

## 乾式メタン発酵法活用による都市型バイオマス エネルギーの実用化に関する技術開発\*

長谷川 猛\*\*

### 1. はじめに

東京都では、2006年に「10年後の東京」を策定し、その中で2020年度までに、2000年度比25%のCO<sub>2</sub>排出削減を目指す「カーボンマイナス東京10年プロジェクト」の推進を定め、東京都環境確保条例を改正し、地球温暖化対策に係る制度を強化するなど、各種施策を展開している。

このような状況を踏まえ、当研究所でも、近年、地球温暖化対策関連の調査研究に積極的に取り組んでおり、平成20年度は8テーマの調査研究を行っている。これらの調査研究の特徴は、その内容が、都におけるCO<sub>2</sub>削減対策のあり方、バイオエネルギーの活用、建築物の省エネ対策、エコドライブの推進等、多岐にわたり、研究資金も、都の環境局から委託された1テーマを除き、国、公益法人、都の環境局以外の局、民間企業から、いわゆる外部資金を導入し実施していることである。この中には、環境省の「産学官連携基盤整備モデル事業」に採択され、川崎市公害研究所等と連携して行ったエコドライブ関連のテーマも含まれる。

当研究所は、平成19年度に、都の環境局から(財)東京都環境整備公社に移管されたが、移管の目的の一つに、外部資金の導入により効率的・効果的に調査研究を行うことが挙げられていたが、地球温暖化対策関連の調査研究は、外部資金の導入という面で、移管の効果の最も挙げられた調査研究分野と言える。一方、調査研究に当たっては、外部資金導入のためのプレゼンテーション、入札参加、共同研究機関との調整や進行管理等のマネジメント、経費の精算など、従来の地方環境研究所の調査研究の枠を超える業務も多く、事務処理面を含め、試行錯誤をしつつ調査研究を進めている状況にある。

これらのテーマのうち、ここでは、「乾式メタン発酵法活用による都市型バイオマスエネルギーの実用化に関する技術開発」(以下、「乾式メタン法による都市型バイオマス研究」と言う。)を取上げ、調査研究の概要を、準備段階の調査研究を含めて報告する。

### 2. 研究の経緯

「乾式メタン法による都市型バイオマス研究」は、東京ガス(株)が技術開発代表者、公社が共同研究者となり、環境省の「平成20年度地球温暖化対策技術開発事業」に応募し採択された事業で、研究期間は、平成20～22年度の3ヶ年を予定している。

当研究所では、この研究の実施前に、東京ガス(株)から「バイオマス・都市ガス活用による再生可能エネルギー導入促進研究」を受託し、東京大学の山地教授を委員長、芝浦工業大学の村上教授を副委員長とする検討会を設け、調査研究を行ってきたが、その結果の概要は次のとおりである。

- ① 大規模事業所の廃棄物は、厨芥の割合が高く発熱量が低いので、乾式メタン発酵法を用いてバイオガスを回収すれば、エネルギー回収効率が高く、焼却処理を上回る可能性が高い。
- ② 都内の業務・商業集積地区には、大規模事業所の廃棄物が多量に存在するので、これらを原料とし、バイオガスを効率的に回収できれば、都内に、地産、地消型の再生可能エネルギーシステムを導入することが可能となる。
- ③ 都市型再生可能エネルギーシステム実現のためには、熱の安定供給の確保と、ガスホルダの規模縮小等を図る必要であり、このためには、バイオガスと都市ガスの最適混焼制御に係る技術開発が要件となる。また、乾式メタン発酵法

\*Urban Biomass Energy System by Dry Anaerobic Digestion Technology Development Program

\*\*Takeshi HASEGAWA (財)東京都環境整備公社東京環境科学研究所) The Tokyo Metropolitan Research Institute for Environmental Protection of Tokyo Environmental Public Service Corporation

は、発酵残渣の発生量が多いので、固形燃料化技術など、残渣の処理技術の開発も必要となる。

上記の結果を踏まえ、東京ガス(株)と当研究所では、乾式メタン発酵法の実証試験施設を設置し、実際に廃棄物を処理する中で、必要な技術開発を行うことを検討し、研究計画としてまとめ、採択されたのが、本報告の「乾式メタン法による都市型バイオマス研究」である。

### 3. 都市内のバイオ資源

東京23区の清掃工場で焼却処理されるごみの内、約40%は“持込ごみ”と言われる事業系廃棄物であり、都心3区では、その割合は78%にも達する。

一方、東京23区では、大規模事業所(床面積3,000m<sup>2</sup>以上)の廃棄物の減量化指導を行っており、この結果、これらの事業所では図1に示すように紙類の再利用が進んでおり、厨芥の割合の多い発熱量の低いごみが増えていることが見込まれる。

都市内のバイオ資源のうち、量的に多いのは、厨芥、紙類といった廃棄物であるが、これをバイオマス資源として利用するには、焼却処理よりもエネルギー回収効率が高いことが要件となる。このためには、発熱量が低い廃棄物が望ましいが、大規模事業所の廃棄物は、この条件に適合している可能性が高く、都心3区のような業務・商業機能が集積し、熱需要が多い地域で多量に排出される廃棄物であるという条件にも恵まれている。

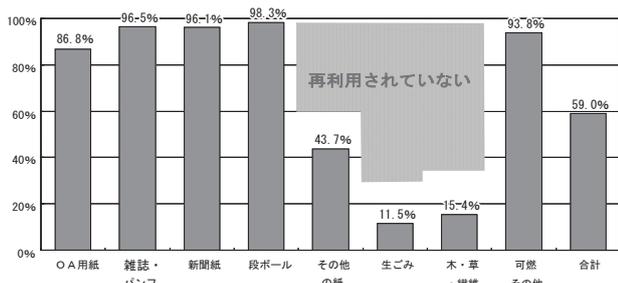


図1 東京23区におけるごみの再利用率  
出典：平成17年度東京23区再利用計画書のまとめ

このため、大規模事業所(床面積3,000m<sup>2</sup>以上)のごみの性状を把握するため、江東区の協力を得て実態調査を行った。その結果の一部を表1に示す。

表1の事業所は、紙類と厨芥を他のごみと分別して排出しており、組成調査は、これらのごみを、排出量に比例させて混合した後に実施した。なお、スーパー(食品系)と小学校を除く事業所は、建物内に飲食店舗又は社員食堂を有している。

表1より、ビジネスホテル(飲食店舗の面積小)を除く事業所は、清掃工場搬入ごみとは異なり、紙類<厨芥で、発熱量も低く、“その他ごみ”の混入も少ないことが分かる。

これらの調査は、都心地区の大型複合ビル(最大のビルで紙類・厨芥発生量：3.5t/日)等でも実施したが、飲食店舗の床面積当たりの厨芥発生量が、オフィスの床面積当たりの紙類発生量を大幅に上回っており、紙類<厨芥という傾向は変わらなかった。

また、“5.1”でも述べるように、大規模建築物の多くは、ごみ集積所の管理を専門業者に委託しており、受託業者は処理コストを削減するため、テナントから排出された紙類のうち、再生利用が可能なものを選別し、専用車でリサイクル先に搬出しており、清掃工場への“持込ごみ”は、ごみ集積所での組成比よりも更に、紙類<厨芥になると推定される。

以上のことから、大規模事業所の廃棄物(清掃工場への“持込ごみ”)は、質、量ともに、都市型バイオマス資源として有望と推定される。

### 4. バイオガス回収方式

#### 4.1 バイオガス回収方式の検討

IEAでは、バイオガスプラントを表2に示すように技術分類している。

表2に示すように、バイオガス回収技術は、投入固形物濃度により、湿式法と乾式法に分けられる。このうち、湿式法は、日本でも、従来から下水汚泥の処理等に用いられており、最近では、食品廃棄物を液状化して処理し、バイオガスを回収

表1 大規模事業所のごみの性状調査結果 単位：低位発熱量 KJ/Kg

		スーパー：食品系	スーパー：総合系	商業ビル	ビジネスホテル	事務所ビル	小学校：給食ごみ	清掃工場：区部
組成%	紙類	12.9	43.9	46.9	57.0	42.7	—	43.5
	厨芥	87.1	55.1	48.4	30.6	56.4	100	35.5
	その他	—	1.0	4.1	9.7	0.9	—	21.1
含水率(%)		79.2	59.5	46.8	32.6	52.5	74.9	42.7
低位発熱量		943	4,120	6,210	9,030	6,560	2,310	9,100

表2 欧州のバイオガスプラントの技術分類

		消化 / 混合消化										
方式	湿式					乾式						
固形物濃度	6 ~ 10 %					25 ~ 40 %						
運転方式	連続式					回分式		連続式				
混合方式	完全混合			押出流れ				完全混合	間欠混合	押出流れ		
処理温度	高温	中温	両方	中・高温	中温	高温	中温	高温	中温	高温	中温	
システム	Herning Vegger Uppsala	Biomet Bellaria DSD -CTA	Waasa	S-Uhde	BTA Paques	ANM	Biocel	Snam-progetti	Valorga	Dranco Kompogas	Funnel	

出典：「岡山県工業技術センター・技術情報・NO. 464」

表3 事業所別のバイオガス発生量の予測実験結果 単位：ガス発生量 Nm<sup>3</sup>/t, 他は%

	スーパー：食品系	スーパー：総合系	商業ビル	ビジネスホテル	事務所ビル	小学校：給食ごみ
バイオガス発生量	90.5	159.7	215.4	270.9	282.1	118.5
メタン濃度	51.2	53.2	56.1	53.3	53.2	56.3
ごみのTS濃度	20.8	40.5	53.2	67.4	47.5	25.1
発酵汚泥TS濃度	10.1	24.7	33.2	52.6	18.1	5.3
発酵成立の可能性	×	○	○	○	○	×

注：発酵汚泥TS(全固形分)濃度は、ラボ実験結果に基づく計算値。この値が15%以下だと、Dranco方式の乾式メタンは、発酵汚泥が固体状にはならず成立しない。

することも行われている。一方、乾式法は、固形廃棄物を直接処理し、バイオガスを回収する方式で、厨芥の他に紙類なども処理でき、発酵槽内の有機物濃度が高いので、単位原料当たりのバイオガス回収量が多く、近年、ヨーロッパを中心に普及しつつある。

大規模事業所の廃棄物(持込ごみ)は、紙類と厨芥の混合物で、固形物濃度が高いので乾式法が適していると考えられる。現在、日本には、乾式法として、表1のDranco、Kompogasの2システムが導入されており、前者は穂高市が実証実験を行っており、後者は京都府園部町で実機が稼働している。このうち、Drancoシステムは、ごみの性状にもよるが、発酵残渣の含水率が80%程度なので、汚水の発生がないシステムの構築が可能である。このため、バイオガス回収方式は、汚水が発生せず、窒素処理の必要がないDrancoシステムで検討することとした。

なお、Drancoシステムの場合、発酵槽は縦型で高さは20mを超えるが、都市内の地下空間を利用して設置できるというメリットもある。例えば、韓国のソウル特別市東大門区では、PFI方式で、公園地下に「環境資源センター」を建設中であるが、この内、Drancoシステムのバイオガスプラント(処理能力98トン/日)は、地下2階に設置し、地上に出る部分は、建物等で遮蔽すること

により、違和感のない構造としている。

#### 4.2 バイオガス回収量の推定

環境省の「循環型社会形成推進交付金」のうち、高効率原燃料回収施設の交付要件(交付率1/2)は、メタン回収ガス(バイオガス)発生率が150Nm<sup>3</sup>/t以上となっている。このため、表1の事業所の廃棄物を用いDranco方式で、どの程度のバイオガス回収量が見込まれるか、プラントメーカーに委託してラボ実験を実施した。その結果を表3に示す。

表3から分かるように、TS(全固形分)濃度の低いスーパー(食品系)、小学校(給食ごみ)のごみを除いてはDranco方式の乾式メタンは成立し、バイオガス発生量は150Nm<sup>3</sup>/tを超えている。この結果より、乾式メタン発酵法は、含水率の高い湿式メタン発酵法に適する食品系廃棄物と、発熱量の高い焼却処理に適する可燃ごみの中間に位置する廃棄物の処理に適していると推定される。

乾式メタン処理と焼却処理について、前者は、ごみ発熱量を5,870KJ/Kg(1,400Kcal/Kg)、バイオガス発生量を215Nm<sup>3</sup>/t(メタンガス濃度53%)、後者は、ごみ発熱量を9,220KJ/Kg(2,200Kcal/Kg)とし、エネルギー回収効率を比較した結果を表4に示す。

表4より、乾式メタン発酵法は、焼却処理よりも一次のエネルギー回収効率は低いが、プラントエネルギー消費量が少ないので、外部利用が可

表 4 乾式発酵処理と焼却処理のエネルギー回収効率の比較

	ごみエネルギー	①エネルギー回収効率	プラント消費量	②エネルギー回収効率	残渣処理エネルギー	③エネルギー回収効率
乾式発酵法 (50t/日)	100%	60%	10%	50%	19% *1	31% (50%) *3
T 清掃工場 (600t/日)	100%	84%	44%	40%	$\alpha$ % *2	(40- $\alpha$ )%

注：①\*1は(乾燥+炭化処理)を想定，\*2は灰溶融エネルギー(不明のため $\alpha$ とする)，\*3は炭化物の燃料としての使用を想定，  
②データの出典：乾式発酵法はプラントメーカー，T 清掃工場はホームページの値。

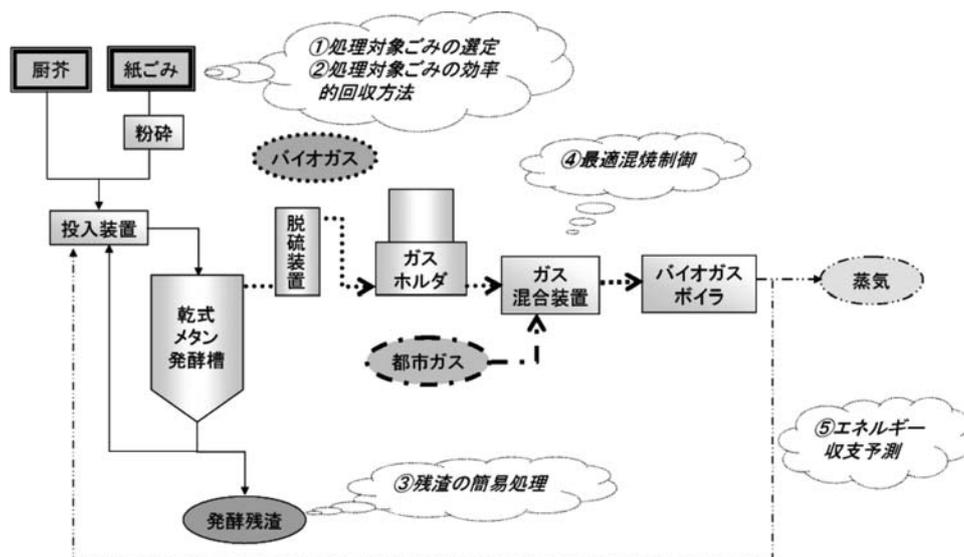


図 2 実証試験施設のフローシート

能な二次のエネルギー回収効率は焼却処理と同等以上になる。残渣処理後の利用可能なエネルギー回収効率は、データが不足しており評価は難しいが、乾式メタンの発酵残渣の乾燥・炭化が効率よく実施でき、燃料として有効活用できれば、焼却処理を上回ることは間違いないものと推定される。

以上の結果から、乾式メタン発酵法は、焼却処理に向かない廃棄物でも、焼却処理と同等以上のエネルギー回収効率を期待できると推定されるので、都市型再生可能エネルギーシステムのバイオ技術として有望である。ただし、都市内に導入するためには、エネルギーの安定供給の確保や、ガスホルダーを設けなくて良いなど、導入上の課題をなくすことが要件となる。課題の解決を図るためには、バイオガス発生量の変動を都市ガスで吸収することが考えられ、バイオガスと都市ガスの最適混焼制御技術の開発が必要となる。また、乾式メタン発酵法は、発酵残渣がごみ処理量の約90%も発生するという問題点がある。発酵残渣の含水率は80%程度なので、清掃工場で焼却処理することも可能であるが、燃料として有効活用することが望ましく、発熱量の高い炭化物を、エネ

ギー消費量の少ない方法で製造するための乾燥・炭化技術の開発を図る必要がある。

### 5. 乾式メタン法による都市型バイオマス研究

本研究は、これまで述べてきた一連の調査研究結果を踏まえ、Dranko システムの乾式メタン実証試験施設を設置し、その運転を通して、データを蓄積・解析し、必要な要素技術を開発し、都市型再生可能エネルギーシステムの実用化を図ることを目的としている。

平成20年度は、研究初年度であったので、実証試験施設の設定工事を行うとともに、併せて、①処理対象ごみの選定と効率的な回収方法、②残渣の簡易処理に関する技術開発、③バイオガス・都市ガス最適混焼制御に関する技術開発、④システム全体のエネルギー収支予測、について予備的検討を行った。以下に、検討結果の概要を示す。

#### 【実証試験施設】

実証試験施設は、江東区の「江東清掃事務所、環境学習館えこっくる江東」の敷地内に、処理能力300Kg/日の施設を設置した。実証試験施設のフローシートを図2に示す。

実証試験施設は平成21年2月中旬に完成し、2月下旬にメタン発酵槽内に種汚泥を投入し、その後、ごみ投入量を徐々に増やしていき、約1ヶ月後に定常量の投入を開始した。現在のバイオガス発生量は、ごみ1t当たり200Nm<sup>3</sup>を超えており、今後、バイオガス発生量が安定したのを確認後、最適混焼制御実験等を開始する予定である。

### 5.1 処理対象ごみの選定と効率的回収方法の検討

実証試験用のごみは、ごみ発生量の多さ、輸送の容易性等を考慮し、江東区内の大型複合施設(商業棟1棟、オフィス棟3棟より構成)のごみを用いることとした。この施設のごみ発生量は、1日当たり、紙類400Kg、厨芥400Kg、計800Kgである。実証実験では、第一段階は、紙類と厨芥、各50%のごみを処理する計画であるが、この施設のごみは、表5に示すように固形分濃度が高いので、乾式メタン適合ごみに合わせるように水分添加を行い、その分を考慮して処理量を減らしている。

大規模事業所の場合、厨芥は、調理屑だけでなく食べ残しが多いので、厨芥>紙類であっても含水率は低い傾向にある。このことは、プラントのごみ処理能力に影響するので、この施設のごみ集

積所を管理している業者に、ごみの処理先への排出方法の確認調査を行った。この結果によれば、ごみの収集車両は搬出先別に用意しており、例えば、オフィス棟から排出される紙類は、紙コップや汚れ紙が清掃工場へ、その他の良質な紙はリサイクル先に搬出することである。一方、厨芥はリサイクル料金が非常に高いので、テナントの希望がない場合は、清掃工場へ搬出するので、清掃工場への“持込ごみ”は、排出量時点よりも、厨芥>紙類になるとのことである。なお、搬入料金は、清掃工場は14.5円/Kg、厨芥のガス化料金は35円/Kg、飼料化料金は22円/Kgとのことである。また、このような収集運搬方式を採用の大規模事業所の場合は、コスト面の問題はあがるが、ごみ集積所において、バイオガス回収に適したごみを選別し、回収することは可能ではないかとの話であった。

### 5.2 残渣の簡易処理に関する技術開発

メタン発酵残渣の炭化物の燃料としての可能性を検討するため、炭化炉メーカーに依頼し、電気炉(温度条件350℃)でメタン発酵残渣(他プラントの残渣)の炭化物を作り、下水汚泥炭化物(火力発電所の補助燃料や土壌改良材として使用)との比較

表5 複合施設のごみと乾式メタン発酵適合ごみとの比較

	複合施設のごみ(50%混合低位発熱量：7,400KJ/Kg)				乾式メタン適合ごみ
	厨芥	紙類	50%混合物 <sup>①</sup>	①×水分25%	
TS(固形分：%)	33.4	84.7	59.1	44.3	35.0～50.0
VS(揮発分：%)	30.7	77.3	54.0	40.5	32.0～44.7
全窒素：mg/kg	8,700	3,500	6,100	4,600	4,060～5,980

表6 乾式メタン発酵残渣と下水汚泥炭化物の性状比較

	低位発熱量	TS：固形分	TS中揮発分	炭素含有量	酸素含有量
メタン発酵炭化物	15,700KJ/Kg	100%	66.7%	68.3%	21.6%
下水汚泥炭化物	10,200KJ/Kg	77.9%	51.1%	60.3%	30.0%

注：炭素及び水素含有量は、揮発分中の含有量

表7 バイオガス・都市ガス混焼制御方式

制御方式	バイオガス流量一定制御	バイオガス熱量一定制御	バイオガスホルダレス制御(熱量制御)	バイオガスホルダレス制御(排出O <sub>2</sub> 濃度制御)
制御内容	バイオガス流量を一定に制御し、バイオガスの発熱量変化を都市ガス流量によって吸収する	都市ガス流量を一定とし、バイオガスの発熱量変化をバイオガスの流量によって吸収する	バイオガスの発熱量・流量変化を都市ガス流量によって吸収する	ボイラの排ガス酸素濃度によりバイオガスの総熱量変化を推測し、都市ガス流量によって吸収する
制御構成のシンプルさ	△	△	○	◎
ボイラ必要最低燃焼量	○	◎	△	△
ガスホルダ容量	△ (バイオガス生成流量変動による)	△ (バイオガス生成流量変動による)	◎ (ホルダなし)	◎ (ホルダなし)

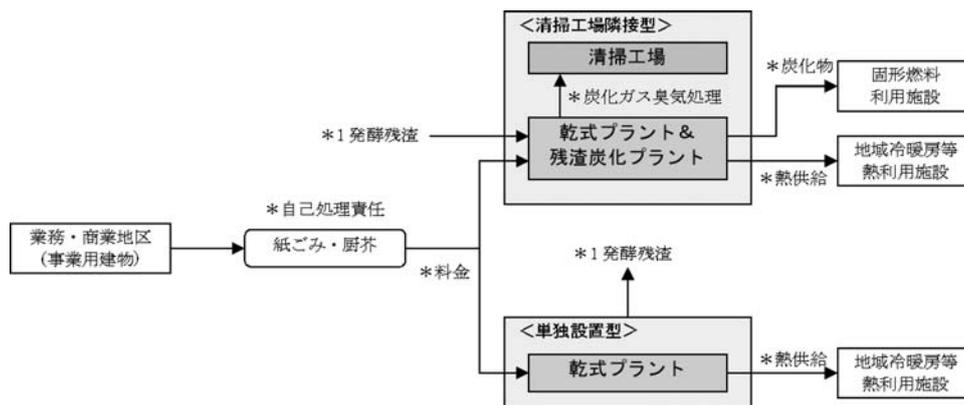


図4 事業実施時のシステム全体のイメージ

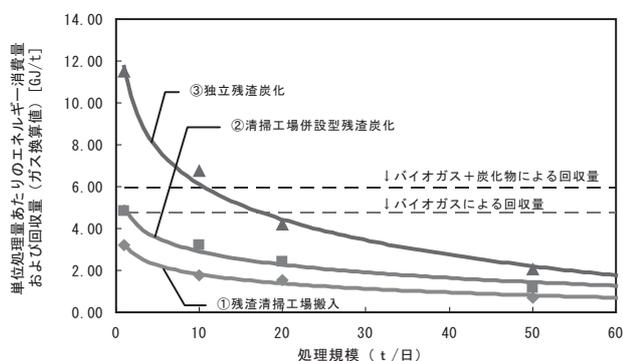


図3 残渣処理の設置形態別・ごみ処理規模別エネルギー消費量及び回収量

を行った。この結果の一部を表6に示す。

メタン発酵残渣炭化物と下水汚泥炭化物を比較すると、発酵残渣炭化物の方が発熱量が高い。これは、発酵残渣炭化物の方が、より炭化が進んだ(炭素成分が多く、酸素成分が少)こと、及び下水汚泥炭化物が、保管上の安全対策として水分を添加していることによるが、乾燥・炭化条件を適切に設定できれば、発酵残渣の燃料化の可能性は十分にあると推定される。

### 5.3 バイオガス・都市ガス最適混焼制御に関する技術開発

バイオガスと都市ガスの混焼のための制御技術の検討を行い、4つの制御方式を実証試験施設に組み込んだ。これらの制御内容と、その特徴の概要を表7に示す。

### 5.4 システム全体のエネルギー収支予測

都市型再生可能エネルギーシステムの実用化を図るには、今後、実証試験により得られるデータを蓄積・解析し、導入規模に合わせたエネルギー収支予測を行うことが不可欠となる。そこで、本年度は、予備的検討として、エネルギー収支的に最も問題となる発酵残渣の処理を、①残渣清掃工場搬入(焼却処理)、②清掃工場併設型残渣炭化、

③独立残渣炭化、の3つのケースに分け、処理規模に伴うエネルギー消費量の変化の傾向を、プラントメーカーの既存の設計試算例を整理して把握することとした。この結果を図3に示す。

これにより以下のようなことが分かる。

- ① 処理規模が大きくなるほど、単位処理量あたりのエネルギー消費量が小さくなる傾向があり、いわゆるスケールメリットが見て取れる。
- ② 残渣の炭化を行うことでエネルギー消費量、回収量ともに増大するが、独立残渣炭化では、臭気除去等に要するエネルギー消費量が多くなり、炭化によるエネルギー収支上のメリットを得ることが難しい。

以上のことから、事業実施時の都市型再生可能エネルギーシステム全体のイメージは、図4のようになると想定される。

## 6. おわりに

「乾式メタン法による都市型バイオマス研究」は実証試験施設が完成し、これを用いて、今後、各種データを蓄積・解析し、事業化のためのフィジビリティスタディを行っていく段階にある。当研究所では、東京ガス(株)と共同し、本システムの実用化を目指し研究を進めるとともに、研究の進展状況を踏まえ、東京オリンピックや再開発事業等における再生可能エネルギー導入施設、又は清掃工場リニューアル時の併設施設として、機会をとらえ、本システムも用いた計画案を積極的に提案していきたいと考えている。

### —参考文献—

- 1) 東京ガス(株):「乾式メタン発酵法活用による都市型バイオマスエネルギーの実用化に関する技術開発」, 2009
- 2) 東京都環境整備公社:「バイオマス・都市ガス活用による再生可能エネルギー導入促進研究」報告書, 2008