

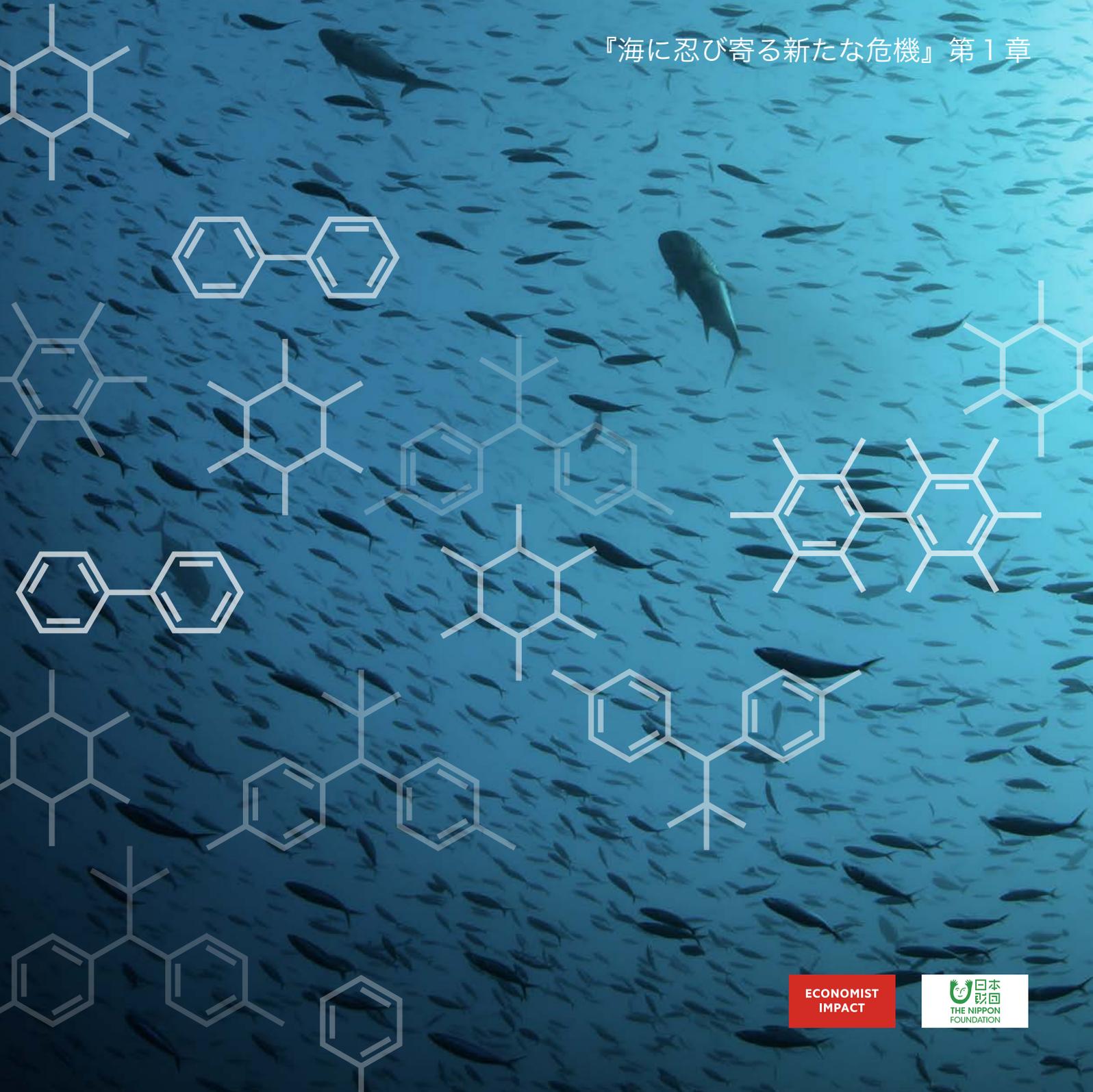


Back to Blue

An initiative of
Economist Impact and The Nippon Foundation

海洋化学汚染の主要原因物質

『海に忍び寄る新たな危機』 第1章



報告書について

陸上・大気・河川・排水路などで見られる化学物質汚染は、過去数十年で悪化の一途を辿っている。これまでも度々対策が講じられてきたが、その深刻さが明らかとなったのはつい最近のことだ。栄養素・重金属・残留性有機汚染物質 [Persistent Organic Pollutants = POPs]・排水などに含まれる化学物質は、様々な形で環境へ流出し、土壌・帯水層・食物連鎖、あるいは南極・高地・低地をはじめとする極地帯など、地球上のありとあらゆる場所で検出されている。近年は自然環境・人体への害を示す多くのエビデンスが明らかとなっており、この問題が気候変動・生物多様性の損失と並ぶ（あるいは両者との相互作用により）深刻な脅威になるという認識が広まりつつあるのだ。

化学汚染の構造的問題が取り上げられる際には、人の生活と密接に関わる陸上環境に焦点が当たることが多い。海洋環境における化学汚染の規模や潜在的影響 — またその喫緊性 — も同様に深刻だが、未だ十分に認識されていないのが現状だ。同報告書は、海洋化学汚染に対する認知度を高め、海洋環境における化学物質汚染の防止・緩和・減少に向けた取り組みを促進すべく作成された。主な目的は、海洋環境の“汚染ゼロ”実現というよりも、『Back to Blue』の掲げる理念に沿って）現実的かつ踏み込んだ目標・方策を提示することにある。

『Back to Blue』発足の契機となったエコノミスト・インパクトのグローバル・アンケート調査（2021年実施）では、海洋環境問題の二大関心事にプラスチック汚染と化学物質汚染が挙げられた（3番目に回答が多かったのは気候変動）。報告書『海に忍び寄る新たな危機 — 有害化学物質による海洋汚染と克服に向けたビジョン・方策』が明らかにする通り、これら三つの問題は、複雑に、深く絡み合っている。

地表面積の70%、居住可能空間の99%を占める¹海洋環境は、あらゆる生命体にとって極めて重要な存在だ。しかし化学物質汚染の規模や、海洋環境（海洋生物・生物多様性・生態系機能など）への影響については、十分な科学的検証が行われていない。同報告書では、現時点で明らかな影響、そしてさらなる研究が急務となる領域を明らかにしてゆく。

この問題への対応が急務である大きな理由は、一刻も早く行動を起こさなければ、極めて大きな脅威となることだ。そのため同報告書では、汚染軽減に向けた具体的な方策を、ステークホルダーごとに提起している。こうした取り組みはあくまでも出発点に過ぎない。同報告書の発表後、『Back to Blue』は問題克服に向けたロードマップを打ち出すことを次の目標としている。

海洋環境の重要性

同報告書の対象となるのは、深海・沿岸・湾岸・河口部など、水圏の中でも海水の存在する“海水域”で、サンゴ礁・藻場・マングローブ林・干潟・堆積層・水柱といった多様な生態系が見られる場所だ。河川・水路・地下水を含む淡水域も、海・沿岸地域への汚染経路として取り上げるが、基本的には調査の対象外であることに留意いただきたい。

“この問題への対応が急務である大きな理由は、一刻も早く行動を起こさなければ、極めて大きな脅威となることだ”

海水域は地球上の生命体にとって不可欠な存在だが、その重要性は著しく過小評価されている。数十億単位の人々に食料源を供給するだけでなく、大気中の酸素の半分以上を生成し、炭素吸収源として地球温暖化のブレーキ役も担う。また漁業・海運・観光・娯楽・資源開発など、経済的にも重要な役割を果たしている。化学汚染によって、数十兆ドル規模の市場が失われる可能性を考えても、極めて深刻な事態と言わざるを得ない。

これまで人類は、有害物質・廃棄物を無尽蔵に吸収・分解可能な存在として海を扱ってきた。しかしこうした考え方は誤りだ。研究は途上にあるが、化学物質が海洋環境にもたらす害については既に明らかな点も多い。ホッキョクグマ・プランクトン・海中植物・ツツノオトシゴなどの海洋生物相からより広範な生態系まで、深刻な影響を及ぼしていることは動かざる事実だ。また化学物質の生産拡大に伴い、汚染が悪化しつつあることにも異論の余地はない。問題克服に向けた早急な取り組みが求められているのはそのためだ。

人類の活動が気候変動の大きな原因であることは、これまでの科学研究からも明らかだが、海洋化学汚染も同様に人為的問題であり、これら二つの問題には密接な相関関係がある。化学物質が気候変動のもたらす負の影響を増幅する一方、気候変動（海水温上昇・大気中のCO2濃度上昇に伴う海水の酸性化・塩分濃度上昇など）も化学物質の有害性を悪化させることが知られている。こうした負の循環に歯止めをかけるためには、二つの問題へ同時に対処する必要があるのだ。

海洋環境の生物多様性（つまり“多様な生態系とそれによって生じる自然界の摂理”²）は、気候変動や汚染、水産資源の乱獲などによって急速に損なわれつつある。この問題を放置すれば、海洋生態系の破壊はさらに深刻化するだろう。生物種の減少は、陸上・海洋環境に共通する問題だ。しかし後者には未知の部分も多く、被害の実態把握が難しいという点で大きく異なる³。

生物多様性、そしてそれを支える複雑な生物の相互作用に及ぶ害は、海洋生態系の機能・回復力にも影響を与えている。同分野の研究は依然として黎明期にあり、海水温度の上昇や酸性化、化学物質汚染、海洋産物の乱獲などを含む産業開発がもたらす悪影響も十分に解明されていないのが実状だ。しかし海洋環境における化学物質汚染の悪化が、人類の生活、そして気候・炭素の循環など地球上の生態系機能の損失（あるいは破壊）につながることは間違いない。

海洋環境と化学物質汚染

海洋環境汚染に対する関心は近年高まっているが、その焦点となっているのはプラスチック汚染の問題だ。今回取材を行った専門家の多くが指摘する通り、この問題は目に見えやすく、感情に響きやすい。鼻にストローが刺さったウミガメや、死んだクジラ・海鳥の胃から取り

出される大量のプラスチックごみの映像が強い印象を与えることを考えれば、注目が集まるのは当然と言える。

化学物質汚染とも深く関わるプラスチック汚染は、複雑かつ重大な脅威だ。しかし次のような理由から、化学物質汚染はそれ以上に深刻な問題と言える：

- 化学物質汚染は物理的に目に見えづらいため、(ウミガメの映像のような) 視覚的イメージを認知度向上に活用することが難しい。こうした特徴が、汚染の実態解明と危機意識の醸成を妨げている。
- 合成化学物質の生産・開発は急速に拡大しており、今後数年から数十年間でさらに加速する可能性が高い。その重要な背景となっているのは、環境配慮や持続可能性のある社会への移行、つまり“グリーン・トランジション” [green transition] の推進だ。
- 化学物質の生産拠点は、規制・施行体制が発展途上にある中・低所得国へとシフトしつつある。対策が一定の効果を上げている高所得国も、開発・イノベーションの加速とそれに伴う汚染リスクに直面し、さらなる対応を迫られている。
- 多くの科学者は、汚染の影響評価に向けたさらなる研究の必要性を訴えている。数万種に上る化学物質の多くで、人体・環境への影響がほとんど解明されていない現状を考えれば、科学者の懸念は驚きに値しない。
- 海洋化学汚染は先進国にとっても脅威だが、その影響は発展途上国で特に顕著になりつつある。こうした国々は化学物質の主要消費地ではなく、市民・生態系に対する影響が注目されにくい。

同報告書が明らかにする通り、この問題に対する危機意識は依然として低い。世界は今、事態の打開に向けた早急な取り組みを求められているのだ。

主要な化学物質と汚染源

最近発表された研究によると、世界には少なくとも35万種の合成化学物質が存在し、毎年数千種が新たに開発されている。そしてその多くについては、人体・環境への影響がほとんど解明されていない⁴。毒性の高さから使用が禁止された場合も、代替品から有害物質が検出される(“残念な代替” [regrettable substitution] と呼ばれる) ことも少なくない。

使用禁止・制限・代替措置の対象となった化学物質は、過去数年で数百種に上る。特に有害性が高いのは、残留性有機汚染物質 [Persistent Organic Pollutants = POPs] と呼ばれる物質で、長距離を移動し環境・生物相に深刻な脅威をもたらす恐れがある。これまでに数百種の化学物質が POPs に認定されているが、一部の研究者は対象とすべき化学物質がさらに数千種あると考えている。

世界には膨大な数の化学物質が存在しており、同報告書の中で有害性の高いものを全て網羅することは難しい。今回組織された専門家パネルの助言により、危険性が危惧される化学物質は、以下三つへの影響・関与の高さを軸に分類されている：

- 自然環境 (特に海洋環境)
- 人体の健康
- 経済 (経済的影響の数値化は、『Back to Blue』イニシアティブが掲げる長期的目標の一つ)

有害性が特に高い POPs は、主要汚染源の一つであり、同報告書でも大きく取り上げている。他にも重金属・栄養素・農薬・プラスチック・医薬品・放射性物質・石油製品・家庭用化学製品、そして擬似残留性化学物質[pseudo-persistent chemicals]なども深刻な汚染源だ。しかしこれら化学物質の大半は、現在のところ使用禁止・制限の対象となっていない。

同報告書では現時点の影響評価を元に対象を選別しているが、有害化学物質の数は今後さらに増えるはずだ。また今後の研究によって、海洋化学汚染の影響がより広範かつ深刻であることが判明する可能性もある。

海洋環境における化学物質汚染の現状を評価するためには、特に二つの観点から分析を行う必要がある：

- 有害化学物質は海洋環境にどのような影響を及ぼしているのか？
- どのような経路をたどって海洋環境へ流出しているのか？

一つ目について正確な答えを導き出すためには、さらなる研究が必要だ。個々の化学物質、あるいは化学物質の混合物がもたらす自然環境への影響については、特にそうだと言える。二つ目の点を明らかにするためには、まず化学物質のバリューチェーンに関わる様々なステークホルダーを特定しなければならない。例えば、化学セクター（これまで汚染コストの多くを外部化してきた）や、その顧客となる企業（工業製品の95%以上が化学物質を使用）、投資家、規制当局・政府関係者（浚渫・防衛など汚染源となる公共事業者も含む）、廃品・リサイクル業者、市民社会などはそれにあたるだろう。

消費者もステークホルダーとして重要な存在だ。海洋汚染の原因となる化学物質には、殺虫

剤・肥料・プラスチックといった消費者向け製品（“新たに懸念される化学物質” [chemicals of emerging concern] と呼ばれることもある）も含まれているからだ。また過去数十年を通じた沿岸部都市の増加・拡張、世界的な人口・所得増加などを背景に、医薬品・パーソナルケア製品による汚染も急速に悪化している。

こうした現状を踏まえ、同報告書では原料となる原油や鉱物、金属の採掘・処理など、製造前の段階も視野に入れながら、化学製品のバリューチェーンに関する分析を行っている。例えば、原料採掘と製造の両方を手がける大手石油・ガス会社（例：Exxon Mobil・Shell・BP）は、大きな責任を担うべき存在だ。また化学セクターによる説明責任の問題も、重要なテーマとなるだろう。長期的成長が見込まれる同業界は、海洋汚染に深く関与しながらも、厳格な規制の対象となっていない。

都市ごみや電子廃棄物、未処理排水など、製品ライフサイクルの出口にあたる処分・廃棄 [end of life] 段階も海洋汚染の大きな原因となっている。例えばプラスチック製品は、製造段階で様々な化学物質が使われるだけでなく、分解によってマイクロプラスチック・ナノプラスチックを生成。海水中の化学物質を吸収し、長距離を移動することで汚染を悪化させている。

規制当局は、（少なくとも理論的には）原料の採掘・抽出から廃棄までのライフサイクル全体を監視すべき存在だ。厳格な規制の施行・徹底、他地域・国との連携、事業移転などを通じた企業による“規制逃れ”の防止といった取り組みは、汚染対策を進める上で極めて重要な意味を持つ。欧州委員会 [European Commission] の調査によると、規制の施行は人体・環境にもたらす影響の軽減や、水質レベルの改善など様々な効果をもたらしているという。

規制を効果的に活用すれば、生産者による共通基準の遵守、あるいは廃棄処分や海洋環境への影響を視野に入れた製品設計を促すことも可能だろう。

“何もしない”ことのリスク

海洋環境の化学物質汚染は、ほとんどが人為的なものであり、過去100年に発生したものだ。そして化学物質の生産・イノベーションは、今後数年から数十年にかけて加速する見込みで、規制環境が発展途上にある国々がその中心となる可能性が高い。対策が講じられなければ、海洋化学汚染は更に大幅に悪化する可能性が高い。

“厳格な規制の施行・徹底は、汚染対策を進める上で極めて重要な意味を持つ”

現在そして将来的な汚染の範囲・規模・影響と、それに伴う損失の評価は、科学者・環境活動家にとって喫緊の課題だ。脅威の実態が明らかになれば、対策の実効性も高まるだろう。“何もしない”という選択肢も存在するが、現実的には何らかの対策が講じられる可能性の方が高い。過去数年で、問題に対する危機感がさらに深まっているからだ。例えば国連環境計画[UNEP]は、化学物質・プラスチック・廃棄物による汚染を、気候変動・生物の多様性損失と相関関係にある三大人為的危機の一つに認定した。また国際連合[国連]は、汚染問題を海洋環境の持続可能性が「深刻な脅威に晒される」重大な背景と考えており、『持続可能な開発目標』[SDGs] 達成の鍵を握る要因と位置づけている。科学誌 New Scientist も 2021 年中旬に発表された記事に、“化学物質汚染が地球の三大危機

である理由”という見出しを掲げ、危機感をあらわにした⁵。一方、Stockholm Resilience Centre は過去十年間、この問題を地球上で人間が安全に生存できる限界“プラネタリー・バウンダリー” [planetary boundary] の一つと見なしている。

だが危機意識を高める言葉も、具体的行動につながらなければ意味がない。汚染の実態には依然として不明な点も多く、さらなる研究の推進と資金確保が欠かせないだろう。ただし問題の全容解明をただ待つ時間は残されていない。数万種に上る化学物質の検証には数十年という時間が必要だが、その間にも着実に悪化する汚染を傍観している余裕はないからだ。世界で近年広まりつつある“予防原則”^{*} [precautionary principle] という考え方にに基づき、一刻も早く対策を講じることが求められている。

対策を進める上で特に大きな責任を負うのは、化学セクターやその顧客となる企業だ。気候変動と同様、汚染の影響を前提とした企業活動は取り組みの第一歩となるだろう。

世界が何もしなければ、海洋化学汚染のさらなる悪化は避けられない。化学製品の生産拡大が大きな要因であるのは確かだが、規制とその実行体制や製品設計の問題、家庭・工業排水処理体制・廃棄物管理体制の不備など、対応すべき課題はその他にも数多くある。

今回取材を行った専門家が特に大きな課題と考えているのは、“海は廃棄物・有害物質を無尽蔵に吸収・分解できる”という人々の固定観念だ。そして同報告書が明らかにするとおり、これは全くの誤解なのだ。

* 予防原則：重大かつ不可逆的な影響を及ぼす仮説上の恐れがある場合、科学的因果関係が十分証明されなくても規制措置を可能にするという考え方

世界的問題と実態解明の必要性

海洋における化学物質汚染は、国境や生産地からの距離に関わらず、あらゆる地域と人々に影響を及ぼす問題だ。それを証拠に太平洋島嶼部やフェロー諸島、北極圏の住民—特に海産物を食料源とする貧困国の女性・子供—からも、有害物質が検出されている。つまりこれは、世界全体の脅威として捉えるべき問題だ。

しかしその経済的コストは一部の高所得国を対象とした検証であり、海洋環境に生活や命がかかっている数十億の人々への影響はほとんど分かっていない。海洋生態系や人体、地域経済に最も有害な化学物質に焦点を当てた調査・資金支援が、喫緊の課題となっているのはそのためだ。

また個々の化学物質だけでなく、複数の化学物質による相互作用が海洋環境にもたらす影響についても、さらなる調査が求められる。分析の際には、気温・酸性度・塩分濃度といった変動要因を考慮に入れる必要があるだろう。

既存の研究は先進国を対象とすることが多いため、少なからずバイアスが見られる。同報告書ではこうした現状を念頭に置き、新興国を対象とした研究も可能な限り活用した。研究活動の偏りは、今後解消すべき大きな課題の一つと言えるだろう。

既存の研究にまつわるもう一つの課題は、より幅広いコミュニティとの知見共有だ。国連環境計画が指摘するように、研究者と政策立案者間のコミュニケーションについても改善を図る必要がある。何もしないことのデメリットと、対策を講じることのメリットを明確化することが変化を促す有効な手段となるだろう。同

報告書で取り上げた米国メキシコ湾沿岸部の化学物質汚染では、低酸素海域 [デッドゾーン] の拡大に伴う漁業への推定被害額が年間約8億3800万ドル(約960億円)に上っている。一方、適切な対策を講じた場合は、生物多様性の回復につながるだけでなく、漁業収入が1億1700万ドル(約134億円)以上増加する見込みだ。

企業

主要汚染源となっている化学セクターは、問題克服に大きな責任を担うだけでなく、取り組みの成功を左右する存在だ。仮に対応を怠れば、業界そのものが存亡の危機に立たされるだろう。その理由の一つは、化石原料に大きく依存する同セクターが、脱炭素化を求める政府・金融機関のさらなる圧力に直面することだ。もう一つの理由は、化学物質汚染が環境・人体に及ぼす影響の解明が進み、気候変動の問題でも重要な役割を果たした消費者・投資家の声が高まることだ。

現状維持に甘んじる企業は、グリーンケミストリー分野で見られる革新的企業の台頭によって、特に大きな圧力にさらされる可能性が高い。革新的企業は、業界の持続可能な変革にも重要な役割を果たすだろう。化学物質使用の適正化、規制の厳格化を求める消費者・市民の声の高まりを背景とした顧客企業の取り組み加速も、こうした流れを後押しするはずだ。

プラスチック汚染対策と同様、化学セクターでは循環利用の推進に向けた機運が高まっているが、意外にも企業の対応は限定的で、業界レベルの連携はほとんど見られない。改革を加速させるためには、文化・構造レベルで企業のあり方を変える必要がある。

おわりに

海洋環境の化学物質汚染は可視化が難しい問題だ。しかし現在、この課題は徐々に解消されつつある。問題の規模・深刻度、そして事態のさらなる悪化が海洋環境にもたらすリスクについては、科学的エビデンスの蓄積が進んでいる。気候・天候の調整や、酸素の生成、炭素の吸収、数十億の人口に対する食料源の供給など、海洋環境が果たす重要な役割を考えれば、現状容認という選択肢は存在しない。

あらゆるステークホルダーの関与を実現し、具体的行動につなげるためには、複雑な課題への対応を迫られる。問題克服は決して不可能でない。同報告書（そして『Back to Blue』イニシアティブ）を通じ、問題の背景や実態、現時点で明らかな影響、克服に向けたソリューションなど、この地球規模の課題に対する認知度が向上し、様々なステークホルダーの取り組みが推進されることを願っている。

海洋化学汚染の主要原因物質

本章では、海洋汚染の原因となる主な化学物質を取り上げ、現時点で解明されている原因・影響を検証する。

1.1 主要な論点

- **世界には膨大な数の化学物質が流通しているが、その多くについては潜在的影響が解明されておらず、“残念な代替”が行われるケースも少なくない**

現在世界で流通する合成化学物質は数万種類に上るが、海洋環境・人体に及ぼす影響はほとんど知られていない。しかし一部については、高い毒性が明らかになっている。過去数年で、数十種類以上の化学物質が禁止・制限・代替措置の対象とされたが、十分な評価が行われないうまま代替物質に指定され、後に有害性が発覚する事例（“残念な代替” [regrettable substitution]）も少なくない。

- **海洋環境に有害な“高懸念科学物質”は非常に数が多い**

“高懸念化学物質” [chemicals of greatest concern] の対象となるのは、残留性有機汚染物質 [Persistent Organic Pollutants

= POPs]・重金属・栄養素・農薬・プラスチック・医薬品・放射性物質・石油製品・家庭用化学製品・消費者向け化学製品・擬似残留性化学物質 [pseudo-persistent chemicals] などだ（一部重複あり）。一部の例外を除き、こうした化学物質のほとんどは禁止・制限対象となっていない。規制対象となった化学物質についても、依然として大量備蓄が存在し、廃棄・処理が必要なものが多い。中でも特に影響が深刻なのは POPs だ。ストックホルム条約*等の国際条約によって、既に数十種類の化学物質が POPs に指定され、禁止・制限・代替措置の対象となっている。しかし POPs の条件を満たしながら、規制対象外となっている化学物質の数は数千種類に上る（他の高懸念化学物質についても状況は同じ）。一刻も早い対策が求められているのはそのためだ。

*ストックホルム条約：正式名称は『残留性有機汚染物質に関するストックホルム条約』[Stockholm Convention on Persistent Organic Pollutants] で POPs 条約と呼ばれることもある

- **有害化学物質の解明は、依然として道半ばだ**
化学物質（そしてその相互作用）が海洋環境にもたらす害については、依然として十分に解明されていない。特に大きな足かせとなっているのは資金不足の問題だ。資金支援の対象を高懸念化学物質の研究に絞り、生態系・生物相*・人体・地域経済に及ぼす影響を解明するといったアプローチは有効だろう。また新興国における実態解明も大きな課題だ。既存の研究は先進国を対象とするものが多く、汚染の影響が特に深刻な新興国の貧困層・社会的弱者に十分な関心が向けられていない。
- **汚染対策は研究と並行して進める必要がある**
上述のように、海洋化学汚染の研究は依然として途上であり、今後さらに多くの化学物質について影響評価・管理を進める必要がある。しかし、一部の化学物質が海洋環境に及ぼす影響は既に明らかであり、汚染対策は研究の進展を待たず早急に進めるべきだ。

**“ごく一部の例外を除き、
化学物質が人体・環境にもたらす影響は、
ほとんど（あるいは全く）分かっていない”**

2020年に発表されたある研究によると、製品・使用対象として登録済みの化学物質・化合物は、これまでの推計よりも3倍多い35万種類。そして企業による極秘扱い、あるいは曖昧な記述によって詳細が不明な化学物質も、約12万種類に上るといふ。

専門家が、現在の推定をはるかに上回る環境被害を懸念するのはそのためだ。海産食品を通じた直接的な形、あるいは気候変動、漁場や

マングローブ林・サンゴ礁（高潮の抑制効果を持つ）の破壊といった間接的な形で人体に及ぶ影響も、同様の理由から過小評価されている可能性が高い¹。

世界的な知識・情報不足を解消する必要性は、2019年に国連環境計画が発表した報告書『Global Chemicals Outlook』[世界化学物質アウトルック]でも指摘されている。同報告書はこの問題を、化学汚染の軽減に向けて対応すべき主要10課題の一つとして明記。問題克服の鍵として、「研究プロトコル[実施計画書]の統一や、人体・環境への影響分析を通じた優先課題の特定（例：新たに確認された問題）、科学者・政策担当者の連携加速を通じた科学・政策インターフェイスの強化」といった取り組みを挙げている²。

また同報告書は、複数化学物質による相互作用も優先研究分野として指摘。「(『生物多様性条約**』の2010年目標は)混合化学物質に対する生態系の累積暴露[cumulative exposure]を、生物多様性の損失につながる5大要因の一つに挙げている」とし、「この“混合物質”が人・生物の健康や環境に及ぼす影響がほとんど解明されていない」現状に警鐘を鳴らしている³。

高懸念化学物質を包括的にリスト化することは難しい。ごく一部の例外を除き、化学物質が人体・環境にもたらす影響は、ほとんど（あるいは全く）分かっていないからだ⁴。過去20年の論文13万本（3500品目以上の化学物質を分析）を検証したある研究によると、その半数はわずか65種類の化学物質を対象としていた。また「一部の化学物質については、化学セクター関連出版物で発表された内容がほとんどを占めていた」といふ⁵。つまり研究対象となる化学

* 生物相 [biota]：特定の環境（地域・時代）に生息する生物を全てまとめた概念

** 生物多様性条約：正式名称は『生物の多様性に関する条約』[Convention on Biological Diversity = CBD]

物質は限られており、その中には客観性が疑わしい分析も含まれているのだ。

多くの研究がテーマとしている人体への影響を見ても、有害化学物質の危険性は明らかだ。例えば、世界保健機関 [WHO] の推計では、化学物質汚染による早世者の数が2019年時点で200万人に達している（死因のほぼ半数は鉛中毒）⁶。同機関はこのデータが「問題の一端に過ぎず、人々はさらに多くの化学物質へ日常的に晒されている」として懸念を示している⁷。

1.2 定義の問題と取り組みの現状

化学物質が海へもたらす影響については、ほとんど解明が進んでおらず、包括的かつ信頼性の高いリストを作成することは不可能に近い（その理由について後ほど詳しく取り上げる）。しかし一部の国家機関・国際機関は、取り組みを既に始めている。例えば、EUの専門機関である欧州化学物質庁 [European Chemicals Agency = ECHA] は複数のリストを作成。その一つである認可候補リスト [Candidate List] は、「(ヨーロッパで生産、あるいは輸入され) 人体・環境への影響が非常に深刻な」223種類の化学物質を掲載している⁸。

また認可対象物質リスト [Authorisation List] には、EU内で段階的廃止対象となった54の化学物質⁹、制限物質リスト [Restricted List] には、域内での製造・使用が禁じられた69の化学物質が含まれている¹⁰。

三つのリストは今後も随時更新される予定で、加盟国による化学物質の追加提案も可能だ。例えば認可候補リストに掲載された8物質は、「生殖機能に異常を来す物質・発ガン性物質・呼吸器感受性物質・内分泌かく乱物質など、人体に

深刻な影響をもたらす」として、2021年7月に追加されたものだ¹¹。

しかしリストへの掲載によって、対象物質の使用が完全に禁止されるわけではない。2007年1月に発効した『REACH規則』*の下で、濃度が0.1重量パーセントを超えた場合に限り、「安全な使用に必要な情報を顧客・消費者へ提供する義務」が発生するに過ぎない¹²。

他の国内・国際機関も独自のリストを作成している。例えば、ヨーロッパを拠点とするNGO ChemSec [国際化学物質事務局] は、『SINリスト』**と呼ばれるリストにECHAを遥かに上回る1027種類の有害化学物質を掲載。より安全性の高い代替物質の導入・使用を、企業に呼びかけている。

こうした取り組みから浮かび上がるのは、“禁止・制限対象とすべき化学物質を特定する最善の方法は何か”という疑問だ。『Back to Blue』イニシアティブは、明確・迅速かつ世界規模で応用可能なプロセスを知識ベースとしてまとめることを目指している。本報告書が、海洋環境・人体・地域経済に最も有害な（あるいはその可能性が高い）化学物質の特定を重要な目的としているのはそのためだ。高懸念化学物質を特定できれば、優先度の高い研究分野も自ずと明らかになるだろう。

前述の通り、有害性の判定は決して容易でない。特に困難が伴うのは、どのような特性を分析対象とすべきか判断することだ。難分解性・生体蓄積性・毒性（併せてPBTと呼ばれる）を基準とするのが一般的だが、POPsを対象とするストックホルム条約では、長距離移動の可能性も考慮されている（国単位のPOPs対策が

*REACH規則：正式名称は『化学物質の登録・評価・認可・制限に関するEU法』 [Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals]

**SINリスト：SINリストの“SIN”は“Substitute It Now” [今すぐ代替が必要] の頭文字を取ったもの。

難しい理由もそこにある)¹³。また影響評価の基準となる摂取量・暴露量の閾値やデータソースにも組織ごとの違いがあり、評価に差が生じる要因となっている¹⁴。高懸念物質リストの対象物質（そして POPs と認定されるかどうか）が評価機関によって異なるのもそのためだ。

こうした既存リストの多くが、目的を果たしていないと考える専門家は少なくない。例えば複数の独立評価によると、POPs に認定すべき化学物質の数は、ストックホルム条約の 29 物質をはるかに上回る。95000 種類の化学物質を分析したある研究は、そのうち 5000 種類が POPs の候補になると結論づけている¹⁵。

“残念な代替”

段階的廃止措置は、有害化学物質の管理に有効なアプローチだ。しかし効果的な汚染対策のためには、代替品となる化学物質にも目を向ける必要がある。例えば、難燃剤の一つポリ臭素化ジフェニルエーテル [PBDE] は、約一世紀前に工業生産が開始されたポリ塩化ビフェニル [PCB] の代替材料として普及した。PCB は海中堆積物や河川・地上に蓄積し、食物連鎖を通じて人体・生物へ深刻な害を及ぼすことが確認されたからだ。

PCB と分子構造の共通点が多い¹⁷ PBDE は、難燃性の高さ*から、家具・マットレス・絨毯・プラスチック製収納用品などに使用されてきた。しかし、内分泌かく乱作用によって人間・動物に深刻な影響を及ぼすことが発覚している¹⁸。十分な検証が行われないうまま代替材料が流通し、(場合によっては元の化学物質以上の) 毒性が明らかとなる現象は、“残念な代替” [regrettable substitution] と呼ばれている。

市場に流通する 3 種類の PBDE** [pentaBDE・octaBDE・decaBDE] は制限措置の対象となっている。しかし EU で一定量の使用が認められるなど、現在も全世界で様々な製品に利用されている。

そして PBDE は五つある臭素化難燃剤の一つにすぎず、(PCB のケースが示すように) “残念な代替” による負の連鎖も依然として続いている。例えばある研究は、PBDE の代替材料の一つである有機リン酸エステル [OPE]²⁰ が、飼い猫の甲状腺中毒の原因となる可能性を指摘²¹。Arctic Monitoring & Assessment Programme*** [北極モニタリング評価プログラム]²² も、OPE を “北極の新たに懸念される化学物質” [Chemicals of Emerging Arctic Concern = CEAC] に指定した²³。2019 年に発表された別の研究も、OPE が現在の暴露レベルでも人体に影響をもたらすとし、「PBDE を上回るレベルで検出されるケースも見られる」状況に懸念を示している²⁴。

“残念な代替” は決して珍しい現象ではない。海運セクターが近年直面した状況はその一例だ。2020 年 1 月、国際海事機関 [International Maritime Organization = IMO] は、低硫黄燃料油 [Very Low Sulphur Fuel Oil = VLSO] の義務化に踏み切った。硫黄分が多く、二酸化硫黄を大量に排出する通常燃料を代替し、海水の酸性化と生態系破壊を軽減するのがその狙いだ²⁵。

モーリシャスの沖合で貨物船『わかしお』が座礁し、運行不能に陥ったのは、そのわずか半年後 2020 年 7 月のことだ。燃料タンクの重油はほとんど回収されたものの、約 1000 トンが海に流出。ある研究者グループによると、同船

* 米国の化学メーカーによって長年販売された PBDE の難燃性能については、複数の研究者が疑問を呈している¹⁶。

** decaBDE は、pentaBDE・octaBDE の代替材料として開発された。これも “残念な代替” の一例と言える。

*** 北極モニタリング評価プログラム：国際協議組織 北極評議会 [Arctic Council = AC] のワーキンググループの一つ。

が使用していた新燃料には、海洋生物へ影響を及ぼす有害物質が通常の重油ほど含まれていなかったという²⁶。

しかし同研究の主執筆者でカーティン大学地球・惑星科学学部 西オーストラリア生命・同位体地球化学センターに所属する Alan Scarlett 氏によると、別のタイプの新燃料から「より高い濃度の有毒成分が検出」されている。「さらなる研究を通じて、全ての新燃料に環境負荷の軽減効果があるかを見極めるべきだ」というのが同氏の見解だ²⁷。

化学物質の相互作用

上述のように、既存の化学物質に関する研究は、依然として途上にある。そのため高懸念物質のリスト化と、適切な代替材料の特定は容易でない。

問題をさらに複雑化させているのは、複数の化学物質による相互作用の影響だ。海洋環境には無数の化学物質が存在し、複合的な反応を生じる場合がある。例えば一部の化学物質では、毒性効果（化学物質の混合により毒性が蓄積される）や、相乗効果（個々の物質が持つ以上の毒性作用を発揮する）が確認されている。また他の化学物質の毒性をさらに高める、あるいは（反応の順序によって）生物に対する毒性が変化するものもある。

海水温上昇や海水の酸性化・貧酸素化なども、化学物質の移動性・毒性を左右する要因だ（詳細については、第3章を参照）。一部の専門家は、化学物質の相互反応と各物質の相対的重要性が、こうした環境要因によって変化する可能性を懸念している。つまり様々な不確定要素が状況を変える恐れもあるのだ。

化学物質と有害な相互作用

本報告書が掲げる目標に沿って、特に懸念の大きな化学物質をリスト化したのが次ページの表だ。上述の理由から、リストは完全なものではない。将来的な研究に向けた土台作りという意味合いが大きいことに留意いただきたい。

前章でも紹介したこれらの化学物質は、海洋環境への影響が特に大きいと専門家パネルが現時点で考えるものだ。こうした汚染物質への対策は、海洋環境の回復を進める上で重要な一歩となるだろう。本報告書では、影響が最も深刻な化学物質を次のように分類する（一部重複）：

- 残留性有機汚染物質 [POPs]：前出の PCB・PBDE の他、有機塩素系農薬、ダイオキシン、フラン、PFAS と呼ばれるフッ素化学品の一部（例：ペルフルオロオクタンスルホン酸 [PFOS]・ペルフルオロオクタン酸 [PFOA]）など
- 重金属：水銀、鉛、カドミウムなど
- 栄養素：富栄養化*につながる肥料、人・動物の排泄物などの有機物²⁸
- 農薬：ストックホルム条約で禁止対象とされる化学物質の半分以上は農薬であることから、特に重要なカテゴリーと言える
- プラスチック：マクロプラスチック・マイクロプラスチック・ナノプラスチックなど。プラスチック自体が汚染源となるだけでなく、POPs をはじめとする化学物質の長距離移動を促す
- 医薬品：人・動物向けの医薬品など。大量使用や誤用を通じた“薬剤耐性”の原因となる抗生物質は特に懸念が大きい

* 富栄養化：藻類の異常増殖により水中が酸欠状態となり、海洋生物の大量死を招く現象。

化学汚染と海洋環境：汚染物質と経路

世界では現在、35万種以上の化学物質が製造・使用を目的として登録されており、スマートフォンから食品の保存料まで、日常生活に不可欠なテクノロジー・製品の生産に重要な役割を果たしている。ある著名な研究によると、海洋化学汚染の約80%は陸上由来の物質を原因とするもので、海洋由来の物質はわずか20%にとどまっている。下の図は、特に懸念の高い化学物質をまとめたものだ。



重金属

Hg

水銀

人力小規模金採掘や石炭の燃焼、非鉄金属・セメントの製造により発生・流出

Cd

カドミウム

発がん性リスクが極めて高く、電池・ソーラーパネル・プラスチックなどの製造に使用。石材・鉄鋼・めっき産業の排水にも多く含まれる。

Pb

鉛

鉱業、石油・ガス開発、インフラ整備、浚渫、電子機器などの産業で発生する。生体蓄積により心臓病・脳卒中・がんの原因となる。

化学製品



残留性有機汚染物質 [POPs]

炭素ベースの化学物質で、家具・電子機器などの製品に使用。健康被害をもたらす恐れがある。



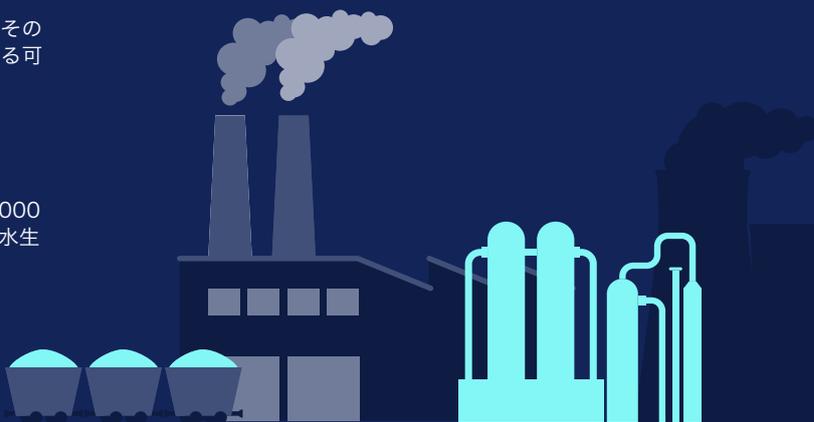
炭化水素

石油には約1万種類の成分が含まれており、その一部はがん・突然変異・出生異常の原因となる可能性がある。



農薬

殺虫剤・除草剤・殺菌剤など、世界全体で1000種類以上が使用され、サンゴの死滅・白化や水生植物の損失の原因となる。



- 放射性物質：近年発生した放射能汚染（例：2011年の福島原発事故）、これまでに廃棄された放射性物質、自然放射線など
- 石油：流出事故の処理に使用される化学物質を含む
- 家庭用化学製品・消費者向け化学製品：洗剤・化粧品・シャワージェル・日焼け止めなど
- 擬似残留性化学物質：水域環境で急速に拡散。幅広い製品（例：医薬品）に使用されているため、濃度が急速に上昇しつつある
- その他化学物質：現在使用されている約30万種の化学物質の多くは、影響がほとんど解明されていない

1.3 残留性有機汚染物質 [POPs]

残留性有機汚染物質 [POPs] は、炭素ベースの化学物質の総称で、人・動物への毒性が強い。汚染源から離れた極地にも、土壌・水・大気を通じて広く拡散し、長期間にわたって環境に残留する（PFOAの場合は永久的に残留する可能性もある）。また POPs は食物連鎖を通じて脂肪組織などに蓄積され、人や魚、捕食鳥、捕食性哺乳類ではバックグラウンド濃度*の7万倍まで生体濃縮されることがある²⁹。

環境中に存在する POPs の多くは、農業や工業製品の製造工程（例：家具・電子機器・玩具などの消費者向け製品）で使用されるものだ。ダイオキシンやフランなど、その他の POPs は焼却や工業プロセスの副産物として流出することが多い³⁰。ストックホルム条約のリストに掲載された29物質の使用は減少しつつある。しかし依然として大量の備蓄が存在しており、さらなる環境汚染を食い止めるためには、適切な廃棄処分・処理が不可欠だ。また POPs の

基準を満たす化学物質の数は、既存の29種類をはるかに上回る可能性が高い。

POPs が危険物質とされる最大の理由は、がん・アレルギー・生殖障害・先天異常などの原因となることだ。またその多くは、内分泌かく乱や免疫機能・神経系異常を引き起こすことも知られている。ストックホルム条約の対象となった29の POPs の多くは“廃絶”対象となっており³¹、2022年初頭の時点でさらに6物質が追加候補に挙がっている³²。

おそらく世界で最も著名な POPs は、米国軍がベトナム戦争で用いた“枯葉剤”で有名になったダイオキシン、そして農薬・殺虫剤として使われた DDT だろう。枯葉剤は世代を超えて深刻な健康被害を及ぼしており、DDT も内分泌をかく乱することが分かっている。後者は農業使用が禁じられているが、一部の国では現在も蚊の駆除に使用されている。

PCB

POPs と比べ知名度は低いですが、PCB [ポリ塩化ビフェニル] は“最も有害なレガシー汚染物質”³³と呼ばれる化学物質だ。1979年に禁止されるまでの生産量は、米国だけで約68万トンに上っている³⁴。全世界で推定130万トンが生産された³⁵ PCB は、変圧器（難燃剤として）、塗料、電気機器、プラスチックの添加剤や、道路のほこり飛散防止剤としても使われていた。総生産量の3分の1は沿岸地域の堆積物や海中に、残りは廃棄物埋め立て地や、現在も使用中の施設などに残留すると考えられており、今後数十年にわたって影響を及ぼす可能性が高い³⁶。

PCB に特徴的な化合物を含む化学物質は209種類ある。人・動物への毒性が高く、その全て

*バックグラウンド濃度：汚染の影響を受けていない状態の濃度。

はストックホルム条約で“廃絶”対象とされている。食物などを通じて人体に取り込まれ、発達障害・行動障害・記憶機能低下の原因となる。また人間や一部の動物（例：アシカ）の免疫機能を低下させ、発がん性も確認されている³⁷。PCBの影響は魚介類にも見られ、高濃度で蓄積された場合は死亡、低濃度の場合は繁殖機能の障害を招く恐れがある。

1980年代に発表された著名な研究によると、主な海洋汚染の経路となっているのは大気降下だ。その後の調査では、北半球（特に地中海・バルト海）で特に高濃度のPCBが検出されている³⁸。

**“ POPs が危険物質とされる最大の理由は、
がん・アレルギー・生殖障害・先天異常、内分泌かく乱、
免疫機能・神経系異常などの原因となることだ ”**

ただし一部の海域では、濃度の減少が見られる。例えば、大西洋北東部の海洋環境保護を目的とした地域機関 OSPAR Commission [オスパー委員会] の研究によると、三つの対象地域（北海北部・南部・カディス湾）では、統計的な濃度低下が見られたという。（アイルランド・スコットランド西部沿岸地域の堆積物には、2015年時点で減少が確認されなかった³⁹。）

ただし甲殻類を対象とした2017年の調査では、二つの深海域で海表面をはるかに上回る多種のPCB（そしてPBDE）汚染が確認されている。同域の甲殻類から検出されたPCBの濃度は、汚染が深刻な中国の河口域に生息する蟹の50倍に上った⁴⁰。また2016年の研究によると、南極海の魚に蓄積されたPCB・POPsの濃度も、過去20年上昇傾向にあるという⁴¹。

一部の国では特定機器を対象とし、PCBが2025年まで使用される見込みだ。こうした

機器は、2028年までの処分・解体が義務づけられているが、あらゆる国に期限遵守を徹底するのは難しい。ストックホルム条約が発効してから数十年が経つが、PCBによる影響は今後も続くだろう。

その他の POPs

一般的な認知度は低いものの、ストックホルム条約の附属書Aには、現在数十種類のPOPsが掲載されている。クロルデン・ディルドリン・リンデン・ジコホール・エンドスルファンなどの殺虫剤・農薬はその一例で、エンドスルファンは多くの国でコーヒー・米の栽培などに使用されている。また殺虫剤やプラスチック・ゴム・電気機器の難燃材として使われるマイレクス、電気機器・自動車・飛行機・絨毯などに使われる臭素系難燃材デカブロモジフェニル・ヘキサブロモジフェニルなども含まれている。

だが前述の通り、本来POPsと見なされるべき化学物質の数は、これよりもはるかに多い。2012年に行われたある研究によると、対象物質93000種類のうち190～1200種類が、POPsの基準（残留性・生体蓄積性・毒性・長距離移動性など）を満たしている⁴²。同論文の著者によると、そのうち10種類は「現在も大量生産が行われている」という⁴³。

同条約の対象となる化学物質の中で、最も対策強化の必要性が高いのは、パーフルオロアルキル化合物およびポリフルオロアルキル化合物 [PFAS] と呼ばれる化学物質群だ。米国環境保護庁 [Environmental Protection Agency] の試算によると、PFASに含まれる合成化合物は9200種類を上回る⁴⁴。ストックホルム条約のリストに掲載済みのPFASは、ペルフルオロオクタンスルホン酸 [PFOS] とペルフルオロオクタン酸 [PFOA] だけだ。しかし、同条約の専門委員会はPFHxSも対象に加えることを

提案しており、その他の物質についても追加が検討されている。また2021年中盤には、長鎖パーフルオロカルボン酸 [PFCA]（それらの塩と関連物質を含む）を掲載候補としてカナダが提案⁴⁵。同条約の POPs 検討委員会は2022年初頭、これらが基準を満たすと判断し、掲載審査第2段階（全3段階）への移行を決定した。このまま審査が進めば、数年後には世界的な禁止措置が施行される見込みだ⁴⁶。また同委員会は、有害プラスチック添加剤 UV-328・デクロランプラス・中鎖塩素化パラフィン [MCCP]（プラスチックの難燃剤などとして使用）についても対策が必要としている⁴⁷。

PFAS は、熱・油・水ぬれ・グリースなどへの耐性が高く、消火剤、衣服の耐水加工、耐油・耐水食品包装材、焦げ付き防止調理器具、化粧品、日焼け止め、人工芝（耐摩擦加工など）、電子機器（難燃性強化など）といった様々な家庭用・工業用製品に過去数十年使われてきた。

PFAS の中でも特に毒性が高いのは PFOA と PFOS だ。前者はかつて、焦げ付き防止調理器具のテフロン加工に使用されていた。後者については、前駆物質が3Mの“スコッチガード”撥水剤に使われ、現在も金属メッキなどの工業処理に活用されている。いずれも米国では段階的廃止措置の対象となっている⁴⁸。PFAS はタンパク質に結合しやすく、発がん性が高い。人・動物に免疫機能低下やホルモン系かく乱といった害を及ぼすことが知られている。PFOS・PFOA は共に海洋性プランクトン⁴⁹や海水⁵⁰から高濃度で検出されている。ある調査では、太平洋北部海域から北極海まで30箇所の海表面から採取された海水サンプルの80%以上から、パーフルオロアルキルカルボン酸 [PFCA]（PFAS の一種で PFOA もその中に含まれる⁵¹）が見つかった⁵²。

「これは極めて憂慮すべき事態だ。PFAS は内分泌かく乱物質であり、生殖機能・免疫機能への影響が極めて大きい」と指摘するのは、非営利団体 International Pollutants Elimination Network [国際汚染物質廃絶ネットワーク = IPEN] のシニア・アドバイザー Mariann Lloyd-Smith 氏。「免疫機能の低下は様々な健康問題につながるため、特に影響が懸念される。」

PFAS は水溶性が高く、深さ50～200mの海水層にとどまることが多い⁵³。複数の研究によると、「大気と海洋の相互作用が発生し、商業漁業の対象となる多くの生物相（魚類の卵・幼生など）が生息する」厚さ50マイクロメートル（0.005cm）の海表面マイクロ層でも、高濃度の PFAS が検出されている⁵⁴。

生体蓄積や堆積物への沈殿、あるいは深海から海表面へ浮上し、大気から微小な水滴として長距離を移動するなど、PFAS は様々な経路で汚染を拡散する。海洋性エアロゾルは、大気中の PFAS の最も大きな二次汚染源となっており、気候変動にも影響を及ぼす⁵⁵。その拡散度と海洋環境への影響は依然として十分解明されていない。しかし複数の研究によると、北米五大湖地方の雨水から検出される PFAS の濃度は、水銀・PCB・農薬といったレガシー汚染物質の10～1000倍に達しているという⁵⁶。

PFAS は、その他にも様々な形で海洋環境を汚染しつつある。例えば、消火訓練が定期的に行われる防衛施設では、消火剤による PFAS 汚染が蔓延している。同国の NGO Environmental Working Group [EWG] は、約700の防衛施設を対象に実施した米国防衛省の調査⁵⁷を受け、385の施設で「飲料水・地下水源・周辺地域の汚染が深刻化している」と発表した。オーストラリアをはじめとする他の国でも、同様の汚染が確認されている⁵⁸。

PFASは、排水処理施設で除去することが極めて難しい⁵⁹。PFASを構成する“炭素-フッ素結合”は、“有機化学で作りに出せる最も強力な結合”⁶⁰とされており、環境への流出後もほとんど分解が進まないためだ。分解性のあるPFASも、高い残留性を保ったまま蓄積される事が多い。これまで分析が行われたPFASは全体のごく一部だが、その多くは数年にわたって人体に蓄積され、半減期も数年から数十年にわたることが判明している⁶¹。“永遠の化学物質”[フォーエバー・ケミカル]と呼ばれるのはそのためだ。

こうした有害性が確認されていながら、PFASの多くは現在も合法的に使用可能だ。しかし近年、こうした状況に変化が生じつつある。例えば米国環境保護庁は、「PFASに対する理解を深め、潜在的リスクを軽減する」ための組織を設立⁶²し、そのうち一つについては「政治的判断の影響が認められる」として有害性評価の訂正・更新を行った⁶³。これは、先進国において適切な影響評価が必ずしもされていないことの証しだ。

“PFASの半減期は数年から数十年にわたることが判明している。“永遠の化学物質”[フォーエバー・ケミカル]と呼ばれるのはそのためだ”

また2021年中盤には、ヨーロッパ5カ国（ドイツ・デンマーク・オランダ・ノルウェー・スウェーデン）がEU圏内における「PFASの製造・市場化・使用」制限措置を共同提案。発表された声明では、現状容認に甘んじれば、PFASによる環境汚染が不可逆的なレベルに悪化するとして警鐘を鳴らした⁶⁴。

また5カ国は、「水溶性・移動性が高いPFASによる、地表・地下水・飲料水・土壌の汚染

はEU圏内だけでなく世界全体で進行しており、今後も深刻化が予測される」と指摘。「環境に流出したPFASの除去は極めて困難で、膨大な費用が必要となる。また一部のPFASは、人体・環境への毒性が高い、または生物蓄積性を持つ（あるいは両方の特質を併せ持つ）物質であることが証明されている」として対策の必要性を訴えている⁶⁵。

1.4 重金属

一部の重金属を対象とした国・世界レベルの規制は、近年強化されている。しかし国連環境計画が発表した『世界化学物質アウトLOOK第2版』によると、「ほとんどの重金属（鉛・水銀など）については、市場規模が横ばい状態あるいは拡大傾向にある」という⁶⁶。

鉛・水銀は、電池・ソーラーパネル・プラスチック製品などの安定剤・着色料として使われるカドミウムや、銅、クロム、マンガンといった他の汚染物質よりもはるかに認知度が高い。

2021年は、重金属の規制において大きな分岐点となる年だった。毒性の高い有鉛ガソリンを流通する唯一の国アルジェリアが販売を停止し、撤廃措置が完了したからだ⁶⁷。国連環境計画によると、約一世紀にわたりガソリン添加剤として使われてきた鉛は、「大気・粉塵・飲料水・作物を汚染し」、心臓疾患・脳卒中・がん・発達障害・知能指数の低下（IQ5~10の減少）などの原因となってきた⁶⁸。この撤廃措置により、年間約120万人の早世、そして世界全体で約2.5兆（約284兆円）ドルに及ぶ経済損失を防ぐことができたという⁶⁹。

しかしヒ素・カドミウム・水銀と同様、鉛の海洋流出は今も続いている。汚染源の一つとなっているのは深海採鉱だ。陸上における鉱物埋蔵量の減少に伴い、深海採鉱の重要性は今後

さらに高まる可能性が高い（詳細については、第3章を参照）。

もう一つの主要な汚染源は、港湾・沿岸部における浚渫作業^{しゅんせつ}で、堆積物に含まれる重金属の流出につながっている⁷⁰。未処理排水も、海洋化学汚染の大きな要因だ。特に新興国では、排水全体に占める割合が80～90%と多く、「鉛・カドミウム・水銀などの重金属が含まれることも多い」という⁷¹。また陸上環境における採鉱や石油・ガス採掘、化石燃料の燃焼も深刻な汚染源だ。

重要な汚染経路となっているのは、食物連鎖を通じて重金属が体内濃縮された魚介類の摂食だ。複数の研究によると、ブラジル・カナダ・中国・コロンビアの漁業コミュニティで育つ子供の1.7%に認識機能障害が認められたという⁷²。

特に水銀は、重金属の中でも神経系・免疫機能・肺・腎臓への毒性が強く、胎児・幼児へ特に深刻な影響を与える⁷³。世界保健機関[WHO]が、公害を引き起こす10大化学物質の一つに定めているのはそのためだ⁷⁴。

1.5 栄養素

このカテゴリーに含まれるのは、肥料の栄養素（窒素・リン・カリウム）や人・動物の排泄物などだ。海洋環境へ流出したこれらの栄養素が、植物プランクトン・海藻の異常増殖を引き起こす現象は“富栄養化”と呼ばれ、赤潮や水中の酸素減少に伴う魚介類の窒息死、“デッドゾーン”[低酸素海域]発生の原因となる。

環境破壊や、魚介類（牡蠣・カニなどを含む）の漁獲量減少といった経済損失をもたらす富栄養化は、自然発生することもある。しかし、排水処理施設や農業用地・都市部から

の（雨などによる）流出など、人為的要因によって発生することがほとんどだ⁷⁵。

富栄養化の影響が、世界で最も深刻な海域の一つはバルト海だ。最近発表されたある研究によると、「2011～16年にかけて、海域の97%で富栄養化の影響が見られた（窒素・リンを含む肥料の流出が主な原因）」という。窒素・リンの使用は過去数十年を通じて減少傾向にあるが、同海域への流出量は依然として多い（2014年時点で、それぞれ82万5825トン・3万949トン）。主な流出源は周辺地域の河川で（P.30の図参照）、年間38～44億ユーロ（約5000億～5800億円）の経済損失につながっているという⁷⁶。

デッドゾーンがもたらす損失については、海洋化学汚染の経済的影響を検証する第4章のケーススタディで取り上げることにする。

1.6 農薬・殺虫剤

大規模農業の普及により、農薬（殺虫剤・除草剤・殺菌剤など）の需要は急速に拡大しつつある。人口増加によって食料増産の必要性が高まる現在、世界全体で1000種類以上の農薬が使用されている⁷⁷。農薬の使用が禁止されれば、栄養不足・餓死のリスクに直面する人口は8億人から30億人へ増加する見込みだ⁷⁸。しかし、国連食糧農業機関[FAO]が指摘するように、非工業国で有機栽培法を取り入れれば、生産量の拡大も（少なくとも減産を防ぐことが）可能だろう⁷⁹。

こうした理由から、専門家の間では農薬の是非に関する様々な議論が行われている。ただしその多くが高い毒性を持ち、人・動物・環境へ深刻な被害をもたらすことに異論の余地はない。その証拠に、ストックホルム条約によって廃絶措置の対象とされたPOPsの半分以上は農薬だ。

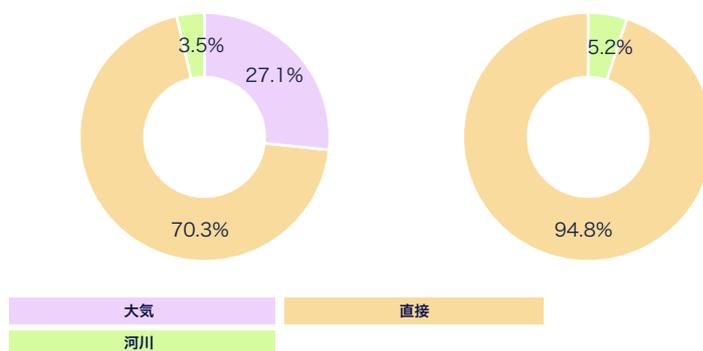
図1：バルト海の化学汚染と流出源

窒素・リンの流出源内訳（2014年）

バルト海への総流出量（2014年）

窒素（82万5825トン）

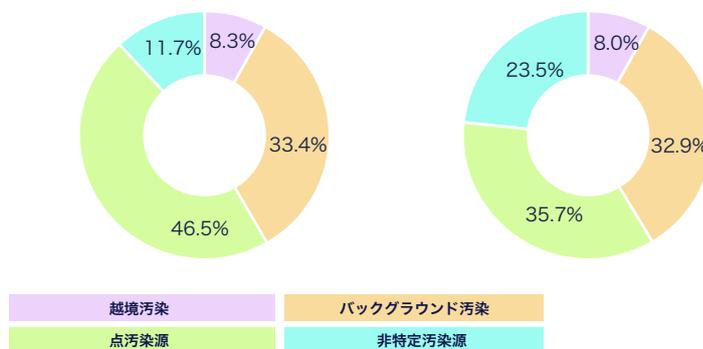
リン（3万949トン）



河川からバルト海への総流出量（2014年）

窒素（52万9583トン）

リン（2万2273トン）



資料：State of the Baltic Sea – Second HELCOM holistic assessment 2011-2016, HELCOM, p42.

農薬の被害が最も深刻なのは陸上環境だが、流出・大気降下などを通じて海洋環境にも深刻な影響を及ぼしている。例えば国連環境計画によると、カリブ海では魚の大量死やサンゴの死滅、卵殻の菲薄化（ひはくか）といった形で農薬の影響が浮き彫りになっている⁸⁰。またジャマイカでは、「コーヒー農園での農薬散布

時期と、沿岸部で魚が大量死した時期に相関性が確認された」という。特に除草剤は、藻場やその他海藻類に深刻な影響をもたらしている⁸¹。

世界最大のサンゴ礁群を抱える重要な海洋保護区の一つで、サンゴの死滅と白化現象が近年深刻化するオーストラリアのグレートバリア

リーフは、海洋環境破壊を象徴する存在となっている。その大きな原因となっているのは気候変動の影響だが、陸上由来の殺虫剤・農薬も重要な汚染源となっている。専門家が特に懸念するのは、サトウキビなどの農園から大量に流出する農薬の影響だ。複数の研究によると、散布された農薬とそれに伴う分解生成物が、沿岸部の河川⁸²や近海⁸³から検出されている。

“こうした状況を踏まえ、農薬規制の強化、あるいは特に有害な農薬の廃止といった措置が求められているが、取り組みは遅々として進んでいない。例えば、90カ国にまたがる600以上のNGOで構成される国際団体農薬アクション・ネットワーク [PAN] は、WHOやEU・米国・日本政府の情報に基づき、毒性が極めて高い農薬として338種類を挙げている”

こうした状況を踏まえ、農薬規制の強化、あるいは特に有害な農薬の廃止といった措置が求められているが、取り組みは遅々として進んでいない。例えば、90カ国にまたがる600以上のNGOで構成される国際団体 Pesticides Action Network International [国際農薬行動ネットワーク = PAN] は、WHOやEU・米国・日本政府の情報に基づき、毒性が極めて高い農薬として338種類を挙げている。しかし、ストックホルム条約の廃絶対象リストに掲載される農薬の数は20種類以下だ⁸⁴。PANが指摘するように、農薬の影響（内分泌かく乱など）に関する研究の遅れを考えると、同条約のリストは不十分と言わざるを得ない。

農薬の深刻な影響は、海洋生態系にも及びつつある。例えば、約400種類の農薬がもたらす影響について25年間にわたり評価した2021

年の研究によると、「農薬の使用量減少と共に、脊椎動物への影響は減少しつつあるが、（特に昆虫・海生無脊椎動物に対する）毒性は著しく悪化している」という。この分析結果を見ても、農薬の環境負荷が減少しているとは思えない、というのが著者の見解だ⁸⁵。

農薬の絶対的な使用量、1ha [ヘクタール]あたりの使用量は、共に増加の一途を辿っている。食糧農業機関 [FAO] によると、2019年の農薬使用量は世界全体で420万トンに上る（世界人口一人あたり0.6kgにあたる量）。30年前と比較すると約50%増加している計算だ⁸⁶。除草剤はそのうち半分以上を、残りのほとんどは殺菌剤・殺虫剤が占めている。

数百の環境団体の支援を受けるPANは、農薬の使用があくまでも最終手段だと考えており、38種類の農薬を対象に2030年までの段階的廃止措置を求めている⁸⁷。豆科のカバークロップや堆肥の活用、混合農業*、種まき・草取りの時期適正化といった農業生態学的アプローチが、人体・環境負荷の軽減と収穫増につながることは、数多くの研究により証明されているからだ⁸⁸。こうした取り組みは、海洋環境にもプラスの影響をもたらすだろう。

1.7 プラスチック

1950年代の大量生産開始以来、世界は膨大な量のプラスチックを生産してきた。ある推計によると、総生産量は2015年時点で83億トンに達しており、そのうち20億トンは現在も使用されているという⁸⁹。残りは既に廃棄物として処理されており、その80%程度が埋め立て処分、あるいは流出などの形で（海を含む）環境汚染の原因となっている。海洋環境の廃プラスチックが分解されるには、数世紀という長い

* 混合農業：家畜飼育と作物栽培を組み合わせた農業。

時間がかかる。こうしたプラスチックは細片となって拡散するが、その影響は依然として十分解明されていない。

プラスチック汚染に対する市民の危機意識は極めて高い。例えば、最近行われたアンケート調査によると、海洋環境問題の最優先課題としてプラスチック汚染を挙げた回答者は全体の60%に上っている（次いで多いのは化学物質汚染・気候変動）⁹⁰。こうした危機感を裏付けるように、世界全体のプラスチック生産量は2020年時点で3億6700万トンに達しており⁹¹（その多くは包装材・建材⁹²）、2040年までに倍増する見込みだ⁹³。

環境へ流出するプラスチックも膨大な量に上る。ある推計によると、1950～2015年にかけて生産された83億トンのうち、80%が埋め立て・廃棄処分され、その一部は海へ流出した⁹⁴。海洋環境における廃プラスチック（あらゆる種類を含む）は、2016年時点で約1億5000万トンと推計され、その後も年間800万トンのペースで増加している。毎分トラック一台分のプラスチックが海洋環境へ流出している計算だ。対策が講じられなければ、この数字は2050年までに3倍へ増加する可能性が高い⁹⁵。

この問題が複雑なのは、プラスチック製品の多くは使用後に価値がなくなってしまう（あるいはほぼゼロになる）ためだ。製造コストが安く、廃棄も容易で、多くの国がリサイクル・再利用に必要な処理能力を備えていないことも事態を悪化させている。

問題はそれだけではない。海洋プラスチック汚染という言葉が想起させるのは、漁網が絡まったアザラシや、プラスチック片で窒息したクジラ、ビニール袋を飲み込んで死んだウミ

ガメなどのイメージだ。しかし汚染の大部分は、目に見えない形で広がりつつある。

ビニール袋・プラスチック容器・釣具・ストロー・カップの蓋・使い捨て包装材などの製品が、海洋汚染の原因となっているのは事実だ。しかしマクロプラスチックと呼ばれるこうした製品は、問題の一端に過ぎない。マイクロプラスチック（大きさ5mm～1μm [0.001mm]）やナノプラスチック（大きさ1μm未満）の存在は、海洋環境へさらに深刻な脅威をもたらしている。

マイクロプラスチック・ナノプラスチックには、製造段階で使われるもの（例：化粧品のマイクロビーズ）と、使用過程で発生するもの（自動車用タイヤや合成繊維製の衣服の摩滅片など）がある。これらは、まとめて“一次マイクロプラスチック”と呼ばれる。一方、自然環境における摩滅、波・日光の作用などで生じるものは、“二次マイクロプラスチック”と呼ばれる。

マイクロプラスチック・ナノプラスチックが海洋環境に有害な理由は、プラスチック片が（リンゴなどの有機物と異なり）分解されずに微小な粒となって環境に残ること、そして食物連鎖を通じて生物に深刻な影響を与えることだ。例えば、魚介類の体内に蓄積されることで栄養失調を引き起こし、有害化学物質を吸収した微小な粒子が食物連鎖を循環することで生体濃縮の原因となる⁹⁶。

またマイクロプラスチックは、潮流に乗って長距離を移動し、汚染を拡散する性質を持つ。POPsが汚染源から遠く離れた超深海や極地などでも検出されるのはそのためだ。

プラスチックがもたらす脅威として最も深刻なのは、（原料となる石油成分そのものよりも）

中にほぼ必ず含まれるBPAやフタル酸類、着色剤などの添加剤だ。こうした汚染物質の有害性は、大気の変動や他の化学物質との相互作用などによってさらに悪化する可能性がある。こうした相互作用の解明にはさらなる研究が必要だが、プラスチックの過剰な生産・使用が海洋環境へ深刻な影響をもたらすことは確かだろう。

1.8 医薬品

世界的な人口拡大と医療支出の増加により、医薬品の生産量は急速な伸びを示している。また養殖海産物を含む肉類の増産に伴い、動物向け医薬品の需要も拡大している。

“一部の医薬品に含まれる有害化学物質が深刻な影響を及ぼしていることは、動かざる事実だ。その影響は、藻・海藻類から食物連鎖を通じて生態系全体へ波及する可能性が高い”

こうした市場拡大が海洋環境にもたらす影響は、決して前向きなものではない。一部の製品に含まれる有害化学物質が深刻な影響を及ぼしていることは、動かざる事実だからだ。その影響は、藻・海藻類から食物連鎖を通じて生態系全体へ波及する可能性が高い⁹⁷。国連環境計画によると、食物連鎖への影響は既に現れており、魚の性転換といった形で波及しつつある⁹⁸。またある研究は、抗うつ剤が魚同士のコミュニケーションや捕食行動に及ぼす影響も報告している⁹⁹。しかし医薬品がもたらす海洋化学汚染は、まだ十分に解明されていないのが実状だ。

ただし、製造過程や製品の使用、人・動物の排泄物、未使用品（使用期限切れなど）の不適正な廃棄など、医薬品の流出経路は既に明らかとなっている。

製造過程・製品の使用については、海へ到達する前に排水処理施設を経由するが、この段階で化学物質の流出を防ぐことは難しい。国連環境計画が指摘するように、こうした施設の多くは「排水の酸化によって固形物やバクテリアを除去しており、化合物の処理を念頭に置いている」¹⁰⁰。そのため、医薬品に含まれる化学物質はる過されずに、「淡水系を経由して海へと流れ込んでしまう」のだ¹⁰¹。

こうした現象は、世界各地の研究で報告されている。例えば、バルト海域における医薬品汚染の実態を調査した2017年の研究によると、汚染物質のほとんどは都市下水処理施設[MWWTPs]から流出したものだ¹⁰²。分析対象となった医薬品118品目の多くで、除去率が低いレベルにとどまっており、ほぼ半数近くが50%を下回った。また、そのうち16品目については濃度上昇が見られたという。

こうした医薬品が海洋生物にもたらす影響には、依然として不明な点が多い。しかし抗生物質の流出は、WHOが「世界の健康に対する10の脅威」の一つに挙げる薬剤耐性菌[AMR]の増加につながる可能性が高い¹⁰³。

抗菌性・抗真菌性・抗ウィルス性物質を含む抗菌剤で、手の消毒剤をはじめとする様々なパーソナルケア製品に使われるトリクロサンは、その代表例だ。こうした殺生物剤が、(カドミウム・水銀などの重金属と同様に)「細菌の抗生物質耐性遺伝を加速させ、AMRの拡散につながる」ことは、多くの研究で指摘されている¹⁰⁴。つまり行き過ぎた“除菌”が、強い薬剤耐性を持つ細菌の増加につながる可能性は高いのだ。

こうした懸念が現実のものとなれば、影響は極めて深刻だろう。2014年に英国政府が発表した報告書によると、抗生物質耐性を持つ

図2：都市下水処理施設における医薬品の除去率

調査対象となった医薬品 118 品目のうち除去率が 95% を上回ったものはわずか 9 品目で、16 品目については濃度上昇が確認された。調査を実施した研究者によると、現時点で原因を断定するのは難しいという。



資料: Pharmaceuticals in the aquatic environment of the Black Sea region: A status report, UNESCO and HELCOM, p32

“超細菌” [superbug] による死亡者は、2050 年までに世界全体で年間 1000 万人へ増加し、60～100 兆ドル（6900 兆～1.2 京円）規模の経済損失をもたらす可能性がある。

1.9 放射性物質

国際原子力機関 [IAEA] によると、放射性廃棄物の海洋投棄は、1946 年に米国カリフォルニア州沿岸部から約 80km 離れた近海で初めて行われた¹⁰⁵。放射性廃棄物はそれ以後、圧力容器に入れられた放射性固形廃棄物・液体廃棄物など、様々な形で海洋環境へ流出してきた。世界には 14 カ国 80 箇所以上の処分場があり、最後に廃棄が実施されたのは 1993 年のことだ。

軍用船舶や核兵器、放射性物質の輸送容器などの事故・損壊も放射能汚染の大きな原因だ。

陸上事故や核兵器実験（海上・水中の両方）の放射性降下物、原子力発電所からの放射性廃棄物なども、海洋汚染の要因となっている。

IAEA によると、海洋投棄された放射性廃棄物の多くを占めるのは、放射能レベルの低い固形廃棄物（54%）や 使用済み核燃料を含む原子炉（43%）などだ。放射線レベルが 8.5×10^4 TBq を下回り、意図的に廃棄される放射性廃棄物の 95% 近くは、大西洋北東部や北極海のロシア北部海域に集中しており（両者はほぼ同量）、残りの大部分は大西洋北西部や太平洋が占めている。

海洋環境にある既存の放射性廃棄物は、減衰によって 2×10^4 TBq 程度まで放射線レベルが減少しており、2050 年までにはさらに半減する見込みだ。

福島原発事故と海洋汚染

2011年3月11日に発生した福島第一原子力発電所の事故は、人的被害だけでなく海洋環境にも深刻な影響をもたらした。例えばヨウ素 131・セシウム 134・セシウム 137 をはじめ¹⁰⁶、事故発生前の数百万倍に上る¹⁰⁷放射性物質が環境へ流出している。

ヨウ素 131・セシウム 134 は半減期が比較的短く、事故発生から数週間後には急速に減少した。特にヨウ素 131 は、数週間内にほとんどが減衰。複数の専門家によると、セシウム 134 の 97% も 2021 年までに減衰している。一方、セシウム 137 は減衰に長い時間がかかり、半減期を迎えるまでの期間も 30 年だ¹⁰⁸。魚介類から高濃度のセシウム 137・セシウム 134 が検出されたことを受け、沿岸部の漁業は操業停止を余儀なくされた¹⁰⁹。

しかし近年、同地域の海洋環境には回復の兆しも見られるようになってきている。例えば 2015 年以降、日本の厳格な基準を上回る放射線が検出される魚は、1000 匹当たり 2 匹程度まで減少¹¹⁰。発電所からは依然として放射性物質の流出が続くものの、「事故発生後 1 ヶ月のセシウム放出量に達するまで 5000 年が必要」なレベルまで改善した。福島沿岸の放射線量も安全基準を満たしており、2016 年以降は 1 平方メートル当たり 100 ベクレルの水準を保っている。事故発生前の 1 平方メートル当たり 2 ベクレルというレベルにはほど遠いが、発生から数日内の 5000 万ベクレルという数値を考えれば大きな改善と言える¹¹¹。

しかしこうした状況は、大きく変わろうとしている。政府が 2021 年に、原発敷地内のタンク約 1000 基に貯蔵された汚染水を海洋放出処分する意向を示したからだ。2023 年を目処に 100 万トン以上の汚染水を放出するこの決定を受け、中国・韓国政府は反発を強めている。ろ過された汚染水に含まれる放射性物質は（少なくとも理論上は）、比較的汚染リスクが低いと考えられている水素の同位体トリチウムだけだ¹¹²。

しかし貯蔵タンクには、他の放射性同位体が大量に含まれている。米国 Woods Hole Oceanographic Institution [ウッズホール海洋研究所] 上級研究員で海洋放射科学者の Ken Buesseler 氏は、「こうした物質の健康リスクはトリチウムよりも深刻で、魚介類や海底の堆積物に蓄積しやすい」として懸念を示している¹¹³。

例えば、汚染物質として知られるコバルト 60・ストロンチウム 90 は、「特に蓄積・生体濃縮しやすい性質がある」という。東京電力・日本政府から（同氏のような）専門家への情報提供が十分でないことを考えれば、プルトニウムやその他汚染物質が含まれる可能性も否定できないというのが同氏の見解だ¹¹⁴。

政府・東京電力は、汚染水の成分に関する情報公開を進め、「海洋放出を実施する前に、トリチウム以外の汚染物質が除去されていることを示すべきだ」と同氏は指摘している¹¹⁵。

意図的な廃棄物以外にも、天然起源放射性物質 [NORM] (例：ウラニウム・ラジウム・ラドン)、海底油田・ガス田の採掘、リン酸肥料の加工は海洋汚染の大きな原因となっている。また、数千トンに上る汚染水が流出した2011年の福島原発事故など、事故による流出も深刻な汚染源だ(詳細については、P.35の囲み記事を参照)。

採掘によって石油・ガス貯留層から放出される油汚濁水 [produced water] には、低レベルの天然起源放射性物質(鉛210・ポロニウム210・ラジウムなど)が含まれている¹¹⁶。しかし大西洋北東部を除いては入手可能なデータが限られており、正確な汚染状況を把握することが難しい¹¹⁷。

大西洋・太平洋・北極海に廃棄された放射性廃棄物の放射線レベル(種類別)

廃棄開始年(1946年)から停止年(1993年)までが対象

廃棄物の種類	海域			合計	全体に占める割合
	大西洋	太平洋	北極海		
使用済み核燃料を含む原子炉	0	0	3.7×10^4	3.7×10^4	43
使用済み核燃料を含まない原子炉	1.2×10^3	1.7×10^2	1.4×10^2	1.5×10^3	2
放射線レベルが低い固形廃棄物	4.4×10^4	8.2×10^2	5.9×10^2	4.6×10^4	54
放射線レベルが低い液状廃棄物	$< 1 \times 10^{-3}$	4.6×10^2	7.6×10^2	1.2×10^3	1
合計	4.5×10^4	1.4×10^3	3.8×10^4	8.5×10^4	-
全体に占める割合	53	2	45	-	100

資料: Pharmaceuticals in the aquatic environment of the Black Sea region: A status report, UNESCO and HELCOM, p32

だが、放射性物質が海洋生態系に深刻な影響をもたらすことは確かだ。残留期間の短いヨウ素131(半減期8日)、そして残留期間の長いセシウム137(半減期30年)を含め、放射性物質は植物プランクトン・動物プランクトン・海藻といった海洋生物に吸収される可能性が高く、食物連鎖を通じて人・生物に害をもたらす恐れがある¹¹⁸。

例えば英国で行われた複数の研究によると、同国の原子力発電所が数十年にわたって放射性物質を放出したアイルランド海では、アザラシ・ネズミイルカの体内から高濃度のセシウム・プルトニウムが検出されている。特にアザラシでは、「海水の300倍、餌となる魚の3~4倍の濃度に達する」という¹¹⁹。

放射性物質の蓄積状況は、照射量やその期間、半減期の長さなど様々な要因に左右されるが、遺伝子損傷やがん、死亡など深刻な害を及ぼす恐れがある。

1.10 石油

石油・ガスの年間生産量の大部分を占めるのは海洋掘削で、探鉱・製造にまつわる工程の多くが汚染原因となっている。しかし最も深刻な影響を及ぼすのは、タンカーや掘削装置の事故に伴う石油流出だ。例えば2010年に発生したメキシコ湾石油流出事故は、掘削施設ディープウォーター・ホライズンの大規模爆発が発端となり、近海に深刻な被害をもたらしている。

ただし、石油による海洋汚染の大きな割合を占めるのは陸上汚染源だ。海洋環境に流出する年間推定27億リットルの廃油の半分以上は、陸上の排水路や工業施設の未処理排水に由来する¹²⁰。

陸上・海洋由来の石油汚染は、共に野生動物とその生息地へ破壊的影響をもたらす、観光・漁業などの分野でも長期的な経済損失の原因となる¹²¹。

“石油による海洋汚染の大きな割合を占めるのは、工業施設の未処理排水などの陸上汚染源で、タンカーや掘削装置の事故に伴う石油流出の影響も深刻だ”

約一万種類に上る石油成分の中でも、多環芳香族炭化水素 [PAH] (特に石油由来 PAH) は、環境への影響が大きい。森林火災・火山噴火・自動車の排気ガス・廃棄物の焼却など、有機物の不完全燃焼によって発生する燃焼由来 PHA [pyrogenic PAH] の汚染も深刻だ。

環境中で検出される PAH は 100 種類以上に上り¹²²、その多くはがんや突然変異、動物の出生異常の原因となる。また PAH は比較的安定性の高い物質で、分解しにくいいため、数十年にわたり堆積物の中に蓄積されることもある¹²³。

石油流出事故の際に油の除去に使われる化学物質も、海洋汚染の大きな原因だ。約 500 万バレルの原油が流出したディープウォーター・ホライズンの事故では、約 4 万 7000 バレルの分散剤 (コレキシット [Corexit] 9500・9527.203) が処理に使われた。原油を微液滴に分解し、希釈するために利用される分散剤は、バイオアベイラビリティ*を高めることが知られている。またその中に含まれる化学物質が、免疫・神経・心臓血管・肺機能に害をもたらすことも、複数の臨床試験によって判明している¹²⁴。

1.11 家庭用・消費者向け化学製品

溶剤・家庭用洗剤・カビ取り・洗濯用洗剤・掃除用洗剤・漂白剤・家具用ツヤ出し剤・芳香剤・塗料・ニス・殺虫剤・電池など、一般家庭では無数の化学製品が使われている。

こうした製品に含まれる有害物質は、不適正な使用・廃棄によって海洋環境へ流出する可能性が高い。例えば、自動車のウォッシャー液は、雨によって道路へ流れ落ち、排水溝から河川・海へと到達する。また洗濯用洗剤・掃除用洗剤は、流し台から (整備されている国では) 排水処理施設を経由し、処理排水として海へ放出される。

* バイオアベイラビリティ [bioavailability = 生物学的利用能] :

人・生物に投与された薬物のうち、どれだけの量が全身に循環するのかを示す指標。

その他にも、家庭で使われることの多い化粧品・シャワージェル・デオドラント・シャンプー・日焼け止めなどには、化学物質が多く含まれている。例えば、日焼け止めには、ベンゾフェノン [benzophenone] やその派生物質 [誘導体] であるオキシベンゾン [oxybenzone]¹²⁵・ジオキシベンゾン [dioxybenzone]¹²⁶ が紫外線吸収剤として使用される。オキシベンゾンや、一部の日焼け止めに使われるオクチノキサート [octinoxate]・メチルベンジリデンカンファ [4-methylbenzylidene camphor]・ブチルパラベン [butylparaben] などの物質も、海洋生物に長期的な影響を及ぼすことが知られている¹²⁷。

“溶剤・家庭用洗剤・カビ取り・洗濯用洗剤・掃除用洗剤・漂白剤・家具用ツヤ出し剤・芳香剤・塗料・ニス・殺虫剤・電池など、一般家庭では無数の化学製品が使われている。こうした製品に含まれる有害物質は、不適正な使用・廃棄によって海洋環境へ流出する可能性が高い”

一部の国は、こうした化学物質への対策を進めている。例えば2021年中頃には、タイ政府が国立公園地域における日焼け止めの使用を禁止した（サンゴへの深刻な害が主な理由）¹²⁸。ハワイ・パラオも同様の取り組みを行っている。

また化粧品¹²⁹や歯磨き、手の除菌用ローションなどに用いられる抗菌剤トリクロサンも、毒性の高い化学物質だ¹³⁰。米国の食品医薬品局 [FDA] はハンドソープへの使用を2016年に禁止したが、他の消費者向け化学製品には現在も使用されている¹³¹。

トリクロサンは拡散率が極めて高く、米国疾病管理予防センター [CDC] によると米国人の尿検体の4分の3から検出される。排水処理施設では完全な除去が難しいため、海洋環境へ流出し、細菌の減少につながる恐れがある。例えばある研究によると、水不足が頻発し、排水の希釈が十分行われないことも多い地中海沿岸では「トリクロサンがもたらす環境リスクが深刻化している」という¹³²。また魚の甲状腺機能にも影響をもたらすことが知られている¹³³。

1.12 擬似残留性化学物質

化学物質には、水分解性が高いために影響が比較的短期間で減退するもの、そして POPs のように長期間にわたって害を及ぼすものがある。

上述の通り、“残留性”はストックホルム条約による候補選別基準の一つだ。“長期間”の定義については、例えば国連環境計画が“半減期60日以上”と定めている¹³⁴。

擬似残留性化学物質 [pseudo-persistent chemicals] は、この残留性という点において特徴的な傾向が見られる。半減期は比較的短いですが、普及度・使用頻度の高い製品（医薬品など）に含まれるため、環境での蓄積性が高いのだ。

ただし、半減期の特定は決して容易でない。実験室と実際の環境の違い（気温・日照条件など）によって、結果に大きな差が生じるからだ。例えば、抗てんかん薬のカルバマゼピン [carbamazepine]、消炎沈痛薬として使われるイブプロフェン [ibuprofen] ではこうした傾向が顕著に見られる。

カルバマゼピンを対象としたある実験では半減期が3.5日にとどまったが、二つの現地調査では63日・1200日とはるかに長かった。一方イブプロフェンについては、現地調査の半減期が実験室よりも短い¹³⁵。

ストックホルム条約やその他協定では、残留性が重要な基準となっている。このことを考えても、さらなる比較検証を早急に進める必要があるだろう。

1.13 その他の有害化学物質

現在使用されている約30万種類の化学物質の一部は、上述のカテゴリーに含まれているが、汚染原因となる物質はその他にもある。危険物質が積載・輸送される危険貨物や、難破船、化学物質の不法廃棄、荷下し後の貯蔵タンク洗浄などはその一例だ。

大量の染料を使う衣料品業界も深刻な汚染源となっている。例えばジーンズ一本あたりに使われる水の量は最大100リットルで、その他にも合成インディゴ（年間約4万トン）、ヒドロ亜硫酸ナトリウム [sodium hydrosulphite]

（7万5000トン）、苛性アルカリ溶液 [lye]（4万8000トン）などの化学物質が加工に必要だ¹³⁶。これらの多くは排水溝を經由して海に流出するため、染色工業が盛んな新興国では特に汚染が深刻化している。

しかし近年には、ナノテクノロジーを活用した新たなジーンズ染色技術も開発されている。米国の研究者グループが開発したこの技術は、水の使用量を大幅に削減可能で、加工に有害化学物質を必要としない。現時点では商業化されていないが、年間数億本を製造するジーンズ産業の汚染軽減に向けた重要なステップと言えるだろう¹³⁷。

グローバル化が進む現在の世界で、海洋化学汚染の複雑な因果関係を解明するのは決して容易でない。海洋汚染をもたらす化学物質には様々な種類が存在する（そして一部は重複する）が、問題解消に向けた第一歩となるのは、汚染源とその拡散経路を突き止めることだろう。次章では、連鎖反応のスタート地点となる、汚染源について検証する。

化学汚染と海の生物多様性：これまでの研究成果と課題

海洋環境における化学物質汚染については、依然として解明の進んでいない領域が多い。生態系や海水域（沿岸部から深海まで）の生物多様性、海洋環境の複雑な濃淡が織りなす影響、海水域・淡水域の相互作用などはその一例だ。

また生態学・生物地球化学・気候学といった観点から、海洋環境が持つ機能の監視・分析を進めることも急務となっている。海洋化学汚染の領域でも、生物相・生物多様性・生態系機能にもたらす害、そして汚染経路（大気降下・河川など）による影響の違いについては、依然として不明な点が多い。

本章で指摘したとおり、数十万種に上る合成化学物質の一つ一つが、あるいは複数の相互作用として海洋環境にどのような影響を与えるのか、あるいは気候変動に伴う海水温や塩分濃度の変化がどう作用するのかといった点についても、多くは謎のままだ。

海洋化学汚染の複雑なメカニズムについては、過去数年で理解が進んだものの、研究は依然として道半ばだ。さらに解明が進めば、海洋環境の機能、そして有害化学物質が短期・長期的にもたらす影響の全体像も明らかになってくるだろう。

国連もさらなる研究の必要性を認識しており、2021年には『国連海洋科学の10年』*を発足させた。“私たちが望む海のために私たちが必要な科学”というビジョンを掲げ、2030年まで実施予定の同プログラムは、“汚染源を特定し、削除、除去したきれいな海”の実現を、目指すべき七つの成果の一つに挙げている¹³⁸。

また同プログラムは、“海洋汚染の解明と克服”、“汚染源の特定・除去と影響の軽減”や、“人の健康・海洋生態系への潜在的影響の理解”など、合計10項目の挑戦課題を特定¹³⁹。科学者・政府・企業、その他のステークホルダーとの連携を通じた実態把握と、発生源レベルでの汚染除去を謳っている。

過去数十年の研究成果により、海洋環境・海洋生物・生物多様性・生態系に化学物質汚染がもたらす深刻なリスクは動かざる事実となっている。国連の取り組みは、さらなる知見の蓄積と汚染の実態解明につながるはずだ。これまでの科学研究で明らかとなった、五つの主要汚染源は次の通り：

1. マイクロプラスチック・ナノプラスチック

化学物質や微生物を吸着し、長距離を移動するマイクロプラスチック・ナノプラスチックは、重要な汚染源の一つであり、海洋環境への影響はますます深刻化している。プラスチック・マイクロプラスチックは、魚・海鳥・海洋ほ乳類などが餌と間違えて摂食することで消化器官に蓄積され、栄養失調・生殖機能障害・死亡の原因と

* 国連海洋科学の10年：

正式名称は“持続可能な開発のための国連海洋科学の10年” [Decade of Ocean Science for Sustainable Development]

なる¹⁴⁰。またマイクロプラスチックが細胞の損傷・炎症を引き起こす一方¹⁴¹、ナノプラスチックは消化器の細胞膜を通過し、動物組織に蓄積する恐れがある¹⁴²。

プラスチックに含まれる有害化学添加物も、水域環境へ流入し、海洋生物の組織に侵入する可能性がある¹⁴³。マイクロプラスチック・マイクロファイバーは、人・動物の病気の原因となる細菌（大腸菌など）の移動媒体・生息場所となりやすい¹⁴⁴。例えば、沿岸生態系に深刻な影響を及ぼす有害有毒藻類ブルーム [harmful algal bloom = HAB] は、マイクロプラスチックを通じて増殖・拡散しやすいことが知られている¹⁴⁵。

2. 主要な化学汚染物質

主要な汚染源として挙げられるのは、水銀・カドミウム・鉛などの有害金属、POPs [残留性有機汚染物質]・炭化水素・農薬・有機金属（例：船体の汚れ止めに使われるトリブチルスズ [TBT]）などの人工化学物質、核廃棄物をはじめとする放射性物質の三つだ。これらは残留性が高いものと、短期間で大きな害をもたらすものに分類できる。

化学物質汚染の影響は年単位で続き、食物連鎖の上位に向かうほど汚染濃度が増す“生物濃縮”も起こりやすいため、生態系の不可逆的な損失につながることが多い。汚染物質が短期間で流出した場合も、大量死・遺伝子変異・新たな疾病の発生など直接・間接的な影響を通じて、海洋生物・生物多様性・生態系に長期的な害をもたらす恐れがある¹⁴⁶。

一部の汚染物質は、食物連鎖下位の生物相から拡散し、ホルモン・免疫機能・生殖機能の不全や行動障害を引き起こす。日焼け止めに含まれる紫外線吸収剤が、サンゴ礁にもたらす害はその一例だ¹⁴⁷。プランクトンからオキアミ、それを摂取する小魚やクジラ、そしてそれを摂取するアザラシからホッキョクグマやサメなど、食物連鎖を伝って汚染を拡散させる化学物質もある。

例えばPOPsは食物連鎖の頂点へ波及し、ホッキョクグマの生殖機能障害・がんの原因となっている¹⁴⁸。同様に拡散性の高いPCBは、世界各地のシャチに生殖機能障害をもたらしている¹⁴⁹。また有害化学物質による海洋植物の死滅は生態系をも減ぼしている。

3. 有害有毒藻類ブルーム

酸素や固定炭素などの栄養素を生成する藻類は、海洋生態系にとって不可欠な存在だ。自由生活性のプランクトン藻類はその代表例で、数種類が世界の藻類生物量の大部分を占めている。特に沿岸部では、季節によって生物量が変化し、生態系に重要な影響を及ぼす。

例えば、熱帯域で浮遊する褐藻は、海洋生物に産卵・生育場所を提供する、CO₂ 吸収や海水酸性度の中和を通じて温暖化が貝類にもたらす影響を緩和する^{150,151} など、生物多様性の保全に重要な役割を担っている。

しかし藻類には、一定条件下で大量発生し、有害性の高い毒素を生成するものもある（“赤潮”あるいは有害有毒藻類ブルームと呼ばれる）。こうした現象は自然発生することもある。しかし過去数十年は、高濃度の汚染物質流入（排水・肥料由来の窒素・リン等）や海表面温度の上昇、海水の酸性化を背景に、人為的汚染の頻発化と急速な規模拡大が進む。海草・魚・甲殻類の大量死につながる酸素欠乏など、海産物・海洋環境にもたらす影響は深刻だ。

4. 病原体の拡散

陸上に生息する細菌・ウイルスは、家庭・工業排水や農業用水などを通じて海へ流出することがある。その結果として遺伝子の水平伝播*が生じ、海中の微生物に有害な遺伝形質が取り込まれれば、毒性・抗菌薬耐性の悪化といった影響を及ぼしかねない¹⁵²。複数の研究によると、海水の汚染レベルと病原体の生存状況には正の相関関係が見られるという¹⁵³。

5. テクノロジー製品の基幹物質

電子・防衛関連産業向けの最新テクノロジー製品に使われる化学物質・化学成分も、深刻な汚染源となる。ニオブ・タンタル・ガリウム・インジウム・ゲルマニウムをはじめとする微量金属、ネオジム・ガドリニウム・イッテルビウム等のレアアースはその一例だ。

これらの一部については、研究が行われた（あるいは現在行われている）が、海洋環境にもたらす影響はほとんど解明されていない。2019年に発表されたある研究によると、ガリウム・インジウム・ゲルマニウムの地球化学的な分析が進む一方、沿岸水域で生じる化学反応についてはほとんど不明だ。そのため、こうした物質の有害性評価は極めて難しい。また一部の物質については生物濃縮が確認されているものの、具体的な毒性、食物連鎖を通じた生物濃縮の可能性（水銀と同様）、安全基準の閾値といった点については情報が不足している。

おわりに

『国連海洋科学の10年』は、汚染の影響検証・対策といった様々な側面で、研究を加速させる可能性が高い。しかしこうしたプログラムの存在自体が、未知の領域の大きさを物語っているのも事実だ。海洋科学汚染を食い止めるためにも、実態解明を早急に進める必要があるだろう。

* 遺伝子の水平伝播：母細胞から娘細胞への遺伝ではなく、個体間や他生物間に起こる遺伝子取り込みのこと。
生物の進化に影響を与える可能性が指摘されている。

脚注

- 1 Toward a Global Understanding of Chemical Pollution: A First Comprehensive Analysis of National and Regional Chemical Inventories, Wang Z et al, Environmental Science & Technology (2020年)
参照: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.est.9b06379>
- 2 Global Chemicals Outlook II: From Legacies to Innovative Solutions: Implementing the 2030 Agenda for Sustainable Development, UNEP (2019)
参照: <https://www.unep.org/resources/report/global-chemicals-outlook-ii-legacies-innovative-solutions>
- 3 同上
- 4 Does the scientific knowledge reflect the chemical diversity of environmental pollution? – A twenty-year perspective, Kristiansson E et al, Environmental Science & Policy (2021年) 参照: <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2021.09.007>
- 5 同上
- 6 The public health impact of chemicals: knowns and unknowns - 2021 data addendum, WHO (2021年)
参照: <https://www.who.int/publications/i/item/WHO-HEP-ECH-EHD-21.01>
- 7 The public health impact of chemicals: knowns and unknowns, WHO (2021年)
参照: <https://www.who.int/publications/i/item/WHO-FWC-PHE-EPE-16.01-eng>
- 8 参照: <https://echa.europa.eu/sv/-/candidate-list-updated-with-eight-hazardous-chemicals>
- 9 参照: <https://www.echa.europa.eu/authorisation-list>
- 10 参照: <https://echa.europa.eu/substances-restricted-under-reach>
- 11 参照: <https://echa.europa.eu/sv/-/candidate-list-updated-with-eight-hazardous-chemicals>
- 12 同上
- 13 Stockholm Convention on Persistent Organic Pollutants (POPs): Text and Annexes, Stockholm Convention (2019年)
参照: <http://chm.pops.int/TheConvention/Overview/TextoftheConvention/tabid/2232/Default.aspx>
- 14 How many persistent organic pollutants should we expect? Scheringer M et al, Atmospheric Pollution Research (2012年)
参照: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1309104215304128>
- 15 同上
- 16 "Fear fans flames for chemical makers", Chicago Tribune (2012年)
参照: <https://www.chicagotribune.com/investigations/ct-met-flame-retardants-20120506-story.html>
- 17 Technical Fact Sheet – Polybrominated Diphenyl Ethers (PBDEs), EPA (2017年) 参照: https://www.epa.gov/sites/production/files/2014-03/documents/ffrrofactsheet_contaminant_perchlorate_january2014_final_0.pdf
- 18 同上
- 19 参照: <https://www.efsa.europa.eu/en/topics/topic/brominated-flame-retardants>
- 20 "This everyday chemical was cast aside. Its replacement might be making cats sick", PBS (2019年) 参照: <https://www.pbs.org/newshour/science/this-everyday-chemical-was-cast-aside-its-replacement-might-be-making-cats-sick>
- 21 Silicone Pet Tags Associate Tris(1,3-dichloro-2-isopropyl) Phosphate Exposures with Feline Hyperthyroidism, Poutasse et al, Environmental Science & Technology (2019年) 参照: <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b02226>
- 22 参照: <https://arctic-council.org/en/>
- 23 POPs and Chemicals of Emerging Arctic Concern: Influence of Climate Change. Summary for Policy-makers, Arctic Monitoring & Assessment Programme (2021年) 参照: <https://www.amap.no/documents/doc/pops-and-chemicals-of-emerging-arctic-concern-influence-of-climate-change.-summary-for-policy-makers/3511>
- 24 Organophosphate Ester Flame Retardants: Are They a Regrettable Substitution for Polybrominated Diphenyl Ethers? Blum A et al, Environmental Science & Technology Letters (2019年)
参照: <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/acs.estlett.9b00582>
- 25 参照: <https://www.imo.org/en/MediaCentre/HotTopics/Pages/Sulphur-2020.aspx>
- 26 Mauritius incident was world's first major spill of very low sulfur fuel oil, Phys.org (2021年9月7日)
参照: <https://phys.org/news/2021-09-mauritius-incident-world-major-sulfur.html>
- 27 同上
- 28 富栄養化は「海洋環境における栄養素の過剰な流入による、プランクトン・藻類・水生植物の過剰な増殖」と定義され、「過剰な富栄養化の進行によって、照度の低下、貧酸素化、藍色細菌の増殖といった生態系の変化が生じる」と言われている。参照: Climate Change in the Baltic Sea 2021 Fact Sheet, HELCOM. 参照: <https://helcom.fi/media/publications/Baltic-Sea-Climate-Change-Fact-Sheet-2021.pdf>

- 29 参照: <http://chm.pops.int/TheConvention/ThePOPs/tabid/673/Default.aspx>
- 30 参照: <https://www.epa.gov/dioxin/learn-about-dioxin>
- 31 参照: <http://chm.pops.int/TheConvention/ThePOPs/AllPOPs/tabid/2509/Default.aspx>
- 32 参照: <http://chm.pops.int/TheConvention/ThePOPs/ChemicalsProposedforListing/tabid/2510/Default.aspx>
- 33 Ocean Pollutants Guide: Toxic Threats to Human Health and Marine Life, IPEN and the National Toxics Network (2018年10月) 参照: https://ntn.org.au/wp-content/uploads/2018/10/ipen-ocean-pollutants-v2_1-en-web.pdf
- 34 参照: <https://oceanservice.noaa.gov/facts/pcbs.html>
- 35 IPEN (2018)
- 36 同上
- 37 参照: <http://chm.pops.int/TheConvention/ThePOPs/AllPOPs/tabid/2509/Default.aspx>
- 38 Chapter 15 - Polychlorinated Biphenyls in the Global Ocean, World Seas: An Environmental Evaluation (2019年)
参照: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128050521000176>
- 39 参照: <https://oap.ospar.org/en/ospar-assessments/intermediate-assessment-2017/pressures-human-activities/contaminants/pcb-sediment/>
- 40 'Extraordinary' levels of pollutants found in deepest parts of the sea, Science (2017年)
参照: <https://www.science.org/content/article/extraordinary-levels-pollutants-found-deepest-parts-sea>
- 41 Persistent organic pollutants in tissues of the white-blooded Antarctic fish *Champscephalus gunnari* and *Chaenocephalus aceratus*, Strobel A et al, Chemosphere (2016年)
参照: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0045653516301047?via%3Dihub>
- 42 Scheringer M et al (2012年)
- 43 同上
- 44 参照: https://comptox.epa.gov/dashboard/chemical_lists/pfasmaster
- 45 Health science summary: Long-chain perfluorocarboxylic acids (PFCAs), their salts and related compounds, Government of Canada (2021年) 参照: <https://www.canada.ca/en/health-canada/services/chemical-substances/chemicals-management-plan/initiatives/health-science-summary-long-chain-perfluorocarboxylic-acids-salts-related-compounds.html>
- 46 U.N. expert committee takes action on toxic plastics additives, pesticides, and two groups of industrial chemicals, IPEN (2022年) 参照: <https://ipen.org/news/un-expert-committee-takes-action-toxic-plastics-additives-pesticides-and-two-groups-industrial>
- 47 同上
- 48 参照: <https://www.ewg.org/pfaschemicals/what-are-forever-chemicals.html>
- 49 Accumulation of Perfluoroalkylated Substances in Oceanic Plankton, Casal P et al, Environmental Science & Technology (2017年) 参照: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/28192988/>
- 50 Poly- and Perfluoroalkyl Substances in Seawater and Plankton from the Northwestern Atlantic Margin, Zhang X et al, Environmental Science & Technology (2019年) 参照: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/31565932/>
- 51 IPEN (2018年)
- 52 参照: <https://www.epa.gov/assessing-and-managing-chemicals-under-tsca/risk-management-and-polyfluoroalkyl-substances-pfas>
- 53 "Forever chemicals": the hidden threat from the toxic PFAS on your shelf", The Guardian (2021年) 参照: <https://www.theguardian.com/environment/2021/sep/14/forever-chemicals-the-hidden-threat-from-the-pfas-toxins-on-your-shelf>
- 54 Aquatic Pollutants in Oceans and Fisheries, IPEN and NTN (2021年) 参照: <https://ipen.org/news/chemical-pollution-causes-fish-declines>
- 55 "Forever chemicals", The Guardian (2021年)
- 56 "Raining PFAS: Amount of PFAS found is outpacing legacy contaminants", Great Lakes Now (2021年)
参照: <https://www.greatlakesnow.org/2021/06/raining-pfas-outpacing-legacy-contaminants/>
- 57 "DOD Holds First Public Outreach Event to Engage With PFAS Stakeholders", DoD News (2021年7月19日)
参照: <https://www.defense.gov/Explore/News/Article/Article/2699103/dod-holds-first-public-outreach-event-to-engage-with-pfas-stakeholders/>
- 58 参照: https://www.aph.gov.au/Parliamentary_Business/Committees/Joint/Foreign_Affairs_Defence_and_Trade/PFASRemediation
- 59 "Forever chemicals", The Guardian (2021年)
- 60 参照: <https://www.ewg.org/research/mapping-pfas-chemical-contamination-206-us-military-sites>
- 61 FIGO calls for removal of PFAS from global use, International Federation of Gynecology and Obstetrics (2021年)
参照: https://www.figo.org/sites/default/files/2021-05/FIGO_Statement_removal_of_PFAS_from_global_stage_0.pdf
- 62 EPA Administrator Regan Establishes New Council on PFAS, EPA (2019年4月27日)
参照: <https://www.epa.gov/newsreleases/epa-administrator-regan-establishes-new-council-pfas>

- 63 同上
- 64 参照: <https://echa.europa.eu/registry-of-restriction-intentions/-/dislist/details/0b0236e18663449b>
- 65 同上
- 66 Global Chemicals Outlook II, UNEP (2019年)
- 67 参照: <https://www.unep.org/news-and-stories/press-release/era-leaded-petrol-over-eliminating-major-threat-human-and-planetary>
- 68 同上
- 69 同上
- 70 IPEN (2018)
- 71 Global Chemicals Outlook II, UNEP (2019年)
- 72 参照: <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/mercury-and-health>
- 73 同上
- 74 同上
- 75 参照: <https://oceanservice.noaa.gov/facts/nutrpollution.html>
- 76 参照: <https://helcom.fi/%e2%80%8bhelcom-state-of-the-baltic-sea-report-despite-improvements-the-baltic-sea-is-not-yet-in-a-good-state/>
- 77 参照: <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/pesticide-residues-in-food>
- 78 Earth Detox: How and Why We Must Clean Up Our Planet, Julian Cribb (Cambridge University Press) (2021年), p122.
- 79 Organic farming, FAO. 参照: <https://www.fao.org/organicag/oa-faq/oa-faq7/en/>
- 80 Persistent Organic Pollutants (POPs) and Pesticides, UNEP.
参照: <https://www.unep.org/cep/persistent-organic-pollutants-pops-and-pesticides>
- 81 同上
- 82 IPEN (2018)
- 83 Herbicides: a new threat to the Great Barrier Reef, Lewis S et al, Environmental Pollution (2009年)
参照: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/19349104/>
- 84 PAN International List of Highly Hazardous Pesticides, PAN (2021年3月)
参照: https://pan-international.org/wp-content/uploads/PAN_HHP_List.pdf. The four criteria for hazards are: acute toxicity; long-term health effects; environmental hazard; inclusion in international regulations
- 85 Applied pesticide toxicity shifts toward plants and invertebrates, even in GM crops, Schulz R et al, Science (2021年)
参照: <https://www.science.org/doi/10.1126/science.abe1148>
- 86 Pesticides use, pesticides trade and pesticides indicators 1990-2019, FAO (2021年)
参照: <http://www.fao.org/food-agriculture-statistics/data-release/data-release-detail/en/c/1417434/>
- 87 No More Excuses: Global Network Demands Phase-Out of Highly Hazardous Pesticides by 2030, PAN (2021年) 参照: <https://pan-international.org/release/no-more-excuses-global-network-demands-phase-out-of-highly-hazardous-pesticides-by-2030/>
- 88 Replacing Chemicals with Biology: Phasing Out Highly Hazardous Pesticides with Agroecology, PAN (2015年)
参照: <https://files.panap.net/resources/Phasing-Out-HHPs-with-Agroecology.pdf>
- 89 Production, use, and fate of all plastics ever made, Roland Geyer, Jenna R. Jambeck, Kara Lavender Law, Science Advances (2017年7月) 参照: <https://advances.sciencemag.org/content/3/7/e1700782.full>
- 90 "New surveys reveal heightened concern about ocean pollution", EIU (2021年3月31日)
参照: <https://ocean.economist.com/governance/articles/surveys-with-consumers-and-executives-reveal-heightened-concern-about-ocean-sustainability-knowledge-gaps?elqcsid=272&elqcsid=4434>
- 91 "Coronavirus Puts Brakes On Global Plastics Production", Barron's via AFP (2021年6月10日) 参照: <https://www.barrons.com/news/global-plastics-production-falls-in-2020-for-first-time-since-2008-manufacturers-01623309613>
- 92 The growing role of plastics in construction and building, Plastics Industry Association (2016年)
参照: <https://www.plasticsindustry.org/article/growing-role-plastics-construction-and-building>
- 93 A binding global agreement to address the life cycle of plastics, Simon et al, Science (2021年7月)
- 94 Geyer et al (2017年)
- 95 The New Plastics Economy: Rethinking the future of plastics, World Economic Forum (2016年)
参照: https://www3.weforum.org/docs/WEF_The_New_Plastics_Economy.pdf
- 96 Aquatic Pollutants, IPEN and NTN (2021年)
- 97 Pharmaceuticals in the Environment, R E Hester and R M Harrison, Royal Society of Chemistry (2016年)
参照: <https://pubs.rsc.org/en/content/chapter/bk9781782621898-00070/978-1-78262-189-8>
- 98 Drugged waters – how modern medicine is turning into an environmental curse, UNEP (2018年)
参照: <https://www.unep.org/news-and-stories/story/drugged-waters-how-modern-medicine-turning-environmental-curse>

- 99 Antidepressants in Our Waters Really Are Affecting Fish in a Strange Way, Study Shows, ScienceAlert (2019年)
参照: <https://www.sciencealert.com/our-antidepressants-are-having-a-strange-effect-on-the-way-fish-hunt-for-food>
- 100 同上
- 101 同上
- 102 Pharmaceuticals in the aquatic environment of the Black Sea region: A status report, UNESCO and HELCOM (2017年)
参照: <http://www.helcom.fi/Lists/Publications/BSEP149.pdf>
- 103 Ten threats to global health in 2019, WHO.
参照: <https://www.who.int/news-room/spotlight/ten-threats-to-global-health-in-2019>
- 104 Global Chemicals Outlook II, UNEP (2019年)
- 105 Inventory of Radioactive Material Resulting from Historical Dumping, Accidents and Losses at Sea, IAEA (2015年)
参照: <https://www.iaea.org/publications/10925/inventory-of-radioactive-material-resulting-from-historical-dumping-accidents-and-losses-at-sea>
- 106 Fukushima Dai-ichi and the Ocean: A decade of disaster response, WHOI Oceanus (2021年)
参照: <https://www.whoi.edu/oceanus/feature/fukushima-disaster-response/>
- 107 "10 Years After Japan's Fukushima Daiichi Meltdown, I'm Still Worried", Ken Buesseler, Newsweek (2021年3月10日)
参照: <https://www.newsweek.com/10-years-after-japans-fukushima-daiichi-meltdown-im-still-worried-opinion-1574892>
- 108 WHOI (2021年)
- 109 同上
- 110 同上
- 111 同上
- 112 Japan to release Fukushima water into sea after treatment, Reuters (2021年4月13日) 参照: <https://www.reuters.com/world/asia-pacific/japan-says-release-contaminated-fukushima-water-into-sea-2021-04-12/>
- 113 同上
- 114 "10 Years After...", Newsweek (2021年3月10日)
- 115 同上
- 116 The Second World Ocean Assessment, United Nations (2021年)
参照: <https://sdgs.un.org/publications/launch-second-world-ocean-assessment-woa-ii-volume-i-32884>
- 117 同上
- 118 Radioactivity in the Ocean: Diluted, But Far from Harmless, Yale Environment 360 (2011年)
参照: https://e360.yale.edu/features/radioactivity_in_the_ocean_diluted_but_far_from_harmless
- 119 同上
- 120 IPEN (2018年)
- 121 参照: <https://oceanservice.noaa.gov/hazards/spills/>
- 122 参照: <https://www.sciencedirect.com/topics/earth-and-planetary-sciences/polycyclic-aromatic-hydrocarbon>
- 123 IPEN (2018年)
- 124 同上
- 125 参照: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/oxybenzone>
- 126 参照: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/dioxybenzone>
- 127 参照: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/oxybenzone#section=Safety-and-Hazards>
- 128 "Thailand bans coral-damaging sunscreens in marine parks", BBC (2021年8月4日)
参照: <https://www.bbc.com/news/world-asia-58092472>
- 129 参照: https://ec.europa.eu/health/scientific_committees/opinions_layman/triclosan/en/l-3/3-environment.htm
- 130 "5 Things Wrong With Your Deodorant", Time (2016年7月5日)
参照: <https://time.com/4394051/deodorant-antiperspirant-toxic/>
- 131 参照: <https://www.fda.gov/news-events/press-announcements/fda-issues-final-rule-safety-and-effectiveness-antibacterial-soaps>
- 132 Triclosan persistence through wastewater treatment plants and its potential toxic effects on river biofilms, Ricart M et al, Aquatic Toxicology (2010年) 参照: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0166445X10003292>
- 133 Time (2016年7月5日)
- 134 Assessing the persistence of pharmaceuticals in the aquatic environment: Challenges and needs, Bu Q et al, Emerging Contaminants (2016年9月) 参照: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405665016300105>
- 135 同上
- 136 "Scientists find eco-friendly way to dye blue jeans", UGA Today (2021年)
参照: <https://news.uga.edu/scientists-find-eco-friendly-way-to-dye-blue-jeans/>
- 137 同上

- 138 参照: <https://www.oceandecade.org/vision-mission/>
- 139 同上
- 140 Interactions of microplastic debris throughout the marine ecosystem, Galloway, TS et al, *Nature Ecology & Evolution*, 1.5 (2017年): 1-8.
- 141 Accumulation of different shapes of microplastics initiates intestinal injury and gut microbiota dysbiosis in the gut of zebrafish, Qiao, R et al, *Chemosphere*, 236 (2019年): 124334.
- 142 A comparison of nanoparticle and fine particle uptake by *Daphnia magna*, Rosenkranz, P et al, *Environmental Toxicology and Chemistry: An International Journal*, 28.10 (2009年): 2142-2149.
- 143 Enhanced desorption of persistent organic pollutants from microplastics under simulated physiological conditions, Bakir, A et al, *Environmental Pollution*, 185 (2014年): 16-23.
- 144 Colonisation of plastic pellets (nurdles) by *E. coli* at public bathing beaches, Rodrigues, A et al, *Marine Pollution Bulletin*, 139 (2019年): 376-380.
- 145 Dangerous hitchhikers? Evidence for potentially pathogenic *Vibrio* spp. on microplastic particles, Kirstein, IV et al, *Marine Environmental Research*, 120 (2016年): 1-8.
- 146 Effects of pollution on marine organisms, Mearns, AJ et al, *Water Environment Research*, 87.10 (2015年): 1718-1816.
- 147 The effects of ultraviolet filters and sunscreen on corals and aquatic ecosystems, NOAA (2019年)
参照: <https://www.coris.noaa.gov/activities/effects-ultraviolet-filters-sunscreen-corals/welcome.html>
- 148 Polar Bear Cubs at High Risk from Toxic Industrial Chemicals, Despite Bans, *Scientific American* (2017年)
参照: <https://www.scientificamerican.com/article/polar-bear-cubs-at-high-risk-from-toxic-industrial-chemicals-despite-bans/>
- 149 "Pollution threatens the future of killer whales", BBC (2018年)
参照: <https://www.bbc.com/news/science-environment-45652149>
- 150 The ability of macroalgae to mitigate the negative effects of ocean acidification on four species of North Atlantic bivalve, Young, CS and Gobler CJ, *Biogeosciences*, 15.20 (2018年): 6167-6183.
- 151 Installing kelp forests/seaweed beds for mitigation and adaptation against global warming: Korean Project Overview, Chung, IK et al, *ICES Journal of Marine Science*, 70.5 (2013年): 1038-1044.
- 152 Detection and antimicrobial resistance of *Vibrio* isolates in aquaculture environments: implications for public health, Igbnosa, EO, *Microbial Drug Resistance*, 22.3 (2016年): 238-245.
- 153 Sediment composition influences spatial variation in the abundance of human pathogen indicator bacteria within an estuarine environment, Perkins, TL et al, *PloS One*, 9.11 (2014年): e112951.

本報告書に記載された情報の正確を期すために、あらゆる努力を行っていますが、エコノミスト・インパクトは第三者が本報告書の情報・見解・調査結果に依拠することによって生じる損害に関して一切の責任を負わないものとします。

ロンドン

20 Cabot Square
London, E14 4QW
United Kingdom
Tel: (44.20) 7576 8000
Fax: (44.20) 7576 8500
Email: london@eiu.com

ジュネーブ

Rue de l'Athénée 32
1206 Geneva
Switzerland
Tel: (41) 22 566 2470
Fax: (41) 22 346 93 47
Email: geneva@eiu.com

ニューヨーク

750 Third Avenue
5th Floor
New York, NY 10017
United States
Tel: (1.212) 554 0600
Fax: (1.212) 586 1181/2
Email: americas@eiu.com

ドバイ

Office 1301a
Aurora Tower
Dubai Media City
Dubai
Tel: (971) 4 433 4202
Fax: (971) 4 438 0224
Email: dubai@eiu.com

香港

1301
12 Taikoo Wan Road
Taikoo Shing
Hong Kong
Tel: (852) 2585 3888
Fax: (852) 2802 7638
Email: asia@eiu.com

シンガポール

8 Cross Street
#23-01 Manulife Tower
Singapore
048424
Tel: (65) 6534 5177
Fax: (65) 6534 5077
Email: asia@eiu.com