

2.8.3 持続可能な土壌環境

（1）研究開発領域の定義

土壌・地下水の汚染物質等に焦点をあて、その把握と拡散防止、除去・浄化に関する研究開発を扱う領域である。土壌・地下水環境における公害原因物質や、人間や生態系への負の影響が懸念される物質等を扱う。具体的には人為活動に伴う揮発性有機化合物、福島第一原子力発電所の事故で放出された放射性物質、難分解性有機フッ素化合物（PFAS）や自然由来重金属などを対象とする。それらの人為的な拡散を抑制する技術や持続可能な方法で除去・浄化する技術、効率的なモニタリング技術、リスク評価に基づくマネジメント技術等を対象とする。

（2）キーワード

リスク評価、サステナブル・レメディエーション、自然由来重金属、放射性セシウム、揮発性化学物質、難分解性有機フッ素化合物（PFAS）、硝酸性・亜硝酸性窒素

（3）研究開発領域の概要

〔本領域の意義〕

土壌汚染は地下水汚染と一体的に考える必要がある。その理由の例として、トリクロロエチレンやテトラクロロエチレンなどの揮発性有機化合物（Volatile Organic Compounds：VOC）が土壌深くの帯水層にまで浸透し、汚染が広域化してしまう問題等があげられる。

我が国で現在利用されている土壌・地下水汚染処理技術は掘削除去が主体である。汚染土壌を掘削してオンサイトまたはオフサイトで浄化処理や埋め立て処分する手法であり、長期の修復期間や多額の費用負担、エネルギー消費をはじめ多様な環境、社会、経済への負荷が生じている課題がある。原位置浄化処理を目指した新技術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、環境だけでなく社会や経済を包含したサステナブル・レメディエーションの進展が期待されている。

我が国では2011年の福島第一原子力発電所事故に伴って放出された放射性セシウムによる土壌汚染対策が大規模に実施¹⁾され、1,300万m³以上の除去土壌が中間貯蔵施設に保管されており、2045年までに県外最終処分を行うことが決まっている。更に、撥水剤や消火剤等に用いられるPFOS（ペルフルオロオクタンスルホン酸）・PFOA（ペルフルオロオクタン酸）等の難分解性有機フッ素化合物（PFAS：ペルフルオロアルキル化合物及びポリフルオロアルキル化合物）による土壌・地下水汚染が顕在化し、指針値が定められるなど社会的に高い関心を集めている。人間活動に由来する汚染への対応に加えて、土壌に自然的原因で含まれる重金属等（以下、自然由来の重金属等）の把握や、リスク評価に基づく合理的マネジメント等の課題も持続的な環境、社会、経済に対して重要である。持続可能な開発目標（SDGs）に関連し、環境保全やリスク低減に加え、住み続けられる強靱な都市づくり、産業、社会の持続的発展の観点を一体的に捉えた土壌環境対策が近年検討されている²⁾。

環境省が1991年度から2020年度までに把握した基準不適合事例累計は15,472件³⁾であるが、多くの中小企業などではそもそも調査されておらず、汚染箇所が多数潜在していると考えられている。中小企業での調査・対策を進めるために、安価な調査対策技術の開発が必要である。

〔研究開発の動向〕

土壌汚染は典型7公害の1つとして古くから認識されていたものの、土壌環境基準の制定や土壌汚染対策法の成立は他の公害と比べて遅かった。その後も新たな知見や汚染問題を受けて、法改正が行われている（図表2.8.3-1）。

図表 2.8.3-1 日本における主な土壌・地下水汚染規制等の流れ

時期	出来事
1870年代後半	渡良瀬川流域の銅汚染をはじめ、鉱山廃水を原因とする農用地の汚染問題
1970年代以降	東京都江東区の鉱さい埋立跡地の六価クロム汚染など都市部の土壌汚染問題
1991年	重金属等10項目について土壌環境基準を設定
1997年	23項目を対象とした地下水の環境基準を設定
2001年	ふっ素およびほう素が土壌環境基準項目に追加
2003年	土壌汚染対策法の成立
2010年	自然由来の重金属含有土も規制対象に追加するなど土壌汚染対策法の大きな改正
2011年	福島第一原子力発電所事故に伴って放出された放射性セシウムによる土壌汚染の対策。放射性物質の除染・減容化の取り組み、研究が活性化。
2014～2017年	東京都豊洲市場の大規模な土壌浄化事業が実施。揮発性化学物質（ベンゼン、水銀等）摂取リスクに係わる対策が社会的に高い関心を集めた
2017年	クロロエチレンや1,4-ジオキサン等の特定有害物質の追加、自然由来土壌や海上埋立地に対する調査・対策の一部が緩和などの土壌汚染対策法の大きな改正
2019年	1,2-ジクロロエチレンの土壌環境基準の見直し
2020年	水質汚濁に係る人の健康の保護に関する環境基準等における要監視項目に「PFOS及びPFOA」が追加され、指針値（暫定）が設定
2021年	カドミウム、トリクロロエチレンの土壌環境基準の見直し（基準強化）

一般に、土壌・地下水汚染の対策コストはきわめて高額で長期間に及ぶ。そのため、環境への負荷が小さく、比較的低コストで実施できる原位置浄化や生物学的処理や自然機能活用による修復技術の普及が期待されている。生物学的処理を利用する修復技術はバイオレメディエーションと呼ばれ、そのうち特に植物を用いる場合にファイトレメディエーションと呼ばれている。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、様々な手法が検討されてきている。バイオレメディエーションはバイオスティミュレーションとバイオオーグメンテーションの2種類に大別される。前者は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処理である。後者は汚染物質の分解菌を外部で高濃度に培養して導入する処理で、分解をより促進して処理できる利点があるが、導入する微生物の安全性評価などが課題となる。また、鉱山跡地や鉱山廃水の対策として、自然的な環境および資材を活用したパッシブ・トリートメント（自然力活用型坑廃水処理）が研究開発されている。

近年、企業や自治体が持続可能な土壌汚染対策を行うに際して、環境面、経済面、社会面を一体的にとらえた対策を行うサステナブル・レメディエーションの考え方が発展してきた。この考え方の下では、効率的かつ低コストであることに加え、使用する資材の安全性や環境適用性を高め、投入するエネルギーの最小化も目指す。企業が操業中で資金に余裕のある段階からしっかりと土壌汚染対策を実施することが持続的な環境マネジメントに有効である。自治体からみても、資金力の弱い中小企業が操業中から土壌汚染対策を行うことが特に重要と考えられる。今後は、コストと効果のバランスを重視した土壌浄化の実践、ならびに環境施策と都市計画とを両立させた合理的なサステナブル・レメディエーションの実践、企業が操業中から土壌汚染の調査や浄化を行うことなどが求められる^{2),4)}。

自然由来の重金属等による土壌環境への負荷の軽減も重要な課題である。自然由来の重金属等は基準値の数倍という低濃度で広く分布していることが多い。我が国ではヒ素、鉛、カドミウムなどの自然土壌中での

濃度が比較的高く、トンネル工事等に伴う土砂や岩石に含まれる重金属等が基準を超過する事例があり、その合理的な対策と管理、ステークホルダーとの対話が求められている。人為的な高濃度の汚染と異なり、低濃度で大量の基準超過土壌に対応するため、低コストかつ周辺環境に配慮した、健康リスクの大きさに基づいた環境対策が求められる。土砂から重金属等の溶出を低減する技術、吸着層や吸着マットなどによる重金属等の除去技術や封じ込め・拡散防止技術などが研究開発されている。リスク評価に基づく合理的な措置の検討も進んでいる。土壌汚染対策法においてもリスク評価に基づき一定リスク以下であれば、飛散防止のため表面被覆や帯水層に接しないよう遮水工を設ける等の措置を講じて、自然由来等土壌を土木構造物の盛土材料等として利用可能となっている⁵⁾。

土壌汚染はストック型の汚染であり、基準値が設定される以前の汚染に対して対応しなければならない。そのため新規化学物質に対する土壌・地下水汚染分野での評価や対策も進められている。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。除染で発生した1,300万m³以上の放射性セシウムを含む除去土壌や廃棄物は現在、中間貯蔵施設で保管されており、2045年までの県外最終処分に向けて、環境省や中間貯蔵・環境安全事業株式会社（JESCO）による産官学が連携した技術実証として、減容化（土壌洗浄および熱処理）や再生利用に関する技術開発や実証試験が進められている。

■論文・特許動向

本研究開発領域の論文および特許動向を調査した結果、以下のポイントが明らかになった。なお、調査結果の詳細は「研究開発の俯瞰報告書 論文・特許データからみる研究開発動向（2024年）」の「3.1.E8.3 持続可能な土壌環境」にて報告している。

- ・論文数の国別推移に関しては、近年中国の増加が顕著であった。中国では改正環境保護法（2015年）や土壌汚染防地法（2019年）の施行に伴い、土壌・地下水汚染に係る基礎研究の予算が増大したことが背景にあると考えられる。次いで欧州が論文数で優位性を示す。欧州は各地で土壌・地下水に関する関心が非常に高く、国際的な科学技術や規制をリードしている。近年はインドの伸びも著しく、2021年時点で米国の論文数を上回っていた。
- ・日本は福島原子力発電所事故以降、放射性物質に関する基礎研究が加速されたが、本領域における論文数は他国と比較し低調であった。
- ・特許ファミリー件数、特許ポートフォリオの総価値（Patent Asset Index）ともに2021年において中国が約80%のシェアを有し、他国を圧倒していた。Patent Asset Index上位オーナーはいずれも中国の研究機関、企業が並ぶ。日本の特許ファミリー件数シェアは中国に次ぎ2位であるが、近年減少傾向にあった。

（4）注目動向

〔新展開・技術ピックアップ〕

① リスク評価に基づく合理的なマネジメント

土壌・地下水汚染対策では、環境リスクに応じた合理的なリスクマネジメントが求められる。土壌汚染による環境リスクを科学的に評価するためのモデル開発が行われている。例えば、（社）土壌環境センターのサイト環境リスク評価モデル（SERAM）や、産業技術総合研究所の地圏環境リスク評価システム（GERAS）があり、多様な曝露経路を想定した健康リスクを評価するためのツールが整備されてきている。さらに、環境省が「地下水汚染が到達し得る距離の計算ツール」、「措置完了条件（目標土壌溶出量・目標地下水濃度の計算）の計算ツール」、「自然由来等土壌構造物利用施設における新たな地下水汚染を引き起こさないための措置の決定に係る個別サイト評価の計算ツール」を公開するなど、土壌汚染対策法の枠内においても環境リスク評価の利活用が進んでいる。

リスク評価モデルの活用事例として、汚染地から離れたオフサイトでの土壤汚染のリスクマネジメント、汚染物質の地下水に沿った移動距離の推定、浄化目標値の設定、さらには各種の浄化技術の有効性や残存リスクの将来的な予測など、多岐にわたっている。最近では、建設発生土のリスク評価や土地利用用途に応じた浄化目標の設定などの環境政策にも活用されている。先に述べたとおり、法制度にリスク評価の枠組みが導入され、公的にオーソライズされた環境リスク評価モデルや計算に用いるパラメータの整備、使用が進んでおり、リスク低減とコスト軽減を同時に追及する合理的なサステナブル・レメディエーション達成への基礎となりうる。

② 原位置浄化技術の新規開発

化学的処理による原位置浄化技術として、フェントン法や鉄粉を用いた酸化・還元処理法、薬剤による不溶化処理、透過性浄化壁を用いる手法などがある。これらは土壤・地下水汚染、および土壤から溶出した重金属、VOC、鉱物油に適用されている。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、プラズマや高温加熱等によるVOCの分解処理などが実用化されている。

物理的処理による原位置浄化技術として、土壤洗浄や土壤ガス吸引、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。土壤洗浄では、土壤粒径により汚染物質の存在割合が大きく異なることから、分級処理と選別処理のプロセスが重要となる。土壤ガス吸引法は主に不飽和帯のVOCの除去に適用されている。スパージングは主に地下水汚染に適用されている。空気や蒸気、さらに反応性のガスなどを利用した種々のスパージング技術が開発され、土壤汚染現場でも実践されている。マイクロバブルの長期にわたる機能性や選択性を生かし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。また、土壤ガス吸引法やスパージングは、電気発熱法と併用して効率を高める事例も報告されている。

③ 持続可能性からみた土の利用

我が国は土砂処分用地の取得が難しいため、掘削土の再生利用は重要課題であり、様々な取り組みが行われてきた。国土交通省が2020年に発表した「建設リサイクル推進計画2020」では、高い再資源化率の維持と循環型社会形成へのさらなる貢献、およびICT（情報通信技術、Information and Communication Technology）を活用した生産性向上が求められている⁶⁾。建設工事に伴って発生する土は廃棄物でないためこの計画の範囲外だが、トンネル掘削工事プロジェクト等から大量に発生する土の有効利用は、資源循環の観点からみて重要な課題と言える。2018年の建設発生土の発生・処理状況をみると発生土の処分量は減少し、工事内・工事間利用等の有効利用が2014年から増加した。これは発生土の有効利用を図るための制度整備が進んだこと、地盤改良等の技術が発展したことによるものと言える。また、建設工事に伴って発生する汚泥（建設汚泥）を有効利用するための地盤改良技術の開発も行われている。

④ 自然由来重金属等を含む土の利用

大量に発生する土の処理と有効利用を進める上で、自然由来の重金属等の存在は無視できない。2002年に施行された土壤汚染対策法は、2010年に大きく改正され、自然由来の重金属等も法対象となり、より一層の配慮が行われるようになった。しかしながら、多くの自然由来の重金属等が基準超過しても比較的低濃度であること、特定の地質に分布していることを踏まえると、対応が過剰であると指摘する声があった。その中で2017年に同法は改正され、自然由来の重金属等を含有する土を適正な管理の下で移動・活用することが可能になり、今後はリスクに配慮しつつ切り盛りのバランスが図られることが期待されている⁷⁾。

⑤ バイオレメディエーションの実践

バイオレメディエーションには環境への負荷が小さく、比較的低コストであることなど様々な有効性がある。

一方、汚染物質の分解菌を新たに汚染土壤に導入するバイオオーグメンテーションには社会受容性の確保が必要となり、遺伝子組換え改良菌を利用する場合には一定の規制がかかる。我が国では、環境省と経済産業省の共管として、「微生物によるバイオレメディエーション利用指針」が運用されている。バイオオーグメンテーションで、自然環境から分離した特定の微生物を選択して培養されたものを意図的に導入する際には、環境省と経済産業省の双方が審査することで微生物を安全に活用可能な状況となっている。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行われている⁸⁾。分解速度の遅い1,2-ジクロロエチレンやクロロエチレンを短期間で基準値以下にすることが課題となっている。

⑥ 揮発する化学物質に対する土壤汚染対策

東京都豊洲市場土壌・地下水汚染調査において、ベンゼンや水銀等の揮発による地上施設での摂取リスクに関する検討が行われた。従来の土壤汚染対策法では、揮発性物質の気相経由での曝露は対象となっていなかったため、地下からの揮発フラックスおよび健康リスクを科学的に明らかにすることが求められた。改正土壤汚染対策法の付帯決議でも、気相経由での曝露への対策が指摘されている。最近では、揮発性物質の揮発フラックスの観測および予測に関する研究開発が実施され、地上施設における漏洩防止のための遮蔽構造や建物内の換気設備などが技術的に検討されている。

⑦ 科学的自然減衰（MNA；Monitored Natural Attenuation）

薬剤を使用せずに、低エネルギー消費で、鉱物や微生物などによる分解や揮発・拡散等による希釈といった環境が有する自然力を活用した持続可能な対策の1つとして、MNAの国内外の鉱山跡地への適用が期待されている。MNAはモニタリングしながら自然力による浄化の進行を科学的に判断するプロトコルで、鉱物油などの汚染サイトで適用され始めている。欧米では数多くの実証事例が報告され、我が国でも山形県、熊本県などでのVOC汚染のモニタリングと科学的な検証結果が報告されている。微生物分解が活発な状況や移流・拡散により汚染物質が減衰するような環境では、MNAの導入が期待できる。また、他の浄化技術を用いた際も、基準値の数倍程度まで浄化でき、健康リスクの大きさが懸念されない状況となっていれば、その後も時間や費用、エネルギーを多くかけて浄化を続けるよりは、MNAを選択することもあり得る。MNAを促進するための社会システムやガイドラインの整備、リスクコミュニケーションの促進が必要である。

[注目すべき国内外のプロジェクト]

・環境省 低コスト・低負荷型土壤汚染調査対策技術検討調査

地下水・土壤汚染の研究開発支援について、簡易で低コスト・低負荷型の土壤汚染調査手法や対策技術を実用化して普及させるため、様々な処理技術を開発・利用してきている。環境関連企業やゼネコン、各種製造業が参入し、汚染土壤の浄化・修復を実施している。

・サステナブル・レメディエーションに関する取り組み

2016年に産業技術総合研究所でサステナブル・レメディエーション・コンソーシアムおよびSuRF-JAPANが設立され、世界各国のSuRF（Sustainable Remediation Forum）と連携して、持続可能な土壤汚染対策に取り組んでいる。また、東京都環境局が「環境・経済・社会に配慮した持続可能な土壤汚染対策ガイドブック」を2022年に発行するなど、産学官を通じた取り組みが進んでいる。

・JESCO 除去土壌等の減容等技術実証事業

中間貯蔵開始後30年以内の最終処分を見据えた除去土壌等の減容・再生利用等に活用し得る実用的、実務的な技術について実証試験を行い、除去土壌等の減容・再生利用等の促進に資することを目的とした事業。2016年から2023年度までに58の実証テーマが採択されている。

・文部科学省/JAEA「英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業」(2015年～)

国内外の英知を機関や分野の壁を越えて融合・連携させることにより、福島第一原子力発電所の廃炉現場の課題解決に資する基礎的・基盤的研究及び人材育成を推進している。2023年度は「課題解決型廃炉研究プログラム」「国際協力型廃炉研究プログラム(日英原子力共同研究)」で公募が行われ、それぞれ9課題、2課題が採択されている。

・土壌のマイクロプラスチック汚染

欧米では土壌のマイクロプラスチック汚染に関するプロジェクトが進められ、土壌・大気・水・植物等の相互作用に及ぼす影響を解明し、そのメカニズムを明らかにすることを目指している。

- ・米国 NSF「CAREER：マイクロプラスチック汚染が土壌水文学に及ぼす影響とメカニズムの解明」(2024-2029)
- ・欧州 Horizon 2020「PlastiSol：マイクロプラスチック汚染サイクルにおける土壌の影響定量化と大気・海洋・土壌のマイクロプラスチック相互作用のモデル分析」(2022-2025)

・バイオレメディエーションによる土壌修復

欧州では、Horizon EuropeやLIFEの枠組みの中で、バイオレメディエーションによる土壌修復の研究が進められている。

- ・LIFE「A step further in bioremediation: mycoremediation for soil recovery」(2020-2024)
- ・Horizon Europe「SYMBIOREM：Symbiotic, circular bioremediation systems and biotechnology solutions for improved environmental, economic and social sustainability in pollution control」(2022-2026)

(5) 科学技術的課題

① バイオ(ファイト)レメディエーションの高度化

浄化効果の持続性や基準達成までに時間がかかるなどといった技術的な課題が未だ少なくない。地質や環境の諸条件による制約が特に大きく、対象とする物質や汚染サイトごとに現象が異なるなどの問題がある。微生物の改変や耐性を中心とした基礎生物学や遺伝子情報の研究と、地質環境における微生物の生態や挙動に関する研究は別々に発展してきた。これらを融合して現場の条件に適合した効率的な技術を創出する取り組みも進められている。近年、汚染サイトで採取した微生物を汚染物質に適合させ、さらに現場の環境条件に応じた微生物群の改変を可能にする研究開発が進められている。

また、揮発性有機塩素化合物による汚染地盤の内部を分解微生物に最適な温度に加温制御することで、浄化期間を半分に短縮するとともに、エネルギー使用や二酸化炭素の排出量も大幅に削減する技術開発も進められている。適用できる汚染サイトや対象物質を増やすことが期待される。

② 浄化・修復対策技術-複雑な汚染現場の状況と多様なエンジニアリング条件

汚染物質の溶出メカニズムは、汚染物質の種類や汚染サイト毎の多様な要因が影響しており、実環境下での汚染物質の長期的挙動を高精度に予測することが難しい。土壌汚染の現場では、土質や地質の違い、土地の形態や利用条件などが様々であり、汚染サイトごとの個別対応が必要である。建設工事(土木分野)

や地盤調査（地質分野）との連携による対策の更なる効率化が課題である。また、建物直下における汚染の調査・対策技術として適用可能な水平ボーリング技術による調査技術、水平井戸を活用した土壌ガス吸引やエアスパーキング技術などの技術開発が進められているが、操業中でも適用できる調査・対策技術の更なる効率化・低コスト化が課題である。特に中小企業でも対応できる安価な技術の開発ニーズは高い。

土壌汚染の対策技術には効率性、コスト、土地の特徴や広さ、土地利用形態、社会的側面などの多様な制約条件がある。個々の技術で適用可能性が異なり、それらの関連性を総合的に評価できる仕組みも存在しない。エンジニアリングマニュアルの整備が望まれる。

③ 調査・分析技術

(a) 安価で正確な公定法分析

土壌汚染の規制対象物質は30種類近くもあり、更に土壌汚染サイトでは水平方向、鉛直方向に多数の土壌を採取して分析する必要があり、分析コストは膨大である。正確さを担保しつつ、効率的かつ低コストで実施できる公定法の改善や一斉分析プロトコルの開発が課題である。1,4-ジオキサンやPFASのような新たな懸念物質についても、効率的かつ低コストで実施できる調査技術、分析技術の開発が課題である。

(b) 現場で簡易に測定可能なオンサイト技術

公定法分析以外でも現場で簡易に汚染物質の濃度レベルを把握し、汚染分布の詳細な把握や基準超過の可能性の判定ができれば、実作業上のメリットが大きい。その実現には、VOCや重金属等を対象とした簡易で安価な現場型オンサイト測定・検査技術の開発が課題となる。また、調査が進んでいない中小企業でも安価に汚染の有無の判定ができる簡易分析技術の開発も課題である。

(c) 溶出試験を代替する試験法（カラム試験など）

重金属等の溶出試験法には再現性、ばらつきをはじめとした多くの技術的な課題がある。これを代替、補完可能な公的試験法としてISO準拠のカラム試験法の開発が求められている。

④ リスク評価技術の社会実装と合意形成の円滑化

(a) リスク評価手法の社会実装

土壌汚染対策は、リスクベースの合理的なリスクマネジメントが国際的に主流だが、我が国では技術的に成熟していないなどの理由から導入されていない。これは掘削除去偏重の大きな原因にもなっている。今後はリスク評価に基づく合理的な対策の実現可能性を高め、広める必要があると考えられている。リスク評価結果等に基づき対策手法を検討するためには、周辺住民等とのリスクコミュニケーション手法の構築が重要となる。

(b) モデリング技術の高度化

リスク評価モデルの高度化に加えて、現場の高次元データを用いた順逆双方向の解析などの信頼性の高いリスクモデリング技術が望まれる。そのため、データ駆動による数理統計的な解析技術の開発、現場での実証試験によるデータベースの蓄積が求められる。

(c) リスクコミュニケーションや合意形成の円滑化

土壌汚染に代表されるストック型の環境汚染問題を円滑に解決するための社会的な取り組みとして、レギュラトリー・サイエンスを基礎とした文理融合型のリスクコミュニケーション手法の構築と社会実装のための研究開発が必要である。

⑤ 新規化学物質に対する土壌汚染対策技術

近年、1,4-ジオキサンやクロロエチレンなど新規化学物質の土壌・地下水汚染の評価や対策が進展しているが、1,4-ジオキサンについては効率的な調査技術の開発が課題となっている。2020年に水質の要監視項目に加わったPFOSやPFOAに代表されるPFASについても注視していく必要がある。環境省の全国

状況把握調査では、河川だけでなく地下水や湧水からも指針値（PFOSとPFOAの合算値で50 ng/L）を超える濃度が検出されている。また、米軍基地周辺などでも検出事例が報告されており、土壌汚染実態の把握や、効率的な調査、対策技術の検討は喫緊の課題である。

このような新規物質の気相・水相・固相間の分配特性や環境中の挙動は、物質毎・土質毎に異なり、不明な点も多い。環境動態の把握と、それを考慮した簡易調査法の開発やシミュレーション技術の確立が求められる。また、新規化学物質による汚染は、産業活動に起因した人為由来によるもののほか、自然界の反応プロセスで副生成物として生じるものもあり、そのメカニズムの解明も重要な研究課題である。

⑥ グリーナー・クリーンアップ（Greener Cleanup）の社会実装

グリーナー・クリーンアップは米国環境保護庁で実践されているスーパーファンド法に基づく実行計画である。土壌汚染対策を他事業と連携で実施し、環境負荷を最小限に抑えて汚染対策する取り組みを提唱している。土壌環境に限定せず、広く地球環境問題を見据えた将来的な枠組みで、大気、水質、地球環境を一体的にみた環境保全を目標にしている。エネルギーの最小化、コストの軽減を図る技術体系である。汚染対策の資材を最小化し、廃棄物の循環を促進するため、公共事業や建設工事などと連携して総合的な設計を実現し、長期間にわたり生態系を配慮したトータルな環境改善を実践できる。

⑦ 地圏環境情報の整備とリスク情報のコミュニケーションツール

土壌汚染対策では、重金属等の地域特性やバックグラウンドの把握などの最も基本となる土壌環境に関する各種情報の整備が遅れている。そのため、地域ごとの地質情報を反映した地球化学図、土壌環境基本図の整備、リスクマップの作成と公開が求められる。

地球化学情報やリスク情報などを市民が正しく理解するための仕組みが存在しない。そのため土壌汚染リスク情報の整備とコミュニケーションツールの開発が課題となる。

⑧ 土壌マイクロプラスチック汚染

国連環境計画（UNEP）の報告によると、農地の土壌には、海洋よりも大量のマイクロプラスチックが混入している可能性がある。これらのマイクロプラスチックは、温室用のパネルなど農業用のプラスチック製品が劣化していく過程で生じ、土壌や地下水に浸出する。土壌中のマイクロプラスチックを検出する標準的な方法の開発や、生分解性プラスチックのような材料開発が求められる。

（6）その他の課題

① 法制度と技術開発のギャップ

我が国の環境法は分野別に制定され、土壌環境と他の環境（大気、水質、地球環境など）を一体的にとらえていない課題がある。土壌汚染対策法での特段の問題は、国際的に主流であるリスクベースの対応をとっていないこと、溶出量と含有量の両者を採用していることなどが具体的にあげられる。これらは我が国独自の考え方であるため、国内外で開発した新規の対策技術を導入する際に、技術と法制度のギャップが課題となる場合が多い。バイオ（ファイト）レメディエーションのように、合理的で高度な技術であっても、リスクベースの考え方がなされないために導入が困難な技術や手法が多く、掘削除去偏重となる原因となっている。我が国では、鉱物油（ガソリン、軽油、重油など）の規制は行われていないが、トルエンやキシレンといった健康影響が懸念される化学物質が多く含まれ、消費量も多いことから鉱物油の土壌汚染に関わる法整備が期待される。

② 新規汚染物質への対応

土壌汚染はストック型の汚染である。将来、新規の土壌汚染物質に加わる可能性のある物質として、水

質汚濁の要監視項目やPRTR対象物質等の他の法制度等で管理が求められている有害化学物質についても、汚染の未然防止の取り組みが重要である。更には、事故や災害に伴う有害物質の環境流出についても、土壌や地下水の汚染の可能性を想定して、対策を検討しておく必要がある。

③ 地域特性と人材育成

我が国は、地質が複雑で鉱山活動が盛んだった地域が多く、地域により重金属のバックグラウンド値の差異が大きい。このような地域特性は、居住する住民活動や農業活動、生態系を保全するための基盤であり、土壌汚染対策への反映が重要である。土壌汚染対策法は新しく、また非常に複雑な法体系のため、社会システムの整備や人材育成が追いついていない。土壌汚染の専門知識を有する人材が極めて少なく、調査・評価、対策技術の現場適用の進捗が遅れている。

④ 低濃度汚染土や建設副産物の利用可能性に関する世界の動向

諸外国の研究動向をみると、地盤汚染や廃棄物地盤の浄化技術に関する研究事例は多いが、上述した低濃度汚染土の利用可能性に関する学術研究は極めて少ない。これは、多くの先進国では土砂処分用地の確保が容易で、低濃度汚染土の再資源化が必ずしも求められるわけではないためである。しかし、EUでConstruction & Demolition Waste Management Protocolが2018年に策定され、低濃度汚染土の活用に向けた手法が議論されつつあるように、特に欧州で土壌の持続可能な利用は重要な地球環境課題として認識され始めている。自然由来重金属等のみならず、放射性物質を低濃度で含む土や、微量の有害物質を含む建設副産物の持続的な有効活用も、今後の重要課題である。

⑤ アジア諸国等との国際的共同事業

アジア諸国において土壌汚染対策に関する環境規制法の制定が進んでいる。予防措置を中心とした科学的なリスク管理の枠組みも提案されており、アジア諸国と連携して土壌汚染対策を共同で実践していくことは、国家や企業の環境対策のみならず、国際的なセキュリティの観点からも重要である。

開発途上国での自然由来ヒ素、フッ素、鉛等の土壌・地下水中の健康有害物質のモニタリングデータは先進国と比べて不足しており、国際貢献を果たしていく必要がある。

⑥ 硝酸性・亜硝酸性窒素のモニタリングと自治体連携の対策

地下水汚染の原因となる硝酸性・亜硝酸性窒素のモニタリングが欧米と比べて少ない。我が国では水道水源としての地下水利用が限定的だが、硝酸性窒素等は乳児にメトヘモグロビン血症（ブルーベビー症候群）を引き起こす。我が国の地下水の水質汚濁に関する環境基準に対し、20年以上にわたり硝酸性窒素が最も超過している。硝酸性窒素等の主な供給源は生活由来、農業由来（施肥）、畜産由来（家畜排せつ物）であり、安定同位体比による供給源推定などの研究蓄積は既にある。環境省は、地方自治体の現状把握、対策立案、取組推進のため「硝酸性窒素等地域総合対策ガイドライン」を2021年に定め、公表した。水道水源を地下水とした面的汚染地域では、自治体の垣根を超えた一体的対策が必要である。

(7) 国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	◎	→	●福島第一原子力発電所事故以降、放射性セシウムの吸・脱着やモニタリングなどに関する放射性物質に関する基礎研究が加速された。 ●重金属類や揮発性有機化合物などの土壌・地下水汚染研究領域で非常に重要な基礎研究に対して、依然として予算の減少が続いている。
	応用研究・開発	◎	→	●福島第一原子力発電所事故以降、放射性物質による汚染の浄化や汚染水のモニタリング技術および処理技術などの応用研究・開発が加速され、復興支援に貢献した。 ●自然由来の重金属類や揮発性有機化合物による土壌汚染に係る低コスト・低環境負荷の技術開発は予算と提案数の減少に伴って減速傾向であり、加速する必要がある。 ●鉱山や工業跡地を中心に、持続可能な政策を目指したサステナブル・レメディエーションの研究開発が盛んに進められている。
米国	基礎研究	◎	→	●米国国立科学財団（NSF）や米国環境保護庁（US EPA）などが継続的に土壌汚染に係る基礎研究を支援し、推進している。環境中の微生物や植物など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ている。
	応用研究・開発	◎	→	●US EPAや米国エネルギー省（DOE）などが管理する実汚染サイトで、開発技術の検証や実証試験ができる。応用研究の実施環境としては非常に恵まれている。
欧州	基礎研究	◎	→	●英国やオランダ、イタリア等が環境的側面、社会的側面、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を継続的に支援している。 ●欧州 AquaConSoilが隔年で開催され、土壌・地下水汚染問題に加え、水資源管理、底質環境などとの一体的な観点で持続可能な利用と管理について最先端の検討がなされている。
	応用研究・開発	◎	↗	●欧州各国で土壌・地下水に関する関心が非常に高く、国際的な科学技術や規制をリードし、他地域に対する優位性を一段と高めている。 ●英国を中心に提案されたサステナブル・レメディエーションに関する国際標準規格（ISO 18504：2017）が成立した。 ●ドイツを中心に、ポリ塩化ビニフェル（PCB）や多環芳香族炭化水素（PAH）、ダイオキシンなどの汚染物質に係る国際標準規格の提案や議論が行われている。
中国	基礎研究	◎	↗	●環境に対する関心が高まりから、環境への投資も年々増加している。特に改正環境保護法の施行（2015年1月）や土壌污染防治法の施行（2019年1月）に伴い、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。 ●土壌汚染に関する基礎研究では、農用地などを対象として、生物の浄化作用についての研究が多く実施されている。工業用地を対象とした研究では、汚染源の遮断やリスクマネジメントなど、海外の最新の動向を踏まえた対策の導入が検討されている。特に工業用地の浄化に関しては、海外から優秀なエンジニアを招聘する事例も増えている。 ●地下水汚染に関する基礎研究では、放射性同位元素トレーサーによる汚染源特定の研究に関心が集まっており、国際会議や論文の発表件数が増えている⁹⁾。
	応用研究・開発	◎	↗	●中国は土地が100%国有であるため、現場または原位置実証研究を行いやすい利点がある。 ●中国国内で開発技術した技術のほか、欧米などで開発された技術の検証やクロスチェックが複数の大型プロジェクトで行われている。 ●土十条と呼ばれる土壌汚染防止行動計画（2016年5月）や土壌污染防治法の試行（2019年1月）に伴い、浄化技術やリスク低減措置、サステナブル・レメディエーション等の応用研究・開発が飛躍的に進展している。

				●植物 (LACs) による土壌の中の重金属の除去 (Phytoexclusion) の応用実験も行われている ¹⁰⁾ 。
韓国	基礎研究	○	→	●韓国国内において、特に目立った動きはない。 ●留学生や研究者の海外派遣は目立つようになってきている。
	応用研究・開発	△	→	●海外技術の導入や外国との連携により、今後応用研究が加速される可能性が極めて高い。

(註1)「フェーズ」

「基礎研究」：大学・国研などでの基礎研究レベル。

「応用研究・開発」：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」 ※我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。

◎：他国に比べて特に顕著な活動・成果が見えている ○：ある程度の顕著な活動・成果が見えている

△：顕著な活動・成果が見えていない ×：特筆すべき活動・成果が見えていない

(註3)「トレンド」

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

参考・引用文献

1) 高畑陽, 他「アカデミックロードマップ:テーマ:地盤環境:8-3地下水地盤環境」公益社団法人地盤工学会, https://www.jiban.or.jp/images/file/AR_PDF/8-3AR.pdf, (2023年2月2日アクセス) .

2) 駒井武「SDGsに向けたサステナブル・レメディエーション」『第33回環境工学連合講演会講演論文集』(東京:日本学術会議土木工学・建築学委員会, 他, 2021), 21-24.

3) 環境省 水・大気環境局「令和2年度 土壌汚染対策法の施行状況及び土壌汚染調査・対策事例等に関する調査結果 (令和4年5月)」環境省, <https://www.env.go.jp/content/000040441.pdf>, (2023年2月2日アクセス) .

4) 保高徹生, 古川靖英, 張銘「わが国と諸外国のサステナブル・レメディエーションへの取り組み」『環境情報科学』46巻2号(2017):43-47.

5) 環境省「自然由来等土壌構造物利用施設の例 汚染土壌を構造物の資材として利用できるようになりました」<https://www.env.go.jp/water/dojo/gl-man/naturepamph2021.pdf>, (2023年2月2日アクセス) .

6) 国土交通省「「建設リサイクル推進計画2020～「質」を重視するリサイクルへ～」の策定について」https://www.mlit.go.jp/report/press/sogo03_hh_000247.html, (2023年2月2日アクセス) .

7) 勝見武「法改正等を踏まえ、自然由来物質を含む土への対応を考える」『基礎工』47巻6号(2019):2-5.

8) 日本水環境学会 土壌地下水汚染研究委員会「土壌地下水汚染に関する最近の研究動向 2021」『水環境学会誌』44巻3号(2021):78-84.

9) Huixia Wang, et al., “Research Progress on Indicator of Groundwater Pollution Identification and Traceability,” *Research of Environmental Sciences* 34, no. 8 (2021) : 1886-1898., <https://www.hjkxyj.org.cn/en/article/doi/10.13198/j.issn.1001-6929.2021.03.10>, (in Chinese).

10) Liang Wang, et al., “Phytoexclusion of heavy metals using low heavy metal accumulating cultivars: A green technology,” *Journal of Hazardous Materials* 413 (2021) : 125427., <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.125427>.