

B-45 下水汚泥セメント資源化によるゼロエミッションに向けた汚泥処理

東京大学大学院 工学系研究科 都市工学専攻 ○稲葉陸太

東京大学大学院 工学系研究科 都市工学専攻 花木啓祐

1. はじめに

環境負荷排出の極小化を目的としたゼロエミッション構想の一環として、下水汚泥のセメント資源化システムが考えられている。このシステムではまず、脱水汚泥を乾燥し生石灰を加え水分の低い粉流体（以下カンブンという）とする。つぎに、これを通常原料と調合して JIS 規格セメントを製造する。本研究では主として、ゼロエミッションの導入前のシステム（以下従来型という）およびゼロエミッションの導入後のシステム（以下ゼロエミッション型という）各々の資源・エネルギー消費と環境負荷について LCA を行った。また、汚泥処理プロセスの変化が資源化プロセスにおける資源消費・環境負荷削減に与える影響を検討することによって、セメント資源化に向けた汚泥処理プロセス改善の有効性を評価した。

2. 資源・エネルギー消費と環境負荷排出の LCA

2. 1 評価を行う範囲と項目の明確化

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、ゼロエミッション型のシステムを比較して異なる部分のみを扱う。ただし、ゼロエミッションの効果を明確にするため、共通する範囲・項目であっても例外的に含む場合がある。このように考えると、評価を行う範囲と項目は図 1 のようになる。

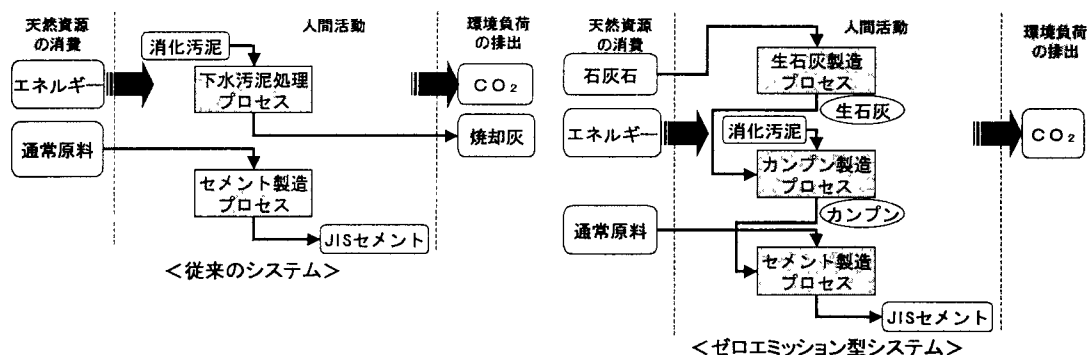


図 1. 評価を行う範囲・項目

2. 2 LCA の概要

2. 1 で設定した評価の範囲と項目に従って、従来型、ゼロエミッション型各々のシステムについて、単位量の下水汚泥を原料とした場合の資源・エネルギー消費および環境負荷を求め、それらの項目のトータルな値を求めるインベントリー（一覧表）を作成する。これによってゼロエミッション導入による影響、さらにゼロエミッション型システムの改善策による影響を評価する。本システムのように、エネルギー多消費型システムの場合、設備の建設に関する環境負荷は相対的に小さいので無視した。

(1) ゼロエミッション導入による影響

まず、ゼロエミッション導入による影響を評価する。対象とするのは消化汚泥で、脱水方式はベルトプレス、凝集剤は高分子凝集剤を用いるものとする。このとき脱水汚泥の含水率は 80%、DSあたりの塩素含有

量は2000mg/kgとする。また、カンブンの化学成分とセメントの化学成分の許容値を考慮すると、カンブンのセメント原料としての許容混入割合は0.83%で、汚泥固形分1.0kgあたりのセメント製造量は186.0kgと相対的に大きくなる。これらの条件を元に、投入される汚泥の固形分量、および製造されるセメントの量を従来型およびゼロエミッション型で等しくして比較を行う。通常原料の化学成分を示したデータ、および目標とするセメント成分を示したデータから、各々の原料の混合割合を算出し、これをもとに汚泥固形分1.0kgあたりのシステム全体の物質収支を算出する。

つぎに、物質収支の算出によって資源消費の値を求める。また、原単位を用いて汚泥固形分1.0kgあたりのCO₂排出・エネルギー消費の値を求める。これらの値を従来型、ゼロエミッション型それぞれのシステムについて求めて作成したインベントリーを表1、2に示し、それをもとにゼロエミッション導入による各項目の変化率を算出し、表3に示した。

表1. 従来型システムのインベントリー

(ベルトプレス、含水率80%、塩素2000mg/kg)

項目	消化汚泥 焼却・埋	通常セメント 製造	合計
投入消化汚泥	24.8	0.0	24.8
資源消費	石灰石	0.0	243.6
	粘土	0.0	28.3
	珪石	0.0	3.5
	鉄原料	0.0	6.7
エネルギー 消費	電力	1.5	7.2
	重油	0.5	9.6
	合計エネルギー	8.6	105.9
環境負荷 排出	直接分CO ₂	1.3	94.2
	電力分CO ₂	0.9	4.4
	重油分CO ₂	1.4	27.6
	合計CO ₂	3.6	126.2
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. ゼロエミッション型システムのインベントリー

(ベルトプレス、含水率80%、塩素2000mg/kg)

項目	生石灰 製造	消化汚泥 カンブン化	通常セメント 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	0.0	241.5
	粘土	0.0	0.0	28.0
	珪石	0.0	0.0	3.6
	鉄原料	0.0	0.0	6.7
エネルギー 消費	電力	0.0	1.1	7.2
	重油	0.1	0.0	9.2
	合計エネルギー	1.0	2.5	102.3
環境負荷 排出	直接分CO ₂	0.7	0.0	94.7
	電力分CO ₂	0.0	0.7	4.4
	重油分CO ₂	0.3	0.0	26.5
	合計CO ₂	1.1	0.7	125.6
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

(2) ゼロエミッション型システムの改善策による影響

表3. 従来型とZE型の比較

ゼロエミッションの効果を高める改善策として、

(ベルトプレス、含水率80%、塩素2000mg/kg)

汚泥含水率の低減を考える。その理由は、下水処理汚泥をセメント原料の一部とする際に、最大の制約要因となっているのは塩素であり、そのほとんどが汚泥の水分中に存在するからである。ゆえに、汚泥の含水率を低減すれば塩素含有量が低減し、混合可能なカンブンの割合が増加してゼロエミッションの効果の増大が期待できる。

汚泥含水率の低減策として、ベルトプレスに比べ脱水効率の高い遠心脱水を考える。脱水汚泥の含水率は75%、DSあたりの塩素含有量は1500mg/kg

とする。このとき、カンブンのセメント原料としての許容混合割合は1.14%である。ベルトプレス、遠心脱水ともにエネルギーとして電力を用い、その消費量とそれに伴うCO₂排出は同程度であるが、後者の方が若干大きい。また、脱水効率の高い方式として、加圧ろ過(脱水汚泥含水率平均70%)も考えられるが、凝集剤として塩化第二鉄と消石灰を使用するので塩素含有量が高くなるおそれがある。そこで、高分子凝集剤を使用する遠心脱水を採用することとする。

以上の議論をふまえて、脱水方式として遠心脱水を採用した場合(脱水汚泥含水率75%、塩素含有量

項目	従来型	ZE型	変化量	変化率 (%)
投入消化汚泥	24.8	24.8	0.0	0.0
資源消費	石灰石	243.6	-0.2	-0.1
	粘土	28.3	-0.3	-1.2
	珪石	3.5	0.1	4.2
	鉄原料	6.7	-0.1	-0.8
エネルギー 消費	電力	8.8	-0.4	-4.4
	重油	10.1	-0.8	-7.7
	合計エネルギー	114.5	-8.7	-7.6
環境負荷 排出	直接分CO ₂	95.6	-0.1	-0.1
	電力分CO ₂	5.3	-0.2	-4.1
	重油分CO ₂	29.0	-2.2	-7.7
	合計CO ₂	129.9	-2.5	-2.0
製造セメント	186.6	186.6	0.0	0.0

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

1500mg/kg) について、2. 2 (1) と同様に汚泥固形分 1.0kg あたりの各項目に対するインベントリーを作成した。これらの結果をもとに、汚泥処理における脱水方式がベルトプレスの場合（脱水水汚泥含水率が80%、塩素含有量 2000mg/kg）と、遠心脱水の場合（脱水汚泥含水量 75%、塩素含有量 1500mg/kg）それぞれについて、ゼロエミッション導入による各項目の変化率を求めた。資源・エネルギー消費の変化率の比較を図2に、環境負荷（CO₂）排出の変化率の比較を図3に示した。

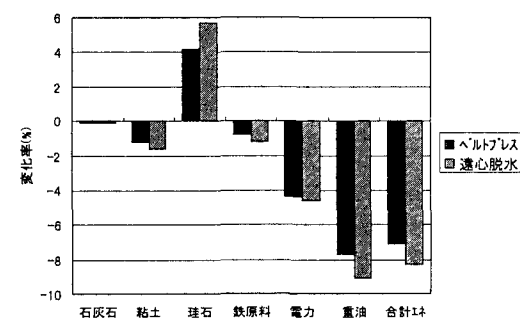


図2. ゼロエミッション導入による
資源・エネルギー消費の変化率 (%)

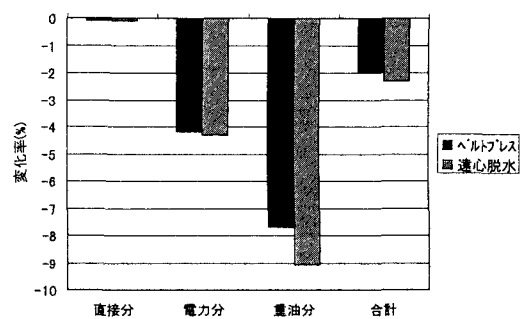


図3. ゼロエミッション導入による
環境負荷（CO₂）排出の変化率 (%)

2. 3 LCA の結果の考察

(1) ゼロエミッションの導入による効果

表1, 2, 3から、粘土や鉄原料といった天然資源の消費量が比較的大きく減少しており、カンブンの無機分がこれらの原料に代替していると考えられる。また、電力、重油の消費も減少している。これは、脱水汚泥のカンブンのほうが焼却よりエネルギー消費が少ないためと、ゼロエミッション型システムのセメント焼成プロセスにおいてカンブンの有機分がエネルギーとして重油に代替しているためであると考えられる。それらのことが CO₂ 排出の減少にも反映されている。

(2) ゼロエミッションの改善による効果

図2, 3から、ベルトプレスの場合と遠心脱水の場合を比較した結果、遠心脱水の方が、一部の例（珪石）を除いて、資源・エネルギー消費、環境負荷排出共にその削減率が大きくなっている。これは、汚泥含水率低減によってカンブンのセメント原料への混合割合が増加し、それに伴って物質収支全体に対する汚泥固形分量の割合が大きくなったことが理由と考えられる。それによって2. 3 (1) で述べたゼロエミッション導入による削減の割合が大きくなったと考えられる。ただし、生石灰混合量の変化は考慮していない。

3. まとめ

LCA の結果、ゼロエミッションの導入によって、下水汚泥焼却灰の環境中への排出が減少するとともに、粘土、鉄原料などの天然資源の消費が減少し、エネルギー資源消費およびそれに伴う CO₂ 排出も減少することがわかった。また、汚泥の脱水方式をベルトプレスから遠心脱水に変更し、脱水効率を向上することによって、資源・エネルギー消費、環境負荷排出共にその削減率が高まることが示された。ここで取り上げたゼロエミッションは下水汚泥の資源としての需給バランスもとれており、非常に有効なシステムであるといえる。今後の課題としては、システム全体に対する経済性の評価が必要である。

4. 謝辞

本研究に多大なご協力を頂いた（財）下水道新技術推進機構に深謝いたします。