

エグゼクティブサマリー

持続可能で豊かな社会の実現に向けて取り組むべき課題は社会、経済、地球環境など広範にわたり山積している。近年の世界の歩みは、新型コロナウイルス感染症（COVID-19）の世界的流行、気候変動や自然災害、各地での紛争等の影響もあり多くの面で停滞または後退している。いかにして歩みを進め、持続可能で豊かな社会への移行（トランジション）を実現するかが改めて問われている。

とりわけ近年の中心的課題は気候変動対策である。COVID-19の負の影響からの回復のために各国政府が景気刺激策を講じる中、感染症対策と並んでグリーン政策を柱建てる国が複数見られる。人為起源の気候変動は世界中のあらゆる地域で極端な高温、降水、干ばつ等の頻度や強度に影響を及ぼし、深刻な損失と損害を既に引き起こしている。ゆえに各国政府にとって気候変動対策は自国民の生活や産業の基盤を維持する上で優先度の高い題目になっている。パリ協定の目標達成に向けて温室効果ガス排出の正味ゼロ（ネットゼロエミッション）、いわゆるカーボンニュートラルの実現を目標として掲げる国・地域は150を超えている。科学技術イノベーションへの期待も大きい。各国政府が気候変動対策に注力する背景には技術や資源を巡る覇権争いの側面もあるため産業政策としても重視されている。民間企業に対しては、気候変動への取り組みやその影響に関する財務情報開示を求める動きが本格化しており、対応の必要性が高まると同時に新たな機会とも捉えられている。国際的議論の場では気候変動対策と大気汚染対策、あるいは気候変動対策と生態系・生物多様性対策を組み合わせる等、複数の地球規模課題の相互連関に着目した総合的な取り組みも目立ちつつある。

2022年2月に始まったロシアのウクライナ侵攻は国際エネルギー市場に大きな影響を与え、世界の多くの国・地域にエネルギー安全保障の重要性を再認識させる機会を与えた。必要十分なエネルギーを安定的に適切な価格で供給することが難しくなれば、たちまち国民生活や社会経済活動に深刻な影響が及ぶ。エネルギー安全保障とカーボンニュートラルをどのようにバランスよく両立していくかが新たな社会の関心事となっている。

本書では、環境・エネルギー分野を取り巻く社会・経済的な動向を認識した上で、35の研究開発領域を設定し、各領域における研究開発動向を俯瞰した。

<エネルギー分野>

- ・ **電力のゼロエミ化・安定化**：再エネ電源の設置場所の拡大や機器大型化、効率向上による低コスト化、運用最適化等を通じた再エネ電源の拡大とともに、電力の安定に寄与する火力発電の低CO₂排出化および水素・アンモニア等のカーボンニュートラル燃料への転換、蓄エネルギーの拡大、安全性の確保を大前提とした原子力発電の活用検討が進む。
- ・ **産業・運輸部門のゼロエミ化・炭素循環利用**：動力や熱源の電化や低炭素排出燃料への転換を図るとともに、エネルギー効率の改善、炭素循環利用の技術開発が進む。電力用の大型蓄電池分野ではさらなる高容量、長寿命、安全性、低コスト化の研究開発、水素・アンモニアでは高効率かつ低コストな水電解技術や水素キャリア関連技術（液体水素、有機ハイドライド、アンモニア）の研究開発が進められている。CO₂有効利用技術では安定なCO₂を活性化させ水素と反応させるための高度な触媒開発、水素を経由せず直接CO₂を電解還元する方法の検討が進められている。高温ヒートポンプや蓄熱材等、熱制御については一層の技術開発が期待されている。
- ・ **業務・家庭部門のゼロエミ化・低温熱利用**：民生部門におけるエネルギー消費量削減のためにZEB（Net Zero Energy Building）、ZEH（Net Zero Energy House）への移行が推進されている。
- ・ **大気中CO₂除去**：排ガスからのCO₂回収・貯留が国内外で実証試験等を通して技術を蓄えつつある。ま

たネガティブエミッション技術としてDACCS (Direct Air Carbon Capture and Storage) 等の工学的手法に加えて土壌炭素貯留や植林、沿岸部ブルーカーボン等の自然を活用した手法の検討も進められている。

- ・ **エネルギー分野の基盤科学技術**：ナノからマクロなスケールまで摩擦や破壊解析等の現象理解が進展。一方で流体や熱、構造・強度等に関する基礎的なデータが国内で体系的、継続的に集積されておらず、デジタルツイン技術等のシミュレーションで適用限界などの問題を孕む。

<環境分野>

- ・ **地球システムの観測・予測**：衛星、地上、海洋観測等を駆使した温室効果ガス (GHGs) 収支のより高精度な把握が進む。気候モデルや地球システムモデル、全球雲解像モデル等の各種予測モデル高度化と並行して予測結果の活用拡大に向けた取り組みが活発化している。水循環分野は気象水文連携を好事例として多分野連携や社会との連携による先駆的な取り組みを行っている。生態系・生物多様性観測では衛星観測データの活用拡大、環境DNAや3次元スキニング等の地上観測の手法やツールの多様化、無人航空機 (UAV) の普及等の発展が見られる。大量のデータを活用したデータサイエンスは共通の潮流。
- ・ **人と自然の調和**：社会―生態システムの評価・予測のため生態系サービスの定性的・定量的な評価や生態系サービス間の連関 (ネクサス) 分析等の研究が進められている。農林水産業への気候変動影響はシナリオを使った予測や資源評価の研究が進展。生態系を活用した適応策 (EbA) や防災・減災 (Eco-DRR) 等とともに「自然を活用した解決策 (NbS)」の考え方が急速に普及。都市では街区レベルの解像度で暑熱対策等の解析が可能になっている。COVID-19対応ではリスク学の観点からの対策効果の検証や下水疫学調査の研究が精力的に行われている。
- ・ **持続可能な資源利用**：水利用に関して海水淡水化や再生水利用は今も世界的に関心が高い。社会変化やインフラ老朽化等に対応した水供給インフラ、カーボンニュートラルへの貢献等も重要テーマ。大気に関しては対流圏オゾンやエアロゾルであるPM_{2.5}の発生機構の解明の他、カーボンニュートラル実現に向けた社会移行に伴う大気汚染問題の変化に関心ももたれている。土壌汚染分野ではサステナブル・レメディエーションの普及を重要視。リサイクル分野ではプラスチックを炭化水素原料に戻すケミカルリサイクル技術の研究開発が活発。ライフサイクル評価に関しては技術やシステムの将来性を評価する手法の検討等が進められている。
- ・ **環境分野の基盤科学技術**：地球環境リモートセンシングのための観測機器では光学計測機器の解像度やデータ処理能力の向上により高頻度計測が可能となる等の進展が見られる。環境分析では安定同位体を使った分析の活用、多成分一斉 (ワイドターゲット) 分析、ノンターゲット分析等に関する研究開発が引き続き中心的に進められている。未知物質の推定等に深層学習を活用するなどデータ駆動型研究もトレンドになっている。バイオアッセイ・毒性評価では定量的構造的活性相関 (QSAR) や類似物質のデータから毒性予測を行う手法の開発等が活発。マイクロプラスチックに係る研究は環境中での動態研究が盛んだが添加剤の影響に関する研究も進められている。

上述の研究開発動向を概観すると、気候変動対応に係る取り組みが一層活発になっていることが分かる。これは各国・地域の政策にカーボンニュートラルが取り込まれるようになり、具体的な計画や戦略が策定・施行され始めたことで、研究開発動向にもその影響が見え始めてきたためと考えられる。

しかし様々な技術・システムについての研究開発とその社会実装に向けた取り組みが強化される一方で、カーボンニュートラルの達成に向けた取り組みが進みにくい分野があることも明白になってきた。例えば産業活動における熱エネルギー利用は規模が大きく成熟したプロセスゆえに脱炭素化が難しい。再生可能エネルギー由来電力を利用して生産される「グリーン水素」は電気分解に係るコストがボトルネックとなっており、

少なくとも当面は天然ガス等から取り出す「ブルー水素」(但し発生するCO₂は回収する)等も含めたクリーンな水素の幅広い検討が必要と考えられている。また分散型・自律型のエネルギーシステムは従来の大規模集中型のエネルギーシステムと比べてより複雑になるため、需給バランスを一定に保つためのエネルギーマネジメント技術が新たに必要になる。こうした個別課題に加えて、ロシアのウクライナ侵攻による国際エネルギー市場の混乱はエネルギー安全保障の重要性を再認識させる機会になった。一時的ではあるものの人々の関心を当面のエネルギー資源確保という短期的課題に集中させ、カーボンニュートラル実現への歩みが停滞しかねない事態も招いた。

カーボンニュートラルの実現に向けて長い時間をかけて社会の移行(トランジション)を進める中では、新規技術・システムの社会実装の停滞や不測の事態の発生など、様々な不確実な事柄が付きまとうことになる。これらに柔軟かつ動的に対応しながら着実に前進していくことができなければ野心的な目標の達成は難しい。そのため不確実性にいかに対処していくか、すなわち不確実性のマネジメントという観点でトランジションの過程において重要になると考えられる。気候変動対応とくに気候変動の緩和に向けた取り組みでこうした傾向が顕著だが、これはカーボンニュートラルの実現に向けた取り組みに限らず、気候変動適応、防災・減災、生物多様性、循環型経済、化学物質管理、都市環境等、持続可能な社会への移行の様々な側面で共通するテーマであると考えられる。

以上を踏まえると、今後の環境・エネルギー分野の研究開発の方向性として重要なキーワードは「トランジションと不確実性のマネジメント」である。今後は科学技術イノベーションがこれにどう貢献できるかについて考えを深め、研究開発やそれを支える環境の整備、体制構築等に役立てていく必要がある。

研究開発の観点からは、「トランジションと不確実性のマネジメント」は3つの柱に整理することができる。すなわち、①トランジション促進、②トランジションの進捗状況把握・予測・評価、③トランジションの停滞や負の側面への備え、である。

1つ目はトランジション促進のための手段や手法の開発、仕組みの構築である。新規技術の創出や実現パスの探索、システム設計、社会実装加速等に係る研究開発を進めていく必要がある。2つ目は、トランジションの進捗の把握・予測や評価である。時間的・空間的に高精度な把握技術、予測技術、評価技術が求められる。評価対象は必ずしも明確であるとは限らず、多様な観点から評価するための手法開発等も必要になる。3つ目は、トランジションの停滞やトランジションを進める中で顕在化する負の側面への備えである。例えば予期しない事態や根本的な問題等による新規技術の社会実装やシステム構築の停滞、トランジションの過程におけるエネルギーの供給と需要のミスマッチにより生じるエネルギー不足、新規技術の社会実装の過程で直面する倫理的・法的・社会的課題を含む新たな課題の顕在化、問題間の繋がり(相互連関)に基づく負の影響の拡大、等の様々な事態に柔軟かつ動的に対処する必要がある。代替手段の用意、システムの安定化、レジリエンスの強化、相互連関の考慮、統合的な推進等に係る研究開発が求められる。

研究開発体制・システムのあり方の観点からは、エネルギー分野ではカーボンニュートラルの実現という大きな目標に向けて社会実装の加速が目下の重要課題である。個々の機器や技術の高度化だけでなく、エネルギーシステム全体をどう変革していくかを意識する必要がある。どのようなエネルギーバランスで「S+3E」(安全、安定供給、経済効率、環境負荷低減)とカーボンニュートラルを両立させるのか、その中で個々の機器や技術がどのような規模感でどのような役割を果たし得るのかを見極め、必要な研究開発ターゲットを探索・設定していくことが求められる。産業界が果たす役割が大きい、大学や公的研究機関も社会実装のシナリオを理解した上で基礎に立ち返って検討すべき課題を特定したり、現行技術の代替となりうる将来技術を探索したりする等を通じた貢献が期待される。産学の連携強化が不可欠であり、環境作りを進める必要がある。アカデミアにおいても、伝統的な理工学系の研究のみならず、シナリオ研究やライフサイクルアセスメント(LCA)の他、経済・社会・政治・文化・倫理など幅広い研究分野が関わりを持ちうるため、それらの間での多分野連携を促す雰囲気の醸成が必要である。

環境分野では、カーボンニュートラルの実現のみならず気候変動適応、防災・減災、安全で安価な水の確

保、大気・水・土壌の保全・汚染除去、持続可能でレジリエントなまちづくり、持続可能な生産と消費、適正な化学物質管理等の多様な領域への貢献が求められる。近年は対象とすべき問題自体が以前よりも複雑化しており、社会とのつながりも含めた多分野連携による研究開発の推進が必要である。ここで言う「多分野」には2通りの意味が含まれ、1つは行政等の意思決定主体との連携やステークホルダーとの協働を意味する。もう1つは学術基盤の強化という観点から専門分野の枠を超えた横断的な繋がり強化を意味する。環境分野には公的な仕組みやサービスも多く、国や自治体が率先して国内の研究開発基盤の維持・強化に關与する必要がある。大規模な研究インフラの維持・管理には長期的な視点と計画性、戦略性が求められる。データ・解析基盤や計算機施設も同様である。これらを支えるエンジニアリング人材の育成・確保も喫緊の課題となっている。

なお国際連携、国際協調はエネルギー分野、環境分野に共通する重要項目である。エネルギー分野の中には国内産業が活発ではない領域もあるが、エネルギー安全保障の面からも国際協働等を活用した基盤技術や人材の長期的・継続的な維持・向上が必要である。環境分野では、観測等、国際的な枠組みと深く結びついているものも多く、国際的な研究プロジェクトや研究コミュニティへの積極的な参画が不可欠である。

環境・エネルギー分野の研究開発は広範囲に亘る。現在の社会の発展とともに、より良い社会と地球環境を将来世代へと引き継ぐ責務を担っている。様々な困難を乗り越えてたくましく発展していく社会を支える柱として、研究開発を力強く進めていくことが求められる。

