

## 1.3 今後の展望・方向性

### 1.3.1 今後重要となる研究の展望・方向性

持続可能な社会への移行（トランジション）を促進する要因の1つとして環境・エネルギー分野の研究開発には大きな期待が寄せられている。その中で昨今の中心的な話題は気候変動への対応である。温室効果ガス排出量の正味ゼロ（カーボンニュートラル）実現に向けた取組みが主要国を中心に進められているが、ここ数年はトランジションの難しさやその不確実性に直面する場面も散見される。こうした状況に鑑みると、今後重要となる研究の展望・方向性は「トランジションと不確実性のマネジメント」であると考えられる。

カーボンニュートラルの実現に向けた取組みは一層活発になっている。EUは欧州グリーンディール関連の戦略や計画を立て続けに発表した。日本では菅総理大臣（当時）が国会での所信表明演説の中で2050年までにカーボンニュートラル達成を目指すことを発表し、グリーン成長戦略が策定された。カーボンニュートラルを宣言していた国は以前から複数あったが、2020年頃を境にして各国のカーボンニュートラルを政策に取り込む動きは加速した。2021年11月時点では154か国・1地域が年限を区切った形でカーボンニュートラル実現を表明している。

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いる。例えばエネルギー分野では蓄エネルギー、水素、大気中CO<sub>2</sub>の回収・貯留やCO<sub>2</sub>の循環的利用など個々の研究開発領域での動きが活発化している。再生可能エネルギー由来電力による水電解、太陽光・太陽熱ハイブリッドプラントシステムなどトータルシステムの構築を目指した動きも顕著である。ライフサイクル評価を基にして地域の脱炭素化に自治体、大学、民間企業が連携して取り組む研究開発も各地で進められている。大気中CO<sub>2</sub>を回収・貯留するためのネガティブエミッション技術はカーボンニュートラルの実現に不可欠と考えられるようになりここ数年で一段と注目されている。特にDACCS（Direct Air Capture with Carbon Storage）と呼ばれる工学的なアプローチに加え、農地や森林、海洋生態系などにおける自然のプロセスを活用するアプローチへの関心・期待が高まっている。環境分野ではパリ協定に基づき実施されるグローバル・ストックテイクへの貢献を意図して全球規模の炭素収支解析のための衛星観測データの活用やモデルの高度化に係る研究開発が精力的に進められている。

多方面で検討が進む一方、カーボンニュートラルの達成に向けた取組みが進みやすい分野と進みにくい分野があることも明白になってきている。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困難な分野と考えられている。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CO<sub>2</sub>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認識されている。需要側にも再エネ電源や蓄電池が付加される分散型・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。エネルギー利用に係る一人一人の行動や都市計画・街づくりを根本的に変えていくことも容易ではない。カーボンニュートラル達成のためにはこうした様々な困難にも対処していく必要があると認識されている。

また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、人々の関心を、少なくとも一時的には、長期的な目標であるカーボンニュートラルの実現から当面のエネルギー資源確保という短期的な課題へと変えさせた。欧州諸国のエネルギー資源確保におけるロシア依存度の高さは従前からリスクと捉えられていた。しかし今回のような事態を通じてカーボンニュートラルへの道が一時的にも停滞することを予測することは多くの人にとって困難であったと思われる。長い時間をかけて社会の移行を進める中ではこうした不確実な事柄が常に付きまとうことになる。そ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カーボンニュートラルの実現という極めて野心的な目標の達成は難しい。

それゆえ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がトランジションの過程においては重要になる。

なお今回の事態は、エネルギー安全保障の重要性を再認識させる機会にもなった。必要十分なエネルギーを安定的に妥当な価格で供給することが脅かされるとたちまち国民生活や社会経済活動に深刻な影響が及ぶ。カーボンニュートラル達成を目指す中では環境負荷低減が重視されがちだが、その過程、あるいは到達した社会における社会基盤としてのエネルギーを考える場合、エネルギー安全保障との両立は不可欠な視点となる。とくに不確実性のマネジメントにおいてエネルギー安全保障は中心的な関心事項の1つであると考えられる。

ここまで気候変動対応とくに気候変動の緩和に向けた取り組みに対する今後の研究の展望・方向性として「トランジションと不確実性のマネジメント」を踏まえることが重要であることを述べてきたが、このこと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。例えば気候変動の影響は各地で顕在化しつつあるが、将来的な影響がどこにどの程度、どのような形で発生するかについての確たる予測は難しい。よってある程度の不確実性が含まれることは避けられず、そのことを考慮した対策の立案が必要となる。長い年月をかけて構築され固定化した従来システムからの移行は容易には進まず、その過程では不確実な事態が起きうる。これらには柔軟に対応すべきであり、また制度変革や習慣、価値観の変化なども含めたあらゆる方策を総動員する必要がある。当然ながら科学技術イノベーションも重要な要素の1つであり大きな貢献が求められている。

### 1.3.2 日本の研究開発の現状と課題

ここでは環境・エネルギー分野の日本の研究開発の現状と課題を概観する。一般的な研究開発の現状は1.2.2に、研究開発領域ごとの詳細は第2章に示す。

#### エネルギー分野

- 電力のゼロエミ化・安定化**：今後の電化促進に伴う電力需要の増加と変動性再生可能エネルギー導入の拡大とともに、電力の安定化がより重要な課題となる。安定な電力供給を担う火力発電のゼロエミ化および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が必要とされてゆく。日本は火力発電における水素・アンモニアへの燃料転換、CO<sub>2</sub>回収では世界をリードする技術を有し、実機信頼性や燃料供給を含めたシステムの実用化に向けた開発を加速している。それを支える基盤として燃焼素反応過程の解明やデジタルツイン技術の開発などが期待されている。一方、炭素排出を伴わない水素・アンモニアの供給網の構築には時間がかかるため、既存設備の高効率化、CO<sub>2</sub>回収技術と組み合わせた低CO<sub>2</sub>排出化技術も並行して開発する必要がある。再エネ電源の拡大にはステークホルダーの協力や運用時の発電量や需要の予測も必要であり、気象や人文社会科学分野との連携が大切になると考えられる。太陽光発電や風力発電では国内適地が少ないこともあり、国内製造産業が苦戦している。しかしながら、ペロブスカイト薄膜太陽電池の開発では世界をリードし、洋上風力発電の浮体構造や耐候技術、高温蓄熱材料、海洋発電や地熱発電でも高い技術力を有する。これらの技術を再エネ適地が広い諸外国との協業も活用して進展させることも一つの方策と考えられている。また、蓄エネルギーの機能も有する揚水発電や蓄熱発電の技術も継続して維持・開発が必要である。原子力による発電に関わる科学技術は高い水準にあるが、継続的な国内の技術基盤の維持・向上が必要とされている。核融合発電技術の実現には時間がかかるが、民間も含めて投資が増大しており、機会を逃さないよう着実な取組が必要である。
- 産業・運輸部門のゼロエミ化・炭素循環利用**：動力や熱源の化石燃料から電化および低炭素燃料への転換とともに、エネルギー効率の改善、炭素循環利用の技術開発が進められている。日本は二次電池技術で強みを持ち、リチウムイオン電池、レドックスフロー電池、ナトリウム硫黄電池等さらなる高性能化、

大容量化、低コスト化とともに、資源制約に対応するための新しい材料・製造技術の開発が期待される。水素の利用拡大には大きな期待が寄せられ各国で技術開発が進められている。水電解による水素製造、および貯蔵・輸送のためのエネルギーキャリア技術（液体水素、有機ハイドライド、アンモニア）においては劇的なコストダウン手法の開発が求められている。日本は燃料電池、水素エンジン等で世界に先行しているが社会普及が課題である。また、水素やアンモニアは火力発電用燃料や製鉄産業における活用が期待される。CO<sub>2</sub>を炭素資源として循環利用することで実効排出量を抑制するCCU（CO<sub>2</sub>利用）技術において、メタノール合成、メタネーション、FT（フィッシャー・トロプシュ）合成等、日本は触媒技術開発が進んでいる。実用化には経済的価値を高めることが必要であり、CO<sub>2</sub>直接電解反応や光触媒などによる低コスト化、高付加価値品の製造技術開発が期待される。産業熱利用の高効率化は継続的に進められているが、低温熱利用技術や高温ヒートポンプ技術、蓄熱材については一層の技術開発が必要とされている。

- ・ **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CO<sub>2</sub>除去**: カーボンニュートラルの実現に向けて大気中のCO<sub>2</sub>を吸収するための技術が必要不可欠である。CO<sub>2</sub>の負の排出技術であるネガティブエミッション技術には、DACCS（Direct Air Carbon Capture and Storage）、BECCS（Bio-energy with Carbon Capture and Storage）などの工学的な手法に加えて、土壌炭素貯留、植林、沿岸部ブルーカーボンなどの自然を活用した方法がある。工学的手法は実証に向けた研究開発が進んでいる。自然を活用した方法についてはCO<sub>2</sub>の吸収を高める研究や、定量的な評価に向けた生態系を含む観測・予測・モデリングに関する研究が進められている。
- ・ **エネルギー分野の基盤科学技術**: 実用燃焼機器の熱効率やエミッション低減、ナノ領域からの現象理解と低摩擦技術や複合材料の破壊解析などで強みを有する。一方、欧米の最先端研究開発拠点と比較すると個別組織や個別分野での研究に依存する傾向が弱みとなっている。また、基盤科学技術の発展に学会を中心に産学が協力して流体や熱、構造・強度等に関する基礎的なデータ集及びシミュレーション整備が行われてきたが、2000年半ば以降途絶えている。欧米のデータ集やそれに基づくシミュレーションコードが用いられているが、適用限界などの問題を孕んでいる。

## 環境分野

- ・ **地球システムの観測、予測**: これまでの研究開発の中心的課題は近年の気候変動が人為影響で起きていることの科学的メカニズム検証であった。しかし、我が国のカーボンニュートラル宣言やIPCC第6次評価報告書（AR6）が公表され、この2年で確実に変化している。GHGs排出削減の進行の確認やSLCFs削減の影響、極端気象（熱波、海洋熱波、大規模森林火災等、植生減少等）の気候変動影響寄与率解析（イベント・アトリビューション）や、それが大気-陸域、大気-海洋を通して再び大気に与える影響解析など、より詳細で身近な社会ニーズに近い研究課題が中心になってきている。沿岸データは地域的特性のため定性的蓄積はあるが外洋のような定量的蓄積がなく統合的解析が課題である。我が国も独自の地球システムモデル（ESM）や気候モデル（GCM）、IPBES（生物多様性及び生態系サービスに関する政府間科学政策プラットフォーム）への参加などを通じて国際的枠組みに貢献している。生態系・生物多様性に対しても「昆明・モンリオール生物多様性枠組」が採択され、社会的関心が徐々に高まっている。企業に対して気候に関する財務情報開示に続き、生態系・生物多様性に関する財務情報開示の国際的検討が進んでいる。我が国も、生態系・生物多様性観測の東アジア地域の情報蓄積などに貢献し、基礎的な評価指標や応用的なグリーンインフラの多面的効果なども研究されている。IPCC AR6でも水循環の変化（洪水、干ばつ等）が指摘されているが、我が国は特に水災害を受ける地域にある。気象水文連携などで独自の研究成果を創出しており、河川流域統合マネジメントなど社会水文連携に向けた研究も見られるが、実際に発生している土砂や流木による取水口遮断リスク等、欧米が行ってい

る横断的研究が手薄である。観測と予測の両輪の推進が必須だが、とくに継続的観測データが不足しており、その主導権をもつ欧米に国際的議論をリードされている傾向があり、強化が急務となっている。

- ・ **人と自然の調和**：都市防災について、都市ヒートアイランド対策や災害廃棄物に対して我が国は多くの蓄積をもつが、過去の蓄積が十分に生かされていない課題がある。多くの組織でBCPが策定され、新たに複合災害やレジリエンスの定性的な研究もなされている。街区や建築物のレジリエンスの定量的指標は全世界的に課題となっている。気候変動適応などのローカル実装ではモデル都市は優れた取組がみられるが、それ以外の都市では人材不足等から掲げる理想と現状が乖離している課題がある。都市生態系においては我が国の自然や気候環境に対応した研究がなされている。社会-生態システムについて、植生の生態系保全機能や光合成による炭素吸収機能や水貯留による防災機能などの多面的機能を不確実性を踏まえて評価することなどが国際的課題であり、我が国でも課題である。IPCC AR6において、気候レジリエント開発のコンセプトが示されたが、その内容は名称と異なり気候にとどまらず生物多様性、生態系サービスも一体的に捉えており、多様な機能の定量評価指標やネクサス（つながり）、社会文化的側面も含んだ多様な価値を踏まえた研究が課題となる。国際共同研究により作物生産予測が進展しているが、海外における作物収量変化、極端気象災害や病害虫影響は我が国の食料安全保障の観点で重要な研究課題である。斜面崩落による土砂災害は海外では乾燥等によるが、我が国では地震や豪雨、人為的盛り土などにより発生しており、複合型災害のメカニズム詳細や監視が課題である。水産業に関しても、栄養塩の分布や気候変化などに伴い生息域変化など大きな影響があり、その予測を担う為にも持続的観測データが不足している課題がある。COVID-19に対して、環境リスクアプローチからの観点で下水ウイルス調査（下水疫学調査）、換気、シミュレーション研究などで社会貢献につながる研究や情報発信が積極的に行われている。欧米や中国と比べて発表全体の件数が少なく、積極的な層が一部に偏っており、厚みが無い点が課題である。世界最高感度をもつ下水中ウイルス検出手法の開発など顕著な成果がある一方、米国はCDCやベンチャー企業が全米の下水のウイルス濃度や変異ウイルス推移などのデータを集めて公表しており、我が国よりも産学官連携が進んだ姿をみせている。空気清浄システムやUV殺菌システムについて製品化する企業もあり、競争力をもっている。
- ・ **持続可能な資源利用**：大気汚染について我が国は全般には良化基調で、浄化技術は高い水準にあるが、対流圏オゾンや二次生成PMの分析と把握、カーボンニュートラル移行に伴う統合評価などが課題である。土壌汚染について我が国の法はリスクに基づく運用を規定しているが、いまだゼロリスク信仰や掘削除去の偏重が根深い課題である。福島第一原子力発電所事故に伴う1,300万m<sup>3</sup>を超える掘削土壌をはじめ、自然由来の低濃度重金属を含む建設残土などの、リスク管理に基づく技術適用に向けてリスクコミュニケーションも重要な課題に含まれる。水利用・水処理ではセラミック膜処理やUV-LED処理などで国際的に高い水準にある一方、水循環と統合した流域管理の推進や、海外現地事情にあった水ビジネス展開や国際協働研究が課題としてあげられる。土壌、水処理に共通して我が国の実運用先の人材資源に余力がなく、廉価で現地で簡易に適用可能な技術開発へのニーズが高い。ライフサイクル管理において、難分解性で長期に残留するPFAS等が我が国でも社会問題となっており、未規制段階からの新規物質の包括的な評価が課題となっている。開発中技術や大規模導入前のLCAが注目されており、我が国でもムーンショット事業等で研究段階からのLCAが行われているが、LCA専門知識がなくても実施可能な方法論やツールの開発、CO<sub>2</sub>排出削減以外の観点も含めた包括的LCA等が課題である。リサイクルに関して、海洋プラスチック問題を受けた生分解性プラスチックやバイオマスプラスチック等、新材料の普及が進んでいるが、リサイクルシステムが複雑化する課題への対応がある、循環型経済として枯渇性資源利用を減らし再生可能資源利用を増やす際に、トレーサビリティやサプライチェーン全体を含めたビジネスモデルの構築、多様な影響項目に対してバランスよい設計を包括的評価する手法等が課題である。
- ・ **環境分野の基盤科学技術**：地球環境リモートセンシングでは我が国の地球観測衛星が気候変動観測や防災等への基盤データを取得しており、ユーザーと開発が協調した開発指針議論や国際協調も行われてい

る。打ち上げ目前の衛星ミッションも複数あるが、課題として将来衛星ミッションの検討が停滞している。我が国はヒ素、水銀や大気中PMなどに対して高い水準の分析技術を持つが、全国の大学で分析化学講座が廃止されており、現在の高度な分析技術が近未来に断絶する危惧がある。ICP-MSや安定同位体比、QSARなどを生かした様々な分析手法も我が国で用いられているが、取得データの解析ソフトなどで欧米に後れをとっている。環境中で長期に残留する性質が悪影響をもたらす難分解性物質のPFASやプラスチックの環境動態や生体影響などが我が国でも精力的に研究されている。境界的・横断的課題として、欧米が小規模でも独自の観測機器、分析機器を事業化する中小企業やベンチャー企業も育成して持続的に基礎研究を推進しているのに対して、個別的な時限の支援に偏っており、国際的展開に消極的ともみられる傾向があげられる。

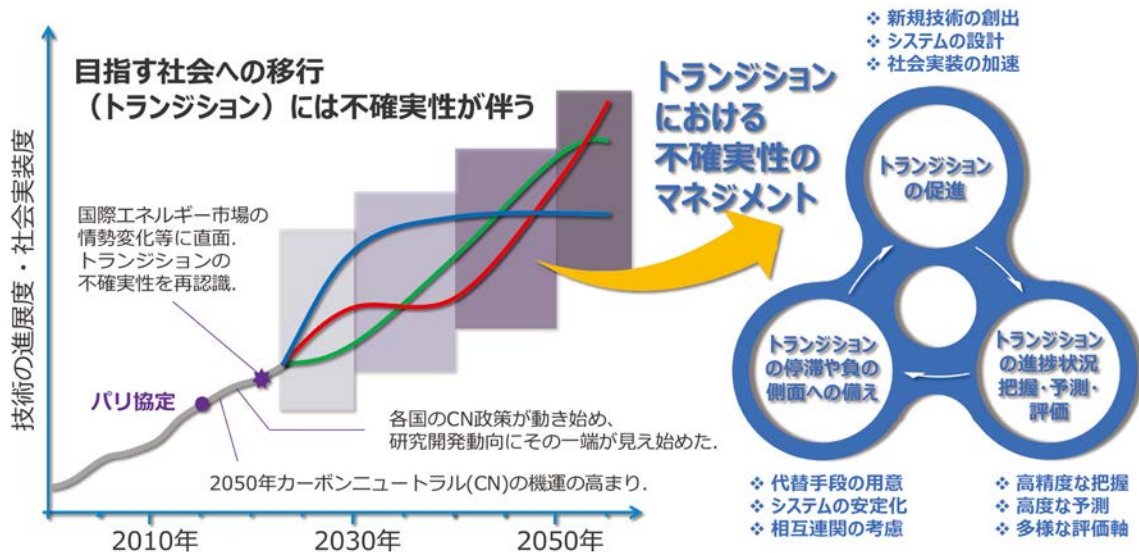
### 1.3.3 わが国として重要な研究開発

#### ①重要な研究開発

本項では、国内外の社会・経済の動向や研究開発の現状、今後の展望などを俯瞰した中から見えてきた、わが国として今後重要となる研究開発について記述する。なお環境・エネルギー分野では「俯瞰ワークショップ」を開催しており、本項を含む1.3は同ワークショップでの議論も踏まえている。ワークショップでは本書第2章の各研究開発領域の動向をレビューするとともに領域を超えた横断的な視点から分野全体の現状や今後の方向性について議論した<sup>1</sup>。

環境・エネルギー分野の今後の研究開発では「トランジションと不確実性のマネジメント」を踏まえることが重要であると考えられる。以下ではこれを3つの柱——「トランジション促進」、「トランジションの進捗状況把握・予測・評価」、「トランジションの停滞や負の側面への備え」——に分け、関連する研究開発テーマや課題例をまとめる（図表1.3.3-1）。ただしここに示すテーマや課題例は固定的なものではなく、今後の社会の変化や研究開発上の進展などに即して常に追加や変更がありうる。

1 エネルギー分野はグループ別討議を令和2年10月26日（グループB）と11月9日（グループA）、全体討議を同12月7日に実施した。環境分野はグループ別討議を同11月4日（グループD）と11月20日（グループC）、全体討議を同12月4日に実施した。



図表 1.3.3-1 今後の研究の方向性 (イメージ図)

**(1) トランジション促進**

トランジション促進のための手段や手法の開発、仕組みの構築が必要である。これに資する新規技術の創出や実現パスの探索、システム設計、社会実装加速などに係る研究開発が求められている。

**(研究開発テーマ例)**

- ・ 電力のゼロエミッション化の促進 (再生可能エネルギーの導入拡大、カーボンニュートラル燃料導入等)
- ・ 水素・アンモニアの大量製造 / 輸送技術確立、利用技術深化
- ・ CO<sub>2</sub>の回収・貯留・有効利用
- ・ 新しい電力システムの構築 (スマートグリッド)
- ・ レジリエントな電力・エネルギー供給システムの構築 (マルチユース)
- ・ 電力を用いた物質・エネルギー変換技術 (電気化学)
- ・ 自然資本の持続的な管理・活用 (自然を活用した解決策、持続可能な資源マネジメント)
- ・ ライフサイクル設計
- ・ 循環型経済促進のための技術・システム構築

**(2) トランジションの進捗状況把握・予測・評価**

トランジションの進捗を適切に把握・予測し、望ましい方向性やペースで進んでいるかを評価することが必要である。これらに資する時間的・空間的に高解像度な把握や高度な予測の技術が求められる。また評価対象は必ずしも明確とは限らず、数値化が困難なものもあり得るため、多様な観点から評価するための手法開発も必要となる。

**(研究開発テーマ例)**

- ・ 統合的な観測、観測との協調による生態系を含む全球のモデリング、予測の高度化
- ・ 社会システムや土地利用等の変化に伴う土地、水、大気、生態系、人間の生活環境等への影響の把握・予測
- ・ 土壌の再生・管理
- ・ 化学物質の環境リスク評価・管理

- ・ ニーズ対応型環境分析
- ・ 持続可能性の評価 (ライフサイクル評価、カーボンフットプリント評価、気候変動影響評価、生物多様性・生態系サービス評価等)

### (3) トランジションの停滞や負の側面への備え

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を進める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ための方策検討が必要である。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。

#### (研究開発テーマ例)

- ・ エネルギー需給の安定化 (蓄エネ、自然エネルギー資源豊富地帯での実証・協働研究)
- ・ エネルギー源の多様化・分散化 (各種熱源発電、地産地消、マイクログリッド)
- ・ クリーンテクノロジーのサプライチェーン上の脆弱性対応 (機器自給率向上、希少金属確保・代替材料開発、使用済み機器等の処理・資源循環)
- ・ 熱利用・熱源のゼロエミッション化 (カーボンニュートラル燃料拡大、ヒートポンプ、熱制御の高度化等)
- ・ 気候レジリエントな開発 (気候変動適応策立案、包摂的アプローチ)
- ・ 感染症や自然災害に対するレジリエンス強化 (事前警戒型社会構築のための感染症リスク評価・リスク管理、環境疫学、都市環境、防災・減災対策)
- ・ 社会変化・インフラ劣化への対応 (持続可能な水利用等)

## ② 研究開発体制・システムのあり方

ここではエネルギー分野、環境分野で複数の研究開発領域において見られた共通課題等を整理する(図表1.3.3-2)。

### エネルギー分野

カーボンニュートラル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。そこでは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」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。こうしたシステムの観点が必要なのは全体を包含するナショナルレベルだけでなく、構成要素となるサブシステムレベルでも同様である。例えば水素に関して欧州は想定されるサプライチェーンを描きつつ関連する研究開発を推進している。産業界が果たすべき役割が大きい、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、現行候補技術の代替となりうる将来技術を探索したりするなどを通じて貢献が期待される。そのための国内研究開発体制としては産学の連携強化が重要課題であり、環境作りを進める必要がある。なお将来には不確実性があるため、シナリオは単一ではなく、複線的に捉える必要がある。候補技術も少なくとも最初の段階では複数検討し、多様な選択肢を持つことが重要となる。また、このような形の検討を進めるにあたっては、理工学系の分野の研究のみならず、シナリオ研究やLCAのほか、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。理工学分野の中でも気象や気候分野、数理科学分野との連携強化の必要性も指摘されるようになってきている。今後はそうした多分野連携を可能にする体制作りや雰囲気醸成がこれまで以上に必要に

なる。

研究環境、研究インフラの観点からは、データ基盤の整備が課題である。新規材料や製品開発に関わる共通的な材料物性値などの基盤的なデータの系統的な収集・管理・活用は、データ駆動型の研究開発が大きな潮流となっている中では独創的で競争力ある研究の源泉になりうる。またエネルギー関連機器を製品として社会に実装していくためには技術実証が必須だが、その技術実証に必要となる大型設備が国内では十分に整備されていない。設備の維持・管理に係るコストもあり容易ではないものの対処する必要があると指摘されている。また、技術進展を反映した法規制の適正化や社会受容の醸成なども新技術の開発推進には必要である。技術開発とルール作りなどを一体的に進めるアプローチは昨今「責任ある研究イノベーション (RRI)」とも言われておりその方法論は確立していないが個別具体的な成功事例を積み重ねていくことが重要と考えられる。

国際分業化や再生可能エネルギー資源の乏しさなどから国内産業が活発ではない分野もあるが、カーボンニュートラル実現のみならずエネルギー安全保障の面からも国際協働なども活用した基盤技術や人材の長期的・継続的な維持・向上が求められている。これを進めるためには国際協働の活用や国際的な枠組みへの参加を積極的に行っていく必要があると考えられる。

## 環境分野

環境分野の研究開発は、持続可能な社会の実現に向けて気候変動の緩和・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など多様な領域への貢献が求められている。一般的に、環境分野では、規制強化によって研究開発活動が誘発され、技術進展が促されてきた。しかし近年は対象とすべき問題自体が以前よりも深刻化・複雑化しており、規制のみを駆動要因とした研究開発サイクルでは立ち行かなくなっている。そうした背景から、昨今は複雑な問題に対処していくための新たな研究開発の在り方が模索されている。今後重要になるのは、多分野連携による超学際的または学際的な研究開発の推進である。ここでいう「多分野」には2通りの意味が含まれる。1つは行政等の意思決定主体との連携や、当該問題に関わる多様なステークホルダーとの協働である。問題の設定や研究開発の計画段階から多様な主体が関わることで、研究開発をより効果的に進めることができる。もう1つは、学術基盤の強化という意味での多分野連携である。対象とすべき社会問題が複雑化するほど、個々の専門分野だけでは対処が難しい。水の問題を取り上げて多様な分野があるように、専門分野の枠を超えた横断的な繋がりを強化し、新たな学術基盤を構築していく必要がある。

環境分野には環境監視、インフラ整備、保全・再生、除去・浄化、安全性評価など公的な仕組みやサービスも多く、そうした領域では国や自治体が率先して国内の研究開発基盤の維持・強化に関与する必要がある。特に以下に示すように大規模な研究インフラの維持・管理には国の計画的・戦略的な関与が不可欠である。ただし、グリーンファイナンス等、持続可能な社会の実現に向けた取り組みを投資対象とする動きが近年顕在化しつつある。かつてはコストと捉えられがちであった環境対策が投資の対象になってきている。こうした状況変化を踏まえ、今後は産業界との関わりを強化していくことも重要な方向性の一つである。

研究環境、研究インフラに関しては、とりわけ地球環境や生態系の観測においては衛星観測、地上観測、海洋観測など多様な観測インフラを国として統合的かつ戦略的に構築・運用していく必要がある。国際社会と連携しながらも同時に日本の独自性も発揮できるよう、中長期的な視点に立って進める必要がある。また環境に関する膨大かつ多種多様なデータの処理や数値計算も不可欠な研究基盤であり、これを支えるデータ基盤、計算機施設の高度化も最先端の研究開発を支える上で必須となる。現在、一部の分野では、研究インフラ維持が研究者個人の研究費獲得に依存している状況が常態化している。こうした状況では中長期的な視点に立ってインフラを管理することは極めて困難である。国として持つべき研究インフラの全体ビジョンを策定・共有し、それに沿った一体的かつ統合的な運用が求められる。なおインフラ整備は、施設や機器等の共用促進、蓄積される各種データの利活用促進のための仕組みづくり等、限られた資源を有効活用するための検討と両輪で進める必要がある。



研究インフラについての中長期的な見通しが明瞭になることは人材の確保・育成にも有益と考えられる。環境分野は他分野と同じく人材不足が深刻な問題になっており、次世代を担う人材の育成・確保が喫緊の課題である。特に純粋な科学研究の人材のみならず、エンジニアリング人材の確保も課題になっている。モデリング人材、環境ビッグデータ活用人材、観測・計測機器などのハードウェア開発人材の確保・育成が必要とされている。環境分野に進む人材が将来のキャリアパスを描けるよう環境を整備していくことが求められる。

環境分野の研究の多くは国際的な枠組みと深く結びついている。そのため研究開発の方向性自体も国際協調の枠組みに沿っている場合がある。国内の研究人材に限られる中では、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は今後の我が国の研究力の維持・強化において必須であると考えられる。

図表 1.3.3-2 研究開発体制・システム上の課題

	エネルギー	環境
国内研究開発体制	<ul style="list-style-type: none"> <li>●エネルギーシステム全体、個々の技術・機器間の関係性を考慮した研究開発課題の探索・設定</li> <li>●トータルシステムの構築を見据えた研究開発</li> <li>●複数のシナリオを見据えた複線的な研究開発（複数の技術的選択肢の保持）</li> <li>●多分野連携</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>●多分野連携による学際的・超学際的な研究開発の推進（意思決定主体との連携、多様なステークホルダーとの協働、専門分野の枠を超えた横断的な学術基盤強化）</li> <li>●公的性質の強い分野に対する国・自治体の関与</li> <li>●産業界との関わり強化</li> </ul>
研究環境、研究インフラ	<ul style="list-style-type: none"> <li>●データ基盤の整備</li> <li>●技術実証に必要な大型施設への投資、長期利用、保守</li> <li>●技術進展に応じた法規制の適正化検討、社会受容の醸成（責任ある研究イノベーション）</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>●継続的かつ統合的な観測体制の構築、中長期的視点に立った計画とその実行</li> <li>●データ基盤、計算機施設の高度化</li> <li>●社会の中での情報の利活用促進</li> </ul>
人材	<ul style="list-style-type: none"> <li>●長期戦略に基づく人材の確保・育成</li> <li>●学際的・分野横断型人材の育成</li> <li>●プログラムディレクター人材の育成</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>●次世代の育成・確保</li> <li>●エンジニアリング人材（モデリング、環境ビッグデータ活用、ハードウェア開発等）の確保・育成</li> </ul>
国際連携	<ul style="list-style-type: none"> <li>●国際協働研究などを通じた技術や経験値の維持・強化</li> <li>●国際的枠組みへの積極的な参加</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>●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加</li> </ul>