

家庭系食品廃棄物を排水に流すべきか都市ごみとともに処理すべきか、それが問題だ

家庭系食品廃棄物の管理に関する各選択肢が及ぼす経済的および環境的な影響について、政策決定者がしっかりとした分析を行うことが必要である。食品廃棄物は、人々の健康（食品廃棄物は腐敗し、悪臭を発生し、ネズミを集める）やコスト（ごみ収集の頻度に関わる）に影響を及ぼす。食品廃棄物管理における3種類の都市ごみシステム（収集とコンポスト化、収集と廃棄物熱源転換、収集と埋立）および2種類の排水システム（台所用ディスポーザーと農村現場排水処理、台所用ディスポーザーと都市排水処理）に関し、ライフサイクルインベントリは、総材料量、総エネルギー量および総コストと、環境への流量とを数量化するのに用いられる。比較のためデータを標準化しなければならないので、インベントリの各パラメータは、食品廃棄物 100kg（湿重量）当たりの値で示される。システム境界には、取得、使用、および廃棄が含まれる。パラメータには、投入（土地、材料、水）および大気・水・土地への排出が含まれる。各パラメータは、単に、高い値のものから低い値のものへとランク付けされる。全体において最も高いランクとなったのは農村集落排水システムであり、このシステムでは、設計寿命全体にわたる総処理量に関連して食品廃棄物およびキャリア水が多い。2番目のランクとなったのは廃棄物熱源転換である。食品廃棄物の燃焼は、コストがかかるが、取り出せるエネルギーはわずかである。続いて、都市排水処理と埋立とが同ランクとなった。都市排水処理は、土地、材料、エネルギー、コストにおいて低い値だが、食品廃棄物の副生成物（汚泥）において最も高い値である。埋立は、大気放出とコストにおいて低い値となっている。最も低いランクとなったのがコンポスト化である。コンポスト化は、材料および水の投入において最も低い値であり、また排水と、水により運ばれる廃棄物との発生が最も少ない。

**Carol Diggelman (ミルウォーキー工科大学、
建築・建設学部)**

Milwaukee School of Engineering, Architectural Engineering & Building Construction Department, 1025 N. Broadway, Milwaukee, WI. 53202, USA.

**Robert K. Ham (ウイスコンシン大学マディソン校、
社会環境工学部名誉教授)**

Professor Emeritus, Civil and Environmental Engineering, Engineering Hall, University of Wisconsin-Madison, Madison, WI. 53706, USA.

キーワード
ライフサイクルインベントリ、都市ごみ、廃棄物熱源転換、コンポスト化、埋立、現場システム、都市排水システム、ディスポーザー、wmr490-8

著者の連絡先

Carol Diggelman, Milwaukee School of Engineering, Architectural Engineering & Building Construction Department, 1025 N. Broadway, Milwaukee, WI. 53202, USA.
電話: +1 414 277 7320、Email: diggelma@msoe.edu

2001年1月15日受付、2003年10月10日修正版を受理

はじめに

食品廃棄物管理システムの影響を評価するに当たっては、都市ごみシステムと排水システムの両方を考慮することが必要である。すべての食品廃棄物が都市ごみになるという想定は成り立たない。台所のシンクに設置される家庭用ディスポーザーを使用すると、ディスポーザーは、食品廃棄物を破砕し、その行く先を都市ごみシステムから排水システムへと転換させる。本調査プロジェクトでは、ライフサイクルインベントリと、食品廃棄物の管理に当たり現在用いられている5種類のシステムにおける典型的な施設の取得、使用、廃棄による、システム全体での材料、エネルギー、コスト、環境への流出の量を数量化するための種々の計算手法を用いる。

この5種類のシステムには、2種類の排水システム、すなわち従来の農村現場システムと公営処理場が含まれる。3種類の都市ごみシステムは、都市ごみの自治体収集とそれに続く埋立、都市

ごみの自治体収集とそれに続くコンポスト化施設、都市ごみの自治体収集とそれに続く廃棄物熱源転換施設である。5種類のシステムとその呼称、使用される具体的な施設は、以下の通り。

- ・ 都市ごみ収集とそれに続く埋立（都市ごみ収集/埋立）：ウイスコンシン州マディソン市都市ごみ収集施設/ウイスコンシン州デーデン郡埋立地
- ・ 都市ごみ収集とそれに続くコンポスト化施設（都市ごみ収集/コンポスト化）：ウイスコンシン州マディソン市都市ごみ収集/ウイスコンシン州コロムビア郡コンポスト化施設
- ・ 都市ごみ収集とそれに続く廃棄物熱源転換施設（都市ごみ収集/廃棄物熱源転換）：ウイスコンシン州マディソン市都市ごみ収集/ヘネビン・エネルギー資源会社の廃棄物熱源転換施設

- ・ ディスポーザーとそれに続く公営処理場（ディスポーザー／公営処理場）：マディソン都市圏下水地域の排水処理施設
- ・ ディスポーザーとそれに続く農村現場システム（ディスポーザー／現場システム）：2種の現場システム間の差異。腐敗槽およびドレンフィールドは、ディスポーザーを収容できるよう、25%大きくされる。

評価対象となっている具体的な施設は以上の通りである。これらの施設が選ばれた理由は、これらが現在の最新技術の実践施設として代表的なものだからである。すなわち、通常の施設に比べ大きく過ぎず小さ過ぎず、安定的な操業歴を有し、現行の法令を遵守している。さらに、地域でおよび／または公的に入手可能な、このプロジェクトに必要となる材料・エネルギー・コストのデータがある。現場システムにおいては、従来の2システム（ディスポーザーを収容する設計としない設計）の間の差異が評価対象となった。

システム毎のライフサイクルインベントリには、土地、総システム材料、総システムエネルギー、総システムコスト、および環境への総流出（大気放出、水と水により運ばれる廃棄物、固形廃棄物、およびシステム食品廃棄物残渣）が含まれる。比較のためデータを標準化しなければならないので、インベントリの各パラメータは、含水食品廃棄物 100kg 当たりの値で示される。システム境界には、取得、使用、および廃棄が含まれる。ランク付けされたパラメータには、土地、投入された資源、および大気・水・土壌への放出が含まれる。各パラメータは、単に、高い値のものから低い値のものへとランク付けされる。各システムにおける具体的な事実および仮説については、結果のセクションにて詳述する。

調査方法

本調査プロジェクトでは、家庭系食品廃棄物の管理において用いられている諸システムを比較するため、公的に入手可能な情報源からデータベースを作成した。ディスポーザーが食品廃棄物の行き先を排水システムへと変更させる家庭用排水回収システム機器であるため、ディスポーザーと現場システムや公営処理場を組み合わせた場合の総影響を評価するに当たり、ディスポーザーの各パラメータを現場システムや公営処理場のパラメータに加算する。同様に、都市ごみ収集システムの各パラメータも、3種類の都市ごみシステムにおける施設のパラメータに加算する。

諸論文（Bennett & Linstedt 1975、Ligman et al. 1974、Hutzler & Boyle、Siegrist et al. 1976）の調査によると、1日当たりの食品廃棄物排出量が 0.13kg/人であると想定すれば、2.63人で構成される平均的な米国の家族は、約1年で100kgの含水食品廃棄物を排出することになるのであり、またこの含水食品廃棄物の75%がディスポーザーで処理される可能性がある（Strutz 1995）。2種類の排水システムに関して、100kgの食品廃棄物がディスポーザーから出ていくよう洗い流すには1031kgのキャリア水が必要であり、これだけのキャリア水が食品廃棄物に加えられている（複数の家庭を対象とした、ディスポーザーに起因する実際の水使用量の計測に基づく）（Ketzenberger 1995）。

システム取得に当たっての投入物には、機能するシステムを作るために必要な土地、建設材料、資本コスト、資本エネルギーが含まれる。材料には、骨材、コンクリート、アルミニウム、アスファルト、銅、ガラス、塗料、鋼材、および木材が含まれる。燃料には、天然ガス、石炭、精製された石油、ウラン、および食品が含まれる。環境への流出物には、大気放出、水および水により運ばれる廃棄物、材料・燃料由来の固形廃棄物が含まれる。

運用は、システムをその設計寿命の終わりまで使用することによる影響の数値化を含む。これは、食品の排水あるいは都市ごみ収集システムへの投入に始まり、大気放出や水と水により運ばれる廃棄物の環境への流出、システム食品廃棄物副生成物（汚泥、汚水、またはコンポスト）の最終用途における利用、および灰、処理工場残渣または都市ごみの埋立処分により終わる。食品廃棄物がシステムを通過していく間に生じる変化は、明らかにされ、また数値化される。システム使用時の他の投入物には、メンテナンス材料および運用エネルギーが含まれる。

システムの廃棄には、システムの除去に必要な材料およびエネルギーの投入と、大気放出、水と水により運ばれる廃棄物、および固形廃棄物の環境への排出が含まれる。

この分析に必要となる情報は膨大かつ複雑なものとなるが、Diggelman (1988) において詳細にわたりこの情報が提供されている。公営処理場、コンポスト化、埋立、および都市ごみ収集の諸システムは、公営の施設である。そのため、設計、入札、契約および請求関連の書類、運用上および規制上の報告書はいずれも、目的とする情報を得るために用いられた。廃棄物熱源転換施設は民間のものであるが、公的機関に提出された書類で十分であることが分かった。ディスポーザーのデータは、あるメーカーの尽力のおかげで入手可能となった。現場システムがディスポーザーを収容するに当たり生じる全体の差異は、専門家やコンサルタントとの議論を経て決定され、詳しくは州規制による要件および建設業者との議論により補完された。いずれの場合においても、各施設の関係者はプロジェクト担当者に喜んで協力していただき、この方々から指示や書類、批評をいただくことができたため、調査の正確性が向上した。エネルギーと材料の流れのデータ、および材料とエネルギーの投入に関連した排出量のデータは、論文または直接のやり取りから得ている（Franklin Associates 1996）。

食品廃棄物の組成および流れは、このプロジェクトを通じて使用されており、以下の通りの全米データに基づいている。

- ・ 食品廃棄物の組成は C21.53H34.21O12.66N1.00 であると想定されており（Tchobanoglous et al. 1993）、食品廃棄物の30%は固体、70%は水分であり（Morgan 1995）、食品廃棄物における固体の95%は分解可能であり（Baldwin et al. 1998）、残る5%は灰である（Tchobanoglous et al. 1993）。
- ・ 熱エネルギー価は含水食品廃棄物 1kg 当たり 4650kJ（Tchobanoglous et al. 1993）。
- ・ 廃棄時において米国の都市ごみに占める食品廃棄物の割合が8%という1990年の値が、都市ごみに占める食品廃棄物の量を定めるに当たり用いられた（Tchobanoglous et al. 1993、USEPA [米国環境保護庁] 1992）。

食品廃棄物は、公営処理場の曝気槽あるいはコンポスト化システムを通過するとき、微生物バイオマスにより好氣的に分解されることが想定されている。この場合、最終生成物は新しいバイオマス、二酸化炭素、そして水である。食品廃棄物は、現場システム、埋立、または公営処理場の新しいバイオマス、メタン、二酸化炭素、水を生成する消化槽を通過しながら処理されるとき、嫌氣的に分解される。食品廃棄物の加水分解において発生する電子の3分の1は新しいバイオマスへ至り、3分の2は嫌気性システムおよび好気性システムの電子受容体反応へ至る。廃棄物熱源転換システムに関し、食品廃棄物は酸化して二酸化炭素、水、NO（一酸化窒素）、N₂（窒素）になることが想定されている（Ragland 1996）。各システムについて、全体の化学反応は確定されている。

自治体の4システムに関し、ディスポーザーの使用はシステムの大きさに影響を与えないことが想定されている。マディソン都市圏下水地域の諸施設の現行の設計は、ウィスコンシン州管理条例（Wisconsin Administrative Code）NR 110(4)によって規定されているが、この条例はサービス区域にディスポーザーが設置されて

いる場合には公営処理場により厳しい設計要件を適用する。全米データによれば、現在、都市部の家庭の平均 40%がディスポーザーを有し (Carney 1995)、農村部の家庭の平均 20%がディスポーザーを有している (Strutz 1995)。従って、マディソン都市圏下水地域の現行の設計は、そのサービス区域におけるディスポーザーの影響を組み込んでいくということが想定される。各家庭がディスポーザーを有しようといまいと、1人が廃棄する都市ごみの1日当たりの平均重量に与える影響も、都市ごみシステムの設計許容量に与える影響も、ともにわずかなものであることが想定される。上に示されているように、現場システムについて、ディスポーザーを使用する場合にはシステムの再設計が必要となることが想定された。

5種類のシステムの比較を行うに当たっては、100kgの含水食品廃棄物をシステムに送る家庭が行う選択の影響を想定している。公営処理場については、その公営処理場の設計寿命全体においてそこを通過する食品廃棄物+キャリア水の総量に対する、100kgの含水食品廃棄物+キャリア水の比が、100kgの食品廃棄物に起因する各パラメータの比を決めるに当たり用いられる。現場システムについては、ディスポーザーを使用するに当たり、腐敗槽および濾過フィールドの大きさを25%増やさなければならぬということが想定される。この場合、この2システム間の差異はすべて食品廃棄物に起因するものであり、用いられる比は、100kgの含水食品廃棄物+キャリア水を、その公営処理場の設計

寿命全体においてそこを通過する含水食品廃棄物の総量+キャリア水の合計で除した数である。食品廃棄物が排水システムへとその行き先を変更されたとしても、都市ごみの諸システムに変化はないということが想定されている。各パラメータを諸都市ごみシステムに比例配分するために用いられる比は、食品廃棄物100kgを、あるシステムの設計寿命全体においてそこを通過する都市ごみの総量で除したものである。表1は、設計寿命と、インベントリパラメータを比例配分するために用いられる比とを示している。このプロジェクトにおいて用いられる財務計算は、金利が10%、物価上昇率が3%であるとの想定のもとになされている。

各パラメータは、システムの取得、運用、廃棄にわたって総計される。続いて各システムは、単に、高い値のものから低い値のものへランク付けされる。ランク付けの表に含まれるパラメータは、土地、材料 (から食品廃棄物およびキャリア水を引く)、エネルギー (から取出可能な食品廃棄物エネルギーを引く)、水、コスト、大気放出、酸性ガス (NOx [窒素酸化物] および SO₂ [二酸化硫黄])、温室効果ガス (CO₂ [二酸化炭素] およびその21倍の高温室効果能を有する CH₄ [メタン])、排水、水により運ばれる廃棄物、固形および建設廃棄物、そして食品廃棄物の副生成物である。その後、各システムのランクを平均化して、全体でのランクを出す。

表1 システム設計寿命、およびインベントリパラメータを含水食品廃棄物 100kg に比例配分するに当たり用いられる比

	システム設計寿命、年数	システム毎の比
ディスポーザー	12	8.9e-02
2 現場システムにおける差異	20	5.4e-02
公営処理場	30	7.4e-10
都市ごみ収集システム	15	5.8e-08
コンポスト化システム	15	2.9e-07
廃棄物熱源転換システム	20	1.8e-08
埋立システム	15	6.2e-08

結果

表2において、各技術間での材料、エネルギー、コストの直接比較がなされている。表3においては、5種類の食品廃棄物管理システムの各々に関して、環境への総流出量および総副生成物量 (汚泥、汚水、コンポスト、灰、および埋立残渣) が示されている。表2および表3につながる詳細な情報は、Diggelman (1998) より得ており、各技術についての事実の概略や想定は、このセクションの残りの部分で述べている。

ディスポーザー

ディスポーザーがそのライフサイクル全体にわたって与える影響は数値化されており、この影響にはディスポーザーの取得 (製造、輸送および設置) によるもの、使用 (ディスポーザーの運用) によるもの、そしてディスポーザーの廃棄によるものが含まれる。ディスポーザーを通過する食品廃棄物から環境への流出物は、ディスポーザーを建設、運用、廃棄 (化石燃料の燃焼等)

するに当たりエネルギー源から発生した環境への流出物に加えられ、またシステム材料として具体化されたものに加えられる。

ディスポーザーにおけるライフサイクルインベントリは、以下の事実と想定に基づくものである。

- ISE モデル 333 家庭用サイズのディスポーザーの設計寿命は12年である (Strutz 1995)。
- 1家庭当たり 2.63人である (米国商務省 1993)。
- ディスポーザーの使用に必要なキャリア水の量は、1人1日当たり 1L である (Ketzenberger 1995)。
- ディスポーザーを通過する乾燥固体の総負荷は、0.0291kg/人/日である (Ketzenberger 1995)。
- ディスポーザーの使用時間は、1日当たり平均 0.6分である (Ketzenberger 1995)。
- 包装を含めたディスポーザーの重量は 7.8kg であり、米国においてはディスポーザーの 95%は最終的に埋立処分されている (Strutz 1995)。

- ・ ディスポーザーの製造用建物の敷地面積は 36,000m²、その建物の設計寿命は 25 年であり、3,225,000 個のディスポーザーが毎年製造されている (Strutz 1995)。配送センターとの間の平均往復距離は 2200 個を運ぶ満載状態のトレーラートラックで 3150km、燃費は 2.2km/L である (Strutz 1995)。
- ・ ディスポーザーの設置においては、1 個を運ぶ燃費 8.5km/L のトラックが、往復で 32km 移動する。
- ・ システムの廃棄において消費される材料はないということが想定されている。一方、廃棄に必要なエネルギーは設置に関係するエネルギーの 25% であり、廃棄コストはシステムの資本コストの 25% である。

ディスポーザーは、その設計寿命の全体で食品廃棄物 1120kg をキャリア水 11,520kg で処理するのであり、それはすなわち、食品廃棄物 100kg 当たりキャリア水 1031kg が必要ということである。ディスポーザーの平均コストが食品廃棄物 100kg 当たり 17.45 ドルであることが、表 2 において示されている。表 2 からはまた、ディスポーザーの寿命にわたり、120kg の材料、 9.4×10^4 kJ のエネルギー、 6.0×10^5 m² の土地が食品廃棄物 100kg に起因することがわかる。この材料の大部分 (90%) およびエネルギーの大部分 (84%) がディスポーザーの使用に起因するものであることが、ここに示されていないが、Diggelman (1998) において指摘されている。ディスポーザーに起因する材料の大部分 (92%) を水が、エネルギーの大部分 (80%) を食品廃棄物が占める。コストの 87% はシステムの取得に起因し、8% はシステムの使用に起因する。

表 3 から、環境への流出量 130kg の大部分を水が占めていることがわかる。この水の大部分は、システムの使用中に生じる (Diggelman 1998)。ディスポーザーにおける材料、エネルギー、環境への流出物 (から食品廃棄物およびキャリア水を引く) は、都市ごみ収集システムにおける材料、エネルギー、および環境への流出物との間で均衡が取れている。

2 種の現場排水管理システム間の差異とディスポーザー

一方の現場システムはディスポーザーを収容するよう、他方の現場システムはディスポーザーを収容しないよう、様々な情報源からの提言に基づき、設計されたものである (Boyle 1995、Converse 1995、様々な建設業者およびウィスコンシン州自然資源局職員)。そのため、この 2 種の現場システムの差異は、ディスポーザーの使用に起因する。これらの現場システムの取得、使用、廃棄に関する材料、エネルギー、コスト、環境への流出の差異は、食品廃棄物 100kg (にキャリア水を加える) に比例配分される。ライフサイクルインベントリは、以下の事実および想定を含む。

- ・ ディスポーザーを収容するよう設計されたシステムは、2 室に区分された 4750L の腐敗槽と、92.9m² の吸着床を備える。一方、ディスポーザーを収容しないよう設計されたシステムは、2 室に区分された 3800L の腐敗槽と、69.7m² の吸着床を備える。
- ・ この腐敗システムの設計寿命は 20 年である。
- ・ 必要となる土地は、床面積の 150% であると想定される。
- ・ 伝統的な 3 年のポンプ使用間隔が想定されている (Wisconsin Section 145.24 (3) 統計値)。
- ・ 流出物濃度は Ketzenberger (1995) より、汚水濃度は ASCE (米国土木学会) (1992) 表 2.11 より採った。
- ・ 汚水の除去および運搬に関し、地元の運搬業者にコストがかかる。これは、2 室に区分された腐敗槽を 3 年に 1 度ポンプ作業する際にかかるコストで、120 ドルになる (Speedway Sewer Service 1994)。

- ・ 流出物に含まれる食品廃棄物揮発性固形物は、半分が腐敗槽の中で、残り半分が吸着床で、嫌氣的に分解されると想定されている。
- ・ システム材料には 80km の往復移動が必要であることと、汚水処理のための運搬には 64km の往復移動が必要であることが想定されている。
- ・ システムの廃棄に当たっては、腐敗槽は埋め立てられ、吸着床の材料 (主に骨材) は現場に残されることが想定されている。
- ・ パラメータを食品廃棄物 100kg に比例配分するために用いられる比 (0.0537) は、システムの 20 年間の設計寿命の間にシステムを通過する食品廃棄物およびキャリア水の総計に対する食品廃棄物 100kg+キャリア水の比である。
- ・ 食品廃棄物 100kg がこのシステムを通過して処理されるとき、メタン 7kg が発生し、エネルギー生産のために回収される分はない。

1980 年代中にオレゴン州グライドの腐敗槽について 8 年間の監査が実施され、平均的な 12 年のポンプ使用間隔は不当に長いわけではないとする 1950 年代に出版された米国公衆衛生局の調査報告書に賛成であるという結論が出された。ディスポーザーのある家庭の約 20% は、スカムの堆積率が 34% 増えたが、汚泥の堆積率は、ディスポーザーのない家庭に比べわずか 2% 上昇しただけだった (Bounds 1994)。

表 2 を見れば、現場システムの場合とディスポーザーと現場システムとの組合せの場合におけるライフサイクルの材料、エネルギー、コストの差異の概要がわかる。3300kg の材料、 9.8×10^5 kJ のエネルギーと、1.9m² の土地が、ディスポーザーと現場システムの組合せの設計寿命にわたり食品廃棄物 100kg に起因するものとなるが、これには食品廃棄物 100kg 当たりの食品廃棄物エネルギー 4.7×10^5 kJ は含まれない。ライフサイクル材料は、建設材料 (42%)、水 (54%) と、食品廃棄物 (3%) を含む。食品廃棄物のエネルギーを含む総エネルギーは、39% が建設材料に、22% がディーゼル燃料に、32% が食品廃棄物において具体化される。ディスポーザーと現地システムの組合せの平均コストは、食品廃棄物 100kg 当たり 67.20 ドルである。材料の大部分 (97%) およびエネルギーの大部分 (90%) がシステムの取得に起因するという結論は、ここには示されていない (Diggelman 1998)。

表 3 には、現場システムとディスポーザーの組合せから環境への流出物の概要が示されており、それを見ると、食品廃棄物 100kg に起因する総量は 2.2×10^3 kg (床に残る骨材は含まない) である。システムの流れの総量の大部分は水 (77%) であるが、固体廃棄物が 10%、汚水が 6% を占める。

自治体排水回収処理システム (公営処理場) とディスポーザー

ウィスコンシン州マディソン市の自治体排水回収システムと、マディソン都市圏下水地域の排水処理施設が、これらの計算に使用された。下記は主な事実と想定である。

- ・ この排水回収システムは、約 260,000 人の住民と 120,000 戸の住宅 (内 40% がディスポーザーを有する) を想定している。
- ・ マディソン都市圏下水地域は 3 段階の排水処理機構を有する。排水処理は、予備処理、一次処理、脱窒・リン除去・紫外線消毒を行う生物学的二次処理の 3 段階から成る。固体処理は、汚泥の濃縮、安定化、脱水と、それに続く保存および土壌施用から成る。
- ・ このシステムの設計寿命は 30 年であると想定されている。
- ・ 支管、取付下水管、下水集水管は、垂直面を有する溝に設置され骨材の中に置かれていると想定される。1970 年以前には

支管と取付下水管はガラス固化粘土から作られ、1970年以降はポリ塩化ビニルから作られている (Dailey 1995)。マンホールの間隔は76mであることが想定されている (Dailey 1995)。最近完成したポンプ場と同一であると想定されるポンプ場が94カ所ある。回収システムの建物の総面積は1239m² (Dailey 1995)、排水システムのそれは20,300m²である (マディソン都市圏下水地域の施設図面による)。

- 流入するTSS(全浮遊物)の生分解可能な部分は80%であり、一方、食品廃棄物の生分解可能な部分は95%である。有機性窒素の95%はアンモニアに変換され、その97%が酸化される。流入する有機性リンの95%はオルトリンに対して可溶性を呈する。全体でBOD₅の96%が除去され、曝気槽内においてTSSの92%が除去される。BOD₅の除去による汚泥の発生量の測定に当たり想定される発生係数は、BOD₅の1kg除去当たり0.90kgのVSS(揮発性浮遊物)が発生するというものであり、また想定される腐敗係数は1日当たり0.04、平均汚泥滞留時間は10.5日である。硝化による汚泥発生に当たり想定される発生係数は、アンモニアの1kg酸化当たり0.25kgのNVSS(不揮発性浮遊物)が発生するというものであり、また想定される腐敗係数は1日当たり0.05である。廃棄汚泥に占める固形分の割合は0.24%である。気泡浮上分離法のプロセスにおいて、固形物回収率は98%であり、全窒素および全リンは固形物と同じ割合で除去され、浮上物に占める固形分の割合は3.6%である。重力ベルト式濃縮機における固形物回収率は98%であり、固形分の割合は5.8%である (マディソン都市圏下水地域、技術メモ 1994)。
- システムで用いるプロセス装置の重量は、ポンプ場、マンホール、マディソン都市圏下水地域のタンクおよび建物の重量の10%であることが想定されている。
- 設置のエネルギーは、発掘物の量および平均32kmの往復移動に基づき計算されている。
- 1997年のマディソン市下水道施設 (25.30ドル/100m³) およびマディソン市水道施設 (22.25ドル/100m³) の住民サービス利用料金は、回収・排水処理システムの資本・運用コストをすべて組み込んでいたことが想定されており、コストの計算に用いられる。
- システムの廃止において、材料の大量の使用はなく、システムの設置に要するエネルギーの25%が必要であり、コストはサービス使用料金に含まれていることが想定されている。
- 30年の設計寿命にわたる総流量 (139×10³m³/日) および総負荷 (26,100kgTSS/日) における、食品廃棄物100kgおよびキャリア水1031kgに起因する部分は、7.4×10⁻¹⁰である。この比は、食品廃棄物に起因する各パラメータの比を決めるに当たり使用された。

- 消化槽に送られる一次汚泥における食品廃棄物量と、消化槽に送られる食品廃棄物に起因する二次汚泥の量は、食品廃棄物100kgから4.8kgのメタンが発生するというを決めるに当たり使用される。1kgのメタンから3.86kWhの電力が発生しうることと、メタンがすべて嫌気性消化槽で回収されること、また発生電力の90%が取出可能であることが想定されている (Franklin Associates Ltd 1994にて報告された Taylor 1992)。従って、食品廃棄物100kgから約16kWhの電力を入手できる。

食品廃棄物のパラメータを組み込んだ計算と、ディスポーザーの使用、および公営処理場に関する事実と想定により、ディスポーザーを使用している40%の家庭において、ディスポーザーのない家庭と比較してのディスポーザーに起因するマディソン都市圏下水地域の施設への排水負荷の割合上昇は10%未満であったこと、流量の上昇は0.1%であったこと、BOD₅、TSS、VSSの上昇はそれぞれ7.5%、7.9%、9.0%であったこと、TKN(ケルダール窒素)と全リンの上昇はそれぞれ1.4%、1.2%であったことが明らかになった (Diggelman 1998)。

表2は、ディスポーザーと公営処理場の組合せにおけるライフサイクルの材料、エネルギー、コストの概要を示している。1300kgの材料、1.2×10⁵kJのエネルギー、3.0×10⁻⁴m²の土地が、このシステムを通過する食品廃棄物100kgに起因する (ここには食品廃棄物100kg当たり4.7×10⁵kJの食品廃棄物のエネルギーは含まれない)。材料は主に水分(92%)と食品廃棄物(8%)であり、システムの取得(46%)および使用(54%)の双方に起因する (Diggelman 1998)。総エネルギー(食品廃棄物のエネルギーも含む)の大部分は、食品廃棄物に起因し(80%)、またディスポーザーの材料として具体化される(9%)。システムのエネルギーの大部分はシステムの使用(64%)および取得(34%)に起因する (Diggelman 1998)。食品廃棄物100kgは、理論的には16kWhの取出可能な電力を生産できる。メタンの生成および取出可能電力への変換の効率により、公営処理場の場合には食品廃棄物100kg当たり4.6×10⁴kJの全エネルギー生産、ディスポーザーを含めた場合には食品廃棄物100kg当たり4.8×10⁴kJの全エネルギー使用となることが指摘されている。表2から、6.7×10⁴kJの取出可能電力の生産が食品廃棄物のエネルギーの14%の変換効率を示していることがわかる。

表3において、ディスポーザーと公営処理場の組合せのシステムから環境へ1300kgの流出物があることが示されている。環境への流出物には、85%の水、4%の大气放出と、12%の汚泥が含まれる。これらの排出物の多くは、システムの使用中に生じたものである (Diggelman 1998)。

表2 食品廃棄物管理に用いられる5種類のシステムの材料、エネルギー、コスト (含水食品廃棄物 100kg 当たり)

	ディスポーザー	現場システム	ディスポーザー +現場システム	公営処理場	公営処理場 +ディスポーザー	都市ごみ 収集	コンポスト化	コンポスト化 +都市ごみ 収集	廃棄物 熱源転換	廃棄物熱源 転換+都市 ごみ収集	埋立	埋立+ 都市ごみ 収集
土地、m ²	6.0e-05	1.9e+00	1.9e+00	2.4e-04	3.0e-04	1.1e-03	7.5e-02	7.6e-02	8.3e-04	1.9e-03	1.8e-02	1.9e-02
材料												
建設材料および埋立材料	5.2e-02	1.4e+03	1.4e+03	3.6e+00	3.6e+00	1.2e+00	2.7e+00	3.9e+00	2.2e+00	3.5e+00	1.1e+02	1.1e+02
プロセス装置、車両	3.5e-02	-	3.5e-02	2.4e-02	5.9e-02	7.7e-02	1.6e-01	2.4e-01	5.3e-02	1.3e-01	3.9e-02	1.2e-01
電力*	6.5e-01	-	6.5e-01	6.3e-01	1.3e+00	2.4e+00	4.3e+00	6.8e+00	1.0e+01	1.2e+01	-	2.4e+00
天然ガス	2.3e-01	-	2.3e-01	7.3e-03	2.4e-01	-	-	-	1.1e+00	1.1e+00	2.7e-01	2.7e-01
ディーゼル燃料	6.2e-02	5.8e+00	5.9e+00	2.9e-02	9.1e-02	6.5e-01	7.0e-02	7.2e-01	8.5e-01	1.5e+00	6.1e-01	1.3e+00
ガソリン	3.1e-01	-	3.1e-01	9.8e-04	3.1e-01	-	-	-	-	-	-	-
ディスポーザー材料	7.0e-01	0.0e+00	7.0e-01	0.0e+00	7.0e-01	0.0e+00	0.0e+00	0.0e+00	0.0e+00	0.0e+00	0.0e+00	0.0e+00
水 (キャリア水を含む)	1.2e+02	1.7e+03	1.8e+03	1.0e+03	1.2e+03	1.7e+01	1.2e+01	2.9e+01	1.7e+01	3.4e+01	2.0e+01	3.8e+01
食品廃棄物	0.0e+00	1.0e+02	1.0e+02	1.0e+02	1.0e+02	0.0e+00	1.0e+02	1.0e+02	1.0e+02	1.0e+02	1.0e+02	1.0e+02
総材料	1.2e+02	3.2e+03	3.3e+03	1.1e+03	1.3e+03	2.2e+01	1.2e+02	1.4e+02	1.3e+02	1.5e+02	2.3e+02	2.5e+02
総材料から食品廃棄物およびキャリア 水を引いたもの	1.2e+02	2.1e+03	2.2e+03	1.0e+01	1.3e+02	2.2e+01	1.9e+01	4.1e+01	3.1e+01	5.3e+01	1.3e+02	1.5e+02
エネルギー、kJ												
具体化された材料	3.2e+02	5.6e+05	5.6e+05	6.0e+03	6.3e+03	2.0e+04	1.4e+04	3.4e+04	2.4e+03	2.2e+04	7.0e+03	2.7e+04
具体化されたプロセス装置/車両	1.6e+03	-	1.6e+03	1.1e+03	2.6e+03	2.1e+03	7.4e+03	9.5e+03	2.2e+03	4.3e+03	1.7e+03	3.9e+03
電力	6.5e+03	-	6.5e+03	6.4e+03	1.3e+04	2.5e+04	4.3e+04	6.8e+04	1.0e+05	1.3e+05	-	2.5e+04
天然ガス	1.4e+04	-	1.4e+04	4.4e+02	1.4e+04	-	-	-	6.5e+04	6.5e+04	1.6e+04	1.6e+04
ディーゼル燃料	3.9e+03	3.2e+05	3.2e+05	1.7e+03	5.7e+03	3.6e+04	3.7e+03	3.9e+04	4.5e+04	8.1e+04	3.4e+04	6.9e+04
ガソリン	1.8e+04	-	1.8e+04	5.5e+01	1.8e+04	-	-	-	-	-	-	-
ディスポーザー材料	5.0e+04	0.0e+00	5.0e+04	0.0e+00	5.0e+04	0.0e+00	0.0e+00	0.0e+00	0.0e+00	0.0e+00	0.0e+00	0.0e+00
水 (キャリア水を含む)	5.8e+02	8.3e+03	8.8e+03	5.1e+03	5.6e+04	8.5e+01	4.6e+01	1.3e+02	8.1e+01	1.7e+02	9.8e+01	1.8e+02
総エネルギー	9.4e+04	8.8e+05	9.8e+05	2.1e+04	1.2e+05	8.3e+04	6.9e+04	1.5e+05	2.2e+05	3.0e+05	5.9e+04	1.4e+05
総エネルギーから取出可能な食品廃 棄物エネルギーを引いたもの**	9.4e+04	8.8e+05	9.8e+05	-4.6e+04	4.8e+04	8.3e+04	6.9e+04	1.5e+05	2.2e+05	3.0e+05	1.9e+03	8.5e+04
コスト (米ドル)	17.45	49.75	67.20	0.49	17.94	9.90	6.70	16.60	10.39	20.30	3.75	13.65

*システム電力を発生させるために必要な燃料の総量

**メタン燃焼に基づく取出可能な電力

公営処理場に関する取出可能なエネルギーは 100kg の食品廃棄物すなわち 16kWh の電力当たり 6.7E+4 kJ、埋立に関する取出可能なエネルギーは 100kg の食品廃棄物すなわち 16kWh の電力当たり 5.7E+4 kJ、100kg の食品廃棄物当たり 4.7E+5 kJ の食品廃棄物のエネルギーは含まれていない。コストを除き、全ての値は四捨五入して有効数字 2 桁まで算出。-: 適用せず、または、情報なし

表3 食品廃棄物管理のための5種類の技術的システムにおける取得、使用、廃棄によるライフサイクル排出量（含水食品廃棄物 100kg 当たり）の概要

	ディスポーザー	現場システム	ディスポーザー+現場システム	公営処理場	公営処理場+ディスポーザー	都市ごみ収集	コンポスト化システム	都市ごみ収集+コンポスト化	廃棄物熱源転換システム	都市ごみ収集+廃棄物熱源転換	埋立システム	都市ごみ収集+埋立
大気放出												
粒子状物質	1.3e-02	1.1e-01	1.2e-01	8.4e-04	1.3e-02	7.3e-03	6.2e-03	1.3e-02	4.2e-03	1.2e-02	4.0e-03	1.1e-02
NO _x (窒素酸化物)	2.0e-02	2.8e-01	3.0e-01	2.3e-03	2.3e-02	3.0e-02	1.6e-02	4.7e-02	1.3e+00	1.3e+00	2.1e-02	5.1e-02
HC (炭化水素) メタン以外	2.1e-02	9.3e-02	1.1e-01	1.2e-03	2.2e-02	1.2e-02	6.9e-03	1.9e-02	4.9e-02	6.1e-02	1.8e-02	3.1e-02
SO _x (硫黄酸化物)	2.9e-02	1.3e-01	1.6e-01	2.6e-03	3.2e-02	2.7e-02	2.8e-02	5.5e-02	8.6e-03	3.6e-02	7.2e-03	3.4e-02
一酸化炭素	5.9e-02	2.2e-01	2.8e-01	2.6e-03	6.2e-02	2.5e-02	1.4e-02	3.9e-02	2.9e-02	5.5e-02	2.0e-02	4.5e-02
二酸化炭素	6.2e+00	5.1e+01	5.8e+01	3.8e+01	4.4e+01	4.4e+00	4.3e+01	4.7e+01	6.0e+01	6.4e+01	3.1e+01	3.6e+01
アルデヒド類	7.1e-05	4.8e-03	4.8e-03	2.4e-05	9.6e-05	5.4e-04	6.1e-05	6.0e-04	7.0e-04	1.2e-03	5.0e-04	1.0e-03
その他の有機物	9.7e-03	9.4e-02	1.0e-01	5.0e-04	1.0e-02	1.1e-02	1.1e-03	1.2e-02	1.4e-02	2.4e-02	9.9e-03	2.0e-02
アンモニア	2.1e-06	3.1e-05	3.4e-05	1.8e-07	2.3e-06	3.6e-06	5.7e-07	4.2e-06	4.6e-06	8.2e-06	3.3e-06	6.9e-06
鉛	1.6e-06	8.9e-09	1.6e-06	5.1e-09	1.6e-06	1.0e-09	1.6e-10	1.2e-09	1.3e-09	2.3e-09	9.3e-10	2.0e-09
CH ₄ (メタン)	1.1e-04	6.9e+00	6.9e+00	1.3e-05	1.3e-04	6.8e-05	5.8e-05	1.3e-04	9.9e-05	1.7e-04	2.3e+00	2.3e+00
ケロシン	4.7e-07	1.1e-07	5.8e-07	5.9e-08	5.3e-07	5.1e-07	8.8e-07	1.4e-06	3.4e-08	5.4e-07	1.5e-08	5.2e-07
HCl (塩化水素)	6.3e-08	9.7e-07	1.0e-06	5.4e-09	6.9e-08	1.1e-07	1.7e-08	1.3e-07	1.4e-07	2.5e-07	1.0e-07	2.1e-07
食品廃棄物からの水蒸気	0.0e+00	0.0e+00	0.0e+00	1.1e+01	1.1e+01	0.0e+00	7.4e+01	7.4e+01	9.1e+01	9.1e+01	1.0e+01	1.0e+01
総大気放出	6.4e+00	5.9e+01	6.6e+01	4.9e+01	5.5e+01	4.5e+00	1.2e+02	1.2e+02	1.5e+02	1.6e+02	4.4e+01	4.8e+01
固体廃棄物および建設廃棄物	7.3e-01	2.2e+02	2.2e+02	1.3e+00	2.0e+00	4.4e-01	7.6e-01	1.2e+00	1.5e-01	5.9e-01	3.0e+00	3.4e+00
*その他	0.0e+00	1.4e+02	1.4e+02	1.6e+02	1.6e+02	0.0e+00	1.8e+01	1.8e+01	1.5e+00	1.5e+00	1.1e+01	1.1e+01
水および水により運ばれる廃棄物												
水	1.2e+02	1.6e+03	1.7e+03	9.4e+02	1.1e+03	1.7e+01	9.4e+00	2.7e+01	1.3e+01	3.0e+01	8.6e+01	1.0e+02
酸	4.6e-10	3.0e-02	3.0e-02	3.0e-02	3.0e-02	7.9e-10	1.2e-10	9.2e-10	1.0e-09	1.8e-09	7.2e-10	1.5e-09
金属イオン	9.6e-06	1.5e-04	1.5e-04	8.1e-07	1.0e-05	1.7e-05	2.6e-06	1.9e-05	2.1e-05	3.8e-05	1.5e-05	3.2e-05
DS (溶解性物質濃度)	6.1e-03	8.2e-02	8.8e-02	1.1e+00	1.1e+00	9.5e-03	1.5e-03	1.1e-02	1.2e-02	2.2e-02	8.7e-03	1.8e-02
SS (懸濁物質濃度)	3.2e-03	5.6e+00	5.6e+00	9.2e-02	9.5e-02	5.2e-04	5.8e-04	1.1e-03	1.7e-04	6.9e-04	1.1e-02	1.2e-02
BOD (生物化学的酸素要求量)	4.8e-04	1.6e-03	2.1e-03	5.8e-05	5.4e-04	2.0e-03	1.8e-04	2.2e-03	1.5e-05	2.0e-03	6.0e-03	8.0e-03
COD (化学的酸素要求量)	1.8e-03	3.9e-04	2.2e-03	6.0e-06	1.8e-03	5.9e-05	5.0e-05	1.1e-04	5.9e-05	1.2e-04	1.1e-02	1.1e-02
フェノール	3.2e-08	4.7e-07	5.0e-07	2.6e-09	3.5e-08	5.4e-08	8.5e-09	6.2e-08	6.9e-08	1.2e-07	4.9e-08	1.0e-07
油	6.6e-04	1.1e-03	1.8e-03	1.5e-05	6.7e-04	1.4e-04	8.0e-05	2.2e-04	2.1e-04	3.5e-04	1.2e-04	2.6e-04
硫酸	1.1e-03	2.5e-04	1.4e-03	1.4e-04	1.2e-03	1.2e-03	2.1e-03	3.3e-03	7.5e-05	1.3e-03	3.3e-05	1.2e-03
鉄	2.7e-04	6.5e-05	3.4e-04	3.4e-05	3.1e-04	3.0e-04	5.1e-04	8.1e-04	1.9e-05	3.2e-04	5.7e-03	6.0e-03
アンモニア+NO ₃	7.7e-07	1.1e-05	1.2e-05	6.3e-08	8.3e-07	1.3e-06	2.0e-07	1.5e-06	1.7e-06	3.0e-06	1.1e-03	1.1e-03
クロム	1.9e-09	2.7e-08	2.9e-08	1.5e-10	2.0e-09	3.2e-09	4.9e-10	3.7e-09	4.0e-09	7.2e-09	2.9e-09	6.1e-09
鉛	8.3e-10	1.2e-08	1.3e-08	6.8e-11	9.0e-10	1.4e-09	2.2e-10	1.6e-09	1.8e-09	3.2e-09	1.3e-09	2.7e-09
亜鉛	1.2e-08	1.8e-07	1.9e-07	1.0e-09	1.3e-08	2.0e-08	3.2e-09	2.4e-08	2.6e-08	4.7e-08	1.9e-08	3.9e-08
水および水により運ばれる廃棄物の総量	1.2e+02	1.6e+03	1.7e+03	9.4e+02	1.1e+03	1.7e+01	9.4e+00	2.7e+01	1.3e+01	3.0e+01	8.6e+01	1.0e+02
総量	1.3e+02	2.0e+03	2.2e+03	1.1e+03	1.3e+03	2.2e+01	1.4e+02	1.7e+02	1.7e+02	1.9e+02	1.4e+02	1.7e+02
*汚水 (現場システム) / 汚泥 (公営処理場) / コンポスト (コンポスト化) / 灰 (廃棄物熱源転換) / 食品残渣 (埋立)												
水により運ばれる廃棄物	1.4e-02	5.7e+00	5.7e+00	1.3e+00	1.3e+00	1.4e-02	5.0e-03	1.9e-02	1.3e-02	2.7e-02	4.5e-02	5.8e-02
酸性ガス (NO _x および SO _x)	4.9e-02	4.1e-01	4.6e-01	4.9e-03	5.4e-02	5.7e-02	4.4e-02	1.0e-01	1.3e+00	1.3e+00	2.9e-02	8.6e-02
温室効果ガス+ (二酸化炭素およびメタン++)	6.2e+00	2.0e+02	2.0e+02	3.8e+01	4.4e+01	4.4e+00	4.3e+01	4.7e+01	6.0e+01	6.4e+01	7.9e+01	8.3e+01

++同じ重量において 100 年間にわたるメタンの温室効果能が二酸化炭素のその 21 倍 (USEPA 2000) (<http://www.epa.gov/ghginfo/qa/index.htm#11>) であるため、メタンの値には 21 を掛けている。

都市ごみ収集

本稿で検討するすべての都市ごみ食品廃棄物管理システムは、トラックを使用した都市ごみ収集を含む。そのため、都市ごみ収集システムの取得、運用、廃棄に必要となる材料、エネルギー、金銭と、材料、エネルギー、システムを通過する食品廃棄物から環境への流出物とは、別々に検討される。このプロジェクトが使用したのはウィスコンシン州マディソン市の都市ごみ収集システムであり、トン数、建設材料、コストはこのシステムに特有のものである。Research Triangle Institute (RTI) の調査に基づく全米データが、車両、マイル数、必要水量に関する収集パラメータに対して用いられる。全米の都市ごみの発生率、回収率、廃棄率が用いられている。都市ごみ収集システムのインベントリにおいて用いられる想定および事実は、以下の通りである。

- 人口 191,000 人、世帯数 72,535、商業施設数 3815 の市において、週 1 回の都市ごみ収集が想定されている。
- 都市ごみ収集システムについて、全体での設計寿命は 15 年と想定されており、建物については 30 年、車両については 8 年、カートについては 7.5 年の設計寿命が想定されている。
- 都市ごみ（および食品廃棄物）は、高密度ポリエチレン製の容器に入れて台所で保管され、収集のため 340L の高密度ポリエチレン製の車輪付きカートへ移される。
- 建物の必要面積は 9300m² である (Burse 1996)。
- 土地の必要面積が建物の必要面積の 2 倍であることと、土地がフェンスで囲われていることが想定されている。
- 都市ごみを収集するに当たり必要なディーゼル燃料は、都市ごみ 1000kg 当たり 7.5L である (RTI 1995)。
- 都市ごみ 1000kg 当たり 22kWh の電力が必要である (RTI 1995)。
- 都市ごみ収集施設において必要な水は、都市ごみ 1000kg 当たり 42L である (RTI 1995)。
- 都市ごみ 1 メートルトン当たりの収集に掛かるコストは 98.70 ドルである (Dreckmann 1997)。
- システムの寿命である 15 年間に収集される都市ごみの量は 1.7×10⁹kg であり、これに対する食品廃棄物 100kg の比は 5.8×10⁻⁸ となる。

表 2 は、22kg の材料、8.3×10⁴kJ のエネルギー、1.1×10⁻³m² の土地が、都市ごみ収集システムを通過する食品廃棄物 100kg に起因することを示している。材料の 80% は水であり、11% は電力を発生させるために必要な燃料、6% は建設材料、3% がディーゼル燃料である。材料の 78% はシステムの使用に、22% はシステムの取得に起因する (Diggelman 1998)。エネルギーにおいては、43% がディーゼル燃料に、30% が電気に起因し、24% が材料として具体化される。エネルギーの 73% がシステムの使用に、27% がシステムの取得に起因する (Diggelman 1998)。

表 3 は、総計 22kg の環境への流出物について、その 78% が水であり、20% が二酸化炭素であることを示している。他の排出物は非常にわずかである。流出物の 63% がエネルギー源に、19% が施設の水に、18% が材料に起因する (Diggelman 1998)。

都市ごみ収集と埋立

ウィスコンシン州デーデン郡の埋立地がこのプロジェクトのモデルとして採用されており、都市ごみのトン数、建設材料、車両、プロセス装置、およびコストはこの埋立地に特有のものである。埋立地の寿命を通しての設計の変更に対応するため、最後に行われた埋立地の拡大部分が埋立地全体を代表するものであると想定する。事実および想定は、以下の通りである。

- 埋立地の設計寿命は 15 年とする。閉鎖後 30 年間にわたり管理を行うが、その間は埋立地の再生利用を行わない。
- 埋立地は、設計寿命全体にわたり、暦日 1 日当たり平均 293 メートルトンを受け入れる。従って、食品廃棄物 100kg をこの総都市ごみで除すると、6.2×10⁻⁸ という比が得られる。
- 埋立地の土地面積は 12ha であり、フェンスで囲われた土地の面積は 28ha である。
- ライナーは、高密度ポリエチレン製の弾力性のあるメンブレンライナーおよびジオテキスタイルを備えた 1.2m の粘土である。最終カバーシステムは、0.61m の粘土と、高密度ポリエチレン製のジオコンポジットを含む。
- 埋立地は、浸出水回収システムを有し、浸出水を処理のためマディソン都市圏下水地域に放出する。
- 埋立地は、発電装置を備えたガス回収システムを有し、システム寄生負荷は生産される電力の 10% である (Mandli 1995)。
- 二酸化炭素およびメタンが埋立ガス回収システムに達することが想定されている。生成される埋立ガスの 66% が回収および使用され、33% が大気へ放出されることが想定されている。
- 食品の水分が浸出水回収システムに達することが想定されている。すべての浸出水は浸出水回収システムで集められる。
- 埋立地には総面積 1300m² の 2 棟の建物が必要である (Mandli 1995)。
- 埋立地の建設および運営に当たっては、都市ごみ 1000kg 当たり 5.9L のディーゼル燃料が必要であることが想定されている (RTI 1995)。
- 食品廃棄物の固形分の 95% が分解可能であること (Baldwin and Ham 1996) と、内 84% が埋立地で設計寿命の間に分解されること (Eleazer et al. 1997) が想定された。
- 埋立コストの平均は 1 メートルトン当たり 37.49 ドルであると想定されている (Mandli 1995)。
- 生産される電力は、埋立地の食品廃棄物 100kg から 6.8kg のメタンが嫌氣的に生成されること、3 分の 2 が回収されること、メタン 1kg 当たり 3.86kWh が回収され、そこから 10% の寄生負荷を引くことに基づき計算される (Franklin Associates Ltd. 1994 にて報告された Taylor 1992)。

表 2 は、250kg の材料、1.4×10⁵kJ/kg のエネルギー、1.9×10⁻²m² の土地が、都市ごみ収集と埋立の組合せのシステムを通過する食品廃棄物 100kg に起因することを示している。材料の 44% が土ライナーの材料であり、40% は食品廃棄物、15% は水である。総計の 88% がシステムの取得に起因する（即日覆土はシステムの取得に含まれる）(Diggelman 1998)。食品廃棄物を含む総エネルギーにおいて、77% が食品廃棄物に、11% がディーゼル燃料に起因する。エネルギーの大部分（70%）がシステムの使用に起因する (Diggelman 1998)。表 2 において示されているように、食品廃棄物 100kg から回収されるメタンは、16kWh の取出可能な電力を発生させる。メタンから電気への変換により取り出されるエネルギーを考慮すると、食品廃棄物 100kg 当たりの全体の必要エネルギーは、埋立の場合には 1900kJ、都市ごみ収集システムを含む場合には 8.5×10⁴kJ となる。食品廃棄物 100kg 当たり 5.7×10⁴kJ の取出可能な電力が発生するという事は、食品廃棄物に含まれたエネルギーの変換効率が 12% であることを示している。

表 3 は、環境への流出物 170kg が、都市ごみ収集と埋立の組合せのシステムを通過する食品廃棄物 100kg に起因することを示している。表 2 によれば、表 3 には含まれない、システムに残る 110kg の土がある。また、環境への流出物の 59% は水および水により運ばれる廃棄物であり、29% は大気放出であり、6% が食品残渣である。

都市ごみ収集／コンポスト化

このプロジェクトの実施に当たり選ばれた施設は、ウィスコンシン州コロンビア郡コンポスト化施設である。この施設の設計許容量である 63 メートルトン/日は、全米平均設計許容量 118 トン/日の 62% である。この施設の資本コストである 250 万ドルは、全米平均資本コスト 690 万ドルの 36% であり、1 トン当たり 36 ドルの廃棄料金は、全米平均廃棄料金である 1 トン当たり 48 ドルの 75% である (Steuteville 1994 による)。材料、エネルギー、コストに関するすべてのデータは、コロンビア郡コンポスト化施設 (Columbia County Composting Facility) に特有のものである。事実および想定は以下の通りである。

- この施設は、設計寿命の 15 年間にわたり、1 日当たり 63 トンの許容量にて稼働する。設計寿命を通じてこのシステムを通過する食品都市ごみの総量に対する食品廃棄物 100kg の結果的な比は、 2.9×10^{-7} である。
- コンポスト化の作業は 5900m² のビル内で行われる。このビルは面積の 45% に当たる約 2700m² のウィンドロー用コンクリートパッドを備えている。施設の面積は 26ha で、そのすべてがフェンスで囲われている (Casey 1996)。
- 容器内コンポスト化プロセス装置は、2 つのプロセスの流れを含み、そのいずれもが鋼製消化ドラム、トロンメル式選別機、コンベヤーを含む。
- 都市ごみは 20% が水分であり、チーズ工場の排水を加えてこれを 50% にする (Casey 1996)。
- 食品廃棄物内の分解可能な固形分の 95% は、最終的には分解される。分解の 83% が容器内コンポスターの中で生じ、また 17% が続くウィンドローでのキュアリングの途中で生じることが想定されている。
- コンポストの 50% は乾燥固体、残る 50% が水分である。
- このプロセスからの浸出水はないということが想定されている。
- 資本コストは 2,500,000 ドルだった。この施設の設計寿命である 15 年の間の運用コストは 20,167,496 ドル、資本コストの 25% である廃棄コストは 625,000 ドルなので、総コストは 23,292,496 ドルとなった。従って、食品廃棄物 100kg 当たり 6.70 ドルとなる。

表 2 は、140kg の材料が、都市ごみ収集とコンポスト化の組合せのシステムを通過する食品廃棄物 100kg に起因することを示している。この材料の大部分 (71%) は食品廃棄物であり、水 (21%) はシステムの使用に起因する。食品廃棄物 100kg に起因するエネルギーが 1.5×10^5 kJ あり、内 76% が食品廃棄物のエネルギー、11% が電力燃料である。大部分のエネルギーはシステムの使用に起因する (Diggelman 1998)。土地の要件は 7.6×10^{-2} m² である。

表 3 は、170kg の環境への流出物が、都市ごみ収集とコンポスト化の組合せのシステムを通過する食品廃棄物 100kg に起因することを示している。内、71% が大気放出、11% がコンポスト、16% が水である。

都市ごみ収集／廃棄物熱源転換

このプロジェクトの実施に当たり選ばれた施設は、ミネソタ州ヘネピン郡エネルギー資源会社の大量焼却ユニットである。この施設は、水冷壁の技術を熱回収のために、乾式スクラバー／線維性フィルタのシステムを大気汚染防止のために利用している。ヘネピン・エネルギー資源会社に依頼された情報のいくつかは独占的なものでありこのプロジェクトのためには公開不可と考えられたため、他の情報源 (主にミネソタ州公害防止庁のファイル、

また民間の情報源も) からの情報により情報不足を補った。事実および用いられた想定は、以下の通りである。

- ヘネピン・エネルギー資源会社のこの施設は、設計許容量が 1 日当たり都市ごみ 1088 メートルトンであるが、1 日当たり 907 トンを処理している。この施設の設計寿命は 20 年である。設計寿命全体にわたりこの施設を通過して処理される都市ごみの総計に対する 100kg の比は、 1.8×10^{-8} である。
- この施設は、4.6ha の敷地に建てられ、約 1400m² の補助的な建物も有する (ミネソタ州公害防止庁のファイルより)。
- 炉、ボイラー、タービンなどのプロセスの流れが 2 種類ある。
- 総計で出力は 38MW、770kWh/トンが処理される。正味で出力は 33MW、595kWh/トンである (NREL [National Renewable Energy Laboratory (国立再生可能エネルギー研究所)] 1992、ヘネピン・エネルギー資源会社のパンフレット)。ヘネピン郡の参考廃棄物の、都市ごみ 1kg 当たり 1.047×10^4 kJ (ミネソタ州公害防止庁のファイルより) という高い発熱量に基づけば、595kWh/トンは取出可能エネルギー変換効率が 20% であることを示している。
- 食品廃棄物のエネルギー価は 0.47×10^4 kJ/kg である。Diaz et al. (1982) に基づけば、施設のエネルギー要件である 0.035×10^4 kJ/kg、システムのエネルギー損失である 0.43×10^4 kJ/kg、食品廃棄物の焼却から得られる正味エネルギーの値はいずれも非常に低い。食品廃棄物の焼却からの正味のシステムエネルギーの出力はないことが想定されている。
- 大気汚染防止には、石灰粉噴射、熱的 DeNO_x、および水銀抑制のための活性炭が含まれる。
- 都市ごみが焼却された場合、25% が灰になる。その灰の 88% はボトムアッシュ、12% はフライアッシュである。
- 食品廃棄物の乾燥固体は 95% が可燃性であり、5% が灰になる。
- 人為的に低くなっている廃棄料金および他の様々な要因、およびヘネピン・エネルギー資源会社に特有な報告方法のため、コスト情報は不正確である。ヘネピン・エネルギー資源会社のパンフレットと、NREL (1992) においてまとめられた補完情報から、最終的な出費が 1 トン当たり 104 ドルと見積もられており、その 47% が資本コスト、41% が運用、12% が廃棄に関する出費である。

表 2 によれば、都市ごみ収集と廃棄物熱源転換の組合せのシステムを通過する食品廃棄物 100kg に起因する土地は、 1.9×10^{-3} m² である。150kg の材料が食品廃棄物 100kg に起因し、この材料の大部分 (67%) は食品廃棄物に、23% は水に、8% は電力燃料に起因する。大部分の材料の使用は、システムの使用に起因する (Diggelman 1998)。 3.0×10^5 kJ/kg のエネルギーが、都市ごみ収集と廃棄物熱源転換の組合せのシステムを通過する食品廃棄物 100kg に起因する。このエネルギーの内、ほとんど全部 (98%) がシステムの使用に起因する (Diggelman 1998)。上に示されているように、取出可能なエネルギーで食品廃棄物に起因するものはない。

表 3 において、190kg の環境への流出物が、このシステムを通過する食品廃棄物 100kg に起因することが示されている。この流出物の内、84% が大気放出であり、1% が灰、16% が水である。

結果

表 2 および表 3 は、各項目についてかなり細かい研究と計算が行われているため、有益な情報が多く盛り込まれている。食品廃棄物 100kg (および必要に応じてキャリア水も) を含めることにより、材料の流れやエネルギー要件に関するいくつかの合計項目において、値が全く変わってしまう。従って、一部の合計項目は食

品廃棄物およびキャリア水を含める場合と含めない場合の両方において、結果が示されている。食品廃棄物やキャリア水を除外した値は、プロセスそのものの要件や流れを強調する。一方、食品廃棄物やキャリア水を含めた値は、食品廃棄物を処理あるいは廃棄するために特定の技術を用いた場合の影響の全容を見せる上で、より正確である。

キャリア水の使用は、以下のいくつかのランキングカテゴリにおける重要性を失わせるものである。本研究においてモデリングのためにキャリア水を使用する量は、先に述べた通り Ketzenberger (1995) の家族研究に基づいているが、家庭での実践により変わることがある。たとえば、皿をすすぐときのみディスポーザーを使うなら、ディスポーザーの使用に当たっての追加的な水の使用は必要ないであろう。逆に、いつもディスポーザーを通常の流水とは別に使うならば、より多くのキャリア水が使われるかもしれない。

システムの概要

表 4 は、12 のパラメータにつき、5 種類のシステムの単純なランキングを示している。このパラメータには、土地、総システム材料（から食品廃棄物およびキャリア水を引く）、総システムエ

ネルギー（から食品廃棄物およびキャリア水を引く）、コスト、水使用量、排水量、水により運ばれる廃棄物、大気放出、酸性ガス、温室効果ガス、固体廃棄物および建設廃棄物、システム食品廃棄物副生成物が含まれる。本稿の著者達は、比較できないはずの量同士を比較した場合に生じる本来的な相違について理解している。特に大気放出においては、水蒸気、粒子状物質、酸性ガス、鉛の影響は決して等価にはならない。

各システムの各ランキング項目は平均され、平均のランクが示される。局所的な因子が各パラメータの相対的重要性を決めるということも大事である。たとえば、ある場所においてはコストが決定的な重要性をもつかもしれないし、別の場所においては土地面積がそうであるかもしれない。さらに、本稿で検討していない別の因子——たとえば、食品廃棄物を家庭で保管し都市ごみ収集に出すことに対する、ディスポーザーを使用し食品廃棄物を家庭から迅速に取り除くことの健康的および美的な利点など——が決定的な重要性をもつかもしれない。全体のランキングと議論は、この調査の結果の利用例としてののみ、ここに公開されているものである。

表 4 排出量によりランク付けされた食品廃棄物管理システム (1: 低、5: 高)

	ディスポーザー/ 現場システム	ディスポーザー/ 公営処理場	都市ごみ収集/ コンポスト化	都市ごみ収集/ 廃棄物熱源転換	都市ごみ収集/ 埋立
土地、m ² /100kg	1.9E+00	3.0E-04	7.6E-02	1.9E-03	1.9E-02
ランク	5	1	4	2	3
材料（から食品廃棄物およびキャリア水を引く）、kg/100kg	2214	130	41	53	153
ランク	5	3	1	2	4
エネルギー（から取出可能な食品廃棄物エネルギーを引く）、J/100kg	9.8E+08	4.8E+07	1.5E+08	3.0E+08	8.5E+07
ランク	5	1	3	4	2
水、kg/100kg	1744	1058	27	30	104
ランク	5	4	1	2	3
コスト、ドル/100kg	67.20	17.94	16.60	20.30	13.65
ランク	5	3	2	4	1
大気放出、kg/100kg	66	55	121	157	48
ランク	3	2	4	5	1
酸性ガス (NO _x および SO ₂)、kg/100kg***	0.46	0.05	0.10	1.33	0.09
ランク	4	1	3	5	2
温室効果ガス (21*CH ₄ +CO ₂)、kg/100kg*	202	44	47	64	83
ランク	5	1	2	3	4
排水、kg/100kg	1744	1058	27	30	104
ランク	5	4	1	2	3
水により運ばれる廃棄物、kg/100kg	5.73	1.27	0.02	0.03	0.06
ランク	5	4	1	2	3
固体廃棄物および建設廃棄物、kg/100kg	216	2	1	1	3
ランク	5	3	2	1	4
食品廃棄物副生成物、kg/100kg**	140	155	18	2	11
ランク	4	5	3	1	2
平均ランク	4.67	2.50	2.42	2.92	2.50
ランク	5	2/3	1	4	2/3

*同じ重量において 100 年間にわたるメタンの温室効果能が二酸化炭素のその 21 倍 (USEPA 2000)

(<http://www.epa.gov/ghginformo/qa/index.htm#11>) であるため、メタンの値には 21 を掛けている。

**汚水 (現場システム)、汚泥 (公営処理場)、コンポスト (コンポスト化施設)、灰 (廃棄物熱源転換施設)、食品残渣 (埋立地)

***HCl (塩化水素) はごく少量。発生するすべてのメタンは焼却されエネルギー回収されるか、排出されるかする (土壌酸化や土壌収着はされない)。

ディスポージャー／現場システム

ディスポージャー／現場システムは、食品廃棄物 100kg に起因する投入（土地、総システム材料、総システムエネルギー、および総システムコスト）および環境への総流出量において最も高い値である。2種類の現場システム、すなわちディスポージャーを収容するよう設計された現場システムと収容しないよう設計された現場システムとの差異はすべて、ディスポージャーの使用に起因する。従って、食品廃棄物 100kg は、設計寿命にわたってこれらのシステムを通過する食品廃棄物およびキャリア水の総量の差に対する比において、他のどのシステムよりもかなり大きくなる。ディスポージャーのキャリア水は、材料および環境への流出物において全体的に重要な原因となっており、環境への流出物の内、約 4 分の 3 はこれによるものである。

ディスポージャー／公営処理場

ディスポージャー／公営処理場システムは、食品廃棄物 100kg 当たりの土地要件、正味のエネルギー要件、酸性ガス、温室効果ガスにおいて、最も低い値である。このシステムはまた、大気放出、固体廃棄物および建設廃棄物においても低い値である。コストは、食品廃棄物 100kg 当たり 17.94 ドルと、5 システムの中で中位に位置するが、総システムコストの大部分 (97%) をディスポージャーのコストが占めており、このコストは住宅所有者が負担するものであるということは重要である。食品廃棄物に公営処理場を通過させてこれを処理するコストは、食品廃棄物 100kg 当たり 0.50 ドル未満である。ディスポージャー／公営処理場システムは、管理の必要な食品残渣（汚泥）において最も高い値である。この汚泥は、使用可能なシステムにより、有用な産物であると捉えるか否かが変わってくる。マディソン都市圏下水地域は、肥料の平均値、乾燥肥料 1 トン当たり 15 ドルと見積もっており、同地域では農民達による汚泥の需要が供給を上回っている (National Research Council 1997 にて報告された Taylor & Northouse 1992)。公営処理場／ディスポージャーのシステムは必要水量、排水および水により運ばれる廃棄物の環境への流出において 2 番目に高い値であるが、これは主にディスポージャーのキャリア水によるものである。水は環境への総流出物の約 85% を占めている (表 3)。食品廃棄物 100kg およびキャリア水の、ディスポージャー／公営処理場の設計寿命 30 年にわたりこのシステムを通過する流れおよび固形物の総量に対する比は小さい。

本調査の目的ではないが、排水システムが炭素制限システムであることも重要である。栄養物がバイオマスで炭素と同化し、汚泥としてシステムから除去される場合、食品廃棄物の炭素を炭素制限排水システムに加えることで、流出物からの栄養物（窒素およびリン）の純除去に寄与することができる。

都市ごみ収集／コンポスト化

都市ごみ収集／コンポスト化システムは、全体的に低い値である。このシステムは、材料および水の要件が最も少なく、排水および水により運ばれる廃棄物の生成量も最も少ない。都市ごみ収集が関係する 3 システムの中では土地の要件において最も高い値であり、全システムでも土地の要件においては 2 番目に高い値である。総システムコストでは 2 番目に低い値であり、他の自治体システムと似た値となっているが、先述したように、モデルとなった施設の資本コストは、全米基準に比べると低い。このシステムは、大気放出において 2 番目に高い値となっている。

都市ごみ収集／廃棄物熱源転換

都市ごみ収集／廃棄物熱源転換システムは、全体で 2 番目に高い値となっている。大気放出と酸性ガスの生産において最も高い値であるが、食品廃棄物副生成物（灰）および固体廃棄物においては最も低い値である。都市ごみ収集関係のシステムの中では、コストが最も高い。環境への流出物の約 80% は大気放出である (表 3 参照)。エネルギー要件においては、このシステムは、自治体関係のシステムの中で最も高い値である。

回収可能エネルギーがないという想定については、議論の必要がある。Thobanoglous et al. (1993) は、含水食品廃棄物 1kg 当たり 4650kJ という発熱量を示しているが、食品廃棄物からの取出可能エネルギーを決めるに当たり、この値は、ボイラー、熱交換、発電の損失により減らされるだろう。食品廃棄物に水分が多く含まれているため、また施設のエネルギー要件や、取出可能エネルギーの生成に関連する損失のため、食品廃棄物から回収される正味エネルギーは少なく、先述したように 0 であることが想定されている (Diaz et al. 1982)。他の事実や想定に従い、これにいくらかの値を加えることもできるが、そうしたとしても、おそらく総エネルギー要件のランキングを変えることはできないだろう。たとえば、4650kJ/kg の発熱量が 30% (この値は、高いが、熱回収を最大限にする現代の施設においては可能な値である [Nilsson 2000]) 変換したとしても、含水食品廃棄物 100kg 当たり 1.4×10^5 kJ になり、この値は、総エネルギーにおける 5 システム中の廃棄物熱源転換システムのランクを変えるには至らない。(ここにおいてモデルとなっているヘネピン・エネルギー資源会社の取出可能エネルギー生産効率率は 20% であると、以前伝えられていたことに注意すること。)

都市ごみ収集／埋立

都市ごみ収集／埋立システムの全体でのランク付けは低くなっている。エネルギー要件では最も低い値である部類に入り、5 廃棄物管理システムの中でコストが最も低い。環境への流出物も少なく、その中には大気放出と、管理を要する食品廃棄物残渣の総量が含まれる。環境への総流出物の約 60% が水であり、30% が大気放出である (表 3 参照)。メタン 1kg 当たり 3.86kWh の電力が発生するという、埋立地のメタンの 66% が回収されるということ、またその電力の 90% が取出可能であることを想定すると、食品廃棄物 100kg は、理論的には 16kWh の取出可能な電力を生産することができ、この値はディスポージャー／公営処理場システムで生産されるそれに近い。

結論

以下の結論は、モデリングのために選ばれた 4 種類の運用システムと、2 種の現場システム間の差異、そして多くの公的情報源からの複雑なデータ（そのいくつかは時代遅れおよび／または証明できないものであるかもしれない）、さらには種々の意見や計算に基づいている。従ってこれらの結論には、他の場面に応用する前に解釈が必要となるし、ひょっとすると再計算も必要となるかもしれない。この調査の結果は、以下の結論に要約されている。

- 排水システムから環境への総流出物は、都市ごみ収集システムにおけるその約 10 倍に上る。これは、主にディスポージャーのキャリア水のためである。
- ディスポージャー／現場システムは、農村部にとって唯一の選択肢であるが、多くのパラメータにおいて 1 番目か 2 番目に高い値であった。現場システム間の相違の比がより多く、含水食品廃棄物 100kg に起因していたため、土地、材料、エネ

ルギー、および環境への流出物は、4種類の自治体関係のシステムよりも、この農村のシステムの方が高かった。

- 都市ごみ収集／廃棄物熱源転換システムは、全体では2番目に高い値となっており、総システムコストにおいてもそうである。食品廃棄物を焼却しても、これらのシステムでは取出可能なエネルギーをほとんど生産しない。
- ディスポーザー／自治体の排水システムは、土地およびエネルギーの要件において最も低い値であり、酸性ガスおよび温室効果ガスの発生も最も少ない。水使用量、排水および水により運ばれる廃棄物において2番目に高い値であるが、これはディスポーザーのキャリア水のためである。ライフサイクル全体にわたり、コストの大部分がディスポーザーによるものであり、その分のコストは住宅所有者が負担する。コミュニティが自治体の排水システムを使って食品廃棄物を処理するコストは、食品廃棄物100kg当たり0.50ドル未満である。このシステムは、汚泥の形で、最も多い食品廃棄物副生成物を生成する。排水システムに行く食品廃棄物は、処理中に汚泥を生成するとき、窒素とリンを同化させて食品廃棄物中に残った価値を獲得し、土地改良に使用される。消化槽の中でメタンに転換された汚泥は、焼却されて電力を生産した場合、化石燃料から発生する電気を置き換える。
この調査から明らかになったことは、ディスポーザーは、客観的に評価されれば、自治体の全体的な廃棄物管理システムの構成要素として見るができるということである。ディスポーザーは、排水システムと都市ごみシステムの双方に影響を与える。先に結論付けたように、食品廃棄物がディスポーザーを通過して排水システムに行き、処理の過程で窒素およびリンの取り込みに貢献し、化石燃料の代替として焼却されるメタンへの消化があろうとなかろうと土地改良に使用された場合、それは有効に再利用される。食品廃棄物が都市ごみシステムに行った場合、ごみ収集の回数を増やすことになり、食品廃棄物を都市ごみの高くつく構成要素としてしまう。ディスポーザーが排水処理施設に与える悪影響の可能性を危惧して禁止されてきた、最新式の廃棄物管理システムを有するコミュニティ（そして国々）においては、この調査の結果は、直観に反するように見えるかもしれない。
- 都市ごみ収集／コンポスト化システムは、全体において最も低い値を示している。総システム材料および水の要件において最も低い値であり、排水、水により運ばれる廃棄物、および固体廃棄物の生成においても最も少ない。食品廃棄物の栄養分は、コンポスト化システムを経て、土に戻される。

- 都市ごみ収集／埋立システムは、全体において2番目に低い値と、コストにおいて最も低い値を示している。このシステムはまた、システムエネルギー要件、総大気放出、食品廃棄物副生成物において低い値を示している。
- 3種の都市ごみシステムにおいては、総システムコストの半分から4分の3は、収集システムによるものである。湿って腐敗しやすい食品廃棄物の行き先を都市ごみからディスポーザーへ計画的に転換させることにより、都市ごみをより乾燥し、より貯蔵性の高いものとして、毎週のごみ収集の必要性和、毎週の収集によるコストを減らし、また都市ごみ収集による大気放出や騒音を減らす可能性が生まれる。

歴史的には、ディスポーザーは便利な消費財として販売され（または販売が禁止され）てきた。ディスポーザーが普及している米国のような国々でさえ、それは実質的には変わらなかった。願わくは、この調査が、コミュニティの全体的な（排水および都市ごみ）廃棄物管理システムにおけるディスポーザーの役割についてのより全体論的、現実的な理解のための貢献となってほしい。ディスポーザーは、排水および都市ごみ管理の双方において、有効な手立てとなりうる。都市ごみ収集の頻度を減らし、コストも減らしたいと考えているコミュニティがあれば、市民にディスポーザーの使用を求めることが、食品廃棄物の腐敗に関する公衆衛生の問題（臭い、ネズミ、虫）を減らすことにつながりうる。都市ごみ収集の頻度を減らすことはまた、化石燃料の消費と、それに関連する大気放出を減らすことでもある。食品廃棄物を最新式の排水施設に効果的に送ることで、食品廃棄物のエネルギーを、再生可能なエネルギー源であるメタンとして捕捉できる。食品廃棄物をディスポーザーを通して送ることは、食品廃棄物管理における効果的な方法である。

略語

FWD	Food waste disposer (ディスポーザー)
HERC	Hennepin Energy Resources Corporation (ヘネピン・エネルギー資源会社)
MMSD	Madison Metropolitan Sewerage District (マディソン都市圏下水地域)
MSW	Municipal solid waste (都市ごみ)
NREL	National Renewable Energy Laboratory (米国立再生可能エネルギー研究所)
OSS	On-site system (現場システム)
POTW	Publicly operated treatment works (公営処理場)
USEPA	United States Environmental Protection Agency (米国環境保護庁)