

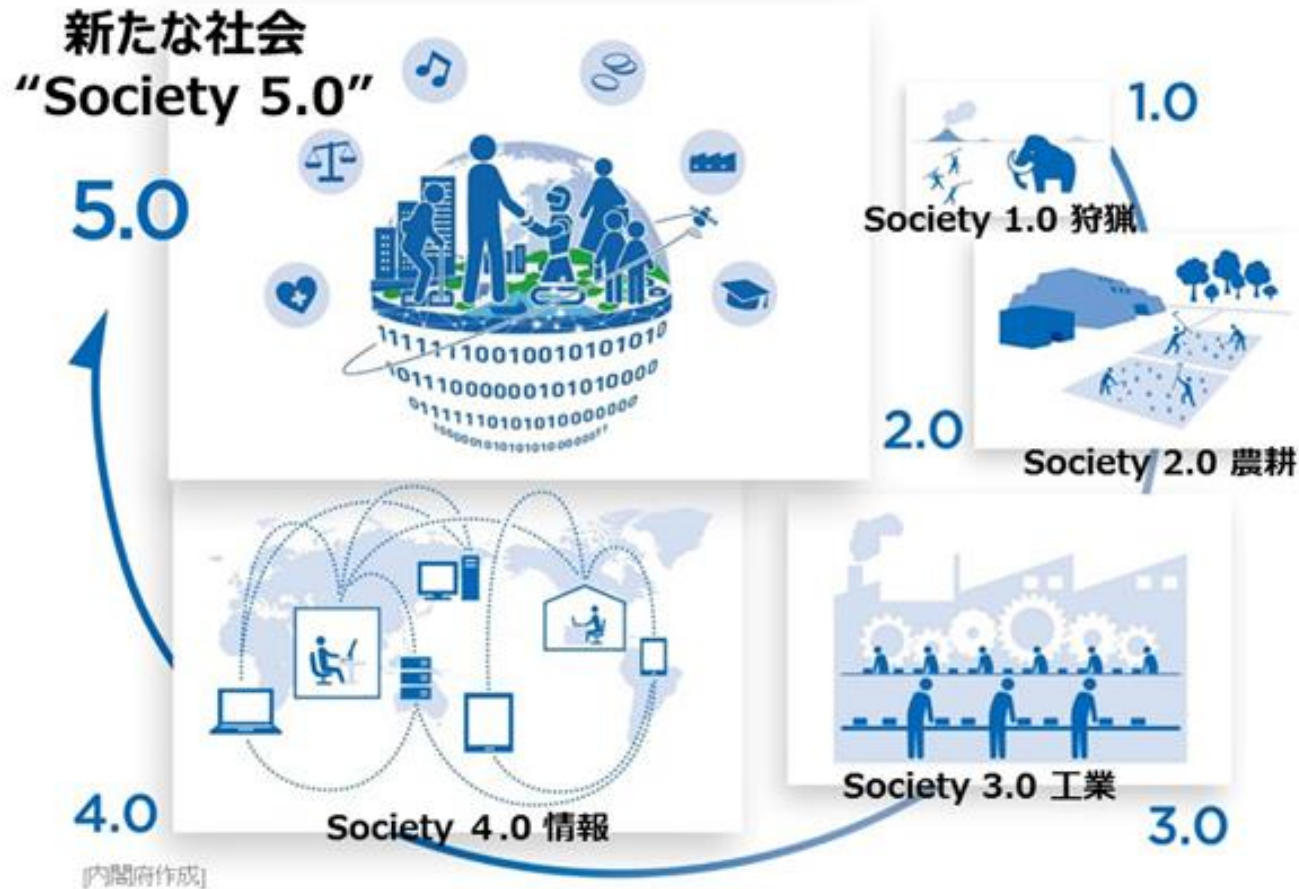


評価技術と制度の連携を軸とした リスクガバナンス

～最近の事例研究を通じて～

大阪大学 大学院工学研究科
環境エネルギー工学専攻 東海明宏

Society 5.0:サイバー空間(仮想空間)とフィジカル空間(現実空間)を高度に融合させたシステムにより、経済発展と社会的課題の解決を両立する、人間中心の社会(Society)。



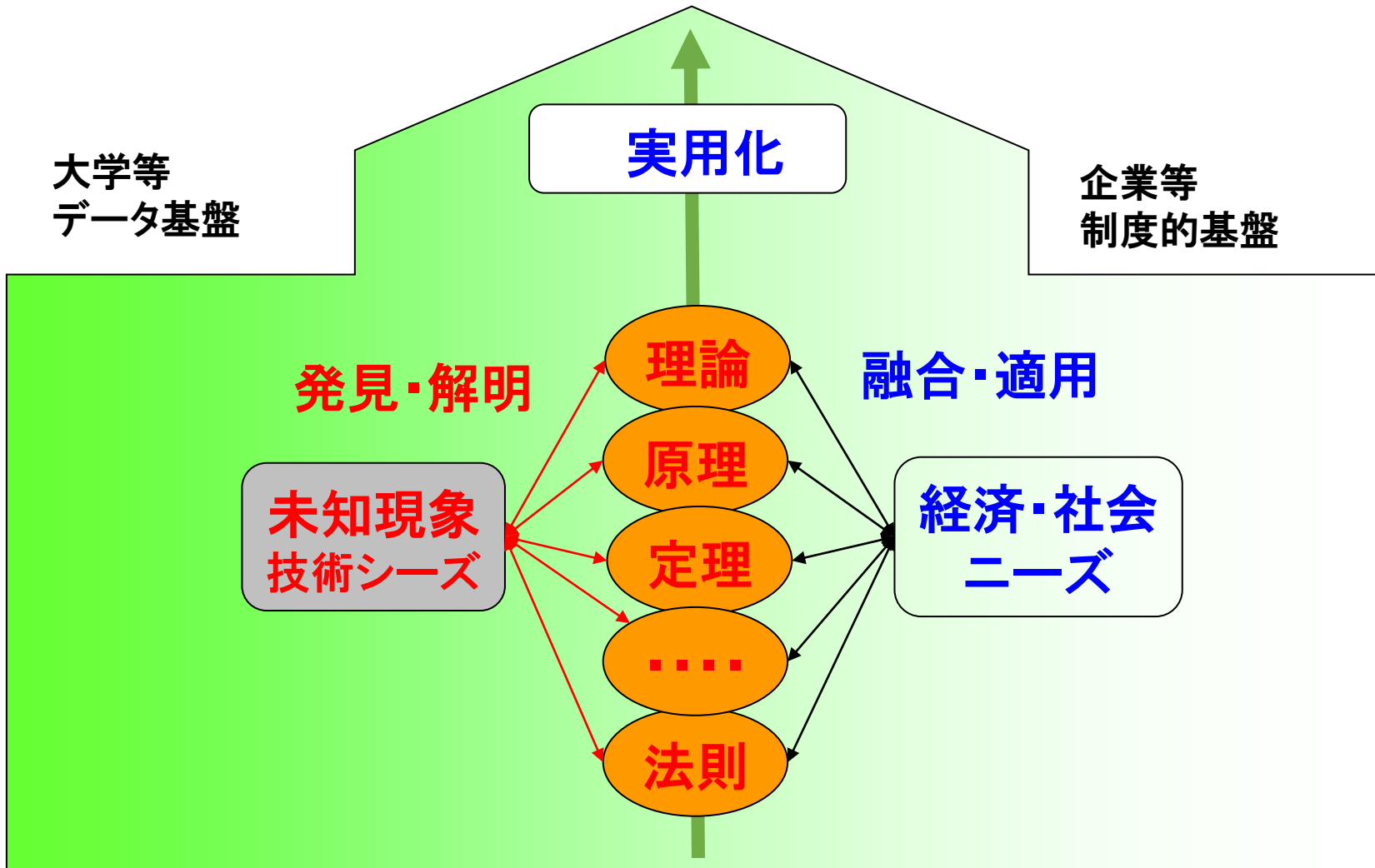
内閣府作成資料より

→化学物質安全との関連を整理すると、...

WSSD2020年目標以降の化学物質管理

- SDGs(Sustainable Development Goals)
 - 3.9-2030年までに、有害化学物質、並びに大気、水質及び土壌の汚染による死亡及び疾病の件数を大幅に減少させる。
 - 6.3-2030年までに、汚染の減少、投棄の廃絶と有害な化学物・物質の放出の最小化、未処理の排水の割合半減及び再生利用と安全な再利用の世界的規模で大幅に増加させることにより、水質を改善する。
 - 12.4-2020年までに、合意された国際的な枠組みに従い、製品ライフサイクルを通じ、環境上適正な化学物質や全ての廃棄物の管理を実現し、人の健康や環境への悪影響を最小化するため、化学物質や廃棄物の大気、水、土壌への放出を大幅に削減する。
 - ポストSAICM
 - 化学物質管理システムを構築・実施し、ライフサイクルを通じた化学物質及び廃棄物による被害を最小化又は予防することを目的としたポストSAICMが、2020年に採択予定
 - WSSD2020年目標の達成とポスト2020年目標の策定に関する議論の先導に向け、化学物質のライフサイクル全体でのリスク評価推進や化審法に基づくリスク評価の加速化に取り組む(環境省)
- 化学物質のリスク評価の加速化に引き続き取り組むことに加えて、化学物質のライフサイクル全体でのリスク評価手法の確立が今後必要となる。**データ利活用の枠組みの拡張。**

化学物質管理という地球的規模の課題解決へ



本日の話題



1. リスク評価とライフサイクル評価の融合に基づく意思決定支援

2. 化学物質安全への関心事に答える評価に基づく意思決定支援

※マルチスケールでデータの関連性を眺める視点

研究開発目的と達成課題

■ 研究の目的

化学物質・製品を中心に据え、相伴う環境負荷をも環境リスクとして捉えて統合評価する「リスク評価技術」を開発し、リスクトレードを組み込んだリスクガバナンスの提言を目的とする。

■ 達成目標

第一に、サプライチェーンによる製品類型化に基づき代表製品を選定し、フロー・ストックに伴うリスクの評価技術を開発する。

第二に、上記のモデル製品を対象に、リスク・リスクトレードオフの知見を得るとともに、現行のリスク評価・管理を補完するリスクガバナンスモデルとそのための管理指標を提案する。

本研究で得られた研究成果の全体像(A,B,C)

A: サプライチェーンリスク評価技術の開発

A-1: PRTR物質の類型化

A-2: 長期間過去再現と将来投影

化審法・化管法

ストック

屋外

B: リスクトレードオフ解析

B-1: 物質代替の詳細解析

B-2: ケーススタディの総括

環境
経路
での
広域
曝露

直接曝露

川中・川下産業
製品から

屋内

事業所
周辺

トレード
オフ

C: 評価基盤整備

C-1: リスクトレードオフ図

C-2: リスクガバナンスモデル

C-3: 事例ベース 場の占有

フロー

エネルギー
消費

資源消費

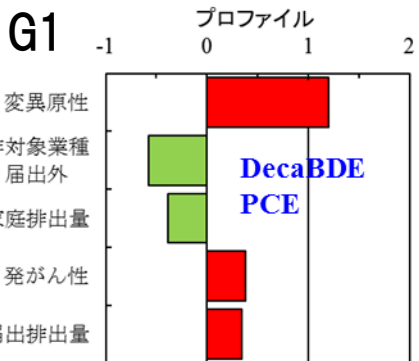
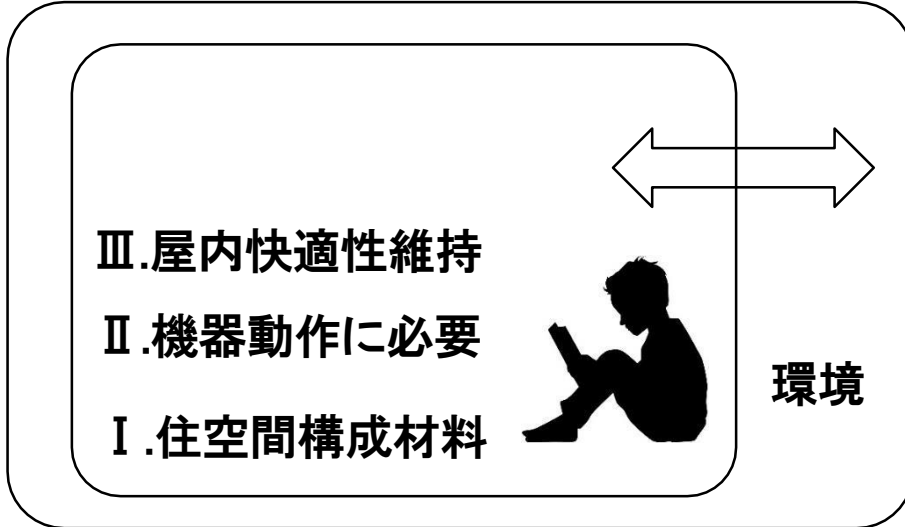
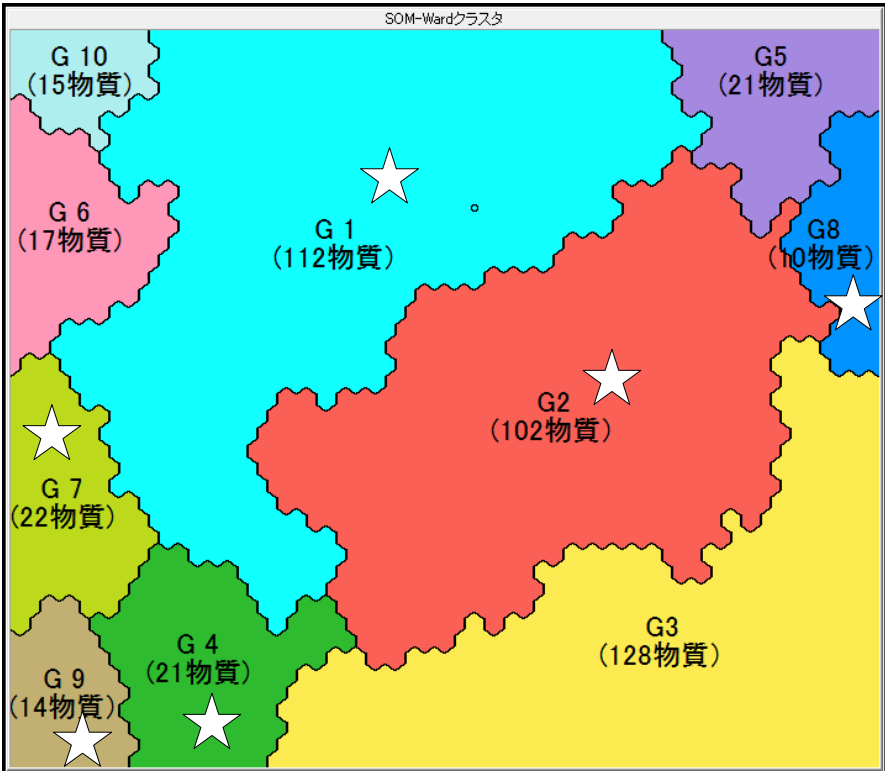
化学物質消
費

企業の自主的管理

消費者のリスク選択

ライフステージ

A-1. SOMでPRTR物質を10個のクラスターに類型化し指標性を明確化した対象物質を決定する方法を開発



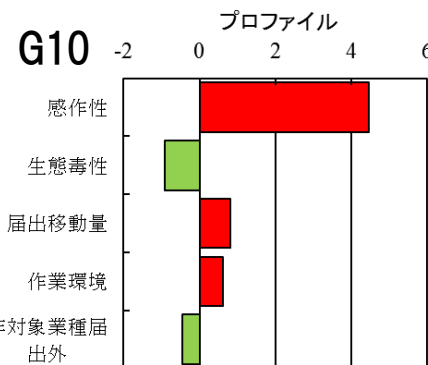
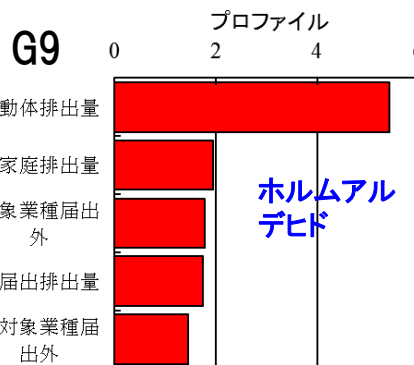
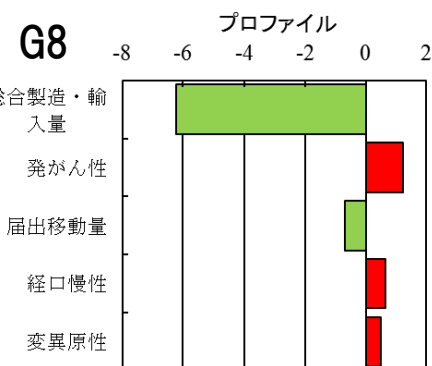
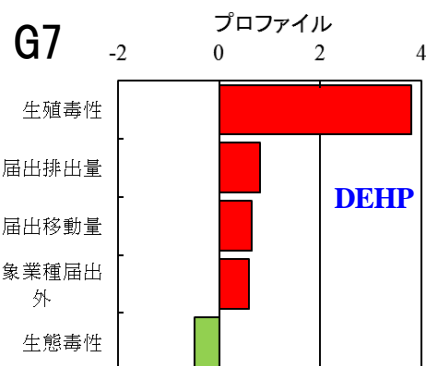
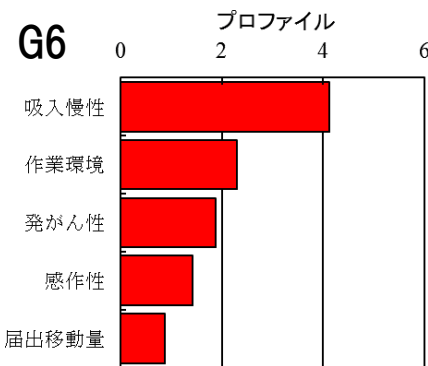
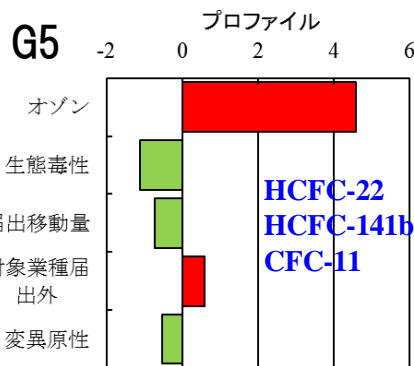
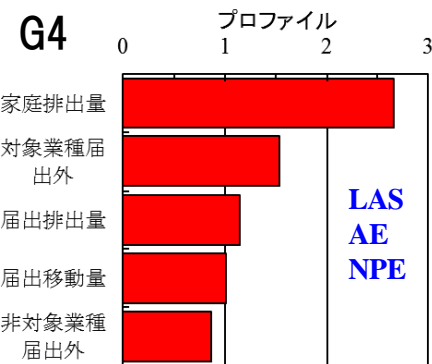
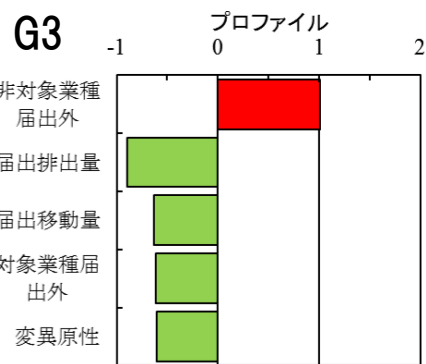
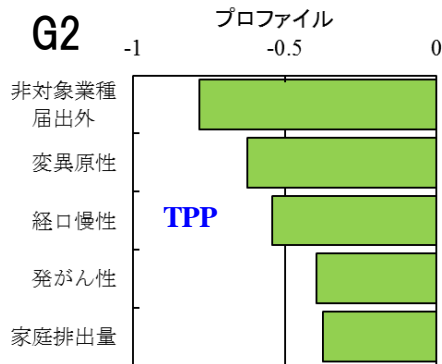
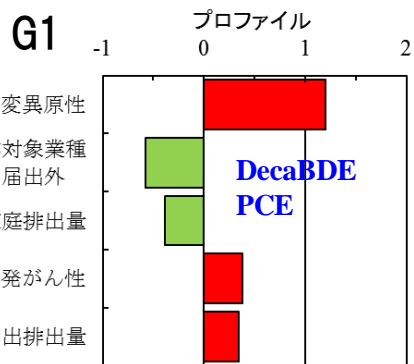
SOM: 自己組織化マップ

プロフィール: 全体データの平均からのクラスタ範囲の平均の偏差; 単位は全体データの標準偏差。t検定より。

正偏差 (Red)
 負偏差 (Green)

		製品類型		
		I	II	III
化学物質クラスター	G 1		難燃剤	業務用洗浄剤
	G 2		難燃剤	
	G 3			
	G 4			家庭用洗浄剤
	G 5	発泡断熱材	機器用冷媒	
	G 6			
	G 7		可塑剤	可塑剤
	G 8			
	G 9	接着剤		
	G10			

A-1. 10個のクラスターから物質を選定



➤ プロファイル: 全体データの平均からのクラスター範囲の平均の偏差; 単位は全体データの標準偏差。T検定より。

正偏差
負偏差

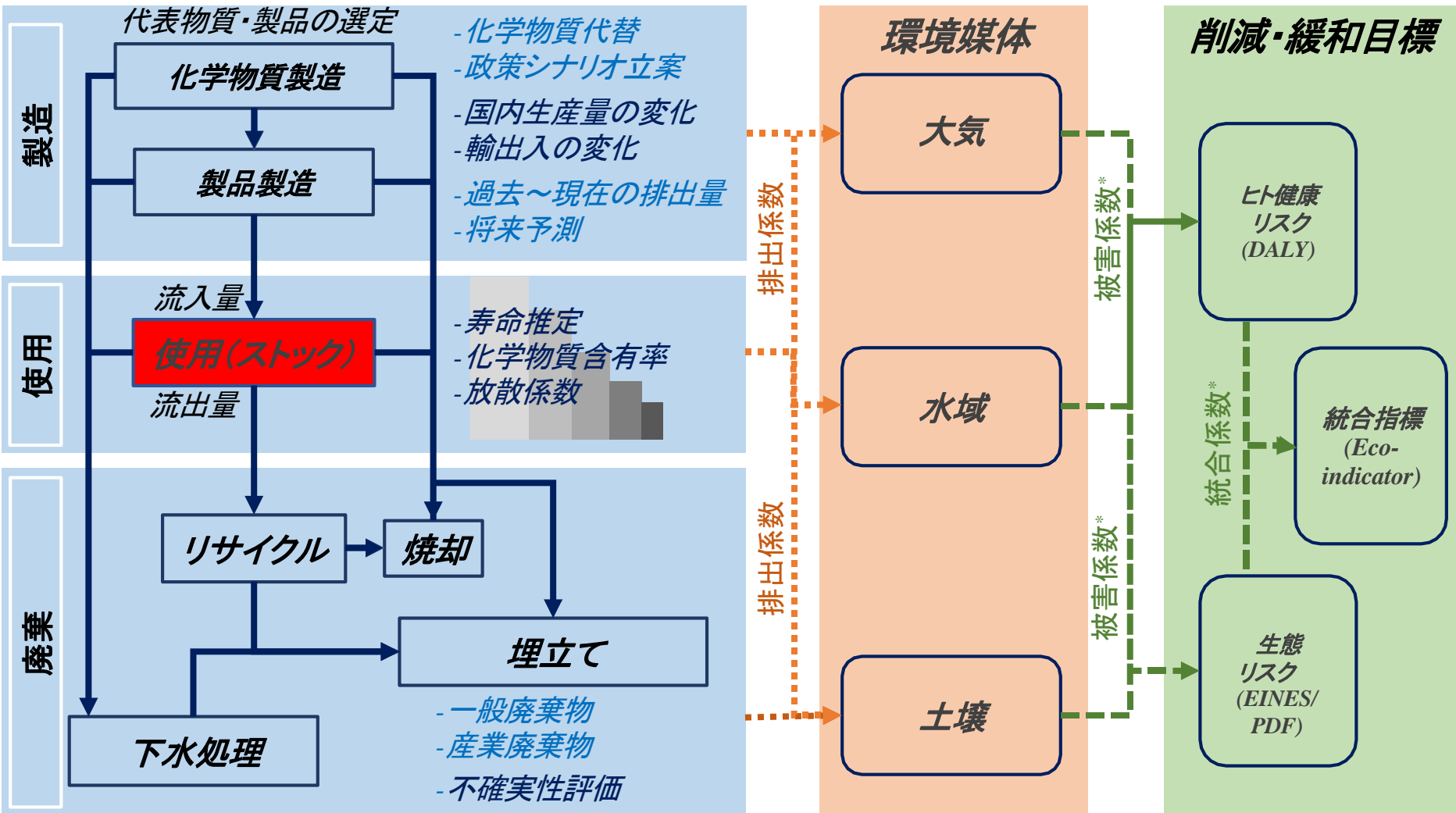
A-2. ライフステージを組み込んだフロー・ストックモデルの構築

過去／現在／将来モデルの構築 × ライフサイクル考慮 ⇒ 政策評価

フロー・ストック解析

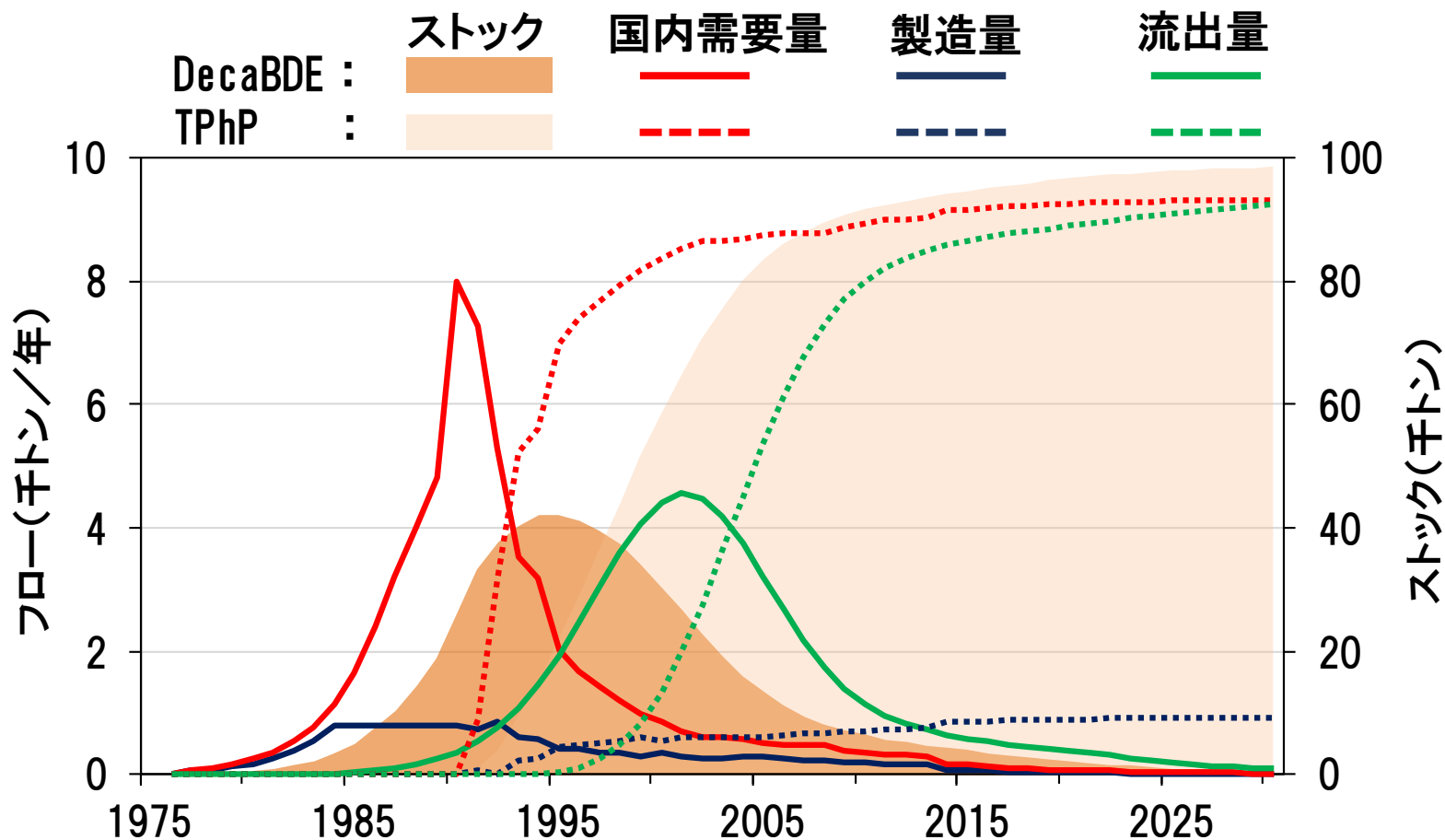
環境排出

効果・被害評価



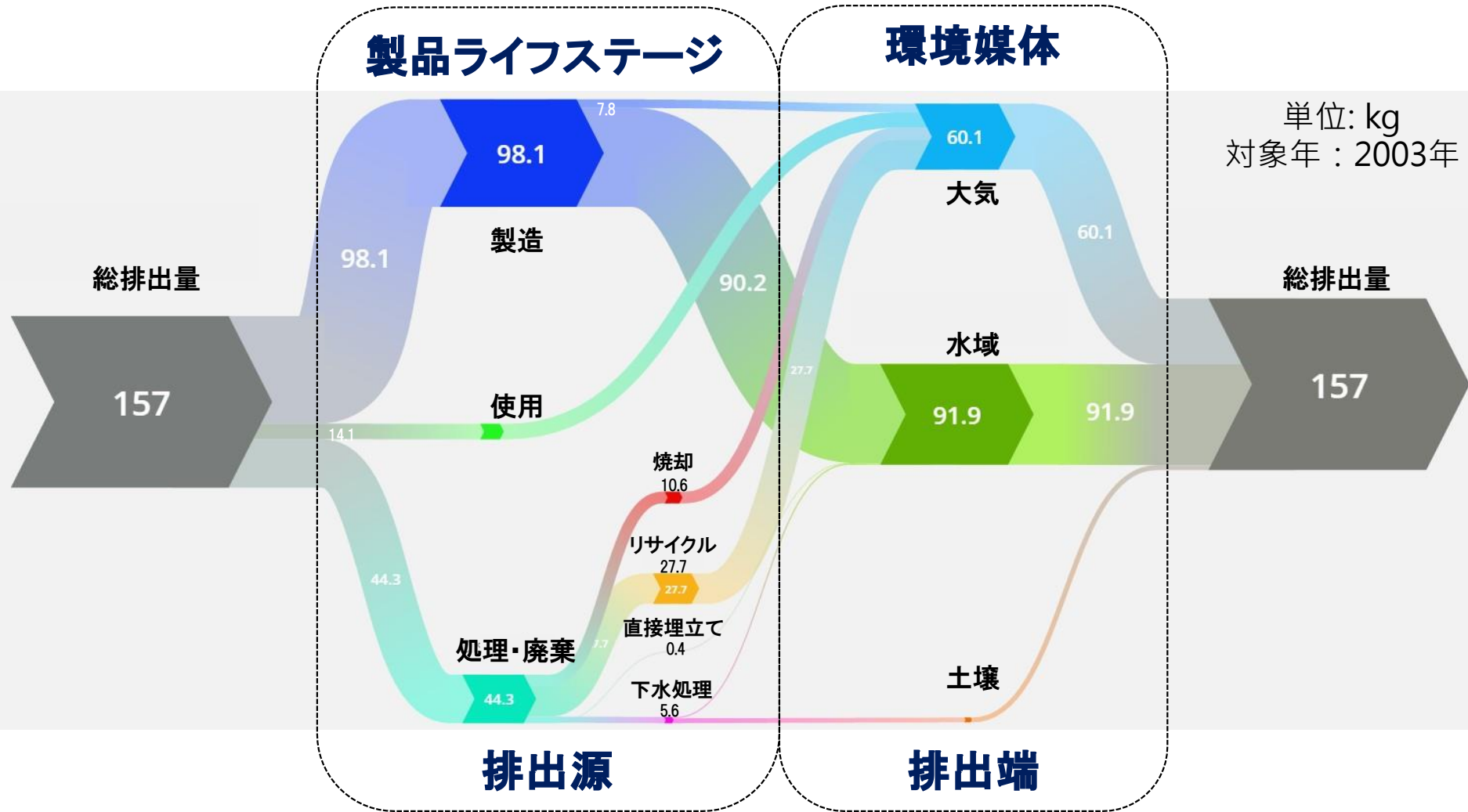
*LCA等から比較指標を推計: Goedkoop, M., Spriensma, R., 2000. The eco-indicator 99; Goedkoop, M. et al., 2009. ReCiPe 2008; Itsubo, N. and Inaba, A. LIME2.

B-1. 難燃剤のフロー・ストック推計



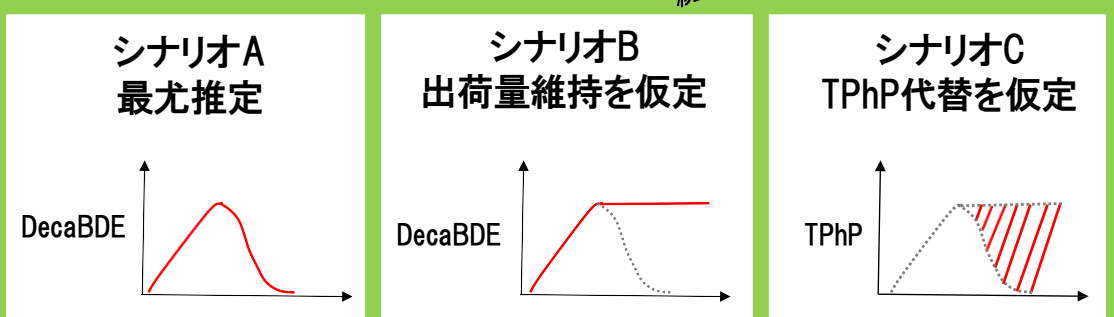
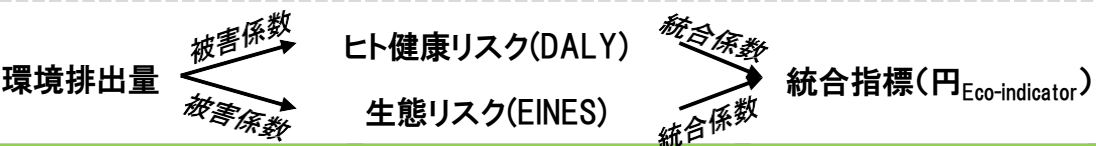
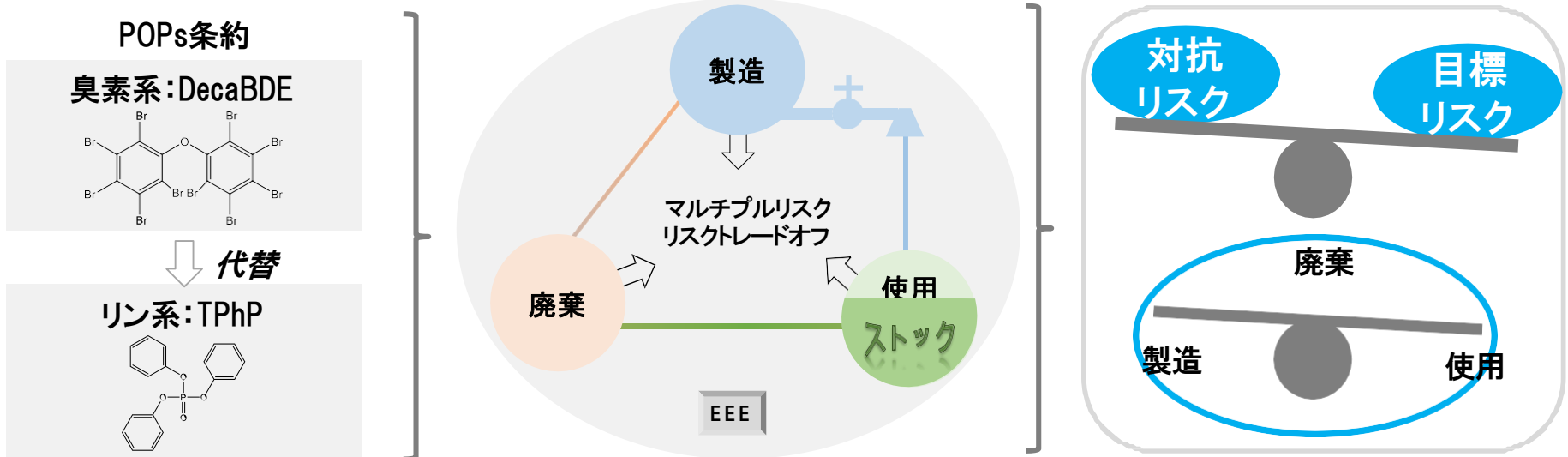
日本国内の電気・電子機器に由来するDecaBDEとTPhPのフロー・ストック推計結果

B-1. 難燃剤の環境排出構造の明確化

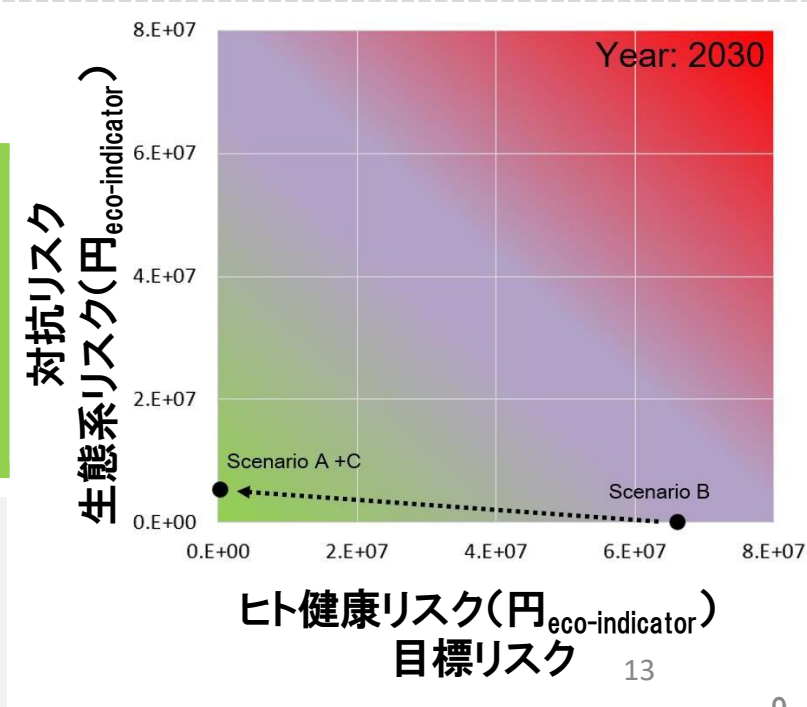


製品ライフステージ、環境排出に着目した DecaBDE のSankey Diagram

B-1. リスクトレードオフ評価の枠組み



シナリオA: DecaBDE 出荷実績から最尤推定
 シナリオB: DecaBDE 出荷量が1990年以降 変化無し
 シナリオC: DecaBDE から TPhP への代替

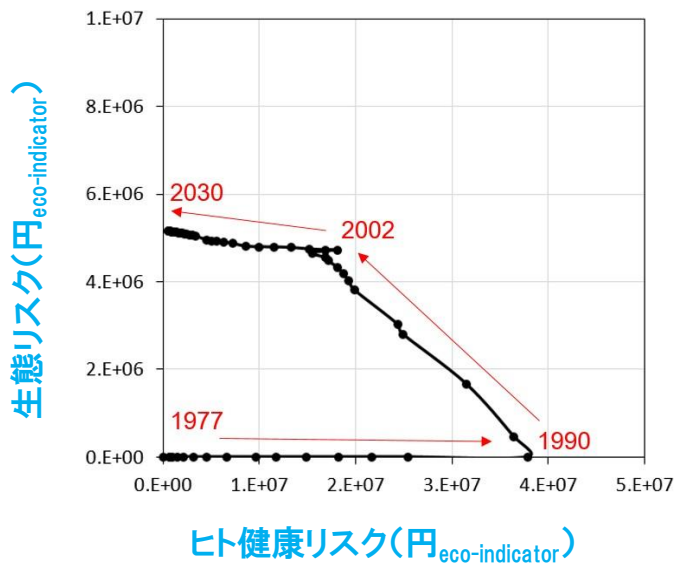


B-1. リスクトレードオフ評価結果

シナリオA+C:DecaBDEからTPhPへの代替

視点1

ヒト健康リスクVS 生態リスク



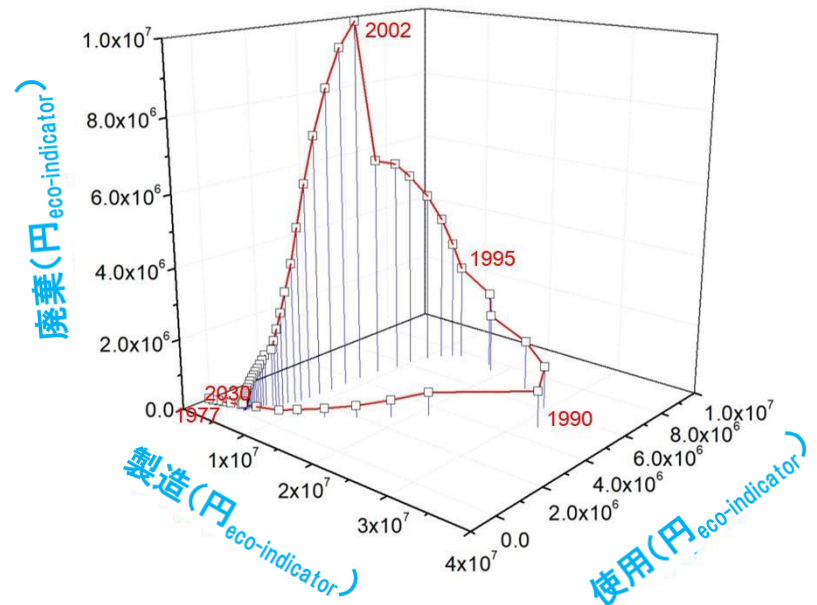
生態リスク

ヒト健康リスク

複数指標
による意思決定

視点2

製品ライフステージ間の比較



廃棄

製造

使用

ライフサイクル全体
を通じたリスク管理

B-2. 新たな管理・評価指標の提案

今よりも堅実な化学物質管理に向けて、
意思決定を支える二つの評価指標を提案する。

1

多指標の意思決定

リスクトレードオフ比

- 目標リスクと対抗リスクを同時に考慮することが可能
- 総リスク量の最小化を目指す指標である
- 政策の“落とし穴”を予見する

$$\text{トレードオフ比(RTr)} = \frac{\text{対抗リスク増加量}}{\text{目標リスク削減量}}$$

RTr<0: Win-Win

※前提: 目標リスクは増加しない

0<RTr<1: 許容可能なリスクトレードオフ

1<RTr: 許容できないリスクトレードオフ

2

ライフサイクル

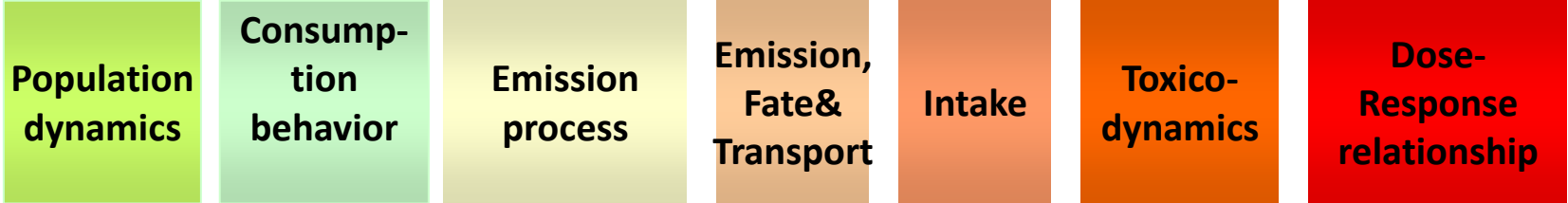
フロー・ストック比

- 化学物質のストックを取り込んだ指標
- 長期にわたる詳細リスク評価が必要/不要であるかを判断可能
- リスクトレードオフ比との連携を通じて「落とし穴」を網羅的に予見する

$$\text{フロー・ストック比} = \frac{(\text{ストック/フロー})_{\text{物質代替後}}}{(\text{ストック/フロー})_{\text{物質代替前}}}$$

Merging lifecycle thinking and risk assessment

Chemicals, local health risk :

$$\Delta Risk = Population \frac{Consumption}{Person} \frac{Emission}{Consumption} \frac{C_{env}}{Emission} \frac{\Delta Dose}{C_{env}} \frac{\Delta EffectiveDose}{\Delta Dose} \frac{\Delta Risk}{\Delta EffectiveDose}$$


The diagram below the equation maps the terms to specific stages of the lifecycle thinking process:

- Population dynamics** (green box)
- Consumption behavior** (light green box)
- Emission process** (yellow box)
- Emission, Fate & Transport** (orange box)
- Intake** (red-orange box)
- Toxicodynamics** (orange-red box)
- Dose-Response relationship** (red box)

$\Delta Risk \Rightarrow DALY$ (Pennington et al. 2002)

Carbon dioxides, global health risk: (Scriver, 2008)

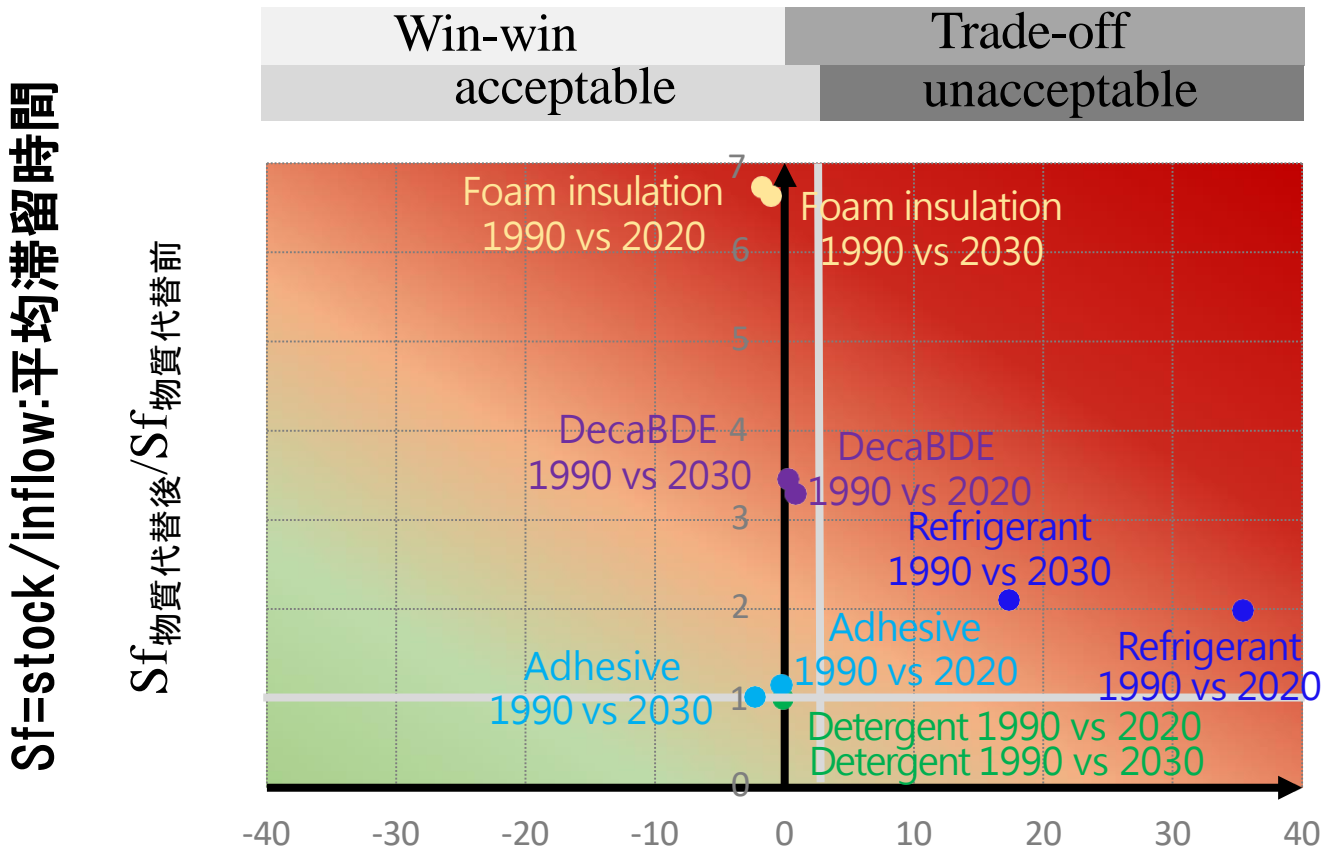
$$\Delta Risk = Population \frac{Consumption}{Person} \frac{Emission}{Consumption} \frac{\Delta Temp}{Emission} \frac{DALY}{\Delta Temp}$$

Risk Trade off ratio: Δ countervailing risk / Δ Target risk

Stock characteristics: Residence Time b / Residence time a

a: before substitution, b:after substitution

C-1. リスクトレードオフ管理図の提案



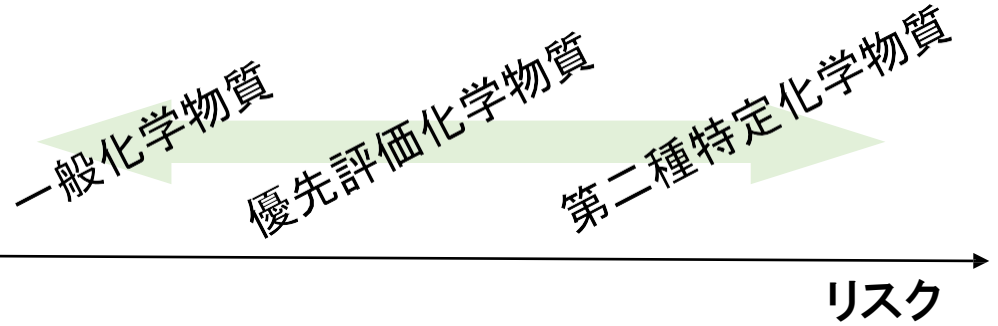
$$\text{トレードオフ比} = \frac{\text{対抗リスク増加量}}{\text{目標リスク削減量}}$$

学術的意義: Risk versus Risk:
Graham&Wiener (1997)の概念図の定量化

C-2. 現行の化学物質管理制度にリスクトレード オフ情報を組み込んだ化学物質管理

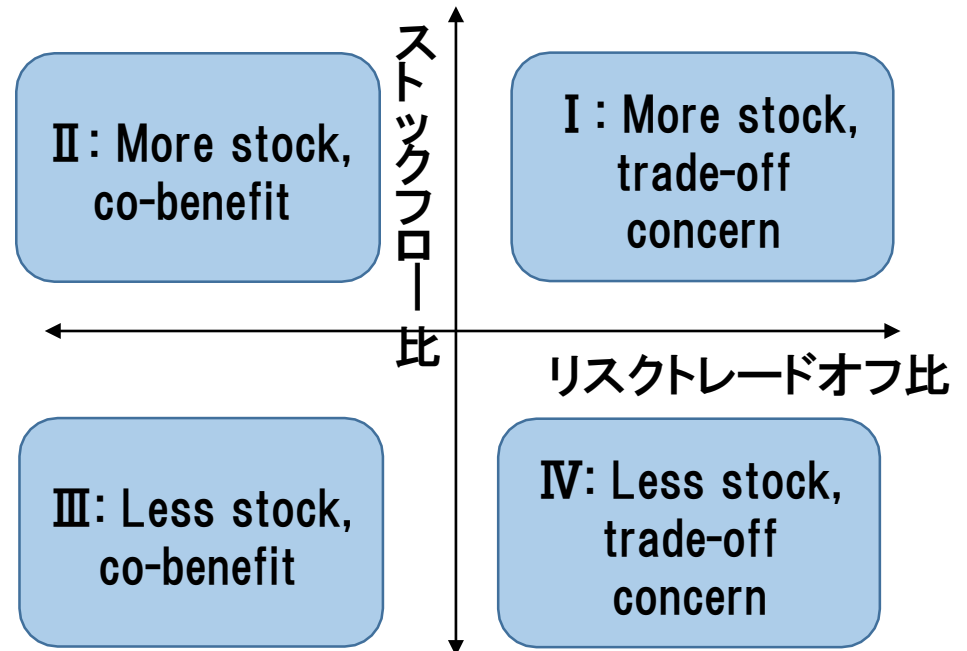
現行の評価: 網羅性と予防的視点

- ・段階的リスク評価(全物質スクリーニング+リスク評価)
- ・リスクの高い物質の特定(2特)
- ・**エンドポイントが物質固有**
- ・**リスク削減の多面的評価の不足**




現行の制度補完:

- ・技術ガイダンス+ライフステージ別、フロー・ストック をサプライチェーンを通じた曝露評価を通じ、著しいトレードオフが発生していないか。ストック性の高い物質になっていないか?(分解性+蓄積性+用途を反映)をモニタリング。ライフステージ別寄与の明確化。
- ・**多重なリスクマネジメントに資する知見の提供**



本日の話題

1. リスク評価とライフサイクル評価の融合に基づく意思決定支援

 2. 化学物質安全への関心事に答える評価に基づく意思決定支援

※マルチスケールでデータの関連性を眺める視点

化学物質全体を把握する

● 既往研究

	既往研究	概要	知見	課題
分類 ¹¹⁾	Mia Stenberg et al. 2009	有機化合物56302物質の構造データを主成分分析により次元削減し32グループに分類。その結果と有害指定リストを比較。	構造類似性に基づく分類と残留性有機汚染化合物の相関関係を明らかにした	主成分の正負により分類しており、統計的に正しい分類とは言えない
USEtox ¹²⁾	Evangelia Demou et al. 2011	産業化学物質の室内リスク評価による優先順位とUSEtoxの特性化係数による優先順位を比較。	毒性の強さのみでなく、暴露範囲にも重点をおいた評価と管理が必要	パラメータの収集に時間がかかる

● 本研究の新規性

	手法	新規性
本研究	化審法対象物質を主成分分析とクラスター分析により分類し毒性を推計。その結果を用いてUSEtoxを利用しリスクを推計。	<ul style="list-style-type: none"> 化審法における化学物質評価にUSEtoxを用いた 新規に合成された物質でも構造情報のみで大まかなリスクを定量化できる枠組みを構築した

対象物質と収集データ

● 対象物質

- 化審法対象物質
- CAS番号と対応している
- 製造・輸入数量が1 t以上の一般化学物質

規制分類 (略字)	特徴	対象物質数(全数)
第一種特定化学物質 (C1S)	難分解・高蓄積・長期毒性	27 (33)
監視化学物質 (M)	難分解・高蓄積・毒性不明	32 (38)
第二種特定化学物質 (C2S)	高残留性・慢性毒性	16 (23)
優先評価化学物質 (PA)	リスクが低いと言い切れない	169 (223)
一般化学物質 (G)	リスクが十分に低い	783 (約28,000)
合計		1027

● 収集したデータ

種類	数	データ	収集元
物理化学特性	13	分子量, 沸点, 蒸気圧, 生物蓄積係数など	EPI Suite, MOE
構造データ	68	体積, 原子数, 結合数, 結合の強さ, 電気的性質など	MOE
毒性データ	3	発癌性毒性, 反復投与毒性, 水生生物への毒性	OECD QSAR Toolbox
排出量	3	大気, 水域, 土壌それぞれへの排出量	PRTRデータ

方法

✓ コンピュータによる予測 = *in-silico*を利用した推計

➤ 物理化学特性推計

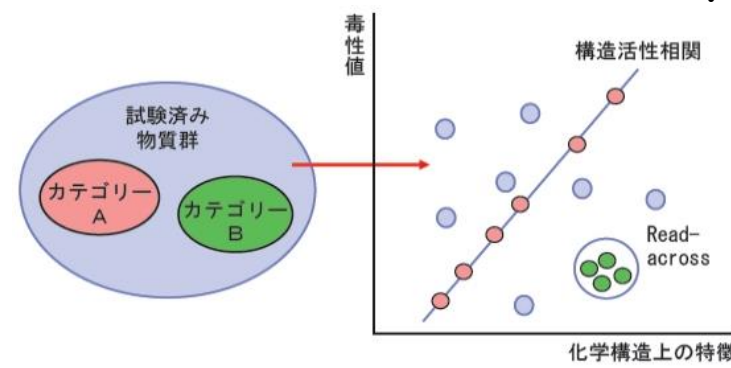
研究が進んでおり、信頼性の高いモデルが多数開発されている。
EPI (Estimation Programs Interface) Suite (EPA, 2012)は、これらをまとめたプログラムである。

➤ カテゴリーアプローチ

化合物の類似性に基づき毒性を推計する。
化学物質を構造類似性に基づき分類し、それぞれのグループで単回帰分析により推計式を算出する。

$$Tox = a \times P_{ow} + b$$

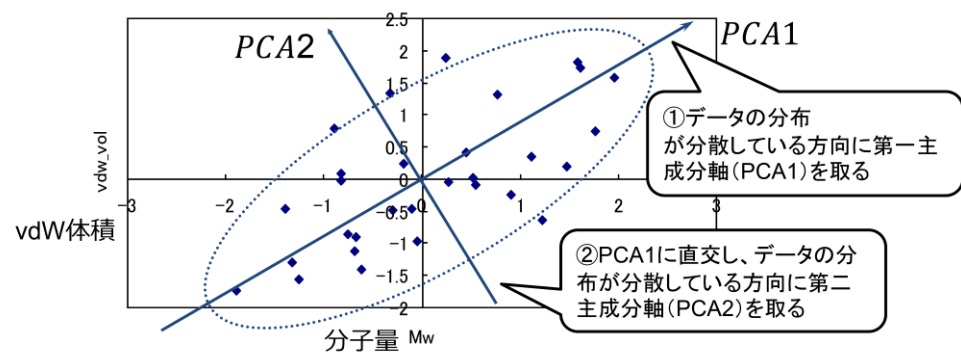
a, b : 定数
 P_{ow} : 水オクタノール分配係数



➤ 主成分分析

複数の説明変数を少数の一次式に変換することで、総合特性を表す

→ 相関のある多くの変数の値を、1つまたは小数個の合成変量(主成分)で表すことができる



$$PCA1 = a * Mw + b * vdw_vol$$
$$PCA2 = c * Mw + d * vdw_vol$$

方法 つづき

✓ **Life Cycle Assessment (LCA)**によるリスク推計 = **USEtox** (USEtox™, 2010)を用いる

2005年にUNEP-SETACが開発したLCA手法に基づく多媒体環境動態モデル
3スケール11コンパートメント, 媒体間移行と媒体内分解を考慮

$$IS = \sum_i CF_i \cdot M_i$$

IS : impact score (DALY(hum) or PDF*m³*d(eco))

CF : characterization factor (DALY/kg(hum) or PDF*m³*d/kg(eco))

M : emission (kg)

i : compartment

$$CF = iF \cdot EF$$

iF : intake fraction (kg_{intake}/kg_{emitted})

EF : effect factor (disease cases/kg(hum) or PAF*m³/kg(eco))

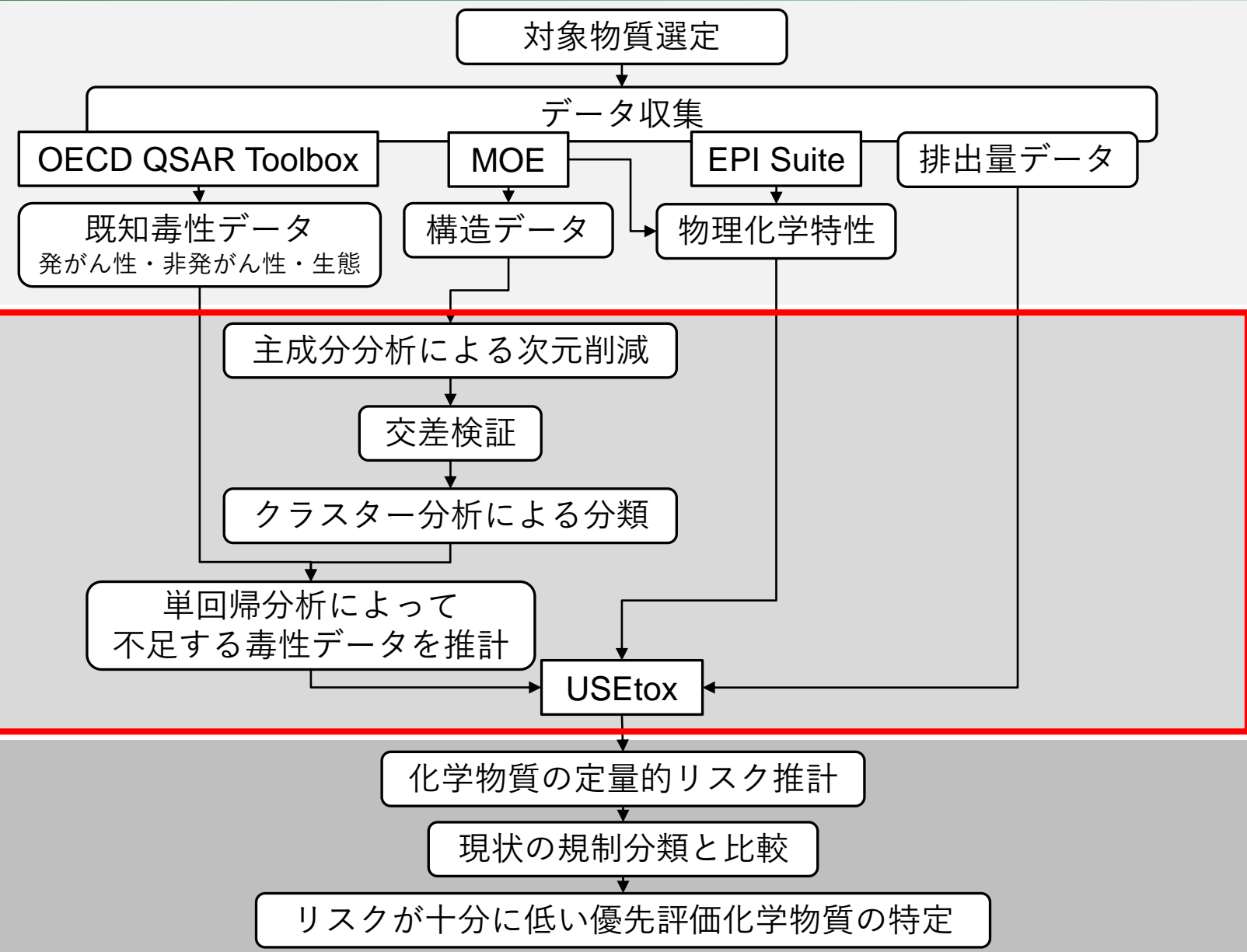
対象地域スケール : 日本全体

DALY : disability-adjusted life year
(余命指標)

PDF : potential disappeared
fraction

PAF : potential affected fraction

研究の枠組み



データベース
作成

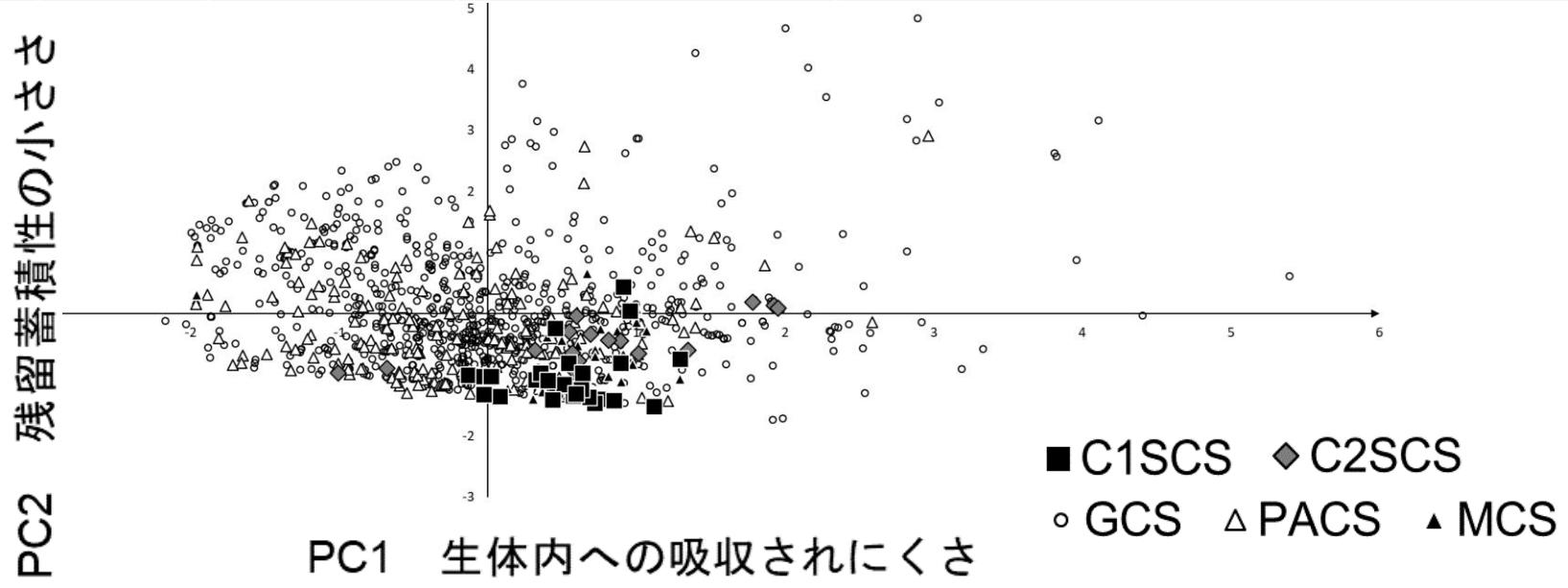
解析

評価

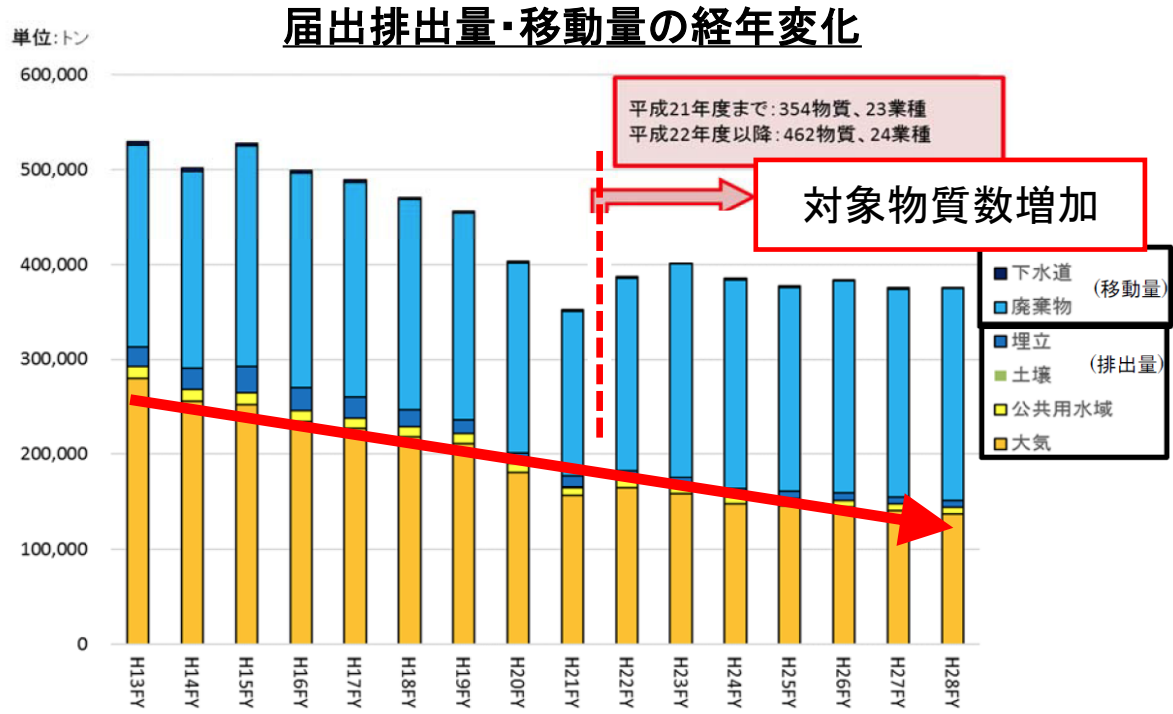
主成分分析の結果

●主成分分析結果

PC	固有値	寄与率	累積寄与率	各主成分の特徴	環境中リスクとの関係
1	27.4	40.3	40.3	サイズの大ささ	生体内への吸収されにくさ
2	9.1	13.4	53.7	極性の大きさ	小さいほど疎水性 = 高い残留蓄積性
3	7.0	10.3	64.0	柔軟性の小ささ	毒性の大きさ (芳香族)
4	3.7	5.4	69.4	ハロゲンの大きさ	毒性の大きさ
5	2.8	4.1	73.5	電氣的性質(水素結合供与体の少なさ)	生態膜の透過しにくさ



サプライチェーンの中での化学物質： PRTR制度の制定以後、化学物質排出量は削減を続けている。 (移動量の増減は顕著ではない)



排出量ベースでの評価

産業連関分析の適用

産業連関表の中分類108業種をPRTR対象業種(38業種)に揃える。

問題点

- PRTR対象業種⇔産業連関表業種分類の対応関係をより現実的に*。
- レオンチェフ逆行列は解析期間内で不変。生産額等を調整する必要あり。

*便宜的に、鉄スクラップ卸売業・石油卸売業・自動車卸売業・燃料小売りを商業全体に対応させるなど)

PRTR制度対象業種	産業連関表中分類項目
金属鉱業	→ 金属鉱物
原油・天然ガス鉱業	→ 石炭・原油・天然ガス
食料品製造業	→ 食料品
飲料・たばこ・飼料製造業	→ 飲料、飼料・有機質肥料、たばこ
繊維工業	→ 繊維工業製品
衣服・その他の繊維製品製造業	→ 衣服・その他の繊維既製品
木材・木製品製造業	→ 木材・木製品
家具・装備品製造業	→ 家具・装備品
パルプ・紙・紙加工業	→ パルプ・紙・板紙・加工紙
出版・印刷・同関連業	→ 印刷・製版・製本
化学工業	→ 化学製品(大)
石油製品・石炭製造業	→ 石油・石炭製品(大)
プラスチック製品製造業	→ プラスチック製品
ゴム製品製造業	→ ゴム製品
なめし革・同製品・毛皮製造業	→ なめし革・毛皮・同製品
窯業・土石製品製造業	→ 窯業・土石製品(大)
鉄鋼業	→ 鉄鋼(大)
非鉄金属製造業	→ 非鉄金属(大)
金属製品製造業	→ 金属製品(大)
一般機械器具製造業	→ はん用機械(大)・生産用機械(大)
電気機械器具製造業	→ 電子部品(大)、電気機械(大)、情報・通信機器(大)
輸送用機械器具製造業	→ 輸送機械
精密機械器具製造業	→ 業務用機械
武器製造業	→ 業務用機械
その他の製造業	→ その他の製造工業製品
電気業	→ 電力
ガス業	→ ガス・熱供給
熱供給業	→ ガス・熱供給
下水道業	→ 水道
鉄道業	→ 鉄道輸送
倉庫業	→ 倉庫
石油卸売業	→ 商業
鉄スクラップ卸売業	→ 商業
自動車卸売業	→ 商業
燃料小売業	→ 商業
洗濯業	→ 洗濯・理容・美容・浴場業
写真業	→ その他の対個人サービス
自動車整備業	→ 自動車整備・機械修理
機械修理業	→ 自動車整備・機械修理
商品検査業	→ その他の対個人サービス
計量証明業	→ その他の対個人サービス
一般廃棄物処理業	→ 廃棄物処理
産業廃棄物処分量	→ 廃棄物処理
医療業	→ 医療
高等教育機関	→ 教育
自然科学研究所	→ 研究

産業連関分析とその応用

行: 生産額50における需要の内訳を表す。

列: 生産額50に対して必要な材の内訳を表す。

	産業A	産業B	中間投入計	最終需要	生産額
産業A	10	20	30	20	50
産業B	30	50	80	20	100
付加価値	10	30			
生産額	50	100			

	産業A	産業B
産業A	0.2	0.2
産業B	0.6	0.5

最終需要 = 国内需要 + 輸出 - 輸入

③: 投入係数表

(①を列ごとに各産業の生産額②で除す)

③ = A , ④ = F , ⑤ = X とした時、

AX (中間投入ベクトル) + F (国内最終需要ベクトル) = X (国内生産額ベクトル)

$$X = (I^* - A)^{-1} \cdot F \quad ※I^*: \text{単位行列}$$

$(I - A)^{-1}$: レオンチェフ逆行列 (L と表記)

産業連関分析とその応用 つづき

レオンチェ
フ逆行列
 $(I - A)^{-1}$

L : 需要が1単位増加した際に生産額がどれだけ増えるかを表す。

例). 建設業の需要が1単位増える

- ① 直接的な需要として建設業の生産が増える。
- ② 建設業の生産に必要な業種の生産も増える
- ③ 生産の増えた業種の生産を満たすために他の業種の生産も増える。

L は経済波及の仕組み = 生産構造を表している。

L が大きい = 需要を満たすために必要な生産が多い

産業連関分析とその応用 つづき

$$X(\text{国内生産}) = L(\text{レオンティエフ逆行列}) \cdot F(\text{国内需要})$$

上式を排出量を組み込んだ式に変換する。

$$g = p f L y_s y_v \quad *$$

g : 化学物質排出量 (kg)

f : 各産業の排出強度 (排出量(kg) / 生産額(円))

p : 人口 (人)

L : レオンティエフ逆行列

y : 最終需要額

y_s : 人口一人当たりの需要構造 (ベクトル)

y_v : 人口一人当たりの需要額 (スカラー) (円)

$$p f L y_s y_v = p \cdot \begin{bmatrix} f_1 \\ \vdots \\ f_n \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a & \cdots & b \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ c & \cdots & d \end{bmatrix} \cdot y_s \cdot \begin{bmatrix} m \\ \vdots \\ n \end{bmatrix} = p \cdot y_s \cdot \begin{bmatrix} f_1 a m + \cdots + f_1 b n \\ \vdots \\ f_n c m + \cdots + f_n d n \end{bmatrix}$$

各産業種ごとに排出係数を設定する。

産業連関分析とその応用 つづき

各項の各年(平成12、17、23年)における変化量を算出し、寄与率を推定

$$g = p f L y_s y_v$$

(黒字: 基準年の値、赤字: 経年の値)

$$\Delta g = (p - p) f L y_s y_v + p (f - f) L y_s y_v + p f (L - L) y_s y_v + p f L (y_s - y_s) y_v + p f L y_s (y_v - y_v)$$

$$p f L y_s y_v = p \cdot \begin{bmatrix} f_1 \\ \vdots \\ f_n \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a & \cdots & b \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ c & \cdots & d \end{bmatrix} \cdot y_s \cdot \begin{bmatrix} m \\ \vdots \\ n \end{bmatrix} = p \cdot y_s \cdot \begin{bmatrix} f_1 a m + \cdots + f_1 b n \\ \vdots \\ f_n c m + \cdots + f_n d n \end{bmatrix}$$

生産構造変化(L)

a~bの行要素が大きくなる→産業1の他産業への影響が大きくなる。
つまり、他産業からの需要の増加を意味する。

cが大きくなる→産業1の生産工程における産業nへ依存度が高くなる。

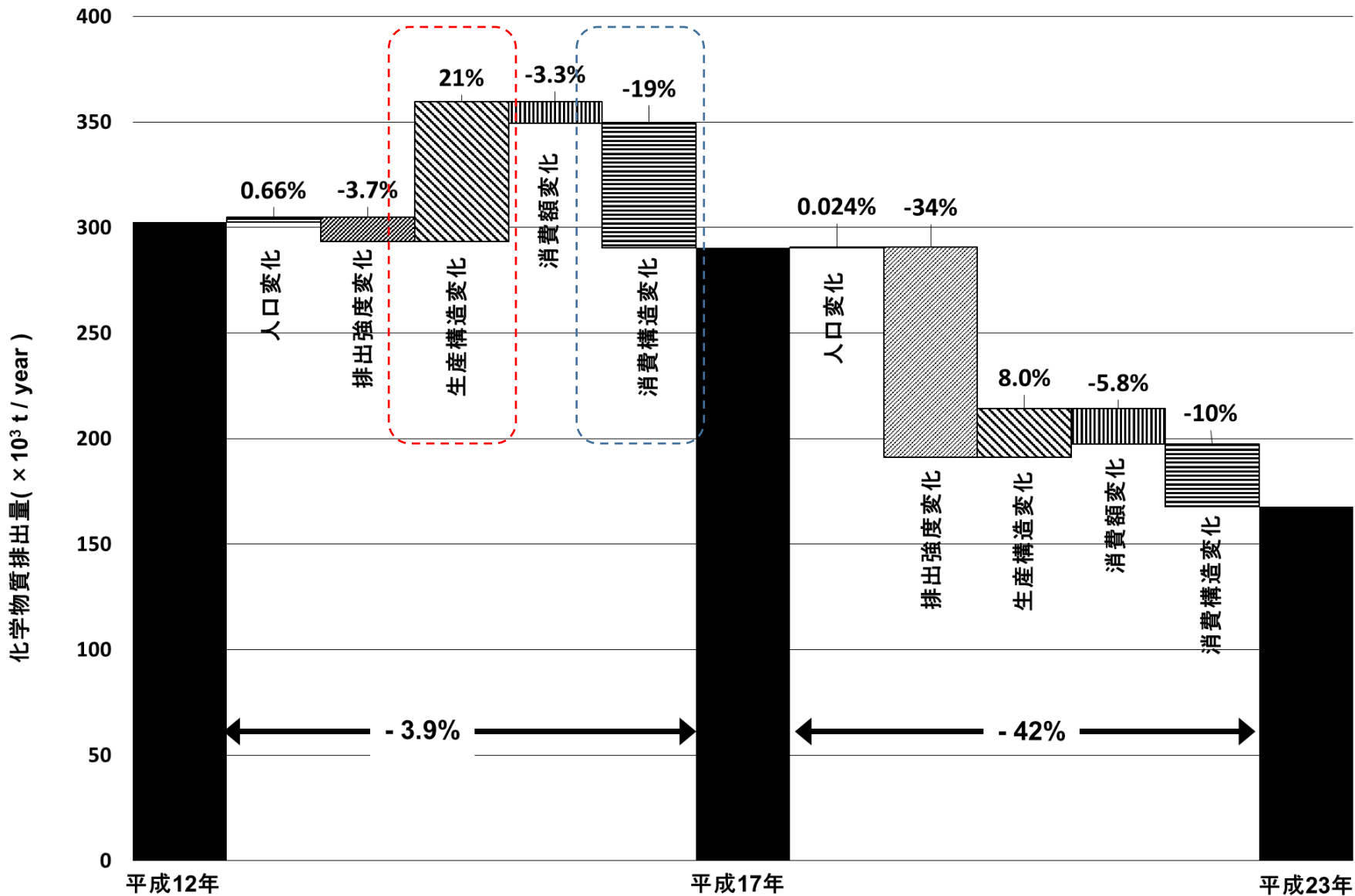
需要構造変化(y_v)

mが小さくなる→需要全体における、産業1の割合が小さくなる。
つまり、需要が減少した or 輸入額が増加した。

需要額変化(y_s)

国内消費活動そのものが増加、減少した。

産業連関分析とその応用 結果



$$pfLy_s y_v = p \cdot \begin{bmatrix} f_1 \\ \vdots \\ f_n \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a & \cdots & b \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ c & \cdots & d \end{bmatrix} \cdot y_s \cdot \begin{bmatrix} m \\ \vdots \\ n \end{bmatrix} = p \cdot y_s \cdot \begin{bmatrix} f_1 am + \cdots + f_1 bn \\ \vdots \\ f_n cm + \cdots + f_n dn \end{bmatrix}$$

増加要因

生産構造の変化によって**21%の増加**

特に原油・天然ガス鉱業が生産構造変化による排出量増の中で支配的

要因

原油・天然ガス鉱業の感応度係数(a~bなどの行和)が2.2→3.2へ(需要増加)

特に、電気業からの需要が約2倍になるなど、変化が一番大きい。

これは、この期間中に原油価格が約3.3倍になったことが大きいと考えられる。

結果として、各産業のサプライチェーンにおいてエネルギーへの負担割合が増し、感応度係数の増加に繋がった。

減少要因

需要構造の変化によって**19%の削減**

特に原油・天然ガス鉱業が需要構造変化による排出量減の中で支配的

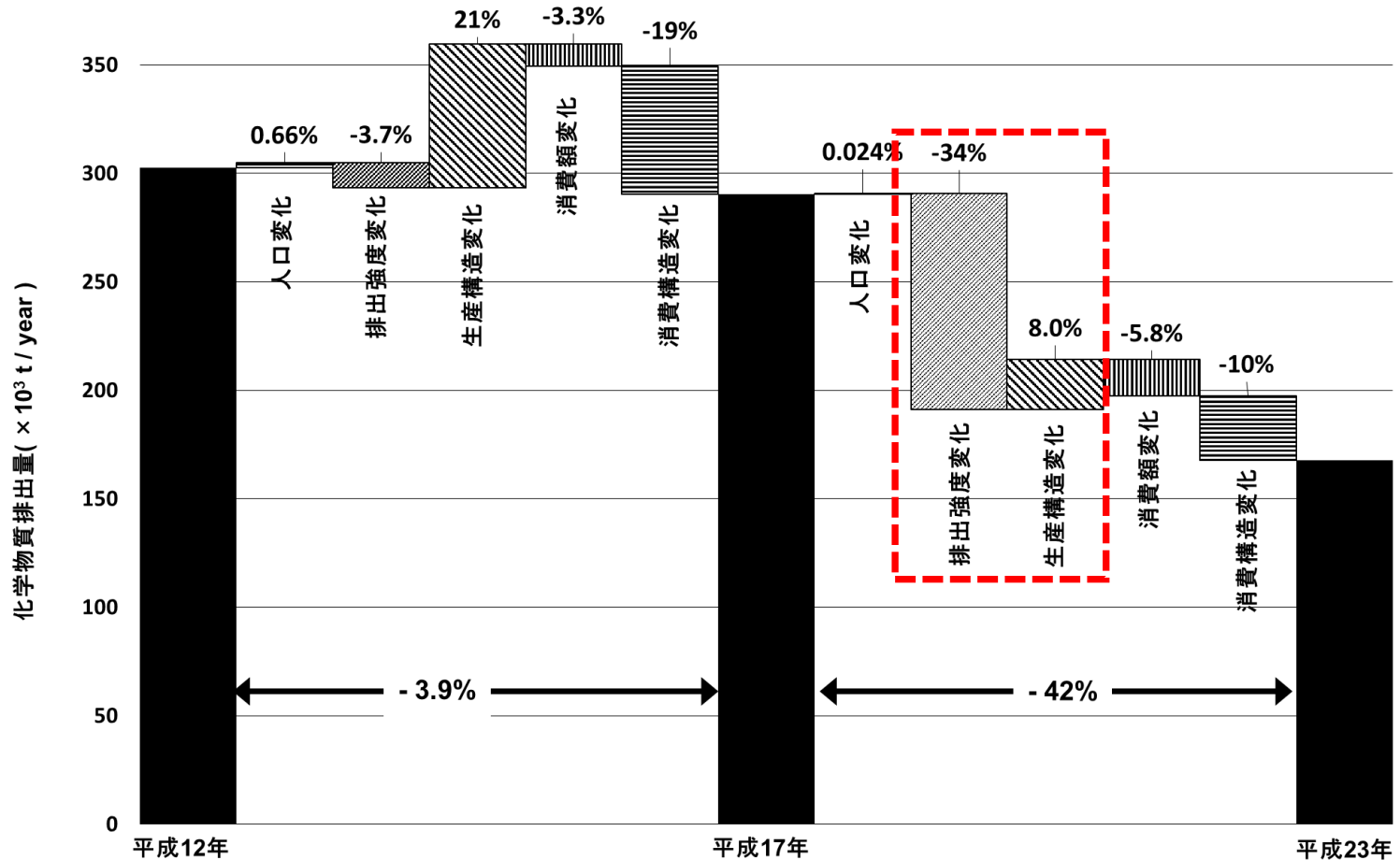
要因

増加と同じ要因で、原油価格の上昇によって輸入額が増加し、国内需要の比率(式中 m 等)が下がったと考えられる。

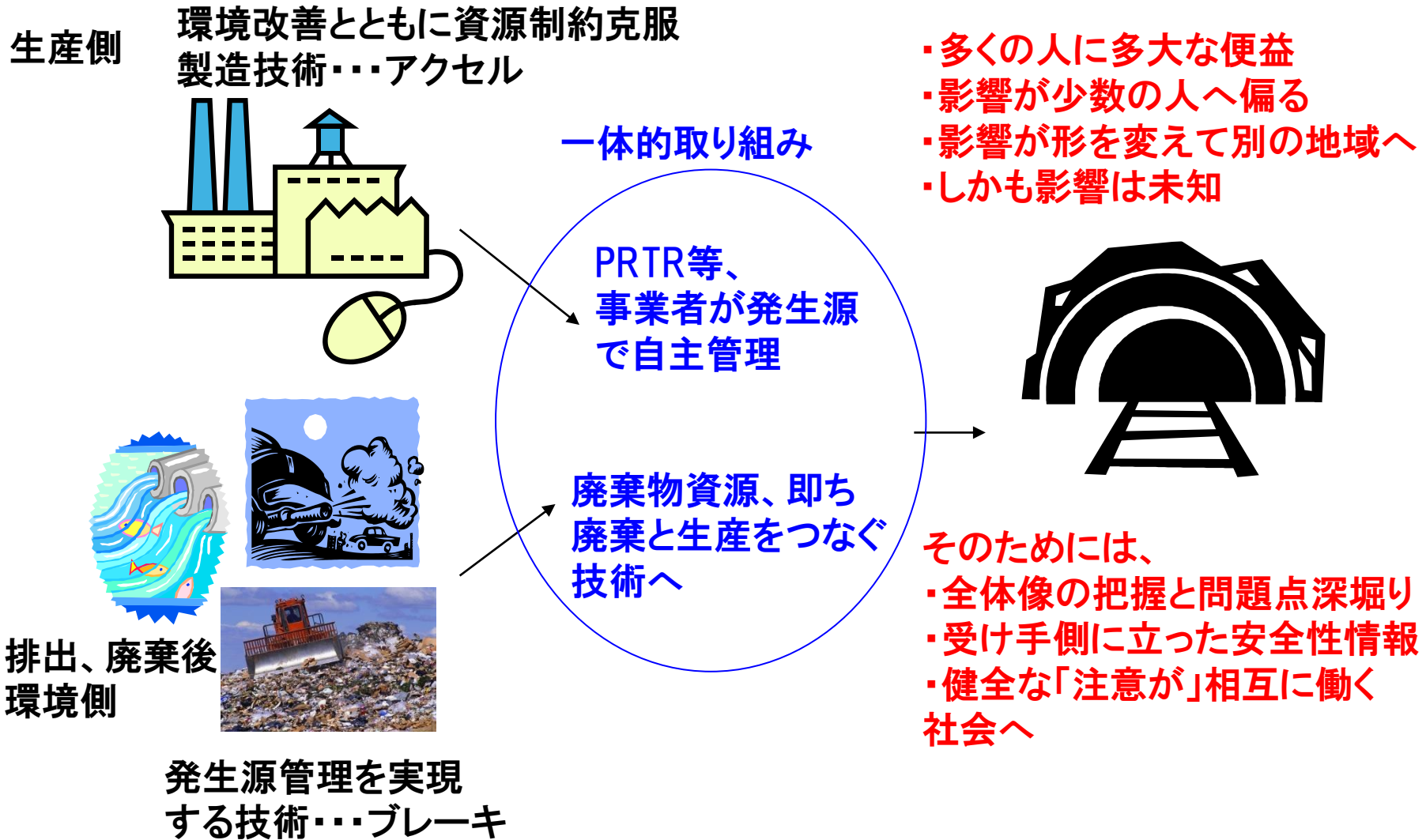
その他の要因は、排出量変化にほとんど寄与していなかった。

平成
17→23年

全体として**42%の削減**
排出強度の変化によって**34%の削減**

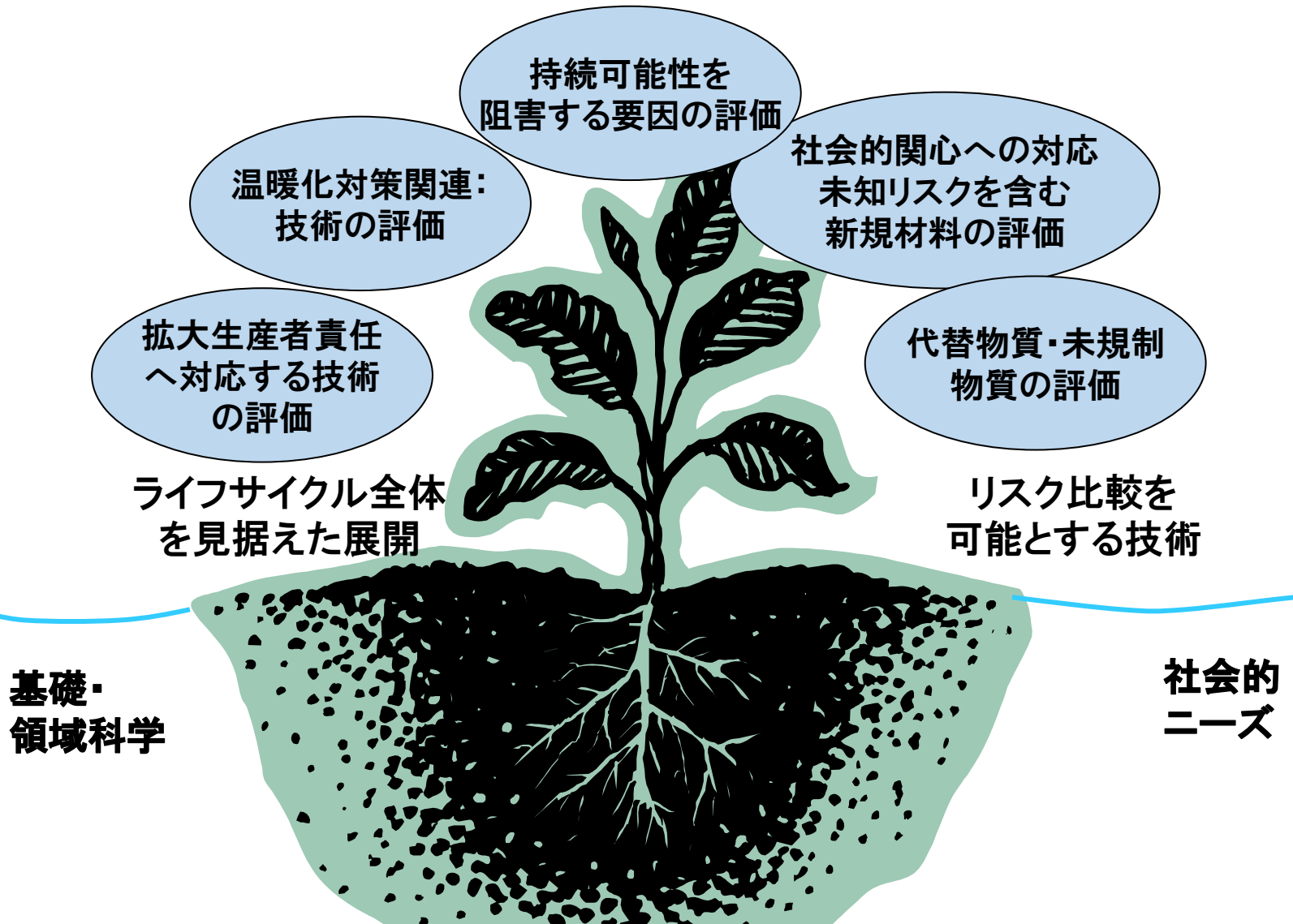


Society5.0 環境産業技術にしめるリスク評価技術の位置



Society5.0 環境産業技術にしめるリスク評価技術の位置 ……つづき

複数の領域専門科学



評価・マネジメントの科学: 全体像を描き, Priorityをつけ, Projectで推進

まとめに代えて

新たな社会における化学物質安全を見据えたとき、

- ・社会のニーズとともにリスク評価の変容(進化)
- ・リスク評価技術は制度と両輪をなして社会に定着
- ・マルチプルリスク、Risk Risk trade offを前提としたリスク管理

=> 複数の深い専門性に根ざしたgeneralistの役割がより重要

本発表は、以下の研究をもとにしております。記して謝意を表します。

経済産業省化学物質管理課 大学連携事業

環境省 環境研究総合推進費(1-1501)