

# 太陽光で CO<sub>2</sub> を分離回収し、資源化する

東京理科大学 工学部 工業化学科 准教授 いまほり たつし  
東京理科大学 研究推進機構 総合研究院 カーボンバリュー研究拠点 **今堀 龍志**

## 1. はじめに

気候変動に関する政府間パネル (IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change) は 2021 年から 2023 年にかけて第 6 次評価報告書 (IPCC AR6)<sup>1)</sup> を公表し、気候変動が人間活動に由来する温室効果ガスの影響によって引き起こされていることに疑う余地はないと結論づけています。気候変動を引き起こす地球温暖化を食い止めるためには温室効果ガスの削減が必須であり、特に、産業革命以降の産業活動によって膨大に増え続けている CO<sub>2</sub> の排出の影響が最も大きいことから、大気中の CO<sub>2</sub> を削減する技術の開発が求められています。CO<sub>2</sub> の削減技術の開発に時間的な余裕はありません。気候変動の悪影響を回避するために、世界の平均気温を産業革命以前に比べて 2℃ より十分低く保つ (2℃ 目標) とともに、1.5℃ に抑える努力を追求する (1.5℃ 目標) ことを掲げたパリ協定が採択され (2015 年、気候変動枠組条約第 21 回締約国会議: COP21)<sup>2)</sup>、想定シナリオでは、1.5℃ 目標を達成するには 2050 年までに、2℃ 目標を達成するには 2070 年までに正味の CO<sub>2</sub> 排出量をゼロにするカーボンニュートラルを達成する必要があります<sup>1)</sup>。しかしながら、現状の各国の CO<sub>2</sub> 削減政策を維持しても、これらは達成できない見通しとなっており<sup>1)</sup>、技術開発を加速し、早急に CO<sub>2</sub> 削減を強化していかなければなりません。

## 2. 大気中の CO<sub>2</sub> を削減する技術

大気中の CO<sub>2</sub> を削減するには、CO<sub>2</sub> の排出を緩和する技術、CO<sub>2</sub> を含む排ガスや大気から CO<sub>2</sub> を除去する技術が有効です。さらに、これらを組み合わせた、CO<sub>2</sub> を除去し、除去した CO<sub>2</sub> を資源利用することで CO<sub>2</sub> の排出を緩和するカーボンリサイクル技術が、近年注目を集めています【図 1】。それぞれ、多様な技術開発が進められています。

## 2. 1. CO<sub>2</sub> の排出を緩和する技術

CO<sub>2</sub> の排出を緩和する技術は、化石炭素資源の使用を抑制する技術が該当し、社会実装が進められています。例えば、照明を蛍光灯から LED に変えて省エネ化することで、火力発電所での化石燃料による発電を抑え、CO<sub>2</sub> 排出を緩和できます。また、化石燃料を使用しない太陽光発電や、水素エンジン自動車等も CO<sub>2</sub> の排出を緩和します。エネルギー転換、産業、運輸、家庭等の各分野において、広く省エネ化、再エネ利用、水素利用等を進めることで、大幅に化石炭素資源の使用を減らし、CO<sub>2</sub> の排出を削減することができます。他にも、排熱利用による省エネ化技術やバイオマス利用、アンモニア燃焼等、化石炭素資源の使用を回避する様々な技術開発が進められています。

## 2. 2. CO<sub>2</sub> を除去する技術

CO<sub>2</sub> 排出の緩和技術が広く社会実装されることで、大幅な大気中 CO<sub>2</sub> の削減が見込めますが、CO<sub>2</sub> の排出を緩和する技術によって化石炭素資源の使用を完全に排除し、CO<sub>2</sub> の排出をゼロにすることは困難です。また、火力発電所等の大規模な CO<sub>2</sub> 排出源から、工場やごみ焼却場等の中規模の CO<sub>2</sub> 排出源、さらには自動車等の小規模の CO<sub>2</sub> 排出源まで、多種多様な CO<sub>2</sub> 排出源のすべてに CO<sub>2</sub> 排出を緩和する技術を導入することも困難です。CO<sub>2</sub> 排出の緩和技術だけでは CO<sub>2</sub> の排出を完全にゼロにすることは難しく、残余分の CO<sub>2</sub> 排出量は CO<sub>2</sub> を除去する技術によって削減することが想定されています。国際エネルギー機関 (International Energy Agency: IEA) のレポート<sup>3)</sup> では、将来的に約 2 割の CO<sub>2</sub> 排出が CO<sub>2</sub> を除去する技術によって削減されることが見込まれており、CO<sub>2</sub> を含む排ガスが大気に排出される前に排ガスから CO<sub>2</sub> を分離・回収し除去する技術や、既に大気中に排出された CO<sub>2</sub> を大気から直接分離・回収して除去する技術 (Direct Air Capture: DAC) の開発が進められています。

これらの CO<sub>2</sub> を除去する技術の CO<sub>2</sub> 分離・回収法

として、化学吸収法、物理吸収法、物理吸着法、膜分離等が挙げられます。化学吸収法は、CO<sub>2</sub> 吸収剤が CO<sub>2</sub> と化学的に結合することで CO<sub>2</sub> を分離・回収します。物理吸収法は、溶液への CO<sub>2</sub> の溶解を利用して CO<sub>2</sub> を分離・回収する手法です。物理吸着法は、多孔質吸着剤の空隙に CO<sub>2</sub> を取り込んで CO<sub>2</sub> を分離・回収します。また膜分離は、分離膜前後の CO<sub>2</sub> の濃度差を利用し、選択的な CO<sub>2</sub> の透過によって CO<sub>2</sub> を分離します。それぞれに特徴があり、CO<sub>2</sub> 分離・回収の対象ガスの CO<sub>2</sub> 濃度や分離後の CO<sub>2</sub> に必要とされる CO<sub>2</sub> 純度によって方法が選択されることが想定されています。またそれぞれに開発段階が異なっています。現状では化学吸収法の開発が最も進んでおり、火力発電所等への導入が進められています。

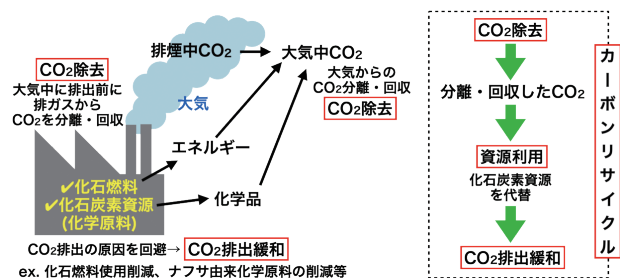
## 2. 3. CO<sub>2</sub> を除去し、資源利用する カーボンリサイクル

CO<sub>2</sub> を分離・回収し、回収した CO<sub>2</sub> を資源として利用するカーボンリサイクルは、部分的な技術として、CO<sub>2</sub> の分離・回収を CO<sub>2</sub> の除去技術として捉えることができます。技術全体としては、化石炭素資源を消費せずに炭素資源を循環させる技術であるため、CO<sub>2</sub> を排出しない CO<sub>2</sub> 排出緩和技術として捉えることができます。例えば、分離・回収した CO<sub>2</sub> を化学品に転換する等、回収した CO<sub>2</sub> を化石炭素資源の使用を回避する資源に転換することで、化石炭素資源の使用を削減し、CO<sub>2</sub> の排出を防ぐことができます。カーボンリサイクルは、CO<sub>2</sub> の除去と排出緩和の両方で二重に CO<sub>2</sub> を削減する有用な技術として捉えることができます。

## 3. CO<sub>2</sub> 削減技術の課題

CO<sub>2</sub> の排出を緩和する技術は、太陽光発電等、実用化が進んでいる身近な技術もありますが、多種多様な技術開発が進められており、開発途上の技術も多い状況です。例えば、水素エネルギーの利用においては、現状の水素製造はほとんどが化石燃料の改質による水素（グレー水素）であり、CO<sub>2</sub> を発生させるためクリーンなエネルギーとは言えません。再生可能エネルギーを利用した水の電気分解等の CO<sub>2</sub> を排出しない低炭素水素が理想的であり、低コストで安定供給が可能な低炭素水素製造技術の開発が求められています<sup>4)</sup>。

CO<sub>2</sub> を除去する技術は、化学吸収法、物理吸収法、



【図 1】大気中 CO<sub>2</sub> の削減技術：CO<sub>2</sub> 排出緩和、CO<sub>2</sub> 除去、カーボンリサイクル

物理吸着法、膜分離の各 CO<sub>2</sub> 分離・回収技術において、加熱や圧力制御といった多くのエネルギーを消費する工程が含まれ、全般にエネルギーコストによる運用コストの増大が実用化の障害となっています。最も開発が進んでいる化学吸収法においても、CO<sub>2</sub> 吸収後に CO<sub>2</sub> を放散させ回収し、CO<sub>2</sub> 吸収剤を再生する段階に加熱が必要であり、現状では運用コストが高くなっています（中～高濃度の CO<sub>2</sub> の分離・回収の運用コストは 4,000～6,000 円/t-CO<sub>2</sub> と試算されています<sup>5)</sup>。低コスト化に向けた省エネ化技術や CO<sub>2</sub> 吸収・放散の効率化の技術開発が盛んに進められています<sup>6)</sup>。省エネルギー技術の開発は、エネルギー生産過程における CO<sub>2</sub> 排出リスクを排除する点でも有効です。また、CO<sub>2</sub> を除去する技術の実用化は、現段階では火力発電所等の大規模 CO<sub>2</sub> 排出施設における化学吸収法の導入がほとんどであり、非常に大型の設備になっています。小規模 CO<sub>2</sub> 排出施設も含めた多様な CO<sub>2</sub> 排出施設への分散型の導入を実現し、技術を普及させるためには、装置のコンパクト化が必須であり、この点からも効率的な CO<sub>2</sub> 分離・回収技術の開発が重要となります。

CO<sub>2</sub> を除去し、資源利用するカーボンリサイクルの技術は、上記の CO<sub>2</sub> 除去技術の課題とともに、CO<sub>2</sub> の資源利用の課題も伴います。炭酸水、ドライアイス、植物施肥といった分離・回収した CO<sub>2</sub> をそのまま利用する技術は、基礎的な技術の課題は少なく、実用化は比較的容易ですが、コンクリート原料や化学品、合成燃料等といった資源に CO<sub>2</sub> を転換する技術には、CO<sub>2</sub> の変換技術を開発する必要があります。容易ではありません。特に化学品や合成燃料への化学的な CO<sub>2</sub> の転換は、反応性の低い CO<sub>2</sub> を変換する化学反応自体が少なく、CO<sub>2</sub> 変換反応そのものの開発が必要であり、さらにそれらは効率のかつ省エネの CO<sub>2</sub> 変換反応であることが求められます。例えば、分離・回収した CO<sub>2</sub> を医薬品原料やプラスチック原料等の機能性化学品に転換する技術は、現状ではポリカーボネートやウレタン等の含酸素化学品への転換技術に限られ、多彩

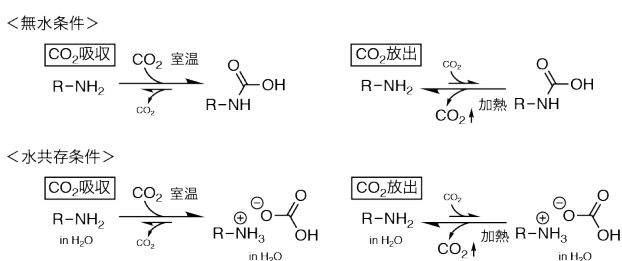
な機能性化学品のカーボンリサイクルには対応できていません<sup>5)</sup>。多彩な機能性化学品への転換を実現する多様な CO<sub>2</sub> 変換反応の開発が必要です。

#### 4. 太陽光を利用する高効率・省エネカーボンリサイクル技術の開発

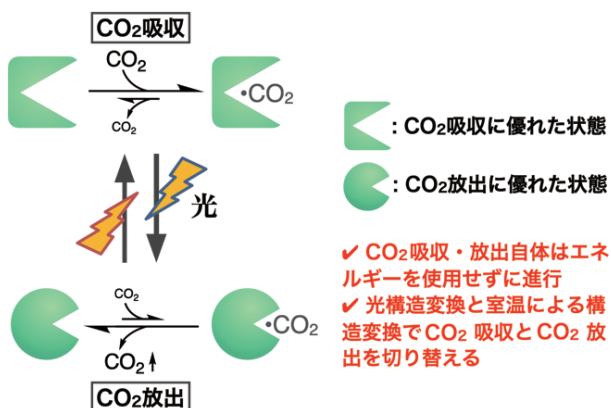
CO<sub>2</sub> を含む排ガスや大気から CO<sub>2</sub> を分離・回収し、回収した CO<sub>2</sub> を多彩な機能性化学品に転換するカーボンリサイクルは、CO<sub>2</sub> の除去と CO<sub>2</sub> の排出緩和による二重の CO<sub>2</sub> 削減を広く適用できるため、実用化に適しており、我々はその課題を克服する技術開発に取り組んでいます。CO<sub>2</sub> 分離・回収技術のエネルギー消費の課題は、再生可能エネルギーである太陽光を利用した技術開発によって克服できます。回収した CO<sub>2</sub> の資源利用には、多彩な機能性化学品に展開可能な有用化合物の炭素骨格を構築する CO<sub>2</sub> 変換反応を開発しています。また、その反応も太陽光を利用した触媒反応であり、高効率・省エネの CO<sub>2</sub> 変換反応としています。

#### 4. 1. 太陽光を利用する CO<sub>2</sub> 化学吸収法的设计開発

最も開発が進められているアミンを CO<sub>2</sub> 吸収剤に用いる CO<sub>2</sub> 化学吸収法【図 2】では、アミンと CO<sub>2</sub>



【図 2】一般的なアミン CO<sub>2</sub> 吸収剤による CO<sub>2</sub> 化学吸収法

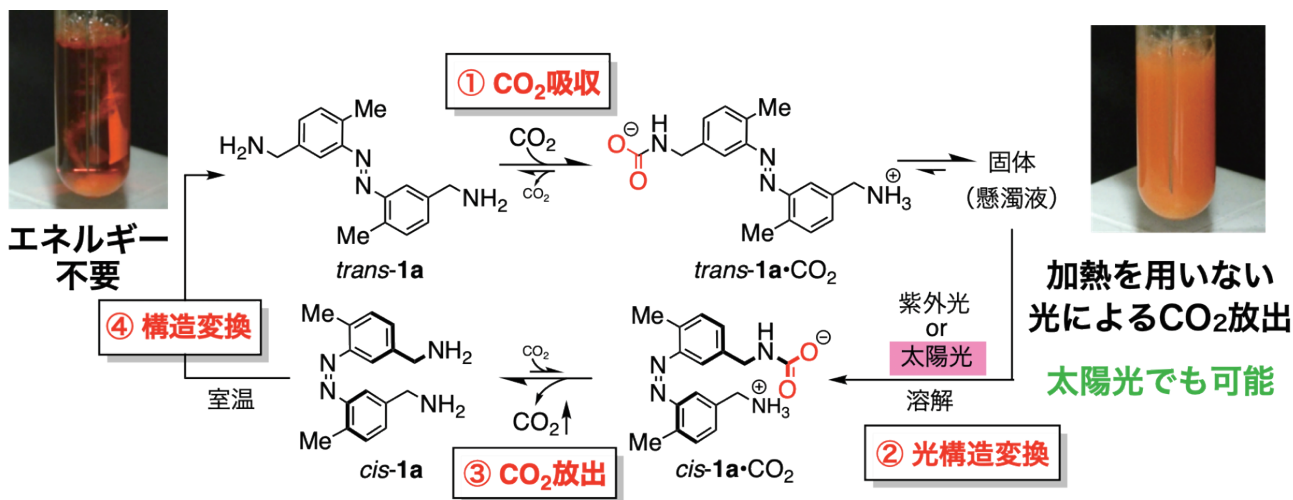


【図 3】光による CO<sub>2</sub> 化学吸収法 の概念図

が化学結合を形成することで CO<sub>2</sub> を吸収します。この CO<sub>2</sub> 吸収反応は、逆反応の CO<sub>2</sub> 放出反応との可逆的な平衡反応となっており、一般に CO<sub>2</sub> 吸収能の高いアミンを用いるため、CO<sub>2</sub> 吸収側に平衡が偏ります。一方で、CO<sub>2</sub> 吸収後、CO<sub>2</sub> を放散させ回収し、CO<sub>2</sub> 吸収剤を再生させる段階では、進行しづらい逆反応の CO<sub>2</sub> 放出反応を進行させるためエネルギーが必要であり、加熱が行われます。この加熱を排除することで、省エネ化が実現できますが、CO<sub>2</sub> 吸収と CO<sub>2</sub> 放出が逆反応の裏表の関係にあり、CO<sub>2</sub> 吸収能と CO<sub>2</sub> 放出能がトレードオフされるため、加熱なしで CO<sub>2</sub> 放出が進行するアミンは CO<sub>2</sub> 吸収が苦手であり、CO<sub>2</sub> 吸収効率が下がってしまいます。つまり、一般的なアミン CO<sub>2</sub> 化学吸収法では、省エネ技術の開発は困難ということになります。

そこで我々は、CO<sub>2</sub> 吸収と CO<sub>2</sub> 放出をそれぞれ CO<sub>2</sub> 吸収剤の別の状態で行うことを考案しました【図 3】。CO<sub>2</sub> 吸収は CO<sub>2</sub> 吸収が得意な状態で、CO<sub>2</sub> 放出は CO<sub>2</sub> 放出が得意な状態で行うことで、これらは別々の反応であり、逆反応になりませんので、それぞれが独立してエネルギーを投入せずとも速やかに進行します。ただし、それらの状態を切り替える仕組みが必要で、そこにはエネルギーが必要になります。その CO<sub>2</sub> 吸収剤の状態変換を光による構造変換によって行い、加熱を用いませぬ。光には再生可能エネルギーである太陽光を用い、省エネの CO<sub>2</sub> 吸収・放出を実現します。

そのような光構造変換を実現するアミン CO<sub>2</sub> 吸収剤として、光構造変換するアゾベンゼンを組み込んだ **1a** を設計開発しました【図 4】<sup>7)</sup>。非常に興味深いことに、*trans*-アゾベンゼン体である *trans*-**1a** は CO<sub>2</sub> と速やかに反応し、CO<sub>2</sub> 吸収体であるカルバミン酸体 (*trans*-**1a**•CO<sub>2</sub>) を形成して析出することがわかりました【図 4-①】。また、その CO<sub>2</sub> 吸収体の懸濁液に紫外光を照射することで *trans*-アゾベンゼン体から *cis*-アゾベンゼン体への光構造変換が起こり【図 4-②】、固体が溶解するとともに CO<sub>2</sub> が放出されることがわかりました【図 4-③】。CO<sub>2</sub> 放出後、室温で一定時間放置することで *cis*-**1a** から *trans*-**1a** に戻り【図 4-④】、CO<sub>2</sub> 吸収と CO<sub>2</sub> 放出を繰り返すことができます。また、光による CO<sub>2</sub> 放出は紫外光照射よりも時間がかかるものの、太陽光 (擬似太陽光, 1sun) 照射によっても可能であり、太陽光の直接利用のみによる CO<sub>2</sub> 分離・回収を実現することができます。



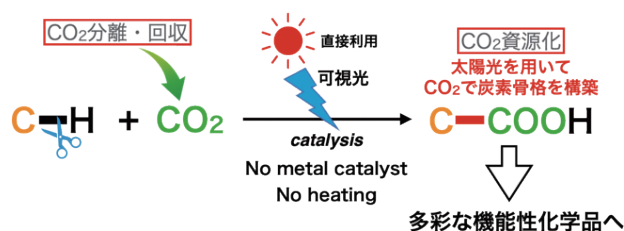
【図4】 光によるCO<sub>2</sub>化学吸収法

一般的な加熱を用いるCO<sub>2</sub>化学吸収法では、全体の運用コストに占める投入熱エネルギーのコストが大きく、中～高濃度のCO<sub>2</sub>の分離・回収では2.5～5割以上<sup>8,9)</sup>、DACでは8割程度<sup>10)</sup>と試算されています。入手容易で安価な再生可能エネルギーである太陽光のみを利用する我々のCO<sub>2</sub>化学吸収法では、この熱エネルギーのコストを省くことができるため、低コストのCO<sub>2</sub>化学吸収法を実現できると期待されます。

#### 4. 2. 太陽光を直接利用するCO<sub>2</sub>変換・資源化

太陽光を用いて分離・回収したCO<sub>2</sub>を高効率・省エネで多彩な機能性化学品に資源化する手法として、太陽光を用いたCO<sub>2</sub>によるC-C結合形成反応の開発を行っています【図5】。C-C結合の形成によって有用化合物の炭素骨格を構築し、多彩な機能性化学品に誘導することで、分離・回収したCO<sub>2</sub>の機能性化学品へのカーボンリサイクルを広く展開できます。また、太陽光をエネルギーとすることで、省エネ・低コストのCO<sub>2</sub>資源化を実現します。

現在我々は、可視光酸化還元触媒を用いたCO<sub>2</sub>を原料とするC-C結合形成反応の開発を行っており、常温・常圧下、希少金属触媒を用いない省エネ・省資源の炭素骨格構築を実現しています<sup>11)</sup>。生成するカルボン酸誘導体は、多彩な機能性化学品に誘導することができます。他にも、太陽光を用いたCO<sub>2</sub>によるC-C結合形成反応の開発を進めています。



【図5】 太陽光を用いるCO<sub>2</sub>によるC-C結合形成反応

### 5. おわりに

現状のままでは、2100年の世界の平均気温が産業革命以前から約3.2℃上昇し、地球環境が大幅に悪化することが予想されています<sup>1)</sup>。CO<sub>2</sub>削減技術の開発に時間の猶予はなく、地球温暖化を食い止める省エネ・低コスト・分散型の革新的なCO<sub>2</sub>削減技術を早急に開発し、普及させる必要があります。我々の太陽光を利用するカーボンリサイクル技術の開発を加速し、実現を目指します。

#### 【参考文献】

- 1) Intergovernmental Panel on Climate Change 6<sup>th</sup> assessment report, 2021-2023.
- 2) The Paris Agreement on Climate Change, 2015.
- 3) Energy Technology Perspectives 2020, International Energy Agency.
- 4) 水素基本戦略, 2023年6月9日改訂, 閣議決定.
- 5) カーボンリサイクルロードマップ, 2023年6月改定, 経済産業省.
- 6) U. Khan *et al.* Carbon Capture Sci. Technol. 2023, 8, 100125.
- 7) 今堀龍志, 本山涼, 特許第746621号.
- 8) エネルギー・環境技術のポテンシャル・実用化評価検討会報告書, 2019年6月, 経済産業省, 文部科学省.
- 9) 前田基秀ら, 神戸製鋼技法, 2020, 70, 69.
- 10) M. Fasihi *et al.* J. Clean Production 2019, 224, 957e980.
- 11) S. Uno, T. Imahori, manuscript in preparation.