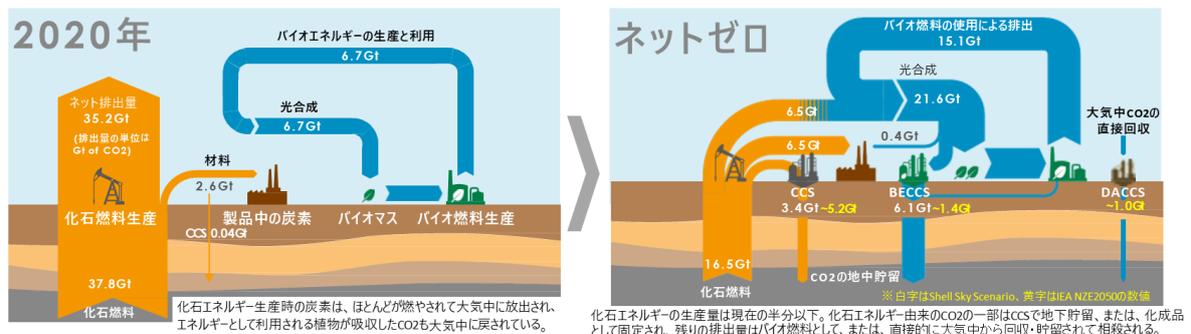


二酸化炭素回収貯留の事業と技術の将来

◆CCSの拡大と産業化が温暖化防止に必要とされる理由

世界が持続可能な社会に移行するために、地球の平均気温上昇を産業革命以前よりも1.5℃以下に抑制することが世界共通の目標となった（パリ協定第2条）。それには、化石資源に依存する経済産業活動からの脱却が必須であるが、原料・燃料の削減や代替だけでは不十分である。化石資源を使い続ける限り発生するCO₂を回収して大気に放出しない状態とする必要があるからだ。

現状のエネルギー経済システムにおいては、石油、石炭、天然ガスなどの生産によって生じる炭素の殆どが利用時に燃焼されて大気に放出されるだけでなく、植物が吸収したCO₂もエネルギー資源として利用される際に大気中に戻される。大気中の炭素収支がバランスされた状態である、ネットゼロの実現のためには、再生エネルギーへのシフトによって化石エネルギーの生産量を半分以下とするだけでなく、発生するCO₂の多くを回収しつつ、残りの排出量もバイオ燃料として大気中から回収して相殺する必要がある。

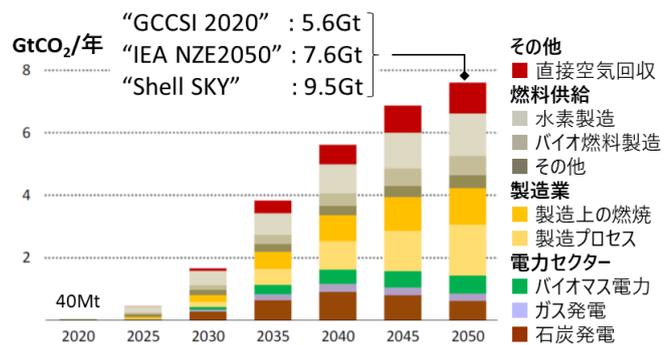


回収されたCO₂の行く末には2つの経路がある。一つは貯留であり、もう一つは再利用だ。二酸化炭素回収・貯留（CCS）とは、発電所や化学工場などから排出されたCO₂を濃縮して地下深くに圧入する技術である。二酸化炭素回収・利用（CCU）は、CO₂を原料として石油代替燃料や化学原料などの有価物に転換する。一般的には、両者を併せてCCUSとも呼ばれる。

国際エネルギー機関（IEA）が2020年9月に公表した「Energy Technology Perspective 2020, Special Report in CCUS」によれば、化成品や燃料として利用される炭素の一部は最終的に地下貯留されるが、殆どは焼却炉や動力機関に

よって大気に再放出されることが指摘されている。そのため、20年には、回収された0.16Gt¹の化石由来のCO₂のうち、0.04Gtが地下貯留されて0.12Gtが大気放出されたが、ネットゼロ実現時には、地下貯留を6.6Gtに増加させつつも、再放出量は現状よりも削減して0.05Gtとする姿が示されている。炭素リサイクルと呼ばれる研究開発が目下の話題となっているが、仮に循環経済の下で炭素が複数回のサイクルに亘って再利用されたとしても、化石由来のCO₂を原料とする限りはカーボンニュートラルとはならない²。

以上の理由より、ネットゼロの実現には、製造業から2.8Gt、火力発電から1.4Gt、水素製造から1.4Gt、燃料製造から1.0Gt、大気中から1.0GtのCO₂を毎年回収して計7.1Gtを地下貯留する必要性がIEAや石油会社Shellにより予測されている。7.1Gtの数値は



ネットゼロにおける排出源セクター別のCO₂回収量
("Net Zero by 2050", IEAより引用作成)

現在、運用中の設備能力の160倍となるが、貯留の潜在可能性のある場所は世界各地に存在する。具体的には、既知の石油・ガス田を活用すれば数100Gtの収容能力があり、塩水層には数1,000Gtのポテンシャルがある。CCSの実証や商用運転は既に各国で行われており、日本でも苫小牧（北海道）で実証され、柏崎（広島県）、有明（福岡県）、舞鶴（京都府）でも部分的実証や準備が進められている。つまり、貯留場所はCCSの拡大の制限とはならない。他の廃棄物処理と同様に、コスト負担と削減の仕組みが産業化の鍵である。

◆ASEAN・豪州でもCCSの実証検討が始まる

21年6月22日、経済産業省と東アジア・アセアン経済研究センターは、ASEAN、豪州、米国、日本の計13カ国が参加してアジア全域でのCCUSの活用に向けた情報共有や事業環境整備を目指す「アジアCCUSネットワーク」の立ち上げを発表した。IEAの報告書「東南アジアにおけるCCUSの機会」（21年6月21日公表）によれば、

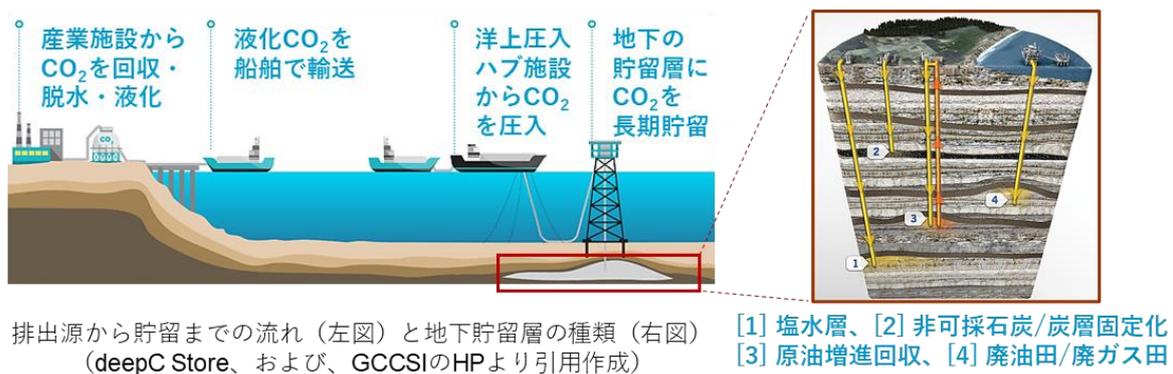
¹ 以下、CO₂の数量を Gt（10 億トン）、Mt（100 万トン）と表記する。

² バイオや大気中由来の CO₂ 利用ならば、カーボンニュートラルとなる可能性がある。

今後も化石燃料需要が増加する東南アジアでのCCUSの役割は大きく、30年時点で35Mt、50年には200Mt以上の回収が望まれる。その実現には25年から30年までに毎年10億ドルの投資が必要とされ、革新的な分離回収技術や長距離間の船舶輸送の実証、2国間クレジット制度の活用など、日本の貢献が期待されている。

21年6月15日、豪州を拠点とする海洋ガス田開発企業Transborders Energyは、JX石油開発、および、東邦ガスと、洋上CO₂貯留施設「deepC Store」の共同開発契約を締結した。deepC Storeは、アジア太平洋地域の産業施設から回収したCO₂を船舶で輸送し、豪州沖合の地下に長期貯留する設備である。両社は、既存提携先である東京ガス、大阪ガス、九州電力などと共に、プロセスの概念設計、地下貯留層の選定、ファイナンスを含む主要契約条項の事前協議を進める。

21年9月14日、豪州の石油・ガス製造業Santosが、東ティモールのBayu-Undan沖合の石油貯留層をCCSとして利用する実行可能性の共同調査を行うために同国の石油鉱業評議会との覚書を締結した。Bayu-Undan貯留層には年10MtのCO₂を貯留できる可能性が予測されている。東ティモール政府は、これまで自国の経済を支えてきた石油産出の資産が脱炭素移行で座礁するリスクを見越し、他国のCO₂を受け入れるための貯留地に転用することで、将来の財源となる排出権取引枠や炭素クレジットを確保する。



◆ CCSの適用が期待される産業とビジネスの現状

CCSの展開加速のために各国政府の主導で設立されたシンクタンク「Global CCS Institute」(GCCSI)によれば、各産業セクターでのCCSの必要性を次の通りに分類している。i) セメント、製鉄、化学など、本質的にCO₂排出や高温加熱を伴う製造業を脱炭素化する。ii) 石炭や天然ガスとCCSとの併用によって低炭素水素（ブルー水素）を安価に製造する。iii) 再エネの大規模導入時に課題とな

る送電系統の不安定性に対して火力発電とCCSの併用で補完する。iv) CO₂削減が困難な産業セクターでの排出残補償のために後述のBECCSやDACCSなどのネガティブエミッションを活用する。v) CO₂排出量の大きな既存産業にCCSを適用することでネットゼロ経済移行期の資産座礁や失業を防止する。

IEAによれば、より具体例に、水素製造（天然ガス、石炭、産廃プラスチック由来）、製鉄・セメント製造、火力発電（バイオマス、天然ガス、石炭）、化成品・燃料合成（アンモニア、メタノール、高付加価値品）のプロセスからのCO₂貯留を50年のカーボンニュートラル実現までに導入することが期待されている。

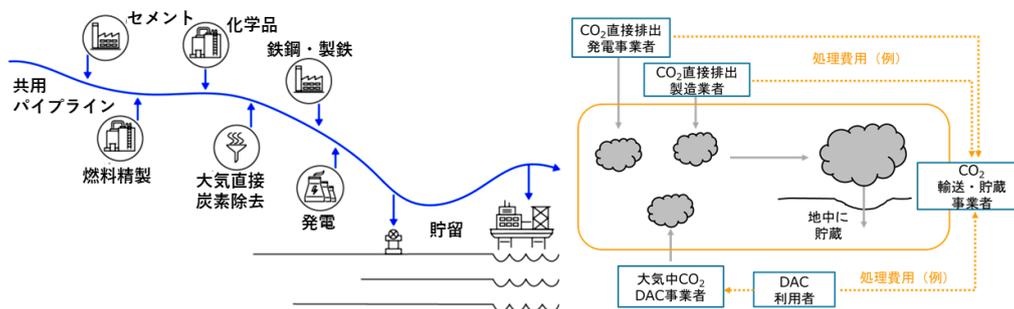
現在までに、世界の65カ所でCCS施設が運転されており、毎年40MtのCO₂が貯留されている。米国では、連邦政府による45Q税控除やカリフォルニア州の低炭素燃料基準による排出権取引が商用化を牽引した。同国中西部に広がるバイオエタノール工場のCO₂をパイプラインで南部に輸送し、石油・ガス田で原油増進回収（EOR）に用いる事業が拡大した。EORとは、CO₂圧入で残留石油・ガスの産出を行う技術であり、化石エネルギーの需要が続く限りは付加価値を生む。

一方、脱炭素の旗頭である欧州では、社会的批判を受ける石油・ガス会社による脱炭素化目的での地下貯留が急速に発生しつつある。しかしながら、一般の廃棄物処理と同様に単なるCO₂の貯蔵だけでは付加価値は生まれず、補助金、ないしは、炭素税や排出権取引が産業の原資とならざるを得ない。GCCSIによれば、炭素価格が50から100ドル/tCO₂となる30年代には、CO₂の回収から貯留までのコストも約50から90ドル/tCO₂までに低減されており、CCSの各バリューチェーンでの利益配分が可能になると予測される。

このような背景から、来るべきCCS産業の将来像を見越した、「ハブ&クラスター型」の事業モデルが形成されつつある。ハブ&クラスターとは、大規模排出源の事業者が座組の長となり、近隣の火力発電や化成品・セメント製造業などの複数の中低規模排出源の事業者との協業体を構成し、パイプラインや貯留設備を共用する仕組みである。規模の経済効果で投資リスクを低減しつつ、操業を安定化させることが狙いだ。この仕組みは欧州以外にも転移され、各国で新たに設置されるCCS拠点の事業モデルの標準となりつつある。

結果的に、天然ガス処理やバイオエタノール製造の大規模排出源からのCO₂回収とEOR利用が従来のCCS事業の主流であったが、次第に、中小規模排出源の事業

者もCCSに参入しつつある。これに伴い、より低コストで汎用性のあるCO₂回収技術が市場で要求されつつある。



ハブ&クラスター型事業モデルのイメージ (左図：“Global Status of CCS 2020”, GCCSIより引用作成)

◆新しい事業モデルが欧州企業から始まる

21年9月8日、ノルウェーの設備メーカー Aker Carbon Capture (ACC) が、同国のバイオ炭製造業 Carbonor の脱炭素化の共同開発契約を締結した。ACCの小型CO₂回収設備「Just Catch 100」を炭製造プロセスに接続し、24年5月から稼働する Øygarden 島沖合の貯留地への輸送と圧入までの一貫サービスを提供する。



Akerのモジュラー型CO₂回収装置「Just Catch」。既設燃焼炉に附帯でき、移設も可能である。(同社のHPより引用)

利用者である Carbonor は、炭素回収量に応じた料金を支払う。ACC は、セメント会社などの大規模排出事業者には年間40万トン級の大型設備を販売しつつ、複数の中小規模排出事業者には10万トン級の小型設備の利用を柔軟な支払いサービスで提供してハブ&クラスターに取り込む。結果的に貯留地の稼働率を向上でき、コストを排出権取引などの炭素価格の範囲内にまで落とし込める。これが、ACCの事業モデル「Carbon Capture as a Service」だ。

21年8月17日、デンマークの Aalborg Portland Cement は、Ineos など29の企業・研究機関・大学とのコンソーシアムと共に、セメント製造から排出されるCO₂を貯留する欧州初の実証パイロットの建設に合意した。同国 North Jutland のセメント工場で回収されたCO₂はタンカー船でデンマーク領北海の Nini West 油田貯留層に輸送され、22年後半から洋上注入を行う。北海には16Gt、EUの全海域では300GtのCO₂貯留能力がある。コンソーシアムは将来的にハブ&クラスターに発展し、デンマークの全排出量の4分の1に相当する年間800万トンのCO₂を貯留し、同国が目標とする30年までのCO₂排出量70%削減への貢献を目指す。

◆ CCSとCCUの共通基盤となるCO₂分離回収技術

CO₂の地下貯留、或いは、再利用のいずれの場合でも、酸素、窒素、水素などとの混合ガスからCO₂を選択的に分離して高濃度・高純度で回収するプロセスが必要であり、コスト削減の決め手となる。具体的には、溶媒を利用する化学吸収・物理吸収法、固体材料を利用する化学吸着・物理吸着法、膜分離法、深冷分離法が従来から開発・実用化されている。稀に、ケミカルループ法、静電気法なども利用されており、最近では電気化学的手法も研究されている。

吸収法・吸着法の場合には、吸収液・吸着材に混合ガスを接触してCO₂のみを単離し（分離）、CO₂が希薄なガスで洗い流すことで脱着を行う（回収）。これらの工程でCO₂を分離する駆動力（温度差、CO₂濃度差・分圧差、湿度差など）との組み合わせによって、同じ材料でも様々なプロセスが存在する。

プロセスの設計指標には、処理前ガスの圧力・組成、処理前後でのCO₂回収率、処理後ガス中のCO₂濃度、また、材料腐食性、排気・廃液処理などが挙げられるが、分離回収エネルギーが最重要であり、運転コストに直接的に影響する。分離回収エネルギーは、同じ材料やプロセスであっても処理前ガスのCO₂濃度・分圧に依存する。このため、分離を行う処理前ガスのCO₂濃度・分圧に適した、運転エネルギーが最小となる材料やプロセスの設計が求められる。さらに、プロセスの分離回収エネルギーが同じであっても、運転コストは設置場所で調達できる電力や熱源に依存する。そのため、設備実装の際には対象とするプロセスに密着した高度な専門技術が求められる。

前述のIEAのネットゼロシナリオによれば、50年に7.6GtのCO₂回収が必要とされる。古典的な技術では分離回収エネルギーが高いため（約4.0GJ/tCO₂）、年間32兆円の運転経費が必要であるが、エネルギーの低い技術を実装できれば（日本政府目標は1.5GJ/tCO₂）、12兆円にまで抑制できる³。



CO₂分離回収の技術とコスト削減 ※輸送・利用・貯留コストは含まず
（「エネルギー関係技術ロードマップ」経産省（2014年）より引用）

³ 天然ガス価格を 10 ドル/MMBTU とする。

◆CO₂分離回収技術を開発提供する米国企業

現状では、三菱重工、Shell、Acerなどの大手のエンジニアリング会社や石油会社がCO₂分離回収の設備事業の主流である。一方、米国には、独自の吸着材料や分離膜を研究する大学やベンチャー企業だけでなく、プロセス技術を開発する専門会社も複数存在する。例えば、化学プロセスのシンクタンクSRI Internationalは、ポリアミン担持シリカ粒子を開発し、ノルウェーのセメント工場でのパイロット試験を実施した。この技術は、Baker Hughesにライセンス譲渡されている。TDA Researchは、アルカリ化アルミナ系吸着材を用いて概ね等温等圧下でのCO₂濃度差で吸着・再生を行うプロセスを開発し、石炭火力発電所でのパイロット実証を行った。膜分離技術の開発会社である、Membrane Technology and Researchは、ポリエチレングリコール系分離膜によるCO₂分離とH₂分離のハイブリッドプロセスを提案。石炭ガス化複合発電所の合成ガスからのCO₂回収コストを試算して約2,500円/tCO₂に目途を付けた。技術系NPOのGas Technology Instituteは、酸化グラフェン膜とPEEK膜の直列モジュールプロセスを開発し、石炭火力発電所でのパイロット実証を行った。



a) TDAによるSinopec工場でのパイロット実証
 b) RTIによる非水溶媒系吸収材のパイロット実証
 c) GTIが試作した酸化グラフェン膜モジュール

◆CO₂分離回収技術の実証を支援する米国・欧州政府

さらに、米国とノルウェーには、実ガス実証のパイロット設備が複数あり、企業や大学の技術開発の支援体制が整備されている。

米国エネルギー省（DOE）傘下のエネルギー技術研究所の資金提供で設立されたNational Carbon Capture Centerには、石炭ガス化炉と石炭火力発電の実ガス試験を提供する環境が整っており、DOE予算で運営される開発テーマの多くが実証試験を行っている。また、Wyoming州政府と地域電力会社の協業で設立された、Wyoming Integrated Test Centerには、20MW級の石炭火力発電の煙道ガスを

用いた試験設備が提供されており、川崎重工による利用実績もある。University of Kentuckyにも、石炭発電の燃焼後回収の実ガス設備があり、硫化水素などの影響を検証できる。

ノルウェーの国営石油会社Gassnova、および、Equinor、Shell、Totalが設立した、Technology Centre Mongrstadには、石油精製プラントと天然ガス火力発電の2種類のCO₂回収設備が提供されている。Aker、Shell Cansolv、Flourなど大手設備メーカーの利用実績があり、21年からは固体吸着材や分離膜の実証設備も新たに稼働を始めた。

◆将来技術であるネガティブエミッションへのCCSの適用

ネットゼロを超えて地球をさらに「冷やす」ためには、過去の経済・産業活動で大気中に蓄積されたCO₂を人工的に取り除く必要がある。所謂、ネガティブエミッションと呼ばれるプロセスであり、バイオマス発電（BE）や直接空気回収（DAC）で回収された大気中のCO₂をCCSで地下貯留する事業が検討されている。

BECCSとは、大気中からCO₂を吸収して成長したバイオマスを燃料として電力や熱を取り出しつつ、排気CO₂を回収貯留する技術である。国内では、東芝エネルギーシステムズによる、年間15万tCO₂の一部実証が始まった。また、プラスチックなどの化石原料由来の廃棄物と、大気中のCO₂が固定された紙・木材などのバイオマス廃棄物が混合されたごみを焼却処分する際、化石由来の廃棄物から発生するよりも多量のCO₂を回収貯留することで、ネガティブエミッションとなる。オランダの廃棄物処理事業者Twenceは、前述のACCの回収設備「Just Catch」をごみ焼却炉に実装し、ネガティブエミッションの商用運転を開始した。

DACCSとは、化学工学的手法で大気中からCO₂を直接に回収して地下に貯留する技術である。欧米のベンチャー企業Climeworks、Carbon Engineering、Global Thermostatによる商用化が先行しているが、国内でも川崎重工が移動層プロセスのベンチ実証を行った。米国でもDOEによる開発支援が急進しており、21年に立ち上がった開発プログラムに産官学が40件以上のテーマをエントリーした。従来法であるアミン系だけでなく、MOFなどの新たな吸着材、電気化学的分離、ケミカルループの利用、さらに、海水中からのCO₂除去も提案されている。

◆CCSによるネガティブエミッションの実用化が始まる

21年9月8日、スイスのベンチャー企業Climeworksがアイスランドに建設した、DACCS設備「Orca」の稼働を開始した。この設備は地熱発電で運転され、年間で約870台の自動車排出量に相当する4,000トンのCO₂を空気中から濃縮回収する。回収されたCO₂は地下1,000メートルの岩盤に圧入され、地熱によって約2年を掛けて鉱物化・固定化される。

21年9月10日、東芝エネルギーシステムズと石炭フロンティア機構を含む13法人は、環境省の公募テーマ「環境配慮型CCUS一貫実証拠点・サプライチェーン構築事業」に採択された。三川発電所のバイオマス燃焼炉の排ガスから1日あたり600トンのCO₂を分離回収し、パイプラインで低温液化圧縮設備に輸送して港湾から船舶で海上輸送までのバリューチェーンを実証する。将来的には、一連の設備をBECCSに拡張する計画である。

21年9月27日、国内大手の医薬品開発試験の受託企業である新日本科学が、九州大学とのCCSに関する共同研究契約を締結した。同社が鹿児島県内に所有する敷地を活用して、九州大学のカーボンニュートラル・エネルギー国際研究所がCO₂貯留の可能性を検討する。同社の敷地は地熱地域に該当するため、圧入後のCO₂が鉱物に変化して安定に貯留されることが期待される。

◆CCSの産業化を誘導する政策支援への期待

ネットゼロ実現のために拡大が期待されるCCSであるが、政策支援も必要だ。GCCISは、政府による3つのイニシアチブを提案する。i) インセンシティブ（税控除、炭素税、排出権取引、排ガス基準、政府調達）や財政投資によって回収・輸送・貯留事業者に収益を適切配分する。ii) CO₂排出者と貯留者の2者間のみによる事業運営では設備稼働率低下のリスクが伴い、コスト負担も分散されない。複数の排出者を募ってハブ&クラスター型ネットワークを開発するために、当初は政府が輸送・貯留設備を所有し、段階的に民間に売却する。iii) 地下貯留されたCO₂の漏洩リスクは否めない。排出事業者に対する漏洩責任には短期的上限を設け、長期的責任は政府に移管する、或いは、損害補償を設ける。

温暖化危機に国境はなく、猶予も期限もない。世界のリスクを回避して事業機会に変えるために、産官学を挙げての喫緊のコミットが必要だ。【酒向謙太郎】