

2.2.5 除去・浄化技術（大気、土壌・地下水）

（1）研究開発領域の定義

大気、土壌・地下水の汚染物質等の把握、拡散防止と除去・浄化に関する研究開発を扱う領域である。人体や大気、土壌・地下水環境の公害を招く原因物質や、負の影響が懸念される物質等について、人為的な排出そのものを抑制する技術や排出後に除去・浄化する技術、リスク評価に基づくマネジメント等を対象とする。

大気汚染物質に関しては、人為的な排出のうち特に移動発生源を対象として、自動車エンジン排ガス後処理技術をはじめとした規制開発等を扱う。

土壌・地下水汚染物質に関して、人為活動に伴う重金属や揮発性有機化合物に加え、自然由来汚染物質も対象として、拡散防止技術やリスク持続的な浄化技術等を扱う。

（2）キーワード

自動車CASE変革の進行、自動車排出ガス、排気後処理技術、規制開発、三元触媒、粒子捕集フィルター、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

（3）研究開発領域の概要

[本領域の意義]

■大気

大気汚染物質の排出源は自動車、船舶、航空機等の移動発生源と工場等の固定発生源に大別される。固定発生源対策技術は技術熟成度が高く、研究開発動向が少ない一方、移動発生源は各国で開発競争や規制開発が続けられている。特に自動車排出ガスに含まれる大気汚染物質やその前駆物質に対する排出規制の達成は、陸上生活圏の環境保全に加え、世界市場において環境技術の優位性を示すことに直結する。各自動車メーカーが高度な技術をもとに、環境性能の向上にしのぎを削っており、各国も環境保全と産業競争力の維持に注力している。

我が国では、人の健康の保護及び生活環境の保全のため望ましい基準として、窒素酸化物や浮遊粒子状物質などの有害大気汚染物質に対する大気環境基準が設定され、様々な発生源に対する排出規制の強化が段階的に施行されてきた。これらの規制が功を奏し、主に、エンジンの燃焼改善などのエンジン自体の改良と排気触媒など排気後処理の抑制対策が進められ、我が国の大気環境は著しく改善されている。しかし、オキシダントや微小粒子状物質（PM_{2.5}）などの光化学反応の寄与が大きい物質については課題が残されている^{大気1)}。日米欧等の先進諸国を除き、世界の各都市の大気環境はまだ深刻で^{大気2)}、排出ガス低減に対する要求は高い。

■土壌・地下水

土壌汚染は地下水汚染と一体的に考える必要がある。その理由として、揮発性有機化合物（Volatile Organic Compounds：VOC）のように比重が水より重い物質は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があげられる。

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、エネルギー消費を要する課題がある。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

メディア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行われた^{土壌1)}。また、2014年以降、東京都豊洲市場で大規模な土壌浄化事業が実施され、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行われ、社会的に高い関心を集めた。また、我が国では人間活動に由来する汚染ばかり社会的に注目を集めるが、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な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。また、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^{土壌2)}。

[研究開発の動向]

■大気

自動車排出ガス低減技術は規制に対応して技術開発が高度化してきた（図表2.2.5-1）^{大気3)}。自動車排出ガス対策は、エンジンの改良と排気触媒や粒子除去フィルターなどの排気後処理技術との両輪により成立しているが、日米欧が主導してきた厳しい排出ガス規制に対応するには、排気後処理が必須、かつ今後とも極めて重要な技術である。

図表2.2.5-1 日米欧三極における自動車排出ガス規制開発の流れ

時期	国・地域	出来事
1940年代	米国	カリフォルニア州で炭化水素（HC）と二酸化窒素（NO ₂ ）から生成された光化学オキシダントによるスモッグ発生
1962年	米国	カリフォルニア州がHC抑制のためクランクケース・エミッション規制を制定
1963年	米国	大気浄化法が制定
1965年	米国	カリフォルニア州がエンジンからの排出ガスを対象にした規制が導入
1966年	日本	ガソリン車の一酸化炭素（CO）濃度規制
1968年	日本	大気汚染防止法の公布
1968年	米国	排気規制が開始
1970年	米国	マスキー法成立。大気汚染対策としての自動車排出ガス規制を段階的に強化
1970年	欧州	排出ガス規制が制定
1970年	日本	東京新宿区でのガソリン含有4エチル鉛による鉛中毒事件、東京杉並区の高校での光化学スモッグ等が原因と疑われた大気汚染問題が発生
1973年	日本	昭和48年排出ガス規制でガソリン車のHCと窒素酸化物（NO _x ）が追加
1974年	日本	昭和49年排出ガス規制以降、ディーゼル車の排出ガス規制が段階的に強化
1975年～	日本	昭和50年、53年規制でマスキー法水準に引き上げ。対策として、点火時期遅延や排出ガス再循環（Exhaust Gas Recirculation：EGR）、副燃焼室を採用した燃焼改善等でNO _x を低減、COとHCを酸化触媒で浄化する技術が採用。電子式燃料噴射制御装置や酸素センサーの実用化により、CO、HC、NO _x を同時に浄化する三元触媒システムが開発され、一部の車両で採用された。
1990年代	欧州	大気汚染の深刻化により、段階的に規制が強化 ^{大気4)} （米国並みの規制に強化）

1994年～	日本	短期規制（1994年）でディーゼル車のPMの排出重量規制を導入。その後もディーゼル車の規制を段階的に強化。試験モードを定常運転から過渡試験に変更。新短期規制（2003～2004年）以降、ディーゼル車にも、様々な排気後処理装置が採用。
2000年～	日本	平成12年、17年規制でガソリン車コールドスタート時のエミッション低減が強化
2009年	日本	燃費性能に優れた筒内直接噴射ガソリンエンジンで、最新のディーゼル車を超える粒子排出があったこと ^{大気5)} から、吸蔵型窒素酸化物還元触媒を装着した希薄燃焼方式の直接噴射式エンジンを有する自動車を対象に粒子に対する排出規制が導入
2020年	日本	全ての直接噴射式エンジン搭載車で粒子に対する排出規制を導入予定

ガソリン車の多くが排出ガス低減システムに三元触媒システムを採用している。自動車用触媒は、多孔質状の担持体にアルミナ (Al_2O_3)、セリア (CeO_2) などの酸化物と、白金 (Pt)、パラジウム (Pd)、ロジウム (Rh) などの貴金属を担持した物質で、現在はハニカム状のコーゼライトや金属などのモノリス基材が使われている。コールドスタートエミッションの低減には、触媒をできるだけ低温から機能させる必要があり、熱容量が少ない高密度薄壁モノリス担体、低温活性に優れた触媒などが開発されている。排ガスの酸化・還元雰囲気変動を利用し、貴金属が結晶から固溶・析出を繰り返す自己再生機能で貴金属粒子の肥大化による劣化を防ぎ、高活性を維持するインテリジェント触媒なども開発されている^{大気6)}。

ディーゼル車の排出ガス規制に対しても、多くの技術が導入されている。国内ではディーゼル車にもディーゼル用粒子捕集フィルター (Diesel Particulate Filter : DPF)、酸化触媒、NO_x 触媒などの排気後処理装置が採用されている。DPFについて、そのもの自体の改良に加え、エンジンやその制御技術の改良等により、実用化に至っている。DPFの材料として、一般に耐熱性の高いコーゼライトやシリコンカーバイド (SiC) などの多孔質セラミックスが用いられているが、高気孔率材料の開発やフィルター構造の改良などが行われてきた。DPFは目詰まり防止のため、捕集したPMを燃焼等により処理し再生する必要がある。ヒーターやバーナー等により燃焼させる方式やDPFの前段に酸化触媒を設け、排気中のNOを酸化能力の高いNO₂に変換して、それによりPMを処理する連続再生式DPFなどの様々な方式のDPFが開発されている。最近ではDPFとSCR触媒などのNO_x触媒を組み合わせたシステムが主流となっている。このような排気後処理技術の採用で、ディーゼル車からの大気汚染物質は著しく低減されてきた。同時にディーゼル燃料の開発も進み、触媒の被毒や劣化を防止するため、ディーゼル燃料中の硫黄分は10ppm以下に低減化している^{大気7)}。

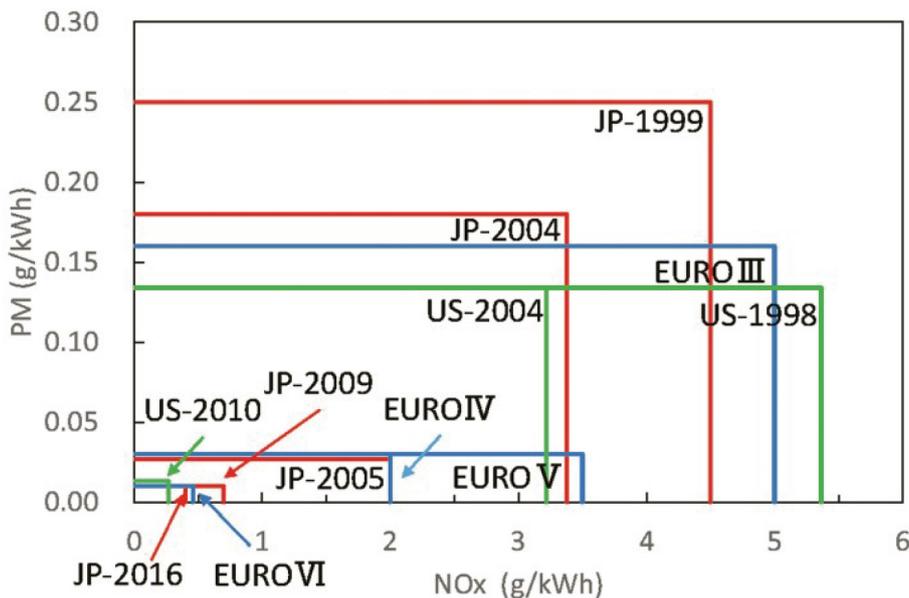
図表 2.2.5-2 に日米欧の重量ディーゼル車の規制値の比較を示す^{大気4)}。

日米欧の現在の排出ガス規制値はガソリン車、ディーゼル車とも同水準で、浄化技術は高い水準であり、汚染物質の排出量は過去と比べ著しく低減している。ディーゼル車のNO_xについては、認証時と実使用条件下との排出量の乖離が問題視され、広範囲の運転条件下における排出量の低減が求められている。世界最大の自動車市場となった中国やインドでは、欧州と同等の規制が数年遅れで採用されている。都市部の大気汚染対策として、排気後処理装置への要求は年々高まっており、貴金属等の資源の不足が懸念されている。

排気後処理装置は、最新の低排出ガス車を支える重要であり、浄化性能としては極めて高い技術水準に達している。今後の課題としては、広範囲の運転条件下における浄化性能の向上や更なる信頼性の向上、触媒等に使用する貴金属等の省資源化などがあげられる^{大気8)}。これらの研究開発を効率的に進めるため、後処理装置内における粒子堆積の挙動や反応機構を解明してモデル化するための研究が進められている^{大気8), 9)}。

2.2

環境区分と研究開発領域



図表 2.2.5-2 ディーゼル重量車に対する日米欧の排出ガス規制値の比較

■ 土壌・地下水

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。

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生物学的処理や自然機能活用による修復技術であるグリーンレメディエーションが期待されている。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新たに導入する処理で、時間を要するが、温和な条件のもと低コストで汚染を処理できる利点がある。

鉱山跡地や鉱廃水の対策として、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。企業や自治体が持続可能な土壌汚染対策を行うには環境面、経済面、社会面を一体的にとらえたサステナブル・レメディエーションの考え方が重要である。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も最小化する必要がある。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の一貫と考えられる。今後は、コストと効果のバランスを重視した土壌浄化、環境施策と都市計画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が求められる^{±(2), 3)}。

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。自然由来の重金属は低濃度で広く分布していることが多い。我が国では砒素、鉛、カドミウムなどの自然土壌中での濃度が比較的高く、平均的な曝露量も欧米と比べて高い。トンネル工事に伴う土砂や岩石に含まれる重金属等の問題で時折クローズアップされているが、その適切な対策と管理が求められている。人為的な高濃度の汚染と異なり、低コストか

つ周辺環境に配慮し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、吸着マットなどによる重金属等の除去技術などが研究開発されている。

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。内閣府・科学技術戦略推進費「放射性物質による環境影響への対策基盤の確立」で、放射性物質の分布状況等に関する調査研究および農地土壌等における放射性物質除去技術が開発された。「除染モデル実証事業」の支援を受け、日本原子力研究開発機構（JAEA）が除染や廃炉に関連したセシウムやストロンチウム等の放射性物質を対象に、放射性物質の挙動の把握や、放射線遮蔽技術、吸着・洗浄に関する技術開発を行った。関連して、地下水土壌汚染除去に関わる人材育成が行われている^{土壌4)}。

図表 2.2.5-3 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年から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	1,4-ジクロロエチレン等の土壌環境基準の見直し

(4) 注目動向

[新展開・技術トピックス]

■大気

・自動車の変化

自動車は100年に一度の変革期にあると言われ、「CASE」という用語を一般向け報道で目にする機会も増えている。CASEは、「Connected：繋がる車」「Autonomous：自動運転」「Shared：シェアリング（共有）」「Electric：パワートレインの電動化」の頭文字をとった、今後の自動車の姿を示すキーワードとなっている。CASE分野の研究や製品開発には、これまでの自動車産業と異なる新しい分野の研究開発資源、人材や研究設備への多額の投資が必要とされる。この背景と排出ガス対策を含む内燃機関の技術の高

度な成熟性を考慮すると、今後、研究開発への投資は削減される可能性が高い。このような状況を踏まえ、これまで各メーカーが独自に実施してきた内燃機関の基礎研究が、国の助成を受けて各メーカーの壁を越え産学共同で行われるようになってきている。技術レベルを維持するとともに、高めていくための継続的な取り組みが必要となる。

• 自動車用パワートレインの電動化と中国市場の動き

世界最大の自動車市場の中国では、深刻な大気汚染や温室効果ガスの削減対策とともに、自国の自動車産業を育成するため、国を挙げて、動力源の電動化を進めている。これは環境保全の観点に加え、世界の先端企業のエンジン技術に追いつくのが困難な背景を踏まえての中国の産業戦略と認識されている。2018年から中国新エネルギー車 (New Energy Vehicle : NEV) 規制が導入されている。これはハイブリッド車 (Hybrid EV : HEV) を除いた純バッテリー式電気自動車 (Battery EV : BEV)、プラグインハイブリッド車 (Plug-in HEV : PHEV)、燃料電池車 (Fuel Cell EV : FCEV) のみで販売数量を義務化する規制だった。しかし、財政逼迫による補助金支給額の削減等により、NEV市場がマイナス成長に転じたため、電動化一本の政策を見直し、HEVなどの低燃費車も重視する方針を示している^{大気10)}。新型コロナウイルス感染症に伴う景気後退への対策として、2020年終了予定だったNEV補助金を2022年まで延長する措置などが打ち出されている。中国政府は、2023年7月から欧州の最新規制であるユーロVI規制にあたる「国6」基準を導入する予定である^{大気11)}。四川・重慶など大気汚染対策の重点地域は「国6」基準を前倒して適用する方針だったが、コロナ禍等による市場低迷から、適用を遅らせる動きも加わり、流動的な状況である^{大気12)}。今後、世界水準の最新規制が適用されることになれば、大量の排気後処理装置が必要になることから、関連する業界や研究開発動向にも影響を与えることが推察される。

• 内燃機関搭載車両の販売禁止の動き

欧州では中国市場への対応に加え、ディーゼル車の排出ガス対策に関する不正や地球温暖化対策への対応から、ガソリン車やディーゼル車を販売禁止にする議論が勢いづいている (図表 2.2.5-4)^{大気13), 14)}。ノルウェー、スウェーデン、オランダ、ドイツ、フランス、イギリスの議会や政治家などが2025年から2040年にかけて、ガソリン車やディーゼル車の販売禁止を検討していると報じられている。この動きに、巨大自動車市場の中国、インドを含めた世界の各国が追随している。現時点では、法規制に至っておらず、ほとんど議論段階だが、このような内燃機関排除の動きがもし現実的になれば、自動車業界にとって影響が大きい。EV等の新型車の現実的な普及予測では、2050年もHEVやPHEV、大型車の動力源として、内燃機関搭載車が残ると推察されている^{大気15), 16)}。ただし、この情勢をみて、脱エンジン宣言をする自動車会社が欧州では相次いでいる。さらに、2021年1月に米国GM社も2035年に全ての普通乗用車をゼロエミッションにする構想を公表した。EVと比較して内燃機関の技術優位性や価格競争力は高い。それらの観点では短中期に内燃機関市場は消えないが、EVのコスト低下や普及動向に加え、各国の環境政策・産業政策の不確実性は高く、注視する必要がある。

図表 2.2.5-4 内燃機関自動車の販売禁止の動き

国 (地域)	規制開始年	動力源		新車販売規模	備考
		ガソリン車・ディーゼル車	PHEV車		
米国 カリフォルニア州	2018年	規制	規制なし	約200万	カリフォルニア州ゼロエミッション車両プログラム。販売台数比率の規制を段階的に引き上げ。
コスタリカ	2021年	販売禁止	販売禁止	約4万	大統領が就任式で表明 (2018年)
ノルウェー	2025年	販売禁止	販売禁止	約10万	中道右派と中道左派が合意 (法規制化は不明)
スウェーデン	2030年	販売禁止	販売禁止	約40万	環境大臣が欧州規制を促す発言 (法規制化は不明)
オランダ	2030年	販売禁止	販売禁止	約40万	与党が提議して、議会下院を通過
ドイツ	2030年	販売禁止	販売禁止	約340万	規制案がドイツ連邦参議院を通過
イギリス	2030年	販売禁止	販売禁止	約240万	首相が2040年からガソリン車は2030年に前倒し発表 (2020年)。PHEV車は2035年。
アイルランド	2030年	販売禁止	販売禁止	約10万	首相が発言 (2018年) (法制化は不明)
中国	2040年	販売禁止	販売禁止	約2800万	工業情報化部発表、NEVクレジットによる規制。
イスラエル	2030年	販売禁止	販売禁止	約30万	エネルギー大臣が計画を発表 (2018年)
フランス	2040年	販売禁止	販売禁止	約220万	国務大臣兼環境連帯移行大臣が発表
スペイン	2040年	販売禁止	販売禁止	約340万	首相が発表 (2018年)

• 粒子個数 (Particulate Number : PN) 規制

欧州では、粒子状物質の排出重量に加えて、PN規制が2011年からディーゼル車を対象に実施されている^{大気4)}。さらに、2014年からガソリン車、LPG車 (液化石油ガス、Liquefied Petroleum Gas) に対してもPN規制が実施され、2017年からディーゼル車と同水準の規制が適用されている。

PN規制に対応するため、欧州ではガソリンエンジン用粒子捕集フィルター (Gasoline Particulate Filters : GPF) 搭載車両が販売されている。我が国でも直噴ガソリン車が普及しつつあることと国際的な基準調査の観点から、PN規制の導入が検討されている。規制が適用された場合、GPFへの要求が高まるものと推察される。さらに、欧州におけるPN規制は、当初、粒径が23nm~2.5μmの粒子を対象としていたが、粒径の下限値を10nmへと引き下げる検討がされている。

• 実路走行排ガス (Real Driving Emission : RDE) 試験への対応

従来の自動車排出ガス測定は、シャシダイナモを使った試験室での台上試験だった。しかし、実路上での排出量との大きな乖離の問題から、欧州で2017年9月からRDE試験が行われることとなった。RDE試験では、公道上で車載排ガス測定装置 (Portable Emission Measurement System : PEMS) 搭載車

両を実際に走行させて、その際の排出ガスを測定する。規制値として、NO_xとPNの上限値が設定され、順守が義務付けられる^{大気4)}。我が国でも、2022年10月からの実施が決まっている。国連欧州経済委員会の下自動車基準調和世界フォーラム (UN-ECE/WP29) で、様々な条件下における排出ガス試験の議論が続いており、触媒等の排気後処理装置はより広範囲の運転条件下における高い浄化性能を求められていくこととなる。

• 希薄燃焼ガソリンエンジンの開発

希薄燃焼がガソリンエンジンの燃費向上に有利なことは周知の事実だったが、技術的困難が実用化を阻んできた。具体的には希薄燃焼範囲が限定的である困難や、排気中に酸素を含むことから三元触媒が適用できないために排出ガス規制へ対応できない困難などがあった。しかし、国内自動車会社が広範囲の運転条件で希薄燃焼実現できる新しい燃焼方式を開発し、高い燃費性能を示すエンジンを市場に投入した。このエンジンでは、新しい燃焼方式と排出ガス再循環 (Exhaust Gas Recirculation : EGR) 等により窒素酸化物の排出を抑制し、GPF搭載のみで、最新規制をクリアしている。

• 船舶の低硫黄燃料

船舶の排出ガスは主に海洋で排出されることから、人間の生活圏広域で大気環境悪化に直結する自動車と比べると影響は緩やかである。一方で主要港湾を有する国や都市などでは関心が高く、自動車に遅れて徐々に規制が強化されてきている。船舶の国際的な排気規制は船舶による汚染防止のためのマルポール条約で定められ、沿岸を要する国家でも独自規制が設けられている。マルポール条約は世界174か国が加盟する世界海事機関が監督しているが、署名国は先進国を中心に89か国である。個別の規制を定める付属書の批准国数は異なっている。2020年1月に全ての海洋でSO_x排出規制を3.5%から0.5%に引き下げる改正が行われた^{大気17)}。技術的には既に完成しており、排気浄化処理装置 (SO_xスクラバー) を搭載した船舶等の普及が進むものと期待される。

• 航空機の新燃料開発

航空機の排出ガスは主に高度10km程度の上空で排出されることから、船舶同様に、自動車と比べて影響は緩やかで、自動車より遅れて規制の強化が議論されてきている。自動車以上に厳しい安全性基準や騒音規制に技術開発が集中し、ジェット燃料は船舶用の重油と異なりSO_x含有率が少ないことも背景にある。一方、1970年頃から飛行場周辺の大気汚染がみられ、1980年代にNO_xやHC、COの規制が国連傘下のICAO (International Civil Aviation Organization、国際民間航空機関) で制定された。2010年以降、欧州を中心に温室効果ガスの排出への関心が高まり、CO₂の規制が議論されてきた。COVID-19が拡大する前の議論においては、2027年以降に排出権取引を原則導入する方針や、2020年以降には毎年2%ずつCO₂削減の義務努力が同意されている^{大気18)}。COVID-19を受けた逆風下においても、各国、各航空会社における自主努力は進められている。我が国においては、石油代替の持続可能航空燃料 (Sustainable aviation fuel : SAF) の開発、導入などの努力が続けられている^{大気19)}、²⁰⁾。

■ 土壌・地下水

• 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還元処理法、薬剤による吸着処

理、透過性浄化壁を用いる手法などがある。これらは土壌・地下水汚染、および土壌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砒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VOCの分解処理などが新規に技術開発され、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、土壌洗浄やスパージングにより重金属やVOCの浄化・修復が行われている。土壌洗浄では、土壌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。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、土壌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。

• グリーン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壌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、バイオレメディエーション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^{±壤5)}。

• 科学的自然減衰 (Monitored Natural Attenuation : MNA)

薬剤を使用せずに、低エネルギー消費で、鉱物や微生物などの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、科学的自然減衰 (Monitored Natural Attenuation : 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急速に減衰するような環境では、MNAの導入を促進するための社会システムやガイドラインの整備が必要である。

• リスク評価に基づく合理的マネジメント

土壌・地下水汚染対策では、健康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。土壌汚染による健康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) がある。また、重金属類の含有量や溶出量、形態などの情報を地理情報システム (GIS) 上で統合化し活用するための環境情報システムである地圏環境インフォマティクスシステム (GENIUS) が東北大学、産業技術総合研究所、DOWAホールディングス (株) により開発されている。

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壌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、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。法制度にリスク評価の枠組みが導入できれば、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。

● 揮発する化学物質に対する土壌汚染対策

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。従来の土壌汚染対策では、揮発性物質は対象ではなかったため、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。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。

[注目すべき国内外のプロジェクト]

■ 大気

排気後処理装置では、更なる浄化性能の向上や貴金属の低減などが課題である。従来の技術開発は主に企業が単独実施してきたが、近年、学術的な基礎研究の成果をもとに実用的なソフトウェアを開発する産学連携研究が日本でもやっと始まり、触媒やDPF内での挙動解明やそれらを元にしたシミュレーションモデルの開発を実施している。このような産学連携で業界共通の基礎研究を行う研究組織は、ドイツが数十年前に先駆けてきた歴史がある。

● ドイツ内燃機関研究協会 (Die Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen : FVV)

ドイツの内燃機関に関する産学連携研究コンソーシアム。広範囲にわたる業界共通の基礎研究等を実施している。170以上の団体が参加しており、基礎研究に加えて、専門的な人材の育成についても重点を置いている。ドイツではこのような研究組織で得られた成果や育成された人材を応用研究や製品開発に繋げる道筋が確立されている。

● 自動車用内燃機関技術研究組合 (AICE)

ドイツFVVなどの研究組織を参考に組織された研究組合。自動車関連9企業2団体が加盟し、自動車用内燃機関の燃焼技術や排気後処理技術の高度化などを研究している。内閣府SIP「革新的燃焼技術」(2014～2018年)の熱効率50%以上のガソリンエンジン、ディーゼルエンジンなどの研究成果を活用した産学連携研究も推進している。

● 米国U.S.DRIVE (United States Driving Research and Innovation for Vehicle efficiency and Energy Sustainability) パートナーシップ

米国エネルギー省が主導する次世代軽量自動車の研究開発を支援するパートナーシップ。米国の自動車会社やエネルギー関係企業が参画している。電動化、水素燃料などに加え、内燃機関の効率向上や排気浄化技術の性能向上なども研究目標に含めている。2020年の計画では、2025年を目標年としたバッテリーや燃料電池のコスト低減、内燃機関の効率向上によるハイブリッド車を含む効率向上などが開発目標として示されている。

■土壌・地下水

• 環境省 低コスト・低負荷型土壌汚染調査対策技術検討調査

地下水・土壌汚染の研究開発支援について、簡易で低コスト・低負荷型の土壌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、汚染土壌の浄化・修復を実施している。

• サステナブル・レメディエーション・コンソーシアム

2016年に産業技術総合研究所で設立され、持続可能な土壌汚染対策に取り組んでいる。

• 福島第一原子力発電所構内環境評価・デブリ取出しから廃炉までを想定した地盤工学的新技术開発と人材育成プログラム

文部科学省 国家課題対応型研究開発事業「英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業」の支援で2015年度から2019年度まで実施された。土壌・地下水汚染に関わる内容として、①地下水および地下の広域環境評価・将来予測技術、②放射線遮蔽特性を有する土質材料開発とデブリ取り出し補助技術、③構内除染廃棄物・解体廃棄物の処分、デコミッショニング技術の開発推進とともに、人材育成が行われた^{土壌4)}。

(5) 科学技術的課題

■大気

• 触媒の貴金属等の使用量削減

従来からの課題であるが、新興国における著しい自動車の普及により、これまで自動車触媒に使用されてきた主要な貴金属の資源が不足すると言われており、その使用量の削減や代替金属の開発が望まれている。特に、最大の市場である中国の動向を注視する必要がある。中国は車両の電動化を強く推進してきたが、補助金支給額の削減等から電気自動車の販売が伸び悩み、HEV等の低燃費車にも関心を示している。加えて、欧州のユーロVI規制と同等レベルの排出ガス規制を今後導入する予定である。

• ディーゼル車用NOx触媒の性能向上

国内では道路沿道大気のNOx濃度は、年々、低下傾向にある。しかし、一般環境大気に比べて道路沿道大気のNOx濃度は高い。特にディーゼル車の寄与が大きいため、ディーゼル車用NOx触媒の浄化率向上が求められている。

さらにRDE規制への対応には、より広範囲の運転条件下で高い浄化性能の維持が要求される。そのため、浄化性能に加えて、低温活性、暖機性能の向上などが求められる。ディーゼル車用NOx触媒は、大型車を中心に、尿素水を用いたアンモニアによるNOx選択還元触媒（Selective Catalytic Reduction：SCR）が主流である。一方、中小型車については、アンモニアを使用しないNOx触媒の研究開発についての今後の発展が期待される。

• 粒子フィルターの性能向上

粒子フィルターについては、ディーゼル車（DPF）に加えて、直噴ガソリン車（GPF）への対応も必要とされてきた。気孔率の最適化や連続再生能力の向上による圧力損失の低減や信頼性の更なる向上が求め

られている。GPFについては、粒子フィルターに三元触媒機能を持たせたもの等が開発されており、今後の発展が期待される。

• 再始動時における浄化性能向上

燃費向上を目的にアイドリングストップ機能搭載車やHEV、PHEVの普及が進んでいる。これらの車両は信号待ちなどの間にエンジンが停止する。この期間に触媒に空気が流れ込んで、触媒の貴金属が酸化状態になり、再始動後の排出ガスの浄化性能が低下し、特に、NOx排出量の増加を招くことがある。最近では、触媒材料の改良により、触媒内における蒸気改質反応を促進させ、水素量を増やすことで、再始動時のNOx排出を抑制する手法が開発されている。RDE規制にも有効とみられ、注目される。

• 後処理装置内の挙動解明とモデル化

排気後処理装置の性能はかなり高い水準にある。さらに性能を効率的に向上させるには、後処理装置内で起きている様々な物理・化学的な現象を解明してモデルを作成し、それらを組み込んだシミュレーションソフトの開発が必要とされている。既に産学連携研究プロジェクトで取り組みが進行しているが、今後の進展が期待される。

• 排気後処理システム全体の改良

現在のディーゼル車の排気後処理システムは酸化触媒、連続再生式粒子フィルター、尿素SCR触媒、アンモニア除去触媒などの複数の処理装置を直列に繋いだ複雑なシステムで、それらを搭載するために大きなスペースを割り当てている。各処理装置の機能の複合化や性能向上により、コンパクトで低コストのシステムの開発が期待されている。

ガソリン車も、温室効果ガス削減対策のためにHEVやPHEVなどの複雑なパワートレイン制御システム搭載車両が増加していくと予測される。やはりガソリン車でも排気後処理を含めた車両全体でのシステムの最適化が必要とされる。

■ 土壌・地下水

• 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不完全な浄化といった技術的な課題が未だ多い。地質や環境の諸条件の制約が特に大きく、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必要がある。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んでいる。

• 浄化・修復対策技術

- 複雑な汚染現場の状況

汚染物質の溶出メカニズムには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で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

携による対策の効率化、建物直下における汚染の調査対策として適用可能な水平ボーリング技術が課題である。

- 複雑な汚染現場の状況と多様なエンジニアリング条件

土壌汚染技術には効率性、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。

• 調査・分析技術

- 安価で正確な公定法分析

土壌汚染の規制対象物質は30種類もあり、分析コストは膨大である。効率的かつ低コストで実施できる一斉分析による公定法の手法や分析プロトコルの開発が課題である。

- 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判定や濃度レベルの検査ができれば、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現場型オンサイト測定・検査技術の開発が課題となる。

- 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る。

• リスク評価技術

- 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理由から導入されていない。そのため、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。

- 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。

- リスクコミュニケーションの円滑化

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・サイエンスを基礎とした文理融合型の研究開発が必要である。ストック型環境汚染問題に対する学際的解決手法の構築と社会実装が課題である。

• 新規化学物質に対する土壌汚染対策技術

近年、1,4-ジオキサンや塩化ビニルモノマー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。それらの分配特性や環境中の挙動にも不明な点が多く、環境動態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。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。

• 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（温暖化ガス）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。

• 地圏環境情報の整備

- 地球化学図、土壌環境基本図の整備

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。

- リスク情報の公開と情報伝達

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。

(6) その他の課題

■ 大気

• 途上国における都市の大気環境問題

自動車排出ガス規制が厳しい日米欧の都市部の大気環境は継続的改善傾向にあり、WHOや各国の環境基準を満足しつつある。一方、世界の多くの都市の大気環境は、いまだに極めて厳しい。原因の多くが自動車や発電所、工場、事業所等での燃料の燃焼に起因している。2000年上半期、新型コロナウイルス感染症拡大防止のため世界各国、各都市で次々とロックダウン、外出自粛要請等の措置が取られ、工場稼働停止や自動車走行数減少などの経済活動の縮退が人為的に行われた。その間、中国やインドで濁った大気が透明化したことが報道され話題となった。これに伴い、一時的にNO_x濃度、SO_x濃度も低下したものとみられるが、経済活動再開に伴い、すぐに透明度の低い汚染大気環境に戻ったとみられている。

固定発生源自動車排出ガスの低減には、排気後処理の付いた車両への代替が効果的だが、燃料の低硫黄化が未達で、低排出ガスの車両が導入できない状況にある。経済的事情から新型車に更新されず、古い車両が長期間使用されることも一因である。使用過程車に対する排出ガス対策は、触媒やDPFなどの後付け可能な処理装置が効果的だが、一般的な排気後処理装置は、低硫黄燃料を前提に開発されており、大気汚染が深刻な途上国での適用が困難な状況にある。途上国における排出ガス低減対策は、ビジネスとして成立し難い側面もあるが、燃料事情の悪い条件下で使用可能な排気後処理装置の開発が望まれる。

• 船舶への規制強化

船舶の排出ガスはマルポール条約の付属書VIで規制されている。批准国の海洋でSO_xを0.5%以下とする規制強化が2020年に行われたが、特定排出規制海域（北欧のバルト海、北海、北米大陸のカリブ海と米国西海岸、東海岸）では2015年から0.1%以下とされ、以前より航行時の燃料切り替えがなされている。

- 航空機需要のCOVID-19による不確実性

中国をはじめとする世界的な経済発展により民間航空機需要は顕著に増加してきたが、2020年に本格化したCOVID-19による航空機需要の低下は、2003年のSARSの影響を遥かに上回っている^{大気21)}。国際線の運航本数の回復には向こう数年を要するとみられ、世界の主要航空会社、航空機会社の経営への打撃は深刻である。逆風下で、関連した研究開発の余力は低下せざるを得ない。持続可能な技術への開発投資などの不確実性が高まっている。

■ 土壌・地下水

- 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法制度に合わないために導入が困難な技術や手法が少なくない。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。

- 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、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い法体系のため、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。

- アジア諸国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。

(7) 国際比較

■大気

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	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> ●自動車の排気後処理技術に関する基礎研究が大学、国立研究機関、自動車会社や触媒メーカー等で実施され、世界をリードする研究成果を生み出している。大学や国立研究機関と企業との共同研究では、大型放射光施設SPring-8を利用した研究等により、貴金属が自己再生するインテリジェント触媒や貴金属に代わる鉄触媒の開発などの成果を挙げている。産業界が必要とする共通の基盤研究を産学官が連携して実施する研究組織が設立され、自動車の排気浄化技術について触媒やDPF内での挙動解明等の基礎研究が実施されている。これらの成果をもとにした研究開発ツールとしてのモデル化の研究等が進められ、今後の発展が期待できる。 ●企業における内燃機関や排ガス浄化に関する基礎研究への投資が削減する傾向にあり、産学官が連携して継続的に研究を行える体制の整備が望まれる。また、世界の自動車技術者、研究者が参加する米国SAE (Society of Automotive Engineers) 等の国際的な学会での報告が、過去に比べて減少しており、懸念される。
	応用研究・開発	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> ●ガソリン車用の三元触媒を始め、ディーゼル車用のDPFやNOx還元触媒など、広範囲の分野で高い技術開発能力を保有している。特に、触媒担体やDPFなどのセラミック製品の分野では、市場シェアも大きく、世界をリードしている。 ●米国SAEにおいて、これまで自動車会社や触媒メーカー等から、多くの研究報告がなされてきたが、近年報告数が減少しており、懸念される。 ●ディーゼル車分野は、欧州と比べて産官学の連携研究の遅れなどがあったが、最近では、AICEなどの研究組織が立ち上がり、欧州と同様な開発環境になりつつある。 ●自動車の排出ガス対策には、後処理装置の性能だけでなく、後処理装置を有効に作動させるためのエンジン側の制御技術などの総合的な技術力が要求されるが、この分野についても高い技術力を有している。
米国	基礎研究	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> ●自動車排出ガス規制をリードしてきており、広範囲に渡って、高度な研究が実施されている。基礎研究は、我が国と同様、大学、国立研究機関、自動車会社や触媒メーカー、担体メーカー等で実施されている。大学等には、世界から若手の研究者が集まり、政府や企業の支援を受けて研究に取り組んでいる。 ●内燃機関から電気自動車への移行が進みつつある世界的な情勢を反映して、基礎研究においても、内燃機関に関連する研究の割合が縮小し、バッテリー、燃料電池、水素燃料などの研究の割合が増えつつある。
	応用研究・開発	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> ●自動車産業の中心地として世界を牽引してきた歴史から、各国の自動車会社や部品メーカー等が開発拠点や生産拠点を有しているため、研究開発水準は高い。特に、日欧に比べて、厳しい排出ガス規制の試験法が適用されており、技術開発に対する要求も高いことが、技術レベルを押し上げてきた要因と考えられる。 ●米国SAEでの報告も多い。近年、大型ディーゼルの排気浄化に関する報告が多い。
欧州	基礎研究	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> ●欧州は、他に先駆けて、研究コンソーシアムを組織し、企業における競争領域以外の基礎研究を産学連携で実施してきた。対象はエンジンだけでなく、排気触媒などの後処理分野も含め広範囲に及んでいる。BASF (独)、ジョンソン・マッセイ (英)、ユミコア (ベルギー) など、世界の自動車触媒のリーダー的企業の拠点もあり、自動車用触媒の材料や後処理装置内の挙動解明などの広範囲にわたって、高い研究能力を有している。

				<ul style="list-style-type: none"> ●米国SAE等の国際学会での報告も欧州各国から広く行われている。 ●ディーゼル車エンジン排ガス制御用ソフトウェアの不正発覚のショックや温室効果ガス排出削減のためディーゼル車離れが顕著に進んでおり、二次電池などの電気自動車や水素などの燃料電池に関連する基礎研究の振興を図っている。ドイツやフランスでの各国水素戦略に続き、EU水素戦略のビジョンが打ち出され、燃料自動車の基礎研究への誘因を大きく打ち出している。
	応用研究・開発	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> ●自動車用触媒の世界的リーダー企業に加え、世界の自動車会社からエンジンシステム開発業務を受託しているAVL（オーストリア）、FEV（独）、リカルド（英）などの著名なエンジニアリング会社が存在し、高い技術開発能力がある。米国SAEへの論文発表も多い。 ●最近、VWは、SCR触媒を2段にし、広範囲の温度条件で高い浄化性能を有するシステムを開発している。 ●ディーゼル車エンジンの排ガス制御用ソフトウェアの不正発覚から、ディーゼル離れが明確に進んでおり、パワートレインの電動化を進めている。 ●粒子個数の排出規制やRDE規制など、世界に先駆けて、新しい規制を導入しており、一歩、先んじている。
中国	基礎研究	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ●環境触媒等において、優秀な人材も多く精力的に基礎研究をしていると言われており、自動車の排気浄化分野で近年、米国SAEに大学等からの報告も見られるが、欧米に比べて件数は少ない。
	応用研究・開発	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> ●世界一の乗用車市場となった背景から、世界の主要な自動車会社や排出ガスの後処理装置を含めた部品会社等が、現地企業との合併等により、生産開発拠点を設けている。 ●中国政府は、エンジン車から電動車等の新エネルギー車への転換を強力に推し進めてきたが、補助金の縮小などにより勢いに陰りがみられる。欧州の最新規制と同等の排出ガス規制の導入が検討されており、今後の動向について注視する必要がある。
韓国	基礎研究	△	→	<ul style="list-style-type: none"> ●生産台数世界5位の自動車メーカーを有し、高品質の自動車が生産されているものの、自動車排気浄化に関する基礎研究について、米国SAE等の学会への報告数が日米欧に比べて少ない。
	応用研究・開発	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ●厳しい排出ガス規制の欧米市場に、多くの車両を輸出しており、排ガス浄化技術は、世界のトップクラスにある。触媒等の後処理装置について、世界の主要な触媒メーカー企業やその提携企業等と開発、生産しており技術水準は高いと推察されるが、国際会議等での報告数が少ない。
インド	基礎研究	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> ●近年、米国SAEに大学等からの報告が増加している。注目すべき研究は少ないが、研究水準が年々向上していくトレンドにあると思われる。
	応用研究・開発	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> ●乗用車市場として中米日に次ぐ規模となっている。海外企業や海外との合併企業が多いが、技術水準が年々向上していくトレンドにのっていると推察される。 ●特に乗用車の排出ガス規制では、2020年4月から欧州ユーロVに相当する、バーラトステージ6と呼ばれる規制を導入した。ユーロIII相当だったバーラトステージ4を2017年に導入したばかりだったが、深刻な大気汚染などを背景に、一足飛びに規制を強化している。景気動向により自動車市場の不確実性はあるものの、排出ガス低減技術に対する要求は高止まりしており、規制対応に向けて技術水準も高まっていくものと思われる。 ●米国SAE等にも関連する研究についての報告が増加している。

2.2 俯瞰区分と研究開発領域

■ 土壌・地下水

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	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> ●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。 ●しかし、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において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。国際的なイニシアティブを確保するためには、加速が必要である。また、揮発性化学物質の摂取リスクに関する研究の充実が急務である。
	応用研究・開発	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> ●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。 ●一方、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	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> ●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	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> ●米国 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	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> ●英国が環境の側面、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	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> ●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) が議論されている。 ●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	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> ●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。
	応用研究・開発	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> ●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。

2.2 俯瞰区分と研究開発領域
環境区分

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の範囲

応用研究・開発：技術開発（プロトタイプの開発含む）の範囲

(註2) 現状 ※日本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

×：特筆すべき活動・成果が見えていない

(註3) トレンド ※ここ1～2年の研究開発水準の変化

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

関連する他の研究開発領域

- ・火力発電（環境・エネ分野 2.1.2）
- ・化学エネルギー利用（環境・エネ分野 2.1.12）
- ・反応性熱流体（環境・エネ分野 2.1.15）
- ・気候変動観測（環境・エネ分野 2.2.1）
- ・水利用・水処理（環境・エネ分野 2.2.4）
- ・分離技術（ナノテク・材料分野 2.1.5）

2.2

俯瞰区分と研究開発領域
環境区分

参考・引用文献

■大気

- 大気 1) 環境省, 「大気汚染状況」『環境省』, <https://www.env.go.jp/air/osen/index.html> (2020年9月アクセス)
- 大気 2) World Health Organization (WHO), *Ambient air pollution: A global assessment of exposure and burden of disease* (Geneva, Switzerland: WHO, 2016), <https://www.who.int/phe/publications/air-pollution-global-assessment/en/>
- 大気 3) トヨタ自動車75年史, 「文章で読む75年の歩み第2部第2章第3節「排出ガス規制への対応」」『トヨタ自動車75年史』
- 大気 4) Diesel Net, “Emission Standards”, Diesel Net, <https://www.dieselnet.com/standards/> (2020年10月アクセス)
- 大気 5) 小林伸治 他, 「直噴ガソリン乗用車の粒子状物質排出特性」『自動車技術会論文集』43巻5号 (2012): 1009-1014, doi: 10.11351/jaeronun.43.1009
- 大気 6) 田中裕久, 「自動車触媒のプロジェクトXX」『自動車技術』59巻1号 (2005): 42-47
- 大気 7) 石油連盟, 「サルファーフリーについて」『石油連盟』, http://www.paj.gr.jp/eco/sulphur_free/ (2020年10月アクセス)

- 大気 8) 植西徹 他, 「Diesel Particulate Filterの内部輸送現象の研究 (第2報) - Soot cake 層に及ぼす堆積条件の影響のモデル化」『自動車技術会論文集』46巻4号 (2015): 725-730
- 大気 9) 岡耕平 他, 「SCRモデルの高温領域でのNOx浄化性能予測精度向上の試み (第2報)」『自動車技術会論文集』48巻2号 (2017): 291-297
- 大気10) 多部田俊輔, 「中国、環境車優遇にHVも 日本勢に追い風」『日本経済新聞』(2020年6月23日), <https://www.nikkei.com/article/DGXMZO6063814050A620C2FFE000/>
- 大気11) 株式会社エヌ・エヌ・エー アジア経済ニュース「排ガス基準「国6」、23年までに2段階導入」『株式会社エヌ・エヌ・エー』, <https://www.nna.jp/news/show/1551928> (2020年10月アクセス)
- 大気12) JETROビジネス短信, 「国家発展改革委員会など11部門が連名で自動車消費拡大策を発表」『JETRO』, <https://www.jetro.go.jp/biznews/2020/05/5a2df065b298cfc1.html> (2020年10月アクセス)
- 大気13) 安川洋, 「各国のガソリン車禁止・ディーゼル車販売禁止の状況」『EVsmartブログ』, <https://blog.evsmart.net/ev-news/global-petrol-gas-car-ban/> (2020年10月アクセス)
- 大気14) 宮口祐貴, 「化石燃料車販売禁止まで15年、産業界が直面する課題とは (英国)」『JETRO』, <https://www.jetro.go.jp/biz/areareports/2020/eb53475efa5d9387.html> (2020年10月アクセス)
- 大気15) Shell, "Sky Scenario", Shell, <https://www.shell.com/energy-and-innovation/the-energy-future/scenarios/shell-scenario-sky.html> (2020年10月アクセス)
- 大気16) bp p.l.c., "BP Energy Outlook 2020 edition", bp, <https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/energy-outlook.html> (2020年10月アクセス)
- 大気17) 国土交通省 海事局, 「海事分野におけるSOx規制の概要及び国土交通省の対応について」『国土交通省』, <https://www.mlit.go.jp/common/001292832.pdf> (2020年10月アクセス)
- 大気18) 日本航空機開発協会, 「航空機関連データ令和元年版 (令和2年3月発行) 第VI章航空輸送を取り巻く環境2. 排出ガス規制」『日本航空機開発協会』, http://www.jadc.jp/files/topics/43_ext_01_0.pdf (2020年10月アクセス)
- 大気19) IATA (International Air Transport Association, 国際航空運送協会), "What is SAF?", IATA, <https://www.iata.org/contentassets/d13875e9ed784f75bac90f000760e998/saf-what-is-saf.pdf> (2020年10月アクセス)
- 大気20) ANAグループ, 「再生可能エネルギー大手NESTEと中長期的なSAFの調達に関する覚書を締結」『ANA』, <https://www.anahd.co.jp/group/pr/202010/20201026-2.html> (2020年10月アクセス)
- 大気21) 一般財団法人日本航空機開発協会 (JADC), 「民間航空機に関する市場予測2020-2039」『JADC』, http://www.jadc.jp/files/topics/157_ext_01_0.pdf (2020年10月アクセス)

■土壌・地下水

- 土壌 1) 高畑陽 他, 「小項目テーマ: 8-3地下水地盤環境」『地盤工学会』, https://www.jiban.or.jp/images/file/AR_PDF/8-3AR.pdf (2020年9月アクセス)
- 土壌 2) 駒井武 他, 「SDGsに向けたサステナブル・レメディエーション」『環境工学連合大会講演集』29巻

(2020)

- 土壌 3) 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
- 土壌 4) 東畑郁生 他, 「福島第一原子力発電所構内環境評価・デブリ取出しから廃炉までを想定した地盤工学的新技术開発と人材育成プログラム」『地盤工学会』,
https://www.kenkyu.jp/nuclear/training/adoption/jiban_intro.pdf (2020年10月アクセス)
- 土壌 5) 国立環境研究所, 「バイオレメディエーション」『環境展望台』,
<https://tenbou.nies.go.jp/science/description/detail.php?id=53> (2020年9月アクセス)

2.2

環境区分
と研究開発領域