

表1 CO₂分離で注目されるガス分離膜の素材、原料および特徴

分離膜の名称	ガス分子の経路	メカニズム	透過係数の順の典型例
ゴム状高分子	時間的変動が大きい自由体積孔	溶解度係数の差が分離性に影響	CO ₂ > H ₂ , CH ₄ > N ₂
ガラス状高分子	凍結した自由体積孔	拡散係数の差が分離性に影響	H ₂ > CO ₂ > N ₂ > CH ₄
炭素膜	マイクロ孔, スリット状	分子サイズの差に基づく分子ふるい	H ₂ > CO ₂ > N ₂ > CH ₄
シリカ膜	マイクロ孔, 三次元網目状	分子サイズの差に基づく分子ふるい	H ₂ >>> CO ₂ , N ₂ , CH ₄
表面修飾メソ孔シリカ膜	均一なメソ孔	表面拡散	CO ₂ > N ₂
ゼオライト膜	均一なマイクロ孔(結晶孔)	分子ふるいと表面拡散	CO ₂ > H ₂ > N ₂ > CH ₄
促進輸送膜	キャリアと媒体(液体または高分子)	キャリアによる促進輸送	CO ₂ > H ₂ , N ₂
Mixed Matrix Membrane	自由体積孔とマイクロ孔	マイクロ孔フィルターの分子ふるい	H ₂ > CO ₂ > N ₂ > CH ₄

分子サイズ(動力学直径 [nm]): H₂(0.29) < CO₂(0.33) < N₂(0.36) < CH₄(0.38)
 ガスの凝縮性(臨界温度 [K]): CO₂(304) > CH₄(191) > N₂(126) > H₂(33)

微粒子を高分子膜に分散した膜である。その微粒子単独で緻密な連続層を形成した膜を作製すれば一番よいが、コストが高くなると考えられ、微粒子を分散することで低いコストで元の高分子膜よりも高い性能を引き出そうという膜である。微粒子を分散していない元の高分子膜に比べ、透過係数と分離係数の両方を増加させることが期待されるが、実際に両方が増加する例はあまり多くない。

高分子膜と炭素膜では、ガス分子が膜の自由体積孔およびウルトラマイクロ孔に取り込まれ、膜中を拡散すると考えられる。ゼオライト膜は結晶孔にはガス分子が吸着し、膜中を拡散する。膜への取り込まれやすさは凝縮しやすいガスほど大きい。臨界温度が高いガスほど凝縮しやすい。表1に示すように、4つのガスで比較するとCO₂が一番高い臨界温度を示すので、これらの膜におけるCO₂の透過係数は他のガスよりも高くなる傾向がある。

透過係数で透過性と分離性が高いことが確認された素材が今も継続的に現れている。しかし、薄膜化および大面積化の技術開発には相当な時間がかかる。単位体積あたりの膜面積が高い、充填密度の高い膜エレメントへの加工技術も重要である。密閉するためのシール技術に苦戦する場合も多いようである。最終的な実装にはエンジニアリングも不可欠である。実用化までの道のりは長いことが多い。

5 主なCO₂分離膜の基本性能比較

図4に高分子膜^{2~10)}、炭素膜^{11~14)}、シリカ膜^{15~18)}、ゼオライト膜^{19~22)}のガス透過分離性能の比較を示す。例としてCO₂/CH₄に対する性能を示す。この図はある程度の薄膜化を達成できた

第3章 大気中から二酸化炭素を回収する DAC 技術の開発

である。これら課題の解決には、革新的な DAC 技術の開発と、それをスケールアップできる革新的な回収システムの開発が不可欠である。

本内容では、特に DAC の技術開発に焦点を置き、現状の DAC 政策や DAC の技術動向を伝えるとともに、設置コストや回収エネルギーの面で化学吸収法や物理吸着法に比べ圧倒的にアドバンテージがある膜分離法について、特に我々が開発を進めている超高 CO₂ 透過分離膜について紹介する。

2 DAC の現状について

DAC に関しては海外で既に実用化されており、その市場も急激に拡大すると考えられている (図 1)²⁾。また、地球温暖化の抑制と 2050 年代のネットゼロ社会実現には DAC は必要不可欠な技術として位置付けられている (図 2)⁴⁾。しかし、例えば Climeworks 社の設備では分離回収エネルギーが 9 GJ/t-CO₂、コストが \$ 600~\$ 1,000/t-CO₂ と見積もられており、DAC 開発においては、CO₂ 分離回収プロセスに投入されるエネルギーに対しての技術的ポテンシャルを見通し、理論的な回収限界を可能な限り明らかにしておくことが重要となる。現在の温暖化の進行を考えると、先ずはできることから始めることは必要であるが、将来出現するであろう技術を考えて上で開発を進める必要がある。

現状、DAC に関して最も進んだ取り組みを行っているのは米国である。米国政府は、気候変動対策とネットゼロ実現のため、DAC 技術の大規模展開を促進すべく、地域ごとの特性を活かした 4 つの DAC ハブ (Hub) 構想を進めている⁵⁾。各ハブは、地理的条件、エネルギー供給、既存インフラ、産業連携などの面で異なる強みと課題を持っている。

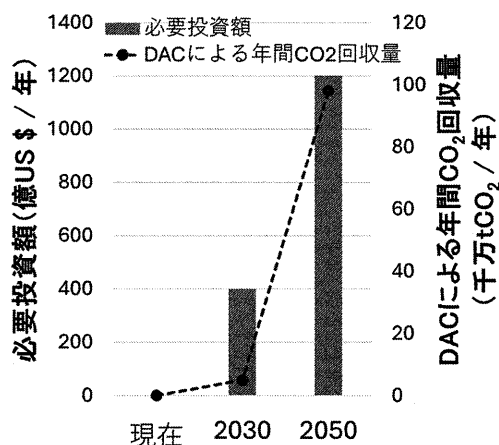


図 1 DAC 市場規模予測

IEA Report (2022) "Direct Air Capture: A key technology for net zero" からデータを抽出して作成。

2 企業における技術開発等の状況

CO₂-メタネーション技術（反応）は、反応前後において、分子数が減少（5→3）する、且つ発熱するため、平衡論的に高圧・低温下ほど反応率が增加する（表1）。一方、一般に高圧ほど設備のCAPEX/OPEXが増加し、低温ほど効率的な熱回収・利用が困難となるため、目的に応じて触媒や反応器、反応プロセスを開発する必要がある。

2.1 国内企業状況

国内の企業における技術開発等の状況については、継続して第12回、第13回のメタネーション推進官民協議会において、各社が取組み状況を公表している^{6,7)}。INPEXを含む企業がサバティエ反応の開発・実証に取り組む他に、水素資化性メタン菌（バイオガス生産時のメタン菌は、主に酢酸資化性メタン菌）等を活用した生物学的なCO₂-メタネーションの技術開発を進めている。また、NEDO-GI基金事業において、PEMやSOECでの共電解による革新的メタネーションの技術開発が進められている⁸⁾。

e-methaneの普及拡大を目指してINPEXらで設立したCCR研究会では、2020年からの国内のCO₂-メタネーション実証マップを作成・公表している（図1）⁹⁾。

さらに、e-methaneの普及に係る国際的なアライアンスであるe-NG Coalitionが発足しており、東京ガス、大阪ガス、東邦ガス、三菱商事、川崎汽船、IHI、INPEXが日本企業として加盟している¹⁰⁾。

表1 CO₂-メタネーション反応に基づく特性

	原料ガス	用途	・ステータス ・規模感	平衡反応式 左辺		平衡反応式 右辺		左辺右 辺の分子 数比	ΔH kJ/mol
CO-メタ ネーション 技術	低・高濃度 CO, 低濃度CO ₂	水素化脱硫・ NH ₃ 生産用水 素生産、石炭 ガス化SNG生 産等	・商用 ・数十万 Nm ³ -CO/h	CO	3H ₂	CH ₄	H ₂ O	4:2 (0.5)	-206.1 発熱
CO-メタ ネーション から見た CO ₂ -メタ ネーション	None	None	None	反応性 が著しく 減少	もう1 分子H ₂ が必要	変化 無し	蒸気発 生量が 増加	圧力異 存が減 少	発熱量 が減少
CO ₂ -メタ ネーション 技術	高濃度CO ₂	合成メタン (e-methane)	・実証 ・数百 Nm ³ -CO ₂ /h	CO ₂	4H ₂	CH ₄	2H ₂ O	5:3 (0.6)	-164.9 発熱
逆水性ガス シフト技術	高濃度CO ₂	合成ガス (CO+H ₂)生産	・商用	CO ₂	H ₂	CO	H ₂ O	2:2 (1.0)	41.2 吸熱

2 CCS事業化の変遷

図1はGCCSI (Global CCS Institute) が作成した世界のCCS事業の年次推移を示した図である²⁾。これは2010年から2021年まで、CCS事業によって実際に地下に貯留されているCO₂量、さらに建設中と計画段階にある予測CO₂貯留量の推移を示している。図1で分かることは、稼働中のCCSはゆっくりと増加し、2021年時点で年間約4,000万トンのCO₂がCCSによって削減されている。一方、計画段階にあったCCS事業は、建設段階に推移することなく2017年まで減少し続けた。しかしながら2017年を境に、CCSの事業計画は再び増加の勢いを取り戻した。この図はCCSの社会実装の困難性と同時に、今後の事業化への方向性を示している。

図1は大きく3つの時期に分けることが出来る。まず2015年までを「CCSは絵に描いた餅」の時代と呼ぶ事にする。その理由は、図1からも明らかな様に、大変多くのCCS事業が検討されたが、その殆どは事業化に至らなかった。次は2015年から2018年を「冬来りなば春遠からじ」の時期と命名しよう。そして2018年以降を「CCS事業化の大波」の時代と呼びたい。

「CCSは絵に描いた餅」の時代を作り出したのは、世界的によく知られた成功した2つの大規模なCCS事業と言える。その一つは、1996年にノルウェーの石油会社Equinor社（当時の社名はStatoil社）が北海のスライプナーガス田で始めた年間約100万トンのCCS事業である。この事業は、ガス生産に伴う随伴CO₂をガス層よりも浅い砂岩層に貯留するプロジェクトである。このCCSは、ノルウェー政府の高額な炭素税と比較して、CCS事業の方がコスト的に安

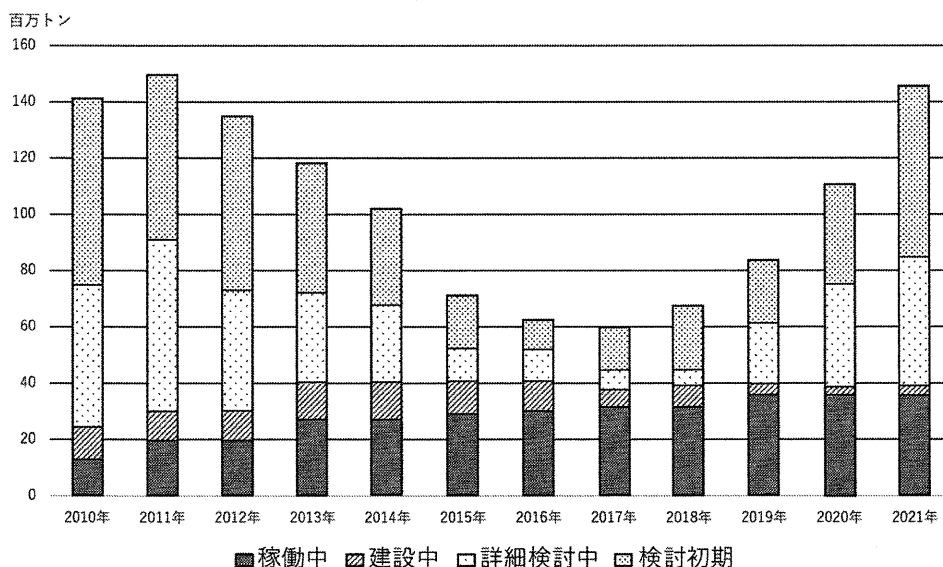


図1 世界で稼働中と検討中のCCS事業での貯留CO₂量 (単位百万トン)
(出典：文献2)を加筆修正)