

番号: A-13-1J

PJ: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—

担当機関名: 産業技術総合研究所

問合せ先: 川本徹 (産総研) tohru.kawamoto@aist.go.jp



【技術の概要】 排ガス中のNOxと廃水中窒素化合物をアンモニアに変換後、分離濃縮して資源化する技術を開発。プロセス設計・環境影響評価なども進め、開発技術の実装加速・効果評価も。

【優位性】 省エネ性が高く、従来の無害化技術よりも低エネルギーで排ガス・廃水処理が可能に。さらに資源も回収し、一挙両得。

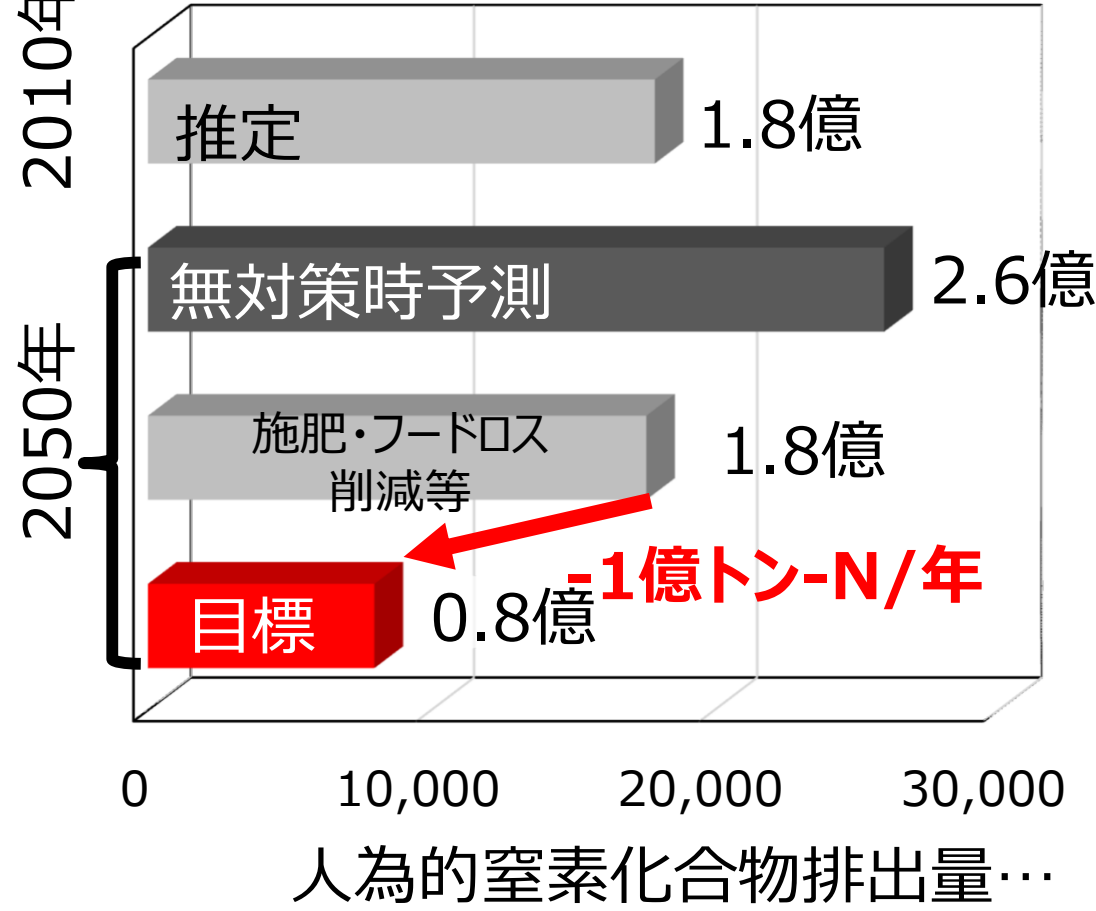
◆背景◆

(a) 窒素化合物排出量の目標値



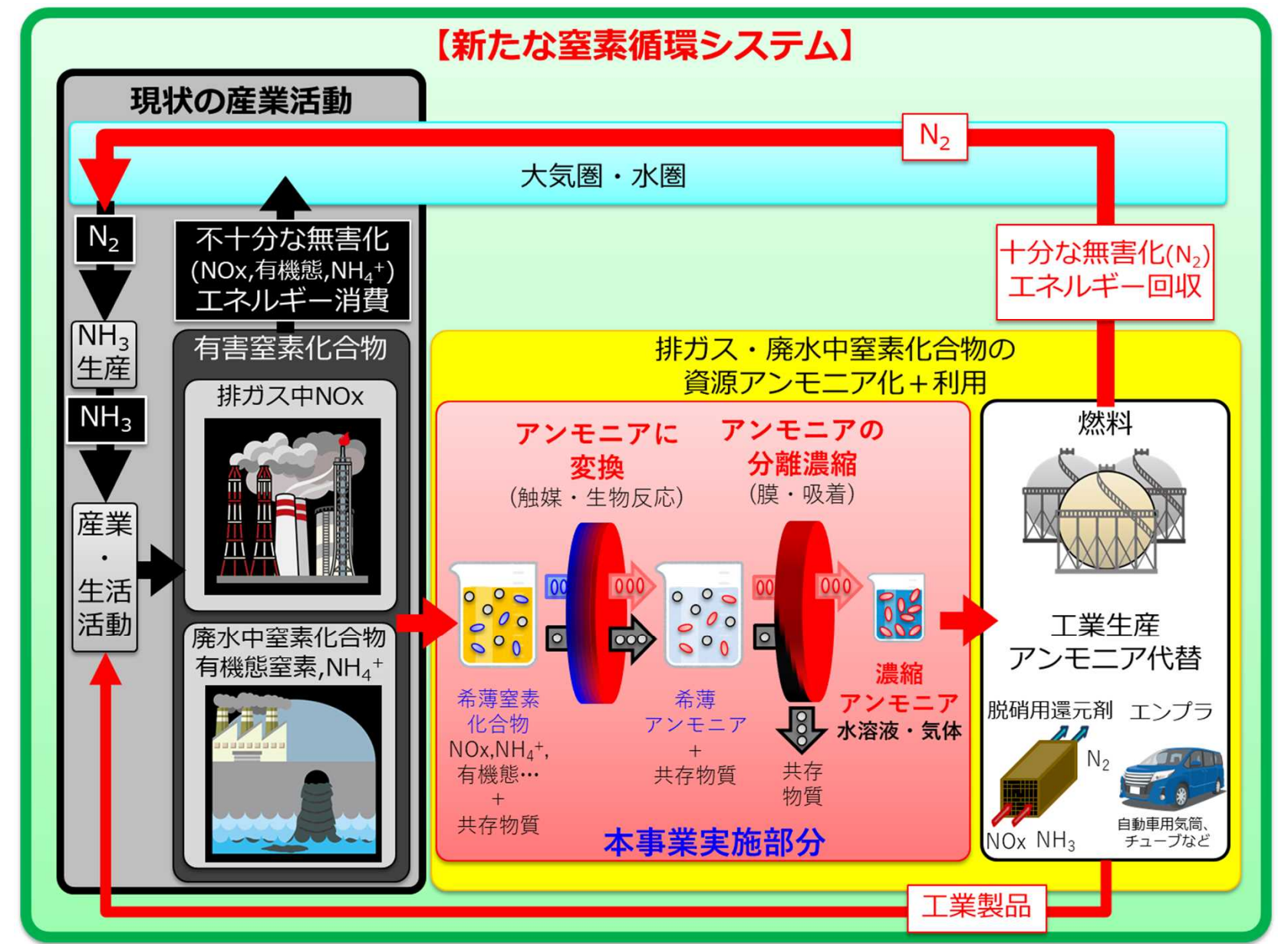
Galloway, Biogeochem. (2004),
Fowler, Philos. Trans. R. Soc. B Biol. Sci. (2013)
de Vries, Curr. Op. Env. Sus. (2013)

(b) 人為的窒素化合物排出量の現状と目標の比較

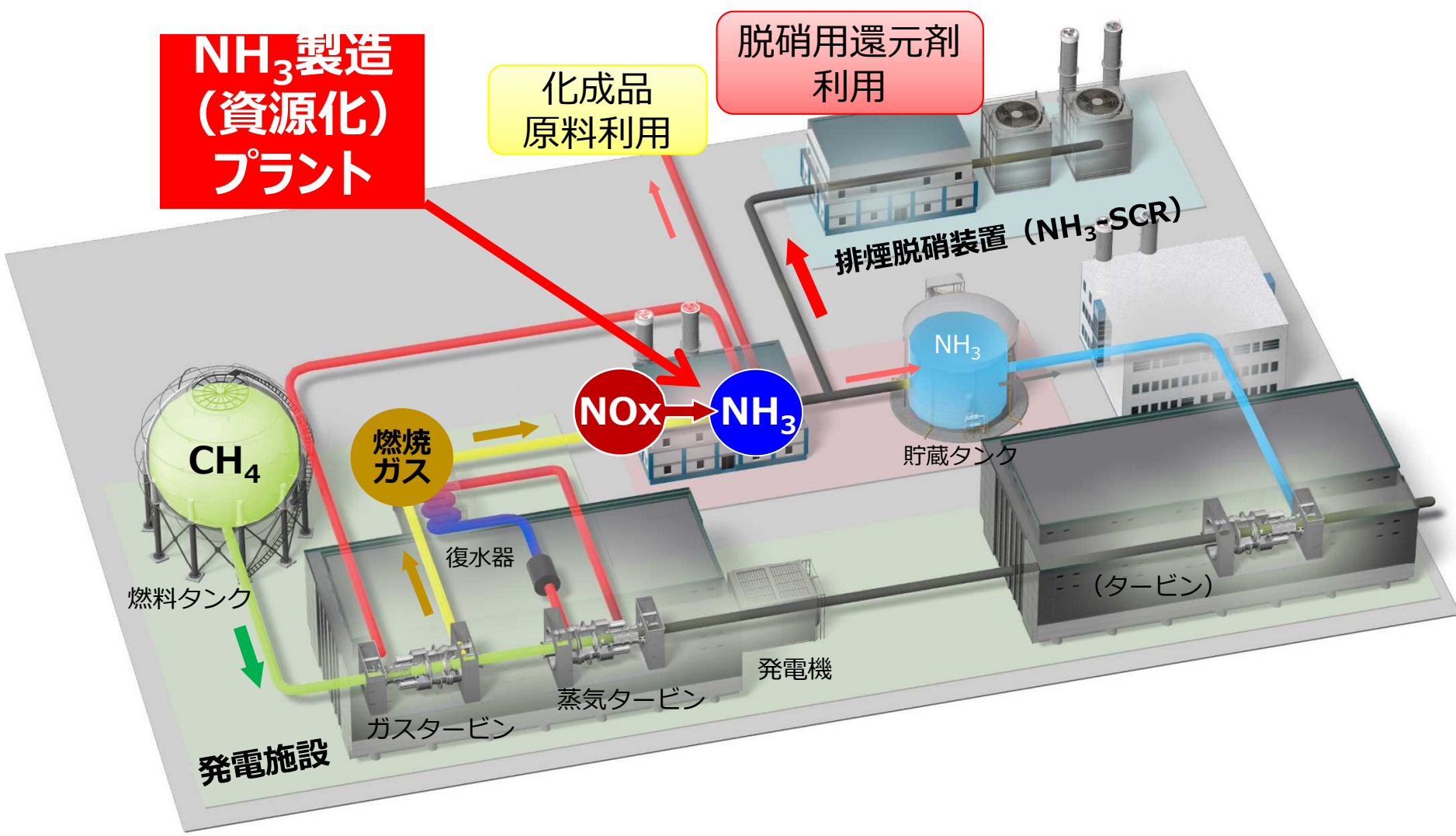


1億トン-N/年の削減上積みが必要

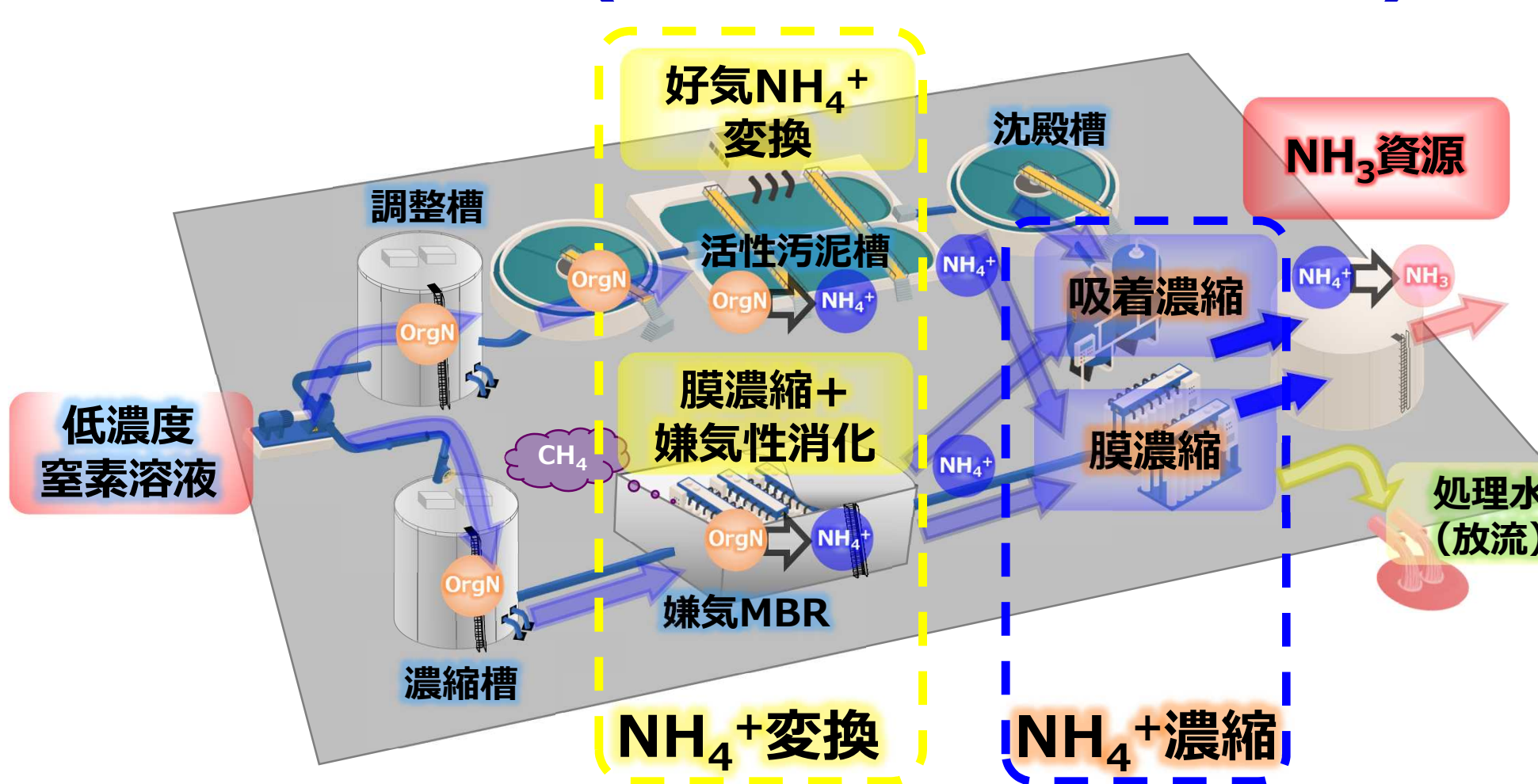
◆1億トン-N削減のための窒素循環システム◆



◆プラントイメージ(NOx資源化)◆



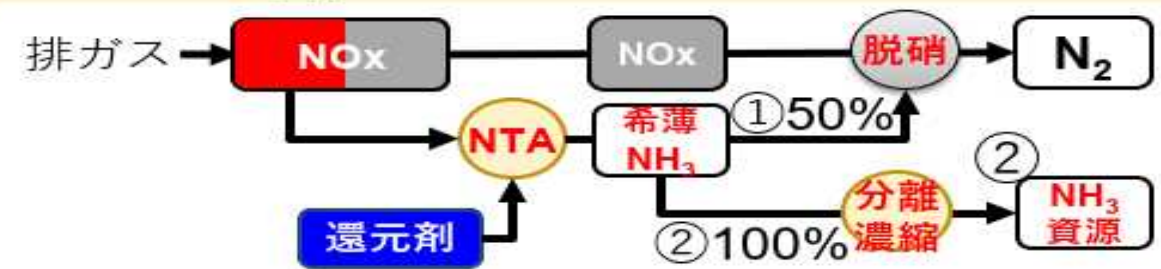
◆プラントイメージ(水相窒素化合物資源化)◆



◆研究項目◆

【項目1. 気相NOx無害化・資源化】 TL小倉(東大)

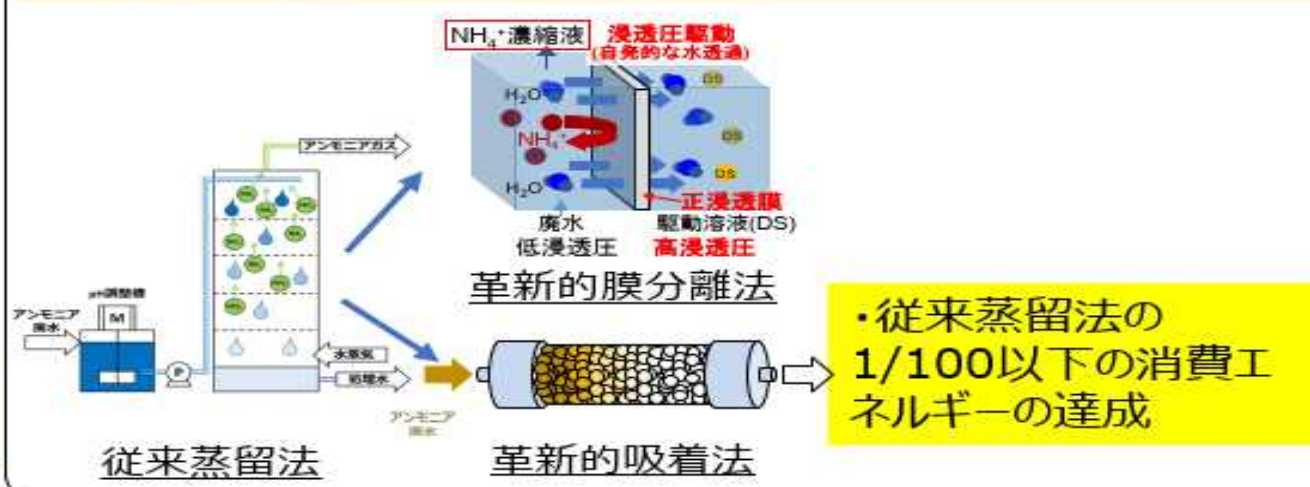
- ①排ガス中低濃度NOx・NH3の濃縮
- ②NOx→NH3触媒の低温活性向上でエネルギー削減
- ③共存酸素の影響のない手法開発(O2分離、酸素下でも使用できる触媒)



- 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

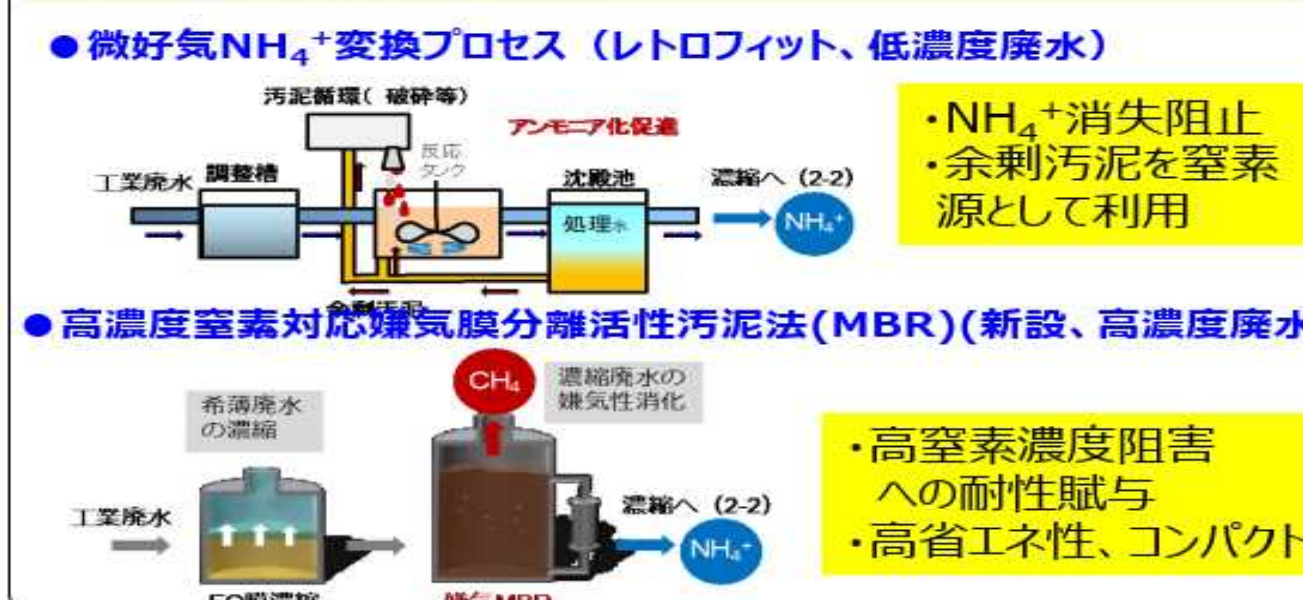
【項目2-2. 水相資源化(濃縮)】 TL松山(神戸大)

- ①項目2-1からの様々なNH4+・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



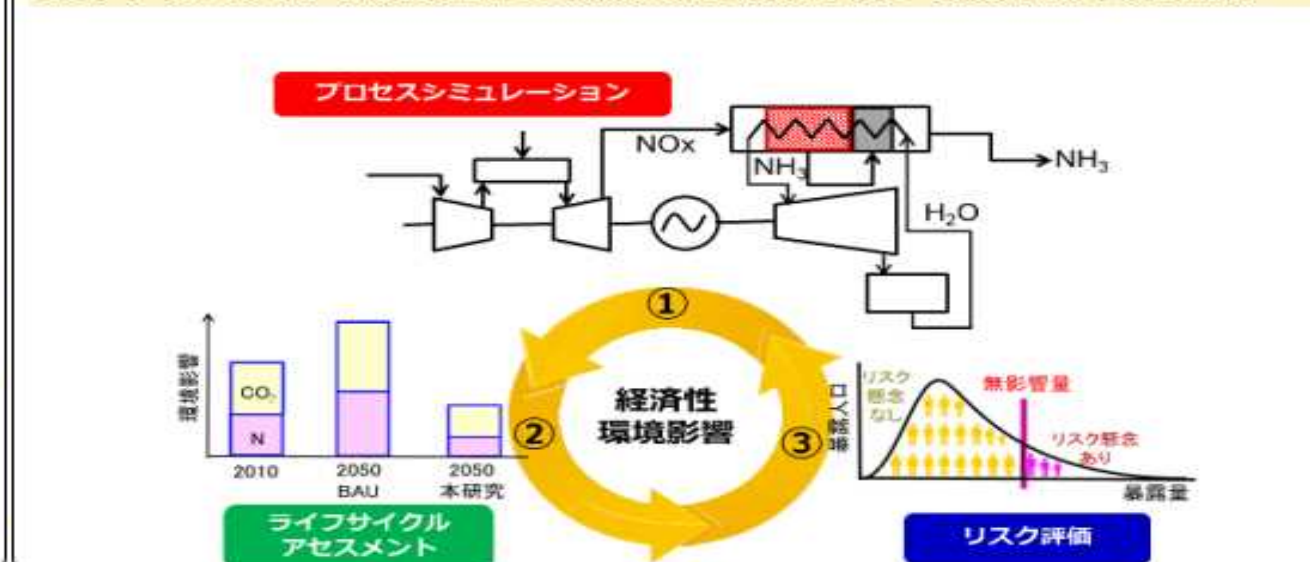
【項目2-1. 水相資源化(変換)】 TL堀(産総研)

多様な施設・廃水に適用できる好気・嫌気の効率的NH4+変換バイオプロセスの構築



【項目3. 全体像構築】 TL松本(東工大)

- 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



◆本日のポスター◆

A-13-2J~5J

項目1:気相NOxの無害化・資源化

A-13-6J~8J

項目2-1:水相資源化(変換)

A-13-9J~13J

項目2-2:水相資源化(濃縮)

A13-14J~15J

項目3:全体像構築

番号: A-13-2J

PJ: 産業活動由来の希薄な窒素化合物の循環技術創出

テーマ名: 気相NOxの資源化: O₂やH₂Oの共存下、一段でNOをNH₃に変換

担当機関名: 早稲田大学

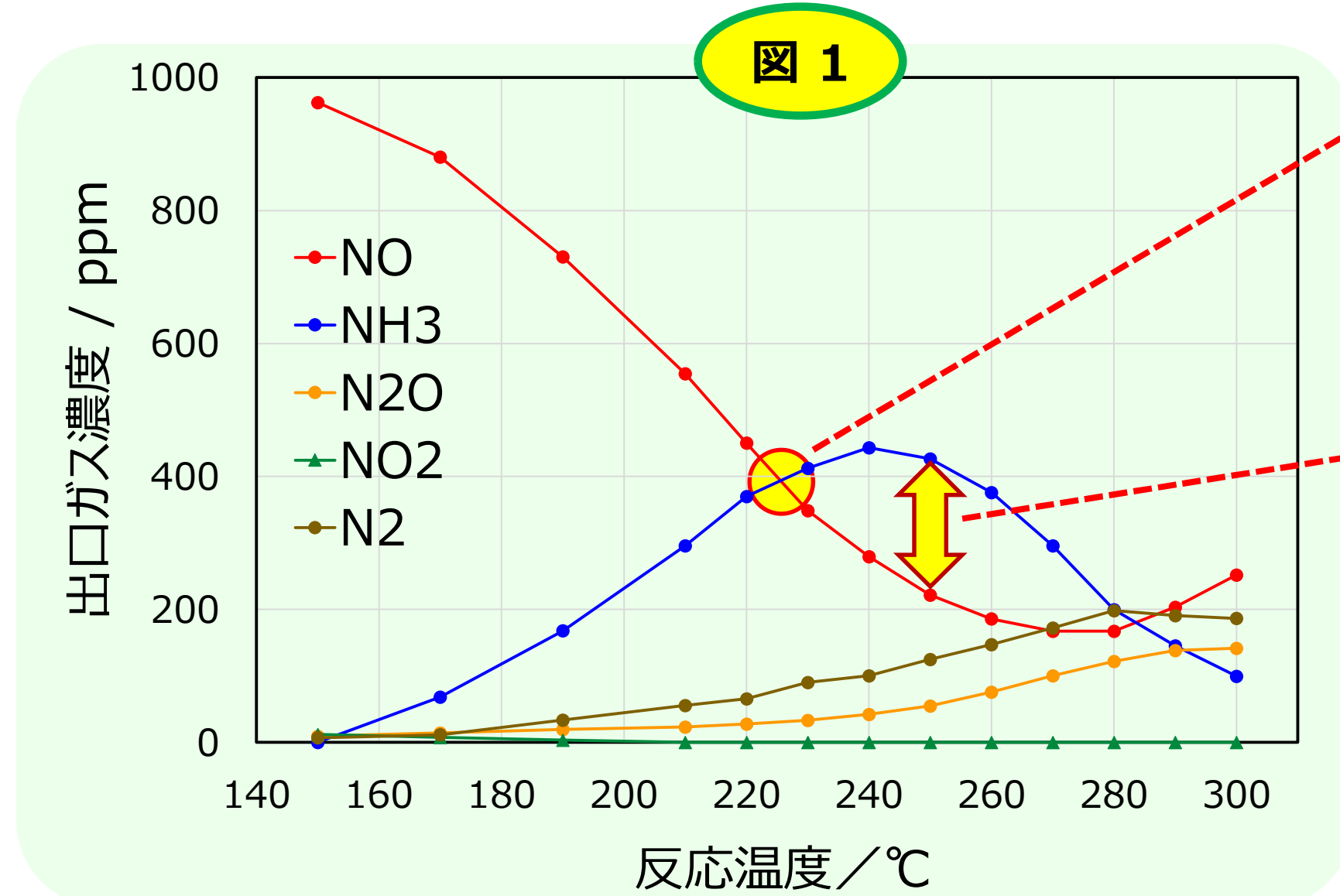
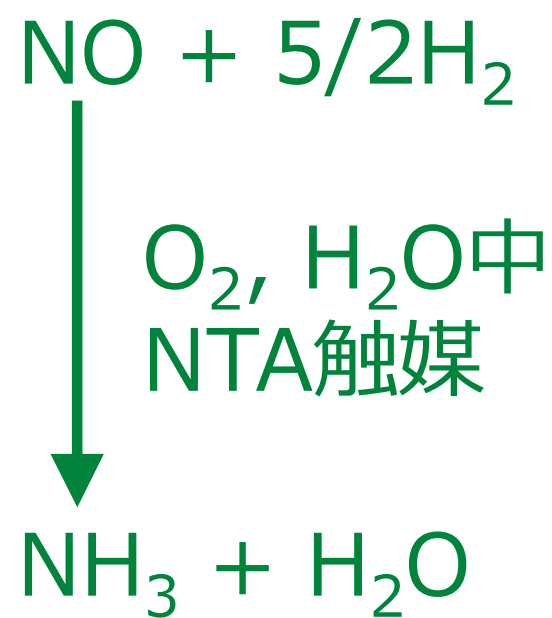
問合せ先: 岩本正和 (早稲田大学) m.iwamoto3@kurenai.waseda.jp



【技術の概要】 窒素酸化物NOを濃縮や分離操作なしで (一段で) 水素H₂によってアンモニアNH₃に変換する (NTA反応)。生成NH₃をそのまま選択還元SCRシステムに、あるいは濃縮してNH₃利用工業に供給
【優位性】 NH₃供給が不要なNH₃-SCRシステムの実現。ハーバーボッシュ法を用いない工業用NH₃の生産

1. 高効率一段NTA触媒WSD-01を開発し、クロスポイント利用とHB代替NH₃生産を提案 (図1)

一段 NTA 反応
(NO濃縮やO₂除去、
H₂O除去が不要)



触媒: WSD-01、反応条件: SV=50,000 h⁻¹、0.1% NO、1.5% H₂、10% O₂、10% H₂O、バランス N₂

NH₃供給が不要なNH₃-SCRの実現
クロスポイント C_{NO} = C_{NH3}
H₂-NTAとNH₃-SCRを連結すれば
NH₃供給不要のNH₃-SCRが実現

工業生産NH₃の代替合成を実現
C_{NH3} >> C_{NO}では生成したNH₃を分離
濃縮し、工業的に利用 (利用可能な
NH₃量はC_{NH3}-C_{NO})

NH₃が必要な時に必要な量をその場で生産

2. 100ppm NOに適用可能な一段NTA触媒WSD-02を開発し、超希薄NO無害化実現へ先鞭 (図2)

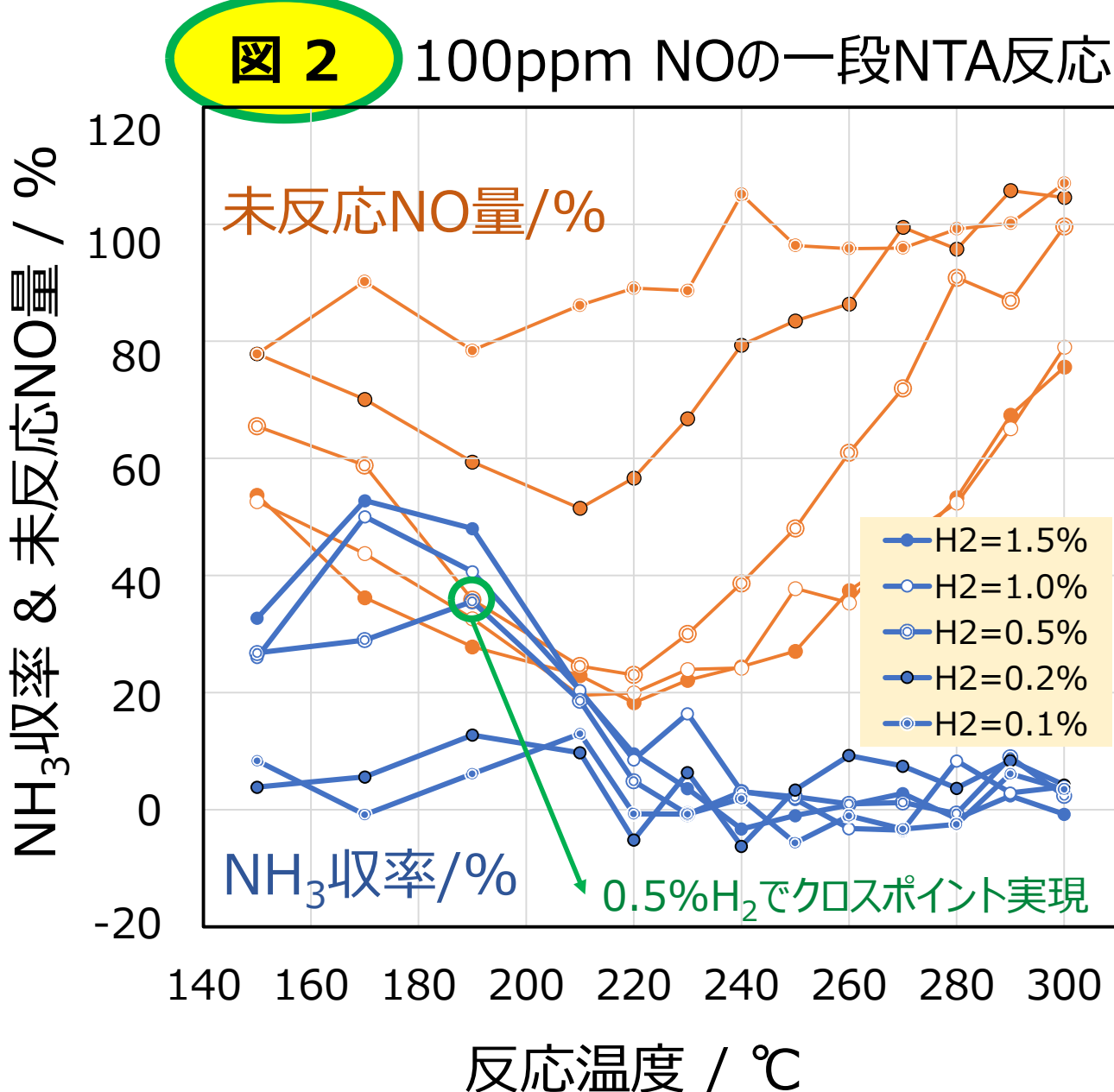
環境基準以下の超希薄NOの浄化に有効なNTA触媒を開発。大気環境の更なる改善を推進

3. 炭化水素利用NTA触媒WSD-03を開発し、水素社会実現までの過渡対応を可能にした (図3)

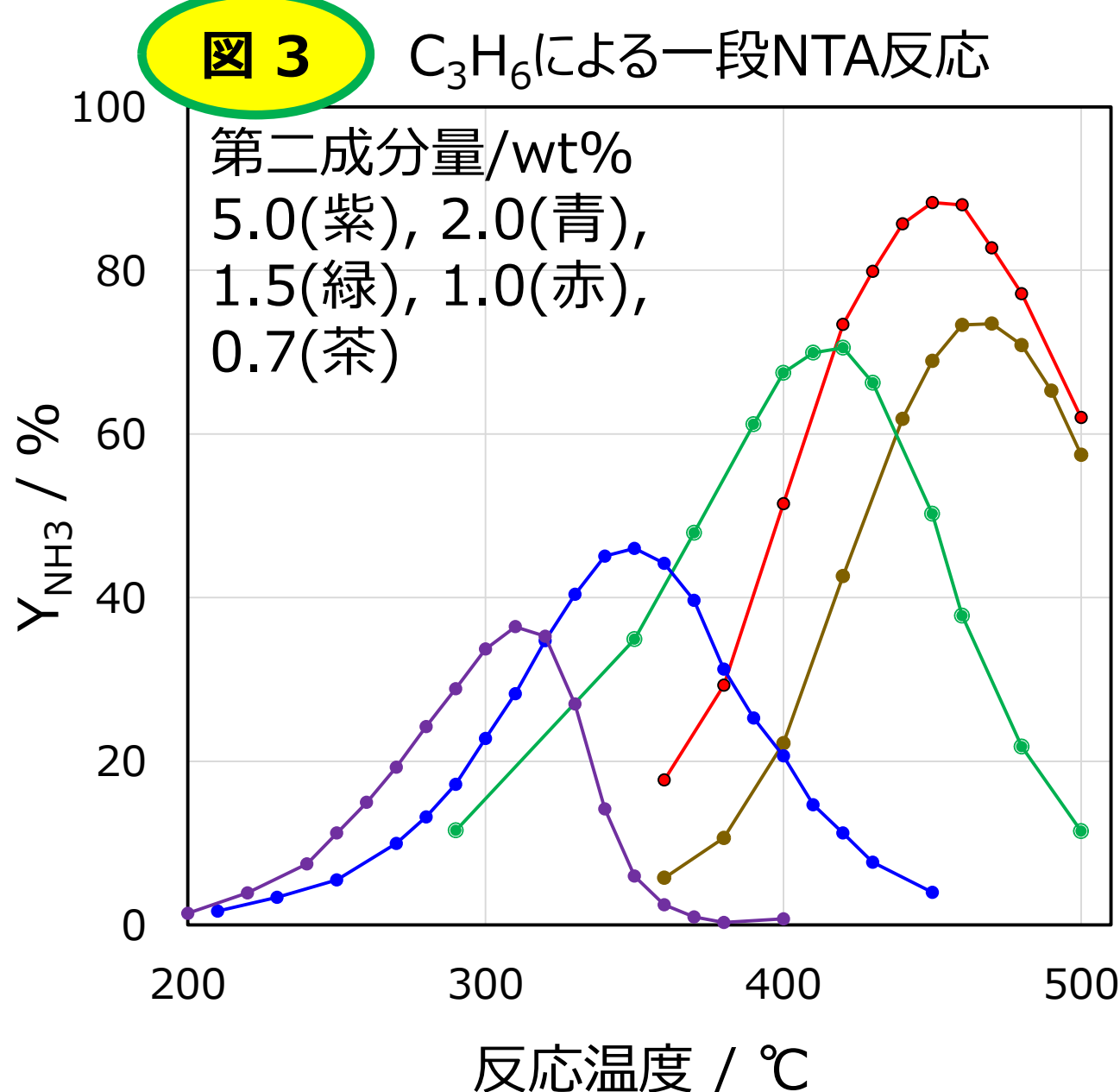
水素供給網が整備されていない場合は炭化水素系還元剤を使ってNTA反応を実行可能。現行燃焼機関にも対応

4. ベンチスケール実験用ペレット触媒の調製と予備活性試験 (図4)

触媒メーカーと共同でペレット触媒を調製。圧壊強度、比表面積、触媒活性 (マイクロリアクター実験) を確認



触媒 WSD-02, 空間速度 50,000 h⁻¹, 0.01% NO, 0.1-1.5% H₂, 10% O₂, 10% H₂O, バランス N₂



触媒 WSD-03, 空間速度 10,000 h⁻¹, 0.1% NO, 0.5% C₃H₆, 10% O₂, 10% H₂O, バランス N₂



【想定される用途・効果】

船舶、ゴミ焼却炉等の小規模NO発生源

生成NH₃を自家消費するNH₃-SCR (NH₃供給不要) の実現。水素供給源は水素あるいは炭化水素

火力発電所、酸化プロセス、セメントキルン等の大規模NO発生源

生成NH₃を分離濃縮し、工業用NH₃を供給 (ハーバーボッシュ法不要)。NH₃生産のローライゼーション

番号: A-13-3J

PJ: 産業活動由来の希薄な窒素化合物の循環技術創出

テーマ名: ハニカムローター型 2step NTA触媒システム開発

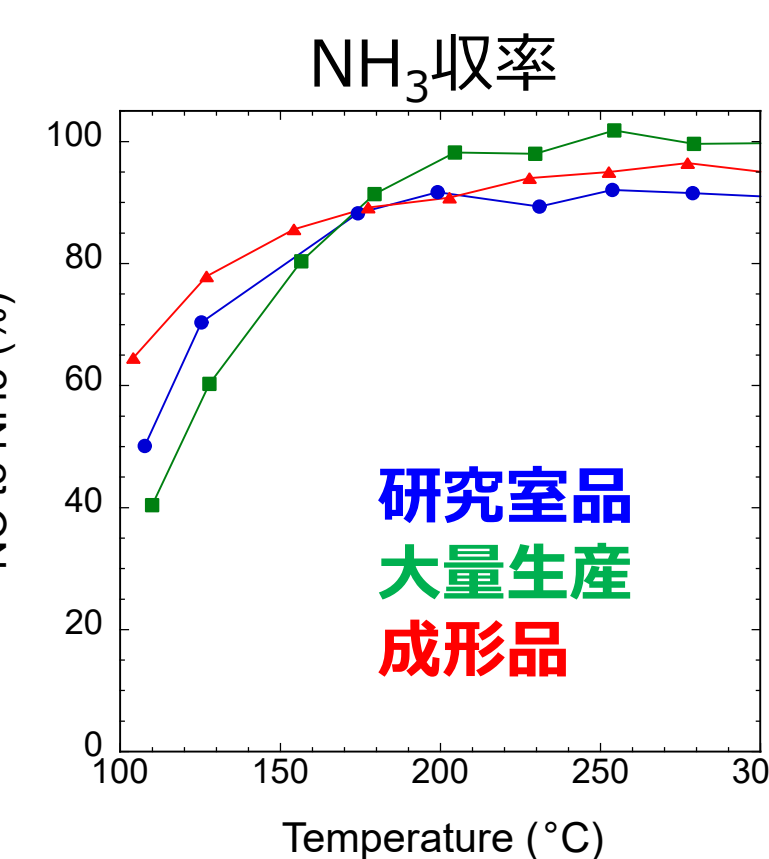
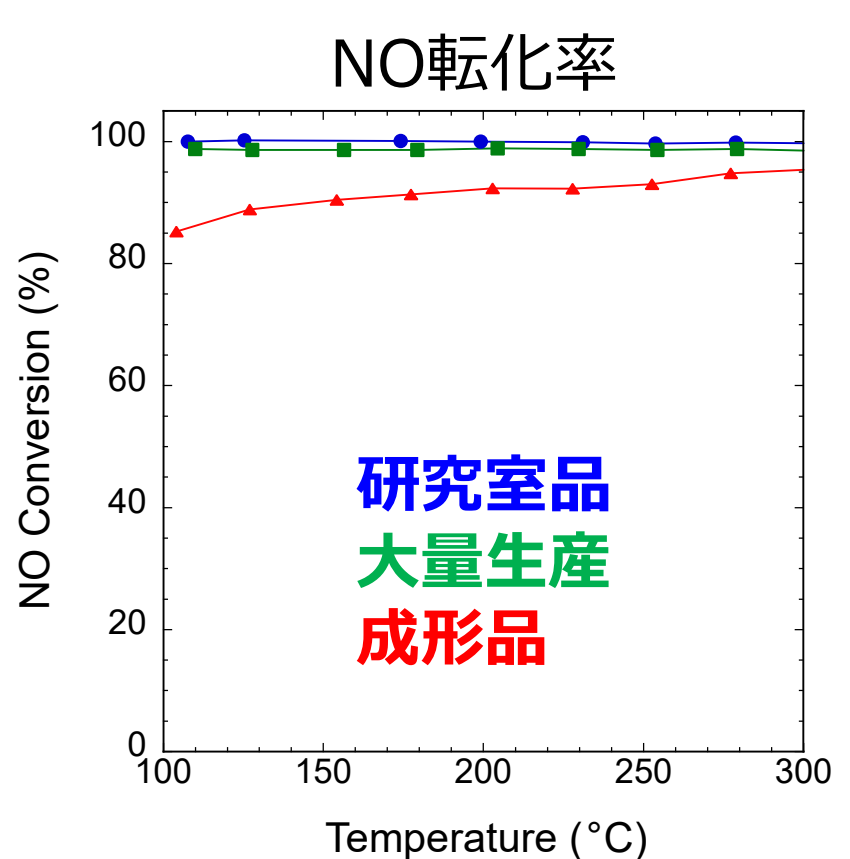
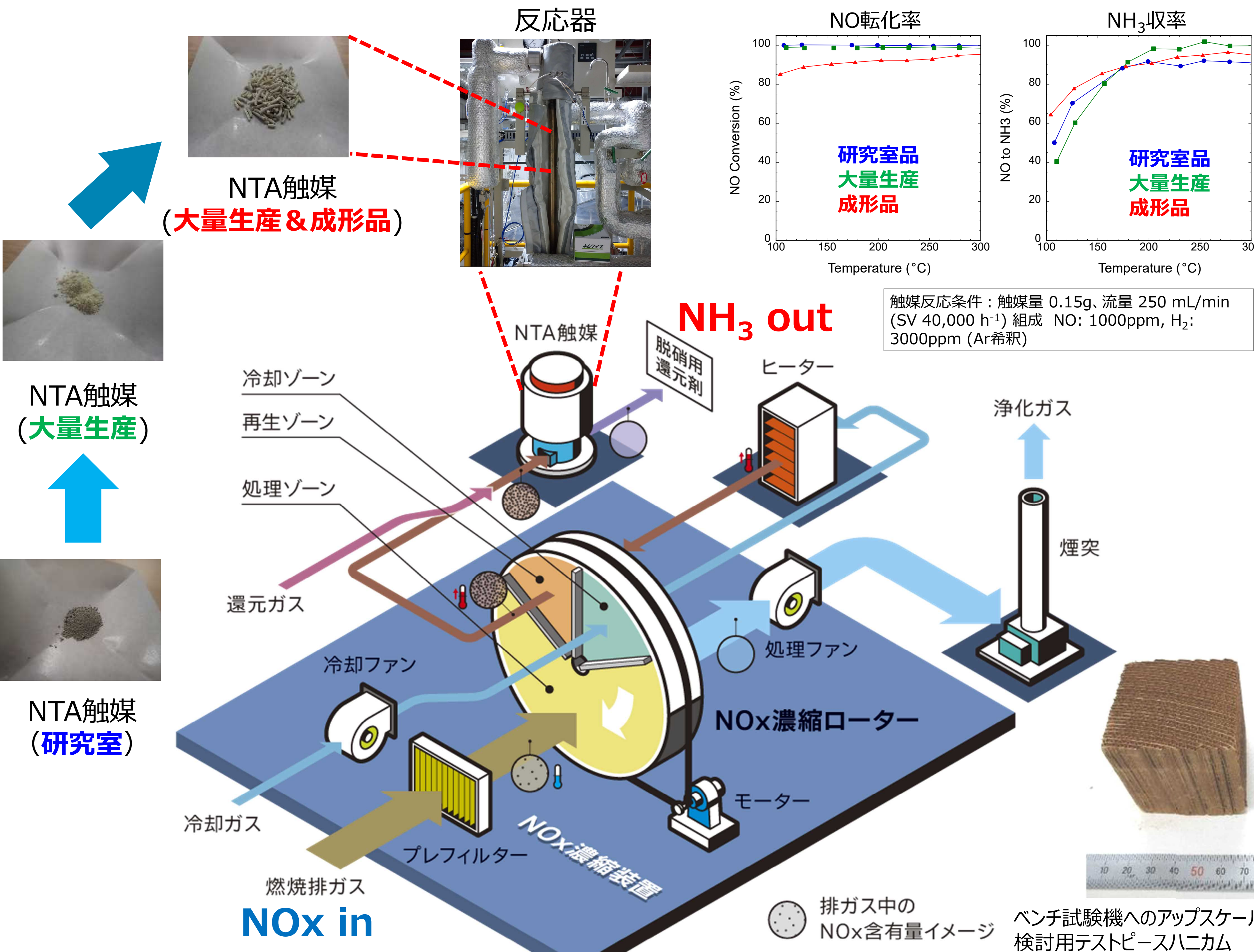
担当機関名: 東京大・産総研・(株)西部技研・東工大

問合せ先: 小倉 賢 (東京大) oguram@iis.u-tokyo.ac.jp

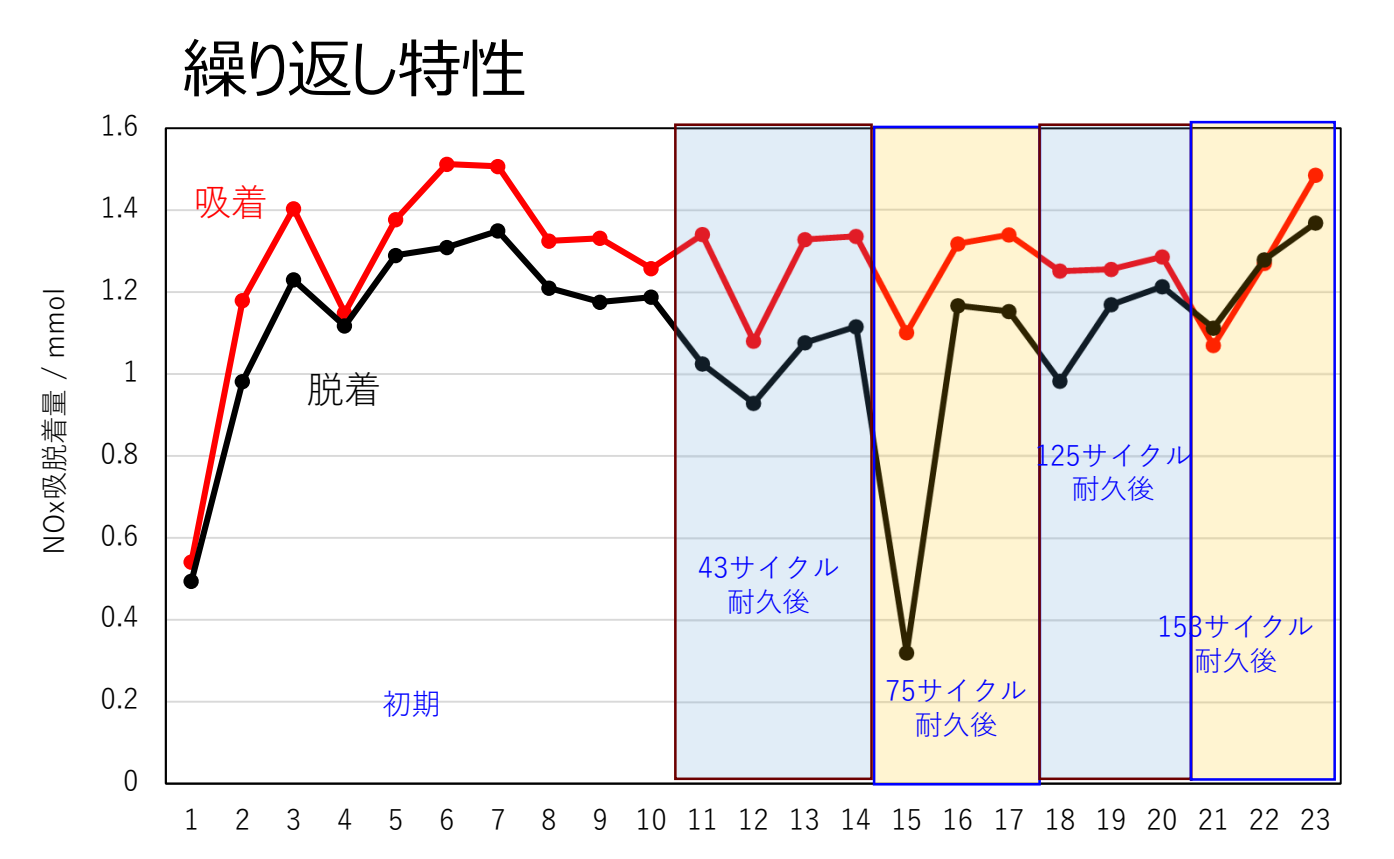
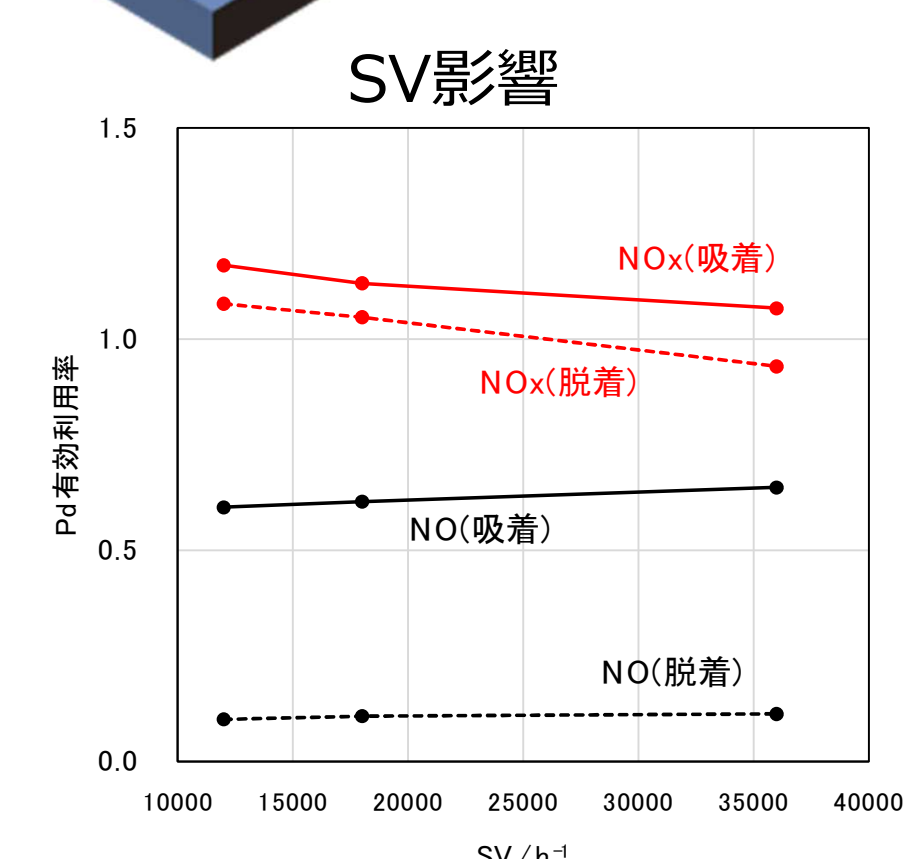
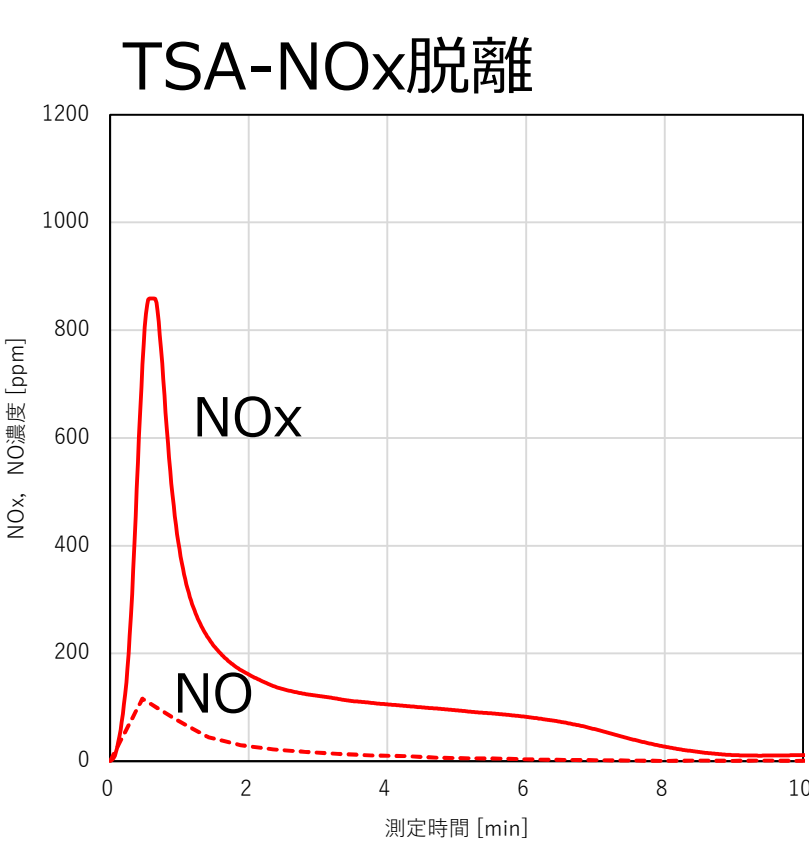
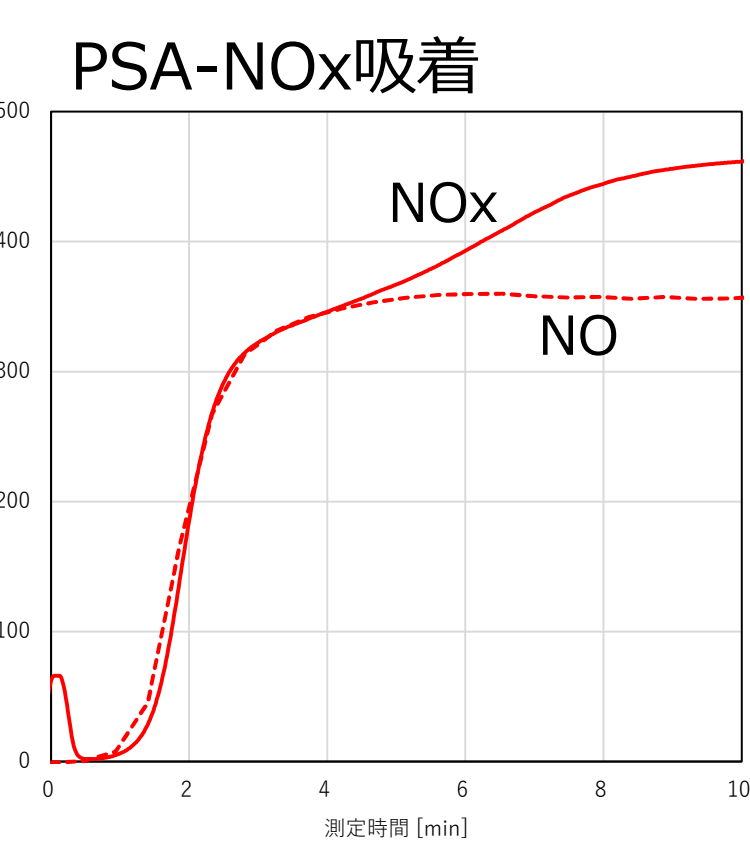


【技術の概要】 酸素・水蒸気共存下, 熱回収後の低温排ガスからのNOx選択的吸着・濃縮と, 無酸素下200℃レベルのNTA反応をシームレス接続する2step NTA触媒システムの設計。

【優位性】 極低濃度NOx無害化に対応可能。NOx濃度変動にも対応可能。NTA反応温度域でのNOx供給能において世界トップレベル。95%超のアンモニア収率。資源化も視野に。



触媒反応条件: 触媒量 0.15g, 流量 250 mL/min (SV 40,000 h⁻¹) 組成 NO: 1000ppm, H₂: 3000ppm (Ar希釈)



吸着条件: 500ppm NO/Air (14.7 L/min) at 100°C; 脱離条件: N₂流通(14.7 L/min) 100-300°C昇温(20°C/min程度)
 基材: E 吸着材: 三井金属ベータゼライト担持Pd 約46wt%・94.1kg/m³; ハニカムサイズ: φ25 x 100 mm SV: 18000 h⁻¹

【想定される用途・効果】 発電所, 酸化プロセス, セメントキルンなどの大規模・低温・極低濃度NOx発生源 生成NH₃を地産地消するNH₃-SCRの実現。水素供給源はグリーン水素など様々な利活用ルートを想定。

番号：A-13-4J

PJ：産業活動由来の希薄な窒素化合物の循環技術創出

テーマ名：気相NO_x資源化 - NO_x吸蔵還元によるNH₃の選択合成

担当機関名：産業技術総合研究所

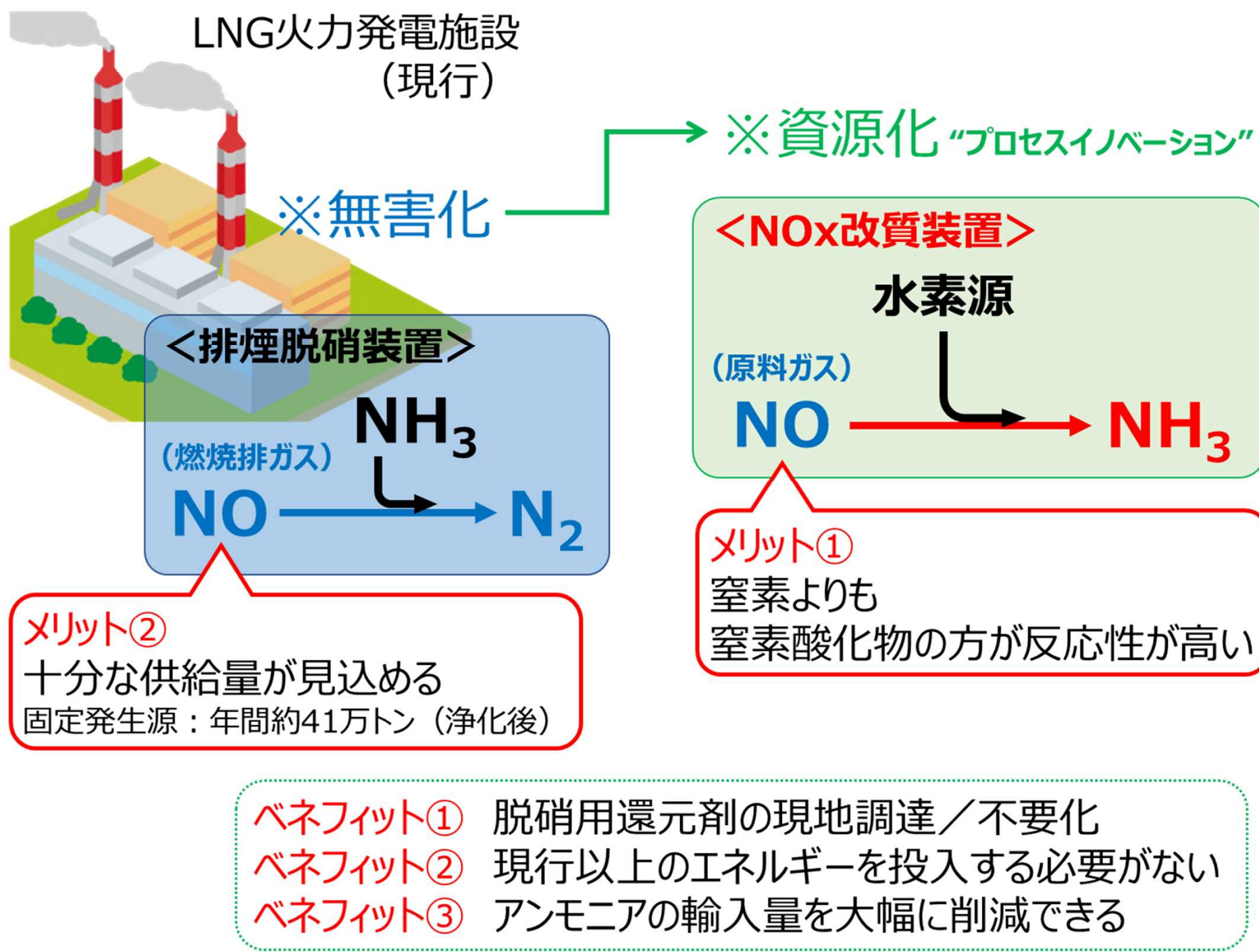
問合せ先：木村辰雄（産総研）t-kimura@aist.go.jp



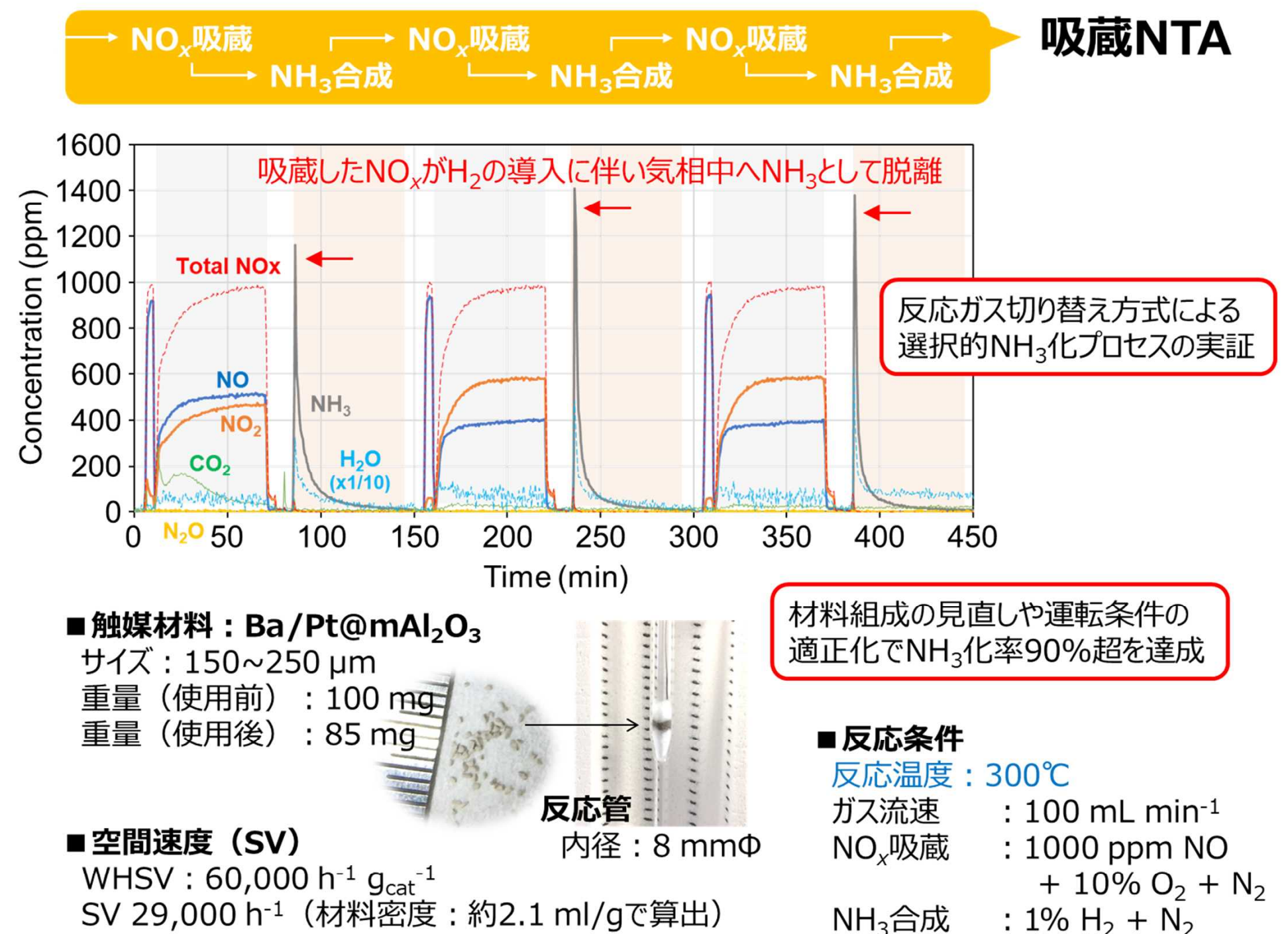
【技術の概要】 導入ガスの切り替えでNO_x吸蔵とNH₃化を設計、共存ガスの影響を排除等して選択的NH₃化

【優位性】 高温でもNO_x回収が可能のため、同一温度でNO_x吸蔵とNH₃化を実施、熱マネージメントも不要
機能複合化した触媒材料1種でNO_x吸蔵とNH₃化を実施、負荷変動に応じたNO_x吸蔵も可能

窒素資源の循環技術：無害化から資源化へのゲームチェンジ

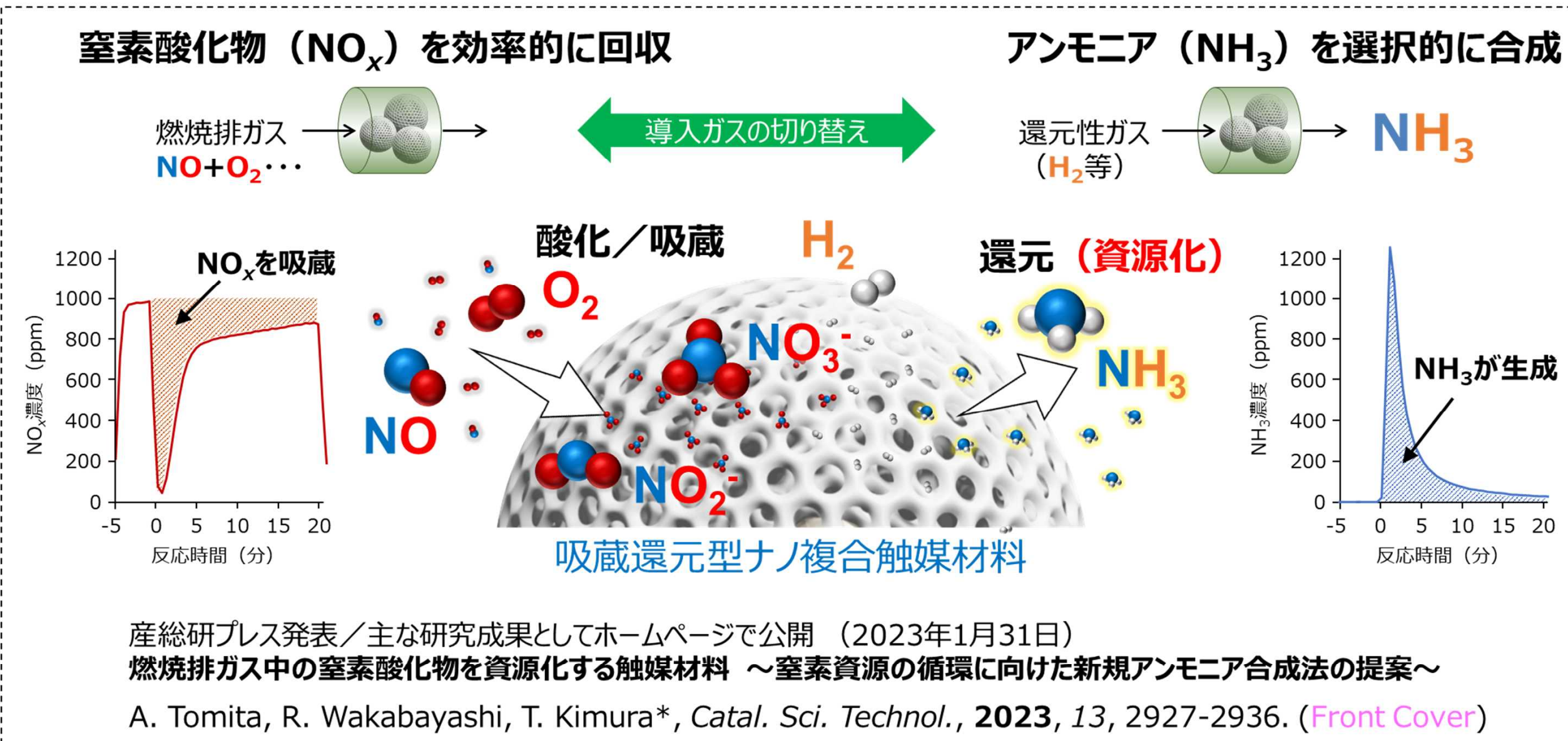


産総研（中部）の取り組み：吸蔵したNO_xをその場でアンモニア化する一例

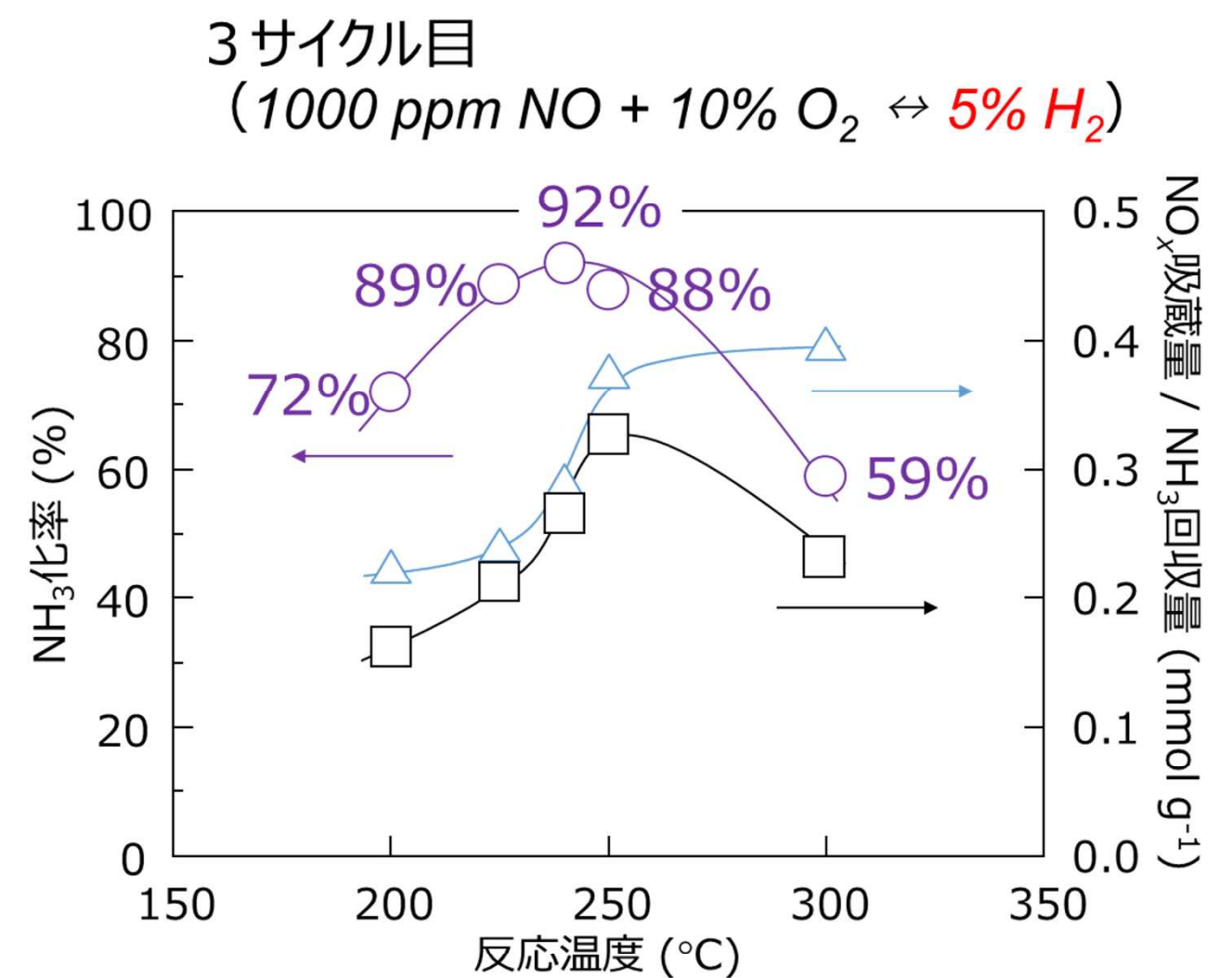


反応条件の影響や夾雑物による阻害効果の検証

導入ガス切替方式のNO_x吸蔵還元反応：基本原理の実証



★反応温度の影響

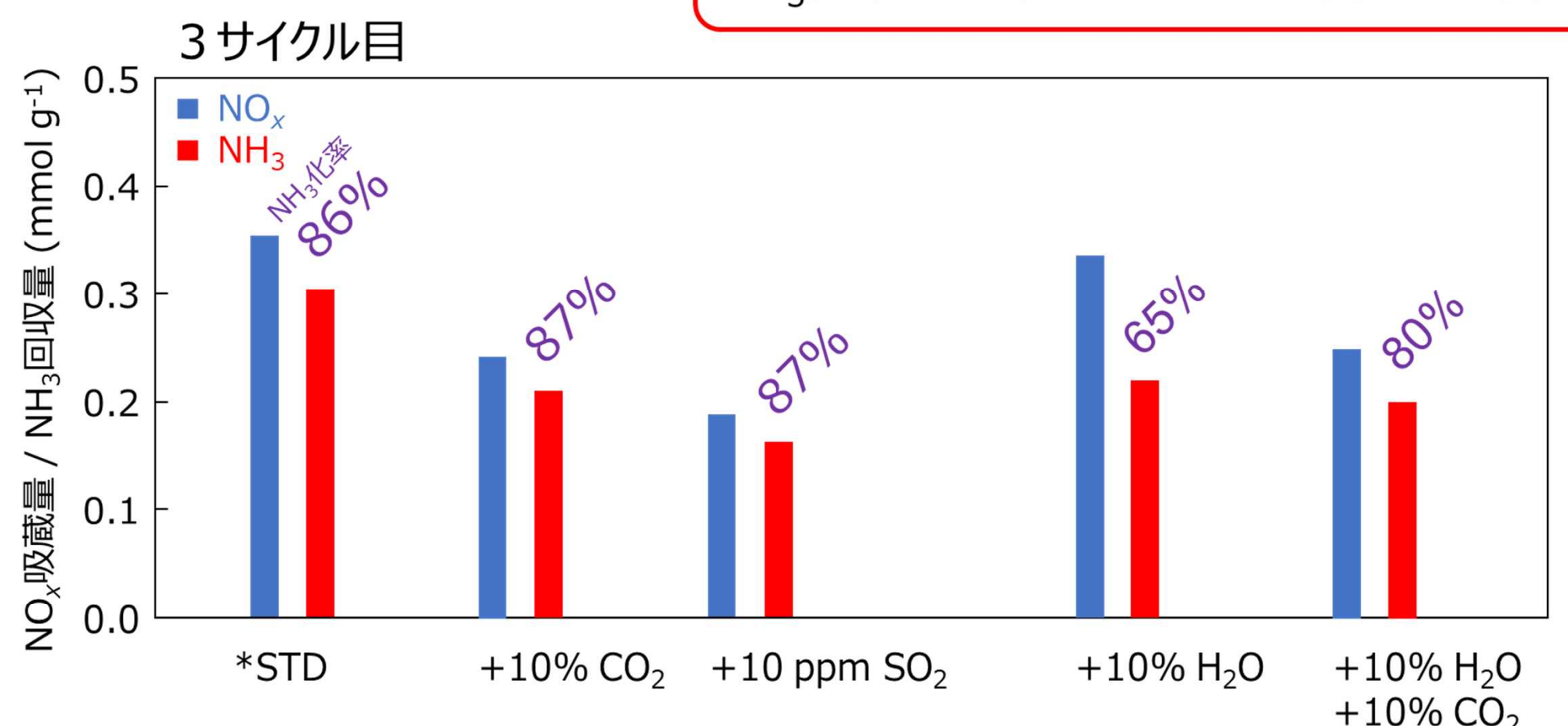


成果① NH₃化率90%以上となる反応条件を明確化

★共存ガスの影響

■反応条件
反応温度：250℃
ガス流速：100 mL min⁻¹
NO_x吸蔵：1000 ppm NO + 10% O₂ + N₂
+ 10% CO₂ + 10% H₂O + 微量SO₂
NH₃合成：5% H₂ + N₂

成果②
共存成分毎に課題を把握
NO_x吸蔵量を意図的に減少、NH₃化率の低下を抑制



【想定される用途・効果】

ゴミ焼却炉等の小規模NO_x発生源

- ・ 現地での脱硝用還元剤利用、NH₃製造プラントへも拡張、負荷変動運転に対応したNO_x吸蔵も可能
- ・ 幅広い温度域でNH₃化率90%超を達成、材料組成の設計で最適温度を調節、200℃以下にも対応可能

番号: A-13-5J

PJ: 産業活動由来の希薄な窒素化合物の循環技術創出

テーマ名: アンモニア吸着濃縮回収資源化プロセスの構築

担当機関名: 産業技術総合研究所(2)

問合せ先: 南公隆(産総研) kimitaka-minami@aist.go.jp



【技術の概要】 排ガス中の窒素酸化物NOをアンモニアNH₃に変換(NTA反応)した処理ガスから、アンモニア吸着材(プルシアンブルー型錯体)を用いてアンモニアを吸着-濃縮-脱離によって資源化する技術

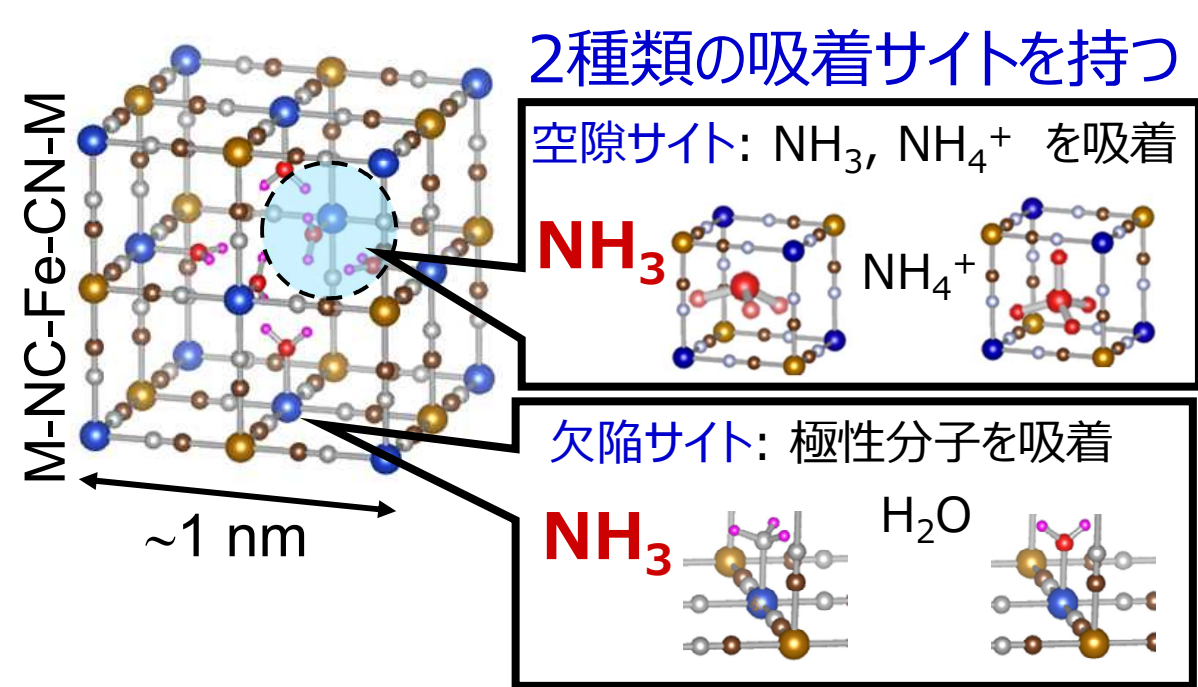
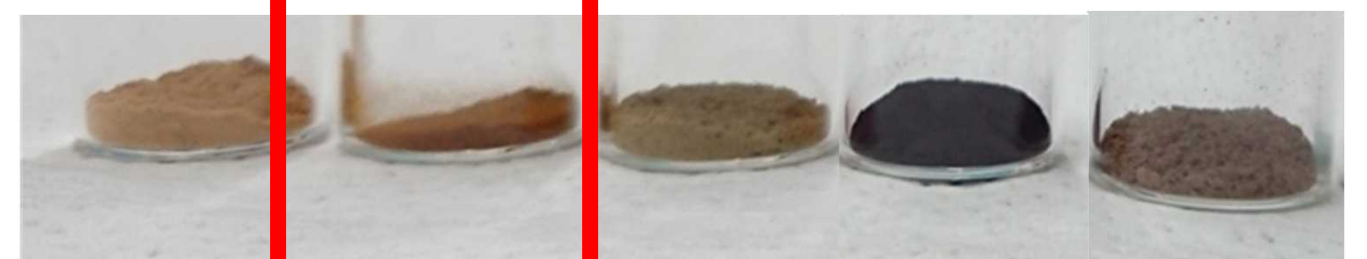
【優位性】 大容量・高選択性のアンモニア吸着材のため、水蒸気や二酸化炭素の共存するガス中からでもアンモニアを選択的に吸脱着して濃縮が可能。加熱なし・低エネルギーで炭酸水素アンモニウム(固体)として回収。

フェロシアン化金属錯体(PBA)吸着脱離評価

H. Usuda, et al., *Molecules* 27, 8840 (2022).

PBA
 $A_xM_y[M'(CN)_6] \cdot zH_2O$
 M=M'=Fe: プルシアンブルー(PB)
 M, M'=Fe, Cu, Zn, Ni, Co..., A=Na, K, NH₄+: PBA

M	Zn ²⁺	Ni ²⁺	Cu ²⁺	Co ²⁺	Mn ²⁺
M'	Fe ³⁺	Fe ³⁺	Fe ³⁺	Fe ³⁺	Fe ³⁺



PBA(産総研)	1.5
PB(産総研)	0.26
吸着イオン交換樹脂(市販)	0.18
活性炭(市販)	0.03

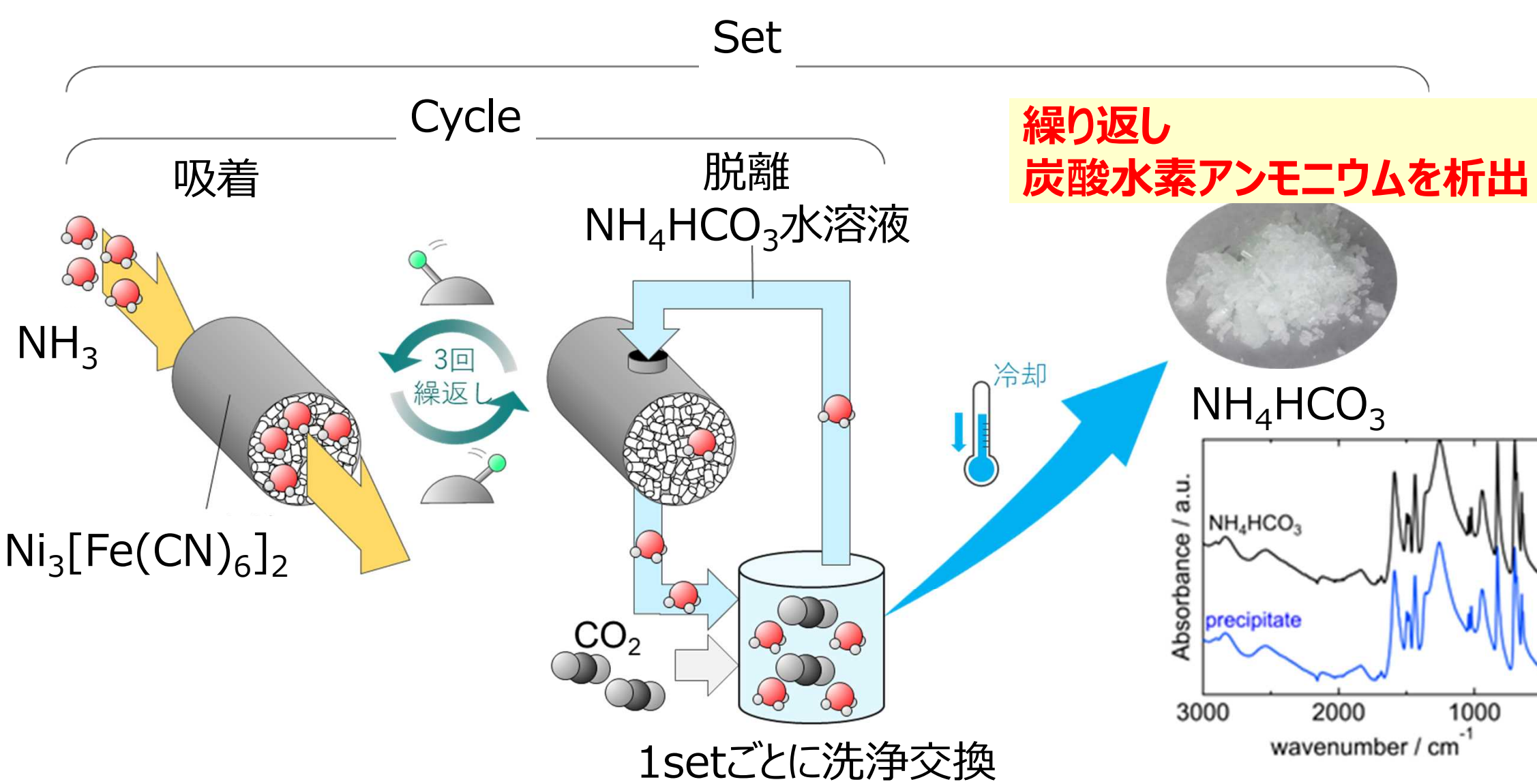
従来吸着材の 8.3~50倍
 30ppm-NH₃の理論吸着容量 (mmol/g)

吸着量 [mmol/g]	2.66	5.48	13.2	1.47	4.57
洗浄脱離量 [mmol/g]	0.53	1.49	8.19	0.14	-0.63
構造維持 (XRD)	×	○	×	○	○

PBAが世界最高のNH₃吸着能を示すことを発見

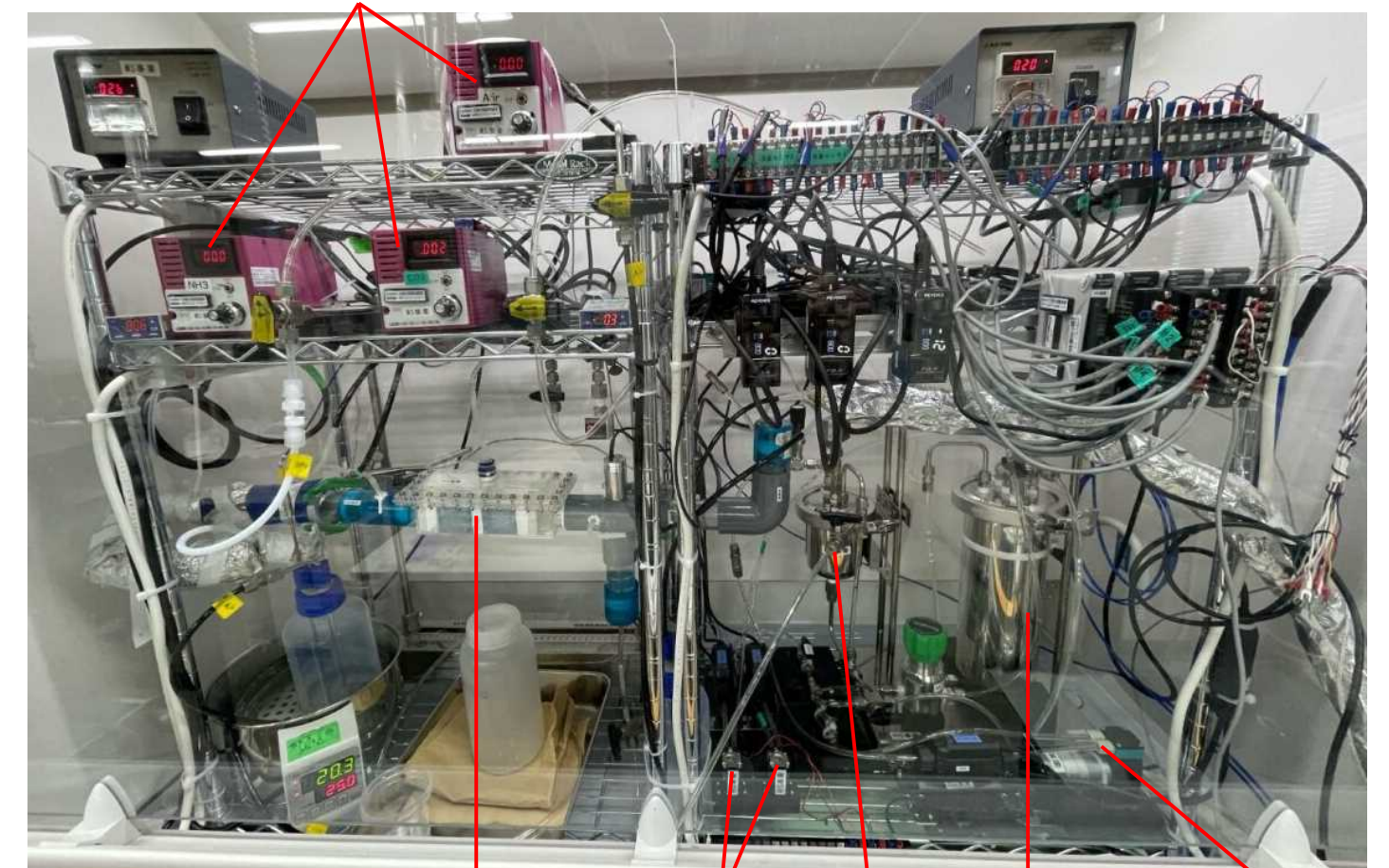
アンモニア吸着脱離システム

H. Usuda, et al., *ACS Sustain. Chem. Eng.*, Accepted (2023).



質量流量制御装置

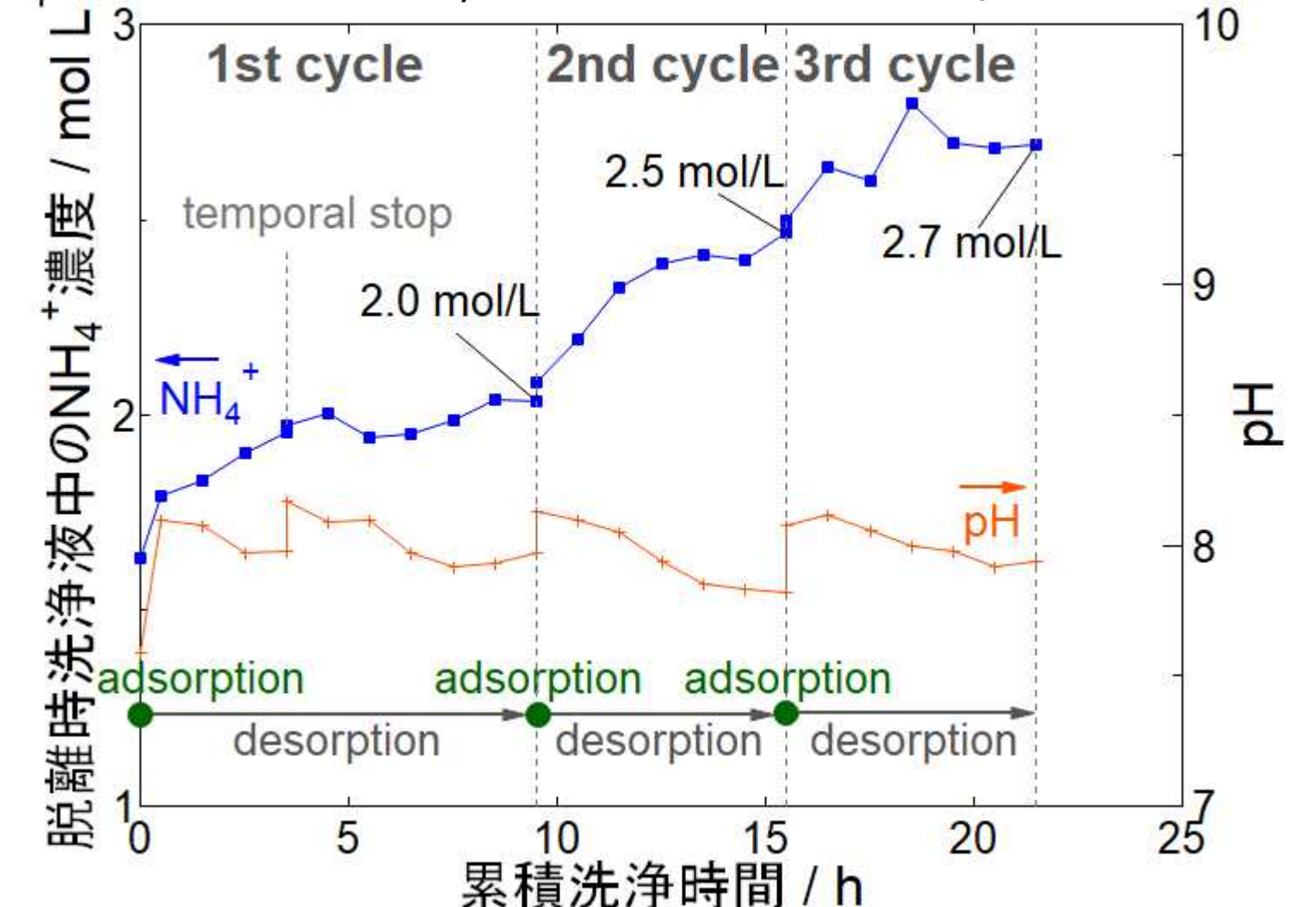
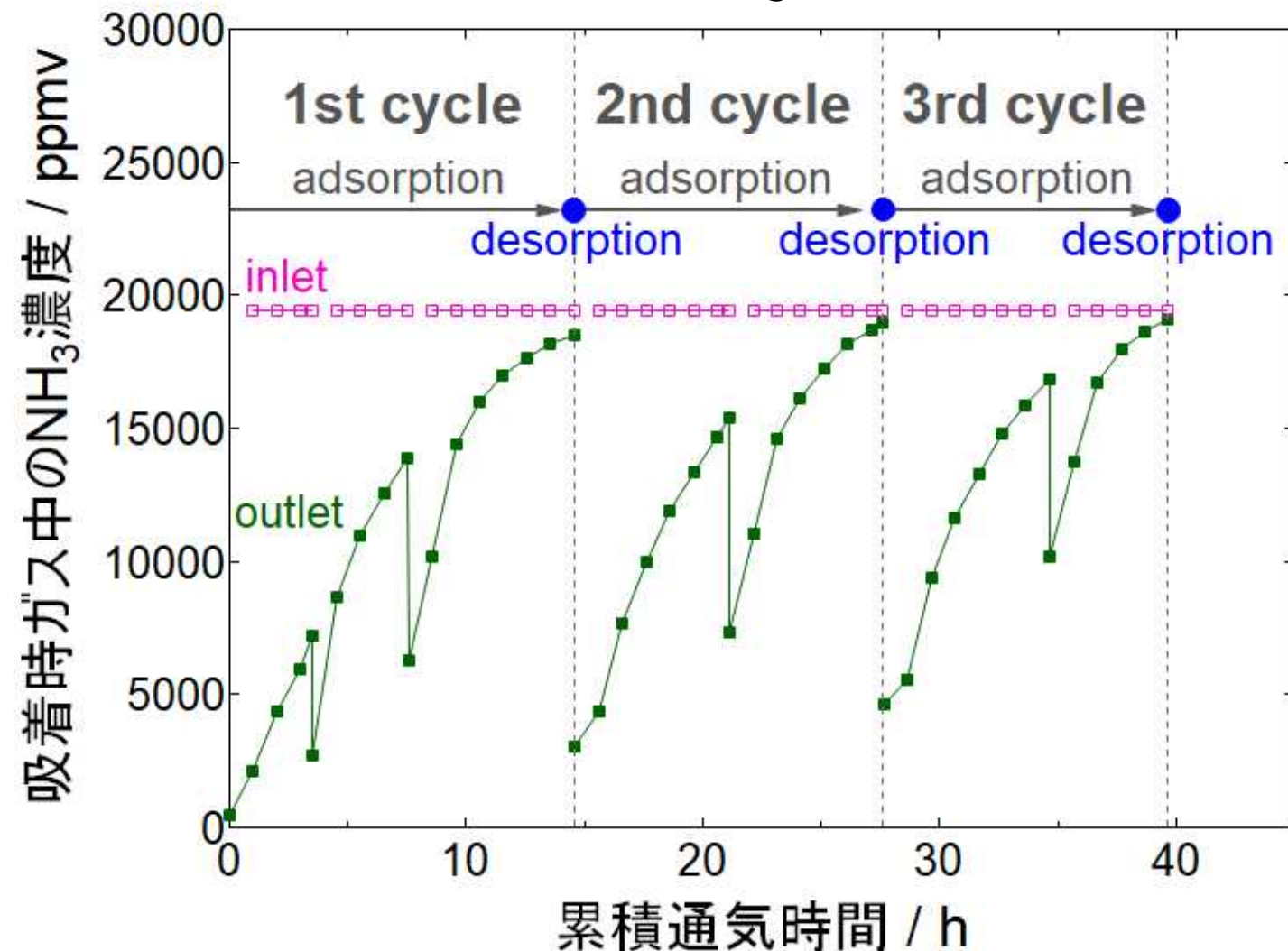
実際に使用した装置



吸着材カラム ポンプ CO₂タンク 洗浄液タンク

温度: 25°C, ガス流量2.1L/min, NH₃濃度1.9%, 水蒸気3.1%, 吸着材177g

温度: 25°C, 洗浄流量25~40mL/min



- outletのNH₃濃度は、十数時間でinletの95%以上になった
- 脱離をすると、出口濃度が下がった→脱離できている

- 脱離をすると、液中NH₄濃度は数時間で上昇→脱離できている
- pHは一旦上がった後、下がる→NH₃が溶けた後、CO₂が溶ける

【想定される用途・効果】

船舶、ゴミ焼却炉、火力発電所、酸化プロセス、セメントキルン等の排ガス

発生するNOをNTA反応によりNH₃に変換し、分離濃縮により燃料や工業生産アンモニアとして資源化。

番号: A-13-6J

PJ:産業活動由来の希薄な窒素化合物の循環技術創出

テーマ名: 廃水中窒素化合物のNH₄⁺変換-微好気性NH₄⁺変換プロセス (1)

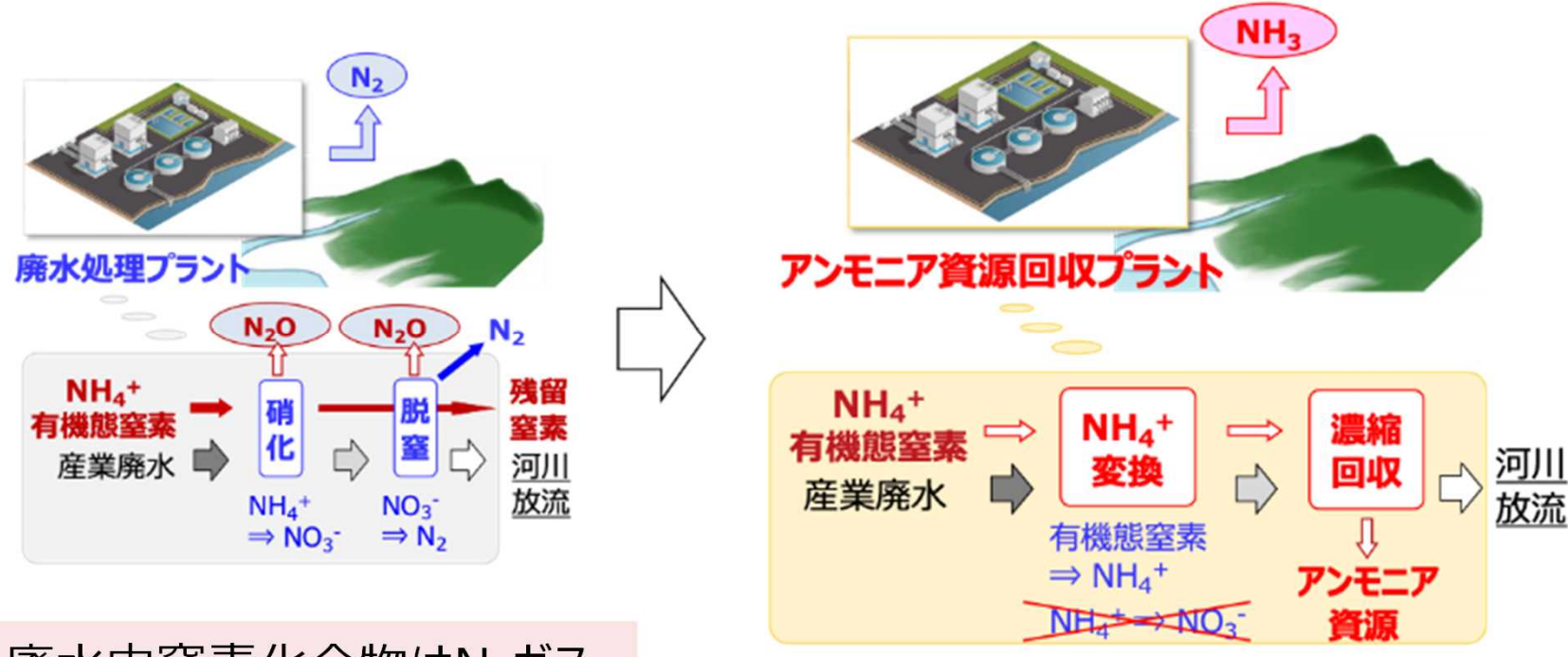
担当機関名: 産業技術総合研究所 (産総研) ・キリンホールディングス株式会社 (KHD Co., Ltd.)

問合せ先: 堀知行 (産総研) hori-tomo@aist.go.jp; 志水豪 (KHD) takeshi.shimizu@kyowa-kirin.co.jp



【技術の概要】・アンモニアへの効率的変換と超省エネ分離濃縮を連結した一連のシステム
・環境への窒素化合物排出を完全カットし、高濃縮アンモニア水から資源・エネルギーを回収
【優位性】多様な施設・廃水に適用できる、好気と嫌気のバイオプロセスを開発

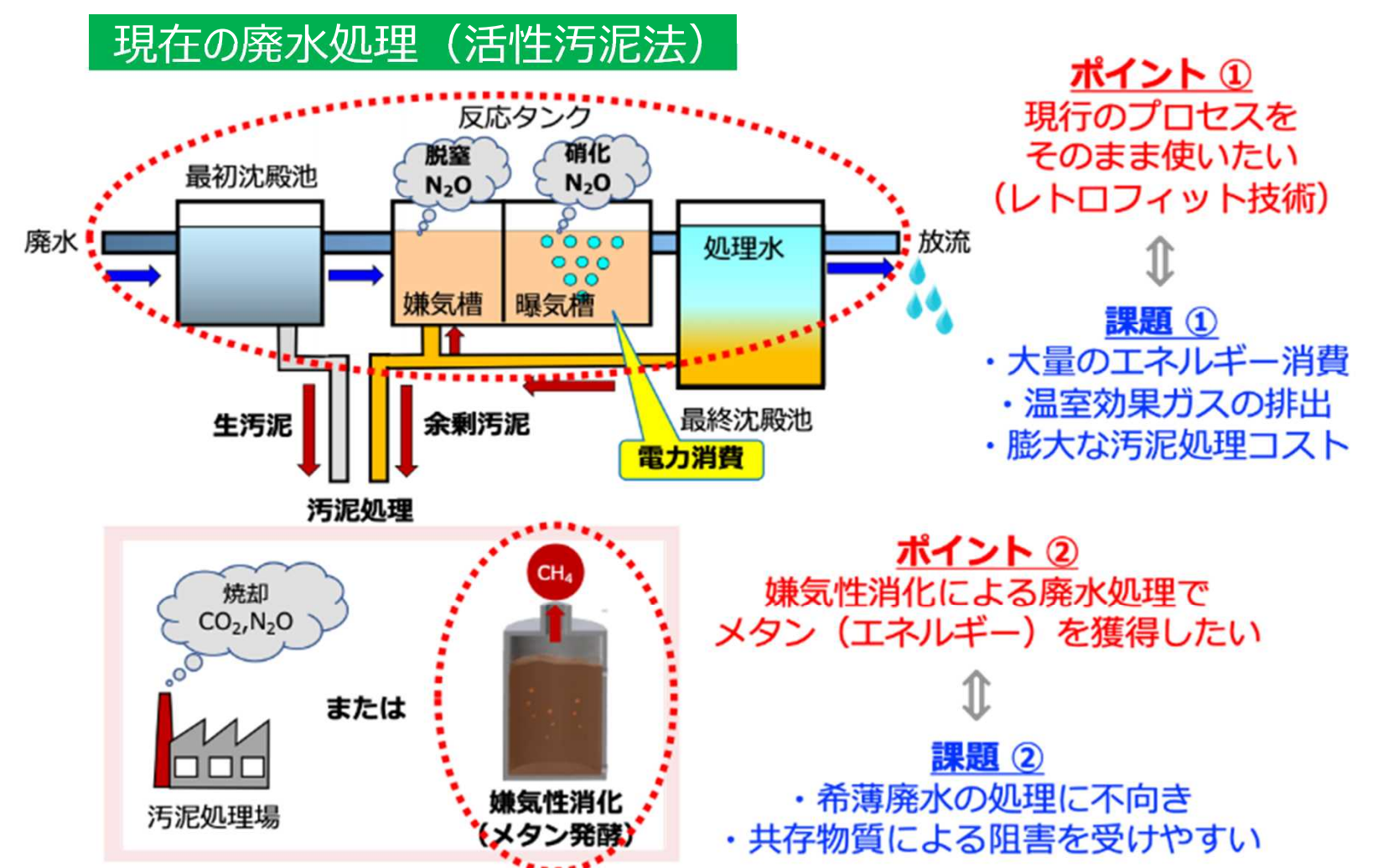
● 現状と将来像 (2050年)



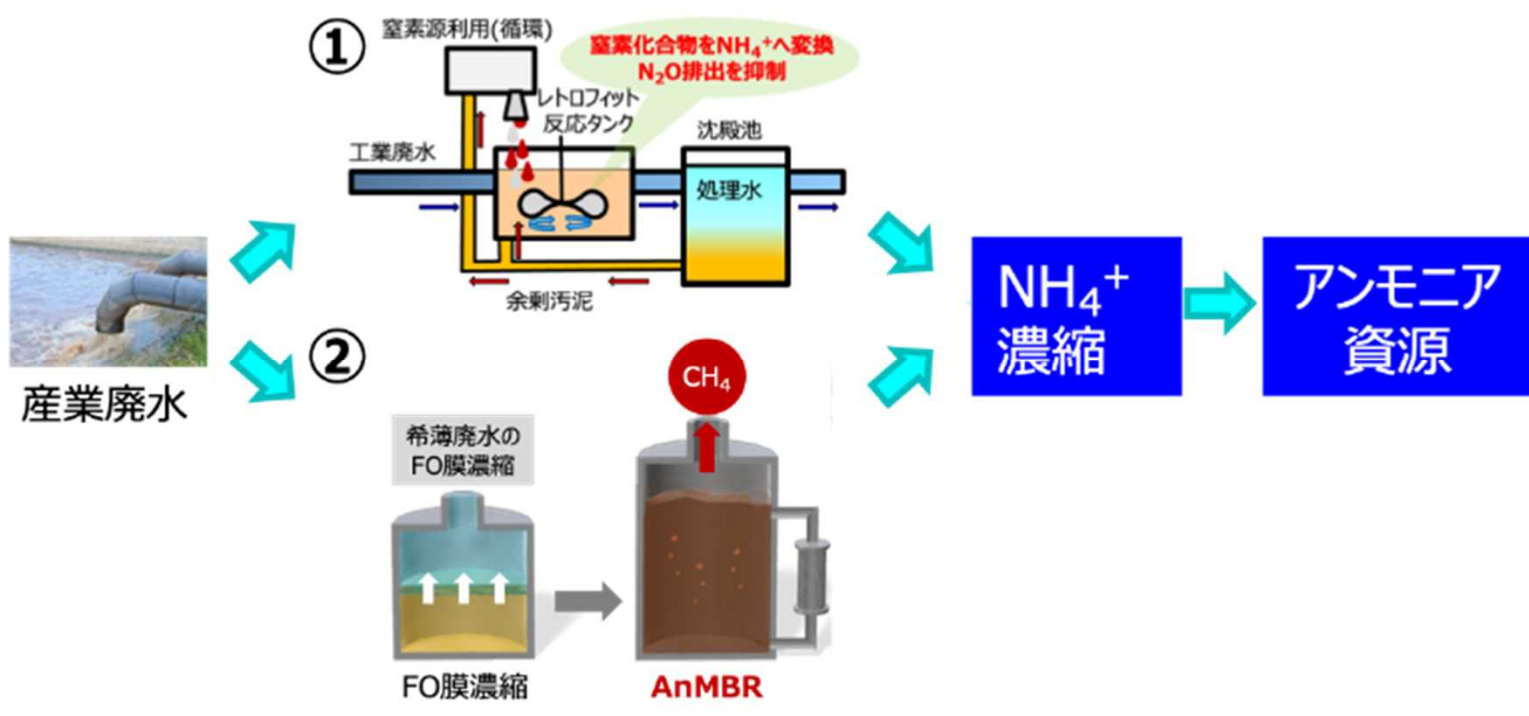
- 廃水中窒素化合物はN₂ガスに変換 (N₂Oも生成)
- 膨大なエネルギーが必要
- 残留窒素は環境へ放出

- 廃水中窒素化合物をアンモニアへと変換、濃縮回収
→ アンモニア資源として利用

● アンモニア変換技術における2つのポイント

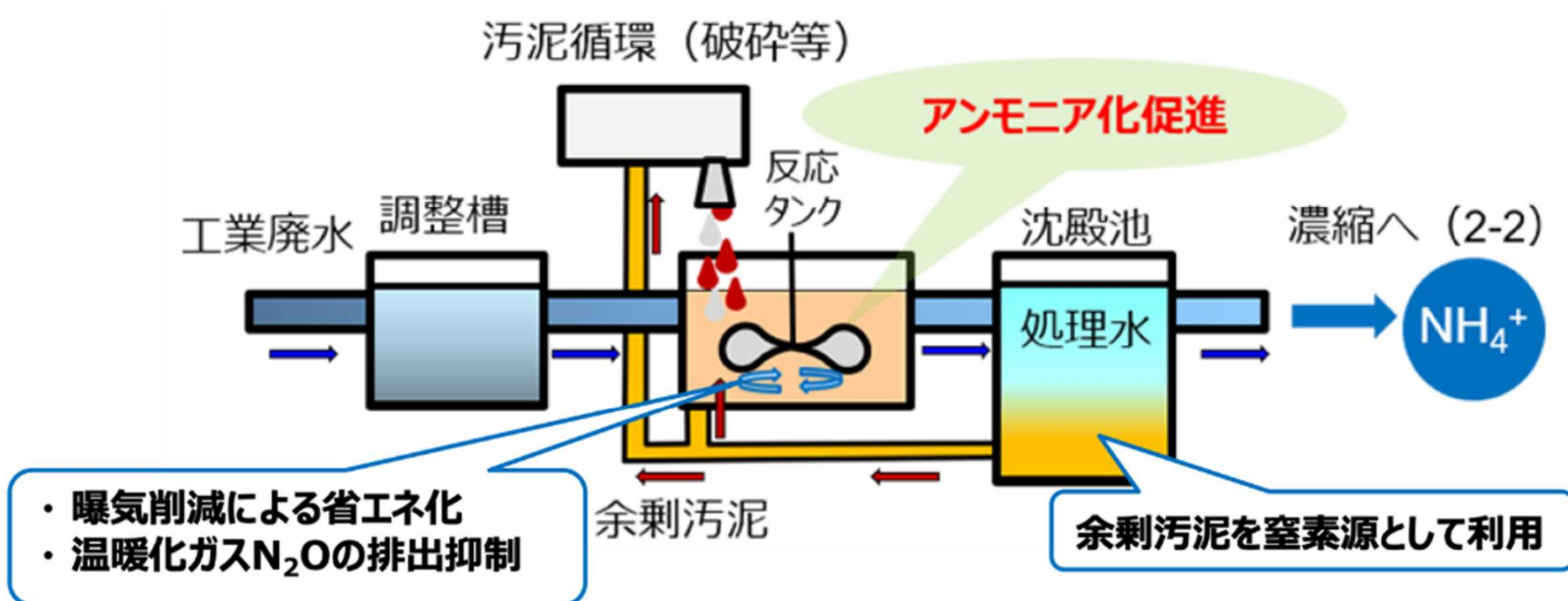


● 目標: ①微好気性変換プロセスと②嫌気MBRによる廃水中窒素化合物のアンモニアへの効率的・高速変換



	① 微好気性変換プロセス	② 嫌気MBR
有機物負荷	○ 低負荷対応	○ 高負荷対応
有機物処理性能	○ 全量処理	○ ほぼ全量処理 (~10%が残存)
窒素回収	○ ほぼ全量回収 (硝化抑制)	○ 全量回収
バイオガス回収	-	◎ メタン回収 (エネルギーとして利用)
レトロフィット	◎ 現行プロセスを使用 (迅速展開)	△ プロセス更新が必要だが、スポット適用可能
対象廃水	○ 低濃度 (産業廃水、下水等)	○ 低~高濃度 (産業廃水、下水等 [+FO濃縮])

● 微好気性アンモニア変換プロセスの概要

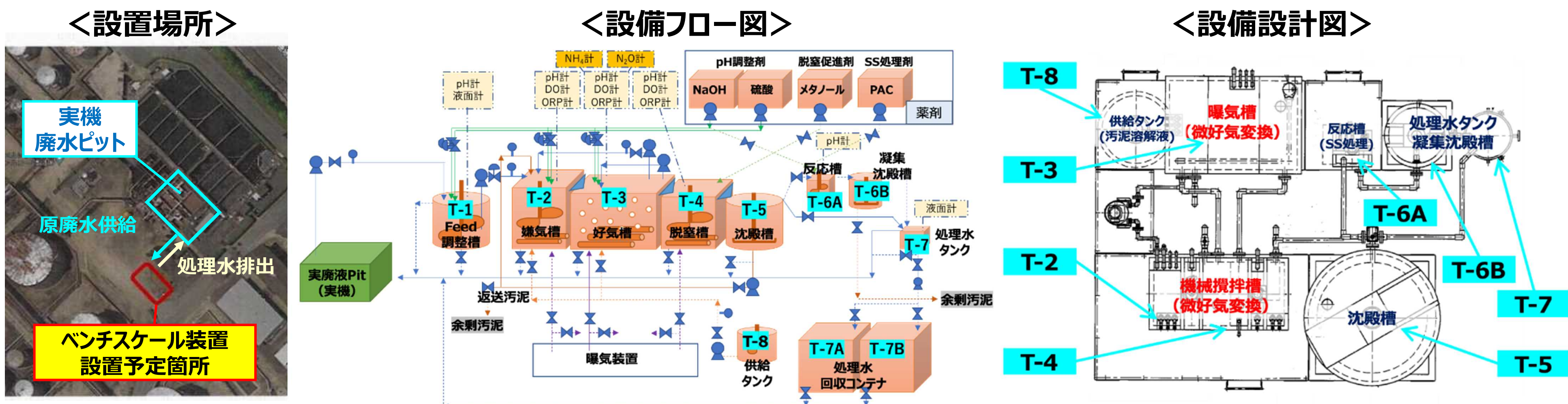


● 実施体制

- 微生物群集制御に基づく運転管理手法 (産総研)
- 窒素化合物動態制御に基づく運転管理手法 (東京農工大学)
- エネルギー・物質収支評価とN₂O排出抑制手法 (京都大学)
- ベンチスケール装置の構築・運転・維持手法 (キリンHD)



● ベンチスケール実証試験の準備状況

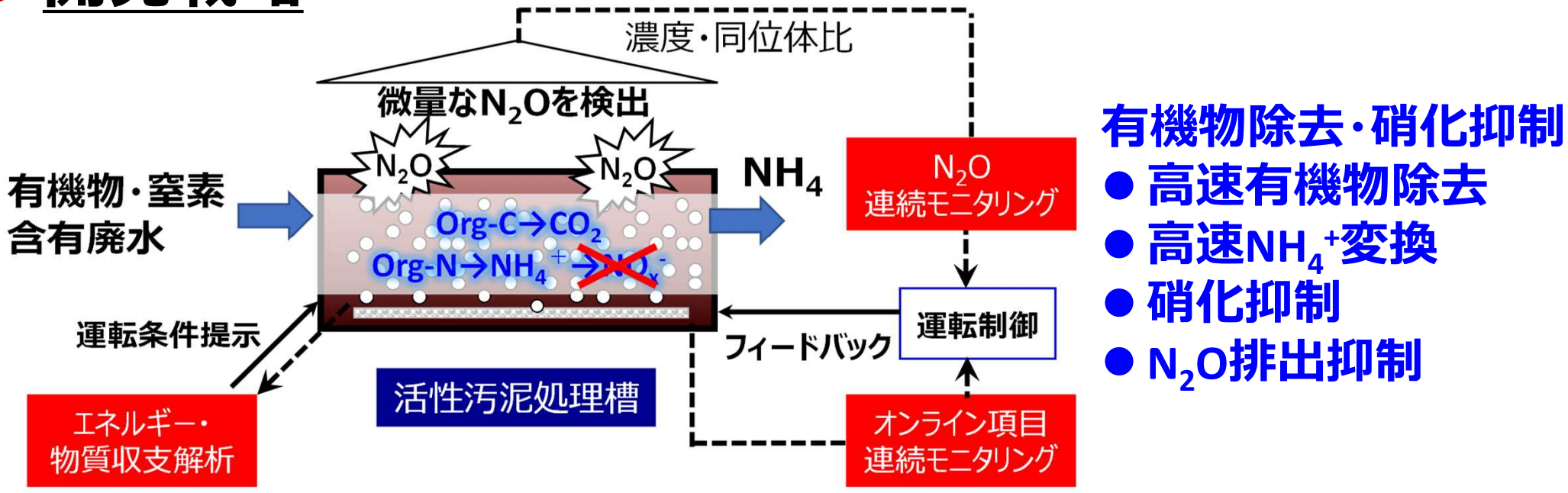


【想定される用途・効果】ベンチスケール装置による発酵産業廃水からのNH₄⁺変換・保持実証
● レトロフィット技術: 現行の活性汚泥プロセスをそのまま利用可能、様々な有機廃水への適用

【技術の概要】 活性汚泥法を最適なDO濃度 (微生物条件) およびpHにより運転し、高効率な有機物除去とNH₄⁺変換・保持を達成する。同時に、硝化抑制運転により、温室効果ガスN₂Oの排出を削減する。

【優位性】 操作因子を調整することで既存の活性汚泥法を微生物アンモニア変換・保持にレトロフィット可能

開発戦略



実用化

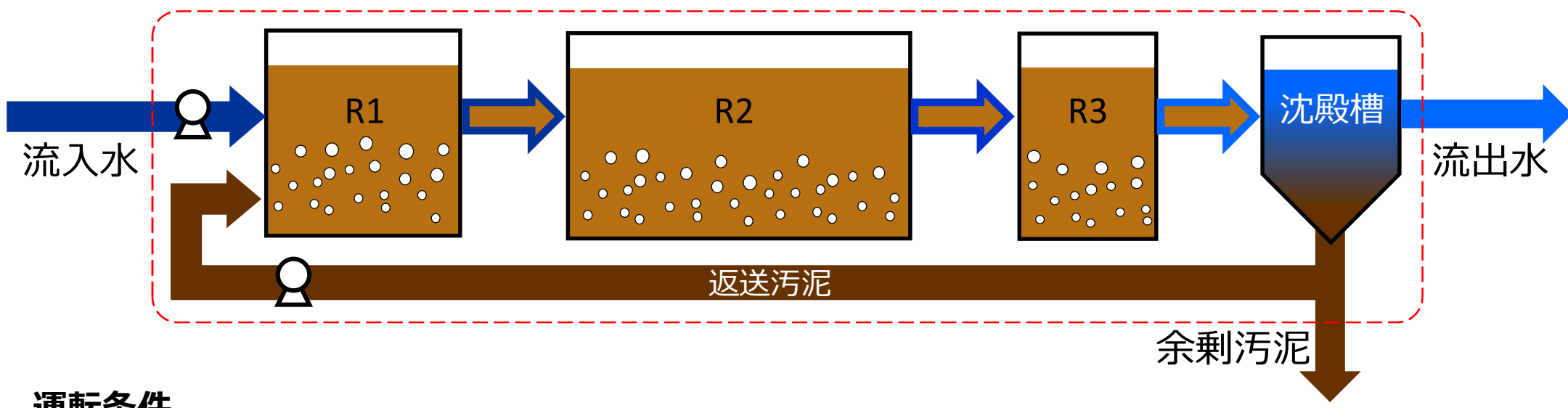
- 三槽式装置へ拡張 (京都大)
- 物質収支の解析
- 安定運転条件の確立
- N₂O排出抑制機構解明

安定化・高速化

- プロセス改良・高度化 (農工大)
- N₂Oモニタリングによるフィードバック技術
- 微生物の凝集体の創製

ベンチ試験へスケールアップ

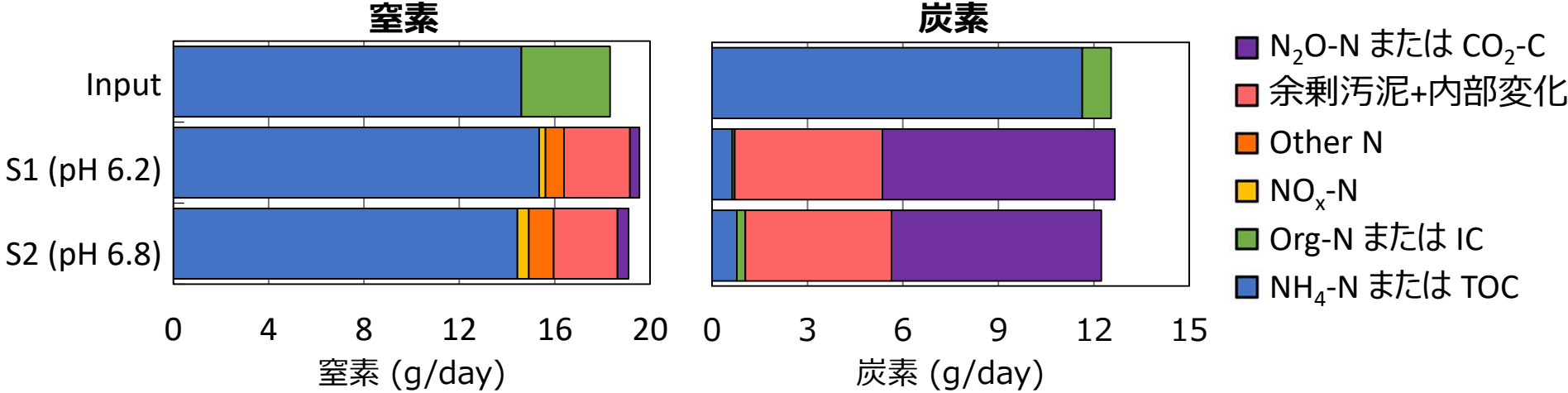
三槽式ラボスケール装置の運転



運転条件

システム	運転期間 (日)	pH制御	DO制御	SRT (日)	MLSS (mg/L)	HRT (時間)	流入人工廃水
S1	64日	R2 = 6.2	R2, R3 < 1 mg/L	10	3036 ± 793	30	TN = 600 mg/L NH ₄ -N = 480 mg/L TOC = 360 mg/L
S2		R2 = 6.8		9.6	3082 ± 831		

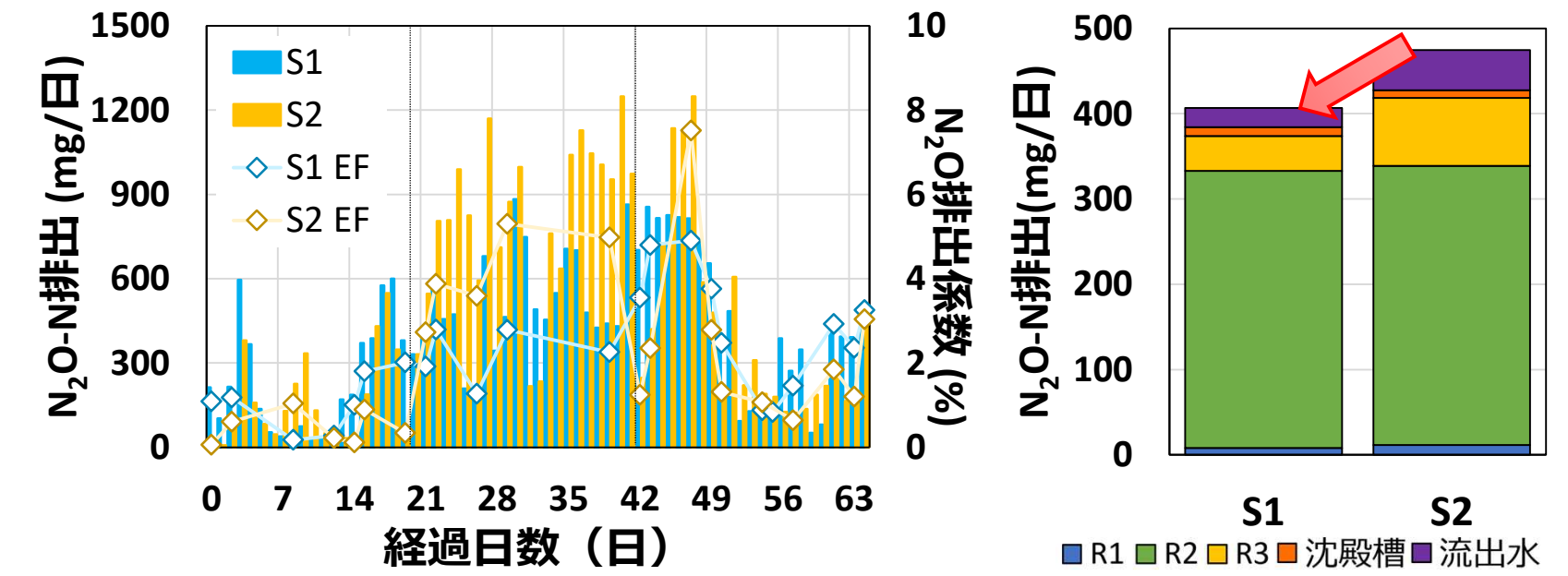
物質収支



- 微生物条件下で90%以上の全有機炭素(TOC)除去率および80%以上のアンモニア回収率が得られた。
- 窒素の損失は主に余剰汚泥によって引き起こされた。

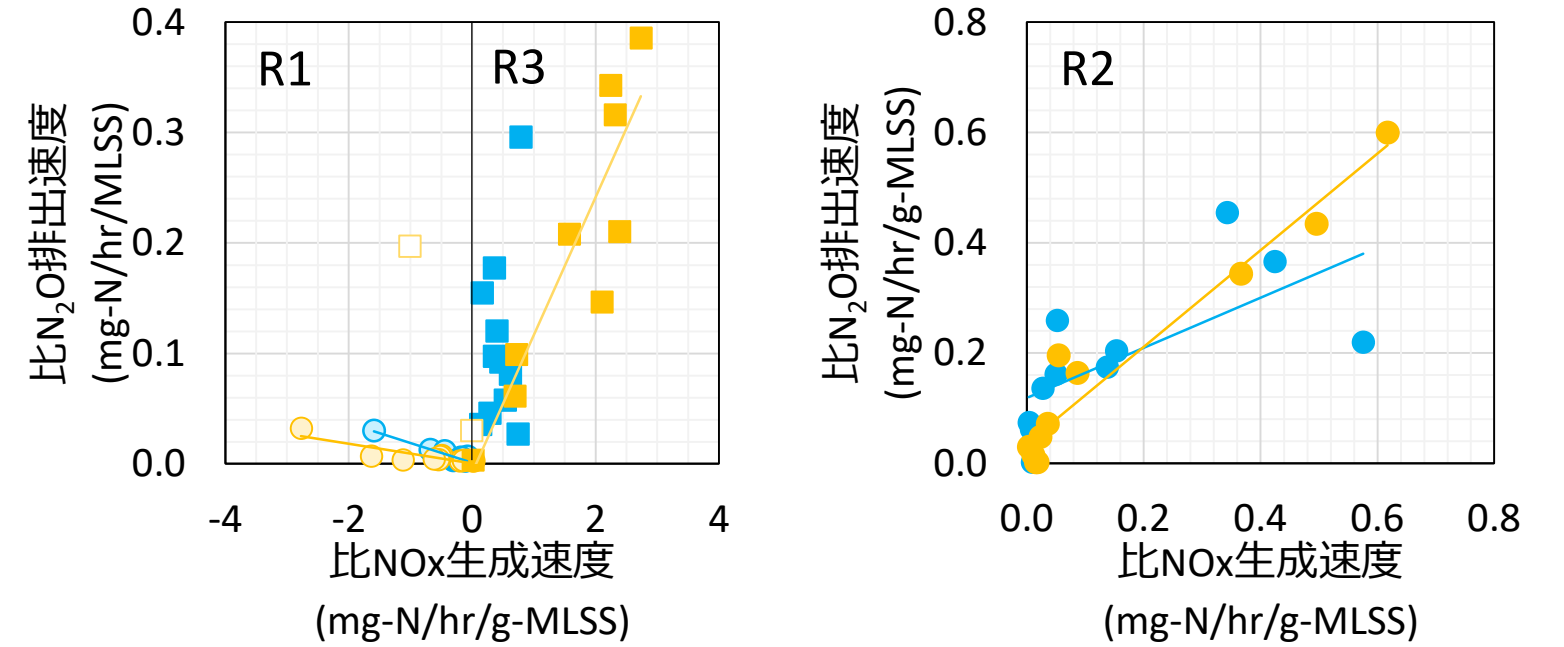
出典: Xinyi Zhou et al., Water Research, 247, 120780, 2023.

N₂O排出



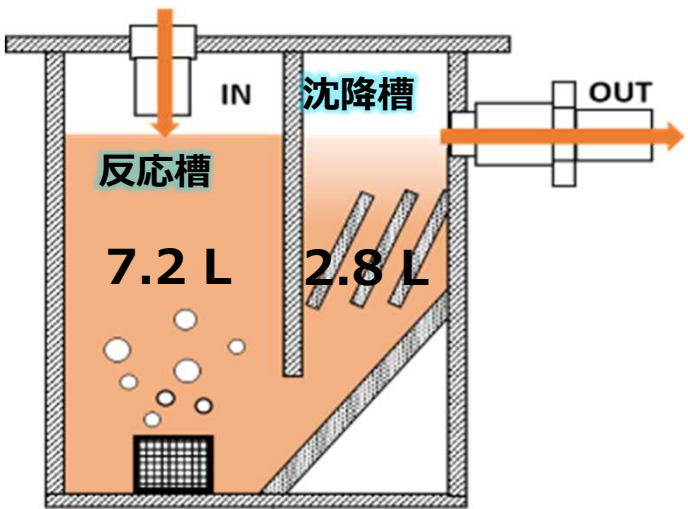
- pHが低いS1条件で、N₂O排出量がS2より15%削減可能。二つシステムの排出係数は標準活性汚泥法と同レベルであるが、N₂O削減可能な条件を解明。
- 硝化反応にとまない、主にR2がN₂O排出に寄与、R3からも排出。

N₂O排出とNO_x生成の関係

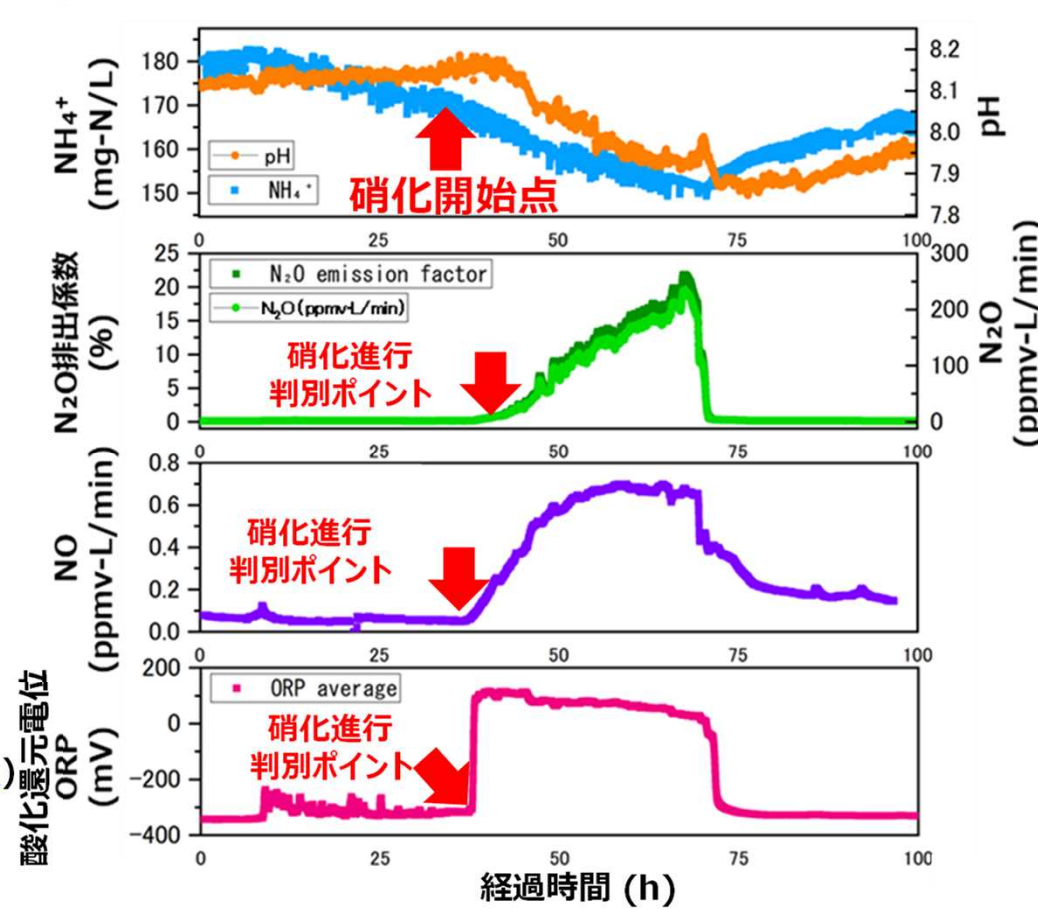


オンライン監視によるフィードバック技術に向けた検討

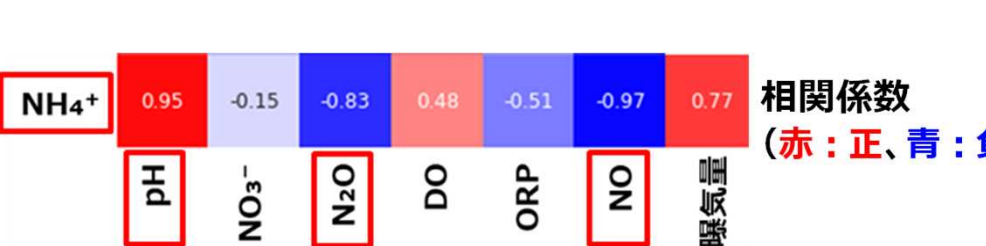
実廃水を連続流入



NH₄⁺酸化抑制→進行移行時での各指標の動態



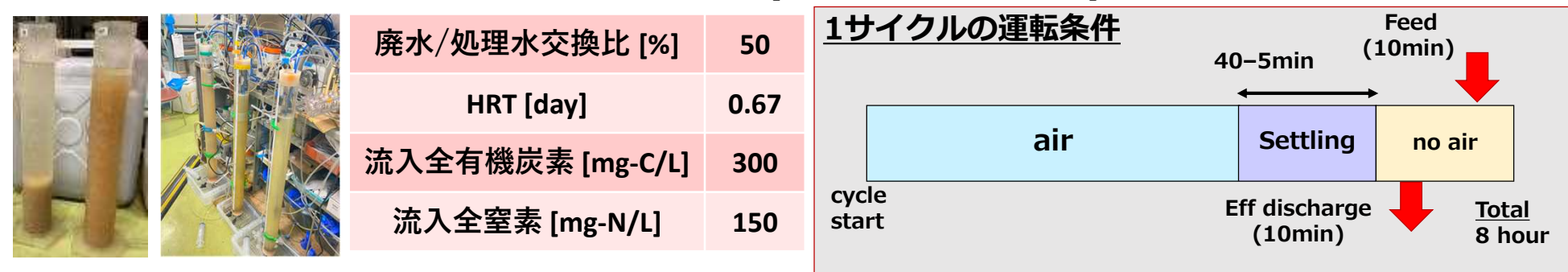
曝気量変動に対するオンライン監視項目の相関性



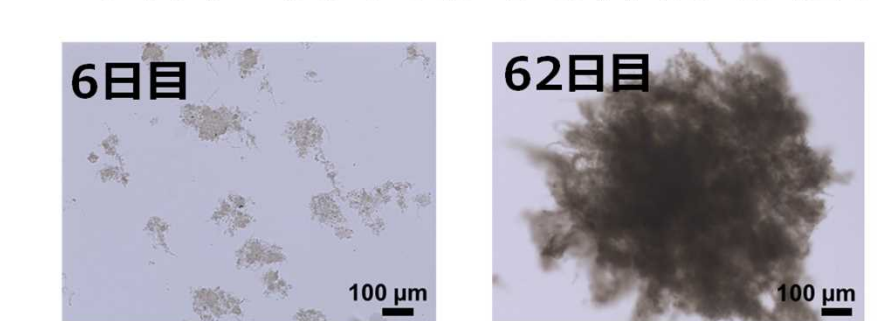
- NOおよびN₂Oガスのモニタリング→望ましくないNH₄⁺酸化と高い相関性

微生物の凝集体 (グラニュール) の創製

汚泥沈降性向上に向けた、グラニュールの創製 (回分的な廃水供給)

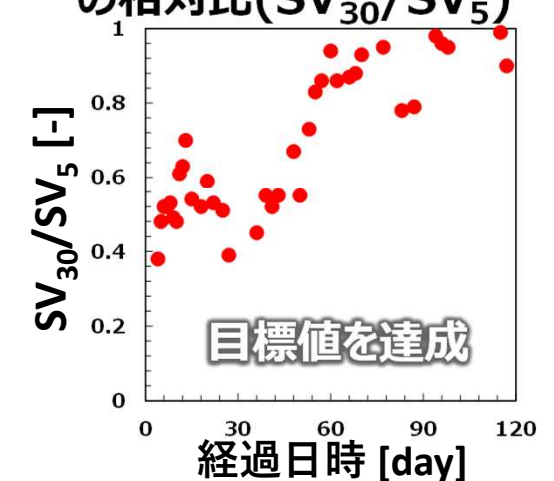


エアリフト型装置に実廃水を半回分的に通水

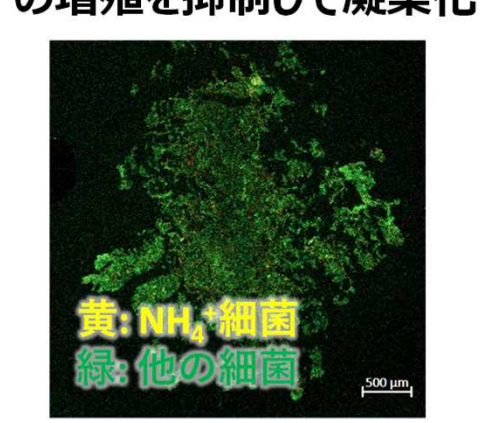


運転開始1か月後に凝集体を形成

5分・30分後の汚泥沈殿率の相対比 (SV₃₀/SV₅)



アンモニア酸化細菌の増殖を抑制して凝集化



- 半回分式の廃水通水により、グラニュールの創製。高いNH₄⁺と沈降性を達成。

【想定される用途・効果】 ベンチスケール装置による実廃水からのNH₄⁺変換・保持実証試験への支援

- 運転方法の確立による安定した有機物除去、NH₄⁺変換・保持、N₂O排出削減
- オンライン監視・フィードバック技術による突発的なNH₄⁺酸化を抑制
- グラニュールの生成による流出懸濁物の削減、NH₄⁺変換・保持の安定化・高速化

番号: A-13-9J

PJ:産業活動由来の希薄な窒素化合物の循環技術創出

テーマ名: 水相NH₄分離濃縮-正浸透膜濃縮プロセス

担当機関名: 神戸大・東洋紡エムシー(株)・早稲田大

問合せ先: 松山秀人(神戸大学) matuyama@kobe-u.ac.jp



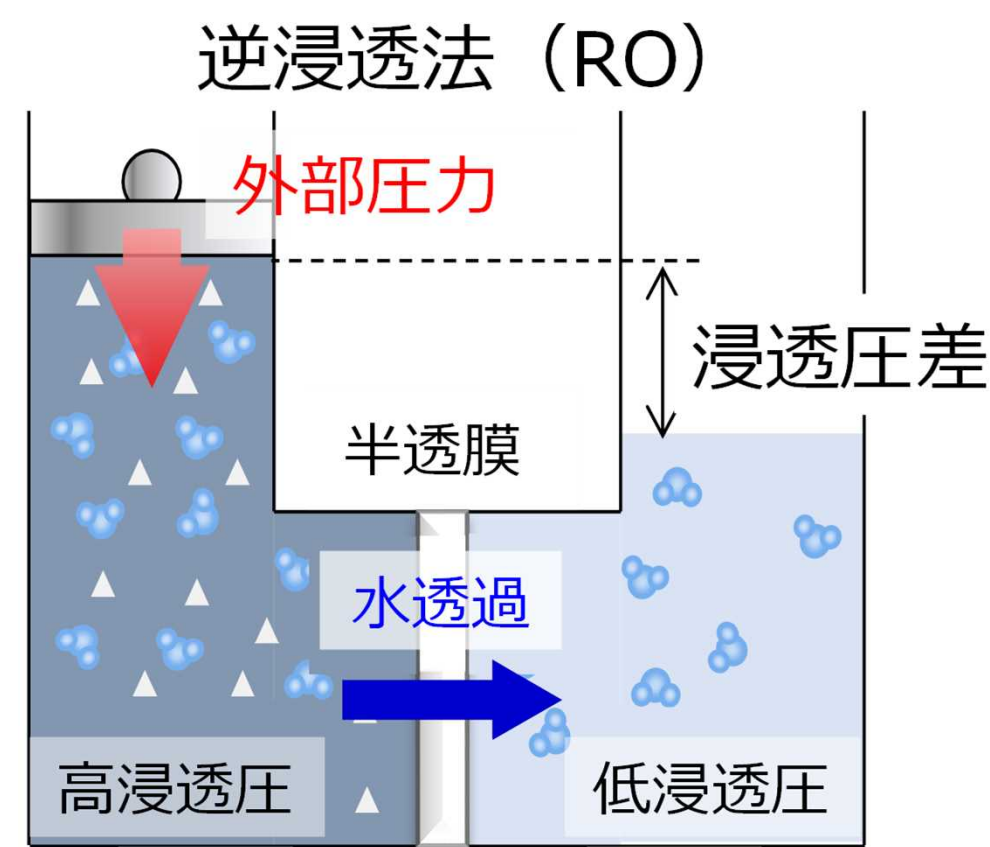
TOYOBO



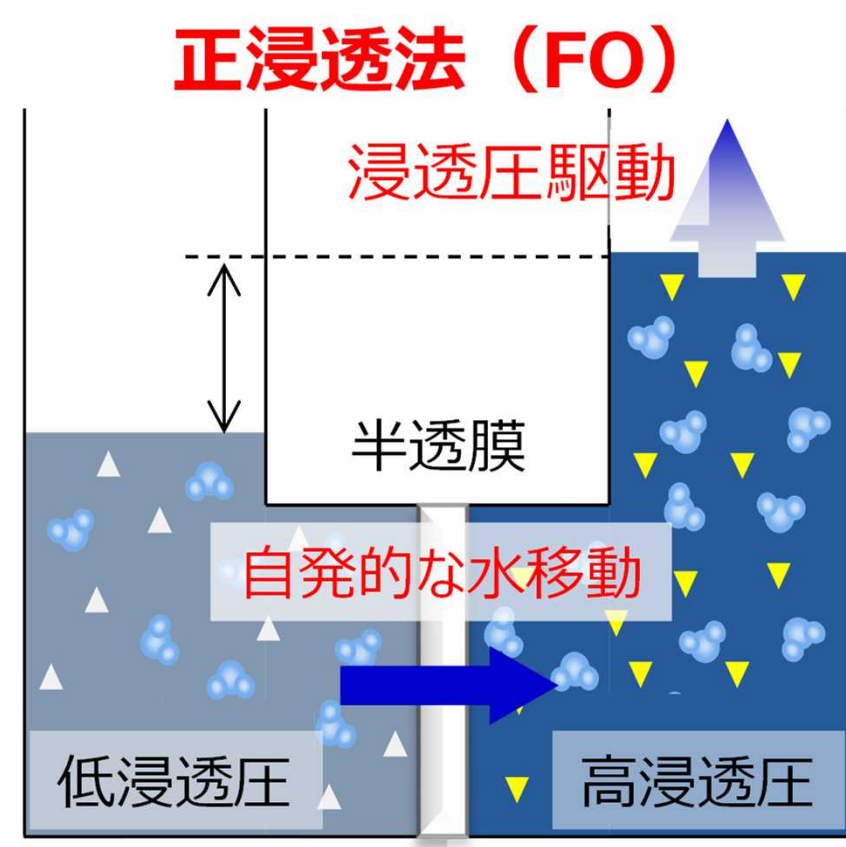
【技術の概要】 浸透圧差による自発的な水移動を利用する正浸透(FO)膜法を用いて廃水を濃縮する。

【優位性】 従来の圧力駆動型の逆浸透膜法と比較して、低エネルギーでの濃縮が可能。

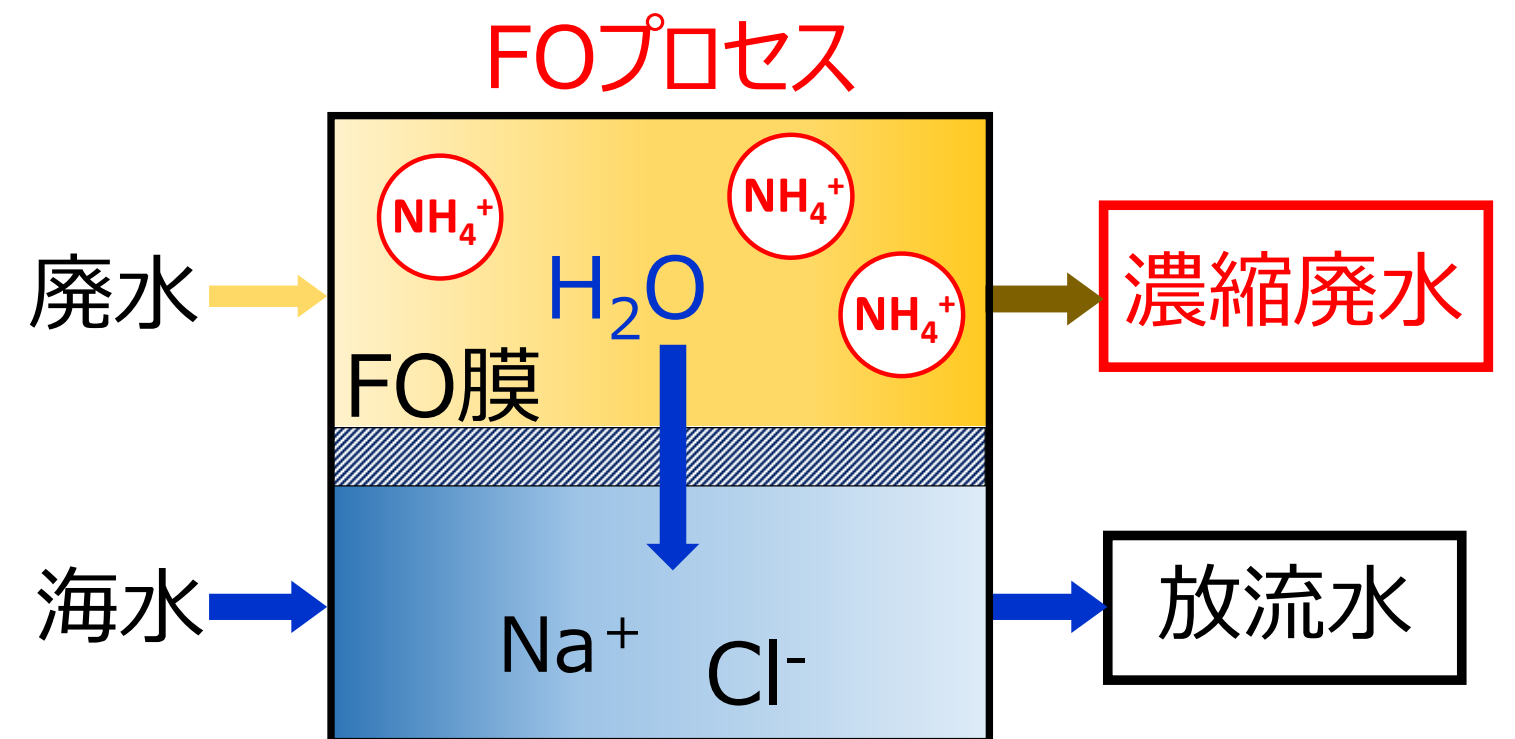
正浸透(Forward osmosis; FO)膜法



逆浸透法 (RO)
外部圧力
浸透圧差
半透膜
水透過
高浸透圧
低浸透圧
廃水
純水
透水のためには浸透圧以上の高圧を印加する必要がある
→消費電力が大きい



正浸透法 (FO)
浸透圧駆動
半透膜
自発的な水移動
低浸透圧
高浸透圧
廃水
駆動溶液 (DS)
浸透圧を利用した自発的な水の移動を利用する
→省エネルギー化が期待できる

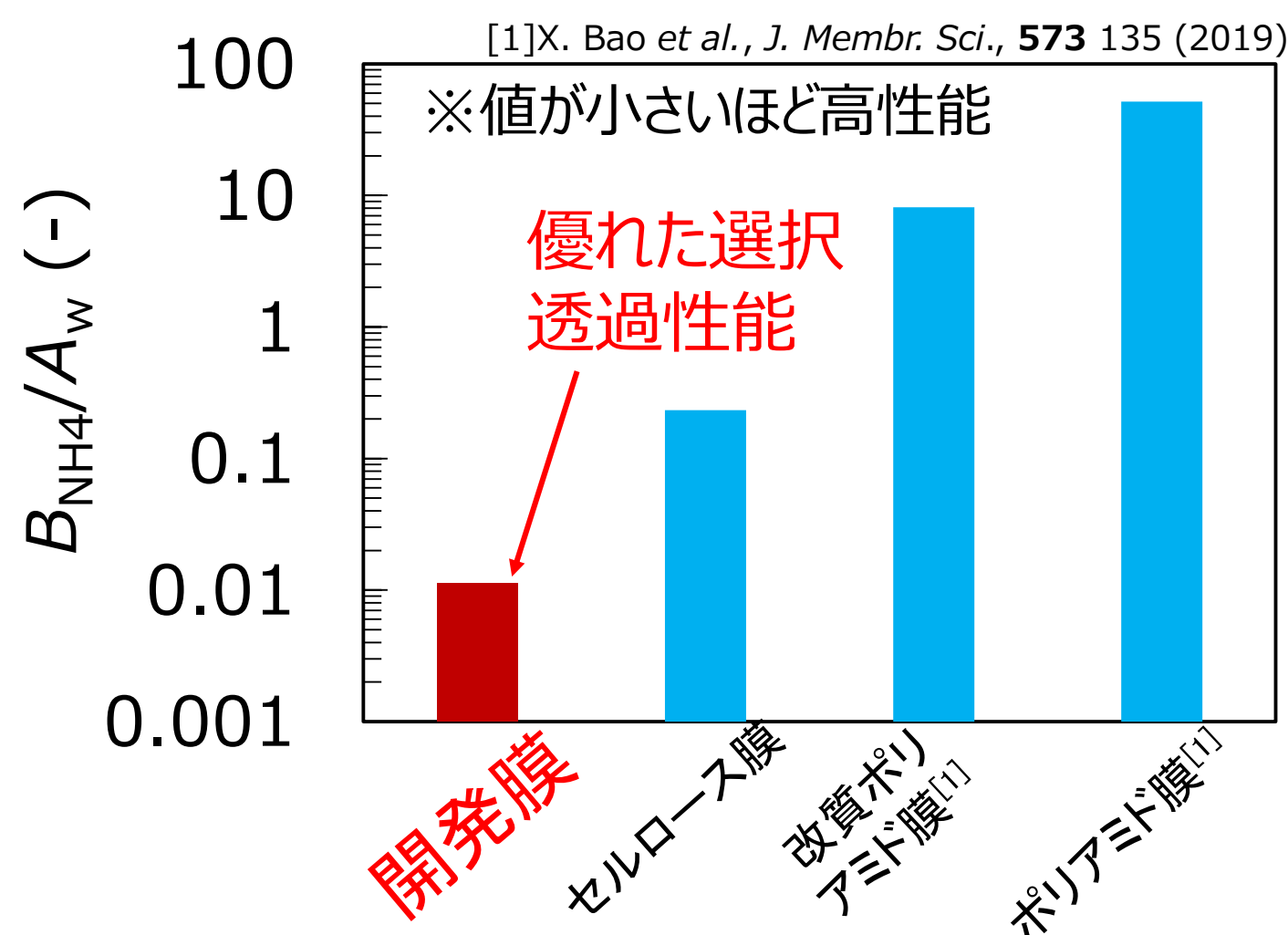


- 濃縮にかかるエネルギーは低圧ポンプ動力のみ
- FOプロセス後に生じた希釈海水はそのまま放流可能

駆動溶液に海水を用いることにより、低コストで廃液濃縮プロセスを運転可能

高性能FO高分子膜の開発

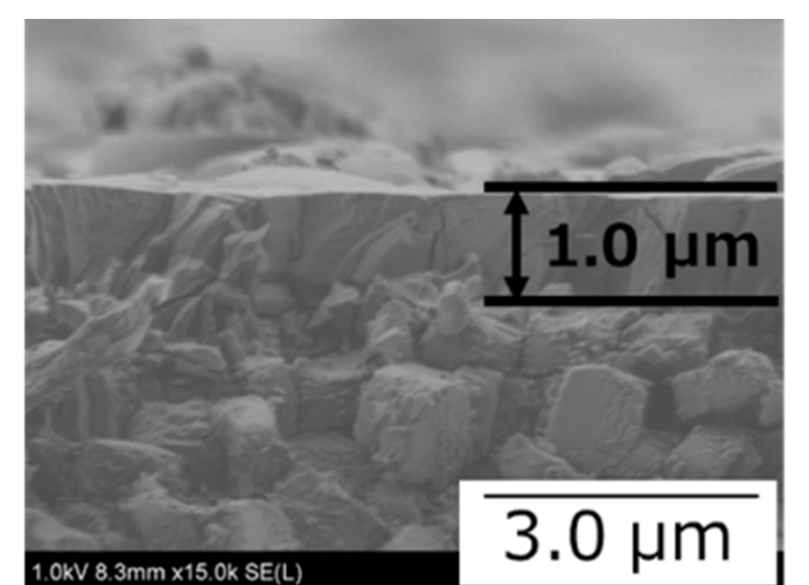
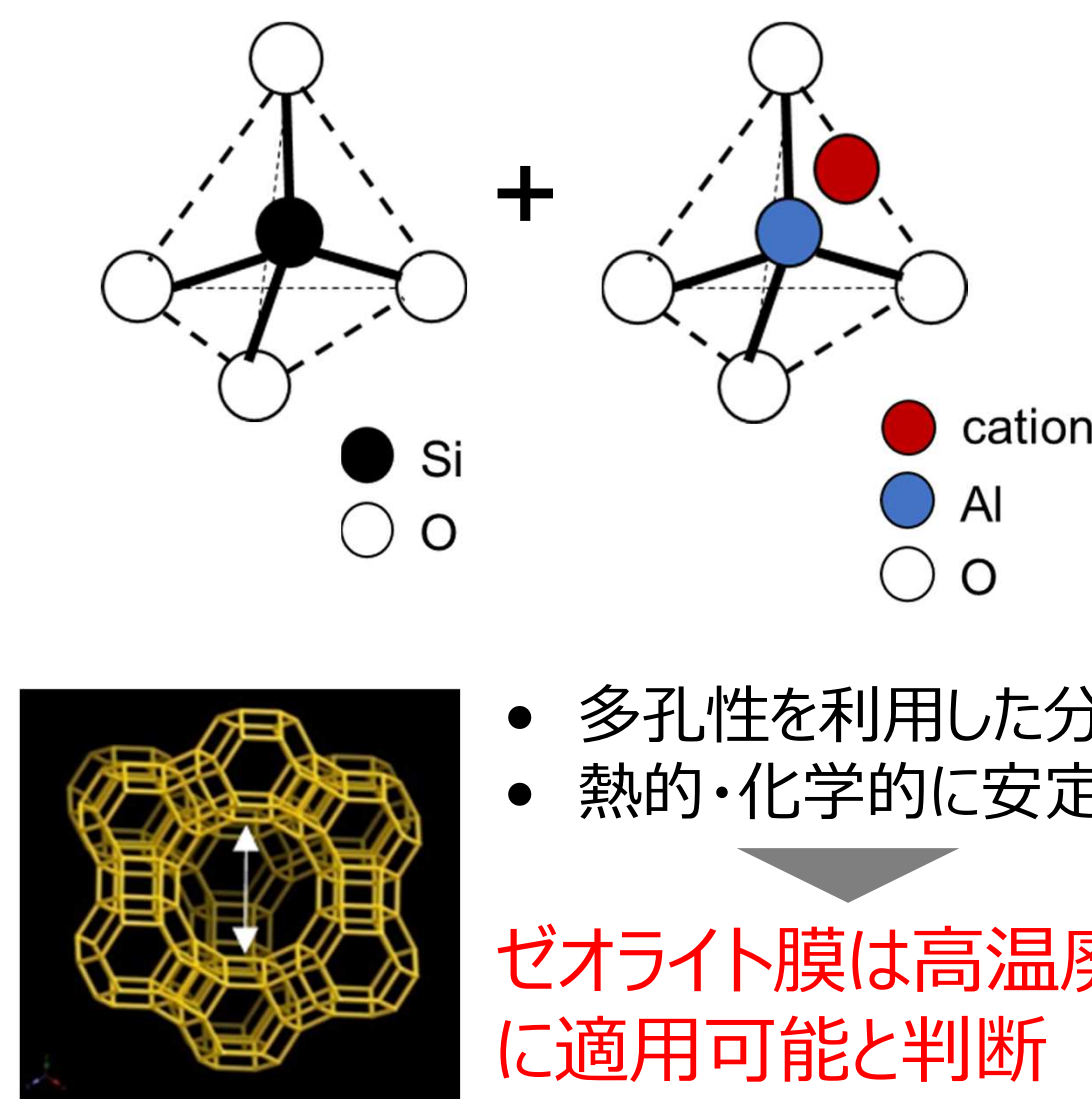
透水性(A_w)に優れ、アンモニウムイオンの漏洩(B_{NH_4})が少ない分離膜の開発に成功



高温FO用セラミック膜の開発

ゼオライト: 結晶性アルミノケイ酸塩

ゼオライト膜の作製

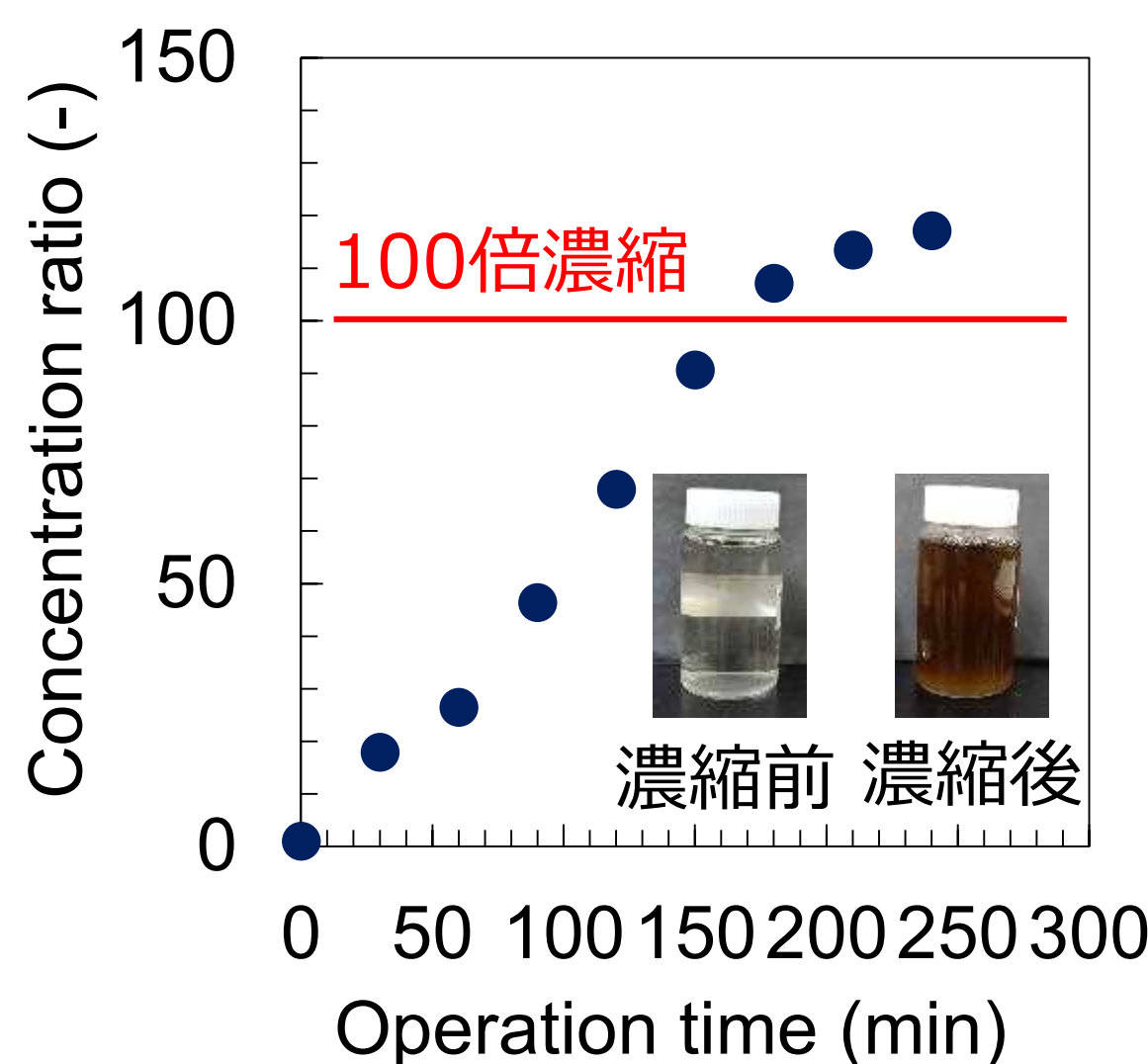


- イオン交換サイトを持たず親水的なゼオライトの開発
 - 表面処理による正電荷の付与
- NH₄⁺を濃縮可能なゼオライト膜の開発に成功

ベンチモジュール(高分子膜)による実液濃縮試験

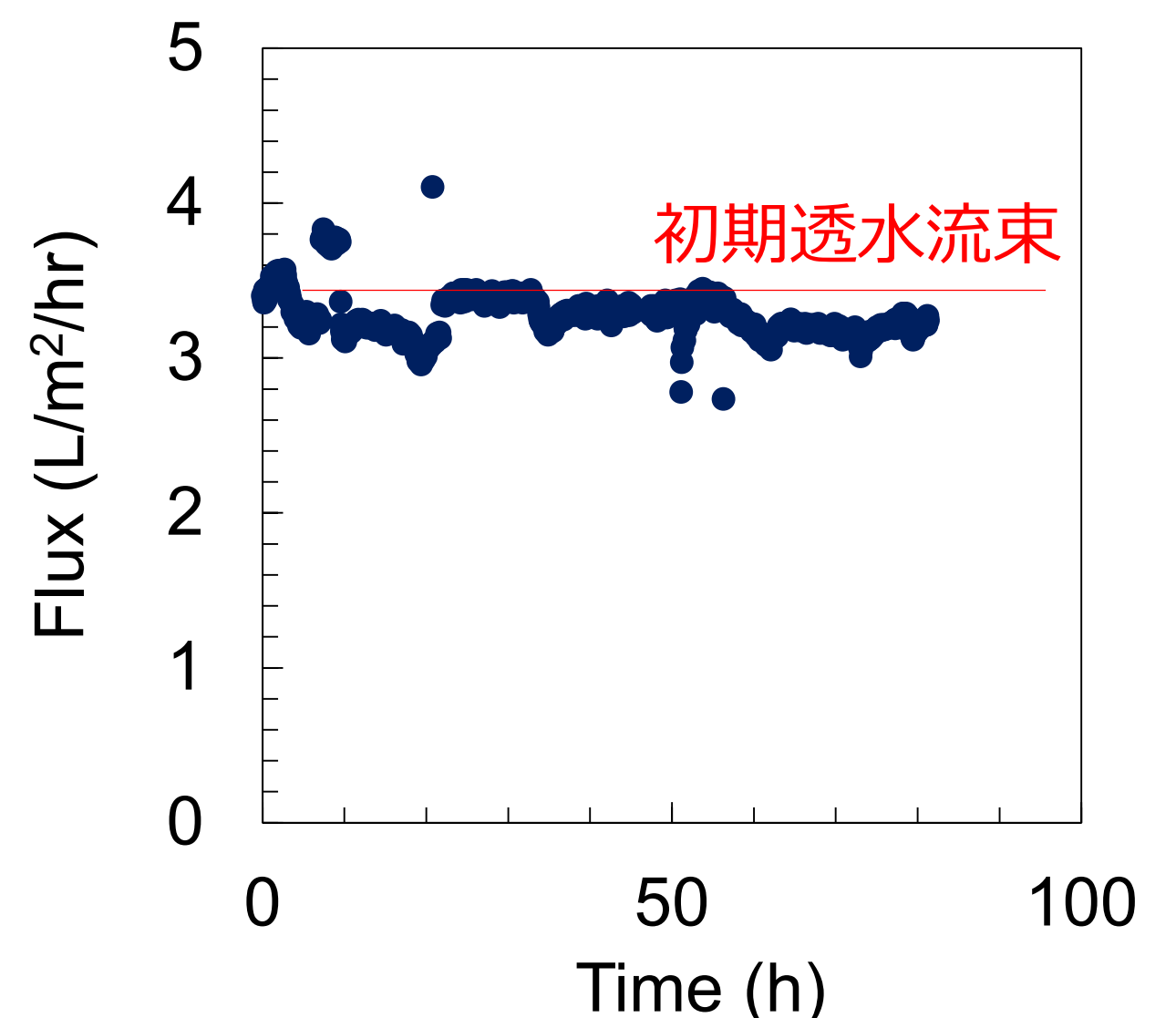


- 5インチモジュール(膜面積60 m²)を3本搭載
- 流量、圧力など運転条件を調節可能



ベンチモジュールを用いて、FS入口流量2 L/min (=2.88 ton/day)にて、実都市下水を体積ベース100倍以上に濃縮

耐ファウリング性の検証



10倍濃度の都市下水を用いて、80 hでほぼファウリングは起こらないことを確認

【想定される用途・効果】

下水や工場廃水など希薄廃水からの効率的なアンモニア(NH₄⁺)濃縮

非常に希薄な廃水も省エネで10~100倍濃縮、T-N 4000ppmへ大量濃縮可能

番号: A-13-10J

PJ:産業活動由来の希薄な窒素化合物の循環技術創出

テーマ名: 水相NH₄分離濃縮 - Brine concentrationプロセス

担当機関名: 神戸大学

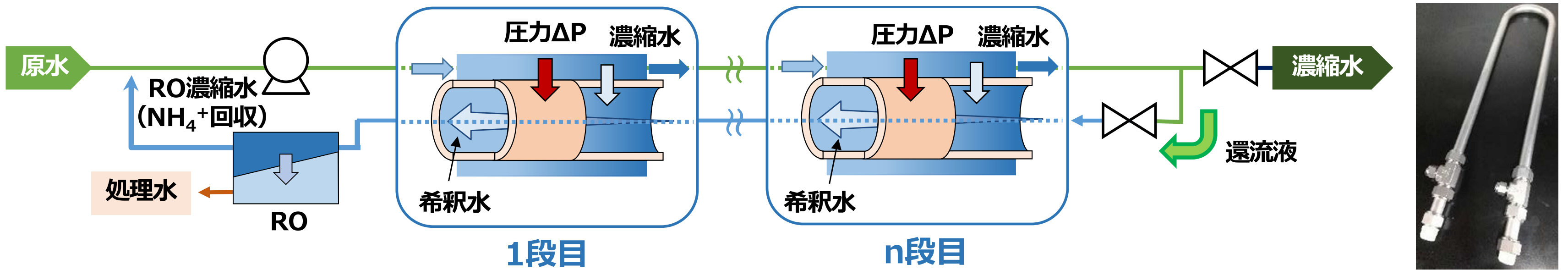
問合せ先: 中川 敬三 (神戸大学) k.nakagawa@port.kobe-u.ac.jp



【技術の概要】 NH₄⁺の濃縮と回収を同時に行い、廃水の液体排出を最小限に抑える**ブライン濃縮 (Brine concentration: BC) - 逆浸透(Reverse osmosis: RO) ハイブリッド膜プロセス**を構築。

【優位性】 効率的なNH₄⁺濃縮とクリーンな水の生成

◆ブライン濃縮(BC)法によるNH₄⁺濃縮プロセスの確立と逆浸透膜(RO)法による純水回収の両立



■ ブライン濃縮法(BC)

緻密膜を用いた浸透圧補助逆浸透法による濃縮法

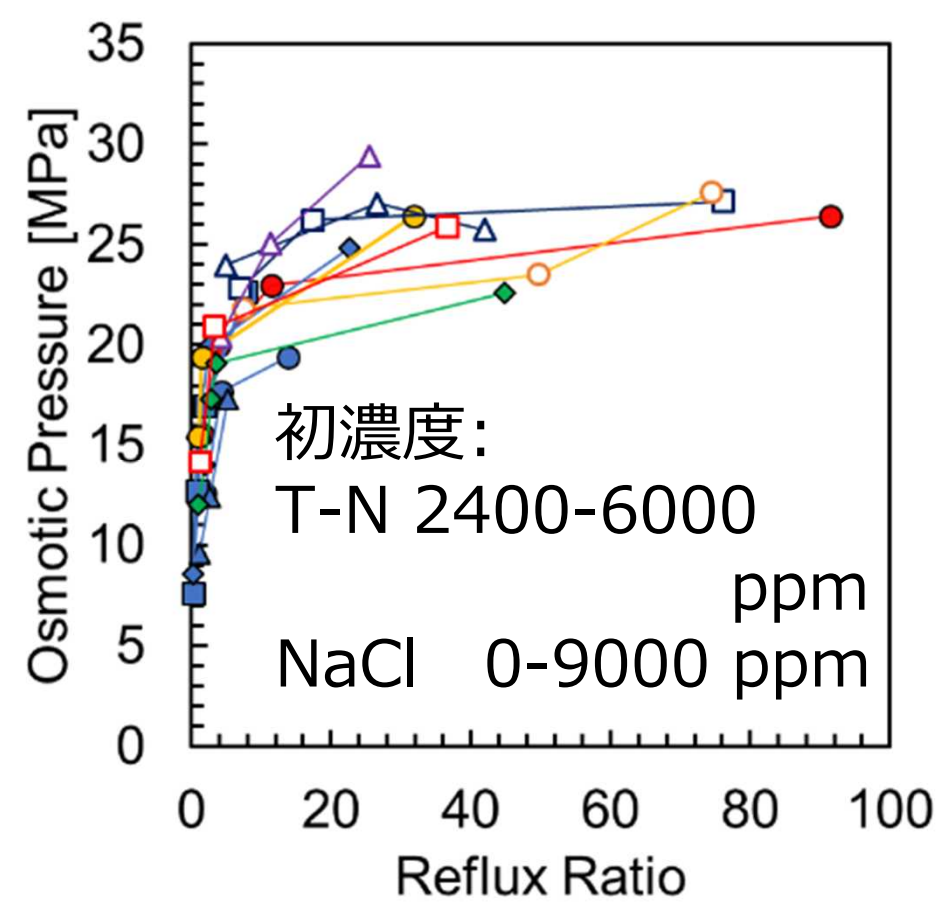
■ ハイブリッド膜プロセス(BC+RO)

廃液から水と栄養分の濃縮と回収を可能とする効率的な方法であり、環境への排出量を制御可能

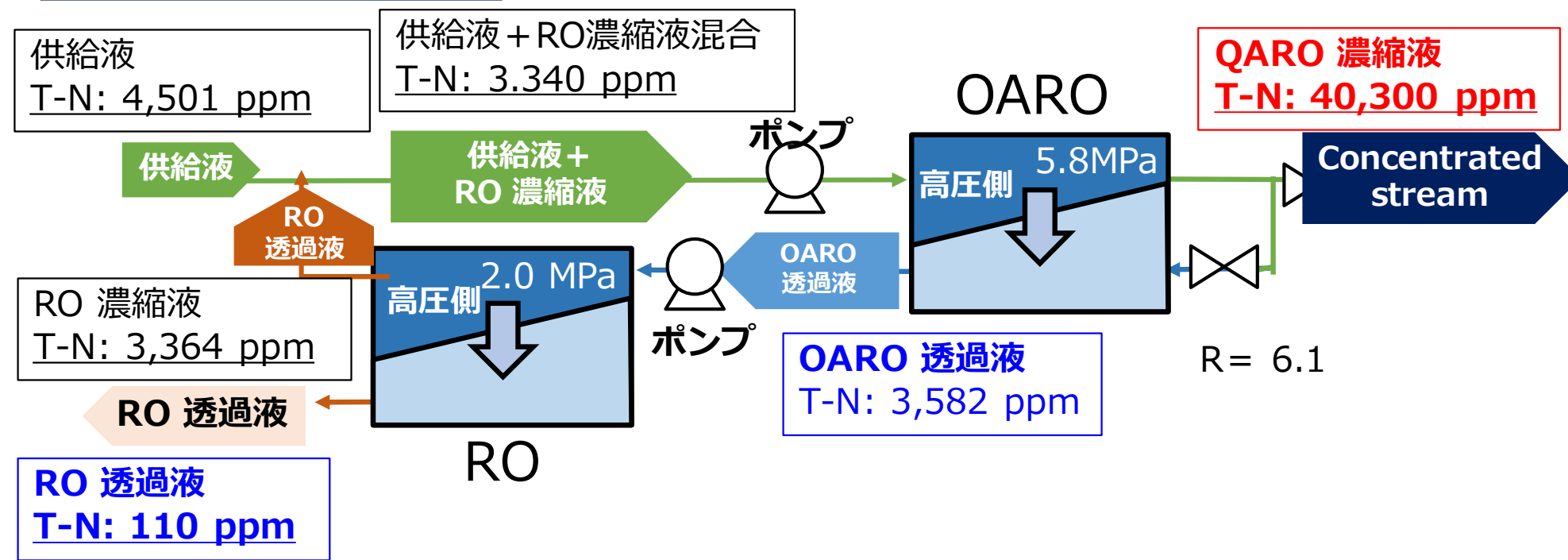
【モデル廃水での検討】

- ✓ 還流比の増加と共に溶液の浸透圧 (濃縮度) が増加
- ✓ 溶液の浸透圧約30MPa (T-N換算85,000 ppm)まで濃縮可能

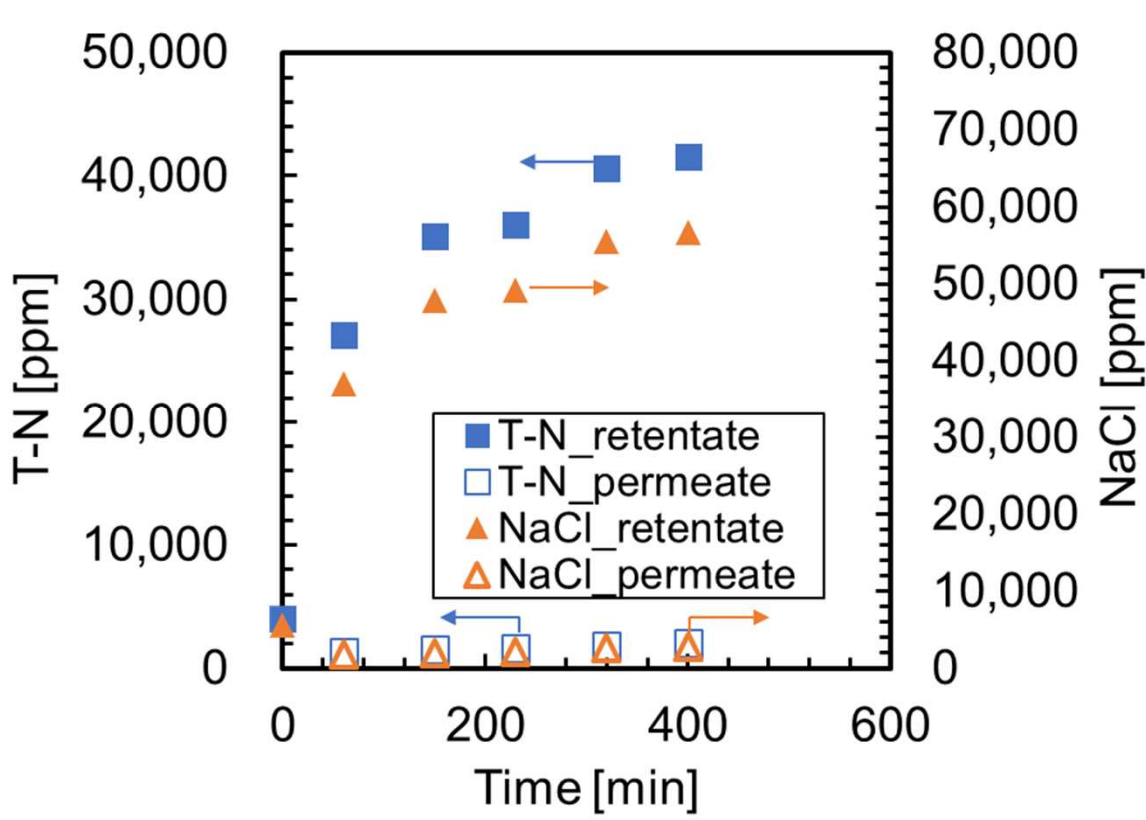
様々な操作条件でBC濃縮



【実廃水での検討】

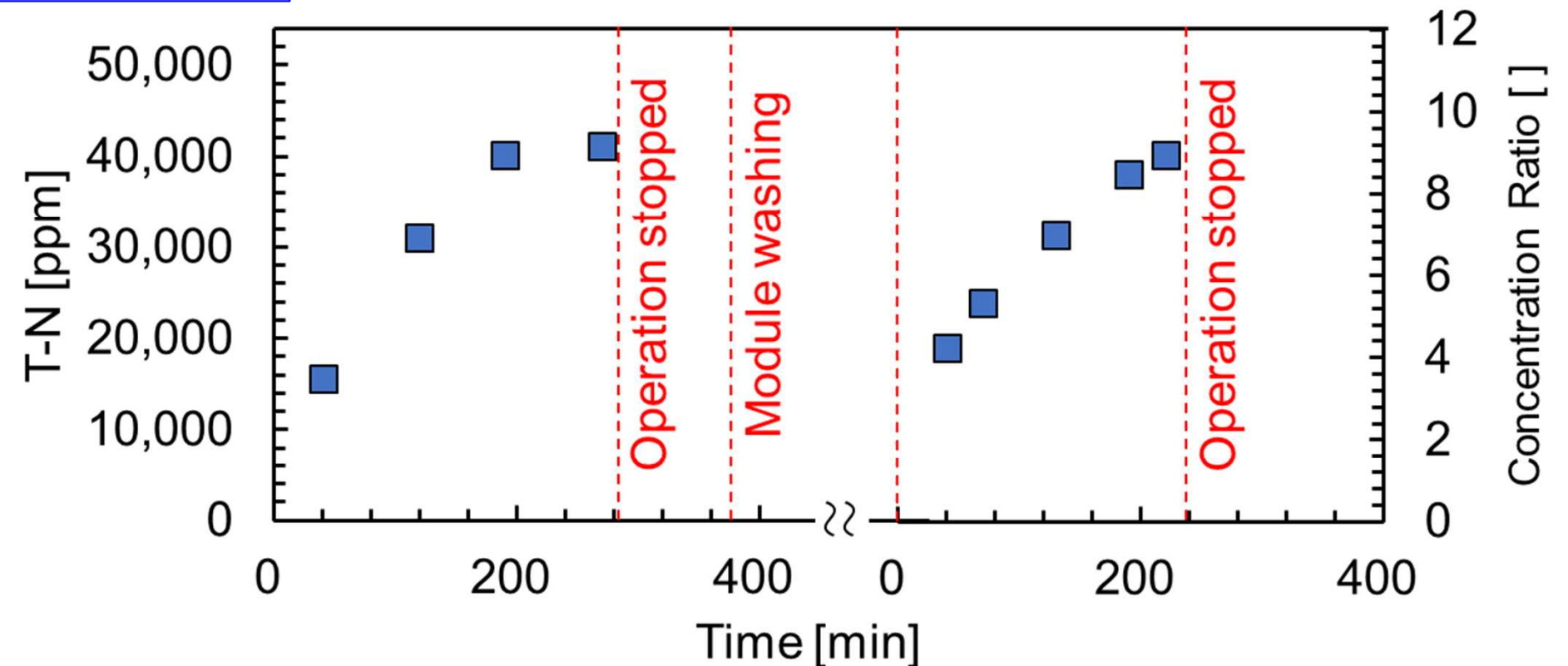


BC-ROハイブリッド膜プロセス



初濃度: T-N 4,000ppm, NaCl 5,460 ppm
 BC: $\Delta P_{BC} = 6.5 \text{ MPa}$, $R = 1.04$
 RO: $\Delta P_{RO} = 2.0 \text{ MPa}$

- ✓ BC-RO法で、効率的にNH₄⁺を濃縮
- ✓ RO透過液のNH₄Cl濃度はほぼ0



- ✓ 実廃水において、ハイブリッドBC-RO法によりNH₄⁺の約10倍濃縮 (T-N 41,000ppm) と高NH₄⁺回収率 (98%) を達成

【得られた成果】

- ✓ BC-ROハイブリッド膜プロセスを、モデル廃水および実廃水のNH₄⁺濃縮と脱水に初めて適用した。
- ✓ ハイブリッド膜プロセスの適用により、NH₄⁺の10倍濃縮、NH₄⁺回収が促進された。またNH₄⁺を含む廃液の排出量を最小限に抑えることができた。
- ✓ 濃縮中にスケール成分が析出しないように、前処理でスケール成分を除去するプロセスを構築し、実廃水の濃縮で効果を確認した (特許出願済み)。

【想定される用途・効果】

都市下水や工場廃水からの効率的なアンモニア (NH₄⁺) 濃縮

正浸透(FO)法(T-N 0.04%→0.4%)で濃縮された中濃度域のNH₄⁺を、低エネルギー消費量でさらに連続高濃縮可能 (T-N 0.4%→4%)

番号: A-13-11J

PJ:産業活動由来の希薄な窒素化合物の循環技術創出

テーマ名: 水相NH₄分離濃縮-膜蒸留

担当機関名: 神戸大・広島大

問合せ先: 吉岡 朋久 (神戸大) tom@opal.kobe-u.ac.jp



【技術の概要】 NH₃水溶液を多孔膜を介して蒸発させる膜蒸留 (MD) 法により、NH₃を濃縮

【優位性】 揮発性物質であるNH₃を省スペースかつ高効率で精製・濃縮可能

NH₃水溶液の膜蒸留 (MD) 法の開発 - 実験的検討 - (神戸大学)

エアギャップ膜蒸留 (AGMD)

直接接触膜蒸留 (DCMD)

NH₃ 回収 & 濃縮において:

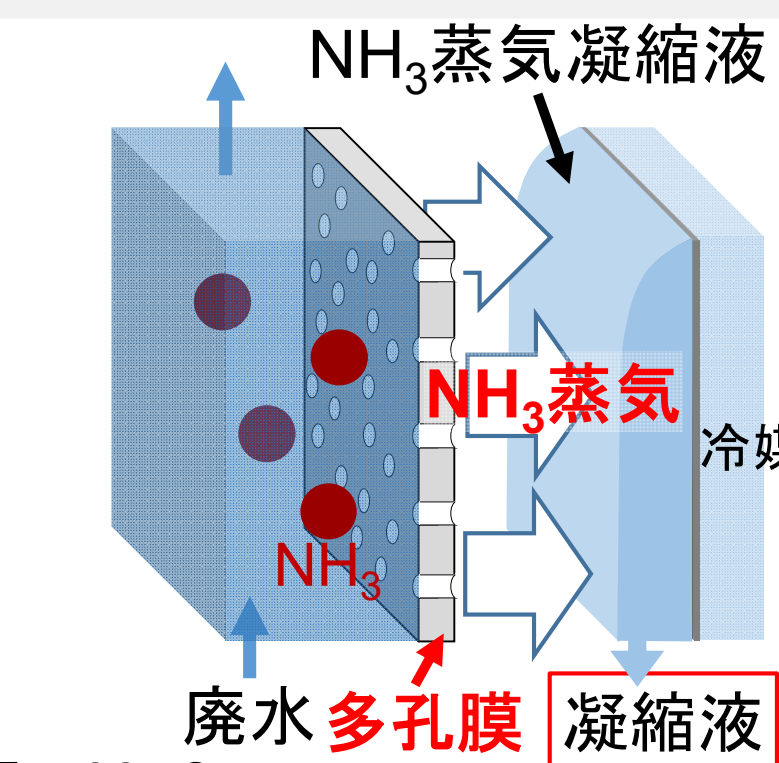
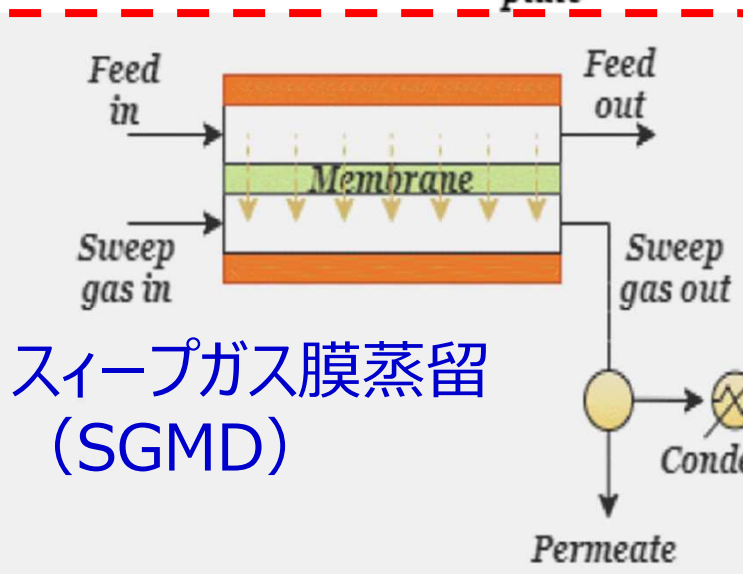
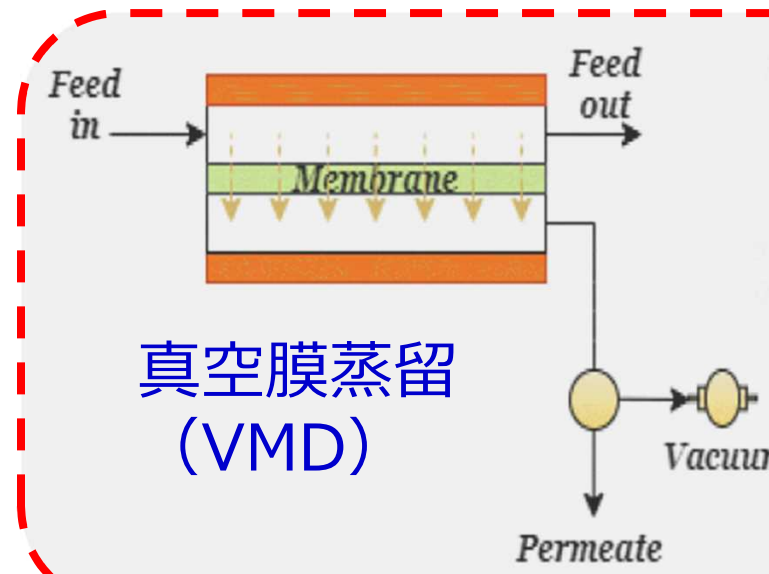
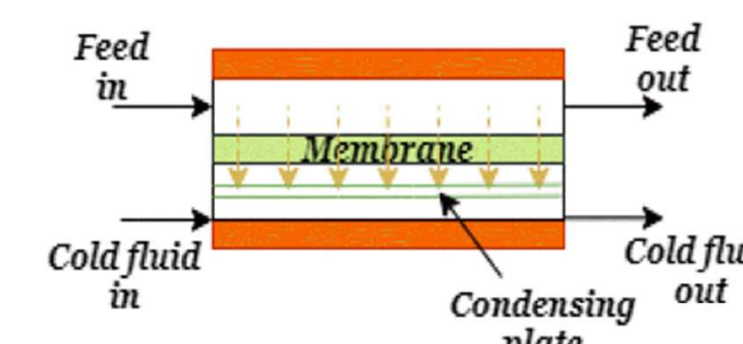
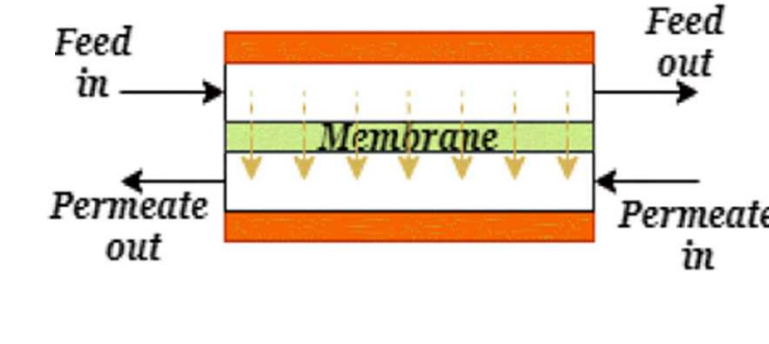
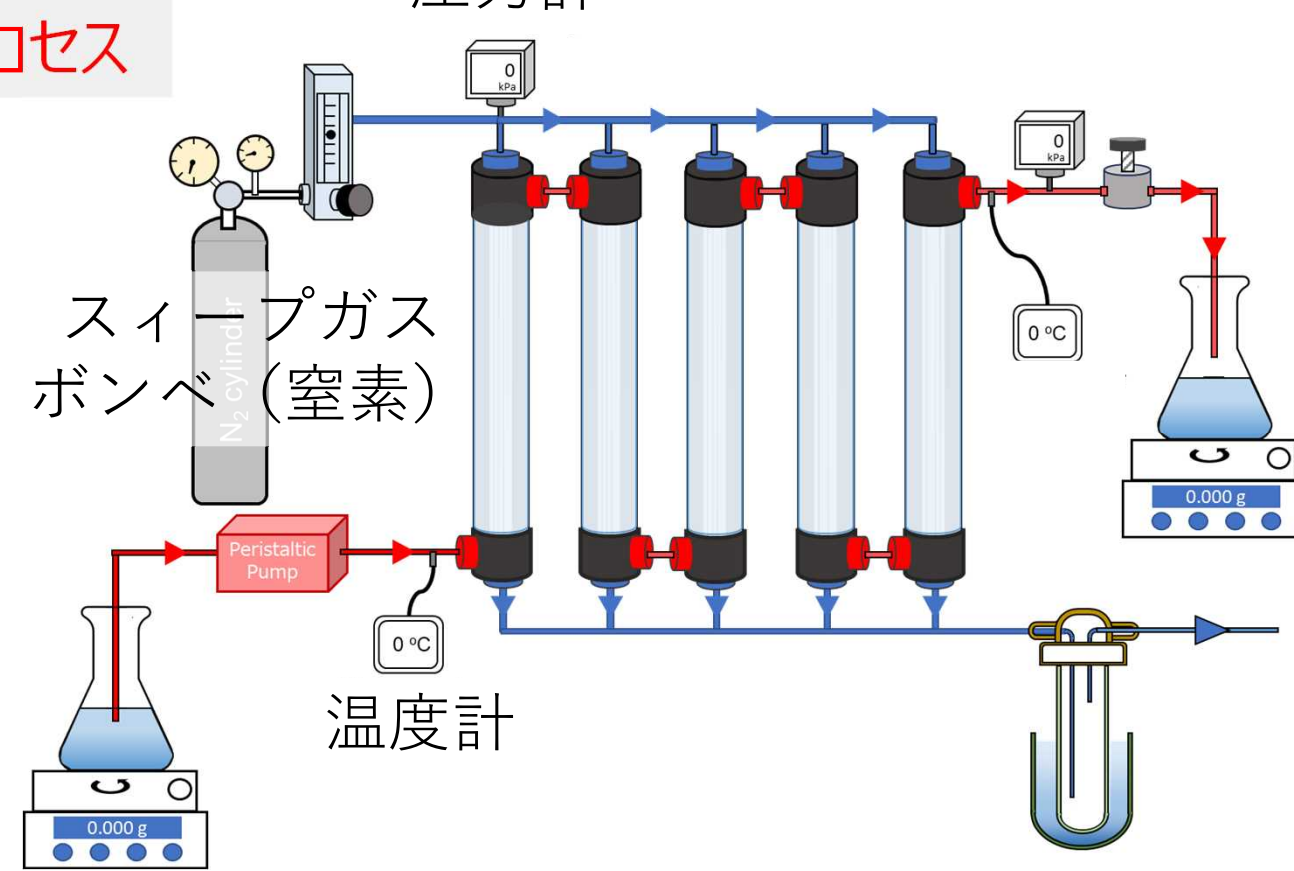
× DCMD (透過側が薄まる)

× AGMD (NH₃の凝縮しにくい)

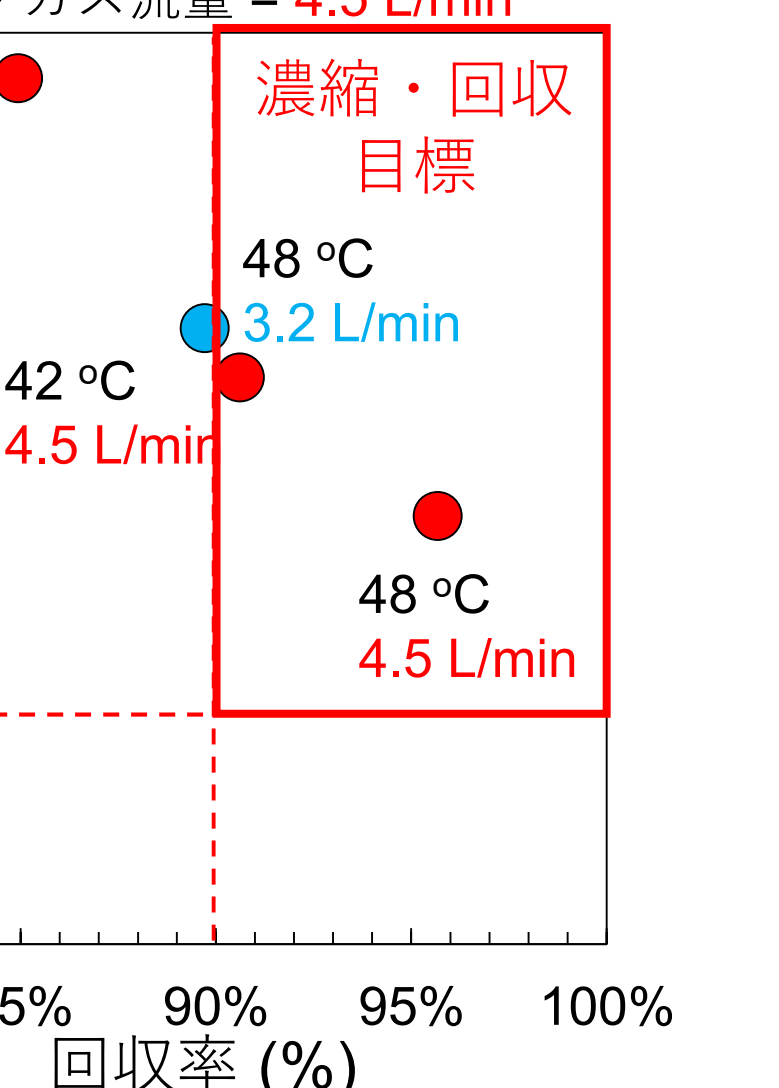
○ VMD または SGMD が適切なプロセス

複数の膜モジュールによる
流通式NH₃回収システム

圧力計

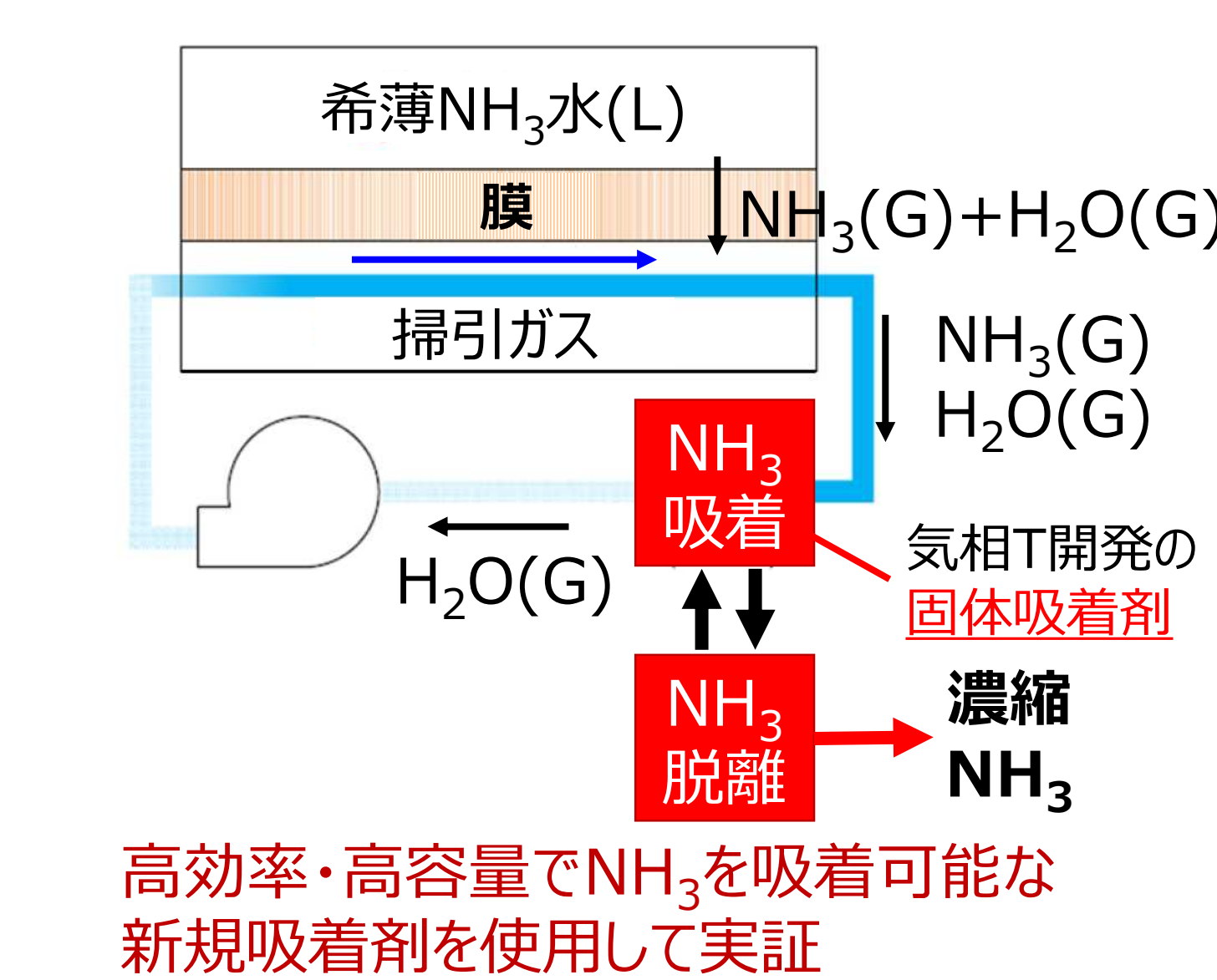


操作温度 = 38 °C
スニープガス流量 = 4.5 L/min



最適化により目標達成
・NH₃回収率 > 90%
・透過液中のNH₃濃度 > 20 wt%

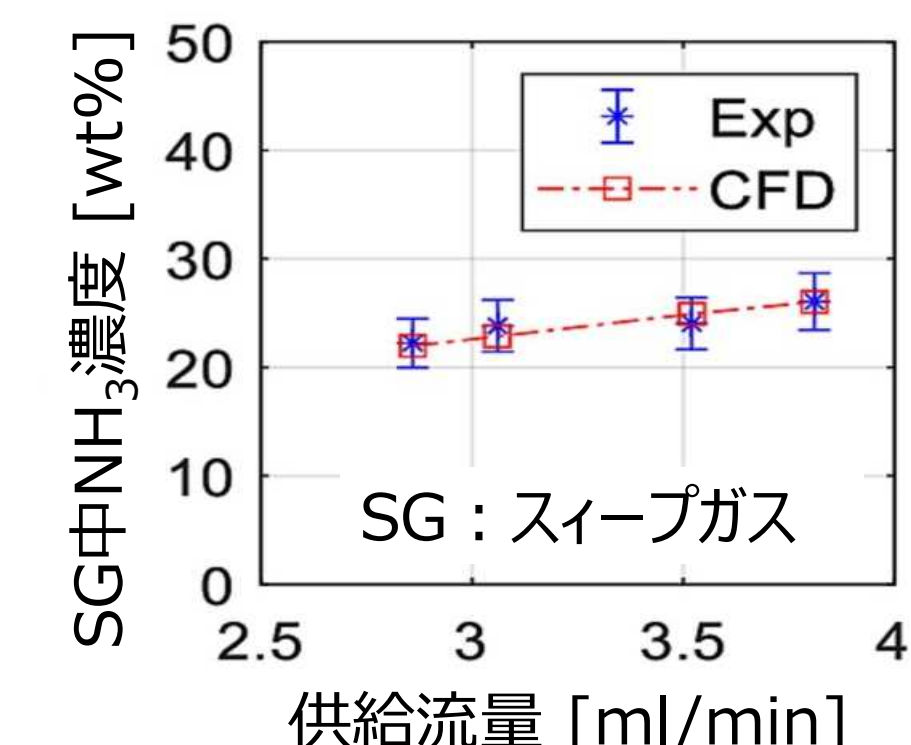
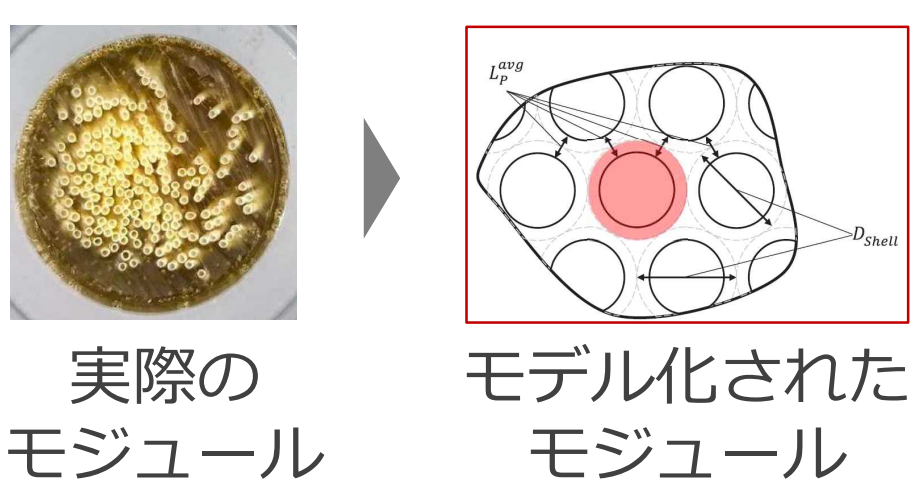
気相Teamと水相Teamのシナジー効果



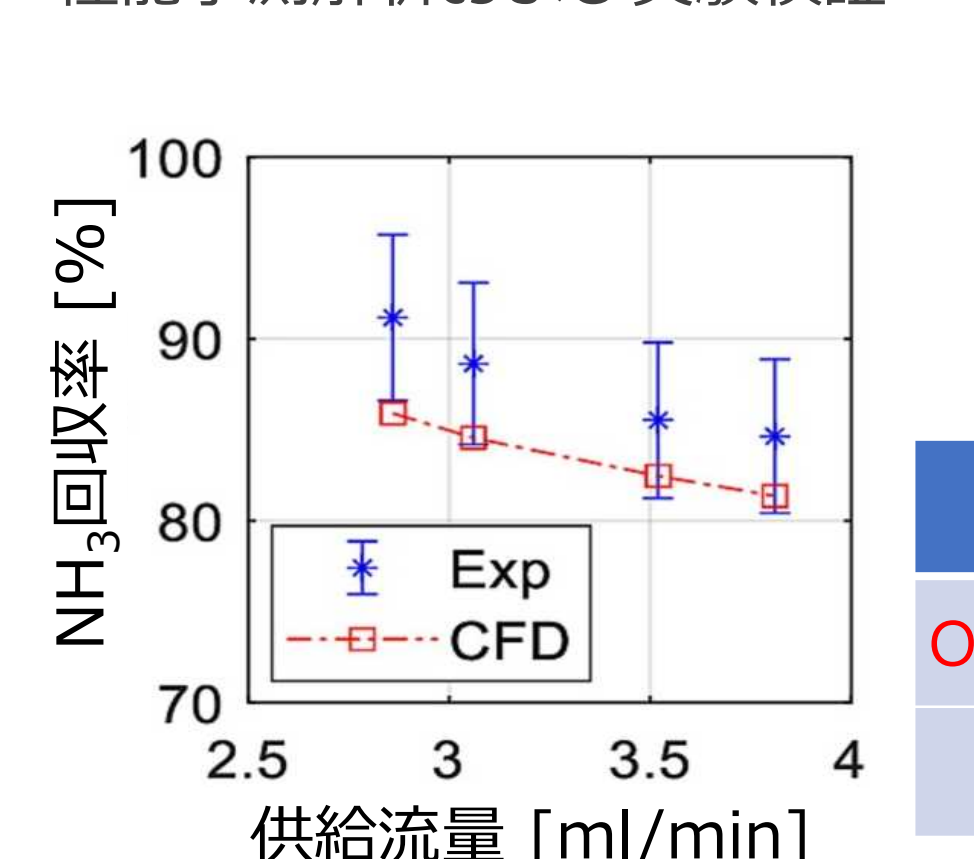
高効率・高容量でNH₃を吸着可能な
新規吸着剤を使用して実証

MD膜モジュールの性能予測のための数値流体力学 (CFD) モデルの開発 (広島大学)

1. 大規模SGMDモジュールの性能予測のための単繊維モデルの開発



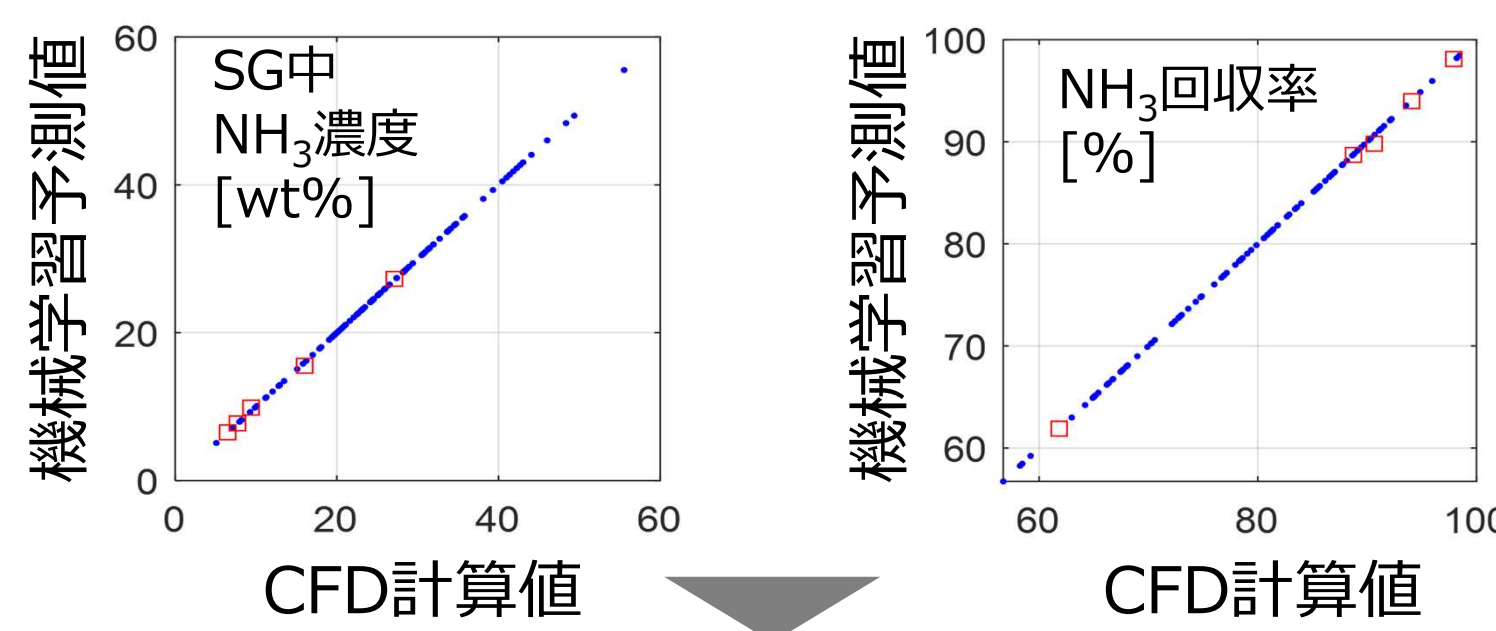
平均化されたセグメント
(単繊維) のみを解析
性能予測解析および実験検証



本モデルは大規模モジュールの実験結果を良好に予測できた

2. 機械学習を用いたSGMDプロセス条件最適化

単繊維モデルによる解析結果をデータセットに用いて機械学習



機械学習を最適化ソルバー (遺伝的アルゴリズム) に連携

	供給温度 [K]	SG温度 [K]	SG線速 [m/s]	NH ₃ 回収率 [%]	SG中NH ₃ 濃度 [%]
Optimized	320.69	298.15	2.5	93.04	32.91
Exp.	297.65	297.68	7.47	88	40.49

大規模モジュールのプロセス条件最適化に成功

【想定される用途・効果】

都市下水・工場廃水中のアンモニア回収

正浸透(FO)法(T-N 0.04%→0.4%)や浸透圧補助逆浸透(BC)法(T-N 0.4%→4%)等でプレ濃縮されたNH₄⁺を高濃度アンモニア水(4%→20~25% NH₃水)として高温を使わず省エネルギーで精製・回収

番号: A-13-12J

PJ:産業活動由来の希薄な窒素化合物の循環技術創出

テーマ名:水相NH₄⁺分離濃縮-イオン交換膜法によるアンモニア廃水濃縮プロセスの開発

担当機関名: 山口大学・株式会社アストム

問合せ先: 比嘉充(山口大) mhiga@yamaguchi-u.ac.jp



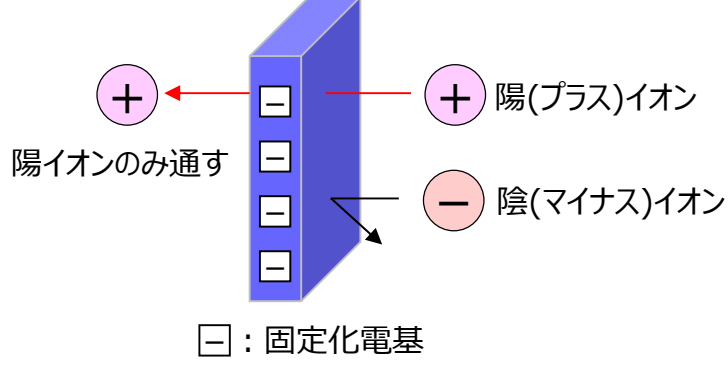
【技術の概要】 イオン交換膜を用いてNH₄⁺を選択的に回収・濃縮。一次濃縮(ドナン透析、< 400ppm → 4,000ppm T-N)では塩分濃度差エネルギーを使って省エネ濃縮、二次濃縮(電気透析、4,000ppm → 40,000ppm T-N)では電気エネルギーを使って高速・安定濃縮。

【優位性】 汚れ成分を含む廃水を前処理無しで連続処理可能。

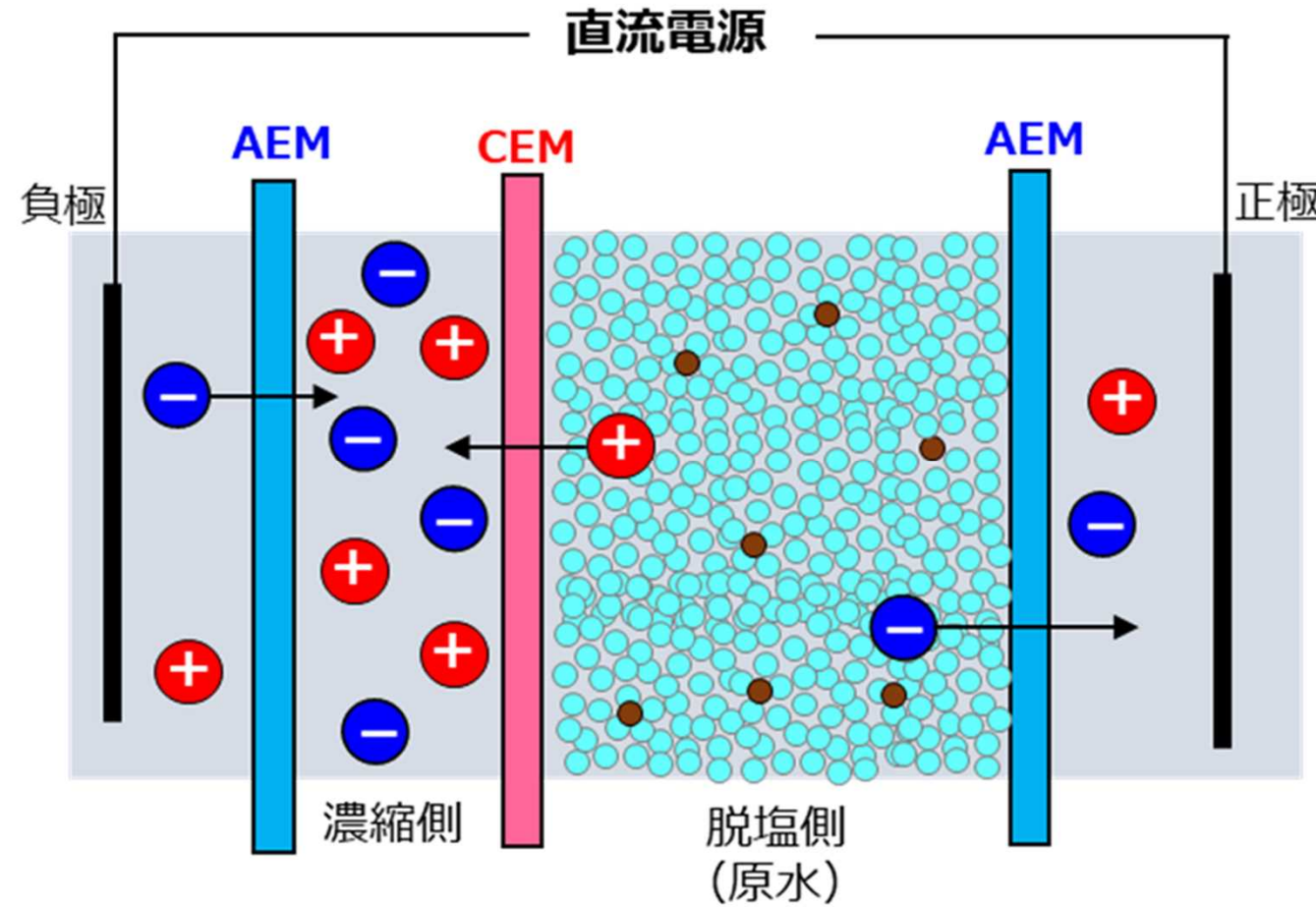
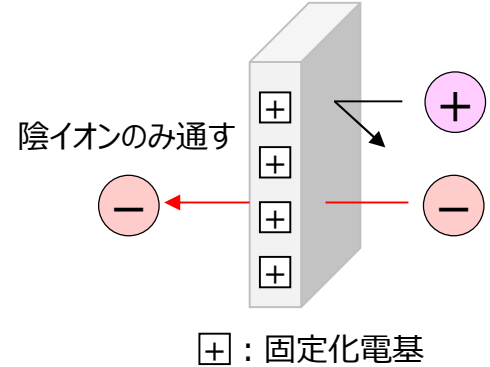
背景と目的

イオン交換膜を用いたNH₄⁺回収・濃縮

陽イオン交換膜 (CEM)



陰イオン交換膜 (AEM)



+: 処理陽イオン (NH₄⁺ など)

●: 水分子

○: 陰イオン (Cl⁻ など)

●: 汚れ成分

特定のイオンを
選択的に透過させる膜

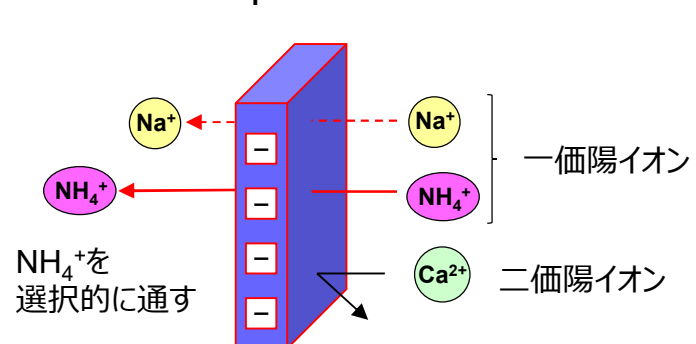
特長: 汚れ成分等を含む廃水中の**極微量NH₄⁺**を
高選択的・高安定に濃縮分離

	ドナン透析	電気透析
原理図		
駆動力	高濃度塩水 (濃度差)	電気力
長所	ゼロエネルギー	高処理速度 対象塩濃度が広い
短所	低処理速度	電力が必要
適用箇所	一次濃縮 (400ppm→4,000ppm T-N)	二次濃縮 (4,000ppm→40,000ppm T-N)

新規NH₄⁺選択性膜の開発

新たに開発したNH₄⁺選択膜により、NH₄⁺の高選択的濃縮に成功

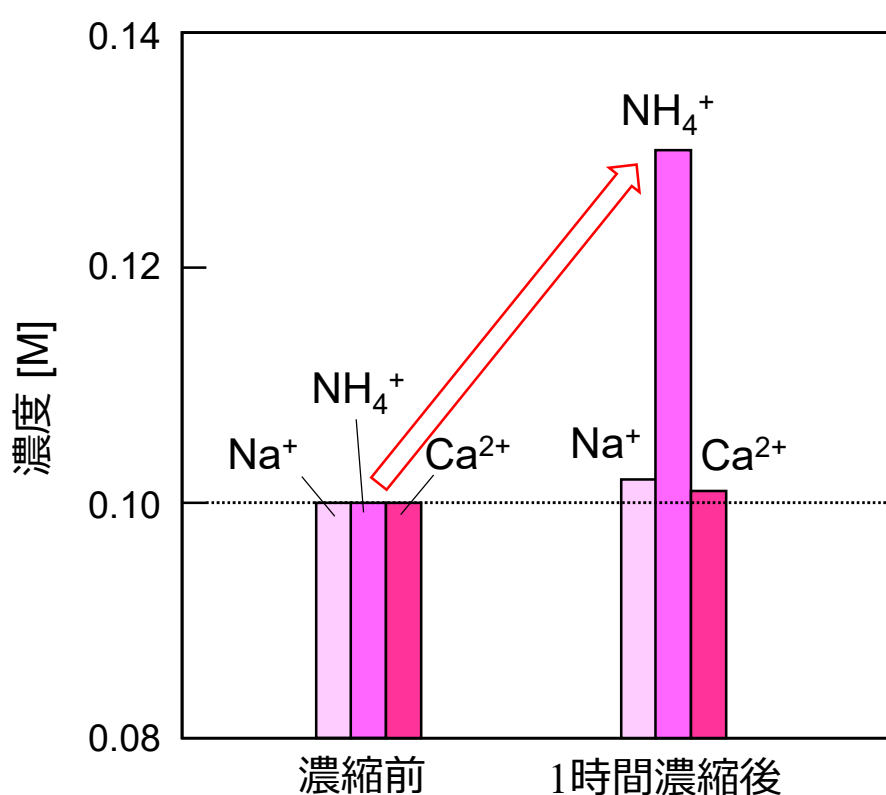
NH₄⁺選択膜



Na⁺やCa²⁺を含む実際の廃水において

- ・濃縮エネルギーの低減
- ・前処理不要で安定に長期連続運転が可能
- ・濃縮側が清澄

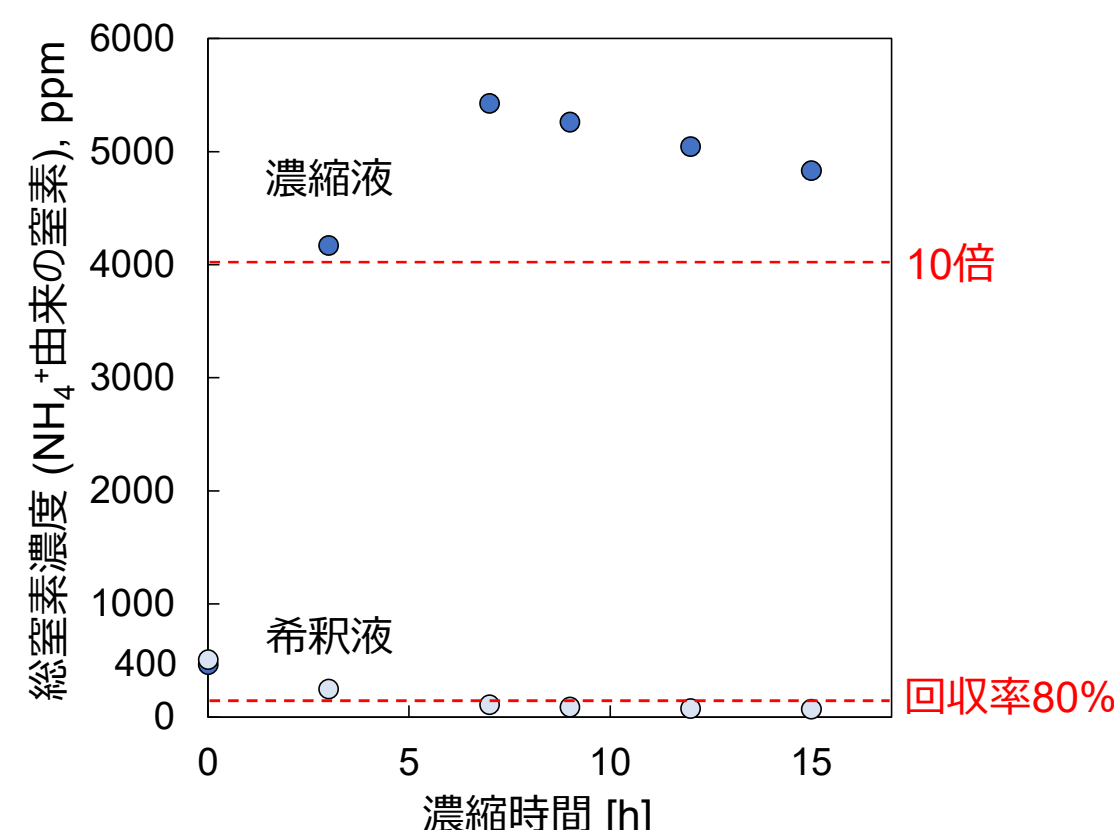
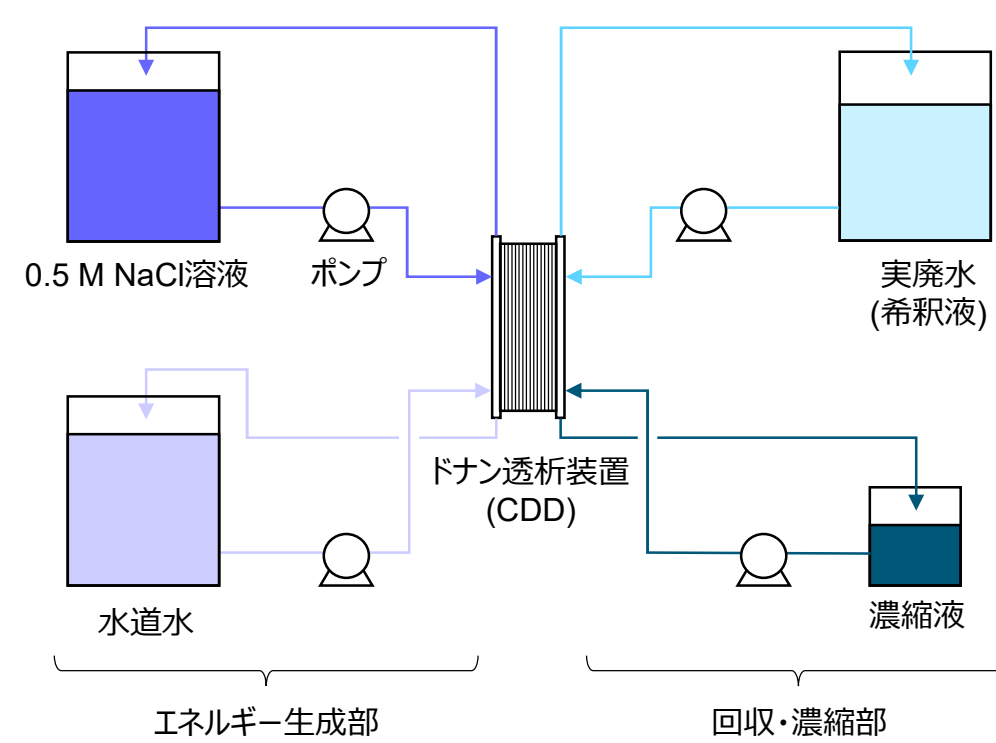
NH₄⁺選択性膜による電気透析試験



ドナン透析によるNH₄⁺濃縮

実廃水(約400ppm T-N)からNH₄⁺を10倍濃縮、NH₄⁺の回収率80%を達成

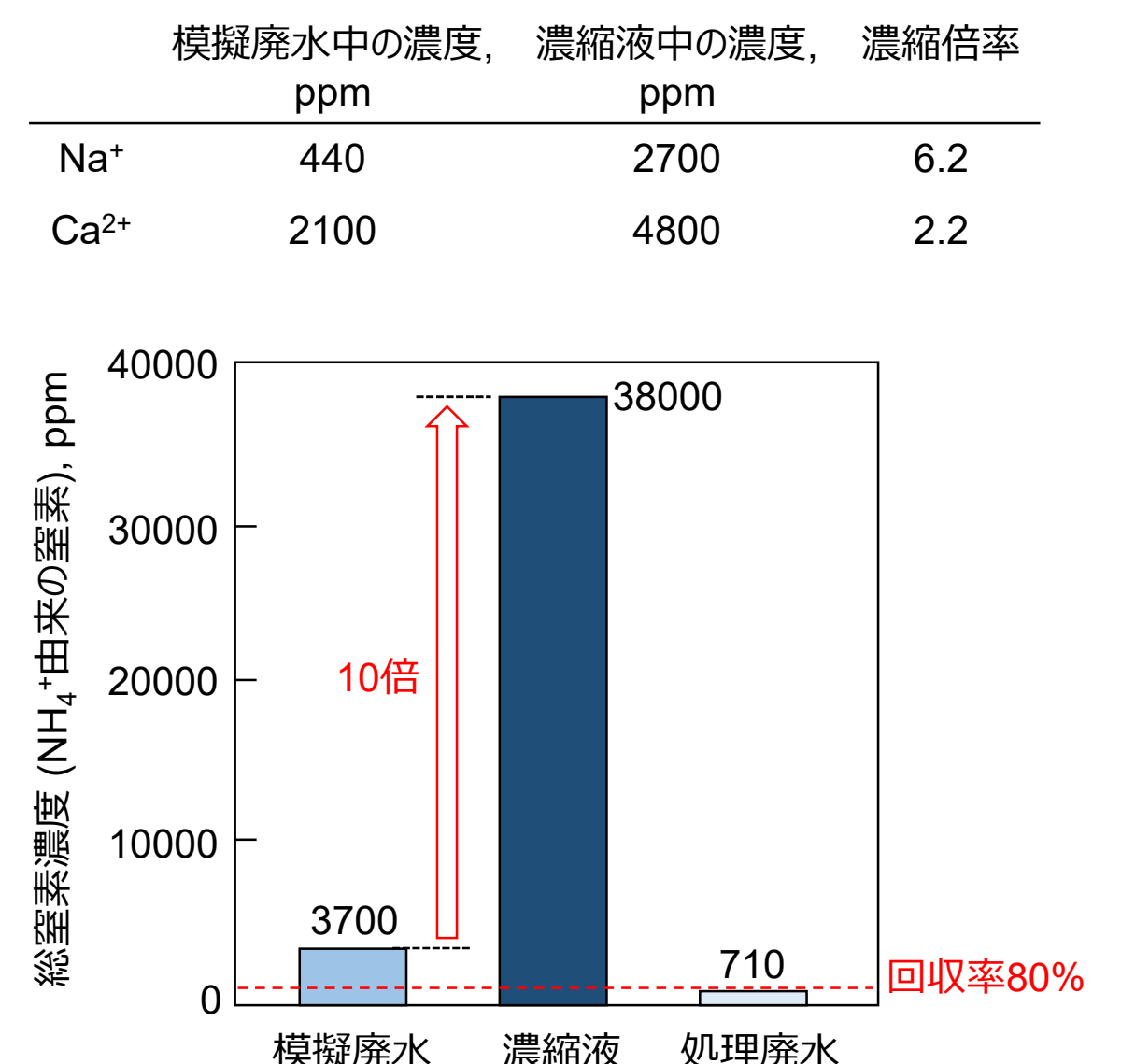
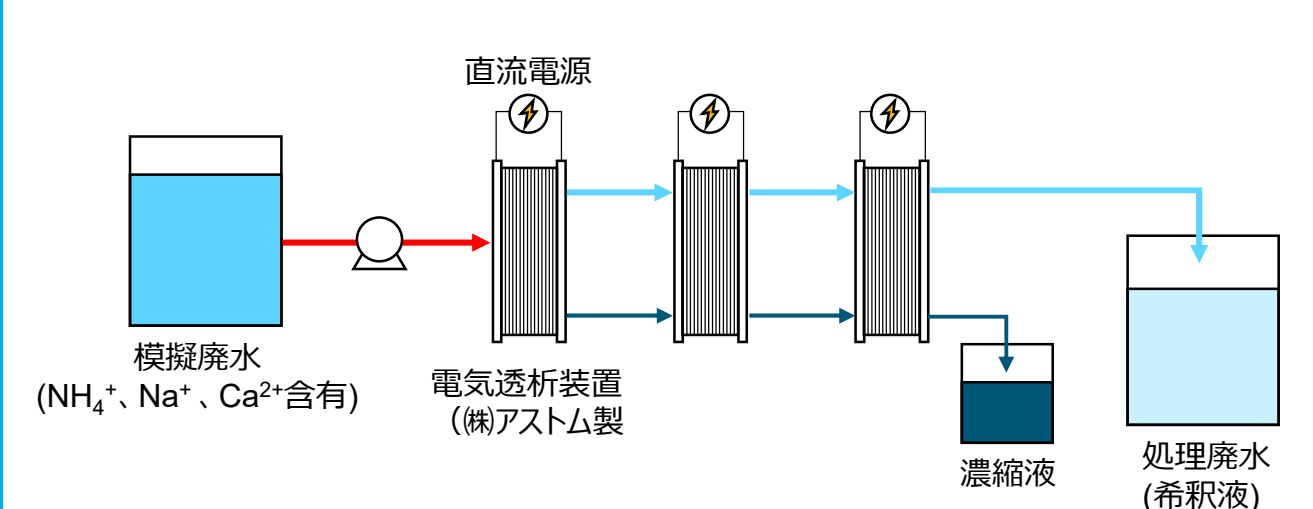
実廃水の濃縮試験



電気透析によるNH₄⁺濃縮

模擬廃水(約4,000ppm T-N)からNH₄⁺を10倍濃縮、NH₄⁺の回収率80%を達成

模擬廃水の濃縮試験



【想定される用途・効果】

膜ろ過濃縮が困難な夾雑物が多い廃水からのNH₄⁺の回収・濃縮

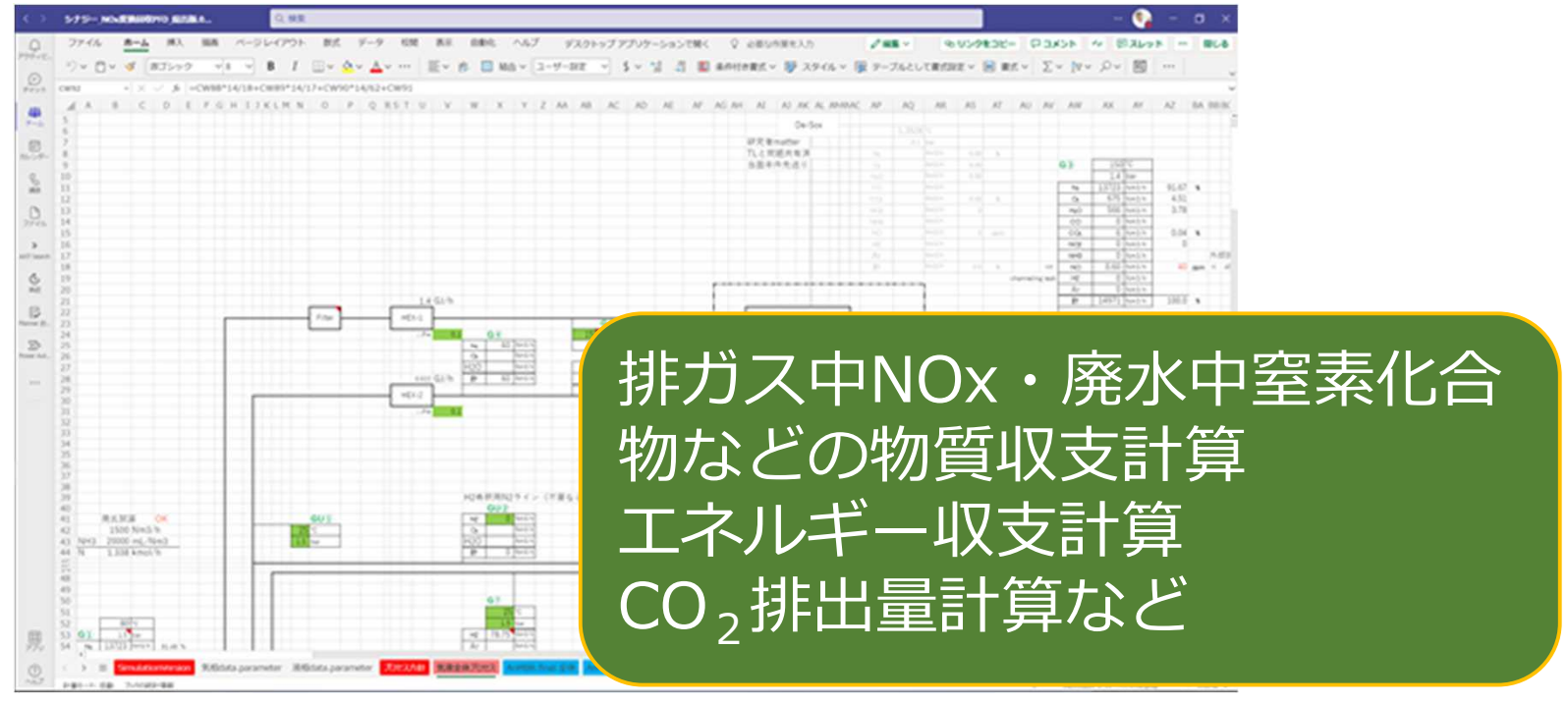
低純度NH₄⁺溶液を薬品・熱を使わず、連続的に400ppm以下を約40,000ppm (T-N)へ2段階で濃縮可能

【技術の概要】 速度論に基づくプロセスモデルの構築、プロセスシミュレーションによる気相NTAシステムの合成と評価、液相窒素化合物濃縮プロセス合成と評価

【優位性】 ベンチ/パイロットスケールプロセスの試験データの解析を効率的に実施できる

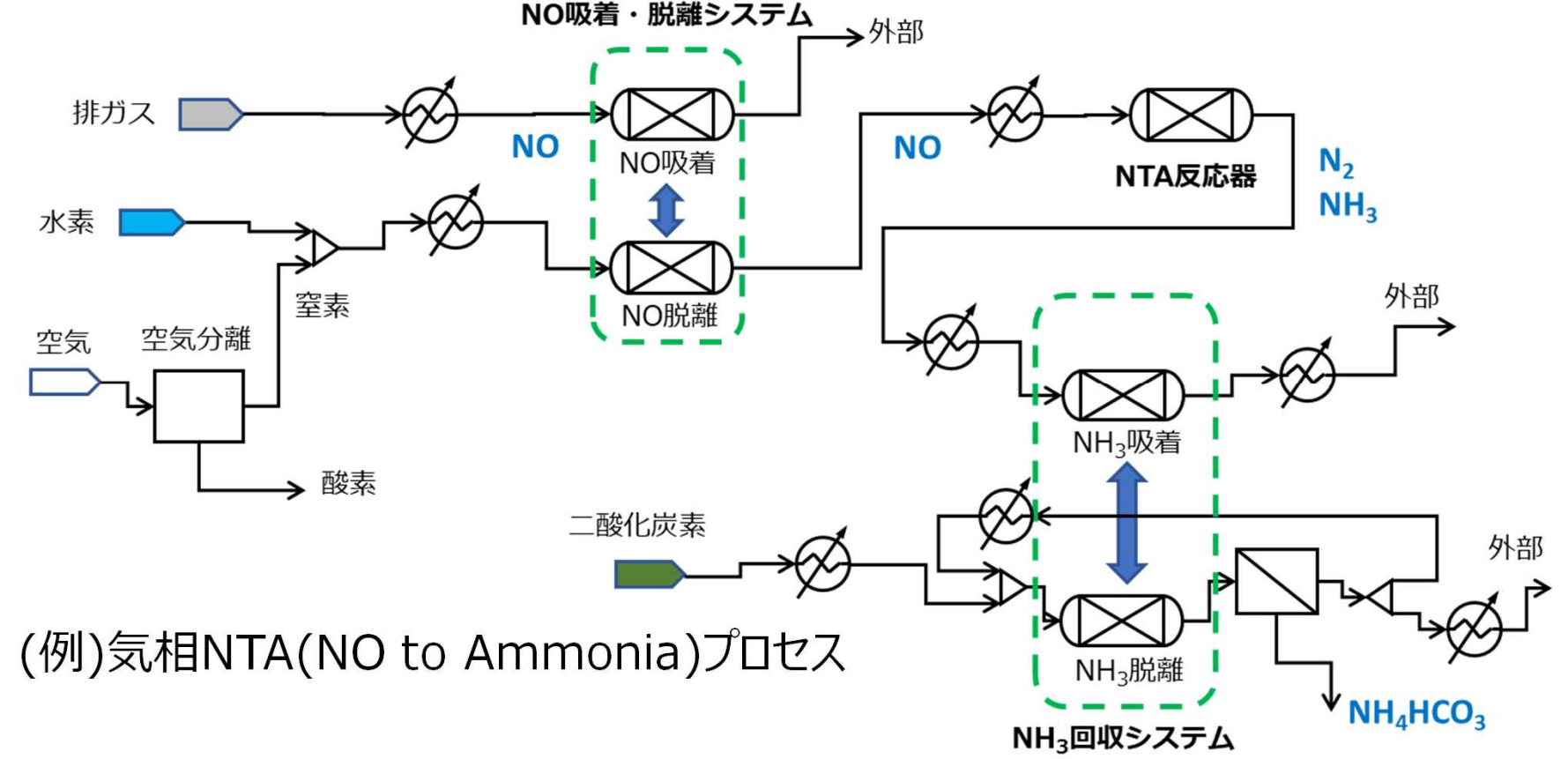
【研究開発概要】 本研究プロジェクトで開発される排ガス中NOx、廃水中窒素化合物の資源化の技術を、2050年頃までに普及させるための、開発された要素技術の導入を想定したプロセスシステム(プラントシステム)の設計と評価

Excelを活用した物質・熱フローの計算・可視化モデルに基づき、窒素循環プロセスシステムのあるべき姿を明確化



排ガス中NOx・廃水中窒素化合物などの物質収支計算
エネルギー収支計算
CO₂排出量計算など

定常モデルに基づく要素プロセスの概念設計とシステム全体評価



(例)気相NTA(NO to Ammonia)プロセス

NH₃、反応性窒素、その他環境負荷物質のフロー分析

- LCAによる窒素技術導入の評価
- 窒素化合物循環のリスク評価

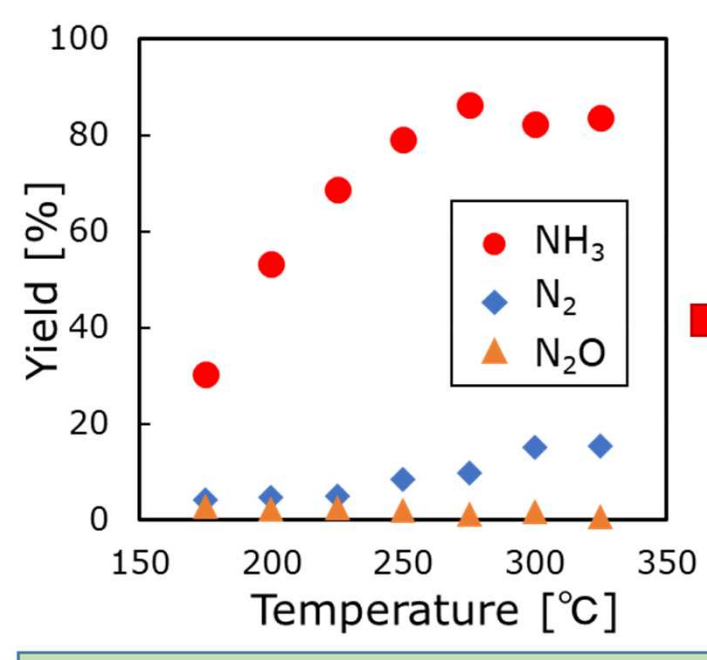
ポスター番号 A-13-15J

- 上図の構成プロセスシステムのCO₂排出量が、選択触媒還元法(SCR)の適用の1/4以下と試算
- 気相NTAプロセスシステム内の熱の回収・利用を最適化することで、約65%の省エネ化(CO₂排出量削55%減)がはかれると試算

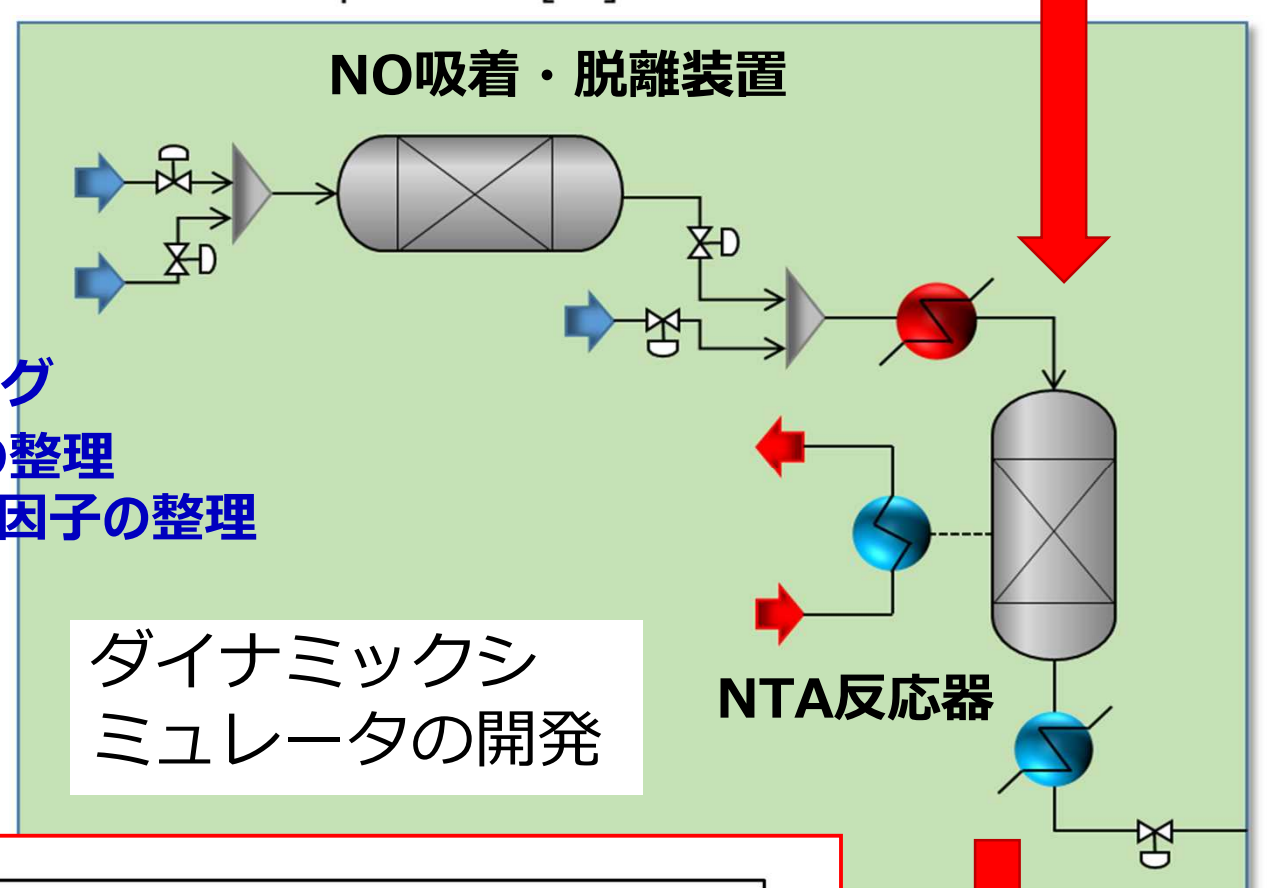
ベンチ/パイロットスケールプロセスのシミュレーションと動特性解析

① 気相NTAプロセスシステムの合成・設計

ラボスケール試験装置を用いた触媒活性試験データの収集

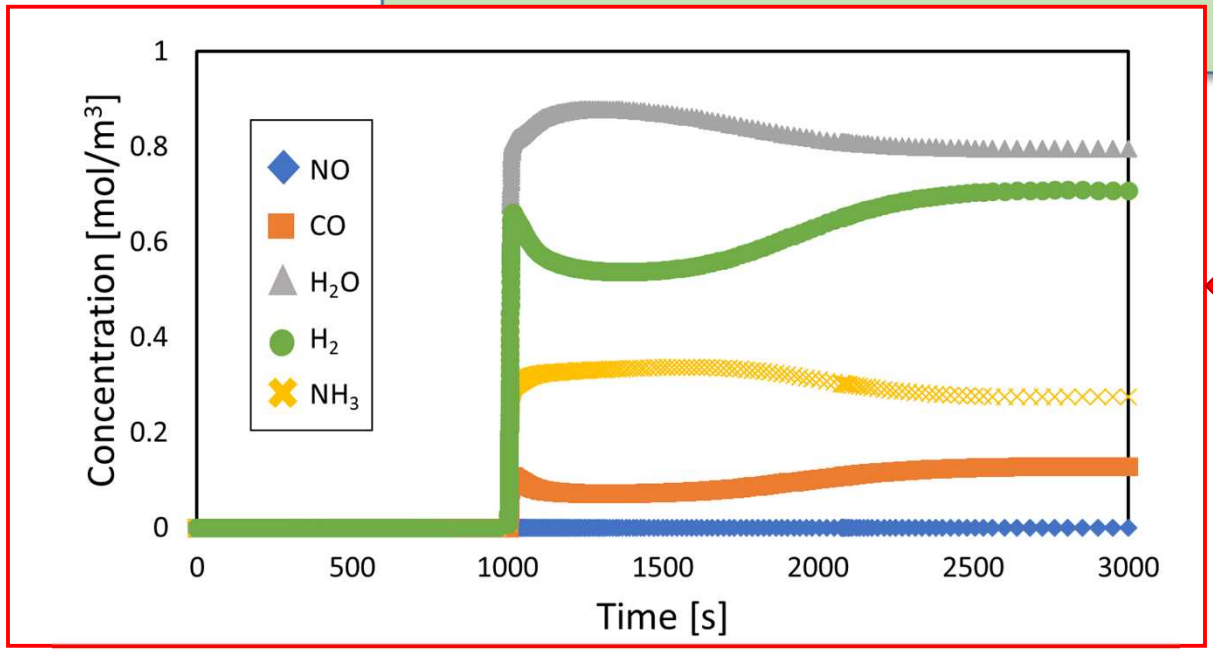


反応速度式モデルの構築



装置のサイジング
システム評価法の整理
時空間的な変動因子の整理

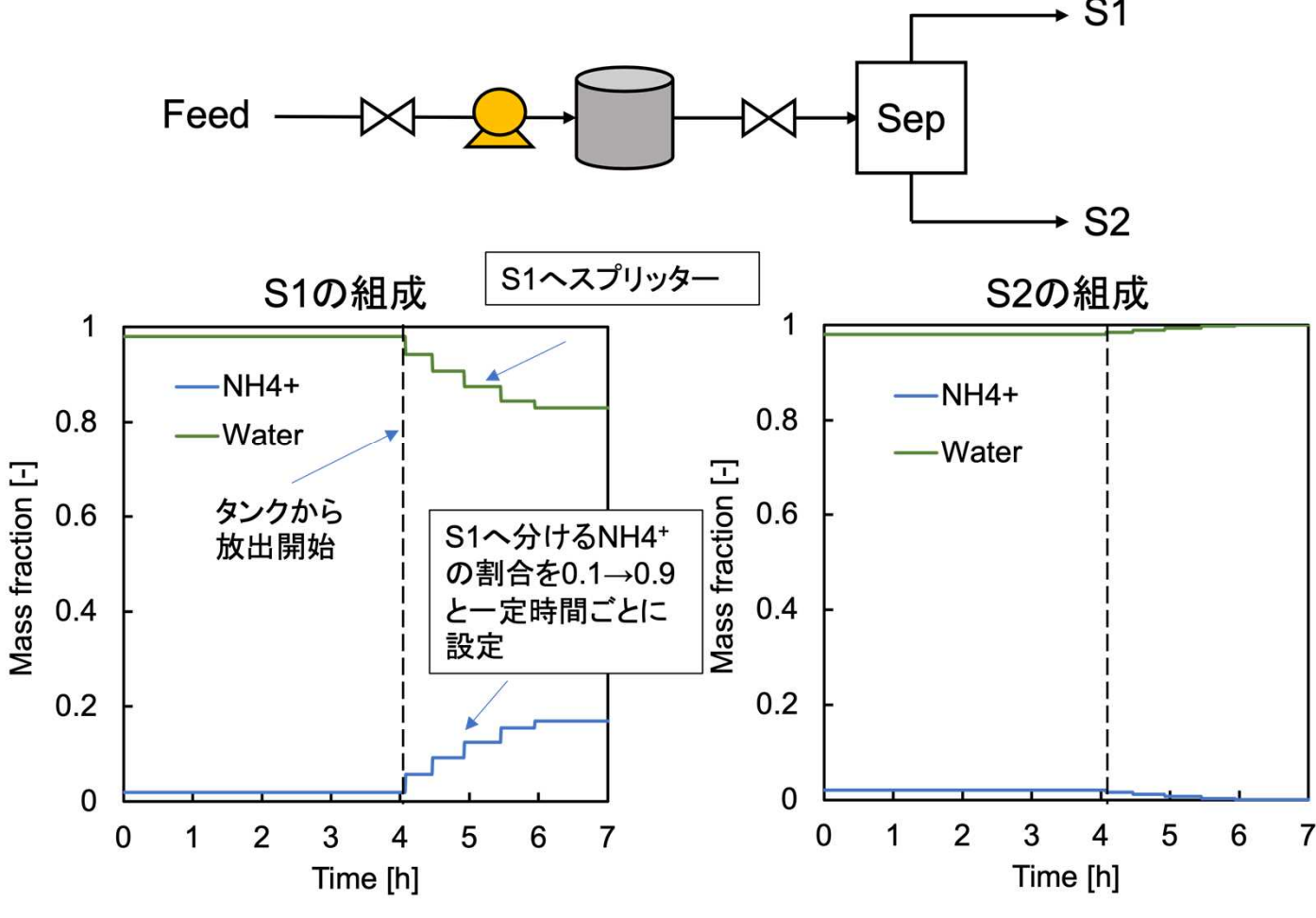
ダイナミックシミュレータの開発



非定常操作の影響解析

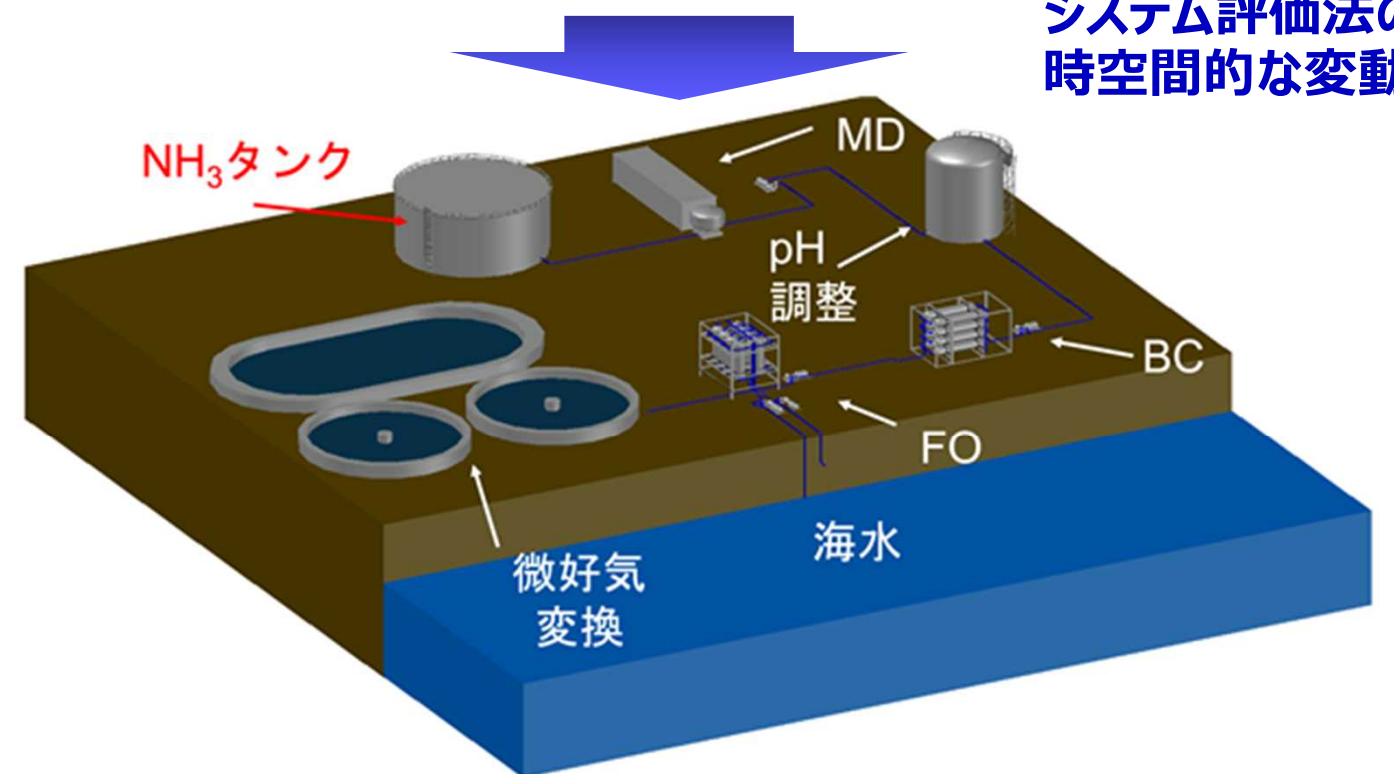
② 水相資源化プロセスシステムの合成・設計

定常モデルを拡張してダイナミックモデルの構築



ダイナミックシミュレーションを用いた動特性の解析

システム評価法の整理
時空間的な変動因子の整理



【①, ②の共通課題】 要素プロセスはそれぞれ処理量, 滞留時間, 物質, エネルギーが異なるため, 各プロセスの操作を時空間的に成立させるシステム全体の合成・設計

【想定される用途・効果】 運転操作性・制御性を考慮したプロセス設計・評価の情報を要素技術の研究開発にフィードバックすることで, 研究開発のリードタイムを短縮

【技術の概要】 窒素循環技術評価のためのデータベース開発

【優位性】 既存のデータベースでは出力される反応性窒素(Nr)が考慮されているが、IDEAでは入力される窒素も考慮したことが優れている。現在は、約700品目の製品を対象に窒素インベントリデータを整備した。

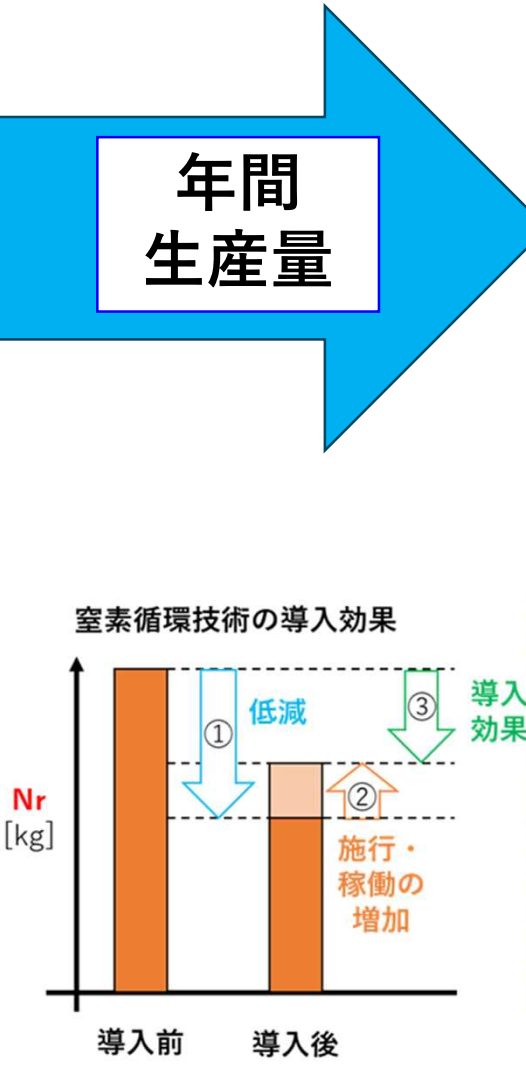
① 窒素インベントリデータの整備

アンモニア[1kg]の製造

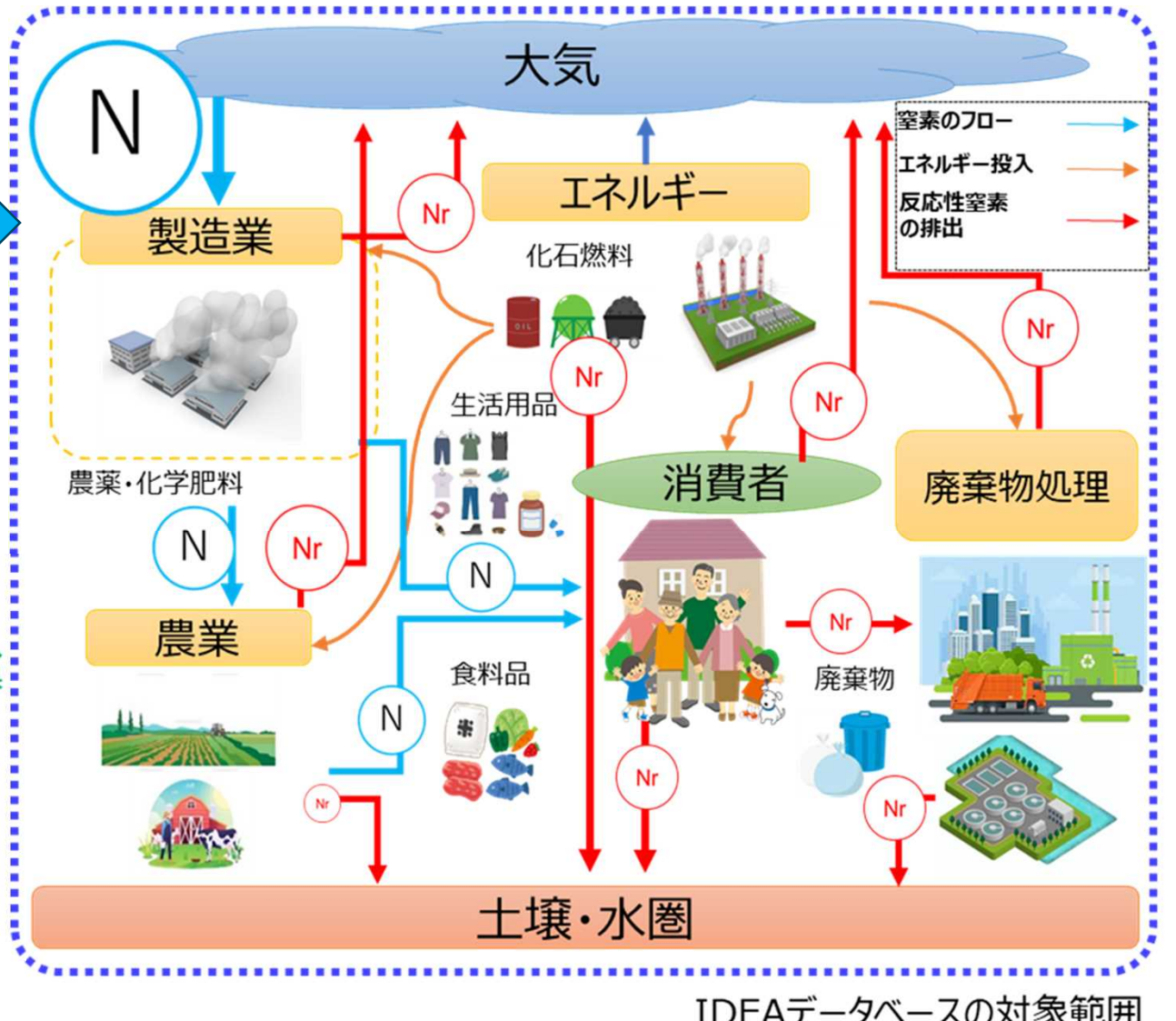
入力項目	入力量	単位	窒素含有率	窒素入力	単位	出力項目	出力量	単位	窒素含有率	窒素出力	単位
天然ガス	0.50	kg	-	-	-	アンモニア	1.00	kg	0.82	0.82	kg
空気	2.30	kg	0.86	1.97	kg	炭酸ガス	1.02	kg	-	-	-
N ₂	1.97	kg	-	-	-	CO ₂	0.29	kg	-	-	-
O ₂	0.28	kg	-	-	-	メタン	0.02	kg	-	-	-
CO ₂	0.00	kg	-	-	-	水素	0.001	kg	-	-	-
Ar	0.04	kg	-	-	-	窒素	1.15	kg	1.00	1.15	kg
プロセス水	0.52	kg	-	-	-	アルゴン	0.04	kg	-	-	-
酸素	0.21	kg	-	-	-						
計	3.53	kg	-	1.97	kg	計	3.53	kg	-	1.97	kg
プロセス水	1.00	kg	-	-	-						
電力	0.09	kwh	-	-	-						
天然ガス	6.32	MJ	-	-	-						

窒素バランス: 3.53 kg (入力) - 1.97 kg (排出) = 1.56 kg (製品中)

マスバランス: 3.53 kg (入力) - 1.97 kg (排出) = 1.56 kg (製品)



② 国内窒素フローの把握



材料として入力される窒素量と製品中に取り込まれる窒素量、環境中に排出される窒素量を整備した。
約700製品の窒素インベントリデータを整備した。

製品ごとの窒素入出力量をもとに年間生産量を適応することで国内の窒素フローを把握した。

【技術の概要】 2050年における人為起源窒素化合物の国内排出量の試算とそのオゾン等への影響を評価
【優位性】 2050年の船舶等に対する窒素循環技術普及に伴う大気質への影響を行うにあたり、その前段階として2050年における人為起源由来の反応性窒素化合物の排出インベントリを算出

- 目的①: NO_xやNH₃等の反応性窒素化合物(Nrs)を含む2050年の人為起源排出量の試算
- 目的②: 2050年のNrs等削減に伴うオゾンとPM_{2.5}濃度への影響の評価
- ソフトウェア: Community Multiscale Air Quality Modeling system (CMAQv5.3.3)
- 2050年の気象: 全球気候モデルCCSM4により試算されている中位温暖化シナリオ(RCP4.5)*
- 将来排出量シナリオ: 4種の脱炭素シナリオ(LED: 社会変容, ELE: 全電化, H2: 水素普及, ZERO: ネットゼロ)

*RCP4.5: 2100年までに全球平均で1.1~2.6℃の温暖化が生じるとされる気候シナリオ

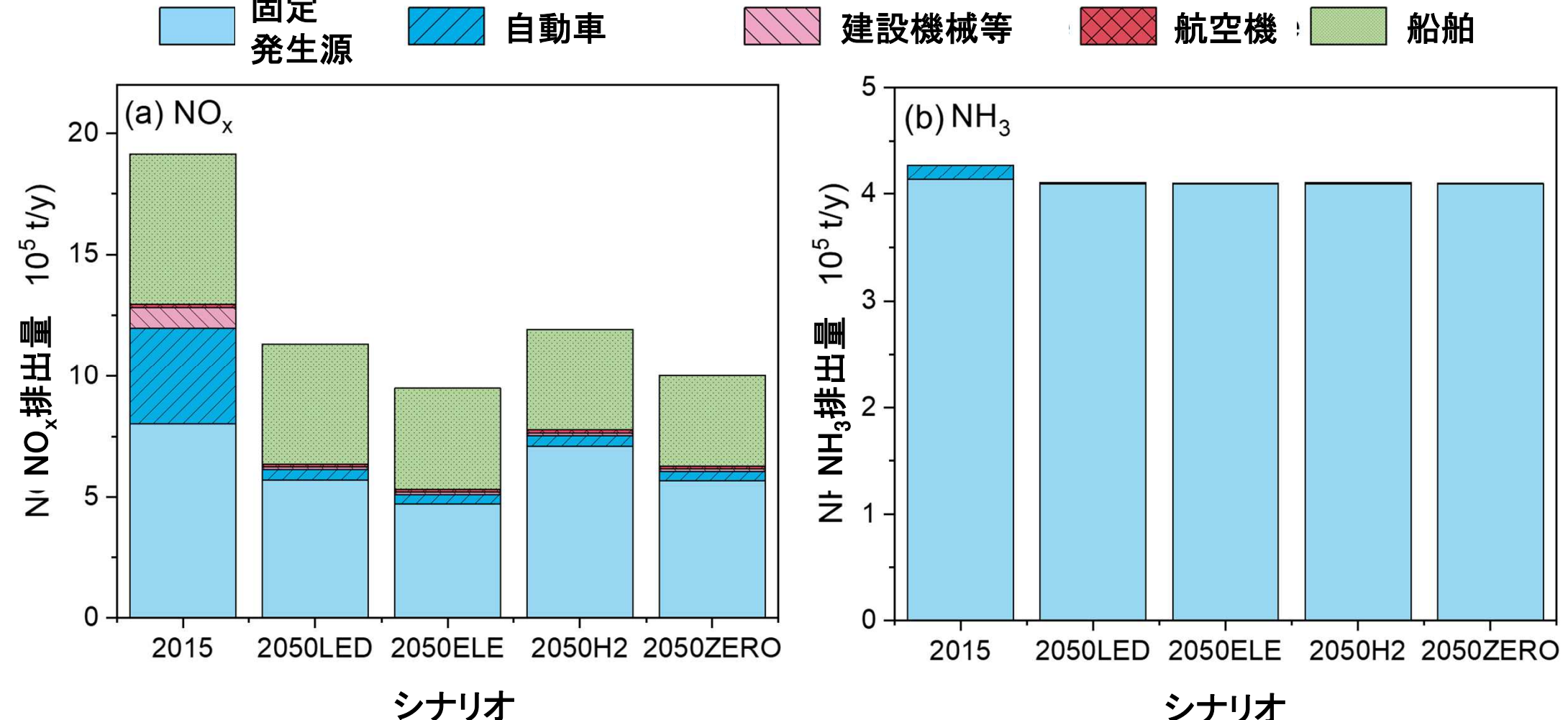


Fig.1 NO_xとNH₃の排出セクター別の2050年国内将来排出量

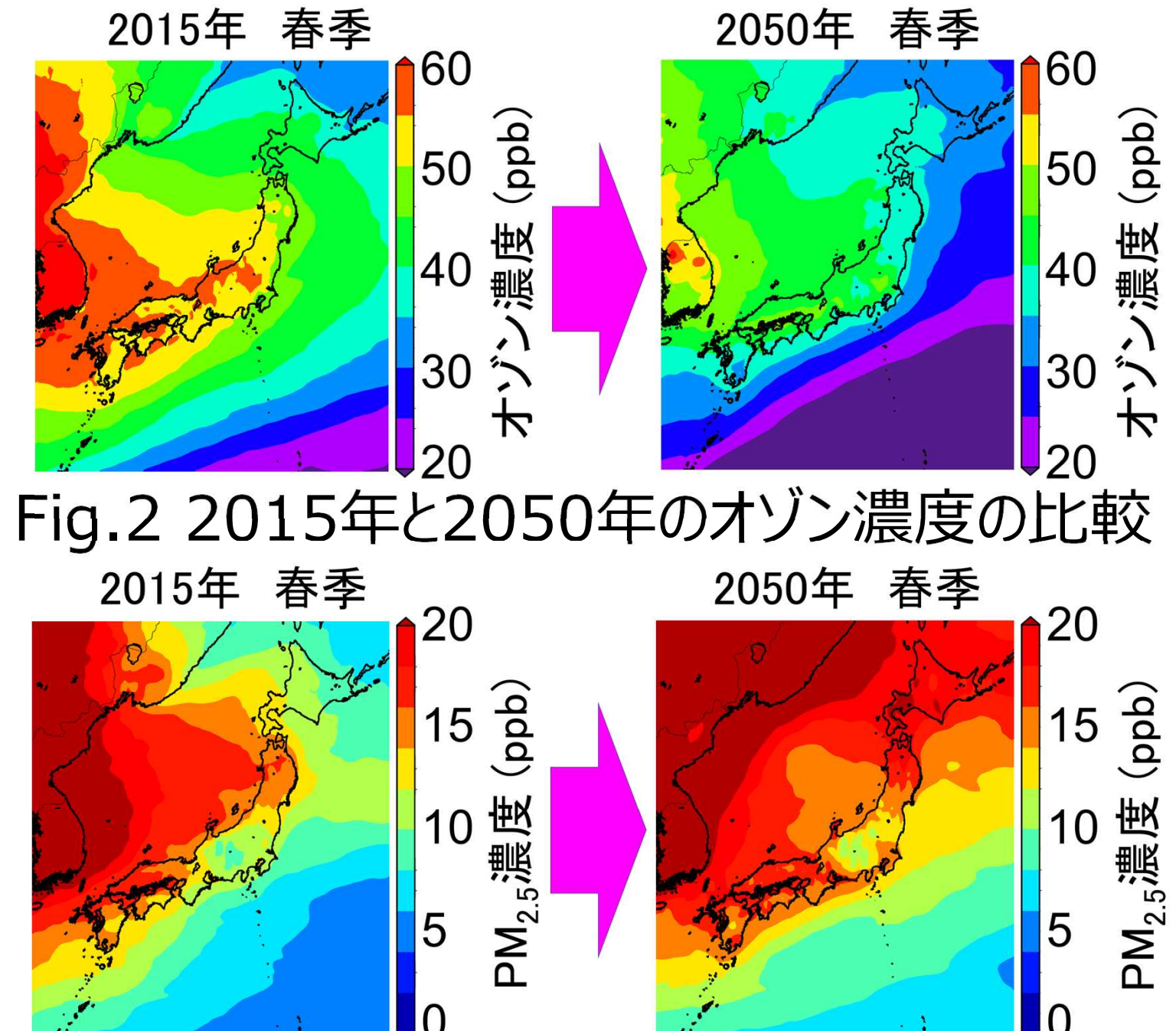


Fig.2 2015年と2050年のオゾン濃度の比較
Fig.3 2015年と2050年のPM_{2.5}濃度の比較

- 2050年に自動車由来のNO_x排出量が低減する一方で固定発生源と船舶からのNO_x排出と農業由来のNH₃排出への効果は限定的(Fig.1)
- Nrs等の削減効果により国内のオゾン濃度は10ppb程度減少(Fig.2)
- 気候変動による日射量の増加によりPM_{2.5}濃度は増加する(Fig.3) (掲載論文: Hata et al. Sci. Total Environ. (2023))
- 現在、同様の解析を世界全体(全球)スケールでも実施中

【想定される用途・効果】

- LCAに基づく窒素循環技術導入によるエネルギー削減効果・環境改善効果を可視化
- 窒素循環技術導入による大気中の有害物質削減効果とヒトや生態系へのリスク削減効果の提唱