

船底防汚塗料の海洋環境リスク評価手法の 国際標準化

千田 哲也*

International-standardization of marine environmental risk assessment methods on anti-fouling systems on ships

by

Tetsuya SENDA

Abstract

Since the AFS Convention, adopted at IMO in the year of 2001, globally prohibited the use of organotin compounds in ship's anti-fouling paints, tin-free active substances have been used in the paints. However, there are no assessment methods available as a global standard for the effects on marine eco-systems of these anti-fouling paints. Activities thus have been carried out for establishing an international standard of marine environmental risk assessment method on anti-fouling systems on ships. The risk assessment method consists of two parts: Part 1 on active substances and Part 2 for anti-fouling paints. Both are based on exposure- and hazard-assessments, and the risk is eventually evaluated by calculating the ratio of PEC (predicted environment concentration) derived from exposure assessment and PNEC (predicted no effect concentration) by hazard assessment. These methods could provide guidelines examining the proposal submitted to IMO for adding a compound to the prohibited substance list, Annex 1 to the Convention. They are also available for a marine environmental risk assessment when establishing an industry's self-approval system of anti-fouling paints.

* 海洋環境評価系
原稿受付 平成23年 8月 19日
審査日 平成23年 9月 29日

目 次

1. はじめに	58
2. 防汚塗料とその規制	58
2.1 AFS 条約の採択と有機スズ規制	58
2.2 わが国における規制	59
2.3 海外における規制	60
3. ISO 13073 の提案と審議	60
3.1 国際標準の必要性と意義	60
3.2 海洋生態系へのリスク評価手法	61
3.3 国際標準化の趣旨	61
3.4 主な内容	62
3.5 審議の経過	62
4. 活性物質のリスク評価	63
4.1 暴露評価と有害性評価	63
4.1.1 暴露評価	63
4.1.2 有害性評価	64
4.2 リスク評価のスキーム	64
4.2.1 有機化合物の評価スキーム	64
4.2.2 無機化合物の評価スキーム	66
4.3 リスク判定	67
5. 防汚塗料のリスク評価	67
6. おわりに	68
参考文献	69

1. はじめに

船舶の海水との摩擦抵抗は船体表面の粗度に非常に強く依存し、船体外板の生物付着は表面粗度を増大させて燃料消費が著しく増加する。生物付着による船底の汚れ（fouling）は、経済性の悪化だけでなく、塗装表面を浸食して防食効果を低下させることがある。さらに、船体に付着して生物が越境移動すると、海洋生態系の攪乱を促進する。このため、船舶は、没水部表面に生物付着を防止する塗料、すなわち防汚塗料（anti-fouling paint）を塗装している。防汚塗料として、一部には、表面の物理的性質により生物付着を防止する塗料（生物の付着力を弱めて航行中に脱落させることにより防汚機能を保持するものでシリコーン樹脂系が代表的）が使用されているが、多くは防汚機能を示す成分、すなわち活性物質（active substance）を非常に緩慢な速度（数～数十 $\mu\text{g}/\text{cm}^2/\text{day}$ ）で海水中に溶出させ、表面近傍での殺傷または忌避作用により生物の付着を防止している。このような塗料は、意図した付着生物以外の海生生物にも悪影響を与える可能性があり、海洋環境保護の観点から、事前に生態系へ

の影響を評価して、有害性が許容範囲にあることを確認する必要がある。このために、船舶の防汚塗料の海洋環境リスク評価手法を国際標準化（ISO）する作業が進められている。本稿では、その背景、趣旨、概要等を紹介する。

2. 防汚塗料とその規制

2.1 AFS 条約の採択と有機スズ規制

防汚塗料の多くは、塗膜中に含まれる防汚機能を有する活性物質を、量溶出させる。これらの物質は、殺生物剤（バイオサイド；biocide）の一種で、農薬、抗菌剤等と似た性質を持つものが多い。図-1 は、海水に浸漬された防汚塗装の断面写真である。塗膜中の白い粒子は活性物質である亜酸化銅であり、表面近傍には、亜酸化銅が溶出した後にスケルトン状になった塗膜が観察される。

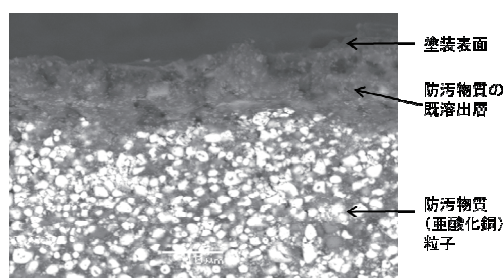


図-1 防汚塗料断面で観察される活性物質

これまでに防汚目的で使用されてきた物質には、現在も広く使用される銅化合物の他、タール、ピッチ、鉛、ヒ素化合物、水銀化合物、DDT（ジクロロジフェニルトリクロロエタン）等がある。1960 年代になって、有機化学物質による防汚システムが開発され、その代表的な活性物質は TBT という略称で知られるトリブチルスズ（tributyltin）と TPT とよばれるトリフェニルスズ（triphenyltin）である。有機スズ化合物は優れた防汚機能を示したが、海水や底泥（海底の土砂）中に長期間残留し、また、多くの海生生物に蓄積することがわかり、生態系に深刻な影響が生じていることが報告された。特に、メスの巻貝（イボニシ）にオスの生殖器が形成される現象（インボセックス）は、内分泌攪乱作用の代表例として知られている。

この問題に対処するために、わが国では、日本造船工業会が 1990 年頃から使用自粛措置をとり、日本塗料工業会は 1997 年までに有機スズ系防汚塗料の国内製造を完全に中止した。しかし、国際

航海をする船舶の環境問題は、国際的に強制力のある措置が必要であることから、有機スズ問題が国際海事機関（IMO）に提起され、1990年の第29回海洋環境保護委員会（MEPC）で審議が始まった。10年にわたる審議を経て、2000年10月の第45回MEPCで新条約案を承認、2001年10月の外交会議で「2001年の船舶の有害な防汚方法の規制に関する国際条約」（International Convention on the Control of Harmful Anti-fouling Systems on Ships, 2001; 通称 AFS 条約）が採択されるに至った。AFS 条約は、2007年9月に発効要件である25カ国、船腹量25%以上の国の批准を得て、2008年9月に発効した。

AFS 条約は、第4条に基づき、禁止すべき有害な防汚方法（防汚塗料の塗布）を附属書1（Annex 1）に規定している。現在、Annex 1には、禁止対象として有機スズ化合物（Organotin compounds which act as biocides in anti-fouling system）だけが掲載されている。一方、この条約の審議の過程で、有機スズを含まない防汚塗料（非スズ系防汚塗料）についても海洋環境影響が問題となる可能性が指摘されていた。条約では、新たに有害と判断された物質を Annex 1 に追加することができるが、そのためには、Annex 2 にしたがって対象物質の有害性の根拠となる情報を「当初提案」（Initial proposal）として IMO へ提出する必要がある。さらに、禁止のための詳細検討を行うことが妥当と判断された場合は、リスク評価を行うために Annex 3 に示された詳細な情報を「包括的提案」（Comprehensive proposal）として提案国が提出し、MEPC の下に設けられる技術グループで検討が行われる。技術グループから禁止の勧告があれば、MEPC での合意を得て Annex 1 の改正（新規物質の追加）が決定される。

活性物質の環境影響評価は膨大なデータを必要とする複雑なプロセスであり、標準的な手法と

して確立したものがない。条約では提案に必要なデータの項目を列挙しているが、評価や判定の方法は定められていない。このため、IMO では AFS 条約採択に付随して表-1 に示すような決議を採択し、Annex 3 に規定する新規対象物質追加の際の詳細検討の内容を考慮し、防汚方法の承認等に努めること（Resolution 3）、及び防汚方法の試験・評価方法及び性能基準の調和のための作業を継続すること（Resolution 4）を決議として各国に要請している。しかし、IMO では、これ以降、具体的な取り組みはなく、非スズ系防汚塗料の評価は、課題として残されている。

2.2 わが国における規制

AFS 条約に規定される有機スズの禁止は、国内法としては船舶安全法に基づく船舶安全法施行規則（第65条）に定められている。これは、AFS 条約に対応して有機スズの使用のみを禁止する規定であり、防汚塗料について一般的な有害性を判断する基準等は定められていないため、他の非スズ系活性物質を含む塗料の規制への拡張は困難である。

一方、一般の化学物質は、3省（厚生労働省、経済産業省、環境省）の所管する「化学物質の審査及び製造等の規制に関する法律」（化審法）で規制されている。化審法は、難分解性でかつ人の健康を損なうおそれがある化学物質による環境の汚染を防止するために1973年に制定された。その後、2009年の改正（改正化審法）により、包括的な化学物質管理の実施によって有害化学物質による人や動植物への悪影響を防止するため、化学物質の安全性評価に係る措置を見直すとともに、国際的動向を踏まえた規制合理化のための措置等を講ずることとされ、2010年から段階的に使用制限措置等の施行が始まっている。

改正化審法では、我が国で製造、輸入される化学物質について、製造・輸入者からの届出に基づ

表-1 AFS 条約とともに採択された IMO 決議の一部

Resolution 3	The Conference invites States to approve, register or license anti-fouling systems applied in their territories, bearing in mind the information contained in Annex 3 of the Convention.
Resolution 4	The Conference urges States to continue the work, in appropriate international fora, for the harmonization of test methods, assessment methodologies, and performance standards for anti-fouling systems containing biocides.

き、以下の観点から審査し判定を行っていくことになっている。

- ・ 自然的作用による化学的変化を生じにくいかどうか（分解性）
- ・ 生物の体内に蓄積されやすいかどうか（蓄積性）
- ・ 継続的に摂取される場合には、人の健康を損なうおそれがあるかどうか（人への長期毒性）
- ・ 動植物の生息若しくは生育に支障を及ぼすおそれがあるかどうか（生態毒性）

評価された化学物質は、性状に応じて以下のよう
に分類され、製造・輸入の許可、使用の制限等
が課せられる。

- ・ 第一種特定化学物質：難分解性、高蓄積性及び人又は高次捕食動物への長期毒性を有する化学物質
- ・ 第二種特定化学物質：人又は生活環境動植物への長期毒性を有する化学物質
- ・ 監視化学物質：難分解性でかつ高蓄積性があると判明した既存化学物質
- ・ 優先評価化学物質：環境への暴露量が高く且つ人及び生態毒性が高いことから、優先的に安全性評価を行う必要がある化学物質

防汚塗料に用いられるほとんどの活性物質はこれらに含まれるため、今後順次審査の対象となる。しかしながら、化審法自体には海洋生態系への影響を評価する手法は定められておらず、評価手法の構築が必要である。

2.3 海外における規制

海外ではいくつかの国で防汚塗料の認証制度が制定されている。代表的なものは、欧州連合（EU; European Union）のバイオサイド指令（BPD; Biocidal Products Directive）と米国の農薬関連規制（FIFRA; Federal Insecticide, Fungicide and Rodenticide Act）である。

BPD¹⁾は、バイオサイド製品（biocidal products）の欧州内の市場の調和をはかりつつ、高いレベルで人、動物及び環境を保護することを目的として 1998 年に欧州議会（European Parliament）で採択され、2000 年 5 月に発効している。EU で輸入・製造されるバイオサイド製品とそれに含まれる活性物質の安全性評価と登録制度の指針である。バイオサイド製品とは、化学的または生物学的手段により、有害な生物活動を抑制する製品とされ、用途（PT; product type）として 23 分類あり、船底防汚塗料は PT21 の防汚製品（antifouling product）に含まれている。防汚製品とは、船底、養殖、その他水中内で使用する構

造物への汚損生物の成長、付着を抑制するために使用する製品と定義されている。

米国では、農薬規制 FIFRA の一環として防汚塗料認証制度がある。FIFRA は BPD と同様にリスク評価の考え方に立っているが、以下の相違点がある。

- ・ 毒性試験をすべき生物種が FIFRA の方が BPD より多い（鳥、陸上植物が必要）。
- ・ 生分解性試験条件では、BPD は海水のデータが必要だが、FIFRA は淡水のみである。
- ・ 評価係数（assessment factor）の基準が異なる。
- ・ FIFRA は、底生生物での毒性試験要否の判断基準が BPD と比較して明確である。

3. ISO 13073 の提案と審議

3.1 国際標準の必要性和意義

防汚塗料の海洋生態系への影響については、AFS 条約で有機スズが禁止され、欧米などいくつかの国では個別の認証制度が整備されている。しかし、船舶建造・修繕等のための塗料消費量が多いアジア地域には、日本を含め、適切な認証制度が確立されていない。有機スズの禁止で先導的な役割を果たしたわが国が、非スズ系防汚塗料の海洋環境影響評価手法の標準化においてリーダーシップをとる必要がある。

AFS 条約の非スズ系活性物質への拡張は有力な方法であるが、条約には必要なデータの項目が指定されているだけで、その評価方法や判断基準は示されていない。また、AFS 条約は、禁止する物質をリスト化する方式（negative list 方式）であり、禁止したい物質の有害性を示すデータを提示しなければならない。有機スズは、有害性が指摘されてから広範な研究が行われ、豊富なデータが公開情報として得られた。しかし、非スズ系活性物質は、具体的な環境影響がいまのところ指摘されておらず、毒性評価を含め物質に関する公開データは限定的である。しかし、環境保護のためには、影響が顕在化する前に普及を防止する予防措置が重要であり、そのためには、製造者側が有害性が低いことを示す方式（positive list 方式）が必要である。

事実、欧米等で施行されている認証制度は、positive list 方式である。しかし、欧米の規制は他のバイオサイドを含む汎用的な制度の中にあるため、防汚目的の活性物質には必要ない過剰なデータが要求されており、結果として製造者側に過大な負担となっている。このため、すでに開発

費が回収されている既存製品は別として、新規製品の市場投入は困難であり、より環境負荷の低い物質の開発をも妨げる可能性がある。

一方、近年、企業が製品の環境適合性を自ら示すことは、必ずしもコストを要するだけでなく、むしろ環境に配慮する企業としての宣伝効果を有する時代となってきた。このため、適切なコストであれば、業界の自主認証制度を構築することも可能である。事実、木材防腐剤では木材保存協会の認定制度、抗菌プラスチックでは抗菌製品技術協議会の登録制度(SIAA マーク)、抗菌繊維では繊維製品新機能評価協議会による認証制度(SEK マーク)などが運用されている。ただ、船舶は市場が国際的であるため、認証の基準が国際的に認知されていることが必要である。

このような状況の中で、防汚塗料の海洋環境リスク評価手法を国際標準(ISO)化することは、わが国の産業界における防汚塗料の自主的な認証制度の制定に向けて評価手法を確立すること、AFS 条約において新たな禁止物質が提案される場合に、その有害性の判断の根拠を提供すること等の意義があるほか、現在規制の行われていないアジア諸国への規制導入に際して標準的な評価手法を提供することにもなり、制度の導入を促進するだけでなく、国毎に違った制度が導入されることの抑制も期待できる。

3.2 海洋生態系へのリスク評価手法

化学物質の環境影響では、近年はリスク評価手法が用いられる。リスクとは、健康被害や生態系攪乱などの「よくない出来事」が起きる可能性とその出来事の重大さを組み合わせて、被害が生じる可能性を表現するものであり、悪い影響を起こす可能性を有する物質(あるいは活動)を意味するハザードとは区別される。従来の化学物質の規制はハザード評価に基づき、毒性の強い物質の使用を制限するものであったが、リスク評価ではその物質の暴露量(摂取量)を考慮して計算される「害を引き起こす確率」を基礎に置いている。まずハザードつまりリスクの根源を特定し、つぎにエンドポイント(影響判断点)すなわち想定される「よくない出来事」を決定する。さらに、暴露評価(exposure assessment)により暴露量の推定を行い、毒性試験等に基づく有害性評価(hazard assessment)から得られる用量反応関係を使って、暴露量に対応するリスクが計算される。活性物質を含む防汚塗料は、有害な生物の殺滅や忌避という効用(benefit)がある一方で、意図しない生態系に対しても有害な影響(risk)がありうる。効用に応じて許容できるリスクを定め、

使用量の増加に伴い増大するリスクに対して、許容範囲となるよう防除措置を講じるか使用を抑制するなどの対策をとるのがリスク管理であり、管理のツールが、リスク推定に基づく環境リスク評価である。

防汚塗料に関する環境リスク評価において、ハザードは活性物質(及びその分解生成物)であり、エンドポイントは塗装作業者の健康被害、食用海生物経由の人の摂取による健康被害、そして海生物の殺傷による海洋生態系の破壊などである。本標準は、これまでの確な規制がなかった海洋生態系破壊をエンドポイントとしており、図-2に示すようなフローとなる。有害性評価として予測無影響濃度(PNEC; predicted no-effect concentration)を、また暴露評価として予測環境濃度(PEC; predicted environmental concentration)をそれぞれ推定する。二つのパラメータの比PEC/PNECの値が1を越える場合には、環境濃度の予測値が影響が懸念されるレベルであることを意味し、何らかの対策を必要とする。また、生物への蓄積しやすさを示す生物濃縮係数(BCF; bioconcentration factor)や、分解性の指標である水中や堆積物中濃度の半減に要する日数で示す半減期(HL; half life)、生殖毒性、内分泌攪乱作用に関してもそれぞれ基準が設定されている。

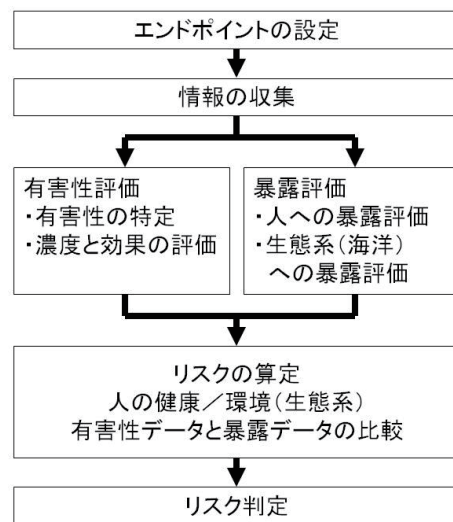


図-2 化学物質の環境リスク評価のフロー

3.3 国際標準化の趣旨

国際標準化機構船舶及び海洋技術専門委員会海洋環境保護小委員会(ISO TC8 SC2)において、海洋環境リスク評価の観点から防汚塗料の評価を行うための手法を国際標準化するための審議

を進めている。環境リスク評価手法の標準化は、ISO としてきわめて異色で画期的なものである。本来、こうした評価は、公権力をもつ行政機関により法的な根拠をもって実施されるものであるが、適当な法規制がない場合に民間の標準である ISO を制定することにも意義がある。まず、産業界が自主的に製品の環境適合性を示したい場合の評価ツールとなり、国毎の法令に基づくものと異なり国際的に統一した評価が可能となる。このために、標準化される評価手法は、まず科学的に妥当とみなされるものでなければならない。また、これに基づく認証制度等が現実的な運用が可能な (pragmatic) ものではない。必要な経費が過大でないことは、世界で広く使用されるうえで重要である。また、欧米の規制等の先行する法令と要求データをできるだけ共通化することも、国際的な調和 (harmonization) や必要経費の抑制の観点から重要である。

本標準は評価手法を規定するものであって、規制や認証の制度ではない。すなわち、本標準を用いて得られる結果は、リスクが低いか高いか(「低リスク」、「比較的低リスク」、「リスク懸念」の3水準)の評価であって、使用の可否の判定を直接与えるものではない。規制や認証の制度は、本標準とは別に構築されるべきもので、本標準はそのなかで評価に用いられることを想定している。本標準で与えられる「低リスク」と「比較的低リスク」という評価は認証可能、「リスク懸念」は認証不可の判定に対応するが、実際の認証制度では、「リスク懸念」であっても使用数量の制限やモニタリングの実施等の条件を付加することで認証される場合や、「低リスク」であっても防汚効果が明確でないことで認証されない場合もありうる。

3.4 主な内容

本標準の対象は船底塗料であり、同じく防汚機能を持つものでも漁網防汚剤や発電所(海水取水口等)の塗料は含まない。船舶用途に限定することで、必要な試験項目を的確に定めることができる。評価手法は、化学物質のリスク評価手法としてもっとも系統的に整備されている BPD で用いられる方法に可能な範囲で準拠し、BPD 申請とデータの相互利用を可能としている。評価に用いる個々のデータについて、その試験方法を特定しないが、OECD、米国環境省 (US EPA)、ISO、ASTM 等で規定されるなど、公的に認知された方法を使い、優良試験所基準 (GLP; Good Laboratory Practice) または ISO 17025 等の基準に適合した試験機関で実施することを求め、データの

質を確保している。

防汚塗料は防汚機能をもつ生物殺傷活性物質 (biocidally active substance) を含むシステム (anti-fouling system) であり、活性物質とシステム (防汚塗料製品) の2つのパートに分けて海洋生態系へのリスクを評価する。まず、Part 1 (ISO 13073-1) では、活性物質を対象として、物質としてリスクを評価する。Part 2 (ISO 13073-2) では、活性物質を含む塗料製品の評価を、Part 1 で評価されたデータを使って実施する。あらかじめ活性物質の評価を実施することで、塗料毎に活性物質の詳細なデータの準備を必要としない評価体系としている。なお、Part 3 として、塗装作業への影響 (Workers' Exposure) を評価する手法も標準化する予定であるが、本稿では取り上げない。

3.5 審議の経過

国際標準の制定は、図-3 のような手順で審議が進む。本標準の場合、2005 年度から国内及び海外の塗料メーカ、活性物質メーカ等と協議を続けるとともに、ISO TC8 SC2 において、将来テーマとしての予備検討を始め、2008 年 7 月にワーキンググループ参加予定者の会合を開催した。これらの事前準備を経て、2008 年 9 月に活性物質の海洋環境リスク評価手法 (Part 1) の新規作業項目提案 (NP; New Work Item Proposal) を行い、TC8 SC2 メンバーによる投票で承認され、12 月に採択されてワーキンググループ (TC8 SC2 WG5) が発足した。ISO 番号は 13073-1 が割り振られた。その後、2009 年 11 月に CD (Committee Draft) 投票が行われ、DIS (Draft International Standard) 投票が 2011 年 1 月に

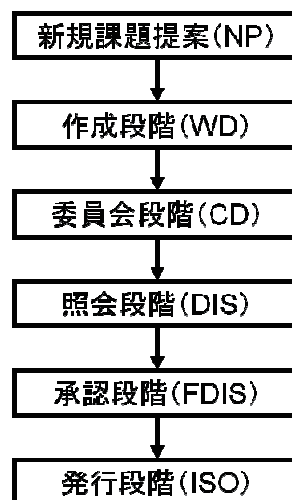


図-3 国際標準 (ISO) の審議のフロー

開始され6月に承認された。2011年中には FDIS (Final Draft International Standard) 投票が開始され、2012年4月頃にISOとして発行される見通しである。一方、防汚塗料の海洋環境リスク評価手法(Part 2)は、2010年5月に新規作業項目採択の投票に付された。投票の結果、SC2メンバーの賛成を得て2010年11月にWD (Working Draft) 登録され、CD投票を経てDIS投票に向けた準備中である。この標準化は、日本提案として着手され、日本側は、日本財団の助成により財団法人日本船舶技術研究協会に設置された作業グループを中心に意見のとりまとめを行い、国際塗料印刷インキ協議会(International Paint & Printing Ink Industry Council)の防汚塗料作業部会の協力を得て、作業を進めている。

4. 活性物質のリスク評価

活性物質のリスク評価(13073-1)は、有機化合物と無機化合物のそれぞれにスキームを作成している。いずれも、暴露評価と有害性評価からなり、暴露評価から得られる予測環境濃度(PEC)と有害性評価から得られる予測無影響濃度(PNEC)の比で評価される。

4.1 暴露評価と有害性評価

4.1.1 暴露評価

暴露評価は、活性物質が船体から海水に溶出する速度(溶出速度)の推定、対象とする海域に対応する排出シナリオ(emission scenario)の選定、排出シナリオに基づく数値モデルを使った拡散計算の各過程からなる。得られる濃度分布から、最大値をPECとする。

防汚塗料の設計上も重要な指標である溶出速度は、環境中に当該物質がどの程度放出されるかを見積もる上での基本データであり、実験または計算で求めることができる。活性物質はいろいろな塗料で用いられ、塗料によって溶出速度が異なるため、活性物質に固有の溶出速度があるわけではないが、リスク評価を行うために代表値が必要であるため、現実的な塗料を設定して溶出速度を求める。

本標準では、Annex Aに主な溶出速度測定方法を掲載し、これらの中から選択することが望ましいとしている。リスク評価にもっとも適する方法はISO 10890として規格化された計算法である²⁾。これは、塗装された活性物質が塗膜寿命の間に平均的に溶出すると仮定して求めるもので、マスバランス法とよばれる。実験的な方法としては、ISO及びASTMで定められた回転円筒試験(ISO 15181シリーズ等)が代表的である³⁾。これらは、相対的な評価を行う方法として構築された試験であり、得られる溶出速度は現実のものに比べて大幅に過大で、リスク評価のように溶出速度の絶対値を必要とする場合には適さない(適切な修正係数で補正する必要がある)とされている。実海域で停泊中の船体から直接測定する方法⁴⁾も報告されている。この結果では、停泊中はマスバランス法の計算よりもさらに溶出速度が低くなるため、Annex Aでは、港湾等で停泊中の船舶からの溶出を推定する場合は、マスバランス法であっても修正係数を用いることも現実的であると注記している。

排出シナリオでは、評価の対象と考えている海域のタイプ毎に、溶出と拡散の条件を設定する。リスクを評価するためには、現実的な範囲で最悪のケース(realistic worst case)を想定する必要

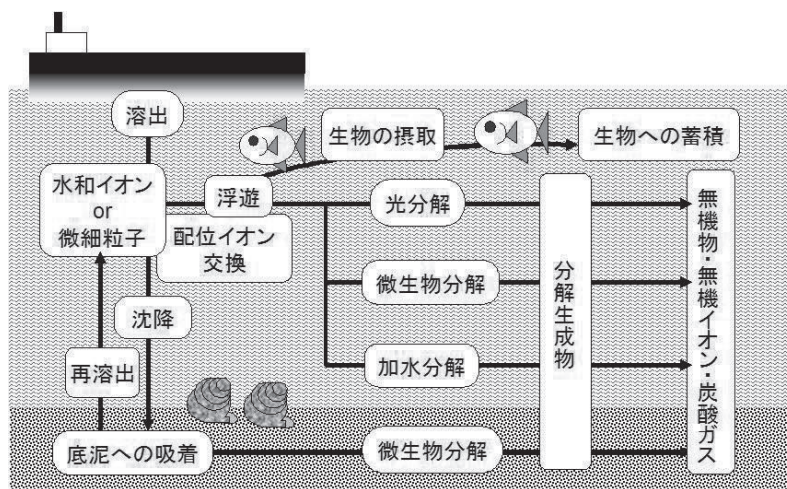


図-4 活性物質の海中での挙動

がある。防汚塗料に関する排出シナリオは、OECDで設定されたものが代表的である⁵⁾。大洋、航路、港湾、マリーナの設定があり、船舶の数、海域の大きさ、海水の性質、潮汐等による交換の条件等を設定する。

排出シナリオ毎に、数理モデルを使った拡散シミュレーションで濃度分布を計算する。この中には、光や微生物による分解、底泥への吸着等の過程も含まれる。活性物質の海水あるいは底泥中の挙動は、図-4に示すように複雑であり、完全に解明されているわけではない。しかし、光や微生物による分解速度等のデータがあれば、一般に公開された計算モデルを用いて濃度分布の推定を行うことができる。主なモデルは、Annex Hにまとめているが、Delft大学で開発されたMAMPECが代表的である。別のモデルを使うことも可能であるが、検証(validation)されていることが必要である。

4.1.2 有害性評価

有害性は予測無影響濃度(PNEC)で表し、さまざまな毒性試験から、生物に影響を与えない濃度の最小値を求め、これをさらに評価係数(assessment factor)で割った値として定義される。慢性毒性試験から得られる最大無影響濃度(NOEC)あるいは急性毒性試験から得られる半数致死濃度(LC₅₀)または半数影響濃度(EC₅₀)を用いる。PNECは、環境の各部分(海水(PNEC_{sw})、底質(PNEC_{sed})の他、捕食動物(PNEC_{pred})に対するものをそれぞれ評価する必要がある。毒性試験の方法は、OECDや米国環境省(US EPA)等で定められた方法があり、そのリストはAnnex Eに掲載している。

評価係数は、毒性試験の不確実性を補正するための係数で、根拠とする毒性試験の種類(急性毒性か慢性毒性か)と数(対象生物種の範囲)が少ない場合は高く、広汎な生物種から慢性毒性を評価する長期試験を含む場合は低い値を用いることができる。Annex Fには、BPDに示された評価係数を掲載しており、通常は最大10,000から10までの値から選択する。

4.2 リスク評価のスキーム

活性物質のリスク評価は、有機化合物と無機化合物で異なる点があるため、それぞれ別に定めている。有機化合物(亜鉛ピリチオン、DCOIT等多数)はAnnex Bに、無機化合物(主に亜酸化銅)はAnnex Cに詳細を記述している。

4.2.1 有機化合物の評価スキーム

有機化合物のリスク評価は、残留性(persistence)、生物蓄積性(bioaccumulation)、毒性(toxicity)で判定され、そのスキームを図-5に示す。残留性は半減期(HL; half life)で、生物蓄積性は生物濃縮係数(BCF; bioconcentration factor)で、それぞれ表される。HL及びBCFの試験方法は、Annex Eに掲載されている。毒性に関しては、4.1で述べた方法でリスクが計算される。

本標準では、環境負荷の低い防汚システム開発の促進と、現実的な認証制度をサポートするために、段階的な評価システムとしてティア(tier)制とレベル(level)制を採用している。ティア制では、特に環境負荷が低いとみなせる物質を優遇するためのTier 1と、通常の物質に対するTier 2からなる。Tier 1では、易分解性・低蓄積性(HL<15 d, BCF<100)の物質に対しては、PEC/PNEC<1であれば、経費を要する分解産物の同定等の試験がなくても、失活試験により分解により生物への活性が失われることが確認されることを条件に「低リスク」と判定する。こうした物質は防汚物質としてはあまりないが、より有害性の低い物質の開発の動機付けとなることも想定して設定されている。通常の活性物質はTier 2に進むことになるが、高蓄積性(BCF>2,000)の物質は、本スキームでは他の指標の値にかかわらず「リスク懸念」に分類される。

Tier 2は、二段階のレベルに分けて評価を行う。これは、多額の経費を要する試験を最初からすべて要求するのではなく、分解性と蓄積性のどちらかが比較的低い物質に対して、Level 1において一部のデータで仮判定を行うシステムで、「相対的低レベル」に分類される場合には、一定期間は残りのデータ提出が猶予される。この標準を使った認証制度においては、この仮判定で期間を限定して認証し、製品を市場に出しつつ追加データの取得により次の段階(Level 2)の準備を行うことができる。このことにより、開発に要する経費を一部回収しつつ多額の経費を要する評価に必要なデータを取得することが許容され、制度の現実的な運用と、環境負荷の低い新製品の開発促進の効果が見込める。

Tier 2のLevel 1においては、以下の2つの基準のいずれかに該当する物質(比較的低蓄積性または易分解性)であれば、一時的に「相対的低レベル」の評価となる。

- ・ BCF<100, HL<60 dで失活が検証,
Kp<2,000, PEC/PNEC<1
- ・ BCF<1,000, HL<15 dで失活が検証,

$K_p < 2,000$, $PEC/PNEC < 1$
 ここで、 K_p は、土壌吸着係数の最大値(maximum

soil adsorption coefficient) である。
 Level 1 において「相対的低レベル」に分類さ

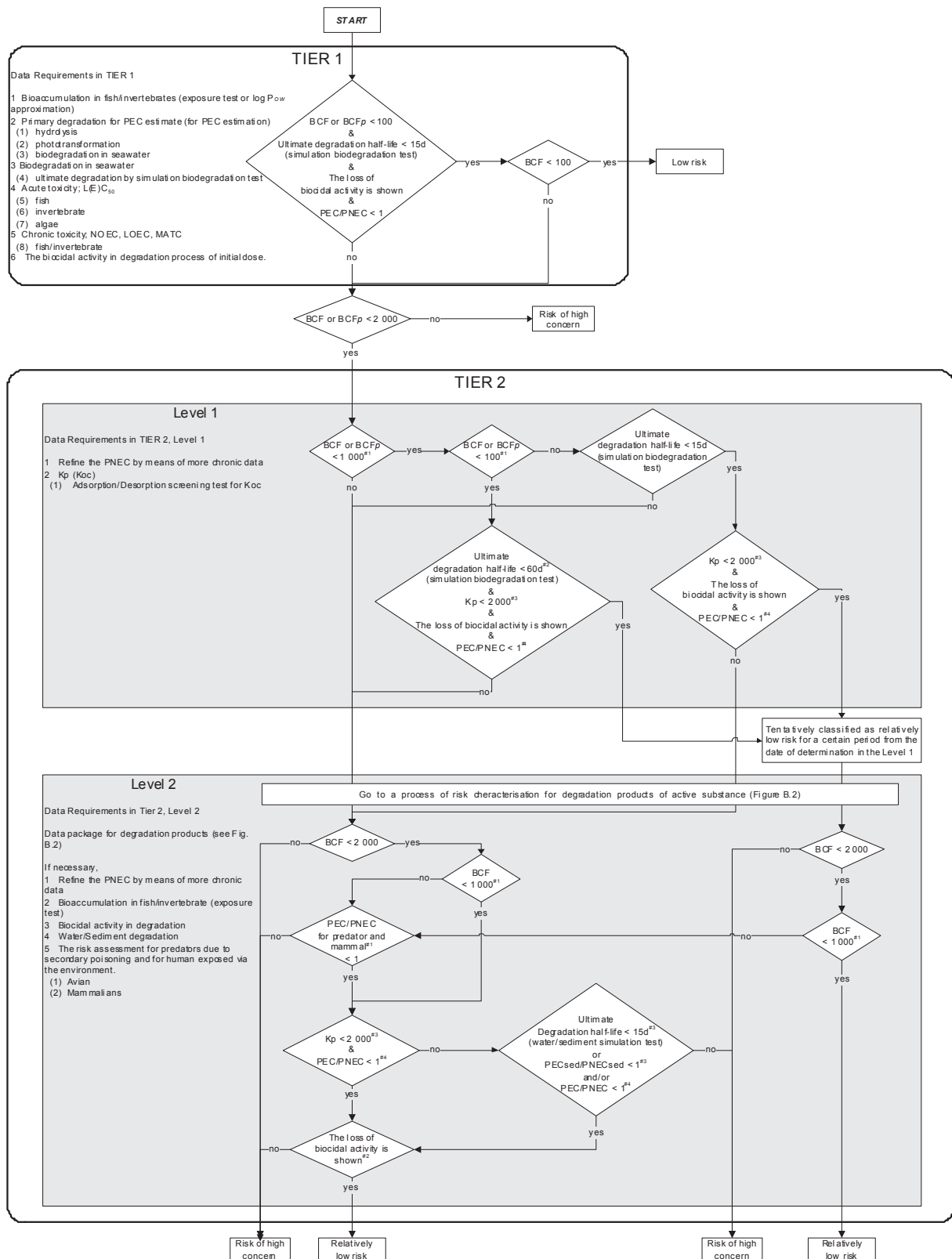


図-5(a) 有機系活性物質のリスク評価のフロー (その1: 原物質のフロー)

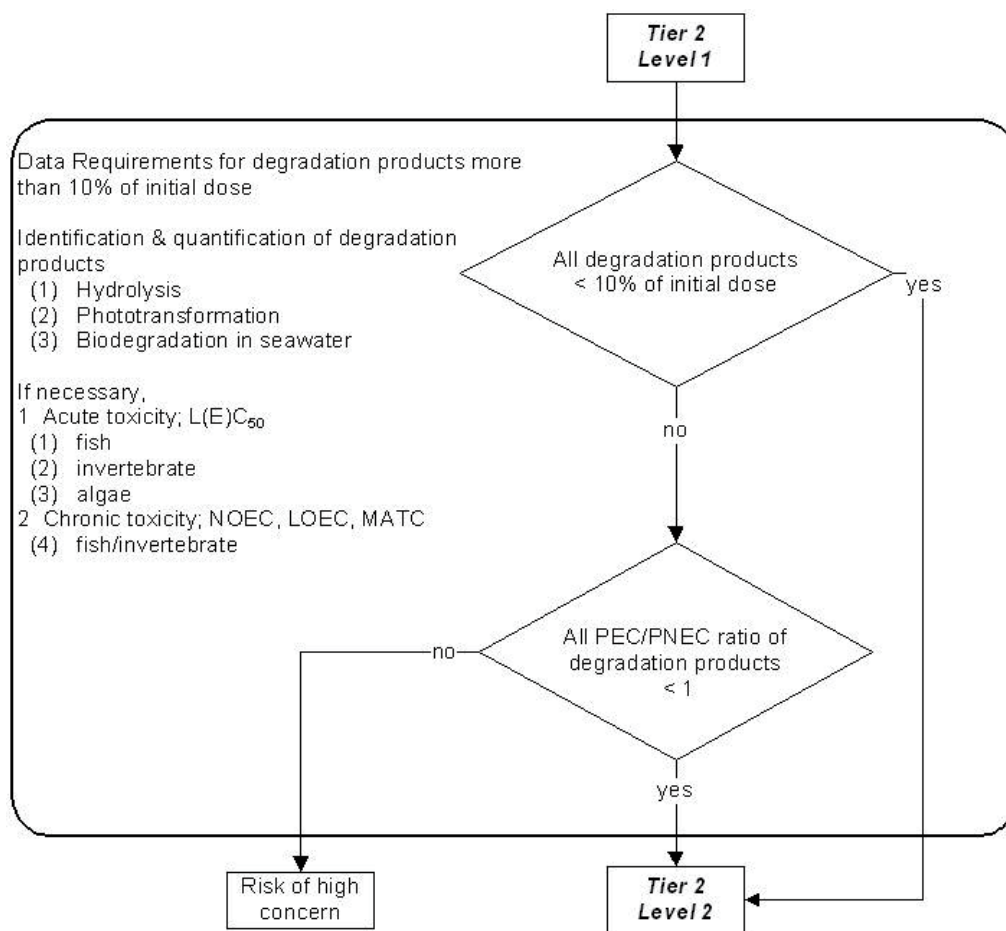


図-5(b) 有機系活性物質のリスク評価のフロー（その2：分解産物のフロー）

れなかった物質と、「相対的低レベル」で一定期間を経過した物質は、Level 2 の評価を受ける必要がある。Level 2 では、生物蓄積性については、(i) $BCF < 1,000$ であるか、または 1,000 以上 ($< 2,000$) であっても捕食者・ほ乳類の $PEC/PNEC < 1$ であること、(ii) 底泥への蓄積性が低いこと ($Kp < 2,000$ 等で示す) 物質であること、(iii) $PEC/PNEC < 1$ であることのほか、(iv) 原物質の 10% 以上を占める分解産物について $PEC/PNEC < 1$ の場合に、「相対的低レベル」との判定が与えられる。

4.2.2 無機化合物の評価スキーム

無機化合物（代表的な物質は亜酸化銅； Cu_2O ）についても、リスク評価の骨格は有機化合物と同様である。しかし、いくつかの点で、有機化合物と大きく異なっている。

無機化合物では、活性を示すのは防汚物質として用いられる金属化合物であるより、海水中に溶解した金属イオンである場合が多い。このような

金属イオンは、バックグラウンドとして環境に一定量が存在し、生物にとっても必須元素として取りこまれるものであり、有機化合物がもともと環境に存在しない物質であるのと異なる。また、生物学的利用能 (bio-availability) を考慮した濃度推定が必要で、活性は金属イオンとして存在する場合に高く、有機化合物に結合して安定化している場合には低いことに留意する必要がある。暴露評価においては、バックグラウンド濃度や生物学的利用能を考慮した推定が必要であり、可能であれば実環境の濃度測定結果を用いるべきである。

有害性評価においても、有機化合物では二酸化炭素と水に分解されることを前提として残留性や生物蓄積性の評価がなされるのに対して、金属系の無機化合物では、海水流動による拡散や有機化合物への結合・安定化による活性の消失が除去過程であり、分解性・蓄積性の考え方が有機化合物とは異なる。また、金属化合物は天然に産出する鉱物として古くから知られており、信頼性の高い豊富なデータがすでに利用可能であるため、評

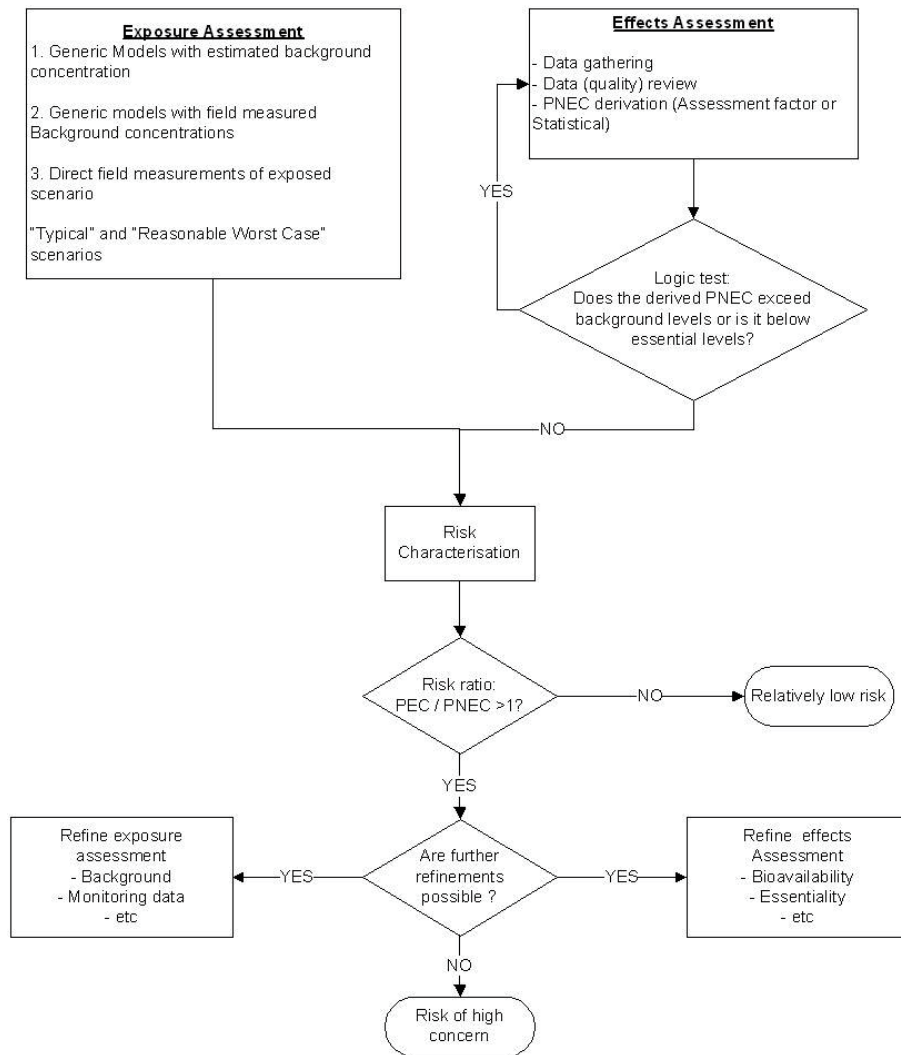


図-6 無機系活性物質のリスク評価のフロー

係数は一般に低い値となる。実環境の多様なデータに基づいた統計的な手法により有害性の確率を計算する方法（SSD; Species Sensitivity Distribution Approach）を適用できる場合は、1～5 という値も可能である。

これらの特性を考慮したリスク評価のスキームは図-6 のように表される。

4.3 リスク判定

リスクは、予測環境濃度と予測無影響濃度の比（PEC/PNEC）で判定する。予測環境濃度が予測無影響濃度より低い（PEC/PNEC<1）場合はリスクは低い（低リスク；low risk）または許容できる程度に低い（相対的低リスク；relatively low risk）とみなすことができ、高い（PEC/PNEC>1）場合は、リスクが高い（リスク懸念；risk of high concern）とみなされる。前述の通り、本標準は、リスク評価の手法を定めたもので、使用の可否を

決める制度そのものではないため、上記の判定が直接使用可または不可を意味するわけではないことに注意が必要である。

実施されたリスク評価は、報告書としてまとめなければならない。Annex G に、リスク評価報告書に記載すべき項目をまとめている。

5. 防汚塗料のリスク評価

ISO 13073-2（Part 2）として標準化される防汚塗料のリスク評価手法は、活性物質のリスク評価と同様のスキームで、個別の防汚塗料毎に実施されるものである。使用される活性物質は、Part 1 のスキームに従って評価が実施されたものが対象であり、そこで得られた PNEC が用いられる。このため、防汚塗料のスキームの中では、あらためて有害性評価を行う必要はない。基本的には、

Part 1で「低リスク」または「比較的 low リスク」と判定された物質が使用可能な活性物質である。しかし、「リスク懸念」に分類された物質であっても、使用量、対象海域、使用期間等を限定するなど、特別なケースでは対象となる場合がある。

Part 2の主な作業は、暴露評価である。活性物質の溶出速度の計測（または計算）、排出シナリオの決定、計算モデルによる濃度分布の推定等により予測環境濃度を算出し、Part 1で評価された予測無影響濃度との比を求める。PEC/PNEC 比が1より低ければリスクは低いとみなされる。この比が1より高い場合は、データの再調査等による精査（refinement）が可能である。

防汚塗料では複数の活性物質を組み合わせる用いることが多い。この場合、それぞれの作用が相乗的に作用して有害性が高まることも想定される。しかし、防汚塗料からの溶出で生じる低濃度の場での相互作用は報告がなく、適当な評価手法もないのが現状である。したがって、相互作用については、リスク評価のスキームには採り入れず、必要があれば専門家の判断を求めることにしている。

防汚塗料製品は、含まれる活性物質の種類と量も同じ製品のシリーズとして製造されることがある（frame formulation）。具体的には、同じ組成で色が違うといったケースである。このようなシリーズの製品では、一括して代表製品でリスク評価を行うことが合理的である。

防汚塗料製品のリスク評価のスキームを図-7に示す。得られた結果は、報告書としてまとめなければならない。報告書に記載されるべき項目はAnnex Aに示されている。

6. おわりに

有機スズのような環境問題を再び起こさないための制度構築を支援することを目的とした、防汚塗料の海洋生態系へのリスクを評価する手法を国際標準化する取組みについて紹介した。今日の環境問題は、対立する問題の間のジレンマ、トリレンマの形をとる場合が多いが、防汚塗料に関しても、効用（抵抗低減による二酸化炭素排出の抑制、生物の越境移動の防止）とリスク（海洋生態系への負の影響）をどう調和させるかが重要である。これまで、学術的にも制度的にも十分でなかった海洋生態系へのリスク評価手法を国際標準として定めることは、リスクを軽減して高い効用を得るうえで重要な第一歩であると考えられる。また、AFS条約採択に伴って求められた「防汚方法の試験・評価方法及び性能基準の調和のための作業」への的確な対応であり、アジアにおける防汚塗料の環境リスク評価の制度の普及を加速するものと期待される。ISO化はまだ道半ばであるが、作業は順調に進捗しており、平行して自主認定の制度や改正化審査対応の作業も進めら

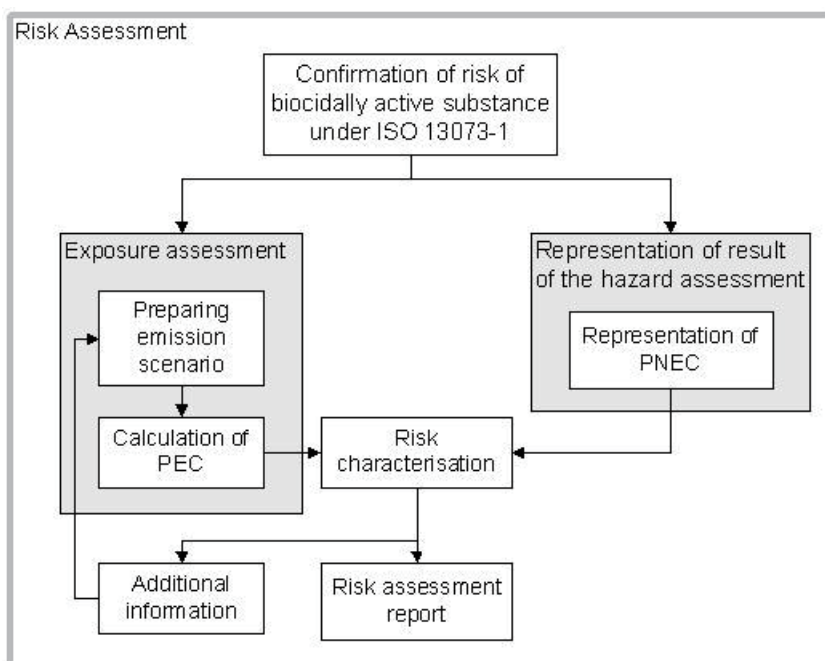


図-7 防汚塗料製品のリスク評価のフロー

れている。まもなく、世界に誇れる体制が構築されると期待される。

参考文献

- 1) European Commission (2003) Technical Guidance Document on Risk Assessment in support of Commission Directive 93/67/EEC on Risk Assessment for new notified substances, Commission Regulation (EC) No 1488/94 on Risk Assessment for existing substances, Directive 98/8/EC of the European Parliament and of the Council concerning the placing of biocidal products on the market (Part II), Institute for Health and Consumer Protection, European Chemicals Bureau. EUR 20418 EN/2
- 2) ISO 10890 Paints and varnishes -- Modeling of biocide release rate from antifouling paints by mass-balance calculation.
- 3) ISO 15181-1 Paints and varnishes -- Determination of release rate of biocides from antifouling paints -- Part 1: General method for extraction of biocides
- 4) Finnie, A. A. (2006) Improved estimates of environmental copper release rates from antifouling products. *Biofouling*, 22, 279-291
- 5) OECD 2005, EMISSION SCENARIO DOCUMENT ON ANTIFOULING PRODUCTS, OECD Environmental Health and Safety Publications. Series on Emission Scenario Documents No. 13. Environment Directorate, Organisation for Economic Co-operation and Development. ENV/JM/MONO(2005)8