

2.1.9 CO₂回収・貯留 (CCS)

(1) 研究開発領域の定義

火力発電所、製鉄所およびセメント工場などの排ガスあるいは空気中から二酸化炭素 (CO₂) を分離回収する技術 (Carbon dioxide Capture) およびそれに引き続いて行う貯留技術 (Storage) を扱う。分離回収から貯留までの一連の工程をCCSと呼ぶ。貯留については地下深部の塩水性帯水層、枯渇油・ガス田へのCO₂圧入に加え、生産性が低下した油田へのCO₂圧入に伴う石油増進回収 (EOR) のように地下資源を回収しつつCO₂を封入する技術も含める。分離回収したCO₂を利用するCCU (Carbon Capture and Utilization) は「2.2.3 CO₂利用」領域にて扱う。

(2) キーワード

燃焼前回収 (pre-combustion)、燃焼後回収 (post-combustion)、酸素燃焼・オキシフュエル (Oxy-fuel)、アミン、吸収法、吸着法、膜分離法、DAC (Direct Air Capture、大気中CO₂直接回収)、分離回収エネルギー、塩水性帯水層、石油増進回収法 (CO₂ Enhanced Oil Recovery : EOR)、マイクロバブルCO₂圧入法、光ファイバーセンシング技術

(3) 研究開発領域の概要

[本領域の意義]

国際エネルギー機関 (IEA) の試算によると、所謂2°Cシナリオの実現にはCCSが不可欠であり、2060年までの累積CO₂排出削減のうち15%程度をCCSが担うとされている¹⁾。米国、カナダ、ノルウェーなどでは既に商用規模の実用化に至っているが、当該シナリオの実現に向けては社会実装の加速が必要である。また、回収したCO₂を資源として捉え、多様な炭素化合物等として再利用する技術 (CCU) についても、世界各国でイノベーションを目指して研究開発が活発に行われている。我が国では、2019年に経済産業省が内閣府、文部科学省、環境省の協力のもと「カーボンリサイクル技術ロードマップ」を策定し、2020年には、政府の統合イノベーション戦略推進会議がパリ協定の長期戦略等に基づく「革新的環境イノベーション戦略」を決定し、2050年までの確立を目指す革新的技術 (全39テーマ) のなかに「⑫CCUS/カーボンリサイクルの基盤となる低コストなCO₂分離回収技術の確立」さらには「③⑨DAC (Direct Air Capture) 技術の追求」が挙げられた。CO₂分離回収技術は、CCSおよびCCU (CCUS) の根幹をなす共通基盤技術であり、極めて重要な技術であると位置づけられている。また、2020年10月に我が国は「2050年カーボンニュートラル」を宣言し、同年12月に「2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」を策定した²⁾。2023年の経済産業省のCCS長期ロードマップ検討会では、2050年に必要とされるCCSの目標値を年間1.2億トン～2.4億トン (現在のCO₂排出の10～20%) とすることを確認している³⁾。ネットゼロ社会においても、化石資源の利用は残るものと考えられるが、CO₂を生成させた場合でもCCSを併せて行えばカーボンニュートラルと見なせる。DACと貯留を組み合わせたDACCSやバイオマス利用後のCO₂を回収・貯留するBECCS (Bioenergy with CCS) は排出が負のネガティブエミッションと見なせ、大気中へのCO₂放散が避けられない用途でのCO₂排出量を相殺するために必要な技術となる。CO₂回収・貯留技術は、カーボンニュートラルの実現とエネルギーの安定供給、産業維持を両立する上で不可欠の技術と考えられる。

[研究開発の動向]

■ CO₂分離回収技術

- ・ 気候変動に関する政府間パネル (IPCC) がまとめたCCSに関する特別報告には、CO₂分離回収法として、化学吸収法、物理吸収法、物理吸着法、膜分離法、深冷分離法が挙げられている。
- 化学吸収法：アミン液とCO₂の化学反応を利用、加熱によりCO₂を脱離させる。

- 物理吸収法: CO₂の溶媒への溶解、圧力差または温度差でCO₂を脱離させる。
- 物理吸着法 (固体): 炭素やゼオライトなどの固体にCO₂を物理吸着させる。
- 化学吸収/吸着 (固体): 多孔質担体にアミン等を含浸させた固体の吸収材または吸着材を用いる。
- 膜分離法: 膜の両側のCO₂の分圧差により片側にCO₂を移動させる。膜としてCO₂と相互作用を持つ有機膜や無機膜 (ゼオライト、シリカ) など。
- 深冷分離法: 空気を分離して高純度ガスを製造する際に確立された技術だが、液化及び蒸留を伴うため、特に、対象ガスが低濃度の場合には多大なエネルギーを消費し、貯留を含めたCCSには不利と考えられる。
- ・ CO₂回収の負荷を下げるために、CO₂の発生源における反応プロセスでの対応も検討されている。
- 酸素燃焼・オキシフュエル法: 窒素を含まない純酸素によって燃料を燃焼し、燃焼後水を復水として取り除くと100%近いCO₂が回収できる手法である。酸素製造コストが課題である。
- ケミカルルーピング法: CO₂を金属酸化物と反応させる工程を設けCO₂を炭酸塩化し、得られた炭酸塩は別の反応器で加熱しCO₂を脱離・回収する。炭酸塩化反応の発熱エネルギーも回収して、プロセス全体のエネルギー効率を高める。
- ・ 貯留向けに、吸収法、吸着法、膜分離法によるCO₂分離回収技術の研究開発が盛んに行われてきた⁴⁾。それらのうち、実用化が進み最も成熟した技術は液体の吸収法によるものである。石炭燃焼排ガス等の比較的CO₂分圧が低いガスに対するCO₂回収 (燃焼後回収) ではMEA (エタノールアミン) 等のアミン系化学吸収液が用いられ、天然ガス精製時等の比較的CO₂分圧が高いガスに対する回収 (燃焼前回収) ではMDEA (メチルジエタノールアミン) 等のアミン系化学吸収液あるいはメタノール等の物理吸収液が用いられている。また近年はこれらアミン系吸収剤を固体表面に固定した手法 (川崎重工業株式会社によるKCC法など) も提案・実証されている。
- ・ Global CCS Instituteのデータベースによると、2019年時点で19の大規模CCS施設が稼働していた (年間CO₂回収量40万t以上を大規模と定義。ただし、石炭火力発電所の場合は年間80万t以上)。それら19件のうち、液体の吸収法によるCO₂回収は16件を占め、そのうちの9件がアミン吸収液を用いている。石炭火力発電所での燃焼後回収で世界最大の規模 (年間約150万t-CO₂) を誇るPetra Nova CCUSプロジェクトでは、日本の回収技術 (アミン吸収液KS-1を用いた関西電力株式会社と三菱重工業株式会社の共同開発技術) が採用されている。
- ・ 比較的高濃度の排ガス中CO₂を対象に実証レベルに達した現行吸収液技術に置き換わるものとして、非水溶媒や相分離液などの新規吸収液、革新的な固体吸着材 (あるいは固体吸収材) や分離膜を用いた分離回収プロセスの研究開発が、分離回収エネルギーおよびコストの低減、低濃度CO₂への対応を目指して行われている。分離回収材料は、CO₂捕捉のためにはCO₂との相互作用が強いことが好ましいが、次にCO₂を放出させるときには小さい方が好ましく、そのバランスが重要となる。
- ・ DAC技術については、カナダのCarbon Engineering社 (米Occidental Petroleum社傘下)、スイスのClimeworks社、米国のGlobal Thermostat社等による開発が目玉され、多額の資金が提供される状況である。一方で、アジア地域では具体的な研究はほとんど行われていないが、日本ではムーンショット型研究開発事業や未踏チャレンジ2050などで研究開発が加速しつつある。DACにおいては、CO₂濃度が希薄な大気を対象であるため (約400ppm)、大量の大気を送り込み処理する必要があり、そこに投じるエネルギーの削減が課題となる。
- ・ CO₂分離回収技術の実用化のためには、実ガスに対する耐性の検証が非常に重要である。米国エネルギー省 (DOE) のCO₂分離回収技術のプロジェクトの多くは、プロジェクト後半にNational Carbon Capture Center (NCCC) 等の実ガス試験サイトでの実ガス試験を計画している。CO₂分離回収技術の研究開発を推進する世界各地の実ガス試験施設のグローバル連合として、International Test Center Network (ITCN)⁵⁾ が2012年に設立され、日本からは地球環境産業技術研究機構 (RITE) が加入している。

2.1

電力のゼロエミ化・安定化

■ CO₂貯留技術

- ・ 地中貯留は、地下にあった炭化水素化合物を人類が利用して元に戻すという考え方に基づくものであり、貯留方式として、枯渇石油・ガス田への貯留、CO₂-EOR⁶⁾、EGR (Enhanced Gas Recovery)⁶⁾、ECBM (Enhanced Coal Bed Methane)⁶⁾、塩水性帯水層貯留 (狭義のCCS)⁷⁾ などがある。CO₂-EORは石油増進回収を目的として、生産性が低下した油層にCO₂を圧入するもので、経済的に有利な方法である。ECBMは石炭層に吸着している炭層ガス (主にメタンガス) をCO₂によって置換させ、CO₂貯留とメタンの回収を図る技術である。塩水性帯水層貯留はCO₂貯留の安定性が最も高い技術と考えられている。
- ・ CO₂-EORは米国では1970年代からエネルギー国家戦略のもと政策的に行われている⁸⁾。塩水性帯水層貯留については、1990年後半から北海やアルジェリアのガス田において、天然ガスに随伴するCO₂を地下深部の塩水性帯水層圧入する事業が実施されてきた。このケースではCO₂圧入対象層はガス田開発過程で確認されていたため、比較的容易に実現に移行できている。
- ・ 我が国においては、2000年からRITEが中心となって、塩水性帯水層へのCO₂貯留技術開発に取り組んでいる^{9), 10)}。地層水 (化石海水) を含んだ隙間の多い砂岩層からなる帯水層の上部に気体や液体を透さないキャップロックと呼ばれる固い層 (遮蔽層) が存在することにより、帯水層に圧入したCO₂を長期に安定して閉じ込めるものである。帯水層貯留技術は、基本的に天然ガスの地下貯留やCO₂-EOR等で蓄積された地中へのガス圧入・貯留技術を応用できる。CO₂の安定貯留の点で、最も即効的かつ有効であると言われており、大規模実証試験プロジェクトが日本では2016年から苫小牧沖合で実施され (海域地中貯留)、現在も地下でのCO₂挙動モニタリングが行われている。

■ 論文・特許動向 (分離回収/貯留共通)

本研究開発領域の論文および特許動向を調査した結果、以下のポイントが明らかになった。なお、分析結果の詳細は「研究開発の俯瞰報告書 論文・特許データからみる研究開発動向 (2024年)」の「3.1. E1.9 CO₂回収・貯留 (CCS)」にて報告している。

- ・ 各国の論文数は概ねゆるやかに増加しているが、中では中国や英国の伸び率が高い。2021年のシェアでは中国が首位となっており、CCSの適地のポテンシャルが高いと考えられる米国は2位となっている。
- ・ フィールド試験が重要となる分野であり論文の企業共著率は総じて他分野よりも高い。中でも日本が最も高い。
- ・ 各国間の共著率では中国、米国、英国との共著が多く、日本との共著は相対的に低調である。
- ・ 特許ファミリー件数シェアは中国の伸びが顕著で、2022年は中国が首位、日本は米国に次いで3位となっている。Patent Asset Indexのシェアは米国、中国、日本の順になっており、上位オーナーに日本の企業が複数社挙がっている。日本はCO₂貯留のフィールドには恵まれていないものの、CO₂分離・回収技術で存在感を見せているものと考えられる。

(4) 注目動向

[新展開・技術トピックス]

■ CO₂分離回収技術

- ・ それまでは難易度が高いとされていた石炭火力発電所での商用スケールCCSが実証に至っている。カナダではBoundary Dam発電所の燃焼後回収設備 (Cansolvプロセス¹⁰⁾、約2,500 t-CO₂/day、2014年～)、米国ではW.A. Parish発電所の燃焼後回収設備 (KM CDRプロセス¹¹⁾、4,776 t-CO₂/day、2016年～) が稼働し、ここ数年の期間にデータを蓄積している。CO₂回収にはアミンによる化学吸収法が適用されている。
- ・ 国内では、COURSE50プロジェクトでRITEと日本製鉄株式会社が共同で開発した新規アミン吸収液

(RN液)を採用した省エネ型CO₂回収設備(ESCAP)の商業機が、室蘭製鉄所(2014年～)および新居浜西火力発電所(2018年～)に導入されCCUを目的に実用化されている(各約120～143 t-CO₂/day)¹²⁾。また関西電力舞鶴火力発電所において、川崎重工業株式会社とRITEが開発したKCC法による固体を用いた吸収が、40 t-CO₂/dayの規模で実証が進められている¹³⁾。

- ・ 上述のようにアミン液を用いた吸収法は大規模CCUSで実証されており、現在は、新規吸収液(非水溶媒や相分離液)、固体吸収材あるいは吸着剤、分離膜を用いたCO₂分離回収の技術成熟度レベル向上を目指した研究開発が重要となっている。RITEは燃焼前回収のためのCO₂分離膜モジュール(分子ゲート膜)を開発し、膜エレメントの実ガス試験を実施している¹⁴⁾。
- ・ 米国では、2018年に成立した45Q法案によるCCUSに対する政府補助(Tax Credit)がインフレ削減法(2022年8月)により増額され、CO₂回収・貯留は最大85\$/t-CO₂の税額控除に増額された。DACに対するインセンティブも加えられた。2024年までに施設建設を開始したCO₂回収設備に対し、操業開始から12年間を対象期間とする。またインフラ投資雇用法によりDACハブの構想に35億ドルが投じられる(2022年12月)。

■ CO₂貯留技術

・ マイクロバブルCO₂圧入技術

地下貯留技術として、CO₂-EORおよび帯水層貯留は大規模なCO₂削減対策として注目されており、米国が最も多く120箇所以上の実績がある。通常圧入の方法として、CO₂と水を交互に圧入して炭酸水として貯留するガス水相互圧入法(WAG: Water Alternating Gas)が用いられるが、比較的厚い油層や不均質性の高い貯留層に対して効果が上がりにくいという課題がある。それに対しRITE、東京ガス株式会社、京都大学はCO₂をマイクロバブル(微細気泡)化して圧入することで、従来ではアクセスできない狭い孔隙にも浸透でき、原油の回収率の向上が可能な技術を開発している¹⁶⁾。この技術は秋田県の申川油田での実証試験を通じて有効性が検証されており、生産性の低い油田からの原油回収率の向上や油田の寿命の延長が可能だけでなく、約80%のCO₂が地中に留まることを確認しており、CO₂の効率的な貯留の観点でも大きく貢献できると期待される¹⁷⁾。

・ 光ファイバー方式CO₂モニタリング

地中に圧入されたCO₂が安全に貯留されているかを把握するために、石油や天然ガス開発で培ってきた地下探査技術が応用されている。CO₂モニタリングは法令順守(監督機関への報告)や社会的受容性(住民とのリスクコミュニケーション)の観点も重要である。一方、操業者にとっては、安全性を確保しながらも、モニタリングコストを下げていく必要がある。操業期間中だけでなく、圧入終了後も一定期間内、継続してモニタリングが必要である。RITEを中心に二酸化炭素地中貯留技術研究組合が取り組んでいる光ファイバー方式のCO₂モニタリング技術は、実用化に向けて国内外サイトで実証試験が行われており、特に米国North DakotaのCO₂貯留サイトにおいては米国環境保護庁(EPA)によって承認されている¹⁸⁾。このCO₂モニタリング技術は、1本の光ファイバーケーブルに組み合わせて、温度分布測定(DTS: Distributed Temperature Sensing)、ひずみ測定(DSS: Distributed Strain Sensing)および音響測定(DAS: Distributed Acoustic Sensing)を同時に行うことが可能であり、低コストモニタリング技術として期待されている¹⁹⁾⁻²¹⁾。

[注目すべき国内外のプロジェクト]

■ CO₂分離回収技術

- ・ 環境省「環境配慮型CCS実証事業」²²⁾(2021年度～)

東芝エネルギーシステムズ株式会社が三川火力発電所に設置したアミン吸収液(TS液)による回収

施設は2020年10月より本格試験を開始し、630 t-CO₂/dayの回収性能を実証している。本回収設備は、バイオマス発電所から排出されたCO₂を分離回収する世界初となる実用規模の設備であり、船舶による輸送を経て、沖合の海底下に貯留することを目指している。計画通りCO₂貯留が行われれば、BECCS(バイオマスエネルギーCCS)システムとして商用規模のネガティブエミッションを実現することになる。

- ・ NEDO (GI基金)「CO₂分離回収等技術開発プロジェクト」²³⁾ (2022年度～)

高压でCO₂濃度が高い排ガスに比べ、CO₂分離回収に多くのエネルギーを要する低压・低濃度の排ガス(CO₂濃度10%以下)を対象として、2030年に2000円台/t-CO₂以下の分離回収コストを実現するための技術開発に取り組む。開発課題として、①天然ガス火力発電排ガスからの大規模CO₂分離回収、②工場排ガス等からの中小規模CO₂分離回収、③CO₂分離素材の標準評価共通基盤の確立、の3つが挙げられている。

- ・ NEDO「先進的二酸化炭素固体吸収材の石炭燃焼排ガス適用性研究」²⁴⁾ (2020～2024年度)

CO₂を低コストに分離回収することができる固体吸収材の開発。2018年から石炭火力発電所向けに固体吸収法の実用化に向けた研究開発に取り組んでおり、ベンチスケール試験(数t-CO₂/day)では、RITEが開発した固体吸収材を用いて、CO₂分離回収エネルギー目標1.5 GJ/t-CO₂の達成と設備大型化への目途が得られている。2020年度開始の事業では、舞鶴発電所に川崎重工業社が設計製作するパイロットスケール試験設備(40 t-CO₂/day)を設置し、長期連続運転によるCO₂分離回収試験を行う。

- ・ NEDO「二酸化炭素分離膜システム実用化研究開発」²⁵⁾ (2021～2023年度)

「高温・不純物耐久性CO₂分離膜及び分離回収技術の研究開発」(東レ株式会社)、「革新的CO₂分離膜モジュールによる効率的CO₂分離回収プロセスの研究開発」(九州大学、東京工業大学、東ソー株式会社)、「高性能CO₂分離膜モジュールを用いたCO₂/H₂膜分離システムの研究開発」(次世代型膜モジュール技術研究組合)が実施されている。

- ・ 内閣府 ムーンショット目標4「地球環境再生に向けた持続可能な資源循環を実現」²⁶⁾ (2020年度～)

2050年のカーボンニュートラルに向けて、目標4ではCO₂分離回収や利用の技術開発が取り上げられている。DACシステム、オフィスビルでのCO₂回収、LNG冷熱利用、鉱物への吸収(岩石風化)、生物利用などの将来を見据えた研究開発プロジェクトに取り組む。

- ・ JOGMECのプロジェクトで、日本ガイシ株式会社と日揮株式会社が開発したモノリス型DDRゼオライト膜を用いたCO₂分離プロセスを用いて、米国テキサス州でCO₂-EORでの実証試験を実施中である。小型膜エレメントの試験に続いて、商業用大型膜エレメントを用いたフィールド実証試験を行っている²⁷⁾。

- ・ 米国DOEのプロジェクト中で、米MTR社が実機サイズの高分子膜モジュールおよび膜分離システムを開発中である。燃焼後回収用の10 t-CO₂/dayの膜モジュール・システムの実ガス試験をノルウェーTCM (Technology Centre Mongstad) の設備で実施し、将来はWyoming ITC (Integrated Test Center) にて150 t-CO₂/dayの実ガス試験を計画するなど実証フェーズに向けた研究開発が進んでおり、今度の動向が注目される²⁸⁾。

- ・ ノルウェーTCMは、アミン系吸収液を中心に化学吸収法の大規模実証試験を実施してきたが、運転開始から10年が経ち、新規技術の実証試験も対象とすべく設備の拡充が実施されている。米国DOEプロジェクトと連携しており、上述のMTR社の膜分離システムのほかに、TDA Research社の膜-固体ハイブリッドシステムの開発に関わっている。

■ CO₂貯留技術

- ・ 2017年にはテキサス州のW.A. Parish 石炭火力発電設備において、日本のJBICおよびJX石油開発が出資したPetra Novaプロジェクト²⁹⁾が開始された。米国では税控除措置(45Q)やインフレ抑制法(IRA)を契機にCO₂地中貯留事業が続々と計画されているほか、CarbonSAFE (Carbon Storage Assurance Facility Enterprise) プロジェクトの圧入量は5,000万t以上となっている。税控除措置は

カナダでも導入され、アルバータ州の大規模CO₂地中貯留事業を後押ししている。

- ・ 中国では東北部の吉林油田でのCO₂-EORに続いて、北西部の延長油田でも2017年3月に統合CCS実証施設の建設が開始された。さらに、中国にはさまざまな計画段階にある大規模施設が7つある。韓国とオーストラリアはそれぞれ2施設を計画中である。
- ・ 経済産業省が日本CCS調査株式会社に委託した苫小牧一貫実証事業では、2016年から2019年11月までの間に石油精製用水素製造プラントから回収された累積30万t-CO₂が海底下貯留層へ圧入されたことを報告している³⁰⁾。
- ・ アジア全域での二酸化炭素回収・利用・貯留（CCUS）活用に向けた国際的な産学官プラットフォーム「アジアCCUSネットワーク」が立ち上がった（2021年6月）。13の加盟国から構成される（ASEAN10カ国、豪州、米国及び日本）。第2回のフォーラムでは、技術で先行する米国、豪州、日本の協力を含め、2030年にアジアでのCCUSネットワークを構築すること、そのために2025年にASEANでのCCSパイロットプロジェクトを創出することを発表³¹⁾。
- ・ 金属鉱物資源機構（JOGMEC）は、「先進的CCS事業」として次の7つの案件を選定した（2023年6月）：1）苫小牧地域、2）日本海側東北地方、3）東新潟地域、4）首都圏、5）九州北部沖～西部沖、6）マレー半島東海岸沖（輸送・貯留）、7）大洋州（輸送・貯留）。2030年までにCO₂の年間貯留量約1,300万トンの確保を目指す³²⁾。

（5）科学技術的課題

■ CO₂分離回収技術

- ・ アミンを用いたCO₂を分離回収はその環境影響評価の重要性が指摘されており、特に、欧米の実証事業では多くのケーススタディが実ガスを用いて行われている。アミン自身を環境に漏洩させないための対策は技術的に可能である一方、仮に出た場合の影響について、大気化学、生体毒性などの観点での学術的理解を深化させていくことが求められる。
- ・ 分離膜技術は、供給側と透過側の圧力勾配によってCO₂を透過させる。燃焼後回収は低圧のガスであり、十分な圧力差をつけるために供給側の圧縮あるいは透過側の減圧のコストがかかるため、コスト的に他の分離法よりも有利になるためには、高CO₂透過性膜の開発および膜分離システム上の工夫が必要であり、そのような観点での研究開発が進められている。燃焼前回収の場合、圧力差があるため圧縮ポンプや真空ポンプの動力が不要となり、分離膜はコスト的に有利と考えられる³³⁾。ただし、高温・高圧条件での耐久性の高い分離膜が必要となる。分離膜特有の課題として、吸収法等に比べ純度を上げるのが難しく、回収率を上げると純度低下やコストが大きくなる等の問題が生じる。これらの技術課題を解決するため、吸収法、液化、吸着剤等とのハイブリッド化の検討も行われている。
- ・ DACの研究開発はここ数年で急速に加速し、現在世界中で19のDACプラントが稼働している。そのうちのいくつかはLCAの結果、既にネガティブエミッション技術として成立していることが報告されており³⁴⁾、数年前まで存在していた本技術の有効性に関する疑念は払拭されつつある。しかしながら依然として、排熱や再生可能エネルギーが利用できる場所に限定されることやCO₂回収コストが高い課題があり、各企業は装置や材料の改良を続けながら大規模実証を行っている状況にある。
- ・ 鉄鋼やセメント産業など、排出量の多い産業部門でのCO₂削減技術の開発が重要になると考えられる。
- ・ 輸送分野の移動体から発生するCO₂の回収技術も課題である。国交省の補助事業「海洋資源開発関連技術高度化研究開発事業“CC-Ocean”」では、石炭運搬船にCO₂小型デモプラントを搭載し実証試験が行われている³⁵⁾。トラックへのCO₂分離回収技術の積載を検討した報告もある³⁶⁾。
- ・ CCUでは利用目的に応じて回収CO₂が満たすべき要件が異なる。そのためCO₂分離回収技術に求められる多様性が増加している。

■ CO₂貯留技術

- ・我が国の石油・ガスの地上設備における環境対策技術は世界トップレベルの技術力を保持しており、今後も継続的な研究開発により、これら技術力の向上が期待される³⁷⁾。しかし、国内の油ガス埋蔵量が少なく、EORや天然ガス地下貯蔵の事例は限られる。また地下構造も複雑であり、CO₂圧入対象の貯留層条件（孔隙率、浸透率）も海外に比べて劣ることから、塩水帯水層を中心とした我が国の地質条件に適した技術開発が肝要である。
- ・秋田県申川油田の現場試験では、マイクロバブルCO₂圧入技術が従来法に比べて、貯留効率を約17%向上させたほか、圧入性も4倍ほど高くなったことが確認できたが、本格的な事業展開には大規模実証試験が必要である。マイクロバブルCO₂は微細気泡であり、地層水との密度差に起因する浮力が小さく、高い浸透性の貯留層では掃攻効率（sweep efficiency）も高いため、日本独自のCCS技術として海外移転できる。CO₂-EORにも有効であり、マイクロバブルCO₂圧入技術はすでに海外の石油開発会社にライセンス供与の実績はあるが、今後さらなる海外への技術展開が待たれる。
- ・光ファイバー測定技術のうち、分布式ひずみ測定は日本が世界のトップランナーであり、特許も複数件取得されている。ひずみ測定（DSS）は貯留層を覆う遮蔽層の安全性やCO₂圧入サイト周辺断層の力学的安定性及び健全性の監視に適している。分布式温度測定（DTS）と組み合わせ圧入井背面のケーシング腐食やセメント劣化によるCO₂漏洩検知が可能であり、さらに同一光ファイバーを利用した音響測定（DAS）により地下のCO₂分布状態を調べることができる。光ファイバーは熔融石英から作られており、腐食に強く半永久的に使用できることから、CO₂モニタリングコスト削減が期待できる。国内CCS事業への実用化に向けて、検証、改良を継続していく必要がある。
- ・地質条件に恵まれていない我が国では、1本の坑井からのCO₂圧入量が海外に比べて少なく、排出源から回収されたCO₂全量を圧入するには、複数の圧入井を掘削する必要がある。RITEを中心に二酸化炭素地中貯留技術研究組合は、光ファイバー測定技術を取り入れて、国内サイトで複数坑井最適配置に係る技術開発を進めている。
- ・我が国では海外から化石燃料を輸入しており、CO₂排出源が沿岸域とくに太平洋側に分布している。一方、貯留適地は日本海側に多いため、CO₂輸送手段はパイプラインよりも船舶になると考えられている。しかし、輸送過程のCO₂液化等も含めてコストが非常に高いと指摘されており、さらには圧入サイトによっては港湾施設を新たに整備しなければならない。国内CCS事業の実用化には、船舶やパイプラインによる合理的な輸送システムの構築と、排出源と貯留適地のマッチングが課題となる。

(6) その他の課題

■ CO₂分離回収技術

- ・従来のアミン吸収液に替わる新規材料として、新規合成アミン、イオン液体等を含ませた各種多孔質材料、高分子ポリマー、金属有機構造体（MOF）、また均一状態からCO₂吸収に伴い固体として分離する系³⁸⁾など、多様なCO₂分離回収材が多く提案され、ラボレベルでは高い性能が報告されている。それらのシーズがCCUS技術として実用化が見込めるかの迅速な評価は研究開発を加速するために重要と考えられる。そのためには、スケーラビリティや分離回収コストの評価のほか、実ガス耐久性の評価、さらにはLCAを始めとする各種の評価手法に関しての国内あるいは世界的な共通基盤の整備が求められる。
- ・大学やベンチャー企業がシーズ技術を育てることができる環境の整備が課題として挙げられる。上述の課題のうち、ラボレベルの技術開発の障壁の一つが実ガス試験である。これまで海外の米国のNCCCやノルウェーのTCMなどの大規模な実ガス試験サイトに依存していたが、NEDOグリーンイノベーション事業の「CO₂分離素材の標準評価共通基盤の確立」（産総研、RITE、2022年度～）²³⁾において、都市ガスボイラーの排ガスをを用いた実ガス試験センターをRITEに設置することとなった。この設備の活用により日本のCO₂分離回収の研究開発の加速が期待される。

■ CO₂貯留技術

- ・海外では大規模地中貯留事業が数多く実施されているが、その多くは油ガス田開発などで豊富な地下情報によるものであり、貯留適地開発のリスクが少ない。貯留規模の拡大のためには、油ガス開発と同じく地下情報の不確実性の低減や事業コストの削減に向けた不断の調査が必要である。
- ・CCSが真に気候変動対策技術として実効的なものとなるための課題は、世界的にも①法規制枠組みの整備、②資金調達の仕組みの整備、③社会的合意の形成、の3点であると認識されており、科学技術面のみならず社会科学的な取り組みが重要である。

(7) 国際比較

■ CO₂分離回収技術

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	◎	→	●JST 未来社会創造事業「地球規模課題である低炭素社会の実現」領域で、2050年の温室効果ガスの大幅削減に向け、CO₂分離回収技術の開発が行われている。 ●CO₂分離回収技術分野の特許出願数は米国や欧州と同等であり、技術優位性を維持していると言える³⁹⁾。 ●「ムーンショット型研究開発事業」では目標の一つに「2050年までに、地球環境再生に向けた持続可能な資源循環を実現」を掲げ、DAC技術開発等を実施²⁶⁾。 ●NEDO グリーンイノベーション事業「CO₂分離素材の標準評価共通基盤の確立」(産総研、RITE) が2022年度に開始²³⁾。CO₂分離素材について国内企業による新規技術開発の促進が期待される。
	応用研究・開発	◎	→	●化学吸収法による燃焼後回収の分野で、三菱重工業株式会社、東芝株式会社、株式会社 IHI などの世界的トッププレーヤーを誇る。 ●RITEと日本製鉄株式会社はCOURSE50 プロジェクトで世界トップレベルの化学吸収液を開発しており、CCU 分野では実用化されている。 ●RITEは燃焼後回収用途に革新的固体吸収材を開発した。当該固体吸収材を川崎重工業株式会社の移動層回収システムに適用し、2022年度後半から舞鶴発電所で40 t/dの規模の実ガス試験を開始する予定である¹³⁾。 ●次世代型膜モジュール技術研究組合は、燃焼前回収用途に新規CO₂選択性分離膜（分子ゲート膜）モジュールの研究開発を実施しており、石炭ガス化ガスの実ガス試験を実施した¹⁴⁾。2021年度からは、膜分離システムの実用化研究開発（3件）が実施中である²⁵⁾。 ●日本ガイシ株式会社と日揮ホールディングス株式会社が開発したモノリス型DDRゼオライト膜によるCO₂分離プロセスを用いて、米国テキサス中でCO₂-EORでの実証試験を日揮ホールディングス株式会社とJOGMECが共同実施中である²⁷⁾。 ●NEDO グリーンイノベーション事業「CO₂分離素材の標準評価共通基盤の確立」(産総研、RITE) により、RITEに国内初の実ガス試験センター（都市ガス燃焼排ガス、100kg/dayレベル）を設置予定（2024年稼働予定）²³⁾

米国	基礎研究	◎	→	●ノースダコタ大学、テキサス大学、ケンタッキー大学、イリノイ大学、カーネギーメロン大学、リジャイナ大学（カナダ）など、CO₂分離回収技術研究を牽引する歴史ある大学、研究機関が多数存在する。 ●現在、DOE傘下のエネルギー技術研究所（NETL）ではCO₂の分離回収に関して、燃焼後回収で91件、燃焼前回収で13件のプロジェクトが採択されている⁴⁰⁾。 ●Chevron社はMOF系の吸着剤を用いて同社の保有するカーンリバー油田で、天然ガス火力および石炭ガス火力発電の燃焼排ガスから25 t/d規模のCO₂を回収するためのテストプラント装置の建設を完了し、今後実証試験を行う予定である⁴¹⁾。 ●アリゾナ州大学では人工樹木によるDACのプロトタイプが稼働し始めた⁴²⁾。
	応用研究・開発	◎	→	●NCCCでは、開発技術の実ガス試験が可能である。日本を含む海外の技術の試験も積極的に受け入れ、技術と情報を集積している。また、2020年からは石炭燃焼排ガスに加え、天然ガス燃焼排ガスの実証試験を開始するとともに、DAC、Utilizationの実証試験も開始している⁴¹⁾。 ●国立のDACセンターをNETL内に設立することが発表された（2024年5月稼働予定）⁴¹⁾。 ●分離膜の実用化に向けてはMTR社がリードしている。その他は、新規膜のラボ、ベンチスケールの研究開発が多い⁴¹⁾。 ●Global Thermostat社は、チリのマガジャネス地域で行われるHaru Oniプロジェクトで、大気中のCO₂から2023年に最大13万リットル、2027年には最大5.5億リットルのe-fuel（再生エネルギー由来の合成燃料）を製造することを計画している⁴³⁾。 ●Occidental社と関連会社の1PointFive社、Carbon Engineering社はテキサスのパーミアン盆地で世界最大のDACプラントの建設を開始した。このプラントは100万t/yのCO₂を回収することができ、2035年には70の施設を展開すると発表されている⁴⁴⁾。 ●インフラ投資雇用法を通じ、DACハブへの助成が行われている。上述のOccidental社のグループも助成の対象となっている。
欧州	基礎研究	○	→	【EU】 ●シェフィールド大学（英国）、エジンバラ大学（英国）、ICL（英国）、NTNU（ノルウェー）、SINTEF（ノルウェー）、ECN（オランダ）など、CO₂分離回収技術研究を牽引する歴史ある大学、研究機関が多数存在する。 【フィンランド】 ●DACについては、VTT Technical Research Centre of FinlandはNEO CARBON FOODプロジェクトにおいて、水素酸化細菌、再生可能な電気、水、空気、栄養素から食用の微生物タンパク質を生産することに成功している。
	応用研究・開発	◎	→	【ノルウェー】 ●石油エネルギー省傘下GassnovaがフルスケールCCSプロジェクトを推進。回収ではごみ焼却施設やセメント工場でアミン吸収法による試験を行う。 【EU】 ●DACには非常に精力的に取り組んでおり、政府や大手企業から資金援助を受けたベンチャー企業によって実証規模の試験が多数行われている。 【スイス】 ●Climeworks社は現在16基のDACのパイロット/商用プラントをヨーロッパ各地で稼働させており、中でもアイスランドのHellisheidei地熱発電所では4,000 t/yのCO₂を連続的に地中に貯留している。これは現在稼働中のDAC装置では最大規模である⁴⁵⁾。 【英国】 ●Carbon Clean Limitedは、太平洋セメント（株）がNEDO事業で実施するセメントキルン排ガスからのCO₂分離回収実証試験（2021～）に、高効率・低コスト型化学吸収法技術を提供する⁴⁶⁾。

2.1

電力のゼロエミ化・安定化

中国	基礎研究	○	↗	●当該分野の学術論文発表が増加し、数では米国や日本を超えている。
	応用研究・開発	○	↗	●化学工場や発電所での回収実証プロジェクトが実績、計画ともに増加。 ●中国と英国のCCUS分野での協力に関する覚書に基づき設立された英国・中国（広東省）CCUSセンターが海豊の石炭火力発電所にCO ₂ 回収試験設備を建設し、2019年より稼働。
韓国	基礎研究	○	→	●一定水準の学術成果を発表している。
	応用研究・開発	△	↘	●KEPCO/KIERのプロジェクトで、2013年に炭酸カリウム担持固体吸収材を用いた燃焼後排ガスを対象とした大規模試験回収装置（200 t-CO ₂ /day）を建設するなど活発であったが、その後動きは鈍化。
その他の国・地域	応用研究・開発	○	→	【カナダ】 ●International CCS Knowledge Centre（2016年にBHP社とSaskPower社により設立された非営利組織）は、大規模CCSプロジェクト実施と、Boundary Dam 3 CCS施設およびShandスタディとして知られる包括的な次世代CCS研究の両方から得た基礎知識と最適化のノウハウを蓄積している。 【豪州】 ●CO ₂ CRCは世界最大規模のCCSの研究組織である。豪州政府のプログラムで、CCSを研究および実証することを目的に10年以上前に設立された。CO ₂ CRCはオトウェイで豪州初のCO ₂ 地層貯留実証を行ってきたが、2016年からは同地で回収技術の試験も行っている。

■ CO₂貯留技術

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	◎	↗	●CO ₂ -EOR 油層技術に関しては、JOGMECが2000年以降油層シミュレーションやラボ実験等の基礎的研究に関して十分な知識を把握し、海外産油国（UAE/ベトナム等）とも共同研究が進められている。 ●CCSに関してはRITEを中心に二酸化炭素地中貯留技術研究組合がマイクロバブルCO ₂ 圧入技術や光ファイバー測定技術の実用化研究を進めている。マイクロバブルCO ₂ 圧入技術は我が国の地質条件に適しており、CO ₂ 貯留率や圧入性の向上に寄与すると申川油田での実証試験より確認している。CO ₂ -EORにも利用できるため、海外の石油開発会社にライセンス供与実績がある。光ファイバー測定技術と共に、日本独自のCCS技術として海外への展開が期待できる。
	応用研究・開発	○	↗	●CO ₂ -EORに関しては、日本の油田規模が小さいため、1990年代に小規模実証試験の実績しかない。一方、海外事例では1990年代にはトルコ国営石油と実油田での実証試験、2016年米国の油田で商用規模の実績がある。また、海外産油国（UAE、インドネシア等）で、日本の最先端のCO ₂ 回収技術（無機膜）の現地での性能実証試験も計画されている。今後、地上のCO ₂ 回収設備を含めた油層評価技術の基礎的構築がされると推察される。 ●CCSの分野は、2015年から苫小牧沖合の大規模実証試験（経済産業省）の実施や船舶輸送と船上からの圧入を伴うCCS構想（環境省）の実証試験計画が進められている。CO ₂ -EOR及びCCS技術に関しては、油田開発の先進国である米国、英国、ノルウェーと技術格差が短縮され、日本の独自研究開発が発揮できる可能性が増している。 ●2020年以降新型コロナウイルス感染症（COVID-19）拡大で、財政的な影響が危惧される中、NEDOを通じて国内外でのCCS/CCUS研究開発と実証試験事業化案件は増加している。

米国	基礎研究	◎	→	●米国でのCO₂-EORの研究開発は、1970年代から国家エネルギー戦略計画から原油増産政策が実施され、基礎研究レベルは1990年台でほぼ完了している。CCSに関する基礎研究分野はオバマ政権下で、DOE、USGS、EPA等が実施したCO₂-EORの学習経験を含め、安全性、環境保全モニタリング等のガイドライン等の整備がされ着実に実績を上げている。
	応用研究・開発	◎	↗	●米国でのCO₂-EORの応用研究開発は、前述のごとく国家エネルギー戦略から実施され、今日約130の陸上油田で実施された経験があり、世界のトップランナーの技術国であり、CO₂-EOR・CCS技術力は非常に高い。 ●バイデン政権の下では帯水層へのCO₂地中貯留事業も大幅に増えている。今後は陸上だけでなく、メキシコ湾など海域CO₂貯留も実施される見込みである。 ●インフレ抑制法、インフラ投資雇用法を通しCCSへの開発・投資を加速させている。
欧州	基礎研究	◎	↗	【英国】 ●CO₂-EORに関しては、国際石油資本であるBP社が国際的に石油開発の技術を2000年までに蓄積し、基礎研究部門はほぼ完了している。CCSに関しては、国際的には先駆的な政策を提言している。また、同国の政策（DECC）においてもCCS Ready（CCR）法に基づき電力企業に対してCCSが義務けられており、老朽化した北海ガス田や帯水層にCO₂を貯留する技術検討及び経済性評価の研究開発が進められている。 【ノルウェー】 ●政府及びStatoil社（現在のEquinor社）を中心に自国領海の海洋石油開発を実施している。CO₂-EORの油田に関しては国内実績が無いが、石油・ガス産出国の中で、1992年世界で初めて産業物濃度排出規制から総量規制に転換した国であり、CO₂削減計画が進められている。CO₂削減に関しての法制度も含めた基礎研究分野は、世界でも最も進んでいる国家である。CCSに関しては、1996年に世界初の海洋油ガス田にて年90万t-CO₂圧入大規模海洋帯水層CCS（Sleipnerガス田）案件を実施し、現在までほぼ同規模の圧入を継続している。 【その他】 ●フランス、ドイツ、オランダも民間の国際石油企業が存在し、独自のCO₂-EORの基礎研究は進んでいる。一方、北海の油・ガス田の開発も英国、ノルウェーとの競争もあり、自国海域でCCS構想計画も進められている。
	応用研究・開発	○	↗	【英国】 ●BPが国際的な石油開発企業として、CO₂-EORの油田の実施の経験を有する。 ●CCSに関してはBP社とStatoil社が同国ガス公社と2004年にアルジェリア国の陸上ガス田（In Salah）で世界初の年100万トン圧入の大規模実証試験（陸上深部帯水層）を実施している。更にこれらの経験を通して、北海における英領の海洋の油・ガス田に対しても、CO₂-EORや老朽化したガス田・帯水層にCO₂を貯留する大規模実証試験の計画が進められている。 ●2020年のCOVID-19拡大による原油価格の低迷の影響で、石油開発産業界も設備投資額が縮小した際、大規模CO₂-EOR / CCSの設備は巨大投資であるため、コスト低減への技術開発および政府の財政的支援補助の再検討がなされている。 【ノルウェー】 ●Sleipnerサイトでの経験を踏まえて、更に2004年アルジェリア国陸上CCSや、2008年自国LNG基地の天然ガスの処理設備中でCO₂を回収し、約150 km離れた海底帯水層へ年約70万t圧入した実績があり、帯水層のCO₂挙動、流動シミュレーション、CO₂鉱物固定、漏洩モニタリング等の貯留層解析技術を有している。日本での海洋CCS計画においては、学ぶべき事項は多い。2019年には、石油開発産業界のCCS知見および経験を踏まえて、セメント工場からのCO₂回収の世界初のCCS実証試験事業が実施され、他の産業への技術移転・波及策を強化しようとしている。また周辺各国からのCO₂を受け入れて北海の貯留サイトに圧入するCCSハブ構想を提唱し、実現が近いとみなされている。

				【その他】 ●各国で、海洋CCS計画の実施に向けた安全性や経済性評価基準、法整備等の検討が進められており、2020年以降は具体的な実施案件のための建設が進められる。2019年12月に「欧州グリーンディール」を公表し、ポストコロナ以後の温暖化対策を促進する政策を推進し、CCS/CCUおよび再エネ案件を強化している。
中国	基礎研究	△	↗	●有数な石炭産出資源国であり、産業のエネルギーは石炭への依存度が高い。近年、国内大気汚染問題や国際的な要請を踏まえ、国家政策として再エネ技術・省エネ技術の研究・開発力のレベルは急激に高まっている。CO ₂ -EORに関しては、国営石油企業（Sinopec社、PetroChina社）で国内油田の適用検討が独自に進められている。基礎研究の歴史が浅いため、十分な技術力を保有していないと想定される。またCCS分野も同様と予想される。
	応用研究・開発	○	↗	●CO ₂ -EOR /CCSに関しては、国営石油企業が陸上油田で約8件が検討され、CO ₂ 源としては天然ガス処理設備、石炭火力発電所、石油化学プラント等の排出CO ₂ であり、種々のCO ₂ 源を考慮しているのが特徴である。独自の技術力には限界があり米国等の海外先進国の支援が必要であり、上記案件の半数は米国との共同研究であり、今後も海外勢の技術支援が必要である。ただし2020年以降、米中対立の影響により、自国の技術でのCO ₂ -EOR /CCS案件の推進を強化している。
韓国	基礎研究			N/A
	応用研究・開発	△	→	●韓国では2010～2014年で10 MW規模の発電所で、物理吸着法の実証プロジェクトを実施。2014年のプロジェクト終了直後、300 MW規模での商用化を目指す計画であるとされていたが、その後の展開については言及がみられない。浦項産業技術科学院（RIST）は、アンモニア水を利用し高炉ガスからCO ₂ 回収するプロジェクト研究を行っている。
その他の国・地域	基礎研究	◎	↗	【カナダ】 ●CO ₂ -EORに関して、1990年代から自国石油企業及び大学等で油田の原油増産技術の研究が実施されており、基礎研究分野のレベルは高い。CCSに関しても政府や州政府の支援のもと2000年以降から基礎研究がなされ、国際機関IEAと大規模CO ₂ -EOR/CCS計画の共同研究を実施している。
	応用研究・開発	◎	↗	【カナダ】 ●政府および州政府の資金的援助により、陸上油田のCO ₂ -EOR /CCS型の実証試験・商用化が大規模に推進されている。具体的には世界最大級のCO ₂ -EOR /CCS（年300万t-CO ₂ 圧入）がWeyburn油田で実施されており、CO ₂ -EORが終了する2035年には本格的なCCSを開始する予定である。更に帯水層へ圧入するCO ₂ -EOR /CCS案件も実施しており、陸上でのCCSの技術力、社会的制度構築のレベルは非常に高い。

(註1)「フェーズ」

「基礎研究」：大学・国研などでの基礎研究レベル。

「応用研究・開発」：技術開発（プロトタイプの開発含む）・量産技術のレベル。

(註2)「現状」 ※我が国の現状を基準にした評価ではなく、CRDSの調査・見解による評価。

◎：他国に比べて特に顕著な活動・成果が見えている ○：ある程度の顕著な活動・成果が見えている

△：顕著な活動・成果が見えていない

×：特筆すべき活動・成果が見えていない

(註3)「トレンド」

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

参考・引用文献

1) International Energy Agency (IEA), “Energy Technology Perspectives 2017,” <https://www.iea.org/reports/energy-technology-perspectives-2017>, (2024年2月19日アクセス)。

- 2) 経済産業省「2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略を策定しました」<https://www.meti.go.jp/press/2021/06/20210618005/20210618005.html>, (2024年2月19日アクセス)。
- 3) 経済産業省「CCS 長期ロードマップ検討会 最終とりまとめ (2023年3月)」https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/ccs_choki_roadmap/pdf/20230310_1.pdf, (2024年2月19日アクセス)。
- 4) David Kerns, Harry Liu and Chris Consoli, “Technology Readiness and Costs of CCS, March 2021,” Global CCS Institute, <https://www.globalccsinstitute.com/wp-content/uploads/2021/03/Technology-Readiness-and-Costs-for-CCS-2021-1.pdf>, (2024年2月19日アクセス)。
- 5) International Test Center Network (ITCN), <https://itcn-global.org/>, (2024年2月19日アクセス)。
- 6) 独立行政法人エネルギー・金属鉱物資源機構 (JOGMEC)「EOR/EGR技術概要および日本でのCO₂圧入事例 (2022.10.07)」経済産業省, https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/ccs_choki_roadmap/kokunaiho_kento/pdf/002_05_01.pdf, (2024年2月19日アクセス)。
- 7) 公益財団法人地球環境産業技術研究機構 (RITE) CO₂貯留研究グループ「CCS安全性評価への取り組み」RITE, <https://www.rite.or.jp/co2storage/safety/>, (2024年2月19日アクセス)。
- 8) National Energy Technology Laboratory (NETL), “Carbon Dioxide Enhanced Oil Recovery: Untapped Domestic Energy Supply and Long Term Carbon Storage Solution,” U.S. Department of Energy (DOE), https://www.netl.doe.gov/sites/default/files/netl-file/CO2_eor_primer.pdf, (2024年2月19日アクセス)。
- 9) 公益財団法人地球環境産業技術研究機構 (RITE)「RITE Today Annual Report: 年次報告書 (2014年版第9号)」https://www.rite.or.jp/results/today/pdf/RT2014_all_j.pdf, (2024年2月19日アクセス)。
- 10) Shell Global, “Shell CANSOLV® CO₂ Capture System,” <https://www.shell.com/business-customers/catalysts-technologies/licensed-technologies/emissions-standards/tail-gas-treatment-unit/cansolv-co2.html>, (2024年2月19日アクセス)。
- 11) 三菱重工業株式会社「CCUS: 排ガスからのCO₂回収技術: KM CDR Process™」<https://solutions.mhi.com/jp/ccus/co2-capture-technology-for-exhaust-gas-kmcd-r-process/>, (2024年2月19日アクセス)。
- 12) 中尾真一「高効率CO₂分離回収技術の実用化に向けた取り組み」公益財団法人地球環境産業技術研究機構 (RITE), <https://www.rite.or.jp/news/events/pdf/nakao-ppt-kakushin2018.pdf>, (2024年2月19日アクセス)。
- 13) 公益財団法人地球環境産業技術研究機構 (RITE), 川崎重工業株式会社「石炭火力発電所における省エネルギー型二酸化炭素分離・回収システムのパイロットスケール実証試験を開始」RITE, https://www.rite.or.jp/news/press_releases/pdf/press20200924.pdf, (2024年2月19日アクセス)。
- 14) 公益財団法人地球環境産業技術研究機構 (RITE) 化学研究グループ「RITE Today 2021: CO₂分離・回収技術の高度化・実用化への取り組み」RITE, https://www.rite.or.jp/results/today/pdf/RT2021_kagaku_j.pdf, (2024年2月19日アクセス)。
- 15) Office of Clean Energy Demonstrations, “Regional Direct Air Capture Hubs,” U.S. Department of Energy (DOE), <https://www.energy.gov/oced/DACHubs>, (2024年2月19日アクセス)。
- 16) Ziqiu Xue, et al., “Carbon dioxide microbubble injection-Enhanced dissolution in geological sequestration,” *Energy Procedia* 4 (2011) : 4307-4313., <https://doi.org/10.1016/>

j.egypro.2011.02.381.

- 17) 上田良, 他「マイクロバブル技術のEOR適用可能性」『石油技術協会誌』83 巻 6 号 (2018) : 442-449., <https://doi.org/10.3720/japt.83.442>.
- 18) Trevor Richards, et al., “Demonstrating novel monitoring techniques at an ethanol 180,000-MT/YR CCS project in North Dakota,” SSRN, <https://ssrn.com/abstract=4278987>, (2024年2月19日アクセス) .
- 19) Yankun Sun, Ziqiu Xue and Tsutomu Hashimoto, “Fiber optic distributed sensing technology for real-time monitoring water jet tests: Implications for wellbore integrity diagnostics,” *Journal of Natural Gas Science and Engineering* 58 (2018) : 241-250., <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2018.08.005>.
- 20) Xinglin Lei, Ziqiu Xue and Tsutomu Hashimoto, “Fiber Optic Sensing for Geomechanical Monitoring: (2) - Distributed Strain Measurements at a Pumping Test and Geomechanical Modeling of Deformation of Reservoir Rocks,” *Applied Science* 9, no. 3 (2019) : 417., <https://doi.org/10.3390/app9030417>.
- 21) Rasha Amer, et al., “Distributed Fiber Optic Strain Sensing for Geomechanical Monitoring: Insights from Field Measurements of Ground Surface Deformation,” *Geosciences* 11, no. 7 (2021) : 285., <https://doi.org/10.3390/geosciences11070285>.
- 22) 東芝エネルギーシステムズ株式会社「大規模CO₂分離回収実証設備の運転開始について」<https://www.global.toshiba/jp/news/energy/2020/10/news-20201031-01.html>, (2024年2月19日アクセス) .
- 23) 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO)「「グリーンイノベーション基金事業/CO₂分離回収等技術開発プロジェクト」に係る実施体制の決定について」https://www.nedo.go.jp/koubo/EV3_100245.html, (2024年2月19日アクセス) .
- 24) 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO)「「CCUS研究開発・実証関連事業/CO₂分離回収技術の研究開発/先進的二酸化炭素固体吸収材の石炭燃焼排ガス適用性研究」に係る実施体制の決定について」https://www.nedo.go.jp/koubo/EV3_100206.html, (2024年2月19日アクセス) .
- 25) 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO)「「CCUS研究開発・実証関連事業/CO₂分離回収技術の研究開発/二酸化炭素分離膜システム実用化研究開発」に係る実施体制の決定について」https://www.nedo.go.jp/koubo/EV3_100246.html, (2024年2月19日アクセス) .
- 26) 内閣府「ムーンショット目標4：2050年までに、地球環境再生に向けた持続可能な資源循環を実現」<https://www8.cao.go.jp/cstp/moonshot/sub4.html>, (2024年2月19日アクセス) .
- 27) 三好啓介, 田中勝哉, 川村和幸「膜が環境を救う! : 分離膜技術の環境適用」独立行政法人エネルギー・金属鉱物資源機構 (JOGMEC) , https://oilgas-info.jogmec.go.jp/_res/projects/default_project/_page/001/009/318/TRC132_20220406.pdf, (2024年2月19日アクセス) .
- 28) Vincent Batoon, et al., “Scale-Up and Testing of Advanced Polaris Membranes at TCM (DE-FE0031591),” National Energy Technology Laboratory (NETL), https://netl.doe.gov/sites/default/files/netl-file/22CM_PSC16_Merkel.pdf, (2024年2月19日アクセス) .
- 29) 藤原勝憲「ペトラ・ノヴァ・CCUSプロジェクト：石炭火力発電所排ガスからのCO₂回収および老朽化油田の原油増産」『石油技術協会誌』84 巻 2 号 (2019) : 114-122., <https://doi.org/10.3720/japt.84.114>.
- 30) 経済産業省, 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構, 日本CCS調査株式会社「苫小牧におけるCCS大規模実証試験30万トン圧入時点報告書(「総括報告書」)(2020年5月)」経済産業省,

2.1

電力のゼロエミ化・安定化

https://www.japanccs.com/wp/wp-content/uploads/2020/05/report202005_full.pdf, (2024年10月31日アクセス)。

- 31) 経済産業省「「アジアCCUSネットワーク」が立ち上がりました」, <https://www.meti.go.jp/press/2021/06/20210622005/20210622005.html>, (2024年2月19日アクセス)。
- 32) 独立行政法人エネルギー・金属鉱物資源機構 (JOGMEC)「国内初のCCS事業化の取り組み～2030年度までのCO₂貯留開始に向け、調査7案件を候補として選定～」https://www.jogmec.go.jp/news/release/news_01_00034.html, (2024年2月19日アクセス)。
- 33) 国立研究開発法人科学技術振興機構 (JST) 低炭素社会戦略センター「LCS-FY2016-PP-06CCS (二酸化炭素回収貯留) の概要と展望 (Vol.2) : 膜による分離回収コスト及び貯留コストの評価と課題 (平成29年3月)」JST, <https://www.jst.go.jp/lcs/pdf/fy2016-pp-06.pdf>, (2024年2月19日アクセス)。
- 34) Sarah Deutz and André Bardow, “Life-cycle assessment of an industrial direct air capture process based on temperature-vacuum swing adsorption,” *Nature Energy* 6, no. 2 (2021) :203-213.,<https://doi.org/10.1038/s41560-020-00771-9>.
- 35) 三菱重工業株式会社「三菱造船、川崎汽船および日本海事協会と共同で洋上用CO₂回収装置検証のための小型デモプラント試験“CC-Ocean”プロジェクトを実施：国交省の海洋資源開発関連技術高度化研究開発事業の対象プロジェクト」<https://www.mhi.com/jp/news/20083101.html>, (2024年2月19日アクセス)。
- 36) Shivom Sharma and François Marechal, “Carbon Dioxide Capture From Internal Combustion Engine Exhaust Using Temperature Swing Adsorption,” *Frontiers in Energy Research* 7 (2019) :143., <https://doi.org/10.3389/fenrg.2019.00143>.
- 37) 香山幹「石油開発最新事情：IEA-EOR第38回年次総会参加報告」独立行政法人エネルギー・金属鉱物資源機構 (JOGMEC), https://oilgas-info.jogmec.go.jp/info_reports/1004689/1007484.html, (2024年2月19日アクセス)。
- 38) Soichi Kikkawa, et al., “Direct Air Capture of CO₂ Using a Liquid Amine-Solid Carbamic Acid Phase-Separation System Using Diamines Bearing an Aminocyclohexyl Group,” *ACS Environmental Au* 2, no. 4 (2022) :354-362.,<https://doi.org/10.1021/acsenvironau.1c00065>.
- 39) 特許庁「平成29年度特許技術動向調査報告書 (概要) : CO₂固定化・有効利用技術 (平成30年2月)」https://warp.ndl.go.jp/collections/info:ndljp/pid/12302224/www.jpo.go.jp/resources/report/gidou-houkoku/tokkyo/document/index/29_09.pdf, (2024年10月31日アクセス)。
- 40) National Energy Technology Laboratory (NETL), “Point Source CARBON CAPTURE Project Map,”<https://netl.doe.gov/carbon-management/carbon-capture/ccmap>, (2023年3月5日アクセス)。
- 41) National Energy Technology Laboratory (NETL), “2022 CARBON MANAGEMENT PROJECT REVIEW MEETING - GENERAL SESSION - PROCEEDINGS,”<https://netl.doe.gov/22CM-General-Proceedings>, (2024年2月19日アクセス)。
- 42) Marisol Ortega, “The World’s First Mechanical Tree Prototype Is To Be Built At ASU Next Year,” *The State Press*, October 15, 2020, <https://www.statepress.com/article/2020/10/spbiztech-the-worlds-first-mechanical-tree-is-to-be-built-at-asu-by-next-year>, (2024年2月19日アクセス)。
- 43) Siemens Energy, “Haru Oni: Base camp of the future,”<https://www.siemens-energy.com/global/en/news/magazine/2021/haru-oni.html>, (2024年2月19日アクセス)。
- 44) Carbon Engineering Ltd., “Occidental, 1PointFive to Begin Construction of World’s Largest Direct Air Capture Plant in the Texas Permian Basin,” <https://www.oxy.com/news/news->

releases/occidental-1pointfive-to-begin-construction-of-worlds-largest-direct-air-capture-plant-in-the-texas-permian-basin/,（2024年2月19日アクセス）。

45) Mihrimah Ozkan, et al., “Current status and pillars of direct air capture technologies,” iScience 25, no. 4 (2020) :103990.,<https://doi.org/10.1016/j.isci.2022.103990>.

46) 太平洋セメント株式会社,丸紅プロテックス株式会社,CarbonCleanLimited「セメントキルン排ガスからのCO₂分離・回収実証試験のための設備設置について」太平洋セメント株式会社, <https://www.taiheiyo-cement.co.jp/news/news/pdf/210421.pdf>,（2024年2月19日アクセス）。

2.1

電力のゼロエミ化・
安定化