

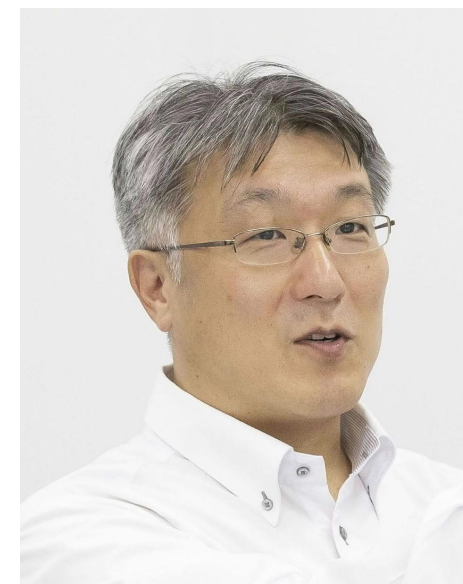
# 産業活動由来の希薄な窒素化合物の循環技術創出 —プラネタリーバウンダリー問題の解決に向けて

PM：川本徹

産業技術総合研究所 材料・化学領域 ナノ材料研究部門 研究グループ長

PJ参画機関： 国立研究開発法人産業技術総合研究所、  
国立大学法人東京大学、学校法人早稲田大学、  
国立大学法人東京農工大学、国立大学法人神戸大学、  
国立大学法人大阪大学、国立大学法人山口大学、  
協和発酵バイオ株式会社、株式会社アストム、  
東洋紡株式会社、株式会社フソウ、宇部興産株式会社

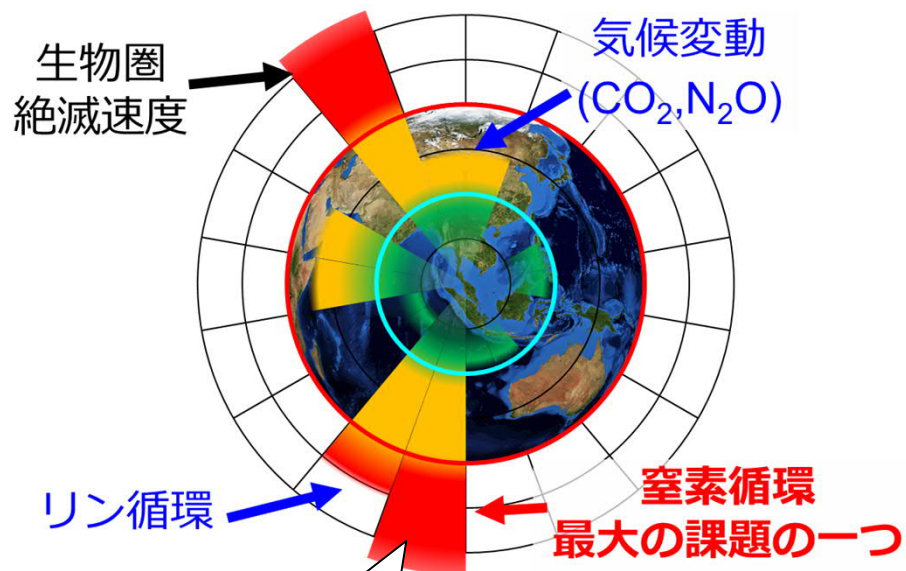
実施期間：2020年8月～2030年3月



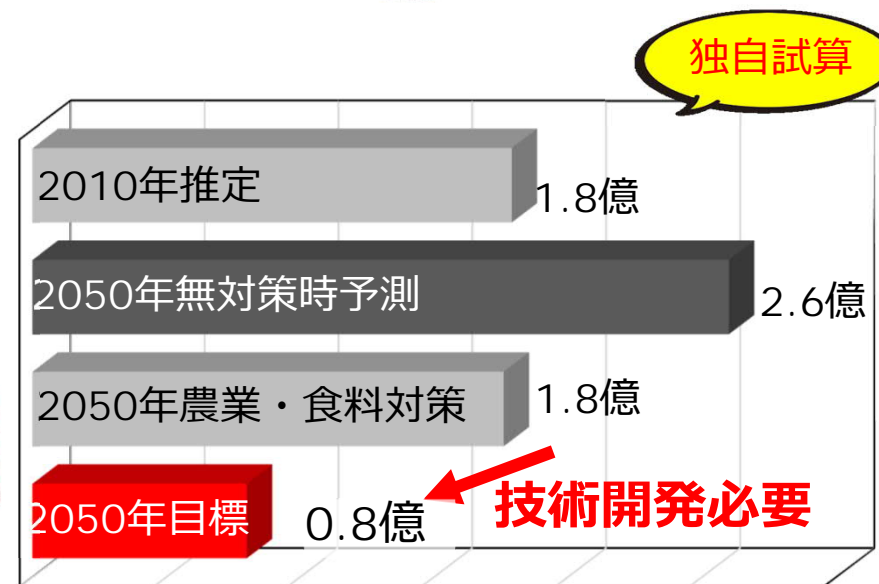
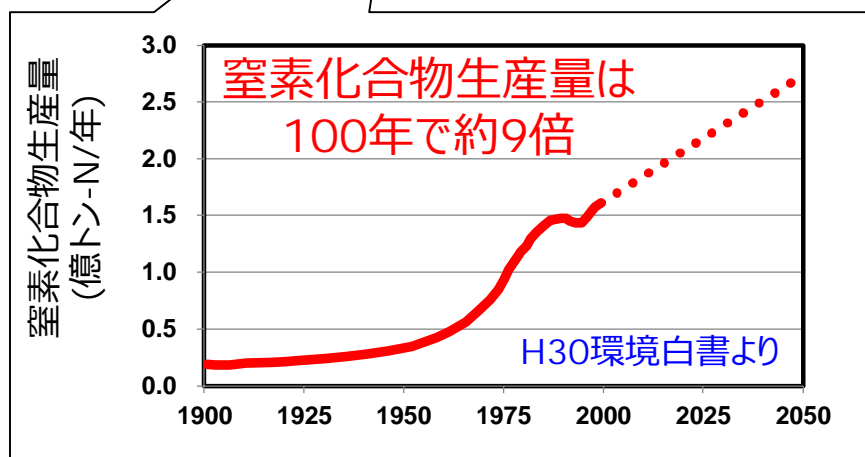
川本徹

窒素化合物排出は最大の環境問題の一つで、**排出量1億トン-N/年削減が必要**

【プラネタリーバウンダリーの最大の問題の一つ】

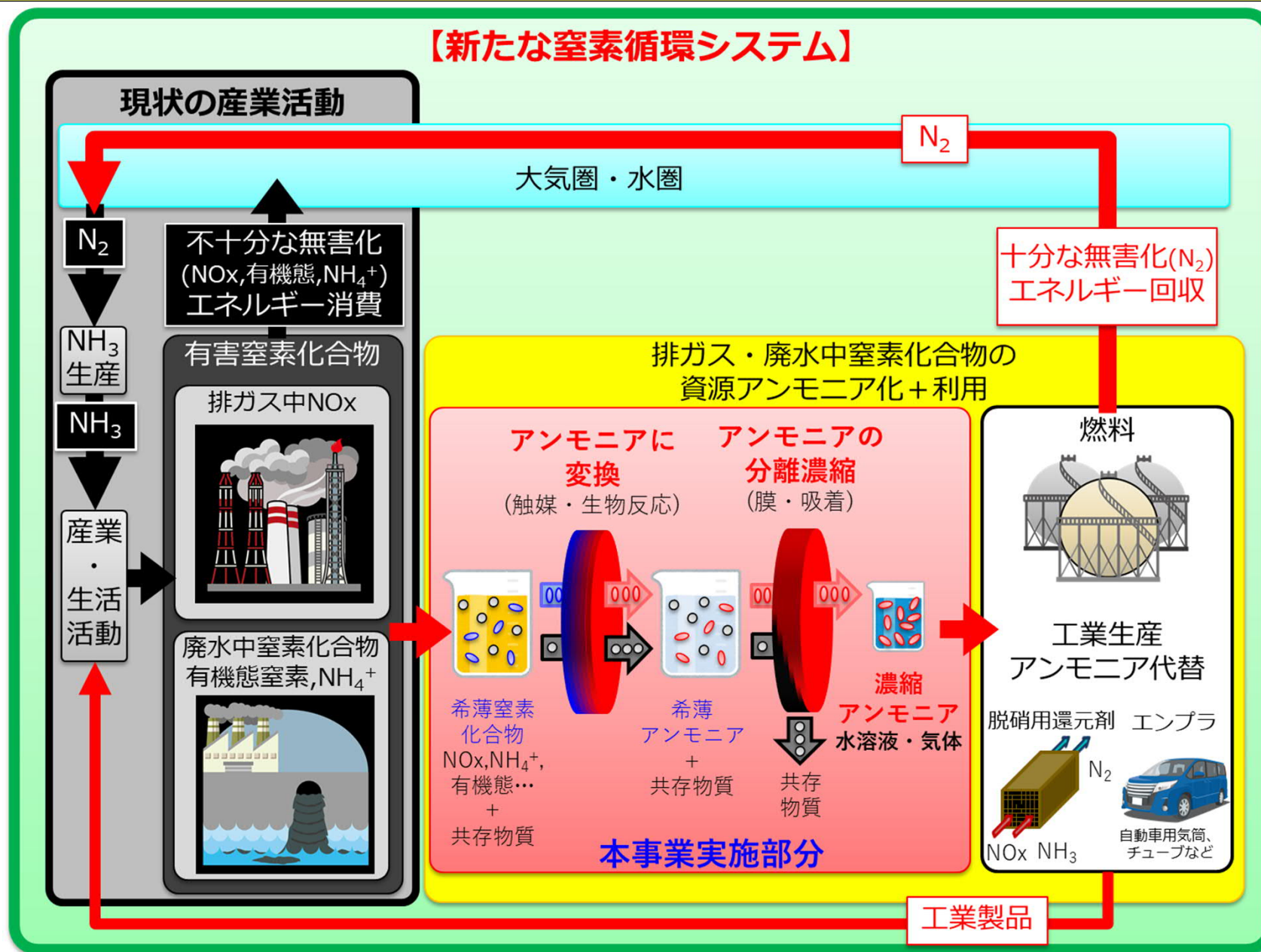


【人為的窒素化合物排出量の目標設定】



**1億トン-N/年の削減を実現する技術開発が必要**

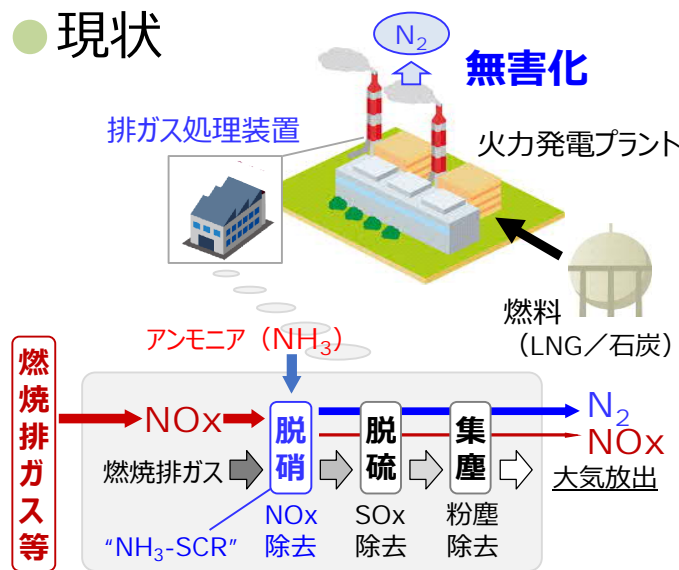
排出量1億トン-N/年削減を実現するための新たな窒素循環システムを構築



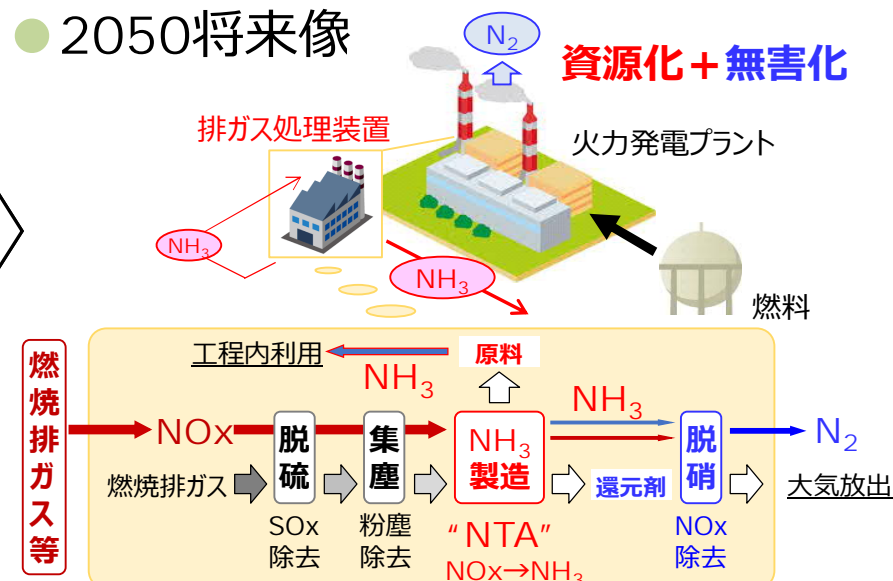
排ガス中NO<sub>x</sub>をNH<sub>3</sub>に変換、脱硝材や工業原料に活用。廃水中窒素化合物はアンモニア資源として回収、燃料や原料として利用

## 排ガス

### ● 現状

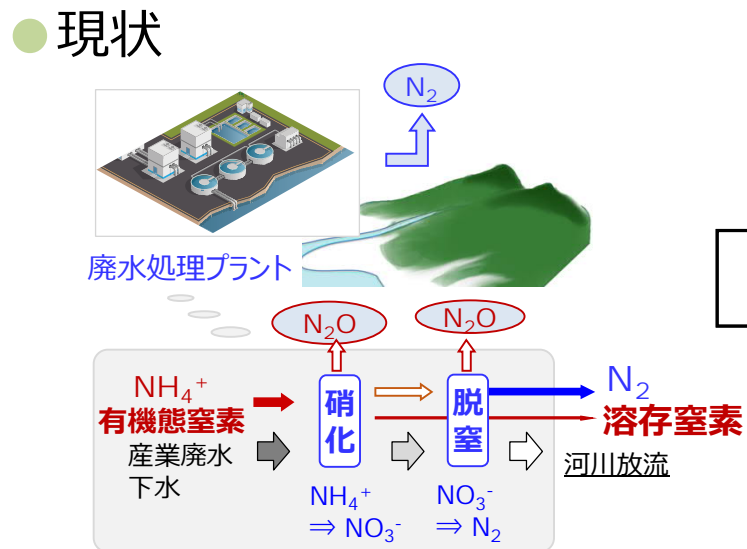


### ● 2050将来像

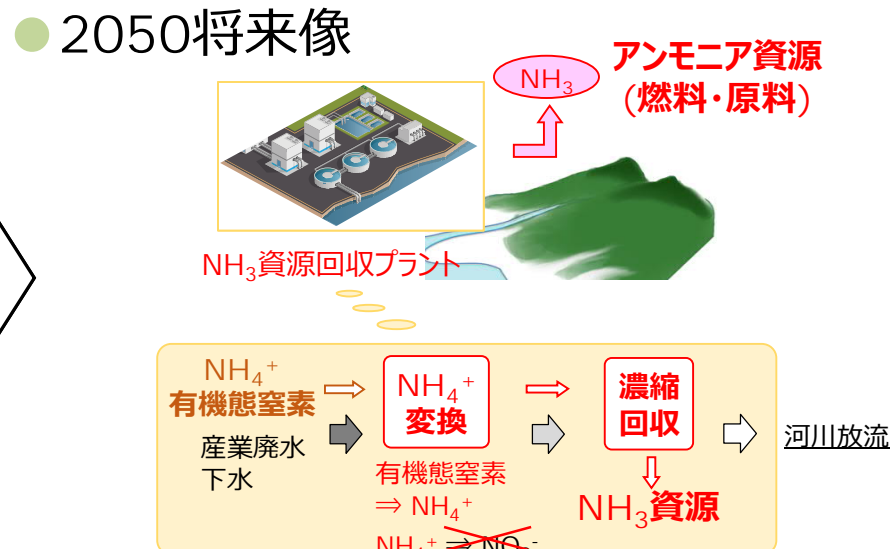


## 廃水

### ● 現状

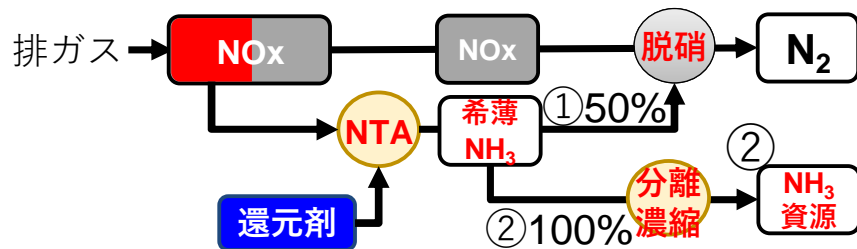


### ● 2050将来像



## 【項目1. 気相NOx無害化・資源化】

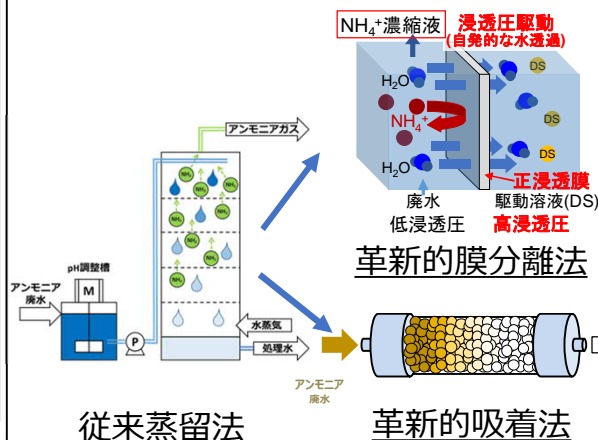
- ①排ガス中低濃度NOx・NH<sub>3</sub>の濃縮
- ②NOx→NH<sub>3</sub>触媒の低温活性向上でエネルギー削減
- ③共存酸素の影響のない手法開発(O<sub>2</sub>分離、酸素下でも使用できる触媒)



- ①変換率50% →アンモニアを脱硝材に利用。NOx完全浄化
- ②変換率100% →分離濃縮し、アンモニア資源へ

## 【項目2-2. 水相資源化(濃縮)】

- ①項目2-1からの様々なNH<sub>4</sub><sup>+</sup>・夾雑物濃度の廃水に適用可能な膜分離/吸着分離の新規開発
- ②超省エネ分離濃縮プロセス構築

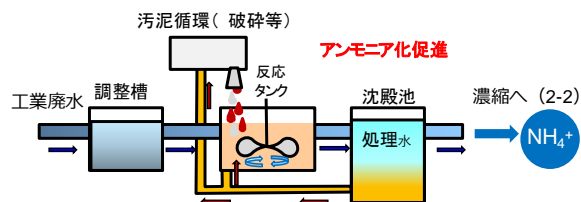


・従来蒸留法の1/100以下の消費エネルギーの達成

## 【項目2-1. 水相資源化(変換)】

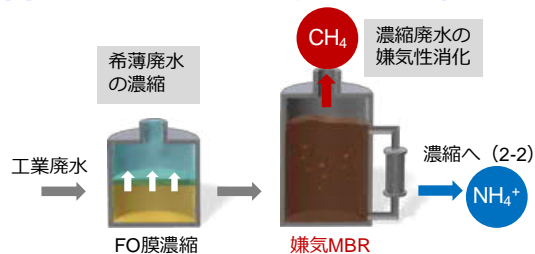
多様な施設・廃水に適用できる好気・嫌気の効率的NH<sub>4</sub><sup>+</sup>変換バイオプロセスの構築

### ● 微好気NH<sub>4</sub><sup>+</sup>変換プロセス (レトロフィット、低濃度廃水)



- ・NH<sub>4</sub><sup>+</sup>消失阻止
- ・余剰汚泥を窒素源として利用

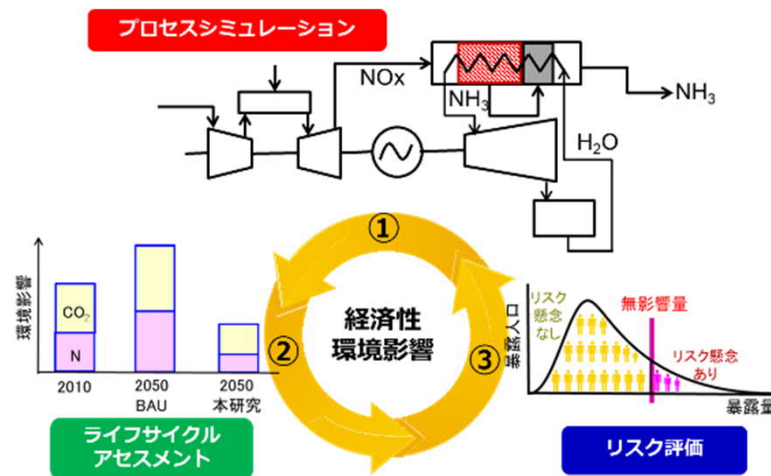
### ● 高濃度窒素対応嫌気膜分離活性汚泥法(MBR) (新設、高濃度廃水)



- ・高窒素濃度障害への耐性賦与
- ・高省エネ性、コンパクト

## 【項目3. 全体像構築】

- ①全体プロセス設計による実機・パイロット等具現化
- ②LCA・リスク評価技術に立脚した経済性・環境影響評価



2024年にベンチ実証、2029年にパイロット実証のスケジュールに沿って開発を進める

	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2039	2050
<b>全体計画</b>	基礎技術の確立			ベンチスケール実証		パイロット実証に向けた技術構築・設置			パイロット実証		実用化普及	
<b>気相中窒素化合物アンモニア資源化</b>	NOx無害化 ・高性能NTA触媒の開発 ・高性能NOx吸着材の開発			NOx無害化 ・2stepNTA触媒システム設計		NOx資源化 ・実プロセスの課題抽出			実ガスパイロット実証		窒素資源循環技術の実用化・普及  プラネタリーバウンダリー問題の解決	
<b>水相中窒素化合物アンモニア資源化</b>	水相NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> 変換 ・窒素変換微生物群集の構築			水相NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> 変換 水相NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> 資源化 ・ベンチ実証		水相NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> 変換 ・パイロット設計諸元の決定と運転手法の確立			実廃水パイロット実証			
	水相NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> 資源化 ・膜・吸着材開発					水相NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> 資源化 ・パイロット設計・パイロット用モジュール作製						
<b>窒素循環システムの構築</b>	プロセス・環境影響評価 ・プロセスモデル・サプライチェーンモデルの作成			プロセスの設計 ・省エネ性評価 ・インベントリーデータ作成		窒素循環プロセスの設計 ・パイロットプラント評価 ・導入地域の環境影響評価			窒素循環システム設計			

# 項目1の成果(酸素共存下NTAの実現！)



- 23種の金属, 10種の担体によるスクリーニングにより, TiO<sub>2</sub>担持Ag触媒を発見
- アンモニア収率80%を実現, 繰り返し安定性も良好

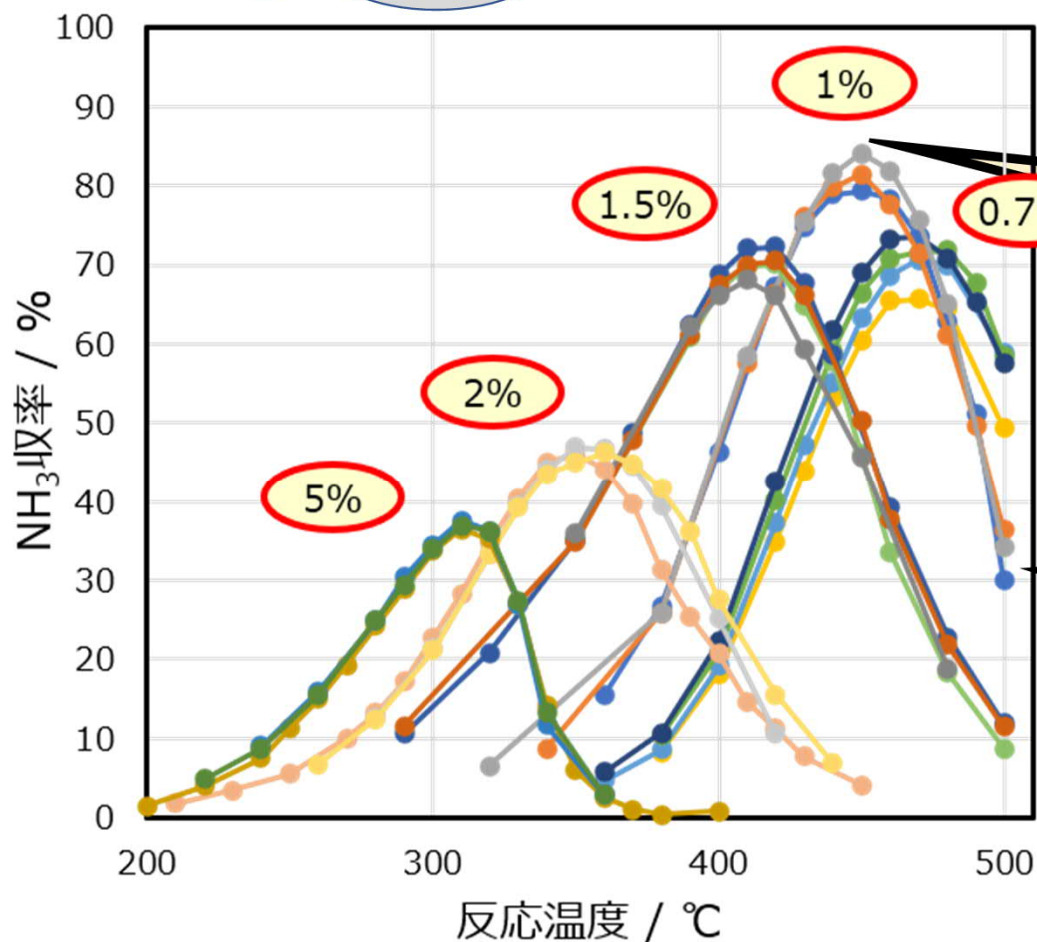
燃烧排ガス

NO, O<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, HC,  
CO, CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>

NO<sub>x</sub> to NH<sub>3</sub> (NTA)  
10%酸素、10%水共存

NH<sub>3</sub>

O<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, HC, CO,  
CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>



TiO<sub>2</sub>担持Ag触媒で  
アンモニア収率80%を達成  
(無害化(50%)を超え、資源化へ)

繰り返し利用での  
安定性も良好

図中の数値はAg担持量(wt%)

反応条件 : NO 1000 ppm、C<sub>3</sub>H<sub>6</sub> 0.50 %、O<sub>2</sub> 10 %、  
H<sub>2</sub>O 10.0 %、N<sub>2</sub> バランス  
全流量 100 mL/min、触媒量 0.6 mL (SV 10,000 h<sup>-1</sup>)

# 項目2-1の成果(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>変換条件を最適化)



- 微好気変換：実廃水での変換試験に着手（人工廃水でNH<sub>4</sub><sup>+</sup>変換率80%を達成）
- 嫌気MBR：高濃度NH<sub>4</sub><sup>+</sup>・NaClによる阻害経路を強化するBioaugmentation戦略を構築

## 項目2-1

工場廃水  
協和発酵  
バイオ等

**変換**  
・微好気変換  
・嫌気MBR

**膜濃縮**  
・FO/BC膜  
・イオン交換膜

**NH<sub>3</sub>資源製造**  
・MD膜  
・吸着法

**NH<sub>3</sub>資源**

### 1) 微好気性NH<sub>4</sub><sup>+</sup>変換プロセス (レトロフィット)

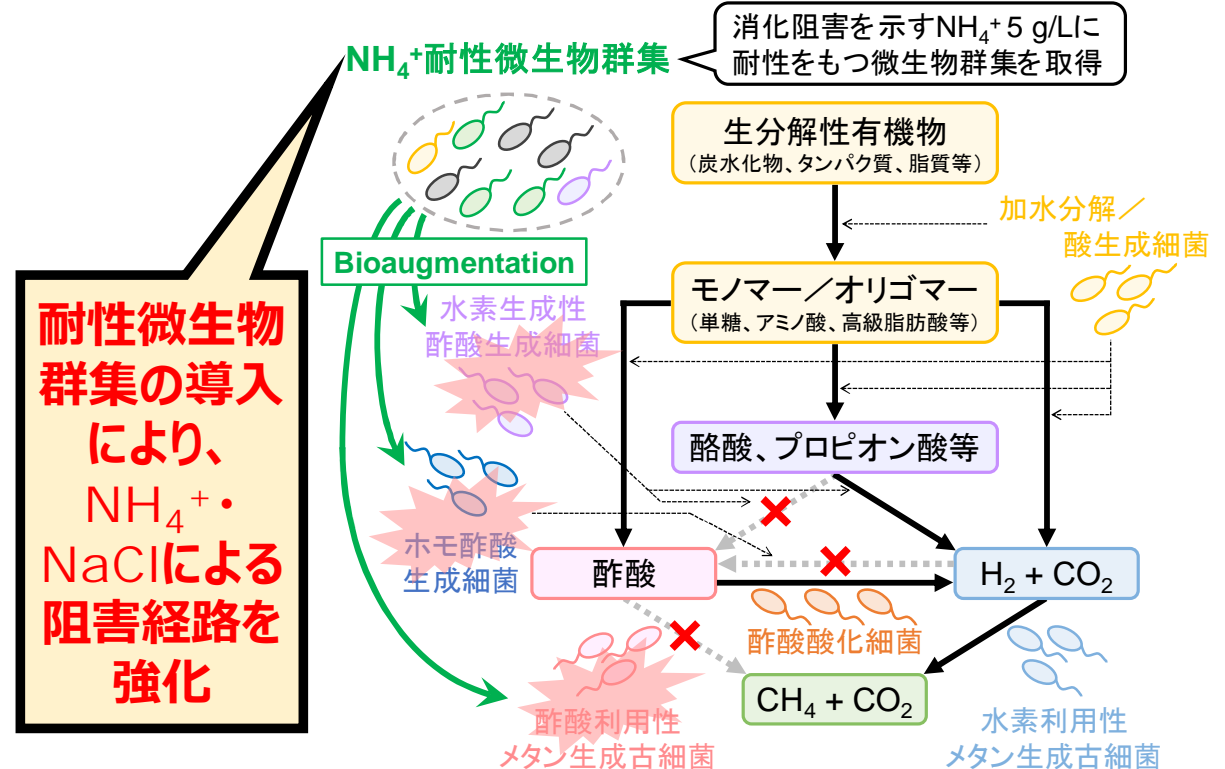
実廃水試験でNH<sub>4</sub><sup>+</sup>変換に関する鍵因子を特定

N <sub>2</sub> O濃度	-0.43	0.025	-0.82	-0.77	-0.55	0.44
酸化還元 電位	-0.39	0.095	-0.68	-0.76	-0.8	0.73
	温度	溶存酸素	pH	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> 濃度	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> 濃度	曝気量

### ピアソンの積率相関係数による評価

- N<sub>2</sub>Oと酸化還元電位がNH<sub>4</sub><sup>+</sup>と負の相関
- 溶存酸素の制限によるNH<sub>4</sub><sup>+</sup>変換促進とN<sub>2</sub>O抑制

### 2) 高濃度窒素対応型嫌気MBR (新設・コンパクト化)



**耐性微生物群集の導入により、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>・NaClによる阻害経路を強化**



# 項目2-2の成果(濃NH<sub>3</sub>水の生産に成功)



- 3種の膜濃縮の組み合わせにより400ppm→市販NH<sub>3</sub>水レベルへの濃縮達成
- 実廃水を用いた濃縮に着手。

## 項目2-2

工場廃水  
協和発酵  
バイオ等

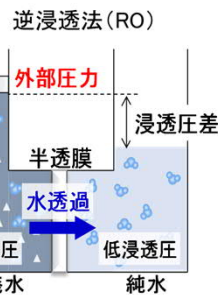
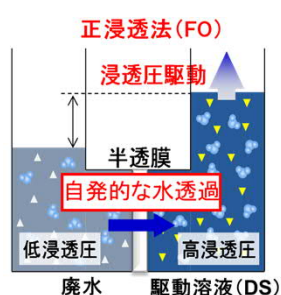
**変換**  
・微好気変換  
・嫌気MBR

**膜濃縮**  
・FO/BC膜  
・イオン交換膜

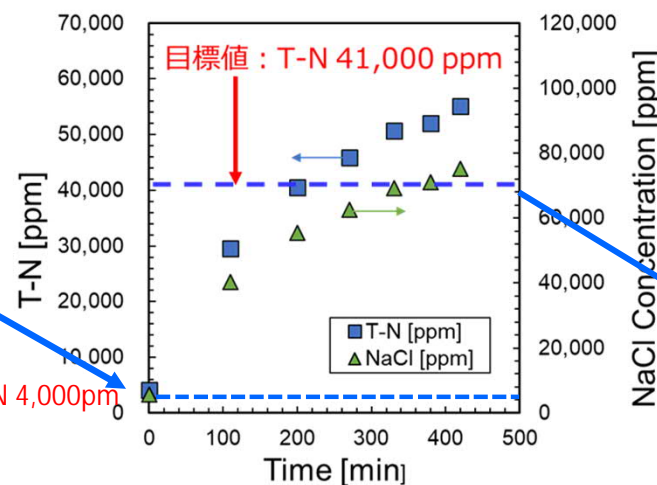
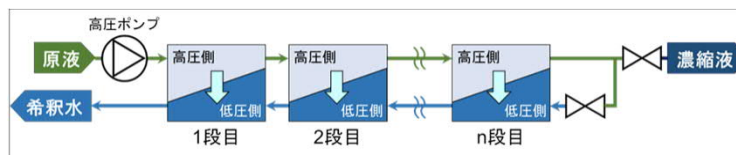
**NH<sub>3</sub>資源製造**  
・MD膜  
・吸着法

**NH<sub>3</sub>資源**

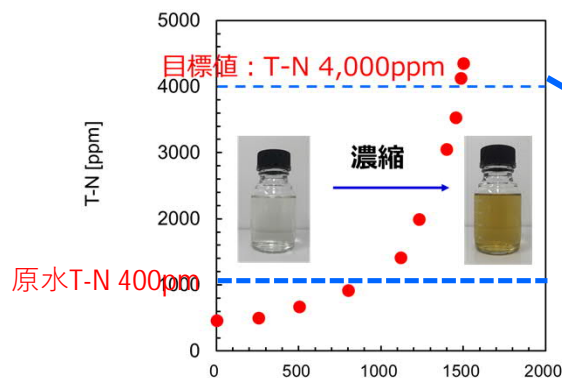
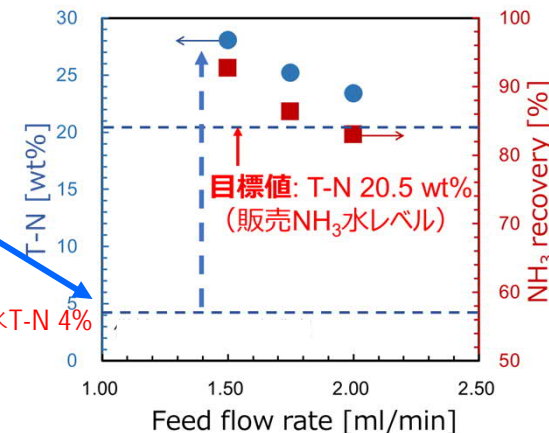
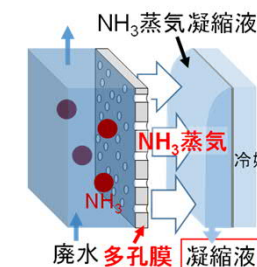
### 1) Forward Osmosis(FO)膜法



### 2) Brine Concentration(BC)膜法



### 3) Membrane Distillation(MD)法



一次濃縮で実廃水を用いて10倍の濃縮に成功

二次濃縮でT-N 5.8wt% 達成

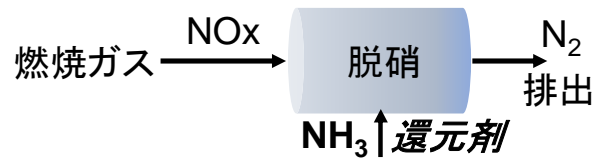
T-N 20.5wt%達成

- 燃焼ガス中のNOx再利用の環境影響評価を実施し、既存のNOx無害化処理と比較
- 総合評価によって、NOx回収利用が環境影響の低減化にもたらす効果を明確化

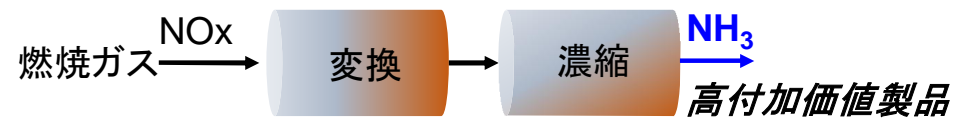
## 【既存技術 VS 新技術】

Xue et al., Sustainability, 13(14), 7826 (2021).

従来技術(脱硝): SNCR/SCR\*



新技術(NOx資源化)



## 【環境影響評価】

### (1) 被害評価 (LIME2、4項目)

従来	SNCR	3.64E-03	2.94E+04	1.82E-11	8.36E+01
	SCR	1.39E-03	1.34E+04	3.92E-10	5.43E+01
	新技術	2.29E-04	1.61E+03	9.85E-11	6.16E+00

人間健康 (DALY)  
社会資産 (JPY)  
生物多様性 (EINES)  
一次生産 (kg DW eq.)

NOx処理は社会資産への影響が大

被害大 (Red)  
被害中 (Yellow)  
被害小 (Green)

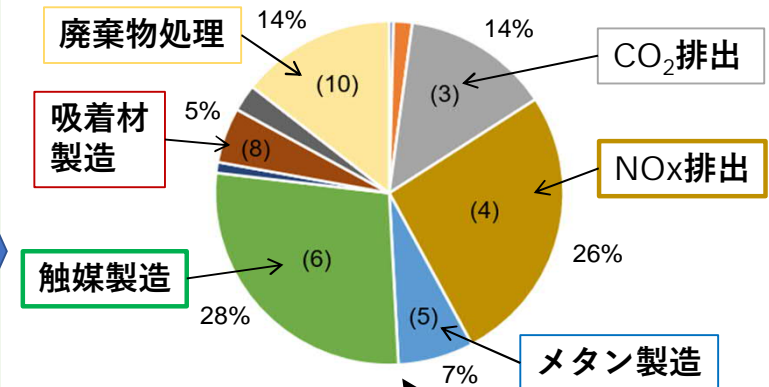
### (2) 統合評価 (LIME2)

従来	SNCR	8.58E+04
	SCR	4.19E+04
	新技術	7.16E+03

単一指標 (JPY)

統合評価では新技術の環境影響が最も小さい

### (3) 新技術の環境影響の要因分析



新技術をさらに改善する方法を明確化

\*SNCR: 無触媒還元法 (selective non-catalytic reduction)、SCR: 選択接触還元法 (selective catalytic reduction)

## 【背景】

- 窒素化合物の環境放出は、プラネタリーバウンダリー最大の課題の一つ→回復可能性という観点では気候変動などを超えるリスク
- この課題を解決するには、産業・生活からの排出を年1億トン削減することが必要

## 【研究開発の目的】

- 2050年に、年1億トンの窒素化合物排出を削減する技術の開発

## 【開発項目】

- 排ガス中NO<sub>x</sub>をアンモニアに変換し、無害化、資源化する技術
- 廃水中窒素化合物をアンモニアに変換し、資源化する技術
- 開発したアンモニア資源化技術の有効性の評価

## 【成果】

- NO<sub>x</sub>を80%アンモニアに変換し、NO<sub>x</sub>無害化に必要な条件(50%)を達成。
- 水中窒素化合物大半の80%をアンモニアに変換。実液処理水も項目2-2に提供開始
- 3種の膜濃縮の組み合わせにより原水(400ppm)→市販NH<sub>3</sub>水レベルへの濃縮
- 排ガス用新技術が既存技術より環境影響が少ないことを確認

