

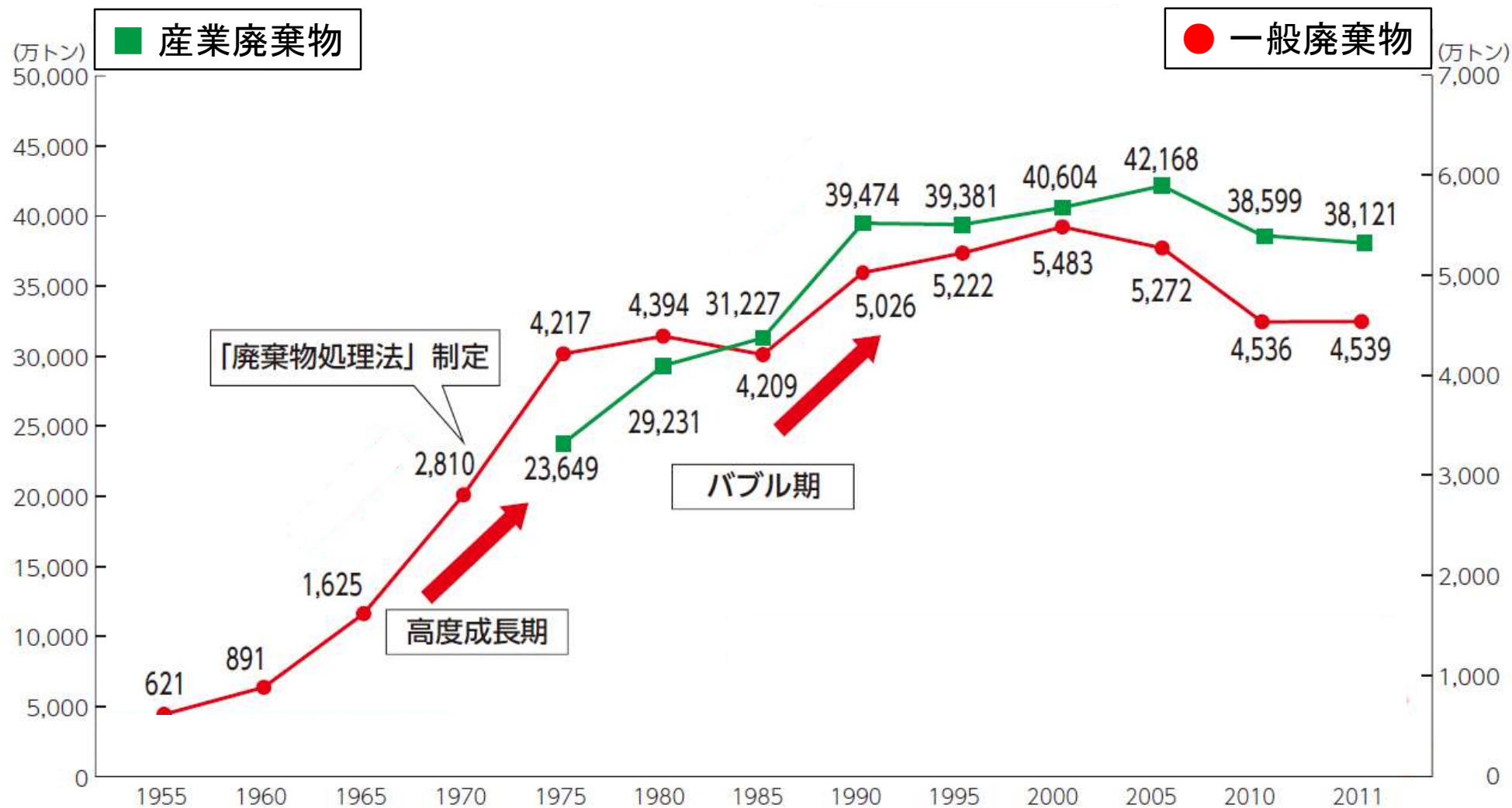
令和元年12月20日(金)
令和元年度 東京都環境科学研究所 公開研究発表会
都民ホール(都庁 都議会議事堂)

一般廃棄物焼却灰のリサイクル ～意義と課題～

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

肴倉 宏史

廃棄物の総排出量の推移



出典：「日本の廃棄物処理」、「産業廃棄物排出・処理状況調査」（各年度版）環境省より作成



可燃



粗大ゴミ



廃油・汚泥



木くず



不燃



廃液



廃プラ



ガラスくず



びん



カン



ペット
ボトル



グリストラップ
汚泥



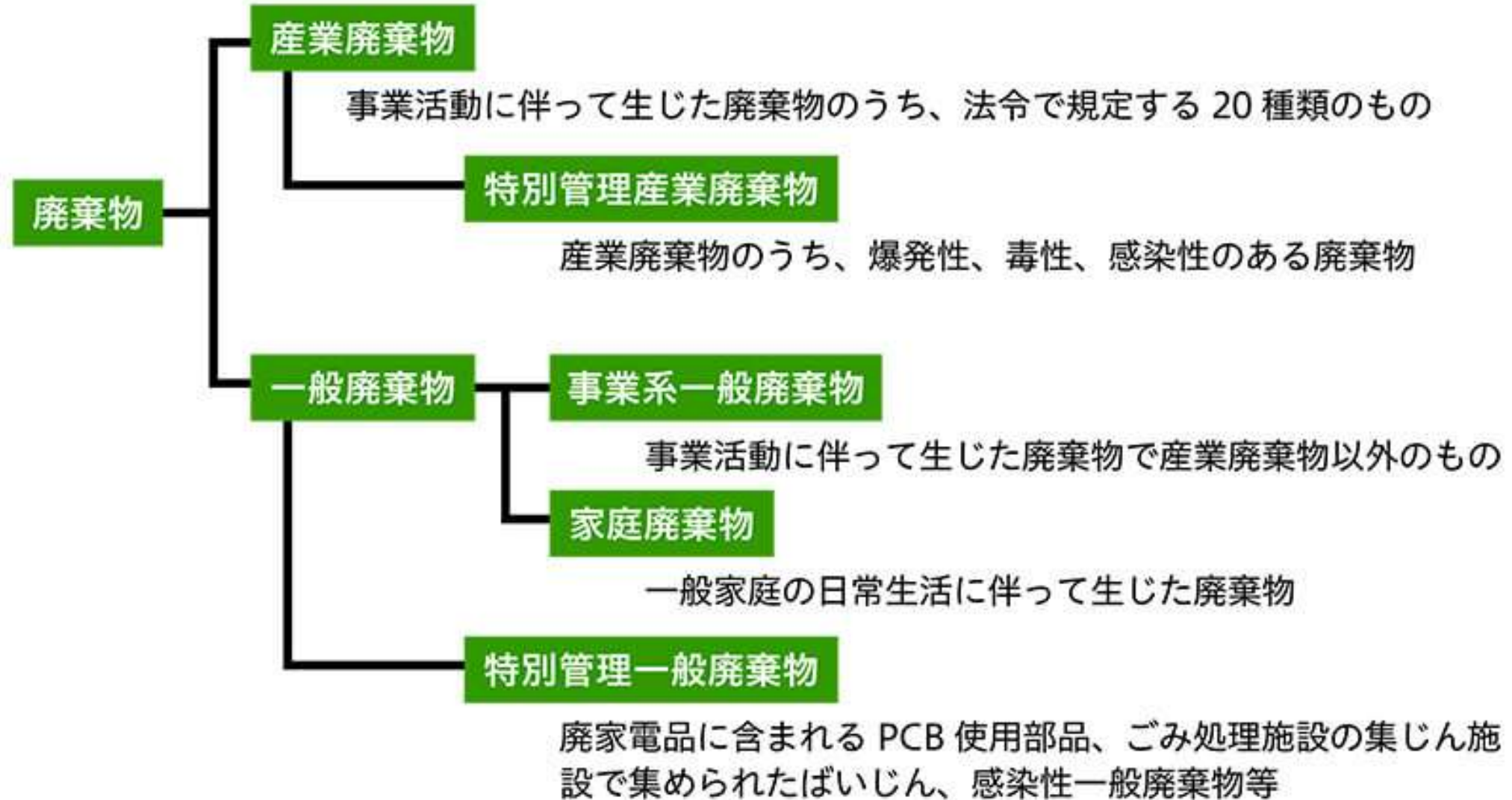
アスベスト



石膏ボード等



日本の廃棄物の区分







不燃ごみ・粗大ごみ



資源

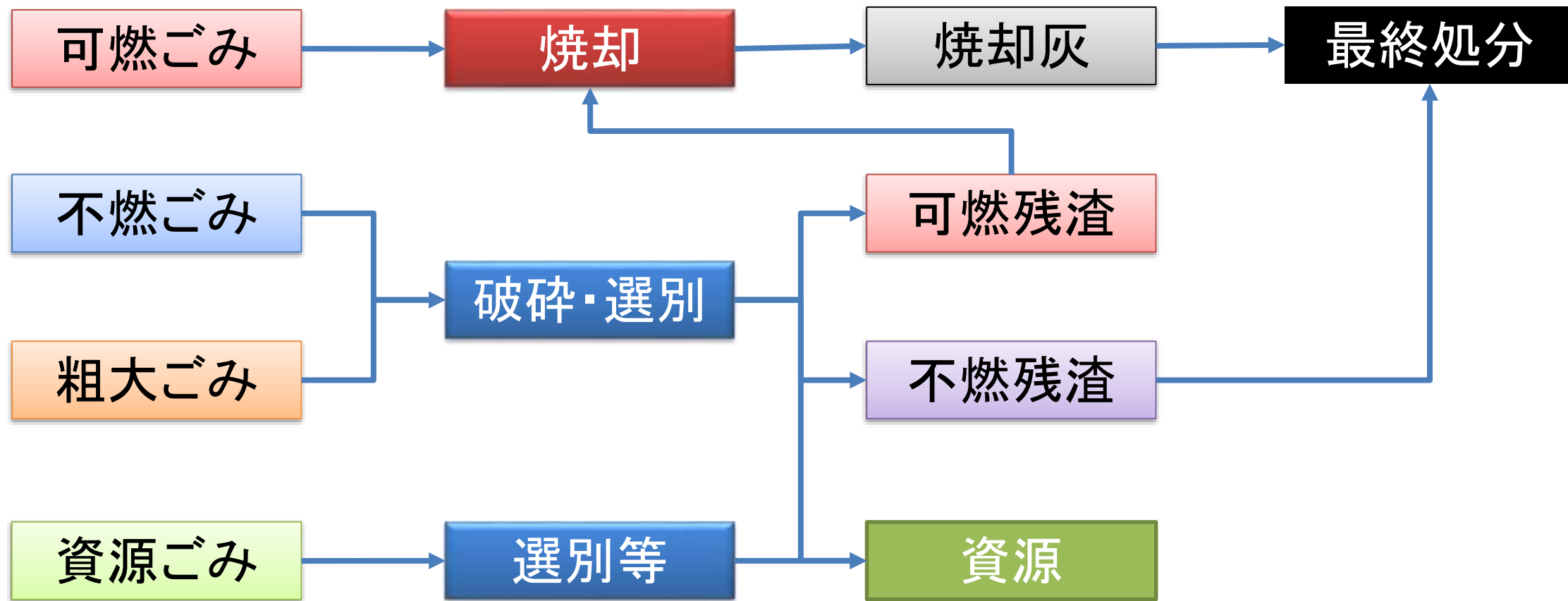


可燃残渣



不燃残渣

一般廃棄物処理の主な流れ





さしま環境管理事務組合最終処分場



内津山北最終処分場



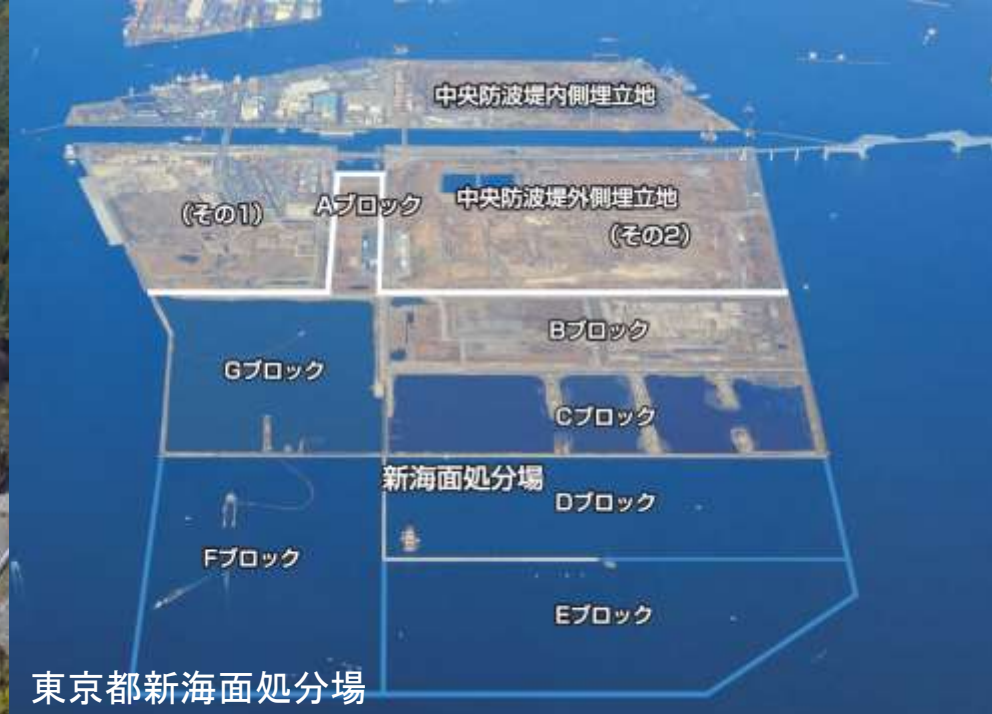
浜松市平和最終処分場



岡崎市北部一般廃棄物処分場



エコパークかごしま



東京都新海面処分場

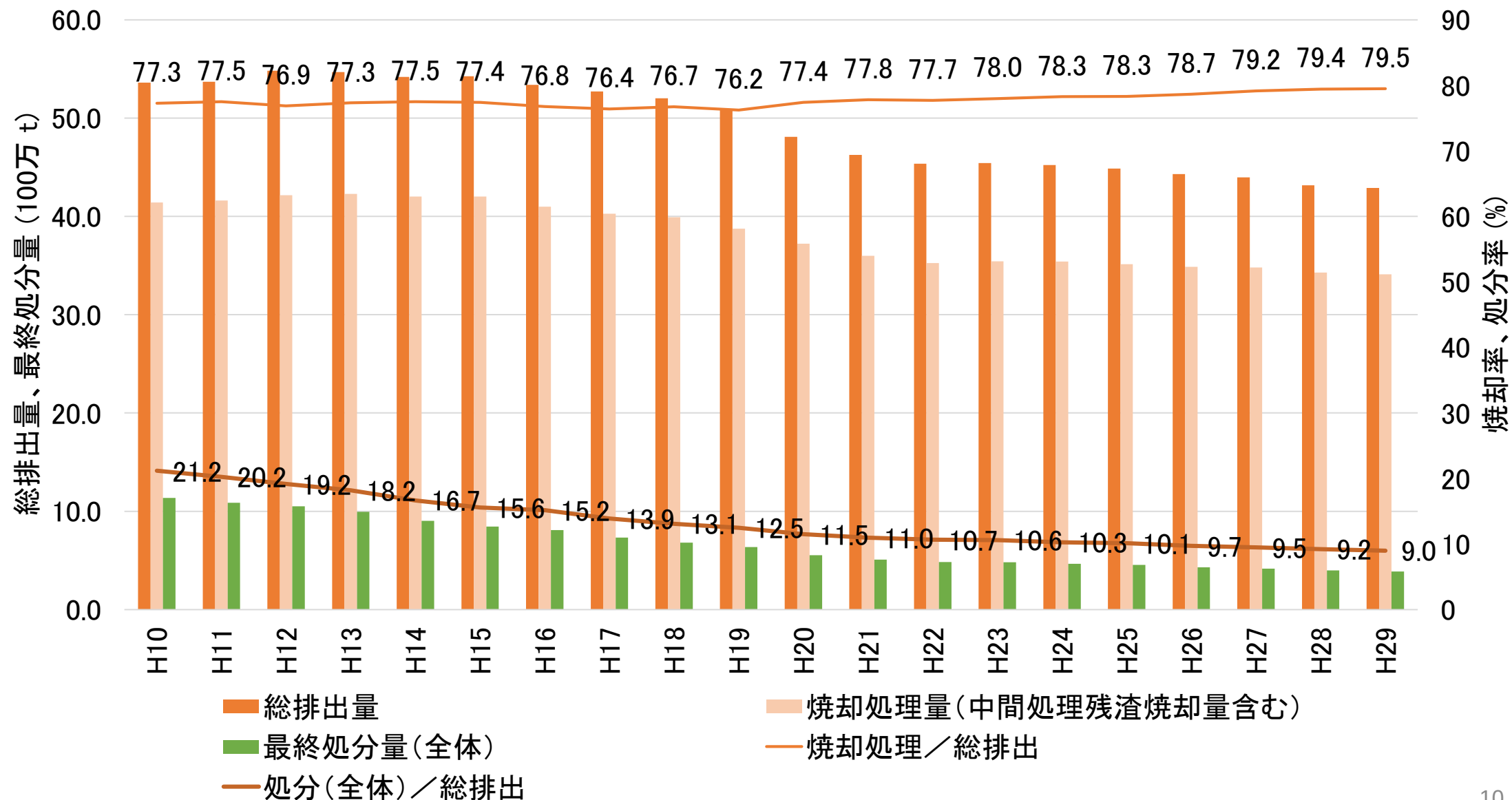


第二伊地山一般廃棄物最終処分場

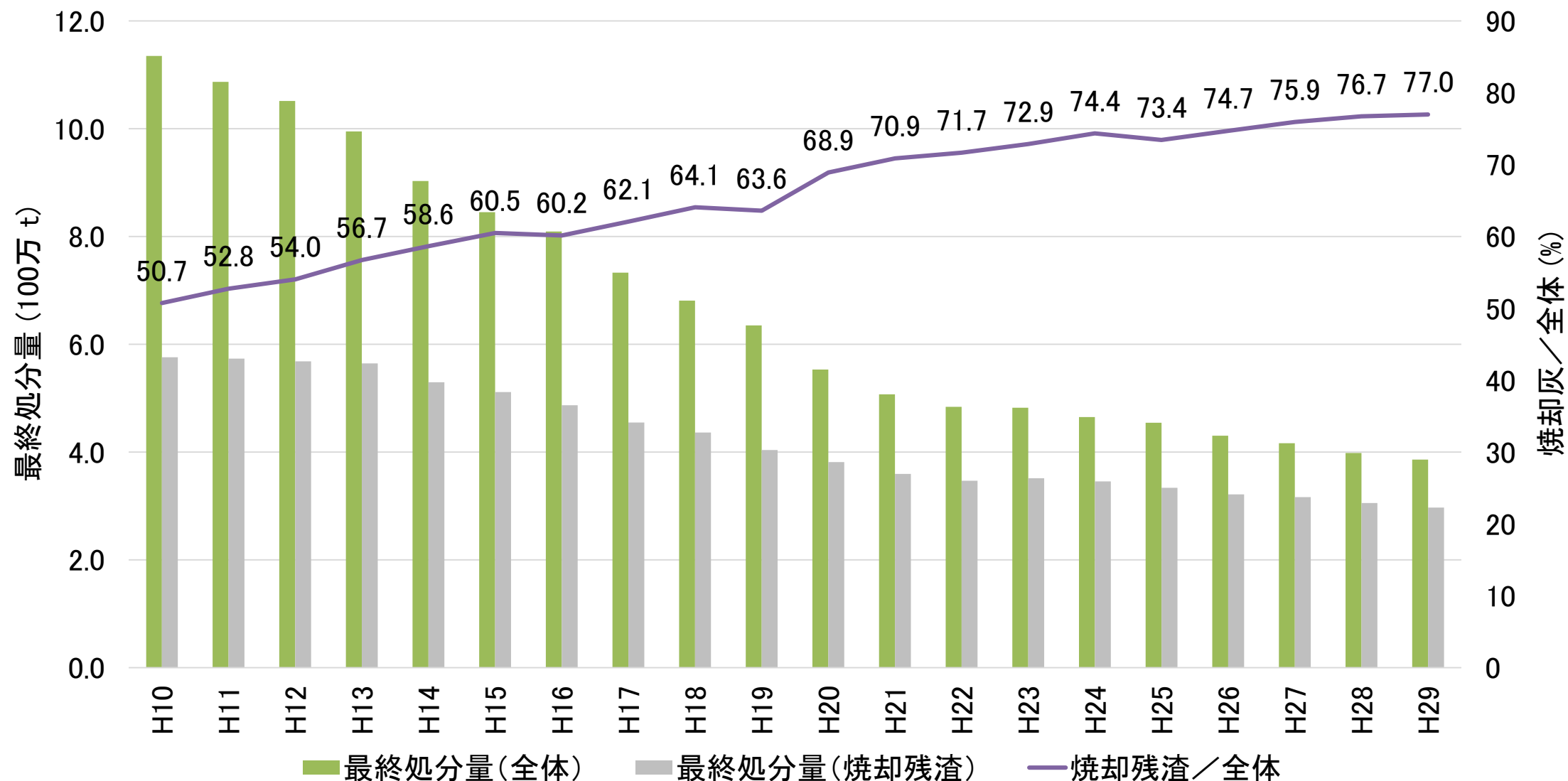


大阪沖埋立処分場

一般廃棄物の排出量、処理量、最終処分量の推移



一般廃棄物の最終処分量に焼却灰が占める割合の推移



最終処分に対する私の認識

- **最終処分場は私たちの生活に必要な施設**
 - 廃棄物の発生は未来永劫続き、最終処分しなければならない廃棄物は必ず残る。
 - わが国の最終処分場は、従来型、被覆型、海面型など、様々なタイプに発展し、高い技術の下、廃棄物を安全に処分することが可能である。
- **最終処分場の寿命(残余年数)は上昇傾向**
 - ごみの減量やリサイクルの進展による、最終処分量の減少
- **しかし、最終処分場の新規建設は、昔も今も極めて困難**
 - (上手くいっている自治体も少なくはないが、一般論として)
 - 昔の処分場のイメージ(害獣虫、臭いなど)からか？
 - 現有の処分場を、少しでも、長く持たせたい。
 - 最終処分場を持っていない自治体も多い。
- **主要な埋立物である焼却灰のリサイクルが問題解決の鍵**

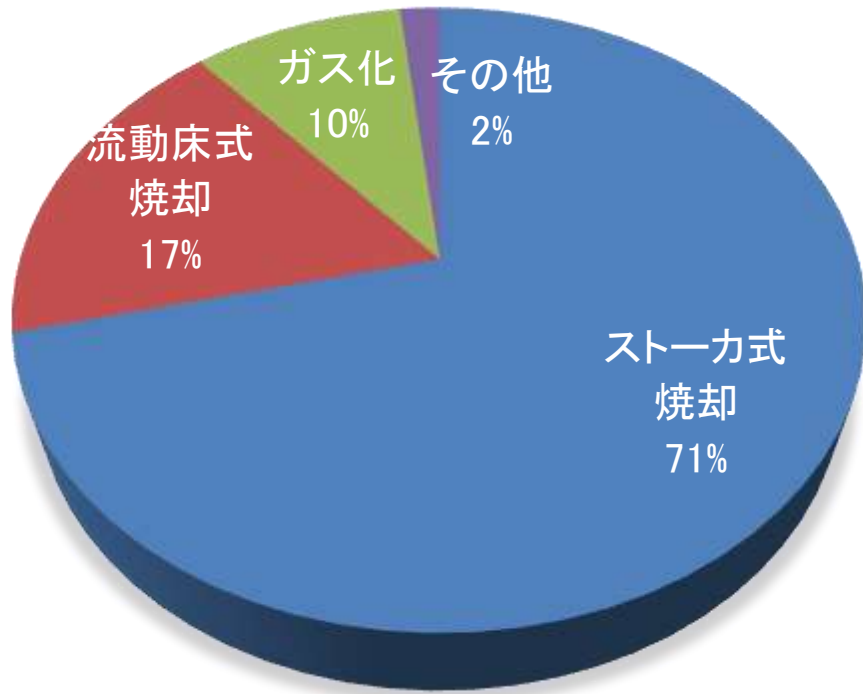


焼却処理に対する私の認識

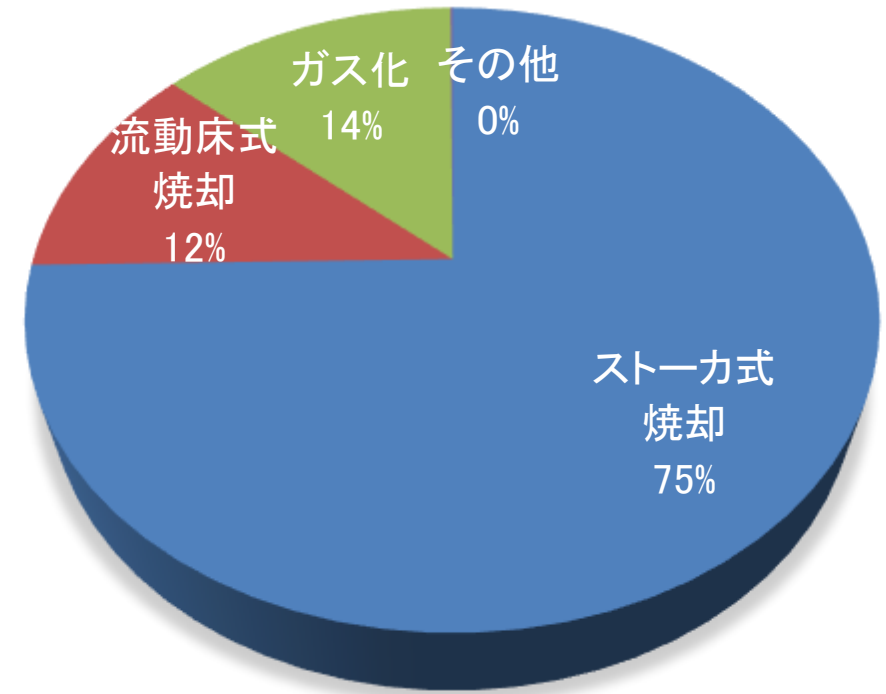
- 衛生面と減量化の面から必須。エネルギー回収も重要。
 - 腐敗性の有機物の迅速な無機化
 - 約90%がガス化
 - 高効率発電、余熱利用
- マイナス面 ⇒ 技術で解決
 - ダイオキシン類の発生抑制(完全燃焼)、酸性廃ガスの中和処理
 - 焼却灰に重金属が濃縮
- これまでに様々な技術が開発されてきたが、焼却処理以上に確かな技術は無く、これからも頼っていかなければならない。
 - 焼却灰は発生し続ける。



焼却炉形式の種類と割合

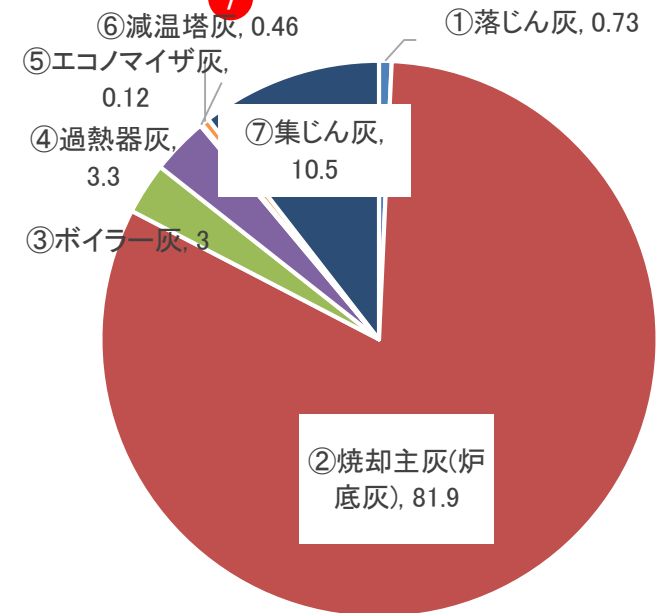
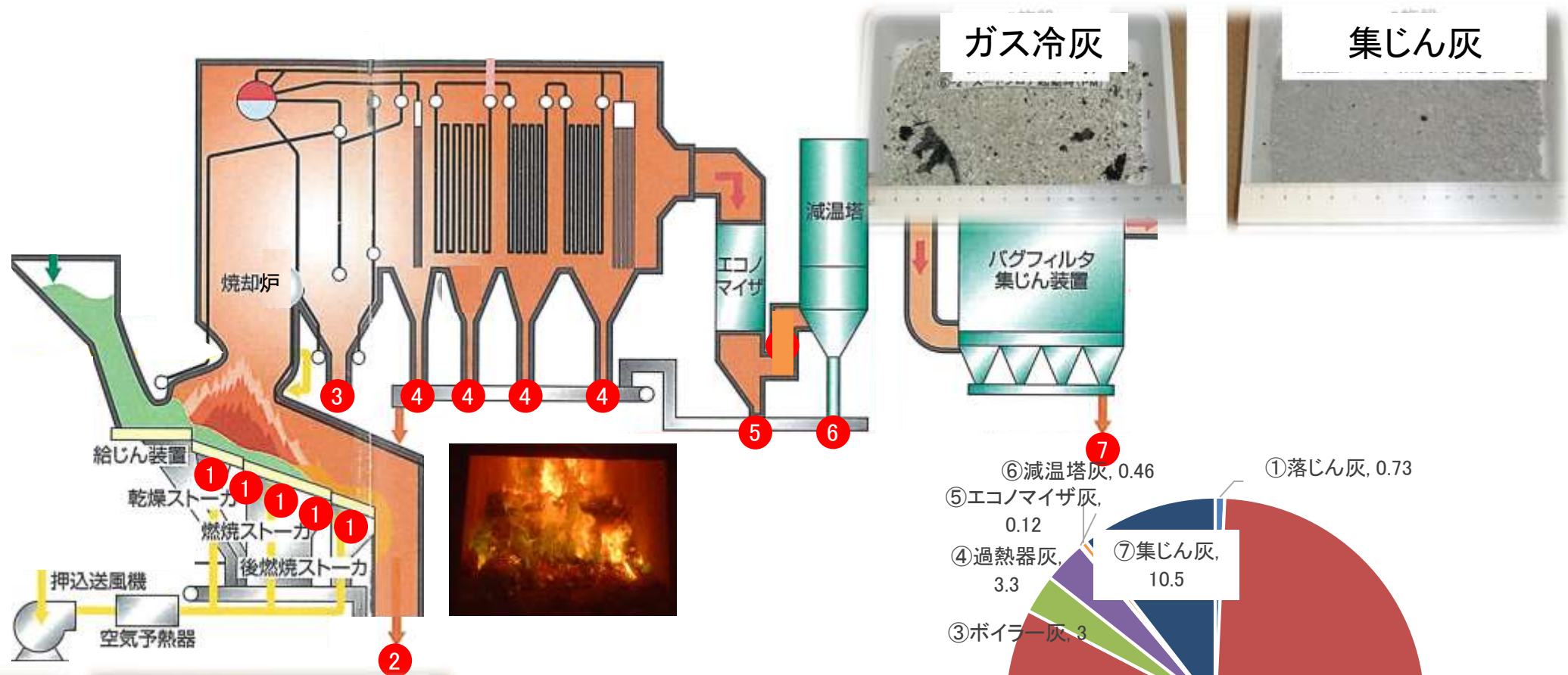


■ ストーカ式焼却 ■ 流動床式焼却 ■ ガス化 ■ その他
施設数(全1103施設)



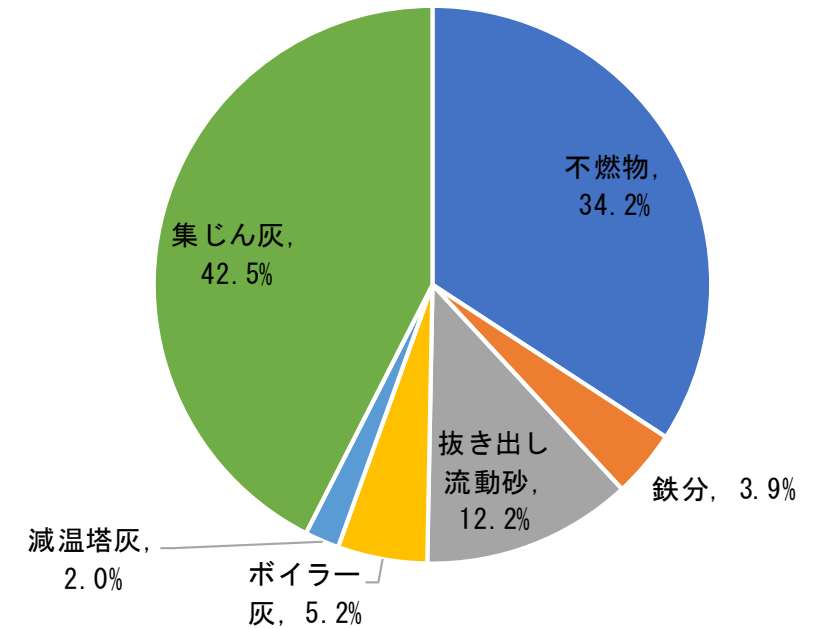
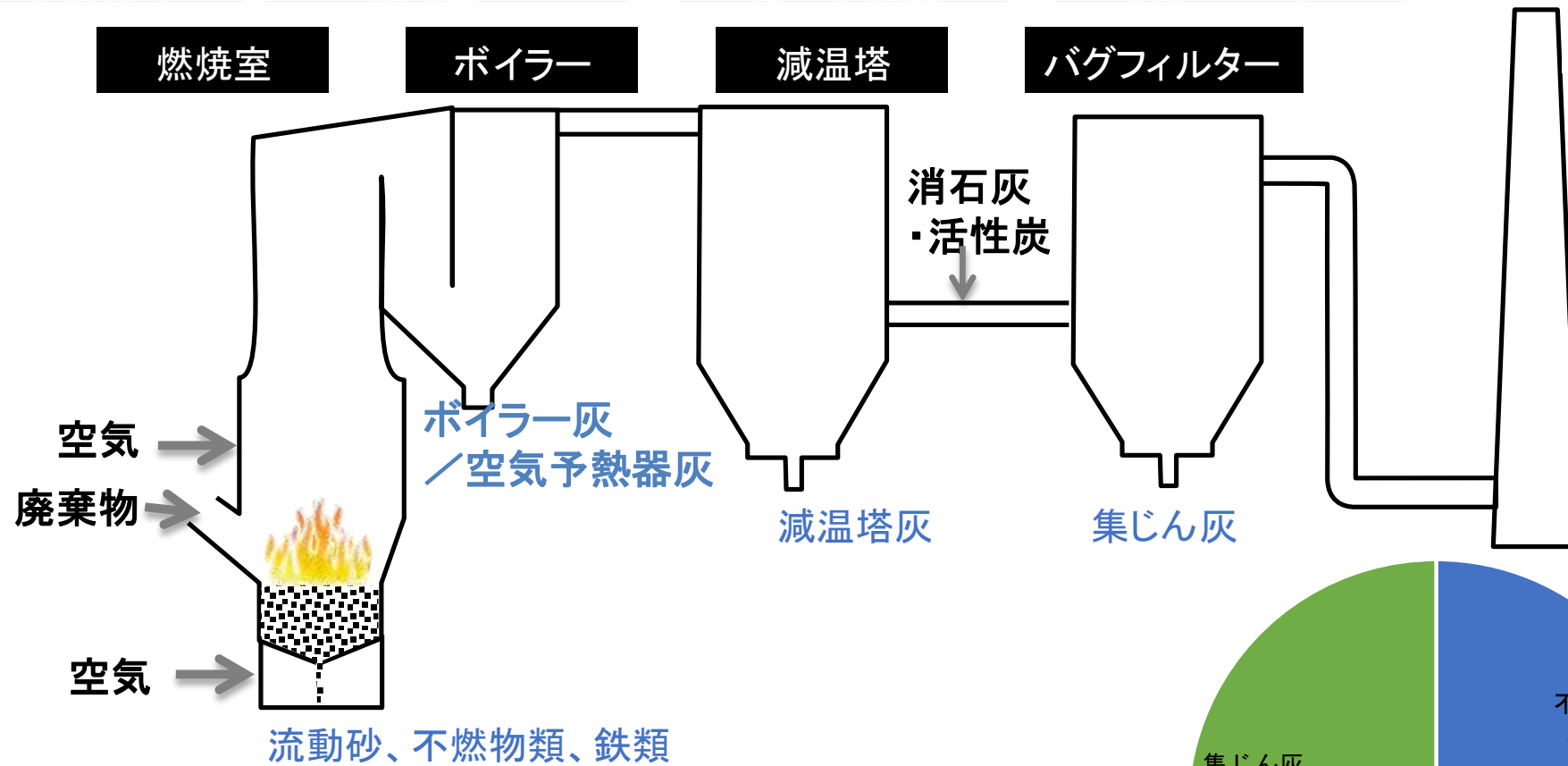
■ ストーカ式焼却 ■ 流動床式焼却 ■ ガス化 ■ その他
処理量(全3千3百万トン)

ストーカ式焼却炉

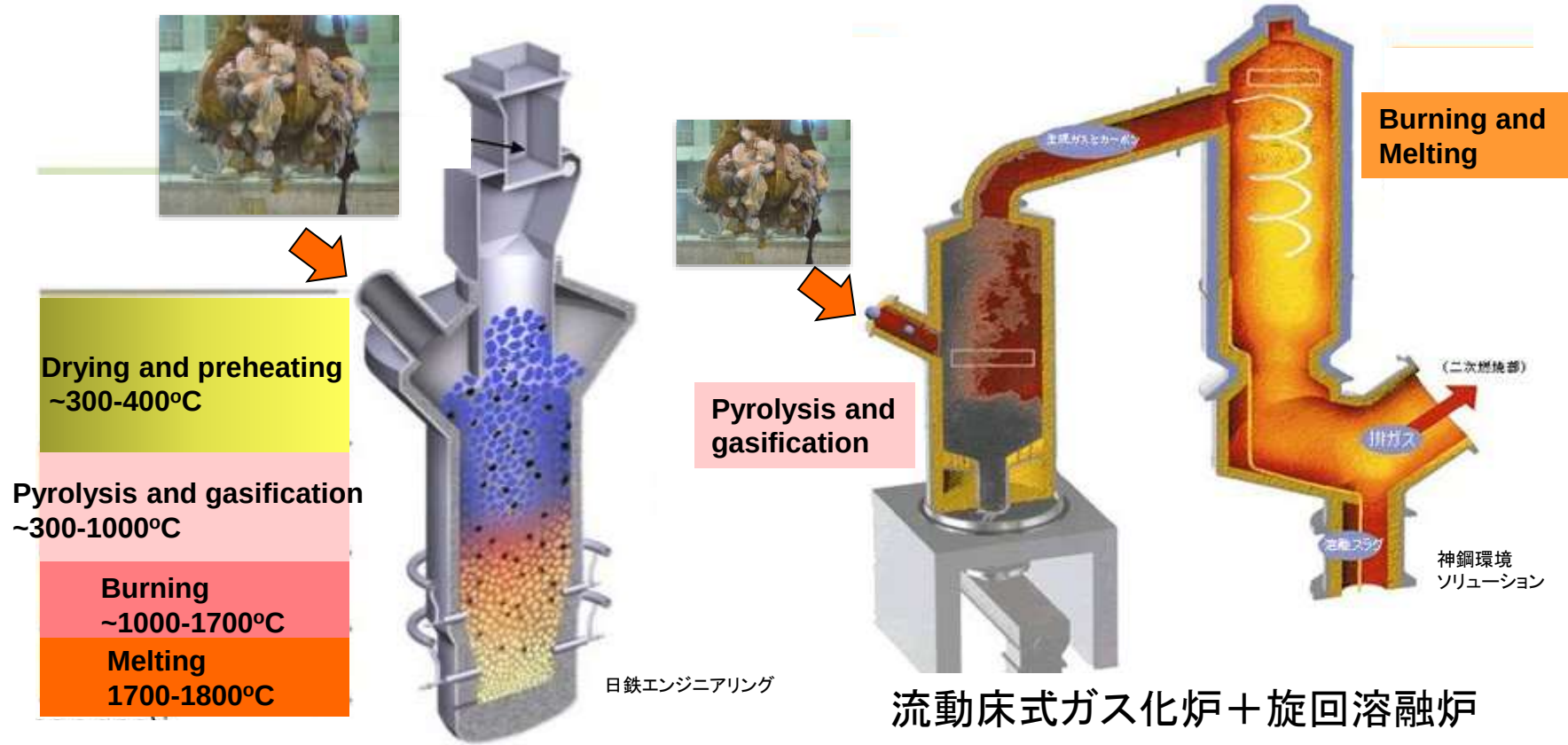


焼却灰の発生割合(例)

流動床式焼却炉



ガス化溶融炉



シャフト式ガス化溶融炉



「溶融メタル」



「溶融スラグ」(水砕／空冷)



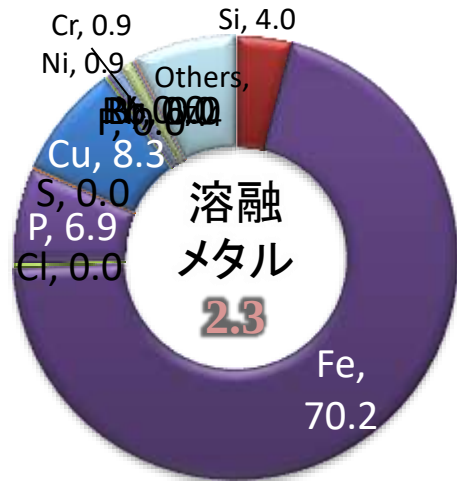
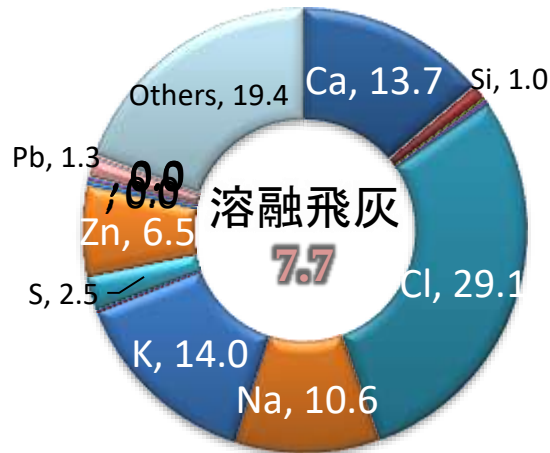
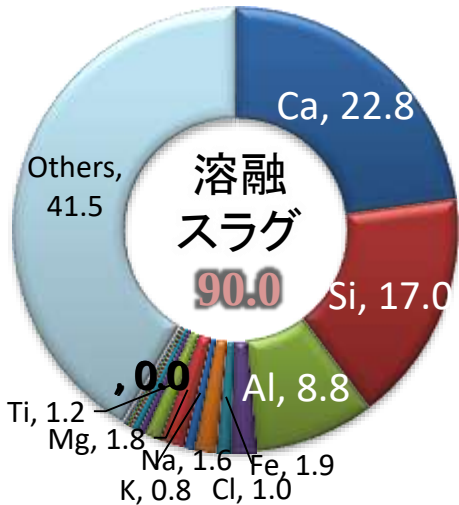
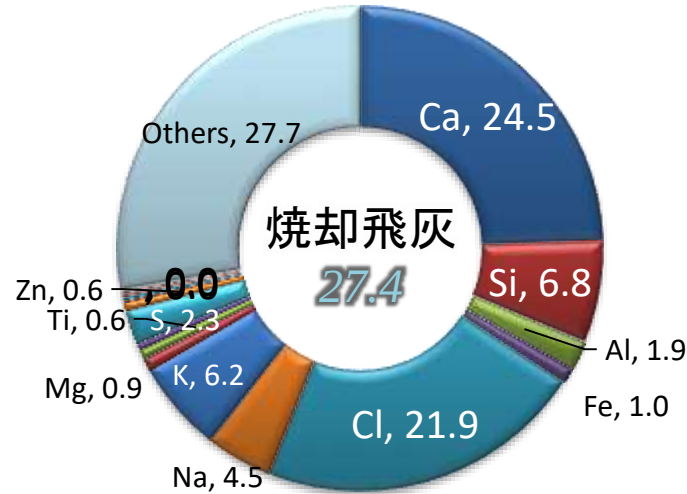
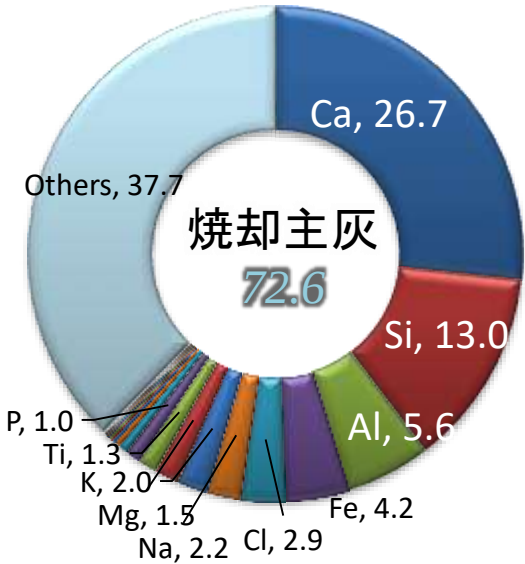
「溶融飛灰」

各生成物を構成する元素(例)

単位:重量%
中央の数値は
発生重量割合%

その他(Others)は
主に酸素。

元素記号	元素名
Al	アルミニウム
Ca	カルシウム
Cl	塩素
Cu	銅
Fe	鉄
K	カリウム
Mg	マグネシウム
Na	ナトリウム
P	リン
Pb	鉛
S	硫黄
Si	ケイ素
Ti	チタン
Zn	亜鉛



焼却灰中の微量元素の濃度(“含有量”という。)

単位: 1キログラムあたりのミリグラム ※100万ミリグラム=1キログラム。1キログラム中に1万ミリグラム (=0.01 キログラム) 存在すれば 1重量%

		焼却主灰	焼却飛灰	スラグ	溶融飛灰	メタル
Ag	銀	2.7	8.2	1.8	16.2	57.2
As	ヒ素	5.0	16.0	0.80	12.6	192
Au	金	0.39	<0.25	<0.25	<0.25	14.6
B	ホウ素	122	65.7	179	15.5	299
Bi	ビスマス	0.80	9.8	<0.5	67.3	<1
Cd	カドミウム	3.4	49.2	<0.05	344	<0.1
Co	コバルト	60.0	22.3	9.7	3.9	1390
Cr	クロム	353	214	595	20.3	9180
Cs	セシウム	0.89	2.4	0.100	12.7	<0.1
Cu	銅	2200	411	329	2740	82600
In	インジウム	<0.05	<0.05	<0.05	0.3	7.7
Li	リチウム	19.6	18.3	28.0	41.5	<5
Mn	マンガン	934	393	1260	379	1680
Mo	モリブデン	8.2	9.0	2.4	4.3	400
Nd	ネオジウム	12.1	5.8	19.5	0.81	0.28
Ni	ニッケル	382	26.2	99.5	10.0	9090
Pb	鉛	781	1010	8.4	12600	271
Pd	パラジウム	0.38	0.20	<0.05	<0.05	19.0
Pt	プラチナ	<0.05	0.05	<0.05	<0.05	14.7
Sb	アンチモン	41.0	225	1.5	611	1940
Se	セレン	0.71	2.5	1.5	5.6	<1
Sn	スズ	365	151	16.8	2540	2270
Tl	タリウム	<0.25	0.50	<0.25	4.3	<0.5
V	バナジウム	62.8	28.1	46.9	2.9	386
Zn	亜鉛	2640	4800	456	69300	1740

焼却灰中の元素の由来は？

分 類			重量割合 %	重量割合 %	重量割合 %	
不燃物類	金属類		2.3	4.1		
	ガラス類		1.2			
	瀬戸物・砂石類		0.6			
可燃物類	厨芥類		8.1	8.1	8.4	8.4
	紙・布類	紙類	30.6	37.7	31.9	39.3
		布類	7.0		7.3	
	木・竹・わら類		10.8	10.8	11.2	11.2
	ビニール・合成樹脂類	ビニール類	22.0	34.5	22.9	35.9
		プラスチック類	5.8		6.1	
		PET	2.2		2.3	
		おむつ類	4.5		4.7	
	ゴム・皮革類		1.3	1.3	1.3	1.3
その他(5 mm 以下)		3.8	3.8	3.9	3.9	
合計			100	100	100	100

可燃物類および「その他(5 mm以下)」(以下、各可燃ごみ等という。)の各分類について、650℃にて恒量となるまで加熱することにより各灰を得た。それぞれの灰について、王水抽出とアルカリ溶融の2段階で分解を行い、各抽出液中をICP発光またはICP-MSで定量(n=3)。ClやPはXRFデータ。



上段：厨芥類（灰化後）
下段：紙・布類（灰化後）

木・竹類
（上段：灰化前、下段：灰化後）

ゴム・皮革類
（上段：灰化前、下段：灰化後）

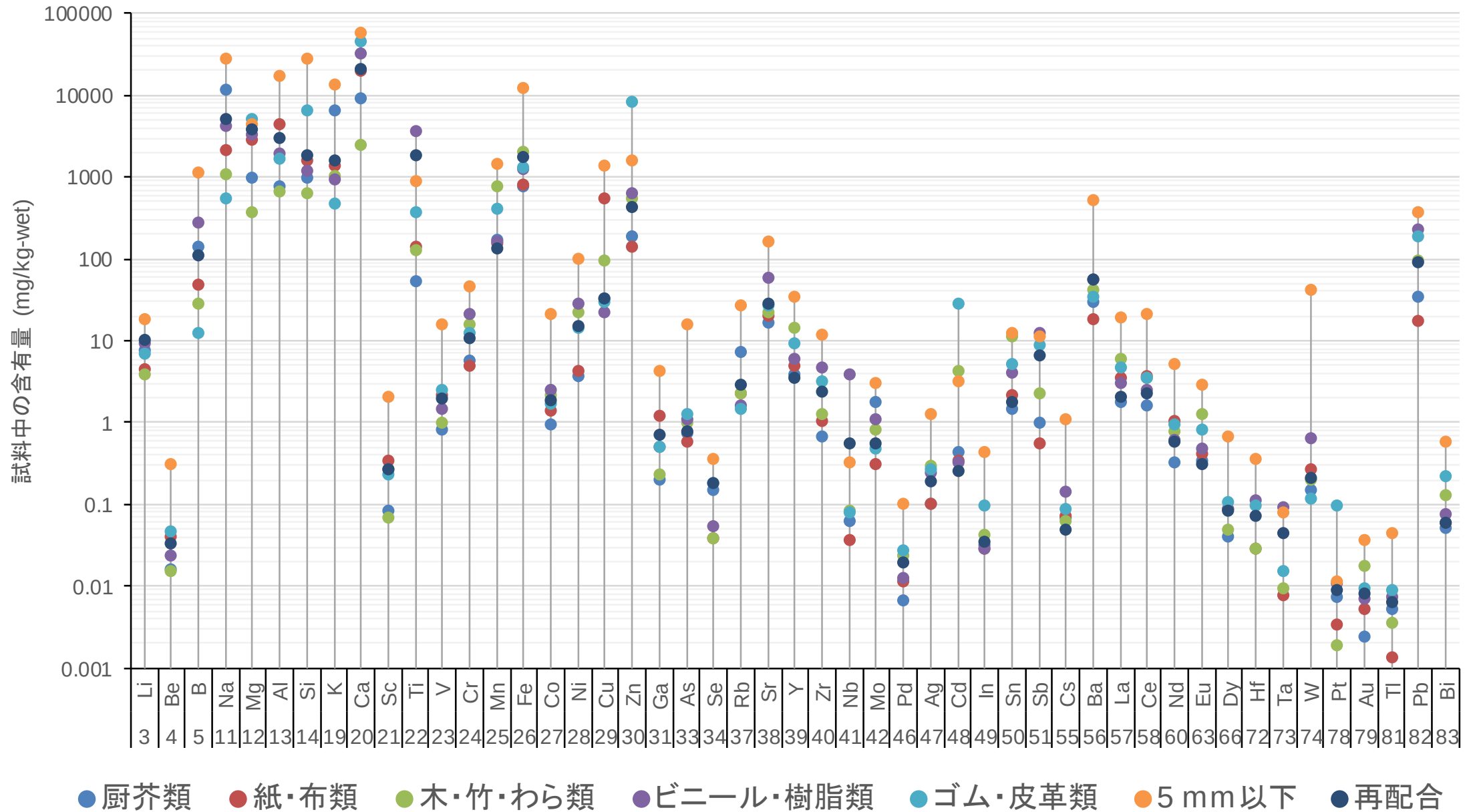


ビニール・合成樹脂類
(上段：灰化前、下段：灰化後)

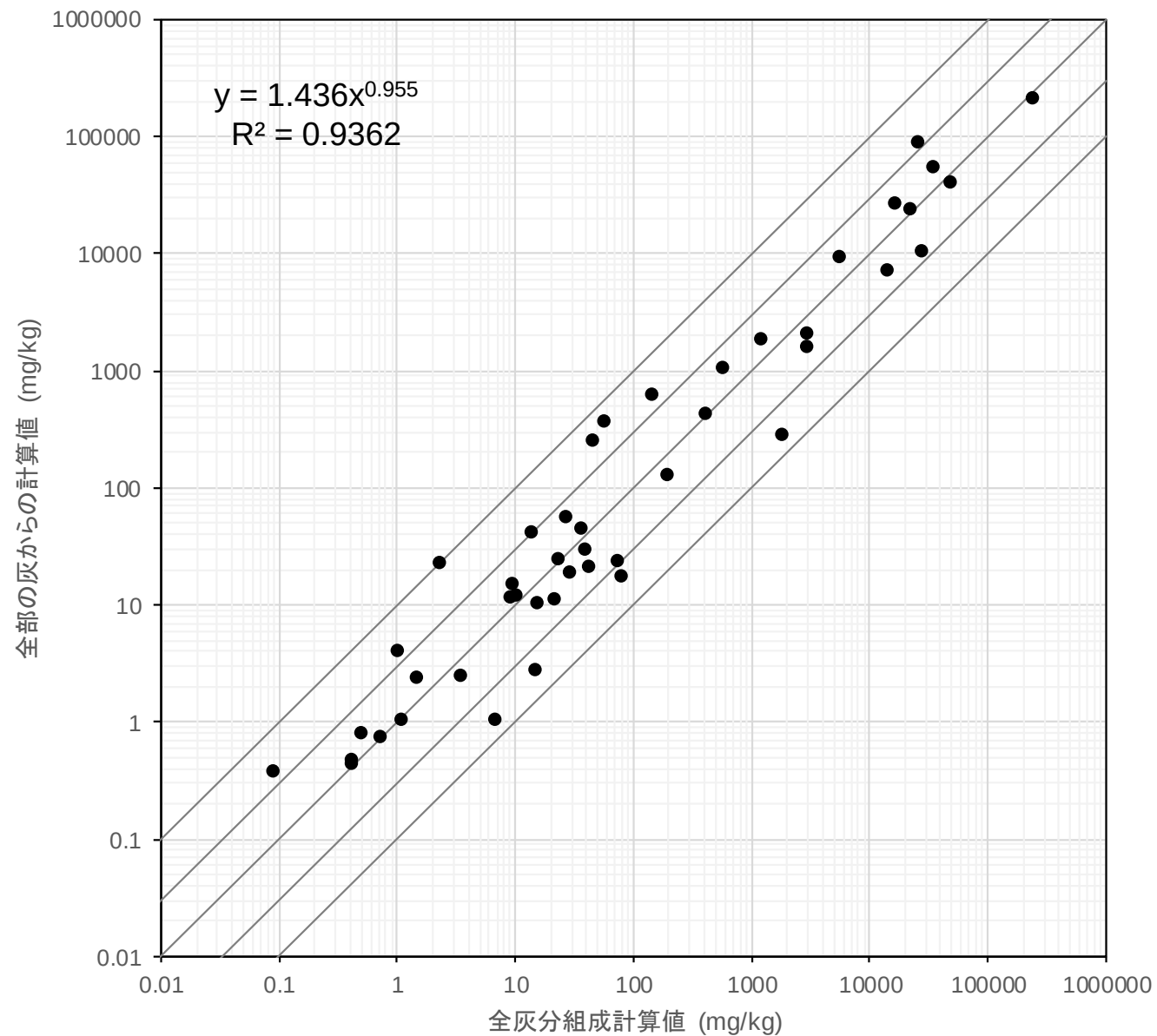
5 mm 以下
(上段：灰化前、下段：灰化後)

再配合品
(上段：灰化前、下段：灰化後)

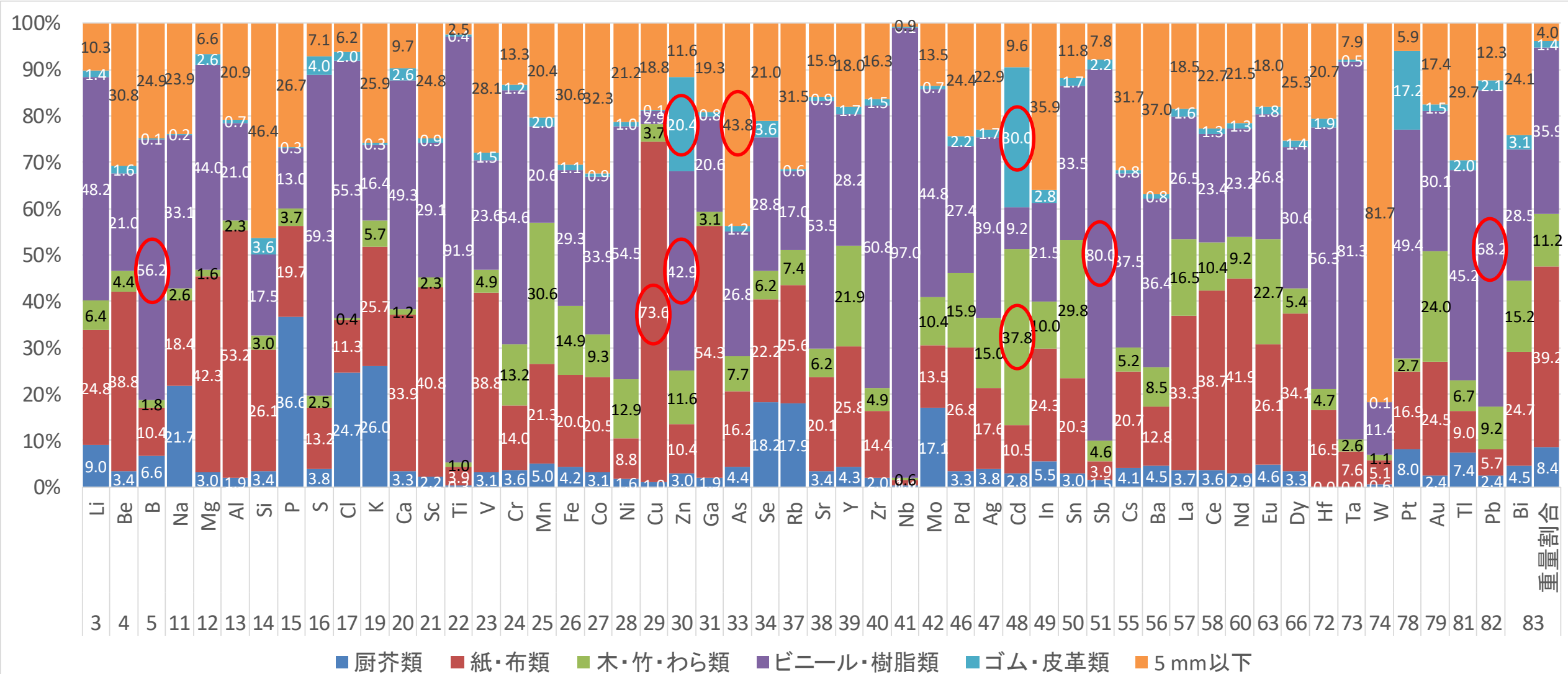
各試料の元素組成(湿重量基準)



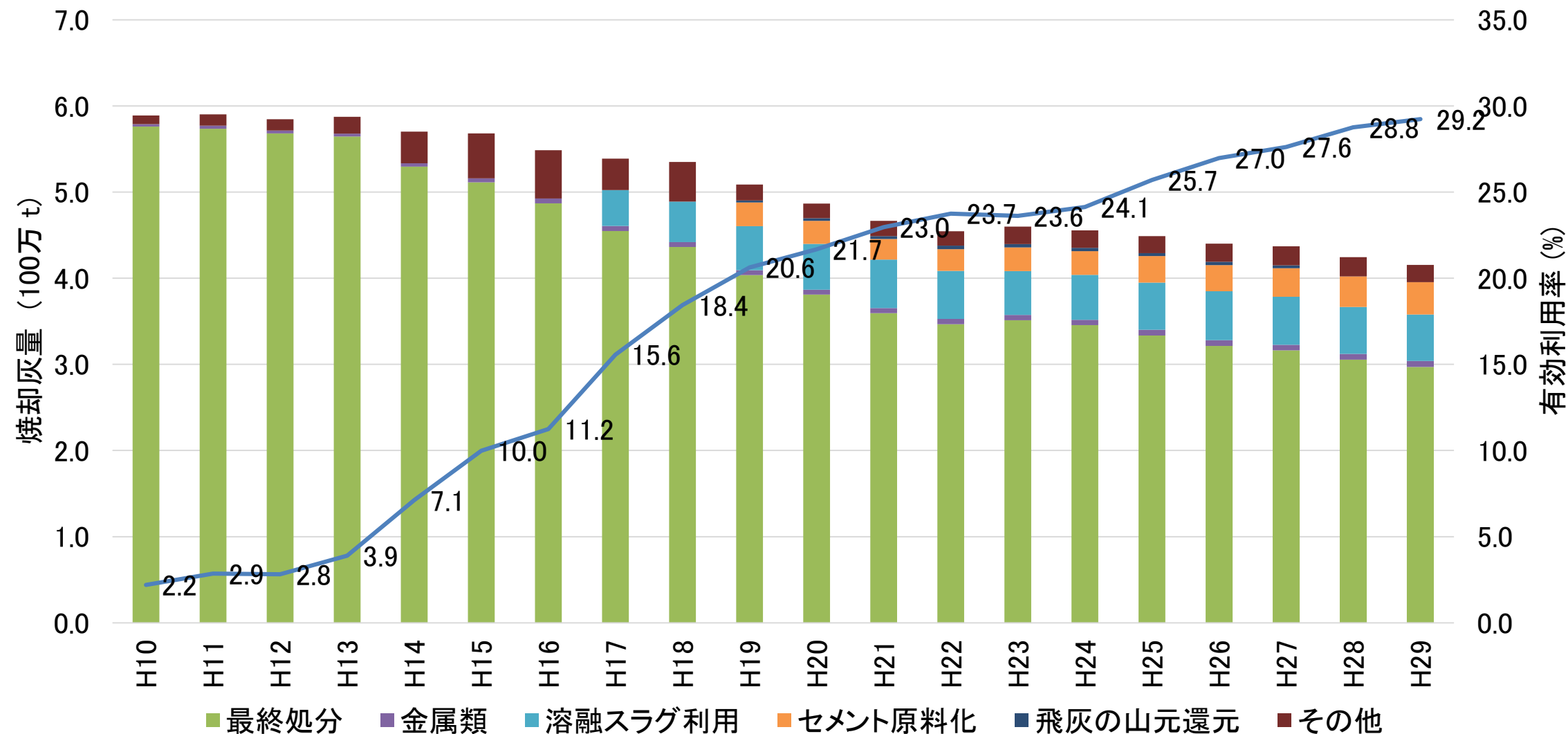
ごみの灰分と焼却灰の元素組成の比較



各ごみ中元素の焼却灰への寄与率



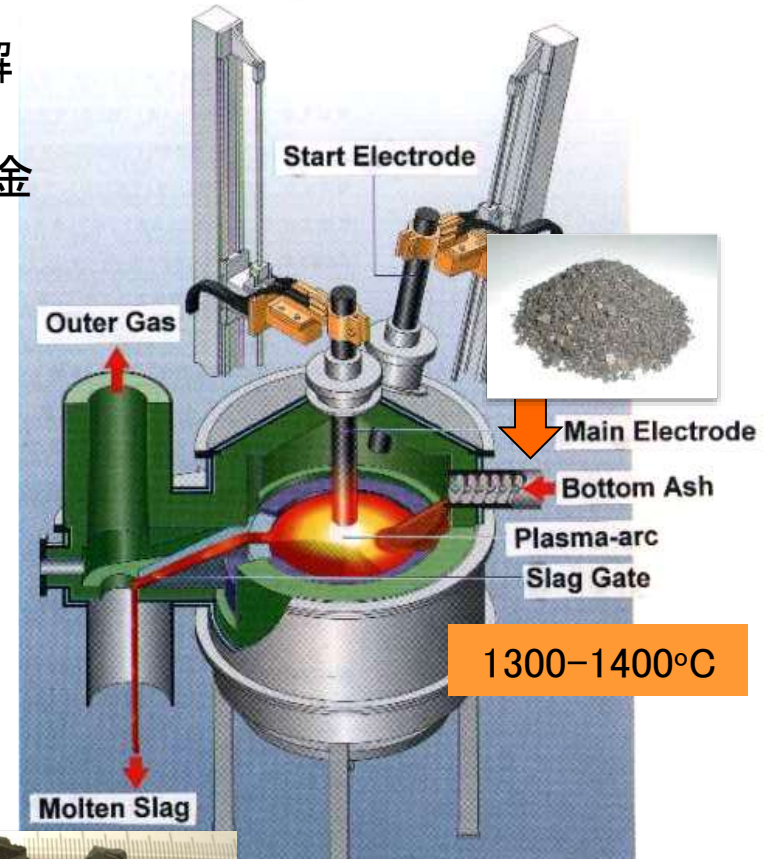
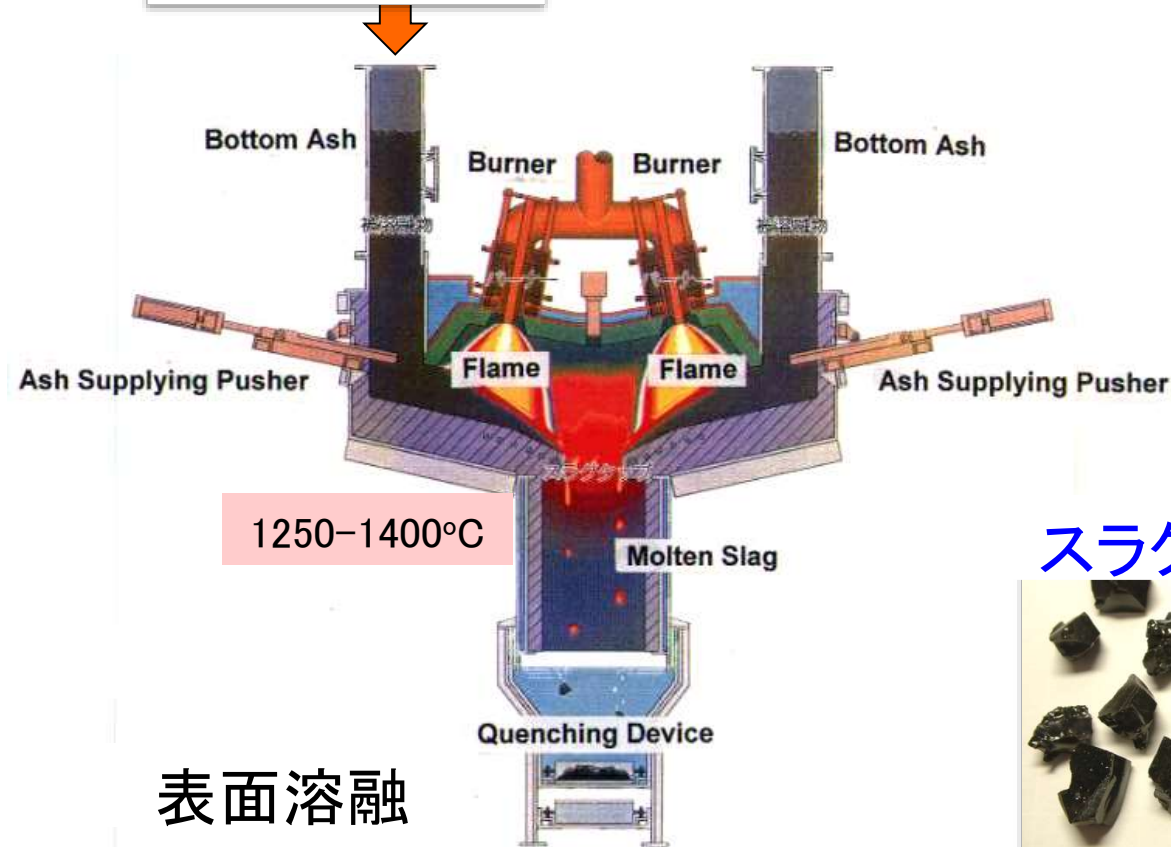
焼却灰の最終処分とリサイクルの推移



熔融スラグ化

焼却灰

- 微量に残留する有機物を分解
- 熔融スラグを建設資材利用
- 熔融飛灰や熔融メタルにより金属を回収



スラグ



SiO₂, Al₂O₃,
CaO

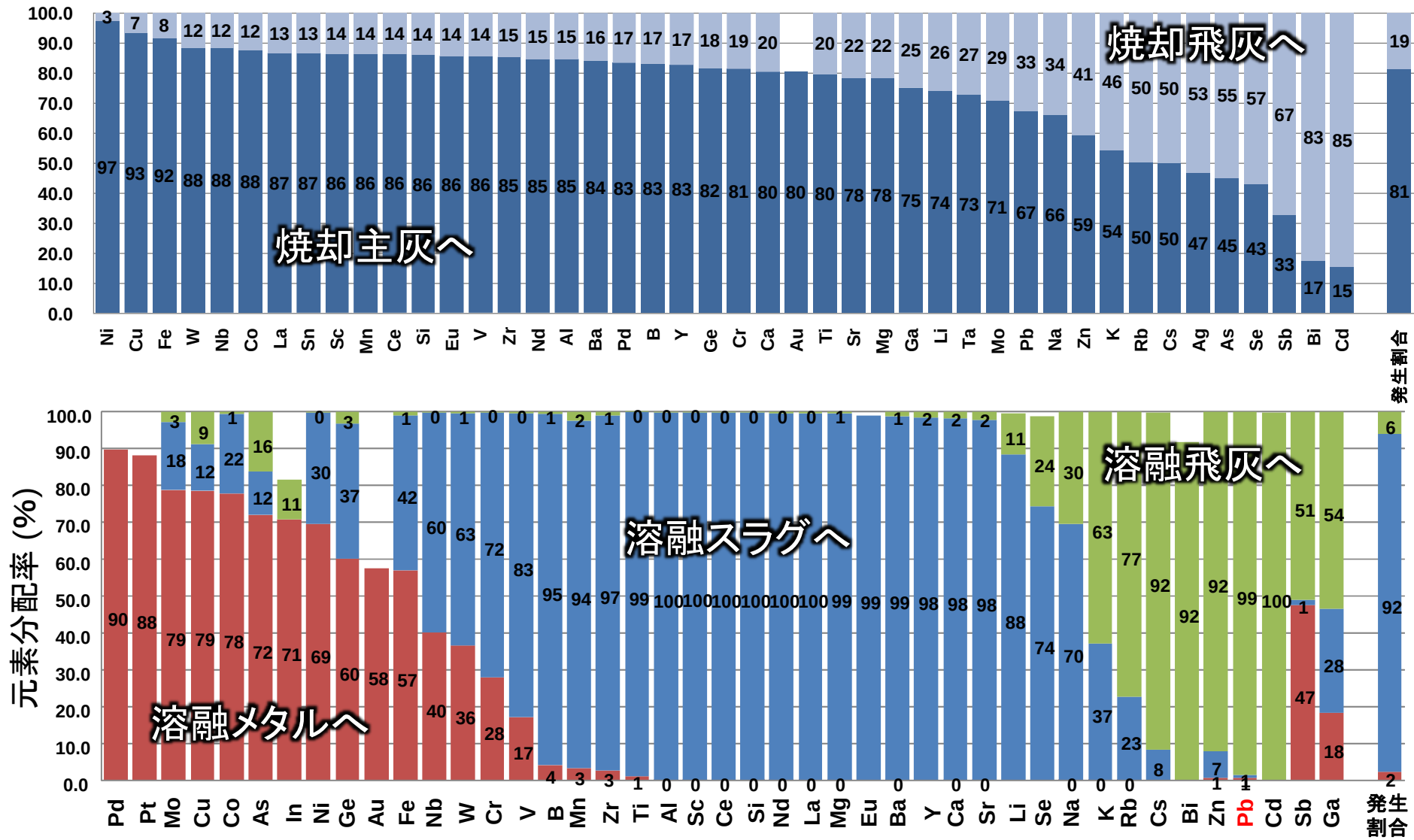
電気熔融

メタル



Fe
Cu

焼却と溶融の元素分配傾向の違い



データ: 倉倉ら(2010) 廃棄物資源循環学会研究発表会

※定量下限値以下のデータは定量下限値と仮定して全体の分配率を計算し、図には非表示とした。

熔融スラグの有効利用



JIS A 5031:2016 一般廃棄物，下水汚泥又は それらの焼却灰を熔融固化したコンクリート用熔融スラグ骨材

- 種類
 - 粗骨材 (MG20-05, MG20-15, MG15-05)
 - 細骨材 (MS5, MS2.5, MS1.2, MS5-0.3)
- 品質
 - 一般事項
 - 化学成分及び物理的性質
 - アルカリシリカ反応性
 - 粒度及び粗粒率
 - 膨張性
 - ポップアウト
 - 環境安全品質基準

JIS A 5032:2016 一般廃棄物, 下水汚泥又は それらの焼却灰を溶融固化した道路用溶融スラグ

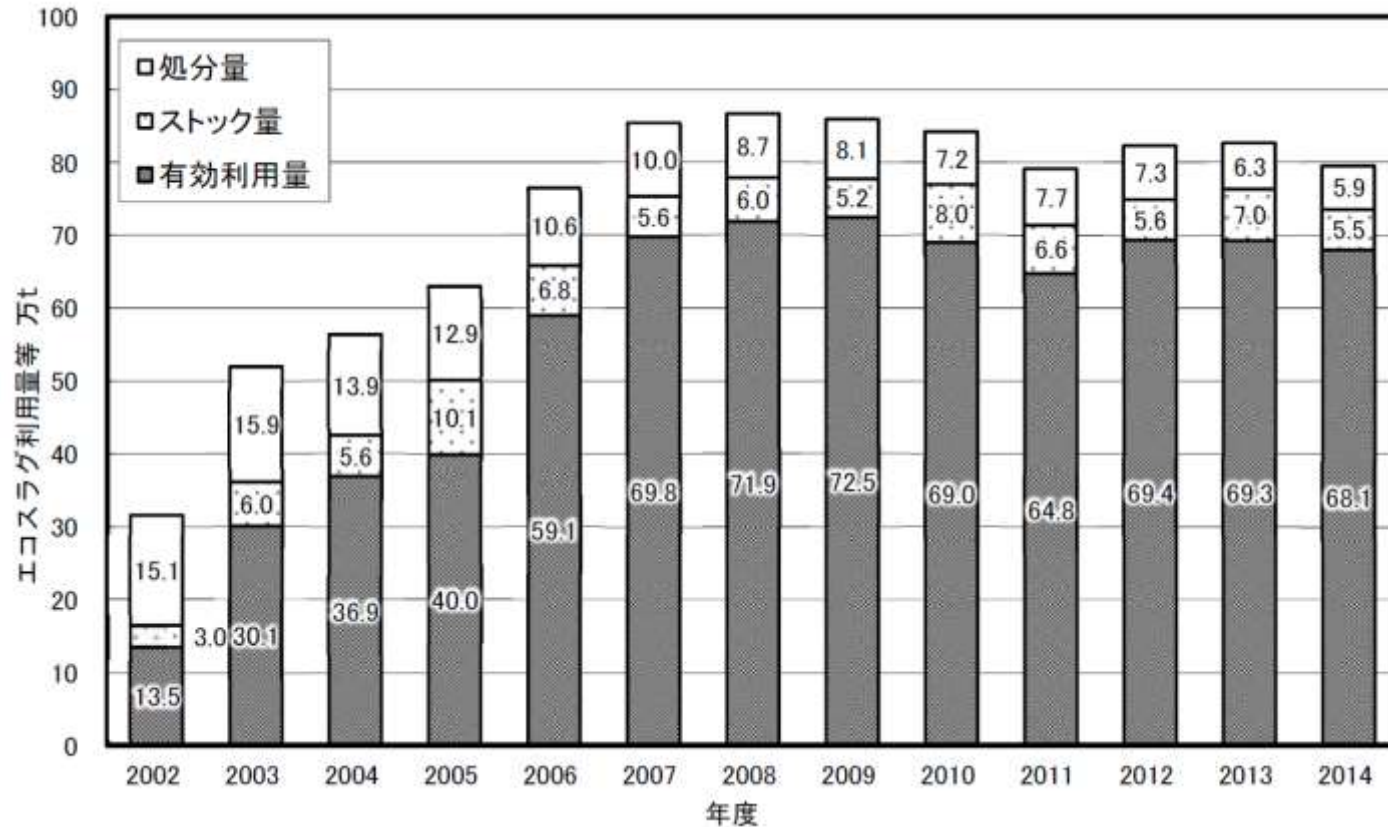
- 種類

- 単粒度溶融スラグ (SM-20, SM-13, SM-5)
- 溶融スラグ細骨材 (FM-2.5)
- 粒度調整溶融スラグ (MM-40, MM-30, MM-25)
- クラッシュラン溶融スラグ (CM-40, CM-30, CM-20, CM-5)

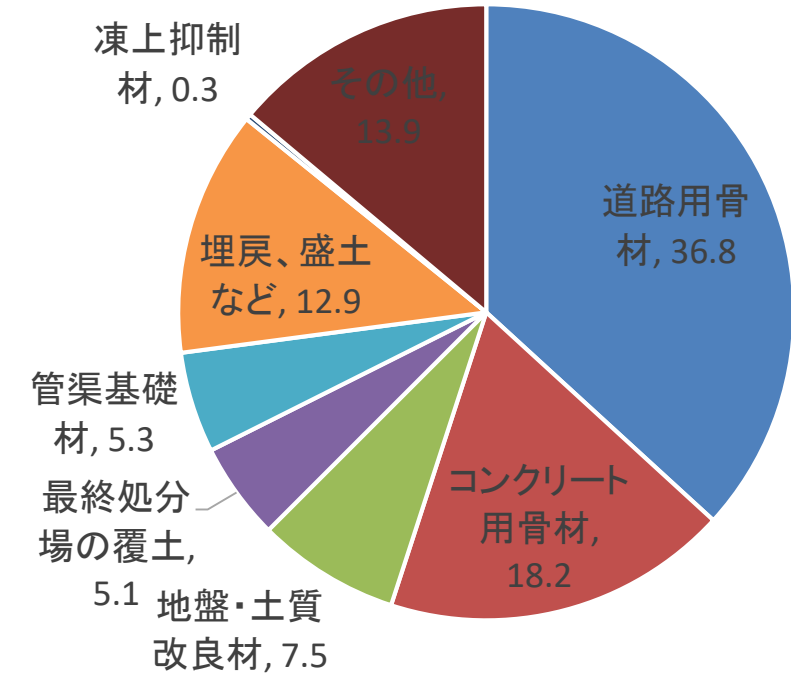
- 品質

- 一般事項
- 物理的性質 (表乾密度, 吸水率, すりへり減量)
- 粒度
- 修正CBR
- 環境安全品質基準

熔融スラグの有効利用



有効利用状況の推移



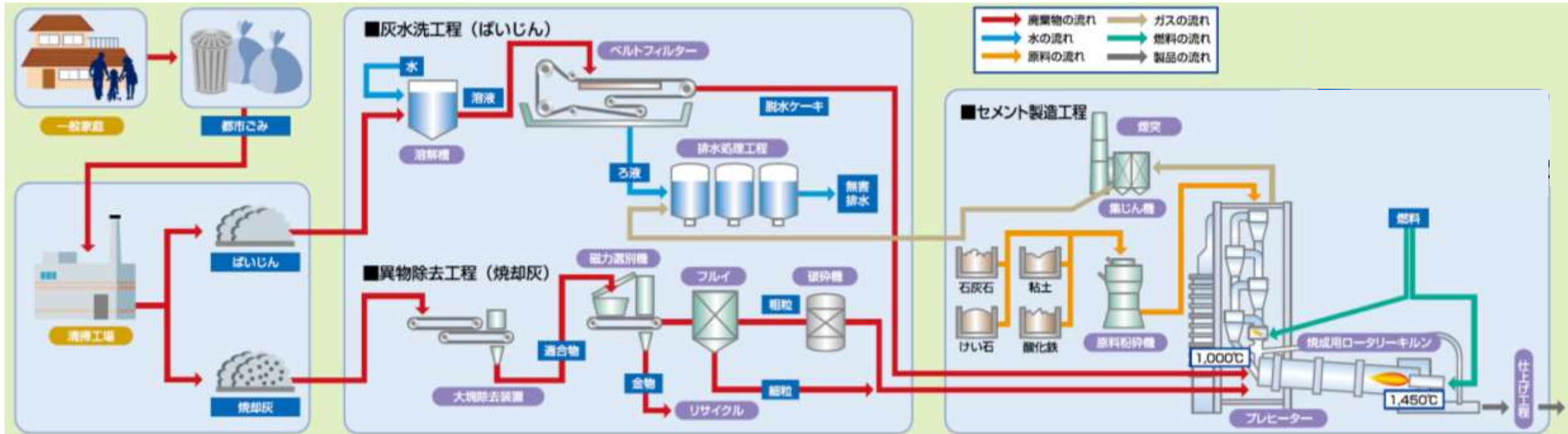
有効利用用途の内訳
(2014年度)

セメント原料化

セメントと焼却残さの化学成分(例)

種 類		セメント主要成分(%)				塩素Cl (%)
		酸化カルシウム CaO	二酸化けい素 SiO ₂	酸化アルミニウム Al ₂ O ₃	酸化第二鉄 Fe ₂ O ₃	
セメント [※]		60～66	21～25	5～8	3～5	0.005～0.01
焼却残さ	焼 却 灰	23	27	14	6	1.1
	ばいじん	36	11	6	1	15

※普通ポルトランドセメント(JIS R 5210)



建設資材化(非加熱処理)

Figure 23 Concrete tiles produced from bottom ashes.



Figure 24 Construction of noise barrier along the A12 highway in The Netherlands.



欧州各国の焼却主灰の取扱いの特徴

国名	焼却主灰の取扱い
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	焼却主灰の建設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:>6 mm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。

- 焼却主灰の**道路材料利用**を行っている国: デンマーク、ベルギー、フランス、ドイツ、オランダ、ポルトガル、英国、スペイン。
- イタリアBSBプラントはコンクリート骨材に利用

台灣での状況

貳・底渣性質及數量流向

(103年統計資料)



註：介慶尚未接受環保局委託處理底渣。

縣市	焚化廠數	再利用機構 (簽約時間)	委託合約期程及數量
宜蘭縣	1	永盛(103.1)	1年，合約2.9萬公噸
基隆市	1	永盛(97.7)	15年，合約前6年保證量15.5萬公噸(底渣及飛灰)
台北市	3	永盛(103.1)	11.5個月，合約2.0665萬公噸
		旭遠(103.1)	11.5個月，合約3.0萬公噸
		榮寶(103.1)	11.5個月，合約3.0萬公噸
新北市	3	潤隆(102.12)	4年，合約12.5萬公噸/年
桃園縣	1	博瑞(100.4)	10年，合約7.15萬公噸/年
新竹市	1	全精英(102.12)	11個月，合約0.82萬公噸
苗栗縣	1	全精英(103.7)	1年6個月，合約1.5萬公噸(103年)/2.25萬公噸(104年)
彰化縣	1	榮寶(102.7)	2年，合約7萬公噸
台中市	3	映誠(103.1)	1年，合約10.2836萬公噸
嘉義市	1	映誠(102.1)	2年，合約0.98萬公噸(103年)/0.98萬公噸(104年)
嘉義縣	1	映誠(103.1)	1年，合約4.6666萬公噸
台南市	2	映誠(103.1)	10個月，合約6.972萬公噸
高雄市	4	映誠(103.7)	1年9個月，合約45.8萬公噸
屏東縣	1	映誠(103.1)	2年，合約6.64萬公噸

(14縣市)(24廠)

貳、底渣處理流程



底渣進入處理場



貯存(每倉約500公噸)



底渣進料



磁選系統



渦電流篩分



篩分



破碎機



成品自動定位分倉貯料

參、資源化產品再利用流程



與加工廠簽訂合約



取得相關工程資料



確認工程地點
未位於集水區域內



加工廠出貨
至最終再利用地點



確認該工程符合再利用
規範後出貨至加工廠



確認工程地點
未位於相關保護區內

肆、資源化產品再利用申報流程



出貨至加工廠後
申報清運紀錄



申報：預申報



拍攝施工前、中、後
照片及現場查證資料



提送完工報備資
料至各相關單位

焚化底渣再利用委託處理案

○○○年○○月○○日
焚化底渣妥善再利用證明文件

工廠名稱：○○○
再利用地點：○○○

榮寶企業股份有限公司
○○○年○○月○○日

申報：後續處理申報
並匯整成冊

焼却灰のリサイクル／処分方法のまとめ

	特徴など	選択の留意点
日本 溶融スラグ化	主灰・飛灰を対象。1250℃以上で加熱スラグ、メタル、溶融飛灰が発生、資源化56万トン(2015 環境省一廃調査)	(金属の事前除去) 乾燥状態であること
セメント原料化	主灰・飛灰を対象。1450℃以上セメント原料のごく一部(約0.5-1%)を代替33万トン(2015 環境省一廃調査)	金属の事前除去 塩素、クロム
建設資材化 (非加熱処理)	主灰を対象。非加熱で、異物除去やセメント等を混合して建設資材化 欧州・台湾 の他、日本も一部実施	金属の事前除去 建設資材としての環境安全性、pH
埋立処分	主灰・飛灰を対象(特に、焼却飛灰?)。320万トン(2015 環境省一廃調査)	主灰: 金属の事前除去 処分物としての環境安全性、塩類(スケール)キレート

焼却主灰の物理組成(例)



【灰分】



【鉄含有物】



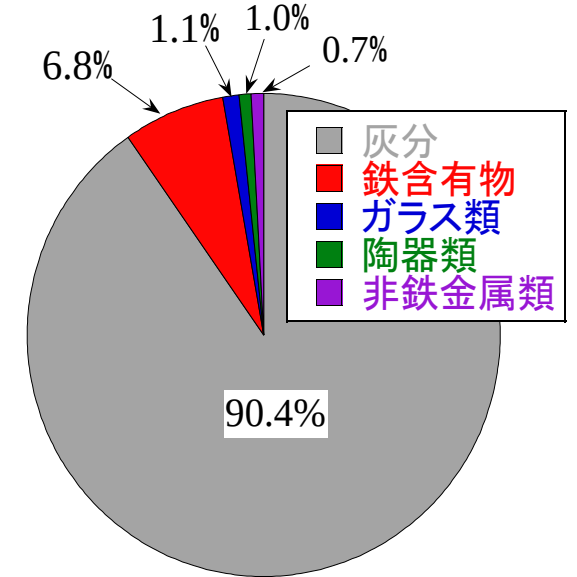
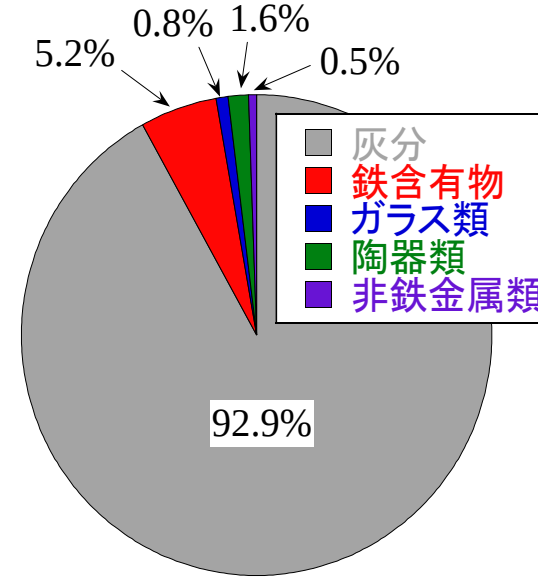
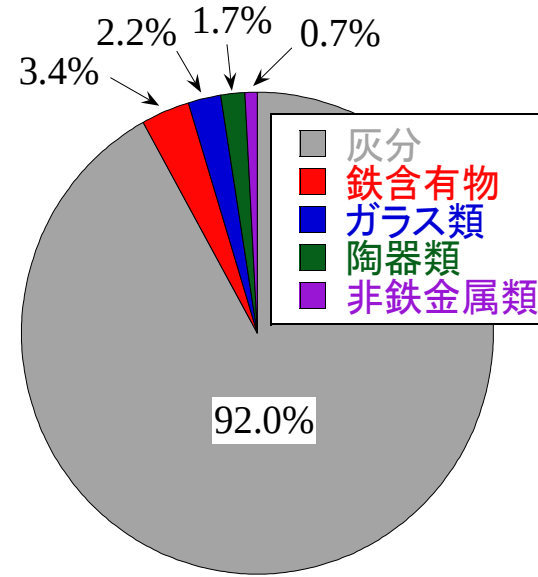
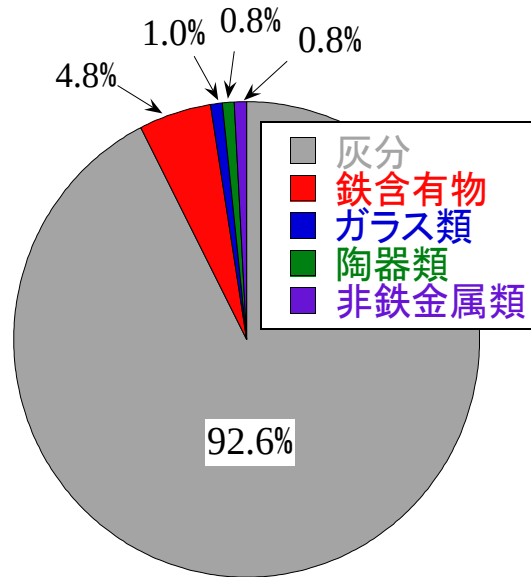
【ガラス類】



【陶器類】



【非鉄金属類】



灰分主体の中に、数%の鉄含有物や非鉄金属類が含まれている。

ヨーロッパにおける一般廃棄物焼却主灰のリサイクル



Confederation of European Waste-to-Energy Plants

Environmentally sound use of bottom ash



Photo: Bottom ash, Indaver

Bottom ash: a sustainable building material

Report 2015



BOTTOM ASH FROM WTE PLANTS METAL RECOVERY AND UTILIZATION



4. A Paradigm Shift in Waste Management

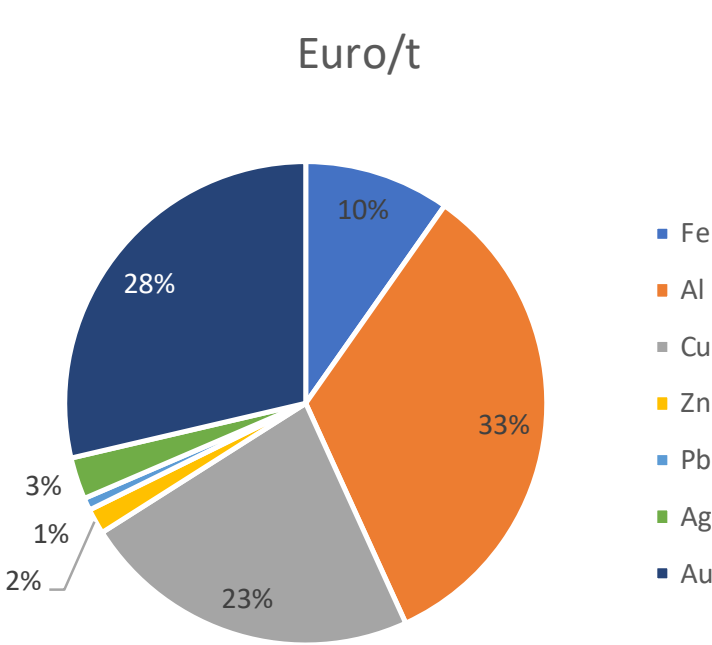
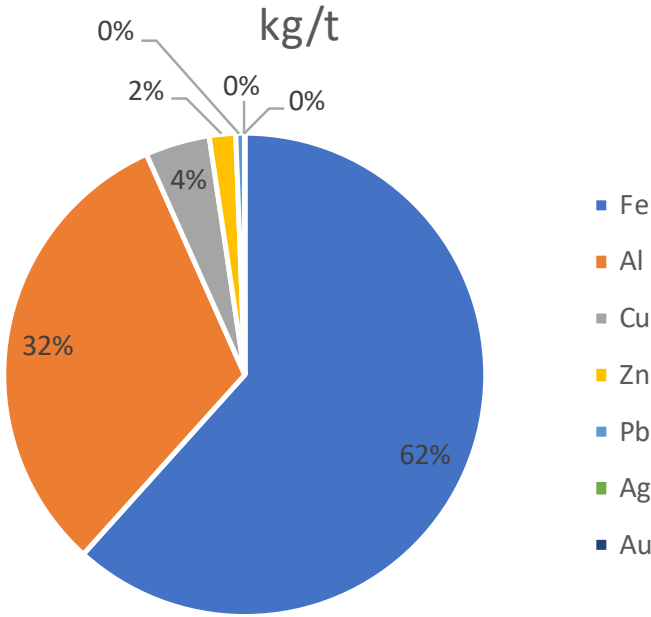
THERMO-RECYCLINGANLAGE



Table 2

Amount of selected metals present in bottom ash, from (Morf, et al., 2013). Scrap prices are subject to variation and thus approximate values.

Metal	Amount [kg/tonne]	Estimated scrap price [€/kg]	
Fe	31.4	0.12	Euro/t
Al	16.1	0.80	3.77
Cu	2.2	4.00	12.88
Zn	0.9	0.73	8.80
Pb	0.3	1.07	0.66
Ag	0.004	270	0.32
Au	0.0004	27600	1.08
			11.04
			38.55





※2016年調査



Aluminium > 0.2 mm



NF-heavy > 0.2 mm



国内で稼働中の選別施設



アンダーサイズ



ミドルサイズ



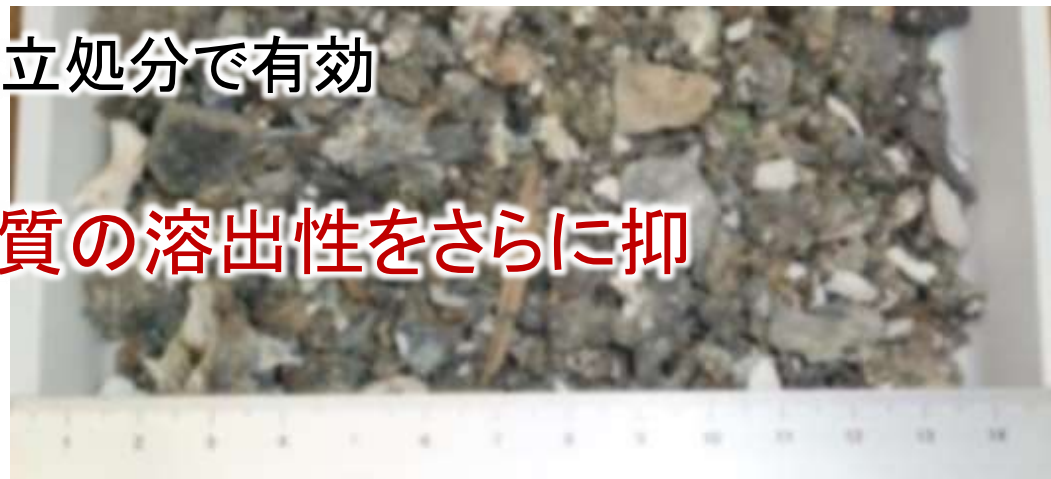
オーバーサイズ

落じん灰(スローカーから直下に落下した粒子)を有価で受け入れ、貴金属を多く含む粒子密度の高い画分の回収を行っている。(写真とは別施設)



焼却主灰のリサイクル推進に向けた研究課題

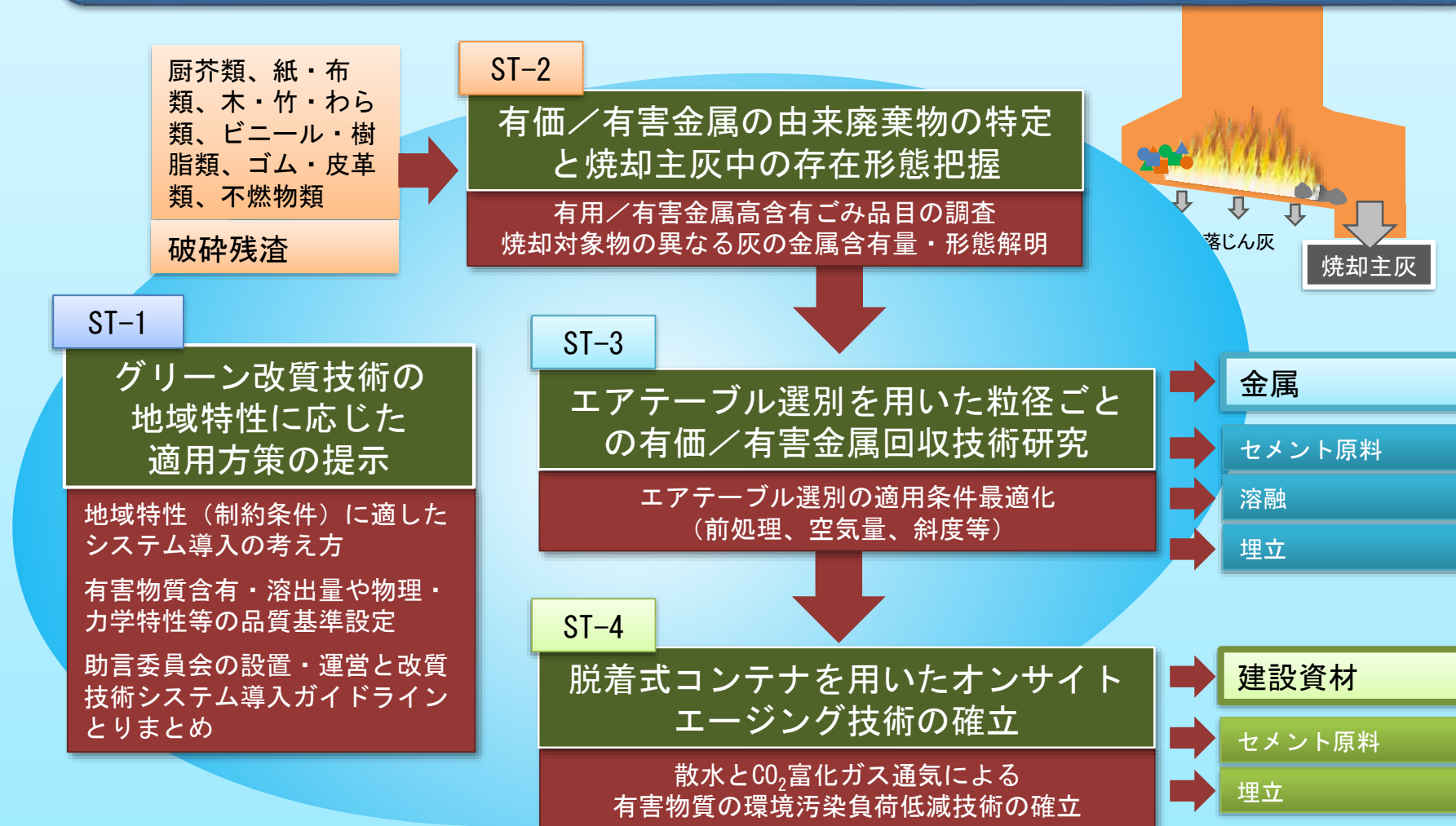
- 金・銀などの有価金属を回収する物理選別処理の効率
は？
 - セメント原料化、建設資材化、埋立処分で有効
- 物理選別処理によって、鉛などの有害金属も同時に回
収される可能性はないか？
 - セメント原料化、建設資材化、埋立処分で有効
- エージング処理により、有害物質の溶出性をさらに抑
制できないか？
 - 建設資材化、埋立処分で有効



環境研究総合推進費 3-1804 (2018-2020年度)
物理選別とエージングを組み合わせた「焼却主灰グリーン改質技術」の確立

- 焼却対象廃棄物中の有害金属低減
- 有価・有害金属の高度物理選別回収
- エージングによる金属溶出等の負荷の低減

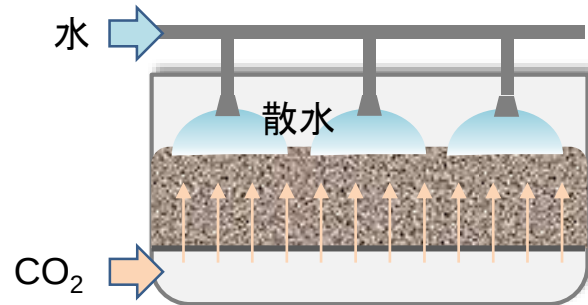
改質処理に必要なエネルギーが
小さく、環境安全性が高い



脱着式コンテナを用いたオンサイトエージング研究

エージング: ある温度・水分・ガス条件で所定の期間養生し、灰を安定化(中性化、不溶化、洗い出し)

▲屋外エージング: 処理に長時間を要する...



オンサイト促進エージング

アーム車脱着式コンテナ(約8 m³)を改造し、散水(標準条件: 液固比0.7 L/kg)とCO₂富化ガス通気(CO₂濃度10% or 100%, 24時間以内)

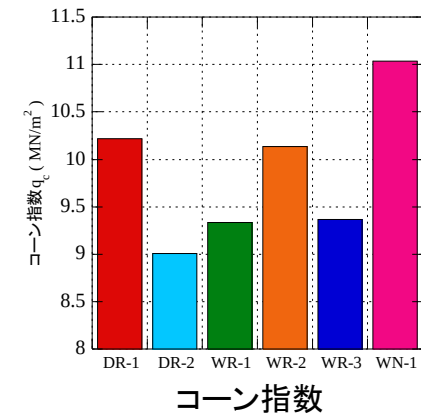
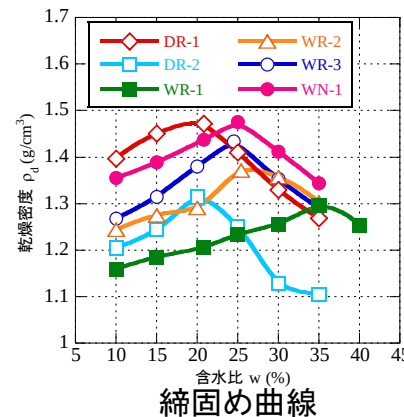
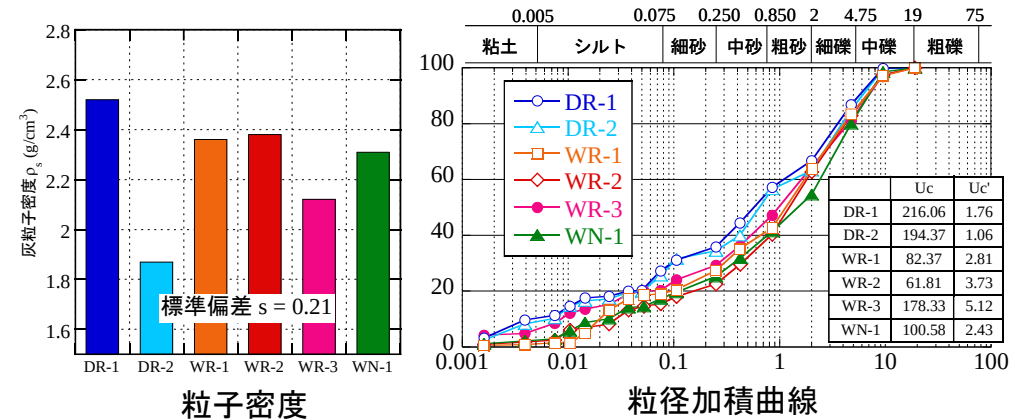


- 中性化
- 不溶化: Pb
- 洗い出し: B, Cl, Cr(VI)

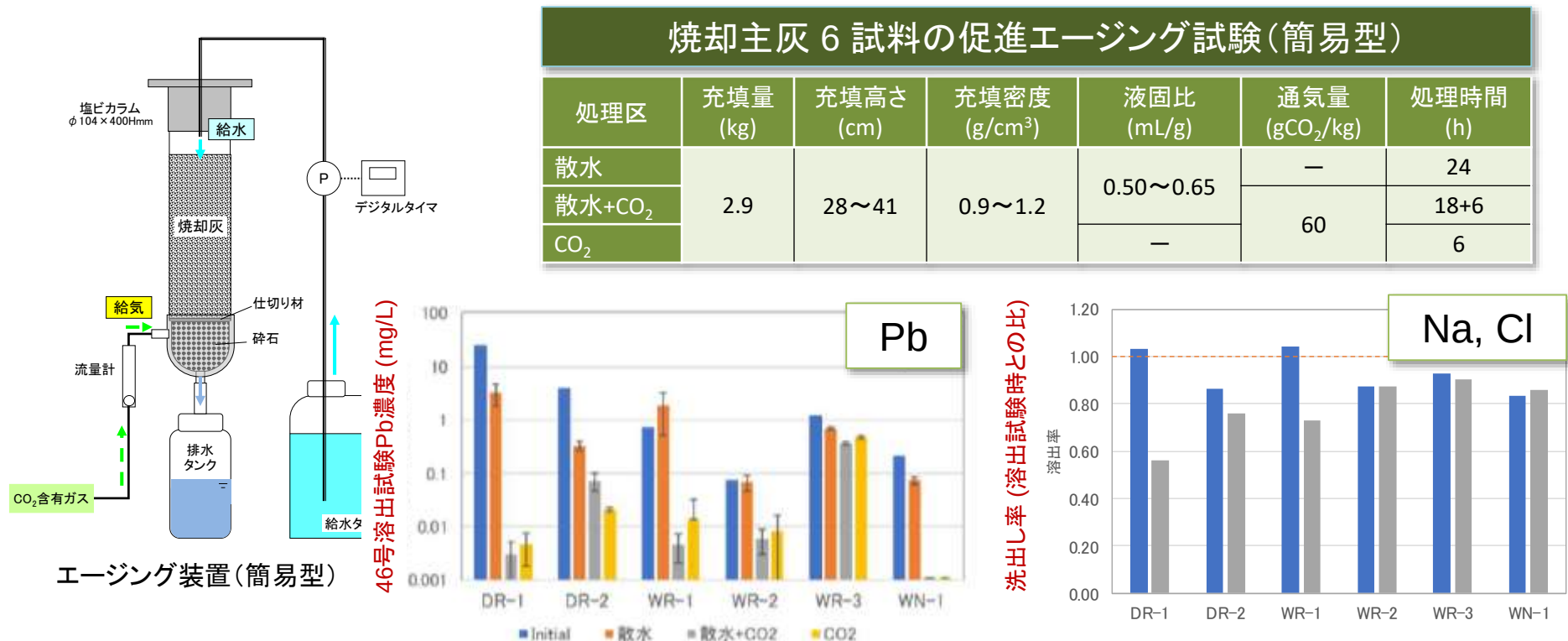


焼却主灰 6 試料の物理・力学特性

- 全国から収集した焼却主灰6試料 (乾灰2, 湿灰4)
- JIS A 1202 土粒子の密度試験 (真空脱気法)
- JIS A 1204 粒度試験 (JIS A 1103 洗い試験により付着細粒分を除去)
- コーン指数試験 ⇒ 盛土材の強度を十分に満たす。

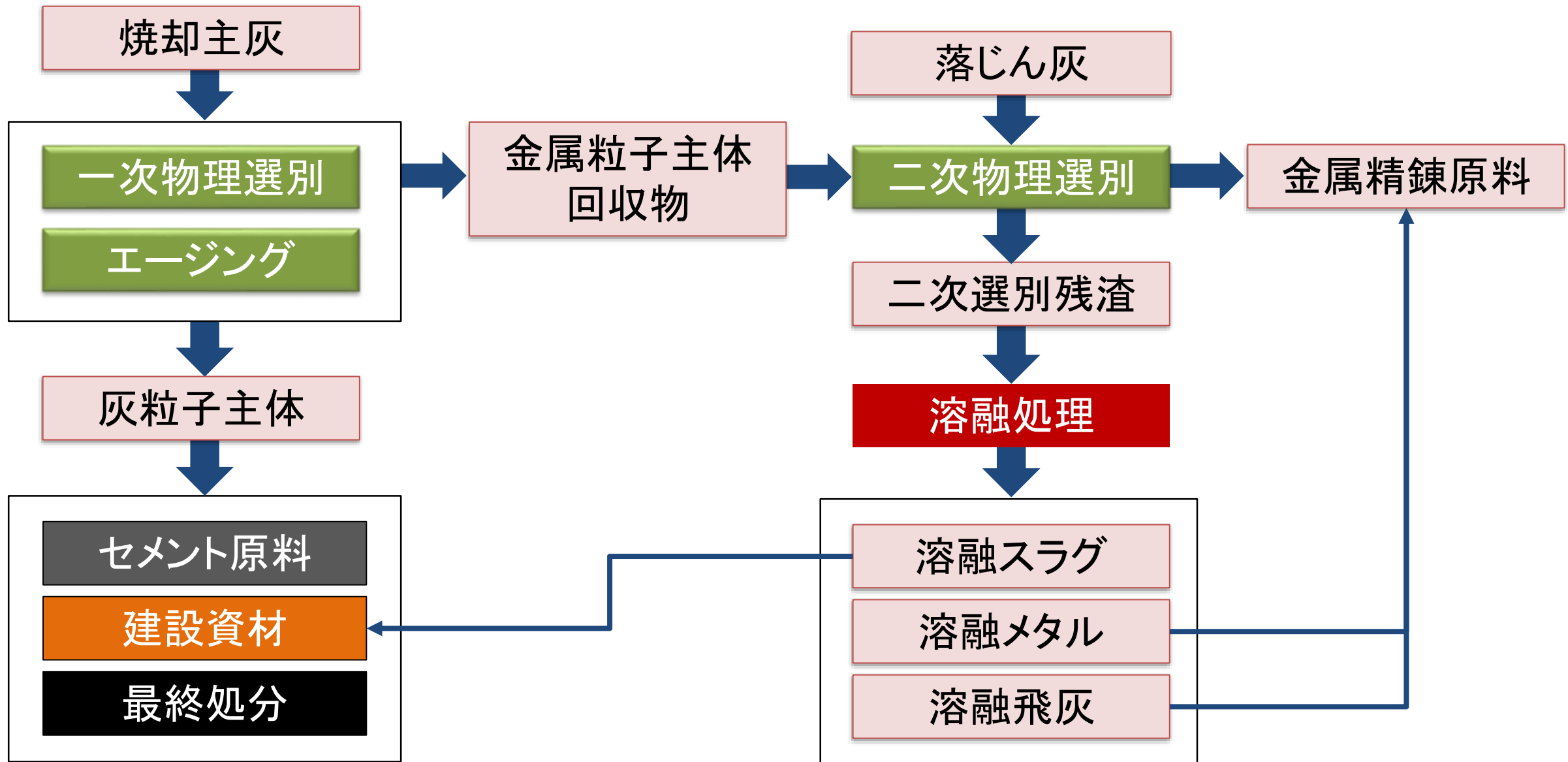


脱着式コンテナを用いたオンサイトエージング研究



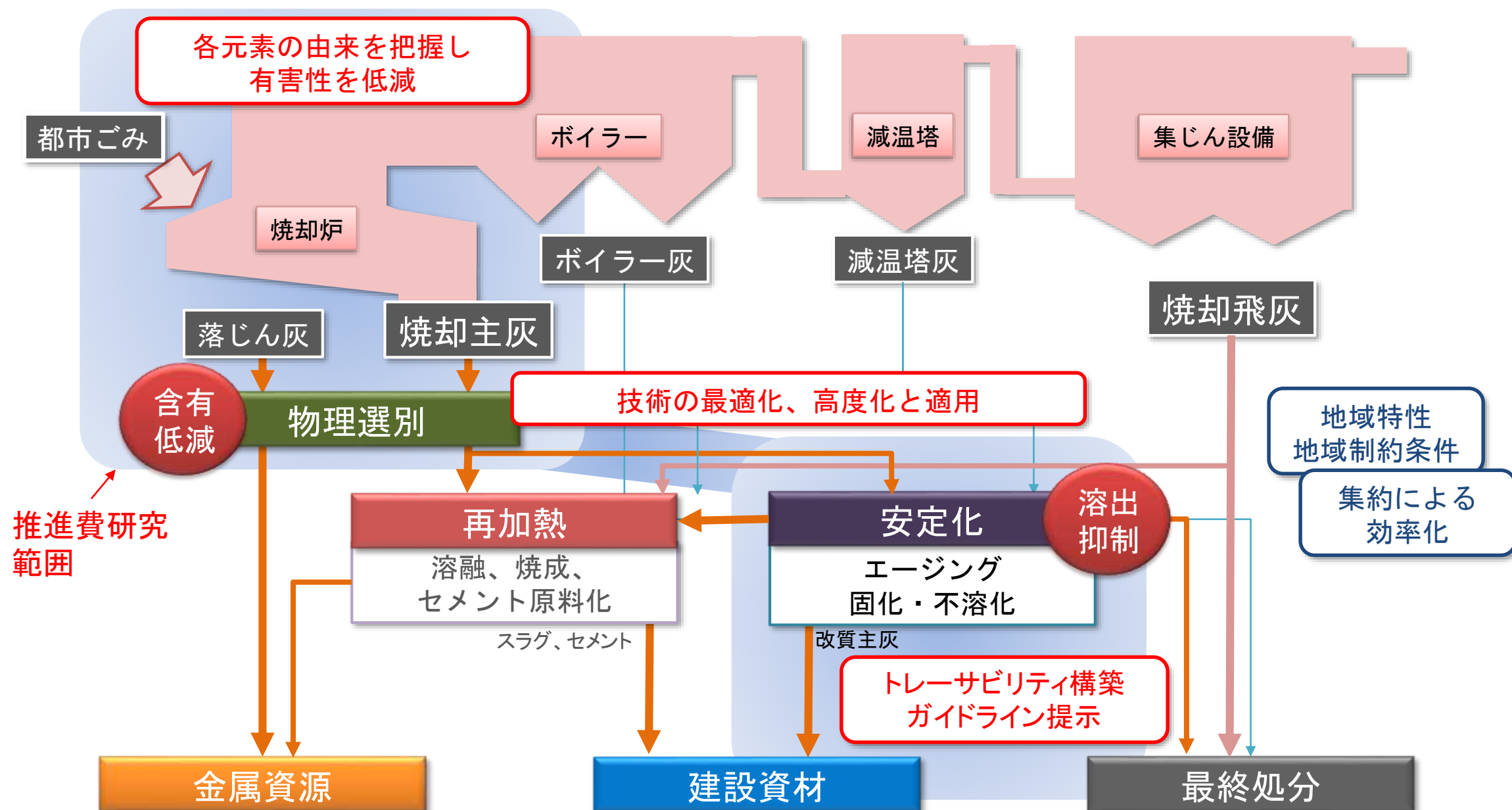
- CO₂通気は6試料中5試料でPb溶出抑制に大きな効果を確認。WR-3は表面水が過剰であった可能性がある。Cr(VI)の溶出の傾向は灰種によって異なった。
- 散水液固比0.7 L/kg以下でClの洗出しは十分進むことを確認した。
- 佐賀市清掃工場CO₂分離・回収施設にてエージング実証試験を実施。

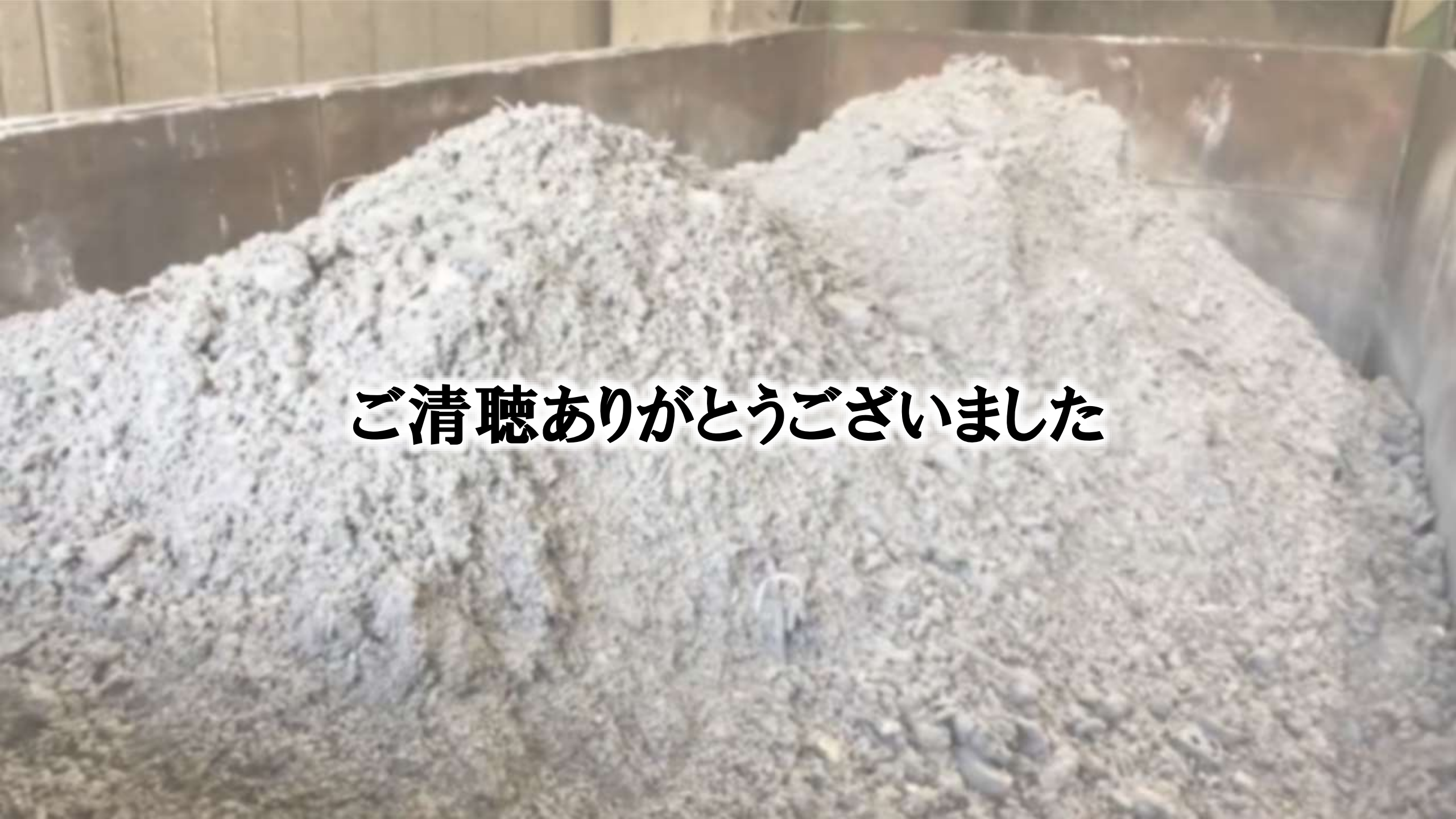
金属粒子物理選別やエージング処理を導入した焼却主灰資源化フロー(案)



地域特性に応じて選択

焼却灰の各性状に応じたりサイクルや最終処分に向けて





ご清聴ありがとうございました