



Title	廃棄物ライフサイクルにおける有害物質のサブスタンスフローアナリシス (第2報)
Author(s)	井上, 雄三; 山田, 正人; 木苗, 直秀 他
Description	第7回衛生工学シンポジウム (平成11年11月11日 (木) -12日 (金) 北海道大学学術交流会館) . 2 廃棄物 2 . 2-1
Citation	衛生工学シンポジウム論文集, 7, 37-42
Issue Date	1999-11-01
Doc URL	<a href="https://hdl.handle.net/2115/7261">https://hdl.handle.net/2115/7261</a>
Type	departmental bulletin paper
File Information	7-2-1_p37-42.pdf



2-1

廃棄物ライフサイクルにおける有害物質のサブスタンスフローアナリシス  
(第2報)

○井上雄三、山田正人 (国立公衆衛生院)、木苗直秀 (静岡県立大学)  
小野芳朗 (岡山大学) 吉野秀吉 (神奈川県環境化学センター)  
市川 勇、田中 勝 (国立公衆衛生院)

1. はじめに

鉛は、鉛蓄電池の電極やハンダ、無機薬品原料など広い分野で用いられており、私たちの生活に密接な金属である<sup>1)</sup>。近年、WHOの鉛の飲料水基準の見直しに伴い我が国の水質基準や環境基準が0.01mg/lと厳しくなり、私たちは改めて鉛の有害性が砒素なみに高いことを認識させられた。しかし鉛の生活環境や産業環境における動態および環境移行量はわかっておらず、リスク管理を行う上で大きな障害となっている。鉛のライフサイクルフローを考えた場合、製品の製造・使用および廃棄過程で環境(大気・水域・土壌)中に放出され、最終的には生物体内に蓄積されることにより環境・健康リスクが増大する可能性が十分考えられる<sup>2)</sup>。そこで、本研究では鉛のマテリアルフローを明らかにし、それを基にサブスタンスフロー解析を行うことによって、鉛の動態解明を行いリスク管理の方策を探ることとする。

2. 研究方法

2.1 マテリアルフローの作成

現在、国内において鉛がどの程度輸入・採掘され、精錬を経て製品化されているか、また流通・消費・廃棄およびリサイクルがどの程度行われているのかを把握するため、鉛のマテリアルフローを作成した。なお、調査対象年度は平成7年(1995年)度とした。各段階における調査方法を次に述べる。資源・原材料・部品段階：資源・原材料・部品については、通産省資源統計年報<sup>3)</sup>および同省機械統計年報<sup>4)</sup>を使用した。ただし、部品についての輸出・輸入量は、関係者へのヒアリングを行い、データを収集した<sup>5, 6)</sup>。製品段階：調査対象製品に関する鉛のデータ収集は、既存文献調査<sup>7)</sup>あるいは主に関係者へのヒアリングを行い、情報<sup>8, 9)</sup>を収集した。製品における年間の鉛使用量は、各製品1個当たりの鉛含有量を調査し、これに年間生産量を乗じて求めた。製品としての鉛が輸出入

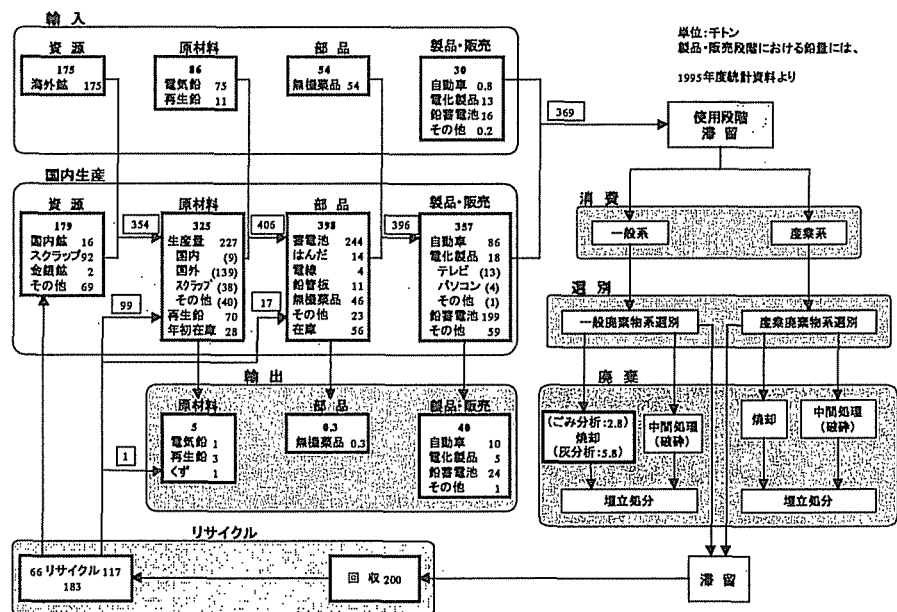


図1 鉛のマテリアルフロー(1995年度)

される量についても、同様にして算出した。電化製品や自動車のような多くの部品から構成される製品に関する鉛量は、①製品に含まれる鉛が、どのような鉛使用部品から構成されているかを把握、②1製品当たりの鉛含有量を算出し（部品中の鉛含有量を各々算出・累計する）、そして③製品ごとの年間鉛量を計算した。

### 3. 結果と考察

#### 3.1 鉛のマテリアルフロー

収集したデータを用いて、鉛のマテリアルフローを作成した（図1）。それによると、わが国では1995年度輸入鉱50%、国内鉱およびスクラップ・その他50%が精錬され、35.4万tの鉛地金（資源段階）が生産される。鉛地金は次に電気鉛（原材料）に精製され、国内32.5万t、輸入含めて40.6万tが市場に供給される。鉛地金の71.7%が原材料（電気鉛）となり、原材料段階から部品段階に入ってくる鉛量の94.1%が実際の部品になっている。一方、部品段階から製品・販売段階に入ってくる鉛量の95.7%は製品として利用されており、ほぼ全量の鉛を製品段階で押さえることができた。従来製品段階で高々8割程度の鉛を押さえるに過ぎなかったが、本研究ではそれに大量含有製品のガラス、乾電池、塗料、塩ビ製品を加えることによって製品への鉛の配分率を上げることができた。

実際に私たちの生活環境に入ってくる製品・販売段階における鉛量の内訳を表1に示す。鉛蓄電池（バッテリー、小型シール電池）が55%、バッテリーを部品の一部として組みこんでいる自動車が22%、塩ビ製品が7%である。電化製品中の鉛量は全体の7%であるが、そのうちの96%が、テレビおよびデスクトップ型パソコンのブラウン管に含まれている。ガラス製品と塩ビ製品の割合の high が注目される。

一方、廃製品から鉛がリサイクルされる割合は、回収段階で20万t、リサイクルされた量として18.3万tとなり、製品段階で扱われている鉛の約50%に達している。

図1のマテリアルフローにおいて、消費・滞留段階～滞留間のコンパートメントの鉛の数値がほとんどなく、焼却コンパートメントの値があるに過ぎない。その値は都市ごみ中の鉛は5千t/年、多くても1万t/年で、この量が一般廃棄物の最終処分場に入ってくる。回収鉛を除いた残りの19万tの行き先は不明である。

#### 3.2 鉛のサブスタンスフローアナリシス

表1 製品中の鉛含有量  
(1995年度) 単位:t 割合%

自動車	自動車	85880.2	22.68
	自動二輪	80153.5	21.17
		5726.7	1.51
家電製品		17890.4	4.72
	冷蔵庫	28.5	0.01
	洗濯機	13.4	0.00
	ビデオ	188.2	0.05
	オーディオ	25.9	0.01
	テレビ	13076.9	3.45
	DTパソコン	4380.1	1.16
電子レンジ	177.5	0.05	
大量含有製品		254656.3	67.25
	鉛蓄電池	199316.3	52.64
	鉛チューブ	422.0	0.11
	ガラス製品	37213.0	9.83
	電球	4928.5	1.30
	乾電池	4609.6	1.22
その他	塗料	8167.0	2.16
		20246.0	5.35
	吸水管	395.0	0.10
	排水管	2196.0	0.58
	通気管	34.0	0.01
	陶磁器	919.0	0.24
合計	ゴム	379.0	0.10
	塩ビ製品	16323.0	4.31
合計		378672.9	100.00

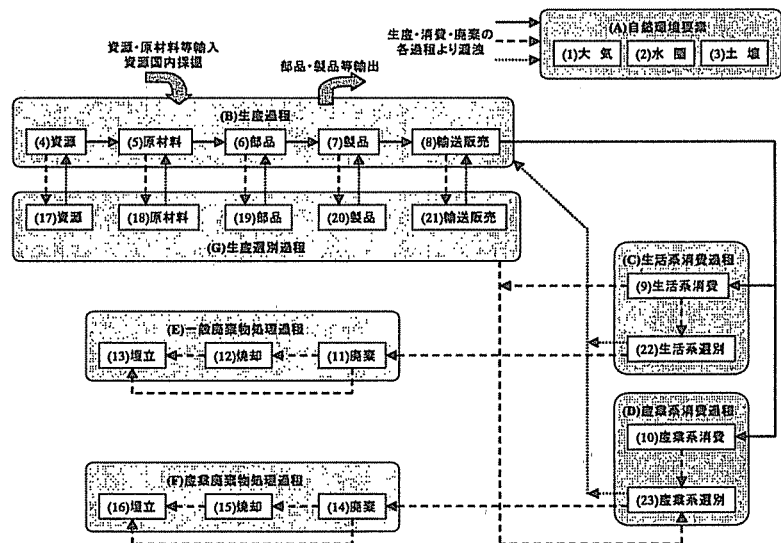


図2 サブスタンスフローモデルのシステム構成

## (1) サブスタンスフローモデルの作成

ある領域内に存在する鉛の総量は変化しないので、製造・輸送・消費・廃棄等の各コンパートメント間での鉛の物質収支に着目した物質収支モデルによる鉛の各コンパートメントへの蓄積および環境移行量を推定することが可能となる。これがサブスタンスフローアナリシスSFAの特徴である。サブスタンスフローアナリシスを行う場合、対象物質のサブスタンスフロー（対象物質の採掘・精錬から製品段階を経て、消費・廃棄・リサイクルに至る全ライフサイクル）を作成する必要がある。前節のマテリアルフロー（図1）を参考に図2に示すサブスタンスフローのシステムを構築した。

本フローは、表2に示すように(A)～(G)の7過程、全24個のコンパートメントから構成されており、

表2 サブスタンスフローモデルにおける各コンパートメントの説明

過程	番号	コンパートメント名	コンパートメントの説明
(A) 自然環境	1	大 気	自然環境要素としての大気
	2	水 圏	自然環境要素としての海洋・湖沼・河川など
	3	土 壌	自然環境要素としての土壌
(B) 生産過程	4	資源採掘	鉛鉱の採掘及び輸入
	5	原材料製造	鉛鉱を精錬した電気鉛の製造及び輸入
	6	部品製造	蓄電池電極や無機薬品等の製造及び輸入
	7	製品製造	自動車・鉛蓄電池等の鉛含有製品の製造及び輸入
	8	輸送販売	生活系及び産業系への製品の輸送及び販売
(C) 生活系消費過程	9	生活系消費	一般消費者が製品を使用
	22	生活消費廃棄物選別	生活消費で生じた一般廃棄物から資源回収
(D) 産業系消費過程	10	産業系消費	産業活動に製品を使用
	23	産業消費廃棄物選別	産業活動で生じた産業廃棄物から資源回収
(E) 一般廃棄物処理過程	11	一般廃棄	資源回収後の一般廃棄物を可燃及び不燃物に選別
	12	焼 却	一般廃棄物の焼却
	13	埋 立	一般廃棄物の埋立
(F) 産業廃棄物処理過程	14	産業廃棄	資源回収後の産業廃棄物を可燃及び不燃物に選別
	15	焼 却	産業廃棄物の焼却
	16	埋 立	産業廃棄物の埋立
(G) 生産選別過程	17	資源廃棄物選別	鉛鉱の採掘過程で生じた廃棄物から資源回収
	18	原材料廃棄物選別	電気鉛の製造過程で生じた廃棄物から資源回収
	19	部品廃棄物選別	鉛含有部品製造過程で生じた廃棄物から資源回収
	20	製品廃棄物選別	鉛含有製品製造過程で生じた廃棄物から資源回収
	21	輸送販売廃棄物選別	製品の輸送及び販売過程で生じた廃棄物から資源回収

生産過程、生活系および産業系消費過程（輸出も含む）、廃棄物処理過程が主フローを構成している。一方、これら生産過程および消費過程のリンクするところに選別過程をおき、この過程を経てリサイクルおよび廃棄フローに分岐する構成となっている。また、資源・原材料は輸入および国内採掘によって供給され、最終的には、一般および産業廃棄物または自然環境（大気・水圏・土壌）に蓄積されるモデルとなっている。

## (2) 基礎式の作成

図2で作成したサブスタンスフローを用いて、対象物質の移動を表すモデルをあるコンパートメントから次のコンパートメントに移動する速度（単位時間あたりの移動量；フラックス）を定式化する。「鉛の移動速度は前コンパートメントに蓄積している鉛量に比例する」という仮定に基づき、定式化した。

$$\frac{dM_i}{dt} = \alpha_{i-1}M_{i-1} + \alpha_i M_i + I_i \quad i=1 \cdots n$$

ここに、 $M_i$ は第*i*コンパートメントの鉛量、 $\alpha_{i-1}M_{i-1}$ 、 $\alpha_i M_i$ はそれぞれ第*i*コンパートメントへの対象物質の流入量および流出量、 $I_i$ は第*i*コンパートメントへの外部からの流入量、 $\alpha_i$ は分配率を表す。上式を差分によって離散化すると24元の連立一次方程式を得る。なお、解析はMicrosoft Excelのシート上リンクソフトで行った。

### (3) 対象物質の分配係数の決定

サブスタンスフローモデルの解析を行うためには、各コンパートメントでの分配係数を決定しなければならない。各コンパートメントにおける係数の決定方法は次のようになる。(A) 自然環境(1)～(3)：本報告では気圏、水圏、土壌圏相互の物質移動は考慮していない。

(B) 生産過程(4)～(7)：各コンパートメントでの環境移行率（大気・水圏・土壌）および廃棄率は、PRTRによる鉛の排出データを参考に推定を行った。なお、PRTRのデータは神奈川県化学物質使用実態調査結果<sup>10)</sup>を利用した。

(8)～(10)：輸送販売コンパートメントにおける生活系および産業系消費率については、鉛が使用されている製品が生活系・産業系に流通する割合（表3）より算出した。また、生活系消費コンパートメントでは、表4に示したように製品が使用された後一般系選別・産業系選別コンパートメントのどちらかに割付した。

(11)～(23)の各コンパートメント：正確な資料がないため、適当な分配率を定めた。産業廃棄コンパー

表3 輸送販売プロセスにおける分配率の推定

	生活消費率	生活製品鉛量[t]	産業消費率	産業製品鉛量[t]
自動車	0.73	58,512	0.27	21,641
自動二輪車	0.8	4,581	0.2	1,145
冷蔵庫	0.7	20	0.3	9
洗濯機	0.9	12	0.1	1
ビデオ	0.9	169	0.1	19
オーディオ	1	26	0	0
テレビ	0.7	9,154	0.3	392
パソコン	0.5	2,190	0.5	2,190
電子レンジ	0.8	142	0.2	35
小型シール電池	0	0	1	20,878
自動車用蓄電池	0.73	101,360	0.27	37,489
二輪車用蓄電池	0.8	3,163	0.2	791
鉛チューブ	1	422	0	0
ガラス製品	0.9	6,107	0.1	679
電球	0.5	2,464	0.5	2,464
乾電池	0.8	3,688	0.2	922
塗料	0.1	817	0.9	7,350
陶磁器	1	98	0	0
ゴム	1	644	0	0
塩ビ製品	0	0	1	24,777
合計	0.62	193,568	0.38	120,783

表4 生活消費プロセスにおける分配率の推定

一般選別品	鉛量[t]	産業選別品	鉛量[t]
冷蔵庫	20.0	自動車	58,512.0
洗濯機	12.0	自動二輪車	4,581.4
ビデオ	169.4	自動車用蓄電池	101,359.6
オーディオ	25.9	二輪用蓄電池	3,162.8
テレビ	9,153.8		
DTパソコン	2,190.0		
電子レンジ	142.0		
鉛チューブ	422.0		
ガラス製品	6,106.5		
電球	2,464.2		
乾電池	3,687.6		
塗料	816.7		
陶磁器	98.0		
ゴム	644.0		
合計	25,952.2	合計	167,615.8

表6 各プロセスへの鉛流入量

プロセス名	項目	入力量 千t/年
(4) 資源採掘	資源輸入	175
	国内採掘	87
(5) 原材料製造	原材料輸入	86
(6) 部品製造	部品輸入	54
(7) 製品製造	製品輸入	30
合計		432

トメントでは埋立、焼却とも分配率をそれぞれ50%とした。

以上の手法により各コンパートメントにおける対象物質の分配率を決定した。決定した分配率を表5に示す。

なお、輸入および国内採掘によってモデル内に流入する鉛量は、前述のマテリアルフロー調査結果に基づき、資源採掘コンパートメントにおいては国内採掘と輸入を、原材料製、部品製造および製品製造では輸入による流入を考慮しており、その総量は年間43.2万tと設定した（表6）。

### (4) 解析結果

経過時間 $t=0$ における各コンパートメントの蓄積量はすべて0と設定し、時間刻み $\Delta t=0.5$ 年、解析終了時刻を10年とした。本モデルでは、輸入・国内採掘によりモデル内に流入する鉛および各種選別コンパートメントから生産過程に移行する鉛は、コンパートメント内で蓄積することなく、全量

表5 各プロセスにおける対象物質の分配率

(A) 自然環境因子

(1) 大気	分配率
水域移動率(2)	0
土壌移動率(3)	0
(2) 水域	分配率
大気移動率(1)	0
土壌移動率(3)	0
(3) 土壌	分配率
大気移動率(1)	0
水域移動率(2)	0

(B) 生産過程

(4) 資源採掘	分配率
大気発散率(1)	0.04
水域発散率(2)	0.002
土壌発散率(3)	0.002
原材料製造率(5)	0.92
資源輸出率(24)	0
廃棄資源率(17)	0.036
(5) 原材料製造	分配率
大気発散率(1)	0
水域発散率(2)	0.0005
土壌発散率(3)	0.0005
部品製造率(6)	0.96
原材料輸出率(24)	0.01
廃棄資源率(18)	0.029
(6) 部品製造	分配率
大気発散率(1)	0.004
水域発散率(2)	0.001
土壌発散率(3)	0.001
製品製造率(7)	0.9
部品輸出率(24)	0
廃棄資源率(19)	0.094
(7) 製品製造	分配率
大気発散率(1)	0.0008
水域発散率(2)	0.0002
土壌発散率(3)	0
製品製造率(8)	0.9
製品輸出率(24)	0.095
廃棄資源率(20)	0.004
(8) 輸送販売	分配率
大気発散率(1)	0
水域発散率(2)	0
土壌発散率(3)	0
生活消費率(9)	0.62
産業消費率(10)	0.38
廃棄資源率(21)	0

(C) 生活系消費過程

(9) 生活系消費	分配率
大気発散率(1)	0
水域発散率(2)	0
土壌発散率(3)	0
一般廃棄率(11)	0
産業廃棄率(14)	0
一般選別率(22)	0.13
産業選別率(23)	0.87
(22) 生活系選別	分配率
大気発散率(1)	0.005
水域発散率(2)	0.001
土壌発散率(3)	0.005
資源リサイクル率(4)	0.1
原材料リサイクル率(5)	0.1
部品リサイクル率(6)	0
製品リサイクル率(7)	0
生活消費財廃棄率(11)	0.789

(D) 産業系消費過程	
(10) 産業系消費	分配率
大気発散率(1)	0
水域発散率(2)	0
土壌発散率(3)	0
産業廃棄率(14)	0
産業選別率(23)	1
(23) 産業系選別	分配率
大気発散率(1)	0.005
水域発散率(2)	0.005
土壌発散率(3)	0.005
資源リサイクル率(4)	0.24
原材料リサイクル率(5)	0.36
部品リサイクル率(6)	0
製品リサイクル率(7)	0
産業消費財廃棄率(14)	0.385

(E) 一般廃棄物処理過程	
(11) 一般廃棄	分配率
大気発散率(1)	0
水域発散率(2)	0
土壌発散率(3)	0
焼却率(12)	0.85
埋立率(13)	0.15
(12) 一般焼却	分配率
大気発散率(1)	0.01
水域発散率(2)	0.01
土壌発散率(3)	0
埋立率(13)	0.98
(13) 一般埋立	分配率
大気発散率(1)	0
水域発散率(2)	0.01
土壌発散率(3)	0.001

(F) 産業廃棄物処理過程

(14) 産業廃棄	分配率
大気発散率(1)	0
水域発散率(2)	0
土壌発散率(3)	0
焼却率(15)	0.5
埋立率(16)	0.5
(15) 産業焼却	分配率
大気発散率(1)	0.05
水域発散率(2)	0.05
土壌発散率(3)	0.05
埋立率(16)	0.85
(16) 産業埋立	分配率
大気発散率(1)	0
水域発散率(2)	0.01
土壌発散率(3)	0.01

(G) 生産選別過程

(17) 資源廃棄物選別	分配率
大気発散率(1)	0
水域発散率(2)	0.01
土壌発散率(3)	0.01
資源リサイクル率(4)	0
産業廃棄率(23)	0.98
(18) 原材料廃棄物選別	分配率
大気発散率(1)	0.01
水域発散率(2)	0.01
土壌発散率(3)	0
資源リサイクル率(4)	0.98
原材料リサイクル率(5)	0
産業消費財廃棄率(14)	0
(19) 部品廃棄物選別	分配率
大気発散率(1)	0.005
水域発散率(2)	0.0005
土壌発散率(3)	0.0005
資源リサイクル率(4)	0.3
原材料リサイクル率(5)	0.3
部品リサイクル率(6)	0.194
産業消費財廃棄率(14)	0.2
(20) 製品廃棄物選別	分配率
大気発散率(1)	0.001
水域発散率(2)	0.0005
土壌発散率(3)	0.0005
資源リサイクル率(4)	0
原材料リサイクル率(5)	0.3
部品リサイクル率(6)	0.3
製品リサイクル率(7)	0
産業消費財廃棄率(14)	0.398
(21) 輸送販売廃棄物選別	分配率
大気発散率(1)	0
水域発散率(2)	0
土壌発散率(3)	0
資源リサイクル率(4)	0
原材料リサイクル率(5)	0
部品リサイクル率(6)	0
製品リサイクル率(7)	0
産業消費財廃棄率(14)	0

が分配率に応じて生産コンパートメントから他のコンパートメント（自然環境要素・生活系および産業系消費・生産選別）に分配されるとした。

図3および図4に10年後における各コンパートメントにおける鉛蓄積量および蓄積割合を示す。鉛の蓄積は、産業廃棄物処理で最も多く、次いで産業系消費で多くなっている。本モデルでは、販売された鉛含有製品の62%が生活系に、38%が産業系に移行するとしたが、生活系で消費された製品のうち、大部分（具体的には87%）が産業廃棄物処理過程に移行するからである。これは、大型製品の一部が、販売店によって引き取られ、最終的には産業廃棄物として処理されているためと考えられる。

一方、自然環境中に蓄積する鉛量は、大気中がもっとも多く、次いで水域、土壌となっている。これは産業廃棄物焼却によって排出された鉛によるものと考えられる。したがって、これらのコンパートメントがリスク管理上のキーポイントなることを示唆するものである。

ところで、本モデルでは、モデル内を移動する製品中の鉛量は、各製品に含有している鉛量の平均値であり、個々の製品の流通経路や寿命を考慮していない。また、コンパートメント間の移動の牽引力が単に対象物質の質量として1次遅れ系で表されているに過ぎない。今後個々の製品レベルに本モデルを適用し、その総和を求めることによって最終的に鉛のサブスタンスフローナリシスとすべきである。

本研究は平成10年度厚生科学研究補助金によって行われたものであることを付記する。また、本研究は岡山県 坂口浩範、三協フロンティア(株)小泉美枝子の支援を頂いた。計算ソフトの開発では(株)日本総研大阪支社、芝野真次氏に支援をいただいた。記して謝意を表したい。

#### 参考文献

- 1) 荒木峻他：環境化学事典，東京化学同人，p.591(1985)
- 2) 酒井伸一：ゴミと化学物質，岩波新書，p.62(1998)
- 3) 通商産業省資源統計年報，1995,1996,1997
- 4) 平成9年度通商産業省機械統計年報，1998
- 5) 日本無機薬品協会，無機薬品の実績と見通し（平成7年度実績・平成8年度見通し），1992
- 6) 関西ペイント(株)：塗料工業における製品の流れ・用途別鉛化合物の使用実績，1992
- 7) 積戸知雄他：家電製品中に含まれる鉛量の推定に関する調査研究，第9回廃棄物学会研究発表会講演論文集，pp.510-512, 1998
- 8) (社)日本電気工業会：世界の白物家電の統計および需要に関する実態調査，1998
- 9) (社)日本電子工業振興協会：使用済みコンピュータの回収・処理・リサイクルの状況に関する調査報告書，1998
- 10) 神奈川県化学物質使用実態調査（平成7年度）<http://www.fsinet.or.jp/~k-center/chem/actual/p5-b04.htm>

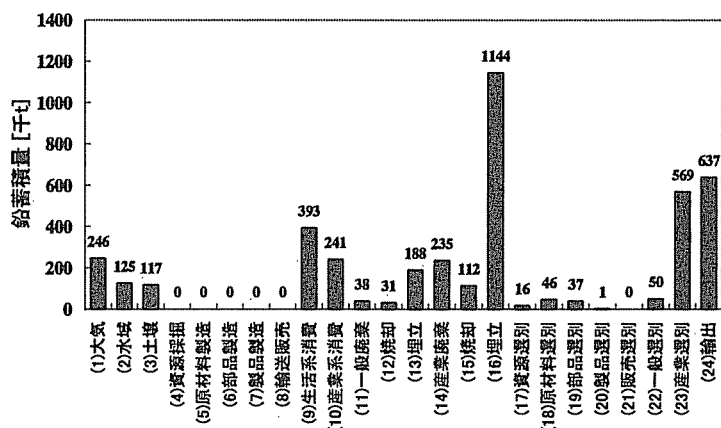


図3 10年後の各コンパートメントにおける鉛蓄積量

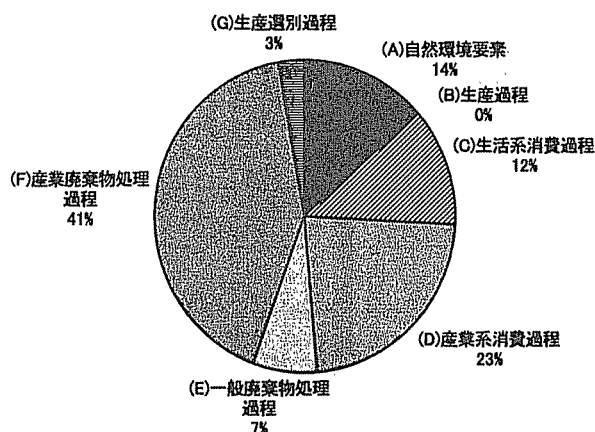


図4 10年後の各コンパートメントにおける鉛蓄積量