

DACの方法とコスト

科学技術振興機構 低炭素戦略センター
越光男、岩崎博、三森輝夫、山田興一

LCSウェビナー 2022.6.24

Outline

1. はじめに

DACによるCO₂捕集の必要量

2. DAC技術の現状

3. 代表的なDAC法のコスト評価

KOH-CaCO₃法（Carbon Engineering社）のコスト

ナノセルロース＋アミン法（Clime Works社）のコスト

4. 吸着剤によるDACの問題点

5. CO₂脱離に「熱」を使わないDAC

6. まとめ

1.はじめに DACによるCO₂捕集の必要量



世界のCO₂排出量：33.5 Gt (2018)

現状：DAC捕集量 0.01 Mt/y (2020) => 1 Mt/y (2024)

IEAのNet Zero 2050 Scenario:

必要なDAC捕集量 85 Mt/y by 2030, 980 Mt/y by 2050

(<https://www.iea.org/reports/direct-air-capture>)

日本ではCO₂排出量：1.1 Gt (2018)

DAC捕集量 現在 0 Mt => 2050には 26 Mt/y程度必要

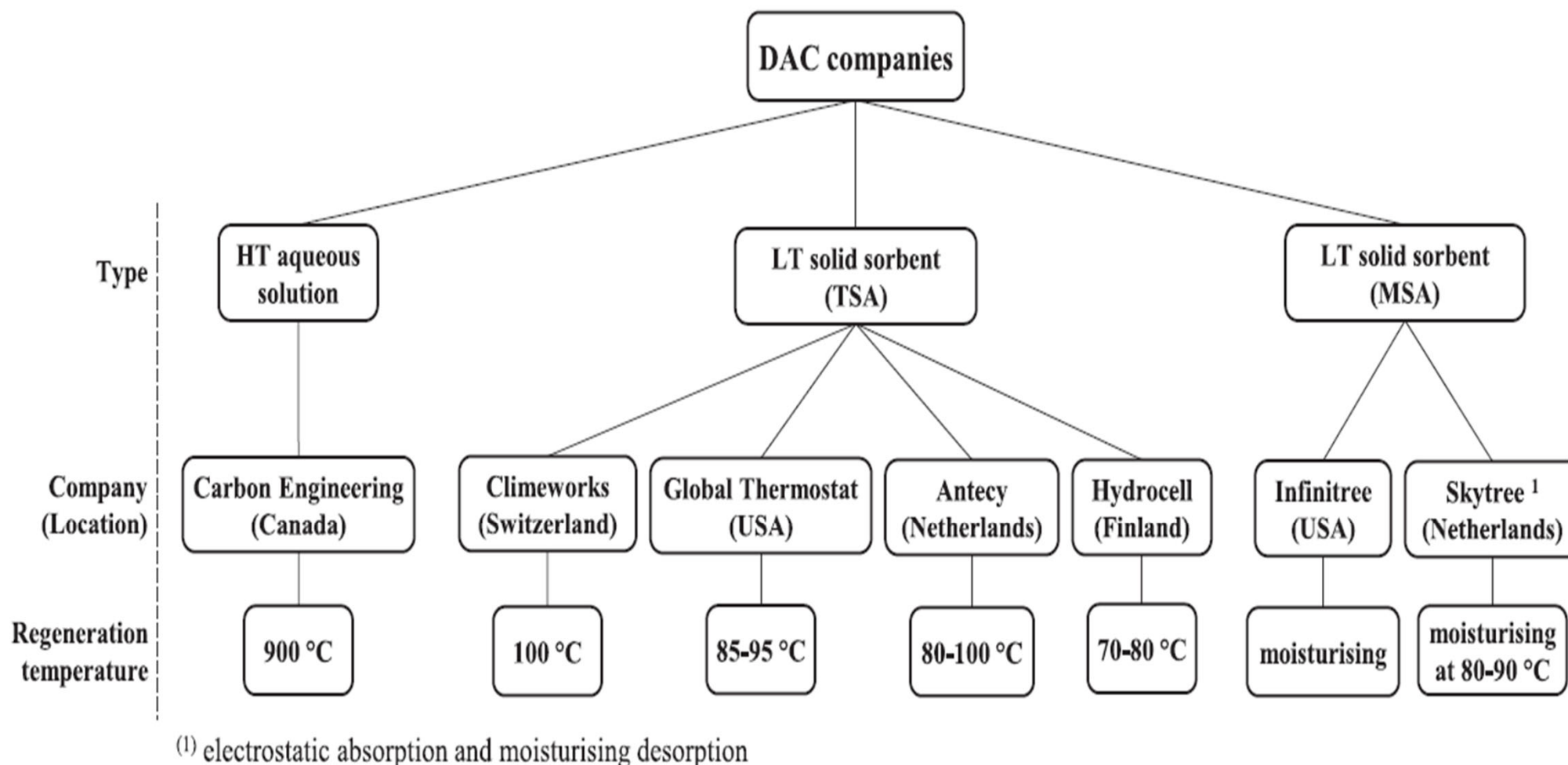
2050年のGDP、電力需要、CO₂排出量の計算結果の一例

(電力需要2000 TWhの場合を示すが、計算は3000 TWhまで実施)

	2015年(基準)	2050年	2050年DAC
GDP(兆円)	533	777	778
輸出(兆円)	87	163	163
輸入(兆円)	102	120	120
電力需要(TWh)	1,000	2,000	2,000
CO ₂ 排出量(Mt-CO ₂)	1,227	26	0
CO ₂ 削減率(%)	6.3	98.0	100

2.DAC技術の現状

開発中のDAC技術とベンチャー企業



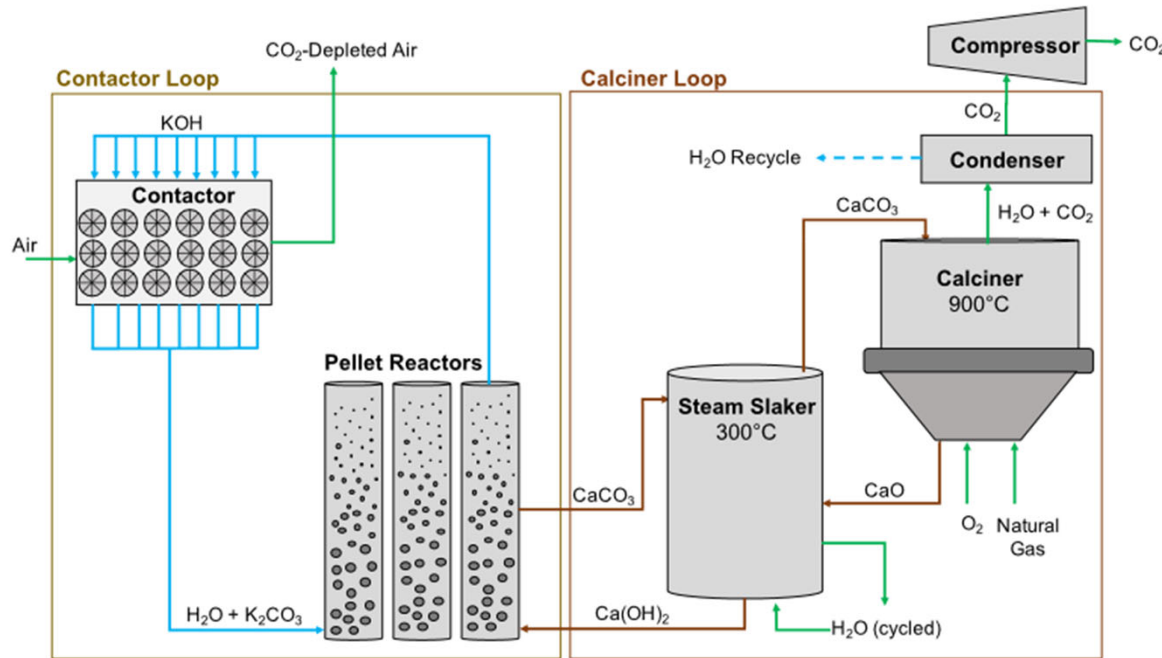
Abbreviations:

HT: high temperature, LT: low temperature, MSA: moisture swing adsorption, TSA: temperature swing adsorption.

M. Fasihi et al., 'Techno-economic assessment of CO₂ direct air capture plants',
J. Cleaner Production, 224, 957 (2019)

3.DACのコスト評価

(1) KOH-CaCO₃法 -Carbon Engineering社-

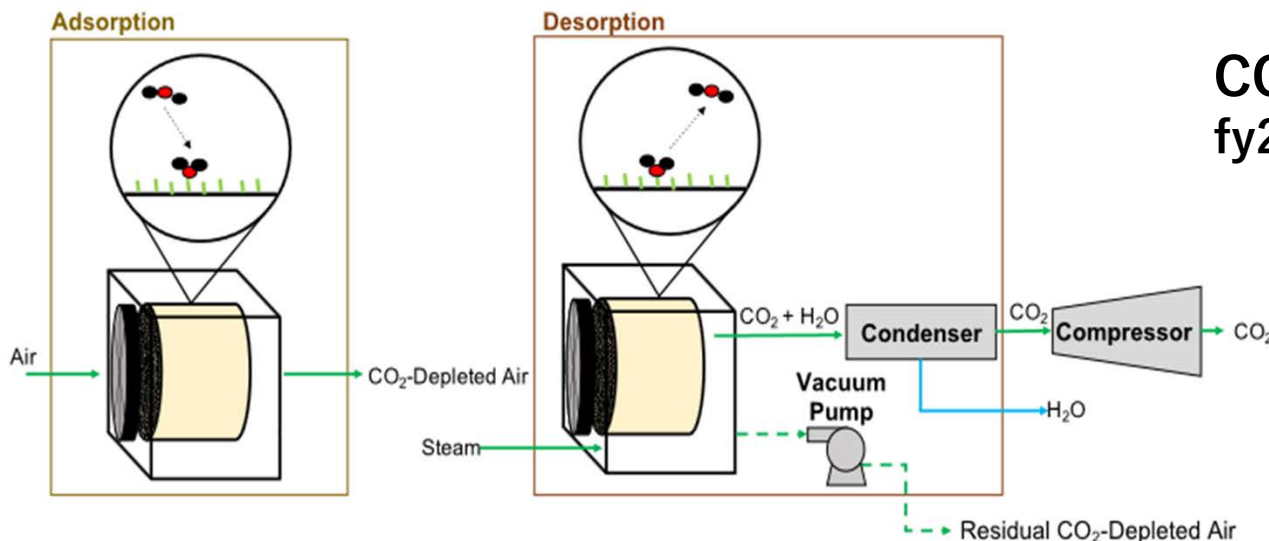


CO₂捕集コスト: LCS政策提案書
fy2019-pp-07 (岩崎、三森)
CO₂捕集量 112 t/hr (0.9Mt/y)

35 円/kg-CO₂

固定費 20.6円
内 Air Contactor 50%
変動費 14.7円
内 NGが90%(国内で実施)

(2) ナノファイバー/アミン法 -Clime Works社-

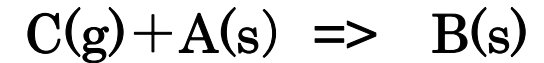


CO₂捕集コスト: LCS政策提案書
fy2020-pp-06 (岩崎、三森)
CO₂捕集量 112 t/hr (0.9Mt/y)

117 円/kg-CO₂

固定費 51.9円
変動費 65.1円
内 捕集材 15.3 円(寿命2年)

4.吸着剤を用いたDACの問題点：定式化 ーシリカ表面上のアミンへのCO₂吸着ー



シリカ表面上のアミン分子：A(s)、分子数 N_A

A(s)分子にCO₂が吸着した分子：B(s)、分子数 N_B

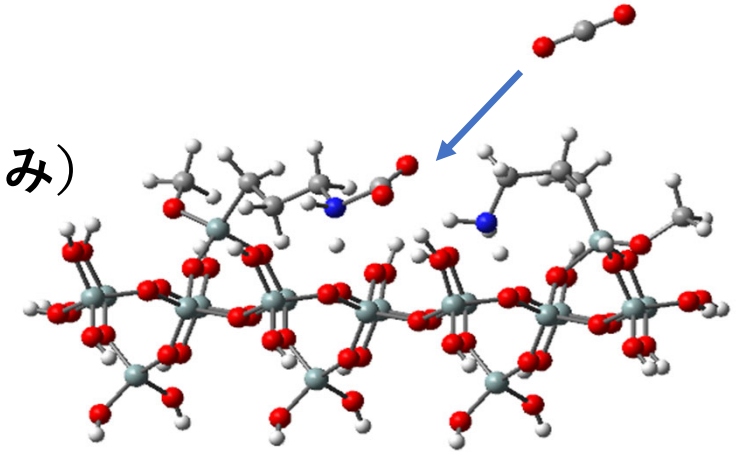
気相のCO₂：C(g)

- ・ A(s),B(s)の回転、並進自由度はなし（振動自由度のみ）
- ・ B(s)上のCO₂は表面拡散しない

$\varepsilon_{0,A}$ 、 $\varepsilon_{0,B}$ ：A(s),B(s)の0Kのエネルギー

q ：分配関数（添え字 ν :振動）

<=DFT計算から求められる



CO₂のシリカ表面アミンへの吸着例

吸着平衡定数

$$K = \exp \left\{ \frac{-\Delta_{ad}H}{k_b T} \right\} \frac{q_{\nu,B}^0}{q_{\nu,A}^0 q_{CO_2}^0}$$

吸着熱

$$Q_{ad} = -\Delta_{ad}H = -(\varepsilon_{0,B} - \varepsilon_{0,A} - \varepsilon_{0,CO_2})$$

吸着量（被覆率）

$$\theta = \frac{N_B}{N_A + N_B} = \frac{K(\frac{P}{P_0})}{1 + K(\frac{P}{P_0})} \quad (\text{Langmuir吸着})$$

$P/P_0 \sim 10^{-4} \Rightarrow K$ は 10^4 程度以上でなければならない

気相CO₂（並進、回転、振動）

吸着

発熱

$\Delta H < 0$

振動と回転の
自由度消失

$\Rightarrow \Delta S < 0$

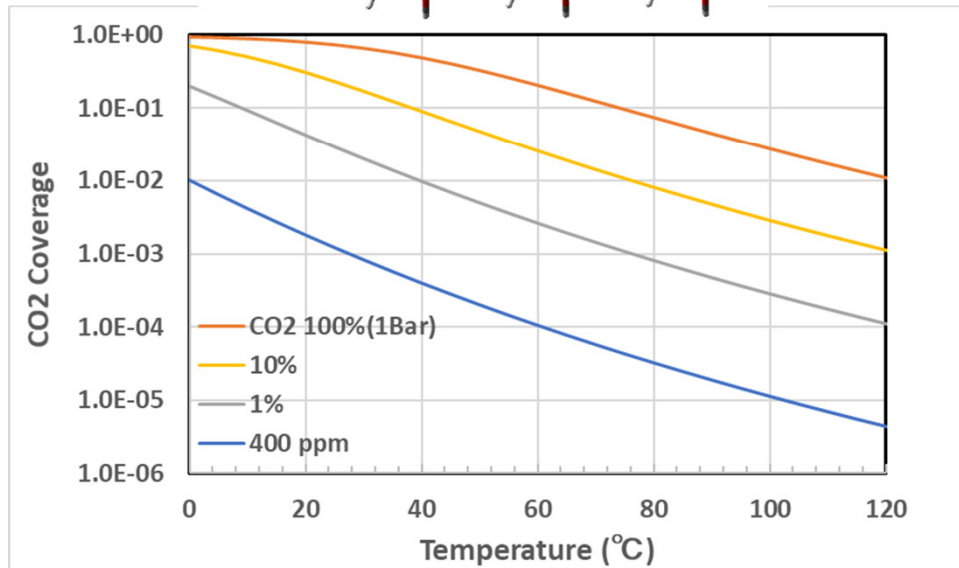
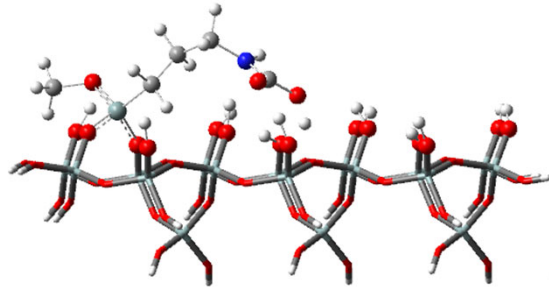
表面CO₂（振動のみ）

$\Delta G = \Delta H - T\Delta S$ 符号は？

4. 吸着剤を用いたDACの問題点

— 吸着量とCO₂脱離エネルギーのTrade-off —

$$Q_{ad}(0K) = 53.7 \text{ kJ/mol}$$

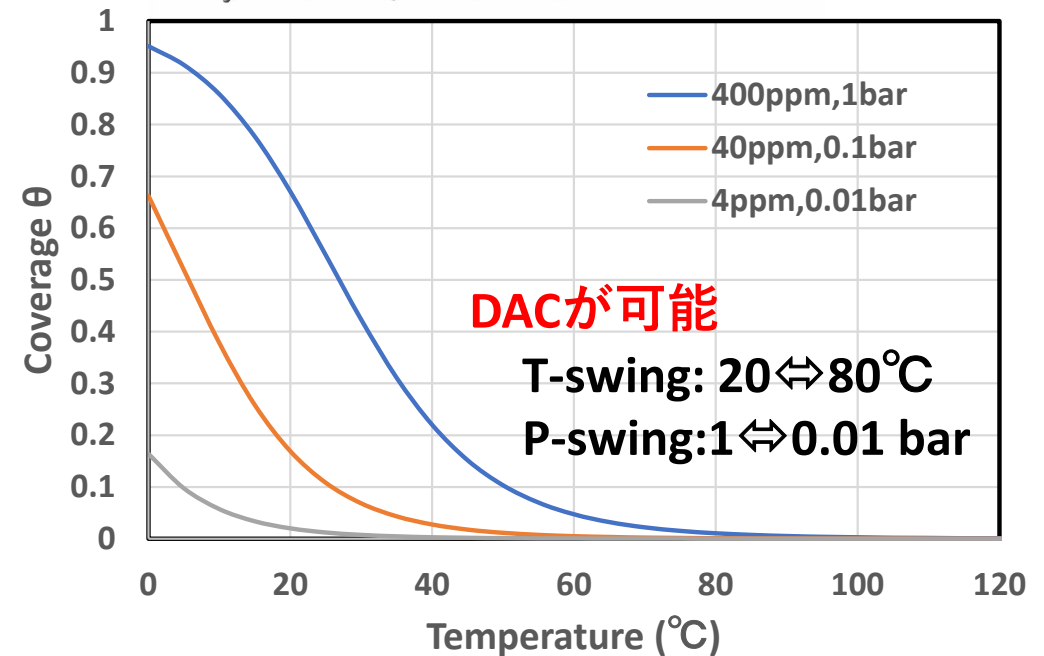
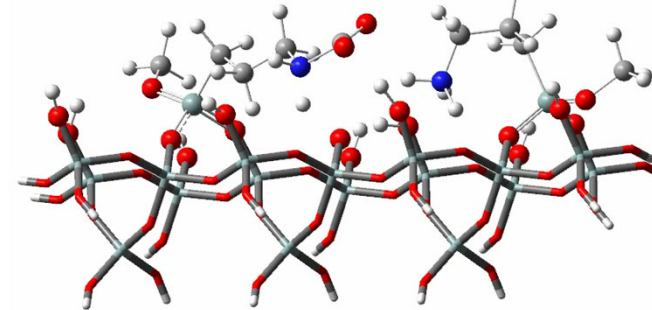


40°C以下では $\Delta G < 0$

Flue gas (CO₂濃度10~15%)には適用可

しかしDACは無理

$$Q_{ad}(0K) = 71.1 \text{ kJ/mol}$$



Trad-off

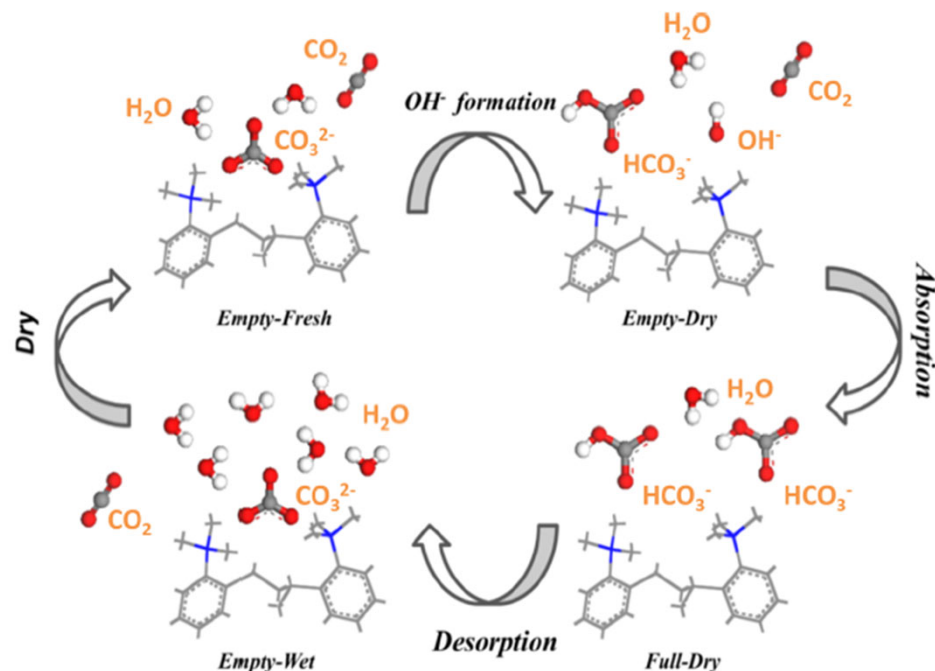
高効率（吸着容量大）⇔ 吸着熱大、脱離エネルギー大

詳細は LCS政策提案書 fy2021-pp-02（越、岩崎、三森）

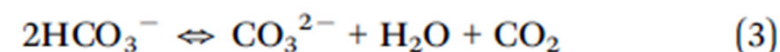
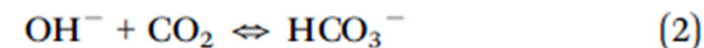
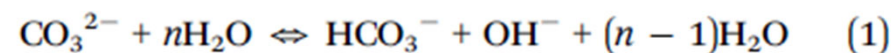
5. CO₂脱離に「熱」を使わないDAC

— Moisture Swing Adsorption (MSA) —

Dry: CO₂吸収、 Wet: CO₂脱離



The absorption process (eqn (1) and (2), dry) and the desorption process (eqn (3), wet) are:

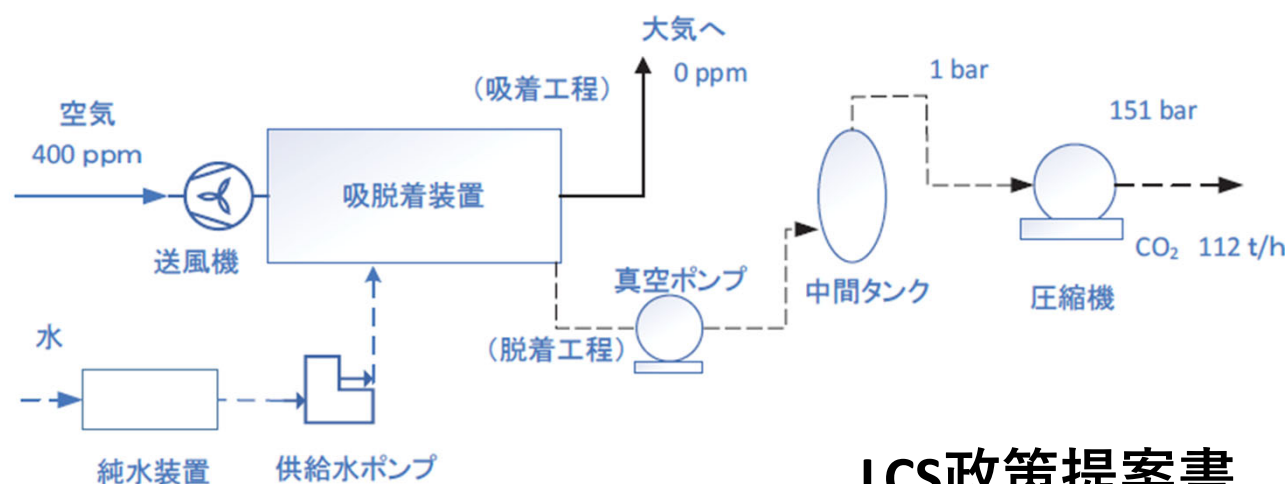


Moisture swingに用いるsorbent

イオン交換樹脂、Polymer ionic liquid (PIL)

Ex: ポリスチレン + NR₄⁺ + CO₃⁻

X. Shi et al., *J. Chem. Phys.*, 149, 164708 (2018)



CO₂捕集量 112 t/h

固定費 29.3

膜モジュール 6.1

電力 2.9

供給水 0.3

計

38.6 円/kg-CO₂

6. まとめ：DACコストの比較



	DAC				排ガスcc
CO ₂ 捕集量(ton/h)	112				691
	吸収液	固体吸着剤			吸収液
プロセス	KOH/Ca(OH) ₂	NFC/amine	MOF ^b	MSA	アミン吸収法
	Carbon Engineering	Clime Works	-	-	(η=90%)
入口CO ₂ 濃度	400ppm	400ppm	400ppm	400ppm	13.40%
出口CO ₂ 濃度	110ppm	0	0	0	1.56%
吸着容量(mol/k)	-	0.7	2.1	0.54	-
吸着速度(mol/kg-CO ₂ /h)	-	0.5	1.5	3.4	-
固定費(¥/kg-CO ₂)	20.7	51.9	26.7	29.3	1.2
変動費：捕集材(¥/kg-CO ₂)	1.4	15.3	25.2	6.1	0.2
変動費：エネルギー(¥/kg-CO ₂) ^a	13.3	49.7	19.2	2.9	2.5
捕集コスト合計 (¥/kg-CO ₂)	35.4	117	71.1	38.6^c	4.1
エネルギー原単位(MJ/kg-CO ₂)	8.84	37.3	14.4	2.1	3.76
LCS政策提案書	fy2019-pp-07	fy2020-pp-06	fy2020-pp-06	fy2021-pp-10	fy2019-pp-07

a) 電力：12円/kWh, 熱量 1.5円/MJ

b) Mg₂(dobdc)(N₂H₄)₁₈:吸着能 3.9mmol/g, ハニカム構造体 吸脱着管 2mx2mx1.5m 9420基
 吸着 25℃ 60分、脱着 90℃ 0.03atm 90分 吸着剤寿命 2年

c) 河川水 0.3円/kgCO₂ を含む

6. まとめ

- ・ 1Mt/yr規模のDACを国内で実施した場合のコストを評価した。1kgのCO₂を捕集するのに要するコストはKOH-CaCO₃法：35円、NFC-アミン法：117円、寿命2年程度のMOFが開発されれば67円程度、イオン交換樹脂を用いた Moisture Swing 法（MSA）では39円程度である。
- ・ 2050年のゼロCO₂排出を実現するためには数十Mt/y程度のDACを実施する必要があり、さらに高効率・低コストDACシステム開発が必要である。
- ・ 単純な化学吸着によるDACでは（吸着剤や下地によらず）70kJ/mol以上の吸着熱が必要であり、吸着容量とCO₂脱離エネルギーの間のTrade-offが存在する。
- ・ このTrade-offを克服して高効率DACを実現するためには、CO₂脱離に必要なエネルギーの供給が不要な方法の開発が必要である。
- ・ MSAはCO₂脱離エネルギーが水和水の凝集エネルギーによって供給されるため、外部からのエネルギー供給が不要であり、さらなる高効率・低コストを実現できる可能性がある。LCSでは密度汎関数法を用いた高効率MSA用吸着剤探索を試みている。