

(48) 微量有害物質のリスクを指標とした製品のライフ・サイクル・アセスメントに関する研究

Product Life Cycle Assessment indicated Risk Derived from Hazardous Micro Chemicals

○ 寺下晃* 盛岡通**

by Akira Terashita Tohru Morioka

ABSTRACT; In the high advanced-technological society, toxic chemicals are build in the consumers' goods, which result in chemicals release into the environment and accumulated potential risk. In order to predict the impacts, the authors construct Life Cycle Ranking System(LCRS) for product life cycle. In this paper, the GaAs which is compound semiconductor and phosphoric ester which is flame retarding chemicals are estimated.

LCRS evaluate the magnitude of potential risk relatively by means of multipling the degree of chemicals release in the environment through each product life cycle step and magnitude of chemical hazard per unit exposure. The difficulty of political alternatives in the stages of production, recovery of disused goods, separation and disposal of toxicant chemicals is evaluated as social cost by ranking.

The result of assessment shows that rise of collecting rate brings rise of potential risk of GaAs in the case of recovery system of the electric household durable goods for only the circulation of resources. Separating GaAs from production certainly decreases chemical risk and increases difficult of the stage of production, separation and disposal. It is found that the difference between decrease of the amount of phosphoric ester used in the consumer's good and the amount of release into environment by recycle of plastic makes chemical risk decreased and the extension of kind of reused parts composed in consumer's goods increases difficulty of the stage of production.

KEYWORDS; Life cycle ranking system, Risk estimation, Chemicals, Societal system

1 高度技術社会における化学物質のリスクの特徴

高度技術社会においては、高機能化をすすめるために民生用の最終製品といえども先端技術が広く利用されている。それにともなって添加される微量の有害化学物質に由来するリスクが懸念されている。その特徴を要約すると次の通りである。

- ①化学物質が製品中に微量かつ多様な形態で使用され、その流通と廃棄の形態が見えにくく複雑化している。
- ②化学物質は生産、流通、消費、廃棄の各段階で環境中に放出され、潜在的効果が集合、累積してはじめてリスクが顕在化する。
- ③事後対策は一般に困難で、未然に影響を予測し防止対策をうつ必要があるが、排出規制を軸とした管理では不十分で、分別リサイクルなどの社会的ルールの形成による化学物質の賢い使いこなしが要請される。
- ④資源循環型の模索が製品中の化学物質のリスクまでは十分に視野におさめておらず、新たに形成される循

* 生活協同組合コープこうべ Coop Kobe

** 大阪大学工学部環境工学科 Department of Environmental Engineering, Osaka University

環型の物質代謝そのものがリスクを低減させるかどうか疑問である。

⑤EPAがプラスチック容器と代替容器の比較を製品のライフ・サイクル・アセスメント（PLA）により行っているが、これまでの例¹⁾では原材料、水、エネルギーの使用量、廃棄物量、汚染物の量や炭酸ガス排出量などで評価しており、環境中に排出された物質の有害性（Toxicity）を評価するにはいたっていない。

そこで本論文では、リスクの効果的な軽減のために、製品のライフ・サイクル自体を設計することを最終的な課題とし、極微量に使用して機能を製品に付加する電子部品の材料としての化合物半導体のガリウムヒ素とプラスチックの多様化を支える添加物の一例として難燃剤のリン酸エステルを典型的な事例としてとりあげ、製品中に含まれる微量有害化学物質のリスクを指標とした製品のライフ・サイクルの評価システム、Life Cycle Ranking System（LCRS）を構築することを目的とする。

2 Life Cycle Ranking System（LCRS）の特徴

2.1 LCRSの全体構造

LCRSは、環境中に放出された化学物質のリスクと、製品のライフ・サイクルを変化させるための施策実行の困難度を段階的に得点づけして、(2.1)、(2.2)式より相対的に製品のライフ・サイクルを評価する。図1にLCRSの構造を示す。

$$\text{リスク} = \left[\text{暴露評価} \right] \times \left[\text{毒性評価} \right] \quad (2.1)$$

$$\text{施策の困難度} = \left[\text{製品段階での困難度} \right] + \left[\text{製品回収段階での困難度} \right] + \left[\text{有害物質の処理・処分段階での困難度} \right] \quad (2.2)$$

製品中に微量に使用される化学物質の環境中のリスクを予測し評価する場合、不特定の発生源からの環境への放出による潜在的な影響の蓄積の結果はじめてリスクが顕在化するため、まずは潜在的なリスクの規模を相対的に把握し傾向を見きわめることが効果的である。また、潜在的リスクの集合、蓄積による影響に対しては、個別発生源ごとの評価ではなく分散型発生源を集合させて評価することになる。そのためLCRSでは(2.1)式のように、暴露量に関係する環境中への化学物質の放出量を評価する暴露評価と化学物質の有害性を評価する毒性評価の2つの評価結果の積から評価する。なお、暴露主体は広く環境中に放出された後の一般市民の暴露を基本としている。リスク伝搬の経路については特定せず、まずは全体のリスクの規模を評価対象にする。

一方、(2.2)式では社会システムの改築・再構成によりリスク軽減が可能であるという立場から、広義の費用として社会システムの再構築にともなう困難さを評価するのが施策の困難度の評価である。社会システムの再構築を行う断面としては、製品製造段階、製品回収段階、有害物質の処理・処分段階の3つを取りあげる。

製品のライフ・サイクルを形成する社会システムには、国、自治体などによる規制、指導などの制度面もあるが、実際に製品管理の実態を決定する社会システムとして関係主体が行う約束ごとと製品の物的管理を

対象とする。主体としては、製造者、流通業者、消費者、回収業者をとりあげる。ただ、リスク管理における情報の非対象性、すなわち製造者が製品の基本的な情報を持っていることから、製品のライフ・サイクルに係わる社会システムの中心的な主体は製造者であると位置づける。

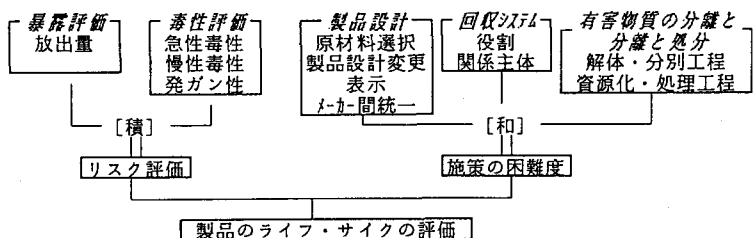


図1 LCRSの評価構造

2.2 リスクの評価方法

(A) 暴露評価

製品のライフ・サイクルの各断面で放出量、飛散量を相対量で評価する手順は、以下のようになる。

- ①化学物質の1年間の製品への投入量を1とする。
- ②製造から廃棄までの製品の流れを描き、化学物質が流入する断面とその相対配分量を推定する。
- ③相対配分量に放出率を乗じて環境中への断面別進入量を推定する。それらの和が総進入量となる。

放出率は、各断面における化学物質を環境中へ放出させる傾向であり、表1のように設定した。資源循環型の物質サイクルを構築した場合でも、技術的／経済的／社会的な制約によって残渣が最終処分されることになるが、その最も一般的な処分空間が埋立地である。そこで、埋立地の環境管理の水準に応じて、放出率を段階的に設定した。また、再利用される場合には、製品中の化学物質が同じ用途で使用されるか否かで、その化学物質の正味の使用量に影響を及ぼすことを考慮した。

(B) 毒性評価

化学物質の持つ毒性として、急性毒性、慢性毒性、発ガン性をつけ、それぞれについて0から5までのスコアを与え、その最大値を化学物質の毒性評価値とする。このような方法は、EPAのハザード・ランキンシステム(HRS)において採用されている²⁾。

表1 化学物質の放出断面と放出率

放出断面	放出特性値
流通・消費・回収・解体段階	1
焼却処理	1－分解率
安定型処分場	1
管理型処分場	0.7
遮断型処分場	0.3
保管	0.2
適正処理・処分	0.1
対象物質の生産量の減少につながる再利用系	各放出断面の放出特性値の1/n
対象物質の生産量が変化しない再利用系	各放出断面の放出特性値の0.8

注) nは再利用を含む利用回数

2.3 施策の困難度の評価方法

物質循環の社会的制御を「製品製造段階」、「製品回収システム」、「有害物質の分離と処分」の3つの段階で行い、それぞれについて施策を行うさいの困難さにスコアをつける。それについては、現在先進的に製造する商品に対する環境対策を行っている企業に、製品の回収システム、リサイクルのための製品設計、有害物質の管理などについて質問した調査結果を参考にしている。企業が実施している、あるいは検討している施策の中でリスクの削減に貢献するものを、各段階での実行可能性のある代替案として取り上げた。また製品設計と有害物質の処理・処分の2断面では、企業がすでに行っているか否か、あるいは企業側の施策実行の困難性に関する記述を考慮してスコアをつけた。

(A) 製品設計変更の困難度

製品設計段階では、まず「原材料の選択」の代替案施策として、有害物質の減量、再利用可能な素材の使用、使用素材種類の減少等が挙げられる。次に「解体しやすい製品構造への変更」と「製品の使用物質表示」があり、表2に示すように製品構造の複雑性と変更を要求する部品の個数のオーダー、あるいは表示の要求される部品の個数のオーダーによって困難度が決定される。利用素材、製品構造、使用物質表示などの「メーカー間での製品規格の統一」も評価対象となる。以上の評価項目について0から8点までのスコアを与える。

表2 製品設計の変更と表示の困難度

		変更要求		表示要求	
		A	B	A	B
製品複雑性レベル	1 簡単な日常製品 例) PETボトル	2		1	
	2 ごく簡単システム製品 例) レンズつきフィルム	2	4	1	
	3 電気器具に代表される比較的簡単なシステム製品(冷蔵庫等)	4	6	1	2
	4 電子器具に代表される複雑なシステム製品(テレビ、ステレオ等)	6	8	1	2

A: 部分的要求 B: 全体的な要求

(B) 回収システム構築・運営の困難度

製品回収システムの構築段階では、まずその回収システムに関与する主体を評価する。主体数が多いほど回収システムを構築しかつ安定的に長期的に運営するために要する時間、コストは高くなると考えられる。そのため、関与主体の数を代理指標としてスコアとする。加えて、主体ごとにおこなう役割について、その項目数をスコアとして評価する。評価対象とする各主体の役割を表3にまとめておく。

(C) 有害物質の分離・処分の困難度

有害物質の分離・処分の段階は、解体・分別工程、資源化・処理工程からなる。

解体、分別工程での困難度は表4に示すように製品の複雑性と分別の要求水準から決定されと考えられる。分別の要求水準は、製品の解体を必要としない分別、解体して製品中の特定部品を抜き取る型、そして解体され

表3 回収、運営に関する主体とその役割

製品メーカー	回収作業、コスト負担、他主体への指導・情報提供、他主体への援助・支援 回収量確保のための施策、他メーカーとの連携
流通業者	回収作業、スペース提供、コスト負担、回収量確保のための施策、解体作業
消費者	商品の持ち込み作業、再生工程作業、コスト負担
回収業者	回収作業、解体作業
関連業界	回収作業、コスト負担、他主体への指導・情報提供、他主体への援助・支援 回収量確保のための施策

たものを分別する型にわけられる。対象とする製品の複雑性と分別の要求水準の組み合わせに対し、最高8点のスコアをつけて困難度を評価する。

資源化・処理工程では、資源化工程として洗浄、分離、品質検査、再生処理の4つ、有害物質処理工程として保管、分離抽出、無害化処理、封じ込めの4つを想定し、各施策に設定されたスコアとその工程に搬入される相対的な処理量の積から困難度が求められる。

(D) 全体の困難度

全体の施策の困難度は、3つの段階での困難度の和により求められる。そのさい、評価対象である複数の代替案のうちで、3段階のそれぞれについて最大に評価された困難度を1として標準化し加算する。そのため、施策の困難度の評価は取り上げた代替案

表4 製品の複雑性と分別要求度のレベル

レベル	製品の複雑性	分別要求度
1	単一素材製品	選定型
2	簡単な日常製品	外部部品取り外し型
3	ごく簡単なシステム製品	要解体・一点抜き取り簡易型
4	比較的簡単なシステム製品	要解体・一点抜き取り複雑型
5	複雑なシステム製品	要解体・粗分別型
6		要解体・細分別型

によって変化する可能性があり、結果の解釈は想定した代替案間の比較の範囲内で行われるべきものである。

なお、個々のスコアの設定については、質問紙調査などを参考にしているものの、評価の信頼性を追求すれば専門家や実務担当者などの参加による議論が求められる。ただ本論文では、それよりもむしろスコアの設定よりも評価項目の抽出に力点を置いた。

3 ガリウムヒ素とリン酸エステルを事例とした評価

3.1 家電製品に内蔵される化合物半導体のガリウムヒ素

(A) 半導体企業への質問紙調査による潜在的リスクの同定

半導体を内蔵する電気製品を製造している企業に対する質問紙調査の結果から次のことが判明した。

- ①半導体の主流はシリコン系であるが、ガリウムヒ素半導体の利用も今後10年間で10倍を超えるとの予想もあり、その用途も幅広い。
- ②半導体企業による製造レベルでの半導体の不良品の回収は行われているが、消費後の廃棄物からの半導体の回収・リサイクルにはミクロン級の回収解体技術と高額な試験装置を要し、困難と判断されている。
- ③IC回収には、技術的には取り外し可能性が条件となるが、それが現状のミクロの限界を追求する設計に反し、また他の部品との関わりもあるため、総合的に設計段階からの対応が必要である。
- ④製品中の微量有害化学物質のリスクについては、一方では「遮水工が十分なら安心」という考え方と、もう一方では製品アセスメントや有害物の回収によりリスクを減少できるという意見がある。
- ⑤IC回収の前提条件としては、取り外しに余り費用がかからず、多少の有価物の回収ができ、単独のメーカーではなく共同での費用負担であることがあげられている。

(B) ライフ・サイクルを変える社会システムの代替案とその評価結果

上でみたようにガリウムヒ素のリサイクルは現状では困難であり、リスク低減の基本的な施策としてガリ

ウムひ素半導体の抜き取りと遮断型の処分場での埋立てを想定する。評価対象となる社会システムを表5にまとめる。廃棄家電製品の流れは、現在の流れを基本とし、特別な施策を行った場合には、消費者行動の予測など既存の調査の結果を利用した。また、ガリウムひ素は封止材等のパッケージの中で使用されているので、埋立処分される前に環境中に放出されることはない想定する。そのため、最終的にガリウムひ素はいずれかの埋立地で処分されることになる。

表5 ガリウムひ素のリスクを左右する廃家電の回収システム

I	家電協会の回収システムが機能し、消費者からの販売店への回収率が80%、最終的に40%が自治体の粗大ゴミとして、60%が処理業者により処分される。
II	自治体の処理能力が限界に近づき、自治体がいったん販売店に回収された廃家電の引き取りを拒否することを想定。最終的に自治体が20%、処理業者が80%処分。
III	メーカーによる抜き取りやすい製品設計、使用部品表示、メーカー間の統一、コスト負担、販売店によるガリウムひ素半導体を含むデバイスの抜き取りなどにより、販売量の60%の回収量のうち90%、全体の54%が遮断型の処分場に搬入される。
IV	製品マニュアルに製品の廃棄方法を明示することにより、消費者からの回収率が80%から87%にアップし、最終的には遮断型への搬入量が58.5%になる。

注) 前提条件として、自治体に処分される廃家電は管理型処分場に、処理業者により処分されるものは安定型処分場にて搬入されるとする。

は封止材等のパッケージの中で使用されているので、埋立処分される前に環境中に放出されることはない想定する。そのため、最終的にガリウムひ素はいずれかの埋立地で処分されることになる。

LCRSによるリスクの評価結果は表6のようなスコアになり、それを

表6 ガリウムひ素のリスクを左右する社会システムの評価結果

	リスク	困難度	製造	回収	処理
システムI	4.4	1.29	0.00	0.80	0.49
システムII	4.7	1.36	0.00	0.87	0.49
システムIII	2.5	2.92	1.00	0.93	0.99
システムIV	2.9	3.00	1.00	1.00	1.00

図2にグラフで表す。4つの社会システムがリスクが高く困難度が低いグラフの右下とリスクが低く困難度が高いグラフの左上に分かれた結果となった。右下が資源循環を目的とした家電協会の回収システムI、IIの場合であり、ガリウムひ素が回収率を上げることで逆に安定型の処分場への潜在的集中化を生じリスクが高く評価された。左上に位置するのは、ガリウムひ素の抜き取りを行う社会システムであり、抜き取った分だけそれに比例してリスクは確実に減少するが、製品段階で製品構造の変更(製品の複雑性は「複雑なシステム製品」、表示の要求度は「部分的な要求」、処理段階として解体・分別工程の必要性(製品の複雑性は「複雑なシステム製品」分別要求水準は「要解体一点抜き取り困難型」と封じ込めの有害物質処理工程が必要になり、家電協会の回収システムよりもかなり困難度は高くなっている。

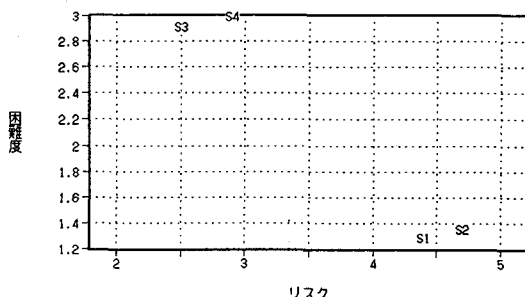


図2 ガリウムひ素のリスクを左右する社会システムのリスクと困難度

S1:システムI S2:システムII S3:システムIII S4:システムIV

3.2 家電製品のプラスチックの難燃剤としてのリン酸エステル

リン酸エステルは人工の有機化学物質であり、難燃剤として様々なプラスチックに添加されて製品に含まれている。しかしその量的質的情報は十分ではない。そこで、リン酸エステルが使用されている可能性があり、かつリサイクル可能な熱可塑性樹脂であるプラスチックとしてポリスチレン(PS)をとりあげる。また、製品としてはプラスチックが再利用されやすいと考えられるリサイクル法の第一種指定製品(テレビ、冷蔵庫、洗濯機、エアコン)

表7 リン酸エステルのリスクを左右する廃家電の回収システム

I	家電協会の回収システムが機能するが、プラスチックのリサイクルは行われない。ガリウムひ素のシステムIと同じ。
II	メーカーが樹脂の種類の表示をし、解体不要型の部品を販売店で製品から取り出し回収する。ここでのリサイクル率を4%としておく。
III	メーカーが樹脂の種類の表示と解体しやすい製品設計を行い、解体容易型の部品を回収業者が回収する。ここでのリサイクル率を48%とおく。
IV	リサイクルの対象を解体困難型の部品までに拡大する。それに必要な社会システムはシステムIIIと同じである。ここでのリサイクル率を64%とおく。

をとりあげる。

リン酸エステルはプラスチックに添加されていて、分離は事実上不可能である。ここでは、家電製品のプラスチックのリサイクルを想定して、そのライフ・サイクルに沿って添加剤のリン酸エステルを評価する。家電のプラスチックのリサイクルは、リサイクルされやすい部品から徐々にされていくと考えられるため、解体不要型、解体容易型、解体困難型と3段階に部品を分類し、段階的にリサイクルが進むことを考え、それに対応して表7に示す社会システムを想定する。各システムにおける各主体の役割を描くさいに、企業への質問紙調査などを参考にしてしている。回収率は、4品目の家電製品のうちでPSを使用している部品との関係から大まかに想定した。なお、リサイクル先はグレードの低い（リン酸エステルの難燃性を必要としない）用途を想定する。

リン酸エステルは、使用中にプラスチックから環境中へ放出される可能性がある。それについては、図3に示すように淀川の実測濃度からFUGACITY MODELを利用して環境中での全存在量を推定し、それとリン酸エステルの生産量を比較してプラスチックからの漏出率を速度論的に推定した。その結果、家電製品の平均廃棄年数の7年間の漏出率は10%となる。

評価結果を表8、図4示す。リサイクルの対象となる部品の種類が拡大することによってリン酸エステルの投入量の減少、処分場からの放出量の減少がおり、その結果リスクは減少している。ただ一方、施策の困難度は、リサイクルの対処となる部品の拡大にともない製品段階での製品構造変更の要求、表示の要求のレベルと解体・分別工程で要求されるレベルが向上するため困難度が高くなっている。

4 まとめ

本論文での結果は、リスクの大きさが廃棄家電製品が搬入される処分場の型に依存される部分が多いという単純な構造になっているものの、以下のことが明らかにできた。

- ①製品中に含まれる微量有害化学物質の潜在的なリスクの大きさとその広義の削減コストを評価する手順を明らかにした。
- ②資源循環を目指した廃棄家電製品の回収では、回収率が高くなると不適切な処分、つまり安定型へ埋立されるガリウムひ素が増加し逆にリスクが高くなる可能性がある。
- ③ガリウムひ素の抜き取り、プラスチックのリサイクルによりそれぞれのリスクは減少できる。
- ④ガリウムひ素、リン酸エステルいずれの場合も、現状の家電協会の回収システムよりリスク削減のための社会システムを構築するさいの困難度、特に製造段階での困難度が高く評価された。

参考文献

- 1) プラスチックと代替物質のエコバランス調査の評価, PLASPIA, No.77, PP.50-55, 1992
- 2) federal register, 厚生省広域処分小委員会資料, 1989

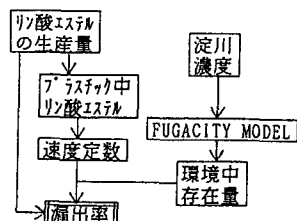


図3 リン酸エステルの漏出率の算定手順

表8 リン酸エステルのリスクを左右する社会システムの評価結果

	リスク	困難度	製造	回収	処理
システムⅠ	1.78	1.35	0.00	0.71	0.64
システムⅡ	1.76	1.95	0.36	0.88	0.71
システムⅢ	1.57	2.37	0.71	0.94	0.71
システムⅣ	1.50	3.00	1.00	1.00	1.00

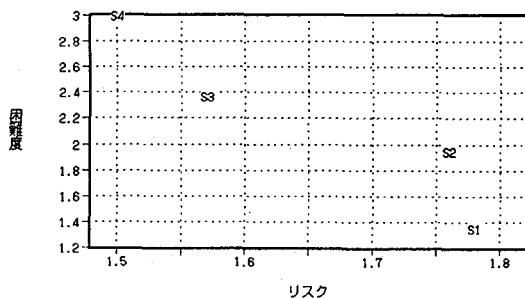


図4 リン酸エステルのリスクを左右する社会システムのリスクと困難度

S1:システムⅠ S2:システムⅡ S3:システムⅢ S4:システムⅣ