

【 論 文 】

都市ごみ中の厨芥類および紙類の利用システムによる
温室効果ガスの削減効果

矢 野 順 也*・平 井 康 宏*・酒 井 伸 一*

出 口 晋 吾**・中 村 一 夫***・堀 寛 明****

【要 旨】 国内都市部の一例として京都市を対象に、都市ごみ中のバイオマスである厨芥類および紙類の賦存量を推定した。厨芥類の発生量は 22.2 万 ton-wet/年、紙類は 22.3 万 ton-wet/年であり、ほぼ全量が焼却処理されている。これらを対象に利用システムの温室効果ガス (GHG) 削減効果およびエネルギー回収率を評価した結果、「バイオガス化 (高温乾式メタン発酵)+ガスエンジン発電 (GE)」は既存の「直接燃焼+蒸気発電」、「直接燃焼+堆肥化」よりも有利であった。また、バイオガス発電時の廃熱を利用する超高温可溶性技術を組み込んだ可溶性システムでは、現状の乾式方式に対してエネルギー回収率および GHG 削減効果で 27% の向上が見込まれた。さらに、バイオガスの燃料電池利用により、GE 利用の最大 1.7 倍まで効果向上が期待された。国内温室効果ガスの削減に向けて都市ごみ中バイオマスの高度なエネルギー変換技術の普及が望まれる。

キーワード：厨芥類、システム解析、高温乾式メタン発酵、超高温可溶性、温室効果ガス (GHG)

1. は じ め に

バイオマスが有する再生可能性、カーボンニュートラルといった特性を利用し、地球温暖化防止や循環型社会形成に向けた取り組みが国内外で進められている。

京都市では、厨芥類、紙類、草木類などのバイオマスをメタン発酵させ、回収したバイオガスをガスエンジン等で発電利用するバイオガス化技術の実証研究を平成 11 年度から実施している¹⁾。また、家庭や事業所から排出される可燃ごみの高度利用システムとして、機械選別による可燃ごみからのバイオマス選別回収と乾式メタン発酵および残渣の焼却処理を検討し、平成 17 年度・環境省「次世代廃棄物処理技術基盤整備事業」において実

証試験を実施するなど²⁾、都市ごみ中バイオマスの有効利用について研究・実証試験を行ってきた。

そして、著者らは環境省「バイオ資源・廃棄物等からの水素製造技術開発事業」(平成 15～19 年度、御国立環境研究所受託、以下「水素製造技術開発事業」)に参画し、国内のバイオマス利用促進のための基礎情報として品目別賦存量 (1 自治体あたり、1 人あたり発生原単位)を整理し、焼却処理しているバイオマスを積極的にエネルギー利用 (メタン発酵、熱分解ガス化による発電・熱利用)するとともに、直接堆肥利用しているバイオマスをメタン発酵させた後に発酵残渣・廃液を農耕地還元することで、GHG 排出量は大きく削減できることなどを明らかにした^{3,4)}。これらのシステム研究成果に加え、著者らのグループでは、バイオマスを原料として、次世代エネルギーキャリアと目される水素製造を視野に入れた高効率エネルギー変換技術の開発も同時に実施してきた^{5,6)}。技術開発成果の地域応用に向けては、具体的地域を対象としたバイオマス賦存量の把握、ならびに利用可能性の高いバイオマスを対象としたエネルギー変換技術の実証が望まれる。

そこで、水素製造技術開発事業の一貫として、技術開

原稿受付 2009. 4. 13 原稿受理 2010. 11. 1

* 京都大学環境保全センター

** (株)タクマ

*** 財京都高度技術研究所

**** 京都市環境政策局

連絡先：〒 606-8501 京都市左京区吉田本町

京都大学環境保全センター 矢野 順也

E-mail: yano@eprc.kyoto-u.ac.jp

発成果を含めた各種バイオマス利用システムの温室効果ガス排出量やエネルギー回収性能に関する比較解析を実施した。すなわち、国内都市部の一例として京都市を対象に、バイオガス化利用に適したバイオマスとして都市ごみ中の厨芥類および紙類（古紙リサイクルに適さないもの）の賦存量を推定した。次いで、これまで技術開発を行ってきた超高温可溶化を導入した高温乾式メタン発酵によるバイオガス化システムを評価し、焼却や堆肥化利用等の従来の処理・利用技術と比較した。

2. 都市ごみ中バイオマス利用の地域実証事例と研究レビュー

近年バイオマスの地域利用は国内外で進められており、都市ごみ中のバイオマスである厨芥類についてもさまざまな地域実証が進められつつある。そこで、本研究で対象とした厨芥類等、都市ごみに含まれるバイオマスの先進的な利用事例を把握しておくことは重要と考え、まずは具体的地域での実証事例、さらに地域実証に向けたシステム解析事例を調査した。

国内では北海道中北空知地域⁷⁾では2003年より家庭厨芥類を分別し、域内3ヶ所の施設でバイオガス化（高温メタン発酵2施設、中温メタン発酵1施設）し、得られた電気は施設内で消費、熱は一部ロードヒーティングとして利用されている。中温メタン発酵施設では発酵残渣は堆肥利用されており、堆肥の利用先確保や堆肥化施設の異臭対策などが課題として指摘されている。

横須賀市では平成14年度から17年度の間、可燃ごみ（家庭からの定期収集ごみ）を機械選別しバイオガス化する実証試験を行った^{8,9)}。得られたバイオガスは機械選別後の投入ごみあたり154 m³N/tonである。このバイオガスをごみ収集車150台の燃料として利用し、余剰分を発電利用した結果、可燃ごみの全量焼却処理と比較して約6,300 ton-CO₂/年を削減できることを報告している。

北九州市¹⁰⁾では炭水化物類が多く含まれるパンなどを中心とした厨芥類を家庭や小学校など小規模排出事業者から0.3 ton/日、スーパーなど大規模事業者から9.7 ton/日収集し、糖化・発酵プロセスを経て約400 L/日の無水エタノールを製造（収率は0.14 L/kg-dryと資源作物の3~4割程度）する地域システムの運用を2007年から開始している。エタノールはガソリンに3%混合したE3ガソリンとしての利用を目指しており、厨芥類を原料とした液体燃料製造を採用している点が特徴的である。

また、EUでは食品廃棄物の利用が進んでいる。バイオガス利用の大部分は、従来はごみ処分場の埋立廃棄物

の分解によるメタンガス由来であったが、固定価格買取制度など国ごとの施策の後押しを受けて近年農場廃棄物や都市ごみのバイオガス化利用が進んでいる¹¹⁾。

Blengini ら¹²⁾はイタリアのピエモンテ州を対象としたバイオマス利用システムのLCAを報告している。州内の都市サン・ダミアノでは家庭から排出される有機性廃棄物1.2万 ton/年に加え剪定枝など植物性廃棄物0.4万 ton/年が分別収集され堆肥4.5万 ton/年を製造、またピネローロでは家庭由来の有機性廃棄物1.1万 ton/年、植物性廃棄物0.1万 ton/年が分別収集され55℃高温メタン発酵利用されている。Blengini らはこの両都市の堆肥化シナリオ、メタン発酵シナリオと、仮想的な全量埋立シナリオのLCAを実施した結果、投入物あたりのGHG排出量は堆肥化シナリオで0.13 ton-CO₂/ton、メタン発酵シナリオで0.20 ton-CO₂/ton、埋立シナリオで0.95 ton-CO₂/tonとなることを明らかにした。同研究ではバイオマス由来のCO₂もGHGとして計上しているため、堆肥化シナリオがメタン発酵シナリオより優位な結果となっているが、バイオマス由来のCO₂をカーボンニュートラルと仮定すればメタン発酵シナリオが最も優位となる。

スウェーデンのストックホルムにおける都市廃棄物約25.5万 tonの処理を機能単位としたケーススタディをEriksson らは報告している¹³⁾。システム境界を都市廃棄物の収集から廃棄、代替物の製造としたLCAで、生分解性廃棄物（発生量約9.3万 ton/年のうち約6.5万 ton/年、回収率70%）をメタン発酵利用するバイオガス化シナリオと全量焼却シナリオを比較している。その結果、バイオガスを発電および地域暖房として利用することで62 kg-CO₂/ton-都市廃棄物のCO₂が削減されることを明らかにした。

以上から、都市ごみ中の厨芥類を含むバイオマスについて、堆肥化のような資源回収に加え、バイオガス化とその残渣利用や、エタノール発酵による液体燃料製造など幅広い新規技術の地域実証を通じたシステム構築が進められていることがうかがえた。特にバイオガス化システムは国内外で広く普及しつつあることから、その物質・エネルギー回収性能の高効率化の可能性やバイオガスのさらなる効果的な利用方法について、技術開発を行うとともにGHG削減効果などを解析することは非常に意義深いと考えられる。

3. 京都市のバイオマス賦存量推定

3.1 京都市の地域特性と対象バイオマス

京都市は、面積が約828 km²、人口が約147万人（平

成 18 年 1 月 1 日現在)の政令指定都市であり、周囲に山林が広がる内陸都市である。平成 17 年 4 月 1 日には面積の 90% 以上が森林である北桑田郡京北町(面積約 218 km²)が編入され、林業の側面もいっそう濃くなっている¹⁴⁾。京都市はその地域特性から、日常生活に起因する都市ごみ中バイオマス(厨芥類や紙類など)のみでなく、観光産業に関連して排出される食品廃棄物、森林や庭園等から排出される林産系バイオマスが顕著であると推測される。本研究では、現在、焼却処理が主たる処理方法であり今後の有効利用が望まれる都市ごみ中バイオマス(厨芥類、紙類)を対象に賦存量(発生量、利用可能量)を推定した。

3.2 推定方法

都市ごみ中バイオマスについて市域の発生量(湿重量)を推定し、次いで乾重量およびエネルギー量に換算、さらに現在の利用状況をもとに飼料化など既に利用されている再資源化量を差し引いた値を利用可能量として推定した。利用可能量は技術的・経済的な利用可能性については考慮していない。発生量は、「環境局事業概要」¹⁵⁾

等をもとに平成 16 年度のデータを使用して推定した。ただし、事業系厨芥類については詳細な調査がされている平成 18 年度のデータを使用した。厨芥類の比率は定期収集ごみ中 39.5%、業者収集ごみ中 41%、市民持込ごみ中 2.1%、紙類の比率は定期収集ごみ中 32.7%、業者収集ごみ中 42.8%、市民持込ごみ中 14.4% である(いずれも湿重量比)。湿重量から乾重量への換算方法は、各品目の含水率を設定して換算した。エネルギー量へは水分を除いた乾重量と乾基準の高位発熱量を用いて換算した。含水率、乾基準の高位発熱量は表 1 に示した通りである。

3.3 利用可能なバイオマス資源の賦存量推定結果

賦存量推定結果は表 2 の通り、厨芥類の発生量は 22.2 万 ton-wet/年、688TJ/年、紙類の発生量は 22.3 万 ton-wet/年、2,865TJ/年となり(TJ は 10¹²J)、厨芥類は家庭系、事業系ともに同程度、紙類は事業系での発生量が多いことが明らかとなった。現在のところ厨芥類の一部(事業系厨芥の 10% 程度)が再資源化されている以外は焼却処理されており、利用可能量は発生量とはほぼ等しい¹⁴⁾。

表 1 対象バイオマスの性状^{16,17)}

項 目		単位	厨芥類	紙類	厨芥 + 紙類
三成分	水分	%	75.2	10.0	55.6
	可燃分	%	21.3	78.4	38.4
	灰分	%	3.5	11.6	5.9
熱量等	LHV	kJ/kg-wet	1,829	12,345	4,984
	HHV	kJ/kg-dry	15,488	13,985	15,037
	見かけ比重	ton/m ³	0.55	0.1	—
元素組成 (重量ベース、現物中の割合)	炭素, C	%-wet	10	32.7	16.8
	水素, H	%-wet	1.4	5.1	2.5
	酸素, O	%-wet	9.34	39.8	18.5
	窒素, N	%-wet	0.49	0.21	0.41
	燃焼性硫黄, S	%-wet	0.015	0.014	0.015
	揮発性塩素, Cl	%-wet	0.068	0.62	0.23
	リン, P	%-wet	0.025	0.02	0.024

表 2 京都市の都市ごみ中バイオマス賦存量(年間値)

品 目		発生量			再資源化量	利用可能量
		重 量		エネルギー		
		ton-wet	ton-dry	TJ	ton-wet	ton-wet
厨芥類	家庭系	111,974	22,395	347	—	111,974
	事業系	109,975	21,995	341	10,199	99,776
	合 計	221,949	44,390	688	10,199	211,750
紙ごみ	家庭系	92,698	85,282	1,193	—	92,698
	事業系	129,942	119,546	1,672	—	129,942
	合 計	222,639	204,828	2,865	—	222,639

備考) 本数値は旧・京北町からの発生量(ともに数百 ton-wet/年程度)を含まない

利用可能量 = 発生量 - 再資源化量

家庭系厨芥類の賦存量は事業系厨芥類と同程度であるが、その利用にあたっては分別収集方法が回収量に影響すると考えられるため、京都市では平成 20～21 年度に家庭厨芥類の分別収集モデル実験を実施している。対して、事業系の厨芥類は飲食店やスーパーから一定量がまとまって定期的に排出されるため、回収・再資源化システムが構築できれば有効利用は進みやすいと考えられる。

また、事業系紙類は、OA 紙など再生紙原料としてリサイクル可能な良質のものが多く含まれ、分別収集システムの構築によりマテリアル利用が促進できると推測される。一方、家庭系紙類は、ティッシュや紙オムツなど衛生用品が含まれることに加え、通常は可燃ごみとして厨芥類と混合排出されているため水分や異物が付着し、紙類のみを選別回収しリサイクルすることは困難である。

今後は、これら一般廃棄物中バイオマス（特に家庭ごみ中の低質なもの）を、温室効果ガス削減や循環型社会形成といった観点から有効利用していくことが求められる。

4. バイオマス利用による温室効果ガス削減効果の解析

4.1 バイオガス化および利用技術システム概要

まずはじめに、水素製造技術開発事業で開発してきた高効率なバイオガス化および利用技術について概要を説明する。

4.1.1 超高温可溶化技術

厨芥類等のバイオガス化技術では多量の発酵残渣・廃液が発生するという課題がある。いずれも肥料として地域還元が可能であるが、肥料需要の少ない都市部では発酵残渣の焼却処理（含水率が高く発熱量が低い）や発酵廃液の水処理が必要となり、一定の水環境負荷やエネルギー消費、GHG 排出につながる。そのため、発酵残渣の減量化を目指した改善方策として可溶化技術の導入が研究・実用化されている。可溶化技術は投入原料やメタン発酵污泥の可溶化促進により、発酵日数の短期化、バイオガス発生量の増大、発酵残渣および排水発生量の低減が可能となる。これまでに酸発酵＋メタン発酵の二相式好気・嫌気発酵システム¹⁸⁾、アルカリ剤の投入¹⁹⁾や重臨界水処理の導入²⁰⁾により可溶化を促進するシステム、好熱性細菌を利用して発酵残渣を 65℃ で好気分解し減量するシステム^{21,22)}などが提案されている。

一方、このような特殊な菌や薬剤および運転条件を必要としない省エネルギー・低コストな技術として、高温メタン発酵に適用できる「超高温可溶化技術」（高温メタン発酵以上の運転温度、60℃ 以上）が、Ahring ら²³⁾

と坪田ら^{24,25)}により開発されている。その技術的特徴は以下のとおりである。

- ・バイオガスの発電利用時の廃熱を用いた消化液中固形物の超高温可溶化（80℃ の高温嫌気条件保持）により有機物分解を促進し、バイオガス発生量を増大、発酵残渣発生量を低減させる。
- ・脱水ろ液の一部をメタン発酵槽へ返送し希釈水として循環利用することで、排水発生量を低減させる。
- ・超高温可溶化槽でのアンモニア回収により消化液中窒素濃度が低減されるため、窒素濃度の低い発酵廃液を未処理で原料の希釈水として利用でき、脱窒処理を必要とする廃液発生量および処理負荷が減少する。
- ・超高温可溶化槽はメタン発酵槽の前段または後段に配置される。両者はエネルギー効率などの性能面で著しい差異はないが、厳密には後段配置の方が消費電力は少なく余剰電力が多い、アンモニア回収量が多い、超高温可溶化槽の容積を 1 割程度縮小できる、などのメリットがある。前段配置では、可溶化槽容積や消費エネルギーが大きい、可溶化槽中の固形物濃度が高いため攪拌トラブルが懸念される、投入物の影響で可溶化槽内の pH が下がった場合にアンモニアストリッピングができない、などのデメリットがある。特に紙類混入条件では、セルロース等の分解速度の遅い基質が存在するため、バイオガス発生量は後段配置で多くなるものと推測される。

4.1.2 バイオガスの発電利用と改質技術

バイオガスは、従来はボイラ燃料やガスエンジン（GE）でのコージェネレーション利用（発電＋熱回収）が一般的であるが、より高効率な利用方法として燃料電池による利用が広まりつつある。国内では食品工場排水や下水污泥からの消化ガスを対象に溶融炭酸塩形燃料電池（MCFC）による利用事例²⁶⁾がある。

固体酸化物形燃料電池（SOFC）は通常 1,000℃ 近い高温で作動する燃料電池であり、他の燃料電池と比べ発電効率が低い、バイオガスを改質せずに脱硫などの精製のみで利用できるといった特徴がある。また、固体高分子形燃料電池（PEFC）は 80℃ 程度で動作する燃料電池であり、家庭用や自動車用での導入が進みつつある。燃料電池セルで水素を利用する PEFC はその前段でガス改質による水素製造および被毒成分である CO などの除去が必要となる。なお、現在市販されている都市ガス用 PEFC などは燃料電池ユニット内に改質器を備えているため、ユニット外部での改質による水素製造は不要である。

バイオガス改質プロセスには、水蒸気改質や自己熱改

質などがある。水蒸気改質は都市ガスを原料とした水素ステーションなどで実用化されているシステムであり、オフガスを利用して間接加熱が可能、高温プロセスであるため起動時間が比較の長いといった特徴がある。対して、自己熱改質は水素製造技術開発事業で開発された技術であり、起動時間が短く装置がコンパクトであるが、水蒸気を製造するための外熱やO₂を使用するため酸素ガス発生装置(O₂-PSA)が必要である。両方式ともに製造する水素ガスの純度は99.999 vol%以上である。

4.2 前提条件

4.2.1 対象バイオマス

厨芥類および紙類を対象とし、その処理量は京都市での新クリーンセンターの整備計画（バイオガス化：60 ton-wet/日）を参考に60 ton-wet/日（厨芥類：紙類＝7：3）とした。対象バイオマスの性状は表1に示した。

4.2.2 対象シナリオ

解析対象としたバイオマス利用システムのシナリオを表3に示した。

まず、既存の技術として、全量焼却し発電を行わない「直接燃焼」と、全量焼却による回収熱を発電利用する「直接燃焼＋蒸気発電」、厨芥類の分別による「直接燃焼＋堆肥化」を設定した。厨芥類の堆肥化では、分別収集の協力率（厨芥類全量のうち分別収集・堆肥化される割合）を50%（一部堆肥化）と100%（全量堆肥化）の2段階で検討した。なお、通常では数十 ton/日規模の焼却処理では蒸気発電を行う規模ではないが、本研究ではバイオマス発電との効率比較を行うためにも、その他の可燃ごみと混合焼却処理されている状態を想定して発電効率を設定し、試算を実施した。

続いてバイオガス化技術として、高温乾式メタン発酵（以下、従来乾式）と、さらに超高温可溶化槽を増設した高効率化システム（以下、可溶化方式）を対象とし、得られたバイオガスの利用先としてGE発電やFC利用を比較した。

4.2.3 評価範囲と方法

原料バイオマスの収集、利用（エネルギー変換含む）、残渣および堆肥の搬出（発酵残渣は焼却後搬出）、発酵廃液の廃水処理、堆肥の化学肥料代替効果までを評価し、焼却残渣の埋立プロセスおよび可燃ごみの混合収集時の機械選別プロセスは評価範囲外とした。焼却・バイオガス化・堆肥化施設はいずれも併設とし、電力などは施設間で融通できるものとした。

評価項目はエネルギー回収率とGHG削減効果とした。エネルギー回収率は式(1)、(2)で定義した。原料熱量は乾物基準の高位発熱量(kJ/kg-dry)を採用し、余剰電力は9.0 MJ/kWhを用いて一次エネルギー換算で評価した。また、代替エネルギーは余剰電力および堆肥化シナリオで代替される化学肥料の製造エネルギーの総和、投入エネルギーは収集、中間処理、搬出時のエネルギーを計上した。「GHG削減効果」についてはCO₂、CH₄、N₂Oを計上し、GWP100年値を用いて算出した。化石燃料の消費に伴うGHG排出は化石燃料の採掘、製造から消費（燃焼）までを評価した。

エネルギー回収率(一次エネルギー換算)[%]＝

$$\frac{\text{回収エネルギー[GJ/日]}}{\text{原料熱量[GJ/日]}} \quad (1)$$

$$\text{回収エネルギー[GJ/日]} = \text{代替エネルギー[GJ/日]}$$

$$- \text{投入エネルギー[GJ/日]} \quad (2)$$

表3 検討対象シナリオ

シナリオ名	厨芥類		紙類	合計	収集方式
	ton-wet/日				
既存の技術					
直接燃焼		42	18	60	混合収集
直接燃焼 + 蒸気発電		42	18	60	
直接燃焼 + 一部堆肥化	焼却 + 蒸気発電	21	18	39	分別収集
	堆肥化 (50%)	21	0	21	
直接燃焼 + 全量堆肥化	焼却 + 蒸気発電	0	18	18	分別収集
	堆肥化 (100%)	42	0	42	
バイオガス化技術					
従来乾式 +GE 発電		42	18	60	混合収集
可溶化方式 +GE 発電		42	18	60	混合収集
従来乾式 +SOFC		42	18	60	混合収集
従来乾式 + 水蒸気改質 PEFC		42	18	60	混合収集
従来乾式 + 自己熱改質 PEFC		42	18	60	混合収集

備考) GE：ガスエンジン、SOFC：固体酸化燃料電池、PEFC：固体高分子形燃料電池

4.3 評価対象システムのモデル化

4.3.1 収集プロセス

収集プロセスは、可燃ごみ全体（プラ含む）の一般的な収集作業を想定して試算した。堆肥化処理の場合は厨芥類を分別収集するものとし、分別厨芥とその他の可燃ごみの2分別で収集することとした（後段の処理については可燃ごみのうちプラスチック等を除く厨芥類・紙類の処理のみを評価）。バイオガス化処理の場合は可燃ごみの混合収集を想定し、機械選別でプラスチック等異物を除去してバイオマスを回収するものとするが、この選別処理（過去の実証試験結果から簡素な機器構成で低エネルギー消費な処理）およびプラスチック等の燃焼・発電は評価対象外とした（厨芥類・紙類の処理のみを評価）。収集プロセスでは軽油消費に伴うCO₂排出を計上した。走行距離は石川が提案したグリッドシティモデル（以下、GCM）²⁷⁾を用いて算出し、収集ごみ量あたりの軽油消費量を設定した。

4.3.2 焼却システム

焼却処理での発電効率は結果に影響を及ぼす重要なパラメータと考えられる。発電効率は施設規模や竣工年度等により差があるため、焼却処理施設の発電効率の技術レベルを3種類（7, 10, 15%）設定した。消費電力由来CO₂排出、蒸気発電による発電電力分のCO₂削減および残渣搬出に伴う軽油消費由来CO₂排出を計上した。

4.3.3 堆肥化システム

堆肥生産量は生ごみの投入量と性状、有機物分解率から乾重量を求め、含水率を考慮して湿重量に換算した。堆肥化プロセスは、堆肥化施設での電力消費によるCO₂排出および分解過程でのCH₄、N₂O排出を計上した。農地還元プロセスでは、堆肥の適用場所は好気性の畑を想定し、CH₄の発生はなく、N₂O排出は堆肥化プロセスで

計上済みとして、いずれの排出もゼロとした。ただし、畑からCH₄、N₂Oが発生する嫌氣的雰囲気の場合についても感度解析を行った。堆肥化プロセスで製造された堆肥は同量の無機態窒素を含む化学肥料を代替するとし、代替によるGHG削減可能量として化学肥料の製造時に排出されるCO₂、CH₄、N₂O、ならびに化学肥料を農地で使用する場合のN₂O排出を計上した。

4.3.4 バイオガス化システム

バイオガス化技術のうち、京都市で実証されている高温乾式メタン発酵システム（コンボガス方式）²⁸⁾を「従来乾式」とした。また、坪田ら^{24,25)}が開発した超高温可溶化技術を導入したシステムを「可溶化方式」とした。超高温可溶化槽は後段配置とした。現状のメタン発酵システムおよび超高温可溶化技術を導入する可溶化システムの特徴を表4に、可溶化システムの計画フローを図1に示す。

バイオガス発生量および発酵廃液、発酵残渣発生量は表4の値を使用した。発酵残渣は焼却処理（焼却システムで評価）、発酵廃液は廃水処理されるとした。本システムでは電力消費由来CO₂および発酵廃液を処理する際に発生するCH₄、N₂Oを計上した。

4.3.5 バイオガス改質プロセス

水蒸気改質、自己熱改質ともに消費電力由来のCO₂を計上した。

4.3.6 GE 発電・燃料電池システム

本解析において燃料電池はSOFC²⁹⁾、PEFC（純水素利用タイプ）³⁰⁾の技術（発電効率）を採用し、既に実用段階の技術であるGEの発電効率は35%とした。発電電力量はバイオガスまたは改質ガス（H₂）の低位発熱量に発電効率（送電端）を乗じて算出し、発電電力分のCO₂を系統電力代替としてマイナス計上した。

表4 バイオガス化システムの特徴

		乾式バイオガス化	可溶化バイオガス化 (可溶化槽前段配置)	可溶化バイオガス化 (可溶化槽後段配置)
概要	原料	厨芥類 42 ton-wet 紙類 18 ton-wet	厨芥類 42 ton-wet 紙類 18 ton-wet	厨芥類 42 ton-wet 紙類 18 ton-wet
	発酵槽	・処理量：110 ton/日 ・HRT：33日	・処理量：152.5 ton/日 ・HRT：24日	・処理量：150 ton/日 ・HRT：24日
	超高温可溶化槽	なし	・処理量：152.5 ton/日 ・HRT：1日、容量：180 m ³	・処理量：128 ton/日 ・HRT：1日、容量：150 m ³
	循環返送汚泥量	36.7 ton-汚泥/日	50.8 ton-汚泥/日	50 ton-汚泥/日
	排水処理能力	処理量：63.3 m ³ /日	処理量：15.9 m ³ /日	処理量：16.0 m ³ /日
	分解率（VS）	厨芥類：84%、紙類：60%	厨芥類：90.0%、紙類：67.3%	
	バイオガス発生量	14,180 m ³ N-dry/日	15,574 m ³ N-dry/日	15,574 m ³ N-dry/日
	発酵残渣発生量	26.9 ton-wet/日	22.2 ton-wet/日	22.1 ton-wet/日
	発酵廃液発生量	63.3 ton/日（排水処理対象）	15.9 ton/日（排水処理対象）	16.0 ton/日（排水処理対象）
	アンモニア性窒素回収量	なし	135.7 kg-N/日	178.2 kg-N/日

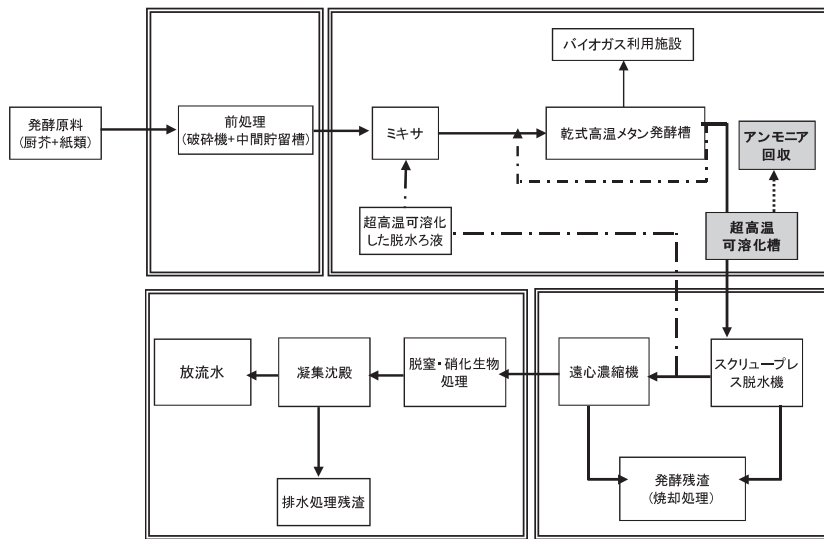


図1 可溶化バイオガス化システムフロー図（後段配置）

4.3.7 パラメータと不確実性について

各シナリオのシステム・プロセスで設定したパラメータを表5にまとめた。水素技術開発事業の成果を踏まえて、京都市で実証事業「京都バイオサイクルプロジェクト（以下、京都PJ）」（環境省・地球温暖化対策技術開発事業）¹⁾が平成19年度から開始されている³¹⁾。実証事業では可溶化方式のバイオガス化システムやバイオガスのSOFC利用について、本研究でのパラメータ設定値と同等の運転データ^{32,33)}が得られており、今後の実用化が期待できる。一方、バイオガスの水蒸気改質や自己熱改質とPEFC利用については基礎研究段階の技術であり、そのパラメータはラボスケールで現在までに達成されている変換効率等の最高値を用いている点には留意が必要であるが、一層の技術開発を推進すべきかどうかの判断材料とすることも含めてシステム評価の対象とした。

4.4 結果と考察

4.4.1 既存システムとバイオガス化システム（GE発電）の比較

各システムの試算結果を表6, 7に示した。

「直接燃焼＋蒸気発電」では発電電力の大小が強く影響し、発電効率7%ではGHG削減効果、エネルギー回収ともに得ることができなかった。発電効率を変数として解析した結果、GHG削減効果が見込めるのは発電効率10.1%以上、エネルギー回収が見込めるのは発電効率9.5%以上であった。

「直接燃焼＋一部堆肥化」、「直接燃焼＋全量堆肥化」

は分別収集に伴う厨芥類（カロリーが低い）の焼却回避により、焼却処理でのエネルギー回収性は向上するが、堆肥化に必要な電力および発酵ガスによるGHG排出負荷が大きく、堆肥化を進めるほどGHG削減効果は減少する結果となった。都市部における厨芥類の堆肥化については、地域内の堆肥の需要と供給の観点も重要である。また、堆肥の適場所として嫌気性雰囲気感を想定した感度解析では、「直接燃焼＋一部堆肥化」で1.23 ton-CO₂/日、「直接燃焼＋全量堆肥化」で2.46 ton-CO₂/日の排出となり、GHG削減効果が見られなくなった（その他のプロセスを含むシナリオ全体では一部堆肥化で0.19 ton-CO₂/日、全量堆肥化で1.79 ton-CO₂/日のGHG排出）。

「直接燃焼＋一部堆肥化」は「直接燃焼（発電なし）」と比較してGHG削減効果、エネルギー回収率ともに優位であった。また、発電を行う「直接燃焼＋蒸気発電」は「直接燃焼＋一部堆肥化」と比較して、発電効率が15%の場合にGHG削減効果が優位であった。したがって、小規模な焼却処理プラントのように発電できないあるいは発電効率が低い（約10%以下）場合には堆肥化を採用することが望ましい。

「従来乾式＋GE発電」は「直接燃焼＋蒸気発電」、「直接燃焼＋一部堆肥化」と比較して、GHG削減効果およびエネルギー回収率の双方で優位となり（発電による代替効果が大）、バイオガス化の有効性が明らかとなった。

さらに、「従来乾式」と「可溶化方式」のバイオガス化システム間の比較から、可溶化技術の導入により、バ

表5 主要パラメータの設定値

プロセス/パラメータ名	値	単位	出典	プロセス/パラメータ名	値	単位	出典
CO ₂ 排出係数				化学肥料製造			
全電源平均	0.378	kg-CO ₂ /kWh	34	エネルギー消費	44	MJ/kg-N	37
軽油	2.83	kg-CO ₂ /L	34, 35	CO ₂ 排出	2.01	kg-CO ₂ /kg-N	37
低位発熱量				CH ₄ 排出	0	g-CH ₄ /kg-N	37
軽油	35.5	MJ-LHV/L	34, a	N ₂ O 排出	0.18	g-N ₂ O/kg-N	37
H ₂	10.77	MJ-LHV/m ³ N	36	化学肥料の農地使用			
CO	12.63	MJ-LHV/m ³ N	36	N ⇒ N ₂ O 変換率	0.99	%	3
CH ₄	35.9	MJ-LHV/m ³ N	36	バイオガス化（共通）			
収集				ガス中 CH ₄ 割合	57	%	28, c
軽油消費（混合収集）	2.38	L/ton-ごみ	27, 計算	排水由来 CH ₄ 排出係数	5.9	g-CH ₄ /m ³	39
軽油消費（分別収集 50%）	2.76	L/ton-ごみ	27, 計算	排水由来 N ₂ O 排出係数	4.5	g-N ₂ O/ton-N	39
軽油消費（分別収集 100%）	2.90	L/ton-ごみ	27, 計算	バイオガス化（乾式）			
焼却処理				消費電力	137	kWh/ton-wet	c
消費電力	120	kWh/ton-wet	—	生成ガス	279	m ³ N-wet/ton-wet	c
発電効率	7, 10, 15	%	b	発酵廃液	1.055	ton/ton-wet	c
焼却残渣含水率	20	%	3	バイオガス化（可溶化・後段）			
堆肥化				消費電力	121	kWh/ton-wet	c
消費電力	50	kWh/ton-wet	33, 37	生成ガス	306	m ³ N-wet/ton-wet	c
分解ガス中 CH ₄ 割合	0.075	%	3, 34	発酵廃液	0.266	ton/ton-wet	c
N ⇒ N ₂ O 変換率	1.25	%	3, 34	水蒸気改質			
N 残存率	87.5	%	3	バイオガス消費	0.80	m ³ N-dry-biogas/m ³ N-H ₂	c
堆肥含水率	30	%	33, 37	消費電力	0.18	kWh/m ³ N-H ₂	c
分解率（厨芥類）	50	%	37	自己熱改質			
堆肥比重	1	ton/m ³	仮定	バイオガス消費	0.88	m ³ N-dry-biogas/m ³ N-H ₂	c
堆肥・残渣搬出				消費電力	0.19	kWh/m ³ N-H ₂	c
積載重量	4,000	kg/台	仮定	自己熱改質（効率向上）			
往復輸送距離	50	km	仮定	バイオガス消費	0.73	m ³ N-dry-biogas/m ³ N-H ₂	c
燃費	4.19	km/L	38	消費電力	0.069	kWh/m ³ N-H ₂	c
農地還元				GE 発電			
炭素ガス化率	50	%	3	発電効率（発電端）	35	%	d
N 肥効率	50	%	37	発電電力の内部消費割合	5	%	d
分解ガス中 CH ₄ 割合	0	%（好気性）	3	SOFC			
N ⇒ N ₂ O 変換率	0	%（好気性）	3	発電効率（送電端）	45	%	29, e
分解ガス中 CH ₄ 割合	6.9	%（嫌気性）	3	発電電力の内部消費割合	0	%	29, e
N ⇒ N ₂ O 変換率	0.99	%（嫌気性）	3	PEFC			
				発電効率（発電端）	46	%	30, f
				発電電力の内部消費割合	5	%	30, f

a) 製造エネルギーと合わせて 38.3 MJ-LHV/MJ³⁵⁾

b) 小型発電～大型発電規模を想定し 3 段階設定

c) メーカーヒアリング値

d) 発電効率：発電端の値，内部消費割合：GE の制御により消費される割合

e) 発電効率：送電端の値，内部消費割合：送電端における発電効率値を使用しているため，0 とした

f) 発電効率：発電端の値（純水素からの発電効率），内部消費割合：PEFC の制御により消費される割合

イオガス発生量 10%，エネルギー回収率および GHG 削減効果約 30% の向上，発酵残渣 20%，発酵廃液 75% の削減効果が見込まれた。

4.4.2 バイオガス利用方法の比較

いずれのバイオガス化システムについても，原料収集，廃水処理および残渣搬出由来の GHG 排出量はバイオガスを利用した発電による GHG 削減量と比べて寄与が小さいことが明らかとなった。したがって，各プロセスの

消費電力が抑えられ，発電電力量の大きなバイオガス利用方法が優位となる。

「従来乾式+SOFC」のエネルギー回収率は 56%，GHG 削減効果は 148.7 kg-CO₂/ton-原料であった。発電電力量の差がエネルギー回収率および GHG 削減効果に影響し，SOFC 利用は GE 利用と比較してエネルギー回収率 1.6 倍，GHG 削減効果は 1.7 倍まで向上した。

一方，PEFC 利用は GE 利用と比べてバイオガスの改

表6 既存の技術システムの試算結果

			既存システム					
			直接燃焼				一部堆肥化	全量堆肥化
			発電なし	蒸気発電			協力率 50%	協力率 100%
発電効率		%	0	7	10	15	15	15
製品	堆肥	ton-wet/日	—	—	—	—	4.2	8.5
エネルギー収支 (電力)	消費電力 焼却	kWh/日	7,200	7,200	7,200	7,200	4,680	2,160
	堆肥化	kWh/日	—	—	—	—	1,050	2,100
	合計	kWh/日	7,200	7,200	7,200	7,200	5,730	4,260
	発電電力	kWh/日	0	5,814	8,306	12,460	10,859	9,258
	余剰電力	kWh/日	0	0	1,106	5,260	5,129	4,998
エネルギー収支 (全体)	投入エネルギー	GJ/日	71	18	6	6	8	7
	代替エネルギー	GJ/日	0	0	10	47	48	49
	回収エネルギー	GJ/日	0	0	4	41	41	42
	エネルギー回収率	%	0	0	1.0	10.7	10.5	10.7
GHG 削減効果	原料収集	ton-CO ₂ /日	-0.4	-0.4	-0.4	-0.4	-0.49	-0.44
	電力由来	ton-CO ₂ /日	-2.7	-0.5	0.4	2.0	1.9	1.9
	堆肥化	ton-CO ₂ /日	—	—	—	—	-0.6	-1.3
	残渣搬出	ton-CO ₂ /日	-0.04	-0.04	-0.04	-0.04	-0.07	-0.09
	化学肥料製造	ton-CO ₂ /日	—	—	—	—	0.09	0.19
	農地使用(化肥)	ton-CO ₂ /日	—	—	—	—	0.22	0.43
	合計	ton-CO ₂ /日	-3.2	-1.0	-0.02	1.5	1.0	0.7

※余剰電力 = (発電電力) - (消費電力)。発電電力 < 消費電力の時は余剰電力は 0

※回収エネルギー = (代替エネルギー) - (投入エネルギー)。代替エネルギー < 投入エネルギーの時は代替エネルギーは 0

※エネルギー回収率 (一次エネルギー換算) = 回収エネルギー / 原料熱量

※GHG 削減効果は、正: GHG 削減、負: GHG 排出

表7 バイオガス化技術システムの試算結果

			バイオガス化システム					
			従来乾式	可溶化方式	従来乾式			
			GE	GE	SOFC	水蒸気改質 +PEFC	自己熱改質 +PEFC	同左 (効率向上)
発電効率		%	35	35	45	46	46	46
生成ガス、残渣	生成ガス	m ³ N-dry/日	14,180	15,574	14,180	14,180	14,180	14,180
	改質生成 H ₂	m ³ N-dry/日	—	—	—	17,688	16,028	19,463
	発酵残渣	ton-wet/日	27	22	27	27	27	27
	発酵廃液(処理前)	m ³ /日	63	16	63	63	63	63
エネルギー収支 (電力)	消費電力 バイオガス化	kWh/日	8,193	7,243	8,193	8,193	8,193	8,193
	残渣焼却	kWh/日	3,229	2,651	3,229	3,229	3,229	3,229
	ガス改質	kWh/日	—	—	—	3,134	3,112	1,334
	合計	kWh/日	11,422	9,894	11,422	14,557	14,534	12,756
	発電電力	kWh/日	28,165	30,934	36,212	28,885	26,174	31,783
	余剰電力	kWh/日	15,334	19,493	24,789	12,884	10,332	17,438
エネルギー収支 (全体)	投入エネルギー	GJ/日	6	6	6	6	6	6
	代替エネルギー	GJ/日	138	175	223	116	93	157
	回収エネルギー	GJ/日	132	169	217	110	87	151
	エネルギー回収率	%	34.0	43.7	56.0	28.4	22.4	38.9
GHG 削減効果	原料収集	ton-CO ₂ /日	-0.4	-0.4	-0.4	-0.4	-0.4	-0.4
	電力由来	ton-CO ₂ /日	5.8	7.4	9.4	4.9	3.9	6.6
	排水処理	ton-CO ₂ /日	-0.008	-0.002	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008
	残渣搬出	ton-CO ₂ /日	-0.04	-0.04	-0.04	-0.04	-0.04	-0.04
	合計	ton-CO ₂ /日	5.4	6.9	8.9	4.4	3.5	6.1
		kg-CO ₂ /ton	89.2	115.5	148.7	73.7	57.7	102.3

※余剰電力 = (発電電力) - (消費電力)。発電電力 < 消費電力の時は余剰電力は 0

※回収エネルギー = (代替エネルギー) - (投入エネルギー)。代替エネルギー < 投入エネルギーの時は代替エネルギーは 0

※エネルギー回収率 (一次エネルギー換算) = 回収エネルギー / 原料熱量

※GHG 削減効果は、正: GHG 削減、負: GHG 排出

質に伴う電力消費の有無、発電電力量の差により、GE 利用と比べてエネルギー回収率および GHG 削減量は水蒸気改質では約 83%、自己熱改質では約 66% へと低下した。純水素を利用する PEFC は改質が必要となり、バイオガス熱量ベースのエネルギー変換効率率は 31% 程度となり発電電力量が低下するためである。また、PEFC 利用に必要なバイオガス改質に伴う消費電力が全体の約 20% を占めており、消費電力量の増加もエネルギー回収率低下の要因となっている。

PEFC 利用のための改質方法の違いについては、改質に必要な消費電力量はほぼ等しいが、 H_2 生成量が自己熱改質の 1.1 倍である水蒸気改質は発電電力量も増加し、エネルギー回収率と GHG 削減量はともに 1.3 倍となった。現時点の技術レベルは水蒸気改質方式の方が優位であるが（家庭用 PEFC での改質方式として採用されている）、自己熱改質方式において将来的に酸素ガス発生装置（ O_2 -PSA）の消費電力が低減、また水素ガス精製装置（ H_2 -PSA）での水素回収率が向上（70 ⇒ 85%）した場合には（表 7「効率向上」）、水蒸気改質方式や GE よりも有利になり得る。ただし、改質後のガス性状として純水素が必要かどうか、他の成分の含有がどの程度許容されるかにより、改質プロセスに求められる要件も変化するため、燃料電池の技術開発状況にリンクした改質プロセスの開発・最適化が必要である。加えて、燃料電池製品の出力規模（1 ユニットあたりの kW）やバイオガスの分散・集中利用などの地域条件も考慮したより詳細なシステム解析が必要であり、今後の課題である。

なお、可溶化方式に SOFC 利用を組み合わせた場合、従来乾式と比較してガス量増大により余剰電力が 1.2 倍となり、GHG 削減量が 1.9 ton- CO_2 /日増加（1.2 倍）する。その結果、「従来乾式+GE 発電」と比較して GHG 削減効果、エネルギー回収率ともに 2.0 倍まで向上する。

4.5 既往研究との比較検討

本研究と同様にバイオガス化を含む厨芥類利用システムの評価事例との比較を行い、本研究で示した利用システムの有効性について検討した。なお、GHG 排出削減効果に差異をもたらす既往研究における前提条件の違いについても合わせて補足した。

まず、本研究でのシステム解析結果（バイオマス重量あたりの GHG 削減量）を京都市の厨芥類賦存量全量（厨芥類 22.3 万 ton+紙類 9.6 万 ton=計 32 万 ton）に適用した場合の各バイオガス化システムの GHG 削減効果を表 8 に示した。また、既往研究では全量焼却処理をベースシナリオとしていることから、同様に「直接燃焼+蒸気発電（15%）」をベースとした場合のバイオガス化技術導入による GHG 削減効果を算出し、比較した。本研究では「従来乾式+GE 発電」ケースでは約 2.0 万 ton- CO_2 、「可溶化方式+GE 発電」では約 2.9 万 ton- CO_2 、「従来乾式+SOFC」では 3.9 万 ton- CO_2 の GHG 削減効果が期待され、可溶化技術および SOFC とともに GHG 削減効果が期待できることが確認された。

2. で紹介した既往研究でのバイオガス化システム検討事例と本研究の結果を表 9 に比較整理した。

本研究で採り上げている可溶化バイオガス化システムについては、平成 19 年度から京都 PJ で実証試験が行われている。京都 PJ における導入効果試算結果³¹⁾では機械選別された厨芥類（約 14.5 万 ton）および紙類（約 10.4 万 ton）のメタン発酵利用（従来乾式+GE 発電、可溶化方式は含まず）による GHG 削減効果は焼却処理と比べて約 1.5 万 ton- CO_2 と試算されている。本研究の「従来乾式+GE 発電」ケースとは 0.5 万 ton- CO_2 の差が見られた。使用しているパラメータは本研究とほぼ同じ値であり、厨芥類と紙類の比率が若干異なることや、事業系厨芥類のメタン発酵利用量を少なく見積もっていることなどが差異の理由であると考えられる。なお、バイオガス化システムの GHG 削減原単位（kg- CO_2 /ton）

表 8 京都市導入時の GHG 削減効果試算結果

		厨芥類		GHG 削減効果			直接燃焼 + 蒸気発電 (15%) との差分	
		賦存量	機能単位	原単位		京都市換算	kg- CO_2 /ton	ton- CO_2 /年
		ton-wet/年	ton/日	kg- CO_2 /ton	ton- CO_2 /日			
既存の技術	直接燃焼 + 蒸気発電（15%）			25.0	1.5	7,927	—	—
バイオガス化 技術	従来乾式 + GE 発電	221,949	42	89.2	5.4	28,272	64.2	20,345
	可溶化方式 + GE 発電			115.5	6.9	36,622	90.5	28,695
	従来乾式 + SOFC			148.7	8.9	47,138	123.7	39,211
	従来乾式 + 水蒸気改質 PEFC			73.7	4.4	23,357	48.7	15,431
	従来乾式 + 自己熱改質 PEFC			57.5	3.5	18,284	32.7	10,358

※京都市 GHG 削減量 = 厨芥類賦存量/厨芥類機能単位 × GHG 削減原単位

※厨芥類 + 紙類（7:3）を対象とした試算であり、紙類 18 ton/日（約 9.6 万 ton/年）の利用効果も含む

表9 バイオガスの地域利用に関する既往研究と本研究の比較

国	日本	日本	日本	スウェーデン	イタリア
地域	京都市	京都市	横須賀市、三浦市、 葉山町	ストックホルム	ピエモンテ州
対象地域人口	約 150 万人	約 150 万人	約 50 万人	約 50 万人	約 250 万人
対象ごみ	厨芥類、紙類	可燃ごみ、廃食用油、 廃木材	収集ごみ	都市廃棄物	家庭系厨芥類、剪定枝
処理量(万 ton/年)	32	45 (14)	12	26 (9.3)	1.2-1.6
ベースシナリオ	焼却	焼却	焼却	焼却	—
GHG 削減効果 (万 ton-CO ₂ /年)	2.0-3.9	11-13(1.5)	0.6	—	—
GHG 削減原単位 (kg-CO ₂ /ton)	64~91~124	61	145	243~321	120
備考	対象ごみは全量 バイオガス化利用	()は厨芥類量または 厨芥類+紙類による GHG 削減効果	収集ごみを機械選別後、 バイオガス化	()は バイオウエイスト量	処理量はプラント の処理量 (一部)
参考文献	本研究	31	8.9	13	12

※ GHG 削減効果はベースシナリオと比較した削減効果

※ GHG 削減原単位は発酵槽投入物あたりの原単位

※ただし、Blengini ら¹²⁾の研究による GHG 削減原単位はメタン発酵シナリオの効果を表記。また、出典ではバイオマス由来 CO₂も計上していたが、バイオマス由来 CO₂を除いた値を表記した

はほぼ同等の値である。

京都 PJ の導入効果試算と同様に機械選別によるメタン発酵を想定した横須賀市の報告^{8,9)}では、従来の焼却処理からメタン発酵利用へシフトすることで約 0.6 万 ton-CO₂の削減効果が報告されており、メタン発酵利用される発酵槽投入物あたりの効果は本研究「従来乾式+GE 発電」の約 2.3 倍であった。本研究では投入量に占める紙類の比率が 30% であるのに対し、横須賀市の機械選別物に占める紙ごみは約 10% 前後である。紙類比率の違いにより本研究ではベースとなる焼却シナリオの GHG 削減効果が高く評価され (対象ごみ熱量の約 74% が紙ごみ由来)、メタン発酵利用にシフトした際の削減効果が小さく評価されていることが差異の理由であると考えられる。また、電力の CO₂ 排出原単位や発電効率の違い、バイオガスの利用方法の違い (発電利用+ごみ収集車の燃料利用) も結果に影響しているものと考えられる。ただし、バイオガスの発電利用とバス燃料利用 (軽油代替)、自動車燃料利用 (ガソリン代替) を比較した Eriksson らの研究¹³⁾では、発電利用とバス燃料利用の GHG 削減効果は同程度という結果を示していた。

Eriksson ら¹³⁾が報告したストックホルム (人口 49.6 万人) における生分解性廃棄物利用の GHG 削減効果 243 (発電代替)~321 (ガソリン代替) kg-CO₂/ton は、本研究と比べ高い結果である。本研究との差異は発酵残渣の化学肥料代替を評価していること、CO₂ 排出量の高い石炭発電を代替していることが原因と考えられる。日本では石炭発電による GHG 排出係数は 0.887 kg-CO₂

/kWh であり⁴⁰⁾、比較のため本研究も石炭発電を代替するとして評価すると「従来乾式+GE 発電」が 219, 「可溶化方式 (後段)+GE 発電」が 281, 「従来乾式+SOFC」では 359 kg-CO₂/ton となり、従来乾式メタン発酵では同程度の代替効果、可溶化方式や SOFC 発電利用ではそれ以上の代替効果が見込まれる。

イタリアのピエモンテ州の家庭系厨芥類、剪定枝利用による GHG 削減効果¹²⁾はバイオマス由来の GHG を含めると 200 kg-CO₂/ton の排出となるが、バイオマス由来 GHG を除けば約 120 kg-CO₂/ton の削減効果である。これは本研究「従来乾式+GE 発電」の 1.9 倍の効果であったが、これは得られたバイオガスは電力代替に加え熱利用の効果も評価しているためと考えられる。したがって、地域インフラも含めた熱利用が可能なシステムが構築された地域においては、バイオガス化はさらに有効な利用方法となりうる可能性が示唆された。

以上から、前提条件が異なる点に注意が必要であるものの、バイオガス化利用はいずれの事例でも GHG 削減効果が得られていることが明らかとなった。また、バイオガス利用方法や熱利用の有無が GHG 削減効果向上に大きな影響を及ぼしており、可溶化技術の導入あるいは SOFC 利用が GHG 削減に効果的である傾向が確認された。バイオガスは発電利用に加え熱利用も可能なことから、熱利用可能な社会システムの実現によりさらに効果が期待できる。

5. 結論と今後の展開

本研究の結論は以下のとおりである。

- ・ 厨芥類および紙ごみの既存技術（焼却処理、堆肥化）とバイオガス化技術の比較により、GHG 削減効果およびエネルギー回収率の面で「バイオガス化」が有利であった。
- ・ 超高温可溶化技術を導入した「可溶化方式」のバイオガス化システムは、発電電力の増加と廃水処理量の低減により、「現状の乾式方式」と比較してエネルギー回収率および GHG 削減効果ともに約 3 割の向上が見込まれた。
- ・ バイオガスの燃料電池利用では、バイオガスをそのまま SOFC で高効率利用できれば、かなりの GHG 削減効果（8.9 ton-CO₂/日、GE 発電と比べ 1.7 倍）および高いエネルギー回収率（56%）が期待できる。また、PEFC でもバイオガス改質技術の効率向上により、将来的に GE 利用を上回る GHG 削減効果やエネルギー回収率が期待できるため、可溶化バイオガス化と組み合わせたガス改質・FC 利用技術の今後の開発・実証が求められる。

京都市の都市ごみ中バイオマスである厨芥類および紙類はほぼ全量が焼却処理されており、今後はこれら一般廃棄物中バイオマスを有効利用していくことが求められる。本研究成果を踏まえた展開は、京都市では平成 19 年 1 月に、厨芥類等から回収したバイオガスの利用方法として、改質技術による水素製造と固体高分子形燃料電池での発電利用を実証した⁴¹⁾。新クリーンセンター（平成 25 年度竣工予定）ではバイオガス化施設の整備、高効率なバイオガス利用を行う計画である。また、前述の京都 PJ では、本研究で優位な効果が認められた可溶化バイオガス化システムを実証している^{1,31-33)}。実証成果については改めて報告したい。

【謝 辞】

本研究は、石油およびエネルギー需給構造高度化対策特別会計による環境省委託事業「バイオ資源・廃棄物等からの水素製造技術開発」（平成 15～19 年度）の一環として実施されたものであり、関係各位に謝意を表します。特にバイオガス化システムのフィージビリティ研究は、大阪ガス㈱、㈱タクマ、Hitz 日立造船㈱の協力によるものであり、改めて謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 堀 寛明：京都市におけるバイオマス利活用の取り組み、都市清掃、第 60 巻、第 278 号、pp.357-362（2007）
- 2) 竹田昌弘、松本智樹、福富淑子、入江直樹、河村公平、岩崎大介、佐藤敏彦、遠藤健一郎、諸岡隆良：ごみメタン化施設における簡易型機械選別技術の開発、都市清掃、第 60 巻、第 277 号、pp.233-237（2007）
- 3) 酒井伸一、平井康宏、吉川彦彦、出口晋吾：バイオ資源・廃棄物の賦存量分布と温室効果ガスの視点から見た厨芥利用システム解析、廃棄物学会論文誌、第 16 巻、第 2 号、pp.173-187（2005）
- 4) 平井康宏、柿沼公二、出口晋吾、酒井伸一：温室効果ガスを考慮したバイオ資源・廃棄物等の最適利用システムに関するケーススタディ、第 17 回廃棄物学会研究発表会講演論文集、pp.284-286（2006）
- 5) 川本克也、倉持秀敏、呉 畏：熱分解ガス化——改質によるバイオマス・廃棄物からの水素製造技術の現状と課題、廃棄物学会論文誌、第 15 巻、第 6 号、pp.443-455（2004）
- 6) 楮 春鳳、稲森悠平、蛇江美孝、加島誠之、孔 海南、清水康利：バイオマス資源の基質特性に応じた水素・メタン二段発酵システムの構築、第 40 回日本水環境学会年會講演集、p.219（2006）
- 7) 有機系廃棄物資源循環システム研究会：バイオガスの技術とシステム（2006）
- 8) 山野井徹、熊坂健一、竹田久人、三井昌文：横須賀市における生ごみの資源化に関する研究（第 4 報）、第 18 回廃棄物学会研究発表会講演論文集、pp.521-523（2007）
- 9) 浅野 悟、梁瀬克芥、竹田久人、三井昌文：横須賀市における生ごみの資源化に関する研究（第 3 報）、第 16 回廃棄物学会研究発表会講演論文集、pp.484-486（2005）
- 10) ㈱新エネルギー・産業技術総合開発機構：バイオマスエネルギー地域システム化実験事業 食品廃棄物エタノール化リサイクルシステム実験事業（2007）
- 11) ㈱新エネルギー・産業技術総合開発機構：バイオガス・バロメータ 2007 年（EU）、NEDO 海外レポート、第 1007 号、pp.21-32（2007）
- 12) G. Blengini: Applying LCA to Organic Waste Management in Piedmont, Italy, Organic Waste Management, Vol. 19, No. 5, pp.533-549（2008）
- 13) O. Eriksson, M. Reich, B. Frostell, A. Björklund, G. Assefa, J. Sundqvist, J. Granath, A. Baky and L. Thyselius: Municipal Solid Waste Management from a Systems Perspective, Journal of Cleaner Production, Vol. 13, pp.241-252（2005）
- 14) 京都市情報館
http://www.city.kyoto.jp/koho/ind_h.htm
- 15) 京都市環境局：平成 17 年度 環境局事業概要
- 16) 平井康宏、村田真樹、酒井伸一、高月 紘：食品残渣を対象とした循環・資源化処理方式のライフサイクルアセスメント、廃棄物学会論文誌、第 12 巻、第 5 号、pp.219-228（2001）

- 17) 財地球環境産業技術研究機構：環境汚染物質の資源化のための微生物バイオテクノロジーの利用可能性に関する調査（1998）
- 18) 坂本 勝，鈴木昌治，李 王友，野池達也：好気性可溶化プロセスを適用した生ごみの二相式メタン発酵特性——好気性可溶化プロセスの評価——，廃棄物学会論文誌，第16巻，第5号，pp. 369-377（2005）
- 19) 坪井博和：アルカリ消化による下水汚泥および生ごみのバイオガス化，新政策，pp. 80-81（2004）
- 20) 吉田弘之：亜臨界水を利用した高効率資源・エネルギー化システム，ケミカル・エンジニアリング，第51巻，第10号，pp. 737-741（2006）
- 21) 宮本 武，隅見彦：汚泥減量化技術を組込んだ食品廃棄物処理システム「PAMEDIS」，神鋼環境ソリューション技報，第1巻，第1号，pp. 49-54（2004）
- 22) 隅 見彦：汚泥減量化技術を組込んだ食品廃棄物処理システム「PAMEDIS」，新政策，pp. 106-107（2004）
- 23) H. Hartmann and B.K. Ahring: A Novel Process Configuration for Anaerobic Digestion of Source-sorted Household Waste Using Hyper-thermophilic Post-treatment, Biotechnol. Bioeng., Vol. 90, No. 7, pp. 830-837（2005）
- 24) 坪田 潤，局 俊明，菅原正孝，濱崎竜英，津野 洋：生ごみの生物学的超高温可溶化とそのメタン発酵への利用，廃棄物学会論文誌，第18巻，第4号，pp. 240-249（2007）
- 25) 坪田 潤，黒木浩二，洪 鋒，千 智勲，津野 洋：生物学的超高温可溶化技術を用いた家庭回収ごみ乾式メタン発酵法の高効率化，廃棄物学会論文誌，第19巻，第4号，pp. 265-274（2008）
- 26) エコ燃料利用推進会議：熱利用エコ燃料の普及拡大について（2006）
- 27) M. Ishikawa: A Logistics Model for Post-consumer Waste Recycling, 日本包装学会誌，第5巻，第2号，pp. 119-130（1996）
- 28) 財全国都市清掃会議：コンボガス式メタン発酵技術実証確認報告書（2001）
- 29) 京セラ㈱：1 kW 級固体酸化物形燃料電池（SOFC）発電システムへの取り組み（2005）
- 30) 東芝燃料電池㈱，㈱長府製作所，大阪ガス㈱：集合住宅における水素供給燃料電池コージェネレーションシステムに関する技術開発（2006）
- 31) 中村一夫，堀 寛明，出口晋吾，矢野順也，平井康宏，酒井伸一：京都バイオサイクルプロジェクトの概要及びシステム解析技術開発（第1報），第19回廃棄物学会研究発表会特別プログラム講演資料集，pp. 63-65（2008）
- 32) 中村一夫，堀 寛明，出口晋吾，酒井伸一：京都バイオサイクルプロジェクトの進捗状況（第2報），第20回廃棄物資源循環学会研究発表会講演論文集，pp. 143-144（2009）
- 33) 財京都高度技術研究所：地球温暖化対策技術開発事業 カーボンフリー BDF のためのグリーンメタノール製造及び副産物の高度利用に関する技術開発報告書（2008）
- 34) 環境省：温室効果ガス排出量算定方法検討会報告書（2002）
- 35) トヨタ自動車㈱，みずほ情報総研㈱：輸送用燃料の Well-to-Wheel 評価 日本における輸送用燃料製造（Well-to-Tank）を中心とした温室効果ガス排出量に関する研究報告書（2004）
- 36) 財日本工業炉協会：工業炉ハンドブック（1997）
- 37) 財国立環境研究所：バイオ資源・廃棄物等からの水素製造技術開発（2006）
- 38) 環境省：地球温暖化対策に関する法律施行令第三条排出係数一覧表
- 39) 環境省：温室効果ガス排出量算定・報告マニュアル ver. 2.1（2007）
- 40) 財電力中央研究所：ライフサイクル CO₂ 排出による発電技術の評価（2000）
- 41) 京都市広報資料：バイオマスを活用した水素ガス生成及び発電実験の成功について（2007）
<http://www.city.kyoto.jp/kankyo/shisetsubu/kojokensetsu/kohos/20070125-01.pdf>（平成19年1月25日）

Greenhouse Gas Reduction Utilizing Waste Food and Paper from Municipal Solid Waste

Junya Yano*, Yasuhiro Hirai*, Shin-ichi Sakai*, Shingo Deguchi**
Kazuo Nakamura*** and Hiroaki Hori****

* Environment Preservation Center, Kyoto University

** Takuma Co., Ltd.

*** Advanced Software Technology & Mechatronics Research Institute of Kyoto

**** Environmental Policy Bureau, Kyoto Municipal Government

† Correspondence should be addressed to Junya Yano :
Environment Preservation Center, Kyoto University
(Yoshida-Honmachi, Sakyo-ku, Kyoto 606-8501 Japan)

Abstract

Kyoto City was taken as an example of a domestic urban area in order to estimate the actual amount of food and paper biomass found in municipal solid waste. The annual amounts of food and paper waste were measured at 222 kt-wet and 223 kt-wet, respectively. At present, most of this is processed through incineration. After evaluation of the greenhouse gas (GHG) reduction effect and energy recovery ratio of the utilization system for this biomass, a biogasification (high-temperature and dry-type methane fermentation) system with gas engine (GE) power generation was found to be more beneficial than the existing system, which uses direct combustion with steam power generation and direct combustion with composting. In addition, biogasification with hydrolysis is expected to give a 27% improvement in GHG reduction effect and energy recovery ratio over the present system of combined biogasification with hyperthermal (80°C) hydrolysis technology operated by exhaust heat from a GE power plant. Furthermore, the use of biogas in fuel cells can reduce GHG emissions by up to 1.7 times compared to GE use. Diffusion of energy conversion technology with high efficiency is therefore being recommended for the reduction of GHG in Japan.

Keywords : waste food, system analysis, dry-type methane fermentation, hyperthermal hydrolysis, greenhouse gas