

学 位 論 文 題 名

Flow Analysis of Metals in Municipal Solid Waste (MSW) Management System

(都市ごみ処理システムにおける金属フロー分析)

学位論文内容の要旨

Metals have toxicity property leading to adverse effect on human health and become scarce resource. If metals in end-of-life goods (wastes) are controlled or treated inadequately, they will eventually result in high environmental risk on human health and ecosystem and valuable resource loss. Metals should therefore be given higher priority in solid waste management (SWM) system.

Treatment and recycling process of solid waste is last stage in goods' life cycle and also critical stage to determine whether metals are recovered, deposited in a landfill, or dispersed to the environment. So, it is significant which process is selected for solid waste treatment and recycling. This thesis aims to identify metal flow in SWM system to obtain the basic information for efficient recovery and appropriate treatment of metals. The specific objectives are (i) to identify distribution ratio of metals in outputs from SWM processes, (ii) to estimate metal content in MSW composition from household area, and (iii) to measure the release amount of hazardous metals to the environment.

This thesis investigated the following all SWM processes commonly used in Japan: incineration, ash-melting, gasification (or pyrolysis)-melting, material recovery facility of household bulky waste, resource recovery facility, refuse derived fuel (RDF) production facility, carbonization facility, plastics liquefaction (or pyrolysis) facility, composting facility, bio-gasification facility.

The major findings of this thesis are summarized as follows.

In chapter 1, target metals were determined based on the possible use year (scarcity) and toxicity and classified into three groups: (i) scarce metals: Pb, Zn, Sn, Cd, Cu, Se, Bi (ii) hazardous metals: As, Cr, Sb (iii) widespread metals: Al, Fe.

Chapter 2 investigated incineration process, which treats approximately 80% of MSW in Japan. Shredded bulky waste in input waste to incinerators was the most influential factor affecting the variation of metal concentrations in fly ash and bottom ash. The effect was confirmed by analysis of shredded bulky waste. During MSW incineration, lithophilic metals such as Fe, Cu, Cr, and Al remained mainly in the bottom ash while Cd volatilized from the furnace and condensed to the fly ash. About two thirds of Pb and Zn was found in the bottom ash despite their high volatility.

In chapter 3, metal behavior in ash-melting and MSW gasification-melting facilities were studied. Distribution ratio of metal elements to MFA were generally determined by volatility of the metal element, but chlorine content in feedstock had a significant effect on Cu and a marginal

effect on Pb. Distribution ratio of Zn to MFA was influenced by the oxidizing atmosphere in the furnace. High MFA generation and distribution ratio of non-volatile metals to MFA in gasification-melting facilities was probably caused by carry-over of fine particles to the air pollution control system due to large gas volume.

In chapter 4, material and metal balance in a material recovery facility (MRF) of household bulky waste were estimated. Metal contents were analyzed for every composition of shredded bulky waste. By composition analysis of oversize and undersize of a trommel separator, up to 40 percent of combustible materials was transferred into undersize fraction that is disposed of in landfill, while transfer ratio of incombustible material into oversize fraction was less than 20 percent. Contribution ratio of end of life (EOL) goods to metals in bulky waste were estimated using the composition of EOL goods, the metal content in composition, and the number of EOL goods in input. Household electric appliances were a large source for most metals. The other groups included metals to some extent as well. So, it is difficult to reduce metal content in shredded bulky waste by excluding specific items of bulky waste.

Chapter 5 investigated metal balance in recycling facilities, i.e. resource recovery, RDF production, carbonization, plastics liquefaction, composting, bio-gasification facility. Incombustible waste directly landfilled was also analyzed for metal content. Bottom ash of MSW incinerators (chapter 2) and bulky waste (chapter 4) were compared with outputs of recycling facilities. In terms of metal content, bulky waste and incombustible waste showed the highest value. Char from a carbonization facility, which treats household waste, was identified as containing higher metal content than MSW incinerator bottom ash. Metal distribution analysis between outputs revealed that most metals transferred to products, i.e. compost and RDF, in composting and RDF facilities, while they remained in reject and dewatering residue in bio-gasification facilities.

In chapter 6, flow analysis of metals in the entire SWM system was conducted based on the metal balance in each facility obtained in the previous chapters (chapter 2~5). Leaching test of all outputs from SWM facilities was performed to measure the release amount of hazardous metals to the environment. By integrating output values in a process, metal content in composition of household solid waste was estimated. For most metals except Cr, total contribution ratio of paper/textile, bulky waste, and incombustible waste was over 80 %. Paper/textile/plastics showed the highest contribution for Bi, Sb, Se, and Zn. High amount of Sn, Cu, and As were mainly contained in bulky waste, and Cd was largely originated from incombustible waste. Pb was almost equally distributed to paper/textile/plastics, bulky waste, and incombustible waste. About 50% of Pb in paper/textile/plastics was originated from leaflet and paper·paper bag·wrap. Most of Cr was caused by small plastics bag with handle in plastics packaging.

Finally, in order to investigate the influence of a waste management option on metal flow, four typical scenarios of MSW management, i.e. present scenario, incineration scenario, gasification-melting scenario, and bio-waste recycling scenario, were assumed and evaluated. Scenario evaluation revealed that most metals were deposited in landfills and the leaching potential of hazardous metals to the environment was very small in all assumed scenarios.

学位論文審査の要旨

主 査 助 教 授 松 藤 敏 彦
副 査 教 授 恒 川 昌 美
副 査 教 授 名 和 豊 春
副 査 助 教 授 廣 吉 直 樹

学 位 論 文 題 名

Flow Analysis of Metals in Municipal Solid Waste (MSW) Management System

(都市ごみ処理システムにおける金属フロー分析)

金属は人間活動を支えるために不可欠な物質である。しかし一部の金属は有害性をもち、不適正に管理されると人間の健康、生態系に悪影響を及ぼすことになる。また可能採掘量が減少し、枯渇が懸念される金属もある。すなわち金属は、循環型社会の目的である環境負荷の低減、天然資源消費の抑制の両方において注目すべき対象である。金属の多くは製品中に使用され、製品の使用後に環境へ放出されるか、資源として回収されるか、あるいは半永久的に保管されるかは、製品ライフサイクルの最後に位置する廃棄物資源化・処理にかかっている。本論文は、循環型社会にふさわしい廃棄物処理のあり方を見出すために、資源化・処理プロセスにおける金属フローを明らかにすることを目的とした。

廃棄物は発生源で分別され、ごみ種ごとにさまざまな処理方法の選択肢がある。本論文では、熱処理として焼却、灰溶融、ガス化溶融、資源化処理として破碎選別、ごみ燃料化、炭化、プラスチック油化、堆肥化、バイオガス化について調査を行い、各施設における金属収支、特に搬出物への分配を明らかにした。次に、施設への搬入ごみである家庭系ごみ中の金属含有量を推定し、典型的な廃棄物処理シナリオを想定し、金属のフローおよび環境への溶出量を推定した。

第1章は序論であり、研究の背景と目的について述べた。また、対象とする金属を、可能採掘年数と有害性の観点より、枯渇性金属 Pb, Zn, Sn, Cd, Cu, Se, Bi, 有害性金属 As, Cr, Sb, 汎用金属 Al, Fe の12種とした。

第2章は、一般廃棄物の80%を処理する焼却施設を調査した。炉形式、規模を考慮してストーカ方式19施設、流動床方式7施設を対象とし、搬出物である焼却灰(底灰)、焼却飛灰を採取し、金属含有量を分析した。焼却残渣中の金属量は燃焼温度、規模には依存せず、処理ごみ中の粗大ごみ割合によることを明らかにし、粗大ごみの分析からもその影響を確かめた。Pb, Znは焼却においては揮発性金属と考えられているが、およそ3分の2は焼却灰に移行していた。これは安定な酸化物形成が原因と考えられる。一方、Cdはほぼ100%

が飛灰へ、Fe, Cu, Cr, Al は焼却灰へ移行した。

第3章は、灰溶融施設、ガス化溶融施設を対象とした。それぞれ多くの方式が存在するため、方式による違いを明らかにするため、前者は8施設、後者は2施設を選んだ。灰溶融施設については、搬出物である溶融スラグ、溶融飛灰のほかに処理対象物（焼却灰、飛灰）も分析した。Cu の溶融飛灰への移行率は塩素量に比例して増加する。これは、沸点の低い塩化物形態となるためである。また Zn は溶融炉が酸化雰囲気となると、飛灰への移行率が低下する。以上は灰溶融、ガス化溶融に共通しているが、ガス化溶融においては Fe, Al, Si など、灰溶融施設では大部分がスラグに移行する金属が 20～30%程度飛灰へと移行した。これは、ガス量が溶融物あたりにすると灰溶融の 10 倍と大きく、粒子としての飛散によると思われる。

第4章は、粗大ごみ処理施設を対象とした。破碎後にふるいによって可燃残渣（ふるい上）、不燃残渣（ふるい下）に分けられるが、組成分析を行ったところ、可燃物の 40% が不燃残渣として埋立処分されていることがわかった。金属含有量は組成ごとに分析し、製品別の金属寄与を推定した。家電リサイクル法施行によって粗大ごみから大型家電製品は排除されているが、その他の家電製品の寄与は依然として大きい。また、家具などにも有害金属が含まれており、特定製品の対策のみでは不十分であることを示した。

第5章は、各種資源化施設を調査し、直接埋立される不燃ごみも破碎後の試料を採取して分析した。処理残渣のうち、粗大ごみ、不燃ごみは最も金属含有量が大きく、焼却残渣と同等である。炭化処理の製品であるチャーの金属含有量は、焼却灰以上であった。堆肥化、RDF 化施設においては大部分が製品に移行するが、絶対量は小さい。

第6章では、まず2～5章の結果をもとに家庭系ごみの組成別金属含有量を推定した。次に典型的な4つのごみ処理シナリオ（現状、焼却、溶融、生ごみリサイクル）を想定し、金属フローの変化を検討した。また搬出物の溶出試験を行い、シナリオ別の環境影響を推定した。組成別に見ると、粗大ごみ、不燃ごみ以外に、紙、プラスチックにも金属は含まれている。金属の大部分は処理シナリオによらず、埋立地に搬入・管理されることになる。金属資源としての損失とはなるが環境中への放出は少ないため、循環型社会にふさわしい廃棄物処理システムの選択は、コスト、エネルギーなど、他の基準によって行うのが適当である。

これを要するに、著者は、廃棄物処理システムを構成する多様な処理施設における金属の収支を明らかにし、搬出物への配分を決定する要因、および一部の施設について現状の問題点を示した。さらに処理対象物である都市ごみの組成別金属含有量を推定し、製品段階での取り組みの必要性を示し、最後に都市ごみ処理システムによる金属フローの変化を推定しており、廃棄物工学の発展に寄与するところ大なるものがある。よって著者は、北海道大学博士（工学）の学位を授与される資格あるものと認める。