

>>>> 特別寄稿 I

欧州における都市ごみ焼却残渣の発生と 金属回収・残渣有効利用の現状

国立研究開発法人国立環境研究所資源循環・廃棄物研究センター
循環利用・適正処理処分技術研究室長 **肴倉 宏史**

1. はじめに

循環型社会のさらなる推進に向けて、日本では熔融処理やセメント原材料化を中心に、都市ごみ焼却残渣の循環利用が図られている。一方、欧州の一部の国々では、焼却残渣から金属等を選別回収した後に、最終処分、もしくは土木資材として有効利用が図られており、特に金属等の選別処理技術の開発がめざましい。そこで本稿では、欧州における都市ごみ焼却処理ならびに焼却残渣の資源化の現状について概観し、さらに、2015年9月と2016年10月の2度にわたって、欧州4カ国（ドイツ、スイス、オランダ、デンマーク）の都市ごみ焼却残渣資源化施設を対象に行った、現地調査の内容を紹介する。

2. 都市ごみ焼却処理の現状

ETC/WMGEの調査¹⁾によれば、EUでは2013年、年間242百万トンの都市ごみ（Mixed municipal waste）が発生した。これに対して、焼却施設の容量は2014年時点で年間81百万トンに達しており、2010年から2014年にかけては6%の伸び率であった。焼却施設容量の大きい国はフランス、ドイツ、オランダであり、この3カ国で50%を越え、イタリア、スウェーデン、英国を含めると74%に達する。他の国々は埋立に頼っており、焼却施設建設中止も

多いようである。人口あたりの焼却容量ではスウェーデンとデンマークが年間600kg/人に近い値で最も多く、オランダ、スイス、オーストリア、フィンランドが続く。幾つかの都市では、焼却は地域暖房にも重要な役割をになっている。都市ごみの輸出入については、2013年は輸出1.4百万トン、輸入2.3百万トン（2013年）で、2008年に対して5～6倍に増加しているが、全発生量に対しては未だ非常に小さい。

次に、欧州廃棄物エネルギー回収施設連合

表1 欧州の焼却施設数と処理量²⁾

	施設数	処理量	
		百万 t/y	千 t/年/施設
フランス	126	14.7	117
ドイツ	121	26	215
イタリア	40	6.11	153
英国	37	8.48	229
スウェーデン	33	5.62	170
スイス	30	3.89	130
デンマーク	26	3.58	138
ベルギー	18	3.4	189
ノルウェー	17	1.63	96
オランダ	12	7.57	631
スペイン	12	2.9	242
スペイン	12	2.9	242
オーストリア	11	2.5	227
フィンランド	9	1.28	142
ポルトガル	4	1.14	285
チェコ	3	0.66	220
スロバキア	2	0.19	95
エストニア	1	0.22	220
ルクセンブルグ	1	0.15	150
アイルランド	1	0.23	230
ポーランド	1	0.04	40
ハンガリー	1	0.38	380
リトアニア	1	0.18	180

(CEWEP) のとりまとめによる 2015 年における都市ごみ焼却施設数と焼却処理量²⁾を示す(表 1)。施設数の合計値は 519 で、フランスとドイツが 120 を越え、3 位のイタリア (40 施設) を大きく引き離している。1 施設当たりの年間処理量は欧州全体の平均値で 181 千トン (加重平均) であり、年間 300 日稼働と仮定すると、602 トン/日であった。国別ではオランダが 631 千トン/年/施設で突出している。CEWEP の焼却主灰ファクトシート³⁾によれば、焼却処理によって発生した焼却主灰の量は、2014 年、欧州全体で 18 百万トンに達している。

3. 焼却残渣資源化の現状

欧州では焼却残渣からの金属回収と回収後の灰分 (“Inert fraction” や “Mineral” (ミネラル) と呼ばれている) の土木資材利用が進められている。

金属回収については、焼却主灰を対象として、粗大な鉄やアルミを選別するだけでなく、10mm 以下の分画に含まれる金・銀等の貴金属をエアテーブルや重液等を用いて選別回収する施設が、近年、急速に普及している。その技術は、例えば国際廃棄物連合 (International Solid Waste Association, ISWA) のレポート⁴⁾や、Runge によるレポート⁵⁾が大いに参考になる。適用されている選別技術は、磁力選別、粒度選別、渦電流選別、X 線等のセンサー選別、エアテーブル選別等である。

ISWA⁴⁾によれば、焼却主灰中にメタルの状態に含まれる鉄や非鉄金属はそれぞれ 7-15%、1-2% と示されており、非鉄金属には銅や亜鉛の他、金や銀が焼却主灰 1kg 当たりそれぞれ 1.9mg、19.9mg がそれぞれ含まれる。その資源的価値 (価格) を概算すると、金や銀などの貴金属の回収益は鉄やアルミを大きく越えるようである。このことが、焼却施設が民間によって運営されている欧州において、焼却主灰から

の貴金属回収施設が急速に普及している理由であると容易に推察される。なお、鉄や非鉄金属の含有量の数値は調査によって様々であることは留意しておく必要がある。

ミネラルの有効利用に関する統計データは残念ながら得られていないが、先のファクトシート³⁾や筆者らのヒアリングによれば、今回調査対象としたドイツ、スイス、デンマーク、オランダのミネラルの取扱い状況は表 2 のようになる。この他、ベルギー、フランス、ポルトガル、スペイン、英国においてもミネラルの道路材料利用が進められている。また、イタリアではコンクリート骨材利用を行っている施設がある³⁾。

表 2 欧州各国のミネラル取扱い状況

国名	ミネラルの取扱い
ドイツ	資材リサイクルに関する統一的制度を準備中だが、現在は地方政府ごとに運用。天然資材が豊富な内陸部では規制は厳しく、資材が比較的乏しい北の平野部では利用に積極的する傾向。 焼却主灰の有効利用率は公式には 90% (路盤材が 30%程度、最終処分場内の敷土材や覆土材に 45%程度)。
スイス	焼却主灰の土木資材利用は法律上許可されておらず、埋立処分しなければならない。
デンマーク	道路材料として長年利用され、自動車専用道路の路盤材として特に利用が進んでいる。99%がリサイクルされている。
オランダ	全ての都市ごみ焼却事業者と政府との間で “Green Deal Bottom Ash” を契約 (内容: >6mm 非鉄の 75%以上を回収する。2020 年以降、粒状物を全て利用できるようにクリーンにする)。自動車専用道路のジャンクションや防音壁にも利用。

4. 現地施設調査

表 3 に示す 7 施設について、現地見学・ヒアリングならびに資料収集による調査を行った。このうち、特にスイスの D 施設は 2015 年の実

証施設を見学後、2016年には実機が稼働する情報を得たことから2016年10月に再訪した。ヒアリングでは資源化施設の担当者ならびに各国の専門家からも情報収集を行った。

表3 調査対象施設の概要

国名	施設名	操業年	主灰処理量
ドイツ	MDSU	2012	1300 t/日
	STORK	不明	60 万 t/年
	TARTEK	2013	12 万 t/年
スイス	ZAV	2015	10 万 t/年
	DHZ	不明	12 万 t/年
デンマーク	AFATEK	不明	24 万 t/年
オランダ	AEB	2010	30 万 t/年

4.1 ドイツ

ドイツ国内の3施設の訪問では、ドイツ連邦材料試験研究所（BAM）のUte Kalbe氏、Olaf Holm氏の両氏に同行をいただいた。彼らからの情報によれば、ドイツには都市ごみ焼却施設が約70カ所、焼却主灰の資源化施設は、規模は様々であるが、約40カ所存在することである。ドイツは焼却主灰の土木資材利用に関する統一的な基準を作成中であり、汚染土壌や二次資材も含めて適用できる統一的制度を準備中とのことである。環境安全性に関する試験方法はバッチ試験（DIN 19529）またはカラム試験（DIN 19528）で決定しているが、材料や用途ごとの規制値、特に、硫酸イオンの規制値について調整が続いている。このため、現在は地方ごとに運用方法を決めており、全体としては、天然の建設資材が豊富な内陸部では主灰利用に対する規制は厳しく最終処分し、北の平野部では積極的に利用する傾向にある。焼却主灰の利用率は公式には90%で、路盤材が30%程度、最終処分場内のドレーン材や覆土材に45%程度利用されている。しかし、市場ベースで動向が変化するので実態はこれと異なる可能性もあるとのことであった。

4.1.1 MDSU

ドイツ北東部のベルリン近郊に位置し、2012年から稼働を開始した。焼却主灰の処理能力は1,600t/dで、調査時の処理量は1,300t/dであった。焼却主灰はドイツ国内だけでなく、オランダやルクセンブルグからも受け入れている。受入施設は屋内のヤードにいったん貯留され、受入からなるべく速やかに、遅くとも10日以内に資源化処理プロセスに投入している。これは、受け入れ時の主灰は12-15%程度の含水率で、長期間放置すると灰分と金属との固結化が進むためである。施設の特徴として、50mm以下の分画を水槽に投入して金属と灰分（“ミネラル”と呼ばれる）の分離を図っている点が挙げられる。ミネラルは、隣接するClass 1（不活性廃棄物のみ埋立可）の最終処分場にて最終処分している。新施設を建設中であり、これが稼働すれば貴金属類の回収、ミネラルの建設資材利用等により、90%をリサイクルし、10%に相当する脱水ケーキのみを最終処分する予定である。

4.1.2 STORK

ドイツ北東部のベルリン近郊に位置し、焼却主灰の年間処理量は60万トンである。その他、有害廃棄物処理、土壌改良、建設廃棄物の資材化等も行っている。焼却主灰は近郊の10施設から受け入れている。各施設との処理契約年数は15～20年とのことであった。屋外でエージング後、破碎、分級、磁選、渦電流選別を組み合わせて処理を行っている。分級サイズは0-8、8-20、20-55mmとしている。アルミと銅をそれぞれ16、4t/d回収しており、ミネラルは最終処分している。

4.1.3 TARTEK

ドイツ中西部のフランクフルト近郊の工業団地内にあり、2013年に設立された。焼却主灰の処理能力は年間25万トンだが、政府許可量上限の年間12万トンの処理を行っている。受入ヤードは屋外にあり（写真1）、3ヶ月間養生



写真1 搬入直後の焼却主灰



写真2 非鉄金属(高比重画分)

して乾燥と化学反応により含水率 20% 以下としてからプロセスに投入される。受入ホッパーと一次破砕機は建屋内に、続く破砕機や各種選別機は屋外に設置されている。大塊物に対して手選によりステンレスを回収も行っている。処理プロセスの詳細は論文⁹⁾に詳述されているので参照されたい。渦電流選別後の非鉄金属は二次処理施設(未確認)で比重選別され、高比重画分は銅を主体とする産物となっている(写真2)。搬入される焼却主灰からの回収物は、鉄と非鉄金属がそれぞれ約 6%、3% 弱であり、残りはミネラルとして近隣の最終処分場にて最終処分を行っている。粒径 1.5mm 以下の画分についても実証ラインを設置していたが、粉じんが多量に発生したため停止中だった。

4.2 スイス

スイスの都市ごみ発生量は年間 3.6 百万トンである。2000 年に直接埋立が禁止され、焼却が主流であり、年間 70 万トンの焼却主灰が発生している。一方、焼却主灰の土木資材利用は

法律上許可されていない。

4.2.1 ZAV

チューリッヒ近郊の KEZO 焼却施設に隣接し、2015 年見学時は実証施設を運転中、実施設を建設中であった。実施設は 2015 年 12 月に稼働を開始したことから、2016 年 9 月に再訪して実施設を見学した。以下では実施設の状況を報告する。焼却主灰は、隣接する 1 施設を含めて、5 施設から焼却主灰を受け入れている。これら 5 施設は当施設の出資元でもある。年間約 10 万トン相当の処理量だが、20 万トンまで増加する計画である。隣接する焼却施設からはコンベアで乾灰が輸送・投入されている。最も遠い施設は 200km 離れており、専用コンテナによる貨物列車を利用している。排出元の焼却施設では焼却主灰を水浸せず、乾灰の状態で排出し、これを専用コンテナで受け入れている。これにより、焼却主灰の固結化を防ぎ貴金属等の分離回収効率を高めている。乾灰は粉じんの発生が懸念されるが、コンテナからの処理プロセスへの投入(写真3)から産物の回収まで全て覆蓋を設け、内部を引圧とし施設内の粉じん濃度を制御している。主灰は磁選により鉄分を分離し、破砕後、80mm、30mm、8mm、1.5mm、0.2mm で篩別している。1.5-8mm と 0.2-1.5mm については、それぞれ渦電流選別が行われ非鉄金属とミネラルが分離された後に、非鉄金属分が振動式分級機により比重選別される。非鉄金属の高比重画分の金含有量は、一例として 95mg/kg で、他の貴金属の価値も併せると日



写真3 コンテナによる乾灰投入

本の溶融メタルと同等レベルの資源価値を有している。ミネラルは現在最終処分されているが、土木資材として有効利用した際の環境安全性について研究に取り組んでいる。

4.2.2 DHZ

チューリッヒ近郊にあり、焼却主灰を受け入れる一次処理施設(最終処分場に隣接)と、シュレッダーダスト等の他廃棄物も受け入れ濃縮・品位向上させる二次処理施設から成る。焼却主灰処理量は、2015年は約12万トンで、主な有価物として非鉄金属を約2,500t回収した。一次処理施設は焼却主灰(湿灰)の受入から最終工程まで全て建屋内で行っている。焼却主灰は破碎後、大塊物は手選別・再破碎を行い、40mm、12mm、3mm、0.5mmで篩別し、0.5mm以上のそれぞれについて磁選、渦電流選別、振動篩選別により、磁着物、非鉄主体(軽量)物、非鉄主体(重量)物に選別している。ただし、非鉄金属中にはミネラルが20-50%程度含まれているため、精錬炉へ直接投入可能な品位に高めるために二次処理施設へ搬送される。ミネラルは隣接の処分場へ最終処分される。二次処理施設は2016年稼働開始で、処理能力は10万t/年である。ラインは8-100mmと0-10mmの2ラインがある。ホッパーへ投入後のラインは全てカバーで覆われ引圧制御されており粉じん濃度は非常に低い。破碎、磁選、渦電流選別後に非鉄金属は振動篩機に投入されアルミと“ヘビー”(銅、亜鉛等)が98%超の品位で回



写真4 二次処理施設の産物

収されている(写真4)。

4.3 デンマーク AFATEK

デンマークには焼却施設が37カ所あるが、焼却主灰の埋立処分が禁止されている。当施設は5つの公営企業の出資により設立され、コペンハーゲン近郊の6つの焼却施設から年間24万トンの焼却主灰を受け入れている。焼却主灰は鉄類6-7%、非鉄金属1-2%、ミネラル90%に選別され、ミネラルは道路用路盤材として逆有償で再利用されている。処理プロセスは全て屋外にあり、受け入れた焼却主灰は3ヶ月間エージングされ、含水率を14-15%程度に低下させた後に選別プロセスに投入される。回収された鉄やアルミの品位はあまり高くないため、別施設で再処理されている。2015年見学時は処理能力100t/hの新施設を建設中で、各機器の設置をほぼ終えていた。新施設は建屋内にあり、分級サイズは、18-50mm、9-18mm、4-9mm、2-4mm、1-2mmおよび0.5-1mmの6系列である。特徴として、ステンレス回収のため「磁場センサー+エアガン」装置を備える一方、非鉄金属の選別装置は設置していない。

4.4 オランダ AEB

アムステルダム近郊にある当施設は2010年に設立され、年間30万トンの焼却主灰を処理している。処理プロセスは関係者外秘のため見学できなかった。焼却主灰受入ヤードとミネラルのエージングヤードは、ともに屋外であった。焼却主灰は7.0%が鉄、1.3%が非鉄(目視では品位はあまり高くなかった)、残りの約90%がミネラルに選別されている。エージング期間は30週間程度を要している。これは、下水汚泥も年間10万トン受け入れており、汚泥中のCuやミネラル中のSb、Mo、SO₄などの溶出濃度低減のためとのことであった。ミネラルは1万トンごとに検査を行っており、BRL2307に記載された試験項目、試験方法、基準値を満足することが必要とされている。

5. おわりに

欧州では焼却主灰からの金属回収とミネラルの有効利用が図られている。各国の社会背景、法的枠組、その他様々な要因によって、各施設における処理レベルや産物の品位は様々であったが、概して、金属回収は経済的要因から注力して取り組まれているようである。

金属回収を徹底することによりミネラルの環境安全性も向上する可能性がある。大部分を占めるミネラルの有効利用の達成は最終処分される廃棄物量の低減に大きく寄与することから、わが国においても積極的に検討を進めるべきと考える。

謝辞 本調査は環境省環境研究総合推進費3K143007 有用・有害金属挙動に着目した都市ごみ焼却残渣の循環資源化トータルスキームの構築（H26～H28）の下で実施した。また、本稿は第38回全国都市清掃研究・事例発表会での報告「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」を再構成し、情報を追加したものである。ご協力いただいた関係各位に感謝します。

参考文献

- 1) ETC/WMGE (2017) Assessment of waste incineration capacity and waste shipments in Europe.
- 2) Confederation of European Waste-to-Energy Plants (2017) Waste-to-Energy Plants in Europe 2015
- 3) Confederation of European Waste-to-Energy Plants (2016) Bottom ash fact sheet
- 4) International Solid Waste Association (2015) Bottom ash from WtE Plants - Metal Recovery and Utilization
- 5) Rainer Bunge (2015) Recovery of metals

from waste incinerator bottom ash

- 6) Olaf Holm, Franz-Georg Simon (2016) Innovative treatment trains of bottom ash (BA) from municipal solid waste incineration (MSWI) in Germany, Waste Management, 59, 229-236

※文献1)～5)はインターネットポータルサイトにてタイトルを入力することで直接検索可能であることを確認 (2017.01.15)