

調査報告書

# 二酸化炭素資源化に関する調査報告

～パリ協定遵守に向けた国内外動向、  
および燃料・化学品へのCO<sub>2</sub>変換技術～



## エグゼクティブサマリー

本報告書では地球温暖化対策の一つとして、その重要性が認識されてきた二酸化炭素（CO<sub>2</sub>）資源化の技術、具体的には CO<sub>2</sub> と水素、水などを用いて、燃料・化学品に変換する技術について、その背景、国内外政策との関係、および技術開発動向とその課題についてまとめた。

- 2015 年に採択された「パリ協定」の参加各国は、産業革命後の気温上昇を 2℃以内に抑えることに合意した。このいわゆる 2℃目標の達成には、省エネルギーのみでは到達できず、大気中の CO<sub>2</sub> を増加させないためのエネルギーシステムの大転換が必要となる。さらにエネルギーシステムにおいては航空、船舶、長距離貨物、負荷調整用発電、製鉄、セメントなど、電化や CO<sub>2</sub> 回収貯留（CCS）での対応が困難な分野も存在しており、これらの対応には発電や燃料の利用で排出される CO<sub>2</sub> を取り除く、いわゆる「脱炭素」だけでなく、CO<sub>2</sub> を循環的に利用する「炭素循環」も必要になる。
- 世界各国の取り組みの中で、EU は 2050 年までに正味ゼロエミッションを目指す複数シナリオを検討しており、その中の重要技術として Power-to-X (P2X) 技術が取り上げられている。P2X 技術は再生可能電力を利用して、CO<sub>2</sub> を燃料・化学品に変換する技術であり、エネルギー形態を電気から燃料へ変換することで熱・運輸などの適用分野の拡大を目指すものである。その実現に向けた研究開発としては、主にコスト削減を目指した実証試験レベルでの技術開発が進められている。一方、米国ではエネルギー安全保障の観点から、幅広い CO<sub>2</sub> 資源化技術を検討しており、P2X 技術以外にも人工光合成、生物学的変換技術などの基礎レベルを含む研究開発が実施されている。
- 我が国では水素社会を目指して水素を中心とした研究開発を展開してきたが、近年になり CO<sub>2</sub> の循環利用のために炭化水素への変換技術の重要性が認識されるようになった。2020 年 1 月には長期戦略のための革新的イノベーションを創出することを目標とした「革新的環境イノベーション戦略」が策定され、その中で炭化水素への変換技術はカーボンリサイクル技術の重要技術の一つとして取り上げられており、今後幅広い研究開発が進められようとしている。
- 上記の日欧米の政策的な動向から、CO<sub>2</sub> の燃料・化学品への変換技術、特に再生可能電力を用いた変換技術の重要性が高まっている。これは PV、風力などの再生可能変動電源の大量導入に対応した電力システム安定化のための需給調整力、長期間のエネルギー貯蔵といった電力部門への貢献のみならず、熱・運輸などの他部門への電力利用拡大（セクターカップリング）に貢献できること、さらには既存インフラが活用できるためである。
- 現状の研究開発は、技術的な見通しが立っている CO<sub>2</sub> と水素を用いた燃料・化学品への変換技術が中心となっており、コスト削減が課題となっている。一方で、水と CO<sub>2</sub> からの直接変換技術は複数段階の反応を単段化できるなど、エネルギー効率向上やプロセス簡略化の可能性があることから、長期的な視点からその重要性が高いと考えられる。この研究開発は、電気・光などの外部エネルギーを用いる反応プロセスとなり、これまでの熱化学を用いた反応プロセスとは大きく異なる。このため実用化に向けては、CO<sub>2</sub> 還元に係る触媒やその反応機構解明の基礎研究に加え、実用化に向けたプロセス開発を含む幅広い研究開発が必要になる。



## 目 次

### エグゼクティブサマリー

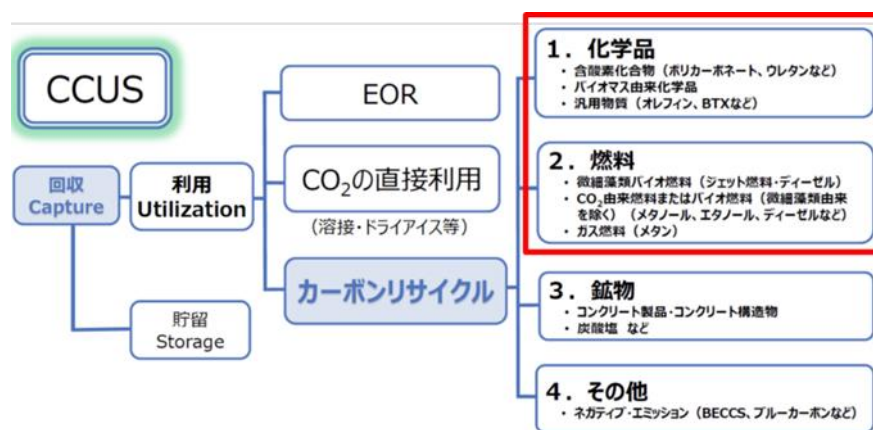
|                                                   |    |
|---------------------------------------------------|----|
| 1. 調査目的                                           | 1  |
| 2. 背景                                             | 2  |
| 3. 海外動向                                           | 6  |
| 3.1 欧州（EU）                                        | 6  |
| 3.2 ドイツ                                           | 11 |
| 3.3 米国                                            | 12 |
| 4. 国内動向                                           | 14 |
| 5. 技術動向と課題                                        | 18 |
| 5.1 CO <sub>2</sub> 変換技術の基本的課題                    | 18 |
| 5.2 水素還元によるCO <sub>2</sub> からの燃料・化学品              | 20 |
| 5.3 電気化学、光化学、生物学的変換を利用したCO <sub>2</sub> からの燃料・化学品 | 21 |
| 5.3.1 電気化学の利用：高分子電解質（PEM）                         | 22 |
| 5.3.2 電気化学の利用：固体酸化物形電解質（SOEC）                     | 22 |
| 5.3.3 光化学の利用（人工光合成）                               | 23 |
| 5.3.4 生物学的変換（藻類）                                  | 23 |
| 5.3.5 その他：CO <sub>2</sub> 還元触媒の課題等                | 24 |
| 5.4 CO <sub>2</sub> 利用による含酸素化合物                   | 25 |
| 5.4.1 アクリル酸製造技術                                   | 25 |
| 5.4.2 カーボネート化合物／ポリカーボネート                          | 26 |
| 5.5 その他：ガス発酵法による化学品製造技術等                          | 27 |
| 5.5.1 ガス発酵による化学品製造                                | 27 |
| 5.5.2 合成ガスからのBTX直接合成                              | 29 |
| 参考                                                | 30 |



## 1. 調査目的

本調査では地球温暖化対策の一つとして、その重要性が認識されてきた二酸化炭素（CO<sub>2</sub>）資源化の技術、具体的には CO<sub>2</sub> と水素、水などを用いて、炭化水素等に変換し、資源化する技術に焦点を当てる。これらの技術は余剰の変動電源などの再生可能エネルギーを利用することで CO<sub>2</sub> の循環的な利用を可能にする技術として将来期待できる。ここではこれらの技術の国内外の取り組み状況と技術課題、さらにはその推進のための政策動向も含めて調査を行うことで、今後の我が国における CO<sub>2</sub> 資源化に関して研究開発の方向性や推進のための政策検討に資することを目的とする。

なお CO<sub>2</sub> 資源化に関しては CO<sub>2</sub> 回収・利用として CCU (Carbon dioxide Capture & Utilization) あるいは貯留も含めた CCUS (Carbon dioxide Capture, Utilization & Storage) と呼んで、政策や技術開発を行っているケースが多い。実際の CCUS は図 1 に示す広い範囲であり、CO<sub>2</sub> 回収や CO<sub>2</sub> 利用としての EOR (Enhanced Oil Recovery : 石油回収増進)、鉱物化（炭酸塩への変換）などの炭化水素以外へ変換技術が含まれる。本報告書では CCUS の内、次章以降で示すように長期的視点から重要性が高まると考えられる CO<sub>2</sub> を燃料、化学品などの炭化水素（含酸素化合物含む）に変換する技術に注目した内容とした（図 1 中の赤枠で示す範囲）。このため CO<sub>2</sub> 回収や CO<sub>2</sub> 利用として炭化水素以外への変換技術が中心の CCU、CCUS の政策・技術開発動向については、末尾の参考にて別途記載することとした。



本報告書の主たる部分は赤枠

図 1 CO<sub>2</sub>回収・利用・貯留技術（CCUS）

出典：資源エネルギー庁カーボンリサイクル室「カーボンリサイクル技術ロードマップ<sup>1</sup>」より

本報告書作成にあたっては、国内政策の急な動きに対応すべく、最新動向の把握を迅速化するために、新エネルギー・産業技術総合開発機構 技術戦略センター（NEDO-TSC）との連携のもと、お互いの情報を持ち寄り、調査を分担してまとめた。

<sup>1</sup> [https://www.enecho.meti.go.jp/category/others/carbon\\_recycling/pdf/concept\\_ja.pdf](https://www.enecho.meti.go.jp/category/others/carbon_recycling/pdf/concept_ja.pdf)（2019年12月23日アクセス）

## 2. 背景

2015 年 12 月に採択されたパリ協定の長期目標では、世界の平均気温上昇を産業革命以前に比べて 2℃より十分低く保つこと（2℃目標）、および 1.5℃に抑える努力をすることが示された。この目標を達成するためにはできるかぎり早く世界の温室効果ガス排出量をピークアウトさせ、21 世紀後半には、温室効果ガス（GHG）排出量と吸収量のバランスをとることが必要とされている。IPCC 第 5 次評価報告書による代表濃度経路シナリオ（RCP 2.6）を基にした予測では、2050 年には世界全体で 2010 年と比べて GHG 排出量の 40～70%を削減し、2100 年にはゼロまたはマイナスの排出量にする必要があるとされている。日本においても 2050 年までの長期戦略として「パリ協定に基づく成長戦略としての長期戦略」<sup>2</sup>が令和元年 6 月 11 日に閣議決定され、国連に提出されている。この長期戦略では最終到達点として「脱炭素社会」を掲げ、今世紀後半のできるだけ早期に実現することを目指すとともに、2050 年までに GHG 排出 80%削減に取り組むことが定められた。

2050 年の GHG 排出 80%削減、さらにはその先の CO<sub>2</sub>排出の正味ゼロエミッション化を実現するためには、エネルギー消費量の大幅削減、高効率化に加え、エネルギーシステム<sup>注</sup>の大転換が必要になる。将来のエネルギーシステムの解析例としては、IEA（国際エネルギー機関）による解析結果の報告書（ETP2017）<sup>3</sup>がある。この報告書は 2060 年までを対象とした 3 つのシナリオとして、①パリ協定の際に提出された各国の自国の貢献（NDC）に基づいた参照シナリオ「RTS」、②2℃未満に抑える 2℃目標シナリオ「2DS」、③2℃を十分に下回ること（およそ 1.75℃）を目指した 2℃超シナリオ「B2DS」を想定しており、これらのシナリオ毎にエネルギーシステムがどのようなようになるか、どのようにしなければならないかをエネルギーモデルを用いて解析したものである。図 2-1 は人為的 CO<sub>2</sub>排出トレンドを示したものであるが、RTS では 2050 年時点で 400 億トンの排出が推定され、この場合 2.7℃の上昇になると予想されている。また 2DS では 2050 年時点で CO<sub>2</sub>排出量が 133 億トン、B2DS では 48 億トンにすることが求められる。特に B2DS では 2060 年には世界全体で CO<sub>2</sub>排出を正味ゼロにすることが必要となる。図 2-2 で示すように 2DS や B2DS のエネルギーシステムは現状の対応に加え、さらなるエネルギー効率向上、CO<sub>2</sub>排出の少ない燃料への転換、さらには CO<sub>2</sub>回収貯留（CCS）といったすべての方策を総動員することが必要になる。また表 2-1 に分析結果の概要、図 2-3 に電源構成を示す。2DS では電力 CO<sub>2</sub>排出量をゼロに近づける対応の必要があることもわかる。また B2DS ではネガティブエミッション技術と呼ばれる GHG 排出を負にする技術（ここではバイオマス燃料による発電の排出 CO<sub>2</sub>を CCS により固定化することを想定）も必要とされる。

注）ここでのエネルギーシステムは、電気や燃料などのエネルギー源の製造・配送・利用のための装置・機器・インフラのほか、それらの運用技術、さらに化学品などの生産システムも含む、これまで化石資源を主に活用してきたシステム全体を指す。

<sup>2</sup> <https://www.env.go.jp/press/111781.pdf> （2019 年 12 月 23 日アクセス）

<sup>3</sup> <https://www.iea.org/reports/energy-technology-perspectives-2017> （2019 年 12 月 23 日アクセス）

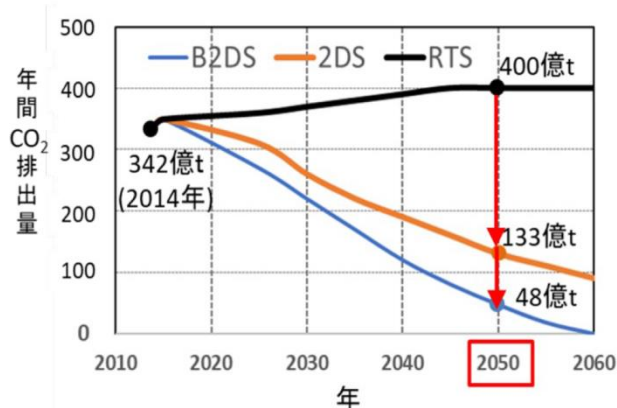
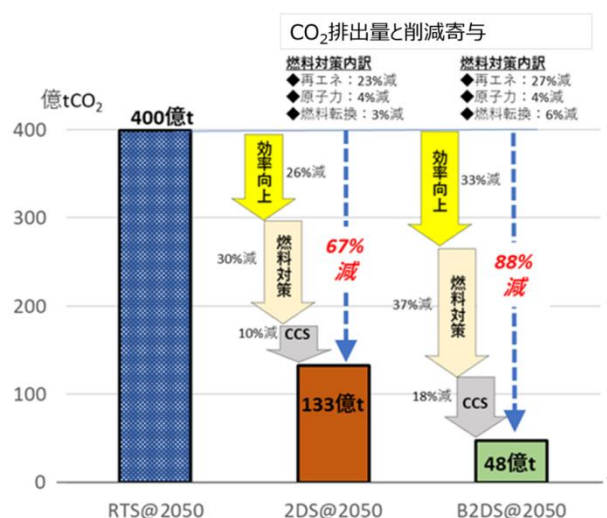
図 2-1 CO<sub>2</sub> 排出量推移図 2-2 2050 年における CO<sub>2</sub> 排出量

表 2-1 各シナリオ (RTS, 2DS, B2DS) におけるエネルギーシステム分析結果

| 項目                                               | シナリオ   |        |        | 2014<br>(参考) | 備考                      |
|--------------------------------------------------|--------|--------|--------|--------------|-------------------------|
|                                                  | RTS    | 2DS    | B2DS   |              |                         |
| CO <sub>2</sub> 排出量【億 t】                         | 400    | 133    | 48     | 340          |                         |
| 一次供給エネルギー量【EJ】                                   | 796    | 633    | 581    | 569          |                         |
| 化石資源割合【%】                                        | 70     | 43     | 33     | 82           |                         |
| 電力総発電量【TWh】                                      | 46,944 | 42,546 | 44,321 | 23,819       | 電化率は向上                  |
| 電力 CO <sub>2</sub> 排出原単位【kgCO <sub>2</sub> /kWh】 | 0.309  | 0.036  | -0.008 | 0.572        | B2DS ではネガティブエミッション技術を利用 |
| 電力構成における変動電源割合【%】                                | 19     | 33     | 35     | 4            | 変動電源：PV、風力、海洋等          |
| CCS 量【億 t】                                       | 9      | 54     | 84     | 0            |                         |

@OECD/IEA ETP2017 データより CRDS で独自に作成

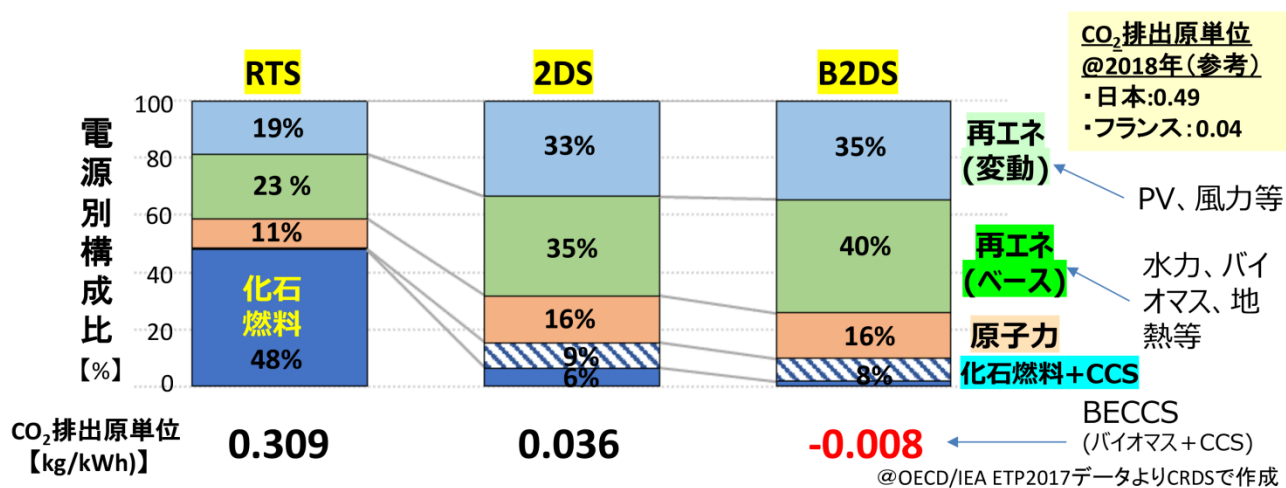


図 2-3 2050 年の各シナリオの電源構成



このようなエネルギーシステムの転換のためには高効率化・省エネ技術進展によるエネルギー消費量自体の一層の削減を推進するとともに、電力では供給側の対応による電力 CO<sub>2</sub> フリー化、およびエネルギー利用側による電化の推進が必要であり、さらには産業分野等での CCS による対応など、最初のステップとしていわゆる「脱炭素化」が重要になる。しかしさらにその先の正味ゼロエミッション化まで推進するためには、電化や CCS が困難とされる部門への対応の課題がクローズアップされてくる。サイエンス誌に掲載された「Net-zero emissions energy systems」<sup>4</sup>では脱炭素化が困難な部門として航空、船舶、長距離貨物、負荷調整用発電（ガスタービン火力等）、製鉄、セメントなどが挙げられており、2014 年世界での CO<sub>2</sub> 排出量の 27%を占めるとされる。これらは運輸用燃料のようにエネルギー源自体を搭載する必要があるもの（すなわち比体積、比重量として高いエネルギー密度が必要）や、負荷調整用発電のように起動停止が多く、定常的な運転ではないため CCS 装着が困難な発電設備、さらには製鉄のように炭素（コークス）を鉄鉱石の還元剤として利用するもの、またセメントのように原理的に原料から CO<sub>2</sub> が排出されるものなど、個別の技術的解決手段が必要なものばかりである。この文献のまとめでは脱炭素化には電化推進が重要であること、さらに電化が困難な分野にはカーボンニュートラルの燃料が重要なことを主張している。このことは脱炭素化に向けた技術である、CCS や再生可能電力などの電化推進のみならず、炭素循環を実現する技術として CCU（CO<sub>2</sub> 回収利用技術）が長期的に重要なことを示唆している。

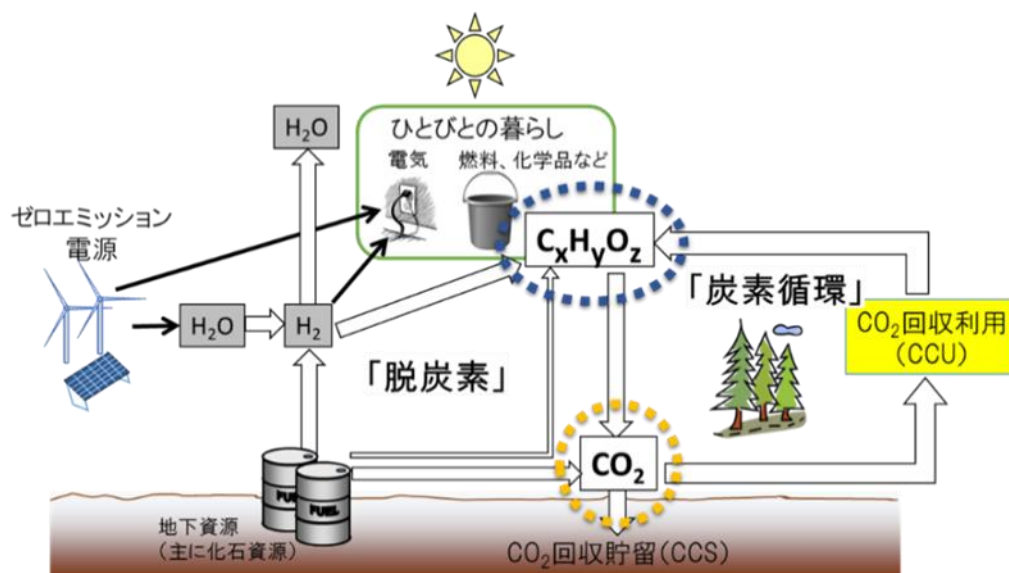


図 2-4 正味ゼロエミッションエネルギーシステム（イメージ図）

なお、炭素循環を実現する技術としてはバイオマス利用もその一つである。ただしバイオマス利用においては栽培から燃料製造までのライフサイクルでの CO<sub>2</sub> 排出量は通常の場合、正味ゼロにはならない。また森林伐採等による土地利用変化の影響も大きいことが知られており、表 2-2 に示すようにケースによっては GHG 排出を増大させることもある。

<sup>4</sup> <https://science.sciencemag.org/content/sci/360/6396/eaas9793.full.pdf> （2019 年 12 月 23 日アクセス）

表 2-2 各種化石燃料、バイオジェット、PtL 燃料におけるライフサイクル GHG 排出<sup>5</sup>

| ジェット燃料の原料    | GHG 排出<br>【gCO <sub>2</sub> eq/MJ fuel】 | 参考<br>直接土地利用変化分を<br>含む場合の GHG 排出値 | 備考                                      |
|--------------|-----------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------------|
| 原油（参考）       | 87.5                                    | ←                                 |                                         |
| 天然ガス（GTL）    | 101.0                                   | ←                                 | GTL: Gas to Liquid                      |
| スイッチグラス（BTL） | 17.7                                    | -2 ※1                             | 食料と競合しない<br>BTL: Biomass to Liquids     |
| 大豆油          | 37.0                                    | 97.8~564.2                        | 食料と競合する                                 |
| パーム油         | 30.1                                    | 39.8~698.0                        |                                         |
| 菜種油          | 54.9                                    | 97.9                              |                                         |
| ジャトロファ       | 39.4                                    | ←                                 | 食料と競合しない                                |
| PtL ※2       | ~1                                      | ←                                 | PtL: Power to Liquids<br>再エネ電力からの炭化水素製造 |

※1: 土壌炭素として吸収量が増加するためマイナス ※2: PV、風力による再生可能電力導入を想定

このため、バイオマス利用においては実質的な CO<sub>2</sub>削減効果を個別に考慮する必要があり、安易には拡大できない。これに代わるものが CCU であり、CO<sub>2</sub>を回収し、化学品、燃料などの製造の一連のサイクルを再生可能電力などの CO<sub>2</sub>フリーエネルギーで製造することで、バイオマス利用よりもライフサイクル的に有利になることが考えられる。特に欧州では上記の観点、さらに風力、PV による再生可能電力価格の低下や、既存インフラを活用できるなどの観点より再生可能電力を用いた燃料への変換技術である Power-to-X (P2X) と呼び、このように得られた製品を e-fuel、e-gas、e-liquid などと呼んで、期待されている。

なお、日本においては脱炭素化として水素社会、すなわち水素利用を想定とした技術を中心に検討されてきた。このため、CO<sub>2</sub>資源化としての CCU 技術は化学品を対象とし、その削減効果が限定的なものと考えられてきた。しかし、最近になってエネルギーシステムにおける炭素循環の必要性が認識され、カーボンリサイクルとしてその対象を燃料にまで広げることで、注目が高まっていると言える。

次項においては CCU に関して海外動向、特に欧州の動向、とりわけ政策動向について説明する。

<sup>5</sup> Schmidt et al., Chem. Ing. Tech. 2018, 90, No.1-2, 127-140

### 3. 海外動向

気候変動対策に積極的な EU および EU 主要国の政策動向、技術開発動向について述べる。また現トランプ政権における米国では、気候変動対策は消極的であるが、州、地方自治体レベル、アカデミア等における関心は高く、また米国エネルギー省（DOE）でも安全保障およびコスト優位性を持つ将来のエネルギー技術の確保の観点から CCU に関連した技術開発への支援も行っており、これらの概況について述べる。

#### 3.1 欧州（EU）

##### 【気候変動政策の概要と P2X 技術への期待】

EU の気候変動政策の特徴は法的強制力を用いたものであり、2020 年、2030 年、2050 年を具体的な目標年として、見直しも含めてさまざまな政策を打ち出してきた。特に 2030 年については「Clean Energy for All Europeans」クリーンエネルギー包括法案<sup>6</sup>として 2016 年 11 月に欧州委員会より提出された。この新たな規制枠組みにより、法的拘束力のある目標として再生可能エネルギー割合 32%およびエネルギー効率改善 32.5%を設定している。包括政策が完全に実施されると GHG 排出削減割合として約 45%が可能になるとされる。また 2050 年についても 2018 年 11 月に欧州委員会より「A Clean Planet for all」<sup>7</sup>として 2050 年長期戦略を示しており、GHG 排出の実質ゼロ（気候中立）を目指したビジョンやそれに関するシナリオ分析の結果<sup>8</sup>を提示している。この中では、2030 年目標の政策実施により 2050 年時点では GHG60%削減が達成されると試算しており、さらに 80%、90%、100%削減するための追加対策として複数の技術を追加したシナリオとその効果分析を行っている。その中には P2X（e-fuel）を活用したシナリオも含まれており、2050 年に向けた対策技術の一つとして期待されている。

表 3-1 に 2020 年、2030 年、2050 年における EU の目標の概略について示す。EU の 2030 年目標を達成するための柱となる方策は、排出権取引制度（EU-ETS フェーズ 4）、ETS 以外の削減を EU 加盟国で分担する仕組み（Effort Sharing Decision: ESD）、さらには森林・土地利用（Land Use, Land Use Change and Forestry : LULUCF）による GHG 吸収・排出抑制の 3 つの政策手段である<sup>9</sup>。最後の LULUCF 分野における吸収・排出抑制策については、改定再エネ指令（RED II）におけるバイオマス利用の持続可能性基準強化と相まって、EU におけるバイオマス利用の安易な拡大を抑止することになると考えられる。RED II の持続可能性基準では、ライフサイクルベースでの GHG 削減率の基準値を高めるとともに、間接的土地利用変化（IDLUC）についても考慮することが決まっている。これにより EU 域外からのバイオ燃料輸入、例えばパーム油のように森林などの土地利用変化による GHG 排出増加が想定される原料を 2030 年までにフェーズアウトさせることになっている。さらに LULUCF 分野の GHG 吸収・排出抑制のためには土地利用や森林の管理強化が必要となることから、EU 域内のバイオマス利用の増加が抑制されることになる。

なお 2019 年 12 月には欧州委員会が新たな追加措置として「European Green Deal」を発表しており、2050 年までに EU 域内の GHG 排出をゼロにするために、2030 年の GHG 削減目標の

<sup>6</sup> <https://ec.europa.eu/energy/en/topics/energy-strategy-and-energy-union/clean-energy-all-europeans>（2019 年 12 月 23 日アクセス）

<sup>7</sup> <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:52018DC0773&from=EN>（2019 年 12 月 23 日アクセス）

<sup>8</sup> [https://ec.europa.eu/clima/sites/clima/files/docs/pages/com\\_2018\\_733\\_analysis\\_in\\_support\\_en\\_0.pdf](https://ec.europa.eu/clima/sites/clima/files/docs/pages/com_2018_733_analysis_in_support_en_0.pdf)（2019 年 12 月 23 日アクセス）

<sup>9</sup> <https://www.eu.emb-japan.go.jp/files/000492981.pdf>（2019 年 12 月 23 日アクセス）

引き上げ、必要な法制化、対象とする産業、投資額や手段などの具体的な行動を明示している。  
これにより環境を守りながら持続可能な経済への移行を目指すこととしている<sup>10</sup>。

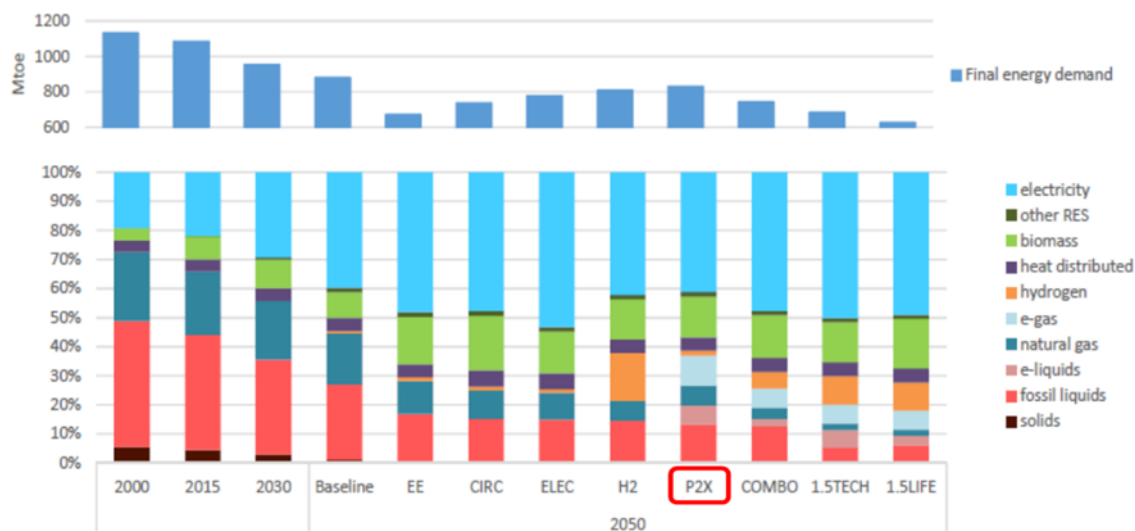
表 3-1 EU の気候変動対策の概要<sup>6, 7, 8, 9</sup>

| 項目 \ 目標年              |                       |                             | 2020                                                                                                                                                         | 2030                                                                                        | 2050                                                                                                                          | 備考                                                                                         |  |
|-----------------------|-----------------------|-----------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|--|
| EU目標                  | GHG削減割合               |                             | 20%                                                                                                                                                          | 40%以上<br>(約45%)                                                                             | 80%以上<br>気候中立を目指す                                                                                                             |                                                                                            |  |
|                       | 再生可能エネルギー割合           |                             | 20%(EU全体)<br>(国別に目標値設定)                                                                                                                                      | 32%以上<br>(27%より修正)                                                                          | 55% <sup>*a</sup>                                                                                                             | *a:PRIMESモデル分析の「COMBOシナリオ」の結果<br>「COMBOシナリオ」: GHG90%削減を目標とした複数シナリオの組み合わせによる費用対効果の高いシナリオ    |  |
|                       | エネルギー効率改善             |                             | 20%<br>(一次エネルギー削減)                                                                                                                                           | 32.5%以上<br>(27%より修正)                                                                        | 2030年比13%削減 <sup>*</sup>                                                                                                      |                                                                                            |  |
|                       | 自動車CO <sub>2</sub> 規制 | 乗用車<br>CO <sub>2</sub> 排出   | 95 g/km                                                                                                                                                      | 37.5%削減<br>(2021年比)                                                                         | ・企業平均規制 (CAFÉ)<br>・車両走行プロセス (TTW : Tank To Wheel)ベースのCO <sub>2</sub> 排出規制<br>・ゼロ (EV/FCV)/低排出車両導入促進のためのインセンティブメカニズム有          |                                                                                            |  |
|                       |                       | 小型商用車<br>CO <sub>2</sub> 排出 | 147 g/km                                                                                                                                                     | 31%削減<br>(2021年比)                                                                           |                                                                                                                               |                                                                                            |  |
|                       |                       | 重量車<br>CO <sub>2</sub> 削減   | -                                                                                                                                                            | 30%削減<br>(2021年比)                                                                           |                                                                                                                               |                                                                                            |  |
| 自動車燃料<br>バイオ割合        |                       | 自動車燃料<br>バイオ割合              | 10% <sup>*a</sup>                                                                                                                                            | 14% <sup>*b</sup>                                                                           | *a:食料由来7%上限/先進型バイオ0.5%以上<br>*b:食料由来7%上限(または2020年実績+1%)/先進型バイオ3.5%以上<br>先進型バイオ/再生可能電力利用でのインセンティブメカニズム有                         |                                                                                            |  |
| 注目<br>ポイント            |                       |                             | ●GHG削減の政策手段として、排出権取引 (EU-ETSフェーズ4へ移行)で対応するセクター (約40%排出)とそれ以外の非ETSのセクターがある。非ETSセクターについては加盟国毎に分担して対応<br>・EU-ETS : 発電、大規模製造業、航空部門<br>・非ETS : 住宅、農業、廃棄物、交通(航空以外) | ●EU全体の目標に対して、国別目標を設定して対応 (例 : ドイツ18%、フランス23%、スウェーデン49%)                                     | ●バイオマス利用の持続可能性基準の強化<br>・LCAベースのGHG削減割合: バイオ燃料50%→65%<br>・間接的土地利用変化の影響を考慮<br>●土地利用、土地利用変化及び林業部門 (LULUCF)<br>・土地管理によるGHG吸収拡大と抑止 | ●2030年目標の施策により2050年にはGHG64%削減を見込む。これを前提に追加対策として「電化(更なる強化)」「水素」「P2X」などの複数のシナリオでのモデル分析結果を公表。 |  |
| 関連する<br>主な提案や<br>法的規制 |                       |                             | ●気候・エネルギー政策パッケージ<br>・再生可能エネルギー利用促進指令(RED)<br>・燃料品質指令(FQD)<br>●車両CO <sub>2</sub> 排出規制 (Clean Mobility Package)                                                | ●「Clean Energy for All Europeans」<br>・改定再エネ指令(RED II)<br>●CO <sub>2</sub> 排出規制(乗用車・商用車・重量車) | ●「A Clean Planet for All」EU長期戦略ビジョン                                                                                           |                                                                                            |  |

一方、2050年目標に対しては複数の技術的シナリオを追加的に対策したケースについて、モデルによる分析を行っている。GHG削減シナリオとしては8種類あり、80%削減シナリオとして、「効率向上 (EE)」「循環 (CIRC)」「電化 (ELEC)」「水素 (H<sub>2</sub>)」「P2X」の5種類の主たる技術、90%削減シナリオとして、これら技術をコスト最小化で統合した「コンボ (COMBO)」が検討されている。P2Xを主たる技術としたシナリオ分析結果 (P2Xシナリオ) では、2050年時点ではe-fuel (e-liquidとe-gas (H<sub>2</sub>含まず)) が139 M石油換算トンとされ、バイオマス利用 (115 M石油換算トン) と同程度の量が利用されると分析している。2015年のバイオマス利用が84 M石油換算トンであることを考えると、2050年時までのバイオマス増加分は3割程度に留まっており、バイオマスを補う形でP2X (e-fuel) が燃料製造技術として期待されていることがわかる。また2050年カーボンニュートラル (1.5℃対応: GHG100%削減) に向けたシナリオである「1.5TECH」「1.5LIFE」の2つについても、e-fuelが各々96 M、61 M石油換算トンと想定され

<sup>10</sup> <http://eumag.jp/behind/d0220/> (2020年2月27日アクセス)

しており、いずれのシナリオでも 2050 年に向けた CO<sub>2</sub>削減のキーとなる技術として P2X が期待されている。



注) CRDS にて P2X に赤枠記載

図 3-1 2050 年 EU のシナリオ毎の最終消費エネルギーのエネルギー源別割合<sup>8</sup>

この P2X が将来技術として期待されている理由としては、電力のセクターカップリングとしての柔軟性が挙げられる。ここでのセクターは熱、交通を指しているが、今後自然変動電源による再生可能エネルギーを積極的に利用拡大するためには、燃料などの別のエネルギー形態に変換して利用することなどにより、総合的に民生、運輸、産業、農業の各需要部門と密接にリンクさせることが重要となる。

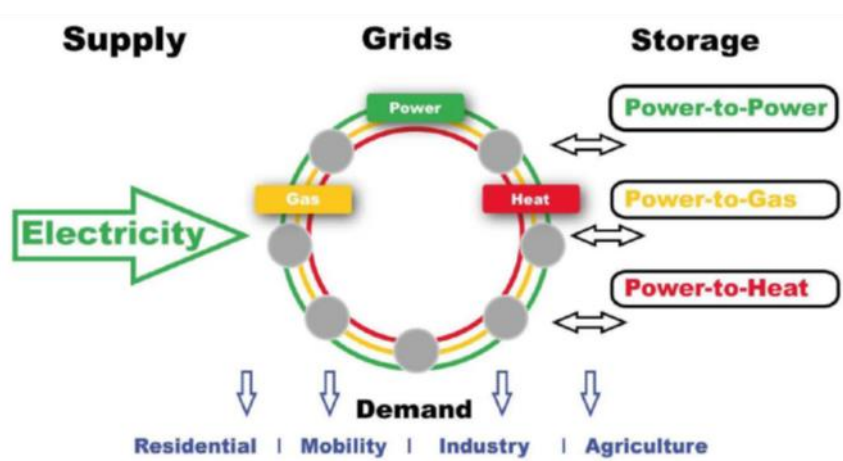
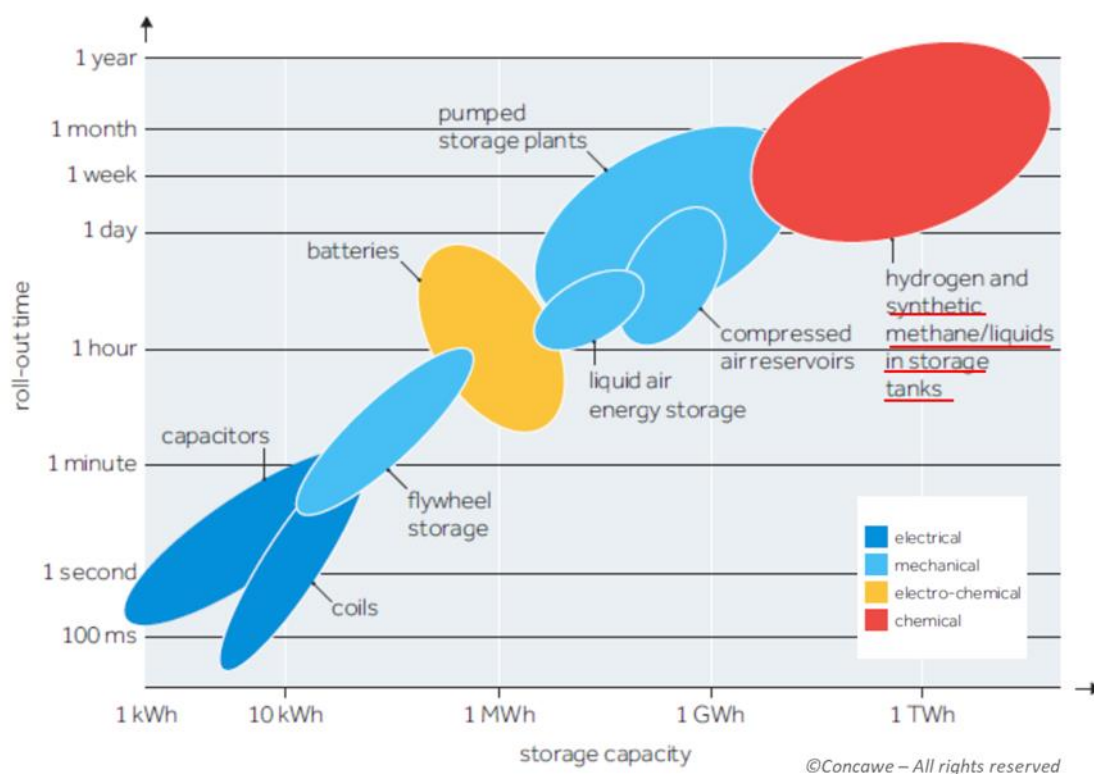


図 3-2 エネルギーセクターの統合<sup>8</sup>

現在のエネルギーシステムのインフラ（電力、ガス、熱供給、燃料など）の耐用年数を考えると、2050 年時点でも相当の割合が利用可能と考えられる。再生可能電力を P2X 技術で既存インフラに合わせた燃料形態で利用することで、既存設備を活用できる。これにより現状の燃料への

混合利用などによる導入規模を段階的に導入できることによりエネルギーシステム転換の障壁を下げ、インフラ投資を最小限に抑えることができるメリットがある。さらに、電化が難しい領域が存在する運輸部門や産業部門などへの適用が容易になる。また燃料への変換は風力・太陽光発電など、増大する自然変動電源の蓄エネルギー技術、特に長期間に対応するエネルギー貯蔵技術という観点での利用も考えられる。図 3-3 は電力システムにおいて各蓄エネルギー技術における電力貯蔵期間と貯蔵容量の関係を示したものである<sup>11</sup>。この図からは蓄エネルギー技術としての P2X は長期・大量貯蔵に適していることを示している。



赤線は CRDS で追記

図 3-3 各蓄エネルギー技術の特徴（貯蔵容量と貯蔵期間）<sup>11</sup>

以上のように期待される P2X 技術であるが、その最大の課題はコストにある。ジェット燃料のコスト試算例として、水電解からの水素と発電などの排ガスから回収された CO<sub>2</sub> を原料に合成ガスを製造し、FT 合成を経由した場合（ドイツでの製造を前提）、現状ベースで 3,245 €/t、2050 年想定で 1,352 €/t（120 円/€とするとそれぞれ 389 円/kg、162 円/kg）としており<sup>5</sup>、現状では高コストであるものが、2050 年時においては再エネ電気代の低下や大型化等の技術進展によるコスト削減効果により半分以下になる可能性を示している（参考 3（1）も参照）。また EU の調査研究として 2050 年における P2X 技術の収益性の分析を行っており、他の競合技術をベンチマーク（例えばメタンへの変換の場合、バイオメタンとの比較）として、P2X 技術が欧州内のどの地域で競争力を持つかを試算した結果例がある（参考 3（2）も参照）<sup>12</sup>。この報告書によると収益性は設備コストに加えて、各国の電力価格に依存しており、スペイン、ポルトガル、およびフ

<sup>11</sup> <https://www.concawe.eu/wp-content/uploads/E-fuels-article.pdf>（2020 年 1 月 14 日アクセス）

<sup>12</sup> <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/1e6b9012-6bbc-11e9-9f05-01aa75ed71a1/language-en/format-PDF/source-96288622>（2020 年 1 月 14 日アクセス）

ランスなどが競争力を持つとしている。

欧州ではこのように既存技術の組み合わせとそのスケールアップによる対応など、早期の商用化に向けた対応を検討しているが、技術的なコスト削減策以外にも、政策的な支援策の在り方が課題となっている。政策的な課題としては、再生可能電力の価格低減策、インセンティブ、規制改正、さらには CO<sub>2</sub> 価格の設定などが挙げられる<sup>13</sup>。例えば自動車 CO<sub>2</sub> 排出規制を例にとると、現状は走行時の車両ベース排出量規制（Tank to Wheel ベース）となっており、仮にカーボンニュートラルな炭化水素燃料を用いても化石由来の燃料と同様な取扱になる。このように電気自動車や水素燃料電池車はゼロエミッション車として導入インセンティブが得られる一方で、同様な効果を持つ e-fuel+内燃機関の組み合わせでは現状ではインセンティブが得られない。これは自動車分野の CO<sub>2</sub> 排出規制が車両ベース（Tank to Wheel : TtW）と燃料ベース（Well to Tank : WtT）と別々の規制となっており、e-fuel を利用する内燃機関搭載車の組み合わせのように Well to Wheel ベース（WtW:燃料採掘から車両走行時排出まで）での CO<sub>2</sub> 削減効果が評価されないためである。これに対して欧州石油精製協会（FuelsEurope）では WtW ベースの CO<sub>2</sub> 削減効果を評価し、2030 年以降は燃料会社と自動車会社間で個別に排出権取引が可能にすることで燃料会社が e-fuel のような低炭素燃料製造の導入に対してインセンティブが得られる仕組みを提案している<sup>14</sup>。

#### 【技術動向】

欧州内の Power-to-X デモプロジェクトは 2003 年に最初のプロジェクトが開始されて以来、2017 年末時点で完了・計画中を含めて 128 件あり、既に 27 件は完了、38 件は計画中、残りの 63 件が実施中である<sup>15</sup>。欧州 16 カ国が実施しており、国別ではドイツが最も多い。表 3-2 に目的、国別を表に示す。

表 3-2 欧州内 P2X プロジェクトの目的・国別動向

| 目的<br>国 | 天然ガスグリッド<br>への混合 | 熱電供給 | 燃料 | 産業用水素 | 非特定 | 国別計  |
|---------|------------------|------|----|-------|-----|------|
| ドイツ     | 18               | 9.5  | 15 | 10    | 4   | 56.5 |
| 英国      | 1                | 2    | 8  | 0     | 1   | 12   |
| フランス    | 5                | 3    | 1  | 2     | 0   | 11   |
| デンマーク   | 7                | 2    | 1  | 1     | 2   | 13   |
| スイス     | 2                | 0    | 3  | 0     | 1   | 6    |
| オランダ    | 3                | 0.5  | 1  | 1     | 0   | 5.5  |
| その他     | 4                | 3    | 7  | 1     | 2   | 17   |
| 目的別合計   | 41               | 23   | 37 | 16    | 11  | 128  |

文献<sup>12</sup>を基に CRDS で作成 注) ドイツ/オランダの共同プロジェクトがあるため、両国に 0.5 ずつ分配

目的別としては天然ガスグリッド（ガス導管）への水素またはメタンの混合を目的としたプロジェクトが最も多く、それに続いて燃料となっている。欧州ではドイツなど水素混入の上限が比

<sup>13</sup> The European E-fuels Conference（開催日 2019.11.6-7、場所：ミュンヘン）

<sup>14</sup> [https://www.fuelsEurope.eu/wp-content/uploads/DEF\\_2018\\_V2050\\_Appendix\\_EN\\_digital.pdf](https://www.fuelsEurope.eu/wp-content/uploads/DEF_2018_V2050_Appendix_EN_digital.pdf)（2020 年 1 月 14 日アクセス）

<sup>15</sup> <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610218309883>（2020 年 1 月 14 日アクセス）



較的緩い国もあることから（図 3-4 参照）、初期段階では P2G として水素製造のプロジェクトが多かったが、最近では混合量に上限のないメタン製造への検討が増加している。（上記プロジェクトの内、水素と CO<sub>2</sub> からのメタン化プロセスを検討しているものは 36 件に上る）

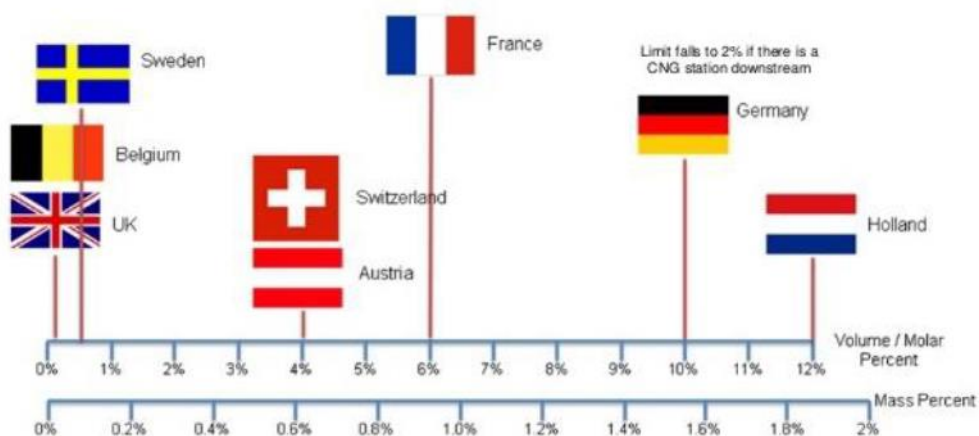


図 3-4 各国の天然ガスグリッドへの水素混合限界<sup>12</sup>

各国の特徴としてデンマークでは天然ガスグリッドへの混合適用、スペインでは熱電供給用途、英国では輸送用水素、ドイツはすべての分野で推進している。また技術成熟度 (TRL) で見ると、水電解技術では TRL6~7 レベルのアルカリ電解槽と PEM がいずれも 49 件と多く、TRL5 レベルの SOEC は 9 件と比較的少ない状況にある。（欧州の TRL 定義については参考 5 参照）

### 3.2 ドイツ

EU 各国においては、EU の政策を国内政策として追加策も含めた形で法整備化を行っている。ドイツでは、2011 年に「Energiewende（エネルギー転換）」と呼ばれる政策が形作られ、2022 年までの原子力の段階的廃止、エネルギー効率向上、再生可能エネルギーへのシフトを加速するエネルギー政策を打ち出した。この長期エネルギー目標の一つとして電力に占める再エネ電源比率を 2020 年には 35%以上、2030 年には 50%以上とすることになっている<sup>16</sup>。2018 年電源構成は、40.4%が再生可能エネルギーによるものであり、主力である風力が 20.4%、太陽光が 8.4%と自然変動電源の割合が大きい<sup>17</sup>。このうち風力発電は風況の関係で北部に集中しているが、電力需要は産業が集積する南部が大きく、さらに南北をつなぐ高圧送電線が不足している状況にある。しかしながら高圧送電線の建設計画は住民反対により進展しておらず、これに代わる方法として再生可能電力を水素、メタンのガスに転換し、それを既存のガスパイプラインを利用して輸送、活用する Power-to-Gas が注目されてきた<sup>18</sup>。これは国内のガスパイプラインが整備されていることに加え、暖房などの熱需要が多く、熱分野での低炭素化の重要性が高いためである。前述のようにドイツでは多くのデモプロジェクトが実施されており、コストダウンに加え、水電解装置についてはモジュールの大規模化 (MW 級) や再生可能エネルギーの出力変動に対する負荷追従性

<sup>16</sup> [https://www.env.go.jp/earth/report/h29-03/h28\\_ref01.pdf](https://www.env.go.jp/earth/report/h29-03/h28_ref01.pdf) (2020 年 1 月 14 日アクセス)

<sup>17</sup> <https://www.nikkei.com/article/DGXMZO39742980Y9A100C1000000/> (2020 年 1 月 14 日アクセス)

<sup>18</sup> 柴田喜朗「我が国における Power to Gas の可能性」2015.12



の向上等、新たな技術開発の余地がある。一方で P2X 技術として水素、メタン以外の輸送用燃料や化成品原料を生産する Power to Fuel についても検討されている。2016 年 4 月に連邦教育研究省 (BMBF) が「第 6 次エネルギー研究プログラム」の一部として「エネルギー転換に関するコペルニクス・プロジェクト」を発表した。プロジェクトは、マックスプランク研究所により発案され、①新ネットワーク構造、②余剰電力の貯蔵“Power-to-X”、③社会的受容も含めた産業化プロセス、④エネルギーシステム・インテグレーションの 4 つの領域からなる。

このうち①では集中発電及び分散発電の電力コンビネーションにより電力変換にかかるコストを削減する研究など、②では余剰な再生可能エネルギーの 90%以上を化学的原料、ガス燃料、または燃料の形で貯蔵するプロセスの研究などを実施する。今後 10 年でアーヘン工科大などのアカデミア、シーメンス社などの産業界、及び市民が連携してエネルギーシステムの転換に必要な技術的、経済的解決策を生み出すことを目指すとしている。研究参加者の 1 割は社会学者である。BMBF は最初の 3 年間 (2016~2018 年) の資金として最大 1.2 億ユーロ、2025 年までに更に 2.8 億ユーロを助成する予定である<sup>19</sup>。

なお、ドイツの再生可能電力拡大を牽引してきた陸上風力については 2017 年のピーク後、建設反対の住民運動による建設の急激な落ち込みにより、ドイツにおける気候変動対策としての再生可能電力確保が大きな課題となっており<sup>20</sup>、今後の政策動向を注視していく必要がある。

### 3.3 米国

米国では連邦政府としての気候変動政策は消極的な一方で、カリフォルニア等の州政府のいくつかは CO<sub>2</sub> 削減の目標を掲げ、積極的に推進している。その先端を走るカリフォルニア州では、GHG 削減目標として、2020 年までに 1990 年と同レベル、2030 年までに 40%削減 (90 年比)、2050 年までに同 80%削減することを義務付けている。2020 年目標は 2016 年に達成している。また、2030 年までに電源の再エネ比率 60%が義務付けられ、2045 年までにはクリーン電力を 100%にする目標が定められた<sup>21</sup>。変動電源拡大に対しては電力会社に一定割合の蓄電容量を義務付ける政策を導入しており、2030 年に向けた政策の実現が中心となっている。

CCUS に関しては DOE (Department of Energy、米国エネルギー省) などから複数の政策文書やロードマップ (参考表 3) が発行されているが、これらは CO<sub>2</sub> 利用として石油回収増進 (EOR) を主な狙いとしている。

米国における CO<sub>2</sub> 資源化に関する技術開発は、気候変動対策というよりもエネルギー安全保障の観点からの幅広いエネルギー技術開発の一つとして DOE が研究開発およびファンディングを行っている。例えば、DOE のエネルギー効率・再生可能エネルギー局 (EERE: Energy Efficiency & Renewable Energy) ではバイオエネルギーに、化石エネルギー研究開発局 (FE: Fossil Energy R&D) では CCUS の技術開発への資金提供が行われている。またこれとは別にハイリスク・ハイペイオフ型の研究開発を目指すエネルギー高等研究計画局 (ARPA-E: Advanced Research Projects Agency) でもいくつかのプログラムが実施されている。

表 3-3 は ARPA-E の燃料製造に関するこれまでの研究プログラムである。ここでは生物化学的変換の研究開発が積極的に実施されていることが特徴と言える。特に Electrofuel のように電気

<sup>19</sup> JST-CRDS「俯瞰報告書 エネルギー分野 (2019 年)」p80

<sup>20</sup> [https://www.osw.waw.pl/sites/default/files/commentary\\_309.pdf](https://www.osw.waw.pl/sites/default/files/commentary_309.pdf) (2020 年 1 月 14 日アクセス)

<sup>21</sup> <https://www.gef.or.jp/globalnet201909/globalnet201909-10/> (2020 年 1 月 14 日アクセス)

エネルギーと微生物を利用することで課題とされる反応速度を高める試みも行われている。

表 3-3 米国 ARPA-E プログラム（炭化水素への CO<sub>2</sub> 変換が含まれるもの）

| プログラム名       | 概要                      | 件数 | 開始年         | 特徴                                                                                                          |
|--------------|-------------------------|----|-------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 【生物化学的変換】    |                         |    |             |                                                                                                             |
| Electrofuels | 電気・水素を利用した微生物による燃料生産    | 13 | 2010 年 4 月  | 電気・水素をエネルギー源として光合成に頼らない微生物によるバイオ燃料生産。遺伝子組み換え等による対応あり                                                        |
| PETRO        | 輸送燃料を直接生産する非食用作物の開発     | 10 | 2011 年 9 月  | 植物自体から直接抽出できる燃料を生産する植物の開発。遺伝子組み換え等により対応あり                                                                   |
| MARINER      | 海藻・大型藻類による燃料製造          | 18 | 2017 年 9 月  | 海藻類より燃料を生産するための栽培・収穫システム、計算モデリングツール、水生モニタリングツール、遺伝子ツールの開発。資本・運用コストを削減するためのエンジニアリング・システムレベルの研究開発（例えば自動牽引船など） |
| REMOTE       | 生物学的変換によるメタンからの液体燃料製造   | 16 | 2013 年 9 月  | 天然ガス、バイオガスなどの豊富に存在するメタンを小規模設備で液体燃料にするためにメタノトロフ微生物を利用                                                        |
| 【電気化学的変換】    |                         |    |             |                                                                                                             |
| REBELS       | 電気化学システム                | 13 | 2014 年 6 月  | 主たる目的は燃料電池の低コスト化のための中温電解質やそのシステムの開発。このシステムによる燃料製造も含まれる                                                      |
| REFUEL       | 再エネ電力からのカーボンニュートラルな液体燃料 | 16 | 2016 年 12 月 | 水素エネルギーキャリアとしてアンモニア生産が主要ターゲットであるが、CO <sub>2</sub> からのエタノール、ジメチルエーテル（DME）への変換技術が含まれる                         |

出典：ARPA-E web 情報を基に作成

2019 年 7 月に開催された ARPA-E サミットの次期候補テーマを紹介するセッションでは産業分野の脱炭素を実現する技術として P2X 技術の紹介があり、米国でも電化が困難な分野の脱炭素化技術として捉えられている<sup>22</sup>。

それ以外も DOE での基礎エネルギー科学の担当である科学局のファンドであるエネルギーフロンティア研究センター（EFRC）として基礎研究が実施され、また光電気化学、いわゆる人工光合成の研究として、人工光合成共同研究センター（JCAP：Joint Center for Artificial Photosynthesis）がイノベーションハブの一つとして実施されている。この JCAP では 2011 年からの第 1 期においては水分解による水素製造に、2015 年からの第 2 期においては水と CO<sub>2</sub> からの燃料製造（CO<sub>2</sub> 還元反応）を中心としたテーマとしており、光触媒に加え、電気化学触媒の研究開発も含まれている<sup>23</sup>。

また全米アカデミーズでは「Gaseous Carbon Waste Streams Utilization: Status and Research Needs（2019）」<sup>24</sup>として、主に CO<sub>2</sub> とメタンが含まれるガス状炭素廃棄流の利用法やその技術に関連した技術レポートを発行しており、その中で CO<sub>2</sub> の資源化技術として化学的変換技術、生物学的変換技術の動向や課題が詳細にまとめられている。

<sup>22</sup> [https://arpa-e.energy.gov/sites/default/files/Fast%20Pitch\\_Soloveichik%20\\_Electrify%20the%20Industrial%20Sector.pdf](https://arpa-e.energy.gov/sites/default/files/Fast%20Pitch_Soloveichik%20_Electrify%20the%20Industrial%20Sector.pdf)（2020 年 2 月 4 日アクセス）

<sup>23</sup> <https://solarfuelshub.org/thrusts>（2020 年 2 月 4 日アクセス）

<sup>24</sup> <https://www.nap.edu/catalog/25232/gaseous-carbon-waste-streams-utilization-status-and-research-needs>（2020 年 2 月 4 日アクセス）

## 4. 国内動向

### 【政策動向】

我が国における CCUS 分野のついでの主な政策文書やロードマップを表 4-1 に示す。

表 4-1 CCUS 分野の政策文書・ロードマップ一覧 (日本)

| 発行機関                   | 発行時期       | タイトル                                       |
|------------------------|------------|--------------------------------------------|
| 内閣府                    | 2016 年 4 月 | エネルギー・環境イノベーション戦略                          |
| 内閣府                    | 2018 年 3 月 | CO <sub>2</sub> 利用に当たってのボトルネック課題及び研究開発の方向性 |
| 資源エネルギー庁<br>カーボンリサイクル室 | 2019 年 6 月 | カーボンリサイクル技術ロードマップ                          |
| 統合イノベーション戦略<br>推進会議    | 2020 年 1 月 | 革新的環境イノベーション戦略                             |

出典：Web 情報を基に作成

2016 年 4 月にまとめられた「エネルギー・環境イノベーション戦略 (NESTI 2050)」<sup>25</sup>では、2050 年を見据え、削減ポテンシャル・インパクトが大きい有望な革新技術を特定している。その革新技術の一つに、CO<sub>2</sub> 固定化・有効利用があり、CO<sub>2</sub> 分離回収と化学品や炭化水素燃料の原料への転換・利用 (CCU) が挙げられている。この段階では CO<sub>2</sub> 資源化としての CCU 技術は主に化学品を対象としたものを想定しており、その CO<sub>2</sub> 削減効果は限定的な位置づけとなっている。一方、我が国では脱炭素化として水素社会、すなわち水素利用を想定とした技術を中心に検討されてきた経緯があるが、2017 年 12 月に策定された水素基本戦略では、水素 (CO<sub>2</sub> フリー) を用いた CO<sub>2</sub> から合成メタン (メタネーション) も水素エネルギーキャリアの一つとして位置付けられた。この合成メタンは既存のエネルギーインフラの活用、および熱利用の低炭素化という観点からエネルギーキャリアとして大きなポテンシャルを有するためである。また 2017 年度の「二酸化炭素の有効利用及び派生技術」を議論のテーマとしたボトルネック課題研究会からは、CO<sub>2</sub> からの化学品への転換における技術課題に関する包括的調査報告書<sup>26</sup>が発行されている。

さらにパリ協定を踏まえ、2050 年を見据えた脱炭素社会の実現に向けてボトルネックとなる技術課題を抽出し、その評価を行うために経産省/文科省共同で「エネルギー・環境技術のポテンシャル・実用化評価検討会」が実施された。そこでは CO<sub>2</sub> 大量削減に貢献する横断的技術として水素、CCUS、再エネ・蓄エネ、パワエレが取り上げられ、その内の CCUS の中で CO<sub>2</sub> 利用技術について検討された (報告書が 2019 年 6 月に公表)。また 2019 年 2 月には資源エネルギー庁にカーボンリサイクル室が設置され、6 月に「カーボンリサイクルロードマップ」が発行された。

なお我が国のパリ協定に基づく 2050 年までの長期戦略に対応して、前述の検討会とロードマップの内容も取り込んだ形で総合的なエネルギー・環境分野の戦略である「革新的環境イノベーション戦略」が策定されており、この中でも CCUS 分野を含むカーボンニュートラルを可能とする革新的技術の確立を目指している。以下にカーボンリサイクル技術ロードマップおよび革新的環境イノベーション戦略の概要を記載する。

<sup>25</sup> <https://www8.cao.go.jp/cstp/nesti/honbun.pdf> (2020 年 2 月 4 日アクセス)

<sup>26</sup> <https://www8.cao.go.jp/cstp/stmain/houkousei.pdf> (2020 年 2 月 4 日アクセス)

#### <カーボンリサイクル技術ロードマップ><sup>27</sup>

2019年6月には資源エネルギー庁に設置されたカーボンリサイクル室より、CO<sub>2</sub>を化学品や燃料の資源として捉え、各種技術の現状と、製造や普及に向けた課題、技術進展のステップを記載したカーボンリサイクル技術ロードマップが策定された。

本ロードマップにおいては、大きく二つのステップが記載されている。一つ目のステップは、2030年までに、“CO<sub>2</sub>を利用しやすい環境の確立”と、“既に基礎技術が確立し、低コスト化を図る既存製品の代替が可能もの”で、早期の普及実現を目指すものがターゲットとなっている。

前者はCO<sub>2</sub>の分離・回収技術と利用の低コスト化、後者は水素が不要なCO<sub>2</sub>利用や転換技術であり、①ポリカーボネートなどの化学品、②微細藻類により製造した燃料、③CO<sub>2</sub>ガスで養生したコンクリートが対象になっている。

もう一つのステップでは、2050年に向けて、未だ技術的には確立していないが、実現した場合にCO<sub>2</sub>利用量が多いものがターゲットとなっている。需要が多い汎用品が対象であり、具体的には、①基礎化学品であるオレフィンやBTX、②燃料であるメタン、アルコール、オキシメチルエーテルなど、③コンクリート製品となっている。

さらに、基幹物質の製造技術として、メタンケミストリー（C1化学）、光や電気を利用した合成ガス製造やメタノール製造にも言及している。

#### <革新的環境イノベーション戦略><sup>28</sup>

2020年1月には、内閣府の統合イノベーション戦略推進会議で、革新的環境イノベーション戦略（以下、本戦略）が決定された。本戦略は、「パリ協定に基づく成長戦略としての長期戦略（以下、長期戦略）」と「総合イノベーション戦略2019」に基づき、エネルギー・環境分野において革新的なイノベーションを創出し、社会実装可能なコストを実現し、これを世界に広めていくために策定されている。特に、世界のカーボンニュートラル、更には、過去のストックベースでのCO<sub>2</sub>削減（ビヨンド・ゼロ）を可能とする革新的技術を2050年までに確立することを目指している。

本戦略の第2章「イノベーション・アクションプラン」には、コスト目標、世界のGHG削減量、技術開発内容、実用化・実証開発まで具体的なシナリオとアクションプラン等が示されている。なお、対象となる技術は5分野に大別されており、内1分野は「カーボンリサイクル、CCUS」となっている。具体的な技術は、人工光合成を用いたプラスチック製造、ポリエステルやポリウレタン等の含酸素化合物、メタネーション、セメントやCO<sub>2</sub>吸収コンクリートの開発となっている。また、他分野にはCO<sub>2</sub>分離回収とDAC（Direct Air Capture）技術も記載されている。

なお欧州で検討が進んでいるPower-to-Gas（P2G）、再エネ水素とCO<sub>2</sub>によるメタン化（メタネーション）であるが、我が国でもその導入による効果や経済性の調査研究が行われている（参考3（3）も参照）<sup>29</sup>。これは、将来想定されるPV、風力発電の大量導入時において、電源構成モデルを用いて余剰電力量を推計し、バイオマス発電、産業部門、火力発電からのCO<sub>2</sub>および余剰電力からの電解水素を用いたメタン合成を行うものとし、その場合の国内供給ポテンシャル、コストについて、水素供給の場合との比較で解析したものである。合成メタン（カーボンニュー

<sup>27</sup> <https://www.meti.go.jp/press/2019/06/20190607002/20190607002-1.pdf>（2020年2月4日アクセス）

<sup>28</sup> <https://www.meti.go.jp/press/2019/06/20190607002/20190607002-1.pdf>（2020年2月4日アクセス）

<sup>29</sup> <https://eneken.ieej.or.jp/data/7769.pdf>（2020年2月4日アクセス）

トラルメタン)を用いる場合は既存インフラの最大限の利用とし、一方水素供給の場合は水素導管を新設することを前提にすると、製造装置等の設備利用率 10%以上で合成メタン利用の方が水素利用よりもコスト的に優位性を持つ可能性が示唆された。これは合成メタンの場合、新たな供給インフラを最小限に抑えることができるためである。また合成メタンを分散型コジェネ(エネファームなどの定置型燃料電池など)に用いた場合の変動調整・電力安定化への寄与について、将来価格低下が見込まれる蓄電池を用いた場合とで比較解析例もある<sup>30</sup>。このケースでは両者の設備コストは同水準であるが、合成メタンとコジェネでの組み合わせが優位性を持つ。これは蓄電池の場合、再生可能電力導入量増大が大きくなるにつれ、蓄電池の放電機会が限定的になり、低炭素化効果が薄れるのに対して、合成ガス+コジェネの場合は合成ガスが電力以外の熱などの電力システム外の別な用途にも展開できるため、その制約が小さくなるためである。

### 【技術開発】

各省より CCUS 関連の研究開発や実証事業が活発に行われている(表 4-2)。二酸化炭素を原料に化学品を製造する研究開発事業が多く、特に光触媒を用い、太陽光エネルギーを活用した人工光合成に関する事業が多いのが特徴である。また、近年では環境省からは CCU 技術を社会実装に向けた実証事業も開始されている。

表 4-2 CCUS 技術の研究開発・実証事業例

| 対象分野 |      |    | 主管    | プロジェクト名                                                                                                | 内容                                                             | 期間            |
|------|------|----|-------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|---------------|
| 分離回収 | 有効利用 | 貯留 |       |                                                                                                        |                                                                |               |
| ○    |      |    | 経済産業省 | 二酸化炭素回収技術実用化研究事業                                                                                       | アミンを固体に担持した吸収材を用いた実用化研究を行う。                                    | 2015～         |
|      |      | ○  | 経済産業省 | CCS 研究開発・実証関連事業                                                                                        | CO <sub>2</sub> の貯留並びに、CO <sub>2</sub> 分離・回収から貯留及びその関連技術を開発する。 | 2012～         |
|      | ○    |    | 文部科学省 | 人工光合成による太陽光エネルギーの物質転換                                                                                  | CO <sub>2</sub> 還元光触媒などを4領域を開発する。有機金属錯体と半導体光触媒との分野間融合を図る。      | 2012～<br>2016 |
|      | ○    |    | 経済産業省 | 二酸化炭素原料化基幹化学品製造プロセス技術開発                                                                                | 光触媒から得られた水素と CO <sub>2</sub> から基幹化学品を製造する。                     | 2012～         |
|      | ○    |    | 文部科学省 | ACT-C 先導的物質変換領域                                                                                        | CO <sub>2</sub> を還元し、C1～C3化合物を変換する技術などを開発する。                   | 2012～         |
|      | ○    |    | 文部科学省 | 学術領域研究<br>光合成分子機構と学理解明と時空間制御による革新的光-物質変換系の創製                                                           | 天然光合成の機構解明と、人工光合成の光触媒を開発する。                                    | 2017～         |
| ○    | ○    |    | 経済産業省 | NEDO 先導研究プログラム[未踏チャレンジ2050]<br>Net Zero Emission (NZE) を実現する複合技術<br>Direct Air capture (DAC) を実現する複合技術 | 2050 年頃を見据えた温室効果ガスの抜本的な排出削減を実現する技術・システムの研究開発を行う。               | 2018～         |
|      | ○    |    | 環境省   | 二酸化炭素の資源化を通じた炭素循環社会モデル構築促進事業                                                                           | 目的とする化学物質を製造し社会で活用するモデルの構築と二酸化炭素削減効果等の検証・評価を行う。                | 2018～         |

出典：特許庁 特許出願技術動向調査報告書「CO<sub>2</sub>固定化・有効利用技術」と Web 情報を基に作成

表 4-2 の内、直近のプロジェクトである環境省「二酸化炭素の資源化を通じた炭素循環社会モデル構築促進事業」のプロジェクトを表 4-3 に示す。

<sup>30</sup> [https://eneken.ieej.or.jp/data/8419\\_summary.pdf](https://eneken.ieej.or.jp/data/8419_summary.pdf) (2020 年 2 月 4 日アクセス)

表 4-3 環境省「二酸化炭素の資源化を通じた炭素循環社会モデル構築促進事業」

| 課題名                                                 | 期間（年度）    | 実施母体           | 技術の特徴                                |
|-----------------------------------------------------|-----------|----------------|--------------------------------------|
| 清掃工場から回収した二酸化炭素の資源化による炭素循環モデルの構築実証                  | 2018～2022 | 日立造船、エックス都市研究所 | メタネーション                              |
| 廃棄物焼却施設からCO <sub>2</sub> を利用した化学品製造に関する炭素循環モデルの構築実証 | 2018～2022 | 積水化学工業、島根大、岐阜大 | 合成ガスを経由した微生物によるエタノール製造               |
| 二酸化炭素と水から syngas（一酸化炭素＋水素）を高効率に常温常圧合成する炭素循環モデルの構築実証 | 2018～2020 | 豊田中研、名古屋大      | 【人工光合成】太陽光変換効率10%の合成ガス製造             |
| 多量二酸化炭素排出施設における人工光合成技術を用いた地域適合型二酸化炭素資源化モデルの構築実証     | 2018～2022 | 東芝             | 【人工光合成】CO <sub>2</sub> への変換（高スループット） |
| 廃棄物処理施設からの二酸化炭素を利用した化学品製造に関する技術開発と実証                | 2019～2023 | 積水化学工業         | 合成ガスを経由した微生物によるエタノール製造               |

出典：環境省 Web 情報を基に作成

人工光合成による合成ガス製造、微生物利用によるエタノール製造（LanzaTech の微生物によるガス発酵技術を利用）、メタネーション技術など、注目される技術を用いた事業が採択されている。

## 5. 技術動向と課題

### 5.1 CO<sub>2</sub> 変換技術の基本的課題

CO<sub>2</sub>を炭化水素に変換する場合、CO<sub>2</sub>から酸素を取り除く「CO<sub>2</sub>還元」が必要になる。CO<sub>2</sub>の持つ化学エネルギーは図 5-1 に示す通り、炭化水素系の中では最も低く、かつ安定な物質のため、熱力学的にエネルギーを何らかの形で与える必要がある。

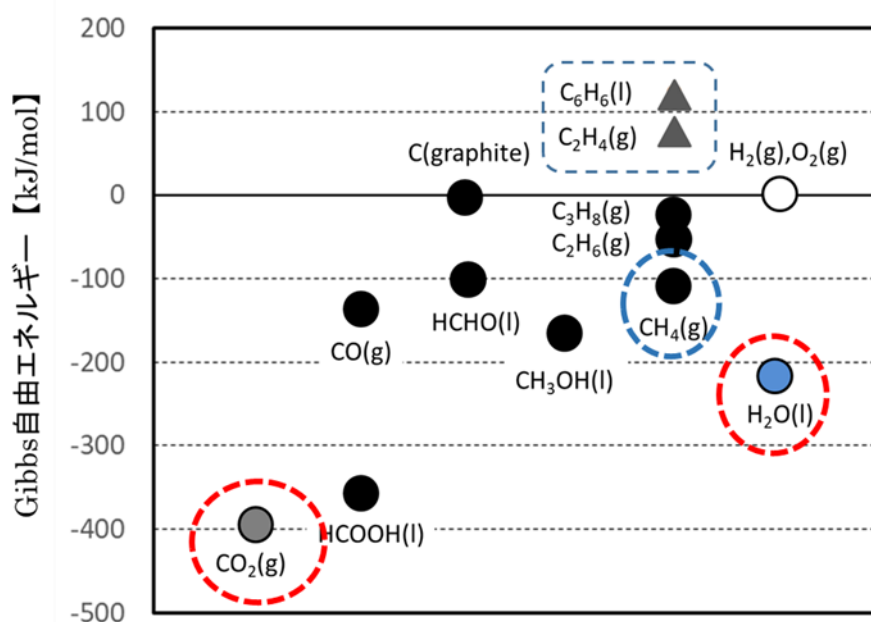


図 5-1 主な化学種の標準生成エネルギー（Gibbs 自由エネルギー）<sup>23</sup>

CO<sub>2</sub>が反応する相手として、水素あるいはエチレンなどの他の炭化水素を還元剤として用いる場合は、それら物質が持つ化学エネルギーにより、多くは発熱反応となり、反応が自発的に進行する。一方で反応する相手として、水（H<sub>2</sub>O）をプロトン源（H<sup>+</sup>）として用いる場合は、水自体もエネルギーレベルが低いことから、反応を進めるためには何らかの形で外部エネルギーを与える必要がある。このため前者は従来の熱化学プロセスで対応できるが、後者のような大きなエネルギーが必要な吸熱反応においては、熱化学プロセスは不向きであり、電気・光をエネルギー源として用いた反応プロセスが必要になる<sup>31</sup>。

電気・光を用いた化学プロセスは現時点で電気が高コストということもあり、これまで工業的な用途は限定的であった。このため電気・光を用いたプロセス開発を進めるためには、基礎科学的な研究に加え、プロセス化の技術開発も必要であり、技術的ハードルが高いと言える。

一方で反応に必要なエネルギー量を考えると後者の方が有利になる可能性がある。図 5-2 は CO<sub>2</sub> からメタンを製造する場合を想定したケースにおいて、熱力学的エネルギーを比較したものである。熱力学的に必要なエネルギーは、図 5-2 中の①に相当する水分解より③に相当する水+

<sup>31</sup> CRDS-FY2017-SP-04 戦略プロポーザル「反応・分離を技術革新する電子・イオンの制御科学」  
<https://www.jst.go.jp/crds/pdf/2017/SP/CRDS-FY2017-SP-04.pdf> (2019 年 12 月 23 日アクセス)

CO<sub>2</sub> 反応の方が低い。電気化学反応における平衡電位でみると、①で 1.23V、③で 1.06V<sup>32</sup>であり、CO<sub>2</sub> と水を同時に分解する方が水分解単独より低い電圧ですむことから、消費される電気エネルギーが少ない。最終的に水と CO<sub>2</sub> からのメタンを製造するための生成エネルギーは熱力学的に同じであるが、上図の②の発熱反応によるエネルギーを 100%回収利用することが前提となる。水と CO<sub>2</sub> との直接的な電気化学反応においては、反応に必要な活性化エネルギーを下げることや、反応生成物の分離プロセスなどの解決すべき他の課題があるが、エネルギー削減の可能性や複数段の反応を一段にするなどのプロセス簡素化の観点より水との直接反応の方が優位性を持つと考えられる。

### 【水分解の水素を経由するメタン製造】 【水との直接反応によるメタン製造】

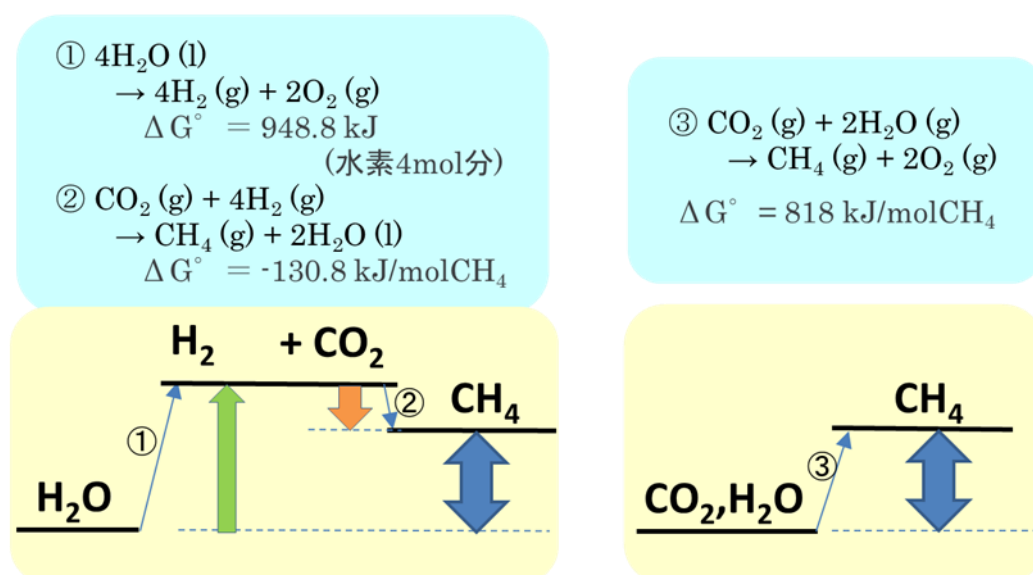


図 5-2 CO<sub>2</sub> からのメタン製造（メタネーション）での熱力学エネルギーの比較

また CO<sub>2</sub> 変換による生成物としては、メタノールやメタン、CO、ギ酸、ホルムアルデヒドなどの C1 化合物が主なものであり、その他としてエチレン、エタノール、エチレングリコールなどの合成が検討されている。表 5-1 に CO<sub>2</sub> の主な変換技術と概要を示す。

<sup>32</sup> <https://pcat.cat.hokudai.ac.jp/document/pdf/BARTP2017.pdf> (2020 年 1 月 14 日アクセス)



表 5-1 主な CO<sub>2</sub> 変換技術（燃料、化学品への変換技術）

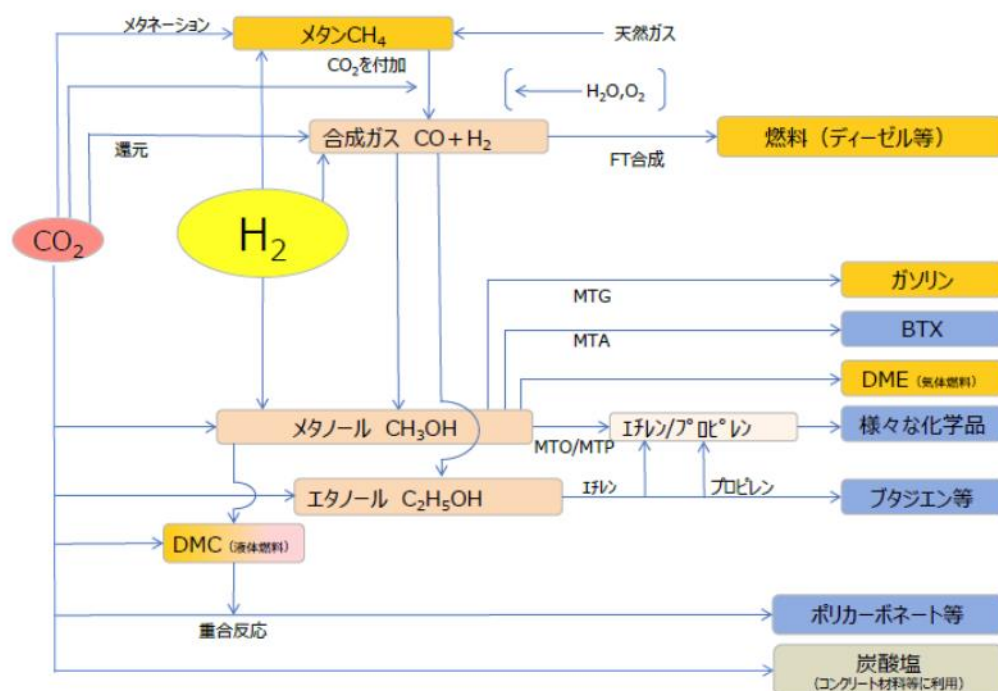
| 原料              | 反応相手             | 主な反応方法            | 生成物                                | 研究開発事例                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 章   |
|-----------------|------------------|-------------------|------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| CO <sub>2</sub> | 水素               | 触媒化学<br>(発熱反応)    | 合成ガス                               | ・逆シフト反応 ( $\text{CO}_2 + \text{H}_2 \rightarrow \text{CO} + \text{H}_2\text{O}$ ) によるCO <sub>2</sub> 還元反応でのCO製造は実用化。ドイツではP2Xとして電解水素を利用した逆シフト反応(電解合成) およびFT合成法も含めた研究開発が進められている。: Sunfire (独) 3トン/年                                                                                                | 5.2 |
|                 |                  |                   | メタノール                              | ・ ( $\text{CO}_2 + 3\text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_3\text{OH} + \text{H}_2\text{O}$ ) 実証化プラント実績あり: Carbon Recycling International (CRI)、三井化学                                                                                                                                                   |     |
|                 |                  |                   | メタン                                | ・サバティエ反応 ( $\text{CO}_2 + 4\text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$ ) によるメタネーション技術として実用化: Audi(独) 1000トン/年<br>日立造船/INPEX が 8 Nm <sup>3</sup> -CO <sub>2</sub> /hスケールのプラント設置 (NEDO事業)                                                                                            |     |
|                 | 水                | 光触媒               | 炭化水素等                              | ・人工光合成(水分解+CO <sub>2</sub> 還元)として研究開発中: 東工大、東京理大、豊田中研など<br>・課題: CO <sub>2</sub> 還元光触媒の選択性や効率向上。また実用化に向けてはプロセス化を考えた検討も必要。                                                                                                                                                                         | 5.3 |
|                 |                  | 電気化学              | CO<br>合成ガス<br>(CO+H <sub>2</sub> ) | ・電気化学反応によるCO製造: (SOEC) Haldor-Topsoe(デンマーク)/Gas Innovations (米) (12Nm <sup>3</sup> /h)<br>低温電解 (PEM)を用いたCO <sub>2</sub> 還元によるCO生成: 東工大<br>東芝が独自開発したガス拡散型触媒電極を用いて高速でCO <sub>2</sub> からCO変換を可能に<br>・高温共電解 (SOEC/CO <sub>2</sub> +水)による合成ガス製造: 産総研、九大<br>・課題: 電解質の性能向上 (電流密度向上、耐久性など)、触媒による選択性向上など、 |     |
|                 |                  |                   | メタン<br>メタノール<br>炭化水素等              | ・中温域(200~400℃程度)での直接電解合成により一段反応での炭化水素合成が可能(プロセス簡略化、また電解水素を経由するよりも高効率化が可能): 名大、東工大<br>・課題: 実用に耐える中温域電解質がほとんどない→新規電解質開発が必要                                                                                                                                                                         |     |
|                 |                  |                   | 炭化水素等                              | ・藻類・シアノバクテリア利用: 経済性を含めたプロセス技術が課題                                                                                                                                                                                                                                                                 |     |
|                 |                  | 生物化学<br>(太陽光、その他) | 炭化水素等                              | ・ハイブリッド型 (例えば水分解は光電解・CO <sub>2</sub> 還元反応に生物代謝を利用。あるいは生体反応における酵素の一部を置き換えることで反応速度や反応選択性を向上) 反応速度の課題が大きい。<br>・米国APAR-EのElectroFuelでは微生物と電気などの組み合わせによる研究開発が行われた。                                                                                                                                    |     |
|                 | (分解)             | 熱                 | CO                                 | ・反応性セラミックスなどの格子酸素欠損を利用したCO <sub>2</sub> 分解反応など 低温化、エネルギー削減が必要                                                                                                                                                                                                                                    |     |
|                 |                  | 電気化学              | 炭素                                 | ・固体炭素の取り扱いも必要になることから技術的に難しい。<br>北大で溶融塩を用いた電気化学反応を検討。また産総研で液体金属カソードを用いて、電気化学的に粉末状炭素を遊離させる基礎研究を予定                                                                                                                                                                                                  |     |
|                 | エチレンなど<br>(有機分子) | 触媒化学<br>(発熱反応)    | 高分子材料の原料<br>カルボキシル化                | ・CO <sub>2</sub> を原料としたカーボネート化合物製造法: 旭化成<br>・エチレンとCO <sub>2</sub> からのアクリル酸合成: BASF                                                                                                                                                                                                               | 5.4 |

CO<sub>2</sub> 変換技術を検討する際は、プロセス全体の効率等を見据えることが重要であり、反応のみならず、その後の分離・精製プロセスなどの容易さや効率を考慮して、CO<sub>2</sub> 還元反応として何を生成物（または中間生成物）として狙うかを考慮していく必要がある。例えば水を溶媒とした光化学・電解合成では水に溶解しないメタン、エタン、エチレンなど炭化水素の製造を目指すなどの工夫や実用性を考えることが重要になる。また電解合成のように生成物の反応と分離の同時達成が可能な仕組みをうまく利用することも重要となる。

また CO<sub>2</sub> 変換技術 (CO<sub>2</sub> 還元反応) としては、水素を還元剤として用いる熱化学的反応 (5.2 章)、水をプロトン源として外部からの電気・光を用いて直接的に反応させるもの (5.3 章) がある。ここには化学的変換 (Chemical conversion) と生物学的変換 (Biological conversion: 微細藻類利用など) が含まれる。また化学品合成においてはエチレン等の他の化学品との反応による方法もある (5.4 章)。なお、それ以外にも CO<sub>2</sub> 資源化に関連して、合成ガスを用いて微生物の非光合成による生物学的な変換方法もある。このような反応は合成ガスの化学エネルギーを利用しているため、厳密には CO<sub>2</sub> の直接的固定化・資源化技術というよりも、合成ガスという中間品からの変換技術と言えるが、最近の注目すべき技術として 5.5 章に記載する。以降、技術毎にその動向を示す。

## 5.2 水素還元による CO<sub>2</sub> からの燃料・化学品

水素を CO<sub>2</sub> 還元用いる主なターゲットとしては、メタン (メタネーション)、CO (逆シフト反応)、メタノールが検討されている。図 5-3 に示すように製造されたメタンは既存の天然ガスへの混合利用が可能であり、また合成ガスおよびメタノールはそれらを原料としてさまざまな化学品・燃料への変換・製造が可能である。

図 5-3 水素を用いた CO<sub>2</sub> 利用のフロー図<sup>33</sup>

いずれも発熱反応のため熱化学的なプロセスで対応でき、工業化例は少ないものの一部は商用化やそれに向けた実証化が行われている。合成ガス製造では Sunfire (独) が、メタノール製造では CRI (アイスランド)、三井化学が、メタン製造では Audi (独)、日立造船/INPEX などが実用化に向けた技術を保有しており、スケールアップなどに向けた研究開発が継続している状況である。このことから水素を CO<sub>2</sub> 還元を用いる主な変換技術は開発フェーズと言える。また合成ガスやメタノールを原料にした後段の製造プロセスの多くは、既に確立した技術が存在するものが多い。このことから、水素を用いた CO<sub>2</sub> の有用物質への変換プロセスは、水素製造や水素運搬などの水素関連の工程の方がプロセス全体におけるインパクトが大きい。このため実用化に向けては、水素製造のコスト削減を可能にする研究開発が重要になる。

### 5.3 電気化学、光化学、生物学的変換を利用した CO<sub>2</sub> からの燃料・化学品

ここでは、外部より電気や光を用いる変換プロセスである電気化学、光化学、藻類利用の生物学的変換 (光合成) による CO<sub>2</sub> 変換技術について述べる。電気化学、光化学における CO<sub>2</sub> 還元反応では競合する水素発生を抑止して、CO<sub>2</sub> の転換率を高めること、また CO<sub>2</sub> 還元反応で狙いとする生成物の選択率を高めるなどが重要であり、現時点では多くが基礎研究レベルである。また藻類利用の生物学的変換については、本質的に遅い光合成による CO<sub>2</sub> 変換速度の向上が課題であり、効率的な生産のためのエンジニアリング的な課題が大きいと言える。

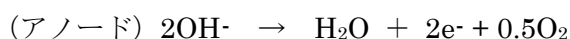
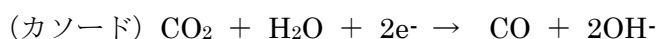
<sup>33</sup> <https://www.meti.go.jp/press/2019/06/20190607002/20190607002-1.pdf> (2019 年 12 月 23 日アクセス)

### 5.3.1 電気化学の利用：高分子電解質（PEM）

合成ガスは CO と H<sub>2</sub> の混合ガスであり、化学プロセスによるメタノールやジメチルエーテルなど、あるいはガス発酵プロセスによるエタノール転換のための原料となるものである。

1990 年代に千葉大学堀教授らにより、電解還元法により CO<sub>2</sub> ガスから CO ガスへ変換する<sup>34</sup>ことが初めて報告された。近年では、研究開発が欧米を中心に進められており、米国の大手化学メーカーの 3M から報告されている<sup>35</sup>。

3M が開発する方式は、高分子電解質を利用しながら、室温下で CO<sub>2</sub> を含有する水を電極表面の金属触媒（Ag）上で電解するものであり、かつ金属触媒上をイオン性ポリマー（イミダゾリウム塩）で被覆していることが特徴となっている。ポリマー被覆により、副反応を抑制し、CO の選択率を高めることができ、ファラデー効率は 98%となっている。各電極での反応は以下に示す通りであり、CO と副生物の O<sub>2</sub> が異なる電極から生成される。



3M では、触媒表面の構造制御技術や連続成膜プロセス技術の開発も行っており、Roll to Roll プロセスでの製造を想定している。また、合成ガスに必要な水素ガス製造についてはアルカリ水電解による技術開発も進めている。

### 5.3.2 電気化学の利用：固体酸化物形電解質（SOEC）

近年では固体酸化物形電解質を利用し、700℃以上の高温下で CO<sub>2</sub> を CO へ電解還元するシステムの実証が進められている。なお、高温下での電解還元の利点は、CO<sub>2</sub> 電解に必要な理論電圧を低減<sup>36</sup>できることにある。

Haldor Topsoe では、オンサイト、オンデマンドな CO 製造をコンセプトに、CO<sub>2</sub> の電解還元システムの実証を行ってきた。本システムは 700~850 度の温度で CO<sub>2</sub> を電解し、精製処理をすることで純度 99.999%、生産量 12 Nm<sup>3</sup>/hr の CO ガス生産システム<sup>37</sup>となっている。さらに、技術開発を進め、純度 99.5%、生産量 96 Nm<sup>3</sup>/hr の大型化も実現し、商用化も行っている<sup>38</sup>。

ドイツのベンチャー企業 Sunfire では、CO<sub>2</sub> と水を同時に電解還元し、合成ガスへ転換する共電解の技術開発を行っている<sup>39</sup>。CO<sub>2</sub> と同様に、高温下では水電解の理論電圧が低下することが特徴である。なお、Sunfire では合成ガスからフィッシャー・トロプシュ法で炭化水素系燃料を合成プロセスの開発も行っている。

日本においては、産業技術総合研究所が NiO-YSZ/YSZ/LSM からなる電解セルを用いた共電解技術を開発してきた<sup>40</sup>。合成ガスからメタン合成することを想定しており、高いメタン転化率と熱の有効利用により、エネルギー効率が 87%に達する可能性を報告<sup>41</sup>している。

<sup>34</sup> Electrochimica Acta, 1994, 39, 1833-1839, [https://doi.org/10.1016/0013-4686\(94\)85172-7](https://doi.org/10.1016/0013-4686(94)85172-7)

<sup>35</sup> Science, 2011, 34, 643-644, <https://doi.org/10.1126/science.1209786>

<sup>36</sup> J. power source, 2015, 277, 161-164, <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2014.11.092>, に温度と理論電圧の関係が記載されている

<sup>37</sup> Chemical Engineering World, 2017, March, 44-46

<sup>38</sup> ECS Trans., 2019, 91, 2601-2611, <https://doi.org/10.1149/09101.2601ecst>

<sup>39</sup> 11th Carbon Dioxide Utilisation Summit 発表資料より

<sup>40</sup> JST/CREST 事業「再生可能エネルギーからのエネルギーキャリアの製造とその利用のための革新的基盤技術の創出」

<sup>41</sup> 燃料電池, 2015, 14, 81-86, <https://www.fedic.com/pdf/toukouronbun/toukou11.pdf>

### 5.3.3 光化学の利用（人工光合成）

人工光合成には水から光触媒で水素を製造し、その水素と  $\text{CO}_2$  により有用化学品製造を目指すものも含まれるが、ここでは水を電子源とする  $\text{CO}_2$  の光還元反応に焦点を当てる。光触媒として半導体触媒、分子触媒等があるが、両者の特徴を活かし、水の酸化側（水分解により酸素発生）を半導体触媒、 $\text{CO}_2$  還元側を分子触媒で機能させることにより、水と  $\text{CO}_2$  からギ酸・ $\text{CO}$  等の燃料合成系が構築されつつある。また、ルテニウム複核錯体と窒化炭素からなる複合光触媒を用いると可視光照射下での  $\text{CO}_2$  のギ酸への還元反応に対して特異的に高活性を示し、通常同時に発生する水素を抑制し、 $\text{CO}_2$  のギ酸への還元選択率も 75% から 99% まで大幅に改善されることが報告されている<sup>42</sup>。

我が国のこの分野の現状の基礎研究レベルは高い。例えば、豊田中央研究所が、半導体と金属錯体触媒を複合化した板状の「人工の葉」素子が太陽光照射下、水と  $\text{CO}_2$  から有機物であるギ酸（ $\text{HCOOH}$ ）を生成することを報告した。その太陽光変換効率（4.6%）は植物の光合成反応の効率に匹敵している<sup>43</sup>。また東京理科大学は、酸化コバルト修飾  $\text{BiVO}_4$ 、還元型酸化グラフェン、 $\text{CuGaS}_2$  を組み合わせた Z-スキーム型粉末光触媒系が可視光照射下、水を電子源とし、 $\text{CO}_2$  を還元して  $\text{CO}$  を生成することを見いだしている<sup>44</sup>。さらに東工大では低濃度の  $\text{CO}_2$ （0.5-1%）でも働く金属錯体光触媒も報告している<sup>45</sup>。これは様々な排出源からの  $\text{CO}_2$  に対応できる技術に繋がる可能性がある。また、昭和シェル石油がメタン（と少量のエチレン）の合成に成功したと発表している<sup>46</sup>。

### 5.3.4 生物学的変換（藻類）

生物学的変換としては光合成を行う微生物である藻類による  $\text{CO}_2$  変換について述べる。藻類は陸上植物と比較して、①水資源を有効活用できる（農業の 100 分の 1 程度、また海水を利用できる藻類も存在）、②光と水があれば土地を選ばない（荒地、砂漠、塩田等も可）、③生産性が高い（陸上植物のように構造体（葉、茎、根）の形成が不要）などの利点を持つ<sup>47</sup>。とは言え、光合成は本質的に太陽光エネルギーの変換効率が低く、また開放系のオープンポンドの場合、水面からの  $\text{CO}_2$  の吸収速度制約があるため、生産量の確保のためには大きな体積と表面積が必要になる。このため藻類栽培においてスケールアップのための技術開発（開放系、閉鎖系（フォトバイオリアクター：PBR））が必要になる。藻類を用いた燃料生産の研究開発は米国で約 30 年前に開始され、2005 年前後に多くのベンチャー企業（Cellana、Chevron、Argenol Biofuels 等）が誕生したが、コストの問題から開発を断念、あるいはターゲットを付加価値品に変更したものも多い。我が国でも、IHI、ユーグレナ、デンソー等が公的資金の援助を受けながら研究開発を行っている。現在実用化への研究開発としては、IHI がボツリオコッカス（炭化水素を合成し、蓄積する緑藻）を用いた大量培養系を検討しており、2027 年からの CORSIA 制度<sup>注1</sup>の義務化に合わせて、藻類由来バイオジェット燃料の商用化に向けた検討が進められている。藻類を用いた事業化を目指す企業では、現状では付加価値の高い製品分野から事業化を進めており、「色素」「健康食品」「機能性油脂」「タンパク質原料」「化成品原料」「燃料」の順で段階的（現状は健康食品）に規模

<sup>42</sup> T.Oshima *et al.*, *Angewandte Chemie International Edition* 57, (27): 8154-158, 2018.

<sup>43</sup> <https://www.tytlabs.co.jp/sflabmorikawa/theme.html> (2020 年 2 月 1 日アクセス)。

<sup>44</sup> Akihide Iwase *et al.*, *Journal of the American Chemical Society* 138, (32): 10260-10264, 2016.

<sup>45</sup> Takuya Nakajima *et al.*, *Journal of the American Chemical Society* 138, (42): 13818-13821, 2016.

<sup>46</sup> [https://www.idss.co.jp/news/2016/shell\\_1205.html](https://www.idss.co.jp/news/2016/shell_1205.html) (2020 年 2 月 14 日アクセス)。

<sup>47</sup> 石油学会新エネルギー部会講演会講演会（2020 年 1 月 24 日開催）「 $\text{CO}_2$  の生物学的変換の現状と課題と取組紹介」

拡大のための技術開発が進めることとしている<sup>47</sup>。

注 1) 国際民間機関（ICAO）では航空業界からの GHG 排出削減制度として 2021 年から CORSIA（Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation）が導入される。これにより各航空会社は定められたルールに沿って必要量の排出枠を購入し、オフセットする義務が課せられる。2021 年からは自主的、2027 年からは義務化される。その対策の一つとしてライフサイクルで CO<sub>2</sub> 排出の少ないバイオ燃料が求められている。

### 5.3.5 その他：CO<sub>2</sub>還元触媒の課題等

ここでは CO<sub>2</sub> 変換における課題やこれまで記載した以外のアプローチについて述べる。

#### <CO<sub>2</sub>還元における課題>

表 5-2 に CO<sub>2</sub> 変換による主な生成物について、商用化に向けた主要な課題を示す<sup>48</sup>。

表 5-2 電気化学反応を用いた CO<sub>2</sub> 変換における主な課題

| 生成物                     | 主な課題                                 |
|-------------------------|--------------------------------------|
| メタノール                   | （水溶液中の反応）高過電圧、低選択性                   |
| ギ酸                      | 触媒の低安定性、反応媒体（水）からのギ酸の分離              |
| メタン                     | 非常に高い過電圧、低選択性                        |
| 一酸化炭素（CO）               | カソード側への高い CO <sub>2</sub> 流量の要求、低転換率 |
| 炭化水素（C <sub>2</sub> 以上） | 低選択性、炭素-炭素結合形成ステップの理解不足              |

出典：文献 47 表 4-3 より抜粋

これらの課題解決のためには触媒開発が重要になるが、転化率、選択率の機能面に加えて、耐久性や安定性も重要な視点となる。さらには現状では C1 化合物が主たる生成物であるが、C2 以上の生成物を直接合成するためには、C-C 間結合生成ステップの理解が不足しており、基礎的研究の充実も必要となる。

また水に溶けにくい CO<sub>2</sub> を気体のまま直接利用できるガス拡散電極（三相界面での反応）も CO<sub>2</sub> の転換速度を向上させる上で重要な技術になる。東芝ではこのような気体のままの CO<sub>2</sub> と水を同時反応させる三相界面反応を可能にする触媒電極を開発しており、触媒層に独自構造を採用することで電流密度 700mA/cm<sub>2</sub>、従来の 450 倍の変換速度を達成したと発表している（参考 2 参照）。

#### <中温域作動固体電解質><sup>49</sup>

現在実用化されている固体電解質は 100℃以下の低温作動の固体高分子形と 700℃程度以上の高温作動の酸化物形である。現在 200℃～500℃の中温域で作動し実用レベルに耐えうる固体電解質は存在しない状況にある。電解合成を考えた場合、低温作動では触媒活性が低いためアノード側に貴金属系が必要、触媒被毒に弱い、反応速度が遅いなどの課題がある。一方で高温作動では、反応物が平衡制約を受けるため生成物が限定的（CO や H<sub>2</sub>）となる、スタックが劣化しやす

<sup>48</sup> <https://www.nap.edu/catalog/25232/gaseous-carbon-waste-streams-utilization-status-and-research-needs>  
（2020 年 2 月 4 日アクセス）

<sup>49</sup> CRDS-FY2014-SP-05 戦略プロポーザル「反応プロセス革新」

いなどの課題がある。中温域の固体電解質を開発することで、触媒開発の自由度も向上し、反応速度、反応選択性、耐久性等において大きな進展が期待できると考えられる。またこれにより電解合成だけでなく、燃料電池利用として、電気化学反応の点から大きな進展が期待できることになる。なお、米国 DOE の ARPA-E では上記の考え方から REBELS プログラム（2014 年～2017 年）<sup>50</sup>を実施し、中温域作動の固体電解質を前提とした電気化学反応に焦点を当てた研究開発が進められた。

#### <生物電気化学システム>

一般的に生物学的変換は生成物の選択性が高い、不純物に強いという利点がある反面、変換速度が遅いことが課題になる。この変換速度を改善するために微生物を触媒として、電子やプロトンを電気化学的に与えることでいわゆるハイブリッド的に検討する方法も考えられている。これらは比較的新しい概念であり、研究はまだ始まったばかりと言えるが、化学品生産（コハク酸、アセテートなど）の観点から期待できる<sup>51</sup>。また ARPA-E でも Electrofuels プログラム（2010 年～2013 年）で微生物に電子・プロトンを外部より与えることで最大 10 倍のエネルギー効率が得られるバイオ燃料生産方法の研究開発が進められた<sup>52</sup>。

## 5.4 CO<sub>2</sub>利用による含酸素化合物

### 5.4.1 アクリル酸製造技術

アクリル酸は高吸水性ポリマー原料のアクリル酸ナトリウムや、接着剤や各種プラスチック製品となるアクリル酸エステルなどの原料として広く利用されている。アクリル酸の製造方法は、1970 年に工業化された日本触媒のプロピレン酸化法が広く普及してきた。

一方で、2019 年 1 月にはドイツの BASF から「Carbon Management at BASF R&D strategies to reduce CO<sub>2</sub>」<sup>53</sup>において、従来法に比べ CO<sub>2</sub>排出量を 30%削減できる新たなアクリル酸製造技術の工業化への可能性について言及した。BASF が支援する Catalysis Research Laboratory (CaRLa) からは、2012 年にエチレンと CO<sub>2</sub>からアクリル酸ナトリウムの製造技術の論文発表<sup>54</sup>があり、以降も開発を継続し、実験室レベルでは Pd 触媒により触媒サイクルが完結するようになったことを近年発表した。

一方、日本の JST・ACT-C においては、研究課題「機能性遷移金属錯体の創製に基づくエチレン及びアセチレンと二酸化炭素からのアクリル酸合成法の開拓」（研究実施期間 平成 24 年 10 月～平成 30 年 3 月）が実施されてきた。東京工業大学の岩澤教授らのグループは、独自開発した PGeP ピンサー型配位子のパラジウム錯体により、アセチレンと CO<sub>2</sub>からのアクリル酸合成に成功している。

また、側鎖にジシクロヘキシルホスフィノメチル基の置換した N-ヘテロ環状カルベン配位子 (NHC-P 配位子) を持つニッケル錯体を触媒として用いた場合に、エチレンと CO<sub>2</sub>を用いたアク

<sup>50</sup> <https://arpa-e.energy.gov/?q=arpa-e-programs/rebels> (2020 年 2 月 4 日アクセス)

<sup>51</sup> <https://www.nap.edu/catalog/25232/gaseous-carbon-waste-streams-utilization-status-and-research-needs> (2020 年 2 月 4 日アクセス)

<sup>52</sup> <https://arpa-e.energy.gov/?q=arpa-e-programs/electrofuels> (2020 年 2 月 4 日アクセス)

<sup>53</sup> [https://www.basf.com/global/documents/en/investor-relations/calendar-and-publications/presentations/2019/190110\\_BASF\\_RD\\_Webcast\\_Speech\\_Dr\\_Martin\\_Brudermueller.pdf](https://www.basf.com/global/documents/en/investor-relations/calendar-and-publications/presentations/2019/190110_BASF_RD_Webcast_Speech_Dr_Martin_Brudermueller.pdf) (2020 年 2 月 4 日アクセス)

<sup>54</sup> Chem. Eur. J. 2012, 18, 14017 – 14025, <https://doi.org/10.1002/chem.201201757>

リル酸合成できることを見出している<sup>55</sup>。

#### 5.4.2 カーボネート化合物／ポリカーボネート

カーボネート化合物は、ポリカーボネートの原料や電解液として広く利用されている化学品であるが、猛毒のホスゲンを原料として合成されてきた。近年、安全性を考慮した  $\text{CO}_2$  を原料とした合成法に関し、研究開発から一部製造まで実施されている。

$\text{CO}_2$  原料利用の研究開発においては、脱水反応が鍵であり、生成する水に伴う反応の平衡制約により反応効率が極めて低いことが課題となっていた。東北大学の富重教授らは、脱水剤として 2-シアノピリジンを利用し、 $\text{CeO}_2$  触媒による  $\text{CO}_2$  とアルコールからの高収率なカーボネート化合物合成を実現している<sup>56</sup>。 $\text{CO}_2$  とメタノールからのジメチルカーボネート合成において、先行研究のモレキュラーシーブ<sup>57</sup>や 2,2-ジメトキシプロパン<sup>58</sup>などの脱水剤に比べ、2-シアノピリジンにより 90%を超える高い収率を実現している。脱水機構は 2-シアノピリジンと水の反応による 2-ピコリンアミド生成である。なお、 $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$  触媒による 2-ピコリンアミドを脱水し、2-シアノピリジンに再生することを想定している。

また透明性が高く、強度の高いポリカーボネートは、CD や DVD などの光記録媒体として、広く普及している。従来の製造は、①有毒なホスゲンの原料利用、②環境負荷の大きい塩化メチレンの利用、③副生物（塩化ナトリウム）の発生などの課題があった。

旭化成では、この課題を解決する  $\text{CO}_2$  を原料利用した非ホスゲン法を開発し、海外で事業化を実現している<sup>59</sup>。非ホスゲン法は、 $\text{CO}_2$  とエチレンオキシドを原料に 3 工程の反応を経て、ジフェニルカーボネートを生成し、ビスフェノール A と重合することでポリカーボネートを製造するものである。なお、ポリエチレンテレフタレートの原料であるエチレングリコールが副生物となる。更に、“重力利用無攪拌溶融重合法”の開発により、塩化エチレンを使用しないポリカーボネート製造を実現した。

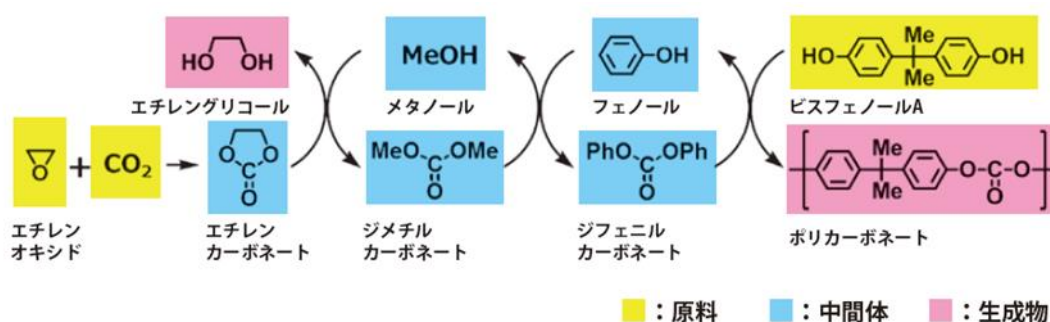


図 5-4 非ホスゲン法によるポリカーボネート製造フロー<sup>59</sup>

<sup>55</sup> JST・ACT-C 研究課題「機能性遷移金属錯体の創製に基づくエチレン及びアセチレンと二酸化炭素からのアクリル酸合成法の開拓」研究終了報告書より

<sup>56</sup> ChemSusChem 2013,6,1341-1344, <https://doi.org/10.1002/cssc.201300229>

<sup>57</sup> Green Chem., 2002,4,230-234, <https://doi.org/10.1039/B200623P>

<sup>58</sup> Catal. Commun., 2008,9,1630-1633, <https://doi.org/10.1016/j.catcom.2008.01.013>

<sup>59</sup> JACI テキスト「GSC 賞を受賞した社会的実践事例 GSC 入門 No. 2」（台湾企業の旭美化成で実用化が記載）

## 5.5 その他：ガス発酵法による化学品製造技術等

近年、合成ガスや CO<sub>2</sub> と H<sub>2</sub> の混合ガスを利用して、多様な化学品への直接転換研究開発が広く進められている。一つは、ゲノム編集技術を利用した菌によるガス発酵法で、高級アルコールなどへの転換技術である。もう一つは、触媒を利用した合成ガスから直接 BTX を合成する技術である。以降、これらの技術動向について、詳述する。

### 5.5.1 ガス発酵による化学品製造

ガス発酵法とは、各種の菌による代謝を利用し、最適な温度を維持した発酵槽内で合成ガスや CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub> の原料ガスから、①アルコール等の水酸基を有するものや、②カルボン酸基を有する化学品へ変換するものである。一般に発酵槽の温度は室温~85℃程度に保持される。なお、水と原料ガスを供給した発酵槽内で、菌は生成した化学品を槽内の水へ排出する。したがって、水と化学品との分離プロセスが必要なため、分離でのエネルギー投入量やコストの低減が実用化でのボトルネックとなるケースが多い。近年では、LanzaTech が合成ガスからのエタノール製造の実証事業を世界各国で実施している。我が国では、環境省の二酸化炭素の資源化を通じた炭素循環社会モデル構築促進事業<sup>60</sup>で、積水化学工業が LanzaTech の技術を利用し、都市ごみからエタノールを製造するパイロットプラントを稼働させている。都市ごみからの合成ガス製造には、オリックス資源循環のガス化処理施設を利用している。更に、合成ガスを原料に C3 化合物のプロパノールの合成<sup>61</sup>や、C4 化合物のコハク酸合成<sup>62</sup>に関する研究開発が EU 地域で活発に行われている。これらの化合物は、基礎化学品であるプロピレンやブタジエンなどへの転換を想定している。

<sup>60</sup> 環境省 令和元年度二酸化炭素の資源化を通じた炭素循環社会モデル構築促進事業「廃棄物処理施設からの二酸化炭素を利用した化学品製造に関する技術開発と実証」<https://www.env.go.jp/press/107319-print.html> より

<sup>61</sup> Lanza Tech 発表資料 「Unique Process to Convert CO<sub>2</sub> into Isopropanol and Acetone」  
7th Conference on Carbon Dioxide as Feedstock for Fuels, Chemistry and Polymers より

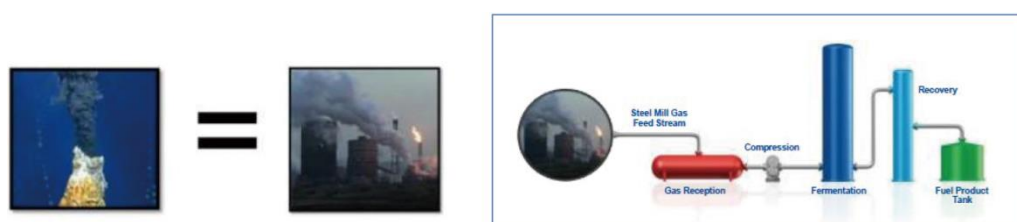
<sup>62</sup> Biotechnology Research and Information Network AG 社 発表資料 「Bite-sizing the Challenge: A Modular Approach for the Biotechnological Valorization of CO<sub>2</sub>」



## コラム 古細菌・アセトゲンをを用いた反応

アセトゲン（acetogen）は地球上に酸素のなかった時代から存在している微生物であり、生物学的にはシアノバクテリアや藻類のような光合成を行う光合成独立栄養微生物よりも古く、古細菌に属する（メタンを合成するメタン菌も古細菌）。アセトゲンは、光合成を行わず、CO、H<sub>2</sub>、CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>、H<sub>2</sub>Sなどが含まれる熱水噴出孔のガスをエネルギー源として成長する化学合成独立栄養微生物の範疇の微生物である。

先に述べた LanzaTech のガス発酵技術は微生物としてアセトゲンをを用いたものである。製鉄産業からの排ガスは熱水噴出孔からのガスと類似しており、そのガスから有用物質を生産できるアセトゲンをウサギの腸から分離選択し、その中からエタノール生産性の高い系統を特定したものである。（遺伝子組み換え（GMO）は行っていない。）



図A 熱水噴出口ガスと製鉄産業からの排ガス 図B LanzaTech プロセス概要（参考資料①）

エタノールを生産する反応は以下の通りとなる。（参考資料②）

| 供給ガス                                  | 反応式                                                                                   |
|---------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| CO                                    | $6\text{CO}_2 + 3\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{EtOH} + 4\text{CO}_2$           |
| CO + H <sub>2</sub>                   | $3\text{H}_2 + 3\text{CO} \rightarrow \text{EtOH} + \text{CO}_2$                      |
| CO + H <sub>2</sub>                   | $4\text{H}_2 + 2\text{CO} \rightarrow \text{EtOH} + \text{H}_2\text{O}$               |
| CO + H <sub>2</sub> + CO <sub>2</sub> | $5\text{H}_2 + \text{CO} + \text{CO}_2 \rightarrow \text{EtOH} + 2\text{H}_2\text{O}$ |

現状は CO をエネルギー源としている。また反応は、CO や H<sub>2</sub> の化学エネルギーを利用していることから、CO<sub>2</sub> 固定化技術というよりも合成ガスを原料にした変換技術と言えるが、ガス成分（CO/CO<sub>2</sub>+H<sub>2</sub>）の変動に対応できる、大規模なガスの浄化を不要などの長所を持った変換技術である。

参考資料：

- ① [http://www.arpa-e-summit.com/paperclip/exhibitor\\_docs/14AE/LanzaTech\\_Inc.\\_131.pdf](http://www.arpa-e-summit.com/paperclip/exhibitor_docs/14AE/LanzaTech_Inc._131.pdf)
- ② 石油学会新エネルギー部会講演会講演会（2020年1月24日開催）「CO<sub>2</sub>の生物学的変換の現状と課題と取組紹介」

### 5.5.2 合成ガスからの BTX 直接合成

BTX は芳香族化合物のベンゼン (Benzene)、トルエン (Toluene)、キシレン (Xylene) の総称であり、基礎化学品としてプラスチックや繊維などの多様な製品に転換されている。従来の BTX 製造は原油からのみ生産されてきたが、近年では多様な原料からの製造技術の研究開発が進められている。具体的には、合成ガスを出発原料にメタノールを利用した MTA (Methanol To Aromatics) がある。但し、本プロセスは、①合成ガスのメタノールへの転換において、平衡制約に伴い、反応転化率が低いこと、②各 BTX 成分とオレフィンが生成物となり、ベンゼンや p-キシレンの選択率が低かった。特に、繊維の原料である p-キシレンは 10%程度に留まっていることが課題となっていた。

富山大学の椿教授らは、複数の触媒をハイブリッド化し、合成ガスからの BTX 直接合成、特に p-キシレンの選択性を高める研究を進めている。Cr/Zn 触媒と、シリケートで被覆した Zn ドープ ZSM-5 をハイブリッド化することで、p-キシレンの選択率を 27.6%まで高めることができた<sup>63</sup>。

<sup>63</sup> Chemical Science, 2017, 8, 7941-7946, <https://doi.org/10.1039/c7sc03427j>

## 参考

### ●参考.1 CCUS 政策動向

#### (1) 欧州

##### 【政策動向】

欧州地域では、欧州委員会から発行された技術ロードマップ「The Strategic Energy Technology (SET) Plan」では、エネルギー、産業部門の脱炭素化を進める上で、重要な技術と位置づけられている<sup>64</sup>。また、ドイツやイギリスなどの各国からも、CCUS に実現に向けた政策文書が発行されている。これらロードマップや政策文書に基づき、研究プロジェクトが企画、実施されている。

参考表 1 CCUS 分野の政策文書・ロードマップ一覧（欧州）

| 発行機関            | 発行時期            | タイトル                                                          |
|-----------------|-----------------|---------------------------------------------------------------|
| ドイツ政府           | 2016 年 11 月     | Climate Action Plan 2050                                      |
| 欧州委員会           | 2017 年 12 月（改訂） | The Strategic Energy Technology (SET) Plan                    |
| EU Horizon 2020 | 2018 年 3 月      | Role of CCUS in a below 2 degrees scenario                    |
| イギリス政府          | 2019 年 6 月      | Delivering Clean Growth: CCUS Cost Challenge Taskforce Report |

<sup>64</sup> The Strategic Energy Technology Plan の P.65~67 と P.81~83 で CCUS が取り上げられている。

## 【技術動向】

欧州地区においては、CCUS の研究開発プロジェクトが複数実施されており（表 3-3）、極めて活発に研究活動が行われている。①工場の排ガスから CO<sub>2</sub> を分離回収し、輸送、貯留するプロジェクトや、②各種焼却灰などのアルカリ源と CO<sub>2</sub> から炭酸塩を生成し、建材を製造するプロジェクト、③CO<sub>2</sub> と水素、もしくは水を水素源として化学品を製造するプロジェクトが実施されてきている。

特に、炭酸塩化技術（表中、下線のプロジェクト）においては、研究開発が終了し、実証および商用化に向けた活動も行われている<sup>65</sup>。

参考表 2 CCUS 技術の研究開発・実証事業一覧（欧州）

| 分離回収 | 有効利用 | 貯留 | 主管 | プロジェクト名                              | 内容                                                                                          | 期間                |
|------|------|----|----|--------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|
| ○    |      |    | EU | CEMCAP                               | セメント製造向けに酸素燃焼技術とともに、CO <sub>2</sub> 回収技術を開発する。                                              | 2015<br>～<br>2018 |
| ○    |      | ○  | EU | Acorn                                | スコットランドの内陸部で回収したCO <sub>2</sub> を輸送し、ガス田等に圧入するプロジェクト。                                       | 2017<br>～<br>2020 |
| ○    |      | ○  | NO | Norway Full Chain CCS                | ノルウェーのセメントや肥料工場からの排ガスからCO <sub>2</sub> を回収し、海底下に圧入する。                                       | 2016<br>～<br>2022 |
| ○    |      | ○  | UK | Teesside Collective                  | 排ガスからCO <sub>2</sub> を回収し、海底下に貯留する。15年間で1100万tのCO <sub>2</sub> 貯留量を見込む。                     | 2015<br>～<br>2020 |
| ○    | ○    |    | EU | <u>Carbon8</u>                       | フライアッシュと排ガスのCO <sub>2</sub> から炭酸塩を生成し、コンクリート骨材を製造する。                                        | 2007<br>～<br>2013 |
|      | ○    |    | EU | <u>CARMAT</u>                        | 鉄鋼スラグに含まれるカルシウム（マグネシウム）シリケートとCO <sub>2</sub> を原料とした炭酸塩から建材を製造する。                            | 2013<br>～<br>2014 |
| ○    | ○    |    | EU | <u>C2B</u>                           | 石炭燃焼からのCO <sub>2</sub> と炭酸アンモニウムから炭酸水素アンモニウムへ転換する。炭酸水素アンモニウムは炭酸水素カルシウムの原料となる。               | 2014<br>～<br>2017 |
|      | ○    |    | EU | CARENA                               | 膜反応器を使用し、CO <sub>2</sub> からMeOHやジメチルカーボネートを合成する。                                            | 2011<br>～<br>2015 |
|      | ○    |    | EU | MicrobioElectrosyn                   | 微生物電極によるCO <sub>2</sub> 電解還元プロセスを用いて、水素・酢酸エステル等の合成プロセスを開発する。                                | 2013<br>～<br>2015 |
| ○    | ○    |    | EU | Smart CO <sub>2</sub> Transformation | CO <sub>2</sub> と水素を原料に、FT反応やMeOH合成を経て、液体燃料を製造する。                                           | 2013<br>～<br>2017 |
|      | ○    |    | NE | The VoltaChem Program                | CO <sub>2</sub> の電解還元、電気化学反応によるCH <sub>4</sub> からメタノールへの転換                                  | 2014<br>～         |
|      | ○    |    | EU | A-LEAF                               | CO <sub>2</sub> /水/太陽光から直接MeOHやメタンなどを合成する触媒反応プロセスを開発する。                                     | 2017<br>～<br>2020 |
| ○    | ○    |    | EU | Project CELBICON                     | 大気中のCO <sub>2</sub> を捕集し、バイオリアクターにより、乳酸やメタンに転換する技術を開発する。                                    | 2016<br>～<br>2019 |
|      | ○    |    | EU | Project Ocean                        | 電気化学反応によるCO <sub>2</sub> からギ酸、シュウ酸への転換。CO <sub>2</sub> 処理量：250g/h @ 1.5 kA/m <sup>2</sup> 。 | 2017<br>～<br>2021 |

出典：特許庁 特許出願技術動向調査報告書 「CO<sub>2</sub>固定化・有効利用技術」と Web 情報等を基に作成

<sup>65</sup> Carbon8 のプロジェクトからは、Carbon8 Aggregates Ltd が設立された。11<sup>th</sup> Carbon Dioxide Utilisation Summit の発表資料より

## (2) 米国

DOE（Department of Energy、米国エネルギー省）などから、複数の政策文書やロードマップが発行されている。EOR 利用も含む大規模な CCS の研究開発プログラムが 2013 年に策定されており<sup>66</sup>、また Notice2015-44 において、Credit for Carbon Dioxide Sequestration<sup>67</sup>（45Q）が制定され、産業部門から排出された CO<sub>2</sub> を地中貯留や EOR で活用することに、インセンティブが付与されている。Accelerating Breakthrough Innovation in Carbon Capture, Utilization, and Storage においては、CO<sub>2</sub> の化学品への転換技術として、水素を利用したメタノール合成、電解による CO 転換、光触媒を用いたメタン合成、炭酸塩化等の技術について言及されている。

参考表 3 CCUS 分野の政策文書・ロードマップ一覧（米国）

| 発行機関 | 発行時期        | タイトル                                                                                            |
|------|-------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|
| DOE  | 2013 年 9 月  | Carbon Storage Technology Program Plan                                                          |
| DOE  | 2017 年 9 月  | Accelerating Breakthrough Innovation in Carbon Capture, Utilization, and Storage                |
| EPRI | 2018 年 7 月  | CURC-EPRI Advanced Fossil Energy Technology Roadmap                                             |
| DOE  | 2018 年 11 月 | CARBON CAPTURE, UTILIZATION, AND SEQUESTRATION : Technology and Policy Status and Opportunities |

その他として CCU をテーマとした NRG COSIA Caron XPRIZE（2015~2020 年予定：賞金総額 2,000 万米ドル）も実施されている。

## (3) 中国

## 【政策動向】

世界最大の温室効果ガス排出国である中国では、第 13 次五か年計画の主たる目標の一つに「生態環境の質の総体的改善」があり<sup>68</sup>、具体的には生産・生活スタイルのグリーン化・低炭素化、建設用地・炭素排出総量の抑制が掲げられている。また、「国家が重点的に普及させる低炭素技術目録」において、CO<sub>2</sub> 回収・利用・貯留（CCUS）技術が対象になっている。本目録に掲載されるのは、すでに投資回収周期が 10 年以内であり、すでに商用化されている技術が対象である。国の優遇政策を受けられることもあり、技術の利用が拡大している<sup>69</sup>。

## 【技術開発】

中国では、国内の油田を活用する EOR の実証事業が複数実施されている。中国の事業での CO<sub>2</sub> 圧入量は 12~60 万 t/年であり、アメリカでの 100 万 t/年を超える EOR 実証事業に比べ、まだ小規模なものに留まっている。なお、2020 年以降には 100 万 t/年を超える CO<sub>2</sub> 分離回収装置での操業計画がある。

<sup>66</sup> Carbon Storage Technology Program Plan, [https://netl.doe.gov/sites/default/files/netl-file/Program-Plan-Carbon-Storage\\_0.pdf](https://netl.doe.gov/sites/default/files/netl-file/Program-Plan-Carbon-Storage_0.pdf)

<sup>67</sup> <https://www.irs.gov/pub/irs-drop/n-15-44.pdf>

<sup>68</sup> mizuho global news, Vol.86, P.20,2016、中国商務指南~中国ビジネス最新ガイド~より

<sup>69</sup> 一般社団法人 日本在外企業協会 月刊 グローバル経営 2017 年 4 月号 「中国の地球温暖化対策」より

参考表 4 CCUS 技術の研究開発・実証事業一覧 (中国)

| 分離回収 | 有効利用 | 貯留 | 実施機関          | プロジェクト名                           | 内容                                                                             | 期間    |
|------|------|----|---------------|-----------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|-------|
| ○    |      |    | 中国華能<br>集団    | CO <sub>2</sub> 回収モデル<br>プロジェクト   | オーストラリアの研究機関との協力と支援を受け、中国発の CO <sub>2</sub> 回収装置が稼働 (3000t/年)。                 | 2008～ |
| ○    |      | ○  | 中原油田          | 中原油田 CCS<br>プロジェクト                | EOR の実証実験を実施。主力油田からの採掘量が減産傾向にあり、EOR で補うことを期待。                                  | 2008～ |
| ○    |      |    | 中国華能<br>集団    | CO <sub>2</sub> 回収工業<br>モデルプロジェクト | 上海石洞口第 2 発電所に排煙 CO <sub>2</sub> 回収装置を設置し、12 万 t/年を回収、利用。                       | 2009～ |
| ○    |      | ○  | 中国石油<br>天然気集団 | 吉林油田 EOR<br>実証プロジェクト              | 天然ガス処理プラントから排出 CO <sub>2</sub> を回収し、パイプラインで輸送し、EOR で利用。2018 年は年間 60 万 t を圧入予定。 | 2018～ |
| ○    | ○    |    | 中国石油<br>化工集団  | 中国石化工<br>(齊魯) CCS<br>プロジェクト       | 肥料工場の CO <sub>2</sub> 回収システムを改裝し、2019 年に 40 万 t/年の回収装置の稼働を予定。                  | 2019～ |

出典：富士経済「CO<sub>2</sub>利活用ビジネスにおけるグローバル市場の現状と将来展望 2019」を基に作成

また中国では石炭を原料とした C1 化学コンビナートが大規模に展開される動きがある<sup>70</sup>。これは石炭からメタノールを製造し、そのメタノールを経由してプロピレン、エチレンをすることで従来の石油ナフサを出発点とした化学コンビナートを置き換えようと言うものである。中国ではメタノールからオレフィンを作る MTO (Methanol To Olefins) 技術はすでに競争力があり、プラント建設が増加している。またメタノールから芳香族を作る MTA (Methanol To Aromatic compounds) の研究開発も進展している。将来的にはこれら化学品製造プロセスに CO<sub>2</sub>をメタン化する技術 (メタンネーション) を組み込むことで CO<sub>2</sub>の再利用が可能になるとしている。

<sup>70</sup> <https://special.nikkeibp.co.jp/atclh/ONB/19/yurin/07/> (2020 年 2 月 26 日アクセス)

## ●参考.2 最近の CCU 関連技術情報

## 【実証化・商業フェーズ】

## (1) 人工光合成

- ◇ 経済産業省は 2020 年度、CO<sub>2</sub>と水から化学品を製造する「人工光合成プロジェクト」でフィールド実証を開始する。太陽エネルギーにより水を水素と酸素に分解する光触媒パネルをラボスケールの 100 倍となる 100m<sup>2</sup>に拡大し、実環境での評価に入る。最終年度の目標はエネルギー変換効率 10%。12 年度からの 10 年計画も残り 2 年となり、高効率化とともに大面積化への技術開発にも拍車をかける。(2019/9/9 化学工業日報)。

## (2) CCS

- ◇ 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) は、「大崎クールジェンプロジェクト」で酸素吹石炭ガス化複合発電 (IGCC) の第 1 段階実証試験で石炭火力発電システムの性能、信頼性、経済性に関し、17 万 kW 規模のプラントとして、世界最高レベルの送電端効率 40.8%を達成し実装試験を完了させた。今後、第 2、第 3 の実証事業に引き続き取り組み、低炭素石炭火力発電の実現を目指す。同試験により、現在普及している超々臨界圧微粉炭火力と比べ、CO<sub>2</sub>排出量を 15%削減できるうえ、再生可能エネルギーの急激な出力変動に対する負荷調整に寄与する。第 2 段階の CO<sub>2</sub> 分離・回収型 IGCC 実証、第 3 段階の CO<sub>2</sub> 分離・回収型の石炭ガス化燃料電池複合発電 (IGFC) 実証に引き続き取り組む (2019/3/12 化学工業日報)。

## (3) CCU・カーボンリサイクル

- ◇ 東芝は CO<sub>2</sub>を気体のまま直接利用可能な触媒電極を開発し、CO<sub>2</sub>を化学品原料となる CO に変換する技術で、世界最高レベルの変換速度を達成したと発表した。変換速度は常温常圧環境で電流密度 700 mA/cm<sup>2</sup>と同社従来技術の約 450 倍。変換システムを省スペース化・低コスト化できる。電極表面で化学反応を起こす電気化学セルに電圧をかけて水溶液に溶け込ませた CO<sub>2</sub>を変換するが、東芝は今回、気体のままの CO<sub>2</sub>と水を同時反応させることで CO<sub>2</sub>の直接利用に成功、変換反応の停滞や電流密度の低下を解消した。固体 (触媒)、気体 (CO<sub>2</sub>)、液体 (水) の三相界面反応が可能な触媒電極を開発した。触媒層にはナノサイズの細孔に加え CO<sub>2</sub>の流路とマクロ孔を導入した独自構造を採用し、より多くの CO<sub>2</sub>を触媒に供給できるようにした (2019/3/18 化学工業日報)。
- ◇ IHI はシンガポール科学技術庁傘下の研究機関と共同開発した高耐久性のメタネーション触媒を用いて、CO<sub>2</sub>からメタンを製造するデモ装置を開発した。地球温暖化対策の国際枠組み「パリ協定」の CO<sub>2</sub>削減目標を受け、同国では 1 月から発電所や化学工場に炭素税適用が始まっており、CO<sub>2</sub>削減を目指す同業界に売り込む。IHI 技術開発本部でも性能検証を進めており、さらに大型の実証装置を国内で開発する計画である。メタネーション技術は、生産や発電の過程で排出される CO<sub>2</sub>を水素と反応させ、メタンをつくる。生成したメタンを既存のパイプラインに供給すれば、発電用燃料や都市ガスとして利用できる (2019/5/15 日刊工業新聞)。
- ◇ 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO)、国際石油開発帝石 (CO<sub>2</sub>回収担当)、

日立造船（メタネーション反応器担当）は、CO<sub>2</sub> と水素からメタンを合成する試験設備を国際帝石のプラント内（天然ガス生産施設の長岡鉱場 越路原プラント）に完成させた。天然ガス生産時に付随して出る CO<sub>2</sub> を活用する。各種試験や連続運転を 2019 年度末まで実施する。カーボンリサイクル技術として注目されるメタネーションの確立を目指す。メタン合成の反応器の能力は 8 m<sup>3</sup>/h。熱回収効率が高く、メタン合成能力の大型化に適したプレート型を採用した。NEDO のプロジェクトで、全体の事業規模は約 13.9 億円を予定。（2019/10/17 日刊工業新聞）。

- ◇ 川崎重工業は実用化を目指している液化水素の用途として、CO<sub>2</sub> と反応させることで化学品原料とするプロセス検討を進める。同社は液化、貯蔵・輸送、発電燃料としての利用にいたるまで、液化水素のサプライチェーンのすべてにかかわる研究開発、実証を進めている。また、CO<sub>2</sub> の分離回収技術の実証を関西電力と共同で実施中であり、来年度は米国でも実施すべく準備を進めている。同社は液化水素の新たな用途として、分離回収した CO<sub>2</sub> と反応させて化学品を製造する CCU（CO<sub>2</sub> 回収利用）プロセスの実現に向け、化学企業などとの連携も含め検討を進めていく（2019/11/22 化学工業日報）。

## 【基礎研究】

### （１）CO<sub>2</sub> 捕捉

- ◇ 京都大学高等研究院物質—細胞統合システム拠点の北川進拠点長・特別教授らは、中国・江蘇師範大学と共同で、CO<sub>2</sub> を選択的に捉えて有機材料の原料へ変換できる多孔性材料（PCP あるいは MOF）を開発した。捕捉後の触媒反応により、CO<sub>2</sub> を種々の化合物に変換できる。環境に負荷をかけない CO<sub>2</sub> の削減と有効利用へと前進した。今回開発した PCP はプロペラのような形状の有機分子と、亜鉛イオンを連ねた。プロペラ構造の回転で、空気中に多い窒素を捉えることなく、CO<sub>2</sub> を穴の中に捕捉できた。穴 1 個当たり 3 個の CO<sub>2</sub> 分子を吸着できる。PCP は短時間で目的の気体を捕捉でき、繰り返し使えるため効率的である（2019/10/9 日刊工業新聞）。

### （２）共電解

- ◇ Sunfire は 2018 年 11 月ドイツのドレスデン工場で高温共電解システムを開発し試験運転（> 500 時間）を行った。固体酸化物セル（SOC）を用いて水蒸気と CO<sub>2</sub> から合成ガス（CO/H<sub>2</sub>）を～80%の効率で製造する。e-crude や e-fuels の投資コストと運転コストを大幅に削減することができる。KIT でのコペルニクス・プロジェクトでは Climeworks の技術で捕集した大気中の CO<sub>2</sub> と 10 kw の電力で 4 Nm<sup>3</sup>/h の合成ガスを製造し INERATEC（FT 合成）と KIT（水素化分解）技術を用いて 2019 年 8 月末までに燃料合成の実証試験を行う。共電解を用いた CO<sub>2</sub> からの初の 2 ステッププロセスの実証となる。更に Federal Ministry of Economics and Energy の資金による SynLink プロジェクトの一環として 1 月初めから 150 kW（DC）の工業規模のスケールアップの検討を始めている。（Green Car Congress, 2019/1/16）



### (3) CO<sub>2</sub> からメタノール

- ☆ チューリッヒ工科大学の JavierPérez-Ramírez 教授らは Total と共同で、CO<sub>2</sub> と水素から直接メタノールを効率的に合成する酸化インジウムをベースにした触媒を開発した。数年前、JavierPérez-Ramírez 教授らはメタノール合成として酸化インジウムを見つけているが、酸化インジウムに少量の Pd を添加することにより選択性や安定性に影響を与えることなく触媒活性を大幅に高めることに成功した。(ETH Zurich、2019/7/29)
- ☆ Carbon Recycling International (CRI) は RTLTM (Emission-to-Liquid) の商品名で開発している CO<sub>2</sub> からメタノールを製造するプロセスに関して、EU Horizon 2020 研究プログラム一環として製造技術の規模拡大のために€180 万 (\$ 200 万) の助成金を得た。この助成金により CRI は大規模生産プラントの商業化の取り組みを加速し欧州での ETL 技術と再生可能なメタノールの市場を拡大する。プロジェクトは「CirclEnergy」と呼ばれている。(Green Car Congress, 2019/4/11)
- ☆ 中国河南順成集團は CRI 社と技術契約を締結した。プロジェクトの総費用は約\$90MM (100 億円) と見積もられている。プラントは中国の河南省安養市に建設される。約 15 万トン/年トンの CO<sub>2</sub> が用いられ 18 万トン/年のメタノールと LNG が生産される。リサイクルされる CO<sub>2</sub> の量は 40,000 台の自動車の年間排出量に相当する。プラントの稼働は 2021 年末の予定である。CO<sub>2</sub> からメタノールへのプロセスのエンジニアリングと建設は CRI によって行われる。(CRI, 2019/5/22)
- ☆ Haldor Topsoe はバイオガスからコスト競争力のある方法でメタノールを生産するコンパクトな eSMR メタノール技術実証のためメタノール 10 kg /時間の工場を建設する。eSMR はバイオガスとして分離および排出されている 40% の CO<sub>2</sub> を用いる。加熱源は風力または太陽電池からのグリーン電力である。実証プラントはデンマークのファウルにあるオーフス大学の研究施設に配置され EUDP (エネルギー技術開発および実証プログラム) から資金提供を受け 2022 年の初めに稼働予定である。化石燃料に基づく従来のメタノール生産と競合できることを実証することが期待されている。eSMR メタノールテクノロジーは従来のユニットよりも約 100 倍小さいため分散型バイオガスサイトで用いられることが期待されている。現在、グリッド品質のバイオガスは天然ガスよりも生産コストがはるかに高いが、メタノールが生産できれば生産価値が上がり化石ベースの製品と競争することができる。(Green Car Congress, 2019/7/20)

### (4) CO<sub>2</sub> からエタノール

- ☆ ReactWell は DOE のオークリッジ国立研究所から CO<sub>2</sub> から電解で直接エタノールを合成する技術 (ORNL) のライセンスを得て既存の有機化合物を合成原油に変換する研究開発プロジェクトである Reactwell プロセスに取り入れた。ORNL の方法は電極に炭素とナノサイズの銅のスパイクを使用することにより CO<sub>2</sub> からエタノールを直接合成することができるワンステップの反応であるため設備投資や運転コストを大幅に節約できる。共同発明者の ORNL の Adam Rondinone らは触媒の高効率化や耐久性の向上の研究を行っている。カーボンナノスパイクは少なくとも 300 時間電気化学的に安定で様々な基板上に生成できることが実証されている。(Green Car Congress,

2019/3/8)

#### (5) ドライリフォーミング

- ☆ JST 戦略的創造研究推進事業において、物質・材料研究機構の阿部 英樹主席研究員、高知工科大学の藤田武志教授、東京工業大学の宮内雅浩教授らの研究グループは、物質・材料研究機構の橋本綾子主任研究員と共同で、金属・セラミックス複合材料のナノ相分離構造のトポロジを操ることにより、メタンと  $\text{CO}_2$  からドライリフォーミング (DRM)) に対して優れた低温触媒活性と長寿命特性を発揮する触媒材料の創成に成功した。研究グループは、金属相のニッケルと酸化物相のイットリア ( $\text{Y}_2\text{O}_3$ ) がナノ繊維状で組みひものように互いに絡み合う特殊なトポロジを備えた「根留触媒 (Rooted Catalysts))」を創成し、 $\text{Ni}/\text{Y}_2\text{O}_3$  と名付けた。この根留触媒により、従来の触媒材料では熱だけでは困難とされていた低温領域 (500℃未満) において、コーキングを効果的に抑止し、長時間 (1,000 時間以上) 安定的に DRM を駆動することに成功した (2019/2/18 化学工業日報)。

#### (6) カルボニル化

- ☆ 東京工業大学 物質理工学院 応用化学系の本倉健准教授と眞中雄一准教授らは、二酸化炭素の資源化反応にギ酸有機アンモニウムが高活性を示す触媒となることを見出した。この反応で  $\text{CO}_2$  から得られるギ酸シリルは水素キャリアとなるギ酸や合成化学的に有用な有機カルボニル化合物誘導体へと容易に変換することができる。この触媒系の特長は高価な遷移金属を用いない有機化合物のみから構成される触媒により、高い触媒活性と選択性を達成した点である。使用した触媒は、反応中は溶媒に溶けているが、反応終了後、室温付近まで冷却することで析出するため、容易に回収し再利用できる (2019/6/17 東工大プレスリリース)。

#### (7) メタン化

- ☆ 静岡大学の福原長寿教授らのグループは、室温雰囲気下で  $\text{CO}_2$  からメタンを製造する「オートメタネーション」技術を開発した。メタンを部分酸化することによる発熱でメタン化反応の作動温度を大幅に下げた。 $\text{CO}_2$  を効率的にメタンに資源化することが可能になる。福原教授は、電力会社と共同で火力発電の排ガスを用いた実証試験を実施して実用化に向けた検討を進める考え。また、メタンから合成ガスを製造し、化学製品の原料として活用するプロセスも視野に入れている (2019/6/6 化学工業日報)。
- ☆ 早稲田大学の関根泰教授らのグループは、常温から 100 度程度の環境で、必要なときに必要なだけオンデマンドで反応を進めることができるメタン化触媒プロセスを開発した。半導体性を有する触媒に外部から電場を印加することで、固体触媒表面で水素イオンを効果的に駆動させ、低温でも速やかに反応が進む (2020/2/3 化学工業日報)。

### ●参考 3 Power to X (P2X) の経済性評価例

P2X 技術が大規模に導入されるためには経済性が重要になる。ここでは本文中でも取り上げた文献におけるコスト試算例について記載する。コスト試算はいくつかの競合する技術の経済性を比較検討するだけでなく、試算における前提を把握することで全体におけるコストでどこにボトルネックがあるかを認識する上で有効である。これにより狙うべき技術課題や具体的な目標値を決める上での参考になる。また技術以外の何らかの施策を検討する上でも参考となる。P2X 技術の製造コストを考える場合、初期投資である固定費（CAPEX）と変動費・運転管理費（OPEX）に分けられるが、固定費は装置コストのみならず、装置寿命や設備稼働率が影響し、変動費では電力価格が大きく影響している。

#### （１）文献：Power-to-Liquids as Renewable Fuel Option for Aviation: A Review<sup>71</sup>

- 2050 年のドイツ国内での変動電源（主に風力）からの電力を利用し、P2X プラント規模は 10 万トン/年を想定。設備コストは現状想定できる 1 万トン/年の装置をスケールアップし 0.7 乗でコスト低下を仮定。電解水素（低温）を用いてフィッシャートロプシュ合成（FT 合成）により製造。また発電などの大規模排出源より CO<sub>2</sub> を回収利用。その他の主な仮定は以下の通りとなる。

参考表 5 電解水素（低温）/FT 合成/大規模排出 CO<sub>2</sub> 源利用

| ジェット燃料 コスト          |       | 入力電力 |                   | 出力燃料 |  | 効率 | 電力コスト  | 年間稼働時間<br>(full換算)<br>h |
|---------------------|-------|------|-------------------|------|--|----|--------|-------------------------|
| €/GJ <sub>LHV</sub> | €/t   | MW   | MW <sub>LHV</sub> | kt/y |  | %  | ct/kWh |                         |
| 31                  | 1,352 | 588  | 310               | 97   |  | 53 | 4      | 3,750                   |

| 投資               |                         |                          |                 |          | プラント<br>寿命 | 利率 |
|------------------|-------------------------|--------------------------|-----------------|----------|------------|----|
| 電解<br>(低温)<br>M€ | H <sub>2</sub> 貯蔵<br>M€ | CO <sub>2</sub> 供給<br>M€ | 合成<br>/調整<br>M€ | 合計<br>M€ | 年          | %  |
| 140              | 30                      | 45                       | 94              | 308      | 25         | 4  |

- ✧ 電力コストが 2.1ct/kWh になった場合の感度解析からは 39% の燃料コストが削減される。

#### （２）文献 METIS Studie Study S8 “The role and potential of Power-to-X in 2050”<sup>72</sup>

- 2050 年時点の EU 域内においてベンチマークとなる再生可能燃料（バイオディーゼル）とのコスト比較。P2X 技術で競争力をもつための閾値となる電力価格を試算したもの。電力価格は EU 域の電源モデルを用いて需給バランスによる市場価格を想定。P2X 技術としては電解水素（低温）を用いてフィッシャートロプシュ合成（FT 合成）により製造。なお CO<sub>2</sub> コストは 40€/t と仮定。
- ベンチマークとなるバイオディーゼルのコストを 75 €/MWh<sub>PtL HHV</sub>（872 €/石油換算トン）と設定した場合、年換算投資コスト（CAPEX+OPEX）が 92.2~176.8 €/kWh<sub>e</sub>/

<sup>71</sup> P.Schmidt, et al., Chem. Ing. Tech, 2018, 90, No.1-2, 127-140

<sup>72</sup> <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/1e6b9012-6bbc-11e9-9f05-01aa75ed71a1/language-en/format-PDF/source-96288622> （2020 年 2 月 26 日アクセス）

年の範囲となりバイオディーゼル（現状価格）と競争できる電力価格の閾値が 42.5€/MWh<sub>el</sub>（4.25ct/kWh）になる。

参考表 6 電解水素/FT 合成（上段：FT 合成/下段：電解水素製造）

| H <sub>2</sub> -to-Liquids                          |      |                       |            |                                          |                     |
|-----------------------------------------------------|------|-----------------------|------------|------------------------------------------|---------------------|
| 効率                                                  | 装置寿命 | CAPEX                 | OPEX       | CO <sub>2</sub> 必要量                      | CO <sub>2</sub> コスト |
| MWh <sub>H<sub>2</sub> HHV</sub> /MWh <sub>el</sub> | 年    | €/kW <sub>power</sub> | % of CAPEX | tCO <sub>2</sub> /MWh <sub>PTL HHV</sub> | €/t CO <sub>2</sub> |
| 80%                                                 | 30   | 365-673               | 3%-5%      | 0.251                                    | 40                  |

| Power-to-H <sub>2</sub>                                  |      |                       |            |
|----------------------------------------------------------|------|-----------------------|------------|
| 効率                                                       | 装置寿命 | CAPEX                 | OPEX       |
| MWh <sub>PTL HHV</sub> /MWh <sub>H<sub>2</sub> HHV</sub> | 年    | €/kW <sub>power</sub> | % of CAPEX |
| 82%                                                      | 20   | 500-725               | 3%-5%      |

- ☆ 前提となる製造方法は（１）の方法と同じである。なお全体の製造の効率について、高位発熱量（HHV）と低位発熱量（LHV）の換算（水素：0.846、ディーゼル：0.94）も含めて計算すると、0.52 となり（１）の場合とほぼ同じ効率を前提としていることがわかる。

（３）文献：カーボンニュートラルメタンの将来ポテンシャル<sup>73</sup>

- 国内での再生可能電力からの P2G による合成メタン（カーボンニュートラルメタン（CN メタン））製造を想定し、既存インフラである都市ガスパイプラインで供給する場合についての経済性や課題について報告している。CN メタンは水電解とメタネーションにより製造し、その前提となる仕様は原単位として表されている。CN メタンがセクターカップリングの重要な技術としての可能性を示唆しており、課題としては電気料金以外に電解装置の設備利用率が低いことも課題。この対策として蓄電池併用などの方策検討も提示している。

参考表 7 電解水素/メタネーション

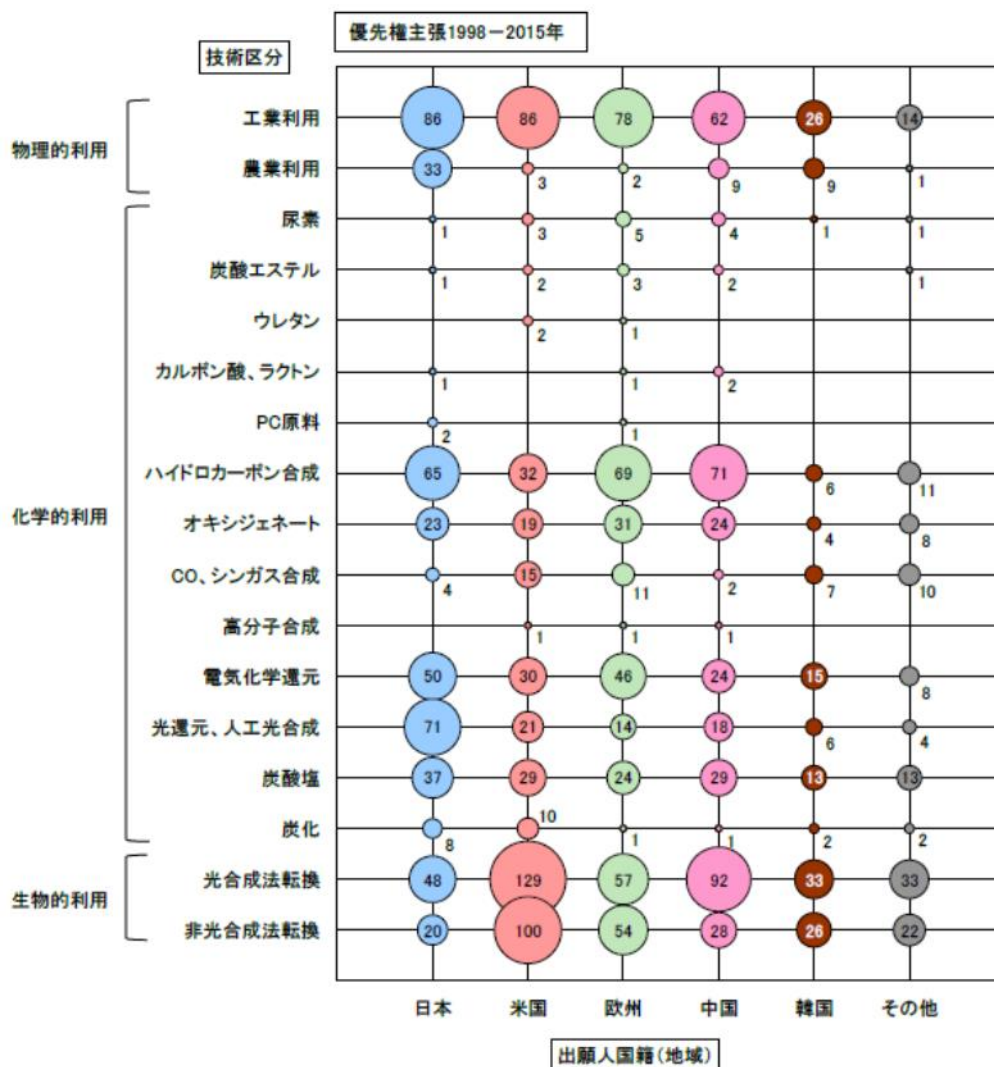
|                               | 単位                                                   | 設定値  | 備考                                                                                                                                                          |
|-------------------------------|------------------------------------------------------|------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 電解装置                          | kWh/Nm <sup>3</sup> -H <sub>2</sub>                  | 4.5  |                                                                                                                                                             |
| 電解＋メタネーション                    | kWh/Nm <sup>3</sup> -CH <sub>4</sub>                 | 18.3 | 設備費 想定 1：300 万円（Nm <sup>3</sup> -CH <sub>4</sub> /h）<br>将来 1：150 万円（Nm <sup>3</sup> -CH <sub>4</sub> /h）<br>将来 2：60 万円（Nm <sup>3</sup> -CH <sub>4</sub> /h） |
| 水使用量（水電解）                     | kg-H <sub>2</sub> O/Nm <sup>3</sup> -H <sub>2</sub>  | 0.8  |                                                                                                                                                             |
| 水使用量（電解＋メタネーション）              | kg-H <sub>2</sub> O/Nm <sup>3</sup> -CH <sub>4</sub> | 3.23 |                                                                                                                                                             |
| 水単価（工業用水）                     | 円/m <sup>3</sup>                                     | 30   |                                                                                                                                                             |
| CO <sub>2</sub> 分離回収コスト       | 円/t-CO <sub>2</sub>                                  | 1000 | 膜分離：1,000 円<br>台物理吸収法・固体吸収材：2,000 円台<br>化学吸収法：4,200 円                                                                                                       |
| 必要 CO <sub>2</sub> 量（メタネーション） | kg-CO <sub>2</sub> /Nm <sup>3</sup> -CH <sub>4</sub> | 1.97 |                                                                                                                                                             |
| 運転管理 修繕費                      | 建設費に対する割合%                                           | 1.6  |                                                                                                                                                             |
| 諸費                            | 建設費に対する割合%                                           | 0.7  |                                                                                                                                                             |
| 運転期間（寿命）                      | 年                                                    | 30   |                                                                                                                                                             |

<sup>73</sup> <https://eneken.ieej.or.jp/data/7769.pdf>（2020 年 2 月 26 日アクセス）

## ●参考 4 特許・論文動向

## 【特許動向】

参考図 1 に特許件数として 1998 年～2015 年（出願年（優先権主張年））の CO<sub>2</sub> 有効利用（物理的利用、化学的利用、生物学的利用）の技術区分別・出願人国籍別ファミリー件数を示す<sup>74</sup>。



参考図 1 CO<sub>2</sub> 有効利用（物理的利用、化学的利用、生物学的利用）の技術区分別・出願人国籍別ファミリー件数（出願年（優先権主張年））：1998 年～2015 年<sup>74</sup>

化学的利用（炭酸塩、炭化除く全件数：756 件）と生物学的利用（全件数：642 件）の出願数に着目すると、日本は化学的利用で計 218 件（29%）、生物学的利用で計 68 件（11%）となる。技術区分としては「光還元、人工光合成」に関する出願が他との比較においても多く、次に「ハイドロカーボン合成」、「電気化学還元」となっている。米国籍出願人は生物学的利用に関する出願が多い。欧州国籍出願人は化学的利用の「ハイドロカーボン合成」、生物学的利用の「光合成法転換」に関する出願が多い。また中国籍出願人は生物学的利用の「光合成法転換」と化学的利用の「ハイ

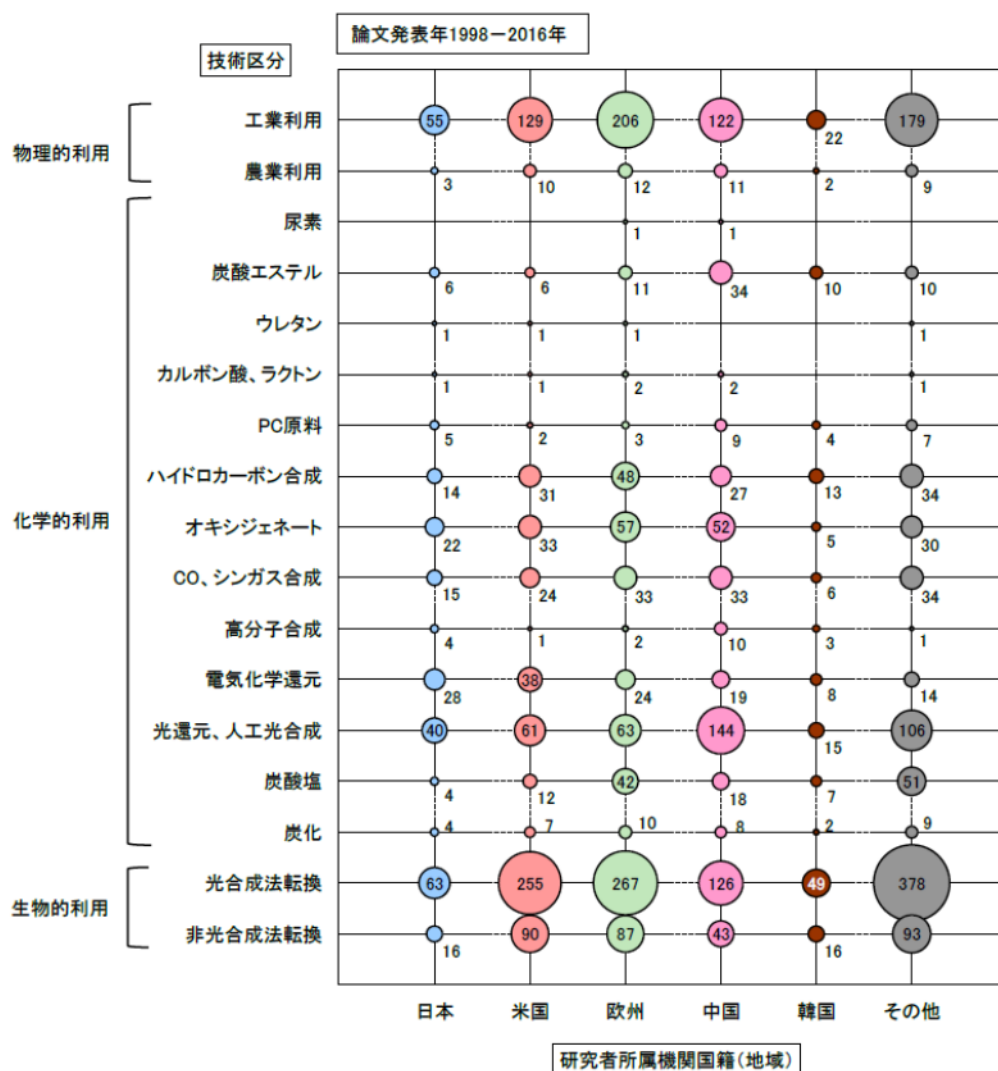
<sup>74</sup> 特許庁 平成 29 年度特許出願技術動向調査報告書（概要）CO<sub>2</sub> 固定化・有効利用技術（平成 30 年 2 月）

ドロカーボン合成」が多い。

なお、直近の 2018 年から 2019 年の間に公開された国内特許では、二酸化炭素利用・転換プロセスに関わるものは 59 件となっている。

### 【論文動向】

参考図 2 に論文発表件数として 1998 年～2016 年（発表年）の CO<sub>2</sub>有効利用（物理的利用、化学的利用、生物学的利用）の技術区分別・研究者所属機関国籍別論文の報文数を示す<sup>74</sup>。



参考図 2 CO<sub>2</sub>有効利用（物理的利用、化学的利用、生物学的利用）の技術区分別・研究者所属機関国籍別論文発表件（発表年：1998 年～2016 年）<sup>74</sup>

化学的利用（炭酸塩、炭化除く報文数：1,212 報）と生物学的利用（全報文数：1,483 報）の出願数に着目すると、日本は化学的利用で計 218 報（11%）、生物学的利用で計 68 報（5%）となり、先の特許動向と比較すると相対的に低い割合になっている。

研究者所属機関国籍別では、日本は生物学的利用の「光合成法転換」、化学的利用の「光還元、



人工光合成」に関するものが多く、米国、欧州は生物学的利用の「光合成法転換」、生物学的利用の「非光合成法転換」に関する論文発表が多い。中国は化学的利用の「光還元」、人工光合成」、生物学的利用の「光合成法転換」に関するものが多い。CO<sub>2</sub>有効利用として、各国・地域共に生物的光合成や光還元、人工光合成に関する論文発表件数が比較的多いという特徴がある。

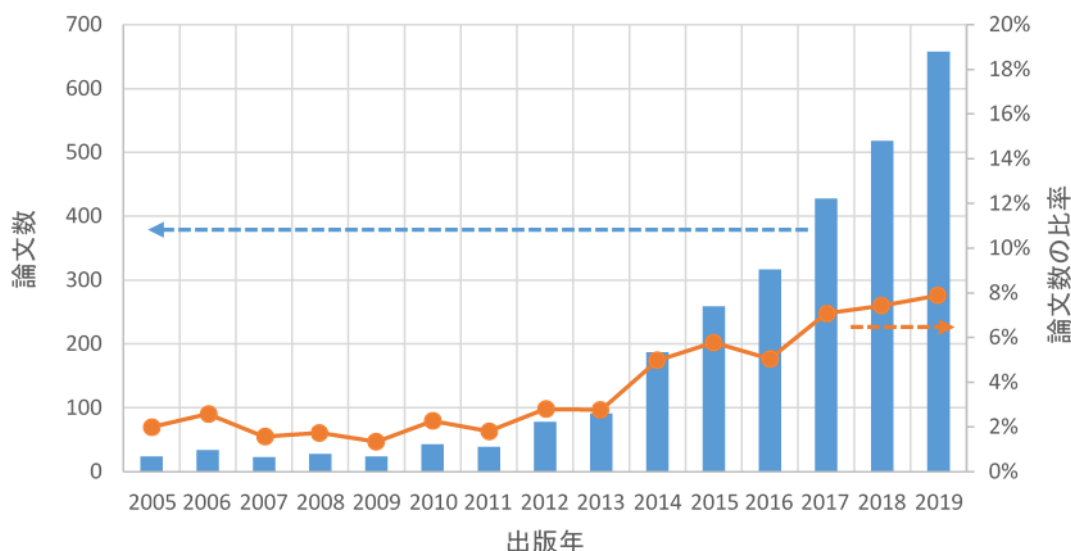
なお直近の 2018 年から 2019 年の間に公開された論文のうち、二酸化炭素利用プロセスに関わる論文は全 3,061 報、うち中国が 1 位で 1,321 報、アメリカが 366 報、イギリスが 192 報、ドイツが 147 報、日本は 124 報で 8 位であった。二酸化炭素転換プロセスで見てみると、4,099 報、うち中国が 1 位で 1,783 報、アメリカが 543 報、韓国が 226 報、ドイツが 213 報と続き、日本は 152 報で 8 位であった。前者は LCA などに関する論文が多く、後者は水素化に関する触媒の論文がほとんどであった。

政策動向・技術動向からは、CO<sub>2</sub>の電気化学反応、すなわち CO<sub>2</sub>電解還元技術の重要性が考えられた。このため、CO<sub>2</sub>電解還元技術の論文数に関する調査分析を行った。参考図 3 は、2005 年から 2019 年に出版された CO<sub>2</sub>電解還元技術（Electrochemical Reduction）の論文数（参考図 3 の棒グラフ）と、CO<sub>2</sub>有効利用技術と還元技術における CO<sub>2</sub>電解還元技術の論文数の比率（参考図 3 の折れ線グラフ）を示す。

論文数は 2014 年以降に増加しつつあり、近年 3 年間では年間 100 報程度の論文が投稿されていた。また、CO<sub>2</sub>電解還元技術の論文数の比率も同様に増加していた。

左軸：CO<sub>2</sub>電解還元技術の論文数

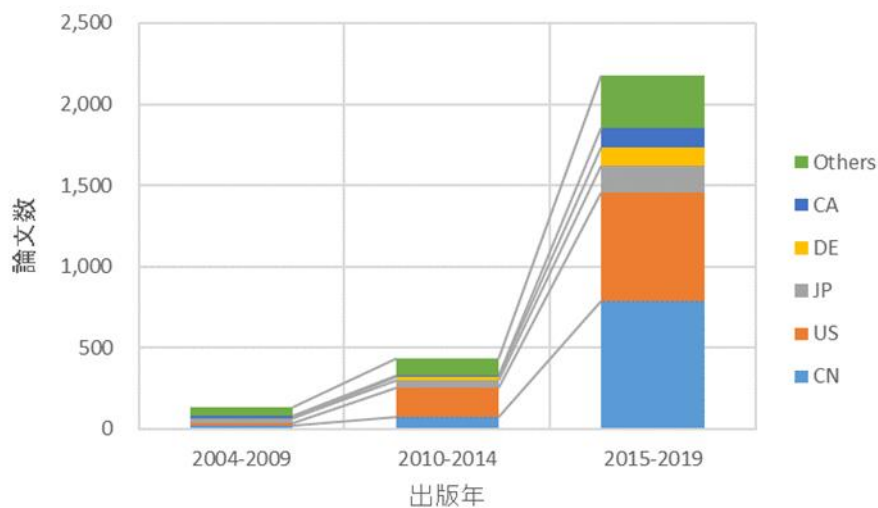
右軸：CO<sub>2</sub>有効利用技術と還元技術における電解還元技術の論文数の比率



出典：Web of Science™ の検索結果を基に作成

参考図 3 CO<sub>2</sub>電解還元技術の論文動向（その1）

参考図 4 に各国からの論文動向を示す。各国ともに直近 5 年間に論文数は急増しており、上位 3 か国の中国は 77 報（2010～2014 年）から 791 報（2015 年～2019 年）へ、米国は 179 報から 663 報へ、日本は 45 報から 164 報と増加していた。



出典：Web of Science™ の検索結果を基に作成

参考図 4 CO<sub>2</sub> 電解還元技術の論文動向（その 2）

以上の論文動向に鑑みると、CO<sub>2</sub> 有効利用技術と還元技術分野において、CO<sub>2</sub> 電解還元技術が重要技術となりつつあると結論づけられる。



## ●参考 5 TRL（技術成熟度）

参考表 8 技術成熟度レベル (Technology readiness levels ,TRL)

(European Commission (EC) における定義)<sup>75</sup>

| TRL | 定義                                                                                         | 技術開発の<br>相対レベル*1 | 実験規模*2         |
|-----|--------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|----------------|
| 1   | <b>Basic principles observed</b><br>(基礎原理の観察)                                              | 基礎技術研究           |                |
| 2   | <b>Technology concept formulated</b><br>(技術コンセプトの明確化)                                      |                  |                |
| 3   | <b>Experimental proof of concept</b><br>実験的なコンセプト証明                                        | 実現可能性の検証のための研究   | 実験室            |
| 4   | <b>Technology validated in lab</b><br>(実験室環境での技術検証)                                        | 技術開発             | 実験室            |
| 5   | <b>Technology validated in relevant environment</b><br>(関連する環境での技術検証)                      |                  | 実験室/ベンチ        |
| 6   | <b>Technology demonstrated in relevant environment</b><br>(関連する環境での技術実証)                   | 技術実証             | パイロット          |
| 7   | <b>System prototype demonstration in operational environment</b><br>(運用環境におけるシステムプロトタイプ実証) | システム試運転          | フル<br>(実証)     |
| 8   | <b>System complete and qualified</b><br>(システム完成と認証)                                        |                  | フル<br>(限定的商用化) |
| 9   | <b>Actual system proven in operational environment</b><br>(運用環境での実システムでの実証)                | システム運用           | フル<br>(広範的商用化) |

\*1)米国 DOE の基準を参考<sup>76</sup> (なお EC と DOE での TRL 定義は類似)、\*2)米国 DOE における実験規模要件  
なお大きく分類すると TRL1-3 が初期の研究ステージ、TRL4-6 が実現可能性に向けた開発ステージ、TRL7-8 が実証と商用化に向けたステージ<sup>77</sup>

<sup>75</sup> [https://ec.europa.eu/research/participants/data/ref/h2020/wp/2014\\_2015/annexes/h2020-wp1415-annex-g-trl\\_en.pdf](https://ec.europa.eu/research/participants/data/ref/h2020/wp/2014_2015/annexes/h2020-wp1415-annex-g-trl_en.pdf)<sup>76</sup> <https://www2.lbl.gov/dir/assets/docs/TRL%20guide.pdf><sup>77</sup> [https://www.researchgate.net/publication/336133895\\_Deliverable\\_D31\\_-\\_Technical\\_requirements\\_for\\_the\\_implementation\\_of\\_structured\\_innovation\\_in\\_ocean\\_energy\\_systems/link/5d91ad21299bf10cff1a19f3/download](https://www.researchgate.net/publication/336133895_Deliverable_D31_-_Technical_requirements_for_the_implementation_of_structured_innovation_in_ocean_energy_systems/link/5d91ad21299bf10cff1a19f3/download)

## ● 専門用語

**Power to X**

再生可能電力から化学品・燃料を製造する技術の総称。略称として P2X、PtX などがある。X に Gas、Fuel、Liquid、Chemicals、H<sub>2</sub>、Heat などの変換後の物質やエネルギー形態を入れて（例えば Gas の場合、Power to Gas（略称 P2G））用いることもある。

**e-fuel**

P2X で製造した燃料を指し、e は電力（electricity）を意味する。主に欧州で用いられており、類似したものとしてガスの場合、e-gas、液体燃料の場合、e-liquid などの呼び方もある。

**Direct Air Capture**

空気中 CO<sub>2</sub> の直接回収技術。略称として DAC。大気中の CO<sub>2</sub> を積極的に削減できるネガティブエミッション技術の一部として注目されている。欧米では、CO<sub>2</sub> 回収装置・プラントの商用化を目指したベンチャー企業（Climeworks（スイス）、Carbon Engineering（カナダ））が現れてきている。



## ■作成メンバー■

|                   |              |              |
|-------------------|--------------|--------------|
| 佐藤 順一             | 上席フェロー・ユニット長 | 環境・エネルギーユニット |
| 尾山 宏次             | フェロー         | 環境・エネルギーユニット |
| 関根 泰              | フェロー         | 環境・エネルギーユニット |
| 中村 亮二             | フェロー         | 環境・エネルギーユニット |
| 【NEDO 技術戦略研究センター】 |              |              |
| 土肥 英幸             | ユニット長        | 環境・化学ユニット    |
| 林 直之              | 研究員          | 環境・化学ユニット    |

※お問い合わせ等は下記ユニットまでお願いいたします。

CRDS-FY2019-RR-05

## 調査報告書

# 二酸化炭素資源化に関する調査報告書

～パリ協定遵守に向けた国内外動向、  
および燃料・化学品への CO<sub>2</sub> 変換技術～

令和 2 年 3 月 March 2020

ISBN 978-4-88890-671-5

国立研究開発法人科学技術振興機構 研究開発戦略センター  
環境・エネルギーユニット  
Environment and Energy Unit,  
Center for Research and Development Strategy, Japan Science and Technology Agency

〒102-0076 東京都千代田区五番町 7 K's 五番町  
電 話 03-5214-7481  
E-mail crds@jst.go.jp  
https://www.jst.go.jp/crds/  
©2020 JST/CRDS

許可無く複製／複製をすることを禁じます。  
引用を行う際は、必ず出典を記述願います。  
No part of this publication may be reproduced, copied, transmitted or translated without written permission.  
Application should be sent to crds@jst.go.jp. Any quotations must be appropriately acknowledged.

