

ENEX2023

火力発電分野における物質循環 — 炭素循環と窒素循環 —

東京ビッグサイト

2023年2月3日

一般財団法人 電力中央研究所

エネルギートランスフォーメーション(EX)研究本部

森田 寛

Ⓜ 電力中央研究所



SDGs視点からの 物質循環(C, H, N)

持続可能な17の開発目標(SDGs)*と物質循環

SUSTAINABLE DEVELOPMENT GOALS



カーボン (C) だけではなく、
化石燃料 (CHNS+Ash) の物質循環を視野に入れるべきでは？

C：炭素、H：水素、N：窒素、S：硫黄、Ash：灰

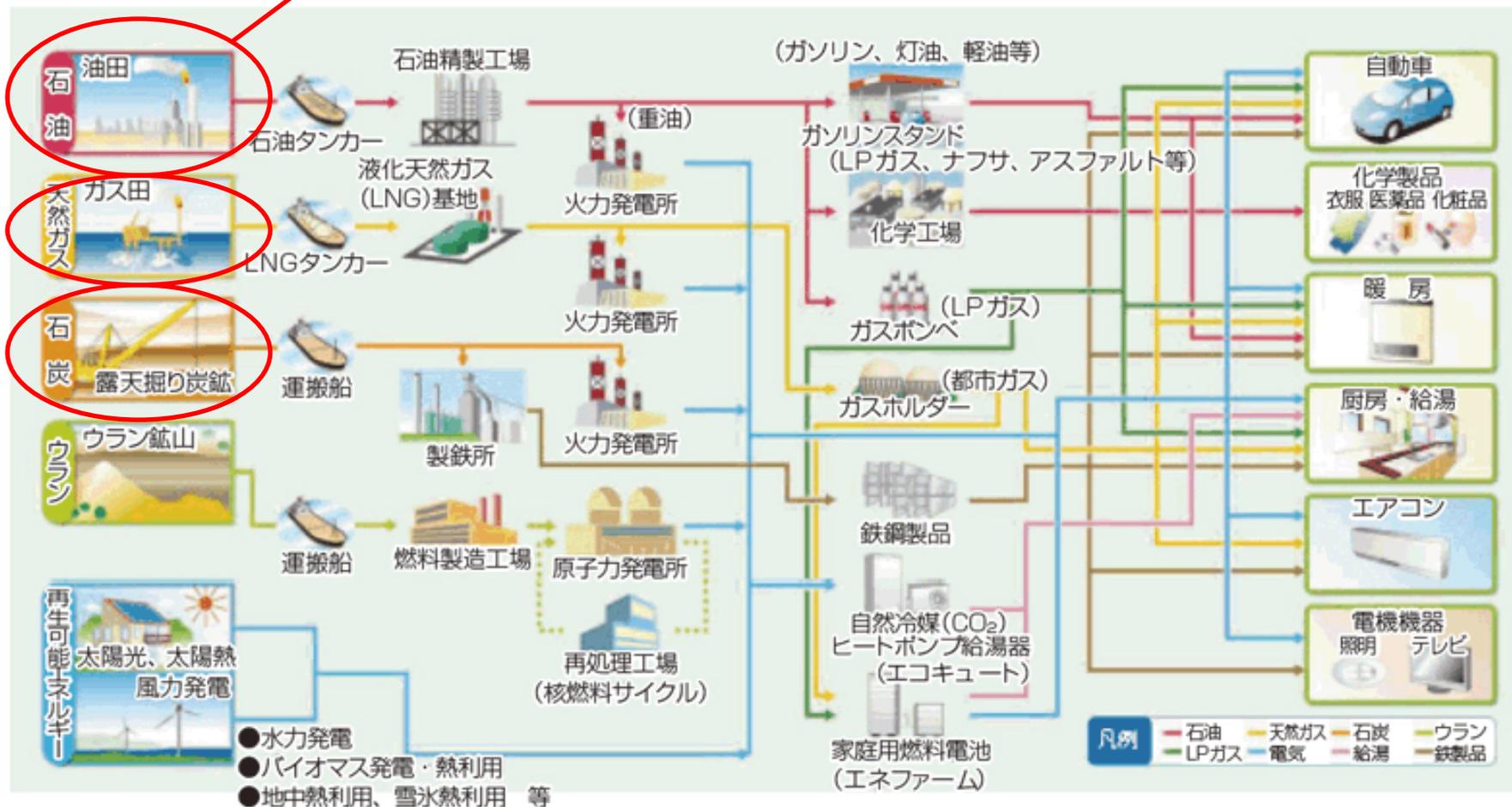
* 2015年9月 国連サミットにおいて採択

カーボンリサイクル(CR:CO₂循環)

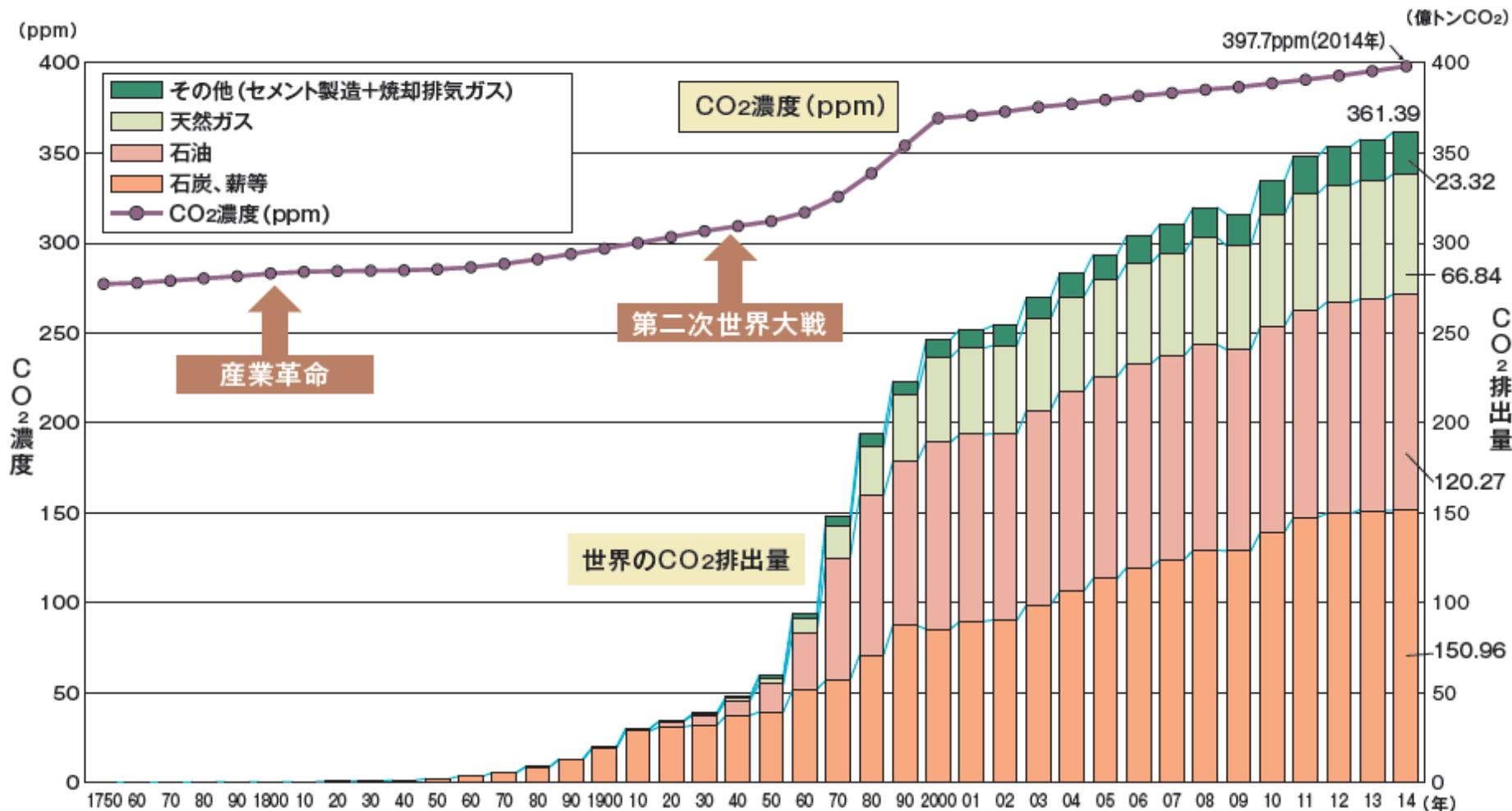
【炭素循環】

エネルギー資源の供給過程と利用形態

化石燃料→消費（燃焼）→CO₂が発生

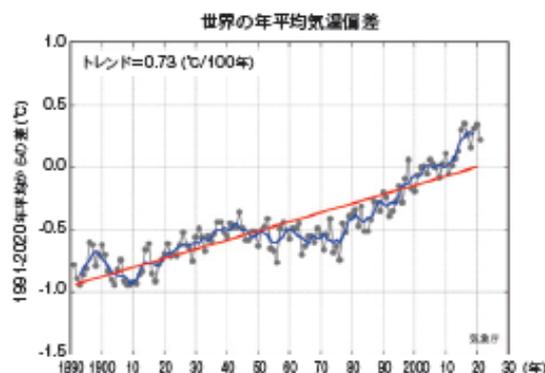


化石燃料等からのCO₂排出量と大気中のCO₂濃度の変化



平均気温の変化

世界の年平均気温の偏差(1891~2021年)



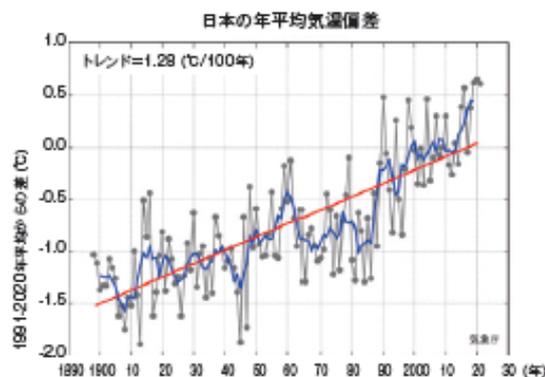
折線(黒)：各年の基準値からの偏差(1991~2020年平均からの差)
(2021年は偏差+0.22℃)

折線(青)：偏差の5年移動平均

直線(赤)：長期的な変化傾向
(100年あたり約0.73℃の割合で上昇)

基準値は1991~2020年の30年平均値

日本の年平均気温の偏差(1898~2021年)



折線(黒)：国内15観測地点*での基準値からの偏差
(2021年は平均差+0.61℃)

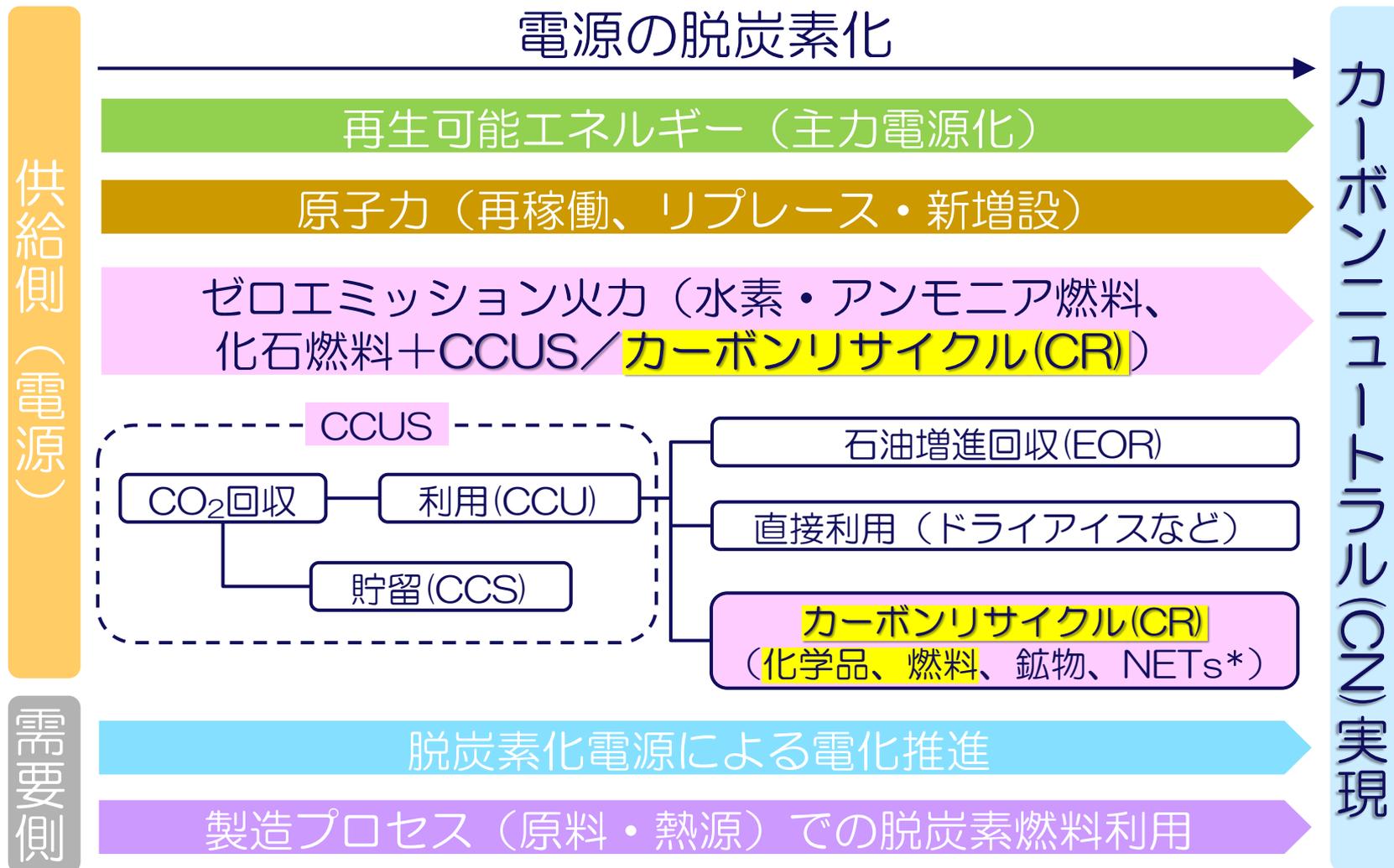
折線(青)：偏差の5年移動平均

直線(赤)：長期的な変化傾向
(100年あたり約1.28℃の割合で上昇)

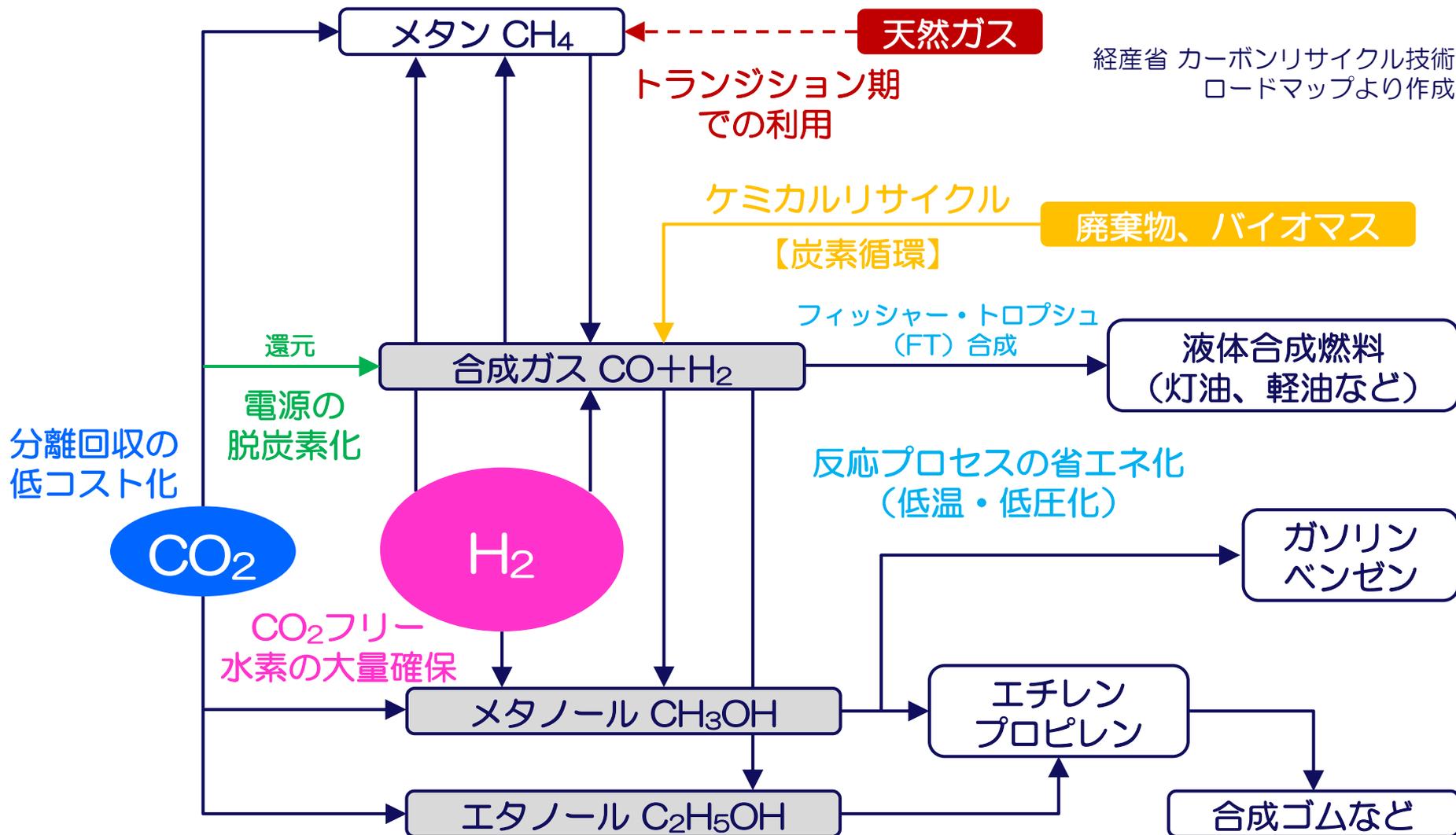
基準値は1991~2020年の30年平均値

※15観測地点:網走、根室、寿都、山形、石巻、伏木、飯田、銚子、境、浜田、彦根、宮崎、多度津、名瀬、石垣島

電気事業におけるCR技術の位置付け



CO₂利用のフロー図(化学品、燃料)

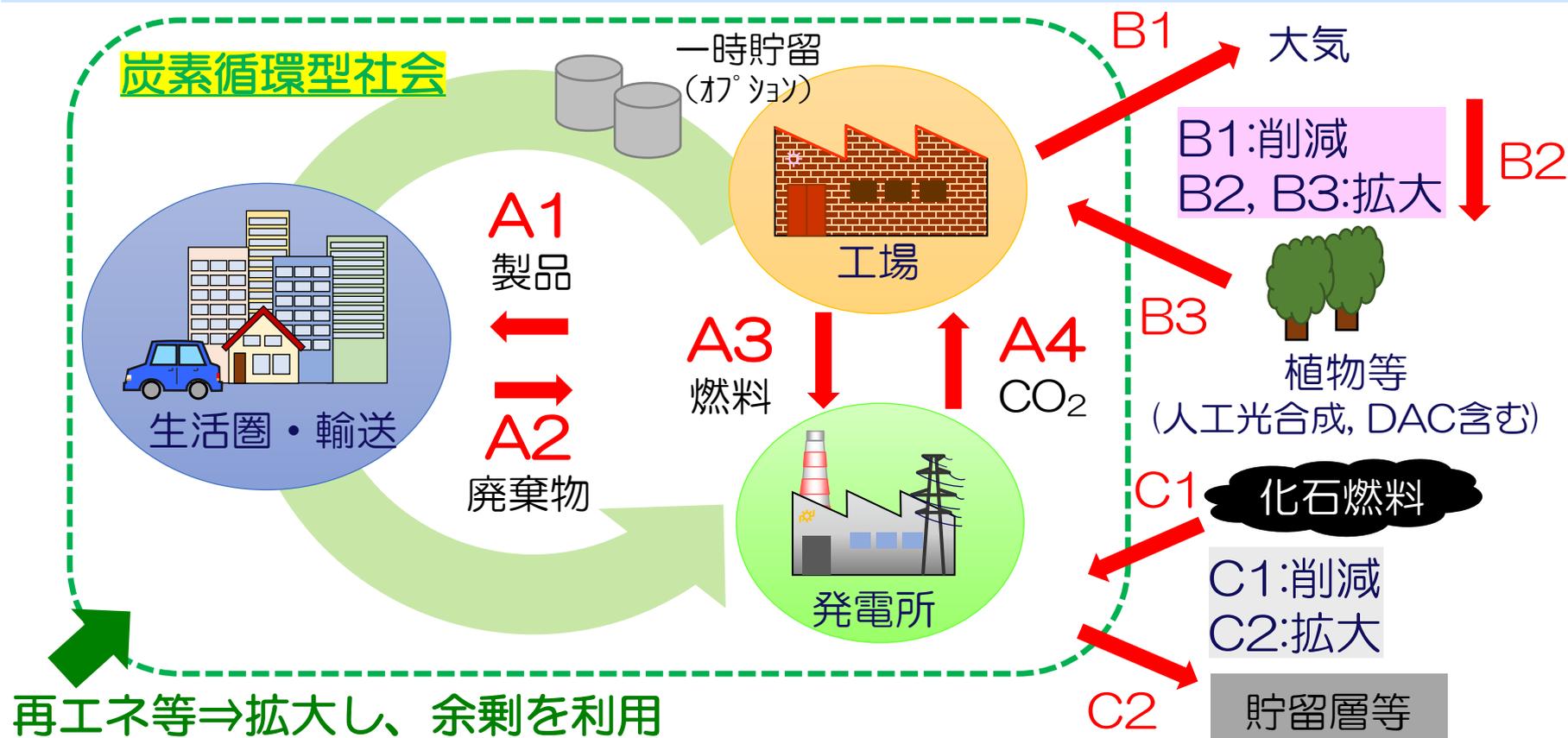


EX研究本部における現状のCR関連研究

実施内容	実施項目
<p>【石炭ガス化技術の分野拡大】 炭素循環型社会に寄与する廃棄物再資源化・ポリジェネレーション技術の調査、開発</p>	<p>CO₂回収型ポリジェネレーションシステム 炭素循環型ガス化技術 廃棄物再資源化技術</p>
<p>【SOFC評価技術の分野拡大】 固体酸化物形燃料電池/電解（SOFC/SOEC）を活用した需給調整用セルの開発</p>	<p>SOFC評価技術 SOFC/SOECリバーシブル技術</p>
<p>【これまでの研究で得た知見をバイオマスへ展開】 バイオマスにおける新規変換技術の開発（高機能成分の分離、炭素隔離としての炭化物、炭化物燃料による燃料電池）</p>	<p>バイオマス成分分離技術 バイオマス炭化物による炭素隔離技術 電気化学的炭素資源有効利用技術</p>

炭素循環型社会に寄与するガス化技術のイメージ

- ✓ 炭素はこれからも社会にとって重要な元素
- ✓ 循環させて大気への排出を削減するには、様々な技術(A1~C2)が必要
- ✓ ガス化技術は、B2(光合成)を除く全ての経路に貢献可能



CO₂回収型ポリジェネレーションシステム

石炭、廃棄物、バイオマスを用いてCO₂を回収しながら高効率に発電し、かつ有価物も併産することで、CO₂分離・回収コストも低減する需給調整機能付きCO₂回収型ポリジェネレーションシステムの開発

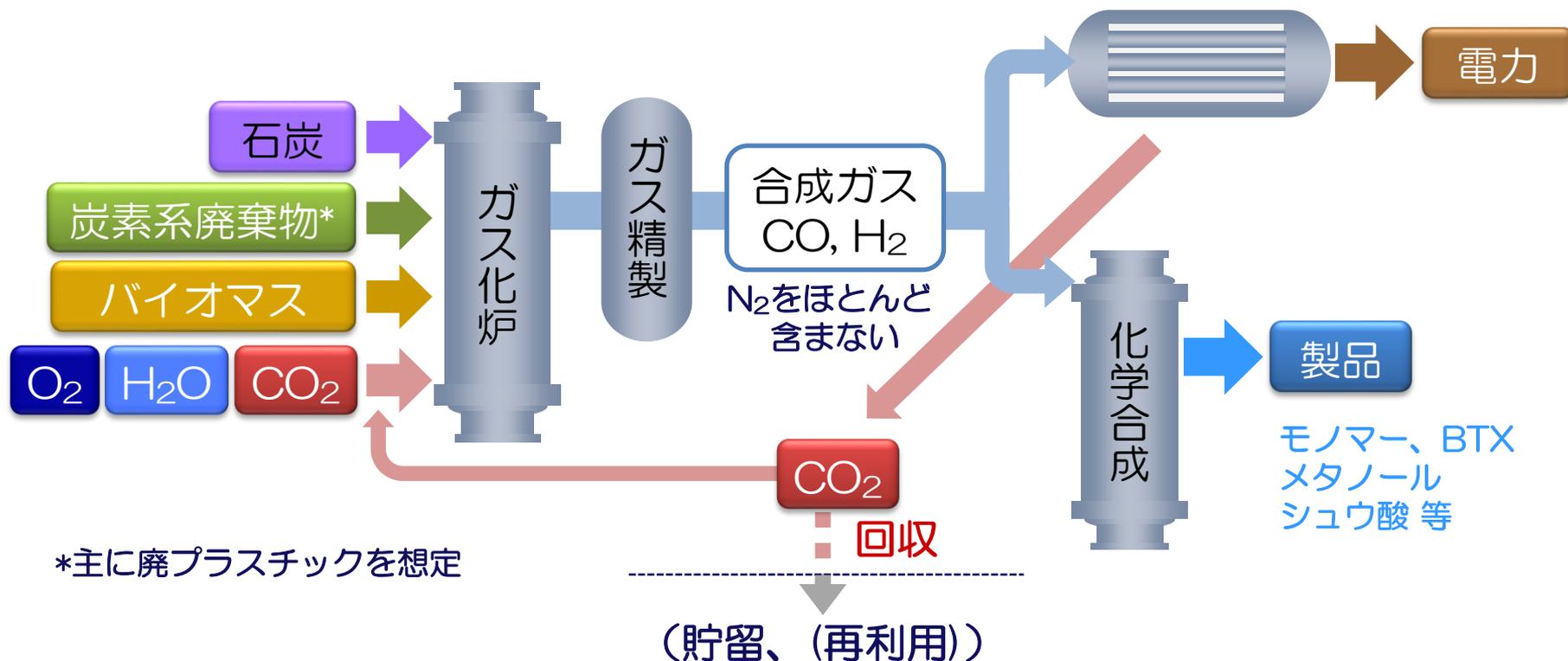


図 CO₂回収型ポリジェネレーションシステムの概要

SOFC/SOECリバーシブルセルによる需給調整

固体酸化物形燃料電池（SOFC：発電モード）を逆反応となる固体酸化物形電解（SOEC：負荷モード）としても活用し、需要と供給の両面から調整が可能となる低炭素なエネルギー変換機器の開発

SOFC/SOECの動作原理とは？

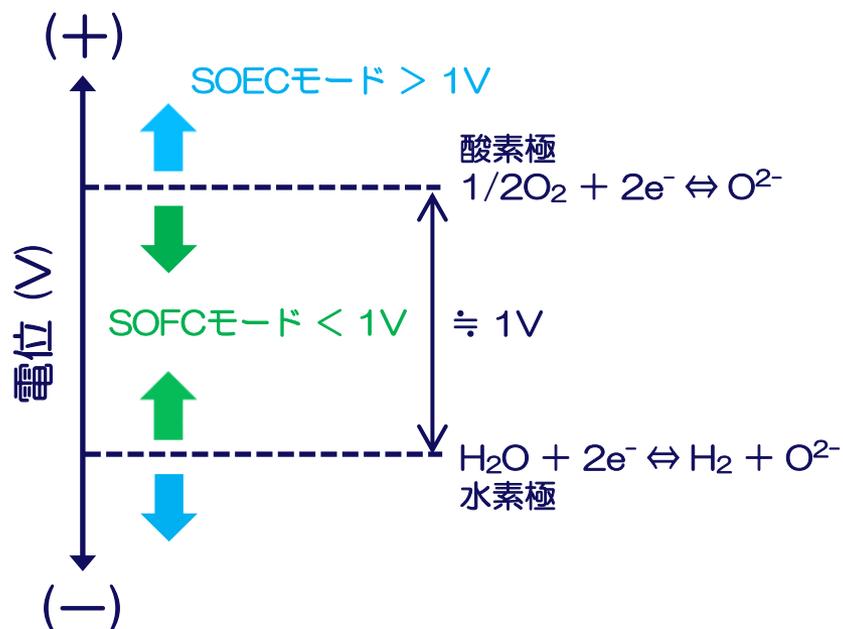
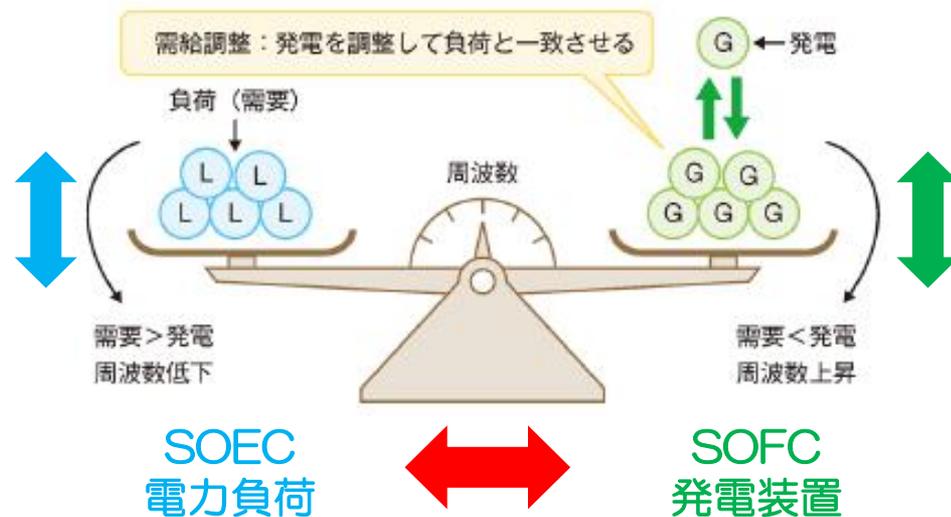


図 SOFC/SOECの動作電位イメージ

SOFC/SOECによる需給調整とは？



リバーシブルに使える固体酸化物形セル (rSOC)

図 需要と発電の周波数調整イメージ

SOFC/SOECリバーシブル技術

SOFC/SOEC需給調整システムにおいては、CO₂を有効利用（カーボンリサイクル）するとともに、蓄電池よりも長い時間軸での調整力市場をターゲット

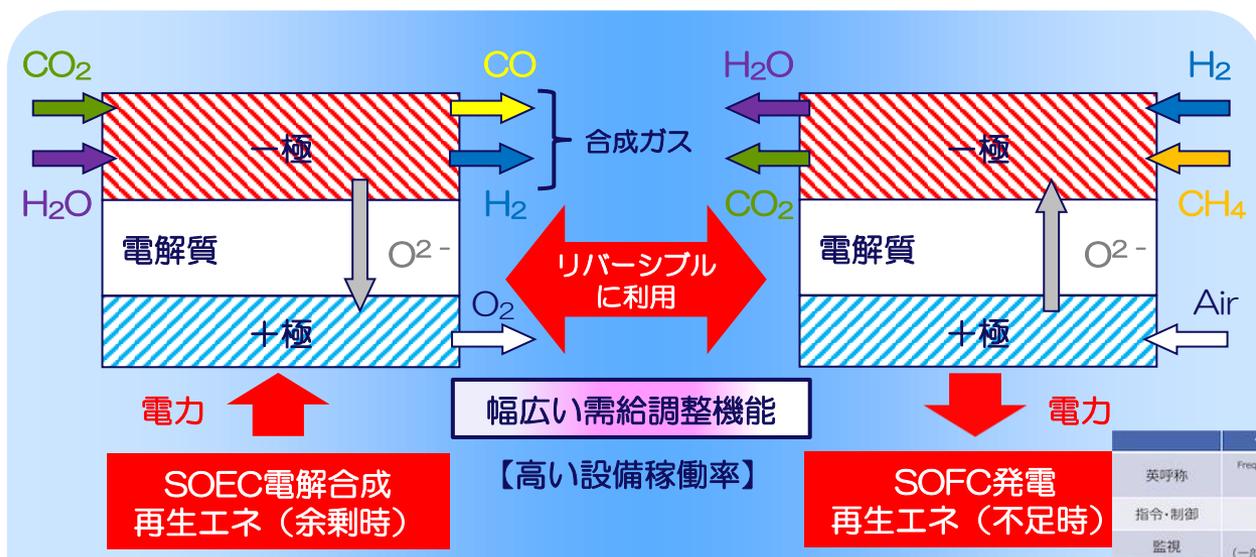


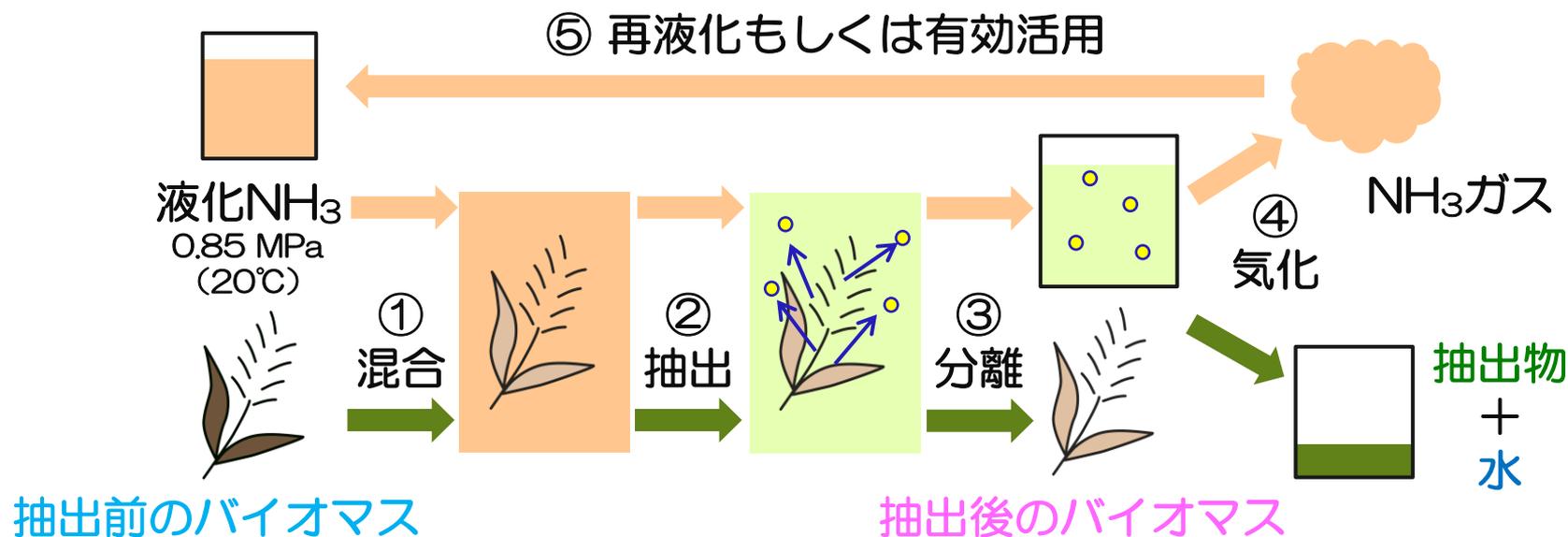
表 需給調整市場における商品の要件*

	一次調整力	二次調整力①	二次調整力②	三次調整力①	三次調整力②
英呼称	Frequency Containment Reserve (FCR)	Synchronized Frequency Restoration Reserve (S-FRR)	Frequency Restoration Reserve (FRR)	Replacement Reserve (RR)	Replacement Reserve-for FIT (RR-FIT)
指令・制御	オフライン（自働制御）	オンライン（LFC信号）	オンライン（EDC信号）	オンライン（EDC信号）	オンライン
監視	オンライン（一部オフラインも可 ^{※2} ）	オンライン	オンライン	オンライン	オンライン
回線	専用線 ^{※1} （監視がオフラインの場合は不要）	専用線 ^{※1}	専用線 ^{※1}	専用線 または 簡易指令システム	専用線 または 簡易指令システム
応動時間	10秒以内	5分以内	5分以内	15分以内 ^{※3}	45分以内
継続時間	5分以上 ^{※3}	30分以上	30分以上	商品ブロック時間(3時間)	商品ブロック時間(3時間)
並列要否	必須	必須	任意	任意	任意
指令間隔	-（自働制御）	0.5～数十秒 ^{※4}	数秒～数分 ^{※4}	専用線：数秒～数分 簡易指令システム：5分 ^{※6}	30分
監視間隔	1～数秒 ^{※2}	1～5秒程度 ^{※4}	1～5秒程度 ^{※4}	専用線：1～5秒程度 簡易指令システム：1分	1～30分 ^{※5}
供出可能量（入札量上限）	10秒以内に出力変化可能な量（機器性能上のGF幅を上限）	5分以内に出力変化可能な量（機器性能上のLFC幅を上限）	5分以内に出力変化可能な量（オンラインで調整可能な幅を上限）	15分以内に出力変化可能な量（オンラインで調整可能な幅を上限）	45分以内に出力変化可能な量（オンライン/簡易指令システムも含む）で調整可能な幅を上限）
最低入札量	5MW（監視がオフラインの場合は1MW）	5MW ^{※1,4}	5MW ^{※1,4}	専用線：5MW 簡易指令システム：1MW	専用線：5MW 簡易指令システム：1MW
刻み幅（入札単位）	1kW	1kW	1kW	1kW	1kW
上げ下げ区分	上げ/下げ	上げ/下げ	上げ/下げ	上げ/下げ	上げ/下げ

図 リバーシブル運転による需給調整概要

バイオマス成分分離技術

- ✓ アンモニアによる新たなバイオマス成分分離技術
- ✓ 液化アンモニア (NH₃) の相変化 (気体と液体) を用いることで、水の蒸発を伴わずエネルギー消費が少ない常温でのプロセスを構築



- ① 液化アンモニアとバイオマスを混合
- ② バイオマスに含まれる成分と水を抽出
- ③ 抽出後のバイオマスと液化アンモニアを分離
- ④ 液化アンモニアを気化
- ⑤ アンモニアガスを再液化

☒ 液化アンモニアを用いてバイオマスに含まれる成分を分離するイメージ

バイオマス炭化物による炭素隔離技術*

- ✓ ネガティブエミッションとしてのバイオマスによる炭素隔離
- ✓ 炭化処理によりバイオマスの腐敗を抑制、固定炭素分を土壌にすき込み
- ✓ 低コストで地産地消に適したネガティブエミッション技術 (NETs)

図 バイオマス炭化物による炭素固定技術のイメージ

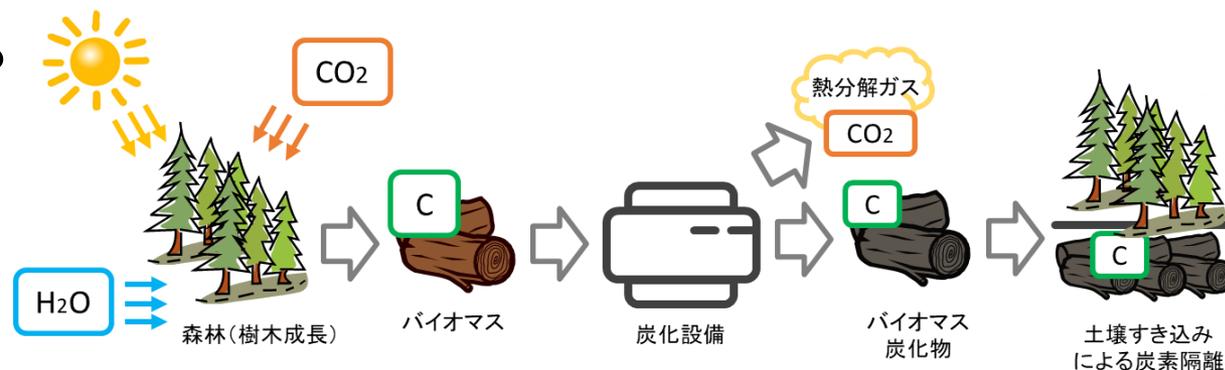


表 他のNETsとの比較

項目		単位	BESCS	BECCS ^a	DACCS ^b (HT)	DACCS (LT)
入力	電力	kWh/t-CO ₂	45	336	852	800
	熱	kWh/t-CO ₂	13	0	1,702	1,547
出力	電力	kWh/t-Bio	268	753	-	-
バイオマス最低必要量		t-Bio/日	2	170	-	-
コスト		\$/t-CO ₂	30~120	100~200	200~300	

a : バイオエネルギーCCS (BioEnergy with Carbon Capture and Storage)

b : 直接大気回収CCS (Direct Air Carbon Capture and Storage)

電気化学的炭素資源有効利用技術

- ✓ 未利用バイオマス中の固定炭素分を有効利用する技術
- ✓ 既存の小型バイオマス発電システムでは、発電効率や小規模化に限界
- ✓ バイオマス利用拡大を意図したダイレクトカーボン燃料電池（DCFC*）の開発



図 DCFCの社会実装イメージ

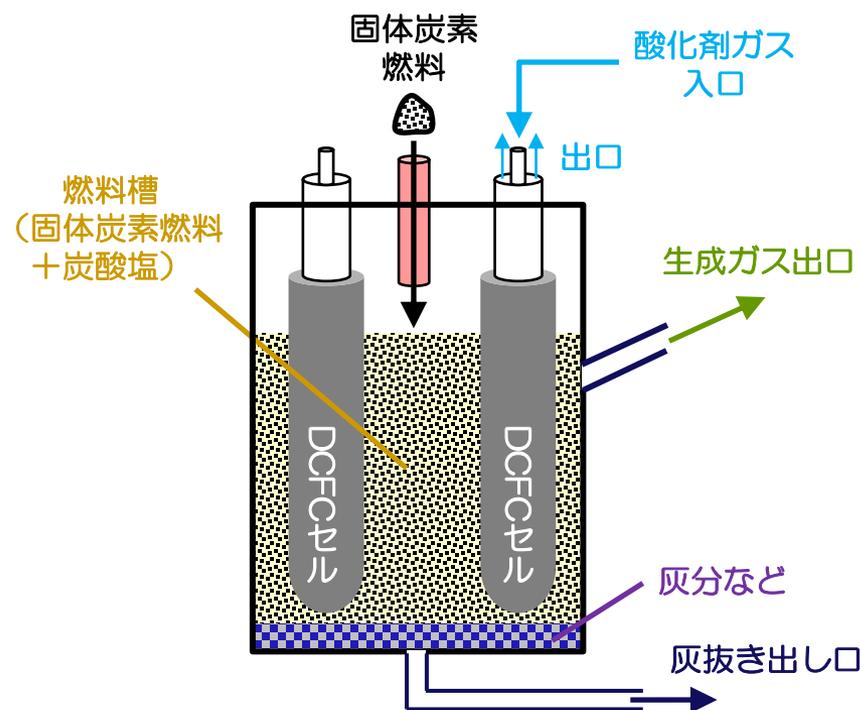
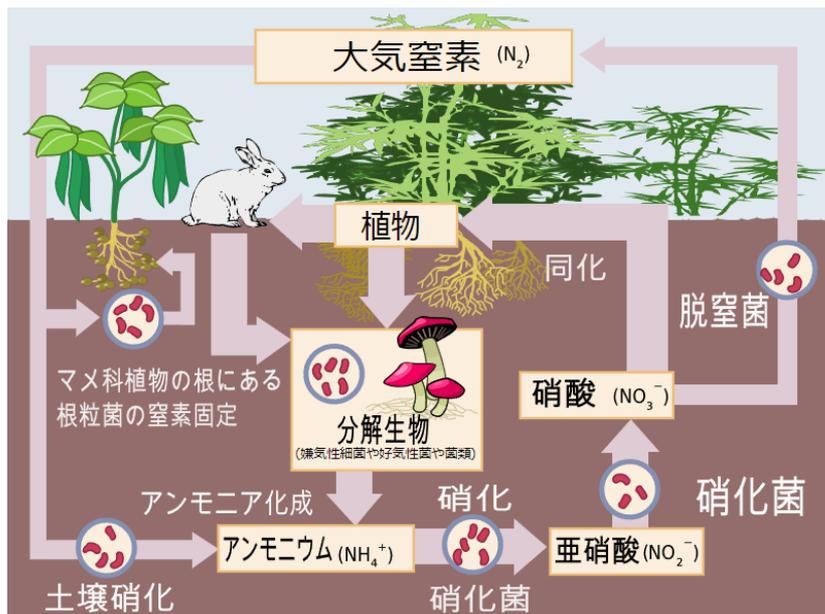


図 円筒形DCFCのイメージ図

【窒素循環】

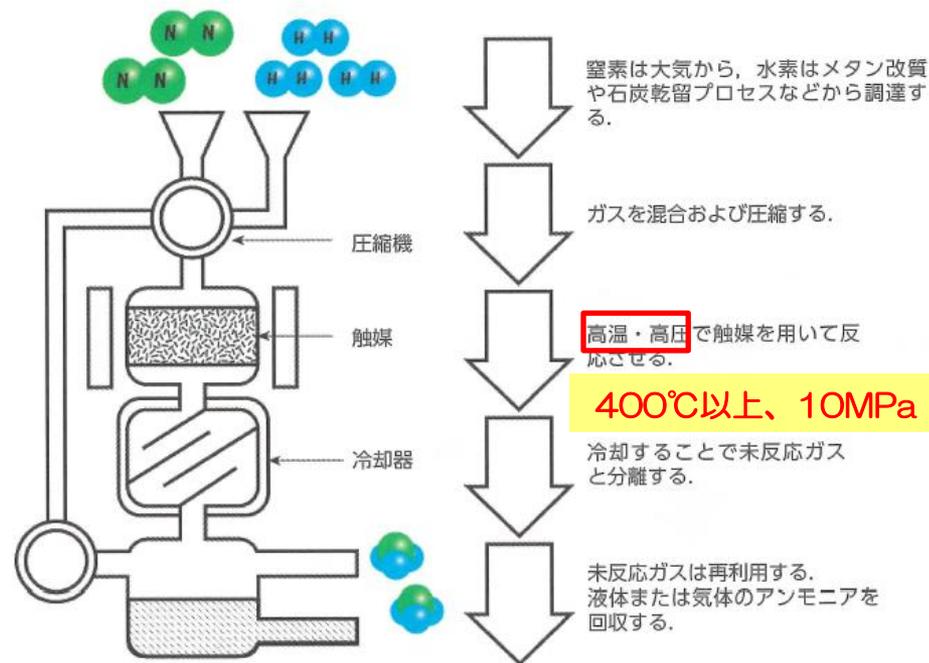
窒素循環とは？

- ✓ 窒素：生物に不可欠な元素であり、あらゆる産業に深く関与
- ✓ 窒素固定：不活性な窒素分子 (N_2) を他の窒素化合物（反応性窒素）に変換するプロセス
- ✓ 窒素循環：窒素がどのように移動するかを表す生物地球化学的循環の一部



自然界での窒素循環（例：陸域生態系）

窒素循環 - Wikipedia



人為的な窒素固定（ハーバー・ボッシュ法）

出典：図説窒素と環境の科学

2億t-N/年
（≒自然界での窒素固定量）

地球規模での窒素循環の状況

- ✓ 反応性窒素が環境中に流出、地球上に蓄積し、環境汚染が拡大
- ✓ 窒素の生物地球化学的循環は、既に高リスク状態

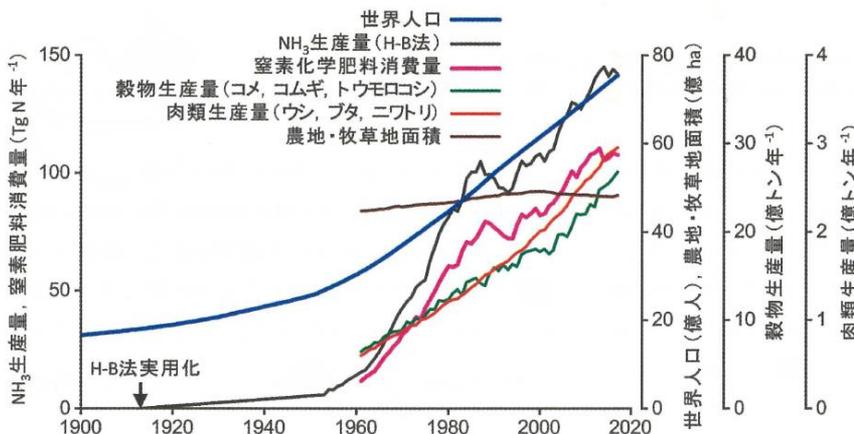
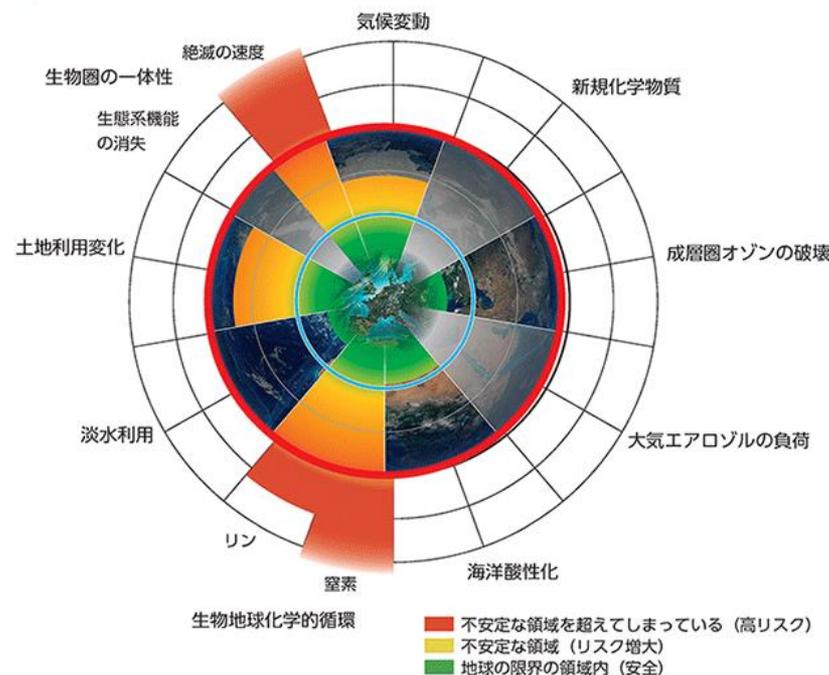
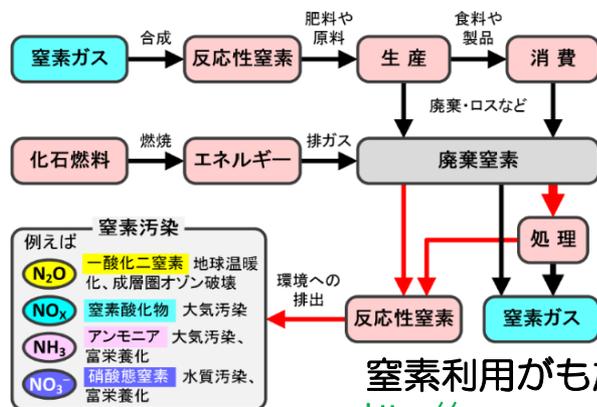


図1-1-1 地球の限界（プラネタリー・バウンダリー）による地球の状況



ハーバー・ボッシュ法と世界人口 出典：図説窒素と環境の科学



窒素利用がもたらす窒素汚染

https://www.naro.go.jp/publicity_report/press/laboratory/niaes/143545.html

プラネタリー・バウンダリーにおける地球の状況

<https://www.env.go.jp/policy/hakusyo/h30/html/hj18010101.html>

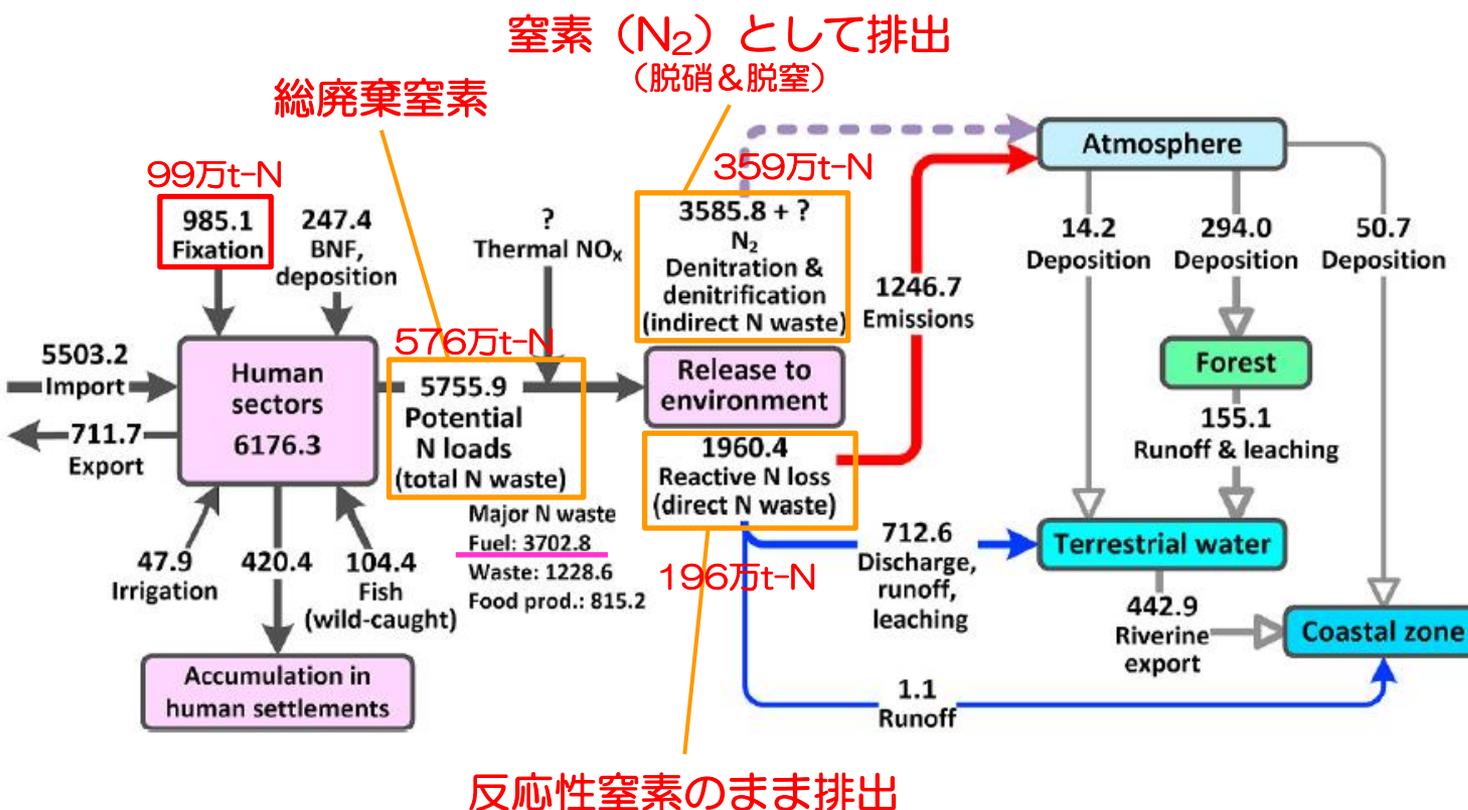
日本の廃棄窒素フロー（2010年）*

総廃棄窒素（576万t-N/年）の内訳では、燃料由来が最も多く（370万t-N/年）

- ✓ 359万t-N：62%が窒素（N₂）に無害化处理されて大気に排出
- ✓ 196万t-N：34%が反応性窒素のまま環境中に排出（大気：水域 ≒ 2：1）

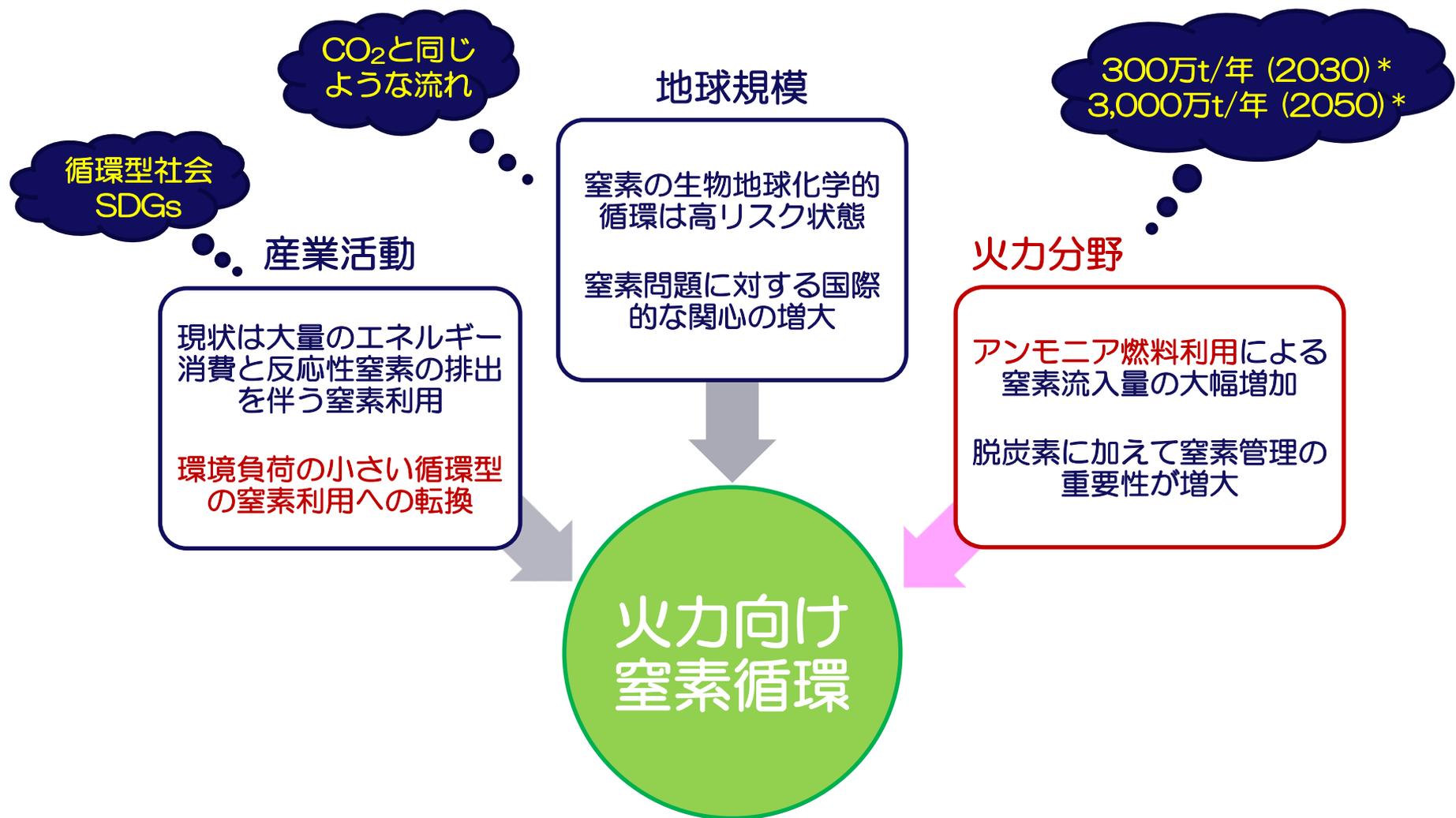
単位：Gg-N/年

1000Gg=100万t



- : 人間活動に関わる反応性窒素の収支
- : 大気に関わる反応性窒素の収支
- : 水域に関わる反応性窒素の収支
- : 大気に関わる窒素
- : 環境中の窒素

火力分野における窒素循環の意義



石炭火力における排煙処理設備

プラント構成図出典：火力原子力発電 Vol.65 No.2 (2014)

将来
分解（脱硝）せず、
NH₃等に変換
【資源化】

現状
NH₃を還元剤として
N₂に分解（脱硝）
【無害化】

【機器名称】
AH : 空気予熱器
IDF : 誘引通風機
FDF : 押込通風機
PAF : 一次通風機

EP : 電気集じん装置(低低温)
GGH : ガスガスヒータ
SAH : 蒸気式空気予熱器
BUF : 脱硫ファン



フライアッシュ
(セメント原料等)

脱硫石膏
(石膏ボード等)



【循環利用】

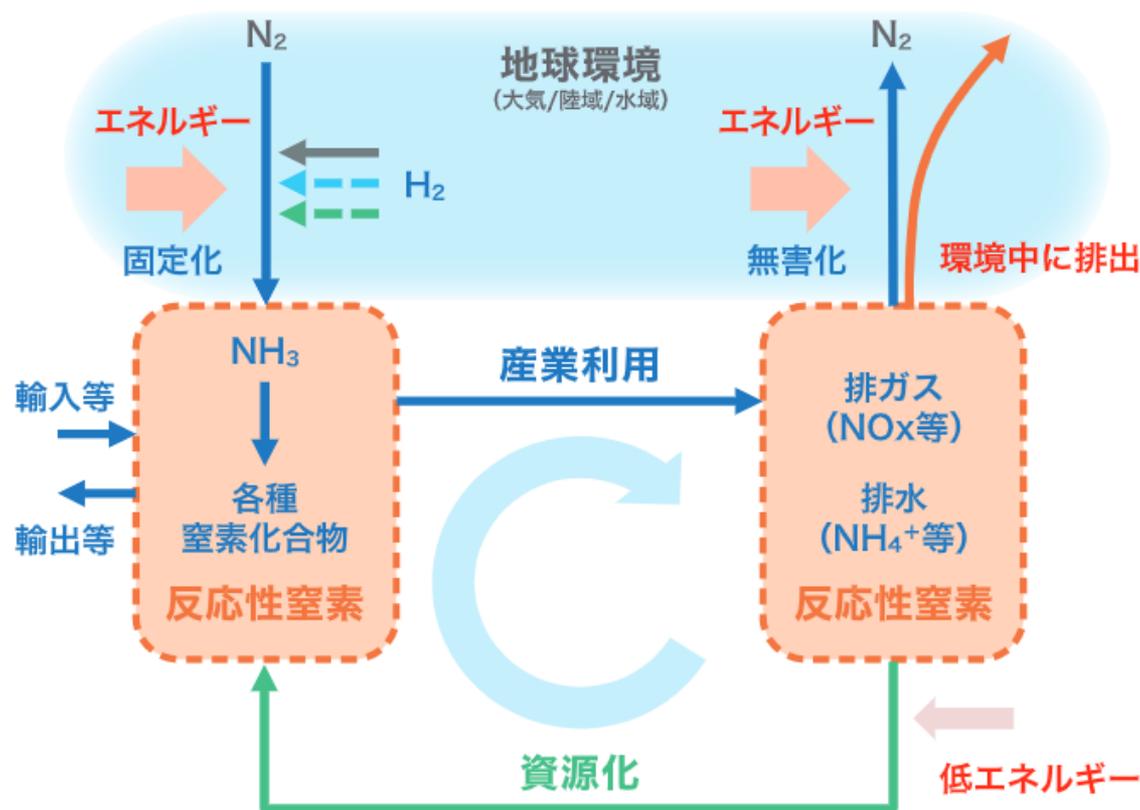
排水処理設備へ

<https://hags-ec.com/column/theres-a-clear-difference-between-cement-and-mortar-what-are-their-characteristics/>

<https://www.denhome.co.jp/archives/5775>

将来的な反応性窒素の資源化プロセス

- ✓ 現状は、反応性窒素の無害化のため多くのエネルギーを消費
- ✓ 窒素利用と環境負荷の低減を両立させた“**窒素循環**”



現状の窒素利用

大量のエネルギー消費を伴う固定化と無害化
 反応性窒素の排出による環境汚染の拡大

将来

持続可能な窒素利用

産業利用後の反応性窒素を低エネルギーで資源化
 反応性窒素の排出抑制による環境汚染の防止

**SDGs視点からの
物質循環(C, H, N)に関する
研究の方向性**

C, H, Nの物質循環と相関(化学品、燃料)



【H₂O：自然界での中心的循環物質】

H₂, H₂O
(単結合)

H

水電解
(グリーン水素)

共電解
(合成ガス製造)

【H₂：人為的、自然界での循環無し】

【課題】大量・安価なCO₂フリー水素の確保

物質循環に関する留意点

- ✓ LCA分析・検証
- ✓ インセンティブな標準・規格化
- ✓ 廃棄物(人工物)の循環・再利用
- ✓ バイオマス(生物資源)の積極利用
- ✓ 水電解における副生酸素(O₂)の利活用
- ✓ 水(H₂O)資源の確保
- ✓ 技術開発 ~ 事業開発 ~ 社会実装の体制

【燃料】

メタン CH₄

【化学品】

合成ガス (H₂+CO)

シュウ酸 (COOH)₂

メタノール CH₃OH

BTX (ベンゼン、トルエン、キシレン)

フィッシャー・トロプシュ合成
(合成ガス → 液体燃料)

ハーバー・ボッシュ法
($3H_2 + N_2 \rightarrow 2NH_3$)

【燃料&化学品】

アンモニア NH₃

【化学品】

硝酸 HNO₃

亜硝酸HNO₂

循環型製造プロセスの要件

- ✓ 脱炭素化 (電源および燃料)
- ✓ 省エネ化 (低温・低圧化)
- ✓ 効率化 (新技術：触媒、膜分離、プラズマガス化等)

O₂
(二重結合)

CO₂電解
(CO, C製造)

【人為的かつ自然界での循環有り】

C
(単~三重結合)

C

CO₂
(二重結合)

【課題】CO₂分離・回収の低コスト化

尿素合成
($CO_2 + 2NH_3 \rightarrow (NH_2)_2CO + H_2O$)

【化学品】

尿素 (NH₂)₂CO

ポリウレタン、アミノ酸

【人為的かつ自然界での循環有り】

N₂
(三重結合)

N

NH₃
(単結合)

【課題】廃棄される反応性窒素(NH₃, NO_x)の再資源化

研究の
方向性

2050年に向けた7つの目標*

