

社会技術研究開発事業・公募型プログラム
研究領域「循環型社会」
研究課題「循環型社会における問題物質群の
環境対応処理技術と社会的解決」

研究実施終了報告書

研究期間 平成 14 年 11 月～平成 17 年 10 月

前田 正史
(東京大学生産技術研究所 教授)

1. 研究テーマ

- (1) 研究領域 : 循環型社会
- (2) 研究総括 : 山本 良一
- (3) 研究代表者 : 前田 正史
- (4) 研究課題名 : 循環型社会における問題物質群の環境対応処理技術と社会的解決
- (5) 研究期間 : 平成 14 年 11 月～平成 17 年 10 月

2. 研究実施の概要

循環型を目指す社会における製造過程では、製造プロセス（誕生）、製品寿命の間（一生）、寿命終了後（永眠）の各プロセスにおいて、もし問題物質が発生するのであれば、その詳細を明らかにし、社会的に容認される形で処置することが必要である。そのような社会的解決が図られない限り、直列的に連鎖している物質の流れは、我々の認知不可能な形でどこかに放置されることになる。これは循環型社会形成に逆行することであり、未来の危険性を高めることになる。

製品の製造過程では、副産物が発生することは必然である。製品を使用する過程においてさまざまなエミッションが発生する場合もある。また、製品の寿命が終了した後、これを再利用しようとする場合においても、再利用可能な部品・材料を回収した後には必ず残渣がある。これらの副産物、廃棄物、残渣は、多くの場合、経済的価値のない、あるいは負の価値を持つ不要物である。不要物であっても、それが無害であり、歴史的時間において安定し、悪さをしないのであれば、そのまま廃棄したとしても、社会的に受容されることは可能であろう。この場合の社会的コストは、単純廃棄に要する費用であり、比較的小さいと言える。

しかし、実際問題として、現状においては単純廃棄できるような副産物、廃棄物、残渣は少なく、適切な処理を経ない単純廃棄は、将来において大きな負の価値を生成することになる。しかも、再利用回収した有価物を分別、分離、精製するためには工学的プロセスが必要となるが、そのプロセスの本質は劣化した材料にエネルギーや物質を作用させることにほかならないため、ここでまた新たな副産物が発生することになる。

従来の研究では、個々の問題物質の流れは全く調査されてない、あるいは調査されている問題物質であっても、環境に対する負荷や影響のみの評価にとどまり、問題物質群の処理技術に焦点をあて、かつ社会的解決をも視野に入れた、一つの物質としてのマテリアルフロー調査は行われておらず、評価もされていない。

本研究では、まず、問題物質のマテリアルフローと処理の現状調査を行った。

問題物質を、非常に毒性の高い微量問題物質、それから少量であるが、長期的に問題となるような少量問題物質、そして工業製品として中規模発生する物質と、石油の副産物である硫黄のように何億トンという単位で発生する物質の中・大量問題物質とに分類した。

具体的に、微量問題物質としては、PCB、ダイオキシン、少量問題物質としては、ヒ素、アンチモン・セレン・テルル、リン、カドミウム、水銀、中量・大量問題物質としては、鉛、クロム、硫黄、フッ素を取り上げた。そして、これら問題物質群を環境対応処理するための技術として、どのような方法が可能なのか、またそのためにどれだけのコストがかかるのだろうか、ということについても検討を進めてきた。高度な循環型社会を構築する新たな指針を提供したいと考えたからである。

そして、今後必要とされる技術や社会システムについて、個々の物質において多少違うものの、技術的視点からは、完全無害である条件の定義を確立すること、経済性を損なわず、完全無害化を達成する物質の抽出技術と制御技術の確立などが必要であり、社会システムの視点からは、まずマテリアルフローの把握、問題物質の集積、処理、無害化、固定化に要するコストと社会的負担に関するコンセンサスの確立が必要であることが明らかになった。

また、社会的にこれらの物質が規制の面からどのように受け止められるのか、ということも大きな課題となる。我が国のGDPの10%は輸出産業により占められており、工業製品を輸出しない限り、我が国は成り立っていかないとと言える。製品輸出国において、政治的に問題物質の規制をかける動きもあり、当然であるが、そういう問題物質を排除した製品の設計、あるいはその処理処分に対する有効な技術的根拠が今後必要となる。

そのために、世界における問題物質の規制について知る必要がある。特に、排出規制が厳しい欧州を中心に、最近の問題物質規制や米国、EU、日本の化学物質規制について調査し、情報開示を行った。

そして、非常に限られた範囲ではあるが、大気汚染物質と一般家庭電気製品を例にとり、PCB 廃棄物に関する環境リスクと処理コストについて、また幾つかの問題物質処理の社会的費用評価について、その経済性評価についても行った。ただ、これに関しては、まだ十分とは言えず、今後、調査の成果を発展させ、詰めていく必要があると考えている。

この活動の過程で、東京大学内にサステイナブル材料国際研究センターを設置した。このセンターは、持続可能社会により近づくため、材料の設計、生産、使用、そして寿命を終えた材料の処理などの諸問題を解決するために設立したが、これは本研究の大きな成果である。センターでは、持続可能社会に向けた材料を開発するため、資源の使用状況について学び、産業的に重要な材料とその副産物の物質循環について検討

し、材料設計の境界条件を探索し、材料生産、またその処理、超長寿命の材料などの研究を行うこととしている。

我々の目指すサステイナブルマテリアルは、すべてを回収せよとか、リサイクルすればいいというものではないと考えている。産業的に重要な材料とその副産物の物質循環について検討し、ワンウェイで使うべきもの、リサイクルするべきものの材料設計の境界条件を探索し、材料生産、またその処理、超長寿命の材料などの最新研究を同時に行っていくことである。

本研究で得られた知見を、単に技術的な解決法だけでなく、問題物質を発生するプロセス技術のイノベーション戦略など、環境的かつ経済的に持続可能な循環社会の構築に資することが求められる。そのためには、まず、問題物質の学術的な処理処分方法を国として明示し、世界の標準を日本でつくるという方向を目指すことも必要であると考える。

3. 研究構想

研究開発時に目指した目標

製品の製造過程では副産物が必然的に発生するが、その中には問題物質も多く含まれる。本研究では、問題物質を非常に毒性の高い微量物質、少量であっても長期的に問題となるような少量物質、工業製品として中規模に発生および大量鉍工業副産物である中・大量問題物質に分類し、それらの最適化処理の可能性を探求し、その技術的評価や、コストにおける考え方等、社会学的な解決を図るための方策を提案することを目標とした。

微量問題物質は、PCBとダイオキシンを取り上げた。PCBについては欧州および日本におけるPCB廃棄物処理の現状を調査し、ダイオキシンについては、鉄鋼産業におけるダイオキシン類について、これまで開発された発生抑制対策技術および将来的な課題について検討した。

少量問題物質は、ヒ素、アンチモン・セレン・テルル、リン、カドミウム、水銀について調査している。回収と再利用を推進するにあたって検討を要する課題を取り上げ、技術的視点や社会システムの視点からの項目をあげた。

中量・大量問題物質は、鉛、クロム、硫黄、フッ素を取り上げた。社会循環に関する実態を調査し、マテリアルフロー、循環型社会構築の見地から必要と考えられる技術およびシステムの開発項目についても検討を進めた。

チーム編成と目的、観点、実施内容

問題物質群の最適化処理の技術的な評価と社会的な解決のため、本研究では総括班、技術班、システム・社会班の3つの班を置いている。それぞれの班の目的、観点、実施内容は以下のとおりである。

総括班：

目的

循環型社会における問題物質群の最適化処理の可能性を探求するため、問題物質の現状を把握し、クローズドループ化の可能性を探索する。

観点

1. 問題物質およびその担体の性状・性質・現状調査
2. 問題物質のクローズドループ化の可能性探索
3. 問題物質のリスク知識の種別化と構造化

実施内容

循環型社会における「製造プロセス（誕生）」、「その製品寿命の間（一生）」、また「寿命終了後（永眠）」の各プロセスにおいて問題物質が発生するのであれば、その詳細を明らかにし、社会的に容認される形で処置し再利用、無害化あるいは安定化する必要がある。さもないと直列的に連鎖している物質の流れは、どこかで我々の認知不可能な形で放置されることになり、結果的に未来の危険が高まることになる。本研究では、微量問題物質、少量問題物質、中量・大量問題物質の現状を調査し、問題物質の適正化処理の可能性を探求し、最終的には社会的解決を図るための方策を研究した。

技術班：

目的

問題物質群の排出防止に関する技術的現状とその限界の調査・解析を行う。具体的には、微量問題物質（PCBs、ダイオキシン類）、少量問題物質（ヒ素、アンチモン・セレン・テルル、リン、カドミウム、水銀）、中量・大量問題物質（鉛、クロム、硫黄、フッ素）を対象とした問題物質の発生と循環のメカニズムの解析を行い、技術的な観点から安定・安全処理技術の有効性を評価し、次世代技術の可能性について検討する。

観点

1. 問題物質の発生と循環のメカニズムと制御
2. 安定・安全処理技術の現状調査および次世代技術の探索
3. 人工環境および自然環境における問題物質循環

実施内容

- ・問題物質の発生と循環のメカニズムと制御の調査のため、鉱工業および農林業等生産過程における問題物質の使用、量および排出のインベントリを整備した。また、各生産過程における問題物質の挙動、混入等を定量的に把握し、その生成メカニズムの得られた最新情報を調査・整理した。排ガス、排水、液体残渣、固体残渣の各形態については、廃棄後の行方について調査を進めた。問題物質が製品に混入するケースでは、使用中および製品の廃棄過程における環境流入および製品のリサイクル過程における循環を定量的に評価を行った。
- ・安定・安全処理技術の現状調査および次世代技術の探索においては、製品の生産、流通、使用、廃棄の各過程における各問題物質の環境流入の現状を把握し、現状の対応技術および現在までに開発されている次世代技術について、問題物質の環境流入量を比較し、技術進展の影響を評価した。
- ・生産過程で排出される液体残渣および固体残渣、使用済み製品の廃棄過程の各処理において、問題物質の処理状況を把握し、現在までに提案されている新技术を適用した場合の効果を評価している。本検討により、関連事項における新たな問題点や、新しい処理法の基礎原理等が見出された場合、これらを整理し、新しい提案ができるか検討した。
- ・人工環境および自然環境における問題物質循環について、自然環境内で分解・変化する問題物質については、それぞれの速度（寿命／半減期）について調査すると共に、自然環境における処理が不可能となる環境流入量について、調査、検討を行った。定量的かつ詳細に把握された循環に基づき、問題物質の無害化あるいは完全循環を可能とする理想的な環境条件の提案や、その実現に必要な要素についての検討を行った。

システム・社会班：

目的

社会的解決に向けて、循環型社会におけるイノベーション戦略について調査・分析を行う。環境的かつ経済的に、持続可能な循環型社会の構築を目指した新たな知見を提供することを目指す。

観点

1. 循環型社会におけるイノベーション戦略の分析と提言
2. 問題物質についての企業行動の分析

実施内容

現代社会において多種多様な物質が利用されており、環境に悪影響を及ぼす

ような問題物質に関しては十分な対応が必要である。有害物質である水銀は、塩素・ソーダの製造法の一つである水銀法において重要な役割を果たしている。ヨーロッパでは1970年代初めに塩素・ソーダ産業からの水銀排出を対象とした規制が設けられ、具体的な排出限界値と環境目的値が定められた。この規制に対応して、企業の多くは水銀法の使用の継続を前提としつつ、水銀の使用・回収を洗練化する技術の開発・導入によって水銀の環境への排出量を削減していった。一方、日本では、ほぼ同時期に水銀法を全廃するという政府の決定が下された。その当時、水銀法が塩素・ソーダの製造工程の大部分を占めていたが、この決定後まもなく産業界では水銀法を代替するイオン交換膜の技術開発が急速に進み、現在ではすべての工場においてこの製造方法が使用されている。

有害物質のもう一例である鉛も、蓄電池材料や電気部品用はんだなどに利用されており、現在日本では年間約35万トン使われている。鉛蓄電池は多数回の充放電を安定して繰り返すことができるので特に自動車用として大量に用いられているが、使用済み電池の多くが回収され、鉛は有価物として再生利用されている。約18万トンの鉛がリサイクル利用されているが、その主は鉛がまわって回収できる蓄電池に用いられたものである。また、電気・電子機器のプリント板では鉛はんだが広く使用されている。そのリサイクルについてはプリント板製造時の余剰はんだは回収し、もう一度溶融してはんだとして使用されている一方、製品からはんだの回収は作業の効率・コストの面からほとんど行われておらず、プリント板からの貴金属回収後の残渣として鉱山の採掘跡地などに埋め立て処分されている。そうした中で、電気・電子機器の製造企業は鉛を他の材料で代替した鉛フリーはんだの研究開発を行ってきている。

このように、同一の問題物質への対応に関しては、その物質を使用し続けたままでその取り扱いを洗練化していくのか、それともそうした物質を代替する材料の開発に向かうのか、2つの異なったイノベーション戦略が存在する。問題物質の利用の洗練化は、従来技術の継続使用を前提とするため、過去の経験や学習の蓄積を活用できる反面、技術開発は漸進的なものにとどまってしまう。一方、他の物質による問題物質の代替化は革新的な技術開発につながる可能性を秘めているが、その実現の過程における不確実性は極めて大きい。「洗練化」と「代替化」という方向性のどちらを選択するのか、循環型社会において企業が社会的使命を果たしつつ、有効なビジネスモデルを構築していく上で極めて重要な問題点となる。

本研究では循環型社会におけるイノベーション戦略という課題について、問題物質の利用の洗練化および他の物質による問題物質の代替化という観点から、企業間・産業間での比較研究し、イノベーション戦略という観点から考察

を行った。循環型社会において環境的かつ経済的に持続可能なビジネスモデルの構築を考えていく上で、有意義な知見の提供についても検討を進めた。

将来展望、知的資産の形成と新技術創製

地球温暖化、オゾン層破壊、有害物質の拡散など、地球環境問題は人類が解決すべき最大の課題の一つとなっている。高度な産業社会を形成している先進国では、生産活動が大きくなり、その結果として生活が豊かになり、従来の地球の浄化作用を超えた人工的な排出物が生じ、そのため地球規模で生活環境に影響が見られるようになった。

生活廃棄物であれ、産業廃棄物であれ、地球上に十分なスペースと浄化作用があるならば、しかるべきところに廃棄することが経済的にもっとも合理性がある。しかしながら、産業活動が活発な地域では、地球の浄化作用が廃棄物量に対応できないことは自明であり、また人類は自然には存在しない人工物を作り出し、それらの多くは地球の自然浄化作用では浄化できないことも多い。

環境問題は、生活者すべてが被害者であり、加害者になっている点が特徴的であり、解決策を見出すことの困難さがそこにある。課題は持続可能な発展であり、計画経済の手法が崩壊した現在、自由経済の下で産業発展と環境保全を共進化させることが重要な課題である。現在、人類が使用している多くの問題物質に関して自然循環と人工循環のバランスを知ることは、この共進化を考える上で重要なことと言える。

高度循環型社会の構築には、問題物質群の最適化処理の可能性を探求するために問題物質の現状を知ること、問題物質のクローズドループ化が不可欠である。膨大な量と種類の問題物質が環境に存在する現状では、問題物質の環境負荷やリスク、さらにはリスク情報の種別化と構造化も重要な課題である。これらの情報は我が国だけでなく、全世界の人々の貴重な知的資産として意義あるものである。

4. 研究成果

4. 1 総括班

総括班は、循環型社会における問題物質群の最適化処理の可能性を探求するため、微量問題物質、少量問題物質、中量・大量問題物質のマテリアルフローと処理の現状調査を行うことを目的とした。

具体的には、少量問題物質であるヒ素、アンチモン・セレン・テルル、リン、カドミウム、水銀、中量・大量問題物質である鉛、クロムについてである。

(1) ヒ素の社会循環に関する実態調査

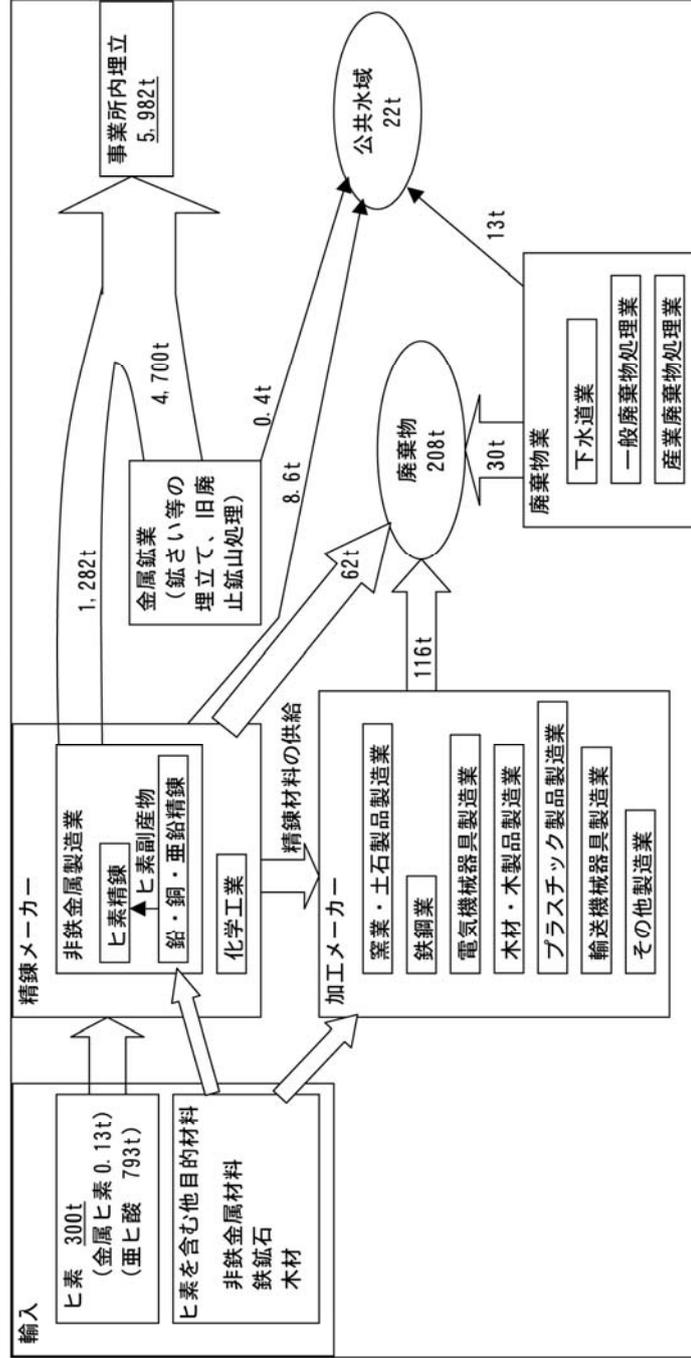
持続発展可能な資源循環型社会を実現するためには、関与する物質とその化合物が回収・処理・再生される過程において、自然と人間に影響を及ぼす可能性を把握しておかなければならない。

ヒ素は、鉱物として紀元前 5 世紀頃から知られており、13 世紀にはマグナスにより初めて単体の製造が記されている。ヒ素は銅表面を白く着色して銀のように見せることから、中世ヨーロッパでは錬金術に用いられており、また、可溶性ヒ素化合物の強い毒性から毒薬としてよく知られており、その特性を活かして、古くから農薬、殺虫剤、木材の保存剤として使用されている。日本でも、江戸時代には「石見銀山ネズミ取り」の名で殺鼠剤としてヒ素化合物が使用された。

1921 年には日本の登録農薬第 1 号としてアメリカから輸入されたヒ酸鉛が発売され、農薬として広く使われている。しかし、R. Carson の名著「沈黙の春」にもあるように、その強い毒性は広い地域で環境汚染とヒ素中毒を引き起こしたことからその利用は制限され、日本でも 1971 年に「作物残留性農薬」に指定されて使用の制限を受けた。その後蓄積性の問題から 1978 年には登録が失効し、事実上の禁止となった。近年では農薬などの環境散布的使用に替わる新たな用途として、金属工業、電子工業、半導体分野がある。金属材料への添加、化合物の合成により素材の特性向上に用いられ、特に化合物半導体の GaAs、InAs で使用が伸びている。今後、産業と生活の電子化が益々進むことで、化合物半導体に代表される金属素材分野での利用が増加すると予測される。

また、ヒ素は火山由来の地層に多いことから、わが国においては休廃止鉱山からの鉱山廃水においては高濃度に、生活水である地下水、温泉水等についても、低濃度であるが多くの地域で含まれており、その環境負荷と健康への影響が懸念されており、これらの無害化、回収についても今後、注視される。本調査は、先端技術分野などで非常に有効であるが、天然由来の汚染も多く毒性の強いヒ素及びその化合物について、化学的性質、毒性、各種規制、使用・回収状況、環境排出、無害化技術の現状を把握し、その結果として将来の技術・社会システム開発の動向をまとめることを目的としている。

ヒ素マテリアルフロー (2001 年度実績)



(注) 下線部は他数値よりの概算値

ヒ素のマテリアルフローを図示した。先に述べたように、ヒ素はその性質と用途から多方面で活用されているとはいえ、広く薄く利用されるためか、回収・再資源化については他の金属資源のように無害化処理技術の研究が進められているとは言い難い。

ヒ素の無害化技術について、1975～2003年8月のJSTデータベースを対象にキーワードによる検索（ヒ素 or 砒素 or ヒ素 and 無害化）を実施した結果、111件の回答を得た。そのうち、重複する内容を省き、実用化ベースにあって本調査の参考として該当すると考えられるもの35件を抽出した。対象物によって以下のように分類できる。個々の無害化技術の概要については報告書を参照されたい。

① 水の無害化

水の無害化技術としては、塩化鉄による共沈法が一般的であるが、その外に金属やイオン交換樹脂などによる化学的吸着除去方法、酸性廃水に対する中和沈殿法、触媒による処理などの報告がある。

② 土壌の無害化

土壌の無害化技術としては、セメント固化、吸着材添加による不溶化、熔融、電気的誘導除去、植物バイオマスによる吸収・蓄積を利用した技術などが報告されている。また、近年、多くの技術が開発されたため、類型化されつつある。それを表4に示す。

③ 廃棄物の無害化

廃棄物はその殆どが埋め立て処分であることから、無害化技術としては、洗浄、不溶化、鉱物化などが多いが、中には回収を目的とした研究も報告されている。

④ その他（基礎技術、分析など）

ヒ素無害化のための技術研究として、スペシエーション分析、システムの設計、吸着及び不溶化の現象解明、猛毒な難分解性ヒ素化合物の処理法などの研究が報告されている。

実際には、ヒ素を伴う多くの金属精錬、鉱工業においても、大半が鉱さいとして廃棄されている。これは、ヒ素を商流に則った形で集積した回収・再資源化することが困難であることを示している。今後は、回収・再資源化プロセスを高効率化し、ヒ素材料の製造と再資源化を結びつけるシステムを確立することが必要である。

一方、旧廃止鉱山より流出する鉱山廃水、地層にヒ素を含む地下水や温泉等のように、溶存形態で際限なく流出するものもある。これらは天然由来ではあるが、ほとんどがかつての人為活動を発端としており、現状では恒久的な対処を求められている。この分野を従来の汚染や鉱害の視点のみではなく、「受動的なヒ素の供給」として新たな資源と捉え、無害化と回収・利用の技術を併せて確立することも、限りある資源の安全な安定した利用を進める循環型社会の構築につながると考えられる。

今後必要とされる技術的視点や社会システムの視点には次のような項目が挙げられる。

[技術的視点]

- 1) 完全無害である条件の定義としての確立
- 2) 経済性を損なわず、完全なる無害化を達成する物質の抽出技術と制御技術の開発
- 3) 用途拡大する半導体、電子部品分野での安全な分離・回収・再資源化技術の確立
- 4) ヒ素を伴う鉄および非鉄金属精錬プロセスにおける高効率な分離・回収技術の確立
- 5) 天然や旧廃止鉱山など受動的なヒ素の安全な無害化・再資源化技術の確立
- 6) 埋立廃棄物、焼却灰中のヒ素の無害化・固定化技術と、安全な抽出・回収技術の確立
- 7) 上記の回収・再資源化技術における高純度ヒ素及びヒ素化合物への再生技術の開発

[社会システムの視点]

- 1) マテリアルフローの把握：分野・製品・形態別の生産・流通・排出量の統計化
- 2) 製品形態での化合物化を鑑みた、各業界団体によるヒ素の取扱い量の把握
- 3) 埋立廃棄物中のヒ素の挙動把握
- 4) 受動的なヒ素供給量の把握と、その取扱いのコンセンサスの確立
- 5) ヒ素を含む物質の集積、処理、無害化、固定化に要するコストと社会的負担に関するコンセンサスの確立

ヒ素の循環技術と関連利用分野の実態調査

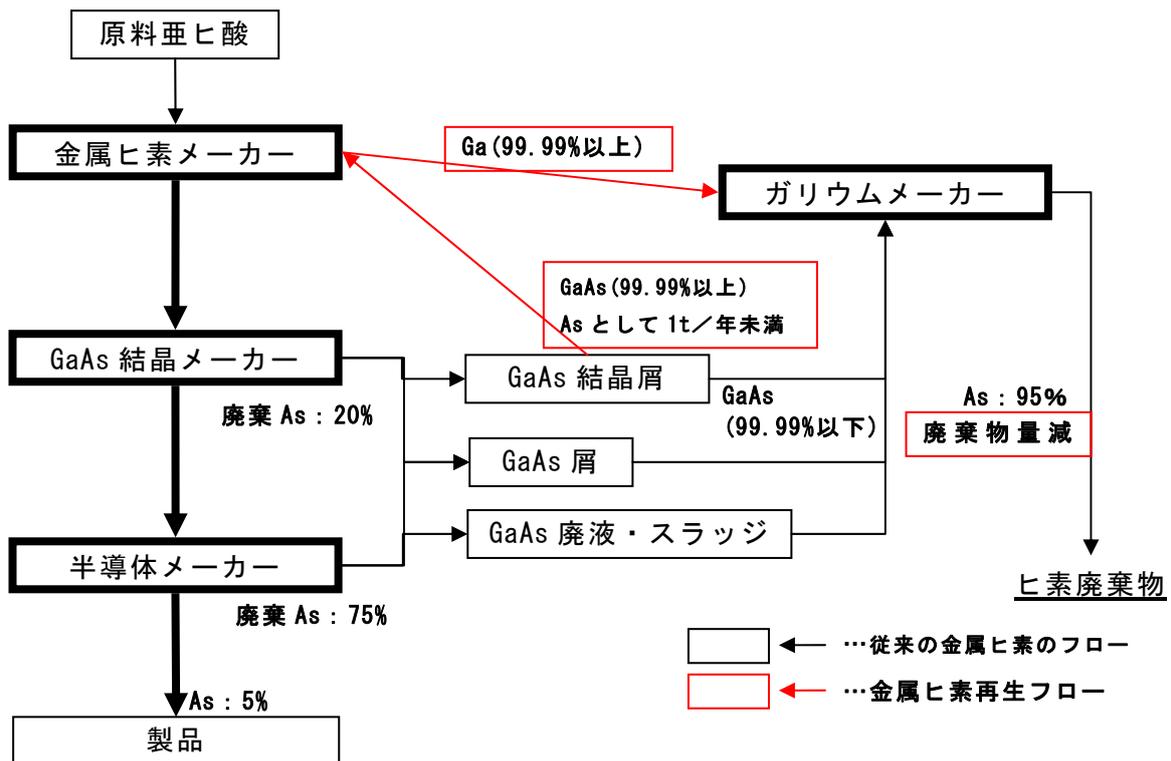
これまで、主に、ヒ素の化学的性質とその法規制、利用・排出分野とマテリアルフロー、現状の無害化技術研究について調査され、その技術的、社会システムの課題が見出された。しかし、それと同時にこの調査より新たな課題も見出された。それは、利用・排出量は把握されたものの、そのヒ素の形態が不明であること、無害化技術は示されたが実際の利用・排出分野における実施形態と将来像が不明であること、の2点である。

その理由には、ヒ素及びその化合物は法的にも規制された有害性の高い化学物質であり、近年の報道に見られるヒ素の汚染や犯罪での使用等による社会感情への影響と懸念から、取扱い事業者が情報の公知となる資料、文献への開示を控えていることが挙げられる。

以上を踏まえ、「関連分野におけるヒ素利用・排出状態の調査」と「ヒ素の回収・再利用に伴う循環技術の現状」について、今後、特に用途の拡大する半導体、電子部品分野、非鉄金属精錬分野、そして最も排出量の多い金属鉱業分野を中心にヒアリングと関係文献の調査を行い、その結果より循環可能分野とその技術及び課題を絞り込み、それらの動向をまとめた。

金属ヒ素の循環フローを示す。

現時点でヒ素の回収・再利用を部分的にも実施している分野は、半導体における金属ヒ素、及びヒ素スラッジ回収における亜ヒ酸の2つである。しかし、その他の分野でもヒ素の無害化に併せて回収技術の検討が進められている。今後、他の分野においてヒ素の回収と再利用を推進するにあたり、検討を要する課題は、以下の3点といえる。



① 原材料化事業者の不在

高純度ヒ素廃棄物を除き、現状のヒ素含有廃棄物は回収後の形態がそれぞれ異なること、純度（含有量）が低いことから、昇華精錬により純度の高い原料亜ヒ酸とする工程が必要である。しかし、ヒ素スラッジから亜ヒ酸を再生する事業者は実用化段階では未だ不在であり、それがヒ素循環のための物質的な繋がりを断ち切っていると言える。

② 費用対効果

現在、回収を視野に検討する事業者は、ヒ素循環の課題として費用対効果を挙げている。これは、原材料化事業者の不在という理由から、自らのヒ素精製を念頭にその再生を検討する場合、原料亜ヒ酸の市場価格が適応しないためである。亜ヒ酸の市場価格は、中国産粗製亜ヒ酸：10-20 万円/t、良質の国内産：30-40 万円/t、金属ヒ素用高純度亜ヒ酸：10～50 万円/t であり、安価である。よって、亜ヒ酸への再生を事業の一環として行うには厳しく、原料廃棄物の有価回収と大量生産を行わなければ、設備費用をも回収し難いと考えられる。

③ 精錬技術

現在、簡易かつ効率的とされている精錬方法は昇華精錬である。よって、これによる再生の費用対効果を亜ヒ酸製品価格と比較する。しかし、より費用対効果の高い精錬方法の開発により、上記課題の解決が期待される。

(2) アンチモン・セレン・テルルのマテリアルフロー調査

少量問題物質として、アンチモン、セレンおよびテルルをあげる。これらのほとんどは化合物までを含んで管理の対象となっている。使用量は比較的少ないものではあるが、決して見落とすことのできない種類のものである。

アンチモン(Antimony, Sb)は原子番号 51 の元素で、周期表上では 5A 属に属しており半金属に分類されている。イオンとしては 3 価または 5 価をとる。3 価のアンチモンの代表的な化合物には前述の Sb_2S_3 の他には Sb_2O_3 が主たるもので、この他には $SbCl_3$ が挙げられる。5 価のアンチモンとしては Sb_2O_5 と $SbCl_5$ がある。5 価のアンチモンの使用としては 3 価の元素と 1 対 1 の化合物とすることで半導体の化合物を得る利用法が良く知られており、インジウムアンチモン(InSb)が代表的なものである。

アンチモンの毒性は化合物によってかなり異なるものである。金属アンチモンは不活性であるが揮発性のスチピン(SbH_3)は極めて毒性が強い。アンチモンは消化管からゆっくりと吸収されアンチモン化合物の多くは消化管を刺激する。血液では 3 価のアンチモンは赤血球中に、5 価のアンチモンは血漿中に多い。

アンチモンは細胞内の酵素や補助因子と反応することによって毒性を発現する。細胞の SH 基と結合して毒性を引き起こしていると考えられている。

セレンは日本が有数の産出国である金属である。PRTR で排出状況が監視されている有害な元素であると同時に動物生命維持に必須の元素でもある。

セレン(Selenium, Se)は原子番号 34 の元素であり、地殻には 0.05ppm しか存在せず、発見は 1817 年といわれている。酸素属カルコゲナイトの元素であり、6 価の原子価をとるが 4 価が最も安定である。

セレンとその化合物のほとんどは経口摂取や呼吸により容易に吸収されるが、皮膚の曝露では血中濃度は上昇しない。吸収後には肝臓と腎臓に高濃度が認められる。人では吸収によりセレン化メチルが生成されニンニク臭の原因となると思われる。急性毒性としては粉塵ヒューム吸入後の刺激と頭痛が認められる。これは二酸化セレンや水で発生した亜セレン酸の刺激によるものと思われる。

テルルはセレンに伴って存在することが多い金属である。毒性も使用上の性質もセレンに似通っている。

テルル(Tellurium)は原子番号 52 の元素であり、酸素属カルコゲナイトに分類され、2、4、6 価の原子価をとる。

吸収はされ難く、化合物には幾分か経口吸収されるものもある。フュームの摂取や吸入が最大の危険性を持つ。テルル化メチルの生成がニンニク臭の原因となるのはセレン化メチルの生成がニンニク臭の原因となるセレンと同じである。尿や汗で排泄されるが急性毒性の解明はまだである。慢性の場合には $0.01\text{-}0.1\text{mg/m}^3$ で消化器症状やニンニク臭、のどの渇き、金属味、傾眠などの症状が出るとされている。

以下に、それぞれのマテリアルフロー推定を掲載する。

アンチモンのマテリアルフロー推定

	内容と量 (トン)					
金属供給	金属輸入	生産	再生鉛中			合計
	8,000	150	60			8,210
製品製造以外の輸入・排出	石炭	鉱石				合計
	300	150				450
金属需要	蓄電池	電線	合金	輸出		合計
	360	15	100	150		625
化合物原料	金属	輸入鉱石				合計
	7,585	15				7,600
化合物供給	生産	輸入				合計
	7,600	6,200				13,800
化合物需要	難燃剤	顔料	ガラス	触媒・試薬	輸出	合計
	11,400	250	150	200	1,800	13,800
製品中	難燃剤	顔料	ガラス	触媒・試薬		合計
	11,050	250	100	100		11,500
排出・未回収	難燃剤	ガラス	触媒・試薬	蓄電池		合計
	350	50	100	10		510
製品輸出	蓄電池	難燃剤等				合計
	100	5,700				5,800
製品輸入	蓄電池	難燃剤等				合計
	50	2,850				2,900
国内放出量	製品	製造時排出	製品以外			合計
	8,600	510	450			9,560
国内回収	蓄電池	電線	合金	鉛輸出	鉛輸入	合計
	350	15	30	20	20	395
回収鉛処理	再生使用	精錬	未処理			合計
	60	285	50			395
精錬鉛から回収	生産	未処理				合計
	150	135				285

セレンのマテリアルフロー推定値、単位トン

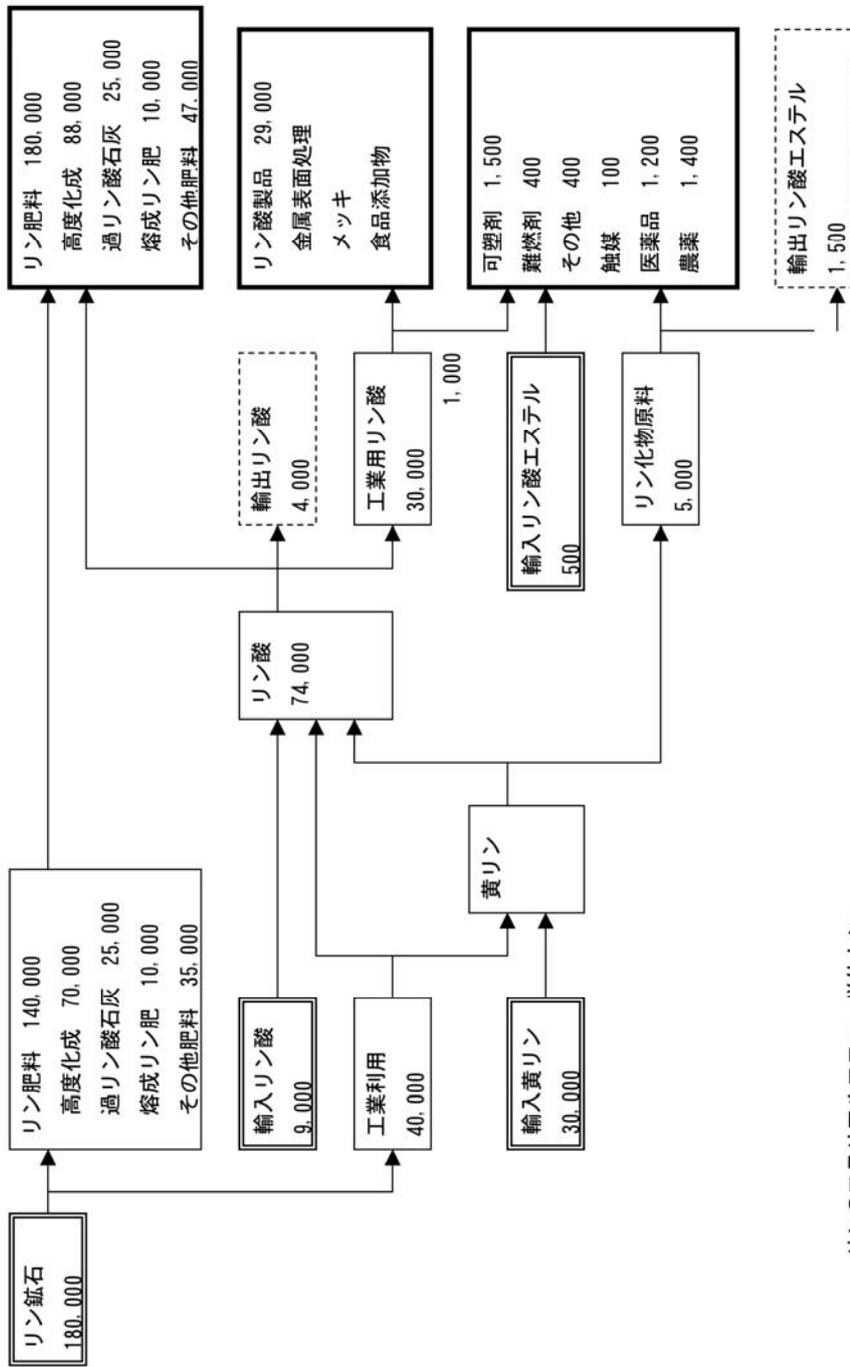
種別						
輸入原料 中	非鉄鉱石	石炭	石油	鉄鉱石		合計
	780	300	500	50		1,630
生産量	生産量	放出				合計
	750	880				1,630
供給量	内需	輸出	回収			合計
	150	600	30			780
使用内訳	ガラス	整流器 他	顔料	化学薬 品	その他	合計
	30	20	10	10	110	180
回収	整流器 他	触媒				合計
	10	20				30

テルルのマテリアルフロー、単位トン

分類					
生産	生産	放出	回収		合計
	50	50	1		101
輸出入	使用	輸出	輸入		合計
	51	15	15		51
使用	鉄鋼	非鉄金属	触媒・薬品	その他	合計
	25	5	13	8	51

(3) 日本におけるリンのマテリアルフロー調査

問題物質としてのリンは主に有機リン薬品によるものといえる。リン自体は動植物の生命維持に不可欠な物であり、リンを使用する生産された製品のほとんどは肥料として用いられている。リンの使用量を見計らうにはこれらの輸入されるリン鉱石と肥料としての使用量がどれくらいになるかの概略を知る必要がある。



リンのマテリアルフロー 単位トン

そのためには、有機リン薬品全体が最終的にはどのように使用され、放出されているのか、有機リン薬品がどのように国内に蓄積されていくかを見ていくことが必要となる。

PRTR 報告によれば、PRTR 第 1 種 353 のうち 37 種が有機リン薬品であり、そのうち 34 種が農薬である。農薬以外の薬品はトリスクロロエチルホスフェート(TCEP)、トリスジメチルフェニルホスフェートとトリブチルホスフェート(TBP)が見られるだけである。PRTR 第 2 種 81 の内、有機リン薬品は 3 種類あり、2 種類は農薬であり、トリスエチルヘキシルホスフェート(TOP)が農薬以外の薬品である。

現在、より毒性の低い農薬への移行が見られる。しかし、このことは現在 ADI 値の小さいより毒性の高い農薬の使用が減少してきており、禁止された種類の農薬は既に使用され尽くしているということは必ずしも意味してはいない。そのような種類の農薬には積極的に回収する手段を用いない限り、蓄積された毒性の高い農薬の使用が一挙に減少することは難しいかもしれない。

農薬以外の薬品は僅か 4 種類であり、しかも、使用量がある程度わかっているものは 2 種類だけである。TCEP の場合には 1,000 トン程度の使用量があるが、排出量は 11 トン、移動量は 4 トンである。排出は大気への放出であり、移動は廃棄物としての移動である。

ジメチルフェニルホスフェートは、使用量は不明であるが、大気への放出量 1 トンと推定放出量 3 トンがあり、移動量は廃棄物の移動 40 トンがある。TBP は使用量 320 トン程度であり、1 トンが公共用水域に排出され、さらに推定 6 トンの排出があると考えられている。移動量は廃棄物の移動 6 トンである。

ここでの数値を見る限り、使用量の数パーセントが放出されるとされており、かなりの放出割合と考えることができる。

リンのマテリアルフロー図を掲載している。単位はトンであり、リンの量を示している。リン酸から作成される各種製品は比較的毒性が低い。毒性が高いのはリン化物から作成された製品である。なかでも毒性が高いのは農薬、触媒と一部の医薬品であることがわかる。

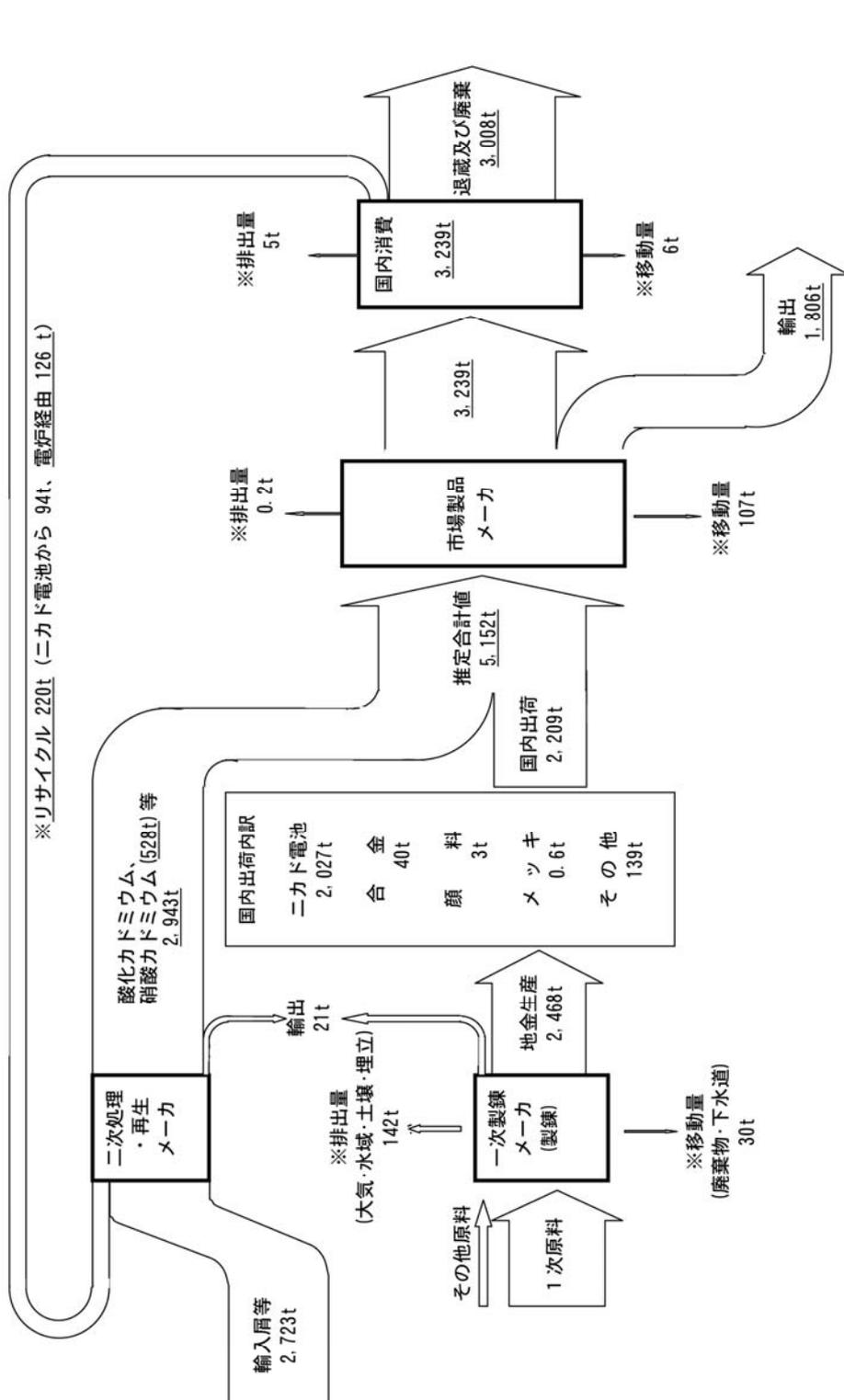
(4) カドミウムの社会循環に関する実態調査

少量問題物質として認識されているカドミウム及びその化合物について化学的性質、毒性、各種規制、使用・回収状況、環境排出、無害化技術の現状等を把握し、その結果として将来の技術・社会システム開発の動向をまとめることを本調査の目的としている。

「過ぎたるは及ばざるが如し」とあるように、すべての物質には光と影があるが、カドミウムもまたその効用にもかかわらず地球上の生命に対する毒性的な影響は無視できず、「制御されて使用されるべき」元素の一つである。

カドミウムマテリアルフロー (2001年実績)

(※は2001年度(4月～3月)実績, 下線数字は推定値)



一方、社会が必要とする Cu や Pb 等のベースメタルを生産するにはほとんどの場合カドミウムが随伴している。したがって、これらの原料中に含まれる Cd を完全に無害化・固定する事も必要である。

これらの視点から、今後必要とする技術や社会システムとしては次のような項目が挙げられる。

[技術的視点]

- 1)完全無害であることの定義付け
- 2)経済性を損なうことなく、上記完全無害化を達成する抽出技術と制御技術の開発
- 3)ベースメタル製錬に随伴するカドミウムの固定化
- 4)焼却灰や焼却飛灰からの Cd の回収と固定化技術の開発

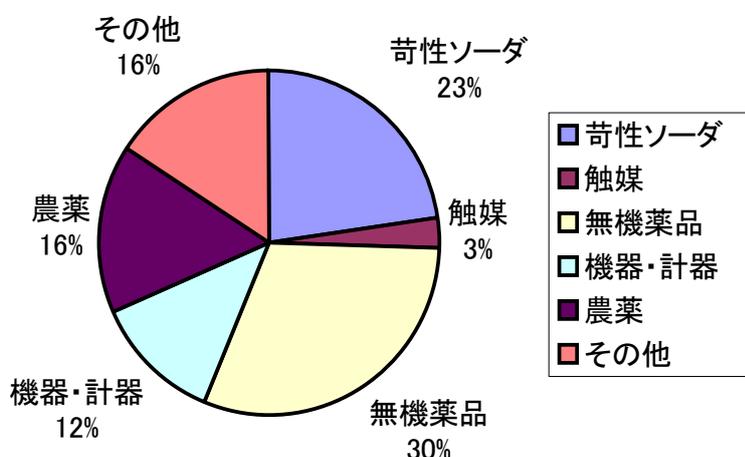
[社会システムの視点]

- 1)マテリアルフローの把握 ; PRTR データを含み、マクロからマイクロへ
- 2)一般廃棄物中の Cd の挙動把握
- 3)EPR(拡大生産者責任)としての Cd 含有量の表示
- 4)Cd を含む物質の集積, 処理, 無害化, 固定化に要するコストと社会的負担に関するコンセンサスの確立

(5) 水銀のマテリアルフロー経緯調査

過去において問題となった物質について、そのマテリアルフローの経緯を調査し、その処理の一助となる調査を実施することは重要である。水銀の過去の物質の流れを調査し、その残存量を推定する。

- ①乾電池における水銀使用の経緯及び蛍光灯における水銀使用の経緯
- ②過去における水銀使用の方法とその残存量の推測
- ③処理技術の一般的フロー、問題点、将来の要求特性、必要な技術開発項目



1936 年からの放出による残留水銀量

1936年からの需要により国内に放出された水銀の内、環境に残留している水銀量を推定し下記のように算出した。

苛性ソーダ製造に用いた水銀電極に由来するもの	3,767,383kg
アセトアルデヒド製造に用いた触媒に由来するもの	483,822kg
無機薬品の製造に由来するもの	5,064,594kg
これには塩化ビニル製造に用いた触媒による 496,441kg も含まれる	
電気機器と計測器としての使用に由来するもの	2,030,559kg
これには蛍光灯等による 151,823kg もふくまれる。	
農薬としての使用に由来するもの	2,617,216kg
その他の使用に由来するもの	2,638,929kg

これには乾電池としての使用 1,479,639kg が含まれる

国内に残留している総量の推定値は 16,602,503kg と算出された。

これにより、下記に示す数値が推定できる。

苛性ソーダ製造に用いた水銀電極に由来するもの	4,000 トン
アセトアルデヒド製造に用いた触媒に由来するもの	500 トン
無機薬品の製造に由来するもの	5,000 トン
これには塩化ビニル製造に用いた触媒による 500 トンも含まれる	
電気機器と計測器としての使用に由来するもの	2,000 トン
これには蛍光灯等による 100 トンから 200 トンもふくまれる。	
農薬としての使用に由来するもの	2,500 トン
その他の使用に由来するもの	2,500 トン

これには乾電池としての使用 1,500 トンが含まれる

国内に残留している総量は 16,500 トン と推定できる。

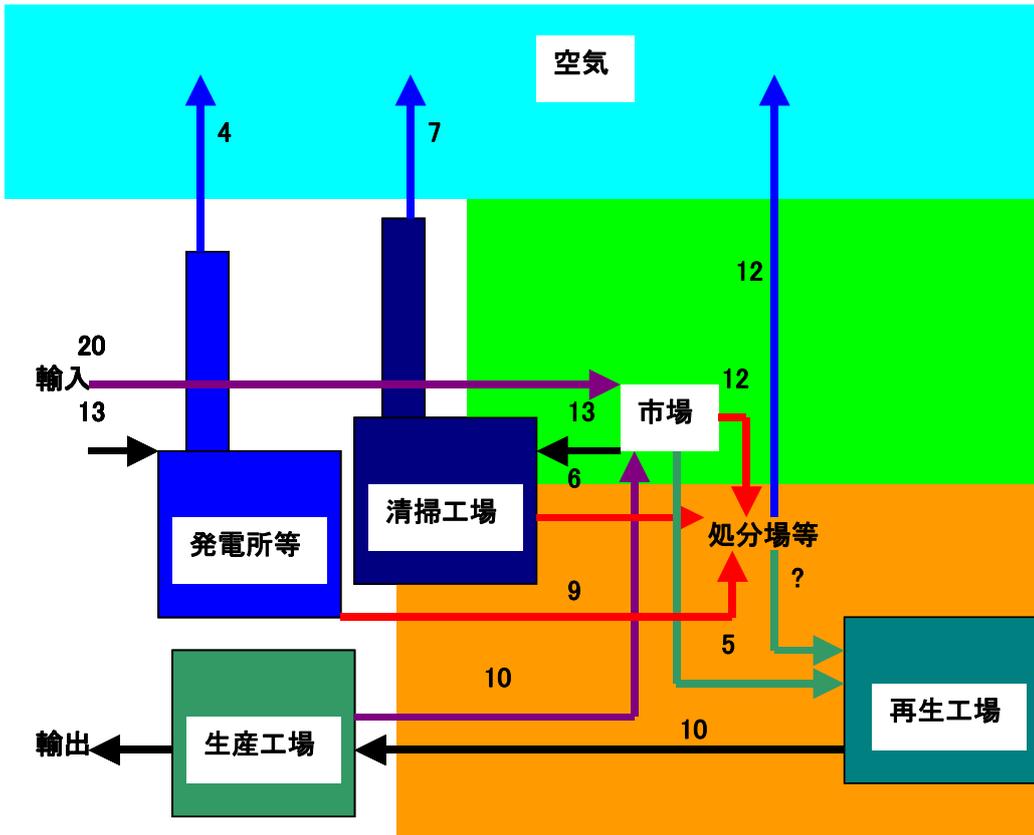
水銀のマテリアルフローの現状実態調査

水銀の物質の流れの現状を調査し、そのマテリアルフローの現状を推定する。

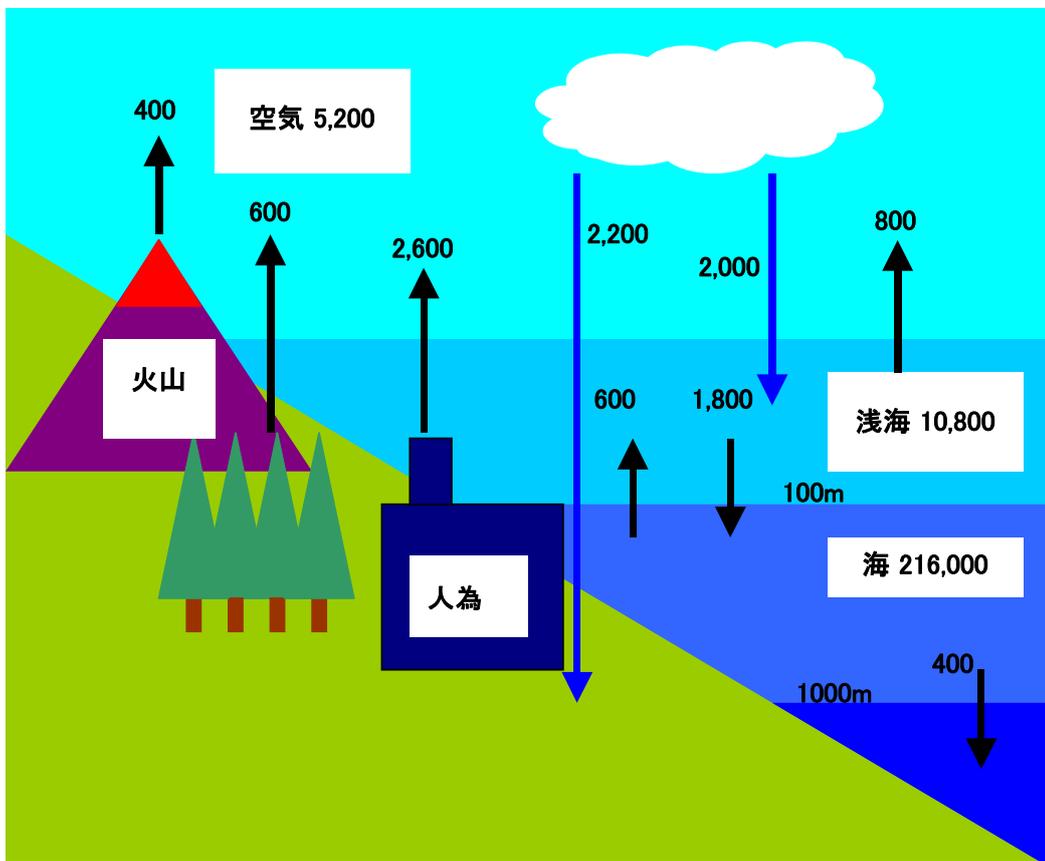
調査内容、方法については以下のとおりである。

- ①水銀に係わるマテリアルフローの現状調査
- ②乾電池における水銀使用の特徴及び蛍光灯における水銀使用の特徴
- ③処理技術の一般的フロー、問題点、将来の要求特性、必要な技術開発項目

人為的な水銀の流れと現在の世界の水銀の流れ、そして、現在の国内の流れを図示する。

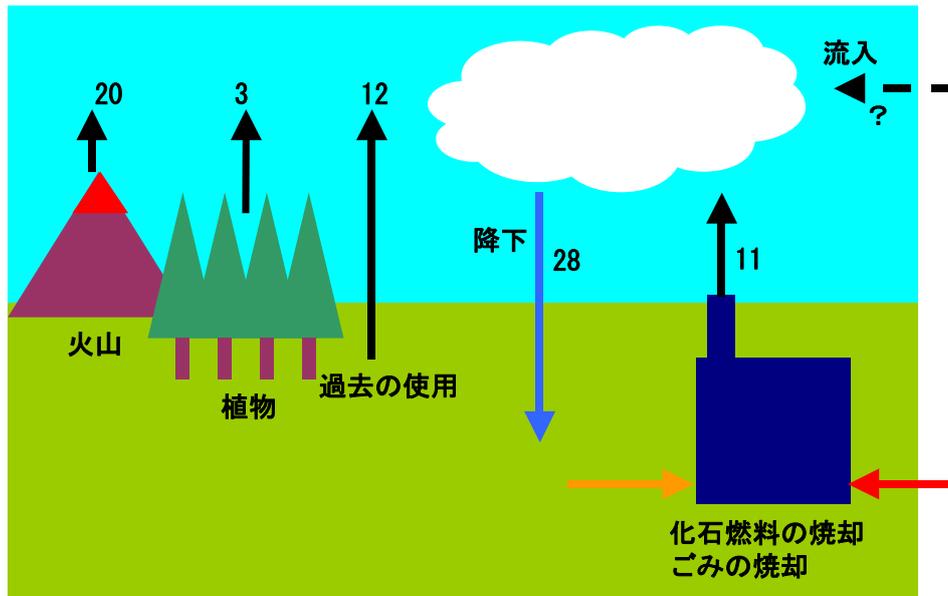


人為的な水銀の流れ 単位トン/年



現在の世界の水銀の流れ8)

単位トン/年



現在の国内の流れ 単位トン／年

まとめると、空気中への放出	年間 46 トン (70 トン)
火山・地表から	20 トン
植物から	3 トン
人為的な増分	23 トン (47 トン)
化石燃料の焼却	4 トン (28 トン)
ごみ焼却	7 トン
過去の使用の影響	12 トン
濃度の高い空気の流入	? トン
空気中からの降下	28 トン (42 トン)

この他に、人間体内への取り込みには魚による物がある。量は少ないものの毒性の高い有機水銀である。

米国における水銀の使用と規制の現状調査

アメリカにおける水銀の生産・輸出入や製品としての使用といった意図した水銀の使用について調査し、他の先進国における使用状況との相違の有無を明確にさせることも重要である。これはアメリカにおける水銀のマテリアルフローを確認するための出発点となる。

主に日本と比較しながらアメリカにおける水銀の使用と規制の状況を見てみた。使用と回収における特徴は以下の通りである。

- ① 既に日本では使用されなくなっている苛性ソーダ製造の水銀使用がかなりある点、歯科におけるアマルガムの使用がかなり多い点などで日本の使用状況とは異なる特徴が見られる。
- ② 現在、最も放出量の多いと思われる石炭の使用が特に発電においてかなり多く見られる。

これは石炭火力発電の割合が少ない日本とは大きく異なる点である。

- ③ 回収はかなり積極的に行われている。特に蛍光灯や他の水銀使用製品及び歯科用アマルガムでは、法的でない場合でも実質的に回収の義務化に近い状況が見られる。また、回収を行っている業者がかなりの数見られる。これは水銀含有製品に特化した回収があまり進んでおらず自治体単位になっており、回収業者が1社しかない日本とは大きな相違がある。

一方、放出や製造及び環境の状況や規制では以下の特徴がある。

- ① 放出の規制については連邦を通じた明確な基準が必ずしも明白なわけではない。これは一律の規制値を有する日本とはかなり異なる点である。
- ② 製品に対する規制は連邦でのものはないとしても、実施的にはEUと同様の規制が行われている。EU法制に合致した製品製造を実質的には行わざるを得ないと言う点では日本と同様であるが州法の規制が行われている点の相違が見られる。
- ③ 水銀の摂取量の参照値にかなりの相違がある。これは主に魚介類摂取に関連するところに大きな影響を持つものであるが比較的魚介類摂取量の少ないアメリカにおいては大きな問題とはなっていないように見受けられる。
- ④ 全世界的に見れば既にアメリカは水銀の放出において目立った存在では無くなってきている。現状では世界的に見れば放出量が降下量を上回っている地域ではあろうが、今後の発電所の放出規制を通して、放出よりは降下の量が多い地域と変化していくものと思われる。

(6) 鉛の社会循環に関する実態調査

鉛は、古くから鉛蓄電池やアンカー等で用いられ馴染みある金属である。特に安価で大電流密度が容易に得られるということから、自動車用蓄電池として主要な位置を占めまだ当分その状況は変わらないと考えられる。一方環境面からは厳しい規制を受けている。現在排水規準は0.1mg/lであり、環境規準はその1/10である。また最近新しい土壌環境規準が制定されつつあり、絶対値規制が行われることになる。

本調査においては、非常に有効であるが有害物質である鉛及びその化合物について、化学的性質、毒性、各種規制、使用・回収状況、環境排出、無害化技術の現状等を把握することを目的としている。

Pbは古代からの文明の発達を支えてきた金属元素の一つであり、現在もなお社会の至る所で有用とされ使用されているが、錬金術者にもみられたようにその毒性は大きく、鉛もまた「制御されて使用されるべき」元素の一つである。社会が必要とするZnを生産する際にはほとんどの場合でPbが随伴しているが、一方Pbの再生使用量は増加してきており例えば我が国においては生産量の約50%を占めるまでになっている。

したがって、Pbの有用性から、いたずらに使用禁止とするのではなく、完全にマテリアルリサイクルされる社会システムを構築して用いていくべき金属である。例えば各家庭な

表. 鉛の排出・移動量 (2001 年度)

(kg/年)

業種名	排出量					移動量			排出・ 移動量 合計
	大気	公共用 水域	土壌	埋立	合計	廃棄物	下水道	合計	
1. 金属鉱業	52	160	0	690,023	690,235	150	0	150	690,385
3. 製造業	54,694	15,675	94	8,474,685	8,545,148	9,037,157	238	9,037,393	17,582,540
衣服・その他の繊維製品製造業	0	0	0	0	0	340	0	340	340
木材・木製品製造業	0	0	0	0	0	2	0	2	2
家具・装備品製造業	0	0	0	0	0	7	0	7	7
パルプ・紙・紙製品製造業	0	0	0	0	0	170	0	170	170
化学工業	814	148	0	150	1,112	398,147	46	398,193	399,305
石油製品・石炭製品製造業	0	0	0	0	0	141	0	141	141
プラスチック製品製造業	252	9	9	0	270	263,122	5	263,127	263,397
ゴム製品製造業	1	9	0	0	9	37,666	0	37,666	37,675
窯業・土石製品製造業	8,813	1,170	4	27	10,014	1,134,621	20	1,134,641	1,144,655
鉄鋼業	1,895	970	0	373,000	375,865	3,345,006	2	3,345,007	3,720,872
非鉄金属製造業	33,916	12,702	1	8,101,508	8,148,126	2,293,508	68	2,293,575	10,441,701
(内、非鉄製錬業)	32,997	12,499	0	8,101,500	8,146,996	480,520	0	480,520	8,627,516
金属製品製造業	3,182	65	56	0	3,303	209,952	19	209,971	213,274
一般機械器具製造業	207	14	1	0	223	79,764	0	79,764	79,987
電気機械器具製造業	1,266	254	0	0	1,520	831,555	63	831,617	833,137
輸送用機械器具製造業	4,337	329	23	0	4,690	388,254	15	388,269	392,959
精密機械器具製造業	9	0	0	0	9	10,443	0	10,444	10,452
その他の製造業	2	5	0	0	7	44,459	0	44,459	44,466
5. ガス業	0	0	0	0	0	17	0	17	17
7. 下水道業	50	16,955	1	4	17,010	71,621	138	71,759	88,770
13. 燃料小売業	305	0	0	0	305	0	0	0	305
16. 自動車整備業	6	0	0	0	6	0	0	0	6
20. 一般廃棄物処理業	51	93	0	2	145	89,420	5	89,425	89,571
21. 産業廃棄物処分量	108	652	0	10	769	141,440	0	141,440	142,209
合計	55,266	33,535	95	9,164,724	9,253,618	9,339,805	381	9,340,184	18,593,803

(注) その他の業種は、排出量、移動量ともにゼロであったので掲載を省いた(出展:経済産業省「PRTR開示データ」)

リビルが電気エネルギーの蓄積用として鉛蓄電池を設置する等も考えられる。もしくは、最も安定な形態～おそらくは金属状～で安全に保管していく事も必要である。

今後の大きな課題は、社会に拡散していく Pb の回収と固定化であり、また世界的に見たマテリアルリサイクルの環の構築である。

これらの視点から、今後必要とする技術や社会システムとしては次のような項目が挙げられる。

〔技術的視点〕

- 1)完全無害である状態の定義
- 2)経済性を損なうことなく、この完全無害化を達成する抽出技術と制御技術の開発
- 3)主用途である鉛蓄電池の完全・安全リサイクル技術の確立
- 4)鉛製錬プロセス（特に、焼結工程）におけるリサイクル鉛の処理方法の確立
- 5)ベースメタル製錬に伴う Pb を含むダスト類の最適処理プロセスの確立
- 6)金属 Pb としての固定化
- 7)焼却灰や焼却飛灰からの Pb の回収と固定化技術の開発
- 8)使用済みブラウン管中の Pb の回収プロセス／再利用プロセスの開発

〔社会システムの視点〕

- 1)主用途である鉛蓄電池の完全なリサイクルシステムの確立
- 2)ブラウン管に使用される鉛入りガラスの国際的な再利用システム
- 3)一般廃棄物中の Pb の挙動把握
- 4)Pb の有用性に関する社会コンセンサスの確立
- 5)上記を受けての、Pb を含む物質の集積、処理、無害化、固定化に要するコストと社会的負担に関するコンセンサスの確立

(7) ステンレス鋼に使用されているクロムのマテリアルフロー調査

クロミウムは通常クロムと呼ばれる金属元素であり、原子記号では Cr と書かれる。

日本においての最大の利用方法はステンレス鋼としての使用である。ステンレス鋼はその名 stainless steel のとおり錆 (stain) の無い (less) 鋼 (steel) である。

ステンレス鋼等に関連するクロムを含有する原料の重量とそのクロム量の推定を挙げている。最大のクロム量となる輸入原料はフェロクロムでありおよそ 400,000 トンのクロム量となる。次いで鉄鋼製造に関連するクロム鉱石の輸入でありおよそ 100,000 トンのクロム量となる。この他ではステンレス鋼くずの輸入が大きくクロム量にして 30,000 トンに近い。これ以外に輸入する鉄鉱石中や石炭中のクロム量を求めてみたが、これらは誤差の内に埋もれる程度であった。

中間製品の輸出としてはフェロクロムの輸出、特に低炭素フェロクロムの輸出は製造量の半量に近いが全体のクロム量に比べれば少ないものである。再生資源以外の国内調達す

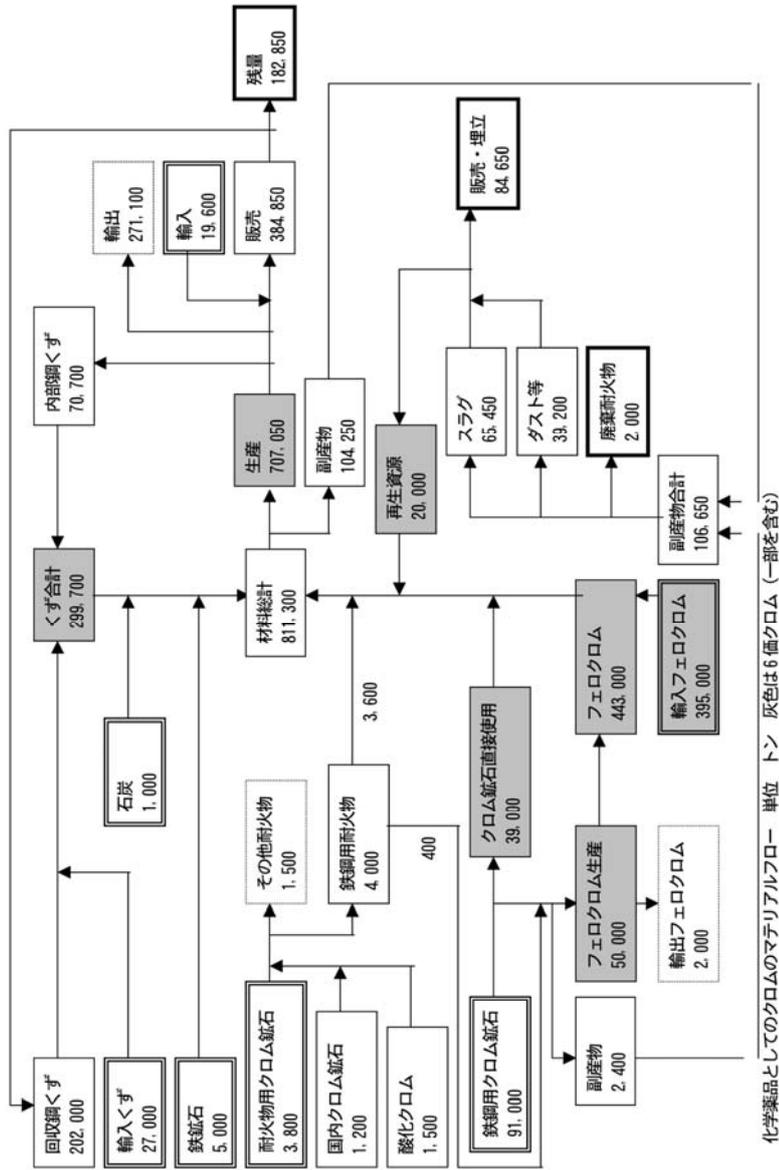
る原料としては耐火材料用のクロム鉱石が挙げられる。そのクロム量としては 1,000 トンを欠けるものとみなされる。従って、輸出入による差 520,000 トンと国内採取による 1,000 トンが国内での再生される資源以外の原料である。

一方、国内で調達される再生資源によるクロム量はおよそ 200,000 トンである。これに製造工場内部での調達される鋼材やダスト・スラッジからの再生資源がありこの量はおよそ 70,000 トンと思われる

次に、これらのスラグ、ダスト、廃棄耐火物の中に 6 価クロムを生成する可能性がないかということである。この場合、強い酸化性の高温状態では 6 価クロムの生成は避けられないものと考えられる。その意味では、これらのスラグ、ダスト等の生成が酸化性の状況で合ったかどうかは重要である。単純に言えば、高炉はほぼ還元性であり、ここでのスラグ、ダストには 6 価のクロムの混入の可能性は少ない。電気炉は酸化性の雰囲気の場合もありその際にはスラグ、ダストにクロムの混入も多く 6 価のクロムも多くなる傾向がある。

これは転炉でも同様であると思われる。ステンレス鋼の炉外精錬では初期の酸化性状況ではスラグもダストにも酸化クロムも多くなり、6 価のクロムも生成するものと思われるが後期の還元性状況ではスラグからはクロムが溶湯に戻るが発生したダストは戻りようがない。

従って、ダストの状況はさらに詳しい調査が望ましいが得られるデータは多くなく、現状ではこれ以上の調査は難しい。



化学薬品に使用されているクロムのマテリアルフロー調査

クロムの最大の輸入量はクロム鉱石の輸入である。日本への主たる輸出国は南アフリカであり、ついでインドからの輸入が多い。全体としての輸入傾向は減少が見られる。

これまでにいくつかの問題が見受けられる。第一に日本におけるクロム鉱山で最後までクロム鉱石精鉱を行っていたのは鳥取県の日本クロム工業株式会社の若松鉱山であるが1995年に閉山あるいは1997年に休止と言われている。にもかかわらず耐火物協会の資料では国産鉱石の使用が示されている。

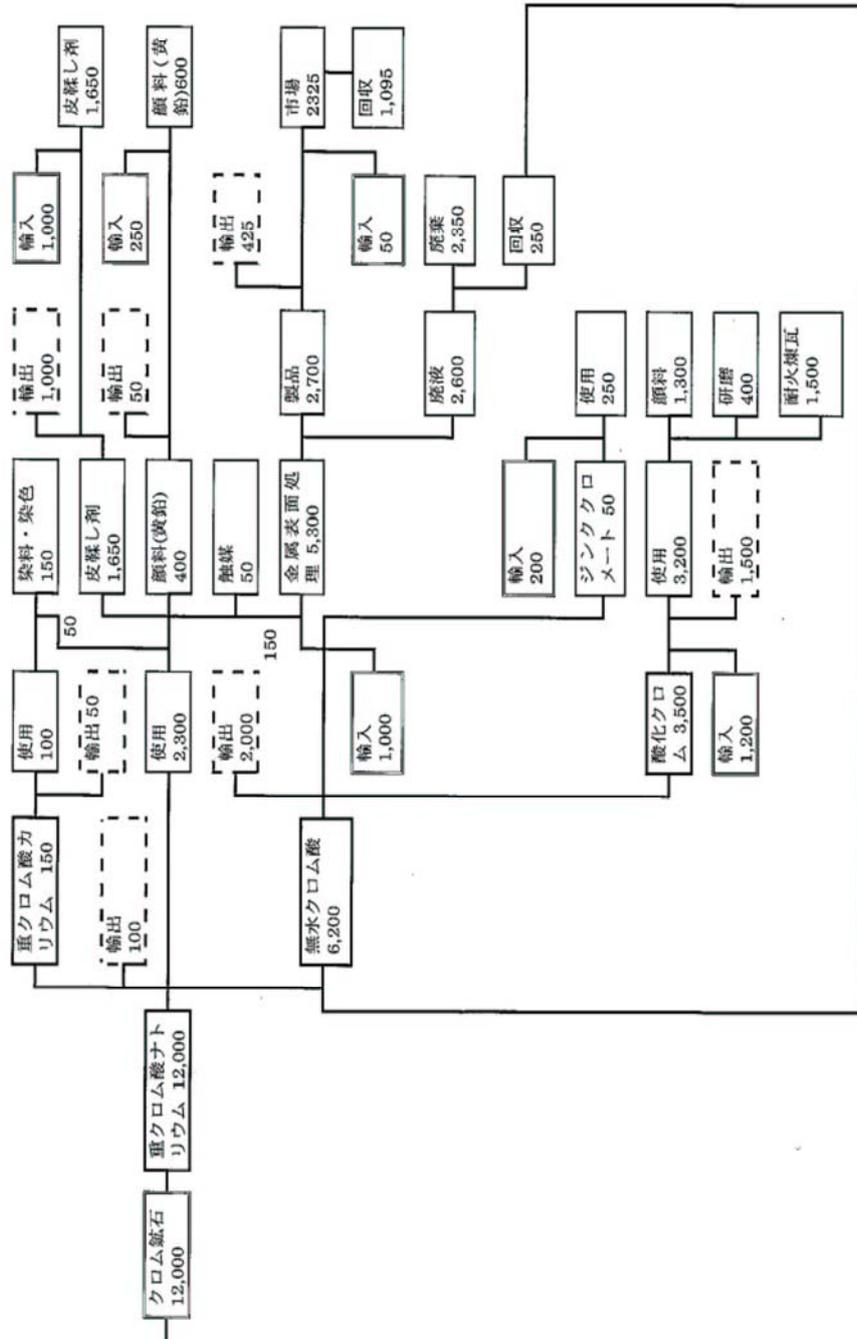
窯業等に使用されているクロムのマテリアルフロー調査

クロム鉱石の最大の使用方法はステンレス鋼等での使用であるがこれに続く量となるのが耐火物としての使用である。耐火物の多くは最終製品を生産するために用いられており、最終製品として使用される量は極僅かである。耐火物の多くは必ずしもクロムを含むものではなく、クロムを含有する耐火物の量は耐火物全体に比べると少量である。

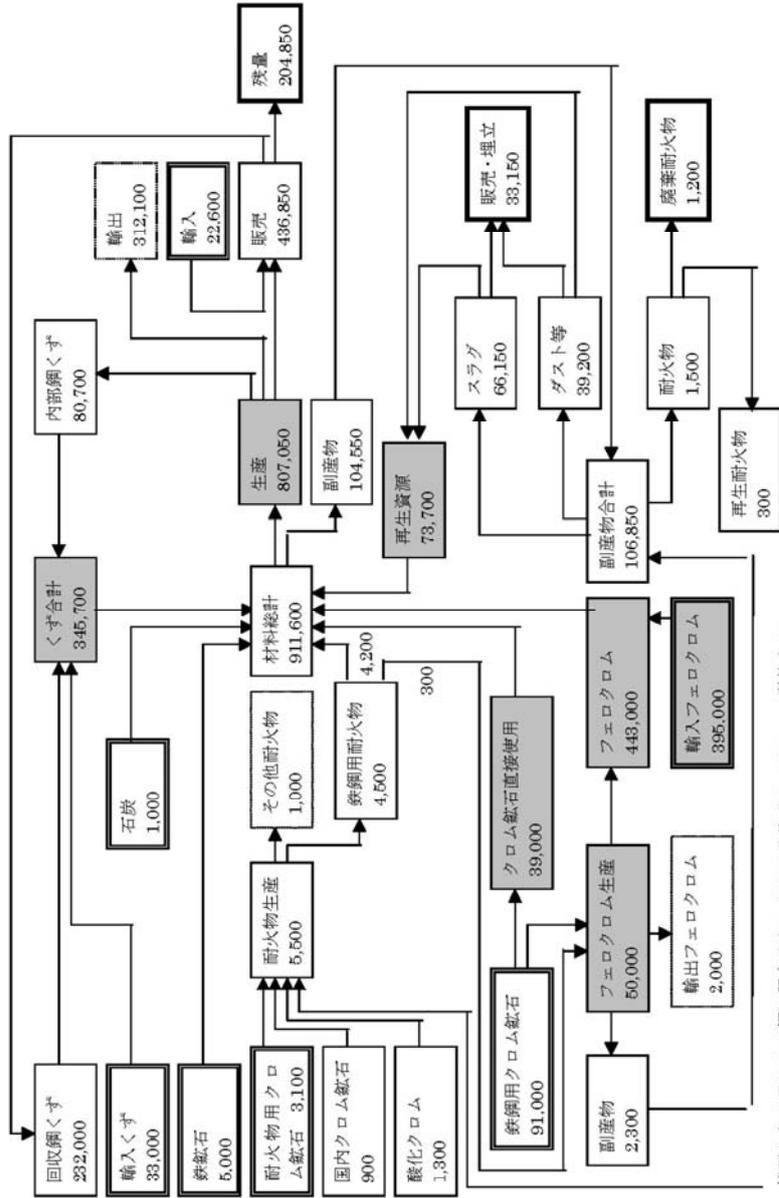
一方、耐火物そのものは3価のクロムの状態である。しかし耐火物として当然であるが高温で使用されるため酸化性の雰囲気である場合には6価のクロムが生じる可能性を含んでいる。また、耐火物の使用状態によっては含有されているクロムが製品中に溶け出す可能性がある。このようなことを踏まえて耐火物に含有されるクロムのマテリアルフローを明白にする。

窯業分野でのクロム使用として耐火物とセメントとコンクリートを明らかにしてきた。また、窯業に似た分野として鑄造用のクロム鉱石の使用としてクロマイトサンドの利用のマテリアルフローを明らかにした。その際、セメント・コンクリートの使用原料として高炉スラグや製鋼スラグ等の鉄鋼副産物におけるクロムのマテリアルフローについても検討している。

この過程で、別報告「ステンレス鋼に使用されているクロムのマテリアルフロー調査」において、ステンレス鋼に関するクロムのマテリアルフローの中で、鉄鋼副産物のクロムの再生資源化の評価が不十分であったことが明らかになってきた。そこで、窯業等に使用されているクロムのマテリアルフローをまとめると共に、ステンレス鋼に使用されているクロムのマテリアルフローの補正を行っている。



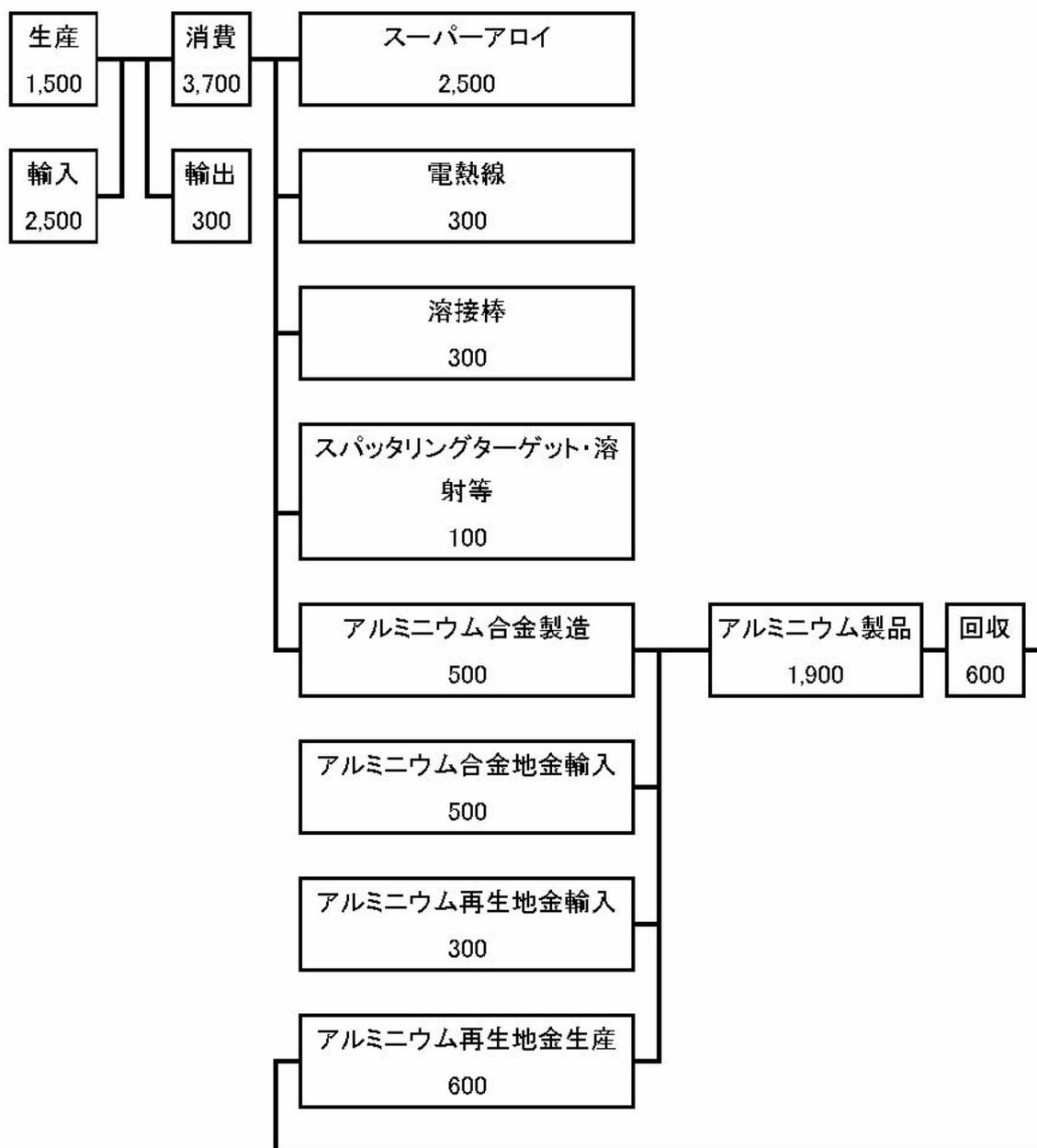
化学薬品としてのクロムのマテリアルフロー 単位 トン 灰色は6個コラム、薄い灰色は一部6個コラム



補正したステンレス鋼に関するクロムのマテリアル・フロー 単位トン

その他に使用されているクロムのマテリアルフロー調査

「ステンレス鋼に使用されているクロムのマテリアルフロー調査」「化学薬品として使用されているクロムのマテリアルフロー調査」「窯業等に使用されているクロムのマテリアルフロー調査」で触れられていないクロムの中で最大量のもは金属クロムとしての使用である。また、化学薬品としての使用で触れ忘れたものに木材防腐剤としての使用がある。



金属クロムに関するマテリアルフロー

4. 2 技術班

技術班は、問題物質群の排出防止に関する技術的現状とその限界の調査の解析を行った。PCB 廃棄物の欧州や日本の現状、わが国の鉄鋼関連施設におけるダイオキシン類の挙動の検討や、日本に埋蔵が多い硫黄の社会循環、地球循環における実態調査、そしてフッ素のマテリアルフローについて調査、検討を行った。

(8) 欧州および日本における PCB 廃棄物処理の現状

1968 年に社会問題化したカネミ油症事件により、その毒性が認識されるようになった PCB は、1972 年の生産・販売中止、回収・保管の行政指導を経て、1974 年に成立した「化学物質の審査及び製造等の規制に関する法律（化審法）」によって、製造・輸入と新たな使用が禁止された。しかし、これ以前から使用されている機器には、現在も使用中のものが存在している。この間の約 30 年に及ぶ保管中に、紛失、漏出などの事例も報告されており、これによる環境汚染も懸念されていた。

一方、PCB の処理技術に関しては、高温焼却法以外に化学処理法が開発され、既に自社処理を開始した企業も存在する。2001 年 5 月「残留性有機汚染物質（POPs）に関するストックホルム条約」が調印され、翌月には「PCB 廃棄物の適正処理の推進に関する特別措置法」が成立した。表に PCB 問題に関する歴史的経緯を示す。以上の経緯の中で、わが国の PCB 廃棄物の処理はようやく始まったといえる。

欧米における PCB 廃棄物の処理状況

EU においては 1996 年の EU 指令により、2010 年までに全ての PCB の処理を完了する計画である。既に使用済みの PCB 廃棄物については、高温焼却処理、化学処理によって半分以上の処理を終えている国あるいは地方が大半である（一部岩塩鉱山跡地に長期保管）。英国で従来保管されていた PCB 廃棄物については処理を終了している。また、いずれの国でも現在使用中のものについては、2010 年までの使用終了および処理を目標としている。

EU 圏内では処理のための PCB 廃棄物の移動が認められており、一部の国では処理設備を持たず、トランス等から PCBs を含有するオイルを抜いた後、容器の洗浄などに要した 2 次的な汚染物を含め、PCB 廃棄物の処理を他国に委託（輸出）している。フランスは特に処理の受託が多い。

処理技術に関しては、高濃度 PCB 油については高温焼却を採用する国が多く、低濃度油は化学処理によって PCBs を除去した後、オイルのリサイクル使用が可能な化学処理を採用する例が多い。しかし、容器の拭き取りや、リサイクルすることが難しい部品類など処理によって生じた 2 次的な汚染物質の化学処理による PCB 除去は困難なため、高温焼却処理に頼ることになる（一部岩塩鉱山跡地に長期保管）。わが国での PCB 廃棄物焼却処理への拒否反応に比較すると、住民の理解が進んでいると感じられる。ただし、排ガス中の環境汚染物質濃度管理、周辺環境モニタリング、測定結果の公開等に対してはかなりの

配慮がされており、これはその結果の一つとも言える。

いずれの処理会社も基本的に私企業であり、処理コストについての情報は皆無に等しい。典型的な形態の PCB 廃棄物のコストに関する質問にも、答えるのは非常に難しいようであった。ケース・バイ・ケースということも事実であると思うが、その裏には PCB 廃棄物処理事業が徐々に難しくなってくる（いる）という予測も関連している可能性が強い。これは、保管されている PCB 廃棄物量が減少するにつれて、PCB 濃度、溶媒種類、容器形状等がそろったものを安定して処理することが難しくなり、プロセス効率が極端に低下する結果、コストも急激に上昇していくという予測である。これは、既に国内の PCB 廃棄物処理を完了している豪州では、既に経験済みであり、処理開始時点（1990 年代前半）に比較して現在は数倍（例えば、\$2,000→\$8,000）程度になっている。なお、豪州では住民の反対により高温焼却処理を断念した経緯があり、わが国の状況と似ているものの処理すべき PCBs 廃棄物量がわが国に比較して数分の 1 と小さい

米国、カナダにおいても焼却処理と化学処理が併用されており、使用を終えた PCBs および PCB 含有機器については 1 年以内の処理が義務化されている。

ドイツにおいては、これまでに生産、使用されたとされる PCBs 製品約 31 万トンのうちの約 88% が既に処理済みとされ、残る処理対象は現在も使用中のものを含め 3,700 トン前後と推定されている。しかしながら、旧東ドイツにおける使用量等の統計値が、旧西ドイツと同様の信頼性があるか否かについては、疑問が残る。

ベルギーの環境行政は Flandars 州、Wallon 州、Brussels 地区に分けて行われている。経済的には Wallon 地域が早くから栄えた経緯があるが、このため逆に、例えば廃棄物焼却施設の老朽化が進んでいる現状にある。Flandars 州政府では、これまで約 65% の PCB 廃棄物を処理済としており、2005 年までに処理を終える計画を提示している。焼却処理および化学処理を行っているが、拭き取り後の固体廃棄物等は、フランス、オランダ等へ処理委託も行っている。

ロシアでは、PCBs 生産中止、使用規制等に関してはかなり遅れていたが、最近、インベントリ調査を含め、かなり活発な動きがある。各地域での使用・保管量の調査がほぼ終了し、これにより、処理設備の立地を含めた建設計画策定が開始されている。

PCB 漏出汚染事故の例として、1988 年のイタリアの例を挙げる。

タイヤ会社のトラックが廃トランスを高速運搬中、急ブレーキでトランスのバルブ溶接が破損し、高濃度 PCB 1,400 kg が 12 km にわたって漏出。周辺への立入禁止措置がとられた。2 ヶ月後に汚染範囲が特定され、汚染対象物の修復措置が行われた。この地域の食物、木材などは 8 ヶ月間にわたって使用が禁止され、また 1,000 トン以上のアスファルト、砕石、木材、農産物が有害廃棄物として管理埋め立てされた。修復総経費 300 万ドルはトラック保有会社が負担している。

次に、1999 年の 0 ベルギーの食肉（鶏肉、鶏卵）汚染の例をあげる。

問題発覚の発端は 1999 年 2 月に、ベルギーの鶏飼育者が雛の神経毒的症狀や卵殻が薄くなる現象に気づいたことである。飼料の生産事業者が飼料および鶏肉、各 1 個のサンプルについてダイオキシン類分析を行ったところ、飼料 781 pg-TEQ/g、鶏肉 958 pg-TEQ/g であることが判明した。これは、ベルギー北西部 Ghent にある企業から供給された油脂が PCBs（ダイオキシン類を含む）に汚染されていたことによるもので、ベルギー国内 9ヶ所その他、フランス、オランダ各 1ヶ所の飼料メーカーに供給されていた。その後、高濃度の PCBs の存在、PCB や PCDDs/DFs の異性体濃度分布プロファイルから、製品 PCB 油の混入汚染であることが明らかになった。リサイクル用廃棄物回収所に違法に持ち込まれた PCBs 含有油を油脂再生会社が動物用飼料原料として飼料会社に納入したことから発生したものとされる。

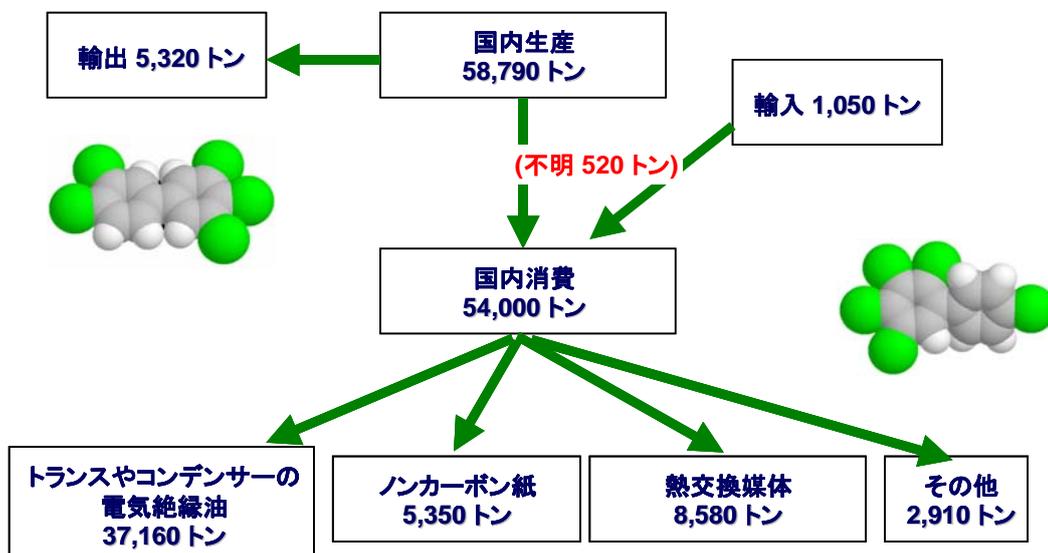
我が国における PCB 排出経緯と廃棄物処理の現状

我が国では PCB は、熱媒体、トランス及びコンデンサ用の絶縁油、感圧複写紙等幅広い分野で使用されてきた。これまで、約 59,000 トンが生産され、このうち約 54,000 トンが国内で使用された。

1968 年、食用油（米ぬか油）の製造過程において熱媒体として使用された PCB が製品に混入し、健康被害を生じたカネミ油症事件が起きた。その後、環境中および種々の生物、人体、母乳等からも、時に高濃度で検出され、PCB 汚染が問題視されるようになった。このため、1972 年以降は PCB の製造が自主的に停止され、1973 年に制定された「化学物質の審査及び製造等の規制に関する法律（化審法）」により、その製造、輸入等は禁止された。

一方、コスト負担を含む PCB 廃棄物処理システムの構築、処理施設の設置場所確保などに大きな困難をかかえ、高圧トランスや高圧コンデンサ等の PCB 廃棄物の処理体制の整備はほとんど進まなかった。このため、事業者などによる長期保管が行われてきたが、

わが国における PCBs の生産と使用の概略



PCB 廃棄物の紛失等が発生し、環境汚染の進行が懸念される状況になってきた。

国際的には、2001 年に PCB 等の残留性有機汚染物質（POPs）による環境汚染を防止することを目的として、「残留性有機汚染物質に関するストックホルム条約が採択され、我が国は、2002 年の国会承認を経て同条約に加入した。本条約では、アルドリン、クロルデン、ディルドリン、エンドリン、ヘプタクロル、ヘキサクロロベンゼン、マイレックス、トキサフェン、PCBs（9 物質）の製造・使用の原則禁止（PCBs に対しては、2025 年までの使用全廃と 2028 年までの適正処分が求められている。） DDT の製造および使用の制限、ダイオキシン、ジベンゾフラン、ヘキサクロロベンゼン、PCBs の非意図的生成物質の排出の削減、POPs 等の廃棄物・廃化学品の適正処理の実施計画策定が求められている。このような状況において、国の PCB 廃棄物処理の基本計画が策定され、適正処理の推進に必要な事項が定められた。

PCB に関する日本の歴史を遡ると、1987 年から 1989 年にかけて鐘淵化学工業(株)高砂工業所において、液状廃 PCB (5,500 トン)の高温焼却処理が実施された。これは、カネミ油症事件の発生原因となった PCB オイルの処理を目的に行われ、PCB の分解効率としては、99.999999%（エイトナイン）を達成している。この実績などに基づき、(財)電気絶縁物処理協会が一括して PCB の高温焼却処理を行うという計画を全国 39 の自治体に働きかけたが、施設の立地問題が解決できず、全て実現できなかった。

大部分の PCB 廃棄物が長期保管を余儀なくされる中で、いくつかの大規模事業者は国の許可を受け、自主的な処理を行ってきたが、保管されている全体量に比較すれば、極めて少ない。

2001 年の PCB 廃棄物処理特別措置法の制定により、環境事業団（2004 年 4 月より、日本環境安全事業株式会社へ移行）が、PCB 廃棄物の処理施設を設置し、処理事業を行うことになった。これにより、約 30 年間の長期保管が続く PCB 廃棄物は、2016 年を目処に処理される計画となっている。

約 15 年前より、PCB 処理技術、分析技術等の調査研究が国主導で行われ、電力会社などの大量保管事業者および環境プラントメーカーを中心として、PCB 処理に関する新技術の開発が進んでいる。また、これらの新技術が適切に開発され、利用されることを目指し、環境省、経産省及び厚生省のそれぞれが、書類審査や実証試験等に基づき、専門家による技術的評価を行った。最近でも、電力会社などを中心にいくつかの PCB 廃棄物処理が行われている。

我が国では、PCB 廃棄物の処理法として、高温焼却の他、以下の方法によるものが許可されている。

・アルカリ触媒分解法（BCD 法）：

有機塩素化合物に水素供与体、炭素系解媒及びアルカリを添加した後、窒素雰囲気下、常圧下で 300℃～350℃に加熱し、脱塩素化。初期反応濃度は、15%以下。PCB 汚染土壌の処理も可能。

- ・化学抽出分解法（DMI/Na OH 法）：
水酸化ナトリウム（Na OH）等のアルカリ及び 1,3-ジメチル-2-イミダゾリジノン（DMI）など非プロトン性極性溶媒存在下、常圧下で約 200℃に加熱し、脱塩素化。ppm～%オーダー濃度の PCB 処理に適用可能。
- ・t-Bu OK 法（カリウム・ターシャリー・ブトオキサイド法）：
PCB の塩素と反応しやすく、かつ油に溶解しやすい有機金属化合物(t-Bu OK)を PCB の混入している油に添加し、加熱反応させることにより、PCB の塩素を塩化カリウム（KCl）として除去。初期濃度は 200 mg-PCB/kg-oil 以下。
- ・触媒水素化脱塩素化法（+t-Bu OK 法）：
PCB をパラフィン系溶剤で希釈し、パラジウム・カーボン（Pd /C）触媒の存在下、水素ガスとの接触による水素化脱塩素反応を行うことにより、PCB の塩素を塩化水素として除去。初期濃度は 15%以下。
- ・超臨界水酸化法：
臨界条件（374℃、22 MPa）を超えた水（超臨界水）の持つ強い反応溶媒特性を利用して、水中に溶解又は存在している有機物質を完全に酸化分解することにより、PCB を分解。濃度 100%の PCB の処理も可能。

(9) 鉄鋼産業におけるダイオキシン類発生量低減

現在、我が国でダイオキシン類の大気への排出規制を受ける鉄鋼関連施設は、鉄鉱石焼結機と製鋼用電気炉である。1990 年代前半まで、これらのプロセス内でダイオキシン類の挙動はほとんど検討されていなかった。しかし、1999 年のダイオキシン類対策特別措置法成立に至る短期間で、両プロセスに関する研究・技術開発が産学および企業間の共同研究として集中的に行われるなど、多くの努力がなされた。

廃棄物焼却、金属製錬・リサイクルなどの高温プロセスにおけるダイオキシン類生成は、非意図的に進行する極めて多くの有機化合物生成反応に付随して起こる極めて微小、微量な反応である。生成量（濃度）は微小であるものの、関連反応は多岐にわたるため、現時点でその詳細を全て明らかにすることは不可能である。しかし、ダイオキシン類と同様に生成してくる有機化合物の中には、微量でも長期間の摂取によって人間や生態系に影響することが懸念されている内分泌攪乱（環境ホルモン）作用が指摘されているものも存在しており、それらの排出量低減も重要な将来的課題と位置付けられる。特に循環型社会の構築に向けて、金属素材リサイクルを推進する際の懸案である塩化ビニルなど有機塩素化合物が混入した金属スクラップや KCl、NaCl など無機塩化物を多く含む廃棄物の焼却、あるいはガス化溶融処理によって生成する飛灰などの残渣の資源化プロセスにおいては十分な配慮が必要である。例えば、各プロセスにおける原料や集塵ダストからのハロゲン元素の効率的除去技術、再利用や効率的処理技術の確立は極めて重要な課題に位置付けられる。

ダイオキシン類に議論を絞ると、生成メカニズムのさらに詳細な把握が現状での最大の

課題と言える。各種燃焼プロセスにおけるダイオキシン類主要生成ルートとして、

1) 前駆物質を経由する生成反応：CBz や CPh などダイオキシン類の骨格を構成する分子構造を持つ物質からの生成

2) *de novo* 合成反応：炭素材の低温酸化時に付随して起こる有機塩素化合物の生成を挙げて議論される場合が多い。

電気炉排ガス研究委員会では、電気炉ダスト粒子をダイオキシン類生成触媒と位置付け、前駆物質からのダイオキシン類生成について検討している。廃棄物焼却炉を対象とした研究においても上記のような主要生成ルートの議論が絶えない。しかし、これを決定づける根拠となる情報は十分ではなく、今後の基礎研究を含めた進展に待つしかないのが現状である。

一方、鉄鉱石焼結プロセスにおいては、塩素化合物の焼結層上層への偏析装入によるダイオキシン類発生量の増加、炭素源がほとんど存在しない床敷層内でのダイオキシン類生成、原料にCBzやCPhなどの前駆物質を添加してもダイオキシン類発生量に顕著な影響が認められないという研究結果が得られている。これらは、焼結層内を揮散・トラップを繰り返して下降する未燃炭素（炭化水素凝集物）を含む粒子がダイオキシン類の直接的な生成源であることを支持する現象である。また、ガス化熔融炉の飛灰を用いた*de novo*合成実験においては、含有する未燃炭素をできるだけ除去した飛灰試料においても無視できないダイオキシン類生成量を報告している例もある。

Table 1. 日本のダイオキシン類排出量推計値 (g-TEQ/年, WHO-TEF (1998))

統計年	1997	1998	1999	2000	2001	2002 (2002)	2003	
発生源	特別措置法 成立		特別措置法 施行	暫定基準解除 (目標値)				
一般廃棄物焼却施設	5000	1550	1350	1019	812	370	310	71
産業廃棄物焼却施設	1500	1100	690	555	533	265	200	74
小型廃棄物焼却炉	700-1153	700-1153	517-848	544-675	342-454	112-135	66-112	73-98
製鋼用電気炉	228.5	139.9	141.5	131.1	95.3	94.8	130	80.3
鉄鋼業焼結工程	135.0	113.8	101.3	69.8	65.0	51.1	93.2	35.7
亜鉛回収業	47.4	25.4	21.8	26.5	9.2	14.7	13.8	5.5
アルミニウム合金製造業	21.8	20.8	13.3	14.2	14.7	14.4	11.8	17.4
セメント製造施設	4.7	4.1	3.9	4.0	3.2	3.7	—	4.7
伸銅品製造施設	3.2	3.2	1.2	1.3	1.3	1.3	—	1.4
火力発電所	1.6	1.6	1.6	1.7	1.6	1.9	—	2.0
火葬場	2.1-4.6	2.2-4.8	2.2-4.9	2.2-4.8	2.2-4.9	2.3-5.1	—	2.3-5.1
自動車排出ガス	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	—	1.4
合計	7910	3920	3040	2460	1960	957	843-891	390

これらは、未燃炭素系物質からのダイオキシン類の生成ルートにおいては、炭素（炭化水素）系の量よりも組成や性質が大きく影響することを示している。特に、高温排ガスの冷却過程では、未燃有機化合物の凝集と共に、種々の金属および金属化合物の凝集も進行し、種々の成分が複合化した微粒子が生成する可能性が高い。このような複合物質は単

独粒子の他に、ダストや飛灰の主要成分であるシリカ、アルミナ、酸化鉄等の混合物および混合酸化物からなる微粒子表面に薄く蒸着された形態で存在していることも考えられる。複合化物からのダイオキシン類生成に関する定量的な検討は、*de novo* 合成反応による生成寄与を明確にするだけでなく、さらに効率的な生成抑制技術開発のための重要な情報を与えるものと期待される。

(10) 硫黄の社会循環に関する実態調査

日本は硫黄鉱の埋蔵が多く、かつては松尾鉱山をはじめとして硫黄鉱石を採掘し、これを原料として硫酸または単体硫黄が製造された時代もあった。しかし、石油精製工程から回収される単体硫黄の量が増えるにつれて鉱山硫黄は競争力を失い、昭和 47 年には国内すべての硫黄鉱山が閉山に追い込まれた。また、硫黄は多くの非鉄金属鉱石に含まれており、その製錬過程において除去され、硫酸として回収されている。現在の日本においては、これら石油精製出の単体硫黄及び非鉄製錬出の硫酸が、大部分を占めており、その量は国内の需要を上回り、一部を海外に輸出しているのが現状である。

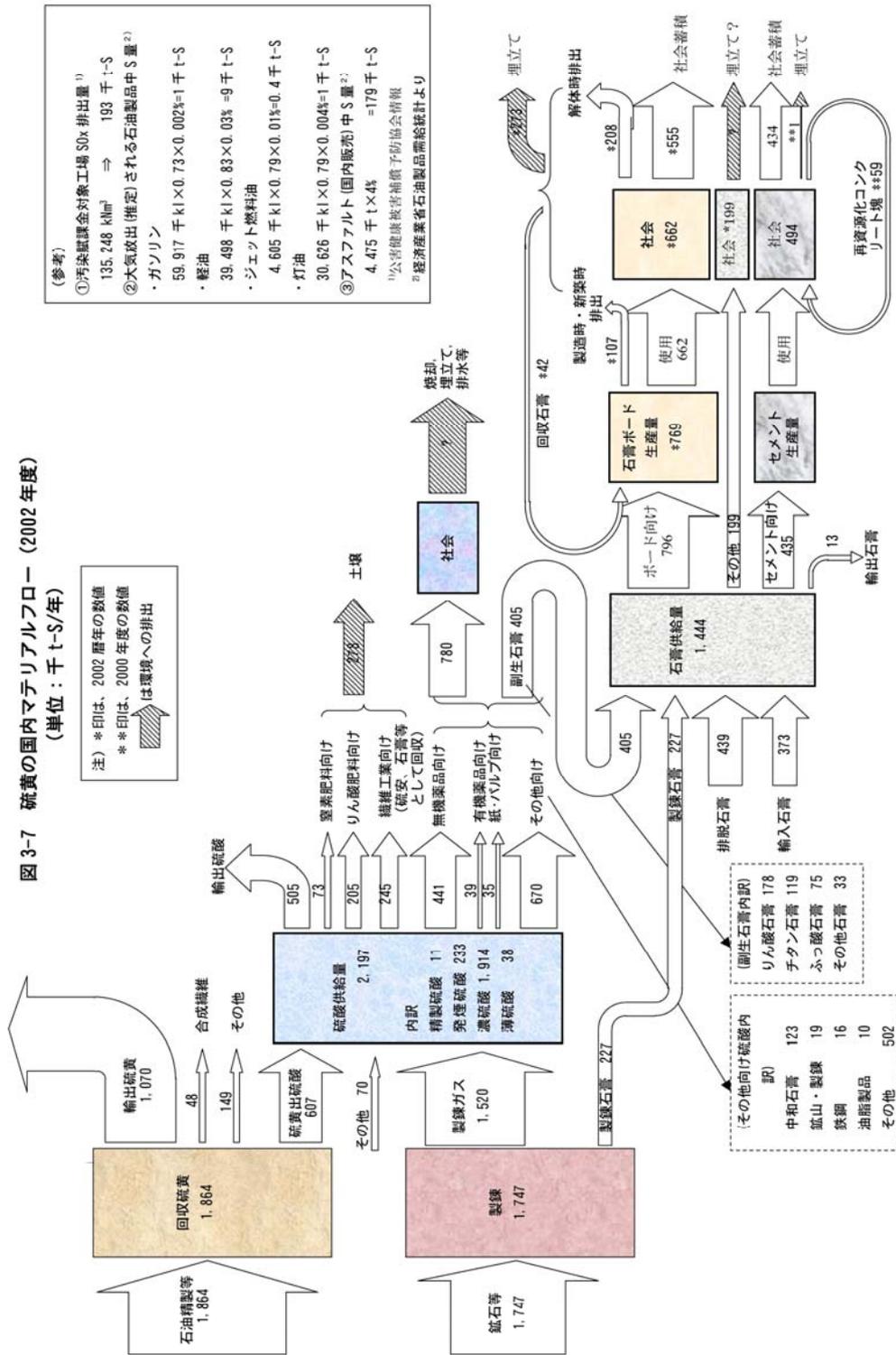
世界においても、硫黄・硫酸の需給バランスは供給過剰の状態であり、カナダ等では 1 千万 t 強の硫黄が貯蔵されているとも言われている。

硫黄化合物のマテリアルフローでは、上流の硫黄からカスケード式に硫酸、石膏の順に製品化されており、上流に戻るフローがほとんど無い。

石膏の循環システムを構築する場合、石膏だけを考えると、あまり多くを望めない需要と、この先増大が予想される回収品との間での需給ギャップにより、循環システムが機能しない恐れがある。そのためには、石膏の硫黄や硫酸への転換も視野に入れておく必要がある。

元素硫黄は、液体である硫酸と比べ保管、輸送、貯蔵が容易なこと、硫酸や硫酸を經由して容易に石膏へ転換が行えること等硫酸と石膏をつなぐ要の機能を有しており、硫黄化合物全体のマテリアルフローを考えた場合、循環システム構築のキーマテリアルになる。硫黄を中核とした硫黄化合物の循環システム構築のためには、未だ技術が確立していない硫酸からの硫黄製造、石膏からの硫黄製造、石膏からの硫酸製造技術等の開発がリサイクルの選択肢を広げ、硫黄含有物の循環システム構築に寄与するものとする。

図 3-7 硫黄の国内マテリアルフロー (2002 年度)
(単位: 千 t-S/年)



硫黄の地球循環に関する実態調査

硫黄あるいは硫酸は、肥料、繊維、化学薬品等、多くの分野で使用されており、また必須元素の1つでもあることから、人間の生活にとって必要不可欠の物質である。しかしながら、 SO_2 に代表されるように、一部の硫黄化合物は毒性或いは有害性を有しており、取扱いや環境への排出には十分な注意が必要である。また、かつては硫黄の需要に生産が追いつかない時代もあったが、環境への配慮から、石油製品からの硫黄回収や製錬排ガスからの硫酸回収が進むにつれて硫黄の需給バランスが崩れ、近年は毎年数百万tの余剰が発生、累積在庫量も約30百万tに達している状況である。一方、自然界においては火山からの SO_2 や H_2S を含むガスの環境への放出などがあり、これが降雨に吸収されて海洋に移動し生物活動などを経て海底堆積物となる、地球規模の硫黄循環がある。

活動に伴って生ずる硫黄の循環の影響度を見積もるとともに、硫黄の使用、環境排出、既往の研究結果に基づいて地球規模での硫黄の循環について把握し、その中で人間の経済排出抑制および再資源化の現状と将来動向を把握することを目的とする。

硫黄化合物のマテリアルフローでは、上流の硫黄からカスケード式に硫酸、石膏の順に製品化されており、上流に戻るフローがほとんどない。また、地球規模の硫黄の循環を概観すると、海洋への蓄積が少しずつではあるが起こっており、硫黄に関しても制御された状態での利用が強く求められる。

国内における硫黄のマテリアルフローを見ると、(廃棄)石膏を如何に循環使用していくかが重要であることが分かる。石膏の循環システムを構築する場合、石膏だけを考えると、あまり多くを望めない需要と、この先増大が予想される回収品との間での需給ギャップにより、循環システムが機能しない恐れがある。そのためには、石膏の硫黄や硫酸への転換も視野に入れておく必要がある。

一方、元素硫黄は、液体である硫酸と比べ保管、輸送、貯蔵が容易なこと、硫酸や硫酸を経由して容易に石膏へ転換が行えること等硫酸と石膏をつなぐ要の機能を有しており、硫黄化合物全体のマテリアルフローを考えた場合、循環システム構築のキーマテリアルになる。硫黄を中核とした硫黄化合物の循環システム構築のためには、未だ技術が確立していない硫酸からの硫黄製造、石膏からの硫黄製造、石膏からの硫酸製造技術等の開発並びに回収硫黄等の安全かつ有益な用途の開発がリサイクルの選択肢を広げ、硫黄含有物の循環システム構築に寄与するものとする。

(11) フッ素のマテリアルフロー

地球温暖化、オゾン層破壊、有害物質の拡散など、ここ十数年で地球環境問題は人類が解決すべき最大の課題の一つとなってきた。高度な産業社会を形成している先進国では、生産活動が大きくなり、その結果として生活が豊かになり、従来の地球の浄化作用を超えた人工的な排出物が生じ、そのため地球規模で生活環境に影響が見られるようになった。

生活廃棄物も産業廃棄物も地球上に十分なスペースと浄化作用があるならば、しかるべ

きところに廃棄するのが経済的にはもっとも合理性がある。しかしながら最早、産業活動が活発な地域では、地球の浄化作用が廃棄物量に対応できないのは明からであり、また人類は自然には存在しない人工物を作り出し、それらの多くは地球の自然浄化作用では浄化できないことが多い。

現在、環境問題は、生活者すべてが被害者であり、加害者になっている点が特徴的であり、解決策を見出すことの困難さがそこにある。現在の課題は持続可能な発展であるが、計画経済の手法が崩壊した現在、自由経済の下で産業発展と環境保全を共進化させることが重要な課題である。現在、人類が使用している多くの物質に関して自然循環と人工循環のバランスを知ることは、この共進化を考える上で重要なことと言える。

鉄鋼業をはじめ各産業においては、フッ素の使用量、排出規制、再利用が重要視されており、蛍石に変わるフラックスの導入やフロンの回収破壊技術および代替物質の開発、排水中への溶出抑制技術³⁾の開発などが進められている。フッ素の環境中への排出抑制、産業廃棄物中のフッ化物量の低減および再利用などを効率的に図るためには、フッ化物の資源の輸入、加工、製造、消費、廃棄にわたるトータルな観点から捉えたマテリアルフローを検討することが重要である。

1997、2001、2002年の国内フッ素のマテリアルフローを調査し、日本国内でのフッ素の使用は、フッ素の排水基準が強化された後、全体としては減少していることがわかった。特に鉄鋼業界では、蛍石の在庫量の減少、使用量の減少により、規制強化前に比べ約30%減少した。化学工業では、フッ素が商品となっているため、規制強化後も顕著な減少は見られない。逆に、フッ素樹脂は、今後需要伸びが予想されている。化学工業で現象の可能性があるのはフロンの生産量で、これは排水基準の規制強化ではなく、国際的なオゾン層保護目的によるフロンガス生産の規制によるものである。排水規制強化については、数多くの特許が申請されているとおり、排水処理技術を向上させることにより対応していると考えられる。

フッ素は使用用途が大変広く、最終的な行先の詳細を知ることは今回の調査で十分にはできなかった。これからの更なる調査特にスラッジにおけるフッ素の含有量の調査が重要である。排水処理技術はカルシウム添加によるフッ化カルシウム、つまり蛍石の除去という方法が最も多いことから、蛍石のリサイクルという可能性に期待したい。

今回このようなマテリアルフローを作成するにあたり、多くの公式な統計データを検索し、利用したが、年々統計データの廃止項目が増えており、統計データが雑になってきているといわざるを得ない。前述したように、今後はこのようなトータルな観点から環境を効率的に考察することが重要となっており、このようなデータベースの整備は必要不可欠になってくるものと思われる。

4.3 システム・社会班

システム・社会班は、循環型社会におけるイノベーション戦略についての分析と提言を行うことを目的とし、欧州を中心とした問題物質規制に関する調査、米国、EU、日本の化学物質規制調査、PCB 廃棄物に関する環境リスクと処理コスト、そして幾つかの問題物質処理の社会的費用標準を行った。

(12) 欧州を中心とした問題物質規制に関する調査

EUにおける問題物質の法規制を調査するに当たって、EUの法体系を概観すると、主権国家であるEU加盟国とEU全域に及ぶ法の関係は複雑なものがあると想像される。問題物質に関連する法がどのような効力を持ちどの程度の安定性を有している法なのであるかを知るためには欠かせないものであると思われる。

表. 水枠組み指令における優先物質

	CAS 番号	名称	用途	識別
1	15972-60-8	アラクロール	農薬	C
2	120-12-7	アントラセン	燃焼での副産物	B
3	1912-24-9	アトラジン	農薬	B
4	71-43-2	ベンゼン	溶剤	C
5		臭化ジフェニルエーテル	難燃剤	C
	32354-81-9	ペンタ臭化ジフェニルエーテル		A
6	7440-43-9	カドミウムとその化合物	乾電池、顔料	A
7	85535-84-8	炭素数 10-13 の塩化アクケン	金属処理、難燃剤	A
8	470-90-6	クロロフェンビンホス	農薬	C
9	2921-88-2	クロロピリホス	農薬	B
10	107-06-2	1,2-ジクロロエタン	塩化ビニルモノマーの原料	C
11	75-09-2	ジクロロメタン	溶剤、噴射剤、発泡剤	C
12	117-81-7	フタル酸ジエチルヘキシル (DEHP)	可塑剤	B
13	330-54-1	ジウロン	農薬	B
14	115-29-7	エンドサルファン	農薬	B
	959-98-8	α -エンドサルファン		B
15	206-44-0	フルオランテン*	燃焼での副産物	C
16	118-74-1	ヘキサクロロベンゼン(HCB)	不使用	A
17	87-68-3	ヘキサクロロブタジエン	農薬中間体	A
18	608-73-1	ヘキサクロロシクロヘキサン (HCH)	農薬	A

	68-89-9	ガンマ同位体 (リンデン)	農薬	A
19	34123-59-6	イソプロツロン	農薬	B
20	7439-92-1	鉛とその化合物	電池、他の多くの製品	B
21	7439-97-6	水銀とその化合物	乾電池、温度計他	A
22	91-20-3	ナフタレン	燃焼での副産物	B
23	7440-02-0	ニッケルとその化合物	ステンレス鋼など	C
24	25154-52-3	ノニフェノール	化学中間体、溶剤他	A
	104-40-5	4-パラ-ノニフェノール		A
25	1806-26-4	オクチルフェノール	化学中間体、溶剤等	B
	140-66-0	パラ-テルト-オクチルフェノール		B
26	608-93-5	ペンタクロロベンゼン	農薬中間体	A
27	87-86-5	ペンタクロロフェノール	殺虫剤	B
28		多環芳香族炭化水素	燃焼での副産物	A
	50-32-8	ベンゾ(a)ピレン		A
	205-99-2	ベンゾ(b)フルオランテン		A
	191-24-2	ベンゾ(g,h,i)ペリレン		A
	207-08-9	ベンゾ(k)フルオランテン		A
	193-39-5	インデノ(1,2,3-)ピレン		A
29	122-34-9	シマジン	農薬	B
30	688-73-3	トリブチル錫化合物	船の防汚塗料	A
		トリブチル錫イオン		A
31	12002-48-1	トリクロロベンゼン	化学的中間体、溶剤等	B
	120-82-1	1,2,4-トリクロロベンゼン		B
32	67-66-3	トリクロロメタン(クロロホルム)	(HCFC)化学的中間体	C
33	1582-09-8	トリフルラリン	農薬	B

A;優先毒性物質、B;優先毒性物質検討中、C;優先物質

*フルオランテンは他のより危険な多環芳香族炭化水素の指標として表に挙げた

(13) 米国・EU・日本の化学物質規制調査

各国での法規制を見る前に、現在行われている国際的な規制を挙げてみる。ここで見られる、規制を前提として、各国で規制が行われているものも多い。

本報告では全ての化学物質に出来る限り CAS 番号を賦与して化学物質の同一性を明白にすることとした。CAS 番号がない化学物質もあり、また、同一物質で合っても異性体混合のあり方によっても異なる番号が付けられることもあるため、場合によっては同一物質であることの確認が難しい場合もある。また、特に日本の化審法に見られるように CAS

番号との相性が悪い場合もある

ストックホルム条約での残留性有機汚染物質

和名	英名	CAS 番号	用途等
アルドリン	Aldrin	309-00-2	有機塩素系殺虫剤
ディルドリン	Dieldrin	60-57-1	有機塩素系殺虫剤
エンドリン	Endrin	72-20-8	有機塩素系殺虫剤
DDT	DDT	50-29-3	有機塩素系殺虫剤
ヘプタクロル	Heptachlor	76-44-8	有機塩素系殺虫剤
クロルデン類	Chlordane	57-74-9 5103-71-9 5103-74-2	殺虫剤、シロアリ防蟻剤
ヘキサクロロベンゼン	Hexachlorobenzene	11-74-1	防腐剤
マイレックス	Mirex	2385-85-5	殺虫剤(日本では未登録)
トキサフェン	Toxaphene	8001-35-2	殺虫剤(日本では未登録)
ポリ塩化ビフェニル	PCBs	1336-36-3	絶縁油等
ダイオキシン	Dioxin	1746-01-6	非意図的
フラン	Furans	51207-31-9	非意図的

モントリオール議定書に定めたオゾン破壊物質の制限

種類	名称等	CAS 番号	制限	
			開発国	開発途上国
CFC 特定フロン	CFC11	75-69-4	凍結 1989/7/1	凍結 1999/7/1
	CFC12	75-71-8	禁止 1996/1/1	禁止 2010/1/1
	CFC113	76-13-1		
	CFC114	76-14-2		
	CFC115	76-15-3		
ハロン	ハロン 1211	353-59-3	凍結	凍結 2002/1/1
	ハロン 1301	75-63-8	禁止 1994/1/1	禁止 2010/1/1
	ハロン 2402	124-73-2		
他の CFC フロン	CFC13	75-72-9	禁止 1996/1/1	禁止 2010/1/1
	CFC111	354-56-3		
	CFC112	76-12-0		

	CFC211	422-78-6		
	CFC212	3182-26-1		
	CFC213	2354-06-5		
	CFC214	29255-31-0		
	CFC215	4259-43-2		
	CFC216	661-97-2		
	CFC217	422-86-6		
4 塩化炭素	CCl3	56-23-5	禁止 1996/1/1	禁止 2010/1/1
トリクロロエタン	Trichloroetane	71-55-6	凍結 1993/1/1 禁止 1996/1/1	凍結 2003/1/1 禁止 2015/1/1
HCFC	Hydrochlorofuloro Carbon 34 種 異性体を含めると 274 種	75-43-4	凍結 1996/1/1	凍結 2016/1/1
		75-45-6 他	禁止 2030/1/1	禁止 2040/1/1
臭化塩化メタン	BromoChloromethane	107-04-0	凍結 1995/1/1	凍結 2002/1/1
			禁止 2005/1/1	禁止 2015/1/1

京都議定書対象化学物質

二酸化炭素	CO2	124-38-9
メタン	CH4	74-82-8
亜酸化窒素	N2O	10024-97-2
ハイドロフルオロカーボン	HCF23	75-46-7
	HFC32	75-10-5
	HFC41	75-46-7
	HFC125	354-33-6
	HFC134	76-41-2
	HFC134a	811-97-2
	HFC143	430-66-0
	HFC143a	420-46-2
	HFC152	75-37-6
	HFC227ea	431-89-0
	HFC236fa	690-39-1
HFC245ca	679-86-7	

	HFC4310mee	138495-42-8
パーフルオロカーボン	PFC14	75-73-0
	PFC116	76-16-4
	PFC218	76-19-7
	PFC3110	355-25-9
	PFCc318	115-25-3
	PFC4112	678-26-2
	PFC5114	355-42-0
六フッ化硫黄	SF ₆	2551-62-4

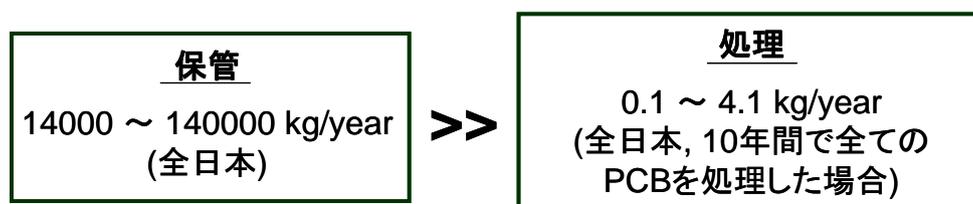
化学兵器禁止条約の表 1 に挙げられている化学物質		
物質名		CAS 番号
O-アルキル-アルキルホスホノフルオリダート類		表 1A 神経剤
サリン	Sarin	107-44-8
ソマン	Soman	96-64-0
O-アルキル-N,N-ジアルキルホスホルアミドシニアニダート類		表 1A 神経剤
タブン	Tabun	77-81-6
O-アルキル-S-2-ジアルキルアミノエチル-アルキルホスホノチオラート類		表 1A 神経剤
VX	VX	50782-69-9
硫黄マスタード類		表 1A びらん剤
マスタードガス	Mastard Gas	505-60-2
2-クロロエチルクロロメチルスルフィド	2-Chloroethyl chloromethyl sulfide	2625-76-5
ルイサイト類		表 1A びらん剤
ルイサイト 1		541-25-3
ルイサイト 2	Lewisite2	40334-69-8
窒素マスタード類		表 1A びらん剤
HN1	HN1	538-07-8
HN2	HN2	51-75-2
HN3	HN3	555-77-1
サキシトキシン		表 1A 神経剤
サキシトキシン	Saxitoxin	35523-89-8

リシン		表 1A 蛋白質合成阻害剤
リシン	Ricin	9009-86-3
アルキルホスホン酸ジフルオリド		表 1B 前駆物質
メチルホスホン酸ジフルオリド	Methylphosphonyl difluoride	676-99-3
エチルホスホン酸ジフルオリド	Ethylphosphonyl difluoride	753-95-8
O-アルキル-O-2-ジアルキルアミノエチル-アルキルホスホニット類		表 1B 前駆物質
QL	QL	57856-11-8
クロロサリン		表 1B 前駆物質
クロロサリン	Chlorosarin	1445-76-7
クロロソマン		表 1B 前駆物質
クロロソマン	Chlorosoman	7040-57-5

(14) PCB 廃棄物に関する環境リスクと処理コスト

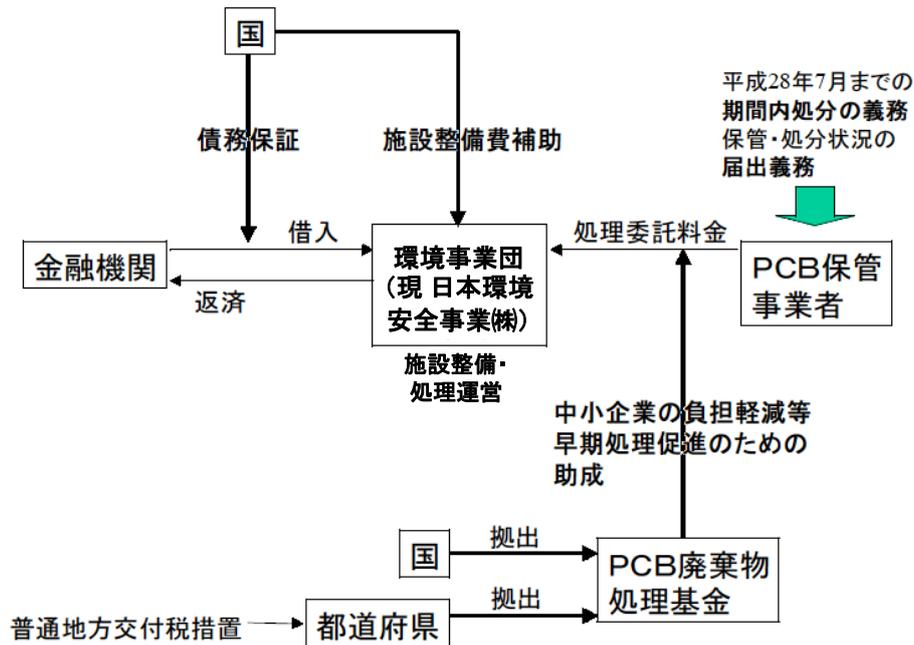
長期保管中の紛失や漏逸などによる PCB の環境排出確率は、PCB 廃棄物の処理過程における値より、極めて小さいことが示された。

PCBの環境放出リスクに関する保管と処理の比較



PCB 廃棄物保管企業の活動終了などに伴う紛失量はかなり多く、これがドライビングフォースとなり、環境事業団（2004 年 4 月より、日本環境安全事業株式会社へ移行）を中心とする PCB 廃棄物処理施設の建設と処理事業の運営が決定された。以下に、我が国の PCB 廃棄物処理システムの概略を示す。

日本のPCB廃棄物処理スキーム



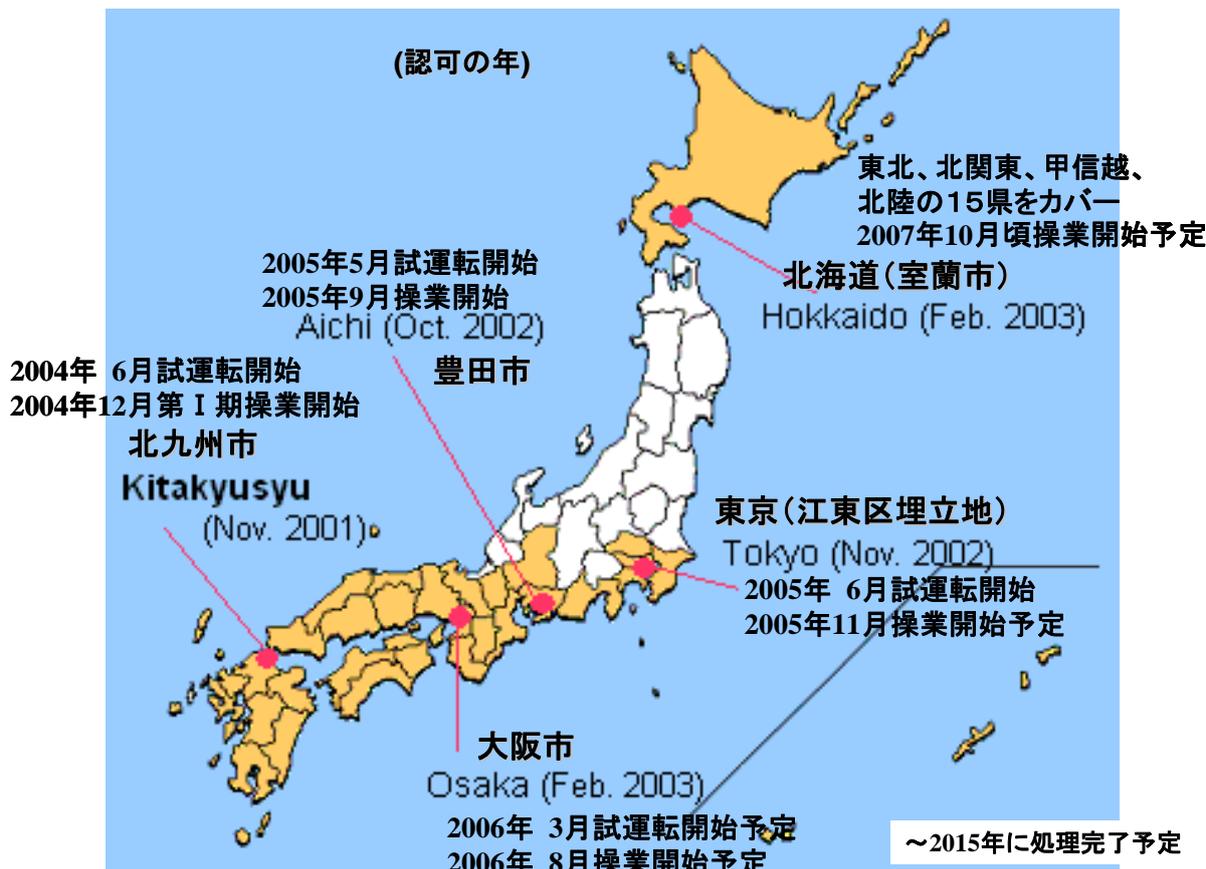
この事業では、下記表に示す全国 5 箇所で、広域的な PCB 廃棄物処理施設を設置し、地方公共団体や大企業、中小企業などの保管事業者から委託を受けて処理を行うことになる。

事業名	処理対象		処理能力
	処理対象区域	処理対象廃棄物	
北九州	鳥取県、島根県、岡山県、広島県、山口県、徳島県、香川県、愛媛県、高知県、福岡県、佐賀県、長崎県、熊本県、大分県、宮崎県、鹿児島県、沖縄県	第1期工事で整備する施設においては、北九州市の区域等に存する高圧トランス等及び廃ポリ塩化ビフェニル等をまず対象とし、第2期工事で整備する施設と合わせて、事業対象の全区域内の高圧トランス等及び廃ポリ塩化ビフェニル等に加えそれ以外のものの処理を検討。	第1期 0.5トン/日 (ポリ塩化ビフェニル分解量) 第2期の施設能力については、処理対象量の把握を踏まえ、今後設定する。
豊田	岐阜県、静岡県、愛知県、三重県	高圧トランス等及び廃ポリ塩化ビフェニル等	1.6トン/日 (ポリ塩化ビフェニル分解量)
東京	埼玉県、千葉県、東京都、神奈川県	トランス、コンデンサ及び安定器が廃棄物となったもの並びに廃ポリ塩化ビフェニル等	2トン/日 (ポリ塩化ビフェニル分解量)
大阪	滋賀県、京都府、大阪府、兵庫県、奈良県、和歌山県	高圧トランス等及び廃ポリ塩化ビフェニル等	2トン/日 (ポリ塩化ビフェニル分解量)
北海道	北海道、青森県、岩手県、宮城県、秋田県、山形県、福島県、茨城県、栃木県、群馬県、新潟県、富山県、石川県、福井県、山梨県、長野県	高圧トランス等及び廃ポリ塩化ビフェニル等	約1.8トン/日 (精査中) (ポリ塩化ビフェニル分解量)

施設整備には、国からの補助金の導入が行われ、処理料金の低減が図られる。さらに、中小企業者が保管する高圧トランスや高圧コンデンサの処理費用の一部は、国、都道府県からの補助金と産業界等民間からの負担で賄われる「ポリ塩化ビフェニル廃棄物処理基金」から補助され、処理費用の負担が軽減される仕組みがある。

日本環境安全事業(株)によるPCBs廃棄物処理事業

日本環境安全事業株式会社法(平成15年法律44号)



PCB 廃棄物処理費用の妥当性検証のため比較対象となったのは、廃棄物焼却や無機素材リサイクル、有機性廃棄物のサーマルリサイクルなどの過程で発生するダイオキシン類の排出削減対策である。

各事業所別の処理費・維持管理費等運営費を考慮しない純粋な PCB 廃棄物処理設備のコストは、PCB 1 トンあたり平均約 840 万円と莫大なものとなる。もちろん規模に大きく左右されるが、通常の高温焼却処理の場合は一桁以上低いコストが推定される。

これは、既設設備を全く利用せず、更地に PCB 廃棄物専用の処理施設を建設すること。および、採用した処理方法がいずれも高いコストを要する化学分解処理を基本とするものであることに起因する。これは、排ガスの排出を最小限に抑制するなど、周辺住民、自治体の理解を得るためのコストと言い換えることも可能である。

PCB廃棄物処理に伴うダイオキシン類の毒性除去量と設備コスト

事業所名	PCB廃棄物処理量 (ton)	含有ダイオキシン類の 毒性等量 (kg-TEQ)	設備コスト (10億円)	PCB廃棄物処理コスト (100万円/ton-PCB) [100万円/kg-TEQ] *ランニングコストを除く
北九州 (第I期)	1,400	30.0	15.6	11.14 [520]
北九州 (Total)	5,000	107.1	34.9	6.98 [326]
豊田	3,900	83.5	33.6	8.62 [400]
東京	4,400	94.2	33.9	7.70 [360]
大阪	4,300	92.0	43.5	10.12 [470]
北海道 (東北等を含む)	4,000	85.6	23.8	5.95 [278]
Total	23,000	492.4	185.3	平均 8.41 [390]

PCB 廃棄物処理に伴う含有ダイオキシン類の毒性（主にコプラナーPCBとPCDFs（フラン）に起因する）除去コストを廃棄物焼却施設に対するダイオキシン類排出削減対策に要した、あるいは将来的に要すると予想されるコストであるが、「ダイオキシン類対策特別措置法」が成立した1999年を挟む1997年から2000年にかけての緊急対策における費用を、ダイオキシン類毒性等量1kg（1kg-TEQ）あたり、約600万円と概算し、これに比較して、PCB 廃棄物処理の場合は390万円であると試算している。

しかしながら、この値は処理費・維持管理費等運営費を考慮しないものであり、さらに、廃棄物焼却に伴って非意図的に発生するダイオキシン類への対策は、PCB 廃棄物処理とは極めて異なるものであることから、この根拠の妥当性は乏しいと言わざるを得ない。

ダイオキシン類の排出抑制に要する費用の比較

事業所名	ダイオキシン類毒性換算処理コスト (100万円/kg-TEQ)
PCB廃棄物処理	390 (278 - 520)
廃棄物焼却施設からのダイオキシン類排出抑制の緊急対策 (1997 to 2000)	600 (200 - 800)
廃棄物焼却施設からのダイオキシン類排出抑制の恒久対策 (10~30年の期間)	7,800 (5,400 - 17,100)

欧米等における PCB 廃物処理コストとの比較

PCB の廃棄物処理は旧西欧、アメリカ、豪州などで進められているものの、処理コスト

の情報は極めて少ない。また、廃棄物の量と形態、保管の状態、処理に伴う基準（処理後の物質および排ガスなど）が大きく異なる場合もあり、正当な比較が難しい。したがって、ここでは、比較的正確な情報と考えられる豪州のケース、および処理方法別のコスト情報をリストアップするにとどめる。

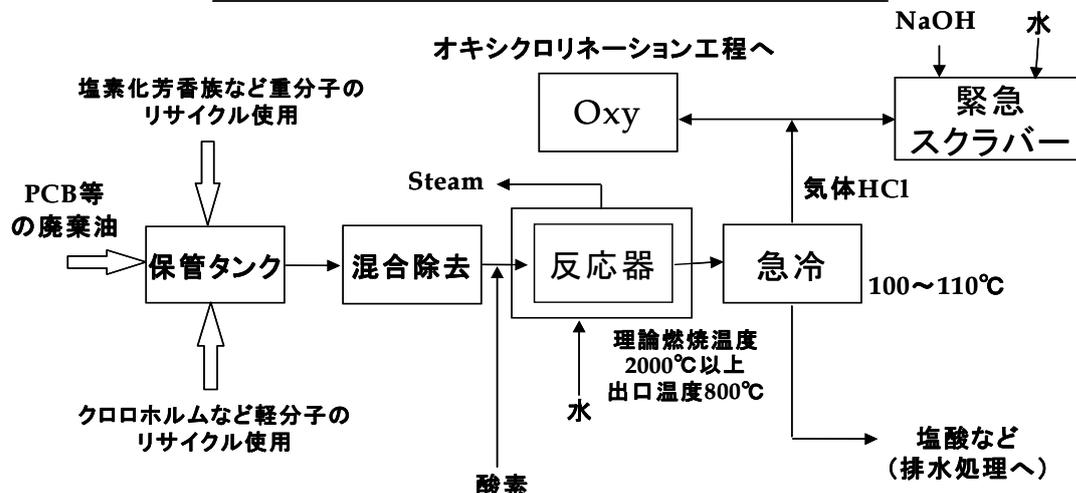
一般的な処理コストとしては、1990年代前半から半ばでは、US\$1,500～US\$2,000（16.5万～22万円）/トンが代表的であったが、現在はその2,3倍というのが一般的である。しかし、高温焼却処理の場合は、現在でもUS\$1,500（16.5万円）/トン以下というケースも多い。一方、化学処理ではUS\$6,000（66万円）/トンに上る場合もある。

豪州では、1990年代はAU\$2,000～\$3,000（16～24万円）/トンの処理コストであったが、2002年あたりのコストはその数倍（最大AU\$6,000（48万円）/トン）と見積もられる。これは、北半球での焼却処理（US\$1,500（16.5万円）/トン）に比較すると高いとされる。

また、2塩化エチレン製造プロセス（既存）を用いたPCB廃棄物処理であるが、これは、ベルギーのアントワープにあるSolVin N.V.が2塩化エチレンモノマー（EDC）の製造工場で、そのプロセス内で発生するクロロホルムなど軽分子有機塩素化合物、クロロベンゼンなど高分子有機塩素化合物のプロセス内でのリサイクルを可能とするシステム（BPR: By-Product Recycling）を開発し、これを使用してPCB廃棄物（液体状）の処理を請け負っている。このプロセスでは、PCBおよびその他のオイルは反応器内で高温燃焼され、生成したHCl気体は、オキシクロリネーション工程に送られ、EDCの製造原料として有効利用される。既存のプロセスを利用するため、初期コストの増加が少なく、極めて低コストで有効利用が可能としている。

日本でも、鉄鋼用電気炉、各種高温製錬工程、セメント製造工程、廃棄物ガス化溶解、灰溶解など種々の高温プロセスを利用する選択肢がなかったかどうか疑問が残る。

BPR (By-Product Recycling)によるPCB処理 EDC(2塩化エチレン)製造プロセスの利用



(15) 幾つかの問題物質処理の社会的費用評価

有害大気汚染物質対策経済性評価調査は2001年度から2003年度に経済産業省製造産業局化学物質管理課が社団法人産業環境管理協会に委託し実施されたものである。

経済産業省によれば、有害大気汚染物質対策について以下の理由で排出抑制の画一的対策が不適當である。すなわち、低濃度・長期曝露、物質・発生源・排出形態の多様性により対策が多岐にわたることから規制により公平で、早急かつ効果的な対策を取ることが困難および化学物質を取り扱う事業者の自主的判断での多様性・柔軟性の確保が可能な方法での自主管理が効果的であるからとしている。このことから、1996年5月の大気汚染防止法の改正により事業者の責務として有害大気汚染物質の排出状況を把握して排出抑制のための必要な措置をとることが規定された。この具体的取り組みとして自主管理の枠組みが整備された。

通商産業省と環境庁が1996年に策定した指針に基づき13物質に対して77の事業者団体が自主管理計画を策定した。この1997年度から1999年度の3年間にわたる第1期自主管理計画はその内容の妥当性、実施状況を産業構造審議会、化学品審議会及び中央環境審議会において検討されると共に結果が公表された。対象とされた有害大気汚染物質はアクリロニトリル、アセトアルデヒド、塩化ビニルモノマー、クロロホルム、1,2-ジクロロエタン、ジクロロメタン、テトラクロロエチレン、トリクロロエチレン、1,3-ブタジエン、ベンゼン、ホルムアルデヒドと二硫化ニッケル・硫酸ニッケルの12物質とダイオキシンである。ダイオキシンを除く12物質の単純加算では参加団体による大気への排出量は41%の削減が見られ当初の目標である35%を大きく上回った。

一方、一部に比較的高濃度の地域があり、審議会の指摘を踏まえて従来の自主管理の枠組みを継続しつつベンゼンの高濃度の地域については地域単位とする新たな自主管理の取り組みである第2期自主管理計画が2001年度から2003年度にかけて行われた。対象12物質の基準年である1999年度の排出量は37701トンであり、2003年度の大気排出量の目標を22771トンと40%の削減とした。この目標は2001年度の実績で既に95%の達成を見ている。

この調査は2001年度から開始されたこの第2期自主管理計画において「削減目標の達成だけではなく、企業努力を評価すべき」との産業構造審議会の指摘を受けて実施されたものである。

従って、一つの目的と下は有害大気汚染物質対策に要した設備投資や年間運転経費のコストの経済成功率を把握して評価することにある。またもう一つの目的としては化学物質を取り扱う事業者が今後より効率の良い対策を講じていけるよう技術的な基礎資料として取り纏めることにある。

この調査の結果は独立行政法人製品評価技術基盤機構のホームページに要約及び報告書として公開されている。

除去技術毎の削減費用見積もり

	処理ガス量 m ³ /h	設備費 百万円	運転経費 百万円/年	回収メリット 百万円/年	処理費用 万円/トン
油吸収	20	25-30			560
	1,000	130-150	0.1		56.4
	1,000	280-350	1.1		132.4
水・酸・アルカリ吸収	6,000	7-10	100		67.2
	30,000	18	400		53.6
活性炭吸着	3,000	20	3	7	-2.7
	7,000	30	6	16	-4.0
	11,000	35	10	25	-4.2
触媒酸化法	500	6	0.3		7.2
	5,000	30	1		3.2
	50,000	100	10		1.6
蓄熱燃焼法	20,000	50	0.8		1.2
	5,0000	70	1.5		0.7
	100,000	100	2.7		0.5
直接燃焼法	2,000	100	2.5	2	21.0
	10,000	150	11	9	6.8
	30,000	280	32	27	4.4

物質毎の削減費用

物質名	有効削減 事例数	削減費用(万円/トン)			
		最小値	最大値	中央値	平均値
ベンゼン	118	0	4,256	28	29
1,3-ブタジエン	76	0	726	25	37
アクリロニトリル	93	0	10,351	27	49
ホルムアルデヒド	41	0	1,508	70	91
アセトアルデヒド	33	0	1,270	24	33
トリクロロエチレン	32	0	1,626	24	130
テトラクロロエチレン	42	0	7,126	28	105
ジクロロメタン	205	0	3,004	13	21
クロロホルム	48	0	1,626	18	39
塩ビモノマー	51	0	3,050	26	45
1,2-ジクロロエタン	52	0	1,626	18	39

アンケートに基づく対象物質毎の削減量と設備投資額及び運転経費

対象物質	削減量	全設備投資額	年平均設備投資額	年平均運転経費	(参考) 1996-2002 年度の削減量
	トン	万円	万円	万円	トン
アクリロニトリル	1,309	166,970	23,853	17,775	1,399
アセトアルデヒド	320	28,997	4,142	11,102	590
塩化ビニルモノマ	1,207	134,917	19,274	18,344	1,672
クロロホルム	542	23,058	3,294	2,675	210
ブタジエン	931	78,958	11,280	2,343	1,845
ベンゼン	2,780	250,703	35,815	4,100	3,100
ジクロロエタン	1,124	124,936	17,848	9,379	1,820
ジクロロメタン	4,671	249,270	35,610	23,265	5,497
テトラクロロエチレン	401	41,842	5,977	6,443	212
トリクロロエチレン	182	37,933	5,419	13,266	133
ホルムアルデヒド	199	31,152	4,450	9,727	254
合計	13,666	1,168,736	166,962	118,415	16,732

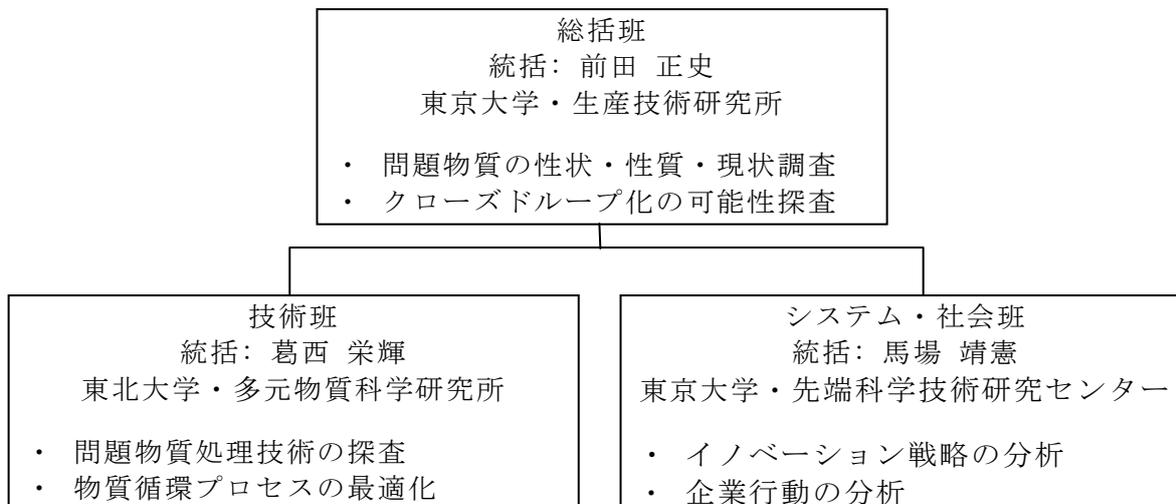
以上の検討をまとめると以下のようなになる。但し、この結論は多くの誤差を含んでいるものである。

- 1) 有害大気汚染物質対策の費用は方法によって異なるがおよそ、20万円/トン程度である。
- 2) 有害大気汚染物質対策としては工程内対策とエンドオブパイプ対策があるこのうち工程内対策では費用は比較的小さいが削減率、削減量も比較的小さくなる。
- 3) 有害大気汚染物質対策のエンドオブパイプ対策には除去設備の新設と既存除去設備へのつなぎ込みの対策がある。このうちと既存設備へのつなぎ込みは設備投資額そのものは小さいため有効な対策であるが場合によっては最も費用の大きいものとなる。
- 4) 除去設備の新設の場合、費用や効果の多様な設備の存在にも関わらずその排気量、排気濃度にふさわしい方法を採用するため、大きな費用のばらつきは見られない。
- 5) その場合の費用は削減量が10トン/年の場合およそ20万円/トンであり、この費用総額はほぼ削減量の平方根に比例する。従って、削減量を z トン/年とすればその削減費用はおよそ $200,000 \times \sqrt{\frac{10}{z}}$ 円/トンで示される。
- 6) 一般家庭製品の回収分別費用は10万円/トン程度である。

- 7) 問題物質を含む物理的に分離できない部分をそのままマテリアルリサイクルするならばその費用はこの 10 万円/トン程度となる。
- 8) 問題物質のみに着目するとその回収分別費用はその部分の問題物質含有率を x とすると $\frac{100,000}{x}$ 円/トンとなる。
- 9) 問題物質自体のケミカルリサイクル処理費用は有害大気汚染物質の削減対策費用と大きく異なることはないと予想される。
- 10) 問題物質を含む一般家庭製品中の物理的に分離できない部分の回収処理量を y トン/年とするとそのケミカルリサイクルでの処理費用は $200,000 \times \sqrt{\frac{10}{xy} + \frac{100,000}{x}}$ 円/トン程度であろうと考えられる。
- 11) サーマルリサイクルの場合には問題物質の除去または分解が必要となるがごみ焼却と同程度の対策で良いならば追加の処理は不要であり、その処理費用は 150,000 円/トン程度であろうと考えられる。
- 12) 追加の除去処理が必要な場合にはサーマルリサイクル費用はケミカルリサイクルとほぼ同様であると考えられる。

5. 研究実施体制

(1) 体制



(2) メンバー表

① 総括班

氏名	所属	役職	研究項目	参加時期
前田 正史	東京大学・生産技術研究所	教授	研究の総括	平成14年11月～ 平成17年10月
岡部 徹	東京大学・生産技術研究所	助教授	問題物質の性状調査	平成14年11月～ 平成17年10月
古角 雅行	東京大学・生産技術研究所	研究員	問題物質の性状調査	平成14年11月～ 平成17年10月
駒井 武	産業技術総合研究所	研究グループ長	問題物質の物質循環調査	平成14年11月～ 平成17年10月
門前 兼廣	(当時)日本鋳業協会 (現)新日鋳テクノロジー株式会社	(当時)技術部兼環境保安部次長 (現)主席研究員	問題物質の物質循環調査	平成14年11月～ 平成17年10月
高須 登実男	九州工業大学	助教授	問題物質の物質循環調査	平成15年6月～ 平成17年10月
三宅 正男	東京大学・生産技術研究所	助手	問題物質の物質循環調査	平成15年6月～ 平成17年10月
前橋 至	東京大学・生産技術研究所	技術専門職員	問題物質の性状調査	平成14年11月～ 平成17年10月

Gnyloskurenko Svyatoslav	東京大学・生産 技術研究所	JST 研究 員	問題物質の性状調査	平成15年1月～ 平成16年12月
齋藤 加余子	東京大学・生産 技術研究所	JST 研究 補助員	資料収集補助	平成16年4月～ 平成17年10月

② 技術班

氏 名	所 属	役 職	研究項目	参加時期
葛西 栄輝	東北大学・多元 物質科学研究所	教授	問題物質の処理技術に関する調査	平成14年11月～ 平成17年10月
光田 好孝	東京大学・生産 技術研究所	教授	問題物質の処理技術に関する調査	平成14年11月～ 平成17年10月
佐藤 修彰	東北大学・多元 物質科学研究所	助教授	問題物質の安定化処理技術の調査	平成14年11月～ 平成17年10月
佐藤 努	金沢大学・理学 部	助教授	問題物質の処理技術の有効性の調査	平成14年11月～ 平成17年10月

③ システム社会班

氏 名	所 属	役 職	研究項目	参加時期
馬場 靖憲	東京大学・先端科学技術研究センター	教授	イノベーション戦略の分析と提言	平成14年11月～ 平成17年10月
鎗目 雅	(当時) 東京大学・先端科学技術研究センター (現) 文部科学省・科学技術政策研究所	(当時) 助手 (現) 主任 研究官	問題物質に関する法規制の調査	平成14年11月～ 平成17年10月
田中 さつき	東京大学・先端科学技術研究センター	JST 研究補助員	資料収集補助	平成15年11月～ 平成17年3月
中臣 由起子	東京大学・先端科学技術研究センター	JST 研究補助員	資料収集補助	平成16年12月～ 平成17年3月

6. 研究期間中の主な活動

(1) ワークショップ・シンポジウム等

年月日	名称	場所	参加人数	概要
平成15年3月13日～14日	社会技術研究会議～オキシハロゲン化合物について～	仙台市	16名	ゴミ処理において問題となっているオキシハロゲンについて、現状および次世代処理技術のための基礎研究について討議を行った。
平成15年6月16日	社会技術研究プロジェクト打合せ	東京大学生産技術研究所	17名	社会技術研究プロジェクト「循環型社会における問題物質群の環境対応処理技術と社会的解決」に関する研究打合せを行った。
平成15年8月11日	第一回社会技術研究プロジェクト勉強会	東京大学生産技術研究所	28名	環境汚染による生物影響について、特に土壌・植物の影響について、および土壌・地下水汚染修復をテーマに討議を行った。
平成15年8月20日	第二回社会技術研究プロジェクト勉強会	東北大学多元物質科学研究所	36名	資源処理と水環境保全、および自然から学ぶ地下水・休廃止鉱山廃水のヒ素浄化法をテーマに討議を行った。
平成15年10月1日	第三回社会技術研究プロジェクト勉強会	東京大学生産技術研究所	18名	水溶液中における重金属イオンの分離・除去、および鉄鋼スラグを栄養源として利用した海洋植物プランクトン増殖によるCO ₂ 固定化をテーマに討議を行った。
平成16年1月9日	第四回社会技術研究プロジェクト勉強会	東京大学生産技術研究所	32名	有機塩素系化合物の水に対する溶解度、および欧州のPCB廃棄物処理状況および処理施設見学報告をテーマに討議を行った。
平成16年11月11日	平成16年度第一回特別研究会：水と生態間の問題物質の循環	東京大学生産技術研究所	28名	硫黄の地球循環と廃棄物を用いる固定について討議を行った。
平成16年12月9日	平成16年度第二回特別研究会：水と生態間の問題物質の循環	東京大学生産技術研究所	23名	海洋を中心とした窒素の循環および火山の噴火と噴煙による火山ガス放出について討議を行った。

平成 17 年 1月27日	平成16年度第三回特別研究会:水と生態間 の問題物質の循環	東京大学生 産技術研究 所	23 名	循環型社会における公共 事業のあり方および各国 の水質基準と試験法の比 較について討議を行った。
平成 17 年 3月10日～ 3月11日	平成16年度第四回特別研究会:水と生態間 の問題物質の循環	宮城県宮城 郡ホテル大 観荘	23 名	リンのマテリアルフロー および有機塩素系化合物 の水への溶解度について討 議を行った。
平成 17 年 10月6日	平成17年度特別研究 会:水と生態間の問題 物質の循環	東京大学生 産技術研究 所	27 名	スコロダイト生成による ヒ素の固定化および地下 水ヒ素汚染と健康影響に ついて討議を行った。

(2) 招聘した研究者等

なし

7. 主な研究成果物、発表等

(1) 論文発表 (国内 2 件、海外 12 件)

- T.Nakamura, M.Maeda, S.Oowada, "Pblems and Prospects of Halogen Element Contained Dust Treatment in Recycling(Overview)", Materials Transactions, 44, 2421, (2003).
- W. H. Han, Y. Mitsuda and M. Maeda, "Measurement of Activity of Cu in Fe-Cu Alloy by Double Knudsen Cell Mass Spectrometry, High Temperature Materials and Processes", 22, 227-231, (2003).
- Y. Kayanuma, T. H. Okabe, and M. Maeda, "Metal Vapor Treatment for Enhancing the Dissolution of Platinum Group Metals from Automotive Catalyst Scrap", Metallurgical and Materials Transactions B, 35B, 817-824, (2004).
- W. H. Han, M.Miyake, Y.Mitsuda, and M.Maeda, Vapor Pressure Measurements of Phosphorus in Cu-P Alloys by Knudsen Cell Mass Spectrometry, High Temperature Materials and Processes , 23, 399-403, (2004).
- Shigeru Ueda and Masafumi Maeda, "Phase Equilibria of the Al₂O₃-CaF₂-FeO_n System", Metall. Mater. Trans. 35B (2004) 181-182.
- Masaru Yarime, "Public Coordination of Participants' Behavior and Expectations: An Attempt to Introduce Low-Emission Vehicles in Tokyo," 社会技術研究論文集, 2, 39-48 (2004).

- Masaru Yarime and Yasunori Baba, “Dynamics of Embedded Software Development: Coevolution of OS Standards and Community Networks in Japan,” *Revista de Comercio Exterior*, 55 (9), 776-787 (2005).
- Masaru Yarime and Saeed Parto, “Governance of Technological Change: Lessons from the Japanese Experience,” MERIT-Infonomics Research Memorandum 2005-031, Maastricht Economic Research Institute on Innovation and Technology, Maastricht, The Netherlands, December (2005).
- 馬場靖憲, 鎗目雅, “酸化チタン光触媒”, 馬場靖憲, 後藤晃編著, 産学連携の実証的研究, 東京大学出版会 (2006).
- Masaru Yarime, “Encouraging Green Innovation or Prolonging Existing Technologies: Effects of Environmental Regulation on Technological Change in the Chlor-Alkali Industry in Japan and Western Europe,” *Journal of Industrial Ecology*, submitted.
- Masaru Yarime, “Introducing Compressed Natural Gas Vehicles in Tokyo: Possibilities and Limits of Public Coordinator,” in David Laws and Lawrence Susskind, eds., *Green Innovation and Public Entrepreneurship Networks*, Berlin: Springer, forthcoming.
- Masaru Yarime, “Innovation on Clean Technology through Environmental Policy: The Emergence of the Ion Exchange Membrane Process in the Japanese Chlor-Alkali Industry,” in Brent Herbert-Copley and Saeed Parto, eds., *Industrial Innovation and Environmental Regulation: Toward an Integrated Approach*, Ottawa: International Development Research Centre; and Tokyo: United Nations University Press, forthcoming.
- Masaru Yarime, “Public-Private Partnership in Science and Technology in Japan: A Case of Materials Innovation,” in Hajime Yamada, ed., *Public-Private Partnership in Science and Technology Policy*, Tokyo: NTT Press, forthcoming.
- Masaru Yarime, “Transition from the State of Technological Lock-in: A Case Study of Replacing Diesel Vehicles with Low-Emission Vehicles in Tokyo,” *International Journal of Environmental Technology and Management*, submitted.

(2) 口頭発表

① 招待、口頭講演 (国内 21 件、海外 21 件)

- 前田正史, 植田滋, “ふっ化物酸化物融体の相平衡”, 日本学術振興会製鋼第 19 委員会 反応プロセス研究会, 2002 年 10 月 23 日.
- 葛西栄輝, 照井敏勝, 中村 崇, Sri Harjanto, “充填層燃焼プロセスによるダイオキシン類汚染土壌の浄化”, 日本鉄鋼協会第 145 回春季講演大会, 2003 年 3 月 28 日
- 山口 周, 岩沢こころ, 王 楠, 脇本佳季, 前田正史, “ダスト及び焼却灰の高温乾式二次処理における重金属酸塩化物の挙動”, 日本学術振興会製鋼第 19 委員会 反応プロセス研究会, 2003 年 5 月 12 日
- 前田 正史, 中村 崇, 佐藤 修彰, “自然と人間起源による硫黄循環”, 資源素材秋季大会, 宇部, 2003 年 9 月 23 日.
- 佐藤 修彰, 中村 崇, “金属系廃棄物を用いるイオウの固定と循環”, 資源素材秋季大会, 宇部, 2003 年 9 月 23 日.
- 前田 正史, “リサイクルとエネルギー”, 資源変換・再生研究センター融合システム研究部門共同シンポジウム, 東北大学多元物質科学研究所, 2003 年 10 月 2 日.
- 鎗目雅, “環境規制とイノベーション戦略: 化学産業におけるケース”, 環境経済・政策学会2003年大会報告要旨集, 206-207 (2003).
- Masaru Yarime, “Unlocking Diesels: Introduction of CNG Vehicles in Tokyo through Public Coordination,” Yarime, Masaru, International Workshop on Social Decision Making Process for Energy Technology Introduction: Case Study Approach and Analytical Framework, Central Research Institute of Electric Power Industry, Tokyo, December 13 (2003).
- 鎗目雅, “環境規制とイノベーション戦略: 化学産業におけるケース”, 環境経済・政策学会2003年大会報告要旨集, 206-207 (2003).
- 鎗目雅, “技術に関わるロックインについて”, TCS研究会セミナー, 日本電気協会裾野研修センター, 8月21-23日 (2003).
- 馬場靖憲, 鎗目雅, “日本において産学連携の成功とは何を意味するか? : 光触媒の事例からの考察”, 東京大学先端経済工学研究センター (AEE) セ

ミナー「産学連携：事実の検証から始める」、東京大学, 6月30日 (2003).

- Masaru Yarime, “New Materials Innovation through University-Industry Collaboration: The Case of Commercialization of Photocatalyst,” Presentation at the PREST Research Seminar, Policy Research in Engineering, Science and Technology, University of Manchester, Manchester, United Kingdom, May 14 (2003).
- Masaru Yarime, “Science-Technology Permeation through University-Industry Collaboration: The Case of Photocatalyst,” Presentation at the SPRU Research Seminar, Science and Technology Policy Research, University of Sussex, Brighton, United Kingdom, May 12 (2003).
- Masaru Yarime, “New Materials Innovation through University-Industry Collaboration,” Presentation at the UNU/INTECH Research Seminar Series 2003-3, United Nations University Institute for New Technologies, Maastricht, The Netherlands, May 9 (2003).
- Yasunori Baba and Masaru Yarime, “Possibilities of Technology Transfer of TiO_2 Photocatalyst for Environmental Protection,” Presentation at the Japan-China Seminar organized by the Institute of Chemistry, Chinese Academy of Science, Beijing, China, January 21 (2003).
- Yasunori Baba and Masaru Yarime, “Science-Technology-Commercialization Interaction Networks: The Case of Titanium Dioxide Photocatalyst,” Presentation at the International Symposium on Consolidation of Technology Management with Science Policy Research, Tokyo, January 30 (2003).
- Yasunori Baba and Masaru Yarime, “Bringing Forth New Technology Innovations: Possibilities of TiO_2 Photocatalyst for the Protection of Ecosystems,” Presentation at the Japan-Vietnam Seminar organized by the Institute of Applied Physics and Scientific Instrumentation and the Vietnam National Center for Sciences and Technology, Hanoi, Vietnam, January 7 (2003).
- M. Maeda, "Materials Flow Control in Sustainable Society and Activity of the International Research Center for Sustainable Materials of the University of Tokyo", China-Japan Symposium on Ecomaterials, Recycling-Oriented Industry and Environmental Management, (2004).

- M. Maeda, "Metal recycling and waste treatment in Japan", Waste Processing and Recycling in Mineral and Metallurgical Industries V 2004 , 27-37, (2004).
- M.Miyake, Y. Mitsuda and M. Maeda, "Recovery of metals from metal mixtures by alkaline leaching", Waste Processing and Recycling in Mineral and Metallurgical Industries V 2004 , 181-187, (2004).
- Y.Kayanuma, T. H. Okabe, Y. Mitsuda, M. Maeda, "Metal Vapor treatment for platinum group metals from spent automotive catalyst", Waste Processing and Recycling in Mineral and Metallurgical Industries V 2004 , 169-180, (2004).
- Masaru Yarime, "University-Industry Collaboration for New Materials Innovation: The Case of Titanium Dioxide Photocatalyst in Japan," Presentation at the Workshop on Sustainable Materials, Annual Meeting 2004 of the Alliance for Global Sustainability, Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden, March 21-24 (2004).
- 馬場靖憲, 鎗目雅, 七丈直弘, "社会共創による知の生成：特許データのネットワーク分析", 第10回人工物工学コロキウム, 東京大学, 12月10日 (2004).
- Masaru Yarime and Yasunori Baba, "Dynamics of Embedded Software Development: Coevolution of OS Standards and Community Networks in Japan," Presentation at the Workshop on International Computer Software Industry, Montreal, Canada, September 24 (2004).
- 鎗目雅, 馬場靖憲, "科学主導イノベーションにおける大学研究者の役割：光触媒のケース", 研究・技術計画学会第19回年次学術大会講演要旨集, 159-162 (2004).
- 馬場靖憲, 鎗目雅, 七丈直弘, 永原裕一, "産学官連携を通じたイノベーション：研究開発コミュニティーのネットワーク分析", 研究・技術計画学会第19回年次学術大会講演要旨集, 175-177 (2004).
- 馬場靖憲, 鎗目雅, 七丈直弘, "光触媒研究者コミュニティーのネットワーク分析：科学技術政策における可能性", 文部科学省科学技術研究所科学技術動向研究センター, 7月23日 (2004).
- Masaru Yarime, "Role of University-Industry Collaboration in New Materials Innovation: Evolving Networks of Joint Patent Applications," Presentation at

the INGENIO Research Seminar, Institute of Innovation and Knowledge Management, Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, Spain, June 14 (2004).

- 馬場靖憲, 鎗目雅, “環境規制と技術革新: 化学物質・有害物質”, 第8回人工物工学コロキウム, 東京大学, 4月26日 (2004).
- 鎗目雅, “環境規制とイノベーション: 日欧における塩素ソーダ産業”, 環境経済学研究セミナー, 上智大学, 4月21日 (2004).
- Masaru Yarime, “New Materials Innovation in Japan: An Analysis from the Perspective of National Innovation Systems,” Presentation at the SSES and ESBRI Research Seminar, organized by the Stockholm School of Economics and the Stockholm School of Entrepreneurship, Stockholm, Sweden, March 29 (2004).
- Masaru Yarime, “University-Industry Collaboration for New Materials Innovation: The Case of Titanium Dioxide Photocatalyst in Japan,” Presentation at the Workshop on Sustainable Materials, Annual Meeting of the Alliance for Global Sustainability, Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden, March 21-24 (2004).
- Masaru Yarime, “Environmental Regulation and Innovation: A Case Study of Hazardous Substances,” 新しい環境法制のあり方を考える研究会ワークショップ・プロシーディングス, 経済産業研究所, 46-72 (2004).
- M. Maeda, "Resources Recycling and The Role of Metallurgical Processes, Proceedings of the 7th Nordic-Japan Symposium Science and technology of process metallurgy," 1:1-1:7, (2005).
- M. Miyake and M. Maeda, "Alkaline Leaching for Mixture of Nickel Hydroxide and Nickel-Rare Earth Alloy", TMS 2005 Annual Meeting, 25-26, (2005).
- Masaru Yarime and Yasunori Baba, “Coevolution of Environmental Regulation and Innovation Network: The Development of Lead-Free Solders in the United States, Europe, and Japan,” Paper presented at the Fourth European Meeting on Applied Evolutionary Economics, Utrecht, The Netherlands, May 19-21 (2005).
- Yasunori Baba, Naohiro Shichijo, Yuichi Nagahara, and Masaru Yarime, “The Evolution of Co-inventor Networks in Advanced Materials: Combining

Technological Change with Industrial Transformation,” Paper presented at the DRUID Tenth Anniversary Summer Conference 2005 on Dynamics of Industry and Innovation: Organizations, Networks and Systems, Copenhagen, Denmark, June 27-29 (2005).

- Masaru Yarime, “Public-Private Partnership in Science and Technology in Japan: A Case of Materials Innovation, Presentation at the International Symposium on Public-Private Partnership in Science and Technology Policy,” Center for Advanced Policy Science, Toyo University, Tokyo, November 12 (2005).
- 鎗目雅, “規制と研究開発コミュニティーの共進化：鉛フリーはんだに関するイノベーション・ネットワークの国際比較分析”, 研究・技術計画学会第20回年次学術大会講演要旨集II, 762-765 (2005).
- 鎗目雅, “環境規制とイノベーション・ネットワークの共進化：日米欧における鉛フリーはんだの開発”, 環境経済・政策学会2005年大会プログラム・報告要旨, 42-43 (2005).
- 鎗目雅, “参加者行動・期待の公的コーディネーション：東京における低公害自動車導入の試み”, 第2回社会技術研究シンポジウム, 科学技術振興機構東京本部, 3月3日 (2005).
- 馬場靖憲, 鎗目雅, “東京大学の産学官連携：光触媒の事例から何が学べるか?”, 産学官連携シンポジウム「脱工業化社会の産学官連携：環境・食・観光」, 鹿児島大学, 2月10日 (2005).

(3)特許出願 (国内 0 件、海外 0 件)

- ①国内 なし
- ②海外 なし

(4)新聞報道等

- ① 新聞報道
毎日新聞, 2005 年 5 月 22 日, “環境配慮の材料開発”
- ②受賞 なし

(5)その他特記事項

なし

8. 結び

本研究の目的は、1) 問題物質の我が国のマテリアルフローの調査、2) 問題物質の発生予防、安心安全処理のための技術的課題の調査、3) これらの社会的コストの調査を行うことであった。さらに、これらの具体的調査成果の上で世界経済の枠組みでの国内および外国との有機的な新たな関係性を視野に入れた、社会技術的提案をすることが申請時の研究目標であった。

与えられた3年間の時間は思いのほか短く、厳しい時間的制約のもとで調査活動を行うこととなった。そのため、総括版と技術班とは1) のマテリアルフローについては相互分担しながら並行して調査した。

その結果、我が国で初めてとっていいくらい、まとまった問題物質調査を行うことができたと自負している。詳細は報告書資料集に譲るが、微量問題物質である、ダイオキシン類、ヒ素、アンチモン・セレン・テルルなどから、大量問題物質として、硫黄やフッ素について調査した。これに加え、水銀、カドミウム、鉛、クロムなど問題物質とされている金属元素についても注意深く調査している。

社会班は、これら調査の結果を待つことなく、技術的なイノベーションの成果が社会的にどのようなインパクトを与えてきたかについて、歴史的な調査を先行して行った。一つは水銀を例にとりソーダ業界について、もう一つは鉛を例にとり電機業界について徹底的な論考を行った。

3) の問題物質社会的処理コストの調査はきわめて困難であった。そこで、少量問題物質として処理の経験のあるPCBをまず調査した。傍証として大気汚染物質にかかる処理コストを推算し、おおむね問題物質処理コストはほぼこれと同等であると仮定し、問題物質含有廃棄物の処理コストを推算した。

付加的に、欧州とアメリカを中心として、工業製品、工業生産にかかる環境規制の詳細について調査した。世界を市場とする我が国の産業にとって、市場における問題物質の規制はそのまま商品コストの上昇と、商品競争力の劣化を招くことになるからである。

国際的に見れば、中国、インド、韓国はもちろん、タイ、インドネシア、マレーシア等東南アジアの世界工業生産における比重は極めて高い。20世紀中盤に我が国が、経験した第一次環境問題が、今、まさにこの地域で起こっていることは想像にかたくない。実際に、多くの事件が報道されている。残念ながらアジア地域での我が国のプレゼンスは必ずしも高いとはいえない。

本研究における調査の成果は、我が国が工業生産と環境保全のバランスをとりながら過去100年間にわたり積み上げてきた社会的技術の総括である。本研究成果

を広く活用し、我が国は、世界の工業生産拠点であるアジアにおいて積極的な支援と提案をしていくべきであろうと考える。

GDPの10%を工業生産によっている我が国は、多量の天然資源を輸入し、加工し、製品として輸出することにより、不足する食料とエネルギー源を確保しなければならないという宿命にある。

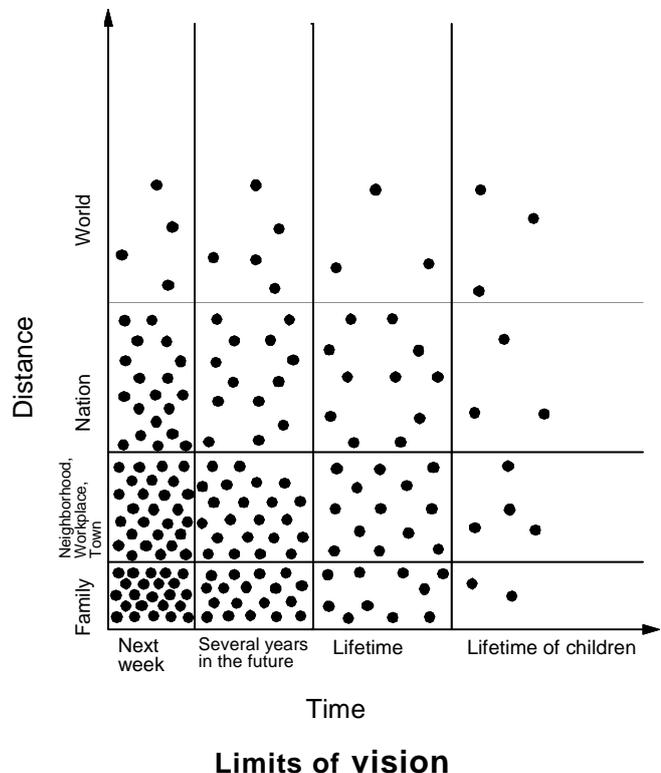
明治時代以降、マルクスの（牧歌的、無限資源期待世界）なビジネスモデルで発展してきた世界経済も、まさに廃棄物の問題性、つまり問題物質の処理問題から必然的にグローバルネットワーク化してきていることが、本研究の成果で明らかになっている。

メドーズらが1970年に定性的に示した図が示唆に富む。それは人の視野の限界である。家族の今日の出来事にはきわめて鋭敏な反応するにも拘わらず、数世代先の世界のどこかの出来事には想像力は及ばない。

資源を消費し、工業生産が盛んなときには、その資源や物質に問題があることなど認識することができないし、それを解決する必要性すら感じられないだろう。

しかし、我が国はすでに50年以上、急速な工業発展を遂げていること、また島国であるという、地理的な事情からも、その問題解決には血のにじむような、人命を賭けた経験知として積み上げてきた。本研究成果はこれらの知識を、限られた範囲ではあるが明示できたと自負している。

アジアの豊かな未来を我が国のリーダーシップで実現するためにも、本研究で取り上げた問題物質の処理処分の課題解決に積極的に取り組むべきであると考え。政府間協力は困難であっても、学術的な連携から開始し、当該国での理解を進めていくことは十分実行可能であり、当該国にとっても役立つことであると考え。



中国、インドの存在感は驚異的である。しかし、我が国の工業生産技術の環境適応性は断然世界第一級である。この目立たないが、きわめて重要な課題解決能力をそれぞれの国々にコスト意識とともに移管していくアカデミアの責務があると実感する。

社会技術研究の成果は我が国にとどめることなくあまねくアジア諸国に反映すべきであるし、中南米、アフリカ諸国に広めていくべきであると考えます。

本研究を結ぶにあたり、この研究に参加してくれた各位、採択を決断した各位に謝意を表するとともに、今後の研究の発展にさらなるご支援を期待し、結びとしたい。