

# 国立国会図書館 調査及び立法考査局

## Research and Legislative Reference Bureau National Diet Library

論題 Title	二酸化炭素回収・利用・貯留 (CCUS)
他言語論題 Title in other language	Carbon Dioxide Capture, Utilization and Storage (CCUS)
著者 / 所属 Author(s)	下田 昭郎 (SHIMOTA Akiro) / 電力中央研究所サステナブルシステム研究本部研究推進マネージャー
書名 Title of Book	脱炭素社会の技術と諸課題 科学技術に関する調査プロジェクト報告書 (Technologies for Decarbonized Society and Related Issues)
シリーズ Series	調査資料 2021-5 (Research Materials 2021-5)
編集 Editor	国立国会図書館 調査及び立法考査局
発行 Publisher	国立国会図書館
刊行日 Issue Date	2022-03-29
ページ Pages	61-72
ISBN	978-4-87582-892-1
本文の言語 Language	日本語 (Japanese)
摘要 Abstract	温室効果ガス排出の大幅削減のための技術として、二酸化炭素回収・貯留 (CCS) 及び二酸化炭素回収・利用 (CCU) が注目されているが、普及及び技術開発上の課題が残されている。

\* この記事は、調査及び立法考査局内において、国政審議に係る有用性、記述の中立性、客観性及び正確性、論旨の明晰 (めいせき) 性等の観点からの審査を経たものです。

\* 本文中の意見にわたる部分は、筆者の個人的見解です。

# 二酸化炭素回収・利用・貯留（CCUS）

電力中央研究所サステナブルシステム研究本部  
研究推進マネージャー 下田 昭郎

## 目 次

はじめに

- I 二酸化炭素回収・利用・貯留（CCUS）の概要
- II 温暖化対策における CCUS の位置付け
- III 二酸化炭素回収・貯留（CCS）
  - 1 技術概要
  - 2 普及状況
  - 3 普及の課題
- IV 二酸化炭素回収・利用（CCU）
  - 1 技術概要
  - 2 普及状況
  - 3 普及の課題

おわりに

## 【要 旨】

2015年にパリで開催された第21回国連気候変動枠組条約締約国会議（COP21）で採択されたパリ協定では、世界の平均気温の上昇を工業化前から2℃以内に抑え、さらに1.5℃に抑える努力を達成するという目標が設定された。目標達成には21世紀後半に温室効果ガスの排出を世界全体で実質ゼロにすることが求められ、あらゆる排出削減対策を総動員する必要がある。排出の大幅削減のための技術オプションの一つに、産業部門、火力発電部門等の発生源からCO<sub>2</sub>を回収し、それを地中に隔離・貯留する二酸化炭素回収・貯留（Carbon dioxide Capture and Storage: CCS）がある。CCSはCO<sub>2</sub>の大規模削減が可能な技術として期待されるが、貯留の不確実性や経済性、社会受容性等の障壁により期待どおりの普及には至っていない。一方、回収したCO<sub>2</sub>を燃料や化学製品等の有価物に変換することでCO<sub>2</sub>削減とコスト補填が期待できる二酸化炭素回収・利用（Carbon dioxide Capture and Utilization: CCU）が注目され始めているが、ほとんどの技術は未だ開発段階にある。

## はじめに

2015年にパリで開催された第21回国連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ものである。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、さらに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<sup>(1)</sup>。2018年に発表された国連気候変動に関する政府間パネル（Intergovernmental Panel on Climate Change: IPCC）の「1.5℃特別報告書」では、気温上昇を2℃とする場合、世界全体のCO<sub>2</sub>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「ネットゼロ」）にする必要があり、1.5℃の場合、2050年にはネットゼロにする必要があるとしている<sup>(2)</sup>。

パリ協定の締結や、その後の「1.5℃特別報告書」の発表で、将来的なネットゼロの必要性の認知が進んだこともあり、2021年6月時点で将来的な目標設定においてネットゼロに言及している国は137か国に及ぶ<sup>(3)</sup>。例えば、英国では2019年6月に、それまでの2050年における排出の1990年比80%削減をネットゼロに強化する法案が制定されている<sup>(4)</sup>。中国の習近平国家主席は、2020年9月の国連総会一般演説で、中国のCO<sub>2</sub>排出を2060年までにネットゼロにする目標を表明した<sup>(5)</sup>。米国のバイデン（Joe Biden）大統領は、選挙公約の中で2050年までのネットゼロ達成を掲げている。日本でも、2020年10月の菅義偉首相（当時）の所信表明演説で、2050年までに排出を全体としてゼロ（カーボンニュートラル）にすることを宣言している<sup>(6)</sup>。

\* 本稿におけるインターネット情報の最終アクセス日は、令和3（2021）年12月13日である。

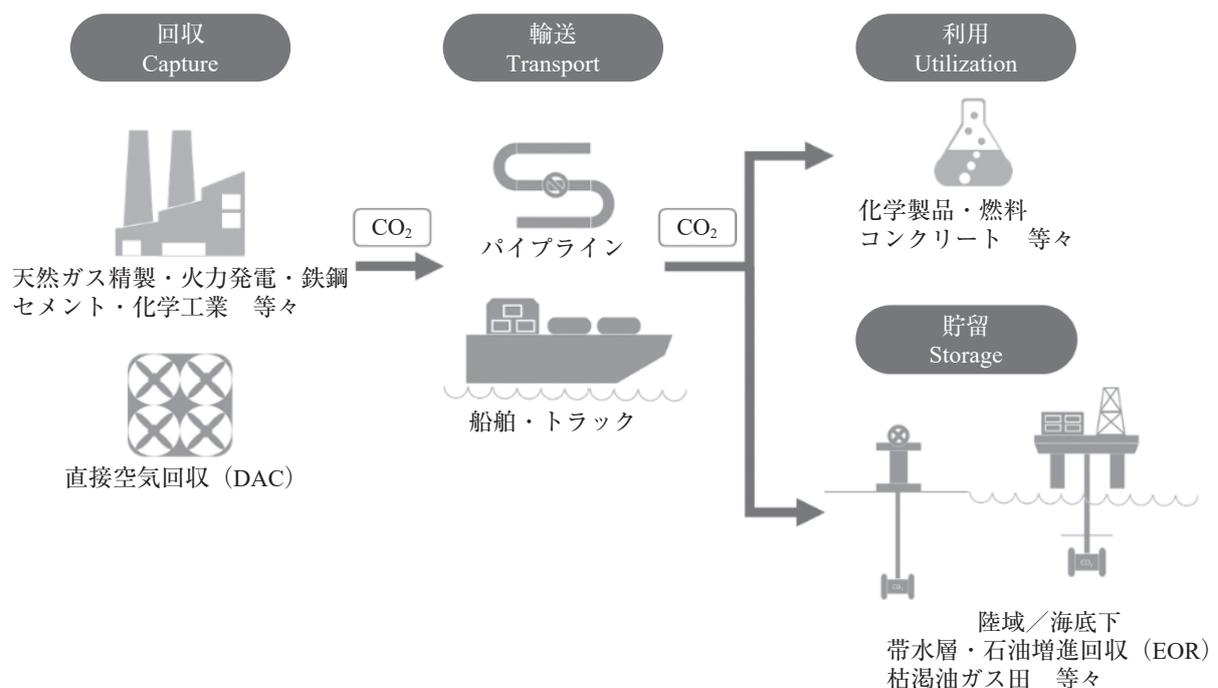
- (1) 「今さら聞けない「パリ協定」」2017.8.17. 経済産業省資源エネルギー庁ウェブサイト <<https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/tokushu/ondankashoene/pariskyotei.html#topic01>>
- (2) IPCC, *Special Report: Global Warming of 1.5°C Summary for Policymakers*, 2018. <<https://www.ipcc.ch/sr15/chapter/spm/>>
- (3) “Race to Net Zero: Carbon Neutral Goals by Country,” 2021.6.8. Visual Capitalist Website <<https://www.visualcapitalist.com/race-to-net-zero-carbon-neutral-goals-by-country/>>
- (4) “UK becomes first major economy to pass net zero emissions law,” 2019. 6. 27. Gov.UK Website <<https://www.gov.uk/government/news/uk-becomes-first-major-economy-to-pass-net-zero-emissions-law>>
- (5) 「中国のCO<sub>2</sub>排出、60年までに実質ゼロへ 習主席表明」『日本経済新聞』（電子版）2020.9.23. <<https://www.nikkei.com/article/DGXMZO64124490T20C20A9MM0000/>>
- (6) 『第百三回国会における菅内閣総理大臣所信表明演説』2020.10.26. 首相官邸ウェブサイト <[https://www.kantei.go.jp/jp/99\\_suga/statement/2020/1026shoshinhyomei.html](https://www.kantei.go.jp/jp/99_suga/statement/2020/1026shoshinhyomei.html)>

人類にとってチャレンジングな目標であるネットゼロを達成するためには、省エネ、エネルギー効率向上、再生可能エネルギー（以下「再エネ」）の普及拡大、技術革新、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 CO<sub>2</sub> 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 の普及障壁の一つであるコスト増加に対して、回収した CO<sub>2</sub> 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。以下では、CCS 及び CCU (併せて CCUS と呼ばれる。) の現状と課題について述べる。

## I 二酸化炭素回収・利用・貯留 (CCUS) の概要

図1にCCUSにおけるCO<sub>2</sub>のバリューチェーンを示す。CCUSのうちCCSは、火力発電、天然ガス精製、鉄鋼、セメント等のプラントで発生するCO<sub>2</sub>を回収し、パイプライン、船舶等で輸送し、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。貯留層は、帯水層等のCO<sub>2</sub>の浸透性が高く、かつ上部をキャップロックと呼ばれる不透水層に覆われ地上への漏洩(ろうえい)の確率が極めて低い地層が選別される。また、枯渇した油ガス田も貯留に適しているとされる。CO<sub>2</sub>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<sup>(7)</sup>。米国では、1986年に石油価格が暴落するまでEORに対して積極的な投資が続き、その間、EORで利用するCO<sub>2</sub>を運ぶパイプラインも整備された。EORで利用されたCO<sub>2</sub>のほとんどは、地中の石油層等で発生した自然起源のCO<sub>2</sub>であった。その後、温暖化に関する懸念の高まりにより、

図1 CCUSのバリューチェーン



(出典) 筆者作成。

(7) 三津石裕士「CO<sub>2</sub>-EOR 30 余年の歩み」『石油技術協会誌』76(6), 2011.11, pp.476-486.

人工起源のCO<sub>2</sub>を回収して、恒久的に地中に圧入することでCO<sub>2</sub>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、大気中のCO<sub>2</sub>を直接回収（Direct Air Capture: DAC）し、貯留する試み（Direct Air Carbon dioxide Capture and Storage: DACCS）も始まっている<sup>(8)</sup>。

CCUは回収したCO<sub>2</sub>を資源と捉え、直接利用あるいは変換することにより化学製品や燃料等の有価物を生成するプロセスである。CCSは、既存の生産プロセスにCO<sub>2</sub>の回収、輸送、貯留のプロセスが追加されるために、コスト増加は避けられない。一方、CCUは回収したCO<sub>2</sub>から有価物を生産することで、生産プロセスの排出低減とコスト増加の補填が期待できる。CO<sub>2</sub>を原料とした肥料や炭酸ナトリウム等を生産する一部の技術は一世紀以上前から行われている。従来のCO<sub>2</sub>利用では、いかに効率的に最終製品を生産し経済性を確保するかが重要であったが、温暖化防止の視点では、対策技術としてどの程度CO<sub>2</sub>削減に貢献できるかも重要となる。

## Ⅱ 温暖化対策におけるCCUSの位置付け

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温室効果ガスの排出を2050年にネット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。2050年における世界人口は97億人で、人口増加のほとんどは新興国及び発展途上国に起因すると想定されている<sup>(9)</sup>。

図2は、NZEシナリオの2050年における分野別年間CO<sub>2</sub>削減量（2020年をベース）を示している。2050年に必要な全削減量500億tのうち、CCUSによる削減量は70億tとなっており、主要な削減手段として位置付けられている。ただし、削減量のほとんどはCCS（貯留）によるもので、CCU（利用）としては5億tの回収CO<sub>2</sub>が航空燃料等の製造に利用されている。

パリ協定は、批准国に対して温室効果ガスの低排出型発展のための長期的な戦略を策定し、国連に提出することを求めている。日本の「パリ協定に基づく成長戦略としての長期戦略」（令和元年6月11日閣議決定）では、目標達成に必要な削減対策・施策において、CCS及びCCUが重要な技術として位置付けられている。具体的には、エネルギー部門ではCCS及びCCUにおいてCO<sub>2</sub>を資源として再利用するカーボンリサイクルの推進が、産業部門ではCCUによる燃料転換が重要な実現目標として挙げられている<sup>(10)</sup>。各国の長期戦略でも、CCSとCCUを併用するCCUSへの言及が少なからず見られる。例えば、英国では、2050年までのネットゼロ達成の中で、CCSは96%までの削減における主要な手段として位置付けられ、CCUは電化や水素燃料の利用が困難な航空機や重量貨物における削減（96%から100%）のための技術オプションとして位置付けられている<sup>(11)</sup>。

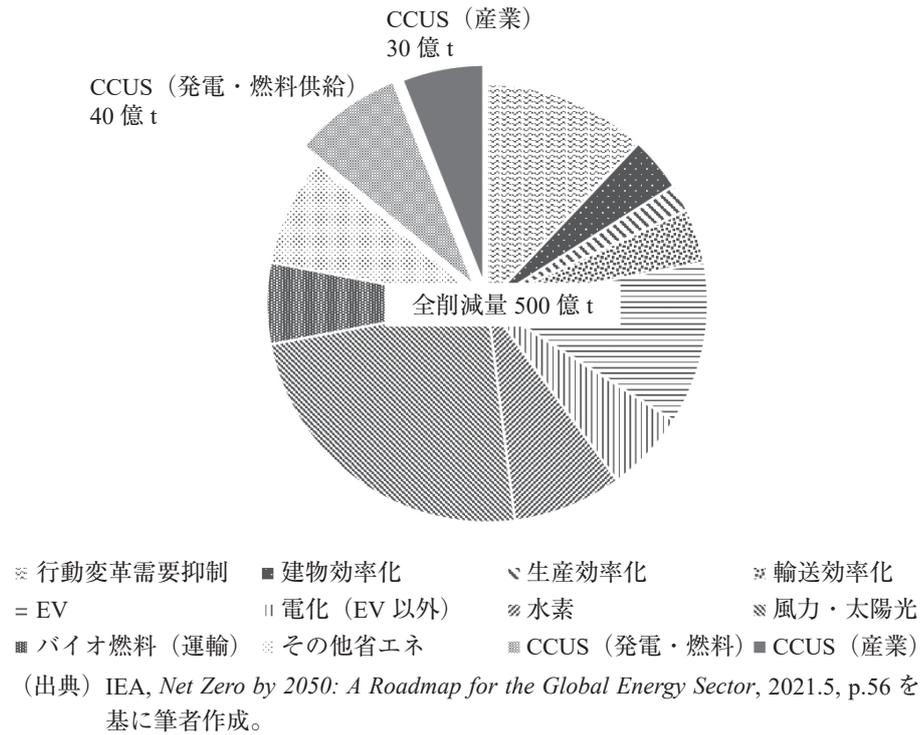
(8) Global CCS Institute, *Global Status of CCS 2020*, 2020, p.65.

(9) IEA, *Net Zero by 2050: A Roadmap for the Global Energy Sector*, 2021.5. <<https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>>

(10) 『パリ協定長期成長戦略のポイント』経済産業省ウェブサイト <[https://www.meti.go.jp/policy/energy\\_environment/global\\_warming/Long-term\\_strategy\\_point.pdf](https://www.meti.go.jp/policy/energy_environment/global_warming/Long-term_strategy_point.pdf)>

(11) Committee on Climate Change, *Net Zero Technical Report*, May 2019, p.297. <<https://www.theccc.org.uk/publication/net-zero-technical-report/>>

図2 IEAのNZEシナリオにおける2050年の分野別CO<sub>2</sub>削減量(2020年ベース)



### Ⅲ 二酸化炭素回収・貯留 (CCS)

#### 1 技術概要

CCSは、発生源からのCO<sub>2</sub>の回収、輸送、貯留のプロセスで構成される。対象となるCO<sub>2</sub>の発生源は、天然ガス精製、化石燃料燃焼発電、鉄鋼等のプラントとなる。排出源から排出される排ガス等のCO<sub>2</sub>を含む混合ガスからCO<sub>2</sub>を分離し回収する際は、対象とする混合ガスの圧力やCO<sub>2</sub>濃度といった物性に依りて方法が選択される。表1は、CCSにおける代表的なCO<sub>2</sub>の分離・回収方法である。現時点では、アミン系<sup>(12)</sup>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。CO<sub>2</sub>分離・回収では、ほとんどの場合、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CO<sub>2</sub>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ている。日本のように海域に囲まれ、陸地への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優位性が出てくるとされる。

CO<sub>2</sub>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

(12) アンモニアの水素原子を炭化水素基で置換した化合物の総称。代表的な吸収液としてモノエタノールアミン(MEA)がある。

表1 CO<sub>2</sub>の分離・回収方法の概要

分離・回収方法		概要
化学吸収法		吸収剤との化学反応を利用してCO <sub>2</sub> を分離。加熱により吸収剤からCO <sub>2</sub> を回収
物理吸収法		吸収剤に溶解させることでCO <sub>2</sub> を分離。減圧または加熱でCO <sub>2</sub> を回収
物理吸着法	温度スウィング	吸着法は活性炭やゼオライトなどの固体の吸着剤にCO <sub>2</sub> を吸着させ分離。加熱によりCO <sub>2</sub> を回収
	圧力スウィング	吸着法は活性炭やゼオライトなどの固体の吸着剤にCO <sub>2</sub> を吸着させ分離。減圧によりCO <sub>2</sub> を回収
膜分離法		高分子膜等の膜材を用いて圧力差を駆動力としてCO <sub>2</sub> を分離回収
深冷分離法		気体の種類による沸点の違いを利用してCO <sub>2</sub> だけを分離回収
酸素燃焼法		空気分離装置で製造した酸素を燃焼させ、高濃度CO <sub>2</sub> の排ガスとして分離回収

(出典) 筆者作成。

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。かつては、CO<sub>2</sub>を海水に溶解させたり、高圧の深海底に液体の状態での滞留させたりする海洋隔離も貯留のオプションとされたが、現在は国際法<sup>(13)</sup>によりCO<sub>2</sub>の海域における貯留は海底下地層に限定されている。

## 2 普及状況

### (1) 世界の商用プロジェクト

表2は、2021年9月時点における世界の商用プロジェクト数<sup>(14)</sup>を示す。計画、中断分も含めて135件が存在し、CO<sub>2</sub>の総回収貯留量は約1.5億tとなっている。運用段階にある27件のプロジェクトのうち回収対象としても最も多いのは、12件の天然ガス精製であり、肥料製造、バイオマスエタノール製造が続いている。これらの分野は、元来、製造プロセスにCO<sub>2</sub>の分離・回収が存在しているため、相対的に低コストでCCSを導入できる。CO<sub>2</sub>の分離・回収プロセス機能を追設する必要がある石炭火力発電プラントを対象とした運用中のプロジェクトは、中断も含めて2件にとどまっている<sup>(15)</sup>。

表2 世界のCCS商用プロジェクト(2021年9月時点)

	運用中	建設段階	開発後期	開発前期	中断	計
プロジェクト数	27	4	58	44	2	135
回収・貯留量 (百万t-CO <sub>2</sub> )	36.6	3.1	46.7	60.9	2.1	149.3

(注) 商用プロジェクトとは、商用運用中のプラントでCO<sub>2</sub>を回収し恒久的な貯留を実施するもの。CO<sub>2</sub>を回収・貯留することにより経済的なリターンが発生している。

(出典) Global CCS Institute, *Global Status of CCS 2021: CCS Accelerating to Net Zero*, 2021, p.14. <[https://www.globalccsinstitute.com/wp-content/uploads/2021/10/2021-Global-Status-of-CCS-Report\\_Global\\_CCS\\_Institute.pdf](https://www.globalccsinstitute.com/wp-content/uploads/2021/10/2021-Global-Status-of-CCS-Report_Global_CCS_Institute.pdf)> を基に筆者作成。

(13) 海洋汚染防止のための国際条約である1972年の「廃棄物その他の物の投棄による海洋汚染の防止に関する条約(ロンドン条約)」及び1996年の議定書。二酸化炭素の海底下地層への処分(貯留)は、2006年11月2日の改正により可能となった。

(14) 商用プロジェクトとは、商用運用中のプラントでCO<sub>2</sub>を回収し恒久的な貯留を実施するもの。CO<sub>2</sub>を回収・貯留することにより経済的なリターンが発生している。

## (2) 商用プロジェクトの事例

### (i) 世界初の商用 CCS プロジェクト

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 CO<sub>2</sub> 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 t の貯留を開始した。ノルウェー政府が 1991 年から導入を開始した炭素税（当時、CO<sub>2</sub>1t の排出に対し約 35 米ドルの課税）への対応措置であり、現在も運用中である<sup>(16)</sup>。

### (ii) 石炭火力発電プラントにおけるプロジェクト

2014 年 10 月に、カナダのサスカチュワン州にある SaskPower 社の Boundary Dam 火力発電所で、世界で初めて商用規模石炭火力発電所における CCS の運用が開始された。この発電所は、近傍で採掘される褐炭を燃料としており、1 号機から 6 号機の構成で総送電端出力は 82.4 万 kW である。耐用年数が迫った 3 号機の改修に合わせて CO<sub>2</sub> の回収機能が追設された。3 号機の送電端出力は 11 万 kW で、排ガスから回収率 90% で年間約 100 万 t の CO<sub>2</sub> が回収されている。回収された CO<sub>2</sub> は、総延長約 60km のパイプラインで石油会社が所有する油田に運ばれ EOR に利用（売却）されている。このプロジェクトは、カナダ連邦政府やサスカチュワン州政府から経済支援を受けている<sup>(17)</sup>。

## 3 普及の課題

前出のとおり、2050 年の世界全体におけるネットゼロ達成のためには、CCUS による年間約 70 億 t の CO<sub>2</sub> 排出削減（ほとんどは CCS）が必要であるとの分析がある。一方、2021 年 9 月時点における CCS による CO<sub>2</sub> 回収・貯留量は、計画、中断分も含めて 1.5 億 t 程度であり、期待どおりの普及には至っていない。以下に主な普及障壁を記載する。

### (1) 経済性

生産プロセスに CCS を導入した場合、追加コストは最終製品に価格転嫁されることになる。図 3 は、石炭火力発電に CCS を追加した場合の発電コストを他の電源と比較したものである。CCS なしの石炭火力から約 5 割弱程度の発電コストの上昇となっている。将来的な事業の見通しを得るためには、CO<sub>2</sub> 削減に対する価格付け（カーボンプライシング）等の制度構築が必要となる。

### (2) 法規制の整備

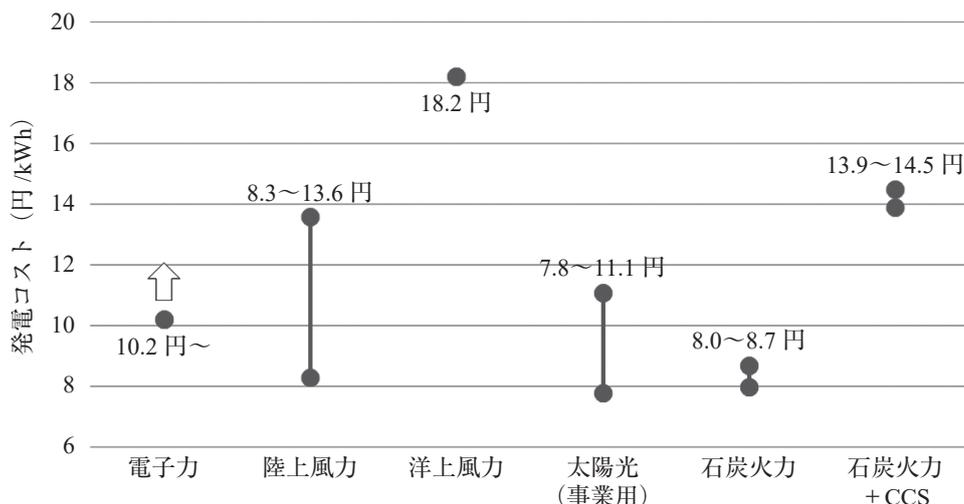
バリューチェーンの広範な CCS は、対応すべき法規・規制が多岐にわたり、また、新興技術であるために法規制が未整備である領域も存在し、事業の見通しが不透明となる可能性がある。例えば、日本において CO<sub>2</sub> を海底下に貯留した場合、貯留に対する長期的な責任は永久に事業者が負うこととなっている。一部の国では、貯留に係る長期的な責任は、一定期間の後

(15) Global CCS Institute, *Global Status of CCS 2021 - CCS ACCELERATING TO NET ZERO*, 2021. <[https://www.globalccsinstitute.com/wp-content/uploads/2021/10/2021-Global-Status-of-CCS-Report\\_Global\\_CCS\\_Institute.pdf](https://www.globalccsinstitute.com/wp-content/uploads/2021/10/2021-Global-Status-of-CCS-Report_Global_CCS_Institute.pdf)>

(16) 都筑秀明「CCS の現状と今後に向けた課題」（革新的環境技術シンポジウム）2016.12, p.10. <<https://www.rite.or.jp/news/events/pdf/tsuzuku-ppt-kakushin2016.pdf>>

(17) 高橋毅編著『図解次世代火力発電—環境性・経済性を両立する実用化への道—』日刊工業新聞社, 2016, pp.120-122.

図3 2030年電源別発電コスト



(注) コストは想定シナリオにより幅を持つ。政策コストは含まれない（石炭火力はCO<sub>2</sub>対策費を除く。）。石炭火力の設備容量は70万kWを想定。CCSのCO<sub>2</sub>処理量は年間285万t。

(出典) 発電コスト検証ワーキンググループ「基本政策分科会に対する発電コスト検証に関する報告」2021.9, pp.4, 60, 64. <[https://www.enecho.meti.go.jp/committee/council/basic\\_policy\\_subcommittee/mitoshi/cost\\_wg/pdf/cost\\_wg\\_20210908\\_01.pdf](https://www.enecho.meti.go.jp/committee/council/basic_policy_subcommittee/mitoshi/cost_wg/pdf/cost_wg_20210908_01.pdf)> を基に筆者作成。

に、政府やそれに準ずる機関に移管される法整備がされている<sup>(18)</sup>。

### (3) 社会受容性

現時点で一般市民に対してCCSがCO<sub>2</sub>削減のための合理的な技術であるとの認知は乏しい<sup>(19)</sup>。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。温暖化対策技術としてのCCSの継続的な啓発とプロジェクトの成功体験の積み重ねが必要となる。

### (4) 貯留

CCSにおいては、貯留における安全性と貯留可能量の評価精度がプロジェクト成功の根幹に関わるが、両者ともに、現時点では不確実性が大きい。そのため、複数プロジェクトの成功体験の積み重ねが必須となる。

## Ⅳ 二酸化炭素回収・利用 (CCU)

### 1 技術概要

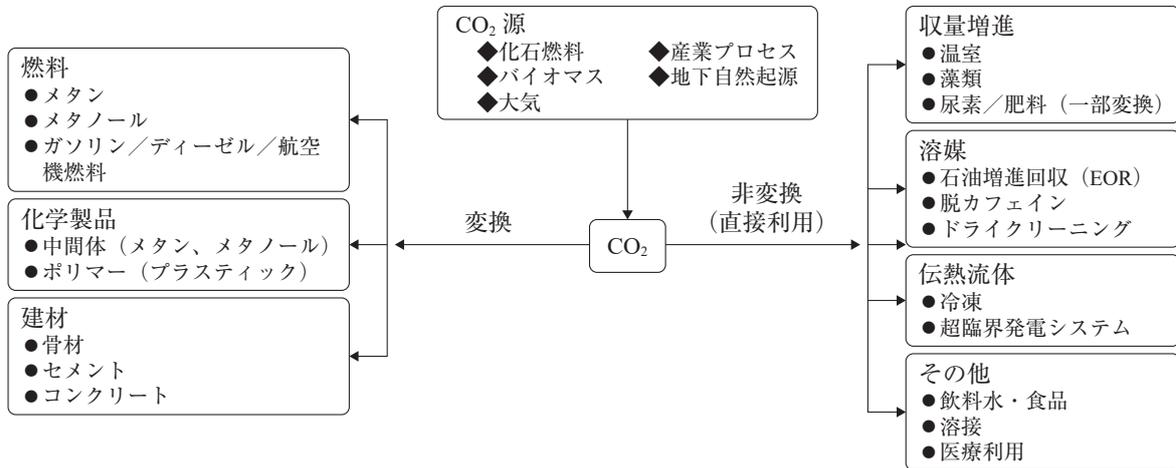
CCUには多様な技術オプションが存在する。図4はCCU技術をおおよそ網羅的に示したも

(18) 下田昭郎ほか『各国におけるCCSに係る長期的責任の取り扱い』（電力中央研究所報告 V11006）電力中央研究所, 2012.1. <<https://criepi.denken.or.jp/hokokusho/pb/reportDownload?reportNoUkCode=V11006&tenpuTypeCode=30&seqNo=1&reportId=7884>>

(19) 窪田ひろみ『CCSに関する一般市民向け情報提供方策』（電力中央研究所報告 V15011）電力中央研究所, 2016.5. <<https://criepi.denken.or.jp/hokokusho/pb/reportDownload?reportNoUkCode=V15011&tenpuTypeCode=30&seqNo=1&reportId=8658>>

のである。大きくは、回収したCO<sub>2</sub>をそのまま利用する非変換プロセスと、別途調達した原料や触媒等を添加して適切な反応条件を与えることで有価物を生成する変換プロセスに分類される。CO<sub>2</sub>は極めて不活性であるため、水素等の活性な物質の同伴が必要であり、これらの合成に大量のエネルギーが消費される。また、生成品の最終的な廃棄・燃焼時にはCO<sub>2</sub>が大気に再放出されるため、排出削減効果が不透明な場合もある。

図4 CCUの技術オプション



(出典) 下田昭郎『CCUのCO<sub>2</sub>排出削減対策としての位置付け—国外事例と電気事業への含意—』(電力中央研究所報告 V20003) 電力中央研究所, 2021.3, p.2. <<https://criepi.denken.or.jp/hokokusho/pb/reportDownload?reportNoUkCode=V20003&tenpuTypeCode=30&seqNo=1&reportId=9015>> を基に筆者作成。

## 2 普及状況

### (1) 現状と見通し

2015年における全世界の生産活動に利用されるCO<sub>2</sub>は、おおよそ年間2億tとされている。そのうち、生産性の低下した油田にCO<sub>2</sub>を圧入して生産効率を高めるEORが0.8億tと、尿素等の肥料製造1.3億tが大部分を占める。その他、炭酸飲料が全体の3%、食品等の冷却に2%程度が利用されている<sup>(20)</sup>。今後、世界全体が脱炭素化に向かうことにより、CO<sub>2</sub>の利用量は増加することが予想される。

表3は、CCUプロセスを、化学製品、燃料、微細藻類、コンクリート建築材、EORで分類し、2050年におけるCO<sub>2</sub>削減ポテンシャル、CO<sub>2</sub>利用ポテンシャル、損益分岐コストを示したものである。損益分岐コストとは、収益、副産物、CO<sub>2</sub>利用あるいは削減により得られるクレジット等を考慮したCO<sub>2</sub>1t利用による最終製品の製造コストである。数値がマイナスの場合、利益が発生し経済的な見通しが立つことを意味する。2050年における利用ポテンシャルは、燃料が10億~42億tと大きい。削減ポテンシャルについては、コンクリート建築材で1億~14億t、EORで1億~18億tと大きい一方で、燃料や微細藻類原料の生産物(バイオ燃料や食品等)は、それらの消費によりライフサイクルとして最終的にCO<sub>2</sub>を大気中に再放出することになるため、削減ポテンシャルは0となっている。損益分岐コストは、ほとんどの場合でプラスとなっており、現時点で温暖化対策としてのCCU導入は社会的コストの増加に繋がる。

(20) IEA, *Putting CO<sub>2</sub> to Use: Creating value from emissions*, September 2019, pp.20-21. <<https://www.iea.org/reports/putting-co2-to-use>>

表3 CCUのCO<sub>2</sub>削減・利用ポテンシャル及びコスト

CO <sub>2</sub> 利用オプション	2050年削減ポテンシャル <sup>注1</sup> (MtCO <sub>2</sub> /year)	2050年利用ポテンシャル (MtCO <sub>2</sub> /year)	損益分岐コスト <sup>注2</sup> (2015US\$/tCO <sub>2</sub> 利用)
化学製品	10～30	300～600	-\$80～\$320
燃料	0	1,000～4,200	\$0～\$670
微細藻類	0	200～900	\$230～\$920
コンクリート建築材	100～1,400	100～1,400	-\$30～\$70
EOR	100～1,800	100～1,800	-\$60～-\$40

(注1) 大気中からCO<sub>2</sub>が除去される量。

(注2) 収益、副産物、クレジット等を考慮したCO<sub>2</sub>1t利用に掛かるコスト(2015年米ドルレート)。損益分岐コストが0ドル以下の場合がCO<sub>2</sub>プライシングなしで経済的な見通しが立つ。CO<sub>2</sub>1t利用に必要なインセンティブ。

(注3) 単位のMtCO<sub>2</sub>はCO<sub>2</sub>メガtつまり100万t分である。

(出典) 下田昭郎『CCUのCO<sub>2</sub>排出削減対策としての位置付け—国外事例と電気事業への含意—』(電力中央研究所報告 V20003) 電力中央研究所, 2021.3, p.4. <<https://criepi.denken.or.jp/hokokusho/pb/reportDownload?reportNoUkCode=V20003&tenpuTypeCode=30&seqNo=1&reportId=9015>>を基に筆者作成。

## (2) 商用プロジェクトの事例

### (i) メタノール

アイスランドにおいてCO<sub>2</sub>変換技術によりメタノールを製造するCRI社は、商用プラントを2012年から稼働している。隣接する地熱発電所から汲み上げ蒸気の随伴CO<sub>2</sub>が電力とともに供給されている。CO<sub>2</sub>の利用量は年間5,600tで、メタノールの生産量は年間4,000tである。製造されたメタノールは近隣のEU諸国にボルカノール(Vulcanol)の商品名で燃料用として輸出されている<sup>(21)</sup>。アイスランドは地熱電力等の安価な再エネが供給可能な地理的優位性を持っていることが、事業性が確保できている一つの要因である。

### (ii) メタン

ドイツの自動車メーカーであるAudi社は、CO<sub>2</sub>からメタンを製造するe-gasプロジェクトを進めている。再エネ由来の水の電気分解で生成される水素とバイオガス生成施設で発生するCO<sub>2</sub>を原材料としている。製造されたメタンは、ドイツ国内の一般ガス網に供給される。2015年時点では、CO<sub>2</sub>利用量は年間2,800tで、メタンの生産量は年間1,000tである<sup>(22)</sup>。製造プラントは、電力系統の負荷変動にも対応可能となっており、ドイツ国内の系統安定化にも貢献している。

### (iii) プラスチック(ポリオール)

ドイツのCovestro社は、2016年から原油に代わりCO<sub>2</sub>を使用してプラスチック(ポリオール)を商用生産するプラントの稼働を開始している。年間生産量は5,000tであり、近隣の化学工場で回収されたCO<sub>2</sub>が供給されている。生産されたポリオールの重量比20%のCO<sub>2</sub>が利用されている(年間1,000t)。ポリオールは、マットレスや家具用の軟質ポリウレタンフォームの利用が想定されている<sup>(23)</sup>。

(21) Paul Wuebben, *Industrial Scale Conversion of CO<sub>2</sub>-to Methanol: The Commercial Rational for Renewable Methanol*, 8<sup>th</sup> Carbon Dioxide Utilization Summit, Feb. 2017.

(22) Hermann Pengg, *Audi e-fuels: Decarbonization of the Mobility Sector*, 5<sup>th</sup> Carbon Dioxide Utilization Summit, Oct. 2015.

### 3 普及の課題

現時点においては、ほとんどの CCU 技術は研究開発段階にあり、生産コストと現状の市場価格には大きなギャップがある。一方、2050 年のネットゼロ達成のために残された時間は少なく、早急な普及が望まれる。そのための課題を以下に記載する。

#### (1) インセンティブ

事業者が CCU 技術を採用するためのインセンティブが不可欠となる。具体的な例として、米国の CCUS 事業に対する税額控除（内国歳入法セクション 45Q<sup>(24)</sup>）がある。CCUS プロジェクトにおける CO<sub>2</sub> 貯留量・利用量に応じて税額控除が受けられる仕組みとなっており、プロジェクトコストの補填が期待できる（表 4）。その他の普及施策としては、CCU 製品の市場価格調整、製品製造において CCU プロセスを品質基準の条件とする規制化、CCU 製品の一定量の政府調達等が考えられる。

表 4 米国における CCUS プロジェクトに対する税額控除（内国歳入法 45Q）

控除対象プロジェクト	控除内容
EOR 及び CO <sub>2</sub> 産業利用	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ \$12.83/tCO<sub>2</sub>～\$35/tCO<sub>2</sub> + 物価補正 (2026 年まで線形上昇、その後物価補正)</li> <li>・ 運用開始から 12 年間継続</li> <li>・ 年間 10 万 t の適用下限</li> </ul>
CO <sub>2</sub> 貯留	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ \$22.66/tCO<sub>2</sub>～\$50/tCO<sub>2</sub> + 物価補正 (2026 年まで線形上昇、その後物価補正)</li> <li>・ 運用開始から 12 年間継続</li> <li>・ 年間 10 万 t の適用下限</li> </ul>

（出典）“Will changes to the US Budget Act of 2018 incentivise CCS in the US?” 2018.3.8. Bellona Website <<https://bellona.org/news/ccs/2018-03-will-changes-to-the-us-budget-act-of-2018-incentivise-ccs-in-the-us>> を基に筆者作成。

#### (2) カーボンフリーエネルギーの調達

CCU のうち、CO<sub>2</sub> 変換を伴うものの多くは、共反応物質として水素と、大量のエネルギー投入が必要となる。その場合、ライフサイクルとして CO<sub>2</sub> の排出を低減させるためには、エネルギーの調達先は、再エネ等のカーボンフリーが必須となる。ネットゼロ社会の構築に向けては、再エネの主力電源化や水素利用が主流となっていくことが想定されるが、他の排出削減対策との水素、再エネ調達の競合の可能性がある。

#### (3) CO<sub>2</sub> 削減量の評価手法の確立

CCU には多様な技術オプションが存在する。現時点では、各プロセスにおける CO<sub>2</sub> 削減量については不透明である。CO<sub>2</sub> 削減に対するクレジット発行等の CCU 製品に対する価値付加は普及促進に繋がると期待できるが、そのためには、正確で透明性の高い CO<sub>2</sub> 排出削減量の評価手法の確立が不可欠となる。

(23) Christoph Guertler, *A Dream Comes True: Activities of Covestro in CO<sub>2</sub> Utilization*, 7<sup>th</sup> Carbon Dioxide Utilization Summit, Oct 2016.

(24) 26 U.S.C. § 45Q Credit for Carbon Oxide Sequestration.

#### (4) CO<sub>2</sub> 輸送インフラの整備

CCUにおいては、原料となるCO<sub>2</sub>の調達、輸送を効率的に行うことが最終的な製品のコスト低減と普及拡大に繋がる。ネットゼロに向けてCCUの社会実装を実現するためには、既存の電力やガスと同様にCO<sub>2</sub>の供給網を社会インフラとして整備する必要がある。

#### おわりに

世界全体で2050年頃のネットゼロが共通目標として設定されたが、その達成のために残された時間は少ない。CCSのシステムを構成する回収、輸送、貯留の各プロセスのほとんどは、既に商用化された技術であり、今後はいかに普及拡大するかが最大の課題である。CCUについては、現時点ではCO<sub>2</sub>利用量、削減量、コスト、技術成熟度等で排出削減対策としてメインプレーヤーにはなり得ないが、最終的にネットゼロを達成するためのキープレーヤーとなる可能性がある。そのため、CCUに関する継続的な技術開発とイノベーションの創出が必要であり、長期的な視点で削減ポテンシャルの高いCCSとの組み合わせによる技術普及の道を開くことが重要である。

(しもた あきろう)