

製品中 HBCD のライフサイクルリスク評価:

物質代替を考慮した環境リスク低減への枠組み

Life-cycle risk assessment for HBCD in consumer products: A basis for risk minimization considering chemical alternatives

○真名垣聡*, 小谷健輔*, 小林剛*, 本藤祐樹*, 半井豊明*, 三宅淳巳*, 益永茂樹*,
Satoshi MANAGAKI, Kensuke KOTANI, Takeshi KOBAYASHI, Hiroki HONDO, Toyoaki Nakarai, Atsumi
MIYAKE and Shigeki MASUNAGA

Abstract. This study is developing a comparative assessment method from a life cycle perspective based on a case study of brominated flame retardant (HBCD) and its potential alternatives. Environmental emissions from products containing HBCD and its potential alternative flame retardant chemicals have been estimated based on material flow analysis and then consumer exposure was calculated by using a multimedia fate model. Based on the life cycle results of other impact factor such as CO₂ emission and alternative cost with the above chemical risk, the environmental impacts of the three alternative scenarios (chemical substitution and product substitution) were compared with continuous HBCD use scenario. Our results suggest the following: chemical substitution would not be the best for minimization of the full risk, from the aspect of the impact of flame retardant and CO₂ emissions, and therefore it is important to consider trade-offs of different risks over a life-cycle of a product containing chemicals for the selection of safer alternatives.

Key Words: alternative assessment, life-cycle, trade-off, brominated flame retardants

1. はじめに

現在使用中の化学物質について毒性が指摘された場合、しばしば予防的に代替化合物や代替製品への移行が起こる。しかしその際、事前に代替に

よってリスクが低減するか否かが評価されることは稀である。有害性情報の少ない物質への代替が、全体としてのリスクの増大や、リスク・トレードオフの発生へ繋がるのが懸念されるため、これ

* 横浜国立大学 大学院 環境情報研究院
(Graduate School of Environment and Information Sciences, Yokohama National University)

らを留意した化学物質のリスク削減対策・リスク管理が重要となっている¹⁾。

このような背景のもと本研究では、環境リスクの最小化のために、代替案(代替物質/プロセス)を対象としたライフサイクル(製造～輸送～使用～廃棄・リサイクル)を通じた総リスク比較を目指している。特に、臭素系難燃剤ヘキサブロモシクロドデカン(HBCD)を例として、環境排出量と曝露量の把握に基づくリスク削減すべきライフステージの抽出(全ライフサイクルリスク評価)と、代替案間の総リスク比較に基づいた最適案の選択する手法(代替リスク評価)の検討をおこなっている。本稿では、現在までに整理された情報や考え方を述べる。

2. 研究方法

2.1 ライフサイクルを通じた環境排出量評価手法

現在、化学物質の排出量をライフサイクル全体で推計する手法のひとつとして、マテリアルフロー(サブスタンスフロー)解析が提案されている。この手法はライフサイクル全体を体系的にとらえることにより、ライフステージごとの潜在リスクの把握など一連の繋がりをもった問題群を漏れなく記述できる利点がある。研究例はまだ少ないものの、近年、臭素系難燃剤のデカブロモジフェニルエーテル²⁾やヘキサブロモシクロドデカン(HBCD)³⁾について実施され、手法としての有効性が検討されている。一方で、代替物質への切り替えを考慮した際には、解析に必要なデータの欠如や整備不足などに直面し、現状課題も多い。本研究で対象としたHBCDでは、1) 代替候補物質の選択、2) 代替物質の導入に伴うフローの変化(使用量、切り替え時期)、3) 代替物質の排出係数に関する情報整備が新たに必要となった。そこでその課題を解決するためにおこなった方法を下記に記す。

(1) 特許出願探索システムによる候補物質の抽出

HBCDは高分子有機材料の難燃化を目的として、火災予防対策が必要な製品に添加・含有されており、優れた難燃性を有している。我が国では、HBCDは国内需要量の約80%が樹脂用途として押出発泡ポリスチレン(XPS; Extruded Polystyrene)やビーズ法発泡ポリスチレン(EPS; Expanded Polystyrene)に、約20%が繊維用として、カーテンやカーシートに使われている。そこで、本研究ではXPS、EPS、カーテン、カーシートの4用途を

対象として、HBCDの代替候補物質を検索した。HBCDの代替候補物質は、特許出願検索を用いておこない、HBCDの規制が議論されはじめた年代を中心に製造企業の特許を調べたところ138物質(樹脂用62物質、繊維用76物質)が抽出された。つぎに関連企業へのヒアリングによって現在使用されている、もしくは使用予定の約12物質が候補物質として絞りこまれた。本研究ではこの中から4用途別に計5物質をHBCDのモデル代替化合物として選定した。主として、樹脂用途では臭素系難燃剤が、繊維用途ではリン系難燃剤と臭素系難燃剤が候補であった。

(2) 代替移行シナリオの構築

HBCDが使用禁止となり、HBCDを使用する4用途において、代替化がおこなわれるケースを仮定した。はじめに、代替シナリオの共通の前提条件として、製品中に含まれるHBCDと代替物質の難燃性は同等であると仮定した。関連業界へのヒアリングにより、用途の変化、切り替え時期、使用量の増減を定量的に調査した。HBCDと比較して、どの代替候補物質も難燃性に劣るため、使用量が増加するのが特徴的である。以下に仮定した代替物質の前提条件の例を示す。

【XPS用HBCDのモデル代替化合物】

切り替え時期; H25年度末までに100%がHBCDから代替される。

使用量; 同等の難燃性を確保するために必要な製品中の代替物質質量はHBCDの1.3倍とする。

【カーテン用HBCDのモデル代替化合物】

切り替え時期; H22年度45%、H24年度100%がHBCDから代替される。

使用量; 同等の難燃性を確保するために必要な製品中リン系難燃剤はHBCDの1.5倍、臭素系難燃剤は1.4倍とする。また、リン系難燃剤と臭素系難燃剤の割合は7:3の比率とした。

(3) 化学物質の物理化学的性質に基づく排出係数の推定

各ライフステージにおける環境排出量は流入量と排出係数を乗じて算出した。排出係数はNITE排出係数一覧表に記載されている値を用いた。NITE排出係数一覧表は4プロセス(製造、調合、工業使用、製品使用)について、47用途分類、26詳細用途と、水溶解度、蒸気圧の値から類型化された排出係数の一覧表である。そこで、NITE一

覧表から XPS、EPS については用途分類の樹脂、難燃剤を、カーテン、カーファブリックについては繊維、難燃剤を選択した。また水溶解度、蒸気圧は EPI suite を用いて HBCD 及び、そのモデル代替化合物のパラメータを推定した。表 1 に EPI suite によって推定した代替化合物の物性パラメータを、表 2 に選択した排出係数の値を示す。

環境排出量の推定

モデル代替化合物のマテリアルフローは HBCD のライフサイクルを通したフローをもとに、モデル代替化合物の導入シナリオを用途ごとに想定し、サブスタンスフローを作成した。代替物質の国内需要量は、HBCD を継続利用した際（レファレンス・シナリオ）の需要量に応じて、各用途の比率と使用量倍率を乗じて算出した。工業使用過程における移動率は、樹脂用途は HBCD と同様の移動率を想定した。繊維用途についてはモデル代替化合物のうち、リン系難燃剤は製品への移動率（吸

着率）を 70%（HBCD は 58%）と仮定した。消費者製品使用過程から廃棄過程までの製品としての移動率は HBCD と同じであるとした。

HBCD とそのモデル代替化合物のライフサイクルのステージを製造、工業使用、消費者製品使用、廃棄・リサイクル過程に分類した。ライフサイクルにおける初期流入量（製造過程への流入量）は国内需要量とし、一方で輸入量は工業使用ステージから流入するとした。また本研究では諸外国からの製品輸入に伴う流入と、廃棄段階での海外への使用済み製品の輸出については対象外とした。消費者製品使用ステージでは、使用製品の耐用期間に応じてある一定期間ストックされるため、廃棄過程への移動は使用製品の耐用期間に応じたストック（残存率）を考慮した。尚、対象期間は 1986 年から 2020 年とした。フローは各ステージにおける流入量、移動量及び環境排出量からなる物質収支に基づく。はじめに HBCD について、製造過程への流入量を国内生産量、工業使用過程への流入

表 1 EPI suite によって推定した代替候補化合物の物性パラメータ

想定用途	HBCD	XPS用HBCDの代替候補	EPS用HBCDの代替候補	カーテン用HBCDの代替候補	カーテン用HBCDの代替候補	カーファブリック用HBCDの代替候補
分子量 (g/mol)	641.7	1018.5	427.8	728.7	306.3	325.31
溶解度 (mg/L)	2.1E-05	3.3E-08	6.9E-02	1.1E-05	7.5E-01	5.7E+00
蒸気圧 (mmHg at 25 °C)	1.7E-08	2.1E-08	7.1E-05	1.2E-15	1.3E-07	1.2E-07
融点 (°C)	180.03	90.27	102.18	291.76	87.23	87.44
沸点 (°C)	462.03	480	342.77	669.46	448.73	450.91
Kow	7.74	8.05	5.24	7.37	3.59	3.73
半減期 day						
大気	2.1	0.1	3.2	1.6	0.9	0.2
水	60.0	180.0	37.5	60.0	37.5	37.5
土壌	120.0	360.0	75.0	120.0	75.0	75.0
底質	54.2	162.8	337.5	54.7	337.5	337.5

表 2 代替候補化合物の排出係数

ステージ	排出先	代替物質					HBCD
		XPS用HBCDの代替候補	EPS用HBCDの代替候補	カーテン用HBCDの代替候補	カーテン用HBCDの代替候補	カーファブリック用HBCDの代替候補	
製造	大気(集塵)	0.0005	0.001	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005
	水域(排水)	0.001	0.001	0.0025	0.001	0.001	0.001
コンパウンド	大気(集塵)	0.0001		0.0001	0.0001		0.0001
	水域(排水)	0.0001		0.00025	0.0001		0.0001
樹脂製品工場 (XPS)	大気					0.001	0.001
	水域(排水)					0.0005	0.0005
樹脂製品工場 (EPS)	大気		0.0025				0.001
	水域		0.0005				0.0005
繊維製品工場	大気	0.001		0.001	0.001		0.001
	水域	0.05		0.05	0.05		0.05
樹脂製品使用	大気		0.0005			0.0005	0.0005
	水域		0.0016			0.0016	0.0016
繊維製品使用	大気	0		0	0		0
	水域	0.001		0.001	0.001		0.001
焼却	大気	対象外	対象外	対象外	対象外	対象外	対象外
	水域	対象外	対象外	対象外	対象外	対象外	対象外
埋立	大気	対象外	対象外	対象外	対象外	対象外	対象外
	水域	対象外	対象外	対象外	対象外	対象外	対象外

量を樹脂、繊維別に配分した2001年までの統計値に基づいて国内需要量を算出した。2001年以降の国内需要量は指数関数に当てはめて推定した。工業使用以降のステージへの流入量は前ステージからの移動量に相当する。各ライフステージにおける環境排出量は、流入量と排出係数を乗じて、単位プロセス毎にインベントリ分析を行いライフサイクルにわたる排出量を求めた。

2.2 ライフサイクルを通じた曝露量の推定

HBCDとその代替物質5種について推定した環境排出量をもとに、ライフステージ毎、曝露媒体別の曝露量を推定し、それらによる各種の曝露量を網羅的に評価するための手法の検討をおこなった。曝露経路に関しては、マテリアルフローに基づく各ステージ（製造、工業使用、製品使用、廃棄）からの排出経路と曝露シナリオによる検証をおこなった。また消費者、作業者の曝露量の推定は情報基盤プラットフォームから選定をおこない環境動態予測モデルを用いた推定をおこなった。横浜国立大学情報プラットフォームに搭載されている一般環境濃度や曝露量推定のためのリスクアセスメントツール一覧から、環境排出量、及び化学物質の物理化学的情報を用いてより曝露経路を網羅的に曝露量を推定できるツールを選択し、一般環境経路、及び労働環境下でのヒトへの曝露量をそれぞれ推定した。本研究ではMuSEM(国立環境研究所)を用いた推定をおこなった。化学物質の物理化学的性質に関する情報はEPI suiteを用いてパラメータを推定した(表1)。また環境中の濃度推定に必要な地理情報は日本を対象とし、該当する統計情報を入力した。

3. 研究結果

3.1 ライフサイクルを通じた環境排出量

HBCDとその代替化合物の1986年から2020年までの国内需要量は、HBCDを継続的に使用した場合では、増加傾向を示し、国内需要量は2020年には約3,000トンと推定された。一方で、HBCD代替物質が用途ごとに導入される場合（代替シナリオ）では、代替が開始される2009年からHBCD需要量は減少に転じ、他方で代替物質の需要量は増加した。最終的に2014年にHBCDの需要量は0トンに、代替物質の4用途における総需要量は約3,900トンになると推定された。レファレンス・シナリオのHBCD需要量(3,000トン; 2020年)

に比べ、代替物質の総需要量が1.3倍と多くなるのは、製品中に含まれる量が同じ場合、代替物質はHBCDに対して難燃性が劣るため、同等の性能を発現するためにより多くの量を製品に必要とするからである。

大気、水域における環境排出量は、レファレンス・シナリオにおけるHBCDは水域への排出に比べ、大気への排出量が全期間を通じて多く、その排出量も対象期間を通じて増加傾向を示した。一方、代替シナリオでは、代替物質が導入される2009年からHBCDの排出量は減少傾向を示した。特に水域においてその減少は顕著であり、2020年には最終的に0.2トンに減少すると推定された。HBCDを継続的に使用した場合と比べると環境中への総排出量(大気と水域)は2020年には代替物質の導入によって約80%減少すると推定された。一方で代替物質の排出量は使用量の増加にともない経年的に増加傾向を示した。特に代替物質の中では水域に排出されるカーシート用代替物質、及び大気に排出されるXPSの代替物質が増加することが想定され、その排出量はレファレンス・シナリオにおけるHBCD排出量とほぼ同程度であった。

3.2 ライフサイクルを通じた曝露量

HBCDを継続使用したシナリオの曝露量の推移は、継続使用した場合、HBCDの曝露量は対象期間を通じて増加傾向を示した。曝露媒体の中では、魚介類の寄与が全体の約90%と最も多く、続いて消費者製品からの寄与となった。一方HBCDの使用を禁止したシナリオでは、HBCDの使用が段階的に削減される2009年から曝露量は減少傾向を示した。HBCDを継続使用したシナリオと使用を禁止したシナリオを比べると2020年には、使用禁止シナリオは継続使用シナリオの約17%に減少した。使用を禁止することで曝露量の大きな削減効果が想定される。ただし、本シナリオでは、2014年以降HBCDの使用が中止されると仮定したが、2014年以降も一定量の曝露が示唆される。これは、製品中にHBCDが蓄積されているため、使用を中止しても製品からの継続的な排出が寄与しているためと考えられる。そのため、使用を禁止したシナリオでは2020年には約20%が消費者製品からの寄与となった。一方、代替物質の曝露量はXPS用、EPS用、及び繊維用全てにおいて対象期間を通じて増加傾向を示した。曝露媒体別に見ると全ての

代替物質で魚介類からの寄与が大きかったものの、繊維系代替物質では飲料水の寄与(2%)が、EPS用代替物質では空気(3%)や葉菜(15%)の寄与が確認された。

HBCDの使用禁止とそれに伴い代替物質を導入した場合の曝露量は、HBCDの使用を禁止することでHBCD曝露量は大きく削減される。一方で、代替物質の使用は経年的に増加する。ただし、単純に全物質の曝露量だけを合計して比較した場合、HBCDを継続的に使用したシナリオと比較して、HBCDの使用を禁止したシナリオは2020年には約10%曝露量が削減されることが想定された。

4. まとめと今後の課題

HBCDとその代替候補化合物を対象として、フロー分析に基づく排出量、曝露量を推定しライフステージ別の寄与、経時的変遷に関する比較評価が可能な汎用的な手法を検討した。今後の課題として以下が挙げられる。

汎用性が高い手法のため、対象物質とその代替化合物を比較できる利点がある一方、データの信頼性に関しては検証・確認をする必要がある。特に適用したNITEの排出係数一覧表には、廃棄段階が評価対象に含まれていない。今後、廃棄段階も含めた評価が必要である。また、NITE排出係数は、化学物質の物理化学的性質に基づいた分類化がなされているが、今回対象とした物質と代替候補物質の区別化が難しく、結果として排出量は需要量に依存している。より詳細に評価できるよう検証が必要である。

謝辞

本研究の一部は、環境研究総合推進費(C-1003)の支援により実施された。

参考文献

- 1) 産業技術総合研究所安全科学研究部門, リスク・トレードオフ解析手法の開発, 入手先 <http://www.aist-riss.jp/projects/RTA/aboutus.html>
- 2) 山口治子ら (2009). 生産から廃棄までの動的サブスタンスフロー分析を用いた DBDE の環境排出量推定環境科学会誌, Vol. 19, pp291-307
- 3) Satoshi Managaki et al.,(2009). Emission load of hexabromocyclododecane in Japan based on the dynamic substance flow analysis. Organohalogen Compound, Vol. 71, pp. 2471-2476

- 4) 国立大学法人 横浜国立大学 事業者の化学物質リスク自主管理の情報基盤, 情報プラットフォーム,
<http://www.anshin.ynu.ac.jp/renkei/infoplat.html>
(2010)