

【レビュー】

# CO<sub>2</sub>回収・利用技術とカーボンプライシングの動向

増田正夫・宮下真一・太田宗吾

## Trends in Carbon Dioxide Capture/Utilization Technology and Carbon Pricing

Masao Masuda・Shinichi Miyashita・Sougo Ohta

2020年10月に日本政府は2050年までにカーボンニュートラル実現を目指すことを宣言した。これを契機に、脱炭素に向けた活動が全ての業種・業界において重要な経営課題となってきた。また、経済産業省はCO<sub>2</sub>を炭素資源と捉えて再利用するカーボンリサイクルというコンセプトを推進している。このような動きを受けて、本報では、CO<sub>2</sub>回収・利用技術とカーボン・プライシングの動向について概説する。

### 1. はじめに

世界各国でカーボンニュートラルを目指す取り組みが加速する中、国内では、2020年10月に菅首相が所信表明演説で、2050年までにカーボンニュートラル実現を目指すことを宣言した<sup>1)</sup>。2022年6月には、岸田首相が「新しい資本主義のグランドデザイン及び実行計画」のなかでGX（グリーントランスフォーメーション）を重点投資分野の一つに指定した<sup>2)</sup>。このような動きを受けて、脱炭素にむけた活動が全ての業種・業界において重要な経営課題となってきた。

カーボンニュートラルとは、温室効果ガスの排出量と森林などによる吸収量を均衡させることを意味する。温室効果ガス排出量を実質ゼロにするという地球温暖化対策の一つとして取り組まれている。また、GXとは、クリーンエネルギーを主軸とする産業構造、社会システムへと変革を図る概念を意味する。

カーボンニュートラルを真に実現するためには、CO<sub>2</sub>排出量を削減するだけでなく、CO<sub>2</sub>を回収・貯留（CCS：Carbon dioxide Capture and Storage）もしくは回収・利用（CCU：Carbon dioxide Capture and Utilization）する技術が不可欠とされている<sup>3)</sup>。

前者のCCSとは、人が化石燃料を燃焼する等の活動で排出されたCO<sub>2</sub>もしくは大気中のCO<sub>2</sub>を回収して、固定化・貯留するプロセスを言う。一般的には、発電所や化学工場などからのCO<sub>2</sub>を回収して地中深くに貯留・圧入することを差す。2005年のグレンイーグルズ・サミットで注目され、2008年の洞爺湖サミットで国際的に支持された。これらを受けて、我が国では、2012年から北海道・苫小牧で大規模な実証実験が始められた。製油所から排出されるガスからCO<sub>2</sub>だけを分離・回収し地中に貯留するもので、2016年から2019年の間に海底下の地中に累計30万トンのCO<sub>2</sub>の貯留を実証できた<sup>4)</sup>。課題はCO<sub>2</sub>回収コストであり、コスト削減のための研究開発が現在も継続されている。また、ブルーカーボン（海洋の沿岸生態系に隔離・貯留される炭素）やグリーンカーボン（植物や土壌など陸上の生態系に隔離・貯留される炭素）も有望なCCSとして注目されている。

一方、後者のCCUとは、人が化石燃料を燃焼する等の活動で排出されたCO<sub>2</sub>もしくは大気中のCO<sub>2</sub>を回収して、化学製品や燃料等に変換するプロセスを言う。これらの製品や燃料を利用する際にCO<sub>2</sub>が大気に再放出されても、従来の化石燃料由来からの置き換えで低炭素化を図れたり、あるいは輸入に頼る化石燃料の代替品を国内で製造・調達できるようになるため、既にあるインフラやサプライチェーンをより低炭素

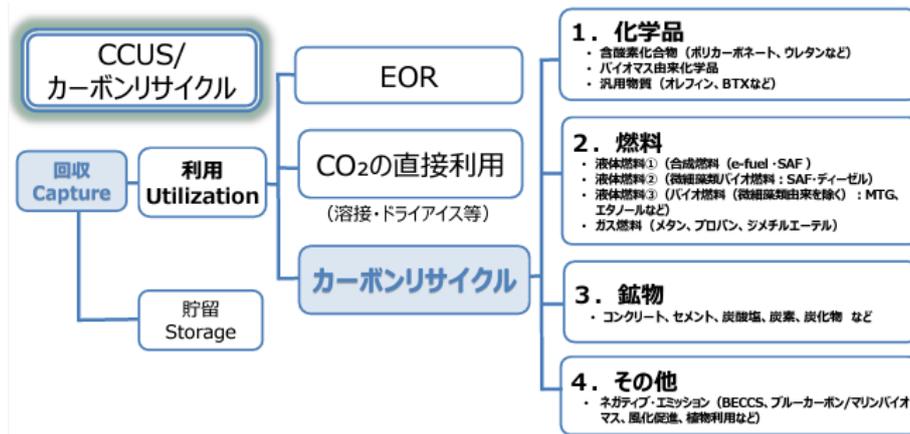


図1 有望なカーボンリサイクル技術<sup>9)</sup>

注) EOR: 原油増進回収法、BTX: 芳香族炭化水素のベンゼン/トルエン/キシレンの総称、e-fuel: 合成燃料、SAF: 持続可能な航空燃料、MTG: メタノールからのガソリン合成法、BECCS: バイオマス燃焼+CCS

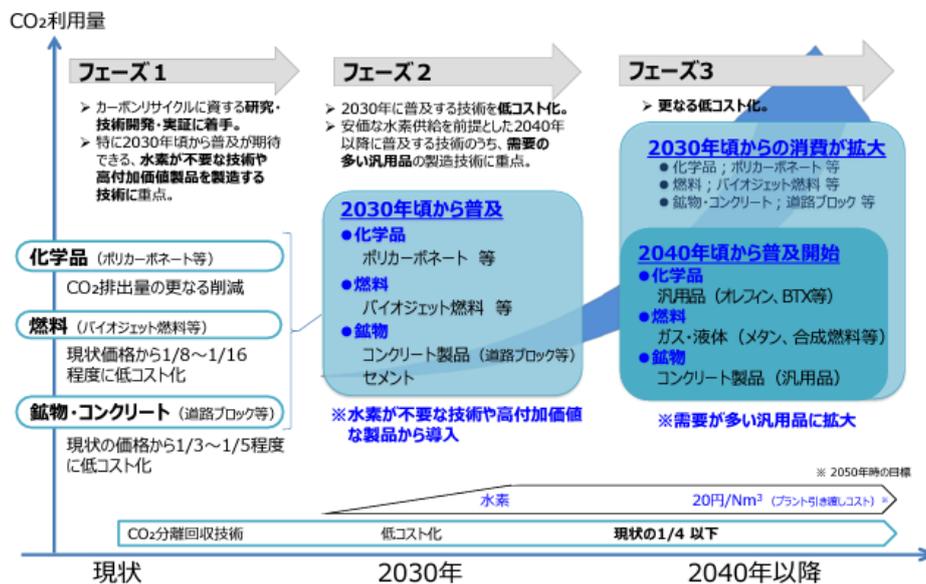


図2 カーボンリサイクル技術ロードマップ<sup>9)</sup>

な形で活用できたりする。既存のインフラ等を変更するのは容易ではないが、新たなビジネスを創出できる可能性を秘めている<sup>5)</sup>。

CCS と CCU の技術を併用して使用すること、もしくはそれらの総称を CCUS (Carbon dioxide Capture, Utilization and Storage) と言う。CCU や CCUS という言葉は、学術論文では 2000 年代初期から見られるが、エネルギー分野で注目され始めたのは、2015 年末のパリ COP21 が一つの背景にあり、これ以降、国際的な会議の報告書で使われるようになった<sup>6)</sup>。

CCU は、特に欧州や米国で先進的に取り組まれている。欧州で 2018 年に提案された A Clean Planet for All<sup>7)</sup>において、2050 年までにカーボンニュートラル経済の実現を目指すことが明示され CCU を活用することが示された。また、米国では、気候変動対策よりもエネルギーセキュリティの観点から幅広い CCU が検討されている<sup>5)</sup>。

我が国では、2019 年 1 月に安倍首相がダボス会議で CCU への意欲を示してから<sup>8)</sup>、経済産業省が CO<sub>2</sub>を炭素資源と捉えて再利用するカーボンリサイクルというコンセプトを推進し始めた。6 月には、各分野で研究開発が必要な技術課題を整理した「カーボンリサイクル技術ロードマップ」<sup>9)</sup>が経済産業省から公表された。その後、米国等との国際的な連携が進展するなど、多岐に亘って大きな進展があったため、カーボンリサイクルの取り組みをさらに加速すべく、2021 年 7 月には改訂版が公表された。改訂版を図 1 と図 2 に示

表 1 CO<sub>2</sub>回収技術の比較

手法	原理	起因力	長所	短所	
化学吸収法	化学反応	温度差	<ul style="list-style-type: none"> <li>・低分圧ガス向き</li> <li>・炭化水素への親和力が低い</li> <li>・高濃度CO<sub>2</sub>が回収可能</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・吸収液が高価</li> <li>・腐食・浸食・泡立ちがある</li> <li>・適用範囲が限定的（大容量向き）</li> <li>・110～130℃の再生用熱源が必要</li> </ul>	
物理吸収法	物理吸収	分圧差(濃度差)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・高分圧ガス向き</li> <li>・適用範囲が広い</li> <li>・腐食・浸食・泡立ちが少ない</li> <li>・再生熱源不要</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・吸収液が高価</li> <li>・重炭化水素との親和性が大</li> </ul>	
物理吸着法	PSA	物理吸着	分圧差(濃度差)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・高純度精製が可能</li> <li>・適用範囲が広い</li> <li>・装置が比較的簡易</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・吸着材の費用が大</li> <li>・再生ガスが必要</li> <li>・水分との親和性が大</li> <li>・高圧対応のためTSAよりもイニシヤル・ランニングが大</li> </ul>
	TSA	物理吸着	温度差	<ul style="list-style-type: none"> <li>・高純度精製が可能</li> <li>・適用範囲が広い</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・吸着材の費用が大</li> <li>・再生用熱源が必要</li> <li>・水分との親和性が大</li> </ul>
膜分離法	透過	分圧差(濃度差)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・簡便</li> <li>・安価</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・低純度</li> <li>・運転費が高い</li> <li>・適用範囲が限定的（小容量向き）</li> <li>・油脂分含有ガスに弱い</li> </ul>	
深冷分離法	液化・精留	相変化	<ul style="list-style-type: none"> <li>・高純度精製が可能</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・装置が複雑</li> <li>・建設費が高価</li> <li>・運転費が高い</li> <li>・適用範囲が限定的（大容量向き）</li> </ul>	
固体吸収法	化学反応 物理吸収	分圧差(濃度差) 温度差	<ul style="list-style-type: none"> <li>・エネルギー消費、コスト面で吸収法よりも優位</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・実用化開発段階</li> </ul>	

す。改訂版ロードマップでは、水素が不要な技術や高付加価値な製品については2030年頃からの普及を目指し、2040年以降に向けては、現在未確立の技術で、実現した場合のCO<sub>2</sub>利用量が多いものの普及を目指すとしている。環境省も2018年より「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」を開始してCCU普及を目指す事業を進めている。

## 2. CO<sub>2</sub>回収技術

CO<sub>2</sub>回収技術には多くの方式があり、それらを比較したものを表1に示す。いずれの方式も長所と短所があり、どの技術を選択するかは、ケース・バイ・ケースで異なってくる。また、CO<sub>2</sub>回収の対象は、CO<sub>2</sub>濃度の高い排ガス（CO<sub>2</sub>濃度7%～15%）とCO<sub>2</sub>濃度の低い大気（約0.04%）に大きく分けられる。前者の方が効率良くCO<sub>2</sub>を回収できるので、一般的には排ガスが対象とされるが、近年では、後者についてもDAC（Direct Air Capture）と呼んで、場所を問わずどこでも大気中のCO<sub>2</sub>を回収できるので注目を浴びている。DACについては、第4章で詳細に説明する。

主なCO<sub>2</sub>回収技術について、以下に概説する。

### 2.1 化学吸収法

化学吸収法は、化学反応を利用してCO<sub>2</sub>を分離する方法である。吸収塔内でCO<sub>2</sub>は40～50℃でアミン水溶液と反応してアミン炭酸塩を生成する。アミン炭酸塩を再生塔で110～130℃まで加熱すると、CO<sub>2</sub>はアミン水溶液から気化するので高濃度CO<sub>2</sub>を回収できる。大規模にCO<sub>2</sub>を回収する用途に向いているため、世界中で研究開発や実証プロジェクトが実施されているが、課題はCO<sub>2</sub>分離時の加熱における多大なエネルギー消費である。現在、エネルギー効率が高くCO<sub>2</sub>吸収率の高いアミン水溶液の開発が進められている。

国内では世界に先駆けて 1980 年代始めから研究が行われている<sup>10)-12)</sup>。近年の事例としては、RITE（公益財団法人地球環境産業技術研究機構）と日本製鉄が、COURSE50（NEDO 委託事業）で開発した化学吸収液とそのプロセスがあり、化学吸収法による CO<sub>2</sub> 回収設備としては世界で初めての商用設備として 2014 年に日鉄エンジニアリングの室蘭製鉄所内に 1 号機が導入された（120 t-CO<sub>2</sub>/day）。2018 年には、石炭火力発電所向けの CO<sub>2</sub> 回収設備として、新居浜西火力発電所で 2 号機が操業を開始した（143 t-CO<sub>2</sub>/day）<sup>13)</sup>。回収された CO<sub>2</sub> は、主に食品産業や化学産業において直接利用されている。

## 2.2 物理吸収法

物理吸収法は、吸収塔で CO<sub>2</sub> を吸収するポリエチレングリコールやメタノールなどの吸収液に排ガスを通して、高圧・低温下で物理的に CO<sub>2</sub> を吸収する方法である。そして再生塔で減圧または加熱し、高濃度 CO<sub>2</sub> を回収する。高圧ガスを対象にする場合には本方式が有利になるが、低圧ガスでは化学吸収法の方が有利になる。

国内で実証プロジェクトが稼働しており、電源開発の若松研究所における EAGLE プロジェクト（2008～2014 年）や大崎クールジェンによるプロジェクト（2019 年～）等があり石炭ガス化複合発電（IGCC）や石炭ガス化燃料電池複合発電プラント（IGFC）との組み合わせによる有効性が実証されている<sup>14)-17)</sup>。

## 2.3 物理吸着法

物理吸着法は、圧力差や温度差を利用し、ゼオライトや活性炭などの固体の吸着材に排ガスを通して、CO<sub>2</sub> を他の気体と分離させる方法である。圧カスイング吸着法（PSA 法）と温度スイング吸着法（TSA 法）に加えて、両者を併用する PTSA 法がある。分離回収に要するエネルギーが比較的小さく、装置が比較的簡易になることもあって適用範囲が広い。しかし水等の他成分が容易に吸着するため、吸着の制御や劣化が課題になる<sup>18)</sup>。

## 2.4 膜分離法

膜分離法は、CO<sub>2</sub> をろ過して取り出す方法である。高圧力の排ガスからの CO<sub>2</sub> 分離においては、加減圧や加熱によるエネルギー消費がなく、最もエネルギー効率が高い。しかし、原理的に高濃度 CO<sub>2</sub> が得られないこと、大容量や低圧ガスには不向きであること等の短所がある<sup>19)</sup>。

## 2.5 深冷分離法

深冷分離法は、気体の沸点の違いを利用し、排ガスを圧縮および低温液化し、蒸留することで CO<sub>2</sub> を取り出す方法である。設備コストが高くなることや排ガスの圧縮エネルギーが大きくなることから、実用化には至っていない。

## 2.6 固体吸収法

固体吸収法では固体の CO<sub>2</sub> 吸収材を利用する。CO<sub>2</sub> を化学的に吸収するアミンを多孔質支持体に担持させたタイプなどがある。化学吸収法と同様の特性を示しながらも、固体であるが故に CO<sub>2</sub> 分離の際の顕熱や蒸発潜熱を削減できることから、化学吸収法に比べて必要なエネルギーを大幅に低減できる。

RITE を中心としたグループを中心に開発が行われており、特に排ガス向けの CO<sub>2</sub> 回収技術としては、化学吸収法の分離回収コストを現状の 4,000 円程度/t-CO<sub>2</sub> から 2,000 円台/t-CO<sub>2</sub> に、エネルギー消費量を現状の 2.5 GJ 程度/t-CO<sub>2</sub> から 1.5 GJ/t-CO<sub>2</sub> に低減できる可能性が示されている<sup>20)</sup>。発電所等の大規模施設での CO<sub>2</sub> 回収方法の本命として期待されている。現状は実証段階にあり、2030 年頃の技術の確立を目指している。

## 3. CO<sub>2</sub> 利用技術

CO<sub>2</sub> 利用は、主に直接利用と間接利用とに分けられる。間接利用とは CO<sub>2</sub> を何らかの製品に変換させて利用することを言う。

### 3.1 直接利用

直接利用としては、溶接ガスなどの産業分野、炭酸水などの飲料・食品分野、並びに医療分野で利用したり、ドライアイスにして生鮮食品の冷温保管・輸送などで利用したりする。農家のハウス栽培で促進栽培に利用したり、枯渇油田に圧入して油田の残存原油を回収する EOR (Enhanced Oil Recovery) に利用したりする。いずれも既に市場が存在するが、現状においては、従来技術よりもコストやエネルギー消費の面で明らかに有利でなければ普及は難しい状況となっている。また、これらの市場は必ずしも大きくないため、将来的に大規模に回収された CO<sub>2</sub>を全てこれらの市場で賄うのは難しいとされている。そのために間接利用の研究開発が盛んに行われている。

### 3.2 間接利用

間接利用としては、CO<sub>2</sub>をメタンやメタノール、エタノール等に変換させて燃料や化学品として利用したり、CO<sub>2</sub>を炭酸カルシウムに変換してセメントの原料にしたり、高強度コンクリートに利用したり、他にも用途は多岐にわたる。これら間接利用は、研究開発段階あるいは実証段階のものが多く、その多くは 2030 年頃からの普及が想定されている。

#### 3.2.1 化学品への利用

CO<sub>2</sub>から製造できる化学品としてはメタノールやエタノールがある。燃料としてそのまま利用することができ、エチレンやプロピレンさらには様々な化学品に合成して利用することもできる。

アイスランドの Carbon Recycling International 社は、レイキャビクにおいて CO<sub>2</sub>からのメタノール生産プラントを 2012 年から商業稼働している。地熱発電の電力で水電解した水素と、地熱発電からの年間 5,500 トン CO<sub>2</sub>を使って、年間 4,000 トンのメタノールを製造・販売している<sup>5)</sup>。

日本でも CO<sub>2</sub>からメタノールを製造するプロジェクトが行われている。東芝は、太陽光発電で水電解から製造した水素と、火力発電所の排ガスからの CO<sub>2</sub>により、メタノールを製造する人工光合成の実証事業を 2018 年より開始している<sup>21)</sup>。

#### 3.2.2 燃料への利用

CO<sub>2</sub>は、メタネーション技術によって水素と反応させてメタンに変換させたり、還元反応による合成ガス (CO と水素の混合ガス) を経て、軽油やアルコール、オレフィンといった製品に変換させたりできる。メタンはそのまま都市ガスとして、軽油はそのまま燃料として利用できるなど、既にあるインフラやサプライチェーンを有効活用できる面で大きなメリットがある。

海外でもメタネーションの技術開発が進んでいる。その代表例として Store & Go プロジェクトがある。ドイツの Falkenhagen、スイスの Solothurn、イタリア南部の Troia の 3 地点において、27 機関が 2016 年から Power-to-Gas (P2G) の実証を行っている<sup>22)</sup>。P2G とは、再生可能エネルギーの余剰電力を、水素やメタンなどの気体燃料に変換して貯蔵・利用することを言う。

国内でもメタネーション実証事業が始まっている。INPEX 社は、自社のガス田からの CO<sub>2</sub>からメタンを製造し、都市ガスとして再利用する事業を 2019 年より始めた<sup>23)</sup>。日立造船は、2018~2022 年度の環境省の事業において、清掃工場の排ガスからの CO<sub>2</sub>と再エネを利用した水電解によって作られる水素でメタンを製造する実証事業を行っており、メタネーション技術のモデル実証を小田原で行っている<sup>24)</sup>。

#### 3.2.3 コンクリートへの利用

CO<sub>2</sub>をセメントの原料の石灰石の主成分である炭酸カルシウムに変換したり、コンクリート製造時に CO<sub>2</sub>を吹き込むことで強度の高いコンクリートに仕上げたりして CO<sub>2</sub>を利用できる。CO<sub>2</sub>利用時に、水素や多量のエネルギーが不要であるため、他の利用先に比べて大きなメリットがあると言われている。

2007 年に創業したカナダの Carbon Cure Technologies 社は、ビル・ゲイツ氏ら富豪からの投資を元手に、セメント製造で炭酸カルシウムを焼成する際に大量に排出される CO<sub>2</sub>をリサイクルしてコンクリートに注入する事業に取り組んでいる<sup>25)</sup>。

国内では、鹿島建設、中国電力、デンカが共同開発したコンクリート CO<sub>2</sub>-SUICOM により、大量の CO<sub>2</sub> をコンクリートに固定する技術を確立している<sup>26)</sup>。

### 3.2.4 ポリマーへの利用

CO<sub>2</sub>から生成されるポリマーは、使い捨て容器などの汎用プラスチックとして利用されるポリエチレンや、電気・電子部品や衣料用繊維などの工業用プラスチックとして利用されるポリカーボネートなど、身近にある様々な製品での利用が期待できる。

海外では、ドイツの化学メーカーCovestro AG が、CO<sub>2</sub>とプロピレンオキシドを反応させてポリマーの原料を年間 5,000 トン生産している<sup>5)</sup>。

国内でも旭化成が CO<sub>2</sub>を原料にポリマーを製造する実証事業を 2014 年度～2016 年度に行っていた。実証により、従来の製造プロセスに比べて省エネかつ CO<sub>2</sub>排出量削減を実現できることが示されている<sup>27)</sup>。

### 3.2.5 バイオマス由来製品への利用

CO<sub>2</sub>を微細藻類などのバイオマスに吸収させ光合成を促進させることで増殖させ、それらを原料に燃料や化学品に変換させる技術も有望な CCU と位置付けられている。

欧州・米国においては、多くの企業や研究機関が早くからバイオマス関連の研究や商品開発を行っている。一方、国内の代表例としては、佐賀市において清掃工場の排ガスから CO<sub>2</sub>を分離回収し、回収した CO<sub>2</sub>を藻類培養事業とバジル栽培事業で利用している<sup>28)</sup>。

## 4. DAC

DAC とは、大気中の CO<sub>2</sub>を直接吸収することによって、大気中の CO<sub>2</sub>を減少させる技術のことを言い、直接空気回収技術とも呼ばれている。DAC に相応しい CO<sub>2</sub>回収方法としては、物理吸着法や化学吸収法、固体吸収法など、様々な手法が検討されている。

### 4.1 DAC の事例

国外では、カナダやスイス、米国などで DAC の実用化、商用化に向けた研究開発が進んでいる。カナダのカーボン・エンジニアリング社は、低コストで大気から CO<sub>2</sub>を回収し、それらを水素と合成して液体燃料を製造することに成功した<sup>29)</sup>。DAC 技術のリーディングカンパニーであるスイスのクライムワークス社は、2021 年 9 月から、アイスランドで世界最大の DAC プラントを稼働させている。このプラントは、年間 4,000 トンの CO<sub>2</sub>を大気から回収しており、今後、2030 年までに年間 100 万トン以上の CO<sub>2</sub>を回収することを目指している<sup>30)</sup>。DAC プラントの写真を図 3 に示す。

国内では、九州大学カーボンニュートラル・エネルギー研究所は、福岡県のナノメンブレン社との共同



図 3 アイスランドにおけるクライムワークス社の DAC プラント<sup>30)</sup>

研究により、分離膜を用いた CO<sub>2</sub>回収技術を研究開発しており、多段の膜分離により空気中の CO<sub>2</sub>を 40%以上まで濃縮できることを明らかにしている<sup>31)</sup>。川崎重工業は、環境省と連携して、固体吸収材を用いた DAC の小型化の実証事業を行っている。1 日 5 kg-CO<sub>2</sub>を回収し、回収された CO<sub>2</sub>も純度 95%で回収できることが確認された<sup>32)</sup>。東京都立大学の山添らは、イソホロンジアミンが CO<sub>2</sub>と反応して固体となって析出することを利用して、大気中の低濃度 CO<sub>2</sub>を高速で吸収する技術を開発しており、将来の DAC 技術への適用が期待されている<sup>33),34)</sup>。

#### 4.2 DAC の課題

CO<sub>2</sub>分離回収に伴うエネルギーコストが膨大であることが、現状の技術水準における最大の課題となっている。既に商用化されているスイスのクライムワークス社の設備でも、コストは 600 ドル/t-CO<sub>2</sub>、エネルギーは 9.0 GJ/t-CO<sub>2</sub>となっており<sup>30)</sup>、一般的な普及に向けては、コストとエネルギーの大幅な低減が求められる。

### 5. カーボンプライシング

カーボンプライシング<sup>35),36)</sup>とは、炭素排出に価格付けを行う仕組みのことを言う。脱炭素社会に向けた行動変容を促す目的で導入する手法の一つとされる。明示的カーボンプライシングと暗示的カーボンプライシングの 2 種類に大別される。前者は、排出される炭素に対して 1 トン当たりの価格付けがなされる。政府によって価格付けされる炭素税や国内排出量取引、民間企業が独自にプライシングするインターナル・カーボンプライシングや国内クレジット取引などがある。一方、後者は、エネルギー消費量に課税することで、間接的に温室効果ガス排出量の抑制を図るものである。代表的なものに、エネルギー課税、エネルギー消費量や機器などに関する規制・基準などがある。

#### 5.1 海外の動向

カーボンプライシングは、海外で先行して取り組まれている。

フィンランドは 1990 年に世界で初めて炭素税を導入した国で、その税収は、所得税の減税や企業の社会保障費削減による税収減少の一部を補填するために使われている。炭素税という形でいち早くカーボンプライシングを取り入れた国であり、これまで CO<sub>2</sub>排出量の削減と経済成長を両立させている。例えば、2014 年時点の CO<sub>2</sub>排出量を 1990 年比で 16%削減しながらも GDP を 48%向上させている<sup>37)</sup>。

EU では、2005 年に世界で最初となる EU-ETS (欧州連合域内排出量取引) が導入された。この制度は、対象企業に対して排出量の上限が割り当てられ、その過不足分を市場取引する仕組みである。対象業種は、発電、鉄鋼、窯業 (セメントやガラス製造業など)、パルプ・紙製造業で、2021 年の改正で、海運、道路輸送、建物 (化石燃料などの暖房を利用する住宅等) が加えられた。全体の排出量は当初より減少傾向にあるものの、多くの企業は排出量の削減が追いつかず排出枠の購入を余儀なくされており、そのコストを商品の価格に転嫁する動きも出てきており、グリーンインフレーション (緑のインフレ) が懸念されている。

中国はエネルギー起源 CO<sub>2</sub>排出量が世界で最も多い国であり、世界の排出量の約 30%を占める。2020 年 9 月の国連総会で、中国は、2060 年までにカーボンニュートラルを達成するよう努力すると表明し、2021 年 7 月に排出量取引制度 (ETS) を開始した。現在の ETS の対象は、石炭および火力発電を行う発電事業者のみであるが、今後は対象事業の拡大が検討されている。

#### 5.2 国内の動向

2012 年 12 月に「地球温暖化対策のための税 (温対税)」として国レベルで炭素税が導入され、すべての化石燃料に対し CO<sub>2</sub>排出量に応じた税率が課された。しかしながら、CO<sub>2</sub>排出量 1 トンあたり 289 円という税率は、諸外国と比べてかなり低い水準に留まっている。これに対して、スウェーデンでは 2021 年 4 月時点で CO<sub>2</sub>排出量 1 トンあたり 137 ドル (日本円で約 1 万 5 千円) である。

自治体の動きとしては、東京都が 2010 年に大規模事業所に対して CO<sub>2</sub>排出量の削減義務を課す「総量削減義務と排出量取引制度」を実施した。続いて、埼玉県でも 2011 年に大規模事業所向けに「地球温暖化対

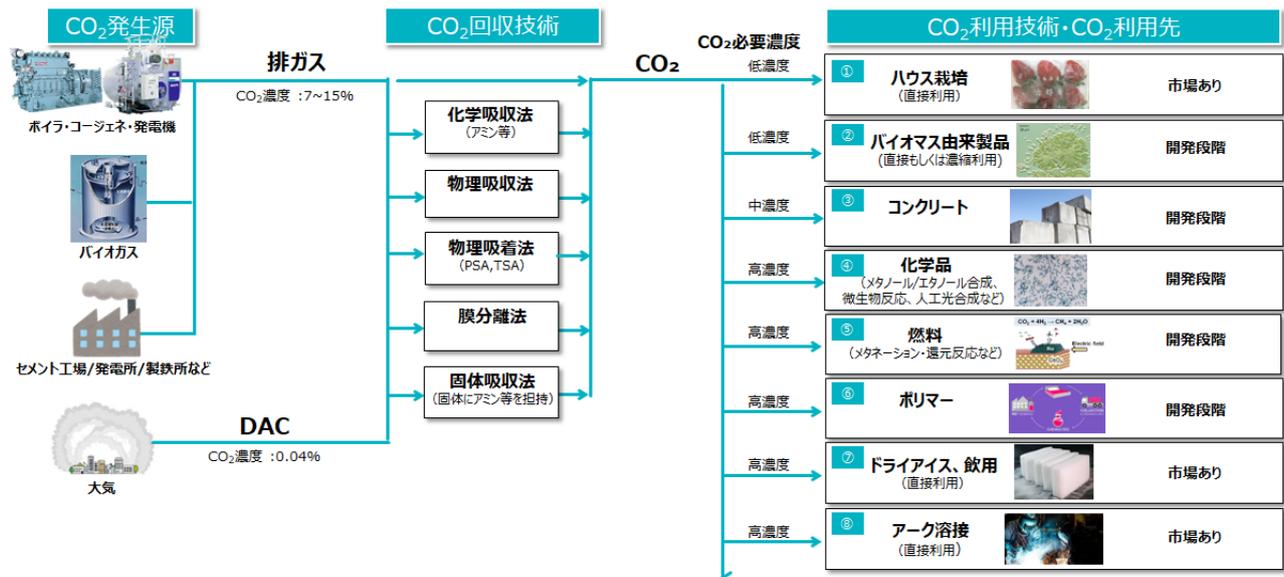


図 4 CO<sub>2</sub>発生源～CO<sub>2</sub>回収技術～CO<sub>2</sub>利用先

策計画制度」と「目標設定型排出量取引制度」を開始した。

東京証券取引所では、経済産業省からの委託事業として、試行取引を行うカーボン・クレジット市場の実証を2022年9月22日から2023年1月末までの予定で実施している。一方、民間セクターでは、企業が独自に排出量に価格をつけ、低炭素投資や対策推進の判断などに活用するインターナル・カーボンプライシングが進んでいる。2022年3月の環境省資料<sup>38)</sup>によると、日本では約280の企業がインターナル・カーボンプライシングを導入または2年以内に導入予定となっている。

### 5.3 カーボンプライシングの課題

カーボンプライシングは、企業や社会に対して脱炭素化に向けた取り組みを強力に促すことができる。排出量が増えればコストが必要になる一方で、減らすことができれば新たな収益の機会となる。したがって、現在の排出量を削減するためのイノベーションに取り組むインセンティブが生まれる。

その反面、以下のことが懸念されている。一つは、民間企業への負担の増加である。これにより産業の国際競争力低下につながる可能性があり、導入の狙いの一つであるイノベーションを逆に阻害してしまうという意見もある。二つ目は、制度設計の難しさである。排出量取引で各企業・業種にCO<sub>2</sub>排出量の上限を設ける場合、現在の排出量や脱炭素技術の発展状況などを踏まえた排出枠や負担金を設定する必要がある。しかし、公平で効果的な制度設計は容易ではない。

今後、国内で本格導入される見込みであるが、現在も産官学の多くの検討会で議論を重ねている。

## 6. おわりに

CO<sub>2</sub>回収・利用技術の実用化には、CO<sub>2</sub>の回収と利用に伴うコストと消費エネルギーの削減が喫緊の課題であり、その普及には、依然として時間を要すると思われる。

一方、地球環境問題に端を発するCCUを好機として、早期にビジネスに活かすためには、CO<sub>2</sub>発生源、CO<sub>2</sub>回収技術、並びにCO<sub>2</sub>利用技術とCO<sub>2</sub>利用先を図4のように俯瞰し、LCAを駆使して技術の組み合わせの最適解を導き出す必要があると考える。例えば、利用側で高濃度なCO<sub>2</sub>が必要な場合には高純度CO<sub>2</sub>回収技術が必要になるが、一方で、利用側が低濃度CO<sub>2</sub>で十分な場合には、必ずしも高度な技術を採用する必要はない。CO<sub>2</sub>発生源とCO<sub>2</sub>利用先のマッチングを踏まえた技術開発でなければならない。

## 文 献

- 1) 資源エネルギー庁：令和2年度エネルギーに関する年次報告（エネルギー白書2021）第1部 エネルギーをめぐる状況と主な対策 第2章 2050年カーボンニュートラル実現に向けた課題と取組 第3節 2050年カーボンニュートラルに向けた我が国の課題と取組(<https://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2021/html/1-2-3.html>), (2021.6).
- 2) 首相官邸：新しい資本主義のグランドデザイン及び実行計画 ～人・技術・スタートアップへの投資の実現～ ([https://www.kantei.go.jp/jp/101\\_kishida/actions/202205/31shihon.html](https://www.kantei.go.jp/jp/101_kishida/actions/202205/31shihon.html) ), (2022.6).
- 3) 有野洋輔, 田村堅太郎：IEA（国際エネルギー機関）による2050年ネットゼロに向けたロードマップの解説(公益財団法人地球環境戦略研究機関ホームページ：<https://www.iges.or.jp/pub/iea-2050netzero/ja>), (2021.7).
- 4) 経済産業省, 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構, 日本 CCS 調査株式会社：苫小牧におけるCCS大規模実証試験30万トン圧入時点報告書（「総括報告書」, (2020.5).
- 5) 野原珠華：CO<sub>2</sub>有効利用（CCU）の国内外の動向, みずほ情報総研レポート Vol.20 (2020).
- 6) 柴田善朗：CCU・カーボンリサイクルに必要な低炭素化以外の視点 -CCUS という分類学により生じる誤解-, (<https://eneken.ieej.or.jp/data/8821.pdf>), (2020.2).
- 7) 経済産業省：英国・EUにおけるカーボンニュートラルシナリオについて, (2020.11).
- 8) 首相官邸：世界経済フォーラム年次総会出席等 ([https://www.kantei.go.jp/jp/98\\_abe/actions/201901/23wef.html](https://www.kantei.go.jp/jp/98_abe/actions/201901/23wef.html) ),(2019.1).
- 9) 経済産業省：カーボンリサイクル技術ロードマップ,(2019.6公表, 2021.7改訂).
- 10) 三村知弘, 林幹洋, 萩生大介：CO<sub>2</sub>化学吸収プロセスの開発～世界最高の低熱消費量への挑戦～, 新日鉄エンジニアリング技報 Vol.3 (2012).
- 11) 飯島正樹, 高品徹：エネルギー問題とCO<sub>2</sub>排出抑制の展望, 三菱重工技報 Vol.41, No.4, (2004.7).
- 12) 飯嶋正樹, 遠藤崇彦, 島田大輔：地球温暖化対策技術としてのCO<sub>2</sub>回収技術, 三菱重工技報 Vol.47 No.1(2010).
- 13) RITE 化学研究グループ：CO<sub>2</sub>分離・回収技術の高度化・実用化への取り組み, RITE Today 2021, (2021.)
- 14) 山口健一：石炭ガス化プラントにおけるCO<sub>2</sub>分離回収技術（物理吸収法）,平成25年度火力原子力発電大会論文集, (2014.4).
- 15) 坂本康一,品田治, 佐々木啓介, 流森文彦, 横濱克彦：IGCC 石炭ガス化複合発電プロジェクトの動向, 三菱重工技報 Vol.52, No.2 (2015).
- 16) 電源開発株式会社：石炭火力からのCO<sub>2</sub>分離回収技術 ～究極の低炭素化技術、ただ更なる技術革新が必須～, 次世代火力発電協議会 第二回会合 資料 2-2 ([https://www.meti.go.jp/committee/kenkyukai/energy\\_environment/jisedai\\_karyoku/pdf/002\\_02\\_02.pdf](https://www.meti.go.jp/committee/kenkyukai/energy_environment/jisedai_karyoku/pdf/002_02_02.pdf)), (2015.6).
- 17) 大崎クールジェン株式会社：大崎クールジェンプロジェクトの概要 (<https://www.osaki-coolgen.jp/project/overview.html>).
- 18) 鈴木正哉：二酸化炭素吸着性能が優れた向き多孔質材の開発 大気圧以上で二酸化炭素を効率的に回収, 産総研 Today([https://www.aist.go.jp/aist\\_j/press\\_release/pr2008/pr20081204/pr20081204.html](https://www.aist.go.jp/aist_j/press_release/pr2008/pr20081204/pr20081204.html)), (2009.4).
- 19) 神尾英治, 吉岡 朋久：日本における膜分離法によるCO<sub>2</sub>分離回収技術, 膜 (MEMBRANE), 42 (1), 2-10 (2017).
- 20) 余語克典：二酸化炭素固体吸収材の研究開発動向と RITE の取り組み, 革新的 CO<sub>2</sub>分離回収技術シンポジウム (2022.2).
- 21) 野々村洗：東芝がCO<sub>2</sub>の資源化開発を加速、光合成を模した「緑の技術」, 日経 XTEC ニュース解説 (<https://xtech.nikkei.com/atcl/nxt/column/18/00001/05470/>), (2021.4).
- 22) Store & Go ホームページ (<https://www.storeandgo.info/>) .
- 23) 株式会社 INPEX, 大阪ガス株式会社：世界最大級のメタネーションによるCO<sub>2</sub>排出削減・有効利用実用化技術開発事業の開始について～都市ガスのカーボンニュートラル化を実現する技術の実用化へ～, プレスリリース (2021.10).
- 24) 日立造船株式会社：国内最大となるメタネーション設備の実証運転開始 ～清掃工場からの二酸化炭素を利用したメタネーションは世界初～, プレスリリース (2022.6).

- 25) 建設テック(CON-TECH)のホームページ：あのビル・ゲイツも投資！CO<sub>2</sub>をリサイクルする Carbon Cure って？ (<https://contech.jp/carboncure/>), (2020.4).
- 26) 鹿島建設株式会社のホームページ:環境配慮型コンクリート「CO<sub>2</sub>-SUICOM® (シーオーツースイコム)」 ([https://www.kajima.co.jp/tech/c\\_eco/co2/index.html#!body\\_02](https://www.kajima.co.jp/tech/c_eco/co2/index.html#!body_02))
- 27) 旭化成株式会社のホームページ：カーボンリサイクルを実現する旭化成のCO<sub>2</sub>ケミストリーのご紹介, (2020.7).
- 28) ふるコネの記事：世界初！ 排ガスから二酸化炭素を取り出す脱炭素・資源循環による持続可能なまちづくり～佐賀県佐賀市～ (<https://furu-con.jp/articles/99>) , (2022.3).
- 29) 環境金融研究機構のホームページ記事：カナダの・カーボン・エンジニアリング社、大気中のCO<sub>2</sub>からガソリンを開発、実用化へ道筋。夢の「炭素フリー」燃料、低価格化が見えてきた (<https://rief-jp.org/ct8/80317>) , (2018.6).
- 30) Audi Japan Press Center：アウディとクライムワークス社が大気中のCO<sub>2</sub>を回収して地下に貯蔵 (<https://www.audi-press.jp/press-releases/2020/b7rqm000000wlb9.html>) , (2020.9).
- 31) 九州大学のプレスリリース：九州大学と双日、分離膜を用い、大気から二酸化炭素を直接回収する技術と その関連技術の社会実装に関する覚書を締結 (<https://i2cner.kyushu-u.ac.jp/ja/news/8029/>), (2022.2)
- 32) 環境金融研究機構のホームページ記事：川崎重工、大気中のCO<sub>2</sub>を直接回収・貯留する「DAC」技術の実証化に取り組み。2025年には実用化を目指す。日本企業のDAC本格取り組みは初めて (<https://rief-jp.org/ct10/120567>) , (2021.12).
- 33) Soichi Kikkawa, Kazushi Amamoto, Yu Fujiki, Jun Hirayama, Gen Kato, Hiroki Miura, Tetsuya Shishido, and Seiji Yamazoe : Direct Air Capture of CO<sub>2</sub> Using a Liquid Amine–Solid Carbamic Acid Phase-Separation System Using Diamines Bearing an Aminocyclohexyl Group, ACSEnviron.Au2022,2,pp.354–362 (2022).
- 34) 日本経済新聞ホームページ：脱炭素へ注目高まる「CO<sub>2</sub>直接回収」新材料で高効率に (<https://www.nikkei.com/article/DGXZQOUC203CM0Q2A520C2000000/>) , (2022.5).
- 35) 野村総合研究所：用語解説 カーボンプライシング([https://www.nri.com/jp/knowledge/glossary/1st/ka/carbon\\_pricing](https://www.nri.com/jp/knowledge/glossary/1st/ka/carbon_pricing)).
- 36) 佐藤みず紀：カーボンプライシングとは？ 海外と日本の動向、課題を解説, 朝日新聞デジタル, (<https://www.asahi.com/sdgs/article/14650075>), (2022.6).
- 37) 環境省：諸外国における炭素税等の導入状況 ([https://www.env.go.jp/policy/tax/misc\\_jokyo/attach/intro\\_situation.pdf](https://www.env.go.jp/policy/tax/misc_jokyo/attach/intro_situation.pdf)), (2017.7).
- 38) 環境省：インターナショナルカーボンプライシング活用ガイドライン ～企業の脱炭素・低炭素投資の推進に向けて～ (<https://www.env.go.jp/content/900440896.pdf>) , (2022.3).

## ABSTRACT

In October 2020, the Japanese government declared that it aims to achieve carbon neutrality by 2050. With this as an opportunity, decarbonization activities have become an important management issue in all industries. On the other hand, the Ministry of Economy, Trade and Industry is promoting the concept of carbon recycling, which treats CO<sub>2</sub> as a carbon resource and reuses it. In response to these trends, this report outlines trends in CO<sub>2</sub> capture/utilization technology and carbon pricing.