

1 | 研究対象分野の全体像

1.1 俯瞰の範囲と構造

1.1.1 社会の要請、ビジョン

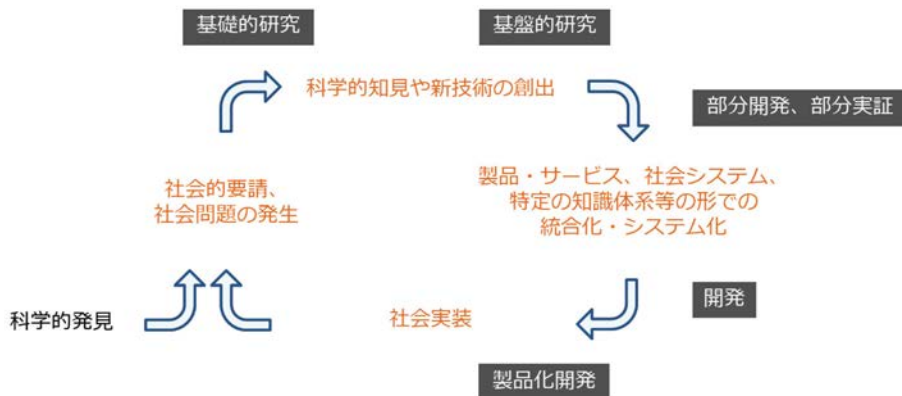
環境・エネルギー分野とは

環境・エネルギー分野の科学・技術は人間社会の基盤として古くから社会の発展を支えてきた。現代に続くエネルギーの大規模利用の歴史は18世紀の蒸気機関の革新にまでさかのぼることができ、環境分野に関する取組みは産業社会の高度化・多様化に伴って深刻化した様々な環境問題への対応とともに発展してきた。時代とともに分野を取り巻く状況は様々に変化してきたものの、社会の要請に応え、将来ビジョンの実現に貢献する分野であるとの根幹は普遍である。このような認識の下、本書では環境・エネルギー分野を以下の範囲としている。

エネルギー分野：エネルギーの生産・流通・利用に係る分野

環境分野：人間活動に必要な土地や生活環境の開発・管理・改善、およびそれらを取り巻く自然環境の管理・活用に係る分野

環境・エネルギー分野の研究開発は、社会の要請の充足や社会課題の解決に資する科学的知見や技術・システムを創出し社会に実装する循環的な営みと言える（図表 1.1.1-1）。種々の社会的要請の充足や社会問題の解決のために創出された新たな科学的知見や新技術・システムは、製品・サービス、社会システム、特定の知識体系等の様々な形で統合化・システム化され、社会に実装されてゆく。なおオゾンホールや地球温暖化等、科学的な発見をきっかけに新規に設定される社会問題もある点は本分野の特徴である。知識や技術が実装された社会には何らかの改善や進展がもたらされるが、同時に更なる社会的要請や課題が生じることとなり、それらが新たな研究開発の動機となる。こうした科学技術と社会との間の循環的な関係性の中に本分野の研究開発がある。



図表 1.1.1-1 環境・エネルギー分野の研究開発

社会の要請、ビジョン

持続可能な豊かな社会の実現は人類社会の共通ビジョンである。人類の飽くなき挑戦は社会を飛躍的に発展させてきたが、地球環境への負荷は軽減されておらず、地域間の格差も依然として大きい。そのため国際社会は「持続可能な開発目標 (SDGs)」を設定し、経済・社会・環境に関わる広範な課題に総合的に取り組んでいる。SDGsの中には水、エネルギー、都市、気候変動、生態系・生物多様性など環境・エネルギー分野と関わりの深い目標が複数設定されている。これらの目標達成に向けた取組みへの貢献は環境・エネルギー分野の科学技術に求められる社会からの要請である。

地球温暖化に伴う気候変動に対する世界の関心や懸念は一段と深まっている。「緩和」に関しては、2016年11月に発効したパリ協定の実現に向け、野心的な長期目標を掲げる国・地域が徐々に増え、具体的な排出削減のシナリオや方策の検討も各地で進められている。しかしながら現行努力の延長線上ではパリ協定が目標とする地球上の平均気温を2°C以内に抑えることは困難であるとの見方は変わっておらず、更なる挑戦的な取組みが必要とされている。我が国でも2020年10月の菅内閣総理大臣(当時)の所信表明演説以降、2050年までに温室効果ガス排出の実質ゼロ(カーボンニュートラル)を目指すとの方針が国内外に示され、その実現に向けた検討や取組みが始まっている。

気候変動の影響は世界各地で既に顕在化しており、それらに対する「適応」の重要性が増している。気候変動に関する政府間パネル(IPCC)の第6次評価報告書は緩和と適応に同時に取り組む考え方「気候にレジリエントな開発(Climate resilient development: CRD)」を強調している。温度上昇が1.5°Cを超えると適応策が手遅れになる分野も急激に増えかねないとし、CRDに早急に取り組む重要性を指摘している。第27回気候変動枠組み条約締約国会議(COP27)では「損失と損害」基金の設置が決まった。

他方、エネルギーはあらゆる人間活動の基盤であり、エネルギーへのアクセスは持続可能な豊かな社会の実現の一要素である。元来、安全(Safety)を前提とした安定供給(Energy Security)、経済効率(Economic Efficiency)、環境負荷低減(Environmental Load)の同時達成すなわち「S+3E」はエネルギー分野における中心的な課題であり社会の要請である。カーボンニュートラルの実現に向けての文脈で環境負荷低減のみが注目されがちだが、社会基盤としてのエネルギーを考えた場合、それだけでは十分ではない。新型コロナウイルス感染症(COVID-19)による経済の落ち込みからの急回復と需給の切迫などによりエネルギー価格はここ数年上昇傾向にあったが、ロシアのウクライナ侵攻を機に価格高騰に拍車がかかった。さらにロシア産の原油、天然ガス、石炭に大きく依存していた欧州諸国はロシア以外の供給源からのエネルギー資源調達を余儀なくされている。こうした事態はカーボンニュートラルの実現に加えてエネルギー安全保障の重要性を再認識させることに大きく寄与した。当然、これは日本にとっても無関係ではない。天然資源に乏しくエネルギー資源の大半を海外からの輸入に頼る日本は安定供給には以前から大きなリスクを抱えていた。国際社会の情勢に大きく依存するため、日本社会にとって「S+3E」はパリ協定への貢献と並ぶ重要な目標と認識されている。

エネルギーの安定供給にはエネルギーシステムの安定化という側面も含まれる。豊かな自然に囲まれる日本の国土だが、自然災害も多く、各種災害に対してレジリエントなエネルギーインフラの構築は大きな社会的要請の1つである。電力システムの脱炭素化として火力発電の縮小や再生可能エネルギーの導入拡大等を進める中では需給バランスの安定化も極めて重要な課題と認識されている。

循環型経済(サーキュラーエコノミー)の構築も近年頻繁に取り上げられるようになってきている。プラスチックごみの問題が昨今の代表事例である。回避可能な使用の抑制や廃棄物の適正管理、新素材開発などに各国政府が取り組んでいる。懸念されたマイクロプラスチックの環境影響リスクについては未だ科学的に未解明であり、リスク評価のための研究が進められている。循環型経済を拡大的に捉える動きもある。人為的な活動に伴い大気中に放出されるCO₂を回収し、貯留ないし循環利用しようとする取組みがカーボンリサイクルと呼ばれ活発化している。

COVID-19への対応も重要な社会的要請である。世界的な流行以降、新型コロナウイルスの特徴が明ら

かになるにつれて、ワクチン開発等のみならず、感染リスクをどう把握し管理するかという観点からの研究開発も活発に行われた。在宅ワークの浸透など社会の在り方にも大きな変化がもたらされた。その一方、温室効果ガス排出の大幅な減少や大気環境などの改善は経済活動の再開に伴い一時的な現象にとどまった。ここ数年はこうした様々な社会変化に対応する科学的知見や新規技術の創出への期待が高まった。

1.1.2 科学技術の潮流・変遷

今般の俯瞰を行うにあたり、前提として捉えるべき既に顕在化しているトレンドは以下の5点である。これらは環境・エネルギー分野の科学技術、研究開発の潮流に大きな影響を与えている。

- ①気候変動緩和に貢献する科学技術（カーボンニュートラル）
- ②持続可能なエネルギー技術の位置づけに関する議論（例：タクソミー規則）
- ③エネルギー安全保障の重要性の再認識（ウクライナ情勢）
- ④異常気象・気候変動への対応に貢献する科学技術（予測、対策）
- ⑤デジタル・トランスフォーメーション（例：AI、自動無人機、ビッグデータ、CPS）

カーボンニュートラルの実現は極めて高い目標であるため、科学技術イノベーションの貢献に期待が寄せられている。どのような実現経路がありうるのかを探索するシナリオ研究、再生可能エネルギーや蓄電池など個々の機器に関連する研究開発、建物や地域などを対象としたエネルギーマネジメントの研究開発等が従前より進められている。近年はカーボンニュートラルの達成に不可欠であるとして大気中に放出されるCO₂を回収・固定して地中に隔離・貯留するためのネガティブエミッション技術の検討も活発化している。

金融分野の動きも研究開発に影響を与えている。2006年に国連が公表した責任投資原則を受けて世界中の機関投資家には環境（Environment）、社会（Society）、企業統治（Governance）に係る課題を投資分析や意思決定プロセスに組み込むことが求められるようになり、投資対象となる主体にはESGの課題に関する適切な情報開示が求められるようになった。2017年には気候関連財務情報開示タスクフォース（TCFD）による提言が公表され注目された。EUは「サステナブル・ファイナンス」の法制化を進める一環として持続可能な経済活動の基準である「タクソミー規則」を2020年7月に発効した。EU域内の企業や金融機関は同規則に基づく情報開示が求められ、投資判断を行う際の基準にもなり得ることから、規則の詳細が注目されている。同規則では（1）気候変動緩和、（2）気候変動適応、（3）水や海洋資源の持続的利用・保全、（4）循環経済への移行、（5）汚染の予防と管理、（6）生物多様性と生態系の保全・回復、という6つの環境目的を定義している。先行的に詳細な検討が進んだのは気候変動緩和と気候変動適応である。このうち前者に関しては原子力エネルギーおよび天然ガスに関連する企業活動が本タクソミーに合致するかどうかの判断が大きいた争点となっていた。国により当該技術への依存度や位置づけが異なるためEU域内でも意見が分かれていたためである。コロナ禍での世界経済の停滞やウクライナ情勢を契機としたエネルギー安全保障の重要性再認識などにより一部に揺り戻しの雰囲気はあるものの、ESG投資の動きは着実に広まっている。

ここ数年の間の原油、天然ガス等の国際エネルギー市場の不安定化は著しく、エネルギー安全保障の重要性を改めて認識させるとともに、各国のエネルギー政策に影響を及ぼしている。コロナ禍での世界的な経済停滞によりエネルギー価格は上昇傾向にあったが、2022年2月からのロシアによるウクライナへの軍事侵攻を契機として価格高騰に拍車がかかった。この状況を受けて欧州は、これまで大きく依存していたロシア産エネルギー資源からの脱却の動きを強めている。例えばドイツでは、ロシア以外の供給国からの調達に備えて液化天然ガス輸入ターミナルを建設し、原子力発電の廃止の一時的な延期を発表している。エネルギーキャリアとしての水素への投資を大幅に強化するなど研究開発にも顕著な動きが見え始めている。カーボンニュートラルの実現のみならず、エネルギー安全保障との両立をどう達成するかが世界的に新たに直面するテーマと

なっている。

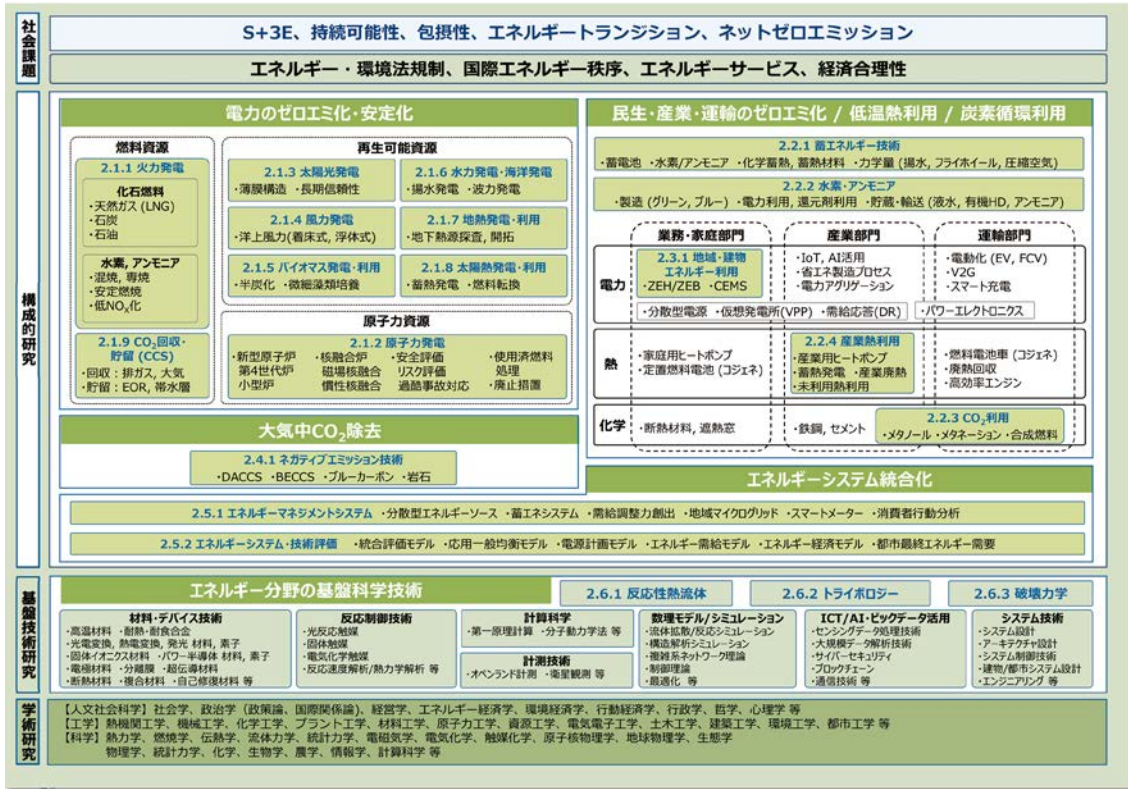
熱波、洪水、干ばつ、低気圧、火災といった気候関連の極端現象による被害は依然として甚大である。インフラ、都市生活、食料生産、自然生態系等、幅広く社会・自然に影響を与える。近年はそれらに対する気候変動の影響も顕在化しつつある。社会を維持していくためにはこうした様々な環境変化に適応していかなければならず、その必要性は年々高まっている。気候変動に関する政府間パネル（IPCC）の第6次評価報告書第2作業部会報告書でも緩和と適応に同時に取り組む考え方「気候にレジリエントな開発（Climate resilient development）」を強調している。気候と人間社会と生物多様性を含む生態系の相互作用を重視した考え方である。関連する研究開発としては、将来起こり得る影響の予測や評価、あるいは対策に関するものが行われている。

分野を問わず、社会のあらゆる側面でデジタル・トランスフォーメーション（DX化）が進みつつある。ドローンなどの自動無人機を活用したデータ収集は環境・エネルギー分野の重要なツールになり始めており、これまで観測困難だった場所や地域の観測を可能とし、新たなデータ収集に貢献している。膨大なデータを処理・解析するためのプラットフォームも普及し始め、グローバルな規模の環境分析が研究室レベルでも可能になっている。データ解析では機械学習・深層学習の応用が本分野でも幅広く浸透している。計算機性能の向上を背景としたシミュレーション技術の高度活用も活発化している。とくに産業界では観測・計測技術や情報通信技術との組み合わせによって実世界とサイバー空間をつなぐCPS（サイバーフィジカルシステム）を自社の技術やサービスに取り込む事例が多数出現している。

1.1.3 俯瞰の考え方（俯瞰図）

本書では分野の概観を図で示したものを「俯瞰図」と呼ぶ。エネルギー分野と環境分野の間には持続可能な豊かな社会の実現という共通するビジョンがあるが、研究開発の内訳は必ずしも同じではない。特にエネルギー分野は産業との関係が密接であるのに対して、環境分野は必ずしもそうではない。そこで本書では環境・エネルギー分野としての俯瞰図を、共通のフレームに基づく2つの図として描いている（図表1.1.3-1、図表1.1.3-2）。

環境・エネルギー分野を構成する研究開発領域は広範だが、本書では以下に示す考え方に基づいて35の研究開発領域を設定した。これらの一部は2019年版からの継続領域だが、いくつかの領域については既存領域を再編成した。



図表 1.1.3-1 エネルギー分野の俯瞰図



図表 1.1.3-2 環境分野の俯瞰図

研究開発領域の抽出は主として3つの基準に照らして検討した。それは、①「社会の要請・ビジョン」、②「社会的・産業的インパクト」、③「横断的基盤研究分野」、の3つである。「社会の要請・ビジョン」は、1.1.2で述べたような各種社会的要請に応えるための研究開発にフォーカスする必要があるとの考えに基づく。「社会的・産業的インパクト」は、温室効果ガスの排出削減のように一定程度の量的規模の社会的インパクトに繋がりを研究開発領域や、日本の産業構造に鑑みて重要と思われる研究開発領域に注目する必要があるとの考えに基づく。「横断的基盤研究分野」は、社会の要諦・ビジョンや産業構造などからは直接的には浮かび上がってこないが、それらを幅広く支える基盤的な科学・技術があり、それらの研究開発動向も捉える必要があるとの考えに基づく。これら3つの基準を軸とし、1.1.2で述べた「科学技術の潮流・変遷」や2021年版の領域構成からの継続性、更には読者による使い勝手を総合的に勘案した上で領域を再構成した（図表1.1.3-3）。

図表 1.1.3-3 第2章で取り上げた研究開発領域の名称

区分	領域名	区分	領域名
2.1 電力のゼロエミ化・安定化	2.1.1 火力発電	2.7 地球システム 観測・予測	2.7.1 気候変動観測
	2.1.2 原子力発電		2.7.2 気候変動予測
	2.1.3 太陽光発電		2.7.3 水循環（水資源・水防災）
	2.1.4 風力発電		2.7.4 生態系・生物多様性の 観測・評価・予測
	2.1.5 バイオマス発電・利用	2.8 人と自然の調和	2.8.1 社会-生態システムの 評価・予測
	2.1.6 水力発電・海洋発電		2.8.2 農林水産業における気候変動 影響評価・適応
	2.1.7 地熱発電・利用		2.8.3 都市環境サステナビリティ
	2.1.8 太陽熱発電・利用		2.8.4 環境リスク学的感染症防御
	2.1.9 CO ₂ 回収・貯留（CCS）		2.9 持続可能な資源利用
2.2 産業・運輸部門の ゼロエミ化・ 炭素循環利用	2.2.1 蓄エネルギー技術	2.9.2 持続可能な大気環境	
	2.2.2 水素・アンモニア	2.9.3 持続可能な土壌環境	
	2.2.3 CO ₂ 利用	2.9.4 リサイクル	
	2.2.4 産業熱利用	2.9.5 ライフサイクル管理 （設計・評価・運用）	
2.3 業務・家庭部門の ゼロエミ化・低温熱利用	2.3.1 地域・建物エネルギー 利用	2.10 環境分野の 基盤科学技術	2.10.1 地球環境リモートセンシング
2.4 大気中CO ₂ 除去	2.4.1 ネガティブエミッション技術		2.10.2 環境分析・化学物質リスク 評価
2.5 エネルギーシステム 統合化	2.5.1 エネルギーマネジメント システム		
	2.5.2 エネルギーシステム・ 技術評価		
2.6 エネルギー分野の 基盤科学技術	2.6.1 反応性熱流体		
	2.6.2 トライボロジー		
	2.6.3 破壊力学		