

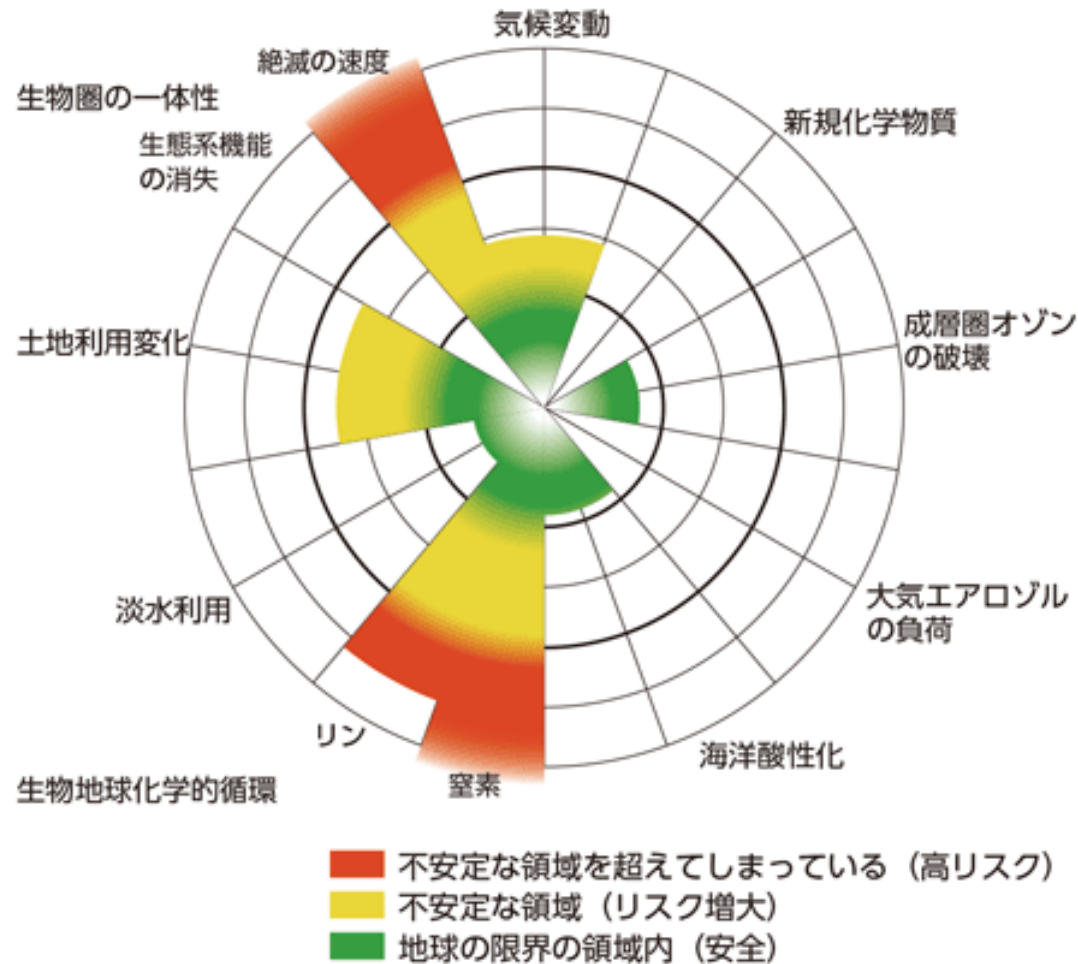
# 下水からの窒素回収の意義と可能性 ～プラネタリバウンダリーと脱炭素の観点から～

---

京都大学大学院工学研究科  
藤原 拓

# プラネタリー・バウンダリー：窒素循環は高リスクと評価

プラネタリー・バウンダリーの考え方で表現された現在の地球の状況



資料：Will Steffen et al. [Planetary boundaries : Guiding human development on a changing planet] より環境省作成

○プラネタリー・バウンダリー(地球の限界)：人間活動が地球システムに及ぼす影響を客観評価する方法の一つ。地球システムに対して、人間が9種類の変化を引き起こしているとの考え方に基づく。

①生態系・生物多様性の破壊、②気候変動  
③新規化学物質による汚染、④成層圏オゾンの破壊、⑤大気エアロゾルの負荷、⑥海洋酸性化、⑦生物地球化学的循環(窒素・リン)、⑧淡水利用、⑨土地利用変化

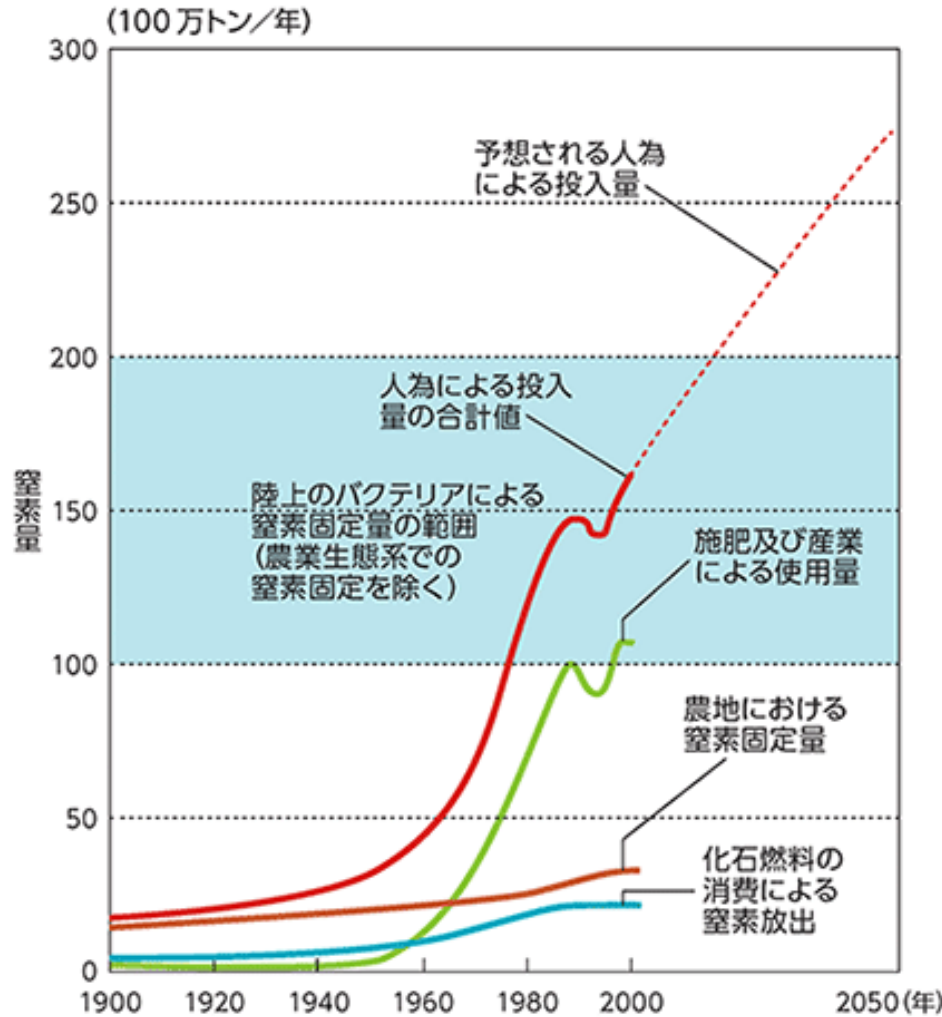
○窒素の生物地球化学的循環：人間活動が地球に及ぼす影響とそれにもなうリスクが顕在化。生物圏の一体性(絶滅の速度)と並び、不安定な領域を超えてしまっている最も高リスクな状況にあると評価されている。

(出典)平成29年版 環境・循環型社会・生物多様性白書

<http://www.env.go.jp/policy/hakusyo/h29/html/hj17010101.html>

# 人為活動による反応性窒素生産量の増大と環境への影響

図1-1-6 人為活動による反応性窒素の生産量



資料：ミレニアム生態系評価

- 反応性窒素**：大気の78%を占める安定な分子状窒素( $N_2$ )以外の窒素化合物
- 窒素の生物地球化学的循環**：本来は、生態系プロセスにより大気から固定される窒素量と、脱窒により硝酸態窒素が大気中の分子状窒素に還元される量はほぼ均衡。
- 化学肥料の需要増大**：世界的な人口増や食生活の変化を背景として、化学肥料の需要が年々増大。人為的な反応窒素投入量の合計は、陸上生態系が自然固定する量と同程度とされ、将来はさらに増大と予測。
- 環境中の反応性窒素による問題**：湖沼・海域の富栄養化、硝酸性窒素による地下水汚染、底層部の貧酸素化、大気に放出された窒素酸化物による酸性雨、一酸化二窒素( $N_2O$ )による気候変動など。
- 下水処理場での高度処理(硝化・脱窒)**：窒素循環の改善、環境中の反応性窒素による問題の解決の両面で重要。

# 下水高度処理にともなう消費電力量・CO<sub>2</sub>排出量の増大

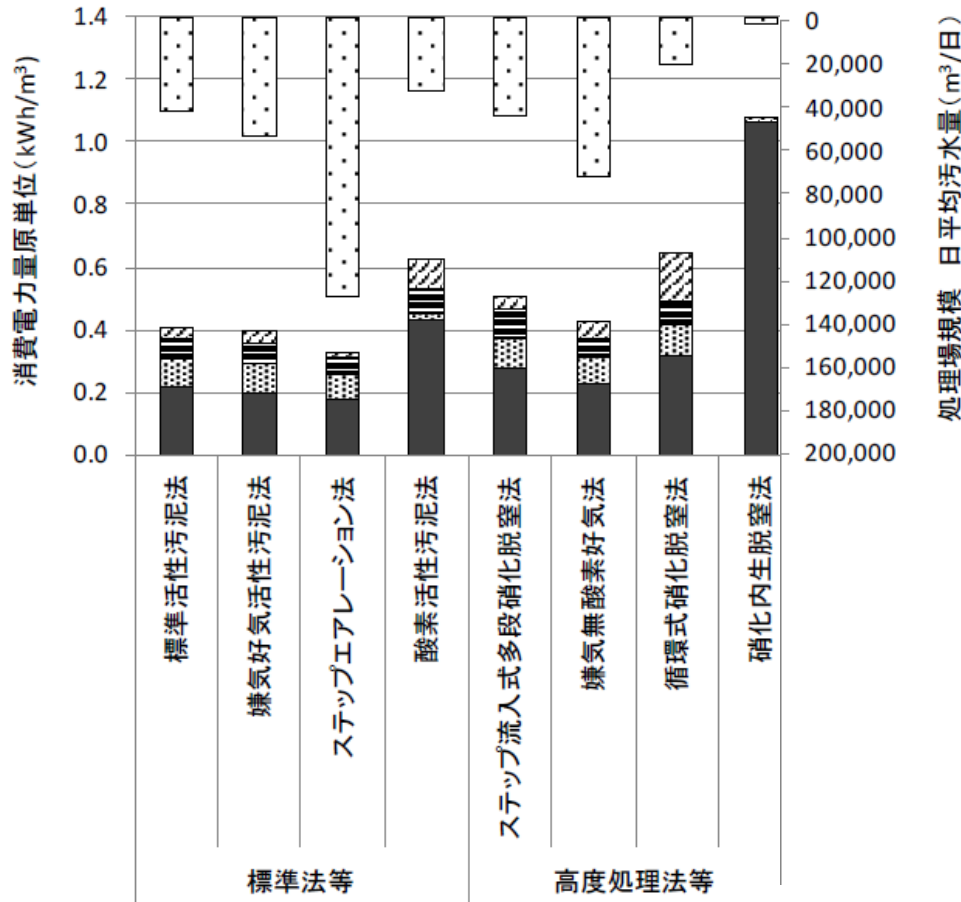


図 処理法別の消費電力量原単位

(出典)公益財団法人 日本下水道新技術機構、活性汚泥法等の省エネルギー化技術に関する技術資料 - 2014年3月 - (一部改変)

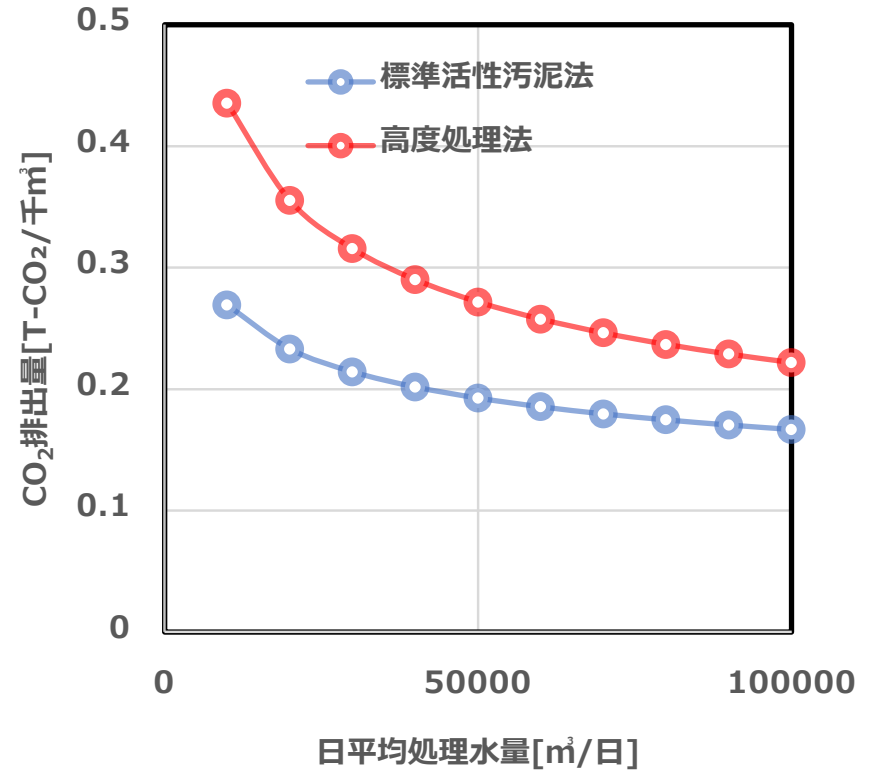


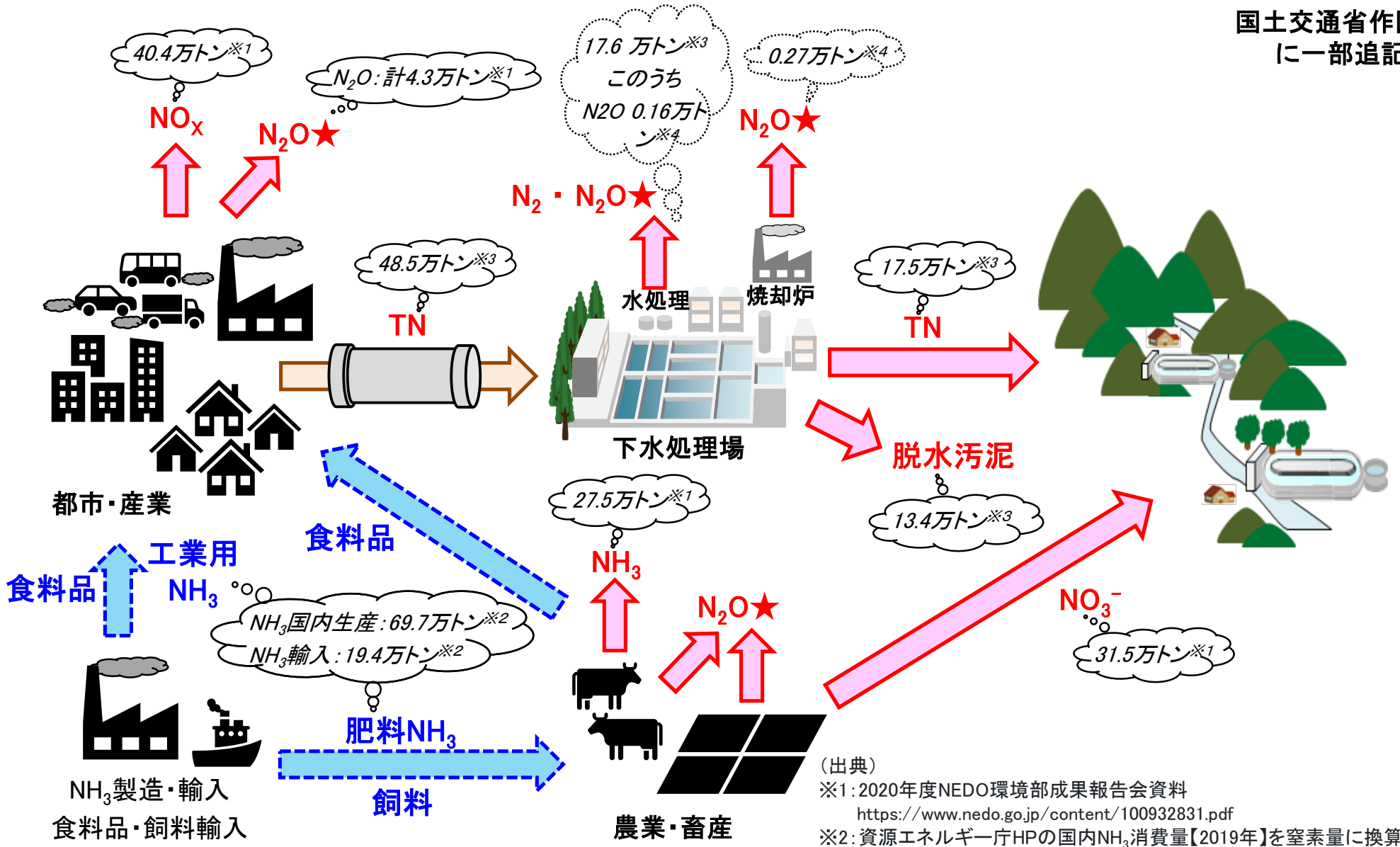
図 CO<sub>2</sub>排出量の推定値

環境省・国土交通省 下水道における地球温暖化対策マニュアル (平成28年)に記載の回帰式に基づき筆者作成

○下水処理場での高度処理は、窒素循環の改善に有効だが、消費電力量およびCO<sub>2</sub>排出量が増加。

# 我が国における反応性窒素の主な排出源と年間排出量

国土交通省作図  
に一部追記

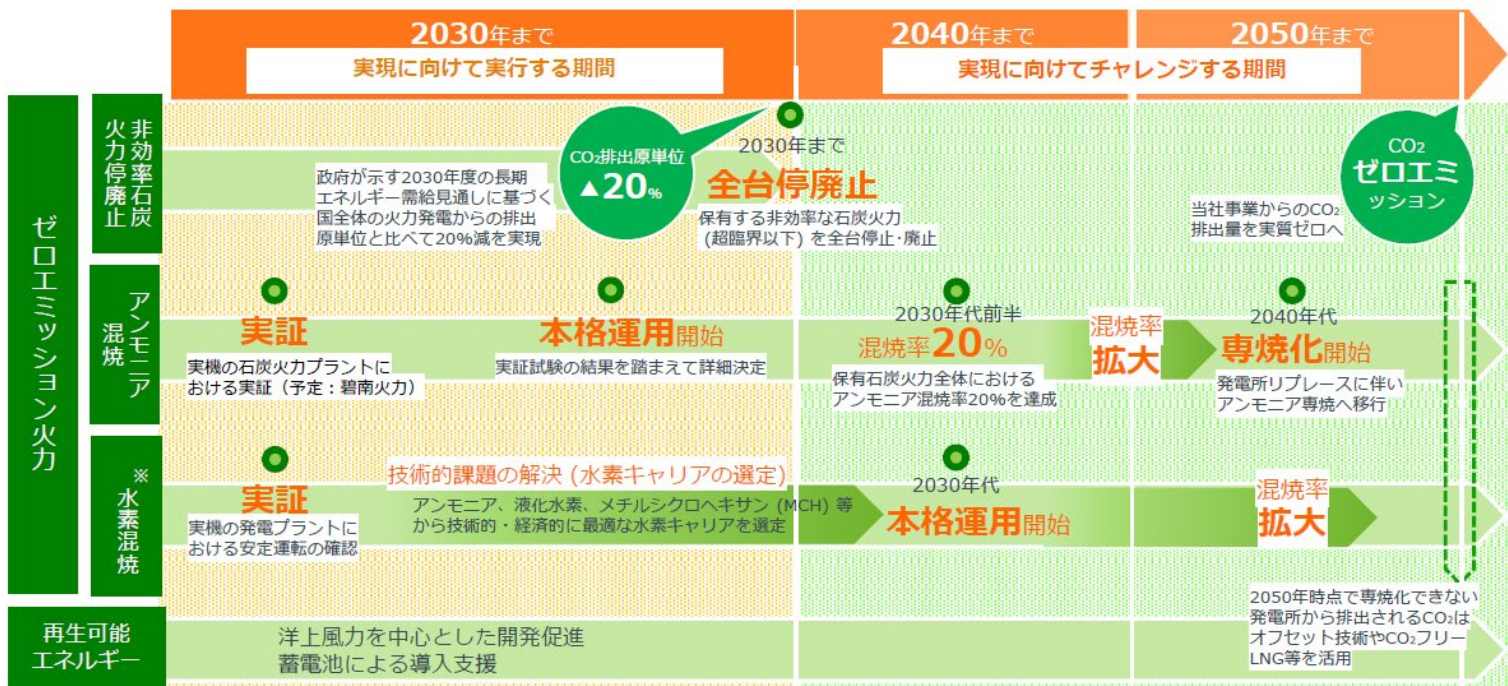


(出典)  
 ※1: 2020年度NEDO環境部成果報告会資料  
<https://www.nedo.go.jp/content/100932831.pdf>  
 ※2: 資源エネルギー庁HPの国内 $\text{NH}_3$ 消費量【2019年】を窒素量に換算  
[https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/johoteikyo/ammonia\\_01.html](https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/johoteikyo/ammonia_01.html)  
 ※3: 小島啓輔ら: 下水道協会誌、58(708), pp. 78-87, 2021  
 ※4: 国土交通省調べ【2018年】

# 脱炭素社会の実現に向けたアンモニアの重要性

- エネルギーキャリア(輸送媒体): 大量輸送が困難な水素をアンモニアに変換して輸送し、利用場所で水素に戻す方法が研究されている。
- カーボンフリーな燃料: 燃焼時に二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)を排出しない。石炭火力発電に混焼することでCO<sub>2</sub>排出量を抑制可能。将来は、アンモニアだけを使用する「専焼」も開始見込み。第6次エネルギー基本計画で水素・アンモニアを2030年に向けた政策対応ポイントに位置づけ。国内大手電力会社が保有する石炭火力発電所の全てで20%の混焼をおこなえば、約4000万トンのCO<sub>2</sub>排出削減量見込み。
- 課題: アンモニアの燃料活用には**安定的な量の確保が課題**。国内の全石炭火力で20%混焼を実現するには2000万トン程度のアンモニアが必要(世界全体の輸出入量とほぼ同量)。

(出典)資源エネルギー庁HP [https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/johoteikyo/ammonia\\_01.html](https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/johoteikyo/ammonia_01.html)



本ロードマップは、政策等の前提条件を踏まえて段階的に詳細化していきます。前提が大幅に変更される場合はロードマップの見直しを行います。 ※ CO<sub>2</sub>フリーLNGの利用も考慮しております。

(出典) JERA プレスリリース「2050年におけるゼロエミッションへの挑戦について」資料2

# アンモニアの生産・輸出入・消費の概要

- 世界全体のアンモニア生産量は、2019年で約2億トン。用途は約8割が肥料、残りの2割は工業用。
- 世界全体のアンモニア輸出入量は2018年で約2000万トンで生産量の約1割。生産国でつくられたアンモニアの9割は自国内で消費。
- 日本のアンモニア消費量は2019年で約108万トン。このうち約8割を国内生産、約2割が輸入。
- アンモニア合成によるCO<sub>2</sub>排出量は化学産業からの温室効果ガス排出量の32.7%を占める。

- 1) 世界の工業的な窒素固定量: 約2億トン(ハーバーボッシュ法によるNH<sub>3</sub>生産量)
- 2) 日本の工業的な窒素固定量: 84.6万トン(国内のNH<sub>3</sub>生産量) → 窒素換算69.7万トンアンモニア
- 3) 日本の窒素輸入量: 23.5万トン(NH<sub>3</sub>輸入量) → 窒素換算19.4万トン
- 4) 日本のN<sub>2</sub>O排出量: 4.3万トン
- 5) 日本の化学肥料製造における窒素使用量(2, 3の内数): 84.9万トン(NH<sub>3</sub>) → 窒素換算70万トン
- 6) アンモニア製造によるCO<sub>2</sub>排出量: 1704 kt-CO<sub>2</sub>/年(2019年度排出量に基づく推定)。化学産業からの温室効果ガス排出量(5,179 kt-CO<sub>2</sub>/年)の32.9%を占める。
- 7) 天然ガス原料のアンモニア合成プロセスのエネルギー消費量(2010年～): ~25.9 GJ/t-NH<sub>3</sub>

(出典)

1)2)3)5)[https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/johoteikyo/ammonia\\_01.html](https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/johoteikyo/ammonia_01.html)

[https://www.meti.go.jp/shingikai/energy\\_environment/nenryo\\_anmonia/pdf/20200208\\_1.pdf](https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/nenryo_anmonia/pdf/20200208_1.pdf)

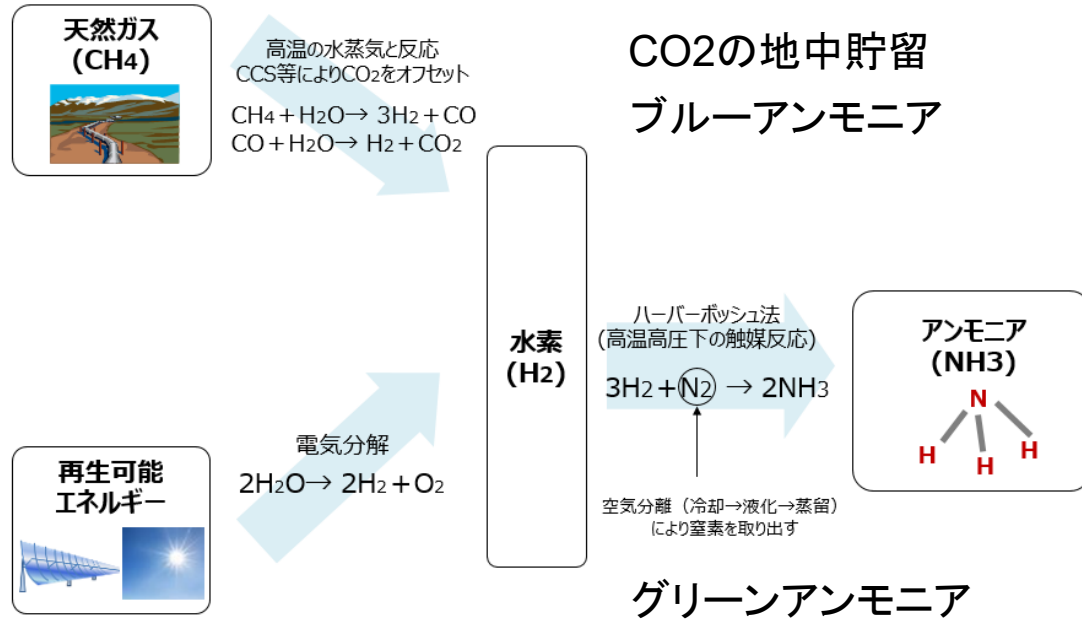
4)<https://www.nedo.go.jp/content/100932831.pdf>

6)温室効果ガスインベントリオフィス(GIO)編 環境省地球環境局総務課脱炭素社会移行推進室 監修、日本国温室効果ガスインベントリ報告書 2021年

7)細野恭生: SIP終了報告書「CO<sub>2</sub>フリー水素からのアンモニア合成プロセスの構築」

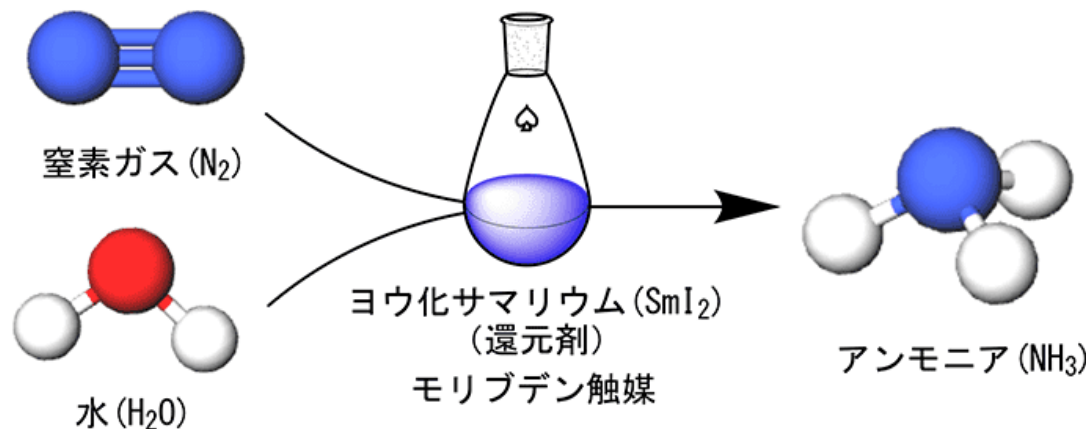
<https://www.jst.go.jp/sip/dl/k04/end/team3-25.pdf>

# CO<sub>2</sub>フリーアンモニアを目指した取り組み



- ブルーアンモニア: 製造過程で排出されるCO<sub>2</sub>を回収・貯留
- グリーンアンモニア: 再生可能エネルギーを使用して水の電気分解により水素を製造

(出典) 経済産業省資源エネルギー庁、  
[https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/joho-teikyo/ammonia\\_01.html](https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/joho-teikyo/ammonia_01.html)



- 新規のアンモニア合成法の開発: 高温高圧環境が必要なハーバーボッシュ法に代わる方法として、常温・常圧で窒素ガスと水から簡単・大量・高速にアンモニアを合成することに成功

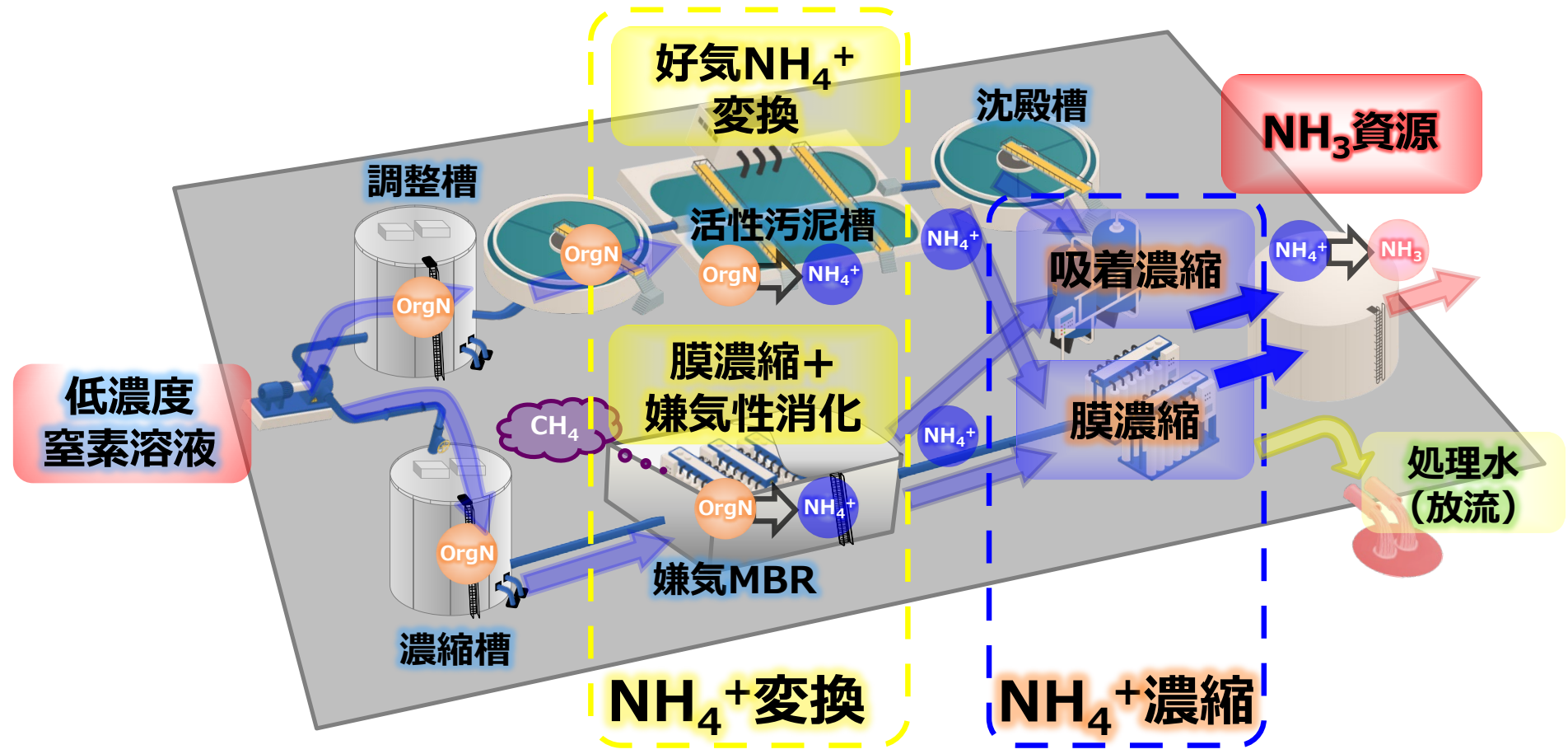
(出典) 科学技術振興機構「画期的なアンモニア合成法 西林仁昭・東京大学教授」  
<https://www.jst.go.jp/seika/bt2020-04.html>

ハーバーボッシュ法に代わる常温・常圧でのアンモニア合成法



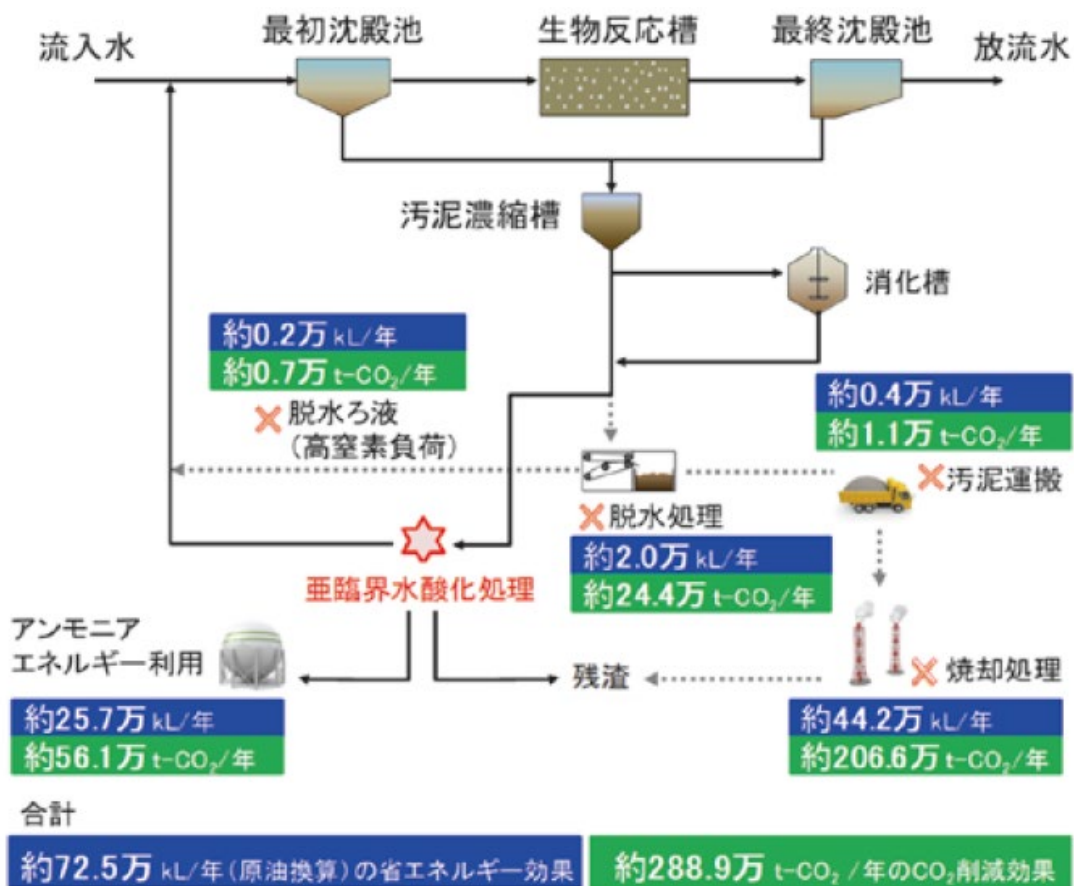
# 廃水からのアンモニア回収の取り組み

○廃水に含まれる有機態窒素を高濃縮されたNH<sub>3</sub>資源として回収する一連のシステムを開発中  
 (ムーンショット型研究開発制度「産業活動由来の希薄な窒素化合物の循環技術創出(代表者:川本徹)」)



(出典)ムーンショット型研究開発制度 産業活動由来の希薄な窒素化合物の循環技術創出  
 プロジェクトマネージャー国立研究開発法人産業技術総合研究所 川本徹 <https://www.n-cycle.jp/>

# 流入下水中窒素のエネルギーポテンシャル



(試算上の仮定)

- 回収対象: 脱水汚泥投入前の汚泥(液体中の窒素も回収)
- 汚泥中の窒素の88.6%を回収しエネルギーとして利用
- 汚泥の窒素成分をエネルギー化する際の必要エネルギーは未考慮

(出典) 小島啓輔ら: 下水処理場における窒素由来のエネルギーポテンシャルの試算とその利用に関する考察、下水道協会誌、58(708), pp. 78-87, 2021

## 既存の下水処理システムを想定

- 流入窒素量: 48.5万t-N/年  
(>アンモニア輸入量24.1万t-NH<sub>3</sub>/年)
- 流入窒素エネルギーポテンシャル: 36.8億kWh/年  
(下水処理場使用電力量の57.1%)
- 回収対象: 流入水中TN平均32.2mg-N/Lと希薄なため、流入水からの回収は非現実的。汚泥に含まれる窒素のアンモニア変換技術が必要(以下では必要エネルギー未考慮)。
- アンモニア回収効果:  
省エネ効果: 25.7万kL/年(直接)  
44.2万kL/年(システム全体)  
CO<sub>2</sub>削減: 56.1万t-CO<sub>2</sub>/年(直接)  
206.6万t-CO<sub>2</sub>/年(システム全体)  
(日本の温室効果ガス排出量の約0.23%相当)

## 2050年に向けて(私見)

- 活性汚泥法から脱却し、窒素を含む資源・エネルギー回収型の脱炭素下水道へ
- 収集システム: 資源・バイオマス集約拠点化
- 処理システム: 生物変換と有価物濃縮技術の組合せによるシステム最適化