

エネルギー・資源学会

「2050年のエネルギーと社会：俯瞰的視点」

2021年度第2回シンポジウム

(第14回ESIシンポジウム)

2021年9月27日 (月)

14:55~15:20

オンライン

# 脱炭素困難部門での対策

中垣 隆雄

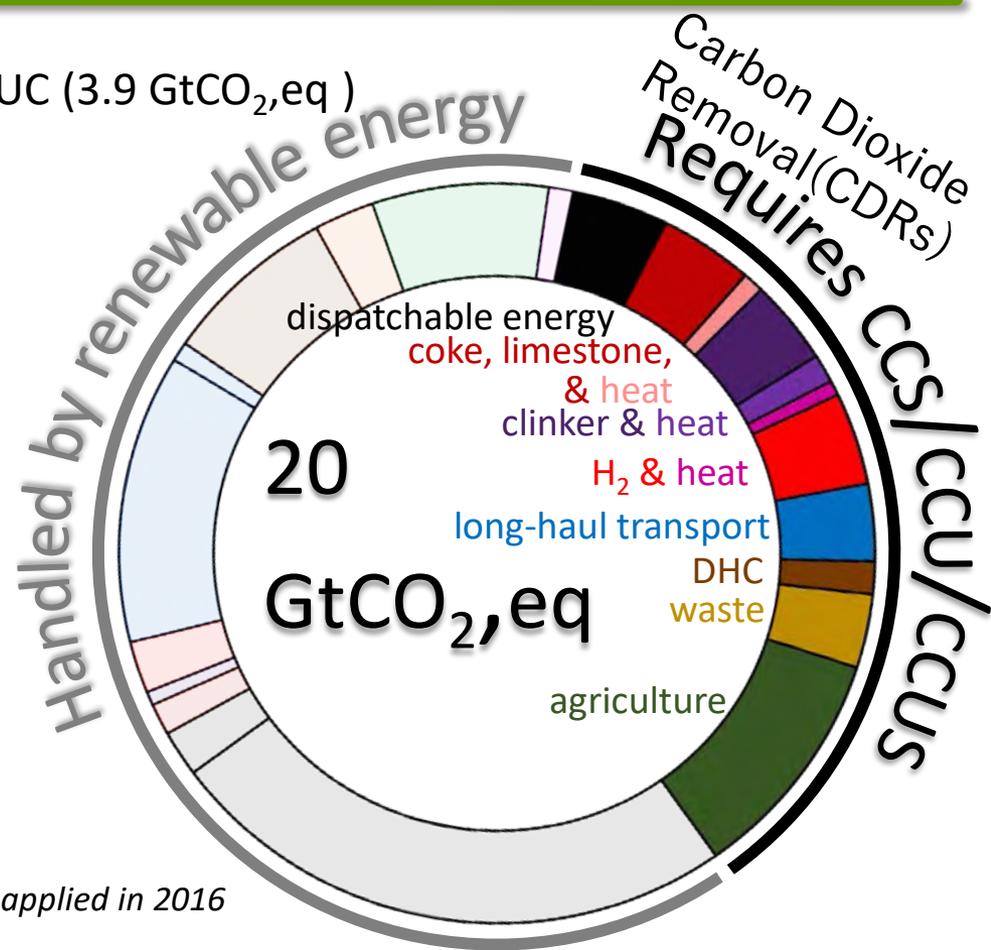
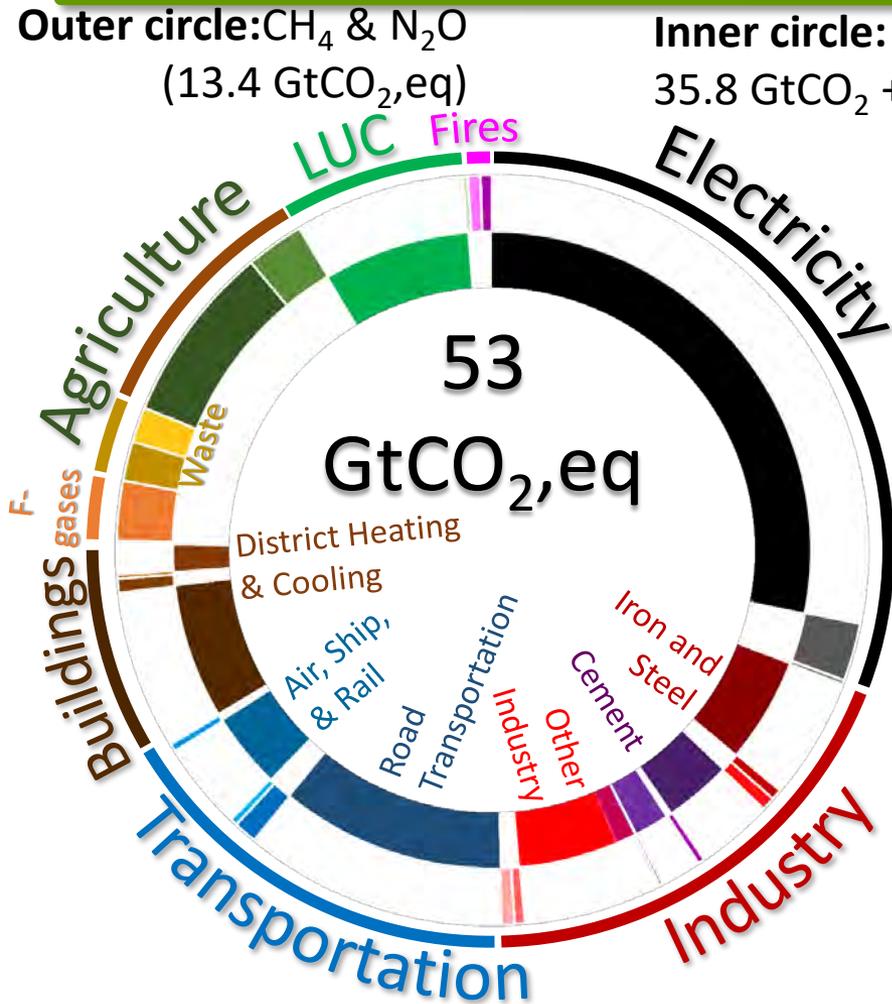


早稲田大学 創造理工学部

School of Creative Science and Engineering, Waseda University

※当該講演資料に関するお問い合わせは[takao.nakagaki@waseda.jp](mailto:takao.nakagaki@waseda.jp) へ

# VRE増だけでNZEは困難



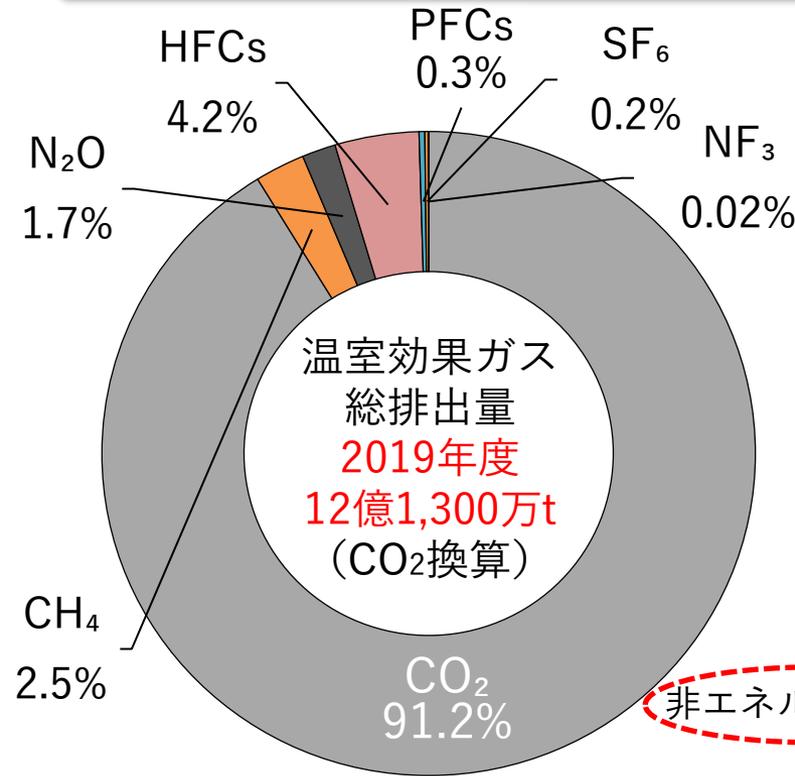
if applied in 2016

- 大気からのCDR + NETs
- CCUを含む完全な炭素循環 ←

REでは削減困難なGHG  
 航空機・船舶の液体燃料  
 農業・廃棄物・極寒地暖房  
 石灰産業, etc...

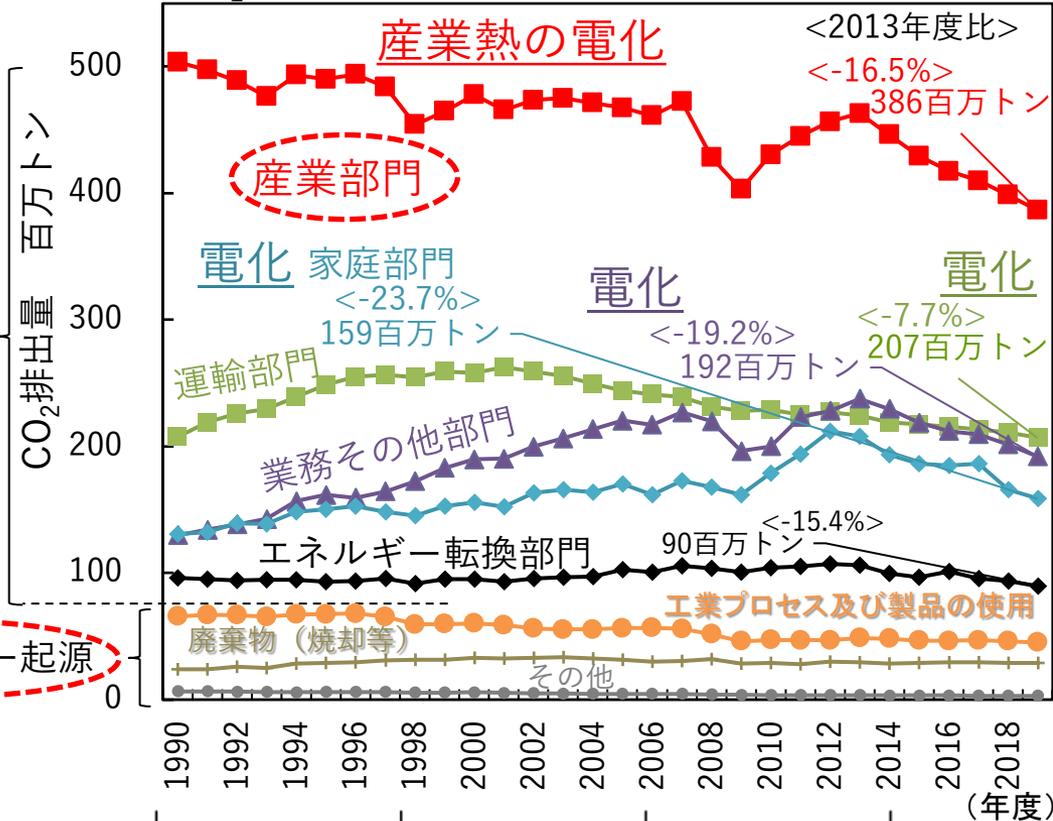
# 2019年度GHG速報

# 国環研GIOより

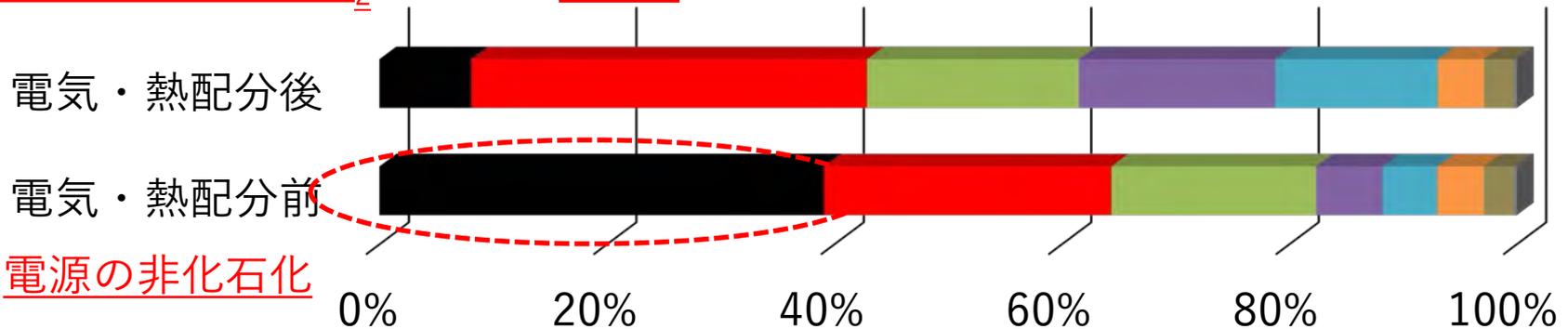


エネルギー起源 **93.0%**  
非エネルギー起源

CO<sub>2</sub>の部門別排出量（電気・熱配分後）の推移



エネルギー起源のCO<sub>2</sub>がGHGの84.9%



# 炭素フロー

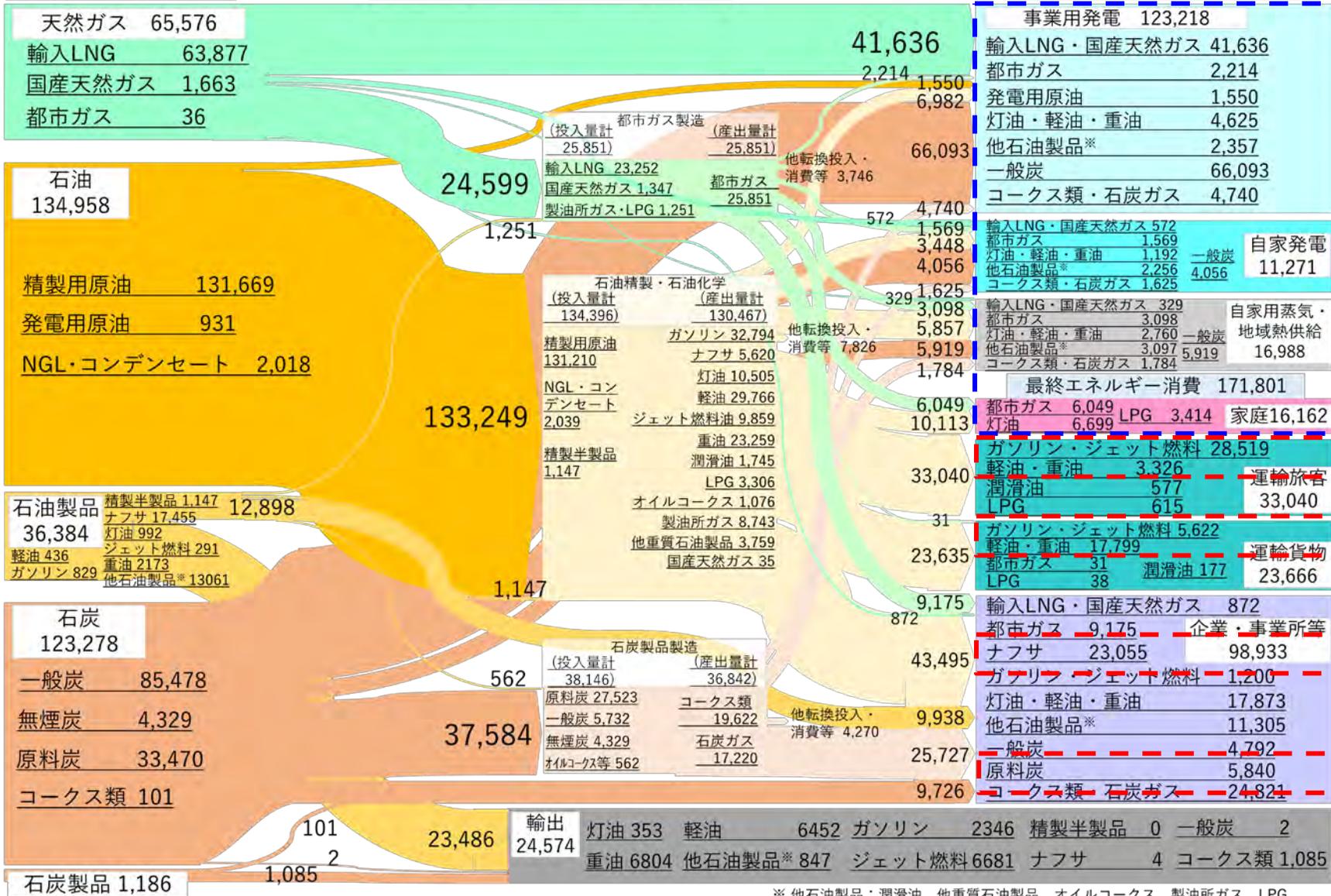
えねるみくす, Vol.99, No.4(2020)

総供給 361,499

一次エネルギー国内供給 336,926

単位:kt-C

エネルギー転換 163,771



発電・200℃以下の熱供給53%

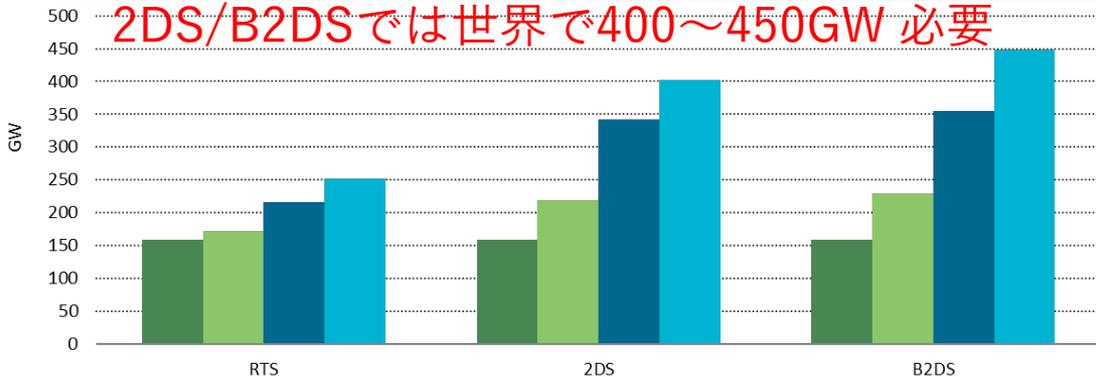
重量車・航空・船舶マテリアルとしての炭素

石灰・最終焼却廃棄物等

※ 他石油製品：潤滑油、他重質石油製品、オイルコークス、製油所ガス、LPG  
出典：資源エネルギー庁「総合エネルギー統計（2017年度）」を基に作成

# 莫大なエネルギーストレージが必要

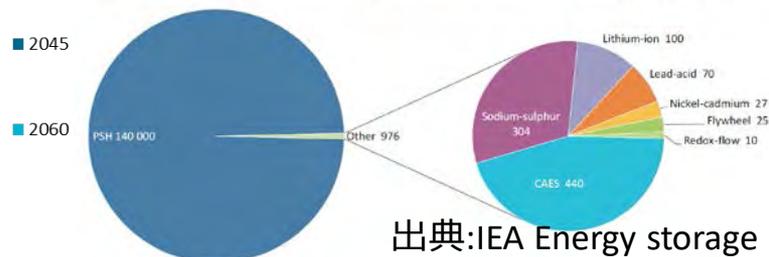
2DS/B2DSでは世界で400~450GW 必要



出典:IEA ETP2017

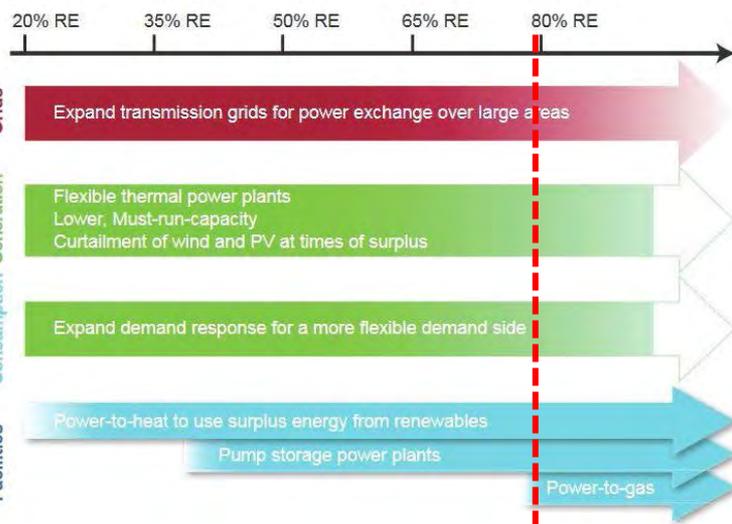
現在は150GWの揚水発電 / 他1GW

Figure 4: Current global installed grid-connected electricity storage capacity (MW)



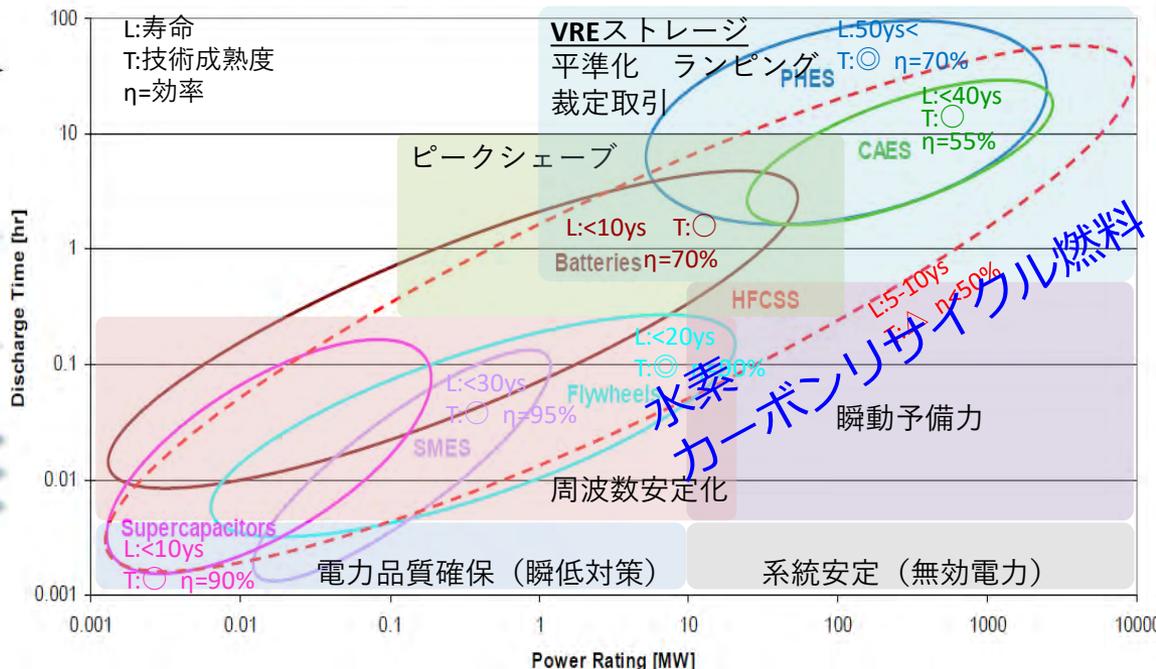
出典:IEA Energy storage

カーボンリサイクル導入境界は  
セクターごとに異なるものの...



ストレージとしてのP2Gの  
出番はRE80以上?

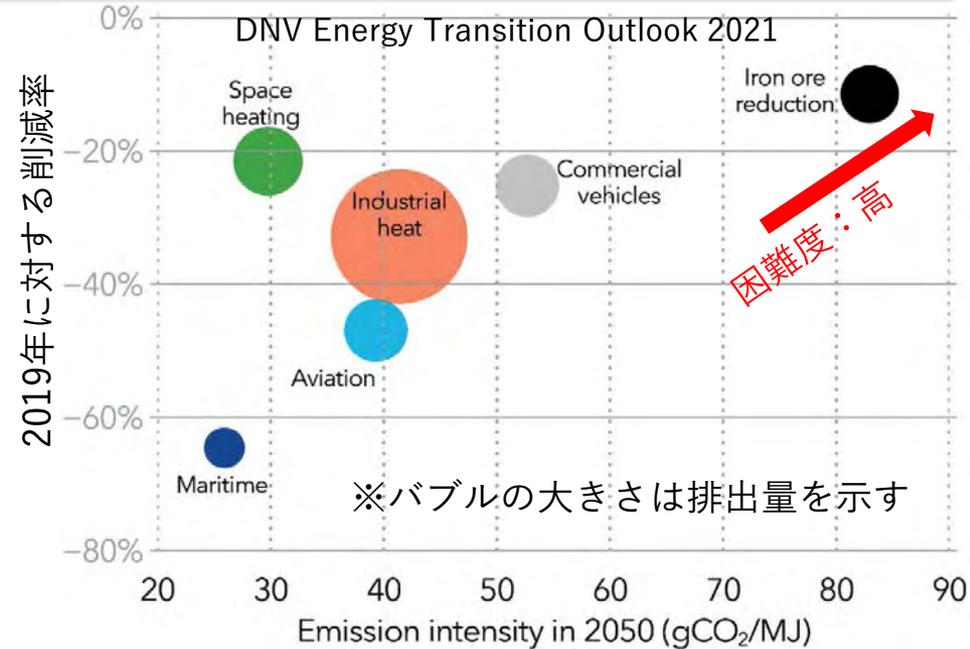
TRL・往復効率・速度容量特性も考慮すべき



Citation: storED Project Report 2.1 Report summarizing the current Status, Role and Costs of Energy Storage Technologies

# 脱炭素が困難な部門 Hard-to-abate sectors

- グローバルなメガトレンド：
  - ✓ 脱化石化 Decarbonization
  - ✓ 非集中化（分散化） Decentralization
  - ✓ 効用・便益の電化 Electrification
- VREの大量導入，主力化
  - ✓ 課題：時空間の需給ミスマッチ解消
  - ✓ Keywords: 柔軟性(Flexibility)  
蓄エネ(Storage)



単純なVRE利用だけで超えられない壁

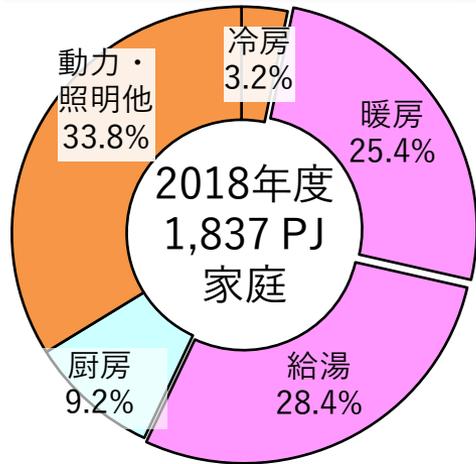
⇒ RE ≒ 80%~

- 多数の技術オプションはあるが，そもそもの排出量が多い  
エネルギー転換部門：電気・熱供給事業（自家生成・消費含む）
- プロセス依存（還元・溶融・熱分解など）
- マテリアル炭素（炭素鋼，有機系化成品，SiCなど）による製造時のリーク
- 長距離・重量輸送（航空機，長距離船舶，長距離トラック）
- 廃棄物処理（リサイクル不能なプラごみ等） etc…

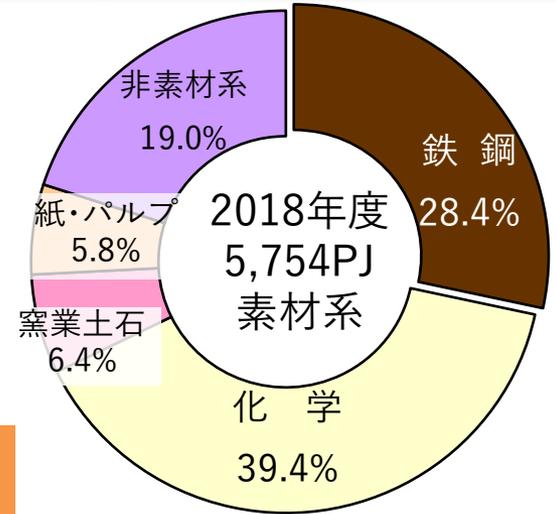
“確固たる政策がない現状では，多国籍企業のサプライチェーンにおけるカーボンフットプリントの低減と金融部門の動向が変化のカギを握る”

DNV Energy Transition Outlook 2021

# CO<sub>2</sub>を減らして同じ便益・効用を得る

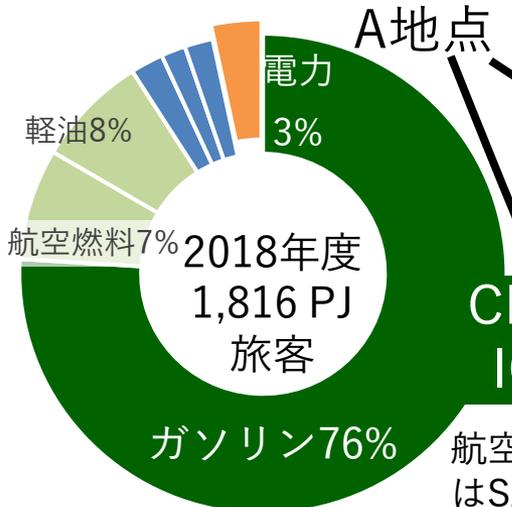


民生部門の便益  
⇒ 給湯暖房

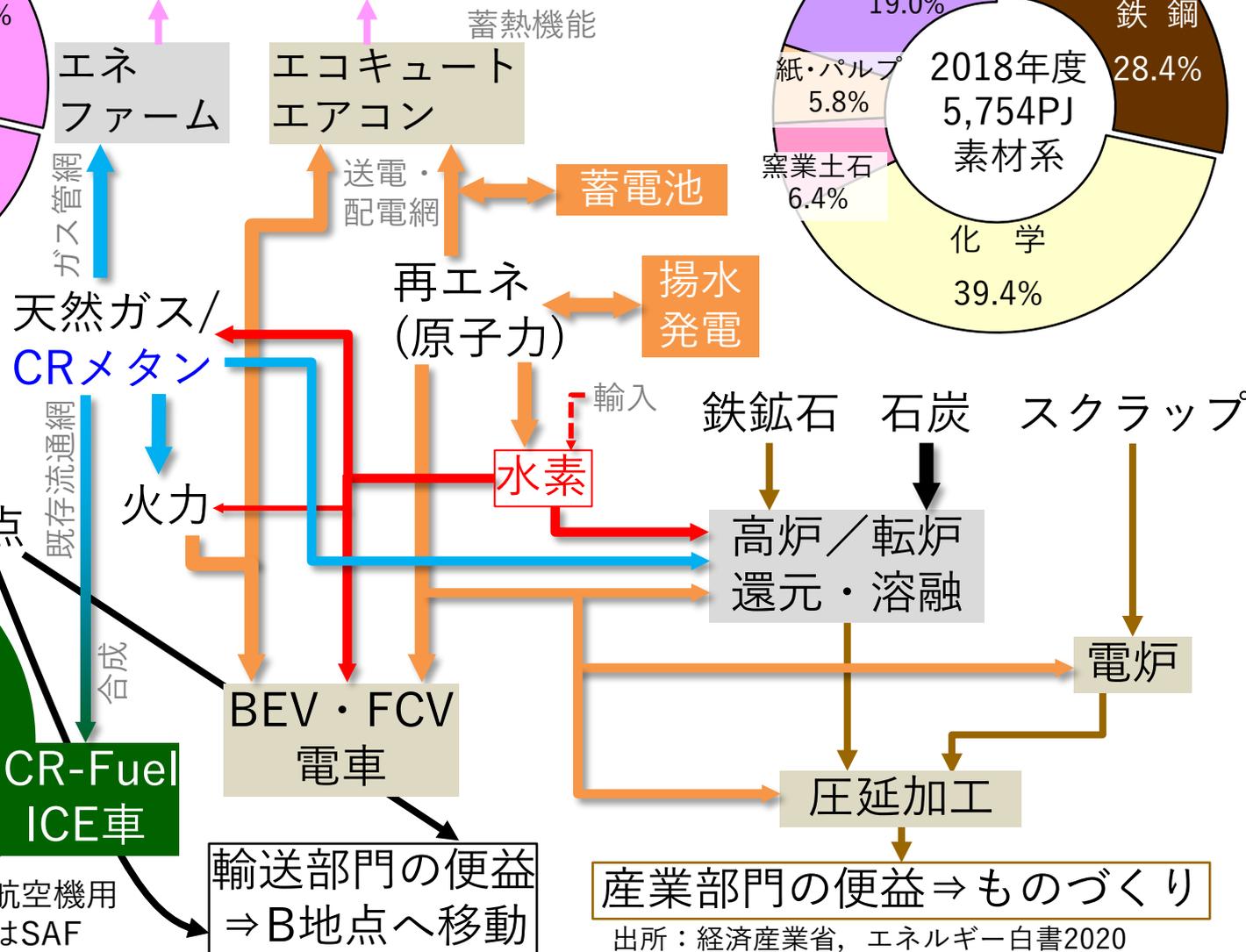


● 電化  
● 非化石化

※CR:カーボンリサイクル



A地点  
CR-Fuel ICE車  
航空機用はSAF  
輸送部門の便益  
⇒ B地点へ移動



産業部門の便益 ⇒ ものづくり  
出所：経済産業省，エネルギー白書2020

# 火力発電 CO<sub>2</sub>80%以上削減の技術オプション

## CO<sub>2</sub>大気放散の実質的な回避

- VRE + 揚水の最大利用
- 需給（特にVRE発電の）予測精度向上
- 連系線を利用した他社融通 etc..

火力発電：入れない，作らない，出さない

### Input

#### 投入燃料の脱化石化

- バイオマスや水素
- 炭素循環燃料
- これらの混焼・専焼
- 燃焼前分離(IGCC)

### Conversion system

#### 高効率化 ※80%削減の解なし

- 作動流体の高温化
- ガス化\*，SOFCトッピング
- 部分負荷効率維持

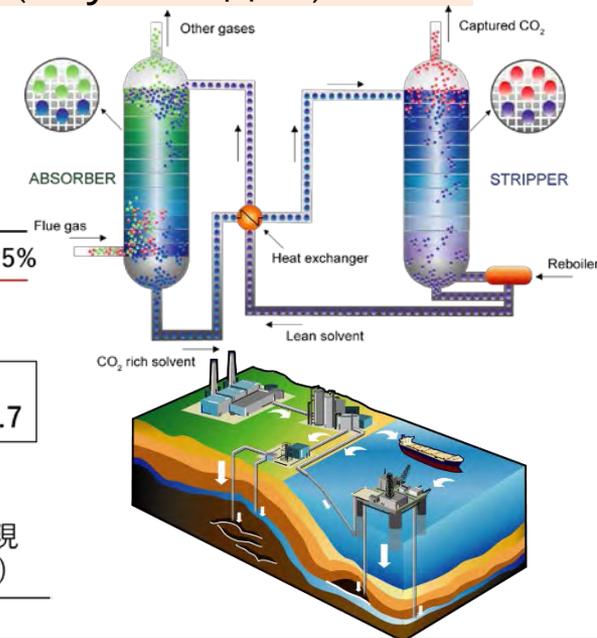
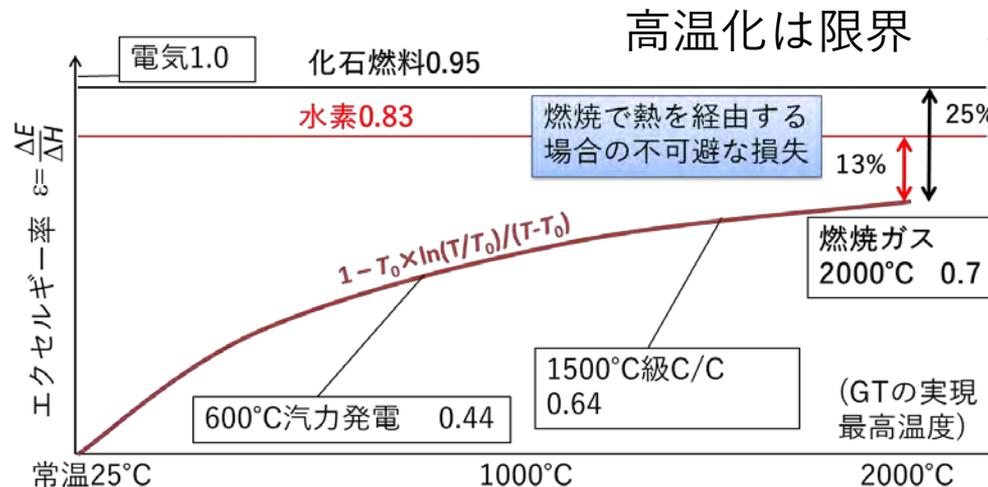
### Output

電力エクセルギー  
ロスなく届ける

### Emission

煙道ガスのCO<sub>2</sub>回収  
⇒CCS/CCUS  
(Oxy-fuel含む)

\*コプロダクションでエクセルギー保存



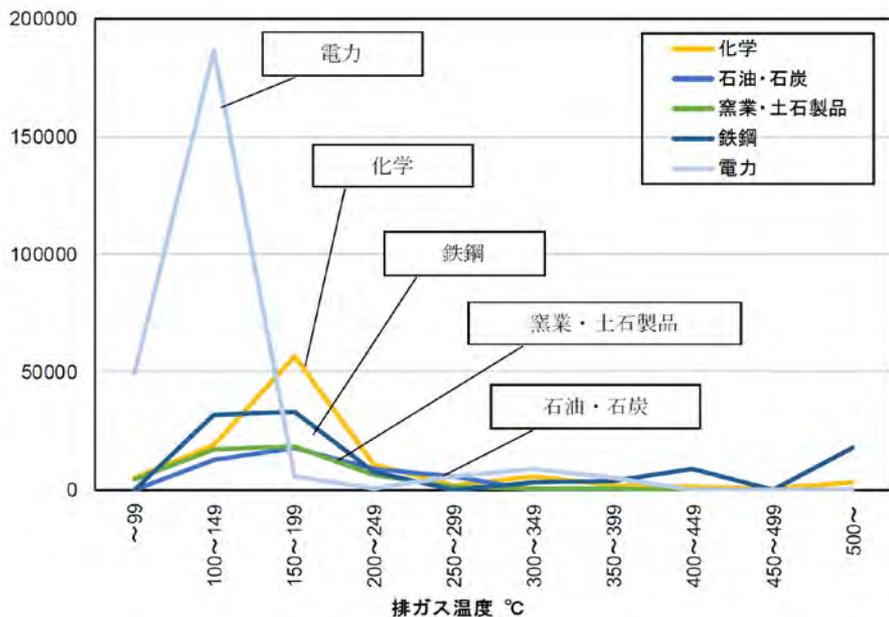
# 産業部門のCO<sub>2</sub>排出削減

省エネ

エネルギー起源対策

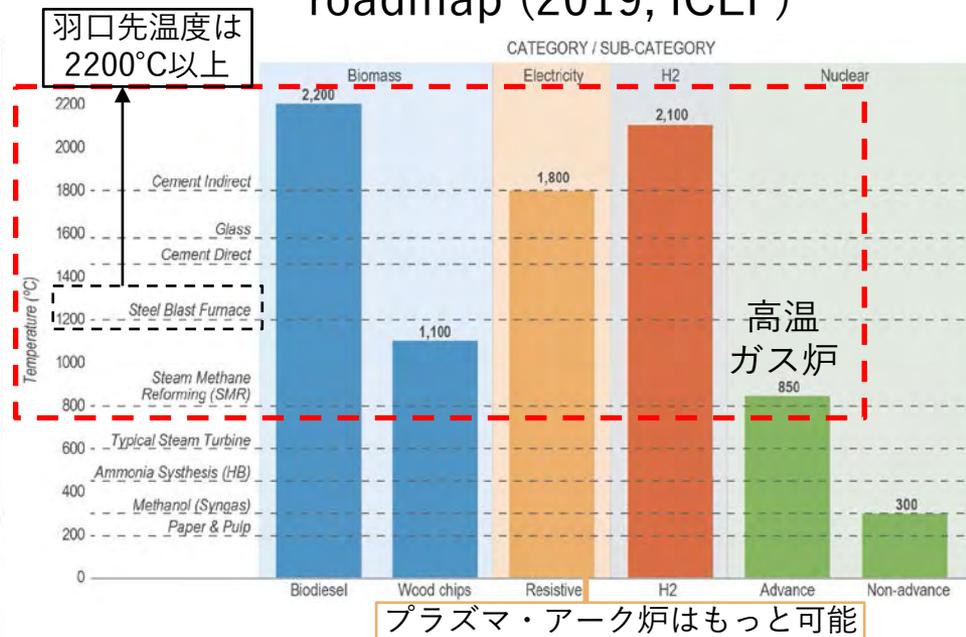
脱化石 + 電化

産業分野の排熱実態調査報告書  
(2019, TherMAT)



熱融通・物質変換  
⇒ 輸送に新たな課題

Industrial heat decarbonization  
roadmap (2019, ICEF)



産業部門はさらに  
物質利用・非エネルギー起源炭素

事業所、業種、部門単独  
(限界あり)



域内、広域、部門間連携  
コプロ・炭素循環利用

# 熔融・熱分解・還元の例

板ガラス製造 熔融1600°C

製鉄工程

還元・  
熔融  
2300°C

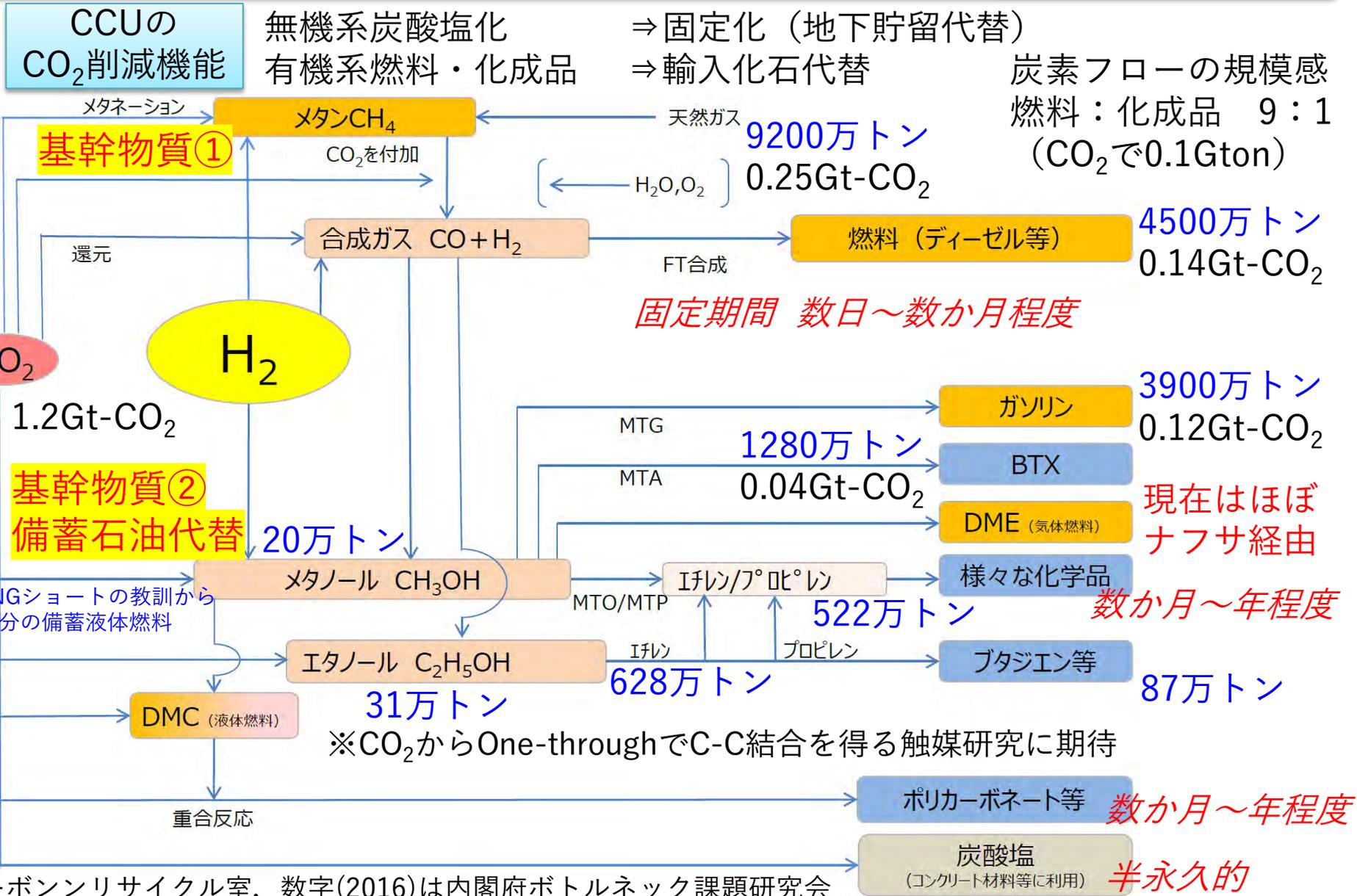
DOI:10.1109/EPTC.2017.8277587

[http://www.jfe-21st-cf.or.jp/jpn/  
chapter\\_2/2d\\_2\\_img.html](http://www.jfe-21st-cf.or.jp/jpn/chapter_2/2d_2_img.html)

Source セメント(クリンカ)製造  
McKinsey & Company (2019)  
Laying the foundation for zero-carbon cement

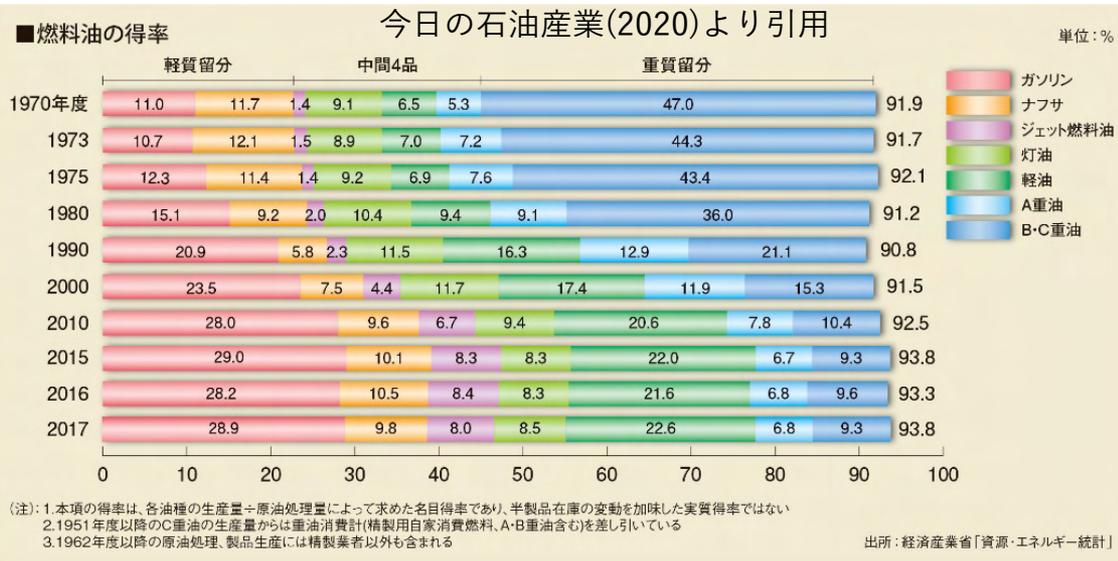
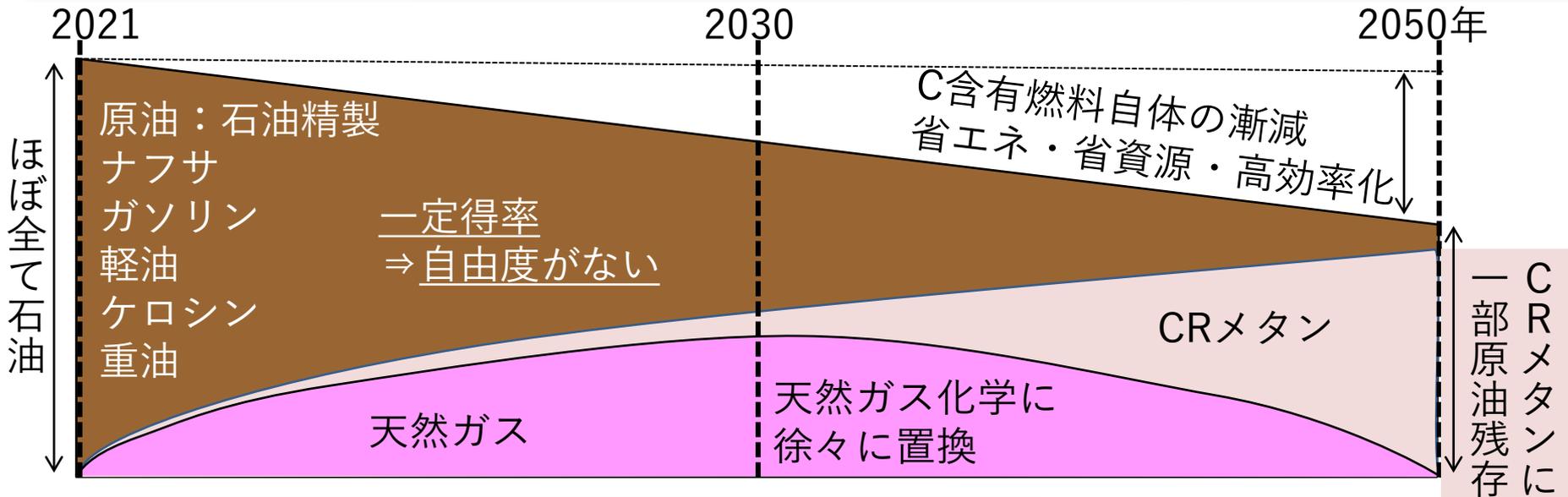
熱分解 1500°C + 石灰石からもCO<sub>2</sub>

# 燃料・化成品の流通量とCO<sub>2</sub>



カーボンリサイクル室, 数字(2016)は内閣府ボトルネック課題研究会

# C1基幹物質メタン・メタノール



## CRメタンのC源

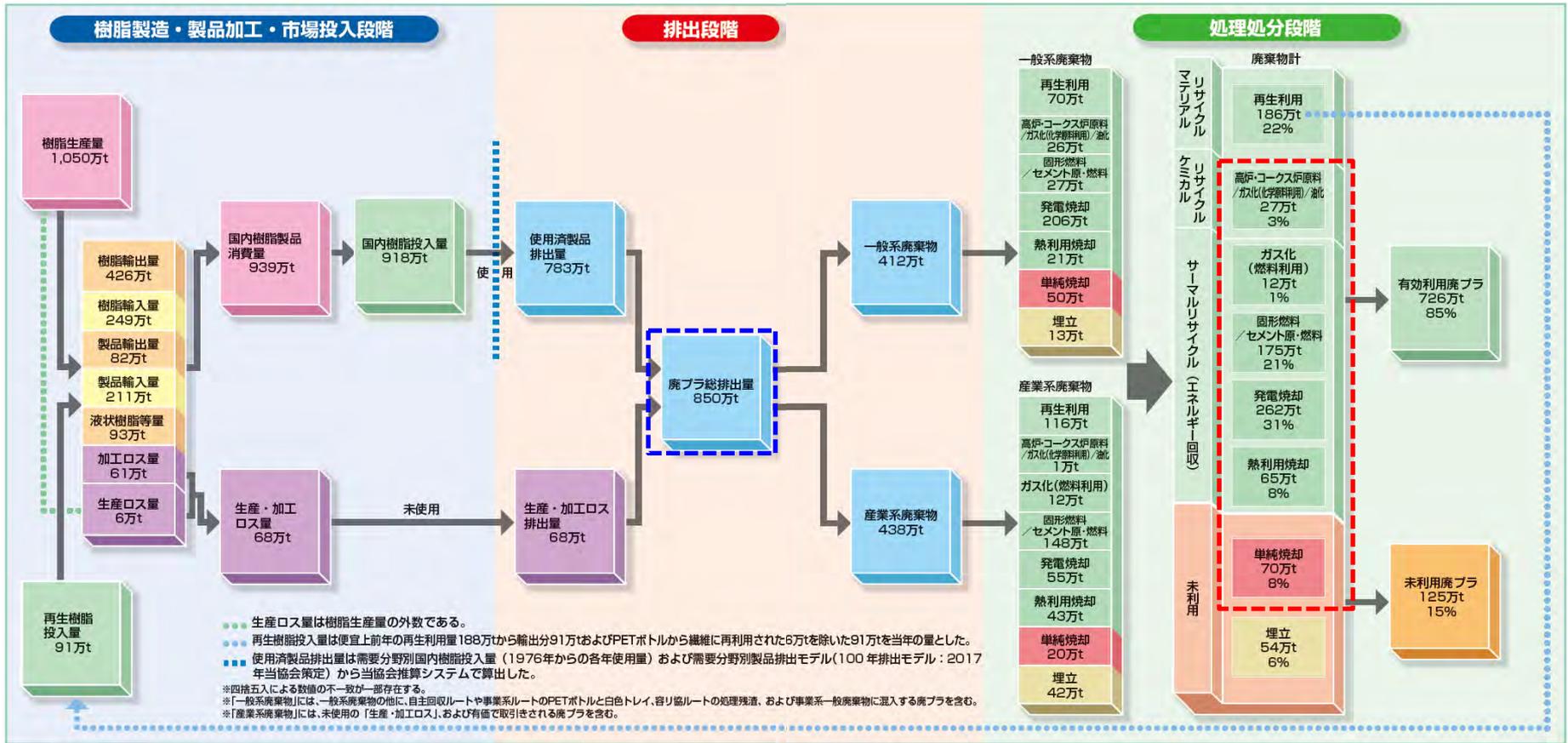
- 残存原油
- 鉄鋼
- 廃プラ焼却
- セメント
- DACなど

- ✓得率縛り無し
- ✓市場変化に柔軟対応

CRメタンに置換  
一部原油残存

※備蓄にはメタノールが適しているが、このような直接反応は実現していない  $\text{CH}_4 + 0.5\text{O}_2 \rightleftharpoons \text{CH}_3\text{OH}$

# プラスチックリサイクル(一社) プラスチック循環利用協会

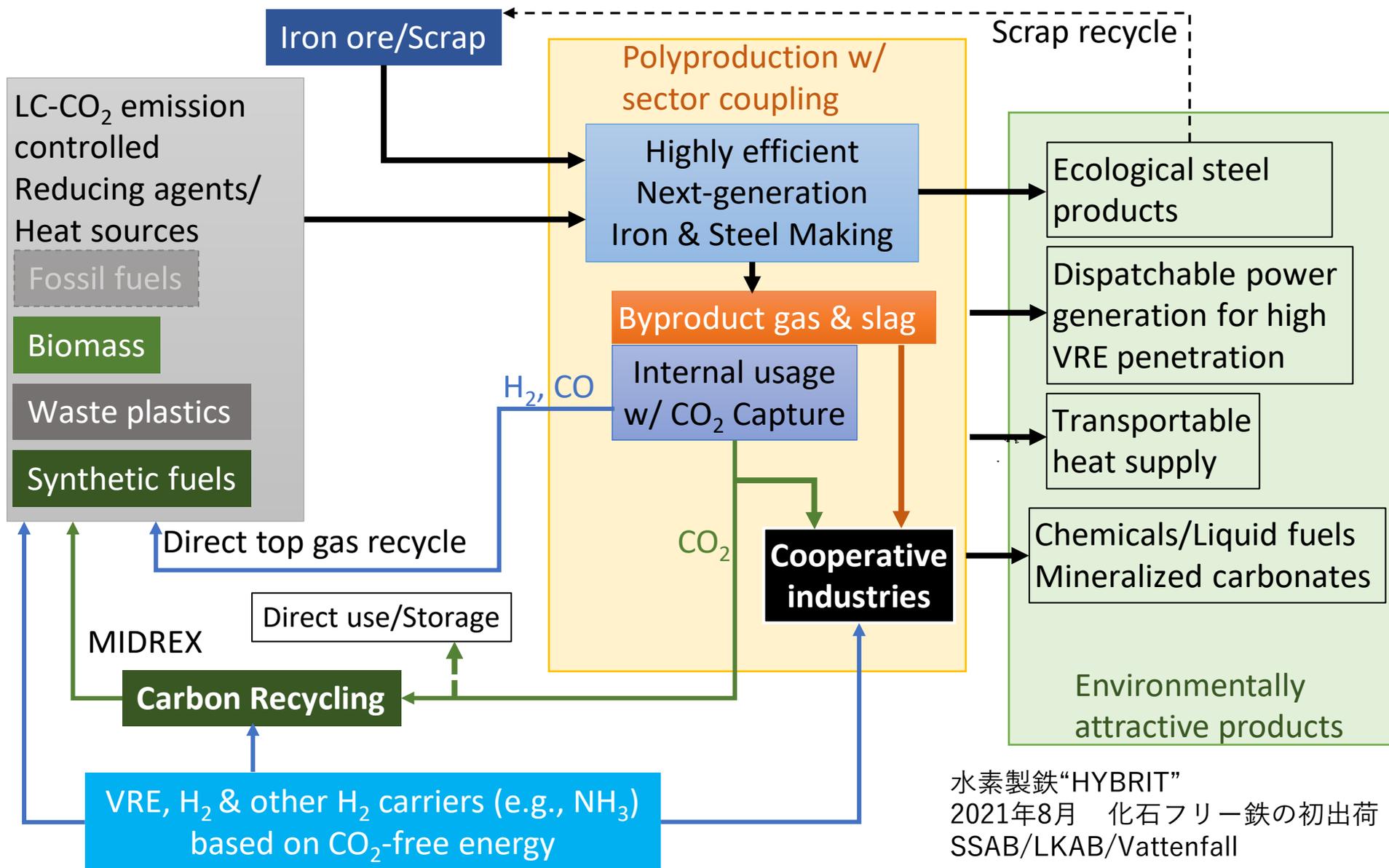


850万t回収 ⇒ 再生樹脂91万トン  
樹脂生産量(新規)の8.7%

分別回収してもわずかな循環量...

- まずはプラスチック循環利用の拡張
  - ✓ リサイクルしやすい環境配慮設計
  - ✓ 分別の徹底
- ガス化, 油化など燃焼前に
- 最後はサーマルリサイクル後のCCU

# 鉄鋼業のPolyproduction center機能



水素製鉄“HYBRIT”  
2021年8月 化石フリー鉄の初出荷  
SSAB/LKAB/Vattenfall

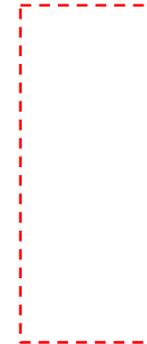
# 水素に依存しない大量のCO<sub>2</sub>固定化 コンクリート

---

CO<sub>2</sub>-SUICOM  
プレキャスト  
コンクリート

<https://www.landes.co.jp/product/113>

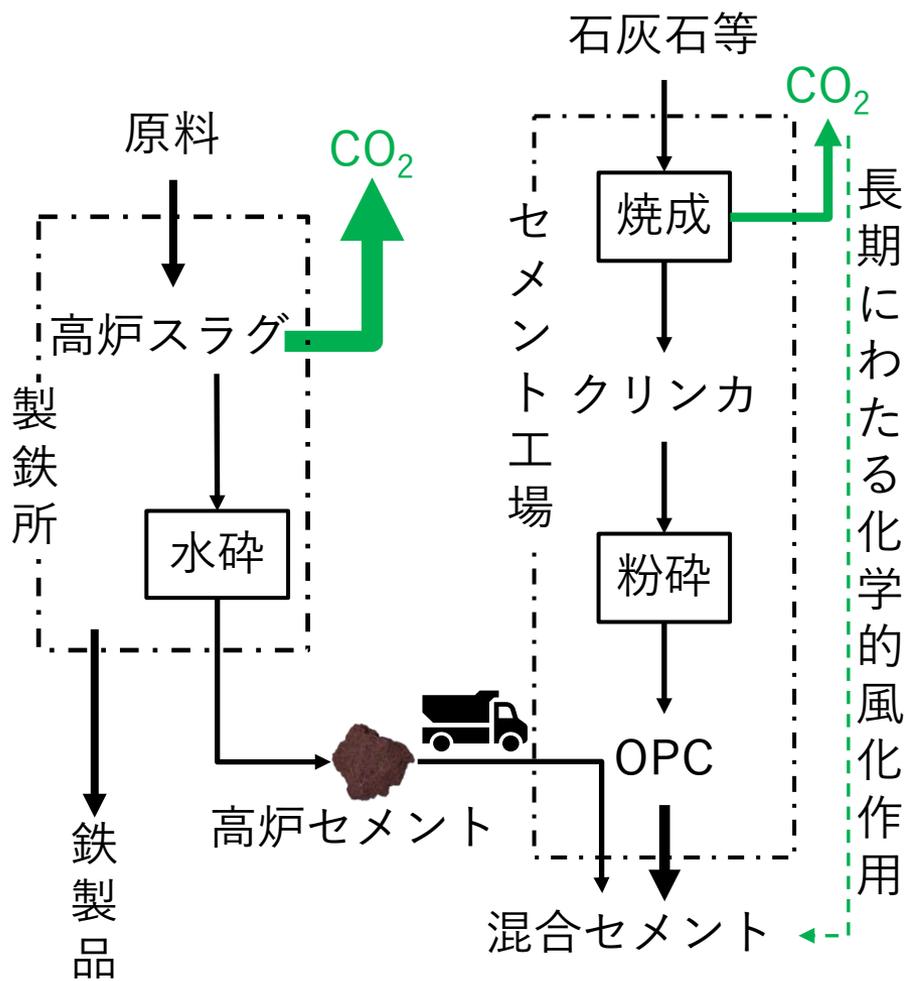
水ではなくCO<sub>2</sub>で硬化



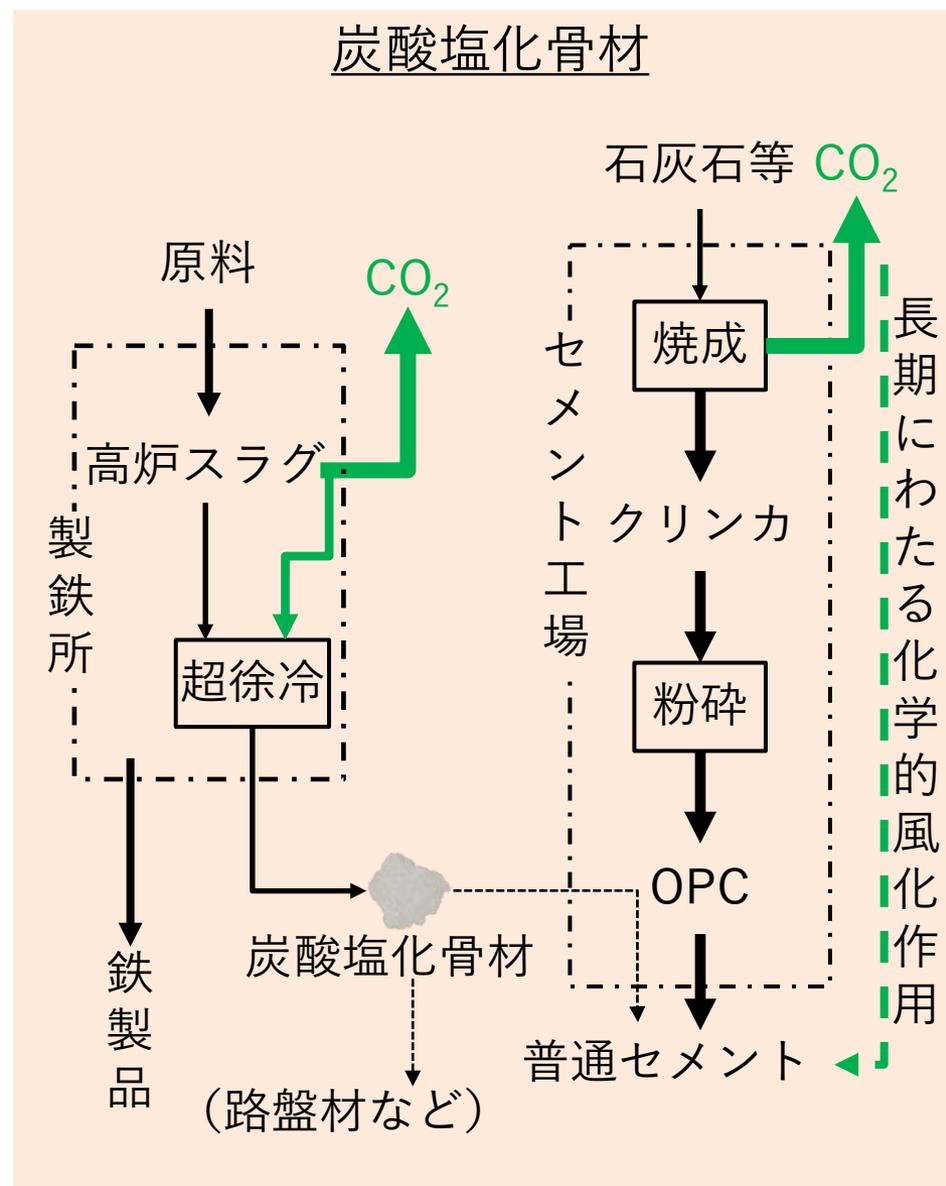
<https://www.solidiatech.com/solutions.html>

# 高炉スラグ骨材利用 + OPCのEW

## 高炉セメント



## 炭酸塩化骨材



※OPC：普通ポルトランドセメント

# 工業地帯の方向性案

## ◆ 工業地帯の共通特徴

- 既設インフラ：多 + 重化学工業率：高 ※再エネや原子力
- カーボンレガシーな産業構造 = 電化困難プロセスあり
- 大都市圏需要・距離の近さ ⇒ C含有資材が豊富 (Cの都市鉱山)
- 自らのエリアだけでCフリーエクセルギー※創出 ⇒ 輸入H<sub>2</sub>・Cフリー電源購入

## ◆ 方向性案

- 電力・ガス・熱導管 ⇒ +水素, +CO<sub>2</sub>パイプライン (Capture Hub)
- Dispatchableなネットワークサービスの提供：熱供給, 系統アンシラリー
- これまで市場性や技術的困難さから未利用だったエクセルギーの利用法開発  
例：LNG冷熱利用(大気からのドライアイス製造など), Cの都市鉱山利用, 未利用熱>100°C

2021現在

輸入化石

系統電力

・サ  
モ  
ノ  
ビ  
ス

CO<sub>2</sub>

2050将来

輸入化石

グリーンH<sub>2</sub>

再エネ電力

・サ  
モ  
ノ  
ビ  
ス

CCU

CO<sub>2</sub>

外部シンク  
CCSなど

図引用:京浜臨海部再編整備協議会

# CCU 水素と分離の観点で

水電解: 50 kWh/kg-H<sub>2</sub>  
 $H_2O \Rightarrow H_2 + 0.5O_2$   
 その他CO<sub>2</sub>フリー-H<sub>2</sub>

+CaO  $\Rightarrow$  CaCO<sub>3</sub> 発熱 分離回収不要の固定化  
 +MgO  $\Rightarrow$  MgCO<sub>3</sub> 発熱

逆シフト反応  
 41.2kJ/mol吸熱, 高温有利 (脱水でDME)

ドライ改質 247kJ/mol吸熱  
 (当面)+CH<sub>4</sub>

$\Rightarrow 2CO + 2H_2$   
 $+2H_2 \rightarrow (1/n)(CH_2)_n + H_2O$   
 FT合成反応 167kJ/mol

ギ酸合成反応  
 31kJ/mol発熱  $\Rightarrow HCOOH$

シュウ酸合成反応  
 34.1kJ/mol発熱  $\Rightarrow (COOH)_2$

CO<sub>2</sub>

CO

+H<sub>2</sub>  $\rightarrow$  +H<sub>2</sub>O  
 $+2H_2 \Rightarrow CH_3OH$  / 0.5(CH<sub>3</sub>)<sub>2</sub>O + 0.5H<sub>2</sub>O  
 メタノール合成反応  
 90.6kJ/mol発熱  
 $\Rightarrow$  燃油・BTX・オレフィン

+0.5O<sub>2</sub> 直接電解 / 水と共電解/電気化学的合成

+3H<sub>2</sub>  $\rightarrow$  +H<sub>2</sub>O 206kJ/mol発熱  
 $+4H_2 \Rightarrow CH_4 + 2H_2O$  サバティエ反応  
 165kJ/mol発熱 (都市ガス網利用可)

太陽光駆動のDAC  
 $H_2O \Rightarrow (CH_2O) + O_2$

太陽光光合成 (触媒/藻類・バイオ)

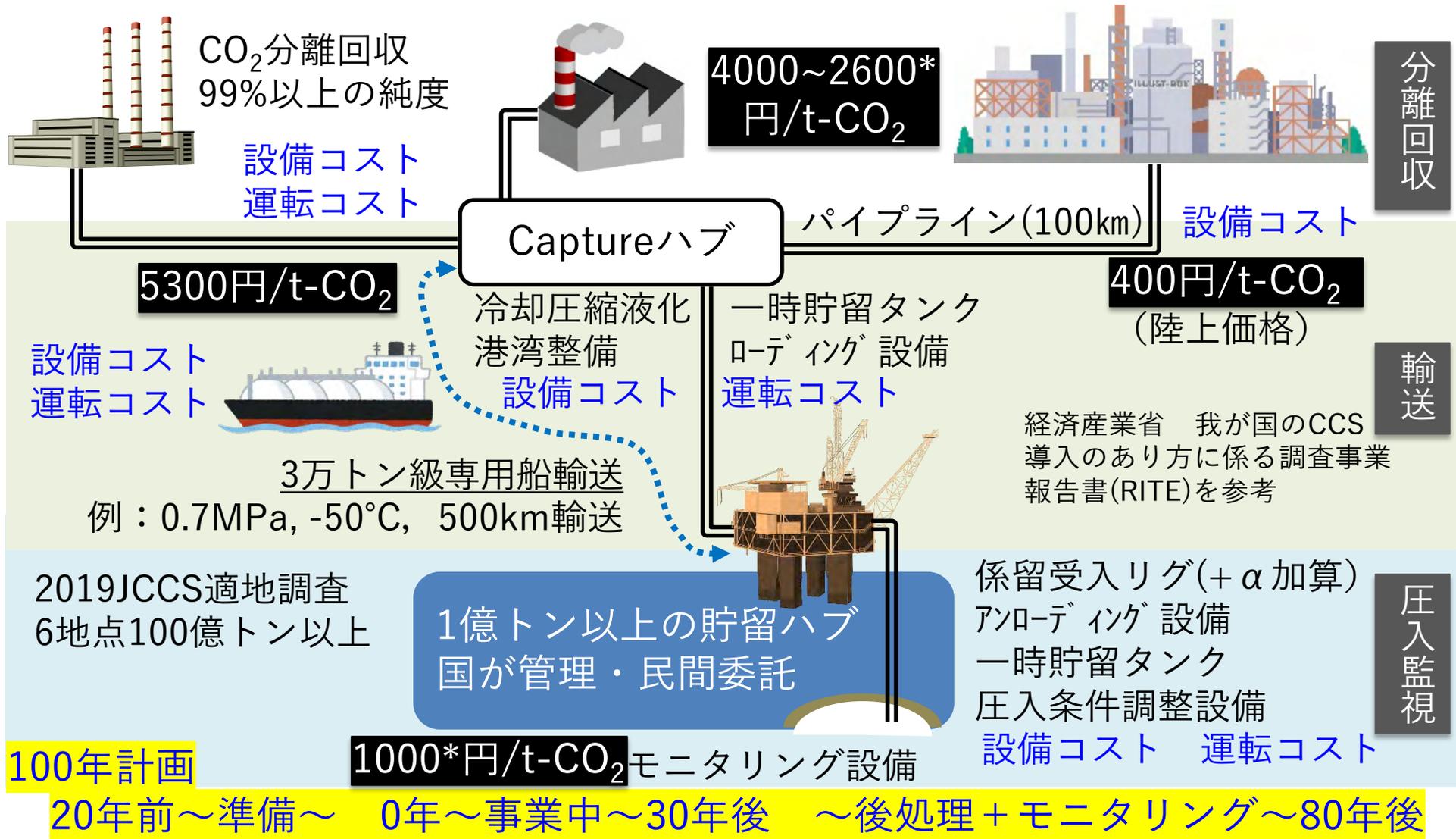
※有機CCUの本質はCO<sub>2</sub>のOの電解or水素による引き離しであり, H<sub>2</sub>Oの系外への除去が効果的  
 ※海水電解は塩素が発生するため脱塩プラントが必須, 水素源の飲料水・農業用水との競合懸念

# CCSの機能とコスト構造

\*苫小牧型1Mtスケール  
(JCCS総括報告書)

レトロフィット集中排出源  
火力発電・鉄鋼・セメントなど

CO<sub>2</sub>分離回収既設(Low Hanging Fruits)  
国産ガス田・アンモニアプラントなど



分離回収

輸送

圧入監視

経済産業省 我が国のCCS  
導入のあり方に係る調査事業  
報告書(RITE)を参考

# 分離回収技術のコストダウン

異なる排出源に  
異なる最適技術

吸収再生サイクル型⇒  
膜分離型⇒

再生エネルギー起因の運転コスト低減  
モジュール化など初期コスト低減

その他実用化済み  
熱炭酸カリ  
チルドアンモニア

## 工業プロセスでの酸性ガス後処理技術の進展

- ◆ 化学吸収法（現行プロセス）4,000円程度/t-CO<sub>2</sub>  
製油所、天然ガスプラント、アンモニア製造プラント
- 化学吸収法

KM-CDR TS ISOLなど

## CCSへの適用性検証（従来技術）

レトロフィット 燃焼後分離  
TRLで化学吸収法が有利  
コスト1000円台は困難？

## 新たな研究開発・実証の進展

- ◆ 石炭火力、廃棄物焼却施設等：化学吸収法
- ◆ 高炉ガス：物理吸着法
- ◆ 高炉ガス：化学吸収法
- ◆ 高圧ガス：物理吸収法

物理吸収 Selexol  
吸着 ASCOA

CCSコストの大半を占めるCO<sub>2</sub>分離回収  
コストの低減に向け、固体吸収材や分離膜  
等を用いた分離回収技術を研究開発中

- 石炭火力：固体吸収法2,000円台/t-CO<sub>2</sub>へ
- 高圧ガス：膜分離法1,000円台/t-CO<sub>2</sub>へ

固体 KCC

液-膜Hybrid

## 苫小牧JCCS 化学吸収法の成果

50%CO<sub>2</sub>(H<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub>)PSAオフガス25,000Nm<sup>3</sup>/h  
高濃度3級アミンで99%回収，純度99.7%

9.3MPa/22.8MPaで25t/h圧入

圧カスイングで一部放散，セミリーンを吸収塔中段に戻す2段吸  
収法で酸化劣化ほぼなし

分離回収エネルギー1.2GJ/t-CO<sub>2</sub> 1Mtスケールで2600円(試算)

## 新たな技術の社会実装の進展、普及拡大

~1,000円/t-CO<sub>2</sub>

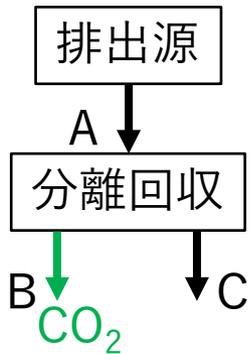
IGCC/改質ガス  
Oxyfuel 燃焼前分離

CO<sub>2</sub>分離回収コスト (円/t-CO<sub>2</sub>)

年代

DACはムーンショットで支援中

# 最低限必要な分離仕事とコスト



~2000TPD

COURSE50(CAT30)  
試算例 1Mt/y, BFG  
回収のみ2000円

物理吸着

Hasan, M. M. F., et al., *Ind. Eng. Chem. Res.* 2012, 51, 15665–15682

NGCC  
排気  
↓  
化学吸収

苫小牧(MDEA)  
回収・圧縮5500円

Direct Air  
Captureは不利

PCPP排気  
↑  
物理吸着(負圧)

膜分離

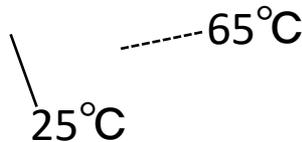
J.Wilcox, *Carbon Capture*,  
(2012)Springer

①事業用発電

②鉄鋼・化学工業・窯業・土石

③セメント・石灰

気液・気固界面現象 → 膜分離=2次元円筒構造  
液体・充填層=3次元構造



←分離に必要な  
理論最小仕事

$$W_{min} = \Delta G_{sep} = \Delta G_B + \Delta G_C - \Delta G_A$$

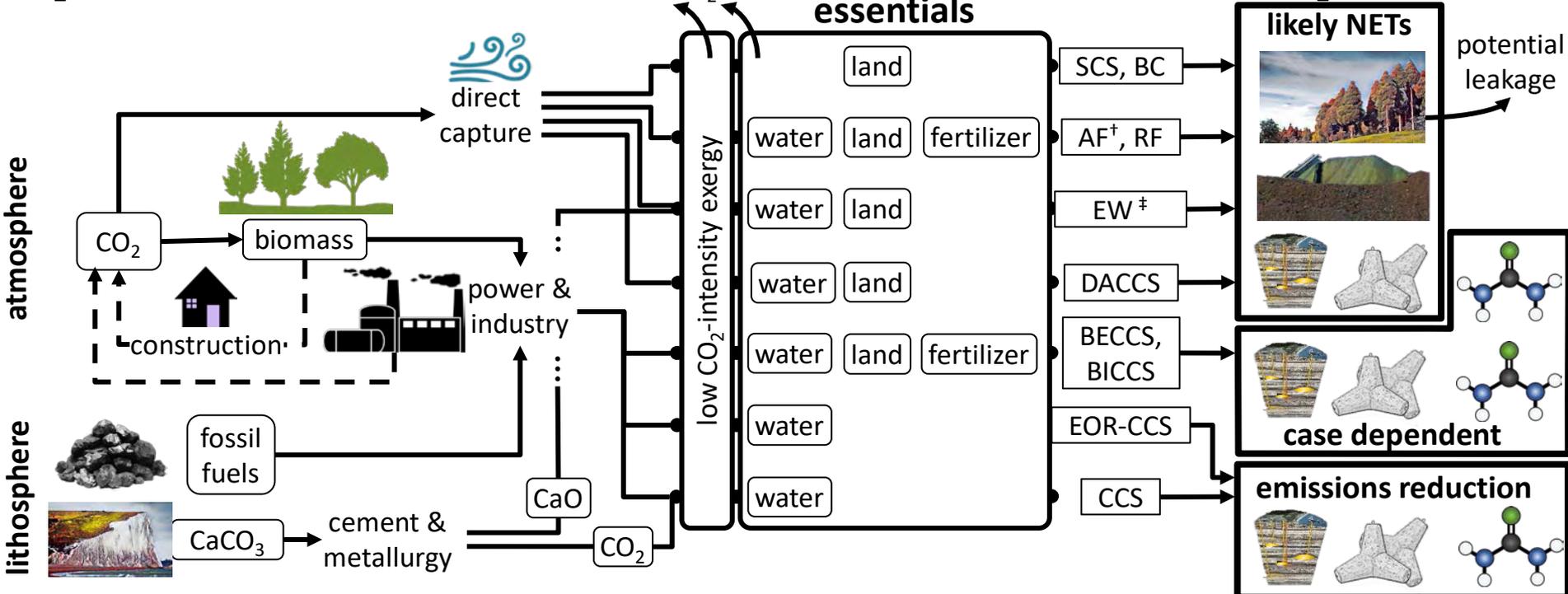
$$W_{min} = RT \left[ n_B^{CO_2} \ln(y_B^{CO_2}) + n_B^{B-CO_2} \ln(y_B^{B-CO_2}) \right]$$

$$+ RT \left[ n_C^{CO_2} \ln(y_C^{CO_2}) + n_C^{C-CO_2} \ln(y_C^{C-CO_2}) \right]$$

$$- RT \left[ n_A^{CO_2} \ln(y_A^{CO_2}) + n_A^{A-CO_2} \ln(y_A^{A-CO_2}) \right]$$

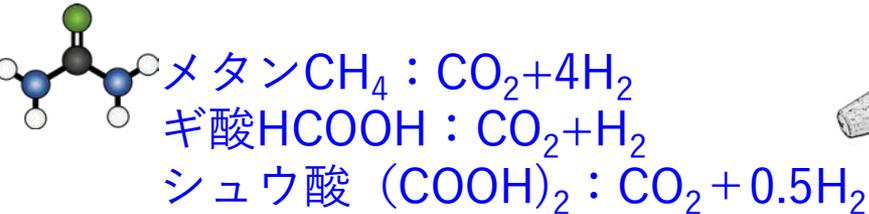
# 最後の砦 NETs → Energy, Water, Land-use Nexus

CO<sub>2</sub> source



SCS: soil carbon sequestration; BC: Biochar; AF: afforestation; RF: reforestation;  
 EW: enhanced weathering; DACCS: direct air capture + CCS;  
 BECCS: Bioenergy + CCS; BICCS: Bioindustry + CCS;  
 EOR-CCS: enhanced oil recover + CCS  
 ‡: includes ocean liming; †: includes ocean fertilization

geologic storage  
 hydrocarbons w/ green H<sub>2</sub>  
 inorganic carbonates  
 figure provided by the Global CCS Institute



クラーク数表 (海水中)  
 4位(23位) FeCO<sub>3</sub> 5位(7位) CaCO<sub>3</sub>  
 6,7位(4,8位) Na/K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, Na/KHCO<sub>3</sub>  
 8位(5位) MgCO<sub>3</sub>

# まとめ

- ◆ Hard-to-abate sectorsでも最終的な**便益・効用・製品の質の確保**が大前提
- ◆ Decarbonization, Decentralization, Electrificationがメガトレンド
- ◆ NZEには莫大なエネルギーストレージ必要, RE80以上でCCUS本格出番か？
- ◆ 2050年の調整力火力はCR燃料, CCS付き火力, H<sub>2</sub>, アンモニア焚き
- ◆ 産業熱：プロセス依存（還元・溶融・熱分解） ⇒ E-Fuelの他, 電化・H<sub>2</sub>・バイオマスでも質(温度)は達成可能, 量とコストが課題
- ◆ 物質としての炭素：新規化石依存度を下げ, 炭素循環(CCU)比率を向上. 基幹物質としてメタン・メタノールでC1ケミストリー
- ◆ 石油起点の物資生産を**天然ガス化学**で作るように少しずつシフト **CRメタンが基幹物質**として置換して橋渡し（ガス導管に直接流せる利点）
- ◆ CCUもH<sub>2</sub>導入動向に大きく依存, コンクリートなど**無機系の固定化**を先行
- ◆ 製鉄は**炭素循環/Polyproduction**で多機能センター, セクターカップリング
- ◆ CO<sub>2</sub>電解でH<sub>2</sub>を減らし, 転換効率Up（**Oを如何に取るか**）
- ◆ CCSはクラスター&ハブ, ボトルネックの貯留ハブには国の関与が必須
- ◆ 燃焼排ガスならCapture必須, DACは分離エネルギーとコストハードルが高い
- ◆ 最後まで残るCO<sub>2</sub>は無機系CCU+NETs+貯留ハブへの輸送で, 正味ゼロ化するシナリオが一案. NETsは水・土地・エネルギーの連環で不確実性があり, 過大な依存は副次的なリスクもある
- ◆ 国際的企業の部品調達の脱炭素化と金融部門からの圧力がDriving force（Taxonomyなど既に始まっている）