

二酸化炭素回収・貯留 (CCS) の 現状とその安全性について

(一財) 電力中央研究所

下田 昭郎 *Akiro Shimota*

1. はじめに

2015年にパリで開催された第21回気候変動枠組条約締約国会議 (COP21) で採択されたパリ協定は、2020年以降における温室効果ガス排出削減の京都議定書に代わる新たな国際的な枠組みを示した。パリ協定では、世界の平均気温の上昇を工業化前と比べて2℃より十分低く保ち、更に1.5℃以下に抑える努力を追求するという目標が設定された。2018年に発表された気候変動に関する政府間パネル (IPCC) の「1.5℃特別報告書」は、気温上昇を2℃とする場合、世界全体のCO₂排出を2030年までに2010年比で約20%削減し、2075年頃にまでに実質ゼロ (以下「カーボンニュートラル: CN」と記す) に、1.5℃の場合、2050年にはCNにする必要があるとしている。

パリ協定の締結や、その後の「1.5℃特別報告書」の発表で、将来的なCNの必要性の認知が進んだこともあり、2023年9月時点で将来的な目標設定においてCNに言及している国は米国、英国、EU加盟国等を含む137か国に及ぶ。日本では、2020年10月の菅首相の所信表明演説で、2050年までにCNにすることを宣言している。

人類にとってチャレンジングな目標であるCNを達成するためには、エネルギー効率向上、再生可能エネルギーの普及拡大、効果的な政策の発動等、あらゆる対策を総動員する

必要がある。その中で、大規模発生源から効率的にCO₂を削減できる技術オプションとして位置付けられる二酸化炭素回収・貯留 (Carbon dioxide Capture and Storage: CCS) への期待が高まっている。また、CCSにおけるコスト増加に対して、回収したCO₂を有価物に変換することでコストの補填が期待できる二酸化炭素回収・利用 (Carbon dioxide Capture and Utilization: CCU) への注目も高まっている (CCSとCCUを併せてCCUSと呼ばれる)。以下では、CCSの概要と普及の現状、および貯留に伴う安全性について見ていく。

2. CCSの概要

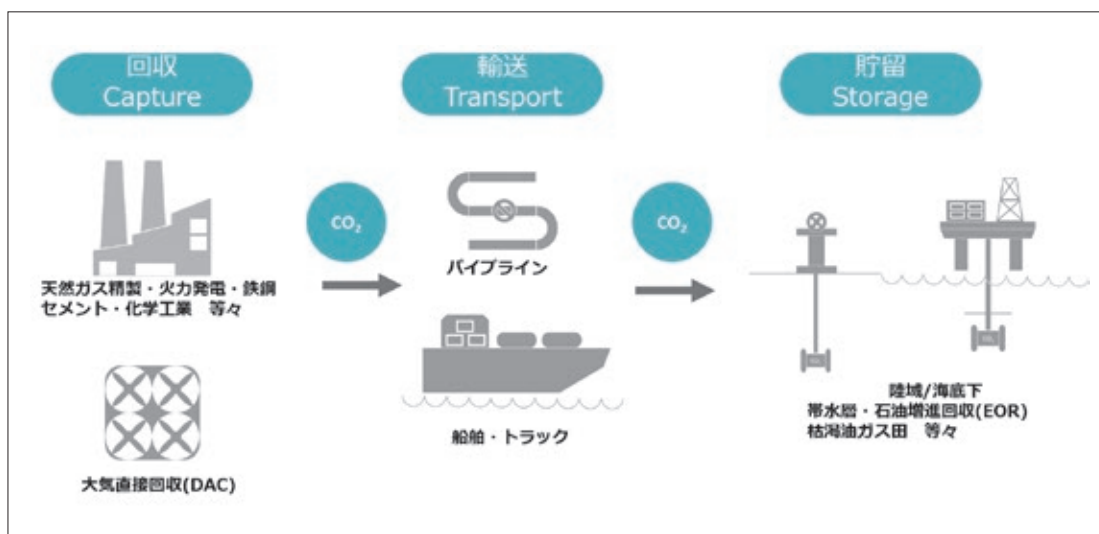
(1) CCSのプロセス

図1にCCSのプロセスを示す。CCSは、火力発電、天然ガス精製、製鉄、セメント製造等のプラントで発生するCO₂を回収し、パイプラインや船舶で輸送し、地中数百メートル以深の地層に貯留する一連のプロセスの総称である。

排出源から排出される排ガス等のCO₂を含む混合ガスからCO₂を分離し回収する際は、対象とする混合ガスの圧力やCO₂濃度といった物性に応じて分離・回収の方法が選択される。現時点では、アミン^{※1}系の化学吸収液を用いたシステムが最も成熟した技術とされている。CO₂分離・回収では、ほとんどの場合、

※1
アミン
アンモニアの水素原子を炭化水素基または芳香族原子団で置換した化合物の総称。

図1 CCSのプロセス



エネルギーの追加供給が必要となり、コスト上昇に直結する。そのため、分離・回収のための消費エネルギー低減が第一の技術開発課題とされる。

回収されたCO₂の一般的な輸送手段はパイプラインである。既に実績のある石油や天然ガス等のパイプライン輸送の経験や規格、基準を基に運用が行われる。日本のように海域に囲まれ、陸域に貯留に適した地層が少ない場合には、船舶による輸送もオプションとなる。一般的に、輸送距離が長くなることにより、パイプラインに対する船舶輸送のコスト優位性が出てくるとされる。

CO₂の地中への貯留については、貯留層への恒久的な封じ込めが大前提となる。そのため、貯留層の上部にキャップロックと呼ばれる岩盤などの不透水層が存在することが条件となる。貯留層としては、粒子間の空隙が大きい砂岩等から成り、水あるいは塩水で飽和されている帯水層が将来的な貯留ポテンシャルが大きいと期待されている。また、枯渇した油ガス田も貯留に適しているとされる。CO₂の地中への圧入は、1970年代に、米国で生産性の低下した油田を回復させる手段としての石油増進回収(Enhanced Oil Recovery: EOR)で開始された。その後、温暖化に

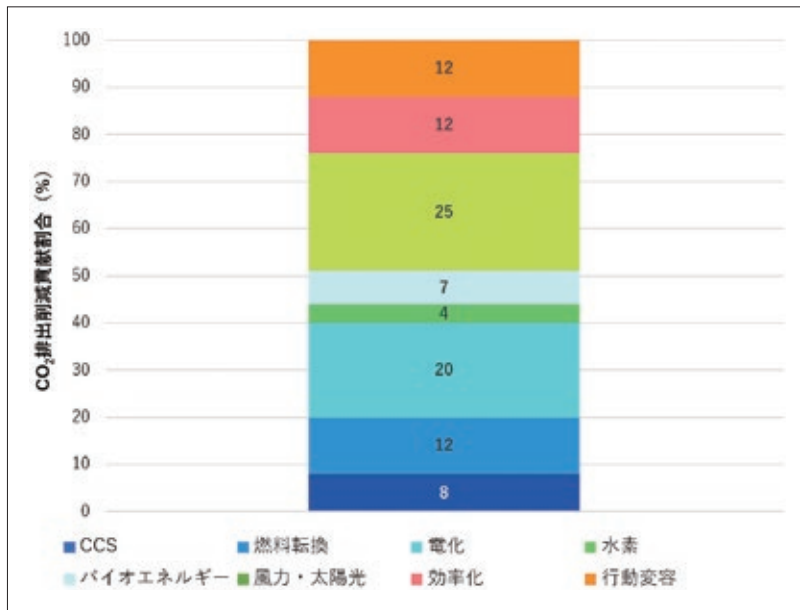
関する懸念の高まりにより、産業起源のCO₂を回収して、恒久的に地中に圧入することでCO₂の排出削減に繋げようとのアイデアに至っている。

最近では、CO₂削減が困難な分野による将来的な排出残余を相殺(炭素除去)することを目指して、大気中のCO₂を直接回収(Direct Air Capture: DAC)し、貯留(Direct Air Carbon dioxide Capture and Storage: DACCS)する試みも注目されている。

(2) CN 達成に向けた CCS の役割

国際エネルギー機関(IEA)は、世界全体のエネルギーシステムからの温室効果ガスの排出を2050年に実質ゼロにするための排出シナリオ(Net-Zero Emissions by 2050シナリオ。以下「NZEシナリオ」)の評価・分析を実施している。NZEシナリオは、目標達成により50%の確率で世界全体の平均気温の上昇を1.5℃に抑えることが可能な想定となっている。図2は、NZEシナリオにおける削減対策別の貢献割合を示している。CCSは2050年の全排出削減(2022年比420億トン減)の約8%に貢献する必要があるとされ、その際のCO₂回収量は2050年時点で約60億トンにのぼる¹⁾。

図2 2050年カーボンニュートラルの対策別の貢献割合



CO₂排出削減シナリオ (NZE シナリオ) : IEA が設定した2022年の排出量370億トンを2050年に実質排出ゼロにするシナリオ。
IEA Net Zero Road Map²⁾ より作成。

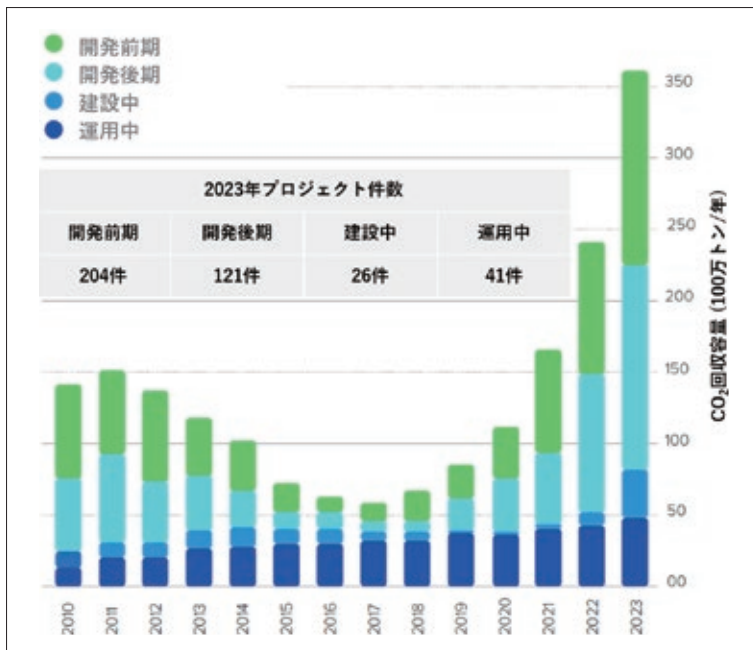
3. CCS の普及の現状

(1) 世界の商用 CCS プロジェクト

図3は、世界の商用プロジェクト^{※2}におけるCO₂回収容量の推移と2023年時点のプロジェクト件数を示す。2023年時点で計画中也含まれた全プロジェクトのCO₂回収容量は年

※2
商用プロジェクト
継続的な商業活動の一環としてCO₂の回収、輸送、貯留が行われるプロジェクト。

図3 CCS 商用プロジェクトの推移



Global CCS Institute Global Status of CCS 2023³⁾ より作成。

間3.6億トン（開発中2.8億トン、建設中0.32億トン、運用中0.49億トン）であり開発段階のプロジェクトが2022年から大きな伸びを見せている。運用中のプロジェクトの回収源は、天然ガス精製が最も多く、肥料製造、バイオエタノールと続いている²⁾。

世界初の帯水層貯留の商用プロジェクトとして、ノルウェーのSleipnerプロジェクトがある。ノルウェーの元国営石油・ガス企業である Statoil 社（現在は Equinor 社）は北海の Sleipner 天然ガス田の天然ガス精製において、1996年から天然ガス随伴CO₂を回収し、パイプラインを利用して直下の海底下帯水層に年間85万トンの貯留を開始し現在も継続中である。ノルウェー政府が1991年から導入を開始した炭素税（当時、CO₂ 1トンの排出に対し約35米ドルの課税）への対応措置としてプロジェクトが開始された。

日本では現時点で CCS の商用プロジェクトは存在しないが、国家プロジェクトとしての実証試験で、2016年から2018年にかけて、北海道苫小牧市の石油製油所の水素製造装置から回収された約30万トンのCO₂が沖合約3 km に貯留された実績がある。

(2) CCS の普及障壁

近年、世界的に増加を続ける CCS プロジェクトであるが、2050年のCN達成に必要な普及の道筋には遠く及ばない。前出の世界の商用プロジェクトにおいては、2023年時点で運用中のプロジェクトによるCO₂回収容量は年間0.49億トンであった。一方、IEAのNZEシナリオでは、2050年CNの達成のために2030年時点で年間約10億トンの回収が必要としている。

CCSの主な普及障壁としては、経済性、法規制、社会的受容性、貯留の安全性等の不確実性がある。例えば、経済性については、生産プロセスにCCSを導入した場合、追加コ

表1 CO₂の人体への影響

CO ₂ 濃度	人体への影響
10,000 ppm 未満	人体への影響はほぼなし
10,000 ppm 超	眠気や頭痛、倦怠感など
30,000~50,000 ppm	めまい、呼吸が早くなる、錯乱など
90,000 ppm	5分で最小致死濃度に達する
100,000 ppm	視覚障害、耳鳴り、震え 1分で意識消失あるいは最小致死濃度に達する
300,000 ppm	ほとんど即時に意識消失

Air Lab. Journal ウェブページ³⁾を参考に作成。

ストは最終製品に価格転嫁されることになり事業見通しが不透明となる。また、関連産業が広範囲に及ぶCCSは、対応すべき法規・規制が多岐にわたり、かつ新興技術であるために法規制が未整備である領域も存在する。各国では、CCSに係る法規制の整備が進行中であるが、日本においても、国内における早期の事業化を目指してCCS事業法^{※3}が制定された。

現時点でCCSがCO₂排出削減のための合理的な技術であるとの認知は一般市民には乏しい。そのため、国によるCCSプロジェクトへの資金支援あるいは社会実装に対して否定的になる可能性がある。普及拡大には温暖化対策技術としてのCCSの継続的な啓発による社会の受容性獲得が必須と言える。

4. CCSにおける安全への対応

(1) CO₂貯留によるリスク

CCSにおける最も重大なリスクの一つは、貯留するCO₂の漏洩による安全および環境への影響である。大気中のCO₂濃度は現在約420 ppmで産業革命以前の約280 ppmから上昇し続けている。室内環境における濃度の目安は1,000 ppm以下で室内の空気環境を判断する指針の一つとされるが、一定の基準

値を超えると人体や環境へ悪影響を及ぼす³⁾(表1)。

高濃度のCO₂による人的被害としては、1986年にアフリカカメルーンにあるニオス湖で発生したマグマ性CO₂の噴出(湖水爆発)により、周辺住民1,746人と多数の家畜の命が奪われた事例がある。この災害は、漏洩のメカニズムはまったく異なるものの、CCSの安全性を議論する際のリスク事例として取り上げられることがある。

CCSにより貯留されるCO₂の漏洩経路としては、貯留層の圧力が上昇することによる低浸透率のキャップロックを經由、キャップロックの亀裂や断層を經由、圧入井や廃棄された既存の坑井を經由、等が可能性として挙げられる(図4)。深部貯留層からの漏洩は、多数の亀裂が存在する火山地帯での噴出であるニオス湖の事例と比較して、CO₂の空間的・時間的なフラックス(流量)が桁違いに小さいと考えられる⁴⁾。

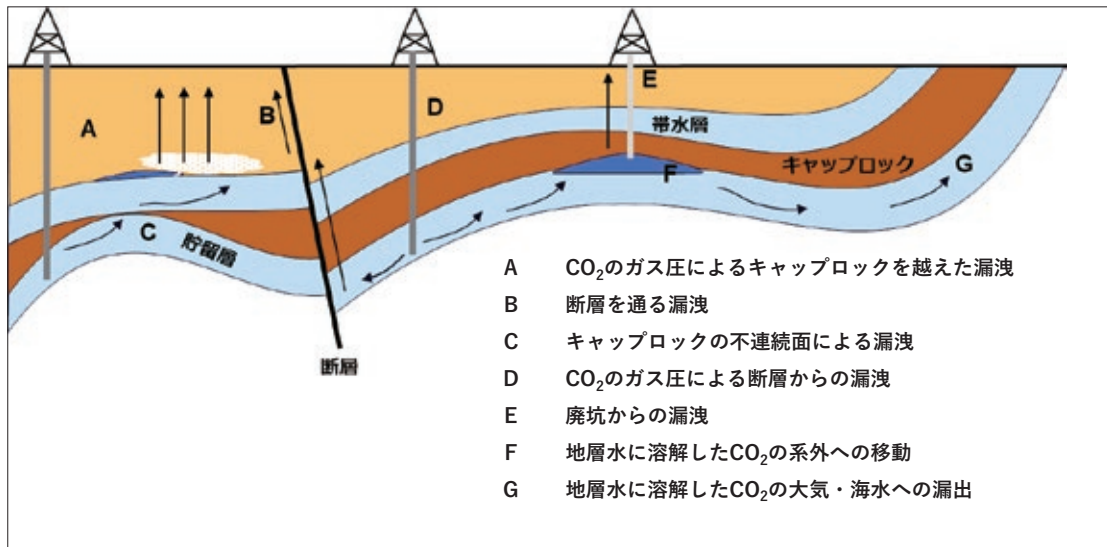
CO₂を高い圧力で貯留層に注入することで、断層破碎や地震を誘発するリスクも想定される。断層破碎はCO₂の新たな漏洩経路となり、誘発地震は規模によっては、構造物あるいは人的な被害を発生させる可能性がある⁴⁾。

(2) リスクへの対応

図5にCCSにおけるCO₂貯留事業のプロセ

※3
CCS事業法
正式名は「二酸化炭素の貯留事業に関する法律」
二酸化炭素の貯留事業の健全な発達等を図るとともに、公共の安全を確保することを目的とした法律。2024年5月17日国会で可決・成立。

図4 CO₂貯留における漏洩経路



IPCC CCS Special Report⁴⁾ より作成。

スを示すが、事業実施においては一般事業と同様に、事業に係るリスクを特定・分析し、それに対応することが求められる。事業実施者は、実際にCO₂を貯留する以前の計画段階においてリスク管理計画を策定し、それを実行して行かなければならない⁵⁾。

CO₂貯留の漏洩については、貯留サイトの選定において、漏洩経路をできるだけ避けるように考慮する。また、サイト選定にあたっては地質構造や震探調査^{*4}等で得られるデータをもとに、計画しているすべてのCO₂

を貯留した場合に影響が及ぶと予測される地層を対象としたシミュレーションモデルを構築し、貯留されたCO₂の挙動把握・予測を行うことでリスクの低減が図れる。サイトの特性評価では、貯留層上部に存在するキャップロックが、必要なシール能力を保持し続けることが可能かどうか、計画しているCO₂圧入圧力によってもキャップロックが破壊されないか、等を確認する必要がある。操業開始後は、リスク管理計画に沿って、貯留層の圧力や温度等の必要なパラメータをモニタリングし、漏洩の兆候をいち早く検知し、万が一の影響を最小化することが求められる。

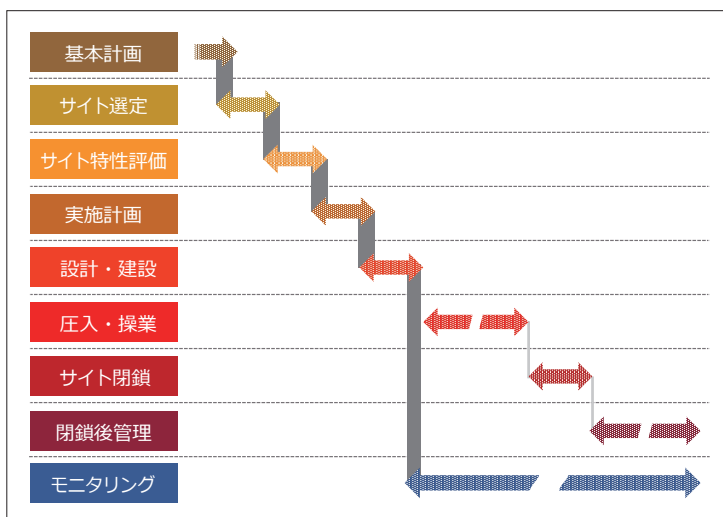
誘発地震については漏洩の場合と同様に、サイト選定の段階で、誘発地震の原因となりうる大規模な断層あるいは動きやすい活断層を避け、貯留層の圧力上昇が起きにくい十分な貯留能力を持った貯留層を選ぶこと、操業中においてモニタリングにより関連するデータを取得し評価することでリスクの低減が図れる。

5. まとめ

2050年までにCNを達成するという人類にとってチャレンジングな目標達成に向け

※4 震探調査
地表で衝撃波または連続波を発生させ、地中から反射して地上に戻ってくる反射波を解析して地下構造を探査すること。

図5 CO₂貯留の事業フロー



二酸化炭素地中貯留技術組合 技術事例集⁵⁾ より作成。

て、大規模発生源のCO₂排出を効率的に削減できるCCSに注目が集まっており、日本を含む各国で普及に向けた動きが活発化している。一方で、新興技術であるCCSには技術的、法的および社会的な障壁が存在し、期待どおりの普及には及んでいない。

歴史の浅いCCS事業は、事業者あるいは社会としての経験が少ないために、事業に係る不確実性が大きく、社会的受容性に乏しい。事業者がCO₂の貯留をいかに安全に実施するかに留意し、成功体験を積み重ねることが、今後のCCS普及拡大のカギの一つとなるだろう。

参考文献

- 1) International Energy Agency, Net Zero Roadmap-A Global Pathway to Keep the 1.5°C Goal in Reach-, 2023 update, 2023. https://iea.blob.core.windows.net/assets/9a698da4-4002-4e53-8ef3-631d8971bf84/NetZeroRoadmap_AGlobalPathwaytoKeepthe1.5CGoalinReach-2023Update.pdf (参照日：2024年6月3日)。
- 2) Global CCS Institute, Global Status of CCS 2023-Scaling up through 2030, 2023. <https://www.globalccsinstitute.com/wp-content/uploads/2024/01/Global-Status-of-CCS-Report-1.pdf> (参照日：2024年6月3日)。
- 3) Air Lab. Journal ウェブページ, 二酸化炭素濃度は人体や環境へどう影響する？ 濃度管理の重要性を解説. <https://minnaair.com/blog/3469/> (参照日：2024年6月3日)。
- 4) Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage, 2005. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/srccs_wholereport-1.pdf (参照日：2024年6月3日)。
- 5) 二酸化炭素地中貯留技術組合, CO₂地中貯留技術事例集—基本計画—。 <https://www.co2choryu-kumiai.or.jp/cms/wp-content/uploads/2021/10/practical-guidance-01-j.pdf> (参照日：2024年6月3日)。



筑波大学環境科学研究科修了。(一財)電力中央研究所研究参事。法政大学デザイン工学部兼任講師。国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合研究開発機構(NEDO)技術委員。専門は大気環境学、リモートセンシング学。博士(理学)