

Environment Research and Technology Development Fund

環境研究総合推進費補助金 総合研究報告書

**廃棄物の焼却処理に伴う化学物質のフローと環境排出量推計に関する研究
(3K153003)**

平成 27 年度～平成 29 年度

Estimation of substance flows and environmental emissions of chemicals associated with waste
incineration

国立研究開発法人国立環境研究所 小口 正弘

平成 30 年 5 月

目 次

I. 成果の概要	・・・・・・・・・・1
1. はじめに（研究背景等）	
2. 研究目的	
3. 研究方法	
3-1 産業廃棄物焼却施設の類型化	
3-2 廃棄物および含有物質のマテリアルフロー推計	
3-2-1 産業廃棄物焼却施設への化学物質流入フローの推計	
3-2-2 PRTR 届出移動量データに基づく廃棄物処理への化学物質流入フローの解析	
3-2-3 産業廃棄物焼却残さ試料の収集・分析と焼却廃棄物の金属類含有量の特徴解析	
3-3 廃棄物焼却における物質挙動・排出特性の把握	
3-3-1 実験炉による化学物質の排出特性把握	
3-3-2 焼却処理における物質挙動のモデル化	
3-4 実施設からの排出実態の調査・解析	
3-4-1 金属類	
3-4-2 六価クロム	
3-4-3 揮発性有機化合物およびアルデヒド類	
3-5 産業廃棄物焼却施設からの排出量推計	
3-5-1 金属類	
3-5-2 六価クロム	
3-5-3 揮発性有機化合物およびアルデヒド類	
4. 結果及び考察	
4-1 産業廃棄物焼却施設の類型化	
4-2 廃棄物および含有物質のマテリアルフロー推計	
4-2-1 産業廃棄物焼却施設への化学物質流入フローの推計	
4-2-2 PRTR 届出移動量データに基づく廃棄物処理への化学物質流入フローの解析	
4-2-3 産業廃棄物焼却残さ試料の収集・分析と焼却廃棄物の金属類含有量の特徴解析	
4-3 廃棄物焼却における物質挙動・排出特性の把握	
4-3-1 実験炉による化学物質の排出特性把握	
4-3-2 焼却処理における物質挙動のモデル化	
4-4 実施設からの排出実態の調査・解析	
4-4-1 金属類	
4-4-2 六価クロム	
4-4-3 揮発性有機化合物およびアルデヒド類	
4-5 産業廃棄物焼却施設からの排出量推計	
4-5-1 金属類	
4-5-2 六価クロム	
4-5-3 揮発性有機化合物およびアルデヒド類	
5. 本研究により得られた主な成果	
6. 研究成果の主な発表状況	
7. 研究者略歴	
II. 成果の詳細	・・・・・・・・・・15
1. はじめに	
2. 研究目的	
3. 研究方法	

- 3-1 産業廃棄物焼却施設の類型化
- 3-2 廃棄物および含有物質のマテリアルフロー推計
 - 3-2-1 産業廃棄物焼却施設への化学物質流入フローの推計
 - 3-2-2 PRTR 届出移動量データに基づく廃棄物処理への化学物質流入フローの解析
 - 3-2-3 産業廃棄物焼却残さ試料の収集・分析と焼却廃棄物の金属類含有量の特徴解析
- 3-3 廃棄物焼却における物質挙動・排出特性の把握
 - 3-3-1 実験炉による化学物質の排出特性把握
 - 3-3-2 焼却処理における物質挙動のモデル化
- 3-4 実施設からの排出実態の調査・解析
 - 3-4-1 金属類
 - 3-4-2 六価クロム
 - 3-4-3 揮発性有機化合物およびアルデヒド類
- 3-5 産業廃棄物焼却施設からの排出量推計
 - 3-5-1 金属類
 - 3-5-2 六価クロム
 - 3-5-3 揮発性有機化合物およびアルデヒド類

4. 結果及び考察

- 4-1 産業廃棄物焼却施設の類型化
- 4-2 廃棄物および含有物質のマテリアルフロー推計
 - 4-2-1 産業廃棄物焼却施設への化学物質流入フローの推計
 - 4-2-2 PRTR 届出移動量データに基づく廃棄物処理への化学物質流入フローの解析
 - 4-2-3 産業廃棄物焼却残さ試料の収集・分析と焼却廃棄物の金属類含有量の特徴解析
- 4-3 廃棄物焼却における物質挙動・排出特性の把握
 - 4-3-1 実験炉による化学物質の排出特性把握
 - 4-3-2 焼却処理における物質挙動のモデル化
- 4-4 実施設からの排出実態の調査・解析
 - 4-4-1 金属類
 - 4-4-2 六価クロム
 - 4-4-3 揮発性有機化合物およびアルデヒド類
- 4-5 産業廃棄物焼却施設からの排出量推計
 - 4-5-1 金属類
 - 4-5-2 六価クロム
 - 4-5-3 揮発性有機化合物およびアルデヒド類

5. 本研究により得られた成果

6. 国際共同研究等の状況

7. 研究成果の発表状況

8. 引用文献

III. 英文 Abstract

・・・・・・・・・・95

I. 成果の概要

補助事業名	環境研究総合推進費補助金 循環型社会形成推進研究事業（平成 27 年度～平成 29 年度）
所管	環境省 及び 独立行政法人 環境再生保全機構
研究課題名	廃棄物の焼却処理に伴う化学物質のフローと環境排出量推計に関する研究
課題番号	3K153003
研究代表者名	小口正弘（国立研究開発法人国立環境研究所）
国庫補助金	118,203,374 円（うち平成 29 年度：36,412,374 円）
研究期間	平成 27 年 5 月 29 日～平成 30 年 3 月 31 日
本研究のキーワード	産業廃棄物、PRTR 制度、化学物質、焼却施設、類型化、物質フロー推計、排出量推計、排ガス濃度、物質挙動解析、熱力学平衡計算
研究分担者	山田正人（国立研究開発法人国立環境研究所） 倉持秀敏（国立研究開発法人国立環境研究所） 三宅祐一（静岡県立大学） 渡辺洋一（埼玉県環境科学国際センター） 堀井勇一（埼玉県環境科学国際センター） 谷川 昇（公益財団法人日本産業廃棄物処理振興センター） 浦野真弥（有限会社環境資源システム総合研究所）
研究協力者	由井和子（国立研究開発法人国立環境研究所） 徳村雅弘（静岡県立大学） 大塚英幸（北海道立総合研究機構） 佐々木基了（公益財団法人日本産業廃棄物処理振興センター） 加藤研太（有限会社環境資源システム総合研究所）

1. はじめに（研究背景等）

第 3 次循環基本計画において有害物質を含む廃棄物等の適正処理システムの構築に向けた化学物質を含有する廃棄物等の評価が、第 4 次環境基本計画では化学物質のライフサイクルにわたるリスク低減の実現が重点的事項の 1 つに掲げられており、それらに向けた基礎情報として化学物質の環境排出量把握が求められる。多くの化学物質は製品や廃棄物に含まれて最終的に処理されると考えられること、廃棄物の焼却処理等では化学物質が非意図的に生成、排出される可能性があることをふまえると、廃棄物処理における化学物質の排出量管理は極めて重要な課題である。

化学物質の環境排出量把握に関する制度として「特定化学物質の環境への排出量の把握等及び管理の改善の促進に関する法律」（化管法）に基づく化学物質排出移動量届出制度（PRTR 制度）が存在する。ただし、廃棄物処理施設からの排出量の多くは PRTR 制度の届出対象外であり、国が行う届出外推計の対象範囲に含まれる。環境省は、平成 19 年度中央環境審議会・産業構造審議会化管法見直し合同会合における指摘もふまえ、作業部会（H19～24 年度）を設置して廃棄物処理からの排出量推計を検討してきた。一般廃棄物焼却について

は主に金属類の大気排出について排ガス実測データに基づく排出係数の作成と排出量推計が行われ、報告書によれば推計排出量は届出排出量と比較して無視できない大きさと試算されている。産業廃棄物焼却施設についても同様の検討が行われたが、廃棄物の性状、物質含有状況、処理フロー等が多様、複雑であるために限られた施設の実測データのみに基づく推計は困難であり、今後の課題として残された。ただし、一般廃棄物焼却施設の推計結果をふまえると、産業廃棄物焼却施設の寄与も無視できないと予想され、排出量推計はその手法確立も含めて重要な課題である。

2. 研究目的

本研究では、前述の背景と想定される寄与の大きさや他の処理への展開可能性をふまえ、廃棄物処理の中でも特に産業廃棄物の焼却処理に着目し、その焼却処理に伴う化学物質の物質フローと大気排出量の推計を行うことを目的とする。焼却施設の類型に着目して、廃棄物種に応じた廃棄物および含有化学物質のマテリアルフロー推計、排ガス実測に加え実験炉による焼却実験や熱力学平衡計算を用いた排出基礎特性解析に基づく排出係数の多面的な検証と作成を行い、焼却施設からの化学物質の大気排出量推計を行うとともに、その推計手法と基礎データを提示する。

3. 研究方法

3-1 産業廃棄物焼却施設の類型化

化学物質の排出量推計においてその結果に影響し得る焼却施設の特徴による違いを反映するために、全国の産業廃棄物焼却施設の類型化を行った。環境省による平成 25 年度産業廃棄物焼却施設におけるダイオキシン類排出状況等調査と同等のデータ（以下、DXNs 調査とする）を使用し、施設設置者区分と施設種類の情報を基に、各施設を産業廃棄物処理業、セメント業、製紙業、その他に区分し、それらの業区分について、産業廃棄物処理業許可の有無での廃棄物種類別焼却処理量を整理した。この業区分別の廃棄物処理情報に基づき、廃棄物種類別の処理量割合を用いた階層的クラスター分析を行い、業区分別に処理廃棄物組成での施設類型化を行った。さらに処理施設の類型別に、炉形式や排ガス処理方式を整理し、その組合せと焼却処理量を明らかにした。

また、DXNs 調査では、産業廃棄物の区分が主要品目に限られており、それ以外の廃棄物は「その他（の廃棄物）」として集約されている。より詳細な処理廃棄物の特徴を考慮するために、関東・近畿・北海道地域を例として産業廃棄物焼却処理業者に公開が義務づけられている維持管理情報を収集、整理し、DXNs 調査データと結合してより詳細な廃棄物種別の焼却量データを把握できるデータベースを作成した。これを用いて DXNs 調査では不明であった「その他」の廃棄物内訳を明らかにするとともに、クラスター分析によってより詳細な分類での処理廃棄物パターンで施設を分類し、追加的に考慮すべき廃棄物種類を検討した。

3-2 廃棄物および含有物質のマテリアルフロー推計

3-2-1 行政情報に基づく産業廃棄物の処理処分フローの推計

産業廃棄物中間処理施設に廃棄物に随伴して流入する化学物質のフローを把握するための基礎データとして、公開・公表されている産業廃棄物に関する行政情報より中間処理に向かう廃棄物の量、種類等に関するデータを収集し、産業廃棄物の処理処分フローを推計した。多量排出事業者報告のデータを収集し、廃棄物の排出業種別・廃棄物種類別に排出量から排出事業場自らによる自己処理量および産業廃棄物処理業者への委託処理量までを整理した。産業廃棄物処理業者へ委託された後の廃棄物種類別の処理・処分量については、当該情報を保有する都道府県から情報を入手して推計した。以上のデータを連結し、多量排出事業場からの産業廃棄物の排出業種別・廃棄物種別の発生から処理種別の処理・処分までのフローを推計できるデータベ

ースを作成した。また、下水汚泥の処理処分フローはより完全なデータである下水道統計（日本下水道協会）のデータを用いて精緻化した。

3-2-2 PRTR 届出移動量データに基づく廃棄物処理への化学物質流入フローの解析

産業廃棄物焼却への化学物質フローの概略を把握するため、PRTR 届出移動量データを化学物質別、処理方法別、廃棄物種別に集計し、廃棄物処理への化学物質の流入フローの整理と特徴把握を行った。複数の処理方法や廃棄物の種類が選択されている届出データはその内訳の実態が不明であるため、処理方法と廃棄物種類の組合せの数で届出移動量を均等按分した上で集計した。また、3-2-1 で作成した産業廃棄物の処理処分フローデータと PRTR 届出移動量データを排出事業所（届出事業所）レベルでマッチングし、両者における届出事業所、廃棄物の種類等の整合を分析するとともに、物質別・廃棄物種類別に単位委託廃棄物量あたりの PRTR 届出移動量（廃棄物の化学物質含有量に相当）を計算し、その傾向を考察した。

3-2-3 産業廃棄物焼却残さ試料の収集・分析と焼却廃棄物の金属類含有量の特徴解析

金属類については、焼却処理へ投入される廃棄物の含有実態を明らかにするため、産業廃棄物焼却残さ試料の金属類含有量分析を重ね、焼却残さの金属類含有実態データを蓄積した。焼却施設や産業廃棄物協会からの協力を得て多数の施設から焼却残さ試料セット（ばいじんおよび燃えがらの試料セット）を継続的に入手する体制を整え、試料を入手、分析するとともに、後述の排出実態調査においても排ガス採取と同時に焼却残さの採取、分析を行った。

試料の金属類含有量は誘導結合プラズマ質量分析計（ICP-MS）および蛍光 X 線分析計（XRF）により分析した。分析対象は PRTR 対象物質（第一種指定化学物質）に含まれる金属類およびその化合物 16 種類（Ag、As、Be、Cd、全 Cr、Co、Cu、In、Ni、Mn、Mo、Pb、Sb、Se、V、Zn）を対象とした。

また、試料と同時に収集した施設の年間廃棄物処理量および焼却残さ発生量データを用いて、焼却廃棄物の金属元素含有量を推定した。推定値について、3-1 において作成した主要な処理廃棄物種の施設類型による違いや傾向を解析し、施設類型別の焼却廃棄物の金属元素含有量データとして整理した。

3-3 廃棄物焼却における物質挙動・排出特性の把握

3-3-1 実験炉による化学物質の排出特性把握

廃棄物の焼却処理に伴う金属類の揮発・排出傾向や有機化合物（揮発性有機化合物（VOCs）、アルデヒド類）の生成・排出傾向を実験的に把握するために、既存の廃棄物焼却施設を模擬した実験炉を作成し、室内燃焼実験を行った。実験炉は温度、ガス滞留時間、ガス雰囲気、試料負荷量を自由に制御できる昇温型電気炉を用いた。燃焼試料は廃棄物焼却施設から提供頂いた廃油と汚泥を用いた。金属類はフッ素樹脂製ろ紙と吸収液（5%硝酸+10%過酸化水素）で粒子態とガス態を分けて捕集し、ICP-MS で分析した。VOCs は活性炭捕集、ガスクロマトグラフィータンデム質量分析計（GC-MS/MS）によって分析した。アルデヒド類は、2g/L 2,4-ジニトロフェニルヒドラゾン（DNPH）吸収液で捕集し、高速液体クロマトグラフィー（HPLC）で分析した。

3-3-2 焼却処理における物質挙動のモデル化

産業廃棄物の焼却処理における金属類の揮発・排出傾向と化学形態を予測・推定するためのマルチゾーン熱力学平衡計算のプログラムを開発し、施設調査の結果がある実験用ロータリーキルン炉および産業廃棄物処理施設 2 施設（ロータリーキルン、キルンストーカ）に適用した。計算で用いる廃棄物の処理量、薬剤・燃焼用空気の使用量と各部分の温度は施設調査による値を用いた。

また、排ガス中の VOCs およびアルデヒド類の濃度について、熱力学平衡計算を用いた推定を試みた。推定は熱力学平衡計算ソフト FactSage を用いた平衡計算により行った。さらに、還元雰囲気における VOCs 濃度を予想するために、還元雰囲気の排ガス組成の条件を与え、温度、O₂ 濃度、HCl 濃度を変動させて、同様の平衡計算を行った。それらの VOCs 濃度へ及ぼす影響を調べ、VOCs の類型化を試みた。

3-4 実施設からの排出実態の調査・解析

本研究では、PRTR 対象物質（第一種指定化学物質）のうち、金属類、六価クロム、分析可能な VOCs およびアルデヒド類を対象とし、実産業廃棄物焼却施設における排ガスへの排出実態の調査・解析を行なった。

3-4-1 金属類

金属類については、PRTR 対象物質に含まれる 16 種類の金属類（Ag、As、Be、Cd、全 Cr、Co、Cu、In、Ni、Mn、Mo、Pb、Sb、Se、V、Zn）を対象とした。排ガス中金属類の採取は JIS Z 8808 および JIS K 0083 に準拠して行い、分析は ICP-MS および ICP 発光分光分析装置（ICP-OES）により分析した。また、実測データの施設数充実のため、各都道府県の産業廃棄物協会等の協力のもと、産業廃棄物焼却施設から排ガス中ダスト濃度の測定等においてダストを採取したろ紙試料を研究実施期間中に継続的に提供頂く体制を構築し、提供試料を用いて金属類の分析と排ガス中濃度の計算を行った。ただし、これらの測定値にはダスト捕集部で捕集される金属類（以下、粒子態）のみが含まれ、ガス吸収部で捕集される金属類（以下、ガス態）が含まれないことから、上記の詳細調査における分析結果をもとに計算した排ガス中金属類の粒子態比を用いて簡易的に排ガス中総金属類濃度に換算した。

3-4-2 六価クロム

PRTR 制度では全 Cr とは別に六価クロム化合物も対象物質となっているが、廃棄物焼却処理施設排ガスにおける六価 Cr 排出実態の報告例は少ない。そこで本研究では、排ガス中六価 Cr の採取・分析方法の開発と排出実態の把握を行った。ISO16740 による 1,5-ジフェニルカルボヒドラジド（DPC）によるポストカラム誘導体化を用いたイオンクロマトグラフィー（IC）による分析法（IC-DPC 法）を改良し、十分な測定感度を持ち、特殊な装置や煩雑な抽出操作を要しない排ガス中六価 Cr の採取・分析方法を確立した。そして、確立した IC-DPC 法を用いて産業廃棄物焼却施設 16 施設 25 試料の排ガス試料の六価 Cr 分析を行った。

3-4-3 揮発性有機化合物およびアルデヒド類

産業廃棄物焼却施設からの VOCs およびアルデヒド類の排出実態の調査を行った。VOCs・アルデヒド類の対象物質には、添加回収試験で良好な回収率が得られた 28 物質を選定した。捕集剤には、VOCs 用としてチャコールチューブ・ジャンボ（柴田科学社製）を、アルデヒド類用として DNPH アクティブガスチューブ（柴田科学社製）を用いた。採取・分析は前述したものと同じ方法を用いた。

3-5 産業廃棄物焼却施設からの排出量推計

3-5-1 金属類

金属類については以下の複数の方法によって大気への排出量の推計を試行した。

まず、基本の推計アプローチとして、

「焼却処理への流入金属類量（＝焼却処理量×処理廃棄物中金属類含有量）」×「最終排ガスへの排出率」

による排出量推計を試行した。処理廃棄物中の含有量、焼却処理への流入量に対する最終排ガスへの排出率は、前述の分析調査結果に基づき、それぞれの傾向を主要な処理廃棄物、排ガス処理方式および運転方式によって整理して推計に適用した。

次に、施設類型をより詳細に分類することで推計値の不確実性をより小さくできる可能性があると考えられることから、上記の基本アプローチによる推計における主要な処理廃棄物の施設類型をより詳細化した推計のケーススタディを試行し、それによる推計精度の向上可能性を検討した。具体的には、DXNs 調査データの廃棄物分類における「その他」の詳細化、「汚泥」の焼却に伴う排出量推計における汚泥の排出業種の考慮の 2 つのケーススタディを実施した。

さらに、上記とは異なる簡易的な推計アプローチの試行として、

「ばいじん発生量」×「ばいじんの金属類含有量」×（1－「排ガス処理における除去率」）

による排出量の推計を試行した。

ばいじんの金属類含有量については、本研究で得られたばいじんの含有量実測データと DXNs 調査データや維持管理情報から整理した処理廃棄物組成データを用いた回帰分析により両者の関係を分析し、廃棄物処理組成からばいじんの金属類含有量を推定する回帰式を作成した。排ガス処理設備における除去率は、限られた施設のデータではあるが、本研究の実測調査結果から計算した除去率に基づいて設定した。

3-5-2 六価クロム

産業廃棄物焼却施設排ガス中の六価クロム濃度の実測はこれまでに例がなく、本研究による実測値は慎重に評価される必要があるが、それを前提としたうえで、本研究では大気排出量の推計を試行した。排ガス濃度の実測値に基づいて焼却処理量あたり排出量（排出係数）を試算し、年間の廃棄物焼却処理量に乗じて大気への六価 Cr 排出量を試算した。焼却処理量は DXNs 調査データを集計したものをを用いた。

3-5-3 揮発性有機化合物およびアルデヒド類

データ数は限られるが、本研究で得られた実測データを用いて産業廃棄物焼却施設からの VOCs およびアルデヒド類の大気排出量の推計を試行した。実測データに基づいて焼却処理量あたり排出量（排出係数）を試算し、年間の廃棄物焼却処理量に乗じて大気への VOCs およびアルデヒド類の排出量を試算した。焼却処理量は DXNs 調査データを排ガス処理方式別に集計したものをを用いた。

4. 結果及び考察

4-1 産業廃棄物焼却施設の類型化

平成 25 年度の全国の産業廃棄物の焼却処理量 2,140 万トンのうち、セメント業が 964 万 t（45%）と多くを占め、残りは廃棄物処理業 608 万 t（28%）、その他で 298 万 t（14%）、製紙業 271 万 t（13%）を占めていた。セメント業と廃棄物処理業ではほぼ全量が業許可を持つ施設で処理されており、委託処理がほとんどであると推察された。一方、製紙業では業許可を持たない施設での処理が約 4 割、その他区分では業許可を持たない施設での処理が約 8 割を占めており、自己処理の比率が高いことがわかった。また、処理廃棄物組成データを用いたクラスター分析の結果、全国の焼却施設は業区分ごとに 3 から 7 の類型に分類できた。各類型はそれぞれ特定の廃棄物を主要な処理廃棄物としていることがわかった。例えば、図 I-1 に示すように、廃棄物処理業における焼却施設は 7 類型に分類され、各類型における主要な処理廃棄物は①汚泥、②廃油、③廃プラスチック、④木くず、⑤感染性廃棄物、⑥多種類混合、⑦その他であることがわかった。

4-2 廃棄物および含有物質のマテリアルフロー推計

4-2-1 行政情報に基づく産業廃棄物の処理処分フローの推計

推計した平成 25 年度の全国の多量排出事業者の事業場および下水処理施設（以下、「多量排出事業場等」という）における産業廃棄物の排出量（2.60 億トン）は、実態調査ではなく原単位法により推計されている動物のふん尿を除いた全国の産業廃棄物排出量の 85%をカバーした。多量排出事業場等から排出された産業廃棄物の自己処理・委託処理を区別した処理処分フローの推計結果を図 I-2 に示す。

焼却量は全体で 1,227 万トン（うち自己処理が 700 万トン、委託処理が 527 万トン）であった。なお、ここでの焼却量にはセメント業の施設における焼却量は含めていない。この結果は前述の DXNs 調査データに基づく焼却処理量の値とよく一致していると考えられた。なお、図 I-2 は全業種・全廃棄物種合計の処理処分

フローを示しているが、作成したデータベースは排出業種別・廃棄物種類別のフローを出力できるものとなっており、排出量推計のためのより詳細な活動量データを得ることができる。

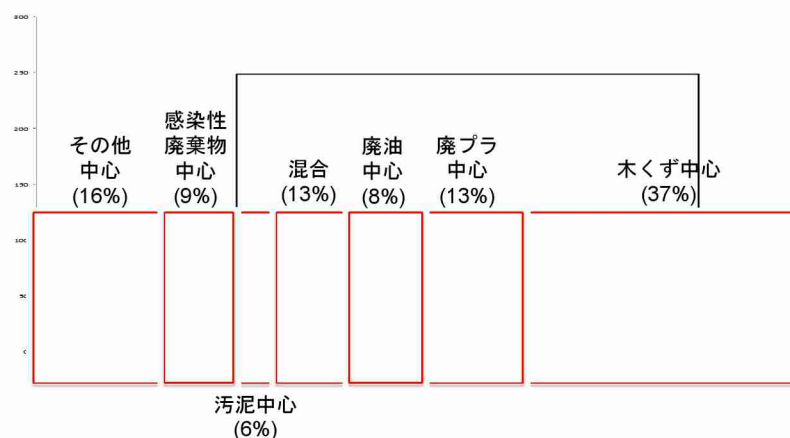


図 I-1 産業廃棄物処理業における処理廃棄物組成によるクラスター分析結果（754 施設）

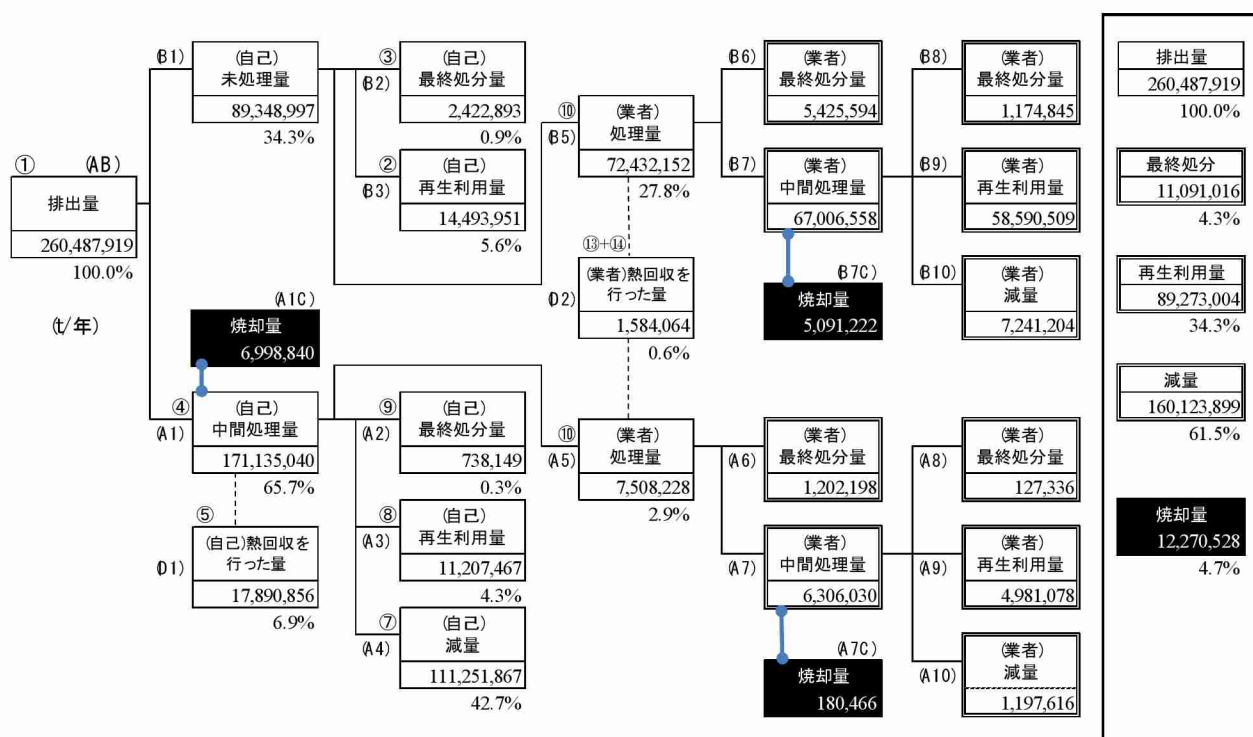


図 I-2 多量排出事業場等データからの産業廃棄物処理・処分フローの推計結果

4-2-2 PRTR 届出移動量データに基づく廃棄物処理への化学物質流入フローの解析

PRTR 届出移動量データの集計解析より、金属類は全体的に焼却・溶融、破碎・圧縮、最終処分への移動が多く、有機化合物はいずれの物質も焼却・溶融への移動が大きな割合を占めていることがわかった。焼却処理（焼却・溶融）への移動量に着目すると、金属類は汚泥、廃酸、廃アルカリに含まれて焼却・溶融へ移動する割合が大きいことがわかった（図 I-3）。この結果より、焼却処理における金属類の排出量推計においては、汚泥、廃酸、廃アルカリ等の焼却処理状況を考慮することが必要であると考えられた。一方、有機化合物については届出移動量（焼却・溶融）の大部分が廃油に含まれて移動するものであり、その排出業種は多

くの物質で化学工業が主要であることがわかった。ただし、複数の処理方法や廃棄物の種類が選択されている届出移動量データについてはその内訳が不明であり、廃棄物処理への化学物質フローの実態をよりの確に把握するためには、届出項目の詳細化や追加によりこの内訳等を把握することが必要であると考えられた。

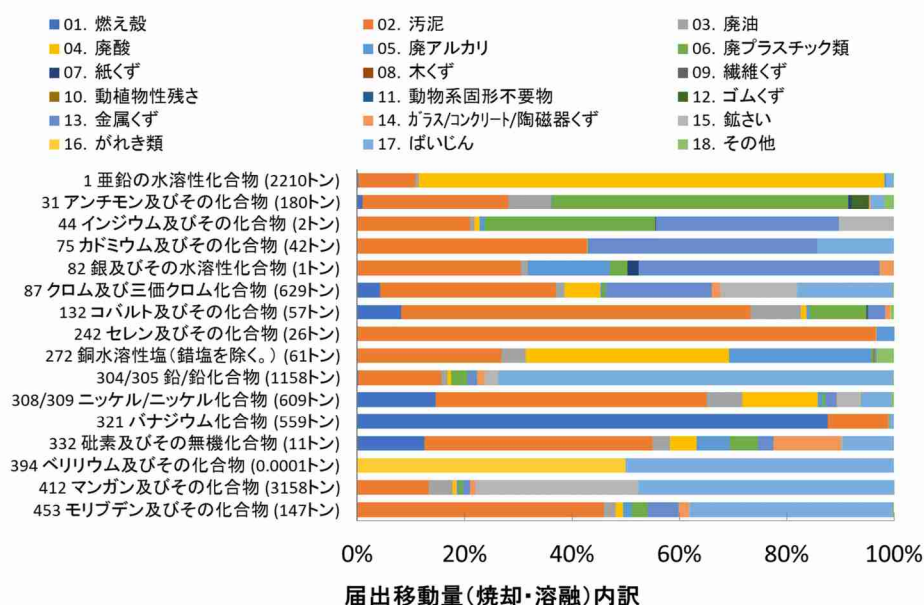


図 I-3 PRTR 届出移動量（廃棄／焼却・溶融）の廃棄物の種類内訳（カッコ内は届出移動量の合計）

4-2-3 産業廃棄物焼却残さ試料の収集・分析と焼却廃棄物の金属類含有量の特徴解析

焼却残さの含有量分析結果と施設の物質収支データから推定した焼却廃棄物の金属元素含有量は、施設によって3桁程度の範囲で異なるものの、一部の施設を除けば元素間の含有量の高低はパターンが類似していた。この違いには施設の主要な処理廃棄物種が焼却廃棄物の含有量に影響している可能性があると考えられた。そこで、焼却廃棄物の推定金属元素含有量を主要な処理廃棄物による施設類型で整理すると（図 I-4）、多くの金属元素について汚泥とその他を主要な処理廃棄物とする施設類型の廃棄物中含有量が高い傾向が見られた。なお、その他を主要な処理廃棄物とする施設類型については、廃酸、廃アルカリの影響であると考えられた。PRTR 届出移動量の集計解析結果でもこれらの金属類は汚泥や廃酸・廃アルカリに含まれて廃棄物処理へ移動する割合が大きいことが示されており、上記の傾向はこれと整合的であった。以上より、主要な処理廃棄物による施設類型によって焼却処理への金属類の流入実態が異なると推察され、排出量推計においてこれを考慮することが重要であると考えられた。以上の成果は排出量推計における活動量としての金属類の流入量を施設類型別に算出するための基礎データとして活用が可能である。

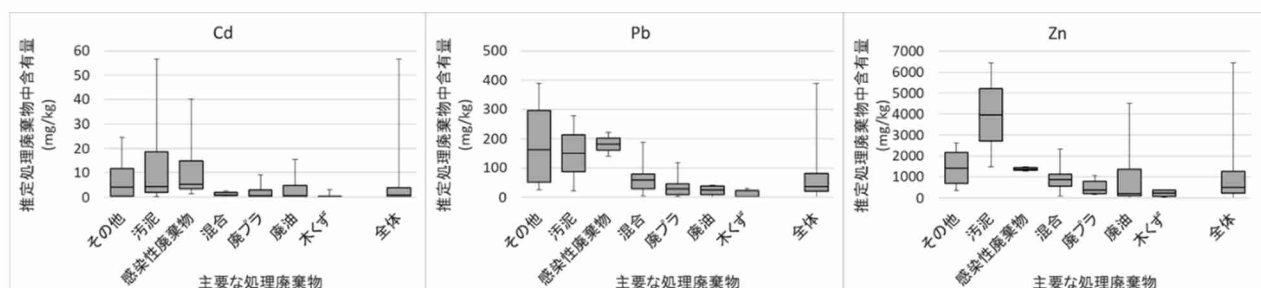


図 I-4 主要な処理廃棄物による施設類型ごとの焼却廃棄物中金属類含有量の整理の例

4-3 廃棄物焼却における物質挙動・排出特性の把握

4-3-1 実験炉による化学物質の排出特性把握

炉内温度を変化させて実汚泥試料の燃焼実験を行ったところ、すべての温度条件において粒子態（ろ紙捕集分）の B が $0.26\text{--}0.35 \mu\text{g}/\text{m}^3$ の濃度範囲で検出された。粒子態の Zn は 950°C の場合のみ $0.14 \mu\text{g}/\text{m}^3$ の濃度で検出された。その他の条件、金属類については定量下限値以下の濃度レベルであった。実際の廃棄物焼却施設では、金属類の発生源となる廃棄物のうち、特に固形分については炉内に一定時間残留するのに対し、今回の燃焼実験では廃棄物試料が炉内で加熱される時間が数分であったため、金属類の総揮発量が少なく、燃焼排ガス中の金属類濃度が低くなったことが考えられる。VOCs とアルデヒド類については、廃油の燃焼実験で芳香族であるトルエン、キシレン、エチルベンゼンのみが検出され、汚泥の燃焼実験では廃油の場合と同様にトルエン、キシレン、エチルベンゼンのみが検出された。廃棄物種が異なっても検出される VOC の種類や濃度レベルが同等であったこと、また炭化水素の不完全燃焼によりトルエン、キシレン、エチルベンゼンを副生成するとの報告があることをふまえると、これらの物質は燃焼副生成によるものである可能性が高いと考えられた。

4-3-2 焼却処理における物質挙動のモデル化

開発したマルチゾーン熱力学平衡計算を用いた計算プログラムによる元素の分配挙動の実測と計算結果の例を図 I-5 に示す。元素の分配挙動は実測と概ね対応した。1 実験炉、2 施設とも、被焼却物の組成や施設の形式に関わらず、アルカリ金属、ハロゲン、Be、Se、Cd、In、Hg は主に飛灰もしくは洗煙飛灰に移行しやすく、そのうち Hg、Se は排ガスに含まれる傾向があった。一方、主灰（燃えがら）に分配しやすいものは P、B、Si、Al、Ca、Mg、Fe、Co、Cr、Cu、Mn、Mo、V であり、Pb、Zn、Sn、Sb は状況に応じて分配挙動が変わり得ることが示された。計算によると、主灰に分配しやすいものはスピネル等の鉄の酸化物やアルミノシリケート、リン酸塩などとなっており、いずれも塩化物にはなりにくい傾向が見られた。飛灰や洗煙水に分配しやすいものは、蒸気圧が高い酸化物、塩化物、単体となりやすいものであった。

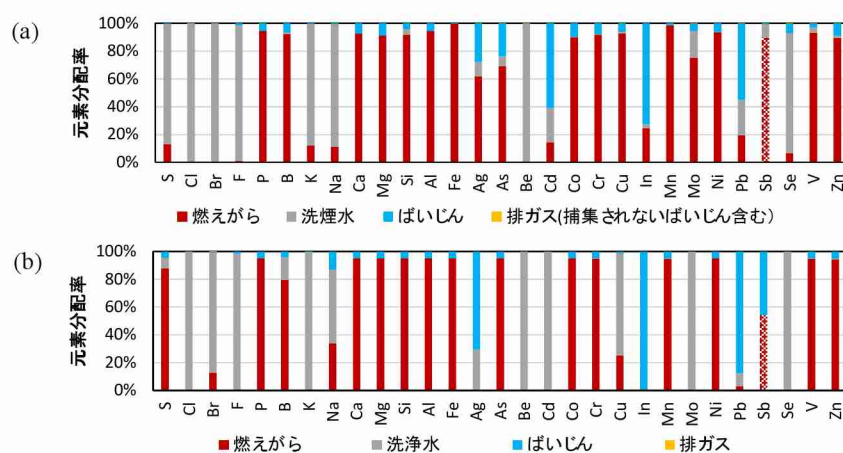


図 I-5 産業廃棄物焼却施設における元素の分配挙動の例（施設 A、a：実測、b：マルチゾーン平衡計算）

熱力学平衡計算を用いて、一次燃焼炉及び煙突における排ガスの主要組成および温度を初期値として平衡時の VOCs・アルデヒド類濃度を計算した。その結果、どの排ガスでも VOCs・アルデヒド類はほぼ完全に分解される結果となり、熱力学平衡計算上は燃焼排ガスに O_2 が存在すれば VOCs やアルデヒドの生成は難しいと

予想された。ただし、還元雰囲気では計算対象とした全ての VOCs・アルデヒド類が生成され、例えば、焼却炉内の熱分解過程（例えば、一次燃焼炉の熱分解ゾーン等）において生成される可能性が示唆された。また、VOCs・アルデヒド類濃度に対する O_2 濃度、HCl 濃度、温度の影響は物質群ごとに異なることが示され、それらを類型化するとともに VOCs・アルデヒド類の排出削減のための熱分解条件について考察した。

4-4 実施設からの排出実態の調査・解析と排出係数作成

4-4-1 金属類

最終排ガス中の金属類濃度は、多くの金属類について数桁の範囲で大きく異なっており、産業廃棄物焼却施設からの排出量推計においては、最終排ガス中の金属類濃度実測データに基づいて単一の排出係数を設定することは適切ではないことが示された。排ガス中金属類濃度そのものは処理廃棄物と排ガス処理方式（および炉形式等のその他の施設属性）等の組合せに影響を受けることから、本研究では、実測結果を焼却処理への金属類の流入量に対する最終排ガスへの排出率として整理し、処理廃棄物と排ガス処理方式等による影響を分離して扱えるようにした。図 I-6 に示すように、排出率は排ガス処理方式、運転形式によって異なる傾向が見られ、より実態を反映した排出量推計のためには排ガス処理方式等の別に排出係数（排出率）を設定することが必要と考えられた。

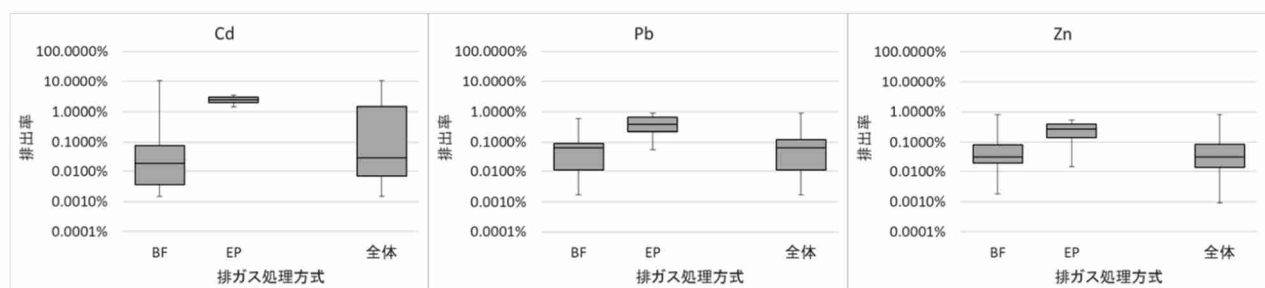


図 I-6 排ガス処理方式による最終排ガスへの排出率の例

4-4-2 六価クロム

分離カラムに関しては、一般的なイオン交換カラムである IonPac AS17 (7.5 $\mu\text{eq}/\text{column}$) から、よりイオン交換容量の多い IonPac AS20 (77.5 $\mu\text{eq}/\text{column}$) に変更した。これにより、抽出溶媒である炭酸塩によるイオン交換カラムのオーバーロードを防ぎやすくなる。また、グラジエントのプログラムなどの測定パラメータを最適化した。その結果、炭酸緩衝液と六価 Cr のピークを分離できる条件を決定できた。

確立した分析方法を用いて、産業廃棄物焼却処理施設の最終排ガス中の六価 Cr 濃度の測定を行った。測定を行った 16 施設のべ 25 試料のうち 19 試料（14 施設、うち 1 施設は定量値が得られた試料もあり）で下限値未満となったが、6 試料（3 施設）では六価 Cr 濃度が定量値として得られ、改良した IC-DPC 法により施設最終排ガスの測定が可能であることが示された。スクラバーのみによる排ガス処理を行っている処理施設で高い六価 Cr 濃度が得られたことから、排ガス処理方式によって排ガス中の六価 Cr 濃度が大きく異なる可能性が示唆された。

4-4-3 揮発性有機化合物およびアルデヒド類

最終排ガス中の VOCs・アルデヒド類は、多くの施設、物質について下限値以上の定量値が得られ、その濃度レベルや排出量の多寡は別として、廃棄物焼却施設においてこれらの物質の排出自体は存在することが示された。検出された VOCs およびアルデヒド類は、脂肪族である n-ヘキサン、芳香族であるベンゼンおよびその誘導体（トルエン、キシレン、エチルベンゼン）が他の VOCs と比較して相対的に高濃度で検出されてお

り、排ガス中に排出される主要な物質であった。これらの物質は 4-3-1 で示した燃焼実験結果においても検出されており、結果は整合的であった。一方、アルデヒド類はいずれも相対的に高濃度で検出された施設が多かった。1,4-ジオキサンについても比較的高濃度で検出された。

4-5 産業廃棄物焼却施設からの排出量推計

4-5-1 金属類

図 I-7 に、産業廃棄物処理業の焼却施設（排ガス処理が BF、EP の施設のみ）についての金属類の排出量推計試行結果を示す。棒グラフは調査施設ごとの処理廃棄物中の金属類含有量、排出率の推定値の中央値、エラーバーは第一および第三四分位数を用いて計算した結果を示している。なお、この結果は本研究で得られた実測データに基づいて試行的に推計したものであり、実測データの充実によって値そのものは多少変わり得ることに注意されたい。

いずれの金属類についても、施設類型を考慮した場合の推計値は、施設類型（主要な処理廃棄物、排ガス処理方式）を考慮しない場合の推計値と比較して数倍大きな値を示した。第一および第三四分位数による推計値で示した推計結果の幅も施設類型の考慮によって小さくなっており、処理廃棄物や排ガス処理方式の違いを考慮することで施設による排出実態の違いを反映し、不確実性も相対的に小さい推計値を得ることができると示された。また、試算値は PRTR 届出排出量（大気）に対して数%～50%程度となり、金属類によっては排出量への寄与が無視できないものもあると考えられた。この結果は産業廃棄物焼却施設からの排出量を的確に把握することの重要性を示していると言える。

また、DXNs 調査データにおける「その他（の廃棄物）」を主要な処理廃棄物とする施設類型について廃酸、廃アルカリの処理有無を考慮した場合、「汚泥」についてその排出業種を考慮した場合、排出実態をより反映した推計ができる可能性も示した。

ばいじんの濃度と発生量を用いた推計アプローチについては、処理廃棄物組成によって施設のばいじん濃度レベルをおよそ推定する回帰式を作成し、これに基づいてばいじん濃度の推定、大気排出量の推計を行った。結果を年間焼却処理量で除した処理量あたりの排出量（いわゆる排出原単位）として基本アプローチによる推計値と比較すると、基本アプローチによる推計値の幅の範囲に収まり、実測データの数や精度を考慮すれば異なるアプローチで類似した結果が得られると考えられる。これより、大気への排出量のみを推計対象とする場合には、より簡易的な推計としてばいじんの金属類含有量や発生量を用いた推計アプローチも適用できる可能性があると考えられた。

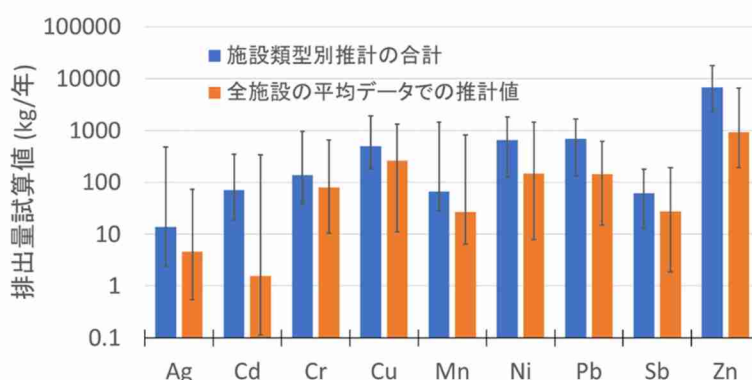


図 I-7 産業廃棄物処理業の焼却施設における金属類の大気排出量推計試行結果
(排ガス処理方式が BF および EP の施設の推計値)

4-5-2 六価クロム

産業廃棄物焼却施設排ガス中の六価クロム濃度の実測はこれまでに例がなく、本研究による実測値は慎重に評価される必要があるが、それを前提としたうえで、本研究では大気排出量の推計を試行した。スクラバーのみによる排ガス処理を行っている施設において六価クロムが最終排ガス中に特異的に高濃度で検出されたことをふまえ、スクラバーとそれ以外（バグフィルター）による排ガス処理方式を区別して焼却処理量あたり排出量（排出係数）を試算し、年間の廃棄物焼却処理量に乗じて大気への六価 Cr 排出量を試算した。大気排出量は PRTR 届出排出量（大気、平成 28 年度）292kg/年の 2%程度に相当する 5.7kg/年と試算された。試算結果から産業廃棄物焼却施設からの排出量は排出量全体への寄与は小さく、排出量推計の観点においては排出係数の精緻化の重要性は大きくはないと考えられた。

4-5-3 揮発性有機化合物およびアルデヒド類

データ数は限られるが、本研究で得られた実測データを用いて産業廃棄物焼却施設からの VOCs およびアルデヒド類の大気排出量の推計を試行した。前述の通り、炉形式等による明確な傾向が見られなかったため、ここでは施設属性等で区別せずに整理を行い、実測データに基づいて焼却処理量あたり排出量（排出係数）を試算し、年間の廃棄物焼却処理量に乗じて大気への VOCs およびアルデヒド類の排出量を試算した。1,4-ジオキサンとアセトアルデヒドを除けば試算値は PRTR 届出排出量（大気）の 2%未満であり、産業廃棄物焼却施設からの大気排出量の寄与は大きくないものと考えられた。一方、1,4-ジオキサンとアセトアルデヒドについては産業廃棄物焼却施設からの排出量が PRTR 届出排出量に対して無視できない可能性があり、実測データの蓄積と排出係数の精緻化が必要と考えられた。

5. 本研究により得られた主な成果

（１）科学的意義

産業廃棄物焼却施設におけるダイオキシン類排出状況等調査や維持管理情報のデータに基づき、国内の産業廃棄物排出量の大部分について詳細な廃棄物種類別の処理状況や処理パターンを明らかにするためのデータベースを構築した。これに基づく解析により、焼却施設は主要な処理廃棄物を持つ場合が多いことを明らかにし、業区分別に主要な処理廃棄物で焼却施設をいくつかの類型に分類した。また、それぞれの類型と炉形式や排ガス処理方式等の施設属性の組合せで焼却処理量の実態を明らかにした。

産業廃棄物に係る行政情報に基づき、産業廃棄物の排出から処理処分までのフローを推計した。推計したデータは排出業種別・詳細な廃棄物種類別のフローデータとなっており、焼却処理へのフローを含む詳細な産業廃棄物の処理処分実態が明らかになった。PRTR 届出移動量データの集計解析より、焼却処理へ移動する化学物質が含まれる主要な廃棄物の種類を物質ごとに明らかにした。また、これらの廃棄物の処理処分フローデータと PRTR 届出移動量データを排出事業所レベルでマッチングすることで、廃棄物に関する行政情報と PRTR データの整合性を評価するとともに、廃棄物の化学物質含有状況を試算した。

産業廃棄物焼却施設における焼却残さおよび焼却排ガスの試料採取、分析をさらに追加することで、これまで情報に乏しかった産業廃棄物焼却からの化学物質排出実態を明らかにするための基礎データを蓄積し、各施設における処理廃棄物の化学物質含有実態や化学物質の排出実態を明らかにした。排出実態については、PRTR 対象物質である 16 の金属類に加え、分析方法が確立されておらず測定事例の報告もほとんどなかった六価クロムや VOCs およびアルデヒド類についても実測データを取得、蓄積した。また、焼却施設における処理廃棄物の化学物質含有実態や焼却施設からの排出実態は、主要な処理廃棄物や排ガス処理方式等の施設類型によって異なる傾向を示すことを明らかにした。また、室内実験炉燃焼実験による排出基礎特性データの

取得、熱力学平衡計算を用いた物質挙動の計算プログラムの開発を行い、これらが実測データの傾向を説明できることを示すことで、焼却施設からの排出実態傾向を検証するための新たなアプローチを提示した。

以上に基づき、産業廃棄物焼却施設からの金属類、六価クロム、VOCs・アルデヒド類の大気排出量を推計するための活動量データ、排出係数を、処理廃棄物や排ガス処理方式等の施設類型ごとに作成、整理し、これらに基づいて大気への排出量推計を試行した。推計においてこれらの施設類型を考慮することで、実態をより反映し、不確実性も相対的に小さい推計結果が得られると考えられることを示した。金属類については大気排出量全体に対する寄与が無視できない可能性がある一方で、六価クロムや多くのVOCs・アルデヒド類はその寄与が小さいと考えられることを示した。

(2) 環境政策への貢献

<行政が既に活用した成果>

PRTR 届出移動量データを産業廃棄物の処理処分における化学物質フローの把握に活用するためには、届出項目である処理方法や廃棄物の種類の詳細や移動量の内訳、算出方法等の実態を把握することが必要であることが指摘された。これらについて届出項目の詳細化や追加の必要性を提言し、PRTR 制度見直しに関する政府内の検討において課題として取り上げられ、見直しに向けた検討が行われている。

<行政が活用することが見込まれる成果>

本研究で示した排出量推計の枠組みと基礎データは、PRTR 届出外推計における産業廃棄物焼却施設からの排出量推計の実施への反映、活用が見込まれる。本研究では施設類型を考慮した排出量推計の必要性が示され、行政における推計においてもその反映を行うことで、より実態を反映した排出量推計の実施が期待される。また、行政情報や実測データに基づく焼却量や廃棄物の化学物質含有量の推計・推定方法は、排出量推計のための活動量データの作成に活用が期待される。

多数の産業廃棄物焼却施設における焼却残さおよび排ガスの実測データ蓄積は、これまで実態が不明であった産業廃棄物焼却への化学物質流入と排出実態を明らかにするものであるとともに、排出量推計のための排出係数等作成に活用可能である。また、特に六価クロムについては、確立した分析法は焼却施設からの排出実態のみならず大気環境中の汚染実態把握にも活用し得るものである。さらに、室内実験による物質挙動規則特性データの取得や熱力学平衡計算を用いた物質挙動計算プログラムの開発により、これまで実測データだけに依存していた廃棄物処理からの排出係数に対して新たな視点での検証方法の導入を可能とする。

また、ダイオキシン類排出状況等調査、多量排出事業者報告、PRTR 届出移動量データなどの行政情報を組み合わせた産業廃棄物の処理処分実態やそれに伴う化学物質フローの把握という、行政情報の新たな活用が期待される。ただし、そのためには既存情報の項目や制度間の整合、公開方法等に課題があることもわかり、行政情報の有効活用に向けた制度等の見直しへの課題を提示した。

6. 研究成果の主な発表状況

(1) 主な誌上発表

<査読付論文>

- 1) Y. MIYAKE, M. TOKUMURA, Y. IWAZAKI, Q. WANG, T. AMAGAI, Y. HORII, H. OTSUKA, N. TANIKAWA, T. KOBAYASHI and M. OGUCHI: J Chromatogr A, 1502, 24-29 (2017)

“Determination of hexavalent chromium concentration in industrial waste incinerator stack gas by using a modified ion chromatography with post-column derivatization method”

<査読付論文に準ずる成果発表>

特に記載すべき事項はない。

(2) 主な口頭発表 (学会等)

- 1) 小口正弘：第26回廃棄物資源循環学会研究発表会 (2015)
「PRTR 届出移動量データを用いた廃棄物処理への化学物質移行フローの特徴整理」
- 2) 由井和子、倉持秀敏、肴倉宏史、大迫政浩：第37回全国都市清掃研究・事例発表会 (2016)
「ごみ焼却炉における重金属の挙動に関する熱力学平衡計算を用いた予測」
- 3) 徳村雅弘、三宅祐一、王齊、雨谷敬史、小口正弘：平成28年度廃棄物資源循環学会春の研究発表会 (2016)
「実験炉を用いたPRTR対象物質の排出特性の把握」
- 4) 谷川昇、佐々木基了、小口正弘：第27回廃棄物資源循環学会研究発表会 (2016)
「産業廃棄物焼却施設における維持管理情報公表の現状」
- 5) 小口正弘、谷川昇、渡辺洋一：第27回廃棄物資源循環学会研究発表会 (2016)
「産業廃棄物焼却残さの分析による焼却投入廃棄物の金属元素含有実態の推定」
- 6) Y. MIYAKE, M. TOKUMURA, Y. IWAZAKI, Q. WANG, T. AMAGAI, Y. HORII, H. OTSUKA, N. TANIKAWA, T. KOBAYASHI, M. OGUCHI: 5th International Conference on Industrial and Hazardous Waste Management (CRETE 2016), Chania, Greece, 2016
“An analytical method for trace levels of hexavalent chromium in stack gas using ion chromatography.”
- 7) N. TANIKAWA, M. SASAKI, S. OKUBO, M. OGUCHI: The 9th Asia-Pacific Landfill Symposium 2016 (APLAS 2016), Hong Kong, 2016
“Present state of treated waste and air pollution control equipment at industrial waste incineration facilities in Japan.”
- 8) 大塚英幸、三宅祐一、小口正弘：第58回大気環境学会年会 (2017)
「産業廃棄物焼却から排出される無機元素について」
- 9) 浦野真弥、加藤研太、谷川昇、小口正弘：第28回廃棄物資源循環学会研究発表会 (2017)
「産業廃棄物焼却施設の業区分別処理廃棄物の解析」
- 10) 渡辺洋一、堀井勇一、小口正弘：第28回廃棄物資源循環学会研究発表会 (2017)
「産業廃棄物焼却残渣の主要成分による分類」
- 11) 小口正弘：環境科学会2017年会 (2017)
「廃棄・循環過程における化学物質の環境排出量把握に関する取り組み」
- 12) 浦野真弥、加藤研太、谷川昇、小口正弘：京都大学環境衛生工学研究会第39回シンポジウム (2017)
「産業廃棄物焼却施設の維持管理情報に基づく廃棄物処理実態の解析」

7. 研究者略歴

研究代表者：小口 正弘

横浜国立大学大学院工学研究科博士課程前期修了、博士 (工学)、現在、国立研究開発法人国立環境研究所 資源循環・廃棄物研究センター 基盤技術・物質管理研究室 主任研究員

研究分担者

- 1) 山田 正人

京都大学大学院工学研究科博士後期課程修了、博士（工学）、現在、国立研究開発法人国立環境研究所 資源循環・廃棄物研究センター 国際廃棄物管理技術研究室 室長

2) 倉持 秀敏

東京都立大学大学院工学研究科博士後期課程修了、博士（工学）、現在、国立研究開発法人国立環境研究所 資源循環・廃棄物研究センター 基盤技術・物質管理研究室 室長

3) 三宅 祐一

横浜国立大学大学院環境情報学府博士課程後期修了、博士（工学）、現在、静岡県立大学食品栄養科学部環境生命科学科 助教

4) 渡辺 洋一

東京農工大学大学院工学研究科博士後期課程修了、博士（工学）、現在、埼玉県環境科学国際センター 研究推進室 副室長

5) 堀井 勇一

茨城大学大学院理工学研究科博士後期課程修了、博士（理学）、現在、埼玉県環境科学国際センター 資源循環研究領域 化学物質担当 専門研究員

6) 谷川 昇

横浜国立大学大学院工学研究科修士課程修了、博士（工学）、現在、公益財団法人日本産業廃棄物処理振興センター 技術参与

7) 浦野 真弥

京都大学大学院工学研究科博士後期課程単位取得退学、博士（工学）、現在、有限会社環境資源システム総合研究所 所長

Ⅱ．成果の詳細

【要旨】

本研究では、産業廃棄物に着目してその焼却処理に伴う化学物質のフローと大気排出量の推計を試行し、これを通じて排出量推計のための手法と基礎データを提示した。全国の産業廃棄物焼却施設について、施設ごとの廃棄物種類別の焼却量や排ガス処理方式等を整理したデータベースを作成し、これに基づいて焼却施設を類型化した。焼却施設は主な処理廃棄物でいくつかの類型に分類できることがわかり、排ガス処理方式等との組合せによる分類で焼却量データを作成した。また、廃棄物に係る行政情報を用いて産業廃棄物の排出業種別・種類別の詳細な処理処分フローを推計し、排出業種までを考慮したより詳細な焼却量データを作成した。PRTR 届出移動量データを集計解析し、物質ごとに焼却処理への移動において主要となる廃棄物が存在することを明らかにするとともに、排出事業所レベルで廃棄物処理処分フローと接続して焼却廃棄物の化学物質含有状況を排出業種別・廃棄物種類別に試算した。焼却残さの組成分析に基づいて焼却廃棄物の金属類含有量を推定し、その金属類含有量は処理廃棄物による施設類型でその傾向が大きく異なり、排出量推計において処理廃棄物による類型を考慮することが必要であることを明らかにした。40 以上の実施設における排ガスの金属類、六価クロム、揮発性有機化合物およびアルデヒド類濃度の実測データ取得、蓄積に基づいて、排ガス処理方式等の施設属性による排出傾向の違いを明らかにし、排ガス処理方式ごとの排出係数として作成、整理した。また、室内燃焼実験による物質挙動データの取得、マルチゾーン熱力学平衡計算を用いた焼却処理における金属類挙動の計算プログラム開発を行い、排出実態の傾向を検証した。以上の成果に基づいて産業廃棄物焼却施設からの化学物質の大気排出量を試算した。処理廃棄物や排ガス処理方式等による施設類型を考慮することで、より実態に近く、不確実性も小さい推計結果が得られる可能性を示した。また、試算結果より、金属類については産業廃棄物焼却施設からの排出が PRTR 届出排出量と比較して無視できない可能性があり、その推計実施と精度向上が必要であると考えられた。一方、六価クロム、揮発性有機化合物およびアルデヒド類については、環境排出における産業廃棄物焼却施設の寄与は小さいと考えられた。

1. はじめに

第3次循環基本計画において有害物質を含む廃棄物等の適正処理システムの構築に向けた化学物質を含有する廃棄物等の評価が、第4次環境基本計画では化学物質のライフサイクルにわたるリスク低減の実現が重点的事項の1つに掲げられており、それらに向けた基礎情報として化学物質の環境排出量把握が求められる。多くの化学物質は製品や廃棄物に含まれて最終的に処理されると考えられること、廃棄物の焼却処理等では化学物質が非意図的に生成、排出される可能性があることをふまえると、廃棄物処理における化学物質の排出量管理は極めて重要な課題である。

化学物質の環境排出量把握に関する制度として「特定化学物質の環境への排出量の把握等及び管理の改善の促進に関する法律」（化管法）に基づく化学物質排出移動量届出制度（PRTR 制度）が存在する。ただし、廃棄物処理施設からの排出量の多くは PRTR 制度の届出対象外であり、国が行う届出外推計の対象範囲に含まれる。環境省は、平成 19 年度中央環境審議会・産業構造審議会化管法見直し合同会合における指摘もふまえ、作業部会（H19～24 年度）を設置して廃棄物処理からの排出量推計を検討してきた。一般廃棄物焼却については主に金属類の大気排出について排ガス実測データに基づく排出係数の作成と排出量推計が行われ、報告書によれば推計排出量は届出排出量と比較して無視できない大きさと試算されている。産業廃棄物焼却施設についても同様の検討が行われたが、廃棄物の性状、物質含有状況、処理フロー等が多様、複雑であるために限られた施設の実測データのみに基づく推計は困難であり、今後の課題として残された。ただし、一般廃

棄物焼却施設の推計結果をふまえると、産業廃棄物焼却施設の寄与も無視できないと予想され、排出量推計はその手法確立も含めて重要な課題である。

2. 研究目的

本研究では、前述の背景と想定される寄与の大きさや他の処理への展開可能性をふまえ、廃棄物処理の中でも特に産業廃棄物の焼却処理に着目し、その焼却処理に伴う化学物質の物質フローと大気排出量の推計を行うことを目的とした。焼却施設の類型に着目して、廃棄物種に応じた廃棄物および含有化学物質のマテリアルフロー推計、排ガス実測に加え実験炉による焼却実験や熱力学平衡計算を用いた排出基礎特性解析に基づく排出係数の多面的な検証と作成を行い、焼却施設からの化学物質の大気排出量推計を行うとともに、その推計手法と基礎データを提示した。なお、本研究の対象物質は、PRTR 対象物質（第一種指定化学物質）から、金属類、六価クロム、一部の揮発性有機化合物（VOCs）およびアルデヒド類とした。具体的な対象物質については各節において述べる。

3. 研究方法

3-1 産業廃棄物焼却施設の類型化

(1) 産業廃棄物焼却施設の業区分別処理廃棄物の解析

多様な施設において多様な廃棄物が処理されている産業廃棄物処理施設について、産業廃棄物の焼却処理の特徴を把握し、化学物質排出量推計においてその結果に影響し得る施設の特徴を整理するために、全国の産業廃棄物焼却施設の特徴の解析と類型化を行った。解析および類型化においては、環境省による平成 25 年度産業廃棄物焼却施設におけるダイオキシン類排出状況等調査と同等のデータ（以下、DXNs 調査とする）を使用した。同データにおける産業廃棄物焼却施設の設置者区分（処理業者、排出事業者、その他）と施設の種類（産業廃棄物処理専業施設、セメント工場、製紙工場、一般廃棄物処理施設、その他）の情報を基に、各施設を産業廃棄物処理業、セメント業、製紙業、その他に区分し、それらの業区分について、産業廃棄物処理業許可の有無での品目別廃棄物処理量を整理した。産業廃棄物の分類は、DXNs 調査における産業廃棄物分類である汚泥、下水汚泥、廃油、廃プラスチック、木くず、感染性廃棄物、その他に従った。また、設置者区分のその他については、第三セクターによる一般廃棄物処理施設や市場などで、焼却処理量も非常に少なかったことから、産業廃棄物焼却施設を対象とした今回の研究からは除外した。区分別データの集計に際しては、許可量以上の処理量を示している、廃棄物品目別処理量と合計処理量が一致しないなど明らかに記載ミスと考えられるデータは修正を行い、判断の付かないものについては修正しなかった。

この業区分別の廃棄物処理情報を用いて、品目別処理割合での階層的クラスター分析を行い、業区分別に処理廃棄物での施設類型化を行った。さらに処理施設の類型別に、炉形式や排ガス処理方式を整理し、その特徴を明らかにすることとした。クラスター分析は、各々の処理施設での産業廃棄物処理組成データを用いて、非類似度をユークリッド平方距離で求め、ウォード法で分析した。

(2) 維持管理情報を活用した詳細な産業廃棄物焼却処理量データの作成と施設類型化

DXNs 調査では、産業廃棄物の区分が主要品目（汚泥、下水汚泥、廃油、廃プラスチック、木くず、感染性廃棄物）に限られており、それ以外の廃棄物は「その他（の廃棄物）」として集約されているが、「その他」は処理量全体の 4 割程度を占めている。その具体的な内訳は DXNs 調査データから知ることができないが、排出量推計への影響が大きい場合にはその内訳の実態の把握と推計への反映が必要である。そこで、より詳細な処理廃棄物の特徴を考慮するためのデータ作成として、産業廃棄物焼却処理業者に公開が義務づけられている維持管理情報を収集、整理し、DXNs 調査との結合を行うことで、より詳細な廃棄物種別の焼却量データ

を把握できるデータベースを作成した。

維持管理情報の収集整理は関東・近畿・北海道地域を対象とし、同地域の都道府県、政令市、中核市のウェブサイトから産業廃棄物処理業の許可を得ている事業者情報を収集した上で、その中で焼却処理の許可を得ている事業者を抽出、整理した。次いで、各々の事業者のウェブサイト等から許可に関する情報（施設概要、許可品目、許可処理量）、2014 年度（平成 26 年度）の廃棄物品目別の焼却処理量情報を収集、整理した。廃棄物の分類は公表の実態をふまえて産業廃棄物 19 品目に 13 号廃棄物、混合廃棄物、未分類を加えた 22 品目と、特別管理産業廃棄物 15 品目（処理業者がなかった廃水銀等を除く）と未分類の計 38 分類とした。両データの施設情報（事業者名不明、許可品目、許可処理量、平成 25 年度の廃棄物処理量等）をキーとして収集整理した維持管理情報データと DXNs 調査データを結合し、詳細な産業廃棄物処理情報と施設情報を含むデータベースを作成した。

このデータベースについて、許可業者に占める維持管理情報の補足率の検証、DXNs 調査との比較による処理量ベースでの補足率の推定を行った。また、廃棄物の品目別焼却処理実態の把握として、三地域での産業廃棄物全体、ならびに特別管理産業廃棄物の品目別焼却処理量を整理して DXNs 調査では不明であったその他区分の廃棄物内訳について明らかにした。さらに処理廃棄物についてのクラスター分析を行い、詳細な産業廃棄物分類での施設の廃棄物処理パターンを明らかにするとともに、追加的に考慮すべき廃棄物区分を検討した。

3-2 廃棄物および含有物質のマテリアルフロー推計

3-2-1 行政情報に基づく産業廃棄物の処理処分フローの推計

わが国の産業廃棄物中間処理施設に廃棄物に付随して流入する化学物質のフローを把握するため、公開・公表されている産業廃棄物に関する行政情報より、中間処理に向かう廃棄物の量、種類等に関するデータを収集し、産業廃棄物処理フローを推計した。

都道府県・政令市が公開している廃棄物処理法（法第 12 条第 10 項、規則第 8 条の 4 の 6、規則第 8 条の 4 の 7、規則様式第二号の九）に基づく、産業廃棄物および特別管理産業廃棄物多量排出事業者報告書（平成 25 年度等実績値：18,236 事業場）を収集し、廃棄物の排出業種別・廃棄物種類別に排出量から排出事業場（同一行政区域内に複数の事業所が存在する場合は事業場単位）自らによる自己処理量および産業廃棄物処理業者への委託処理量までを整理した。法令上報告項目となっていない産業廃棄物処理業者へ委託された後の種類別の処理・処分量については、当該情報を保有する都道府県から情報を入手して推計した。以上のデータを連結させて、多量排出事業場からの産業廃棄物の排出業種別・廃棄物種類別の発生から処理種別の処理・処分までのフローを推計し、データベースを作成した。

なお、多量排出事業者報告の対象は、年間の産業廃棄物発生量が 1,000t 以上または特別管理産業廃棄物発生量が 50t 以上の事業場であり、下水道業については全ての下水道施設をカバーしていない。そこで本研究では、下水道統計（日本下水道協会）のデータを用いて下水汚泥の処理・処分フローデータを精緻化した。下水道統計では全ての下水道施設について下水汚泥の排出量、施設内での処理状況等のデータが公表されていることから、このデータを整理し、多量排出事業者報告の下水汚泥のデータを置き換えた。なお、データは多量排出事業者報告のデータと同じ平成 25 年度実績データを用いた。

3-2-2 PRTR 届出移動量データに基づく廃棄物処理への化学物質流入フローの解析

日本の PRTR 制度においては、届出対象事業者は廃棄物処理のために事業所の外へ移動した量（届出移動量（廃棄））も届出することになっている。この届出移動量（廃棄）に関しては、化管法施行規則の改正により

平成 22 年度把握分から届出事項に「廃棄物の処理方法」と「廃棄物の種類」が追加されている。届出対象事業者からの廃棄物の委託処理は基本的に産業廃棄物処理であることから、PRTR 届出移動量（廃棄）データから産業廃棄物焼却への化学物質フローの概略を把握することができると考えられる。そこで、PRTR 届出移動量データを化学物質別、処理方法別、廃棄物種別に集計し、廃棄物処理への化学物質の流入フローの整理と特徴把握を行った。

集計解析には平成 25 年度の届出移動量データ（2015 年 4 月 6 日に環境省ウェブサイトよりダウンロード）を用いた。なお、移動量は年間合計値が届出されており、複数の処理方法や廃棄物の種類に該当する届出データも存在する。そのようなデータの実際の内訳は届出データから知ることができないため、本研究では処理方法と廃棄物種類の組合せの数で届出移動量を均等按分した上で集計した。また、処理方法または廃棄物の種類がいずれにも該当していない届出データは除外して集計した。

また、3-2-1 で作成した産業廃棄物の処理処分フローデータ、PRTR 届出移動量データのいずれも排出事業所（届出事業所）ごとのレコードとなっていることから、両者のマッチングを行い、多量排出事業者報告と PRTR 届出移動量データにおける届出事業所、廃棄物の種類等の整合を分析するとともに、物質別・廃棄物種類別に単位委託廃棄物量あたりの PRTR 届出移動量（廃棄物の化学物質含有量に相当）を計算し、その傾向を考察した。マッチングは多量排出事業者報告における事業所の名称および所在地（都道府県）をキーとして PRTR 届出データにおける届出事業所を検索して行い、両者のデータにおいて報告、届出されている廃棄物の種類の整合を確認した。また、マッチングできた事業所において、PRTR 届出移動量において単一の廃棄物の種類が選択されていたレコードについては、PRTR 届出移動量を多量排出事業者報告による委託処理量で除して、単位委託廃棄物量あたりの PRTR 届出移動量（廃棄物の化学物質含有量に相当）を計算した。

3-2-3 産業廃棄物焼却残さ試料の収集・分析と焼却廃棄物の金属類含有量の特徴解析

金属類については、焼却処理へ投入される廃棄物の化学物質含有実態を明らかにするため、産業廃棄物焼却残さ試料の収集と金属類の含有量分析を行って、焼却残さの金属類含有実態データを蓄積した。産業廃棄物焼却施設や各都道府県の産業廃棄物協会等からの協力を得て約 30 施設から焼却残さ試料セット（ばいじんおよび燃えがらの試料セット）を継続的に入手する体制を整え、試料を入手するとともに、後述の排出実態調査においても排ガス採取と同時に焼却残さの採取を行った。なお、これらの施設が基本的に試料採取を 3-4 で述べる排ガス試料採取と同時に実施しており、焼却残さと排ガス濃度の関係等の考察に利用可能な試料セットとした。

入手・採取試料について誘導結合プラズマ質量分析計（ICP-MS）および蛍光 X 線分析計（XRF）による金属類含有量分析を行った。分析対象は PRTR 対象物質（第一種指定化学物質）に含まれている金属およびその化合物 16 種類（Ag、As、Be、Cd、全 Cr、Co、Cu、In、Ni、Mn、Mo、Pb、Sb、Se、V、Zn）を対象とした。なお、これらの物質は、PRTR 制度の対象物質では金属又はその化合物などとして指定されているが（表 II-1 参照）、PRTR 制度における届出と同様に化合物も含めて金属元素換算量として分析、評価した。また、初年度の検討における ICP-MS 分析および XRF 分析結果の比較や各分析法による検出試料の割合をふまえ、一部の試料については 6 元素（全 Cr、Cu、Ni、Mn、Pb、Zn）を XRF 分析、それ以外の 10 元素を ICP-MS 分析によって含有量分析を行っている。また、XRF 分析ではその他の分析可能な元素も含めて分析した。

表 II-1 測定対象金属類と対応する PRTR 対象物質（第 1 種指定化学物質）

測定対象	対応する PRTR 対象物質（第 1 種指定化学物質）			測定対象	対応する PRTR 対象物質（第 1 種指定化学物質）		
	物質番号	特定第 1 種	物質名称		物質番号	特定第 1 種	物質名称
Zn	1		亜鉛の水溶性化合物	Pb	304		鉛
Sb	31		アンチモン及びその化合物		305	○	鉛化合物
In	44		インジウム及びその化合物	Ni	308		ニッケル
Cd	75	○	カドミウム及びその化合物		309	○	ニッケル化合物
Ag	82		銀及びその水溶性化合物	V	321		バナジウム化合物
全 Cr	87		クロム及び三価クロム化合物	As	332	○	砒素及びその無機化合物
Co	132		コバルト及びその化合物	Be	394	○	ベリリウム及びその化合物
Se	242		セレン及びその化合物	Mn	412		マンガン及びその化合物
Cu	272		銅水溶性塩（錯塩を除く。）	Mo	453		モリブデン及びその化合物

試料調製および分析方法は以下の通りである。

【採取試料の調製】風乾、破碎、粉碎を行い、異物を除いて目開き 2mm の篩を通過させた。

【XRF 分析】分取した調整試料を乾燥（105℃）、微粉碎した後、塩化ビニル製リングに充填し、タングステンカーバイド製の試料成形用ダイスに挟んで加圧成形したものを分析に供した。分析は波長分散型 XRF 分析装置（リガク社製 ZSX-100e）を用い、半定量分析（SQX 分析）および標準物質を用いた検量線法により行った。SQX 分析は蛍光 X 線による定性分析結果からファンダメンタルパラメーター法により定量演算を行う方法で、標準物質を用いずに純物質による感度ライブラリから理論強度が測定強度に一致する組成を求めるものである。一方、検量線法は金属等の含有量が既知の標準物質の分析を行い、それらの化学組成データと X 線強度から検量線を作成した上で、同様の条件で測定した試料の X 線強度から各元素の含有量を算出するものである。なお、検量線用標準物質には以下の石炭灰標準物質と鉱石標準物質を用いた。

- ・石炭灰認証標準物質 JSAC0521 社団法人 日本分析化学会
- ・石炭灰認証標準物質 JSAC0522 社団法人 日本分析化学会
- ・地球化学標準物質 コールフライアッシュ JCFA-1 産業技術総合研究所 地質調査総合センター
- ・地球化学標準物質 鉱石（銅鉱石） JCu-1 産業技術総合研究所 地質調査総合センター
- ・地球化学標準物質 鉱石（鉛・亜鉛鉱石） JZn-1 産業技術総合研究所 地質調査総合センター
- ・地球化学標準物質 マンガンノジュール JMn-1 産業技術総合研究所 地質調査総合センター

【ICP-MS 分析】分取した調整試料をホットプレート酸分解（硝酸・塩酸）またはマイクロウェーブ酸分解（硝酸・ふっ化水素酸・過酸化水素）により前処理した。ホットプレート酸分解では燃えがら試料についてのみ分解残さのアルカリ融解も行った。溶液の分析は ICP-MS（Agilent Technologies 社製 7500c、7500ce、7700x）を用いて行った。

また、試料と同時に収集した施設の年間廃棄物処理量および焼却残さ発生量データを用いて、焼却廃棄物の金属元素含有量を推定した。焼却廃棄物の金属元素含有量は、ばいじんおよび燃えがらの金属含有量分析値と年間の廃棄物処理量および焼却残さ発生量から(1)式を用いて推定した。

$$C_{\text{waste}} = \frac{(C_{\text{FA}} \times Q_{\text{FA}}) + (C_{\text{BA}} \times Q_{\text{BA}})}{Q_{\text{waste}}} \quad (1)$$

ここで、C は対象物の金属元素含有量(mg/kg)、Q は対象物の年間処理量または発生量(t/年)であり、添字の waste、FA、BA はそれぞれ焼却処理廃棄物、ばいじん、燃えがらについての値であることを示す。推定値に

ついて、3-1 において作成した主要な処理廃棄物種の施設類型による違いや傾向を解析し、施設類型別の焼却廃棄物の金属元素含有量データとして整理した。

3-3 廃棄物焼却における物質挙動・排出特性の把握

3-3-1 実験炉による化学物質の排出特性把握

廃棄物の焼却処理に伴う金属類の揮発・排出傾向や有機化合物（揮発性有機化合物（VOCs）、アルデヒド類）の生成・排出傾向を実験的に調査するために、既存の廃棄物焼却施設を模擬した実験炉を作成し、室内燃焼実験を行った。実験炉の概略図と写真を図 II-1 に示す。実験炉は温度（800-1000℃）、ガス滞留時間（2-8 秒）、ガス雰囲気（窒素・酸素混合比）、試料負荷量（5-10 kg/h/m³）を自由に制御できる昇温型電気炉（三菱化学アナリテック社製 QF-02）を用いた。燃焼試料は廃棄物焼却施設から提供頂いた廃油と汚泥を用いた。なお、燃焼実験炉の容積は $2.22 \times 10^{-4} \text{ m}^3$ （φ 28 mm×330 mm、φ 18 mm×75 mm）であり、燃焼は 30 秒ごとに 18.5 mg の試料を燃焼実験炉に投入した。

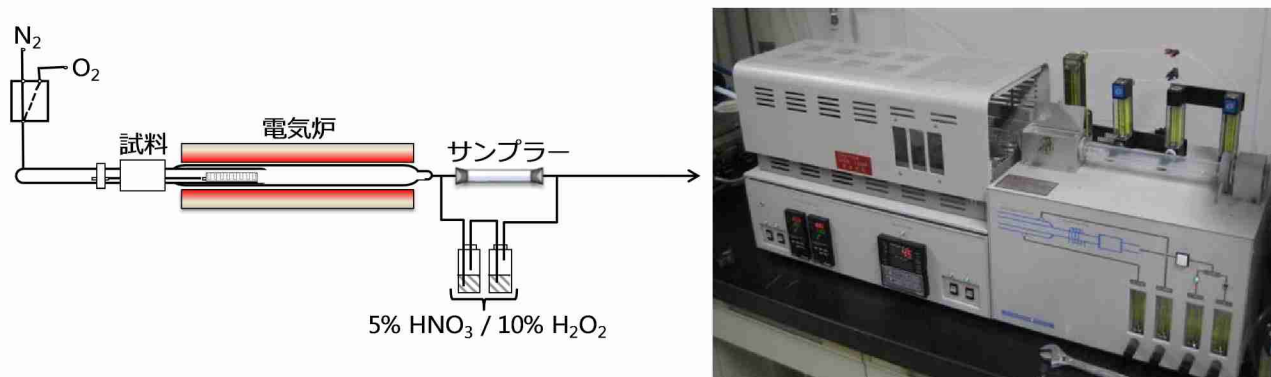


図 II-1 廃棄物焼却施設を模擬した実験炉の概略図（左）と写真（右）

排ガス中金属はフッ素樹脂製ろ紙（アドバンテック東洋 PF040）と、5 mL の 5%硝酸、10%過酸化水素を添加し直列に接続した吸収瓶 2 本を用いて粒子態とガス態金属類に分けて捕集した。捕集後のろ紙は 47%フッ酸 2.5 mL、13 M 濃硝酸 2.5 mL、60%過塩素酸 3 mL を加え、120℃から 200℃で酸処理した。その後、0.1 M 硝酸を加え、内標準物質（Sc、Y、Bi）を各 100 ng 添加後、10 mL に定容した。5%硝酸も同様に内標準物質を添加後 10 mL に定容した。測定には誘導結合プラズマ質量分析計（ICP-MS）（Varian 社製 820-MS）を用いた。

排ガス中 VOCs は活性炭チューブ（柴田科学社製チャコールチューブ・ジャンボ）を用いて捕集した。活性炭をバイアルビンに取り出し、内標準物質としてトルエン-d₈を 2 μg 添加した二硫化炭素 2 mL を加え、30 分間振とう抽出を行った。測定にはガスクロマトグラフィータンデム質量分析計（GC-MS/MS）（Agilent Technologies 社製 7890GC、Waters 社製 Quattro micro）を用いた。排ガス中アルデヒド類は、2 g/L 2,4-ジニトロフェニルヒドラゾン（DNPH）吸収液 5 mL を添加して直列に接続した吸収瓶 2 本を用いて捕集した。10 mL に定容後、高速液体クロマトグラフィー（HPLC）（Agilent Technologies 社製 1200Infinity）で分析した。

3-3-2 焼却処理における物質挙動のモデル化

(1) マルチゾーン熱力学平衡計算を用いた産業廃棄物焼却施設における金属挙動のモデル化

産業廃棄物の焼却処理における金属類の揮発・排出傾向と化学形態を予測・推定するため、マルチゾーン

熱力学平衡計算のプログラムを開発し、施設調査の結果がある実験用ロータリーキルン炉一基および産業廃棄物処理施設 2 施設に適用した。施設の計算モデルを図 II-2 に示す。計算で用いる廃棄物の処理量、薬剤・燃焼用空気の使用量と各部分の温度は施設調査による値を用いた。

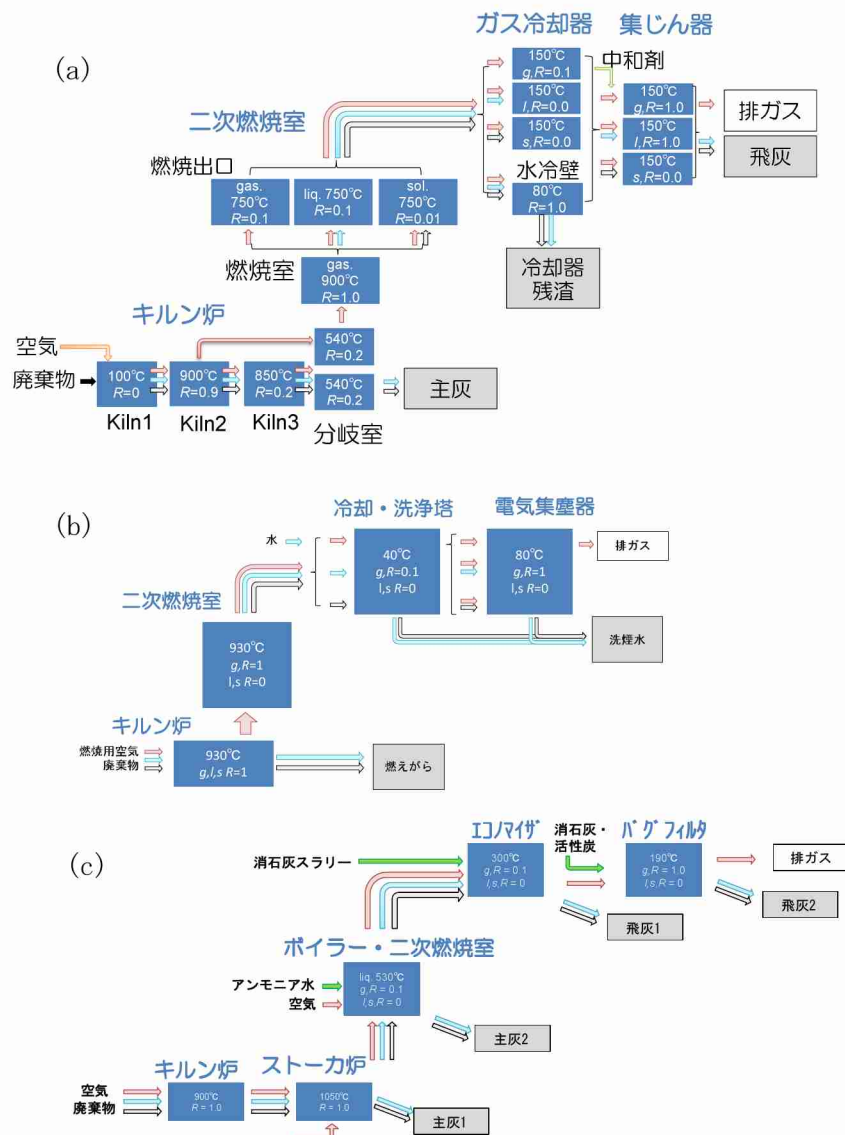


図 II-2 計算に用いたモデル (a: 小型ロータリーキルン、b: 施設 A、c: 施設 B)

計算に必要な廃棄物の元素組成は、実験用炉の試験に供した RDF に関しては分析値を、産業廃棄物に関しては焼却前の性状にばらつきが大きいため、水分、可燃分 (C、H、O、N) の組成データはオランダエネルギー研究財団 (Energy research Centre of the Netherlands (ECN)) の元素組成データベース Phillis2 より推定し、その他元素の組成と灰分量は焼却残さの元素分析の結果と残さの発生量、廃棄物の処理量等から算出した。計算に用いた数値を表 II-2 に示す。

マルチゾーン計算のためのプログラムは、Microsoft Excel 2010 の VBA と Excel 用の熱力学平衡計算アドイン ChemSheet (GTT-technologies 社) を用いて作成した。計算で使用する熱力学データベースは、FactSage7.0 のデータベースから関連する化合物・溶体を選択して ChemSheet 用に変換したものを用いた。データベースの詳細は以下の通りである。なお、重金属が 2 種類以上含まれる化合物は生成の可能性が低いいため計算から除外した。水溶液相のモデルは 100 °C 以下のゾーンでのみ平衡計算に含めた。

- ・気相・液相・固相：FToxid、FactPS、FTsalt
- ・酸化物溶融相モデル：FToxid-slag H (Na、K、Ca、Mg、Mg、Fe^{II}、Si、Al、B、Cr^{II}、Cr^{III}、Pb、Zn、As^{III}、Cu^{II}、Mo^{IX}、Sb^{III}の酸化物、ハロゲン化物) ※元のデータベースに含まれない成分は理想溶体として溶融相にマージした。
- ・塩化物溶融相モデル：FTsalt-saltA (Na、K、Ca、Mg、Fe^{II})
- ・固溶体モデル：SPINA、MEO_AA (鉄酸化物)
- ・水溶液相モデル：FThelg- (OH⁻、Cl⁻、Br⁻、I⁻、Br³⁻、I³⁻、CO₃²⁻、PO₄³⁻、SO₄²⁻、BO₃⁻、IO₃⁻、Na⁺、K⁺、Ag⁺、Ca²⁺、Mg²⁺、Fe²⁺、Cr²⁺、Cr³⁺、Pb²⁺、Zn²⁺、As³⁺、Cu²⁺、Mo⁴⁺、Sb³⁺)

表 II-2 マルチゾーン平衡計算に用いた投入物と施設の情報

実験用キルン炉			施設A			施設B		
RDF 投入量 2.04 kg/h	H ₂ O	4.2	産廃平均 処理量 835 kg/h	H ₂ O	42	産廃平均 処理量 2465 kg/h	H ₂ O	19.7
	C	48		C	25.0		C	40.4
	H	6.8		H	3.2		H	5.5
	N	1.2		N	0.46		N	0.28
	O	30.3		O	16.8		O	12.3
	S	0.096		S	0.32		S	0.17
	Cl	0.86		Cl	1.5		Cl	2.3
	Br			Br	0.032		Br	
	F			F	1.8		F	0.017
	P	0.11		P	0.13		P	0.063
	B			B	0.093		B	
	Na	0.4		Na	1		Na	0.72
	K	0.23		K	0.19		K	0.16
	Ca	2.7		Ca	0.27		Ca	3.1
	Mg	0.16		Mg	0.031		Mg	0.21
	Al	0.35		Al	0.42		Al	0.82
	Si	0.65		Si	0.29		Si	2.6
	Fe	0.34		Fe	2.6		Fe	1.2
	As	0.00019		As	9.8×10 ⁻⁵		As	0.00038
	Cd	0.00016		Cd	8.8×10 ⁻⁵		Cd	1.5×10 ⁻⁵
	Cr	0.002		Cr	0.0045		Cr	0.021
	Cu	0.0042		Cu	0.052		Cu	0.051
	Pb	0.0039		Pb	0.0017		Pb	0.007
	Zn	0.018		Zn	1.3		Zn	0.077
	Be			Be	4.4×10 ⁻⁷		Be	
	Co			Co	0.0013		Co	9.3×10 ⁻⁶
	Mn			Mn	0.068		Mn	0.021
	Ni			Ni	0.012		Ni	0.0066
	Ti			Ti			Ti	0.2
	Sb			Sb	0.0030		Sb	0.015
	Se			Se	9.6×10 ⁻⁶		Se	2.4×10 ⁻⁵
	Mo			Mo	0.0014		Mo	
	V			V	0.00054		V	
	Ag			Ag	0.00085		Ag	
	In			In	6.1×10 ⁻⁵		In	
	Sr			Sr			Sr	0.0086
空気 吹込量 22.0 kg/h	O ₂	23.3	空気 吹込量 6440 kg/h	O ₂	23.3	空気 吹込量 21850 kg/h	O ₂	23.3
	N ₂	76.7		N ₂	76.7		N ₂	76.7
薬剤 使用量 22.5 kg/h	Na ₂ CO ₃	100	洗煙水 使用量 1130 kg/h	H ₂ O	100	アンモニア水 使用量 7 kg/h	NH ₃	14.5
							H ₂ O	85.5
			洗煙水中の薬剤 使用量 18.5 kg/h	NaOH	100	消石灰スラリー 使用量 1068 kg/h	Ca(OH) ₂	2
							H ₂ O	98
						消石灰 使用量 47 kg/h	Ca(OH) ₂	100
						活性炭 使用量 9.9 kg/h	C	100

(2) 排ガス中揮発性有機化合物・アルデヒド類濃度の推定試行

排ガス中の VOCs 濃度の熱力学平衡計算では、占部らの排ガス組成および温度¹⁾を初期値として熱力学平衡計算ソフト FactSage6.4 (GTT-technologies) を用いて平衡計算を行った。ソフトで用いた熱力学データベースは対象が有機化合物であることから FactPS のみとした。また、計算対象とした VOCs は n-hexane、benzene、toluene、ethylbenzene、o-xylene、1,2,4-trimethylbenzene、chloroform、trichloroethylene、tetrachloroethylene、1,2-dichloropropane、chlorobenzene、dichlorobenzene、formaldehyde、acetaldehyde とした。さらに、還元雰囲気における VOCs 濃度を推定するために、還元雰囲気の排ガス組成（以降、参照排ガス組成）として、表 II-3 に示す矢澤らの排ガス組成²⁾を用いて平衡時の VOCs 濃度を計算し、濃度の大きさから生成能を評価した。さらに、温度、O₂ 濃度、HCl 濃度を変動させて、それらの因子が VOCs 濃度へ及ぼす影響を調べ、影響について類型化を試みた。

表 II-3 還元雰囲気の排ガス組成²⁾と任意に与えた変動量

排ガス中の分子	O ₂	CO	H ₂	HCl	C ₂ H ₃ Cl
量 (mol)	0.1	1.8	0.15	0.9	0.1
変動量	0.1~ 1.5	-	-	0.09~ 0.9	-

3-4 実施設からの排出実態の調査・解析

本研究では、PRTR 対象物質（第一種指定化学物質）のうち、金属類、六価クロム、分析可能な揮発性有機化合物（VOCs）およびアルデヒド類を対象とし、実産業廃棄物焼却施設における排ガスへの排出実態の調査を行い、その傾向を解析した。以下、物質の種類ごとに研究方法を述べる。

3-4-1 金属類

金属類については、焼却残さ試料の分析と同じ 16 種類の金属類（Ag、As、Be、Cd、全 Cr、Co、Cu、In、Ni、Mn、Mo、Pb、Sb、Se、V、Zn）を対象とした。なお、分析結果は焼却残さの分析結果と同様に化合物も含めて金属元素換算量として分析、評価した。

(1) 実産業廃棄物焼却施設における排ガス試料採取および金属類分析

実産業廃棄物焼却施設 23 施設において最終排ガスの試料採取および金属類分析を行い、排ガス中金属類濃度を測定した。排ガス中金属類の採取は JIS Z 8808（排ガス中のダスト濃度の測定方法）および JIS K 0083（排ガス中の金属分析方法）に準拠して行った。

ただし、ブランク値低減のため、ダスト捕集部にはふっ素樹脂製ろ紙を用いることとした。使用するふっ素樹脂製ろ紙は、初年度の試料採取の試行において検討したところ、保留粒子径 2 μm のふっ素樹脂製ろ紙（本研究ではアドバンテック東洋 PF020）では排ガス中水分の多い施設、採取排ガス温度が低い施設においてろ紙の目詰まりにより短時間で吸引ポンプが停止してしまうことがあることがわかったため、水分量の多い施設でも安定した試料採取が可能であった捕集粒子径 4 μm（本研究ではアドバンテック東洋 PF040 を使用）を用いることとした。

また、吸収液は EPA Method29 を参考に 5%硝酸および 10%過酸化水素水とした。吸収液に用いる試薬は、実施設における測定試行および試薬のブランクチェックの結果、排ガス中濃度に対して有害金属測定用試薬ではブランク値が無視できない（特に Cr、Pb）ことがわかったため、上で、Ultrapur-100 グレード硝酸および Ultrapur グレード過酸化水素を使用した。また、調査対象施設のうち 4 施設においては、排ガス処理前排ガスの試料採取・分析も行い、排ガス処理による金属類の除去率を計算した。

採取試料の分析は、ろ紙については乾燥して恒量とした後秤量し、ふっ化水素酸・濃硝酸・過塩素酸を用

いた酸分解（120-200℃）またはふっ化水素酸・硝酸・過酸化水素を用いた圧力酸分解を行い、内標準物質を添加して定容した。吸収液も同様に内標準物質を添加して定容した。これらの試料溶液について ICP-MS および ICP 発光分光分析装置（ICP-OES）（Varian 社製 710-ES）による金属類分析を行い、その結果から排ガス中金属類濃度を求めた。なお、ろ紙と吸収液は別々に分析し、後述する排ガス中金属類の粒子態比の計算にも用いた。

（2）ダスト採取ろ紙試料の活用による排ガス中金属類濃度データの充実

（1）の試料採取・分析とは別に、実測データの施設数充実のため、各都道府県の産業廃棄物協会等の協力のもと、産業廃棄物焼却施設から排ガス中ダスト濃度の測定等においてダストを採取したろ紙試料（主にシリカ繊維製円形または円筒ろ紙、施設により異なる）を研究実施期間において継続的に提供頂く体制を構築し、提供試料を用いて金属類の分析と排ガス中濃度の計算を行った。結果として 23 施設、のべ約 80 試料を入手、分析した。分析方法は（1）に示したろ紙試料の分析方法と同じである。ただし、これらの提供試料はシリカ繊維製ろ紙が主であり、金属類の種類によってブランク値が高いことから、試料採取に用いたものと同じロットの未使用ろ紙も提供頂き、ろ紙ブランクの測定も行って測定値から差し引いた。また、これらの測定値にはダスト捕集部で捕集される金属類（以降、粒子態と呼ぶ）のみが含まれ、ガス吸収部で捕集される金属類（以降、ガス態と呼ぶ）が含まれないことから、（1）における分析結果をもとに計算した排ガス中金属類の粒子態比（ダスト捕集部／（ダスト捕集部＋ガス吸収部））を用いて簡易的に排ガス中総金属類濃度に換算した。

3-4-2 六価クロム

上記の排ガス中金属類の分析では ICP-MS または ICP-OES を用いて分析を行っているため、Cr は全 Cr を示している。しかし、PRTR 制度では全 Cr（正確にはクロム及び三価クロム化合物、物質番号 87）とは別に六価クロム化合物（物質番号 88）も対象物質となっている。届出移動量（廃棄）を見ても一定量の六価 Cr が廃棄物に含まれて焼却処理に移動していると考えられる。六価 Cr は大気汚染防止法において優先取組物質に指定されている発がん性物質の一つであることを考えると六価 Cr の排出量についても把握が必要である。しかしながら、廃棄物焼却処理施設排ガスにおける六価 Cr 排出実態の報告例は少ない。そこで本研究では、排ガス中六価 Cr の採取・分析方法の開発と排出実態の把握を行った。

廃棄物焼却施設排ガス中の六価 Cr 濃度の報告例が少ない理由として、気相中の微量な六価 Cr の測定法が確立されていないことがあげられる。これまでに報告されている気相中の六価 Cr の測定法としては、例えば、作業環境空気中の六価 Cr 濃度の測定法である ISO16740 があげられる。この方法は、1,5-ジフェニルカルボヒドラジド(DPC)によるポストカラム誘導体化を用いたイオンクロマトグラフィー(IC)による分析法(IC-DPC法)であり、分析方法の定量下限値(MQL)は 40 ng/m³である。一方、OSHA では OSHA ID-215 を定めており、MQL は 3 ng/m³であるが、希釈工程が必要であり、数多くの試料の測定には操作がやや煩雑である。また、Nusko and Heumann は MQL が 0.008 ng/m³の測定法を開発しているが³⁾、高価で特殊な同位体希釈質量分析装置(IDMS)を要し、その抽出操作も煩雑であるということから、実用的な測定法としては普及に至っていない。以上をふまえると、一般的な機器を用いた手順が簡便かつ高感度な測定法が必要である。そこで、まず、IC-DPC法の改良により、十分な MQL を持ち、かつ特殊な装置や煩雑な抽出操作を要しない、排ガス中の六価 Cr の試料採取・分析方法の検討を行った。具体的には、IC カラムや分離条件の最適化、測定操作ブランクの確認と低減、添加回収試験による回収率確認を行った。

上記で改良、確立した IC-DPC 法を用いて産業廃棄物焼却施設 16 施設 25 試料の排ガス試料の六価 Cr 分析を行った。試料採取は常温のため大部分の六価 Cr は粒子態として存在していると考えられることから、最終排ガスのダスト捕集を行い、捕集したろ紙試料を分析に供した。排ガス採取量は約 1 m³、捕集にはふっ素樹

脂製（PTFE 製）ろ紙を用いた。ろ紙からの六価 Cr の抽出には、50 mM のリン酸緩衝液（リン酸水素カリウム／リン酸二水素カリウム）と、20 mM の硫酸マグネシウム水溶液、炭酸緩衝液（100 g/L 炭酸ナトリウム／20 g/L 炭酸水素ナトリウム）を用い、これらの溶液をろ紙にそれぞれ 1 mL、0.5 mL、5 mL 添加し、純水で 10 mL に調整後、90℃で 1 時間加熱し、抽出を行った。抽出液は遠心分離後、10 mL に定容した。六価 Cr の分析には、イオンクロマトグラフ（Thermo Scientific 社製 Dionex ICS-5000+）を用い、分離カラムにて六価 Cr を分離後、ポストカラム反応液（2 mmol/L ジフェニルカルボヒドラジド／10 %メタノール／0.5 mol/L 硫酸）を加え、UV-VIS 吸光度検出器（530 nm）にて測定を行った。

3-4-3 揮発性有機化合物およびアルデヒド類

産業廃棄物焼却施設からの揮発性有機化合物（VOCs）およびアルデヒド類の排出実態を調査するため、まず、排ガス試料採取・分析方法の妥当性の確認を行った。排ガス中 VOCs・アルデヒド類の測定報告例は限られるが、「排出ガス中の指定物質の測定方法マニュアル」（平成 23 年・環境省）および JIS K 0303:2012 「排ガス中のホルムアルデヒド分析方法」を参考に、簡便な方法である固体吸着捕集による採取と溶媒脱離による分析を検討した。VOCs・アルデヒド類の対象物質には、活性炭または DNPH カートリッジで捕集・分析できる可能性がある物質（47 物質）を選定した（表 II-4）。捕集剤には、VOCs 用としてチャコールチューブ・ジャンボ（柴田科学社製）を、アルデヒド類用として DNPH アクティブガスチューブ（柴田科学社製）を用いた。

採取方法の妥当性の確認として、表 II-4 の 47 物質についての添加回収試験を行った。47 物質の試薬を固体捕集剤に添加し、以下の方法で分析し、回収率を確認した。VOCs の分析では、活性炭をバイアル瓶に取り出し、内標準としてトルエン-d8 を 2 μg 添加した二硫化炭素 2 mL を加え、30 分間振とう抽出を行った。測定は、GC-MS/MS（Agilent Technologies 社製 7890GC/Waters 社製 Quattro micro）を用いて行った。排ガス中のアルデヒド類は、DNPH アクティブガスチューブにアセトニトリル 8 mL を通過させ、10 mL に定容後、HPLC（Agilent Technologies 社製 1200 Infinity）で分析した。

上記の添加回収試験で良好な回収率が得られた物質を対象とし、実産業廃棄物焼却施設における排ガス中の VOCs・アルデヒド類濃度の測定を行った（12 施設、14 試料）。採取・分析は前述したのと同じ方法を用いた。

表 II-4 分析候補物質（VOCs40 物質、アルデヒド類 7 物質）

物質番号	物質名	採取方法	物質番号	物質名	採取方法
9	アクリロニトリル	活性炭	181	m-ジクロロベンゼン	活性炭
10	アクロレイン	DNPHカートリッジ	181	p-ジクロロベンゼン	活性炭
12	アセトアルデヒド	DNPHカートリッジ	186	ジクロロメタン	活性炭
15	アセナフテン	活性炭	200	ジニトロトルエン	活性炭
18	アニリン	活性炭	216	N,N-ジメチルアニリン	活性炭
32	アントラセン	活性炭	232	N,N-ジメチルホルムアミド	活性炭
35	イソブチルアルデヒド	DNPHカートリッジ	240	スチレン	活性炭
53	エチルベンゼン	活性炭	262	テトラクロロエチレン	活性炭
57	エチレングリコールモノエチルエーテル	活性炭	279	1,1,1-トリクロロエタン	活性炭
80	キシレン	活性炭	280	1,1,2-トリクロロエタン	活性炭
84	グリオキサル	DNPHカートリッジ	281	トリクロロエチレン	活性炭
85	グルタルアルデヒド	DNPHカートリッジ	290	トリクロロベンゼン	活性炭
86	クレゾール	活性炭	296	1,2,4-トリメチルベンゼン	活性炭
89	クロロアニリン	活性炭	297	1,3,5-トリメチルベンゼン	活性炭
125	クロロベンゼン	活性炭	300	トルエン	活性炭
127	クロロホルム	活性炭	302	ナフタレン	活性炭
128	クロロメタン	活性炭	316	ニトロベンゼン	活性炭
149	四塩化炭素	活性炭	386	プロモメタン	活性炭
150	1,4-ジオキサン	活性炭	392	n-ヘキサン	活性炭
157	1,2-ジクロロエタン	活性炭	399	ベンズアルデヒド	DNPHカートリッジ
158	1,1-ジクロロエチレン	活性炭	400	ベンゼン	活性炭
159	cis-1,2-ジクロロエチレン	活性炭	411	ホルムアルデヒド	DNPHカートリッジ
178	1,2-ジクロロプロパン	活性炭	438	メチルナフタレン	活性炭
179	1,3-ジクロロプロペン	活性炭			

3-5 産業廃棄物焼却施設からの排出量推計

廃棄物焼却施設からの化学物質排出量の推計は、表 II-5 に事例を整理したように基本的には活動量に活動量あたりの排出量（ここでは広い意味で排出係数と呼ぶ）を乗じる方法で行われている。本研究でも活動量に排出係数を乗じる方法によって排出量推計を試行した。

表 II-5 廃棄物焼却施設からの化学物質排出量の推計アプローチの例

対象物質		排出媒体	方法	推計・計算の目的	文献
水銀	一般廃棄物焼却	大気	廃棄物焼却量× 総括排出係数（焼却量あたり排出量）	排出インベントリ作成	1)
	産業廃棄物焼却	大気	全国排ガス量× 排ガス水銀濃度（排ガス量あたり排出量）	排出インベントリ作成	1)
ダイオキシン類		大気	廃棄物焼却量× 排出ガス量原単位（焼却量あたり排ガス量）× 排ガスDXNs濃度（排ガス量あたり排出量）（※）	排出インベントリ作成	2)
PRTR対象物質	特別要件施設の届出	公共用水域	排水量× 排水中対象物質濃度（排水量あたり排出量）	PRTR届出	3)
	一般廃棄物焼却（届出外排出）	大気	廃棄物焼却量× 総括排出係数（焼却量あたり排出量）	PRTR届出外推計の検討	4)

1) 環境省平成27年度第3回水銀大気排出抑制対策調査検討会 資料1 水銀大気排出インベントリー案（2014年度対象）、
https://www.env.go.jp/air/suigin/kentoukai2015/27_2.html

2) 環境省：ダイオキシン類の排出量の目録（排出インベントリー）、平成29年3月、<http://www.env.go.jp/press/103805.html>

3) 経済産業省・環境省：PRTR排出量等算出マニュアル第4.2版、平成30年3月

4) 株式会社環境計画研究所：平成24年度環境省請負業務PRTR届出外排出量推計等検討業務報告書（第2分冊）、平成25年3月

※廃棄物焼却量×排出ガス量原単位＝全国排ガス量であるから、活動量を排ガス量、排ガス濃度を排出係数とした計算（水銀（産業廃棄物焼却）と同じ）と整理できる。

3-5-1 金属類

産業廃棄物焼却施設からの金属類の排出量は、以下の複数の方法によって推計を試行した。

(1) 焼却処理量、焼却廃棄物の金属類含有量、最終排ガスへの排出率を用いた推計

表 II-5 に整理した事例に倣えば、焼却処理からの排出量の推計は、処理廃棄物量に焼却量あたりの排出量を乗じる方法か、排ガス量に排ガス中濃度を乗じる方法を用いることが考えられる。しかしながら、金属類については、結果と考察で示すように産業廃棄物焼却処理施設においては処理廃棄物中の金属類含有量が主要な処理廃棄物によって大きく異なること、排ガス中金属類濃度は処理廃棄物や排ガス処理方式等の組合せにも影響されることから、焼却量あたりの排出量や排ガス中濃度を排出係数として一般化することが難しいと考えられた。一方、結果と考察で示すように、処理廃棄物中の含有量、焼却処理への流入量に対する最終排ガスへの排出率について、それぞれの傾向を主要な処理廃棄物、排ガス処理方式および運転方式によって独立に整理できたことから、これらを用いた排出量推計を試みた。すなわち、

「焼却処理への流入金属類量（＝焼却処理量×処理廃棄物中金属類含有量）」×「最終排ガスへの排出率」

により排出量を推計した。

上記の式において、後述する結果から、「焼却処理への流入金属類量」は主要な処理廃棄物による施設類型、「最終排ガスへの排出率」は排ガス処理方式または運転方式（連続式／バッチ式）もしくはその組み合わせによる施設類型を考慮することが適当であると考えられた。そこで、これらの施設類型ごとのデータを用いて排出量を推計し、これを総和することで合計の排出量を推計した。これを式で表すと(2)式となる。

$$D_m = \sum_i \sum_j (W_i \times C_{\text{waste},m,i}) \times d_{m,j} \quad (2)$$

D_m : 産業廃棄物焼却施設からの金属類 m の年間大気排出量 (g/年)

W_i : 主要な処理廃棄物による類型 i の施設の年間焼却処理量 (t/年)

$C_{\text{waste}, m, i}$: 主要な処理廃棄物による施設類型 i の処理廃棄物中金属類 m の含有量 (g/t=mg/kg)

$d_{m, j}$: 排ガス処理方式または運転方式 (またはその組み合わせ) による施設類型 j の金属類 m の流入量に対する最終排ガスへの排出率 (-)

なお、結果と考察で示すように、最終排ガスへの排出率は運転方式 (連続式/バッチ式) によっても異なると考えられたが、排ガス処理方式と運転方式の組合せで分類した場合には類型ごとの実測データ数が少なくなってしまうこと、バッチ式による産業廃棄物焼却処理量が全国焼却処理量に占める割合は 15% と大きくはないことを勘案し、本研究の試行ではより排出量推計値への影響が大きいと考えられる排ガス処理方式を考慮した排出率の設定を行った。また、ここでの推計試行では、排ガス処理方式については焼却処理量が多く (合計で全体の 8 割強)、実測データが多数得られたバグフィルター (BF) および電気集じん器 (EP) の施設のみを対象とした。

(2) 施設類型の細分化による推計精度向上の試行

(1) の推計試行において、施設類型を考慮することで施設による排出実態の違いを反映した推計が可能であると考えられるが、施設類型をより詳細に分類することで推計値の不確実性をより小さくできる可能性があると考えられた。そこで、処理廃棄物の分類をより詳細化した推計のケーススタディを試行し、それによる推計精度の向上可能性を示した。具体的には、DXNs 調査データの廃棄物分類における「その他」(汚泥、下水汚泥、廃油、廃プラスチック、木くず、感染性廃棄物以外の廃棄物を集約したもの) の詳細化、「汚泥」の焼却に伴う排出量推計における汚泥の排出業種の考慮の 2 つのケーススタディを実施した。

(3) ばいじんの金属類含有量と発生量を用いた推計の試行

産業廃棄物焼却施設からの大気への金属類排出量は最終排ガスにおける排出量である。したがって、大気への排出量の推計のみを目的とすれば、金属類の排ガス系への移行量と排ガス処理における除去率のみを考慮して推計が可能であると考えられる。排ガス系への移行と排ガス処理における除去は主にダスト (ばいじん) であるとした場合、

$$\text{「ばいじん発生量」} \times \text{「ばいじんの金属類含有量」} \times (1 - \text{「排ガス処理における除去率」})$$

により大気 (最終排ガス) への排出量を推計できる。本研究では (1) とは異なる簡易的な推計アプローチとして、この方法による推計も試行した。この方法の利点は、ばいじんの含有量を基本とすることから、最終排ガス中の濃度が低濃度で通常検出下限値未満となってしまうような金属類 (今回のケースでは As、Be など) についても、ばいじんの含有量が測定できるレベルにあれば推計が可能であることである。なお、PRTR 届出外推計等における排出量推計は 1 年間を単位として行われることから、本研究では年間のばいじん発生量を用いた推計を試行した。より具体的には以下の (3) 式で排出量を推計した。

$$D_m = \sum_i \sum_j (FA_i \times C_{FA, m, i}) \times (1 - e_{m, j}) \quad (3)$$

D_m : 産業廃棄物焼却施設からの金属類 m の年間大気排出量 (g/年)

FA_i : 施設 i の年間ばいじん発生量 (t/年)

$C_{FA, m, i}$: 施設 i の施設のばいじん中金属類 m の含有量 (g/t=mg/kg)

$e_{m,j}$: (施設 i の) 排ガス処理方式等 j の金属類 m の排ガス処理における除去率 (-)

ばいじんの年間発生量については DXNs 調査データに含まれているためこれを用いた。一方、ばいじんの金属類含有量、排ガス処理における除去率は、全個別施設のデータを得ることはできないが、本研究で蓄積した実測データに基づく設定方法を検討した。

ばいじんの金属類含有量は処理廃棄物中の含有量と同様に、主要な処理廃棄物等に依存している可能性が高い。そこで、本研究で得られたばいじんの含有量実測データと DXNs 調査データや維持管理情報から整理した処理廃棄物組成データを用いた回帰分析により両者の関係を分析し、廃棄物処理組成からばいじんの金属類含有量を推定、設定できるか検討した。具体的には、ばいじんの金属類含有量実測データ (33 施設、99 データ) と DXNs 調査データによる廃棄物種類別の年間焼却処理量データを用い、特定の金属類含有量を目的変数、主要な産業廃棄物の処理割合を説明変数とした回帰分析を行ってその回帰式を作成した。なお、同一施設で複数の実測データが得られている場合にはその平均値を用いて分析した。

分析では、まずばいじんの金属類含有量実測データが得られた全施設のデータと DXNs 調査データを用いて金属類ごとに解析を行い、説明変数として適当ではないと考えられる廃棄物種類の処理割合を除外しながら回帰分析を繰り返した。除外する廃棄物種類は決定係数の値と P 値をもとに判断した。なお、廃棄物においては汚泥など同じ廃棄物の種類であってもその性状が大きく異なる場合もあることから、P 値=0.01 や 0.05 などで棄却することは適当ではないと考え、P 値=0.2 を基準として除外した。廃棄物種類の間の相関は、一般廃棄物と下水汚泥の間に最も高い相関係数 0.436 を示したが、この時の VIF (分散拡大要因) は 1.2 程度と小さかったことから、多重共線性は考慮しなくて良いと考えられた。

また、維持管理情報に基づくより詳細な廃棄物分類での分析も行った。維持管理情報からは 33 の廃棄物分類でのデータが得られたが、処理割合間の相関係数が 0.8 以上と高い相関を示す廃棄物種類がいくつか存在したことから、金属類含有量が低いと考えられる、処理施設が少ない、もしくは処理量が少ない廃棄物種類は集約し、廃棄物種類間の相関係数が 0.8 以下になるように整理してから回帰分析を行った。回帰分析の手順は DXNs 調査データを用いた分析と同様であるが、説明変数からの除外の基準は P 値=0.1 とした。

排ガス処理設備における除去率は、限られた施設のデータではあるが、本研究の実測調査結果から計算した除去率に基づいて設定した。結果と考察に示すが、実測調査結果から計算した除去率では金属類による大きな差は見られなかったことから、排ガス処理方式ごとの代表的な値として、バグフィルターで 99.95%、電気集じん器で 99.5%と設定した。その他の排ガス処理方式については本研究では実測データを得ることができなかったが、ここでは電気集じん器よりもやや高めの 99%と設定した。

3-5-2 六価クロム

産業廃棄物焼却施設排ガス中の六価クロム濃度の実測はこれまでに例がなく、本研究による実測値は慎重に評価される必要があるが、それを前提としたうえで、本研究では大気排出量の推計を試行した。

データ数は限られるものの、スクラバーのみによる排ガス処理を行っている施設において六価クロムが最終排ガス中に特異的に高濃度で検出されたことをふまえ、スクラバーとそれ以外 (バグフィルター) による排ガス処理方式を区別して焼却処理量あたり排出量 (排出係数) を試算した。なお、下限値未満であった試料については、PRTR 届出排出量等算出マニュアル (経済産業省・環境省) に従い、排ガス中濃度を下限値の 2 分の 1 と見なして排出係数を計算した。また、中央値等は 1 試料を 1 データとして算出した (複数の試料について測定を行った施設についてもそれぞれの試料のデータを個別に扱った)。

次に、試算した排出係数を年間の廃棄物焼却処理量に乗じて大気への六価 Cr 排出量を試算した。今回の試

算では、スクラバーのみを使用している施設についてはスクラバーのみの施設の排出係数試算値、それ以外の施設についてはバグフィルター使用施設の排出係数試算値を用いた。ただし、電気集じん器やサイクロンのみで排ガス処理を行っている施設についての排出実態は不明であるため、今後のデータ蓄積が望まれる。計算は中央値（スクラバーのみ使用施設については2データしかないため平均値に等しい）を用いて行った。焼却処理量は DXNs 調査データを排ガス処理方式別に集計したものをを用いた。

3-5-3 揮発性有機化合物およびアルデヒド類

データ数は限られるが、本研究で得られた実測データを用いて産業廃棄物焼却施設からの VOCs およびアルデヒド類の大气排出量の推計を試行した。実測データには炉形式等による明確な傾向が見られなかったため、ここでは施設属性等で区別せずに整理を行い、実測データに基づいて焼却処理量あたり排出量（排出係数）を試算した。なお、下限値未満であった試料については、PRTR 届出排出量等算出マニュアル（経済産業省・環境省）に従い、排ガス中濃度を下限値の2分の1と見なして排出係数を計算した。また、中央値等は1試料を1データとして算出した（複数の試料について測定を行った施設についてもそれぞれの試料のデータを個別に扱った）。試算した排出係数を年間の廃棄物焼却処理量に乗じて大気への VOCs およびアルデヒド類の排出量を試算した。焼却処理量は DXNs 調査データを排ガス処理方式別に集計したものをを用いた。排出係数と同様、施設属性等による区別は行っていない。

4. 結果及び考察

4-1 産業廃棄物焼却施設の類型化

(1) 産業廃棄物焼却施設の業区分別処理廃棄物の解析

DXNs 調査データ（平成25年度）から整理した業区分別の年間産業廃棄物焼却処理量を図 II-3 に示す。同データに含まれる1698の焼却炉（焼却量ゼロの炉を除くと1258炉）における産業廃棄物焼却量約2,140万トンのうち、セメント業が964万トン（45%）と多くを占め、そのほかは産業廃棄物処理業が608万トン（28%）、その他製造業等が298万t（14%）、製紙業が271万t（13%）であることが明らかになった。ただし、DXNs 調査データでは製紙業のボイラーが対象外になっている可能性もあることから、製紙業での焼却量は過小に見積もられている可能性がある。

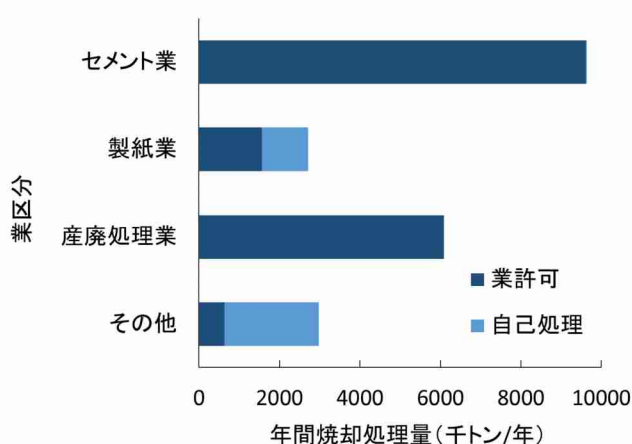


図 II-3 全国の産業廃棄物焼却処理量（業区分別、業許可有無の別）

また、全焼却量のうち1,790万t（84%）が業許可を持つ施設、351万t（16%）が業許可を持たない施設で処理されていた。業区分ごとに業許可有無の内訳を見てみると、セメント業ではほぼ全量、産業廃棄物処理

業では（当然ながら）全量が業許可を持つ施設で処理されており、ほぼ全てを委託処理が占めていると考えられた。一方、製紙業、その他製造業等では業許可を持たない施設での処理がそれぞれ約 4 割、約 8 割を占めていた。ただし、後述するように、製紙業では業許可を持つ施設でも処理量のほとんどが自己処理と考えられるので、製紙業は全てを自己処理、他の業区分は業許可の有無で委託処理、自己処理として集計すると、委託処理による焼却が 1,633 万トン（76%）、自己処理による焼却が 507 万トン（24%）となる。

次に、各業区分別の処理廃棄物の処理量組成を図 II-4 に示す。セメント業／業許可有では、「その他（の廃棄物）」が 66%と多くを占め、「汚泥」の 29%とあわせて全体の 95%を占めていることがわかった。産業廃棄物処理業では、「その他」が 35%、「廃プラスチック」が 26%、「汚泥」が 21%で、これら 3 品目で 8 割強を占めていた。製紙業では、「廃プラスチック」および「木くず」の処理割合に違いが見られるものの、業許可の有無によらず「汚泥」が全体の約 85%を占め、「その他」の処理割合も同等であることがわかった。このことより、業許可を持つ施設においても製紙汚泥等の自己処理が主であり、製紙業では業許可の有無によらず大部分が自己処理による焼却処理であると推測された。一方、その他製造業等では、「汚泥」と「廃油」の割合（それぞれ約 30%、約 10%）であることは類似しているが、それ以外の処理品目（「廃プラスチック」、「木くず」、「その他」）とその割合は業許可の有無で大きく異なっていることがわかった。業許可有の施設においては委託処理で外部から廃棄物を受け入れている施設が含まれているためと考えられ、業許可の有無によって施設の特徴が異なっていると考えられた。

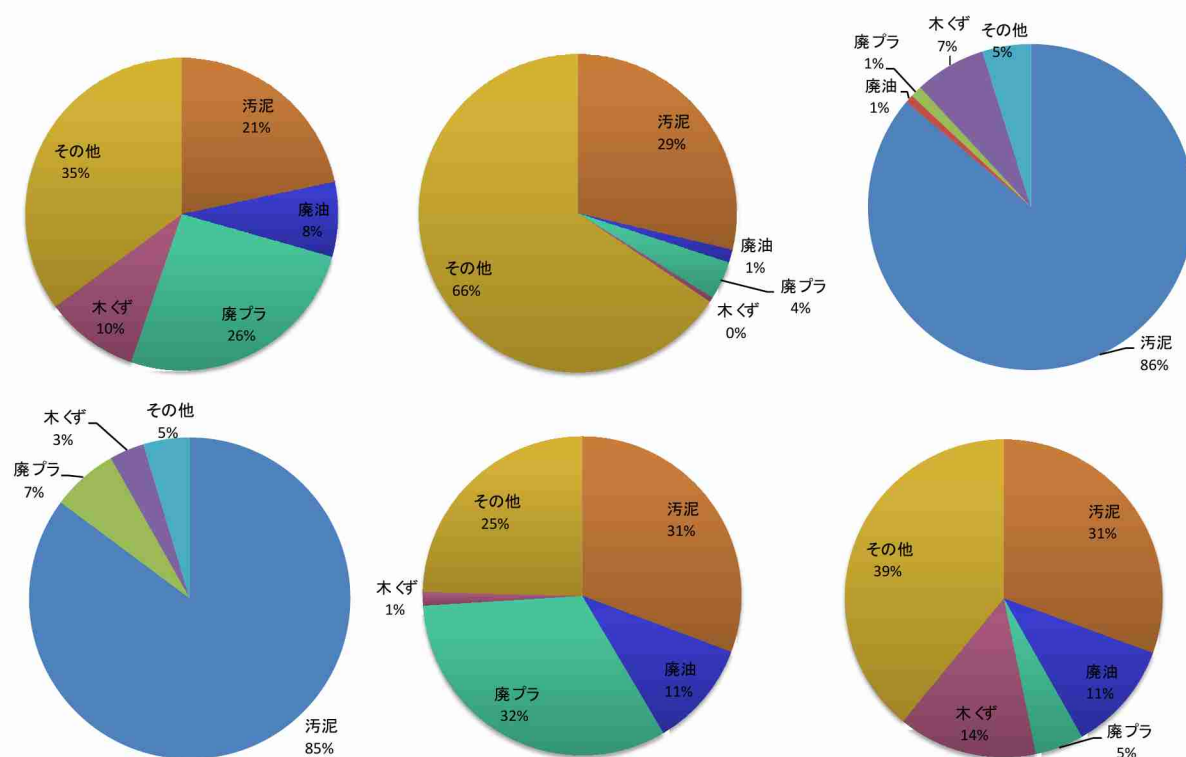


図 II-4 業区分別の処理廃棄物組成（左上：産業処理業、中上：セメント業許可あり、右上：製紙業許可あり
左下：製紙業許可なし、中下：その他許可あり、右下：その他許可なし）

次に、業区分ごとに処理廃棄物組成でクラスター分析を行い、そのパターンを類型化した結果、およびそれぞれのクラスターについて炉形式、排ガス処理方式による内訳を整理した結果を業区分ごとに示す。

(a) 産業廃棄物処理業における施設の類型化および焼却量

図 II-5 に産業廃棄物処理業についてのクラスター分析結果を示す。図中の括弧内パーセンテージは施設数割合を示す。それぞれの処理廃棄物の内訳を参照しつつ、産業廃棄物処理業における焼却施設は 7 つのクラ

スターに分類できた。各クラスターの主な処理廃棄物は①汚泥、②廃油、③廃プラスチック、④木くず、⑤感染性廃棄物、⑥多種類混合、⑦その他といった特徴づけができた（ここで、「主な」という表現は、ほぼその廃棄物のみを処理しているかその廃棄物が中心的な処理廃棄物であることを示す）。このように、施設によって主な処理廃棄物に特徴が見られることから、より実態を反映した排出量推計のためには、その特徴をふまえて焼却残さや排ガスの実測データを分類、解析し、それらを用いた推計を行うことが必要であると考えられる。

なお、本研究では、後述の処理廃棄物の化学物質含有量や排ガス実測データの施設数をふまえて7つのクラスターに類型化した。階層的クラスター分析ではクラスター数は任意であるので、それぞれの廃棄物の処理割合の大きさ等によってさらに詳細な類型を作成することも可能である。多くの実測データが得られるのであればより詳細な類型化を行うことが望ましいが、実測データが得られる施設は限られることから、排出量推計の実施可能性を考えればこの程度の類型化が現実的であると考えられる。

図 II-6、図 II-7 に主な処理廃棄物による施設類型ごとに炉形式および排ガス処理方式別の焼却処理量を整理した結果を示す。処理廃棄物による施設類型と炉形式の間にはいくつかの特徴が見られた。木くずを主な処理廃棄物とする施設では他の類型よりもストーカ炉や固定床炉による処理が多く、廃プラスチックや汚泥を主な処理廃棄物とする施設では流動床炉による処理が多い傾向が見られた。廃油を主な処理廃棄物とする施設ではロータリーキルンやロータリーキルンストーカ炉による処理が多く、また、それらの施設では汚泥やその他廃棄物を混焼しているケースが多く、高カロリーな廃油を燃やしつつ水分が多い廃棄物を処理しているためと考えられた。一方、排ガス処理方式については、全体的にバグフィルターを使用している施設での処理が多いものの、廃油、汚泥、その他を主な処理廃棄物とする施設において電気集じん器の割合が比較的高いことがわかった。

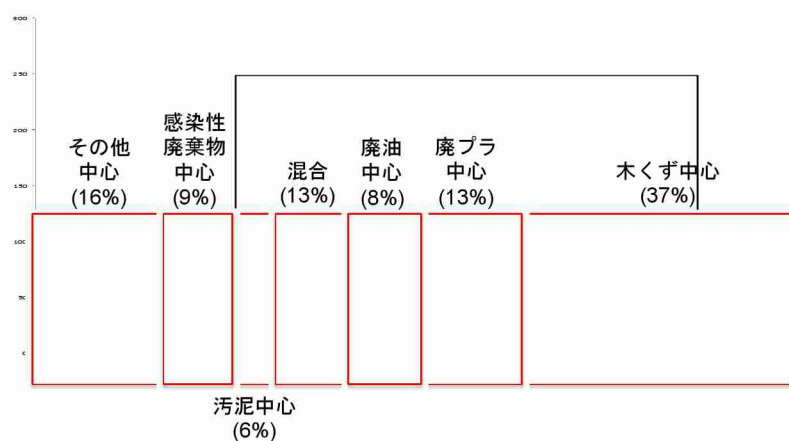


図 II-5 産業廃棄物処理業における処理廃棄物組成によるクラスター分析結果（754 施設）

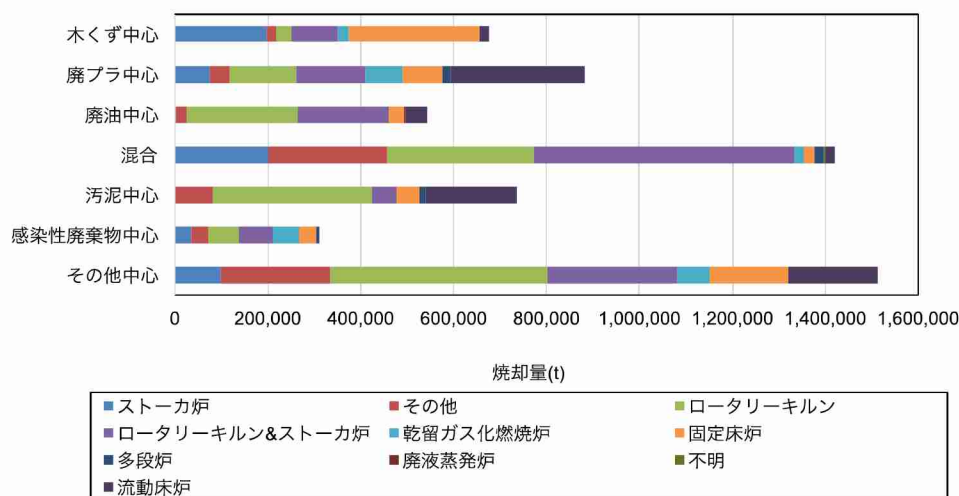


図 II-6 産業廃棄物処理業の処理廃棄物クラスター別炉別処理量

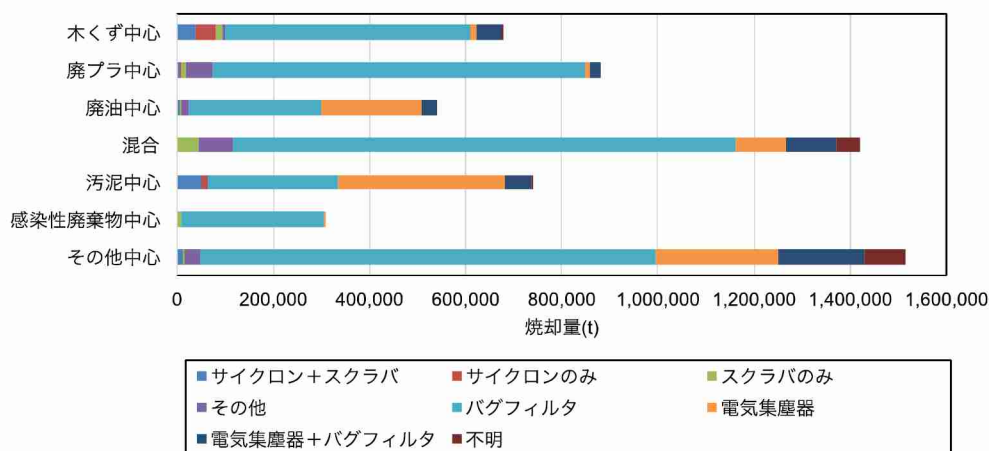


図 II-7 産業廃棄物処理業の処理廃棄物クラスター別排ガス処理形式別処理量

(b) セメント業における施設の類型化および焼却量

図 II-8 にセメント業(業許可有)についてのクラスター分析結果を示す。処理廃棄物のパターンによって、①汚泥、②木くず、③その他、④汚泥とその他を主な処理廃棄物とする施設と⑤廃油のみを処理する施設の5クラスターに類型化され、セメント業においても施設によって特定の廃棄物が処理の中心になっていることがわかった。

図 II-9、図 II-10 に主な処理廃棄物による施設類型ごとに炉形式および排ガス処理方式別の焼却処理量を整理した結果を示す。処理量についてはその他(の廃棄物)を主な処理廃棄物とする施設が大部分を占めていたが、炉形式は主な処理廃棄物によらずほぼロータリーキルンであった。排ガス処理方式については、産業廃棄物処理業とは異なりどの施設類型においても電気集じん器の割合が高かった。

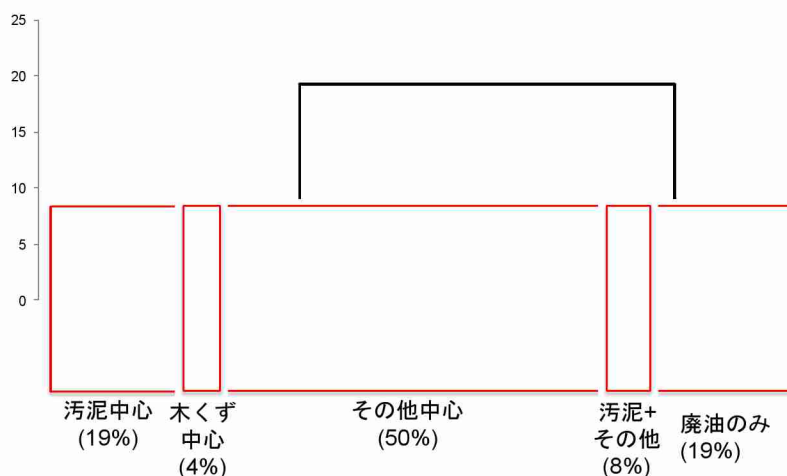


図 II-8 セメント業（業許可有）における処理廃棄物組成によるクラスター分析結果（48 施設）

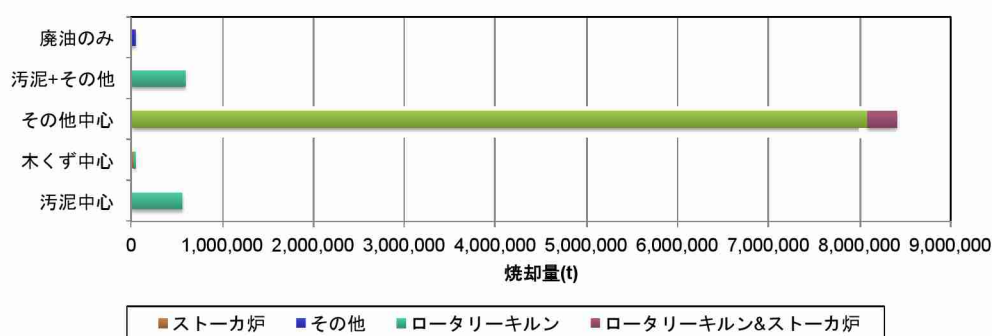


図 II-9 セメント業（業許可有）の処理廃棄物クラスター別炉別処理量

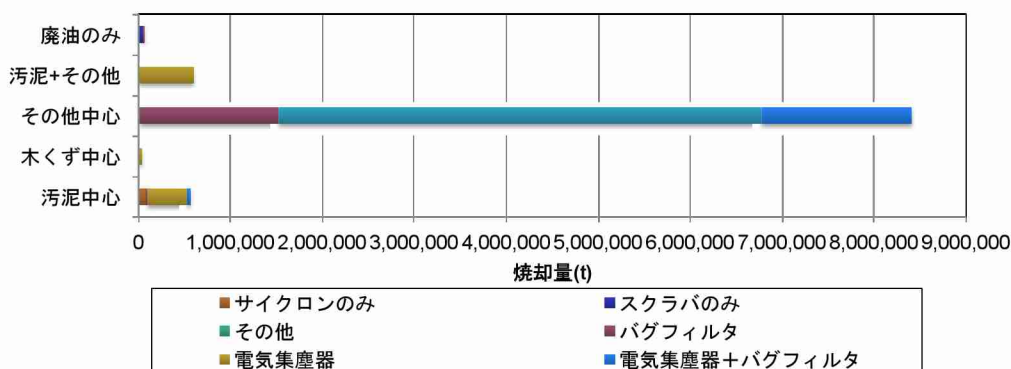


図 II-10 セメント業（業許可有）の処理廃棄物クラスター別排ガス処理形式別処理量

(c) 製紙業における施設の類型化および焼却量

図 II-11 に製紙業／業許可有についてのクラスター分析結果を示す。製紙業／業許可有の施設は、処理量の割合の多寡で2つに分類されるものの、9割以上の施設が汚泥を主な処理廃棄物とする施設として分類され、処理廃棄物の観点からは大部分の焼却施設が同様の特徴を持っていることがわかった。炉形式は処理廃棄物の施設類型によらず流動床炉やストーカ炉が多く（図 II-12）、排ガス処理方式はほぼ汚泥のみを処理している施設では電気集じん器設置施設による処理割合が多いが、汚泥が多め（すなわち他の廃棄物も一定程度処理している）施設では大部分がバグフィルター設置施設による処理であった（図 II-13）。

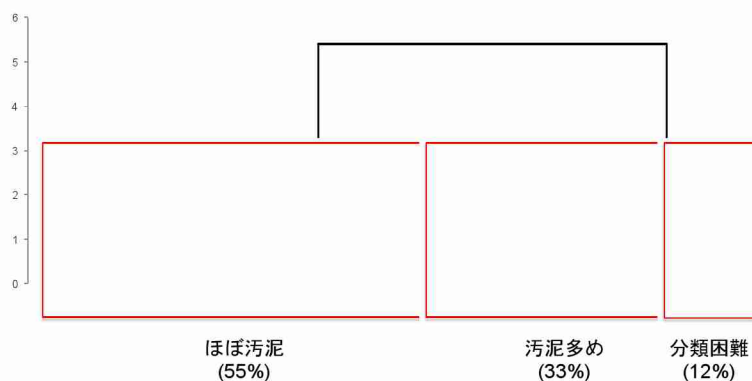


図 II-11 製紙業（業許可あり）における処理廃棄物組成によるクラスター分析結果（33 施設）

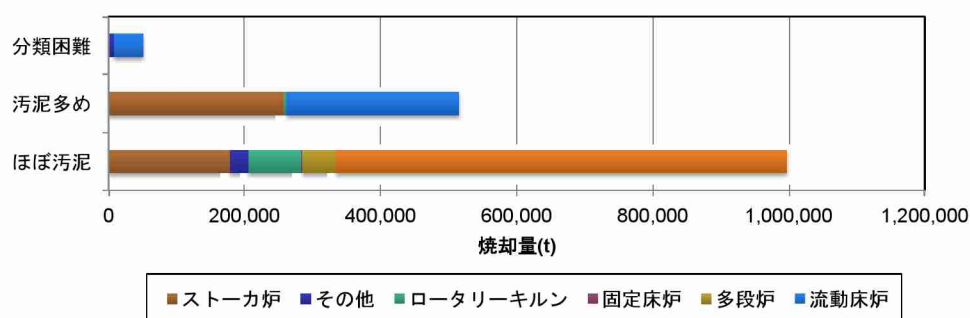


図 II-12 製紙業（許可あり）の処理廃棄物クラスター別炉別処理量

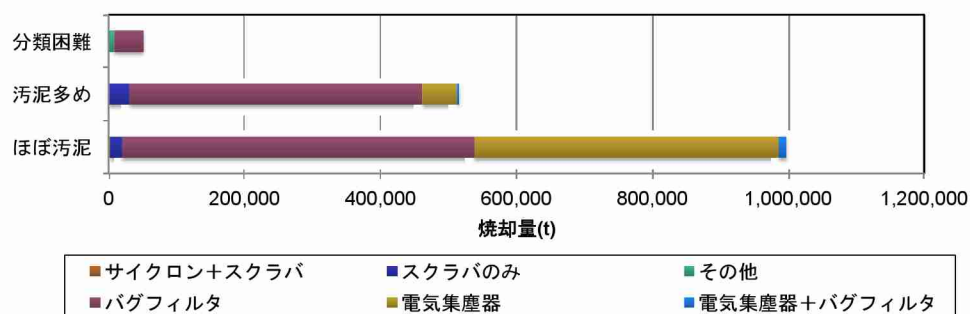


図 II-13 製紙業（許可あり）の処理廃棄物クラスター別排ガス処理形式別処理量

一方、製紙業／業許可無（自己処理のみ）についても、図 II-14 に示すように、汚泥を中心的もしくは多く処理している施設が 9 割を占めた。ただし、業許可を持たない施設では業許可を持つ施設と比べてほぼ汚泥のみを処理している施設の割合が大きいことがわかった。この結果は、製紙業／業許可無では完全に自己処理のみを行っている施設のみであることを反映しているものと考えられる。

炉形式については許可有の施設よりも流動床炉の割合が高い傾向が見られた（図 II-15）。排ガス処理形式については許可有の施設よりもバグフィルター設置施設による処理割合がやや大きく、また、サイクロンやスクラバーのみの排ガス処理を行っている施設による処理も一定割合見られたが（図 II-16）、これらも自己処理のみであるために業許可を持つ施設との違いがあるものと考えられる。

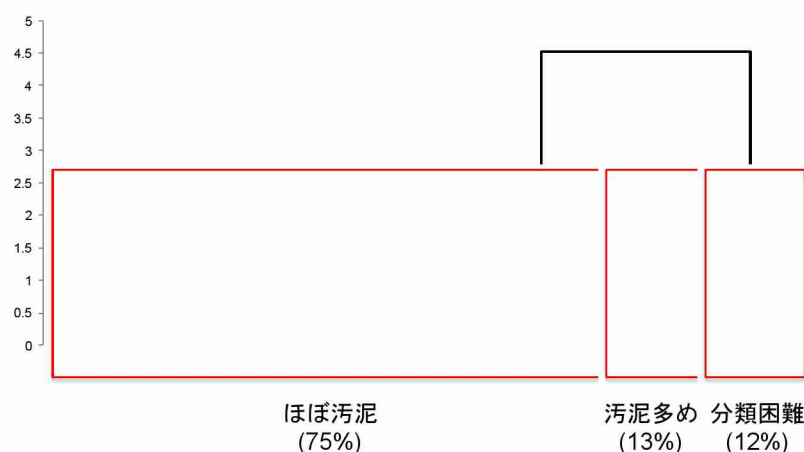


図 II-14 製紙業（業許可なし）における処理廃棄物組成によるクラスター分析結果（29 施設）

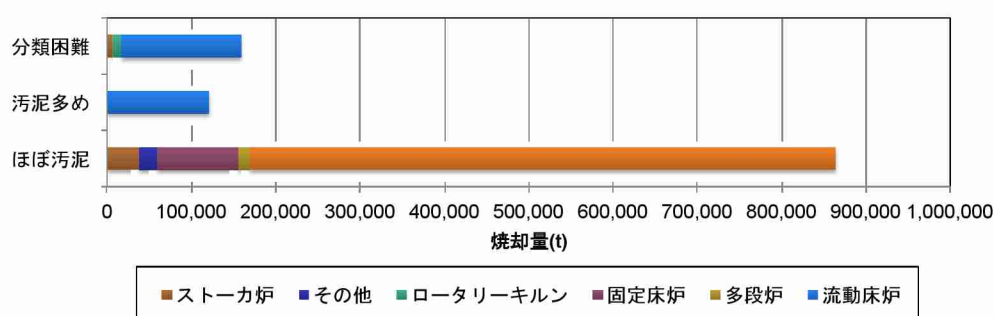


図 II-15 製紙業（許可なし）の処理廃棄物クラスター別炉別処理量

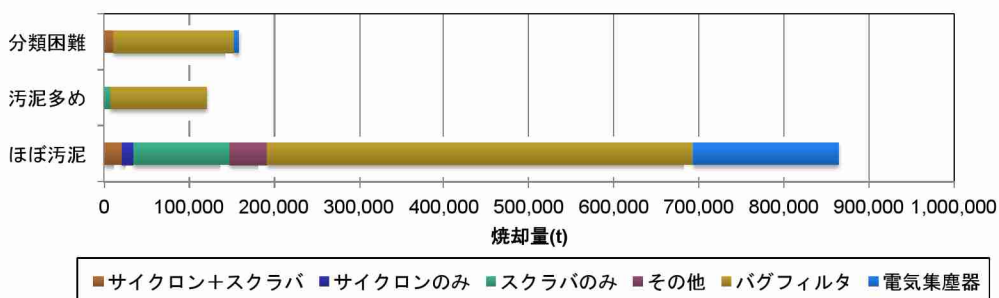


図 II-16 製紙業（許可なし）の処理廃棄物クラスター別排ガス処理形式別処理量

(4) その他製造業等における施設の類型化および焼却量

図 II-17 にその他製造業等／業許可有についてのクラスター分析結果を示す。同業区分においても、主要な処理廃棄物によって施設を7つのクラスターに分類できた。各クラスターの主な処理廃棄物は①汚泥、②多種類混合、③廃プラスチック、④感染性廃棄物、⑤木くず、⑥廃油、⑦その他と、産業廃棄物処理業における施設の類型と類似することがわかった。ただし、処理量は①汚泥、③廃プラスチック、⑦その他を主な処理廃棄物とする施設類型に偏っていた。

図 II-18、図 II-19 に主な処理廃棄物による施設類型ごとに炉形式および排ガス処理形式別の焼却処理量を整理した結果を示す。特に炉形式については、産業廃棄物処理業の場合と比較して、その他の形式および廃液蒸発炉、流動床炉が明らかに多い傾向を示していた。これは金属製錬業者など本業で使用している炉において廃棄物の焼却も行っている施設や自社あるいはグループ企業の性状が固定的な特定の廃棄物を処理している施設が多いためであると考えられた。特に廃プラスチックを主な処理廃棄物とする施設には金属製錬業者と思われる施設が多く、炭素源としての廃プラスチック利用を行っているものと考えられた。この点は後述するその他製造業等／業許可無の施設と異なる特徴を持っている。また、その他（の廃棄物）を主な処理廃棄物とする施設では複数の廃棄物を処理していると考えられるが、その内訳に関する詳細な情報はなく実態は不明である。化学物質排出量の推計にこの業区分を含める場合には、それらの施設の寄与の大きさを勘案し、必要に応じて処理廃棄物の詳細な内訳を把握すべきである。

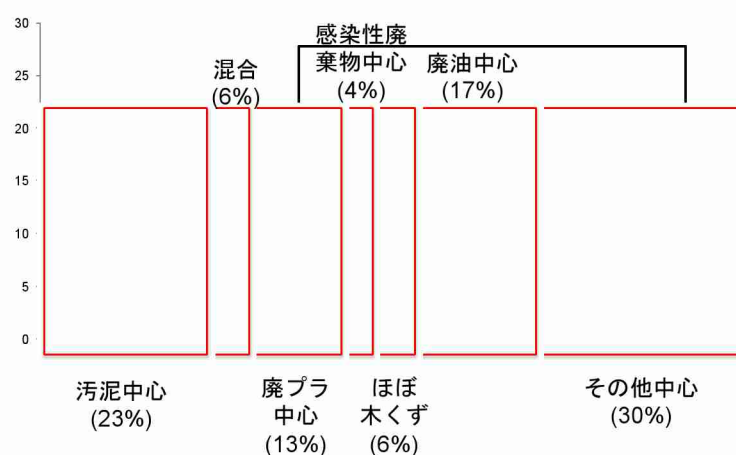


図 II-17 その他（業許可あり）における処理廃棄物組成によるクラスター分析結果（69 施設）

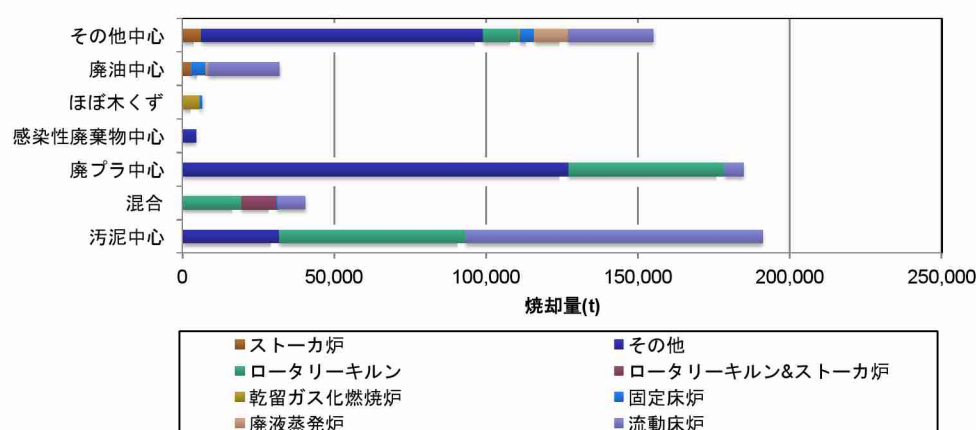


図 II-18 その他区分（業許可あり）の処理廃棄物クラスター別炉別処理量

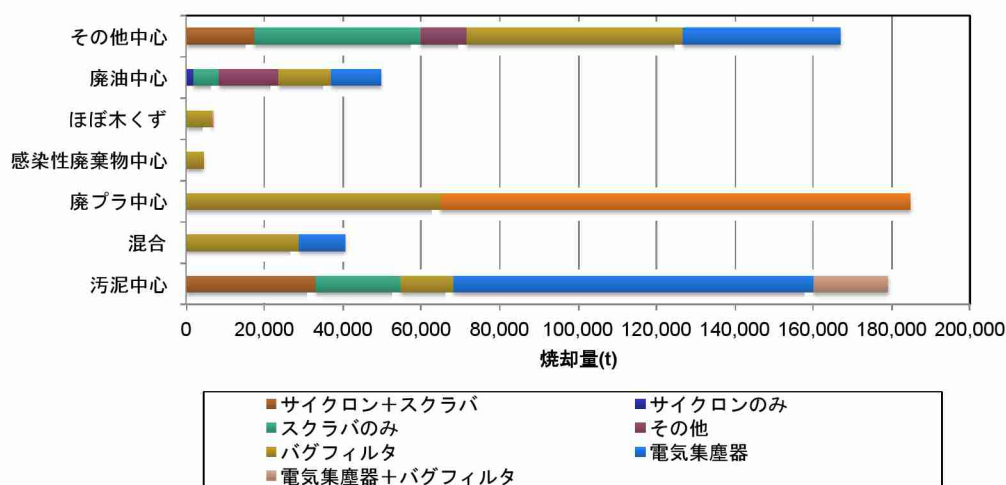


図 II-19 その他区分（業許可あり）の処理廃棄物クラスター別排ガス処理形式別処理量

一方、その他製造業等／業許可無（自己処理のみ）については、図 II-20 に示すように、主要な処理廃棄物によって施設を6つのクラスターに分類できた。各クラスターの主な処理廃棄物は①廃プラスチック、②木くず、③汚泥、④廃油、⑤その他、⑥下水汚泥または感染性廃棄物であった。処理量では③汚泥および⑤その他を主な処理廃棄物とする施設の処理割合が大きく、②木くずを主な処理廃棄物とする施設も一定の処理量があった。なお、⑤その他の類型についての詳細な内訳は同様に不明である。

炉形式についてはその他形式の炉および流動床炉による処理割合が大きい（図 II-21）。その他（の廃棄物）を主な処理廃棄物とする施設では炉形式が多様であり、処理廃棄物に合わせた焼却炉が用いられていると推察される。また、排ガス処理形式については主な処理廃棄物による施設類型で異なり、その他中心では多様であったが、汚泥中心とほぼ木くずではバグフィルターが多かった（図 II-22）。

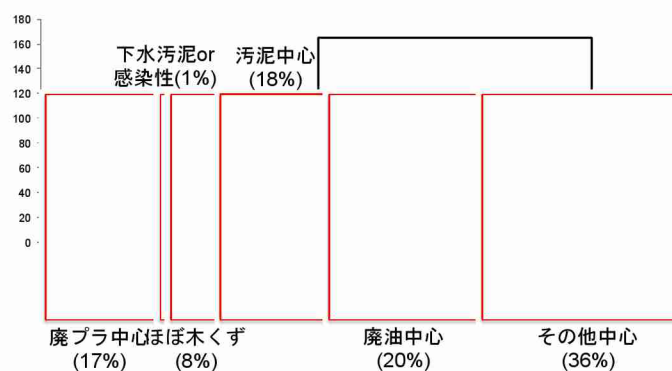


図 II-20 その他（業許可なし）における処理廃棄物組成によるクラスター分析結果（320 施設）

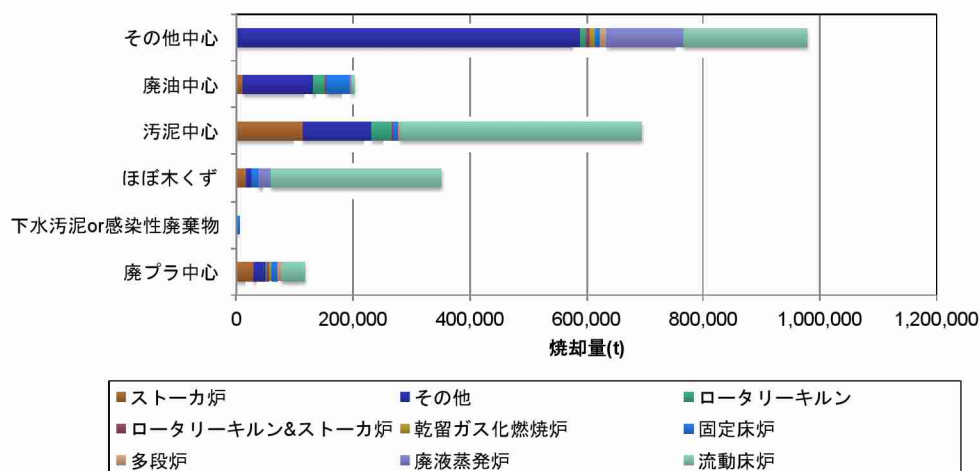


図 II-21 その他区分（業許可なし）の処理廃棄物クラスター別炉別処理量

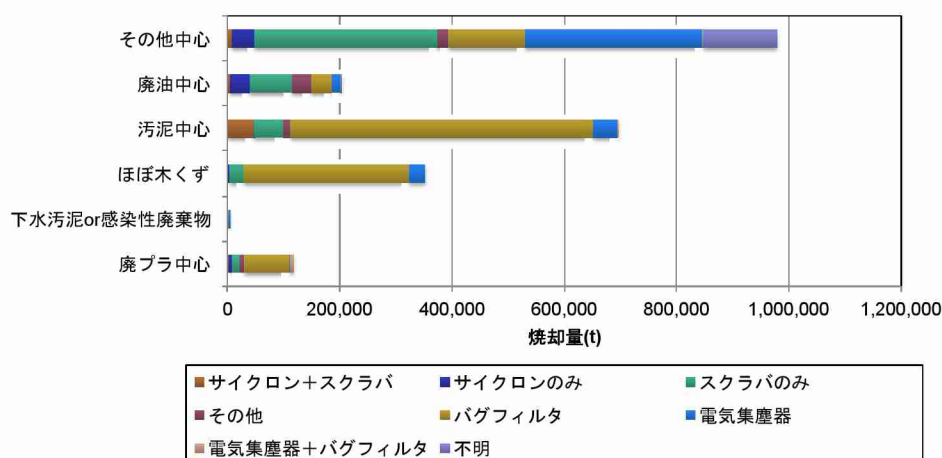


図 II-22 その他区分（業許可なし）の処理廃棄物クラスター別排ガス処理形式別処理量

(2) 維持管理情報を活用した詳細な産業廃棄物焼却処理量データの作成と施設類型化

関東・近畿・北海道の三地域について維持管理情報の収集整理に基づいて作成したより詳細な廃棄物焼却処理量データの結果について述べる。

三地域全体では、セメント業を除く業区分における許可業者数296に対し、維持管理情報とDXNs調査データとマッチングできた業者数は236（80%）であった。マッチングできなかった多くの事業者は名称から小規模事業者と判断され、ウェブサイト等がなく、処理量以外の情報も公開していなかったことから、処理実績がほとんど無い施設と推測された。

処理量データの検証として、三地域で維持管理情報から集計した産業廃棄物の合計焼却処理量とDXNs調査データによる焼却処理量を比較した。三地域における施設の維持管理情報に基づく焼却処理量（2014年度）は、非特別管理産業廃棄物222万トン、特別管理産業廃棄物33.4万トンの計256万トンであり、同地域のDXNs調査データ（2013年度）による焼却処理量289万トンの88%に相当した。年度および情報源が異なっているが、この比較結果から、三地域の施設における焼却処理量の大部分について詳細な廃棄物分類での焼却処理量を把握可能なデータベースを作成できたと考えられた。また、2013年度のDXNs調査データによれば、全国の産業廃棄物処理業による焼却処理量（セメント業を除く）は1,177万トンであり、維持管理情報によるデータベ

ースを作成した三地域の占める割合は25%であった。したがって、全国処理量の4分の1程度について施設ごとに詳細な廃棄物分類での焼却処理量および組成を把握できたことになる。

三地域全体での産業廃棄物処理業の焼却処理廃棄物の詳細な内訳を図 II-23 に示す。三地域合計の処理量では廃プラスチック (31%)、汚泥 (14%)、特別管理産業廃棄物 (13%)、廃油 (8%)、木くず (8%)、廃アルカリ (6%) の順に処理量が大きかった。地域および年度によってこの組成が変わらないとすれば、平成 25 年度の DXNs 調査データで処理量全体の 35%を占めていた「その他」の内訳としては、廃アルカリ、混合廃棄物、特別管理産業廃棄物が多いと考えられた。また、特別管理産業廃棄物については半分程度が感染性廃棄物で、次いで燃えやすい廃油、pH2 以下の廃酸、pH12.5 以上の廃アルカリなどが多いことがわかった。

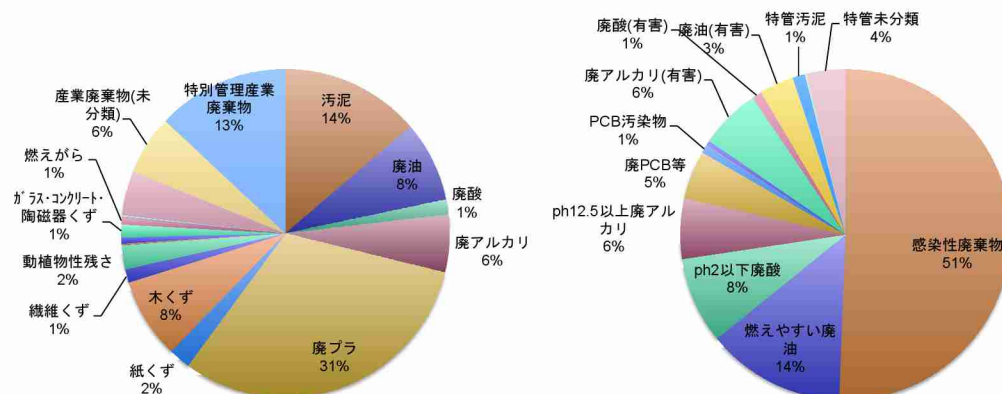


図 II-23 関東・近畿・北海道地域の維持管理情報に基づく産業廃棄物処理業の処理廃棄物組成
(左：全体、右：特別管理産業廃棄物)

一方、その他製造業等／業許可有、セメント業／業許可有の施設について同様に作成した処理廃棄物組成を図 II-24 に示す。DXNs 調査データで「その他」とされていた廃棄物の内訳は、廃アルカリ、廃酸、特別管理産業廃棄物が多くを占めると考えられた。また、特別管理産業廃棄物については廃アルカリと有害廃酸が主であった。ただし、全国を対象とした DXNs 調査データでは廃プラスチックが3分の1程度を占めていたのに対し、三地域の維持管理情報によるデータを集計した結果では廃プラスチックの割合が1%と小さく、地域的な偏りがあることがうかがえるので注意が必要である。また、セメント業について DXNs 調査データでは処理量の66%が「その他（の廃棄物）」であったが、作成した詳細データからそれらの内訳は主にばいじん、鉱さい、燃えがらであると考えられた。

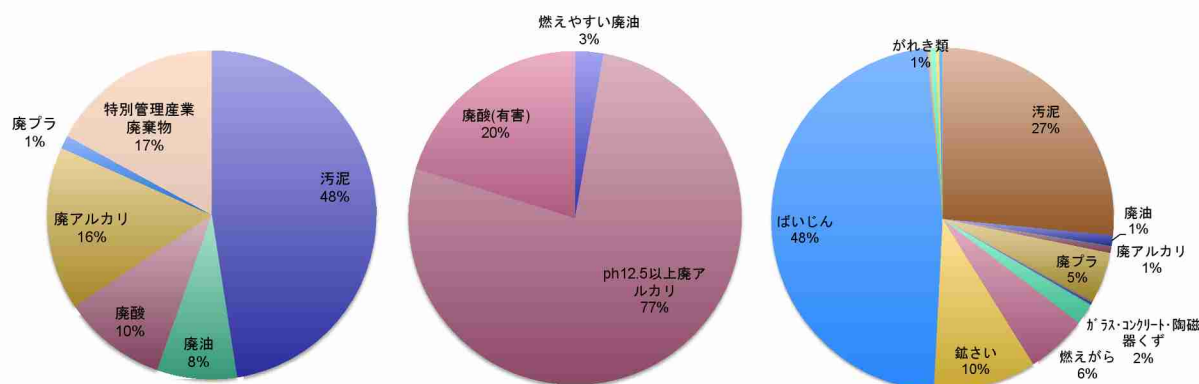


図 II-24 3地域の維持管理情報に基づく廃棄物処理組成
(左：その他許可あり全体、中：その他許可あり特別管理産業廃棄物、右：セメント業許可あり全体)

以上の結果より、DXNs 調査データによるクラスター分析結果で「その他（の廃棄物）」を主な処理廃棄物とする施設類型については、特に廃酸、廃アルカリ（非特別管理産業廃棄物としてのものと特別管理産業廃棄物としてのものの両方）などの処理有無について考慮が必要である可能性が示された。この点については、後述の排出量推計においてケーススタディとしての検討結果を示す。

4-2 廃棄物および含有物質のマテリアルフロー推計

4-2-1 行政情報に基づく産業廃棄物の処理処分フローの推計

多量排出事業者報告および下水道統計のデータから推計した平成 25 年度の全国の多量排出事業者の事業場および下水処理施設（以下、「多量排出事業場等」という）における産業廃棄物の排出量は 2.60 億トンであり、平成 25 年度における全国の産業廃棄物排出量（3.85 億トン、環境省平成 27 年度産業廃棄物排出・処理状況調査報告書）に対するカバー率は 68%となった（表 II-6）。また、全国の産業廃棄物量のうち、実態調査ではなく原単位法（家畜種別飼養頭羽数×家畜種別ふん尿発生原単位）により推計されている動物のふん尿を除いた場合、カバー率は 85%となる。なお、下水道統計を用いた場合、多量排出事業者報告のみを用いた場合よりもカバー率は排出量で 10%程度、減量化量および最終処分量で 20%程度向上しており、下水道統計の活用によってデータは大きく精緻化できることもわかった。排出業種別に多量排出事業場等と産業廃棄物全体の産業廃棄物排出量を比較すると表 II-7 のようになり、特に排出量の多い電気・ガス・熱供給・水道業、製造業、サービス業、建設業などにおいては高いカバー率が得られた。

多量排出事業場等から排出された産業廃棄物の自己処理・委託処理を区別した処理処分フローの推計結果を図 II-25 に示す。平成 25 年度の多量排出事業場からの産業廃棄物の排出量 2.60 億トンのうち、焼却量は全体で 1227 万トン（うち自己処理が 700 万トン、委託処理が 527 万トン）であった。なお、ここでの焼却量にはセメント業の施設における焼却量は含めていない。前述の DXNs 調査データに基づく焼却処理量の値は、セメント業における焼却量（964 万トン、うち委託処理 962 万トン、自己処理 2 万トン）を差し引くと 1176 万トン（うち委託処理 671 万トン、自己処理 505 万トン）であり、さらに DXNs 調査データの下水汚泥焼却量のカバー率（25%程度）と多量排出事業場等の全国排出量に対するカバー率を考えると 2 つの推計値はよく一致していると考えられる。

表 II-6 多量排出事業場等と産業廃棄物全体の産業廃棄物排出量の比較

(千 t/年 平成25年度実績)				
	排出量	減量化量	再生利用量	最終処分量
(A)多量排出事業場からの産業廃棄物 (うち動物のふん尿を除く)	260,488 (256,089)	160,124 (159,059)	89,273 (85,940)	11,091 (11,090)
(B)全国の産業廃棄物 (うち動物のふん尿を除く)	384,642 (302,016)	167,510 (163,578)	205,411 (126,760)	11,721 (11,678)
カバー率 (A)/(B)+100 (うち動物のふん尿を除く)	68% (85%)	96% (97%)	43% (68%)	95% (95%)

表 II-7 多量排出事業場等と産業廃棄物全体の産業廃棄物排出量の業種別の比較

	事業場数	多量排出事業場等 平成25年度実績)			全国の産業廃棄物排出量推計値(平成25年度実績)	(A)/(B)
		計 (A)	産業廃棄物 排出量(t)	特別管理産業 廃棄物	(B)	
農業、林業	1,209	4,326,396	4,326,394	1	82,963,067	5%
漁業	0	0	0	0	8,926	0%
鉱業、採石業、砂利採取業	58	2,340,242	2,339,300	942	8,784,853	27%
建設業	7,542	48,474,339	48,435,689	38,649	80,347,687	60%
製造業	4,971	98,799,899	96,213,197	2,586,703	109,470,075	90%
電気・ガス・熱供給・水道業	3,023	104,955,013	104,890,143	64,870	97,936,494	107%
情報通信業	58	159,096	157,318	1,777	313,352	51%
運輸業、郵便業	35	168,206	166,507	1,699	691,328	24%
卸売業、小売業	49	95,038	94,891	147	1,434,491	7%
金融業、保険業	2	33,072	33,072	0	-	-
不動産業、物品賃貸業	9	22,569	22,567	2	114,378	20%
学術研究、専門・技術サービス業	28	12,216	0	12,216	116,482	10%
宿泊業、飲食サービス業	0	0	0	0	455,287	0%
生活関連サービス業、娯楽業	13	50,017	49,990	26	188,607	27%
教育、学習支援業	22	14,880	9,249	5,631	94,156	16%
医療、福祉	1,102	193,744	6,609	187,135	514,777	38%
複合サービス事業	0	0	0	0	50,858	0%
サービス業 他に分類されないもの	100	802,890	771,260	31,630	1,029,536	78%
公務 他に分類されるものを除く	3	2,227	2,227	0	127,516	2%
分類不能の産業	12	38,076	33,582	4,494	-	-
計	18,236	260,487,919	257,551,996	2,935,923	379,136,960	69%
動物のふん尿を除く	17,027	256,089,326	253,153,404	2,935,923	296,173,893	86%

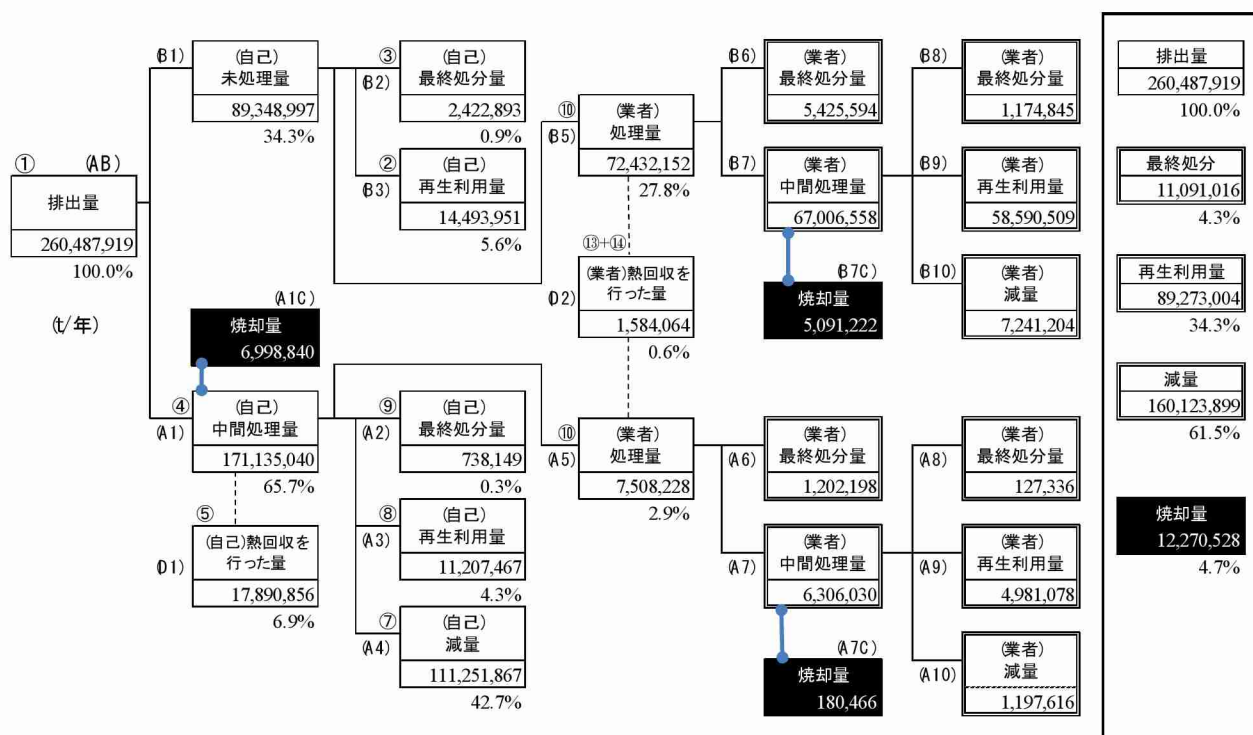


図 II-25 多量排出事業場等データからの産業廃棄物処理・処分フローの推計結果

なお、図 II-25 は全業種・全廃棄物種合計の処理処分フローを示しているが、作成したデータベースは排出業種別・廃棄物種類別のフローを出力できるものとなっている。委託処理による焼却処理量を排出業種別・廃棄物種類別に出力したものを表 II-8 に示す。

表 II-8 産業廃棄物処理業者における業種別・種類別の焼却量

(千t)

	全種類	燃え殻	汚泥	廃油	廃酸	廃プラスチック類	紙くず	木くず	繊維くず	動植物性残さ	ゴムくず	金属くず	ガラス陶磁器	鋳さい	がれき類	動物のふん尿	動物の死体	ばいじん	感染性廃棄物	その他
全業種(計)	5,272	142	1,206	523	447	306	49	296	18	120	0	6	29	340	29	65	1	489	185	1,023
農業、林業	69	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	64	1	0	0	1
漁業	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
鉱業、採石業、砂利採取業	20	0	19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
建設業	1,143	2	222	17	0	111	38	273	15	0	0	2	9	14	26	0	0	0	0	413
製造業(食品)	158	0	33	32	4	18	2	1	0	59	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9
製造業(飲料・飼料)	126	0	16	0	39	2	2	1	0	56	0	0	0	0	0	0	0	0	0	11
製造業(繊維)	62	10	4	1	1	2	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	43	0	0
製造業(木材)	17	0	7	7	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
製造業(家具)	2	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
製造業(パルプ・紙)	635	25	428	2	0	19	4	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	149	0	7
製造業(印刷)	20	0	5	2	2	7	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
製造業(窯業・土石)	167	83	2	6	20	3	0	0	0	0	0	0	2	0	2	0	0	1	0	48
製造業(鉄鋼業)	659	0	264	78	35	10	0	1	0	0	0	0	4	143	1	0	0	97	0	25
製造業(化学)	496	11	46	143	55	23	1	1	1	2	0	0	1	0	0	0	0	12	1	199
製造業(石油・石炭)	79	1	8	15	30	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	4	0	18
製造業(プラスチック)	76	1	5	13	9	33	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	14
製造業(ゴム)	17	1	1	3	0	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1
製造業(皮革)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
製造業(非鉄金属)	86	0	16	6	20	4	0	0	0	0	0	0	0	15	0	0	0	2	0	21
製造業(金属)	197	0	4	76	43	5	0	2	0	0	0	0	1	50	0	0	0	0	0	16
製造業(はん用機器)	24	0	1	10	2	2	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	6
製造業(生産用機器)	19	0	0	5	3	1	0	0	0	0	0	0	0	5	0	0	0	0	0	4
製造業(業務用機器)	11	0	0	3	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4
製造業(電子部品)	225	0	16	26	86	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	90
製造業(電気機器)	105	0	6	13	28	6	0	1	0	0	0	1	8	0	0	0	0	0	0	42
製造業(情報通信機器)	2	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
製造業(輸送用機器)	213	1	7	45	8	19	0	2	0	0	0	1	0	102	0	0	0	2	0	26
製造業(その他)	122	2	5	7	44	12	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	16	0	32
電気・ガス・熱供給・水道業(下水道以外)	198	1	14	3	0	2	0	2	0	0	0	1	1	6	0	0	0	158	0	10
下水道業	64	0	64	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
情報通信業	9	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7
運輸業、郵便業	5	0	3	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
卸売業、小売業	9	0	0	0	3	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5
金融業、保険業	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
不動産業、物品賃貸業	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
学術研究、専門・技術サービス業	6	0	0	4	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
宿泊業、飲食サービス業	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
生活関連サービス業、娯楽業	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
教育、学習支援業	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	0
医療、福祉	183	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	179	1
複合サービス事業	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
サービス業	35	1	7	0	11	4	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8
公務	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
分類不能の産業	7	0	3	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

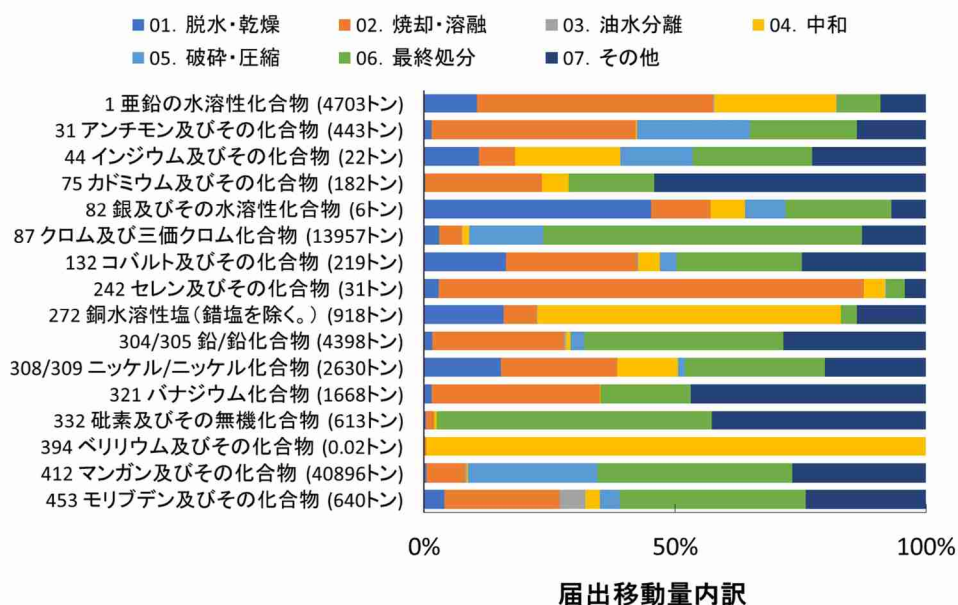
また、多量排出事業場等から発生した産業廃棄物の焼却量について、廃棄物種類別に委託処理の割合を求めた結果を表 II-9 に示す。全種類合計では委託処理の割合が 43%となっているが、委託処理の割合は廃棄物の種類によって明らかに差があり、汚泥（特定有害汚泥を除く）は特に委託処理の割合が小さいことがわかった。また、廃油（特定有害廃油を含む）、廃プラスチック類、紙くず、動植物性残さについては一定割合（数十%）が自己処理されているが、その他の廃棄物については大部分を委託処理が占めていることがわかった。

表 II-9 多量排出事業場等から発生した産業廃棄物の焼却量

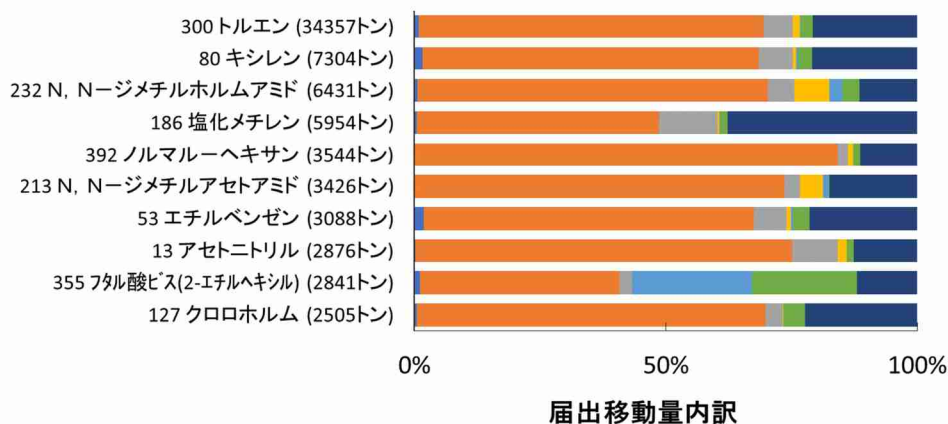
産業廃棄物の種類	排出事業場での 焼却量 (t)	産業廃棄物処理業者 での焼却量 (t)	焼却量全体に対する産業廃棄物処理業者 での焼却率 (%)
うち特定有害			
全種類 (計)	6,998,840	5,271,688	43
特定有害	23,061	227,933	91
燃え殻	0	142,374	100
特定有害	0	4,623	100
汚泥	6,194,529	1,205,548	16
特定有害	1,656	32,647	95
廃油	222,189	523,019	70
特定有害	21,405	26,269	55
廃酸	62,655	446,924	88
特定有害	0	15,696	100
廃アルカリ	41,525	482,066	92
特定有害	0	14,101	100
廃プラスチック類	233,938	305,913	57
紙くず	79,357	48,617	38
木くず	48,745	296,240	86
繊維くず	1,536	17,716	92
動植物性残さ	86,676	119,865	58
ゴムくず	0	48	100
金属くず	0	5,721	100
ガラス陶磁器くず	117	28,572	100
鉱さい	0	226,778	100
特定有害	0	2,088	100
がれき類	0	28,810	100
動物のふん尿	6,270	64,577	91
動物の死体	0	845	100
ばいじん	0	489,317	100
特定有害	0	115,442	100
感染性廃棄物	0	185,322	100
動物系固形不要物	924	2,569	74
その他	20,380	650,845	97
特定有害	0	17,067	100

4-2-2 PRTR 届出移動量データに基づく廃棄物処理への化学物質流入フローの解析

図 II-26 に、金属およびその化合物（16 物質）および有機化合物（届出移動量上位 10 物質）の移動先での処理方法別の PRTR 届出移動量を示す。処理方法については、金属類は全体的に焼却・溶融、破碎・圧縮、最終処分への移動が多いことがわかる。ただし、水溶性物質（亜鉛の水溶性化合物、銅水溶性塩）は中和への移動も目立つ。一方、有機化合物はいずれの物質も焼却・溶融への移動が大きな割合を占めていることがわかる。塩化ビニル樹脂の可塑剤として使用されるフタル酸ビス（2-エチルヘキシル）（DEHP）については、25%程度が破碎・圧縮に移動している。これは廃プラスチックの破碎・圧縮ではないかと考えられる。なお、金属類、有機化合物ともにその他の処理への移動も一定割合の割合を占めているが、PRTR 届出データからはその詳細は不明である。再生利用等を多く含んでいる可能性があり、再生利用等による動脈産業への化学物質の流入・混入の可能性を把握するため、その詳細についての把握も必要である。



(a) 金属及びその化合物 (16 物質)



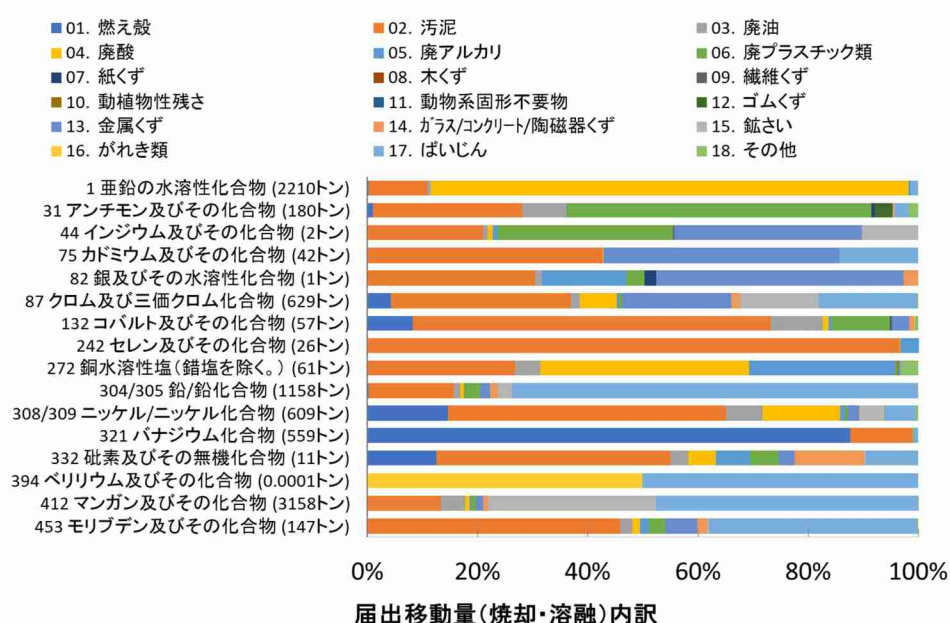
(b) 有機化合物 (届出移動量上位 10 物質)

図 II-26 PRTR 届出移動量 (廃棄) の移動先での処理方法内訳 (カッコ内は届出移動量の合計)

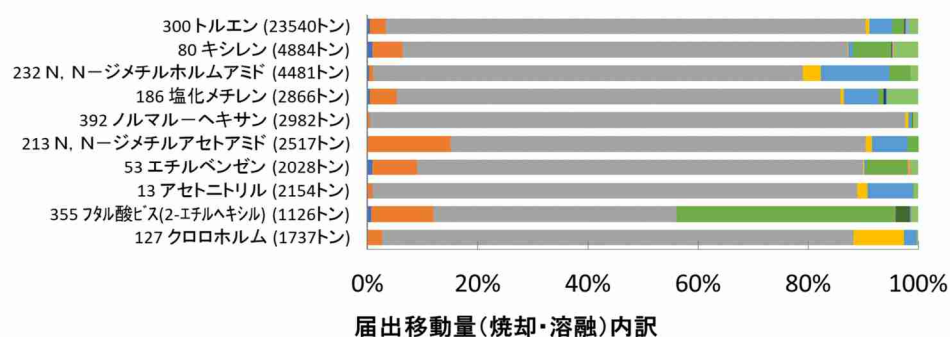
次に、同じ物質について、本研究での排出量推計の対象としている焼却処理（焼却・溶融）への届出移動量を対象に、廃棄物種類別の内訳を整理したものを図 II-27 に示す。金属類については、汚泥、廃酸、廃アルカリに含まれて焼却・溶融へ移動する割合が大きいことがわかる。また、アンチモン、インジウムについては廃プラスチックに含まれて焼却・溶融へ移動するものも一定の割合を占めている。この結果より、焼却処理における金属類の排出量推計においては、汚泥、廃酸、廃アルカリ、および一部の金属類については廃プラスチックの焼却処理状況を考慮することが必要であると考えられる。また、それぞれについてさらにその排出業種（PRTR 制度における届出業種（主たる業種））の内訳を見てみると、金属類によって主要な排出業種は例えば汚泥の場合、鉄鋼業、非鉄金属製造業、金属製品製造業、電気機械器具製造業、輸送用機械器具製造業、化学工業などとなっており、より精緻な排出量推計を行うためには排出業種までを考慮することが必要である可能性がある。

なお、届出移動量データからは、燃えがら、金属くず、鉱さい、ばいじんに含まれて焼却・溶融へ移動するものも大きな割合を占めている場合がある。これらの詳細は届出データからは知ることができないが、いわゆる産業廃棄物の焼却処理でこれらの廃棄物種が焼却処理されることは考えにくいことから、再生利用や無害化の前処理としての焙焼等の熱処理工程へ移動しているか、複数の廃棄物の種類が選択されている届出データの均等按分に起因するものか、いずれかが原因として考えられる。総移動量に占める割合は無視できない大きさであるため、この詳細を把握することは重要な課題であると考えられる。

一方、有機化合物については、フタル酸ビス（2-エチルヘキシル）は届出移動量（焼却・溶融）の40%程度が廃プラスチックに含まれての移動であることを除き、届出移動量（焼却・溶融）の大部分が廃油に含まれて移動するものであり、その排出業種は多くの物質で化学工業が主要であることがわかった。フタル酸ビス（2-エチルヘキシル）は塩化ビニル樹脂の可塑剤として使用されているため、廃プラスチックに含まれて焼却・溶融に移動するものはこれに由来するものと考えられる。



(a) 金属及びその化合物 (16 物質)



(b) 有機化合物 (届出移動量上位 10 物質)

図 II-27 PRTR 届出移動量（廃棄／焼却・溶融）の廃棄物の種類内訳（カッコ内は届出移動量の合計）

以上のように、焼却処理への化学物質流入においては、物質ごとに着目すべき主要な廃棄物の種類があることがわかる。このことは、4-1 節で検討した主要な処理廃棄物による施設類型を考慮した排出量推計の有効性を裏付けるものである。ただし、方法の節で述べたように、複数の処理方法が選択されている届出データも存在しており、その内訳は届出データからは不明であるため、本研究で示した整理は現実のフローを適切に反映できていない可能性がある。PRTR 届出データを今後より有効に活用していくためには、処理方法や廃棄物種類の内訳を含めるなど、移動量の届出項目の詳細化などの制度の改善が必要である。特に、焼却処理への移動量を例とすれば、移動量に占める割合の大きさからみて、廃棄物の種類は汚泥、廃酸、廃アルカリ、廃プラスチック、廃油が選択されている届出データ、排出業種（届出業種）は例えば汚泥に関しては鉄鋼業、非鉄金属製造業、金属製品製造業、電気機械器具製造業、輸送用機械器具製造業、化学工業、廃油に関しては化学工業からの届出データの実態を把握することが必要であると考えられる。

次に、多量排出事業者報告と PRTR 届出移動量データ（いずれも平成 25 年度）における事業所および廃棄物種類のマッチング結果を表 II-10 に示す。事業所については、PRTR 届出事業所約 36,500 件のうち全ての物質で届出移動量（廃棄）がゼロであった事業所を除く約 10,000 件について見ると、約 3,360 件が多量排出事業者報告で報告のある事業所にマッチングした（事業所マッチング率 34%）。マッチングした事業所の届出移動量を集計すると、届出移動量ベースでも全国合計（ダイオキシン類を除く）の 3 割程度をカバーしており、件数ベースとほぼ同じカバー率であった。PRTR 届出事業所数をベースとしたマッチング率が 34%であることから、マッチングしなかった事業所は多量排出事業場に該当しない事業所であると理解されるが、その実態については把握が必要である。

また、両者がマッチングできた事業所について廃棄物種類のマッチング結果を見ると、PRTR 届出移動量データで届出された廃棄物の種類が多量排出事業者報告の委託処理量において報告されている廃棄物の種類にマッチングした率は、マッチング件数が 10 件以下の廃棄物種類を除けば 22%～ 89%（件数ベース）であった。特に本研究の他の検討から焼却処理からの化学物質排出量の推計において注目すべきと考えられた汚泥、廃油、廃酸、廃アルカリ、廃プラスチックについては 67%～ 89%と高かった。なお、排出業種別に見た廃棄物種類のマッチング結果は表 II-11 に示すとおりである。廃棄物の種類がマッチングしなかったレコードについては、同一事業所内での自己処理、多量排出事業者報告データにおける廃棄物種類のコード化の誤りや未報告等が原因である可能性が考えられる。

表 II-10 PRTR 届出移動量データと多量排出事業者報告データにおける事業所と廃棄物の種類のマッチング
件数

	PRTR届 出事業 場数	多量報 告事業 場数	マッ チン グ事 業場数	PRTR個別届出報告別 第1種化学物質の移動廃棄物種類と多量報告等の委託種類とのマッチング状況 ()内は、PRTRデータで報告された移動した廃棄物種類が、多量報告等の委託種類で存在しなかったもの																	(件数)	
				燃え殻	汚泥	廃油	廃酸	廃アル カリ	廃プラ	紙くず	木く ず	繊維く ず	動植 物性 残さ	ゴムく ず	金属くず	ガラス 陶	鉱さい	がれき 類	ばいじん	その他種 類		
マッチン件数	36,528	18,236	3,359	123 (79)	313 (153)	549 (66)	266 (41)	143 (27)	92 (46)	3 (6)	2	3	2	6	10 (24)	29 (15)	77 (17)	2 (1)	67 (129)	22 (76)		
件数ベースのマッチング率				61%	67%	89%	87%	84%	67%	38%	100%				29%	66%	82%	67%	34%	22%		

表 II-11 PRTR 届出移動量データと多量排出事業者報告データにおける事業所と廃棄物の種類のマッチング件数（排出業種別）

PRTR個別届出報告別 第1種化学物質の移動廃棄物種類と多量報告等の委託種類とのマッチング状況 (○)内は、PRTRデータで報告された移動した廃棄物種類が、多量報告等の委託種類で存在しなかったもの																					(件数)	
	PRTR届出事業場数	多量報告事業場数	マッチング事業場数	PRTR個別届出報告別 第1種化学物質の移動廃棄物種類と多量報告等の委託種類とのマッチング状況 (件数)																		
				燃え殻	汚泥	廃油	廃酸	廃アルカリ	廃プラ	紙くず	木くず	繊維くず	動植物性残さ	ゴムくず	金属くず	ガラス陶磁器	鉱さい	がれき類	ばいじん	その他種類		
計	36,528	18,236	3,359	123 (79)	313 (153)	549 (66)	266 (41)	143 (27)	92 (46)	3 (6)	2	3	2	5	10 (24)	29 (15)	77 (17)	2 (0)	67 (129)	22 (76)		
農業、林業		1,209	2																			
漁業、水産養殖業																						
鉱業、採石業、砂利採取業	38	58	3																			
建設業		7,542	43																			
食料品製造業	476	599	107	17 (6)	7 (0)	2			0									2 (3)		(1)		
飲料・たばこ・飼料製造業	143	175	31	5 (0)	2 (0)				1	1	1		0		0	1		1 (2)				
繊維工業	206	55	29	4 (2)	4 (5)	1 (2)	1	1	6									1 (0)		(2)		
木材・木製品製造業	210	40	10	2 (3)		2 (0)		1	1									0	2			
家具・装飾品製造業	93	11	3	1		0	3		2													
パルプ・紙・紙加工品製造業	457	193	66	22 (5)	5 (2)	11			2	1	0							9 (8)		(3)		
印刷・同関連業	340	74	28		2 (0)	17 (3)	4			1	0									1 (5)		
化学工業	2,396	811	368	15 (8)	82 (38)	263 (20)	39 (14)	45 (10)	15 (12)	0			0	3 (2)	1 (0)	2		2 (10)	2 (24)			
石油製品・石炭製品製造業	654	50	16	1	4	1 (0)		2							1			2 (0)	2			
プラスチック製品製造業	1,122	135	65	3 (0)	3 (5)	40 (2)	5 (2)	2	19 (4)					1				2 (3)	1 (2)			
ゴム製品製造業	326	47	14	1	2 (0)	6 (0)			7 (2)				0	0					1 (2)			
なめし革・皮革製品製造業	23	3	2			2							0							(1)		
窯業・土石製品製造業	591	969	91	3 (2)	15 (6)	14 (1)	8 (0)	3 (1)	4 (3)	0				0	13 (10)	4 (0)		7 (0)	1 (1)			
鉄鋼業	397	283	137	1 (0)	18 (11)	6 (6)	7 (3)	2 (1)	1					0	2	42 (4)	1	23 (4)				
非鉄金属製造業	572	152	66	4	16 (4)	5 (2)	11	7	2 (0)			0		0	1	9 (4)		3 (4)		(1)		
金属製品製造業	1,868	314	162	1 (4)	53 (33)	25 (11)	84 (7)	27 (7)	5 (4)					1 (2)		4 (3)		1 (3)		(14)		
製造業機械器具等統合	1,082	405	173	0	12 (8)	20	10 (0)	3 (1)	4 (2)					1 (2)	1	2		0	1 (1)			
電気機械器具製造業	1,390	177	66	0	30 (16)	61 (5)	71 (9)	39 (3)	8 (11)					1 (5)	8 (2)				1 (9)			
輸送用機械器具製造業	1,224	334	132	2 (6)	37 (11)	45 (6)	23 (0)	11 (3)	9 (4)			0		2	2 (4)		14 (4)	1 (3)	5 (5)			
その他の製造業	102	142	29			2																
電気業	257	194	27	1	1 (0)				1							1 (0)		1	2 (1)			
ガス業	32	4																				
熱供給業	12	8	3																			
上水道業		272																				
工業用水道業		22																				
下水道業	2,050	2,523	1,585	29 (10)	15 (6)												0		61	(2)		
情報通信業		58	1																			
運輸業、郵便業	182	35	3			2																
卸売業、小売業	16,960	49	4		0														1			
金融業、保険業		2																				
不動産業、物品賃貸業		9																				
学術研究、専門・技術サービス業	339	28	9			8	1		0													
宿泊業、飲食サービス業																						
生活関連サービス業、娯楽業	166	13	8		4 (0)				4 (0)													
教育、学習支援業	136	22	6	1 (2)		8 (1)	0											1 (0)	1			
医療、福祉	129	1,102	20	0		5 (3)	1 (2)			0									0	1		
複合サービス事業																						
サービス業	213	100	4				1															
廃棄物処理業（一般）	1,856		4	1 (0)															0	(1)		
廃棄物処理業（産業）	486		39	9 (22)	1				0	1	0	1	0	0	1	0		0	11 (18)			
公務		3												0	1	0						
不明		14	3																			

マッチングしたレコードについて、PRTR 届出移動量データにおいて単一の廃棄物の種類が選択されており、多量排出事業者報告データにおいて報告されている廃棄物の種類と 1 対 1 の関係で対応した件数を表 II-12 に示す。表に示した件数は事業所・物質ごとにレコードを数えた件数である。全体では 3200 件程度のレコードについて廃棄物の種類が 1 対 1 で対応し、廃棄物の種類別には汚泥、廃油、廃酸、廃アルカリ、廃プラ、鉱さいなどについて多くのレコードが対応した。なお、物質別の対応件数は表 II-13 に示すとおりである。

表 II-12 PRTR 届出移動量データと多量排出事業者報告データの廃棄物の種類が 1 対 1 で対応した件数

第一種指定化学物質	計	燃え殻	汚泥	廃油	廃酸	廃アルカリ	廃プラ	紙くず	金属くず	ガラス陶磁器	鉱さい	がれき類	ばいじん	その他	(件数)	
計	3,158	35	454	1,891	275	145	130	1	12	31	141	1	0	42		

表 II-13 PRTR 届出移動量データと多量排出事業者報告データの廃棄物の種類が 1 対 1 で対応した件数 (物質別、件数が 10 件以上のものを掲載)

第一種指定化学物質	計	燃え殻	汚泥	廃油	廃酸	廃アルカリ	廃プラ	紙くず	金属くず	ガラス陶磁器	鉱さい	がれき類	ばいじん	件数
														その他
計	3,158	35	454	1,891	275	145	130	1	12	31	141	1	0	42
トルエン	311		7	291		1	9		1	1				1
キシレン	200		4	182	1	3	8							2
エチルベンゼン	125		2	114		1	7							1
マンガン及びその化合物	98		25	4	2	5	1		2	1	57			1
ノルマル- ヘキサン	95		1	92	1									1
N, N- ジメチルホルムアミド	85		2	73	2	6	1			1				
ニッケル化合物	83		40	3	33	1	1		1		4			
クロム及び三価クロム化合物	80		35	3	9					1	31			1
鉛化合物	71		23	7	31	1	5			2	2			
アセトニトリル	67		1	65		1								
ほう素化合物	67	1	31	10	7	2	2		1	7	5			1
塩化メチレン	64		1	63										
ダイオキシン類	59	33	16	6		2				1				1
ホルムアルデヒド	56		3	23	10	15	2			1	2			
ふっ化水素及びその水溶性塩	54		9	1	41	1				1	1			
1, 2, 4- トリメチルベンゼン	49			45			1				1			2
亜鉛の水溶性化合物	45		20	4	20	1								
クロロホルム	43		1	41										1
フェノール	42		5	26	1	2	5	1		1	1			
トリエチルアミン	40		3	28	1	7			1					
1, 3, 5- トリメチルベンゼン	38			37										1
ポリ (オキシエチレン) = アルキルエーテル アルキル基の炭素数が 12 から 15 までの もの及びその混合物	37		12	17	1	3	1			1	1			1
ニッケル	36		17	2	5				2		10			
2- アミノエタノール	35		2	18	1	14								
銅水溶性塩 錯塩を除く)	33		6		23	4								
六価クロム化合物	32		7	4	21									
スチレン	32		2	26		1	3							
アンチモン及びその化合物	31		8	4			9			2	7			1
塩化第二鉄	30		1		29									
モリブデン及びその化合物	29		10	4	2		1			2	10			
N, N- ジメチルアセトアミド	27		1	23		3								
無機シアン化合物 錯塩及びシアン酸塩を 除く)	26		4			22								
フタル酸ビス (2- エチルヘキシル)	25		3	12			10							
ピリジン	20			20										
メタクリル酸メチル	20			18			1							1
クロロベンゼン	19			19										
ナフタレン	19	1	1	15	1		1							
メチレンビス (4, 1- フェニレン) = ジイソシ アネート	19			18			1							
コバルト及びその化合物	18		12	1	1	1					3			
クレゾール	17			15	1	1								
1, 4- ジオキサン	17		1	13	1	2								
2, 6- ジ- ターシャリ- プチル- 4- クレ ゾール	17		2	14			1							
ポリ (オキシエチレン) = ノニルフェニルエー テル	17		3	7	1	5				1				
アクリル酸ノルマル- プチル	16		1	14										1
エチレングリコールモノメチルエーテル	16			15			1							
ペルオキシ二硫酸の水溶性塩	16		4	1	9	1								1
エピクロロヒドリン	15		1	13		1								
N, N- ジシクロヘキシルアミン	15		2	13										
バナジウム化合物	15		11	3			1							
フタル酸ジ- ノルマル- プチル	15		1	10			3			1				
アクリル酸及びその水溶性塩	14		2	8	2		1							1
アクリロニトリル	14		4	9										1
直鎖アルキルベンゼンスルホン酸及びそ の塩 アルキル基の炭素数が 10 から 14 ま でのもの及びその混合物	14		3	8	1	1								1
有機スズ化合物	14		7	3			3				1			
エチレングリコールモノエチルエーテル	13			11			1							1
トリクロロエチレン	13			13										
鉛	13		10		2		1							
メタクリル酸	13		1	11										1
酢酸ビニル	12			10			2							
砒素及びその無機化合物	12		7			1				2	1			1
ビスフェノール A	11		1	6	1		3							
エチレンジアミン	11		1	5		5								
カドミウム及びその化合物	11		4	3	4									
1, 2- ジクロロエタン	11		1	10										
ベンゼン	11			10	1									
メチルナフタレン	11			9	1						1			
エチレングリコールモノエチルエーテルアセ テート	10			8		1	1							
トリレンジイソシアネート	10			10										
無水フタル酸	10			8	1				1					

廃棄物の種類が 1 対 1 で対応したレコードを用い、PRTR 届出移動量データと多量排出事業者報告の委託廃棄物量データから物質別・廃棄物種類別に単位委託廃棄物量あたりの届出移動量を計算した。本報告書では図 II-28 に Zn、Cr、Cu、Pb、Ni、Mn の結果を例として示す。

結果を示した多くの金属類について、汚泥の単位委託廃棄物量あたり届出移動量は大きなばらつきが見られた。汚泥については排出業種等によってその性状が大きく異なり、金属類の含有量も大きく異なることが原因の1つであると考えられる。ただし、汚泥は他の廃棄物種類と比較して、排出事業所（排出業種）によっては高濃度で金属類を含む可能性が示唆され、排出量推計において注意すべき廃棄物であることが示唆される。このことは、前述のPRTR届出移動量データの集計解析結果や後述する焼却残さの分析データに基づく焼却廃棄物の含有量推定値の傾向から得られる示唆と整合している。また、Zn、Cr、Cuについては廃酸において値のばらつきが見られ、排出事業所（排出業種）によっては廃酸もこれらの金属類を高濃度で含む場合があることが示唆された。

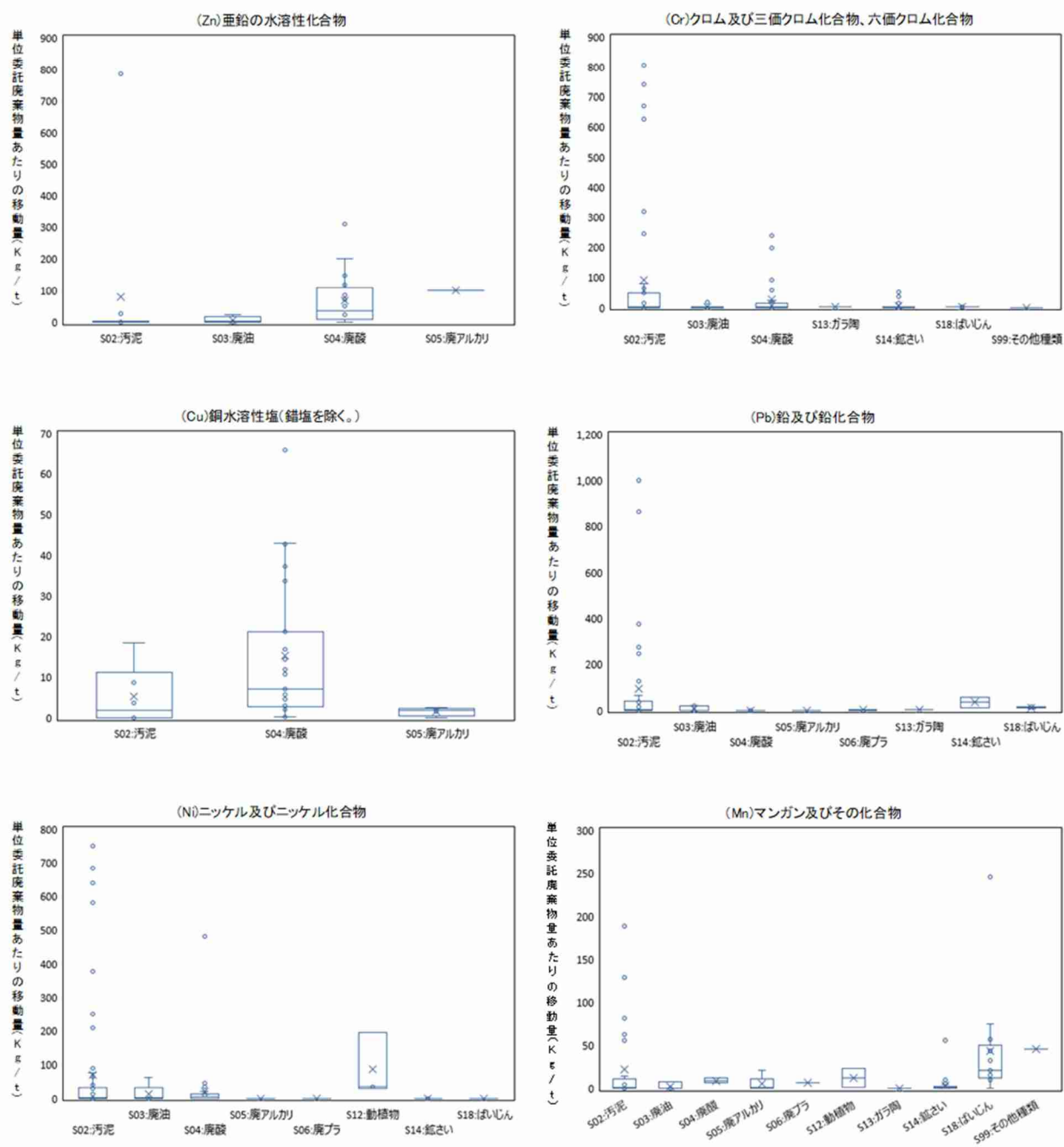


図 II-28 廃棄物種類別の単位委託廃棄物量あたり PRTR 届出移動量の例

汚泥についてはさらに排出業種ごとに単位委託廃棄物量あたりの移動量を整理した。結果を図 II-29 に示す。排出業種別に見ても未だばらつきが大きいものもあり、業種や金属類によってはデータ数が不足するものもあるが、いずれの金属類についても排出業種によって単位委託廃棄物量あたりの届出移動量が大きく異なる様子が見られる。金属類によっても異なるが、全体的には化学工業、各種機器製造業、金属製品製造業などにおいて汚泥の単位委託廃棄物量あたりの届出移動量が大きい傾向が見られた。金属類別には Zn は化学工業と輸送機器製造業、Cr は化学工業、金属製品製造業、一般機器等製造業、電気機器製造業の 4 業種、Cu は金属製品製造業、Pb は一般機器等製造業と輸送機器製造業、Ni は化学工業、金属製品製造業、電気機器製造業、輸送機器製造業、Mn は化学工業、窯業、鉄鋼業、非鉄金属製造業の 4 業種において汚泥の単位委託廃棄物量あたりの届出移動量が大きい傾向が見られた。排出量推計においてこれらの排出業種を区別して考慮できれば、より実態に近い推計ができる可能性があると考えられる。

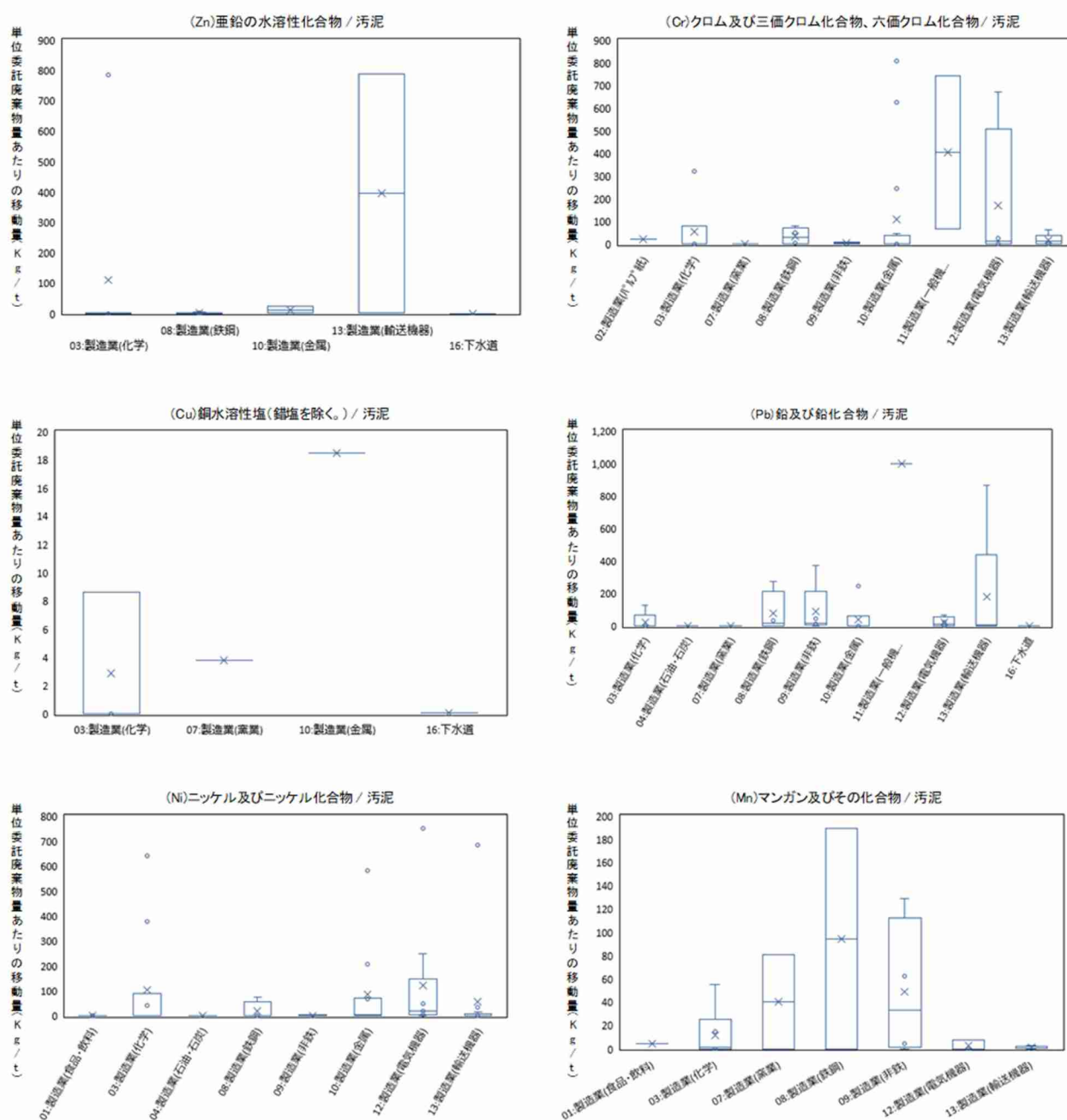


図 II-29 排出業種の汚泥の単位委託廃棄物量あたりの届出移動量

4-2-3 産業廃棄物焼却残さ試料の収集・分析と焼却廃棄物の金属類含有量の特徴解析

産業廃棄物焼却残さ試料セット（ばいじんおよび燃えがら）の金属元素含有量を箱ひげ図で整理した結果を図 II-30 に示す。図には 36 施設、約 100 試料セットのデータを示している。また、図には検出された試料のデータのみを含めており、横軸見出しに検出率（＝分析対象金属元素を検出した試料数/分析試料数）をあわせて示している。

ばいじんと燃えがらの金属元素含有量は、Cd、Pb、Se、Zn の含有量はばいじんの方が高く、Be、Co、Cr、Cu、Mn、V の含有量は燃えがらの方が高いという傾向が見られた。前者は塩化物等の沸点が比較的低く揮発しやすい、後者は金属材料や合金元素として焼却へ混入するために燃えがらに残りやすいことが要因と考えられる。また、金属元素含有量の施設間でのばらつきはばいじんの方が大きい傾向が見られた。

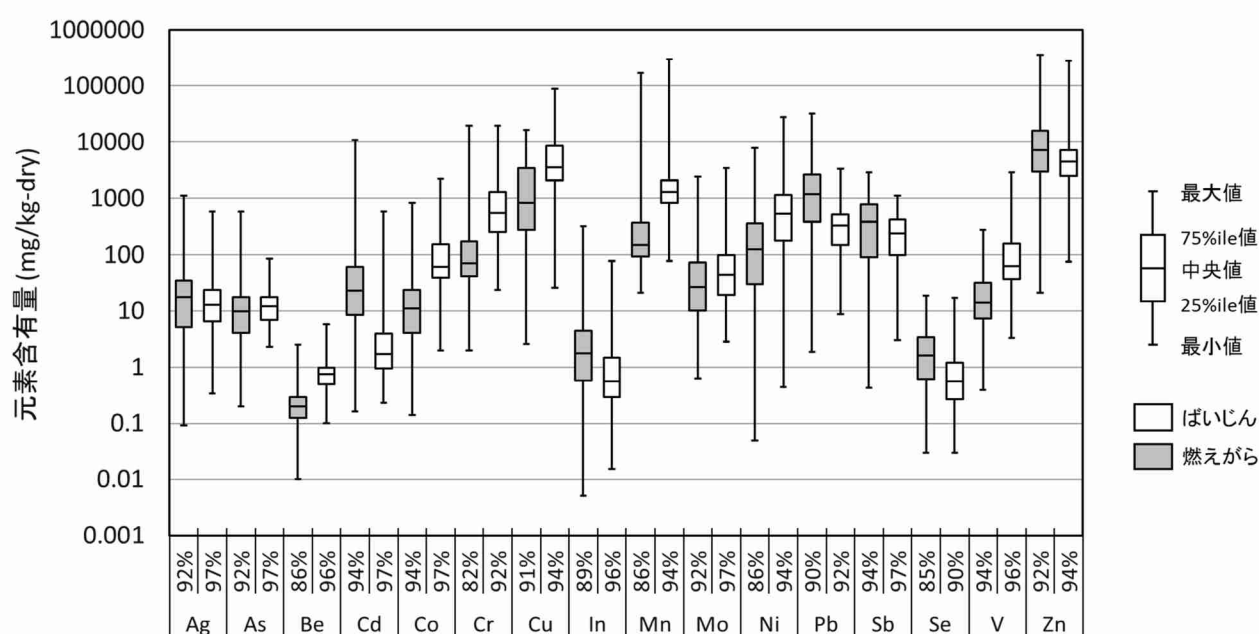


図 II-30 産業廃棄物焼却残さ試料の金属元素含有量
(36 施設/約 100 試料セット、%表記は検出試料数の割合)

次に、図 II-31 に、上記の分析結果と各施設の年間廃棄物処理量および焼却残さ発生量に基づいて(1)式より推定した各施設の焼却廃棄物の金属元素含有量を示す。採取時期の異なる複数の試料が得られた施設については試料ごとの分析結果の平均値を用いて(1)式による計算を行っており、1つの折れ線が1施設のデータを示している。施設によって焼却廃棄物の金属元素含有量レベルは3桁程度の範囲で異なるものの、一部の施設を除けば元素間の含有量の高低はパターンが類似していた。元素間の相対的な傾向としてはCu、Mn、Znの含有量が最も高いレベルにあり、次いでCr、Ni、Pb、Sbなどの元素の含有量が高かった。一方、Be、In、Seの含有量レベルは低かった。なお、試料と同時に入手した処理廃棄物データによれば、調査対象施設の焼却廃棄物内訳は類似しておらず、特定の廃棄物種に偏ってはいなかった。このことより、処理廃棄物の組合せではなく、特定の廃棄物種の処理比率、すなわち施設の主要な処理廃棄物種が含有量の高低に影響している可能性があると考えられた。

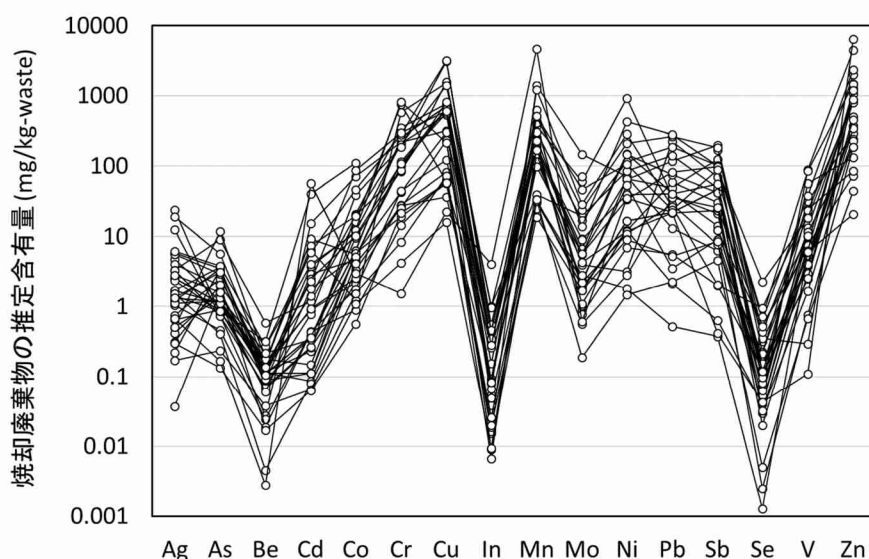


図 II-31 焼却処理される産業廃棄物の推定金属元素含有量

なお、複数時期の焼却残さ試料を入手できた施設について異なる試料採取時期の焼却廃棄物の推定金属元素含有量を比較したところ、図 II-32 に 2 施設の例を示したように、同一施設においてはごく一部の例外を除けば試料採取時期によらず焼却廃棄物中の金属元素含有量は同様の値を示した。この結果より、同一施設においては焼却廃棄物の金属元素含有量が時期によらず比較的安定している可能性が示唆され、限られた時期の採取試料でも処理廃棄物の金属含有実態は評価可能であると考えられた。

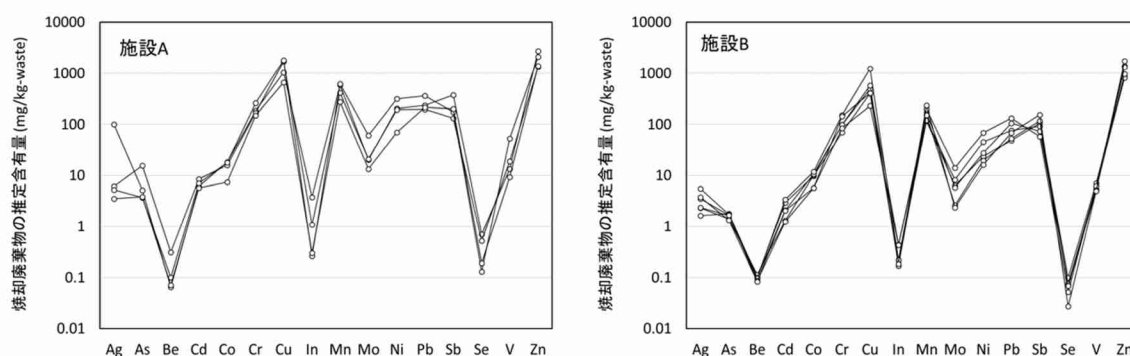


図 II-32 試料採取時期による焼却廃棄物の推定金属元素含有量の変動の例

図 II-31 に示した焼却廃棄物の推定金属元素含有量を、4-1 で作成した産業廃棄物処理業の主要な処理廃棄物による類型ごとに整理したものを図 II-33 に示す。金属元素によって傾向に若干の違いがあるが、多くの金属元素について汚泥とその他を主要な処理廃棄物とする施設タイプの廃棄物中含有量が高い傾向が見られた。また、Sb については廃プラや混合、Co、Cr、Mo、Ni、V については廃油を主要な処理廃棄物とする施設タイプの廃棄物中含有量が高い傾向も見られた。前者の Sb についてはプラスチックの難燃剤、Co 等については切削油等に含まれる金属片等が由来ではないかと考えられる。

なお、前述した PRTR 届出移動量の集計解析結果（図 II-27）では、16 の金属類全てについて汚泥や廃酸・廃アルカリ、Sb はさらに廃プラスチック類に含まれて事業所外（廃棄物処理）へ移動する割合が大きいこと、Co、Cr、Mo、Ni 等の届出移動量の一部は廃油に含まれていることが示されている。上記の傾向はこれと整合

的であり、主要な処理廃棄物による施設類型で焼却廃棄物の含有量を整理し、排出量推計に利用することは妥当であると考えられた。

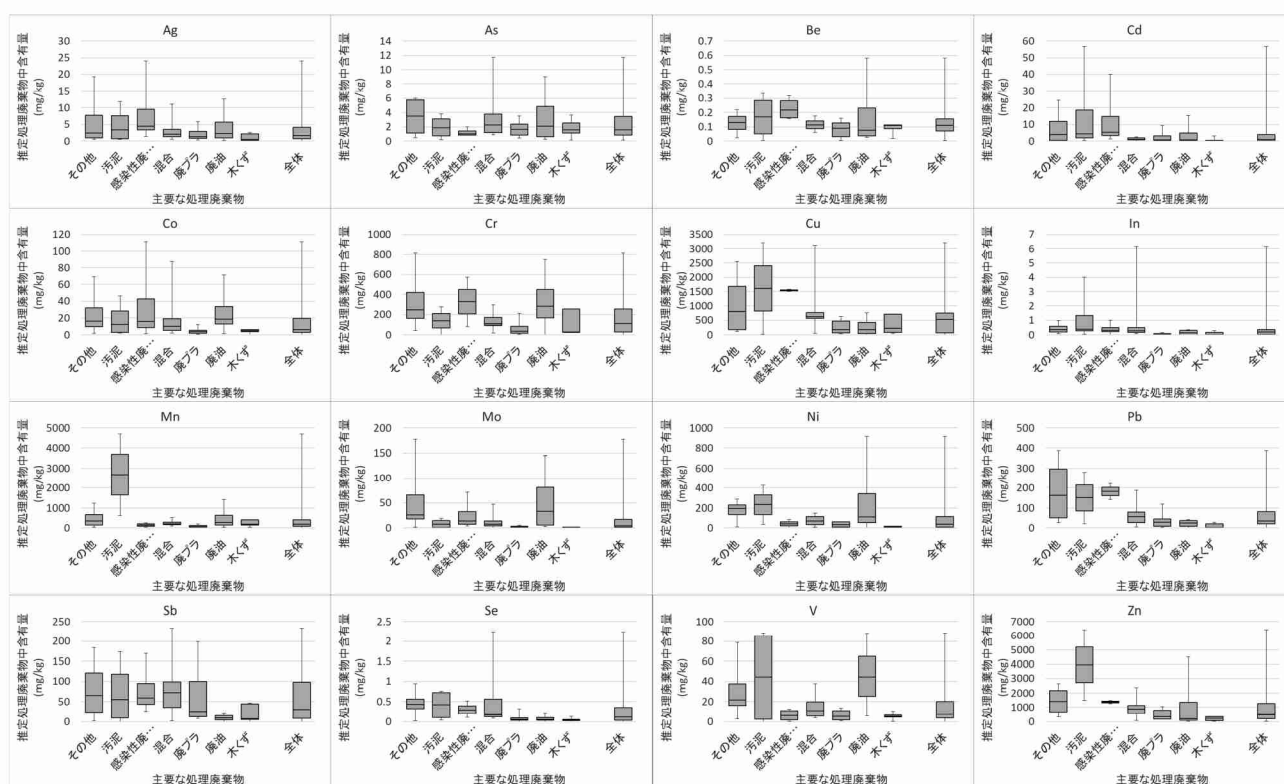


図 II-33 主要な処理廃棄物による施設類型ごとの焼却廃棄物中金属元素含有量の整理

4-3 廃棄物焼却における物質挙動・排出特性の把握

4-3-1 実験炉による化学物質の排出特性把握

実験炉を用いた燃焼実験の妥当性を確認するため、炉内温度 900℃、ガス滞留時間 2 秒、ガス雰囲気 $N_2 : O_2 = 80\% : 20\%$ 、燃焼試料量合計 185 mg に固定して燃焼実験を行った。燃焼実験排ガス中の金属類濃度を表 II-14 に示す。廃油の燃焼実験では全ての金属類の排ガス中濃度が定量下限値以下となった。これは廃油中の金属類濃度が低いことが原因と考えられる。汚泥を用いた実験では、B、Co、全 Cr、Mn、Ni、Zn が粒子態（ろ紙捕集分）として検出された。ガス態（吸収液捕集分）としては B のみが検出され、その他は定量下限値以下であった。算出可能であった粒子態とガス態の存在比は $>1.5 \sim 83$ であった。このことから、排ガス中では金属類は高い割合で粒子態として存在することが示唆された。なお、ガス態が検出された B は、大気中においてガス態での存在割合が高く、今回の実験と同様の傾向を示すことが報告されている。

B はガラス等から溶出する可能性があることから、操作ブランクを十分に低減した実験を行うため、ガス態の金属類捕集に用いた吸収瓶をガラス製のものからフッ素樹脂製のものに変更し、その影響について検討を行った。ガラス製吸収瓶では、バイアル中の濃度で B が 170 ng/mL、Ni が 4.7 ng/mL、Zn が 110 ng/mL、Pb が 1900 ng/mL 検出された。一方、フッ素樹脂製吸収瓶では、B は検出下限値以下、Ni は 1.0 ng/mL、Zn は 20 ng/mL、Pb は 0.3 ng/mL に低減され、フッ素樹脂製吸収瓶を用いることでこれらの元素をより高感度で分析できることが明らかとなった。

表 II-14 実験炉による廃棄物（廃油および汚泥）燃焼実験の排ガス中金属類濃度
(温度 900℃、滞留時間 2 秒)

	廃油			汚泥			
	粒子態	ガス態 (前)	ガス態 (後)	粒子態	ガス態 (前)	ガス態 (後)	粒子態/ガス態
	($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	(-)
Ag	<1.3	<1.3	<1.3	<1.3	<1.3	<1.3	—
As	<1.3	<1.3	<1.3	<1.3	<1.3	<1.3	—
B	<14	<14	<14	27	16	<14	1.7
Be	<0.3	<0.3	<0.3	<0.3	<0.3	<0.3	—
Cd	<0.3	<0.3	<0.3	<0.3	<0.3	<0.3	—
Co	<20	<20	<20	28	<20	<20	>1.4
Cr	<40	<15	<15	73	<15	<15	>4.9
Cu	<14	<14	<14	<14	<14	<14	—
In	—	—	—	—	—	—	—
Mn	<20	<0.3	<0.3	25	<0.3	<0.3	>83
Mo	<14	<14	<14	<14	<14	<14	—
Ni	<20	<1.6	<1.6	84	<1.6	<1.6	>53
Pb	<7.7	<7.7	<7.7	<7.7	<7.7	<7.7	—
Sb	<0.3	<0.3	<0.3	<0.3	<0.3	<0.3	—
Se	<14	<14	<14	<14	<14	<14	—
V	<1.3	<1.3	<1.3	<1.3	<1.3	<1.3	—
Zn	<20	<16	<16	24	<16	<16	>1.5

* “<” は、定量下限値以下を示す

燃焼温度の変化に伴う金属類の排出傾向を確認するため、実際の廃棄物焼却施設より採集した実汚泥の燃焼実験を、炉内温度を 800℃、900℃、950℃と変化させて 2 回ずつ実験を行い、排ガス中の粒子態およびガス態の金属類濃度の測定を行った。その他の条件については、ガス滞留時間は 4 秒、ガス雰囲気は $\text{N}_2 : \text{O}_2 = 80\% : 20\%$ 、燃焼試料量は合計 185 mg で固定した。

すべての燃焼温度の条件において、粒子態（ろ紙捕集分）の B が $0.26\text{--}0.35 \mu\text{g}/\text{m}^3$ の濃度範囲で検出された。粒子態の Zn は、950℃の場合のみ $0.14 \mu\text{g}/\text{m}^3$ の濃度で検出された。その他の条件、金属類については定量下限値以下の濃度レベルであった。実際の廃棄物焼却施設では、金属類の発生源となる廃棄物のうち、特に固形分については炉内に一定時間残留するのに対し、今回の燃焼実験では廃棄物試料が炉内で加熱される時間が数分であったため、金属類の総揮発量が少なく、燃焼排ガス中の金属類濃度が低くなったことが考えられる。

燃焼実験排ガス中の VOCs（26 物質）とアルデヒド類（2 物質）の測定結果を表 II-15 に示す。廃油の燃焼実験では芳香族であるトルエン、キシレン、エチルベンゼンのみが検出され、それぞれ 2.6 、 0.16 、 $0.38 \mu\text{g}/\text{m}^3$ であった。一方、汚泥の燃焼実験では、廃油の場合と同様にトルエン、キシレン、エチルベンゼンのみが検出され、濃度レベルもそれぞれ 1.4 、 0.25 、 $0.25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ と、廃油の場合と同程度であった。廃棄物種が異なっても検出される VOC の種類や濃度レベルが同等であったこと、また炭化水素の不完全燃焼によりトルエン、

キシレン、エチルベンゼンを副生成するとの報告があることをふまえると、これらの物質は燃焼副生成によるものである可能性が高い。

表 II-15 実験炉による廃棄物（廃油及び汚泥）燃焼実験の排ガス中の VOCs およびアルデヒド類濃度
（温度 900° C、滞留時間 2 秒）

	Concentration (µg/m³)	
	Oil	Sludge
<i>n</i> -hexane	<LOQ	<LOQ
benzene	<LOQ	<LOQ
toluene	2.6	1.4
ethylbenzene	0.38	0.25
xylene	0.16	0.25
1,2,4-trimethylbenzene	<LOQ	<LOQ
1,3,5-trimethylbenzene	<LOQ	<LOQ
chloroform	<LOQ	<LOQ
trichloroethylene	<LOQ	<LOQ
tetrachloroethylene	<LOQ	<LOQ
1,2-dichloropropane	<LOQ	<LOQ
chlorobenzene	<LOQ	<LOQ
dichlorobenzenes	<LOQ	<LOQ
1,4-dioxane	<LOQ	<LOQ
formaldehyde	<LOQ	<LOQ
acetaldehyde	<LOQ	<LOQ

4-3-2 焼却処理における物質挙動のモデル化

(1) マルチゾーン熱力学平衡計算を用いた産業廃棄物焼却施設における金属挙動のモデル化

(a) 小型ロータリーキルン炉による都市ごみ RDF 焼却への適用

実験用小型ロータリーキルン炉を用いた都市ごみ RDF 燃焼試験における元素分配挙動の実測値とマルチゾーン平衡計算プログラムによる再現計算の結果を図 II-34 に、焼却残さ等における各元素の形態を図 II-35 にそれぞれ示す。図 II-34 の元素分配率は、酸性ガス中和のための重曹を除いたものである。実測において、Si、Al、Ca、Fe は主に主灰（燃えがら）に分配し、Na、K、Cl は飛灰（ばいじん）に分配した。重金属では、Hg、Pb、Cd、As が飛灰に移行しやすい傾向がみられた。計算による元素の分配率は実測と概ね一致し、本プログラムは燃焼による元素分配挙動の推定に有効であることが分かった。ただし、Pb、Cu、Cd、Cr の計算結果は燃焼試験の結果と概ね一致したが、Zn、As に関しては計算と実測の挙動が一致しなかった。また Hg については、実測では飛灰に、計算では全て排ガスに移行するなど違いが見られたが、Hg は活性炭に吸着されると考えられるため、計算と実測の整合の評価は難しいと考えられた。

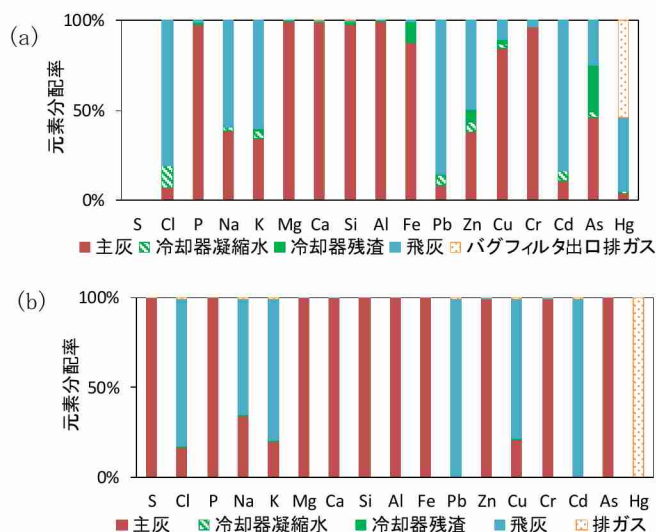
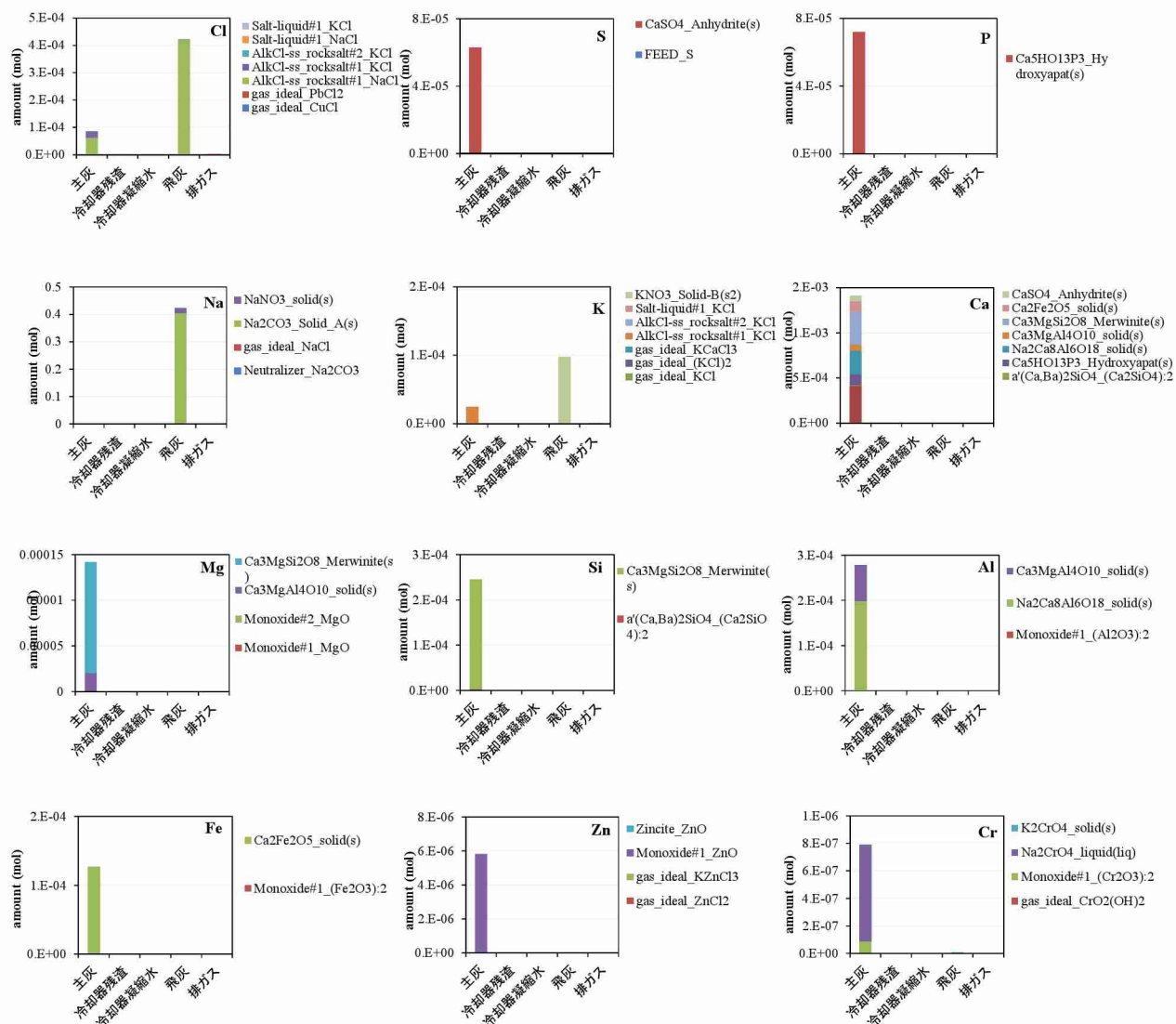


図 II-34 小型ロータリーキルン炉を用いた都市ごみ RDF の燃焼時の元素の分配挙動 (a: 実測、b: 計算)



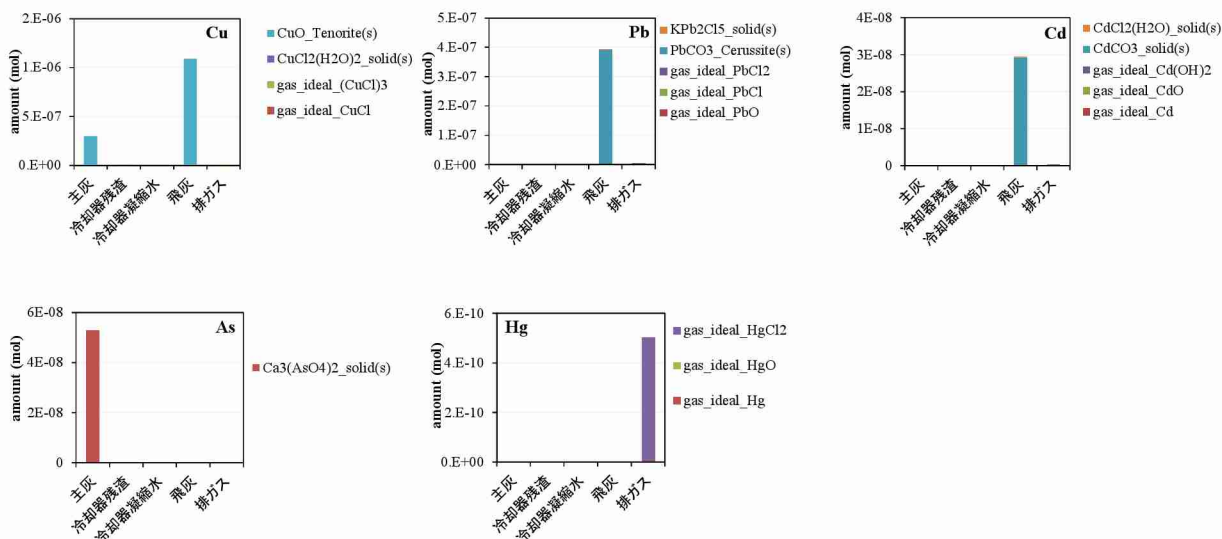


図 II-35 小型ロータリーキルン炉の都市ごみ RDF 燃焼試験残さにおける元素の化合物形態計算結果
(gas_ideal: 気体化学種、Salt_liquid: 溶融塩、Slag-liq: 酸化物溶融相、Aqueous: 水溶液の成分、それ以外は固体を表す)

(b) 産業廃棄物処理施設 A (ロータリーキルン炉＋スクラバー (洗煙) ＋湿式電気集じん器) への適用

産業廃棄物焼却施設 A における元素分配挙動の施設調査と再現計算の結果を図 II-36 に、焼却残さ等における各元素の形態を図 II-37 にそれぞれ示す。洗煙水には薬剤である水酸化ナトリウムによる成分も含まれる。施設調査では、アルカリ金属とハロゲン、Be、Se は洗煙水、Cd、In は主に飛灰 (洗煙飛灰) に分配し、P、B、Si、Al、Ca、Mg、Fe、Co、Cr、Cu、Mn、Mo、V、Zn は主に主灰に分配した。Ag、As、Pb は約半分が飛灰もしくは洗煙水に移行した。計算結果は施設調査の結果と概ね一致した。飛灰もしくは洗煙水に含まれるアルカリ金属、Ag、Be、Cd、Cu、In、Mo、Pb、Se はいずれも塩化物か酸化物の形態をしており、炉内環境において蒸気圧が高い化合物であった。計算と施設調査で違いがあるものとして、As の計算結果は実際よりも燃えがらに含まれる割合が高く、Ag、Cu、Mo の計算結果は実際よりも燃えがらへの残存率が少なかった。一方、洗煙水については Mo と Cd の計算結果は実際よりも水に溶解する割合が高かった。これらの原因として、As に関しては計算に用いた熱力学データベースに実際は生成している何らかの気体化合物のデータが含まれていなかった可能性が考えられる。燃えがらの残存率が再現されていない Ag、Cu、Mo に関しては、燃焼前の形態が、金属の塊など物理的に反応性の低い形態で含まれていた可能性などが考えられる。

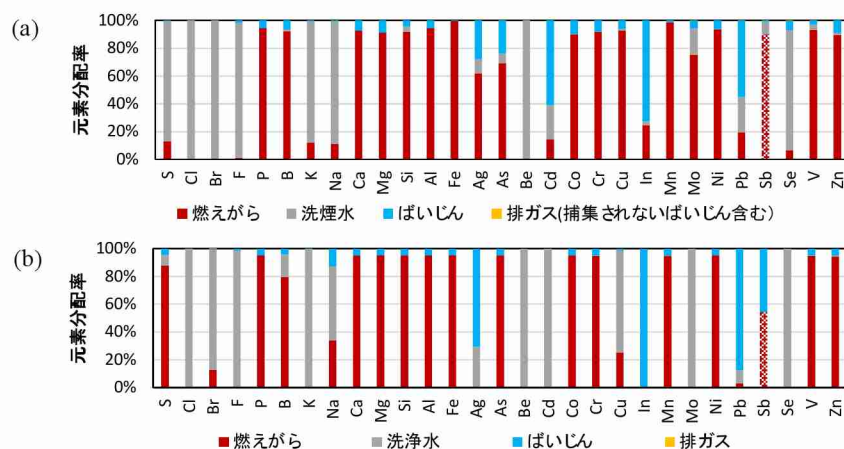
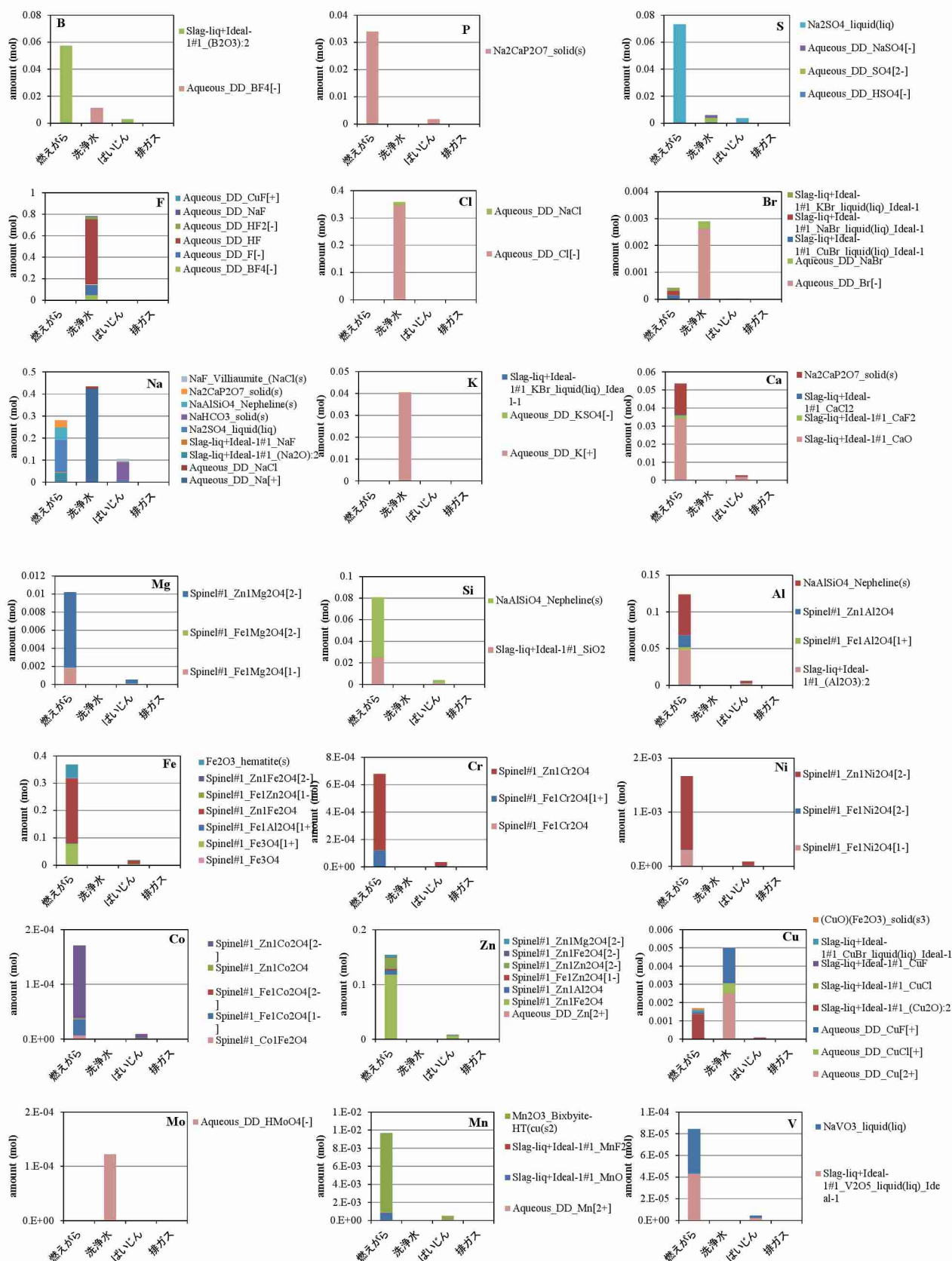


図 II-36 産業廃棄物焼却施設 A における元素の分配挙動 (a: 実測、b: マルチゾーン平衡計算)



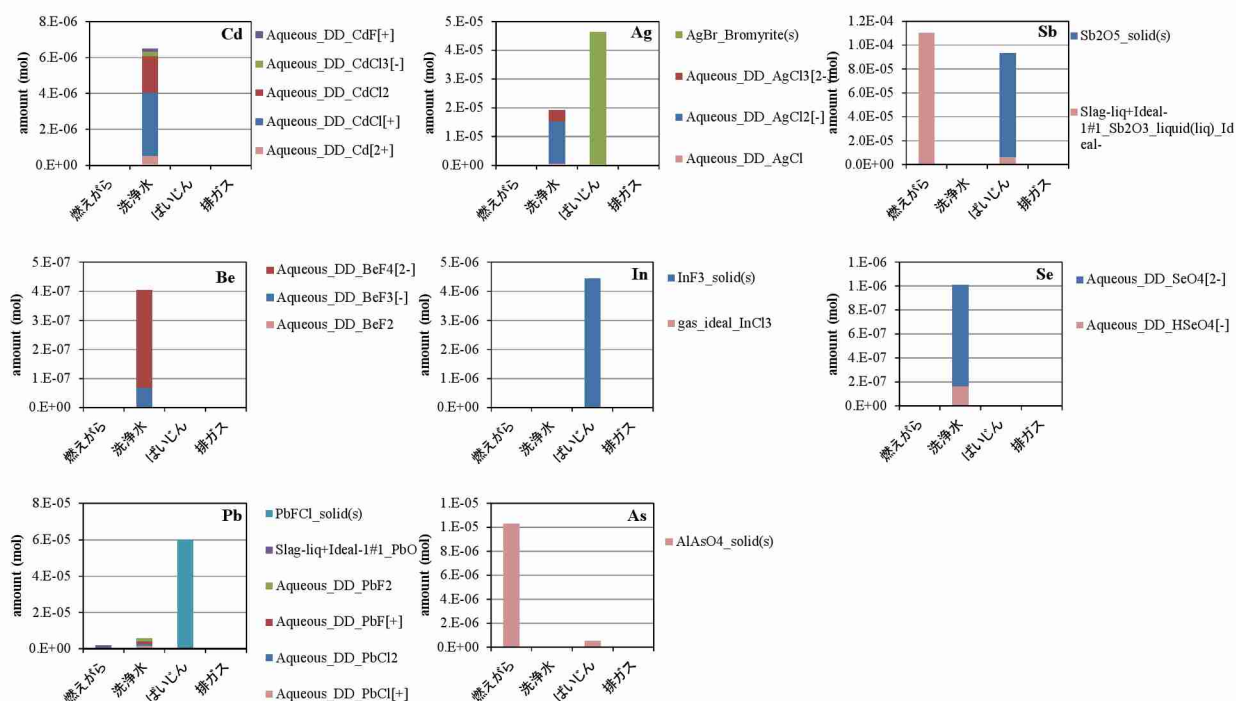


図 II-37 産業廃棄物焼却施設 A の焼却残さにおける元素の化合物形態計算結果

(gas_ideal: 気体化学種、Salt_liquid: 熔融塩、Slag-liq: 酸化物熔融相、Aqueous: 水溶液の成分、それ以外は固体を表す)

(c) 産業廃棄物焼却施設 B (キルンストーカ炉+熱回収+バグフィルター) への適用

産業廃棄物焼却施設 B における元素分配挙動の施設調査と再現計算の結果を図 II-38 に、焼却残さ等における各元素の形態を図 II-39 にそれぞれ示す。なお、F、I、Co、Hg、Se については焼却残さと排ガス濃度のいずれかで測定値 (定量値) が得られなかったため、欠けている成分の濃度を 0 として計算した参考値である。また、飛灰には薬剤として噴霧した消石灰分も含まれる。実測データでは、アルカリ金属とハロゲン、硫黄、Cd、Sn、Sb、Se は飛灰に分配し、P、Si、Al、Ca、Mg、Ba、Fe、Cr、Cu、As、Ni、Mn、Zr、Sr は主に主灰に分配した。Zn、Sn、Sb はほぼ半分が飛灰に移行した。計算結果は施設調査の結果の結果と概ね一致した。施設調査と計算の相違点としては、計算では Br と I は BrI などの気体となると推定されたこと、計算された Sn、Sb、Sr の燃えがらへの残存率が実際より高くなったこと、S、K、Zn の飛灰移行率の計算値が実際より高い点が挙げられる。1 点目に関しては、同じハロゲン化合物との類推から、アルカリ金属やアルカリ土類金属とハロゲン化合物を生成し、飛灰へ移行すると考えられるが、計算によるとバグフィルターによる排ガス処理部分の温度では BrI、Br₂ などが安定種として予測された。なお常温では CaBr₂・6H₂O が安定であった。施設調査との不一致の原因としては、実際にはバグフィルター前において固体成分として析出しているが、熱力学データベースの不具合のためにそれが再現できない、熱力学データベースには問題がないが排ガス冷却の時間内には BrI の生成反応が進行しない、I が何らかの固体化合物になって気体の BrI の生成に関与しない、等が考えられた。3 点目の S、K、Zn の結果に関しては、本計算では廃棄物の可燃分の元素組成を測定しなかったため既存のデータベース (Phillis2) に基づく数値を用いたが、それによるとキルンストーカ炉内の空気比が 1 に満たなかった。そのため、S は酸化雰囲気では蒸気圧の低い硫酸塩となるが、計算では硫化水素ガス (H₂S) となり、また K、Zn の飛灰移行率が実際より高くなったものと思われる。2) の Sn、Sb、Sr に関しては、キルン炉内ではそれぞれ SnS、KSnCl₃、SbCl など一部が気体であったが、ストーカ炉の雰囲気では Sn は SnO₂ の固体、Sr、Sb は酸化物熔融相に溶けた状態が安定種であったため、主灰に移行する結果

になった。実際はキルン炉内で生成したガスは熔融相等に溶けないまま二次燃焼室へ移行する可能性があるため、そのような機構をモデルに取り入れると計算精度を上げることができる可能性がある。なお Sb は施設 A でも主灰残存率の計算値が実測より高いため、実測と計算の不一致は計算において何らかの Sb の気体成分（熱力学データベースにない成分）が再現できていない可能性もある。

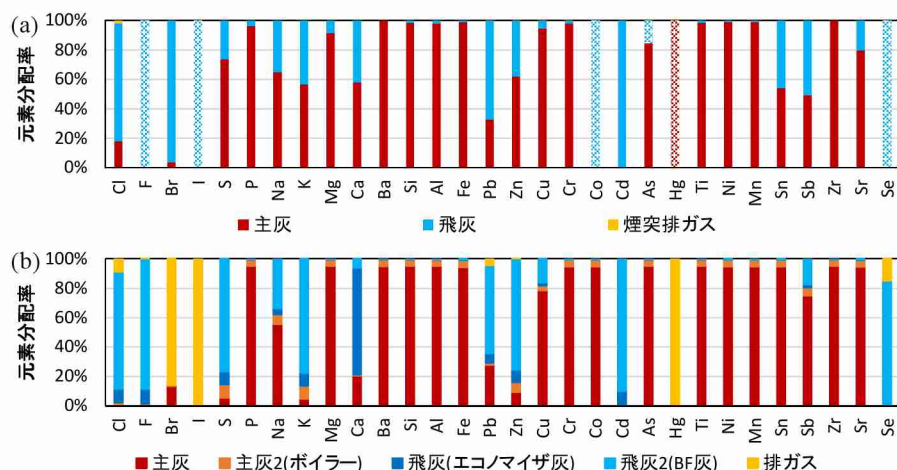
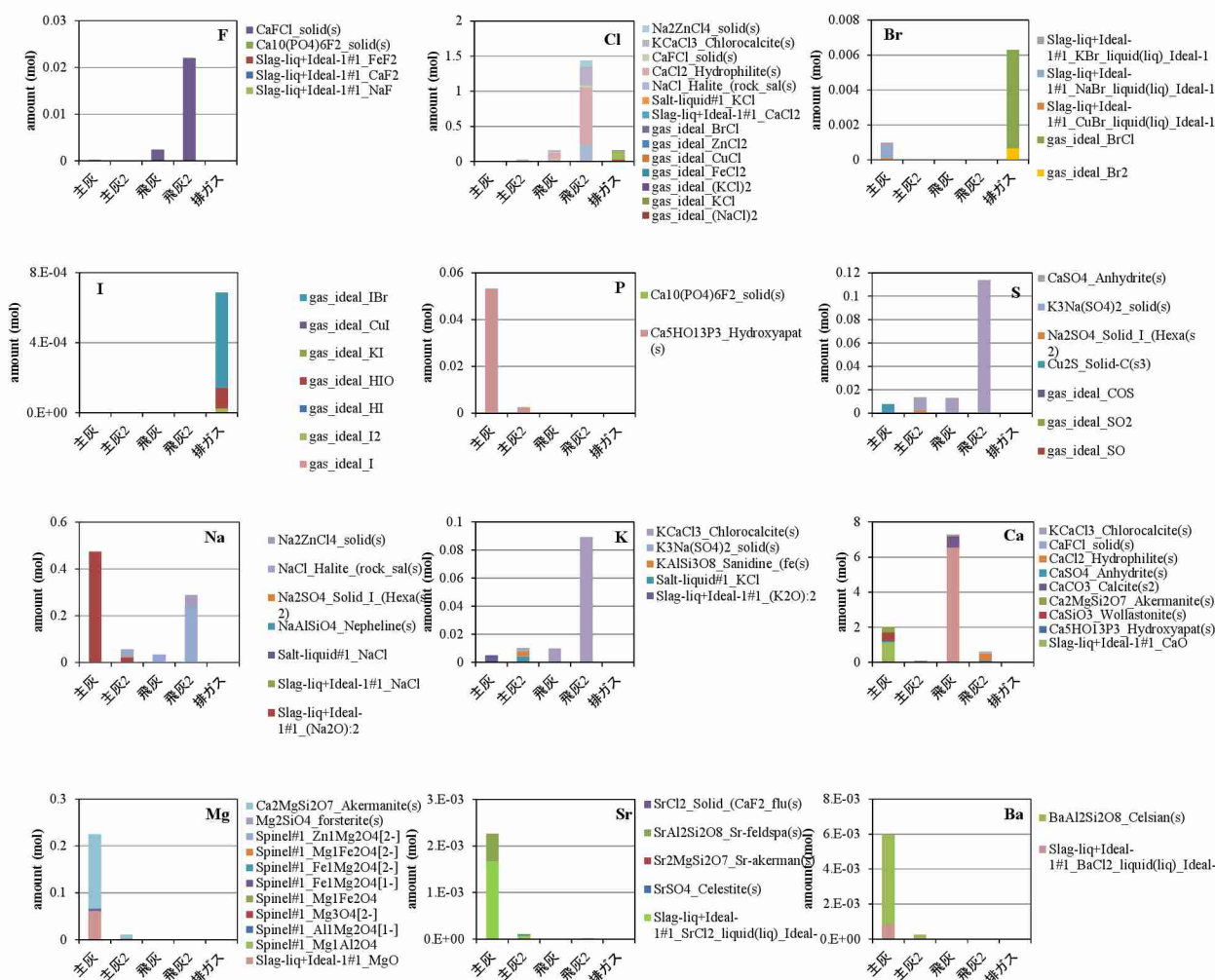


図 II-38 産業廃棄物焼却施設 B における元素の分配挙動 (a: 実測、b: マルチゾーン平衡計算)



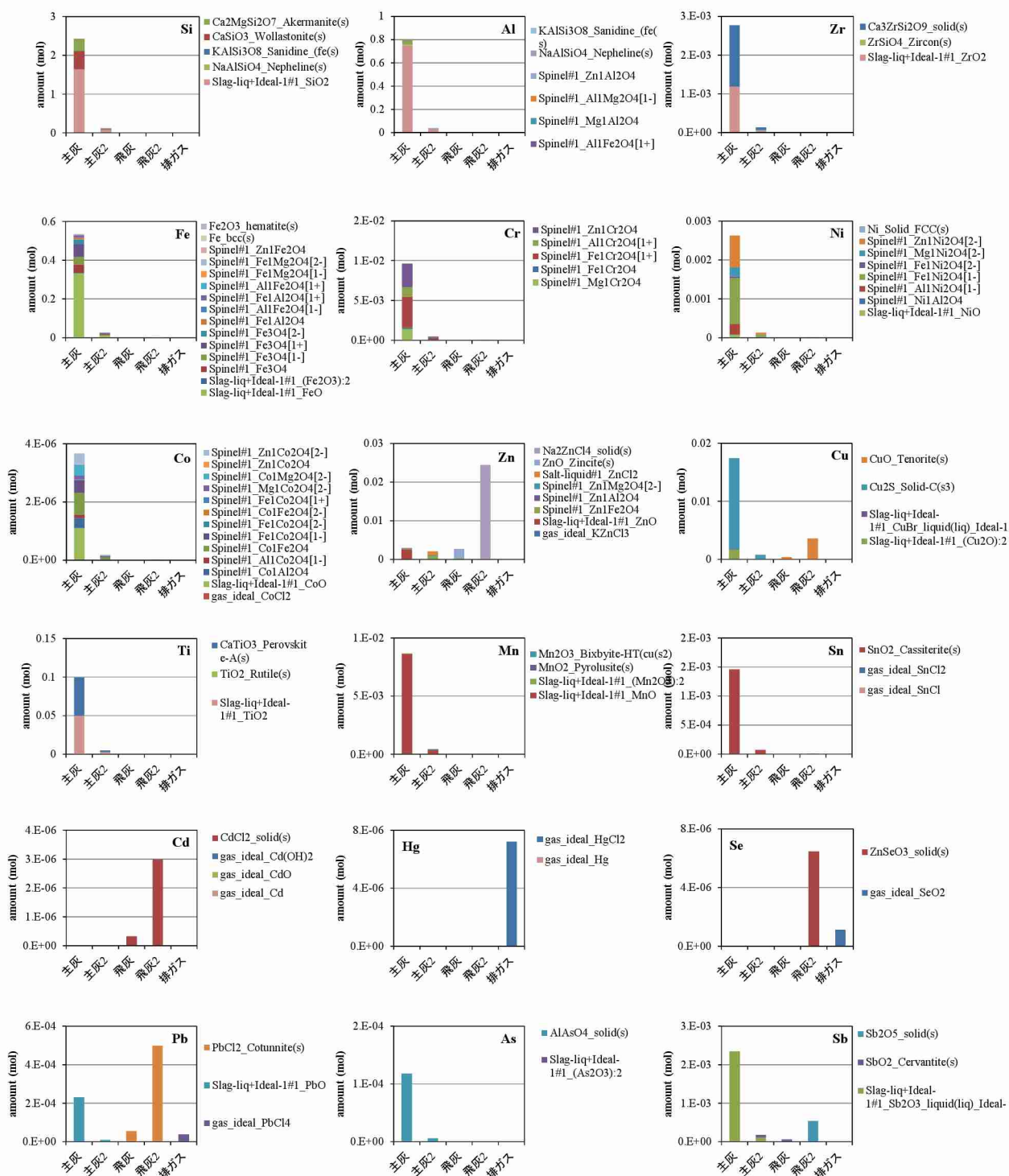


図 II-39 産業廃棄物焼却施設 B の焼却残さにおける元素の化合物形態計算結果

(gas_ideal: 気体化学種、Salt_liquid: 熔融塩、Slag-liq: 酸化物溶融相、Aqueous: 水溶液の成分、それ以外は固体を表す)

以上をまとめると、被焼却物の組成や施設の形式に関わらず、アルカリ金属、ハロゲン、Be、Se、Cd、In、Hg は主に飛灰もしくは洗煙飛灰に移行しやすいと計算された（そのうち Hg、Se は排ガスに含まれる可能性がある）。また、主灰（燃えがら）に分配しやすいものは P、B、Si、Al、Ca、Mg、Fe、Co、Cr、Cu、Mn、Mo、V であり、Pb、Zn、Sn、Sb は状況に応じて変わることが分かった。計算によると、主灰に分配しやすいものはスピネル等の鉄の酸化物やアルミノシリケート、リン酸塩などとなっており、いずれも塩化物にはなりに

くい傾向が見られた。飛灰や洗煙水に分配しやすいものは、蒸気圧が高い酸化物、塩化物、単体となりやすいものであった。

開発したプログラムを適用して計算した 3 施設における金属元素分配率の計算値を実測値とともに表 II-16 に示した。本計算法は、PRTR 対象の元素 (Zn、Sb、In、Cd、Ag、Cr、Co、Hg、Sn、Se、Cu、Pb、Ni、V、As、F、Be、B、Mn、Mo) のうち Cd、Cr、Mn、Se、Pb、Ni、V、Be、B の焼却施設内の挙動を誤差 20%以内で、Sn、As の挙動は 25%以内で再現でき、多くの元素については概ね実測値の分配傾向をマルチゾーン平衡計算によって再現できる計算プログラムを開発できた。本研究では 3 施設のデータを用いてパラメータのチューニングと計算結果の評価を行ったが、他の形式の施設についても施設の運転条件データ等を入力して計算を行うことで、金属類の焼却施設内挙動の検証に活用可能と考えられる。

表 II-16 実験炉および産廃施設における金属元素分配率の計算値と実測値の比較 (単位: %)

	実験炉					
	計算		実測		計算- 実測	
	飛灰	排ガス	飛灰	排ガス	飛灰	排ガス
S	0.0	0.0	-	-	-	-
Cl	82.2	0.8	80.5	-	2	-
P	0.0	0.0	1.4	-	1	-
Na	64.9	0.6	59.3	-	6	-
K	78.9	0.8	60.4	-	19	-
Mg	0.0	0.0	0.3	-	0	-
Ca	0.0	0.0	0.8	0.0	1	0
Si	0.0	0.0	0.3	0.1	0	0
Al	0.0	0.0	0.1	-	0	-
Fe	0.0	0.0	0.7	-	1	-
Pb	98.3	1.0	85.4	-	13	-
Zn	1.0	0.0	49.9	-	49	-
Cu	77.8	0.7	10.5	-	67	-
Cr	1.2	0.0	3.6	-	2	-
Cd	98.3	1.0	83.5	-	15	-
As	0.0	0.0	25.0	-	25	-
Hg	0.0	99.8	41.0	53.9	41	46

	施設A					
	計算		実測		計算- 実測	
	飛灰+洗浄水	排ガス	飛灰+洗浄水	排ガス	飛灰+洗浄水	排ガス
S	12.0	0.0	86.9	0	75	-
Cl	99.5	0.0	99.7	0.0	0	0
Br	87.1	0.0	100.0	0.0	13	0
F	99.3	0.0	99.1	-	0	-
P	5.0	0.0	5	-	-	-
B	20.4	0.0	8.0	-	12	-
Na	65.9	0.0	88.8	-	23	-
K	99.6	0.0	88.1	0.0	12	0
Mg	5.0	0.0	8.9	-	4	-
Ca	5.0	0.0	7.4	0.0	2	0
Si	5.0	0.0	8.2	-	3	-
Al	5.0	0.0	5.4	-	0	-
Fe	5.0	0.0	0.3	0.0	5	0
Pb	97.1	0.0	80.6	0.1	16	0
Zn	6.0	0.0	10.4	0.0	4	0
Cu	75.0	0.0	7.1	0.0	68	0
Cr	5.0	0.0	8.4	0.0	3	0
Cd	100.0	0.0	85.8	0.0	14	0
As	5.0	0.0	30.8	0.0	26	0
Ag	100.0	0.0	38.1	0.0	62	0
Be	100.0	0.0	100.0	0.0	0	0
Co	5.0	0.0	10.2	0.0	5	0
Mn	5.5	0.0	1.5	0.0	4	0
Ni	5.0	0.0	6.5	0.0	2	0
Sb	45.8	0.0	10.2	0.0	36	0
Se	100.0	0.0	91.3	2.2	9	2
Mo	100.0	0.0	7	0.0	93	0
V	5.0	0.0	6.6	0.0	2	0
In	100.0	0.0	75.3	-	25	-

	施設B					
	計算		実測		計算- 実測	
	飛灰	排ガス	飛灰	排ガス	飛灰	排ガス
S	85.5	0.0	26.4	-	59	-
Cl	88.6	8.9	80.4	1.8	8	7
Br	0.0	86.0	96.3	-	96	-
F	98.5	0.0	100.0	-	1	-
I	0.0	99.7	100.0	-	100	-
P	0.3	0.0	3.8	-	4	-
Na	37.8	0.0	35.1	-	3	-
K	86.4	0.0	43.5	-	43	-
Mg	0.3	0.0	8.6	-	8	-
Ca	78.7	0.0	42.1	-	37	-
Sr	0.9	0.0	20.3	-	19	-
Ba	0.3	0.0	0.0	-	0	-
Si	0.3	0.0	1.6	-	1	-
Al	0.3	0.0	1.8	-	2	-
Fe	1.0	0.0	1.1	-	0	-
Pb	66.5	4.5	67.1	0.0	1	5
Zn	84.1	0.0	38.2	0.0	46	0
Cu	18.1	0.0	5.4	0.0	13	0
Cr	0.5	0.0	1.9	0.0	1	0
Cd	100.0	0.0	100.0	-	0	-
As	0.3	0.0	15.4	-	15	-
Hg	0.0	100.0	0.0	-	0	-
Co	0.6	0.0	100.0	-	-	-
Mn	0.6	0.0	0.9	-	0	-
Ni	0.7	0.0	0.8	-	0	-
Sn	0.8	0.0	46.0	-	45	-
Sb	19.5	0.0	50.7	-	31	-
Se	85.1	14.9	100.0	-	15	-
Zr	0.2	0.0	0.0	-	0	-
Ti	0.3	0.0	1.6	-	1	-

※表において、灰色で塗りつぶした元素の行は、実測データのうち、主灰（もえがら）・飛灰（ばいじん）、洗煙水などのいずれかにおいて当該元素の濃度の測定値がなかったため、濃度0として分配率を算出したものであり、分配率の誤差が最大100%であるため、参考値として示すものである。

(2) 排ガス中揮発性有機化合物・アルデヒド類濃度の推定試行

まず、熱力学平衡計算ソフト (FactSage6.4) を用いて焼却施設内の排ガス中の VOCs・アルデヒド類濃度を計算した。表 II-17 に示す低分子化合物以外は生成されない結果となった。また、生成されても僅かな濃度であり、燃焼後に O_2 が存在していれば基本的に有機化合物は生成しにくいものと考えられる。しかし、矢澤らの研究²⁾によれば、還元雰囲気であれば、ダイオキシン類や類縁化合物を含めて有機化合物の生成能は比較的高いと予想される。

表 II-17 一次燃焼および煙突排ガス中の VOCs・アルデヒド類の濃度

	formaldehyde	acetoaldehyde	chloroform	trichloroethylene	tetrachloroethylene
一次燃焼 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	1.21E-11	2.61E-36	1.10E-19	8.66E-37	2.20E-37
煙 突 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	5.10E-48	—	1.99E-44	—	—

※ガス組成は、占部らの論文¹⁾を引用、温度は一次燃焼で 1000℃、煙突で 200℃とした。

焼却炉内において、燃焼前の熱分解過程ではそのような条件になる可能性もあり⁴⁾、矢澤らの排ガスを参照排ガスとして用いて還元雰囲気（酸素過剰率（実際の酸素量/完全燃焼に必要な酸素量）=0.42）における VOCs 濃度を熱力学平衡計算から求めた。なお、熱分解温度は 350～600℃とした。また、平衡時の生成濃度を計算することにより、濃度の大きさから VOCs・アルデヒド類の生成能を議論することとした。

平衡計算結果を図 II-40 に示す。非塩素系では、n-hexane の濃度が極めて低く、次にアルデヒド類の濃度が低く、芳香族類の濃度が最も高い値となった。したがって、熱分解過程では VOCs・アルデヒド類の生成能もその順番に高くなると考えられる。なお、芳香族類の生成能は 400～500℃で最大となり、それ以上の温度では大きく低下すると予想される。一方、アルデヒド類の生成能は温度にあまり影響を受けない傾向にあった。塩素系では、芳香族類の濃度が最も高く、脂肪族類の濃度は塩素数が多いほど低下した。また、温度が高いと濃度、すなわち、生成能も顕著に減少する傾向であった。これらの結果から、アルデヒド類以外は熱分解温度が高いほど生成が抑制されることが示唆された。実際の排ガスと比較すると計算濃度がかかなり高い場合もあるが、実際には完全に平衡まで達しないこと、生成した物質は熱分解後に燃焼過程に入るためそこで大部分が分解されることをふまえると、実排ガスの測定結果とは矛盾しない結果であると考えられる。一方、実排ガスよりも極端に濃度が低い物質（n-hexane や塩素含有脂肪族類）について、触媒を介した生成ルートの存在や熱分解時に比較的生成し易い一方で分解速度が遅いことなどが推察される。

次に、参照排ガスの O_2 濃度を高くして生成濃度に対する O_2 濃度の影響を検討した。その結果を図 II-41～43 に示す。なお、計算で得られた排ガス中の VOCs・アルデヒド類濃度（縦軸）は、図 II-40 の参照排ガス組成に対する濃度で除した値とした。まず、 O_2 濃度を 5 倍に増やすと（酸素過剰率=0.59）、非塩素系では、アルデヒド類の濃度はあまり変化しないものの、それ以外の化合物については、温度とともに濃度が減少した。特に、芳香族類への影響は大きく、 O_2 濃度上昇によって濃度が劇的に減少し、生成能が極めて低くなると予想される。塩素系では、全体的には O_2 濃度の増加によって VOCs 濃度は減少するが、低温と高温で濃度が高くなる V 字の挙動を示した。特に、最低および最高温度における dichlorobenzene と trichloroethylene の濃度は O_2 濃度増加前よりも高くなっており、生成しやすい条件であることが示唆された。 O_2 濃度を 10 倍に増やすと（酸素過剰率=0.8）、アルデヒド類以外は総じて濃度が数桁以上低くなった。特に、塩素含有に関係なく芳香族類の濃度は顕著に低下した。しかし、参照排ガスからの VOCs・アルデヒド類濃度変化率 ($\text{CVOC}/\text{C} \cdot \text{VOC}$) の温度依存性は塩素含有の違いで大きく異なった。さらに、 O_2 濃度を酸素過剰率 1 以上に増やすと、理想的には完全燃焼の状態になることから、formaldehyde、chloroform、tetrachloroethylene、trichloroethylene しか生成せず、表 II-17 に類似した結果が得られた。この状態であれば VOCs・アルデヒド類の生成能はほとんどないものと予想される。

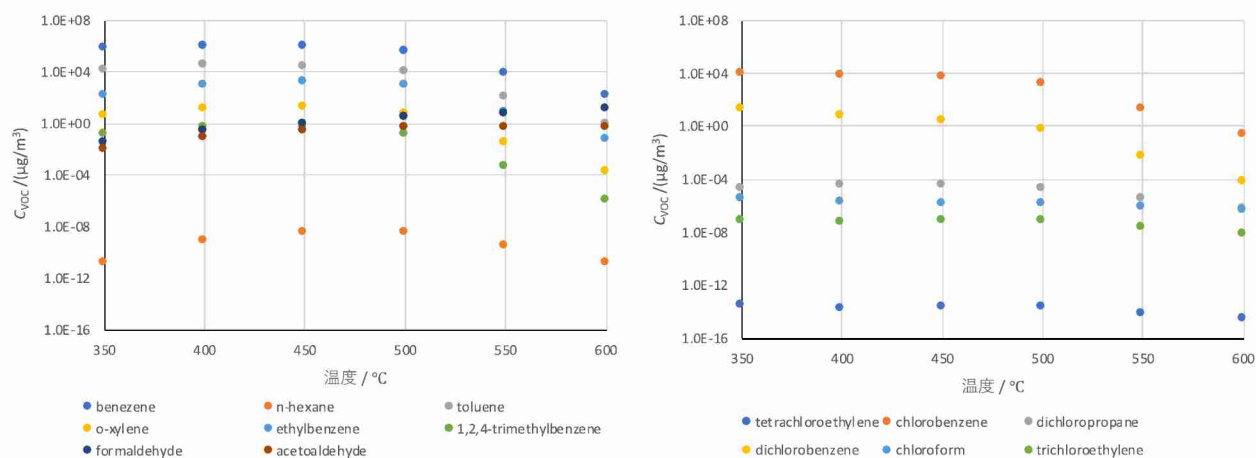


図 II-40 熱力学平衡計算による参照排ガス（酸素過剰率=0.42）中の VOCs・アルデヒド類濃度（左：非塩素系、右：塩素系）

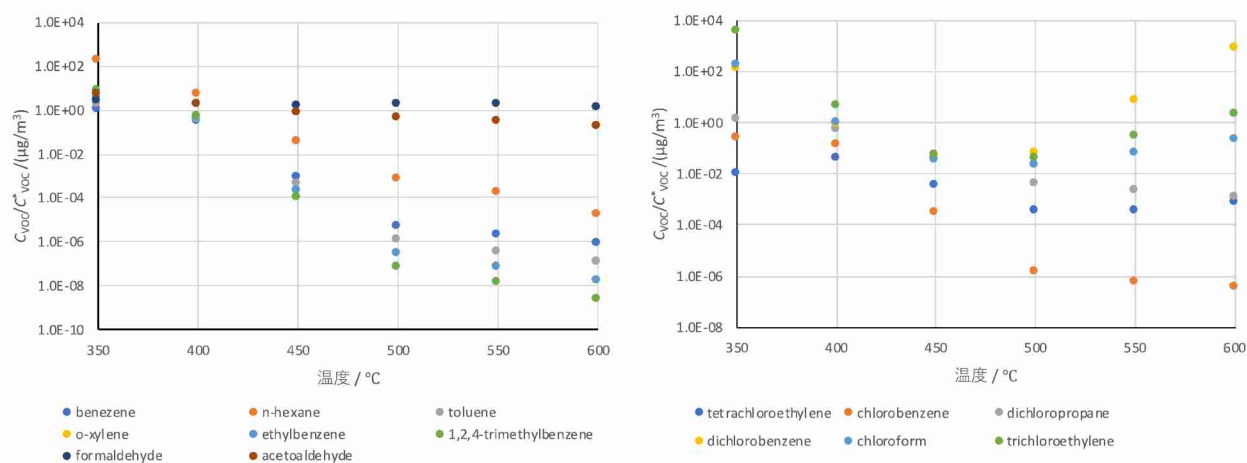


図 II-41 熱力学平衡計算による参照排ガス中の VOCs・アルデヒド類濃度と O_2 濃度の影響（酸素過剰=0.59、左：非塩素系、右：塩素系）

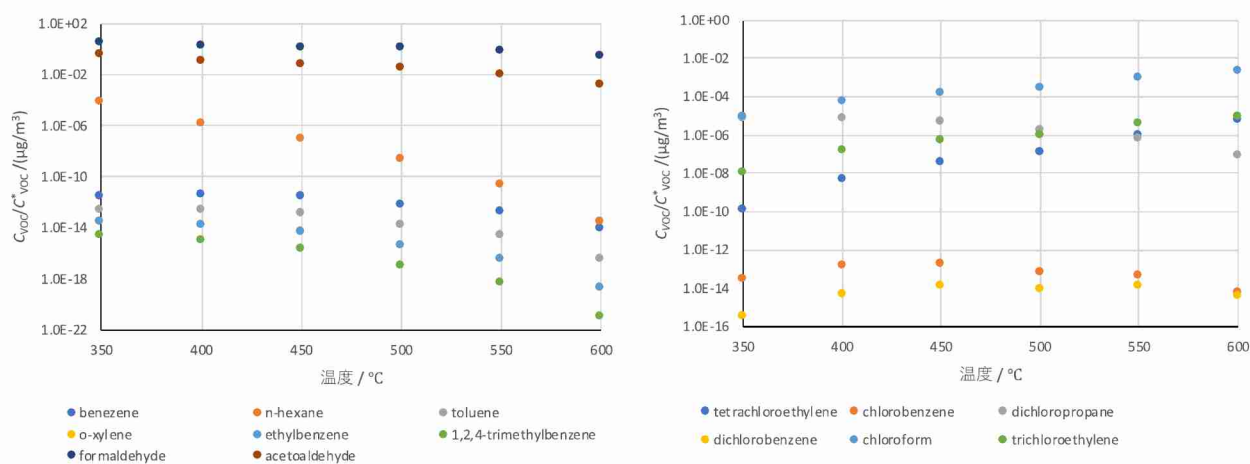


図 II-42 熱力学平衡計算による参照排ガス中の VOCs・アルデヒド類濃度と O_2 濃度の影響（酸素過剰=0.80、左：非塩素系、右：塩素系）

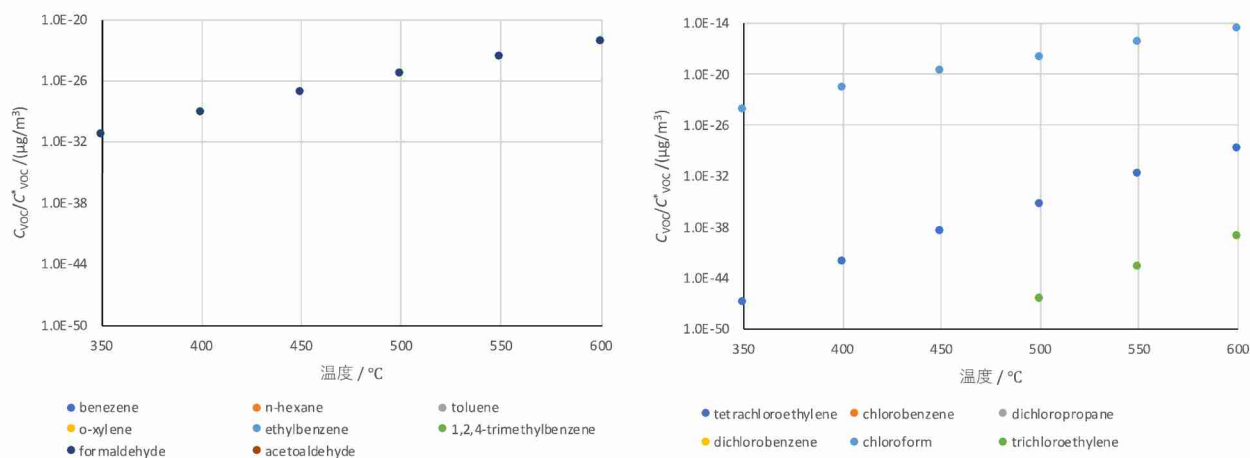


図 II-43 熱力学平衡計算による参照排ガス中の VOCs・アルデヒド類濃度と O_2 濃度の影響 (酸素過剰=1.01、左：非塩素系、右：塩素系)

HC1 濃度の影響については、参照排ガスから HC1 濃度を低くすることによって影響を検討した。その結果を図 II-44 および図 II-45 に示す。HC1 濃度が半分になると、系における Cl 量が低下するため、非塩素系は濃度が増加し、一方、塩素系の濃度は低下した。特に、塩素含有の脂肪族類の濃度低下が大きく、dichloropropane 以外の濃度は HC1 濃度減少前に比べて 1/3~ 1/5 程度になった。濃度変化の温度依存性については、ともに 550°C 以上で数倍程度まで濃度が増加する傾向であった。さらに、HC1 濃度を低下させると、非塩素系の濃度については、500°C 以下ではあまり変化しないものの、塩素系の濃度については、全体的に濃度がさらに低下した。HC1 濃度半減の場合と同様に、脂肪族類の濃度はより大きく低下した。濃度を生成能と読み替えると、塩素含有の脂肪族類の排出量には HC1 濃度もしくは系内の Cl 量が影響すると考えられる。ただし、550°C 以上では、非塩素系の VOCs の生成能が大きく増加する可能性があるため、熱分解温度には注意が必要である。参照排ガスの計算結果では、熱分解温度を高温にすれば VOCs 生成能が低下したが、 O_2 及び HC1 雰囲気によっては温度の影響により生成能が増加する条件もある。VOCs の排出量を評価する上では、今回検討した影響因子による寄与を慎重に考えて考察する必要がある。

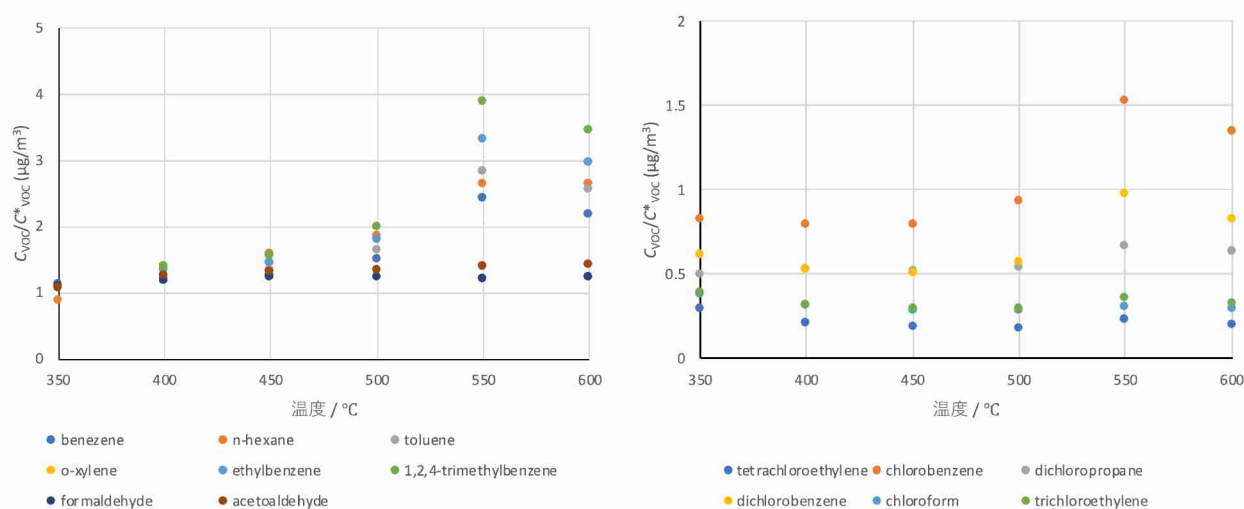


図 II-44 熱力学平衡計算による参照排ガス中の VOCs・アルデヒド類濃度と HC1 濃度の影響 (参照排ガス中の HC1 量を 1/2、左：非塩素系、右：塩素系)

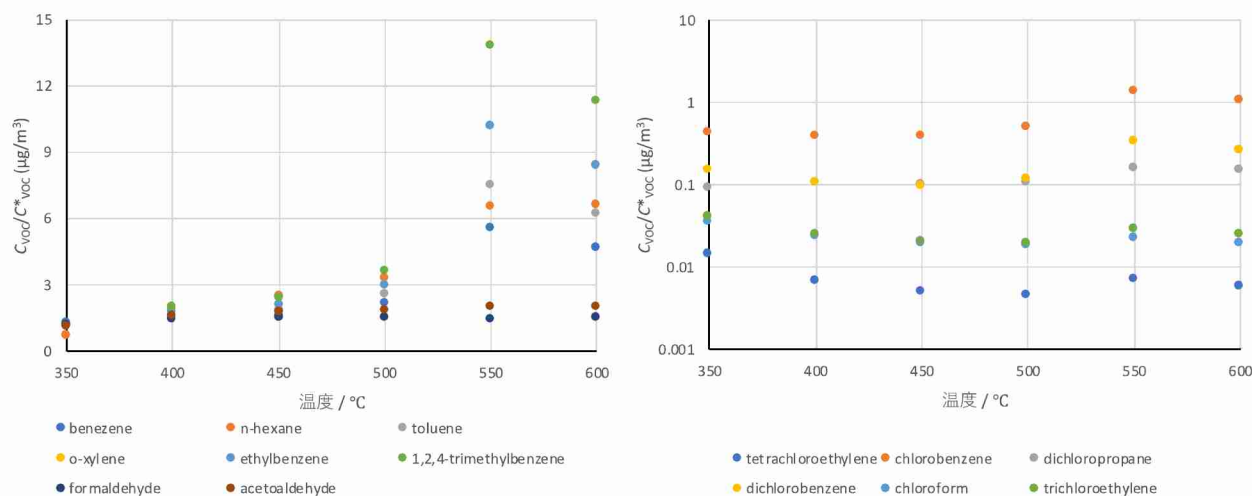


図 II-45 熱力学平衡計算による参照排ガス中の VOCs・アルデヒド類濃度と HCl 濃度の影響（参照排ガス中の HCl 量を 1/10、左：非塩素系、右：塩素系）

以上の結果から、熱力学平衡計算を用いて排ガス中の VOCs・アルデヒド類濃度の説明を行うことは困難であった。これは燃焼後の O_2 が十分に存在する条件ではこれらの物質が生成しにくいことを示唆している。ただし、還元雰囲気では平衡計算を行ったところ比較的高い生成能が予測され、焼却炉内の熱分解過程において VOCs・アルデヒド類が生成しやすいことが熱力学平衡計算の適用によって示唆された。また、 O_2 濃度、HCl 濃度、温度による VOCs・アルデヒド類濃度もしくは生成能への影響を考察した結果、物質群ごとに異なる影響が見られ、生成能の違いで物質を類型化できる可能性が示された。これらの成果は VOCs・アルデヒド類の排出実態の傾向の検証に利用できる可能性がある。ただし、今回計算した物質数が少ないことから、物質数を増やした更なる検討が必要である。

4-4 実施設からの排出実態の調査・解析

4-4-1 金属類

(1) 実産業廃棄物焼却施設における排ガス試料採取および金属類分析

23 の産業廃棄物焼却施設において測定した排ガス中金属類濃度の結果を図 II-46 に示す。図に示した濃度は粒子態とガス態の合計値（総濃度）である。粒子態またはガス態のいずれかが検出下限値未満であった場合はその値をゼロとして合計しており、両者ともに検出下限値未満であった場合は表示していない。

調査した 23 施設の最終排ガスはダスト濃度も低く、金属類濃度が検出下限値未満となったケースも見られたが、多くの金属類について排ガス中濃度は施設によって数桁の範囲で大きく異なっていることがわかった。この結果より、産業廃棄物焼却施設からの排ガス（大気）への金属類の排出量推計においては、最終排ガス中の金属類濃度実測データに基づいて単一の排出係数を設定することは適切ではないことが改めて示された。施設による違いは処理廃棄物の違いや排ガス処理方式の違いに依存している可能性が考えられ、排出量推計においてはそれらを考慮することが必要であると考えられた。

4 施設について排ガス処理前後での排ガス中金属類濃度の測定を行った結果から計算した排ガス処理による除去率を表 II-17 に示す。最終排ガスで検出下限値未満であった場合は「>」を付けて表示、排ガス処理前排ガスと最終排ガスの両方で検出下限値未満であった場合は空欄で示している。

調査施設数が限られており、一般的な傾向を見出すことは難しいが、排ガス処理前後で検出された金属類の結果を見る限りでは、バグフィルター（BF）を採用している施設では電気集じん器（EP）を採用している

施設よりも除去率が高くなっている傾向が見られ、排ガス処理方式による違いがあるものと考えられた。

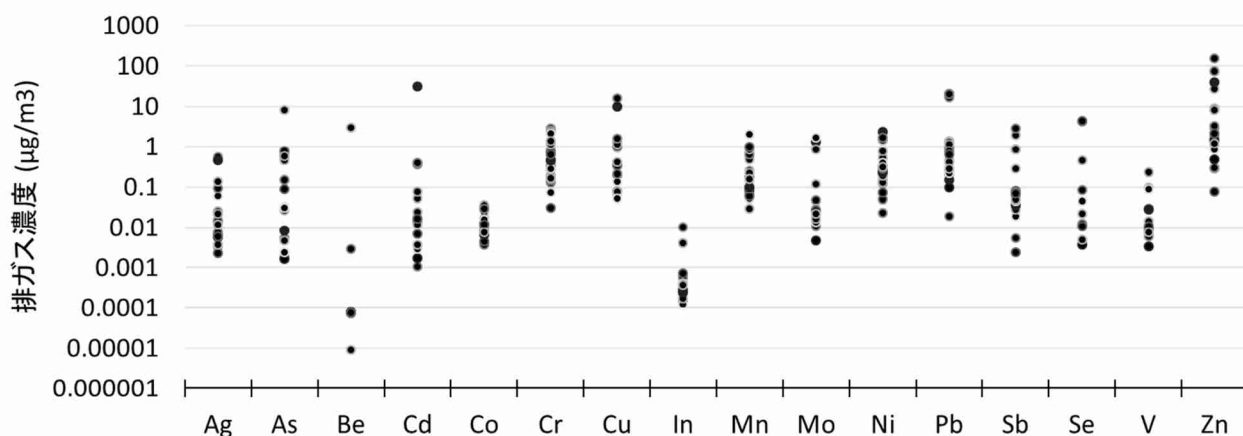


図 II-46 産業廃棄物焼却施設 23 施設における排ガス中金属類濃度測定結果

表 II-17 4 施設における測定結果から計算した排ガス処理による金属類の除去率

	施設A		施設B	施設C	施設D
	BF	減温反応塔+BF	BF	急冷・洗浄塔+EP	冷却・除害塔+EP
ばいじん	99.993%	99.97%	99.97%	99.4%	99.3%
Zn	99.99%	99.99%	99.97%	99.4%	99.6%
Sb	>99.98%	>99.96%	99.95%	>99.7%	>94.4%
In	—	—	>99.1%		—
Cd	>99.97%	>99.96%	>99.88%	>98.7%	99.7%
Ag	>99.92%	>99.8%			—
Cr	>99.7%	>98.8%	>99.8%	71%	98.8%
Co		—			>99.3%
Se	>92%	>89%			
Pb	99.98%	99.98%	>99.93%	99.6%	99.8%
Ni	>99.2%	>98%	>98%		>99.8%
As	>99.0%	>98%			>86%
Be	—	—			—
Mn	>99.86%	>99.7%	99.69%		>98.7%
Mo	>96.92%	>93%	>98.38%		>99.0%
Cu	99.99%	99.992%	99.996%	99.3%	99.6%
V	>98.1%	>98.5%			>97.7%

(2) ダスト採取ろ紙試料の活用による排ガス中金属類濃度データの充実

排ガス中ダスト濃度の測定のためにダストを採取したろ紙試料の分析結果から計算した排ガス中金属類濃度相当の換算値は粒子態の金属類のみであり、ガス態(ダスト捕集部を通過してガス吸収部で捕集される分)を含まない。しかし、4-3-1 で示した実験炉による燃焼実験結果によれば、排ガス中の金属類は主に粒子態として存在している可能性が高く、ダスト採取ろ紙試料の分析値を排ガス中金属類濃度の実測データ充実に活用できる可能性は高い。そこで、(1)の実測調査における粒子態およびガス態金属類濃度の測定結果を用いて総濃度(粒子態+ガス態)への簡易的な換算を試みた。

図 II-47 に廃棄物焼却最終排ガス中の金属類濃度の粒子態およびガス態の内訳(のべ 19 施設、23 試料)

を示す。元素ごとに粒子態比を見てみると、Sb (15-100%、中央値 76%) や In (20-100%、中央値 100%)、Cd (6-100%、中央値 79%)、Ag (3-100%、中央値 56%)、Cr (2-100%、中央値 73%)、Co (58-100%、中央値 87%)、Pb (28-100%、中央値 87%)、Ni (18-100%、中央値 61%)、As (3-100%、中央値 65%)、Mn (10-100%、中央値 85%)、Mo (24-100%、中央値 82%)、V (5-100%、中央値 71%) は中央値が 50%を超えた。施設によってばらつきが大きく一般化は難しいが、本研究では簡易的に中央値を用いて総濃度への換算を行った。なお、粒子態金属類、すなわちダスト捕集部が検出下限値未満であった場合（粒子態比 0%）を除けば粒子態比は多くの場合で中央値の数分の 1~ 数倍の範囲にあり、ばらつきの範囲で考えても総濃度換算値は数分の 1 から数倍の範囲に留まるケースが多いと考えられる。以上の換算によって得られた排ガス中金属類濃度を図 II-48 に示す。

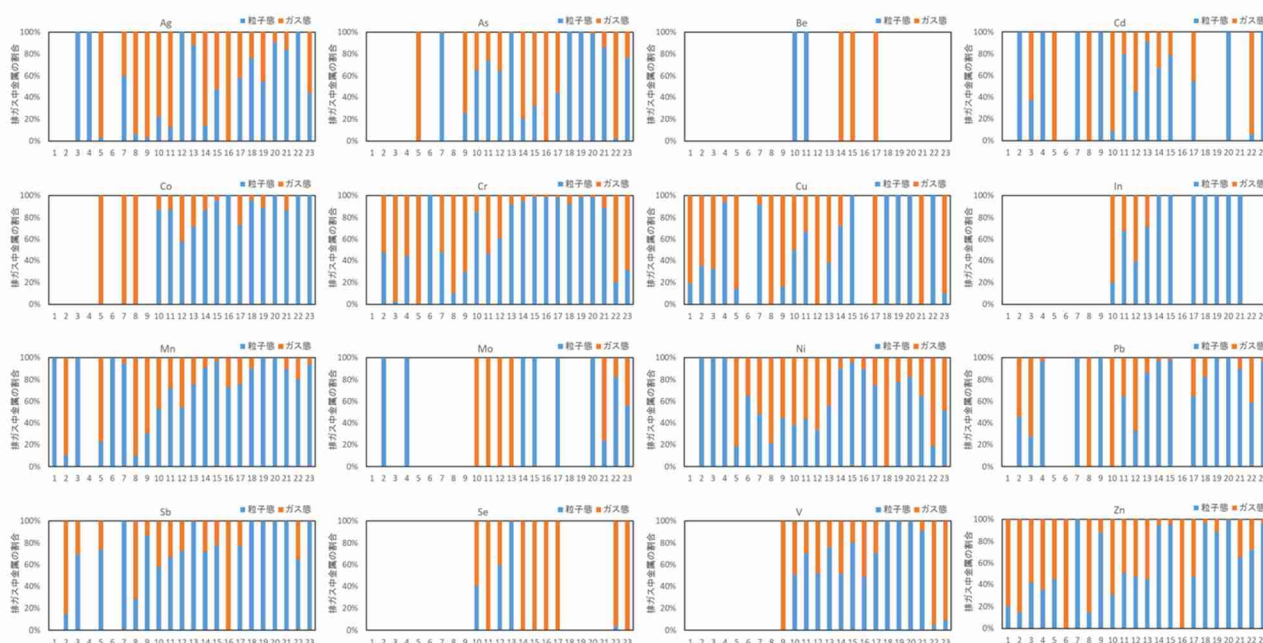


図 II-47 廃棄物焼却最終排ガス中の金属類濃度の粒子態およびガス態の内訳（のべ 19 施設、23 試料）

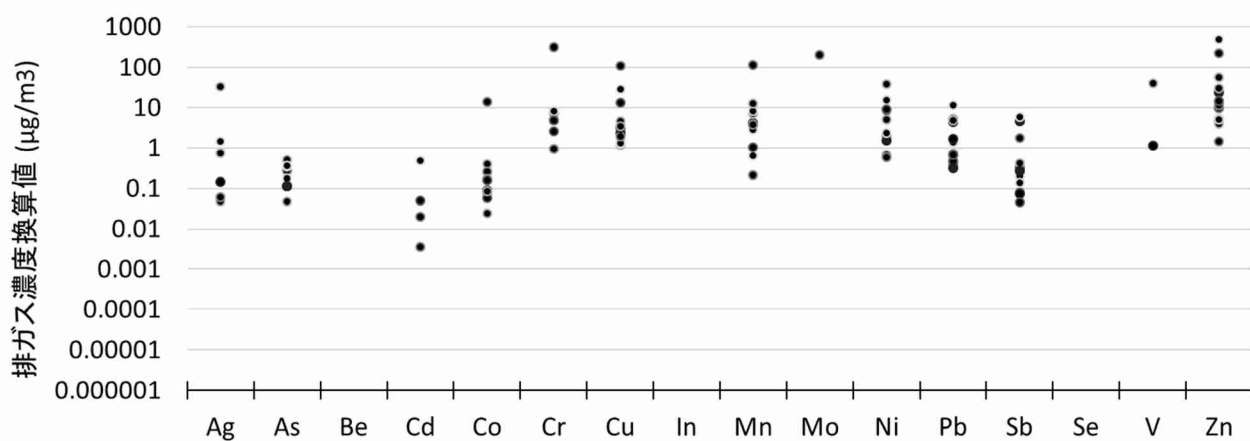


図 II-48 ダスト濃度測定用ろ紙試料の分析結果から求めた排ガス中金属類濃度換算値（ガス態を含む）

(3) 排ガス中金属類濃度実測データに基づく排出係数作成

上記 (1) で得られた排ガス中金属類濃度測定値と (2) で得られた排ガス中金属類濃度換算値を合わせて図 II-49 に示す。施設数は合わせて 40 施設強である。

調査施設の最終排ガスはダスト濃度も低く、金属類濃度が検出下限値未満となったケースも見られたが、多くの金属類について排ガス中濃度は施設によって数桁の範囲で大きく異なっていることがわかった。この結果より、産業廃棄物焼却施設からの排ガス（大気）への金属類の排出量推計においては、最終排ガス中の金属類濃度実測データに基づいて単一の排出係数を設定することは適切ではないことが改めて示された。施設による違いは処理廃棄物の違いや排ガス処理方式の違いに依存している可能性が考えられ、排出量推計においてはそれらを考慮することが必要であると考えられた。

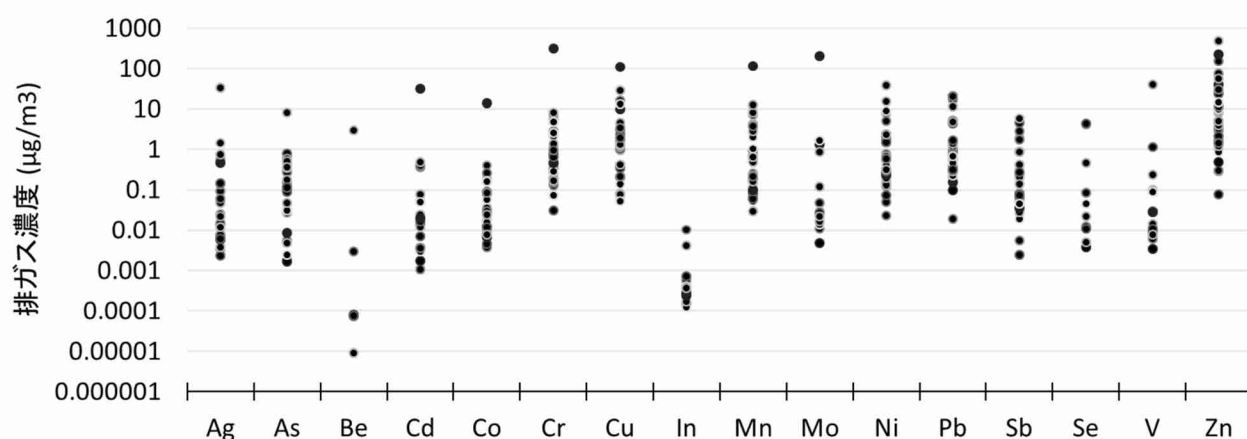


図 II-49 産業廃棄物焼却施設における排ガス中金属類濃度の結果まとめ

しかし、図 II-50 および図 II-51 に例を示すように、排ガス中金属類濃度そのものは、排ガス処理方式や主要な処理廃棄物による明確な違い、傾向は見られない。これは、表 II-17 で例を示したように、排ガス系へ移行した金属類の最終排ガスへの排出傾向（排ガス処理による除去率）の違いは排ガス処理方式の違いによってある程度説明できると考えられるものの、排ガス系へ移行した金属類、すなわち排ガス処理前の排ガス中濃度の絶対的なレベルは処理廃棄物（ひいては処理廃棄物中の金属類含有量）にも影響されるためと考えられる。すなわち、最終排ガス中の金属類濃度そのものは、処理廃棄物と排ガス処理方式（および炉形式等のその他の施設属性）等の組合せに影響を受けると考えられる。このため、排ガス中金属類濃度の傾向は施設の主要な処理廃棄物、排ガス処理方式等の単独の施設属性では説明が難しいことから、排出量推計における排出係数は、これらの属性を独立して扱うことができるような形で作成することが望ましいと考えられる。

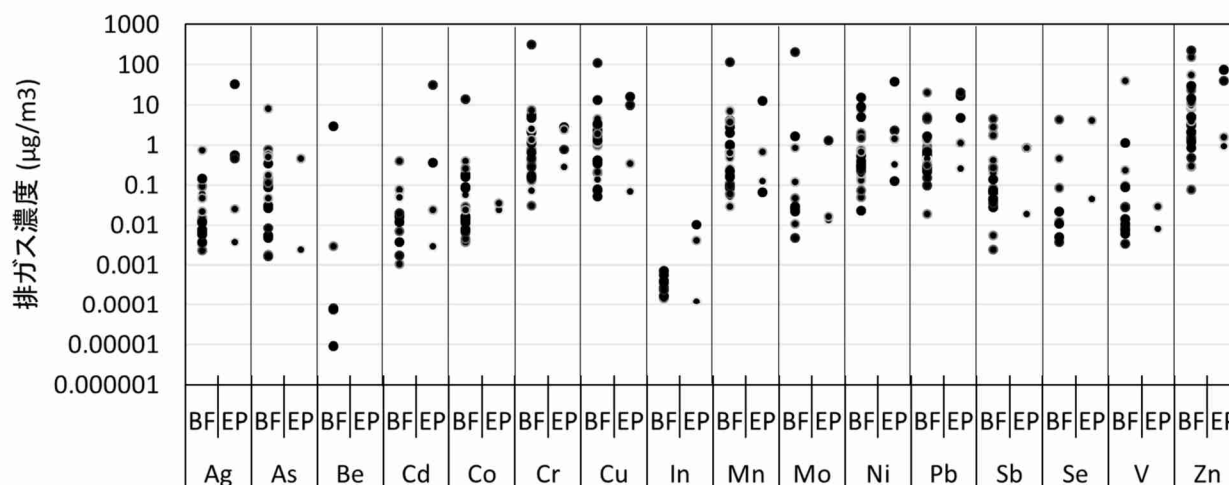


図 II-50 排ガス処理方式別の産業廃棄物焼却施設排ガス中金属類濃度の測定結果の例（BF：バグフィルター、EP：電気集じん器）

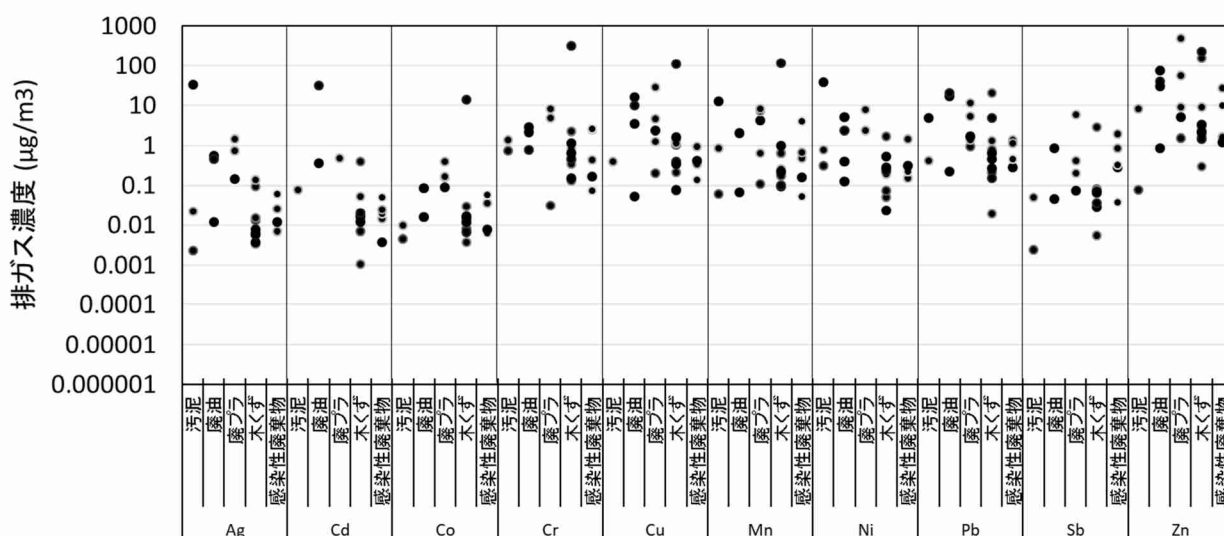


図 II-51 主要な処理廃棄物による施設類型別の産業廃棄物焼却施設排ガス中金属類濃度の測定結果の例

そこで本研究では、処理廃棄物と排ガス処理方式（および炉形式等のその他の施設属性）による影響を分離して扱うため、最終排ガス中金属類濃度の測定結果と 4-2-3 で示した処理廃棄物中金属類含有量の推定結果から、焼却処理への金属類の流入量に対する最終排ガスへの排出率 d を以下の式により計算し、整理した。

$$d = \frac{C_{\text{flue_gas}} \times Q_{\text{flue_gas}} \times oh \times od}{C_{\text{waste}} \times Q_{\text{waste}} \times 10^3} \quad (4)$$

ここで、 $C_{\text{flue_gas}}$ は最終排ガス中の金属類濃度 ($\text{mg}/\text{m}^3_{\text{N}}$)、 $Q_{\text{flue_gas}}$ は排ガス流量 ($\text{mg}/\text{m}^3_{\text{N}}$)、 oh は 1 日あたり稼働時間 (h/日)、 od は年間稼働日数 (日/年)、 C_{waste} は焼却廃棄物の金属類含有量 ($\text{mg}/\text{kg-waste}$)、 Q_{waste} は年間焼却処理量 (t/年) である。 $C_{\text{flue_gas}}$ および $Q_{\text{flue_gas}}$ は試料採取における実測値、 C_{waste} は 4-2-3 において焼却残さ

の分析結果から推定した値、 Q_{waste} は oh および od は 4-1 で整理したデータまたは調査施設からの提供データを用いた。

図 II-52 に排出率の計算結果を示す。焼却残さ試料と排ガス試料の採取日・時間等のずれもあるため、値の精度には注意が必要であるが、桁レベルで見ても最終排ガスへの排出率は施設によって 3 桁程度の範囲で異なっていることがわかる。したがって、施設の属性による排出率の違いを排出量推計において考慮することが必要であると考えられる。なお、Be、In、Mo、Se、V については排出率の分布が見かけ上狭くなっているが、これは最終排ガス中の金属類が検出下限値未満であったケースも多くデータ数が限られているためであることに注意されたい。

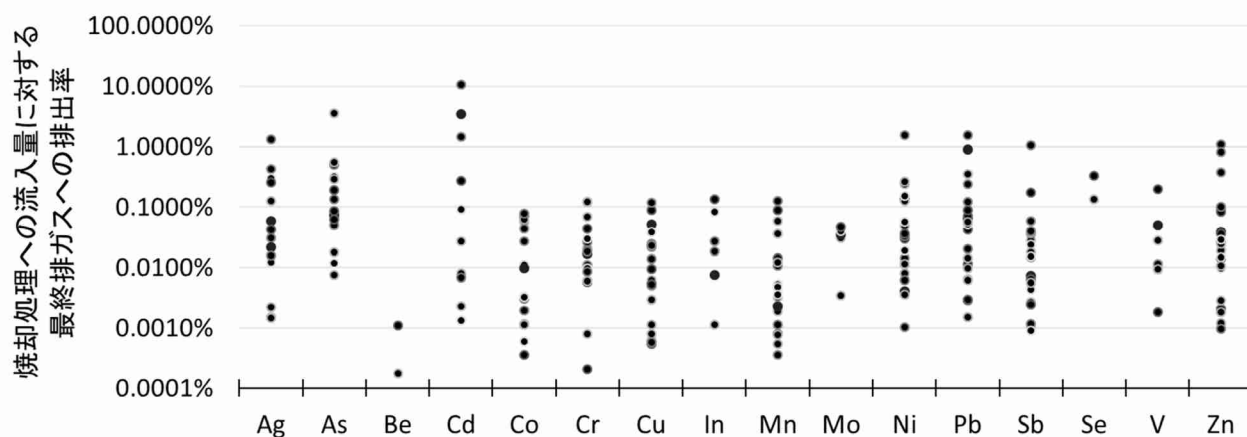


図 II-52 焼却処理への流入量に対する最終排ガスへの排出率の計算結果

最終排ガスへの排出率は、焼却処理へ流入した金属類の焼却炉内の排ガス系への移行率、排ガス系へ移行した金属類の排ガス処理による除去率によって決まると考えられることから、それらに影響すると考えられる炉形式、運転方式（連続式またはバッチ式）、排ガス処理方式等の施設属性を考慮して整理することが必要であると考えられる。そこで、図 II-53～ 2-55 に、炉形式、運転方式、排ガス処理方式別に排出率の分布を整理した結果を示す。得られた計算値の数が少ない属性についても表示しているが、Be、In、Mo、Se、V については全体としても計算値が得られた施設数が少ないためデータを表示していない。なお、各属性別の計算値が得られた施設数は表 II-18 にまとめた通りである。特にストーカ式や流動床式の炉形式、スクラバーによる排ガス処理等の施設のデータが不足している。後述するように、排ガス処理方式については排出率への影響が大きいと考えられることから、今後スクラバー等を使用している施設のデータを蓄積することが必要である。

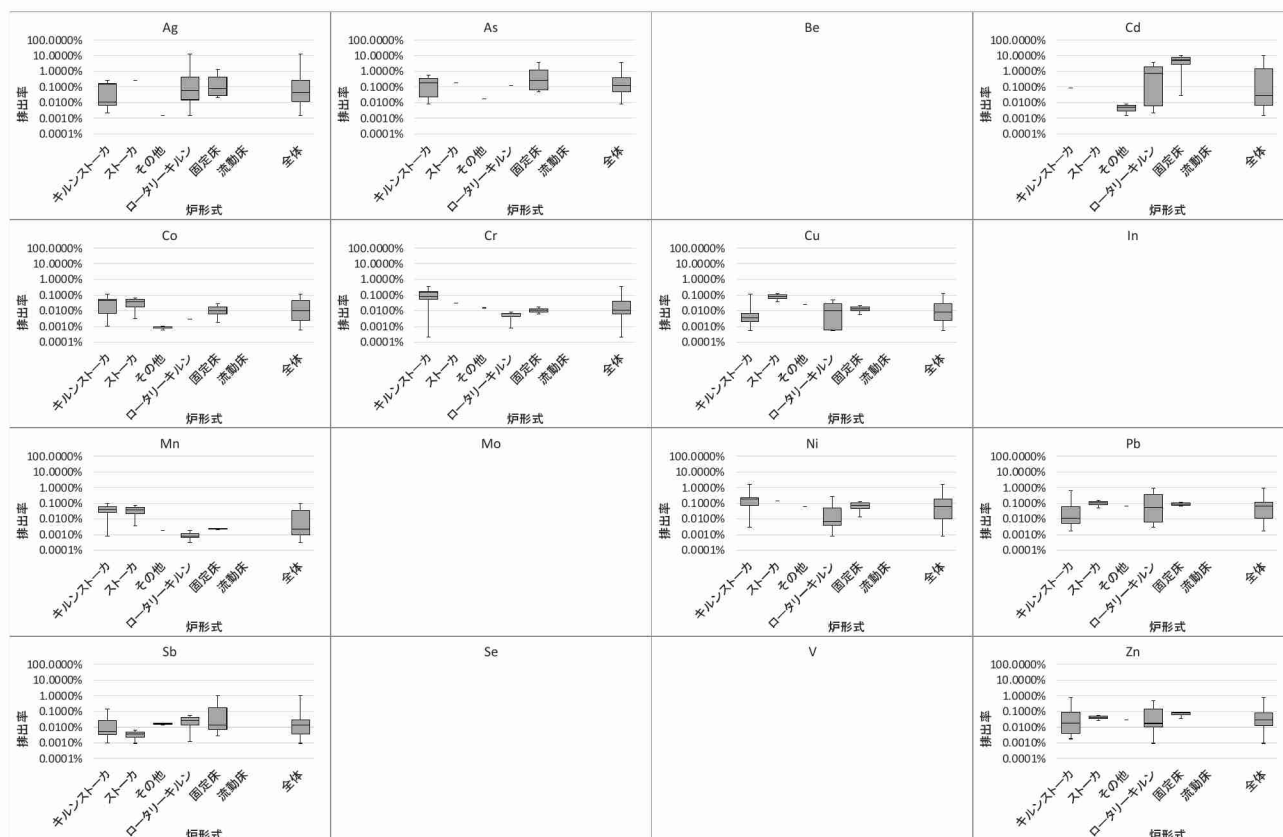


図 II-53 最終排ガスへの排出率計算値の分布（炉形式別）

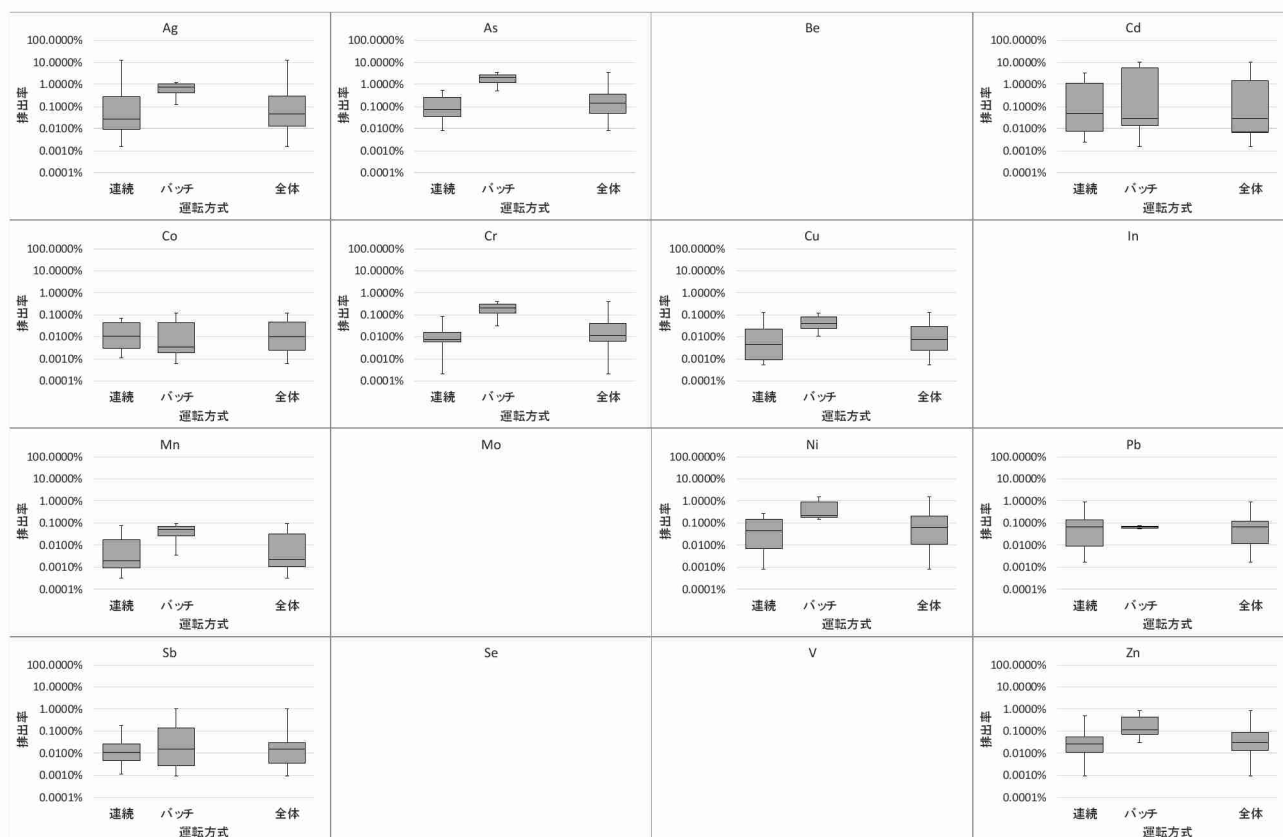


図 II-54 最終排ガスへの排出率計算値の分布（運転方式別）

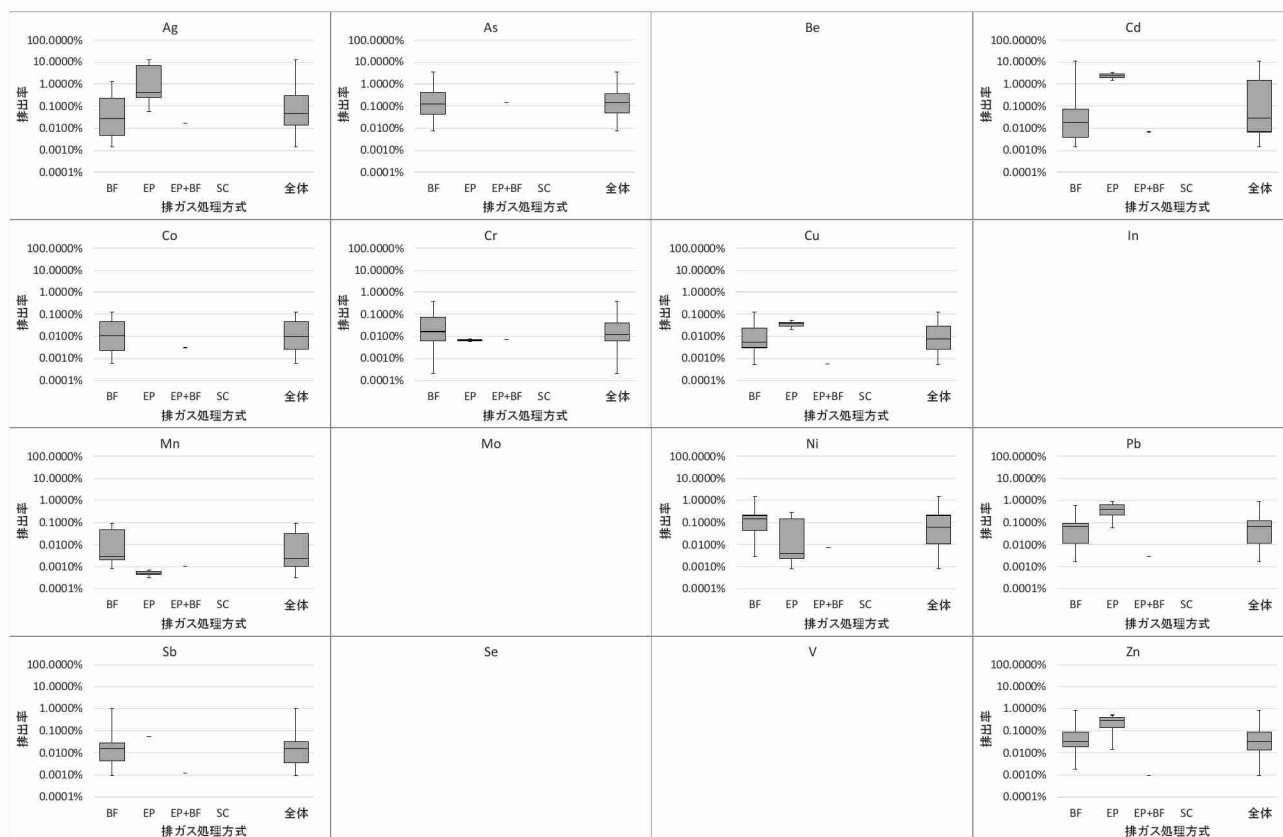


図 II-55 最終排ガスへの排出率計算値の分布（排ガス処理方式別、BF：バグフィルター、EP：電気集じん器、SC：スクラバーのみ、BF、EPには他方式の排ガス処理を組み合わせた施設も含む）

表 II-18 排出率の計算値が得られた施設数

		Ag	As	Be	Cd	Co	Cr	Cu	In	Mn	Mo	Ni	Pb	Sb	Se	V	Zn
合計		14	13	1	9	15	12	16	4	13	4	15	17	19	1	6	16
炉形式別	キルンストーカ	3	6	0	1	7	4	7	0	4	1	6	6	7	0	1	6
	ストーカ	1	1	0	0	2	1	2	0	2	0	1	2	2	0	1	2
	その他	1	1	1	2	2	1	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1
	ロータリーキルン	5	1	0	4	1	4	4	1	4	2	5	5	3	0	0	4
	固定床	4	4	0	2	3	2	2	2	2	0	2	3	5	0	3	3
	流動床	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
運転方式別	連続	12	11	1	6	10	10	13	4	11	4	12	15	14	1	5	13
	バッチ	2	2	0	3	5	2	3	0	2	0	3	2	5	0	1	3
排ガス処理方式別	BF	10	12	1	6	14	9	13	3	10	3	11	13	17	1	6	13
	EP	3	0	0	2	0	2	2	1	2	1	3	3	1	0	0	2
	EP+BF	1	1	0	1	1	1	1	0	1	0	1	1	1	0	0	1
	SC	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

施設属性別のデータ数は限られるが、得られたデータの範囲では、炉形式についてはその違いによって排出率に明確な差異は見られなかった。一方、運転形式、排ガス処理方式については、その違いによって排出率に差が見られる金属類があることがわかった。例えば、運転方式についてはCr、Cu、Mn、Ni、Znなどでは連続式処理の施設の方がバッチ式処理の施設よりも最終排ガスへの排出率が低い傾向が見られた。同様に排ガス処理方式については、Ag、Cd、Cu、Pb、Znなどでバグフィルターよりも電気集じん器の排出率の方が高く、Cr、Mn、Niなどで反対の傾向が見られた。この結果からは、産業廃棄物焼却施設からの排出量推計においては、排出係数（排出率）の設定で運転方式や排ガス処理方式による違いを考慮することで、より実態を反映した推計結果が得られるものと考えられた。

ただし、施設属性別のデータ数は限られていることから、データが十分ではない属性の施設（例えば流動床式、バッチ式、スクラバーやサイクロンのみの排ガス処理などの施設）についてデータをさらに蓄積し、施設属性による傾向をより明確に把握していくことが必要である。また、本研究では、排出率に大きく影響すると考えられる上記3つの施設属性を考慮したが、より詳細には排出率は炉内の燃焼条件等にも影響される可能性がある。PRTR 届出外推計等における排出量推計においてそのような詳細までを考慮することは実務的に困難であると考えられるが、推計における代表的なパラメータ設定の裏付けとして炉内燃焼条件等による影響を確認しておくことは必要である。

4-4-2 六価クロム

(1) 採取・分析方法の確立

従来の IC-DPC 法の問題の一つは、六価 Cr の抽出溶媒として高濃度の炭酸緩衝液（20 g/L- NaHCO_3 、100 g/L- Na_2CO_3 ）などが使われており、抽出液中の塩類と六価 Cr を分離することが困難であることから、抽出溶媒である炭酸緩衝液と、六価 Cr のクロマトグラムのピークがオーバーラップしてしまうことである。この問題を解決するため、最適な分離カラムや分離条件の検討を行った。分離カラムに関しては、一般的なイオン交換カラムである IonPac AS17（7.5 $\mu\text{eq}/\text{column}$ ）から、よりイオン交換容量の多い IonPac AS20（77.5 $\mu\text{eq}/\text{column}$ ）に変更した。これにより、抽出溶媒である炭酸塩によるイオン交換カラムのオーバーロードを防ぎやすくなる。また、グラジエントのプログラムなどの測定パラメータを最適化した。その結果、図 II-56 に示す通り、炭酸緩衝液と六価 Cr のピークを分離できる条件を決定できた。

一般的には、炭酸塩由来の塩による、イオン交換カラムのオーバーロードを防ぐため、既往の測定法では希釈を行うが、それにより測定感度が低下してしまうという問題があった。しかし、上記の改善を行うことで、希釈する必要がなくなり、より高感度な測定が可能となるだけでなく、希釈工程が省かれ、より簡便に測定できるようになった。

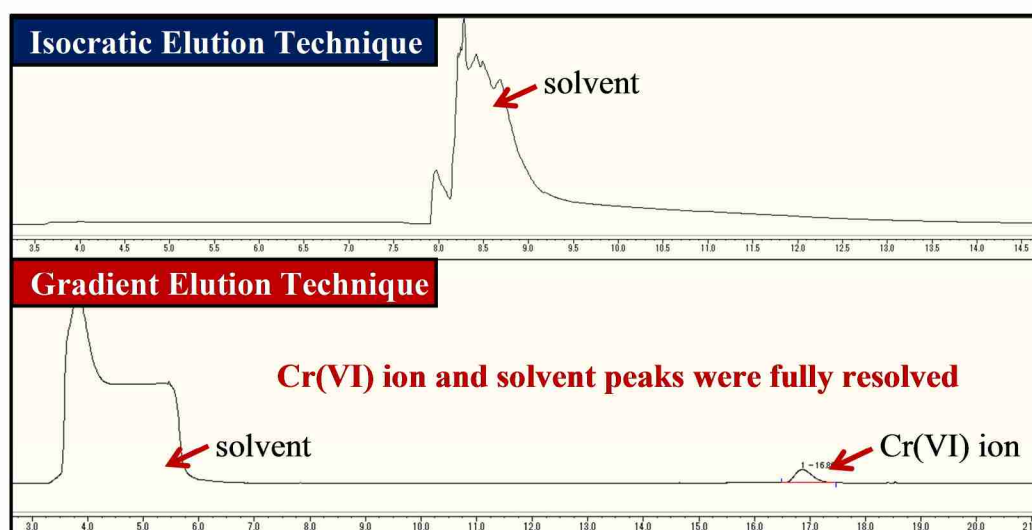


図 II-56 ICを用いた従来の六価 Cr 分析条件（上）と改良した分析条件（下）のイオンクロマトグラム

次に、改良した IC-DPC 法を用いてブランク試料を測定したところ、六価 Cr の位置に微小なピークが得られた。ピークの原因を特定するため抽出試薬中の六価 Cr 濃度の測定を行ったところ、図 II-57 に示すように抽出試薬に用いているリン酸緩衝液、硫酸マグネシウム、炭酸緩衝液のいずれについても微量ではあるが六

価 Cr が含まれていることがわかった。これより、MQL をより低減するためにはより高純度な試薬が必要となることがわかった。

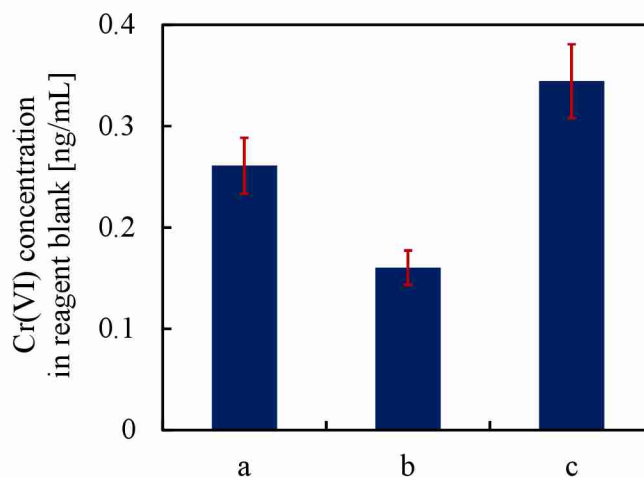


図 II-57 抽出試薬中の六価クロム濃度の測定 (a: リン酸緩衝液、b: 硫酸マグネシウム、c: 炭酸緩衝液)

改良した IC-DPC 法の精度を確認するため、添加回収試験を行った。また、試料採取に使用したろ紙から六価 Cr を抽出する際には捕集されたダストが混在しているため、抽出時のダストの存在が六価クロムの回収率に及ぼす影響も確認した。結果を図 II-58 に示す。六価 Cr の添加量を 50~ 1000 ng で変化させて添加回収試験を行ったところ、ダストを添加しない場合の回収率は平均で 100%~ 106%であった。一方、ガス採取量を 1 m³ とした場合の排ガス中ダスト濃度の基準値に相当する 150 mg を添加して添加回収試験を行ったところ、六価クロムの回収率は添加量 50ng の場合に平均 77%とやや低い値になったものの、250、1000 ng 添加の場合はそれぞれ回収率が平均で 92%、101%となり、良い回収率が得られた。

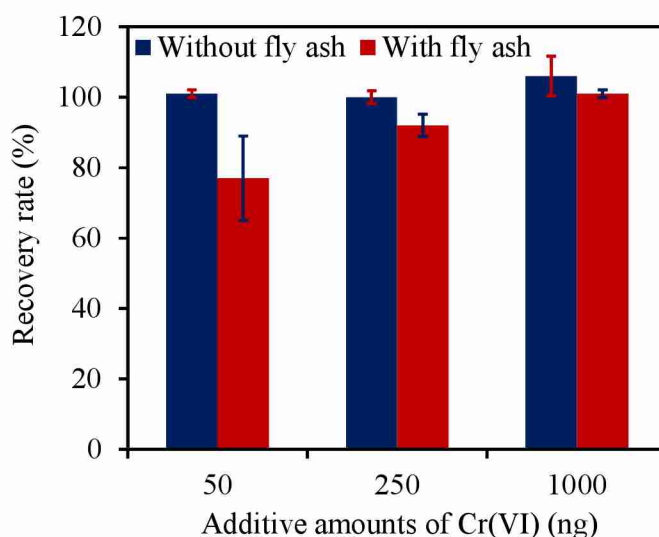


図 II-58 添加回収試験結果

また、改良した IC-DPC 法の検量線を図 II-59 に示す。分析溶液中六価 Cr 濃度 0.5~ 10 ng/mL の範囲において良好な直線性 (決定係数 0.99 以上) が得られた。以上より、改良した IC-DPC 法は排ガス中六価 Cr 濃度の測定に適用可能と考えられた。

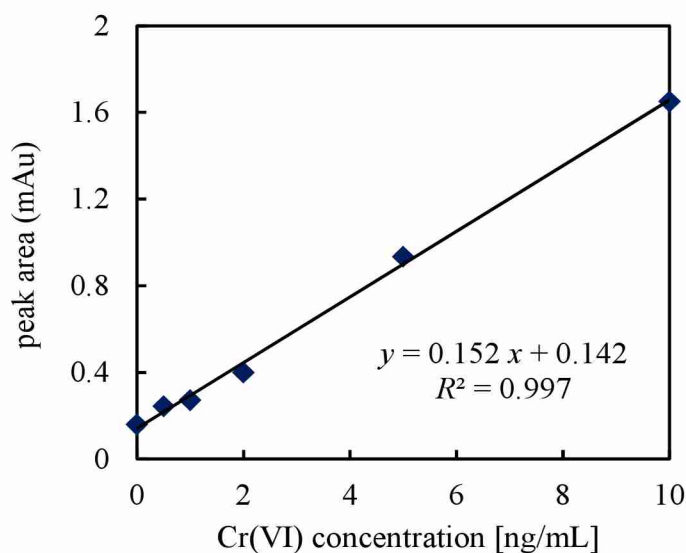


図 II-59 改良した IC-DPC 法の検量線

改良した IC-DPC 法の測定精度に関するまとめを表 II-19 に示す。試薬のブランクを考慮しても六価 Cr の定量下限値は抽出溶液中で $0.53 \mu\text{g/L}$ 、排ガス採取量が 1 m^3 の場合における排ガス中濃度の定量下限値は 5.3 ng/m^3 と非常に高感度な分析法が確立できた。

表 II-19 改良した IC-DPC 法の測定精度に関するまとめ

添加回収試験回収率	68%–110% (mean = 96%)
再現性	± 11%
検量線の直線性	$R^2 > 0.99$
測定可能範囲	0.5–10 ng/mL
定量下限値 (LOQ)	0.53 ng/mL
分析方法の定量下限値 (MQL)	5.3 ng/m^3 (排ガス 1 m^3 採取の場合)

(2) 実産業廃棄物焼却施設における排ガス中六価 Cr 濃度の測定

確立した分析方法を用いて測定した産業廃棄物焼却処理施設の最終排ガス中の六価 Cr 濃度の測定結果を表 II-20 に示す。測定を行った 16 施設のべ 25 試料のうち 19 試料（14 施設、うち 1 施設は定量値が得られた試料もあり）で下限値未満となったが、6 試料（3 施設）では六価 Cr 濃度が定量値として得られ、改良した IC-DPC 法により実施施設最終排ガスの測定が可能であることが示された。1 施設を除けば排ガス中濃度は最大でも 16 ng/m^3 となり、大気中濃度 ($1.0 \pm 1.0 \text{ ng/m}^3$ 程度⁵⁾) と比較しても高濃度ではないと考えられた。一方、1 施設（2 試料）については $1600\text{--}3100 \text{ ng/m}^3$ と高濃度で検出された。他の施設は全て排ガス処理方式にバグフィルターを採用（他の方式の設備との組み合わせを含む）しているのに対し、当該施設はスクラバーのみによる排ガス処理を行っており、排ガス処理方式によって排ガス中の六価 Cr 濃度が大きく異なる可能性が示唆された。ただし、廃棄物焼却施設の排ガス中六価 Cr 濃度の測定はこれまでに例がないことから、測定値については今後慎重な評価が必要ではある。

なお、総 Cr 濃度に対する六価 Cr 濃度の割合は、定量値が得られた施設において 1%未満から 3%程度、その他の施設においても数%未満と計算され、最終排ガスにおいては Cr のごく一部が六価 Cr として存在していると考えられた。

表 II-20 産業廃棄物焼却処理施設の最終排ガス中の六価クロム濃度（のべ 16 施設、25 試料）

施設	測定データ数	排ガス中濃度 (ng/m ³ _N)	
		六価Cr	総Cr
1	1	<4	340
2	7	<11 - 16	<1600 - 2400
3	1	<4	-
4	2	<5 - <8	150 - 450
5	2	1600 - 3100	10000 - 21000
6	1	<8	73
7	1	<6	2200
8	2	<3 - <6	280 - 930
9	1	<8	850
10	1	<8	1400
11	1	<5	450
12	1	<9	-
13	1	12	<5400
14	1	<13	810
15	1	<5	130
16	1	<10	190

4-4-3 揮発性有機化合物およびアルデヒド類

(1) 採取・分析方法の妥当性確認

添加回収試験の結果、分析対象候補とした 47 物質のうち表 II-21 に示した 28 物質については 70-120%と良好な回収率が得られ、今回採用した活性炭捕集・二硫化炭素脱離・GC/MS 法および DNPH カートリッジ捕集・アセトニトリル脱離・HPLC 法で排ガス中濃度の測定が可能であると考えられた。

表 II-21 測定が可能と判断された分析対象物質（VOCs26 種、アルデヒド類 2 種）

物質番号	物質名	採取方法	物質番号	物質名	採取方法
9	アクリロニトリル	活性炭	181	m-ジクロロベンゼン	活性炭
12	アセトアルデヒド	DNPHカートリッジ	181	p-ジクロロベンゼン	活性炭
53	エチルベンゼン	活性炭	186	ジクロロメタン	活性炭
57	エチレングリコールモノエチルエーテル	活性炭	200	スチレン	活性炭
80	キシレン	活性炭	200	テトラクロロエチレン	活性炭
125	クロロベンゼン	活性炭	216	1,1,1-トリクロロエタン	活性炭
127	クロロホルム	活性炭	232	1,1,2-トリクロロエタン	活性炭
149	四塩化炭素	活性炭	240	トリクロロエチレン	活性炭
150	1,4-ジオキサン	活性炭	262	1,2,4-トリメチルベンゼン	活性炭
157	1,2-ジクロロエタン	活性炭	279	1,3,5-トリメチルベンゼン	活性炭
158	1,1-ジクロロエチレン	活性炭	280	トルエン	活性炭
159	cis-1,2-ジクロロエチレン	活性炭	392	n-ヘキサン	活性炭
178	1,2-ジクロロプロパン	活性炭	400	ベンゼン	活性炭
179	1,3-ジクロロプロパン	活性炭	411	ホルムアルデヒド	DNPHカートリッジ

一方、クロロメタンやブロモメタンは、GC-MS/MS 分析において抽出溶媒である二硫化炭素と共溶出してしまいうため分析が困難であることがわかった。また、クレゾールやクロロアニリンなどの高極性物質は、抽出溶媒が無極性溶媒である二硫化炭素では活性炭から十分抽出することができず、回収率が 40%以下となり、今回採用した方法での分析は困難であることが分かった。その他、半揮発性化合物にも分類されるナフタレンやアントラセンなどは、活性炭へ吸着しやすいことから十分な回収率が得られなかった。アルデヒド類では、HPLC 分析において妨害ピークが多数検出されており、ホルムアルデヒドとアセトアルデヒド以外の物質の同定は困難であった。ホルムアルデヒドとアセトアルデヒド以外のアルデヒド類を測定する場合は、液体

クロマトグラフィータンデム質量分析計（LC-MS/MS）など、より定性能が高い分析機器を用いる必要があると考えられた。

また、実施設における採取・分析方法の適用性確認のため、初年度の調査において2施設（一般廃棄物焼却1施設、産業廃棄物焼却1施設）の排ガス採取を行い、分析を試行した。排ガス採取量はVOCs、アルデヒド類用それぞれについて60 L（流速1 L/min、1時間採取）として採取、分析を行ったところ、いずれの施設においても複数のVOCsおよびアルデヒド類を検出、定量することができた。また、捕集剤を2本ずつ連結して採取を行い、別々に分析を行ったが、後段の捕集材に対象物質は検出されず、60Lの排ガス採取では対象物質の破過はないと考えられた。以上より、採用した採取・分析方法で60L程度の排ガス採取を行うことで、実施設の排出レベルにおけるVOCsおよびアルデヒド類の測定が可能であると考えられた。

(2) 実産業廃棄物焼却施設における排出濃度の測定

図II-60に上記の採取・分析方法で測定した実産業廃棄物焼却施設（12施設、14試料）の最終排ガス中のVOCs・アルデヒド類濃度を示す。比較として、初年度試行した一般廃棄物焼却施設における測定結果もあわせて示した（白抜きプロット）。なお、図に示した18物質以外の10物質は全ての試料で検出下限未満であった。

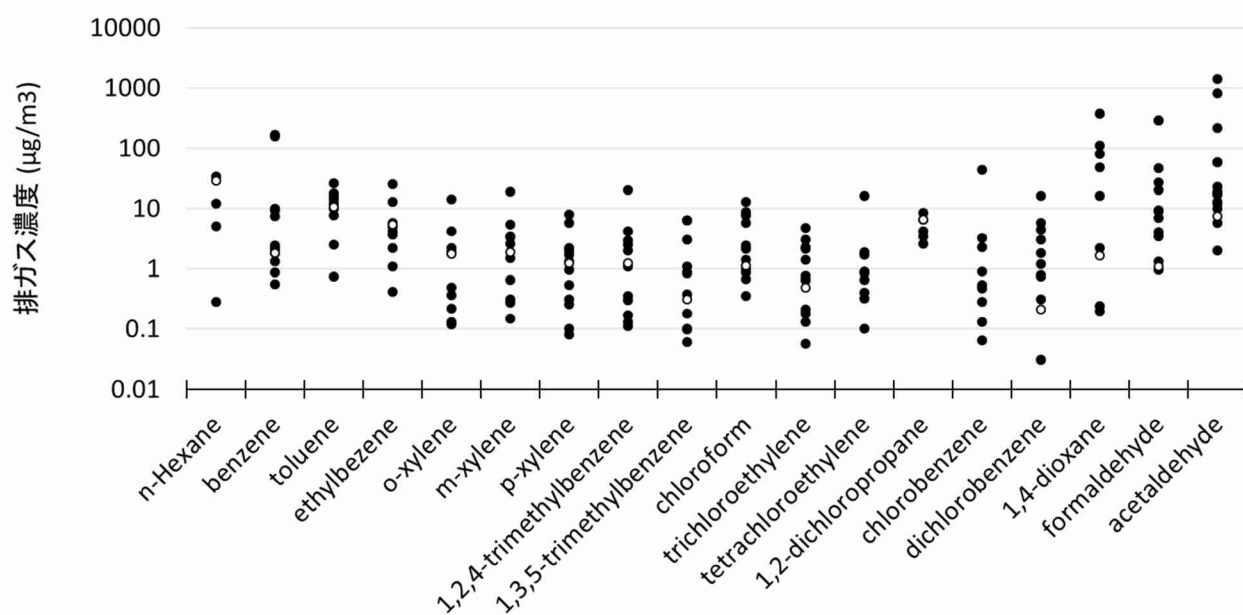


図 II-60 焼却排ガス中 VOCs およびアルデヒド類の濃度測定結果
（白抜きプロットは一般廃棄物焼却施設の測定結果）

多くの施設、物質について、下限値以上の定量値が得られ、その濃度レベルや排出量の多寡は別として、廃棄物焼却施設においてこれらの物質の排出自体は存在することが示された。検出されたVOCsおよびアルデヒド類は、脂肪族であるn-ヘキサン、芳香族であるベンゼンおよびその誘導体（トルエン、キシレン、エチルベンゼン）が他のVOCsと比較して相対的に高濃度で検出されており、排ガス中に排出される主要な物質であった。これらの物質は4-3-1で報告した燃焼実験結果においても検出されており、結果は整合的であった。一方、アルデヒド類は、ホルムアルデヒドおよびアセトアルデヒドを分析しているが、いずれも相対的に高濃度で検出された施設が多かった。1,4-ジオキサンについても比較的高濃度で検出された。

なお、一般廃棄物焼却施設においても同様の排ガス組成が得られており、またその濃度レベルに明確な差

異は見られなかった。一般廃棄物焼却施設では廃棄物組成が産業廃棄物焼却施設と明らかに異なると考えられること、またこれらの有機化合物が処理廃棄物に多く含有されているとは考え難いことをふまえると、検出された物質は処理廃棄物に由来するというよりも、廃棄物の燃焼による生成に由来している可能性が高いと考えられた。また、炉形式等の施設属性による明確な傾向も見られなかった。

4-5 産業廃棄物焼却施設からの排出量推計の試行

4-5-1 金属類

(1) 焼却処理量、焼却廃棄物の金属類含有量、最終排ガスへの排出率を用いた推計

図 II-61 に、産業廃棄物処理業の焼却施設（セメント業、製紙業、その他製造業等を除く業区分において業許可を持つ施設）についての金属類の排出量推計試行結果を示す。前述のように、排ガス処理が BF、EP の施設のみを対象とした結果を示している。棒グラフは調査施設ごとの処理廃棄物中の金属類含有量、排出率の推定値の中央値、エラーバーは第一および第三四分位数を用いて計算した結果を示している。図には、最終排ガス中濃度が多くの施設において検出下限値未満となった（すなわち排出率が算出できなかった）As、Be、Co、In、Mo、Se、V を除いた 9 種の金属類の結果を示した。また、施設タイプの考慮による推計の有効性を示すため、施設の主要な処理廃棄物や排ガス処理方式を考慮せず、全調査施設の結果を分類せずに用いて推計した結果を合わせて示した。なお、この結果は本研究で得られた実測データに基づいて試行的に推計したものであり、実測データの充実によって値そのものは多少変わり得ることに注意されたい。

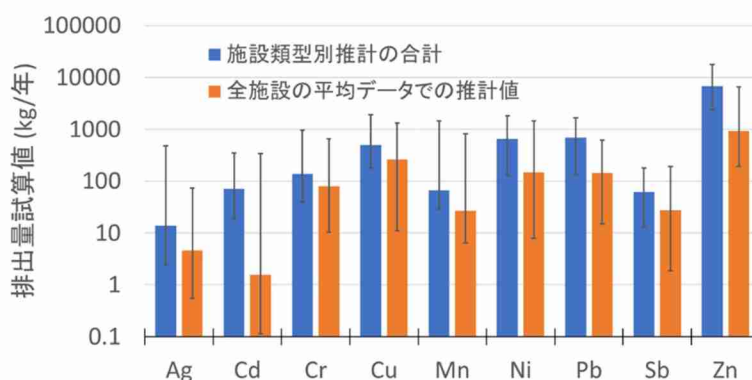


図 II-61 産業廃棄物処理業の焼却施設における金属類の大気排出量推計試行結果
(排ガス処理方式が BF および EP の施設の推計値)

いずれの金属類についても、施設類型を考慮した場合の推計値は、施設類型（主要な処理廃棄物、排ガス処理方式）を考慮しない場合の推計値と比較して数倍大きな値を示した。これは、施設類型を考慮しない場合、処理廃棄物の金属類含有量や最終排ガスへの排出率の中央値が小さい方に偏るため、金属類の排出量を過小に推計してしまうためと考えられる。具体的には、「汚泥」や「その他」、一部の金属類については「廃プラスチック」や「廃油」を主要な処理廃棄物とする施設、排ガス処理方式が EP の施設などからの排出量が施設類型を考慮した場合の処理廃棄物の金属類含有量や最終排ガスへの排出率よりも小さい値を用いて推計され、全体の排出量推計値が過小評価となる可能性を示唆している。

また、第一および第三四分位数を用いて推計した排出量の幅を見ても、施設類型を考慮した場合の推計値はそれを考慮しない場合の推計値と比較して概ね数分の一から 1 桁程度小さくなっている。これも上記の理由と同様で、施設類型を考慮した場合は処理廃棄物の金属類含有量や最終排ガスへの排出率の施設によるば

らつきが小さくなっているため、これが排出量推計値にも反映されるためである。

以上のとおり、産業廃棄物焼却施設については、処理廃棄物や排ガス処理方式の違いを考慮しないと金属類の排出量が過小評価される可能性があること、これらの違いによる施設の類型ごとの推計を行うことで施設による排出実態の違いを反映し、不確実性も相対的に小さい推計値を得ることができる可能性が示された。

推計値自体はあくまで本研究で得られた実測データに基づいて試行した推計の結果であり、実測データの充実によって値自体は変わり得ることを理解した上で、以下に PRTR 届出排出量との比較考察を行う。図 II-61 に示した 9 種の金属類の排出量推計値（中央値で比較）は、PRTR 届出排出量（大気）の数%~ 50%程度と試算された。第一四分位数を用いて推計した幅の下限側では 0.05%~ 15%程度と小さくなるため、施設類型別の実測データの充実によってその推計精度を向上する必要があるが、金属類によっては排出量への寄与が無視できないものもあると考えられる。この結果は産業廃棄物焼却施設からの排出量を的確に把握することの重要性を示していると言える。一方で、排出率の推定値からわかるように、廃棄物焼却処理への金属類の移動量の大きさに比してその多くは焼却処理（排ガス処理）によって環境中への排出が抑制されており、廃棄物処理プロセスが社会システムにおいて環境排出を防止する役割を適切に果たしているとも言える。

(2) 施設類型の細分化による推計精度向上の試行

(1) で示した施設類型を考慮した推計で実態により近い排出量推計値が得られる可能性が示されたが、それでもなお推計値は一定の幅の不確実性（ばらつき）を示している。これは、本研究で得られたデータの範囲では、処理廃棄物の金属類含有量や最終排ガスへの排出率のばらつきが大きい施設類型が未だ存在することが理由である。これらの施設類型について、さらに詳細な分類や実測データの充実を行うことで、推計値の幅をより小さくした推計が可能になると考えられる。例えば、処理廃棄物による類型については、「汚泥」や「その他」を主要な処理廃棄物とする施設のデータのばらつきが大きい。「その他」についてはダイオキシン類排出状況等調査で区分されている汚泥、廃油、廃プラスチック、木くず、感染性廃棄物、一般廃棄物以外の廃棄物種を詳細化することで、処理廃棄物の性状の違いをさらに考慮することができると考えられる。また、「汚泥」については排出業種によってその性状は大きく異なることが予想されるため、排出業種までを考慮することで汚泥の性状の違いをさらに考慮することができると考えられる。ここでは、この 2 点について考慮した推計のケーススタディを示す。

(a) 主要な処理廃棄物「その他」の細分化による推計の例

前述の通り、「その他」については汚泥、廃油、廃プラスチック、木くず、感染性廃棄物、一般廃棄物以外の廃棄物種がすべて含まれている。例えば、図 II-27 に示した PRTR 届出移動量（廃棄）データから、廃酸、廃アルカリは処理廃棄物の金属類含有量への寄与が大きい可能性がある。このことは、本研究での調査施設の実測データにも見ることができる。図 II-62 に、主要な処理廃棄物が「その他」であった調査施設の処理廃棄物の金属類含有量推定値を示す。データ数は限られるが、Ag、Cd、Cu、Pb、Sb などについて、年間処理量データにおける廃酸、廃アルカリの有無によって処理廃棄物中の含有量が異なる傾向を示している（廃酸、廃アルカリを処理している施設で高い傾向を示している）。また、維持管理情報を用いた詳細な廃棄物種類別の焼却処理量データの把握からも、廃酸、廃アルカリの処理を考慮することの必要性が示されている。

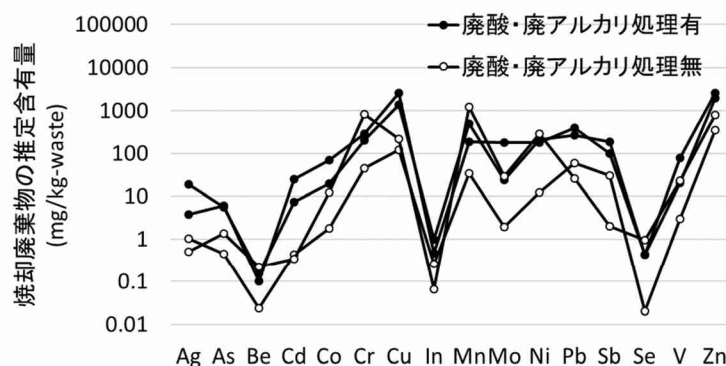


図 II-62 廃酸・廃アルカリ処理有無による焼却廃棄物中含有量推定値の違い
(主要な処理廃棄物「その他」類型)

以上より、ここでは事例として、主要な処理廃棄物「その他」の施設類型について、廃酸、廃アルカリの処理有無によって細分化を施し、推計を試行した。推計の試行は、(2)式における主要な処理廃棄物による施設類型 i = 「その他」をさらに廃酸、廃アルカリの処理有無で細分化して行った。年間焼却処理量は、4-1 で整備した三地域の維持管理情報による詳細廃棄物処理量データにおける「その他」類型の焼却処理量の廃酸、廃アルカリの処理有無別の割合を算出し、「その他」類型の全国の焼却処理量を廃酸、廃アルカリの有無で按分して用意した。なお、今回は、廃酸、廃アルカリを全く処理していない施設を処理無、それ以外を処理有と分類した。処理廃棄物の金属含有量推定値は 4-2-3 で作成したデータに基づいた。

廃酸、廃アルカリの処理有無を考慮した主要な処理廃棄物「その他」の施設類型についての金属類の排出量推計試行結果を図 II-63 に示す。図には処理廃棄物や排ガス処理方式による施設類型を考慮しない場合、廃酸、廃アルカリの処理有無を考慮しない場合の推計値もあわせて示した。

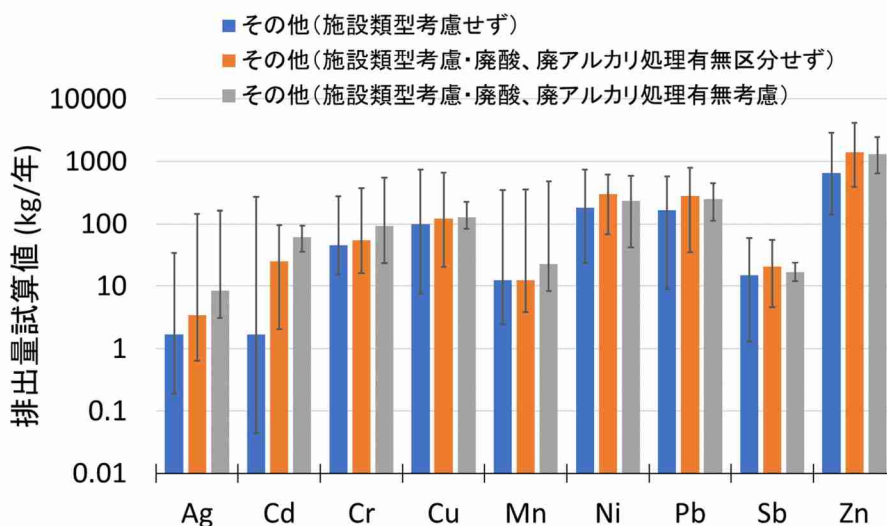


図 II-63 廃酸・廃アルカリ処理有無を考慮した金属類の大気排出量推計試行結果
(主要な処理廃棄物「その他」類型、排ガス処理方式「BF」および「EP」類型)

結果が示すように、図 II-62 で廃酸、廃アルカリの処理有無で処理廃棄物の含有量が明確に異なる金属類 (Ag、Cd、Cu、Pb、Sb など) については、排出量推計値の幅が小さくなっていることがわかる (Ag や Cd の

ように推定含有量もオーダーレベルで異なる場合には、中央値での推計値も異なる値が得られている)。現時点では得られた実測データ数が限られているため、実測データを充実して廃棄物種の影響をより詳細に把握していく必要があるが、この事例が示すように、処理廃棄物種による施設類型を細分化することでより不確実性の小さい排出量推計値を得ることができると考えられる。

(b) 汚泥の排出業種を考慮した排出量推計の例

ここでは特に排出業種による単位委託廃棄物量あたりの届出移動量（廃棄物の含有量に相当）のばらつきが大きかった汚泥を例として、排出業種を考慮した大気排出量推計の試行例を示す。

図 II-29 に示した結果をふまえ、各排出業種を汚泥の単位委託廃棄物量あたり届出移動量の高低で 2 区分し、それぞれの区分の単位委託廃棄物量あたり届出排出量（平均値）と焼却処理量を掛け合わせて焼却処理への金属類の流入量を計算した。これに図 II-55 に示した最終排ガスへの排出率（中央値）を乗じ、大気排出量を試算し、排出業種を区分しない場合の結果と比較した。なお、排ガス処理方式は BF と EP について計算した。排出業種ごとの汚泥の単位委託廃棄物量あたり届出移動量の区分は表 II-21 に示すとおりである。

表 II-21 単位委託廃棄物量あたり届出排出量の高低による排出業種の区分設定

排出業種	単位委託廃棄物量あたり届出移動量の区分設定					
	Zn	Cr	Cu	Pb	Ni	Mn
医薬品製造業	高	高	低	低	低	高
化学工業	高	高	低	低	高	高
農薬製造業	高	高	低	低	高	高
窯業・土石製品製造業	低	低	高	低	低	高
鉄鋼業	低	低	低	低	低	高
非鉄金属製造業	低	低	低	低	低	高
金属製品製造業	低	高	高	低	高	高
医療用機械器具・医療用品製造業	低	高	低	高	低	低
一般機械器具製造業	低	高	低	高	低	低
精密機械器具製造業	低	高	低	高	低	低
電気機械器具製造業	低	高	低	低	高	低
電気計測器製造業	低	高	低	低	高	低
電子応用装置製造業	低	高	低	低	高	低
船舶製造・修理業、舶用機関製造業	高	高	低	高	高	低
輸送用機械器具製造業	高	高	低	高	高	低
その他	低	低	低	低	低	低

表 II-22 に全業種と業種区分ごとの単位委託廃棄物量あたり届出移動量、焼却処理量、焼却処理への金属類流入量の計算値を示す。全業種の平均を用いた場合と比較して、単位委託廃棄物量あたり届出移動量の高低で業種を区分した場合は焼却処理への金属類流入量が 2 分の 1 から数分の 1 まで小さくなっている。これは、全業種平均のデータを用いて計算した場合、単位委託廃棄物量あたりの届出移動量（廃棄物の含有量に相当）が高い排出業種のデータの影响が大きく表れるためである。この結果だけからも汚泥については排出業種を考慮することの必要性が見てとれる。

これに最終排ガスへの排出率を乗じて大気排出量とした試算結果を表 II-23 に示す。排出業種を考慮して試算した汚泥の焼却に伴う金属類の大気排出量は、排出業種を考慮せず一括で扱った場合の試算値と比べて数分の 1 から 10 分の 1 程度となった。汚泥の焼却のみを対象としたここでの試算値は、汚泥以外も対象とした(1)の結果と比較して大きめの値となっており、計算された単位委託廃棄物量あたり届出移動量の値の代表性などに課題があると考えられるので、値自体の精度は検討の余地がある。しかし、ここでの試算から排出業種による違いを考慮すると推計値は大きく異なることがわかり、同じ廃棄物の種類でも排出業種によってその性状が大きく異なる場合には、その違いを考慮することが必要である可能性が示唆された。

なお、計算値の代表性等に課題がある原因の可能性として、今回は単一の廃棄物の種類が選択された PRTR 届出移動量データのみを計算に用いたこと、PRTR 届出移動量算出の精度に問題があることが挙げられる。前

者については、前述の PRTR 届出移動量データの集計解析でも複数の廃棄物の種類や処理方法が選択されたレコードはその内訳の実態が不明であるという課題が指摘された。PRTR 届出移動量データは多くの化学物質について廃棄物処理への流入フローを示す貴重なデータであるが、化学物質フローの把握に実際に活用するためには届出移動量に関する届出項目の詳細化や追加などによりその内訳や算出方法の実態を把握することが必要である。

表 II-22 単位委託廃棄物量あたり届出排出量の高低による排出業種の区分設定

			Zn	Cr	Cu	Pb	Ni	Mn
データ数	全業種平均	業種A平均	20	42	6	33	57	25
		業種B平均	11	9	4	27	13	11
		業種B平均	9	33	2	6	44	14
単位委託廃棄物量あたりの移動量 (kg/トン)	全業種平均	業種A平均	81.01	92.38	5.18	95.56	71.79	22.43
		業種B平均	3.61	19.69	2.19	46.47	7.47	1.97
		業種B平均	175.62	112.21	11.15	316.45	90.80	38.50
焼却量 (トン)	(BF)	全業種平均	1,047,753	1,047,753	1,047,753	1,047,753	1,047,753	1,047,753
		業種A平均	1,018,204	1,005,162	1,045,618	1,035,583	1,039,062	770,427
		業種B平均	29,549	42,591	2,135	12,170	8,691	277,326
		計	1,047,753	1,047,753	1,047,753	1,047,753	1,047,753	1,047,753
	(EP)	全業種平均	162,419	162,419	162,419	162,419	162,419	162,419
		業種A平均	138,110	123,953	158,966	150,564	154,028	106,529
		業種B平均	24,309	38,466	3,453	11,855	8,391	55,890
		計	162,419	162,419	162,419	162,419	162,419	162,419
	(全方式)	全業種平均	84,880	96,795	5,426	100,122	75,221	23,498
		業種A平均	3,673	19,793	2,293	48,124	7,761	1,515
		業種B平均	5,189	4,779	24	3,851	789	10,678
		計	8,862	24,572	2,316	51,975	8,550	12,192
焼却処理への金属類流入量 (トン)	(BF)	全業種平均	13,158	15,005	841	15,520	11,661	3,643
		業種A平均	498	2,441	349	6,997	1,151	209
		業種B平均	4,269	4,316	39	3,751	762	2,152
		計	4,767	6,757	387	10,748	1,912	2,361
	(EP)	全業種平均	98,038	111,800	6,267	115,642	86,882	27,140
		業種A平均	4,171	22,234	2,641	55,121	8,912	1,724
		業種B平均	9,458	9,095	62	7,603	1,551	12,830
		計	13,629	31,329	2,704	62,724	10,463	14,554
	(全方式)	全業種平均	60.9	17.4	0.59	125	101.5	0.71
		業種A平均	16.9	4.8	0.39	102	11.6	0.37
		業種B平均	2.4	3.5	0.25	58	10.5	0.05
		計	14.5	1.3	0.14	44	1.1	0.33

表 II-23 排出業種を考慮した汚泥の焼却に伴う金属類の大気排出量試算結果

	排出量試算値 (kg/年)					
	Zn	Cr	Cu	Pb	Ni	Mn
全業種平均	60.9	17.4	0.59	125	101.5	0.71
業種区分あり合計	16.9	4.8	0.39	102	11.6	0.37
区分 (低)	2.4	3.5	0.25	58	10.5	0.05
区分 (高)	14.5	1.3	0.14	44	1.1	0.33

なお、ここでは処理廃棄物の詳細化による推計値の精度向上の可能性を示したが、最終排ガスへの排出率についてもより詳細な分類を行うことで推計値の精度を向上できる可能性がある。例えば、本研究では排ガス処理方式のみを考慮したが、前述の通り、運転方式（連続式またはバッチ式）によっても同様に排出率の傾向が異なると考えられる。本研究では得られた実測データ数の制約から推計においてこれを考慮できなかったが、排ガス処理方式と運転方式の組合せでの施設類型によって推計を行うことがより望ましいと考えられる。また、本研究で得られたデータの範囲では、炉形式による最終排ガスへの排出率の違いは明確に見られなかったが、実測データの充実によってその違いが見られれば、炉形式も含めた施設類型を考慮することが必要である。

(3) ばいじん濃度とばいじん発生量を用いた推計の試行

ばいじんの金属類含有量の実測データおよび DXNs 調査の廃棄物処理組成から各金属の回帰分析を行った

結果を表 II-24 に示す。ここでは金属毎に p 値が 0.2 未満を示した品目の係数を取りまとめた。

自由度補正決定係数を見ると、As と Cr で 0.2 前後の低い値を示しており、この廃棄物分類でばいじんの金属類含有量を表現できない、もしくは同一品目中では含有量の変動が大きいと考えられた。それ以外の金属については、幅があるが決定係数 0.36~ 0.79 を示した。比較的高い決定係数を示していた金属は、In、Mn、Mo、Se、V であった。In および Mn については一般廃棄物の寄与が大きく、これが原因で決定係数が大きくなったと考えられる。Mo については廃油の寄与が大きく、添加剤あるいは潤滑油や切削油等に由来するものと考えられる。Se については下水汚泥、それ以外の汚泥、廃油、その他で表現され、V については、汚泥、廃油、その他で表現された。その他の金属類については、全体的には汚泥や廃油、木くずを含むケースが多く、これらの廃棄物に由来していることが示唆された。一方、下水汚泥、廃プラスチックについては負の値を取ることが多く、これらの金属類を含まず、ばいじんを発生させていると推測された。

表 II-24 DXNs 調査データに基づく重回帰分析結果

金属	自由度補正決定係数	表示	一般廃棄物	汚泥（下水汚泥除く）	下水汚泥	廃油	廃プラ	木くず	その他（感染性廃棄物を除く）	感染性廃棄物
Ag	0.493	係数				5.1E+02				
		P値				3.7E-06				
As	0.191	係数				1.4E+02			4.1E+01	
		P値				4.3E-02			2.0E-01	
Be	0.401	係数		5.1E-01		1.2E+00	3.8E-01			
		P値		1.2E-01		2.8E-02	6.9E-02			
Cd	0.562	係数	4.4E+03		-1.2E+05	2.3E+03				
		P値	2.5E-06		4.9E-03	1.8E-02				
Co	0.499	係数	1.0E+02			3.5E+02				
		P値	4.6E-02			2.0E-05				
Cr	0.230	係数							2.8E+03	
		P値							4.1E-03	
Cu	0.503	係数				9.2E+03		3.6E+03	5.7E+03	
		P値				1.1E-02		1.2E-01	8.7E-04	
In	0.629	係数	2.6E+02		-6.9E+03				2.7E+01	
		P値	3.3E-08		6.6E-04				1.9E-01	
Mn	0.725	係数	1.0E+05		-2.6E+06					
		P値	2.0E-10		6.0E-05					
Mo	0.790	係数				1.3E+03	-7.1E+01			
		P値				6.3E-12	1.4E-01			
Ni	0.464	係数	7.8E+02			3.3E+03		1.4E+03		
		P値	1.7E-01			2.2E-04		1.1E-02		
Pb	0.363	係数				1.1E+04		1.7E+04		
		P値				8.2E-02		4.4E-04		
Sb	0.553	係数		5.2E+02	3.4E+04		4.0E+02	5.9E+02	8.7E+02	
		P値		1.5E-01	9.5E-02		9.1E-02	1.1E-01	3.3E-03	
Se	0.681	係数		3.3E+00	1.4E+02	7.2E+00			2.7E+00	
		P値		1.1E-02	4.2E-02	9.3E-04			4.5E-03	
V	0.710	係数		5.6E+01		1.8E+02			1.9E+01	
		P値		5.7E-03		1.5E-06			1.7E-01	
Zn	0.570	係数	2.3E+05		-5.0E+06	8.5E+04		7.4E+04		
		P値	2.5E-06		2.0E-02	9.3E-02		3.4E-02		

次に、ばいじん中の金属濃度の実測データおよびばいじん試料の採取施設の維持管理情報に基づく詳細な年間廃棄物処理組成から各金属の回帰分析を行った結果を表 II-25 に示す。詳細な廃棄物分類による回帰分析では、自由度補正決定係数が 0.30~ 0.82 となった。Cr、Ni、Co、Ag、Pb では決定係数 0.3~ 0.4 程度と低めで、それ以外は概ね 0.6 以上を示したが、Cd と Zn はやや低めであった。

回帰係数全体について見てみると、廃酸、廃アルカリが関与している金属が最も多く、次いで特管汚泥、さらに次いで一般廃棄物、廃油、鉍さい・燃渣の寄与が大きかった。ただし、特管汚泥、鉍さい・燃渣については負の係数を示すことが多く、ばいじんの発生量は増加させているが金属類の含有量には影響が小さいと考えられた。

表 II-25 維持管理情報に基づく詳細な廃棄物組成での回帰分析結果

金属	自由度補正 決定係数	表示値	一般廃棄物	汚泥	廃油	廃酸・アル カリ	廃プラ・ゴ ム	紙くず	木くず	繊維くず	その他	鉱滓・燃渣	感染性廃棄 物	特管汚泥	特管廃酸・ アルカリ
Ag	0.401	係数				7.8.E+02									-4.8.E+03
		P値				6.0.E-05									1.4.E-02
As	0.485	係数			1.0.E+02									3.5.E+03	
		P値			8.5.E-02									9.7.E-04	
Be	0.644	係数		7.9.E-01	3.1.E+00	-1.8.E+00				7.6.E+00		-1.2.E+01			
		P値		4.4.E-03	1.1.E-06	5.0.E-03				4.4.E-02		3.1.E-02			
Cd	0.457	係数	4.5.E+03												
		P値	1.0.E-05												
Co	0.381	係数	1.7.E+02			4.8.E+02								-3.2.E+03	
		P値	1.3.E-02			6.5.E-04								7.0.E-02	
Cr	0.340	係数				-4.8.E+03						1.0.E+05			
		P値				8.1.E-02						2.3.E-04			
Cu	0.651	係数			7.2.E+03	1.7.E+04					1.4.E+04	-7.7.E+04			
		P値			6.8.E-02	7.9.E-04					5.0.E-05	6.6.E-02			
In	0.638	係数	2.2.E+02											2.1.E+03	
		P値	7.6.E-07											4.0.E-03	
Mn	0.660	係数	1.0.E+05												
		P値	5.5.E-09												
Mo	0.683	係数			1.1.E+03	8.2.E+02						-6.0.E+03		-1.1.E+04	
		P値			1.4.E-06	3.4.E-03						5.0.E-03		6.6.E-04	
Ni	0.296	係数				3.1.E+03			1.5.E+03						
		P値				8.1.E-03			1.8.E-02						
Pb	0.401	係数							1.7.E+04					2.3.E+05	
		P値							3.0.E-04					2.5.E-02	
Sb	0.627	係数				2.1.E+03	7.5.E+02	1.9.E+03	6.7.E+02						
		P値				1.9.E-03	4.7.E-03	2.0.E-02	5.3.E-02						
Se	0.626	係数		4.6.E+00		1.1.E+01					4.2.E+00				
		P値		1.7.E-03		2.3.E-04					4.5.E-02				
V	0.820	係数		4.5.E+01	1.7.E+02	2.4.E+02						-1.3.E+03		-1.3.E+03	
		P値		6.7.E-03	7.5.E-06	6.5.E-06						2.8.E-04		1.3.E-02	
Zn	0.555	係数	2.4.E+05			1.1.E+05			7.3.E+04						
		P値	3.3.E-06			9.0.E-02			4.0.E-02						

多くの金属類のばいじん中含量に関与するとされた廃棄物種類についてその性状から整理すると、廃酸、廃アルカリは金属類を含有していることに不思議はない。特管汚泥については前記の通り負の値を取っているケースも半数見られたが、有害金属等の含有量が高いことで区別されている廃棄物であるので、正の値を示した金属類についてばいじん中含量に正の影響を与えることは理解できる。一般廃棄物については、Cd、In、Mn、Zn で係数が得られたが、電池の混入による影響ではないかと考えられる。廃油については添加剤として Zn や Mo が加えられている可能性があるほか、切削時の微小金属混入や油劣化に伴う酸性化で金属が溶解することも考えられ、合金元素である Be や Mo などの金属類が含まれることは十分に考えうる。鉱さい・燃渣については多くの金属類を含むことが考えられるが、決定係数の低い Cr を除けば回帰係数が負の値をとっていることから、これらの焼却処理への投入はばいじん中の PRTR 対象金属類の含有量を小さくする方向に影響している傾向があると解釈される。鉱さい・燃渣は PRTR 対象金属以外の鉄やアルミ、シリカなどの元素を多く含み、これらの一部がばいじんへ移行することで、相対的に PRTR 対象金属類のばいじん中含量を小さくする方向に影響している可能性を反映していると考えられる。その他、一定水準以上の決定係数が得られた Pb、Sb、Zn で木くずの影響の可能性が示されているが、これらは塗料や防災・難燃剤として使用されていたものに由来することが考えられる。

この様に詳細な廃棄物分類で解析した結果においては、DXNs 調査で「その他」に区分されていた廃棄物による影響が大きく表れており、また用途や性状から考えても金属類が含有されている可能性がある。また、回帰分析結果を比較して、回帰式の決定係数や回帰係数の大小、P 値、解析対象金属が含まれる可能性のある廃棄物品目が選定されているかなどを検討した結果からも、維持管理情報に基づく詳細な廃棄物分類に基づく回帰分析の方がばいじん中濃度をより表現できていると考えられた。これより、維持管理情報データを用いた回帰分析によって得られた回帰式を用い、個別施設の処理廃棄物組成データからばいじんの金属類含有量を推定し、ばいじんの年間発生量データと設定した排ガス処理方式別の除去率を用いて排出量の推計を

試みた。推計は維持管理情報のデータを収集整理した三地域（関東・近畿・北海道地域）の施設を対象とした。

個別施設について推計した排出量をクラスター分析による主な処理廃棄物の施設類型で集約した結果を図 II-64 および図 II-65 に示す。推計試行の結果、いずれの金属類についても分類困難に区分した多様な廃棄物を処理している施設の寄与が大きくなっていた。排出量については Zn が最も大きく、次いで Mn、Cu、Pb、Cd、Sb が大きいと推計された。

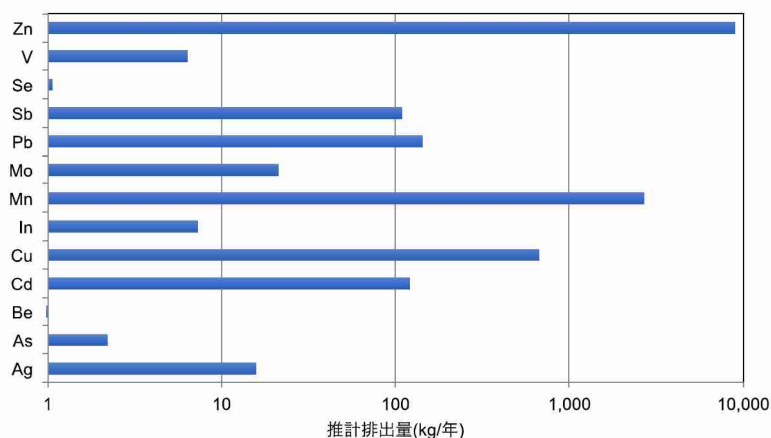


図 II-64 三地域（関東・近畿・北海道）における金属類の大気排出量の試算結果

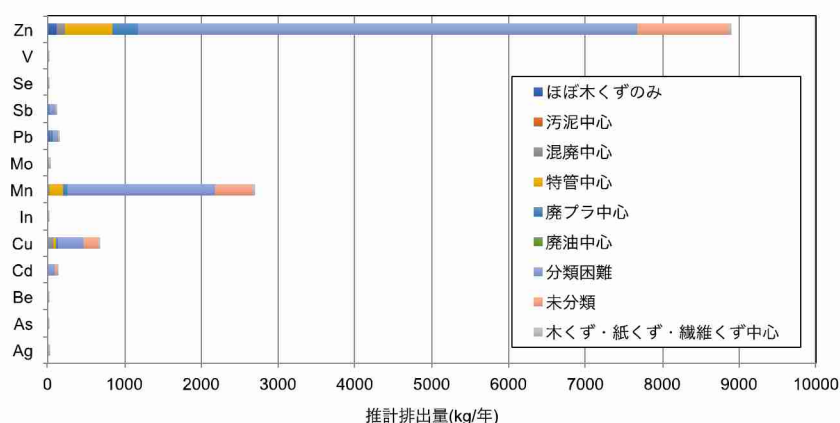


図 II-65 三地域（関東・近畿・北海道）における金属類の大気排出量の試算結果
(主要な処理廃棄物による施設類型別)

この結果を(1)の推計試行結果と比較する。両者は推計対象地域の範囲が異なるため直接は比較できないので、ここでは対象地域における年間焼却処理量で除した処理量あたりの排出量（いわゆる排出原単位）として比較した。図 II-66 にその比較結果を示す。図には両者に共通して結果を得た 8 種の金属類の比較を示している。図に示すように、ばいじんの金属類含有量と年間発生量を用いた推計結果は、(1)で示した推計結果よりも若干大きい値を示す金属類が多いものの、およそ(1)の推計結果の幅の範囲に収まっており、実測データの数や精度を考慮すれば類似した結果が得られたと考えられる。なお、(1)の結果よりも若干大きい値を示した原因としては、バグフィルターおよび電気集塵器以外の施設の影響が大きいこと、ばいじん中含有量の回帰分析において一般廃棄物を含むやや特殊な施設のデータも含めて分析したために回帰式によるばいじん

中含量の推計値がやや高めの値を示していたことなどが可能性として考えられる。

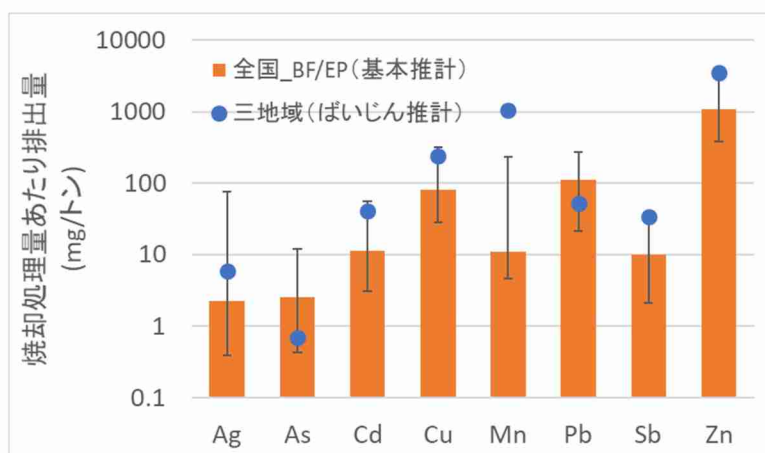


図 II-66 異なる推計アプローチによる焼却処理量あたり大気排出量の比較

以上の結果より、大気への排出量のみを推計対象とする場合には、より簡易的な推計としてばいじんの金属類含有量や発生量を用いた推計アプローチも適用できる可能性があると考えられる。このアプローチの1つの利点として、最終排ガス中濃度の実測では多くが下限値未満となってしまう金属類についても推計値が得られる可能性が高いことが挙げられる。

なお、より精度の高い推計に向けては、廃棄物処理量と廃棄物やばいじんの含有量データ、排ガス処理方式ごとの排出率データを蓄積することが必要である。その際には、特に廃酸、廃アルカリ、廃油、特管汚泥、木くず等の焼却を行う施設のデータを優先的に収集することが望ましいと考えられる。また、排ガス処理方式についてはスクラバーやサイクロンのみ（またはその組み合わせ）を使用する施設の排出率データが不足している。それらの排ガス処理方式では原理的にバグフィルターや電気集じん器よりも排出率が高くなる可能性があることから、推計精度の向上に向けてはデータの蓄積が望まれる。

4-5-2 六価クロム

産業廃棄物焼却施設排ガス中の六価クロム濃度の実測はこれまでに例がなく、本研究による実測値は慎重に評価される必要があるが、それを前提としたうえで、本研究では大気排出量の推計を試行した。

前述の通り、データ数は限られるものの、スクラバーのみによる排ガス処理を行っている施設において六価クロムが最終排ガス中に特異的に高濃度で検出されたことをふまえ、スクラバーとそれ以外（バグフィルター）による排ガス処理方式を区別して焼却処理量あたり排出量（排出係数）を試算した。表 II-26 に産業廃棄物焼却処理施設からの六価 Cr の排出係数試算値のまとめを示す。バグフィルター使用施設（15 施設、23 データ、他の排ガス処理方式との組み合わせを含む）では中央値で $80 \mu\text{g}/\text{トン}$ 、四分位数で幅を見た場合には 59（下限値未満）～ $155 \mu\text{g}/\text{トン}$ と比較的幅の狭い分布となった。一方、スクラバーのみを設置している施設（1 施設、2 データ）では中央値で $51500 \mu\text{g}/\text{トン}$ 、最小/最大の幅では $35000 \sim 68000 \mu\text{g}/\text{トン}$ と試算され、排出係数として整理しても特異的に大きな値となった。ただし、データ数が少ないため、今後データを蓄積した上で、慎重に評価を行うべきである点には注意されたい。

表 II-26 産業廃棄物焼却施設からの六価 Cr の大気排出係数試算値

排出係数試算値 (mg/トン)			
バグフィルター		スクラバーのみ	
最小値	0.024 (下限値未満)	最小値	35
第一四分位数	0.059 (下限値未満)		
中央値	0.080	平均値	52
第三四分位数	0.16		
最大値	0.80	最大値	68
データ数	23	データ数	2

次に、試算した排出係数を年間の廃棄物焼却処理量に乗じて大気への六価 Cr 排出量を試算した。今回の試算では、スクラバーのみを使用している施設についてスクラバーのみの施設の排出係数試算値、それ以外の施設についてはバグフィルター使用施設の排出係数試算値を用いた。ただし、電気集じん器やサイクロンのみで排ガス処理を行っている施設についての排出実態は不明であるため、今後のデータ蓄積が望まれる。計算は中央値（スクラバーのみ使用施設については2データしかないため平均値に等しい）を用いて行った。焼却処理量は DXNs 調査データを排ガス処理方式別に集計したものをを用いた。

大気排出量は 5.7kg/年と試算された。この量は、PRTR 届出排出量（大気、平成 28 年度）292kg/年の 2%程度に相当する。排出係数試算値の最大値で計算しても 12kg/年、PRTR 届出排出量の 4%強と試算され、産業廃棄物焼却施設からの大気排出量の寄与は大きくないものと考えられた。なお、焼却処理量では全体の 1%強に過ぎないスクラバー使用施設が中央値による計算では排出量試算値の 9 割、最大値による計算でも 5 割を占めており、その寄与は大きい可能性がある。本研究で試算した排出係数は限られたデータ数に基づくものであり、各種の排ガス処理方式等による排ガス中濃度や排出係数の傾向はデータ蓄積と追加の検討が必要である。ただし、試算結果から産業廃棄物焼却施設からの排出量は排出量全体への寄与は小さいと考えられることから、排出量推計の観点においては排出係数の精緻化の重要性は大きくはない。

4-5-3 揮発性有機化合物およびアルデヒド類

本研究における実測調査で産業廃棄物焼却施設からの VOCs やアルデヒド類の排出自体は存在することが示された。そこで、データ数は限られるが、本研究で得られた実測データを用いて産業廃棄物焼却施設からの VOCs およびアルデヒド類の大気排出量の推計を試行した。

前述の通り、炉形式等による明確な傾向が見られなかったため、ここでは施設属性等で区別せずに整理を行い、実測データに基づいて焼却処理量あたり排出量（排出係数）を試算した。なお、下限値未満であった試料については、PRTR 届出排出量等算出マニュアル（経済産業省・環境省）に従い、排ガス中濃度を下限値の 2 分の 1 と見なして排出係数を計算した。また、中央値等は 1 試料を 1 データとして算出した（複数の試料について測定を行った施設についてもそれぞれの試料のデータを個別に扱った）。

表 II-27 に産業廃棄物焼却処理施設からの VOCs およびアルデヒド類の排出係数試算値のまとめを示す。中央値で見ると、アセトアルデヒドの排出係数が約 900mg/トンと最も高く、次いでベンゼン、トルエン、クロロホルム、ホルムアルデヒドなどが 100-300mg/トン程度と高かった。その他の物質は 10 から数十 mg/トンのオーダーにあった。排出係数試算値の幅を四分位数で見れば、数分の 1 から数倍程度の幅にあり、第一四分位数から第三四分位数までの幅としては 10 倍から 20 倍程度に収まった。ただし、1,4-ジオキサンについてはその幅が 500 倍程度と大きく、施設によって排出係数が大きくばらついている可能性が示された。

表 II-27 産業廃棄物焼却施設からの VOCs およびアルデヒド類の大気排出係数試算値

	最小値	第一四分位数	中央値	第三四分位数	最大値	平均値
n-Hexane	4.0	21	57	214	1000	252
benzene	8.0	23	140	225	5200	645
toluene	35	90	255	1075	4300	750
ethylbenzene	5.5	16	50	400	640	199
o-xylene	1.7	3.4	11	68	400	81
m-xylene	2.2	6.3	17	123	530	115
p-xylene	1.2	3.6	11	61	210	49
1,2,4-trimethylbenzene	0.73	3.4	11	67	1900	174
1,3,5-trimethylbenzene	0.011	2.8	8.5	34	290	47
chloroform	2.0	19	102	195	420	122
trichloroethylene	1.9	4.6	11	37	130	27
tetrachloroethylene	0.060	7.1	13	51	250	41
1,2-dichloropropane	8.5	39	78	151	1300	198
chlorobenzene	1.6	8.9	20	79	670	81
dichlorobenzene	0.023	5.2	12	46	430	70
1,4-dioxane	0.10	5.4	46	2588	11000	2046
formaldehyde	1.0	113	295	630	9000	1196
acetaldehyde	11	308	885	3850	25000	4595

次に、試算した排出係数を年間の廃棄物焼却処理量に乗じて大気への VOCs およびアルデヒド類の排出量を試算した。焼却処理量は DXNs 調査データを排ガス処理方式別に集計したものをを用いた。排出係数と同様、施設属性等による区別は行っていない。

試算された大気排出量を表 II-28 に示す。比較として PRTR 届出排出量（大気、平成 28 年度）をあわせて示した。大気排出量は、排出係数試算値の中央値を用いた計算で数十から数千 kg/年、四分位数を用いた計算値の幅は多くの物質でその数分の 1 から数倍と試算された。1,4-ジオキサンとアセトアルデヒドを除けば第三四分位数での試算でも PRTR 届出排出量の 2%未満であり、多くの VOCs やアルデヒド類について産業廃棄物焼却施設からの大気排出量の寄与は大きくないと考えられた。一方、1,4-ジオキサンとアセトアルデヒドについては産業廃棄物焼却施設からの排出量が PRTR 届出排出量に対して無視できない可能性がある。特にこれらの物質は施設によるばらつきも大きいため、実測データの蓄積と排出係数の精緻化が必要である。

表 II-28 産業廃棄物焼却施設からの VOCs およびアルデヒド類の大気排出量試算値

	大気排出量試算値 (kg/年)					PRTR届出排出量 (kg/年)
	最小値	第一四分位数	中央値	第三四分位数	最大値	
n-Hexane	28	146	397	1480	6926	10124225
benzene	55	162	970	1558	36014	620140
toluene	242	625	1766	7445	29781	51043440
ethylbenzene	38	107	346	2770	4432	14628653
o-xylene	12	24	76	469	2770	26933364 *
m-xylene	15	43	118	848	3671	
p-xylene	8.3	25	76	422	1454	
1,2,4-trimethylbenzene	5.1	24	76	464	13159	2675622
1,3,5-trimethylbenzene	0.076	19	59	232	2008	930566
chloroform	14	129	703	1351	2909	262257
trichloroethylene	13	32	76	258	900	2536252
tetrachloroethylene	0.42	49	87	353	1731	693600
1,2-dichloropropane	59	269	537	1048	9004	78655
chlorobenzene	11	61	139	547	4640	304621
dichlorobenzene	0.16	36	85	317	2978	62768
1,4-dioxane	0.66	38	315	17920	76184	40157
formaldehyde	6.6	779	2043	4363	62332	253468
acetaldehyde	76	2130	6129	26664	173144	44994

* キシレン合計

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

産業廃棄物焼却施設におけるダイオキシン類排出状況等調査や維持管理情報のデータに基づき、国内の産業廃棄物排出量の大部分について詳細な廃棄物種類別の処理状況や処理パターンが明らかにするためのデータベースを構築した。これに基づく解析により、焼却施設は主要な処理廃棄物を持つ場合が多いことを明らかにし、業区分別に主要な処理廃棄物で焼却施設をいくつかの類型に分類した。また、それぞれの類型と炉形式や排ガス処理方式等の施設属性の組合せで焼却処理量の実態を明らかにした。

産業廃棄物に係る行政情報に基づき、産業廃棄物の排出から処理処分までのフローを推計した。推計したデータは排出業種別・詳細な廃棄物種類別のフローデータとなっており、焼却処理へのフローを含む詳細な産業廃棄物の処理処分実態が明らかになった。PRTR 届出移動量データの集計解析より、焼却処理へ移動する化学物質が含まれる主要な廃棄物の種類を物質ごとに明らかにした。また、これらの廃棄物の処理処分フローデータと PRTR 届出移動量データを排出事業所レベルでマッピングすることで、廃棄物に関する行政情報と PRTR データの整合性を評価するとともに、廃棄物の化学物質含有状況を試算した。

産業廃棄物焼却施設における焼却残さおよび焼却排ガスの試料採取、分析をさらに追加することで、これまで情報に乏しかった産業廃棄物焼却からの化学物質排出実態を明らかにするための基礎データを蓄積し、各施設における処理廃棄物の化学物質含有実態や化学物質の排出実態を明らかにした。排出実態については、PRTR 対象物質である 16 の金属類に加え、分析方法が確立されておらず測定事例の報告もほとんどなかった六価クロムや VOCs およびアルデヒド類についても実測データを取得、蓄積した。また、焼却施設における処理廃棄物の化学物質含有実態や焼却施設からの排出実態は、主要な処理廃棄物や排ガス処理方式等の施設類型によって異なる傾向を示すことを明らかにした。また、室内実験炉燃焼実験による排出基礎特性データの取得、熱力学平衡計算を用いた物質挙動の計算プログラムの開発を行い、これらが実測データの傾向を説明できることを示すことで、焼却施設からの排出実態傾向を検証するための新たなアプローチを提示した。

以上に基づき、産業廃棄物焼却施設からの金属類、六価クロム、VOCs・アルデヒド類の大気排出量を推計するための活動量データ、排出係数を、処理廃棄物や排ガス処理方式等の施設類型ごとに作成、整理し、これらに基づいて大気への排出量推計を試行した。推計においてこれらの施設類型を考慮することで、実態をより反映し、不確実性も相対的に小さい推計結果が得られることを示した。金属類については大気排出量全体に対する寄与が無視できない可能性がある一方で、六価クロムや多くの VOCs・アルデヒド類はその寄与が小さいと考えられることを示した。

(2) 環境政策への貢献

<行政が既に活用した成果>

PRTR 届出移動量データを産業廃棄物の処理処分における化学物質フローの把握に活用するためには、届出項目である処理方法や廃棄物の種類の詳細や移動量の内訳、算出方法等の実態を把握することが必要であることが指摘された。これらについて届出項目の詳細化や追加の必要性を提言し、PRTR 制度見直しに関する政府内の検討において課題として取り上げられ、見直しに向けた検討が行われている。

<行政が活用することが見込まれる成果>

本研究で示した排出量推計の枠組みと基礎データは、PRTR 届出外推計における産業廃棄物焼却施設からの排出量推計の実施への反映、活用が見込まれる。本研究では施設類型を考慮した排出量推計の必要性が示され、行政における推計においてもその反映を行うことで、より実態を反映した排出量推計の実施が期待され

る。また、行政情報や実測データに基づく焼却量や廃棄物の化学物質含有量の推計・推定方法は、排出量推計のための活動量データの作成に活用が期待される。

多数の産業廃棄物焼却施設における焼却残さおよび排ガスの実測データ蓄積は、これまで実態が不明であった産業廃棄物焼却への化学物質流入と排出実態を明らかにするものであるとともに、排出量推計のための排出係数等作成に活用可能である。また、特に六価クロムについては確立した分析法は、焼却施設からの排出実態のみならず大気環境中の汚染実態把握にも活用し得るものである。さらに、室内実験による物質挙動規則特性データの取得や熱力学平衡計算を用いた物質挙動計算プログラムの開発により、これまで実測データのみに依存していた廃棄物処理からの排出係数に対して新たな視点での検証方法の導入を可能とする。

また、ダイオキシン類排出状況等調査、多量排出事業者報告、PRTR 届出移動量データなどの行政情報を組み合わせた産業廃棄物の処理処分実態やそれに伴う化学物質フローの把握という、行政情報の新たな活用が期待される。ただし、そのためには既存情報の項目や制度間の整合、公開方法等に課題があることもわかり、行政情報の有効活用に向けた制度等の見直しへの課題を提示した。

6. 国際共同研究等の状況

特に記載すべき事項はない。

7. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文（査読あり）>

- 1) Y. MIYAKE, M. TOKUMURA, Y. IWAZAKI, Q. WANG, T. AMAGAI, Y. HORII, H. OTSUKA, N. TANIKAWA, T. KOBAYASHI and M. OGUCHI: J Chromatogr A, 1502, 24-29 (2017)

“Determination of hexavalent chromium concentration in industrial waste incinerator stack gas by using a modified ion chromatography with post-column derivatization method”

<査読付論文に準ずる成果発表>

特に記載すべき事項はない。

<その他誌上発表（査読なし）>

- 1) 小口正弘：国立環境研究所ニュース、35(4)、6-9（2016）
「廃棄物処理における化学物質のフローと環境排出量推計に関する研究」

(2) 口頭発表（学会等）

- 1) 渡辺洋一：第 26 回廃棄物資源循環学会研究発表会（2015）
「焼却炉投入廃棄物と焼却灰中金属濃度の関係－木くず焼却の事例－」
- 2) 小口正弘：第 26 回廃棄物資源循環学会研究発表会（2015）
「PRTR 届出移動量データを用いた廃棄物処理への化学物質移行フローの特徴整理」
- 3) 渡辺洋一：第 37 回全国都市清掃研究・事例発表会（2016）
「産業廃棄物焼却残渣中の金属含有量と業種別特性解析事例」
- 4) 由井和子、倉持秀敏、肴倉宏史、大迫政浩：第 37 回全国都市清掃研究・事例発表会（2016）

「ごみ焼却炉における重金属の挙動に関する熱力学平衡計算を用いた予測」

- 5) K. YUI, H. KURAMOCHI, H. SAKANAKURA, M. OSAKO: ACS 251st National Meeting, San Diego, USA, 2016
“Development of a multizonal thermodynamic equilibrium calculation model to predict the fate and speciation of inorganic elements in municipal solid waste incineration facilities.”
- 6) 徳村雅弘、三宅祐一、王斉、雨谷敬史、小口正弘：平成28年度廃棄物資源循環学会春の研究発表会（2016）
「実験炉を用いたPRTR対象物質の排出特性の把握」
- 7) 佐々木基了、谷川昇、小口正弘：第27回廃棄物資源循環学会研究発表会（2016）
「産業廃棄物焼却施設における廃棄物・環境関連情報の作成と保管の現状」
- 8) 谷川昇、佐々木基了、小口正弘：第27回廃棄物資源循環学会研究発表会（2016）
「産業廃棄物焼却施設における維持管理情報公表の現状」
- 9) 浦野真弥、加藤研太、谷川昇、小口正弘：第27回廃棄物資源循環学会研究発表会（2016）
「産業廃棄物焼却施設の分類と処理廃棄物」
- 10) 小口正弘、谷川昇、渡辺洋一：第27回廃棄物資源循環学会研究発表会（2016）
「産業廃棄物焼却残さの分析による焼却投入廃棄物の金属元素含有実態の推定」
- 11) 徳村雅弘、三宅祐一、岩崎悠太、王斉、雨谷敬史、堀井勇一、大塚英幸、谷川昇、小林剛、小口正弘：第27回廃棄物資源循環学会研究発表会（2016）
「廃棄物焼却施設からの排煙に含まれる六価クロムの測定」
- 12) Y. MIYAKE, M. TOKUMURA, Y. IWAZAKI, Q. WANG, T. AMAGAI, Y. HORII, H. OTSUKA, N. TANIKAWA, T. KOBAYASHI, M. OGUCHI: 5th International Conference on Industrial and Hazardous Waste Management (CRETE 2016), Chania, Greece, 2016
“An analytical method for trace levels of hexavalent chromium in stack gas using ion chromatography.”
- 13) N. TANIKAWA, M. SASAKI, S. OKUBO, M. OGUCHI: The 9th Asia-Pacific Landfill Symposium 2016 (APLAS 2016), Hong Kong, 2016
“Present state of treated waste and air pollution control equipment at industrial waste incineration facilities in Japan.”
- 14) 渡辺洋一、小口正弘：第43回環境保全・公害防止研究発表会（2016）
「産業廃棄物焼却残渣の元素組成調査」
- 15) 渡辺洋一：第38回全国都市清掃研究・事例発表会（2017）
「産業廃棄物焼却灰及び集塵灰の化学組成調査」
- 16) 徳村雅弘、三宅祐一、岩崎悠太、王斉、雨谷敬史、堀井勇一、大塚英幸、谷川昇、小林剛、小口正弘：平成29年度廃棄物資源循環学会春の研究発表会（2017）
「産業廃棄物焼却施設からの排ガス中の六価クロム濃度の測定 - IC-DPC法の改良による高感度化 - 」
- 17) 三宅祐一、徳村雅弘、岩崎悠太、王斉、雨谷敬史、小林剛、小口正弘：第26回環境化学討論会（2017）
「廃棄物焼却排ガス中六価クロムの測定法開発と排出濃度調査」
- 18) 大塚英幸、三宅祐一、小口正弘：第58回大気環境学会年会（2017）
「産業廃棄物焼却から排出される無機元素について」
- 19) 浦野真弥、加藤研太、谷川昇、小口正弘：第28回廃棄物資源循環学会研究発表会（2017）
「産業廃棄物焼却施設の業区分別処理廃棄物の解析」
- 20) 由井和子、倉持秀敏、肴倉宏史、大迫政浩：第28回廃棄物資源循環学会研究発表会（2017）

「都市ごみ焼却処理過程における熱力学平衡計算を用いた金属元素挙動の解析」

21) 渡辺洋一、堀井勇一、小口正弘：第28回廃棄物資源循環学会研究発表会（2017）

「産業廃棄物焼却残渣の主要成分による分類」

22) 小口正弘：環境科学会2017年会（2017）

「廃棄・循環過程における化学物質の環境排出量把握に関する取り組み」

23) 浦野真弥、加藤研太、谷川昇、小口正弘：京都大学環境衛生工学研究会第39回シンポジウム（2017）

「産業廃棄物焼却施設の維持管理情報に基づく廃棄物処理実態の解析」

24) 渡辺洋一：第39回全国都市清掃研究・事例発表会（2018）

「産業廃棄物焼却残渣の化学組成による分類」

25) 谷川昇、小口正弘、浦野真弥、藤原博良：第39回全国都市清掃研究・事例発表会（2018）

「都道府県・政令市における産業廃棄物焼却量情報の入手方法と取扱いの現状」

（3）知的財産権

特に記載すべき事項はない。

（4）「国民との科学・技術対話」の実施

- 1) 一般公開シンポジウム「US フォーラム」（主催：静岡県立大学、2015年9月29日、静岡県立大学 13411 室、観客約 90 名）において講演、講演テーマ「有害な化学物質の焼却処理とそれによる新たなリスク」
- 2) 静岡北高等学校におけるスーパーサイエンスハイスクールインセンティブレクチャー「排ガス中揮発性有機化合物の測定」において成果紹介（2015年10月17日、聴講者約 20 名）
- 3) 広島大学大学院工学研究科における授業科目「Advanced Environmental Systems Engineering」の「Emission of chemicals to the environment: Estimation approaches and legal systems(PRTR)」と題した講義において研究背景・成果紹介（2016年1月13日、受講学生 10 名）
- 4) 国立環境研究所一般公開「春の環境講座」（2016年4月23日、来場者約 500 名）にてパネル展示・説明による研究背景と成果紹介（タイトル「PRTR 制度と廃棄物処理からの化学物質排出量に関する研究」）
- 5) 国立環境研究所公開シンポジウム 2016（2016年6月17日、ロームシアター京都、来場者約 250 名、2016年6月24日、メルパルクホール、来場者約 500 名）にてポスター発表による研究背景と成果紹介（タイトル「PRTR 制度と廃棄物処理における化学物質のフローと環境排出」）
- 6) 女子中高生の理系進路選択支援プログラム「夏の体験実験 in 県大：空気中の有機化合物を調べてみよう」にて成果紹介（2016年8月17日、静岡県立大学、聴講者約 240 名）
- 7) 静岡北高等学校におけるスーパーサイエンスハイスクールインセンティブレクチャー「排ガス中揮発性有機化合物の測定」にて成果紹介（2016年10月15日、聴講者約 20 名）
- 8) 広島大学大学院工学研究科における授業科目「Advanced Environmental Systems Engineering」の「Emission of chemicals to the environment: Estimation approaches and legal systems(PRTR)」と題した講義において研究背景・成果紹介（2016年1月13日、受講学生 18 名）
- 9) 女子中高生の理系進路選択支援プログラム「夏の体験実験 in 県大：機器分析による身の回りの化学物質の分析」にて成果紹介（2017年8月17日、静岡県立大学、聴講者約 200 名）
- 10) 静岡北高等学校におけるスーパーサイエンスハイスクールインセンティブレクチャー「自動車の排ガス中の二酸化炭素、二酸化窒素の濃度を測ろう」にて成果紹介（2017年10月7日、聴講者約 20 名）

- 11) 広島大学大学院工学研究科における授業科目「Advanced Environmental Systems Engineering」の「Emission of chemicals to the environment: Estimation approaches and legal systems(PRTR)」と題した講義において研究背景・成果紹介(2017年12月20日、受講学生25名)
- 12) 平成29年度埼玉県環境科学国際センター講演会「守ろう 創ろう 未来の環境 ~ 持続可能な社会とは ~」で「産業廃棄物処理に伴う化学物質の流れ ~ 焼却処理による重金属のゆくえ ~」と題して成果紹介(2018年2月2日、聴講者約250名)
- 13) 国立環境研究所公開シンポジウム2017(2017年6月16日、びわ湖ホール中ホール、来場者約250名、2016年6月23日、メルパルクホール、来場者約570名)にてポスター発表による研究背景と成果紹介(タイトル「熱処理プロセスにおける有害物質挙動を予測する - 放射性セシウムを含めて -」)

(5) マスコミ等への公表・報道等

特に記載すべき事項はない。

(6) その他

- 1) 徳村雅弘、三宅祐一、岩崎悠太、王齊、雨谷敬史、堀井勇一、大塚英幸、谷川昇、小林剛、小口正弘：産業廃棄物焼却施設からの排ガス中の六価クロム濃度の測定- IC-DPC法の改良による高感度化-、平成29年度廃棄物資源循環学会春の研究発表会(2017)が「優秀ポスター賞」を受賞。

8. 引用文献

- 1) 占部武生、基昭夫：廃棄物学会論文誌 7(4)、174-182 (1996)
「清掃工場燃焼室ボイラー水管の腐食状況及び腐食環境に関する研究」
- 2) 矢澤彬、中澤重厚：資源と素材、115、775-780 (1999)
「燃焼ガス中におけるダイオキシン類抑制の反応に関する熱力学的考察」
- 3) R. NUSKO, G.K. HEUMANN: J Anal Chem, 357, 1050-1055 (1997)
“Cr(III)/Cr(VI) speciation in aerosol particles by extractive separation and thermal ionization isotope dilution mass spectrometry, Fresenius”
- 4) T. GINSBERG, D. LIEBIG, M. MODIGELL, B. SUNDERMANN: Process Saf Environ, 90, 38-44 (2012)
“Multizonal thermodynamical modelling of heavy metal transfer in incineration plants”
- 5) 奥田知明、小島礼子、渡部功太郎、松浦慎一郎、大久保圭祐、鳩谷和希、郡司裕真：大気環境学会誌、48、268-273 (2013)
「優先取組物質の見直しに対応した大気中クロム分析法の開発」

Ⅲ. 英文 Abstract

Estimation of substance flows and environmental emissions of chemicals associated with waste incineration

Principal Investigator: Masahiro OGUCHI

Institution: Center for Material Cycles and Waste Management Research,
National Institute for Environmental Studies
16-2 Onogawa, Tsukuba, Ibaraki 305-8506, JAPAN
Tel: +81-29-850-2784 / Fax: +81-29-850-2091
E-mail: oguchi.masahiro@nies.go.jp

Cooperated by: University of Shizuoka, Center for Environmental Science in Saitama, Japan
Industrial Waste Information Center, Institute of Environment and Resource
System

[Abstract]

Key Words: Industrial waste, Pollutant Release and Transfer Register (PRTR), chemical substance, incineration facility, classification, material and substance flow analysis, emission estimation, determination of chemical concentration in exhaust gases, substance behavior, thermodynamic equilibrium calculation.

This study estimated substance flows and atmospheric emissions of chemicals associated with industrial waste incineration in Japan. We collated information on the amounts of wastes incinerated and the types of technology installed for waste and exhaust gas treatment at the industrial waste incinerators. We then conducted cluster analyses to classify the incineration facilities by the predominant types of waste processed and the technology installed. We also estimated substance flows through the industrial waste treatment and disposal processes by using the information on waste generation, treatment, and disposal. These investigations provided detailed data on the types and amounts of waste incinerated, which we subsequently used to estimate environmental emissions of chemicals.

We determined the types of waste that contained the chemicals that were transferred to industrial incineration and other waste treatment/disposal by analyzing the information obtained from the Japanese Pollutant Release and Transfer Register (PRTR). We also estimated the heavy metal content in incinerated waste by analyzing the metal content in samples of incineration residue. Those results show that specific waste categories were dominant in the chemical transfer to waste incineration: for example, sludge and waste acid/alkali were the dominant sources of heavy metals. Thus, to accurately estimate environmental emissions, the types of waste predominantly processed by the different incineration facilities must be considered.

We estimated emission factors for selected incineration facilities by determining the concentrations of total heavy metals, hexavalent chromium, volatile organic compounds, and aldehydes in the exhaust gas. The emission factors ranged over two or three orders of magnitude, which we attribute to differences among exhaust treatment systems; thus, the installed technology must be considered to accurately estimate emission factors for incineration facilities. To verify the investigated emission factor results, we developed a multi-zone thermodynamic equilibrium calculation to simulate the behavior of metals during the waste incineration process.

Finally, we preliminarily estimated chemical emissions to the atmosphere from industrial waste incineration facilities. The accuracy and precision of the estimates were improved when the type of predominant wastes and installed technology at each incineration facility was taken into account. The results suggested that the amount of heavy metals released by industrial waste incineration cannot be ignored when compared with those released by other emission sources. By contrast, the amounts of hexavalent chromium, volatile organic compounds, and aldehydes released by industrial waste incineration were much less than those by other sources.