

# 持続可能な窒素利用に向けた ステークホルダーエンゲージメント

## 第3回窒素循環シンポジウム

2023年11月27日

人間文化研究機構

総合地球環境学研究所・教授

林 健太郎

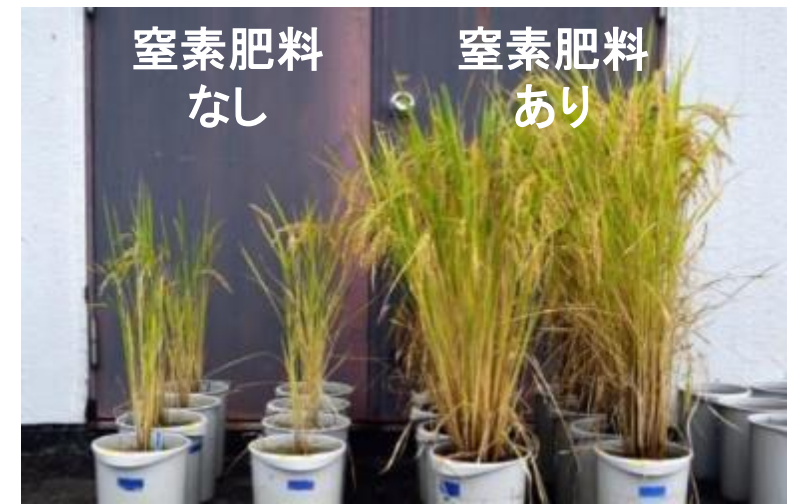
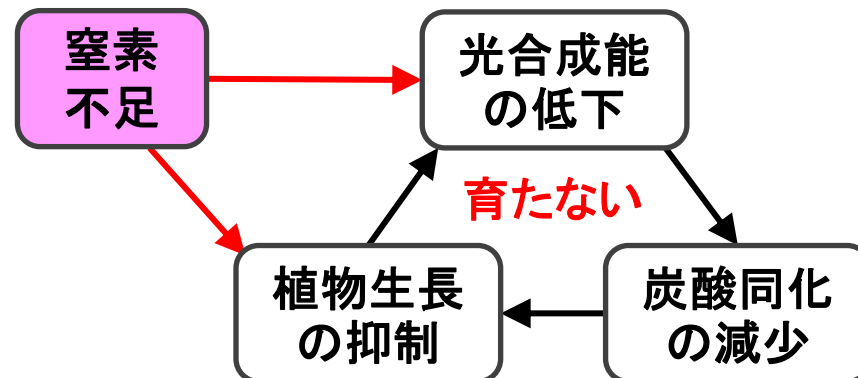


# 窒素(N)は生物の必須元素

## 生命代謝, 体づくり, 遺伝情報

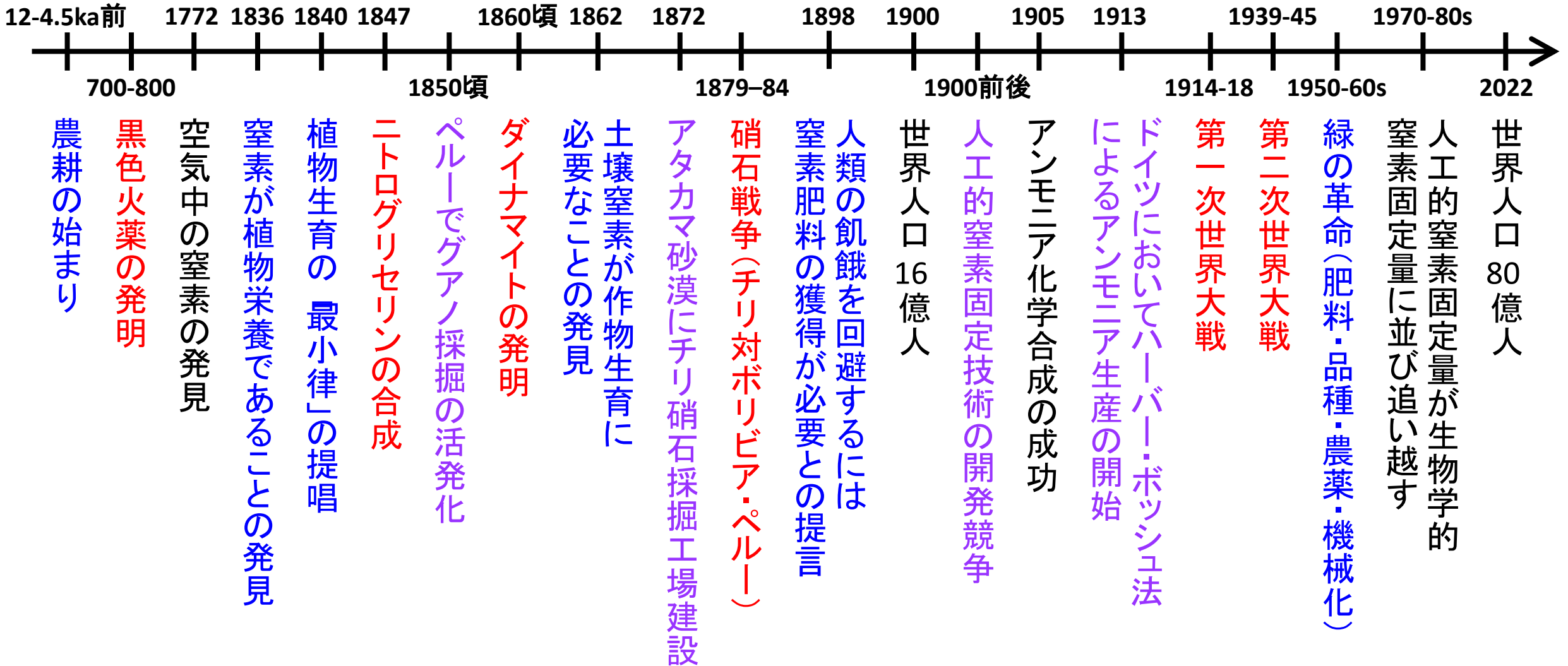
- 窒素は, アミノ酸や核酸塩基の形成に必須
  - アミノ酸はタンパク質, 核酸塩基はDNAの素材
- 多くの生物は大気の78%を占める窒素ガス( $N_2$ )を利用できない
  - 動物: 有機態窒素(他の生物・有機物)を摂食
  - 植物: 無機態窒素(特にアンモニアと硝酸)を吸収
- 酵素もタンパク質 → 光合成を担うのは酵素 → **窒素は重要な肥料**

$N_2$ 以外の窒素化合物を  
「反応性窒素」と総称

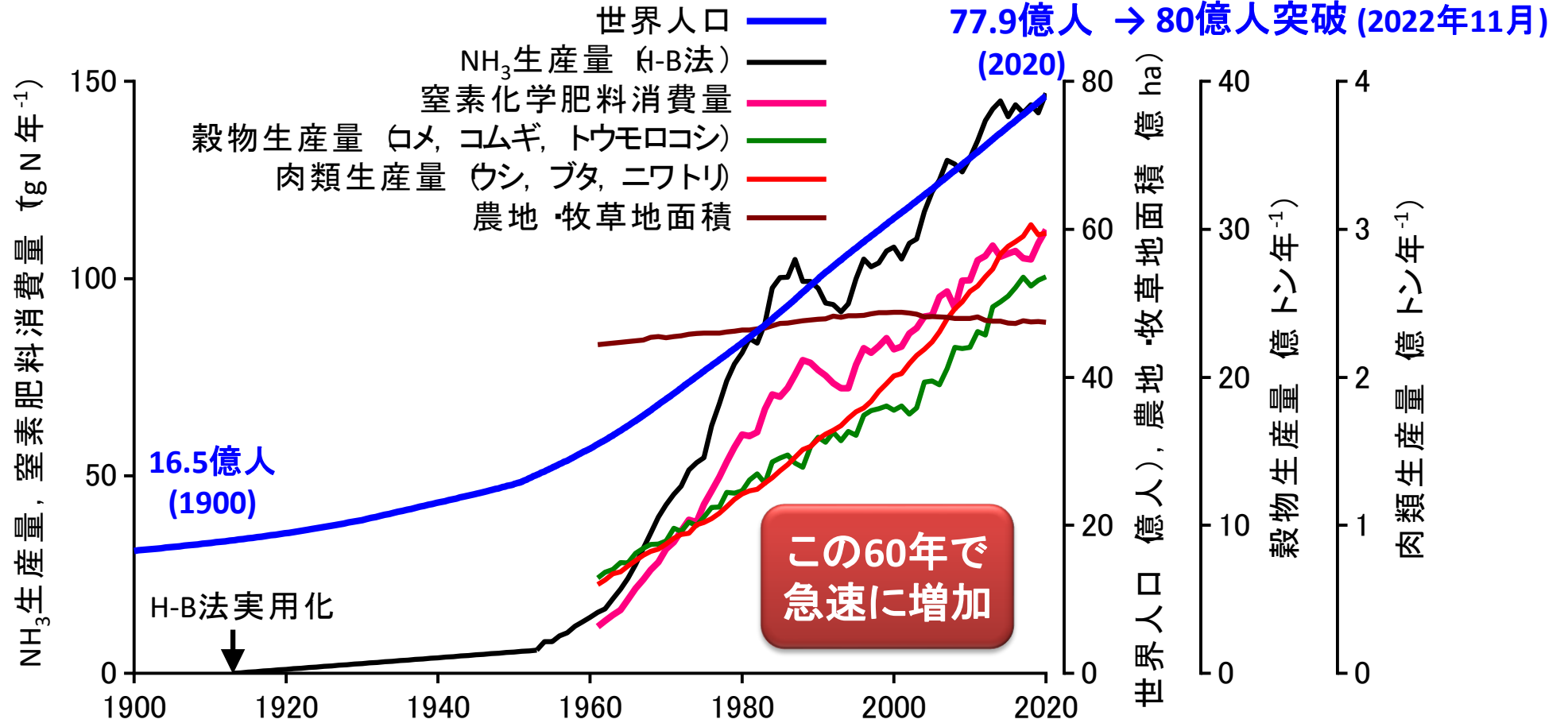


# 人類と窒素の歴史

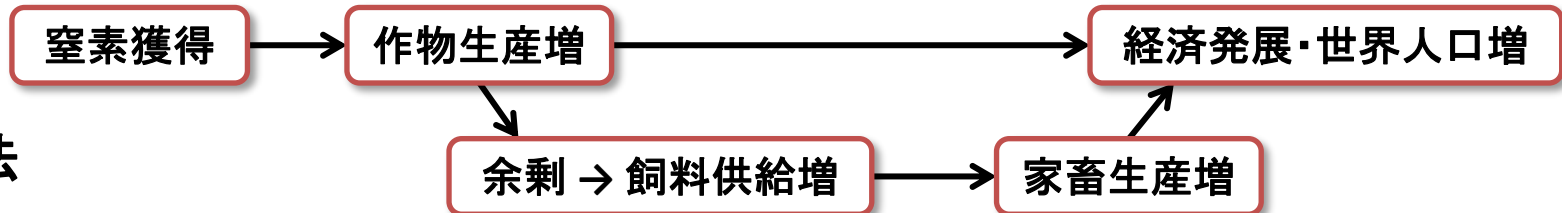
## 「食」と「争」の二面性(紫は両面を含む)



# 人類は20世紀はじめに反応性窒素(Nr)を獲得 豊富なN<sub>2</sub>からアンモニア(NH<sub>3</sub>)を望むだけ合成可能に

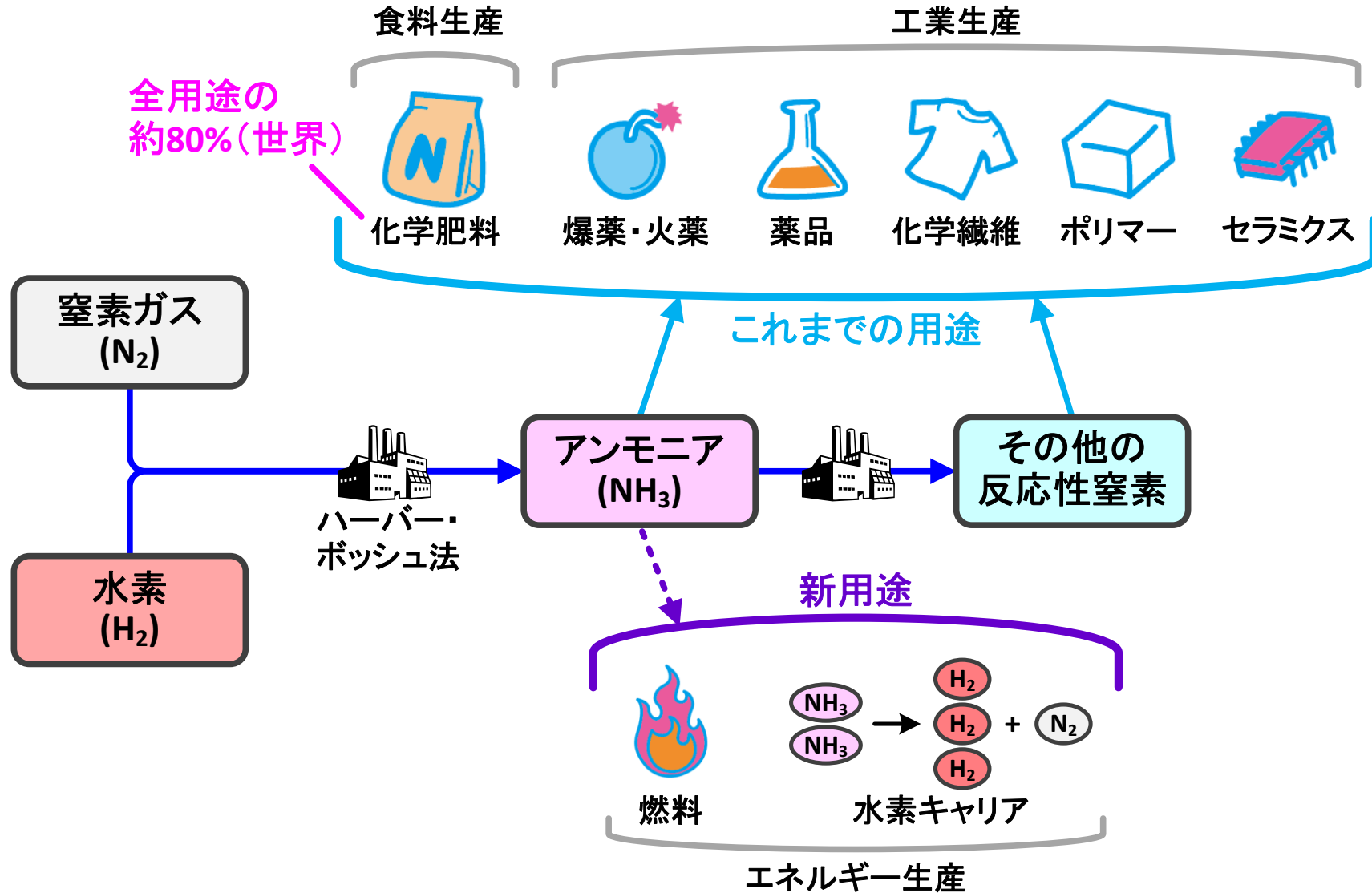


H-B法:  
ハーバー・ボッシュ法



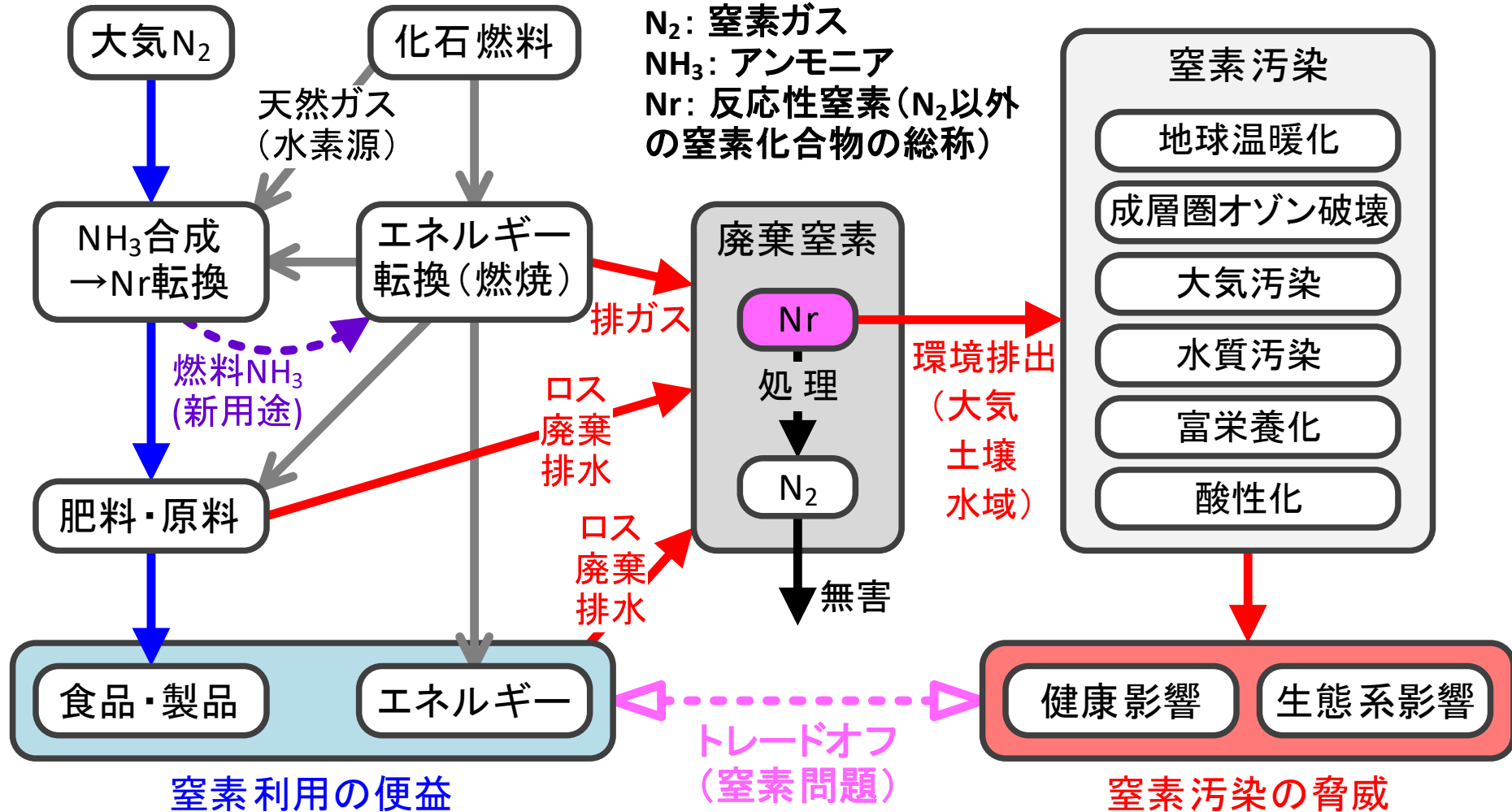
# 多様化する窒素の用途

## 化学肥料, 工業原料, そして燃料・水素キャリア



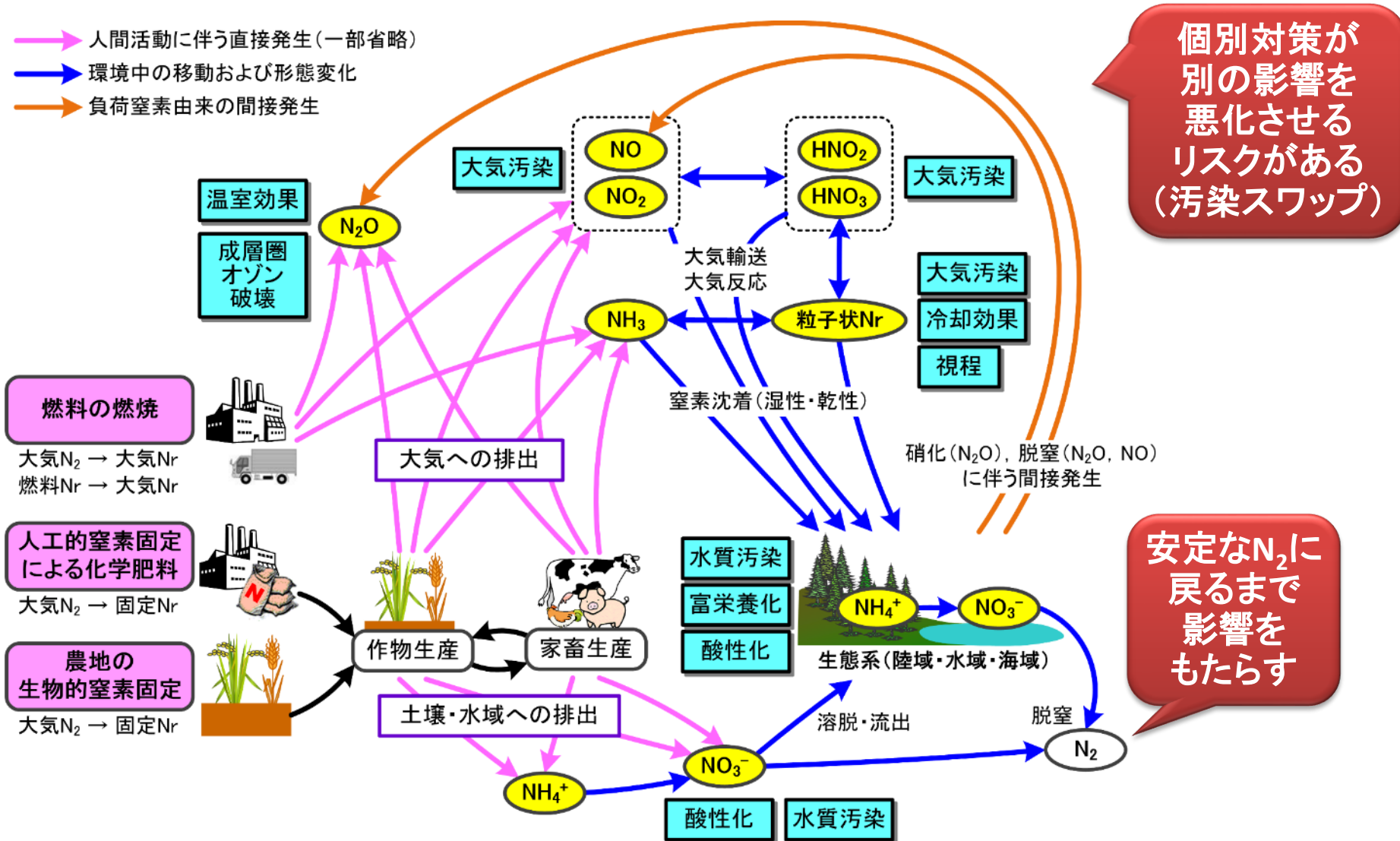
# 窒素問題

## 窒素利用(便益)と窒素汚染(脅威)のトレードオフ

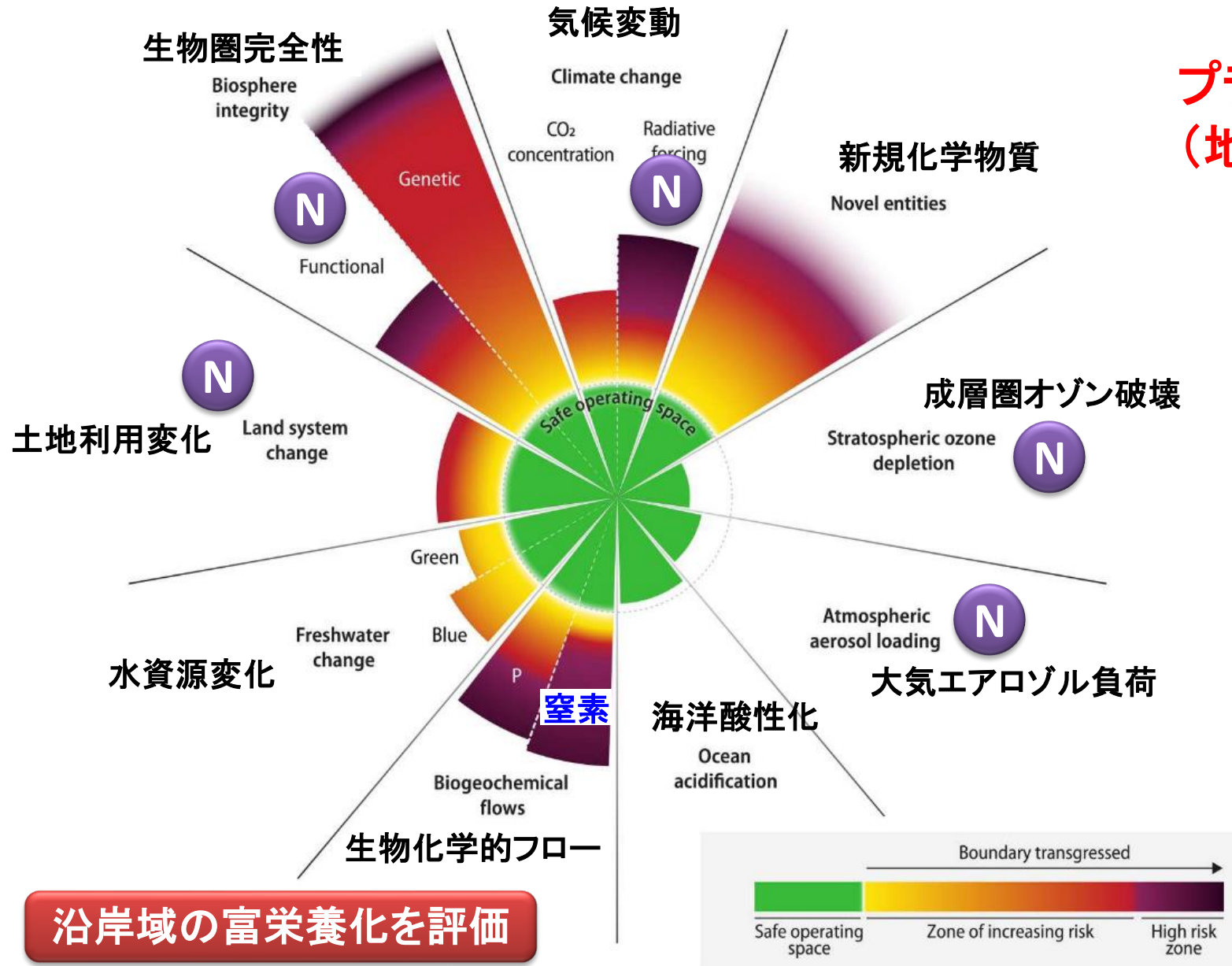


# 窒素カスケード

窒素は大気と水と土壌をつないで複雑に巡る



# 窒素循環のかく乱は地球システムへの脅威



プラネタリー・バウンダリー  
(地球システムの限界)

窒素は  
いずれにも関与

沿岸域の富栄養化を評価

Richardson et al. (2023)  
に基づき作図



# 窒素問題のステークホルダー

## すべての人が「消費者」でもある

- **行政・政策**： 資源としての窒素の利用と、付随する諸問題への対策
  - 食料生産・消費： 農林水産省
  - 経済とエネルギー生産・消費： 経済産業省
  - 環境保全： 環境省
  - 国土保全： 国土交通省
- **生産者**： 農業，水産業，林業など
- **消費者**： 食料・モノ・エネルギーを消費 → 行動変容のボトムアップ効果
- **企業**： 消費財・サービスの供給，インフルエンス大
- **メディア**： 情報の共有，問題提起，インフルエンス大
- **NPO**： 問題解決に向けた行動を実践する一つの主体
- **科学者・専門家**： 未知の探求 → 情報発信 → 各主体のエンゲージメント

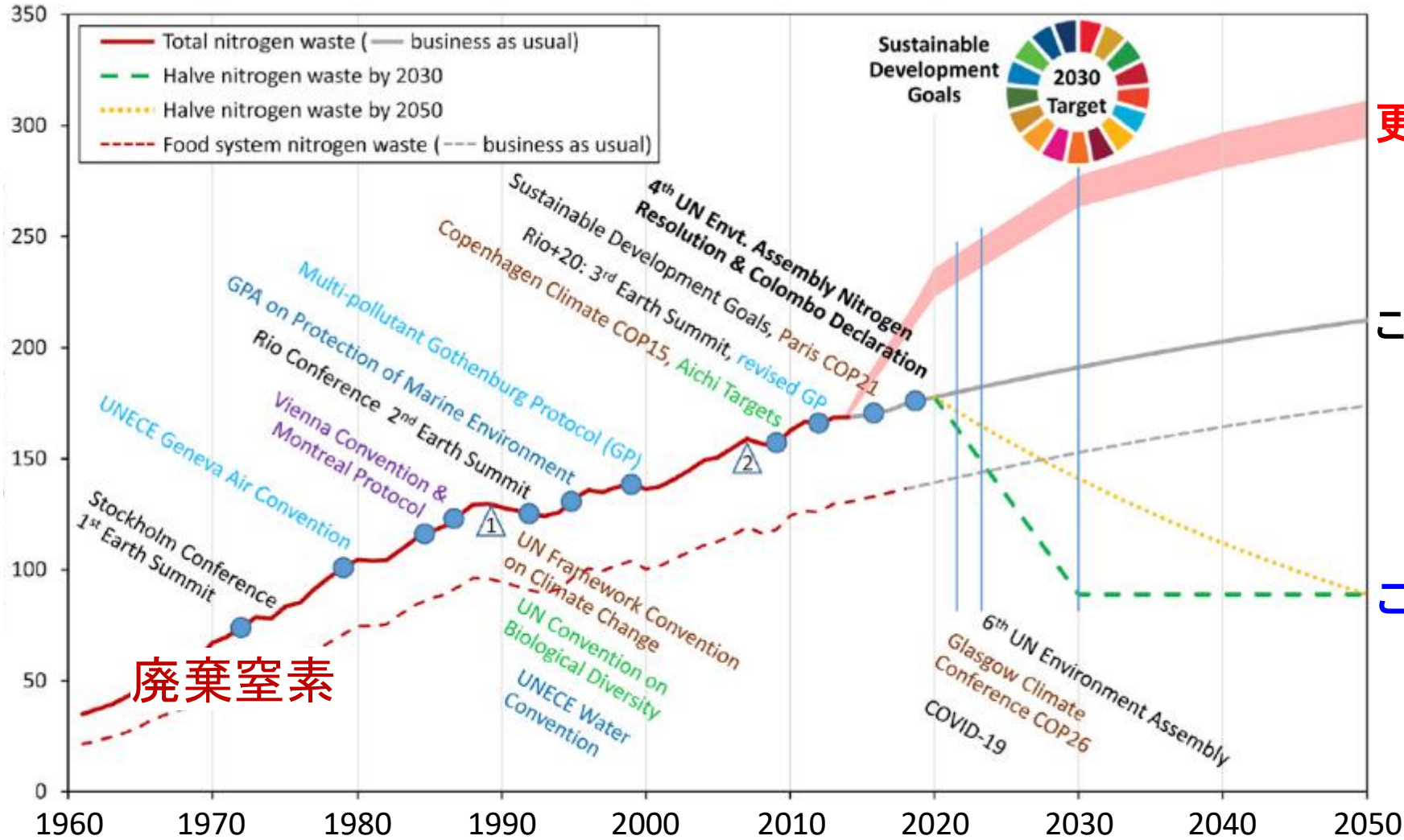
各々がその所掌の課題に取り組む  
→ トレードオフやオフセットが有り得る  
→ 情報を持ち寄ってシナジーを狙うべき  
→ 将来世代のためになる

# 廃棄窒素（人間社会から発生する窒素）の増大

## 国際的な窒素管理に向けて

2005年の廃棄窒素 = 1億5000万トン

世界の廃棄窒素(10億米ドル/年)  
=(百万トン窒素/年)



更に増えるシナリオ

このままいくと

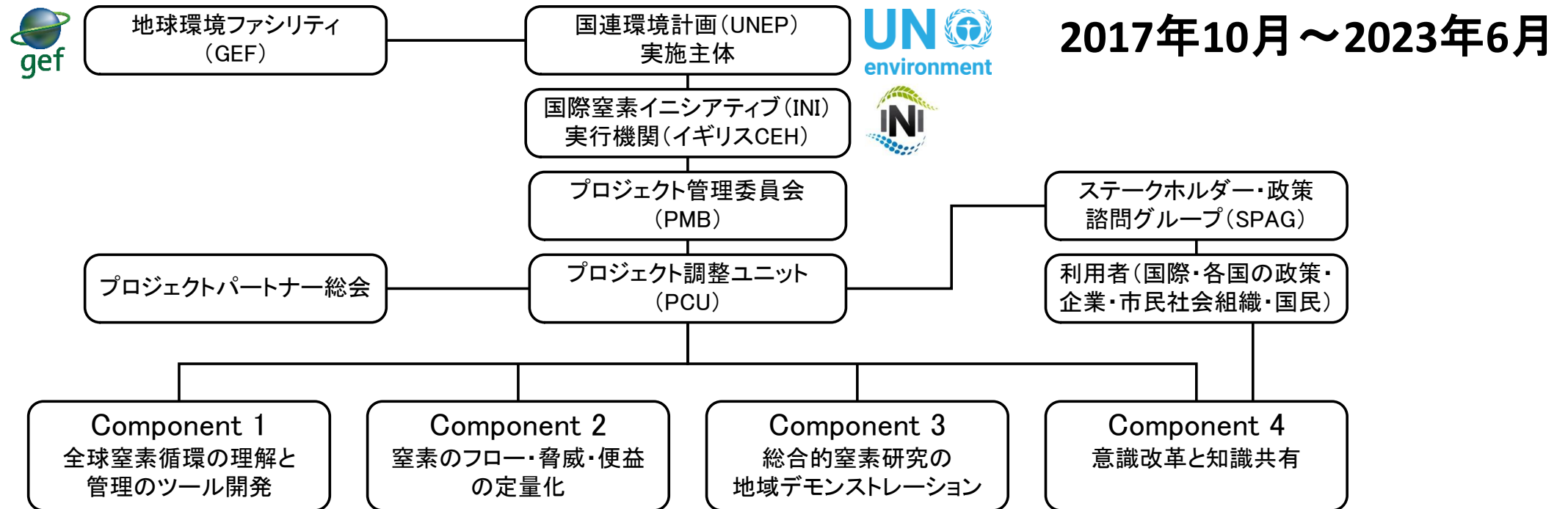
これを目指す

廃棄窒素

# プロジェクト: 国際窒素管理システム (INMS)

## International Nitrogen Management System

自然科学・政策の知見を束ねて国際政策に活かすプロジェクト  
 国際窒素評価書 (2024年7月刊行予定, Cambridge University Press)



<https://www.inms.international/>



# 専門家グループ：国際窒素イニシアティブ (INI)

International Nitrogen Initiative

<https://initrogen.org/>

- 主旨： 持続可能な食料生産における窒素の**利便性の最適化**と、食料・エネルギー生産に由来する窒素負荷が人間健康や環境に及ぼす**負の影響の最小化の両立**
- 主な活動： 国際プロジェクトの立案（例：INMSプロジェクト）、国際機関の活動支援（例：UNEP）、国際窒素会議の主催（原則3年ごと）
- 組織（2022年2月改組）： 代表（アメリカ）  
地域センター： 東アジア（代表：日本[林]、副代表：中国）、南アジア（インド、パキスタン）、欧州（スペイン）、北米（カナダ、アメリカ）、南米（チリ）、オセアニア（オーストラリア）、アフリカ（ナイジェリア）

# 国際窒素会議 (INI Conference)

## 次回: INI2024, 南アジア地域センター担当

- 第9回会議 (発表申込2023年10月10日締)
- 場所: インドラプラスタ大学, ニューデリー (インド)
- 期間: 2024年2月6日～8日
- 参加予定者: 科学者, 専門家, 国際窒素管理関係者 (UNEPなど)
- 参考: 第1回 (オランダ), 第2回 (アメリカ), 第3回 (中国), 第4回 (ブラジル), 第5回 (インド), 第6回 (ウガンダ), 第7回 (オーストラリア), 第8回 (ドイツ, 完全オンライン)
- 第10回会議を日本 (京都) に招致したく, 準備を進めています

# 国際窒素管理：国連環境計画（UNEP）

## ここ数年で取り組みが進展中

- 国連環境総会（UNEA: United Nations Environment Assembly）を主催
  - 次回 UNEA-6： 2024年2月26日～3月1日
  - 持続可能な窒素利用決議： UNEA-4 (2020) と UNEA-5 (2022) で採択
  - UNEA-6 に向けた議論 → 窒素作業部会
- 窒素作業部会（Working Group on Nitrogen）
  - UNEP 栄養塩管理グローバルパートナーシップ（GPNM）が担当
  - 各国に窓口： 日本は環境省（2022年より参加）、他省庁と連携
  - 第4回会合（2023年9月28～29日）
  - 第5回会合（2024年1月9～10日予定）
  - 科学者・専門家として支援（林：地球研，仁科：国環研）

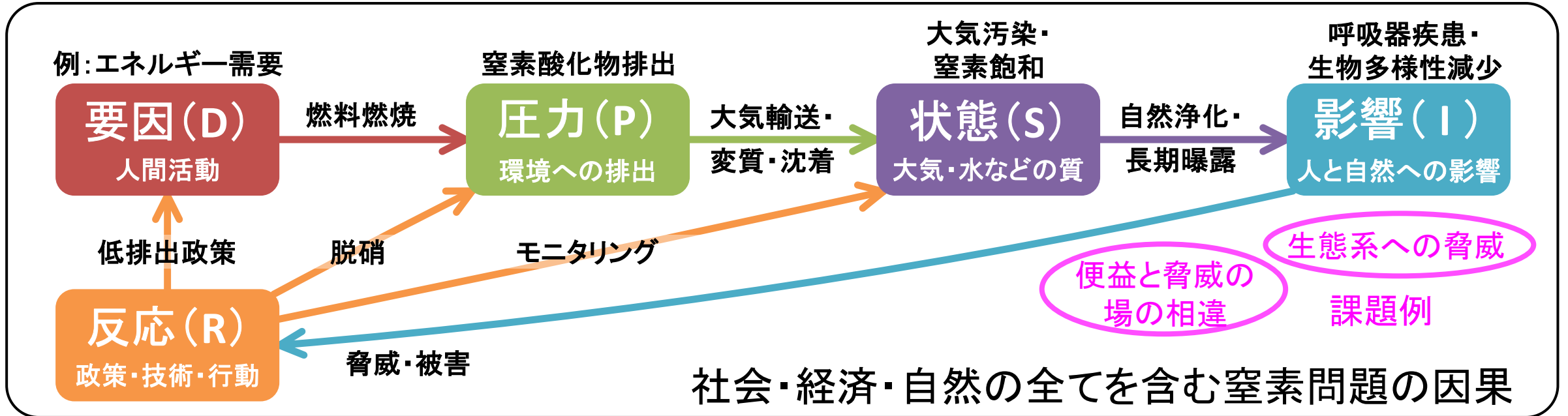
# 地球研 Sustain-N-able プロジェクト(2022-2027年度)

## 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



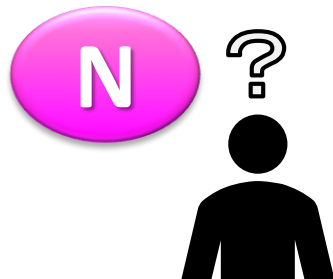
# 求められる3つのブレイクスルー

## 因果解析, 認識浸透, 将来設計



①因果解析: 用途・量が変わった時の応答, 政策・技術の効果などを定量評価すること

②認識浸透: 認識の乏しい窒素問題を国内外のステークホルダーに知ってもらうこと



③将来設計: ①の知見と②の進捗と並行し, 持続可能な窒素利用に必要な政策・技術・行動変容を思索すること (フューチャー・デザイン, FD)



# ステークホルダーエンゲージメント

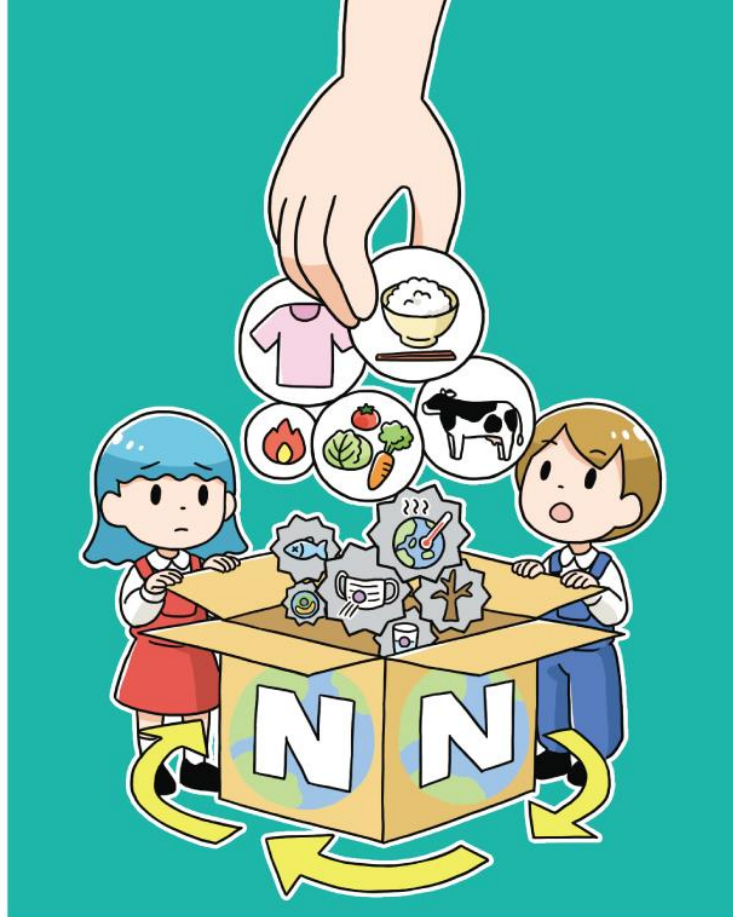
## 各主体間の情報共有と意見交換の促進を

- 窒素問題に関する知見・取り組みの共有と浸透
  - 日本窒素評価書：制作開始（日本語版と英語版）
  - ナラティブ：読み物，動画，インタラクティブコンテンツなど
  - 窒素コミュニケーション：科学者とサイエンスコミュニケーターの協働
- 情報共有と意見交換の促進 → 将来設計の枠組み
  - 行政・政策 ↔ 科学者・専門家
  - 生産者・消費者・企業など ↔ 科学者・専門家
  - 包括的枠組み：国際的にはUNEPの枠組み → 国内の枠組みも必要
  - 将来世代への継承・影響を考慮した議論：フューチャー・デザイン

# 本日の話題のまとめ

- **窒素問題**: 我々の窒素利用が窒素汚染を伴うトレードオフ
- **窒素の便益**: 化学肥料, 工業原料, エネルギー資源
- **窒素の脅威**: 環境への反応性窒素排出による多様なインパクト
- **世界の動き**: UNEPによる国際窒素管理の動きが本格化
- **国内の動き**: 各主体が各々の所掌・機能から問題に対処
- **今後の取り組み**
  - 主体間の情報共有と意見交換の枠組みの構築
  - ステークホルダーエンゲージメントの促進
  - 日本窒素評価書の制作や国際窒素会議の招致





↓ PDF版リーフレット

<https://www.chikyu.ac.jp/Sustai-N-able/achievements.html>

「Sustai-N-able」で  
検索すると出ます

総合地球環境学研究所 実践プログラム

**Sustai-N-able** 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



地球研実践プロジェクト  
2022～2027年度  
研究代表者：林 健太郎  
RIHN14200156

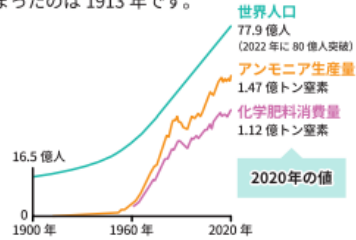
# 窒素問題の概要も伝えるリーフレット(会場に持参)

## Nrを手に入れて、世界は変わった

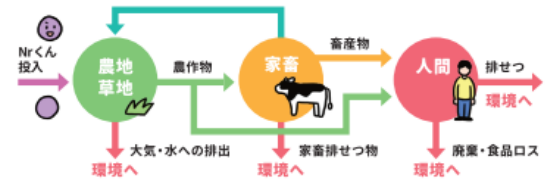


人類はどれだけのNrを使ってきたのでしょうか。ハーバー・ボッシュ法による商業生産が始まったのは1913年です。

1960年代からアンモニア生産と化学肥料の消費量が急速に伸び、現在まで続いています。窒素肥料が食料生産を増やして、世界人口の増加を支えてきたのです。



窒素肥料によって、農作物をたくさん作れるようになり、農作物を飼料とする畜産物もたくさん作れるようになりました。ところが、食料生産に投入するNrの多くが漏れています。投入した窒素のうち生産物に届く割合を窒素利用効率とよびます。世界の窒素利用効率は、農作物で50%、畜産物で5%~20%ほど。残りは、うまく循環させないと漏れてしまうのです。そして、同じ量のタンパク質を食べるならば、農作物より畜産物の方が環境にNrが漏れやすいのです。食べられるのに捨ててしまう食品ロスも、捨てた食品そのものを無駄にしますし、捨てた食品の生産に投入したNrも無駄になります。



漏れたNrの行き先は、大気、土壌、陸水、そして海洋です。漏れたあとは環境をぐるぐると巡り、Nrの種類に応じた影響が生じます。Nrは農業だけから漏れるわけではありません。快適な生活のためのエネルギー(熱・動力・電気)を得るために化石燃料を燃やしたり、廃棄物を燃やすと、窒素酸化物といわれるNrが大気に漏れます。排ガスや排水に含まれるNrは、処理によって悪さをしないN<sub>2</sub>に戻せます。ただし、処理にはコストがかかるため、無駄になるNrを減らすことが大切です。



## 窒素ってなんだろう



窒素は太陽系で5番目に多い元素です。元素記号は「N」、英語ではnitrogenと呼ばれます。

地球では、窒素原子が2個くっついた窒素ガス(N<sub>2</sub>)が大気の78%を占めます。タンパク質やDNAの素材として、窒素は生き物に必要な元素なのです。人体の重さの約3%は窒素でできています。しかし、たくさんあるN<sub>2</sub>は安定で何もしません。生き物が見える形の反応性窒素(Nr)が必要なのです。Nrにはたくさんの種類があります。



生態系では微生物がN<sub>2</sub>からNrを作り出します。植物はNrを吸収して育ちます。草食動物は植物を食べ、肉食動物は草食動物を食べ、Nrを取り入れています。排せつ物や遺体に含まれるNrを分解して、最後にはN<sub>2</sub>に戻すのも微生物です。

人類もまた、このNrを循環させて暮らしてきました。かつての農業も、下肥、魚肥、堆肥などの有機物に含まれるNrを使っていたのです。

## 足りなくなってきた反応性窒素(Nr)

地球の人口は次第に増えていきます。食料がもっと必要になります。どうすれば食料をたくさん作れるでしょう。肥料です。農作物の肥料になるNrが欲しいのです。



20世紀初期に、N<sub>2</sub>からNrの仲間のアンモニアを人工的に造り出す技術(ハーバー・ボッシュ法)が開発されました。化学肥料を望むだけ合成できるようになったのです。

Nrには肥料以外の用途もあります。例えば、ナイロン、ウレタン、火薬・爆薬などの工業原料だったり、燃料という新しい用途も注目されています。



**Sustain-N-able 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

- 2020年度 インキュベーション研究
- 2021年度 予備研究
- 2022年度 プレリサーチ
- 2023~2027年度 フルリサーチ

プロジェクトリーダー 林健太郎(総合地球環境学研究所)

自然循環班 班長 木庭啓介(京都大学)

人間社会班 班長 松八重一代(東北大学)

経済評価班 班長 栗山浩一(京都大学)

将来設計班 班長 林健太郎(兼任)



Sustain-N-able プロジェクトウェブサイト  
に、プロジェクトおよび窒素に関する様々な情報を載せています。  
ぜひご覧ください。

<https://www.chikyu.ac.jp/Sustain-N-able/index.html>

〒603-8047 京都市北区上賀茂本山 457 番地 4  
Tel: 075-707-2315  
Mail: rihn.susn@chikyu.ac.jp

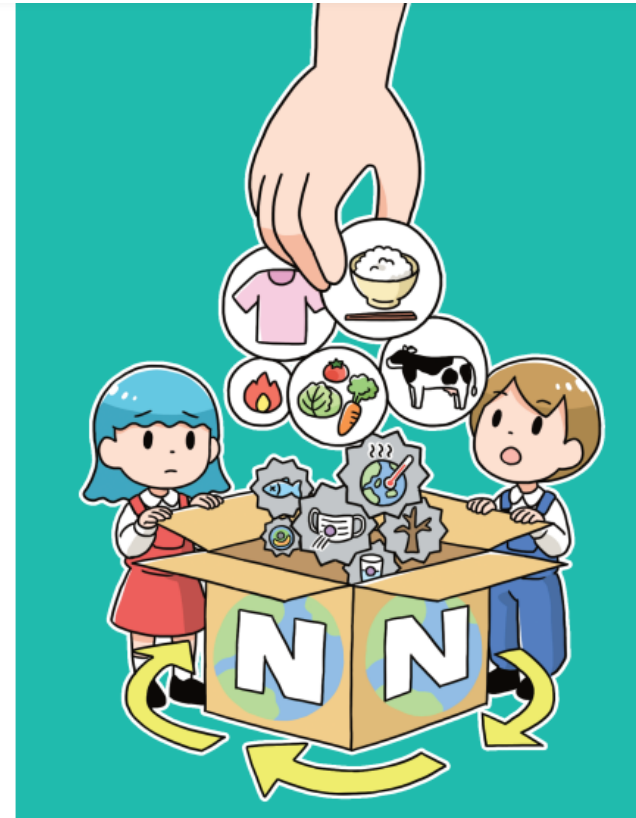


Research Institute for  
**Humanity and Nature**  
大学共同利用共同研究法人  
人間文化研究機構 総合地球環境学研究所

制作(50音順): 浅野真希・梅澤有・木村文子・齋木真琴・館野陸之輔・林健太郎・尾藤環・皆木香渚子

イラストレーション: 中林まどか

2023年4月

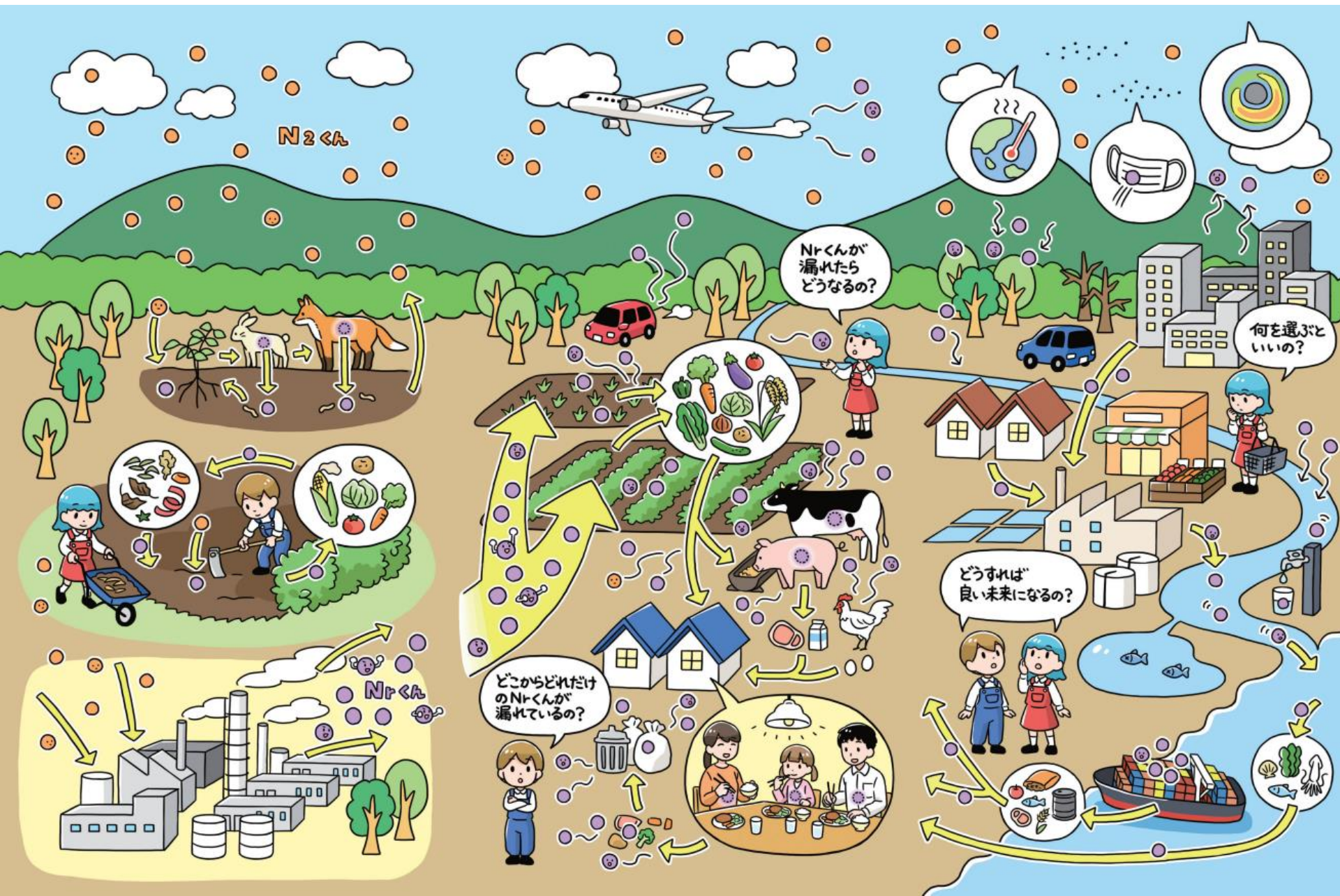


総合地球環境学研究所 実践プログラム

## Sustain-N-able 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





**反応性窒素 (Nr) が漏れると、何が起るのか**

**地球温暖化**

Nrの仲間の一酸化二窒素 (N<sub>2</sub>O) は、二酸化炭素の300倍近い温室効果をもち、地球温暖化の原因となります。

**成層圏オゾン破壊**

Nrの仲間のN<sub>2</sub>Oには、成層圏に入るとオゾンを破壊して地上に到達する紫外線を増やすたらしきもあります。

**大気汚染**

Nrの仲間の窒素酸化物や、Nr由来の細かい粒子も含むPM2.5(微小粒子状物質)などは、呼吸器に有害です。

**水質汚染**

Nrの仲間の硝酸性窒素などは、チアノーゼ症や変異原性などの健康影響をもたらす可能性があります。

**富栄養化**

Nrが陸域や水域に入ると、窒素栄養が豊富になって生物多様性や生態系が変化したり、ひどい場合には生き物が死滅します。

**酸性化**

Nrの仲間の硝酸などは、土壌や陸水を酸性にするはたらきがあり、ひどい場合には生き物が被害が及びます。

**Sustai-N-able プロジェクトの取り組み**

自然循環班	人間社会班
<p><b>Q1</b> Nrくんが漏れたらどうなるの?</p> <p>Nrが漏れることで起こる大気・水・土壌の変化、その変化が人や自然に及ぼす影響、そして、自然がもつNrをN<sub>2</sub>に戻す能力を明らかにしていきます。</p>	<p><b>Q2</b> どこからどれだけのNrくんが漏れているの?</p> <p>食料・モノ・エネルギーの生産・消費において、どこからどんなNrがどれだけ漏れているのかを明らかにし、窒素フットプリントのような私たちの暮らしの指標や、将来の窒素利用のシナリオを作っていきます。</p>
経済評価班	将来設計班
<p><b>Q3</b> 何を選ぶといいの?</p> <p>消費者の食料選択や農家さんの食料生産において、Nrがもたらす環境影響への対策がどのくらい重視されているのかを明らかにし、持続可能な食と農業を考えていきます。</p>	<p><b>Q4</b> どうすれば良い未来になるの?</p> <p>Nrが私たちの暮らしを支えつつも環境に影響を及ぼしていることを多くの人たちに知ってもらい、将来の世代が幸せにNrを使っていく仕組みを皆さんと一緒に考えていきます。</p>



大学共同利用機関法人 人間文化研究機構 総合地球環境学研究所

# Humanity & Nature

RIHN

## Newsletter

地球研ニュース

No.89  
August 2023

今号の特集

P2 特集1  
プロジェクトリーダーに迫る！  
「あたりまえにある」  
ゆえに見えにくい窒素のこと

林健太郎  
阿部健一

P12 特集2  
「ほろ酔い地球研」その参…… 動画制作編  
広報と研究が織りなす  
情報発信  
メイキング・オブ「ラボストーリー」

木村 英 + 寺本 颯 + 由水 千景  
三村 豊

連載 P11 晴れときどき書評  
「環境問題を(見える化)する——映像・対話・協働」…… 大谷 通高

P16 表紙は語る…… 林 健太郎



### 特集1

#### プロジェクトリーダーに迫る！

### 「あたりまえにある」ゆえに見えにくい窒素のこと

研究プロジェクト@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

話し手●林 健太郎(教授)

聞き手●阿部 健一(教授)

太陽系で5番目に多い窒素元素。空気の8割は窒素ガス。地球に暮らす生きものにとって窒素は、タンパク質やDNAの素材として欠かせない。食物の肥料、工業・産業製品の原料、燃料として便益をもたらす一方で、あらゆる環境問題の裏側には窒素がからみ、人間の都合なき窒素利用がもたらす窒素汚染はじわじわと人と自然の健康を蝕んでいる。「窒素を見ずして地球の未来は語れない。複雑にからむ窒素循環の全体像を見なければ、環境問題は解決できない」と論ずる林さん。プロジェクトの略称「Sustai-N-able」の真ん中に「窒素(N)」を配した覚悟が見えてきた

阿部●2022年度からはPRとして、いよいよ本格的にプロジェクトが始まりましたね。要覧にはプロジェクトの概要が記されていますし、IS(インキュベーション研究)からFS(予備研究)、PR(プレリサーチ)と段階を追うなかで、プロジェクトの概要について話を聞く機会があったのですが、いまだに要領を得ない。窒素問題がテーマですが、プロジェクトとしてなにをしようとしているのか、わかりにくいところがあります。

まず、窒素が大きな環境問題だということは、じつはわれわれ地球研にいる研究者にもあまり浸透していない。

林●そうですね。ISやFSの段階から、つねに問われていたんです。「窒素のなにが問題なのかわからない」と(笑)。阿部さんからもなんどもお尋ねいただいて、それに答えて、そのときは「わかったような気がする」と言われるのですが、そのあとまた、「よくわからん」のくり返し。(笑)

阿部●窒素問題の奥が深いからでしょうか、底なしの沼に入った気がしました。

林●私は最近、農水省、環境省、経済省、国交省をまわって説明する機会があったのですが、みなさんおしなべて同じような反応をされるのです。ある意味、当然だとも思っています。それゆえなのかなを、これからお話ししようと思います。

阿部●ようやく話が抜け出せる。(笑)



阿部 健一

#### 「あたりまえにある窒素」を私たちはどれだけ知っているだろうか

林●窒素はとてもだいで、必要なものですが、そもそもそこがわかってもらえていないのです。

たとえば生きものであれば、タンパク質やDNAなどをつくるのに窒素が必要です。私たちはその窒素を「食べる」ことで摂り入れるしかなく、その食べものをつくるには、肥料になる窒素が必要です。植物も窒素がないと体をつくれず、光合成に必要な酵素も、窒素がないとつくれないからです。

阿部●なるほど。生物多様性がいかに大切かということも、私たちは一瞬懸命に伝えますが、なかなか一般の人にはわかってもらえないのと同じですね。「高校生にわかるように」というのは、地球研初代所長の日高敏隆さんの言葉ですが、あたりまえのことを伝えるのはけっこうむずかしい。窒素は「あたりまえにだじ」なのですね。

林●そうですね。日々呼吸しているのと同じです。私たちが吸っている空気の78%が窒素です。

#### なにもしない窒素と利用できる窒素

阿部●窒素は身近にありふれていて、しかも、人間の体のかなりの部分は、窒素からつくられるタンパク質。それなのに、窒素のなにが問題なのかを知らない。

林●じつは窒素には2種類あります。一つは、私たちが取り囲んでいる空気中にある、良い意味でも悪い意味でも「なにもしない窒素」。この不活性な窒素を「窒素ガス」といいます。なにもしないといっても、空気が窒素だけになったら、私たちは窒息して死にます。これが「窒素」の名称の由来です。

阿部●窒素って、窒息からきているのか。

林●ドイツ語ではStickstoff、窒息物質という意味で、それをそのまま日本語に訳したのです。この「なにもしない窒素」は、その存在さえ知られていなかった。18世紀後半まで、人類の発見を逃れてきた物質です。阿部●だから、問題だといっても、なかなか通じない。(笑)

林●そうですね。あまりにも周りにありすぎるし、ほんとうになにもしない。呼吸しても、ただ体に入って出ていだけで、筋肉がつかたりはしない。だから私たち動物は、「利用できる窒素」を食べなくてはならない。動物であればタンパク質やアミノ酸、植物ならアンモニアや硝酸などの窒素化合物を取り入れる。

阿部●その「利用できる窒素」は、不活性窒素に対して、活性窒素？

林●「反応性窒素(Nr: reactive nitrogen)」とよんでいます。いろいろな種類があるのですが、大きく分けて、窒素元素(N)が2つあった窒素ガス(N<sub>2</sub>)以外をすべてNrとしています。

じつは空気中にはNrもわずかに入っているのです。直径1mの風船からN<sub>2</sub>だけを集めると直径92cm、Nrだけを集めるとわずか0.7cmくらい。生きものは、このわずかなNrがほしいのです。そして、このNrこそが、生態系の物質めぐりを決めているのです。

