

## 9. 下水汚泥有効利用に伴うリスク評価に関する研究

担当機関 国土交通省 独立行政法人土木研究所 材料地盤研究グループ リサイクルチーム 鈴木穰

重点強化事項 循環型

研究期間 平成13年度～平成15年度

研究予算総額 57,194千円

### 研究の背景と目的

下水汚泥は平成14年度において211万トン(DS)発生しており、緑農地還元や建設資材利用による有効利用の推進が求められている。一方、PRTR(Pollutant Release and Transfer Register、環境汚染物質排出移動登録)制度は、人の健康や生態系に有害な影響を及ぼす可能性のある化学物質について、事業者等から環境中への排出量および廃棄物に含まれての事業所外への移動量を、事業者が自ら把握し行政機関に対して届け出ると共に、行政機関は届出データや推計に基づき、排出量・移動量を推計し、公表する制度である。我が国においては平成11年、「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」(PRTR法)により制度化され、平成13年4月より施行、平成15年3月より集計結果の公表が行われている。下水道事業者も本制度の対象となっており説明責任の観点から、これらの重金属の下水処理プロセスおよび下水汚泥有効利用における挙動を明らかにする必要がある。

本研究は、PRTR法で指定されている重金属の流入実態と処理過程での挙動を解明し、汚泥有効利用製品への移行量推定手法を検討する。また、汚泥有効利用製品の環境に対する重金属の負荷量を把握し、それに伴うリスクを評価することを目的とした。

### 研究の成果

#### 1) 全国の下水処理場における実態調査

PRTR法で指定されている重金属の流入実態と処理過程での挙動を解明するため、全国22箇所の下水処理場を対象に流入下水、放流水、脱水ケーキ、焼却灰、溶融スラグ、コンポスト中の重金属含有量を測定した。流入下水、放流水、脱水ケーキのみの結果を図-1～3に示す。流入下水、放流水試料ではBe、Co、Se、In、Cd、Sb、Te、Tl、Hgはほとんど検出されなかったが、汚泥中に濃縮されることにより脱水ケーキをはじめ、各汚泥試料中からこれらの元素が定量下限値を超え検出されている。しかし、脱水ケーキと他の汚泥試料との間で、各元素の含有量は必ずしも比例関係は見られなかったことから、各元素の水処理工程での除去率および汚泥への移行率は処理場毎によって異なることが推定された。また元素毎の特性としては、B、Mn、Mo、Asは大部分が溶解物として流入するが、下水処理場での除去率はMn>As>B、Moの順であり、B、Moはほとんど除去されていなかった。

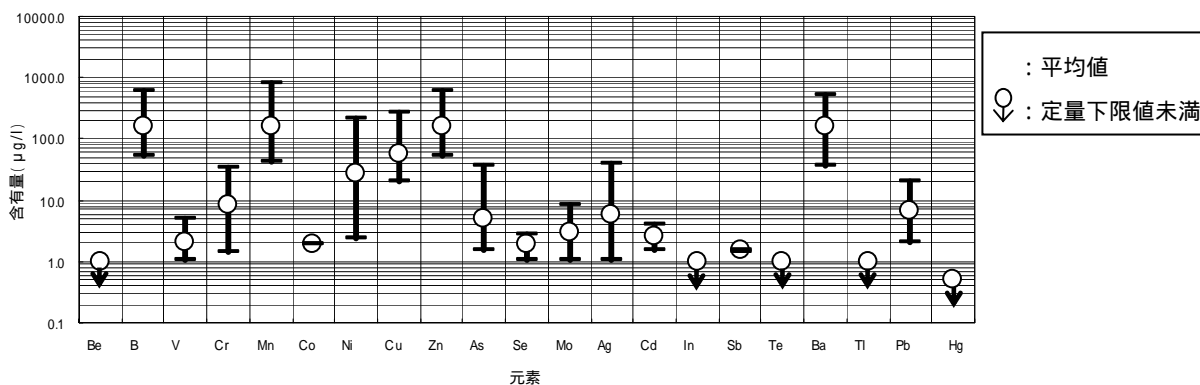


図4-2-1 流入下水(T)の分析結果

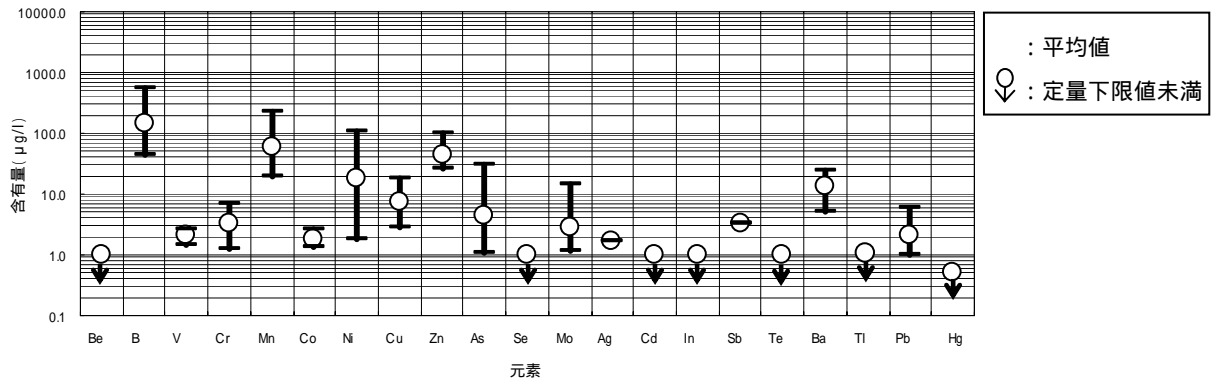


図4 - 2 - 3 放流水(T)の分析結果

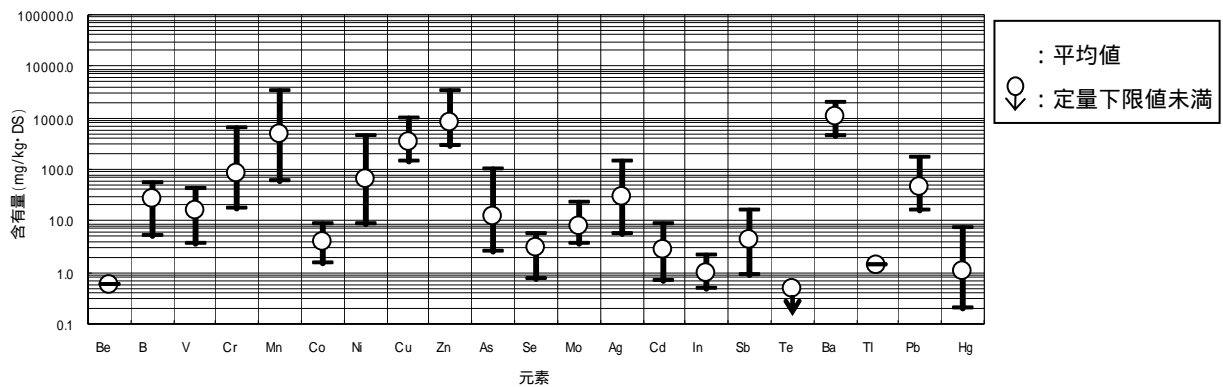


図 - 3 脱水ケーキの分析結果

## 2) 下水処理場における詳細調査

1箇所の流域下水道終末処理場を対象に5ヶ月間継続的にサンプリングを行い重金属の実態調査を行った。サンプリング試料は、流入下水、初沈流出水、放流水、返流水、焼却設備洗煙排水、脱水ケーキおよび焼却灰である。また、処理場内で使用する薬品類から混入するPRTR対象重金属量を把握するため、重油、高分子凝集剤、次亜塩素酸ソーダなどをそれぞれ採取し、処理場内での使用量を考慮し適宜希釈した後分析に供した。流入下水および脱水汚泥における元素毎の含有量(5ヶ月間の平均値)と、上記の全国調査によって得られた値を比較したものを図 - 4 ~ 5 に示す。流入下水については、Niが全国調査の平均値を上回っているのを除けば低めの値となっていた。ただし、Se、Cd、Sbが全国調査値の範囲を下回っていたが、全体としては全国調査の濃度の範囲内であった。脱水ケーキの分析結果は、流入下水と同様にNiを除く各元素の平均値は概ね低めの値となっていたが、全国調査の範囲内にあった。

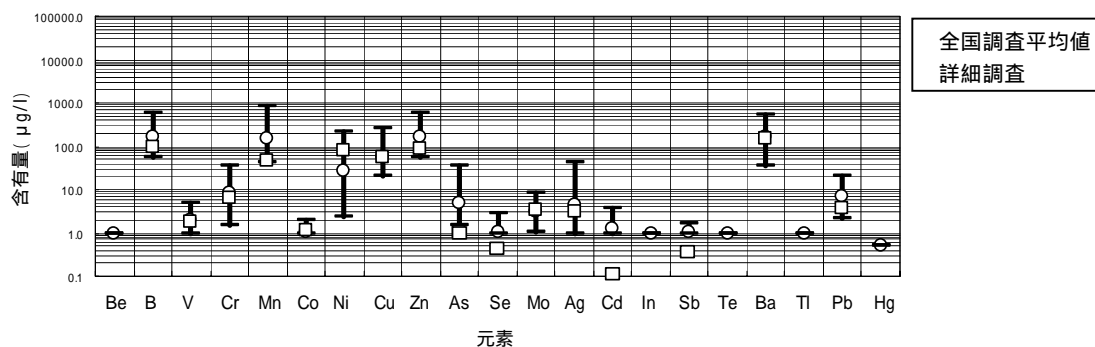


図 - 4 流入下水の分析結果

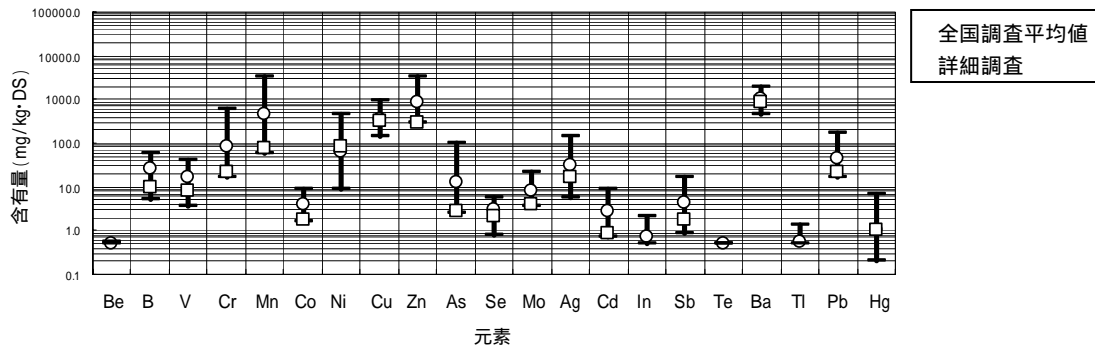


図 - 5 脱水汚泥の分析結果

各元素の水処理プロセスにおける除去率とSS分画割合を表したものを図 - 6 ~ 7 に示す。SS分画割合が高いほど固形物に由来する重金属濃度が高いことを示す。図 - 6 は全国22箇所の下水処理場の調査結果であり、重金属の除去率およびSS分画の割合とも若干のばらつきはあるが、Moの除去率が低くなっているのを除けば両者はほぼ比例関係であることが分かる。図 - 7 は詳細調査の結果であり各元素の除去率は全国調査の結果とほぼ同様であるが、SS分画割合が全体的に低くグラフの左側にシフトした形となった。これはSSの分析手法が異なるためである。一次処理におけるSS分画割合と除去率の関係について図 - 8 に示すが、明確な相関関係は見られなかった。また、一次処理を経た二次処理におけるSS分画割合と除去率の関係について図 - 9 に示すが、Moを除き概ね正の相関関係が得られており、固形物に由来する元素は生物処理により比較的除去されやすいものと考えられる。

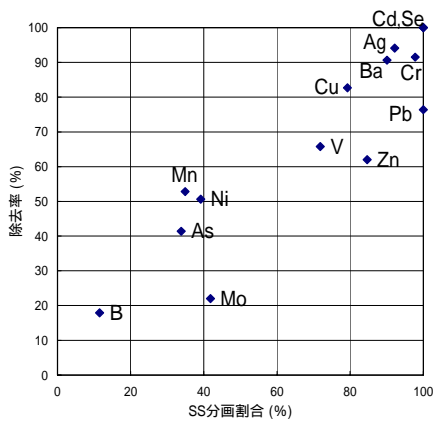


図 - 6 SS分画割合と除去率(全国平均値)

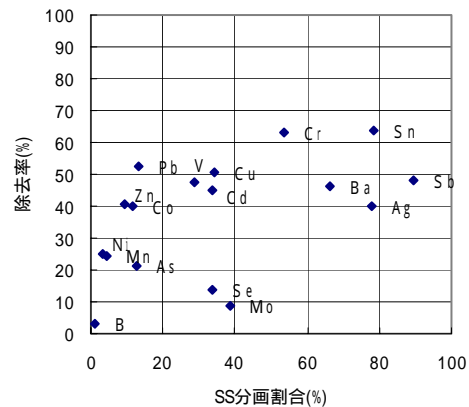


図 - 8 SS分画割合と水処理一次除去率(詳細調査)

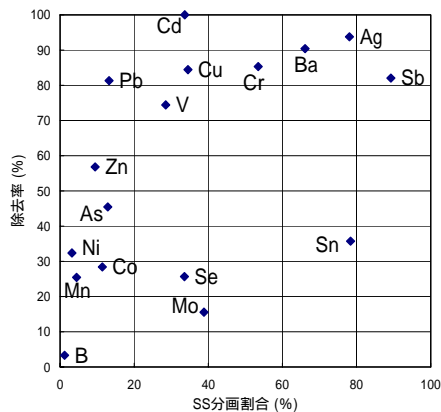


図 - 7 SS分画割合と除去率(詳細調査)

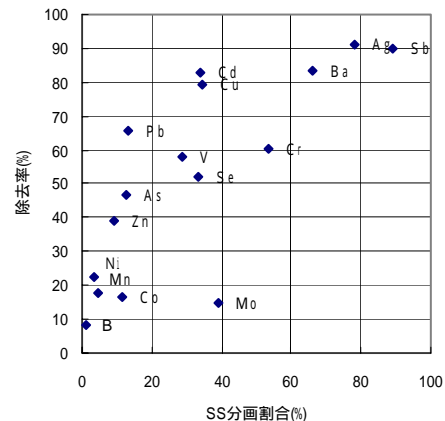


図 - 9 SS分画割合と水処理二次除去率(詳細調査)

下水処理場全体における重金属の挙動を明らかにするため、各処理プロセスにおける重金属の収支を計算した。その結果、焼却灰への移行割合が60～80%程度と比較的高い元素はV、Cu、Ag、Cd、Sb、Ba、Pbであった。Seは汚泥焼却施設排水からの戻り量が非常に多く、処理場内を循環している割合が高いと考えられた。また、処理場内で使用する薬品や重油などから混入する重金属類は微量であり、収支に影響を与えないレベルであった。

### 3) 汚泥有効利用製品における重金属類の実態調査

下水汚泥有効利用製品を対象に、P R T R対象重金属の溶出傾向、溶出量および含有量の実態を明らかにするため、溶出試験および含有量試験を行った。溶出試験法は再生資材評価法および環境庁告示46号に基づく方法、また、含有量試験はマイクロ波加熱分解法および環境省告示19号に基づく方法によった。試験結果の1例を図-10に示す。

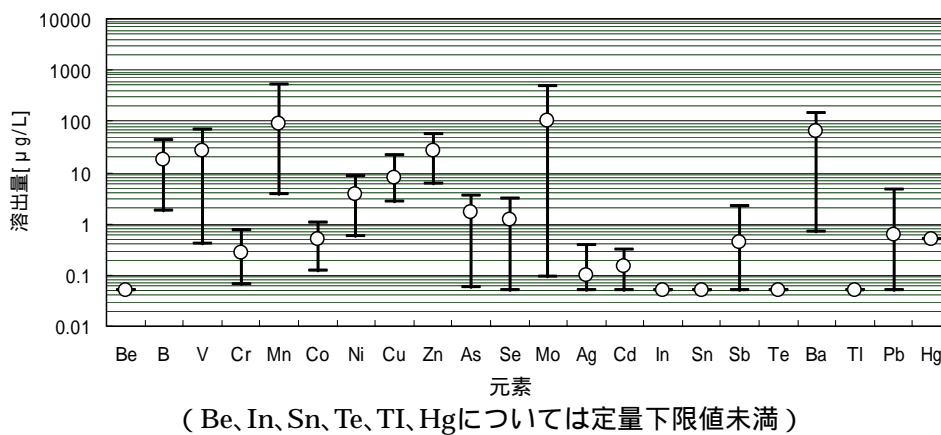


図-10 建設資材(焼成品)向汚泥有効利用製品における溶出量「再生資材評価法」

本調査では汚泥有効利用製品を製造方法から大きく、建設資材(焼成品)、建設資材(非焼成品(水和反応利用製品))および高分子系コンポストの3つに分類し、分類毎に溶出量、含有量を整理した。再生資材評価法における溶出量が環告46法における溶出量を上回っている重金属類は、建設資材(焼成品): Mn, Co, Ni, Cu, Zn、建設資材(非焼成品): V, Mn, As、高分子系コンポスト: Cr, Mn, Zn, Ag, Ba, Pb, Hgであった。逆に環告46法における溶出量が再生資材評価法における溶出量を上回っている重金属類は、建設資材(焼成品): V, Cr, Mo, Sn, Sb、建設資材(非焼成品): Cr, Co, Ni, Se, Mo, Sn, Sb, Ba, Pb、高分子系コンポスト: 該当無しであった。両溶出試験の大きな差は試験に使用する溶出液が炭酸水であるか中性水であるかである。攪拌方法が異なるため正確な溶出量の比較はできないが、大まかな傾向としては、前者は炭酸による酸性で溶出しやすい状態で存在し、後者は炭酸による酸性よりも中性の方が溶出しやすい状態であると推定される。なお、建設資材(非焼成品)において後者(再生資材評価法の溶出量<環告46法の溶出量)である重金属類が多い。試験後のpHが環告46法ではpH10～13、再生資材評価法ではpH6～10であることを考えると、環告46法溶出試験では一部の重金属類においてアルカリ側溶出が進行したためと推定された。含有量では、定量限界未満の重金属類を除いた全ての重金属類で、環告19法における含有量はマイクロ波加熱分解法における含有量の同等以上であった。建設資材向け汚泥有効利用製品に比べると高分子系コンポストでは比較的含有量の差が小さい重金属類があった。これらの重金属類は建設資材向け製品中では焼成や水和などの処理を得て溶出し難い状態で存在しているものと考えられる。

#### 4) 溶出重金属のリスク評価

リスク評価を行う際は、ハザード評価および曝露評価を行う必要がある。しかし現時点にて、汚泥有効利用製品使用時に溶出する物質について、曝露評価およびハザード評価を行うためには各種の情報が不足している。そこで、本研究では環境媒体を水、対象をヒト、対象との接触経路を経口とした場合に最大量の曝露条件と考えられる再生資材評価法時の溶出液を直接飲むという条件でリスク評価を行った。使用するハザード指標には日本国内において環境法などの見直し、制定時に資料として提示された TDI (もしくは TDI 相当値) を用いた。ヒトの体重を 50kg、飲水量を 2l/day とした場合のハザード比 (=曝露量/TDI) を前述の汚泥有効利用製品における溶出試験結果を基に算出した結果を表 - 1 ~ 3 に示す。建設資材 (焼成品) および建設資材 (非焼成品) ではハザード比は 1 を超えることがなかった。また、高分子系コンポストにおいてもハザード比はほとんどの重金属類で 1 を超えることは無かったものの As、Pb においては平均値で 1 を超えるものが存在した。これらの重金属類について、前述の媒体、経路およびハザード情報などの条件を基にのみ判断した場合、優先的に対処が望ましい重金属類と考えられる。

汚泥有効利用製品から溶出した重金属類は、実際の環境中では様々な希釈、濃縮、形態変化を経てヒトに接触する。さらに発ガン性や内分泌攪乱作用など今回の評価に含まれていない様々な有害可能性を持つ重金属類も存在する。曝露評価およびハザード評価に必要な各種情報のさらなる蓄積を経て、より実状に近いリスク評価が行われることが望まれる。

#### 研究のまとめ

以上の研究結果をまとめると以下のとおりとなる。

1. 全国の下水处理場の実態調査では、流入下水、放流水試料から Be、Co、Se、Cd、In、Sb、Te、Tl、Hg はほとんど検出されなかったが、汚泥中に濃縮されることにより脱水ケーキをはじめ、各汚泥試料中からこれらの元素が定量下限値を超え検出された。また、各元素の水処理工程での除去率および汚泥への移行率は処理場毎によって異なることが推定された。
2. 固形物に由来する元素は生物処理により比較的除去されやすいものと考えられた。また、詳細調査において各処理プロセスにおける重金属の収支を計算した結果、焼却灰への移行割合が 60 ~ 80% 程度と比較的高い元素は V、Cu、Ag、Cd、Sb、Ba、Pb であった。Se は汚泥焼却施設排水からの戻り量が非常に多く、この戻り量に応じて全体の除去率が左右される。

表 1 建設資材 (焼成品) のハザード比

元素	建設資材 (焼成品)		
	max	min	average
B	1.7E-02	7.3E-04	7.6E-03
Mn	2.8E-01	2.1E-03	4.9E-02
Ni	6.6E-05	4.5E-06	3.0E-05
As	6.9E-02	1.1E-03	3.4E-02
Se	3.1E-02	5.0E-04	1.2E-02
Ag	1.5E-09	2.0E-10	3.9E-10
Cd	1.3E-02	2.0E-03	5.8E-03
Sn	8.0E-04	8.0E-04	8.0E-04
Sb	1.4E-02	3.3E-04	3.0E-03
Pb	5.2E-02	5.7E-04	6.8E-03

表 2 建設資材 (非焼成品) のハザード比

元素	建設資材 (非焼成品)		
	max	min	average
B	1.2E-02	9.3E-04	4.7E-03
Mn	7.3E-03	4.2E-05	1.9E-03
Ni	1.2E-05	2.9E-06	6.3E-06
As	2.0E-01	1.0E-03	6.2E-02
Se	1.2E-03	5.0E-04	6.8E-04
Ag	2.0E-10	2.0E-10	2.0E-10
Cd	2.0E-03	2.0E-03	2.0E-03
Sn	1.8E-03	8.0E-04	1.1E-03
Sb	9.9E-04	3.3E-04	5.6E-04
Pb	3.8E-03	5.7E-04	1.4E-03

表 3 高分子系コンポストのハザード比

元素	高分子系コンポスト		
	max	min	average
B	3.0E-01	5.8E-02	1.5E-01
Mn	2.2E+00	5.4E-02	6.4E-01
Ni	2.9E-03	2.3E-04	1.3E-03
As	5.8E+00	6.0E-01	3.3E+00
Se	2.6E-01	1.4E-02	1.3E-01
Ag	1.2E-06	1.7E-08	4.6E-07
Cd	4.0E-01	2.5E-02	1.7E-01
Sn	1.9E+00	2.4E-02	4.0E-01
Sb	1.7E-01	3.3E-03	5.6E-02
Pb	5.5E+00	3.3E-02	1.1E+00

3. 下水汚泥有効利用製品を対象に溶出試験および含有量試験を行うことにより、PRTR対象重金属の溶出傾向、溶出量および含有量の実態を明らかとした。その結果、建設資材（焼成品）、建設資材（非焼成品）、高分子系コンポスの3つに汚泥製品を分類したところ、重金属の溶出傾向に差が見られた。

4. 溶出試験結果を基に、媒体を水、ヒトへの摂取経路を経口ならびに溶出液の直接摂取を想定し、重金属の溶出に伴うリスク評価を行った。今後、汚泥製品から溶出した重金属の環境中での挙動やヒトへの暴露評価をさらに行い、より実状に近いリスク評価を行う必要がある。

## 研究発表

発表題目	掲載法/学会等	発表年月	発表者
(誌上発表) 下水処理場におけるPRTR対象重金属類の挙動に関する研究	下水道協会誌論文集	(投稿中)	五十嵐、鈴木、峰松、北村、諏訪
下水汚泥有効利用製品から溶出するPRTR対象重金属類のリスク評価	下水道協会誌論文集	(投稿中)	諏訪、鈴木、五十嵐
(口頭発表) PRTR対象重金属の下水処理システムにおける挙動	日本水環境学会 年会講演集	15.3	峰松、鈴木、北村
PRTR対象重金属の下水処理システムにおける挙動	下水道研究発表 会講演集	15.7	峰松、鈴木、北村
下水汚泥の重金属含有量の経年変化	日本水環境学会 年会講演集	16.3	五十嵐、鈴木
PRTR対象重金属類の汚泥製品からの溶出傾向について	下水道研究発表 会講演集	16.7	五十嵐、鈴木、諏訪

## 工業所有権

特許等の名称	願書年月日	公告番号	公告記日	登録番号
特になし				