

下水汚泥と都市ごみのゼロエミッション指向型管理

MANAGEMENT OF SEWAGE SLUDGE AND MUNICIPAL SOLID WASTES DIRECTED TOWARD ZERO EMISSION

稲葉 陸太*

花木啓祐*

Rokuta INABA* and Keisuke HANAKI*

ABSTRACT ; Environmental loads in cement production from sewage sludge and tile production from municipal solid wastes (MSW) were assessed using life cycle assessment (LCA) as the examples of waste management directed toward zero emission. Inventory analysis of cement production from sewage sludge shows that consumption of clay, iron material and energy, and CO₂ emission are reduced. On the other hand, consumption of silica stone is increased. Inventory analysis of tile production from MSW shows that consumption of feldspar and pottery stone is reduced. On the other hand, energy consumption and CO₂ emission are increased. As impact assessment, change of mass balance in Japan is evaluated in case if zero emission is put into practice. Impact assessment of cement production from sewage sludge shows that 25% of sewage sludge(dry sludge base) and 0.10% of CO₂ emission are reduced in Japan. If dewatering process is changed, the effect of zero emission is increased. Impact assessment of tile production from MSW shows that 3.32% of MSW ash is reduced and 0.01% of CO₂ emission is increased. If melting process is omitted, increase of energy consumption and CO₂ emission is eliminated. Assessment of regional mass balance shows that cement production from sewage sludge is effective in Chugoku, Shikoku and Kyushu area, and tile production from MSW is effective in Gifu prefecture.

KEYWORDS; zero emission, life cycle assessment, CO₂ emission, cement production from sewage sludge, tile production from municipal solid waste

1 序論

廃棄物問題を解決するために、「ゼロエミッション」という考え方が広く注目されてきている。これは1994年、国連大学によって提唱された言葉であり、中心的な意味内容とされているものは、「産業における生産等の行程を再編成し、産業活動に伴う廃棄物をできる限りゼロに近づける」というものである。一方、地球温暖化阻止のためには、廃棄物管理といえどCO₂等の温室効果ガスの削減責任は免れない。それゆえ、ゼロエミッション構想の目指すべき姿は「廃棄物やエネルギー等の有効利用による環境負荷全般の極小化」と広義にとらえ直す必要がある。このようなゼロエミッションの考え方を導入した廃棄物管理をゼロエミッション指向型管理と呼ぶことにする。その具体的な事例について廃棄物のみならずCO₂の排出等も考慮した定量的評価は、ほとんど研究されていない。本研究では、廃棄物のゼロエミッション指向型管理の事例として、下水汚泥のセメント資源化および都市ごみ焼却灰のタイル資源化を対象とし、ライフサイクルアセスメント(LCA)の手法を用いて、ゼロエミッション実施に伴う資源・エネルギー消費および環境負荷排出の定量的評価を行った。具体的には、まず、ゼロエミッションを実施しないシステム(以下従来型システムと呼ぶ)とゼロエミッションを実施するシステム(以下ゼロエミッション指向型システムと呼ぶ)を比較対象

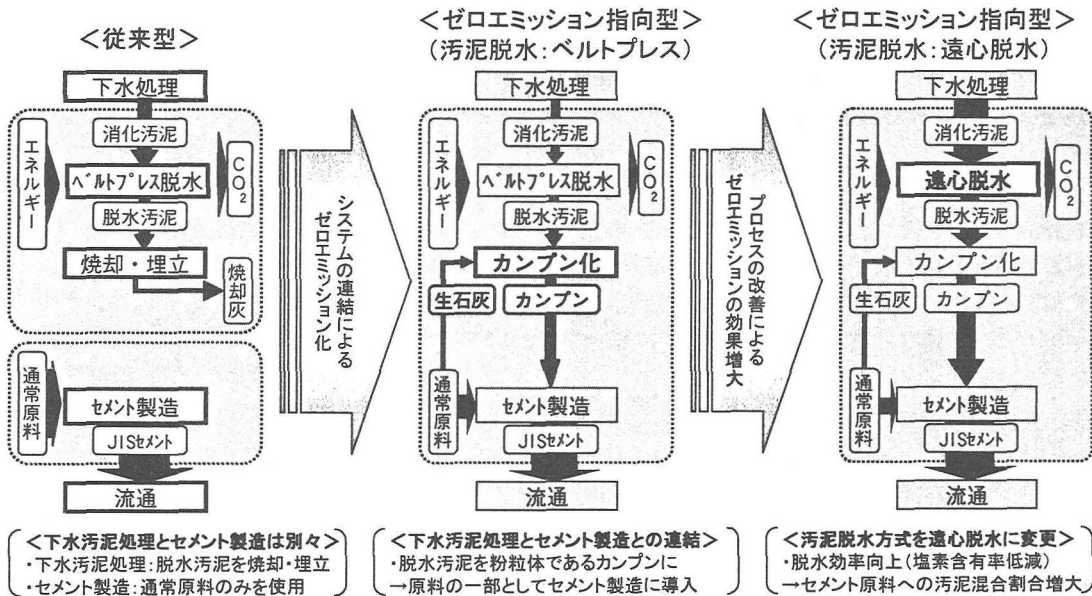
*東京大学大学院工学系研究科都市工学専攻 Department of Urban Engineering, University of Tokyo

とし、評価を行う範囲と項目を設定した。次に、インベントリー分析として、廃棄物の単位量あたりの資源・エネルギー消費および環境負荷量を求め、それらのインベントリーを作成した。つづいて、廃棄物のゼロエミッション指向型管理を日本全体で実施した場合の、日本全体での環境負荷量の増減を求めた。さらに、環境負荷をより低減するための課題を抽出して改善案を検討し、それを導入した場合を想定して、再度インベントリー分析を行い、日本全体での環境負荷量の増減を求めた。また、廃棄物のゼロエミッション指向型管理を日本全体で実施することを想定し、地方別に廃棄物の資源としての需給バランスを検討した。

2 下水汚泥のゼロエミッション指向型管理

2.1 目的の設定と範囲の明確化

下水汚泥は固形分にして年間約 171 万トン発生している（「平成 10 年 日本の下水道」より）。そのゼロエミッション指向型管理になり得る対策として、緑農地利用、建設資材利用およびエネルギー利用（消化ガス）などが考えられているが、緑農地利用は汚泥に含有される重金属が問題となっている。また、建設資材の中でもインターロッキングブロック等は、製品品質の不安定性およびそれに起因する事業採算性に課題が残されている。こういった状況の中、産業規模の大きさ、原料調合のフレキシビリティにより、下水汚泥の大量かつ安定的な受け入れ、および製品品質の安定性、事業採算性が期待出来るという理由で、セメント資源化が注目されている。本研究ではその一例として、消化汚泥を原料の一部として普通ポルトランドセメントを製造するシステムに着目する。このシステムでは、まず、消化汚泥を脱水・乾燥したのち生石灰を加え粉流体であるカンブとする。つぎに、これをセメント産業に導入し他の通常原料と調合して JIS 規格に適合する普通ポルトランドセメントを製造するものである。セメント産業は既に他の様々な産業廃棄物も原料として受け入れているが、ここではそれらとの競合は考えない。評価の対象とするシステムの範囲・項目は原則として、従来型、ゼロエミッション指向型のシステムを比較して異なるものを扱うものと考え、評価対象は図 2-1 の破線で囲まれた範囲になる。



2. 2 インベントリー分析

インベントリー分析では、まず、汚泥固形分 1 kg あたりのゼロエミッション指向型システムおよび従来型システム各々の各プロセスの物質収支を求め、さらに原単位を用いてエネルギー消費、CO₂ 排出を求めている。比較のため、汚泥固形分投入量 (1kg) は従来型、ゼロエミッション指向

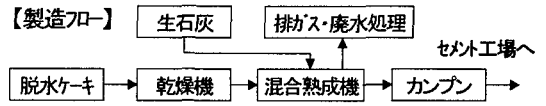
型の両システムで等しくする。セメント製造量も同様に両システムで等しくする。また、対象システムはエネルギー多消費型であり、施設建設段階の環境負荷は相対的に小さいので省略した。

(1) ゼロエミッション指向型システム

1) 汚泥カンブン化プロセスの物質収支；脱水プロセスにおいて投入される汚泥の性状は、高分子系の凝集剤を用いた消化汚泥（汚泥固形分 1kg あたり 24.8kg、含水率 96%）であり、これをベルトプレス脱水方式で含水率 80%の脱水ケーキ（汚泥固形分 1kg あたり 5.0kg）にする。脱水ケーキ中塩素量は凝集剤が石灰系の場合は約 5800mg/kg-Ds に達したり、高分子系の場合では約 500mg/kg-Ds と低い値を示す場合もあるなど変動の幅が大きい。ここでは表 2-1 の（注）で示す文献で仮定された 2000mg/kg-Ds という値を用いる。このとき汚泥中の塩素はすべて水分中に存在するものと考え、汚泥水分中塩素量は 500mg/L となる。脱水ケーキカンブン化プロセスのフローは、図 2-2 に示すとおりで、汚泥固形分 1.0kg あたり脱水ケーキ投入量が 5.0kg、生石灰投入量が 1.0kg、カンブン生産量が 2.33kg（固形分 2.3kg）となる。

2) 生石灰製造プロセスの物質収支；カンブン化に必要な生石灰 1.0kg 製造するのに必要な石灰石の量は、石灰の化学反応式から 1.89kg である。

3) セメント製造プロセスの物質収支；カンブン中の成分のうちセメントの製造工程および品質に悪影響を及ぼすものとして、塩素、リン酸およびアルカリ量が考えられ、各成分ごとのカンブン中の値、セメント製品の現状値および許容値から、セメント原料へのカンブン混入許容割合を求めた（表 2-1）。アルカリ量に着目したカンブン混



出典：下水汚泥のセメント資源化システムに関する共同研究
平成9年 財団法人 下水道新技術推進機構

図 2-2 脱水ケーキカンブン化プロセス

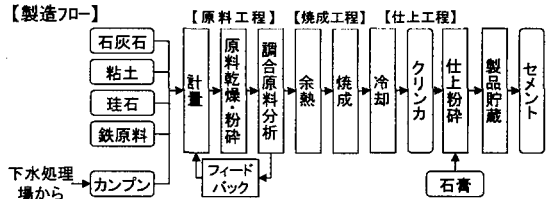


図 2-3 セメント製造プロセス

表 2-1 セメント製造に影響を及ぼす成分
を考慮したカンブン混入許容割合

	脱水ケーキ 中の値 (%—Ds) 塩素は (mg/kg—Ds)	カンブン 中の値 (%—Ds) 塩素は (mg/kg—Ds)	セメント製品		セメント原料 への カンブン混入 許容割合
			現状値 (%) (mg/kg)	許容値 (%) (mg/kg)	(%)
塩素	2000	870	60	70	0.83
リン酸	4.0	1.7	0.1	0.2	4.09
アルカリ量	0.70	0.30	0.60	0.65	-11.04

(注)①各成分の脱水ケーキ中の値、セメント製品の現状値及び許容値は、「下水汚泥のセメント資源化システムに関する共同研究」(平成9年(財)下水道新技術推進機構)の中で仮定された値を参考にした。
②セメント原料重量：セメント製品重量=1557.5:1030
③カンブン重量：カンブン固形分重量=2.33:2.3

表 2-2 各原料の成分組成

	ig.loss	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	Other	Total
カンブン	40.97	8.78	4.34	2.02	38.75	5.15	100.00
石灰石	40.42	8.86	0.04	0.20	49.18	1.29	100.00
粘土	4.28	51.04	32.94	5.17	3.78	2.79	100.00
珪石	2.94	91.08	3.24	0.88	0.00	1.86	100.00
鉄原料	-6.10	35.72	4.92	59.57	3.42	2.46	100.00

(注)「下水汚泥のセメント資源化システムに関する共同研究」(平成9年 下水道新技術推進機構)で示された値を参考に、Totalが100.00%になるよう補正した。

表 2-3 セメント目標係数

	管理目標値	
		中間値
水硬率：HM=CaO/(SiO ₂ +Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃)	2.00~2.19	2.10
珪酸率：SM=SiO ₂ /(Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃)	2.20~2.90	2.55
鉄率：IM=Al ₂ O ₃ /Fe ₂ O ₃	1.20~2.20	1.70

管理目標値の出典：

改定2版 セメントの材料化学 荒井康夫著 大日本図書 1990

入許容割合が負の値を示しているが、これはカンブン中の値が現状値より低いためで、混入割合を大きくしてもアルカリ量は小さくなり問題ない。ゆえに、制約条件としてもっとも厳しい値は塩素に着目した 0.83% であり、これがカンブンのセメント原料としての許容混入割合となる。

表 2-2 はカンブンおよび通常原料の成分組成を示したものである。鉄原料の $ig.loss$ (強熱減量) が負の値を示しているのは、鉄が酸化物となって重量が増し、強熱による増量があるためと思われる。セメント原料の調合割合の決定に用いられるのがセメント目標係数 (表 2-3) で、セメントの主成分である CaO 、 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 の値で決まる。筆者らは管理目標の中間値を用い、また各原料の成分組成値 (表 2-2)、目標係数の式 (表 2-3) からカンブンの混入割合に対する各通常原料混入割合の変化を表す (2-1) 式を求めた。

石灰石： $y_1 = -0.89x + 86.18$

粘 土： $y_2 = -0.15x + 10.48$

珪 石： $y_3 = 0.06x + 0.97$

鉄原料： $y_4 = -0.02x + 2.38$

… (2-1)

(x：カンブン混入割合)

(2-1) 式に前述したカンブン混入許容割合を代入し、ゼロエミッション指向型システムにおける通常原料の混入割合を求めた。これと表 2-4 の量比から、セメント製造プロセスの物質収支を求めた。4) エネルギー消費と CO_2 排出；1) から 3) で求めた物質収支の値と表 2-6 に示す原単位の積から、エネルギー消費量と CO_2 排出量を求めた。エネルギー消費が不明の場合は、 CO_2 排出の値を、二酸化炭素排出強度の起源別寄与の値 (表 2-5 の⑩、⑪) で各エネルギー源 (その他の化石燃料は重油と考えた) に割り振り、その値とエネルギー消費に伴う CO_2 排出原単位 (表 2-6 の⑧、⑨) の逆数との積から求めた。例えば、セメント製造における電力消費の値は以下の (2-2) 式で求められる。

セメント製造における電力消費の値

$$= \text{石灰石由来の} CO_2 \text{ 排出量} \times \frac{a}{b} \times \frac{1}{\text{⑧}}$$

… (2-2)

(a,b…表 2-5 の⑩で示された起源別寄与。a：電力、b：石灰石)
汚泥中有機分の発熱量はセメント焼成で用いられるものとした。生石灰の採取・輸送およびカンブンの輸送分は粘土等の通常原料の採取・輸送分と同程度と考えた。1) から 4) で求めた値を表 2-8 に示した。

(2) 従来型システム

- 1) 汚泥焼却・埋立プロセスの物質収支；投入する消化汚泥の量・性状および脱水プロセスの物質収支も 2.2 の (1) の 1) と同じである。発生した脱水汚泥 5.0kg を焼却して 0.25kg の焼却灰にし、埋め立てるものとする。
- 2) セメント製造プロセスの物質収支；セメント製造量をゼロエミッション指向型システムと等量にして、

表 2-4 セメント製造における量比

調合原料	クリンカー	石膏	セメント
1557.5	1000	30	1030

(注) 下水汚泥のセメント資源化に関する共同研究
平成9年 (財) 下水道新技術推進機構 より

表 2-5 二酸化炭素排出強度への起源別寄与

分類	番号	電力	石灰石	その他化石燃料
セメント	⑩	1.009146	14.151749	6.273222
廃棄物処理 (公営)	⑪	0.177075	0.003431	0.324520

(t-C/百万円、生産者価格、1990年)

表 2-6 原単位

種類	番号	分類	値	単位	出典
電力消費	①	汚泥脱水	0.160	kWh/kg	*
	②	汚泥乾燥	0.750	kWh/kg	*
	③	汚泥熟成	0.100	kWh/kg	*
	④	生石灰粉砕	0.023	kWh/kg	*
重油消費	⑤	生石灰焼成	0.1	L/kg	*
CO2 排出	⑥	セメント	0.228	kg-C/kg	**
	⑦	廃棄物処理 (公営)	0.1187	kg-C/kg	***
	⑧	電力	0.165	kg-C/kWh	****
	⑨	重油	0.782	kg-C/L	****

* (財) 下水道新技術推進機構へのヒアリングでの値
** 土木学会地球環境委員会環境負荷評価 (LCA) 検討小委員会
土木建設業における環境負荷評価 (LCA) 検討部会、
「平成7年度調査報告書」、1996
*** 空気調和・衛生工学会 地球環境に関する委員会、
「地球環境に関する委員会報告書」、1995
**** 環境庁企画調整局環境研究技術課、(社) 環境情報科学センタ
「ライフサイクルアセスメントの実践 環境負荷低減を目指して」、1996

(2-1) 式のカンプン混入許容割合を 0.00%として従来型システムにおける各通常原料の混入割合を求めた。あとは2. 2の(1)と同様にして、セメント製造プロセスにおける物質収支を求めた。

3) エネルギー消費と CO₂ 排出; 2. 2の(1)と同様に、1)と2)で求めた物質収支の値と原単位の積から、エネルギー消費量と CO₂排出量を求めた。

1) から3)で求めた値を表2-7に示した。

表2-7 従来型システムのインベントリー

項目	消化汚泥 焼却・埋立	セメント 製造	合計
投入消化汚泥	24.8	0.0	24.8
資源 消費	石灰石	243.1	243.1
	粘土	29.6	29.6
	珪石	2.7	2.7
	鉄原料	6.7	6.7
エネルギー 消費	電力	10.9	12.4
	重油	14.6	15.0
	合計エネルギー	160.0	167.7
	直接分	94.0	94.0
CO ₂ 排出	電力分	6.6	7.5
	重油分	41.7	43.1
	合計	142.4	144.6
製造セメント	0.0	186.6	186.6

単位…電力はkwh、重油はL、エネルギーはMcal、それ以外はkg
数値は全て汚泥固形分1kgあたり

表2-8 ゼロエミッション指向型システム
のインベントリー

項目	生石灰 製造	消化汚泥 カンパニ化	セメント 製造	合計
投入消化汚泥	0.0	24.8	0.0	24.8
資源 消費	石灰石	1.9	241.0	242.9
	粘土	0.0	29.2	29.2
	珪石	0.0	2.9	2.9
	鉄原料	0.0	6.6	6.6
エネルギー 消費	電力	1.0	10.9	12.0
	重油	0.1	14.2	14.3
	合計エネルギー	1.0	156.3	159.6
	直接分	0.7	93.2	94.0
CO ₂ 排出	電力分	0.6	6.6	7.3
	重油分	0.3	40.6	40.9
	合計	1.1	140.5	142.1
製造セメント	0.0	0.0	186.6	186.6

単位…電力はkwh、重油はL、エネルギーはMcal、それ以外はkg
数値は全て汚泥固形分1kgあたり

表2-7、表2-8の比較から、従来型に比べゼロエミッション指向型システムでは、石灰石消費が0.1%、粘土消費が1.2%および鉄原料消費が0.8%減少する一方、珪石消費が5.3%増加する。また、エネルギー消費が4.8%、CO₂排出が1.7%減少する。これは、ゼロエミッション指向型システムでは、カンプン中の SiO₂ 含有率が他の原料に比べ低く、目標係数である珪酸率を保つよう珪石の割合が増えること、カンプン中の有機分の熱量がセメント焼成で有効利用されること、焼却に比べカンプン化の方がエネルギー消費が少ないことが理由と考えられる。エネルギー削減割合に比べ CO₂ の削減割合が小さいのは石灰石由来の直接分 CO₂排出量が大きく、ほぼ不変であるためである。

2. 3 下水汚泥セメント資源化の実施が日本全体の物質収支に及ぼす影響

(1) ベルトプレス脱水の場合

インベントリー分析の結果得られた各環境負荷項目の収支量の値をもとに、下水汚泥セメント資源化を日本全体で実施した場合の、各項目の収支量の総和の変化を求め、下水汚泥セメント資源化の実施が日本全体に及ぼす影響について検討した。カンプンと粘土等の通常原料の輸送距離は同程度と考え、また地域による差異は無いものと考えた。ここでは、ゼロエミッション実施による日本全体の物質収支の変化量と変化率を求め、表2-9の「ベルトプレス」の列に示した。表2-9を見ると、CO₂の排出は日本全体で年間約 107 万 t 減少しているが、削減率は 0.09%と微小である。一方、下水汚泥固形分の排出は、変化量が年間約 43 万 t 減少、削減率が 25%と顕著に減少している。

表2-9 ゼロエミッション実施による
日本全体の物質収支の変化

		変化量(ZE-従来)		変化率(%)	
		ベルトプレス	遠心脱水	ベルトプレス	遠心脱水
重油	(万kl)	-30	-35	-0.45	-0.53
石灰石	(万t)	-9	-12	-0.04	-0.06
粘土	(万t)	-17	-18	-0.96	-0.99
珪石	(万t)	6	9	1.29	1.89
鉄原料	(万t)	-2	-3	-0.02	-0.02
CO ₂	万t-CO ₂	-107	-129	-0.09	-0.11
汚泥固形分	(万t)	-43	-59	-25.07	-34.27

※重油消費量(1997)…「F 94 エネルギー総合便覧」日本工業新聞社
石灰石、粘土、珪石消費量(1990)…「鉱産物の知識と取引-工業用鉱物編」吉田園夫著
鉄原料消費量(1990)…「第四十八回 日本統計年鑑」総務庁統計局編
CO₂排出量(1990)…「環境白書(平成4年版)」環境庁
汚泥固形分発生量(1996)…「平成10年度 日本の下水道」建設省都市局下水道部監修
セメント製造量(1990)…概算値、「第四十八回 日本統計年鑑」総務庁統計局編

(2) 遠心脱水の場合

ここでは、カンブ入割合を増大させるために、汚泥脱水方式をベルトプレスにくらべ脱水効率の高い遠心脱水に変更して汚泥の含水率を低減し、DSあたりの塩素含有量を低減させることを考えた。汚泥性状は2.3(1)と同様(汚泥水分中塩素量500mg/L)であり、このとき脱水汚泥の含水率を75%とすると、DSあたりの塩素含有量は1500mg/kgとなり、カンブ入の許容混合割合は1.14%となる。これをもとに、2.2と同様に汚泥固形分1.0kgあたりのインベントリー分析を行い、2.3(1)と同様にゼロエミッション指向型管理の実施前と実施後の日本全体の収支量を求め、表2-9の「遠心脱水」の列に示した。「遠心脱水」の数値を「ベルトプレス」の数値と比較すると、CO₂排出はさらに約22万t減少しているが、削減率は0.11%と有意な差はない。一方、下水汚泥固形分の排出は変化量が年間約59万t減少、削減率が34%であり、脱水方式の変更が有効な改善策である事が示された。

2.4 下水汚泥のセメント資源としての需給バランス

ここでは各地方別の下水汚泥の発生量と、セメント産業側の受け入れ可能量を比較する。地方別の汚泥固形分発生量は、前述した年間発生量と、水洗便所設置済み人口(「平成8年度 下水道統計」より)の地方別の値を全国値で除した値との積で求めた。また、地方別の受け入れ可能量は、地方別のセメント製造量(「下水汚泥のセメント資源化に関する共同研究」より)を、インベントリー分析で求めた汚泥固形分あたりの製造セメントの比率で除した値で求めた。図2-4をみると、中国、四国および九州地方では、汚泥受け入れ可能量が発生量を上回っているが、関東、中部および近畿地方といった三大都市圏を含む地方は依然として汚泥受け入れ可能量が発生量を大きく下回っている。東日本(北海道から中部)、西日本(近畿から九州)というより大きなスケールで需給バランスを考えても、東日本では圧倒的に汚泥発生量が受入可能量を上回っている。西日本では近畿で受け入れ切れなかった汚泥を、受入量が余っている九州などで吸収することも考えられるが、それでも西日本全体としては供給過剰である。

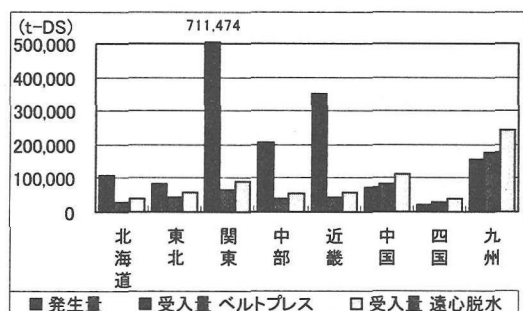


図2-4 下水汚泥のセメント資源

としての需給バランス(地方別)

3 都市ごみ焼却灰のゼロエミッション指向型管理

3.1 目的の設定と範囲の明確化

都市ごみ焼却灰は年間約600万トン発生している。そのゼロエミッション指向型管理になり得る対策として、焼却灰そのもののセメント資源化、タイル資源化、焼成によるブロック化、溶融スラグの骨材化などが考えられている。本研究では、タイル製造が盛んな地域において地場産業を生かすことができ、また他の建設資材化に比べ付加価値の高い製品に再資源化できるという特色を持つタイル資源化に着目する。これは、焼却灰を溶融スラグにし、通常原料と調合してJIS規格タイルを製造するものである。評価対象とするシステムの範囲・項目は、原則として、従来型、ゼロエミッション指向型のシステムを比較して異なるものを扱う。これを図3-1に示す。

3.2 インベントリー分析

インベントリー分析では投入される都市ごみ焼却灰溶融スラグの固形分量、および製造されるタイルの量を両システムで等量とする。都市ごみ焼却灰溶融スラグ、通常原料および目標とするタイル製品の成分組成

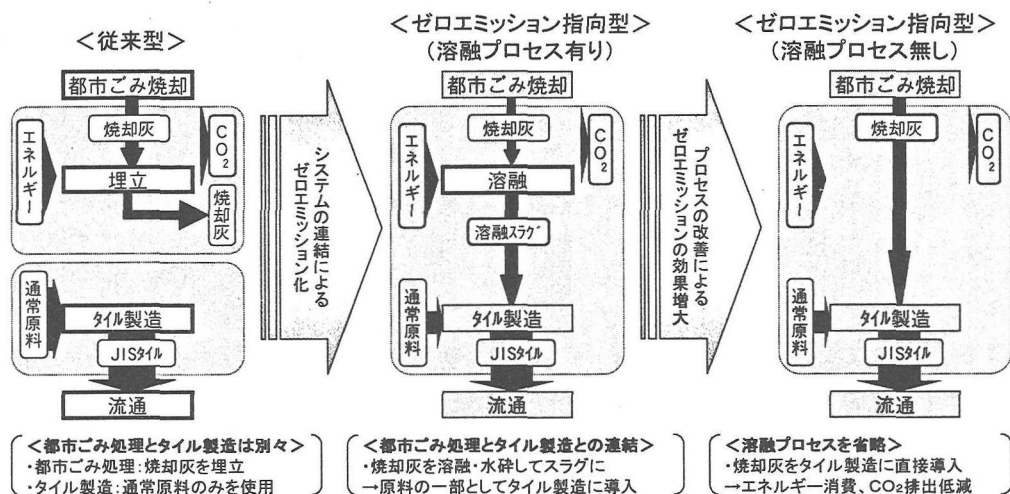


図 3-1 インベントリー分析の範囲

(表 3-2) から、タイル製品の呈色で問題となる Fe_2O_3 の含有率 1% を制約条件として考慮すると、都市ごみ焼却灰溶融スラグのタイル原料としての許容混入割合は 16% で、都市ごみ焼却灰溶融スラグ 1.0kg あたりのタイル製造量は 5.4kg となる。タイル製造における原料調査は、目標係数が存在せず経験的に行われている。そこで、粘土についてはタイル原料の成形性を保持する可塑性原料であるため固定とし、長石および陶石については通常の混合比率 1:1:1 を保ったまま減少させることにした。これをもとに都市ごみ焼却灰溶融スラグ 1.0kg あたりのシステム全体の物質収支を算出し、これと表 3-2 の CO_2 原単位からインベントリーを作成した(表 3-3、3-4)。対象システムはエネルギー多消費型であり、設備の建設に関する環境負荷は相対的に小さいことから無視した。溶融スラグの輸送分は粘土等の通常原料の輸送分と同程度と考えた。表 3-3、表 3-4 の比較から、従来型に比べゼロエミッション指向型システムでは、長石消費

が 25.8%、陶石消費が 33.3% 減少する。また、エネルギー消費が 12.7%、 CO_2 排出が 14.1% 増加する。

【製造フロー】

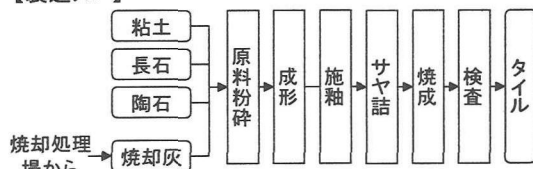


図 3-2 タイル製造プロセス

表 3-1 使用した主な CO_2 排出原単位

分類	値	単位
電力	0.104	kg-C/kWh
重油	0.802	Kg-C/L
軽油	0.721	Kg-C/L
灯油	0.689572	Kg-C/L
LPG	0.81996	kg-C/kg
都市ガス	0.5835	kg-C/m ³

出典: 容器包装リサイクルに関する定量的分析研究会

「包装廃棄物のリサイクルに関する定量的分析」

(株)野村総合研究所、1995

表 3-2 各原料の成分組成

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	lg.loss
粘土*	59.7	25.5	1.08	1.06	0.48	0.57	1.01	0.01	10.53
長石**	79.4	13	0.18	0.05	0.36	0.01	3.89	2.65	0.48
陶石***	84.3	10.7	0.42	0.15	0.08	0.08	2.28	0.01	1.92
スラグ****	41.2	15	3	1.1	30.4	3.2	0	3.7	2.4

*小名田1級木節

**大福A級長石

***備前陶石

****名古屋市の都市ごみ焼却灰から作成

(注) データ全て%。メーカーの試験データを参考にした。

3. 3 都市ゴミ焼却灰タイル資源化の実施が日本全体の物質収支に及ぼす影響

(1) 溶融有りの場合

インベントリー分析の結果得られた各環境負荷項目の収支量の値をもとに、都市ごみ焼却灰タイル資源化を日本全体で実施した場合の各項目の収支量の総和の変化を求め、表3-5の「溶融有り」の列に示した。溶融スラグと粘土等の通常原料の輸送距離は同程度と考え、また地域による差異は無いものと考えた。表3-5を見ると、重油の消費、CO₂の排出が増加する一方、長石、陶石は顕著に減少している。焼却灰は日本全体で20万t減少しているが、削減率は3.32%にとどまっている。

表3-3 従来型システムのインベントリー

項目	最終埋立	タイル製造	合計
投入都市ごみ	1.00	0.00	1.00
資源	粘土	0.00	2.30
	長石	0.00	3.10
	陶石	0.00	0.30
	電力	0.00	0.08
エネルギー	軽油	0.00	0.02
	重油	0.00	0.00
	LPG	0.00	0.71
	合計エネルギー	0.01	8.91
CO ₂	電力分	0.00	0.01
	軽油分	0.00	0.02
	重油分	0.00	0.00
	LPG分	0.00	0.58
	合計	0.00	0.61
製造タイル	0.00	5.40	5.40

単位: kg(ただし電力: kwh, 軽油: L, エネルギー: Mcal)
数値は全て焼却灰1kgあたり

表3-4 ゼロエミッション指向型システムのインベントリー

項目	溶融	輸送	タイル製造	合計
投入焼却灰	1.00	0.00	0.00	1.00
資源	粘土	0.00	2.30	2.30
	長石	0.00	2.30	2.30
	陶石	0.00	0.20	0.20
	電力	0.10	0.06	0.16
エネルギー	軽油	0.00	0.02	0.02
	重油	0.10	0.00	0.10
	LPG	0.00	0.71	0.71
	合計エネルギー	1.21	0.00	8.85
CO ₂	電力分	0.01	0.01	0.02
	軽油分	0.00	0.01	0.01
	重油分	0.08	0.00	0.08
	LPG分	0.00	0.58	0.58
	合計	0.09	0.60	0.69
製造タイル	0.00	0.00	5.40	5.40

単位: kg(ただし電力: kwh, 軽油: L, エネルギー: Mcal)
数値は全て焼却灰1kgあたり

(2) 溶融無しの場合

ここでは、エネルギー消費を削減するために、都市ごみ焼却灰を溶融せず、直接タイル原料として導

入することを考えた。焼却灰の組成は焼却以前の段階で安定化され、それに伴うあらたなエネルギーの消費、CO₂排出は無いものとする。以上の議論をふまえて、溶融プロセスを省略した場合について、3-2と同様にインベントリー分析を行い、ゼロエミッション指向型管理の実施前と実施後の日本全体の収支量を求め、表3-5の「溶融無し」の列に示した。表3-5を見ると、溶融プロセスを省略した場合、重油の消費の増加、CO₂の排出の増加が無くなるのが分かった。

表3-5 ゼロエミッション実施による日本全体の物質収支の変化量と変化率

		変化量(ZE-従来)		変化率(%)	
		溶融有り	溶融無し	溶融有り	溶融無し
軽油	(万L)	0	0	0.00	0.00
重油	(万L)	2	0	0.03	0.00
LPG	(万t)	0	0	0.00	0.00
耐火粘土	(万t)	0	0	0.00	0.00
長石	(万t)	-16	-16	-13.56	-13.56
陶石	(万t)	-2	-2	-9.72	-9.72
CO ₂	(万t-C)	2	0	0.01	0.00
焼却灰	(万t)	-20	-20	-3.32	-3.32

※重油、軽油、LPG消費量(1997)・・・「'94 エネルギー総合便覧」日本工業新聞社
耐火粘土消費量(1989)・・・「鉱産物の知識と取引-工業用鉱物編」吉田國夫著
長石、陶石消費量(1990)・・・「鉱産物の知識と取引-工業用鉱物編」吉田國夫著
CO₂排出量(1990)・・・「環境白書(平成4年版)」環境庁
焼却灰発生量(1994)・・・「日本の廃棄物処理 平成6年度版」厚生省水環境部
タイル製造量(1990)・・・概算値、「1995年版 建材統計要覧」通商産業省生活産業局窯業建材課

3. 4 都市ごみ焼却灰のタイル資源としての需給バランス

ここでは各地方別の都市ごみ焼却灰の発生量と、タイル産業側の受け入れ可能量を比較し、都市ごみ焼却灰のタイル資源としての需給バランスを検討する。地方別の都市ごみ焼却灰発生量は、都市ごみ焼却残さ(「日本の廃棄物処理 平成6年度版」より)の地方別の値を全国値で除して求めた。また、地方別のタイル産業側の受け入れ可能量は、「1995年版 建材統計要覧」を参考にした。図3-3に示された結果から、都市ご

み焼却灰のタイル資源化を地方別に広域的に行っても、現在の条件で有効であると言えるのは中部地方においてのみであろう。東日本（北海道から中部）、西日本（近畿から九州）というより大きなスケールで考えても、都市ごみ焼却灰発生量が受入可能量を大きく上回っている。ただし、都道府県ごとに見ると、タイル製造業が盛んな岐阜県では受け入れ可能量が発生量を上回るという結果が出ている。

4 結論

セメント資源化による下水汚泥のゼロエミッション指向型管理の実施によって、汚泥中の無機分が代

替して、粘土、鉄原料等の資源消費が減少することがわかった。しかし汚泥は SiO_2 が少ないため、それを補うため珪石の消費は増加する。また、カンブ化プロセスのエネルギー消費が焼却に比べて少なく、汚泥中の有機分の発熱量がセメント焼成に使われるため、エネルギー消費とそれに伴う CO_2 排出が減少することがわかった。改善策として、汚泥脱水方式の変更により汚泥含水率を下げ、塩素含有量を低減しカンブ混入量を増加することにより、前述したゼロエミッション実施の効果が增大することも示された。

タイル資源化による都市ごみのゼロエミッション指向型管理の実施によって、焼却灰溶融スラグが代替することによって、長石、陶石の消費が減少することがわかった。エネルギー多消費型の溶融プロセスが加わるため、エネルギー消費とそれに伴う CO_2 排出が増加することがわかった。改善策として、都市ごみ焼却灰の組成の安定化を図り、溶融プロセスを省略することが可能であれば、エネルギー消費とそれに伴う CO_2 排出の増加は無くなることも示された。

下水汚泥のセメント資源化の場合は、カンブのセメント原料への混入率は非常に小さかったが、受け入れ側のセメントの生産量が汚泥固形分の発生量に比べ非常に大きいため、需給バランスの面で有効であるとの結果を得た。一方、都市ごみ焼却灰のタイル資源化の場合は、焼却灰溶融スラグのタイル原料への混入率は大きかったが、受け入れ側のタイルの生産量が焼却灰の発生量に比べ小さいため、需給バランスの面では有効であるのはタイル産業が盛んな地域でのみであるとの結果を得た。これらの結果を踏まえて、ゼロエミッションの導入及びその改善策等を検討する際は、対象とする廃棄物の混入率と発生量、廃棄物を受け入れる製品の生産量の規模に十分注意を払う必要がある。

5 今後の課題

本研究では、脱水ケーキ中の塩素含有量を 2000mg/kg-Ds と仮定して様々な評価を行ったが、塩素含有量の変動も考慮する必要がある。また、リン除去等の高度処理に伴い汚泥中のリン濃度が高まる可能性がある。リンは塩素とともにセメント品質に影響を及ぼす成分であり、混入率の算出においてはリンについても考慮しなければならないだろう。都市ごみ焼却灰のタイル資源化として焼却と溶融が分離したプロセスについて評価したが、近年盛んに研究されている高熱効率型の処理プロセスの適用を検討する必要がある。また、経済性も評価軸として加える必要がある。今後は必要なデータを入力すればゼロエミッションの有効性が容易に評価できるように体系化・標準化された評価手法を構築することが望まれる。

なお、本研究は文部省科学研究費・特定領域研究「ゼロエミッションをめざした物質循環プロセスの構築」の補助を得てなされたものである。

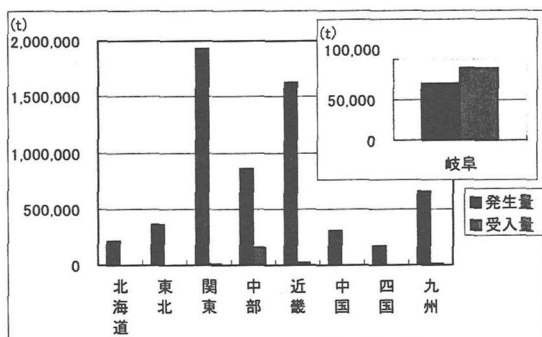


図3-3 都市ごみ焼却灰の
タイル資源としての需給バランス

主要参考文献

- ・荒井康夫、「セメントの材料化学」、大日本図書、1990
- ・環境庁、「平成10年度 環境白書」、1998
- ・建設省都市局下水道部 監修、「平成10年 日本の下水道」、(社)日本下水道協会、1998
- ・環境庁企画調整局環境研究技術課、社団法人 環境情報科学センター、「ライフサイクルアセスメントの実践 環境負荷低減を目指して」、化学工業日報社、1996
- ・土木学会地球環境委員会環境負荷評価(LCA)検討小委員会 土木建設業における環境負荷評価(LCA)検討部会、「平成7年度調査報告書」、1996
- ・空調和・衛生工学会 地球環境に関する委員会、「地球環境に関する委員会報告書」、1995
- ・環境庁国立環境研究所、「産業連関表による二酸化炭素排出原単位」、1997.2
- ・財団法人下水道新技術推進機構、「下水汚泥のセメント資源化システムに関する共同研究」、1997
- ・日本工業新聞社、「'94 エネルギー総合便覧」、1994
- ・総務庁統計局、「第四十八回 日本統計要覧」、日本統計協会、毎日新聞社、大蔵省統計局、p.294,1999
- ・(株)野村総合研究所 容器包装リサイクルに関する定量的分析研究会、「包装廃棄物のリサイクルに関する定量的分析」、1995
- ・通商産業大臣官房調査統計部、「平成八年工業統計書 品目編」、p.202,1998.4
- ・吉田國夫、「鉱産物の知識と取引ー工業用鉱物編」、財団法人通商産業調査会、p.254-257,p.263-275, p.390-401,p.405-413
- ・「廃棄物関係統計総合資料集 厚生省水道環境部調べ(日本の廃棄物処理 平成6年度版より)」、都市と廃棄物,Vol.27,No.11,1997.11
- ・通商産業省生活産業局、「1995年版 建材統計要覧」、1995