

戦略プロポーザル

環境調和型プラスチック戦略

～化学物質としてのプラスチックの
安全な管理・活用を推進するための戦略的研究～

STRATEGIC PROPOSAL

Plastics Strategy in a Sustainable Society

- Strategic approach to research and development
for environmentally sound management of plastic wastes -

研究開発戦略センター（CRDS）は、国の科学技術イノベーション政策に関する調査、分析、提案を中立的な立場に立つて行う公的シンクタンクの一つで、文部科学省を主務省とする 国立研究開発法人科学技術振興機構（JST）に属しています。

CRDSは、科学技術分野全体像の把握（俯瞰）、社会的期待の分析、国内外の動向調査や国際比較を踏まえて、さまざまな分野の専門家や政策立案者との対話を通じて、「戦略プロポーザル」を作成します。「戦略プロポーザル」は、今後国として重点的に取り組むべき研究開発の戦略や、科学技術イノベーション政策上の重要課題についての提案をまとめたものとして、政策立案者や関連研究者へ配布し、広く公表します。

公的な科学技術研究は、個々の研究領域の振興だけでなく、それらの統合によって社会的な期待に応えることが重要です。「戦略プロポーザル」が国の政策立案に活用され、科学技術イノベーションの実現や社会的な課題の解決に寄与することを期待しています。

さらに詳細は、下記ウェブサイトをご覧ください。

<https://www.jst.go.jp/crds/>

エグゼクティブサマリー

本戦略プロポーザルは、化学物質としてのプラスチックの安全管理・活用を通じて経済、環境、社会の持続的な発展を推進するための研究開発戦略である。化学物質は人間社会のあらゆる場面で利用・消費されている。人間社会にもたらした多大な便益に疑問の余地はないが、その反面、意図的・非意図的に環境中に放出された化学物質が生態系や人の健康に及ぼす影響への懸念も存在する。社会の発展に伴って新たな化学物質が次々と創り出される中、これらを如何にして安全に管理・活用するかは、「持続可能な開発目標（SDGs）」のゴール 12「つくる責任、つかう責任」内のターゲットとしても取り込まれている通り、持続可能な発展を目指す社会が真正面から取り組むべき課題である。また、同時に、プラスチックのみならず多様な化学物質の安全管理・活用に係る各国・地域の法規制は当該市場への展開にあたっての非関税障壁ともなりうるものであることから、それら化学物質の環境リスクを適正に評価できる技術やノウハウを有しておくことは、わが国の産業競争力強化の観点からも重要である。

今後の取組みにあたっては、化学物質をこれまで以上に「賢く使う」ということが基本的な方向性となる。「賢く使う」とは、例えばプラスチックの利用を通じた経済的価値の創出・拡大、環境負荷の最小化、社会的価値の創出・拡大の同時達成を目指すことである。またそのための具体方策は、①代替や回避が妥当な場合はそちらへ移行する、②適正な廃棄物管理・処理を行う、③環境リスクを考慮して素材・製品開発に取り組む、という3点である。さらにその実現に向けて科学技術に求められる役割は、基本的に「社会的・経済的インパクトの評価」、「新しい素材の開発」、「廃棄物の適正な管理・処理に係る技術やプロセスの開発」、「環境リスク評価の実施」の4点である。素材開発や廃棄物の適正な管理・処理に重点が置かれることが多いが、それらと安全性に係る評価は表裏一体の関係であり、一体的に推進する必要がある。

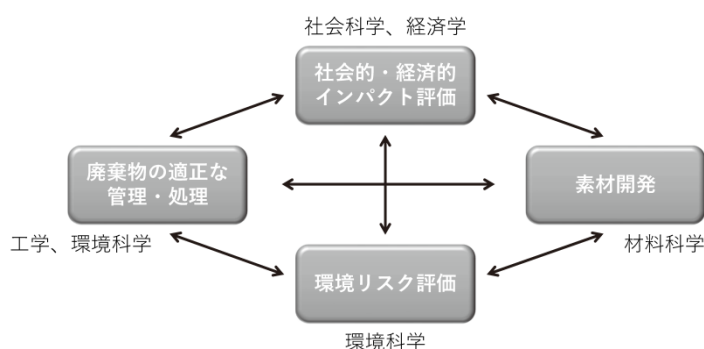


図 ES 1 社会的・経済的インパクト評価、素材開発、廃棄物の適正な管理・処理、
環境リスク評価の一体的推進が必要

以上を踏まえて本戦略プロポーザルでは、今後取り組むべき研究開発課題およびその推進方策等について、プラスチックごみ問題への対応、ならびにプラスチックをはじめとする化学物質の安全管理に資する科学技術基盤強化という二つのテーマに分けて提案する。プラスチックごみ問題への対応は今日の国際的問題として重要であるものの、それのみでは短期的な対応となる。従ってその基盤強化とともに推進することで、持続可能な社会を実現するための研究開発エコシステムの構築に向けた取組みとすることが、長期的には重要であり、かつわが国の産業競争力強化や研究力強化に繋がると期待できる。

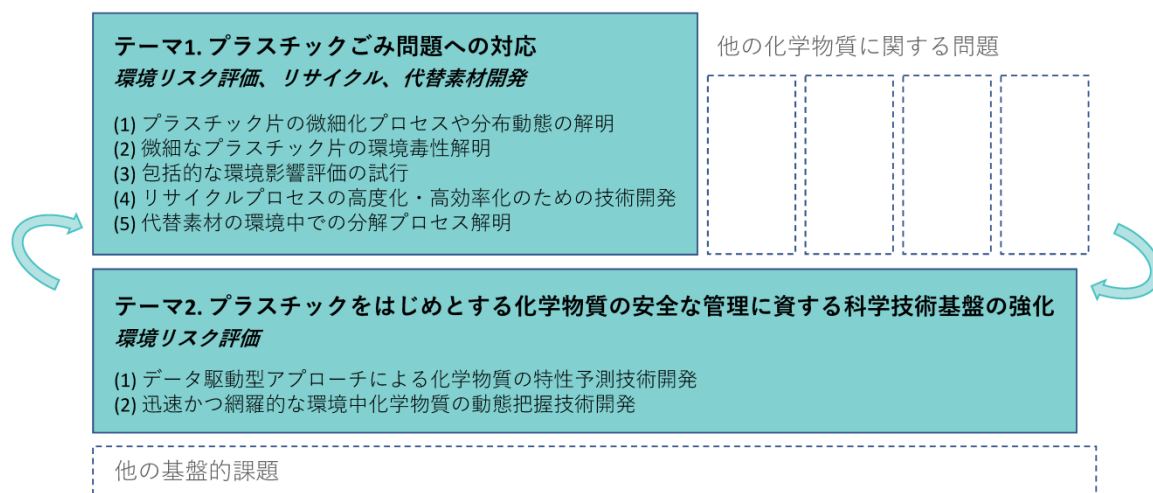


図 ES 2 テーマ毎の重要研究開発課題とその関係性

テーマ1に関しては、関連府省のリーダーシップの下、国としての一体的な取組みを早急に始める必要がある。各課題から得られる知見や技術は相互に共有され最終的には一定の環境リスク評価が実施できる形にまで統合化を目指す。共通ビジョンの下で関連府省が連携して推進する形が望ましく、例えば「ミッション志向型研究開発プログラム」とも呼ぶべき仕組みの下で一元的に推進する形が適当と考えられる。欧米を中心とした研究の枠組みの議論や国際的なルール作りの議論の進展状況に鑑みると、プラスチックごみ問題に関する研究開発ならびに国際的議論は今後10年間で大きく進むことが予想される。わが国でも「プラスチック資源循環戦略」（令和元年5月31日）や「海洋生分解性プラスチック開発・導入普及ロードマップ」（令和元年5月7日）で2030年を目途とした目標がいくつか設定されている。日本として統合的に推進する観点からは、これらの時間軸に沿って本提案に基づく研究開発を推進する必要がある。

テーマ2に関しては、中長期的な視点に立って基盤強化を推進するとの立場から各研究開発課題を推進する必要がある。ただし、環境リスク評価となると専門性が高く、限られたコミュニティに範囲が狭まりがちである。ところが実際に取り扱うべき問題は複雑かつ多面的であり、環境リスク評価を取り巻く伝統的な関連分野の研究コミュニティだけでは十分な対応は困難である。データ駆動型研究開発アプローチの興隆など科学技術の潮流もある。材料科学、計算科学、生命科学など周辺分野からの参入をはじめとする多様な分野の融合・連携の推進は本分野の新たな進展に不可欠である。当然ながら学会間の連携も必要である。

またテーマ1および2を包含するものとして、第6期科学技術基本計画において、環境リスク評価等の安全性に係る研究が産業競争力強化と密接に関わることを明確にすることが重要である。国の基本方針の中でそのような位置づけを明確にすることにより、関連分野の研究開発力強化を促進することができる。

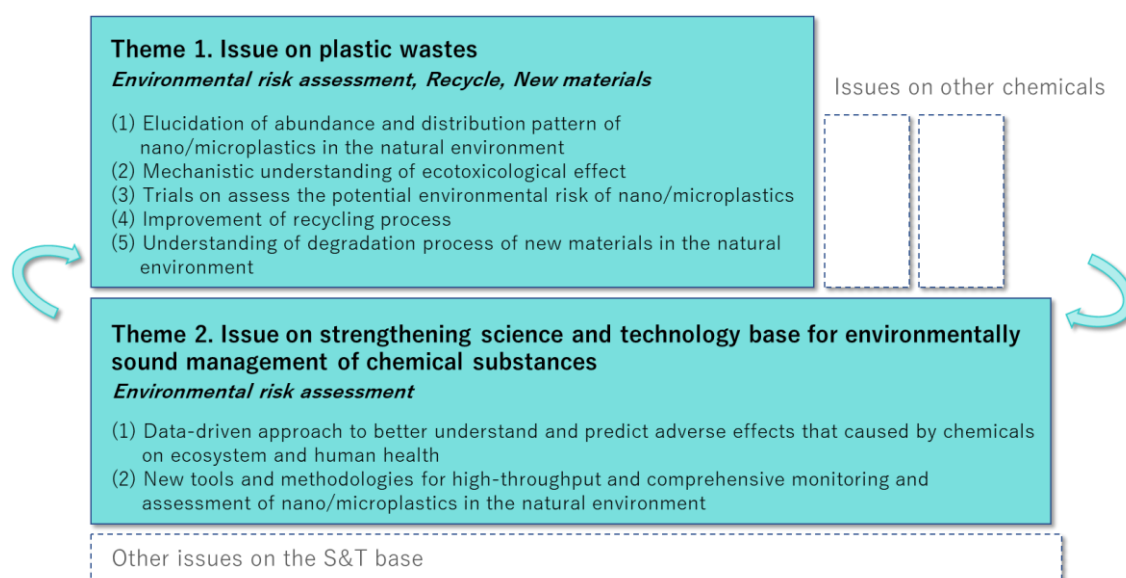
産学官の連携も必要である。長期的には経済、環境、社会の融合を目指して持続的な研究開発エコシステムを構築することが目指すべき社会の姿であり、そこに向かう手段として、産学官が一丸となって直面する問題を認識・共有し、その解決に向けて議論を深め、一体的かつ戦略的に研究開発を進め、その成果を迅速に日常生活や企業の経済活動に還元していくことのできる仕組みを作っていくことが求められる。

Executive Summary

This proposal refers to a research and development (R&D) strategy for environmentally sound management and utilization of plastics to promote development of society in an economically, environmentally and socially sustainable ways. Various types of chemical substances, including plastics, are found everywhere in our daily lives. They have brought tremendous benefits widely to our society; however, there are often concerns about their negative impacts on ecosystem and human health. Therefore, the sound management of chemical substances is a critical issue for sustainable development, and it is one of the targets of “Responsible Consumption and Production”, the Goal 12 of the Sustainable Development Goals. The sound management of chemical substances has impacts on economy as well. This is because little information on the safety of the new materials or the chemical substances hampers introduction of the products to the markets of other countries, and thus, it is important to strengthen the research capability in the field of the safety, such as environmental risk assessment, to enhance industrial competitiveness.

The term, “wise use” of chemical substances, not only means the maximization of economic and social values of the chemical substances, but also the minimization of their negative impacts onto the environment. To take “wise use” into action, we need to (1) use alternatives, or avoid using chemical-based materials if appropriate, (2) manage wastes appropriately, and (3) develop new materials with less environmental risks. Accordingly, R&D needs to relate to socio-economic impact assessment, development of new materials, appropriate waste management, and environmental risk assessment. The current R&D puts more focus onto new materials and waste management, but here, we propose environmental risk assessment is also important.

The action against plastic waste problems is one of the important international issues today; however, solving the plastic problem alone will give short-term solution, and we need concurrently to give rise to science and technology (S&T) base that enables to deal with wider range of issues regarding the sound management of chemical materials, including plastics. Therefore, this proposal consists of two R&D themes: Theme 1 addresses the issue on plastic wastes, and Theme 2 addresses the issue on strengthening the S&T base that contributes to improve environmentally sound management of chemical substances.



Theme 1 is expected to be promoted in an integrated way under the leadership of the national government. Common vision should be shared, and knowledge and technologies obtained from individual R&D tasks should be also shared and integrated into a comprehensive knowledge from which we could get some information about environmental risk of plastic wastes. This type of R&D program could be called as “mission-oriented R&D program”. This program is needed to be considered and planned as soon as possible, because environmental risk assessment of plastic wastes is actively discussed by international academic community, and significant progress is expected over the next ten years.

In theme 2, it is necessary to promote each R&D task with the aim to raise the S&T base for environmental risk assessment of chemical substances. The range of R&D related to environmental risk assessment is broad. Scientific and technological advancements in related fields have facilitated progress in this field. Data-driven approach is one of major trends in this field in recent years. In order to strengthen the S&T base, it is thus necessary to encourage cross-sectional R&Ds that goes beyond the traditional disciplines such as toxicological science, materials science, computational science, life science, chemistry, physics etc. Collaboration between academic societies is needed.

Cooperation between industry, academia and government is important as well. It would be necessary to build an ecosystem, in which they recognize and share the facing issues, deepen discussions to solve the problems, advance R&D in an integrated and strategic manner, and return research outcomes smoothly into economic activities and our daily lives.

目 次

エグゼクティブサマリー

Executive Summary

目 次	1
1. 研究開発の内容	1
2. 研究開発を実施する意義	7
2-1. 現状認識および問題点	7
2-1-1. 海洋プラスチックごみ問題を巡るリスク評価研究の現状および問題点	7
2-1-2. 化学物質の安全な管理のためのリスク評価研究に係る現状および問題点	11
2-2. 社会・経済的効果	15
2-3. 科学技術上の効果	19
3. 具体的な研究開発課題	21
3-1. プラスチックごみ問題への対応として取り組むべき研究開発課題（テーマ1）	21
3-2. プラスチックをはじめとする化学物質の安全な管理に資する 科学技術基盤の強化に向けて取り組むべき研究開発課題（テーマ2）	26
4. 研究開発の推進方法および時間軸	29
4-1. 推進方法	29
4-2. 時間軸	35
付録1. 検討の経緯	37
付録2. 海外動向（関連する研究プログラム・プロジェクト例）	41

1. 研究開発の内容

本戦略プロポーザルは、化学物質としてのプラスチック（ここでは「人工的に合成される高分子化合物」とする。）の安全管理・活用を通じて経済、環境、社会の持続的な発展を推進するための研究開発戦略である。化学物質は人間社会のあらゆる場面で利用・消費されている。人間社会にもたらした多大な便益に疑問の余地はないが、その反面、意図的・非意図的に環境中に放出された化学物質が生態系や人の健康に及ぼす影響への懸念も存在する。社会の発展に伴って新たな化学物質が次々と創り出される中、これらを如何にして安全に管理・活用するかは、「持続可能な開発目標（SDGs）」のゴール 12「つくる責任、つかう責任」内のターゲットとしても取り込まれている通り、持続可能な発展を目指す社会が真正面から取り組むべき課題である。また、同時に、プラスチックのみならず多様な化学物質の安全管理・活用に係る各国・地域の法規制は当該市場への展開にあたっての非関税障壁ともなりうるものであることから、それら化学物質の環境リスクを適正に評価できる技術やノウハウを有しておくことは、わが国の産業競争力強化の観点からも重要である。

今後の取組みにあたっては、化学物質をこれまで以上に「賢く使う」ということが基本的な方向性となる。ここで「賢く使う」とは例えばプラスチックの利用を通じた経済的価値の創出・拡大、環境負荷の最小化、社会的価値の創出・拡大の同時達成を目指すことである。そのための具体方策は以下の3点である。

- ① 代替や回避が妥当な場合はそちらへ移行する
- ② 適正な廃棄物管理・処理を行う
- ③ 環境リスクを考慮して素材・製品開発に取り組む

さらにその実現に向けて科学技術に求められる役割は、図1に示すように基本的に「社会的・経済的インパクトの評価」、「新しい素材の開発」、「廃棄物の適正な管理・処理に係る技術やプロセスの開発」、「環境リスク評価の実施」の4点である。素材開発や廃棄物の適正な管理・処理に重点が置かれることが多いが、それらと安全性等に係る評価は表裏一体の関係であり、一体的に推進する必要がある。

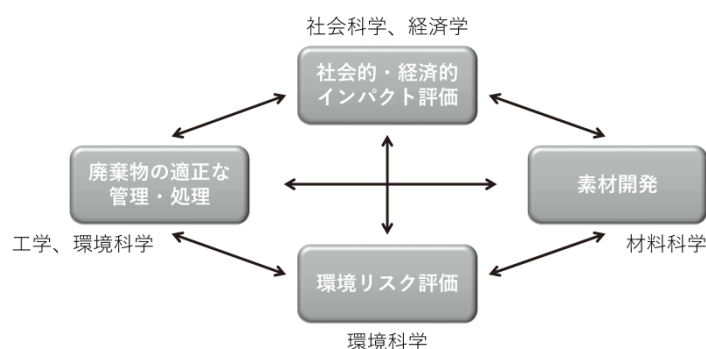


図1 社会的・経済的インパクト評価、素材開発、廃棄物の適正な管理・処理、環境リスク評価の一体的推進が必要

海洋プラスチックごみ問題が国際的な議題として再認識されてから5年程経ったが、注目度は依然として高く、様々な取り組みが各所で始まっている。特に産業界からのニーズも高い環境リスク評価に取り組むことは、ひいてはわが国の産業競争力の強化にも寄与するものであるため、積極的に取り組むべきである。実際、欧州はサーキュラー・エコノミーの推進と本問題を関連付け、強力に推進しつつある。わが国においても、環境保全の観点はもちろんのこととして、産業競争力の観点からも取り組むべきである。

また、海洋プラスチックごみ問題への対応は目下の短期的課題だが、より長期的視点からは、プラスチックに限らず人工的に合成される様々な化学物質の安全管理に繋がる基盤の強化が不可欠である。化学物質ごとの個別的・専門的な問題に迅速かつ効果的に取り組むことができるよう、横断的な課題に取り組み、その対応力を維持・向上させることが必要である。

以上を踏まえて本戦略プロポーザルでは、今後取り組むべき研究開発課題およびその推進方策等について、プラスチックごみ問題への対応、ならびにプラスチックをはじめとする化学物質の安全管理に資する科学技術基盤強化という二つのテーマに分けて提案する。プラスチックごみ問題への対応は今日の国際的な問題として重要であるものの、そのみでは短期的な対応となる。従ってその基盤強化とともに推進することで、持続可能な社会を実現するための研究開発エコシステムの構築に向けた取り組みとすることが、長期的には重要であり、かつわが国の産業競争力強化や研究力強化に繋がると期待できる。

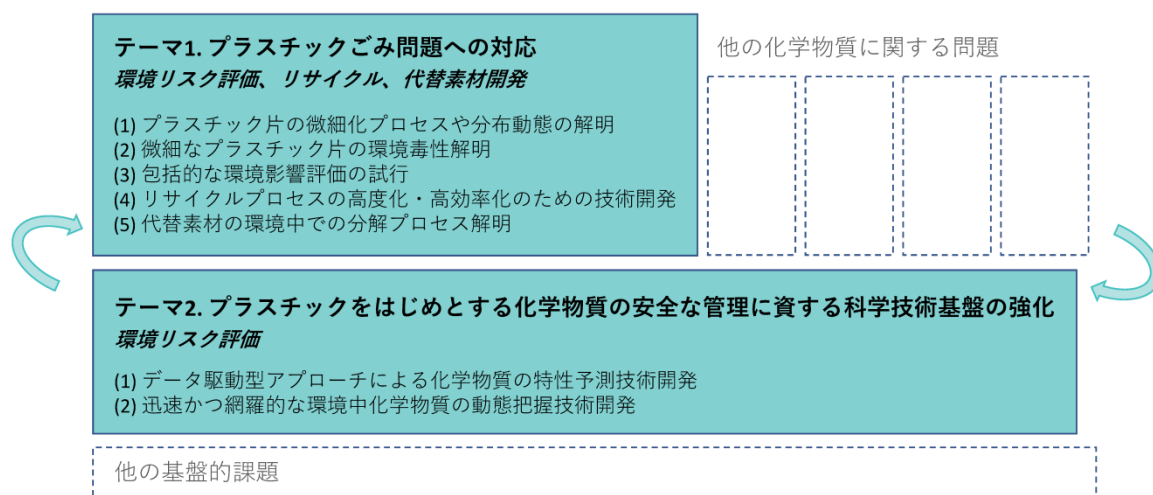


図2 テーマ毎の重要研究開発課題とその関係性

コラム 環境リスク評価とは

一般的にリスクとは、「原因／事象が保護対象に対して好ましくないことを生じさせる可能性」*¹を言う。リスクには様々なものがあるが、本戦略プロポーザルでは化学物質による環境リスクを扱う。また化学物質による環境リスクは、ここでは化学物質が人の健康や生態系に有害な影響を及ぼすおそれのこととする。更に化学物質による環境リスクの推定、すなわち環境リスク評価は、実務上は所定の手続きに従って実施されるが、その基本的な考え方は以下のように表される。

環境リスク = ばく露 × 有害性

構成要素である「ばく露」は、例えば「予測環境中濃度」(PEC、Predicted Environmental Concentration)として表現される。また「有害性」は、生態毒性に関する知見に基づいて、生態系に対して有害な影響を及ぼさないと予想される濃度「予測無影響濃度」(PNEC、Predicted No Effect Concentration)として表現される。そしてリスク評価は、この PEC と PNEC の比較等に基づいて行われる。

化学物質の環境リスク評価は法律に基づき実施されている。わが国では工業用途での化学物質の製造や輸入を規制する法律に「化学物質の審査及び製造などの規制に関する法律」(以下、「化審法」と呼ぶ。)がある。化審法においては、ばく露の可能性を勘案しつつ、基本的には化学物質の有害性に関する評価に応じて化学物質を特定化学物質または監視化学物質に指定し、所定の規制措置が講じられている。具体的には、新規化学物質については製造・輸入の届出の際に分解性及び蓄積性に関する情報が提出される(ただし難分解性の場合には人への毒性及び動植物への毒性に関する情報が添付される)。また既存化学物質については、国が有害性(分解性、蓄積性、人への毒性、動植物への毒性)の点検を行っている。

このように環境リスク評価は、化学物質が人の健康や生態系にもたらす著しい悪影響を最小化する上で必要不可欠な要素だが、同時に経済の観点からも重要な要素である。詳細は本文第2章に記すが、ともすれば科学技術イノベーションの推進の阻害要因と捉えられかねない環境リスク評価は、本来的には、経済、環境、社会の一体的な持続的発展に寄与する新たな価値の創出・普及を支える基盤的要素である。

また環境リスク評価は、毒性学、分子生物学、観測・計測、分析技術等の関連科学技術分野の進展との関わりも深い。関連分野における進展が環境リスク評価に新たな手段や知見をもたらし、環境リスク評価に係る研究開発の発展にも繋がっている。従って環境リスク評価は、ルーチン化された手続きではなく、時代とともに常に変化する研究分野の一つでもある。

※1 リスク学事典(2019)、一般社団法人日本リスク研究学会編集

テーマ1. プラスチックごみ問題への対応として取り組むべき研究開発課題

海洋プラスチックごみ問題への対応として比較的盛んに取り組まれてきたのは、分布実態の把握やシミュレーションによる分布予測、代替素材としての生分解性プラスチックの開発である。いずれもわが国に強みがあるテーマであり重要と言える。しかしながら海洋プラスチックごみ問題の解決という観点で言えば、そもそも環境中に放出した微細なプラスチック片が生態系や人の健康にどのような影響をどの程度与えるのか、という「リスク」の評価・把握が不可欠である。リスクを適切に評価できれば、真に必要な対策をこれまで以上に明確化することが可能になると期待できる。プラスチックを素材あるいは製品として利用する業界からの関心も極めて高く、科学的知見の蓄積が最も望まれている部分である。

その一方、プラスチック片の環境リスク評価には標準的な評価フレームが存在せず、それを定義するための議論が産業界と学术界が一堂に会する国際会議の場で進められている。詳細に検討すべき項目は多数あり、これらのすべてを日本だけでカバーすることは困難である。しかしそのうちのいくつかの重要なポイントに絞って取り組むことは可能であると思われる。

また、前述の通り、環境リスク評価は廃棄物の適正な管理や処理、素材開発等と一体的に取り組むべきである。以上より、ここでは環境リスク評価の観点から踏まえた重要研究開発課題を提案する。

- (1) 環境中での微細化プロセスや分布動態の解明およびそのための基盤技術開発
 - 極微小物質（ナノ・マイクロスケールのプラスチック片）の迅速かつ網羅的な回収・分析技術開発
 - プラスチック片の環境中での微細化プロセスの解明
 - 微細化プロセスを組み込む等によるプラスチックの分布動態モデルの詳細化およびシミュレーション
- (2) マイクロサイズ以下の微細なプラスチックが生態系（個々の動物やその食物連鎖等）に及ぼす影響（環境毒性）の解明
 - モデル動物等を用いた実環境条件下での毒性発現機構の解明
 - 実環境条件下での毒性の種内・種間での伝播機構の解明、生態系に与える影響予測
- (3) 包括的な環境影響評価の試行
 - 特定地域を対象とした環境リスク評価の試行
 - 環境毒性値を組み込んだライフサイクル影響評価の試行
- (4) リサイクルプロセスの高度化・高効率化のための技術開発
 - 有害成分除去や複合材の単一成分化などリサイクルの高品質化・高効率化のための分離技術開発
 - リサイクルに伴い劣化する物性の回復・改善のためのプロセス技術開発
 - ケミカルリサイクルの拡大のためのプロセス技術開発
- (5) 代替素材の環境中での分解プロセス（環境分解性）の詳細解明・評価
 - 生分解を含む環境分解性素材の階層構造ごとの分解機構の詳細解明（球晶構造、ラメラ構造、微細な結晶構造等）
 - 階層構造ごとの分解機構解明に基づく高度な環境分解性を有する革新的素材の開発

テーマ2. プラスチックをはじめとする化学物質の安全管理に資する科学技術基盤の強化に向けて取り組むべき研究開発課題

化学物質は多種多様であり、それらの安全管理のためには最終的には化学物質の性質等に応じた個別の対応が求められる。そのため関連分野は多岐に亘り、関連する研究開発課題も無数にあり得る。そこでここでは、そうした特徴を持つ本分野の研究基盤強化という観点から、前述のプラスチック片の環境リスク評価とも関連し、横断的な課題であり、かつ近年の研究開発動向の潮流にも乗っている課題を提案する。また本分野の研究開発は産業競争力とも直結するため産業界で自ら実施される部分もあるが、ここでは大学や公的研究機関等が中心となって取り組むべき研究開発課題を提案する。

安全管理のための前提としてまずはリスクの評価・把握が必要になる。しかし化学物質は多種多様にあるため、信頼性のあるリスク評価を如何に効率的に行うかが求められる。また動物愛護の観点から全体的に動物試験が回避される方向にあり、そのような中でリスク評価の構成要素

である毒性をどう予測・評価するかが課題となっている。関連する昨今の潮流としてはデータ駆動型の研究開発が挙げられる。計算機性能の向上や機械学習等のデータ解析技術の普及がこの分野でも重要なドライバーとなっている。マテリアルズ・インフォマティクスは物質の新しい機能の探索や創生という点に主眼があるが、本戦略プロポーザルで提案するような化学物質の負の側面に焦点を当てた研究開発においても有効であると期待されている。

またリスク評価は従来は化学物質ごとに行われているが、環境中ではそれらは同時に存在し、物質によっては光や生物的影響で分解したり、複合的な影響をもたらしている可能性もある。従って環境中での存在状態や影響の実態を明らかにすることは化学物質管理が目指すべき目標の一つである。分析機器の性能向上やデータ解析技術の進展等を駆動力にして更なる発展が期待される分野となっている。

以上を踏まえてここでは予測ならびに把握に関する重要研究開発課題を提案する。

- (1) データ駆動型アプローチによる化学物質の特性予測技術の高度化
 - 動物試験に基づく良質なデータセットの構築
 - 公開データ等の多種多様なデータセットの収集・統合化のための基盤技術開発
 - 環境毒性・健康影響予測のための定量的構造活性相関手法の高度化
- (2) 迅速かつ網羅的な環境中化学物質の動態把握技術の開発
 - 環境中に存在する多数の化学物質や周辺環境情報を一斉かつハイスループットで分析するための手法開発
 - 化学物質間の相互作用およびそれらによる複合的な環境影響機構解明

上記2テーマの推進方策について、まずテーマ1に関しては、関連府省のリーダーシップの下、国としての一体的な取組みを早急に始める必要がある。各課題から得られる知見や技術は相互に共有され最終的には一定の環境リスク評価が実施できる形にまで統合化を目指す。関連府省が共通ビジョンの下で連携して推進する形が望ましく、例えば「ミッション志向型研究開発プログラム」とも呼ぶべき仕組みの下での一元的な推進が適当と考えられる。欧米を中心とした研究の枠組みの議論や国際的なルール作りの議論の進展状況に鑑みると、プラスチックごみ問題に関する研究開発ならびに国際的議論は今後10年間で大きく進むことが予想される。わが国でも「プラスチック資源循環戦略」(令和元年5月31日)や「海洋生分解性プラスチック開発・導入普及ロードマップ」(令和元年5月7日)で2030年を目途とした目標がいくつか設定されている。日本として統合的に推進する観点からは、これらの時間軸に沿って本提案に基づく研究開発を推進する必要がある。

テーマ2に関しては、中長期的な視点に立って基盤強化を推進するとの立場から各研究開発課題を推進する必要がある。ただし、環境リスク評価となると専門性が高く、限られたコミュニティに範囲が狭まりがちである。ところが実際に取り扱うべき問題は複雑かつ多面的であり、環境リスク評価を取り巻く伝統的な関連分野の研究コミュニティだけでは十分な対応は困難である。データ駆動型研究開発アプローチの興隆など科学技術の潮流もある。材料科学、計算科学、生命科学など周辺分野からの参入をはじめとする多様な分野の融合・連携の推進は本分野の新たな進展に不可欠である。当然ながら学会間の連携も必要である。

またテーマ1および2を包含するものとして、次期の第6期科学技術基本計画において、環境

リスク評価等の安全性に係る研究が産業競争力強化と密接に関わることを明確にすることも重要である。国の基本方針の中でそのような位置づけを明確にすることにより、関連分野の研究開発力強化を促進することができる。

産学官の連携も必要である。長期的には経済、環境、社会の融合を目指して持続的な研究開発エコシステムを構築することが目指すべき社会の姿であり、そこに向かう手段として、産学官が一体となって直面する問題を認識・共有し、その解決に向けて議論を深め、一体的かつ戦略的に研究開発を進め、その成果を迅速に日常生活や企業の経済活動に還元していくことのできる仕組みを作っていくことが求められる。

2. 研究開発を実施する意義

2-1. 現状認識および問題点

2-1-1. 海洋プラスチックごみ問題を巡るリスク評価研究の現状および問題点

＜海洋プラスチックごみの実態把握は道半ば＞

世界のプラスチック生産量は1950年時点では200万トン/年だったが2015年には4億700万トン/年に達した¹。プラスチックごみの発生量も増加の一途を辿っており2015年には3億200万トン/年に達した。リサイクルされるのは生産量のうちのわずか14～18%と推定されている。累計では1950年から2015年の間で83億トン生産され、うち25億トンが継続使用、58億トンが廃棄されてきたとの推計もある²。その廃棄分のうち46億トンが投棄・埋立・環境漏出等、7億トンが焼却で、リサイクルに回されたものは5億トン程度とされている。

発生したプラスチックごみのうちどの程度が海洋へ流出しているかは明らかではない。海洋に面した世界192か国を対象にした調査では2010年に480～1,270万トンのプラスチックごみが海洋に流出したと推計された³。流出量を国別に見ると上位10カ国のうち6カ国が東アジア・東南アジア地域の国であった（その中に日本は含まれていない）。しかしながらこうした推計は現時点では極めて限定的であり、世界ならびに日本国内における、プラスチックごみの陸上および海洋での定量的な分布や動き（物質循環）は、ほぼ解明されていない。

プラスチックごみの分布推定に使われている実測データは未だ限定的である。比較的容易なため海表面に浮遊するプラスチックごみの実測が進んでいるが、それでもまだ道半ばという状況にある。特にミリサイズ以下の極めて微細なプラスチック片は従来の回収ネットの網目（合目）サイズ以下のため回収できず、その行方が不明なことから“ミッシング・シンク”とも呼ばれている。

湖沼や河川などの淡水域や耕作地等の陸域にどの程度分布しているか、どの程度のフローがあるのかも不明である。欧州では下水汚泥の大半を農地へ回しており、そこから農作物へというフローの解明が注目されている。このように実態把握は部分的な知識に依っているのが現状であり、より網羅的かつ詳細な実態解明が求められている。

＜環境や人の健康への影響はほぼ未解明＞

“マイクロプラスチック⁴”の環境影響に関しては過去の研究を基にしたシステマティックレビューが進められている。例えば欧州委員会に設置されている「欧州アカデミーによる政策のための科学的助言」(Science Advice for Policy by European Academies, SAPEA)⁵は様々な分野の800報を超える学術論文等のレビューを実施し、その結果を「自然および社会におけるマイクロプラスチックに関する科学的展望」としてとりまとめ2019年1月に公表している（図3）。

¹ OECD (2018) Improving Markets for Recycled Plastics -Trends, Prospects and Policy Responses-.

² Geyer *et al.* (2017) Production, use, and fate of all plastics ever made. *Sci. Adv.*, 3(7), e1700782

³ Jambeck *et al.* (2015) Plastic waste inputs from land into the ocean. *Science*, 347(6223), pp768-771

⁴ 一般的には5ミリ以下のプラスチック片を呼ぶことが多く、本戦略プロポーザルでも同様とする。

⁵ 欧州委員会の「科学的助言メカニズム (SAM)」の一部。

ナノ・マイクロプラスチックの環境リスクについての科学的知見 「A Scientific Perspective on Microplastics in Nature and Society」*

- ・ ナノ/マイクロプラスチックの環境中での運命、あるいは自然生態系やヒトへの曝露および影響に関する評価手法は質の向上と国際調和が必要。
- ・ 淡水や海面上のマイクロプラスチックの分布に関する知見は比較的増えているが、**土壌や大気、あるいは海面下における状況についての知識はほとんどない**。
- ・ 生態系への影響リスクは極めて小さいと認識しているが、**一部の沿岸域の水中ないし堆積物中ではリスクが存在している可能性がある**。また、今後、環境中のプラスチックごみが増加を続ければ、そうしたリスクが広範囲に広がる可能性がある。
- ・ **ヒトの健康への影響リスクについてはほとんど分かっていない**。

(結論部分の一部をJST-CRDSが抜粋・仮訳)

* SAPEA, Science Advice for Policy by European Academies. (2019). A Scientific Perspective on Microplastics in Nature and Society. Berlin: SAPEA. <https://doi.org/10.26356/microplastics>
 [補足] 欧州委員会の「科学的助言メカニズム (SAM)」の一部である「欧州アカデミーによる政策のための科学的助言 (SAPEA)」が作成したエビデンスレビューレポート。厳選した849報の文献をレビューし、何が既に分かっているか、何がまだ分かっていないかを整理した。

図3 ナノ・マイクロプラスチックの環境リスクについての科学的知見

同レポートではマイクロプラスチックによる生態系への影響は極めて小さいとの認識を示しているが、集中的に分布するような一部の沿岸域の水中ないし堆積物中では一定のリスクが存在する可能性があるとしている。また環境中のプラスチックごみが今後も増加し続けるならばそうしたリスクが広範囲におよぶ可能性があることも指摘している。これらの結果は極めて重要な知見をもたらしている。しかしあくまで過去の研究成果を統合化したものであるため、科学的な解明という意味では十分ではない。今後の更なる検証や解明が求められている。

一部で懸念されているような人の健康への影響については環境影響ほどにも分かっていない。前述のようなレビューは徐々に始めているがその多くは環境影響に関するものである。先のレポートでも人の健康への影響についてはほとんど分かっていないとされている。実験的に生物にマイクロプラスチックを与えた場合の影響を調べた研究は多数報告されており、その中には物理的異物としての影響が検出されたとの報告も知られている。しかし実環境下よりもはるかに高い濃度であったり、その手順や用いられるサンプルが標準化されておらず再現性に課題がある等、問題点があることも指摘されている。プラスチックそのものではなくそれに吸着した別の化学物質が毒性を示す可能性も指摘されているが、これについても同様の問題点が指摘されている。以上から今後は毒性学や材料科学等、専門性の高い個別分野の知見を持ち寄ったより詳細かつ精密な研究が必要となっている。

なお、生物からすると5ミリ前後のプラスチック片というのはかなり大きいサイズであり、健康影響は考えにくいというのが一般的な認識である。しかし更に細分化されマイクロサイズ以下、特にナノサイズのプラスチック片となった場合には、細胞膜を通過するケースも指摘されるため、生物に対して何らかの影響を及ぼす可能性があるとも言われている。従って極めて微細なプラスチック片による影響の解明も必要である。

＜欧州連合の積極的な取り組み＞

そもそも現在のように海洋プラスチックごみ問題が国際社会で認識されたのは 2014 年の第 1 回国連環境総会や 2015 年の G7 エルマウ・サミット以降のことである。それまでも海洋に漂うごみの問題は古くから認識されており、野生生物による海洋ごみの誤飲・誤食や絡まり問題、あるいは太平洋ごみベルト（Great Pacific Garbage Patch）の存在等がよく知られていたが、これらに加えて微細化したプラスチック、いわゆる“マイクロプラスチック”が生態系や人の健康に影響を及ぼすとの懸念が新たに指摘されるようになった。産業界では 2016 年の世界経済フォーラムにて循環型のプラスチック生産・消費の実現を提案する報告書「The New Plastic Economy」が公表され世界的に注目されたことが転機の一つとなり、動きがより一層活発化した。2018 年の G7 シャルルボワ・サミットでは使い捨てプラスチック用品の削減やリサイクルの推進を各国で進めること等を盛り込んだ「海洋プラスチック憲章」が議論され、カナダ、フランス、イギリス、ドイツ、イタリア、EU が署名した。

国際社会における注目度が増す中で、積極的な取り組み姿勢を示してきたのが欧州連合（EU）である。EU はそれ以前から資源効率性や循環型経済に関連する政策を展開してきており、2015 年には「循環経済政策パッケージ」を発表した。いわゆる“サーキュラー・エコノミー”への議論が世界的に盛り上がることになったきっかけの一つである。またこのパッケージの一環として EU は 2018 年 1 月に「循環経済におけるプラスチックのための欧州戦略」（以下、「プラスチック戦略」とする。）を発表した。これによって海洋プラスチックごみ問題が環境保全と循環型経済という 2 つの政策的文脈の中に位置づけられることになり、その推進力はより強力なものとなった。加えて EU は 2019 年 5 月に「使い捨てプラスチック使用規制法案」を欧州理事会にて最終採択した。この規制によりストロー、使い捨て食品容器、スプーン・フォーク等の食卓用製品、発砲スチロール製の容器等が使用禁止対象になることとなった。

こうした政策方針の下、プラスチックに関連する研究・イノベーションへの支援も強化した。現在進行中の欧州研究・イノベーション枠組み計画（Framework Programme）「Horizon 2020」（2014～2020 年）の残り期間中に 1 億ユーロをプラスチック戦略の実行策に対して追加投資すると表明した。主な研究公募テーマとしては「よりスマートかつリサイクル性の高いプラスチック素材」、「より効率性の高いリサイクルプロセス」、「リサイクルプラスチック材料からの有害物質の除去」が挙げられている。加えてプラスチックごみの実態把握や環境影響評価に係る公募も行われている。

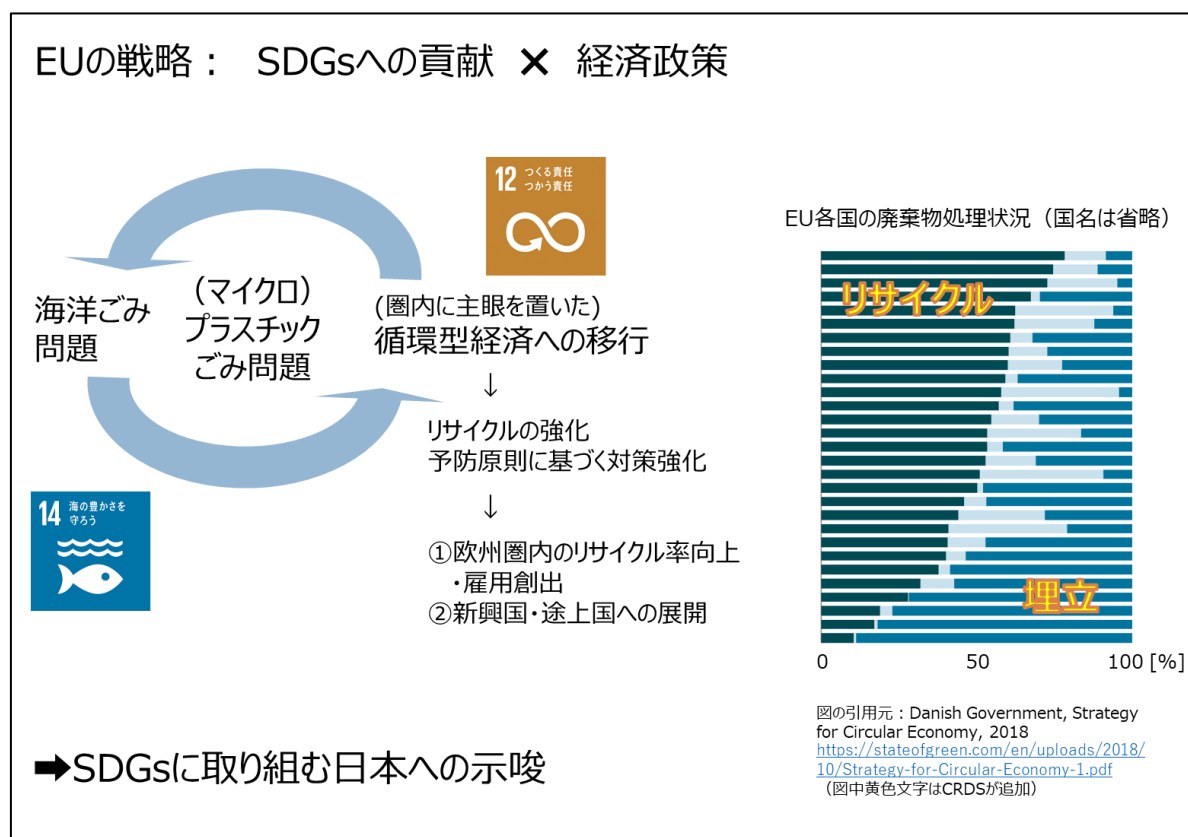


図4 環境保全と循環型経済を組み合わせた欧州連合（EU）の取り組み

<プラスチックのグローバルな循環フローが大きく変化>

EUを中心とした国際社会における動きと時期を同じくして、2017年、中国政府が海外からの廃棄物輸入を停止する旨を公表し、順次停止した。対象品目の中には生活由来／工業由来の廃プラスチックが含まれている。こうした輸入規制は、原材料となり得る固形廃棄物の中に汚染物質や危険物質が大量に混入していたことが理由とされている。またこれに続くように東南アジアの一部の国々でも同様の輸入規制の動きが出始めた。結果としてプラスチックのグローバルな循環フローが大きく変化することとなった。

日本も大きく影響を受けている。廃プラスチックの年間総排出量約900万トンのうち2017年には143.1万トンを出していた。しかし、下表にある通り、その50%以上が中国向けであったが、翌2018年には東南アジアへと輸出先を大きく変えざるを得なくなっている。また輸出できない分については国内で保管されているが、既に保管上限を超えており、その対応が問題となっている。こうした状況から、これまではグローバルな循環フローを前提にして構築されてきたプラスチックのリサイクルシステムの見直しが迫られている。国内処理の必要が今後も続く可能性を考えると、国内のリサイクル能力、リサイクルシステムを改めて再考し、不足する技術を開発する必要も生じてくると見られる。特に国内処理におけるボトルネックは経済性と言われており、低コストなリサイクルシステムの構築に向けた研究開発への期待が高まると予想される。

表 1 日本の廃プラスチック輸出量（単位：万トン、()内は構成比(%)）⁶

輸出先	2017 年	2018 年上半期
タイ	5.8 (4.1)	14.4 (26.9)
マレーシア	7.5 (5.3)	10.7 (20.1)
ベトナム	12.6 (8.8)	8.8 (16.4)
台湾	9.1 (6.4)	8.4 (15.8)
韓国	3.3 (2.3)	3.9 (7.3)
香港	27.5 (19.2)	2.2 (4.1)
中国	74.9 (52.3)	1.7 (3.2)
総排出量	143.1	53.5

＜リスク評価の実施に向けた国際的議論の開始＞

使い捨てプラスチックの使用禁止等、脱プラスチックとも言える動きが急速に進みつつある一方で、リスク評価の必要性が、特に産業界や学术界から指摘されている。その背景には、プラスチックがもたらす多種多様な便益を考慮し、各種の規制は科学的な根拠を踏まえたものであるべきとの考えがある。そのため産業界と学术界が連携してリスク評価を行うための標準的なフレームの検討が進められている。環境毒性学分野における世界最大の国際会議である環境毒性化学会（Society of Environmental Toxicology and Chemistry, SETAC）で議論が積み重ねられており、評価フレームのプロトタイプも公開されている。

プラスチックごみ問題に関連した研究は 2010 年代以降に活発化しており、研究実績は少なくとも質的には日米欧の間で概ね横一線の状況にある。むしろ日本は実態把握等を比較的早い時期から始めていたためデータの蓄積やノウハウに優位性がある。それにも関わらず評価フレームの検討は欧米の研究者らが中心となって進めており、日本からの参加は極めて限定的である。リスク評価の先には産業競争力との関連付けが出てくるため、日本としてもこれまで以上に積極的に参画することが望まれる。

2-1-2. 化学物質の安全管理のためのリスク評価研究に係る現状および問題点

＜リスク管理が現在の主流＞

化学物質の安全管理は「ハザード管理」から「リスク管理」へと変化してきた。「ハザード管理」とは有害性（ハザード）に着目したものであり、1970 年代に注目された発がん物質への対応のように“有害な化学物質はゼロであるべき”との考え方に基づく。しかしこれではどの程度の量であればどのような危害が起こるのか、どの程度の量までなら許容できるのかといった判断ができず、対処の目標や方針が定まらないという問題があった。そこで 1980 年代に「リスク管理」についての議論が活発化した。「リスク管理」は“全ての化学物質は何らかの有害性を有しており、有害になるか否かはその量に依存する”という基本的な考え方に基づく。現在はこのリスク管理

⁶ JETRO 地域分析レポートを基に表作成（2019 年 1 月 10 日「行き場を失う日本の廃プラスチック」、<https://www.jetro.go.jp/biz/areareports/special/2019/0101/fceb0360455b6cdf.html>、2020 年 3 月アクセス）

が世界的に標準の考え方となっており、その実施を支え、より良いものとするためにリスク評価研究が欧米を中心に進められている。

持続可能な社会の構築のためには化学物質の安全管理は不可欠である。そのためリスク管理に関する国際的な目標も設定されている。2002年にヨハネスブルクで開催された持続可能な開発に関する世界サミット（ヨハネスブルク・サミット）で定められた「2020年までに化学物質の製造と使用による人の健康と環境への悪影響の最小化を目指す」との目標（以下、「WSSD2020目標」とする。）がそれであり、同目標はSDGsのゴール12を構成するターゲットの一つとしても組み込まれている。またWSSD2020目標の達成に向けた取り組みの一つとして「国際的な化学物質管理のための戦略的アプローチ」（Strategic Approach to International Chemicals Management、SAICM）がある。SAICMは化学物質によるリスクの削減のための更なる手法の開発や、調和のとれた効率のよい国際的な活動の実現を目指して策定された。日本では関係省庁による連絡会議を通じてSAICMに沿った取組の状況の共有等が行われている。最近のSAICMでは2020年目標の後継にあたる「beyond 2020」の戦略策定の議論が進められている。今後はこの議論が国際的にはさらに活発化すると予想され、わが国としても、自国の課題に沿った対応を国際社会との調和的対応の中に組み込む等、効果的・効率的に推進してゆくための体制整備が必要である。

化学物質の効率的・効果的な管理

■ 新しい化学物質が日々合成・登録されている

米国化学会の化学物質データベース「CAS REGISTRY」には2015年までの50年間で累計1億件の化学物質が登録された。

■ 化学物質管理は90年代以降に ハザード管理からリスク管理へ移行

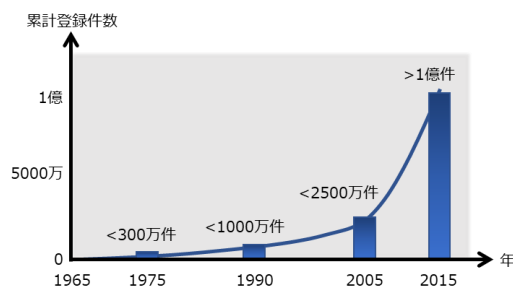
「有害な化学物質はゼロであるべき」から
「全ての化学物質は何らかの有害性を有しており、
有害になるか否かはその量に依存する」へ。

■ 2002年のヨハネスブルクでの地球サミットで**2020年目標（WSSD2020）**を採択

化学物質の製造と使用による環境や人の健康への著しい悪影響を科学的根拠に基づくリスク評価とリスク管理によって2020年までに最小化することを目指すという目標。

■ WSSD2020目標は**SDGsゴール12「つくる責任つかう責任」**のターゲット12.4としても位置づけ

➡ リスク管理は豊かな社会の構築のための不可欠要素



図：PRNewswire記事（2015年6月29日、<https://www.prnewswire.com/news-releases/cas-assigns-the-100-millionth-cas-registry-number-to-a-substance-designed-to-treat-acute-myeloid-leukemia-300106332.html>）を基にCRDS作成

図5 化学物質の効率的・効果的な管理の社会的位置づけ

＜リスク評価は革新的な素材や製品の創出と表裏一体＞

リスク評価は産業競争力とも直結する。国際的な条約などに加えて各国・地域の市場には化学物質管理のための規制があり、素材や製品を展開するためには定められた試験やリスク評価を実施する必要がある。いかに革新的な素材や製品であっても安全性等に関する情報がないままでは市場に投入できない。それゆえ規制への対応力はあらゆる民間企業にとって市場への製品展開のための不可欠要素である。また、こうした背景から、欧米の民間企業にはリスク評価研究への強い動機が存在する。研究力も持つため、規制に関する新しい議論が始まる際にも欧米の民間企業は積極的に関与し、ときに議論をリードする存在になる。

更にこうした環境があるため、学への期待や役割分担も大きい。特に米国ではリスク評価研究は異分野横断・異分野融合的な性格の強い挑戦的な分野と認識されている。欧州でも社会的な意義だけではなく産業政策上も必要な分野として継続的に支援されている。結果として欧米ではリスク評価研究に関する産学官による強い研究基盤が醸成されている。

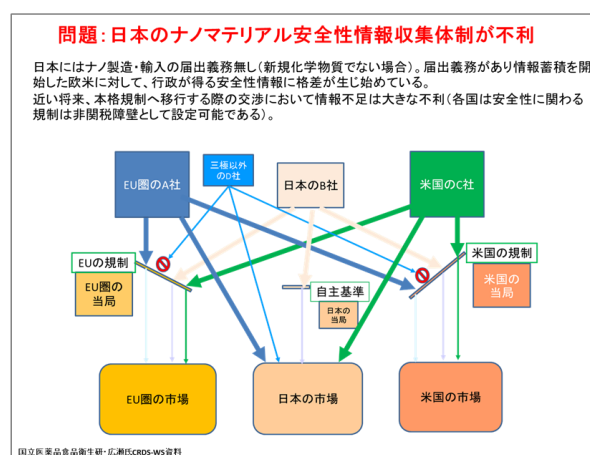
新しい物質の創生と安全性評価（リスク評価）は表裏一体

- “No data, No market”：安全性の分からない化学物質は嫌がられる
- 世界の標準的規制である欧州REACH規則への対応にはリスクを考慮した評価が必要
- 規制の目的は「安全」、だけでなく、**非関税障壁的な側面も持つ**

（例）欧州REACH規則の目的は「人の健康と環境の保護」に加え、「EU化学産業の競争力と革新の強化」を含む

- REACH規則ではリスク評価の実施を産業界に移行
- 従ってリスクに関する情報やノウハウを持つことは**産業競争力強化にも重要**
- 現在、欧州で検討されている化学物質：
 - ✓ ナノマテリアル
 - ✓ 化学物質の混合毒性
 - ✓ プラスチック/マイクロプラスチック
 - ✓ 残留有機汚染物質（POPs）等

➡産業競争力強化を掲げる日本への示唆



JST-CRDS（2016）、「俯瞰ワークショップ報告書 ナノテクノロジー・材料分野 領域別分科会『ナノテクノロジーのELSI/EHS』」

図6 産業競争力に直結する安全性評価（リスク評価）

<わが国の研究基盤>

わが国では 90 年代の環境ホルモン問題の時期にリスク評価研究が盛んに行われた。これを受けてその後の第 2 期科学技術基本計画（2001～2005 年度）では「7. 科学技術振興のための基盤の整備」の中でリスク評価の徹底等が記載された⁷。

また 2000 年代に入ると、ナノテクノロジーの勃興を背景にナノ材料の社会受容が注目された。ちょうど第 3 期科学技術基本計画（2006～2010 年度）の期間に入るタイミングであったため、同計画の中でも「ナノテクノロジーの社会的影響に関する検討や研究を総合的・戦略的に推進する」との記載が加えられた。

ナノ材料の安全性に関する取り組みは、総合科学技術会議（当時）の基本方針の下、内閣府、文部科学省、経済産業省、厚生労働省、環境省の連携・共同により取り組まれた（内閣府 科学技術連携施策群）。特に産業技術総合研究所は、ナノ材料のリスク評価手法構築のための研究開発を世界に先駆けて開始した。一連のプロジェクトは 10 年間にわたって実施され、成果物としての評価書作成にとどまらず、多数の知見やノウハウが蓄積されることとなった。

現在、ナノ材料に限らず化学物質の安全性にかかる研究に関しては、当時ほどの積極的な方針は示されていない。第 5 期科学技術基本計画（2016～2020 年度）での関連記述は、「(2) 国及び国民の安全・安心の確保と豊かで質の高い生活の実現」の中において、「日常生活に利用される種々の化学物質（ナノマテリアルを含む。）のリスク評価も重要であり」、各種の研究を推進するとともに「研究成果を化学物質の安全性評価に係る基礎データとして活用し、国際貢献の観点からも推進する」との部分である。

前述のとおり、新素材や製品の開発とリスク評価研究は表裏一体の関係にある。ところがわが国の科学技術イノベーション政策における位置づけでは現状そのような観点は必ずしも明確ではない。素材産業や化学産業はわが国に強みのある分野の一つであるが、これらの産業の競争力強化の一要素として改めて認識し、その位置づけを明確化する必要がある。

次に研究現場の状況を見ると、化学物質の安全管理にかかる業務を所管する省の傘下にはいくつもの公的研究機関があり、リスク評価研究に従事する部門がある。個々に顕著な研究が実施されているものの、基本的には所管する省が抱える目下の政策的課題等への対応が中心であり、省を超えて連携しながら横断的な課題に取り組むような動きや、中長期的な視点に立って当該分野における国の研究開発基盤を強化するような戦略的な取り組みは見られない。今後は公的研究機関が果たすべき役割や他の研究主体との関係性を改めて見直し、必要に応じた強化を図っていく必要がある。

大学における研究は、主として運営費交付金や科学研究費補助金（科研費）によって賄われている。大学や地域の特性を活かした多様な取り組みや純粋基礎研究等は見られるが、産や官と連携した形での取り組みは見られない。

産業界は、日米欧三極の化学工業会（JCIA、ACC、Cefic）が協力して実施する、化学物質の安全管理や評価に係る科学的知見の蓄積や新手法の開発支援を目的とした研究助成事業 Long-Range Research Initiative（LRI）を運営している。同事業は当該分野において大学と産業

⁷ 「20 世紀後半に生み出された人工物質・素材等が、環境への影響、安全性の評価を欠いたまま利用され、後に生命や地球環境に重大な悪影響を及ぼしたことを真摯に受け止める必要がある。これに対する反省に立って、その開発や利用・導入の前には、長期的な安全性についての評価や社会生活・自然環境に対するリスク・アセスメントを徹底するとともに、その情報を公開し、不断の見直しを図る。」（第 2 期科学技術基本計画本文より抜粋、<https://www8.cao.go.jp/cstp/kihonkeikaku/honbun.html>、2020 年 3 月アクセス）

界を繋ぐ極めて重要な機能を果たしているが、規模的には必ずしも大きくはない。また LRI は産業界のニーズに基づき研究提案が選考され採択・助成されるが、産業界のニーズと大学での取り組みの間のギャップを指摘する声は少なくない。リスク評価は実学的な側面の強い分野であるため、産学間の距離が近づき、互いにとってより意義のある取り組みが進められるような体制作りを改めて考える必要性が高まっている。ただしその際、産業界側にもリスク評価研究の実態や具体的なニーズを学会等の公の場で発表することが少ないという課題が指摘されている。産学相互の蓄積・ノウハウや課題がオープンに共有され議論されるような関係性の構築と、それを促進する場の創出が必要である。

以上より、わが国には欧米ほどの成熟した研究基盤が構築されているとは言い難い状況だが、その要素となるステークホルダーやプレーヤーは存在し、今後改めて体制を見直し、必要な強化策を検討することが必要な時期にある。

国としてリスク評価研究の基盤を持たないことは、産業政策上のリスクにもなり得る。例えば規制に係る新たな議論が欧米で始まったとしても、十分な研究力がないために科学的根拠を揃えられず、議論の場で優位性が発揮できないという事態にもつながりかねない。仮に日本に不利な結論になった場合には、非関税障壁となってしまうことも懸念される。標準化や規格化、その他の国際ルール策定の議論で主導権を持つことの重要性は広く認識されており、交渉力に加えてそれを支える研究力を維持・強化することが国としては極めて重要である。

2-2. 社会・経済的效果

<プラスチックの一層の有効活用>

環境リスク評価や適正な廃棄物の処理・管理等への取組みを通じてプラスチックを「賢く使う」ことがより一層進めば、経済、環境、社会の同時かつ持続的な発展に貢献することができる。プラスチックは容器包装、建築、輸送、ヘルスケア、電機など多岐にわたる産業や生活のあらゆる場面で利用され社会に幅広く浸透している。そのプラスチックの用途のうち、比較的短期間で使用期間が終わり、かつ環境中に無秩序に放出されやすいものとして代表的なものは容器包装である⁸。その容器包装は最も多様な応用形態であり、プラスチック全量の 26%を占める。安価、軽量、高性能等の特性を持つため、輸送の負担軽減や食品の鮮度保持にも寄与してきた。容器包装プラスチックは年率 5%という高い成長率で市場を拡大し、容器包装の世界市場の中では 2000 年～2015 年の間に 17%から 25%にシェアを拡大してきている。2013 年には 7,800 万トンが生産され、売上高は 2 億 6,000 万ドルにのぼる。規制等の動向が不透明だが、現在のところこうした成長は今後も続くとの見通しがなされている。2050 年には年間生産量が現在のプラスチック産業全体の規模（3 億 1,100 万トン、2014 年）を上回る 3 億 1,800 万トンにまで拡大するとの予測もある。

しかしながら、その一方では容器包装プラスチックの 95%が一度使用されただけで捨てられており、リサイクルのために回収されているのは 14%に過ぎないとも言われる。そこで今後は、「賢く使う」ことをこれまで以上に徹底することにより、社会的・経済的価値をもたらしてきた容器

⁸ World Economic Forum (2016) The New Plastics Economy: Rethinking the future of plastics.

包装プラスチックを無駄なく活用し、同時に使い捨てによるプラスチックごみ問題を軽減させることが必要である。

その他には、意図的に生産・利用されるマイクロプラスチックを規制した場合の経済的損失についての試算がある（代替品への移行コストも含む）。これによると、もし 5mm 以下のポリマーが幅広く制限された場合には年間約 5,720 億円（52 億ユーロ）の損失可能性がある⁹。こうしたマイクロプラスチックはその他にも塗料、洗剤、研磨剤、肥料等にも使われている。

このように意図的に生産・利用されるマイクロプラスチックが不可欠な機能を担っているケースは大いにあるが、欧米では規制の動きが広まりつつある。そのため使用の停止や、代替可能な手段があるものについては部分的な移行が今後進んでいくと予想される。

しかしその反面、現在の規制の動きは政治的な判断と予防原則の観点に立ったものであるとの見方も強い。リスク評価を実施し、その結果に基づいて適正な制限の範囲を見極めることができれば、無用な機会損失を抑えることも可能である。また、予防原則の観点は社会的にも重要だが、科学的根拠に基づく環境リスク評価を実施し、その結果に基づきより適切な管理の在り方を不断に見直すことは、より良い社会を作り上げるための姿勢として極めて重要である。

<海洋プラスチックごみ問題対応への貢献>

国連環境計画による 2014 年のレポート¹⁰では、大量のプラスチックごみによって海岸が汚染され観光客が減少したり漁業に悪影響が出たりすることによる損害は年間で総額約 1 兆 4,300 億円（130 億ドル）にも上ると指摘されている。また食品、飲料、非耐久性家庭用品等の消費財産業においてプラスチック利用が二酸化炭素排出や水や大気などの自然資本に与える負荷は年間約 8 兆 2,500 億円（750 億ドル）相当になるとも指摘されている。これらの損害あるいは負荷をできるだけ抑えつつ、社会的・経済的な価値の享受との両立を果たすためには、廃棄物の適正な処理・管理、素材開発、社会的・経済的インパクトの評価、環境リスク評価に一体的に取り組むことが必要である。

またこうした取組みを自国に限るのではなく、令和元年 6 月の G20 日本開催で合意された「G20 海洋プラスチックごみ対策実施枠組」にもあるように、国際協調の下で推進していくことが、国際社会への貢献にも繋がる。更にわが国は地理的にも海洋プラスチックごみ問題とは密接な関わりを持つ位置にあるため、国際協調はひいては国内における損失の軽減にも繋がると期待できる。

なお政府としては「プラスチック資源循環戦略」（令和元年 5 月 31 日）や「海洋プラスチックごみ対策アクションプラン」（令和元年 5 月 31 日）を府省を越えて既に策定しており、これらの方針に沿って各種の取組みを推進している。本戦略プロポーザルはこれらの方針に沿うものである一方、現状において取組みが比較的薄い環境リスク評価に関する研究開発の推進を提案している。

⁹ European Commission (2017) Intentionally added microplastics in products.

¹⁰ UNEP (2014) Valuing Plastics: The Business Case for Measuring, Managing and Disclosing Plastic Use in the Consumer Goods Industry.

コラム 海洋プラスチックごみ問題への対応に関連するわが国の政策俯瞰

わが国では、2019年6月のG20大阪サミットを見据え、同年5月に、プラスチックに関連する政府の政策文書として、「プラスチック資源循環戦略」、「海洋プラスチックごみ対策アクションプラン」及び「海洋生分解性プラスチック開発・導入普及ロードマップ」がそれぞれ策定された。

「プラスチック資源循環戦略」は、資源・廃棄物制約、海洋プラスチックごみ問題、地球温暖化、アジア各国による廃棄物の輸入規制等の幅広い課題に対応するため、3R+Renewable（再生可能資源への代替）を基本原則としたプラスチックの資源循環を総合的に推進するための戦略である。このうち、特に海洋プラスチックごみ問題についてわが国が取り組む具体的なアクションを示したものが、「海洋プラスチックごみ対策アクションプラン」である。本アクションプランは、「新たな汚染を生み出さない」ことに焦点を当てており、プラスチックごみの国内適正処理量や海洋プラスチックごみ回収量といった指標を設定し、毎年その進捗を確認することとしている。

また8つの対策分野のうちの一つには「代替素材の開発・転換等のイノベーション」が挙げられており、その主な取組として、経済産業省が策定した「海洋生分解性プラスチック開発・導入普及ロードマップ」が挙げられている。同ロードマップは、官民一体で連携して海洋生分解性プラスチックの開発・導入普及を促進していくために、海洋生分解性機能に係る新技術・素材の開発段階に応じて、技術課題はもとより経済面や制度面も含めて今後の主な課題と対策を取りまとめたものである。経済産業省は、廃棄物の適切な管理が何より重要であることを前提に、3R（リデュース、リデュース、リサイクル）の着実な推進を行い、それでもなお廃棄物が海洋流出するリスクに対応していくため、新素材・代替素材の技術開発を促進する等、イノベーションによる解決で世界への貢献を目指すこととしている。

なお上記3件の文書では、環境中に放出され微細化したナノサイズ、マイクロサイズのプラスチック片の動態把握や環境影響、健康影響等に関する研究を進める必要性についても記載があるが、これらを受けた国としての一体的な取り組みは、特に研究面では顕著な動きは見られていない。

表 関連政策文書の俯瞰（表中に示した3つの項目に関する記載の程度を●の大きさで表している）

	素材開発	廃棄物の適正管理	実態把握・ 環境リスク評価
プラスチック 資源循環戦略	再生材やバイオプラスチックの利用 促進、代替イノベーションの推進 （海洋生分解性プラスチック） 	リデュース、リユース、リサイクル 	海洋プラスチックごみの実態把握 
海洋プラスチックごみ 対策アクションプラン	代替素材の開発・転換等の イノベーション 	適正回収、流出防止 	海洋プラスチックごみの実態把握 科学的知見の集積 
海洋生分解性 プラスチック開発 ・導入普及ロードマップ	海洋生分解性プラスチックの 開発・普及 	識別表示の整備、分別回収・処理 に係る検討 	海洋中のマイクロプラスチックの測定 方法の開発と標準化 

<関連産業の競争力強化>

本戦略プロポーザルでは、化学物質の安全性評価に係る研究力の強化は新しい素材や製品の開発と表裏一体のものであり、わが国の産業競争力強化に繋がるものであるという点を指摘している。そのためその効果は化学産業を中心に幅広い産業の発展に貢献しうるものである。特に化学産業の規模は極めて大きく、世界市場は3兆3,470億ユーロにもなる。EUの市場は約67兆8,000億円（5,650億ユーロ）であり、その内訳にはポリマー（21.3%）、塗料や除草剤等の特殊化学品（27.2%）、消費者向け化学品（12.4%）等が含まれる¹¹。日本の市場は約21兆6,000億円（1,800億ユーロ）である。その他、例えばテーマ1に関連するものとしては以下の2つの事例を挙げることができる。

まず生分解性プラスチック（ポリ乳酸、PBAT、PBS、PHA、デンプン等）製品の世界市場は2018年には約1,100～3,300億円（10～30億ドル）だが2020年半ばには約6,600億円（60億ドル）にまで成長するとの予測がある¹²。しかし本文でも述べたように現状では「生分解性」の検討は未だ不十分であり、今後、科学的解明とそれに基づく素材開発が可能となれば、市場において高い競争力を持った製品を投入することも期待できる。

また中国をはじめとする東アジア各国がプラスチックごみの輸入を制限し始めたことにより、世界的な資源循環（マテリアル・フロー）は大きく変化しつつある。わが国も例外ではなく、従来は経済合理性に従って輸出されていたプラスチックごみの一部を国内処理せざるを得ない状況も出てきている。こうした状況を踏まえると今後は国内外のリサイクル産業にも新たな機会が生まれる可能性がある。現在のプラスチックのリサイクル産業の世界市場は2017年時点で約3兆8,500億円（350億ドル）だが、今後需要が伸びて処理量が増えることにより2026年には約6兆1,600億円（560億ドル）にも達するとの予測がある¹³。新しい技術やシステムの開発によりコストの壁や技術的制約を克服することができれば当該産業に大きなインパクトを与えることも期待できる。

<化学物質の安全管理・活用への貢献>

「2020年までに化学物質の製造と使用による人の健康と環境への悪影響の最小化を目指す」とするWSSD2020目標に日本政府を含む各国が取り組んでいる。WSSD2020目標の後継にあたる「beyond 2020」の議論も数年前から進められている。またWSSD2020目標はSDGsのゴール12「つくる責任、つかう責任」の一部（ターゲット12.4）としても組み込まれている。こうしたことから明らかなように、化学物質の安全管理・活用は持続可能な社会の発展に不可欠な要素である。

一方、SDGsは目標であり、これに取り組むためには様々な手段を講じる必要がある。科学技術イノベーションはそうした主要な手段の一つである。また目標達成に向けた取組みは日本の競争力強化や環境改善のような自国にとっての利点との繋がりも必要である。これらがなければ力

¹¹ CEFIC (2020) Facts and Figures 2020 of the European chemical industry.

¹² Allied Market Research (2019) Biodegradable Plastic Market by Type (PLA, PBAT, PBS, PHA, Starch Blends, and Others) and Application (Packaging, Agriculture, Consumer Durable, Textile, and Others): Global Opportunity Analysis and Industry Forecast, 2019-2026.

¹³ Transparency Market Research (2018) Plastic Recycling Market: Global Industry, Size, Share, Growth, Trends and Forecast, 2018-2026.

強い動きにはなり難い。本戦略プロポーザルが提案する内容は、社会的課題の解決のみならず研究開発を通じてわが国の産業競争力強化にも寄与することを目的としている。従ってこれらの動きが実現すれば、SDGs の目標達成に向けた取組みへの貢献も期待できる。

更に SDGs の目標は複数あり、目標どうしの関連性を見極めて相乗効果を狙うという取組み方もありうる。特に海洋プラスチックごみ問題対応については、EU がそうであるようにゴール 14「海の豊かさを守ろう」との相乗効果が期待できる。加えてゴール 6(安全な水とトイレを世界に)、ゴール 11(住み続けられるまちづくりを)、ゴール 15(陸の豊かさを守ろう)等も関連が深い。

2-3. 科学技術上の効果

＜海洋プラスチックごみ問題対応を通じた「政策のための科学」の推進＞

本戦略プロポーザルのテーマ 1 については「ミッション志向型研究開発」とも呼ぶべき仕組みの下で推進する形がありうる。研究開発の推進による科学的探究や技術開発に留まらず、得られる知見を統合化し積極的に活用することにより、国内の各種施策の遂行や、社会的議論あるいは標準化等の国際ルール策定の議論に供することを目指す。これらを通じて、「海洋プラスチックごみ問題の解決」という社会的課題に統合的に取り組む一つのモデルケースとなり得る。

また意図的に生産・利用されるマイクロプラスチックに関する制限が欧米を中心に広まりつつあるが、これらの背景には予防原則に基づく考え方があると言われている。しかしながら予防原則には本来、単なる憶測や仮定ではない、相応の科学的基礎が求められると考えられる。また予防的措置は恒久的なものではなく、あくまで暫定的なものであり、科学的営為を通じて積み重ねられる知見を基により適切なリスク管理の在り方を継続的に検討するような、リスク管理とリスク評価の間の円環的な仕組みの構築が必要である。このような観点から、本戦略プロポーザルで提案する取組みは、化学物質の安全管理・活用にあたっての「科学的根拠に基づく政策立案」(EBPM、Evidence-Based Policy Making)を支える重要な研究基盤になり得る。

＜科学技術・研究開発の新たな展開の促進：テーマ 1＞

テーマ 1 に関連するものとしては、まずグリーンケミストリーの推進が挙げられる。本戦略プロポーザルで課題として提案する生分解性の詳細な説明はこれまで見過ごされていたテーマである。昨今の生分解性プラスチックに関する議論では、生分解性の定義があいまいであり、科学的な厳密さが不足している。そもそもの目的である環境への負荷最小化を実現したいのであれば、生分解性の詳細検討は必須の項目である。実際、日英米独中 5 ヶ国の主たる化学会と研究資金配分機関が協力して隔年で開催している「国際化学サミット」¹⁴の第 8 回会合(2019 年 11 月にロンドンで「Plastics」をテーマとして開催し、日本からは日本化学会と JST が参加)でもこの点が指摘され、重要性が共有された。また生分解性の詳細説明を、今後、生分解性の制御へと応用することができれば、新たな素材開発に繋げていくことも期待できる。わが国には生分解性プラ

¹⁴ 各回テーマを設定し、化学の領域の最先端の科学者が各国から数名ずつ集まり、世界が直面する社会的な重要課題を取り上げて解決に資する糸口を探るために議論する会議。議論の成果はホワイトペーパーとしてとりまとめ、公開されている。

スチックの研究開発に精力的に取り組んできた歴史があり強みを有する。こうした強みを伸ばすとの観点からも当該課題への取り組みは新たな展開の基盤となりうる。

リサイクル関連の技術開発ではその環境性や経済性がボトルネックとなることが多い。そのためそれらを克服できるプロセスやシステムを如何に構築するかが課題になる。ケミカルリサイクルではリサイクルを化学合成プロセスと統合化する試みが行われており、当該分野の研究開発の一つの潮流となっている。ここでの提案課題はこうした潮流と合致するものである。

< 科学技術・研究開発の新たな展開の促進：テーマ2 >

テーマ2に関連するものとしては、まずデータ駆動型研究開発の進展を挙げることができる。環境リスク評価の重要性は論を俟たないが、その実施にあたっては様々な課題に直面している。例えば動物愛護の観点から動物実験の実施が難しくなっており、代替法の開発のニーズが高まっている。またそもそも化学物質の数が膨大なため、それらの環境リスクを把握・評価するための効率的な手法の開発の必要性も高まっている。如何にして有用なデータを収集・蓄積し、その限られたデータを最大限活用するかということが目下の重要課題である。

こうした中、計算機性能の向上や機械学習等の比較的新しいデータ解析手法の台頭が本分野の研究開発にも新しい潮流を作り出している。化学物質の構造と生物学的な活性との間の関係性である定量的構造活性相関（QSAR）という研究分野が以前からあるが、そのような分野でも膨大なデータを集め、解析するアプローチが台頭し始めている。本戦略プロポーザルで提案する課題は、こうした分野の研究開発を、情報科学や数理科学、材料科学など多様な分野の連携・融合により活性化させ、基礎基盤の強化に繋げることを意図している。

なおマテリアルズ・インフォマティクスと呼ばれるような材料開発におけるデータ駆動型研究開発アプローチは基本的に新しい機能の探索・設計等に焦点が当てられている。そのため新たに創成された化学物質がどのような環境リスク（分解性、生物蓄積性、毒性）を持つかは不明なままである。本来であればそうした「負」の側面の予測にもインフォマティクスを駆使することは当然あってしかるべきであるが、新機能の探索等、「正」の側面に焦点が当てられてきた。こうした観点からも本提案課題は新たな研究開発の方向性を提案するものである。

その他、分析・計測技術における進展も期待できる。ライフサイエンス分野で用いられるような高性能な質量分析装置を環境分析に用いることで、より精密な分析が可能となり、特定の化学物質の環境中での挙動を詳細に明らかにすることが可能になってきている。また環境 DNA のように河川の水からそこに生息する動物種の在・不在を解析できるようになってきたため、野外環境の生物多様性に関する情報を化学物質の環境リスクなどと関連づけるような試みも始まっている。本戦略プロポーザルで提案する課題においては、こうした野外の複雑環境における分析・計測にかかる分野の進展が期待できる。

3. 具体的な研究開発課題

3-1. プラスチックごみ問題への対応として取り組むべき研究開発課題（テーマ1）

（1）環境中での微細化プロセスや分布動態の解明およびそのための基盤技術開発（環境分析、モデル化、将来予測等）

現状の環境分析は海洋表層を対象とする研究が大半である。特に海表面を浮遊するプラスチック片を回収・分析し、その知見を基にして分布動態を推定・予測する研究が多い。また主な対象となっているのはマイクロ～ミリサイズのプラスチック片である。これらの研究成果から得られる知見は極めて有用だが、今後は、更なる網羅性や詳細化が求められる。こうした観点から今後必要と考えられる研究開発課題は以下の3点である。

- ・ マイクロサイズ以下の環境中プラスチック片の迅速かつ網羅的な回収・分析技術開発
- ・ プラスチック片の環境中での物理的・化学的・生物学的な微細化プロセスの解明
- ・ 微細化プロセスを組み込む等によるプラスチック片の分布動態モデル詳細化およびシミュレーション

【回収・分析技術の開発】……海表面調査から推定される浮遊量と海洋に放出される量（流入量）の間には大きな開きがあり、「ミッシング・シンク」の存在が指摘されている¹⁵。ミッシング・シンクの解明に向けた課題の一つはマイクロサイズ以下の極めて微小なプラスチック片の回収である。プラスチック片の回収のために通常用いられるのはニューストンネットやマンタネットと呼ばれるような網目（目合）が小さいネットである。回収に関する標準プロトコルの開発などが検討されており、目合の大きさについても検討がなされている。しかしながらマイクロサイズ以下の極めて微小なプラスチック片はこうしたネットからもすり抜けてしまうため、回収できていない。水サンプルを採取しその中に含まれるプラスチック片を回収する方法もあるが、ネットでの回収に比べると極めて効率が悪い。加えて、いずれの方法でも回収後のごみの除去やプラスチックの種類判別などは基本的に手作業に頼っている状況であり、ここも極めて効率的が悪いのが現状である。そのためこの回収技術の高度化を推進する研究開発が活発に行われている。例えばここ数年でハイスループット化を進める取り組みが始まっており、フーリエ変換赤外分光光度計（FTIR）と機械学習による画像解析を組み合わせた分析技術の開発が注目されつつある。

【微細化プロセスの解明】……プラスチック片の分布動態の把握や将来予測をシミュレーションするにあたって欠落している情報の一つはプラスチック片の微細化プロセスである。一般的に波が海岸に打ち付けられる際の物理的な作用によって微細化すると考えられているが、海岸生物による分解や紫外線劣化のような生物学的・化学的な作用もあり、これらによる微細化のプロセスを明らかにすることがシミュレーションの精度を高める上でのボトルネックとなっている。

¹⁵ Cozar *et al.* (2014) Plastic debris in the open ocean. PNAS 111(28) pp.10239-10244

【分布動態の推定・予測のためのシミュレーション】……地域規模から地球規模まで様々なスケールでプラスチック片の分布動態を把握・予測できるようになれば、対策をとるべき地域やエリアの同定がより容易になると期待される。その実現のためには前述のプラスチック片の微細化プロセスなど、メカニズムベースの知見の蓄積とモデルへの組み込みが必要である。また、より広域での調査も必要になる。それは海表面上の水平方向での空間的な拡大だけではなく、鉛直方向（海表面から海底、および海底下）の分布を明らかにする必要がある。加えて海のみならず湖沼や河川、陸地（農地など）の実態把握も必要であり、環境中に放出したプラスチック片のマテリアルフローの全体像を描くことが究極的な目標となる。実際に欧州では下水処理汚泥の堆肥としての利用率が極めて高く、農地にどの程度の移動があるかにも関心が持たれている。

（２）マイクロサイズ以下の微細なプラスチックが生態系（個々の動物やその食物連鎖等）に及ぼす影響（環境毒性）の解明

環境毒性に関する研究は極めて限定的であり、複数の問題点が指摘されている。例えば、ラボ実験で環境中よりもはるかに高い濃度でプラスチック片を与えた場合の影響を調べたり、野生動物体内からプラスチック片がどれだけ見つかったかのみを調べる等、それら自体にも科学的情報としての価値は当然あるものの、実際の環境下での毒性を推測するには必ずしも十分ではない研究が世界中で多数報告されている。さらにこうした情報の一部がそのままニュースとして取り上げられ、一般社会に広く知られると、あたかも環境毒性があるかのような受け止められ方をすることも懸念されている。環境リスク評価は、ばく露と有害性の積に基づき求められるものであり、環境毒性を科学的な方法論に従って解明することはプラスチックの環境影響を正しく理解し、効果的かつ有意義な対策をとるために不可欠である（コラム参照）。

他方、わが国の現状として、プラスチックの環境毒性に取り組む研究者は必ずしも十分に存在するとは言えず、また互いに緊密に連携して取組みが進んでいるとも言い難い。そのためここではトップダウンによる研究推進の必要性を指摘するとともに、取り組むべき研究開発課題を以下に挙げる。

- ・モデル動物等を用いた実環境条件下での毒性発現機構の解明
- ・実環境条件下での毒性の種内・種間での伝播機構の解明、生態系に与える影響予測

【毒性発現機構および生態系内での伝播の解明】……可能性として挙げられているのはプラスチックそのものによる毒性と、プラスチック片に環境中で付着する様々な化学物質の影響である。元来、プラスチックは極めて安定な物質でありそれゆえ広く社会に浸透した。そのためプラスチック片自体の毒性を懸念する声はほとんどないと言える。しかしナノサイズにまで微細化したプラスチック片が野生生物体内に取り込まれて蓄積した場合にどのような影響があるかを調べた研究は極めて限定的であり未知な部分がある。例えばナノサイズになると人の細胞膜を通過するケースも指摘されるため、比較的大きなサイズのプラスチック片とは異なる影響を及ぼす可能性を科学的に評価し検証する必要がある。

一方、プラスチック片が様々な化学物質を吸着しキャリアとなって野生生物体内に運ぶ可能性も指摘されている。この場合には吸着した化学物質の毒性が重要になるため、どのような物質を

吸着しているのかを解明することが重要になる。また環境中で吸着した化学物質が野生生物体内で脱着し、本当に吸収され毒性を発揮するかの確認も必要である。

モデル動物等を用いた上述のような毒性発現機構の解明に加え、実環境下での実態解明も不可欠である。仮に毒性があった場合には、同種内では生殖・繁殖等を通じた次世代への影響や、種間では食物連鎖を介した影響の伝播や濃縮が懸念される。これらについての理解を深めるための実地調査やシミュレーション研究などが必要である。

（３）包括的な環境影響評価の試行

プラスチック片の環境影響に関してこれまでに蓄積された科学的知見をレビューし統合化してみせる研究が徐々に始まっている。こうした研究は科学的・社会的インパクトが大きく極めて重要なアプローチである。また環境リスク評価のフレーム作りの議論が SETAC のような国際的な場で行われ始めてもいる。こうした動向を踏まえると、(1)や(2)のような重要構成要素にフォーカスした研究と同時に全体像を設計し、また知見を統合化する研究にも取り組む必要がある。検討すべき研究開発課題は以下の２点である。

- ・ 特定地域を対象とした環境リスク評価の試行
- ・ 環境毒性値を組み込んだライフサイクル影響評価の試行

【特定地域での環境リスク評価の試行】……プラスチック片の環境リスクを評価するための包括的な研究は現状ほとんど行われていない。その理由は標準的な評価フレームが構築されていなかったためである。しかし前述のとおり標準的な評価フレームの議論が進みつつあり、それらを参照した形での評価が可能な状況になりつつある。そのため、例えば流域圏からその河口域までの地域を対象にするなど、プラスチック片の移動経路を考慮したフィールドを設定し、その中で包括的かつ体系的な評価を試行する研究が今後重要になる。評価結果そのものも重要な知見となるが、それと同程度に、評価フレームの問題点等を分析・把握することに繋がるため、プラスチック片の環境リスク評価を大幅に進展させる上での不可欠な情報を得ることができ、国際的な議論にも重要な貢献を果たすと期待される。ただし、それゆえ、SETAC で議論されているフレームをベースにする等、国際的な議論の動向を踏まえた計画策定が求められることとなる。

【ライフサイクル影響評価の試行】……ライフサイクル影響評価は近年では CO₂ や NO_x などの排出量算定等を目的として研究が進められてきた。国際規格化や国主導によるデータベース開発等も進められてきた。わが国でも研究者らにより LIME のような評価ツールが開発されている。ここではそうした既存の評価の枠組みを活用し、新たに環境毒性等の影響を組み込んだ評価・分析を試行する形が考えられる。なお環境毒性等の因子を新たに組み込むにあたっては、包括的に評価・分析を行うことを重視し、必要な要素研究は含めるが、場合によっては仮定的な数値をあてはめた形での評価・分析を検討する方向も考えられる。実際の計画段階での詳細な検討が必要である。

（４）リサイクルプロセスの高度化・高効率化のための技術開発

プラスチックごみのリサイクルはグローバルな仕組みが長年維持されていたが、最大の輸入国であった中国が 2017 年からその受け入れを順次規制し始めたことにより、そのバランスが大きく崩れることとなった。別の輸出先を確保する努力が払われているが、同様にして受け入れを規制する国が次々と現れており、行先を失った一部のプラスチックごみが国内に滞留し続けている。従って今後は、国内でのリサイクル量を増やしたり、輸入国が受け入れ可能なペレット状のリサイクル原料にまで処理する等、従来は輸出によって不要となっていた段階の処理を国内で対応可能にする必要性が高まると予想される。

リサイクルはマテリアルリサイクル、ケミカルリサイクル、サーマルリサイクル（エネルギー回収）に大別される。サーマルリサイクルは他のリサイクルと比較して必ずしも環境負荷面で劣るものではないが、二酸化炭素排出の問題は避けられず、そうした観点からの議論・検討が必要となる。従ってここでは他の 2 つのリサイクルについて取り上げることとし、検討すべき研究開発課題を以下に挙げる。

- ・ 有害成分除去や複合材の単一成分化などリサイクルの高品質化・高効率化のための分離技術開発
- ・ リサイクルに伴い劣化する物性の回復・改善のためのプロセス技術開発
- ・ ケミカルリサイクルの拡大のためのプロセス技術開発

【マテリアルリサイクル】……廃プラスチックを溶融等により再び原料として用いるマテリアルリサイクルには、例えば PET ボトルを PET ボトルへと再生する「水平リサイクル」や、その他の製品へと再生する「カスケードリサイクル」がある。いずれにおいても品質の良い廃プラスチックを効率よく入手することが望ましいが、廃プラスチックとなった段階では、たばこの吸い殻等、有害物質が付着したものもあり、これらをいかに除去するかが技術的課題となっている。また様々な機能を付与するために添加剤を混合したり複合材として用いられることが多く、リサイクルの際には各種の成分を分離する必要もある。さらに、マテリアルリサイクルの処理プロセスの中でペレット化や金型成型時のせん断による分子量の低下等が生じ、結果として物性が低下するという課題もある。これらを克服し、経済性や環境性等の観点からも妥当なプロセスを構築することが今後取り組むべき課題である。

【ケミカルリサイクル】……ケミカルリサイクルでは、廃プラスチックを原料やモノマー、油やガスに戻して再びプラスチックや他の基礎化学品として使うか、または鉄を作る際の還元剤として利用する。これまでも多くの試みが行われており、大量の資源の効率的な確保や、エネルギー的または経済的な収支等がボトルネックとなってきた。原料・モノマー化については、化学的に高分子をどの段階まで戻すことが現実的であるか、プロセスやエネルギーコストの面で難しい課題であるが、その検討はまだ端緒に付いたところである。現在行われていることは、従来の PET ボトルのリサイクルに加え、例えば最近ではポリエステル製衣類を回収・リサイクルするシステム構築の試みがある。また油化・ガス化については化成品の生産工程に原料として追加するシステムを構築する試みが進んでいる。このようなリサイクルと化学合成プロセスの統合化は今後の拡大が期待され、取り組むべき課題である。

（５）代替素材の環境中での分解プロセス（環境分解性）の詳細説明・評価

廃棄物を適切に管理してもなお環境中に放出してしまうプラスチックごみの問題がある。これの対応としてわが国が注力しているのは生分解性プラスチックの開発である。2019年5月には「海洋生分解性プラスチック開発・普及ロードマップ」を経済産業省が策定した。同ロードマップでは海洋生分解性プラスチックを「海洋中で微生物が生成する酵素の働きにより水と二酸化炭素に分解されるプラスチック」と定義している。しかしロードマップの中心は革新的な素材の開発、分解に寄与する微生物の探索、用途拡大、生産プロセスの改善等であり、分解性そのものを詳細検討する方向の取り組みは見られない。

分解性の評価には標準的な手法が定義されているが、必ずしも実環境下での分解が考慮されたものではない。例えば海洋プラスチックごみの問題では海洋中での分解性を確認する必要があるが、そのためのフィールドテストは緒についたばかりという状況である。

分解性を科学的に深掘りすることは新しい代替素材の環境性を科学的に確認するということがあり社会的にも重要なテーマである。また分解性の理解が深まることにより代替素材開発に新たな視点が付与される好機にもなり得る。ISOにおける生分解性評価の標準化に係る検討ではわが国は主導的地位にあるが、そうした国際的優位性をより高めるためにも、環境分解性についての研究開発を深化させ、その科学的根拠の強化を進めておく必要がある。こうした観点から今後必要と考えられる研究開発課題は以下の2点である。

- ・ 生分解を含む環境分解性素材の階層構造ごとの分解機構の詳細説明（球晶構造、ラメラ構造、微細な結晶構造等）
- ・ 階層構造ごとの分解機構説明に基づく高度な環境分解性を有する革新的素材の開発

なおここで言う環境分解性とは、環境中における化学物質の分解され易さを意味し、水・土壌中の微生物をはじめとする生物による分解と、大気中の光化学反応および水中での加水分解反応などの非生物学的な分解の両方を含む言葉と定義する。

【階層構造ごとの分解機構説明】……一般的に、「環境中の微生物が分泌する分解酵素により低分子化合物に分解され、最終的には二酸化炭素と水にまで完全に分解されるプラスチック」が生分解性プラスチックと呼ばれている。ただしその分解様式には、高分子鎖を直接分解する分解酵素により低分子化合物に分解されたのち微生物代謝されるか、水による加水分解により低分子化合物へと変換されたのちに微生物代謝によって分解されるかという異なる種類のものがある。

実際の自然環境中での分解は大気中の光化学反応や温度変化などの様々な条件が複雑に関与するためその機構は極めて複雑であり十分に解明されていない。そのため現在はより単純な条件下での分解機構についての研究が進められている。現在のところ、生分解性プラスチックに関しては高分子固体の結晶化度や基本構造であるラメラ結晶の厚さによって分解速度が異なること等が明らかになっている¹⁶。今後はこうした高分子の階層構造を考慮したより詳細な分解性の機構説明を様々な高分子材料を対象にして進めることが必要である。また、それらを通じて得られた知見を環境分解性の高度制御技術として応用することができれば、環境低負荷な素材開発に対して

¹⁶ 岩田忠久（2018）生分解性プラスチックの生分解速度のコントロールを目指して、月刊プラスチックスエージ，12月号 pp.45-49

新たな展開が期待できる。

3-2. プラスチックをはじめとする化学物質の安全管理に資する科学技術基盤の強化 に向けて取り組むべき研究開発課題（テーマ2）

（1）データ駆動型アプローチによる化学物質の特性予測技術の高度化

あらゆる化学物質を対象に毒性評価試験を実施することには膨大な労力が必要となるため、日々開発される新規化学物質の環境毒性や健康影響を適切かつ迅速に評価できる手法への需要が高まっている。また化学物質の毒性評価のために行われる動物試験が動物愛護の観点から減少傾向にあり、代替手法の需要も高まっている。その一方で、周辺分野の研究開発では、マテリアルズ・インフォマティクスのように、計算機性能の向上や機械学習等のデータ解析技術の進展によるデータ駆動型アプローチが大きな潮流になっている。

こうした背景から、化学物質の構造等の情報から毒性を予測することにより、詳細な評価試験が必要な化学物質を絞り込むためのスクリーニングを可能にする技術が注目されている。既にいくつかの取り組みが始まっており、活用事例も出始めているが、課題も残されている。例えば動物実験に基づく良質なデータセットは限られている。また多種多様な化学物質関連情報（ビッグデータ）の効率的・効果的な解析手法も確立されていない。更に化学物質の構造やそれらが置かれている実環境と毒性発現との関係性やメカニズムも解明されていない。これらを克服してより高度かつ有用な方法論として社会への普及を目指すためには、以下に示す研究開発課題に今後取り組む必要がある。

- ・ 動物試験に基づく良質なデータセットの構築
- ・ 公開データ等の多種多様なデータセットの収集・統合化のための基盤技術開発
- ・ 環境毒性・健康影響予測のための定量的構造活性相関手法の高度化

【データセット】……規制当局や公的機関等が管理・公開する化学物質毒性データベースには多様なものがあり、数も膨大だが、信頼性の高いデータベースは限られている。例えば動物試験で標準的なプロトコルに従って実施され、試験個体ごとにデータが整理されているものとなると極めて限定的である。同一ラボでの動物試験でも半数致死量（LD50）が10倍異なる結果が得られる場合もあるため、どのデータベースを参照するかということは予測結果を左右する重要な要因となりうる。また、そうした質の高いデータベースが限られていることは、予測性能を高める上では制約となりかねない。従って質の高いデータベースを構築・保有すること自体も差別化要因の一つとして重要性が一層高まると予想される。動物試験が回避される方向性が強まる昨今ゆえに、真に有用なデータベースの構築・活用戦略が必要になってきている。

【定量的構造活性相関 (QSAR)】……QSAR は、物性等のパラメータを用いて統計的に得られたモデル式により、データがない物質の物性、環境中運命あるいは毒性を予測する方法である¹⁷。統計学的手法等により構築されたモデル式を用いた予測や、毒性の発現に寄与する官能基や部分構造の専門家判断に基づく予測がある。また QSAR 以外の方法にはカテゴリーアプローチがある。カテゴリーアプローチは化学物質の構造的な類似性と、物性や環境中運命あるいは毒性の類似性等に基づき化学物質カテゴリーを作り、同一カテゴリー内の既知物質の試験結果から未知物質の試験結果を予測する方法である。これらの方法は試験を実施することなく補完的なデータを入手したり、試験実施対象の優先順位付けを行うためのスクリーニングに用いたりといった活用がなされている。近年は計算機性能の向上や機械学習等によるデータ解析技術の進展を背景にした研究開発が潮流となっており、データ駆動型研究開発の適用分野の一つである。研究開発としては比較的単純な予測を実施する段階であり、化学物質の構造と機能の関係性を様々な角度から解明し予測につなげることが必要である。そのためには毒性学のみならず、数学、情報科学、物質科学などの多様な分野からのアプローチを促すことが必要となっている。

(2) 迅速かつ網羅的な環境中化学物質の動態把握技術の開発

環境毒性を評価するためには化学物質の環境中での分布状況や動態を適切に把握する必要がある。しかし環境中には人工的な化学物質であっても多種多様な物質が存在する。時間と共に個別の化学物質の状態が変化したり、化学物質どうしが相互作用を示すこともある。そのため環境中の化学物質を迅速かつ網羅的に分析・解析するための技術開発は本分野の基盤強化において不可欠なテーマである。周辺分野では環境 DNA のようなフィールドデータの簡易かつ迅速な収集・分析手法も開発されており、例えばそうした手法を取り入れてみるような、新たな発想による手法の開発への期待も多い。こうした観点から今後必要と考えられる研究開発課題は以下の2点である。

- ・ 環境中に存在する多数の化学物質や周辺環境情報を一斉かつハイスループットで分析するための手法開発
- ・ 化学物質間の相互作用およびそれらによる複合的な環境影響機構解明

【一斉分析】……多種多様化する化学物質に対応した多成分一斉（ワイドターゲット）分析やノンターゲット分析、あるいは理論同族異性体が多いためこれまで分析困難だった物質への対応等が近年の環境分析の潮流である。多成分の一斉定量と未知物質推定を可能にした技術的背景には、連続した精密質量測定が可能な飛行時間型質量分析計（Time of Flight MS、TOF-MS）の普及と高度化がある。フーリエ変換イオンサイクロトロン共鳴質量分析計（FT-ICR-MS）やオービトラップ型質量分析計等、質量分解能が十万以上の質量分析計の環境分野への応用が進んだことが未知物質の組成式の推定確度を上げているという側面もある。一方、個別分析に比べると未だ精度が低い、分析精度が物質ごとに異なる等の課題もあり、更なる高度化が求められている。

¹⁷ 一般財団法人化学物質評価研究機構ホームページ、（定量的）構造活性相関（(Q)SAR）等による予測を用いた評価、https://www.cerij.or.jp/service/10_risk_evaluation/QSAR.html、2020年3月アクセス

【複合影響】……通常、化学物質の環境リスク評価は個別の物質を対象に実施される。しかし実際の環境中では複数の化学物質が同時に検出され、それらの複合的な影響が懸念される。そのような問題意識に基づき 2010 年前後から複合暴露リスク評価に関する国際的な検討が始まった。これまでに幾つかの複合影響予測モデルが開発されており、それら既存のモデルを組み合わせた新たな評価手法の開発や、既存のモデルをベースとした新たなモデルの開発等が行われている。その他にも細胞レベルでの複合影響の発現機構解明等の生命科学的なアプローチも検討されている。

4. 研究開発の推進方法および時間軸

4-1. 推進方法

＜目指す社会イメージとその実現に向けた研究基盤強化の方策＞

本戦略プロポーザルが目指す社会イメージを図7に示す。「安全、安心な社会」や「つくる責任、つかう責任の全う」を実現するために、「社会」、「リスク管理」、「リスク評価」、「リスク評価研究」の三者が相互に影響を及ぼしあいながら漸進的に社会を発展させていく姿が今後の目指すべき方向性である。科学技術が社会の中に組み込まれ、科学と社会の間に循環的な関係性が存在するようなエコシステムを構築していくことが必要である。

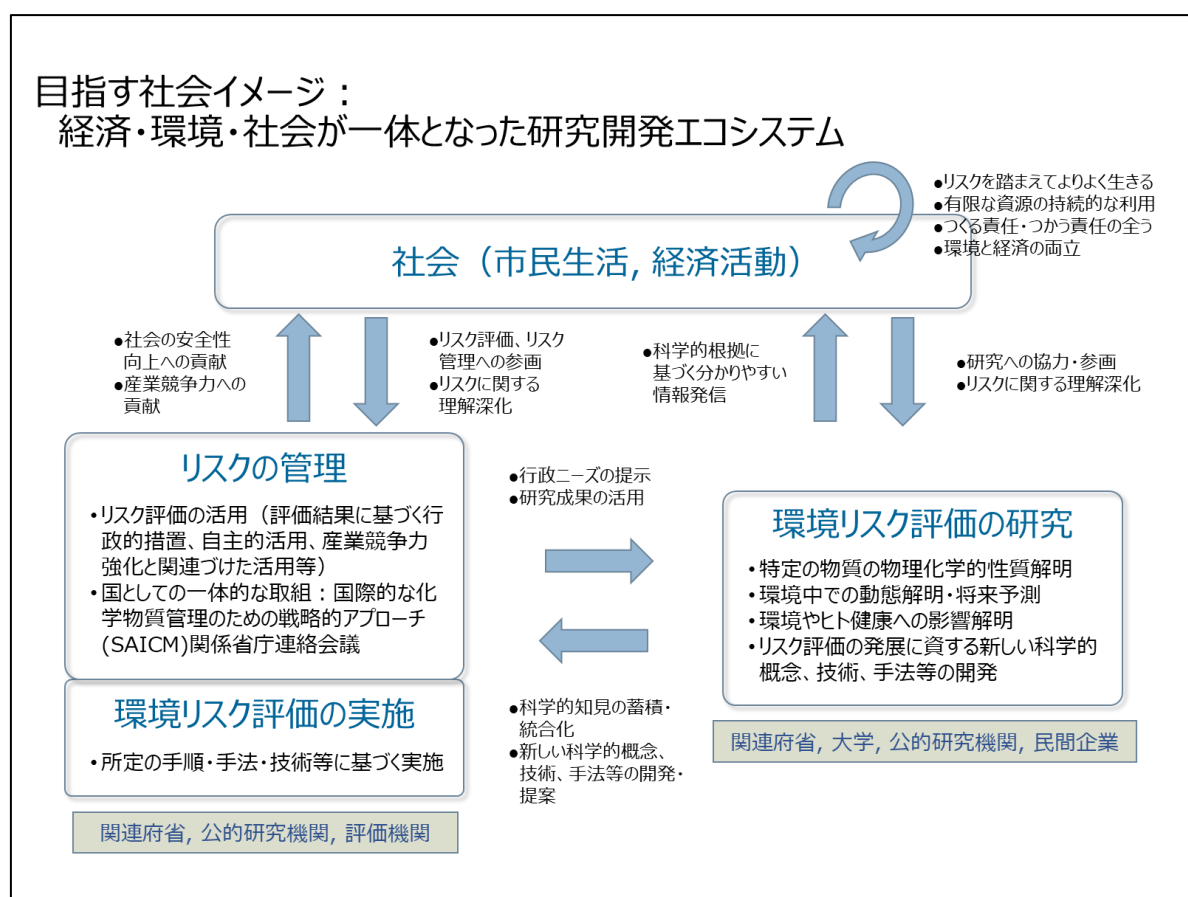


図7 目指す社会イメージ

このようなエコシステムの実現に向けて特に重要な点は、「リスク評価研究」の強化である。なぜならば、“どのようなリスクをどの程度まで許容するか”は時代ごとの社会の雰囲気や意思決定・合意形成に依存するが、その前提として“どのようなリスクが存在するのか”を適切に把握・評価することはいつの時代にも求められるものであり、これを可能とするためには専門的な科学的知見や多様な手法・技術を蓄積し、それらを駆使する必要があるためである。

「リスク評価研究」の強化、すなわち研究基盤強化には、国によるイニシアチブとそれに基づく

中長期的視点に立った推進・支援が不可欠である。欧米では製造者側にリスク評価の実施が求められ、またリスク評価・リスク管理が産業競争力とも密接に関わるとの認識があるため、産官双方に当該分野の研究力強化への強い動機が存在する。それと連動して必然的に学（大学や公的研究機関）の活動も活発である。他方、法規制の仕組みがやや異なる日本ではリスク評価の実施は部分的であり必ずしも同様の状況があるとは言えない。わが国の化学産業の競争力を一層高めていくためにも、今後は欧米と同様のエコシステムの構築を目指す方向へと移行していくことが必要である。これらの実現に向けてここでは2つの方策を提案する。

コラム 産学官が集う場としての SETAC

環境毒性化学会 (Society of Environmental Toxicology and Chemistry, SETAC) は、90 カ国以上の 5,300 人以上の個人と機関が参画する非営利の世界的な専門組織である。環境毒性学と環境化学の分野では世界最大の学会となる。「持続可能な環境と生態系保全の強化と管理に向け、その理念と実践を促進し支援すること」をミッションとし、環境問題の研究、分析、解決、天然資源の管理と規制、研究開発、環境教育に焦点を当てている。その設立は北米で、1979 年に遡るが、地域組織の活動も活発であり、SETAC-Europe、SETAC-Asia/Pacific、SETAC-Latin America、SETAC-Africa がある。

SETAC の強みは、産学官から均等に役員や会議等の代表を出す等、セクター間のバランスが取れていることである。客観的情報や科学的知見を基に産学官が情報を共有し、共に課題を話し合うことにより、参加国の環境政策に大きな影響を与える。また Environmental Toxicology and Chemistry (ET&C) と Integrated Environmental Assessment and Management (IEAM) という2種類の学会誌では、産や学が著者の論文が多数掲載されている。最近では、マイクロプラスチックの環境リスク評価に関する総説 (Gouin *et al.*, 2019, ET&C) や水生環境におけるマイクロプラスチックの影響に関する総説 (Burns *et al.*, 2018, ET&C) などがオープンアクセスで公開されている。これらの総説では最新の科学的証拠が網羅され、課題が洗い出され、将来の方向性が示されている。

環境中のプラスチックごみ問題に関しては、年次大会でも最新の課題の議論が活発になっている。例えば、第40回 SETAC 北米年次大会 (2019 年 11 月、カナダ、トロント市開催) で行われた特別セッションでは、環境中のマイクロおよびナノプラスチックの毒性についての研究手法や、当該研究領域における手法の標準化等についての議論が行われた。これは近年、当該分野の研究が世界的に拡大するに伴い研究成果が多く報告されている一方で、多様な分析法が出現し研究間の比較の困難性が浮き彫りになったためである。また、アメリカのテキサス州にて開催予定 (2020 年 3 月) の第9回 SETAC 環境系若手研究者大会では、環境中のマイクロプラスチックの化学的および毒性学的な側面をテーマとするセッションがあり、将来の方向性が議論される見込みである。さらに、アイルランドのダブリンで開催予定 (2020 年 5 月) の第30回 SETAC ヨーロッパ年次大会では、「LCA に基づく海洋ごみへの科学的アプローチ」についてのセッションがあり、海洋ごみの環境への影響という、学際的研究を必要とする課題について情報交換が行われる見込みである。

最近の注目すべき動向としては、昨年、マイクロプラスチックに関する Interest Group (IG) が設置されたことが挙げられる。IG は SETAC 内のオンラインプラットフォームであり、現在 25 グループ程度の IG がある。その目的は、特定の科学トピックに関心を持つ関係者が専門知識を共有したり、情報発信をしたりすることである。

マイクロプラスチック IG のミッションは、「湖、川、海から農業土壌に至る環境中に見られる多様なサイズのプラスチック粒子に関する科学的研究の進展を支援すること」である。対象は、マクロ、マイクロ、ナノスケールのプラスチック粒子と繊維であり、プラスチック粒子の収集、抽出、分析、および暴露と摂取への対応に関する世界標準の開発にも取り組むこととしている。

このように SETAC は、環境中のプラスチックごみ問題に産学官の 3 つのセクターが協力して取り組むプラットフォームとなっており、世界の環境政策を先導する立場を担っていると言える。

方策① 科学技術イノベーション政策上の位置づけの明確化

現行の第 5 期科学技術基本計画では、「食品安全、生活環境、労働衛生等の確保」に必要なものとして環境リスク評価を含む安全性にかかる研究が位置付けられている。しかし過去に遡ると、例えば第 2 期科学技術基本計画時には「科学技術振興のための基盤の整備」、特に「ものづくりの基盤の整備」に必要なものとの位置づけがなされていた。また第 3 期期間中はナノマテリアルの安全性が注目された時期と重なり、これへの対応を基本計画の中で明確に位置づけたことが当該分野の研究開発を推進する駆動力となっていたことは明らかである。次期科学技術基本計画の検討が活発化している中、今後は「社会の安全」と「科学技術振興のための基盤」という 2 つの位置づけを両方とも明記して取り組むことが必要である。

方策② 国としての体系的な研究開発の推進

関連府省の連携に基づくフラッグシップ的な研究開発プログラムの発足、もしくは既存事業群の中での体系的な推進が必要である。

特にテーマ 1 は、各課題から得られる知見や技術を相互に共有し、最終的には一定の環境リスク評価を実施できる形にまで“知の統合化”を目指すことが重要である。そのため共通ビジョンの下で関連府省が連携して推進する形が望ましい。具体的には内閣府の主導の下、関連府省所管の公的研究機関の研究者が参画するイメージである。当然、大学や産業界からの参画も必要である。特に計画策定段階から産業界に意見を求め、共に作り上げていく必要がある。なぜならば本テーマに係る科学的知見は、海洋プラスチックごみに関連する国際的なルールや各国・地域の規制の議論とも深く関連するため、産業との連携を念頭に置いた計画策定が重要になるためである。従って研究開発のみならず標準化をはじめ様々なルール策定に係る国際的議論とも密接に関係させる必要もある。

以上を踏まえると、テーマ 1 は、例えば「ミッション志向型研究開発プログラム」とも呼ぶべき形で一元的に推進する形が適当と考えられる。「ミッション志向型研究開発プログラム」とは欧州の次期研究枠組み Horizon Europe の検討の中で議論されているものであり、海洋プラスチックごみ問題対応や温室効果ガス排出削減など多様な例が示されている。

ただし、関連府省で行われている既存事業群の中での推進も次善策として実施可能である。「ミッション志向型研究開発プログラム」が理想的な形であるとしても、その枠組みでの実施が困難だった場合には、分散型の研究体制で推進することも可能と思われる。何らかの協議体を作り、

その場を通じてビジョンを共有し、プロジェクト間の連携を図る形が考えられる。その際、各プロジェクトを推進する府省は、プロジェクト間の連携を促進するための支援に最大限に取り組むことが求められる。テーマ1の規模感を考慮すれば、例えば特定の公的研究機関を中心とした実施や、特定の競争的資金事業の領域・テーマとして設定した中での実施が考えられる。

グランドチャレンジ：

海洋プラスチックごみ問題解決

ミッション：

環境調和型プラスチック戦略

- ・ ナノ・マイクロプラスチックの環境リスク評価の実施
- ・ 国内リサイクル処理能力の強化
- ・ 環境分解性を備えた新素材開発

関連分野・セクター等：

研究開発課題：

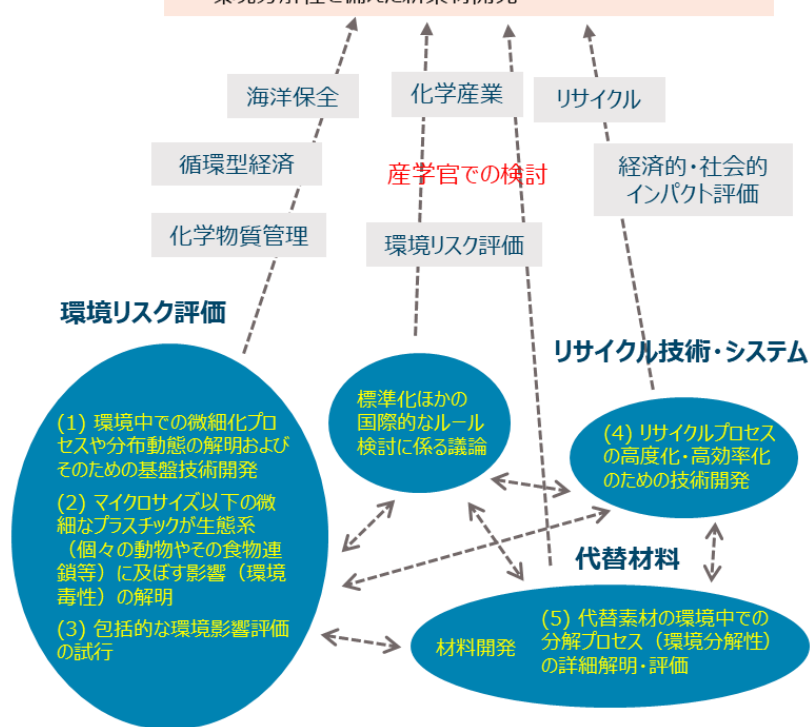


図8 ミッション志向型研究開発プログラムとしての全体イメージ

具体的な体制は、図9に示すように、環境リスク評価に係る部分は「ばく露」「環境毒性」「評価」という3つの柱に沿って研究を進めるイメージとなる。またこれらの研究開発は「標準化」などの国際的なルールに関する議論・検討とも必要に応じて連動することが必要である。科学的知見やノウハウに基づいた議論への参画は日本の発言力強化につながり得る。反対にこうした議論の鍵となるような研究開発項目が明確となれば研究開発現場に還元することも可能になる。こうした双方向性を作ることができればプログラムがより有意義な形になる。

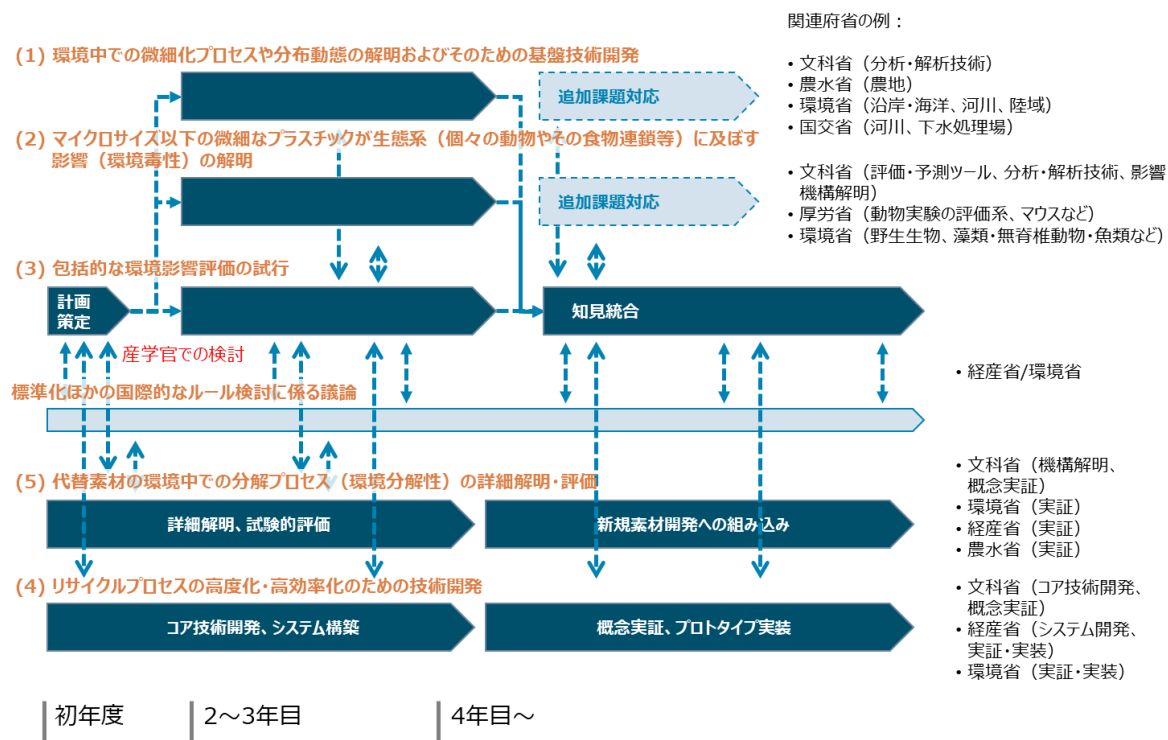


図9 テーマ1の推進体制例

次にテーマ2に関しては、中長期的な視点に立って基盤強化を推進するとの立場から各研究開発課題を推進する必要がある。テーマ1のようにミッションを明確化した推進よりは、科学的な探求や新しい技術・手法等の開発・高度化を深めていく方向性が望ましい。こうした横断的・基盤的な研究開発を推進することが、ひいてはテーマ1のような社会的に注目を浴びるトピックに迅速に対応する研究力を醸成することに繋がる。

提案した2つの研究開発課題はいずれも横断的かつ基礎的課題である。それぞれに独立した研究領域・テーマとして推進しうるものであり、科学技術の基礎基盤強化を趣旨とする競争的な研究助成事業の領域・テーマとして設定し推進する形が適当と考えられる。

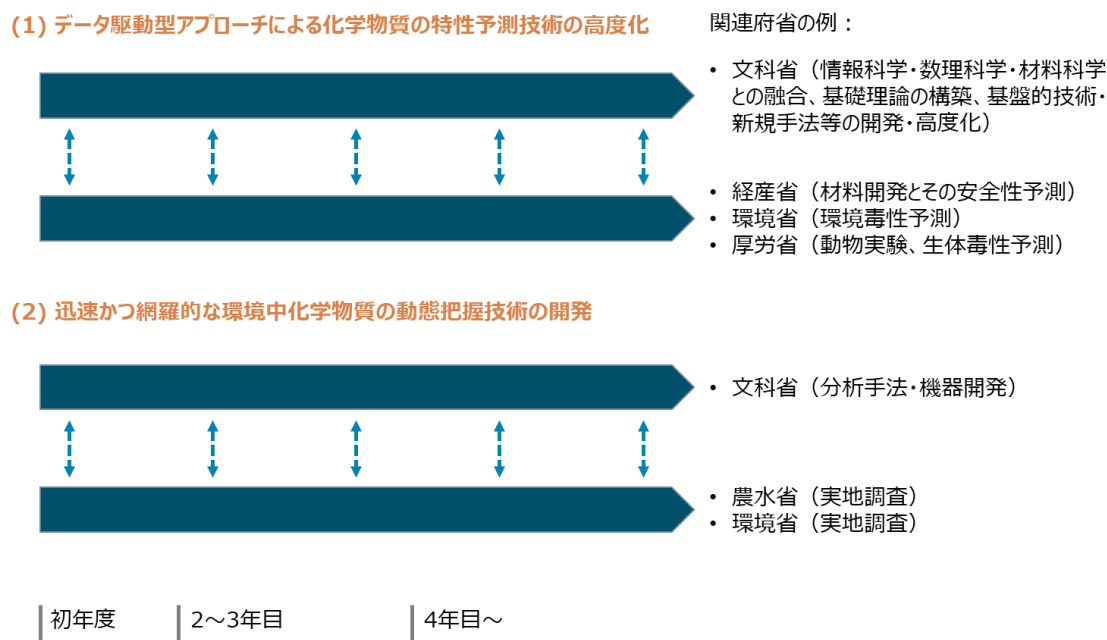


図 10 テーマ 2 の推進体制例

＜一体的な推進に向けた方策＞

リスク評価やリスク管理に関連する学会や研究会は複数ある。それに限らず海洋プラスチックごみ問題への対応を議論している学会・研究会となると更に多様性が増す。各々では研究報告や議論が活発に行われており、主な問題意識としては科学的知見の蓄積に加えて「科学者の社会的責任」という側面も強い。その一方、学会や研究会間の繋がりを見てみると、必ずしも緊密ではない。そのため比較的類似のテーマでそれぞれが個別に議論しているという印象も拭えない。今後、国として一体的に研究開発を推進するためには、散在する英知を結集し、共通の目標に向かって統合的に取り組む体制を作る必要がある。

そのために鍵となるのは産業界との連携である。特にテーマ 1 の推進にあたっては、計画の策定段階から産業界と連携して進める必要がある。例えば日本化学工業協会は日米欧の化学工業会が協力して進める研究助成事業 Long-Range Research Initiative (<https://www.j-lri.org/index.html>) を長年実施しており、リスク評価研究へのニーズを公開している。研究そのものではないが同会は海洋プラスチック問題対応協議会（略称：JaIME、https://www.nikkakyo.org/upload/files/jaime/JaIME_jp.pdf）も発足させており独自の活動も行っている。その他にも官民連携の取組みであるクリーン・オーシャン・マテリアル・アライアンス（略称：CLOMA、<https://cloma.net/>）も積極的な活動を展開している。こうした取組みは海洋プラスチックごみ問題への対応に関する産業界としての強い問題意識の表れと捉えることができる。産業界の強い問題意識を求心力の一つにして、多様な学会や大学・公的研究機関等も巻き込んだ中で計画を策定し研究開発を推進することができれば強力な体制になると期待される。

また、分野間の連携・融合も必須である。3 章でも述べた通り、化学物質の毒性予測ではデータ駆動型の研究開発が最近の潮流である。また環境中の化学物質の分析においても環境 DNA のような近隣分野で活用が進む新しい技術の応用が検討されている。こうした新しいアプローチや

技術を受け入れるような異分野連携・異分野融合を積極的に活用することが、本分野の今後の展開においては不可欠である。

従来であれば毒性、分析、リスク評価等の分野が本テーマの主たる関連分野だったと思われるが、プラスチックごみ問題においては海洋物理のようなモデリング・シミュレーションに係る分野や高分子科学のような材料系の分野、あるいは廃棄物処理分野の貢献は不可欠である。また化学物質の毒性予測では機械学習等のデータ解析や数理学、情報科学分野の研究者への期待も高い。必然的に異分野連携・異分野融合の動きが現れ始めているが、そうした動きを積極的に推進・支援することが今後の発展には極めて重要である。

4-2. 時間軸

<テーマ1>

国内では、「プラスチック資源循環戦略」（令和元年5月31日）や「海洋生分解性プラスチック開発・導入普及ロードマップ」（令和元年5月7日）等、海洋プラスチックごみ問題対応と関連の深い国家戦略や計画では2030年が一つの目標年として設定されている。また世界ではICCA（国際化学工業協会協議会）とSETAC（環境毒性化学会）がマイクロプラスチックの環境リスク評価を行うためのフレームを議論・検討しているが、これらが実行へとフェーズを移行する時期はそう遠くないと思われ、今後の10年間で海洋プラスチックごみ問題を取り巻く状況は大きく変化することが予想される。したがって本戦略プロポーザルで提案する一連の研究開発戦略も、これらの時間軸を念頭に置く必要がある。

早急に取り組み始め、5年程度経った時点で中間的なレビューを行い、国内外の状況との整合性をはかる必要がある。当然ながら5年ですべての問題が解決するとは限らないため、更なる長期的なプログラムやプロジェクトの構想もあり得るが、数年区切りで一定のマイルストーンを設定することがテーマ1では必要と思われる。

なお研究に多くの時間が必要であることは分野を問わず言えることであるが、本件は進行中の問題であり国際社会が高い注目を示す今の時期に積極的に国内外へ発信することが重要である。リスク評価やプラスチックの規制に係る国際的な議論も進行中であり、そうした議論に対して日本からも積極的にインプットを行っていくことが重要である。

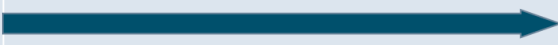
<テーマ2>

データ駆動型アプローチによる化学物質の毒性予測技術に関しては、公開されている信頼性の高い化学物質関連データを利用したデータ解析が目下の中心テーマである。しかしながらこれらのデータは有限であり、独自に動物実験を実施して信頼性の高いデータを新たに蓄積していくことも戦略上重要な取り組みとなる。また公開されている一連のデータセットに加えてその他の多種多様なデータ（ビッグデータ）を取り込んだより複雑なデータ解析の試みも今後のテーマである。これらの時間軸については、計算機性能が向上し、機械学習等のデータ解析手法が様々な分野で取り入れられ進展しつつある昨今、またマテリアルズ・インフォマティクスの隆盛が以前か

ら続いている中においては、数年程度のタイムスパンでの集中的な取り組みで一定の成果を狙う進め方が有効と考えられる。

環境中化学物質の迅速かつ網羅的な分析・解析に関しても数年程度のタイムスパンで集中的に実施し、更にその先の戦略はその時点の成果等に基づき順応的に更新することが現実的と考えられる。なおフィールドで実際に分析・解析を実施するような研究では、サンプル採取を多地点で行う必要があり、また研究目的によっては日変動、季節変動、あるいは年変動を評価する場合もあるため、1～2年程度での成果創出が困難な研究もあると予想される。機器開発や手法開発は最終的にはこうしたフィールド研究によって検証されなければならないため、最終的な成果創出には10年単位の時間軸を想定する必要がある。

■ テーマ1.

	2020～	2030～
プラスチック資源循環戦略	プラ製容器包装・製品のデザインを技術的に分別容易かつリユース可能またはリサイクル可能なものに（～2025） プラスチック製容器包装の6割をリユースまたはリサイクル（～2030）	
海洋生分解性プラ開発・導入普及ロードマップ	海洋生分解性メカニズムの解明	海洋生分解性メカニズムを応用した革新的素材の創出
(1)～(5)	 国際的なリスク評価研究に貢献する 科学的知見の蓄積・体系化 新技術の試験的実装	

■ テーマ2.

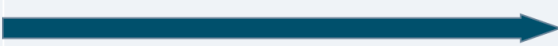
	2020～	2030～
	SDGs（～2030） 第6期科学技術基本計画（2021～2025） WSSD2020（～2020）、beyond2020（ポストWSSD2020）	ポストSDGs?
(1)・(2)	 産業競争力強化の一環としての 位置づけ明確化 新技術・手法の試験的実装	

図11 時間軸イメージ

付録1. 検討の経緯

国立研究開発法人科学技術振興機構（JST）研究開発戦略センター（CRDS）では、2019年度の戦略スコープ検討委員会において、戦略プロポーザルを作成すべきテーマの一つとして本テーマを選定した。これを受けて検討チームを発足させ、2019年6月から正式に活動を開始した。ただし下調査は正式始動以前より開始しており、チーム活動はそれらを基にしている。チーム活動では、有識者インタビュー、文献調査、学会等からの情報収集やワークショップでの議論等を行い、本テーマを取り巻く現状把握や分析、今後の研究開発の方向性等について議論・検討を深めた。これら一連の活動の概要を以下に示す。

1. 有識者インタビュー

本戦略プロポーザルの作成にあたり、国内外の社会的情勢、科学技術への期待、具体的な研究開発課題等についての調査分析を行うため、関連する分野・テーマのシンポジウムや学会等に参加した。また関連分野の有識者に個別インタビューを実施した。2019年1月～2020年3月までの間に実施した個別インタビューでは、材料開発、リサイクル、環境分析、モデリング・シミュレーション、毒性評価、法規制・標準化等の分野の約30名の有識者にお話しを伺い、意見交換等を実施した。また関連する府省、業界団体、民間の非営利団体の担当者の方々とも意見交換等を実施した。

2. 科学技術未来戦略ワークショップ

調査分析を進め、問題点やとりまとめの方向性がある程度定まってきた段階で、その内容の妥当性を確認し、議論をより一層深めるため、ワークショップを企画・開催した。以下に概要を示す。

また本ワークショップの詳細については、「科学技術未来戦略ワークショップ報告書『社会および産業競争力を支える基盤としての環境リスク評価研究』」を別途とりまとめた。報告書は2020年3月にJST-CRDSのワークショップ報告書のWebサイト※1にて公開予定である。

※1 <https://www.jst.go.jp/crds/report/report05/index.html>

- <名 称> 科学技術未来戦略ワークショップ
「社会および産業競争力を支える基盤としての環境リスク評価研究」
- <開催日時> 2019年12月3日（火）13:00～18:05
- <開催場所> JST 東京本部 2階 共創スペース（東京都千代田区）
- <開催趣旨>

環境リスク評価研究を取り巻く我が国の現状と今後の課題について多様な専門家を交えて議論を行ない、今後国として向かうべき研究開発の方向性について示唆を得ることを目的とする。具体的には次の3点を主なテーマとして議論を行う：①海洋プラスチックごみ問題への対応としての環境リスク評価研究、②我が国の環境リスク評価研究体制の在り方、③化学物質の環境リスク評価に関連する挑戦的な基礎研究開発課題。

<参加者> 以下の通り

[WS 参加者] (敬称略、五十音順)

赤渕 芳宏	名古屋大学 大学院環境学研究科 社会環境学専攻 准教授
伊坪 徳宏	東京都市大学 環境学部 環境マネジメント学科 教授
大嶋 雄治	九州大学 大学院農学研究院 資源生物科学部門 動物・海洋生物科学 教授
島村 道代	海洋研究開発機構 経営企画部 調査役
高橋 祐次	国立医薬品食品衛生研究所 安全性生物試験研究センター 毒性部 第3室室長
高原 淳	九州大学 先端物質化学研究所分子集積化学部門 教授
鳥村 政基	産業技術総合研究所 環境管理研究部門 副研究部門長
内藤 航	産業技術総合研究所 安全科学研究部門 リスク評価戦略グループ 研究グループ長
仲山 慶	愛媛大学 沿岸環境科学研究センター 化学汚染・毒性解析部門 助教 (特任講師)
永井 孝志	農業・食品産業技術総合研究機構 農業環境変動研究センター 生物多様性研究領域 化学物質影響評価ユニット 上級研究員
日向 博文	愛媛大学 大学院理工学研究科 生産環境工学専攻 教授
平尾 雅彦	東京大学 大学院工学系研究科 化学システム専攻 教授
藤井 健吉	花王株式会社 研究開発部門 安全性科学研究所 ディレクター
道田 豊	東京大学 大気海洋研究所 国際連携研究センター センター長/教授

[JST-CRDS 検討チームメンバー]

佐藤 順一	JST-CRDS 環境・エネルギーユニット 上席フェロー ※チーム総括責任者
中村 亮二	JST-CRDS 環境・エネルギーユニット フェロー/ユニットリーダー ※チームリーダー
有本 建男	JST-CRDS 科学技術イノベーション政策ユニット 上席フェロー
小林 恵	JST プログラム戦略推進部 主査
二歩 裕	JST プログラム・マネージャーの育成・活躍推進プログラム 研修生 ※東京農工大
長谷川景子	JST-CRDS 環境・エネルギーユニット フェロー
原田千夏子	JST 未来創造研究開発推進部 副調査役
前川 智美	JST-CRDS 環境・エネルギーユニット フェロー
松村 郷史	JST-CRDS 環境・エネルギーユニット フェロー
宮下 哲	JST-CRDS ナノテクノロジー・材料ユニット フェロー/ユニットリーダー
吉田 有希	JST-CRDS 科学技術イノベーション政策ユニット フェロー

[傍聴登録] ※2019年12月2日時点 (敬称略、順不同)

菅野 普	内閣府 政策統括官 (科学技術・イノベーション担当) 付 上席政策調査員
鈴木 悟司	文部科学省 研究開発局 海洋地球課 課長補佐
日比野 祥	文部科学省 研究開発局 海洋地球課 係長
村上 泰紀	文部科学省 研究開発局 海洋地球課
中田 希衣	文部科学省 研究開発局 環境エネルギー課 行政調査員
橋本 成俊	環境省 大臣官房 総合政策課 環境研究技術室 係員
原島 省	独立行政法人環境再生保全機構 環境研究総合推進費プログラムオフィサー

<タイムスケジュール> 以下の通り

時間	内容
13:00-13:20	開会挨拶、趣旨説明 JST-CRDS
13:20-14:50 (90min.)	<第一部: 海洋プラスチックごみ問題への対応としての環境リスク評価研究> ● テーマ: 今後 5 年程度の期間で国として取り組むべき研究開発課題とその実施方策 ● 話題提供者(ご発表 12 分+質疑応答 3 分): 1) 海洋研究開発機構 島村道代 調査役 2) 東京大学 道田豊 センター長・教授 3) 産業技術総合研究所 内藤航 グループ長 4) 花王株式会社 藤井健吉ディレクター ● コメンテータ(コメント 3 分): 1) 産業技術総合研究所 鳥村政基 副研究部門長 2) 愛媛大学 日向博文 教授 3) 東京都市大学 伊坪徳宏 教授 4) 東京大学 平尾雅彦 教授
14:50-15:00	<休憩>
15:00-15:50 (50min.)	<第二部: 我が国の環境リスク評価研究体制の在り方> ● テーマ: 目指すべき理想像、大学や資金配分機関の役割、何が欠けているか? ● 話題提供者(ご発表 10 分+質疑応答 5 分): 1) 名古屋大学 赤淵芳宏 准教授 2) 九州大学 大嶋雄治 教授
15:50-16:00	<休憩>
16:00-18:00 (120min.)	<第三部: 化学物質の環境リスク評価に関連する挑戦的な基礎研究開発課題> ● テーマ: 国として取り組むべき挑戦的な研究開発テーマ(短期、中長期)^{※1} ● 話題提供者(ご発表 12 分+質疑応答 3 分): 1) 花王株式会社 藤井健吉ディレクター 2) 国立医薬品食品衛生研究所 高橋祐次 室長 3) 農研機構 永井孝志 上級研究員 4) 愛媛大学 仲山慶 助教 ● コメンテータ(コメント 3 分): 1) 九州大学 高原淳 教授^{※2}
18:00-18:05	閉会挨拶 JST-CRDS

※1 ここでは「短期」は 5 年程度先まで、「中長期」はそれ以降の想定とした。

※2 諸事情により第三部の時間帯にご発表いただいたが第一部に関連するコメントをいただいた。

3. 国際会議等

(1) マイクロプラスチック汚染ラウンドテーブルに関する G7 科学的アドバイス協力会合

<開催日時> 2019 年 2 月 13 日 (水) 13:30~18:00

<開催場所> 在米カナダ大使館 (ワシントン D.C.、US)

<開催趣旨>

欧州委員会首席科学顧問グループ (EC Group of Chief Scientific Advisors) およびカナダ首席科学顧問 (Chief Scientific Advisor) によるイニシアチブに基づき開催。G7 首席科学顧問が各国の政策策定者に対してより良い科学的アドバイスを行えるよう、マイクロプラスチック汚染に関する情報 (健康および環境に対する影響を含む) を共有し、理解を深め、連携をより強めることを目指す。

<参加者> G7 の政府科学技術顧問、専門家、各国政府代表ら

<その他>

日本からは本戦略プロポーザル検討チームメンバーである有本、中村も参加した。各国の取組み状況や、科学的に明らかになっていること・明らかでないこと等が共有された^{※1}。

また議論の成果は「Co-Chairs' Summary」としてとりまとめられ、公開されている^{※2}。

※1 有本建男 (2019)、地球課題解決に向けた科学技術と政治のインターフェースの強化ー科学助言国際ネットワークとプラスチック海洋汚染の事例に見るー、Chemistry & Chemical industry 72、pp.393-394

※2 カナダ政府の首席科学顧問オフィス web ページ、
https://www.ic.gc.ca/eic/site/063.nsf/eng/h_97763.html、2020 年 3 月アクセス

(2) 第 8 回国際化学サミット

<開催日時> 2019 年 11 月 10 日 (日) ~13 日 (水) 終日

<開催場所> バーリントンハウス (ロンドン、UK)

<開催趣旨>

日英米独中 5 カ国の主たる化学会と研究資金配分機関が協力して隔年で開催している。各回テーマを設定し、化学の領域の最先端の科学者が各国から数名ずつ集まり、世界が直面する社会的な重要課題を取り上げて解決に資する糸口を探るために議論を実施。議論の成果はホワイトペーパーとしてとりまとめ、公開されている。今回は第 8 回であり、「Plastics」をテーマとし、以下 4 つのセッションに分けて議論を実施：①New Plastics、②Recyclability of plastics、③Degradation of plastics、④Measuring the impact of plastics。

<参加者> 化学会担当者、科学者、研究資金配分機関担当者ら

<その他>

日本からは日本化学会、科学者 5 名、JST (本戦略プロポーザル検討メンバーの宮下、中村) が参加。化学をはじめ科学技術が果たすべき役割・貢献について議論がなされた。議論の成果はホワイトペーパーとして 2020 年春に公開予定。

付録2. 海外動向（関連する研究プログラム・プロジェクト例）

欧州

（1）Horizon 2020 Framework Programme (H2020) のグラントデータベースから抽出された研究イノベーション関連プログラム

【検索条件】

- ・ URL :
<https://ec.europa.eu/info/funding-tenders/opportunities/portal/screen/opportunities/topic-search>
- ・ 検索年月：2020年2月
- ・ 検索条件：キーワードに「Plastics」を入力し、フォーカスエリアで「Connecting economic and environmental gains - the Circular Economy」を選択。
- ・ 検索結果：以下14件のプログラムが該当（下表）

表 H2020 下のプラスチック関連プログラム

公募切年	プログラム名
2018年	-Smart plastic materials with intrinsic recycling properties by design -Methods to remove hazardous substances and contaminants from secondary raw materials
2019年	-Microorganism communities for plastics bio-degradation -Upcycling Bio Plastics of food and drinks packaging -Sustainable solutions for bio-based plastics on land and sea
2020年	-Raw materials innovation for the circular economy: sustainable processing, reuse, recycling and recovery schemes -Improving the sorting, separation and recycling of composite and multi-layer materials -Pilot action for the removal of marine plastics and litter -Develop, implement and assess a circular economy oriented product information management system for complex products from cradle to cradle -Understanding the transition to a circular economy and its implications on the environment, economy and society -Develop and pilot circular systems in plastics, textiles and furniture sectors -Innovative textiles – reinventing fashion -A common European framework to harmonise procedures for plastics pollution monitoring and assessments -Plastics in the environment: understanding the sources, transport, distribution and impacts of plastics pollution

（2）EU 圏内の国内事例

- [英] 研究・イノベーション機構 (UKRI) による「Plastics Research and Innovation Fund」(2017年)
- ・ Engineering and Physical Sciences Research Council (EPSRC)、Innovate UK、Natural Environment Research Council (NERC)によって実施され、3つのファンディングから構成：
 - ①Leadership and Knowledge Exchange: UK Circular Plastics Network funding（約2.8億円（200万ポンド））
 - ②Research: Plastics ‘Creativity’ funding（約11億円（800万ポンド））

③Business led research and development: Plastics ‘Innovation’ funding (約 14 億円 (1,000 万ポンド))

- [仏] 環境・エネルギー管理庁 (ADEME) による「OBJECTIF RECYCLAGE PLASTIQUES」(2016 年)
 - ・再生プラスチックの産業における利用促進のため助成事業 ORPLAS で 68 プロジェクトを採択
- [仏] フランス海洋科学研究所 (IFREMER) による「MERLIN Microplastics」(2016 年)
 - ・ The Abyss/POPSTAR – A new-generation fish-tagging system/Microplastics
 - ・ 4 つの目的に沿って実施：①MPs 運命、サンプリング方法、②微生物叢の生息地としての plastisphere、③深海での MPs、④シチズンサイエンスによる沿岸域サンプリング
- [仏] 国立研究機構 (ANR) による「海洋環境中の MPs, NPs」(2016 年)
 - ・ 5 つの目的に沿って実施：①海洋環境中でプラ片的微細化プロセス、②微小粒子のサンプリング・特性評価方法論確立、③環境中（海水、堆積物、海洋生物）の分布、④海洋環境における MPs 運命、海洋生物に対する毒性評価、⑤MPs・NPs の海洋食物連鎖への移行、ヒト健康リスク評価
 - ・ 4 年間で総額 6,500 万円
- [独] ドイツ連邦教育研究省 (BMBF) による “MICRO-FATE” Project
 - ・ 太平洋における MPs ホットスポットと低濃度域間での MPs 運命の解明を目的とし、太平洋を横断（バンクーバー～シンガポール）する 5 週間の調査を実施。自然環境下でのプラ片的微細化プロセスについても船上で実験予定。
 - ・ ヘルムホルツ協会ドイツセンター (UFZ) が中心となりフランホーファーやライプニッツ協会等が参画
 - ・ 研究資金は BMBF からで総額約 1 億円（82 万ユーロ）、2021 年まで実施

米国

(1) 国内事例

- DOE（エネルギー省）エネルギー効率・再生可能エネルギー局と科学局による「Plastics Innovation Challenge」(2019 年)
 - ・ 2030 年までの達成目標を 5 つ掲げて実施：①海洋プラごみの回収技術の開発、②プラごみを有用化学物質へ転換する新規生物学的・化学的手法の開発、③プラごみを高付加価値物質へ転換（アップサイクル）する技術の開発、④リサイクルを予め考慮した設計の新規プラスチックの開発、⑤国内でのプラスチックのアップサイクル・サプライチェーンの拡大・実装を推進する技術の開発
 - ・ Manufacturing USA の一機関である REMADE Institute を通じて公募を実施（約 12 億円 (1,100 万ドル)、12-18 プロジェクト）。

- NSF（全米科学財団）Emerging Frontiers in Research and Innovation(EFRI)（2020 年）
 - ・ 1.分散型化学物質製造 (DCheM)、2.使用済みプラスチック除去のエンジニアリング (E3P)
 - ・ エンジニアリング総局が中心となり、生物科学総局、数理物理学総局、社会科学・行動科学・経済学総局とともに運営。DOE、NIST もパートナーとして参画。
 - ・ 総額約 33 億円（3,000 万ドル）、15 プロジェクト

■作成メンバー■

総括責任者：佐藤 順一	上席フェロー	(環境・エネルギーユニット)
リーダー：中村 亮二	フェロー／ユニットリーダー	(環境・エネルギーユニット)
メンバー：有本 建男	上席フェロー	(科学技術イノベーション政策ユニット)
小林 恵	主査	(プログラム戦略推進部)
二歩 裕	JST PM 育成・活躍推進プログラム研修生	
長谷川景子	フェロー	(環境・エネルギーユニット)
原田千夏子	副調査役	(未来創造研究開発推進部)
前川 智美	フェロー	(環境・エネルギーユニット)
松村 郷史	フェロー	(環境・エネルギーユニット)
宮下 哲	フェロー／ユニットリーダー	(ナノテクノロジー・材料ユニット)
吉田 有希	フェロー	(科学技術イノベーション政策ユニット)

※お問い合わせ等は下記ユニットまでお願いします。

CRDS-FY2019-SP-07

戦略プロポーザル

環境調和型プラスチック戦略

～化学物質としてのプラスチックの
安全な管理・活用を推進するための戦略的研究～

STRATEGIC PROPOSAL

Plastics Strategy in a Sustainable Society
- Strategic approach to research and development
for environmentally sound management of plastic wastes -

令和2年3月 March 2020

ISBN 978-4-88890-672-2

国立研究開発法人科学技術振興機構 研究開発戦略センター
環境・エネルギーユニット

Environment and Energy Unit,

Center for Research and Development Strategy, Japan Science and Technology Agency

〒102-0076 東京都千代田区五番町7 K's 五番町

電話 03-5214-7481

E-mail crds@jst.go.jp

<https://www.jst.go.jp/crds/>

©2020 JST/CRDS

許可無く複写／複製をすることを禁じます。

引用を行う際は、必ず出典を記述願います。

No part of this publication may be reproduced, copied, transmitted or translated without written permission.

Application should be sent to crds@jst.go.jp. Any quotations must be appropriately acknowledged.

ATTAATC A AAGA C CTAAC T CTCAGACC

CT CTCGCC AATTAATA

TAA TAATC

TTGCAATTGGA CCCC

AATTCC AAAA GGCCTTAA CCTAC

ATAAGA CTCTAACT CTCGCC

AA TAATC

AAT A TCTATAAGA CTCTAACT CTAAT A TCTAT

CTCGCC AATTAATA

ATTAATC A AAGA C CTAAC T CTCAGACC

AAT A TCTATAAGA CTCTAACT

CTCGCC AATTAATA

TTAATC A AAGA C CTAAC T CTCAGACC

AAT A TCTATAAGA CTCTAACT

ATTAATC A AAGA C CT

GA C CTAAC T CTCAGACC

0011 1110 000

00 11 001010 1

0011 1110 000

0100 11100 11100 101010000111

001100 110010

0001 0011 11110 000101

ISBN-978-4-88890-672-2

