ネット・ゼロ排出に向けたエネルギー需給システムの展望

エネルギー総合工学研究所 加藤 悦史

パリ協定の長期目標である世界的なネット・ゼロ排出達成に必要なエネルギーシステムの転換に重要となる技術について概説した。その目標であるネット・ゼロ排出とは、人為的な温室効果ガスの排出を、人為的な温室効果ガスの吸収も利用して正味でゼロにすることを意味している。ゼロ排出化が困難であるセクターを挙げ、そのセクターにおける技術オプションの可能性、さらにはどうしても避けられない排出をオフセットするため、あるいは、正味炭素排出を負とする場合に必要とされるネガティブエミッション技術のオプションを解説した。

KEYWORDS: *Paris Agreement, Energy Systems, Net Zero Emissions, Negative Emissions Technologies*

I. パリ協定とネット・ゼロ排出

1. パリ協定とネット・ゼロ排出目標

2015 年に開かれた国連気候変動枠組み条約 (UNFCCC) 第 21 回締結国会議 (COP21) においてパリ協定が採択され、その後の各国の速やかな批准により 2016 年 11 月に発効がなされた。この協定では、産業革命以前からの地球の平均気温上昇を 2℃より十分低く保つとともに、1.5℃に抑える努力を追求することを長期的な気温目標としている (第 2 条 1 項)。また、気温目標の達成のため、出来る限り早期に世界の温室効果ガスの排出量をピークアウトし、今世紀後半には人為的な温室効果ガスの排出と吸収による除去の均衡を達成することを緩和に関する長期目標としている (第 4 条 1 項)。この長期目標は、気候変動に関する政府間パネル (IPCC) 第 5 次報告書 (2014) の科学的知見、つまり気温上昇を 21 世紀にわたって 2℃未満に維持できる確率が 66%以上である排出シナリオと整合的なものとなっている。さらに 2018 年に公表された IPCC 1.5℃特別報告書では、1.5℃および 2℃の気温上昇が起きた場合の影響およびリスクの違いを評価し、1.5℃に抑えるための排出経路の類型も分析している。1.5℃特別報告書の政治的な位置づけは各国の状況によって異なるものの、2019 年 9 月の国連気候行動サミットにおいては、1.5℃目標を念頭におき、今世紀半ばまでにネット・ゼロ炭素排出を達成する

ことを長期戦略とすることを公表した国は 65 カ国に上った。ただし、いずれの温度目標にせよ、世界全体の平均気温の上昇を安定化させるためには、将来的に CO₂ 排出量がネット・ゼロに向かう必要があり、場合によってはその後にネット・ネガティブの CO₂ 排出量が求められることになる。

このように、政治的な長期目標として温室効果ガスあるいは CO₂ 排出量をネット・ゼロすることが潮流となりつつあるが、世界的かつ長期的なネット・ゼロ排出の達成には、エネルギーシステム全体の大きな転換が必要となる。これまで検討されてきた低炭素化に向けたエネルギーシステムへの転換では、発電部門では再生可能エネルギー利用・化石燃料利用と炭素回収貯留 (CCS) 利用・原子力利用といった方策、需要部門では電化促進および省エネルギー、産業部門では生産プロセスの変更など、部門ごとの個別検討が主であった。しかし、エネルギーシステム全体でのネット・ゼロ排出達成のためには、システム全体での統合した低排出エネルギーキャリアやエネルギー貯蔵の利用といった転換に加え、排出削減が非常に難しい部門 (炭素を材料とする素材生産部門、運輸部門のうち長距離輸送・船舶・航空、農業部門など) からのどうしても避けられない排出をオフセットすることが必要となり、大気中から CO₂ を取り除く技術、いわゆるネガティブエミッション技術の考慮も必要となる。

2. ネット・ゼロ排出達成に必要なエネルギーシステム

エネルギーシステムのネット・ゼロ排出に向けた転換

Perspectives on energy supply and demand systems toward net-zero emissions : Etsushi Kato.

(2019 年 10 月 31 日 受理)

の検討において、Davis ら¹⁾は、排出削減が難しいセクターとして、負荷追従可能な発電、鉄鋼およびセメント産業、船舶輸送、航空、そして長距離輸送トラックなどの大型運輸を挙げている。

まず運輸部門に関してしてみると、乗用車に関しては電気自動車あるいは燃料電池自動車と比較的に現状のシステムからの変更が可能となるであろう。しかし、長距離輸送トラック、船舶、航空機では貨物や旅客の容量確保や重量の制約により蓄電池などの利用が厳しく、重量あたりのエネルギー密度が高いカーボンニュートラルあるいは低炭素なエネルギーキャリアの利用が将来においても必要となる。もちろん自動運転化や運輸の分散化によって、需要側での低炭素化も期待できるが、それでもエネルギー密度の高い液体燃料利用は長距離輸送にとって有利となる。これらの候補として、水素キャリアとしての液化水素、高圧水素、アンモニアなど、正味で低炭素排出となりえる炭化水素液体燃料としてはバイオ燃料、合成燃料が挙げられる。合成燃料に関しては、原料の炭素として大気中から回収した二酸化炭素を利用し、かつ合成燃料製造プロセスにおいて非化石燃料によるエネルギーを利用した場合にはカーボンニュートラルな燃料となり得る。このような水素キャリアおよび合成燃料製造プロセスにおいては、二酸化炭素を排出しない水素製造コストの低下がいずれにとっても大きな技術課題となる。この点において、ゼロ排出かつ低コストである電力の利用が鍵である。また、電力システムにおいても変動性再生可能エネルギーのエネルギー貯蔵として、水素および合成燃料製造には大きな役割もあり、運輸部門と発電部門のシステム協調といった面でも重要なオプションといえる。

次に、産業部門での鉄鋼、セメントといった素材生産部門をみえる。鉄鋼においては、高炉において鉄鉱石の還元のためにコークスが用いられ、その過程でCO₂が排出される。さらに高温熱が必要とされるため化石燃料由来のエネルギーが利用される。鉄鋼部門の低炭素化はこれまでも多く検討がなされてきたが、ゼロ排出に向けた鉄鋼産業の検討は、スクラップ利用の電炉利用以外は一般にハードルが高い。ただし、高炉によらない鉄鉱石の直接還元も検討がなされており、化石燃料由来の炭素を使わない直接水素還元製鉄、電気分解(溶融酸化物電気分解)による還元製鉄の実証も始まりつつある。セメント製造におけるCO₂排出は、炭酸カルシウムの煅焼プロセスにより約6割、キルンへの高温熱供給のための化石燃料利用による排出が残りの約4割となっている。現在のセメント製造プロセスにおいて、炭酸カルシウムの煅焼は必須であるため、この分野のゼロ排出化を行うには排出ガスのCO₂分離回収が重要となる。セメント製造における排出ガスのCO₂濃度は、化石燃料発電の排気ガスよりも比較的高いため、回収コストの面か

らも有利であるといえる。また、セメントはその利用のライフサイクルにおいてCO₂を吸収するため、熱源のゼロ排出化と硬化時におけるCO₂有効利用などを組み合わせることによってゼロ排出に近づける検討もされている。

負荷追従可能な電力、つまり非常に信頼性の高い電力は現代の文明に必要な不可欠な要素である。太陽光発電、風力発電といった変動性再生可能エネルギーの割合が増えるにつれ、負荷追従可能な電力の重要性は当然高くなる。一般にガスカービンによる柔軟な発電により負荷追従が行われ、また、揚水発電などエネルギー貯蔵や原子力発電の負荷追従運用も重要な要素となる。さらに需要側のエネルギーマネジメントの統合も必要となる。供給側の柔軟な負荷追従技術は、その設備利用率が非常に低くなるため、ゼロ排出化に向けては経済性の検討が最も重要である。そのため、蓄電池の新技術、電力を水素や合成燃料として貯蔵する技術など、蓄エネルギー技術の低コスト化、スケールアップ、およびCCS技術の柔軟性対応といった技術課題も大きい。その他の蓄エネルギー技術としては、圧縮空気を利用したエネルギー貯蔵(CAES)システムや蓄熱発電の技術なども蓄エネルギー必要期間に応じた利用も期待されている。

II. ネガティブエミッション技術

1. ネガティブエミッション技術とは

今世紀後半、あるいは2050年でのネット・ゼロ排出達成には、上述したエネルギーシステム全体での大幅な転換とともに、排出削減が難しい部門からの排出量を打ち消すために、さらにはより野心的な温度上昇抑制目標に対応するために、大気中からCO₂を取り除く必要がある^{2,3)}。IPCC 1.5℃特別評価報告書に示された代表的な4つの排出経路では、その必要量は社会イノベーションの度合いによって異なるとしているが、緩和・適応の観点から中位的な社会経済シナリオでは21世紀末に約16 GtCO₂ yr⁻¹、気温上昇のオーバーシュートを許容する(一時的に目標温度を超えることを許容するが21世紀末には1.5℃目標に抑える)シナリオでは約24 GtCO₂ yr⁻¹、イノベーションによりエネルギー需要を極端に抑える社会シナリオでも約5 GtCO₂ yr⁻¹の年間CO₂除去量となっている。大気中からCO₂を除去あるいは隔離するために検討されている技術として、陸域生態系を活用する「大規模植林」、「農地土壌への炭素蓄積増加」、陸域生態系と工業的技術の複合による「バイオエネルギー利用によるCCS(BECCS)」と「バイオ炭」、工業的技術による「直接空気回収(DAC)によるCCS」、鉱物を利用した「風化促進」および「鉱物化」、海洋生態系を利用した「海洋肥沃化」、海洋による化学反応を利用した「海洋アルカリ化」、沿岸生態系の回復を利用した「ブルーカーボン」などが挙げられる。これらの技術はその炭素隔離時

間の違いによって、生態系に十年から100年のオーダーで一時的に大気中のCO₂を移動するものと、地質・鉱物的により長い時間スケールで炭素を隔離するものに分類することができる。前者としては、大規模植林、土壤炭素蓄積、海洋肥沃化、ブルーカーボンがあり、後者としては、BECCS、バイオ炭、DAC、風化促進、海洋アルカリ化に分けることが可能であろう。

それぞれの技術は直接的あるいは間接的にエネルギーシステムに関わるものがあり、エネルギーシステムへの統合の検討も必要となる。例えばBECCSはバイオエネルギーを発電に利用するとともに排気ガスからCO₂を回収するシステム、あるいは、液体およびガス燃料をバイオマスから転換製造するプロセスにおいてCO₂を回収し隔離するシステムであり、ネガティブエミッションを実現する上でエネルギーサービスも供給する。バイオ炭もバイオマスから炭を製造する上で熱供給が可能な技術である。逆にDACシステムは大気中のCO₂を分離回収するために、外部の電力・熱といったエネルギーを大量に利用する技術となる。その他にも、ライフサイクルでのエネルギー分析が重要であり、例えばBECCS、バイオ炭ではバイオマスの運搬、風化促進では岩石の採掘、粉碎、運搬といったプロセスでのエネルギー利用や排出の考慮が必要となる。また、持続可能性の観点から、水・エネルギー・食料のネクサスの考慮が特に陸域生態系が関与するネガティブエミッション技術では重要となる。

これらネガティブエミッション技術は現在大規模に利用されていない技術であるため、そのポテンシャルと実現可能性の精査、およびスケールアップとコスト低下に向けた研究開発、実証、さらには社会実装に向けた政策展開が今後10年で急務となっている。全米アカデミーズ(National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine)は、2019年に「ネガティブエミッション技術と信頼できる隔離：研究課題」^[4]と題した報告書を出版した。この報告書では、現状での各技術による大気中CO₂の除去ポテンシャルとその制約、およびコストをまとめ、必要な研究分野の特定と研究開発につき込むべきリソースに関し提言を行っている。その中で、現状のポテンシャルとコストに関しては次のようにまとめている。

- 1) 土地利用に基づく4つの技術(再植林、森林管理、農耕方法変更による土壤蓄積増加、BECCS)は、現時点においても広範囲に実施可能で緩和戦略としてもコスト的にも見合う。
- 2) ただし土地利用に基づく技術は、食料生産や生物多様性への悪影響をもたらさないレベルでの実施が必須であり、その制約の中ではこれらの技術だけでは世界全体で10 GtCO₂ yr⁻¹といったパリ協定達成に必要なCO₂除去量に達しない。
- 3) DACと鉱物化のCO₂除去ポテンシャルは大きく、革

新的な技術となりえる。前者はコスト低下が課題、後者はメカニズムの解明も必要。

- 4) ブルーカーボンによるCO₂除去ポテンシャルは他のネガティブ技術と比較すると小さい。ただし生態系回復や沿岸域の気候変化への適応といった面からの実施が期待されるため、CO₂除去の観点からは低コストとなりえる。

このように、副作用をもたらさないレベルでの陸域生態系利用と、DACや風化促進・鉱物化の研究開発によるスケールアップが重視されてきており、今後は地域ごとに適したネガティブエミッション技術の実施に向けたポートフォリオを探索することが必要である。一方、海洋を利用したネガティブエミッション技術の可能性に関しては、実態の把握が遅れているため、今後も基礎的な研究の継続が必要であろう。

2. DACの研究開発動向

米国アカデミーズの報告書でも見たように、単一のネガティブエミッション技術、特に陸域生態系を利用した技術のみを利用した場合の問題点に対する指摘の増加とともに、化学工学的に大気中のCO₂を直接回収するDAC技術に対する期待が高まりつつある。DACは潜水艦や国際宇宙ステーションのような特定の分野で用いられる技術であったが、現在は数社のベンチャー企業も設立され、研究開発および商用化(図1)も進みつつある⁵⁾。

ただしCO₂の現在のマーケットは非常に小さく、DACによって回収されたCO₂は温室での植物栽培向け、あるいは炭酸飲料水向けなどに少量利用されているのみであった。しかし最近になり、Power-to X (P2X)として合成燃料製造に向けたDAC実証設備の製造や、石油増産に向けたCO₂利用(CO₂-EOR)向けの大規模設備建設が予定され始めた。DACの今後の動きとしては、こういった低炭素燃料製造でのDAC利用の増加とコスト低下と、クレジット等インセンティブの付加によるDACで回収されたCO₂の地質的および鉱物的隔離によ

図1 Climeworks社DAC商用設備

るネガティブエミッション技術としてのスケールアップが望まれる。現状でも、米国のCO₂回収貯留に関する税額控除45Qや、カリフォルニア州の低炭素燃料規制(low-carbon fuel standard: LCFS)がDACをクレジットするなど、経済的に成り立つDACの条件も整備されつつあるが、CO₂除去量の定量化に関する標準化など、ガバナンスに向けた動きの加速も必要である。

現在商用化されているDAC技術は、化学吸収液システムと固体吸着材システムに大きく二分される。化学吸収液システムは既存の工業プロセスがベースであり、強塩基性の水溶液を大気と接触させCO₂を回収し、さらにCa(OH)₂水溶液と混合することにより炭酸カルシウムとして取り出す。ただし炭酸カルシウムからCO₂を分離するための煅焼に900℃程度の高温の熱を必要とする点で大きなエネルギーが必要となる。一方、固体吸着材システムでは、広範囲な材料が研究されているが、商用化されている設備ではアミン材料が用いられているものが多い。固体吸着材システムでは、CO₂の吸着と再生に加熱・冷却を用いるものと乾燥・湿潤を用いるものがあるが、どちらも70~100℃程度の比較的低温な熱を利用するため、システムとして排熱利用可能でありエネルギーコストが低い。材料開発のさらなる進展とスケールアップが必要である。

Ⅲ. おわりに

世界的なネット・ゼロ排出に向けた必要性の理解と政治的目標の形成がなされつつある中、エネルギーシステム全体のゼロ排出化実現の困難さとそれを克服するための技術展望を概観した。このような転換に向けては、ゼロ排出電力とエネルギー貯蔵システムの統合、需要側の可能な限りの電化とエネルギーマネジメント、素材産業での新規プロセスや素材開発およびCO₂再利用による素材製造とCCSの活用、大型運輸でのゼロ排出水素キャリアやバイオマス利用も含むCO₂循環を通した低炭素燃料の拡大が鍵になると考えられる。また、このような大幅な排出削減技術の実装に並行して、ネガティブエミッション技術のスケールアップも必要となる。

現実には、現在利用可能な技術に関しても、コスト的

および制度的な課題により社会実装へのバリアが大きく存在している。さらに排出削減がどうしても困難なセクターにおいては、社会および技術イノベーションによる新規技術の展開が必要であり、イノベーションを通じたコスト低下と利用可能なオプションの幅広い選択肢の拡大が求められる。そのためには、個別技術のイノベーションに向けた研究開発投資と、システム全体のネット・ゼロ排出に向けた低コストとなりえる統合化への研究開発投資といった2軸が現在必要と考える。

— 付 記 —

本稿は環境再生保全機構の環境研究総合推進費(2-1704)「日本における長期地球温暖化対策経路の複数モデルを用い評価と不確実性の分析」の成果、および、エネルギー・資源学会の研究委員会「2050年に向けた日本のエネルギー需給」での議論を反映したものである。

— 参 考 資 料 —

- 1) Davis, S. et al., Net-zero emissions energy systems, Science, 360, eaas9793, 2018.
- 2) 黒沢厚志, 加藤悦史, 杉山昌広, 増田耕一, “パリ協定と気候変動対策技術”, 化学工学論文集, 第43巻, 第4号, 171-177, 2017.
- 3) 加藤悦史, “2℃および1.5℃目標に向けた大規模ネガティブエミッション技術の実現”, 環境情報科学, 第46巻, 第3号, 41-45, 2017.
- 4) NASEM, Negative Emissions Technologies and Reliable Sequestration: A Research Agenda. National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine; Washington, DC: The National Academies Press, 2019.
- 5) 石本祐樹, 杉山昌広, “CO₂直接空気回収技術の研究動向”, エネルギー・資源, 第38巻, 第6号, 309-313, 2017.

著 者 紹 介

加藤悦史 (かとう・えつし)
エネルギー総合工学研究所
(専門分野/関心分野) 地球規模の炭素循環, エネルギーシステム分析, ネガティブエミッション技術