

# 巻頭言

## Preface

東京科学大学 (旧 東京工業大学) 総合研究院  
ゼロカーボンエネルギー研究所  
教授 村上 陽一



## 気候変動、GXの潮流とCO<sub>2</sub>分離回収における熱学理の重要性

欧州連合の気象機関は2024年6月、世界の平均地上気温が12か月間連続(2023年6月~2024年5月)で月別温度の最高記録を更新し続け、その12か月間の平均が産業革命前の平均温度を1.63℃上回ったと報じた<sup>1)</sup>。これはパリ協定の世界の平均気温上昇を産業革命前以前の1.5℃以内に抑えるという努力目標<sup>2)</sup>を超えている。近年の気候変動は世界規模で災害<sup>3)</sup>、飢餓<sup>4)</sup>、健康被害<sup>5)</sup>を引き起こしている。温暖化による気候災害の激甚化は我が国でも顕在化している<sup>6)</sup>。

大気中の二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)濃度上昇が地球温暖化に寄与すること(真鍋淑郎, ノーベル物理学賞2021)、及び大気中のCO<sub>2</sub>濃度上昇が主に人為起源であることは科学的に証明されている<sup>7,8)</sup>。現在、大気中のCO<sub>2</sub>濃度の上昇は一層加速している<sup>9)</sup>。現在の世界の年間CO<sub>2</sub>排出量は約400億トンと見積もられる中、日本は年間約10億トンのCO<sub>2</sub>を排出している<sup>10)</sup>。

グリーントランスフォーメーション(GX)とは「化石燃料中心の経済・社会、産業構造をクリーンエネルギー中心に移行させ、経済社会システム全体の変革すること」<sup>11)</sup>である。政府は2020年の「2050年カーボンニュートラル宣言」以降、最近、GX推進法、GX脱炭素電源法、水素社会推進法、二酸化炭素の貯留事業に関する法律(CCS事業法)等でGX推進を加速している<sup>12)</sup>。また、GX推進の金融支援制度を整えつつ、GXリーグを2023年に開始してカーボンプライシング制度の確立を本格化している<sup>12)</sup>。これらのことは、今後規模の大小によらずCO<sub>2</sub>排出の経済への組み込みが本格化することを意味している。

経済原理は社会の動機理由なので、ある手段がもたらすCO<sub>2</sub>削減量の多少によらずインセンティブが伴うのは合理的である。しかし、その本来の目的は冒頭で述べた気候変動対策であり、そこで問題となっている排出量は年間100億トンとか10億トンというオーダーであるという事は常に留意されるべきであろう。CO<sub>2</sub>有効利用は方向として排出削減につながり、経済インセンティブの面でも合理性をもつが、10億トンとは現在の日本の主要な化成品の生産量より何桁も大きな量である。地域局所で見ても、一般に、火力発電所や製鉄所は一事業所あたり年間1000~2000万トン程度ものCO<sub>2</sub>を排出している。

カーボンニュートラル達成には、日本の最終エネルギー消費の大半が非電力用途という点<sup>13)</sup>を踏まえても、脱炭素化が困難な分野での排出削減が鍵となる。そのような分野で引き続き化石燃料を使用しつつ量的な排出削減を図るには、CO<sub>2</sub>を回収し地下貯留するCCSが不可欠である<sup>12)</sup>。活発化しつつあるCCSの事業推進<sup>14)</sup>により、CCSは気候変動に対し量的な排出削減効果をもつ現実的な解に育ってゆくであろう。貯留地に加え問題となるのは、CCSコストの半分程度を占めると予想されるCO<sub>2</sub>の分離回収コスト<sup>15)</sup>である。現在、比較的大きなCAPEX(Capital Expenditure, 資本的支出, 設備費等)を要するアミン水溶液を用いた化学吸収法に加え、多くの方式が研究開発段階にある。OPEX(Operational Expenditure, 運営的支出)部分では、CO<sub>2</sub>の吸収液・吸着材の更新費や設備の維持費に加え、捕獲したCO<sub>2</sub>を材料から引きはがす工程(=再生工程)において必要となる投入エネルギーのコストが主要部分となる。

しかし、このエネルギーコストの支配原理(=熱力学)が政策立案者や事業者、或いは研究者にさえ、よく理解されているとは言い難い現状がある。例えば、大気中の0.04%という極希薄なCO<sub>2</sub>を分離回収する場合(Direct Air Capture, DAC)は、CO<sub>2</sub>への選択率を高めるためCO<sub>2</sub>への反応熱(液体の場合)や吸着熱(固体の場合)が高い材料を用いる必要があり、DACでは再生工程においてより大量の熱エネルギーの投入、OPEXを要する。熱力学の理論限界かつ「室温での等温過程による準静的分離」という最も理想的な場合においてさえ再生には1トンのCO<sub>2</sub>あたり0.5GJのエネルギー投入が必要であり<sup>16)</sup>、現実にはその10倍を超えるエネルギー投入が必要になろう。

また、小さいデモ機ではCO<sub>2</sub>脱離時の吸熱で吸着材や吸収液の温度が低下しても「周囲からの気づか

ない熱侵入」によってその温度低下が防がれるため、アーティファクトとして脱離デモが出来てしまう。しかしこれはスケールアップ時に破綻する。円筒の表面積と断面積の比は直径に反比例し、かつ伝熱学が教えるように（円筒座標系では少し違うが）熱拡散距離は時間の平方根に比例するため、脱離とともに材料が冷えてさらなる脱離が抑制され、対策として熱源の設置が必要となり、結局原理上必要なエネルギー投入が必要になるからである。逆の吸着過程についても、「温度低下」を「温度上昇」に読み替えて、スケールアップ時には同様なことが起こる。このような小規模な実験装置だからこそ成立しているアーティファクトは学術論文や一般向けのデモ実験でもよく見受けられ、投資家や市民などの判断を誤らせることになりかねない。脱離時にキャリアガスを流してあげればそれは（濃縮ではなく）希釈になっているし、そのキャリアガスが「材料の温度低下を防いでいる隠れた熱源」になっている。CO<sub>2</sub>分離回収に限らず、エネルギーに係るGXの効果的推進には大学教育のレベルを上げ、産業人や経済人を含む広い人材に対して根本で現象を支配する熱の学理（熱力学や伝熱学）の啓発を行ってゆくことが肝心である。

GX・脱炭素を進めるには、エネルギー安全保障確保と経済成長を狙う視座に加え、その本来の目的が気候変動抑止であるので、本質的に莫大なCO<sub>2</sub>排出削減が必要であることを留意する視座が必要である。限られた政府、企業、投資機関等の予算が適切に分配され使用されるためにも、効果の評価の基礎をなす熱の学理が今後一層重要になるだろう。有効なGX・脱炭素の推進には、このような視点を踏まえたシステムや材料の研究開発が望まれる。

## 文 献

- 1) 欧州機関 (EU) コペルニクス気候変動サービス ニュースリリース (2024年6月6日)  
<https://climate.copernicus.eu/may-2024-marks-12-months-record-breaking-global-temperatures>
- 2) 環境省 令和4年度版環境白書 第1章  
<https://www.env.go.jp/policy/hakusyo/r04/html/hj22010101.html>
- 3) 世界気象機関 (WMO) 報告書 Provisional State of the Global Climate in 2023 (2023年11月30日)  
<https://wmo.int/files/provisional-state-of-global-climate-2023>
- 4) 国連世界食糧計画 (WFP) サイト Climate action (2024年7月6日参照)  
<https://www.wfp.org/climate-action>
- 5) 世界保健機関 (WHO) Fact sheet—Climate change (2023年10月12日)  
<https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/climate-change-and-health>
- 6) 国土交通白書 2022 序章  
<https://www.mlit.go.jp/hakusyo/mlit/r03/hakusho/r04/pdf/np100000.pdf>
- 7) IPCC 第6次評価報告書 第1作業部会発表 (2021年) 第1章及び第3章  
[https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC\\_AR6\\_WGI\\_Chapter01.pdf](https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_Chapter01.pdf)  
[https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC\\_AR6\\_WGI\\_Chapter03.pdf](https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_Chapter03.pdf)
- 8) 英国王立協会サイト Climate change—Evidence and causes (2024年7月6日参照)  
<https://royalsociety.org/news-resources/projects/climate-change-evidence-causes/>
- 9) 米国海洋大気庁サイト Trends in Atmospheric Carbon Dioxide  
<https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/>
- 10) 環境省 ニュースリリース (2024年4月12日)  
[https://www.env.go.jp/press/press\\_03046.html](https://www.env.go.jp/press/press_03046.html)
- 11) 内閣官房 GX 実行会議ホームページ (2024年7月6日参照)  
[https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/gx\\_jikkou\\_kaigi/index.html](https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/gx_jikkou_kaigi/index.html)
- 12) 第11回GX実行会議 齋藤GX実行推進担当大臣兼経済産業大臣提出資料 (2024年5月13日)  
[https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/gx\\_jikkou\\_kaigi/dai11/siryoul.pdf](https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/gx_jikkou_kaigi/dai11/siryoul.pdf)
- 13) 資源エネルギー庁 総合エネルギー統計 令和4年度エネルギー需給実績 (2024年4月12日)  
[https://www.enecho.meti.go.jp/statistics/total\\_energy/pdf/honbun2022fykaku.pdf](https://www.enecho.meti.go.jp/statistics/total_energy/pdf/honbun2022fykaku.pdf)
- 14) 経済産業省 ニュースリリース (2024年6月28日)  
<https://www.meti.go.jp/press/2024/06/20240628011/20240628011.html>
- 15) H. Isogai, C. A. Myers, T. Nakagaki, Mechanical Engineering Journal, vol. 9, p. 22-00028 (2022).  
<https://doi.org/10.1299/mej.22-00028>
- 16) 村上陽一 東京工業大学オープンキャンパス 2023 模擬講義 (2023年11月24日)  
<https://youtu.be/9u3-jzXUtVg>