HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	集約型還元溶融を用いた一般廃棄物中有用金属回収システム提案に関する研究
Author(s)	山口, 直久
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(工学)
Dissertation Number	甲第14244号
Issue Date	2020-09-25
DOI	https://doi.org/10.14943/doctoral.k14244
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/79445
Type	doctoral thesis
File Information	Yamaguchi_Naohisa.pdf

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

集約型還元溶融を用いた一般廃棄物中有用金属回収システム提案に関する研究

北海道大学大学院 工学院

環境創生工学専攻　廃棄物処分工学研究室

26175130　山口直久

目次

第 1 章　はじめに 1
1.1　研究の背景 1
1.2　研究の目的と構成 2

第 2 章　集約型還元溶融による焼却残渣再資源化技術の環境負荷の解析 5
2.1　目的と研究方法 5
2.2　焼却残渣の再資源化技術の種類と概要 6
2.3　集約型還元溶融のプロセスフロー 9
2.4　資源代替性の評価 11
2.5　$LCCO_2$ 解析 16
2.6　集約型還元溶融システムの展開可能性の検討 23
2.7　まとめ 25

第 3 章　溶融処理で生成される溶融メタルの金属資源性評価 29
3.1　背景と目的 29
3.2　研究方法 31
3.3　結果と考察 34
3.3.1　搬出物の重量割合 34
3.3.2　溶融メタル中の金属濃度 36
3.3.3　炉形式による影響 37
3.3.4　搬出物中の金属量と小型家電リサイクルの影響 40
3.3.5　搬出物あたりの希少金属量 41
3.3.6　TMR による溶融メタルの金属資源性評価 42
3.4　まとめ 44

第 4 章　破砕残渣の有する金属資源ポテンシャルの評価 46
4.1　目的 46
4.2　研究方法 47
4.3　結果と考察 51
4.3.1　破砕残渣の組成 51
4.3.2　破砕残渣および搬出物の希少金属濃度 53
4.3.3　１人１日あたりの希少金属量 56
4.4　まとめ 58

第 5 章　小型家電リサイクルの金属資源回収効率の評価と廃棄物中の金属資源の由来の整理.60
5.1　小型家電リサイクル法の概要 60
5.2　小型家電リサイクルによる金属資源回収の状況 61
5.3　溶融処理による溶融メタル中の金属量と小型家電の製品中金属量等の比較 68
5.4　廃棄物中の金属資源の由来（金属資源の国内需要）の整理..... 72
5.5　まとめ..... 76

第 6 章　一般廃棄物中の有用金属の回収促進に向けたシステム設計の検討.....79
6.1　背景と目的 79
6.2　研究方法..... 81
6.3　検討対象とする有用金属回収システムの設定..... 81
6.4　環境負荷の評価 85
6.5　経済性の試行的評価..... 90
6.6　まとめ..... 92

第 7 章　おわりに.....95

第 1 章　はじめに

1.1　研究の背景

2016 年 1 月 21 日に「廃棄物の減量その他その適正な処理に関する施策の総合的かつ計画的な推進を図るための基本的な方針」が変更され、一般廃棄物の 2020 年度目標値（2012 年度に対して）として、排出量の削減（約 12%削減）、再生利用率の増加（現状の約 21%を約 27%に増加）および最終処分量の削減（約 14%削減）が掲げられている [1)]。わが国の一般廃棄物の最終処分量 [2)]は 1998 年度に約 11 百万 ton であったのが 2014 年度には約 4.3 百万 ton と一貫して減少傾向にあるものの、2009 年度以降はその減少傾向は鈍化している。最終処分量に占める焼却残渣の割合は 75%（2014 年度）であり、最終処分量の削減および再生利用率の増加のためには焼却残渣の再資源化が期待されるところである。

従来の焼却残渣の資源化手法としては、灰溶融による土木資材化やセメント製造施設を用いたセメント原料化が行われており、最終処分量の削減には一定の効果を示している。しかしながら、灰溶融による土木資材化はスラグ利用の困難さ、廃棄物からのエネルギー回収優先等のために稼働停止する施設が増えている（「2.2 焼却残渣の再資源化技術の種類と概要」に詳述）。一方で、焼却残渣には銅・鉛等のベースメタルに加え、金・銀等の貴金属類も含まれていることから、これら金属系有用資源の集積場所としての側面も有する。これまでセメント原料化における鉄分の再利用やエコセメント化施設における銅・鉛・亜鉛等の回収などの事例 [3,4)]はあるものの、従来の灰溶融やセメント原料化手法では、一部を除いてこれら金属系有用金属については回収されることはない。

一方で、近年、民間溶融施設による焼却残渣の再資源化事業（集約型還元溶融事業）が実用化され、焼却残渣の溶融処理を行うとともに金属資源が濃縮された溶融メタルや溶融飛灰（粗酸化亜鉛）を非鉄製錬施設において山元還元することにより金属資源の回収が行われている。集約型還元溶融は電気炉を用いた製鋼技術の応用であり、強還元雰囲気で重金属類をスラグから還元分離する。また、自治体単位での施設導入ではなく複数の自治体等からの焼却残渣を民間処理施設で集約処理する形態となっている。集約型還元溶融は従来の焼却残渣の再資源化手法とは異なり、ベースメタルや貴金属類等の金属資源回収が可能な技術であり、焼却残渣の最終処分量の削減に加え、わが国における枯渇性資源の確保と循環型社会の構築の観点からの付加価値が高いと考えられることから、本研究では集約型還元溶融に着目する。

1.2　研究の目的と構成

本研究では、焼却残渣の再資源化技術として集約型還元溶融に着目し、集約型還元溶融の金属資源回収ポテンシャルを評価するとともに、環境負荷の観点から集約型還元溶融の有用性を示し、さらに、集約型還元溶融を活用した地域特性に応じた新たな焼却残渣資源化システムの提案を行うことを目的とする。

本研究の構成を図 1-1 に示す。本研究は以下に示す 5 つの章から構成され、まず、集約型還元溶融の物質フローや環境負荷を評価するとともに、溶融処理で生成される溶融メタルの金属資源性を評価する。さらに、一般廃棄物の有する金属資源ポテンシャルや小型家電リサイクルによる資源回収効率、廃棄物中の金属資源の由来といった金属資源回収の関連状況を整理・評価する。そして、これらを踏まえて集約型還元溶融を活用した金属資源の回収促進に向けたシステム設計を行う。

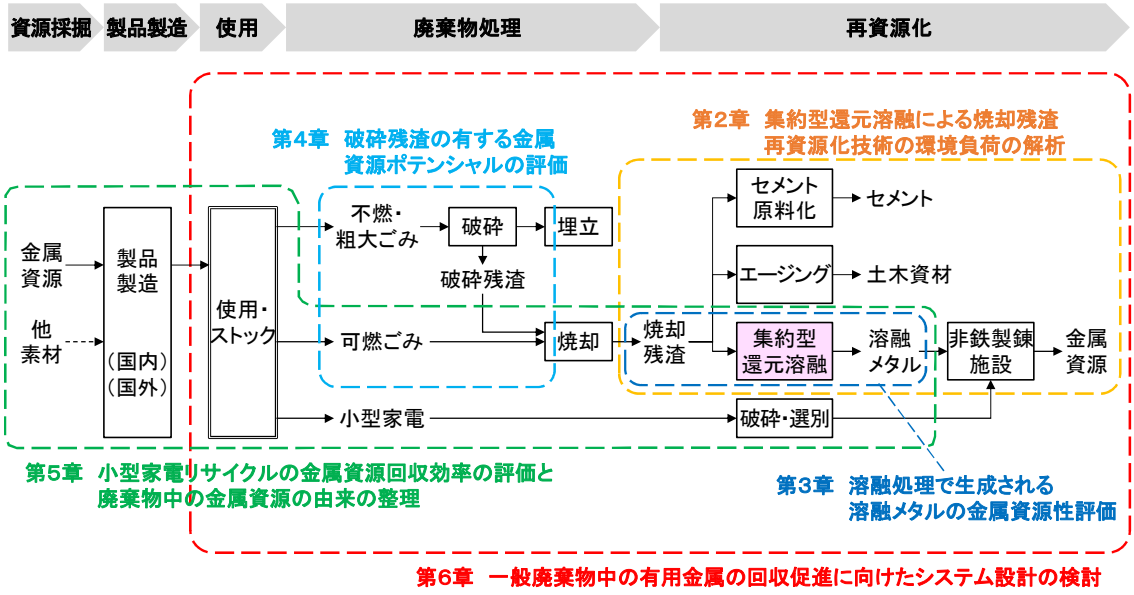


図 1-1　本研究の構成

第 2 章　集約型還元溶融による焼却残渣再資源化技術の環境負荷の解析

集約型還元溶融を用いた焼却残渣の再資源化技術そのものの有用性を環境負荷の観点から確認した。

具体的には、集約型還元溶融の実稼働データを用いて他の焼却残渣再資源化技術と比較することにより、物質フロー及び環境負荷（$LCCO_2$）の観点から集約型還元溶融による焼却灰再資源化技術の評価を行った。

第 3 章　溶融処理で生成される溶融メタルの金属資源性評価

溶融処理で生成される溶融メタルの金属資源性について、炉形式や溶融条件等による違いを評価した。

具体的には、一般廃棄物の溶融処理で生成される溶融メタルに着目し、炉形式や溶融条件等による溶融メタルの金属濃度の相違やその要因を考察するとともに、溶融メタルの金属資源性を評価した。また、小型家電リサイクルの実証状況による影響についても考察した。

第 4 章　破砕残渣の有する金属資源ポテンシャルの評価

溶融メタルの金属資源性は、溶融施設に投入される廃棄物の性状に大きく依存するが、溶融施設に投入される廃棄物は、可燃ごみだけではなく、不燃・粗大ごみの破砕残渣も投入される。

そのため、一般廃棄物焼却施設から生じる焼却残渣及び不燃粗大ごみ破砕施設から発生する破砕残渣を対象として金属資源含有量の実測調査を行い、焼却残渣及び破砕残渣の有する金属資源ポテンシャルの評価を行った。

第 5 章　小型家電リサイクルの金属資源回収効率の評価と廃棄物中の金属資源の由来の整理

一般廃棄物に含まれる金属資源のメインソースは小型家電と考え、溶融処理による金属資源回収と比較することで、小型家電リサイクルによる金属資源回収の効率を評価した。

具体的には、小型家電リサイクルの実施状況を整理し、回収方法等による小型家電の回収効率や評価を行うとともに、小型家電の製品中金属量および小型家電リサイクルによる金属回収実績と、溶融処理によって回収量される金属量との比較を行った。

また、効率的な金属資源回収システムの検討を行う上での基礎情報として、廃棄物中の金属資源の由来について、金属資源の国内需要の推移等を整理した。

第 6 章　一般廃棄物中の有用金属の回収促進に向けたシステム設計の検討

第 2 章～第 5 章の検討を踏まえ、一般廃棄物に含まれる金属資源を効率的に回収するための、集約型還元溶融を活用した資源循環システムを検討、提案した。

【参考文献】

1) 環境省：「廃棄物の減量その他その適正な処理に関する施策の総合的かつ計画的な推進を図るための基本的な方針」の変更及び意見募集の結果について（お知らせ）（平成 28 年 1 月 21 日）(2016)

2) 環境省：一般廃棄物処理実態調査結果（1998～2014 年度）(2000-2016)

3) 野村幸治：東京都多摩地域におけるエコセメント化施設の運営報告（特集第 36 回全国都市清掃研究・事例発表会より），都市清掃，第 68 巻，第 325 号，pp.217-222 (2017)

4) 竹本智典，花田隆，石田泰之，高橋一広，高柳温子，奈良和彦，木村貴之：エコセメント化施設を活用した焼却残渣からの貴金属回収技術の開発，第 37 回全国都市清掃研究・事例発表会講演論文集，pp.148-150 (2016)

第 2 章　集約型還元溶融による焼却残渣再資源化技術の環境負荷の解析

集約型還元溶融を用いた焼却残渣の再資源化技術そのものの有用性を環境負荷の観点から確認する。

2.1　目的と研究方法

(1) 目的

焼却残渣の処分・再資源化に係る環境影響（温室効果ガス（以下、GHG）排出）の評価に関しては、これまでも多くの研究が行われている。たとえば、焼却残渣の最終処分については松藤 [1]が一般廃棄物を対象とした評価プログラム（H-IWM：北大・総合廃棄物処理評価プログラム）を開発し、最終処分に係るユーティリティ使用量やコスト・GHG 排出量等の評価が可能となっている。また、焼却残渣のセメント原料化に関しては、Kawai ら [2]によって、焼却残渣をセメント原料として再利用する場合の資源代替性が評価されている。また、セメント製造施設そのものについては、(一社)セメント協会 [3]が LCI データベースとして公表している。集約型還元溶融事業については、松岡ら [4]により回収資源の性状評価等は行われているものの、従来の焼却残渣再資源化手法との資源代替性の比較や環境負荷の評価は行われていない。エージングについては成岡ら [5]によって焼却灰の無害化に関する研究が行われている。複数の焼却残渣リサイクルの CO_2 排出量の比較・評価については、(財)旧クリーン・ジャパン・センター[6]（現(一社)産業環境管理協会）が灰溶融、セメント原料化、山元還元等を含めて総合的に行っているが、回収した金属資源の資源代替までを含めた評価は行われていない。

そのため、集約型還元溶融事業の資源代替性や環境負荷を評価することを目的として、実際に自治体で採用されている集約型還元溶融事業を例として、従来の焼却残渣再資源化手法と比較したマテリアルフロー解析および $LCCO_2$ 評価を実施する。

(2) 研究方法

まず、焼却残渣の再資源化技術について、技術の種類と概要を整理する。

その上で、従来型の焼却残渣再利用技術（セメント原料化、エージング）と集約型還元溶融について、マテリアルフロー分析により資源代替性を評価する。

加えて、$LCCO_2$ 解析により、温室効果ガス排出量について評価するとともに、温室効果ガス排出量の観点から、集約型還元溶融システムの展開可能性を検討する。

2.2　焼却残渣の再資源化技術の種類と概要

焼却残渣の資源化方法は、大きく分けて、(1)灰溶融、(2)セメント原料化、(3)エージングの 3 つがある。集約型還元溶融事業は、(1)灰溶融の一つに区分される。

(1) 灰溶融

灰溶融は、焼却残渣を溶融処理し、溶融スラグとして再生する技術である。主灰のみを溶融処理する場合と、飛灰も含めて溶融処理する場合がある。スラグは製造方法によって、水砕スラグ、空冷スラグ、徐冷スラグに分けられる。2014 年度において稼働中の焼却施設 1,021 施設のうち、焼却残渣の処理方法として溶融を選択している焼却施設は 79 施設となっている [7]。1996 年に国は、ばいじんに含まれるダイオキシン類の飛散・溶出防止の対策や焼却灰のリサイクル推進を図るため、溶融施設の付設を国庫補助金の交付要件とした。その後、1999 年にダイオキシン類対策特別措置法が制定されたこともあり、溶融施設は大幅に増加した。一方で、高い維持管理コストとスラグ利用の低迷等を理由に灰溶融施設を休止または廃止する自治体もあり [8]、また、東日本大震災以降に焼却エネルギーの利用方法を灰溶融から発電に切り替える動きもあって、近年、溶融施設は減少傾向にある（図 2-1）。たとえば、東京二十三区清掃一部事務組合 [9]では 2015 年度から 7 つの灰溶融施設のうち 5 つを休止し、焼却灰のセメント原料化を開始している。

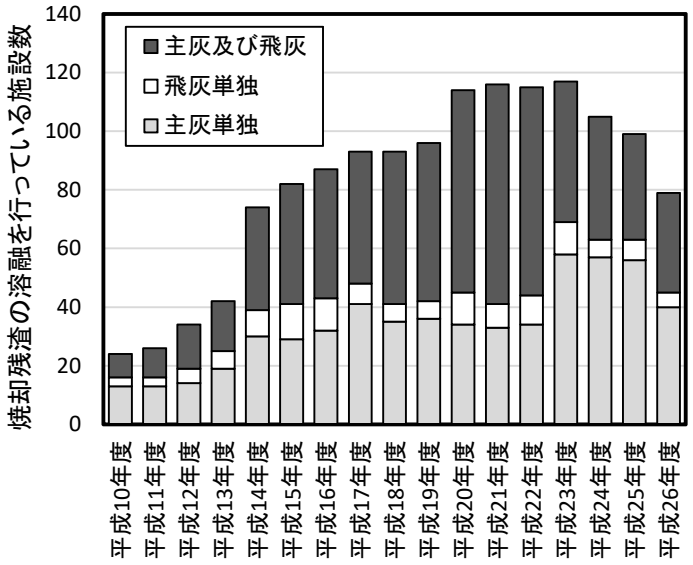


図 2-1 焼却残渣の処理方法に溶融を選択している焼却施設数の推移 [7]
（ガス化溶融や集約型還元溶融は含まない）

一方、焼却残渣の灰溶融の民間委託が行われており、全国で 8 施設（名古屋市 1 施設、茨城県鹿嶋市 2 施設、栃木県小山市 1 施設、福島県いわき市 1 施設、青森県八戸市 3 施設）が稼働し、全国の複数の自治体からの焼却残渣を広域的に受け入れて溶融処理を行っている（集約型還元溶融施設）。集約型還元溶融は従来の焼却残渣の再資源化手法とは異なりベ

ースメタルや貴金属類等の金属資源回収が可能な技術であり、焼却残渣の最終処分量の削減に加え、わが国における枯渇性資源の確保と循環型社会の構築の観点からの付加価値が高いと考えられる。

そのため、本研究では灰溶融技術の中でも集約型還元溶融に着目し、今後の焼却残渣の再資源化手法として有望と考えられる他の手法（セメント原料化、エージング）との比較を行う。

(2) セメント原料化

焼却残渣のセメント原料化は、清掃工場で発生した焼却残渣をセメント製造施設において主に普通ポルトランドセメントの原料として有効利用するものである。セメント製造施設は全国に 30 施設が存在している。主灰だけを受け入れる施設と飛灰まで含めて受け入れる施設があるが、飛灰を受け入れる場合は飛灰中の塩分の除去のための水洗設備が必要となる。一般廃棄物焼却施設の焼却残渣のセメント原料化量は 2006 年度以降、約 25～30 万 ton/年程度で推移しており、2014 年度でセメント原料化を行っている市町村は 235 市町村となっている [7]。

焼却残渣のセメント原料化は地域的に特色がある。埼玉県 [10]では 1998 年に「埼玉ゼロエミッション行動計画」を策定し、セメント製造施設に灰水洗システムを導入して県内市町村の焼却残渣のセメント原料化を実施している。山口県 [11]では 2001 年に「やまぐちエコタウンプラン」を策定し、県内の一般廃棄物焼却施設から排出される焼却灰全量について水洗脱塩素等を行った上でセメント原料化している。兵庫県 [12]では 2010 年から(公財)ひょうご環境創造協会において市町等からの焼却残渣の脱塩等の前処理を実施し、セメント原料化している。東京たま広域資源循環組合 [13]ではエコセメント化施設を所有し、多摩地域（25 市 1 町）の清掃工場から排出される焼却残渣をエコセメントの原料としてリサイクルしている。東京二十三区清掃一部事務組合 [14]では主灰のみを対象としたセメント原料化を 2015 年度から開始している。一方、横浜市 [15]では、前処理施設の建設も含めた焼却灰のセメント原料化事業を計画していたが、財政状況が厳しいことを勘案し、2011 年に事業を中止している。

なお、セメント製造施設は、焼却残渣の他にもさまざまな廃棄物・副産物を原燃料として利用しており、2015 年度において約 2,800 万 ton の廃棄物・副産物を受け入れている。このうち、一般廃棄物焼却施設の焼却残渣を含む「燃えがら」の利用量は 144 万 ton である [16]。これをセメント 1ton あたりの廃棄物・副産物使用量に換算すると、廃棄物・副産物全体で 475kg となり、燃えがらは、このうちの約 5%となる。セメント業界は、2010 年度におけるセメント産業全体でのセメント 1ton あたり廃棄物等利用量 400kg を努力目標 [17]としてきたが、既にこれを達成し、2015 年度では 475kg となる [16]など、廃棄物等利用量は限界に達しつつある。また、今後のセメント需要は減少見込み [18]である。2030 年度のセメント生産量の見通しは 5,558 万 ton であり [19]、2015 年度の生産量 5,924 万 ton と比べて約 5%の減少見込みである。そのため、今後、焼却残渣の受入量をさらに増加させる場合には、

他の廃棄物・副産物をセメント製造施設で受け入れられなくなるおそれがある。

(3) エージング

エージングは、焼却灰（主灰）を直接的に土木資材等にリサイクルする技術である。主灰を湿潤状態で大気に晒すことで、主灰に含まれる重金属類と大気中の二酸化炭素が反応し、炭酸金属になることで不溶化するプロセスを利用した手法である。

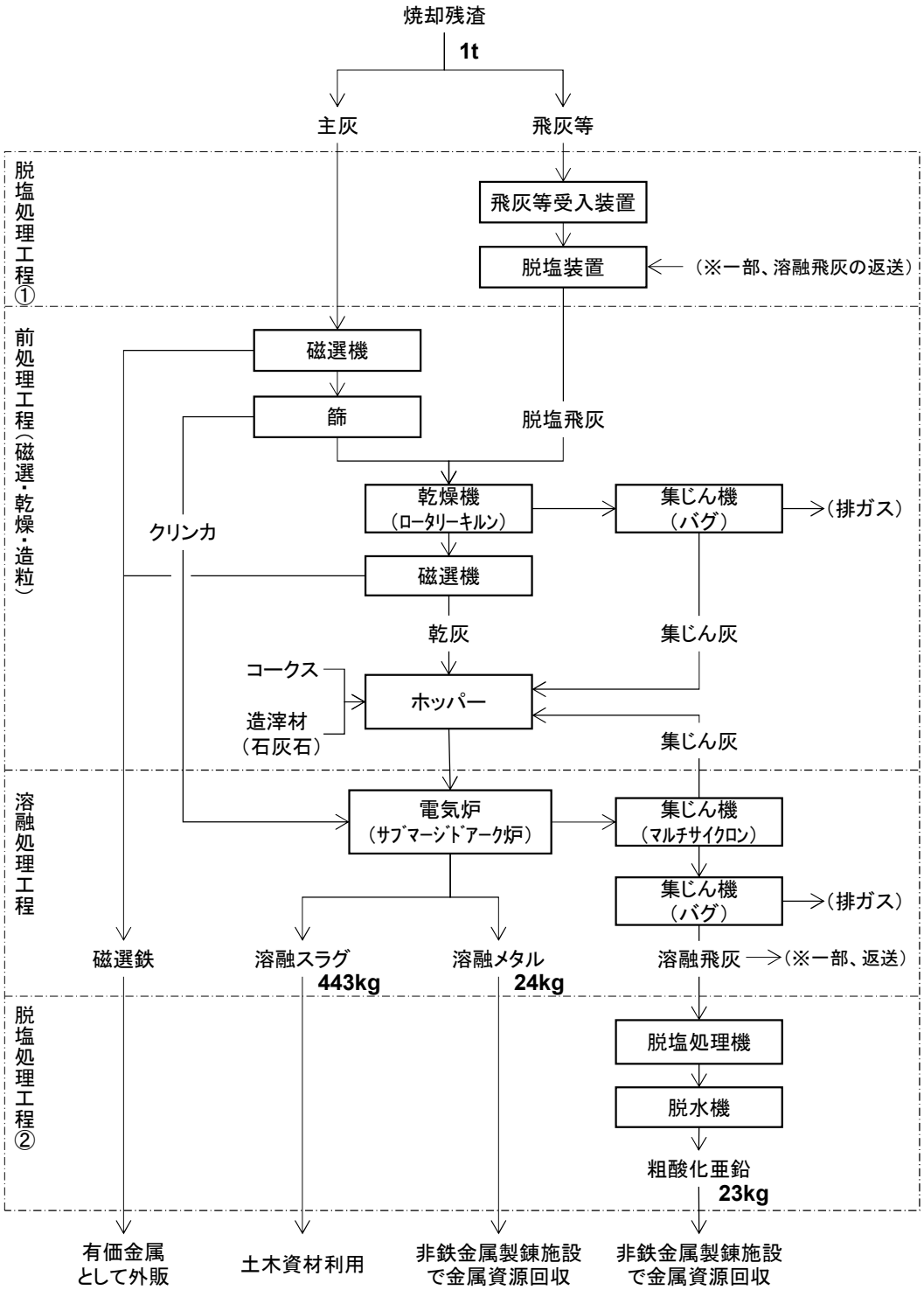
国内では北九州市皇后崎工場の焼却灰をエージング後に駐車場の路盤材として使用された事例[20]がある。国により考え方や方針が異なるが、欧州の一部の国（オランダ、ドイツ、フランス等）では焼却灰のエージングは積極的に行われており、路盤材等建設資材として直接利用されている[6]。いずれも、都市ごみ焼却灰に数週間～3 か月程度のエージングを施したのち、定められた管理方法のもとで直接利用している。コストを抑えながら焼却灰を土木資材等にそのまま再利用することが可能となる手法である。また、近年は、特に金属等の選別処理の高品位化がめざましいとされている[21]。

2.3　集約型還元溶融のプロセスフロー

集約型還元溶融事業は電気炉を用いた製鋼技術の応用であり、複数の市町村の一般廃棄物焼却施設や産業廃棄物焼却施設から発生する焼却残渣の溶融処理を行っている。現在、国内では集約型還元溶融施設は 8 施設が稼働しており、このうち本研究の対象とした A 施設の処理フローを図 2-2 に示す。

投入された焼却灰（湿灰）は磁選、ふるいおよび乾燥された後に、ホッパーに投入される。なお、塩分の高い飛灰等については、脱塩後に乾燥機に投入される。また、乾燥機の排ガス集じん機によって除去された集じん灰についてもホッパーに投入される。ホッパーに投入された乾灰・集じん灰は、造粒装置で造粒された後に、コークスおよび造滓材（石灰石）および前段でふるい分けられたクリンカとともに電気炉（サブマージドアーク炉：45ton-dry/d）に投入され、還元溶融される。サブマージドアーク炉は、溶融原料内に挿入した電極を介して直接電流を流し、その電気的抵抗を利用して高温（1,500～1,600℃）で還元溶融を行うものである。その際、乾灰・集じん灰に含まれる高沸点の金属（銅等）は溶融状態で炉の底部に存在し、低沸点の金属（亜鉛、鉛等）は排ガス処理工程に移行する。乾灰・集じん灰は溶融された後、一日数回、間欠的に出滓され、スラグパンで徐冷される。この徐冷工程で溶融スラグと溶融メタルは自然に比重分離して固化する。溶融スラグは路盤材等の土木資材として再利用され、溶融メタルは非鉄金属製錬施設にて金属資源回収が行われる。電気炉の排ガス処理によって集じんされた溶融飛灰は脱塩され、粗酸化亜鉛として回収され、非鉄金属製錬施設にて金属資源回収が行われる。製造される溶融スラグ、溶融メタル、粗酸化亜鉛の量は、投入される焼却残渣の質によって異なる。

ここでは一般廃棄物の焼却残渣を対象とし、実際に A 施設に搬入される B 市の流動床焼却炉から排出される焼却残渣を想定すると、焼却残渣 1ton あたり溶融スラグ 443kg、溶融メタル 24kg、粗酸化亜鉛 23kg となる（2013 年度の実績をもとにした A 施設による推計値）。なお、産業廃棄物の焼却残渣も含めた施設全体の回収量でみると、焼却残渣 1ton あたりの溶融スラグ、溶融メタルの回収量は上記よりも多くなる。



※数量はB市から発生する焼却残渣の2013年度処理実績（6か月分）を基に日量換算。
溶融スラグ、溶融メタル、粗酸化亜鉛の生産量はA施設による推計値。

図 2-2 集約型還元溶融施設（A施設）のプロセスフロー

2.4　資源代替性の評価

本研究では、ベースラインシナリオとして焼却残渣の埋立処分を、検討対象シナリオとして、焼却残渣の再資源化技術のうち、灰溶融の 1 手法である(1)集約型還元溶融、従来の焼却残渣再資源化手法である(2)セメント原料化、欧州で行われている(3)エージングをとりあげる。

まず、これらのシナリオについて、既存文献情報や実稼働施設のプロセスデータを活用してマテリアルフロー解析を行い、それぞれのプロセスにおける資源代替性を明らかにする。そして、その上で「2.5　$LCCO_2$解析」において GHG 排出量を評価する。それぞれの調査対象システムの概要は次のとおりである。

(1) 集約型還元溶融

a) 金属資源代替

溶融メタルおよび粗酸化亜鉛の金属品位について、集約型還元溶融事業についての実稼働施設のプロセスデータを示した文献[4]によると、灰処理量約 22 千 ton に対して、溶融メタルが約 960ton、粗酸化亜鉛が約 370ton 生産され、それぞれ溶融メタルから銅 111ton、銀 665kg、金 40kg、粗酸化亜鉛から亜鉛 135ton、鉛 19ton が回収されるとしている（2008 年度実績)。このデータを基にすると、集約型還元溶融施設において製造される再生資源の金属品位は、溶融メタルにおいては銅 12%、銀 0.069%、金 0.0041%、粗酸化亜鉛においては亜鉛 36%、鉛 5.1%となる。再生資源の金属品位は年度によって異なるものの、桁で変わるようなことはないため、本論文では集約型還元溶融の再生資源の金属品位として、この値を採用する。B 市の流動床焼却炉では鉄・アルミが回収されるため、集約型還元溶融施設での磁選鉄回収量は 0 とした。一方で、鉱山で採掘された鉱石は選鉱によって品位が高められた精鉱(銅・鉛・亜鉛精鉱)の状態にして国内に輸入されていることから、集約型還元溶融施設において製造される再生資源は精鉱を代替すると考える。なお、金、銀の多くは銅・鉛・亜鉛の非鉄製錬工程の副産物として生産されており、銅・鉛・亜鉛精鉱にも金銀がふくまれているが、溶融メタル中の金銀濃度が金鉱石・銀鉱石の品位よりも高いことから、ここでは金鉱石、銀鉱石を代替すると仮定する。金属精鉱および金属鉱石の品位には幅があるものの、本研究では金属精鉱および金属鉱石の品位に表 2-1 に示す値を採用し、集約型還元溶融事業における再生資源（溶融メタル、粗酸化亜鉛）は、銅・鉛・亜鉛の品位は金属精鉱の 1/10～1/3 程度であり、金・銀の品位は、金は金属鉱石の 40 倍、銀は 53 倍となる。焼却残渣 1ton あたりの金属回収量およびそれらが代替する鉱石・精鉱量を推計すると、集約型還元溶融事業における再生資源（溶融メタル、粗酸化亜鉛）は銅精鉱 8.6kg、銀鉱石 1,300kg、金鉱石 910kg、亜鉛精鉱 16kg、鉛精鉱 2.3kg をそれぞれ代替すると推計される。

表 2-1 集約型還元溶融事業における焼却灰 1 ton の資源代替性

再生資源	生産量※（kg/t-灰）	金属	金属回収量（kg/t-灰）	金属品位 [4]（%）	鉱石・精鉱品位 [22,23]（%）	焼却残渣 1t が代替する資源（kg）
溶融メタル	24	銅	2.8	12	銅精鉱：32%Cu	銅精鉱：8.6
		銀	0.017	0.069	銀鉱石：0.0013%Ag	銀鉱石：1300
		金	0.0010	0.0041	金鉱石：0.00011%Au	金鉱石：910
粗酸化亜鉛	23	亜鉛	8.3	36	亜鉛精鉱：50.4%Zn	亜鉛精鉱：16
		鉛	1.2	5.1	鉛精鉱：59.9%Pb	鉛精鉱：2.0

※一般廃棄物焼却残渣から製造される再生資源量（実稼働施設における処理実績値を基にした A 施設による推計値）

なお、集約型還元溶融施設における還元溶融工程において、金属資源は溶融メタル、溶融飛灰およびスラグに移行する。各金属資源の溶融飛灰、メタル、スラグへの移行率は運転条件（コークス添加量、塩素量、滞留時間）によって変化するが、既存研究 [24]によると Pb、Zn 等は 90%以上が溶融飛灰に、Cu、Au 等は 80%以上が溶融メタルに移行し、Ag 等は運転条件により溶融飛灰またはメタルへの移行率が変化することに注意が必要である。

b) 砕石代替

集約型還元溶融事業の焼却灰溶融工程において生産される溶融スラグは、約 2 日かけてゆっくり徐冷され結晶化スラグとなり、外観は石材に酷似する。その性状は表 2-2、表 2-3 のとおりであり、性状としても骨材や石材と同等である。そのため、溶融スラグ 1kg は砕石 1kg を代替する。焼却残渣 1ton から製造される溶融スラグは、443kg/ton-灰（実稼働施設における処理実績値を基にした A 施設による推計値）であることから、焼却残渣 1ton は砕石 443kg を代替すると考えられる。

表 2-2 溶融スラグの溶出試験結果 [25]

	全 Hg	Cd	Pb	Cr^{6+}	As	Se
溶融スラグの溶出試験結果（mg/L）※	0.0005 以下	0.005 以下	0.0005 以下	0.04 以下	0.005 以下	0.0085 以下
土壌環境基準（mg/L）	0.0005 以下	0.01 以下	0.01 以下	0.05 以下	0.01 以下	0.01 以下

※環境庁告示第 46 号

表 2-3 溶融スラグの道路用骨材としての物性値 [25]

	表乾比重	吸水率（%）	すり減り原料（%）	圧壊強度（N/mm^2）
溶融スラグの物性値例	2.80～2.85	0.1～0.3	26～45	40～100
上層路盤材の品質規格	－	－	50 以下	－
アスファルト舗装表層・基層用砕石の品質目標値	2.45 以上	3.0 以下	30 以下	－

上記 a)、b)をまとめると、集約型還元溶融施設の資源代替性は図 2-4 の(a)のとおりとなる。

(2) セメント原料化

セメント（普通ポルトランドセメント）は、石灰石、粘土、けい石、酸化鉄原料、石こう、廃棄物・副産物を原料として製造される（図 2-3）。セメント 1ton の製造に必要な原料は、おおよそ石灰石 1,100kg、粘土 200kg、その他原料 100～200kg であり、セメントの主要成分（CaO、Al_2O_3、SiO_2、Fe_2O_3）を含む物質は原料として使用可能なことから、製鉄所からの副産物である高炉スラグ、石炭火力発電所の石炭灰や、各種の廃棄物の有効利用が進められている [26]。焼却灰（主灰）は主に粘土や石灰石の代替原料となる。これらの原料を調合し、原料ミルで粉砕した後にプレヒーター（予熱器）を経て、ロータリーキルンにおいて 1,450℃以上の高温で焼成されクリンカが製造される。クリンカに石こうが添加され、最終製品のセメントとなる。なお、焼却残渣のうち飛灰は塩濃度が高く脱塩プロセスが必要となるため、本研究では主灰のみをセメント原料化の対象とする。

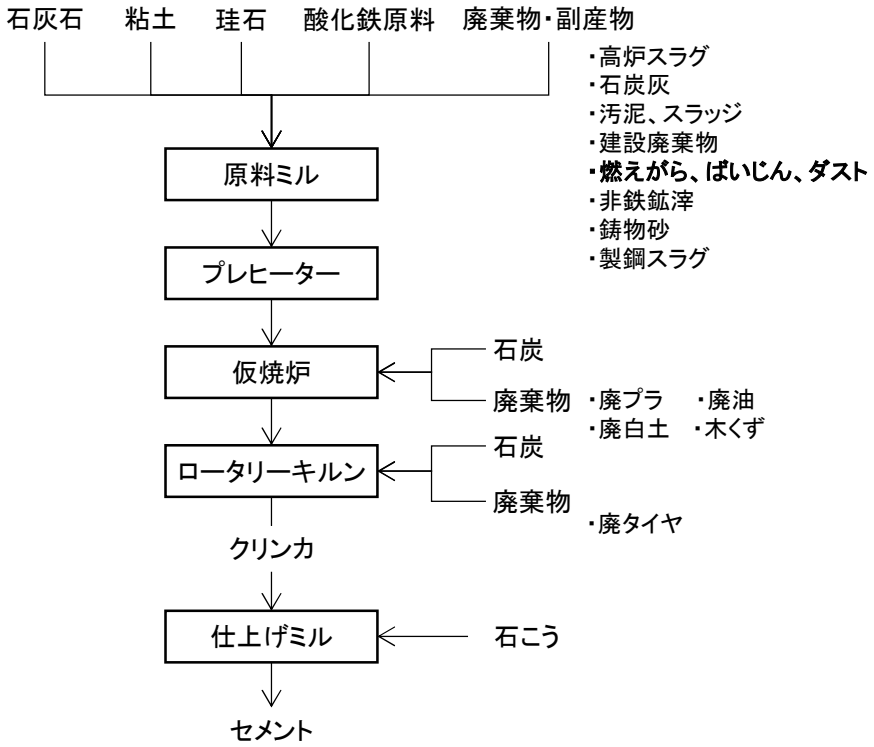


図 2-3 セメント製造施設のプロセスフロー

焼却灰（主灰）はセメント原料のうち主に粘土や石灰石を代替するが、酸化鉄の一部も代替する。Kawai ら [2]によると、焼却灰をセメント原料として再利用する場合の資源代替効果は、焼却灰 1ton あたりセメント原料の粘土 0.653ton、石灰石 0.474ton、酸化鉄 0.014ton

の削減、けい石 0.183ton の増加となる。本研究では焼却灰（主灰）をセメント原料代替の対象とし、焼却残渣に占める焼却灰（主灰）と飛灰の割合は、平岡ら[27]の研究（ごみ中の灰分を 10%、ごみ中の灰分から発生する焼却飛灰の割合を 10%、飛散ダストに対する添加アルカリ剤の割合を 2 倍量と仮定）を踏まえて、焼却灰：飛灰=3：1 とする。上記をまとめると、集約型還元溶融施設の資源代替性は図 2-4 の(b)のとおりとなる。

なお、セメント製造施設においてはロータリーキルンにおいて石炭が使用されるなど多くの燃料が投入される。これらの燃料代替として、廃プラスチックや廃油等の廃棄物原料が投入されているが、焼却残渣を原料代替とすることによる燃料利用量の変化はないものと考えられる[28]。

(3) エージング

エージングの種類には、強制的に通気を行う方法や、水分調整や金属資源回収等を合わせて行う方法等、いくつかの方法があるが、ここでは単純に焼却灰（主灰）を湿潤状態で数週間～3 か月程度、大気に晒す方法を想定する。なお、焼却残渣のうち飛灰は重金属類濃度が高いことから、エージングの対象となるのは主灰となる。

エージングによって改質された焼却灰（主灰）は、砕石等の建設資材として全量が再利用できるものと仮定する。エージングは主灰に含まれる重金属類と大気中の二酸化炭素の反応であるが、二酸化炭素との反応による重量の増加は無視できるものと考える。また、エージングによる焼却灰の水分の変化もここでは考慮しないこととする。焼却残渣に占める焼却灰（主灰）と飛灰の割合は、平岡ら[27]の研究を踏まえて、焼却灰：飛灰=3：1 とする。上記により、エージングを行うことにより、焼却残渣 1ton は砕石等を 0.75ton 代替する（図 2-4 の(c)）。

(4) 集約型還元溶融の資源代替性のまとめ

集約型還元溶融事業における再生資源（溶融メタル、粗酸化亜鉛）については、銅・鉛・亜鉛の品位は金属精鉱の 1/10～1/3 程度、金・銀の品位は金属鉱石の数十倍程度であり、焼却残渣 1ton は銅・鉛・亜鉛精鉱を数 kg～十数 kg 程度、金・銀鉱石を 1ton 程度それぞれ代替すると推計される。また、集約型還元溶融事業で生産される溶融スラグは砕石を代替する。代替する量はエージングによる砕石代替量ほどではないが、焼却残渣 1ton あたり 0.4ton 程度となる。

全国で埋立処分される焼却残渣[7]は 321 万 ton であり、このすべてが集約型還元溶融で再資源化されると仮定すると、全国の焼却残渣が有する金属資源の潜在的回収量は、銅が約 9.0 千 ton、鉛が約 3.9 千 ton、亜鉛が約 27 千 ton、銀が約 45ton、金が約 3ton とそれぞれ試算される。国内の金属生産量（2016 年）[29,30]は、銅（電気銅）が約 150 万 ton、鉛（電気鉛）が約 20 万 ton、亜鉛（電気亜鉛または蒸留亜鉛）が約 53 万 ton、銀が約 2 千 ton、金が約 76ton であり、全国の焼却残渣が有する金属資源の潜在的回収量は国内の金属生産量の 0.6～5%と推定される。また、この潜在的回収量に金属資源価格[31-35]（銅：734 円/kg、

鉛：319 円/kg、亜鉛：373 円/kg、銀：61 千円/kg、金：4,533 千円/kg、2017 年平均価格）を乗ずると、全国の焼却残渣が有する金属資源の潜在的回収量の金属資源価値は、約 350 億円に相当すると試算される。

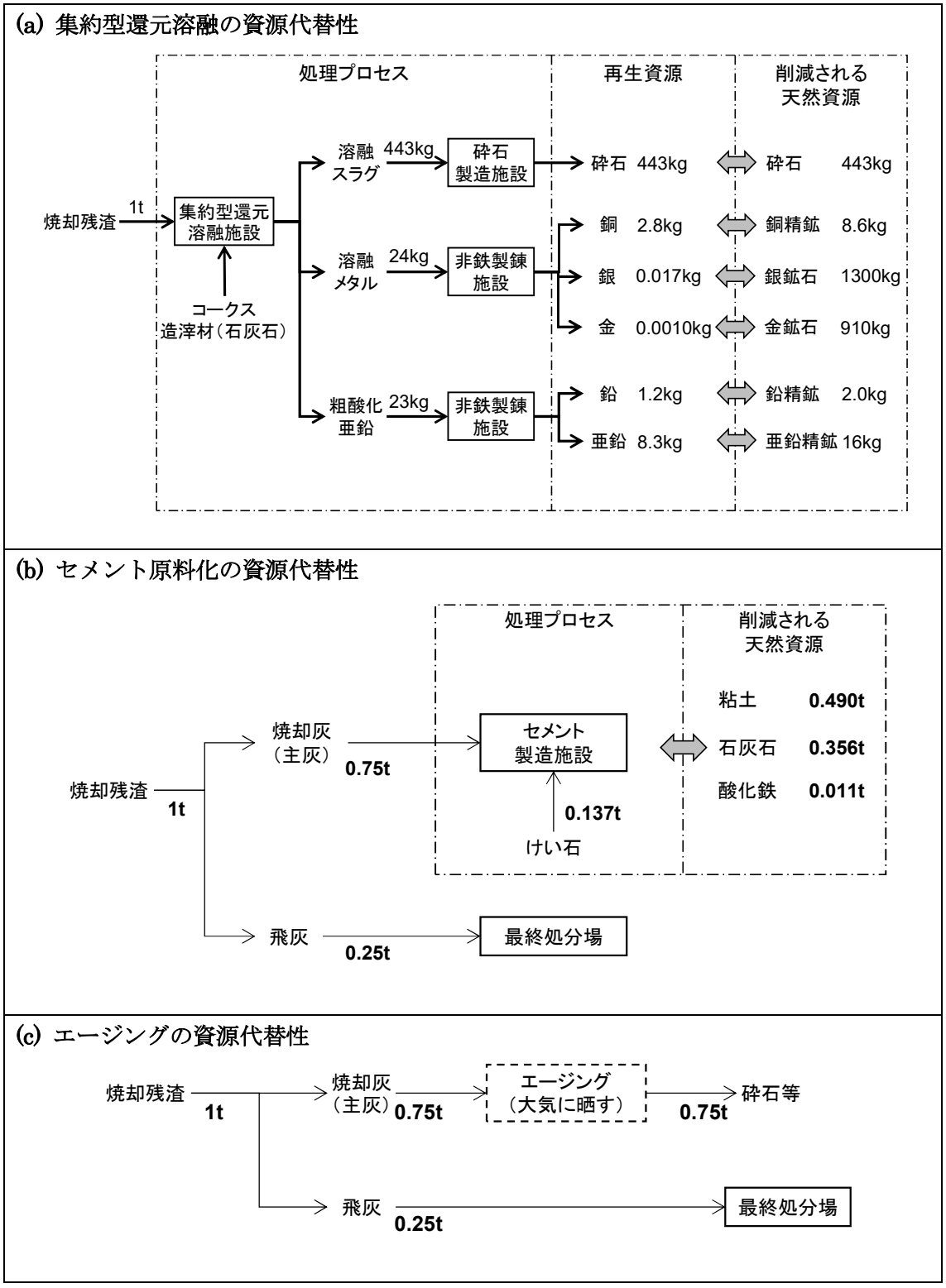


図 2-3 調査対象システムの資源代替性

2.5 $LCCO_2$ 解析

都市ごみ焼却残渣の再資源化事業を対象として $LCCO_2$ ケーススタディを実施し、GHG 排出量および GHG 削減効果を 3 ケース（評価対象シナリオ①、②および③）で試算する。

評価対象シナリオ①（集約型還元溶融）は、焼却残渣を集約型還元溶融施設において溶融スラグと溶融メタル・粗酸化亜鉛に再資源化し、溶融スラグは砕石の代替として利用し、溶融メタル等は非鉄製錬施設に投入し、金属資源を回収する方法である。評価対象シナリオ②（セメント原料代替）は、焼却残渣をセメント原料（粘土・石灰石等）の代替としてセメント製造プロセスに投入し、セメントを製造する方法である。評価対象シナリオ③（焼却残渣のエージング）は、焼却残渣のうち主灰を湿潤状態で大気に晒すことで、主灰に含まれる重金属類の炭酸化により有害物質を不溶化し、砕石の代替として利用する方法である。また、一般的な処理方法である焼却残渣の埋立処分をベースラインシナリオとして位置づけ、評価対象シナリオの環境負荷との比較を行う。

(1) 機能単位

各シナリオの機能単位は、「焼却残渣 1 ton の処理・再資源化」と設定する。

(2) プロセスフローとシステム境界の設定

各シナリオのプロセスフローを図 2-5～図 2-8 に示す。

各プロセス間の比較を行うために、評価の対象とするプロセスのフローに加えて、他の評価対象シナリオに対応する従来プロセスのフローを並列で評価する。具体的には、ベースラインシナリオ（最終処分）においては、最終処分のフローに加えて評価対象シナリオ①～③に対応する従来プロセスのフローを併記する。評価対象シナリオ①については、評価対象シナリオ②～③に対応する従来プロセスのフローを併記する。評価対象プロセス②、③についても同様の考え方とする。

システム境界は図の網掛けの範囲とする。いずれのプロセスフローも、焼却残渣の再資源化によって代替される資源の「原料調達段階」から評価対象とする。焼却残渣の輸送はシステム境界内とする。銅精鉱、鉛精鉱、亜鉛精鉱等の調達に関しては、採掘箇所からの輸送をシステム境界内とする。最終処分や集約型還元溶融施設はシステム境界内とする。一方、セメント製造、砕石製造、非鉄製造における「製造段階」は各プロセスにおいて共通のプロセスであるためシステム境界外とする。

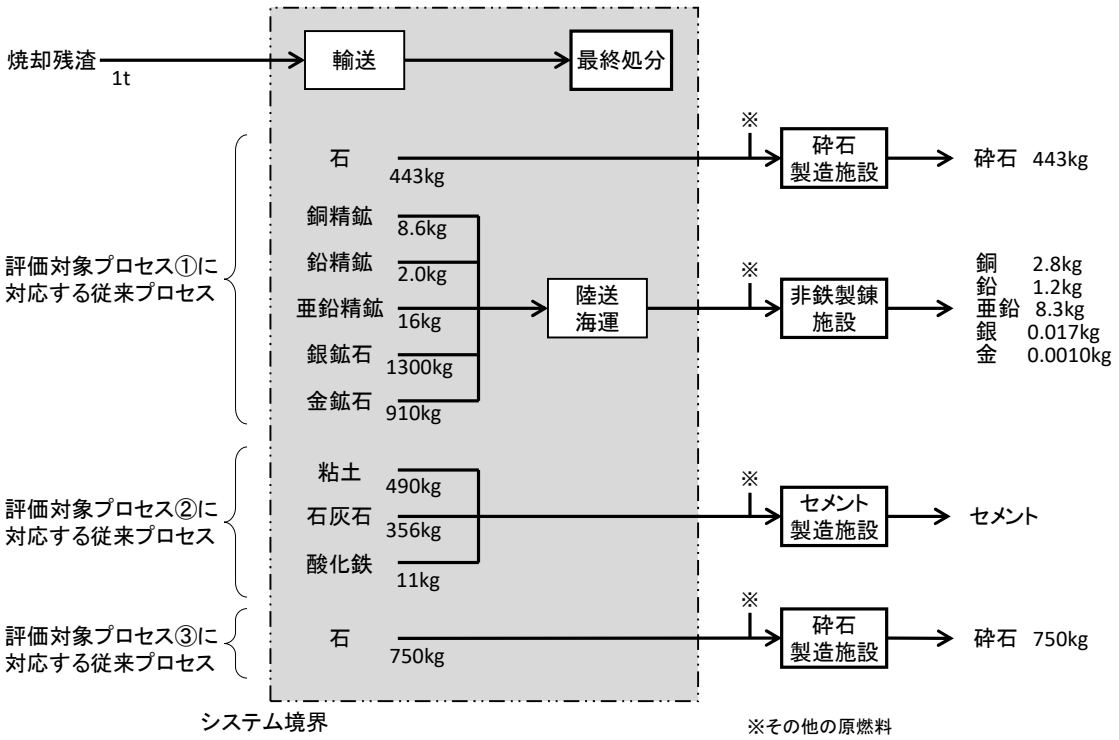


図 2-5 プロセスフローとシステム境界（ベースラインシナリオ：埋立処分）

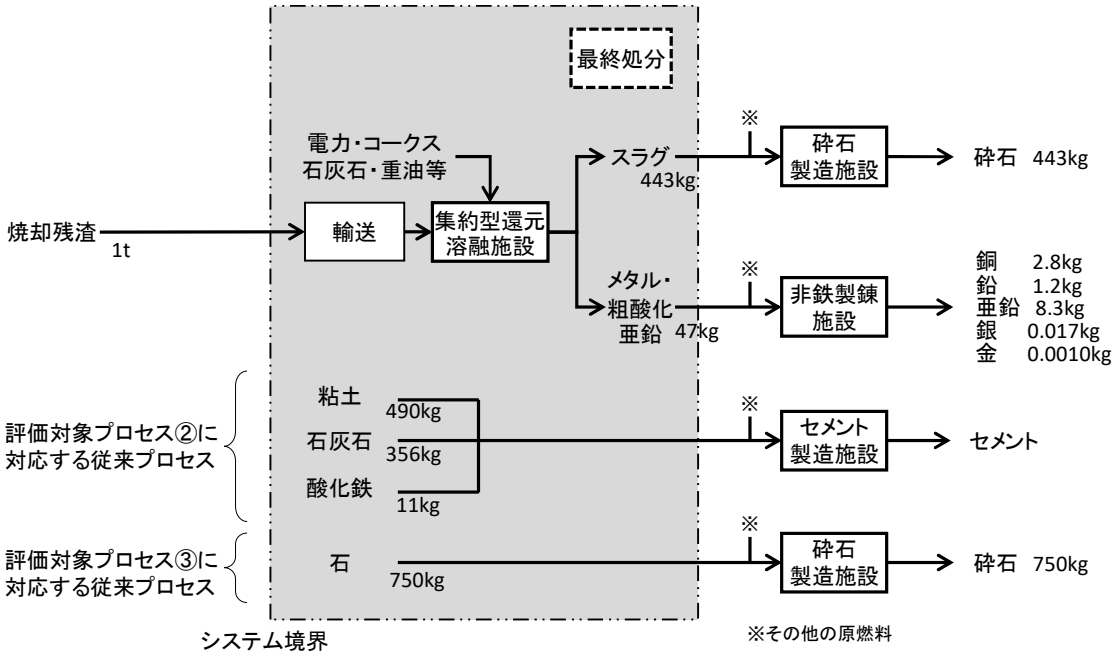


図 2-6 プロセスフローとシステム境界（評価対象シナリオ①：集約型還元溶融）

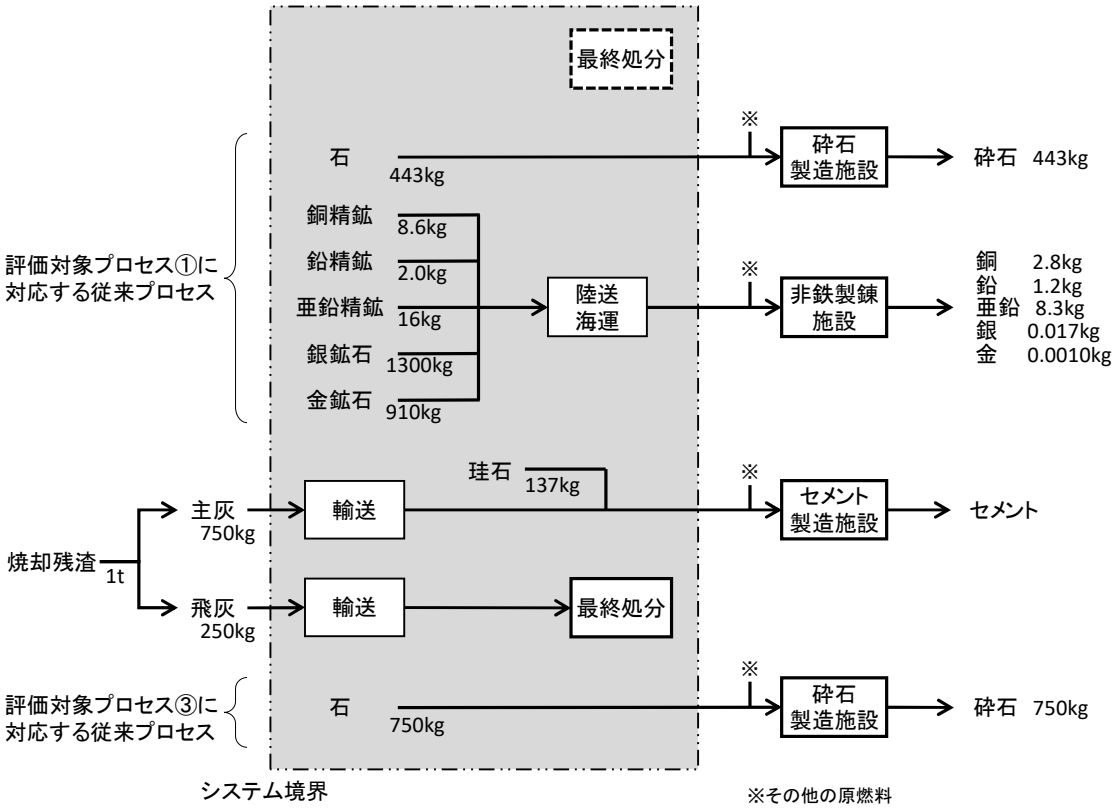


図 2-7 プロセスフローとシステム境界（評価対象シナリオ②：セメント原料化）

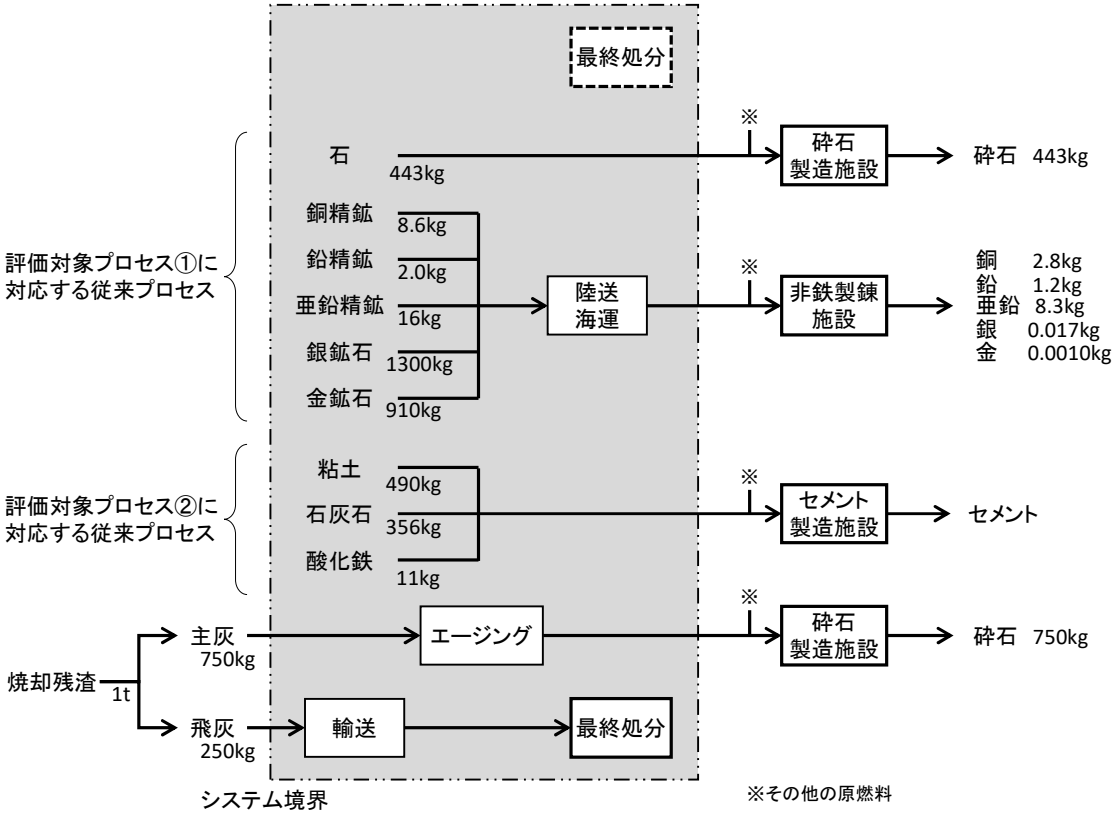


図 2-8 プロセスフローとシステム境界（評価対象シナリオ③：エージング）

(3) プロセスデータの収集

a) 集約型還元溶融施設のプロセスデータ

評価対象プロセス①（集約型還元溶融）における集約型還元溶融施設におけるプロセスデータは、A 施設から提供を受けたデータを用いる。データの詳細は開示できないが、溶融炉において電力、コークス、造滓材（石灰石）が、乾燥炉において重油が、その他の設備等で電力、軽油、工業用水が投入される。

b) 輸送のプロセスデータ

ベースラインシナリオおよび評価対象シナリオ②、評価対象シナリオ③における最終処分場への焼却残渣および飛灰の輸送距離は、B 市の焼却施設から B 市の最終処分場までの距離を参考に、15km と設定する。評価対象シナリオ①における集約型還元溶融施設への焼却残渣の輸送距離は、B 市における実績をもとに 300km と設定する。評価対象シナリオ②におけるセメント製造施設への焼却残渣の輸送距離は、B 市の焼却施設から近隣のセメント製造施設（4 施設）への距離の平均値を参考に 80km と設定する。評価対象シナリオ①に対する従来プロセスにおける銅精鉱・鉛精鉱・亜鉛精鉱の輸送については、鉱石の輸入元を想定し、陸送距離と海運距離を表 2-4 のとおり設定する。国内における金および銀を含有する鉱石の生産はごくわずかであるが、本研究では金鉱石と銀鉱石は国内産出と想定し、輸送距離は考慮しない。

表 2-4 銅精鉱・鉛精鉱・亜鉛精鉱の輸送距離の設定

種類	主要輸入国 [36]	主要鉱山	輸送距離の設定
銅精鉱	チリ	Antofagasta Region Chuquicamata 鉱山	鉱山→（陸送：200km）→Antofagasta 港→（海運：17,000km）→日本
鉛精鉱	米国、豪州等（ここでは豪州と設定）	クイーンズランド州 Cannington 鉱山	鉱山→（陸送：600km）→Karumba 港→（海運：6,000km）→日本
亜鉛精鉱	豪州	クイーンズランド州 Century 鉱山	鉱山→（陸送：200km）→Karumba 港→（海運：6,000km）→日本

c) その他のプロセスデータ

銅精鉱等、鉱物資源の採掘・精鉱および最終処分、輸送、陸送・海運に係る投入エネルギーや用役使用量等のプロセスデータについては、LCI データベース（(一社)産業環境管理協会：IDEA ver.1.1.0）のデータを用いる。その際、石灰石については石灰石の生産と消費を考慮する。コークス、重油、軽油については、それらの生産と燃焼を考慮する。評価対象プロセス③のエージングは、エネルギーや用役等を使用しないものとした。

d) GHG 排出係数

GHG 排出係数（物質・エネルギーの投入量あたりの温室効果ガス排出量）は、プロセスデータを元に LCA システム MiLCA ver.1.2 を用いて算定する。MiLCA では各プロセスにおける CO_2、CH_4、N_2O、SF_6 の各排出量が算定され、地球温暖化係数は、「温室効果ガス排出量算定・報告・公表制度における算定方法・排出係数一覧（2015 年度排出量)」の値(CO_2=1、CH_4=25、N_2O=298、SF_6=22,800)を用いて、CO_2 排出量に換算する。MiLCA の算定プロセスには川上側のプロセスも含まれており、たとえば銅精鉱の GHG 排出係数には銅粗鉱の生産等も含まれる。なお、電力の GHG 排出係数は LCA システム MiLCA ver.1.2 により発電系統電力を採用し、0.555kg-CO_2/kWh となっている。

(4) $LCCO_2$ 算定結果と評価

各プロセスの GHG 排出係数を表 2-5 に、各シナリオにおける $LCCO_2$ 算定結果を表 2-6 および図 2-9 に示す。

評価対象シナリオ①（集約型還元溶融）の GHG 排出量はオリジナルプロセスと比べて 57%（315kg-CO_2/ton-焼却残渣）増加する。非鉄製錬プロセスにおける金・銀鉱石採掘の回避と焼却残渣埋立処分の回避による GHG 排出削減はあるものの、集約型還元溶融施設の稼働に伴う GHG 排出量が大きく、さらに集約型還元溶融施設までの輸送に伴う GHG 排出量によって GHG 排出量は大きくなる。GHG 排出量が最も大きいのは集約型還元溶融プロセスであり、その中でも電力の消費による排出が約 7 割であり、残りの GHG 排出量のほとんどをコークスの燃焼と重油の燃焼が占める。これは、集約型還元溶融プロセスが電気炉による溶融が主プロセスであるためであり、また、副資材としてコークスを用いること、乾燥キルンの燃料として重油を用いていることが要因である。銅精鉱、鉛精鉱、亜鉛精鉱の採掘回避による GHG 排出削減量は、金銀鉱石の採掘回避による削減量に比べてずっと小さくなっている。これは、銅精鉱、鉛精鉱、亜鉛精鉱はそれぞれ数十%の金属含有量であり削減される精鉱量が数 kg～10 数 kg であるのに対し、金銀鉱石は貴金属鉱石量としてそれぞれ 1ton 前後の削減量が見込めるためである。また、削減される銅精鉱、鉛精鉱、亜鉛精鉱の量が限られているため、これらの精鉱の輸送に伴う GHG 排出削減量もわずかなものとなっている。スラグの製造により採石や砂・砂利等の生産が回避されるが、回避される石の重量は大きいものの、採石等にかかる GHG 排出係数が小さいため GHG 排出量の削減も小さくなる。

評価対象シナリオ②（セメント原料代替）の GHG 排出量はベースラインシナリオと比べて−38%となり、大きく削減される。特に、セメント製造プロセスにおける石灰石の消費の回避が大きくなっている。これは石灰石の製造回避に伴うものではなく、石灰石の熱反応過程から発生する GHG の排出回避によるものである。また、粘土の生産回避の量が大きいため、それに伴う GHG 排出削減もある。酸化鉄の GHG 排出係数は粘土と同等と仮定したが、酸化鉄の生産回避量はわずかであるため GHG 排出削減もわずかなものとなっている。けい石の使用量が増加するが、その量はわずかであるため GHG 排出量もわずかなものとな

っている。また、焼却残渣の埋立処分の回避による GHG 排出削減はあるものの、セメント原料代替を行うのは焼却残渣のうち主灰のみとしているため、飛灰の埋立処分に伴う GHG 排出は残る。セメント製造施設への焼却灰(主灰)の輸送に伴う GHG 排出量はわずかである。

評価対象シナリオ③(エージング)の GHG 排出量はベースラインシナリオと比べて−7%となり、わずかに削減される。エージングプロセスにはエネルギーを投入しないとしているため、エージングプロセスそのものからの GHG 排出量はない。そのため、GHG 排出削減が見込めるのは焼却残渣の埋立処分の回避によるものである。ただし、エージングを行うのは焼却残渣のうち主灰のみとしているため、飛灰の埋立処分に伴う GHG 排出は残る。

表 2-5 各プロセスの GHG 排出係数

シナリオ	項目		GHG 排出係数	単位	備考
ベースライン	輸送	輸送⓪	1.30E-01	kg-CO_2/t･km	トラック輸送(10 トン車)
シナリオ	埋立処分	埋立処分⓪	4.27E-02	kg-CO_2/kg	埋立処分(一廃、ごみ由来を除く)
評価対象シナリオ①	砕石原料	石	7.44E-03	kg-CO_2/kg	採石、砂･砂利･玉石の生産
	非鉄製錬原料	銅精鉱	6.83E-01	kg-CO_2/kg	銅精鉱(32%Cu)の選鉱
		鉛精鉱	1.26E-01	kg-CO_2/kg	鉛精鉱(59.9%Pb)の生産(参考データ)
		亜鉛精鉱	1.26E-01	kg-CO_2/kg	亜鉛精鉱(50.4%Zn)の生産(参考データ)
		銀鉱石	1.36E-01	kg-CO_2/kg	貴金属鉱石の生産
		金鉱石	1.36E-01	kg-CO_2/kg	貴金属鉱石の生産
		陸送(銅･鉛･亜鉛精鉱)	1.23E-01	kg-CO_2/t･km	トラック輸送(20t 車)
		海運(銅･鉛･亜鉛精鉱)	6.44E-03	kg-CO_2/t･km	その他バルク運搬船輸送
	集約型還元溶融	輸送①	1.30E-01	kg-CO_2/t･km	トラック輸送(10t 車)
		集約型還元溶融	6.36E-01	kg-CO_2/kg	事業者提供のプロセスデータをもとに設定
評価対象シナリオ②	セメント原料	粘土	5.05E-02	kg-CO_2/kg	その他の非金属鉱物の生産(採掘･選鉱)
		石灰石	5.56E-03	kg-CO_2/kg	石灰石の生産(採掘･選鉱)
		石灰石の消費	4.40E-01	kg-CO_2/kg	石灰石の消費(CO_2排出)
		酸化鉄	5.05E-02	kg-CO_2/kg	粘土と同等と仮定
	セメント原料代替	輸送②(セメント原料化)	1.30E-01	kg-CO_2/t･km	トラック輸送(10 トン車)
		珪石	6.56E-03	kg-CO_2/kg	珪石の生産
		輸送②(埋立処分)	1.30E-01	kg-CO_2/t･km	トラック輸送(10 トン車)
		埋立処分	4.27E-02	kg-CO_2/kg	埋立処分(一廃、ごみ由来を除く)
評価対象シナリオ③	砕石原料	石	7.44E-03	kg-CO_2/kg	採石、砂･砂利･玉石の生産
	エージング	輸送③	1.30E-01	kg-CO_2/t･km	トラック輸送(10 トン車)
		埋立処分③	4.27E-02	kg-CO_2/kg	埋立処分(一廃、ごみ由来を除く)

表 2-6 $LCCO_2$ 算定結果

シナリオ	項目		ベースライン シナリオ (埋立処分)	評価対象シナリオ① (集約型還元溶融)	評価対象シナリオ② (セメント原料代替)	評価対象シナリオ③ (エージング)
ベースライン シナリオ	輸送	輸送⓪	2.0	―	―	―
	埋立処分	埋立処分⓪	42.7	―	―	―
評価対象 シナリオ①	砕石原料	石	3.3	―	3.3	3.3
	非鉄製錬 原料	銅精鉱	5.9	―	5.9	5.9
		鉛精鉱	0.3	―	0.3	0.3
		亜鉛精鉱	2.0	―	2.0	2.0
		銀鉱石	177.4	―	177.4	177.4
		金鉱石	124.2	―	124.2	124.2
		輸送(陸送、海運)	2.4	―	2.4	2.4
	集約型 還元溶融	輸送①	―	39.0	―	―
		集約型還元溶融	―	635.8	―	―
評価対象 シナリオ②	セメント 原料	粘土	24.7	24.7	―	24.7
		石灰石	2.0	2.0	―	2.0
		石灰石の消費	156.6	156.6	―	156.6
		酸化鉄	0.6	0.6	―	0.6
	セメント 原料 代替	輸送②(セメント)	―	―	10.4	―
		珪石	―	―	0.9	―
		輸送②(埋立)	―	―	0.5	―
		埋立処分②	―	―	10.7	―
評価対象 シナリオ③	砕石原料	石	5.6	5.6	5.6	―
	エージング	輸送③	―	―	―	0.5
		埋立処分③	―	―	―	10.7
合計			549.5	864.3	343.4	510.4
オリジナルプロセスとの比較			―	+57%	-38%	-7%

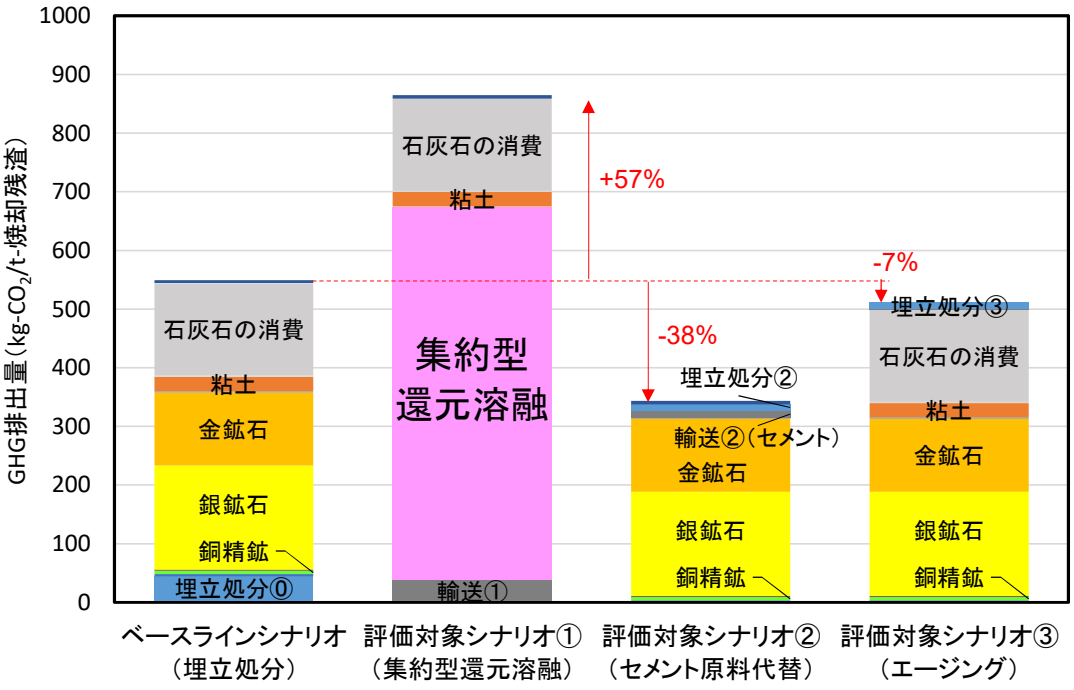


図 2-9 $LCCO_2$ 算定結果

2.6　集約型還元溶融システムの展開可能性の検討

(1) 低炭素化社会への移行を踏まえた GHG 排出量の削減可能性の検討

$LCCO_2$評価によって集約型還元溶融を活用した焼却残渣の再資源化システムは、GHG 排出量がベースラインシナリオと比較して増加することが明らかとなったが、プロセスの核に電気炉を据える集約型還元溶融の性質上、現状の評価においては、やむを得ない面がある。

しかしながら、低炭素化社会に向けた取り組みが推進されており、将来的には電力の GHG 排出係数が下がることが予想される。具体的には、わが国は 2030 年度の GHG 削減目標を 2013 年度比 26%減とする「日本の約束草案 [37]」を決定し、国連気候変動枠組条約事務局に提出している。これを受け、電力大手 35 社は「電力事業における低炭素社会実行計画 [38]」を策定し、2030 年度の排出係数を 2013 年度比で約 35%削減となる 0.37kg-CO_2/kWh 程度（使用端）とする自主目標が発表されている。また、中央環境審議会地球環境部会において、2050 年にすべての火力発電所に CCS（二酸化炭素貯留設備）を導入することにより、電力部門の GHG 排出量の 80%削減を達成することが示唆されている [39]。加えて、こうした目標は国全体の GHG 排出係数および排出量としての目標であり、地域によってはさらに GHG 排出係数の小さい電力が供給される可能性があり、他に、集約型還元溶融事業者独自でグリーン電力を調達するオプションもある。そのため、これら将来の電力の GHG 排出係数の低減を想定し、表 2-7 に示すとおり評価対象シナリオ①（集約型還元溶融）の改善シナリオを仮想的に設定する。

改善シナリオを導入することによる $LCCO_2$ 算定結果は図 2-10 のとおりである。改善シナリオ①により電力の GHG 排出係数が 2030 年目標である 0.37kg-CO_2/kWh となると、現状シナリオと比べてベースラインシナリオからの GHG 排出量の増分は半分程度になるものの、それでもベースラインシナリオより GHG 排出量は増加する。改善シナリオ②により電力の GHG 排出係数が 2050 年の可能性として示された 80%削減が達成されると、ベースラインシナリオより GHG 排出量は 5%削減される。改善シナリオ③により集約型還元溶融事業者が自然エネルギー100%のグリーン電力を自主調達することができれば、ベースラインシナリオより GHG 排出量は 20%削減される。ここでの $LCCO_2$ 算定は「2.5 $LCCO_2$ 解析」で示したシステム境界としているため、セメント製造等を含めずに埋立処分と集約型還元溶融を単純に比較すると GHG 排出量は約 30%削減されることになる。なお、電力の GHG 排出係数が 0.145kg-CO_2/kWh のときに、集約型還元溶融シナリオの GHG 排出量はベースラインシナリオと同等になる。これは、電力の GHG 排出係数の 75%削減に相当する。

表 2-7 評価対象シナリオ①（集約型還元溶融）の改善シナリオの設定

	電力の GHG 排出係数（kg-CO_2/kWh）	設定の考え方
現状シナリオ	0.555	－
改善シナリオ①	0.37	「電力事業における低炭素社会実行計画」における 2030 年の目標（約 35%削減）
改善シナリオ②	0.111	中央環境審議会地球環境部会による 2050 年の排出削減可能性（80%削減）
改善シナリオ③	0	集約型還元溶融事業者によるグリーン電力の自主調達

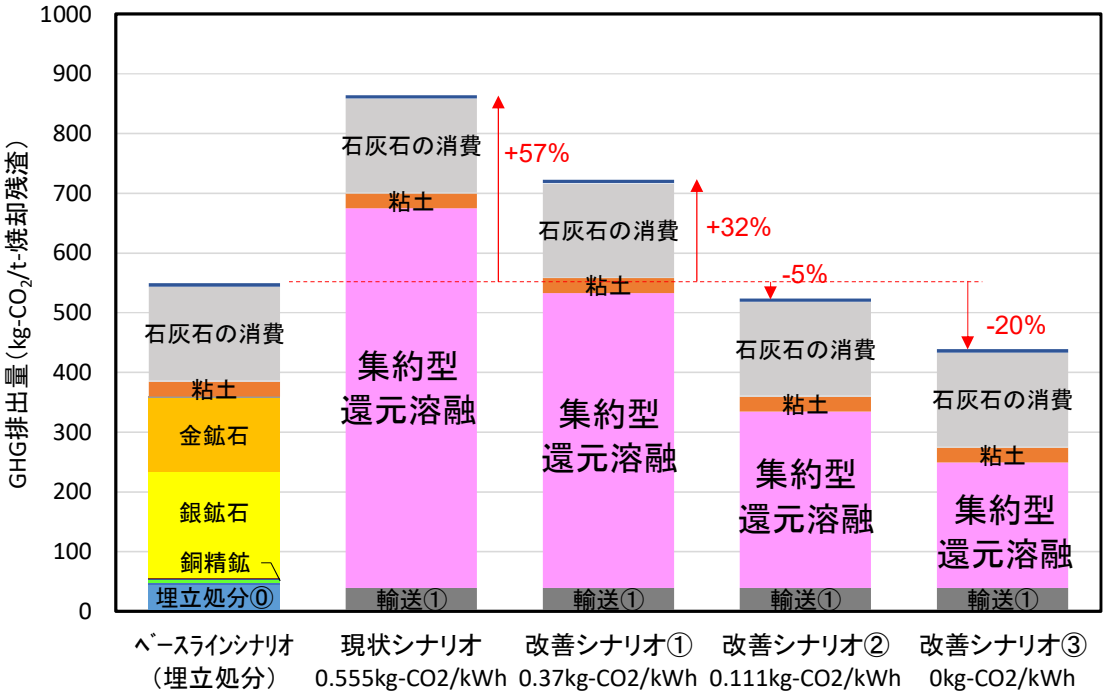


図 2-10 $LCCO_2$ 算定結果（集約型還元溶融の改善シナリオ）

(2) 立地特性による GHG 排出量の削減可能性の検討

現状シナリオでは焼却残渣の輸送距離を 300km と設定しているが、焼却残渣の排出場所と集約型還元溶融の立地場所の関係によっては、輸送距離はもっと短くなる。ただし、輸送距離を短くしただけでは GHG 排出量の大幅な改善は見込めないことから、上記で検討した電力の GHG 排出係数の低減を前提にした上で、輸送距離が短くなることを想定する。なお、電気自動車の普及等、輸送に係る排出係数も将来変わる可能性があるが、本研究では対象外とした。

ここで輸送距離を 100km と設定すると、電力の GHG 排出係数が 0.18kg-CO_2/kWh のときに、集約型還元溶融シナリオの GHG 排出量はベースラインシナリオと同等になる。また、輸送距離が 30km とすると、電力の GHG 排出係数が 0.19kg-CO_2/kWh のときに、集

約型還元溶融シナリオはベースラインシナリオと同等になる。0.19kg-CO_2/kWh は電力の GHG 排出係数の約 65%削減に相当し、将来的には達成が見込める水準と考えられる。

2.7 まとめ

還元溶融施設で複数自治体の焼却残渣を集約的に再資源化する事業（集約型還元溶融事業）に着目し、焼却残渣の埋立処分および従来の焼却残渣再資源化手法（セメント原料代替、エージング）と比較したマテリアルフロー解析により、焼却残渣の資源代替性を明らかにするとともに、$LCCO_2$ 手法による環境負荷の評価を行った。その結果、集約型還元溶融事業における再生資源（溶融メタル、粗酸化亜鉛）については、銅・鉛・亜鉛の品位は金属精鉱の 1/10～1/3 程度、金・銀の品位は、金は金属鉱石の 40 倍、銀は 53 倍であり、焼却残渣 1ton は銅・鉛・亜鉛精鉱を数 kg～十数 kg 程度、金・銀鉱石を 1ton 程度それぞれ代替すると推計された。全国で最終処分される焼却残渣が有する金属資源の潜在的回収量は、国内の金属生産量の 0.6～5%と推定され、この金属資源価値は約 350 億円に相当すると試算された。集約型還元溶融施設は、現状の設定における $LCCO_2$ 算定では GHG 排出量が増加するものの、将来的に電力の GHG 排出係数の低減や輸送距離の短い立地場所を想定することにより、埋立処分よりも GHG 排出量が削減される可能性があることが示された。

今後の研究課題としては、溶融メタル等の金属品位は原料である焼却残渣の金属品位に左右されることから、炉形式の違い等、さまざまな焼却施設の焼却残渣を対象とした金属品位やそのばらつきに関する調査を実施することがあげられる。また、金属資源を多く含む小型家電の回収が始まっており、小型家電回収の実施状況と焼却残渣の金属品位との関係性の解析や、金属含有量が多く含まれる粗大ごみ破砕残渣の金属含有量の分析等により、より効率的な焼却灰資源循環システムの検討を実施する。GHG 排出量については表 2-5 で設定した GHG 排出係数によるところが大きく、将来的な鉱石の品位低下を考慮すると、非鉄製錬原料の精鉱等に係る GHG 排出係数は現在の評価よりも増加、すなわち、焼却残渣等のリサイクル原料を用いることの有効性がさらに増すことから、これらの精査も課題となる。

集約型還元溶融は、従来の焼却残渣再資源化手法と比較して有用金属資源の回収が可能であるという大きな利点があり、金属資源の乏しいわが国においては持続的な金属資源確保の観点からも有用性は認められるところである。現状では集約型還元溶融の GHG 排出量は大きいものの、投入エネルギー削減に向けた検討も進められており、GHG 排出量の少ないシステムを構築することができれば、集約型還元溶融施設は都市鉱山の製錬施設としての社会インフラとなる可能性はあると考えられる。今後、各自治体において最終処分量の削減に向けた焼却残渣の再資源化の検討が求められるとともに、廃棄物処理の広域化を進める際においても焼却残渣を含めた最適な資源循環システムの構築の検討が必要となる。焼却残渣再資源化手法にはさまざまな手法があるが、集約型還元溶融も選択肢の一つとして地域の特性や社会の情勢を踏まえた最適な手法を各自治体が採用することにより、持続的な循環型社会の構築が進むことが望まれる。

【謝辞】

本研究成果の一部は、環境省の環境研究総合推進費 3K153002「廃棄物処理システムの持続可能性評価手法と改善戦略に関する研究」（代表研究者：大迫政浩）により実施されたものです。また、データを提供いただいた各関係機関の方々に深謝いたします。

【参考文献】

1） 松藤敏彦：都市ごみ処理システムの分析・計画・評価～マテリアルフロー・LCA 計画プログラム～，技報堂出版（2005）

2） K. Kawai and M. Osako：Reduction of Natural Resource Consumption in Cement Production in Japan by Waste Utilization, Journal of Material Cycles and Waste Management, Vol. 13, pp.94-101 (2012)

3） (一社)セメント協会：セメントの LCI データの概要（2017 年 2 月 7 日）

4) 松岡庄五，大河内宝：ごみ焼却灰を再資源化してできる溶融スラグについて，環境浄化技術，第 9 巻，第 7 号，pp.39-43 (2010)

5) 成岡朋弘，門木秀幸，中島和希，縄田大輔，井上陽仁，上田智幸，肴倉宏史：エージングによる一般廃棄物焼却灰の無害化（その 3）実証試験による検証，第 26 回廃棄物資源循環学会研究発表会講演論文集，pp.431-432 (2015)

6) (財)旧クリーン・ジャパン・センター（現(一社)産業環境管理協会）：ごみ焼却灰リサイクルの温室効果ガス排出削減・ライフサイクル管理に関する調査研究－民間施設を活用したごみ焼却灰のリサイクルに関する調査研究（その 2）－報告書（平成 22 年 3 月）(2010)

7) 環境省：一般廃棄物処理実態調査結果（1998～2014 年度）（2000-2016）

8) 東京二十三区清掃一部事務組合：平成 24 年度第 1 回区民との意見交換会清掃一組からの説明「今後の焼却灰溶融処理施設の運営について」，http://www.union.tokyo23-seisou.lg.jp/kikaku/kikaku/iken/ikenkokan/documents/24_1_ikenkoukan_setumei_youyuu.pdf（閲覧日 2018 年 7 月 5 日）

9) 東京二十三区清掃一部事務組合：平成 25 年度第 1 回区民との意見交換会資料「今後の灰溶融処理の休止について」，http://www.union.tokyo23-seisou.lg.jp/kikaku/kikaku/iken/ikenkokan/documents/2501haiyouyuu_setumei.pdf（閲覧日 2018 年 4 月 22 日）

10) 藤谷典秀，金井啓充，黒須美紀，鶴見威，小野雄策，荻野正夫：埼玉ゼロエミッション推進事業について，資源処理技術，第 47 巻，第 4 号，pp.163-168 (2000)

11) 環境省：山口県エコタウンプランの承認について（平成 13 年 5 月 29 日），http://www.env.go.jp/press/2640. html（閲覧日 2018 年 4 月 22 日）

12) 兵庫県：セメントリサイクル事業の開始（兵庫県農政環境部環境管理局環境整備課，平成 22 年 8 月 20 日），https://web.pref.hyogo.lg.jp/governor/documents/000160788.pdf（閲覧日 2018 年 4 月 22 日）

13) 東京たま広域資源循環組合，エコセメント事業，http://www.tama-junkankumiai.com/eco_cement/index.html（閲覧日 2018 年 4 月 22 日）
14) 東京二十三区清掃一部事務組合：主灰のセメント原料化事業について，http://www.union.tokyo23-seisou.lg.jp/kanri/haiki/kumiai/oshirase/sementogenryouka.html（閲覧日 2018 年 4 月 22 日）
15) 横浜市資源循環組合：焼却灰セメント原料化事業の中止及び特定事業の選定の取り消しについて，http://www.city.yokohama.lg.jp/shigen/sub-jigyo/nyusatsu/kouji/pfi/（閲覧日 2018 年 4 月 22 日）
16) (一社)セメント協会：セメントハンドブック 2016 年度版 (2016)
17) (一社)セメント協会:廃棄物・副産物使用における目標値（セメント 1 トン当り 400kg）について，http://www.jcassoc.or.jp/cement/1jpn/ja3b.html (閲覧日 2018 年 4 月 22 日)
18) 経済産業省総合資源エネルギー調査会：長期エネルギー需給見通し小委員会（第 3 回会合）資料 1，エネルギー需要見通しに関する基礎資料（平成 27 年 2 月，資源エネルギー庁） (2015)
19) (一社)セメント協会：低炭素社会実行計画フェーズ II (2014)
20) (一社)廃棄物資源循環学会関西支部:「技術セミナー（講演会・施設見学会）」開催報告，廃棄物資源循環学会誌，第 22 巻，第 1 号，pp.90-91 (2011)
21) 肴倉宏史，大迫政浩，佐藤研一，藤川拓朗，近藤守，小野義広，山本浩，高宮健，谷田克義，谷垣信宏：欧州における焼却残渣からの金属回収と資源化に関する技術調査，第 38 回全国都市清掃研究・事例発表会講演論文集，pp.226-228 (2017)
22) (一社)産業環境管理協会：LCI データベース IDEAver.1.1.0
23) (独)物質・材料研究機構元素戦略クラスター：概説資源端重量（Total Material Requirement：TMR），NIMS-EMC 材料環境情報データ No.18 (2009)
24) (独)石油天然ガス・金属鉱物資源機構，中部リサイクル(株)：平成 19 年度現場ニーズに対する支援事業「都市ごみ等の溶融処理により得られる溶融メタル・溶融ダストの有価金属の挙動解析に関する共同スタディ」報告書(平成 20 年 5 月) (2008)
25) A 施設, http://www.chubu-recycle.co.jp/w_yoyu_seijou.html (閲覧日 2016 年 2 月 1 日)
26) (一社)セメント協会, http://www.jcassoc.or.jp/cement/1jpn/jd3.html#1 (閲覧日 2017 年 1 月 4 日)
27) 平岡正勝，酒井伸一：ごみ焼却飛灰の性状と処理技術の展望，廃棄物学会誌，第 5 巻，第 1 号，pp.3-17 (1994)
28) 佐野奨，市川牧彦，玉重宇幹，松藤敏彦，田中信壽：都市ごみ焼却灰および廃プラスチックの処理・有効活用技術に関する環境負荷の定量化，廃棄物学会論文誌，第 13 巻，第 3 号，pp.131-140 (2002)
29) 経済産業省資源エネルギー庁資源･燃料部鉱物資源課：非鉄金属等需給動態統計平成 28 年度版（平成 29 年 7 月 14 日）(2017)
30) (独)石油天然ガス・金属鉱物資源機構：鉱物資源マテリアルフロー2017 (2018)

31) (株)日刊市況通信社：銅建値（月平均）の推移，http://www.mrj.jp/data/price/nonferrousmetals/copper.pdf（閲覧日 2018 年 7 月 8 日）
32) (株)日刊市況通信社：鉛建値（月平均）の推移，http://www.mrj.jp/data/price/nonferrousmetals/lead.pdf（閲覧日 2018 年 7 月 8 日）
33) (株)日刊市況通信社：亜鉛建値（月平均）の推移，http://www.mrj.jp/data/price/nonferrousmetals/zinc.pdf（閲覧日 2018 年 7 月 8 日）
34) ロンドン貴金属市場協会:http://www.lbma.org.uk/precious-metal-prices（閲覧日 2018 年 4 月 22 日）
35) 日本銀行：時系列統計データ検索サイト外国為替相場状況（日次），http://www.stat-search.boj.or.jp/ssi/cgi-bin/famecgi2?cgi=$nme_a000&lstSelection=FM08（閲覧日 2018 年 7 月 8 日）
36) (独)石油天然ガス・金属鉱物資源機構：鉱物資源マテリアルフロー2015 (2016)
37) 環境省 : 日本の約束草案（平成 27 年 7 月 17 日 : 地球温暖化対策推進本部決定）(2015)
38) 電気事業連合会・電源開発(株)・日本原子力発電(株)・特定規模電気事業者有志 :「電気事業における低炭素社会実行計画」の策定について (2015)
39) 環境省中央環境審議会地球環境部会：2013 年以降の対策・施策に関する検討小委員：技術 WG とりまとめ (2011-2012)

第 3 章　溶融処理で生成される溶融メタルの金属資源性評価

溶融処理で生成される溶融メタルの金属資源性について、炉形式や溶融条件等による違いを評価した。

具体的には、一般廃棄物の溶融処理で生成される溶融メタルに着目し、炉形式や溶融条件等による溶融メタルの金属濃度の相違やその要因を考察するとともに、溶融メタルの金属資源性を評価する。また、小型家電リサイクルの実証状況による影響についても考察した。

なお、本来であれば集約型還元溶融施設で製造される溶融メタルを分析対象とすることが望ましいが、集約型還元溶融施設は産業廃棄物も受け入れているため、溶融メタルの性状は産業廃棄物の影響を受けることとなる。本研究では、一般廃棄物の金属資源性を評価することが目的であることから、集約型還元溶融に類似する施設として一般廃棄物の溶融施設を対象とし、その溶融メタルの金属資源性を評価した。

3.1　背景と目的

鉄スクラップや非鉄金属スクラップは金属資源としての価値が高く、古くから自然発生的に再資源化市場が形成されている。都市ごみ処理においてもスチール缶、アルミ缶などの分別収集のほか、粗大ごみ破砕残渣からの金属回収は一般的に行われてきた。2001 年に施行された家電リサイクル法、2005 年に施行された自動車リサイクル法は、使用済製品からの金属回収が不十分であることがその背景としてあり、鉄、アルミ、銅などの主要金属回収の向上を図るものである。

一方、電子機器には、金、銀等の貴金属やレアメタル、レアアースなどの希少金属が多く含まれている。1988 年、南條 [1]は、工業製品中に含まれるレアメタルの成分比が鉱石品位（粗鉱品位）より高い場合が多いこと、製錬・精製に要するエネルギーが少なくてすむことを特徴として指摘し、地上に蓄積された工業製品を「都市鉱山（Urban mine）」と名付けた。特にパソコン、携帯電話、デジタル機器等の小型電子機器の含有量が高い [2]ことが知られるとともに、資源価格高騰、資源供給の偏在性・寡占性といった資源制約の高まりや環境負荷の低減に対応するため、2013 年に使用済小型電子機器等の再資源化の促進に関する法律（以下、「小型家電リサイクル法」）が施行された。

また、都市ごみ焼却残渣の灰溶融施設、ガス化溶融施設から排出される溶融メタルや溶融飛灰に有用金属が分離濃縮されることが知られている [3]。焼却残渣からの金属資源回収の可能性に着目し、電気炉を用いた製錬技術の応用により焼却残渣の溶融処理を行うとともに金属資源が濃縮された溶融メタルや粗酸化亜鉛を非鉄製錬施設において山元還元することにより金属資源の回収を行う集約型還元溶融事業が実用化されている [4]。

肴倉ら [5]は灰溶融施設（電気溶融 1 施設）を対象として溶融メタルおよび溶融飛灰中の希少金属等（54 元素）の分析を行い、溶融プロセスにおける元素の分配挙動を解析し、貴金属や製鋼の成分調整に使用される金属（Mo、Cu、Co、Ni）は主に溶融メタルに移行しやすい傾向を確認している。辰市ら [6]は都内 8 施設の灰溶融施設（電気式または燃料式）で生成

される溶融メタルおよび溶融飛灰中の希少金属等（32 元素）の分析を行い、貴金属やニッケル、銅等の金属は溶融メタルに分配する傾向を確認している。肴倉ら、辰市らによる貴金属および希少金属（リサイクル優先 5 鉱種・リサイクル検討優先鉱種 [7]）の分析結果は表 3-1 のとおりであり、溶融メタル中の貴金属のうち Au、Pt、Pd の濃度は鉱石品位（表 3-2）の 10 倍以上の濃度であった。しかし表 3-1 の結果はすべて灰溶融施設において得られたものであり、ガス化溶融施設についての測定は行われていない。これらの炉形式等と溶融メタル中金属濃度の関係は不明である。また、集約型還元溶融を対象として有価金属の挙動を解析した調査 [8]では、Cu、Ni、Au、Pd、Pt、Mo、V、W、Sb の 80%以上が溶融メタルに分配されることを確認しているが、この処理対象物は産業廃棄物と一般廃棄物が混合している。

そこで、本研究は、溶融施設で生成される溶融メタルの金属資源性に着目し、炉形式や溶融条件等による溶融メタルの金属濃度の相違やその要因を考察するとともに、溶融メタルの金属資源性を評価することを目的とした。具体的には、さまざまな炉形式の施設を対象として溶融条件等のアンケートを実施し、溶融メタル、スラグを分析して炉形式間の希少金属等の含有量の差、溶融メタルとスラグ間の元素配分、さらには小型家電リサイクルの実施状況による影響について考察した。また、溶融メタルの金属資源性を、TMR（Total Material Requirement）によって評価した。

表 3-1　既存研究による溶融メタル中の希少金属濃度の測定例

金属		溶融メタル中希少金属濃度［mg/kg］			
		肴倉ら（n=1）	辰市ら（n=8）		
			平均	最大	最小
貴金属	Au	14.6	51.4	186.7	< 1.0
	Ag	57.2	N.R.	N.R.	N.R.
	Pt	14.7	15.2	35	1.8
	Pd	19	11.9	30.7	< 1.0
リサイクル優先 5 鉱種	Co	1390	N.R.	N.R.	N.R.
	W	490	372	674	115
	Ta	8.6	N.R.	N.R.	N.R.
	Nd	0.28	27.2	120	< 1.0
	Dy	< 0.1	1.1	3	< 1.0
リサイクル検討優先鉱種	Li	<5	N.R.	N.R.	N.R.
	In	7.7	9.8	23.3	< 1.0
	Ga	76.3	N.R.	N.R.	N.R.
	Sm	N.R.	1	3.9	< 1.0
	Eu	< 0.1	< 1.0	< 1.0	< 1.0
	Tb	N.R.	< 1.0	< 1.0	< 1.0
	Y	< 0.1	1.7	5.3	< 1.0
	La	0.3	N.R.	N.R.	N.R.
	Ce	0.3	9.4	24.5	< 1.0

N.R.：not reported

表 3-2　鉱石の金属品位

金属	鉱石等の種類	粗鉱品位 [8]・精鉱品位 [9] ［mg/kg］
Au	粗鉱	1.1
Ag	粗鉱	13
Pt	粗鉱	1.4
Pd	粗鉱	1.1
Cu	精鉱	320,000

3.2　研究方法

(1) 溶融施設からの分析試料入手と溶融条件等の調査

全国の灰溶融施設およびガス化溶融施設を対象に分析試料（溶融メタル、スラグ）の提供依頼を行うとともに、これら施設に対するアンケート調査により溶融条件等を把握した。

分析試料の提供依頼は、環境省資料[10]を参考に、灰溶融施設 55 施設、シャフト炉式ガス化溶融施設 46 施設に対して行った。なお、シャフト炉式以外のガス化溶融施設に関しては、溶融メタルを生成しないため除外した。このうち分析試料を提供いただいた施設の数は、灰溶融施設が 14 施設（提供率 25%）、ガス化溶融施設が 14 施設（提供率 30%）であり、本研究ではこの計 28 施設を分析・評価の対象とした。

アンケート調査の設問項目は、溶融条件として、炉型式、溶融温度、溶融対象物、スラグおよび溶融メタルの出滓方法と冷却方法とした。これらの項目は溶融メタルへの希少金属等の移行に影響すると予想したものであり、各条件の分類方法は設計要領[11]を参考にした。また、各施設からの搬出物（溶融メタル、スラグ、溶融飛灰）の年間排出重量も回答いただいた。

調査対象施設の炉形式、溶融温度、出滓・冷却方法等を表 3-3 に整理した。施設の記号は灰溶融を A、ガス化溶融を G と区別している。また、小型家電リサイクルの実施の有無との関連を検討するために、溶融施設が搬入物を受け入れている自治体のホームページで小型家電リサイクルの実施状況を確認した。ホームページで確認できなかった自治体に対しては自治体に電話ヒアリングを行った。

(2) 分析評価方法

① 評価対象とする金属

本研究では Au、Pt、Pd、Cu を分析対象とした。なお、Au、Pt、Pd よりも TMR 係数の大きな元素（Ra（ラジウム）、Rh（ロジウム）、Os（オスミウム））も存在するが、先行研究[5]の溶融メタル中の Au、Pt、Pd、Rh の濃度を TMR に換算すると、Rh の TMR は Au、P、Pd の TMR に比べて 1～2 桁小さくなるため、Rh は分析の対象外とした。また、先行研究[5,6]では、Ra、Os は測定されていない。一方、Cu は溶融スラグ中の含有量が多く TMR が大きくなることから分析の対象とした。

片桐ら[8]によるとTMRとは「関与物質総量と呼ばれ、採掘に伴う岩石や土砂の移動など、経済行為の枠組みでは表現できない物質フローの量を表現する指標」であり、直接物質投入量＋間接物質投入量＋隠れた物質フローの総和である。鉄鋼の場合、直接投入は銑鉄、燃料、その他の関連素材、間接投入は、鉄鉱石やコークスなど、隠れた物質フローは粗鉱石を掘り出す際のズリ、剝土、掘削により湧き出た坑内水などである。希少な物質ほど採掘時に多くの廃土が発生するためTMRは大きく、また製錬時に多くのエネルギーを使用する物質ほどTMRは大きい。

溶融メタルの金属含有量にTMR係数（表3-4）を乗ずることで溶融メタルのTMRを算出した。溶融メタルのTMRはその溶融メタルを金属資源として再利用すると回避できる、金属鉱石採掘時の廃土や製錬時のエネルギーの量を示している。すなわち溶融メタルの金属資源としての価値を表す。Au、Pt、PdはTMR係数が大きく、含有量がわずかでもTMRに大きく影響する。

表3-3　調査対象施設の溶融条件等

施設No.	分類	炉型式		溶融温度［℃］	溶融対象物	出滓方法	冷却方法	小型家電リサイクル
A-E1	灰溶融	電気	プラズマ	1500	焼却灰・飛灰	間欠	水砕	実施
A-E2	灰溶融	電気	プラズマ	1350	焼却灰・飛灰	間欠	水砕	実施
A-E3	灰溶融	電気	交流アーク	1300	焼却灰・飛灰	連続	水砕	実施
A-E4	灰溶融	電気	交流アーク	1250	焼却灰・飛灰	連続	水砕	実施
A-E5	灰溶融	電気	交流アーク	1400	焼却灰	連続	水砕	実施
A-E6	灰溶融	電気	交流アーク	1300～1600	焼却灰・飛灰	連続	水砕	実施
A-E7	灰溶融	電気	交流アーク	1300～1400	焼却灰・飛灰	連続	水砕	実施
A-E8	灰溶融	電気	交流電気抵抗	1500	焼却灰・飛灰	間欠	空冷	実施
A-E9	灰溶融	電気	直流電気抵抗	1300	焼却灰・飛灰	間欠	空冷	実施
A-F1	灰溶融	燃料	酸素バーナ火炎	1200～1600	焼却灰	間欠	水砕	一部実施※
A-F2	灰溶融	燃料	その他	1300～1400	焼却灰・飛灰	連続	水砕	一部実施※
A-F3	灰溶融	燃料	その他	1300以上	焼却灰	間欠	水砕	実施
A-F4	灰溶融	燃料	放射式表面溶融	1400	焼却灰	連続	水砕	未実施
A-F5	灰溶融	燃料	コークスベッド	1700	焼却灰	連続	水砕	実施
G-C1	ガス化溶融	シャフト炉	コークスベッド	1700～1800	一般廃棄物･産業廃棄物	間欠	水砕	実施
G-C2	ガス化溶融	シャフト炉	コークスベッド	1600	一般廃棄物	連続	水砕	未実施
G-C3	ガス化溶融	シャフト炉	コークスベッド	1800	一般廃棄物･産業廃棄物	間欠	水砕	実施
G-C4	ガス化溶融	シャフト炉	コークスベッド	1800	一般廃棄物	連続	水砕	実施
G-C5	ガス化溶融	シャフト炉	コークスベッド	1400	一般廃棄物･産業廃棄物	間欠	水砕	実施
G-C6	ガス化溶融	シャフト炉	コークスベッド	1800	一般廃棄物･産業廃棄物	間欠	水砕	実施
G-C7	ガス化溶融	シャフト炉	コークスベッド	1800	一般廃棄物	間欠	水砕	実施
G-C8	ガス化溶融	シャフト炉	コークスベッド	1800	一般廃棄物	間欠	水砕	実施
G-C9	ガス化溶融	シャフト炉	コークスベッド	1800	一般廃棄物･産業廃棄物	間欠	水砕	実施
G-C10	ガス化溶融	シャフト炉	コークスベッド	1500	一般廃棄物	間欠	水砕	実施
G-O1	ガス化溶融	シャフト炉	酸素	1650～1800	一般廃棄物	連続	水砕	実施
G-O2	ガス化溶融	シャフト炉	酸素	1650	一般廃棄物･産業廃棄物	連続	水砕	実施
G-O3	ガス化溶融	シャフト炉	酸素	1400以上	一般廃棄物	連続	水砕	実施
G-O4	ガス化溶融	シャフト炉	酸素	1500～1800	一般廃棄物	連続	水砕	未実施

※小型家電リサイクル「一部実施」は、受け入れている複数自治体のうち一部のみ小型家電リサイクルを実施している場合。

表 3-4　主な金属の TMR 係数

元素	TMR 係数 [8)]［g/g-金属］	本研究での評価対象
Au	1,100,000	○
Pd	810,000	○
Pt	520,000	○
Ag	4,800	－
Cu	360	○
Zn	36	－
Pb	28	－
Fe	8	－

② 金属含有量の分析方法

分析試料のうち溶融メタルは大きな金属塊と砂状のものが混合していたため、1.0mm のふるいにかけ、粒径の大きい試料（以下、「粒径大」）と粒径の小さい試料（以下、「粒径小」）に分け、それぞれから四分法により約 20g ずつ採取した。ばらつきの確認のためにこの作業を 2 回行い、粒径大と粒径小をそれぞれ 2 サンプルずつ作成した。

分析試料の前処理は、「製品中のレアメタル等の暫定分析方法（v.2）」[12)]を参考にした。ただし分析対象の元素である Au、Pt、Pd、Cu が王水に可溶であるため、本研究では王水に不溶な金属の溶解を目的とするアルカリ融解処理は省略した。まず作成した試料をハンマーにより粉砕し、試料を約 0.2g 秤量し、正確な重量を記録した後にマイクロウェーブ（ETHOS TC、マイルストーンゼネラル）によりフッ酸（HF）分解し、Si を気化除去するために硫酸を加えて加熱処理した。そして王水約 10mL を加えマイクロウェーブにより加熱溶解した。HF 分解は HF3mL、硝酸 6mL、過酸化水素水 1mL を加え、王水分解は溶解を確かにするため 2 回以上繰り返した。溶解液は 100mL に定容した。

Au、Pt、Pd は定容した溶液を 100 倍希釈し、ICP 質量分析（Agilent 社製 8800ICP-QQQ）を用い、検量線法によって分析した。検量線は 0.1～10［μg/L］の範囲に設定し、定量下限は 5［μg/g-試料］とした。Cu は定容した溶液を 100 倍希釈し、ICP 発光分析（島津製作所製 ICPE-9000）を用い、検量線法によって分析した。検量線は 0.1～10［mg/L］の範囲に設定し、定量下限は 5［mg/g-試料］とした。粒径小の重量割合が 20%以下の試料では粒径大の金属濃度をその施設の溶融メタル試料の金属濃度とした。粒径小の重量割合が 20%以上の試料（A-E4、A-F4、G-C9、G-02）は粒径大の試料と粒径小の試料の金属濃度を重量比によって補正して金属濃度を算出した。重量割合の大きい Si、Ca、Fe、Al、Cu の重量割合は蛍光 X 線分析（堀場製作所製 MESA-500）によって測定し、FP 法を用い、元素割合として測定した。なお、蛍光 X 線分析は定量値としての信頼性が低いが、希少金属量の差を考察するには十分と考えた。

3.3　結果と考察

3.3.1　搬出物の重量割合

各施設における搬出物の重量割合を図 3-1 および表 3-5 に示す。ただし、G-O2、G-O4 の年間溶融メタル搬出量のデータを入手できなかったため、図ではゼロとしている。

搬出物に占める溶融メタルの割合は電気式灰溶融で平均 4.4%（2.0～7.6%）、燃料式灰溶融で平均 2.3%（1.3～3.8%）、コークスベッド式ガス化溶融で平均 9.3%（6.3～14.1%）であった。酸素式ガス化溶融は 2 施設のみのデータしかないが、平均 1.9%（0.7～3.2%）であった。炉形式ごとの溶融メタル割合について t 検定により平均値の差を検定したところ、コークスベッド式ガス化溶融は、電気式灰溶融および燃料式灰溶融よりも有意水準 5%で大きいと判定された。

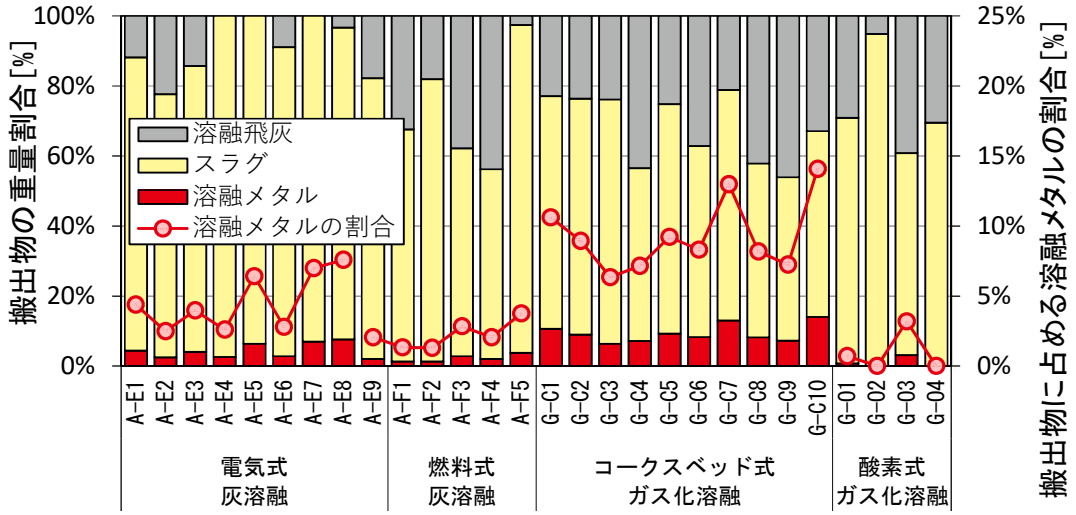


図 3-1　各施設の搬出物の重量割合

表 3-5　搬出物割合・溶融メタル中希少金属等濃度（ICP 質量分析・ICP 発光分析）

施設 No.	搬出物の重量割合[-]			溶融メタル中希少金属等濃度			
	スラグ	溶融メタル	溶融飛灰	Au	Pt	Pd	Cu
				［μg/g-溶融メタル］			[mg/g-溶融メタル]
A-E1	0.838	0.044	0.118	69.2	24.4	32.8	113.1
A-E2	0.751	0.025	0.224	35.7	10.0	19.2	114.9
A-E3	0.818	0.040	0.143	72.6	15.3	17.7	145.8
A-E4	0.974	0.026	-	68.0	20.0	28.3	115.4
A-E5	0.936	0.064	-	45.5	7.7	15.8	161.9
A-E6	0.883	0.028	0.089	41.5	7.1	11.5	118.8
A-E7	0.930	0.070	-	21.9	10.5	6.7	86.4
A-E8	0.891	0.076	0.033	58.0	9.0	15.8	149.1
A-E9	0.802	0.020	0.178	195.1	18.6	40.8	241.9
A-F1	0.663	0.013	0.324	175.6	33.2	42.3	361.3
A-F2	0.807	0.013	0.180	60.6	19.7	22.1	252.8
A-F3	0.594	0.028	0.378	132.3	14.0	53.1	247.8
A-F4	0.541	0.021	0.438	84.6	14.1	23.4	116.4
A-F5	0.936	0.038	0.026	75.5	15.5	12.2	149.0
G-C1	0.665	0.106	0.229	55.4	25.8	5.4	41.4
G-C2	0.675	0.089	0.236	32.5	5.2	8.1	100.5
G-C3	0.698	0.063	0.238	35.9	<5	<5	50.4
G-C4	0.494	0.071	0.434	28.3	15.0	11.2	35.2
G-C5	0.657	0.092	0.251	28.6	<5	5.5	56.6
G-C6	0.545	0.083	0.372	28.1	<5	6.8	48.7
G-C7	0.659	0.130	0.212	30.3	<5	<5	45.4
G-C8	0.497	0.082	0.421	25.2	<5	7.0	47.5
G-C9	0.467	0.072	0.461	19.9	4.1	6.4	26.5
G-C10	0.530	0.141	0.329	17.7	<5	<5	35.6
G-O1	0.702	0.007	0.291	215.2	15.0	36.1	275.0
G-O2	0.949	0.000	0.051	80.9	24.7	25.4	170.7
G-O3	0.577	0.032	0.392	60.9	<5	27.3	88.3
G-O4	0.695	0.000	0.305	22.2	<5	<5	23.2
				ICP 質量分析			ICP 発光分析

3.3.2　溶融メタル中の金属濃度

各施設における溶融メタル中の金属濃度を図 3-2 および表 3-5 に示す。溶融メタル 1g あたりの金属含有量は Au が平均 65μg（18～215μg）、Pt が平均 11μg（<5～33μg）、Pd が平均 17μg（<5～53μg）、Cu が平均 122mg（23～361mg）であった。これらは既存研究の溶融メタル中金属濃度の分析結果（表 3-1）と同程度であった。

施設ごとの差が大きい酸素式ガス化溶融を除き、炉形式ごとの溶融メタル中の金属濃度の平均値の比較を行ったところ、コークスベッド式ガス化溶融が電気式灰溶融および燃料式灰溶融と比べて、いずれの金属も有意に小さいと判定された（有意水準 5%）。なお検定方法は、Pt はデータに等分散性が見られたことから t 検定により、Au、Pd、Cu はデータに等分散性が見られなかったことから Welch 検定[13]によった。

図 3-3 に、金属間の濃度の相関を示す。図中カッコ内は定量下限以下であり、ガス化溶融のうちコークスベッドでは Pt：5 施設、Pd：3 施設、酸素式は Pt：2 施設、Pd：1 施設が該当し、ここではゼロとして扱った。図のとおり、Au とその他 3 金属の濃度には正の相関が見られ、各金属が溶融処理を経て同じような割合で溶融メタルに移行していることを示していると考えられる。

溶融温度、溶融対象物、出滓方法、冷却方法による溶融メタル中の金属濃度への明確な影響は確認できなかった。

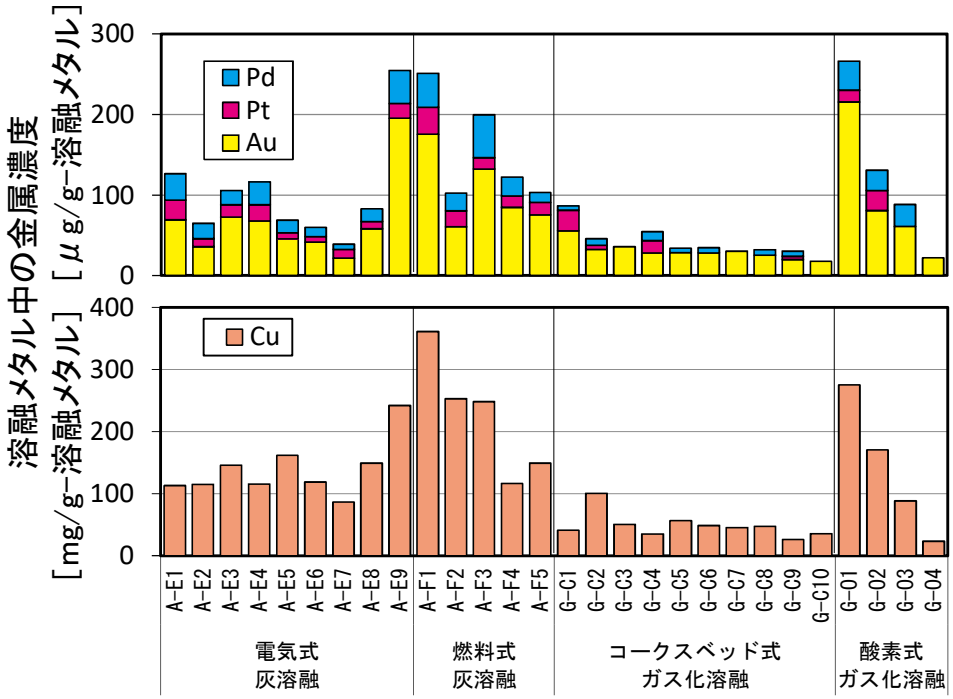


図 3-2　各施設の溶融メタル中の金属濃度

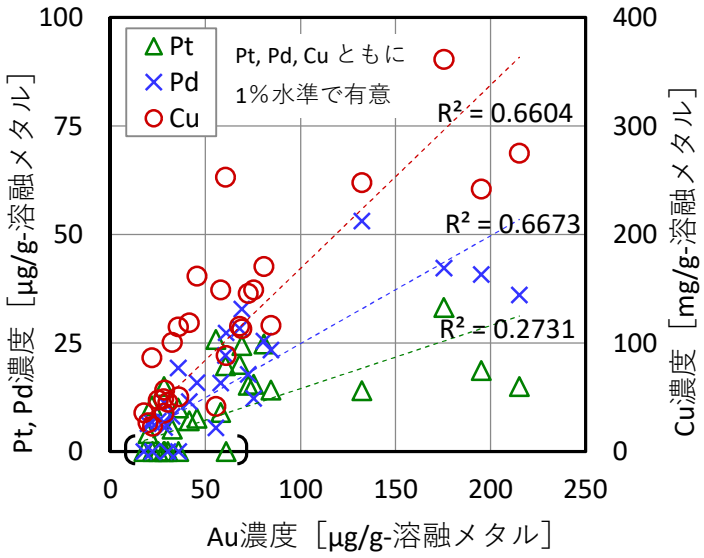


図 3-3　Au と Pt、Pd、Cu 濃度の関係

3.3.3　炉形式による影響

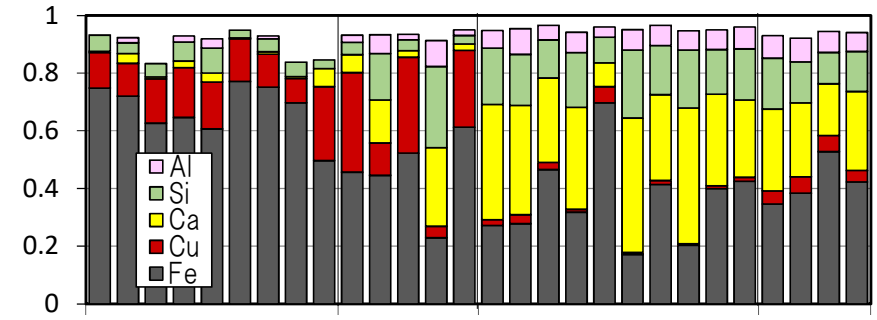
図 3-2 において溶融メタル中の Au、Pt、Pd、Cu 濃度が低いコークスベッド式ガス化溶融は、搬出物に占める溶融メタルの割合が多い（図 3-1）。この理由を、以下に考察する。

図 3-4(a)および表 3-6 に、蛍光 X 線分析により測定した溶融メタル中の主要元素（Si、Ca、Fe、Al、Cu）の割合を示す。以下の考察で挙動が類似した Fe と Cu を濃い色で、Si、Ca、Al を淡色で示した。ただし特定された元素の合計を 1 としている。

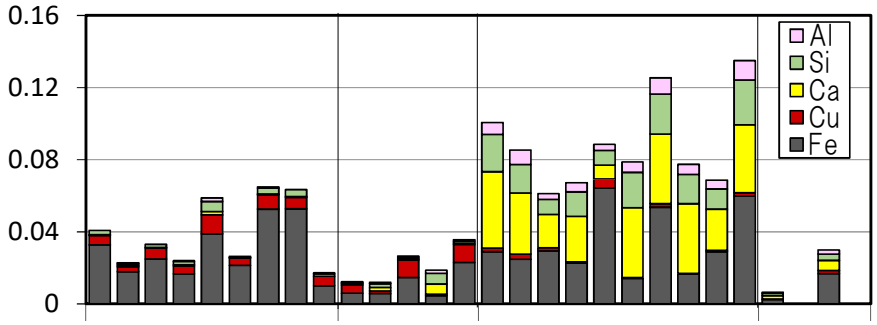
次に、図 3-1 に溶融メタルとしての排出割合を乗じて算出した、搬出物全体に占める溶融メタル中の主要元素量を図 3-4(b)に示す。またスラグ中の主要元素割合の分析も行い、スラグ中で特定された主要元素量を図 3-4(c)に示す。図 3-4(b)(c)は特定できた元素割合を 1 とする（酸素を含まない）ため、酸化物を含むスラグ中の金属は過大評価される。

図 3-4(b)(c)より、コークスベッド式ガス化溶融は他の炉形式と比べて溶融メタル中に Si、Ca、Al が多いことがわかる。これらは、スラグの三成分が SiO_2、CaO、Al_2O_3 であることから、スラグと溶融メタルの分離が不十分で、溶融メタル側へスラグの一部が混入したと考えられる。図 3-4(a)中でばらつきが大きいことから、出滓口の位置と数、スラグと溶融メタルの出滓順序、両者の分離方法などの違いによるものと思われる。特に、ガス化溶融は灰溶融と比べると明らかに塩基度（Ca/Si）が高くなっており、塩基度が高いと粘性が小さくなることから、この点もスラグ・メタル分離性能に影響を与えた可能性がある。溶融飛灰の測定は行っていないが、Si、Ca、Al のスラグと溶融メタルの合計に対する溶融メタルへの移行率は、コークスベッド式ガス化溶融が 0.03～0.13、その他の施設は 0.01 程度である。また、コークスベッド式ガス化溶融の Ca が多い要因は、副資材として投入される石灰石の影響が考えられる。以上のことから、コークスベッド式ガス化溶融の溶融メタル中の Au、Pt、Pd の濃度が他の形式よりも低くなっている。

（a）溶融メタル中の主要元素割合［－］



（b）搬出物を1とする溶融メタル中主要元素量［－］



（c）搬出物を1とするスラグ中主要元素量［－］

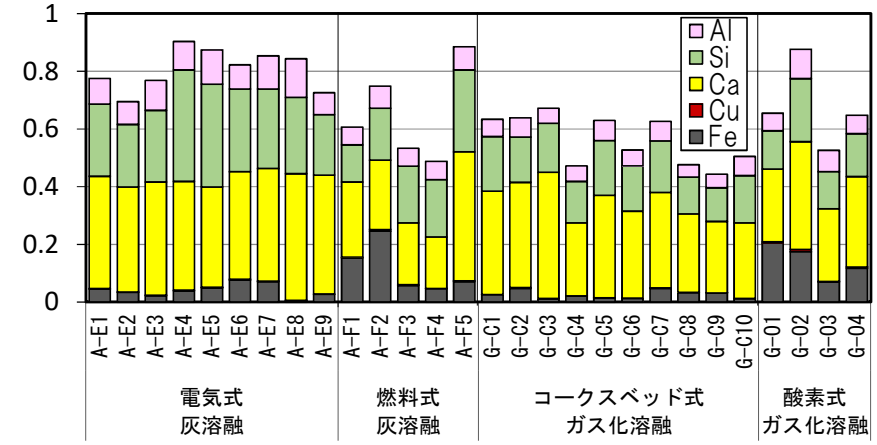


図 3-4　溶融メタルおよび搬出物全体中の主要元素量

表 3-6　溶融メタル中の主要元素割合（蛍光 X 線分析）

施設 No.	溶融メタル中の主要元素割合［kg/kg-溶融メタル］				
	Fe	Cu	Ca	Si	Al
A-E1	0.748	0.123	0.005	0.056	0.000
A-E2	0.721	0.114	0.034	0.037	0.018
A-E3	0.626	0.154	0.008	0.045	0.000
A-E4	0.646	0.173	0.023	0.066	0.020
A-E5	0.607	0.163	0.030	0.087	0.032
A-E6	0.771	0.147	0.003	0.027	0.000
A-E7	0.751	0.115	0.009	0.044	0.010
A-E8	0.697	0.084	0.007	0.050	0.000
A-E9	0.497	0.256	0.063	0.031	0.000
A-F1	0.456	0.346	0.062	0.042	0.025
A-F2	0.446	0.112	0.150	0.161	0.064
A-F3	0.522	0.332	0.024	0.038	0.019
A-F4	0.229	0.041	0.272	0.282	0.090
A-F5	0.612	0.266	0.022	0.030	0.019
G-C1	0.272	0.020	0.399	0.196	0.061
G-C2	0.278	0.031	0.380	0.177	0.089
G-C3	0.466	0.026	0.292	0.131	0.050
G-C4	0.318	0.010	0.353	0.190	0.070
G-C5	0.697	0.056	0.083	0.088	0.035
G-C6	0.172	0.006	0.467	0.235	0.071
G-C7	0.414	0.014	0.298	0.171	0.070
G-C8	0.203	0.005	0.471	0.200	0.067
G-C9	0.400	0.010	0.317	0.154	0.069
G-C10	0.425	0.014	0.268	0.177	0.076
G-O1	0.346	0.046	0.283	0.177	0.077
G-O2	0.384	0.057	0.256	0.142	0.082
G-O3	0.528	0.056	0.179	0.109	0.073
G-O4	0.423	0.040	0.273	0.139	0.065

3.3.4　搬出物中の金属量と小型家電リサイクルの影響

溶融メタル中の Au、Pt、Pd、Cu を、搬出物全体に対する量として図 3-5 に示す。前述した辰市らや肴倉らの報告では Au、Pt、Pd 等の貴金属は主に溶融メタルに移行するとされているため、スラグ中の含有量は測定していない。また、図 3-4(c)より Cu もスラグへの移行率は低いため、図 3-5 は搬出物あたりのほぼ全存在量と考えてよく、搬出物全体中の金属量とみなす。図 3-5 において炉形式ごとに特徴的な傾向は見られない。副資材の投入等により搬出物の全体量は異なるものの、それらの影響が小さいと仮定するならば、図 3-5 は処理される廃棄物の違いによると考えられる。

排出物中の金属量（図 3-5 の量）を、小型家電リサイクルの実施状況別に図 3-6 に箱ひげ図で示す。箱の上下端は 75 パーセンタイル値、25 パーセンタイル値、中心の線はメジアン（中央値）、ひげは最小～最大である。小型家電リサイクルの実施により自治体のごみ処理ラインから小型家電が抜けると、溶融施設に投入される金属資源量は減少するはずである。小型家電からの潜在的回収量（Au：6 t、Cu：3,841 t）[14]を全国の焼却残さ量（約 316 万 t）[10]で割ると、焼却残さの金属濃度は Au は約 2 μg/g、Cu は約 1.2 mg/g となり、小型家電リサイクルの実施の有無により搬出物全体中の Au、Cu の量は最大でこの程度の差が生じると予想した。しかし、そのような傾向は見られなかった。

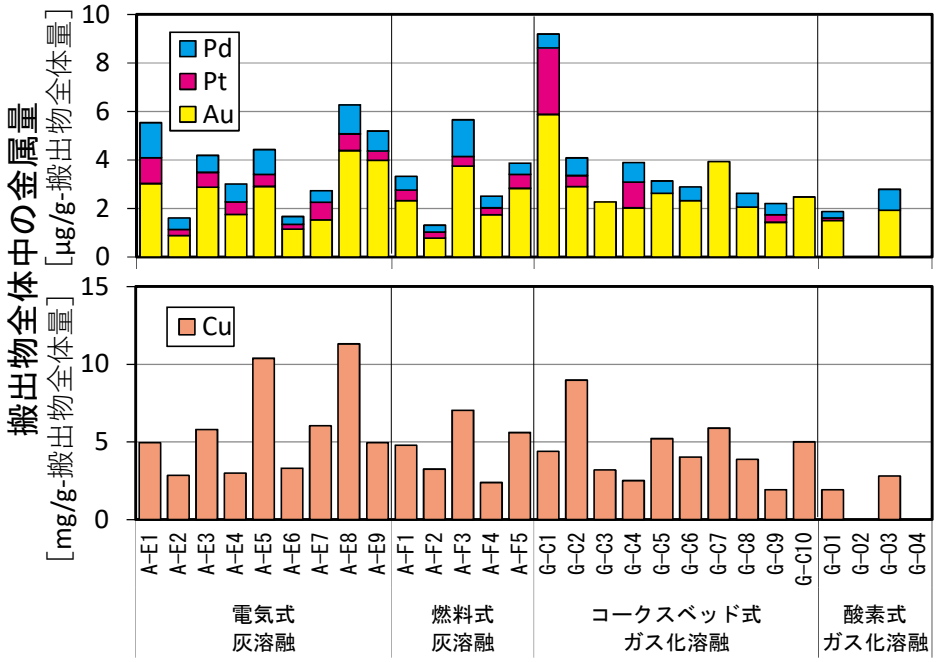


図 3-5　搬出物全体中の金属量

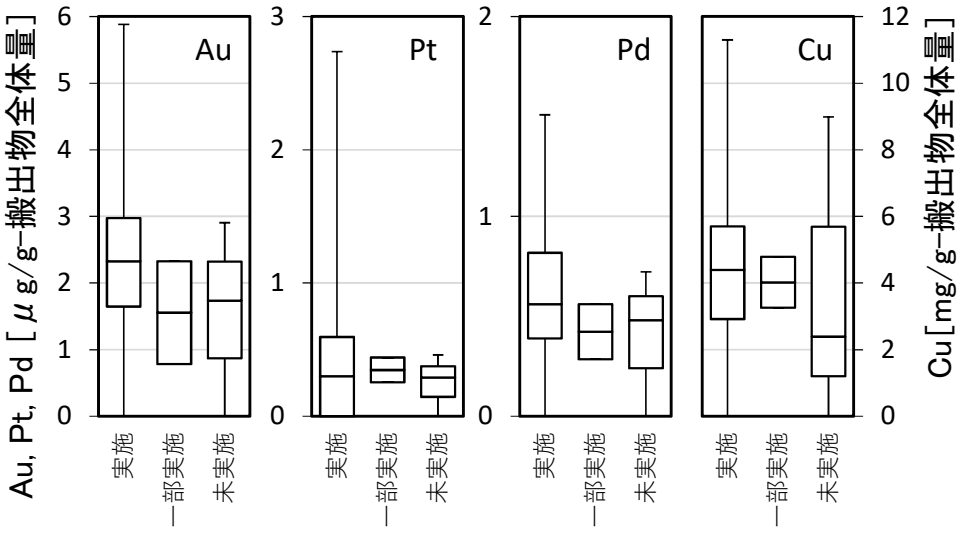


図 3-6　搬出物全体中の金属量（小型家電リサイクルの実施状況別）

3.3.5　搬出物あたりの希少金属量

施設からの搬出物全体中の希少金属量の違いを考察するため、搬出物量あたりの希少金属 Au、Pt、Pd、主要元素 Fe、Cu、Ca、Si、Al の量を、搬出物別に次のように表す。

	溶融メタル	スラグ	溶融飛灰
希少金属	P_M	P_S（≒0）	P_F（≒0）
主要元素	M_M	M_S	M_F

ここでは主要元素には酸素を含めることとし、M_M≒溶融メタル量［kg/kg］となるので、溶融メタル中希少金属濃度は

$C_P = P_M/M_M$［μg/g-溶融メタル］

と表される。M_Mは図 3-4(b)、P_Mは図 3-5、C_Pは図 3-2 に示している。

横軸にM_M、縦軸にC_Pとしてプロットすると、両者の関係は図 3-7 となる。図中カッコを付したプロットは年間溶融メタル搬出量が得られなかった 2 施設のデータであり、$M_M = 0$として示した。C_PがM_Mと逆比例するのは、上式の関係があるためである。コークスベッド式ガス化溶融炉が図の右下部分に、燃料式灰溶融が図の左上部分にプロットされているのは、「3.3.3 炉形式による影響」で述べたように、出滓方法の違い等により溶融メタル側へのスラグ成分の混入度合いの違いによるものである。一方、図 3-5 の平均値を$\overline{P_M}$ とすると、その 1/2～2 倍の範囲にプロットはばらついている。このばらつきは炉形式や出滓方法による違いではなく、施設への搬入量あたりの希少金属量には差があることを示している。すなわち、前節で述べたように小型家電回収との差は見られないものの、各溶融施設に投入される廃棄物の性状が異なるためと考えられる。

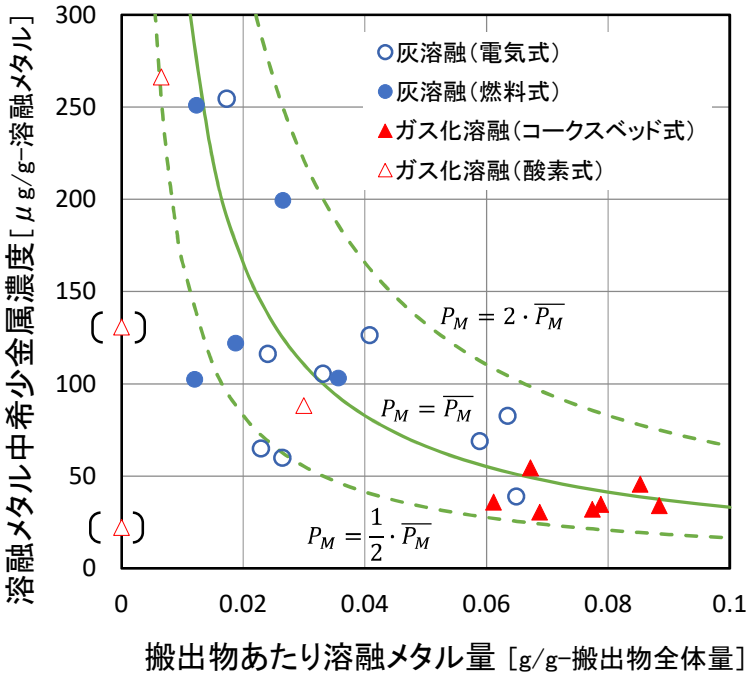


図 3-7　搬出物を 1 とする溶融メタル中主要元素量と溶融メタル中希少金属濃度

3.3.6　TMR による溶融メタルの金属資源性評価

各施設の溶融メタルの TMR は図 3-8 の上図のとおりであり、燃料式灰溶融（平均 230［g-TMR/g-溶融メタル］）と電気式灰溶融（平均 150［g-TMR/g-溶融メタル］）が大きく、コークスベッド式ガス化溶融は平均 60［g-TMR/g-溶融メタル］と小さくなる傾向が見られた。酸素式ガス化溶融の TMR は施設によって異なる。金属の種類で見ると、Au と Cu の寄与が大きくなっている。TMR は溶融メタルの金属資源性の大きさを表しており、燃料式灰溶融や電気式灰溶融の溶融メタルはコークスベッド式ガス化溶融の溶融メタルと比べて、金属資源としての品位は高いと考えられる。

一方、各施設の溶融メタルの TMR を搬出物全量あたりに換算すると図 3-8 の下図のとおりとなる。搬出物 1g あたり TMR は、施設ごとにばらつきは見られるものの炉形式ごとの特徴的な傾向は見られず、電気式灰溶融、燃料式灰溶融、コークスベッド式ガス化溶融のいずれも平均で 5［g-TMR/g-搬出物］程度となった。すなわち、炉形式によらず Au、Pt、Pd、Cu といった金属は概ね一定割合が溶融メタルに分配され、金属資源の総量としてはほぼ同等の金属回収ポテンシャルを有する。その上で、溶融メタルへの Si、Ca、Fe 等の混入度合いによって溶融メタル中の金属濃度は決定されると考えられる。

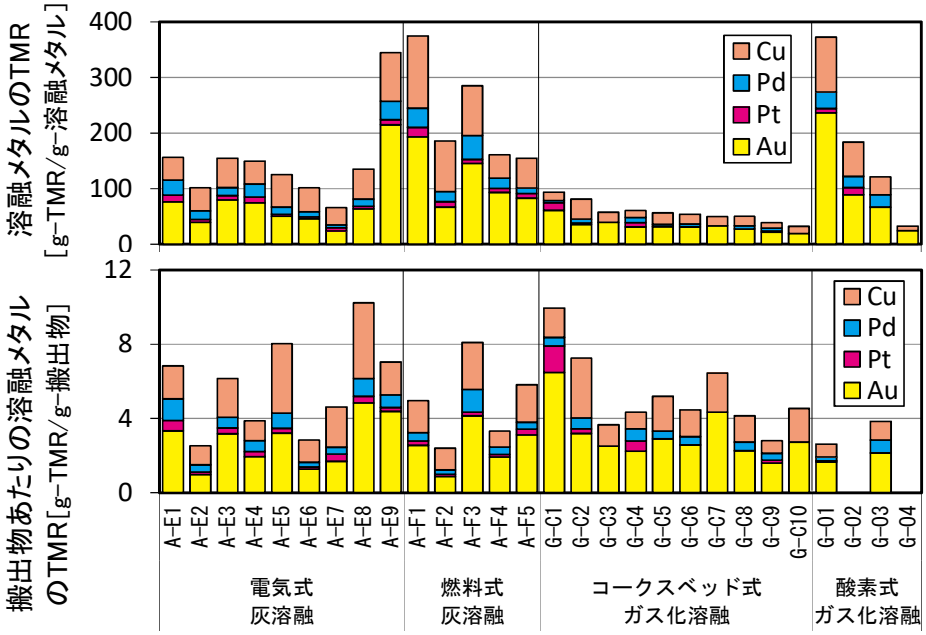


図 3-8　各施設の溶融メタルの TMR

3.4　まとめ

本研究では、全国の灰溶融施設およびガス化溶融施設の溶融メタル等の金属濃度を分析するとともに、炉形式等の溶融条件との関係性の解析を行った。

溶融メタル中の金属濃度を分析した結果、既存研究における濃度と同程度であり、鉱石の金属品位と比較して Au、Pt、Pd は 10 倍以上であった。また、Au と Pt、Pd、Cu の濃度には正の相関が見られた。これらの金属が溶融処理を経て同じような割合で溶融メタルへ移行するためである。ただし、コークスベッド式ガス化溶融は他の炉形式と比べて搬出物に占める溶融メタルの割合が大きく、溶融メタル中の金属濃度は低かった。

搬出物全体中の溶融メタル割合は、Si、Ca、Al 等の主要元素の溶融メタルへの移行割合によって変化する。コークスベッド式ガス化溶融はこの割合が高いため、溶融メタル中 Au、Pt、Pd 濃度が低くなっている。

搬出物全体中の金属量でみると、炉形式ごとに特徴的な傾向は見られない。搬出物全体中の金属量は処理される廃棄物の性状を反映していると考えられたが、小型家電リサイクルの実施状況との関連は見られなかった。

搬出物全体中の Au、Pt、Pd 量にはばらつきが見られ、施設への搬入量あたりの希少金属量には差がある。

溶融メタルを TMR で評価したところ、燃料式灰溶融と電気式灰溶融が、コークスベッド式ガス化溶融と比べて大きく、金属資源としての品位は高い。

金属資源の総量としては、溶融メタルは炉形式によらずほぼ同等の金属回収ポテンシャルを有する。

今後の研究課題としては、スラグや溶融飛灰も含めた金属のマスバランスを明らかにするとともに、副資材投入量等も踏まえて、投入される廃棄物中の金属含有量を試算することが考えられる。また、廃棄物中に含まれる金属資源の起源を明らかにし、廃棄物の溶融処理を経た金属資源化を行う場合の効率的なリサイクルシステムの検討が必要となる。

【謝辞】
本研究の実施にあたり、データおよび試料を提供いただいた各関係機関の方々に深謝いたします。

【参考文献】
1) 南條道夫 : 都市鉱山開発－包括的資源観によるリサイクルシステムの位置付け，東北大學選鑛製錬研究所彙報，Vol.43，pp.239-251，1988.
2) 相澤寛史，平井康宏，酒井伸一 : 日本における小型電気電子機器のリサイクル，廃棄物資源循環学会論文誌，20 巻，6 号，pp.371-382，2009.
3) 藤吉秀昭 : 都市ごみ焼却灰等の溶融処理の経緯と課題，廃棄物学会誌，Vol.16，No.2，pp.98-110，2005.
4) 松岡庄五，横田育久，青山英明 : 中部リサイクル(株)のごみ焼却灰及び飛灰の再資源化技術，エバラ時報，No.217，pp.50-54，2007.
5) 肴倉宏史，小口正弘，寺園淳 : 焼却・溶融実処理プロセスにおける希少金属等 54 元素の分配と変動，第 21 回廃棄物資源循環学会講演論文集，pp.407-408，2010.
6) 辰市祐久，茂木敏，井上宏 : 都市ごみ等に含まれる金属資源の挙動に関する研究（2）－蛍光 X 線分析及び ICP-MS による希少金属等の分析－，東京都環境科学研究所年報 2012，pp.70-76，2012.
7) 産業構造審議会 産業技術環境分科会 廃棄物・リサイクル小委員会（第 26 回）資料 4 レアメタル・レアアース（リサイクル優先 5 鉱種）の現状（平成 26 年 5 月 20 日），2014.
8) 片桐望, 中島謙一, 原田幸明 : 概説 資源端重量 (Total Material Requirement ; TMR)，NIMS-EMC 材料環境情報データ No.18, (独)物質・材料研究機構元素戦略クラスター，2009.
9) (一社)産業環境管理協会 : LCI データベース IDEA ver.1.1.0
10) 環境省 : 一般廃棄物処理実態調査結果（平成 27 年度）
11) (公社)全国都市清掃会議 : ごみ処理施設設備の計画・設計要領 2017 改訂版，pp.527-615，2017.
12) (一社)廃棄物資源循環学会物質フロー研究部会 : 製品中のレアメタル等の暫定分析方法（v.2），2010.
13) 神田善伸 : EZR でやさしく学ぶ統計学～EBM の実践から臨床研究まで～，中外医学社，2012.
14) 環境省・経済産業省 : 使用済小型家電からのレアメタルの回収及び適正処理に関する研究会とりまとめ（平成 23 年 4 月），2011.

第 4 章　破砕残渣の有する金属資源ポテンシャルの評価

溶融メタルの金属資源性は、溶融施設に投入される廃棄物の性状に大きく依存するが、溶融施設に投入される廃棄物は、可燃ごみだけではなく、不燃・粗大ごみの破砕残渣も投入される。

そのため、一般廃棄物焼却施設から生じる焼却残渣及び不燃粗大ごみ破砕施設から発生する破砕残渣を対象として金属資源含有量の実測調査を行い、焼却残渣及び破砕残渣の有する金属資源ポテンシャルの評価を行う。

4.1　目的

「3.3.4 搬出物中の金属量と小型家電リサイクルの影響」の結果、搬出物の金属量は小型家電リサイクル実施状況との関連が見られなかった。また、不燃ごみの組成分析の例 [1]では、小型家電と小型家電を含む複合製品が約 3 割を占めているというデータがある（図 4-1）。

そのため、焼却処理される廃棄物中の金属供給源として不燃ごみ・粗大ごみの破砕施設の破砕残渣を想定し、破砕残渣による焼却残渣中の希少金属への寄与を推定することにより、金属資源回収システム検討の基礎的な情報を得ることを目的とする。

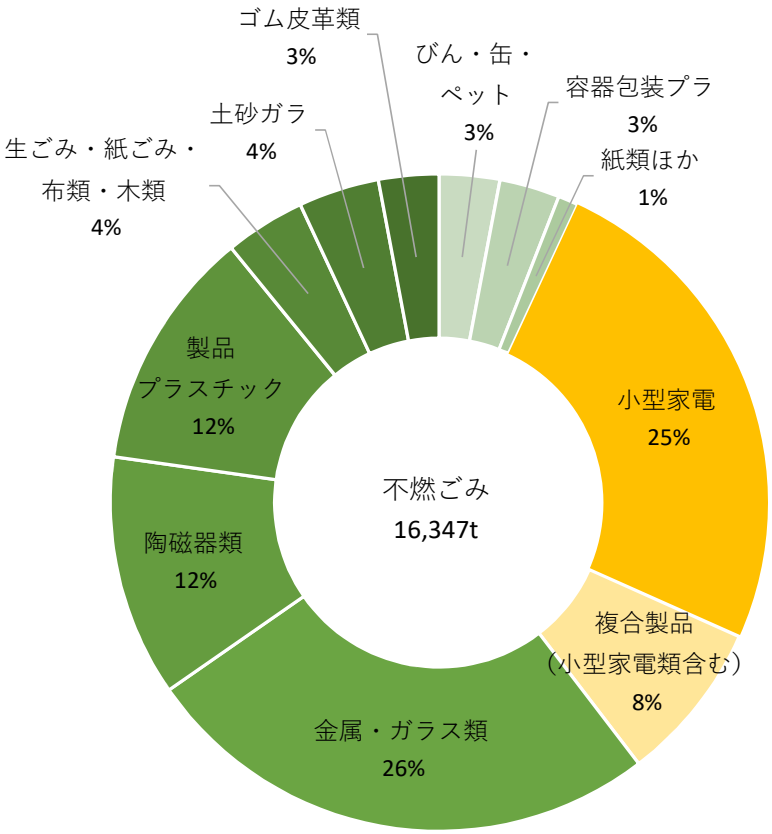


図 4-1 不燃ごみの組成分析の例（札幌市）（文献 [1]をもとに再構成）

4.2　研究方法

不燃ごみ・粗大ごみの破砕施設の破砕残渣とこれらを処理する焼却施設及びガス化溶融施設の搬出物について、処理施設から試料を入手し、希少金属濃度を分析し、金属の収支をもとにして金属の由来を推定する。

(1) 調査対象施設

① 施設の選定

焼却施設および溶融施設を対象として試料提供の依頼を行った。対象とした施設は平成28 年度一般廃棄物実態調査結果 [2)]を参考に北海道内の施設から選定した。結果として 2 施設から協力を得た。

施設の選定条件とその理由は以下のとおりである。

- 破砕処理施設が併設されている焼却施設であること（破砕残渣中に含まれる不燃ごみ, 粗大ごみと焼却残渣中に含まれる希少金属の関係を明らかにするため)。
- ある程度の施設規模があること（施設規模が小さい場合、結果に偏りが生じる可能性が考えられたため)。
- 訪問しやすい位置にあること（サンプリングを行いやすくするため)。

しかしながら、2 施設では傾向が見えにくいと考えられることから、「第 3 章 溶融処理で生成される溶融メタルの金属資源性評価」において仲嶺 [3)]が調査対象とした施設にも協力を依頼し、結果として 2 施設から協力を得た（第 3 章の対象施設 G-C4 と G-C7 から協力を得られ、本章では G-C1、G-C2 と表記する)。上記の条件に下記の条件を加えて施設を選定した。

- 「第 3 章　溶融処理で生成される溶融メタルの金属資源性評価」の対象施設であること（アウトプットである溶融メタルの分析が行われており、分析結果の比較ができるため)。
- ガス化溶融施設であること（破砕残渣が溶融炉で直接処理され、関係が明確になると考えられるため)。
- コークスベッド式であること（炉の特性が明らかであり、関係が明確になると考えられるため)。

② 調査対象施設の概要

調査対象施設の概要を表 4-1 に示す。施設記号は焼却の形式を表しており、S はストーカ炉、G-K はキルン式ガス化溶融炉、G-C はコークスベッド式ガス化溶融炉をそれぞれ採用している施設である。

それぞれの破砕施設、焼却施設における搬入量と搬出量を表 4-2 に示す。搬入量と搬出量は処理対象人口をもとに 1 人 1 日あたり量に換算している。緑に色付けされているものが分析対象となる試料であり、青に色付けされているものは破砕施設から搬出されて焼却施設に搬入されるものであり試料は同一となる。表の下部に示すようにいくつかの仮定をし

ているが、基本的に影響は少ないと考えている。

表 4-1 調査対象施設の概要

No.	形式	設備	備考
S	焼却	ストーカ炉	
G-K	ガス化溶融	キルン式	
G-C1	ガス化溶融	コークスベッド式	3 章では G-C4
G-C2	ガス化溶融	コークスベッド式	3 章では G-C7

表 4-2 各施設の搬入・搬出物および搬入・搬出量

		搬入量および搬出量（g/人日）							
施設		S		G-K		G-C1		G-C2	
破砕施設	搬入	不燃ごみ	11.4	家庭系不燃	29.5	資源ごみ･不燃ごみ	55.0	粗大ごみ	33.1
		大型ごみ	26.9	家庭系大型	5.2	自己搬入(*4)	7.6		
				不法投棄等	0.3				
				家庭系自己搬入	17.0				
				事業系一廃	21.3				
	搬出	可燃残渣:高速回転式(*1)	17.0	可燃残渣	51.6	資源化物	27.8	粗大ごみ	33.1
		可燃残渣:切断式(*1)	0.9	鉄類	6.4	鉄	14.1		
		不燃残渣	7.1	アルミ	0.4	アルミ	1.6		
		破砕不適物	0.3	小型家電	1.0	破砕残渣	15.4		
		資源物	13.1	不燃残渣(*3)	12.6				
				破砕不能物(*3)	0.1				
焼却施設	搬入	可燃ごみ	596.2	可燃ごみ等	652.0	可燃ごみ	894.7	普通ごみ	362.4
		破砕可燃物	17.9	可燃残渣	51.6	破砕残渣	15.4	事業系ごみ	176.0
								中間処理残渣	60.1
								粗大ごみ	33.1
	搬出	焼却灰(*2)	53.2	スラグ	38.1	メタル	11.6	メタル	20.9
		飛灰(*2)	17.7	鉄･アルミミックス	7.5	スラグ	73.0	スラグ	105.9
						溶融飛灰(H28)	69.9	溶融飛灰	34.0

*1 破砕対象物中の高速回転：切断式=95:5 とした
*2 焼却残渣中の主灰：飛灰=3:1 とした
*3 埋立対象物中の不燃残渣：破砕不能物(破砕機で破砕できなかったもの)=99:1
*4 処理割合から算出

分析対象

重複しているもの

それぞれの施設の処理フローとサンプリングポイントを図 4.2～図 4.5 に示す。赤字は今回の分析対象となる試料である。施設 S および G-K では破砕後にふるい選別が行われ、不燃残渣と可燃残渣に選別される。不燃残渣は埋立処理が行われ、可燃残渣は焼却施設又はガ

ス化溶融施設へ搬出される。G-C1 および G-C2 では破砕後にふるい選別は行わずに破砕残渣をガス化溶融施設へ搬出する。

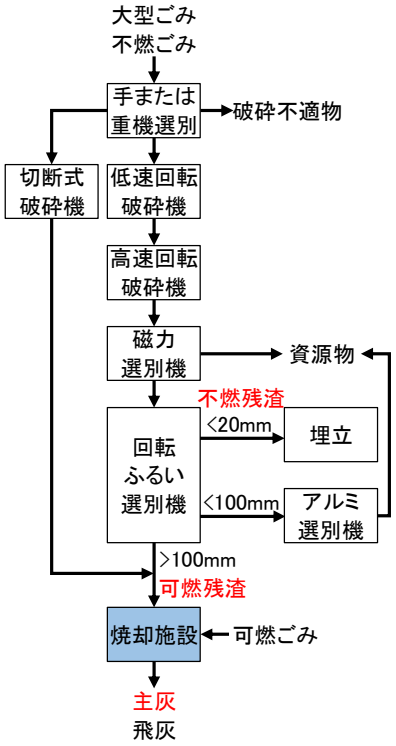


図 4-2 施設 S の処理フロー

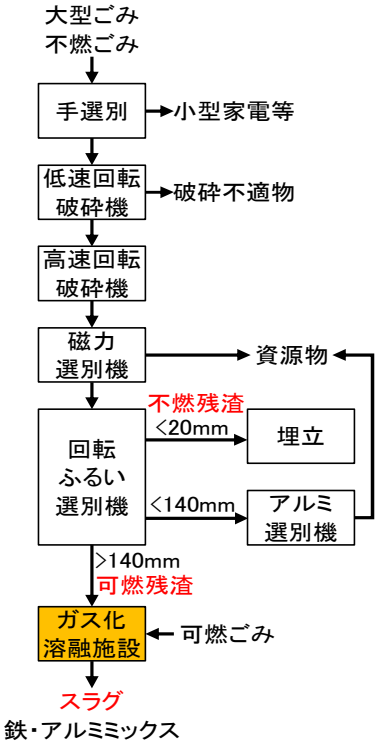


図 4-3 施設 G-K の処理フロー

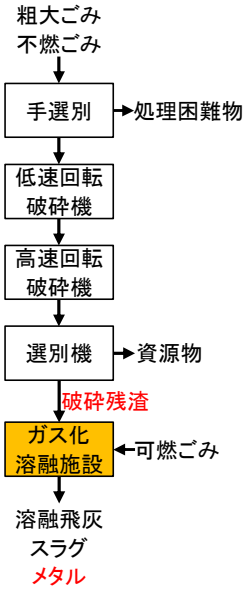


図 4-4 施設 G-C1 の処理フロー

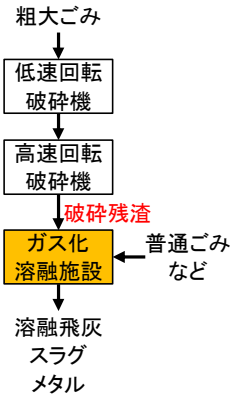


図 4-5 施設 G-C2 の処理フロー

(2) 分析項目と分析方法

破砕残渣（基板、小粒径破砕残渣）および搬出物（主灰、溶融メタル、スラグ）の希少金属濃度（Au、Pt、Pd）の分析を行うとともに、破砕残渣の組成分析を行った。

① 前処理

分析の手順を図 4-6 に示す。前処理方法は廃棄物資源循環学会物質フロー研究部会の「製品中のレアメタル等の暫定分析方法(v.2) [4]」を参考にした。最初に各試料について乾燥を行った。分析対象として焼却施設および溶融施設の搬出物である主灰、溶融メタル、スラグと、破砕残渣中で希少金属を含むと考えられる基板および小粒径破砕残渣を分析対象とした。基板と小粒径破砕残渣についての説明は後述する。

主灰と溶融メタルは四分法により少量採取し、ハンマーにより粉砕した。スラグは四分法により少量採取した。基板は採取した量が少量であるため、全量をハンマーで粉砕した。小粒径破砕残渣は木くずなどの可燃分の割合が大きいと考えられるため、熱しゃく減量を行った。熱しゃく減量は光洋サーモスシステム株式会社製の 1150℃ボックス炉 KBF894N1 で 600℃、3 時間加熱した。加熱の際は開始 20 分程度るつぼに蓋をし、灰が飛散しないようにした。各試料を約 0.2g はかり取り、正確な重量を濃度計算のために記録した。

はかり取った試料にフッ化水素酸 3ml、硝酸 6ml、過酸化水素 1ml を加えて、マイルストーンゼネラル株式会社製のマイクロウェーブ試料前処理装置 ETHOS TC により分解した。その後、Si を揮発除去するために硫酸 0.5ml を加えてホットプレート上で過熱し、白煙処理を行い、王水 10ml を加えてホットプレート上で加熱溶解を行った。溶解液は 100ml に定容した。各試料につき 3 つの溶液を作成した。

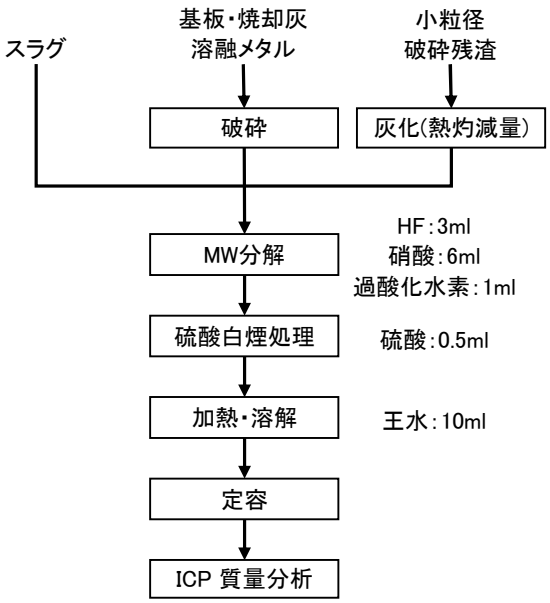


図 4-6 分析の手順

② 組成分析

破砕残渣は乾燥後に組成分析を行った。施設 S および G-K の不燃残渣、施設 G-C1 および G-C2 の破砕残渣は四分法を行い、5.66mm ふるいと 2mm ふるいにかけた。ふるい上に残ったものはそれぞれ組成分析を行い、ふるい下（2.00mm 以下）のものは小粒径破砕残渣とした。施設 S および G-K の可燃残渣は全量の組成分析を行った。

組成分析では、基板、金属、プラスチック・ガラス・石、木、その他の 5 つに分類した。金属には針金や鉄くず、釘などが含まれている。その他は布類やほこりなどが中心となる。金属やプラスチック等には希少金属が含まれているとは考えにくいため、基板と小粒径破砕残渣を下記の分析対象に選んだ。

③ 分析方法

Au、Pt、Pd を分析対象の元素とし、ICP 質量分析により分析を行った。ICP 質量分析では試料溶液をプラズマによりイオン化し、質量分析計で質量や電荷数に応じて分離、計測が行われる。装置は Agilent 社製の 8800ICP-QQQ を使用して北海道大学創成研究機構グローバルファシリティセンターオープンファシリティにて分析した。検量線を 0.1～10 μg/L の範囲で設定し、検量線法により分析した。溶液の希釈倍率と定量下限、試料の最低濃度を表 4-3 に示す。試料の最低濃度とは、ある試料の 3 つの溶液のうち 1 つの溶液のみから定量下限値が検出され、ほかの 2 つからは検出されなかった場合の濃度である。

表 4-3 希釈倍率と定量下限

試料	希釈倍率 （－）	溶液の定量下限 （μg/g）
焼却灰	2	0.1
溶融メタル	10	0.5
スラグ	2	0.1
小粒径破砕残渣	2	0.1
基板	2(*1)	0.1

*1　G-K の溶液の 1 つのみ 200 倍希釈

4.3　結果と考察

4.3.1　破砕残渣の組成

破砕残渣の組成分析の結果を表 4-4 と図 4-7 に示す。

S と G-K は不燃残渣と可燃残渣に分けられる。不燃残渣ではプラ・石・ガラスと小粒径の割合が多くなっている。一方で、可燃残渣ではその他（布類やほこりなど）が多くなっており、金属や木も一定の割合で含まれている。

G-C1 と G-C2 は破砕残渣 1 種類で搬出されるが、金属と小粒径の割合が多くなっており、G-C2 では木の割合も多くなっている。

いずれの施設の破砕残渣も基板の割合は非常に少ない。

表 4-4 破砕残渣の組成分析結果

		S		G-K		G-C1	G-C2	分析
		不燃残渣	可燃残渣	不燃残渣	可燃残渣	破砕残渣	破砕残渣	対象
組成 (%)	基板	0.07	0.23	0.01	0.44	0.67	0.06	○
	金属	2.62	11.78	1.21	7.99	34.15	26.39	
	プラ･石･ガラス	62.66	37.33	45.90	19.21	24.34	12.65	
	木	0.74	1.63	4.60	20.03	1.30	25.52	
	小粒径	32.44	1.27	47.22	3.67	34.75	31.24	○
	その他	1.48	47.77	1.06	48.65	4.79	4.14	

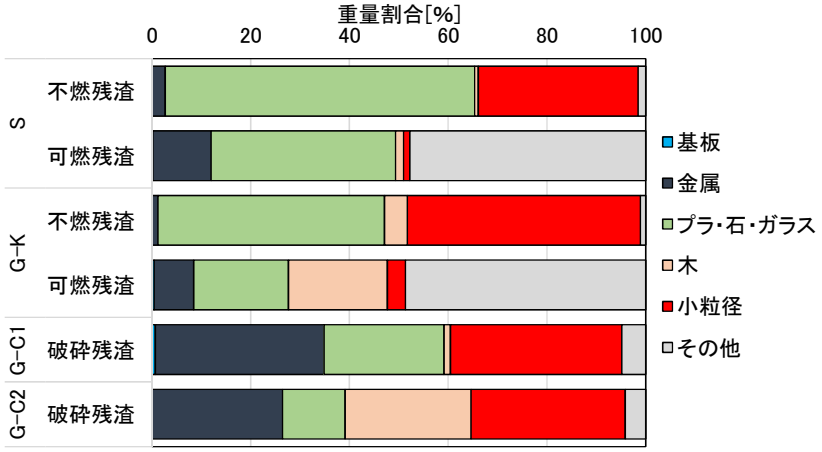


図 4-7 破砕残渣の組成分析結果

破砕残渣の組成ごとの重量を表 4-5 と図 4-8 に示す。これは 1 人 1 日あたりの破砕残渣量に上記の重量割合を乗じたものである。

G-K、G-C2、S、G-C1 の順で破砕残渣の量が多くなっており、破砕残渣の量は施設によって 2 倍以上の違いがある。S および G-K の可燃残渣ではその他（布類やほこりなど）が多く、プラスチック等や小粒径のものは可燃残渣にも不燃残渣にも含まれる。G-C1 および G-C2 では金属と小粒径が多く、プラスチック類やその他の量は少なくなっている。

表 4-5 破砕残渣の組成ごとの重量（単位：g/人日）

	S		G-K		G-C1	G-C2	分析
	不燃残渣	可燃残渣	不燃残渣	可燃残渣	破砕残渣	破砕残渣	対象
基板	0.01	0.04	0.00	0.23	0.10	0.02	○
金属	0.18	2.00	0.15	4.12	5.25	8.75	
プラ･石･ガラス	4.43	6.33	5.77	9.91	3.74	4.19	
木	0.05	0.28	0.58	10.33	0.20	8.46	
小粒径	2.29	0.21	5.94	1.89	5.34	10.36	○
その他	0.10	8.11	0.13	25.08	0.74	1.37	
ごみ重量(g/人/日)	7.1	17.0	12.6	51.6	15.4	33.1	

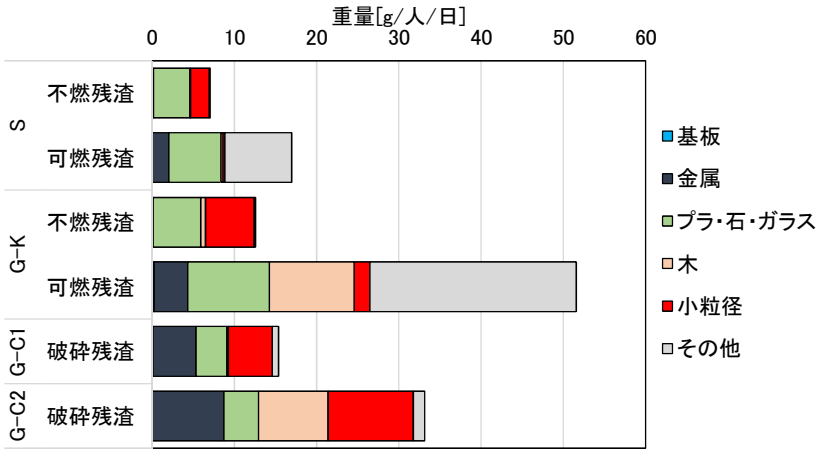


図 4-8 破砕残渣の組成ごとの重量

4.3.2 破砕残渣および搬出物の希少金属濃度

各試料中の Au、Pt、Pd の濃度をそれぞれ表 4-6 と図 4-9 に示す。表中の「－」は存在しない試料、もしくは測定を行っていない試料である。表中の赤字は定量下限値未満の試料であり、濃度は 0 としている。図中では試料ごとに桁が異なるため縦軸は対数軸とした。図の横軸は焼却施設およびガス化溶融施設の搬出物（焼却灰、溶融メタル、スラグ）と破砕残渣のうち分析対象としたもの（基板、小粒径）に区分している。プロットは施設ごとのもので仲嶺の H29 研究 [3]における測定値は白抜きにしている。図中の青線は定量下限値であり、それ未満の試料については軸上にプロットした。図中の赤線は H29 研究における希少金属濃度の範囲である。

まず、Au について考察する。今回の G-C1 の溶融メタル中の Au 濃度は H29 研究や先行研究の測定値 [5,6]を考えると極めて低くなっといる。この要因としては溶融メタル試料のばらつきやサンプリング誤差によるものが考えられるが、定かではない。今回の G-C1 の溶融メタルを除けば、搬出物において溶融メタル、主灰、スラグの順で Au 濃度が高い。これは溶融処理によって溶融メタルに希少金属が濃縮されるためだと考えられる。破砕残渣の基板には、Au が含まれていないものもあるが、Au が含まれている試料では施設間の差が約 10 倍程度あり、製品の差であると考えられる。小粒径破砕残渣にはあまり含まれていないことが分かる。

次に Pt について考察する。搬出物では Pt は G-C1 の溶融メタル（今回と仲嶺の研究）のみ検出されている。G-C1 の溶融メタル中の今回の PT 濃度は H29 研究の約 10 分の 1 程度であり、Au ほどではないが今回の溶融メタル中濃度は低い。Au と同じく破砕残渣中には Pt はあまり含まれていない。

最後に Pd について考察する。搬出物では、G-C1 の溶融メタル中の Pd 濃度を見ると、今回の濃度は仲嶺の H29 研究における濃度の約 5 分の 1 であり、Au や Pt よりも近い値と

なっている。搬出物において溶融メタル、主灰、スラグで Pd 濃度が高い順となるのは Au と同様に溶融処理が濃縮機構になっているためだと考えられる。破砕残渣では、Au、Pt と比較すると基板及び小粒径破砕残渣中の濃度が高くなっている。これは Au、Pt とは使用されている製品が異なるためと考えられる。

表 4-6 破砕残渣および搬出物の希少金属濃度

(a) 各試料中の Au 濃度［μg/g］

		S	G-K	G-C1	G-C1(H29)	G-C2	G-C2(H29)
搬出	焼却灰	0.1	—	—	—	—	—
	メタル	—	—	0.1	28.3	—	30.3
	スラグ	—	0.0	0.0	—	—	—
破砕残渣	基板	1.8	1.2	0.1	—	0.0	—
	小粒径	0.0	0.0	0.0	—	0.1	—

※1 値「0.0」は図中では軸上にプロットされている
※2 H29 研究 [3]における濃度は 17.7～215.2μg/g の範囲

(b) 各試料中の Pt 濃度［μg/g］

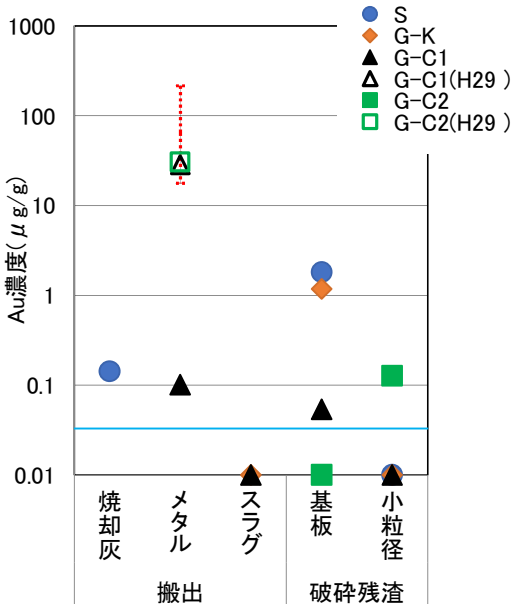
		S	G-K	G-C1	G-C1(H29)	G-C2	G-C2(H29)
搬出	焼却灰	0.0	—	—	—	—	—
	メタル	—	—	1.7	15.0	—	0.0
	スラグ	—	0.0	0.0	—	—	—
破砕残渣	基板	0.0	0.0	0.0	—	0.0	—
	小粒径	0.0	0.0	0.1	—	0.0	—

※1 値「0.0」は図中では軸上にプロットされている
※2 H29 研究 [3]における濃度は 0～33.2μg/g の範囲

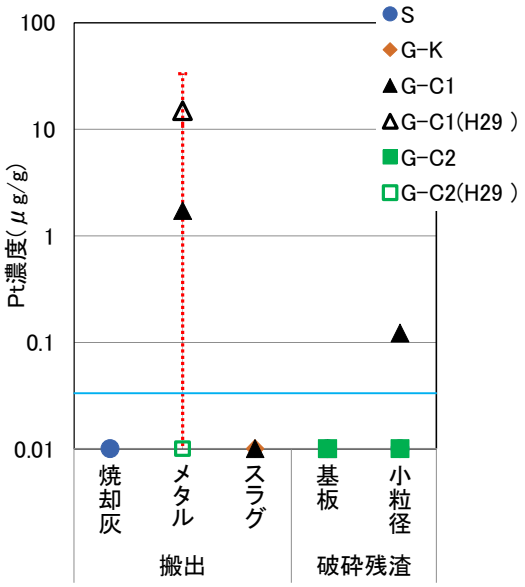
(c) 各試料中の Pd 濃度［μg/g］

		S	G-K	G-C1	G-C1(H29)	G-C2	G-C2(H29)
搬出	焼却灰	1.0	—	—	—	—	—
	メタル	—	—	2.7	11.2	—	0.0
	スラグ	—	0.2	0.3	—	—	—
破砕残渣	基板	0.8	18.8	2.4	—	0.0	—
	小粒径	0.4	0.2	2.4	—	0.2	—

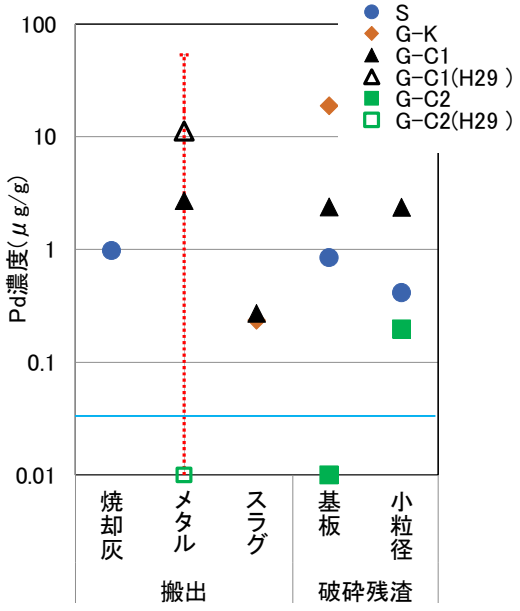
※1 値「0.0」は図中では軸上にプロットされている
※2 H29 研究 [3]における濃度は 0～53.1μg/g の範囲



(a) 各試料中の Au 濃度



(b) 各試料中の Pt 濃度



(c) 各試料中の Pd 濃度

図 4-9 破砕残渣および搬出物の希少金属濃度

溶融メタルの希少金属濃度は上述のとおり H29 研究や先行研究の値と比べて 1～2 桁低いものであったが、H29 研究のデータも含めると溶融メタルの希少金属濃度は Au：0.1～30.3 μg/g、Pt：1.7～15.0 μg/g、Pd：0～11.2 μg/g となる、

一方、基板の希少金属濃度（Au：0～1.8 μg/g、Pd：0～18.8 μg/g（＝mg/kg））は、既存研究による PC 基板[7]の濃度（Au：2～120 mg/kg、Pd：6～160 mg/kg）や携帯電話の基板[8,9]の濃度（Au：50～500 mg/kg、Pd：30～70 mg/kg)と比べて低い。また、小型家電の金属

含有量（Au：3.7 μg/g、Pd：0.26 μg/g：H29 小型家電リサイクルにおける認定事業者の小型家電処理量および金属回収量 [10]から算定）と比較して、Au の濃度はやや低め、Pd の濃度はかなり高めとなっている。

小粒径破砕残渣の Au、Pt 濃度はごくわずかだが、Pd 濃度は一部において溶融メタルに近い値となっている。

これらをまとめると表 4-7 のとおりとなり、希少金属濃度はおおよその傾向として、基板≧溶融メタル＞焼却灰＞小粒径破砕残渣＞スラグとなっている。

表 4-7 溶融メタル、基板、小粒径破砕残渣の希少金属濃度

試料	区分	希少金属濃度［μg/g］		
		Au	Pt	Pd
焼却灰	今回測定値	0.1	N.D.	1.0
溶融メタル	今回測定値	0.1	1.7	2.7
	既存データ（仲嶺 H29）	28.3～30.3	N.D.～15.0	N.D.～11.2
スラグ	今回測定値	N.D.	N.D.	0.2～0.3
基板	今回測定値	0～1.8	N.D.	N.D.～18.8
	既存データ（PC 基板）	2～120		6～160
	既存データ（携帯電話基板）	50～500		30～70
（参考）	既存データ（小型家電）	3.7	－	2.6
小粒径破砕残渣	今回測定値	N.D.～0.1	N.D.～0.1	0.2～2.4

4.3.3 1 人 1 日あたりの希少金属量

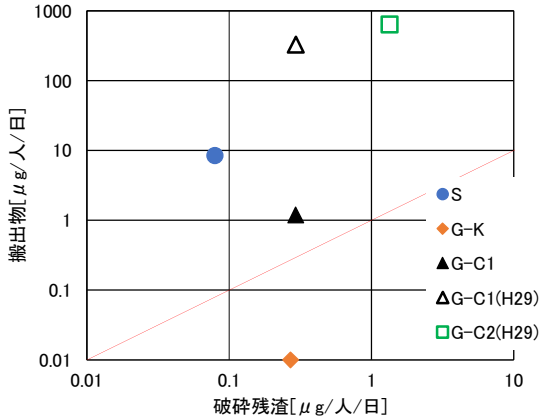
焼却施設およびガス化溶融施設からの搬出物と破砕残渣に含まれる Au、Pt、Pd の希少金属量をそれぞれ図 4-10 と表 4-8 に示す。希少金属量は各試料の希少金属濃度にそれぞれの 1 人 1 日あたりの発生量を乗ずることで算出した。表中の赤字は希少金属が含まれていなかった試料であり、希少金属量は 0 とした。図の縦軸は焼却施設及びガス化溶融施設からの搬出物に含まれる希少金属量、横軸は破砕残渣に含まれる希少金属量をそれぞれ表している。横軸の破砕残渣には埋め立て処分される不燃残渣も含まれているが、粗大ごみ・不燃ごみに含まれる希少金属量と焼却残渣中に含まれる希少金属量を比較するためである。縦軸、横軸は対数軸としており、試料中の希少金属量が 0 の場合は縦軸、横軸の両方で軸上にプロットした。図中の赤線は x＝y の線であり、これにプロットが近いほど搬出物と破砕残渣に含まれる希少金属量が近い。

Au について考察する。G-K を除く施設では搬出物に含まれる量が破砕残渣に含まれる量よりも多い。今回調査の G-C1 ではサンプリング誤差等により希少金属量が少なく計算されると考えられるため、それを除くと搬出物に含まれる量と破砕残渣に含まれる量は少なくとも 100 倍の差がある。

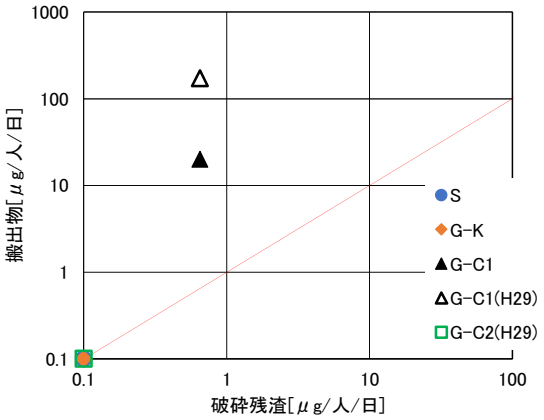
次に Pt について考察する。G-C1 についてしか比較できないが、搬出物に含まれる量は破砕残渣に含まれる量よりも多い。Au と同じく今年度のメタルの濃度は低いため、H29 研

究と比べると 100 倍ほどの差がある。

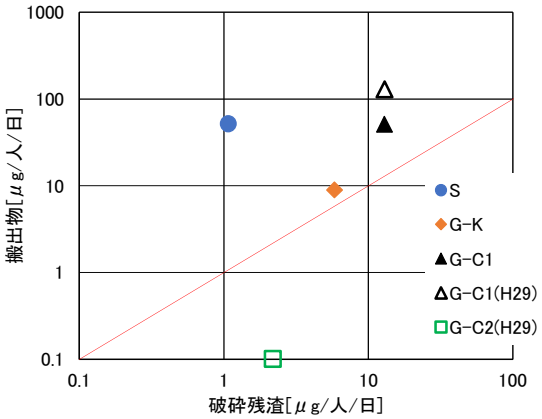
最後に Pt について考察する。G-C2 を除く施設では希少金属の搬出物に含まれる量は破砕残渣に含まれる量よりも多い。搬出物と破砕残渣で希少金属量の差がもっとも大きい場合では 50 倍程度の差がある。



(a)　搬出物と破砕残渣に含まれる Au 量



(b)　搬出物と破砕残渣に含まれる Pd 量



(c)　搬出物と破砕残渣に含まれる Pt 量

図 4-10 破砕残渣と搬出物中の１人１日あたり希少金属量の関係

表 4-8 破砕残渣と搬出物中の１人１日あたり希少金属量

試料	Au［μg/人日］		Pt［μg/人日］		Pd［μg/人日］	
	破砕残渣	搬出物	破砕残渣	搬出物	破砕残渣	搬出物
S	0.08	8.40	N.D.	N.D.	1.07	51.93
G-K	0.27	N.D.	N.D.	N.D.	5.84	8.97
G-C1	0.29	1.18	0.65	20.06	12.93	51.33
G-C1（H29）	－	325.70	－	172.22	－	129.30
G-C2	1.34	－	N.D.	－	2.19	－
G-C2（H29）	－	632.80	－	N.D.	－	N.D.

4.4　まとめ

搬出物（焼却灰、溶融メタル、スラグ）および破砕残渣（基板、小粒径破砕残渣）の希少金属濃度の分析を行った結果、希少金属濃度はおおよその傾向として、基板≧溶融メタル＞焼却灰＞小粒径破砕残渣＞スラグとなっている。

一方、破砕残渣に占める基板の組成割合は小さく、1 人 1 日あたりの金属量で比較すると、破砕残渣の希少金属量は搬出物と比べて桁違いに小さくなった。そのため、本研究では、焼却処理される廃棄物中の金属供給源として不燃ごみ・粗大ごみの破砕残渣を想定したが、その傾向を明確にすることはできなかった。

今回の分析対象とした破砕残渣試料は均質なものではなく、サンプリングのばらつきや日変動も大きいと考えられる。実際に同じ施設からサンプリングした基板であっても希少金属含有量は大きく異なることがあった。そのため、より多くのサンプルを対象とした破砕残渣の分析調査が望まれる。

【謝辞】
本研究の実施にあたり、データおよび試料を提供いただいた各関係機関の方々に深謝いたします。

【参考文献】

1) 札幌市環境局：新スリムシティさっぽろ計画（札幌市一般廃棄物処理基本計画）（2018年3月）(2018)
2) 環境省：一般廃棄物実態調査結果（平成28年度），http://www.env.go.jp/recycle/waste_tech/ippan/h28/index.html，閲覧日2019年2月12日
3) 仲嶺彰人：一般廃棄物ガス化溶融および灰溶融施設から発生する溶融メタルの金属資源性評価，北海道大学工学部環境社会工学科衛生環境工学コース廃棄物処分工学研究室 平成29年度卒業論文（2018)
4) (一社)廃棄物資源循環学会物質フロー研究部会：製品中のレアメタル等の暫定分析方法（v.2）(2010)
5) 肴倉宏史、小口正弘、寺園淳：焼却・溶融実処理プロセスにおける希少金属等54元素の分配と変動, 第21回廃棄物資源循環学会研究発表会講演論文集, pp.407-408(2010)
6) 辰市祐久，茂木敏，井上宏：都市ごみ等に含まれる金属資源の挙動に関する研究（2）－蛍光X線分析及びICP-MSによる希少金属等の分析－，東京都環境科学研究所年報2012，pp.70-76 (2012)
7) 白波瀬朋子，貴田晶子：詳細解体による廃パソコン中の金属含有量の推定，廃棄物資源循環学会論文誌，第20巻，第4号，pp.217-230 (2009)
8) 中島謙一，中野加都子，長坂徹也：使用済み携帯電話の資源性－レアメタル・貴金属のリサイクル－，INDUST，第23巻，第4号，pp.13-17 (2008)
9) 酒井伸一，浅利美鈴，平井康宏，高月紘：情報通信機器の素材とリサイクリングに関する一考察，第11回廃棄物学会研究発表会講演論文集 I，pp.42-44 (2000)
10) 産業構造審議会 産業技術環境分科会 廃棄物・リサイクル小委員会 小型家電リサイクルワーキンググループ（第 4 回）中央環境審議会 循環型社会部会 小型電気電子機器リサイクル制度及び使用済製品中の有用金属の再生利用に関する小委員会(第17回)，資料2 小型家電リサイクル制度の施行状況について（2019)

第 5 章　小型家電リサイクルの金属資源回収効率の評価と廃棄物中の金属資源の由来の整理

第 4 章で破砕残渣が金属資源の供給源であることを明確にすることはできなかったが、本章では一般廃棄物に含まれる金属資源のメインソースは小型家電と考え、溶融処理による金属資源回収と比較することで小型家電リサイクルによる金属資源回収効率を評価した。

具体的には、小型家電リサイクルの実施状況を整理し、回収方法等による小型家電の回収効率について評価を行うとともに、小型家電の製品中金属量および小型家電リサイクルによる金属回収実績と、溶融処理によって回収量される金属量との比較を行った。

また、廃棄物中の金属資源の由来について整理を行った。

5.1　小型家電リサイクル法の概要

使用済となった小型電子機器等からは、鉄やアルミニウムなど一部の金属は再資源化されていたが、金や銅などの金属はほとんどが埋立処分されていた。そのため、使用済小型電子機器等の再資源化を促進するための措置を講ずることにより、廃棄物の適正な処理及び資源の有効な利用の確保を図ることを目的として、平成 25 年 4 月に小型家電リサイクル法が施行された。

小型家電リサイクル法は、使用済小型電子機器等の再資源化事業を行おうとする者が再資源化事業計画を作成し、主務大臣の認定を受けることで、廃棄物処理業の許可を不要とし、使用済小型電子機器等の再資源化を促進する制度である。

再資源化の対象となる機器は、一般消費者が通常生活の用に供する電子機器その他の電気機械器具のうち、効率的な収集運搬が可能であって再資源化が特に必要なものとして携帯電話端末、ゲーム機、デジタルカメラなど 28 品目が政令で対象品目に指定されている。

小型家電リサイクル法による使用済小型家電のリサイクルのイメージは図 5-1 のとおりであり、各市町村はそれぞれの地域の特性に合わせて回収品目や回収方法を選択し、認定事業者が使用済小型家電を広域的に回収し、破砕・選別等の中間処理を行う。また、市町村からの回収だけでなく、小売店等からの直接回収も行われている。認定事業者は、平成 31 年 3 月現在、全国 54 者が認定されている。選別された基板や金属等は金属製錬施設に送られ、金属資源として回収される。

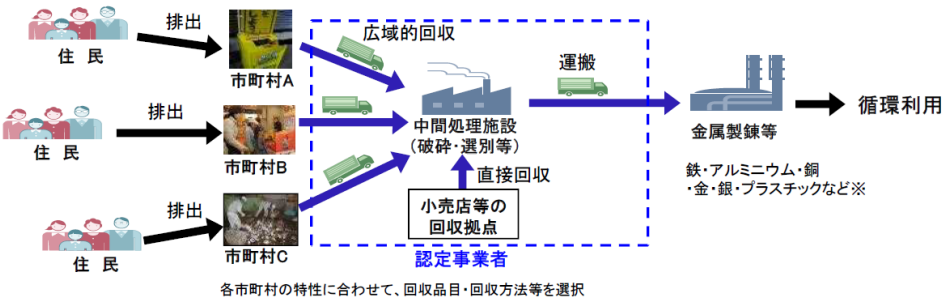


図 5-1 小型家電リサイクル法による使用済小型家電のリサイクルのイメージ [1)]

5.2　小型家電リサイクルによる金属資源回収の状況

(1) 使用済小型家電の回収実績

平成 30 年 6 月現在で、小型家電の回収・処理の取組を実施中、あるいは実施に向けて調整中の市町村は、全体の約 93%（1,620 市町村、居住人口ベースでは約 97%）[1]であり、ほとんどの自治体で小型家電回収の取組が進められている。使用済小型家電の回収量は年々増加しており、平成 30 年度（暫定値）で約 10 万 t となっている（図 5-2）。ただし、制度開始当初に設定された目標値である年間 140,000 t には到達していない。

1 人あたりの回収量は全国平均では 446g/人年であるが、人口規模が大きくなるほど減少する傾向が見られる。特に、人口 100 万人以上の市町村では 39 g/人と最も少なくなっている（図 5-3）。そのため、都市部において効率的な回収が行われていないことが示唆される。

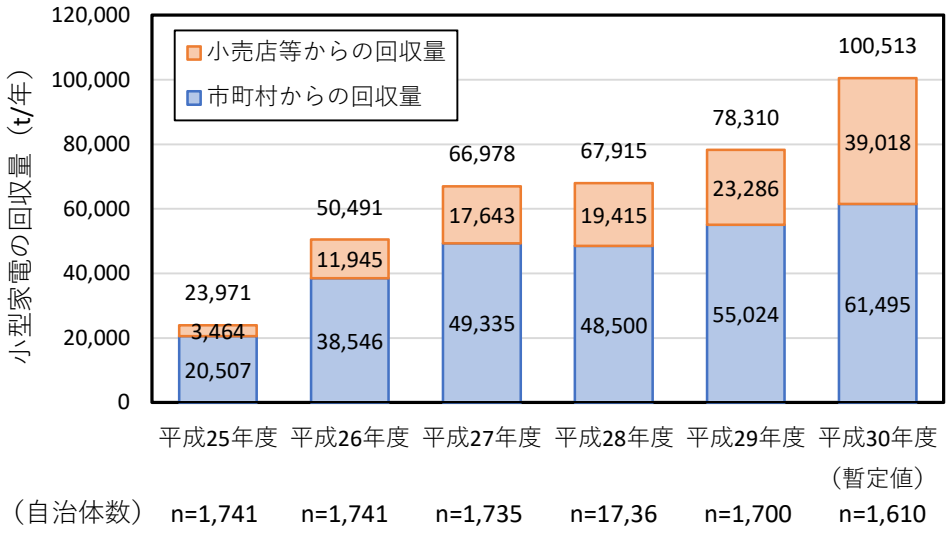


図 5-2 小型家電の回収量の推移（文献 [2]をもとに再構成）

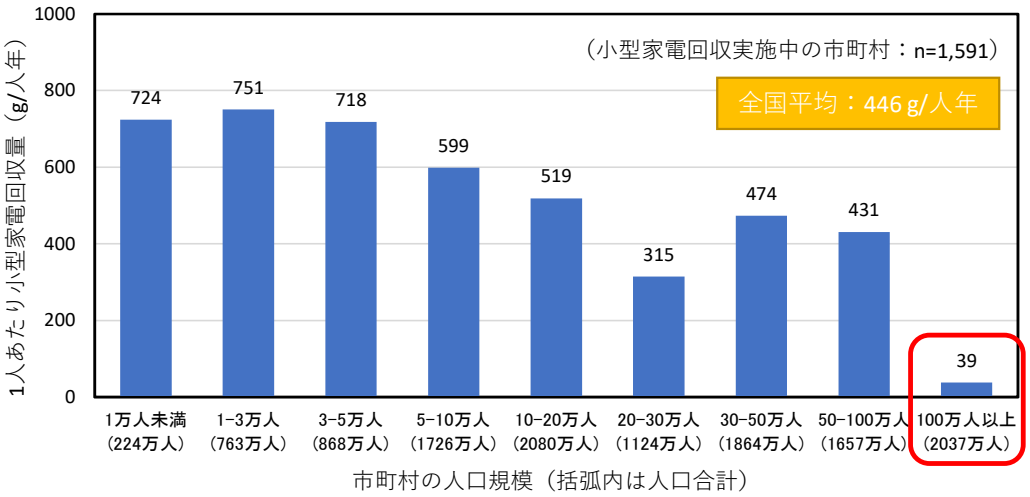


図 5-3 市町村における人口規模別の 1 人あたり回収量（平成 29 年度）
（文献 [1]をもとに再構成）

(2) 回収方法別の回収量

市町村における小型家電の回収方法には、①ボックス回収、②ステーション回収、③イベント回収、④ピックアップ回収、などの方法がある（表 5-1）このうち、ボックス回収を採用している市町村が最も多く（50.4%）、次いでピックアップ回収（38.4%）となっている[1)]。

表 5-1 市町村における小型家電の回収方法の例

回収方法	具体的内容
①ボックス回収	使用済小型家電の回収ボックスを公共施設・小売店等に設置し、定期的に回収する。
②ステーション回収	分別区分を追加し、ステーション（ごみ回収場所）で定期的に行っている資源回収と合わせて使用済小型家電を回収する。
③イベント回収	イベント開催の期間に限定して、イベント会場で使用済小型家電を回収する。
④ピックアップ回収	排出された粗大ごみや不燃ごみ等から、清掃工場等において使用済小型家電を選別する。

市町村の人口規模・回収方法別の 1 人あたり回収量は図 5-4 のとおりである。回収方法で比較すると、ステーション回収やピックアップ回収による回収量が多くなっており、一方、ボックス回収は回収量が少なくなっている。ただし、いずれの回収方法においても人口規模が大きくなるほど 1 人あたり回収量は少なくなる。特に人口 100 万人以上の市町村においては極端に回収量が少なくなっている。

ボックス回収について、市町村ごとの回収ボックス設置数[3)]と収集対象人口から算定した回収ボックス 1 個あたりの収集対象人口を図 5-5 に示す。数千人～数万人に 1 個の密度で回収ボックスは設置されているが、市町村の人口が増えるほど回収ボックス 1 個あたりの収集対象人口は多くなる。そのため、人口 100 万人以上の市町村では、回収ボックスの設置数は概ね数万人に 1 個となっている。ステーション回収やピックアップ回収を導入するためには分別区分の新設や作業員・スペースの確保が必要となるのに比べて、ボックス回収は設置施設の理解は必要であるものの比較的導入がしやすいと考えられる。そのため、ボックス回収は市町村の立場からは利便性が高いが、小型家電を排出する市民の立場からは利便性に劣る回収方法となっていると考えられる。

ステーション回収は、分別区分の新設が必要になることに加えて、小型家電の回収量が非常に少ない（1 人 1 日あたり数 g であり可燃ごみの 100 分の 1 以下）ために収集効率が非常に悪くなることが、採用の妨げとなっていると考えられる。

また、ピックアップ回収は、特に規模の大きな都市において、作業人員の確保が課題となる。例えば札幌市では、3 つの破砕工場で粗大ごみ・不燃ごみ等が破砕処理されている（H29 年度実績[4)] で 41,883 t）が、年間 280 日稼働と仮定すると各破砕施設における処理対象量

は約 50 t/日となり、この量の廃棄物から小型家電をピックアップすることは現実的ではない。

また、2017 年に総務省から出された勧告 [5]では、市町村がステーション回収およびピックアップ回収を実施していない理由として、①他の回収方法より費用負担が大きい、②収集、運搬、選別及び保管のための設備・場所等が確保できない、③ステーション回収はごみ収集区分の調整・増加が必要となり、住民への負担を招くなどがあげられている。

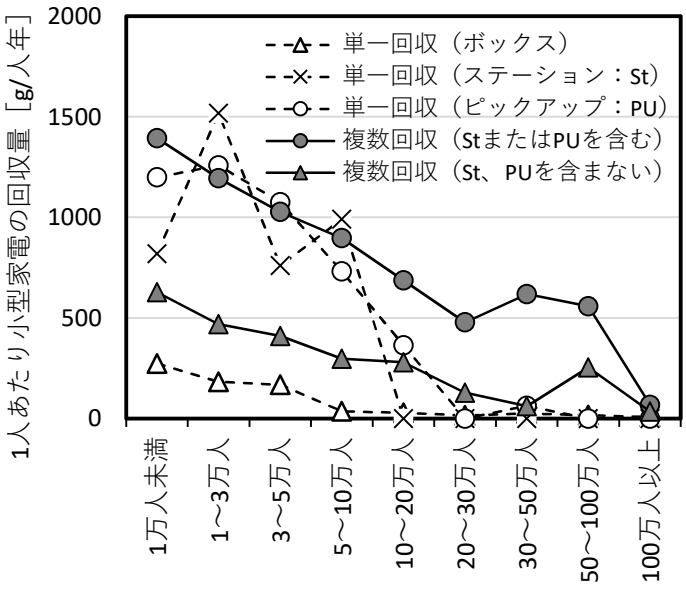


図 5-4 人口規模・回収方法別の 1 人あたり小型家電回収量（文献 [1]をもとに再構成）

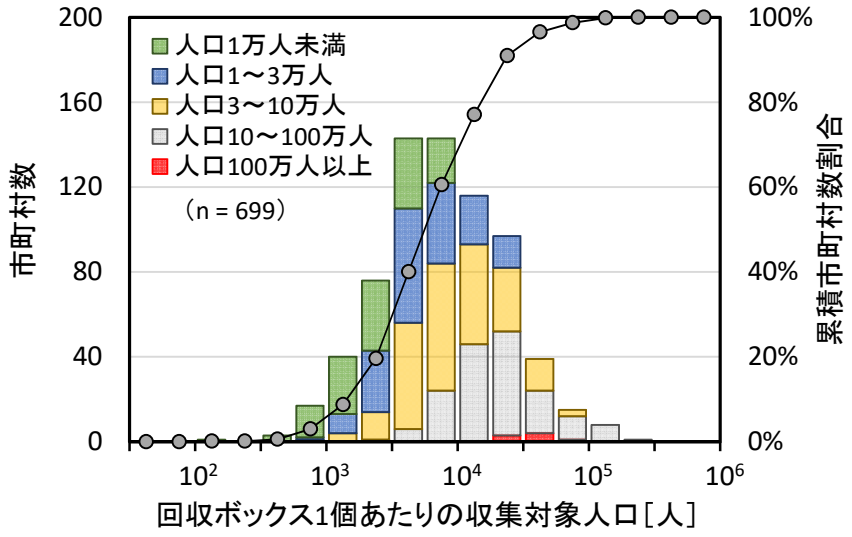


図 5-5 回収ボックス 1 個あたりの収集対象人口（複数回収を含む）
（文献 [3]をもとに算定）

(3) 品目ごとの回収量

① 使用済小型家電回収モデル事業における回収実績（京都市実証事業の例）

小型家電リサイクル法の制定に先駆け、環境省および経済産業省は、使用済小型家電に含まれるレアメタルをはじめとする希少金属の効果的・効率的な回収方法の検討を行うこと等を目的として、平成 21 年度～平成 23 年度にかけて全国 7 箇所で使用済小型家電の回収モデル事業を実施している。なお、このうち京都市実証事業については筆者が実施に関与している。

京都市実証事業[6]では、京都市内 50 か所（店舗、区役所・支所、まち美化事務所、地下鉄駅）に回収ボックスを設置し、平成 21 年 11 月 1 日から平成 22 年 12 月 31 日まで小型家電 15 品目を対象とした回収を実施した。このうち平成 22 年 2 月～12 月の回収物について品目および重量の計測を行っている（表 5-2）。

回収物を個数で見ると、携帯電話・PHS、ポータブル音楽プレーヤー、デジタルカメラ、家庭用ゲーム機（ソフト）、PC 外付けディスクドライブが多くなっており、一方、重量で見ると PC 外付けディスクドライブ、携帯電話・PHS、家庭用ゲーム機（本体）が多くなっている。

回収対象の 15 品目以外であるが、AC アダプタ・コード類や充電器の回収数も多くなっている。モデル事業で主眼を置いていたレアメタル回収の観点からはこれら品目は有効ではないものの、Cu の回収という観点からはコード類の回収は一定の効果が考えられる。

また、電池や蛍光灯といった禁忌物も数多くボックスに投入されており、重量比で 10%程度となっている。また、ごみ（紙類やプラスチック類など）も重量比で 3%程度が混入している。特に、駅に設置したボックスでは、回収台数は多くなるが、ごみ・禁忌物も多いという結果であった。

表 5-2 には、人口 1 人あたりの回収重量も掲載しているが、人口に比べてボックス設置個数が少ない（約 28,000 人に 1 個）ため、1 人あたり 1.1g 程度の回収量に留まっている。

趙[7]は、京都市を事例として、小型家電回収システムに関する現状分析を行い、京都市は使用済小型家電の処理に苦慮し財政負担が増加している傾向が見られたと報告している。また、その原因として、①使用済小型家電の回収・運搬責任を京都市が負うことから、回収品目の増大及び回収拠点の増設などによって委託運搬にかかる費用が増大していること、②認定事業者との間では、引取契約に基づき、回収された使用済小型家電を認定事業に引き渡すことから、資源市場の価格変動の影響をうけ、好景気の場合に有償で、逆に低迷な場合は逆有償で認定事業者に引き渡すことになっていること、③使用済み小型家電の売却収入は少額であり、売却収入では市が負担する回収費用を賄えないのが実情であることをあげている。

表 5-2 京都市実証事業における小型家電回収量（ボックス回収：11 か月間）[6)]

品目		個数	重量（kg）	1人あたり回収重量（g/人）※	
小型家電（15品目）	携帯電話・PHS	2033	210.3	0.152	0.727（56%）
	携帯液晶テレビ	54	23.9	0.017	
	デジタルカメラ	310	62.5	0.045	
	電子手帳	35	6.1	0.004	
	ビデオカメラ	38	32.8	0.024	
	電子辞書	102	19.0	0.014	
	USBメモリー	84	1.0	0.001	
	電卓	282	29.7	0.021	
	ICレコーダー	13	0.8	0.001	
	ポータブル音楽プレーヤー	425	73.8	0.053	
	ポータブルDVDプレーヤー	23	20.0	0.014	
	ポータブルラジオ	178	74.4	0.054	
	PC外付けディスクドライブ	308	223.6	0.161	
	家庭用ゲーム機（本体）	251	202.8	0.146	
	家庭用ゲーム機（ソフト）	418	25.7	0.019	
小型家電（その他品目）	DVDプレーヤ・レコーダ	18	29.0	0.021	0.396（30%）
	カーDVD	0	0.0	0.000	
	電磁調理器	0	0.0	0.000	
	電動歯ブラシ	8	0.9	0.001	
	電気かみそり	71	12.5	0.009	
	リモコン	183	16.9	0.012	
	モデム・ルータ・ハブ	126	28.1	0.020	
	PC基盤	251	23.5	0.017	
	ヘッドホン	163	4.7	0.003	
	フィルムカメラ	59	17.7	0.013	
	ゲームコントローラ	110	23.3	0.017	
	玩具・学習教材	11	1.1	0.001	
	充電器	468	40.0	0.029	
	ACアダプタ・コード類	1143	138.5	0.100	
	その他電気製品	671	212.8	0.154	
禁忌物	電池	5274	190.1	0.137	0.138（11%）
	蛍光灯	26	1.0	0.001	
ごみ	紙類	940	13.7	0.010	0.039（3%）
	プラスチック類	1773	31.0	0.022	
	その他ごみ	229	9.8	0.007	
合計		16,078	1,801	1.300	

※京都市人口：1,385,300人

② 使用済小型家電の回収実績（いくつかの市町村の事例）

小型家電リサイクル法にもとづいて回収される使用済小型家電の品目ごとの回収量に関するデータは少ない。そのため、Web 調査により品目ごとの回収実績が公開されているデータをいくつか収集し、整理した。

回収方法別の回収量を整理すると図 5-6 のとおりであり、市町村によって 1 人あたり回収量には大きな差があり、品目にも差異がある。なお、各市町村の回収方法は、豊中市はピックアップ＋イベント、武蔵野市はピックアップ、柏原市、国分寺市、町田市、練馬区、新潟市はボックス回収となっている。

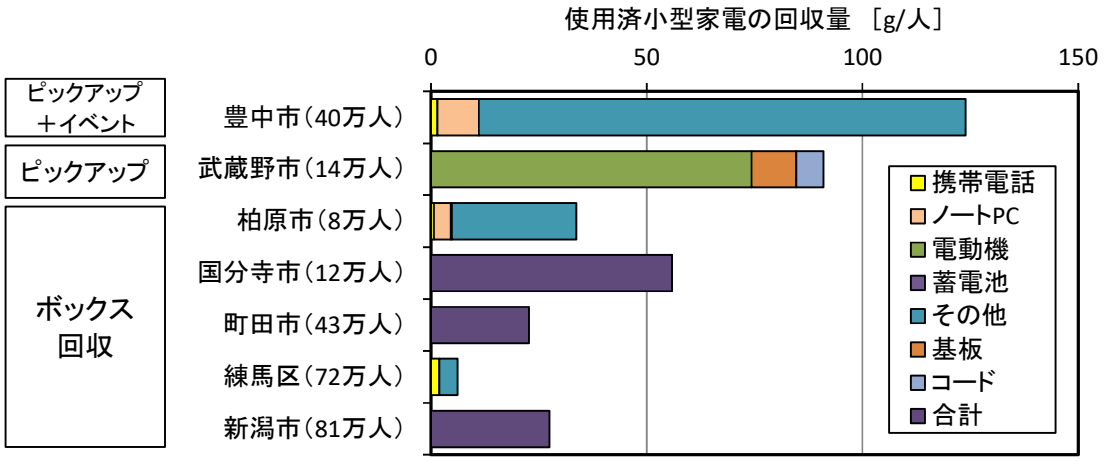


図 5-6 使用済小型家電の品目別回収実績の例 [8-14)]

また、ボックス回収、ピックアップ回収など複数の回収方法を採用している市町村における使用済小型家電の回収実績は図 5-7 のとおりであり、ピックアップ回収による回収量がボックスによる回収よりも 10～50 倍多くなっている。回収量の多い市町村は、回収品目が多い（宝塚市）、あるいは選別の徹底度が高いという理由が考えられる。

そのため、使用済小型家電の回収量を上げるためには回収品目を増やすことやピックアップ回収を採用することが現実的な方法と考えられる。

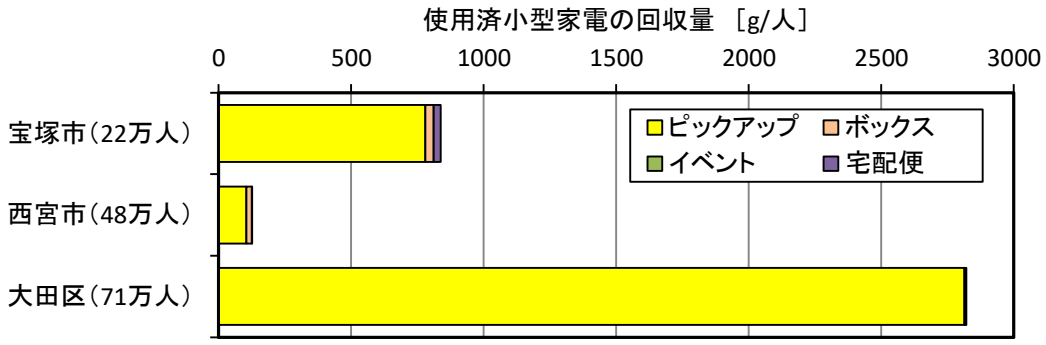


図 5-7 使用済小型家電の回収方法別の回収実績の例 [15-17)]

(4) 小型家電リサイクルによる金属回収実績と考察

金属資源の回収量で見ると、小型家電の潜在的回収量に含まれる金属量（既存統計による出荷量から推計された潜在的回収台数と 7 箇所の小型家電回収モデル事業で得られた金属含有量から算定されている）に比べて、小型家電リサイクルの認定事業者によって再資源化された金属量は少ない（表 5-3）。

実施市町村数で見ると小型家電リサイクルの実施率は高いが、実質的な回収率が低いため、Au、Pd など貴金属類の回収実績は潜在的回収量に比べて極端に低くなっていると考えられる。

一方で、Cu の回収実績は潜在的回収量に比べて半分程度である。Au、Pd など貴金属類の回収率と比べると Cu の回収率は高くなっている。この理由としては、①上述の京都市モデル事業で見られたように、Cu を多く含む電源ケーブルや AC アダプターなどが小型家電として排出されていること、②回収実績には市町村との契約による引取量だけでなく、消費者からの直接回収や事業所からの直接回収も含まれることから、家庭から排出される小型家電以外の寄与が考えられること、が可能性として考えられる。

表 5-3 小型家電からの金属資源の潜在的回収量と回収実績

金属	単位	小型家電リサイクルによる潜在的金属回収量	小型家電リサイクルによる金属回収実績（2017）	回収率
Au	μg/人日	129	5.2	4.1 %
Pt	μg/人日	0.86	不明	－
Pd	μg/人日	25	0.36	1.4 %
Cu	μg/人日	82,300	37,400	45 %
備考		文献値[18]を 1 人 1 日あたりに換算	文献値[1]を 1 人 1 日あたりに換算	

5.3　溶融処理による溶融メタル中の金属量と小型家電の製品中金属量等の比較

(1) 目的

「5.2 小型家電リサイクルによる金属資源回収の状況」において、小型家電リサイクルによって回収される金属回収量が、小型家電の製品中金属量（潜在的回収量）よりも少ないことが明らかとなった。

そこで、ここでは「第 3 章 溶融処理で生成される溶融メタルの金属資源性評価」で得られたデータを精査し、溶融処理による溶融メタル中の金属量を 1 人 1 日あたりの量に換算して、小型家電の製品中金属量等と比較する。

(2) 評価方法

第 3 章で得られた溶融メタル中の金属含有量を、下式により溶融施設が処理対象とする人口 1 人あたりの金属量に換算し、小型家電の製品中金属量および金属回収実績と比較した。

1 人 1 日あたり溶融メタル移行金属量＝

溶融メタル中金属濃度×溶融メタル搬出量／推定処理対象人口

ここで推定処理対象人口は、ガス化溶融施設については処理対象市町村の合計人口を、灰溶融施設については当該施設に焼却残渣を搬入している焼却施設の処理対象人口の合計を用いた。その際、単一市町村で複数の焼却施設がある場合は焼却処理量で人口を按分するとともに、産廃の処理割合も考慮した。焼却処理量及び産廃の処理割合は一般廃棄物処理実態調査のデータを活用した。

なお、小型家電の製品中金属量（潜在的金属回収量）および金属回収実績は、表 5-3 の値を用いた。

(3) 結果と考察

a) メタル移行金属量（小型家電リサイクルとの比較、炉形式による特徴）

1 人 1 日あたり溶融メタル中金属量と小型家電の製品中金属量および小型家電リサイクルによる金属回収実績を比較すると図 5-8、図 5-9 のとおりである。溶融メタルに含まれる Au、Pd の量は小型家電の製品中金属量とほぼ同等であった。また、溶融メタルに含まれる Pt、Cu の量は小型家電の製品中金属量より多いことから、焼却処理される廃棄物中の金属資源の供給源は、小型家電以外にも存在する可能性が考えられる。一方で、小型家電リサイクルによる金属回収実績は、小型家電の製品中金属量と比較して数%程度（Au、Pd）であった。

いずれの金属もコークスベッド式ガス化溶融炉は溶融メタルに含まれる金属量が多く、他の溶融形式とは異なる傾向であった。コークスベッド式ガス化溶融は産業廃棄物を併せ処理しているため、産業廃棄物に由来して金属量が増加した可能性が考えられる。

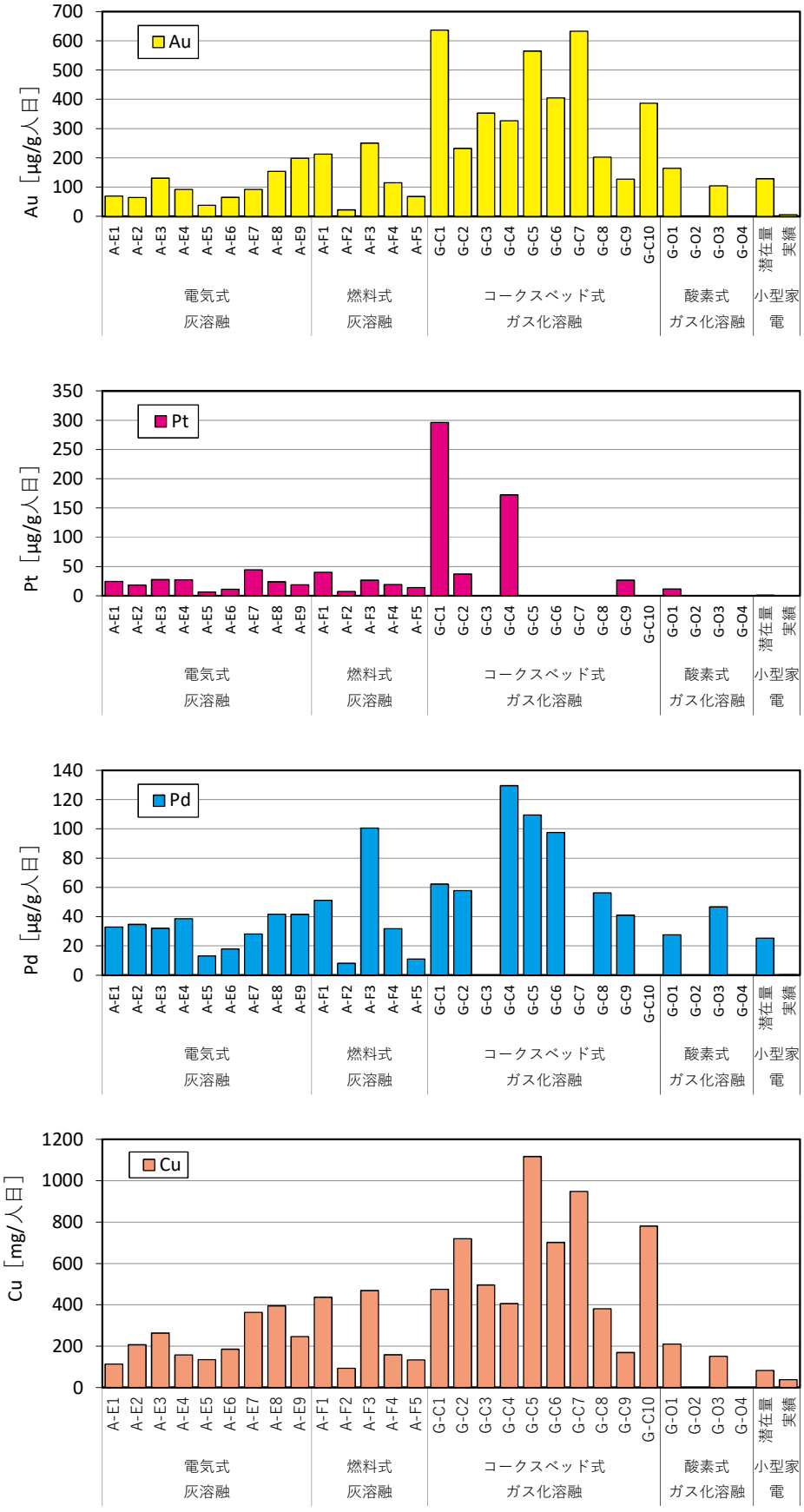


図 5-8 溶融メタル中の金属濃度と小型家電リサイクルによる金属回収量の比較

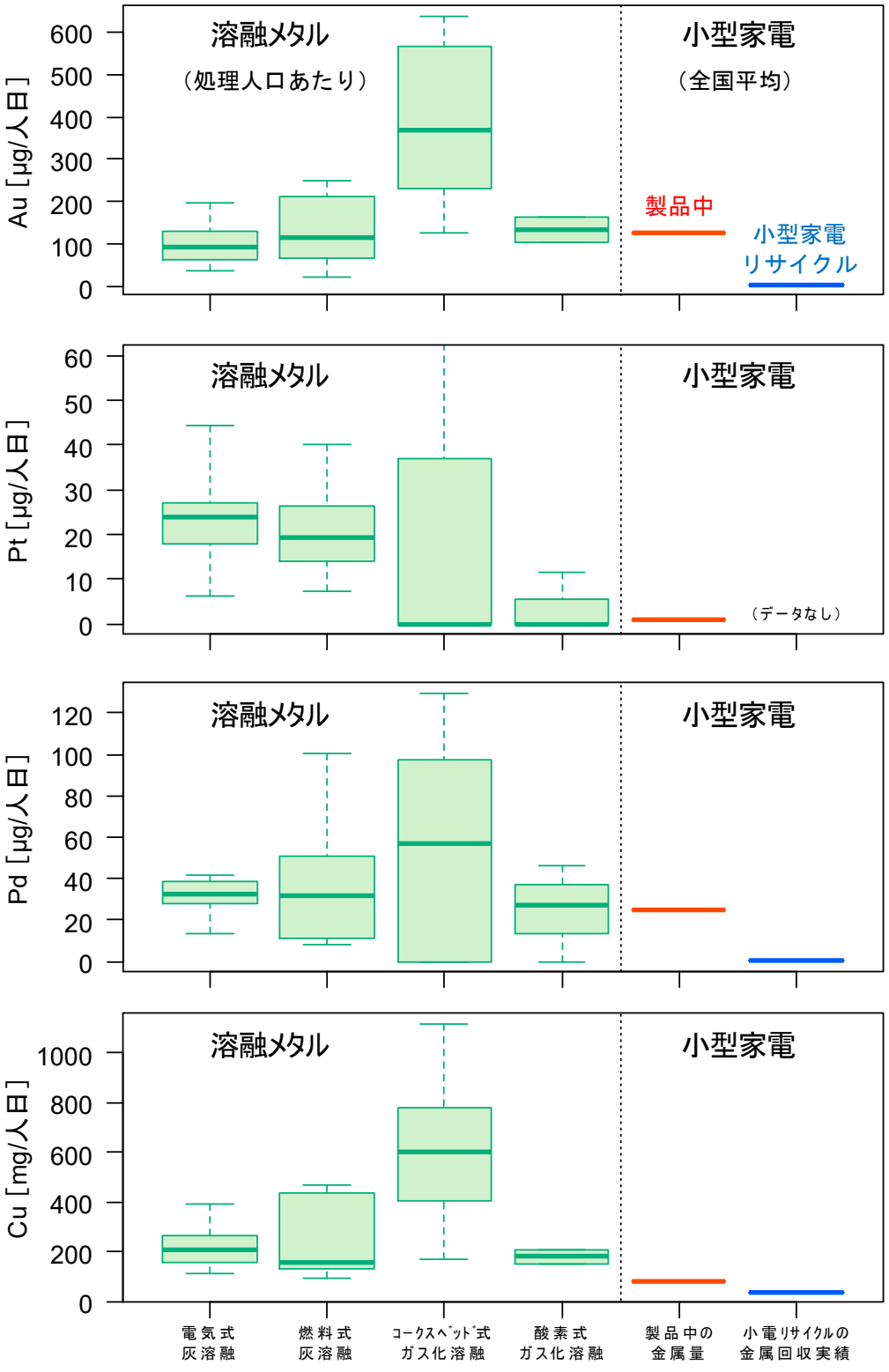
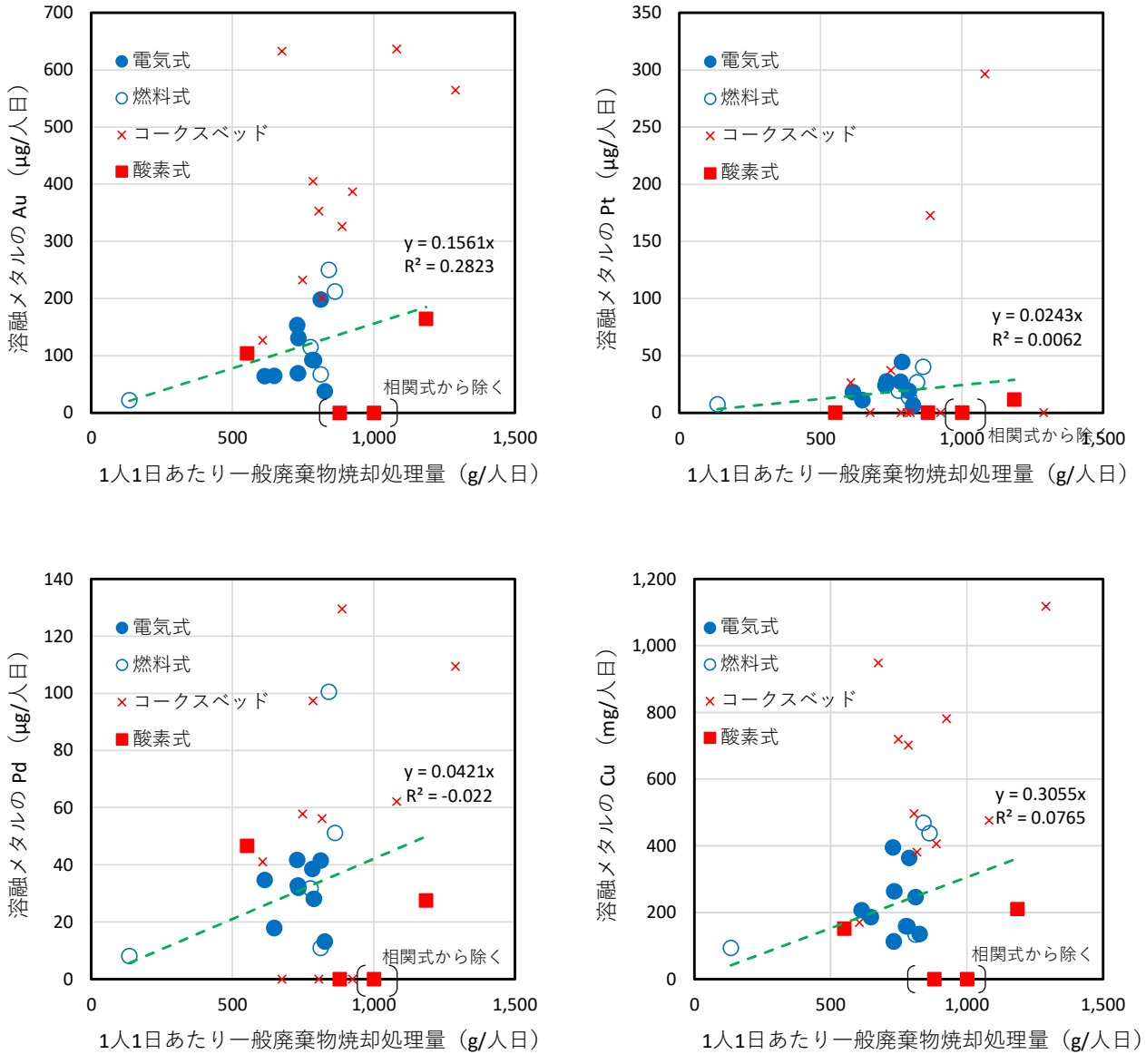


図 5-9 溶融メタル中金属量と小型家電の製品中金属量および
小型家電リサイクルによる金属回収実績の比較

（箱の上下端は 75 パーセンタイル値、25 パーセンタイル値、中心線は中央値、ひげは最小～最大）

b) 焼却処理量と溶融メタル移行金属量の関係

1 人 1 日あたり一般廃棄物焼却処理量と溶融メタルの金属量を比較すると図 5-10 のとおりとなる。焼却処理されるごみ量が多いほど回収される金属量も単純に増加するとの仮説のもと、両者には一定の関係性が見られるのではないかと予想したが、明確な関係は見られなかった。(コークスベッド式ガス化溶融炉を除けば、Au は 5%有意。他の金属はばらつきが大きい。)



※相関式の算定にはコークスベッド式ガス化溶融炉と括弧をつけた酸素式のデータを含まない。

図 5-10　1 人 1 日あたりの一般廃棄物焼却処理量と溶融メタルの金属濃度の関係

5.4　廃棄物中の金属資源の由来（金属資源の国内需要）の整理

前述の 5.3 節でコークスベッド式ガス化溶融炉の溶融メタル移行金属量が多く、産業廃棄物由来の金属供給源が示唆された。また、溶融メタルに含まれる Pt、Cu の量は小型家電の製品中金属量より多いことから、焼却処理される廃棄物中の金属資源の供給源は、小型家電以外にも存在する可能性が考えられた。

そのため、効率的な金属資源回収システムを検討する上での基礎情報として、Au、Pt、Pd、Cu の国内需要を整理する。

(1) Au の国内需要

Au の国内需要の推移は図 5-11 のとおりであり、2002～2007 年は約 200t/年で推移し、需要の中心は電気・通信機・機械部品用であったが、その後、企業の海外生産移転や製品の小型化が進んだことにより、2014～2,017 年には約 60t/年に減少している。

これを、1 人 1 日あたりの国内需要に換算すると 1500μg/人日（2018 年）となる（表 5-4）。一方で、小型家電リサイクルによる潜在的回収量（小型家電の製品中金属量）は 129μg/人日となっており、これは国内需要の 1 割弱を占める。

Au の需要のうち、一般廃棄物として排出される可能性があるのは、「電気通信機・機械部品用」及び「メッキ用」「その他の消費者需要」の一部と考えられる。また、準消費退蔵である「宝飾用」や「メダル用」なども、排出される可能性はある。

ただし、小型家電をはじめ電子機器の製造拠点の多くは海外に移転されており、製品に組み込まれて輸入されている。これらの輸入製品に含まれる Au の需要量はこの統計では把握できない。

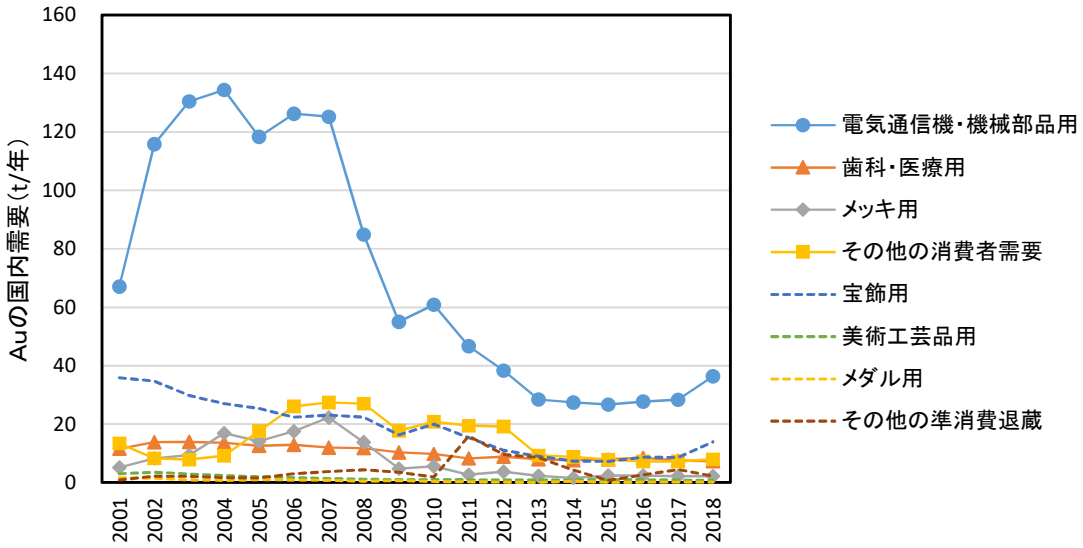


図 5-11　Au の国内需要の推移 [19)]

表 5-4 一人一日あたりの Au の需要（2018 年）（文献 [19]をもとに作成）

	一人一日あたり需要（μg/人日）	一般廃棄物中の金属供給源として可能性が高いと考えられる品目
電気通信機・機械部品用	788	○
歯科・医療用	159	
メッキ用	48	○
その他の消費者需要	174	○
宝飾用	301	
美術工芸品用	17	
メダル用	2	
その他の準消費退蔵	48	
合計	1,537	

(2) Pt の国内需要

Pt の国内需要の推移は図 5-12 のとおりであり、2002～2008 年は約 40～50t/年で推移し、需要の中心は自動車触媒用（ディーゼル車）や電気・電子機器用であった。その後、次世代自動車の普及が進んだことにより自動車触媒用の需要は減少し、一方、水素燃料電池の電極触媒や自動車用の貴金属スパークプラグなど新たな需要により電気・電子機器用の需要は増加している。その結果、2018 年の Pt の国内需要は約 37t/年となっている。

これを 1 人 1 日あたりの国内需要に換算すると 800μg/人日（2018 年）となる（表 5-5）。一方で、小型家電リサイクルによる潜在的回収量は 0.86μg/人日であり、Pt の国内需要全体からみるとごくわずかとなっている。

Pt の需要のうち、一般廃棄物として排出される可能性があるのは、「電気通信機・機械部品用」、「その他の消費者需要」及び「宝飾品用」のごく一部と考えられる。

ただし、小型家電をはじめ電子機器の製造拠点の多くは海外に移転されており、製品に組み込まれて輸入される機器はこの統計では把握できない。

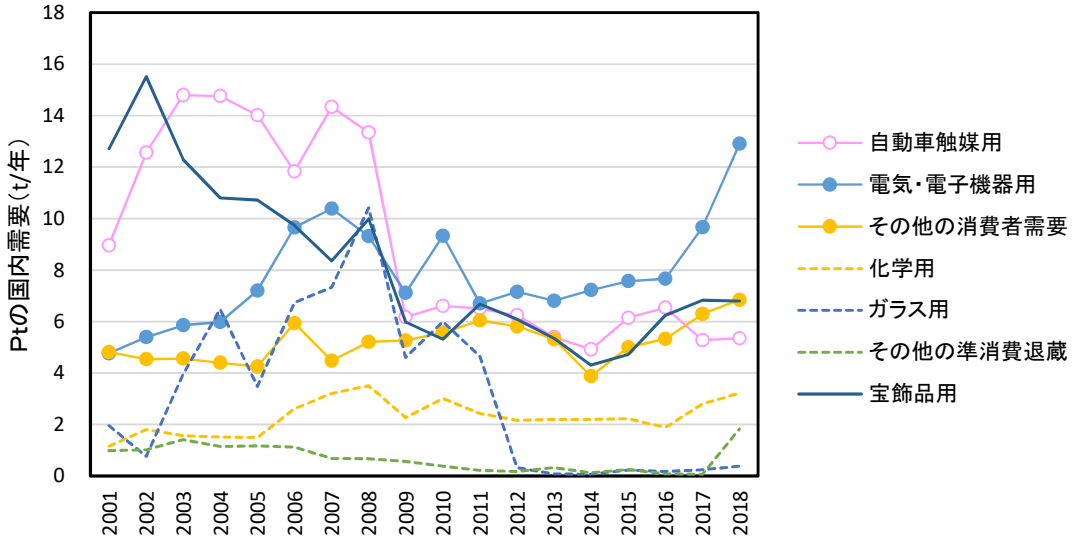


図 5-12　Pt の国内需要の推移 [19]

表 5-5 一人一日あたりの Pt の需要（2018 年）（文献 19)をもとに作成）

	一人一日あたり需要（μg/人日）	一般廃棄物中の金属供給源として可能性が高いと考えられる品目
自動車触媒用	116	
電気・電子機器用	280	○
その他の消費者需要	148	○
化学用	70	
ガラス用	8	
その他の準消費退蔵	40	
宝飾品用	147	
合計	809	

(3) Pd の国内需要

Pd の国内需要の推移は図 5-13 のとおりであり、2003～2008 年は 50t/年以上で推移し、需要の中心は歯科・医療用や自動車触媒用（ガソリン車）であった。その後、次世代自動車の普及が進んだことにより自動車触媒用の需要は減少したものの、2015 年の独フォルクスワーゲンの排ガス不正処理事件の発覚を契機にガソリン車に需要が高まり、その触媒となるパラジウムの需要も増加に転じた。その結果、2018 年の Pd の国内需要は約 42 万 t/年となっている。

これを 1 人 1 日あたりの国内需要に換算すると 910μg/人日（2018 年）となる（表 5-7）。一方で、小型家電リサイクルによる潜在的回収量は 25μg/人日となっており、これは国内需要の 3%程度である。

Pd の需要のうち、一般廃棄物として排出される可能性があるのは、「電気・電子機器用」、「その他の消費者需要」の一部と考えられる。

ただし、小型家電をはじめ電子機器の製造拠点の多くは海外に移転されており、製品に組み込まれて輸入される機器はこの統計では把握できない。

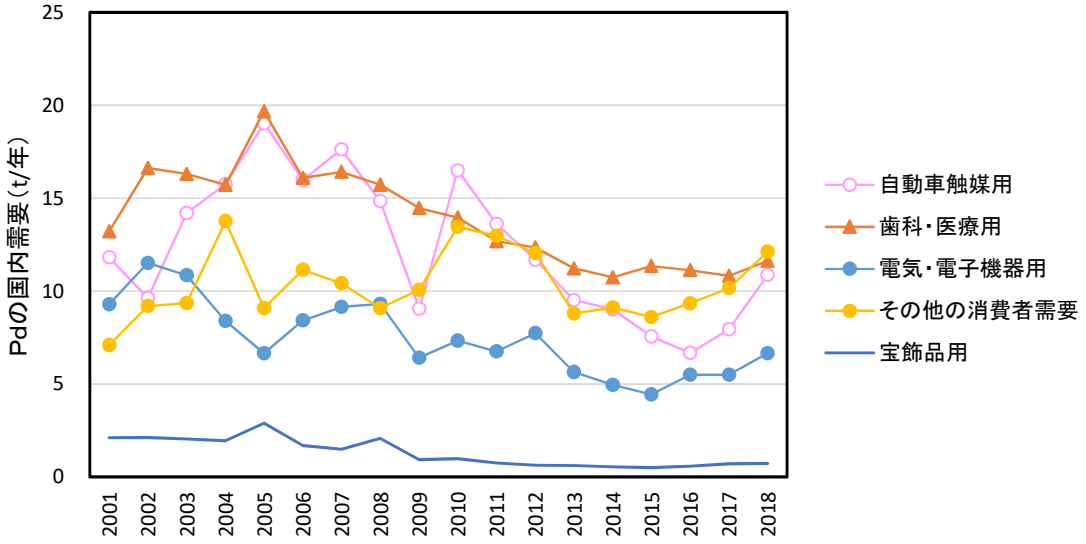


図 5-13　Pd の国内需要の推移 19)

表 5-6 一人一日あたりの Pd の需要（2018 年）（文献 [19]をもとに作成）

	一人一日あたり需要（μg/人日）	一般廃棄物中の金属供給源として可能性が高いと考えられる品目
自動車触媒用	236	
歯科・医療用	252	
電気・電子機器用	144	○
その他の消費者需要	263	○
宝飾品用	15	
合計	910	

(4) Cu の国内需要

Cu の国内需要の推移は図 5-14 のとおりであり、電線と伸銅品を合わせて、1988～2000 年は約 180 万 t/年で推移し、需要の中心は通信（電線）、電気電子（伸銅品）、機械（伸銅品）、輸送機器（伸銅品）であった。その後、電機メーカーや自動車メーカーの海外生産が進み、電線の国内需要は 2000 年 89 万 t から 2018 年 68 万 t に減少、また、伸銅品の国内需要も 2000 年 96 万 t から 2018 年 53 万 t に大きく減少している。

これを、1 人 1 日あたり国内需要に換算すると、電線と伸銅品を合わせて 26,000mg/人日（2018 年）となる（表 5-7）。一方で、小型家電リサイクルによる潜在的回収量は 82 mg/人日となっており、Cu の国内需要全体からみるとごくわずかとなっている。

Cu の需要のうち、一般廃棄物として排出される可能性があるのは、電線（電気機械）、伸銅品（金属製品、電気電子、機械、その他）の一部でと考えられる。

ただし、小型家電をはじめ電子機器の製造拠点の多くは海外に移転されており、製品に組み込まれて輸入される機器はこの統計では把握できない。

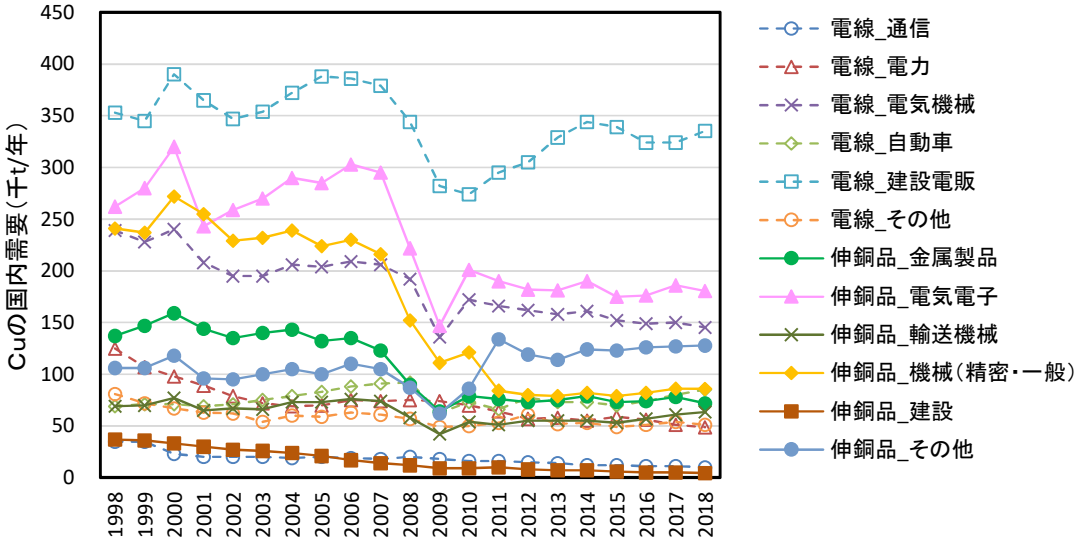


図 5-14　Cu の国内需要の推移 [19]

表 5-7 一人一日あたりの Cu の需要（2018 年）（文献 [19]をもとに作成）

	一人一日あたり需要（mg/人日）	一般廃棄物中の金属供給源として可能性が高いと考えられる品目
電線_通信	217	
電線_電力	1,060	
電線_電気機械	3,144	○
電線_自動車	1,848	
電線_建設電販	7,267	
電線_その他	1,109	○
伸銅品_金属製品	1,561	○
伸銅品_電気電子	3,910	○
伸銅品_輸送機械	1,375	
伸銅品_機械（精密・一般）	1,862	○
伸銅品_建設	97	
伸銅品_その他（製造業・その他）	2,767	○
合計	26,218	

5.5 まとめ

溶融メタルへの移行金属量と小型家電の製品中金属量（潜在的回収量）を 1 人 1 日あたりの量に換算して比較したところ、コークスベッドガス化溶融施設を除き、Au、Pd の溶融メタル移行金属量は小型家電リサイクルによる潜在的回収量と同等もしくはそれ以上であった。そのため、一般廃棄物における Au、Pd の主要供給源は小型家電である可能性が考えられた。

また、Pt と Cu の溶融メタル移行金属量は小型家電リサイクルによる潜在的回収量より多かった。Pt と Cu は、国内需要全体に比べて小型家電の製品中金属量はごくわずかであることから、一般廃棄物における Pt、Cu の供給源は小型家電以外にも存在する可能性が考えられる。

なお、小型家電リサイクルによる金属回収実績は、Au、Pd では小型家電の製品中金属量（潜在的金属回収量）の数%程度にすぎなかった。一方、Cu では 45%となっており、特に Cu については小型家電以外からの供給源が考えられる。

なお、一般廃棄物中の金属資源の由来を金属資源の国内需要から整理を試みたところ、金属資源の国内需要全体に対する小型家電の製品中金属量（潜在的回収量）は、Au で約 1 割、Pd で約 3%、Pt と Cu はごくわずかであった。

【参考文献】

1) 産業構造審議会 産業技術環境分科会 廃棄物・リサイクル小委員会 小型家電リサイクルワーキンググループ（第 4 回）中央環境審議会 循環型社会部会 小型電気電子機器リサイクル制度及び使用済製品中の有用金属の再生利用に関する小委員会(第 17 回)，資料 2 小型家電リサイクル制度の施行状況について（2019）
2) 産業構造審議会 産業技術環境分科会 廃棄物・リサイクル小委員会 小型家電リサイクルワーキンググループ 中央環境審議会 循環型社会部会 小型電気電子機器リサイクル制度及び使用済製品中の有用金属の再生利用に関する小委員会 合同会合：小型家電リサイクル制度の施行状況の評価・検討に関する報告書（案）(2019)
3) 環境省：小型家電リサイクル回収ポータルサイト，http://kogatakaden.env.go.jp（閲覧日：2019/08/28)
4) 環境省：一般廃棄物実態調査結果（平成 29 年度），https://www.env.go.jp/recycle/waste_tech/ippan/h29/index.html（閲覧日 2020 年 1 月 17 日）
5) 総務省：小型家電リサイクルの実施状況に関する実態調査結果に基づく勧告（平成 29 年 11 月），2017.
6) 株式会社エックス都市研究所：平成 22 年度使用済小型家電の回収モデル事業（京都市事業運営業務）報告書（平成 23 年 3 月）(2011)
7) 趙迪：日本の使用済み小型家電回収システムにおける責任分担に関する現状分析－京都市を事例に－，龍谷大学大学院政策学研究，第 006 号，pp.247-250（2017）
8) 豊中市 HP，https://www.city.toyonaka.osaka.jp/kurashi/gomi_risaikuru_bika/gomi_recycl_bika_to/a0010600200300002.html1（閲覧日 2019 年 11 月 1 日）
9) 武蔵野市：第 3 回 武蔵野市ごみ収集の在り方等検討委員会，資料 3 小型家電リサイクルに関する本市の取り組み（平成 28 年 3 月 10 日），http://www.city.musashino.lg.jp/_res/projects/default_project/_page_/001/010/437/arikennsiryou3.pdf（閲覧日 2019 年 11 月 1 日）
10) 柏原市：使用済小型電子機器等の再資源化実績報告書（平成 30 年度），http://www.city.kashiwara.osaka.jp/docs/2014121100011/files/30nenndojixtusekihyou.pdf（閲覧日 2019 年 11 月 1 日）
11) 国分寺市：平成 30 年度版（29 年度実績）国分寺市清掃事業概要（平成 30 年 10 月），http://www.city.kokubunji.tokyo.jp/_res/projects/default_project/_page_/001/019/513/h30seisou.pdf（閲覧日 2019 年 11 月 1 日）
12) 町田市 HP，https://www.city.machida.tokyo.jp/kurashi/kankyo/gomi/event/recycle/kogatakadenn.html（閲覧日 2019 年 11 月 1 日）
13) 練馬区 HP，https://www.city.nerima.tokyo.jp/kurashi/gomi/wakekata/kogatakaden9.html（閲覧日 2019 年 11 月 1 日）

14) 新潟市：平成 30 年度新潟市使用済小型家電回収実績，https://www.city.niigata.lg.jp/kurashi/gomi/recycle/koden_recycle/koden_recycle_ryou.files/h30koden_ryou.pdf（閲覧日 2019 年 11 月 1 日）
15) 宝塚市：平成 30 年度使用済小型家電リサイクル実績，http://www.city.takarazuka.hyogo.jp/_res/projects/default_project/_page_/001/001/131/h30jisseki.pdf（閲覧日 2019 年 11 月 1 日）
16) 西宮市：平成 28 年度使用済小型家電の回収量，https://www.nishi.or.jp/kurashi/gomi/shigen/recycle/h28kaishuryo.html（閲覧日 2019 年 11 月 1 日）
17) 大田区 HP，https://www.city.ota.tokyo.jp/seikatsu/gomi/shigentogomi/kogatakaden.html（閲覧日 2019 年 11 月 1 日）
18) 環境省・経済産業省：使用済小型家電からのレアメタルの回収及び適正処理に関する研究会とりまとめ（平成 23 年 4 月），2011.
19) 資源エネルギー庁：貴金属流通統計調査

第 6 章　一般廃棄物中の有用金属の回収促進に向けたシステム設計の検討

集約型還元溶融による一般廃棄物中の有用金属の効率的回収システムを設計するとともに、その環境負荷や経済性などを試行的に評価し、システムの導入可能性を検討する

6.1　背景と目的

我が国の一般廃棄物の最終処分量に占める焼却残渣の割合は 77%（2017 年度）であり [1]、焼却残渣の再資源化の促進は、最終処分量の削減および再生利用率の増加の両面から期待されるところである。

従来の焼却残渣の資源化手法としては、灰溶融による土木資材化やセメント製造施設を用いたセメント原料化が行われており、最終処分量の削減には一定の効果が示されている。しかしながら、灰溶融による土木資材化はスラグ利用の困難さ、廃棄物からのエネルギー回収優先等のために稼働停止する施設が増えている。

一方で、焼却残渣には銅・鉛等のベースメタルに加え、金・銀等の貴金属類も含まれていることから、これら金属系有用資源の集積場所としての側面も有する。近年、民間溶融施設による焼却残渣の再資源化事業（集約型還元溶融事業）が実用化され、焼却残渣の溶融処理を行い、金属資源が濃縮された溶融メタル等を非鉄製錬施設において山元還元することにより金属資源の回収が行われている。集約型還元溶融は自治体単位での施設導入ではなく、複数の市町村の一般廃棄物焼却施設や産業廃棄物焼却施設から発生する焼却残渣を集約して処理する形態となっている。集約された焼却残渣は電気炉において還元溶融され、製造された溶融スラグは土木資材として、溶融メタルと溶融飛灰（粗酸化亜鉛）は非鉄金属製錬施設に搬入され金属資源として再資源化される（第 2 章 図 2-2）。集約型還元溶融は従来の焼却残渣の再資源化手法とは異なり、ベースメタルや貴金属類等の金属資源回収が可能な技術であり、焼却残渣の最終処分量の削減に加え、わが国における枯渇性資源の確保と循環型社会の構築の観点からの付加価値が高いと考えられる。還元溶融施設における焼却残渣の処理量は年々増加しており、2015 年度では民間 4 社で 144 千 t となっている [2]。還元溶融による焼却残渣からの金属回収システムについては、山口ら [3]や胡ら [4]は金属資源性を TMR（Total Material Requirement：関与物質総量）によって評価した解析を行っており、大きな金属回収効果が示されている。小島ら [5]は還元溶融による溶融スラグの安全品質の分析を行うとともに、物性品質が天然鉱石相当であることを示している。また、山口ら [6]は集約型還元溶融施設による焼却残渣再資源化事業についてマテリアルフロー解析により金属資源の代替性を評価するとともに、LCCO$_2$ 評価によって現状では温室効果ガス排出量は増加するものの将来的な電力構成の変更や立地場所の最適化、投入エネルギー削減等により埋立処分よりも温室効果ガスが削減される可能性があることを示している。

一方で、2013 年 4 月に使用済小型電子機器等の再資源化の促進に関する法律（以下、「小型家電リサイクル法」）が施行され、使用済小型電子機器等に含まれるアルミ、貴金属、レ

アメタルなどの再資源化が行われている。2018 年 6 月現在で、小型家電の回収・処理の取組を実施中あるいは実施に向けて調整中の市町村は、全体の約 93%（1,620 市町村、居住人口ベースでは約 97%）であり [7]、ほとんどの自治体で小型家電回収の取組が進められている。使用済小型家電の回収量は年々増加しており、2018 年度（暫定値）で約 10 万 t となっている（第 5 章 図 5-2）。しかし使用済小型電子機器等の再資源化の促進に関する基本方針[8]に定める回収量目標である年間 14 万 t には到達していない。この理由は、以下のように考えられる。

市町村における小型家電の回収方法には、①ボックス回収（スーパーなどに回収ボックスを設置）、②ステーション回収（分別区分を追加し、通常のごみと同様に収集）、③イベント回収（イベント開催時に回収）、④ピックアップ回収（不燃・粗大ごみを収集し、その中から抜き取る）、などの方法がある。ボックス回収を採用している市町村が最も多いが、1 人あたり回収量はステーション回収やピックアップ回収と較べて少ない。2017 年に総務省から出された勧告 [9]では、市町村がステーション回収およびピックアップ回収を実施していない理由として、①他の回収方法より費用負担が大きい、②収集、運搬、選別及び保管のための設備・場所等が確保できない、③ステーション回収はごみ収集区分の調整・増加が必要となり、住民への負担を招くなどがあげられている。また、人口規模が大きくなるといずれの方法も 1 人あたり回収量は減少する（第 5 章 図 5-4）。人口 1 人あたりの回収量は人口規模が大きくなるほど減少する傾向が見られ、人口 100 万人以上の市町村では特に極端に少なくなっている（第 5 章 図 5-3）。都市部において使用済小型家電の効率的な回収が行われていないことが示唆される。この回収率の低さのため、金属資源の回収量で見ると、小型家電の潜在的回収可能量に含まれる金属量 [10]（既存統計による出荷量から推計された潜在的回収台数と 7 箇所の小型家電回収モデル事業で得られた金属含有量から算定されている）に比べて、小型家電リサイクルの認定事業者によって再資源化された金属量 [7]は少ない（第 5 章 表 5-3）。一方、集約型還元溶融はわが国の中心的処理方法である焼却を介するため、一般廃棄物中の金属を効率的に回収することができる。

これらを踏まえ、本研究では集約型還元溶融による一般廃棄物中の有用金属の効率的回収システムを設計するとともに、その環境負荷や経済性などを試行的に評価し、システムの導入可能性を検討することを目的とする。

6.2　研究方法

本研究では、まず、現状の小型家電リサイクルを Case-1A とする。次に小型家電リサイクル回収率の向上を促進する Case-1B、それと同等の効果を得るための集約型還元溶融の導入を Case-2 とする。Case-1A、Case-1B はともに全国での回収であるが、Case-2 は金属資源の回収率が高いため、一部地域のみに導入する。

まず全国の小型家電排出フローを設定し、基本方針に定められた回収量目標を達成するため、回収率の向上を見込んだ Case-1B を設定する。Case-2 は、Case-1A から Case-1B とすることによる金属回収量増加分と同等の量を回収するために集約すべき地域の大きさを設定する。

その上で、これらシステムについて GHG 排出量を算定するとともに、試行的な経済性の評価を行い、システムの導入可能性や将来の金属資源回収のあり方について考察する。

6.3　検討対象とする有用金属回収システムの設定

(1) 小型家電の排出量と回収量の設定

現状における使用済小型家電の排出フロー（Case-1A）を、図 6-1 に示す。市町村の回収ルート、および認定事業者の回収ルートでの回収によってリサイクルされる使用済小型家電は 1.41g/人日である。図中、「その他ルート」とは C to C リユース（Consumer to Consumer（個人間取引）による中古品売買）、不用品回収業者、廃棄物処理業者、資源回収業者、リユース/輸出業者）に流れる小型家電であるが、本論文では、市町村に排出される使用済小型家電のうち市町村の回収ルートでリサイクルされる小型家電と最終処分等される小型家電を検討の対象とする。前述した現状の回収量 7.8 万 t、目標値 14 万 t とは認定事業者とその他適正な者の回収量の合計である。

Case-1B は、認定事業者ルート、その他ルートはそのままとし、最終処分等される使用済小型家電の一部が市町村の回収ルートに流れるものと仮定して、市町村回収量を設定した。また再資源化において、その他適正な者への処理量は変わらず、増分はすべて認定事業者にわたるとする。

Case-2 では小型家電リサイクルは現状の取り組みに加えて、集約型還元を一定の広さの地域で実施する。

また小型家電リサイクルを開始する以前の状況として、使用済小型家電が全て最終処分等されるとする Case-0 を設定する。

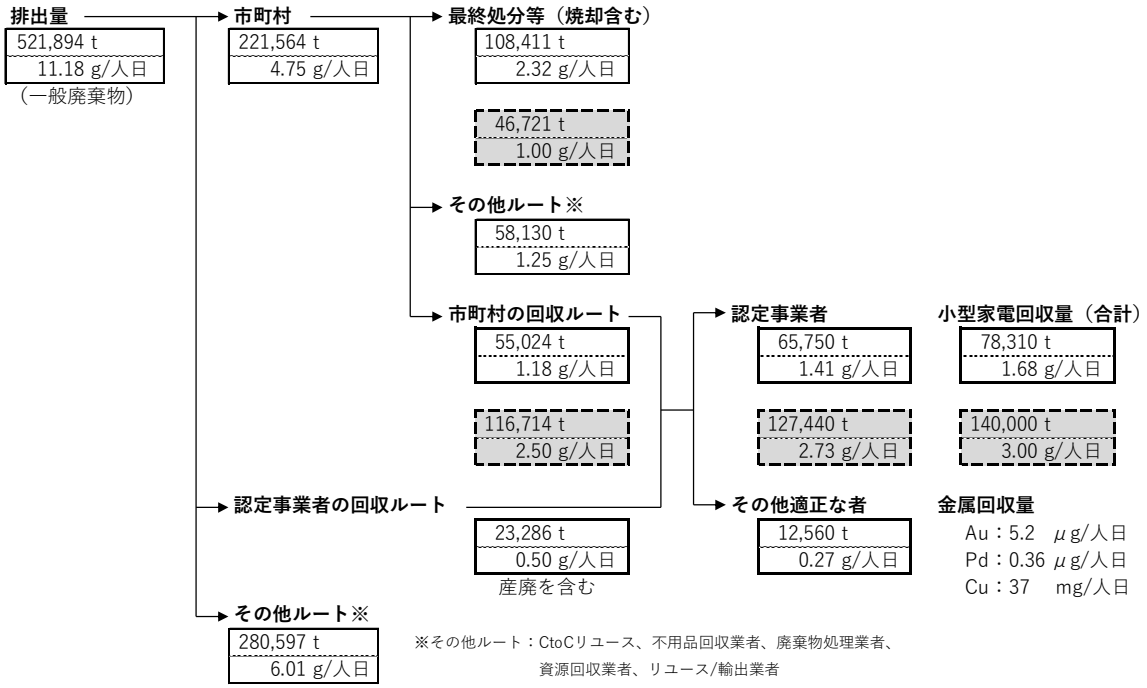


図 6-1 使用済小型家電の排出フローの設定
（2017 年度実績。網掛けは基本方針で定める回収目標からの想定）

(2) 金属資源回収量の設定

各ケースの金属資源回収量は 1 人 1 日あたりの量として表 6-1 のとおりとする。ここでは先行研究[11]を参考に、金属資源として Au、Pt、Pd、Cu を対象とした。

Case-1A における金属資源回収量は、小型家電リサイクルの認定事業者による金属資源回収量の実績値とする。Case-1B における金属資源回収量は、基本方針に定められた回収量目標を達成するように想定した。具体的には、認定事業者による小型家電リサイクル量（Case-1A で 1.41g/人日、Case-1B で 2.73g/人日）に比例すると仮定し、Case-1A の 1.94 倍とした。

表 6-1 各ケースにおける金属資源回収量の設定

	1 人 1 日あたり金属資源回収量［μg/人日］				
	Case-0	Case-1A	Case-1B	Case-2	
	対策なし	小型家電 リサイクル （現状）	小型家電 リサイクル （促進）	小型家電 リサイクル	集約型 還元溶融
Au	－	5.2	10.2	5.2	98.3
Pt	－	－	－	－	18.5
Pd	－	0.36	0.70	0.36	31.8
Cu	－	37,400	72,500	37,400	171,800

Case-2 では、小型家電リサイクルによる金属資源回収と集約型還元溶融による金属資源回収が行われ、前者は Case-1A と同じとする。集約型還元溶融における金属資源回収について、筆者らが実稼働している灰溶融施設、ガス化溶融施設（これらの灰溶融施設等を有する市町村の多くは小型家電リサイクルを実施していた）を対象に溶融メタル中の貴金属等を分析した結果 [11]を用いる。ただし、コークスベッド式ガス化溶融は産業廃棄物を併せ処理していた。また、集約型還元溶融施設は産業廃棄物の焼却残渣と混合処理が行われている。そのため、本研究では、一般廃棄物の焼却残渣のみを処理している電気式灰溶融、燃料式灰溶融、酸素式灰溶融の溶融メタル中の金属量を 1 人 1 日あたりの量に換算した中央値 [12]を用いた。なお、溶融方式ごとの溶融メタルに含まれる金属量と小型家電の製品中金属量（潜在的回収量）および小型家電リサイクルの金属回収実績を 1 人 1 日あたりの量にして比較すると第 5 章の図 5-9 のとおりであり、溶融メタルに含まれる金属資源量は小型家電リサイクルの金属回収実績よりも明らかに多く、小型家電の製品中の金属量と同等かそれ以上となっていた。そのため、表 6-1 における集約型還元溶融の金属量は、Case-1A のそれと較べて大変に大きく、第 5 章の表 5-3 に示した潜在的回収量に近い値となっている。これは、集約型還元溶融は、焼却処理された小型家電の金属資源を回収できることに加えて、宝飾品など小型家電以外の廃棄物に含まれる金属資源も回収できるためである。特に Cu は調理器具やインテリア用品など様々な生活用品に使用されているため、集約型還元溶融による回収量は小型家電リサイクルによる潜在的回収量よりも多くなる。

(3) 集約型還元溶融の導入規模の検討

小型家電リサイクルは全国から薄く広く金属資源を回収するのに対し、集約型還元溶融はある地域の金属資源を焼却残渣を介して集中的に回収する仕組みである。ここでは小型家電リサイクルによる金属資源回収を促進する場合と同等の金属資源回収効果を集約型還元溶融の導入により達成することを考える。すなわち、Case-1B と Case-1A の金属回収量の差分に相当する金属量を集約型還元溶融によって回収すると想定した。そうすると必要な処理対象人口は、Au を基準にすると 640 万人、Pd を基準にすると 140 万人、Cu を基準とすると 2600 万人と算出される（表 6-2）。本研究では資源価値の高い Au に着目し、人口 640 万人を処理対象とする集約型還元溶融システムを想定する。

表 6-2 小型家電リサイクル促進による金属回収量増分に相当する金属量を
集約型還元溶融で回収する場合の必要処理対象人口

	①	②※
	Case-1B と Case-1A の差分 （1 人 1 日あたり金属回収増分） ［μg/人日］	①に相当する金属量を集約型還元溶融で回収する場合に必要な処理対象人口 ［千人］
Au	4.9	6,400
Pt	－	－
Pd	0.34	1,400
Cu	35,100	26,100

※②＝①×全国人口／集約型還元溶融による 1 人 1 日あたり金属回収量

小型家電リサイクルでは第 5 章の図 5-3 に示したとおり人口 100 万人以上の市町村における 1 人あたり回収量は極端に低い。こうした人口規模の大きな自治体においては、焼却を介して回収する集約型還元が有利と考えられる。一方、人口 100 万人以上の市は全国で 11 市であり、人口の合計は 2000 万人を超える。そのため、人口 100 万人以上の市のうち 3～5 市程度（640 万人相当）の焼却残渣を集約型還元溶融で処理することで、小型家電リサイクルの回収目標に相当する金属資源を回収することが可能となる。

また、1 人 1 日あたり焼却残渣量 13)は 65.4g/人日であることから、人口 640 万人相当の焼却残渣量は 420t/日となる。集約型還元溶融炉の実規模は 67～260t/日であるため、2 施設程度を新設し集約すれば人口 640 万人相当の焼却残渣量を処理することが可能となる。

そのため、効率的な金属資源回収システムとして、以下のシステムを提案する。

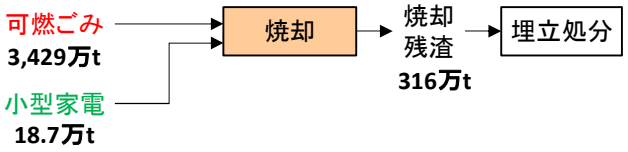
＜提案システム＞
○人口 100 万人未満の都市：これまでの小型家電リサイクルを継続、促進。
○人口 100 万人以上の都市：これまでの小型家電リサイクルの継続に加え、3～5 市（人口 640 万人相当）の焼却残渣を 2 施設程度の集約型還元溶融施設に集約し、金属資源回収を実施。

6.4　環境負荷の評価

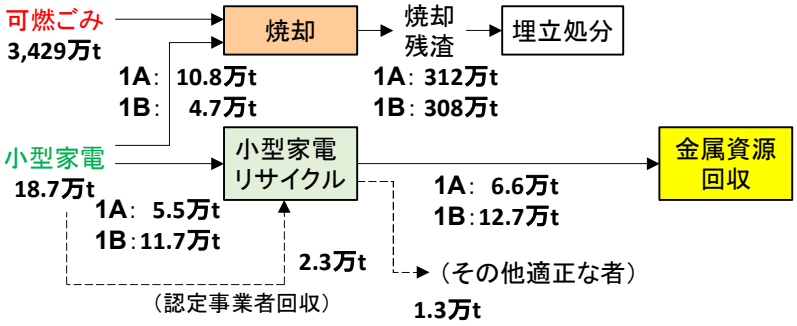
(1)　プロセスフローとマテリアルバランス

本研究の対象は小型家電リサイクルと集約型還元溶融なので、全国市町村の一般廃棄物の処理フローのうち Case によって変化するのは可燃ごみと小型家電のフローである。そこで直接埋立される廃棄物などを除くと、評価対象となるプロセスフローは図 6-2 のようになる。

■Case-0：対策なし



■Case-1A、1B：小型家電リサイクルによる金属資源回収



■Case-2：集約型還元溶融による金属資源回収

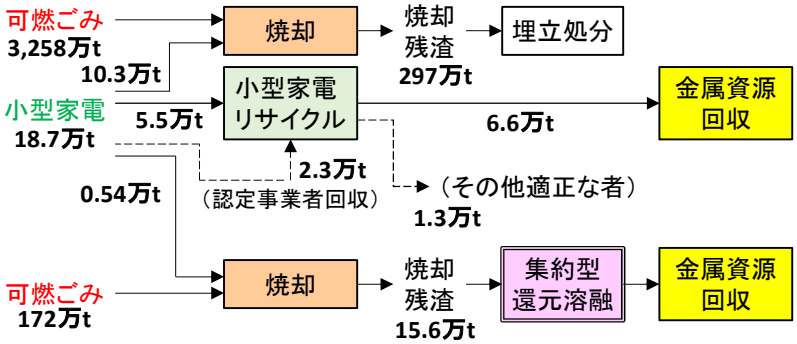


図 6-2　評価対象 Case のプロセスフロー

Case-0（対策なし）は、小型家電リサイクル実施以前のフローである。小型家電と可燃ごみを合わせて焼却処理し、焼却残渣は埋立処分とする。小型家電の一部は直接埋立等されるが、ここでは全量直接焼却と仮定する。金属資源回収は実施されない。

Case-1A（小型家電リサイクル：現状）は、小型家電の一部を回収して小型家電リサイクルルートに乗せ、有用金属を回収する。小型家電の回収強度は現状と同等（2017 年度実績）を想定する。小型家電を認定事業者に引渡し、破砕選別して非鉄製錬原料とするまでをシステム境界内とし、非鉄製錬施設における金属回収はシステム境界外とする。金属資源の回収による天然資源の採掘削減は評価の対象とする。小型家電の回収、認定事業者への引渡し量等は図 6-1 の値を採用する。認定回収事業者による小型家電の回収とその他適正な者への引渡しは評価のシステム境界外とする。

Case-1B（小型家電リサイクル：促進）は、小型家電の回収促進を想定したケースであり、Case-1A との違いは小型家電の回収強度である。回収強度は小型家電リサイクルの回収目標とする。

Case-2（集約型還元溶融）は、従来から実施している小型家電リサイクルに加えて、人口 640 万人相当の都市域を対象として集約型還元溶融システムを導入し、当該地域から発生する焼却残渣を還元溶融により溶融メタルとして金属資源回収を行う。そのため、小型家電に含まれる金属資源と、可燃ごみに含まれる金属資源が回収される。なお、集約型還元溶融を導入しない地域は、現状の Case-1A と同じとする。

それぞれの検討対象システムの処理量および資源回収量、資源採掘回避量を整理すると表 6-3 のとおりとなる。小型家電リサイクルの回収促進を行う Case-1B と集約型還元溶融を導入する Case-2 ではどちらも Au の回収量が 0.47t/年となり、現状（Case-1A）の回収量の 1.9 倍となる。金属資源を回収することにより、貴金属鉱石や Cu 精鉱等の資源採掘の回避が行われる。また、集約型還元溶融を導入する Case-2 では最終処分量が削減される。

表 6-3　検討対象システムのマテリアルバランス

		単位	Case-0	Case-1A	Case-1B	Case-2	
			対策なし	小型家電リサイクル（現状）	小型家電リサイクル（促進）	小型家電リサイクル	集約型還元溶融
排出	小型家電排出量	千 t/年	187	187	187	177	9.4
焼却処理	可燃ごみの焼却処理量　※1	千 t/年	34,293	34,293	34,293	32,575	1,718
	可燃ごみの焼却残渣量　※1	千 t/年	3,054	3,054	3,054	2,901	153
	小型家電の焼却処理量　※2	千 t/年	187	108	47	103	5
	小型家電の焼却残渣量　※3	千 t/年	120	70	30	66	3
資源回収	小型家電回収量（市町村ルート）	千 t/年	－	55	117	55	－
	小型家電再資源化量（認定事業者）	千 t/年	－	66	127	66	－
	焼却残渣の再資源化量	千 t/年	－	－	－	－	156
	金属資源回収量（Au）	t/年	－	0.25	0.47	0.25	0.23
	金属資源回収量（Pt）	t/年	－	－	－	－	0.043
	金属資源回収量（Pd）	t/年	－	0.017	0.033	0.017	0.074
	金属資源回収量（Cu）	t/年	－	1,747	3,386	1,747	402
	溶融スラグ生産量　※4	千 t/年	－	－	－	－	69
最終処分	最終処分量	千 t/年	3,175	3,124	3,084	2,968	0
資源採掘回避	Au 鉱石採掘回避　※5	千 t/年	－	223	432	223	209
	Pt 鉱石採掘回避　※5	千 t/年	－	－	－	－	31
	Pd 鉱石採掘回避　※5	千 t/年	－	15	30	15	68
	Cu 精鉱採掘回避　※6	千 t/年	－	5	11	5	1
	砕石採掘回避　※7	千 t/年	－	－	－	－	69

※1）1 人 1 日あたりの焼却処理量および焼却残渣量の全国平均値[13]をもとに算定。
※2）全て直接焼却と仮定。
※3）認定事業者の再資源化実績[7]において、処理した小型家電重量に対する「製錬業者に引き渡した金属等の重量」の割合（64.4%）を不燃物量と仮定。
※4）焼却残渣 1t あたり 443kg と設定[6]。
※5）鉱石品位を Au：0.00011%、Pt：0.00014%、Pd：0.00011%と設定[14]。
※6）銅精鉱の品位を 32%Cu と設定[15]。
※7）溶融スラグ 1t は砕石 1t を代替すると設定[6]。

(2) 用役使用量および GHG 排出係数

① 小型家電リサイクルのプロセスデータ

小型家電リサイクルの認定事業者（54 事業者）の処理フローを各社 HP 等で確認したところ、処理フローから設備構成が確認できたのは約 10 事業者であった。ただし、全ての設備を公開しているわけではなく一部不明な事業者もある。事業者によって選別の強度や設備構成に違いはあると思われるが、おおまかに見ると設備構成は、破砕機、磁選機、渦電流選別機、手選別、高度選別（比重選別、光学式選別等）の組合せとなる。また、認定事業者のうち取扱量の多い 1 者にヒアリングを行ったところ「従前からの金属スクラップや雑品スクラップの破砕選別ラインに小型家電を投入しており、リチウムイオン電池の発火防止対策（絶縁処理）を追加した他は、設備の追加はない。他の事業者も既存のラインを活用することが多いだろう」とのことであった。そのため、小型家電リサイクルの設備構成は、破砕機、磁選機、渦電流選別機、手選別と設定した。なお、高度選別が導入されている場合もあるが、その内容は事業者によって様々であることから設備構成からは省略した。そのため、小型家電リサイクルの GHG 排出量は少なめに評価されることとなる。

これらを踏まえると、小型家電リサイクルの設備構成は、不燃ごみ処理施設の設備構成とほぼ同様と考えられることから、小型家電リサイクルのプロセスデータは H-IWM（北大ー総合廃棄物処理評価プログラム）[16]における不燃ごみ処理施設のプロセスデータを採用した。具体的には、H-IWM において不燃ごみ処理施設として、破砕＋磁選別＋ふるい選別＋アルミ選別を想定し、表 6-4 のとおり設定した。なお、水道水使用量はわずかであることから無視した。電力と重油の GHG 排出係数は排出量算定・報告・公表制度における排出係数[17]を採用した。

表 6-4 小型家電リサイクルのプロセスデータの設定

項目	単位	値
電力使用量	kWh/t	22.1
重油使用量	L/t	1.6

② その他のプロセスの GHG 排出係数

その他のプロセスにおける GHG 排出係数は、文献や既存研究をもとに、表 6-5 のとおり設定した。ここで、廃棄物の焼却（発電考慮）はプラスチックの焼却による GHG 排出と廃棄物発電による GHG 排出削減が考慮されている[18]。また、小型家電リサイクルの認定事業者が引き取った小型家電の再資源化実績[7]から算定される小型家電のプラスチック組成割合は 25%程度であり、一般廃棄物のプラスチック組成割合と大差ないと考え、可燃ごみの焼却と小型家電の焼却は同じ GHG 排出係数を採用した。

また、Case-1B において小型家電回収促進によって小型家電の収集運搬量は増加するが、収集運搬距離の設定が困難であることに加え、筆者らが実施した集約型還元溶融システム

の $LCCO_2$ 評価[6]では収集運搬に伴う GHG 排出量がシステム全体に与える影響は軽微であったことから、ここでは対象外とした。同様に、Csase-2 における焼却灰の輸送についても対象外とした。

表 6-5 その他プロセスのの GHG 排出係数の設定

プロセス	活動量指標	GHG 排出係数 ［$t\text{-}CO_2eq/t$］	出典
廃棄物の焼却 （発電考慮）	焼却処理量	0.267	文献 13,18)
埋立処分	埋立処分量	0.0427	文献 6)
小型家電リサイクル （破砕選別）	小型家電処理量	0.0161	文献 16,17)
集約型還元溶融	焼却残渣処理量	0.636	文献 6)
貴金属鉱石の生産	鉱石量	0.136	文献 6)
銅精鉱の選鉱	精鉱量	0.683	文献 6)
砕石の生産	砕石生産量	0.00744	文献 6)

(3) GHG 排出量の算定結果と評価

GHG 排出量の算定結果は表 6-6 に示すとおりであり、現状の Case-1A と比較すると Case-1B の GHG 排出量は減少し、Case-2 は増加する結果となった。

小型家電リサイクルを促進する Case-1B は、現状の Case-1A と比較して、小型家電リサイクル（破砕選別）の GHG 排出量は増加するものの、小型家電の焼却回避と資源採掘回避による GHG 削減効果が大きくなる。

集約型還元溶融を導入する Case-2 では、埋立回避による GHG 削減効果はあるものの、集約型還元溶融の GHG 排出量が大きくなる。Case-2 による GHG 排出量増分は、日本の廃棄物部門の GHG 排出量[19]の 0.2%程度となる。還元溶融は電力多消費型のシステムであり、Case-2 の GHG 排出量が大きくなるのは現状ではやむを得ないものの、既往研究[6]で示されているとおり、将来的な電力構成の変更や投入エネルギー削減等に向けた取組が進めば GHG 排出量は削減される可能性が考えられる。

表 6-6　検討対象システムの GHG 排出量算定結果

	温室効果ガス排出量［千 t-CO_2/年］				
	Case-0	Case-1A	Case-1B	Case-2	
	対策なし	小型家電リサイクル（現状）	小型家電リサイクル（促進）	小型家電リサイクル	集約型還元溶融
焼却（可燃物＋小型家電）	9,203	9,182	9,165	8,722	460
小型家電リサイクル（破砕選別）	－	1	2	1	－
集約型還元溶融	－	－	－	－	100
埋立処分	136	134	132	127	－
資源採掘回避	－	-37	-71	-37	-43
GHG 排出量合計	9,338	9,279	9,228	9,329	
現状（Case-1A）からの増分	**59**	**0**	**-52**	**49**	

6.5　経済性の試行的評価

(1) 処理単価の設定

廃棄物および小型家電の輸送や処理に係る単価は文献等をもとに表 6-7 のとおり設定した。

小型家電の回収方式は、ボックス回収では回収量の増加が見込まれないこと、ステーション回収では分別区分の変更や住民への周知が必要となることから、効率的な手法としてここではピックアップ回収を想定する。使用済小型家電 1t の回収に要する作業員数は、ガイドライン [25]に示される A 施設における回収モデル事業の実績値をもとに、実事業では 5 倍程度の効率化が図れると仮定した。作業員人件費は普通作業員の労務単価を採用し、事業主が支払う必要経費も考慮した [26]。なお、Case-1A の現状の小型家電リサイクルでは、ボックス回収やステーション回収も含まれておりピックアップ回収の単価を適用することは適当ではないが、ここでは検討対象システム間の費用の差を確認することが目的であるため、Case-1A や Case-2 の現状の小型家電回収にも便宜的にこの単価を適用することとした。

小型家電リサイクルの「引渡し」は認定事業者への小型家電の売却費用である。集約型還元溶融への処理委託費用は施設の建設費や運転管理費、回収された金属の販売益などを全て考慮して処理事業者が定める費用であり、焼却残渣の品質や施設、地域によって異なるものの、ここでは便宜的に文献値を採用した。

小型家電リサイクルの中間処理施設（認定事業者）は全国に 54 者あるのに対し、集約型還元溶融施設の立地は現状では 5 市（名古屋市、鹿嶋市、小山市、いわき市、八戸市）に限られている。そのため、認定事業者への小型家電の運搬は 4t 平ダンプ（片道 25km、積載率 50%）、還元溶融施設への焼却残渣の運搬は 10t コンテナ車（片道 75km、積載率 95%）と仮定した。

還元溶融施設への委託処理費は、焼却灰の性状や量などによって変動すると考えられる

が、文献[24]を参考に暫定的に設定した。

(2) 費用の試算結果

費用の試算結果は表 6-7 のとおりである。現状の Case-1A と比較すると Case-1B も Case-2 も費用増となり、Case-1B と Case-2 を比較すると集約型還元溶融を導入する Case-2 の優位性が示された。すなわち、集約型還元溶融を導入する地域だけで見ると費用は増加するものの、全国ベースで小型家電リサイクルを促進する場合よりも小さい費用で同等の金属資源回収効果が得られると解釈できる。

なお、Case-1B では小型家電回収促進に係る費用が増加し、Case-2 では集約型還元溶融に係る費用が増加する一方で最終処分費用は削減され、これらのトレードオフで費用は決定される。特に、今回の試算では Case-1B の使用済小型家電のピックアップ回収の費用が大きくなっており、いかに効率的に小型家電を回収するかが鍵となる。仮にステーション回収を採用したとすると、回収単価は 63,250 円/t（人件費＋燃料費）[20]であり、この場合であれば Case-1B は Case-2 よりも費用が下がる。また、本試算では Case-0 が最も費用が少なくなっているが、仮に回収単価を 56,000 円/t とするならば、Case-1A、Case-1B、Case-2 は Case-0 よりも費用は低減される。本試算は簡易なものであり、市町村ごとに個別に小型家電リサイクルの費用便益を評価する場合は費用便益分析ツール [27]を活用するなど詳細に分析される方が良い。

また、廃棄物から金属資源回収を行うことは、金属資源の乏しい我が国においては持続的な金属資源確保の観点から有用性が認められるところであり、地球規模で考えても資源採掘回避などの環境負荷削減は見込まれる。小型家電リサイクルの促進や集約型還元溶融の導入によって費用が増加したとしても、必要な社会コストとして容認すべきとの考えも成り立ちうる。

表 6-7　検討対象システムの費用試算結果

		処理費用［百万円/年］					処理単価［円/t］	出典
		Case-0	Case-1A	Case-1B	Case-2			
		対策なし	小型家電リサイクル（現状）	小型家電リサイクル（促進）	小型家電リサイクル	集約型還元溶融		
焼却		793,034	791,233	789,814	751,598	39,634	23,000	文献 20)
最終処分		149,203	146,832	144,965	139,477	－	47,000	文献 20)
小型家電リサイクル	回収	－	6,713	14,239	6,713	－	122,000	
	運搬	－	237	502	237	－	4,300	文献 21)
	引渡し	－	-275	-584	-275	－	-5,000	文献 22,23)
集約型還元溶融	運搬	－	－	－	－	939	6,000	文献 21)
	処理委託	－	－	－	－	7,512	48,000	文献 24)
費用合計		942,237	944,740	948,937	945,835			
Case-1A からの増分		**-2,503**	**0**	**4,197**	**1,095**			

6.6　まとめ

一般廃棄物に含まれる金属資源の効率的な回収方法の 1 つとして集約型還元溶融に着目し、小型家電回収効率の低い人口 100 万人以上の都市の一部（3～5 市：人口 640 万人相当）に集約型還元溶融を導入することで、小型家電リサイクルの目標と同等の金属資源回収を達成できることが示された。

また、小型家電リサイクルを促進するシステムと比較すると、集約型還元溶融システムは GHG 排出量が増加するものの、全体としての費用は低減する可能性が示された。

小型家電リサイクル法が施行され、小型家電からの金属資源の回収が行われているが、小型家電リサイクルの回収促進を行うことは容易ではなく、効率的な回収や費用負担、市民への負担、選別・保管場所の確保、分別区分の変更やその周知など様々な課題が指摘されている。これら課題を考慮すると、小型家電リサイクルを促進することと同等の金属資源回収効果が得られる集約型還元溶融システムは、GHG 排出量は増加するものの金属資源回収面からは効率の良いシステムと言える。

【参考文献】

1) 環境省：日本の廃棄物処理 平成 29 年度版（平成 31 年 3 月），2019.
2) 杉山晋，高橋英和，大島俊治，小島久典：民間集約型の還元溶融炉を用いた焼却灰の再資源化について，都市清掃，Vol.70，No.335，2017.
3) 山口直久，河井紘輔，大迫政浩：集約型還元溶融施設による焼却灰の再資源化事業に係る環境評価，都市清掃，Vol.70，No.337，pp.206-210，2017.
4) 胡浩，権田樹，小野田弘士：還元溶融プロセスによる焼却灰からの金属回収システムの評価，第 29 回廃棄物資源循環学会研究発表会，pp.365-366，2019.
5) 小島久典，北辻政文，小野田弘士，杉山晋，石飛剛，大河内宝：還元溶融による焼却灰等の再資源化について，第 41 回全国都市清掃研究・事例発表会，pp.148-150，2019.
6) 山口直久，河井紘輔，大迫政浩，松藤敏彦：集約型還元溶融施設による焼却残渣再資源化事業のマテリアルフロー解析による資源代替性及び $LCCO_2$ 評価，廃棄物資源循環学会論文誌，Vol.29，pp.191-205，2018.
7) 産業構造審議会 産業技術環境分科会 廃棄物・リサイクル小委員会 小型家電リサイクルワーキンググループ（第 4 回）中央環境審議会 循環型社会部会 小型電気電子機器リサイクル制度及び使用済製品中の有用金属の再生利用に関する小委員会（第 17 回）資料 2 小型家電リサイクル制度の施行状況について，2019.
8) 使用済小型電子機器等の再資源化の促進に関する基本方針（平成 25 年 3 月経済産業省・環境省告示第 1 号），2013.
9) 総務省：小型家電リサイクルの実施状況に関する実態調査結果に基づく勧告（平成 29 年 11 月），2017.
10) 環境省・経済産業省：使用済小型家電からのレアメタルの回収及び適正処理に関する研究会とりまとめ（平成 23 年 4 月），2011.
11) 山口直久，松藤敏彦，東條安匡，仲嶺彰人：一般廃棄物ガス化溶融および灰溶融施設で生成される溶融メタルの金属資源性評価，土木学会論文集 G（環境），第 76 巻，第 1 号，pp.1-8，2020.
12) 山口直久，仲嶺彰人，松藤敏彦：溶融処理による溶融メタル中の金属量と小型家電の製品中金属量等の比較，第 27 回衛生工学シンポジウム要旨集，1-12，2019.
13) 環境省：一般廃棄物処理実態調査結果（平成 27 年度）
14) (独)物質・材料研究機構元素戦略クラスター：概説資源端重量(Total Material Requirement; TMR)，NIMS-EMC 材料環境情報データ No.18，2009.
15) (一社)産業環境管理協会：LCI データベース IDEA ver.1.1.0
16) 松藤敏彦：都市ごみ処理システムの分析・計画・評価－マテリアルフロー・LCA 計画プログラムー，技報堂出版，2005.
17) 環境省：温室効果ガス排出量算定・報告・公表制度における算定方法・排出係数一覧（2019 年度排出量），2020

18) 金相烈，加々見祐佳：一般廃棄物の焼却における温室効果ガス排出量の評価，pp.101-102，第 29 回廃棄物資源循環学会研究発表会，2018.
19) 国立環境研究所地球環境研究センター 温室効果ガスインベントリオフィス：日本国温室効果ガスインベントリ報告書 2019 年
20) 中央環境審議会廃棄物・リサイクル部会小型電気電子機器リサイクル制度及び使用済製品中の有用金属の再生利用にする小委員会（第 3 回）資料 6 リサイクル制度の必要性について（平成 23 年 6 月 27 日），2011.
21) (一財)建設物価調査会：建設物価，No.1207（平成 30 年 2 月 1 日），2018.
22) 広島県：小型家電リサイクル推進事業 実施結果報告書（概要版）（平成 25 年 3 月），2013.
23) 鴻巣行田北本環境資源組合 第 5 回新施設建設等検討委員会：参考資料 1 経済性の比較（平成 27 年 2 月 17 日），2015.
24) (財)旧クリーン・ジャパン・センター（現(一社)産業環境管理協会）：ごみ焼却灰リサイクルの温室効果ガス排出削減・ライフサイクル管理に関する調査研究－民間施設を活用したごみ焼却灰のリサイクルに関する調査研究(その 2)報告書(平成 22 年 3 月)，2010.
25) 環境省，経済産業省：使用済小型電子機器等の回収に係るガイドライン（Ver.1.2）平成 30 年 6 月，2018.
26) 国土交通省 土地・建設産業局 建設市場整備課：報道発表資料「令和 2 年 3 月から適用する公共工事設計労務単価について」（令和 2 年 2 月 14 日），2020.
27) 環境省：市町村における小型家電リサイクルの費用便益分析ツール（ver1.0），https://www.env.go.jp/recycle/recycling/raremetals/bunseki.xlsx（閲覧日：2020 年 3 月 15 日）

第 7 章　おわりに

わが国の一般廃棄物の最終処分量は一貫して減少傾向にあるものの、2009 年度以降はその減少傾向は鈍化している。最終処分量に占める焼却残渣の割合は依然と多く、最終処分量の削減および再生利用率の増加のためには焼却残渣の再資源化が期待される。一方で、焼却残渣には銅・鉛等のベースメタルに加え、金・銀等の貴金属類も含まれていることから、これら金属系有用資源の集積場所としての側面も有する。従来の焼却残渣の再資源化手法である灰溶融やセメント原料化では、一部を除いてこれら金属系有用金属については回収されることはない。

このような中、近年、民間溶融施設による焼却残渣の再資源化事業（集約型還元溶融事業）が実用化され、複数自治体の焼却残渣を集約して溶融処理を行うとともに金属資源が濃縮された溶融メタルや溶融飛灰を非鉄製錬施設において山元還元することにより金属資源の回収が行われている。集約型還元溶融は電気炉を用いた製鋼技術の応用であり、強還元雰囲気で重金属類をスラグから還元分離する。集約型還元溶融は従来の焼却残渣の再資源化手法とは異なり、ベースメタルや貴金属類等の金属資源回収が可能な技術であり、焼却残渣の最終処分量の削減に加え、わが国における枯渇性資源の確保と循環型社会の構築の観点からの付加価値が高いと考えられる。

こうした潮流を背景に、焼却残渣の再資源化技術として集約型還元溶融に着目し、集約型還元溶融の金属資源回収ポテンシャルを評価するとともに、環境負荷の観点から集約型還元溶融の有用性を示し、さらに、集約型還元溶融を活用した地域特性に応じた新たな焼却残渣資源化システムの提案を行うことを目的として本研究を実施した。

本研究では、まず第 2 章で、集約型還元溶融事業と、焼却残渣の埋立処分および従来の焼却残渣再資源化手法（セメント原料代替、エージング）と比較したマテリアルフロー解析により、焼却残渣の資源代替性を明らかにするとともに、$LCCO_2$ 手法による環境負荷の評価を行った。その結果、集約型還元溶融事業における再生資源（溶融メタル、粗酸化亜鉛）については、銅・鉛・亜鉛の品位は金属精鉱の 1/10～1/3 程度、金・銀の品位は、金は金属鉱石の 40 倍、銀は 53 倍であり、焼却残渣 1ton は銅・鉛・亜鉛精鉱を数 kg～十数 kg 程度、金・銀鉱石を 1ton 程度それぞれ代替すると推計された。全国で最終処分される焼却残渣が有する金属資源の潜在的回収量は、国内の金属生産量の 0.6～5%と推定され、この金属資源価値は約 350 億円に相当すると試算された。また、集約型還元溶融施設は、現状の設定における $LCCO_2$ 算定では GHG 排出量が増加するものの、将来的に電力の GHG 排出係数の低減や輸送距離の短い立地場所を想定することにより、埋立処分よりも GHG 排出量が削減される可能性があることが示された。

次に第 3 章において、一般廃棄物の溶融処理で生成される溶融メタルに着目し、炉形式や溶融条件等による溶融メタルの金属濃度の相違やその要因を考察するとともに、溶融メタルの金属資源性を評価した。溶融メタル中の金属濃度は既存研究における濃度と同程度であり、鉱石の金属品位と比較して Au、Pt、Pd は 10 倍以上であった。また、Au と Pt、

Pd、Cu の濃度には正の相関が見られ、これらの金属が溶融処理を経て同じような割合で溶融メタルへ移行すると考えられた。搬出物全体中の溶融メタル割合は、Si、Ca、Al 等の主要元素の溶融メタルへの移行割合によって変化するが、コークスベッド式ガス化溶融はこの割合が高いため、溶融メタル中 Au、Pt、Pd 濃度が低くなる。なお、搬出物全体中の金属量は処理される廃棄物の性状を反映していると考えられたが、小型家電リサイクルの実施状況との関連は見られなかった。溶融メタルの TMR（関与物質総量：Total Material Requirement）からは、燃料式灰溶融と電気式灰溶融が金属資源としての品位は高いが、金属資源の総量としては、溶融メタルは炉形式によらずほぼ同等の金属回収ポテンシャルを有すると考えられた。

第 4 章では、破砕残渣の有する金属資源ポテンシャルの評価を行った。溶融施設には不燃・粗大ごみの破砕残渣も投入されるため、一般廃棄物焼却施設から生じる焼却残渣及び不燃粗大ごみ破砕施設から発生する破砕残渣を対象として金属資源含有量の実測調査を行った。その結果、希少金属濃度はおおよその傾向として、基板≧溶融メタル＞焼却灰＞小粒径破砕残渣＞スラグとなっていた。一方、破砕残渣に占める基板の組成割合は小さいことから、1 人 1 日あたりの金属量で比較すると、破砕残渣の希少金属量は搬出物と比べて桁違いに小さくなった。焼却処理される廃棄物中の金属供給源として不燃ごみ・粗大ごみの破砕残渣を想定したが、その傾向を明確にすることはできなかった。

第 5 章では、一般廃棄物に含まれる金属資源のメインソースは小型家電と考え、溶融処理による金属資源回収と比較することで、小型家電リサイクルによる金属資源回収の効率を評価した。具体的には、溶融メタルへの移行金属量と小型家電の製品中金属量（潜在的回収量）を 1 人 1 日あたりの量に換算して比較したところ、Au、Pd の溶融メタル移行金属量は小型家電の製品中金属量と同等もしくはそれ以上であった。そのため、一般廃棄物における Au、Pt の主要供給源は小型家電である可能性が考えられた。また、Pt と Cu の溶融メタル移行金属量は小型家電リサイクルによる潜在的回収量より多く、小型家電以外にも金属供給源が存在すると考えられた。一方、小型家電リサイクルによる金属回収実績は、Au、Pd では小型家電の製品中金属量の数%程度にすぎなかった。なお、一般廃棄物中の金属資源の由来を金属資源の国内需要から整理を試みたところ、金属資源の国内需要全体に対する小型家電の製品中金属量は、Au で約 1 割、Pd で約 3%、Pt と Cu はごくわずかであった。

最後に、第 6 章において、一般廃棄物に含まれる金属資源を効率的に回収するための、集約型還元溶融を活用した資源循環システムを検討、提案した。具体的には、一般廃棄物に含まれる金属資源の効率的な回収方法の 1 つとして集約型還元溶融に着目し、小型家電回収効率の低い人口 100 万人以上の都市の一部（3～5 市：人口 640 万人相当）に集約型還元溶融を導入することで、小型家電リサイクルの目標と同等の金属資源回収を達成できることが示された。また、小型家電リサイクルを促進するシステムと比較すると、集約型還元溶融システムは GHG 排出量が増加するものの、全体としての費用は低減する可能性が示された。

小型家電リサイクル法が施行され、小型家電からの金属資源の回収が行われているが、小型家電リサイクルの回収促進を行うことは容易ではなく、効率的な回収や費用負担、市民への負担、選別・保管場所の確保、分別区分の変更やその周知など様々な課題が指摘されている。これら課題を考慮すると、小型家電リサイクルを促進することと同等の金属資源回収効果が得られる集約型還元溶融システムは、GHG 排出量は増加するものの金属資源回収面からは効率の良いシステムと言える。

近未来の我が国の姿を描くと、人口減少による人手不足、再生可能エネルギーの普及、最終処分場の確保難などが予想される。大都市の一部に集約型還元溶融システムを導入することにより、収集や選別に多くの人手を要する小型家電リサイクルを進めるのと同等の金属資源回収効果が得られる。我が国では焼却処理が普及しているため、集約型還元溶融の導入は難しくない。金属資源の乏しい我が国においては持続的な金属資源確保、さらには、地球規模での資源採掘回避などの環境負荷削減への貢献が見込まれる。加えて、再生可能エネルギーが普及して還元溶融施設の電源に利用可能となれば、集約型還元溶融からの温室効果ガス削減の可能性がある。また、集約型還元溶融は最終処分量を大幅に削減できるため、特に最終処分場の不足する都市部での導入は意義がある。

集約型還元溶融は廃棄物に含まれる金属資源の効率的な回収方法の 1 つであり、都市規模や産業構造など市町村の特性に応じてそれぞれ最適なリサイクルシステムを採用し、これらを組み合わせることで、全体として効率的な資源循環システムが構築されることを願う。