

「CO₂分離回収・有効利用技術開発の動向と RITEの取り組みー」

2025年2月5日

(公財)地球環境産業技術研究機構(RITE)

化学研究グループ

余語 克則



本日の内容

①「CO₂分離回収・有効利用技術開発の動向とRITEの取り組み」

化学研究グループ グループリーダー 余語 克則

- ・化学吸収液の大規模社会実装に向けた準備状況
- ・CO₂分離回収技術の回収率、純度、コストについて
- ・海外のDAC技術開発の動向と課題、RITEの取り組み(ムーンショット事業)

②「大阪・関西万博におけるDACを中心としたカーボンイミッション技術の展示」

同 サブリーダー 菊池 直樹

③「炭素回収技術評価センター(実ガス試験センター)」

同 主任研究員 後藤 和也

RITE化学研究グループの取り組み

研究員募集中！

RITE化学研究グループ 44名(内博士15名)2025年1月時点

研究部門

分離回収

- ・吸収液
- ・固体吸収材・吸着剤
- ・有機膜・無機膜

有効利用

- ・炭酸塩固定
- ・基幹物質・燃料

産業連携部門

共通基盤(標準化)

炭素回収技術評価センター
(実ガス試験)
(2025年2月～稼働予定)

産業化戦略協議会

- ・研究会
- ・事務局

GI基金 共通基盤
プロジェクト推進協議会
実ガスワーキングG
(大学:4、企業:19社+RITE)

試験設備・
評価法
意見

連携
参加、意見交換

アドバイザーボード
分離回収および有効利用
技術に関する学識経験者

科学的支援

情報提供
マッチング
技術指導
技術要望

会員企業

荒川化学工業、アルバック機工、イーセップ、いすゞ自動車、岩谷産業、
エア・ウォーター、AGC、大阪ガス、川崎重工業、関西電力、京セラ、
広栄化学、神戸製鋼所、コスモ石油、JFEスチール、住友化学、石油
資源開発、双日、太平洋セメント、大陽日酸、千代田化工建設、東
ソー、東邦ガス、日揮ホールディングス、日揮ユニバーサル、日本ガイシ、
日本ゼオン、日本測器、ファインセラミックスセンター、日立造船、マツダ、
三井化学、三井金属鉱業、三菱ケミカル、ヤンマー、レゾナック
(36団体 2025.1現在)

若手人材育成*

連携

出向
共同研究

国内外研究機関
(大学、国研等)

民間企業

- ・NAIST(奈良先端科学技術大学院大学)
連携研究室:博士前期課程学生(5名)受入れ
- ・大学等での講義

*これまでに大学教員等14名、博士3名、修士41名を排出

産業化戦略協議会の活動内容

企業会員と共にCO₂分離回収・有効利用技術の更なる活性化を図る活動を実施中【会員企業】—昨年度16社(現時点で35社+1法人に増大)

◆共通活動

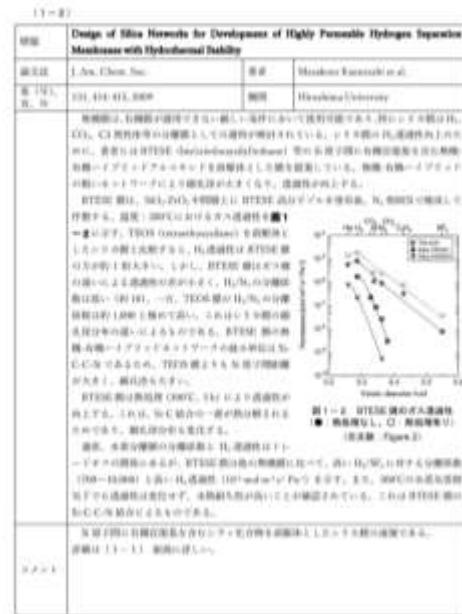
- 1) 会員向け研究会の実施
- 2) 会員限定セミナーの開催
- 3) 会員向け情報発信(ニーズ・シーズ情報、ホットピックス)
- 4) 革新的CO₂分離回収・有効利用技術シンポジウムの開催
(会員企業のポスター発表)



会員限定セミナーの開催



シンポジウムの開催



ニーズ・シーズ情報 (セミナーの文献・特許紹介)

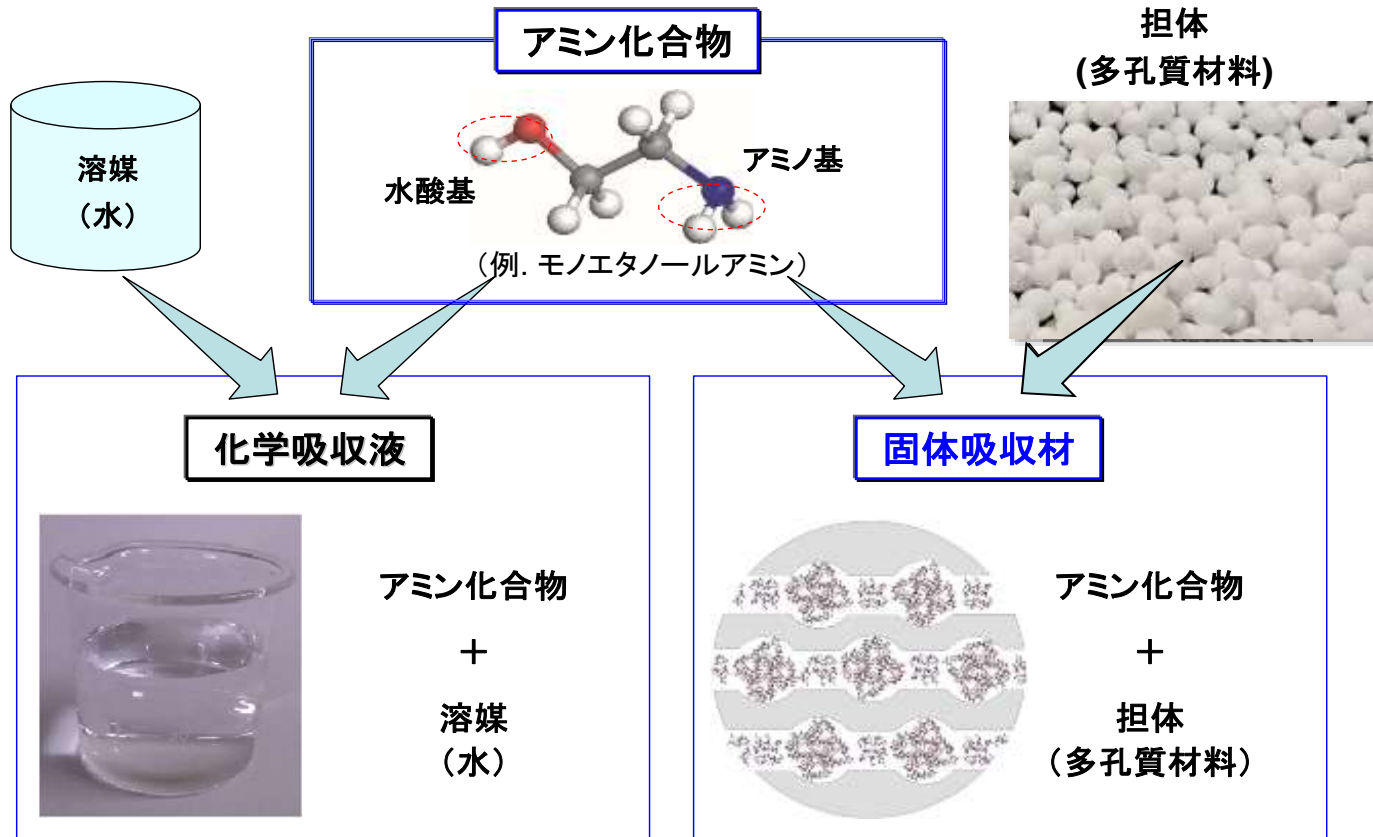
◆2024年度の全体スケジュール

4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月
総会 セミナー	HP更新	研究会準備	情報発信 研究会準備 HP更新	膜研究会	セミナー CO ₂ 研究会	HP更新	情報発信 研究会準備	CO ₂ 研究会 HP更新	セミナー 膜研究会	研究会準備 HP更新	シンポジウム 膜研究会 CO ₂ 研究会

R06化学研究グループ実施事業(国プロ)

技術	適用先	CO ₂ 濃度	事業名	体制	期間 (最長)
吸収液	高炉ガス	22%	グリーンイノベーション基金事業／製鉄プロセスにおける水素活用／高炉を用いた水素還元技術の開発／外部水素や高炉排ガスに含まれるCO ₂ を活用した低炭素化技術等の開発／CO ₂ の分離・回収技術	NEDO事業 ・日本製鉄 ・RITE	2021～ 2029
固体吸収材	発電所 (石炭火力)	13%	カーボンリサイクル・次世代火力発電等技術開発/CO ₂ 分離回収技術の研究開発/先進的二酸化炭素固体吸収材の石炭燃焼排ガス適用性研究	NEDO事業 ・KHI ・RITE、 ・名古屋大	2020～ 2024
固体吸収材	天然ガス火力	3～5%	グリーンイノベーション基金事業／CO ₂ の分離回収等技術開発／天然ガス火力発電排ガスからの大規模CO ₂ 分離回収技術開発・実証／天然ガス燃焼排ガスからの低コストCO ₂ 分離・回収プロセス商用化の実現	NEDO事業 ・千代田化工建設 ・JERA ・RITE	2022～ 2024 (2030)
固体吸収材	大気	400 ppm	ムーンショット型研究開発事業/地球環境球再生に向けた持続可能な資源循環を実現/大気中からの高効率CO ₂ 分離回収・炭素循環技術の開発	NEDO事業 ・金沢大 ・RITE ・MHI	2020～ 2024 (2029)
分離膜 (有機膜)	IGCC、ブルー水素・アンモニア製造	40% (～3MPa)	カーボンリサイクル・次世代火力発電等技術開発/CO ₂ 分離・回収技術の研究開発/二酸化炭素分離膜システム実用化研究開発/高性能CO ₂ 分離膜の水素製造システムへの適用性検討	NEDO事業 ・MGM技術研究組合 ・三菱化工機	2024～ 2026
分離膜 (無機膜)	有効利用(メタノール合成)	回収後の高濃縮CO ₂ を利用	カーボンリサイクル・次世代火力発電等技術開発／CO ₂ 排出削減・有効利用実用化技術開発／化学品へのCO ₂ 利用技術開発／CO ₂ を用いたメタノール合成における最適システム開発	NEDO事業 ・JFEスチール ・RITE	2023～ 2025
分離膜 (無機膜)	He分離		NEDO先導プログラム/新産業・革新技术創出に向けた先導研究プログラム/不燃性ガス田における高効率ヘリウム膜分離回収技術の開発/シリカ膜長尺製膜技術開発	NEDO事業 ・JFCC ・RITE	2023～ 2025
吸収液 吸着剤 分離膜	各種燃焼排ガス	10%以下	グリーンイノベーション基金事業／CO ₂ の分離回収等技術開発／低圧・低濃度CO ₂ 分離回収の低コスト化技術開発・実証／CO ₂ 分離素材の標準評価共通基盤の確立	NEDO事業 ・産総研 ・RITE	2022～ 2024 (2030)

化学吸収液と固体吸収材



◎水の顕熱、蒸発潜熱が必要
→ 非水溶媒系、2相分離系等の開発

<吸収剤>
アミン
化合物

+

<溶媒1>水

<溶媒2>非水溶媒

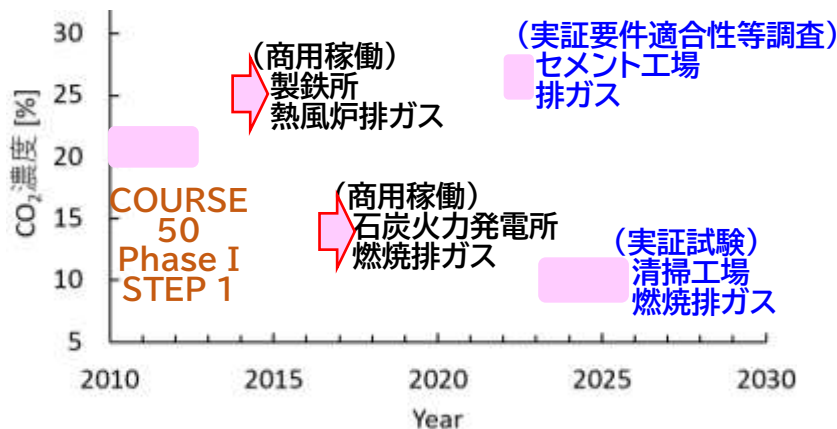
固体吸収材:

- ◎ 比熱の高い水溶媒に替わり**低比熱の多孔質材料**を担体に用いて再生に必要な**エネルギー**を低減.
- ◎ 溶媒の揮発が無いため蒸発潜熱としての**熱ロス**が無い.
→ **再生温度60℃程度の低温再生プロセスの開発** (廃熱利用可能)

COURSE50成果の実用化および新規実証研究

～日鉄エンジニアリング(株)保有技術“ESCAP®”の技術展開～

【RITE開発の吸収液技術の利用】



※(注意) グラフは排ガスの一般的なCO₂濃度を参考にプロットしたもの

製鉄所熱風炉排ガス

商業1号機:日本製鉄(株)北日本製鉄所
室蘭地区構内【①】



石炭火力発電所燃焼排ガス

商業2号機:住友共同電力(株)
新居浜西火力発電所構内【①】



廃棄物処理施設(清掃工場)排ガス

GI基金事業「CO₂分離・回収を前提としてCN型廃棄物焼却処理全体システムの開発」【②, ③】



セメント工場排ガス

2022年度NEDO事業「エネルギー消費の効率化に資する我が国技術の国際実証事業」の1テーマ【④】



【①】https://www.eng.nipponsteel.com/business/environment_and_energy_solution/escap/escap/

(参照資料)

【②】<https://www.eng.nipponsteel.com/news/detail/2024021502/>

【③】<https://www.eng.nipponsteel.com/news/detail/20240216/>

【④】https://www.rite.or.jp/news/events/240207RITE_sympo_hagiu_ppt_haifu.pdf

実ガスベンチ試験

GI基金事業「製鉄プロセスにおける水素活用／高炉を用いた水素還元技術の開発／外部水素や高炉排ガスに含まれるCO₂を活用した低炭素化技術等の開発」の進捗

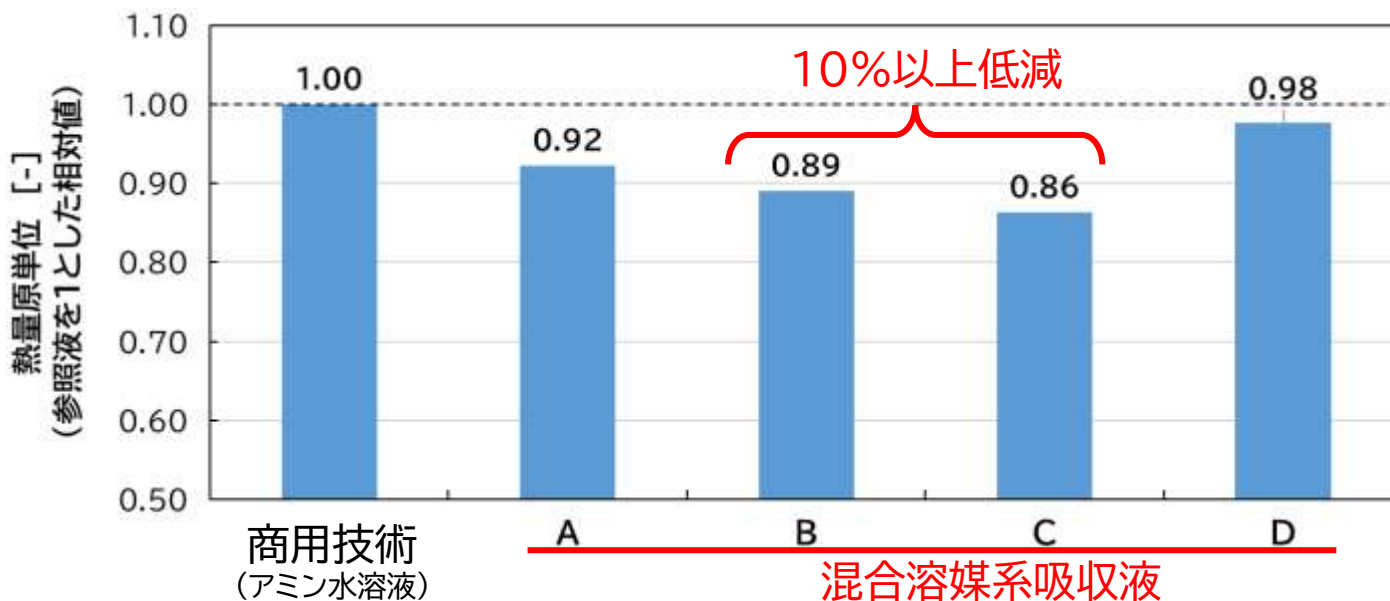
RITEが開発した混合溶媒系吸収液のエネルギー消費及び実用性能(劣化耐久性)を検証

- 期間: 2024年1月～6月
吸収場所: 日本製鉄(株) 東日本製鉄所君津地区
試験設備: 可搬式小型CO₂分離回収試験設備
“m-ESCAP™”(日鉄エンジニアリング(株)保有)
対象ガス: 高炉ガス(22%CO₂)
試験液: 混合溶媒系_4種(A～D)、
参照液_1種(商用技術: 高性能アミン水溶液)



(CO₂回収能力: 0.2～1.2 t-CO₂/日)

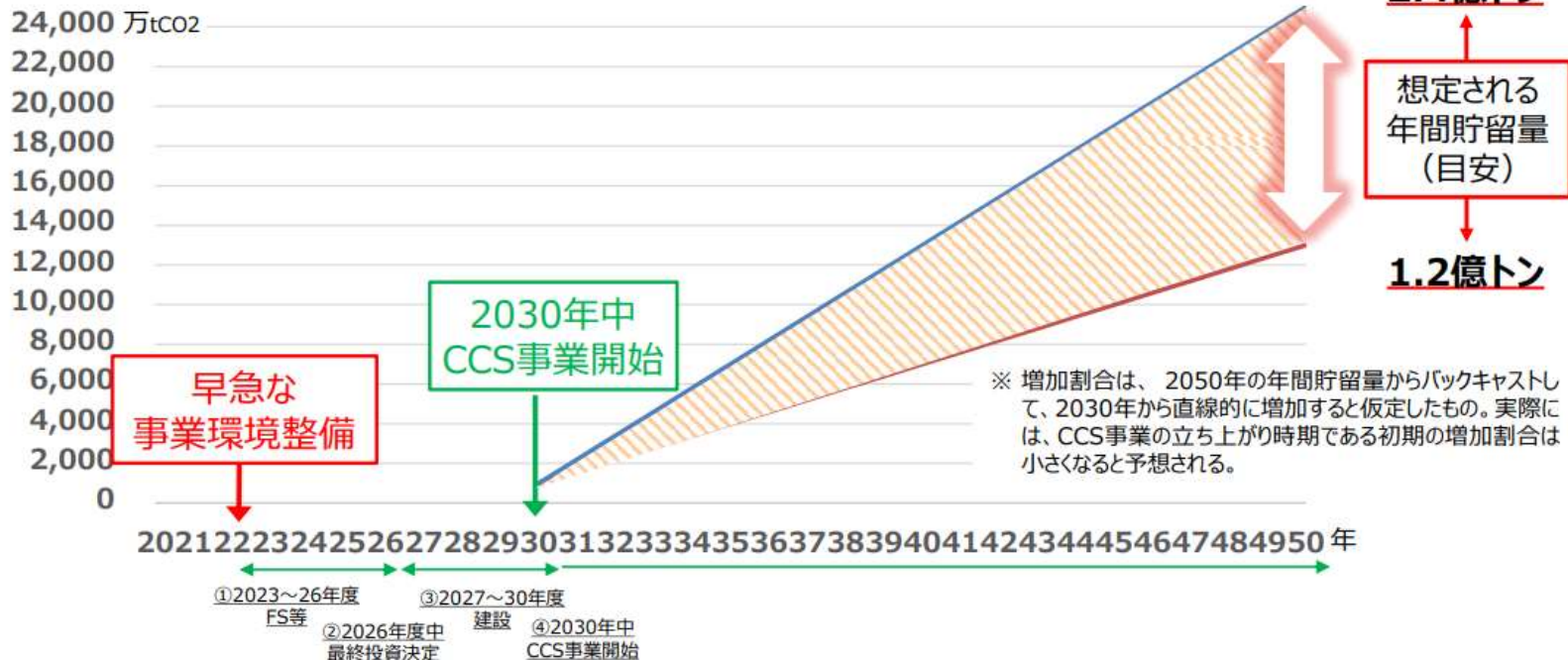
<https://www.eng.nipponsteel.com/news/2024/20240508.html>



2030年までのCCS事業開始に向けた事業環境整備の必要性

- IEAによる試算から推計すると、2050年時点のCCSの想定年間貯留量は年間約1.2~2.4億tが目安。2030年にCCSを導入する場合、2050年までの20年間の毎年、約600~1,200万tずつ年間貯留量を増やしていく必要。
- 2030年CCS導入の先送りは2050年カーボンニュートラルの実現に必要な年間貯留量の確保が困難となる懸念がある。

CCSの導入拡大イメージ



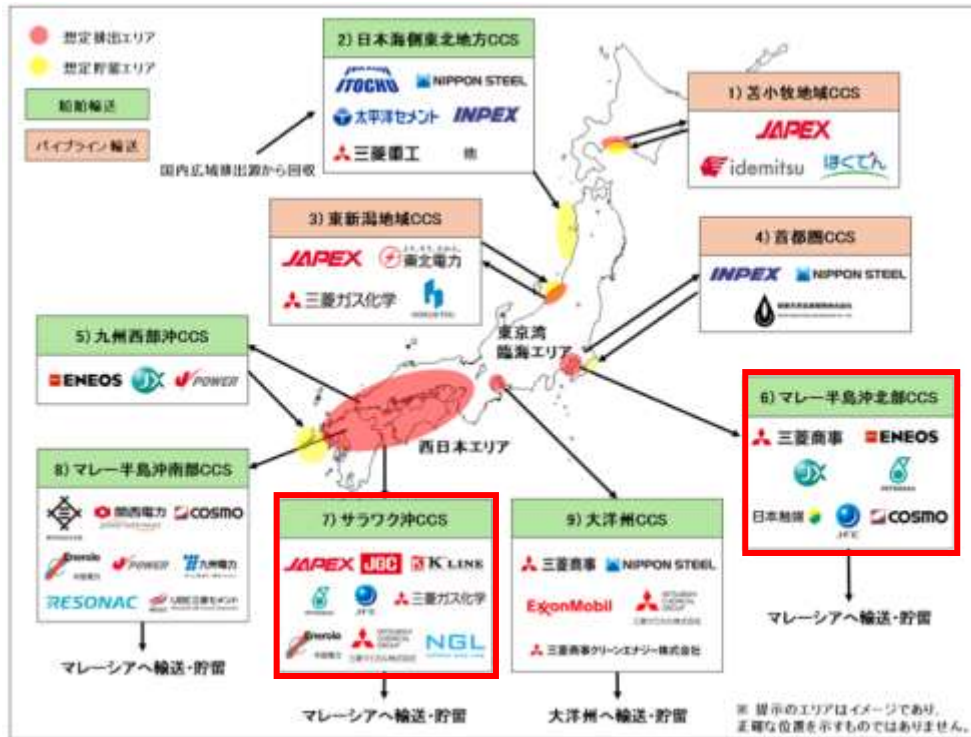
吸収液の大規模社会実装に向けて

【国内動向】

2024年5月24日

二酸化炭素の貯留事業に関する法律(CCS事業法)公布
 ロンドン議定書第6条改正受諾(CO₂越境輸送)

～2026年5月23日 貯留事業・導管輸送事業の施行



先進的CCS事業に採択された9地点 (R6年6月時点)

【必要な取組み】

千トンスケール製造への対応:

FY2026 FID(最終投資判断)

FY2030 CCS事業開始

に向けて、原料調達も含めた吸収液製造に関するリスク検討

吸収液原料製造および吸収液製造を担う化学会社との連携、協力

⇒スケールメリット・連続プロセス化によるコストダウン検討など

新たな吸収液開発

GI基金PJの成果(高性能吸収液)を活用しつつ、ユーザーの要望を開発へフィードバックしてユーザーフレンドリーな吸収液を目指す。

- ・劣化抑制
- ・発泡抑制
- ・吸収液単価低減

ISO 27913:2024 Pipeline transportation systems

➤ 6章：コンセプト開発と設計基準

CO₂パイプライン特有の設計要件および推奨事項が記載されている。

- 安全哲学、信頼性と可用性
- システム設計の原則：パイプラインの健全性確保のための要件。
 - ✓ CO₂>95mol%は業界慣行である。
 - ✓ 非凝縮性不純物(H₂、O₂、N₂、CH₄、Ar、CO)<5mol%は業界慣行である。
 - ✓ いかなる操業条件においても水相、水和物が生成しないように十分なマージンをもって成分仕様を決定する。
 - ✓ デンス相での最低操業圧力は不純物影響を考慮した気液境界圧力以上とする。
 - ✓ 軽い不純物成分はデンス相での不安定延性破壊に影響することを考慮する。
- 腐食防止の原則：
 - ✓ 内面腐食防止のためにはCO₂ストリームを十分に脱水することが基本である。
 - ✓ 水相が生成し腐食を生じないように、十分な設計マージンをもって最大水分量を設定する。
 - ✓ 内部腐食、ハイドレード形成防止のために、脱水と湿度管理を行う。
- フローアシュアランス：CO₂ストリームを問題なく輸送するための技術的な課題と対策。
- パイプラインの配置：ベントやポンプなどシステムの設計と配置に関する考慮事項。

海底下廃棄をすることのできるガスの基準

ロンドン条約
 (1972年:廃棄物その他の物の投棄による海洋汚染の防止に関する条約)日本は1980年10月に締結

海洋汚染等防止法
 (海洋汚染等及び海上災害の防止に関する法律)
 (ロンドン条約・96年議定書の国内担保法)

「96年議定書 附属書I」
 1.8 Carbon dioxide streams from carbon dioxide capture processes for sequestration

4 Carbon dioxide streams referred to in paragraph 1.8 may only be considered for dumping, if:

.1 disposal is **into a sub-seabed geological formation**; and

.2 **they consist overwhelmingly of carbon dioxide***. They may contain incidental associated substances derived from the source material and the capture and sequestration processes used; and

.3 **no wastes or other matter are added** for the purpose of disposing of those wastes or other matter.

「海洋汚染等及び海上災害の防止に関する法律施行令」
 第十一条の五 法第十八条の七第二号の政令で定める基準は、次のとおりとする。

一 **アミン類**と二酸化炭素との化学反応を利用して二酸化炭素を他の物質から分離する方法により集められたものであること。

二 当該ガスに含まれる二酸化炭素の濃度が**体積百分率九十九パーセント以上**(当該ガスが石油の精製に使用する水素の製造のために前号に規定する方法が用いられたことにより集められたものである場合には、体積百分率九十八パーセント以上)であること。

三 **二酸化炭素以外の油等**が加えられていないこと。



CCS事業法公布に伴う18条七の改定により見直し

*外務省和訳

「当該二酸化炭素を含んだガスが極めて高い割合で二酸化炭素から構成されている」

Northern Lights: Liquid CO₂ Quality Specifications

Northern Lights JV DA用のCO₂製品仕様: DNVが主導し、上限値を定義

Component	Unit	Limit for CO ₂ Cargo within Reference Conditions ¹	
Carbon Dioxide (CO ₂)	mol-%	Balance (Minimum 99.81%)	
Water (H ₂ O)	ppm-mol	≤ 30	
Oxygen (O ₂)	ppm-mol	≤ 10	
Sulphur Oxides (SO _x)	ppm-mol	≤ 10	
Nitrogen Oxides (NO _x)	ppm-mol	≤ 1.5	Updated component
Hydrogen Sulfide (H ₂ S)	ppm-mol	≤ 9	
Amine	ppm-mol	≤ 10	
Ammonia (NH ₃)	ppm-mol	≤ 10	
Formaldehyde (CH ₂ O)	ppm-mol	≤ 20	
Acetaldehyde (CH ₃ CHO)	ppm-mol	≤ 20	
Mercury (Hg)	ppm-mol	≤ 0.0003	Updated component
Carbon Monoxide (CO)	ppm-mol	≤ 100	
Hydrogen (H ₂)	ppm-mol	≤ 50	
Cadmium (Cd), Thallium (Tl)	ppm-mol	Sum ≤ 0.03	Moved to solids
Methane (CH ₄)	ppm-mol	≤ 100	
Nitrogen (N ₂)	ppm-mol	≤ 50	
Argon (Ar)	ppm-mol	≤ 100	
Methanol (CH ₃ OH)	ppm-mol	≤ 30	New component
Ethanol (C ₂ H ₅ OH)	ppm-mol	≤ 1	
Total Volatile Organic Compounds (VOC) ²	ppm-mol	≤ 10	
Mono-Ethylene Glycol (MEG)	ppm-mol	≤ 0.005	
Tri-Ethylene Glycol (TEG)	ppm-mol	Not allowed	
BTEX ³	ppm-mol	≤ 0.5	
Ethylene (C ₂ H ₄)	ppm-mol	≤ 0.5	
Hydrogen Cyanide (HCN)	ppm-mol	≤ 100	
Aliphatic Hydrocarbons (C _n +) ⁴	ppm-mol	≤ 1,100	
Ethane (C ₂ H ₆)	ppm-mol	≤ 75	
Solids, particles, dust	Micro-meter (µm)	≤ 1	

基準条件:

貯蔵タンク内の液化CO₂上の蒸気
 圧力範囲: 13 bar(g) ~ 15 bar(g)
 温度範囲: -26.5 °C ~ -30.5 °C

が基準条件内にある場合、全ての圧力接続された貯蔵タンク内の液化CO₂とCO₂蒸気は、基準条件内にあるとみなされる。

総揮発性有機化合物(VOC):

エタノール、メタノール、ホルムアルデヒド、アセトアルデヒド、および BTEX(ベンゼン、トルエン、エチルベンゼン、キシレン)

に加え、以下の成分を含む: 1-プロパノール < 1ppm-mol、2-ブタノール < 1ppm-mol、1,2,4-トリメチルベンゼン < 5ppm-mol、酢酸メチル < 10ppm-mol、アセトン < 10ppm-mol、ヘキサナール < 10ppm-mol、ジエチルエーテル < 10ppm-mol、アセトニトリル < 10ppm-mol。その他のVOCは認められない

4) 炭化水素の総量は1,100ppm-molを超えない。炭化水素グループの個別制限値: C3 < 1,100ppm-mol、C4-C5 < 815ppm-mol、C6-C7 < 75ppm-mol、C8-C9 < 8ppm-mol。C10+は許されない。

CO₂回収率向上に関するDOEの見解

How to achieve CO₂ high capture rates?

Capture Technology	90% CO ₂ Capture	99% CO ₂ Capture	Comments
Chemical absorption 化学吸収法	+	+	
Physical absorption 物理吸収法	+	+	
Solid sorbent – chemical 固体吸収材	+	+	
Solid sorbents – physical 吸着剤	+	+/-	Trade off with CO ₂ purity Process design optimization
Chemical looping ケミカルルーピング	+	+	
Polymeric membranes* 高分子膜*	+	- 達成不可能	Trade-off with CO ₂ purity High compression/low vacuum needed
Metal membranes (H ₂) 金属膜 (H ₂)	+	+	
Refrigeration 凍結法	+	+/-	Higher capture rates achievable with CO ₂ -solid formation; purity issues with liquid formation

(+) achievable, (-) not achievable

*technically achievable with higher selectivity

+ 達成可能、- 達成不可能

*選択性が高ければ技術的に達成可能

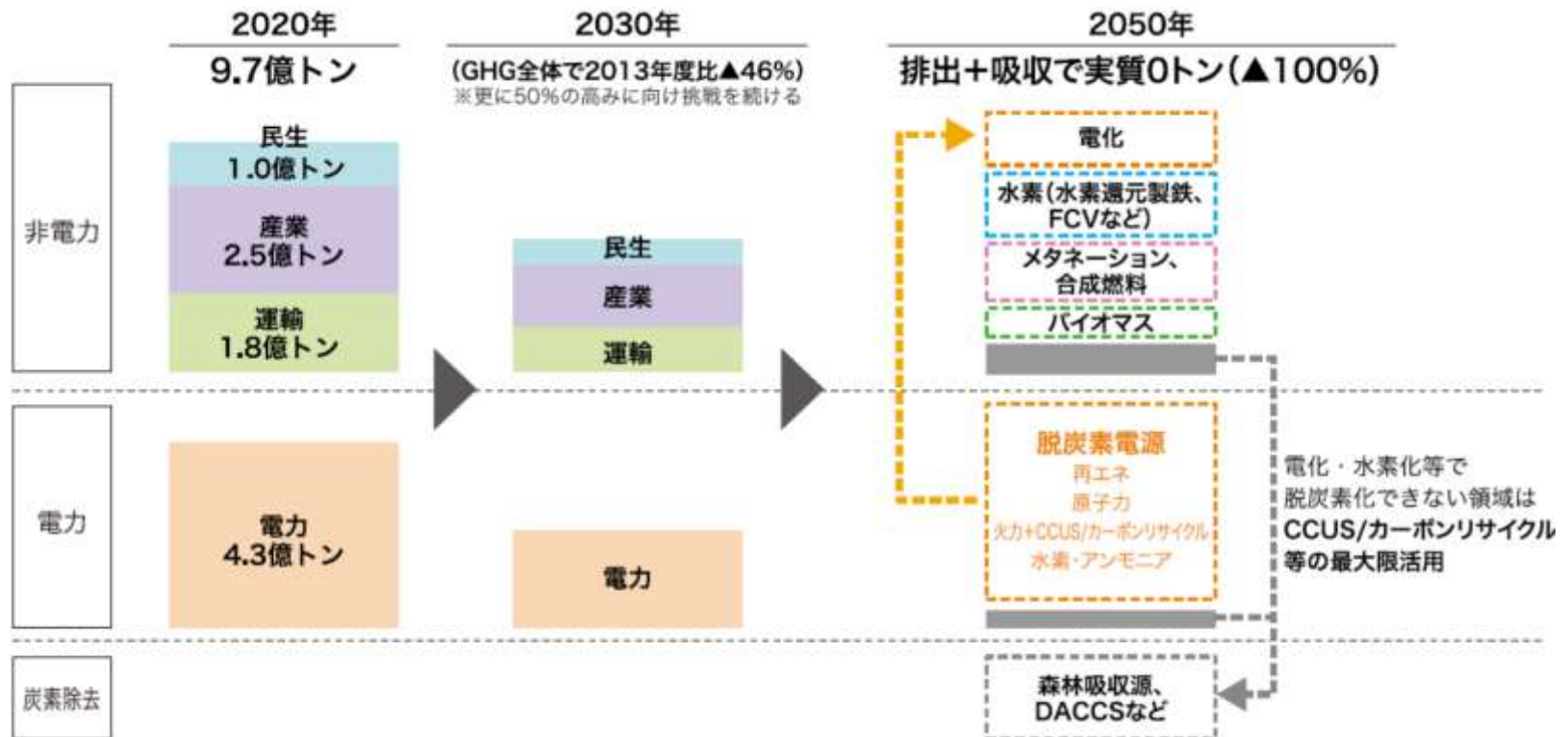
Adapted from IEAGHG (2019)

DOE:開発目標95+%のCO₂回収率が実施されている

- 物理吸着：回収率とCO₂純度はトレードオフの関係
- 高分子膜：低CO₂濃度排ガス(～4%)からCO₂回収率99%は困難(例外：促進輸送膜)

国内の2050年カーボンニュートラルのイメージ

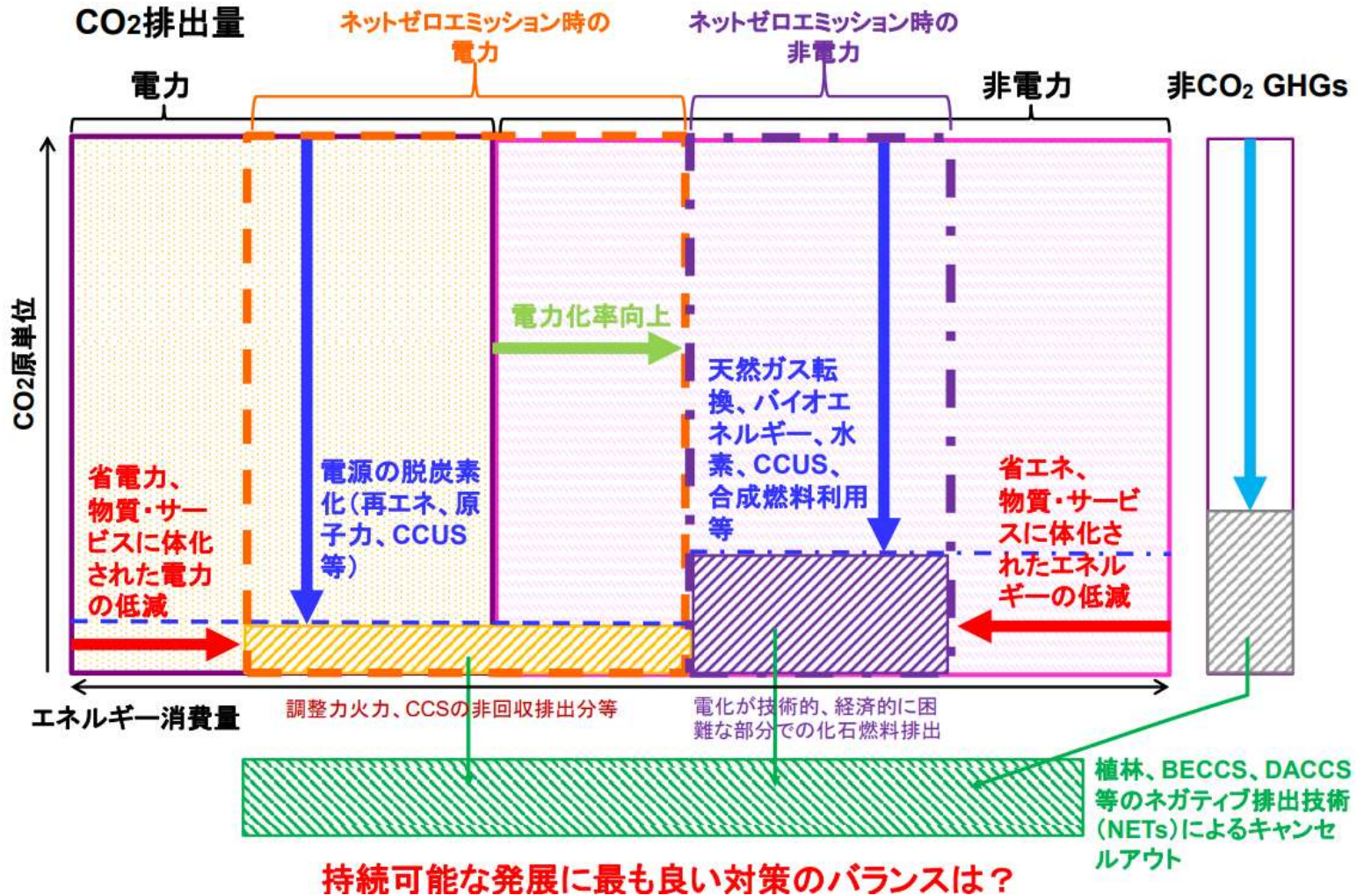
- カーボンニュートラル実現には、電力部門は、原子力、再エネ、水素・アンモニア、CCUSで構成することが必要。
- 海外の再エネ、CCSの活用手段として、輸入水素・アンモニアなどの利用も重要。
- CCS無しの化石燃料利用がある場合には、大気中の炭素除去技術(バイオマスや直接空気回収)でのオフセットが必要。



出典:https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/johoteikyo/energyissue2023_1.html

※数値はエネルギー起源CO₂

ネットゼロエミッションへの対策のイメージ

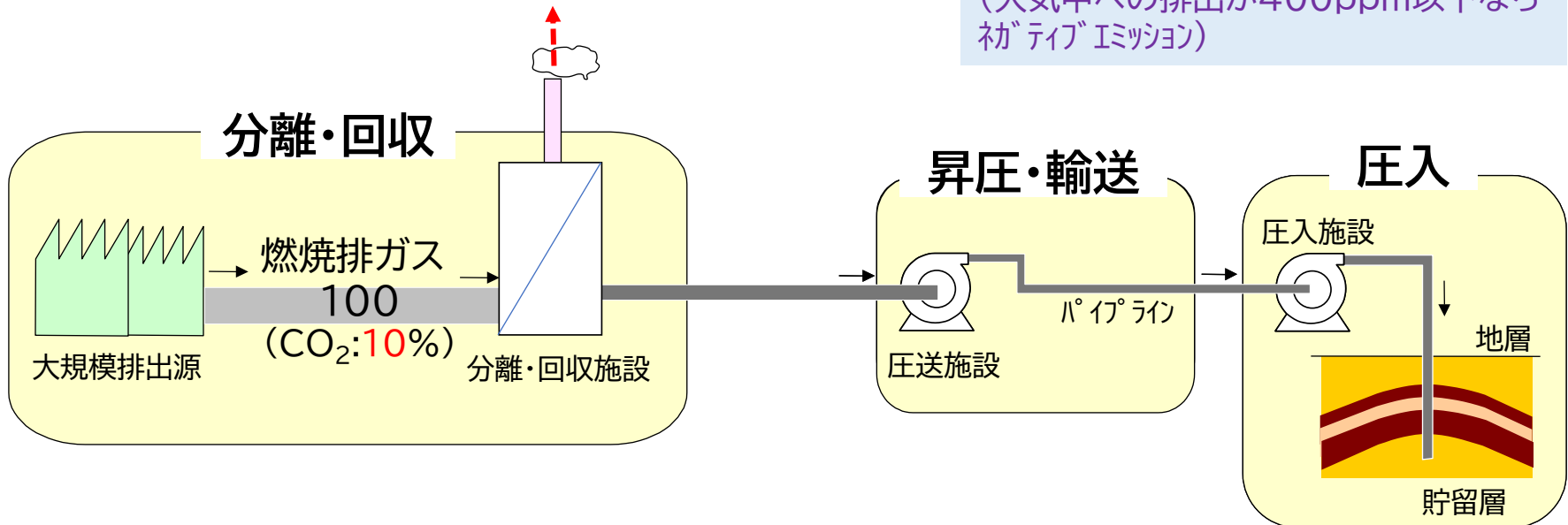


CO₂回収率と純度

大気中への排出CO₂
 (1) 回収率90%
 (0.5) 回収率95%
 (0.1) 回収率99%

回収率90%⇒95%なら
 DACの規模は半分、
 99%なら1/10で済む

(大気中への排出が400ppm以下なら
 尙タイプエミッション)



回収したCO₂の性状

CO ₂ (9)	回収率90%(純度100%)
CO ₂ (9)+Air等(0.47)	回収率90%(純度95%)
CO ₂ (9)+Air等(0.09)	回収率90%(純度99%)
CO ₂ (9.5)+Air等(0.5)	回収率95%(純度95%)
CO ₂ (9.9)+Air等(0.1)	回収率99%(純度99%)

化学吸収法による高CO₂回収率検討(技術動向)

Table 2: Summary techno-economic assessment for a natural gas fired combined cycle with PCC at different CO₂ capture rates

	NGCC without PCC	NGCC with PCC		
		Standard PCC plant design		
		90%	95%	99% ⁷
Gross power output (MW)	890	890	890	890
Net power output (MW)	878	728	720	691
Net plant HHV efficiency (%)	52.66	43.91	43.37	41.94
Net plant LHV efficiency (%)	58.25	48.57	47.97	46.39
CO ₂ emission intensity (t/MWh _e)	0.349	0.0372	0.0176	0.000
Equivalent electrical energy consumption (MWh _e /t CO ₂)	-	0.523	0.526	0.583
Specific capital requirement (€/kW _{net}) ⁸	939	1611	1629	1716
LCOE (€/MWh) ⁹	52.9	77.6	78.9	82.7
CO ₂ avoided cost (€/t CO ₂)	-	79.3	78.6	85.5

- 90%、95%回収でエネルギー消費/コストは同程度
- 99%回収では共に上昇している

化学吸収法による高CO₂回収率検討(技術動向)

- 標準液MEA30wt%aqのモデル検討では回収率98%程度からエネルギー諸費が上昇。

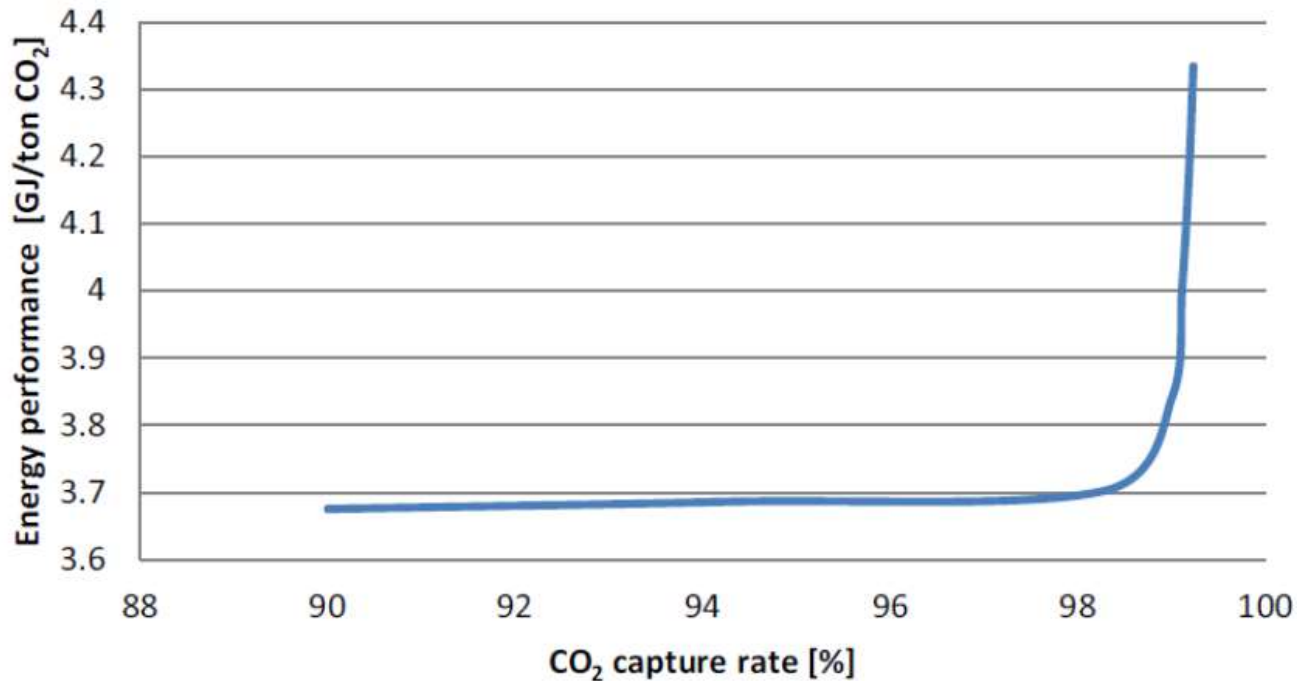
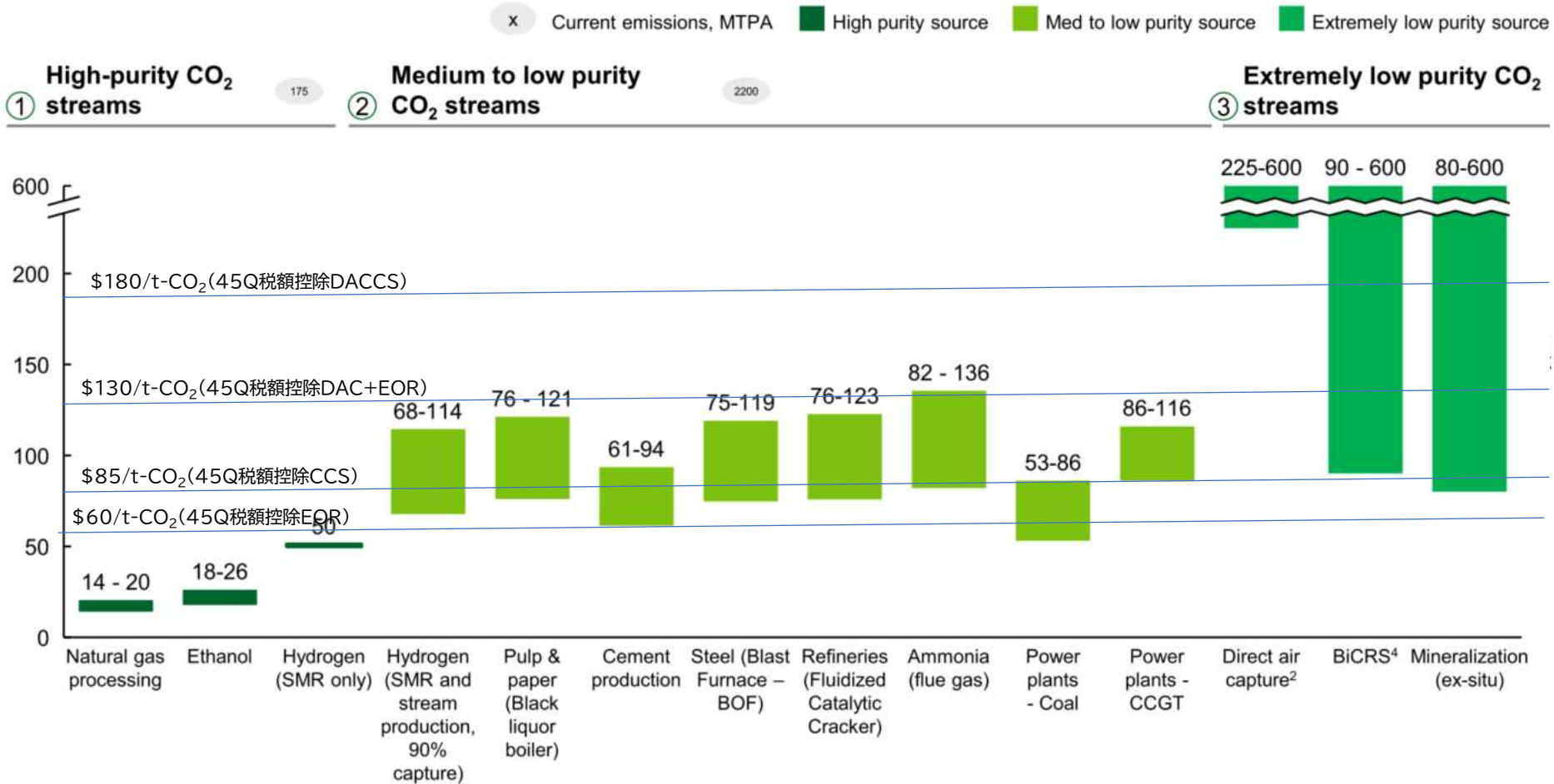


Figure 7 Reboiler duty as a function of CO₂ capture rate for 30% MEA (Flø et al. 2016)

Ref) IEAGHG Technical Report 2019-02 (2019)

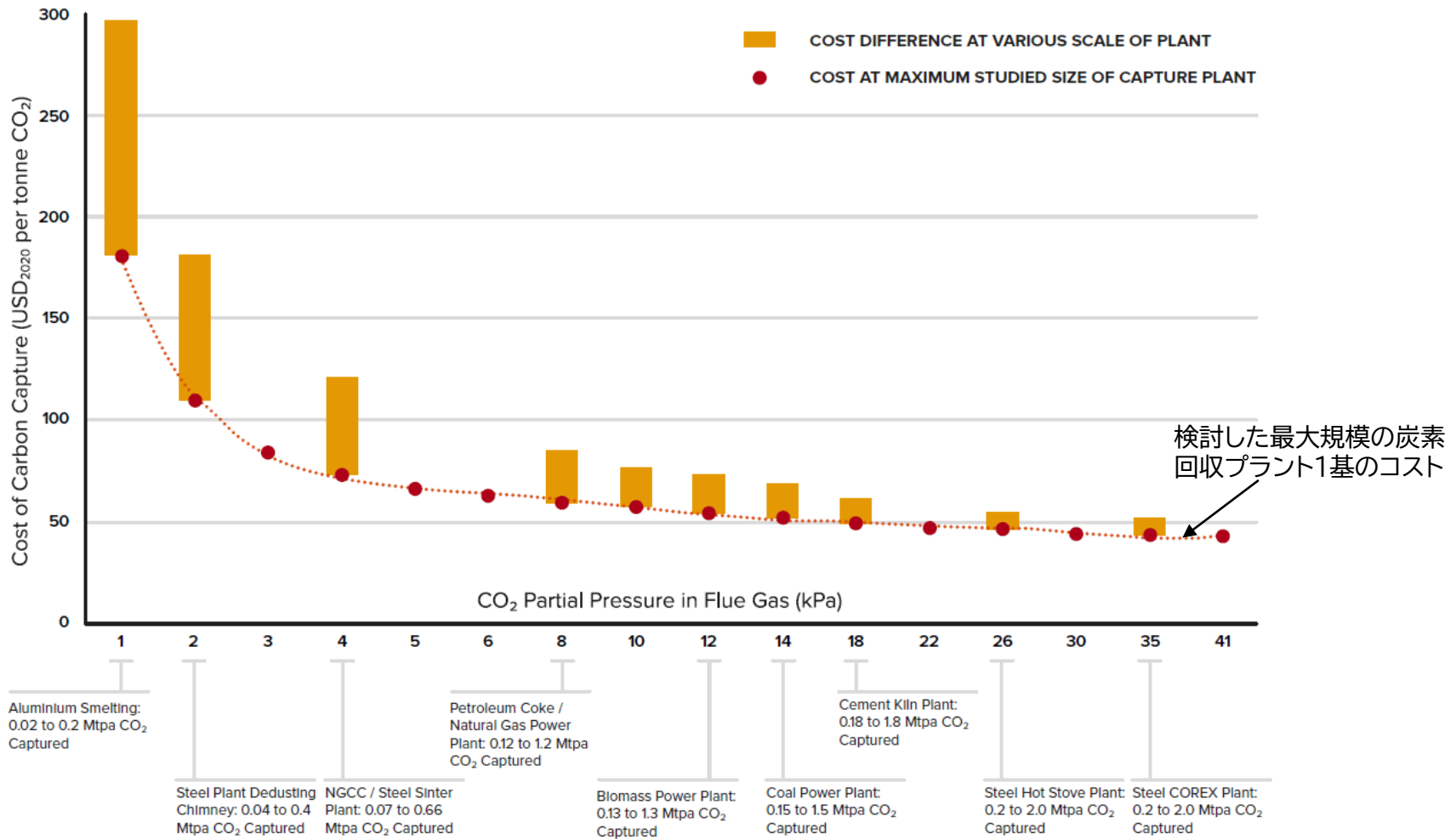
各種排出源からのCO₂分離回収コスト

Carbon capture costs¹ excluding storage and transport costs, \$/tonne CO₂

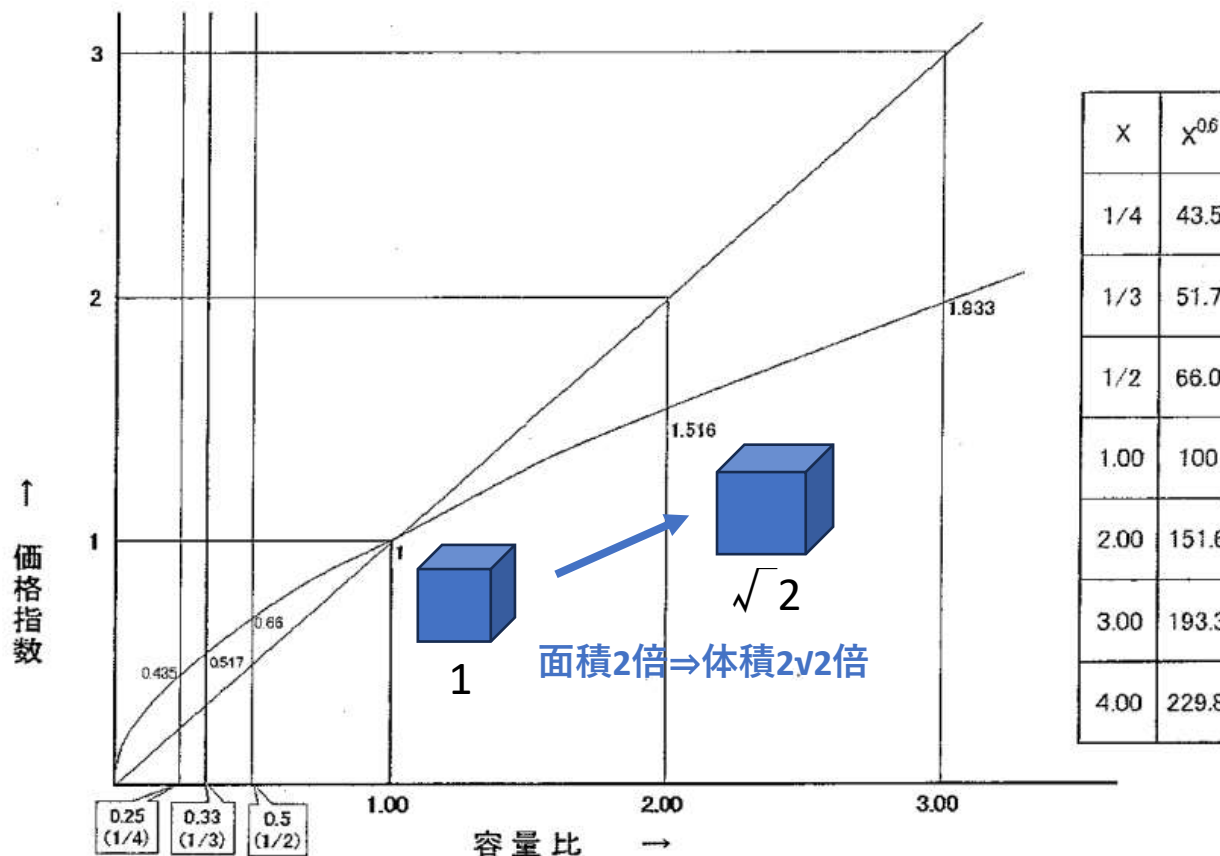


CO₂分離回収コスト:

CO₂分圧と規模の影響(常圧排ガス)



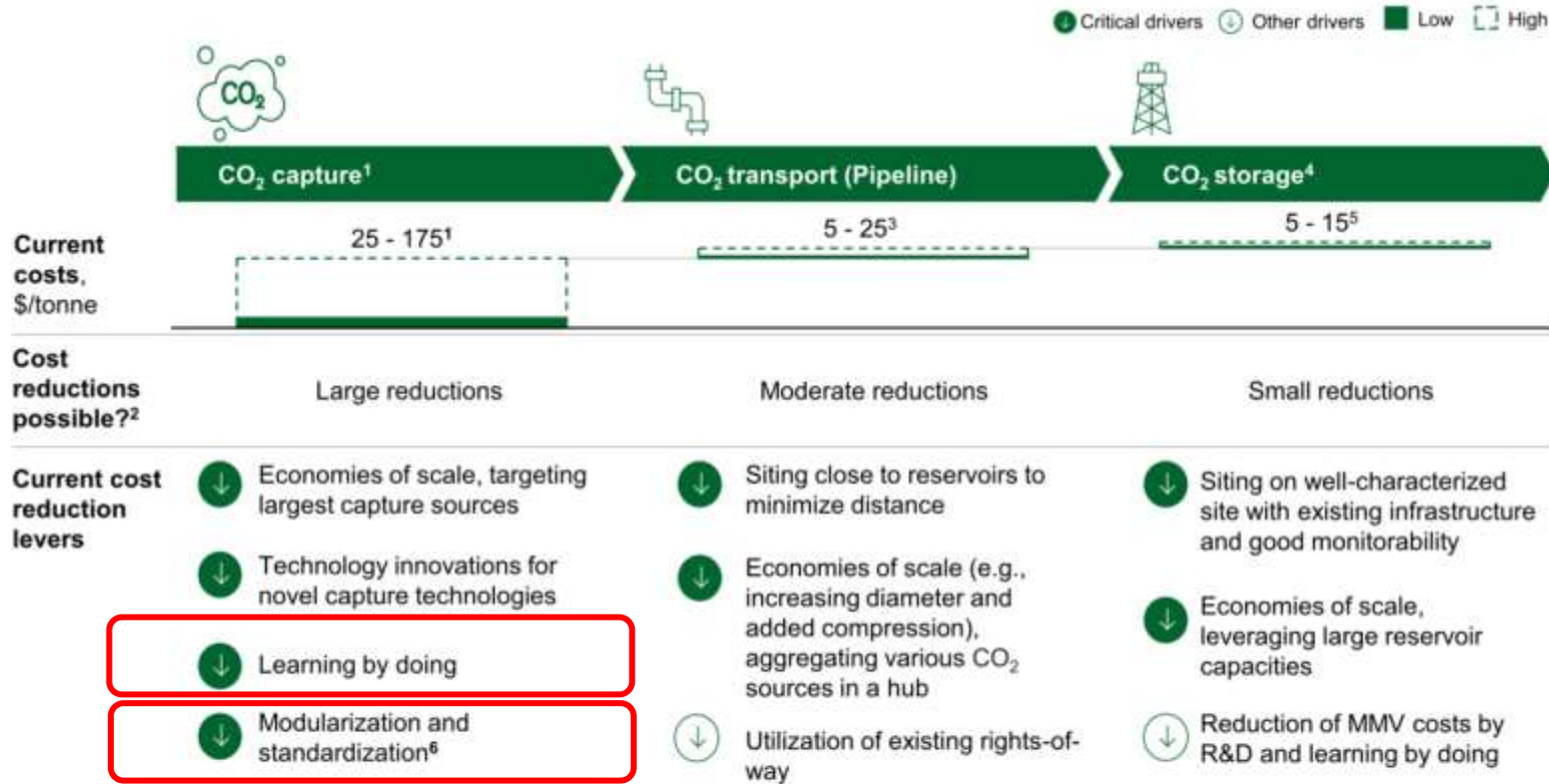
0.6乗則法（能カーコスト曲線法）に基づく積算技法



CO₂回収規模:大 ⇒ CO₂トン当たりの回収コスト低下
 (逆に言えば、規模が小さいと割高になる)

Capture drives the majority of unit costs for CCUS and represents the majority of cost reduction potential

Demonstration and initial commercial projects are critical to achieving cost declines through “learning-by-doing”.



1 Refers to CO₂ capture broadly across sectors examined in this report (see Figure 1); Costs drawn from EFl Foundation, "Turning CCS Projects in Heavy Industry & Power into Blue Chip Financial Investments"
 2 Generalized across sectors. Individual sectors will have sector-specific cost reductions
 3 Approximate costs based on published studies by the European Zero Emission Technology and Innovation Platform, the National Petroleum Council, and GCCSI process simulation for a 30 year asset life. All costs have been converted to a U.S. Gulf Coast basis. Lower end of pipeline cost assumes 20 MTPA, 180 km onshore pipeline. Upper end of pipeline cost assumes 1 MTPA, 300 km onshore pipeline.
 4 Utilization routes also exist including, but not limited to, conversion of CO₂ into syngas or plastics and utilization of CO₂ in EOR and building materials
 5 Figure represents a levelized cost of site screening, site selection, permitting & construction, operations, and site closure and post-injection site care
 6 Modularization will be a more critical driver for certain technology types than for others
 Note: Supply chain risk and technical risk across the CCS value chain has been found to be low (DOE CCS Supply Chain Deep Dive Assessment)
 Source: Capture costs from EFl Foundation, "Turning CCS Projects in Heavy Industry & Power into Blue Chip Financial Investments"; Transport costs from Global CCS Institute, "Technology Readiness and Costs of CCS"; Storage costs from BNEF

大気中からのCO₂回収(Direct Air Capture)の位置づけ

DACの利点:大気はどこにでもある…
貯留サイトの直上、Utilization設備に隣接
等、どこに設置しても良い
⇒エネルギーコストが安い場所で実施可能?



DIAGRAM BY JOE ZEFF, NATIONAL GEOGRAPHIC

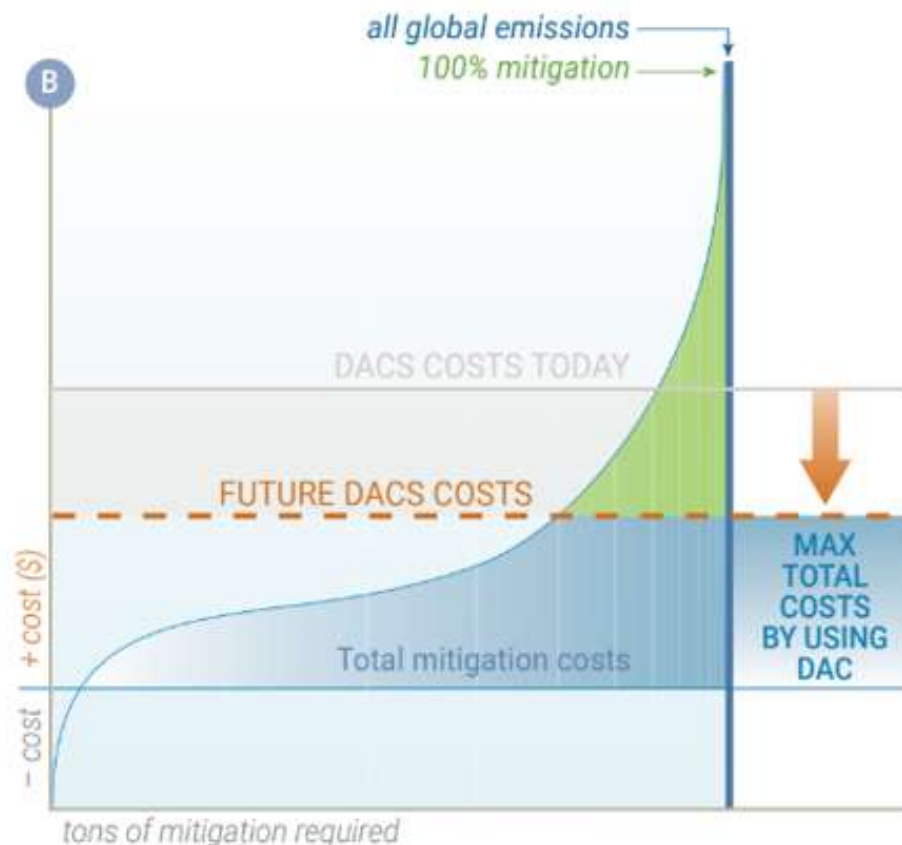


Figure. Conceptual cost curves for total climate mitigation with DAC as a backstop technology option.

出典: *Direct Air Capture of Carbon Dioxide, ICEF Roadmap 2018*

DACCS(Direct Air Capture with Carbon Storage)
⇒ **Backstop technology**(CN達成に必要な削減費用の上限値を決める技術)

Global DAC Deployments

<https://daccoalition.org/global-dac-deployments/>

Global DAC Deployments

This map tracks all of the announced, developing, and built DAC facilities globally. Created by AlliedOffsets and Direct Air Capture Coalition. To contribute to the map, please submit your data here: <https://forms.gle/6KvHZGPCuixzx48I7>
[Show less](#)

Global DAC Deployments

● Canceled	1
● Planned	4
● Announced	22
● Prototype	1
● Pre-FEED Study	3
● FEED Study	12
● Construction	25
● Operational	31
● Completed	1



[MegaDAC Database](#) に登録されているDAC企業:

DAC Coalition -DAC企業50の技術分類-

2025年1月27日時点

技術分類	企業数	企業名
◆吸収液 ・KOH水溶液 ・NaOH水溶液 ・Ca(OH) ₂ 水溶液 ・アミノ酸水溶液	14	Aircela Inc, AirMyne, CAPTURE6, CARBONMINER, CARBON ATLNTIS, CARBON BLADE, EDAC Labs, GAIA Refinery, Greenlyte Carbon Technologies, HOLOCENE, Mission Zero Technologies, NORDIC DAC GROUP, Parallel Carbon Limited, RedoxNRG, X/44
◆固体吸収材 ・酸化カルシウム ・ハニカム+アミン ・ポリアミン-Cu錯体	18	8 RIVERS, Aircapture, Airhive, Carbon Capture, Clarity Technology, Climeworks , Global Thermostat , HEIMDAL, Heirloom Carbon , JEEVAN Climate Solutions, LowCarbon, Noya, ORIGEN, ReCarbn, Sirona Technologies, Skytree, Soletair power, Sustaera
◆(物理)吸着材 ・活性炭、活性炭素繊維 ・ゼオライト ・金属有機構造体(MOF)	12	AspiraDAC, AVNOS Inc, DACMA, Cabon Reform, Carbyon, NEG8 CARBON, NEOCARBON, REMOVR, SOUTH OCEAN AIR ,SPIRITUS, TerraFixing, ZERO CARBON PRODUCTION
◆膜分離	2	RepAir Carbon Capture (イオン透過膜) UCANEO (生体膜)
◆不明	3	HAGO ENERGETICS, OCTAVIA CARBON, Thalo Labs

稼働中/予定のDACプラントとコスト

*各企業HP,各種資料よりRITE作成

DAC企業/技術	プラント	CO ₂ 回収規模 (t/y)	コスト
Carbon Engineering (Canada) KOH吸収液 Occidental Petroleumが買収	 <p>STRATOS (米国 テキサス)</p>	年間最大 50 万トンの CO ₂ を回収できるように設計されており、2025 年半ばに商業的に稼働予定 (代替燃料による削減平均コストが \$ 600/ t-CO ₂ を超える脱炭素化が難しい輸送業界に短期的に低コストの削減ソリューションを提供できるとしている)	不明、APS (American Physical Society)の試算によると \$ 600/ t-CO ₂ 程度
Climeworks (Switzerland) アミン固体吸収材	 <p>Mammoth (アイスランド)</p>	(Orca)2021年9月~4,000t/y (Mammoth)2022年6月着工、2025年中に36,000t/yを目指す (2024年10月時点6000t/y、世界最大) (2050年までに10億t/y達成)	CHF20,50,100のレベル別で料金を設定、DNV証書発行 クレジット:CHF1,250/t-CO ₂ (19,901 人 (個人) が参加中) コスト公表値: \$ 600/t-CO ₂ 目標(2040年) \$ 300~400/t-CO ₂
Heirloom (USA) Ca(OH) ₂ 吸収材	 <p>1,000t/y 商用プラント (Tracy, CA)</p>	1,000t/y DAC Hubs Project 2拠点 (ルイジアナ、ノースウェスト) に参画	2035年までに26,900トン分のカーボンクレジットを総額2,660万ドルで Stripe, Meta, Shopify, JPMorgan, Mckinsey, Workday, H&M, Autodeskに販売する契約を2023年11月に締結 (およそ \$ 1,000/t-CO ₂) 目標 \$ 100/t-CO ₂
AspiraDAC (Australia) 吸着剤 (MOF)	 <p>Prototype Stage DAC装置</p>	310t/y Southern Green GasがNew South Wales州の休耕地にDAC装置を設置	クレジット : 900€/t-CO ₂ (Puro Standardを満たすPJに対してクレジットを発行) 2024年~事業開始
Global Thermostat (USA) アミン固体吸収材 Zero Carbon Systems が買収	 <p>自社敷地内(デンバー)</p>	1,000t/y Haru Oni Project (チリMagallanes) でスケールアップ装置を製作中	現状 : \$ 875/t-CO ₂ 目標 : (2025年) \$ 300/t-CO ₂ (2050年) < \$ 200/t-CO ₂ (願わくば\$100)/t-CO ₂

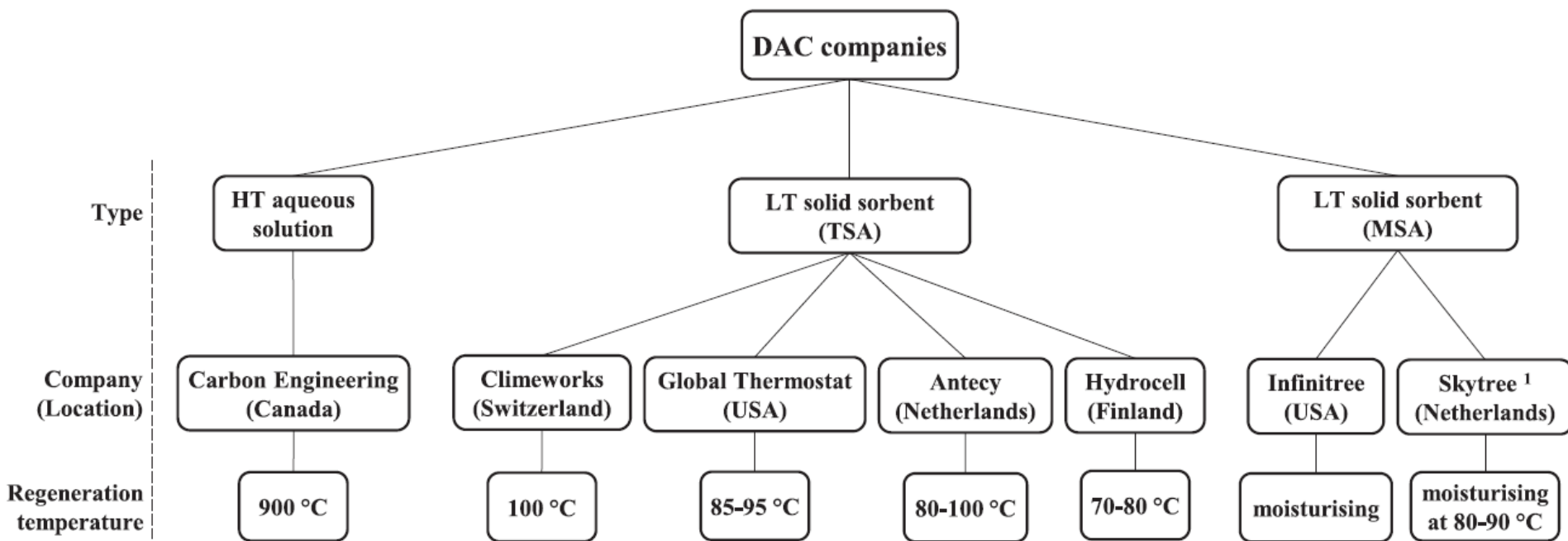
現状のDACコストは極めて高い

DAC技術開発の動向①

2つの技術的アプローチ:

① **Liquid DAC (L-DAC)**: 塩基性水溶液 (水酸化カリウムなど) を利用、捕捉した CO₂ を高温 (300~900 °C) で動作する一連のユニットを通じて放出

② **Solid DAC (S-DAC)**: 常圧から低圧 (真空下)、中温 (80~120 °C) で動作する固体吸着剤 (吸収材) を使用



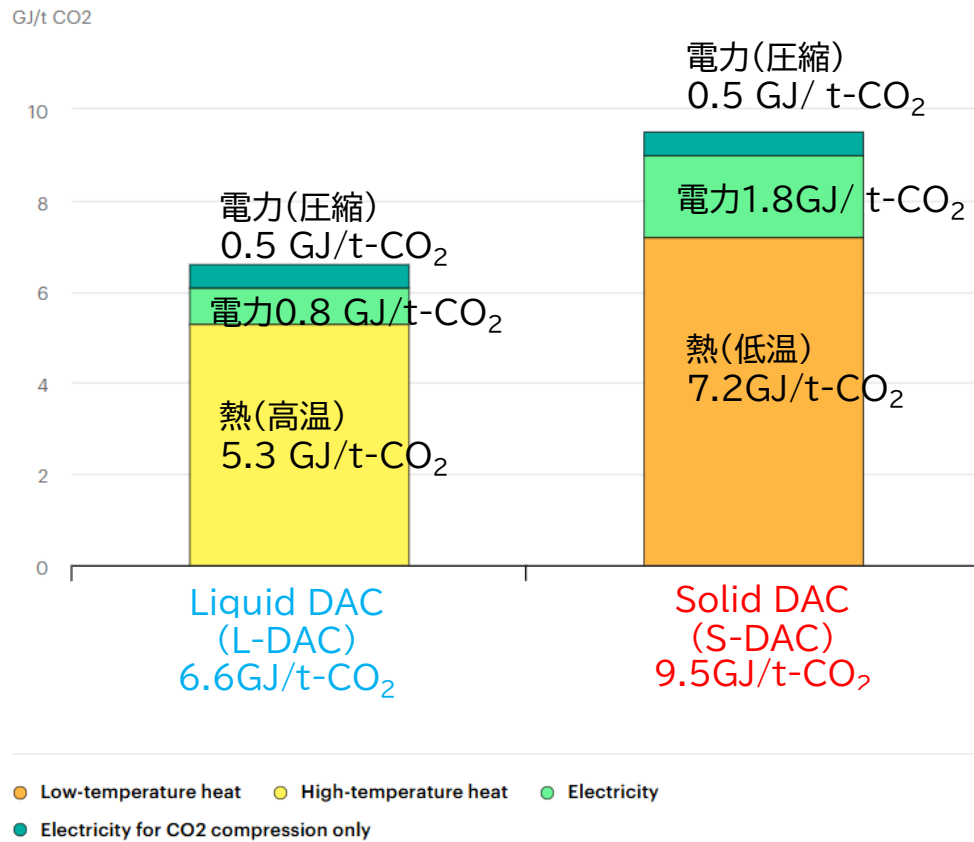
⁽¹⁾ electrostatic absorption and moisturising desorption

Abbreviations: high temperature (HT), low temperature (LT), moisture swing adsorption (MSA), temperature swing adsorption (TSA)

DACに必要なエネルギー

DACによる大気中のCO₂の回収は、現在、エネルギーを大量に消費する。

Energy needs of L-DAC and S-DAC, 2023



大気から希薄なCO₂を回収するには、点源から回収するよりも多くのエネルギーが必要、コストも高くなる。

DAC技術開発の動向②

エネルギー低減を目的とした新たな技術開発の動き

①電気スイング吸着(ESA)-DAC :

固体電極が負に帯電するとCO₂を吸着し、正に帯電するとCO₂を放出する電気化学セルを使用. 米国と英国で開発されている。

②物理吸着(ゼオライト):

ゼオライトを利用した最初のDACプラントが2022年にノルウェーで稼働を開始(回収したCO₂を温室での野菜栽培に使用). 2025年までに2,000 t-CO₂/yearまで拡大する計画(Removrプロジェクト).

③パッシブDAC:

水酸化カルシウムと大気中のCO₂を石灰石に変える自然のプロセスを加速。

①～③ : <https://www.iea.org/energy-system/carbon-capture-utilisation-and-storage/direct-air-capture>

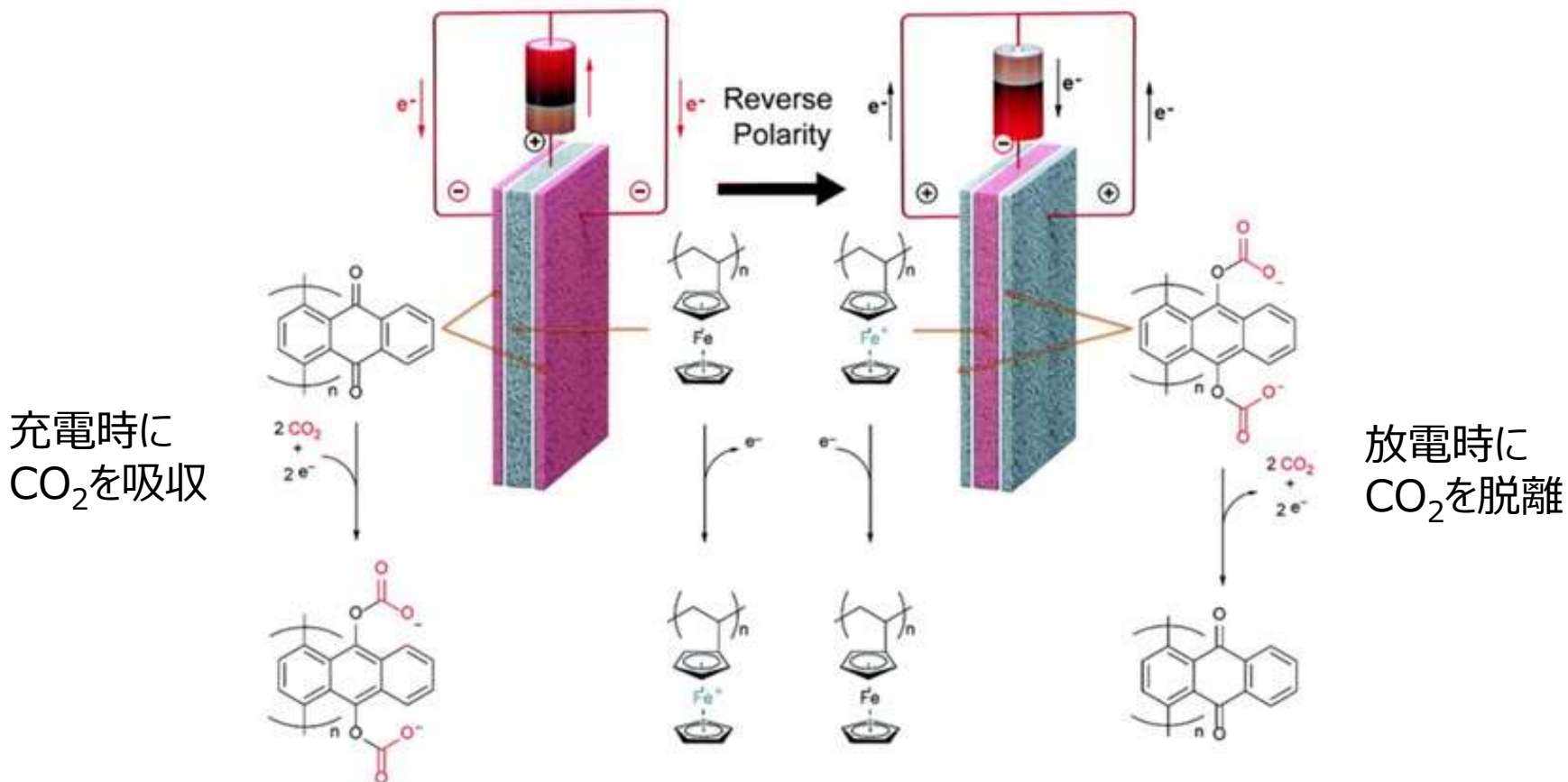
上記に加え、

④DOC(Direct Ocean Capture):

海洋中からのCO₂回収(海洋のCO₂吸収能力の増大)

ポリアントラキノン/CNT電極を用いた電気スイングによるDAC

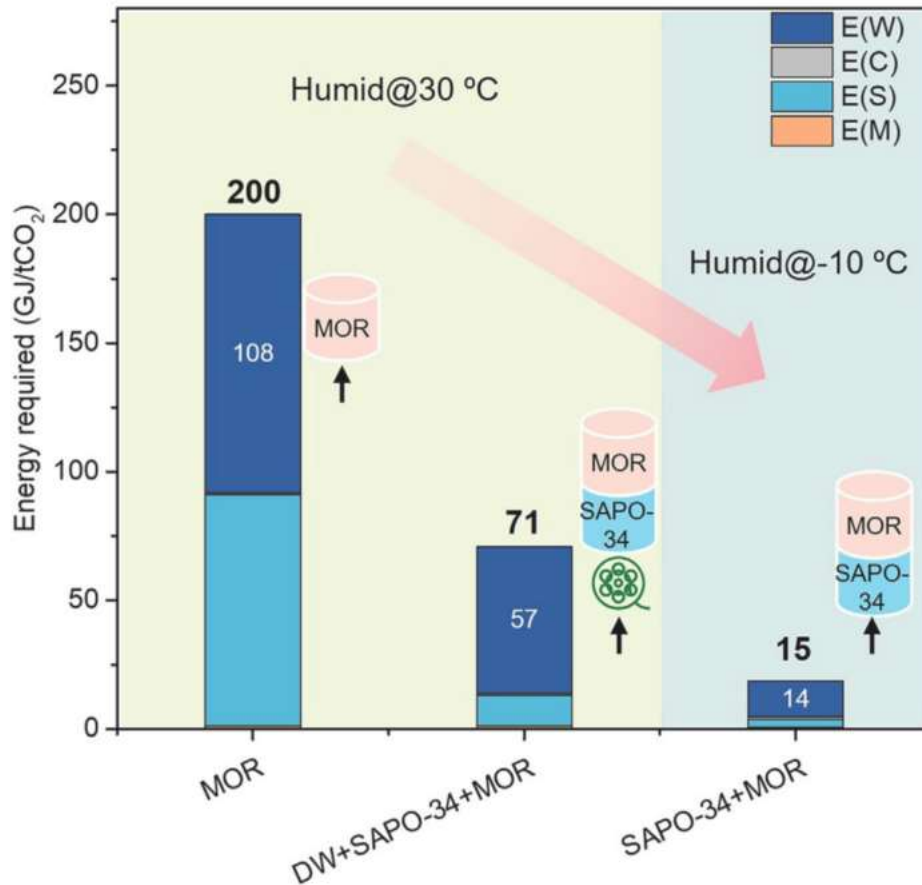
充放電によりCO₂を吸収/脱離する分子(ポリアントラキノン)で電池セルを構成



多孔質電極と電解質セパレーターを備えたエレクトロスイング吸着電気化学セルの概略図

物理吸着の適用性

ゼオライトによるDACの可能性検討(California Institute of Technology)



E(M), mechanical energy,
E(C), heat required for CO₂
E(S), heat required for solids,
E(W) heat required for H₂O

AQSOA Z02+ MORはDACに利用可能で、100°Cの低温で完全に再生可能

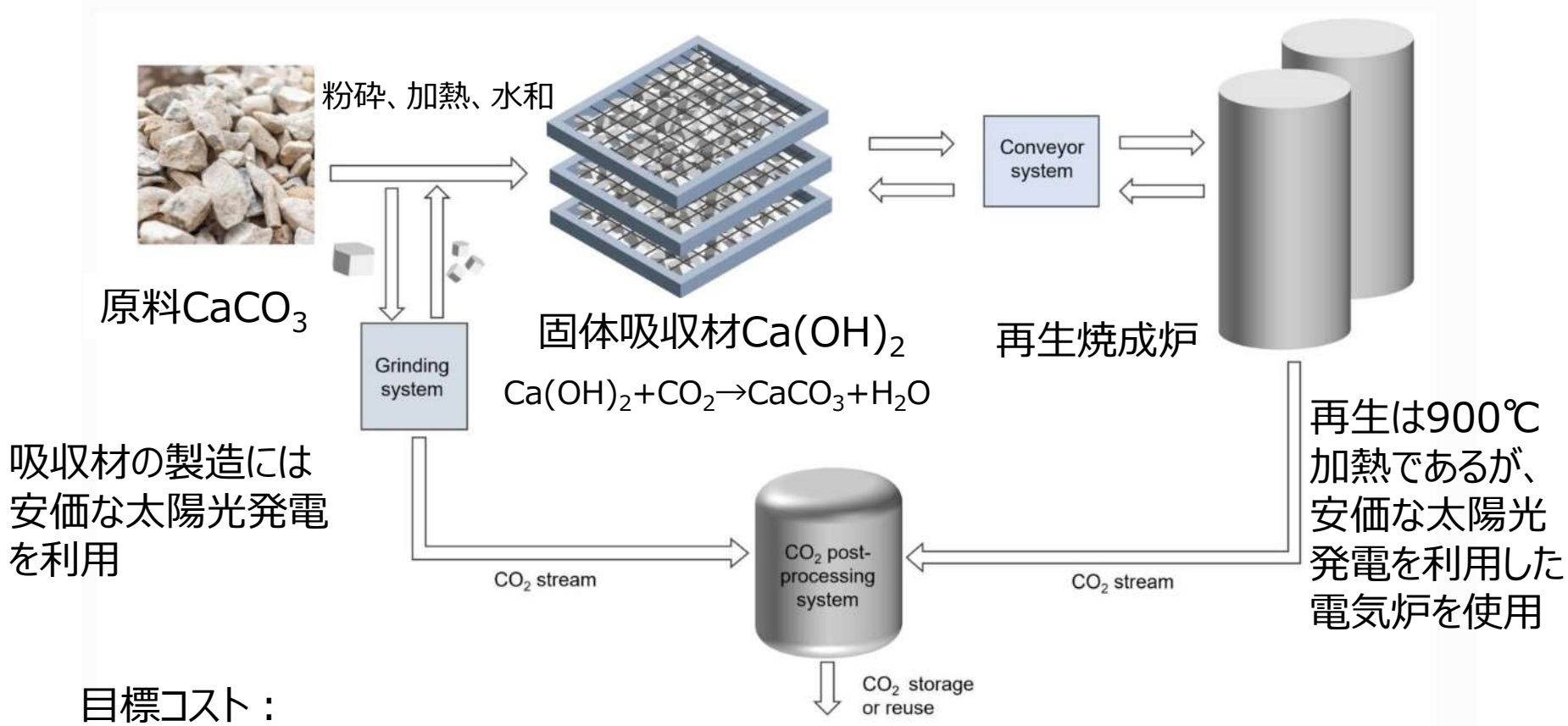
物理吸着剤を用いたDACでは水管理が重要な要素

最適化されたシステムのCO₂回収コストは\$246~568/t-CO₂

DACは水利用が統合されたシステムで稼動すれば採算が取れる？

Heirloom Carbon(米国)

CaCO₃を原料とした固体吸収材を使用するDACシステム



吸収材の製造には安価な太陽光発電を利用

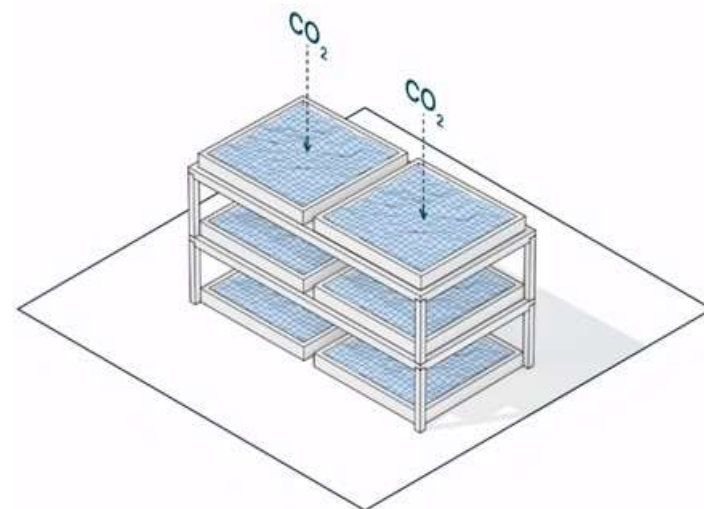
目標コスト：
\$ 100/t-CO₂

Carbon Cure社のコンクリート製造に使用
(DAC-to-concrete storage pathway)

2023年11月に1,000 t /Yの商用DACプラントが完成



Tracy, CAに完成した商用DACプラント



トレイに $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 吸収材を充填
垂直に積み重ねて使用する

プラントで分離回収した CO_2 は、Carbon Cure社のコンクリート製造に使用するとともに Heirloom Carbonは、カーボンクレジットも販売している。

DAC Hubs Project は2拠点（レイジアナ、ノースウェスト）に参画している。

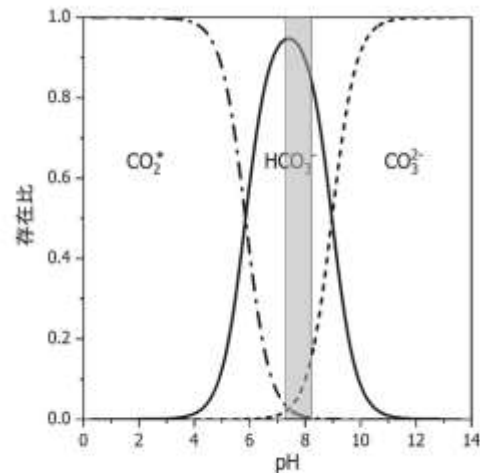
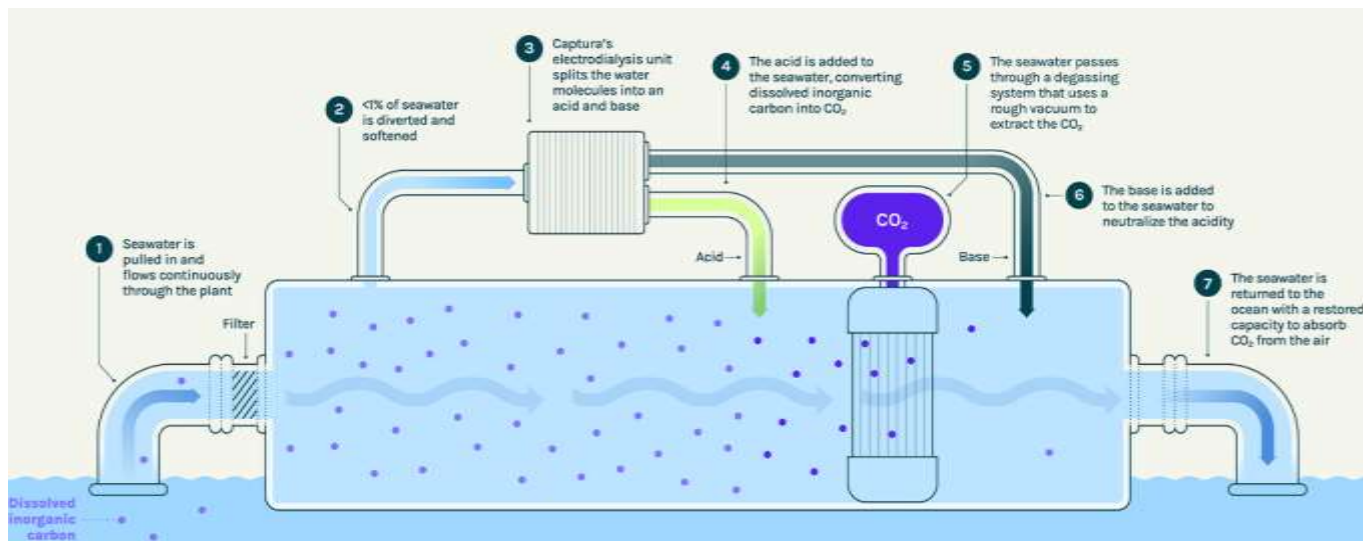
2035年までに、26,900トン分のカーボンクレジットを総額2,660万ドルで Stripe, Meta, Shopify, JPMorgan, Mckinsey, Workday, H&M, Autodeskに販売する契約を2023年11月に締結した。

Direct Ocean Capture(DOC)

海洋と大気中のCO₂との平衡: $CO_2 + H_2O \rightleftharpoons HCO_3^- + H^+ \rightleftharpoons CO_3^{2-} + 2H^+$
 海中からCO₂を除去⇒海洋のCO₂吸収能力増⇒大気中のCO₂をより多く吸収
 イオン交換膜を用いた電気透析で酸性度(H⁺濃度)を変化させCO₂を回収

2023年:100t/年規模の実証試験を実施

2025年にハワイで1,000t/年のプラントを稼働予定(数百億ドルを投じている?)



pHの違いによる海面での炭酸系成分の存在比

(出典)村田、ぶんせき(2022)7.

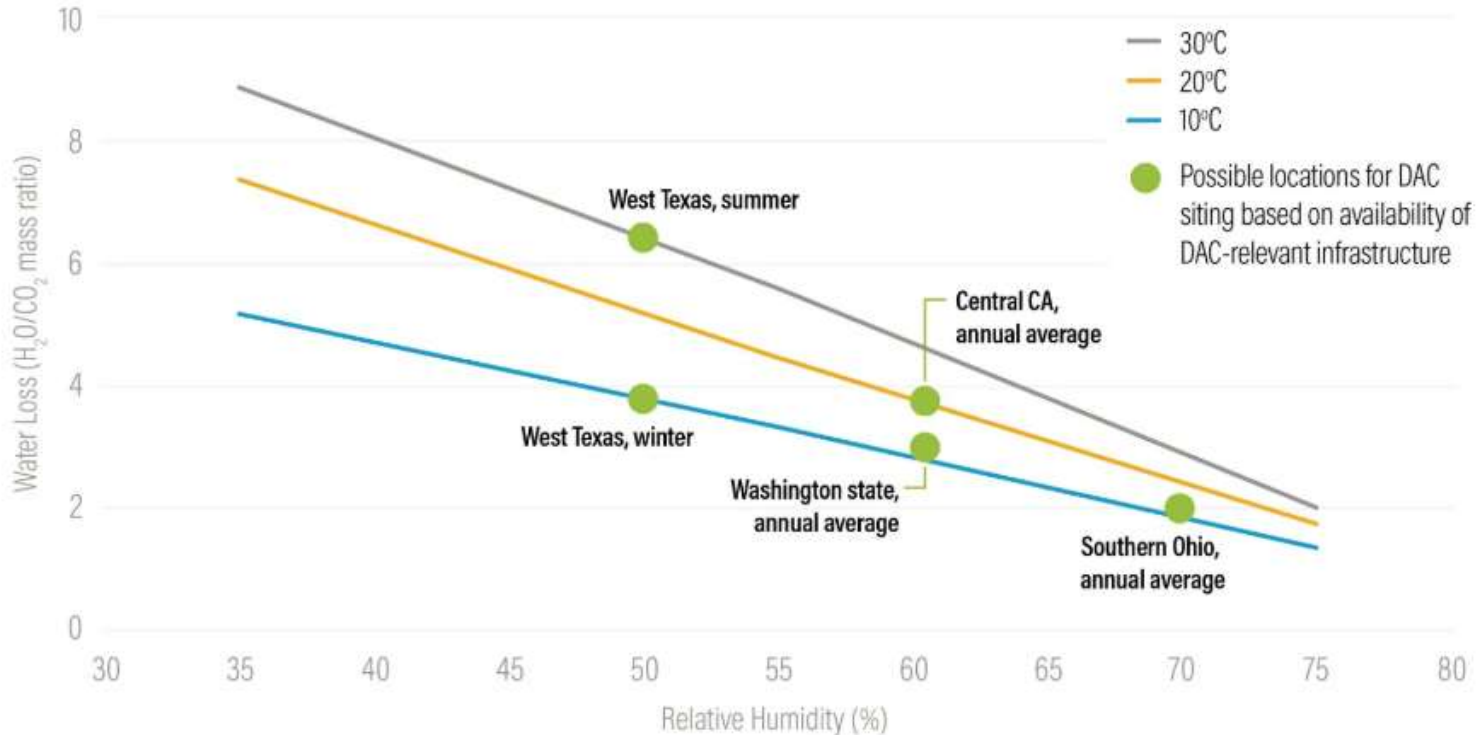
電気透析と独自開発の膜を使用. 弱アルカリ性の海水をくみ上げ, 電気透析で海水の一部を酸性にすると海水からCO₂が生じ, 膜でCO₂を回収. CO₂除去後の海水は海に戻す.

【利点】海中CO₂濃度は大気の150倍→効率が良い?(海水を移動させる動力も大)

【課題】大気中のCO₂削減効果をどのように測定するのか?

DACの課題①: 水の影響

Water Use for Liquid Solvent DAC Systems Based on Temperature and Humidity



Source: Adapted from Keith et al. 2018

Note: Water use based on 2 M potassium hydroxide (KOH) solvent solution



WORLD RESOURCES INSTITUTE

溶剤 DAC システム: 1 トンの CO_2 を回収するのに 1~7トンの水が必要(米国内想定)

高温で乾燥した環境では損失が大

固体吸収材 DAC システム: 蒸気凝縮再生システムでは回収した CO_2 1 トンにつき 1.6 トンの水を使用
 間接加熱システムでは、回収した CO_2 1 トンにつき推定0.8~2トンの水を生み出す。

DACの課題②: 吸収材の生産

SINTEF:

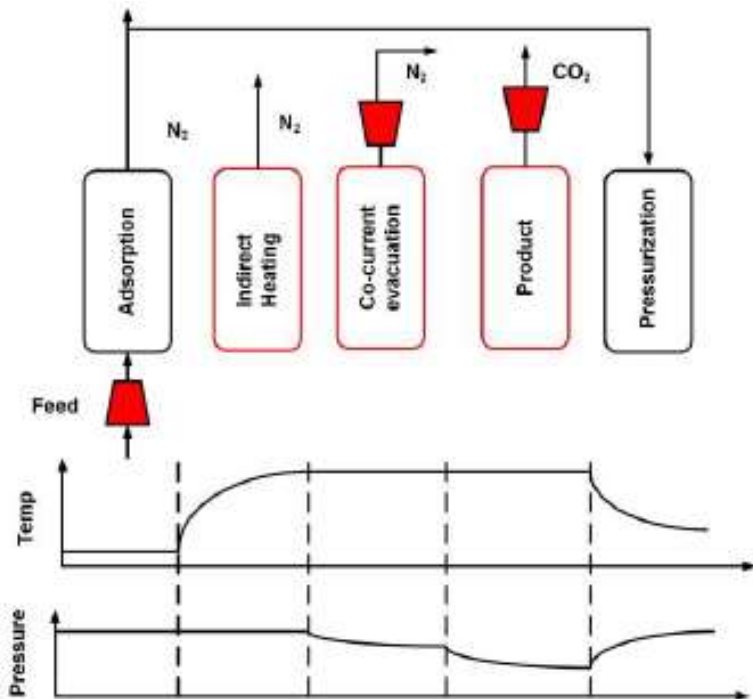
five-steps Vacuum-Temperature-Swing-Adsorption (VTSA) processを検討*

*Giorgia Mondino, GHGT-17 ,SINTEF Industry, Norway

VTSAで使用する吸収材のCO₂吸収性能

Lewatit® VP OC 10657 : 0.060 mol_{-CO₂} / (m³_{-sorbent} · s)

a diamine-appended MOF (mmem-Mg₂(dobpdc)) : 0.070 mol_{-CO₂} / (m³_{-sorbent} · s)



10万t-CO₂/year plantに必要な材料・エネルギー

- Lewatit:

536モジュール、計979ton
(7.82~13.5 GJ/t)

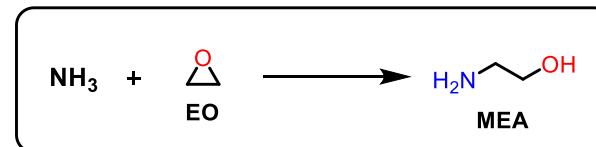
- MOF:

479モジュール、計885ton
(6.17~8.6GJ/t)

MOFの最大製造規模 100トン(BASF or SVANTE)

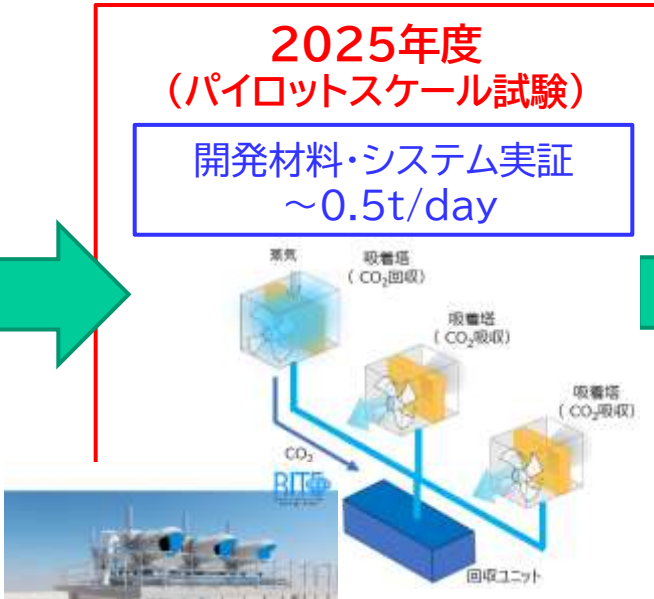
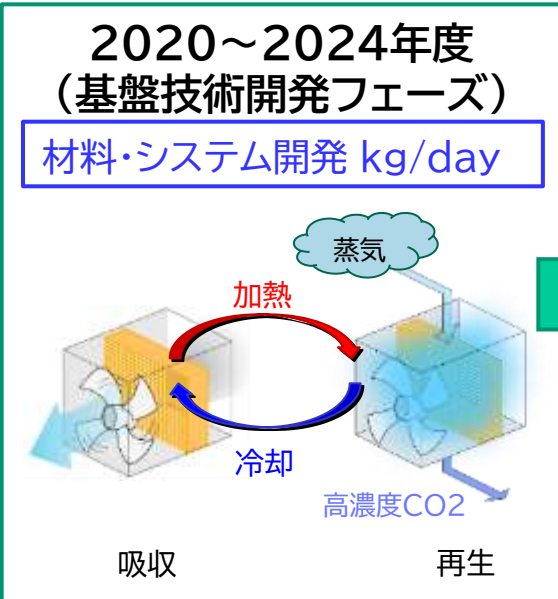
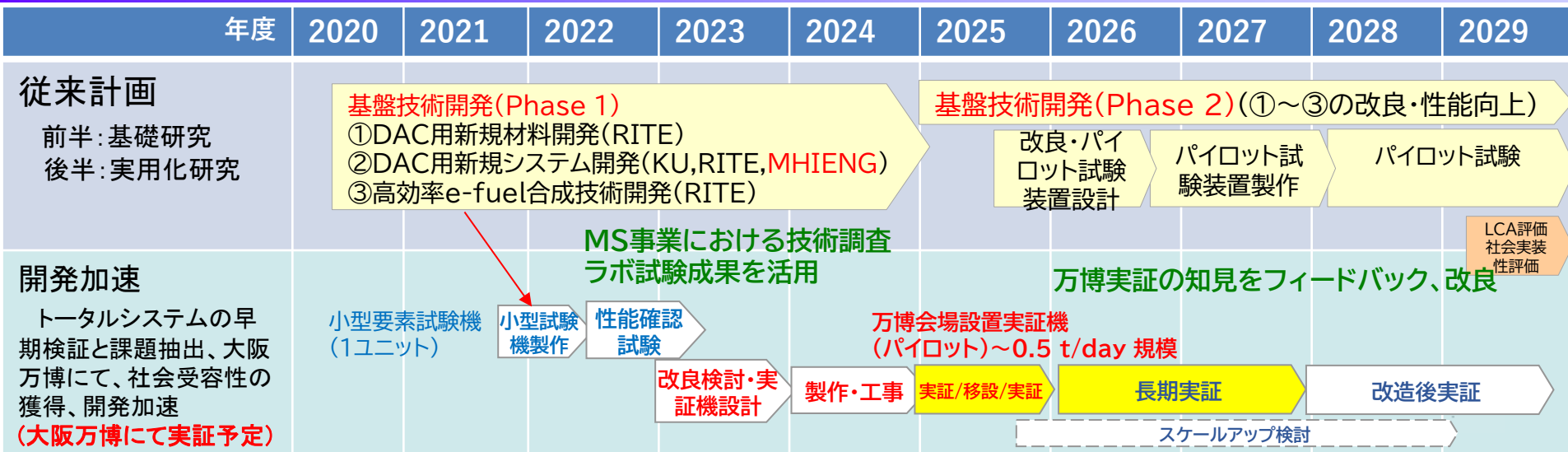


アルカノールアミン(MEA)の製造:



ムーンショット型研究開発事業—目標と計画:

三菱重工との連携による材料開発およびDAC装置開発加速



大規模化・社会実装を加速

2025大阪関西万博でのDAC試験

パイロットスケール規模でのDAC→Utilizationの実証を予定(国内初)

- グリーン万博カーボンリサイクルファクトリー内で、DAC回収CO₂を大阪ガス メタネーション設備(*1)へ供給し、e-メタンを製造 *1:環境省事業(バイオメタネーション、触媒メタネーション)

パイロットスケール試験機イメージ
3つの吸着塔+回収ユニット(共通)



*DACのパイロットスケール試験はNEDOのムーンショット型研究開発事業として実施

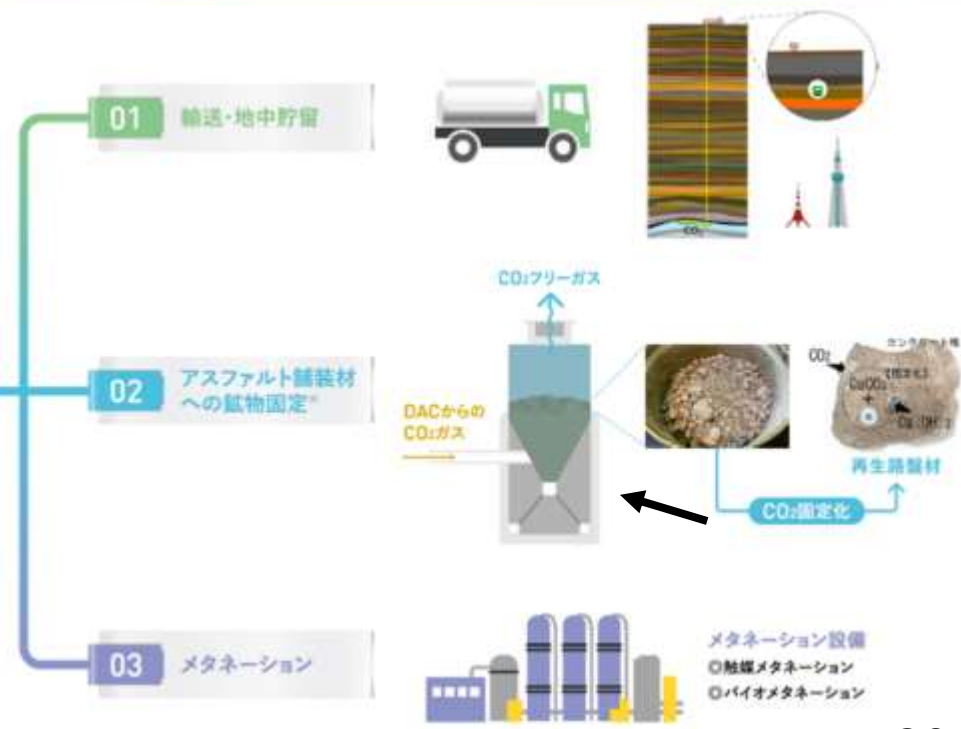


DAC (Direct Air Capture) 装置 最大 500 kg/day



実証プラントエリア全景図

敷地面積 (約38m×約31m)



海外のDAC企業の動向との比較

Carbon Engineering社
Occidental Petroleumが買収
Global Thermostat社
Zero Carbon Systems が買収

AspiraDAC
310 t/y



Hairloom
Global Thermostat
1,000t/y

Climeworks



DAC-?
75 kg/d



DAC-3
410 kg/d



Orca
DAC-96(2021)
4,000t/y(≒11t/d)



Mammoth
DAC-864(2024)
36,000t/y(≒100t/d)



第三世代
DAC-??(20??)



Demonstrator DAC-1
8 kg/d 135 kg/d



DAC-18(2015)
2,460 kg/d



RITE-MHI

MS(2020.10月採択)



ラボ機(2021)
g/d



小型試験機(2022.9月)
3~5kg/d

MHI社内
設置機



パイロット試験機(2024.10月)
数100kg/d

180名の開発チームで5年間
検討、効率2倍
・吸着材(新構造、耐久性3倍)
テスト15,000時間(5,000
サイクル)

2030年目標
Captureコスト
\$250~350/t-CO₂
NET removal
\$400~600/t-CO₂

まとめ

・RITE化学研究グループではこれまで石炭火力、製鉄からのCO₂回収技術の早期実用化・大規模化を目指した開発を実施している。今後、低濃度のCO₂排出源(天然ガス火力、大気等)等、多様な排出源に対応できるよう複数の技術開発を進めるとともに、CO₂分離回収技術の共通基盤となる実ガス試験センターを設置・運営し、素材メーカーとエンジニアリングメーカー等の開発加速支援も行っていく予定

分離回収するCO₂の純度、回収率、コスト

- ・現状、海外CCSではCO₂純度95%以上(パイプライン)が業界慣行となっているが、先進的CCS事業法公布に伴う今後の海防法の見直し、海外動向を注視する必要がある。
- ・CNを達成するためにはCCSの非回収排出分のネガティブエミッション技術が必要であるが、各技術の回収率とコスト低減の進展により、バランスを取る必要があると思われる。

海外のDAC技術開発の動向と課題

- ・世界で30機以上のDAC装置が稼働、1,000t/yの稼働は4か所のみ、
- ・現状コスト(クレジット)はおよそ\$1,000t/y⇒大規模実証を通じて“learning-by-doing”、装置のモジュール化・標準化を進め、低コスト化につなげることが不可欠
- ・吸収液:大規模プラントが建設中. 熱に天然ガスを使用する必要あり。水の損失による補充量も多い。
- ・固体吸収材:材料によっては大規模化が困難(規模が小さい)
- ・膜分離:膜で高濃縮は非現実的
- ・(物理)吸着分離:ゼオライトPSAを適用した場合の除湿エネルギー(理論値)が膨大
- ・DOC:削減効果の定量的な評価が課題

ご清聴ありがとうございました。



Research Institute
of
Innovative Technology for the Earth

この成果は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の以下の委託業務の結果得られたものです。

- ・CCUS研究開発・実証関連事業 (JPNP18006)
- ・カーボンリサイクル・次世代火力発電等技術開発 (JPNP16002)
- ・環境調和型プロセス技術の開発 (JPNP13012)
- ・グリーンイノベーション基金事業 (JPNP21014, JPNP21019)
- ・ムーンショット型研究開発事業 (JPNP18016)
- ・NEDO先導研究プログラム (JPNP14004)

DAC (Direct Air Capture) 実験棟の整備にあたっては、SMBC日興証券株式会社及び三井住友DSアセットマネジメント株式会社のイノベーターカーボンニュートラルファンドから頂いた寄付金を使わせていただきました。