

令和5年度地球温暖化・資源循環対策等に資する調査委託費
2050年カーボンニュートラルに必要な技術に係る
横断分析調査

調査報告書

2023年6月29日



ARTHUR D LITTLE

ご注意：本資料にはADL社の独自コンセプト、分析フレームや手法が含まれており、本資料開示範囲は、貴社内およびグループ企業内に限定させていただいております。
上記以外の第三者開示は、事前にADL社の文書による確認をお願い申し上げます。

- 1 プロジェクトの全体像
- 2 Step1: 主要技術方式の技術開発動向
- 3 Step2: 低圧低濃度排出源の適合度評価
- 4 Step3: 対象国の市場・政策動向
- 5 Step4: 主要プレイヤー・プロジェクト動向
- 6 Appendix

2050年カーボンニュートラルに必要な技術に係る横断分析調査を実施

背景

- 令和2年10月26日の国会での菅総理の所信表明演説にて、成長戦略の柱に経済と環境の好循環を掲げてグリーン社会の実現に最大限注力すること、2050年までに温室効果ガスの排出を全体としてゼロにすること(2050年カーボンニュートラル、脱炭素社会の実現)を目指すことを宣言した。岸田総理もこの路線を踏襲し、令和3年11月2日のCOP26でのスピーチにおいて、温室効果ガス50%削減への挑戦を全世界に約束している。
- カーボンニュートラルの実現には、革新的なイノベーションに基づく技術開発が必要不可欠であり、我が国も他国の技術開発動向を踏まえて、技術開発を行うことが重要である。

目的・実施概要

- 我が国が、各種研究開発事業(グリーンイノベーション基金事業、エネルギー・環境分野の中長期的課題解決に資する新技術先導研究プログラム等)を効果的に実行していくため、諸外国で行われる、技術開発支援の動向について横断的な分析を行い、分析結果を政策に活かすことを目的とする。
- (1)「分析」:数%~10%程度の、低圧・低濃度CO₂を含む排ガス(LNG火力排ガス、工場排ガス)をターゲットとした各種CO₂分離回収技術の開発動向・ビジネス環境の調査
- (2)「会議運営」:会議の事務局運営

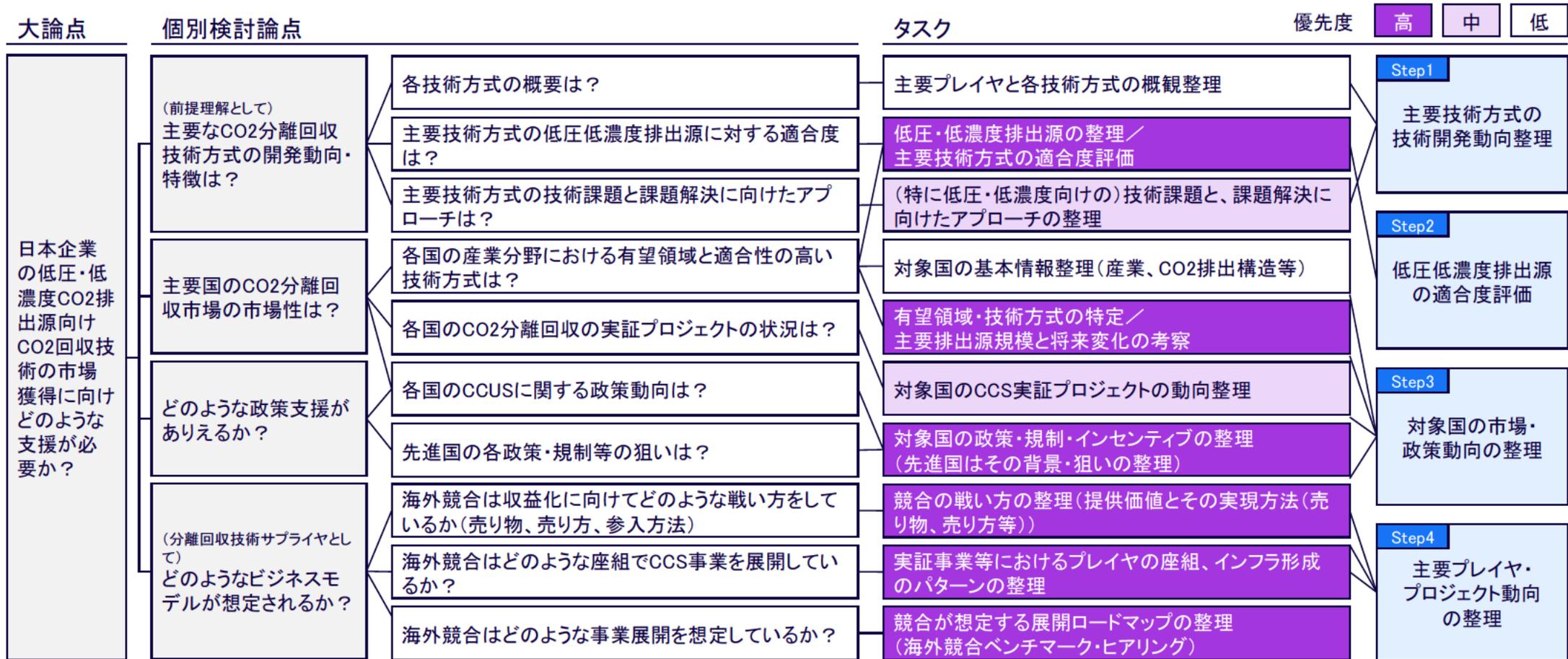
数%～10%程度の、低圧・低濃度CO₂を含む排ガス(LNG火力排ガス、工場排ガス)をターゲットとした各種CO₂分離回収技術の開発動向・ビジネス環境について調査

タスク	調査・分析内容	調査アプローチ	協議事項
①技術開発動向調査	<ol style="list-style-type: none"> 各技術(※)の主要開発プレイヤーと技術開発状況、実証事例 社会実装へ向けて残された課題、コスト分析・コストダウンアプローチに関する情報 ビジネスモデル 実装が予想されるタイミング 	<ul style="list-style-type: none"> 各種公開情報(技術文献(特許等)、主要プレイヤーのプレスリリース、など) 各技術のキープレイヤーへのヒアリング(各技術1件程度)* 技術展示会・学会** 	<p>*: 場合によってはよりヒアリングを優先したアプローチも可能(より深い情報取得が望ましい場合)</p> <p>**: 対象展示会・学会は貴省と相談。また企業ヒアリング件数を踏まえて実施有無を調整</p>
②ビジネス環境調査	<ol style="list-style-type: none"> 低圧低濃度CO₂排出源の細分類化 上記分類を念頭に置いての、世界主要地域*の市場規模と将来変化 ①で想定した各技術について、各種排出源への適・不適の整理 主要地域*において導入されやすそうな技術種の分析(政策要因・地理要因・産業構造要因などから考察) 	<ul style="list-style-type: none"> 同上 	<p>*: フォーカス地域については貴省と相談</p>

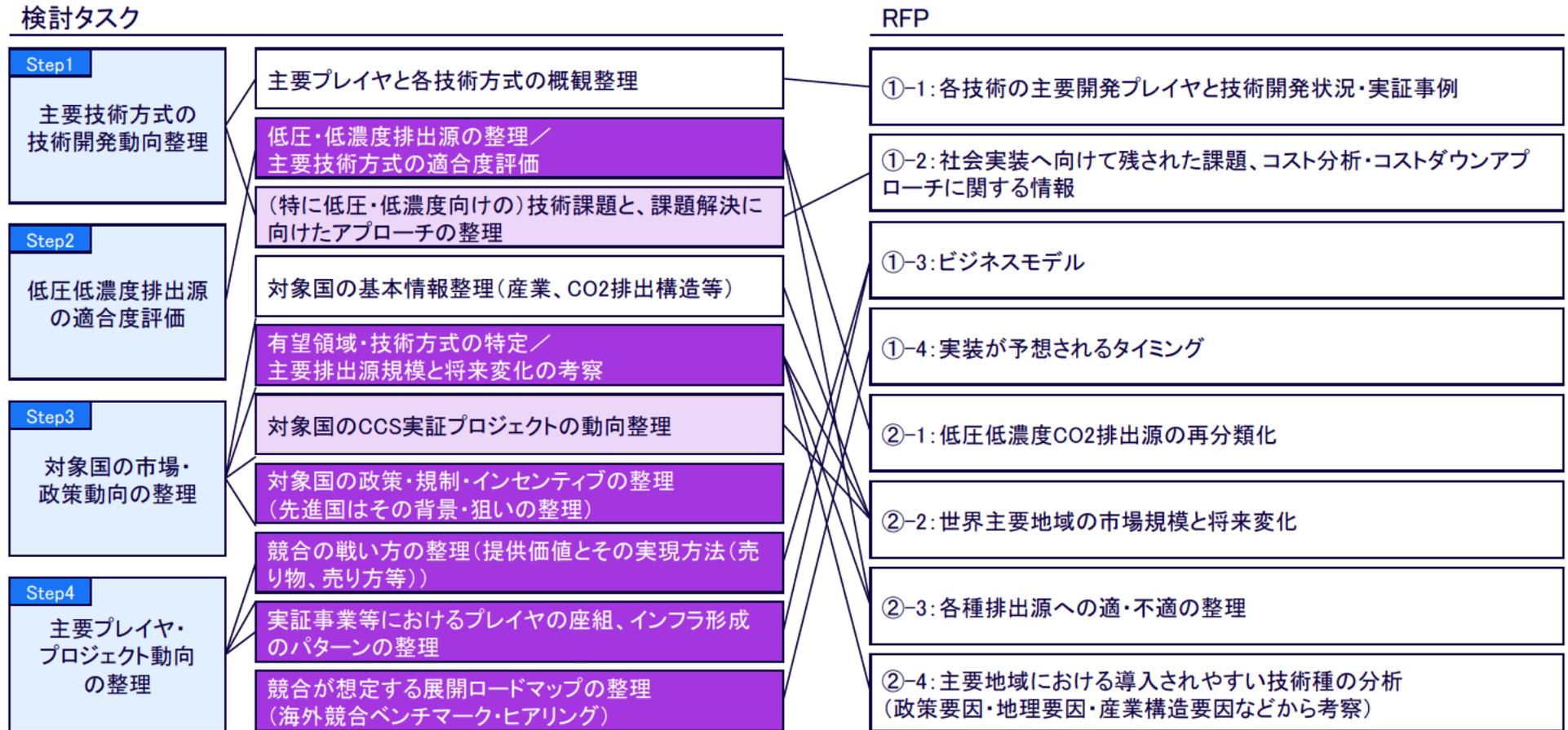
※ 具体的な技術例として、膜分離、物理吸着、化学(液体、固体)吸収、オキシフューエル、ケミカルルーピング、それらの組み合わせを想定

※ なお、ヒアリングにおいてはGI基金で取組中の技術と類似の技術を保持または開発中の企業を可能な限り含める

CO2分離回収の政策支援の検討に向けて、主要技術方式の開発動向や、主要プレイヤーの事業参入のあり方、主要国の市場・政策動向等を分析



貴省の仕様書と検討タスクは下記の通り対応



貴省との摺合せした結果、各検討タスクの調査スコープは下記の通り

検討タスク	調査スコープ
Step1 主要技術方式の 技術開発動向整理	主要方式: 技術動向の概観+技術課題・アプローチ/其他方式: 技術動向の概観 ・ 主要方式: 化学吸収法、物理吸収法、物理吸着法、膜分離法、固体吸収法、深冷分離法 ・ 其他方式: 電界法(デンソー)、オキシフューエル法、ケミカルループ法
Step2 低圧低濃度排出源 の適合度評価	産業分野の低圧低濃度の主要なCO2排出源プロセス
Step3 対象国の市場・ 政策動向の整理	米国、EU、英国、ノルウェー、ドイツ、インドネシア、マレーシア (EUを政策動向のみ)
Step4 主要プレイヤー・ プロジェクト動向 の整理	グローバルの主要プレイヤー・主要プロジェクト

- 1 プロジェクトの全体像
- 2 Step1:主要技術方式の技術開発動向
- 3 Step2:低圧低濃度排出源の適合度評価
- 4 Step3:対象国の市場・政策動向
- 5 Step4:主要プレイヤー・プロジェクト動向
- 6 Appendix

Step1 サマリ

①技術方式の全体像

- CO₂分離回収技術としては主に6方式(化学吸収法・物理吸収法・物理吸着法・膜分離法・固体吸収法・深冷分離法)が存在。化学吸収法・物理吸収法・物理吸着法が商用化されている一方で、その他技術は開発～実証レベルとなっている

②主要プレイヤー動向

- 現在、化学吸収法・物理吸収法・物理吸着法・膜分離法について、回収装置はHoneywellがトップシェアを持つなど市場で大きなプレゼンスを持っている。HoneywellやShell、BASFは回収装置・素材両方の技術を保有する一方で、Dow等の素材開発・提供に特化するプレイヤーも存在
- 各社の低圧低濃度排ガス向け回収技術の開発は技術開発で先行する化学吸収法が中心。一方、化学吸収法の技術を保有しないプレイヤーは他社と協業して化学吸収法技術を取込んだり、その他の自社保有の技術方式の開発推進により市場参画を目指している
 - LindeやSchlumbergerは他社からの化学吸収法技術の取込みにより参入展開を目指す
 - Air Liquideは自社保有の深冷分離法と膜分離法、他社技術との組合せでの低圧低濃度排ガス向けのソリューション展開を模索
 - Svanteは物理吸着法の吸着剤の効率向上による参入展開を目指す
- 設備導入側は、技術導入において実績があるものを導入する傾向がある。先行する化学吸収法に技術的には追いついても、実績で負ける可能性もあることより、如何に開発を早めターゲット市場で実績を積むかが肝要。各回収方式ともに火力発電、セメント、鉄鋼等の大規模排出源を足掛かりに実証・商用事例を創出しノウハウ・採用事例を蓄積しつつ、中小規模排出源への進出を狙う。

③技術課題と解決アプローチ

- いずれの技術方式においても、低圧・低濃度下で低下する吸収/吸着効率の向上や再生時の熱エネルギー効率の向上等が主な課題であり、新規材料開発や装置の改善、新しいプロセスの導入といった取組みが重要な開発領域となっている
- なお、深冷分離法は排ガスに含まれる成分の物理特性を基にしており、分離効率の向上は困難。注力領域は装置のモジュール/小型化でのCAPEX低減、プロセス最適化でのOPEX低減となる

Step1では、CO2分離回収の技術方式の全体像、主要方式のプレイヤー動向、主要方式の技術課題とその解決アプローチを整理

Step1-1: 技術方式の全体像

STEP1-1: CO2分離回収技術の全体像

ADL

主要なCO2分離回収技術としては、化学吸収法、物理吸収法、物理吸着法、膜分離法、固体吸収法の5つが存在。また電界式CO2回収システムも開発が進む

技術方式	分離の仕組み	Pros	Cons	技術開発状況
化学吸収法	温度差	<ul style="list-style-type: none"> 低圧CO2流に適合性 大規模CO2流に適合性(スケールアップあり) 熟成済みの条件 熟成が楽(コスト) 	<ul style="list-style-type: none"> 溶媒の消費/廃棄処理コスト 熟成に必要な設備 結晶生成の条件 低圧のCO2流は昇圧必要 	商用レベル
物理吸収法	分圧差・温度差	<ul style="list-style-type: none"> 高圧のCO2流に適合性(スケールアップあり) 熟成が楽(コスト) 	<ul style="list-style-type: none"> 低圧のCO2流は昇圧必要 	商用レベル
物理吸着法	分圧差 (PSA) 温度差 (TSA)	<ul style="list-style-type: none"> CO2の高純度回収が可能 熟成が楽(PSA) 装置構成がシンプル(PSA) 高圧のCO2流に適合性(スケールアップあり) 大規模CO2流に適合性 熟成が楽(コスト) 	<ul style="list-style-type: none"> 細孔の特性(吸着性/脱吸性) 高圧のCO2流は昇圧必要 CO2の脱吸が難しい 大規模CO2流に適合性 熟成が楽(コスト) 	商用レベル
膜分離法	分圧差	<ul style="list-style-type: none"> 高圧のCO2流に適合性(スケールアップあり) 大規模CO2流に適合性 熟成が楽(コスト) 	<ul style="list-style-type: none"> 膜の特性(透過性/耐久性) 高圧のCO2流は昇圧必要 大規模CO2流に適合性 熟成が楽(コスト) 	開発~実証レベル
固体分離法	分圧差・温度差	<ul style="list-style-type: none"> CO2の高純度回収が可能 高圧のCO2流に適合性(スケールアップあり) 大規模CO2流に適合性 熟成が楽(コスト) 	<ul style="list-style-type: none"> 固体の特性(吸着性/脱吸性) 高圧のCO2流は昇圧必要 大規模CO2流に適合性 熟成が楽(コスト) 	開発~実証レベル
電界式CO2回収システム	電圧印加	<ul style="list-style-type: none"> CO2の高純度回収が可能 高圧のCO2流に適合性(スケールアップあり) 大規模CO2流に適合性 熟成が楽(コスト) 	<ul style="list-style-type: none"> 電界式の特性(吸着性/脱吸性) 高圧のCO2流は昇圧必要 大規模CO2流に適合性 熟成が楽(コスト) 	開発~実証レベル

© Arthur D. Little 15

Step1-2: 主要プレイヤー動向

ADL

回収装置において化学吸収・物理吸収・物理吸着とともにHoneywellがトップシェア。HoneywellやBASF、Shellは回収装置と材料の開発を一方で、Dow等は装置・材料のいずれかに注力

技術方式	主要プレイヤー	開発状況/注力	主要プレイヤーの動向
化学吸収法	Honeywell, BASF, Shell	回収装置と材料の開発	Honeywell: 回収装置と材料の開発を一方で、Dow等は装置・材料のいずれかに注力
物理吸収法	Honeywell, BASF, Shell	回収装置と材料の開発	Honeywell: 回収装置と材料の開発を一方で、Dow等は装置・材料のいずれかに注力
物理吸着法	Honeywell, BASF, Shell	回収装置と材料の開発	Honeywell: 回収装置と材料の開発を一方で、Dow等は装置・材料のいずれかに注力
膜分離法	Honeywell, BASF, Shell	回収装置と材料の開発	Honeywell: 回収装置と材料の開発を一方で、Dow等は装置・材料のいずれかに注力
固体分離法	Honeywell, BASF, Shell	回収装置と材料の開発	Honeywell: 回収装置と材料の開発を一方で、Dow等は装置・材料のいずれかに注力
電界式CO2回収システム	Honeywell, BASF, Shell	回収装置と材料の開発	Honeywell: 回収装置と材料の開発を一方で、Dow等は装置・材料のいずれかに注力

© Arthur D. Little 16

Step1-3: 技術課題と解決アプローチ



CO2の分離回収技術としては主に以下の9つが存在

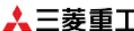
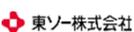
方式	分離回収メカニズム	装置構成
化学吸収法	<ul style="list-style-type: none"> 水溶液中の塩基性の材料(主にアミン)とCO2の化学反応により吸収。水溶液を加熱することで、逆反応によりCO2を回収 	<ul style="list-style-type: none"> 主に吸収液により排ガスを吸収する吸収塔と、水溶液を加熱、CO2を分離する再生塔で構成
物理吸収法	<ul style="list-style-type: none"> メタノールやエタノール等の吸収液にCO2を物理的に溶解させて吸収。減圧・加熱することでCO2を回収 	<ul style="list-style-type: none"> 主に吸収液により排ガスを吸収する吸収塔と、水溶液を加熱、CO2を分離する再生塔で構成
物理吸着法	<ul style="list-style-type: none"> ゼオライトや活性炭等の吸着剤にファンデルワールス力によりCO2を選択的に吸着。吸着剤を減圧(PSA)又は加熱(TSA)することでCO2を回収 	<ul style="list-style-type: none"> 主に吸着剤により排ガスを吸着・脱着を行う反応器で構成。反応器内の圧力や温度の切替えにより吸着・脱着を行う
膜分離法	<ul style="list-style-type: none"> 高分子膜や無機膜等の分離膜を膜前後の分圧差により排ガスを透過させることで、CO2を濾過・回収 	<ul style="list-style-type: none"> 主に分離膜を収めた分離装置で構成。分圧差が足りない場合は、昇圧装置が必要
固体吸収法	<ul style="list-style-type: none"> 多孔質材料に担持した塩基性の材料(主にアミン)とCO2の化学反応により吸着。吸着剤を加熱することで、逆反応によりCO2を回収 	<ul style="list-style-type: none"> 同一反応器で吸/脱着を行う固定層型、吸着剤を吸/脱着塔で流動する流動層型、容器で移動する移動層型が存在
深冷分離法	<ul style="list-style-type: none"> 排ガスを圧縮・冷却し、気体の沸点の違いによりCO2を分離・回収 	<ul style="list-style-type: none"> 主に排ガスと冷却する熱交換機と各気体を分離する蒸留塔で構成
オキシフューエル法	<ul style="list-style-type: none"> 燃焼前に空気分離機で酸素濃度を95%以上の高濃度化することで、燃焼後排ガスをCO2とH2Oのみとし、H2Oを除去することでCO2を回収 	<ul style="list-style-type: none"> 主に燃焼前に窒素等を除去する空気分離装置と燃焼後排ガスからH2Oを除去し、CO2を回収する回収装置で構成
ケミカルループ法	<ul style="list-style-type: none"> 金属酸化物を酸素キャリアとして燃焼に活用することで排ガスをCO2とH2Oのみとし、H2Oを除去することでCO2を回収 	<ul style="list-style-type: none"> 主に金属酸化物を酸化させる酸化塔と燃焼させる還元塔で構成
電界式CO2回収法	<ul style="list-style-type: none"> 電極セル表面に形成した電界に電子を送ることで電極上でCO2を捕捉。脱着時には電極上の電子を引き抜くことでCO2を解放・回収 	<ul style="list-style-type: none"> 主に電極によりCO2の捕捉・回収を行う分離回収装置で構成

本調査では主な分離回収技術のうち6方式の深堀を実施。化学吸収・物理吸収・物理吸着が商用化されている一方で、その他技術は開発～実証レベルとなっている

深堀対象

技術方式	分離メカニズム	Pros	Cons	技術開発状況
化学吸収法	温度差	<ul style="list-style-type: none"> • 低圧のCO2源に優位性 • 大規模CO2源に優位性(スケールメリットあり) 	<ul style="list-style-type: none"> • 腐食・浸食・発泡のリスク • 熱源必要(吸収液再生用) • 吸収液の毒性 	商用レベル
物理吸収法	分圧差、温度差	<ul style="list-style-type: none"> • 高圧のCO2源に優位性(分離メカニズムに利用) • 熱源不要or小さい 	<ul style="list-style-type: none"> • 低圧のCO2源は昇圧必要 	商用レベル
物理吸着法	分圧差(PSA)、温度差(TSA)	<ul style="list-style-type: none"> • CO2の高純度精製が可能 • 熱源不要(PSA)、装置構成がシンプル(TSA) 	<ul style="list-style-type: none"> • 排ガスの除湿必要(吸着剤に吸湿性あり) • 真空ポンプ必要(PSA)、熱源必要(TSA) 	商用レベル
膜分離法	分圧差	<ul style="list-style-type: none"> • 運転コストが低い • 小規模CO2源に優位性(機器構成がシンプル) 	<ul style="list-style-type: none"> • CO2の精製純度が低い • 大規模CO2源に不向き • 膜が高コスト・劣化リスク(排ガス中の不純物より) 	開発～商用レベル
固体吸収法	温度差	<ul style="list-style-type: none"> • 熱源が小さい(化学吸収法比) • 設備の小型化可能(化学吸収法比) 	<ul style="list-style-type: none"> • 装置が複雑(機械的な稼働設備必要) 	開発～実証レベル
深冷分離法	相変化	<ul style="list-style-type: none"> • CO2の高純度精製が可能 • 大規模CO2源に優位性 	<ul style="list-style-type: none"> • 低濃度ガスの分離エネルギーが大きい • 装置が複雑で建設/運転コストが高い 	開発～実証レベル
オキシフューエル法	空気分離	<ul style="list-style-type: none"> • CO2の高純度精製が可能 	<ul style="list-style-type: none"> • 空気分離設備が大型 • 空気分離装置に動力が必要 	開発～実証レベル
ケミカルループ法	空気分離	<ul style="list-style-type: none"> • 低消費エネルギー 	<ul style="list-style-type: none"> • 装置耐久性に課題 	開発レベル
電界式CO2回収法	電圧印加	<ul style="list-style-type: none"> • 低濃度・小規模CO2源に優位性 • 低消費エネルギー 	<ul style="list-style-type: none"> • (開発中技術の為、商用化に向け、吸着効率の継続ウォッチが必要) 	実証レベル

回収装置において化学吸収・物理吸収・物理吸着ともにHoneywellがトップシェア。HoneywellやBASF、Shellは回収装置と材料の両方を開発する一方で、Dow等は装置・材料のいずれかに注力

技術方式	主要プレイヤー※1	市場シェア(2021年)※2	主要プレイヤーの取り組み動向
化学吸収法	装置    	1位: Honeywell 2位: BASF 3位: Shell	<ul style="list-style-type: none"> 天然ガス、アンモニアの脱炭酸工程でのCO2回収への適用が現在一般的 将来的には、発電所や製鉄・セメントといった発生源の大規模CCUS計画・建設において化学吸収法の活用への取組が進む CO2分離時の消費熱エネルギー低減に向けたプロセス改良や排熱有効活用を検討 吸収液は特定の排ガス向けや複数の成分回収が可能な材料開発が進む
	材料   	1位: Dow Chemical 2位: BASF 3位: Shell	
物理吸収法	装置   	1位: Honeywell 2位: Air Liquide/Linde	<ul style="list-style-type: none"> 天然ガスの脱炭酸工程への導入が現在一般的。今後はバイオガス精製への適用が進められている 吸収液の冷却コスト削減のために、一定温度(-8℃)以上でもCO2回収効率が減少しない吸収液の開発や冷却プロセスの改良に取り組む
	材料 	1位: Dow Chemical	
物理吸着法	装置    	1位: Honeywell 2位: Linde 3位: Thyssenkrupp	<ul style="list-style-type: none"> PSA法が石油精製プラントの水素製造装置で現在活用されている。今後はバイオガス精製への適用が進められている 吸着剤のゼオライトは水分への親和性が強く、脱水・脱湿工程が必要となるため、耐水性に優れた新規吸着剤の開発が進められている
	材料※    	1位: Honeywell 2位: Zeochem 3位: 東ソー	

※1 主要プレイヤーは回収装置の開発プレイヤーと、吸収剤等の回収装置で活用される主要材料の開発プレイヤーについて整理 ※2 装置の市場シェアは2021年における累積導入数(プラント数)より試算。材料の導入数量(t)より試算 ※3 物理吸着向けゼオライトと活性炭の市場を合計して試算

出所: 富士経済「カーボンサイクル CO2削減関連技術・材料市場の現状と将来展望 2022(2022.7)」, その他公開資料よりADL作成

膜分離は装置・材料ともにHoneywellがトップシェア。固体吸収・深冷分離は開発～実証レベルであり複数のプレイヤーが装置・材料の開発を進める

技術方式	主要プレイヤー※1	市場シェア(2021年)※2	主要プレイヤーの取り組み動向	
膜分離法	装置	Honeywell Uop Schlumberger EnviTec Biogas EISENMANN AirLiquide	1位: Honeywell 2位: Schlumberger 3位: EnviTec Biogas	<ul style="list-style-type: none"> 天然ガス(特に海上ガス田)の精製用途で現在活用。今後はバイオガス精製向けへの活用も進む 他方式と比較して低いCO2分離性能の向上を各社取組む 高分子膜はバイオガス精製向けの市場拡大に伴い、ポリミド系膜の開発が進む(天然ガスは酢酸セルロース膜が主流) 無機膜は均一な厚さでの大面積成膜技術の開発が進められている
	材料※2	Honeywell Uop Schlumberger EVONIK AirLiquide FUJIFILM	1位: Honeywell 2位: Schlumberger 3位: Air Liquide	
固体吸収法	装置	Shell RITE	開発～実証レベル	<ul style="list-style-type: none"> 現在、鶏糞の燃焼発電プラント向けが唯一稼動。今後は火力発電所やセメントプラント等への展開を予定 化学吸収法等と比較してCO2再生に排熱が利用ができ、装置小型化も可能なため、中小規模の民間工場やゴミ焼却場への展開も想定している
	材料	Kawasaki		
深冷分離法	装置	ExxonMobil AirLiquide	開発～実証レベル	<ul style="list-style-type: none"> 現在は商用化前。今後は天然ガス精製の用途での実証が一部進む 低濃度CO2排出源に対しては、コンプレッサー等の補助機の電力コストが嵩むため、CO2濃度の高い大規模排出源への活用を中心に検討が進む
	材料	PMW TECHNOLOGY CHART		

※1 主要プレイヤーは回収装置の開発プレイヤーと、吸収剤等の回収装置で活用される主要材料の開発プレイヤーについて整理 ※2 装置の市場シェアは2021年における累積導入数(プラント数)より試算。材料の導入数量(t)より試算 ※3 高分子膜の市場シェアより。ゼオライト等の無機系膜は研究開発段階であり僅少
出所: 富士経済「カーボンサイクル CO2削減関連技術・材料市場の現状と将来展望 2022(2022.7)」、その他公開資料よりADL作成

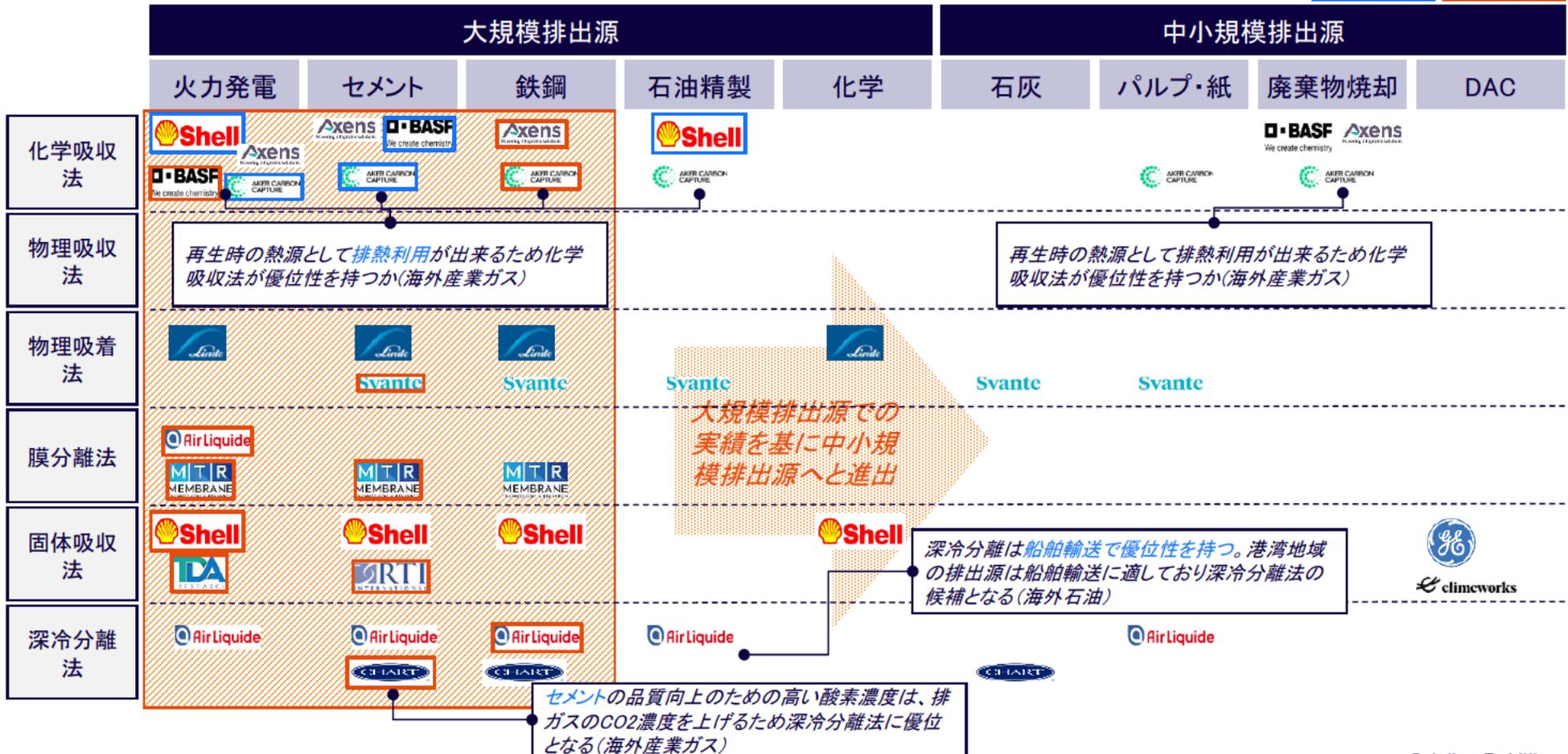
化学吸収法を保有する各社は自社化学吸収法の技術開発を推進。化学吸収法を保有しない企業は外部からの技術取込み、固体吸収法等の自社保有技術の性能向上による参画を図る

	Honeywell uop		Shell		BASF		Air Liquide		Schlumberger		Air Liquide		Svante	
	素材	装置	素材	装置	素材	装置	素材	装置	素材	装置	素材	装置	素材	装置
化学吸収法	低圧低濃度向けCO2回収システム「ASC」を開発		再生エネルギーの低減のための吸収液・高効率プロセスの開発		低圧低濃度向け吸収液の開発		保有技術なし BASFの吸収液による低圧低濃度向けプロセス開発		保有技術なし RTI*の吸収液による低圧低濃度向けプロセス開発		保有技術なし		保有技術なし	
物理吸収法	高圧高濃度向けCO2回収プロセスの開発中心		保有技術なし		保有技術なし		吸収液「Rectisol」を開発展開。但し高圧高濃度向け		保有技術なし		低圧・低濃度向け取組は少ない		③化学吸収法以外の保有技術の性能向上に向けた開発	
物理吸着法	高圧高濃度向けの回収プロセスの開発中心		TSA法による分離回収技術の開発		保有技術なし		HISORP®CCを開発。但し、高濃度ガスが主用途		保有技術なし		保有技術なし		排ガス向けに吸着効率を向上させたMOFを開発	
膜分離法	高分子膜を展開。但し高濃度天然ガス向けが主用途		保有技術なし		保有技術なし		保有技術なし		膜技術を保有。但し高濃度CO2の回収が主用途。		低選択性を克服するための他方式併用やプロセス開発		保有技術なし	
固体吸収法	保有技術なし		再生エネルギーの低減のための吸着剤・高効率プロセスの開発		保有技術なし		保有技術なし		③化学吸収法以外の保有技術の性能向上に向けた開発		保有技術なし		保有技術なし	
深冷分離法	保有技術なし		③化学吸収法以外の保有技術の性能向上に向けた開発		保有技術なし		保有技術なし		保有技術なし		他方式(膜分離法等)を前処理として活用する方式をCryocap FGとして展開中		保有技術なし	

※ RTI: Research Triangle Institute
出所: CMCリサーチ「世界のCCUS総合分析(2022.8)」, エキスパートヒアリングよりADL作成

各回収方式ともに火力発電、セメント、鉄鋼等の大規模排出源を足掛かりに実証・商用事例を創出しノウハウ・採用事例を蓄積しつつ、中小規模排出源への進出を狙う形か

商用事例有 (計画中含) 実証事例有 (計画中含)



出所: 各種公開資料、エキスパートインタビューよりADL作成

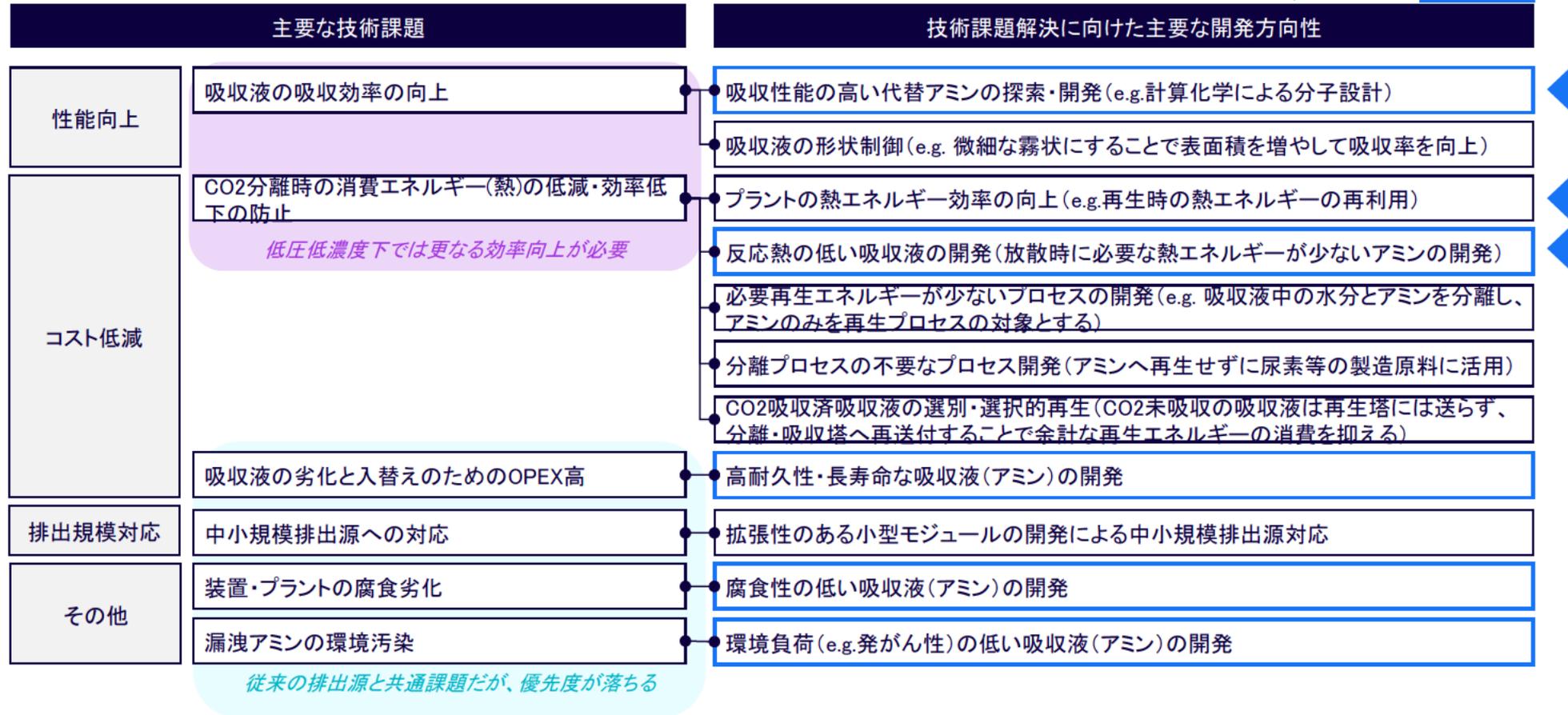
低圧・低濃度下で低下する吸収/吸着効率の向上や再生時の熱エネルギー効率の向上等が主な課題であり、主に材料や装置の改善による取組みが現在の注力領域

	素材	装置	プロセス
化学吸収法	性能向上 吸収効率の高い吸収液の開発 (代替アミンの探索・開発)	コスト削減 プラントの熱エネルギー効率の向上 (排熱等の利用)	コスト削減 再生時の熱エネルギーの低減 (CO2吸収アミンを選択的に加熱再生する技術の開発)
物理吸収法	性能向上 低圧下での吸収効率の低下 (高効率な吸収液の開発)	コスト削減 吸収液の冷却コスト高 (高効率な冷却装置の開発)	現時点では特段の取組は見られない
物理吸着法	性能向上 低圧下での吸着効率の低下 (低圧下でも吸着量の多い吸着剤開発)	コスト削減 圧スイング時の昇/減圧コストの増加 (排熱(冷熱)利用の高効率な回収法の開発※)	現時点では特段の取組は見られない
膜分離法	性能向上 低濃度下における分離性能の低下 (高選択性膜の開発)	コスト削減 昇圧時のコスト増加 (高効率な昇圧装置の開発)	コスト削減 低濃度下での回収コスト増加 (他方式との併用)
固体吸収法	性能向上 吸着効率の高い吸着剤の開発 (多孔質担体の活用)	コスト削減 プラントの熱エネルギー効率の向上 (排熱等の利用)	コスト削減 低濃度下の再生用熱エネルギーの浪費 (CO2未吸着吸着剤の変換プロセスの開発)
深冷分離法	現時点では特段の取組は見られない	コスト削減 装置の複雑性による高CAPEX (機器のモジュール・標準化)	コスト削減 低濃度下での昇圧・低温下コストの増加 (他方式との併用)

※ 冷熱によりCO2を固化・回収することでPSA法における減圧に掛るコストの低減を実現
 出所: エキスパートヒアリングに基づき作成

化学吸収法では、低圧低濃度下においても従来同様吸収液の吸収効率の向上・再生時の反応熱の低減が鍵となる

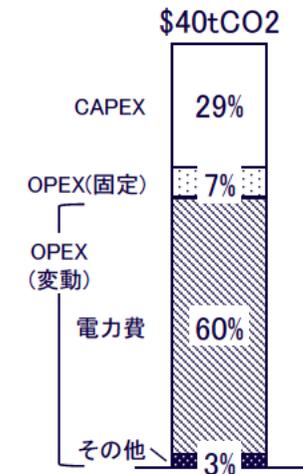
◀ 主要な取組 素材関連の取組



化学吸収法では、吸収液の吸収効率の向上と再生時の熱エネルギーの低減が主要な課題となる

技術課題	<ul style="list-style-type: none"> 化学吸収法においては、従来の排出源と同じではあるが、吸収効率の向上と再生時の熱エネルギーの低減が主要な課題となる(海外産業ガス 技術者) アミン法は化学結合でCO₂と結合するため分圧が変わっても吸収効率は変化しない。また、脱着も加熱により行うため圧力・濃度は影響がない。そのため、高圧～低圧下でも課題は共通となる。元々低圧排出源に向いている方法だが、主な課題としては吸収効率の向上と再生時のエネルギーの低減となる(元国内化学 技術者)
開発・取り組み方向性	<ul style="list-style-type: none"> 再生時の熱エネルギーの低減に対しては、再生に掛るエネルギー量が低い吸収液の探索・開発を行うと共に、熱エネルギーの効率利用のため回収装置や運用環境の最適化に取り組んでいる(海外産業ガス 技術者) 現在9割以上の水素製造装置は天然ガス等の改質により水素を製造しているが、この改質装置へのCO₂回収装置の実装が化学吸収法における大きな市場になる(海外産業ガス 技術者) アミンの種類は数が限られており探索余地はあまり残っていない。一方で、再生時の熱エネルギー低減では排熱利用等の熱マネジメントの他、再生前に余分な水分をアミンから分離することでエネルギー消費を抑えるような新しいプロセスの開発も行われている(元国内化学 技術者) CO₂未吸収な吸収液を再生させることによるエネルギーロスには、未吸収の吸収液を分離・吸収塔に再度送り返すことで吸収済みの吸収液のみを再生させる方法等がある(海外石油化学 技術者)

現状コスト試算例



想定コスト・主な条件

分離回収コスト: \$40tCO₂
 排出源: 250MWe級ガス火力発電
 CO₂濃度: 12%
 回収率: 90%

※ 設備稼働率の設定によっては回収コストの上/下振れの可能性がある

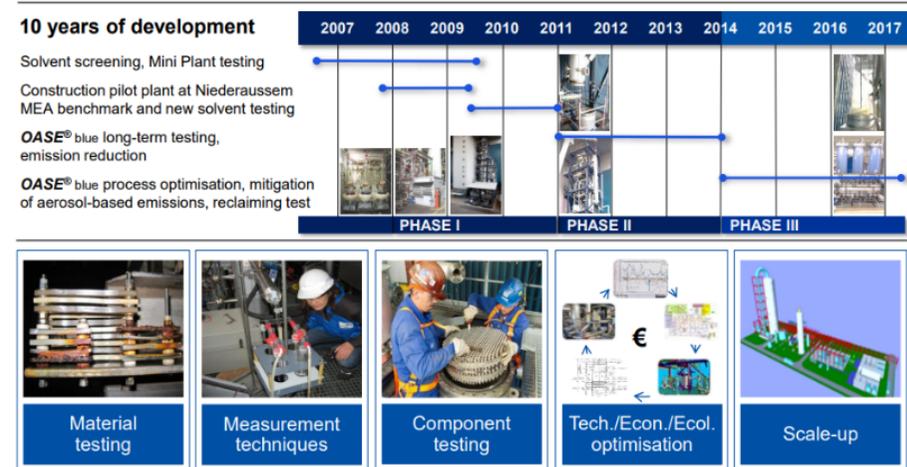
出所:「Technical and economic performance assessment of post-combustion carbon capture using piperazine for large scale natural gas combined cycle power plants through process simulation(2021.6)」
 有識者インタビューよりADL作成

BASFは低圧低濃度排ガス向けの吸収液をOASE blueとして展開。Lindeと共に10年に亘り低圧低濃度排ガス向けの回収プロセスと併せて開発を進め提供を開始

OASE blueの概要

- BASFはOASEブランドの元で複数の排出源向けの吸収液を展開
- 排ガス向けにはOASE blueを展開。OASE blueはLindeと共に2007年より開発・プラント実証を行うことで製品化を実現したもの
 - 実証プラントはドイツのNiederaussemにある火力発電所にて行われ、約14%の低圧低濃度排ガスからの新規アミン吸収液によるCO₂の分離の実証が実施された
- 180以上の吸収液のスクリーニングを行い、再生時の消費エネルギーが25%低い吸収液が実証用に選択され、OASE blueの開発に繋がった
- 米国でもDOEの支援の下、石炭火力発電所向けのパイロットプラントにおける実証を実施中(2021-2026年)

BASFとLindeの低圧低濃度向け回収システムの開発

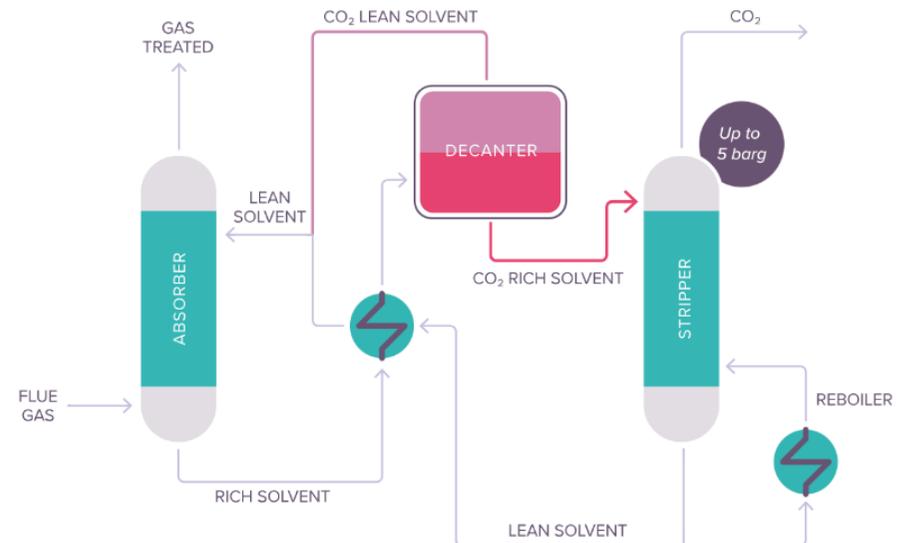


AXENSはCO₂の吸収有無により吸収剤を分離し、CO₂吸収済みの吸収液のみ再生することで、エネルギー効率を高めた分離プロセスを開発

AXENSの高効率な再生プロセス

- AXENSはフランスのエネルギー分野における主要研究機関であるIFPのグループ会社として、IFPが開発した高効率再生プロセスをDMX™として実用化・事業展開を行う
- DMX™は特殊な温度とCO₂分圧条件下で、CO₂を吸収している吸収液と未吸収吸収液を分離させることが出来るプロセス。未吸収吸収液は再度吸収塔に送り返されることで、再生時に余分な吸収液を加熱することを防止し、高効率な再生プロセスを実現する
- AXENSによるとMEAプロセスと比較して30%のエネルギー効率向上をDMX™は実現。CO₂分圧が低～中の用途に向いており、石炭やバイオマス火力発電所、鉄鋼、セメントプラント、焼却炉等への適用が想定されている
- フランスのダンケルクにあるArcelorMittalの鉄鋼プラントにおいてHorizon 2020の支援の下、2025年稼働に向けて回収プラントの設置・実証が行われている

DMXのプロセス概要



高圧・高濃度排出源に優位性を持つ物理吸収法は、低圧排出源へ適用する際は効率が低下。吸収量の多い吸収液や効率的な昇圧プロセスの開発が必要

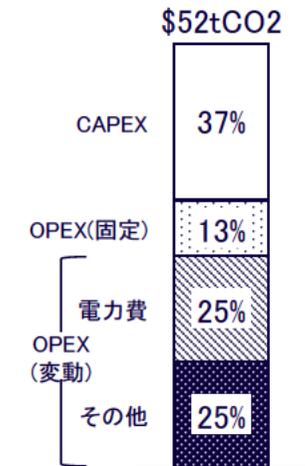
← 主要な取組 素材関連の取組

主要な技術課題		技術課題解決に向けた主要な開発方向性	
性能向上	低圧下での吸収効率低下(及び昇圧によるコスト高) <i>低圧低濃度下では更なる効率向上が必要</i>	低圧下でも吸収量の高い吸収液の開発	←
コスト低減	吸収液の冷却コスト高(低温下ほどCO2吸収量が增大) <i>従来の排出源と共通課題</i>	高効率な昇圧プロセスの開発	←
	低圧低濃度下では更なる効率向上が必要	高効率な冷却装置の開発	←
	低濃度化に伴う複数の気体の混合による分離プロセスの高コスト化	一定温度以上でも吸収量が下がらない吸収液の開発	←
排出規模対応	中小規模排出源への対応	現時点で有効な手立てはないか	
		現時点では特段の取組は見られない	

物理吸収法においても吸収効率の向上、冷却コストの低減が重要課題。一方で原理的に低圧低濃度排出源に適した回収とは言えず、他方式と比較しても優位性があまり無い

技術課題	<ul style="list-style-type: none"> 物理吸収法は高い分圧でより多くのCO2を吸収するため、圧力低下に伴う吸収効率の低下が課題。また、従来排出源と同じではあるが冷却コスト低減も主要な課題となる(海外産業ガス 技術者) 低濃度となるとCO2以外の気体の混合が増加することで、冷却効率の低下・冷却コストの増加が発生する。物理吸収法は吸収液の溶解度の差で対象物を分離するが、CO2のみ溶解度が他と異なるような吸収液はあまりなく、原理的に限界がある(元国内化学 技術者) 昇圧することで吸収効率を上げることは可能だが、コスト増に繋がる(元国内化学 技術者)
開発・取り組み方向性	<ul style="list-style-type: none"> 物理吸収法の効率は吸収液の物理特性に依存するため、低圧・低濃度下での吸収効率の向上には新しい吸収液の開発が不可欠(海外産業ガス 技術者) 冷却コストは、省エネな熱交換機や冷却器の開発に取り組んでいる(海外産業ガス 技術者) 低圧低濃度向けは化学吸収法が主であり、物理吸収法は目立つ開発プロジェクトは無い(海外産業ガス 技術者) 高圧高濃度排出源に適した手法であり低圧低濃度排出源では優位性が他手法に劣る(元国内化学 技術者)

現状コスト試算例



想定コスト・主な条件

分離回収コスト: \$52tCO2
 排出源: バイオ燃焼製造
 CO2濃度: >60%

※ 設備稼働率の設定によっては回収コストの上/下振れの可能性がある

出所:「Techno-economic evaluation of carbon capture via physical absorption from HTL gas phase derived from woody biomass and sewage sludge(2021.9)」, 有識者インタビューよりADL作成

Honeywell UOPはDowのSelexol Maxを活用した次世代プロセス「SeparALLプロセス」開発に取り組む。吸収効率向上による吸収量増大が見込まれるが、主な適用先は高圧高濃度排出源となる

SeparALLの概要

- Honeywell UOPは次世代SelexolプロセスとしてDow Chemicalの「Selexol Max」を使用した「SeparALLプロセス」の開発に取り組み、実証としては世界で初めて大崎クールジェンで行われている
 - 大崎クールジェンは石炭ガス化技術を活用した火力発電であり、ガスは燃焼前(Pre-combustion)のガスから分離するため、**高圧・高濃度**となる
 - CO₂分離回収に係る実証は2019年から実証試験を開始している
- 従来の吸収液(Selexol)と比較して新しい吸収液「Selexol Max」は**溶解度が大きく、同一条件下では吸収量が多くなる**等、吸収効率の向上が実現されている

大崎クールジェン(IGCC)向けCO₂回収

2019年12月から実証試験を開始

実証規模	IGCCガスからのCO ₂ 回収率15%相当 (日量400トン)
COシフト	Sweet (脱硫後) シフト
回収方式	物理吸収方式
基本性能	CO ₂ 回収効率: 90%以上 回収CO ₂ 純度: 99%以上

①シフト反応器に水蒸気を添加して水蒸気改質反応により、一酸化炭素 (CO)を二酸化炭素 (CO₂) に転換する、②高圧・低温下で吸収液にCO₂が吸収される、③減圧することで吸収液からCO₂が分離される。

物理吸着法(PSA法)は、低圧排ガスでは昇圧コストが増加。低圧下でも吸着量が大きい、或いは小圧力差で多くのガスを脱着できる吸着剤の開発が必要

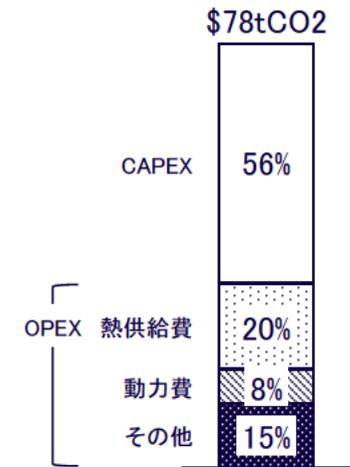
◀ 主要な取組 素材関連の取組

主要な技術課題		技術課題解決に向けた主要な開発方向性	
性能向上	低圧下での吸着量の低下(PSA/TSA) <i>低圧低濃度下では更なる効率向上が必要</i>	● 低圧下でも吸着量の大きい吸着剤の開発(e.g.PCP/MOF)	◀
	吸湿による吸着効率低下(高除湿コスト)(PSA/TSA) <i>従来の排出源と共通課題だが、優先度が落ちる</i>	● 除湿不要な耐水性のある吸着剤の開発 ● 高効率な除湿工程の開発	
コスト低減	圧カスイング時の減/昇圧コストの増加(PSA) <i>低圧低濃度下では更なる効率向上が必要</i>	● 圧力変化で吸着量が大きく変わる吸着剤の開発 ● 高効率な減/昇圧工程の開発(e.g. 未利用冷熱を活用した減圧時エネルギーの削減)	◀
	加熱コスト(TSA) <i>従来の排出源と共通課題だが、優先度が落ちる</i>	● 温度変化で吸着量が大きく変わる吸着剤の開発 ● プラントの熱エネルギー効率の向上(e.g. 排熱の有効利用)	
	吸着剤コスト	● 吸着剤・吸着フィルタの大量生産手法の開発(e.g. Roll to Rollによる吸着フィルタの大量生産)	
排出規模対応	大規模排出源への対応	● 規模の変化へ柔軟に対応可能な回収装置のモジュール化	

物理吸着法においても吸着効率の低下や昇圧によるコスト増が課題となり、低圧下でも吸着量の多い吸着剤の開発や未利用エネルギーの利用によるコスト低減が打ち手となる

技術課題	<ul style="list-style-type: none"> 基本的には圧力と比例して吸着量が増えるため、低圧排出源では吸着効率が低下すること、及び昇圧によるコスト増が課題となる(元国内化学 技術者)
開発・取り組み方向性	<ul style="list-style-type: none"> 低い分圧でも分圧の変化で吸着量が急激に変わる吸着剤の開発が主要な取り組み方向性。特にPCPやMOFは組合せが多く想定出来るため開発余地は大きい(元国内化学 技術者) 脱着時のエネルギー低減(高効率な減圧プロセス)では、コンプレッサーそのものは技術的改善余地は少ないが、近傍の冷熱(LNG基地等)を活用しCO2を冷却・固化により減圧することで、従来真空ポンプ等で減圧していたコストを削減するといった効率向上の取組余地はある(元国内化学 技術者)

現状コスト試算例



想定コスト・主な条件
分離回収コスト: \$78tCO2 排出源: 産業排ガス CO2濃度: 12% 回収率: 90%

※ 設備稼働率の設定によっては回収コストの上/下振れの可能性がある

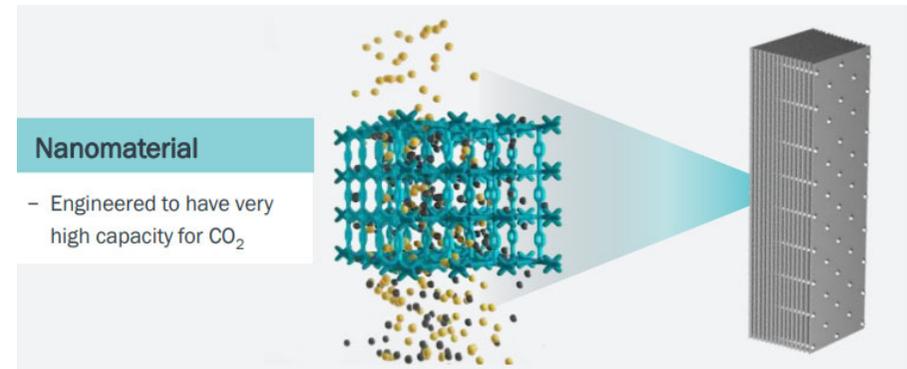
出所:「Postcombustion CO2 Capture: A Comparative Techno-Economic Assessment of Three Technologies Using a Solvent, an Adsorbent, and a Membrane(2021.8)」
有識者インタビューよりADL作成

Svanteは、水蒸気に強い耐性を持つMOF吸着剤を開発。低温蒸気を直接吸着剤に当てることで効率的且つ低コストでCO2を回収可能な技術の大量生産に取り組む

SvanteのMOF吸着剤の開発

- Svanteは低温蒸気を利用することでセメント工場や水素製造プラント等のCO2排出を迅速に回収するMOF吸着剤を開発したことを2021年に発表
- この吸着剤は強い水耐性を持つことより、低温蒸気を直接当てることで低コスト・迅速なCO2分離を実現している
- また、BASFと協業することで、このMOF吸着剤を低コスト且つ大量に生産する製造プロセスを開発した他、シート状の積層体に吸着剤をコーティングする、大量かつ低コストなRoll to rollプロセスを開発している

MOFを活用した吸着フィルタ



膜分離法は高圧・高濃度排出源向けに優位性を持ち、低圧・低濃度排出源では透過性や選択性の向上、昇圧コストの削減等の課題が存在

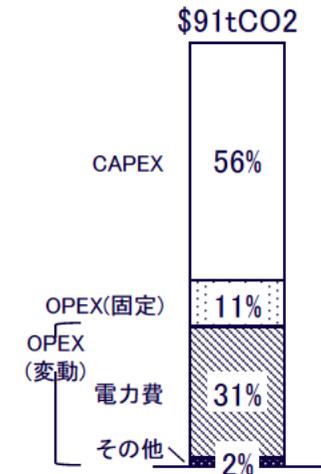
← 主要な取組
素材関連の取組



膜分離においては、低圧低濃度下での分離効率の低下が課題となる。昇圧プロセスの追加や夾雑物を改質することで分離を容易にするような新しいプロセスの開発が必要

技術課題	<ul style="list-style-type: none"> • 低圧低濃度下では分離効率の低下・昇圧による高コスト化が課題となる(海外化学メーカー技術者) • CO₂を選択的に分離する分離膜は特殊なポリマーを使う等素材の開発費が掛っており、IP等も絡むため高価となっており、分離膜コスト低減も課題の1つ(海外化学メーカー技術者) • 透過性と選択性を両立した分離膜の開発が低圧低濃度下では求められる(元国内化学技術者)
開発・取り組み方向性	<ul style="list-style-type: none"> • 膜分離法は高圧化で働くため低圧排出源では昇圧プロセスを追加することで対応。コスト増のためコスト効率の向上・昇圧プロセスの低コスト化は必要(海外化学メーカー技術者) • 低濃度化(COやN₂等の混合気体も増える)ではCO₂の分離が難しくなる。COとの分離では一度、水性ガスシフトでCO₂と水素に変換してからCO₂を分離する方法に取り組んでいる(海外化学メーカー技術者) • 透過性の向上は、高分子膜であれば支持膜に塗布する機能膜を多孔質にする等で吸収量を増やす方法が想定される。ゼオライト膜であれば薄膜化が鍵だがクラック等が生じないような成膜技術の高度化が必要(元国内化学技術者) • ゼオライト膜はセラミックの支持体がコスト高の要因。代替や量産化によるコスト削減が可能(元国内化学技術者)

現状コスト試算例



想定コスト・主な条件

分離回収コスト: \$91tCO₂
 排出源: 鉄鋼プラント
 CO₂濃度: 12%
 回収率: 90%
 設備稼働率: 85%

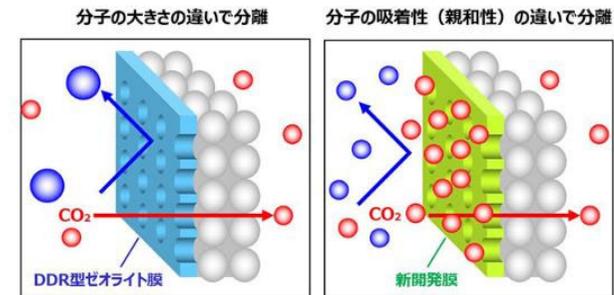
膜分離法は依然としてCO2分離性能が低い点が主要な課題であったが、日本ガイシは分離精度を大幅に高めた分離膜の開発に成功

膜分離法に関する主要な課題

- 膜分離法は、他の技術方式と比べCO2の分離性能が低く、適用範囲が限定されている点が課題
- 天然ガスおよびバイオガス精製では実用化・普及しているものの、他用途への拡大・普及するためには、分離性能の向上が必要
 - 従来の分離膜は分子の大きさの違いで分離するため、CO2よりも大きな分子であるメタンが主成分である原油随伴ガスや天然ガスでは、容易にCO2が分離できる
 - 一方で、産業排ガスの主成分はCO2と分子の大きさが近い窒素や酸素であるため、従来の膜では高い精度を実現するのが難しいという課題が存在

課題解決に向けた取り組み

- 日本ガイシは産業排ガスに対して、従来製品の約5倍のCO2分離精度を実現する新たな分離膜の開発に成功
- 分子の吸着性(親和性)の違いを利用してCO2を窒素や酸素から分けることで、分離性能の向上を図るという新たなメカニズムを開発



MTRは発電所由来の排ガスからのCO2分離等に取り組みPolaris等の高性能膜を展開。現在、膜モジュールと深冷分離法を組合せたCO2回収技術の開発を行っている

MTRの低圧・低濃度向けの取組

- MTRは天然ガスやバイオガス用途の膜モジュールを販売。火力発電所由来の燃焼排ガスからのCO2分離への研究にも取り組んでおり、開発した高性能膜のPolaris膜は幅広く採用されている
- 現在、膜モジュールと深冷分離を組合せたCO2回収技術の開発を行っている
- 2020年9月よりDOEの研究開発プログラムの中で、石炭・天然ガス火力発電所及び産業排出源CO2の回収に係る研究開発を実施。プロジェクト3年目から大型パイロットシステムの設計・運用が行われる予定
 - CO2濃度約13%の低濃度排ガスを2段階の膜分離プロセスを通すことで約85%まで高濃度化する
- その他、オークランド大学と共同で高い透過性と分離性を有するPIM(Polymer of Intrinsic Microporosity)の合成に取り組んでいる

MTRがDOE支援で行う火力発電所向け回収事業の概要

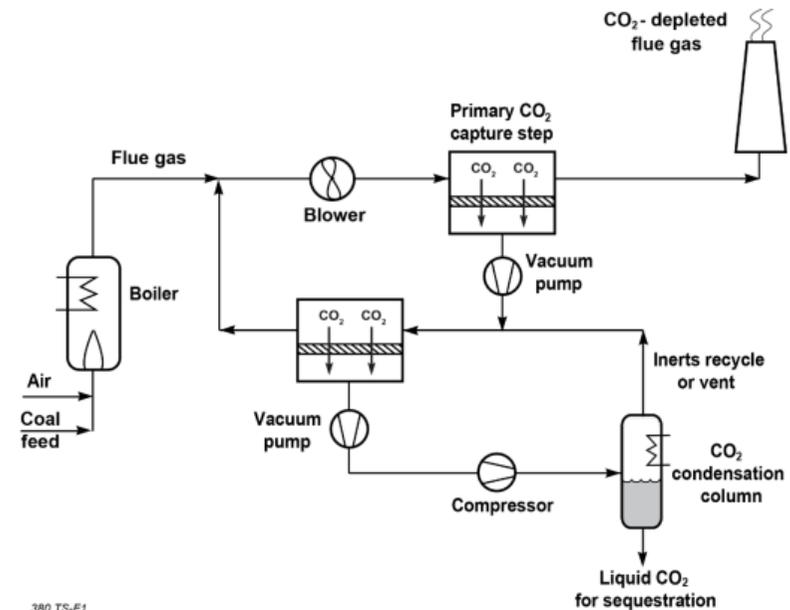


Figure 1: Simplified block diagram of the MTR large pilot CO₂ capture plant to be built.

固体吸収法は化学吸収法と同様に、吸着剤の吸収効率の向上・再生時の反応熱の低減が鍵となる

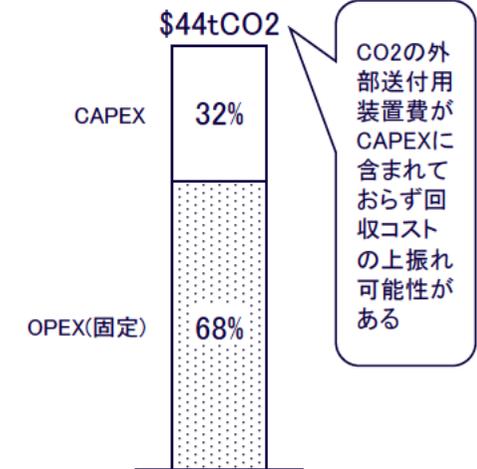
← 主要な取組 素材関連の取組



固体吸収法では、吸着剤の吸着効率や再生時のエネルギー効率の向上が主な課題であり、新規の吸着剤の開発や新プロセスによる効率的な再生プロセスの実現が望まれる

技術課題	<ul style="list-style-type: none"> 化学吸収法と同様に分圧によって吸収効率は大きく変わることはないため、吸着効率の高い吸着剤の開発及び再生時のエネルギー効率の向上が主な課題となる(元国内化学 技術者) 低濃度下ではCO2未吸着の吸着剤の割合が多くなり再生エネルギーの効率が低下することが大きな課題となる。固体吸収法は化学吸収法と比較してエネルギー効率は高いが、例えば石炭火力発電所にCO2回収装置を設置すると、依然として発電した電力の1割*近くを回収装置で消費してしまう(海外石油化学 技術者) また調整電源に活用する際は稼働率が低下するが、吸収塔や再生塔を作動させるためには一定以上の出力が必要であり、エネルギー効率が落ちるリスクが存在する(海外石油化学 技術者)
開発・取り組み方向性	<ul style="list-style-type: none"> 吸収効率の向上においては、CO2との反応性が高過ぎず(再生時の必要エネルギーが大き過ぎない)、吸着量も多い吸着剤の開発が重要であり、具体的にはアミン基を修飾することで実現する方法が取組まれている(元国内化学 技術者) アミンによるプラント等の劣化は、固体に担持されるため化学吸収法と比較して課題にはならなくなる(元国内化学 技術者) CO2未吸着な吸着剤を再生させることによるエネルギーロスには、吸着剤の吸着力を多孔質担体等を活用し上げること、未吸着の吸着剤を分離・吸収塔に再度送り返すことで吸着済みの吸着剤のみを再生させる方法等がある(海外石油化学 技術者)

現状コスト試算例



想定コスト・主な条件
分離回収コスト: \$43.5tCO2
排出源: 500MWe級石炭火力発電
CO2濃度: 12.3%
回収率: 90%
設備稼働率: 85%

※ 排ガスの送風用ブロワと加熱再生のために約5%を、回収したCO2の圧送用のコンプレッサ等で約5%の電力を消費
出所:「Adsorptive systems for post-combustion CO2 capture(2015.9)」, 有識者インタビューよりADL作成

Shellは固体吸収法を活用した低圧濃度排ガス向けのデモプラントを2024年稼働に向けて建設。 流動層を用い、多孔質担体に担持した吸着剤を用いることで吸収量の向上と省エネに取り組む

Shellによる排ガス向けデモプラントの建設「TulipGreenCO2プロジェクト」

- Shellは**固体吸収法**を用い、排ガスからCO₂を回収する新技術を開発。BMC Moerdijk発電所の敷地内にそのための実証プラントを建設しています。2024年には、1日あたり約150トンのCO₂を捕捉する予定
 - **流動層**を用いた固体吸収法となっている
- 化学吸収法と比較して**多孔質担体**を吸着剤に用いることで吸収量を向上させ、全体のエネルギーコストを**25%削減**
- この技術を用い**バイオガス火力発電所、セメント・鉄鋼業、水素製造**などの排ガスからCO₂を分離を目指す



Climeworksは大気中(低圧・低濃度)のCO₂回収に独自のアミン担持固体吸着剤を利用したDAC装置を商用化。焼却炉等の排熱を脱着に利用することで熱プロセスの効率化を図る

ClimeworksのDACの取組

- Climeworksはアイスランド施設でAudiと協働でCO₂削減プロジェクトを推進。年間4,000tのCO₂を大気中から濾過・回収し、地下に送り込み鉱化させる
- この装置では吸引した空気をフィルターが設置された「CO₂コレクター」に取り込み、そこで**独自開発のアミン担持固体吸着剤**を使用して空気中のCO₂を回収。排熱プラントからの**排熱**により100°Cに加熱することで、回収したCO₂を分離する
- 焼却炉の排熱を利用して脱着を行うため、設置場所は100°C以上の排熱が利用可能な場所に限られる



深冷分離法は物理特性を基にした回収法であり、分離効率の向上は困難。注力領域は装置のモジュール/小型化でのCAPEX低減、プロセス最適化でのOPEX低減となる

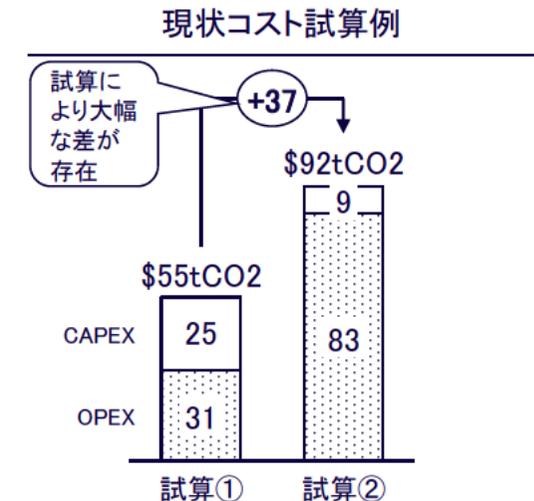
◀ 主要な取組 素材関連の取組

主要な技術課題		技術課題解決に向けた主要な開発方向性	
性能向上	物理特性を基にしており分離効率向上は困難	現時点では特段の取組は見られない	
コスト低減	低濃度を補うための冷却・昇圧によるコスト増 <i>低圧低濃度下では更なる効率向上が必要</i>	他方式を前処理として活用し濃度を上げてから深冷分離法により分離回収(e.g.膜分離法、物理吸収法)	◀
	<i>従来の排出源と共通課題</i>	低温熱源の利用や熱マネジメントの効率化	
	複雑な装置による高設備コスト	昇圧プロセスの高効率化	◀
	水分・不純物の前処理(除去)コスト	装置のモジュール化・簡易プロセスの開発	◀
排出規模対応	中小規模排出源への対応	効率的な脱水・不純物除去プロセスの開発	
		モジュール化によるコンパクト設計	

深冷分離法は低濃度下ではエネルギー効率が下がる他、CAPEXが高いことが課題。別方式との併用による濃度の向上や装置のモジュール化等によるコスト削減への取組が進められている

技術課題	<ul style="list-style-type: none"> 深冷分離法の主な課題は複雑な装置によりCAPEXが大きくなることである(海外産業ガス 技術者) 元々高濃度排ガス向けの技術であり、低濃度下では向かない。濃度が下がることで余分なガスの冷却も必要になり、エネルギー効率が下がることになる(元国内化学 技術者)
------	--

開発・取り組み方向性	<ul style="list-style-type: none"> 深冷分離の主な注力領域はCAPEXの低減であり、熱交換機を含むコールドボックス等の装置のモジュール化によりコスト圧縮が見込める(海外産業ガス 技術者) あくまで物理特性を基にした回収法であり、温度帯で性能は決まってくるため化学プロセスの改良ではなく装置の小型化や最適化、プロジェクト毎で異なるのではなく標準化された装置の導入によりコスト削減が見込まれる(海外産業ガス 技術者) 低濃度向けには別方式(膜分離や物理吸収法等)で前処理を行い濃度を上げてから処理することが有効。但し、プロセスが複雑になりコスト高となる(元国内化学 技術者)
------------	---



想定コスト・主な条件	
試算①	分離回収コスト: \$55.1tCO2 排出源: 550MWe級石炭火力発電 回収率: 90%
試算②	分離回収コスト: \$92.3tCO2 排出源: 天然ガス精製

※ 試算①は深冷分離法の開発事業者であるSES(Sustainable Energy Solutions)の試算でありバイアスが存在する可能性もあるため、試算②として榊富士経済の試算も併記(富士経済試算はCAPEXが1基当りの試算のためプラント寿命を25年としてCAPEXを計算)

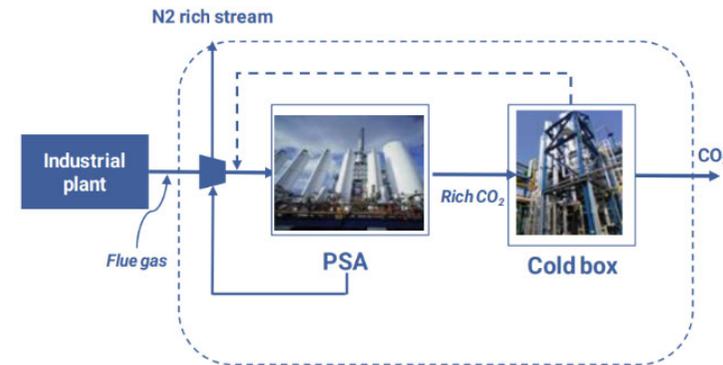
出所:「Final/Technical Report Cryogenic Carbon Capture Development(2019.9)」、「カーボンリサイクル CO2削減関連技術・材料市場の現状と将来展望2022」、有識者インタビューよりADL作成 © Arthur D. Little 37

Air Liquideは複数の排出源向けのCO2分離回収向けの深冷分離法をCryocap™シリーズとして展開。低濃度排出源向けには物理吸収法と組合せたCryocap™FGを提供している

Cryocap™FGの概要

- Air LiquideはCryocap™シリーズとして複数の排出源向けのCO2分離回収向けの深冷分離法による回収技術を展開
- 特に低濃度排ガス向けにはCryocap™FGを展開中。深冷分離法は低濃度排ガスと比較して高濃度排ガスの方がエネルギー効率が良いことから、Air Liquideが保有する他の分離回収方式(物理吸着や膜分離)と組合せたソリューションを提案
- Cryocap™シリーズで対象とする排出源としては、水素製造装置(SMR)やセメント・石灰製造、鉄鋼、石油精製、化石・バイオマス火力発電、紙・パルプ製造が挙げられており、CO2濃度等により複数のソリューションが提供されている
 - CO2濃度が15%程度の排ガス向けのCryocap™FGの適用分野は水素製造装置やセメント・石灰、鉄鋼、石油精製、石炭・バイオマス火力発電、紙・パルプ製造が挙げられている
- 水素製造向けのCryocap™H2等は既に商用プラントでの運用が開始されており、排ガス向けのCryocap™FGも商用プラント向けに事業開発と提案を現在実施している

Cryocap™FGの構成イメージ



Chartは、深冷分離法技術を保有するSESを買収。セメント工場におけるパイロット/小規模商用スケールの実証事業を2022年から実施

実証事業の概要

- Chart Industryは深冷分離法の技術を持つSustainable Energy Solutions(SES)を2020年に買収。セメントや鉄鋼、石炭/ガス火力、パルプ・紙、化学業界向けへの展開を狙う
- 2022年から2025年に掛けて、DOEの助成により米国ミズーリ州のセメント工場において深冷分離法を用いた回収プラントの設計・建設・試運転を行う
 - 2022年～2024年はプラント設計や試運転に向けた行政手続きを実施
 - 2025年に2カ月の試運転・検証を行う予定
- 実証においてはモジュール型の回収装置を用いることで、サイト外での組立を行い、迅速な設置やコスト低減を狙う

実証プラントのイメージ



- 1 プロジェクトの全体像
- 2 Step1: 主要技術方式の技術開発動向
- 3 Step2: 低圧低濃度排出源の適合度評価
- 4 Step3: 対象国の市場・政策動向
- 5 Step4: 主要プレイヤー・プロジェクト動向
- 6 Appendix

Step2 サマリ

①評価対象工程の抽出

- 低圧・低濃度排ガスが想定される一般産業で分析対象となる工程を、将来的なCCS必要性も踏まえて抽出。主要工程抽出には、燃料燃焼の有無に加え、原材料の化学反応によるCO₂排出有無及び電化難易度を踏まえた将来的な電化可能性を考慮することが重要

②各排出源に対する適合度評価

- 各排ガスに適合する回収技術を検討する際は、排ガスの4つの特性(圧力・濃度・発生量・夾雑物)に注目。回収技術により、圧力領域や濃度、夾雑物の有無への材料やプロセス上の得手不得手が存在する他、プラント規模の拡大容易性により発生量も回収技術の選定において重要な要素となる
- 各業種で導出した主要なCO₂排出工程について、排ガス特性を整理した後、各回収技術の適合度を整理。化学吸収法が全般的に適合度が高い傾向がある。一方で、中小規模排出源であれば固体吸収法、大規模排出源であれば深冷分離法も比較的適合度が高い
 - － 化学吸収法は、セメント(焼成)・製鉄(高炉)を除き、いずれの工程についても適合度が高い。特に吸収液の劣化を引き起こす可能性のある夾雑物が無い場合は有効
 - － 物理吸収法は、高濃度の製鉄(高炉)・セメント(焼成)等を除き、低圧・低濃度下における性能低下により全般的に適合度が低い。
 - － 物理吸着法は、中小規模排出源への適正・夾雑物耐性など利点はあるが、低圧低濃度に合わせた工夫が必要となる
 - － 膜分離法は、中小規模排出源への適正など利点はあるが、低圧低濃度に合わせた工夫が必要となる
 - － 固体吸収法は、発電・石油精製・高炉製鉄(高炉)・セメント・有機化学・無機化学を除き、適合度が高い
 - － 深冷分離法は大規模発生源を中心に適合度が高い。但し、低濃度排出源においては分離膜等の前処理等で濃度を引き上げる必要がある。また、船舶輸送等で予め液化する必要があるユースケースに適している
- なお、上記適合度評価は、あくまで技術的な視点により各排ガスと回収技術の適合度を評価したものであり、実際の導入においては他方式とのコスト比較や導入実績により影響される
- 物理吸着法や膜分離法では、素材開発やプロセス効率の向上等の開発余地が存在し、低圧低濃度排出源への適用度の向上やコスト削減余地が高いと見られる

Step2では、CO2排出源を業種 × 主要プロセスで細分類化し、細分類化したセグメントに対して 主要なCO2分離回収技術方式の適合度を評価

Step2-1

- 発電・製造業・廃棄物セクターのCO2排出源を業種 × 主要プロセスで細分類化し、技術方式の適合度を評価するセグメントを選定

Step2-2

- 主要回収技術方式の排ガス特性に対する適合度を整理し、各低圧低濃度排出源に対する適合度を評価

エネルギー・製造業・廃棄物セクターの主要業種における代表的工程を整理し、現状の電化進展度とプロセスCO2の有無により技術適合性評価の対象とするプロセスを選定

産業	業種	主要(製造)工程	主要CO2排出工程			技術適合性評価対象プロセスの選定		
				主要排出プロセス	プロセスCO2	電化進展度	プロセスCO2	
電力	発電(石炭)	燃烧	●	✓		中~高	—	●
		発電				—	—	—
	発電(ガス)	燃烧	●	✓		中	—	●
		発電				—	—	—
石炭・ 石油	石油精製	常圧蒸留	●	✓		低	—	●
		減圧蒸留				—	—	—
		水素化脱硫	●	✓	✓	低	✓	●
		LPG回収				—	—	—
		接触改質・分解	●	✓	✓	低	✓	●
		⋮						

Step I

- 評価対象とする産業 × 業種 × 主要工程の整理

Step II

- 技術適合性評価対象のプロセスの選定
 - 現状の電化進展度とプロセスCO2の有無で評価
 - すでに電化が進展しているプロセスはCCS導入可能性が低い
 - プロセスCO2が発生するプロセスはCCS導入可能性が高い

以下、各業種の主要製造工程の内、主要な燃焼行程及びプロセスCO2の排出工程について適合度評価の対象とした

産業	業種	主要製造工程	熱利用の有無	プロセスCO2の有無	適合度評価対象
電力	発電(石炭)	燃焼	✓		対象
		発電			
	発電(ガス)	燃焼	✓		対象
		発電			
石炭・石油	石油	常圧蒸留	✓		対象
		減圧蒸留	✓		
		水素製造	✓		
		水素化脱硫	✓	✓	対象
		LPG回収	✓		
		接触改質・分解	✓	✓	対象
		コークス化	✓		
鉄鋼	製鉄(高炉)	焼結	✓		対象
		高炉	✓	✓	対象
		転炉	✓		
		精錬・連铸	✓		
		圧延	✓		
	製鉄(電炉)	熱処理・メッキ	✓		
		電炉	✓		対象
		精錬・連铸	✓		
		圧延	✓		対象
		熱処理・メッキ	✓		
非鉄金属	アルミニウム	電解精錬	✓	✓	対象
		铸造	✓		
		溶解	✓		
		铸造	✓		
		圧延	✓		
		熱処理・メッキ	✓		



以下、各業種の主要製造工程の内、主要な燃焼行程及びプロセスCO2の排出工程について適合度評価の対象とした

産業	業種	主要製造工程	熱利用の有無	プロセスCO2の有無	適合度評価対象
非鉄金属	その他非鉄金属	電解精錬	✓	✓	対象
		casting	✓		
		冷却			
窯業・土石製品	石灰・非金属鉱物	破碎			
		粉碎			
		洗浄・分級			
	セメント	焼成	✓	✓	対象
		冷却			
		調合			
		乾燥	✓		
		粉碎			
		焼成	✓	✓	対象
	ガラス	冷却・粉碎			
		調合			
		溶解	✓	✓	対象
清澄					
成形		✓			
徐冷					
洗浄					
化学	有機化学	乾燥			
		切断・検査			
		ナフサ分解	✓		対象
		冷却			
		蒸留	✓		

以下、各業種の主要製造工程の内、主要な燃焼行程及びプロセスCO2の排出工程について適合度評価の対象とした

産業	業種	主要製造工程	熱利用の有無	プロセスCO2の有無	適合度評価対象
化学	無機化学	一次改質	✓		
		二次改質	✓		
		COシフト	✓	✓	対象
		分離			
		合成	✓		
	その他化学品	反応	✓		
		抽出			
		脱溶媒	✓		
		晶析・分離			
		乾燥	✓		対象
パルプ・紙	パルプ・紙製造	包装			
		蒸解	✓		
		洗浄漂白			
		形成叩解			
		搾水			
		抄紙乾燥	✓		対象
		光沢づけ	✓		
		巻取			
機械	一般機械器具	仕上	✓		
		鍛造・熱処理	✓		対象
		加工			
		洗浄乾燥	✓		
		組立			
		塗装乾燥	✓		

以下、各業種の主要製造工程の内、主要な燃焼行程及びプロセスCO2の排出工程について適合度評価の対象とした

産業	業種	主要製造工程	熱利用の有無	プロセスCO2の有無	適合度評価対象
機械	輸送用機械(車体)	プレス加工			
		溶接	✓		
		洗浄			
		塗装乾燥	✓		対象
		組立			
	輸送用機械(部品)	切断			
		溶解			
		鑄造	✓		対象
		鍛造加熱	✓		対象
		鍛造			
食品・飲料	食材加工品	バリ取り			
		熱処理・メッキ	✓		
		成形・調味			
		充填			
	清涼飲料	加熱処理	✓		対象
		冷却			
		包装・検査			
		処理	✓		
	清涼飲料	調合			
		充填			
		殺菌	✓		対象
		包装			

以下、各業種の主要製造工程の内、主要な燃焼行程及びプロセスCO2の排出工程について適合度評価の対象とした

産業	業種	主要製造工程	熱利用の有無	プロセスCO2の有無	適合度評価対象	
繊維	紡糸紡績	溶解・紡糸	✓		対象	
		延伸	✓			
		巻取				
		混打綿				
		梳綿				
		練条				
	染色織物	粗紡精紡				
		原糸・撚糸				
		整経・整織				
		染色	✓		対象	
廃棄物	廃棄物処理	乾燥	✓			
		蒸絨	✓		対象	
		搬入				
		燃焼	✓		対象	
		排ガス処理				
		固形物処理				
		搬出・処分				

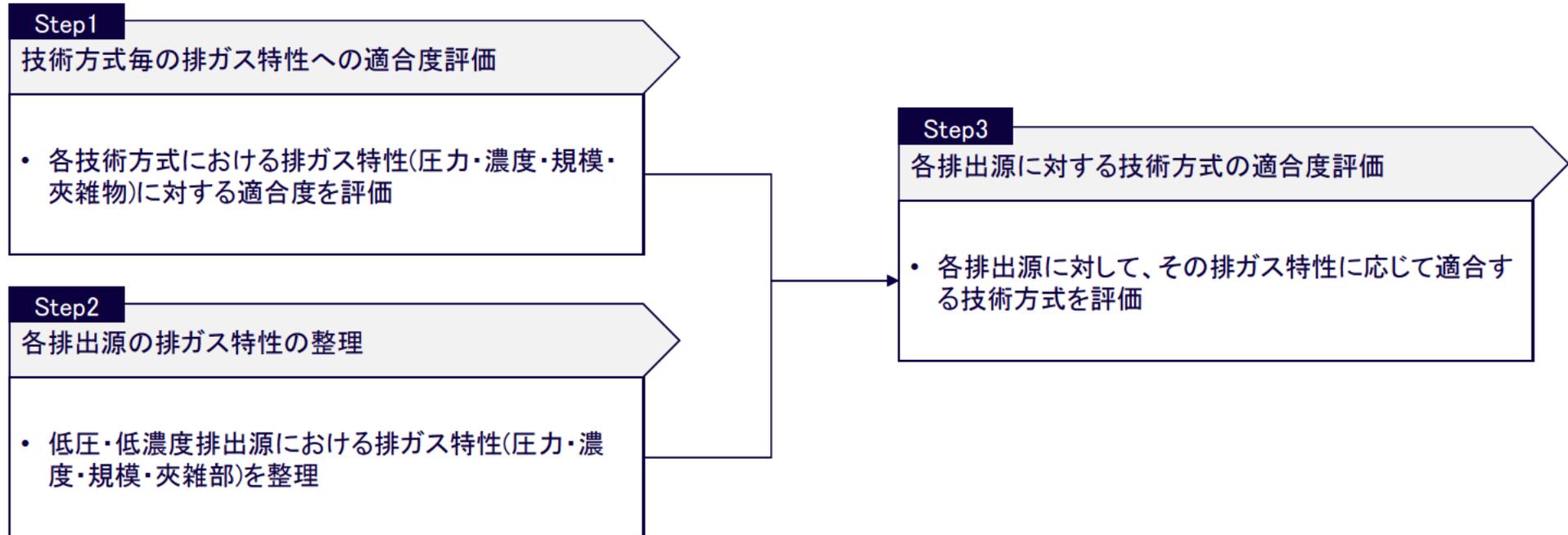
CCSの適合度が高い各産業の工程を26導出

産業	主な排出工程		排ガス特性			
			圧力	濃度	発生量	夾雑物
電力	石炭発電	発電	低圧	12-15%	大規模	N ₂ /O ₂ /H ₂ O/NO _x /SO _x /PM
	ガス発電	発電	低圧	7-10%	大規模	N ₂ /O ₂ /H ₂ O/NO _x /SO _x
石油・石炭	石油	常圧蒸留	低圧	8-10%	大規模	N ₂ /O ₂ /H ₂ O/SO _x /NO _x /PM
		水素化脱硫	低圧	8-10%	大規模	N ₂ /O ₂ /H ₂ O/SO _x /NO _x /PM
		接触改質・分解	低圧	11-17%	大規模	N ₂ /O ₂ /H ₂ O/SO _x /NO _x /PM
			低圧			
鉄鋼	製鉄(高炉)	焼結	低圧	8%	大規模	O ₂ /H ₂ O/CO/PM
		高炉	低圧	20-25%	大規模	N ₂ /O ₂ /H ₂ O/NO _x /SO _x /PM
	製鉄(電炉)	電炉	低圧	1%	大規模	PM
		圧延	低圧	8-10%	大規模	N ₂ /O ₂ /H ₂ O/NO _x /SO _x /PM
非鉄金属	アルミニウム	電解精錬	低圧	1%	中小規模	N ₂ /O ₂ /H ₂ O/フッ素化合物
	その他非鉄金属	電解精錬	低圧	1%	中小規模	N ₂ /O ₂ /H ₂ O
窯業・土石製品	石灰・非金属鉱物	焼成	低圧	1%	中小規模	N ₂ /O ₂ /H ₂ O
	セメント	焼成	低圧	14-33%	大規模	N ₂ /H ₂ O/NO _x /SO _x
	ガラス	溶解	低圧	8-10%	中小規模	O ₂ /H ₂ O/NO _x /SO _x
化学	有機化学	ナフサ分解	低圧	7-10%	大規模	N ₂ /O ₂ /H ₂ O/SO _x /NO _x /PM
	無機化学	COシフト	低圧	25%	大規模	H ₂
	その他化学品	乾燥	低圧	8-10%	中小規模	N ₂ /O ₂ /H ₂ O/NO _x /SO _x
パルプ・紙		抄紙乾燥	低圧	8-10%	中小規模	N ₂ /O ₂ /H ₂ O/NO _x /SO _x
機械	一般機械器具	鍛造・熱処理	低圧	8-10%	中小規模	N ₂ /O ₂ /H ₂ O/NO _x /SO _x /PM
	輸送用機械(車体)	塗装乾燥	低圧	8-10%	中小規模	N ₂ /O ₂ /H ₂ O/NO _x /SO _x
	輸送用機械(部品)	鍛造・鋳造	低圧	8-10%	中小規模	N ₂ /O ₂ /H ₂ O/NO _x /SO _x /PM
食品・飲料	食材加工品	加熱調理	低圧	8-10%	中小規模	N ₂ /O ₂ /H ₂ O/NO _x /SO _x
	清涼飲料	殺菌	低圧	8-10%	中小規模	N ₂ /O ₂ /H ₂ O/NO _x /SO _x
繊維	紡糸紡績	溶解・熔融	低圧	8-10%	中小規模	N ₂ /O ₂ /H ₂ O/NO _x /SO _x
	染色織物	染色・蒸絨	低圧	8-10%	中小規模	N ₂ /O ₂ /H ₂ O/NO _x /SO _x
廃棄物		燃焼	低圧	7-15%	中小規模	N ₂ /O ₂ /CO/NO _x /SO _x /塩素化合物

※ 発生量は0.1Mt CO₂/年以上を大規模、未満を中小規模として整理
出所: エキスパートインタビュー、各種公開資料よりADL作成

各技術方式の排ガス特性に対する適合度を評価した後、各排出源における排ガスの特性を踏まえて、各排出源に対する主要技術方式の適合度を評価

各排出源に対する技術方式の適合度評価のアプローチ

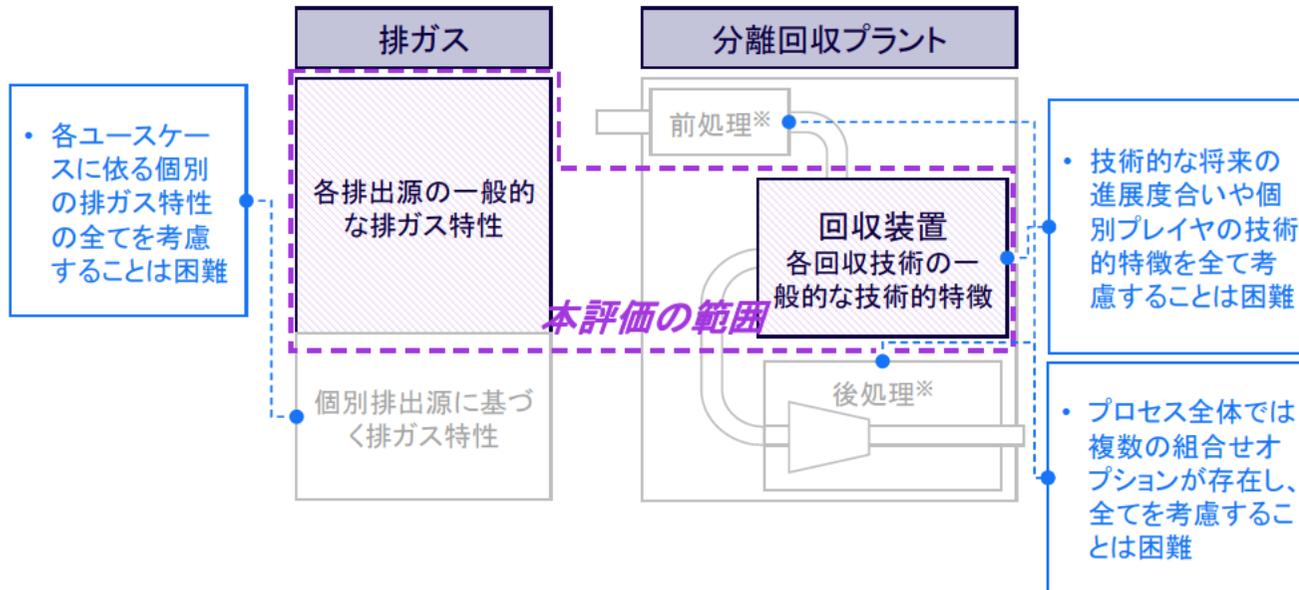


なお、本評価は足元の技術的特徴を踏まえた分離回収装置に絞った優位性の評価であり、実導入ではプロセス全体の効率性やコスト、各ユースケースに依る諸条件に留意する必要がある

①全体像と本評価の範囲

評価における
制約条件

②評価における留意点



- プロセス全体の効率性やコスト、各ユースケースに依る排出源や排ガスの特性、各プレイヤーの提供する分離回収技術の特徴、将来的な技術進捗度合いにより導入時の優位性は変化するため留意が必要

- 各分離回収技術の現時点の一般的な技術的特徴と各排出源の一般的な排ガスの特性に基づき、分離回収装置にフォーカスして評価

※ 前処理では夾雑物の分離や昇圧、後処理ではコンプレッサーや液化装置等による処理が想定される
出所: ADL作成

ガス圧力、CO₂濃度、CO₂発生量、夾雑物の各特性に対して、各技術方式から見たときの適合度が高い領域は下記の通り整理できる

技術方式	排出源特性①ガス圧力※ ¹		排出源特性②CO ₂ 濃度※ ²		排出源特性③発生量		排出源特性④夾雑物※ ⁴	
	適合度の高い領域	理由	適合度の高い領域	理由	適合度の高い領域	理由	適合度の高い領域	理由
化学吸収法	低圧	低CO ₂ 分圧※ ³ 排出源に対して、高いCO ₂ 回収性能を示すため	低濃度	低CO ₂ 分圧※ ³ 排出源に対して、高いCO ₂ 回収性能を示すため	中小～大規模	スケールアップにより設備コストが低減可能。一方で近年小型モジュール式中規模排出源向け装置の開発も進む	NO _x 、SO _x 等を含まないガス	NO _x 、SO _x 、H ₂ S等により吸収液が劣化するため
物理吸収法	高圧	高CO ₂ 分圧排出源に対して、高いCO ₂ 回収性能を示すため(低分圧の場合、昇圧工程が必要となり追加コスト)	高濃度	高CO ₂ 分圧排出源に対して、高いCO ₂ 回収性能を示すため	中小～大規模	スケールアップにより設備コストが低減可能なため(但し排出源の規模に関わらず大がかりな設備が必要)	夾雑物影響なし	ガス中の夾雑物による影響はほとんどないため
物理吸着法(PSA)	高圧	原則高CO ₂ 分圧排出源に対して高いCO ₂ 回収性能を示す。但し、低分圧でもある程度の回収性能を示す	高濃度	原則高CO ₂ 分圧排出源に対して高いCO ₂ 回収性能を示す。但し、低分圧でもある程度の回収性能を示すため	中小規模	スケールアップ時にはモジュールを並列化する必要があり、コストが線形増加するため	夾雑物影響なし	ガス中の夾雑物による影響はほとんどないため
膜分離法(高分子膜)	高圧	高CO ₂ 分圧排出源に対して、高いCO ₂ 回収性能を示すため(低分圧の場合、昇圧工程が必要となり追加コスト)	高濃度	高CO ₂ 分圧排出源に対して、高いCO ₂ 回収性能を示すため	中小規模	スケールアップ時にはモジュールを並列化する必要があり、コストが線形増加するため	NO _x 、SO _x 等を含まないガス	NO _x 、SO _x 、H ₂ S等により分離膜が劣化するため
固体吸収法(移動層方式)	低圧	低CO ₂ 分圧排出源に対して、高いCO ₂ 回収性能を示すため	低濃度	低CO ₂ 分圧 ⁴⁾ 排出源に対して、高いCO ₂ 回収性能を示すため	中小規模	スケールアップ時にはモジュールを並列化する必要があり、コストが線形増加するため	NO _x 、SO _x 等を含まないガス	NO _x 、SO _x 、H ₂ S等により吸収液が劣化するため
深冷分離	低圧～高圧	圧力の影響をほぼ受けないため	高濃度	高CO ₂ 分圧排出源に対して、高いCO ₂ 回収性能を示すため	大規模	設備コストが高く、大規模排出源に向くため	夾雑物影響なし	ガス中の夾雑物による影響はほとんどないため

※¹ 大気圧程度を低圧、1Mpa程度を高圧と定義 ※² 10%超を高濃度、10%以下を低濃度を定義 ※³ CO₂分圧はCO₂濃度×ガス圧力で算出される。分圧とは多成分からなる混合気体において、ある1つの成分が混合気体と同じ体積を単独で占めたときの圧力を指す ※⁴ 夾雑物は吸収塔等のプロセスで除去可能となる場合もある
出所:各種公開資料、エキスパートインタビューよりADL作成



セメント(焼成)・製鉄(高炉)を除き、化学吸収法はいずれの工程についても適合度が高い傾向。
特に吸収液の劣化を引き起こす可能性のある夾雑物が無い場合は有効

産業	主な排出工程	排出源と化学吸収法の適合度	評価結果			発生量	夾雑物				
			総合	圧力	濃度						
電力	石炭発電	発電	○	○	低圧排出源に向く	○	低濃度排出源に向く	○	中小～大規模いずれも対応可能	△	NOx, SOx等を含む
	ガス発電	発電	○	○	低圧排出源に向く	○	低濃度排出源に向く	○	中小～大規模いずれも対応可能	△	NOx, SOx等を含む
石油・石炭	石油	常圧蒸留	○	○	低圧排出源に向く	○	低濃度排出源に向く	○	中小～大規模いずれも対応可能	△	NOx, SOx等を含む
		水素化脱硫	○	○	低圧排出源に向く	○	低濃度排出源に向く	○	中小～大規模いずれも対応可能	△	NOx, SOx等を含む
		接触改質・分解	○	○	低圧排出源に向く	○	低濃度排出源に向く	○	中小～大規模いずれも対応可能	△	NOx, SOx等を含む
鉄鋼	製鉄(高炉)	焼結	◎	○	低圧排出源に向く	○	低濃度排出源に向く	○	中小～大規模いずれも対応可能	○	劣化を引き起こす夾雑物を含まない
		高炉	△	○	低圧排出源に向く	△	高濃度排出源に向かない	○	中小～大規模いずれも対応可能	△	NOx, SOx等を含む
	製鉄(電炉)	電炉	◎	○	低圧排出源に向く	○	低濃度排出源に向く	○	中小～大規模いずれも対応可能	○	劣化を引き起こす夾雑物を含まない
		圧延	○	○	低圧排出源に向く	○	低濃度排出源に向く	○	中小～大規模いずれも対応可能	△	NOx, SOx等を含む
非鉄金属	アルミニウム	電解精錬	◎	○	低圧排出源に向く	○	低濃度排出源に向く	○	中小～大規模いずれも対応可能	○	劣化を引き起こす夾雑物を含まない
	その他非鉄金属	電解精錬	◎	○	低圧排出源に向く	○	低濃度排出源に向く	○	中小～大規模いずれも対応可能	○	劣化を引き起こす夾雑物を含まない
窯業・土石製品	石灰・非金属鉱物	焼成	○	○	低圧排出源に向く	○	低濃度排出源に向く	○	中小～大規模いずれも対応可能	△	NOx, SOx等を含む
	セメント	焼成	△	○	低圧排出源に向く	△	高濃度排出源に向かない	○	中小～大規模いずれも対応可能	△	NOx, SOx等を含む
	ガラス	溶解	○	○	低圧排出源に向く	○	低濃度排出源に向く	○	中小～大規模いずれも対応可能	△	NOx, SOx等を含む
化学	有機化学	ナフサ分解	○	○	低圧排出源に向く	○	低濃度排出源に向く	○	中小～大規模いずれも対応可能	△	NOx, SOx等を含む
	無機化学	COシフト	○	○	低圧排出源に向く	△	高濃度排出源に向かない	○	中小～大規模いずれも対応可能	○	劣化を引き起こす夾雑物を含まない
	その他化学品	乾燥	○	○	低圧排出源に向く	○	低濃度排出源に向く	○	中小～大規模いずれも対応可能	△	NOx, SOx等を含む
パルプ・紙		抄紙乾燥	○	○	低圧排出源に向く	○	低濃度排出源に向く	○	中小～大規模いずれも対応可能	△	NOx, SOx等を含む
機械	一般機械器具	鍛造・熱処理	○	○	低圧排出源に向く	○	低濃度排出源に向く	○	中小～大規模いずれも対応可能	△	NOx, SOx等を含む
	輸送用機械(車体)	塗装乾燥	○	○	低圧排出源に向く	○	低濃度排出源に向く	○	中小～大規模いずれも対応可能	△	NOx, SOx等を含む
	輸送用機械(部品)	鍛造・鋳造	○	○	低圧排出源に向く	○	低濃度排出源に向く	○	中小～大規模いずれも対応可能	△	NOx, SOx等を含む
食品・飲料	食材加工品	加熱調理	○	○	低圧排出源に向く	○	低濃度排出源に向く	○	中小～大規模いずれも対応可能	△	NOx, SOx等を含む
	清涼飲料	殺菌	○	○	低圧排出源に向く	○	低濃度排出源に向く	○	中小～大規模いずれも対応可能	△	NOx, SOx等を含む
繊維	紡糸紡績	溶解・溶融	○	○	低圧排出源に向く	○	低濃度排出源に向く	○	中小～大規模いずれも対応可能	△	NOx, SOx等を含む
	染色織物	染色・蒸絨	○	○	低圧排出源に向く	○	低濃度排出源に向く	○	中小～大規模いずれも対応可能	△	NOx, SOx等を含む
廃棄物		燃焼	○	○	低圧排出源に向く	○	低濃度排出源に向く	○	中小～大規模いずれも対応可能	△	NOx, SOx等を含む

※ 総合評価は、全ての項目で○の場合は◎、○が3つの場合は○、○が2つ以下の場合は△として評価
出所:各種公開資料、エキスパートインタビューよりADL作成



物理吸収法は、高濃度の製鉄(高炉)・セメント(焼成)等を除き、低圧・低濃度下における性能低下により全般的に適合度が低くなる

産業	主な排出工程	排出源と物理吸収法の適合度	評価結果				
			総合	圧力	濃度	発生量	夾雑物
電力	石炭発電	発電	△	△ 低圧排出源に向かないため(昇圧コスト)	△ 低濃度排出源に向かない	○ 中小～大規模いずれも対応可能	○ 夾雑物の影響をほぼ受けない
	ガス発電	発電	△	△ 低圧排出源に向かないため(昇圧コスト)	△ 低濃度排出源に向かない	○ 中小～大規模いずれも対応可能	○ 夾雑物の影響をほぼ受けない
石油・石炭	石油	常圧蒸留	△	△ 低圧排出源に向かないため(昇圧コスト)	△ 低濃度排出源に向かない	○ 中小～大規模いずれも対応可能	○ 夾雑物の影響をほぼ受けない
		水素化脱硫	△	△ 低圧排出源に向かないため(昇圧コスト)	△ 低濃度排出源に向かない	○ 中小～大規模いずれも対応可能	○ 夾雑物の影響をほぼ受けない
		接触改質・分解	△	△ 低圧排出源に向かないため(昇圧コスト)	△ 低濃度排出源に向かない	○ 中小～大規模いずれも対応可能	○ 夾雑物の影響をほぼ受けない
		製鉄(高炉)	焼結	△	△ 低圧排出源に向かないため(昇圧コスト)	△ 低濃度排出源に向かない	○ 中小～大規模いずれも対応可能
鉄鋼	製鉄(電炉)	高炉	○	△ 低圧排出源に向かないため(昇圧コスト)	○ 高濃度排出源に向く	○ 中小～大規模いずれも対応可能	○ 夾雑物の影響をほぼ受けない
		電炉	△	△ 低圧排出源に向かないため(昇圧コスト)	△ 低濃度排出源に向かない	○ 中小～大規模いずれも対応可能	○ 夾雑物の影響をほぼ受けない
		圧延	△	△ 低圧排出源に向かないため(昇圧コスト)	△ 低濃度排出源に向かない	○ 中小～大規模いずれも対応可能	○ 夾雑物の影響をほぼ受けない
非鉄金属	アルミニウム	電解精錬	△	△ 低圧排出源に向かないため(昇圧コスト)	△ 低濃度排出源に向かない	○ 中小～大規模いずれも対応可能	○ 夾雑物の影響をほぼ受けない
	その他非鉄金属	電解精錬	△	△ 低圧排出源に向かないため(昇圧コスト)	△ 低濃度排出源に向かない	○ 中小～大規模いずれも対応可能	○ 夾雑物の影響をほぼ受けない
窯業・土石製品	石灰・非金属鉱物	焼成	△	△ 低圧排出源に向かないため(昇圧コスト)	△ 低濃度排出源に向かない	○ 中小～大規模いずれも対応可能	○ 夾雑物の影響をほぼ受けない
	セメント	焼成	○	△ 低圧排出源に向かないため(昇圧コスト)	○ 高濃度排出源に向く	○ 中小～大規模いずれも対応可能	○ 夾雑物の影響をほぼ受けない
	ガラス	溶解	△	△ 低圧排出源に向かないため(昇圧コスト)	△ 低濃度排出源に向かない	○ 中小～大規模いずれも対応可能	○ 夾雑物の影響をほぼ受けない
化学	有機化学	ナフサ分解	△	△ 低圧排出源に向かないため(昇圧コスト)	△ 低濃度排出源に向かない	○ 中小～大規模いずれも対応可能	○ 夾雑物の影響をほぼ受けない
	無機化学	COシフト	○	△ 低圧排出源に向かないため(昇圧コスト)	○ 高濃度排出源に向く	○ 中小～大規模いずれも対応可能	○ 夾雑物の影響をほぼ受けない
	その他化学品	乾燥	△	△ 低圧排出源に向かないため(昇圧コスト)	△ 低濃度排出源に向かない	○ 中小～大規模いずれも対応可能	○ 夾雑物の影響をほぼ受けない
パルプ・紙		抄紙乾燥	△	△ 低圧排出源に向かないため(昇圧コスト)	△ 低濃度排出源に向かない	○ 中小～大規模いずれも対応可能	○ 夾雑物の影響をほぼ受けない
機械	一般機械器具	鍛造・熱処理	△	△ 低圧排出源に向かないため(昇圧コスト)	△ 低濃度排出源に向かない	○ 中小～大規模いずれも対応可能	○ 夾雑物の影響をほぼ受けない
	輸送用機械(車体)	塗装乾燥	△	△ 低圧排出源に向かないため(昇圧コスト)	△ 低濃度排出源に向かない	○ 中小～大規模いずれも対応可能	○ 夾雑物の影響をほぼ受けない
	輸送用機械(部品)	鍛造・鋳造	△	△ 低圧排出源に向かないため(昇圧コスト)	△ 低濃度排出源に向かない	○ 中小～大規模いずれも対応可能	○ 夾雑物の影響をほぼ受けない
食品・飲料	食材加工品	加熱調理	△	△ 低圧排出源に向かないため(昇圧コスト)	△ 低濃度排出源に向かない	○ 中小～大規模いずれも対応可能	○ 夾雑物の影響をほぼ受けない
	清涼飲料	殺菌	△	△ 低圧排出源に向かないため(昇圧コスト)	△ 低濃度排出源に向かない	○ 中小～大規模いずれも対応可能	○ 夾雑物の影響をほぼ受けない
繊維	紡糸紡績	溶解・溶融	△	△ 低圧排出源に向かないため(昇圧コスト)	△ 低濃度排出源に向かない	○ 中小～大規模いずれも対応可能	○ 夾雑物の影響をほぼ受けない
	染色織物	染色・蒸絨	△	△ 低圧排出源に向かないため(昇圧コスト)	△ 低濃度排出源に向かない	○ 中小～大規模いずれも対応可能	○ 夾雑物の影響をほぼ受けない
廃棄物		燃焼	△	△ 夾雑物の影響をほぼ受けない	△ 低濃度排出源に向かない	○ 中小～大規模いずれも対応可能	○ 夾雑物の影響をほぼ受けない

※ 総合評価は、全ての項目で○の場合は◎、○が3つの場合は○、○が2つ以下の場合は△として評価
 出所:各種公開資料、エキスパートインタビューよりADL作成



物理吸着法は、中小規模排出源への適正や夾雑物耐性など利点はあるが、低圧低濃度排出源に合わせた工夫が必要である

産業	主な排出工程	排出源と物理吸着法の適合度	評価結果								
			総合	圧力	濃度	発生量	夾雑物				
電力	石炭発電	発電	△	△	△	△	△	○	夾雑物の影響をほぼ受けない		
	ガス発電	発電	△	△	△	△	△	△	○	夾雑物の影響をほぼ受けない	
石油・石炭	石油	常圧蒸留	△	△	△	△	△	△	○	夾雑物の影響をほぼ受けない	
		水素化脱硫	△	△	△	△	△	△	△	○	夾雑物の影響をほぼ受けない
		接触改質・分解	△	△	△	△	△	△	△	○	夾雑物の影響をほぼ受けない
		焼結	△	△	△	△	△	△	△	○	夾雑物の影響をほぼ受けない
鉄鋼	製鉄(高炉)	高炉	△	△	○	△	△	△	○	夾雑物の影響をほぼ受けない	
		製鉄(電炉)	電炉	△	△	△	△	△	△	○	夾雑物の影響をほぼ受けない
		圧延	△	△	△	△	△	△	○	夾雑物の影響をほぼ受けない	
非鉄金属	アルミニウム	電解精錬	△	△	△	△	○	△	○	夾雑物の影響をほぼ受けない	
	その他非鉄金属	電解精錬	△	△	△	△	○	△	○	夾雑物の影響をほぼ受けない	
窯業・土石製品	石灰・非金属鉱物	焼成	△	△	△	△	○	△	○	夾雑物の影響をほぼ受けない	
	セメント	焼成	△	△	○	△	△	△	○	夾雑物の影響をほぼ受けない	
	ガラス	溶解	△	△	△	△	○	△	○	夾雑物の影響をほぼ受けない	
化学	有機化学	ナフサ分解	△	△	△	△	△	△	○	夾雑物の影響をほぼ受けない	
	無機化学	COシフト	△	△	○	△	△	△	○	夾雑物の影響をほぼ受けない	
	その他化学品	乾燥	△	△	△	△	○	△	○	夾雑物の影響をほぼ受けない	
パルプ・紙		抄紙乾燥	△	△	△	△	○	△	○	夾雑物の影響をほぼ受けない	
機械	一般機械器具	鍛造・熱処理	△	△	△	△	○	△	○	夾雑物の影響をほぼ受けない	
	輸送用機械(車体)	塗装乾燥	△	△	△	△	○	△	○	夾雑物の影響をほぼ受けない	
	輸送用機械(部品)	鍛造・鋳造	△	△	△	△	○	△	○	夾雑物の影響をほぼ受けない	
食品・飲料	食材加工品	加熱調理	△	△	△	△	○	△	○	夾雑物の影響をほぼ受けない	
	清涼飲料	殺菌	△	△	△	△	○	△	○	夾雑物の影響をほぼ受けない	
繊維	紡糸紡績	溶解・溶融	△	△	△	△	○	△	○	夾雑物の影響をほぼ受けない	
	染色織物	染色・蒸絨	△	△	△	△	○	△	○	夾雑物の影響をほぼ受けない	
廃棄物		燃焼	△	△	△	△	○	△	○	夾雑物の影響をほぼ受けない	

※ 総合評価は、全ての項目で○の場合は◎、○が3つの場合は○、○が2つ以下の場合は△として評価
 出所:各種公開資料、エキスパートインタビューよりADL作成



膜分離法は、中小規模排出源への適正といった利点はあるが、低圧低濃度排出源に合わせた工夫が必要である

産業	主な排出工程	排出源と膜分離法の適合度	評価結果								
			総合	圧力	濃度	発生量	夾雑物				
電力	石炭発電	発電	△	△	低圧排出源に向かない(昇圧コスト)	△	低濃度排出源に向かない	△	大規模排出源に向かない(設備コスト)	△	NOx, SOx等を含むため
	ガス発電	発電	△	△	低圧排出源に向かない(昇圧コスト)	△	低濃度排出源に向かない	△	大規模排出源に向かない(設備コスト)	△	NOx, SOx等を含むため
石油・石炭	石油	常圧蒸留	△	△	低圧排出源に向かない(昇圧コスト)	△	低濃度排出源に向かない	△	大規模排出源に向かない(設備コスト)	△	NOx, SOx等を含むため
		水素化脱硫	△	△	低圧排出源に向かない(昇圧コスト)	△	低濃度排出源に向かない	△	大規模排出源に向かない(設備コスト)	○	劣化を引き起こす夾雑物を含まない
		接触改質・分解	△	△	低圧排出源に向かない(昇圧コスト)	△	低濃度排出源に向かない	△	大規模排出源に向かない(設備コスト)	○	劣化を引き起こす夾雑物を含まない
鉄鋼	製鉄(高炉)	焼結	△	△	低圧排出源に向かない(昇圧コスト)	△	低濃度排出源に向かない	△	大規模排出源に向かない(設備コスト)	○	劣化を引き起こす夾雑物を含まない
		高炉	△	△	低圧排出源に向かない(昇圧コスト)	○	高濃度排出源に向く	△	大規模排出源に向かない(設備コスト)	○	劣化を引き起こす夾雑物を含まない
	製鉄(電炉)	電炉	△	△	低圧排出源に向かない(昇圧コスト)	△	低濃度排出源に向かない	△	大規模排出源に向かない(設備コスト)	○	劣化を引き起こす夾雑物を含まない
		圧延	△	△	低圧排出源に向かない(昇圧コスト)	△	低濃度排出源に向かない	△	大規模排出源に向かない(設備コスト)	△	NOx, SOx等を含むため
非鉄金属	アルミニウム	電解精錬	△	△	低圧排出源に向かない(昇圧コスト)	△	低濃度排出源に向かない	○	中小規模排出源に向く	○	劣化を引き起こす夾雑物を含まない
	その他非鉄金属	電解精錬	△	△	低圧排出源に向かない(昇圧コスト)	△	低濃度排出源に向かない	○	中小規模排出源に向く	○	劣化を引き起こす夾雑物を含まない
窯業・土石製品	石灰・非金属鉱物	焼成	△	△	低圧排出源に向かない(昇圧コスト)	△	低濃度排出源に向かない	○	中小規模排出源に向く	△	NOx, SOx等を含むため
	セメント	焼成	△	△	低圧排出源に向かない(昇圧コスト)	○	高濃度排出源に向く	△	大規模排出源に向かない(設備コスト)	△	NOx, SOx等を含むため
	ガラス	溶解	△	△	低圧排出源に向かない(昇圧コスト)	△	低濃度排出源に向かない	○	中小規模排出源に向く	△	NOx, SOx等を含むため
化学	有機化学	ナフサ分解	△	△	低圧排出源に向かない(昇圧コスト)	△	低濃度排出源に向かない	△	大規模排出源に向かない(設備コスト)	△	NOx, SOx等を含むため
	無機化学	COシフト	△	△	低圧排出源に向かない(昇圧コスト)	○	高濃度排出源に向く	△	大規模排出源に向かない(設備コスト)	○	劣化を引き起こす夾雑物を含まない
	その他化学品	乾燥	△	△	低圧排出源に向かない(昇圧コスト)	△	低濃度排出源に向かない	○	中小規模排出源に向く	△	NOx, SOx等を含むため
パルプ・紙		抄紙乾燥	△	△	低圧排出源に向かない(昇圧コスト)	△	低濃度排出源に向かない	○	中小規模排出源に向く	△	NOx, SOx等を含むため
機械	一般機械器具	鍛造・熱処理	△	△	低圧排出源に向かない(昇圧コスト)	△	低濃度排出源に向かない	○	中小規模排出源に向く	△	NOx, SOx等を含むため
	輸送用機械(車体)	塗装乾燥	△	△	低圧排出源に向かない(昇圧コスト)	△	低濃度排出源に向かない	○	中小規模排出源に向く	△	NOx, SOx等を含むため
	輸送用機械(部品)	鍛造・鋳造	△	△	低圧排出源に向かない(昇圧コスト)	△	低濃度排出源に向かない	○	中小規模排出源に向く	△	NOx, SOx等を含むため
食品・飲料	食材加工品	加熱調理	△	△	低圧排出源に向かない(昇圧コスト)	△	低濃度排出源に向かない	○	中小規模排出源に向く	△	NOx, SOx等を含むため
	清涼飲料	殺菌	△	△	低圧排出源に向かない(昇圧コスト)	△	低濃度排出源に向かない	○	中小規模排出源に向く	△	NOx, SOx等を含むため
繊維	紡糸紡績	溶解・溶融	△	△	低圧排出源に向かない(昇圧コスト)	△	低濃度排出源に向かない	○	中小規模排出源に向く	△	NOx, SOx等を含むため
	染色織物	染色・蒸絨	△	△	低圧排出源に向かない(昇圧コスト)	△	低濃度排出源に向かない	○	中小規模排出源に向く	△	NOx, SOx等を含むため
廃棄物		燃焼	△	△	低圧排出源に向かない(昇圧コスト)	△	低濃度排出源に向かない	○	中小規模排出源に向く	△	NOx, SOx等を含むため

※ 総合評価は、全ての項目で○の場合は◎、○が3つの場合は○、○が2つ以下の場合は△として評価
 出所:各種公開資料、エキスパートインタビューよりADL作成



固体吸収法は、発電・石油精製・製鉄(高炉)・セメント・有機化学・無機化学を除き、適合度が高い傾向

産業	主な排出工程	排出源と固体吸収法の適合度 評価結果									
		総合	圧力	濃度	発生量	夾雑物					
電力	石炭発電	発電	△	○	低圧排出源に向く	○	低濃度排出源に向く	△	大規模排出源に向かない(設備コスト)	△	NOx, SOx等を含む
	ガス発電	発電	△	○	低圧排出源に向く	○	低濃度排出源に向く	△	大規模排出源に向かない(設備コスト)	△	NOx, SOx等を含む
石油・石炭	石油	常圧蒸留	△	○	低圧排出源に向く	○	低濃度排出源に向く	△	大規模排出源に向かない(設備コスト)	△	NOx, SOx等を含む
		水素化脱硫	△	○	低圧排出源に向く	○	低濃度排出源に向く	△	大規模排出源に向かない(設備コスト)	△	NOx, SOx等を含む
		接触改質・分解	△	○	低圧排出源に向く	○	低濃度排出源に向く	△	大規模排出源に向かない(設備コスト)	△	NOx, SOx等を含む
		製鉄(高炉)	焼結	○	○	低圧排出源に向く	○	低濃度排出源に向く	△	大規模排出源に向かない(設備コスト)	○
鉄鋼	製鉄(電炉)	高炉	△	○	低圧排出源に向く	△	高濃度排出源に向かない	△	大規模排出源に向かない(設備コスト)	△	NOx, SOx等を含む
		電炉	○	○	低圧排出源に向く	○	低濃度排出源に向く	△	大規模排出源に向かない(設備コスト)	○	劣化を引き起こす夾雑物を含まない
		圧延	△	○	低圧排出源に向く	○	低濃度排出源に向く	△	大規模排出源に向かない(設備コスト)	△	NOx, SOx等を含む
非鉄金属	アルミニウム	電解精錬	◎	○	低圧排出源に向く	○	低濃度排出源に向く	○	中小規模排出源に向く	○	劣化を引き起こす夾雑物を含まない
	その他非鉄金属	電解精錬	◎	○	低圧排出源に向く	○	低濃度排出源に向く	○	中小規模排出源に向く	○	劣化を引き起こす夾雑物を含まない
窯業・土石製品	石灰・非金属鉱物	焼成	○	○	低圧排出源に向く	○	低濃度排出源に向く	○	中小規模排出源に向く	△	NOx, SOx等を含む
	セメント	焼成	△	○	低圧排出源に向く	△	高濃度排出源に向かない	△	大規模排出源に向かない(設備コスト)	△	NOx, SOx等を含む
	ガラス	溶解	○	○	低圧排出源に向く	○	低濃度排出源に向く	○	中小規模排出源に向く	△	NOx, SOx等を含む
化学	有機化学	ナフサ分解	△	○	低圧排出源に向く	○	低濃度排出源に向く	△	大規模排出源に向かない(設備コスト)	△	NOx, SOx等を含む
	無機化学	COシフト	△	○	低圧排出源に向く	△	高濃度排出源に向かない	△	大規模排出源に向かない(設備コスト)	○	劣化を引き起こす夾雑物を含まない
	その他化学品	乾燥	○	○	低圧排出源に向く	○	低濃度排出源に向く	○	中小規模排出源に向く	△	NOx, SOx等を含む
パルプ・紙		抄紙乾燥	○	○	低圧排出源に向く	○	低濃度排出源に向く	○	中小規模排出源に向く	△	NOx, SOx等を含む
機械	一般機械器具	鍛造・熱処理	○	○	低圧排出源に向く	○	低濃度排出源に向く	○	中小規模排出源に向く	△	NOx, SOx等を含む
	輸送用機械(車体)	塗装乾燥	○	○	低圧排出源に向く	○	低濃度排出源に向く	○	中小規模排出源に向く	△	NOx, SOx等を含む
	輸送用機械(部品)	鍛造・鋳造	○	○	低圧排出源に向く	○	低濃度排出源に向く	○	中小規模排出源に向く	△	NOx, SOx等を含む
食品・飲料	食材加工品	加熱調理	○	○	低圧排出源に向く	○	低濃度排出源に向く	○	中小規模排出源に向く	△	NOx, SOx等を含む
	清涼飲料	殺菌	○	○	低圧排出源に向く	○	低濃度排出源に向く	○	中小規模排出源に向く	△	NOx, SOx等を含む
繊維	紡糸紡績	溶解・熔融	○	○	低圧排出源に向く	○	低濃度排出源に向く	○	中小規模排出源に向く	△	NOx, SOx等を含む
	染色織物	染色・蒸絨	○	○	低圧排出源に向く	○	低濃度排出源に向く	○	中小規模排出源に向く	△	NOx, SOx等を含む
廃棄物		燃焼	○	○	低圧排出源に向く	○	低濃度排出源に向く	○	中小規模排出源に向く	△	NOx, SOx等を含む

※ 総合評価は、全ての項目で○の場合は◎、○が3つの場合は○、○が2つ以下の場合は△として評価
出所:各種公開資料、エキスパートインタビューよりADL作成



深冷分離法は大規模発生源を中心に適合度が高い傾向。但し、低濃度排出源においては分離膜等の前処理等で濃度を引き上げる必要がある

産業	主な排出工程	排出源と深冷分離法の適合度	評価結果					
			総合	圧力	濃度	発生量	夾雑物	
電力	石炭発電	発電	○	○	△	○	○	
	ガス発電	発電	○	○	△	○	○	
石油・石炭	石油	常圧蒸留	○	○	△	○	○	
		水素化脱硫	○	○	△	○	○	
		接触改質・分解	○	○	△	○	○	
		焼結	○	○	△	○	○	
鉄鋼	製鉄(高炉)	高炉	◎	○	○	○	○	
		製鉄(電炉)	○	○	△	○	○	
	圧延	○	○	△	○	○		
非鉄金属	アルミニウム	電解精錬	△	○	△	△	○	
	その他非鉄金属	電解精錬	△	○	△	△	○	
窯業・土石製品	石灰・非金属鉱物セメント	焼成	△	○	△	△	○	
		セメント	◎	○	○	○	○	
		ガラス	△	○	△	△	○	
化学	有機化学	ナフサ分解	○	○	△	○	○	
	無機化学	COシフト	◎	○	○	○	○	
	その他化学品	乾燥	△	○	△	△	○	
パルプ・紙		抄紙乾燥	△	○	△	△	○	
機械	一般機械器具	鍛造・熱処理	△	○	△	△	○	
	輸送用機械(車体)	塗装乾燥	△	○	△	△	○	
	輸送用機械(部品)	鍛造・鋳造	△	○	△	△	○	
食品・飲料	食材加工品	加熱調理	△	○	△	△	○	
	清涼飲料	殺菌	△	○	△	△	○	
繊維	紡糸紡績	溶解・溶融	△	○	△	△	○	
	染色織物	染色・蒸絨	△	○	△	△	○	
廃棄物		燃焼	△	○	△	△	○	

※ 総合評価は、全ての項目で○の場合は◎、○が3つの場合は○、○が2つ以下の場合は△として評価
出所:各種公開資料、エキスパートインタビューよりADL作成

化学吸収法は全般的に適合度が高い傾向がある。一方で、中小規模排出源であれば固体吸収法、大規模排出源であれば深冷分離法も比較的適合度が高い

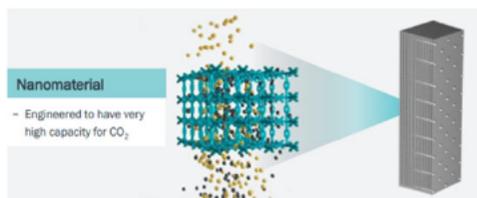
産業	主な排出工程	排出源と各方式の適合度 評価結果							
		化学吸収法	物理吸収法	物理吸着法	膜分離法	固体吸収法	深冷分離法		
電力	石炭発電	発電	○	△	△	△	△	○	
	ガス発電	発電	○	△	△	△	△	○	
石油・石炭	石油	常圧蒸留	○	△	△	△	△	○	
		水素化脱硫	○	△	△	△	△	○	
		接触改質・分解	○	△	△	△	△	○	
		製鉄(高炉)	焼結	◎	△	△	△	○	○
鉄鋼	高炉	電炉	△	○	△	△	△	◎	
		製鉄(電炉)	電炉	◎	△	△	△	○	○
		圧延	○	△	△	△	△	○	○
非鉄金属	アルミニウム	電解精錬	◎	△	△	△	◎	△	
	その他非鉄金属	電解精錬	◎	△	△	△	◎	△	
窯業・土石製品	石灰・非金属鉱物	焼成	○	△	△	△	○	△	
	セメント	焼成	△	○	△	△	△	◎	
	ガラス	溶解	○	△	△	△	○	△	
化学	有機化学	ナフサ分解	○	△	△	△	△	○	
	無機化学	COシフト	○	○	△	△	△	◎	
	その他化学品	乾燥	○	△	△	△	○	△	
パルプ・紙		抄紙乾燥	○	△	△	△	○	△	
機械	一般機械器具	鍛造・熱処理	○	△	△	△	○	△	
	輸送用機械(車体)	塗装乾燥	○	△	△	△	○	△	
	輸送用機械(部品)	鍛造・鋳造	○	△	△	△	○	△	
食品・飲料	食材加工品	加熱調理	○	△	△	△	○	△	
	清涼飲料	殺菌	○	△	△	△	○	△	
繊維	紡糸紡績	溶解・熔融	○	△	△	△	○	△	
	染色織物	染色・蒸絨	○	△	△	△	○	△	
廃棄物		燃焼	○	△	△	△	○	△	

物理吸着法では、低圧低濃度下における吸着率の低下に対して、吸着剤開発による吸着率の向上やプラント全体におけるコスト効率向上等により他方式に対して伍していくことが可能か

主な課題

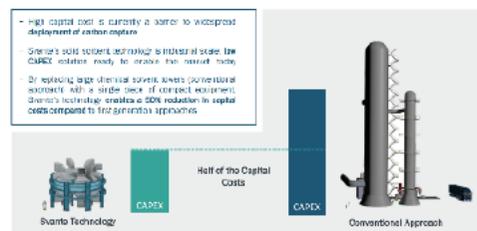
低圧低濃度下における吸着率の低下

取組事例①



- Svanteはカルガリー大学との共同研究により、CALF-20と呼ばれるMOF(金属有機構造体)を開発
- CALF-20は垂鉛等から成る複雑な3次元構造体でナノメートルサイズの穴によりCO2を選択的に物理吸着することが可能
- NOxやSOx、水分に強い耐性を持つと共に、比較的低いエネルギーでCO2を脱着することが可能

取組事例②



- Svanteはセメント工場向けの物理吸着法を用いた商用スケールの実証をDOEの支援のもとで取組む
- 物理吸着は化学吸着と比較して再生時のエネルギーの低減を狙うことが可能であり、再生塔を不要としたモジュール化により通常の化学吸収法と比較してCAPEXを50%低減できるとしている

- 吸着剤によっては低分圧でも大きな吸着量が期待出来る素材も存在。PCPやMOFといった低分圧下における圧力変化でも大きな吸着・脱着が可能な素材の研究は有効か
- 昇圧減圧におけるコスト削減については、冷熱を利用して固化することで減圧コストの削減を狙っている研究も存在。未利用エネルギーを活用して効率化する方向性はある

(元国内化学 技術者)

- アプリケーション次第で、低圧低濃度下でも優位性を持つことが可能
- MOFやカーボンナノチューブを用いた吸着剤のDACへの利用が検討されているが、固体吸収法と比較して再生時のエネルギー低減により優位性を獲得しつつ、高い選択性を実現することが出来るのではないか

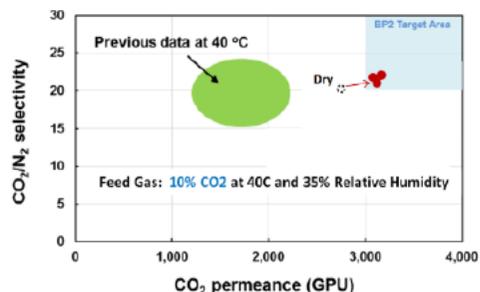
(海外石油化学 事業開発担当)

一方、膜分離法では素材開発による選択性や透過性の向上に加え、他方式の前処理としての活用やプロセス変更、コスト競争力を活かした利用形態が用途として想定されるか

主な課題

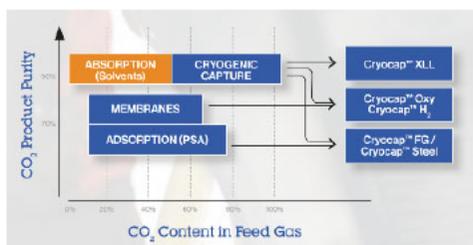
低圧低濃度下における選択性の低下

取組事例①



- MTRはバッファロー大学やテキサス大学と共に高い選択性と、透過性を備えたCO₂分離膜の開発にDOE支援のもとで取組む
- MTRが支持膜の開発を、他2者が選択膜の開発を行い、複合膜を開発する
- 2023年にNCCC※において火力発電所の排ガスを想定したベンチスケールのテストを実施予定

取組事例②



- Air Liquideは深冷分離法を用いたCO₂回収技術のCryoCapシリーズにおいて、排ガスのCO₂濃度を上げるための前処理工程として分離膜を活用
- 分離膜のコスト競争力を活かし、深冷分離に必要な濃度まで低コストに濃度を上げるなど、アプリケーションの工夫により低圧低濃度ユースケースでも活用している

- 他ガスが多く含まれる低濃度下ではプロセス変更による対応を模索
- 例えば、水素分離膜は実用化されているが、COとCO₂の分離は分子サイズが同等なため難易度が上がる
- COが含まれるガスからCO₂の分離を考えると、水性ガスシフトでCOをCO₂と水素に変換し、CO₂と水素の混合ガスとすることで水素を分離し、CO₂を取り出すことが出来る(海外産業ガス 事業開発担当)

- 各ユースケースで必要な回収率の高さにより適用可能な方式は変わり得る
- DACはネガティブエミッションのため、回収率を99%にする必要はなく、50%でも良い。このようなケースであればコスト競争力のある膜分離も適用可能
- 結局どの回収方式で、どこまで回収し、残りをクレジットで相殺するかというトータルでの考え方が必要になる(元国内化学技術者)

※ NCCC: National Carbon Capture Center

出所: 各種公開資料、エキスパートインタビューよりADL作成

各回収方式の足元の課題・開発余地を踏まえると、コスト削減余地は物理吸着法や膜分離法、固体吸収法が比較的高くなるか

凡例(素材、プロセス/装置): ○今後の開発余地がある要素、△開発余地が少ない要素
 凡例(コスト削減余地): ◎コスト削減余地大きい、○コスト削減余地中程度、△コスト削減余地はあまり大きくない

回収方式	回収コスト (\$/tCO2)	CAPEX	OPEX	素材	プロセス/装置	コスト削減余地
化学吸収法	40	■	■	△ 新規吸収剤の開発余地は少ない	○ 未利用エネルギーを活用したCO2脱着時に必要なエネルギー・コストの低減余地	△ ・ 開発余地はプロセスがメイン、比較的成本も低く、コスト削減余地はあまり大きくないか
物理吸収法	52	■	■	△ 各ガス成分を選択的に分離可能な吸収液の開発余地は少ない	○ 冷却に必要なエネルギー・コストの低減余地	△ ・ 開発余地はプロセスがメイン、比較的成本も低く、コスト削減余地はあまり大きくないか
物理吸着法	78	■	■	○ 低圧低濃度下における高い吸着能力を持つ吸着剤の開発余地 ○ 大量生産による吸着剤コスト削減余地	○ 未利用エネルギーを活用した減圧エネルギー・コストの低減余地	◎ ・ 素材・プロセス共に開発余地が残る。現状コストも高く、コスト削減余地は大きい
膜分離法	91	■	■	○ 高い選択性・透過性を持つ分離膜の開発余地 ○ 大量生産による膜コスト削減余地	○ シンプルな分離プロセスを活かした回収装置の小型化・低コスト化	◎ ・ 素材・プロセス共に開発余地が残る。現状コストも高く、コスト削減余地は大きい
固体吸収法	44	■	■	○ 組成・構造改良による低エネルギーでのCO2脱着可能な吸着剤の開発余地	○ 未利用エネルギーを活用したCO2脱着時に必要なエネルギー・コストの低減余地	○ ・ 素材・プロセス共に開発余地が残る。比較的成本は低く、コスト削減余地は中程度
深冷分離法	55-92.3	■	■	△ 対象ガスの物理特性を利用したものであり素材面での開発余地は無い	○ 冷却装置を含むCAPEXの低減余地	△ ・ 開発余地はプロセスがメイン、比較的成本も低く、コスト削減余地はあまり大きくないか

※ 化学吸収法・物理吸着法・膜分離法・固体吸収法・深冷分離法については排ガス由来CO2の回収(濃度10-15%)、物理吸収法はバイオ燃料製造由来のCO2回収(>60%)における回収コストの試算結果。固体吸収法についてはCO2の外部送付用装置費がCAPEXには含まれておらず回収コストの上振れ可能性がある。深冷分離法は開発実施者の数値(\$55tCO2)のバイアス可能性を踏まえて、第三者(富士経済)の試算結果(\$92.3tCO2)も併せて記載(棒グラフは平均を記載)
 出所:各種公開資料よりADL作成

- 1 プロジェクトの全体像
- 2 Step1: 主要技術方式の技術開発動向
- 3 Step2: 低圧低濃度排出源の適合度評価
- 4 Step3: 対象国の市場・政策動向
- 5 Step4: 主要プレイヤー・プロジェクト動向
- 6 Appendix

Step3 サマリ

①国別の基本情報

- ドイツ・インドネシア・マレーシアはGDP構成比における製造業が1位を占めており経済において大きな位置を占める。電源構成は、ドイツや米国、インドネシア、マレーシアでは化石燃料による火力発電が将来的にも50%近くの大きな地位を維持することが見込まれる。また、CO2排出構造においてはドイツ・ノルウェー・米国はエネルギー転換・産業由来CO2が5割近くとなっており大きな削減対象となる

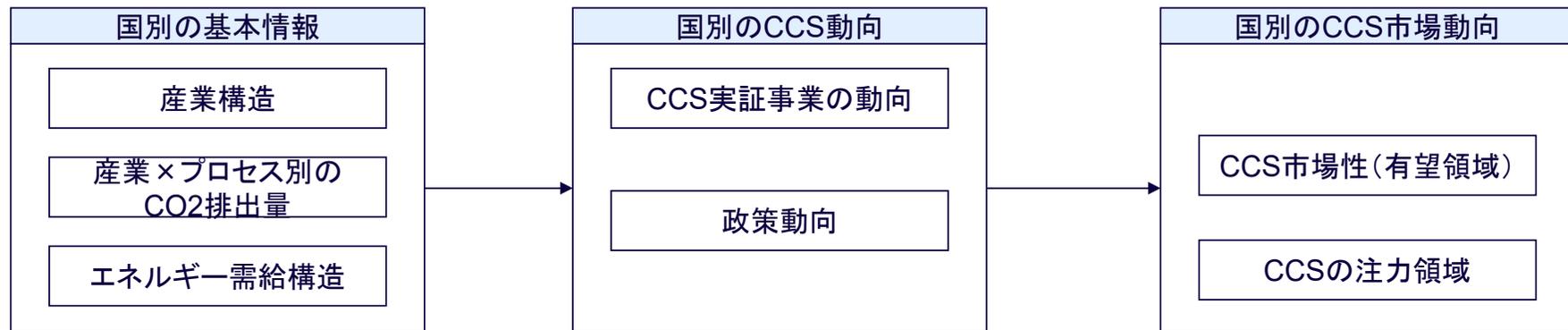
②国別のCCS動向

- インドネシアやマレーシア、米国は発電やガス等のエネルギー分野のCCS導入を積極的に後押し。一方で英国は鉄鋼・セメント・化学産業等のエネルギー集約型産業へのCCUS導入による脱炭素目標を目指す。ドイツは国民の反発により動きが遅れるも今後プロジェクトの増加が見込まれる。支援施策においては、英国・ノルウェーが直接補助金により支援する一方で、米国やインドネシア・マレーシアは税制優遇による取組促進が中心と見られる

③国別のCCS市場動向

- 英国: 火力発電や鉄鋼は短期的拡大の後、縮小。セメントや石灰・非金属鉱物、有機化学等は排出量も多く継続的な成長が期待
- ドイツ: 火力発電・鉄鋼は排出量は大きいもののあまり成長は見られず、石灰・非金属鉱物やセメントが継続的な成長が期待
- ノルウェー: 鉄鋼(高炉)、セメントが短期的に拡大が見込める。アルミニウム、有機化学は長期的に緩やかな拡大見込み
- 米国: 火力発電・セメント・化学が短期的に拡大後も継続的な拡大が期待。石灰・非金属鉱物は長期的に緩やかな拡大見込み
- インドネシア: 火力発電・石油・無機化学が短期的且つ継続的な拡大が期待出来る一方で、鉄鋼はあまり変化は期待出来ない
- マレーシア: 石油が短期且つ継続的な拡大が期待出来る一方で、最大排出源の火力発電ではあまり変化は期待出来ない。鉄鋼やセメントは長期的に緩やかに拡大が期待

対象国の産業・CO2排出構造等の国別の事情、CCUSの実証事業、政策動向等から各国のCCSの市場動向を整理

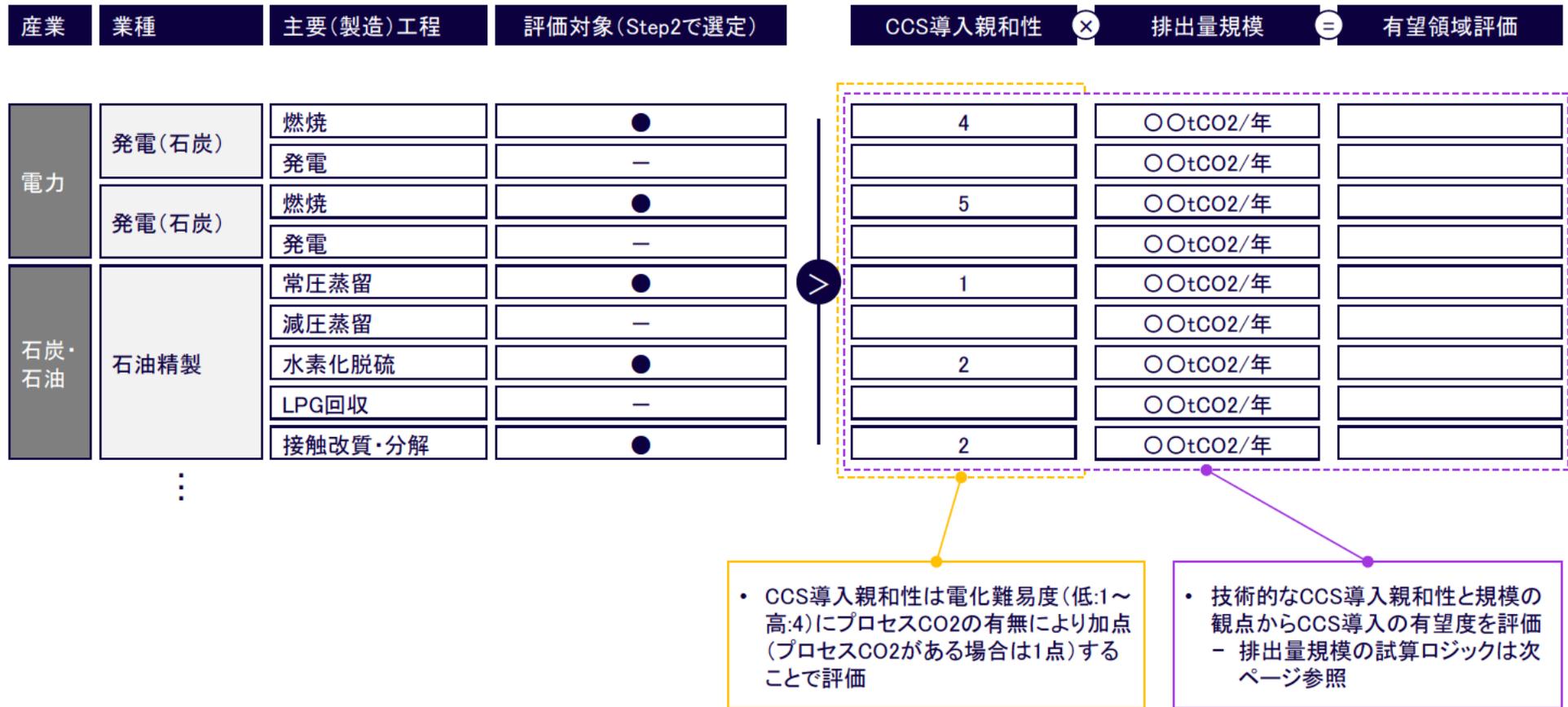


各国の政策動向は、分離・回収工程を中心にCCUS自体に対する支援施策と産業全体の脱炭素に向けた施策を調査

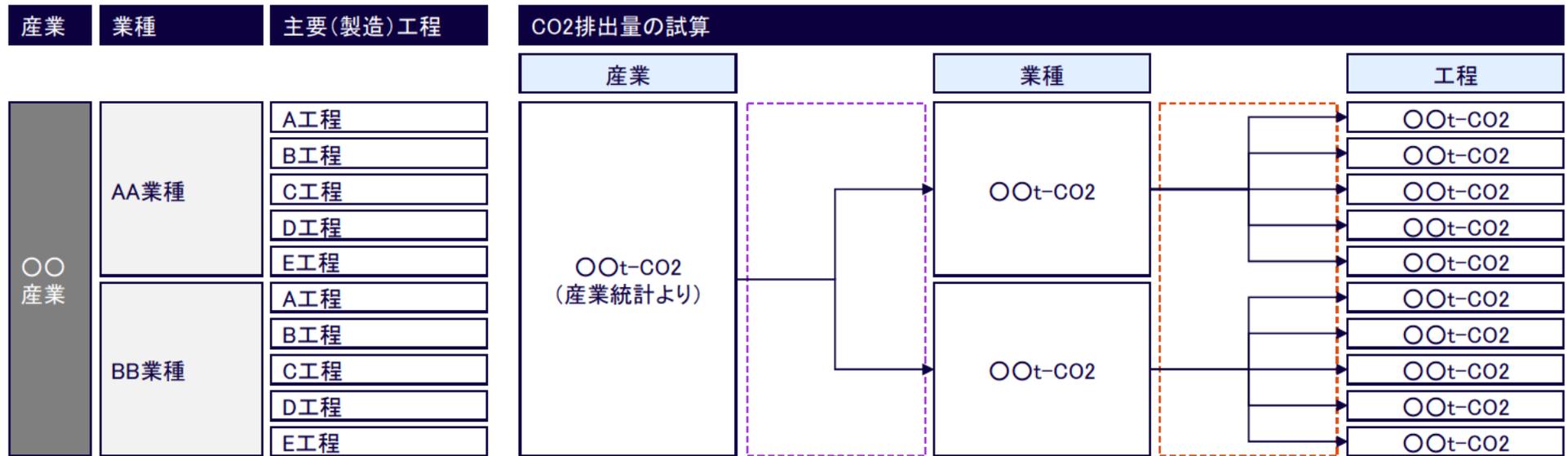
対象	項目	分離・回収	輸送	貯留	利用
CCUS	設備投資支援	<ul style="list-style-type: none"> 直接補助金 投資減税 資金調達支援(公的出資・低金利融資・債務保証) 	<ul style="list-style-type: none"> 直接補助金 資金調達支援(公的出資・低金利融資) 	<ul style="list-style-type: none"> 直接補助金 資金調達支援(債務保証) 	<ul style="list-style-type: none"> Xxx
	運転時支援	<ul style="list-style-type: none"> 直接補助金 CO2貯留税額控除 炭素税免除 クレジット付与 固定価格買取 	<ul style="list-style-type: none"> 直接補助金(政府による利用料支払型も含) 	<ul style="list-style-type: none"> 直接補助金(政府による利用料支払型も含) クレジット付与 貯留リスクへの政府保証 	<ul style="list-style-type: none"> クレジット付与
産業全体	市場型政策	<ul style="list-style-type: none"> クレジット市場 炭素税 	<ul style="list-style-type: none"> Xxx 	<ul style="list-style-type: none"> Xxx 	<ul style="list-style-type: none"> Xxx
	排出規制	<ul style="list-style-type: none"> 排出枠 	<ul style="list-style-type: none"> Xxx 	<ul style="list-style-type: none"> Xxx 	<ul style="list-style-type: none"> Xxx

分離・回収の領域を中心にCCUSや産業全体に関する個別政策の中身を整理。

各国のCCS市場性として業種×プロセスの電化可能性とCO2排出量の観点からCCS導入の有望度を評価



業種×プロセス別のCO2排出量は、大本となる産業の排出量をCO2排出量と相関関係が強いエネルギー消費量に応じて工程別に配賦

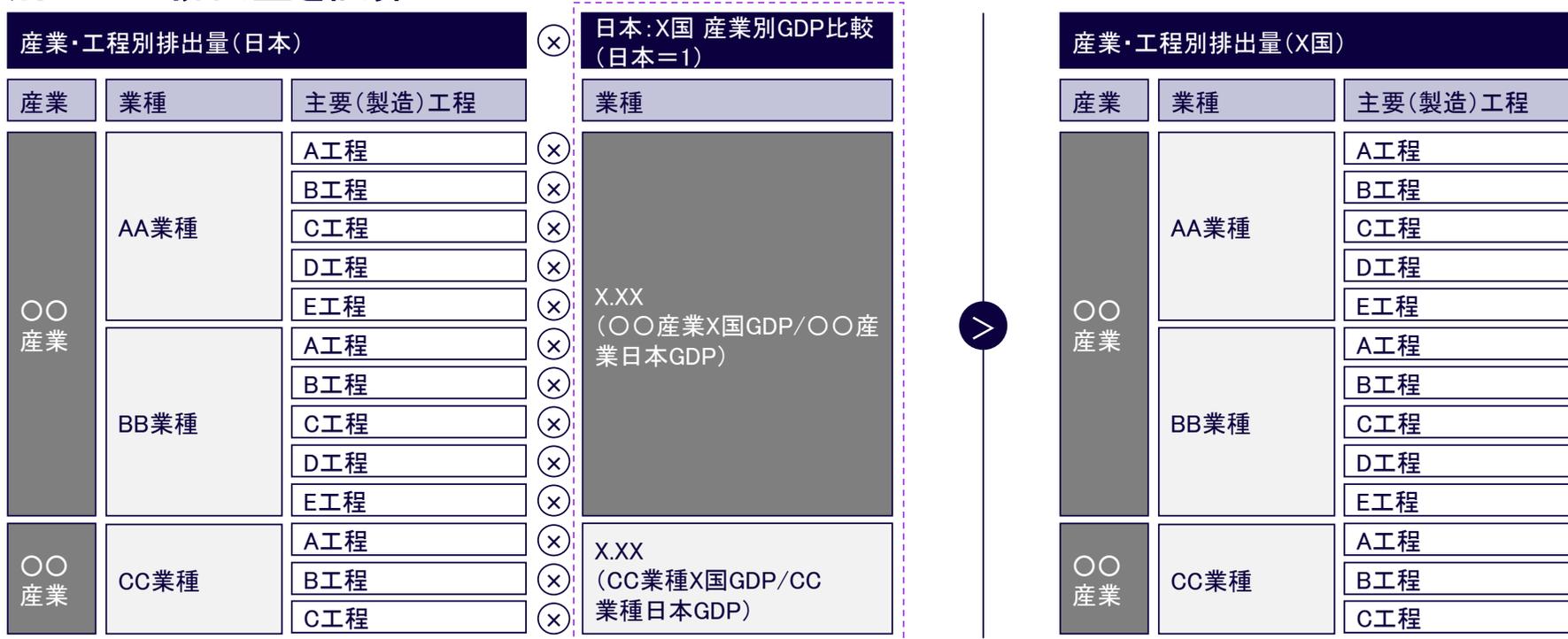


• 産業のCO2排出量を業種別のエネルギー消費量で配賦

• 業種のCO2排出量を下記優先度で配賦

- 業界団体、国の委員会等の公開情報による工程別CO2排出割合
- 上記が無い場合、工程別エネルギー消費量(民間レポート出所)に燃料種別CO2排出係数を乗じて工程別CO2排出量を試算。業種における工程別CO2排出割合を試算し、業種のCO2排出量に乗じて工程別のCO2排出量を試算

日本の業種×プロセス別のCO2排出量を発射台に、日本とのGDP比率で各国の業種×プロセス別のCO2排出量を試算



- 日本と対象国の産業別のGDP規模の倍率を日本の各工程排出規模に掛ける
※業種別のGDPが比較可能な場合は、業種別の倍率を掛ける

また各国の産業別GDPは下記出所を参照

産業	年度	出所
日本	2019	2021年度国民経済計算
英国	2019	Dataset GDP output approach-low-level aggregates_Office for National Statistics
ドイツ	2019	Statistisches Bundesamt Destatis_National accounts – Net value-added
ノルウェー	2019	Statistic Norway National Accounts Production account and income generation, by industry
米国	2019	Bureau of Economic Analysis Gross Output by Industry
インドネシア	2019	Bank Indonesia_Indonesian Economic and Financial Statistics Real Sector Gross Domestic Product
マレーシア	2019	Malaysia Information Data Center National Accounts GDP by Kind of Economic Activity at Current Prices

各国排出規模の試算に日本との産業・業種別GDPが不明な場合は各国平均を用いて試算

当該産業/業種別GDPが不明なため他国の平均値を活用したもの

産業	業種	日本	英国	ドイツ	ノルウェー	米国	インドネシア	マレーシア
電力	石炭火力	産業別GDPを活用	産業別GDPを活用	産業別GDPを活用	産業別GDPを活用	産業別GDPを活用	産業別GDPを活用	産業別GDPを活用
	ガス火力	産業別GDPを活用	産業別GDPを活用	産業別GDPを活用	産業別GDPを活用	産業別GDPを活用	産業別GDPを活用	産業別GDPを活用
石炭石油	石油	産業別GDPを活用	産業別GDPを活用	産業別GDPを活用	産業別GDPを活用	産業別GDPを活用	産業別GDPを活用	産業別GDPを活用
鉄鋼	製鉄(高炉)	一次金属に英国・米国の鉄鋼・非鉄金属の割合を乗じて試算	産業別GDPを活用	一次金属に英国・米国の鉄鋼・非鉄金属の割合を乗じて試算		産業別GDPを活用	一次金属に英国・米国の鉄鋼・非鉄金属の割合を乗じて試算	
	製鉄(電炉)		産業別GDPを活用			産業別GDPを活用		
非鉄金属	アルミニウム	一次金属に英国・米国の鉄鋼・非鉄金属の割合を乗じて試算	産業別GDPを活用			産業別GDPを活用		
	その他非鉄金属		産業別GDPを活用			産業別GDPを活用		
窯業・土石製品	石灰・非金属鉱物	窯業・土石製品に英国の石灰・セメント・ガラスの割合を乗じて試算	業種別GDPを活用	窯業・土石製品に英国の石灰・セメント・ガラスの割合を乗じて試算				
	セメント		業種別GDPを活用					
	ガラス		業種別GDPを活用					
化学	有機化学	産業別GDPを活用	業種別GDPを活用	業種別GDPを活用	業種別GDPを活用	業種別GDPを活用	業種別GDPを活用	業種別GDPを活用
	無機化学							
	その他化学品							
パルプ・紙	パルプ・紙	業種別GDPを活用	業種別GDPを活用	業種別GDPを活用	業種別GDPを活用	業種別GDPを活用	業種別GDPを活用	業種別GDPを活用
機械	一般機械器具	業種別GDPを活用	業種別GDPを活用	業種別GDPを活用	機械に各国の一般機械器具・輸送用機械の割合を乗じて試算	業種別GDPを活用	業種別GDPを活用	業種別GDPを活用
	輸送用機械(車体)	業種別GDPを活用※	業種別GDPを活用※	業種別GDPを活用※		業種別GDPを活用※	業種別GDPを活用※	業種別GDPを活用※
	輸送用機械(部品)				業種別GDPを活用※	業種別GDPを活用※		
食品・飲料	食材加工品	食品飲料にマレーシアの食材加工・飲料の割合を乗じて試算						業種別GDPを活用
	清涼飲料							業種別GDPを活用
繊維	紡糸紡績	産業別GDPを活用	産業別GDPを活用	産業別GDPを活用	産業別GDPを活用	産業別GDPを活用	産業別GDPを活用	産業別GDPを活用
	染色織物	産業別GDPを活用	産業別GDPを活用	産業別GDPを活用	産業別GDPを活用	産業別GDPを活用	産業別GDPを活用	産業別GDPを活用
廃棄物	廃棄物処理	産業別GDPを活用	産業別GDPを活用	産業別GDPを活用	産業別GDPを活用	産業別GDPを活用	産業別GDPを活用	産業別GDPを活用

※ 輸送用機械について車体と部品でGDPを分けている国はないため輸送用機械として同じ倍率を活用

電化難易度は、温度帯及び導入時の前後工程への影響度合いにより評価

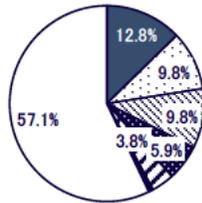
電化難易度の評価の考え方

難易度	点数	基準
	4点	<ul style="list-style-type: none"> 温度帯がヒートポンプ等では対応可能出来ない高温度帯(180℃～)であり、且つ現在、前後工程由来の副生物を燃料として活用する等、前後工程との関係により単純に電化することが困難な場合
	3点	<ul style="list-style-type: none"> 電化技術はあるが、温度帯がヒートポンプ等では対応可能出来ない高温度帯(180℃～)である場合
	2点	<ul style="list-style-type: none"> 電化技術はあるが、温度帯がヒートポンプ等のエネルギー効率の高い加熱方式で対応可能な低～中温度帯(~180℃)である場合
	1点	<ul style="list-style-type: none"> 既に電化済み

産業構造 (GDP構成比)

製造業は9.8%となっており、卸売・小売・宿泊・外食業に続いて、2番目に大きい

- 卸売・小売・宿泊・外食業
- 製造業
- 運輸・倉庫・通信業
- 建設業
- 鉱業・電気/ガス/水供給業
- 農林水産業
- その他



産業構造※1

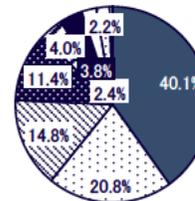


製造業内訳

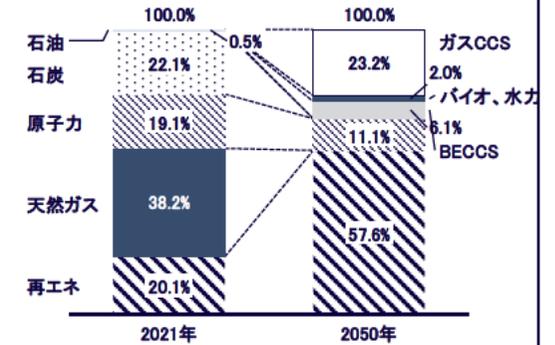
電源構成・電源計画

現在の構成では天然ガスが最も多く40.1%であるが、将来の計画では再エネが57.6%で最も多くを占める

- 天然ガス
- 風力
- 原子力
- バイオ燃料
- 太陽光
- 廃棄物
- 石炭
- 石油
- 水力
- 潮力



電源構成詳細 (2021年: 発電量ベース) ※2

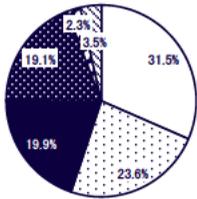


電源構成の将来予測 (発電量ベース) ※3

CO2排出構造

排出構造では輸送が最も多く31.5%であり、次いでエネルギー供給 (23.6%)、住宅 (19.9%) が多い

- 輸送
- エネルギー供給
- 住宅
- ビジネス
- 公共
- その他



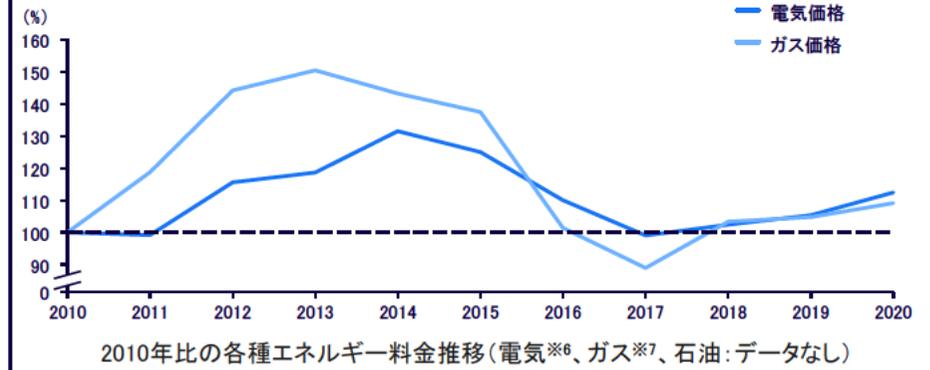
CO2排出構造 ※4



地域別CO2排出量 (2020年) ※5

エネルギー料金

電気価格/ガス価格ともに2017年から上昇傾向である



出所: ※1: GD Freak「イギリスのGDPと人口の推移」、※2: IEA「Energy Statistics Data Browser」、※3: METI(2020)「英国・EUにおけるカーボンニュートラルシナリオについて」、※4: Department for Business, Energy & Industrial Strategy(2022)「2021 UK greenhouse gas emissions, provisional figures」、※5: National Atmospheric Emissions Inventory「UK Emissions Interactive Map」、※6: eurostat「Electricity prices by type of user」、※7: statista「Prices of natural gas for industry in the United Kingdom (UK) from 2008 to 2020」よりADL作成

CCUSプロジェクトの動向

【プロジェクト概況】

- 2023年5月時点で稼働中プロジェクトは1件のみであり、計画が発表されているプロジェクトの大半は未稼働。プロジェクトのCO2排出源は発電所やブルー水素製造が多く、CO2回収技術については化学吸収法(アミン吸収)を主に採用
 - 稼働中プロジェクト:三菱重工と英DraxによるNorth Yorkshire州のバイオマス発電所を対象としたプロジェクトでは化学吸収法(アミン吸収)を採用
 - 稼働予定プロジェクト:2025年稼働予定の「Net Zero Teesside」プロジェクトにおいても化学吸収法を採用する見込み
- 分離方式が確認できた8PJにおいては、化学吸収法が7件、酸素燃焼法が1件※富士経済レポートおよび上記代表的PJを対象に調査を実施

【ハブクラスター】

- 2050年までのCN目標達成と低炭素産業を主軸とした経済成長の両立に向けてCCUS活用による産業クラスターの脱炭素化を推進。CCUSクラスターの開発計画が急速に進んでおり、ブルー水素製造も行うクラスターも存在
 - HyNet North West:ブルー水素製造および産業部門から排出されるCO2を回収し、既存のパイプラインを利用して輸送/貯留を行う。将来的には再エネを利用したグリーン水素製造に移行する見通し(2025年稼働予定)
 - Scottish Cluster:スコットランド北部に位置する産業クラスターで、CCS及びブルー水素製造を行うAcornプロジェクトを中核とする(2025年稼働予定)

【他プロジェクトのインフラ利用】

- 近隣にCCSに適した土地がない地域においてもプロジェクトを計画しており、他プロジェクトのCO2輸送・貯留インフラの利用を想定したプロジェクトが見受けられる
 - Southampton Water Project:回収したCO2の輸送・貯留施設の開発はプロジェクトには含まれず、既に稼働中である他プロジェクトのシステムを利用する計画
 - South Wales Industrial Cluster:他のCCUSクラスターのCO2輸送・貯留インフラの拠点となる港湾に船舶でCO2を輸送

CCUS関連政策動向

政策全体像	<ul style="list-style-type: none"> 2017年、気候変動対策と低炭素社会に向けた2020年代までの戦略を示す「グリーン成長戦略」を発表。CCUSも重要な存在であることを明確化し、CCUS実証事業への最大1億ポンドの投資やCCUS評議会の設置を行うことを明記 2018年、CCUS国内普及に向けたアクションプランを発表。CCUSの国内普及に向けたアクションプランやロードマップや、鉄鋼/セメント/化学などのエネルギー集約型産業におけるCCUS導入の重要性を示すと同時に、CCUS普及に向けた世界的リーダーになるというビジョンを掲げていることを記載 2020年、「グリーン産業革命のための10項目の計画」を発表。10項目にはCCUSも含まれており、最大10億ポンドの投資によるCCUSクラスター設立支援や2030年までに年間1,000万tのCO2回収を実現するという目標を記載 2023年4月に公開された「CCUS ネットゼロ投資ロードマップ」では、CCUSの開発と展開をリードする立場にあり、欧州最大級のCO2貯蔵可能容量を備えていることから、今後もCCUS技術開発を牽引する存在となることを目標に設定
-------	---

回収	<ul style="list-style-type: none"> 直接補助金 電力賦課金/CO2固定価格買取 産業エネルギー移行基金
----	---

課税	<ul style="list-style-type: none"> 利用料 CCSインフラ基金
----	--

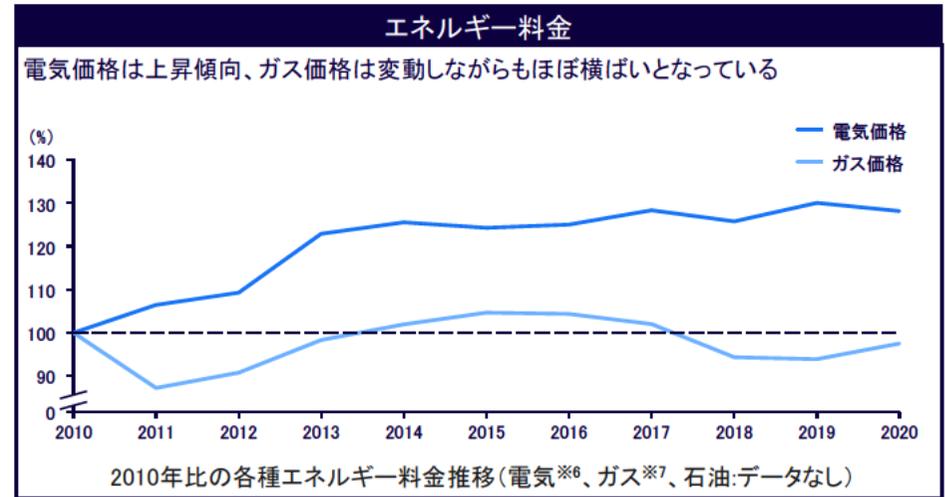
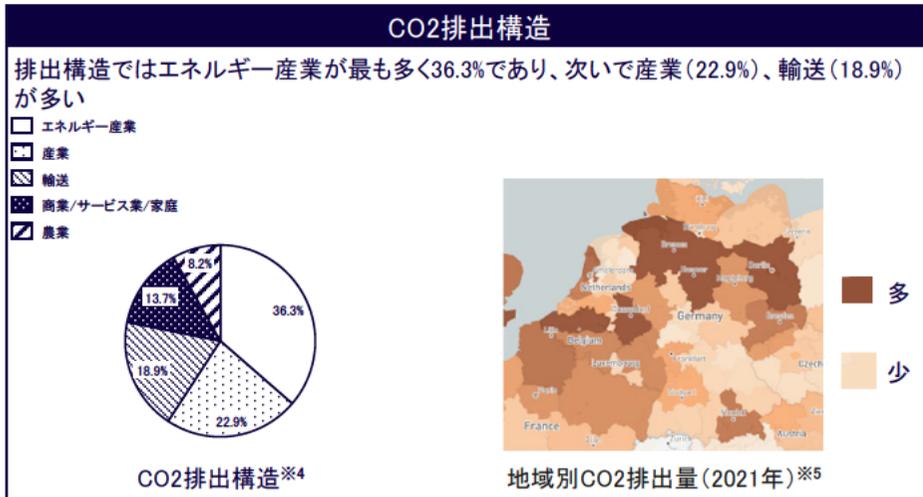
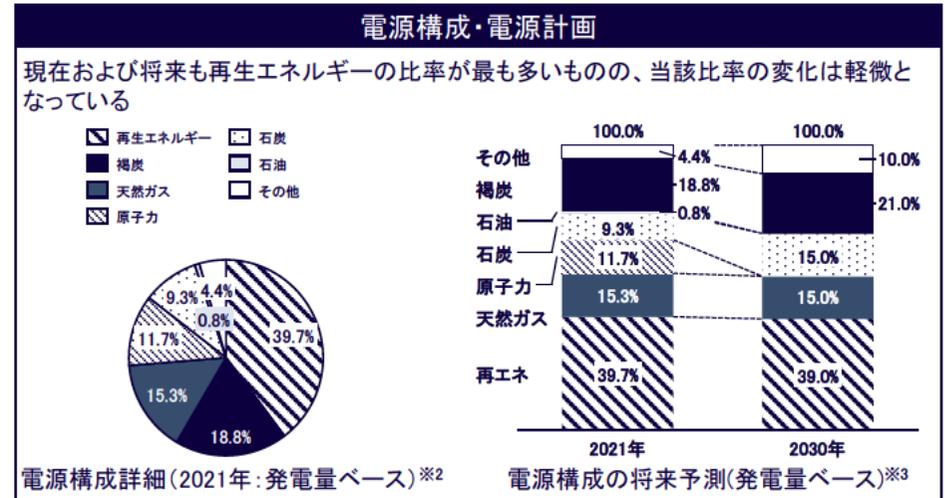
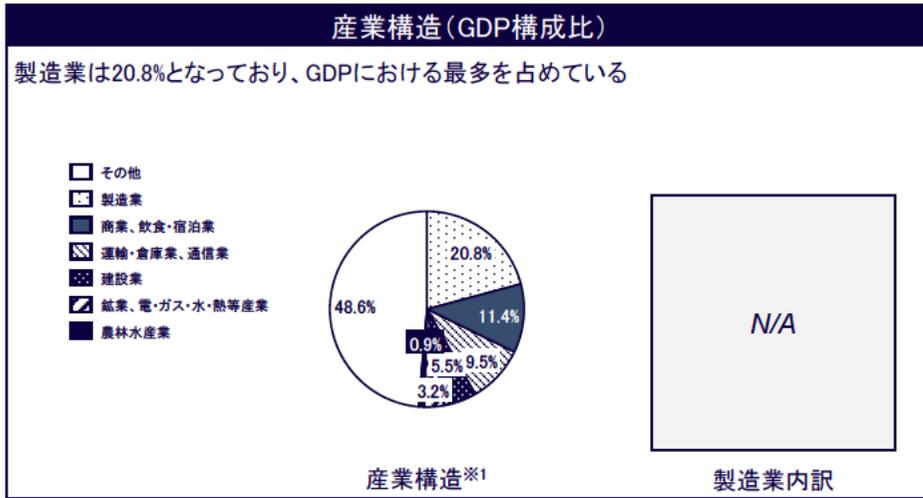
評価	<ul style="list-style-type: none"> 利用料 CCSインフラ基金
----	--

差引	<ul style="list-style-type: none"> N/A
----	---

CCUSの位置付け

鉄鋼、セメント、化学産業などのエネルギー集約型産業へのCCUS導入により、脱炭素目標の達成を図る

出所:JETRO(2022)「英国の主要な産業クラスターにおけるCCUSプロジェクトの動向～イングランド北東部ハンバー地域～」、(2022)「英国の主要な産業クラスターにおけるCCUSプロジェクトの動向～ティーズサイド地域～」、(2023)「英国の主要な産業クラスターにおけるCCUSプロジェクトの動向～スコットランド地域～」、(2023)「英国の主要な産業クラスターにおけるCCUSプロジェクトの動向～ハンバーおよびティーズサイドを除くイングランド～」、(2023)「英国の主要な産業クラスターにおけるCCUSプロジェクトの動向～ウェールズ地域～」、HM Government(2017)「The Clean Growth Strategy」、(2018)「Clean Growth The UK Carbon Capture Usage and Storage deployment pathway An Action Plan」、(2020)「The ten point plan for a green industrial revolution」、(2023)「CCUS Net Zero Investment Roadmap」、RITE(2022)「CCS普及に向けた規制とインセンティブの海外事例」、富士経済(2022)「カーボンリサイクル CO2削減関連技術・材料市場の現状と将来展望2022」よりADL作成



出所: ※1: GD Freak「ドイツのGDPと人口の推移」、※2: AGEB「Bruttostromerzeugung in Deutschland nach Energieträgern」、※3: APPLE TREE (2022)「【世界環境ジャーニー・ドイツ】再エネ推進と脱原発を同時に進める環境先進国の取り組みとは?」、※4: 在日ドイツ商工会議所 (2019)「ドイツの温室効果ガス」、※5: OpenGHGMap、※6: eurostat「Electricity prices by type of user」、※7: TRADING ECONOMICS「Germany - Gas prices: Medium size households」よりADL作成

CCUSプロジェクトの動向	
<p>【国内のCCSに対する反対】</p> <ul style="list-style-type: none"> 居住地域へのCO2貯留に対する抵抗心を理由に国民の反対が強かった影響でCCSは実験・開発を除いて禁止されていたため、稼働中のCCUSプロジェクトは2023年1月時点では存在しない <ul style="list-style-type: none"> 過去に計画が進められていた「Jämschwalde Project」や「RWE IGCC Plant with CO2 Storage」は、国民の反対を理由に頓挫 他方、2023年5月に実施された世論調査では、回答者の50%が「CCSを受け入れる」と回答、直近での国民心理の変化が見受けられる 分離方式が確認できた2PJにおいては、化学吸収法が1件、LEILAC手法(間接加熱を用いた石灰石の脱炭酸)が1件※IEAデータベースを対象に調査を実施 	
<p>【方針の見直し】</p> <ul style="list-style-type: none"> 2022年のCO2貯蔵法を評価する報告書で、2045年までにカーボンニュートラルを達成するという目標のために、2045年までにCCS(年間3,400~7,300万トンのCO2回収/貯蔵)が必要であることを示した 上記報告書を受け、CCUSに関する詳細な規制などを取り決める「炭素管理戦略(Carbon Management Strategy)」の策定を進めており、2023年に同戦略の詳細を発表予定 直近、ドイツ国内においてCCUSプロジェクトに関する取り組みが発表されており、今後も同国内におけるCCUSプロジェクトは増加すると推察 <ul style="list-style-type: none"> 独セメント大手ハイデルベルク・マテリアルズは、独・米国資本のガス大手のリンデと合併会社を設立し、独国内の工場にCO2回収・利用(CCU)施設を建設すると発表 セメント製造工程における排出CO2をアミン吸収法で分離回収した後に加工(精製/液化)し、抽出されたCO2の大半はリンデが飲料・食品産業、化学産業に販売 	

CCUS関連政策動向	
政策全体像	<ul style="list-style-type: none"> 同国はCCUS関連政策/法律の策定に動いている最中で、具体的な政策/規制は未策定 2012年、CCUSの研究開発のみを認可した法律である「KSpG(CO2貯蔵法)」が策定。2022年、同法で定められている「4年ごとの研究評価」の結果、CN達成にはCCUS技術が必要不可欠との結論に到達 <ul style="list-style-type: none"> 2019年、首相Merkel氏は「CCUS無くしてCN達成は不可能であると確信している」と発言、また環境大臣Svenja氏も「CCUSに関して真剣な検討が必要」との考えを示している 現在、CCUSに関する詳細な規制などを取り決める「炭素管理戦略(Carbon Management Strategy)」の策定を進めていることから、今後はCCUSプロジェクトに向けた政策が打ち出されていくと推察
回収	<ul style="list-style-type: none"> N/A
輸送	<ul style="list-style-type: none"> N/A
貯留	<ul style="list-style-type: none"> 連邦州は特定地域での炭素貯蔵を禁止することができ、多くの州は事実上全面禁止を導入(2012 carbon storage law:貯留の許可申請期限は2016年)
利用	<ul style="list-style-type: none"> N/A

CCUSの位置付け

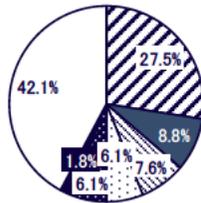
国民からの強い反発によりCCS関連政策の整備/拡充が他国より遅れていたが、CCSを許容する世論の変化と、2045年CN目標達成にはCCUSが必要不可欠との研究評価を受け、今後は国内CCUSプロジェクトの増加と政策の整備/拡充が見込まれる

出所: CLEAN ENERGY WIRE (2019)「Merkel puts contentious CCS technology back on German agenda」、(2023)「Quest for climate neutrality puts CCS back on the table in Germany」、(2023)「Quest for climate neutrality puts CCS back on the table in Germany」、(2023)「Half of Germans would accept CO2 storage sites in their region - survey」、JETRO (2023)「ハイデルベルク・マテリアルズ、ドイツ国内にCO2回収・利用施設を建設」、IEA「CCUS Projects Database(2023年5月参照)」よりADL作成 © Arthur D. Little 76

産業構造 (GDP 構成比)

製造業は6.1%で4番目の大きさとなっている

- 鉱業・電気/ガス/水供給業
- 卸売・小売・宿泊・外食業
- 運輸・倉庫・通信業
- 製造業
- 建設業
- 農林水産業
- その他



産業構造※1

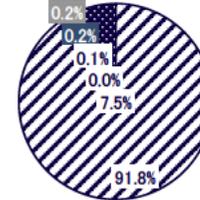


製造業内訳

電源構成・電源計画

現在の電源構成は、水力発電が91.8%を占めている

- 天然ガス
- 石炭
- 原子力
- 風力
- 水力
- 太陽光
- バイオマス
- 石油
- 地熱
- その他



電源構成詳細 (2021年: 発電量ベース)※2

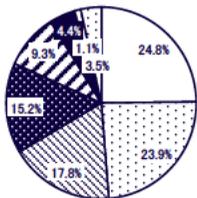


電源構成の将来予測

CO2排出構造

排出構造では石油/ガス抽出が最も多く24.8%であり、次いで産業 (23.9%) が多い

- 石油/ガス抽出
- 産業
- 道路交通
- 道路以外の輸送
- 農業
- 廃棄物
- 建物の暖房
- その他



CO2排出構造※3

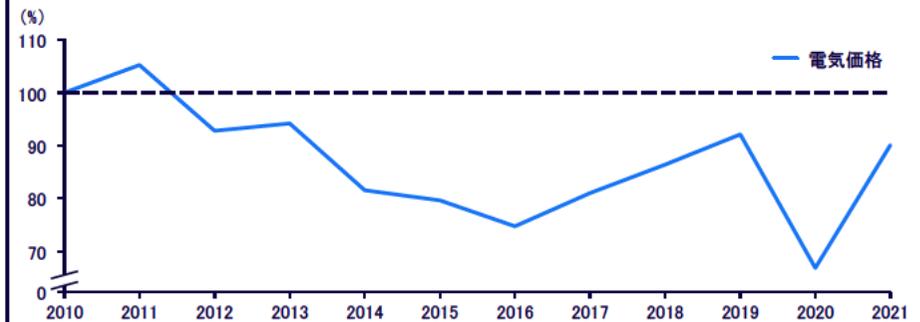


地域別CO2排出量 (2021年)※4

■ 多
■ 少

エネルギー料金

電気価格は2010年から2016年にかけて減少。以降は足元にかけて大きく変動しながら推移している



2010年比の各種エネルギー料金推移 (電気※5、ガス/石油: データなし)

出所: ※1: GD Freak「ノルウェーのGDPと人口の推移」、※2: iea「Energy Statistics Data Browser」、※3: Environment Norway「Norwegian greenhouse gas emissions」、※4: OpenGHGMap、※5: eurostat「Electricity prices by type of user」よりADL作成

CCUSプロジェクトの動向

【これまでのプロジェクト】

- ノルウェーでは20年間に渡って、天然ガス処理に対する2つのCCSプロジェクト(Sleipner、Snøhvit)をベースにCO2貯留を進めてきた
 - Sleipner:ノルウェー沖合250kmに位置。天然ガスには高い濃度(9%)のCO2が含まれているため、欧州ガス市場における販売基準(CO2含有量2.5%未満)を満たすべくアミン法によってCO2を分離
 - Snøhvit:天然ガス(CO2濃度5~8%)はLNGプラントでの冷却前にアミン法によってCO2を除去。除去されたCO2はCO2用パイプライン(145km長)でSnøhvitガス田まで戻され、海底下2,500mのTubåen層に年間70万トン貯留

【現行のプロジェクト】

- 政府方針である「費用対効果の高いCCS技術開発」および「2020年までにフルスケールCCSプラントの建設」を目的に、政府投資額171億ノルウェークローネのLongShipプロジェクトを発足
 - 史上初の国境を越えたCO2回収・輸送・貯留インフラネットワークを持つCCSプロジェクトとなっており、2024年半ばには年間最大150万t、将来的には年間500万tのCO2貯留を目指す
 - 回収:セメント、肥料生産工場や廃棄物焼却場から排出されるCO2をAker Solutionsのアミン回収技術で回収予定
 - 輸送/貯蔵:Northern LightsがCO2輸送/貯留施設の開発/運営を担当しており、ヨーロッパ大陸全体からのCO2輸送を考慮して将来的な拡張を見込む
 - Sleipner、Snøhvitプロジェクトとの違いは以下の通り※詳細後述

プロジェクト名	運転開始	排出源	輸送タイプ
Longship	2024	廃棄物処理場/セメント工場	船舶→陸→海底パイプライン
Snøhvit	2008	天然ガス精製	陸→海底パイプライン
Sleipner	1996	天然ガス精製	直接圧入

いずれのPJも分離方法は化学吸収法※富士経済レポートおよび上記代表的PJを対象に調査を実施

CCUS関連政策動向

政策全体像

- GHG排出量と比較すると豊富な貯留可能量を有しており、将来的には他国向けに同貯留地を提供することを企図している
 - 国内貯留可能量は約700億tと評価されており、主要電源構成が水力発電である同国だけでは供給過多=貯留可能量>貯留必要量
 - 「Longshipプロジェクトは複数の国からの大量のCO2の貯蔵キャパシティを有するインフラの開発を目的とする」(GASSANOVA:ノルウェー石油エネルギー省傘下の国営企業のHPIに記載)

回収

- 直接補助金:CAPEXおよび稼働時に一定額の補助金を提供

輸送

- 直接補助金:CAPEXおよび稼働時に一定額の補助金を提供
- 石油法:SleipnerやSnøhvitといった大型プロジェクトが開始された際には該当する法律が存在しなかったため、石油法に基づいて規制が行われた

貯留

- 直接補助金:CAPEXおよび稼働時に一定額の補助金を提供
- EU-CO2貯留指令:貯留場所の調査および貯留に関する規制
- CO2貯留規則:海底貯留槽における調査/探査/開発に関する規制

利用

- CO2貯留規則:海底貯留槽における調査/探査/開発に関する規制
- 影響評価に関する規則:CO2貯留施設に関する影響評価に関する規制

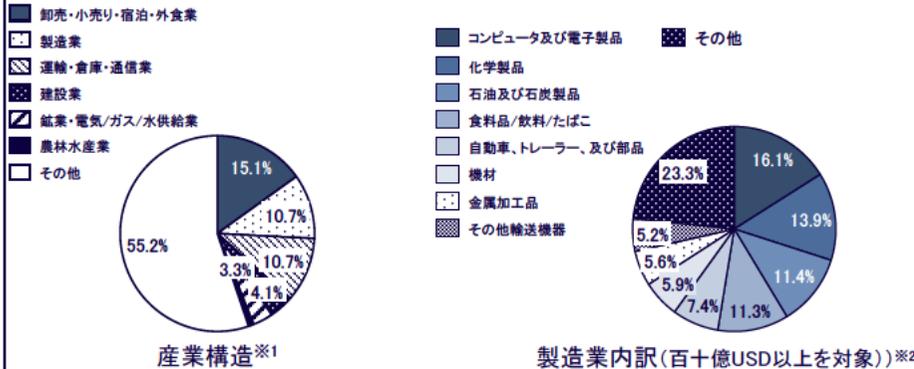
CCUSの位置付け

自国の排出のみならず、他国の利用も想定し、自国の有効資産として注力

出所:資源エネルギー庁「CCSの事業化に向けた今後の論点整理」、Northern Lights「About the Longship Project」、BELLONA「Norway's Longship CCS project」、GLOBAL CCS INSTITUTE「ノルウェーのCCS活動」、環境省「Northern Lightsプロジェクトにおける影響評価」、地球環境産業技術研究機構(2021)「地球温暖化・資源循環対策等に資する調査委託費(我が国におけるCCS事業化に向けた制度設計や事業環境整備に関する調査事業)調査報告書」、CCS Norwayホームページ(2023年5月26日閲覧)、MRI(2022)「令和3年度二国間クレジット取得等のためのインフラ整備調査事業(JCM実現可能性調査(CCUS含む))」、CEFIA「国内事務局業務及びCCUS普及展開支援等業務報告書」、CCS Norway(2022)「Longship State Support Agreements」、富士経済(2022)「カーボンリサイクル CO2削減関連技術・材料市場の現状と将来展望2022」よりADL作成

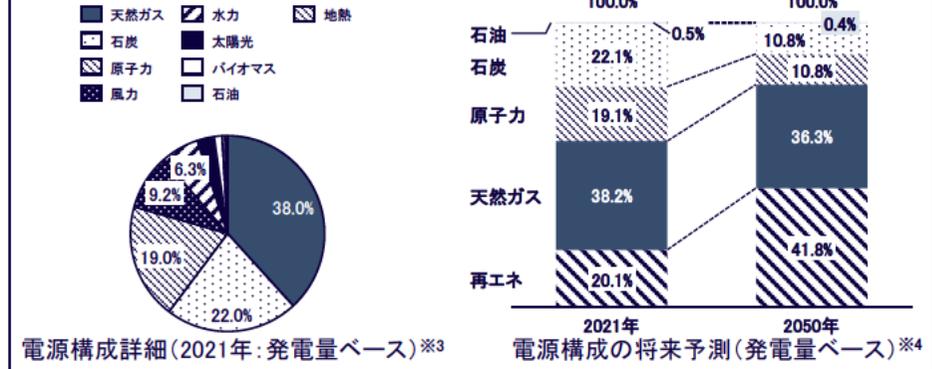
産業構造 (GDP構成比)

製造業の内訳では、コンピュータ及び電子製品が16.1%と最も高くなっている



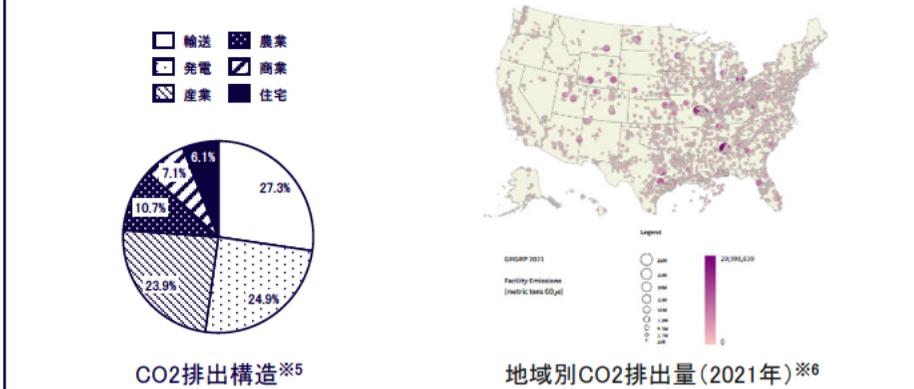
電源構成・電源計画

現在の電源構成では天然ガスが最も多く38%であり、2050年時点の計画では再生可能エネルギーが最も多く42%となっている



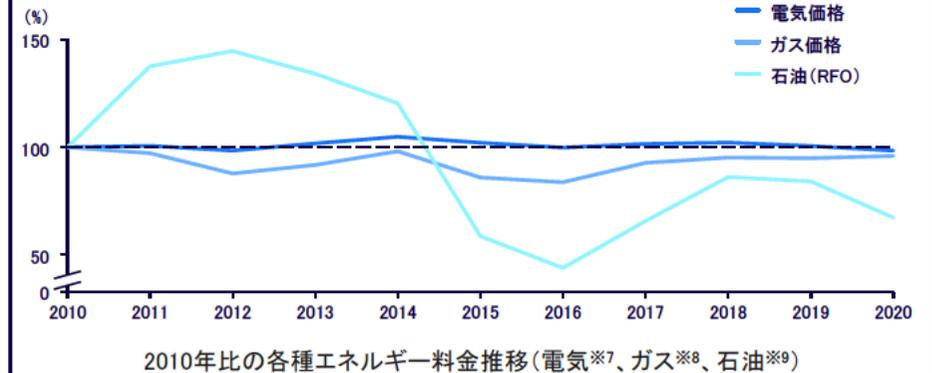
CO2排出構造

排出構造では輸送が最も多く27.3%であり、次いで発電 (24.9%)、産業 (23.9%) が多い



エネルギー料金

電気価格は横ばい、ガスは2016年から上昇傾向、石油 (RFO) は2018年から下落傾向となっている



出所: ※1: GD Freak「アメリカ合衆国のGDPと人口の推移」、※2: NIST「Manufacturing Industry Statistics」、※3: eia「Electricity explained Electricity in the United States」、※4: COUNCIL on FOREIGN RELATIONS (2022)「How Does the U.S. Power Grid Work?」、※5: EPA「Climate Change Indicators: U.S. Greenhouse Gas Emissions」、※6: EPA「GHGRP Emissions by Location」、※7: Statista「Average retail electricity price for industrial consumers in the United States from 1970 to 2021」、※8: FRED ECONOMIC DATA「Average Price: Utility (Piped) Gas per Therm in U.S. City Average」、※9: eia「U.S. Residual Fuel Oil Wholesale/Resale Price by Refiners」よりADL作成 © Arthur D. Little 79

CCUSプロジェクトの動向

- 【CCUSプロジェクトの特徴】**
- 米国では石油ガス産業が集中しているメキシコ湾周辺、エタノール工場が集中している中西部、環境規制が厳しいカリフォルニア州にCCUS施設が集中している
 - 稼働中/建設中のCCUSプラントが20件弱、開発中のものを含めると90件弱のプラントが存在。今後は貯留を目的としたCCUSのPJ増加が予定されている※PJ件数はGCCSI 2022参照
 - 稼働中施設13件:EOR→11件、貯留→2件
 - 稼働予定施設68件:EOR→6件、貯留→50件、評価中/不明→12件
 - CO2回収技術については、稼働中/稼働予定施設ともに化学吸収法が主に採用されており、主たるCO2排出源は発電所、天然ガス製造、水素製造が挙げられる
 - 分離方式が確認できたプロジェクトは稼働中が8件、稼働予定が8件※富士経済レポートおよび上記代表的PJを対象に調査を実施
 - 稼働中:化学吸収法4件、物理吸収法3件、その他(酸素燃焼)1件
 - 稼働予定:化学吸収法7件、固体吸収法が1件
- 【ハブプロジェクト構想】**
- 米国では下記プロジェクトのようなCO2吸収量が年間1,000万tを超えるハブ構想が進められており、CCUS関連設備を複数企業と共有することで投資インセンティブを高める動きが見られる
 - Houston CCS Hub:石油化学産業の集積地におけるハブ構想
 - Summit Carbon Solutions:エタノール産業の集積地におけるハブ構想
- 【プロジェクト中止】**
- 一方で、補助金を活用してもなお採算確保可能な事業モデル構築が困難で計画中止に至るケースが多くなっており、具体的な中止理由としては、事業見直し難、政策の不透明性、資金不足、計画遅延などが挙げられる
 - ミシシッピ州で進められていた「Kemper County IGCC Project」では、設計見直しに起因する計画遅延でプロジェクトコストが70億USDまで増加(当初のプロジェクトコストは22億USD)、同州が設定したコスト転嫁上限22億USDを大幅に超過した結果、事業見直し難となり2017年に計画中止
 - 2017年にテキサス州で運用が開始された「Petra Nova CCUS Project」では、COVID-19パンデミックに起因する原油価格下落によりEORの採算が不透明化したことから、2020年6月に計画中止(2023年6月以降の再開を見込む)

CCUS関連政策動向

- | | |
|-------|--|
| 政策全体像 | <ul style="list-style-type: none"> • 2021年11月にインフラ投資/雇用法 (Infrastructure Investment and Jobs Act:IIJA)を制定、今後5年間でCCSIに120億米ドルの投資を発表 • 2022年8月にインフレ抑制法 (Inflation Reduction Act:IRA)を制定、CO2排出量の多分を有している電力・製造業・自動車・燃料産業へのCCS導入を推進 • 回収後CO2の利用用途として、既に商業化されているEORの他に、燃料・化学品変換技術に対する技術開発にも着手 |
| 回収 | <ul style="list-style-type: none"> • 税控除:45Q(連邦税制優遇制度)の適用 <ul style="list-style-type: none"> - 2032年末までに建設開始、かつ回収対象設備ごとに設定された年間CO2回収量を上回るプロジェクトに適用 |
| 輸送 | <ul style="list-style-type: none"> • イリノイ州:SB1821「二酸化炭素の輸送と隔離に関する法律」 • ケンタッキー州:SB50「CO2パイプライン開発業者への土地収用権」 |
| 貯留 | <ul style="list-style-type: none"> • 税控除:45Q(連邦税制優遇制度)の適用 • 規制:安全飲料水法_地下圧入管理プログラム |
| 利用 | <ul style="list-style-type: none"> • 税控除:45Q(連邦税制優遇制度)の適用 |

CCUSの位置付け

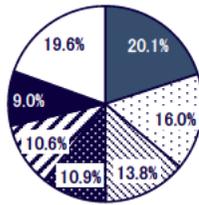
電力・製造業・自動車・燃料産業へのCCS導入を進め、脱炭素を加速

出所:三井住友銀行(2023)「米州におけるCCUSの動向」、RITE(2021)「令和2年度 地球温暖化・資源循環対策等に資する調査委託費 調査報告書」、(2022)「CCS普及に向けた規制とインセンティブの海外事例」、(2022)「第1回 CCS長期ロードマップ検討会 昨年度までの検討結果及び今年度の実施概要」、みずほ総研(2020)「CO2有効利用(CCU)の国内外の動向」、産業環境管理協会(2020)「米国におけるCCUSに関する内閣歳入法45Q条の概要」、電力中央研究所(2022)「米国「インフレ抑制法」における気候変動関連投資」、U.S. Department of Stat(2021)「THE LONG-TERM STRATEGY OF THE UNITED STATES Pathways to Net-Zero Greenhouse Gas Emissions by 2050」、GCCSI(2020)「OVERVIEW OF ORGANISATIONSAND POLICIES SUPPORTING THE DEPLOYMENT OF LARGE-SCALE CCS FACILITIES」、(2022)「GLOBAL STATUS OF CCS 2022」、富士経済(2022)「カーボンリサイクル CO2削減関連技術・材料市場の現状と将来展望2022」よりADL作成 © Arthur D. Little 80

産業構造 (GDP構成比)

製造業は20.1%であり、最も多くを占めている

- 製造業
- ▨ 卸売・小売り・宿泊・外食業
- ▩ 農林水産業
- ▧ 建設業
- ▦ 鉱業・電気/ガス/水供給業
- 運輸・倉庫・通信業
- その他



産業構造※1



製造業内訳

CO2排出構造

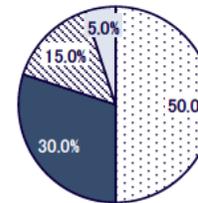
CO2排出構造に該当する公開情報なし

N/A

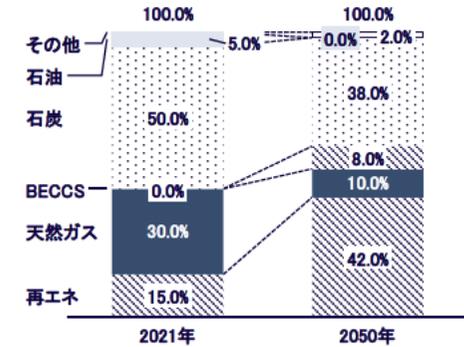
電源構成・電源計画

現在の電源構成は石炭が50%と最も多くを占めているが、2050年の電源計画では再エネが42.0%で最多となる見込み

- 石炭
- ▨ 再エネ
- 天然ガス
- 石油



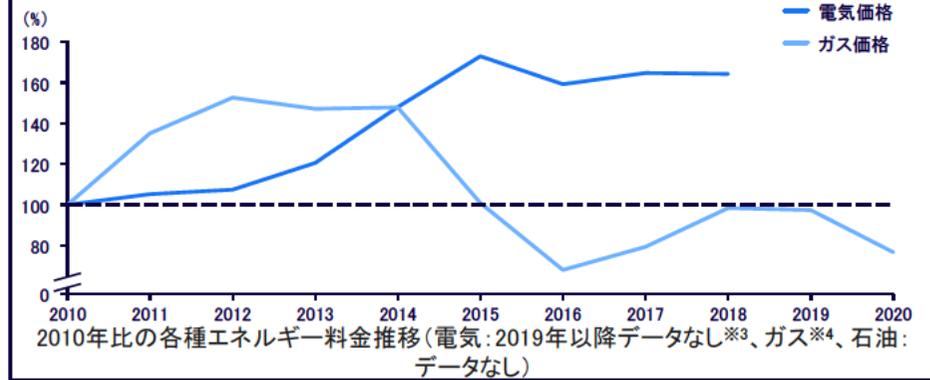
電源構成詳細(2020年)※2



電源構成の将来予測(2021年 vs 2050年)※2

エネルギー料金

電気価格は上昇傾向、ガス価格は上下動しながら2018年から下落傾向にある



CCUSプロジェクトの動向

【現状】

- 海外の石油・ガス事業者によるプロジェクト推進に伴って、国内におけるCCUS関連の政策や規制の整備を進めている
- 現在、調査/準備段階のCCS/CCUS活動やプロジェクトはMEMR省令の後押しによって2030年までに本格化することを目標としている
 - REPSOL SAKAKEMANG CARBON CAPTURE AND INJECTION
 - インドネシアおよびRepsol社にとって初のCCSプロジェクトで、年間約200万tのCO2貯留を行う見通しとなっており、回収されたCO2は隣接する枯渇ガス田に貯蔵
 - 同社のガス田開発と同時進行で実行される(2026年に稼働開始予定)
 - SUKOWATI CCUS
 - 15年間で1,500万tのCO2削減を見込むプロジェクト
 - CO2圧入地域から40km離れた油田からCO2を収集する計画であり、CO2源が油田内で分散しているため相互接続性に関する研究を進めている(2030年に商業化予定)
- (分離方式に関しては将来稼働予定PJのみとなっているため、詳細不明)※富士経済レポートおよび上記代表的PJを対象に調査を実施

【将来の見込み】

- 将来的な回収CO2貯留量は2030年には年間600万t、2060年には年間約1億9,000万tに達する見通し

CCUS関連政策動向

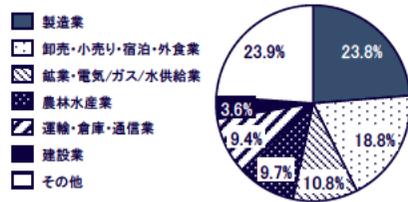
政策全体像	<ul style="list-style-type: none"> 2022年6月に、2060年までに再エネによる全電力供給を目指す法案が提出され、石炭火力発電所におけるCCUSやバイオマス混焼などの導入を通してクリーンエネルギー移行の実現を目指す LTS-LCCR2050(2021年環境林業省)における低炭素化シナリオ(LCCP)では、76%の石炭火力発電所にCCS設備を導入想定 	
回収	<ul style="list-style-type: none"> 規制:MEMR省令 <ul style="list-style-type: none"> 石油・ガス製造施設における燃焼から排出されるCO2に限る 	<ul style="list-style-type: none"> インセンティブ:MEMR省令 <ul style="list-style-type: none"> CCUSの請負業者は、石油/ガスに対して税制優遇などの優遇措置を受ける
輸送	<ul style="list-style-type: none"> 規制:MEMR省令 <ul style="list-style-type: none"> CO2輸送は、パイプ/トラック/船舶に限る 	
貯留	<ul style="list-style-type: none"> 規制:MEMR省令 <ul style="list-style-type: none"> CO2貯留は、油田/ガス田の貯留層、若しくは石炭層に限る 	
利用	<ul style="list-style-type: none"> 規制:MEMR省令 <ul style="list-style-type: none"> 石油、天然ガス、炭層メタンの増進回収への利用に限る 	

CCUSの位置付け

自国の石炭発電所からの排出削減への活用に注力

産業構造 (GDP構成比)

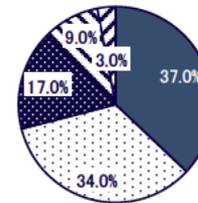
製造業は23.8%であり、全産業の中で最も多くの比率を占めている



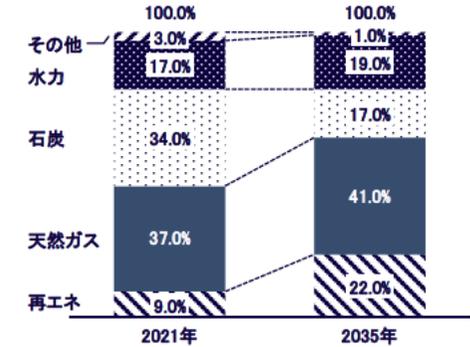
産業構造※1

電源構成・電源計画

現在の電源構成は天然ガスが37%で最も多くを占め、2035年の電源計画でも天然ガスが41%で依然として最多。再生エネルギーの比率は同年に22.0%まで増加する見込み



電源構成詳細(2020年量か容量かは不明)※2



電源構成の将来予測(量か容量かは不明)※2

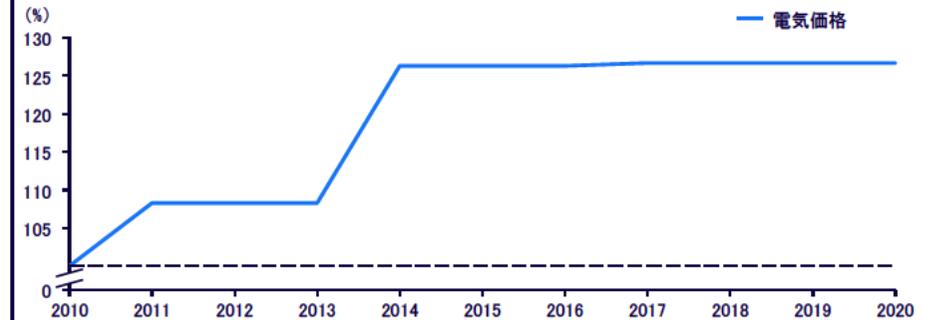
CO2排出構造

CO2排出構造に該当する公開情報なし

N/A

エネルギー料金

電気価格は上昇傾向であるが、2014年からは横ばいで推移している



2010年比の各種エネルギー料金推移(電気※3、ガス/石油: データなし)

出所: ※1: GD Freak「マレーシアのGDPと人口の推移」、※2: IMA(2022)「International Economic and Financial Review ASEAN における脱炭素政策～エネルギー分野を中心に～」、※4: TNB「PRICING & TARIFFS」よりADL作成

CCUSプロジェクトの動向

【現状】

- マレーシアには高濃度CO2を含有するガス田及び枯渇ガス田が多く存在していることから、ガス田の開発を行いつつCO2を分離・回収し古いガス田に圧入する手法が必要とされており、現状稼働中のPJはなく計画/準備中の段階
 - 天然ガスからのCO2分離プロセスは数多くの手法が提唱されている
 - 他方、CO2分離プロセスの選択肢の数が膨大で、CO2分離プロセスの選定を複雑かつ技術的に困難にしている
- アジアをリードする上記手法を活用したCCSハブとしての役割を模索しており、複数のプロジェクトを発表している
 - Petronas Kasawari
 - プロジェクトのCO2最大容量は年間330万tで、オフショア石油/ガス生産設備で実施されるCCUSプロジェクトとしては最大クラス(2025年に開始予定)
 - サワーガス田の開発で発生したCO2を回収・処理し、枯渇したガス田に注入する
 - PTTEP Lang Lebah
 - 発生したCO2を陸上ガスプラントで抽出し、輸送後にゴロク鉱区で注入(2026年に開始予定)
 - CarigaliHess, JDA Block A-18 expansion
 - 現在Pre-Feed段階であり、既存インフラを活用したプロジェクトとなる予定
- 分離方法が確認できた2PJにおいては、化学吸収法が1PJ、膜分離法が1PJ ※富士経済レポートおよび上記代表的PJを対象に調査を実施

【国際協力】

- マレーシア国営エネルギーPetronasと日本企業(JAPEX・日揮グローバル・川崎汽船)はCCS共同スタディに関する覚書に調印。マレーシアのCCS候補地におけるCO2貯留可能量の算定方法やCO2地中貯留技術、CO2回収/輸送方法などの検討において協働

CCUS関連政策動向

政策全体像

- CCSを高濃度CO2ガス田開発に適用することがマレーシアで優先領域となった
 - 電源構成の50%以上を占めている石油・ガスセクターに対して、AI技術などのデジタル技術やCCUSの導入を進めている(NATIONAL ENERGY POLICY2022-2040)
 - 2021年には炭素価格メカニズムの導入を発表しており、CCUS規制については現在策定中と推察

回収

濃縮

評価

利用

- CCS事業/サービス保有企業に対する税優遇措置
 - CCS事業の保有企業
 - 投資税制(ITA)により、10年間、適格資本支出の全額を控除
 - 2023年1月1日～2027年12月31日まで、CCS関連機器の輸入関税/消費税を全額免除
 - 事業開始日から5年以内の費用における税額控除
 - CCSサービス提供企業
 - 10年間、適格資本支出の全額に対して投資税制(ITA)を適用
 - 10年間、法定所得の70%を税免除
 - 2023年1月1日～2027年12月31日まで、CCS関連機器の輸入関税/消費税を全額免除

CCUSの位置付け

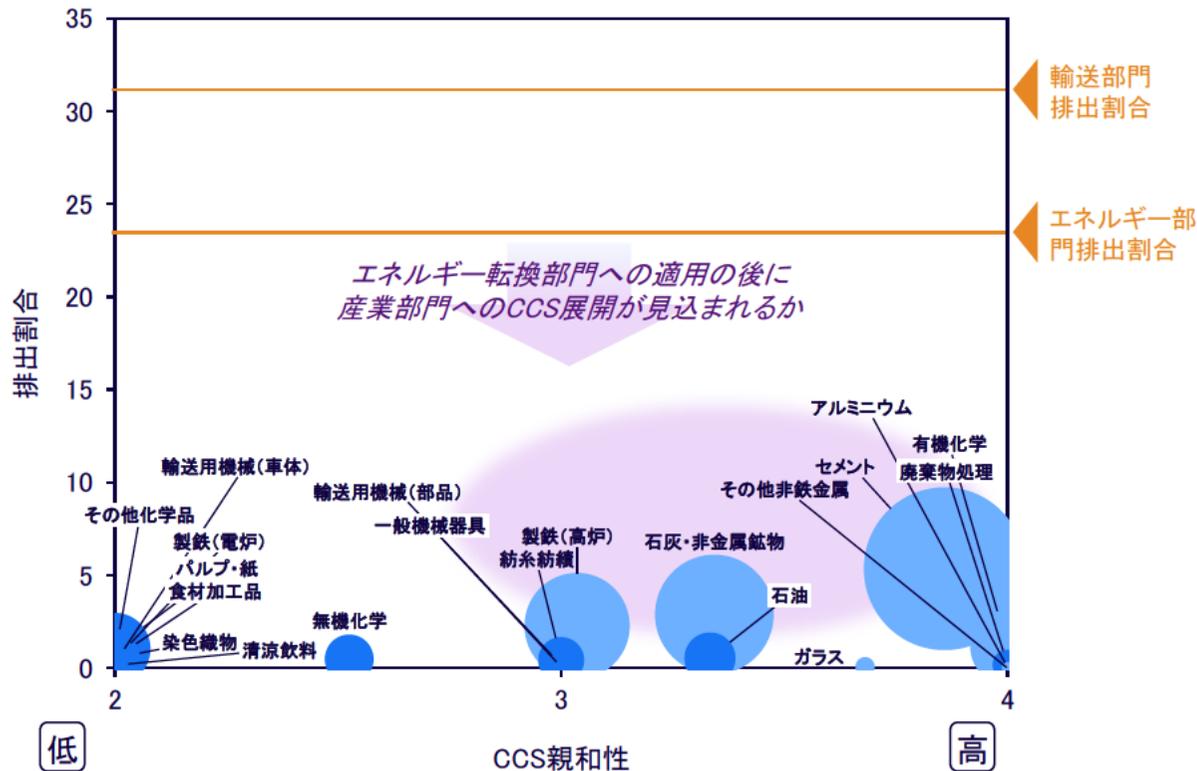
自国の排出削減(石油/ガスセクター)への活用に注力

出所:資源エネルギー庁「海外CCSの推進について」、マレーシア政府「NATIONAL ENERGY POLICY, 2022-2040」、JX石油開発「2022年8月プレスリリース」、Norwegian Energy Partner「CCS delegation to Malaysia」、GCCSI「GLOBAL STATUS OF CCS 2022」、MRI(2022)「令和3年度二国間クレジット取得等のためのインフラ整備調査事業(JCM実現可能性調査(CCUS含む))、CEFIA 国内事務局業務及びCCUS普及展開支援等業務」報告書、JANUS(2021)「Xodus、PETRONASがマレーシア沖で計画するKasawari CCSプロジェクトの概念設計契約を獲得」、松本淳 他(2011)「高濃度のCO2を含有する天然ガス田の開発を前提とした各種CO2分離プロセスの評価手法の提案と検討結果の紹介」、富士経済(2022)「カーボンリサイクル CO2削減関連技術・材料市場の現状と将来展望2022」よりADL作成 © Arthur D. Little 84

英国は、経済全体としては、エネルギー部門の再エネ・水素利用拡大を中心に産業を含む脱炭素化を進める。対象排出源ではセメント・石灰/非金属鉱物・鉄鋼(高炉)がCCS有望領域か

対象排出源におけるCCS有望領域(英国)

英国における脱炭素化の主要な方針



- 2020年にGHG排出ゼロに向けた注力領域を示す「The ten point plan for green industrial revolution」を発表。再エネや水素、原子力等のエネルギー転換部門に加え、CCUSの推進も唱える
- 2021年に2050年のCN実現に向けた成長戦略として「Net Zero戦略」を発表。経済全体の排出量削減に向けて、7つの分野を注力分野として方向性を示す
 - 電力、燃料供給・水素、産業、熱供給・建物、輸送、天然資源・廃棄物、GHG除去
- 政府が支援する複数のハブクラスターにおいても、ブルー水素製造とCCS付火力発電によるエネルギーの脱炭素化を中心に周囲産業の排出削減を目指している

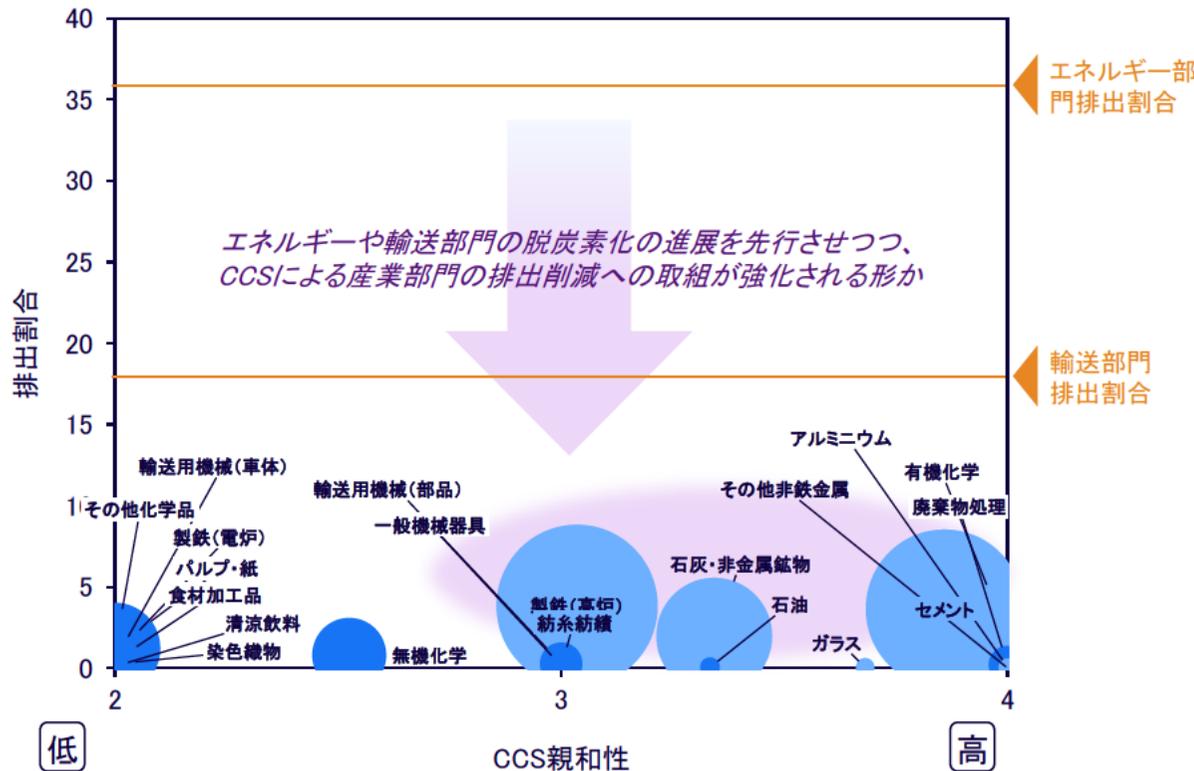
中期的には、家庭・業務部門の両方に大きな影響を与えるエネルギー転換(電力、燃料供給・水素)を経済の排出削減の柱に据えると共に、長期的にはCCSを活用した産業における排出削減への取組を強化する方向性か

※ 排出割合は対象国のCO2総排出量に対する当該産業の排出量(推定)の割合
 ※ 電力については再エネ化の方向性が大きな影響を持つため除外
 出所:「The ten point plan for green industrial revolution(2020.11)」,「Net Zero Strategy(2021.10)」他、各種二次資料よりADL作成

ドイツは、再エネや水素利用による輸送及びエネルギー分野を中心に脱炭素化を推進。対象排出源ではセメント・石灰/非金属鉱物・鉄鋼(高炉)・有機化学がCCS有望領域か

対象排出源におけるCCS有望領域(ドイツ)

ドイツにおける脱炭素化の主要な方針



- 2019年に2030年までにGHGを55%削減するための「気候行動プログラム2030」を策定。8つのセクターに分けて具体的な目標を設定
- 石炭火力の段階的廃止、風力を中心とする再エネ導入拡大と低炭素水素利用によるエネルギー分野の脱炭素化、公共交通機関の利用拡大による排出量削減を中心とする
- 加えて、産業分野においても再エネや水素利用の加速による脱炭素化を進めつつ、CCUSの活用拡大のための技術開発支援も取組として行う

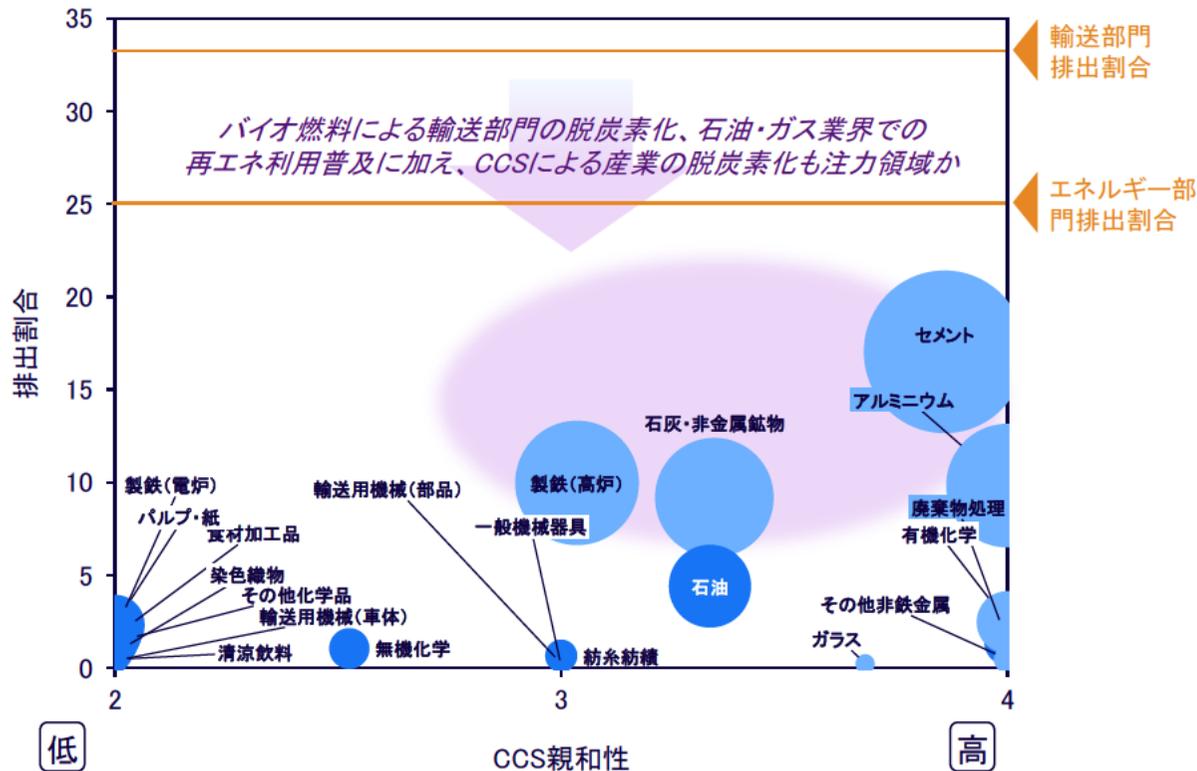
再エネ普及や水素利用によるエネルギー分野や輸送部門の排出削減を脱炭素化の柱に据えると共に、産業分野へのCCUSの活用も進める形か

※ 排出割合は対象国のCO2総排出量に対する当該産業の排出量(推定)の割合
 ※ 電力については再エネ化の方向性が大きな影響を持つため除外
 出所:「Climate Action Program 2030(2022.11)」他、各種二次資料よりADL作成

ノルウェーは、輸送部門・エネルギー部門と併せてCCSによる産業の脱炭素化を推進。対象排出源では、鉄鋼(高炉)・アルミニウム・セメント・石灰/非金属鉱物・鉄鋼(高炉)がCCS有望領域か

対象排出源におけるCCS有望領域(ノルウェー)

ノルウェーにおける脱炭素化の主要な方針



- 2021年パリ協定の気候目標を達成し、グリーン成長を促進するため「環境行動計画2021-2030」を策定。8つのセクターに分けて具体的な目標を設定
- ETS対象分野(エネルギー、産業、航空機)においてはETSの枠組みでの削減を行うと共に、非ETS対象分野における削減強化の方針を提示
 - 非ETS対象部門からの半数の排出を出す輸送部門ではバイオ燃料の普及拡大を柱としている
 - ETS対象部門では石油・ガス業界での再エネ利用の拡大に加え、セメントを中心とした産業分野におけるCCS利用による削減も柱の1つとしている

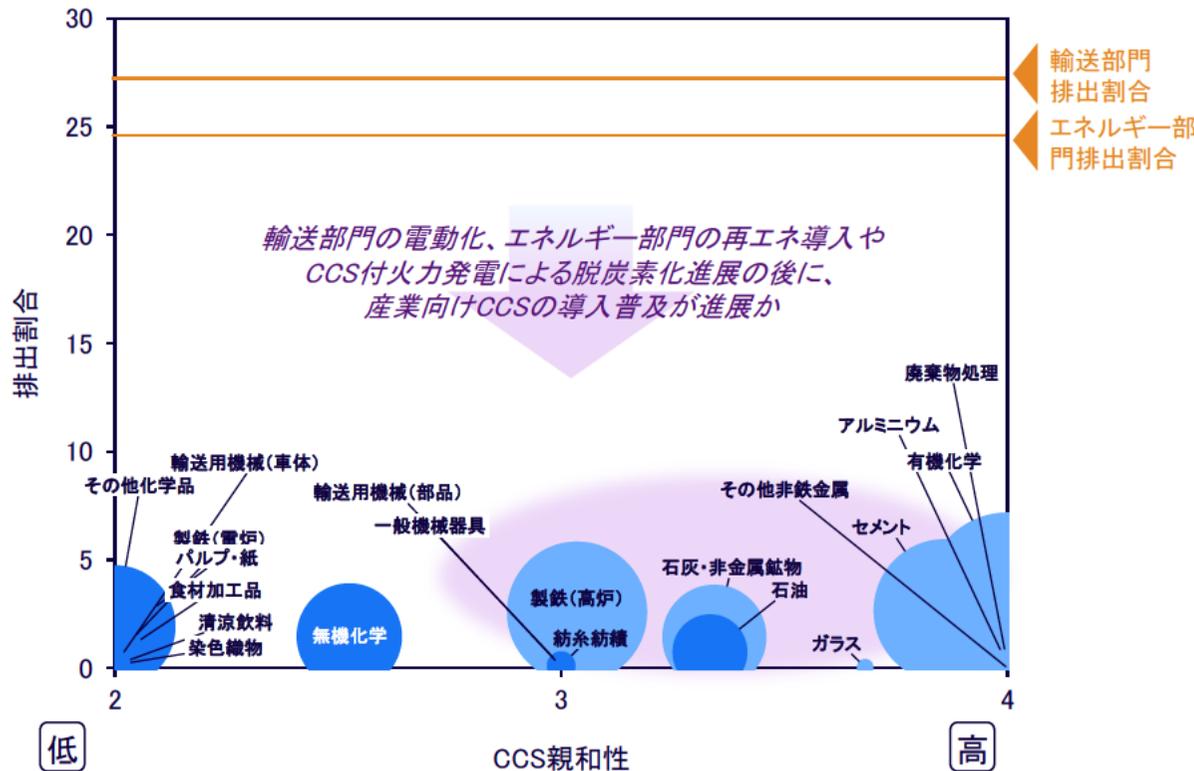
既に水力発電により電力の大半が脱炭素化されており、輸送部門におけるバイオ燃料の利用、石油・ガス業界における再エネ利用に並び、産業分野におけるCCS活用が脱炭素の柱の1つとされているか

※ 排出割合は対象国のCO2総排出量に対する当該産業の排出量(推定)の割合
 ※ 電力については再エネ化の方向性が大きな影響を持つため除外
 出所:「Norway's Climate Action Plan for 2021-2030(2021.1)」他、各種二次資料よりADL作成

米国は、輸送部門のEV化、再エネやCCS等によるエネルギー部門の脱炭素化が排出削減の中心。対象排出源ではセメント・石灰/非金属鉱物・鉄鋼(高炉)・有機化学がCCS有望領域か

対象排出源におけるCCS有望領域(米国)

米国における脱炭素化の主要な方針



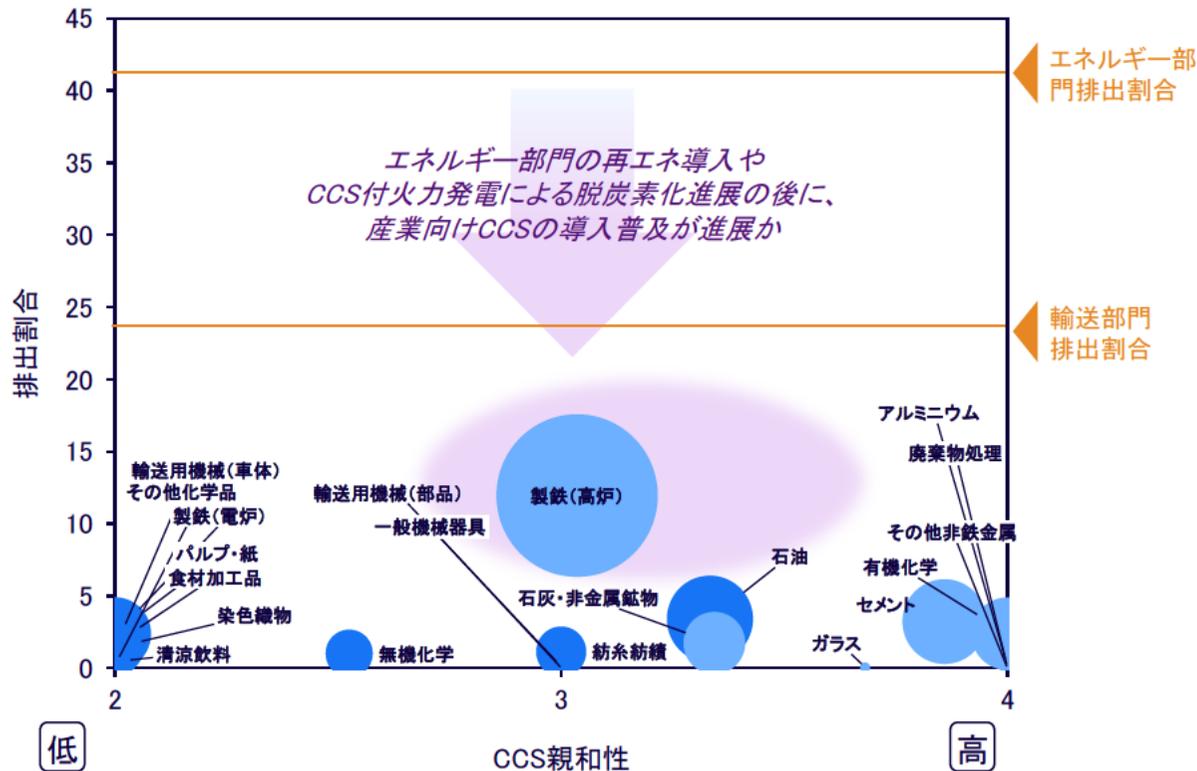
- バイデン大統領の気候変動政策に関する選挙公約と大統領令等によると、2035年までに電力部門でのCO2排出ゼロを目指すと共に、輸送部門での小型・中型自動車の電動化の推進が排出削減の主要な取組みとなる
- 電力部門の排出削減においては洋上風力や太陽光発電の促進、グリーン水素の開発に加え、CO2回収による火力発電の脱炭素化も取組として掲げられている

輸送部門の電動化、エネルギー部門の再エネ導入等による脱炭素化が先行し、産業分野におけるCCS活用による排出削減が続く形か

※ 排出割合は対象国のCO2総排出量に対する当該産業の排出量(推定)の割合
 ※ 電力については再エネ化の方向性が大きな影響を持つため除外
 出所: JETRO「バイデン政権発足で変革する気候変動政策(米国)(2021.3)」他、各種二次資料よりADL作成

インドネシアは、森林再生・土地利用の効率化、エネルギー部門の脱炭素化が排出削減の中心。 対象排出源では鉄鋼(高炉)がCCS有望領域か

対象排出源におけるCCS有望領域(インドネシア)



インドネシアにおける脱炭素化の主要な方針

- 2021年に「低炭素・環境レジリエンスに向けた長期戦略2050」を策定・UNFCCCに提出
- 低炭素化の2つの柱としてAFOUL(農業・森林・その他土地利用)とエネルギー部門が挙げられている
 - AFOULでは森林伐採削減や森林再生、土地利用の効率化により排出削減を目指す
 - エネルギー部門では再エネ導入とCCS付石炭火力の導入により脱炭素化を目指す
- その他、産業部門においては、セメントや鉄鋼由来の排出削減が挙げられているが、主要な方向性としては混合セメントやリサイクル原料の利用が方向性として挙げられている

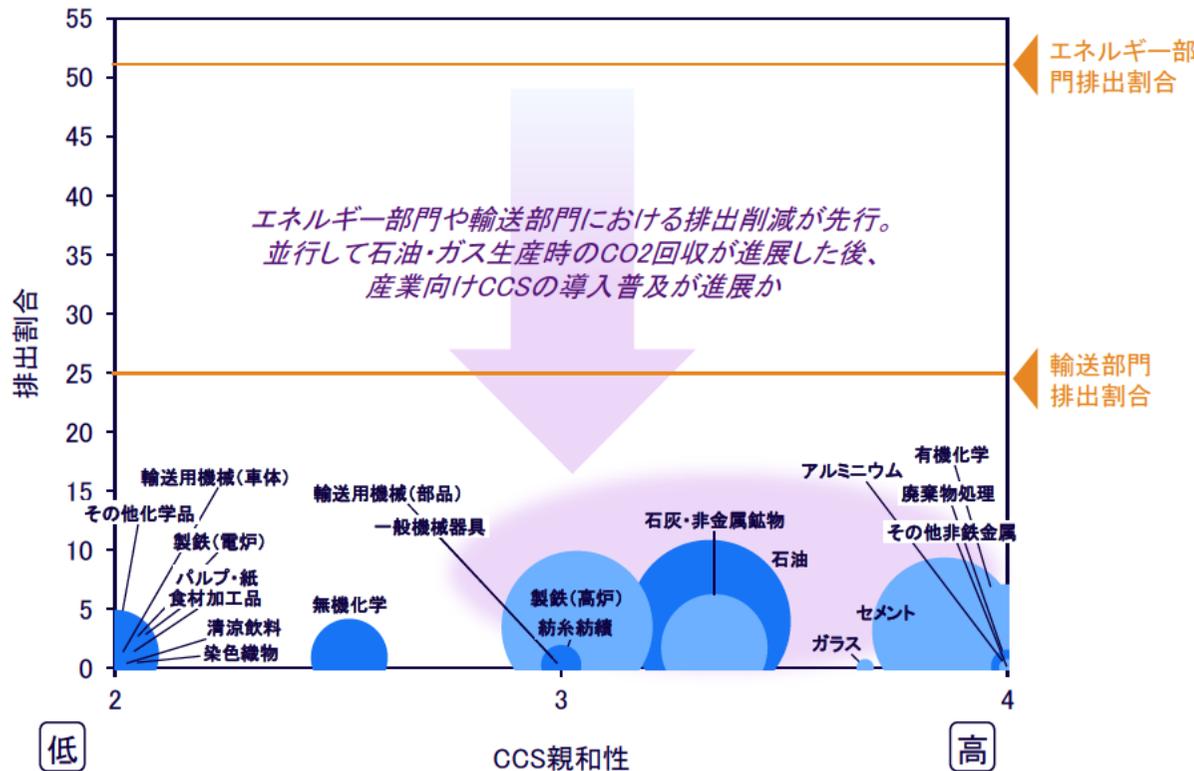
エネルギー部門の再エネ導入やCCS付石炭火力等による脱炭素化が先行し、産業分野におけるCCS活用による排出削減が続く形か。但し、鉄鋼やセメント製造における削減手法はCCSに限らず、材料転換等が検討の中心となっているか

※ 排出割合は対象国のCO2総排出量に対する当該産業の排出量(推定)の割合
 ※ 電力については再エネ化の方向性が大きな影響を持つため除外
 出所:「Indonesia Long-Term Strategy for Low Carbon and Climate Resilience 2050(2021.7)」他、各種二次資料よりADL作成

マレーシアは、エネルギーと輸送部門における脱炭素化が排出削減の中心。対象排出源ではセメント・石油・鉄鋼(高炉)・有機化学がCCS有望領域か

対象排出源におけるCCS有望領域(マレーシア)

マレーシアにおける脱炭素化の主要な方針



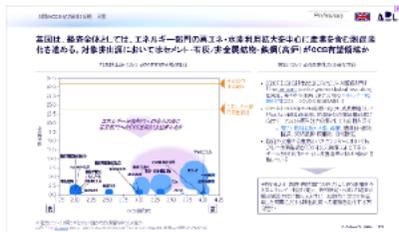
- 2021年に第12次マレーシア計画を策定。2030年までにGHG排出45%削減を目標に掲げ、エネルギーや輸送、産業プロセス、製品利用、廃棄物管理、農業・森林・土地利用分野での取組み推進の重要性を説く
- 注力領域としてはエネルギーと輸送を掲げ、それぞれ水力やPV、バイオマスなどの再エネ導入拡大による低炭素エネルギーの利用拡大、公共交通機関やバイオ燃料、EV化によるモビリティの脱炭素化を具体例として提示
- 2022年に策定された「National Energy Policy 2022-2040」では、石油・ガス業界におけるCCSによるCO2回収の必要性が挙げられている

輸送部門の脱炭素化やエネルギー部門の再エネ導入、石油・ガス産業でのCCSが先行する形で進展か。産業向けCCSの利用拡大は現時点では大きな注力領域ではないか

※ 排出割合は対象国のCO2総排出量に対する当該産業の排出量(推定)の割合
 ※ 電力については再エネ化の方向性が大きな影響を持つため除外
 出所:「Twelfth Malaysia Plan, 2021-2025(2021.9)」,「National Energy Policy 2022-2040(2022.9)」他、各種二次資料よりADL作成

CCS親和性×排出割合で導出した産業に加え、対象国の施策においてCCS適用分野として指定されている産業を加えて、市場動向を定性的に評価

①排出規模・親和性を踏まえた導出



✓ 排出規模が大きく、CCS親和性が高い分野を導出

②政策を踏まえた導出

国	産業	排出量 (Gt)	CCS親和性	注
中国	鉄鋼	2.1	高	中国は鉄鋼産業の脱炭素化を推進している。
中国	セメント	1.5	高	中国はセメント産業の脱炭素化を推進している。
中国	電力	13.5	中	中国は電力産業の脱炭素化を推進している。
中国	化学	0.8	中	中国は化学産業の脱炭素化を推進している。
中国	石油	0.5	低	中国は石油産業の脱炭素化を推進している。
中国	天然ガス	0.3	低	中国は天然ガス産業の脱炭素化を推進している。
中国	その他の産業	0.2	低	中国はその他の産業の脱炭素化を推進している。

✓ 各国施策を踏まえて注力するCCS分野を導出

③市場動向の定性評価

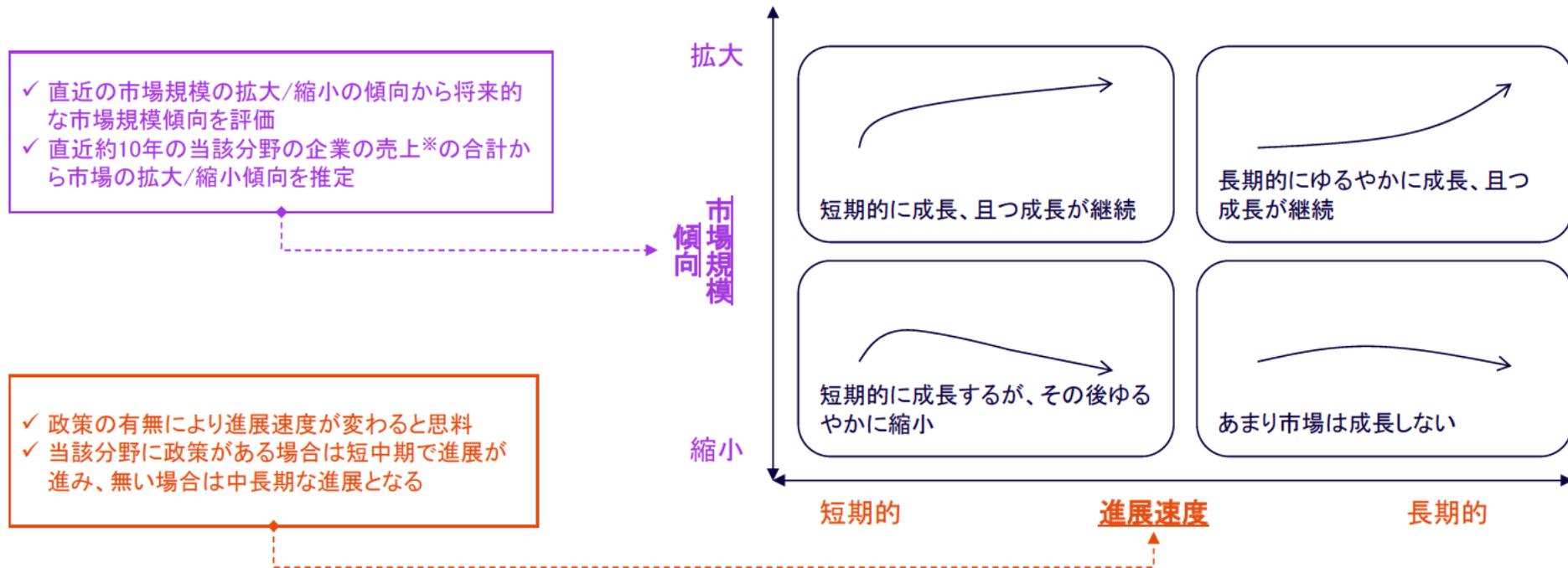
表は、大規模なCCSプロジェクトの建設が予定されている国々、その建設が完了している、一次エネルギーの削減、産業部門の削減がCCS適用分野の導出に寄与する。

国	産業	排出量 (Gt)	CCS親和性	市場動向
中国	鉄鋼	2.1	高	建設予定
中国	セメント	1.5	高	建設予定
中国	電力	13.5	中	建設予定
中国	化学	0.8	中	建設予定
中国	石油	0.5	低	建設予定
中国	天然ガス	0.3	低	建設予定
中国	その他の産業	0.2	低	建設予定

✓ 産業や政策動向を踏まえて、今後の市場動向を定性的に評価

政府施策の有無が当該分野のCCS導入の進展速度に影響を与えると共に、産業規模の拡大/縮小傾向により長期的な市場の拡大/縮小の傾向が予測できるか

進展速度と産業規模の傾向による短長期的な市場予測



※ SPEEDにおける当該国の当該分野における企業(上場・非上場企業)で対象期間において売上情報が存在する企業の各時期の売上を合計して比較



英国は、火力発電や鉄鋼(高炉)は短期的な拡大が見込めるが、その後縮小が予測される。一方で、セメントや石灰・非金属鉱物、有機化学等は排出量も多く継続的なニーズ拡大があるか

産業	主要プロセス	排出規模※	CCS導入親和性 (低:1-高:4)		政策動向	産業動向	市場魅力度	
							短期	長期
電力	石炭火力	171MtCo2	発電	—	↑ ・ 政府注力領域	↓ ・ 産業は縮小傾向	○	△
	ガス火力		発電	—				
石油・石炭	石油	2MtCo2	常圧蒸留	↑ 4.0	→ ・ 施策は現時点では見られない	↓ ・ 産業は縮小傾向	△	△
			水素化脱硫	↑ 3.0				
			接触改質・分解	↑ 3.0				
鉄鋼	製鉄(高炉)	10MtCo2	焼結	↑ 3.0	↑ ・ 政府注力領域	↓ ・ 産業は縮小傾向	○	△
			高炉	↑ 3.1				
窯業・土石製品	石灰・非金属鉱物	10MtCo2	焼成	↑ 3.3	→ ・ 施策は現時点では見られない	↑ ・ 産業は拡大傾向	△	○
	セメント	19MtCo2	焼成	↑ 3.9	↑ ・ 政府注力領域	→ ・ 産業は横ばい傾向	○	○
	ガラス	1MtCo2	溶解	↑ 3.7	↑ ・ 政府注力領域	↑ ・ 産業は拡大傾向	○	○
化学	有機化学	4MtCo2	ナフサ分解	↑ 4.0	↑ ・ 政府注力領域	↑ ・ 産業は拡大傾向	○	○
食品飲料	食材加工品	2MtCo2	加熱調理	→ 2.0	↑ ・ 政府注力領域	↑ ・ 産業は拡大傾向	○	○
廃棄物	燃焼	1MtCo2	燃焼	↑ 4.0	↑ ・ 政府注力領域	↑ ・ 産業は拡大傾向	○	○

※ 小数点以下四捨五入。0.5MtCO2未満の場合は1MtCO2と記載
出所:各種公開資料よりADL作成



ドイツは、電力・鉄鋼は大きな排出量があるがあまり成長は見られず、石灰・非金属鉱物やセメントが継続的な成長が見られるか

産業	主要プロセス	排出規模※	CCS導入親和性 (低:1-高:4)	政策動向	産業動向	市場魅力度			
						短期	長期		
電力	石炭火力	321MtCo2	→	→	・ 施策は現時点では見られない	↓	・ 産業は縮小傾向	△	△
	ガス火力							発電	→
鉄鋼	製鉄（高炉）	30MtCo2	↗	→	・ 施策は現時点では見られない	↓	・ 産業は縮小傾向	△	△
	高炉		↗					△	△
窯業・土石製品	石灰・非金属鉱物	13MtCo2	↗	↗	・ 政府注力領域	→	・ 産業は横ばい傾向	○	○
	セメント	24MtCo2	↗	↗	・ 政府注力領域	↗	・ 産業は拡大傾向	○	○
	ガラス	1MtCo2	↗	↗	・ 政府注力領域	↗	・ 産業は拡大傾向	○	○
化学	有機化学	12MtCo2	↗	→	・ 施策は現時点では見られない	↓	・ 産業は縮小傾向	△	△
廃棄物	燃焼	1MtCo2	↗	↗	・ 政府注力領域	→	・ 産業は横ばい傾向	○	△

※ 小数点以下四捨五入。0.5MtCO2未満の場合は1MtCO2と記載
出所:各種公開資料よりADL作成



ノルウェーは、鉄鋼(高炉)、セメントが短期的に拡大が見込める。アルミニウム、有機化学は長期的に緩やかに拡大する形か

産業	主要プロセス	排出規模※	CCS導入親和性 (低:1-高:4)		政策動向	産業動向	市場魅力度		
							短期	長期	
鉄鋼	製鉄(高炉)	焼結 高炉	4MtCo2	↗	3.0	↗ ・ 政府注力領域	→ ・ 産業は横ばい	○	○
				↗	3.1				
非鉄金属	アルミニウム	電解精錬	4MtCo2	↗	4.0	→ ・ 施策は現時点では見られない	↗ ・ 産業は拡大傾向	△	○
窯業・土石製品	石灰・非金属鉱物	焼成	3MtCo2	↗	3.3	→ ・ 施策は現時点では見られない	↘ ・ 産業は縮小傾向	△	△
	セメント	焼成	6MtCo2	↗	3.9	↗ ・ 政府注力領域	↘ ・ 産業は縮小傾向	○	△
化学	有機化学	ナフサ分解	1MtCo2	↗	4.0	→ ・ 施策は現時点では見られない	↗ ・ 産業は拡大傾向	△	○
廃棄物		燃焼	1MtCo2	↗	4.0	↗ ・ 政府注力領域	→ ・ 産業は横ばい傾向	○	○

※ 小数点以下四捨五入。0.5MtCO2未満の場合は1MtCO2と記載
出所:各種公開資料よりADL作成



米国は、電力・セメント・化学(有機・無機)が短期的に拡大後も継続的な拡大が期待出来るか。石灰・非金属鉱物は長期的に緩やかに拡大すると見込まれる

産業	主要プロセス	排出規模※	CCS導入親和性 (低:1-高:4)	産業・政策動向	産業・政策動向	市場魅力度					
						短期	長期				
電力	石炭火力	2,341MtCo2	発電	→	—	↑	・ 政府注力領域	↑	・ 産業は拡大傾向	○	○
	ガス火力		発電	→	—						
石油・石炭	石油	36MtCo2	常圧蒸留	↑	4.0	↑	・ 政府注力領域	→	・ 産業は横ばい傾向	○	○
			水素化脱硫	↑	3.0						
			接触改質・分解	↑	3.0						
鉄鋼	製鉄(高炉)	115MtCo2	焼結	↑	3.0	↑	・ 政府注力領域	↓	・ 産業は縮小傾向	○	△
			高炉	↑	3.1						
窯業・土石製品	石灰・非金属鉱物	69MtCo2	焼成	↑	3.3	→	・ 施策は現時点では見られない	↑	・ 産業は拡大傾向	△	○
	セメント	128MtCo2	焼成	↑	3.9	↑	・ 政府注力領域	↑	・ 産業は拡大傾向	○	○
	ガラス	2MtCo2	溶解	↑	3.7	↑	・ 政府注力領域	↑	・ 産業は拡大傾向	○	○
化学	有機化学	165MtCo2	ナフサ分解	↑	4.0	↑	・ 政府注力領域	↑	・ 産業は拡大傾向	○	○
	無機化学	71MtCo2	COシフト	→	2.5	↑	・ 政府注力領域	↑	・ 産業は拡大傾向	○	○

※ 小数点以下四捨五入。0.5MtCO2未満の場合は1MtCO2と記載
出所:各種公開資料よりADL作成



インドネシアは、電力・石油・無機化学が短期的且つ継続的な拡大が期待出来る一方で、鉄鋼はあまり変化が見られないか

産業	主要プロセス	排出規模※	CCS導入親和性 (低:1-高:4)	政策動向	産業動向	市場魅力度					
						短期	長期				
電力	石炭火力	194MtCo2	発電	→	—	↗	• 政府注力領域※	↗	• 産業は拡大傾向	○	○
	ガス火力		発電							↗	—
石油・石炭	石油	21MtCo2	常圧蒸留	↗	4.0	↗	• 政府注力領域	↗	• 産業は拡大傾向	○	○
			水素化脱硫	↗	3.0					○	○
			接触改質・分解	↗	3.0					○	○
鉄鋼	製鉄(高炉)	74MtCo2	焼結	↗	3.0	→	• 施策は現時点では見られない	→	• 産業は横ばい傾向	△	△
			高炉	↗	3.1					△	△
非鉄金属	アルミニウム	1MtCo2	電解精錬	↗	4.0	↗	• 政府注力領域	↗	• 産業は拡大傾向	○	○
窯業・土石製品	セメント	20MtCo2	焼成	↗	3.9	↗	• 政府注力領域	→	• 産業は横ばい傾向	○	○
化学	無機化学	6MtCo2	COシフト	→	2.5	↗	• 政府注力領域	↗	• 産業は拡大傾向	○	○

※ 発電の大部分を担うPLNはCN実現の手段としてCCSの導入を挙げている
 ※ 小数点以下四捨五入。0.5MtCO2未満の場合は1MtCO2と記載
 出所:各種公開資料よりADL作成



マレーシアは、石油が短期且つ継続的な拡大が期待出来る一方で、最大排出源の火力発電ではあまり変化は期待出来ないか。鉄鋼やセメントは長期的に緩やかに拡大か

産業	主要プロセス	排出規模※	CCS導入親和性 (低:1-高:4)	政策動向	産業動向	市場魅力度					
						短期	長期				
電力	石炭火力	発電	118MtCo2	→	→	・ 施策は現時点では見られない	→	・ 産業は横ばい傾向	△	△	
	ガス火力	発電							→	→	△
石油・石炭	石油	常圧蒸留	10MtCo2	↗	↗	・ 政府注力領域	↗	・ 産業は拡大傾向	○	○	
		水素化脱硫		↗					3.0	○	○
		接触改質・分解		↗					3.0	○	○
鉄鋼	製鉄（高炉）	焼結	9MtCo2	↗	→	・ 施策は現時点では見られない	↗	・ 産業は拡大傾向	△	○	
		高炉		↗					3.1	△	○
窯業・土石製品	セメント	焼成	8MtCo2	↗	→	・ 施策は現時点では見られない	↗	・ 産業は拡大傾向	△	○	
化学	有機化学	ナフサ分解	5MtCo2	↗	→	・ 施策は現時点では見られない	→	・ 産業は横ばい傾向	△	△	

※ 小数点以下四捨五入。0.5MtCO2未満の場合は1MtCO2と記載
出所:各種公開資料よりADL作成

- 1 プロジェクトの全体像
- 2 Step1: 主要技術方式の技術開発動向
- 3 Step2: 低圧低濃度排出源の適合度評価
- 4 Step3: 対象国の市場・政策動向
- 5 Step4: 主要プレイヤー・プロジェクト動向
- 6 Appendix

Step4 サマリ

①CCSインフラ・座組形成

- CO2回収事業は主に排出者が単独の単独型と、複数のハブ型に分けられる。単独型のプロジェクトはEORや技術開発段階であるCCUのプロジェクトが多く、ハブ型は大規模排出源を中心に中小規模の排出源をクラスター化するものが多い。技術実証系や旧来型の大型CCSプロジェクトを除くと、規模拡大によるCO2回収・貯留コストや事業リスクの分散目的のハブ型プロジェクトが増加
- 政府支援による輸送・貯留インフラの構築を後押しに、多様なプレイヤーによる分業型の兆しが見える。EU等においては競争によるコスト削減等を見据えて、輸送と貯留インフラのオープンアクセスなど競争性の導入を見据えた議論が為されている。分業化の進展によっては、回収から輸送・貯留/利用に至るVC上の複数のプレイヤーとのパートナーリングが今後回収技術の提供プレイヤーには求められる

②ビジネスモデルの方向性

- CO2回収では様々な事業が展開されているが、モノ・サービスの提供範囲と対価の受け取り方で5つのビジネスモデルに分類できる
 - ソリューション提供型: 回収プラントの設計・建設・運用(輸送・貯留含)とVC上の全taskの代行。OPEX型課金
 - インフラ提供型: 回収プラントの設計・建設、輸送・貯留手段(インフラ)の提供。CAPEX型課金+OPEX型課金
 - プラント売り型: 周辺機器を含めた回収プラント全体の設計・調達・建設。CAPEX型課金
 - 回収装置売り型: CO2回収装置の製造・提供。CAPEX型課金
 - 素材提供型: 吸収液・吸着剤・分離膜の提供

③各技術のロードマップ

- 化学吸収法は、2030年頃に政府支援有りの商用化が、2040年以降に完全民間ベースへと移行することが見込まれる。固体吸収法・深冷分離法が化学吸収法に続き、物理吸着法・膜分離法が更に遅れて実証から商用化(政府支援有りから完全民間ベース)へと移行していくことが予想される
- 物理吸収法については低圧低濃度排出源のアプリケーションは現時点では見られず、将来的な商用化見通しは立っていない

Step3では、実証事業・海外競合の取り組みから、業界としてのインフラ・座組形成の動向や、想定されるビジネスモデルの方向性、及び事業展開に向けたロードマップを把握

	CCSインフラ・座組形成	ビジネスモデルの方向性	事業展開ロードマップ
目的	プレイヤーの座組や、排出源・輸送・貯留・利用のインフラ形成のあり方などを考察	黎明期であるCCSビジネスの拡大・加速に向けた特徴的なビジネスモデルの方向性を考察(例:CO2取引PF、クレジットなど環境価値とのセット販売、Sol型ビジネスなど)	競合各社が想定する事業展開ロードマップの整理
ベンチマーク対象	先進国を中心としたCCUSプロジェクト	実証事業+海外競合プレイヤー動向	海外競合プレイヤー <ul style="list-style-type: none"> • CO2分離回収単独 • VC統合型

単独型のプロジェクトはEORや技術開発段階であるCCUのものが多く、ハブ型は中心となる排出源の中小規模の排出源をクラスター化するものが多い

PJ名	国	ステータス	インフラタイプ	排出源
1 CCS Net Zero Teesside	英国	2025年運開	ハブ型	発電所、水素製造プラント、アンモニア製造プラント、廃棄物発電所
2 CCS ZeroCarbon Humber	英国	2027年運開	ハブ型	水素製造プラント
3 CCS Porthos	オランダ	2026年運開	ハブ型	水素製造プラント、製油所、化学品製造プラント
4 CCS Quest	カナダ	2015年運開	単独	水素製造プラント (石油精製プラント内)
5 CCS Longship	ノルウェー	2024年運開	ハブ型	セメント製造工場、廃棄物燃焼施設
6 CCS -	米国	2025年運開	ハブ型	化学プラント、石油精製プラント、発電所、水素製造プラント 他
7 CCS (EOR) Petra Nova Carbon Capture	米国	2016年運開	単独	石炭火力発電所
8 CCS (EOR) ACTL(Alberta Carbon Trunk Line)	カナダ	2020年運開	ハブ型	石油精製プラント、アンモニア製造プラント
9 CCU -	中国	2022年運開	単独	コーク製造プラント
10 CCU Covestro	ドイツ	2016年運開	ハブ型	アンモニア製造プラント
11 CCU STORE&GO	ドイツ	2019年運開	単独	バイオエタノール製造プラント
12 CCU -	米国	2018年運開	ハブ型	N/A
13 CCU Rohm chemical plant	ドイツ	N/A	単独	N/A

PJ名			国	ステータス	インフラタイプ	排出源
14	CCU	Carbon Clean CEMEX Rudersdorf plant	ドイツ	2026年運開	単独	セメント製造工場
15	CCUS	Avedere and Asnaes Power Station	デンマーク	2025年運開	ハブ型	バイオマス発電所、石油精製プラント
16	CCU	Shell heavy residue gasification CCU- Pernis refinery	オランダ	1997年運開	単独	石油精製プラント
17	CCS	Houston CCS Hub	米国	調査中	ハブ型	メキシコ湾周辺の石化施設、工場、発電所等
18	CCS	Summit Carbon Solutions	米国	調査中	ハブ型	周辺のエタノール製造施設等(30ヶ所超)
19	CCS	Sukowati CCUS	インドネシア	2028年運開	単独	石油精製プラント
20	CCS	Repsol Sakakemang Carbon Capture and Injection	インドネシア	2026年運開	単独	天然ガス精製
21	CCS	Arun CCS Hub	インドネシア	2028年運開	ハブ型	オープンアクセスにより複数地域から受入を予定
22	CCS	Lang Lebah CCS	マレーシア	2026年運開	単独	天然ガス精製
23	CCS	Kasawari	マレーシア	2025年運開	単独	天然ガス精製

技術実証系や旧来型の大型CCSプロジェクトを除くと、スケールアップによるCO2排出源当たりのCO2回収・貯留コストや事業リスクを分散化するようなハブ型のプロジェクトが増加しているか



従来の単独モデルに加え、政府支援による輸送・貯留インフラの構築を後押しに多様なプレイヤーによる分業型の兆しが見える。今後は立地環境に適した座組とそこでのパートナーリングが重要

モデルが多様化

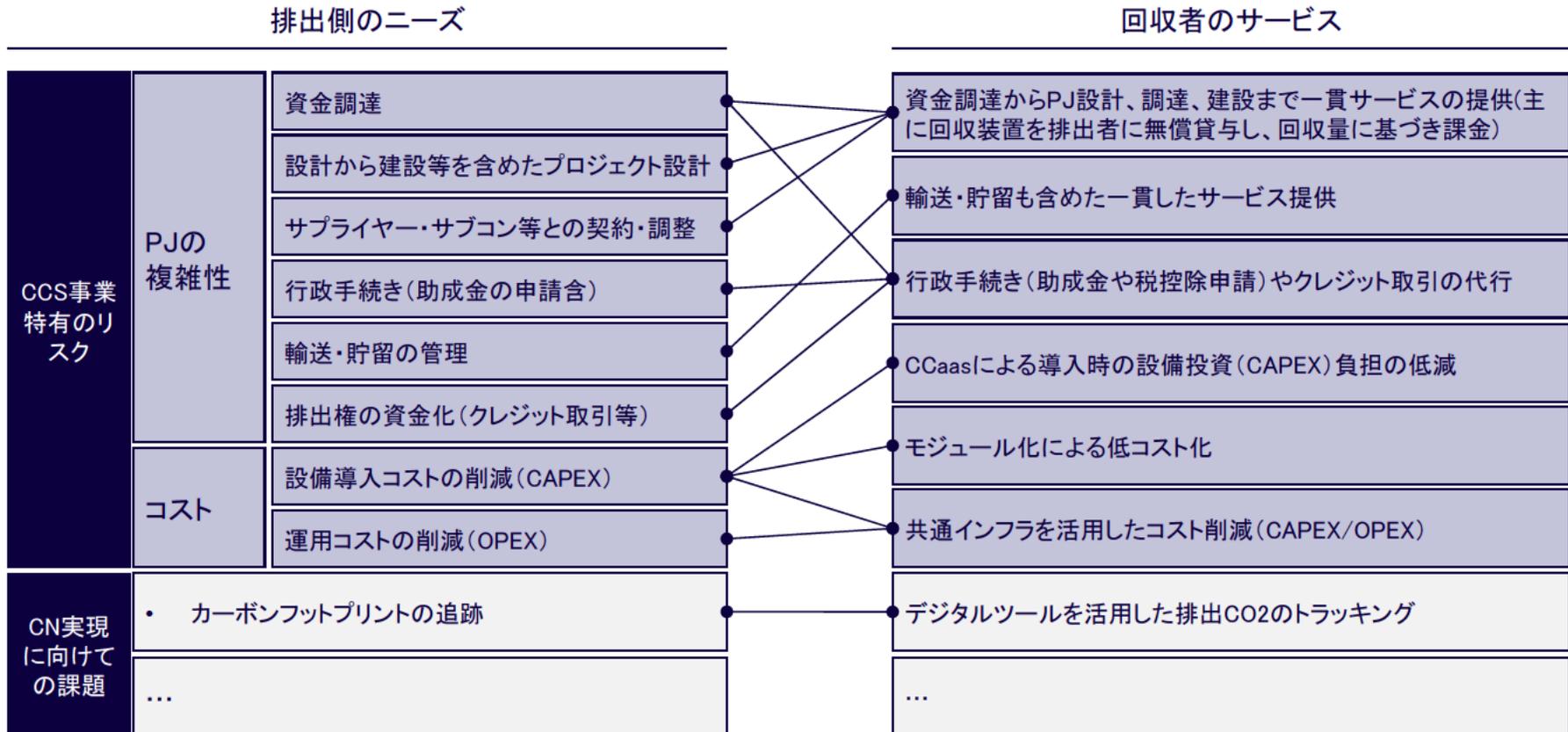
座組	概要	座組イメージ	成立要件	CCSプロジェクトへの影響
一貫通貫単独モデル	<ul style="list-style-type: none"> 排出者が自社プラントの排出CO2を回収・輸送・貯留までプロジェクトを組成・運営 	<p>単独プレイヤーが回収～貯留まで一括で運用</p>	<ul style="list-style-type: none"> 単独でインフラ構築・運用まで負担可能なプレイヤーの存在 周囲に排出源の集積がないこと※1 	<ul style="list-style-type: none"> 高額な投資負担とVC上の複数の工程を統合する複雑性によるリスク増 主要実施者の事業環境変化によるPJ停止リスク(例、Petra Nova)
一貫通貫ハブモデル	<ul style="list-style-type: none"> 主要排出者を中心に複数の排出者を束ねたハブと貯留地を繋ぐ輸送インフラを政府支援で構築・運営 	<p>輸送・貯留インフラを単独プレイヤー(JV含)が提供。複数の排出者が共有インフラを利用</p>	<ul style="list-style-type: none"> 大規模排出源を中心に、排出源の集積が存在すること 大規模な貯留地が近傍に存在すること 	<ul style="list-style-type: none"> 輸送・貯留インフラの構築・共同利用により、コストやリスクを削減(例、Northern Endurance Partnership、Northern Lights) 小～中規模排出者を含めた多様なプレイヤーの参画が可能に
分業ハブモデル	<ul style="list-style-type: none"> 輸送や貯留において専門プレイヤーが出現 回収においても合成燃料や建材等のCO2利用技術を保有したプレイヤーが参画する等、多様な業界から参画 	<p>回収～貯留の各プロセスで複数プレイヤーがインフラやプラントを構築・運用</p>	<ul style="list-style-type: none"> 上記ハブモデル成立要件に加え、クロスボーダーのCCS取引ネットワークの構築、輸送・貯留インフラのオープンアクセスの推進 炭素市場を含む事業環境向上による、事業の予見性改善 	<ul style="list-style-type: none"> 専門プレイヤーの出現※2による輸送・貯留サービスの高度化・必要コストの低減(専門プレイヤーの事例) Gasunie(CO2輸送インフラの構築)、 Carbfix(CO2貯留ソリューション提供)、 DUN-UNITY CO2(CO2輸送船の建造・運用)、 CarbonCure(CO2活用型の建材製造) CO2利用も含めた多様な選択肢とステークホルダーの出現によるCCUSプロジェクトの複雑化

※1 単独で存在するケースとしては、セメントが挙げられる。セメントは長距離の輸送が困難なため、分散的に生産拠点が存在し必ずしもハブを活用出来るとは限られないため単独モデルと成り得る

※2 CO2パイプラインの建設・敷設を行うガスディベロッパーやガス輸送会社や海運会社はCO2輸送への進出例も出てくる他、再エネ由来の水素と回収CO2による化学品原料や燃料製造、建材製造等の回収CO2の利用技術を提供する企業も出現している

出所: ADL作成

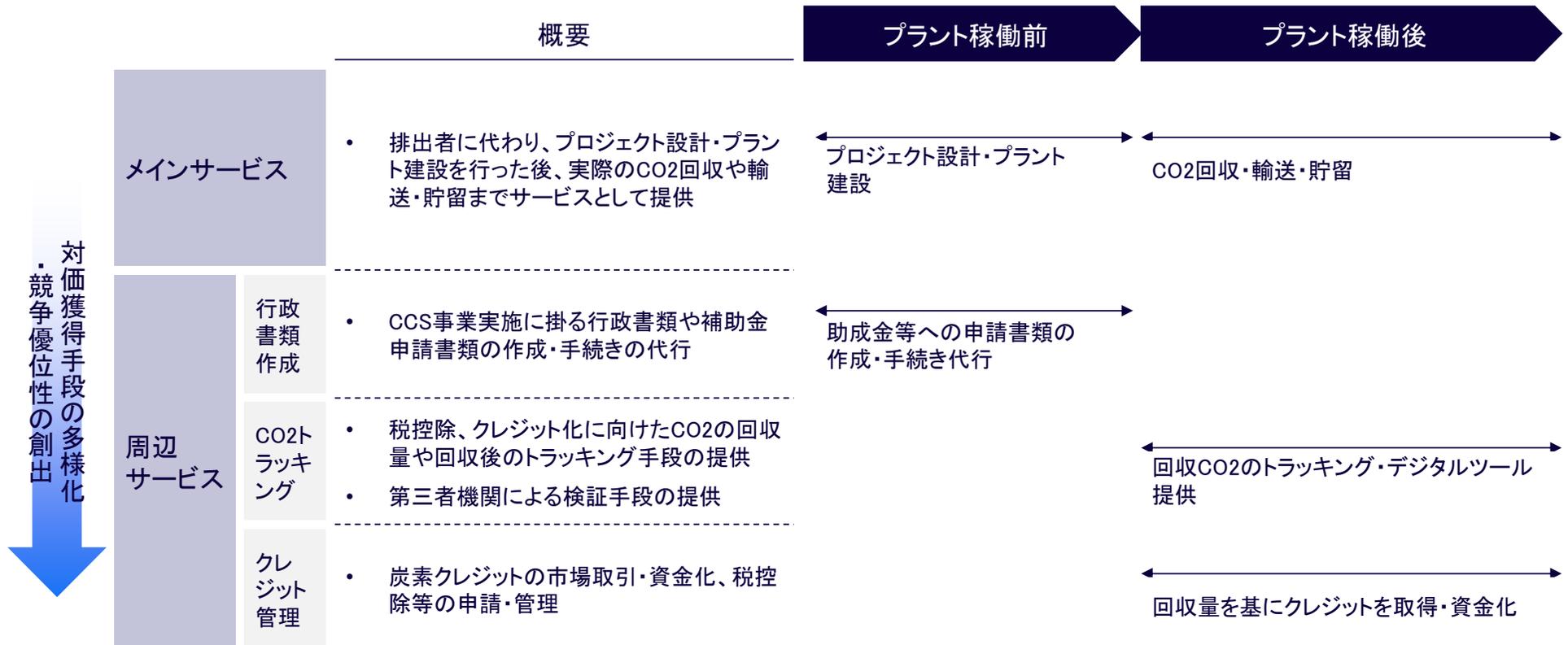
各CO2回収プレイヤーは排出者が抱えるCCS事業特有のリスクやCN実現における課題を充足するために、ワンストップソリューションやコスト削減、CO2トラッキングといった形態でサービスを提供



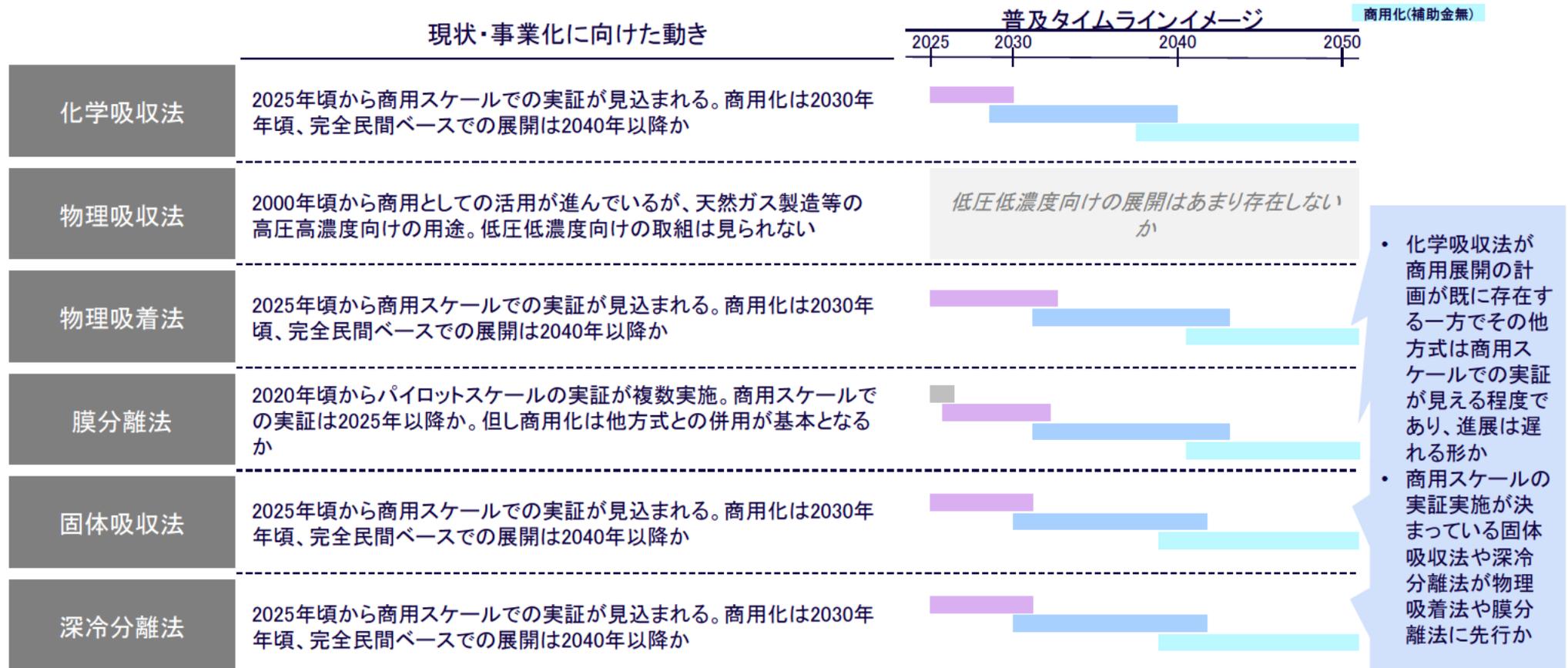
CO2回収において様々な事業が展開されているが、モノ・サービスの提供範囲と対価の受け取り方で以下の5つのビジネスモデルに分類できる

モデル種別	排出者ニーズ	提供サービス	モノ・サービスの提供範囲	事例(プレイヤー・サービス名等)
ソリューション提供型	<ul style="list-style-type: none"> 回収・輸送・貯留におけるCCS事業の複雑性回避 初期導入費の負担軽減 	<ul style="list-style-type: none"> 回収プラントの設計・建設・運用(輸送・貯留含)とVC上の全taskの代行 OPEX型課金 		 CCoas(Carbon Capture as a Service)
インフラ提供型	<ul style="list-style-type: none"> 輸送・貯留におけるCCS事業の複雑性回避 	<ul style="list-style-type: none"> 回収プラントの設計・建設、輸送・貯留手段(インフラ)の提供 CAPEX型課金+OPEX型課金 		 Northern Endurance Partnership(英国)、Longship(ノルウェー)
プラント売り型	<ul style="list-style-type: none"> プラント建設・建設におけるCCS事業の複雑性回避 	<ul style="list-style-type: none"> 周辺機器を含めた回収プラント全体の設計・調達・建設 CAPEX型課金 		
回収装置売り型	<ul style="list-style-type: none"> CO2回収装置の導入 	<ul style="list-style-type: none"> CO2回収装置の製造・提供 CAPEX型課金 		
素材提供型	(装置製造企業のニーズ) <ul style="list-style-type: none"> 高い回収効率を実現する素材の供給 	<ul style="list-style-type: none"> 吸収液・吸着剤・分離膜の提供 		 Svante

加えて、サービス提供型プレイヤーを中心に、排出者が抱えるCCS事業やCN実現上の課題を解決する周辺サービスを提供することで、競争優位性の創出や対価獲得手段の多様化を目指す



化学吸収法の商用化が先行し、2030年頃を見込む他、10年程度の政府支援により完全民間ベースへと移行する形か。固体吸収・深冷分離法が続き、物理吸着・膜分離は更に遅れるか



※ 実際には商用化されても効率化やコスト削減の取組は続けられることが想定されるが、ここでは次の段階が始まった時点で、前段階は一旦完了したとみなして整理
出所: ADL作成

化学吸収法は2010年代からパイロットスケールの実証が複数実施。商用スケールの実証は2025年頃から見込まれ、2030年頃から商用化、2040年以降に完全民間ベースでの展開が想定される

名称等	国	主要 参画者	排出源	種別	スケール	範囲	タイムライン				
							2015	2020	2030	2040	
実証	OASE@blue開発 実証@RWE火力 発電所	ドイツ	BASF, Linde	火力発 電	技術実証	パイロ ット	回収	■パイロット(7.2t/日)実証(-2017)			
	石炭火力向け大 規模実証事業	米国	BASF, Linde	火力発 電	技術実証	商用	回収	■10MWプラント運用試験(2024-2025) ■200-600MWプラントの運用試験(2025-2030) ■商用プラント複数機の稼働(2030-)			
	3D project	フランス	Axens, Arcelor Mittal	鉄鋼	技術実証	パイロ ット/ 商用	回収・ 輸送・ 貯留	■パイロットプラント運用試験(-2021) ■商用規模(1Mt/年)のプラント稼働開始(2025-) ■輸送・貯留クラスターの設計(-2035)			
社会実装	Boundary Dam CCS project	米国	Shell	火力発 電所	技術実証、 事業性検証	商用	回収	■商用プラントへのCO2回収装置の設置・運用事業(2014~)			
	NZT power(Net Zero Teesside)	英国	Aker, Shell	火力発 電所	事業性検証、 商用	商用	回収・ 輸送・ 貯留	■FEED契約に基づきプラント(2Mt/年)設計(2021-2023) ■プラント建設(2023-2026) ■運用開始(2026-)			

化学吸収法は技術としては成熟しているが、CO2分離のエネルギーコストが高いことが依然として高い課題である。既に複数の商用規模での事業が実施されているが、技術課題の解決・スケールアップには更なる技術開発が必要。完全な民間ベースでの商用化は2040年以降になるのではないかと見込まれる。

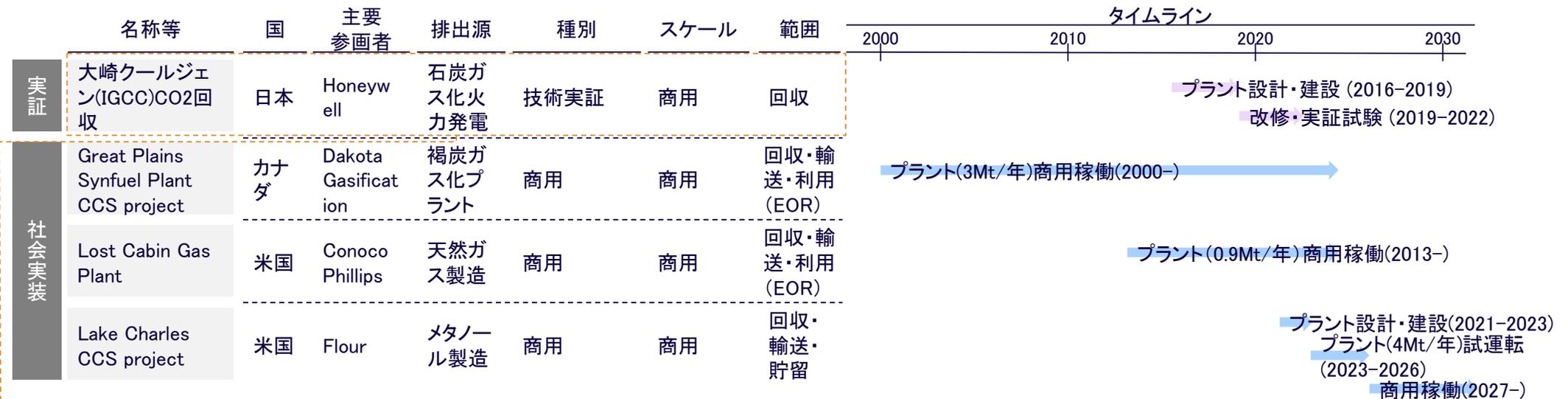


海外石油化学 事業開発担当

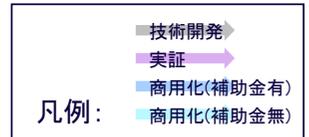


※ Boundary Dam CCS projectは世界発の商用スケールでの火力発電所におけるCCS実証。回収装置の稼働停止等による稼働率低下や代替燃料のコスト低下により、他ユニットへのCCS装置回収は行わないことを決定。年間40万トンのCO2を回収、排出CO2の半数が回収出来ずに大気中に排出されているとされる
 出所: 各種公開資料を基にADL作成

物理吸収法は2000年頃から商用として活用が進み、現在も高効率化に向けた新プロセスの開発が進む。但し、低圧低濃度向けのCO2回収については動きが見られない



大崎クールジェンでは次世代の高効率吸収液「Selexol Max」を活用した「SeparALL」プロセスの開発・実証が行われている



※ Great Plains Synfuel Plant CCS projectではLinde社のRectisolが、Lost Cabin Gas Plant及び大崎クールジェンではDow社のSelexolが吸収液として活用されている
出所: 各種公開資料を基にADL作成

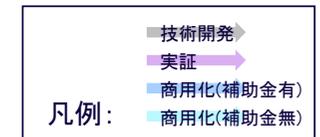
物理吸着法は2010年代からベンチ/パイロットスケールの実証が複数実施。商用スケールの実証は2020年中頃から実施され、政府支援込みの商用化は2030年以降が想定される

名称等	国	主要 参画者	排出源	種別	スケール	範囲	タイムライン				
							2015	2020	2030	2040	
開発・実証	Pre-Combustion Carbon Capture Process	米国	TDA	石炭ガス化火力発電	技術実証	パイロット	回収	2015-2018: プロトタイプ製造・パイロット設計・設置(-2018) 2019-2020: パイロット(0.1MWe)実証(2019-2020)			
	Transformational Sorbent-Based Process	米国	InnoSeptra	火力発電	技術開発、技術実証	ベンチ	回収	2019-2021: 吸着液・プロセス設計(2019-2021) 2021-2022: プラント(500Nm3/時)設計・実証(2021-2022)			
	Advanced Structured Adsorbent	米国	Svante	セメント	技術開発、技術実証	ベンチ	回収	2019-2020: 吸着剤/回収装置設計(2019-2020) 2020-2021: 実証(2020-2021)			
	Advanced CO2 capture from Hydrogen	米国	Svante	水素製造(SMR)	技術実証	商用	回収	2022-: 商用スケール建設に向けたpre-FEED(2022-)			
	LafargeHocim CO2MENT project	米国	Svante	セメント	技術実証	商用	回収	2020-2022: 商用スケール(1.5Mt/年)建設に向けたFEED(2020-2022)			

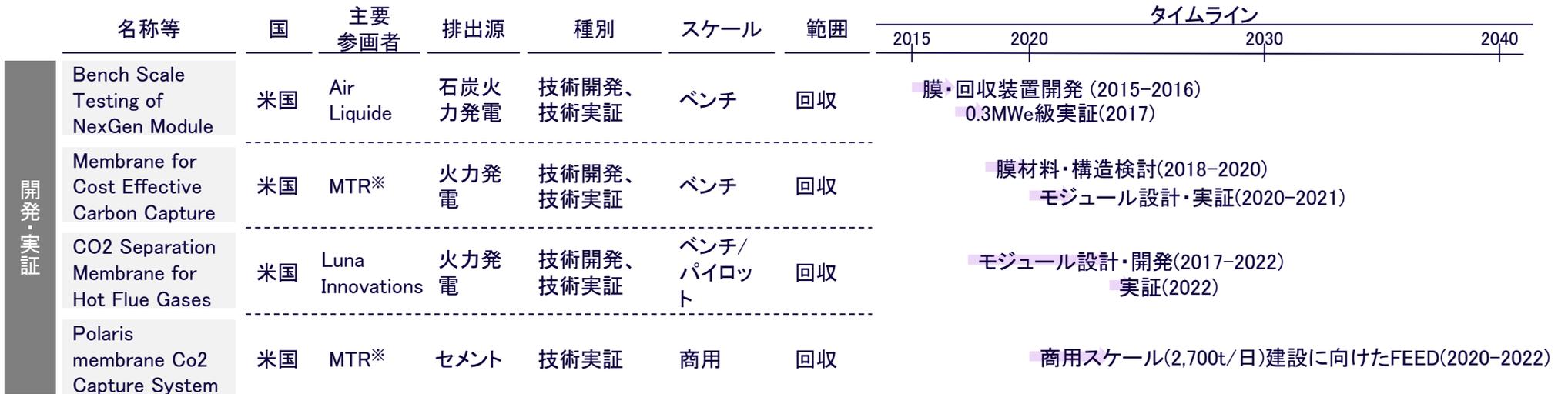
物理吸着法の政府支援有りの商用展開においては、吸着剤の大量生産手法の確立や様々な排ガス源と条件を持つ実証プラントで技術的・経済的実現可能性を検証する必要がある。加えて、規制や政策上の課題の解決が必要。楽観的に見て2030年頃から政府支援込み商用化が見込まれるか



海外石油化学 事業開発担当



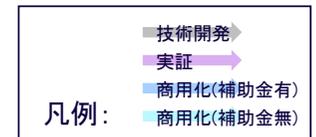
膜分離法は2015年頃からベンチスケール、2020年頃からパイロットスケールの実証が複数実施。単独での低圧低濃度源への適用は困難のため、他方式との併用による商用化が想定されるか



膜分離法は大規模化へのハードルの高さ、昇圧の必要性が技術的困難さを生み出している。低圧低濃度源においては、昇圧の必要性があるため、商用展開は殆どが他方式との併用によるものになるか。将来的なタイムラインの予測は困難



海外産業ガス 事業開発担当



※ MTR: Membrane Technology and Research Inc
出所: 各種公開資料を基にADL作成

固体吸収法は2010年頃からパイロットスケールの実証が、2025年頃から商用スケールの実証が複数実施。商用化フェーズでは10年程立上り期の政府支援により民間ベースの展開に移行か



DACでは一部商用化が進むが、排ガス向けについては遅れる形か。ロードマップについて、少なくとも**最初の10年間**は商業的に意味を成すには、補助金や政府によるインセンティブがなければ成立しない。採算の取れる値段で回収したCO2を販売出来ない限り、政府支援の枠組みが必要。



海外石油化学 事業開発担当



※ RTI: Research Triangle Institute
出所: 各種公開資料を基にADL作成

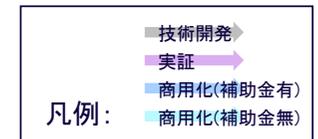
深冷分離法は水素製造向けが先行。低圧・低濃度向けはセメント等での商用スケールの実証が2025年頃から見込まれ、2030～2040年頃に商用化することが想定される

名称等	国	主要 参画者	排出源	種別	スケール	範囲	タイムライン				
							2015	2020	2030	2040	
実証	Port Jerome Cryocap Plant	フランス	Air Liquide	水素製造(SMR)	技術実証	商用	回収	■ プラント(13t/時)運用試験(2015)			
	Cryogenic Carbon Capture Development	米国	SES※1	セメント、火力発電	R&D、技術実証	商用	回収	■ プラント設計・開発(2016-2018) ■ プラント(100t/日)運用試験(2019)			
	Cryogenic Carbon Capture From Cement	米国	Chart	セメント	技術実証	小規模商用	回収	■ プラント設計・行政手続き(2022-2024) ■ プラント(30t/日)運用試験(2025)			
実社会	Mt. Simon Hub project※3	米国	Chart、Wolf※2	セメント・鉄鋼等	商用	商用	回収・輸送・貯留	■ パイプライン建設開始(2024) ■ 初期CO2受入開始(2025) ■ 深冷分離法のCO2回収開始(2025以降)			

排ガス向けには商用スケールの実証及び政府補助有りの普及が2025年から2030年頃に見込まれ、商業ベースでの普及は2030～2040年頃になるか。炭素価格メカニズムや低炭素セメントへのプレミアム価格の設定、CAPEXへの補助により、普及フェーズ(政府支援有り)に移行できる。商業ベースへの移行には、CO2回収・輸送・貯留をカバーできる炭素価格(\$120-180)になること、食品飲料向けの利用可能性が実証されることがトリガーになるか



海外産業ガス 事業開発担当



※1 SES: Sustainable Energy Solutions ※2 Wolf: Wolf Carbon Solutions ※3 Mt.Simon Hub projectでは、物理吸収法によるバイオエタノール製造工場からのCCSをPhaseIとIIで行われるが、PhaseIIIではその他の排出源から回収したCO2もパイプラインによる輸送・貯留を行う予定。ChartはWolfとPhaseIIIにおける深冷分離法を用いたCO2回収に向けて協力することを2023年に発表。出所: 各種公開資料を基にADL作成



Arthur D. Little has been at the forefront of innovation since 1886. We are an acknowledged thought leader in linking strategy, innovation and transformation in technology-intensive and converging industries. We navigate our clients through changing business ecosystems to uncover new growth opportunities. We enable our clients to build innovation capabilities and transform their organizations.

Our consultants have strong practical industry experience combined with excellent knowledge of key trends and dynamics. ADL is present in the most important business centers around the world. We are proud to serve most of the Fortune 1000 companies, in addition to other leading firms and public sector organizations.

For further information please visit www.adlittle.com or www.adl.com.

Copyright © Arthur D. Little Luxembourg S.A. 2023.
All rights reserved.

Arthur D. Little Japan – Tokyo

Contact:

Shiodome City Center 36F
1-5-2 Higashi Shimbashi, Minato-ku
105-7136 Tokyo

T: +81 3 4550-0201 (Reception)

www.adlittle.com

