

研究開発の俯瞰報告書概要

環境分野 (2017年)

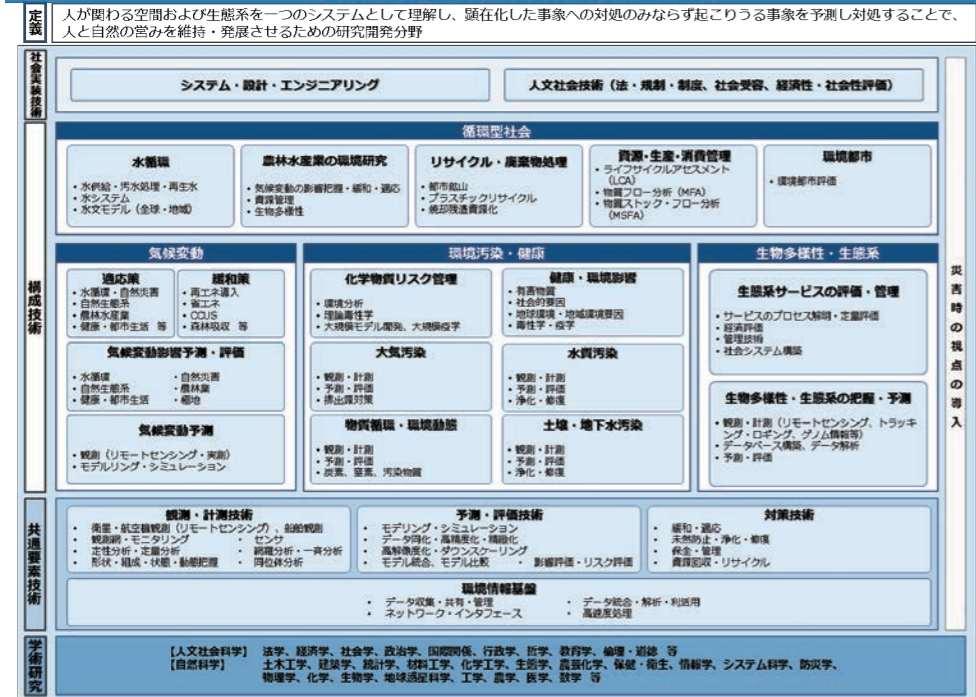
JST研究開発戦略センター
環境・エネルギーユニット

① 分野の範囲と構造

■ 分野の特徴と俯瞰の基本方針

- 地球規模の現象や課題が対象
- 課題解決型分野であるが、顕在化した課題の解決のみならず、将来顕在化する課題を予測し先手を打つという観点を重視

環境分野の研究開発の俯瞰図



■ 4区分、15研究開発領域を設定し俯瞰分析

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

② 研究開発動向・研究開発 (科学技術) 政策

国	研究開発	政策
日本	全体的に研究開発レベルは高いが少数精鋭。生物多様性・生態系区分では欧米豪加が優位。	第5期科学技術基本計画では、資源の安定的な確保と循環的な利用、地球規模の気候変動への対応、生物多様性への対応等を提示。地球環境情報プラットフォームの構築を推進。
米国	全ての領域において高い研究開発レベルを維持。	2017年度科学技術関連予算の編成方針を示す覚書には、優先分野として、気候変動、地球観測、海洋・北極問題が記載。環境保護庁 (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、システムアプローチによる研究開発を推進。エネルギー省 (DOE) や国立科学財団 (NSF) でも食糧・エネルギー・水の複合問題について分野融合の研究を推進。
欧州	全区分で研究開発レベルが高く活発。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。	Horizon2020の3本柱の1つ「社会的課題への取り組み」で「気候への対応、資源効率および原材料」を設定 (7年間で31億ユーロ)。第7次環境行動計画 (2013年) のもと、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。
ドイツ	何れの区分も研究開発レベルが高く、注目すべき活動を多数展開。	第6次連邦政府エネルギー研究プログラムで掲げたビジョン「環境適合性及び信頼性を備えたエネルギー供給構想」に基づき課題や優先事項を設定。その他、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・持続的利用の分野の研究を推進。気候変動対策の中に、資源効率性の向上、森林管理、草原・湿原保全なども位置付け。
英国	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。	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推進。自然環境研究会議 (NERC) の主要テーマとして、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) 技術が該当。先進的かつ時勢を得たテーマ抽出とファンディングを執行。
フランス	特に水循環や農業の領域で存在感を示す。	EUのHorizon2020との整合性を重視したSNR France Europe 2020では、社会的課題として、資源管理および気候変動への対応、持続可能な輸送と都市システム、横断的テーマとして、地球系: 観測、予測、適応が記載。
中国	全体的に他の国・地域と比較して顕著な成果はみられないものの、精力的に研究開発を推進。	「国家イノベーション駆動発展戦略綱要」(2016~2030年) では戦略的ミッションを設定。「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」などが記載。エネルギー開発一辺倒ではなく環境配慮を重視。
韓国	世界を先導する研究開発や成果、大きな特徴はみられない。	第3次科学技術基本計画 (2013-2017年) では、クリーンで便利な生活環境の構築として、気候変動対応力の強化 (CCS)、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)、生活空間の利便性の向上 (高効率エネルギー建築物技術、未来先端都市建設技術) を提示。

③ 科学技術トピックス

衛星観測の強化

- 温室効果ガス
- GOSAT (日) 2009
- OCO-2 (米) 2014
- TanSat (中) 2016
- GOSAT-2 (日) 2017
- MicroCarb (仏) 2020
- 雲・エアロゾル
- CATS(米) 2015
- 大気ライダーATLID(日欧のEarthCARE衛星) 2018
- 森林
- GEDIミッション(米)2019
- MOLIミッション(日)2021
- 表層水・海洋
- SWOT(米仏) 2021

気候変動を予測する地球システムモデルの開発

- 現在多くの研究機関が素素循環過程に取組み
- 多数のサブモデル結合のためのカブラー (ソフトウェア) 開発が盛ん

ダウンスケーリングアンサンブルシミュレーション

- 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) が活発
- 極端現象予測等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の実施

開発される様々なモデルの国際的な比較

国	モデル名	国	モデル名	国	モデル名
USA	ACCESS1.0	USA	CM3.1 (FAMCM)	USA	GFDL-CM2.1
USA	ACCESS1.3	USA	CM3.1 (FAMCM)	USA	GFDL-CM3
USA	BCC-CSM1.1(m)	USA	CMCC-CESM	USA	GFDL-ESM2G
USA	BNU-ESM	USA	CMCC-CM	USA	GFDL-ESM2.5
USA	CanCM4	USA	CMCC-CMS	USA	GFDL-HIRAM-C30
USA	CanESM2	USA	CMCC-CMS	USA	GFDL-HIRAM-C30
USA	CCSM4	USA	EC-EARTH	USA	GISS-E2-H
USA	CESM1(BGQ)	USA	FGOALS-g2	USA	GISS-E2-H
USA	CESM1(CAM5)	USA	FGOALS-g2	USA	MIROC4h
USA	CESM1.3(FV2)	USA	FIO-ESM-v1.0	USA	MIROC5
				USA	MIROC-ESM
				USA	MIROC-ESM-CHEM
				USA	MIROC-ESM-CHEM

例: 比較プロジェクトCMIP5に参加した54の気候モデル
※CMIP5: 第5次結合モデル相互比較プロジェクト。結果はIPCC AR5で活用。

ビッグデータ・地球観測データの活用

- 大気汚染による若年死亡率への寄与の地球規模解析
- 熱波の夜の最低温度が高い地域で高齢者の死亡率高
- 感染症伝播への人間移動の寄与度分析

健康影響の長期・多面的把握

例: トラッキングデータから分かること: A集合体の動き, B生活史, C生態系サービス, D社会的行動, E保護行動, F生態生理学

例: 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

例: エクスposome: 化学的, 物理的, 生物学的, 精神的, 社会的環境ストレスなど多様な環境要因への生涯曝露

AOP研究 (Adverse Outcome Pathway) への注目

代謝研究と分析技術の進展を受け、化学物質への曝露から影響発現までの途中過程を明らかにするAOPが注目。

新規汚染物質の把握・影響解明

- 医薬品および日用品由来化学物質 (PPCPs)
- マイクロプラスチック

同位体研究の進展と物質循環の理解深化

- 軽元素: 分子内部別同位体比を区別しながら測定する技術により、物質の起源・生成過程の解明、同位体温度計開発が進展。
- 有機物: 腐植物質など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計FT-ICRMSが発展、炭素循環等で重要な役割。

無人機、フィールドセンシング技術の発達

例: トラッキングデータから分かること: A集合体の動き, B生活史, C生態系サービス, D社会的行動, E保護行動, F生態生理学

例: 深海の生物多様性のパターンと134°Cの利用可能性

生態系サービスの評価ツールの開発と利用

例: iNVESTによる将来の土地利用シナリオに応じた生態系サービスの地図化

市民科学への注目

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が注目

人間活動を含む全球水文モデル開発

主要4モデル:

- WaterGAP フランクフルト大学他 (独)
- PCR-GLOBWB コトレヒト大学 (オランダ)
- LPJmL ボツダム気候影響研究所 (独)
- H08 国立環境研究所・東京工業大学・東京大学 (日)

リサイクル技術の高度化データベース構築

例: ARENNAソーダ (産業技術総合研究所) 廃棄プラスチックのリサイクル (高付加価値物変換、有用品回収等)

例: EUのProSUM7 外: DB構築, DB連携, 物質フロー可視化

様々な環境インパクト評価の実施

例: 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を解析

例: iNVESTによる将来の土地利用シナリオに応じた生態系サービスの地図化

社会的側面も含む多面的な影響や価値の可視化

例: 多様な利害関係者に結びつく社会影響を見る Social LCA

④ 技術革新の潮流

■ 統合化

- 気候変動や汚染、生態系、資源利用等も含めた統合的研究への発展
- 地球システムモデルへの関連要素の取り込み
- Food-Energy-Water Nexus概念の反映
- 環境面・社会面・経済面を考慮した持続可能性の概念の反映

■ 大規模化

- 衛星観測の飛躍的向上 (情報の質・量・種類)
- 人間活動データや地球観測データを活用した健康影響の把握
- 出生コホート調査やエクスposomeの把握
- 水銀などの有害物質の地球動態モデル

■ 高度化

- AOP (Adverse Outcome Pathway) への注目
- 同位体研究の進展による物質循環理解の深化
- 医薬品および日用品由来化学物質 (PPCPs) やマイクロプラスチックなど新汚染物質の認識と対応
- 選別技術等のリサイクル技術の高度化

■ 可視化

- モデル比較、ダウンスケーリング、アンサンブルシミュレーション
- 生態系サービスの定量評価
- リサイクル技術のDB構築とDB連携、物質フローの可視化
- 環境の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

■ ネットワーク化・共有化

- 衛星や地上局等の観測ネットワーク構築と得られたデータの共有

■ 研究スタイルの変化

- 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、参加モデルを横断的に分析して論文を執筆する形式に変化

⑤ 日本の挑戦課題

■ 統合的な研究開発の実施

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、社会等の関連要素全体を扱う統合的な研究開発への発展

- 対策間のトレードオフ・シナジー効果の解明
- 社会的側面も含む多面的な影響や価値の可視化、経済や社会への反映
- 社会・経済データを含むビッグデータや地球観測データの活用
- エクスposomeの把握
- 持続的な土地、水、生物資源の利用
- 資源循環研究や技術の高度化・システム化 (水、希少資源、廃プラ、廃素材や廃機器等)

■ 地球システムモデル・気候変動影響予測モデルの開発と応用

- 予測精度向上: 人間活動を含む多様な要素の取込み、さらにESMでは炭素排出に対する気候過渡応答 (TCRE) の評価精度向上や高度な海洋生態系モデルの結合等
- 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
- ダウンスケーリング、アンサンブルシミュレーション
- 影響予測・評価の強化と対象の拡大
- その他の環境変動予測・評価

■ 観測や評価の低コスト化・省力化

- 効率的かつ省メンテナンスで統計的にも優れた観測手法の開発
- AOP研究の推進 (毒性試験の省力化・迅速化)

■ 体制面の課題

- モニタリングやシステム開発の継続性と研究プラットフォーム (衛星や観測船等) 維持・強化 (長期間の継続的な観測によるデータ蓄積が研究開発の深化と発展に不可欠)
- 要素技術だけでなくシステム化の研究開発の推進
- 計算機資源の拡充
- 社会受容のための技術評価とリスク評価
- 技術資源のデータベース化

環境分野の概要

2.2 環境分野の概要

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」と定義し、「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区分を設定し俯瞰調査を行った。動向を把握すべき主要な15の研究開発領域を抽出し、研究開発の動向やトピックス、研究開発課題、国際ベンチマークをまとめた。

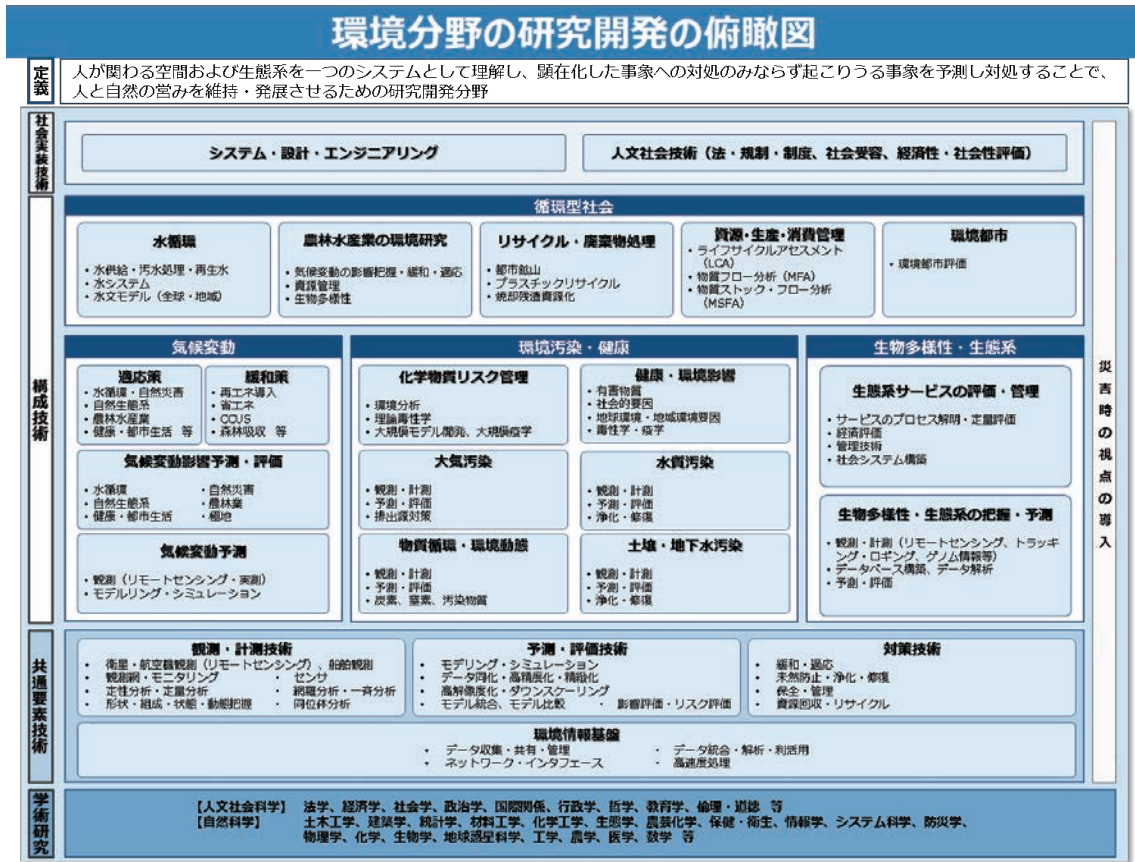


図2-1 環境分野の俯瞰図

日本、米国、欧州、ドイツ、英国、フランス、中国、韓国の1地域・7国について、15の研究開発領域を中心とする研究開発動向（直近2-3年程度）と現在の研究開発（科学技術）政策を以下に示す。

国・地域	概 要	
日 本	研究開発動向	<ul style="list-style-type: none"> • 全体的に研究開発レベルは高いが少数精鋭。生物多様性・生態系区分では欧米豪加が優位。 • 気候変動区分では、温室効果ガス (GHG) 観測衛星、農林業や健康・都市生活、極地への気候変動による影響研究において強み。 • 環境汚染・健康区分では、土壌汚染に関するコンソーシアムが設立。大気中 GHG 濃度や同位体比測定、ノンターゲット分析、薬物の体内動態予測、出生コホート調査、大規模モデル開発など基礎研究が高水準。 • 循環型社会区分では、農業で多面的機能評価や水循環モデル、水管理等が世界を先導。LCA、MFA (物質フロー分析)、MSFA (物質ストック・フロー分析) とともに基礎研究が進展し応用の基盤が強化。様々な評価手法が都市研究に展開、レジリエンス等を含む包括的な定量化理論開発なども拡大。
	研究開発・科学技術政策	<ul style="list-style-type: none"> • 第5期科学技術基本計画では、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を提示。地球環境情報プラットフォームの構築を推進。 • 第四次環境基本計画では、震災復興、放射性物質による環境汚染対策も提示。
米 国	研究開発動向	<ul style="list-style-type: none"> • 全ての領域において高い研究開発レベルを維持。 • 気候変動区分は、気候変動予測で基礎・応用ともに世界を先導。気候変動影響では基礎研究が強い。 • 環境汚染・健康区分では、大気汚染や土壌・地下水汚染に強み。物質循環・環境動態では特に衛星観測で世界を先導、モデル研究でも長い歴史。環境・健康影響や化学物質リスク管理も強い。 • 生物多様性・生態系区分では、モニタリングとデータ整備の国際的な発信源であり、衛星観測も世界を先導。InVEST など生態系サービス評価ツールの開発、Eco-DRR など気候変動関連の基礎研究が進展。 • 循環型社会区分では、Food-Energy-Water Nexus の概念のもとパシフィック・ノースウェスト国立研究所 (PNNL) などで全球水文モデルを開発。農林水産業の環境研究は基礎・応用ともに強い。LCA や MFA、MSFA など資源・生産・消費管理では議論の中心であり、戦略物質の優先順位評価と意思決定への活用などの応用研究・開発が進展。
	研究開発・科学技術政策	<ul style="list-style-type: none"> • 2017年度における科学技術関連予算の編成方針を示す覚書には、9つの優先分野のうち、気候変動、クリーンエネルギー、地球観測、海洋・北極問題が記載。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。 • 環境保護庁 (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、システムアプローチによる研究開発を推進。エネルギー省 (DOE) や国立科学財団 (NSF) でも食糧・エネルギー・水の複合問題について分野融合の研究を推進。
欧 州	研究開発動向	<ul style="list-style-type: none"> • 全区分で研究開発レベルが高く活発。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。 • 気候変動区分では様々な EU プロジェクトにて活発な研究開発を推進、基礎・応用ともに強い。 • 環境汚染・健康区分では、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研究を推進。水質汚染など問題発掘に積極的に関与。エクスポソームに着目した出生コホート調査を実施中。 • 生物多様性・生態系区分では、基礎から応用まで研究者層が厚い。世界規模のデータベースを維持。生態系サービス評価に関する様々な指標を提案。 • 循環型社会区分では、人間活動を含む複数の全球水文モデルを開発。ウォーターフットプリントなど新概念の提唱と普及には圧倒的な伝統と力がある。リサイクル・廃棄物処理ではプロジェクトが多数発足。特に個別選別技術が世界トップ水準で技術のシステム化にも優れる。資源・生産・消費管理では評価指標を継続的に開発し応用も拡大。気候変動対応のための都市研究や事業化も進む。

	研究開発・科学技術政策	<ul style="list-style-type: none"> • Horizon2020 の3本柱の1つ「社会的課題への取り組み」で「気候への対処、資源効率および原材料」を設定（7年間で31億ユーロ）。優先テーマとして、気候変動への挑戦と適応、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、非エネルギー系・非農業系の原材料の持続可能な供給、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、包括的かつ持続的な地球環境観測および情報システムを設定。 • 第7次環境行動計画（2013年）のもと、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。
ドイツ	研究開発動向	<ul style="list-style-type: none"> • 何れの区分も研究開発レベルが高く、注目すべき活動を多数展開。 • 気候変動区分として、気候変動予測、気候変動影響予測・評価の領域で高い研究開発レベルを維持。マックスプランク研究所などが中核となり、気候変動モデル開発のEUプロジェクトCRESCENDOに参画。 • 環境汚染・健康区分では、水質汚染、土壌・地下水汚染などで強み。 • 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。全球水文モデル開発では世界を先導。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。
	研究開発・科学技術政策	<ul style="list-style-type: none"> • 第6次連邦政府エネルギー研究プログラム（2011年）で掲げたビジョン「環境適合性及び信頼性を備えたエネルギー供給構想」に基づき課題や優先事項を設定。低炭素化、エネルギー高効率化、再エネ導入、省エネ、高効率都市、気候保全（炭素管理へのスマートアプローチ）等が該当。その他、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・持続的利用の分野の研究を推進。 • 気候変動対策の中に、資源効率性の向上、森林管理、草原・湿原保全なども位置付け、気候変動と他の課題を一体的に捉えた対策を実施。
英国	研究開発動向	<ul style="list-style-type: none"> • 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。 • 気候変動区分ではハドレーセンター等が早くから地球システムモデル（ESM）開発を手がけ国際的牽引役。 • 環境汚染・健康区分では、大気モデル開発のレベルが高い。土壌・地下水汚染ではサステイナブルレメディエーションの研究開発が加速、ISO規格提案が進行中。国際窒素管理システム（INMS）を主導。 • 生物多様性・生態系区分では、長期モニタリングと解析から温暖化による生態系変化を明らかにしている。市民によるデータ蓄積、観光統計による生態系サービス情報収集、生態系サービスの貨幣換算評価も推進。
	研究開発・科学技術政策	<ul style="list-style-type: none"> • 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推進。 • 自然環境研究会議（NERC）の主要テーマとして、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）技術が該当。 • 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、先進的かつ時勢を得たテーマ抽出とファンディングを実行。
フランス	研究開発動向	<ul style="list-style-type: none"> • 特に水循環や農業の領域で存在感を示す。 • 循環型社会区分の水循環では、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。農業における環境研究では各種予測技術に強み。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。
	研究開発・科学技術政策	<ul style="list-style-type: none"> • EUのHorizon2020との整合性を重視したSNR France Europe 2020では、社会的課題として、資源管理および気候変動への対応、持続可能な輸送と都市システム、横断的テーマとして、地球系：観測、予測、適応などが記載。

		<ul style="list-style-type: none"> GHG削減努力とともにEUも推し進める循環型経済（Circular Economy）への移行も推進。 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持。
中 国	研究開発動向	<ul style="list-style-type: none"> 全体的に他国・地域と比較して顕著な成果はみられないものの、精力的に研究開発を推進。 気候変動区分では観測衛星打ち上げや地球システムモデル（ESM）開発など国家的にテコ入れ。北極では砕氷船整備や小型衛星開発を進め応用研究が進展。 環境汚染・健康区分では、中国科学院傘下の研究所や大学で「国家重点実験室」研究が進行中。 生物多様性・生態系区分では、近年急速に研究者人口が増加しデータベース整備も組織的に実施。生態系サービスの評価研究も上昇傾向。 循環型社会区分では、膜分離活性汚泥法（MBR）などの実証規模研究を実施。政府が関心を持つ希少資源についてはMFA研究が活発化。LCAなどの手法を用いた都市の評価研究が急速に進展。
	研究開発・科学技術政策	<ul style="list-style-type: none"> 「国家イノベーション駆動発展戦略綱要」（2016～2030年）では戦略的ミッションを設定。「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」などが記載。 グリーン・低炭素という循環型発展モデルの推進が求められているとの認識において、エネルギー開発一辺倒ではなく環境配慮を重視。
韓 国	研究開発動向	<ul style="list-style-type: none"> 環境都市領域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。それ以外に、世界を先導する研究開発や成果、大きな特徴はみられない。
	研究開発・科学技術政策	<ul style="list-style-type: none"> 第3次科学技術基本計画（2013-2017年）における環境関連項目では、①クリーンで便利な生活環境の構築として、気候変動対応力の強化（CCS）、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）、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として、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）を提示。

以上、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研究開発の主な潮流を6点抽出した。

1. 統合化

- 気候変動や汚染、生態系、資源利用なども含めた統合的研究への発展
- 地球システムモデル（ESM）への関連要素の取り込み
- Food-Energy-Water Nexus 概念の反映
- 環境面・社会面・経済面を考慮した持続可能性の概念の反映

2. 大規模化

- 衛星観測による情報の質・量・種類の飛躍的向上
- 人間活動データや地球観測データを活用した健康影響の把握
- 出生コホート調査やエクスポソームの把握
- 水銀などの有害物質の全球動態モデル

3. 高度化

- 代謝研究・分析技術の進展によるAOP（Adverse Outcome Pathway）への注目
- 同位体研究の進展による物質循環理解の深化
- 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など新たな

- な汚染物質の認識と対応
- ・選別技術をはじめとするリサイクル技術の高度化
- 4. 可視化
 - ・モデル比較、ダウンスケーリング、アンサンブルシミュレーションの実施
 - ・生態系サービスの定量評価
 - ・リサイクル技術のデータベース構築とデータベース連携、物質フローの可視化
 - ・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
- 5. ネットワーク化・共有化
 - ・衛星や地上局等の観測ネットワーク構築と得られたデータの共有
- 6. 研究スタイルの変化
 - ・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、参加モデルを横断的に分析して論文を執筆する形式に変化

上記及び、社会・経済の動向も踏まえ、日本が現在、国として、大学等を中心に取り組むべき環境分野の研究開発の内容として、以下を提案する。

1. 統合的な研究開発の実施

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、社会等の関連要素全体を扱う統合的な研究開発への発展

- ・対策間のトレードオフ・シナジー効果の解明
- ・社会的側面も含む多面的な影響や価値の可視化、経済や社会への反映
- ・社会・経済データを含むビッグデータや地球観測データの活用
- ・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）の把握
- ・持続的な土地、水、生物資源の利用
- ・資源循環研究や技術の高度化・システム化（水、希少資源、廃プラ、廃素材や廃機器等）

2. 地球システムモデル（ESM）・気候変動影響予測モデルの開発と応用

- ・予測精度向上（人間活動を含む多様な要素取り込み、ESMでは炭素排出に対する気候過渡応答（TCRE）の評価精度向上、高度な海洋生態系モデルの結合等）
- ・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
- ・ダウンスケーリング、アンサンブルシミュレーション
- ・影響予測・評価の強化と対象の拡大
- ・その他の環境変動予測・評価

3. 観測や評価の低コスト化・省力化

- ・効率的かつ省メンテナンスで統計学的にも優れた観測手法の開発
- ・AOP研究の推進（毒性試験の省力化・迅速化）

また、体制面における課題として以下を示す。

- ・モニタリングやシステム開発の継続性と研究プラットフォーム（衛星や観測船等）維持・強化（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）

- 要素技術だけでなくシステム化の研究開発の推進
- 計算機資源の拡充
- 社会受容のための技術評価とリスク評価
- 技術資源のデータベース化

国際比較表まとめ (環境分野)

【気候変動】

国	フェーズ	気候変動予測				気候変動影響予測・評価											
		観測		ESM		水循環		自然災害		自然生態系		農林業		健康・都市生活		極地	
		現状	トレンド	現状	トレンド	現状	トレンド	現状	トレンド	現状	トレンド	現状	トレンド	現状	トレンド	現状	トレンド
日本	基礎	◎	↑	○	→	△	↓	○	↓	△	↑	◎	↑	◎	↑	◎	↑
	応用・開発	○	→	○	→	○	→	○	→	○	↑	◎	↑	◎	↑	◎	↑
米国	基礎	◎	↑	◎	→	◎	→	◎	→	◎	↑	◎	↑	◎	↑	◎	↑
	応用・開発	◎	→	◎	↑	○	↑	◎	→	○	↑	○	→	○	→	○	→
欧州	基礎	○	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	↑	○	→	◎	↑	◎	↑
	応用・開発	◎	↑	◎	↑	◎	↑	◎	↑	◎	↑	◎	↑	◎	→	◎	↑
中国	基礎	○	↑	△	↑	△	→	○	↑	○	↑	○	→	△	→	△	→
	応用・開発	△	→	△	↑	○	→	○	↑	△	→	△	→	○	↑	◎	↑
韓国	基礎	○	→	△	→	△	→	△	→	△	→	x	→	○	↑	△	→
	応用・開発	△	↑	△	→	△	→	△	→	△	→	△	→	○	↑	○	→

【環境汚染・健康】

国	フェーズ	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	
		現状	トレンド	現状	トレンド	現状	トレンド	現状	トレンド	現状	トレンド	現状	トレンド
		日本	基礎	○	↓	○	→	◎	→	◎	→	○	→
応用・開発	-		-	○	↓	◎	→	-	-	○	→	○	→
米国	基礎	◎	↑	○	↓	◎	→	○	→	◎	→	○	→
	応用・開発	-	-	○	→	◎	→	-	-	◎	→	◎	→
欧州	基礎	◎	→	◎	→	◎	→	◎	↑	○	→	◎	↑
	応用・開発	-	-	◎	↑	◎	↑	-	-	○	→	◎	↑
中国	基礎	○	↑	△	↑	○	↑	○	↑	○	↑	○	→
	応用・開発	-	-	○	↑	△	↑	-	-	△	↑	△	↑
韓国	基礎	○	↑	△	↓	○	→	△	→	△	↑	△	↑
	応用・開発	-	-	△	→	△	→	-	-	△	→	△	→

【生物多様性・生態系】

国	フェーズ	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	
		現状	トレンド	現状	トレンド
		日本	基礎	○	→
応用・開発	○		↑	◎	↑
米国	基礎	◎	→	◎	↑
	応用・開発	◎	↑	○	↑
欧州	基礎	◎	→	◎	↑
	応用・開発	◎	↑	◎	↑
中国	基礎	○	↑	○	↑
	応用・開発	○	↑	○	↑
韓国	基礎	△	↑	△	→
	応用・開発	△	↑	△	→
豪州	基礎	◎	→		
	応用・開発	◎	↑		
カナダ	基礎	◎	→		
	応用・開発	◎	→		

【循環型社会】

国	フェーズ	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	
		現状	トレンド	農業		林業		水産業		現状	トレンド	現状	トレンド	現状	トレンド
		日本	基礎	○	→	◎	↑	○	→	○	→	○	→	◎	→
応用・開発	○		→	○	↑	○	↑	○	→	○	→	○	→	○	↑
米国	基礎	◎	→	◎	→	◎	↑	◎	↑	○	→	◎	→	○	→
	応用・開発	◎	↑	◎	→	◎	↑	◎	→	△	→	◎	↑	○	↑
欧州	基礎	○	→	○	↑	○	→	◎	→	◎	↑	◎	↑	◎	↑
	応用・開発	◎	→	◎	↑	◎	↑	○	↑	◎	↑	◎	↑	◎	↑
中国	基礎	○	→	○	→	△	→	○	→	○	↑	○	↑	△	↑
	応用・開発	○	↑	○	→	△	→	△	→	△	↑	○	↑	◎	↑
韓国	基礎	○	→	△	→	△	→	○	→	△	→	○	→	◎	→
	応用・開発	△	→	△	↑	△	→	△	→	△	→	△	→	○	↑

(註1) フェーズ
 基礎：大学・国研などでの基礎研究レベル 応用：技術開発（プロトタイプの開発含む）・量産技術のレベル
 (註2) 現状（日本の現状を基準にした相対評価ではなく絶対評価）：
 ◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている ○：ある程度の活動・成果が見えている
 △：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない ×：特筆すべき活動・成果が見えていない
 (註3) トレンド：直近2年程度の取り組み状況。↑：上昇傾向、→：現状維持、↓：下降傾向