

2. 俯瞰対象分野の全体像

2.1 俯瞰の範囲と構造

本報告書では、環境分野を「人が関わる空間および生態系を一つのシステムとして理解し、顕在化した事象への対処のみならず起こりうる事象を予測し対処することで、人と自然の営みを維持・発展させるための研究開発分野」と定義する。環境分野はあらゆる学問領域に関わるだけでなく、その目的を実現するために研究者のみならず社会を構成する全ての組織や個人が課題を認識・共有し活動に取り組む必要がある。研究開発にあたっては、個々の要素技術のみならず、課題の解決に必要な複数の要素技術を組み合わせ最適化し、その導入のために社会の受容性や制度設計なども含めて総合的に検討することが求められる。また、環境分野で対象とする現象や課題は地球規模であり、国際的な体制の構築や取り組みへの貢献も不可欠である。

以上の特徴を踏まえ、環境分野の俯瞰図を図 2-1 の通り 4 つの階層で構成した。

第 1 階層は分野を支える学術研究である。自然科学のみならず、人文社会科学も含めほぼ全ての学問が関連する。

第 2 階層として、共通要素技術を設定した。現在顕在化しつつある地球規模の複雑な環境の課題を正しく理解し対処するため、さらには、起こりうる事象を予測し対処するため、観測・計測技術と予測・評価技術による科学的データの提示は重要な役割を担う。そして、そこから得られた知見に基づき適した対策を行うことが科学技術の貢献として求められている。また、観測・計測技術の発展による膨大かつ詳細なデータの取得と、情報科学技術の進展によるデータの解析が可能となりつつあり、様々な要因が複雑に関係する環境の課題において、環境情報基盤とその利活用が重要な位置付けとなっている。

第 3 階層は、第 2 階層の共通要素技術を課題毎に対応させた構成技術である。本階層では、気候変動区分、環境汚染・健康区分、生物多様性・生態系区分、循環型社会区分の 4 区分を設定した。本 4 区分は相互に関連し、多くの研究開発が区分をまたがって行われている。

第 4 階層は社会実装技術を設定した。課題を解決するためには、システム・設計・エンジニアリングや、法・規制・制度、社会受容、経済性評価などの人文社会の技術が必要とされ、学際性（interdisciplinarity）のみならず、あらゆる関係者が参加するトランスディシプリナリ性（transdisciplinarity）も求められる。

2011 年の東日本大震災は、自然災害や人為的災害による影響の把握と評価、被害軽減や早期回復のための対策の必要性を改めて認識させるものであった。今後、気候変動による極端現象の増加、南海トラフ巨大地震や首都直下地震の発生などが懸念されており、研究開発に災害時の視点を取り込むことも重要である。

本報告書の第 3 章では、各課題の解決に向けて行われている研究開発の動向を詳しく把握するために、第 3 階層の構成技術を、4 区分・15 の研究開発領域に細分化することで現状を分析することとした（表 2-1）。

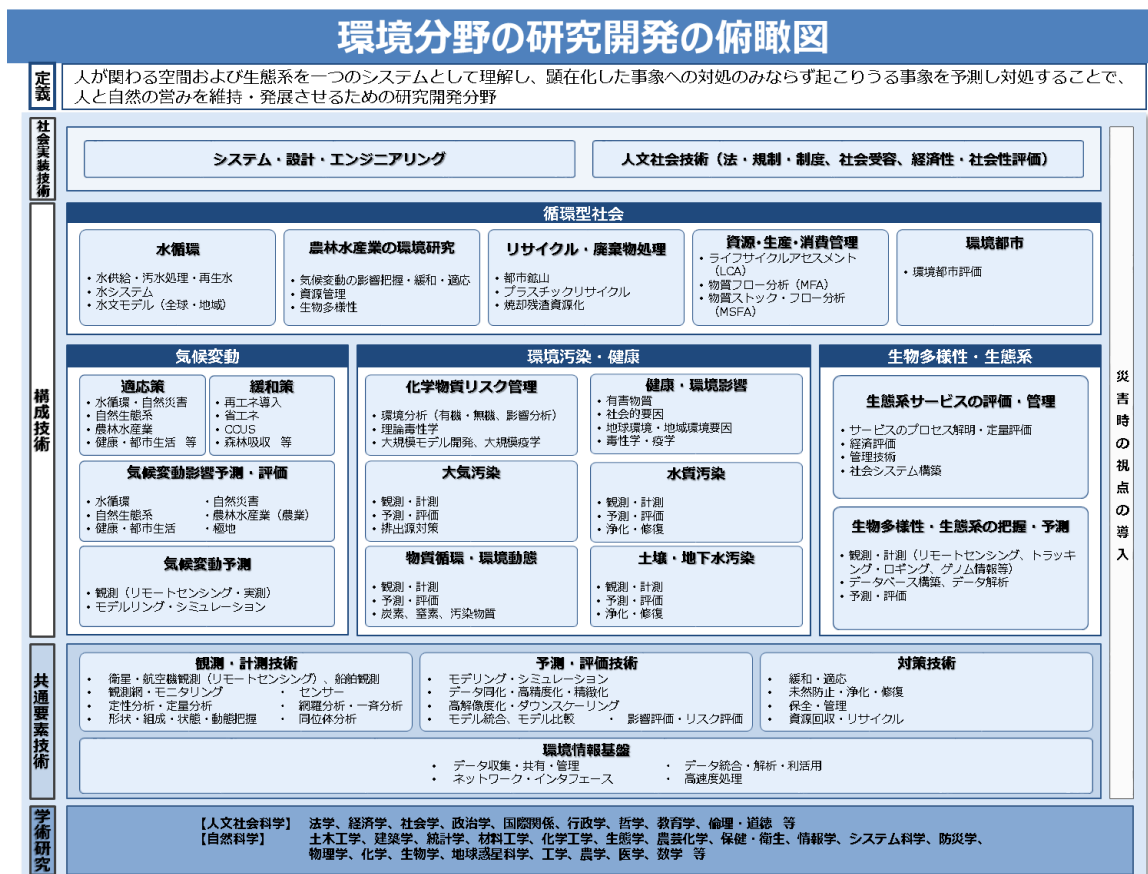


図 2-1 環境分野の研究開発の俯瞰図

表 2-1 4つの区分と15の研究開発領域

気候変動区分	生物多様性・生態系区分
1. 気候変動予測	9. 生物多様性・生態系の把握・予測
2. 気候変動影響予測・評価	10. 生態系サービスの評価・管理
環境汚染・健康区分	循環型社会区分
3. 大気汚染	11. 水循環
4. 水質汚染	12. 農林水産業の環境研究
5. 土壌・地下水汚染	13. リサイクル・廃棄物処理
6. 物質循環・環境動態	14. 資源・生産・消費管理
7. 健康・環境影響	15. 環境都市
8. 化学物質リスク管理	

※気候変動区分の緩和策については、エネルギー分野で取り扱う研究開発領域が該当すること、また、森林や農地土壌の温室効果ガス（GHG）吸収や農地土壌による GHG 排出抑制は、気候変動区分の「気候変動影響予測・評価」、及び、循環型社会区分の「農林水産業の環境研究」で取り扱うことから、研究開発領域として設定していない。適応策については、気候変動影響予測・評価に基づいて行われるため、「気候変動影響予測・評価」の一部として扱う。

2.2 分野における研究開発の歴史・変遷

（1）気候変動区分

二酸化炭素（CO₂）等の温室効果ガス（GHG）による温暖化の現象は、スウェーデンの物理化学者であるアレニウスにより 19 世紀末にはメカニズムを解明する理論が発表されていた。その後、1958 年に米国スクリプス研究所のキーリングがハワイのマウナロア観測所で大気中の CO₂ 濃度の観測を開始し、観測データの蓄積により CO₂ 濃度の上昇が明らかにされ、温暖化研究が取り組まれるようになった。1985 年、国連環境計画（UNEP）主催で科学者による地球温暖化に関する国際会議であるフィラハ会議（オーストリア）が開催され、「21 世紀前半には地球の平均気温の上昇が人類未曾有の規模で起こり得る」との声明を発表した。この会議以降、社会的認識が高まり、科学者と政策担当者が参画した議論が進んでいった。その主要な役割を果たしたのが、1988 年に世界気象機関（WMO）と UNEP により設立された「気候変動に関する政府間パネル（IPCC）」である。IPCC は、気候システムおよび気候変動についての評価を行う第 1 作業部会（WG1）、生態系、社会・経済などの各分野における影響および適応策についての評価を行う第 2 作業部会、気候変動に対する対策（緩和策）について評価を行う第 3 作業部会（WG3）、各国における GHG 排出量・吸収量の目標に関する計画の運営委員会であるインベントリ・タスクフォース（TFI）で構成され、科学的知見の集積と整理を継続して実施している。最新の第 5 次評価報告書（WG1）では、温暖化には疑う余地がなく、20 世紀半ば以降の温暖化の主な要因は、人間の影響の可能性が極めて高い（95%以上）とされた（図 2-2）。現在第 6 次評価報告書作成に向けた取り組みが実施されている。^{1,2}

報告書	公表年	人間活動が及ぼす温暖化への影響についての評価
第1次報告書 First Assessment Report 1990(FAR)	1990年	「気温上昇を生じさせるだろう」 人為起源の温室効果ガスは気候変化を生じさせる恐れがある。
第2次報告書 Second Assessment Report: Climate Change 1995(SAR)	1995年	「影響が全地球の気候に表れている」 識別可能な人為的影響が全球の気候に表れている。
第3次報告書 Third Assessment Report: Climate Change 2001(TAR)	2001年	「可能性が高い」(66%以上) 過去50年に観測された温暖化の大部分は、温室効果ガスの濃度の増加によるものだった可能性が高い。
第4次報告書 Fourth Assessment Report: Climate Change 2007(AR4)	2007年	「可能性が非常に高い」(90%以上) 温暖化には疑う余地がない。20世紀半ば以降の温暖化のほとんどは、人為起源の温室効果ガス濃度の増加による可能性が非常に高い。
第5次報告書 Fifth Assessment Report: Climate Change 2013(AR5)	2013~ 14年	「可能性が極めて高い」(95%以上) 温暖化には疑う余地がない。20世紀半ば以降の温暖化の主な要因は、人間の影響の可能性が極めて高い。

図 2-2 これまでの IPCC の報告（WG I） 出典：環境省²

¹ 文部科学省, 平成 16 年版 科学技術白書
http://www.mext.go.jp/b_menu/hakusho/html/hpaa200401/hpaa200401_2_013.html

² 環境省 IPCC 第 5 次評価報告書の概要 -第 1 作業部会(自然科学的根拠)
https://www.env.go.jp/earth/ipcc/5th/pdf/ar5_wg1_overview_presentation.pdf

将来の気候変動やその影響についてモデルを用いた予測が行われているが、モデルを用いた予測には予測作業そのもの及び予測結果の評価・検証の両面において様々な観測データを必要とする。これまで様々な観測が行われてきたが、中でも衛星観測は地球規模で時空間的に均一、高密度なデータを取得できる唯一の観測方法であり、極めて重要である。

1957年に旧ソ連が世界初の人工衛星スプートニク1号を打ち上げ、1960年に米国が世界初の気象衛星であるTIROS-1（極軌道衛星）を打ち上げた。その後、1975年に米国の静止気象衛星シリーズであるGOESの1号機が、1977年に日本の静止気象衛星シリーズであるひまわりの1号機が打ち上げられた。気象衛星による当初の観測データは雲の分布の把握等に用いられていたが、やがて熱赤外域のカメラによる海面温度／雲頂温度の観測が、さらに赤外域の高波長分解能分光計／サウンダによる気温等の鉛直分布の観測も行われるようになった。災害予測等にも関係する降雨観測では、日米による熱帯降雨観測衛星（TRMM：Tropical Rainfall Measuring Mission、運用1997～2015年）により先駆的な観測が行われた。その後、全球降水観測計画（GPM：Global Precipitation Measurement、日本が開発したGPMコア衛星は2014年打ち上げ済み）が国際共同事業として実施されている。また、米国のGPS衛星等からの電波の到達時間が大気中の水蒸気等によって変わることを利用した全球の水蒸気量分布の把握も行われ、既に気象庁による天気予報でも利用されている。

地球温暖化については、GHGの濃度及びその時空間分布を、衛星で十分な精度で把握することが技術的に困難であり、全球に100～200カ所程度ある地上局での観測に強く依存していた。CO₂とメタンについて対流圏下部まで感度を持つ観測を行った世界初の衛星は、日本の環境省・宇宙航空研究開発機構（JAXA）・国立環境研究所（NIES）によるGHG観測技術衛星（いぶき、GOSAT：Greenhouse Gases Observing Satellite、2009年打ち上げ）である。その後、2014年にCO₂のみを観測する衛星OCO-2（Orbital Carbon Observatory 2）を米国が、2016年末には中国がTanSatを打ち上げた。2017年度には日本がGOSAT-2を、2020年にはフランスがMicroCarbを打ち上げる予定である。

衛星以外では、大気中GHG濃度を大きく左右する陸域の炭素循環について、CO₂等のフラックス観測を行うタワーが世界各地に建設され、そのデータについては各種地域ネットワーク（AsiaFlux等）や全球ネットワーク（FLUXNET）での共有が始まっている。GHGと共に大気の放射強制力を大きく左右するエアロゾルについては、米国宇宙航空局（NASA）主導のAERONETや日本が推進するSKYNET、AD-NET等の地上観測ネットワークが活動している。

気候モデルは、関連する様々な要素を取り込み、対象となる過程と複雑性を増大させながら発展してきた（図2-3）。地球温暖化がもたらす環境変化の包括的な予測を行う際、炭素循環と気候変化の相互作用など、従来の気候モデルには含まれていない過程を考慮することが要請される。海陸の炭素循環や大気微量組成間の化学反応など、生物、化学的過程を含んだ気候モデルが多数開発されてきており、それらの総称が地球システムモデル（ESM：Earth System Model）である。近年ESMが盛んに開発されるようになったきっかけは、炭素循環フィードバックによる温暖化の加速の可能性が示されたことであろう³。多くのESMが炭素循環フィードバックは正の符号をもつ（すなわち温暖化の加速）を示しているが、最近では

³ Cox, P., R. Betts, C. Jones, S. Spall, and I. Totterdell, 2000: Acceleration of global warming due to carbon-cycle feed-backs in a coupled climate model, *Nature*, 408, 184–187.

陸域植生の活動が窒素量により制限されることを考慮すると、この符号が負にもなりうるということが分かってきた⁴。現在、多くの研究機関が ESM への窒素循環過程導入に取り組んでいる。

地球表層環境をシステムとして見る考え方の提唱者として、1970年代に地球環境の維持に生物圏が能動的役割を果たすとするガイア仮説を発表し論争を起こしたジェームズ・ラブロック（英）とリン・マーギュリス（米）などを挙げることができる。これらの業績を礎としながら、地球システム科学という術語を明示的に用い、今日的な意味の輪郭を初めて明確にしたのは、1988年に米国 NASA 諮問会議から提出された報告書⁵であろう。この報告書では地球システム科学の目標を「地球システムの構成要素および要素間の相互作用がどのように発展してきたか、どのように機能しているか、またあらゆる時間スケールについて将来どのように発展していくか、を記述して、地球システム全体についての科学的理解を得ること」と規定し、目標達成のための道具立てとして、全球規模観測や、観測データおよび研究成果を効率的に配布するための情報ネットワーク、モデリングの重要性を指摘している。

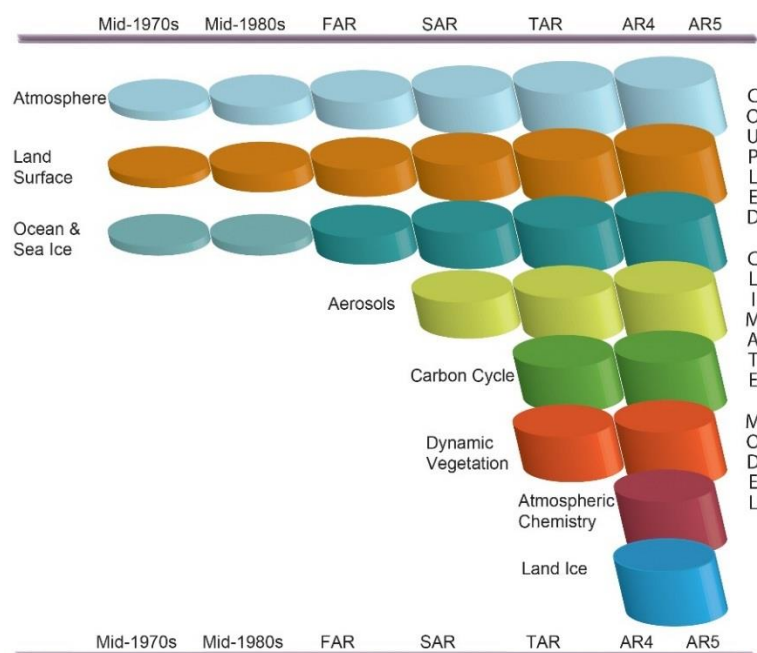


図 2-3 気候モデルの発展の経緯

出典：Climate Change 2013: The Physical Science Basis (IPCC WG1 AR5)⁶

多くのモデルが開発されると同時に、モデルを相互に比較する作業も進行している。1995年、世界気候研究計画（WCRP）の結合モデル作業部会（WGCM）により結合モデル相互比較計画（CMIP：Coupled Model Intercomparison Project）が開始された。IPCC の第 5 次評価報告書（AR5）では、第 5 期結合モデル相互比較計画（CMIP5：Coupled Model Intercomparison Project Phase 5）の結果が活用されている。図 2-4 に CMIP5 に参加した気

⁴ Thornton, P. E., S. C. Doney, K. Lindsay, J. K. Moore, N. Mahowald, J. T. Randerson, I. Fung, J.-F. Lamarque, J. J. Feddema, and Y.-H. Lee, 2009: Carbon-nitrogen interactions regulate climate-carbon cycle feedbacks: results from an atmosphere-ocean general circulation model, *Biogeosciences*, 6, 2099–2120.

⁵ NASA Advisory Council, 1988: Earth System Science: A Closer View, Report of the Earth System Sciences Committee, National Aeronautics and Space Administration, Washington, D.C., 208pp.

⁶ IPCC, Climate Change 2013: The Physical Science Basis <http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/>

候モデルを示す。日本からは気象庁気象研究所等によるモデル（MRI のシリーズ）、海洋研究開発機構（JAMSTEC）等によるモデル（MIROC のシリーズ）が参加している。IPCC の第 6 次評価報告書（AR6）で重要な役割を果たす第 6 次結合モデル相互比較プロジェクト（CMIP6）の仕様において ESM の使用が必須となる実験が設定されており⁷、CMIP6 参加機関の多くから ESM を用いた実験結果が提出される見込みである。

	ACCESS1.0		CESM1 (WACCM)		GFDL-CM2.1		HadGEM2-AO		MPI-ESM-LR
	ACCESS1.3		CESM1 (FASTCHEM)		GFDL-CM3		HadGEM2-CC		MPI-ESM-MR
	BCC-CSM1.1		CMCC-CESM		GFDL-ESM2G		HadGEM2-ES		MPI-ESM-P
	BCC-CSM1.1(m)		CMCC-CM		GFDL-ESM2M		INM-CM4		MRI-AGCM3.2H
	BNU-ESM		CMCC-CM5		GFDL-HIRAM-C180		PSL-CM5A-LR		MRI-AGCM3.2S
	CanCM4		CNRM-CM5		GFDL-HIRAM-C360		IPSL-CM5A-MR		MRI-CGCM3
	CanESM2		CSIRO-Mk3.6.0		GISS-E2-H		IPSL-CM5B-LR		MRI-ESM1
	CCSM4		EC-EARTH		GISS-E2-H-CC		MIROC4h		NCEP-CFSv2
	CESM1(BGC)		FGOALS-g2		GISS-E2-R		MIROC5		NorESM1-M
	CESM1(CAM5)		FGOALS-s2		GISS-E2-R-CC		MIROC-ESM		NorESM1-ME
	CESM1 (CAM5.1.FV2)		FIO-ESM v1.0		HadCM3		MIROC-ESM-CHEM		

図 2-4 CMIP5 に参加した 54 の気候モデル 出典：東京大学大気海洋研究所⁸

気候変動がもたらす様々な影響の予測・評価も進展している。これまで地球温暖化の影響が本当に出ているか（影響の検出）について長い間議論があったが、IPCC の第 5 次評価報告書（AR5）では、ここ数十年ですべての大陸と海洋において気候の変化が自然及び人間システムに対して影響を引き起こしていると評価した（図 2-5）。日本でも、農業・林業・水産業、水環境・水資源、自然生態系、自然災害・沿岸域、健康、産業・経済活動、国民生活・都市生活への影響評価が実施された（図 2-6）。比較的研究成果あるいは論文や知見が充実している分野に農林水産業と自然災害があるが、それ以外は不足しており、特に経済活動や国民生活、都市生活への影響を把握する必要がある。なお、影響評価は気候モデルの予測値を元に行うため不確実性が伝播することから、可能性を確率で評価する段階に達していない。専門家の判断に基づく不確実性の程度を「確信度」で示している⁹。

⁷ C. D. Jones, V. Arora, P. Friedlingstein, L. Bopp, V. Brovkin, J. Dunne, H. Graven, F. Hoffman, T. Ilyina, J. G. John, M. Jung, M. Kawamiya, C. Koven, J. Pongratz, T. Raddatz, J. Randerson, and S. Zaehle, The C4MIP experimental protocol for CMIP6, Geoscientific Model Development, in press, 2016, doi:10.5194/gmd-2016-36

⁸ 東京大学大気海洋研究所, 暑いだけじゃない地球温暖化 2—世界の気候モデルが予測する東アジアと日本の雨—
http://ccsr.aori.u-tokyo.ac.jp/~takayabu/pamphlet_pdf/pamphlet_2_hres.pdf

⁹ JST CRDS, 俯瞰ワークショップ報告書 環境分野の研究開発の概況
<http://www.jst.go.jp/crds/pdf/2016/WR/CRDS-FY2016-WR-06.pdf>

報告書	公表年	気候変動が及ぼす観測された影響
第1次報告書 First Assessment Report 1990(FAR)	1990年	全体に対する明確な記述なし(分野については記載あり)
第2次報告書 Second Assessment Report: Climate Change 1995(SAR)	1995年	全体に対する明確な記述なし(分野については記載あり)
第3次報告書 Third Assessment Report: Climate Change 2001(TAR)	2001年	近年の地域的な気候変化、特に気温の上昇は既に多くの物理・生物システムに対して影響を及ぼしている。
第4次報告書 Forth Assessment Report: Climate Change 2007(AR4)	2007年	すべての大陸及びほとんどの海洋で観測によって得られた証拠は、多くの自然システムが、地域的な気候変動、とりわけ気温上昇の影響を受けつつあることを示している。
第5次報告書 Fifth Assessment Report: Climate Change 2014(AR5)	2014年	ここ数十年で、すべての大陸と海洋において、気候の変化が自然及び人間システムに対して影響を引き起こしている。

図 2-5 これまでの IPCC の報告（WG II） 出典：環境省¹⁰

気候変動影響評価結果の概要

【重大性】

●: 特に大きい

△: 中程度

□: 低い

○: 現状では評価できない

【緊急性】

●: 高い

△: 中程度

□: 低い

○: 現状では評価できない

分野	大項目	小項目	重大性	緊急性	確信度		
農業・林業・水産業	農業	水稲	○	△	●		
		野菜	○	△	●		
		果樹	●	●	●		
		麦、大豆、飼料作物等	●	△	△		
		畜産	●	△	△		
		病害虫・雑草	●	●	●		
	林業	農産生産基盤	●	●	●		
		木材生産(人工林等)	●	□	□		
		特用林産物(きのこ類等)	●	□	□		
		水産業	回遊性魚介類(魚類等の生態)	●	□	□	
水環境・水資源	水環境	増養殖等	●	●	□		
		湖沼・ダム湖	●	△	△		
		河川	△	□	□		
		沿岸域及び閉鎖性海域	△	□	□		
	水資源	水供給(地表水)	●	●	△		
		水供給(地下水)	△	●	□		
		水需要	△	●	△		
		自然生態系	陸域生態系	高山帯・亜高山帯	●	●	△
				自然林・二次林	●	△	△
				里地・里山生態系	△	△	□
人工林	△			●	△		
野生鳥獣による影響	●			●	○		
物質収支	●			△	△		
淡水生態系	湖沼		●	△	□		
	河川		●	△	□		
	渾原		●	△	□		
	沿岸生態系		亜熱帯	●	●	□	
海洋生態系	温帯・亜寒帯	●	●	△			
	温帯・亜寒帯	●	●	△			
自然生態系	生物季節	生物季節	△	●	●		
		分布・個体群の変動	※「生態系」の自然系に 対する評価のみ記載	●	●	●	
	自然災害・沿岸域	河川	洪水	●	●	○	
		沿岸	内水	●	●	△	
			海面上昇	●	●	○	
			高潮・高波	●	●	●	
	健康	海岸侵食	●	●	△		
		山地	土石流・地すべり等	●	△	△	
		その他	強風等	●	△	△	
		冬季の温暖化	冬季死亡率	△	□	□	
産業・経済活動	暑熱	死亡リスク	●	●	●		
		熱中症	●	●	●		
	感染症	水系・食品媒介性感染症	○	○	□		
		節足動物媒介感染症	●	○	○		
	その他	その他の感染症	○	○	○		
		※「複合影響」に対する評価のみ記載	○	○	△		
	製造業	製造業	△	□	□		
		エネルギー需給	エネルギー需給	△	□	△	
			商業	○	○	□	
		金融・保険	●	○	□		
観光業		●	△	●			
建設業		○	○	○			
医療		○	○	○			
その他		その他(海外影響等)	○	○	□		
国民生活	都市インフラ、ライフライン	水道、交通等	●	○	□		
	文化・歴史を感じる暮らし	生物季節	△	●	○		
		伝統行事・地場産業等	○	○	□		
	その他	暑熱による生活への影響等	●	●	●		

出典: 中環審地球環境部会(第126回、2015.8.12)資料

38

図 2-6 各分野の気候変動影響の評価結果¹¹

¹⁰ 環境省, IPCC 第 5 次評価報告書の概要 - 第 2 作業部会(影響・適応・脆弱性)

https://www.env.go.jp/earth/ipcc/5th/pdf/ar5_wg1_overview_presentation.pdf

¹¹ 環境省 中央環境審議会 地球環境部会 (第 126 回) 資料 3 <http://www.env.go.jp/council/06earth/y060-126/mat03.pdf>

影響予測についてもモデルの相互比較が行われている。ドイツのポツダム気候影響研究所（PIK）は、水資源・水災害、陸域生態系、農業（生物物理・農業経済）、健康（マラリア）について比較する気候変動影響評価プロジェクト（ISI-MIP：Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project）を立ち上げた。例えば、水に関して、フェーズ1には11の全球水文モデルが参加し、IPCC第5次評価報告書（AR5）に大きな貢献をした。現在はフェーズ2が実施されており、第6次評価報告書（AR6）等への貢献を目指した活動が行われている。なお、日本からは、人間活動を含む代表的な全球水文モデルであるH08モデル（水資源・水災害、国立環境研究所）のほか、MATSIROモデル（水資源・水災害、東京大学）、VISITモデル（陸域生態系、国立環境研究所）の三つが参加した¹²。農業分野でも農業モデル相互比較・改善プロジェクト（AgMIP：Agricultural Model Intercomparison and Improvement Project）が組織され、作物別及び地域別の活動が推進されている。

影響評価の結果を適応策に活用するために、気候変動予測とそれに伴う不確実性の定量評価が求められることから、アンサンブルシミュレーションも行われるようになってきている。アンサンブルシミュレーションとは、異なる初期値を入力して計算を行い平均やばらつきなどを考慮して予測すること、または計算結果の広がりから予測の確からしさを求めたりすることである。予測の誤差の原因は、初期値の誤差または予測モデルの不完全さの2つに大きく分けられる¹³。文部科学省の気候変動リスク情報創生プログラムでは、極端気象について、多数（最大100メンバ）のアンサンブル実験を行い「地球温暖化対策に資するアンサンブル気候予測データベース（d4PDF：Database for Policy Decision making for Future climate change）」を作成し、適応策への活用を期待して公開している。

その他、ESMとも共通するが、数値モデルに観測データを取り込むことで高精度で推定するデータ同化や、将来推計結果を時空間的により詳細な情報にするダウンスケーリングなどの努力が続けられている。

（2）環境汚染・健康区分

かつての公害のような高レベルの単一原因による健康や環境影響から、低レベルの複数要因による影響、さらには、地球規模の環境問題による健康影響へと課題が遷移してきている。こうした変化を受け、特定の要因に対する研究から、全体を調べて要因を拾い出すような探索的な研究が増加してきたことが大きな特徴である。そして、局所・地域に留まらず、広域かつ地球規模の視野で、気候変動や、生態系管理、資源利用等も含め統合的に研究や取り組みを推進することの重要性も認識されている。

都市部での大気汚染による最初の健康被害は、1952年のロンドン・スモッグ事件であり、通常より約4千人も死亡者が増加した。原因は石炭燃焼による煤煙・煤塵、硫黄酸化物（SO_x）などであり、曝露濃度と死亡率や罹患率などの健康影響との関係性を評価することで大気汚染の医学研究を飛躍的に推進させることにもなった。日本では1960年頃からの四日市喘息が挙げられる。原因はSO_xを含む汚染物質によるものであり、排出基準の強化とそれに対応

¹² 国立環境研究所 地球環境研究センターニュース 2012年11月号 [Vol.23 No.8] 通巻第264号 201211_264001
<http://www.cger.nies.go.jp/cgernews/201211/264001.html>

¹³ 気象庁、アンサンブル予測 <http://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/whitep/1-3-8.html>

した工場・事業所側の集塵装置、排煙脱硫・脱硝設備の導入や重油の低硫黄化対策などにより、環境基準達成が向上した。一方、都市部光化学スモッグが問題となり、原因の1つである窒素酸化物（NO_x）に対し、固定発生源の排出基準強化や自動車排出ガスを規制し、炭化水素も規制した。自動車の急増による NO_x や浮遊粒子状物質（SPM: Suspended Particulate Matter）などの局地的汚染に対しては、特にガソリン車における電子制御式燃料噴射と三元触媒の組み合わせ、さらには燃料の無鉛化などの燃料性状の進展を見極めながら強化されてきたが、大都市部については新車対策のみでは NO_x や SPM などの改善が進まない状況が続いた。さらにディーゼル車による粒子状物質（PM: Particulate Matter）の発がん性を指摘する研究例も出てきたため、1992年には東京都がディーゼル車への対策強化を行った。これを契機にフィルター装置（DPF: Diesel Particulate Filter）を装着したディーゼル車の市場導入が前倒しし、既販車への DPF 装置の装着対応、および DPF 装着時に必要となる低硫黄軽油の早期導入などの対策が進んだ。2009年にはディーゼル車の新車全てに DPF 装着を前提とした排出ガス規制強化が行われ、それ以前のディーゼル車への早期対策も含めて SPM は大きく改善している。なお、現在では大型ディーゼル車への NO_x 排出規制強化の検討ならびに国際基準調和として自動車排出ガスの試験法統一の検討も行われている¹⁴。日欧米の大気質の残された課題は光化学オキシダント（オゾン）と PM_{2.5} とされている。

大気汚染は、範囲が広域であり生成機構が複雑なため、対策には大気濃度場の時空間構造とその変動、複雑な物理・化学過程を取り入れた大気モデルを用いた研究が重要であり、その果たすべき役割は増大している。

水質に関する初期の取り組みとして公衆衛生が挙げられる。1890年に明治政府はコレラなどの伝染病対策の一環として水道条例を制定し、1900年に下水道法を制定した。戦後は、産業活動により排出された重金属による公害が問題となり、1970年の水質汚濁防止法に基づき排水基準が定められ、水環境保全施策が進められた。生活排水対策として下水道や浄化槽の普及が進められ、現在では河川水質は代表的な汚濁指標である生物化学的酸素要求量（BOD: Biochemical Oxygen Demand）で見る限りは大きく回復した。富栄養化が懸念される湖沼では窒素規制およびリン規制が実施され、さらに湖沼水質保全特別措置法によって水質改善が図られた。しかし、湖沼や閉鎖海域には現在も貧酸素水塊が広がる場所がある。また、異常に増殖するシアノバクテリアによって臭気物質や毒素が産生される問題がある。有機物、溶存酸素、重金属や窒素・リンなどの古典的ともいえる汚染物質に対し、PCBsやDDTs、ダイオキシン類、有機スズ化合物、内分泌かく乱化学物質、近年では臭素系難燃剤、有機フッ素化合物、医薬品および日用品等由来化学物質（PPCPs: Pharmaceuticals and Personal Care Products）、ナノ物質など様々な物質による汚染が社会問題となってきた。最近では、微小なプラスチック粒子であるマイクロプラスチックによる海洋汚染、ヒ素などの自然由来物質による飲料水汚染も国際的に関心が高まっている。こうした物質群の処理技術の開発と同時に、分析技術の開発、環境動態や毒性の把握の努力が続けられている。

測定機器については、ガスクロマトグラフ/高分解能質量分析計（GC/HRMS）などがダイオキシンなどの分析に用いられ、医薬品などの測定には高速液体クロマトグラフ/タンデム質量分析（LC/MS/MS）などの技術が汎用されるようになった。従来指標の分析においても、

¹⁴ 一般社団法人日本自動車工業会、微小粒子状物質 SPM から PM_{2.5} へ <http://www.jama.or.jp/eco/PM25/pdf/PM25.pdf>

例えば従来の隔膜式に加えて光学式の溶存酸素計が開発されるなど、より安定的な測定方法が開発されてきている。現場測定でも水質を常時モニターしデータを蓄積あるいは携帯電話回線で送信する機器が開発されてきた。人工衛星からの光合成速度の推定などを行うリモートセンシング技術も進展した。水質を原位置で浄化する技術として、水生植物の定着による水質浄化や、曝気による貧酸素水塊の解消技術などが開発・実証されてきた。また、水質変化と流体モデルを組み合わせた生態系モデルが様々な水圏に適用され、水質汚濁メカニズムの解明や対策効果の推定に用いられてきた。日本の大都市では雨天時に未処理のまま下水が放流される越流水問題（CSO：Combined Sewer Overflow）があり、病原微生物の実態把握や評価も課題とされている。閉鎖性水域での栄養塩管理では、従来は栄養塩の除去のみを目指していたが、現在では漁業の振興の観点から季節によっては栄養塩を積極的に水域に排出した方がよいという考え方も支持されはじめており¹⁵、水産漁業、政策、水の流動シミュレーション、生態系モデルなど、多方面からのアプローチが求められている。

土壌・地下水汚染は、日本では 1870 年代後半の渡良瀬川流域の銅汚染をはじめとする鉱山廃水を原因とする農用地の汚染に始まった。1970 年代からは六価クロム汚染など都市部の土壌汚染が注目され、1991 年には重金属等 10 項目について土壌環境基準が設定、その後対象が拡大されていった。1997 年には 23 項目を対象とした地下水の環境基準が設定され、2001 年にふっ素およびほう素が土壌環境基準項目に追加された。2002 年に土壌汚染対策法が成立し、2010 年の改正では自然由来の重金属等含有土が規制対象とされた。こうした社会的動向を受けて、環境省など国による研究開発が行われてきた。その中には現在も有効な対策技術として利用されている嫌気性微生物による原位置 TCE（トリクロロエチレン）分解技術や鉄粉による TCE 分解技術が含まれる。2011 年の福島第一原子力発電所事故の発生後は、放射性物質の除染・減容化に関する様々な取り組みがなされている。比較的低濃度で広く分布している自然由来重金属等による土壌環境への負荷の軽減も重要な課題となっている。低コストかつ周辺環境に配慮した対策が重要であり、土砂から重金属等の溶出を低減する技術、吸着マットなどによる重金属等の除去技術などが活発に研究開発されている。

従来の土壌汚染に対する要素技術としては、生物を用いた浄化・修復技術であるバイオレメディエーションや植物を用いるファイトレメディエーション等の生物的处理、固化・不溶化処理に関する研究が盛んであるが、処理技術では特に原位置での浄化が目指されている。原位置浄化技術のうち化学的处理としては、フェントン法や鉄粉を用いた還元処理法、薬剤による吸着処理および透過性浄化壁を用いた化学処理などが挙げられる。新規の技術開発としては、マグネシウム化合物を用いたヒ素やセレンの化学形態の変換や吸着処理、プラズマを用いた揮発性有機化合物（VOC：Volatile Organic Compounds）の分解処理などが考案され、実用化されている。物理的处理としては、土壌洗浄やスパージングによる重金属や VOC の浄化・修復が行われている。最近では、マイクロバブルを用いた効率的な洗浄やスパージング技術も研究開発されている。なお、バイオレメディエーションは、1970 年代に米国で石油の分解に微生物を利用したのが始まりである。現在、主にガソリン等の燃料油やその成分であるベンゼン、トルエン、その他の石油系炭化水素、トリクロロエチレン等の炭化水素系溶剤などの浄化に実用化されている。ダイオキシンや塩素系の残留農薬などへの応用研究も

¹⁵ 山本民次、花里孝幸；海と湖の貧栄養化問題、地人書館(2015). ISBN 978-4-8052-0885-4

活発に行われている。

地下水汚染に注目すると、1990年代は揮発性有機化合物を対象とした汚染対策が始められたが、当初は土壌ガス吸引法と地下水揚水処理の組合せがほとんどであった。2000年代からバイオレメディエーションが一般的に行われるようになり、帯水層中に生息している *Dehalococcoides* 族細菌を活性化させるバイオスティミュレーション技術（汚染土壌にもともと生育している微生物に水、酸素、栄養物質を供給して汚染物質の分解を促進させる方法）の適用事例が増えている。1990年頃からは、汚染拡散防止対策として、自然の地下水の流れを妨げることなく地下水中の汚染物質を浄化・安定化する透過性地下水浄化壁も用いられている。米国では1990年代半ばより科学的自然減衰(MNA: Monitored Natural Attenuation)が地下水汚染対策に取り入れられている。硝酸性窒素については、土壌浸透水や地下水の脱窒処理を含めた浄化技術が必要と考えられ、2000年代に入り透過性浄化壁などの技術開発が行われている。窒素安定同位体組成 ($\delta^{15}\text{N}$) を指標とした窒素起源の推定も行われている。

対策の意思決定に関わるアプローチ手法は時代とともに変化してきた。以前はコストベースアプローチが主流であったが、浄化目標を汚染サイトや汚染土壌の利用形態に基づくリスクで評価するリスクベースアプローチが採用されるようになった。土壌汚染による健康リスクを科学的に評価するためのモデル開発も行われている。近年では、環境面だけでなく経済面や社会面を考慮したサステイナブルレメディエーションと言われる考え方も取り入れられつつあり、土壌汚染対策の多様化につながっている。

環境汚染対策を行うには、物質が形態を変えながら移動し蓄積する過程を把握する必要がある。物質循環や環境動態の把握手法の基礎は1930年代に Goldschmidt が始めた地球化学領域にあり、地球上の様々な系での物質の濃度や化学反応を系統的に理解する学問的な基礎ができた。1950年代以降、同位体地球化学が大きく発展し物質循環解析に広く利用されるようになった。最近20年間の進歩として、濃度分析ではICP質量分析計(ICPMS)などに代表される様々な分析法の高感度化とともに、ミクロンあるいはサブミクロンオーダーの局所領域での分析技術（各種電子顕微鏡、レーザアブレーション・ICPMS、マイクロビーム蛍光X線法など）が大きく発展し、微量成分も含めた物質の濃度や分配・分布が解明されるようになった。一方、自然界で起きる複雑な現象の解析には、濃度分析に加えて同位体比の変動の利用が有効である。同位体地球化学分野では、ICP質量分析の発展による重元素まで含めた様々な元素の同位体比研究、分子中の異なる部位の同位体比を用いた物質の起源や化学反応の理解、質量非依存同位体分別(MIF: Mass Independent Fractionation)研究などが進展し広く応用されている。さらに、放射光を用いたX線分光や高分解能の電子顕微鏡などの発展により、元素の化学種を原子・分子レベルで解明し、濃度や同位体比の変動のメカニズムをミクロなレベルから理解できるようになってきた。こうした情報を統合したモデルやシミュレーションにより、さらに正確な物質循環・環境動態の予測が期待される。

炭素や窒素の循環・動態に関する研究の歴史は比較的浅い。酸性雨問題に関連して流域スケールの研究が開始されたのは1950年代以降である。また、GHGであるCO₂や一酸化窒素のグローバル循環が解明され始めたのは1980年代以降である。そして、炭素などの物質循環を表現する数値モデルで本格的に広域を対象としたものが現れ始めたのは1990年代以降である。この時期には気象モデルによるグローバルな数値計算が可能となるほど計算機能

力が向上し、物質循環の基礎的な理解が形成された。観測面で特筆すべきは 1960 年代から 1970 年代にかけて国際科学会議（ICSU）により行われた国際生物学事業計画（IBP）であり、主要な生態系タイプに関する基礎データが網羅的に収集され、日本の研究者も大きく貢献した。1990 年代以降には、実験室や野外での操作実験も行われ、変動環境下での物質循環の応答やその制御メカニズムに関する理解も向上した。地球全域を対象とした衛星観測は 1980 年代から実施され、陸上植物の機能や人間活動による影響に関する継続観測が可能となった。衛星から観測可能な情報は質・量・種類の面で飛躍的に向上している。

物質の微量さによる測定の高難性に対しては、試料精製と測定技術の向上により化学反応性に富む微量物質の測定精度が大幅に向上している。また、コンパクトな質量分析機器により同位体測定の手軽さや精度も向上し、物質の発生起源や移動経路、平均滞留時間などの情報が得られるようになった。特に GHG の主要な発生源である陸域生態系については、CO₂ やメタンの交換量測定で渦相関法などの微気象学的方法が開発され標準的に使用されるようになっている¹⁶。その他の大気中濃度がより低いガスについても簡易渦集積法などが開発され継続観測が可能となった。一方、広域・大量に存在する物質について、陸域生態系や海洋における炭素や窒素のストックは大量かつ分布が不均質で定量に大きな誤差が伴っていたが、近年、衛星観測やモデル予測、同位体研究などの進展により向上している。

人間や生物に対する物質等の影響把握についても多くの研究開発が行われてきた。

産業や都市生活に伴う公害や汚染への対策により、無制限に汚染が激化・拡散する状況は防ぐことができた。しかし、1980 年代半ばから内分泌かく乱化学物質（EDCs：Endocrine Disrupting Chemicals）の問題が認識されるようになった。強毒性物質の禁止・削減後も生物個体数が回復しないことから少量でも悪影響をきたす物質がある可能性が示され、ホルモン受容体等を介した生体内シグナルのかく乱が考えられるようになった。1996 年以降世界的な対応がとられるようになり、日本でも省庁の取り組みが本格化した。1998 年、科学技術振興機構（JST）の CREST では内分泌かく乱化学物質問題の本質的な理解と解決をめざした研究を対象とする「内分泌かく乱物質」研究領域が発足した。2012 年の世界保健機関（WHO）/UNEP による報告書「State-of-the-Science of Endocrine Disrupting Chemicals—2012」では、複数の内分泌かく乱化学物質が協同して相加的効果を発揮する可能性が指摘された。現在は、汎用されている難燃剤や可塑剤、界面活性剤、食品添加物など、多種多様な毒性の弱い物質をも対象とし、内分泌系のみならず神経系や免疫系も含めたかく乱影響を評価すべきという考え方も提唱されるようになってきている。また、複数の物質による複合影響や経世代影響など、残された課題は多い⁹。

環境と健康との関係を扱う研究で、1990 年代中頃からの注目すべき動向として社会疫学が挙げられる。個人や地域の持つ社会的特性が当人や住民の健康レベルを左右するという、直感的には当然と思われる仮定を綿密な調査で実証した分野であり、多くの成果を挙げた。また、環境疫学では、10 万人を超える規模で長期間追跡調査を行い、得られた情報や試料を解析する疫学研究が多数実施されるようになってきた。

化学物質のリスク管理に関しては、環境化学物質・汚染物質の化学分析と毒性影響、生態

¹⁶ Baldocchi, D., et al. (2001), FLUXNET: a new tool to study the temporal and spatial variability of ecosystem-scale carbon dioxide, water vapor, and energy flux densities, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 82, 2415–2434.

影響に関する多くの研究が実施されてきた。しかし、対処すべき物質数の増加や規制強化とともに物質の機能性が向上しており、一層の微量分析の必要性、対応すべき試料と媒体の増加、対象物質の物性範囲の拡大などの新たな課題に直面している。さらに、近年の化学物質リスク管理は、個々の排出規制等の単純な集合体ではなく、社会全体での化学物質管理の枠組みとして捉えられることが一般的になっていることから、分析化学や影響研究のみならず、化学物質の環境排出量の推定、マテリアル／サブスタンスフローの把握、これらの将来予測やシナリオ予測のための環境動態モデルや理論毒性学など、より体系的、包括的な研究の必要性が意識されている。

（３）生物多様性・生態系区分

生物多様性の研究は、生物の個体群や群集を対象とした生態学的な研究に由来する。20世紀前半には個体群の動態についての数理的な基盤が生まれ、それ以前の自然史研究や主に昆虫や害獣を対象とした生物の動態と種間関係の研究をもとに生態系への理解を部分的に深めていく科学的な研究が進展したが、1960年代までは大きな関心は呼ばなかった。ところが、自然環境の破壊によって社会的な関心が国際的に高まった。日本は同時期に高度経済成長期にあり、幅広い分野を巻き込んで環境問題化した。これらは生物多様性研究の基盤づくりを後押しし、日本で当時全国的に取得の検討を開始したデータが現在においても基礎となっている例が多い。1992年の地球サミット以降、生物多様性の保全と持続可能な利用を促進することが共通の課題として広く認識され、生物多様性という用語が急速に広まった。その結果多様なモニタリングの国際プロジェクトや、データベースの促進、評価手法の検討が進められ、2010年以降は社会学や経済学との統合の中で研究開発が行われるようになった。

本区分における観測について、観測ネットワークとして国際長期生態学研究（ILTER：International Long Term Ecological Research）が1993年に設立された。また、全球地球観測システム（GEOSS：Global Earth Observation System of Systems）の一環として生物多様性を観測する生物多様性観測ネットワーク（GEO-BON：Group on Earth Observation - Biodiversity Observation Network）が2008年に発足し、生物多様性を間接的に推定する指標群が提案された¹⁷。リモートセンシングでは、MODIS（MODerate resolution Imaging Spectroradiometer）、Landsat 衛星を用いた森林分布の把握等全球規模の観測研究が進展している。また、地域においては衛星のみならずドローンなどの UAV（Unmanned Aerial Vehicle）の活用も進められている。水中の生物多様性の把握が難しい海洋では、ROV（Remotely Operated Vehicle）の活用とともに音響を使った観測技術も存在する。生物のトラッキング技術も進展しており、様々なロガー（測定値等を時系列に記録する装置）が開発され、衛星データを用いて個体群動態を追跡する計器がある。ゲノム科学の進展に伴う生物間の相互作用や環境変化の影響の把握、環境 DNA（eDNA）による効率的な生息状況の把握なども進められている。生物多様性の指標開発、実測を補う分布推定モデル技術や、過去・将来の予測技術も他分野との連携の中で発展している¹⁸。生物多様性・生態系の評価のためのモデル開発も着実に進んでいる。2000年前後から、Ecopath/Ecosim（カナダブリティッ

¹⁷ H. M. Pereira, H.M. et al. (2013) Essential biodiversity variables. Science, 339, 277-278.

¹⁸ Turner (2014) Sensing biodiversity. Science, 346, 301-302.

シュ・コロンビア大学）や Atlantis（オーストラリア連邦科学産業研究機構（CSIRO））という海洋生態系評価モデルが使用されるようになり広く応用されている。一方で、予測力を重視した統計手法の活用も図られ、機械学習手法を活用した生物多様性の新しい予測技術の開発にも大きな進展が見られる。

情報に関する動向として、2001年にデータ収集と全世界的な利用を目的とする国際的なプロジェクトである地球規模生物多様性情報機構（GBIF：Global Biodiversity Information Facility）及び海洋生物のセンサス（CoML：The Census of Marine Life）が開始された。また、生物に関する Web 上の百科事典である Encyclopedia of Life（EoL）や、短い DNA 塩基配列より生物種を調べる手法に使われる DNA バーコーディングのライブラリを構築する International Barcode of Life Project（iBOL）などが始まり、相互に関連しながら巨大なデータ基盤を構築している。国際的な取り組みである GBIF、海洋生物地理情報システム（OBIS：Ocean Biogeographic Information System）、GEO-BON、ILTER、iBOL では、それぞれに対応する日本ノードが設立されている（JBIF（国立遺伝学研究所・東京大学・国立科学博物館）、BISMaL（海洋研究開発機構）、J-BON（国立環境研究所）、JaILTER（秋田県立大学・北海道大学）、JBOLI（東京大学））。こうした生物分布情報の収集による生物多様性の広域分布の推定が進展し、現状把握とともに世界的な保護区の戦略や保全政策の提言や、マクロ生態学的課題に挑むベースデータとして活用された。データベース化の促進により生物多様性の広域パターンの形成や進化、人間活動（温暖化）とのかかわりに関する事例が散見される。なお、計画された実験データ以外の統計データの解析は容易ではなく、様々な手法が検討されてきた。特に時系列データについては近年の計算機の発達とともに階層ベイズモデルなどの高度に確率分布や非線形性を取り入れた方法が普及し、例えば発見率を考慮した時空間動態解析の取り扱いが容易かつより正確になった。

近年、情報技術や、センシング技術、遺伝情報の解析技術をはじめとするさまざまな技術的解決によって、応用の方向性を強化した研究が推進されると同時に、愛知目標、持続可能な開発目標（SDGs）などの目標が国連と関連組織によって示され、これらに対応するプロジェクト研究も進展している。また、国家管轄権外区域の海洋生物多様性（BBNJ：Biological diversity Beyond areas of National Jurisdiction）・遺伝資源の取得の機会及びその利用から生ずる利益の公正かつ衡平な配分（ABS：Access and Benefit-Sharing）・越境汚染など、外交や国家間交渉においての重要な要素となっている。温暖化の適応に関する多数の計画も実施されている。

生態系から得られる有益なサービスである生態系サービスに国際的な注目が集まっているが、日本では「公益的機能」として古くから注目されてきた。特に森林生態系のもつ水源涵養や土砂流出防備などの機能については、1972年の林野庁による公益的機能の計量・評価を始めとして戦後多くの研究業績がある¹⁹。政策的にも、1897年の森林法制定時から保安林制度として導入され、伐採規制をしながら水土保持機能を維持する政策がとられている。世界では1997年に Costanza が生態系サービスの経済評価を初めて行った²⁰。1998年には生態

¹⁹ 林野庁「森林の公益的機能に関する費用分担および公益的機能の計量、評価並びに多面的機能の高度発揮の上から望ましい森林について（中間報告）」、1972

²⁰ Costanza, R., d'Arge, R., de Groot, R.S., Farber, S., Grasso, M., Hannon, B., Limburg, K., Naeem, S., O'Neill, R.V., Paruelo, J., Raskin, R.G., Sutton, P., van den Belt, M., The value of the world's ecosystem services and natural capital. Nature 387, 253–260, 1997.

系がどの程度安定しているかを検証した研究（Resilience Alliance）がある。2000年代に入ると、国連が生態系サービスを整理し、直近約 50 年の生態系サービスの変化を評価し、生物多様性や生態系サービスのシナリオ分析を実施した（Millennium Ecosystem Assessment）。同時期に、今まで無料と思われてきた生態系サービスに対して支払うシステムである PES（Payment for Ecosystem Services、生態系サービスへの支払い）の必要性が唱えられた。PES は、生態系保全の財源を確保する方法として各地で研究開発と制度への導入がされている。ただし、PES の有効性が指摘されつつも、そのみでは問題を解決できず、その他の手法も組み合わせる必要性が指摘されている²¹。PES 以外の手法として、自然地の開発を行う際に開発前よりも生態系を劣化させないことを目的として開発地やそれ以外の地域において影響を代償する手法である生物多様性オフセットが注目されており、欧米を中心に研究開発と社会実装が進んでいる。2010 年には Tipping Point（重大な変化が起きる転換点）の概念が提唱され、生態系サービスや生物多様性を経済評価する「生物多様性の経済学（TEEB：The Economics of Ecosystems and Biodiversity）」報告書や、世界中の生物多様性の概況に関する「地球規模生物多様性概況第 3 版（GBO3: Global Biodiversity Outlook 3）」が公表された。日本でも 2010 年に日本の「生物多様性総合評価（JBO1: Japan Biodiversity Outlook 1）」が実施され（環境省）、特に陸水、島嶼生態系の劣化が著しいことが示された。同時期には日本の里山・里海評価（JSSA: Japan Satoyama Satoumi Assessment）の公表（国連大学）、全国の生物多様性評価の地図化（環境省）、日本の湿地が有する経済的価値の試行的な評価（環境省）などが実施されている。2010 年以降、国際的に生物多様性と生態系サービス評価の流れが一層加速し、生物多様性条約の中で世界中の生態系や生物多様性を評価する組織である「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（IPBES: Intergovernmental science-policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services）」が 2012 年設立した。気候変動という IPCC に相当する組織であり、2018 年に最初のレポートを出すこととなっている。

（４）循環型社会区分

日本では「循環型社会」、国際的には特に欧州で “Circular Economy” の概念のもと、自然の資源循環とその一部である社会経済の資源循環を目指した社会の形成が目指されている。かつての公害対策のように、排出源で規制するような EP（End of Pipe）型の対応から、低環境負荷型の生産システムの構築を目指す CP（Cleaner Production）型への対応へと変化し、気候変動や生態系などとの関連において、環境的・社会的・経済的に持続可能な社会システムの構築が必要とされている。こうした動向の中で、基礎レベルから応用レベル、システム化や社会実装まで様々な研究開発が実施されている。

人間による水利用やその結果引き起こされる水域の汚染、さらには気候変動による極端現象など、水に関わる研究開発は多岐にわたり、全球での水循環を把握しながら持続可能な形で利用していくための研究開発が必要である。日本での研究開発は、戦後の高度経済成長に

²¹ Hein, L., Miller, D. C., & de Groot, R. “Payments for ecosystem services and the financing of global biodiversity conservation”. Current Opinion in Environmental Sustainability, 5(1) (2013): 87-93.

伴う水需要の増大からスタートした。工業用水や生活用水の質と量の両面からの向上が必要になっただけでなく、汚染排水による環境水質悪化に伴い下水処理場が整備され水循環の概念がもたらされた。その後、膜分離活性汚泥法（MBR：Membrane BioReactor）などの、コンパクトで高速な水処理技術が発展してきた。下水処理は、都市では標準活性汚泥法が、小規模ではオキシデーションディッチ法が主に使われてきたが、湖沼や内湾の富栄養化防止として、AO（Anaerobic-Oxic、嫌気好気）法、硝化脱窒循環法やA2O（Anaerobic-Anoxic-Oxic、嫌気無酸素好気）法などの生物学的栄養塩除去プロセスの導入が進んできている。さらに、省エネルギーとエネルギー回収の視点から、ANAMMOX（Anaerobic Ammonia Oxidation、嫌気性アンモニア酸化）法による窒素除去やUASB（Upflow Anaerobic Sludge Blanket、上向流式嫌気性汚泥床）法などの嫌気処理、DHS（Down-flow Hanging Sponge）などの中間処理が注目されている。さらに汚泥からのバイオガス回収、バイオカーボンの固定技術も研究開発されている。再生水製造技術に関しては、その品質を担保するための計測技術との連携も技術開発課題として重要視されてきており、近年では工場で使った水を工場内で再利用するだけでなく排水すらしないゼロリキッドディスチャージといった動きもある。海外では、米国で飲用水としての品質を確保する再生水利用の技術として間接的飲用（IPR：Indirect Portable Reuse）や直接的飲用利用（DPR：Direct Portable Reuse）が始まり、水不足が深刻なカリフォルニア州からアリゾナ・フロリダ・テキサスへの広がりを見せ、シンガポール、南アフリカやオーストラリアでも研究開発が進められてきた。欧州では、EUの水枠組み指令に従って、有機物、栄養塩、病原性微生物対策が進められ、さらに微量化学物質対策も進められている。中国では、栄養塩を除去する技術の開発が急速に進められており、MBRや膜などの高度処理も注目されている。

地球全体での水循環を対象とする全球水文モデルに関し、人間活動を含むモデルが最初に報告されたのは約20年前である²²。以降、農業用水および工業・生活用水の推定や、ダムの貯水と放流、表層水および地下水からの取水と、人間活動がモデルに追加されている。現在のモデルは、自然の水文過程と人間の主要な水利用に関する計算を行い、空間分解能は緯度経度0.5度（赤道付近で55km四方）、時間分解能（計算を行う時間間隔）は1日というモデルが多く、10年以上の長期期間の計算が可能である。

近年は、気候変動に伴う洪水や渇水リスクの増大などの懸念から、気候変動の影響への適応策の検討のためにも研究や技術開発が求められてきている。また、水問題を食糧問題およびエネルギー問題とリンクさせて解決する”Food-Energy-Water Nexus”の概念が、米国を筆頭に、ドイツ、英国により提唱され注目されている。

気候変動や水循環、生物多様性に影響を及ぼす農林水産業を持続可能にするためには、生産性向上や生産物の高付加価値化の追求と同時に環境への配慮も達成する必要がある。気候変動への対応では、GHGの排出削減や吸収に関する取り組みが実施されてきた。また、顕在化しつつある温暖化の影響評価や適応も活発化している。農業における水循環に関しては、例えば「地球規模水循環変動が食料生産に及ぼす影響の評価と対策シナリオの策定」（2003～2007年度、農林水産省）により、国内外の食料と環境問題の解決への貢献が目指された。

²² Alcamo, J., P. Döll, F. Kaspar, and S. Siebert (1997), Global change and global scenarios of water use and availability: An Application of WaterGAP1.0Rep., 47 pp, Center for Environmental Systems Research (CESR), University of Kassel, Germany, Kassel, Germany.

林業に関しては、1992年の地球サミットによって持続可能な森林管理が共通目標となり、地域的国際共同ワーキンググループが多数発足し、基準指標（生物多様性は基準の一つ）を用いて森林が多面的に評価され、順応的森林管理手法の開発を目指す研究が進捗した。1990年代には、インベントリ作成にかかる研究と、代替指標の抽出研究が盛んに行われた。また、生物多様性条約に向けて目標達成評価が進展し、国内の森林については2010年までに評価研究が実施された。森林の減少や劣化の防止と、炭素蓄積や持続可能な森林経営に関する取り組みであるREDD+（Reduction of Emission from Deforestation and forest Degradation plus）に関しては、2000年代に気候変動枠組条約の締約国会議で議論が進展し、セーフガードとしての生物多様性保全および生態系の便益に関する保全研究および社会経済学的研究が進展した。日本では2013年から2015年にかけて、環境省、林野庁等がREDD+に基づく二国間のカーボンメカニズム（JCM：Joint Carbon Mechanism）を推進し、セーフガードとしての生物多様性保全及び生態系の便益増強に関するチェックリストを開発している。水産業に関しては、カリフォルニア大学のHalpernらの研究グループが、世界の海洋の健全性を判断するための指標として、自然科学的な要素に社会・経済的な要素を加えた10個の目標を設定し、それぞれの達成度を集計する形で世界各国の領海のOcean Health Index（海洋健全度指数）を提示したことが契機となり²³、海洋の環境・生態系・生物資源の健全性を適切に診断・評価するための考え方や方法が議論され始めている。国内においては、閉鎖性海湾の健全性に関して、生態系の構造の多様性や物質循環機能の健全性に着目した「海の健康診断」の方法や基準等の検討が10年ほど前から開始され、事例の解析が進められている²⁴。

循環型社会形成において不可欠なリサイクル技術の対象や用途は極めて多岐にわたるが、その中でも都市鉱山開発は重要である。物理的な選別技術は天然鉱山の選鉱技術がベースとなり、各種の粉砕機と選別装置（比重選別、磁選等の集合選別技術）が利用されてきた。更に1980年頃から対象物の物性を検出して個別選別するリサイクルに特化したソーティング技術（Sensor based sorting）が開発・導入され始め、近年も発展し続けている。都市鉱山に求められる分離技術は、法制定や政策によって大きく左右されるのが特徴である。特に2010年から2011年には中国の輸出制限政策によりレアアースが急騰し、国内ではいくつかのレアメタルを対象とした分離技術の開発が加速した。

日本のプラスチック（樹脂）生産量は1963年頃100万tを超え、1970年代ではその5倍に増加した（現在では1,000万tを超えている）。最終処分埋立地許容量の問題などが顕在化し、当該分野の研究が行われる一方、プラスチック製容器に係る環境負荷分析を起点とするLCA（Life Cycle Assessment）研究も行われるようになった。その後、1995年に容器包装リサイクル法が制定されると、プラスチックの再資源化の社会的要請は高まり、廃プラ（廃棄されるプラスチック）リサイクルに関する研究・技術開発が大きく進展した。日本で実用化されている手法には、材料リサイクル（再生利用）とサーマルリサイクル（セメント原燃料化、ごみ発電、RPF（Refuse Paper and Plastic Fuel）、RDF（Refuse Derived Fuel））、フィードストックリサイクルがある。フィードストックリサイクルは、廃プラに化学的な組成変換を施した後にリサイクルする手法の総称であり、日本では、①原料・モノマー化、②

²³ Halpern et al. (2012) An index to assess the health and benefits of the global ocean. Nature, 488: 615-620.

²⁴ 海洋政策研究財団（2009）平成20年度全国閉鎖性海湾の海の健康診断調査報告書 全国71閉鎖性海湾の海の健康診断一次診断カルテ。

高炉原料化、③コークス炉化学原料化、④ガス化、⑤油化に分類されている。フィードストックリサイクルの研究開発として、加溶媒分解による有機原料回収、熱分解油化、熱分解ガス化が挙げられる。プラスチックリサイクルの地球温暖化防止に対する 2014 年度の寄与度は、プラ製容器包装の再商品化によりエネルギー資源消費換算で少なくとも 190 億 MJ、CO₂ 排出量換算で 164 万 t の削減効果がある。

日本では高度経済成長に伴う廃棄物排出量の急増に対処するため廃棄物の焼却処理が推し進められてきた。その結果、世界でも最も高い焼却率 80% に達しており、リサイクルされなかった可燃物のほぼ全量を焼却するに至っている。近年では、埋立処分される廃棄物の約 9 割を焼却残渣が占めている。最終処分容量の確保は難しく、最終処分場の延命化のために、焼却残渣がセメント原料として有効利用されているものの、焼却残渣にはセメントの忌避物質である塩素が高濃度に含有されているため、効率的な塩素除去技術が求められている。焼却灰の循環資源化において求められる技術開発は、焼却灰中の未燃物の除去、篩選別による粒度調整、鉄・アルミニウム等の高効率の有価金属回収である。排出直後の焼却灰は活性が高く性状が不安定であり、また、重金属、無機塩類が溶出しやすいことからエージングによる前処理技術開発も課題となっている。

循環型社会の構築に向けた取り組みを行うために、資源採掘から廃棄までの一連の過程の環境負荷等を把握することが求められる。ライフサイクル視点で資源消費・環境負荷排出を考えるようになった研究は、1969 年にコカ・コーラ社が米国ミッドウエスト研究所に委託して実施した飲料用容器の比較とされている²⁵。その後、1980 年代には「エコバランス」の名称が用いられ、資源の流れや環境負荷排出を測る研究が進められてきた。同時期に、英国の Boustead らを中心に LCA 評価のための原単位データベースが開発され始めた。オランダのライデン大学環境科学センター（CML）は、1992 年にライフサイクルインパクト（影響）評価でその後広く利用される特性化係数について示した報告書“Life Cycle Assessment of Products”を発表し、現在の影響評価の枠組みの基礎となっている。スウェーデン環境研究所は EPS（Environmental Priority Strategies for Product Design）と呼ばれる環境影響評価システムを開発し、広く利用された。1991 年には環境毒物化学会（SETAC）が LCA の方法論を発表し、世界的な LCA ソフトウェア SimaPro が発売されている。その後、欧州では Eco-Indicator95 が発表され、環境影響の統合化手法が公開され、LCA を実行するための手法群が開発された。1998 年には日本において LCA の国家プロジェクトが開始され（第 1 期：1998～2002 年度、第 2 期：2003～2005 年度、NEDO）、国産のデータベースの開発が進められるようになった。産業技術総合研究所において、被害算定型環境影響評価手法（LIME：Life-cycle Impact assessment Method based on Endpoint modeling）が開発された。国連では、UNEP-IRP（国際資源パネル）を中心にデカップリング（天然資源利用・環境影響と経済成長との切り離し）²⁶や資源効率性の議論・研究が進められた。また、人権など多様な利害関係に結びつく社会影響を見る社会 LCA（SLCA：Social LCA）の必要性も広く認識されている。

都市の環境評価では、1980 年代には、多様な都市の快適性を求める住民と行政の要請に応

²⁵ 産業環境管理協会、環境経営実務コース：環境適合製品・サービス支援手法コース「ライフサイクルアセスメント」、（2004）

²⁶ UNEP, Decoupling natural resource use and environmental impacts from economic growth. A Report of the Working Group on Decoupling to the International Resource Panel, 2011.

え、環境満足度を定量化して複数の指標間を統合化した快適環境指標が開発され²⁷、現在その有用性が再び高く評価されている。一方、ヨーロッパを中心に 1990 年代に地球環境問題の解決を含む社会の持続可能性への関心が高まるにつれ、国連持続可能な開発会議（UNCSD）が提案した持続可能性指標を都市のスケールで定量化する方法論が開発されてきた。P-S-R（Pressure-State-Response）または D-P-S-I-R（Driver-Pressure-State-Impact-Response）で持続可能性を評価する指標体系の開発は、現在でも環境基本計画における評価の論理的フレームの議論でも活用されているが、個別の指標群を総合化して都市の持続可能性を定量化するための論理について検討が深まらないまま現在に至っている。21 世紀に入り、現在は住民の志向を定量化するステークホルダー会議を通じての指標の算定²⁸や、多元的な指標間での重要度の相対性を定量化する試み²⁹がアジアにも広がっている。世界銀行等による世界都市指標プログラム（Global City Indicators Program）で開発された指標は ISO 37120 として標準化され、経済、教育、エネルギー、環境、ファイナンス、火事と緊急事態への対応、ガバナンス、健康、レクリエーション、安全、避難所、廃棄物、通信、交通、都市計画、廃水、水と公衆衛生の 17 テーマについて、計 100 種類の指標を定めている³⁰。日本も国際標準化活動を進めており、都市インフラの評価指標の標準化のための委員会 ISO/TC 268/SC 1 が日本主導で設置された。LCA は、90 年代より建設物、廃棄物の評価を通じて都市の評価へ適用がされてきた。既存の都市部を対象に、更新も含む環境改善施策の実施シナリオごとの LCCO₂（Life Cycle CO₂）を算定し、都市再開発の政策を提言する研究や³¹、コンパクト都市や基盤の再編など都市の更新を評価する LCA 研究³²、地域 LCA システムの開発³³が進められてきた。1990 年代に同じくヨーロッパで提案された概念であるエコロジカル・フットプリント（EF : Ecological Footprint）も、国土や都市、地域の持続可能性の評価に用いられてきた。CO₂排出緩和に特化するカーボンフットプリント（CF : Carbon Footprint）研究も世界各地で進められ、国、都市、家庭、組織、生産プロセス及び製品など様々なスケールで行われているが、その多くは産業連関表による推計を行っており、産業連関表が存在しない都市単位での研究は試行段階にある。1980 年代に提唱された Energy 指標は、都市活動で直接的、間接的に利用された資源エネルギーを太陽エネルギーに集約する方法であり³⁴、人間社会の環境効率を統合的に評価するものとして近年注目が集まっている³⁵。

²⁷ 内藤正明・森田恒幸(1995)：「環境指標」の展開，学陽書房。

²⁸ Kaptein, M., Van Tulder, R., 2003. Toward effective stakeholder dialogue. *Business and Society Review* 108, 203-224.

²⁹ Bai, C., Sarkis, J., 2010. Integrating sustainability into supplier selection with grey system and rough set methodologies. *International Journal of Production Economics* 124, 252-264.

³⁰ World Council on City Data, ISO 37120, <http://www.dataforcities.org/>

³¹ 藤田壮，盛岡通，村野昭人，1999. 都市集積地区から派生するライフサイクル二酸化炭素の評価の都市マネジメントへの展開についての考察. 環境システム研究論文集, 355-364.

³² 林良嗣，加藤博和，北野恭一他，2000. 都市空間構造改変施策に伴う各種環境負荷のライフサイクル評価システム. 環境システム研究論文集 28, 55-62.

³³ 稲葉，陸太，2003. リサイクルに関する L C A 研究の整理. 廃棄物学会誌 14, 321-332.

³⁴ Odum, H.T., 1996. *Environmental accounting*. Wiley.

³⁵ Hau, J.L., Bakshi, B.R., 2004. Promise and problems of emergy analysis. *Ecological modelling* 178, 215-225.2013

2.3 分野の研究開発を取り巻く現状

2.3.1 社会・経済の動向

社会・経済における近年のトピックスとして、2015年に策定された持続可能な開発目標（SDGs）が挙げられる。SDGsでは、17目標と169ターゲットのもと、国連に加盟する全ての国は採択したアジェンダをもとに、2015年から2030年までに、貧困や飢餓、エネルギー、気候変動、平和的社会など、持続可能な開発のための諸目標を達成すべく力を尽くしている。これらの目標の達成に環境分野の研究開発は不可欠であり、SDGsへの貢献を見据えた取り組みが求められる。SDGsの目標と本報告書で設定した研究開発領域との関係を表2-2に示す。

経済では、日本の環境産業の市場規模が2014年に105兆4,133億円と過去最大を記録した（図2-7）³⁶。分野別では地球温暖化対策分野が増加に寄与している（本分野には「研究開発の俯瞰報告書 エネルギー分野」で扱う領域を多く含む）。環境産業の2014年における輸出額は16兆7,149億円であり、地球温暖化対策分野の輸出額に占める割合が大きい。輸出額が大きい製品・サービスとして、エコカー（低燃費・低排出認定車やハイブリッド自動車）、太陽光発電システム、資源回収、再資源の商品化（非鉄金属第二次精錬・精製業や鉄スクラップ加工処理業）、蓄電池などが挙げられる。一方、2014年の輸入額は3兆2,555億円であり、輸出額同様、地球温暖化対策分野の割合が大きい。輸入額が大きい製品・サービスとして、太陽光発電システム、エコカー（低燃費・低排出認定車やハイブリッド自動車）、サルファーフリーガソリンと軽油、省エネラベル（緑）付き液晶テレビなどが挙げられる。国内の環境産業全体の市場規模は2050年にかけて上昇傾向を続け、以下は参考値ではあるが150兆円まで成長すると推計されている。そのうち、国内需要が110兆円（73%）、輸出額が40兆円（27%）とされ、国内需要と輸出額はともに成長する予測である。なお、2050年までに1990年比80%のGHGの排出削減という目標が達成された場合の市場規模も推計しており、その結果によると2050年には204兆円に達するとされている（ただし、地球温暖化対策分野のみ計算を実施）³⁶。

表2-2 持続可能な開発目標（SDGs）と貢献が期待できる研究開発領域

区分・研究開発領域		2 飢餓をゼロに	3 すべての人に健康と幸福を	6 安全な水とトイレを世界中に	7 再生可能エネルギーをみんなにそして安くに	11 住み続けられるまちづくりを	12 つくる責任つかう責任	13 気候変動に具体的な対策を	14 海の豊かさを守ろう	15 陸の豊かさを守ろう
気候変動	気候変動予測				●			●		
	気候変動影響予測・評価	●	●	●		●		●	●	●
環境汚染・健康区分	大気汚染		●			●				
	水質汚染		●	●		●				
	土壌・地下水汚染		●	●		●				
	物質循環・環境動態		●	●		●				
	健康・環境影響		●	●		●				
	化学物質リスク管理		●	●		●				
生態系・生物多様性区分	生物多様性・生態系の把握・予測								●	●
	生態系サービスの評価・管理								●	●
循環型社会区分	水循環			●		●	●		●	
	農林水産業の環境研究	●					●	●	●	●
	リサイクル・廃棄物処理					●	●			
	資源・生産・消費管理					●	●			
	環境都市		●		●	●	●			

※上記以外にも間接的に貢献できるSDGs目標が多数存在する。

³⁶ 環境省環境産業市場規模検討会、平成27年度環境産業の市場規模推計等委託業務 環境産業の市場規模・雇用規模等に関する報告書、平成28年3月 <http://www.env.go.jp/press/files/jp/103482.pdf>

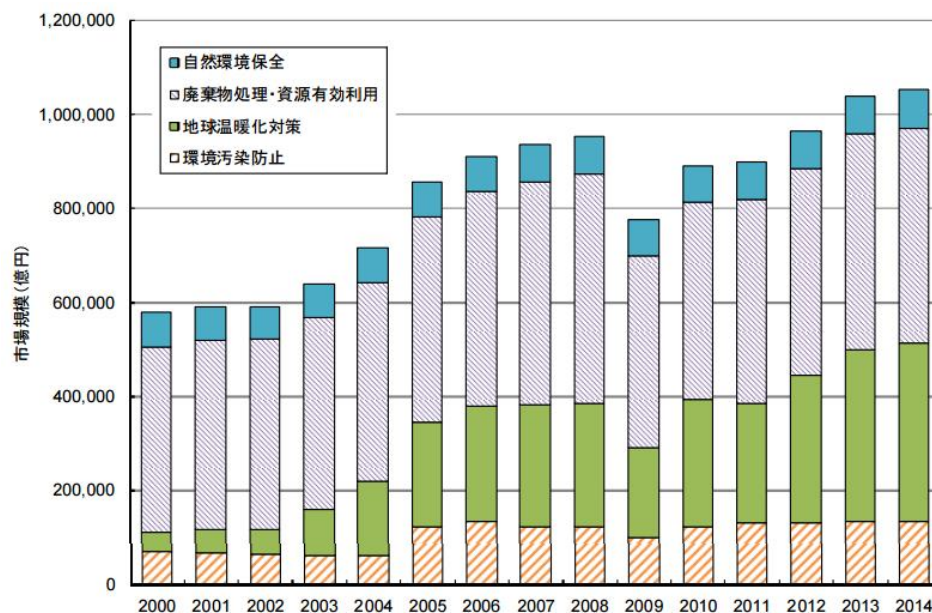


図 2-7 環境産業の市場規模推移 出典：環境省³⁶

(1) 気候変動区分

2015年12月にパリで行われた気候変動枠組条約第21回締約国会議（COP21）で、京都議定書以来の新たな法的拘束力のある合意文書となるパリ協定が採択された。パリ協定は、産業革命前からの世界の平均気温上昇を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目標としている。先進国と途上国の枠を超えて全ての国に削減目標・行動の提出・更新を義務付け、5年ごとに貢献（NDC：Nationally Determined Contribution）を提出・更新する仕組みを設けている。COPの交渉には、1988年に世界気象機関（WMO）と国連環境計画（UNEP）により設立された気候変動に関する政府間パネル（IPCC）の科学的知見が重要な役割を果たしている。2013～2014年に公表された第5次評価報告書（AR5）では、9,200以上の科学論文が参照され、800名を超える執筆者により4年の歳月をかけて作成され、日本の研究者も貢献している³⁷。

日本は2030年度までにGHG排出量を2013年度比で26%削減する目標を提出している（表2-3）。日本における2015年度のGHG排出量は、速報値で13億2,100万tであり2013年度から減少している（図2-8）。減少の要因は、電力消費量の減少や電力の排出原単位の改善に伴う電力由来のCO₂排出量の減少により、エネルギー起源のCO₂排出量が減少したことなどが挙げられる³⁸。なお、エネルギー起源のCO₂排出では、日本は世界5位となっている（図2-9）³⁹。

³⁷ 環境省、平成28年版環境・循環型社会・生物多様性白書 <http://www.env.go.jp/policy/hakusyo/h28/html/hj1601010101.html>

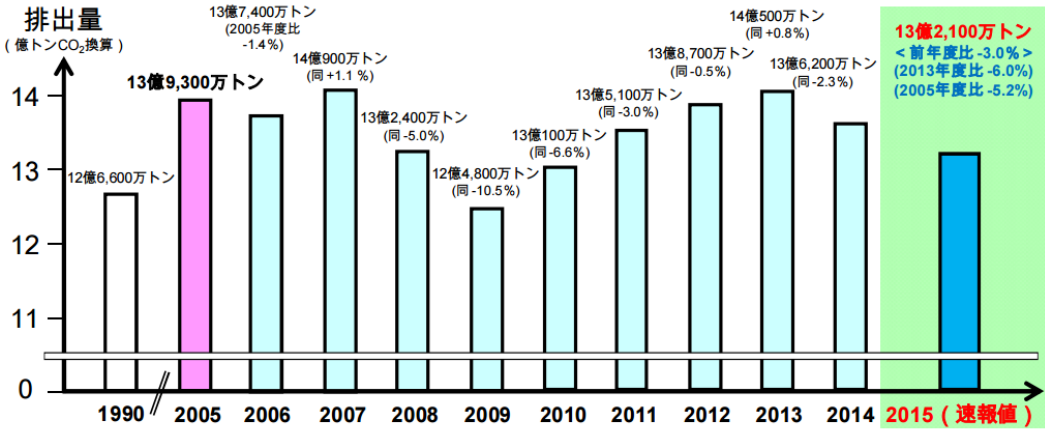
³⁸ 環境省、平成27年度の温室効果ガス排出量（速報値）＜概要＞
http://www.env.go.jp/earth/ondanka/ghg/2015sokuho_gaiyo.pdf

³⁹ 環境省、気候変動の国際交渉 関連資料、世界のエネルギー起源CO₂排出量 2014年
<http://www.env.go.jp/earth/ondanka/cop/shiryo.html#06>

表 2-3 主要国の GHG 削減目標

提出国（CO ₂ 排出量割合 ³⁹ ）	目標の内容
中国（28.2%）	2030 年までに GDP 当たり CO ₂ 排出量－60～－65%（2005 年比） 2030 年前後 CO ₂ 排出量のピーク
米国（16.0%）	2025 年に－26%～－28%（2005 年比） 28%削減に向けて最大限取り組む
EU（9.8%）	2030 年までに少なくとも－40%（1990 年比）
インド（6.2%）	2030 年までに GDP 当たり排出量－33～－35%（2005 年比）
ロシア（4.5%）	2030 年までに－25～－30%（1990 年比）が長期目標となり得る
日本（3.7%）	2030 年度までに－26%（2013 年度比）
韓国（1.8%）	2030 年までに－37%（BAU※比）

※BAU（Business as usual）：現状の排出傾向を前提とした場合の基準年における予測排出量
（何も対策をとらなかった場合との比較）



注1 2015年度速報値の算定に用いた各種統計等の年報値について、速報値の算定時点で2015年度の値が未公表のものは2014年度の値を代用している。また、一部の算定方法については、より正確に排出量を算定できるよう見直しを行っている。このため、今回とりまとめた2015年度速報値と、来年4月に公表予定の2015年度確報値との間で差異が生じる可能性がある。なお、確報値では、森林等による吸収量についても算定、公表する予定である。

注2 各年度の排出量及び過年度からの増減割合（「2005年度比」等）には、京都議定書に基づく吸収源活動による吸収量は加味していない。

図 2-8 日本の GHG 排出量（2015 年度速報値） 出典：環境省³⁸

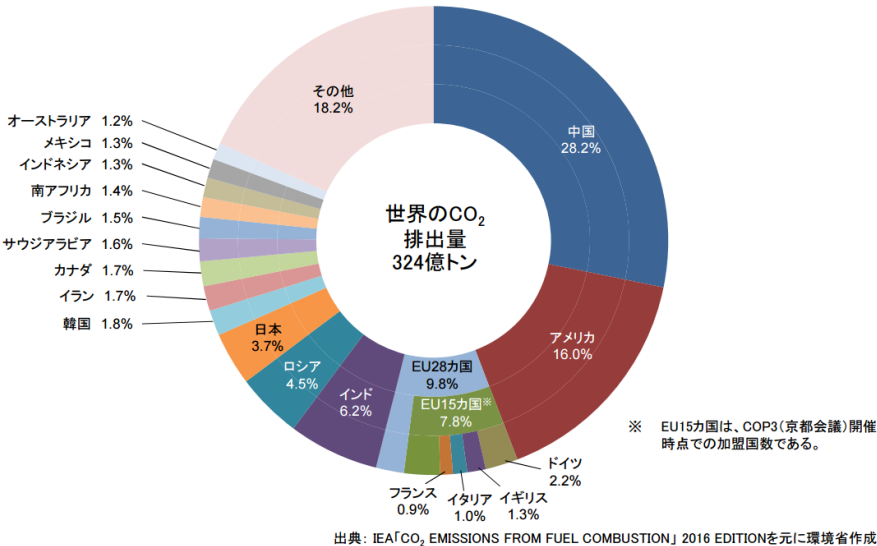


図 2-9 世界のエネルギー起源の CO₂ 排出量（2014 年）³⁹

COP21 決定（成果文書）では、「国内政策、カーボン・プライシング等のツールを含む、排出削減行動にインセンティブを付与する取り組みの重要な役割を認識する」ことが記載され、各国で国の状況を踏まえた様々な取り組みが進められている。また、地方自治体、民間企業、NGO を含むあらゆる主体（非政府アクター）が COP21 に向けて活発な取り組みを行った。特に、民間企業を中心に、中央政府の動きとは独立して様々な連携・提言活動を実施し、締約国政府に対して新たな国際枠組みの合意を後押しした。日本では日本経済団体連合会が COP21 開催前の 9 月 11 日に、「新たな気候変動枠組みの構築に向けた提言」を公表し、経済と両立する公平で実行ある枠組みへの合意や、国益を踏まえた国際交渉への貢献を求めた⁴⁰。また、COP21 首脳会合に際して、趣旨に賛同する国の首脳、民間投資家が集まり、「ミッション・イノベーション」を設立するための会合が行われた。同会合では、気候変動対策におけるイノベーションの重要性を踏まえ、クリーン・エネルギー分野の研究開発についての官民投資拡大を促すイニシアティブが共有された。ミッション・イノベーションでは、①賛同国はクリーン・エネルギー分野の政府研究支出を 5 年間で 2 倍にすることを目指す、②新しい投資は革新的な技術に焦点を当てる、③各国の事情があることを踏まえ各国が適切な方法で取組を加速する、という取組目標を掲げ、日本を含む 20 か国、28 の機関投資家が賛同している³⁷。

ヨーロッパでの熱波による多大な被害や、ハリケーンや台風などの極端現象、北極海氷の面積減少など、世界各地で地球温暖化による様々な影響が顕在化し、気候変動リスクの回避又は最小化に向けた取り組みが行われている。気候変動対策を新たなビジネスチャンスと捉えた動きも活発となり、影響に適応するための商品やサービスが展開されている。環境省では、エネルギー起源の CO₂ 排出の大幅削減を目指し、先導的（Leading）な低炭素技術（Low-carbon Technology）を「L2-Tech（エルツーテック）」と称し、あらゆる部門において分野別にリスト化・発信し、技術普及の強力な推進を目指している。

（2）環境汚染・健康区分

日本では、排出規制などの対策により汚染物質の環境濃度は大幅に改善してきている。大気環境における課題は光化学オキシダントと PM2.5 とされており、微小粒子状物質（PM2.5）は常時監視項目に加わった 2010 年度以降、着実に増加している。大気環境の保全対策の一環として、国や地方公共団体による監視・観測体制が整備され、大気汚染の状況（速報値）が公開され、シミュレーションモデルによりアジア大陸からの大気汚染の影響予測も把握することが出来る。速報値に関しては、そらまめ君（環境省大気汚染物質広域監視システム）や各都道府県のサイトで公開されている。シミュレーションモデルには、SPRINTARS（九州大学）や大気汚染予測システム VENUS（国立環境研究所）、tenki.jp での PM2.5 予測（日本気象協会）があり、これらもサイトで公開されている。水環境では湖沼において環境基準の達成率が低く、有機汚濁の代表的な水質指標である生物化学的酸素要求量（BOD）又は化学的酸素要求量（COD）では 55.6%、全窒素及び全りんが 50.4%となっている。海洋環境については汚染の拡大や進行は確認されていない。土壌環境では汚染が判明した事例は 579 件

⁴⁰ 一般財団法人日本経済団体連合会、新たな気候変動枠組みの構築に向けた提言、2015 年 9 月 11 日
http://www.keidanren.or.jp/policy/2015/077_honbun.html

で、鉛、ふっ素、砒素等の重金属による汚染が多く見られる。地下水質では、施肥、家畜排せつ物、生活排水等が原因と見られる硝酸性窒素及び亜硝酸性窒素の環境基準超過率が2.9%と最も高く課題となっている。汚染源が主に事業場であるトリクロロエチレン等の揮発性有機化合物（VOC）についても、依然として新たな汚染が発見されている。なお、大気・水環境における放射性物質の常時監視では、過去の測定値の傾向の範囲内となっており汚染の拡大や進行は確認されていない³⁷。

一方、世界に目を向けると環境汚染は依然として重大な課題である。大気汚染に関しては、マラリアやHIV/エイズよりも多くの人が亡くなっているという報告がある⁴¹。また、国際エネルギー機関（IEA）によると、大気・室内汚染は、高血圧、貧弱で偏った食事、喫煙に次いで世界の死亡原因の4番目としており、世界全体で年間650万人が死亡し、放置すると2040年には750万人になると推計している⁴²。水質汚染については、1990年代以降、ラテンアメリカやアフリカ、アジアのほぼ全ての川で悪化している。原因は、人口増加や都市化、管理が行き届かず非処理排水を発生させてしまう小規模産業・農業の増加が引き起こす、未処理排水による負荷や、土壌の侵食や富栄養、海底への堆積を促す非持続可能な土地利用などである。2010年の河川における深刻な有機汚染は、ラテンアメリカで6～10%、アフリカで7～15%、アジアで11～17%と予測されている⁴³。海洋については、「海の健康」が極めて重要な問題として認識されており、2015年にドイツで開かれたG7科学技術大臣会合では、増加する海のプラスチックゴミの管理とリサイクル技術や海洋エコシステムに適合した深海資源採掘について議論された⁴⁴。マイクロプラスチックは、外洋の還流（Gyre）に集積し、生態系に侵入する可能性が示され、粒子そのものや含有・付着する有害化学物質の影響が懸念されている。マイクロプラスチックのほか、水域では医薬品および日用品等由来化学物質（PPCPs）やナノマテリアル等、新規汚染物質への懸念が国際的に高まっている。

1980年代以降、地球規模課題が認識され、対策が国境を越え始めたことを受け、化学物質関連の様々な国際的取り組みが行われている。主要なものを挙げると、クロロフルオロカーボン（CFC）の規制に関するモントリオール議定書（1989年）、化学物質管理のための戦略的アプローチSAICM（2002年）、POPsを規制したストックホルム条約（2004年）、欧州の化学物質に関する包括的な取り決めであるREACH規制（2007年）、水銀の使用・国際的流通に関して定めた水俣条約（2013年）などがある。化学物質のみならず、地球温暖化に関連した水系感染症の増加や、節足動物媒介感染症の分布変動、ヒートアイランド現象とも関連した熱中症増加等の問題も危惧されている。

⁴¹ The Guardian, “More people die from air pollution than Malaria and HIV/Aids, new study shows,” 16 Sep. 2015.
<https://www.theguardian.com/environment/2015/sep/16/more-people-die-from-air-pollution-than-malaria-and-hiv-aids-new-study-shows>

⁴² International Energy Agency (IEA), Small increase in energy investment could cut premature deaths from air pollution in half by 2040, says new IEA report, 27 June 2016
<http://www.iea.org/newsroom/news/2016/june/energy-and-air-pollution.html>

⁴³ UNESCO, The United Nations World Water Development Report 2016: Water and jobs
<http://unesdoc.unesco.org/images/0024/002439/243938e.pdf>

⁴⁴ ドイツ連邦教育研究省（BMBF）, Press release, Combatting infectious diseases and marine litter, 9 October 2015
https://www.bmbf.de/files/PM_1009-133ev.pdf

（３）生物多様性・生態系区分

現在は第 6 の大量絶滅の時代といわれ、地球規模での生物多様性の減少が起きている。また、環境改変の 10 の側面のうち、生物多様性の損失は、窒素循環や気候変動とともにすでに限界（Planetary Boundaries）を超えているとの発表がある⁴⁵。生物多様性はそれ自体に価値があるだけでなく、人類に様々な自然の恵み、即ち「生態系サービス」をもたらす源泉と考えられている。持続可能な社会の発展を実現するには、生物多様性の保全と持続可能な利用を促す科学技術の発展が不可欠であり、2010 年に名古屋で開催された第 10 回生物多様性条約締約国会議（COP10）で決議された愛知目標は、その実現のために必要な 2020 年までの具体策を示している。そして、各国はその国の優先度に応じた目標を設定し、国家戦略の中に組み込むことが求められ、COP11 においても戦略目標に沿う形で国家戦略の改定を行うよう要請された。そのような状況の中、日本ではこれまでの戦略を改定する形で生物多様性国家戦略 2012-2020 が策定された⁴⁶。

なお、愛知目標の前の 2010 年目標は、2002 年に開催された第 6 回生物多様性条約締約国会議（COP6）で採択され、「2010 年までに生物多様性の損失速度を顕著に減少させる」ことが目指された。目標年にあたる 2010 年に生物多様性条約事務局は達成状況の評価を行った結果、重要な取り組みが促進されたものの目標は達成できなかったと結論づけた。また、このまま生物多様性の損失が続けば、近い将来、地球のシステムがある臨界点（Tipping Point）を越え、生物多様性の劇的な損失とそれに伴う生態系サービスの劣化が生じるリスクが高まると警鐘を鳴らした。さらに、2010 年目標は抽象的で明確さに欠け達成状況の客観的評価手法が欠如していたなどの課題が指摘され、2011 年以降の世界目標では、明確で計測可能な目標を設定することが求められた⁴⁷。

愛知目標の達成には、生物多様性や生態系サービスの現状や変化を科学的に評価し、それを的確に政策に反映させていくことが不可欠であるため、世界中の研究成果を基に政策提言を行う政府間組織として「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（IPBES）」が 2012 年 4 月に設立された。生物多様性版の IPCC と呼ばれる IPBES は、「科学的評価」、「能力養成」、「知見生成」、「政策立案支援」の 4 つの機能を活動の柱としており、科学的な見地から効果的・効率的な取り組みが一層推進されることが期待され、2019 年に評価結果を公表する予定となっている⁴⁸。

こうした国際的な動向を反映して、社会や経済で様々な活動が活発化している。例えば、生態系サービスへの支払い（PES : Payment for Ecosystem Services）や、生物多様性オフセット、生物多様性オフセットの 1 つの実施方法としてのバンキングがある。一国の経済活動のフローとストックを体系的・統一的に記録する統計体系として国際基準に「国民経済計算体系」（SNA : System of National Accounts）があるが、SNA への「環境・経済統合勘定体系」（SEEA : Satellite System for Integrated Environmental and Economic Accounting）の導入が提唱され、環境勘定に関するはじめての国際基準である「環境経済勘定体系セントラルフレームワーク（主要枠組）」（SEEA-CF）が 2012 年に公表され、2013 年には実験的

⁴⁵ Rockstrom, J. et al. (2009). "A safe operating space for humanity." Nature 461: 472-475.

⁴⁶ 環境省 生物多様性センター、愛知目標 <http://www.biodic.go.jp/biodiversity/about/>

⁴⁷ 環境省 中央環境審議会、生物多様性国家戦略小委員会、第 5 回小委員会 資料 1-2 次期生物多様性国家戦略 第 2 部（素案）
https://www.biodic.go.jp/biodiversity/about/initiatives/files/unite_2012_01_sub5st/0531_ref2.pdf

⁴⁸ 環境省 生物多様性センター、科学と政策の統合（IPBES）
<https://www.biodic.go.jp/biodiversity/activity/policy/ipbes/index.html>

生態系勘定（SEEA-EEA）が国際ガイドラインとして採択された。国などの成長に関しては、国民経済（GDP）や人間開発指数（HDI）などのような短期的な基準ではなく、持続可能性に焦点をあて、長期的に自然資本・生産資本・人的資本の3つを富の指標として考え世界中の経済成長を計るという **Inclusive Wealth Index（IWI、包括的富指標）** に関する最初のレポート「**Inclusive Wealth Report 2012**」が、国連大学地球環境変化の人間・社会的側面に関する国際研究計画（**UNU-IHDP**）と国連環境計画（**UNEP**）などから発表された。途上国における森林減少と森林劣化からの排出削減と森林保全、持続可能な森林管理、森林炭素蓄積の増強を目指す **REDD+** についても 2020 年の実施に向けて準備が進められている。

企業における生態系サービスの評価や管理は、近年は **CSR** 側面だけでなく事業の持続性の側面として重視されている。国際統合報告評議会（**IIRC**）が公開を要求⁴⁹している自然資本などの非財務情報は投資判断に活用されつつある。また、2010 年発行の **ISO26000** は人権と多様性尊重の概念を包含し、2015 年改訂の **ISO14001** では生物多様性保全の項目が追加され、事業活動のサプライチェーンにおける生態系への影響を考慮することが環境経営の要件となった。**ISO20400** では持続可能な調達を実現するガイドラインの作成が進む。**ISO14008** では事業活動における環境負荷を経済価値評価で示す方法をスウェーデンが 2015 年に提案した⁵⁰。2015 年の持続可能な開発目標（**SDGs**）でも生物多様性の目標が掲げられるなど、生態系サービスの評価、管理の必要性がますます認知され、企業の関心は高くなっている。

（４）循環型社会

循環という考え方を歴史的にたどると、1965 年の国連経済社会理事会に米国の国連大使（当時）アドレイ・スティブソンが「宇宙船地球号」という考えを発表したことが挙げられる。1972 年にはローマクラブが「成長の限界」という報告書を発表した。その翌年の 1973 年に第一次石油危機が発生し、日本は資源問題に直面することとなった。1984 年、国連に「環境と開発に関する世界委員会（ブルントラント委員会）」が設置され、1987 年に「われら共有の未来（**Our Common Future**）」を発表し、「持続可能な開発（**Sustainable Development**）」というキーワードを示した。1992 年には地球サミットが開かれ、気候変動に関する国際連合枠組条約、リオ宣言やアジェンダ 21 といった成果が生まれた。日本では、1970 年の公害国会で「廃棄物の処理及び清掃に関する法律」（廃棄物処理法）が、それまでの清掃法を全面的に改正して制定された。地球環境問題への関心の高まりなどを背景に、1993 年に公害対策基本法が全面的に見直され、環境基本法が制定され、その中で循環型社会の考え方の基礎が示された。1994 年の環境基本計画で、長期目標の一つとして初めて「循環」という概念を提示した。その後、中央環境審議会廃棄物部会において循環型社会に関する検討が始められ、2000 年の循環型社会形成推進基本法の制定へとつながった⁵¹。この法律に基づき循環型社会形成推進計画が策定され、様々な施策が行われている。2015 年の持続可能な開発目標（**SDGs**）

⁴⁹ The International Integrated Reporting Council (IIRC), Integrated Reporting <IR> <http://integratedreporting.org/>

⁵⁰ International Organization for Standardization (ISO), "ISO 14008 - Monetary valuation of environmental impacts from specific emissions and use of natural resources." ISO/TC 207/SC 1 Environmental management systems. <https://committee.iso.org/sites/tc207sc1/home/projects/ongoing/iso-14008.html>

⁵¹ 環境省、平成 14 年版循環型社会白書

<https://www.env.go.jp/policy/hakusyo/honbun.php3?kid=216&serial=13176&bflg=1>

のターゲットとしても、消費と生産の資源効率改善や、天然資源の持続可能な管理と効率的な利用、廃棄物発生的大幅削減が 2030 年までの目標として掲げられている。また、欧州連合（EU）では、2011 年には「資源効率的なヨーロッパに向けたロードマップ（Roadmap to a Resource Efficient Europe）」、2014 年には「循環経済に向けて（Towards a circular economy）」を発表し、これらを方針として各種施策が進められている³⁷。

日本の現状として、第三次循環基本計画（2013 年）では、リサイクルよりもリデュース及びリユースの取り組みが遅れていると指摘された。リサイクルについても、産業廃棄物に関する取り組みは 2013 年現在で 53.4%（うち再生利用量／産業廃棄物の排出量）と比較的進んでいるものの、生活に身近な一般廃棄物に関する取り組みは 20.6%（うち再生利用量／一般廃棄物の排出量）と、熱回収や適正処理と比べ十分に進められているとは言えない状況である。2016 年 2 月に行われた第三次循環基本計画の点検では、資源生産性（GDP／天然資源等投入量）は 2000 年度（24.8 万円/t）から長期的には向上しているものの（37.8 万円/t）、同基本計画における 2020 年度目標（46 万円/t）の達成は非常に困難な状況であることが明らかとなった³⁷。資源生産性を向上させるためには、廃棄・処分段階の取り組みだけでなく、生産・流通・消費の段階で資源消費量を削減することが重要とされている。

有害廃棄物の越境移動については、移動に起因する環境汚染等の問題に対処するために採択された 1992 年のバーゼル条約発効を受け、日本は特定有害廃棄物等の輸出入等の規制に関する法律（バーゼル法）を制定した。しかし、使用済電気電子機器などの有害物質を含む廃棄物等の不適正な輸出や輸出先国からのシップバックが頻発するなど、環境保全の観点からの様々な問題が顕在化してきている。また、国内で循環利用されるべき資源の海外への流出、循環資源の海外からの受入れにおける諸外国との競争環境の不利が生じるなど、環境のみならず、経済の側面からも問題が顕在化しつつある⁵²。例えば、輸出先での不適正な処理による人や環境への悪影響、雑品スクラップによる船舶や保管地での火災発生、家電リサイクル法指定機器の海外流出（約 1 割）などが挙げられる。

資源循環の考え方は、製造業のみならず、サービス産業や、水関連産業、農林水産業、都市管理でも共通し、気候変動や健康・汚染問題、生態系、さらには社会・経済なども踏まえた統合的な対応が求められている。

⁵² 環境省、廃棄物等の越境移動等の適正化に関する検討会 報告書、2016 年 4 月
http://www.env.go.jp/press/y0310-01/mat03_3-2.pdf

2.3.2 主要国の研究開発（科学技術）政策の動向

（1）日本

1. 環境に関する概況

1950年代以降、産業に起因する重金属やコンビナートの排煙の大量曝露による毒性が健康被害をもたらした。こうした典型的な公害に対し、1967年の公害対策基本法を皮切りに法的規制や技術進歩などの対策が進んだ。1992年の地球サミット後の1993年には環境基本法が制定され、国際的取り組みへの貢献を意識した活動がなされている。そして、2011年の東日本大震災は、放射性物質の拡散、原子力発電所の停止、災害廃棄物の発生などをもたらし、原子力発電の停止に伴う火力発電割合の増加はCO₂排出量増加につながった。しかし、GHG排出量は2014年度より減少しており、2015年度の速報値では、13億2,100万t（CO₂換算）となっている³⁸。パリ協定における日本のGHG削減目標は、2030年度までに2013年度比で26%削減としており、2050年までに80%削減するという長期目標もある。そのために必要となる技術開発や、森林や農地土壌での吸収は排出抑制に関する戦略や計画が策定されている。

2. 政策立案のガバナンス

日本の科学技術政策は内閣府の「総合科学技術・イノベーション会議（CSTI）」が司令塔の役割を担っている。科学技術基本法のもとに5年毎に策定される科学技術基本計画の策定とフォローアップを行っている。また、科学技術基本計画の方向性のもとに毎年策定される科学技術イノベーション総合戦略も毎年策定している。CSTIで示される方針を踏まえ、環境省や文部科学省、経済労働省、農林水産省、国土交通省などが、環境分野の科学技術・イノベーションに関わる活動を行っている。

3. 環境に関する基本政策

1) 第四次環境基本計画

環境基本法に基づき、2012年に第四次環境基本計画が閣議決定され、9つの優先的重点分野と、震災復興、放射性物質による環境汚染対策が示されている。

「9つの優先的に取り組む重点分野」

- ① 経済・社会のグリーン化とグリーン・イノベーションの推進
- ② 国際情勢に的確に対応した戦略的取組の推進
- ③ 持続可能な社会を実現するための地域づくり・人づくり、基盤整備の推進
- ④ 地球温暖化に関する取組
- ⑤ 生物多様性の保全及び持続可能な利用に関する取組
- ⑥ 物質循環の確保と循環型社会の構築
- ⑦ 水環境保全に関する取組
- ⑧ 大気環境保全に関する取組
- ⑨ 包括的な化学物質対策の確立と推進のための取組

「震災復興、放射性物質による環境汚染対策」

- ・ 東日本大震災からの復旧・復興に際して環境の面から配慮すべき事項

特に、被災地における①自立・分散型エネルギーの導入等の推進、②広域処理を含む災害廃棄物の処理、③失われた生物多様性の回復等の取組に取り組む。

- 放射性物質による環境汚染からの回復等

2) 地球温暖化対策計画

COP21 後の 2016 年 5 月に地球温暖化対策推進本部（内閣官房・環境省・経済産業省）が策定した。2030 年度に 2013 年度に比べて 26%の GHG 削減を目指すという目標を明記し、その達成のために必要となる措置や施策を記載した総合戦略である。

3) 気候変動への影響への適応計画

気候変動による様々な影響に対し、政府全体として整合のとれた取り組みを総合的かつ計画的に推進するため、2015 年 11 月に閣議決定された。分野別施策として、①農業、森林・林業、水産業、②水環境・水資源、③自然生態系、④自然災害・沿岸域、⑤健康、⑥産業・経済活動、⑦国民生活・都市生活、の影響と適応策をまとめるとともに、基盤的・国際的施策として、①観測・監視、調査・研究、②気候リスク情報等の共有と提供、③地域での適応の推進、④国際的施策（途上国支援や人材育成等）を挙げている。

4) 生物多様性国家戦略 2012-2020

生物多様性条約及び生物多様性基本法に基づく、生物多様性の保全及び持続可能な利用に関する国の基本的な計画。2010 年 10 月に開催された生物多様性条約第 10 回締約国会議（COP10）で採択された愛知目標の達成に向けた日本のロードマップを示すとともに、2011 年 3 月に発生した東日本大震災を踏まえた今後の自然共生社会のあり方を示すために、2012 年 9 月に閣議決定された。

2020 年度までに重点的に取り組むべき施策の方向性として以下の「5 つの基本戦略」を策定している。

- 生物多様性を社会に浸透させる
- 地域における人と自然の関係を見直し・再構築する
- 森・里・川・海のつながりを確保する
- 地球規模の視野を持って行動する
- 科学的基盤を強化し、政策に結びつける

さらに、5 年間の政府の行動計画として約 700 の具体的施策を記載し、50 の数値目標を設定した。

5) 第三次循環型社会形成推進基本計画

循環型社会形成推進基本法に基づき、循環型社会の形成に関する施策の総合的かつ計画的な推進を図るために定める計画で、2013 年 5 月に閣議決定された。

最終処分量の削減など、これまで進展した廃棄物の量に着目した施策に加え、循環の質にも着目し、リサイクルに比べ取り組みが遅れているリデュース・リユースの取り組み強化、有用金属の回収、安心・安全の取り組み強化、3R 国際協力の推進等を新たな政策の柱としている。

6) その他

環境分野は様々な政策分野にも関連しており、上記の他にも、エネルギー基本計画、水循環基本計画、海洋基本計画、地理空間情報活用推進基本計画、バイオマス活用推進基本計画、国土強靱化基本計画などが関連する内容を含んでいる。

4. 環境分野の研究開発戦略

1) 第5期科学技術基本計画

科学技術基本法に基づき政府が策定する、10年先を見通した5年間の科学技術の振興に関する総合的な計画であり、第5期の基本計画は2016年1月に閣議決定された。世界に先駆けた「超スマート社会」(Society 5.0)の実現を目指すとともに、経済・社会的課題への対応として13の重要政策課題を挙げている。環境やエネルギーに関連する課題を挙げると、エネルギーの安定的確保とエネルギー利用の効率化、資源の安定的な確保と循環的な利用、持続可能な都市及び地域のための社会基盤の実現、食品安全・生活環境・労働衛生等の確保、地球規模の気候変動への対応、生物多様性への対応が記載されている。また、地球環境情報プラットフォームの構築を推進している。

2) 科学技術イノベーション総合戦略

経済再生に向けて科学技術イノベーションの潜在力を集中して発揮し、時局を打開し未来を切り拓くために、科学技術イノベーション政策の全体像として2013年6月に閣議決定された。科学技術イノベーション総合戦略は、科学技術基本計画の方向性のもとに毎年策定される。科学技術イノベーション総合戦略2016では、経済・社会的課題への対応の1つとして、地球環境情報プラットフォームの構築を掲げている。地球環境の観測・予測データ及び経済・社会問題に関連した各種データを統合した情報基盤（地球環境情報プラットフォーム）を構築し、この情報基盤の活用により気候変動に起因する各種経済・社会的課題（海面上昇、降水量の変化に伴う耕作適地の変化、水害防止等）の解決に貢献する技術開発を推進するとしている。構築に当たっては、他の項目であるエネルギーバリューチェーンの最適化や自然災害に対する「予測力」関連技術等との連携協力に留意することが求められている。

3) 環境研究・環境技術開発の推進戦略について（推進戦略）

環境省では、中長期（2025年～2030年、2050年）のあるべき持続可能な社会の姿をにらみながら今後5年間で取り組むべき環境研究・技術開発の重点課題やその効果的な推進方策を提示するものとして、「環境研究・環境技術開発の推進戦略について」（平成27年8月中央環境審議会答申）をもとに研究開発を推進している。

ここでは、長期（2050年頃）・中期（2025年～2030年頃）で目指すべき社会像を提示し、その実現に向けて低炭素、資源循環、自然共生、安全確保の各領域と、社会科学分野等との連携の推進や災害対応・地方創生等の複合的な課題の解決に資する「統合領域」を設定し、今後5年間で重点的に取り組むべき研究・技術開発の課題（重点課題）を提示している（表2-4）。ここで示された重点課題に沿って環境研究総合推進費を公募している。なお、環境分野の研究・技術開発の推進に当たっては、国が民間企業等と適切に連携しながら主体的に取り組むことなどが重要としている。

表2-4 今後5年間で重点的に取り組むべき環境研究・技術開発

領域	重点課題
統合領域	重点課題①持続可能な社会の実現に向けたビジョン・理念の提示 重点課題②持続可能な社会の実現に向けた価値観・ライフスタイルの変革 重点課題③環境問題の解決に資する新たな技術シーズの発掘・活用 重点課題④災害・事故に伴う環境問題への対応に貢献する研究・技術開発
低炭素領域	重点課題⑤低炭素で気候変動に柔軟に対応する持続可能なシナリオづくり 重点課題⑥気候変動の緩和策に係る研究・技術開発 重点課題⑦気候変動への適応策に係る研究・技術開発 重点課題⑧地球温暖化現象の解明・予測・対策評価

資源循環 領域	重点課題⑨3R を推進する技術・社会システムの構築 重点課題⑩廃棄物の適正処理と処理施設の長寿命化・機能向上に資する研究・技術開発 重点課題⑪バイオマス等の廃棄物からのエネルギー回収を推進する技術・システムの構築
自然共生 領域	重点課題⑫生物多様性の保全とそれに資する科学的知見の充実に向けた研究・技術開発 重点課題⑬森・里・川・海のつながりの保全・再生と生態系サービスの持続的な利用に向けた研究・技術開発
安全確保 領域	重点課題⑭化学物質等の包括的なリスク評価・管理の推進に係る研究 重点課題⑮大気・水・土壌等の環境管理・改善のための対策技術の高度化及び評価・解明に関する研究

5. 代表的な研究開発プログラム（2017年3月現在実施中、情報基盤構築等を含む）

1) 環境分野全般

プログラム名	概要	実施機関	府省等	期間
環境研究総合推進費 統合領域（第1部会）	持続可能な社会の実現に向けたビジョン・理念の提示、持続可能な社会の実現に向けた価値観・ライフスタイルの変革、環境問題の解決に資する新たな技術シーズの発掘・活用、災害・事故に伴う環境問題への対応に貢献する研究・技術開発 等	大学、国研等	環境省	2015 ～（新推進戦略策定後）
データ統合・解析システム（DIAS）	地球規模／各地域の観測で得られたデータを収集、永続的な蓄積、統合、解析するとともに、社会経済情報などとの融合を行い、地球規模の環境問題や大規模自然災害等の脅威に対する危機管理に有益な情報へ変換し、国内外に提供することにより、我が国の総合的な安全保障や国民の安全・安心の実現に資する。	東京大学 他	文部科学省	2006 ～
SATREPS 環境・エネルギー分野 研究領域 1)「地球規模の環境課題の解決に資する研究」	- 気候変動の予測、適応及びその緩和に関する研究 - 化学物質などによる汚染及びそのリスク低減に関する研究 - 安全な水の確保、処理に関する研究 - 循環型社会の構築に関する研究（有用資源の回収、再利用を含む） - 生態系・生物多様性の保全・修復（バイオレメディエーションを含む）に関する研究 - 都市における環境保全（緑化を含む）・環境創造に関する研究 - 快適な都市の構築・運用に関する研究 - 大規模災害による環境の劣化・破壊の復元・修復に関する研究 - 資源の持続可能利用に関する研究 等	大学等	JST	2008 ～
RISTEX フューチャー・アース構想の推進事業「フューチャー・アース：日本が取り組むべき国際的優先テーマの抽出及び研究開発のデザインに関する調査研究」	フューチャー・アースに関する日本及びアジアの課題と日本の地球環境学研究の現状と動向について、客観的なエビデンスに基づいて収集・調査する。また、日本の強みとトランスディシプリナリー（TD）研究の適応性を判断するための評価軸を検討し設定する。これらを用いて、日本が世界においてイニシアティブを発揮できるテーマ群と、TD 研究として取り組むべきテーマ群を抽出し、さらに日本及びアジアにおける研究成果として波及効果が高いと思われるテーマ群の抽出も行う。	大学共同利用機関法人人間文化研究機構 総合地球環境学研究所	JST	2014 ～ 2016
RISTEX フューチャー・アース構想の推進事業「トランスディシプリナリー研究として推進すべき研究開発の可能性調査」	トランスディシプリナリー研究として推進すべき研究開発の可能性調査（Feasibility Study, FS）を実施。可能性調査は Phase1（研究課題の設計）及び Phase2（研究企画の試行）の2段階で実施。	大学等	JST	2014 ～

2) 気候変動区分

プログラム名	概要	実施機関	府省等	期間
環境研究総合推進費 戦略的研究開発領域 S-14「気候変動の緩和 策と適応策の統合的 戦略研究」	被害額や投資額といった従来の経済的指標に加えて、主観的幸福度や生計資本といった指標なども勘案して多面的に評価し、緩和策と適応策の効率的で効果的な実施策に関する知見を提供する。	東京大学 他	環境省	2015 ～ 2019
環境研究総合推進費 戦略的研究開発領域 S-10「地球規模の気候 変動リスク管理戦略 の構築に関する総合 的研究」	「資源環境制約の観点からの目標と指標」、「開発の観点からの目標と指標」、「持続可能な開発目標実現のためのガバナンスの研究」といった多角的視点からの分析を統合し、「資源環境制約下の成長・開発の方向性と目標及び効果的ガバナンスの提示」に向けた知見を提供する。これにより、国際的な持続可能な開発目標設定プロセス、地域・国・都市レベルでの目標設定支援、国内外での規範形成、持続可能な開発に対する国民理解の深化等に貢献する。	国立環境 研究所他	環境省	2012 ～ 2016
環境研究総合推進費 低炭素領域(第2部会)	低炭素で気候変動に柔軟に対応する持続可能なシナリオづくり、気候変動への適応策に係る研究・技術開発、地球温暖化現象の解明・予測・対策評価 等	大学、国 研等	環境省	2015 ～（新 推進戦 略策定 後）
CO ₂ 排出削減対策強化 誘導型技術開発・実証 事業	技術開発の成果を社会実装する実証研究、他の環境問題との間のトレードオフを解消する研究開発、その他早期に実用化が必要かつ可能なエネルギー起源 CO ₂ の排出抑制技術のうち現状の取り組みが不足している開発を通じて、地球温暖化対策を推進することを目的とした開発等資金 ①交通低炭素化技術開発分野 ②住宅・オフィス等低炭素化技術開発分野 ③エネルギー供給低炭素化技術開発分野 ④バイオマス・循環資源低炭素化技術開発分野 ⑤上記4分野に限定されない横断的課題	大学、企 業等	環境省	2005 ～
気候変動適応情報プ ラットフォーム (A-PLAT)	関係府省庁と連携し、利用者ニーズに応じた情報の提供、適応の行動を支援するツールの開発・提供、優良事例の収集・整理・提供などを行うことで、地方公共団体や事業者、国民など各主体の活動基盤となるもの。2020年を目途に気候変動影響の情報に関する国際的なハブ機能を有する「アジア太平洋適応情報プラットフォーム」に発展させる。	国立環境 研究所 地球温暖 化観測推 進事務局 (OCCCO)	環 境 省 他	2016 ～
気候変動リスク情報 創生プログラム	地球シミュレータ等の世界最高水準のスーパーコンピュータを活用し、今後数年～数十年（近未来）で直面する地球環境変動の予測と診断、GHG 排出シナリオ研究と連携した長期気候変動予測、気候変動の確率的予測技術の開発、精密な影響評価技術の開発等、各テーマが有機的に連携した研究体制で研究開発を推進。	東 京 大 学、海洋 研究開発 機構、筑 波大学、 京都大学 他	文 部 科 学省	2012 ～ 2016
気候変動適応技術社 会実装プログラム (SI-CAT)	日本全国に汎用的に適用可能な、近未来における地球温暖化に伴う気候変動の影響や気候変動の影響に対する適応策の効果の評価を総合的に行うことが可能な技術を自治体等と共同で開発し、気候変動に伴って増加する極端気象現象（猛暑や豪雨）等への自治体による地域特性に応じた適応策の導入を支援する。	技術開発 機関：海 洋研究開 発機構、 国立環境 研究所、 社会実装 機関：JST、 自治体	文 部 科 学省	2015 ～ 2019

フラッグシップ 2020 プロジェクト 重点課題「観測ビッグデータを活用した気象と地球環境の予測の高度化」	ポスト「京」を最大限に活用し、局地的豪雨の予測技術、台風の発生や特性の変化予測システムの技術、エアロゾル（微粒子）や PM2.5 などが気象や環境に与える影響を予測・監視するシステムの基盤技術を開発し、環境政策や防災、健康対策への貢献を目指す。	海洋研究開発機構 他	文部科学省	2014 ～ 2020
CREST・さがけ「二酸化炭素資源化を目指した植物の物質生産力強化と生産物活用のための基盤技術の創出」	植物の光合成能力の増強を図るとともに、光合成産物としての各種のバイオマスを活用することによって、CO ₂ を資源として利活用するための基盤技術の創出を目的とする。	大学、国研等	JST	2011 ～ 2018
CREST「環境変動に対する植物の頑健性の解明と応用に向けた基盤技術の創出」	フィールドにおける植物の環境応答機構の包括的な理解に基づき、実用植物を分子レベルから設計する技術の確立に資する研究を推進する。	大学、国研等	JST	2015 ～ 2022
さがけ「フィールドにおける植物の生命現象の制御に向けた次世代基盤技術の創出」	フィールドにおける環境変化に適応し、安定的に生育する植物を分子レベルから設計するための次世代基盤技術の創出に関する研究を推進する。	大学、国研等	JST	2015 ～ 2020
地球温暖化対策技術普及等推進事業	政府の取り組みと連携し、我が国の低炭素技術・製品等の GHG 排出削減効果等を確認・実証する技術実証を実施するとともに、事業性評価や排出削減効果の評価手法等の確立、その他制度・環境整備方策等に関する調査についても実施している。これらの取り組みは定量的評価手法により GHG の削減効果を「見える化」することで、これら技術製品等の普及及び JCM の制度設備に資する。	企業等	NEDO	2011 ～ 2017

3) 環境汚染・健康区分

プログラム名	概要	実施機関	府省等	期間
環境研究総合推進費 戦略的研究開発領域 S-12「SLCP の環境影響評価と削減パスの探索による気候変動対策の推進」	領域大気化学輸送モデルと逆推計手法を用いた SLCP（短寿命気候汚染物質）排出インベントリ の高度化、アジア太平洋統合評価モデル（AIM）における SLCP 過程の高度化、気候・環境 モデルによる影響評価を行い、この 3 つのシステムを組み合わせる SLCP 削減施策の探索を行う。	宇宙航空研究開発機構 他	環境省	2014 ～ 2018
環境研究総合推進費 安全確保領域（第 5 部会）	化学物質等の包括的なリスク評価・管理の推進に係る研究、大気・水・土壌等の環境管理・改善のための対策技術の高度化及び評価・解明に関する研究 等	大学、国研等	環境省	2015 ～（新推進戦略策定後）
科学研究費助成事業 新学術領域研究「福島原発事故により放出された放射性核種の環境動態に関する学際的研究」	長期的な環境中の放射性物質の移行および環境動態予測に、研究者が英知を結集させて取り組み、世界をリードする新たな研究領域の形成を目指す。	筑波大学 他	JSPS	2012 ～ 2016

4) 生物多様性・生態系区分

プログラム名	概要	実施機関	府省等	期間
環境研究総合推進費 戦略的研究開発領域 S-15「持続可能な沿岸 海域実現を目指した 沿岸海域管理手法の 開発」	社会・生態システムの統合化による自然資本・生態系サービスの予測評価	東京大学 他	環境省	2016 ～ 2020
環境研究総合推進費 戦略的研究開発領域 S-13「持続可能な沿岸 海域実現を目指した 沿岸海域管理手法の 開発」	沿岸海域とその後背地である陸域の自然・人間活動を総合的にとらえ、物質循環・エコトーンのあるべき姿に対して、現状を如何に改変することが必要か、具体的な提案を行い、わが国における沿岸海域環境管理手法を提案する。	(公財) 国際エメックスセンター他	環境省	H26 ～ H30
環境研究総合推進費 自然共生領域（第4部会）	生物多様性の保全とそれに資する科学的知見の充実に向けた研究・技術開発、森・里・川・海のつながりの保全・再生と生態系サービスの持続的な利用に向けた研究・技術開発 等	大学、国研等	環境省	2015 ～(新推進戦略策定後)
自然環境保全基礎調査（緑の国勢調査）	陸域、陸水域、海域の各々の領域について国土全体の状況を調査。自然環境保全法第4条の規定に基づきおおむね5年ごとに実施。	環境省	環境省	1973 ～
重要生態系監視地域 モニタリング推進事業（モニタリングサイト1000）	全国に1000ヶ所程度のモニタリングサイトを設置し、基礎的な環境情報の収集を長期にわたり継続し、日本の自然環境の質的・量的な劣化を早期に把握する。研究者は市民調査員など、様々な調査主体が参加。	環境省	環境省	2003 ～
いきものログ	国の機関、地方公共団体、専門家、市民等により、生きものの情報を収集・提供するインターネット上のシステム。	環境省	環境省	2013 ～
CREST「海洋生物多様性および生態系の保全・再生に資する基盤技術の創出」	海洋の生物多様性および生態系を把握するための先進的な計測技術と将来予測に資するモデルの研究開発を行い、これらを保全・再生するために必要な基盤技術を創出	大学、国研等	JST	2011 ～ 2018
科学研究費助成事業 新学術領域研究「新海洋像：その機能と持続的利用」	太平洋を対象海域として、①新たな海洋区系を確立して、それぞれの区系における物質循環と生態系の機能を解明する、②その成果をもとに、人類に様々な恵みをもたらす社会共通資本としての海洋の機能および価値を区系ごとに評価する。従来、機能・価値評価の空白域であった公海に重点を置き、沿岸域および経済水域も評価対象に含める、③海洋の持続的な利用のためのガバナンスに必要な国際的合意形成における法的経済的枠組みを提示する、ことを目的としている。	大学等	JSPS	2012 ～ 2016
科学研究費助成事業 新学術領域研究「海洋混合学の創設：物質循環・気候・生態系の維持と長周期変動の解明」	近年目覚ましく進歩した海洋観測とモデリングを両輪として、鉛直混合の実態とその影響を明らかにするための研究を展開する。	大学等	JSPS	2015 ～ 2019
森林生態系多様性基礎調査	持続可能な森林経営の推進のため、森林の現状とその変化の動向を把握・評価することで、森林計画における森林の整備に係る基本的な事項等を定めるために必要となる客観的資料を得ることを目的として実施。5年間で全国を一巡するサイクルで調査。	林野庁	林野庁	1999 ～

5) 循環型社会区分

プログラム名	概要	実施機関	府省等	期間
環境研究総合推進費 戦略的研究開発領域 S-16「アジア地域における持続可能な消費・生産パターン定着のための政策デザインと評価」	「消費と生産の相互連携の強化」、「経営者や投資家、生活者などの多様な関係者の活動」、「消費における充足性の向上のための政策デザイン」、「SDGs を梃子にした SCP 政策の実施」をテーマとし、異なる学術分野からのアプローチを統合することによって、日本およびアジア各国の SCP パターンへの転換を実現する政策デザインに貢献する。	東京大学 他	環境省	2016 ～ 2020
環境研究総合推進費 資源循環領域（第3部会）	3R を推進する技術・社会システムの構築、廃棄物の適正処理と処理施設の長寿命化・機能向上に資する研究・技術開発、バイオマス等の廃棄物からのエネルギー回収を推進する技術・システムの構築 等	大学、国 研等	環境省	2015 ～（新 推進戦 略策定 後）
CREST「持続可能な水利用を実現する革新的な技術とシステム」	現在抱えている、あるいは気候変動などによって将来さらに深刻化すると予想される国内外の様々な水問題への 適応策となる、物理的・社会的な水利用システムの創出を目指す。	大学等	JST	2009 ～ 2016
COI「世界の豊かな生活環境と地球規模の持続可能性に貢献するアクア・イノベーション拠点」	海水や油を含む水など、多様な水源から安全・安心な水を造り、それを循環して、飲料水や生活用水、農業用水、工業用水などが世界の人々に豊かに提供する。人口爆発が進む 21 世紀、十分な水の供給により、食糧生産量や衛生環境などで地球規模の持続可能性に貢献する。さらに、生産量が増大した農産物の輸出入や、工業の発展などにより経済も潤い、世界の豊かな生活環境の創出に寄与する。	日立製作所 イン フラシス テム社、 東レ、信 州大学他	JST	2013 ～
さがけ「情報科学との協働による革新的な農産物栽培手法を実現するための技術基盤の創出」	気候変動や環境負荷に向けた要求等、様々な制約下でも高収量・高品質な農業生産を持続的に行うことを可能とする先進的な栽培手法の確立を目指す。このため、農学・植物科学と、先端計測やデータ駆動型科学等の情報科学との協働により、様々な環境に適応した植物栽培や生産品質に合わせた植物の生育制御を実現するための研究を異分野連携により推進する。	大学、国 研等	JST	2015 ～ 2020
SATREPS 生物資源分野 研究領域「生物資源の持続可能な生産・利用に資する研究」	- 生物資源の持続的生産及び利用に資する研究（植物・動物・海洋生物・微生物等の資源管理・育種・栽培/繁殖/培養技術、生産システム等） - 生物資源の評価・有効利用に関する研究（生物資源を元にした有用物質の発見・生産など生物多様性の利活用などを含む <ヒトへの創薬は含まない>） 等	大学等	JST	2009 ～
COI「共進化社会システム創成拠点」	地球規模で進む環境変化、国際化、人口問題等に対応できる持続可能な共進化（多様性の共生・進化）社会システムの創成を目指し、ヒト／モノのモビリティ（移動・流通）を中心とした新たな都市 OS（オペレーティングシステム）を科学技術イノベーション政策とマス・フォア・インダストリ（産業数学）に基づく新しい手法によって構築し、全ての人が安心して安全に暮らせる社会を実現する。	九州大学 他	JST	2013 ～

太陽光発電リサイクル技術開発プロジェクト	太陽光発電設備のリサイクル社会の構築に向け、廃棄物の大量発生回避を低コストに実現する技術として、分解処理が困難である太陽電池モジュールの低コスト分解処理技術の確立や、撤去・回収・分別技術などについて課題と対策を検討することを目的とした研究開発や調査を実施する。	企業	NEDO	2014 ～ 2018
環境・医療分野の国際研究開発・実証プロジェクト／アジアにおける先進的資源循環システム国際研究開発及び実証	廃棄物・リサイクル関連の規制強化等を背景として、アジアの新興国を中心に拡大する海外市場での新技術・システム・インフラ需要を取り込むことを目的に、日本の廃棄物処理・リサイクル技術に係る研究開発・実証を海外現地で実施する。研究開発項目として、先進的自動車リサイクルシステム、有用金属を含む廃棄物の高度リサイクル技術、廃油の環境調和型再利用システム、高効率下水汚泥減容化・再資源化、工業廃液等の適正処理及び再生・循環利用技術を実施する。	企業	NEDO	2011 ～ 2016
アジア省エネルギー型資源循環制度導入実証事業	リサイクルによる資源・エネルギーの安定供給及びGHG削減の達成に向け、アジア大での省エネ型資源循環制度の実現を目指す。具体的には、相手国に日本の自治体等が過去に実施したノウハウ（政策ツールや技術・システムなど）を提供し実証事業を通じて有効性を検証する。同時に日本において動脈産業側と静脈産業側が一体となった高度な資源循環システムの構築を目指し、将来的にはアジア地域への展開も視野に入れた資源リサイクルの効率化・高度化を図る研究実証事業を行う。	企業	NEDO	2016 ～ 2020
委託プロジェクト研究	2016年度は、市場開拓に向けた取り組みを支える研究開発、農林水産分野における気候変動対応のための研究開発を公募。	大学、国研、企業等	農林水産省	-

（２）米国

2016 年 11 月の大統領選でのトランプ氏勝利および上下院の共和党多数維持の結果を受け、オバマ政権が進めてきた環境・エネルギー政策が大きく変わる可能性があり、今後の動向に注視する必要がある。ここでは 2016 年 12 月時点における現状を記する。

1. 環境に関する概況（現状）^{53,53-59}

2014 年の米国におけるエネルギー起源 CO₂ 排出量は 51.8 億 t であり、中国に次いで 2 番目、世界 16.0% を占める。また、一人当たりの排出量は 16.22tCO₂ であり、日本の 9.35t CO₂ と比較して 1.7 倍である。これまで米国は地球温暖化に対し消極的な姿勢を取り続けてきた。最大の理由は、エネルギー事情（地政学的要因）と、多くの労働者を抱え政治力を有する石炭・石油産業にあった。国民もエネルギー消費は個人の自由であると考え、省エネを望ましいと捉える世論が育ちにくかった。他の先進国と比較して移民流入による人口増加率が高いことも CO₂ 排出量増加につながってきた。近年はオバマ政権が気候変動対策に積極的な姿勢を見せているが、共和党優位の議会が非協力的である。2015 年 12 月の COP21 パリ協定採択は、オバマ政権としては行政協定と呼ばれる法制化された政策の範囲内での協定として取りまとめ、9 月の批准につなげているが、トランプ政権への移行後は大きな政策転換も予想されている。

米国の温暖化ガス削減目標は 2025 年までに 2005 年比で 26～28% 削減するとしている。これは風力、太陽光などの再生可能電力の導入拡大、LED 照明への転換等のクリーンエネルギー技術導入に加え、環境保護庁（EPA）による火力発電への規制（新設：炭素汚染基準、既設：クリーンパワープラン）などの対策を想定している。しかしトランプ政権への交代後は石炭の国内産業保護の観点から EPA による火力発電への規制見直し等が確実とされている。

2. 政策立案のガバナンス（組織体制）⁶⁰

科学技術政策の基本的な方向性を決定するのは科学技術政策局（OSTP）を中心とする大統領府であり、このため気候変動などの各省庁にまたがる課題については OSTP が調整役を担っている。また、環境分野の研究開発には、エネルギー省（DOE）、EPA を中心に、農務省（USDA）、米国海洋大気庁（NOAA）、地質調査所など多くの省庁が関与している。このため研究開発戦略についても機関毎に作成されている。なお EPA は、健康保護や自然保護の観点での大気・水質・土壌汚染の管理について担当している。

EPA では複合的、複雑化している環境の研究や対策技術について、システムアプロー

⁵³ （株）日立総合計画研究所，日立総研 vol.10-3, 2015 年 11 月。

http://www.hitachi-hri.com/journal/_icsFiles/afiedfile/2015/11/27/Vol10-3.pdf

⁵⁴ 環境省，平成 24 年度環境研究総合推進費研究成果発表会「地球温暖化対策：主要国が参加できる国際合意は見つかるか？」，2013。
https://www.youtube.com/watch?v=mb2yQfY5KBA&feature=c4-overview&list=UUL_vpnyuAvUewfQG8B962xg

⁵⁵ 全国地球温暖化防止活動推進センター http://www.jccca.org/global_warming/knowledge/kno03.html

⁵⁶ 一般財団法人日本原子力産業協会，JAIF 米国原子力政策動向「COP21 合意に対する米国の対応」2016/1/8

http://www.jaif.or.jp/cms_admin/wp-content/uploads/2016/01/us-response_cop21.pdf

⁵⁷ 環境省 地球環境局 国際地球温暖化対策室「COP21 の成果と今後」

http://www.env.go.jp/earth/ondanka/cop21_paris/paris_conv-c.pdf

⁵⁸ みずほ総合研究所（株），みずほインサイト「COP21 がパリ協定を採択」2015 年 12 月 18 日

<http://www.mizuho-ri.co.jp/publication/research/pdf/insight/pl151218.pdf>

⁵⁹ 米国エネルギー省（DOE），”Revolution...Now”，November 2015

<http://energy.gov/sites/prod/files/2015/11/f27/Revolution-Now-11132015.pdf>

⁶⁰ JST CRDS，研究開発の俯瞰報告書 主要国の研究開発戦略(2015 年)

<http://www.jst.go.jp/crds/pdf/2014/FR/CRDS-FY2014-FR-01.pdf>

チによる研究開発が進められている。DOE や NSF でも食料・エネルギー・水の複合問題について、分野融合の研究が進められている。

3. 環境に関する基本政策⁶⁰

1) 戦略計画 2014-2018^{61,62}

人間の健康と環境の保護をミッションとした EPA が策定。以下の 5 つの戦略目標と 4 つの省庁連携の戦略を示している。

- 【目標 1】気候変動への取り組みと大気質改善：GHG の排出削減、気候変動への取り組みに対応した戦略の策定、大気の大気質の保護及び改善等の分野に関連するプログラムを支援
- 【目標 2】米国の水域保護：飲料水の安全確保と魚類、植物、野生動物、経済・レクリエーション・自給自足の活動等を支える水界生態系の保護及び再生を目指す
- 【目標 3】コミュニティ清掃と持続可能な開発の発展：コミュニティの清掃、持続可能な開発の推進を行うと同時に、低所得者やマイノリティの居住地区の保護を実施する。さらに有害物質の投棄を防ぎ、汚染地域の清掃及び再生に向けた取り組み
- 【目標 4】化学物質の安全性確認と汚染防止：化学薬品の安全性を向上させ危険性を削減するほか、発生源での汚染を防ぐ取り組み
- 【目標 5】人の健康と環境保護に向けた法の執行とコンプライアンスの徹底
- 省庁連携の戦略：持続可能な将来に向けた働き、コミュニティでの差異の可視化の作業、州・部族・地域・国際パートナーシップの新しい時代への始動、EPA を高パフォーマンスな組織にする

なお、EPA では環境問題・対策がより複雑化してきたことを受けて、2011 年に ORD (Office of Research and Development) における研究ポートフォリオを 6 つのプログラムに再編した。また、社会、産業、環境の相互影響を考え、持続可能性を目指したシステムアプローチによる研究を目指すこととなった（図 2-10）。

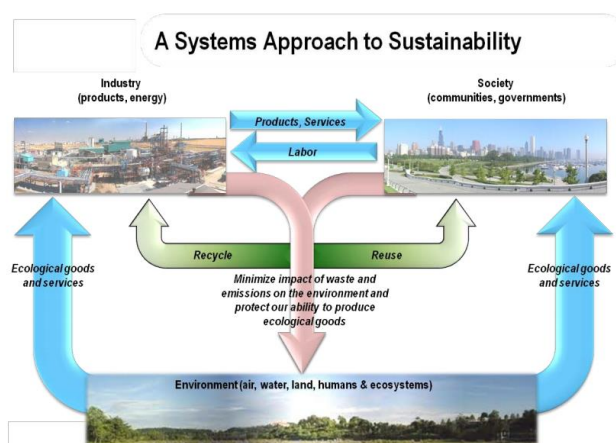


図 2-10 持続可能性を目指したシステムアプローチ 出典：米国 EPA⁶³

⁶¹ 米国環境保護庁 (EPA), EPA Strategic Plan FY2014-2018

http://www2.epa.gov/sites/production/files/2014-09/documents/epa_strategic_plan_fy14-18.pdf

⁶² 日本学術振興会 (JSPS) ワシントン研究連絡センター, 2016 年度米大統領予算教書における研究開発関連予算案の概要, 2015 年 3 月 10 日 http://jspsusa.org/wp-content/uploads/2014/08/150310_The-Presidents-Budget-for-Fiscal-Year-2016.pdf

⁶³ 米国環境保護庁 (EPA), Science for a Sustainable Future

<https://www.epa.gov/sites/production/files/2014-06/documents/strap-overview.pdf>

2) 気候変動行動計画（President's Climate Action Plan）⁶⁴

オバマ政権は、環境・エネルギー分野における研究開発をイノベーション政策の中心としている。政権第1期（2008～2012）では再生可能エネルギー拡大による産業創生を狙った「グリーン・ニューディール」を進めていたが、その後のシェール革命により現在は、“all-of-the-above”（利用し得るすべての資源を使って）という包括的エネルギー政策に転換しており、環境に配慮した国内石油・ガス開発の推進にシフトしている。オバマ政権は気候変動対策としてCO₂の排出権取引制度の導入を検討していたが、2010年中間選挙後の共和党優勢により法案成立が困難化し、このため行政権限の範囲内での政策推進（大気浄化法によるEPAの対応）にシフトしている。2013年6月には大統領令として「気候変動行動計画」を公表。米国のGHG排出の約1/3を占める既設発電所などへの対応などを盛り込んでいる状況にあるが、共和党優位の中で政策の実現性は不明となっている。本計画には適応対策も含まれる。

3) Sustainable Materials Management（SMM）Program⁶⁵

廃棄物と環境影響を最小限にするためにライフサイクルを通じた資源の持続的利用を推進することで健康と環境を守ることを目的としたEPAのプログラム。本プログラムでは、①廃棄率の削減、②全ライフサイクルでの材料による環境影響の削減、③社会・経済便益の増加、④社会受容の拡大、の4つを目指している。本プログラムの2017～2022年における戦略計画（Sustainable Materials Management Program Strategic Plan for Fiscal Years 2017 - 2022）では、環境の構築、持続的食料管理、持続的放送を優先領域に含んでいる。本プログラムのもとで、Federal Green Challenge（FGC）やElectronics Challenge、Food Recovery Challenge（FRC）が実施されている。

- Federal Green Challenge（FGC）

EPAや他の国家機関が参加し、連邦政府による環境影響の削減事例を示すことで国家的努力を行うもの。機関は参加の際に6つの対象領域（廃棄物、エネルギー、電子機器、水、購買、運輸）から最低2つを選択する。

- SMM Electronics Challenge

回収された使用済み電子機器の100%を認証されたサードパーティー（当事者以外の第三者）のリサイクル業者に送る努力を促す。責任あるリサイクルの確立や、機器回収とデータ収集による透明性や説明責任の向上、賞や認証を通じた顕著な実績の向上を目指す。

- Food Recovery Challenge（FRC）

参加機関が持続的な食料管理への改善を約束し結果を報告する取り組み。廃棄の予防や廃棄食品の活用を優先付けのためにFood Recovery Hierarchyが示されている。優先度が高い順に、余剰の削減、貧しい人の食料、動物飼料、産業利用、コンポスト（堆肥）化、埋立／焼却とされている。

⁶⁴ 一般財団法人石油エネルギー技術センター、JPECレポート(2014年12回)「米国における固定排出源への温室効果ガスの規制動向」
http://www.pecj.or.jp/japanese/minireport/pdf/H26_2014/2014-012.pdf

⁶⁵ 米国 EPA, Sustainable Materials Management <https://www.epa.gov/smm>

4. 環境研究開発戦略 60,61,66,67

1) 2017 年度の科学技術優先事項⁶⁸

2017 年度の科学技術関連予算の編成方針を示す覚書で記載された 9 つの優先分野のうち、環境については、気候変動、地球観測、海洋・北極問題が記載され、各省庁で本覚書に基づいた研究開発への予算配分が考慮される。

2) Strategic Research Action Plans 2016-2019⁶⁹

「戦略計画 2014-2018」（3. 参照）に沿って Strategic Research Action Plans が構築されている（Strategic Research Action Plans 2016-2019）。6 つのプログラムの統合が 2016-2019 plans の焦点であり、分野横断的な課題に取り組む研究の協同を特に強調している。6 つのプログラムにまたがる 4 つの領域を選定し、ロードマップのトピックとされている。

- 6 つのプログラム

- 大気、気候、エネルギー（ACE : Air, Climate, and Energy）
- 安全で持続可能な水資源（SSWR : Safe and Sustainable Water Resources）
- 持続可能で健康なコミュニティ（SHC : Sustainable and Healthy Communities）
- 持続可能性のための化学物質の安全性（CSS : Chemical Safety for Sustainability）
- 健康とリスクアセスメント（HHRA : Human Health Risk Assessment）
- 国土安全保障（HS : Homeland Security）

- 4 つの研究ロードマップ

- 気候変動（climate change）：作成中
- 子どもの環境健康（children's environmental health）：公開
- 窒素（nitrogen）と co-pollutants：公開
- 環境正義（environmental justice）：作成中

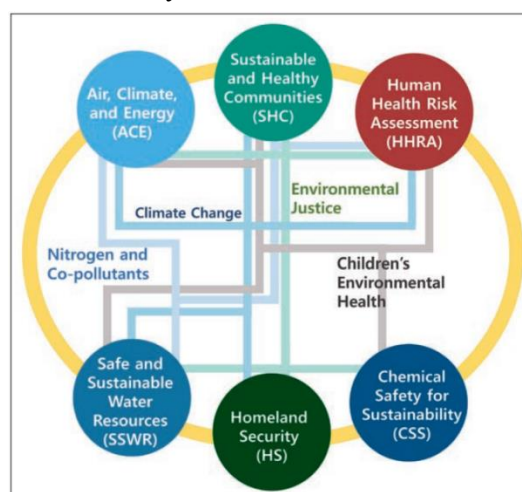


図 2-11 6 つの研究プログラムと 4 つのロードマップにまたがる統合化 出典：米国 EPA⁶⁹

⁶⁶ 米国国立科学財団（NSF），NSF FY 2017 Budget Request https://www.nsf.gov/news/news_summ.jsp?cntn_id=137603

⁶⁷ 経済産業省，平成 23 年度産業技術調査事業 海外主要国における研究開発活動の動向に関する調査 http://www.meti.go.jp/meti_lib/report/2012fy/E002537.pdf

⁶⁸ JST CRDS，米国：2017 年度予算の科学技術優先事項，2015 <http://www.jst.go.jp/crds/report/report06/US20150712.html>

⁶⁹ 米国環境保護庁（EPA），Science to Protect Public Health and the Environment, EPA RESEARCH PROGRAM OVERVIEW 2016-2019 http://www.epa.gov/sites/production/files/2015-10/documents/strap_2016_overview_508.pdf

3) その他

DOE では気候・環境科学局（CESD）が 2012 年に戦略計画を出しており、その中で地下生物地球科学プログラム、陸上生態系科学プログラムを示している。また NOAA の次世代戦略計画（2010 年発表）では水産、沿岸利用、海洋資源、これらの気候変動の影響に関するゴールを設定している。また水問題を食糧問題およびエネルギー問題として解決する考えが強まり、米国などで”Food-Energy-Water Nexus”の概念が提唱されている。米国では DOE が水とエネルギー問題の連鎖（Nexus）について DOE 研究所（PNNL）で全球モデルの開発を進めている。

5. 代表的な研究開発プログラム

1) 米国地球変動研究プログラム（USGCRP）⁷⁰

気候変動分野については 13 省庁による横断的なイニシアチブ「米国地球変動研究プログラム（USGCRP）」に従って実施されている。USGCRP は 1989 年に開始し、10 年間毎に研究計画を策定・更新することとなっている。最初の 2 期（20 年間）は主に観測や気候システムのモデリングに焦点をあてた研究を行ってきた。3 期目の現在は「戦略計画 2012-2021」に沿って、さらに統合化された地球システムの研究推進に加え、気候変動に関した適応策などへの対応準備を支援する情報やツールに関するプログラムを実施している。

USGCRP の研究予算は 27 億ドル（2016 年度）であり、その 6 割程度は NASA が負担することとなっている。戦略計画 2012-2021 における 4 つの達成目標は以下の通り。

- 【目標 1】地球システムにおける自然と人間との要素の統合の科学的知識を推進すること
- 【目標 2】知らせるべき科学的知識を用意し、適用策や緩和策におけるタイムリーな決定を可能にすること
- 【目標 3】気候変動影響や脆弱性について理解、予知、対応するための国民の能力について持続的に評価する力を構築すること
- 【目標 4】気候変動の幅広い公衆への理解に向けたコミュニケーションと教育を進めること

2) 米国国立科学財団（NSF）における環境関連の大きな枠組み予算としては” The Food, Energy, and Water System” への分野融合の課題対応として、理解、設計、モデル化するために 6,200 万ドル（2017 年度予算申請）を提供予定⁶⁷。

3) 環境保護庁（EPA）における研究開発プログラム⁶³

戦略計画 2014-2018（項目 3. 2）参照）の目標のもとでプログラムを実施。

- 大気・気候・エネルギー（ACE : Air, Climate and Energy）プログラム
目標 1 に関連。大気汚染・気候変動・バイオ燃料に関連した環境・健康への影響に重点化した研究を支援。2016 年度予算は 1 億ドル。
- 安全で維持可能な水資源（SSWR : Safe and Sustainable Water Resources）プログラム

⁷⁰ 米国地球変動研究プログラム（USGCRP）, THE NATIONAL GLOBAL CHANGE RESEARCH PLAN 2012-2021
<http://data.globalchange.gov/assets/d0/67/6042585bce196769357e6501a78c/usgcrp-strategic-plan-2012.pdf>

目標 2 に関連。水資源や生態系に関する情報やツールに関する研究を支援。2016 年度予算は 1 億 1,100 万ドル。

- 持続可能かつ健康なコミュニティ (SHC: Sustainable and Healthy Communities) プログラム

目標 3 に関連。土地の保全・再生、コミュニティレベルの政策立案担当者に対して、健康なコミュニティへの支援につながる政策立案ツールの提供。2016 年度予算は 1 億 5,230 万ドル。

- 化学品安全・サステナビリティ (CSS: Chemical Safety and Sustainability) 人健康リスク評価 (HHRA: Human Health Risk Assessment)

国土安全保障 (HS: Homeland Security)

目標 4 に該当。化学薬品の安全性を向上させ危険性を削減するほか、発生源での汚染を防ぐ取り組み。2016 年度予算額は 1 億 6,470 万ドル。

なお、Science for a Sustainable Future (EPA Research program overview 2012-2016) では上記 6 つのプログラムにおける研究として以下の具体例が示されている⁶³。

- ACE: マルチ汚染物質の大気暴露による健康影響、次世代の大気汚染モニタリング、沿岸部における気候変動の影響適応、さらに共同研究として “One environment” モデル (気候変動、土地利用、大気質、水質、経済の総合作用を考慮)
- SSWR: 栄養塩類汚染 (窒素、リン) に関する研究、雨水流出に関する研究、リアルタイムでアクセス可能な水質データの先進技術、さらに共同研究として水圧破壊 (シェールガス・オイル) の飲料水への影響など
- SHC: 廃棄物管理の決定や運用の改良、エコシステムサービスの定量化、窒素の持続可能管理、Atlas (環境の地図情報の web ツール) の持続性、さらに共同研究として子供にあたえる環境に関わる健康影響
- CSS: 化学物質の固有特性および健康と環境への関係の理解、複合した生態または環境システムにおけるモデル、決定者のためのユーザーフレンドリーな化学物質情報データベース、さらに共同研究としてグリーンな化学代替物の研究 (ハロゲン溶剤など)、次世代のリスクアセスメント方法
- HHRA: 迅速なリスクアセスメントと応用技術支援、用量反応解析の進展
- HS: 化学的、生物学的、放射線学的コンタミの高速検知、暫定指針値の開発 (化学物質の高濃度、短時間暴露)、サンプリングと解析の開発と編集、費用対効果の高い浄化手法の評価

(3) 欧州 (EU)

1. 環境に関する概況 (現状)^{71,72}

一般市民が環境問題に高い関心を持ち続けているが、2008 年の経済危機以降、欧州での経済情勢の深刻化は気候変動問題の優先度の低下につながった。

⁷¹ 環境省, 平成 24 年度環境研究総合推進費研究成果発表会「地球温暖化対策: 主要国が参加できる国際合意は見つかるか?」, 2013. https://www.youtube.com/watch?v=mb2yQfY5KBA&feature=c4-overview&list=UUI_vpnyuAvUewfQG8B962xg

⁷² 駐日欧州連合代表部, 環境、気候変動およびエネルギー <http://www.euin-japan.jp/world/environment/>

欧州連合（EU）の環境政策の目的は、現在および未来の世代のために、環境を保護し、保持し、改善することにある。そして、危険な気候変動を食い止めることは、EU にとって、戦略的な優先事項である。欧州は温室ガスの排出を削減することに取り組んでおり、また他の国や地域に対しても同じ努力をすることを推奨している。

2020 年に向けて、気候およびエネルギー目標に到達するために、2014 年 10 月 23 日、欧州理事会は、4 つの目標値を含む、「気候およびエネルギー政策枠組み」を採択し、2030 年までの排出削減目標を 1990 年比で 40% に設定した。

循環型経済、グリーン経済、競争力のある低炭素経済への転換を推進しており、技術開発だけでなく規格化や政策決定に資する情報構築を進め、ビジネス展開までを視野に入れた戦略を持つ。

2. 政策立案のガバナンス（組織体制）⁷³

EU（欧州連合）には、加盟国自身が行える事業については EU では行わずに、加盟国が実施する施策を補助するために様々な事業を行うという原則がある。科学技術・イノベーションの分野でもこの原則が貫かれている。すなわちこの分野では、欧州研究圏（ERA）の構築（2000 年～）やハイリスクな研究開発への投資といった部分に取り組みの焦点が当てられている。

EU の行政機関である欧州委員会の中で省庁と同格の役割を果たす総局のうち、研究・イノベーション総局（DGRTD）が科学技術・イノベーションを所管している。また企業・産業総局、環境総局、コミュニケーションネットワーク・コンテンツと技術総局、エネルギー総局など他の総局もそれぞれの担当分野における科学技術・イノベーションに関連した政策の形成を行っている。これらの各総局が作成した案を DGRTD が調整し、政策案としてまとめる。

3. 環境に関する基本政策⁷⁴

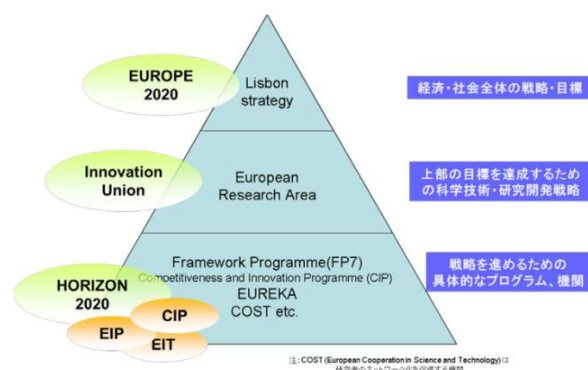
2010 年 3 月に欧州委員会が発表した戦略「EUROPE2020」がある。これは今後の 10 年間の EU の経済・社会に関する目標を定めている。この戦略を具体的に進めるプログラムのひとつに「Horizon2020⁷⁵」がある。これは 3 つの柱を持ち、第 3 の柱が「社会的な課題への取り組み」であり、その中の項目「気候への対処、資源効率および原材料」が、環境分野に該当する。

図 2-12 に、戦略・プログラムの階層構造を示す。まず、リスボン戦略（Lisbon Strategy）や欧州 2020（EUROPE 2020）のような、経済・社会全体の戦略・目標が最上位の概念としてある。その中には科学技術・研究開発に関する戦略が含まれており、それらが第二階層の欧州研究圏（European Research Area）やイノベーション・ユニオン（Innovation Union）である。更にその下の階層に、HORIZON 2020 などの、戦略を進めるための具体的なプログラム・機関が存在する。なお、競争力・イノベーションフレームワークプログラム（CIP）、欧州イノベーション技術機構（EIT）、起業・イノベーションプログラム（EIP）等は 2014 年以降 Horizon 2020 に含まれている。

⁷³ JST CRDS, 研究開発の俯瞰報告書 主要国の研究開発戦略(2015 年)
<http://www.jst.go.jp/crds/pdf/2014/FR/CRDS-FY2014-FR-01.pdf>

⁷⁴ JST CRDS, 科学技術・イノベーション動向報告 EU 編 (2013 年度版)
<http://www.jst.go.jp/crds/pdf/2013/OR/CRDS-FY2013-OR-04.pdf>

⁷⁵ JST CRDS, Horizon 2020 の概要 <http://www.jst.go.jp/crds/pdf/2013/FU/EU20140221.pdf>

図 2-12 戦略・プログラムの階層構造 出典：JST CRDS⁷⁴

1) 第7次環境行動プログラム

EUにおける環境分野の基本的なフレームワークは2002年に公表された「第6次環境行動プログラム」であった。2012年までの間に、気候変動、生物多様性、環境と健康、天然資源と廃棄物、という4つのプライオリティを定め、研究開発にも取り組んできた。

2013年11月、後継の「第7次環境行動プログラム⁷⁶」が採択された。ここでは、2020年までの間に、①自然を守り生態系の復元力を高める、②資源効率的かつグリーンで低炭素型の成長を加速させる（廃棄物の資源への転換に特にフォーカス）、③人々の健康や福祉に対する環境からの脅威を軽減する、という目標が掲げられている。

2) 2030気候およびエネルギー政策枠組み

EUは、危険な気候変動を食い止めるため温室ガスの排出を削減することに取り組んでおり、2014年採択の「2030気候およびエネルギー政策枠組み」⁷⁷で2030年までの、1990年比の排出削減目標を40%に設定した。さらにこの政策枠組みでは、2030年までに、エネルギーミックスにおける再生可能エネルギーの割合を27%、またエネルギー削減を27%増加することを目標としている。なお、2011年には2050年に向け1990年比で少なくとも80%削減する目標を掲げ、ロードマップを作成している⁷⁸。

3) EU 気候変動適応戦略⁷⁹

気候変動影響への準備のためのフレームワークとメカニズムを構築するために2013年に策定。3つの目標として、各国の活動の促進、情報に基づく意思決定の促進、脆弱性を持つ重要な部門における適応の促進を挙げている。

4) EU 生物多様性戦略

EUの生物多様性保全への取り組みは長い。1979年、野鳥保護の「鳥類指令」(Birds Directive)を発効した。1992年、450種類の動物と500種の植物の生息地保全を定める「生息地指令」(Habitats Directive)を発効し、EU域内に「Natura 2000」と呼ぶ生物保護地区のネットワークが確立された。Natura 2000はEU全土の約18パーセン

⁷⁶ European Commission, The 7th Environment Action Programme (EAP)

<http://ec.europa.eu/environment/pubs/pdf/factsheets/7eap/en.pdf>

⁷⁷ Europe Commission, 2030 climate & energy framework https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2030_en

⁷⁸ Europe Commission, The roadmap for transforming the EU into a competitive, low-carbon economy by 2050

https://ec.europa.eu/clima/sites/clima/files/2050_roadmap_en.pdf

⁷⁹ Europe Commission, The EU Strategy on adaptation to climate change

https://ec.europa.eu/clima/sites/clima/files/docs/eu_strategy_en.pdf

トに相当する面積を自然保護区に指定している。しかし、開発や自然資源の乱獲で、欧州の生態系の状況は全体として悪化している。こうした状況を踏まえ、欧州委員会は2011年5月に今後10年間に向けたEUの新たな生物多様性戦略⁸⁰を公表した。同戦略では、2050年までに生態系や生物多様性が人間に提供する多様な自然の恵み（＝生態系サービス）を保全、評価、そして回復するというビジョンを掲げた。そのビジョンのもとに、2020年までに生物多様性の損失を阻止するための6つの優先目標（Target）を掲げた。

Target1：鳥類指令と生息地指令の完全実施

Target2：生態系とそのサービスの維持・回復

Target3：生物多様性の維持、回復への寄与を高めるための持続可能な農林業政策の推進

Target4：漁業資源の持続可能な利用

Target5：侵略的外来種の対策強化

Target6：生物多様性保全の国際的取り組みへの貢献の強化

2012年4月、欧州議会は、生態系保全の政治的優先順位を高める必要があるとの決議を採択した。最近の調査によるとEU域内の生物多様性は低下が続いており、このままでは社会にとって壊滅的な経済的コストにつながるとしている。

5) 循環型経済パッケージ（Circular Economy Package）

欧州委員会は、国際競争力の向上、持続可能な経済成長、新規雇用創出などを目指す「循環型経済パッケージ（Circular Economy Package）」⁸¹を2015年12月に採択した。循環型経済とは、より持続可能な方法で資源を無駄なく利用すること、製品のライフサイクルを利用することにより、あらゆる原材料、製品、廃棄物を最大限に活用し、GHG削減とエネルギーの節約を目指す。EUの研究助成プログラム Horizon2020 から6.5億ユーロ、EU構造基金から55億ユーロを供出、さらに欧州構造投資資金（EFSD）が財政面を支援するなど、EUでは2030年に向け「循環型経済」という新たな経済モデルを成長戦略の核に据えていくことになった。

4. 環境研究開発戦略⁶⁰

大型の研究開発プログラムである Horizon2020（2014-2020）の3つの柱の内、第3番目「社会的課題への取り組み」の中で、⑤項「気候への対処、資源効率および原材料」が環境分野に該当する。7年間で、31億ユーロが配分される。ここでは、欧州における原材料の安全保障とともに、環境に対してやさしく、柔軟かつ持続可能な社会の構築を目指す。気候変動では、地球温暖化を2℃以内に抑えるとともに、生態系と人間社会とを気候変動・環境変動に適応させることを目指している。優先的なテーマとその中での取り組みを表2-5に示す。

⁸⁰ 駐日 EU 代表部公式ウェブマガジン, EU の生物多様性戦略, 2012/9/24 <http://eumag.jp/issues/c1012/>

⁸¹ 駐日 EU 代表部公式ウェブマガジン, EU が取り組む「緑の未来」への投資, 2016/9/30 <http://eumag.jp/feature/b0916/>

表 2-5 気候への対処、資源効率および原材料

優先的なテーマ	取り組み
気候変動への挑戦と適応	- 気候変動に関する理解の向上、信頼できる気候変動予測の提供 - 影響と脆弱性の評価、革新的・費用効率の高い進歩的なリスク防止策の開発 - 緩和政策の支援
自然資源・水・生物多様性・生態系の持続可能なマネジメント	- 生態系、生態系と社会システムの相互作用、経済と福祉を維持する上での生態系の役割に関する理解の促進 - 効果的な意思決定と公約のための知識と手段の提供
非エネルギー系・非農業系の原材料の持続可能な供給	- 原材料の利用可能量に関する知識の向上 - 調査・採掘・処理・リサイクル・回収を包含する持続可能な供給システム・原材料利用の促進 - 危機的状況にある原材料の代替物の発見 - 社会意識と原材料スキルの向上
エコ・イノベーションを通じた環境配慮型経済社会への移行	- 環境配慮の観点から革新（エコ・イノベーション）的な技術・処理・サービス・製品の強化とそれらの市場への浸透の促進 - 革新的政策と社会的挑戦の支援 - 環境配慮型経済に向けた前進の測定・評価 - デジタル・システムを通じた資源効率性の促進
包括的かつ持続的な地球環境観測および情報システム	- 気候・原材料を含む天然資源・生態系・生態系サービスの評価と予測 - 緩和・適応、低炭素排出政策、すべての経済分野で利用可能な方法の評価

出典:JST CRDS⁷⁴を元に作成

5. 代表的な研究開発プログラム

- 1) EUのファンディング・システムとしては、上述の「Horizon 2020」が代表的である。これは、複数年（現在は7年）の研究開発・イノベーションプログラムの方向性を示し、それに基づいて資金配分を行うものである。サブセットとして複数のプログラムが存在し、プログラムごとにファンディングが行われる。環境部門を対象に2014年以降に採択された研究プロジェクト⁸²は159件（2016年2月22日時点）あり、その内、5年間の研究プロジェクトは、5件ある。それらの内容は、IPCC（国連気候変動に関する政府間パネル）の評価支援、生物多様性、水資源、水循環による産業共生、気候変動の全球モデルである。その他、欧州イノベーション技術機構（EIT）、共同研究センター（JRC）、エクセレンスの普及と参加の拡大、社会とともにある・社会のための科学など、相対的に規模の小さい複数の取り組みがあり、その取り組みごとに公募が行われる。以上のような取り組みに対する資金配分の形態は、以下の3つの類型に分けることができる。①欧州委員会による配分（欧州委員会による配分は、欧州委員会内の総局（DG）が公募を行うケースである）、②欧州委員会の執行機関による配分、③イニシアチブによる配分。
- 2) 研究の推進を目的とした共同プログラミングイニシアチブ（JPI）があり、その概念は、2008年7月、ヨーロッパの研究推進を支援するために欧州委員会に導入された。目的は

⁸² European Commission, Community Research and Development Information Service
http://cordis.europa.eu/search/result_en

国際協調・共同研究を推進することで当該国とEUの研究ファンドの価値を高めるものである。現在、健康・医療（4組織）、環境（5組織）、文化遺産（1組織）の10組織が活動しており、環境の5組織については以下の通りである（カッコ内はコーディネータ国、メンバー数+准メンバー数）。

- FACCE JPI：農業・食糧安全保障（フランス・英国、21）
- JPI Climate：気候変動への対応（ドイツ、14+2）
- JPI OCEANS：海洋資源の活用（ノルウェー、20+1）
- Water JPI：水資源管理（スペイン、19+5）
- JPI URBAN EUROPE：都市環境の改善（オーストリア・オランダ、13+3）

JPIClimate⁸³は、2012年、戦略研究アジェンダ（SRA）を策定した。気候に関するSRAは次の4テーマに焦点を当てる。

- 信頼できる10年間の気候変動の予測
- 気候サービスの開発と展開の調査
- 気候変動に直面する社会の持続可能な変換
- 気候変動の下で意思決定ツールの改善

公募要件は、複数国でコンソーシアムを組むことだが、少なくとも3団体で、そしてEU域外から少なくとも1団体入れること。研究期間は、3-5年。予算額は、1プロジェクト当たり1-3百万ユーロ。2013年募集では、6件が採択された。その他に、ロシア北方の北極圏を対象とする3件が採択され、いずれもロシアが参加している。

- 3) 環境保護と気候変動に特化して対処するプログラムとして、Life プログラム⁸⁴がある。これは1992年に開始され、Life I（1992-95）、Life II（1996-2000）、Life III（2000-06）、Life+（2007-13）が完了している。総計3954件31億ユーロを共同支援した。現在は、2014年3月から生物多様性活動プログラム（2014-17）が進められている。生物多様性活動プログラムは、次の4年間の新Lifeプログラム（2014-20）のフレームワークを策定する。環境保護と気候変動対応の各部門へのファンディングがあり、環境保護で11億ユーロ、気候変動対応で3.6億ユーロの支援が予定されている。

（4）ドイツ

1. 環境に関する概況（現状）^{60,85}

ドイツは環境先進国と言われ、環境教育を含め国として取り組んでいる。1990年以降、温暖化問題が広く認識されてからは、より厳格な環境対策と原子力の廃止、高い温暖化対策目標の制定を打ち出している。また、気候変動対策の中に、廃棄物マネジメント促進による資源効率性の向上、森林管理や草原・湿原保全なども位置付け、気候変動と他の環境課題を一体的に捉えた対策を実施している。

ドイツのCO₂排出量は7.6億t（2013年、日本：12.2億t）で世界第6位である。2050年のGHG排出量は1990年比80%削減、再生可能エネルギーの割合60%（最終エネルギー消費）、80%（電力消費）の目標を掲げている。

⁸³ JPI Climate <http://www.jpi-climate.eu/home>

⁸⁴ European Commission, The LIFE Programme <http://ec.europa.eu/environment/life/about/index.htm>

⁸⁵ 大阪・神戸ドイツ連邦共和国総領事館、環境技術から市民のくらしまで 環境先進国 ドイツ、2002年9月

2. 政策立案のガバナンス（組織体制）^{60,86}

ドイツの基本政策の主要所管省は連邦教育研究省（BMBF、連邦政府の研究開発関連予算の約 60%を管理）である。連邦環境・自然保護・原子力安全省（BMUB）予算は約 2%である。2013 年度の政府研究開発費は 147 億ユーロであり、そのうち環境関連が 8%となっている。環境に関する主要な政府関連機関は、BMBF、BMUB、連邦環境庁（UBA）がある。環境政策全般については BMBF が所掌、BMUB、UBA、連邦食料・農業省（BMEL）などが関連している。BMBF が所管しているドイツ研究振興協会（DFG）やフラウンホーファー研究所、さらに国際環境技術センター（ITUT）などが関わっている。また、連邦エネルギー経済省（BMWi）がハイテク戦略で示した「気候・エネルギー（持続可能なエネルギーの生産、消費）」として、カーボンニュートラル、気候に適した都市など、エネルギー分野を通して環境負荷低減の研究を行っている。

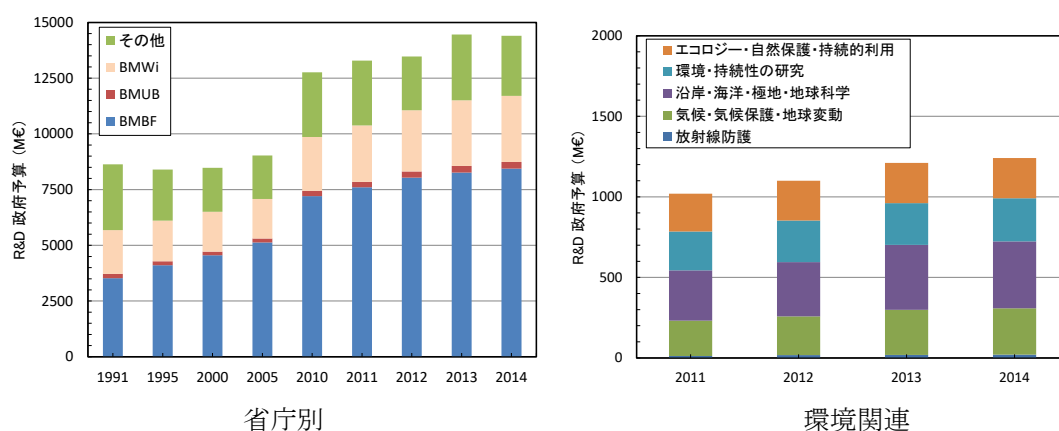


図 2-13 政府 R&D 予算⁸⁶

3. 環境に関する基本政策^{87,88}

1969 年～1970 年、ルール工業地帯での大気汚染に対する環境保護運動が国内に広がった。ドイツ連邦政府は 1970 年、①人間が健康と人間らしい生存のための環境を守る、②大気・土壌・水質・動植物の世界を人間の乱獲から守る、③人間の乱獲による破壊や損失を排除する内容で、動植物の生態を守る「環境保護計画」を発表した。

1992 年には、リオデジャネイロで開催された国連環境開発会議で、「持続可能な発展」という言葉で表した共同宣言が発表された。これを受けてドイツ連邦政府は、1970 年初頭以降、主要な環境保護分野の以下の 9 項目において徐々に進めてきた環境保護の法体系をさらに整備・強化している。また、廃棄物・リサイクルの分野では、1994 年に「循環経済廃棄物法」を制定している。

- 大気汚染防止（二酸化硫黄・窒素酸化物排出）
- 地球気候変動の防止、オゾン層の保護
- 危険防止（危険物質からの保護、設備の安全確保）

⁸⁶ Federal Ministry of Education and Research, Federal Report on Research and Innovation 2014～2016

⁸⁷ JST CRDS, ドイツの環境・気候変動対策関連政策 <http://www.jst.go.jp/crds/pdf/2009/FU/EU20100407.pdf>

⁸⁸ Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety (BMU), Action for biodiversity Supporting implementation of the CBD Strategic Plan 2011-2020

- 廃棄物処理と物質循環（廃棄物の発生回避・リサイクル、環境適正処理、廃棄物の越境処理）
- 土壌保全と既存負荷の除去
- 河川と海洋保護（水域保全の基本、地上の水域、地下水、河川氾濫防止、海洋保全）
- 自然保護、景観保護、森林保護
- 騒音対策
- 原子力安全・放射線保護、放射性物質の供給と処理（核の安全性、放射線防護、放射性廃棄物の処理）

特に 1990 年以降、温暖化問題が広く認識され、1998 年以降には、より厳格な環境対策と原子力の廃止、高い温暖化対策目標の制定が打ち出されてきた。

また、ドイツは「持続可能な発展」の実現には、エコロジー、エコノミー、社会の安定化を重要な 3 つのファクターとしており、経済成長と環境保護をリンクし、地球環境を守る技術や手法を提供、法規制で誘導している。さらに、2008 年ドイツのボンで開催された生物多様性条約（CBD）第 9 回締約国会議で「ボン宣言」が提出され、ドイツ主導で「ビジネスと生物多様性イニシアティブ」が立ち上がった。BMUB の国際気候イニシアティブ（ICI : The International Climate Initiative）は、気候変動を緩和する生物多様性の保全と気候変動の影響に適応するよう設計されたプロジェクトを支援しており、CBD の戦略計画 2011～2020 を促進する生物多様性を目標として、Life Web（協力プラットフォーム）や ICI プロジェクトのアイデア支援などの分野で活動している⁸⁸。

代表的な国の政策は以下の通り。

1) National Sustainability Strategy⁸⁹

2002 年に決定された戦略。1994 年から 2020 年の間に資源生産性を 2 倍、1990 年から 2020 年の間にエネルギー生産性を 2 倍など、持続可能な開発の関連する 21 分野について定量的な目標を設定。2016 年の progress report では、SDGs の目標も視野に入れ、さらに発展した目標と指標を計画。

2) 気候行動プログラム 2020⁹⁰

2007 年に策定した「2020 年までに GHG40%削減（1990 年比）」という目標の達成に向けた包括的政策パッケージとして 2014 年に決定。9 つの要素から構成：①国家エネルギー効率行動計画（NAPE）、②建築、③運輸、④エネルギー非関連分野の排出削減（産業・商業・貿易・サービス・廃棄物管理・農業）、⑤排出権取引、⑥エネルギー部門、⑦モデルとしての州政府の機能、⑧研究開発、⑨コンサルタント・自覚の向上・イニシアチブ。⑧については、特に再生可能エネルギーとエネルギー効率が中心的要素。

3) 気候行動計画 2050⁹¹

気候行動プログラム 2020 では足りない長期目標に必要な追加削減に向けた施策として 2016 年に決定。2050 年までの中間点となる 2030 年の GHG 削減目標を全体で最低

⁸⁹ ドイツ連邦環境・自然保護・原子力安全省（BMUB）, General information Sustainable development
<http://www.bmub.bund.de/en/topics/strategy-legislation/sustainability/general-information/#c3688>

⁹⁰ BMUB, Background paper: Climate Action Programme 2020, 2004
http://www.bmub.bund.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Aktionsprogramm_Klimaschutz/aktionsprogramm_klimaschutz_2020_hintergrund_en_bf.pdf

⁹¹ BMUB, Press Releases, Climate Action Plan 2050: Cabinet adopts guide to climate neutral Germany, 2016
http://www.bmub.bund.de/en/press/press-releases/detailansicht-en/artikel/climate-action-plan-2050-cabinet-adopts-guide-to-climate-neutral-germany/?tx_ttnews%5BbackPid%5D=103

でも 55%（1990 年比）とした。初めて部門ごとの削減目標と達成への具体的指針を示し、エネルギー部門では 2030 年削減目標を 61～62%、農業分野では過剰な肥料により生じる一酸化二窒素排出の大幅な削減を目指し 31～34%の削減が見込まれている。土地利用と林業では、森林における炭素固定に焦点をあてるとともに、持続的森林管理、木材利用、草原保全、湿原保全、自然林形成における潜在力の活用を挙げている。

4) ドイツ適応戦略行動計画⁹²

気候変動に対する適応戦略と行動について 2011 年に策定。4 領域から構成：①知見・情報収集・能力開発（情報の伝達、研究・情報インフラの拡大など）、②連邦政府による枠組設定（法的・技術的枠組や支援政策の改善を目指す）、③連邦政府直轄の活動（連邦政府が所有者や施工主である土地や不動産、インフラにおける活動）、④国際的責任（国連気候変動会議の決定事項の実現や開発支援、国際共同研究活動等）。

5) ドイツ生物多様性国家戦略⁹³

生物多様性の減少と生物多様性の持続可能な利用を実現するために 2007 年に策定。本戦略実施の追加的措置として 2015 年に発表された「積極的自然保護 2020」では、生物多様性の維持と向上、持続可能な利用を目的に 10 分野で 40 の具体的な施策を示した。最も取り組みが必要とされるのが農業が行われている草地であり、農業補助金の仕組みを自然保護に重点化したものに変えるなどの措置を設けた。沿岸や海洋、河川の氾濫原や森林を対象とした施策も示され、保護地域、ビオトープネットワーク、自然のまま残されている地域、さらに都市部も含めた施策も提案。

6) ドイツ資源効率化プログラム（ProgRess II）⁹⁴

2012 年に他国に先駆けて資源保護の基本・行動指針を明確に打ち出したドイツ資源効率化プログラム（ProgRess）の後継プログラム（2016 年、4 年毎に更新）。ProgRessII では、特に市場インセンティブや経済・社会における自主的取り組みの促進が強化された。また、材料とエネルギーの流れを併せて考慮することでその相乗効果を図った。具体的施策として、中小企業への助言の拡充、環境マネジメントシステムの支援、資源効率の高い製品・サービスの公共調達、消費者情報の改善などが記載。国は企業や行政に対し、資源・エネルギー節約、環境配慮と効率的管理のために、促進プログラムや助言・情報の提供で支援する。

7) ドイツ持続可能な消費プログラム⁹⁵

国家レベルで様々な分野に持続可能な消費をシステムの的に強化、拡大するために 2016 年に設定。SDGs の達成に向けた重要なプログラムと位置づけている。負荷削減の潜在性がある 6 つの消費分野として、モビリティ、食料、住宅・家庭、オフィス・労働、衣類、旅行・レジャーを挙げている。

4. 環境分野の研究開発戦略

ドイツ連邦政府は、2006 年 8 月、科学技術イノベーション基本政策である「ハイテク

⁹² 国立環境研究所, 海外ニュース 2011.08.31 <http://tenbou.nies.go.jp/news/fnews/detail.php?i=6443>

⁹³ 国立環境研究所, 海外ニュース 2015.10.14 <http://tenbou.nies.go.jp/news/fnews/detail.php?i=17372>

⁹⁴ 国立環境研究所, 海外ニュース 2016.3.2 <http://tenbou.nies.go.jp/news/fnews/detail.php?i=18252>

⁹⁵ BMUB, General Information - Products and Environment

<http://www.bmub.bund.de/en/topics/economy-products-resources-tourism/products-and-environment/general-information/?cHash=708635c8a9f766bc5d0c165b53867c44>

戦略」を発表、3つのイノベーション領域と、安全で健康な生活、環境技術など、17の重点技術分野を設定した。2010年にはハイテク戦略の改定版「ハイテク戦略 2020」を発表し、2010年～2015年の期間で5つの重点分野として10の未来プロジェクトを政策として示した。「ハイテク戦略 2020」では気候・エネルギー分野が環境技術に該当、カーボンニュートラル、エネルギー高効率、気候に適応した都市などが未来プロジェクトとして設定された。本技術分野は、2015年以降の基本方針を示した第3期ハイテク戦略となる「新ハイテク戦略」（2014年9月）に、「持続可能なエネルギー生産・消費」として引き継がれている。これらの課題として、「CO₂に毒されない、エネルギー効率が高い、気候に対応した都市」、「石油を代替する再生可能な資源」、「2020年までにドイツにおける電気自動車数100万台」などあげられている。⁹⁶⁻¹⁰⁰

2011年8月の「第6次連邦政府エネルギー研究プログラム、環境適合性及び信頼性を備えたエネルギー供給のための研究」では、ドイツが掲げたビジョン「環境適合性及び信頼性を備えたエネルギー供給構想」に基づき、研究開発投資の主要課題や優先事項が設定されている¹⁰¹。この中では環境技術としてのプログラムの設定はされていないが、低炭素化、エネルギー高効率化、再生可能エネルギー導入、省エネルギー、高効率都市、気候保全（カーボンマネジメントへのスマートアプローチ）などが研究項目として該当する。

また、図2-13に示したように、放射線防護、気候・気候保護・地球変動、沿岸・海洋・極地・地球科学、環境・持続性の研究、エコロジー・自然保護・持続的利用の分野で研究が行われている。

5. 代表的な研究開発プログラム

1) ドイツ研究振興協会（DFG）

DFGは、環境科学と地球科学の分野における研究開発投資研究について纏めている¹⁰²。主なものを表2-6～8に示す。

表2-6の研究拠点には、以下の3つがある。

- Clusters of Excellence（EXC）：ドイツの卓越イニシアチブの枠組みにおける大学設置研究拠点
- Collaborative Research Centres（CRC）：学部、学科横断で研究プログラムを実施する大学設置研究拠点
- Transregions（TRR）：2つあるいは3つの大学での協力、連携による研究拠点

表2-7の研究ユニット（Research Units（FOR））は、新しい研究の方向性を模索す

⁹⁶ Federal Ministry of Economics (BMWi) and Technology and Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety (BMU), Energy Concept for an Environmentally Sound, Reliable and Affordable Supply, 28. Sep. 2010

⁹⁷ JST CRDS, G-TeC 報告書「持続可能なエネルギーの未来；米英独仏のエネルギービジョンと研究戦略」

<http://www.jst.go.jp/crds/pdf/2013/CR/CRDS-FY2013-CR-01.pdf>

⁹⁸ JST CRDS, 科学技術・イノベーション動向報告～ドイツ～

<http://www.jst.go.jp/crds/pdf/2014/OR/CRDS-FY2014-OR-01.pdf>

⁹⁹ JST CRDS, (海外トピック情報) ドイツ：科学技術イノベーション政策基本政策「新ハイテク戦略」

<https://www.jst.go.jp/crds/pdf/2014/FU/DE20140916.pdf>

¹⁰⁰ The Federal Government, The new High-Tech Strategy Innovations for Germany, Aug. 2014

¹⁰¹ Federal Ministry of Economics (BMWi), Research for an environmentally sound, Reliable and affordable energy supply, 6th Energy Research Programme of the Federal Government, Nov. 2011

¹⁰² German Research Foundation (DFG), Research in Germany, Geosciences and environmental sciences, Nov. 2016

るもので、多分野の研究者チームで構成される。表 2-8 の優先プログラム（Priority Programmes（SPP））は、成長する研究領域の知見獲得を優先的に推進させるプログラムである。

表 2-6 研究拠点として実施する地球科学と環境科学関連研究

Institute	Title	開始年
CLUSTERS OF EXCELLENCE		
Universität Bremen	The Ocean in the Earth System - MARUM – Center for Marine Environmental Sciences (EXC 309)	2007
Universität Hamburg	Integrated Climate System Analysis and Prediction (CliSAP) (EXC 177)	2007
Christian-Albrechts-Universität zu Kiel	The Future Ocean (EXC 80)	2006
COLLABORATIVE RESEARCH CENTRES		
Universität zu Köln	Earth - Evolution at the Dry Limit (CRC 1211)	2016
Universität zu Köln	Our Way to Europe: Culture-Environment Interaction and Human Mobility in the Late Quaternary (CRC 806)	2009
Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover	Relativistic Geodesy and Gravimetry with Quantum Sensors (geo-Q) (CRC 1128)	2014
Friedrich-Schiller-Universität Jena	AquaDiva: Understanding the Links between Surface and Subsurface Biogeosphere (CRC 1076)	2013
Christian-Albrechts-Universität zu Kiel	Climate-Biogeochemistry Interactions in the Tropical Ocean (CRC 754)	2007
Eberhard Karls Universität Tübingen	Catchments as Reactors: Metabolism of Pollutants on the Landscape Scale (CAMPOS) (CRC 1253)	2016
COLLABORATIVE RESEARCH CENTRES /TRANSREGIOS		
Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn Universität zu Köln Forschungszentrum Jülich	Patterns in oil-Vegetation-Atmosphere-Systems: Monitoring, Modelling and Data Assimilation (TRR 32)	2006
Freie Universität Berlin Technische Universität Berlin Westfälische Wilhelms-Universität Münster	Late Accretion onto Terrestrial Planets (LATP) (TRR 170)	2015
Universität Bremen Universität zu Köln Universität Leipzig	Arctic Amplification: Climate Relevant Atmospheric and Surface Processes, and Feedback Mechanisms (AC)3 (TRR 172)	2015
Universität Bremen Universität Hamburg	Energy Transfers in Atmosphere and Ocean (TRR181)	2016
Karlsruher Institut für Technologie Johannes Gutenberg-Universität Mainz Ludwig-Maximilians-Universität München	Waves to Weather (TRR 165)	2015

表 2-7 研究ユニットとして実施する地球科学と環境科学関連研究

Title	開始年
Matter Under Planetary Interior Conditions -High-Pressure, Planetary and Plasma Physics (FOR 2440)	2016
Space-Time Dynamics of Extreme Floods (SPATE) (FOR 2416)	2016
Mountain Exile Hypothesis (FOR 2358)	2016
Temperature-Related Stresses as a Unifying Principle in Ancient Extinctions (TER-SANE) (FOR 2332)	2016
Structures, Properties and Reactions of Carbonates at High Temperatures and Pressures (FOR 2125)	2015
Multiscale Dynamics of Gravity Waves (MS-GWaves) (FOR 1898)	2014
Data Assimilation for Improved Characterization of Fluxes across Compartmental Interfaces (FOR 2131)	2013
A New Approach toward Improved Estimates of Atlantic Ocean Freshwater Budgets and Transports as Part of the Global Hydrological Cycle (FOR 1740)	2013
CHARON: Marine Carbonate Archives: Controls on Carbonate Precipitation and Pathways of Diagenetic Alteration (FOR 1644)	2013
Urban Climate and Heat Stress in Mid-Latitude Cities in View of Climate Change (UCaHS) (FOR 1736)	2012
From Catchments as Organised Systems to Models based on Dynamic Functional Units (CAOS) (FOR 1598)	2011
INUIT - Ice Nuclei Research UnIT (FOR 1525)	2011
Mapping on Demand (MoD) (FOR 1505)	2011
Space-Time Reference Systems for Monitoring Global Change and for Precise Navigation in Space (FOR 1503)	2011
Stratospheric Change and its Role for Climate Prediction (SHARP) (FOR 1095)	2009
Experimental Impact Cratering - The MEMIN Program (Multidisciplinary Experimental and Modeling Impact Research Network) (FOR 887)	2009
Multi-Scale Interfaces in Unsaturated Soil (MUSIS) (FOR 1083)	2008
Nanoscale Processes and Geomaterials Properties (FOR 741)	2007

表 2-8 優先プログラムとして実施する地球科学と環境科学関連研究

Title	開始年
Mountain Building Process in Four Dimensions (4D-MB) (SPP 2017)	2016
Volunteered Geographic Information: Interpretation, Visualisation and Social Computing (SPP 1894)	2016
Regional Sea Level Change and Society (SeaLevel) (SPP 1889)	2016
Building a Habitable Earth (SPP 1833)	2015
EarthShape: Earth Surface Shaping by Biota (SPP 1803)	2015
Climate Engineering: Risks, Challenges, Opportunities? (SPP 1689)	2013
Planetary Magnetism (PlanetMag) (SPP 1488)	2010
Atmospheric and Earth System Research with the "High Altitude and Long Range Research Aircraft" (HALO) (SPP 1294)	2007
Antarctic Research with Comparative Investigations in Arctic Ice Areas (SPP 1158)	2003
International Continental Drilling Program (ICDP) (SPP 1006)	1995
Ocean Drilling Program/Deep Sea Drilling Project (IODP) (SPP 527)	1978

2) ドイツ連邦環境・自然保護・原子力安全省（BMUB）

- International Climate Initiative（IKI）

GHG 排出緩和、気候変動影響への適応、REDD+、生物多様性保全の分野において、途上国や移行国等との協力強化を目的に 2008 年開始。プロジェクト数は 488 にのぼる（2017 年 1 月現在）。

- Environmental Innovation Programme for Projects Abroad

ドイツの環境に直接影響するプロジェクトや各国の気候行動への投資を増加するプロジェクトを支援するもの。優先事項として、前者については国境地域の水質や大気の汚染対策を対象とし、エンドオブパイプ型の対策からエネルギー利用効率を含む統合的解決への移行を促す。後者については相手国において環境と気候に配慮した経済発展の方向性を示すものであり、相手国自身でプロジェクトを進展させ、ステークホルダーの環境保全の社会受容性増加をねらう。

（5）英国

1. 環境に関する概況（現状）^{60,103,104}

英国は、地球温暖化の緩和に向けた低炭素社会の構築を国家としての主要な取り組みとして進めている。環境施策としては、特に低炭素社会構築やエネルギーといった方面に重点的取り組みがなされている傾向があり、EU 指令にしたがって国内施策が実行されている。

GHG 排出量の削減に関しては、2050 年までに 1990 年比で 80%以上削減を目指している。一次エネルギー起源による CO₂排出量は 2012 年において 2.38 tCO₂/toe、人口一人当たりの CO₂排出量は 7.18 tCO₂/人であった。

2. 政策立案のガバナンス（組織体制）⁶⁰

エネルギー・気候変動省（DECC）がエネルギー供給や気候変動対策に関する業務を、研究開発については科学・イノベーションの主要所管庁であるビジネス・イノベーション・技能省（BIS）と連携し、推進政策を策定してきた。

2016 年 7 月 14 日に、英国の EU 離脱に伴う省庁再編として、BIS がエネルギー気候変動省（DECC）と合併し、ビジネス・エネルギー・産業戦略省（BEIS）になるとともに、高等教育が教育省（DfE）に移管されることが発表された。また、2008 年の気候変動法に基づき設置された独立委員会である、気候変動委員会（Committee on Climate Change）が設置されており、2050 年への最適な移行に向けて、政府に対し予算配分やセクター間の貢献レベルなどに関する専門家としての助言を行う。

英国の総研究開発費は、米国の 1/10 程度、日本の 1/4 程度であり、民間セクターの科学技術活動が比較的弱い。一方で、大学や政府出資による公的研究機関による基礎研究は強い。

¹⁰³ 財団法人自治体国際化協会 CLAIR REPORT No.390 <http://www.clair.or.jp/j/forum/pub/docs/390.pdf>

¹⁰⁴ 国際エネルギー機関（IEA）, STATISTICS <http://www.iea.org/statistics/>

3. 環境に関する基本政策 60,105-110

英国では地球温暖化の緩和に向けた低炭素社会構築への取り組みが重要な課題として位置づけられている。GHG 排出量の削減に関しては、2006 年発表のスターン・レビュー、及び 2008 年制定された「気候変動法 2008」に基づき、2050 年までに GHG 排出量を 1990 年比で 80%以上削減を目指している。

廃棄物処理やリサイクル促進、土地や大気汚染への規制・対策などに対しては、1995 年に制定された「環境法（Environment Act）」で規定されている。

1) Securing the future – The UK Government Sustainable Development Strategy

アジェンダ 21（1992 年）の要請に応え 1994 年に最初に策定された持続可能な発展戦略の 2005 年改定版。世界中のすべての人について、基本的な欲求を満たし、より良い質の生活を享受することを、将来世代の生活の質を損なうことなく、可能とすることを目的とし、重点分野として次の目標を掲げている。

- 持続可能な消費と生産
- 気候変動とエネルギー
- 天然資源の保護と環境の改善
- 持続可能なコミュニティとより公正な世界の創造

2) 英国の低炭素経済への移行計画

2020 年までに GHG を 1990 年比で 34%削減するという目標をどのように達成すべきかについて示す包括的な文書（2009 年）であり、この計画をより詳細に示した文章が同年に 3 つ発表されている（「英国の低炭素産業戦略」、「再生可能エネルギー戦略」、「低炭素輸送：よりグリーンな未来」）。

3) 国家適応プログラム（NAP）

気候変動への適応については「国家適応プログラム（NAP）」が策定されている。気候変動法では、「英国気候変動リスク評価政府報告書（CCRA）」（環境・食糧・農村地域省 DEFRA, 2012）と、「国家適応プログラム（NAP）」の策定と 5 年後とのレビューを義務付けている。国家適応プログラムは、気候変動適応に関する政府の行動をまとめたもので、DEFRA が CCRA に基づいて、産業界、地方政府、その他の組織と連携しながら 2013 年に作成したものである。建築環境、インフラ、健全で強靱なコミュニティ、農業及び林業、自然環境、産業、地方政府の 7 つの分野について、当該分野のビジョン、CCRA において当該分野で抽出されたリスクの一覧、重点領域ごとの目標と取り組みの説明及び優先度の高いリスクに対する行動が記載されている。

4) Biodiversity 2020

COP10 後に策定された生物多様性の国家戦略（2011 年）。2020 年までの 10 年間にお

¹⁰⁵ 英国ビジネス・イノベーション・技能省（BIS）, Our plan for growth: science and innovation

https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/387780/PU1719_HMT_Science_.pdf

¹⁰⁶ 環境省 中央環境審議会総合政策部会（第 26 回）資料 2 <https://www.env.go.jp/council/02policy/y020-26/mat02.pdf>

¹⁰⁷ 国土交通省 社会資本整備審議会環境部会・交通政策審議会交通体系分科会環境部会第 26 回合同会議 参考資料 2-2

<http://www.mlit.go.jp/common/001083882.pdf>

¹⁰⁸ 環境省 中央環境審議会地球環境部会気候変動影響評価等小委員会第 1 回 参考資料 5

<http://www.env.go.jp/council/06earth/y0616-01/ref05.pdf>

¹⁰⁹ 環境省 平成 24 年版環境・循環型社会・生物多様性白書 <https://www.env.go.jp/policy/hakusyo/h24/html/hj12020201.html>

¹¹⁰ 英国環境・食料・地域省（DEFRA）Waste Management Plan for England

https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/265810/pb14100-waste-management-plan-20131213.pdf

ける生物多様性政策の戦略的な方向性を示している。陸域における生態系ネットワークの構築強化や 2016 年末までに領海の 25%を含む海洋保護区のネットワークを構築すること、新たな革新的資金メカニズムの開発や生物多様性の価値を官民の両セクターの意思決定に組み込んでいくこと等を優先的に取り組むべき行動として明らかにし、それらの行動と 2020 年までに達成すべき目標や愛知目標との関係を明らかにするなどしている。

5) 廃棄物管理戦略 2013 (Waste Management Strategy for England 2013)

DEFRA による廃棄物の状況と管理に関する戦略（2013 年）。以前の戦略である廃棄物戦略 2007 から素晴らしい進展があったとしながらも、より一層の発展を目指す内容。

4. 環境研究開発戦略⁶⁰

成長計画：科学とイノベーション

環境分野に特化したものではないが、2014 年に BIS から発表された本計画が現在の政府による科学・イノベーションに関する政策の核となっている。英国がサイエンスとビジネスにおいて世界で最も適した国になるために、6つの柱が掲げられている。柱の1つである「優先分野の決定」では、8つの Great Technologies が記載されており、環境に関連する項目としてはエネルギーとその貯蔵が該当する。

5. 代表的な研究開発プログラム^{60,111,112}

気候変動や環境破壊に伴う大気、海洋、土壌などの生態系影響、人体影響、水資源問題、資源枯渇問題、廃棄物問題などを幅広く扱っている。特に昨今問題となっている都市大気汚染と人体影響との関係、レジリエンス、環境破壊に伴い発生する貧困問題、温暖化に伴う諸影響の評価などについては、先進的かつ時勢を得た研究テーマ抽出とファンディングが行われている。環境・エネルギー関係研究予算の主な助成機関と研究開発プログラムは以下の通り。

- 自然環境研究会議（NERC）

BIS 傘下で基礎・応用研究にプロジェクトベースで助成を行う 7つの研究会議のうちの一つ。傘下に研究施設を有し、自らも基礎・応用研究を実施している。2015 年予算は計 2.9 億ポンド。科学研究の主要テーマとしては、気候システム、生物多様性、天然資源の持続可能な使用、地球システム科学、自然災害、環境・公害・健康、（環境関連）技術。NERC が助成する環境関連の主な研究戦略プログラム（括弧内は期間と予算（計画））は以下の通り。

- Atmospheric Pollution & Human Health in a Developing Megacity : 開発巨大都市における大気汚染と健康
（2014～2020 年、研究対象の中国とインドそれぞれに対して 5.5 百万ポンド）
中国、及びインドの巨大都市の大気の質が人間の健康に及ぼす影響についての研究

¹¹¹ JST CRDS, 科学技術・イノベーション動向報告～英国編～
<http://www.jst.go.jp/crds/pdf/2014/OR/CRDS-FY2014-OR-03.pdf>

¹¹² 在英国日本国大使館・経済班 科学技術担当「英国の科学技術の概要」（2005 年）
http://www.mofa.go.jp/mofaj/gaiko/technology/science/pdfs/uktec_gai.pdf

- Biodiversity & Ecosystem Service Sustainability (BESS) : 生物多様性と生態系サービスの持続可能性
(2011~2017年、13百万ポンド)
- Changing Arctic Ocean: Implications for marine biology & biogeochemistry : 北極海を変える : 海洋生物学と生物地球化学への影響
(2017~2022年、5年間で16百万ポンド)
北極における海氷面積変化が海洋生態系に及ぼす影響についての研究
- Greenhouse Gas Emissions & Feedbacks : GHG 排出量とフィードバック
(2011~2016年、5年間で8.1百万ポンド)
GHG 排出源と吸収源の特定
- Increasing Resilience to Natural Hazards in Earthquake-prone & Volcanic Regions : 地震の発生しやすい&火山地域における自然災害への回復力向上
(2010~2018年、5年間で5.8百万ポンド)
- Science for Humanitarian Emergencies & Resilience (SHEAR) : 人道的な非常事態と回復力のための科学
(2015~2020年、5年間で19百万ポンド、NERC、DFID (国際開発省)、ESRC (経済・社会研究会議) の共同)
途上国における地滑り等のリスク評価や観測等の研究
- Soil Security : 土壌セキュリティ
(2013~2018年、8百万ポンド、NERC、BBSRC (バイオテクノロジー・生物科学研究会議)、DEFRA、スコットランド政府の共同)
- Sustainable Aquaculture : 持続可能な養殖
(2014~2017年、6百万ポンド、BBSRC、NERC、Cefas (環境漁場・水産養殖科学センター) 等の共同)
- Sustaining Water Resources for Food, Energy & Ecosystem Services (SWR) : 食料、エネルギー、生態系サービスのための水資源持続
(2015~2019年、3百万ポンド)
英国とインドとの共同
- UK Droughts & Water Scarcity : 英国の干ばつと水不足
(2013~2018年、12百万ポンド)
- Understanding & Representing Atmospheric Convection across Scales : スケール全体の大気循環の理解と表現
(2015~2020年、5百万ポンド)
- Valuing Nature : 自然の価値
(2013~2018年、7.2百万ポンド、NERC、ESRC、DEFRA の共同)
- Innovate UK
主に産業界に対して助成を行う。イノベーションを通じて英国で成長が期待される分野として 15 優先分野が決定された。そのうち環境エネルギーに関連する分野 (括弧内は 14 年度予算) としては、エネルギー (8,200 万ポンド)、輸送 (7,000 万ポンド)、建物環境 (1,300 万ポンド)、資源効率 (1,300 万ポンド) などがある。

- イノベーションプラットフォーム

Innovate UK が推進。主要な社会的問題に対するイノベティブな製品のリードマーケットを構築するために、産学官が協同で特定の課題に取り組むためのプログラム。6 つのテーマのうち、環境にやさしい建築物、持続可能な農業と食物が環境に関連する。

（6）フランス

1. 環境に関する概況（現状）¹¹³⁻¹¹⁸

フランスの環境政策は、その始まりからヨーロッパレベルでの環境政策の発展と共に形成され、現在の研究戦略も EU のプログラムである Horizon2020 との整合性が重視されている。

環境について様々な分野で取り組みが実施されているが、特に気候変動に関しては 1990 年代初めからフランス政府の優先課題の 1 つとされ、政策は継続的に強化されてきた。原子力の比率が高い電源構成などから、先進工業国の中では GDP 単位当たりでも人口 1 人当たりでも GHG 排出量が最も少ない国の一つである。2015 年の緑の成長のためのエネルギー移行法では、2015 年 12 月にパリで開催された COP21 などにもらみ、GHG 排出量を 2030 年までに 40% (90 年比) 削減する目標が設定されている。同時に、本法律では EU も推し進める循環型経済 (Circular Economy) への移行も目指している。また、フランスは、3 大水メジャーのうちの 2 つ (スエズ、ヴェオリア) を創出し、世界水フォーラムを間接的に主催するなど各国の水政策に影響力を保っている。

2. 政策立案のガバナンス（組織体制）¹¹⁴

フランスの研究戦略は首相直属の合議体である研究戦略会議が策定する（現行の研究戦略である SNR France Europe 2020（4. 参照）を決定）。研究戦略会議の直下に運営委員会が置かれ、研究戦略会議に諮るべき議題を決める役割を担う。また、既存の国立研究機関を横断的につないだバーチャルな研究機関でありフランスの研究を統括する国家連合であるテーマ別研究連合が存在する。テーマ別研究連合は、研究戦略会議の枠組みにおいて、戦略の元となる分野ごとの情報を運営委員会に提示する役割を持つ。なお、テーマ別研究連合には 5 つの研究連合があり、環境分野として AllEnvi (※) が設置されている。こうした研究戦略を含む研究開発・イノベーション政策は、国民教育・高等教育・研究省 (MENESR) の研究・イノベーション総局が担当し、本総局内に上記の運営委員会が置かれている。その他、環境・エネルギー政策は、エコロジー・持続可能な開発・エネルギー省が担当する。

¹¹³ OECD, Environmental country reviews FRANCE <http://www.oecd.org/env/country-reviews/2447902.pdf>

¹¹⁴ JST CRDS, (海外調査報告書) 科学技術・イノベーション動向報告～フランス編～ (2014 年度版)

<http://www.jst.go.jp/crds/report/report10/CRDS-FY2014-OR-04.html>

¹¹⁵ 在日フランス大使館, 気候変動対策に取り組むフランス <http://www.ambafrance-jp.org/article9134>

¹¹⁶ 一般財団法人日本エネルギー経済研究所, 気候変動対策に取り組むフランス, Vol.34 <http://eneken.ieej.or.jp/data/6272.pdf>

¹¹⁷ 経済産業省 水ビジネス国際展開研究会ワーキンググループ (第 5 回) 資料 5 各国の水ビジネスに関する支援状況 (NEDO 調査中間報告) <http://www.meti.go.jp/committee/materials2/downloadfiles/g100115c05j.pdf>

¹¹⁸ 水ビジネス国際展開研究会, 水ビジネスの国際展開に向けた課題と具体的方策, 平成 22 年 4 月

<http://www.meti.go.jp/committee/summary/0004625/pdf/g100426b01j.pdf>

フランスの代表的な研究開発の資金配分機関は国立研究機構（ANR）である。主に大学・国立研究機関を対象として競争的に資金を配分している。その他、環境・エネルギー分野については環境・省エネルギー機構（ADEME）も資金配分を実施している。

（※）AllEnvi：創立メンバー12機関、準会員16機関。創立メンバーは、CEA（原子力・代替エネルギー庁）、CNRS（国立科学研究センター）、CPU（大学学長連盟）、INRA（国立農学研究所）など。

3. 環境に関する基本政策 ¹¹⁹⁻¹²⁸

経済が発展した1970年代以降に環境汚染が深刻化したが、消費を至上のものとする一般国民の環境への関心は総じて低く、政府も経済成長を優先し、環境対策に投じる予算も他の先進工業国に比べて少なく、その環境対策は他の先進諸国に比べて大幅に遅れをとっていた。しかし、1980年代後半になると地球規模問題として認識され始め、欧州統合を目指すECも統一した環境政策を打ち出し、フランスの環境政策、法整備も徐々に進んでいった。1990年代に入ると、ADEMEの設立と国家環境計画（National Environment Plan）により環境保護は国の優先事項となった。

2005年3月には、憲法の中に環境憲章を盛り込む憲法改正を行い、この憲法上の原則に従って、環境保護に向けた多数の政策が策定されている。この枠組みにおいて策定された、環境保護に関する最も野心的で包括的な政策が、2007年に中央政府だけでなく多様な参加者による討議が行われた環境グルネル会議で策定された政策である。環境グルネル会議の提言を実施するために、気候変動の緩和、生物多様性と自然景観の保全、健全な環境への寄与に関する目標等を定めた環境グルネル第1法が制定され、第1法の内容を実現するために、建築物のエネルギー性能、交通、エネルギーと気候、生物多様性、工業的リスク、健康、廃棄物管理、土壌汚染、親会社の環境的責任、公的調査、環境アセスメント、施設分類等に関する全般的な規定が明記された環境グルネル第2法が制定された。

以下に、現在の代表的な国家戦略や計画を示す。

1) 持続可能な開発に関する国家戦略（2015-2020）

グリーン経済と自然資源の維持に基づいて持続可能な開発に関する方針（2016年、第

¹¹⁹ 門彬、「環境憲章」制定のためのフランス憲法改正法案 <http://www.ndl.go.jp/jp/diet/publication/legis/222/022204.pdf>

¹²⁰ 財団法人自治体国際化協会, Clair Report No. 335 (January 25, 2009) フランスの環境配慮型交通政策 <http://www.clair.or.jp/j/forum/pub/docs/335.pdf>

¹²¹ Campus France, Research in environmental sciences in France http://ressources.campusfrance.org/catalogues_recherche/recherche/en/rech_environnement_en.pdf

¹²² 日本貿易振興機構（JETRO）海外調査部, フランスの環境に対する市民意識と環境関連政策, 2011年1月 https://www.jetro.go.jp/ext_images/jfile/report/07000444/france_kankyo_seisaku.pdf

¹²³ Ministre de l'Environnement, de l'Énergie et de la Mer, La stratégie nationale de transition écologique vers un développement durable (SNTEDD) 2015-2020, 9 mai 2016 http://www.developpement-durable.gouv.fr/La-strategie-nationale-de-42115.html?_sm_auiTH6rQ0q0PP8FfZQ

¹²⁴ 国土交通省国土技術政策総合研究所, 研究資料, <http://www.nilim.go.jp/lab/bcg/siryou/tnn/tnn0749pdf/ks074910.pdf>

¹²⁵ 環境省 中央環境審議会 生物多様性国家戦略小委員会 第2回小委員会 資料3-1 海外の生物多様性国家戦略の事例 http://www.biodic.go.jp/biodiversity/about/initiatives/files/unite_2012_01_sub2st/0412_ref3-1.pdf

¹²⁶ 国立環境研究所, 海外ニュース, フランス環境大臣、廃棄物削減・リサイクル計画を発表, 2014.11.07 <http://tenbou.nies.go.jp/news/fnews/detail.php?i=14856>

¹²⁷ Ministre de l'Environnement, de l'Énergie et de la Mer, Troisième plan national santé environnement (2015-2019), 12 novembre 2014 <http://www.developpement-durable.gouv.fr/Troisieme-plan-national-sante.html>

¹²⁸ 国立環境研究所, 海外ニュース, フランス、気候のための国家低炭素戦略を決定, 2015.11.23 <http://tenbou.nies.go.jp/news/fnews/detail.php?i=17638>

3次)。本戦略によりエネルギー移行法の原動力が增強されるとしており、下記9つの軸が示されている。

- 持続可能かつレジリエントな領土の開発
- 循環型かつ低炭素型経済への取り組み
- 環境・社会・領土面での不平等の回避と削減
- 新たな経済・財政モデルの開発
- 経済活動の環境的移行への支援
- 環境的移行に向けた知識・研究・イノベーション創出への方向性提示
- 環境的移行と持続可能な開発への認識の教育・訓練・醸成
- 全てのアクターの関与
- ヨーロッパや国際的規模での持続可能な開発の促進

2) 国家気候変動適応計画（2011-2015）

不適當な適応を避け、適応に係る公的政策の一貫性を確保することを目的として策定（2011年）。20分野について記載（分野横断、健康、水資源、生物多様性、自然災害、農業、林業、漁業・水産養殖、エネルギー・産業、インフラ・輸送システム、都市計画・建築、観光、情報、教育・訓練、研究、基金・保険、海岸線、山岳、欧州と国際、ガバナンス）。

3) 気候のための国家低炭素戦略（SNBC）

2015年7月に成立した「緑の成長のためのエネルギー移行法」の目標達成の手段として決定された（2015年）。2015年から2028年までを3つに区切り、部門ごとの排出上限とそのための施策を定めている。環境・持続可能な開発・エネルギー省の省令によると、2015-2018年の期間は、輸送部門では車両のエネルギー効率化等により29%の排出削減、建物部門ではエネルギー超低消費型またはプラスエネルギーの建物、省エネ改修、インテリジェントメーターによる消費量制御等により約54%、農業部門では嫌気性処理、草地保全等アグロエコロジー事業により12%、工業部門ではエネルギー効率の向上や再生可能エネルギーによる化石燃料の代替を通じ24%、廃棄物部門ではエコデザイン、廃棄物の活用や再利用等により33%の排出削減をそれぞれ目指すとしている。

4) 生物多様性国家戦略（2011-2020）

生物多様性条約第10回締約国会議（COP10）で採択された愛知目標では、各国でも愛知目標を踏まえた生物多様性国家戦略の策定を進めていくことを求めており、COP10後に策定された（2011年、第1次国家戦略（2004）の改訂版）。

特に以下を重視している。

- 全ステークホルダー向けの生物多様性に関する情報と教育の増加
- 開発プロジェクトにおける生物多様性の主流化（特に豊かな生物多様性が地元住民に重大な社会経済的・文化的価値を持つ海外仏領）
- 生物多様性ガバナンス（地方レベルから世界レベルまで）

なお、IPBES（生物多様性と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）はフランスが2005年に提唱した枠組みである。

5) 廃棄物削減・リサイクル計画（2014-2020）

埋め立て処分する廃棄物の量を、2025年までに50%（2020年では30%）削減するこ

とを目標に掲げ、廃棄物の再資源化を進め、廃棄物による環境負荷を削減するとともにリサイクル部門の雇用創出を目指す（2014年策定）。この目標を達成するための手段として、①建材廃棄物のリサイクル強化（専門廃棄物リサイクル施設の全国展開等）、②行政や企業での用紙類の分別普及、③食料廃棄物の分別・リサイクルの促進（共用コンポスターの普及支援等）、④廃棄物、特に使用済みの自動車や電子機器の違法処理の規制、⑤使い捨てビニール袋の禁止措置（一定の使い捨てビニール袋を2016年1月から省令で禁止）、⑥回路基板からの希少金属回収プロジェクトの支援、を挙げている。

6) 国家健康環境計画（2015-2019）

環境による健康への影響を効率的に最小化するための計画（2014年、第3次）。健康に関する優先事項、暴露とその影響に関する知識に関する課題、環境健康研究への挑戦、地域活動・情報・コミュニケーション・トレーニングへの挑戦の4分野から構成されている。

4. 環境研究開発戦略¹¹⁴

フランスにおける現行の研究開発戦略は2015年3月に公表された France Europe 2020（以下、SNR France Europe 2020）であり、その特徴として、社会的課題に基づいたプライオリティ・セッティング、Horizon 2020 との整合性の重視、技術移転や産業技術研究が重視されている。SNR France Europe 2020 は10の社会的課題を定義し、さらに、それぞれの社会的課題には直接的には属さないものの、別途競争的資金の配分を前提としたプロジェクトにより研究を進めるべき5つのテーマが記載されている。社会的課題・テーマのうち環境分野に関する主な項目は表2-9、表2-10の通りである。

表2-9 環境分野に関する社会的課題

社会的課題	研究の方向性
1. 資源管理および気候変動への対応	1.1 地球システムのインテリジェントな計測
	1.2 自然資源の持続可能な管理
	1.3 気候および環境上のリスクの評価・管理
	1.4 地球に優しい産業や社会への変化を支えるエコテクノロジー・バイオテクノロジー
	1.5 沿岸域での研究（地下資源、生物資源、都市計画、土地利用、観光、自然・文化遺産の保護等）
3. 産業の復興	3.2 環境および市民に優しい工場
5. 食料安全保障と人口変動	5.1 健康的で持続可能な食糧（体内細菌の研究、食糧生産・加工・貯蓄プロセスのエネルギー効率の向上、等）
	5.3 バイオマスの多様な利用に基づく（食糧、物質、エネルギーの）生産
6. 持続可能な輸送と都市システム	6.1 都市の観測
	6.2 新たな移動手段のデザイン
	6.3 持続可能な都市のためのツールや技術の開発
	6.4 統合され、かつ柔軟な都市インフラと都市ネットワーク

表 2-10 環境分野に関するテーマ

テーマ	アクション項目
2. 地球系：観測、予測、適応	2.1 とりわけ衛星画像分析および航空センサネットワーク技術の分野において、観測インフラおよびそれに関連したデータ解析に関するブレイクスルー技術を開発する
	2.2 天気予報・リスクアセスメント・農業生産のモニタリング・エネルギー需要予測などのために、気候・環境関連のサービスを開発する
	2.3 実環境に近い「生きた研究室」において、持続可能な食糧生産システム・農業のためのバイオマスの最適利用などのイノベーションに向けた実験を行う

その他、経済・産業・デジタル省に関連する産業競争力強化に向けた戦略も存在する。2013年9月に公表された「フランスの産業再生」報告書は、フランスの産業を再生するために重要な34の優先領域を示したものであり、34の産業分野に対し、5～10年で革新的な製品を開発し、その市場化を行う計画を期待したものである。34の優先領域のうち、主に環境・エネルギー分野に関連する優先領域は表2-11の通りである。

表 2-11 環境分野に関する優先領域（抜粋）

優先領域	
環境に優しい船	水質の確保および希少な水の管理
森林産業	グリーンケミストリー、バイオ燃料
リサイクル、環境に優しい材料	安全・健康・持続可能な食料製品

2013年10月には「イノベーションのための原則と7の大志」報告書が公表された。フランスの長期にわたる繁栄と雇用を確保するために、重要かつ野心的な戦略分野を選択するために大統領が設置したイノベーション2030委員会での検討を踏まえ、7の戦略分野を選択した。環境分野に関連する戦略分野として、材料のリサイクル（レアメタル）、海洋資源の有効活用（金属および海水の淡水化）が記載された。

そして、2013年11月の「イノベーションのための新方策」報告書では、上記「34の計画」「7の大志」を補完する目的で、政策に関する4の軸に沿った40の方策が提示された。

5. 代表的な研究開発プログラム^{114,129,130}

1) フランス国立研究機構（ANR : Agence Nationale de la Recherche）による公募

国の研究戦略（SNR France Europe 2020）に沿った公募が行われている。2015年7月に発表された2015年包括的プロジェクト公募の選考結果では、SNR France Europe 2020で提示された「省資源管理と気候変動への適応」の分類で48件が採択された¹³¹。

水に関する研究およびイノベーションの領域で欧州のリーダーシップと競争力の強化

¹²⁹ The French National Research Agency(ANR), Environment and Biological Resources
<http://www.agence-nationale-recherche.fr/en/projects-and-results/2013-and-previous-editions/environment-and-biological-resources/>

¹³⁰ Ministre de l'Économie et des Finances, LA nouvelle France industrielle
<http://www.economie.gouv.fr/files/files/PDF/nouvelle-france-industrielle-sept-2014.pdf>

¹³¹ JST CRDS, デイリーウォッチャー, 2015年包括的プロジェクト公募: 第1次選考結果の発表 (元記事公開日: 2015/07/24)
<http://crds.jst.go.jp/dw/20150908/201509086708/>

を狙う JPI Water（欧州共同プログラミング・イニシアティブ「変動する世界における水関連の課題」）では、ANR が 2014 年 11 月から統括・座長を担っている¹³²。

2) 「将来への投資」(PIA) による公募

2010 年、サルコジ大統領により未来の重要課題への大規模投資である「将来への投資」が実施され、オランダ大統領も同名の施策を受け継ぎ、公募が行われている。例えば、「循環経済」枠では、2011 年以降タイヤ、リチウムイオン電池、混合プラスチックのリサイクルのほか、バイオガス、土壌の汚染除去に関する 12 件のプロジェクトを支援している。2015 年 6 月発表の新規 9 件の廃棄物リサイクル・回収/産業エコロジープロジェクト（下記）全体の予算規模は 9,160 万ユーロで、その内「将来への投資」による支援総額は 2220 万ユーロである。9 件の内容は、軟質プラスチックのリサイクル、PVB（ポリビニールブチラル）の再生、ガラス工場設備のエコ設計とリサイクル、有機廃棄物の有効利用、リサイクルが複雑な紙のリサイクル、平板ガラスのリサイクル、電気自動車・ハイブリッド車のリチウム・バッテリーの処理と有効利用、ゴム様廃棄物のリサイクルと有効利用、有機廃棄物の昆虫を介した有効利用であり、期間は 2～4 年である¹³³。

3) 拠点

「将来への投資」の一環で実施されている環境分野に関連する主な拠点支援の一例を以下に記載する。

・ カルノー機関

企業との共同研究を推進する国の研究機関に認証を与え、その認証に基づき資金を配分するプログラム。ドイツのフラウンホーファー研究所をモデルに策定された。環境に関連するものとして以下の機関がある。

- Irstea (National Research Institute of Science and technology for Environment and Agriculture) :

ヨーロッパにおける環境研究や政策支援のリーダーを目指し、環境分野と農業分野における科学的・社会的課題に対する研究を実施。主な研究領域は水、環境技術、土地利用。全国にまたがる 9 つのセンターによる体制。

・ IDEX

「優れた拠点」のプログラムの 1 つ。11 の大学拠点に 70 億ユーロを配分。エクス・マルセイユ拠点 (Aix-Marseille Universite) は環境・エネルギーを主なテーマとする拠点の 1 つ。

・ 競争力拠点 (Poles de Competitivite)

産業クラスターを対象としたプログラム。エコテック、環境、エネルギーを活動領域とする拠点「EAU」(地域圏：ミディ＝ピレネー) は準国際レベルとして認定。

4) 産業競争力強化

- ・ 「フランスの産業再生」(4. 参照) に基づき産業界がリードする形でのプロジェクトが 2014 年に 34 領域について開始されている。いずれのプロジェクトもプロジェク

¹³² JST CRDS, デイリーウォッチャー, ANR が統括する、水に関する欧州の研究「JPI Water」 (元記事公開日: 2015/03/23) <http://crds.jst.go.jp/dw/20150421/201504215440/>

¹³³ JST CRDS, デイリーウォッチャー, 「将来への投資」プログラムによる支援を受ける新規 9 件の循環経済産業プロジェクト (元記事公開日: 2015/06/16) <http://crds.jst.go.jp/dw/20150721/201507216169/>

トマネージャーを筆頭に多くの産業界ならびに公的機関が参加した研究開発体制をとっている。環境分野に関連する主なプロジェクトを以下に示す。

- Navires écologiques（環境に優しい船）
- Industries du Bois（森林産業）
- Recyclage et Matériaux Verts（リサイクル、環境に優しい材料）
- Qualité de l' eau et gestion de la rareté（水質の確保および希少な水の管理）
- Chimie Verte et Biocarburants（グリーンケミストリー、バイオ燃料）
- Produits innovants pour une alimentation sûre, saine et durable（安全・健康・持続可能な食料製品）

（7）中国¹³⁴⁻¹³⁸

1. 環境に関する概況（現状）

環境と経済の両立が重視されつつあり、政策にそうした理念が取り込まれ、環境を重点領域と位置づけた巨額のプロジェクトも存在する。

中国は、エネルギー資源の大規模な開発と利用が環境汚染と気候変動の主要な要因の1つであるとの認識を示したうえで、石炭を中心とし、エネルギーのクリーンな利用に最大限の注意を払いながら環境保護に焦点をあてて生態の破壊と環境汚染の防止に取り組んでいく意向を示している。

中国はGHG削減目標を、2030年までのGDP当たりのCO₂排出量を2005年比で60～65%削減とし、排出量は2030年頃にピークをむかえ減少に転じるとしている。

2. 政策立案のガバナンス（組織体制）

中国における環境分野に係る行政機関は、トップダウンでの研究開発資金配分を行う科学技術部や中国環境科学院を擁する環境保護部等がある。これに加え、国務院直属機構として中国最大の研究機関である中国科学院や主としてボトムアップでの資金配分を行う国家自然科学基金委員会も関与している。

3. 環境に関する基本政策

中国は、国民経済と社会発展の緊急のニーズに立脚し、エネルギー、資源、環境の技術開発を優先している。環境分野では「クリーン生産と循環型経済の確立」に加えて「脆弱な生態系の管理」が柱に据えられている。また、2014年4月24日全国人民代表大会常務委員会において「環境保護法」、2015年8月に「大気污染防治法（主席令31号）」、2016年9月に「環境影響評価法（主席令48号）」などの改正案を全国人民代表大会常務委員会によって可決され、環境汚染の防止について強い意思を示している。

環境関係では、「国民経済・社会発展『第13次5ヵ年』計画綱要」で「グリーン発展」がテーマとして掲げられ、資源節約型、環境友好型社会の構築が言及されている。また、

¹³⁴ JST CRCC, 平成27年度版 中国の科学技術の現状と動向（2015年）

¹³⁵ JST CRCC, 平成26年度版 中国の科学技術の現状と動向（2014年）

¹³⁶ JST CRDS, 中国の研究開発戦略に関する調査（2004年） <http://www.jst.go.jp/crds/pdf/2003/FR/CRDS-FY2003-FR-02.pdf>

¹³⁷ Science Portal China <http://www.spc.jst.go.jp/>

¹³⁸ 国家科技计划申报中心 <http://program.most.gov.cn/>

政府の関連部門は以下のような政策・計画を制定している。

- －「生態環境保護『第13次5カ年』計画」（2016年11月、国务院）
- －「国家環境保護『第13次5カ年』科技発展計画」（2016年11月、環境保護部、科学技术部）
- －「全国生態保護『第13次5カ年』計画」（2016年10月、環境保護部）
- －「全国海島保護『第13次5カ年』計画」（2016年12月、海洋局）
- －「国土資源『第13次5カ年』計画」（2016年4月、国土資源部）

4. 環境研究開発戦略

基本政策として、「国家イノベーション駆動発展綱要」（2016－2030）、「科学技術イノベーション『第13次5カ年』計画」に重要な方針が示されている。

「国家イノベーション駆動発展戦略綱要」（2016～2030年）は、イノベーション駆動発展を知的発展、グリーン発展を前提とし、2050年を見据えた科学技術イノベーション中長期基本策である。本戦略綱要では8の戦略的ミッションを設定し、第一のミッションは「産業技術を向上させ、新たな競争優位性を創出」とされている。このミッションには10の技術分野が指定されているが、そのうち「知的・グリーンな製造技術の推進」「グリーン・安全・高効率な現代農業技術の推進」「グリーン・安全・高効率なエネルギー技術の推進」「資源の高効率利用技術と生態保護技術の推進」は環境配慮型となっている。

また、「科学技術イノベーション『第13次5カ年』計画」では、「国民生活水準の向上と持続的発展可能な技術体系の構築」という戦略目標を掲げている。環境技術に関連する技術分野は以下の通りである。

a) 生態環境保護技術の開発

大気汚染防止技術と対策（スモッグの発生メカニズム、汚染源特定技術、大気汚染が健康に与える影響、環境モニタリング技術）、土壌汚染防止技術と対策、水環境の保護技術、クリーン生産技術、生態保全と修復技術、危険化学品環境安全管理、環境保護産業技術、重大自然災害防災技術、グローバル気候変動対応技術の開発を行う。

b) 資源高効率利用技術の開発

水資源利用の高効率化、石炭資源のグリーン利用、油田ガスの利用、鉱物資源のグリーン発掘、廃棄物の再利用に関連する技術の開発を行う。

5. 代表的な研究開発プログラム

「科学技術イノベーション『第13次5カ年』計画」（2016-2020年）からは、2030年に向けた国家型長期支援プロジェクトである「科学技術イノベーション2030（15テーマ）」がスタートし、「石炭のクリーン・高効率利用技術」「京津冀環境総合治理」の2つのプロジェクトが環境技術と関連している。

また、「科学技術イノベーション『第13次5カ年』計画」における、「国家重点研究発展計画」では、環境に関係する課題として以下のプログラムが採択されている。ここでは、それぞれ支援金額上位3位のものを整理する。

- 「グローバル気候変動と対策」（52,887万円 29プロジェクト）
 - グローバル気候変動のデータ収集及び変動過程と要因に関するモニタリング：

- 北京師範大学 梁順林 3,500 万元 5 年間
- 衛星モニタリングシステムによるグローバル範囲の CO₂ 変動の観測システム：
南京大学 居為民 2,800 万元 5 年間
 - グローバル気候変動における陸地水循環の役割に関する研究：
中国水利水電科学研究所 嚴登華 2,800 万元 5 年間
 - 「大気汚染原因及び制御技術」（106,198 万元 93 プロジェクト）
 - 船舶による大気汚染廃棄物の制御技術とデモンストレーション：
上海齋耀科技集团有限公司 陳謹 4,500 万元 4 年間
 - 大気動的汚染源リストアップ技術及びデモンストレーション：
清華大学 賀克斌 4,000 万元 3 年
 - 東沿岸部複合型大気汚染に関する地上・空中・宇宙空間からのモニタリング技術：
南京大学 丁愛軍 3,500 万元 4 年

（８）韓国

1. 環境に関する概況（現状）

韓国の人口密度は 501.52 人/km² で、OECD 加盟国のうち最も人口が過密（日本 350 人）であり、単位面積あたり汚染物質の排出量も、他の OECD 加盟国に比べ 2～10 倍である。

韓国では、GHG 排出量を 2030 年までに現在の予測値（BAU, Business As Usual）よりも 37%削減することを目標としている。

なお、国家予算の中で、環境部の予算の割合は日本より多い。多種多様な賦課金の使用用途は各種環境保全対策であるが、水質保全財源の比率が大きい。これは、汚染事故などの影響で、国民の水質問題への関心が高いためである。

2. 政策立案のガバナンス（組織体制）¹³⁹

環境部（MOE）が環境保全の中心的な役割を担う省庁である。所管機関として、中央環境紛争調整委員会、国立環境科学院及び 8 つの地方環境庁がある。関係機関として環境管理公団、韓国環境資源公社などがある。また、国務総理室の所属として、環境対策に対する専門的な研究と政策立案、環境影響評価書の検討業務を担当する韓国環境政策・評価研究院がある。

環境白書によると、気候変動、大気、水環境、上水道・下水・飲料水、土壌・地下水、環境健康、廃棄物、自然と国土の 8 分類（その他に国際協力とグリーン経済）に分けて政策が進められていると見られる。

3. 環境に関する基本政策¹⁴⁰

2010 年には気候変動対応とエネルギーの目標管理に対応するため、グリーン成長国家戦略、国務総理と民間委員を共同委員長にする大統領所属のグリーン成長委員会を設置

¹³⁹ 金由希，韓国における環境政策とその取り組み

http://archive.kyotogakuen.ac.jp/~o_human/pdf/association/2014/i2014_01.pdf

¹⁴⁰ 韓国環境省，ECOREA, Environmental Review 2015, Korea

し、「低炭素グリーン成長基本法」を2010年1月に制定した。「グリーン成長」について李大統領は、「GHGと環境汚染を減らす持続可能な成長」であるとし、グリーン技術とクリーン・エネルギーにより、新たな成長力と雇用を創出する新しい国家発展のパラダイムである、と位置づけている。

これに伴い、2010年10月環境部の監督の下、13関連省庁共同で、「国家気候変動適応計画（2011-2015）」が、韓国初の法定適応ポリシーとして施行された。健康、災害、農業、林業、海洋と漁業、水管理、生態系、気候変動の監視と予測、適応産業やエネルギー、教育と促進、国際協力の10のセクター87のタスクが含まれている。環境部の下に削減政策を科学的に支える温室効果ガスインベントリおよび研究センター（GIR）を設立し、排出に関する包括的な情報センターとして、分野別削減目標の設定や排出量の分析・評価、政策研究を開始している。それに向け2011年に温室効果ガス・エネルギー目標管理制度を導入し、すでに主要産業やエネルギー集約型部門からの排出規制を行っている。現在580の主要排出事業者が対象となっている。2012年11月、「温室効果ガス排出権の割当及び取引に関する法律施行令」が国务会議（内閣）を通過し、キャップ・アンド・トレード（C&T）制度の基本設計が完了した。2015年から2017年までを第1計画期間、2018年から2020年までを第2計画期間とし、以降5年ごとを計画期間とするもので、各計画期間の6ヶ月前までに割当総量（排出許容総量）、対象部門・業種及び割当基準・割当量、有償割当方法、オフセット基準等を策定する。2013年2月、環境部は、2015年に運用開始が予定される、温室効果ガス排出権取引制度（ETS）を設計するための特別委員会を立ち上げ、国連気候変動枠組条約の下、削減義務を負わない国の中で唯一、全国的な排出権取引制度の実施に向け準備を開始した。

その他、韓国は水環境の回復に力を入れており、2006年に策定された「水環境管理のためのマスタープラン（2006年～2015年）」は、人々の需要を反映して有害物質から生態学的に健全な水環境と安全性を強調している。2011年4月には環境技術及び環境産業支援法の改正や資源循環法、環境保健法の制定などのような環境産業育成のための法的基盤も実施している。

2013年1月、生物多様性および生物資源の保全や、生態系をかく乱する恐れのある侵入種などの管理等を盛り込んだ「生物多様性の保全および利用に関する法案」が施行。2014年3月、環境部は、2014年から2018年までの今後5年間の生物多様性の保全と持続可能な利用を目的と政策方向と戦略課題を提示する「第3次国家生物多様性戦略」を発表した。「生物多様性の保全と生態価値の向上を通じて、創造経済の牽引」を2020年までの中期目標として定め、①生物多様性の主流化、②生物多様性の保全強化、③生物多様性の脅威の低減、④生態系サービスの持続可能な利用、⑤生物多様性の研究と管理システムの構築、⑥生物多様性国際協力の強化などの6大戦略で構成された。国際的には、第10回生物多様性条約締約国会議で採択された遺伝資源の利益共有の議定書（名古屋議定書）発効に先制的に対応できるようになった。

4. 環境分野の研究開発戦略⁶⁰

韓国の科学・イノベーション政策は、2013年7月にNSTCにおいて承認された「第3次科学技術基本計画（2013-2017）」を主軸に推進されている。具体的な研究開発投資

分野としては、IT 融合新産業の創出をはじめとする「5 大推進分野」を掲げ、120 の国家戦略技術及び 30 の重点技術の研究開発を推進する方針を掲げている。環境に関わるものとしては以下が挙げられる。

1) クリーンで便利な生活環境の構築（4 技術から抜粋）

気候変動対応力の強化：CCS 技術

環境保全・復元システムの高度化：汚染物質制御および処理技術（水質・大気など）

生活空間の便利さの向上：高効率エネルギー建築物技術、未来先端都市建設技術

2) 安全安心な社会の構築（6 技術から抜粋）

自然災害予防と被害の最小化：自然災害モニタリング・予測・対応技術

社会的災害対応システムの確保：原子力安全確保技術、社会的複合災害予測・対応技術

また、第 3 次科学技術基本計画と連動して、「社会問題解決総合実践計画（2014-2018 年）」（2013 年 12 月決定）等においても環境分野に係る方針が打ち出されている。全省庁的に優先して推進する必要があるとされた 10 の実践課題のうち、環境分野に係るものとして以下が挙げられている。

- 生活廃棄物：生ゴミ回収・処理時に発生する汚染物質の低減・処理技術、資源化技術
- 水質汚染：安全な上水供給のための藻類の早期検知・予測、安全な浄水処理技術
- 環境ホルモン：環境ホルモンの経路を考慮した健康リスクの統合評価・管理、代替素材の開発
- 気象・災害：黄砂・路面凍結などの災害・気象関連の観測・予報システム、被害低減技術
- 放射能汚染：Web ベースの統合監視・予測システム、高効率除去技術

環境技術及び環境産業支援法に基づき、5 カ年計画を策定して実施している。現在、「第 3 次環境技術と環境産業育成計画（'13~'17）」が進行中である。その中で 5 大目標と 16 の重点技術を設定している。¹⁴¹

1) 資源循環型社会・経済基盤の構築

- 廃棄物リサイクル技術
- 水再利用技術
- 再生可能エネルギー技術

2) 気候変動・地球温暖化問題に効果的に対応できる環境と経済の共生基盤構築

- GHG 発生の低減技術
- CCS と評価モニタリング技術
- 気候変動の評価・適応技術

3) 環境汚染物質の低減と適正管理を通じた環境改善と生態系の回復

- 大気の水質の改善技術
- 水処理技術

¹⁴¹ 国家科学技術委員会「第 3 次環境技術と環境産業の育成（'13~'17）」

- 廃棄物の削減と減量技術
 - 土壌と生態系復元技術
 - 4) 環境性疾患の予防及び対応等の環境保健管理システムの確保
 - 安定供給・管理技術
 - 生活環境有害引数管理技術
 - 環境性疾患対応管理技術
 - 環境に配慮したライフスタイル構築技術
 - 5) 環境災害及び事故等の迅速な危機対応システムの構築
 - 環境災害対応技術
 - 生物資源探索・保安全管理・活用技術
5. 代表的な研究開発プログラム

韓国の課題解決型の環境分野のファンディングを担っているのは韓国環境産業技術院（KEITI：Korea Environmental Industry & Technology Institute）であり、海外進出に関するサービス支援のために 2009 年度に設立された。

主なプログラム¹⁴²として、世界一流のレベルの環境技術の開発を通じた環境産業の新成長動力化と輸出産業化を目的として「グローバルトップ環境技術開発事業」を実施している。2011 年～2020 年（10 年）で 7,820 億ウォンの予算となっている。

表 2-12 グローバルトップ環境技術開発事業

分野	主な内容
エコスマート上水道システムの開発	ET / IT / NT 融合技術に基づいて、国内企業が取水源から受け入れまで上水道事業全般の運営及び管理に関連するトータルソリューション技術の確保、海外水市場への進出
廃水の高度処理技術の開発	汚染原水の最適処理システムと効率的な水資源の確保/利用技術の開発、エネルギー自立型高度処理技術の開発により、世界市場競争力の確保
環境にやさしい自動車技術の開発	自動車排出許容基準と GHG の削減の需要に合致するグリーンカー技術の開発と普及
金属・資源リサイクル技術の開発	未利用廃資源の最新リサイクル技術の開発、資源の為替レートを向上させ、資源循環技術の実用化と海外輸出促進
Non-CO ₂ GHG 低減技術	国の GHG 削減目標（2020 年に 2005 年比 30%）を達成するための Non-CO ₂ の GHG 削減のための重要な技術の開発とシステム開発
グリーンパトロール測定技術	安全で快適な緑の環境の実装のために国内・外の環境政策と需要に基づいた緑の環境の統合管理のための環境測定機器やシステムの技術開発

その他、将来の環境市場の先取りと新産業の創出などの環境産業の高度化基盤構築のために ET、NT、BT、IT 技術の融合を通じた高効率環境技術の開発を目的とした「環境融合事業」（2009～）を実施。2015 年までに 579.98 億ウォンの予算がついている。

¹⁴² 韓国環境産業技術院（KEITI）ホームページ
<http://www.keiti.re.kr/home/subPage.do?menuId=1010112000&tabMenuId=1010112010>

2.3.3 研究開発（科学技術）の動向

（1）各研究開発領域の動向

3章で分析した15の研究開発領域の概要を以下に示す。

【比較表の見方】

・基礎・応用

基礎：大学・国研などでの基礎研究のレベル

応用：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

・現状（わが国の現状を基準にした評価ではなく、CRDSの調査・見解による評価）

◎：特に顕著な活動・成果が見えている ○：顕著な活動・成果が見えている

△：顕著な活動・成果が見えていない ×：活動・成果がほとんど見えていない

・動向

↑：上昇傾向、→：現状維持、↓：下降傾向

1. 気候変動予測

		日本		米国		欧州		中国		韓国	
		現状	動向	現状	動向	現状	動向	現状	動向	現状	動向
観測	基礎	◎	↑	◎	↑	○	→	○	↑	○	→
	応用	○	→	◎	→	◎	↑	△	→	△	↑
ESM	基礎	○	→	◎	→	◎	→	△	↑	△	→
	応用	○	→	◎	↑	◎	↑	△	↑	△	→

■ 観測

衛星による観測性能が、GHG全体の把握からCO₂のみを精密に観測するまでに進んできた。大気中GHG濃度を大きく左右する陸域の炭素循環を解析するため、CO₂等のフラックス観測を行うタワーが世界各地に建設され、そのデータについては各種地域ネットワークや全球ネットワークでの共有が始まっている。

GHG観測衛星では、GOSAT（日本、2009年）、OCO-2（米国、2014年）、TanSat（中国、2016年）が打ち上げられ、今後はGOSAT-2（日本、2017年）、MicroCarb（フランス、2020年）が予定されている。日本はGOSATを持ち基礎研究で世界の中心にいる。米国は雲・エアロゾルの三次元情報が得られるレーザレーダ（LIDAR）を用いた大規模な基礎研究を行い、衛星開発で培った技術を地上展開する企業が現れてきている。欧州は、EUが推進するCopernicus計画で衛星データの実利用を推進する応用研究が急速に進む。しかし、Copernicus計画が重点化したため、基礎研究は比重が低下し、小規模化している。

注目動向として、GOSATやOCO-2のGHG平均濃度観測手法は、地表面で反射された太陽光を観測する分光計測であるが、欧州が回析格子を用いながら観測幅を広げた方式を提案している。なお、太陽光を使う観測では太陽高度が低い冬期や夜間の観測ができないが、レーザによる計測では克服できる可能性がある。一方で、LIDARではレーザ光源の寿命など長期運用可能性に課題がある。

■ 地球システムモデル（ESM：Earth System Model）

地球システムモデル（ESM）の開発が進み、海陸の炭素循環や大気微量組成間の化学反応など生物、化学的過程が含まれるようになってきた。現在、多くの研究機関がESMへの窒素循環過程導入に取り組む。日本は大気汚染物質であるエアロゾルの数値モデル

SPRINTARS を世界に先駆けて開発し、こうしたモデルと気候モデルとの相互作用によりエアロゾルによる気候変動の定量評価が可能となった。

米国は宇宙航空局（NASA）や大気研究センター（NCAR）など多数の研究機関が基礎・応用研究に取り組み世界をリードしている。欧州は 7 つの ESM 開発チームが EU のプロジェクト CRESCENDO に参加し、基礎・応用研究ともに強い。日本はオリジナルのモデル開発を行い研究コミュニティの能力は高い。地球科学研究専用の航空機がないなど資金面で米欧からは遅れている。

注目動向として、従来別々の分野で開発されてきた陸域生態系モデル、大気化学モデルなど多数のサブモデルを ESM に統合するため、カプラーと呼ばれるソフトウェアの開発が盛んになってきたことが挙げられる。観測データの不足で ESM の検証が十分に出来ず異なる ESM 間でのシミュレーション結果に差が出てしまうことや、膨大な計算機資源が必要であることが課題である。今後は、炭素排出に対する気候過渡応答（TCRE）の精度向上や高度な海洋生態系モデルの組み込み、短寿命気候汚染物質（SLCPs：Short-Lived Climate Pollutants、メタン、対流圏オゾン、ブラックカーボン）などによる不確実性の向上、土地利用変化の検討などが求められる。

2. 気候変動影響予測・評価

		日本		米国		欧州		中国		韓国	
		現状	動向	現状	動向	現状	動向	現状	動向	現状	動向
水循環	基礎	△	↓	◎	→	◎	→	△	→	△	→
	応用	○	→	○	↑	◎	↑	○	→	△	→
自然災害	基礎	○	↓	◎	→	◎	→	○	↑	△	→
	応用	○	→	◎	→	◎	↑	○	↑	△	→
自然生態系	基礎	△	↑	◎	↑	◎	↑	○	↑	△	→
	応用	○	↑	○	↑	◎	↑	△	→	△	→
農林業	基礎	◎	↑	◎	↑	○	→	○	→	×	→
	応用	○	↑	○	→	◎	↑	△	→	△	→
健康・都市生活	基礎	◎	↑	◎	↑	◎	↑	△	→	○	↑
	応用	◎	↑	○	→	◎	→	○	↑	○	↑
極地	基礎	◎	↑	◎	↑	◎	↑	△	→	△	→
	応用	◎	↑	○	→	◎	↑	◎	↑	○	→

■ 水循環

人間活動を含む全球水文モデルが精力的に開発・改良され、現時点で約 15 の有力なモデルがある。水文モデルと社会経済モデルの連携が実施・強化されている。

米国は、衛星情報を利用した全球スケールのデータ構築などで圧倒的な力を持ち基礎研究が強い。欧州は、全球水文モデルを多数開発し世界をリードしている。日本は新たな基本概念の提唱や全球スケールの基礎データ構築の点で貢献はゼロではないが大きいとはいえない。少数の研究者がモデル開発、シミュレーション分野で先進的な応用研究を進める。

全球水文モデルの開発において、国を横断して世界を俯瞰するようなデータが存在しないことが課題である。

■ 自然災害

将来推計結果を時空間的により詳細な情報にするダウンスケーリングや、不確実性の定量化や統計解析精度向上のためのアンサンブルシミュレーションが進められている。

米国は、米国版の IPCC 報告書とも呼べる National Climate Assessment を出版しており

基礎研究として高い水準を保っている。応用研究は各州の基金で進められている。欧州は EU の Horizon2020 などの大型プログラムにより EU 全体でのモデル開発が進み、基礎・応用研究ともに強い。日本は、応用研究で、水災害・水資源の分野が世界をリードする状況にある。

特定の自然災害をもたらした極端現象への人間起因の温暖化の寄与を統計的に見積もるイベントアトリビューション（EA）手法が確立され、例えば 2013 年の日本の猛暑での温暖化の影響が定量化されている。洪水・氾濫のシミュレーションの精度は標高や降水量の精度・解像度に大きく依存するが、エラーが多く、高解像度の境界条件データの整備が求められる。

■ 自然生態系

相互作用（たとえば植物と昆虫の共生関係、捕食・被食関係）を形成する生物種間で温暖化に対する反応が異なることが報告されており、生物季節のミスマッチによって個体群の絶滅が予測されている。

米国は、NEON や LTER など、温暖化と生態系の応答を長期的にモニタリングするプログラムがあり財政基盤が確立している。データベースやモデリングでも世界をリードし基礎研究が強い。欧州は研究の歴史が長く、EU の LIFE 気候行動プログラムの実施などで基礎・応用研究で世界をリードしている。日本では、応用研究で気候変動リスク情報創生プログラムや環境省環境研究総合推進費など、大型予算を使ったプロジェクトが開始されている。

生態系変化を予測するためには、気候変動モデルならびにその計算結果のダウンスケーリングが必要になるが、現状の気候変動モデルの出力は粗すぎて平均的な傾向を得ることしかできないことなどが課題である。今後は生態系の回復力（レジリエンス）や閾値を越えた変化（レジームシフト）の検討、気候変動と土地利用変化の影響研究の統合などが求められる。

■ 農林業

温暖化を背景とした気象条件を考慮して作物を管理する必要性が増加し、農業気象データを作成・配信するシステムの開発や、気候変動が農業水利用や水資源に与える影響を評価したマップの作成などが行われている。また、国際的な研究プロジェクトとして、気候変動による農業影響とその対策の評価を目的としたモデルや評価手法を検討するための「農業モデル相互比較・改善プロジェクト（AgMIP : Agricultural Model Intercomparison and Improvement Project）」が組織され、作物別および地域別の研究チームの活動が推進されている。

日本では米や果樹などの多くの品目、米国では主要作物（トウモロコシ、大豆、コムギ）について、定量的な影響評価が行われ、基礎研究が進展している。欧州では緩和・適応技術が進んでいる。

気候変動が農林業に及ぼす影響評価においては、その不確実性の改善が最大の研究課題であり、対象品目の拡大も求められる。

■ 健康・都市生活

熱関連死亡、沿岸洪水死亡、下痢性疾患、マラリア、デング熱、自然災害、低栄養などの影響が研究され、世界保健機関（WHO）のプロジェクトでは、その多くが途上国の小児に大きな影響を及ぼすことが示された。

米国はこれまで考慮できなかった森林火災などの影響定量化手法の開発を進めるなど基礎研究が強い。欧州は、新たな統計モデルの開発で世界をリードし、基礎・応用研究ともに強い。日本は、基礎研究では熱関連死亡の全球定量化、ダウンスケーリング、シナリオ開発を

進め、応用研究では全球気候モデル、都市への精緻化、新たな健康影響予測（例えば河川洪水）などを進めて、欧米と肩を並べる。

従来は複数の要因による影響を全て直線的な関係の集まりとして計算していたが、一般化線型モデルとその拡張による非線形モデルによって直線でない関連も扱えるようになってきた。課題は、都市における微小気候の将来予測とその影響評価への組み込むことや、途上国の公衆衛生インフラ整備が進んでいないため疾病・死亡の報告漏れも多く、健康情報の収集が困難であることである。

■ 極地

北極では急速な温暖化と海氷減少が進行している。南極では温暖化影響が地域により差があるが、氷床変動は全球的な影響をもつ。最近の研究から、南極域の気温変動が他の地域と大きく異なる原因の一つとして、南半球固有の気候変動パターンである南半球環状モード（SAM： Southern Annular Mode）の影響が指摘されている。

米国は、公開性の高い気象数値モデル（WRF： Weather Research & Forecasting Model）の国際共同開発・利用を推進し、基礎研究が強い。応用研究では、北極で自然科学より安全・安心、先住民、コミュニティ支援に重点を置く。欧州は、北極で、EU プロジェクト（DAMOCLES、ACCESS、ICEARC、HORIZON2020、EU Polar-Net）による研究遂行・ネットワーク化を高めており、同プロジェクトでは、経済影響、経済の指導を含む活動も行い、基礎・応用研究ともに強い。日本は、多年の研究の蓄積があり、北・南極に対し、氷床コア解析と合わせた気候モデル研究も国際的評価が高く、無人水中探査（AUV： Autonomous Underwater Vehicle）の活用など新しい技術を検討するなど基礎・応用研究ともに強い。北半球氷床研究に関しては、過去数十万年間にわたる氷期・間氷期変動を、本格的な気候モデルと氷床モデルを組み合わせて再現することに日本の研究者が初めて成功している。この中で入力データとして高精度の CO₂ 変動の年代を使用しているなど、日本のモデル・データ連携研究が世界をリードしている。中国は、北極で、航路、漁場開発などへの関連を強める活動があり、砕氷船を整備し、小型衛星の開発を進め、応用研究が進んでいる。

極域観測の困難さから、氷床減少のメカニズムを理解するための基礎データが圧倒的に不足していることなどが課題である。

3. 大気汚染

	日本		米国		欧州		中国		韓国	
	現状	動向	現状	動向	現状	動向	現状	動向	現状	動向
基礎	○	↓	◎	↑	◎	→	○	↑	○	↑
応用	○	→	◎	→	○	→	△	↑	△	↑

日欧米における大気汚染の共通課題としては、PM_{2.5} と光化学オキシダント（オゾン）である。これらはいずれも大気中の光化学反応により生成される物質が大きく関与しており、原因物質が広域かつ多岐に渡り、生成機構が複雑である。これらの対策のためには汚染物質の大気濃度場の時空間変化が推定できる物理・化学過程を取り入れた大気モデルが必須となり、そのための排出インベントリの整備、モデル開発、将来予測などの大気モデル関連の研究が行われている。

米国では環境保護庁（EPA）などが中心となり、大気モデル関連の研究を進めており、レベルが高い。欧州でも北欧、オランダ、英国を中心に大気モデルの研究が行われている。ま

た国が隣接する欧州では越境汚染に敏感であり、EMEP（The European Monitoring and Evaluation Program）を中心に研究されている。一方、日本では大気汚染の分析や機構に関する基礎研究は行われているが、排出インベントリに用いる固定発生源の測定に関する研究者がほとんどおらず、排出インベントリの整備に課題がある。モニタリング技術、分析技術、排出削減技術は企業が積極的に行っており、途上国が今後の市場となりうる。

短寿命気候汚染物質（SLCPs：Short-Lived Climate Pollutants、メタン、対流圏オゾン、ブラックカーボン）はローカルな大気汚染と地球環境の両方に関わる物質として、特に開発途上国での抑止の観点から最近注目されはじめている。

4. 水質汚染

	日本		米国		欧州		中国		韓国	
	現状	動向	現状	動向	現状	動向	現状	動向	現状	動向
基礎	○	→	○	↓	◎	→	△	↑	△	↓
応用	○	↓	○	→	◎	↑	○	↑	△	→

河川の水質は大きく改善されたが、湖沼の富栄養化による着臭や藻類産生毒物による水道水質問題、海域内湾の底層無酸素水塊による漁業被害が存在する。医薬品および日用品等由来化学物質（PPCPs：Pharmaceuticals and Personal Care Products）やマイクロプラスチックなど新規汚染物質への懸念が国際的に高まり、水域生態系への影響が懸念されている。広域的かつ新たな汚染物質の出現により、水質汚染は複合的な汚染現象へと変化している。

欧州は、PPCPs による汚染など問題自体の発掘に積極的に関与してきた。PPCPs やマイクロプラスチック、農薬、硝化反応阻害物質、アナモックス細菌など、全体的に研究が盛んである。新たな問題の発見と規制の先導によるアドバンテージは大きく、日本は欧米の後追い研究となっている点は否めない。日本はマイクロプラスチック中の化学物質測定やデータベース構築など世界をリードしている領域もあるが、全体的に研究が縮小している傾向にある。米国では、病原性微生物や微量物質の分析法などで優位に研究が進められている。先端的な課題だけでなく、気候変動や資源採掘、地域環境の保全に関連する研究も行われている。

計測技術が進展しており、GC/HRMS（ガスクロマトグラフ/高分解能質量分析）に加え LC/MS/MS（液体クロマトグラフ/タンデム質量分析）による分析が大幅に増加した。現場計測では光学式溶存酸素計など信頼性の高い技術が普及し、データ転送などの情報技術と融合した手法も使用されてきている。メタゲノム解析に基づく環境解析や、バイオテクノロジー、ナノテクノロジー、質量分析技術を用いた病原微生物同定も進展している。

閉鎖性水域での栄養塩管理などの古くから知られた問題では、漁業の振興といった新たな観点の出現により多方面からのアプローチが継続的に必要とされている。突発的な事故で問題が露見することがあり、資源採掘や事故による油汚染は依然として重要なテーマとされている。マイクロプラスチックに関しては、微細マイクロプラスチックの定量法の確立と含まれる化学物質による生物影響の解明が遅れている。今後は、気候変動への対応や生態系の保全、国際連携等の様々な取り組みとも関連した現状の把握と対策も求められている。

5. 土壌・地下水汚染

	日本		米国		欧州		中国		韓国	
	現状	動向	現状	動向	現状	動向	現状	動向	現状	動向
基礎	◎	→	◎	→	◎	→	○	↑	○	→
応用	◎	→	◎	→	◎	↑	△	↑	△	→

土壌・地下水汚染の調査や対策には既に多くの技術が開発され実際に利用されている。しかし、費用・時間・エネルギーなどの課題から、特に原位置での処理を目指した新技術の開発や、環境負荷低減を目指したグリーンレメディエーションの研究開発が行われている。また、自然由来の重金属等による土壌や地下水の汚染、放射性物質による汚染土壌への対応など、現行法の枠組みでは捉えられない新たな問題が発生し解決が求められている。

生物を用いた浄化・修復技術であるバイオレメディエーションは 1970 年代に米国で石油の分解に微生物を利用したのが始まりである。米国では、生物を利用した浄化技術やリスク管理に基づく融合研究が進められ、ポリマーやゼオライト等を添加した高機能型遮水材を対象とした基礎研究が盛んである。実汚染サイトでの検証や実証が可能であり、応用研究の環境として非常に優れている。欧州では特に英国で環境・社会・経済的側面を統合的に考慮したサステナブルレメディエーションの研究開発が加速されており、ISO 規格の提案が進められている。日本には多くの研究開発の推進やその成果がある。減速傾向になりつつあるが、サステナブルレメディエーションコンソーシアムが設立された（産業技術総合研究所）。

要素技術としては、バイオレメディエーションや植物を用いるファイトレメディエーション等の生物的处理、固化・不溶化处理に関する研究が盛んである。新たな動向として、基準のみを考慮して画一的に浄化目標を定めるのではなく、リスク評価やサステナブルレメディエーションのように複数の指標から目標を設定するためのモデル化やフレームワークの確立に向けた検討が多く行われている。自然的な修復機能を活用した科学的自然減衰（MNA：Monitored Natural Attenuation）の適用も注目される。

今後は、効率的かつ低コストな分析手法やオンサイト計測の開発、土地利用形態などの多様な条件や地質などの地域特性への対応、モデリング技術の高度化、地圏環境情報の整備などが課題である。特に、日本は国際的に主流であるリスクベースの対応をとっておらず、リスク評価の考え方の導入とそれに基づく対策の実施が求められる。

6. 物質循環・環境動態

	日本		米国		欧州		中国		韓国	
	現状	動向	現状	動向	現状	動向	現状	動向	現状	動向
基礎	◎	→	○	→	◎	↑	○	↑	△	→
応用	○	→	◎	↑	○	→	○	↑	△	↑

炭素や窒素、汚染物質の動態など天然で起きる現象は非常に複雑であるが、近年の様々な把握手法の発展により実際に起きている現象を原子・分子レベルから理解できるようになりつつある。これらの情報を統合したモデルやシミュレーション技術は、環境汚染、気候変動、資源循環など多くの分野で、物質の動態を予測するために重要とされている。

日本は大気中の GHG 濃度や同位体比測定は最高水準を維持している。米国は観測ネットワーク構築と統合化を積極的に推し進めており、特に衛星観測では世界をリードしている。物質循環モデル研究でも長い歴史を持つ。酸性雨研究や温暖化研究にいち早く取り組み、応用面でも先端的研究を行っている。欧州も炭素および関連する物質循環研究を積極的に推進している。先端的衛星ミッションを成功させて物質循環の広域観測に取り組んできた。中国はモデル分野では独自開発されたものはまだ少ないが、GHG などの物質循環の観測研究を進め、論文数の伸びが非常に大きい。

把握の難しさには大きく 2 つある。第一に、物質が微量なことによる測定の困難さに対し

ては、試料精製と測定技術の向上により化学反応性に富む微量物質の測定精度が大幅に向上し、物質の発生源や移動経路、平均滞留時間などに関する情報も得られるようになった。第二に、物質が広域・大量に存在することによる定量化の難しさに対しては、衛星からのライダー観測による植生バイオマス量の測定や、ハイパースペクトルなどの先進的な光学観測による植生の窒素濃度測定が可能となりつつある。近年、炭素や窒素の循環・動態に関する統合的モデルが開発され、相互作用（例：葉の窒素濃度が光合成能力に与える影響）を考慮した予測が行われる傾向がある。モデル研究におけるプロセス数式化や検証においては、野外での観測データが利用され学際的研究が活発化している。なお、各物質の濃度分析に加えて同位体比の変動の利用が有効であり、同位体地球化学分野は大きく発展している。例えば同位体分析での測定技術の発展は著しく、また同位体比の非質量依存分別（MIF：Mass Independent Fractionation）を用いた研究なども進展している。

物質の環境動態の把握は、その複雑性や空間的不均質性が理解を困難にし、収支の定量化と予測における不確実性の原因になっている。空間的分布を把握するための観測ネットワークの拡充が求められる。そして、物質循環のメカニズムについて、ミクロな視点から理解する方向性と、得られた成果をモデル化し、特定の系、グローバルな系、多圏間の相互作用を含む系に拡張していく2つの方向性が必要である。

7. 健康・環境影響

	日本		米国		欧州		中国		韓国	
	現状	動向	現状	動向	現状	動向	現状	動向	現状	動向
基礎	○	→	◎	→	○	→	○	↗	△	→
応用	○	→	◎	→	○	→	△	↗	△	→

過去の公害事例では、強毒性の少数の汚染物質による健康や生物への影響が問題となったが、先進国ではその可能性は減じている。しかし、残留性有機汚染物質（POPs：Persistent Organic Pollutants）や医薬品および日用品等由来化学物質（PPCPs）による健康・生物影響、特に複合影響や長期影響、継世代影響をはじめ、多くの未解決課題が残っている。生活習慣病やアレルギー疾患などの現代病の激増・悪化と環境要因の関連も指摘され、そのメカニズムも明らかにされつつある。さらに、地球環境問題が健康に与える影響の把握も重要性を増している。

米国は基礎研究が多岐にわたり且つレベルが高い。新しいアプローチが絶え間なく提案されている。ナノマテリアル廃棄物への評価など新しい研究も始まっている。欧州では、EU機関のみならず、オランダやスイス、英国やドイツなど、研究所や大学における研究レベルが高い。質の高い研究成果が発表されており、近年北欧からの報告が増加している。中国では環境問題が深刻であるだけに多くの資源が割かれており、トップレベルの国際学術誌に掲載される論文が増え、着実に実力をつけている。日本も基礎研究のレベルは高く、化学物質影響、気候変動影響などで報告数も増えている。

新たな動向として、代謝過程に関する知識の蓄積と、分析技術の進展により、化学物質への曝露から影響が出るまでの一連の経路を把握するアプローチである AOP（Adverse Outcome Pathway）が注目されている。また、人間活動のデータや地球観測・衛星観測データを利用した健康研究も可能となりつつある。分析技術では多種多様な化学物質の同時分析および未知物質の定性分析技術も向上しつつある。

本領域における研究開発には、細かい実験手法の違いが結果の違いを生むこと、再現性が得難いこと、時間・資金・労力が嵩むこと等の課題がある。今後は、AOPのようなアプローチも必要とされる。また、例えば気候変動の健康影響を考慮すると、前例のない現象を追っており、検証が困難であり、再現性に基づく判断を待つわけにはいかないため、予測力の高いモデルの構築が求められる。

8. 化学物質リスク管理

	日本		米国		欧州		中国		韓国	
	現状	動向	現状	動向	現状	動向	現状	動向	現状	動向
基礎	◎	→	◎	→	◎	↑	○	→	△	↑
応用	○	→	◎	→	◎	↑	△	↑	△	→

管理が必要な化学物質数が飛躍的に増大し、多様な用途と影響範囲に対応する包括的なリスク管理が求められている。さらなる微量分析、対応すべき試料と媒体の増加、対象物質の物性範囲の拡大などの課題に直面し、これらに対処するための研究開発が必要とされている。

日本は高分解の質量スペクトルデータベース MassBank が運用されノンターゲット分析の普及も進む。PBPK（Physiologically-based Pharmacokinetic Model）モデル中心に薬物の体内動態予測が行われ、子供と環境に関する全国調査の実施、大規模モデル開発など基礎研究の水準は高い。北米（特にカナダ）では、超高分離技術と超高分解能質量分析計を合わせた装置開発が進んでいる。ハイスループットスクリーニング研究、理論毒性学的研究ともに基礎レベルは高く（革新的な計算技術は出ていない）、エクスポソーム（化学的、物理的、生物学的、精神的、社会的環境ストレスへの生涯曝露）研究が進む。ToxCast、Tox21、FutureTox II など毒性予測に関する大規模プロジェクトが進められ、基礎から応用への展開が進む。欧州にはノンターゲット分析の手法開発、ソフトウェア・データベース整備、高分解能質量スペクトルデータベースなどでトップクラスの研究機関がある。Solutions や MARS など、分析から毒性までをカバーする世界に先駆けた国際プロジェクトが行われている。有害金属の挙動や安定同位体比の活用は欧州が活発である。

環境分析では多次元分離技術や超高分解能質量分析技術の導入がトレンドである。その他、網羅的一斉分析やパッシブサンプラーなど様々な開発が進められている。安定同位体比分析による有害金属元素の研究も注目される。影響研究では、影響を理論的に解析し新規物質の影響予測等に応用を目指す試みが進められている。リスク評価では、化学物質への曝露から影響が出るまでの一連の経路を把握するアプローチである AOP (adverse outcome pathway) が提示され、毒性試験の省力化、迅速化および動物愛護の観点から期待されている。大きな人間集団、広域／地球規模での研究の必要性から大規模な物質の動態モデルが注目されている。コホート研究も各国で進められている。

今後は、網羅的分析のためのサンプリング技術、高感度化、高極性有機化合物の分析技術、情報解析技術の開発が必要である。また、トレーサビリティ向上や曝露経路の特定につながる分析の高度化と、途上国等での活用が不可欠である。その他、エクスポソーム測定技術の開発、無機的環境における多様な媒体を含む大規模モデル研究などが必要である。

9. 生物多様性・生態系の把握・予測

	日本		米国		欧州		中国		韓国		豪州		カナダ	
	現状	動向	現状	動向	現状	動向	現状	動向	現状	動向	現状	動向	現状	動向
基礎	○	→	◎	→	◎	→	○	↑	△	↑	◎	→	◎	→
応用	○	↑	◎	↑	◎	↑	○	↑	△	↑	◎	↑	◎	→

1992年の地球サミット以降、生物多様性の保全と持続可能な利用を促進することが共通の課題として広く認識され、多様なモニタリングやデータベースの促進、評価手法の検討が進められてきた。

米国では多様な研究が国際連携の下で行われている。カナダを含め DNA バーコーディングの国際的な計画などに進展がみられる。LITER などモニタリングとデータ整備の国際的な発信源であり衛星観測研究もリードしている。応用研究では工学的な環境再生に関する仕組みや指標づくりが目立つ。欧州では従来の生態学的課題の他、特に英国をはじめとして市民調査によるデータ蓄積や観光統計による生態系サービス情報収集などが進んでいる。また、欧州は GBIF、OBIS など世界規模のデータベースを維持している。カナダは FishBase などのデータベース構築、国際ネットワーク構築などで世界をリードしており、Ecopath/Ecosim のような広く使われている生態系モデルも開発している。豪州では特に海洋生態系分野でデータ収集、データベース作成、データ解析、保全への応用のいずれにおいても群を抜く研究グループがある。

新たな動向として、様々な生物と環境に関する局所スケールでのトラッキングやデータロギングが急速に進展している。また、衛星・航空機観測技術と画像解析技術が進展している。特に無人機など、従来の衛星や航空機よりも小型かつ自律的なプラットフォームが急速に普及した。さらに、長期3次元の環境（気象・海洋・地形）データの作成とデータベース化が進んでいる。環境 DNA、メタバーコーディング、現場シーケンス、機能遺伝子の特定など、生物学分野における進展もめざましい。時系列変動データをはじめとする高度な統計学的解析手法の開発も実施されている。

今後は、データ取得の自動化・効率化や、情報基盤の整備（データの流通とキュレーション、前処理の共通化、解析技術の共有、品質管理など）、情報を収集・解析するインフォマティクス技術の開発が求められる。長期的な時系列データが研究開発の進展に重要であり、継続的なモニタリングとデータの整備、その解析技術開発も必要である。統計的解析技術開発とともに、因果関係を解明する技術開発が必要である。

10. 生態系サービスの評価・管理

	日本		米国		欧州		中国		韓国	
	現状	動向	現状	動向	現状	動向	現状	動向	現状	動向
基礎	○	↑	◎	↑	◎	↑	○	↑	△	→
応用	○	↑	○	↑	◎	↑	○	↑	△	→

従来の自然保護の観点のみならず、食料や水の供給、気候の調整、観光の場などの生物多様性を基盤とする生態系から得られる有益な恵みである生態系サービスを持続可能な形で利用する観点から研究開発の必要性が認識されている。

いずれの国・地域においても研究開発の動向は上昇傾向にあるが、歴史の長い欧州では、文化的景観も含めたランドスケープとしての景観とそれがもたらす生態系サービスについて研究が進んでいる。生態系サービスに関する様々な指標が提案され、EU 全体で統合化されると思われる。産業化にむけた取り組みは標準化のための枠組みづくりにおいて開始され、今後さらなる進展が予想される。米国は InVEST など汎用性の高い評価ツールの開発で世界をリードし、そのツールを用いた計算モデルの公開により成果を挙げている。日本では、2010年以降生物多様性と生態系機能、生態系サービスの関係の研究が急速に進められているが、

欧米に比べて基礎データを活用した実用化や政策支援などの実践ツールのレベルで立ち遅れている。

様々な指標の検討や評価の実施が行われている。例えば、生態系サービスを生み出すポテンシャルを示す「生態系容量」と、ある利用パターンを前提とした場合に期待できる「生態系サービスの期待フロー」の両面から計測することで、地域の生態系サービスの資産だけでなく効率的で持続可能な利用を評価するものや、バイオバンキングなどの生物多様性の価値改良と維持政策に結びつける定量評価、サンゴの価値を定量化して保全と観光を繋げた生態系アプローチなどがある。企業でも CSR 側面のほか、近年では、事業の持続性の側面として生態系サービスの評価や管理が重視されている。

課題として、生態系サービスを精度よく計算するための基礎データの不足や、適切な評価指標の検討、受益対象範囲の選定、サービスのダブルカウントの扱い、複数の生態系サービス間に存在するシナジー効果（相乗効果）とトレードオフ効果（相反効果）の検証、金銭換算技術の開発と経済システムへの内部化（取り込み）等が挙げられる。

11. 水循環

	日本		米国		欧州		中国		韓国	
	現状	動向	現状	動向	現状	動向	現状	動向	現状	動向
基礎	○	→	◎	→	○	→	○	→	○	→
応用	○	→	◎	↗	◎	→	○	↗	△	→

人口の増加や経済の発展により世界的に水利用は依然として増加しており、水資源が将来持続的に得られるか総合的なシナリオ分析を実施することが要請されている。水処理技術には、嫌気好気法、硝化脱窒循環法や嫌気無酸素好気法などの生物学的栄養塩除去プロセスや膜分離活性汚泥法の導入が進んできている。また、省エネルギーとエネルギー回収の観点から、ANAMMOX（Anaerobic Ammonia Oxidation）法による窒素除去や UASB（Upflow Anaerobic Sludge Blanket）法などの嫌気処理、DHS（Down-flow Hanging Sponge）などの中間処理が注目されている。再生水製造技術に関しては、近年、工場で使った水を工場内で再利用するだけでなく廃水すらしない（ゼロリキッドディスチャージ）といった動きもある。

国際的には、水問題を食糧問題およびエネルギー問題とリンクさせて解決する考えが強まっており、米国を筆頭に、ドイツ、英国は、“Food-Energy-Water Nexus”の概念を提唱している。この観点のもとでは、廃水処理を従来の水処理プラントの概念から、新たにエネルギー製造プラント、栄養分製造プラント、水製造プラントとして捉え直すパラダイムシフトが起きており、そのための技術革新が必要となっている。また、全球水文モデルの研究開発では、先進国が継続的・精力的に取り組み、急速に進展している。WaterGAP（ドイツ）、LPJmL（ドイツ）、PCR-GLOBWB（オランダ）の開発チームには多くの人材が集まっており、PNNL（米国）もモデル開発を急ピッチで進めている。日本において、全球モデルに関する基礎研究は、現象・過程の理解や水循環・水資源の基本概念の提唱、全球スケールの基礎データの構築という点において、貢献はゼロではないが、あまり盛んではない。

今後は、新たな処理技術（促進酸化法や新規膜処理）や社会変化で発生する新規有害物質や新種のウイルス・微生物への対応、迅速簡便な評価・計測技術が必要である。全球水文モデルでは国を横断した世界的なデータが存在しないことが課題であり、空間解像度の目標値として 30 秒（現在の約 60 倍）が提唱されている。

12. 農林水産業の環境研究

		日本		米国		欧州		中国		韓国	
		現状	動向	現状	動向	現状	動向	現状	動向	現状	動向
農業	基礎	◎	↑	◎	→	○	↑	○	→	△	→
	応用	○	↑	◎	→	◎	↑	○	→	△	↑
林業	基礎	○	→	◎	→	○	→	△	→	△	→
	応用	○	↑	◎	↑	◎	↑	△	→	△	→
水産業	基礎	○	→	◎	↑	◎	→	○	→	○	→
	応用	○	→	◎	→	○	↑	△	→	△	→

気候変動影響のなかでも、生態系を基盤とする農林水産業には極めて大きな影響が予測されている。食料の安定供給と安全確保は、農林水産分野に課された最大の使命であり、環境研究と環境技術開発の推進により、人間社会の持続的発展を支える生物資源生産システムを構築していくことが急務となっている。

これらのシステム構築のために求められる主な技術は、現状把握と予測に必要なデータ収集とモデリングである。農業では土壌炭素の増減などからの GHG 発生量の評価、林業では光学衛星を用いた観測に加え、雲を透過するマイクロ波を用いたセンシング技術、水産業では、生物資源・環境系の現象解析へのモデリングの導入などの研究が行われている。日本は国際宇宙ステーション (ISS) に搭載する植生 LiDAR の開発 (MOLI ミッション) に取り組み、2021 年の打ち上げを目指している。現在、多くの国際プロジェクトが実施されており、例えば、気候変動による農業影響に関するモデルや評価手法を検討する「農業モデル相互比較・改善プロジェクト (AgMIP)」、政府間合意に基づく自発的な研究ネットワークである「農業分野の GHG に関するグローバル・リサーチアライアンス (GRA: Global Research Alliance)」、地球環境変化や人為的な環境変化に対する海洋生態系の応答を的確に予測することを目指す IMBER (Integrated Biogeochemistry and Ecosystem Research) などがある。

農業での国際比較において、日本は多くの品目で定量的な気候変動への影響評価が行われ、農業の持つ多面的機能の評価や分布型水循環モデルの開発、水田の洪水防止機能等を利活用した超過洪水管理等で世界をリードする研究を展開している。米国は全球気候モデル (GCM: Global Climate Model) や流出解析モデルの構築等の基礎的解析技術については世界をリードしている。各種リスクの考え方についても発展している。欧州では、農業水資源に関する基礎的分野で、ドイツ、英国、フランスが抜きんでいる。緩和や適応の応用研究も活発である。

林業では、米国が衛星モニタリングの膨大な研究の蓄積があり、基礎・応用共に強い。欧州は CLT (Cross Laminated Timber) や木質バイオマス利用で世界をリードし、応用研究・開発が進んでいる。航空機 LiDAR の応用研究は 2000 年代初頭より積極的に行われ、特に北欧で実用段階に至っている。日本は、自然森林植生の気候変動の影響評価については研究が進んでいるが、人工林への影響評価研究は開始されたばかりである。モニタリングでは ALOS-2 PALSAR という合成開口レーダを用いたセンサ開発が特徴的である。CLT については欧州に続き研究が進んでいる。

水産業では、米国が基礎・応用共にリードしている。海洋大気庁 (NOAA) 等により水産資源や環境のモニタリングとデータ解析 (CalCOFI) や、気候変動影響のモニタリング (PaCOOS) を継続している。生物等を対象とした行動追跡技術 (バイオロギング) では世界の研究をリードし、漁業生態系管理計画を世界に先駆けて策定している。欧州もドイツ、英国、ノルウェー等を中心に、ICES、IMBER 等の国際的な研究組織で世界の研究をリード

している。日本は素過程や要素技術の研究は進んでいるが、それらを統合した学際分野や境界領域の研究は遅れている。バイオリギングの水産資源研究への応用例はまだ少なく、海洋研究やモデリング等との連携も緒についた段階である。時系列評価の基礎となる継続的・体系的な生物データの基盤が貧弱である。国際共同研究プログラム（PICES や IMBER）では数値モデル開発等で世界をリードしている。

今後は、不確実性の改善が最大の課題であり、将来気候の予測と農林水産業の応答予測の双方について、さらなる精緻化が必要である。農業水資源に関しては、気候モデルと分布型水循環モデルの一体化が要請される。森林・林業分野の環境研究では、森林が流域の水循環に及ぼす影響の広域的・長期的予測手法の確立や、地域で多面的機能（水源かん養や土砂災害防止、物質生産等）を発揮させるための、複数の機能の相互関係（トレードオフ、コベネフィット等）の解明と多面的機能の総合的な評価手法の開発が求められる。水産業では、生態系モデルの検証に必要な海域の生物情報の基盤が日本は極めて貧弱であることが課題である。

13. リサイクル・廃棄物処理

	日本		米国		欧州		中国		韓国	
	現状	動向	現状	動向	現状	動向	現状	動向	現状	動向
基礎	○	→	○	→	◎	↑	○	↑	△	→
応用	○	→	△	→	◎	↑	△	↑	△	→

リサイクル・廃棄物処理の技術は、未利用資源の活用を可能にするために極めて重要であり、有効活用可能な社会システムの構築には必要不可欠である。先進諸国においては、持続可能社会の実現に向け資源制約の解決手段として、都市鉱山に代表される質の高い資源循環の構築が期待されている。

対象物の物性を検出して個別選別する、リサイクルに特化した選別技術（Sensor based sorting）が 1980 年ごろから開発・導入され始め、近年においても発展し続けている。プラスチックのリサイクルでは、選別技術・再製品化技術が高度化し、スケールメリットを活かしてコスト削減を図る試みが出てきている。近年は混合プラスチックの分解触媒の開発が行われ、実際に排出される廃プラ実態に近い研究開発対象へと移行してきている。焼却残渣の処理については、セメント原料としての有効利用のため、高効率の塩素の除去技術が求められている。

EU では、Horizon 2020 の Resource Efficiency and Raw Materials 等に多くの関連プロジェクトが立ち上がっている。欧州は個別選別の開発が盛んで世界トップの水準にある。集合選別技術は他国と大差ないが、これらをシステム化するプラントエンジニアリングに優れ、選別システム単位での販売が盛んである。EU では、技術開発もさることながら、規準や政策決定に資する情報網構築に勢力が注がれているのが特徴である。米国は世界トップの鉱山向け粉砕・選別技術を有しポテンシャルは高いが、都市鉱山向け技術開発の研究者人口は少なく、DOE（エネルギー省）の Critical Materials Institute でも、粉砕・選別技術の開発は盛んではない。ただし 2016 年にはリサイクルやリユースに関する 70 億円規模のプログラム REMADE を開始した。日本の個別製品に対するレアメタルリサイクル技術は進んでおり、プラスチックリサイクルに関しては 1990 年代より先進的技術開発に向けた基礎研究が継続的に行われている。さらに、動脈産業側と静脈産業側が一体となった高度な資源循環システ

ムの構築を目指して、資源リサイクルの効率化・高度化を図る研究実証事業を実施している。
リサイクルにおいて技術と制度は両輪であり、制度面が担う役割も極めて重要である。

14. 資源・生産・消費管理

	日本		米国		欧州		中国		韓国	
	現状	動向	現状	動向	現状	動向	現状	動向	現状	動向
基礎	◎	→	◎	→	◎	↑	○	↑	○	→
応用	○	→	◎	↑	◎	↑	○	↑	△	→

複雑かつ拡大化するサプライチェーンにおいて、適切に資源・生産・消費を管理するためには、俯瞰的な視野における全体の可視化と、科学的な分析手法によるフローやストックの定量化が必須である。なかでも LCA（Life Cycle Assessment）は、製品のライフサイクル全体を対象とした環境負荷や社会的影響、コストの定量的分析を行う手法として開発され利用されている。近年、LCA では基礎的な方法論の深化と共に、応用研究・開発の推進が積極的に進められ、多様な評価対象で活用されている。ライフサイクルを通じた環境影響を見る環境 LCA（ELCA：Environmental LCA）や、人権、紛争、文化遺産等も含め、多様な利害関係者に結びつく社会影響を見る社会 LCA（SLCA：Social LCA）にも関心が高まっている。

欧米は基礎・応用共に強く、欧州は LCA や環境負荷評価の指標開発を企業や研究機関などが継続的に行い、世界最大の LCA データベースの 1 つである ecoinvent やソフトウェア SimaPro などに応用研究が大きく広がりを見せている。物質フロー分析（MFA）では、ブッパタール研究所（ドイツ）、IFF（オーストリア）、ライデン大学（オランダ）、ポツダム気候研究所（ドイツ）、NTNU（ノルウェー）を中心に盛んである。米国も国際的議論の中心となっており、資源供給側の Criticality に関わるイエール大学の研究や、世界の主要都市のメタ簿リズム計測とそのデータベース構築などが注目される。日本においては、石油天然ガス・金属鉱物資源機構（JOGMEC）による鉱物資源マテリアルフロー情報が継続的に整備され、日本 LCA 学会、資源エネルギー学会、廃棄物資源学会、土木学会環境システム委員会等を中心に学術的議論が進んでおり、基礎研究は進展している。

今後は複雑なシステムを科学的正確性を失わずに簡易に捉える方法や、多面的な分析を解釈可能な形に変換する方法が必要になる。また、ライフサイクル情報の公開、さらに、環境負荷発生や資源フローに関する情報について、国よりも詳細な地域レベルでの解像度や網羅性が必要である。

15. 環境都市

	日本		米国		欧州		中国		韓国	
	現状	動向	現状	動向	現状	動向	現状	動向	現状	動向
基礎	◎	→	○	→	◎	↑	△	↑	◎	→
応用	○	↑	○	↑	◎	↑	◎	↑	○	↑

21 世紀に入り、産業化と人口増加を支えてきた都市は新たな規範の下での計画、評価、再構築が必要とされている。変化への対応を社会全体で一律に達成するのではなく、身近なスケールで「社会転換（社会イノベーション）」として具体化し、それを「モデル（模範）」として国や世界に広げる試みが世界各地で広がっている。これまでの生産や暮らしの空間としての都市に加え、環境保全の先導的な貢献を担うと共に新しい革新（イノベーション）を生み出す場として捉え、理論的に目標を設計し、実践につなげる新しい社会科学・工学融合型

の研究が広がっている。

欧州は LCA やエコロジカル・フットプリント（EF：Ecological Footprint）などの評価手法を開発してきた。近年は気候変動対応のための新たな都市計画論に対する要請が急速に広がり、それに応える研究展開や、適応に向けた都市転換の事業化の動きが見られる。中国では LCA や EF などを用いた都市の評価研究が急速に進み、韓国でも環境都市の基盤整備が進められている。日本では、LCA などの様々な環境評価論の都市への展開が進められてきた。さらに、強靱な国土や災害レジリエンスなどを含む、より包括的な環境価値を定量化する理論の開発とともに、社会イノベーションなど実践を支援する方法論を含む産学連携研究も広がっている。

観測技術の進展により様々な環境情報が入手可能となり、データの蓄積やその解析技術が発展している。近年は土地利用や人の移動に関する情報も活用されるようになり、自然科学的な情報だけでなく社会経済的な情報も含めて総合的に解析する様々な研究開発が行われている。多種多様な要素が複雑に関係し、影響しあう都市研究において、総合的な把握は重要であり、こうした動向は一層加速するものと考えられる。

高齢化や人口減少、強靱化など地域的な課題と共に、低炭素、資源節約、生態系保全などの共通する課題の解決を含めた将来の都市像を総合化して描くこと、また、重大な中長期の将来負担を避けるために、身近な負担水準などを科学的、定量的に設定し提示することが課題である。今後は、様々な個別技術を地域特性等を踏まえてシステムとしてくみ上げ、適正な効用と負担を共有する技術や政策評価の理論と手法の開発が求められる。また、エネルギーや IT 分野でのスマートシティ検討と、都市・地域計画分野でのコンパクトシティ検討の連携も求められる。

（２）各国・地域の動向

1. 日本

日本は全体的にレベルの高い研究開発が行われているが、少数精鋭であり、生物多様性・生態系区分では欧米豪加が優位な傾向がある。また、体制、基盤、継続性、システム化、実社会での応用、制度での活用、新たな概念の創出などが課題となっている。強みがある領域や注目動向は以下の通りである

気候変動区分について、GHG の観測衛星では GOSAT を持ち基礎研究で世界の中心にいる。気候変動影響予測・評価について、気候変動リスク情報創生プログラムや環境省環境研究総合推進費などの大型プロジェクトが行われている。農林業では多くの品目で定量的な影響評価が行われ基礎研究が進展している。健康・都市生活では、熱関連死亡の全球定量化、ダウンスケーリング、シナリオ開発の基礎研究、全球気候モデル、都市への精緻化、新たな健康影響予測（例：河川洪水）などの応用研究を進め欧米と肩を並べる。極地に関しては多年の研究の蓄積があり、北・南極で氷床コア解析と合わせた気候モデル研究も国際的評価が高く、AUV（Autonomous Underwater Vehicle、無人水中探査機）の活用など新しい技術を検討するなど基礎・応用研究ともに強い。

環境汚染・健康区分について、土壌・地下水汚染では、多くの研究開発の推進やその成果があるが減速傾向になりつつある。しかし、サステナブルレメディエーションコンソーシ

アムが設立され（産業技術総合研究所）、今後の進展が期待される。物質循環・環境動態では、大気中の GHG 濃度や同位体比測定は最高水準を維持している。健康・環境影響では基礎研究のレベルは高く、化学物質影響、気候変動影響などで報告数も増えている。化学物質リスク管理では、ノンターゲット分析の普及、薬物の体内動態予測、出生コホート調査（出生から成長過程を追跡する大規模疫学）、大規模モデル開発など基礎研究の水準は高い。

生物多様性・生態系区分は近年急速に進展しているが、長期的なモニタリング基盤やデータ基盤が脆弱である。欧米に比べて基礎データを活用した実用化や政策支援などの実践ツールのレベルで遅れている。

循環型社会区分では、農林水産業の環境研究において、農業の持つ多面的機能の評価や分散型水循環モデルの開発、水田の洪水防止機能等を利用した超過洪水管理等で世界をリードする研究を展開している。資源・生産・消費管理では、LCA（Life Cycle Assessment）、MFA（Material Flow Analysis）、MSFA（Material Stock / Flow Analysis）ともに、基礎研究は進展し、応用研究・開発の基盤が強化されてきている。環境都市研究では、様々な評価手法が都市に展開されてきた。災害レジリエンス等を含む包括的な定量化理論の開発や、実践を支援する方法論を含む産学連携研究も広がっている。

2. 米国

米国は取り上げた全ての領域において、高く穴のない研究開発レベルを維持している。強みのある領域と概要は以下の通りである。

気候変動区分では、気候変動予測に関する観測において、雲・エアロゾルの三次元情報が得られるレーザレーダ（LIDAR）を用いた大規模な基礎研究を行い、衛星開発で培った技術を地上展開する企業が現れてきている。また地球システムモデルでは宇宙航空局（NASA）や大気研究センター（NCAR）など多数の研究機関が基礎・応用研究に取り組み世界をリードしている。気候変動影響予測・評価について、水循環では衛星情報を利用した全球スケールの基本データの構築などの基礎研究、自然災害の基礎研究では米国版の IPCC 報告書とも呼べる National Climate Assessment の出版、応用研究は各州の基金で研究が推進されている。自然生態系では NEON や LTER など、温暖化と生態系の応答を長期的にモニタリングするプログラムがあり、財政基盤が確立し基礎研究が強い。農林業では、主要作物（トウモロコシ、大豆、コムギ）について、定量的な影響評価が行われ、基礎研究が進展している。健康・都市生活では森林火災などの影響定量化手法などの開発、極地では公開性の高い気象数値モデル（WRF: Weather Research and Forecasting）の国際共同開発・利用を推進など、いずれも基礎研究が強い。

環境汚染・健康区分について、大気汚染では、環境保護庁（EPA）などが中心となり大気モデル関連の研究を進めている。土壌・地下水汚染では、バイオレメディエーションとして生物を利用した浄化技術やリスク管理に基づく融合研究が進められ、ポリマーやゼオライト等を添加した高機能型遮水材を対象とした基礎研究が進められている。物質循環・環境動態では観測ネットワーク構築と統合化を積極的に推し進めており、特に衛星観測では世界をリードしている。また物質循環モデル研究でも長い歴史を持つ。環境・健康影響では、基礎研究が多岐にわたり、ナノマテリアル廃棄物への評価など新しい研究も始まっている。化学物質リスク管理では、ハイスループットスクリーニング研究、理論毒性学的研究とともに基礎レ

ベルが高く、エクスポソーム研究が進む。毒性予測では ToxCast、Tox21、FutureToxII など大規模プロジェクトが進められ、基礎から応用への展開が進む。同位体比研究、大規模疫学研究ともに展開されている。

生物多様性・生態系区分において、生物多様性・生態系の把握・予測では、国際連携の下で多様な研究が行われている。例えばカナダを含め DNA バーコーディングの国際的な計画、また、モニタリングとデータ整備の国際的な発信源であり衛星観測研究もリードしている。応用研究では工学的な環境再生に関する仕組みや指標づくりが目立つ。生態系サービスの評価・管理では、空間明示型で汎用性の高い生態系サービス評価ツール（InVEST など）の開発、気候変動と結び付けた生態系の活用についての基礎的研究などが進んでいる。

循環型社会区分の水循環では、米国などが水問題を食糧問題およびエネルギー問題とリンクさせて解決する考えとして Food-Energy-Water Nexus” の概念を提唱している。これを受けてエネルギー省（DOE）のパシフィックノースウェスト国立研究所（PNNL）などで、人間活動を含む全球水文モデルの開発を急ピッチで進めている。農林水産業の環境研究では基礎・応用共に進展している。農業については、全球気候モデル（GCM）や流出解析モデル構築等の基礎的解析技術について世界をリードし、各種リスクの考え方についても発展している。林業では衛星モニタリングの膨大な研究の蓄積がある。水産業では海洋大気庁（NOAA）等によりモニタリングとデータ解析が継続され、バイオロギングでは世界をリードし、漁業生態系管理計画を世界に先駆けて策定している。資源・生産・消費管理では、エール大学をはじめ、国際会議やジャーナルで国際的議論の中心となっている。応用研究では、戦略物質の管理に関わる優先順位を供給リスクと重要性に応じて評価しており、政策・意思決定プロセスへの積極的な活用がなされている。またウォルマートによる Hotspot 分析や、国立再生可能エネルギー研究所（NREL）による LCA データベースの公開なども進んでおり、環境情報の開示に関する応用研究・開発は大きく進展しつつある。

3. 欧州

欧州は、環境分野の全区分において研究開発のレベルが高く活発である。技術開発だけでなく、ISO 規格や基準など政策決定に資する情報構築を進め、ビジネス展開までを視野に入れた戦略を持つ。

気候変動区分では、EU が推進する気候変動予測の Copernicus 計画で衛星データの実利用を推進する観測での応用研究が急速に進む。地球システムモデル（ESM）では、7つの ESM 開発チームが EU のプロジェクトである CRESCENDO に参加し、基礎・応用研究共に強い。気候変動影響予測・評価では、「LIFE 気候行動プログラム」にて、EU 全域で気候変動を克服するための革新的な手法を開発し実施している。全球水文モデルや、農林業における緩和・適応技術、健康・都市生活影響における新たな統計モデルの開発などで世界をリードし、北極では EU プロジェクトにより経済影響等を含む活動も実施している。

環境汚染・健康区分では、国が隣接する欧州では越境汚染に敏感で、北欧、オランダ、英国を中心に大気汚染モデルの研究が行われている。医薬品および日用品等由来化学物質（PPCPs）による水質汚染など問題自体の発掘に積極的に関与し、PPCPs やマイクロプラスチック、農薬、硝化反応阻害物質、アナモックス細菌など、全体的に研究が盛んである。問題の発見と規制の先導によるアドバンテージは大きい。土壌・地下水汚染に関して、ポリマ

一系材料を混合した遮水材の基礎研究や、汚染土利用盛土での挙動評価等が盛んに行われている。英国を中心に環境・社会・経済的側面を統合的に考慮したサステイナブルレメディエーション、ドイツを中心に PCB や多環芳香族炭化水素（PAH）およびダイオキシンなどの ISO 規格の提案が進められている。炭素および関連する物質循環研究を積極的に推進し、先端的衛星ミッションを成功させて物質循環の広域観測に取り組んできた。化学物質リスク管理では、欧州にはノンターゲット分析の手法開発、ソフトウェア・データベース整備、高分解能質量スペクトルデータベースなどでトップクラスの研究機関がある。Solutions や MARS など、分析から毒性までをカバーする世界に先駆けた国際プロジェクトが行われている。

生物多様性・生態系区分では、研究者の層が厚く、基礎から応用までの人材がそろそろ。従来の生態学的課題の他、特に英国をはじめとして市民調査によるデータ蓄積や観光統計による生態系サービス情報収集などが進む。GBIF、OBIS など世界規模のデータベースを維持している。歴史の長い欧州では、文化的景観も含めたランドスケープとしての景観とそれがもたらす生態系サービスについて研究が進み、生態系サービスに関する様々な指標が提案されている。

循環型社会区分では、水問題を食糧問題およびエネルギー問題とリンクさせて解決する考えが強まっており、ドイツ、英国などは、“Food-Energy-Water Nexus” の概念を提唱した。人間活動を含む複数の全球水文モデルが開発され、ウォーターフットプリントなど新しい基本概念の提唱と普及には圧倒的な伝統と力がある。農林水産業に関しては、農業における水資源や気候変動の緩和・適応研究、CLT（Cross Laminated Timber）や木質バイオマス利用などに強みを持つ。リサイクル・廃棄物処理では、Horizon 2020 で多くのリサイクル関連プロジェクトが立ち上がっている。特に個別選別技術が世界トップの水準にある。技術のシステム化にも優れている。技術開発だけでなく規準や政策決定に資する情報網構築が進んでいる。資源・生産・消費管理では、評価指標開発を継続的に行い、世界的なデータベースやソフトウェアにより応用にも広がりを見せている。欧州委員会は、GHG 以外の指標も考慮した「製品の環境フットプリント（PEF）」と「組織の環境フットプリント（OEF）」に関する方法論の開発を行い、全球的環境フットプリント研究が進んでいる。気候変動対応のための新たな都市計画論に対する要請が急速に広がり、それに応える研究展開や、適応に向けた都市転換の事業化の動きが見られる。

4. ドイツ

ドイツは、何れの区分においても研究開発のレベルが高く、注目すべき活動を多数展開している。

気候変動区分として、気候変動予測、気候変動影響予測・評価の領域で、日米との比較で高い研究開発レベルを維持している。気候変動予測では、マックスプランク研究所などが中核となり、今後の温暖化抑制のための社会経済シナリオ立案に向けた気候変動モデルを開発する EU プロジェクト（CRESCENDO）に参画している。気候変動影響予測・評価では、フランクフルト大学やボン大学、ポツダム気候影響研究所などが、世界をリードして人間活動を含む全球水文モデルを現在も精力的に開発・改良している。極地の基礎・応用研究にも強みを持ち、南極内陸の観測点としてコーネン基地を、その他、観測用航空機も所有し、2006～2007 年には日独共同航空機観測を実施している。

環境汚染・健康区分では、水質汚染、土壌・地下水汚染などの領域において強みがある。水質汚染では、ドイツ連邦教育研究省（BMBF）の提唱による「海洋環境におけるマイクロプラスチック」が欧州の共同研究イニシアチブ **Healthy and Productive Seas and Oceans** の枠組みの中で行われている。アルフレド・ヴェーゲナー研究所ヘルムホルツ極地海洋研究センターがマイクロプラスチックの分析及び測定方法に関する統一的標準に関する作業を統括し、ヘルムホルツ環境研究センターがプラスチック廃棄物の分散経路、分解及び有毒性等に関する研究を統括している。土壌・地下水汚染では、ドイツが中心となって、PCB や多環芳香族炭化水素（PAH）およびダイオキシンなどの汚染物質に係る ISO 規格の提案を進めている。

循環型社会区分では、水循環、農林水産業の環境技術、リサイクル・廃棄物処理、資源・生産・消費管理などの領域で、優位性がある。水循環では、全球水文モデルで世界をリードする。また、ドイツの大学が中心となり、し尿分離、雑用水利用の研究や地下水の微量化学物質の影響評価や動態研究を進展させている。農林水産業の環境研究では、農業水資源の社会システムの評価に強みを持ち、農業水資源解析技術では、ポツダム気候影響研究所が農業水資源やその社会経済的な影響評価で世界トップレベルにある。水産業の基礎研究でも、国際海洋探査委員会海洋生物地球化学・生態系統合研究等の国際的な研究活動で世界の研究をリードしている。リサイクル・廃棄物処理では、世界トップの都市鉱山向け粉碎・選別技術を有し、国としてのポテンシャルは極めて高い。プラスチックリサイクルに関しても、基礎研究が盛んに行われ、特に 2010 年以降研究文献数の増加傾向が顕著に見られる。資源・生産・消費管理では、ブッパタール研究所、ポツダム気候研究所が中心となって物質フロー分析関連の研究を推進している。

5. 英国

英国は環境分野の研究開発に歴史と蓄積があり、特に気候変動や生物多様性・生態系などの区分で強みを持つ。

気候変動については、ハドレーセンターなどが早くから地球システムモデル（ESM）の開発を手がけており、国際的な研究コミュニティにおいても牽引役となっている。大気汚染では、大気モデル開発の研究が以前より行われておりレベルが高い。近年は、土壌・地下水汚染について、環境面・社会面・経済面も統合的に考慮したサステナブル・レメディエーション（SR）の研究開発が加速されており、英国を中心に提案された SR の ISO 規格の提案が進められている。国際窒素管理システム（INMS）を英国の研究者が主導するなど物質循環に関する取り組みもある。生物多様性・生態系分野では、長期モニタリング結果が蓄積されており、様々な分類群に対して解析が実施され、温暖化による生態系の変化を明らかにしている。従来の生態学的な取り組みのほか、市民によるデータの蓄積や、観光統計による生態系サービス情報の収集、生態系サービスの貨幣換算評価も進められている。環境都市研究では、近年は気候変動への適応に向けたテムズ川 2100 年計画が進められている。

6. フランス

フランスは世界の三大水メジャーのうちの 2 つを持ち、また、農業大国でもあり、特に水循環や農業の領域で存在感を示している。注目される取り組みとして、気候変動区分では、

2020年に予定されているCO₂の排出と吸収を地球規模で把握する衛星MicroCarbの打ち上げが挙げられる。環境汚染・健康区分では、子どもの出生から成長過程を追跡する大規模疫学である出生コホート調査として、「Elfe」が実施されており、150名以上の研究者が参画して様々な環境の影響を追跡・調査している。循環型社会区分では、水循環分野において水メジャーが中東、アジア、アフリカへの展開を意識した応用研究を推進している。農業では各種予測技術に強みを持つ。農業水資源の解析技術では国立科学研究センター（CNRS）や国立環境・農業科学技術研究所（IRSTEA）の活動が代表的である。

7. 中国

全体的に他の国・地域と比較して顕著な成果は見られないものの、各分野において精力的に研究が進められている。

気候変動区分では、GHG観測を含む数多くの地球観測衛星の打ち上げ計画がある。7グループが地球システムモデル（ESM）開発に取り組み、国家的に気候科学分野のテコ入れを図っており、今後顕著な成果を見せる可能性がある。極地研究においては、北極で、航路、漁場開発などへの関連を強める活動があり、砕氷船を整備し、小型衛星の開発を進め、応用研究が進んでいる。

環境汚染・健康区分では、土壌・地下水汚染に係る基礎研究の予算が増大し、中国科学院傘下の研究所や各地の大学で認定された「国家重点実験室」研究が盛んに進められている。物質循環・環境動態では、全土にChinaFluxを設立して急速に観測点数を増やし、GHGなどの観測研究を進め、データ解析分野でも国際的に存在感を高めている。健康・環境影響では、問題の深刻さから多くの資源が割かれ、着実に実力をつけている様子が伺える。

生物多様性・生態系区分では、急速に研究者人口が急増し、データベース構築も組織的に進められている。遺伝データの抽出等でも安価に実施できる民間企業などがあり、急速に研究推進体制が整えられたと思われる。生態系サービスの評価についても上昇傾向で、衛星画像解析を使った広域な土地利用変化と生態系サービスへの影響に関する研究、自然湿地や復元された湿地に関する生態系サービス評価が実施されている。

循環型社会区分では、第十二次五カ年計画（2011-2015年）での再生水利用の目標を達成するため、膜分離活性汚泥法（MBR：Membrane BioReactor）などの実証規模研究を実施している。再利用の国際標準ISO/TC 282では、日本、イスラエルと共に幹事国を務めている。水処理の研究開発の焦点が、処理費用の削減、処理施設から生み出される再生水、汚泥、バイオガスなどの利用回収技術に移りつつあり、基礎研究開発が大学中心に目覚ましい。リサイクル・廃棄物処理では、現状の技術水準は決して高くないが、集約的な研究開発が進められており、諸外国の技術の分析・導入が進められている。資源・生産・消費管理では、清華大学、東北大学、中国科学院が積極的に取り組んでいる。中央政府が関心を持つ希少資源の管理・保全については、マテリアルフロー研究が活発化してきている。環境都市の研究では、特別市など限られた地域での研究に留まるものの応用研究で顕著な活動・成果が見えている。LCA、エコロジカルフットプリントなどの手法を用いた都市に関する評価研究が急速に進んでいる。21世紀以降の行政主導による新都市開発では、必ず環境都市や生態都市であることが求められている。

8. 韓国

環境都市において基盤整備や評価研究、気候変動影響の展開が顕著とされている以外に、世界をリードする研究開発や成果、大きな特徴は見られない。注視すべき動向として以下を挙げる。

大気汚染ではモニタリングをベースとした研究から近年はモデルによるシミュレーション研究も増加している。水循環では再生水と海水淡水化の大型研究プロジェクトが継続して実施され研究レベルは高い。科学技術研究所（KIST）でナノテクノロジーを利用した再生水技術の基礎研究を実施している。農業における環境研究では、水資源管理としての農業用ダム改修を全国一斉に実施・完了するなど、応用研究・開発のスピードが速い。

（3）世界の注目動向（科学技術トピックス）

各区分における近年の主な注目動向（科学技術トピックス）や研究開発プロジェクトは以下の通り。（下記以外にも、多くの優れた研究開発が行われている。）

1. 気候変動区分

- GHG の観測衛星では、GOSAT（2009 年）[日本]、OCO-2（2014 年）[米国]、TanSat（2016 年）[中国] が打ち上げられ、今後は、GOSAT-2（2017 年）[日本]、MicroCarb（2020 年）[フランス] が予定されている。
- 雲やエアロゾルの三次元情報や粒径情報をより直接的に得られるレーザレーダ（LIDAR）の利用検討が進められてきた。2015 年には CATS（Cloud-Aerosol Transport System）が国際宇宙ステーション（ISS）に取り付けられた [米国 NASA]。大気ライダー ATLID が搭載される EarthCARE 衛星が 2018 年打ち上げを目指し開発中である。[JAXA・欧州宇宙機関（ESA）]
- 衛星からの森林炭素蓄積（バイオマス）推定を行う GEDI ミッション（2019 年）[米国 NASA]、MOLI ミッション（2021 年）[JAXA] が予定されている。
- 総合的な地球観測計画である欧州委員会の Copernicus 計画では、衛星・航空機・船舶・地上局等の様々なソースからデータを収集し、環境および安全保障に関する各種サービスを通してユーザに最新情報を提供する目的で実施されている。
- 地球システムモデル（ESM）開発では、現在多くの研究機関が窒素循環過程導入に取り組んでいる。多数のサブモデルの結合のためにカプラーとよばれるソフトウェア開発も盛んになっている。サブモデルの結合作業の支援や膨大なデータの保管・配信・解析を行うシステム開発が、OASIS [欧州科学計算研究訓練センター（CERFACS）・フランス国立科学研究センター（CNRS）]、ESMF [米国 NASA 等] などで行われている。
- 英国ハドレーセンターやドイツマックスプランク研究所など 7 つの ESM 開発チームが参加する大規模な EU のプロジェクト CRESCENDO が、ESM 開発・検証や温暖化緩和策立案への有効活用を目指し推進されている。
- COP21 後の各国の行動を支援するために、大気組成計測とインベントリ（排出目録）／社会経済データの統合に取り組む GHG の情報システムプロジェクト IG3IS が実施されている。[世界気象機関（WMO）]
- 気候変動による様々な影響とリスクを対象とする EU のプログラム IMPRESSIONS が

実施されている。

- 各地で開発される様々な予測モデルを国際的に比較するプロジェクトも多数行われている。代表的なプロジェクトとして、IPCC 第6次評価報告書（AR6）を目指した第6次結合モデル相互比較プロジェクト CIMP6 [世界気候研究計画（WCRP）]、水（水資源・水災害）、陸域生態系、植物生理、農業経済、健康（マラリア）の各分野における気候変動影響では気候変動影響評価プロジェクト ISI-MIP [ドイツポツダム気候影響研究所]、農業では農業モデル相互比較・改善プロジェクト AgMIP [米国コロンビア大学等] が実施されている。
- 各地域で対策を行うための時空間的な詳細化（ダウンスケーリング）も活発である。全球気候モデルの将来推計結果を時空間的に詳細化する統合地域ダウンスケーリング計画 CORDEX が実施されている。[世界気候研究計画（WCRP）]
- 極端現象予測の不確実性の定量化を目指したアンサンブルシミュレーションを用いた洪水予測・警報システムの枠組みとして、EFAS (The European Flood Awareness System) [欧州中期気象予報センター（ECMWF）等]、Hydrologic Ensemble Forecasting [米国海洋大気局（NOAA）] などが行われ始めている。

2. 環境汚染・健康区分

- 大気研究を、大気・気候変動・エネルギーを統合させた分野として扱い、気候変動、土地利用、大気質、水質、経済の総合作用を考慮した One environment モデルに取り組んでいる。また、土壌汚染対策を他事業との連携で実施し、環境負荷を抑えエネルギーやコストの低減を図る技術体系「グリーナー・クリーンアップ」を提唱している。[米国環境保護庁（EPA）]
- マイクロプラスチックによる様々な生体影響（プラスチック自体の物理的影響、酸化防止剤や難燃剤などの添加剤、プラスチックに吸着した化学物質）が明らかにになりつつある。例えば、大型生物では摂食したプラスチックの物理的な作用による生理学的な影響、牡蠣の再生産能力の低下 [フランス CNRS]、淡水魚の卵の孵化率の低下 [スウェーデンウプサラ大学]、ワムシの抗酸化酵素の誘導 [韓国成均館大学] などが報告されている。
- 欧州特に英国で、環境負荷を低減しつつ、経済面や社会面を含めた浄化の意思決定を推進するサステナブルレメディエーションの研究開発が加速しており、従来より広範な概念として持続可能性を取り込んでいる。
- 同位体研究が発展している。軽元素から重元素まで含む同位体比の研究、分子中の異なる部位の同位体比を用いた物質の起源や化学反応の理解、質量に依存しない同位体分別（MIF: Mass Independent Fractionation）の研究などが進展し、物質の動態把握などに応用されている。軽元素では分子内の部位別の同位体比を区別しながら測定する技術が発展し、物質の起源・生成過程の解明や、同位体温度計の開発 [米国カリフォルニア工科大学] が進んでいる。有機物に関しては、腐植物質などの天然の無定形有機物の分子式まで確定できる超高分解能フーリエ変換イオンサイクロトロン型質量分析器（FT-ICRMS）の発展が著しく、炭素循環の研究などで重要な役割を果たしている。[米国フロリダ州立大学]

- 放射光を用いた X 線による元素状態分析研究は、nm レベルでの炭素の官能基マッピングなどに利用され、多くの成果を挙げている。海洋生物由来の有機物が雲における氷の核となる可能性が示された。[英国リーズ大学]
- GCxGC、LC x LC、LCxCE のような多次元分離技術や汚染源解析や未知汚染物質同定への ICR-FTMS や OrbitrapMS のような超高分解能質量分析技術の導入がトレンドの一つになっている。その他には、リアルタイム計測やフィールドでの質量分析やマイクロデバイスの開発、バイオセンサのような生物応答の工学的実装、化学物質の毒性機構や生体中動態の解明のための質量イメージング分析が最新の動向といえる。
- 大気汚染による若年死亡率への寄与を地球規模で解析した研究報告 [ドイツマックスプランク化学研究所] や、熱波の夜の最低温度が高い地域で高齢者の死亡率が高かったとの報告 [フランス健康監視研究所]、さらには人間活動のデータも活用して、マラリアやデング熱の伝播に人間の移動がどの程度寄与するかといった分析 [米国カーネギーメロン大学] が行われている。
- 住環境、移動、消費（食品や食習慣等）の 3 つを対象として、健康と環境を守るためにライフスタイルをどう変えればよいかを探るプロジェクト INHERIT を開始した。[持続可能な消費生産センター（CSCP）]
- 汚染物質の排出から媒体への移行や蓄積を評価可能な大規模モデルについて、特に、地球規模の動態を示す残留性有機汚染物質（POPs）や水銀を対象に注目されている。例えば、水銀の全球動態モデルとして、GEOS-Chem [米国ハーバード大学]、GRAHM [カナダ気候変動・環境省]、EHMERIT [イタリア学術会議]、FATE-Hg [国立環境研究所] などがある。
- 出生から成長過程を追跡する大規模疫学である出生コホート調査が各地で行われ、欧州の出生コホート調査である HELIX では、化学的、物理的、生物学的、精神的、社会的環境ストレスといった多様な環境要因への生涯曝露であるエクスポソーム（Exposome）の概念を看板に実施されている。[スペイン CREAL]
- 欧州の Solutions プロジェクトでは、河川における有害化学物質を現在の科学技術を結集して評価し直すために、分析から影響把握にわたる領域をカバーした総合的な研究が行われている。[ドイツヘルムホルツ環境研究センター]
- 代謝研究と分析技術の進展を受け、毒性影響研究のスタイルが変化している。これまで化学物質の生体影響は量－反応の出入口のみが解析の中心であったが、ブラックボックスであった途中の過程を明らかにする AOP（Adverse Outcome Pathway）の手法の実現が目指されている。

3. 生物多様性・生態系区分

- 衛星からの森林炭素蓄積（バイオマス）推定を行う GEDI ミッション（2019 年）[米国 NASA]、MOLI ミッション（2021 年）[JAXA] が予定されている。（再掲）
- 無人機の活用、フィールドセンシング技術（トラッキングやロギング）の発達、ゲノム科学の進展がめざましい。
- 10 年間に 4.3 億ドルを投じる全米生態観測ネットワーク（NEON）の構築が推進されている。土壌、水、生物、大気に関して観測拠点を建設し、人間活動が及ぼす影響を 30

年間にわたって観測する。

- 生物多様性の分布に関する研究として、深海の生物多様性のパターンがエネルギーの利用可能性によって形作られること [豪メルボルン博物館]、種の個体数と機能的形質を組み合わせた全球的な魚類多様性のホットスポットの解明 [豪タスマニア大学] などの報告がある。
- 形質データ・機能データベースによる生物多様性と機能の関係の理解の促進がバクテリアスケールから魚類のスケールまで進展している。細菌の多様性が機能、安定性、多機能性に及ぼす影響 [スウェーデンヨーテボリ大学]、サンゴの魚類とサンゴの進化における形態、機能、相互依存 [豪ジェームズクック大学] などの研究がある。
- Ecopath/Ecosim [カナダブリティッシュ・コロンビア大学] や Atlantis [オーストラリア連邦科学産業研究機構 (CSIRO)] という海洋生態系評価モデルが使用されるようになり、広く応用されている。
- InVEST [米国スタンフォード大学] という汎用性のあり地図情報化が可能な生態系サービス評価ツールが開発され利用されている。
- 高度な統計学的解析手法として、時系列変動データの因果関係推定法である S-map、CCM、CMS などが話題を集めている。
- 決定論的な変動や Tipping Point の予測について、乾燥地における生態系変動の理論・実証を連動させたレジームシフト予測を行う欧州のプロジェクト CASCADE [オランダワールニンゲン大学] が実施されている。
- 環境 DNA 採取によるホクオウクシイモリの調査 [英 Freshwater Habitats Trust] など、市民によるモニタリングやサンプリングで、試料収集と意識向上を図る市民科学の活用が注目されている。

4. 循環型社会区分

- 人間活動を含む全球水文モデルが精力的に開発・改良されている。主要な 4 つのモデルとして WaterGAP [ドイツフランクフルト大学・カッセル大学・ボン大学]、PCR-GLOBWB [オランダユトレヒト大学]、LPJmL [ドイツポツダム気候影響研究所]、H08 [国立環境研究所・東京工業大学・東京大学] が挙げられる。
- 全球水門モデルの超高解像度化、具体的には 1km 解像度で全球をカバーするシミュレーションの実施が共通目標として受け入れられつつある。
- 人間活動を含む水文モデルの機能のうち、特に 21 世紀中の世界の水利用の予測に重点を置いたマルチモデルプロジェクト Water Future and Solutions が実施されている。[国際応用システム研究所 (WFAS)]
- 食糧・水・エネルギー問題をリンクさせて解決する概念である Food-Energy-Water Nexus を、米国を筆頭にドイツ、英国が提唱しており、米国エネルギー省 (DOE) では、Energy-Water Nexus Crosscut Team を組織し取り組みを始めた。
- 米国は衛星情報を利用した水循環に関する基本データ構築などで圧倒的な力を持ち続けており、重力場観測ミッション GRACE (2002 年) [米国 NASA・ドイツ航空宇宙センター (DLR)]、表層水・海洋ミッション SWOT (2021 年打ち上げ予定) [米国 NASA・フランス国立宇宙研究センター (CNES)] がある。

- リサイクルに特化したソーティング技術（Sensor Based Sorting）の開発と導入が発展している。製品の形態特徴量からニューラルネットワークにより個体認識が可能な ARENNA ソータの開発〔産業技術総合研究所〕が先駆けて開発された。その後、同様の思想に基づいた建設廃材の選別システムが製品化〔フィンランド ZenRobotics Ltd.〕された。
- 欧州ではリサイクルのデータベース構築、基準や政策決定に資する情報網の構築が進められ、ProSUM プロジェクト〔ベルギー WEEE FORUM〕では破棄家電等の希少金属データの抽出法・分析法を開発しデータベースを構築するとともに、他の DB と連携して EU 内の動脈～静脈産業に至る希少金属量やフローの可視化を目指している。
- LCA 研究をベースとした資源消費に関わる水、炭素、窒素等のフットプリント研究が盛んに行われている。
- 大規模な産業連関データを用いて、サプライチェーンを通じた資源利用と生物多様性への影響の解析を行った。〔豪シドニー大学〕
- 資源供給側の Criticality（資源調達に関わる安定性）研究が着目されている。〔米エール大学〕
- 多様な利害関係者に結びつく社会影響を見る社会 LCA などに取り組まれている。

（４）日本の注目動向（科学技術トピックス）

各区分における近年の注目動向（科学技術トピックス）は以下の通り。実施中の研究開発プロジェクトは 2.3.2（１）参照。（下記以外にも、多くの優れた研究開発が行われている。）

1. 気候変動区分

- 主要な GHG である CO₂ とメタンについて対流圏下部まで感度を持つ世界初の衛星いぶき（GOSAT）を 2009 年に打ち上げた。2017 年には GOSAT-2 の打ち上げを予定している。〔環境省・JAXA・国立環境研究所〕
- 地球システムモデル（ESM）である MRI-ESM〔気象研究所等〕や MIROC-ESM〔海洋研究開発機構（JAMSTEC）等〕が開発されている。
- 雲やエアロゾルの三次元情報や粒径情報を直接計測するレーザレーダ（LIDAR）の利用検討が進められている。2015 年には CATS（Cloud-Aerosol Transport System）が国際宇宙ステーション（ISS）に取り付けられた〔米国 NASA〕。現在、2018 年打ち上げを目指し、大気ライダ ATLID（Atmospheric Lidar, 355nm）が搭載される EarthCARE 衛星を開発している。〔JAXA・欧州宇宙機関（ESA）〕
- エアロゾルについては、大気中の主要なエアロゾルを同時に取り扱う数値モデルである SPRINTARS が世界に先駆けて開発された。〔九州大学〕
- 地球規模の雲解像モデル NICAM には SPRINTARS が組み込まれ、スーパーコンピュータ「京」を用いて 3.5km 格子のエアロゾル分布のシミュレーションに成功している。〔東京大学・JAMSTEC・理化学研究所〕
- 極端現象予測の不確実性の定量化を目指したアンサンブルシミュレーションとして、地球温暖化対策に資するアンサンブル気候予測データベース（d4PDF）が文部科学省気候変動リスク情報創生プログラムで作成された。〔気象研究所〕

- データ統合・解析システム（DIAS）において、洪水時の河川管理に汎用的な陸面水文モデルと大量の観測データ、アンサンブルシミュレーションによる確率的な概念を組み込んだ手法を用いる研究が進められている。[東京大学]
- 農業活動（灌漑）による水移動の影響を加味した干ばつ日数の変化推計を、ISI-MIP と気候変動リスク創生プログラムとの連動で実施した。[東京大学]
- 1km メッシュの農業気象データ作成・配信システムの開発や、気候変動が農業水利用や水資源に与える影響を評価した全国マップの提示、大気 CO₂ 濃度と水稻の品質や収量との関係に関する研究などが行われている。[農業・食品産業技術総合研究機構（以下、農研機構）]
- 日本の森林による GHG 吸収量と木材利用による排出削減量が予測され、緩和策として木材利用が重要であることが示された。[森林総合研究所]
- 複数の要因による健康影響を、従来は全て直線的な関係の集まりとして計算していたが、一般化線型モデルとその拡張による非線形モデルにより、直線でない関係も扱えるようになった。
- 北半球氷床に関し、過去数十万年にわたる氷期・間氷期変動を、本格的な気候モデルと氷床モデルを組み合わせることで再現することに初めて成功した。[東京大学・JAMSTEC・国立極地研究所等]
- 観測が難しい北極海上のブラックカーボン（BC）粒子の測定は主に航空機を用いていたが、BC 粒子測定装置（SP2）を用いることで、船舶を利用した北極海上での高精度測定（0.01ng/m³）に世界で初めて成功した。[JAMSTEC・国立極地研究所]

2. 環境汚染・健康区分

- 多次元ガスクロマトグラフ（GC×GC）と高分解能飛行時間型質量分析計（HRTOFMS）、タンデム型質量分析計（MS×MS）などをつなげた分析装置と、自動定量等を行うソフトウェアを開発し、多くの汚染物質と未知物質の検索および定量を一度に行う網羅分析に取り組んでいる。[国立環境研究所]
- 漁業の振興の観点から、季節によっては栄養塩を水域に排出したほうが良いという考え方も支持され始めている。
- 東京電力福島第一原子力発電所事故を受け、除染や廃炉に関連した放射性物質の挙動把握や、放射線遮蔽技術、吸着・洗浄に関する技術開発が実施されている。[福島大学、日本原子力研究開発機構等]
- 同位体比の非質量依存の分別（MIF）を用いた研究は、軽元素ばかりでなく水銀などの重元素の研究にも展開されており、例えば世界的な課題になっている水銀の水圏-大気圏での循環研究においても重要な位置を占めている。[国立環境研究所]
- 水銀の全球動態モデル FATE-Hg が開発されている。[国立環境研究所]
- 出生コホート調査として、環境省による子供の健康と環境に関する全国調査（エコチル調査）が進められている。[国立環境研究所等]

3. 生物多様性・生態系区分

- 国際宇宙ステーション（ISS）に搭載する植生 LiDAR 開発に取り組み、2021 年の打ち上げを目指している（MOLI ミッション）。[JAXA]
- バーバリウム（植物標本）にあるラベル情報から分布モデルを作り、東南アジアの樹木

の種の多様性を推定した。収集した膨大な全ての標本の画像をデータベース化し、DNA配列決定を進め、多くの新種を判定している。[九州大学]

- ・ 気候変動による陸面植生の変化や、その結果起こる大気・陸との相互作用の変化などをシミュレーションする動的全球植生モデル（SEIB-DGVM）[JAMSTEC] や、炭素や窒素など、陸域植生の光合成・呼吸や温室効果ガスの収支に関連する物質の挙動を解明する生態系モデル(VISIT) [国立環境研究所] が開発されている。

4. 循環型社会区分

- ・ データ統合・解析システム（DIAS）により総合的水資源・水環境管理が取り組まれている。[東京大学]
- ・ 人間活動を含む全球水文モデル H08 が開発されている。[国立環境研究所・東京工業大学・東京大学]
- ・ エルニーニョ／ラニーニャと世界の穀物生産との関係性を初めて解明した。[農研機構・JAMSTEC]
- ・ 開放系大気 CO₂ 増加（FACE）実験水田で子実中の炭素・窒素含有量の変化を調査し、水稻の多収品種カタナリが高い CO₂ 濃度下でも高い終了性を示すメカニズムが解明された。[農研機構]
- ・ 日本土着の根粒菌を用いて収穫期のダイズ畑からの N₂O 発生を 30%削減できることを野外実験で証明した。[農研機構・東北大学]
- ・ 熱帯林を対象として、衛星データから推定した森林タイプ別の面積と、地上調査によって求めたそれぞれの森林タイプの単位面積当たりの平均炭素蓄積量とを掛け合わせて国レベルでの森林炭素蓄積量を算定する手法を開発した。[森林総合研究所]
- ・ 農業水利用や水利施設の管理等の人間活動を組み入れた分散型水循環モデルが構築され、農業水資源に対する気候変動影響予測に適用されている。[農研機構]
- ・ 生物多様性解析手法（state-space model などの不確実性を含む情報の統計解析手法、多変量解析手法など）の発展により、広域や異なるスケールの生物分布予測手法が発展し、山梨県では哺乳動物の平均的な体重と公開されている植生や土地の用途などの情報から、動物（ニホンジカ）の生息可能数を予測する技術を開発、予測の実証を開始した。[富士通研究所]
- ・ 製品の形態特徴量からニューラルネットワークにより個体認識が可能なソーティング技術（ARENNA ソータ）を世界にさきがけて開発した。また、廃電子素子群からのタンタルコンデンサ回収技術を開発した。現在、動脈～静脈産業連携による戦略的都市鉱山システム構築を目指した SURE コンソーシアムを設立し活動を推進している。[産業技術総合研究所]
- ・ プラスチックのリサイクルでは、プラスチック・木質バイオマス混合廃棄物を高付加価値化合物へ変換する熱分解プロセス技術や金属含有 PET からの金属とベンゼンの同時回収 [東北大学]、混合プラスチックの分解触媒開発 [室蘭工業大学]、炭素繊維強化プラスチック（CFRP）リサイクルにおける熱分解法、常圧溶解法、超臨界・亜臨界流体の利用 [日立化成、静岡大学等] が取り組まれている。
- ・ 最終処分量を最小化させるための焼却残渣の有効利用の技術開発として、CO₂UFB [九州大学] や硫酸塩 [栗田工業] による難溶解性塩素の分解、遊休キルンを活用した生ゴミ処理とセメント原料化 [太平洋セメント]、焼却灰からの水素ガス回収と回収残渣のセ

メント原料化〔九州大学〕などが行われている。

- 物質ストック・フロー分析が、ベースメタル、稀少金属・戦略物質〔国立環境研究所、東北大学、東京大学等〕や建築・土木構造物〔名古屋大学、立命館大学〕について実施されてきた。
- 資源供給における Criticality（資源調達に関わる安定性）研究が行われている。〔産業技術総合研究所〕

（５）俯瞰ワークショップより得られた動向¹⁴³

俯瞰及び提言に資する活動の一環として、具体的な技術シーズや最新の研究開発動向を把握するために、最前線で活躍する研究者による話題提供と意見交換の会合を、環境分野の 3 つの要素技術ごとに開催した（環境分野俯瞰図（図 2-1）の 3 つの共通要素技術「観測・計測技術」「予測・評価技術」「対策技術」に該当）。各会合から抽出された主要な動向は下記の通りである。

環境分析技術では、主に研究用途を想定した先進的で高感度・精密な分析技術開発と、全球的なモニタリングや現場観測を想定した安価、簡易、可搬的な分析技術開発の 2 つの方向性が示された（二極化）。また、測定技術の発展により、膨大な物質を同時検出する研究開発が進展している。それに伴い、大量のデータを処理する情報処理技術の活用が必然となり、定量の自動化などを行うソフトウェア開発、ライブラリ整備が求められている（網羅性とインフォーマティクスの融合）。そのほか、高感度化の進展だけでなく、生体、プラスチックなど熱に弱い物質の分析や、微粒子の形状や組成、状態の把握も発展している。

環境予測・評価技術では、複雑な地球システムとその現象を把握するため、モデルの精緻化や高解像度化だけでなく、気候変動予測または気候変動影響に関連する多種多様なモデルの統合が進められている（統合化）。地球システムに作用する要素として土地利用などの人間活動も統合され始めている。また、様々なモデルが開発される中で、国際的にモデルを相互比較するプロジェクトが実施されている（モデル比較研究）。

環境対策技術（環境修復・浄化、資源回収・リサイクル技術）では、目的とする課題解決と同時に、省エネ化、低炭素化、低コスト化、副産物の回収、高付加価値物の創出などを達成する技術開発が行われている（高付加価値化）。環境対策技術は、要素技術だけでなく、要素技術を組み合わせるシステム化・統合化する研究開発を推進することも必要である（システム化）。さらに、学際融合のみならず業界や行政などとも連携した取り組みが必要とされる。環境対策技術が社会に受容されるためには、処理メカニズムの解明とともに、技術の評価とその結果の提示も必要である。

体制面の課題として、長期間のモニタリングによるデータの積み重ねが研究開発の進化と発展に不可欠であり、計測や観測点維持、データベース整備の継続性や、こうした活動を評価する仕組みが必要であることが挙げられた。一方で、コスト・労力共に効率的で統計学的にも優れた実測手法の開発や、システムについてはユーザ獲得のためのインタフェースデザイン検討の必要性が指摘された。また、各論的な研究を整理・比較し統一的にまとめる研究やシステム化研究、技術のデータベース化も課題とされた。

¹⁴³ JST CRDS, 俯瞰ワークショップ報告書 平成 27 年度 環境科学技術分野 最新研究開発動向,
<http://www.jst.go.jp/crds/pdf/2015/WR/CRDS-FY2015-WR-13.pdf>

2.3.4 アカデミア・コミュニティの動向^{144, 145}

環境分野の学会員数・学会参加者数や論文の著者数から、研究開発人材の規模について把握を試みた結果を示し、考察した。総務省が実施している科学技術研究調査（平成 26 年度（2014 年）実績（括弧内は平成 16 年度実績））によると、「大学等」および「公的機関等」の自然科学の研究者数は約 23.4 万人（20.6 万人）、「企業」は約 52.5 万人（45.6 万人）であり、「大学等」および「公的機関等」の自然科学の研究者数は 10 年間で 14%、「企業」は約 15%増加している。本調査はこれら調査結果を分野の視点から分析した。

学会の動向からみた各分野の研究者規模の把握

CRDS では、技術分野別のユニットが分野ごとに分野の構造（視座）や包含する領域を定義するために俯瞰図を作成した上で、各ユニット（分野）が主要と考える研究開発領域を選択している。これらの考え方を踏まえ、規模や基礎研究の有無を考慮して各分野の主要な学会（1,000 人以上）を抽出し、各学会に対し、アンケート調査を行った。

ここで、例えば、エネルギー分野に関連する主要学会について考えたとき、機械学会、電気学会、化学工学会が中心となる。ただし、例えば機械学会の中でも機械加工などの直接的にはエネルギーに関連しない部門も大きな割合を占めるため、主には流体力学部門、熱工学部門、エンジンシステム部門、動力エネルギーシステム部門などがエネルギーをメインに扱うセクションといえ、対象となる学会のすべてが、一概にエネルギー分野の研究者とはいえないことには留意が必要である（今回は学会単位での動向のみを調査）。同様に電気学会の電力・エネルギー部門や、化学工学会の粒子・流体プロセス部会、熱工学部会、分離プロセス部会、反応工学部会などに属している科学者・研究者はエネルギー分野の研究者と捉えて良いと考える。一方、石油学会、原子力学会のほとんどはエネルギーに関連していると考えられるし、触媒学会、電気化学学会なども多くはエネルギーへの意識が高い研究者といえよう。同様に日本冷凍空調学会や日本伝熱学会、日本エネルギー学会などもエネルギー分野の研究といえるが、会員の多くは機械学会や化学工学会等と重複した会員でもあることが予想される。エネルギー・資源学会も電気学会と両者に参加している研究者が多いと推測される。もちろん、応用物理学会や化学学会などに太陽電池等のエネルギー分野に関心の高い研究者がいることも事実であるが、割合としては少ないと考えられるので、今回は関連学会に留めた。他の分野についても同様の考えの下、学会を選択し、分析を行った。

このような諸条件を踏まえた上で、以下に分野ごとに学会の会員数、法人会員数および年会参加者数の動向について述べた後、分野間の比較を行った。表 2-13、2-14 は近年の会員数等の増減について示したものであり、原則として 2004 年と 2014 年のデータを用いて 10 年間の変遷について分析した。

環境分野

- 単純に加算すると約 2.1 万人となる。年会参加者をアクティブな研究者と捉え、単純に加算すると約 0.9 万人となる。
- 生態学会、水文・水資源学会は現状維持となっている。対して、気候変動を扱う日本気

¹⁴⁴ 総務省「科学技術研究調査」（平成 26 年度（2014 年）実績）

¹⁴⁵ 文部科学省 科学技術・学術政策研究所「科学研究のベンチマーキング 2015-論文分析でみる世界の研究活動の変化と日本の状況-」

象学会、森林学会も減少はしてはいるが、その他の学会は軒並み 30%以上会員数を減らしている。

- 企業会員数は、全体的に大きく減少している。50%以上減らしている学会が 4 つもあることが特徴的である。
 - 会員数が少ないコンパクトな学会が多い分、生態学会、森林学会、水環境学会、環境化学学会など年会参加率が 60%を超える学会が多いことが特徴といえる。
- ※ 1,000 人未満の学会は調査対象外となっている。記載された学会以外にも多くの学会が大きく関連している。

表 2-13 環境分野の主な学会

学協会名	個人会員数			法人会員数			年会参加者数		
	2004	2014	増減(%)	2004	2014	増減(%)	2004	2014	参加率
日本生態学会	3711	3891	1	165	100	▼39	1352	2464	63
日本気象学会	3812	3311	▼13	415	201	▼52	秋季729	秋季880	27
廃棄物資源循環学会	3656 (2005年)	2580 (2015年)	▼29	280 (2005年)	113 (2015年)	▼60	1179 (2005年)	813 (2015年)	32
日本森林学会	2542 (2005年)	2444	▼4	255 (2005年)	124	▼51	-	1690	69
日本水環境学会	2614	1982	▼24	186	131	▼30	1497	1381	70
水文・水資源学会	1272	1279	0	62 (賛助会員) 23 (賛助会員)	26 (賛助会員) 44 (賛助会員)	▼18	-	293	23
日本環境化学会	1489	885	▼41	91 (賛助会員) 48 (公益会員)	99	-	890	558	63
大気環境学会	1582 (注：法人会員)	1043	▼34	85 (賛助会員)	221	-	812	473	45
日本陸水学会	1200	725 (2015年度)	▼40	64	44 (2015年度)	▼31	380	264	36
日本「トセン」学会	-	1063	-	-	61	-	-	春季250	24
環境科学会	1510	1020	▼32	30	11	▼63	164	288	28
環境経済・政策学会	-	1185	-	-	14	-	-	-	-

表 2-14 環境分野に大きく関連する学会（参考）

学協会名	個人会員数			法人会員数			年会参加者数		
	2004	2014	増減(%)	2004	2014	増減(%)	2004	2014	参加率
土木学会	36406	37284	2	1393	957	▼31	5700	5374	15
日本分析化学会	6884	5346	▼22	1471	1202	▼18	1381	1182	22

エネルギー分野

エネルギー分野も環境分野に大きく関わる分野であるため参考として掲載する。

- エネルギー分野ではない研究者も含まれていること、および学会間で相当数の重複があることを前提に、個人会員数を単純に加算すると約 10.4 万となる。年会参加者をアクティブな研究者と捉え、単純に加算すると約 1.5 万人となる。
- 電気学会、触媒学会は微増となっており、近年の電池研究や水素関連研究への関心の高さが伺える。対して、化学工学会、金属学会、冷凍空調学会、石油学会、エネルギー・資源学会は 15%以上会員数を減らしている。
- エネルギー分野に大きく関連する協会として自動車技術会があるが、唯一会員数を大きく伸ばしている学会である。
- 企業会員数は、規模、分野に依らず、全体的に減少している。

- 年会参加率は、最大規模の機械学会で少なく、伝熱学会で大きい。機械学会等の大きな学会は部門別に年会あるいはそれに近いイベントが開催されるため、全体の会に参加する研究者が少ないことが推察される。

表 2-15 エネルギー分野の主な学会

学協会名	個人会員数			法人会員数			年会参加者数※		
	2004	2014	増減(%)	2004	2014	増減	2004	2014	参加率
日本機械学会	37837	34696	▼8	798	711	▼11	2511	2570	7.4
電気学会	24328	21814	▼10	481	401	▼27	2949	2912	13
化学工学会	9291	7699	▼17	514	425	▼17	1500	1447	19
日本原子力学会	7457	7393	▼1	269	231	▼14	1520	1460	20
日本金属学会	7647	5340	▼30	306	280 (2009)	▼8	1913	1496	28
日本冷凍空調学会	5150	4045	▼21	307	228	▼26	479	458	11
電気化学会	2945	3193	8	224	223	▼1	1956	1800	35
石油学会	3830	3069	▼20	329	279	▼15	450	495	16
触媒学会	2539	2623	3	122	112	▼18	—	861	33
日本伝熱学会	1379	1285	▼7	49	39	▼20	—	818	64
エネルギー・資源学会	1769	1219	▼31	155	103	▼34	298 (2009)	228	18

表 2-16 エネルギー分野に大きく関連する学会（参考）

学協会名	個人会員数			法人会員数			年会参加者数※		
	2004	2014	増減(%)	2004	2014	増減	2004	2014	参加率
自動車技術会	37872	47000	24	511	563	10	4247	5278	11
日本鉄鋼協会	8721	8927	2	179	161	▼10	1333	1415	16
日本セラミックス協会	4985	4516	▼9	297	216	▼27	920	1210	27
有機合成化学協会	4798	4260	▼11	243	207	▼15	-	-	-
日本化学会	33340	28394	▼15	1174	883	▼25	8403 (2009)	8779	31
応用物理学会	23132	21603	▼7	549	410	▼25	9462	6841	32
高分子学会	11555	10248	▼11	374	302	▼19	3396	3112	30

分野間の比較と考察

- 総務省統計では、研究者は増加しているにも関わらず、個人会員数は、分野を問わずほとんどの学会において数を減らしている。リーマンショックなどの影響を受けて、企業の個人会員が大きく減っていることが推察される。自動車技術会は会員数を 20%も伸ばしている。この 10 年の自動車産業の好景気、安定を反映していると推察される。また、電気化学会や触媒学会の増加は今後社会的に重要とされている蓄電池や燃料電池、エネルギーキャリアの流行を反映するなど数字としてわかりやすい形で示されている。
- 法人会員数は、分野を問わず、全体的に大きく減少している。リーマンショックなどの影響を受けて、企業が脱退したことが原因と推察される。特に企業活動に直接結びつきにくい環境分野は 50%を超えて減らしている学会が 4 つもあることが特徴的である。
- 年会参加率は、機械学会、電気学会、自動車技術協会などの大きな学会で 20%以下と低い。大きな学会は部門別に年会相当の企画をもつため大半はそちらにのみ参加していることが考えられる。

2.4 総括及び分野の今後の方向性

■ 世界の技術革新の潮流

世界の研究開発（科学技術）政策および研究開発動向から総合的に判断し、環境分野における世界の技術革新の潮流を6点抽出した。

• 統合化

かつての少数要因による深刻な汚染や健康影響から、複数要因による複雑な汚染や健康影響問題へと変化してきたことを受け、特定の汚染源に対する研究から、気候変動や生態系、資源利用なども含めた統合的な研究が求められている。また、地球システムモデル（ESM）の開発では、気候変動を予測するため、大気や海洋の物理だけでなく、エアロゾルや植生、海洋生態系などの関連する多数の要素を統合したモデルの開発が進められている。さらに、食糧・水・エネルギー問題をリンクさせて解決するFood-Energy-Water Nexusの概念や、環境面のみならず社会面や経済面も考慮した持続可能性の概念の研究開発への反映も行われている。地球全体の水循環を把握する全球水文モデルの開発では、人間活動が反映されるなど、研究開発における人間活動データの統合も重要性を増している。

• 大規模化

衛星による観測技術が進展し、観測可能な情報は質・量・種類の面で飛躍的に向上しており、GHGや雲・エアロゾル、森林、表層水・海洋の観測衛星の打ち上げが続いている。健康影響研究では、課題の地球規模化や複雑化を受け、特定要因だけではなく全体を調べて複数要因の関連や影響を解明する必要性が生じ、解析対象や追跡調査期間などが拡大している。例えば、人間活動を含むビッグデータや地球観測・衛星観測データを健康研究に活用できるようになり、大気汚染や熱波による死亡への影響や、伝染病伝搬への人間移動の寄与を分析するような研究が行われるようになってきている。また、出生から成長過程を追跡する大規模疫学である出生コホート調査が各地で行われるとともに、化学的、物理的、生物学的、精神的、社会的環境ストレスといった多様な環境要因への生涯曝露であるエクスポソームが注目されている。水銀などの有害物質の動態を地球レベルで把握・評価する大規模な全球動態モデルの開発も注目されている。

• 高度化

上記のような統合化や大規模化の一方で、様々な高度化が進められている。例えば、化学物質による生態影響の把握では、代謝研究と分析技術の進展を受け、物質への曝露から影響の発現までの経路を明らかにするAOP（Adverse Outcome Pathway）研究が必要とされている。分析技術の発展により同位体を用いた研究が進展し、物質循環や環境動態研究に応用されている。新たな汚染物質として医薬品および日用品等由来化学物質（PPCPs）やマイクロプラスチックが認識され、高度な分析を必要とする汚染実態調査や生態影響の解明が進められている。リサイクル技術でも選別技術やプラスチックリサイクルなどの分野で高度化が進んでいる。

• 可視化

可視化は、意思決定に活用したり、価値を経済活動に反映するために重要な活動である。気候変動やその影響などの分野において、各国で開発されたモデルを国際的に比較するモデル比較が盛んに行われ、IPCCの報告書でもその結果が利用されている。その

他、国や地域での対策に利用するために、モデルによる将来予測等の時空間的な詳細化を行うダウンスケーリングや、将来予測の不確実性を定量化するためのアンサンブルシミュレーションも実施されている。また、生物多様性や生態系を、有益なサービスを提供する財と捉え持続可能な形で利用するため、生態系サービスや自然資本を定量的に評価しその価値を社会や経済に反映することが求められている。そのため、生物多様性や生態系の実態・変化の把握や機構解明、得られるサービスの定量化などが活発に進められている。リサイクルでは基準や政策決定に資する情報網の構築として、データベースの構築とデータベース同士の連携、物質フローの可視化などが行われている。環境的側面に加え社会的側面のインパクト評価技術の開発と応用が進められ、水・炭素・窒素等のフットプリント研究や、資源利用と生物多様性の解析、社会影響の評価などが行われている。

- ネットワーク化・共有化
ネットワーク化・共有化では、地域・国・国際レベルで衛星や地上局等の観測ネットワークが構築され、得られたデータの共有が進んでいる。
- 研究のスタイルの変化
問題設定とデータ収集、シミュレーション設定を共通化し、モデルを横断的に分析して論文を執筆する形式の研究が行われている。

■ 環境分野の今後の方向性

研究開発動向や研究開発政策、社会・経済の動向、上記の潮流等を踏まえ、日本における環境分野の今後の方向性（取り組むべき研究開発）として、以下の3つを提案する。

- 統合的な研究開発の実施
それぞれの課題に対する研究開発の深化や高度化は従来通り継続する必要があるが、環境分野における課題は互いに複雑に関連しているため、真に課題を解決するためには、気候変動や環境汚染、健康影響、生態系管理、資源利用と循環、経済、社会等の関連する要素全体を統合的に扱う研究開発への発展が不可欠である。統合的な研究開発では、気候変動と大気汚染、資源利用と生態系への影響など、それぞれの要素間のトレードオフやシナジー効果の解明が必要とされる。また、技術や対策などを経済や社会に応用・反映するために、環境的側面のみならず、社会的側面も含む多面的な影響や価値を評価し可視化することが求められる。土地利用や人の移動などの人間活動を含むビッグデータや地球観測データが利用できるようになりつつあり、社会・経済データも含めて活用することも重要である。こうした様々なデータも活用しながら、エクスポソーム（化学的、物理的、生物学的、精神的、社会的環境ストレスへの生涯曝露）研究を推進することで、現代社会における人々の健康への貢献が期待できる。農林水産業は環境に大きな影響を与えるため、持続的な土地、水、植物や海洋資源の利用を目指した長期的な研究開発を推進する必要がある。国際的には **Circular Economy**、日本では循環型社会の構築が目指されている。統合的な観点で、水、希少資源、廃プラ、廃素材や廃機器等の対象について、資源循環研究・技術の高度化・システム化が求められる。
- 地球システムモデル（ESM）や気候変動影響予測モデルの開発と応用
モデル開発では、従来より行われている予測精度向上の努力を継続することが求めら

れる。人間活動を含む様々な要素の取り込み、ESM では TCRE（炭素排出に対する気候過渡応答）の評価精度向上や高度な海洋生態系モデルの結合などにより、不確実性を縮小していく必要がある。こうしたモデル開発を推進するために、データ保管・配信・解析やモデル結合作業を支援するシステム開発も重要である。得られた結果を意思決定に活用するために、ダウンスケーリングやアンサンブルシミュレーションのさらなる実施も不可欠である。また、すでに様々な気候変動による影響が顕在化し始めており、影響予測や評価の強化と対象の拡大を進めなければならない。なお、現在認識している課題以外にも将来顕在化しうる様々な環境変化をいち早く予測し対応することも求められる。

- 観測や評価の低コスト化・省力化

今後、観測対象はさらに増加し、観測地点や観測頻度の増加も予測される。少子高齢化のなかで研究者人口や財源の減少が予測されることから、コストや労力ともに効率的で省メンテナンス、かつ統計学的にも優れた観測手法の開発が欠かせない。自動計測やリアルタイム性なども求められる。また、毒性影響評価では毒性試験の時間・コスト・労力が課題となっており、曝露から影響までの経路を把握する AOP 研究の進展も期待される。

- 体制面における課題

環境分野では長期間の継続的な観測によるデータ蓄積が研究開発の進化と発展に不可欠であり、観測の継続や観測点の管理、データベース整備やモデル開発の継続性を確保しなければならない。地球規模課題への対応には、衛星や観測船などの研究プラットフォームも維持・強化が欠かせない。また、データ取得やデータベース構築、モデル開発といった活動を評価する仕組みの構築も必要である。なお、データを業績とすることでデータ共有のインセンティブを与える動きがある¹⁴⁶。システムにおいては、利用者の獲得を意識したインタフェースデザインの検討も求められる。

その他、要素技術の研究開発だけでなく、システム化の研究開発を推進することが求められる。ダウンスケーリングやデータ同化、アンサンブルシミュレーションなどでは膨大な計算機資源を利用するため、今後の解像度向上等を考慮すると計算機資源のさらなる拡充が不可欠である。様々な対策を実際の社会で行うにあたっては、社会受容性のための技術評価やリスク評価、技術資源のデータベース化が必要である。

¹⁴⁶ 池内 有為, 研究データ共有の現在 異分野データの統合とデータ引用, 日本のプレゼンス, 情報管理. 2015, vol. 58, no. 9, p. 673-682. https://www.jstage.jst.go.jp/article/johokanri/58/9/58_673/_pdf