

※ 本仮訳は、駐日英国大使館主催ウェビナーシリーズのために用意されたものです。
原文をご覧になりたい方は、royalsociety.org/climate-science-solutions をご参照ください。

THE ROYAL SOCIETY

気候変動：科学と解決策 | 報告 5

二酸化炭素回収・貯留： 電力と工業のネットゼロへの道筋

概要

化石燃料を使用する経済活動、あるいはその他の形で炭素を放出する経済活動において排出ネットゼロを実現するためには二酸化炭素回収・貯留（CCS）が欠かせない。効率改善と排出削減が第一の優先課題だが、重工業のように脱炭素化が困難な分野では、CCS が炭素排出に対

する最後の防衛線になるかもしれない。CCS は全世界において工業規模で実証されており、少なくとも 1 万年の期間にわたって炭素を貯留するための信頼できる、安全で監査可能な方法である^{1,2}。

知見

- 排出ネットゼロ実現に向けた最も有望な道筋においては CCS が必要だということが研究結果によって示されている^{3,4}。
- CCS は、電力部門と工業部門を脱炭素化するための確実な技術的選択である。
- CCS を拡大するためにはさらに多くの導入経験が必要である。複数の回収拠点が集団で、共通のパイプまたは輸送手段を用いて共通の貯留エリアに CO₂ を搬送すれば、単位当たりのコストを分担し合い、抑えることができる。現在、この種の CCS プロジェクトの構築と計画が進められている。
- 斬新な回収技術に関する研究により、将来的なコスト削減が期待できるが、こうした新しい方法が商業化されるまでには何十年もの期間を要することがある。
- 工業用 CCS だけでなく、炭素直接空気回収・貯留（DACCS）などのネガティブエミッション技術を含む二酸化炭素除去もまた、21 世紀半ばまでに排出をネットゼロとするという広く合意された目標の達成に貢献する可能性がある。
- 各国または共同体は、炭素回収・貯留を促進するために CCS を助成したり、炭素税を課したりすることができる。ただし、抽出量と釣り合うだけの十分な炭素を確実に貯留するためには、貯留を引き受ける義務を炭素供給者に課す必要があるかもしれない⁵。

1. CCS の必要性 — 何ができるか

気候変動に関する政府間パネル (IPCC) が検証した、ネットゼロの世界への予想進路の多くにおいて、CCS は中心的存在となっている。

CO₂ は、化石燃料、バイオマス燃焼、農業、工業・家庭の汚染源から生じる主要な人為的 (人間が原因の) 温室効果ガス (GHG) である。CO₂ 排出は、エネルギー効率向上と、化石燃料を再生可能エネルギーまたは原子力エネルギーに置き換えることによって減らすことができるが、排出ネットゼロを達成するためには、あらゆる余剰排出を回収し、確実に貯留する必要がある。

気候変動に関する政府間パネル (IPCC) は、ネットゼロの世界に向けて、世界の平均気温上昇を産業革命前の基準値から 1.5°C 以内に抑えるために想定される道筋を検証した。それらの道筋の多くにおいて CCS は中心的存在となっている³。唯一の例外は、とてつもなく急速な、エネルギー供給の脱炭素化による道筋である。国際エネルギー機関 (IEA) の「持続可能な開発シナリオ」では、エネルギー部門で生じる全世界の CO₂ 正味排出量が 2070 年までにゼロへと減少する。このシナリオにおいて、CCS は 2050 年までに年間約 56 億トン CO₂ (GtCO₂/yr) の排出削減を担う。これは、現在の水準である年間 4,000 万トン CO₂ (MtCO₂/yr) のおよそ 140 倍に相当する⁶。

定義

IPCC は CCS を、「工業およびエネルギー関連排出源からの比較的純粋な CO₂ の流れを分離 (回収)、調整、圧縮し、貯留場所まで輸送して、大気から長期的に隔離するプロセス」と定義している³。

IPCC は二酸化炭素回収・利用 (CCU : Carbon Capture and Use) を、「CO₂ が回収され、新しい製品を生産するための化学工業原料試薬として利用される」プロセスと定義しているが、CCU で CO₂ が長期間貯蔵されることはほとんどない。例えば、CO₂ は燃料、化学薬品、プラスチックの製造に使用されている。

CO₂ 圧入による EOR (CO₂ to EOR)

は、CO₂ を回収し、石油増進回収法 (EOR) を通じて増産に役立てるプロセスを意味する。

IEA は、CCS がなければネットゼロへの到達は「事実上不可能」だとしている。また、英国の気候変動委員会は「CCS は選択肢ではなく必須条件だ」とコメントしている^{3,4}。

CCS は、次の 4 つの主要排出源からの排出を貯留するための有力な技術的選択である。

i. 電力供給

CCS は、石炭、ガス、都市廃棄物あるいはバイオマス火力発電所からの CO₂ 排出を減少させ、低炭素電力を供給するために使用できる。

ii. 「ブルー」水素供給

天然ガス、バイオマスまたは石炭からの水素生産を脱炭素化するために、CCS を用いて燃焼前に CO₂ を回収することができる。この過程で、工業・輸送・貯蔵・熱源など、多目的に利用できる低炭素エネルギー源である、いわゆる「ブルー水素」が生成される。

iii. 工業の脱炭素化

CCS は、石油精製、セメント、鉄・鉄鋼、製紙、ガラス、農業用肥料などの工業が排出する CO₂ を回収することができる。これらの排出は世界の人為的 CO₂ 排出量の約 20% を占める^{6,7}。世界の GHG 総排出量 (気候変動枠組条約〈UNFCCC〉のスコップ 1 およびスコップ 2) の約 10% を占める石油・ガス産業は、業界のカーボンフットプリントを大幅に低減させようの一連の対策の一つとして、CCS 開発を率先して推進できる立場にある⁸。

iv. ネガティブエミッション技術 (NET)

NET は、空気中から CO₂ を除去する技術である。この技術には、化学的プロセス

を用いて空気中の CO₂を回収する炭素直接空気回収・貯留（DACCS）や、バイオマスの燃焼または発酵で生じた CO₂を回収する炭素回収・貯留付きバイオマス発電（BECCS）が挙げられる。NET は、二酸化炭素除去（CDR）と呼ばれるより幅広い一連の活動の一角を形成する。IPCC は CDR を「空気中から CO₂を除去し、地

質貯留層、地上貯留施設または海底貯留層、または生産品に永久的に貯留する人為的活動」と定義している。CDR、さらにより幅広い温室効果ガス除去（GGR）には、森林や泥炭地の復元といった自然に基づく解決策も含まれる。（報告 9：「気候変動と土地」を参照）。

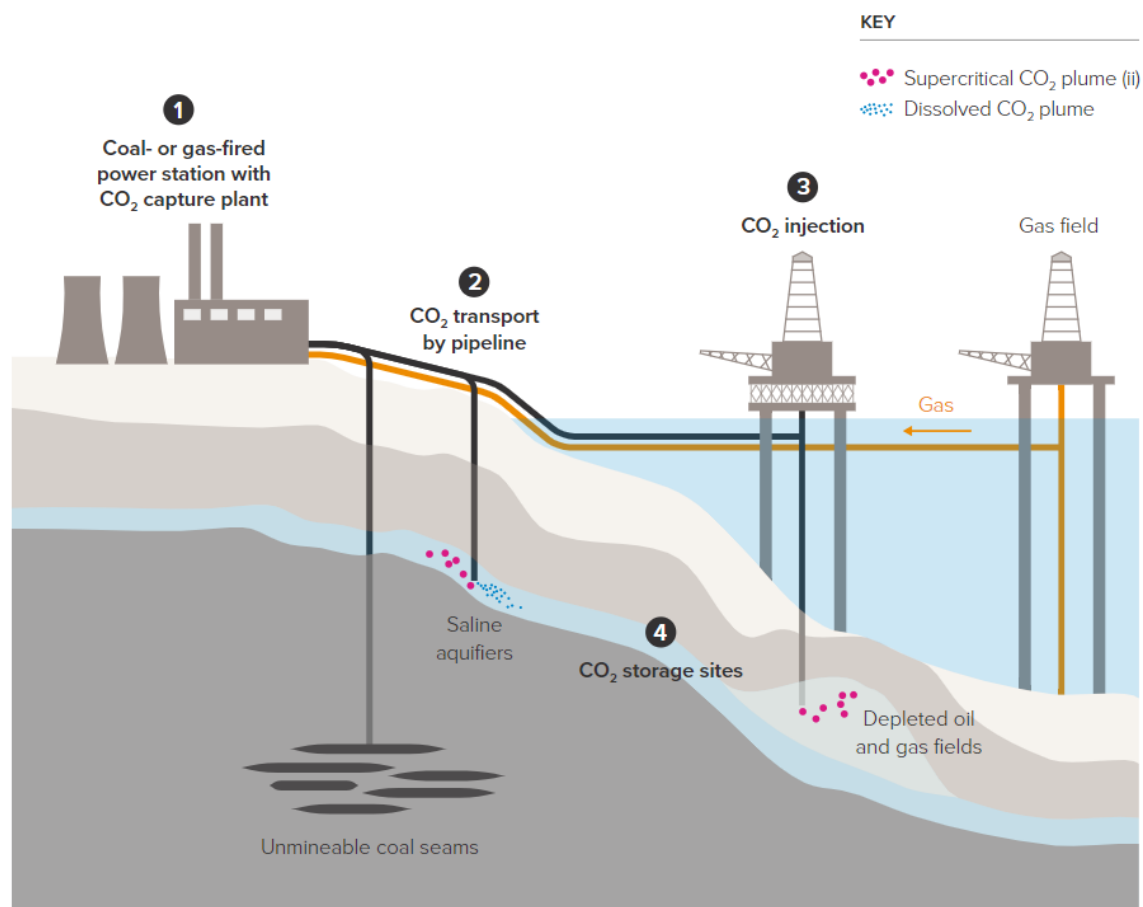
2. CCS の科学と技術 – CCS の機能

CCS は単一の技術または活動ではなく一連の手段（回収・輸送・貯留）であり、さまざまな形での組み合わせが可能である（図 1）。多くの CO₂回収システムは、特定汚染源から排出された CO₂の 85～95%を回収す

るよう設計されてきた。これを 99～100%に引き上げるためには、一般に大型の設備と多数のプロセス段階が必要となり、コストが上昇する（例えば、ガス火力発電所では推定 10%上昇）⁶。

図 1

二酸化炭素回収・輸送・貯留の概要 (i)⁹。



- i. 図は正確な縮尺ではない。CO₂の埋設は一般に地下 1～5km、海岸線から 50～300km で行われる。
- ii. 超臨界 CO₂は地下深部の圧力で自然の流体状態になっている CO₂である。

2.1 回収

発電、工業、水素製造のための CCS は、4 つの主要な技術的方法を用いて導入することができる。

- i. **燃焼後** – 化学溶剤、固体吸着剤または薄膜を使って煙道ガスまたは排気流から CO₂ を分離する。これにより排気ガスを通過させつつ、排気流から CO₂ を回収することができる。
- ii. **燃焼前** – 天然ガスや石炭などの燃料を合成ガス（水素、一酸化炭素および CO₂）に転換した後、水性ガスシフト反応によって水素と CO₂ の混合物に転換する。溶剤、細孔性固体、薄膜その他の方法により水素から CO₂ を分離する。こうして生成された「ブルー」水素は、アンモニア生産、暖房、発電といった他のプロセスで使用することができる。
- iii. **酸素燃焼** – 純酸素（および火炎温度を管理できるようにするためのリサイクル CO₂）中で燃料を燃焼させ、水分を冷却・濃縮・除去すると同時に、CO₂ を燃料ガスから分離しやすくする。
- iv. **工業プロセスでの排出の分離** – 天然ガス精製やエタノール生産と同じく、排出は原料またはプロセス化学から生じる。上記の回収方法の 1 つまたは 2 つ以上、または業界特有の技術を使って CO₂ を回収する。CO₂ の回収は中核的なプロセスの一部であるため、一般に他の方法よりも経済的である。

2.2 輸送

回収拠点から貯留施設までの CO₂ 輸送は、CO₂ を 1000psi 超の圧力で濃厚流体として輸送する専用パイプラインという最も経済的な方法で行われることが多い。1972 年以降、北米では陸上で延べ数千キロメートルにのぼる CO₂ パイプラインが運用されている。また、1996 年以降、北海とバレンツ海では、CCS を用いたオフショア・ガス生産活動のために延べ数百キロメートルの海底 CO₂ パイプラインが運用されている^{3,10}。工業施設が沿岸部または河岸に位置する場合は、CO₂ 排出源と共有貯留拠点を結ぶタンカーが使用されることもある^{11,12}。

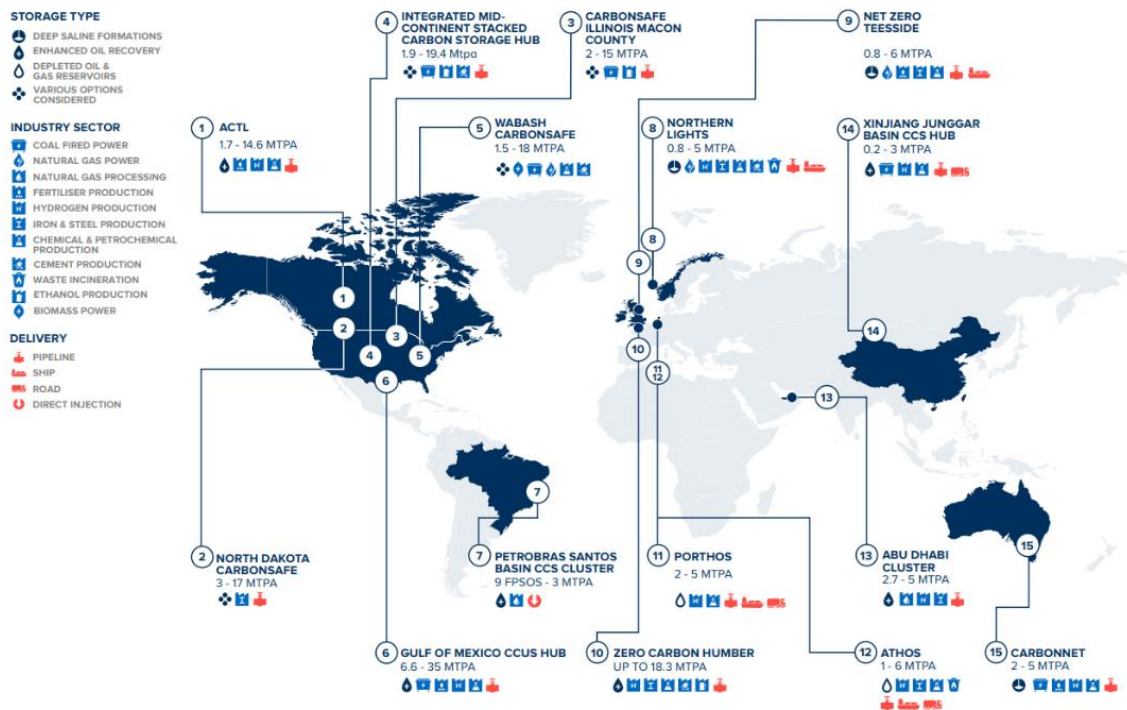
2.3 貯留

CO₂ は、十分なポロシティ、浸透性、安全性を兼ね備えた地下の多孔質岩層を慎重に選定し、永久的に貯留する必要がある。主な候補は枯渇したガス田・油田や塩水滞水層（飲用に適さない塩水を含む多孔質砂岩層）である。貯留の深さは一般に 1~5km である¹。一旦注入された CO₂ が漏出する危険性はきわめて小さい。研究結果によれば、CO₂ の 98% を 1 万年にわたって閉じ込めたままにすることが可能である^{1,13}。永久的な封じ込めの証拠を示すため、貯留サイトは一般に約 20 年間にわたって監視される¹⁴。商業用 EOR に CO₂ を使用する場合、大部分の CO₂ は貯留されたままだが、このプロセスは一般に、燃料生産が増加することで「新たな」CO₂ を生み出す。ただし、気候緩和のために CO₂ 貯留の増強が必要な場合は、追加の CO₂ を注入し、いくつかの石油・ガス貯留層で安全に貯留することができる。これにより、石油のライフサイクル排出がオフセットされ、結果的に確実な正味貯留が達成される¹⁵。

2.4 工業における全世界の運用例

図 2

稼働中または開発中の CCS 施設群¹⁶。



世界の回収・貯留能力は現在、CO₂換算で年間約4,000万トンである。

回収事業：

主要部門の工業規模施設において CCS が有効であることが立証されている（図 2）¹⁷。2020 年末現在、26 カ所が稼働中、3 カ所が建設中であった。13 カ所は開発が進んでフロントエンドエンジニアリング設計（基本設計）段階に入り、21 カ所が開発の初期段階となっている。世界の二酸化炭素回収・貯留能力は現在、CO₂換算で年間約 4,000 万トンである¹⁷。年間約 3,000 万トンの二酸化炭素が EOR 用として販売され、約 1,000 万トンが気候変動緩和を目的として地中に貯留されている。2030 年には貯留能力が CO₂換算で年間約 1 億 2,000 万トンに拡大することが期待される¹⁷。

現在進められている事業で使用される CCS は多岐にわたっている。

天然ガス精製は確実な CO₂分離技術を使用する。事業の例としては、米国のシュートクリーク（CO₂換算で年間 700 万トン）とセンチュリープラント（同 500 万トン）、オーストラリアのゴードン（同 400 万トン）が挙げられる¹⁷。

EOE 用 CO₂の燃焼後回収にアミン溶剤を使用する CCS 付き石炭火力発電は、2 カ所の発電所で安全かつ効率的に運用されている（2014 年からカナダ・サスカチュワン州のバウンダリーダム発電所¹⁷、2017 年からテキサス州のペトラノヴァ）。ペトラノヴァの操業は 2020 年に中止された。これは、油価下落がこのプロジェクトで使われていた EOR の側面に影響を及ぼしたためである¹⁸。

CCS 付きガス火力発電はまだ大規模な導入に至っていないが、米国の天然ガスコンバインドサイクル発電所では、永久的な貯留を伴わない小規模な CO₂回収が商業的に使用されている。エネルギー企業 6 社のコンソーシアムが、北東イングランドのティーズサイドでの「クリーンガス」プロジェクト計画を打ち出している。また、ハンバー地区でも似たようなガス発電 CCS プロジェクトが計画されている^{19, 20}。

工業用 CCS は以下の例を含め、数多く適用されている。

- カナダのアルバータ州の「クレスト」プロジェクトにおける「ブルー」水素生産は、アミン溶剤を使用し、純度 99.5%の二酸化炭素を年間 100 万トン回収する²¹。テキサス州のポートアーサー製油所は、圧力変動吸着法を使用して CO₂を分離し、純度 99%の水素を生産している²²。
- 世界の CO₂排出量の 8%を占めるセメント生産を脱炭素化するため、EU の Low Emissions Intensity Lime and Cement (LEILAC) 産学連携プロジェクトは、ベルギーのリクで実証施設を運用してきたが、現在ドイツ・ハノーバーでの大型施設を設計中である²³。
- ノルウェーのロングシップ CCS プログラムには、ブレビック・セメント工場とオスロ・フィヨルド地域の「廃棄物からのエネルギー回収施設」での CO₂回収が含まれており、この CO₂は液体の形で沿岸部の陸上ターミナルに運ばれ、そこからパイプラインで、北海の海底にあるノーザンライト・プロジェクトの貯留施設に送られる^{24, 25}。
- アブダビの Emirates Steel Industries 社は、初の CCS 付き製鉄所を開発した。ここではメタンを水素／一酸化炭素合成ガスに改質し、鉄鉱石の直接還元を使用する^{26, 27}。

貯留事業：

現在は、回収された CO₂の大半が石油増進回収（EOE）によって貯留されるが、気候緩和を目的とした高度な達成基準を満たすために地下貯留も実施され、監視されている²⁸。例えば、北海のシュレイプナルおよびスノービットの事業では塩水滞水層に年間 170 万トンの二酸化炭素、クレスト・プロジェクトの陸上滞水層では年間 100 万トンの二酸化炭素が貯留される¹¹。全世界で 12,000 ギガトン以上の潜在的 CO₂貯留資源が確認され、400 ギガトンが投資可能と評価された。

技術の力で貯留場所の詳細な監視を行うことで、安全性と現地規則の遵守を徹底する。例えば、繰り返し反射法地震探査は、貯留後のCO₂の安全性と反応を確認することができる。二酸化炭素 2,000 万トンが封

じ込められているシュレイプナル貯留場では、地下 1 キロメートルの深さに位置する厚さ 1 メートル強の二酸化炭素の層を検出できるほどである^{29,30}。

3. 研究・開発・導入の優先課題

多くの技術がそうであるように、導入を阻む最も大きな障害はコストである。IPCC は、(2015 年の価格で) CCS を通じて排出を回避するためのコストを、ガス精製とバイオエタノール生産における最も経済的な用途で CO₂ 換算トン当たり 20 ドル、化石燃料火力発電用途で CO₂ 換算トン当たり 60~140 ドル、最も高額なセメント用で CO₂ 換算トン当たり 190 ドル近くと見積もっている³。これらの数字に対し、2020 年の価格付けを適用した世界の排出量の 22% の CO₂ の平均価格は CO₂ 換算トン当たりわずか 2 ドルにとどまっている³¹。ただし、欧州連合域内排出量取引制度では、価格が CO₂ 換算トン当たり 50 ドルに達している³²。業界の試算によれば、低コストの好機に CCS を導入することにより、CO₂ 換算トン当たり 40 ドルという小さな経済的誘因で 4 億 5,000 万トンの CO₂ を回収・利用・貯留できる可能性がある¹⁷。

現在のプロジェクトの大多数が、CO₂ を EOR 用として石油会社に販売するガス精製とバイオエタノール事業である理由は、これらの経済的なハードルである。地層回収・輸送・貯留を実行可能にするためには、資本と操業コストが下がらなければならない。と同時に、多くの市場で炭素価格が上昇するか、あるいは貯留義務を課す必要がある。

多くの CCS 技術が実証済みだが、進歩を加速させるための重要な鍵を握るのは導入の拡大であるという点を調査結果は示唆している⁵。

3.1 導入の優先課題

導入のいくつかの側面がコストを抑え、新規の稼働を促すことが期待される。

学習の共有は、業界全体での習熟率を高め、コストを押し下げるための方法として実証済みである。例えば、Shell 社は「クエスト」プロジェクトが当初より 30% 少ない費用で構築が可能だと見積もっている³³。グローバル CCS インスティテュート (GCCSI) は、カナダのバウンダリーダム施設で CO₂ 換算トン当たり 100 ドルだった回収コストが、およそ 3 年後、米国のペトラノヴァ施設では 65 ドル未満に下がったとしている¹⁷。GCCSI の推定によれば、習熟率 (能力が 2 倍になるごとのコスト低下) を 8% とすると、CCS コストは 21 世紀半ばに半減することが期待される¹⁷。

産業クラスター (集積地) において、複数の回収拠点から CO₂ を収集するパイプラインや船舶を共用するなど、**インフラを共有**することによってコストが抑えられる。例えば、英国では CCS を利用した一連のクラスターの確立を支援するため、政府が 10 億ポンド (約 13 億 5,000 ドル) の拠出を約束している³⁴。これは、2050 年までにネットゼロを実現させるために必要と想定される年間 1 億 7,000 万 CO₂ 換算トンの貯留の一環である。こうした貯留能力の伸びは北海の石油・ガス開発に近いものの、その規模には及ばない。北海では 1 万 5,000 本の坑井が掘削され、4 万 5,000km のパイプラインが敷設された^{35,36}。

急速な発展を可能にするためには、**世界規模での知識共有**も同様に不可欠である。多くのプロジェクトは政府の支援を受けているため、デベロッパーは設計とパフォーマンスに関するデータをできる限り多く公表する必要があるかもしれない。

多くの CCS 技術が実証済みだが、進歩を加速させるための重要な鍵を握るのは導入の拡大であるという点を調査結果は示唆している。

回収コストを引き下げ、システム設計を改善するためには、**建設の加速と反復**が必要である。CCS チェーンの全ての構成要素といくつかの回収技術は、技術成熟度レベルが7~9と高く、試験レベルまたは実証規模の実施態勢がすでに整っている³⁷。

3.2 斬新な回収技術

すでに導入されている技術の進化に加え、回収効率を99%まで引き上げる、CCS設備のエネルギー需要を抑制する、あるいは設置コストを引き下げるといった方法で、中・長期的にコストパフォーマンスに重大な変化をもたらす可能性のある斬新な開発がいくつか存在する。

熔融炭酸塩型燃料電池 (MCFC) は、天然ガスなどの燃料源に含まれる水素と、煙道ガスに含まれるCO₂を使って電力・熱・水を生成する。捕捉されたCO₂は高濃度で燃料電池から排出されるので容易に分離することができる。

改良型燃焼サイクル：カルシウム・ケミカルルーピング（酸素運搬物質が2つの反応器を通して循環する）は、電力供給プロセスとの一体化を促進することにより、CO₂回収プロセスの基本効率を高める働きをする。

斬新な超臨界 CO₂ (sCO₂) 技術は、臨界温度と臨界圧力またはそれ以上のCO₂を使用する。この技術には、効率が良い、資本コストが小さい、CO₂回収率が高いといった潜在的利点がある。非常に大きな関心を集めている最新のsCO₂プロセスの一つが、まったく新しいタイプの発電所を生み出すアラム・サイクル方式 (Allam-Fetvedt Cycle) である。現存するコンバインドサイクル・ガスタービン (CCGT) プラントにCCSユニットを組み込むのではなく、単一のタービンだけでガスを酸素で燃焼させ、純化されたCO₂が回収やリサイクルされる前に、作業流体としてタービンを回す。テキサス州のアラム・サイクルの実証用モデルの正味効率は59%で、在来型ガス火力発電所並みと報告されている³⁸。

3.3 貯留研究の優先課題

1972年から、地下貯留施設へのCO₂注入が安全な方法で行われている。今後の課題は、数百万トン規模ではなく数十億トン規模での貯留に着手することである。そのためには、地下探知や坑井内センサといったモニタリングの改良が必要となる。CO₂の動きを追跡し、地下での貯留を確保するにあたっては、より強力なコンピュータモデルが役割を担うことになる。

コラム 1

エイコーン・プロジェクト：CCS・DACCS・水素の合体の実証

スコットランドで計画されているエイコーン拠点は、英国初のオフショアCO₂貯留ライセンスを付与され、CCS、DACCSおよび「ブルー」水素生産の実証を行う。第1段階として、アバディーンシャーのセント・ファーガス・ガスターミナルから年間約34万トンのCO₂を回収する。回収されたCO₂はおおよそ100km沖合の砂岩貯留層にパイプラインで送られる³⁹。第2段階では、新プラントがセント・ファーガスの天然ガスから「ブルー」水素を生産し、CO₂を貯留し、全国送ガスシステムに水素を供給する。当初のレベルは2%だが、その後20%に引き上げること

により、この沖合貯留層は、工業施設、ピーターヘッド港経由で輸送されるCO₂など、他の場所からのCO₂を追加的に受け入れる可能性もある。Carbon Engineering社のDACCSは、CO₂を貯留し、Pale Blue Dot Energy社が開発するセント・ファーガス付近の計画中の施設との間でパイプラインと海底貯留層を共有することも考えられる⁴⁰。このプロジェクトは、英国の「産業脱炭素化チャレンジ (Industrial Decarbonisation Challenge)」の一環として、英国研究・イノベーション機構 (UKRI) から3,100万ポンドの支援を受けた⁴¹。

3.4 ネガティブエミッション技術 (NET)

将来的な導入の可能性を見据え、大気中のCO₂を回収するネガティブエミッション技術が研究されている。一部の従来型排出だけでなく、低減が困難な排出をもオフセットするためにはこの技術が必要かもしれないからである。北米と欧州の複数の小規模事業で、炭素直接空気回収・貯留

(DACCS) が試験的に導入されている。これらは一般に化学的プロセスを使用する。コストはCO₂換算トン当たり200ドル～600ドルと推定される⁴²。コスト低減の可能性を持つ要因には、小型モジュール式プラントを貯留場所のすぐ上で迅速に組み立て、逐次学習を行うことによるプロセス改善が含まれる。

このほか現在研究が進められているネガティブエミッション技術としては、木材・藁・コルクなどの建築材料や、レンガなどの人工製品を、CO₂を封じ込める方法で生産する、炭素回収・利用 (CCU) 技術が挙げられる。バイオ炭は、土壌に炭素を貯留する安定した長寿命製品である。熱分解、または少量の酸素でバイオマスを燃焼させることにより生成される。

回収・貯留付きバイオマス発電 (BECCS) は、ネガティブエミッションを達成するための気候モデルの中心的存在として取り上

げられる。穀物や樹木に成長の過程でCO₂を吸収させたのち、CO₂を回収しながら発電や燃料に使用するからである。しかし、例えば、土地開墾や収穫の際に炭素が放出されるため、実際のカーボンフットプリントについてはかなりの議論がある⁴³。一部の専門家は、例えばトウモロコシ、耕作に適した麦稈、またはもみ殻を使用し、BECCSを持続可能な方法で適用できると主張している⁴⁴。

従来型の回収・貯留 (CCS) の短所としては、大規模工業施設から純粋なCO₂を回収することに依存している点が挙げられる。これに対し、多くのNET技術は、貯留場所の近くに設置した小型モジュール式設備で、低純度のCO₂を使って導入できる。

NETの将来的なコストを、最も高コストなCCSの適用より低く抑えられるようであれば、低減が困難な排出のオフセットにNETを利用できるかもしれない。例えば、あるセメント工場で、コストがCO₂換算トン当たり120ドルのCCSによって60%の排出を除去できるが、残った排出除去にはCO₂換算トン当たり300ドルのコストがかかる場合、事業者はNETが提供する空気からのCO₂回収を購入するかもしれない。結果として、これが世界的にCO₂回収の価格上限を形成する可能性がある。

コラム2

土地風化促進法

風化促進の一形態に、玄武岩などの細かく粉碎した岩粉を農地に撒くという、一世紀の歴史を持つ農法の強化がある。このプロセスは、大気中からCO₂を除去し、炭酸イオンと重炭酸イオンに転換する化学反応を加速させる。これらのイオンは洗い流されて海に流れ込み、アルカリ度を高めるか、あるいは石灰石のような炭酸塩鉱物として土壌に沈殿する。この方法は、同時に穀物の生産高を増やし、作物を害虫から保護し、土壌の肥沃度を支えることができる⁴⁵。岩石風化促進法の小規模実地試験におけるCO₂回収量は1m²当たり110～220gの範囲と推定され、回収効率率は60%前後であった。玄武岩は、例えば、オーストラリア、ブラジル、米国などの

国において金やダイヤモンド、ニッケルの採掘で生じる廃棄物として大量に入手可能である。採鉱が社会的・政治的問題を生じる可能性はあるものの、CO₂換算で年間7億～12億トン分の隔離を行うための十分な材料が提供されることになる。CO₂換算で年間5億～20億トン除去するためのコストは、CO₂換算トン当たり80～180ドルと見積もられている⁴⁶。化学反応速度を加速させるために、廃棄岩を予め粉碎しておくことが重要となる。粉碎のための大きな炭素エネルギーが炭素の正味回収量を著しく減少させるためである。風化促進法の潜在的な可能性を測定するためには、さらなる研究と実証が必要である。

4. CCSの実現に必要なアクションー どのようにして拡大させるか

常に浮上するのが、互いに
関係し合う、
CCSの3つの
根本的障害、
すなわちコスト、貯留の安
全性、規制枠
組みである。

常に浮上するのが、互いに関係し合う、
CCSの3つの根本的障害、すなわちコスト、貯留の安全性、規制枠組みである。これ障害には、科学的証拠、技術イノベーション、政策立案を組み合わせることができる。コストを抑え、導入を促進し、安全な貯留を実証する機会を事業者提供するための政策枠組みが必要である。

一つの政策オプションは、有効性とコスト面で重要な変化を示す新技術を生み出すための研究に重点を置くことだろう。しかしながら、上述の斬新な方法は支援に値するものの、これまでの技術イノベーションと技術移転の速度を考えると、少なくとも2040年までは、こうした画期的な選択肢が大きな規模で実現されることは期待できない。

進歩のための最優先事項は、利用可能な技術をより幅広く導入することで、体験による学習を通じてコストを押し下げることだと過去の証拠が示している。広範囲にわたるCCSの導入はGHG排出の大幅削減につながるだけでなく、高価値の雇用創出や大気の浄化など、市民の支持が得られそうなメリットを多数もたらす可能性がある。

CCSは、ネットゼロ実現に向けたさまざまな戦略に取り入れることができる。CCSは、プロセス排出が発生する産業や、ガス火力発電所、セメント生産といった、何らかの形で化石燃料の使用が継続する産業において、排出を大幅に削減できる。多数の用途で使用される水素などのエネルギーベクトルを脱炭素化することも可能である。

CCSは、排出されたCO₂を大気中から再回収することにより、「循環型炭素経済」を形成することができる。同時に、石炭の代わりに水素を使用する製鉄など、よりクリーンな工業プロセスへの移行期の役目を果たすことができる。政策決定者は、化石燃料を長期的に体制に組み込むことを避けたいと考えているからだ。

特に、カーボンゼロのエネルギー選択肢に取って代わられる前に投資を取り戻そうとするのであれば、政策による経済的誘因の提供が必要である。当初は補助金、技術に基づく性能基準、および排出取引または課税を通じてのカーボンプライシングによってこうした誘因を提供することができるが、CO₂貯留が確実に開始されるようにするためには、追加的な誘因も必要である。特に、政府の規制を通じて、継続的なCO₂生成がCO₂貯留によって相殺されるよう保証することにより、市場の成長を確実にすることができる⁴⁷。

CCSの初期投資と運用コストの両方に対処するための一つの方法として「炭素回収義務」がある。これは、化石燃料の生産者と輸入者に、自社が販売する製品の生産・精製・輸送・使用によって生じるCO₂の一部を貯留することを義務付け、貯留するCO₂の割合を徐々に増やしていくという方法である⁴⁷。継続的排出が、地下に貯留される同量の炭素によって必ず長期にわたり相殺されるようにするため、この割合を100%まで、場合によってはそれ以上に引き上げていく。

5. 結論

発電、水素生産、排出集約産業およびその他の排出低減が困難な活動を完全に脱炭素化するためには、特に短・中期的に CCS を運用可能にすることが必要である。CCS プロジェクト構築の現在の進行速度は遅すぎて、2050 年までにネットゼロを実現するという目標に十分に寄与するために必要な能力を形成できない。CO₂貯留を経済的に支援し、義務付ける行政機関のアクションが

不可欠である。今、コスト削減とテクノロジーのスケールアップの進展を加速させるための最善の方法は、CCS 導入主体のアプローチである。政策は重要だが、向こう 10 年間の実現がどうしても必要である。IPCC の予測が示すように、CCS がなければパリ協定の目標には手が届かない可能性が高いからである。

この報告資料は、排出ネットゼロを実現させ、気候変動に適応するための世界的な取り組みを、科学と技術がいかに後押しできるかを検討する一連の資料の一つである。この報告資料集は、各国が 2050 年までのネットゼロに向けた自国のロードマップを策定するにあたり、科学的情報が状況の理解とアクションを助けることができる 12 の課題に関して全世界の政策決定者に情報を提供することを目的としている。

全資料をご覧になりたい方は、royalsociety.org/climate-science-solutions をご参照ください。

この著作物の文章は、クリエイティブ・コモンズ表示ライセンスの条件のもとで認可されています。原作者および出所のクレジットが表示される限り、無制限の使用が認められます。

ライセンス入手先：creativecommons.org/licenses/by/4.0

発行：2021 年 5 月 DES7287_7 © The Royal Society

参考文献

1. Alcalde J *et al.* 2018 Estimating geological CO2 storage security to deliver on climate mitigation. *Nature Commun*, **9**, 2201. (doi: 10.1038/s41467-018-04423-1)
2. Holloway S, Pearce J, Hards V, Ohsumi T, Gale J. 2007 Natural emissions of CO2 from the geosphere and their bearing on the geological storage of carbon dioxide. *Energy* **32**, 1194–1201. (doi:10.1016/j.energy.2006.09.001)
3. IPCC. 2018 Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty. See <https://www.ipcc.ch/sr15/> (accessed 12 December 2020).
4. Climate Change Committee. 2020 Reducing UK emissions: Progress Report to Parliament. See <https://www.theccc.org.uk/publication/reducing-uk-emissions-2020-progress-report-to-parliament/> (accessed 12 December 2020).
5. Haszeldine RS, Flude S, Johnson G, Scott V. 2018 Negative emissions technologies and carbon capture and storage to achieve the Paris Agreement commitments. *Phil. Trans. R. Soc. A*. **376**, 20160447. (doi:10.1098/rsta.2016.0447)
6. International Energy Agency. 2020 CCUS in the transition to net-zero emissions. See <https://www.iea.org/reports/ccus-in-clean-energy-transitions/ccus-in-the-transition-to-net-zero-emissions> (accessed 15 December 2020).
7. Global CCS Institute. Capturing carbon dioxide (CO2). See <https://www.globalccsinstitute.com/about/what-is-ccs/capture/> (accessed 15 December 2020).
8. McKinsey & Company. 2020 How oil and gas companies can decarbonize. See <https://www.mckinsey.com/industries/oil-and-gas/our-insights/the-future-is-now-how-oil-and-gas-companies-can-decarbonize> (accessed 15 December 2020).
9. Scottish Carbon Capture & Storage. CCS Education Centre. See <https://www.sccs.org.uk/> (accessed 15 December 2020).
10. European Commission. 2019 The potential for CCS and CCU in Europe. See https://ec.europa.eu/info/sites/default/files/iogp_-_report_-_ccs_ccu.pdf (accessed 15 December 2020).
11. Northern Lights. 2021 What it takes to ship CO2. See <https://northernlightscs.com/news/what-it-takes-to-ship-co2/> (accessed 15 March 2021).
12. Neele F *et al.* 2017 CO2 Transport by Ship: The Way Forward in Europe. *Energy Procedia* **114**, 6824–6834. (doi:10.1016/j.egypro.2017.03.1813)
13. National Energy Technology Laboratory. Carbon Storage FAQs. See <https://www.netl.doe.gov/coal/carbon-storage/faqs/carbon-storage-faqs> (accessed 15 January 2021).
14. Climate Action. 2011 Implementation of Directive 2009/31/EC on the Geological Storage of Carbon Dioxide. See https://ec.europa.eu/clima/sites/clima/files/lowcarbon/ccs/implementation/docs/gd3_en.pdf (accessed 18 January 2021).
15. Stewart RJ, Johnson G, Heinemann N, Wilkinson M, Haszeldine RS. 2018 Low carbon oil production: Enhanced oil recovery with CO2 from North Sea residual oil zones. *International Journal of Greenhouse Gas Control* **75**, 235–242. (doi:10.1016/j.ijggc.2018.06.009)
16. Global CCS Institute. 2020 Global Status of CCS 2020. <https://www.globalccsinstitute.com/wp-content/uploads/2021/03/Global-Status-of-CCS-Report-English.pdf> (accessed 18 January 2021).
17. SaskPower. Boundary Dam Carbon Capture Project. See <https://www.saskpower.com/Our-Power-Future/Infrastructure-Projects/Carbon-Capture-and-Storage/Boundary-Dam-Carbon-Capture-Project> (accessed 15 March 2021).
18. NRG. Petra Nova: Carbon Capture and the future of coal power. See <https://www.nrg.com/case-studies/petra-nova.html> (accessed 18 January 2021).
19. Net Zero Teesside. The UK's first decarbonised industrial cluster. See <https://www.netzeroteesside.co.uk/> (accessed 15 March 2021).
20. SSE. 2021 Plans for first-of-a-kind hydrogen and CCS projects. See <https://www.sse.com/news-and-views/2021/04/plans-for-first-of-a-kind-hydrogen-and-ccs-projects/> (accessed 16 April 2021).
21. Alberta Government. Quest Carbon Capture and Storage project: annual report 2019. See <https://open.alberta.ca/publications/quest-carbon-capture-and-storage-project-annual-report-2019> (accessed 15 March 2021).
22. Air Productions. Carbon Capture. See <https://www.airproducts.co.uk/company/innovation/carbon-capture/#/> (accessed 18 January 2021).
23. Low Emissions Intensity Lime & Cement. FAQs – Frequently Asked Questions. See <https://www.project-leilac.eu/faq> (accessed 15 March 2021).
24. Northern Lights. 2021 What we do. See <https://northernlightscs.com/en/about> (accessed 15 March 2021).
25. CCS Norway. The Longship CCS Project. See <https://ccsnorway.com/the-project/> (accessed 15 March 2021).
26. Global CCS Institute. 2017 CCS: a necessary technology for decarbonising the steel sector. See <https://www.globalccsinstitute.com/news-media/insights/ccs-a-necessary-technology-for-decarbonising-the-steel-sector/#:~:text=The%20Abu%20Dhabi%20CCS%20Project%20%2D%20also%20called%20Emirates%20Steel-%20Industrie s,produced%20by%20the%20DRI%20reactor> (accessed 15 March 2021).
27. Abu Dhabi Carbon Capture Company. 2017 Case Study: Al Reyadah CCUS Project. See <https://www.csiforum.org/csif/sites/default/files/documents/Abu%20Dhabi2017/AbuDhabi17-TW-Sakaria-Session2.pdf> (accessed 15 March 2021).
28. Jenkins C. 2020 The State of the Art in Monitoring and Verification: an update five years on. *International Journal of Greenhouse Gas Control* **100**, 103118. (doi: 10.1016/j.ijggc.2020.103118)
29. Pevzner, R *et al.* 2017 4D surface seismic tracks small supercritical CO2 injection into the subsurface: CO2CRC Otway Project. *International Journal of Greenhouse Gas Control* **63**, 150-157. (doi: 10.1016/j.ijggc.2017.05.008)
30. Chadwick RA, Marchant BP & Williams GA. 2014 CO2 storage monitoring: leakage detection and measurement in subsurface volumes from 3D seismic data at Sleipner. *Energy Procedia* **63**, 4224-4239. (doi: 10.1016/j.egypro.2014.11.458)

31. World Bank Group. 2020 State and Trends of Carbon Pricing 2020. See <https://openknowledge.worldbank.org/bitstream/handle/10986/33809/9781464815867.pdf?sequence=4&isAllowed=y> (accessed 08 February 2021).
32. Ember. Daily EU ETS carbon market price (Euros). See <https://ember-climate.org/data/carbon-price-viewer/> (accessed 15 March 2021).
33. Hydrocarbon Engineering. 2019 Shell's Quest CCS facility reaches CO2 capture milestone. See <https://www.hydrocarbonengineering.com/the-environment/24052019/shells-quest-css-facility-reaches-co2-capture-milestone/> (accessed 15 March 2021).
34. HM Government. 2020 The Ten Point Plan for a Green Industrial Revolution. See <https://www.gov.uk/government/news/pm-outlines-his-ten-point-plan-for-a-green-industrial-revolution-for-250000-jobs> (accessed 15 January 2021).
35. Helmholtz Centre for Ocean Research Kiel (GEOMAR) Extensive gas leaks in the North Sea: Abandoned wells. See <https://www.sciencedaily.com/releases/2020/07/200730113055.htm#:~:text=The%20positions%20of%20the%20boreholes,Sea%2C%20adds%20Dr%20Haeckel> (accessed 18 February 2021).
36. Oil & Gas UK. 2013 Decommissioning of pipelines in the North Sea Region 2013. See <https://oilandgasuk.co.uk/wp-content/uploads/2019/05/OGUK-Guidelines-on-Decommissioning-of-Pipelines-in-the-North-Sea-Region-Issue-1.pdf> (accessed 18 February 2021).
37. Bui M *et al.* 2018 Carbon capture and storage (CCS): the way forward. *Energy Environ. Sci.* **11**, 1062. (doi: 10.1039/C7EE02342A)
38. International Energy Agency. 2020 The role of CCUS in low-carbon power systems. See <https://www.iea.org/reports/the-role-of-ccus-in-low-carbon-power-systems> (accessed 18 February 2021).
39. Pale Blue Dot. Acorn CCS & Acorn Hydrogen. See <https://pale-blu.com/acorn/> (accessed 18 February 2021).
40. Pale Blue Dot. 2020 Pale Blue Dot Energy and Carbon Engineering create partnership to deploy Direct Air Capture in the UK. See [https://pale-blu.com/2020/09/17/pale-blue-dot-energy-and-carbon-engineering-create-partnership-to-deploy-direct-air-capture-in-the-uk/#:~:text=News-,Pale%20Blue%20Dot%20Energy%20and%20Carbon%20Engineering%20create%20partnership%20to,Air%20Capture%20in%20the%20UK&text=Pale%20Blue%20Dot%20Energy%20are,2\)%20out%20of%20the%20atmosphere](https://pale-blu.com/2020/09/17/pale-blue-dot-energy-and-carbon-engineering-create-partnership-to-deploy-direct-air-capture-in-the-uk/#:~:text=News-,Pale%20Blue%20Dot%20Energy%20and%20Carbon%20Engineering%20create%20partnership%20to,Air%20Capture%20in%20the%20UK&text=Pale%20Blue%20Dot%20Energy%20are,2)%20out%20of%20the%20atmosphere) (accessed 18 February 2021).
41. UK Research and Innovation. 2021 UKRI awards £171m in UK decarbonisation to nine projects. See <https://www.ukri.org/news/ukri-awards-171m-in-uk-decarbonisation-to-nine-projects/> (accessed 12 April 2021).
42. The Royal Society & Royal Academy of Engineering. 2018 Greenhouse gas removal. See <https://royalsociety.org/topics-policy/projects/greenhouse-gas-removal/> (accessed 20 January 2021).
43. Brack D & King R. 2020 Managing land-based CDR: BECCS, Forests and Carbon Sequestration. *Global Policy* **12**, 45-56. (doi: 10.1111/1758-5899.12827)
44. Department for Business, Energy & Industrial Strategy. 2020 The potential of bioenergy with carbon capture. See <https://www.gov.uk/government/publications/the-potential-of-bioenergy-with-carbon-capture> (accessed 19 February 2021).
45. Beerling DJ *et al.* 2018 Farming with crops and rocks to address global climate, food and soil security. *Nature Plants* **4**, 138-147. (doi: 10.1038/s41477-018-0108-y)
46. Beerling DJ *et al.* 2020 Potential for large-scale CO2 removal via enhanced rock weathering with croplands. *Nature* **583**, 242-248. (doi: 10.1038/s41586-020-2448-9)
47. Carbon Takeback. See <https://carbontakeback.org/> (accessed 08 February 2021).