

都市ごみ処理の広域化及びエネルギー回収手法 に関するケーススタディ

茂木 敏^{1*}・荒井 康裕²

¹東京都環境局資源循環推進部計画課（〒163-8001 東京都新宿区西新宿2-8-1）

E-mail: Satoshi_Mogi@member.metro.tokyo.jp

²首都大学東京大学院 都市環境科学研究科（〒192-0397 東京都八王子市南大沢1-1）

都市ごみの焼却に伴う膨大な熱エネルギーは、約50年前から発電や温水供給などにより回収や利用がされてきている。近年においては京都議定書に基づく取組に加え、東日本大震災を起因としたエネルギー供給力の低下などから、エネルギー回収の高効率化についての社会的需要が一層高まっている。本研究では、東京都多摩地域をモデルとして、都市ごみ処理の広域化により焼却施設を大規模集約化した場合の高効率発電の導入効果や、これに熱供給やバイオガス発電を組み合わせた場合の効果についてケーススタディを行い、地域全体としてのエネルギー利用の効率性とその経済性について考察した。その結果、都市ごみ焼却施設の更新等に当たっては、処理の広域化シナリオにより各々の施設規模に応じたエネルギー回収手法が選択し得ることを明らかにした。

Key Words : power generation by municipal waste ,collection wide area , heat supply , biogas

1. はじめに

現在の廃棄物処理の優先順位は、3R（リデュース、リユース、リサイクル）を基本としつつ、これらに適さない廃棄物はエネルギー回収を行う枠組みとなっている。今後も更に 3R を重視しつつ、複合材料で構成された製品や食品が付着した容器などリサイクルに向かない廃棄物の処理においては、処理に伴うエネルギー回収の高効率化にも対応していかなければならない。

都市ごみ焼却施設（以下「焼却施設」という。）におけるエネルギー回収の取組を俯瞰してみると、約 50 年前より発電が開始され¹⁾、発電用タービンの入口蒸気の高温高圧化²⁾などにより高効率化が進められてきた。また、1970 年代以降には電力の外部供給や、地域冷暖房などの熱供給事業にも利用され、さらに近年では都市ごみから選別した食品廃棄物等を活用したバイオガス発電も実用化され、多くの施設で多様なエネルギー回収手法が用いられるようになってきている。

焼却施設などの立地・計画は、市町村などの基礎的自治体の固有事務である一方で、処理区域の広域化により焼却施設を大規模集約化し高効率発電を導入する場合の最適施設規模の検討や、エネルギー回収手法の選択には、市町村などの区域を越えた広域的な視点が必要とされる。

このため、都道府県の計画一例えば東京都廃棄物処理計画一においても熱回収の効率化が主要施策のひとつとして掲げられている³⁾。

これらの状況を踏まえ、本論文では、東京都多摩地域全域（面積 783.94km²、人口約 400 万人、可燃ごみ量約 85 万トン/年）をモデルとして、都市ごみ処理の広域化により焼却施設を大規模集約化した場合について、静脈物流の影響を含めた高効率発電導入によるエネルギー回収効果や、これに熱供給やバイオガス発電を組み合わせた場合の効果について、エネルギー及びコストに関するケーススタディを行い、地域全体としてのエネルギー利用の効率性とその経済性について考察していく。

上記の検討を行うことを目的として、2. では、多摩地域におけるエネルギー回収の現状を整理し、3. では、多摩地域を 3 つの広域ブロックに分類し、現在 17 か所に立地している焼却施設を集約化する際の計画ごみ量及びごみ質を推計し、各ケースの施設規模などの条件設定を行う。

これらを基に、4. では、焼却施設を大規模集約化していく場合の発電端効率、送電端効率、送電端エネルギーから収集運搬に要するエネルギーを差し引いた利用可能エネルギー量、さらに熱供給及びバイオガス施設導入の効果について、エネルギーとコスト（施設建設費、施設

維持管理費、収集運搬費)の両面からケーススタディを行い、多摩地域全体としての将来的なエネルギー回収効率の向上可能性とその経済性について、可能な限りの定量化を試みた。

2. 多摩地域の都市ごみ焼却施設におけるエネルギー回収の現状

東京都内における多摩地域の焼却施設の現状の立地を図-1に、多摩地域及び23区における焼却施設の稼働開始年を図-2に示す。多摩地域の焼却施設は、2012年4月時点において稼働開始後30年以上経過している施設が約半数あり、今後の更新が想定される状況となっている。また、17施設中7施設のみが発電によるエネルギー回収を実施している状況であり、今後の施設の更新と合わせて更なるエネルギー回収の可能性が見込まれる。

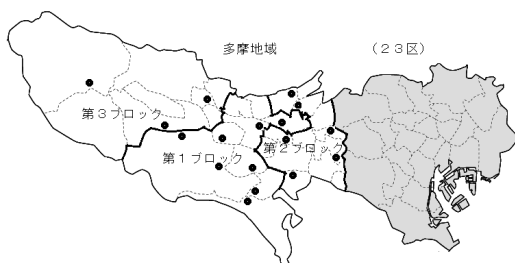


図-1 多摩地域の焼却施設の立地と広域化ブロック

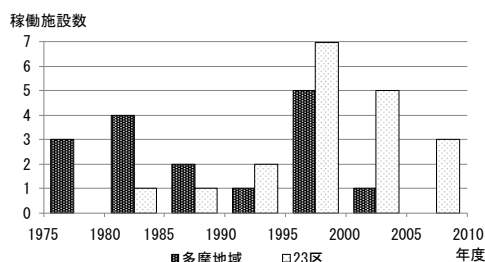


図-2 多摩地域及び23区における焼却施設の稼働開始年度

多摩地域の17施設の全体としての年間焼却量は82.9万トン、これにそれぞれの焼却施設毎の発熱量を乗じて全体を合計した発熱量の合計は6,860TJであり、発電能力の合計は28,780kW、発電実績は125,364MWh(451TJ)、施設内使用電力を差し引いた外部への送電量は23,795MWhである。この他に、公共施設を中心とした熱利用量が607TJあり、回収されたエネルギー量は合計1,058TJ/年であった⁴⁾。発電のみのエネルギー回収率は約7%であるが、熱利用を含めると発生熱エネルギー量全体の15.4%を回収している現状となっている。

3. 都市ごみ焼却施設の集約化と施設規模

処理の広域化により施設を集約化する場合には様々なシナリオが考えられるが、ここでは1999年3月に策定された、東京都ごみ処理広域化計画⁵⁾にある第1～3ブロックを基に、多摩地域全体を3区域に分類し、現在16か所に立地している焼却施設(全連続燃焼式のための施設数、1か所のバッチ燃焼式を除く。)を最小で3か所まで5段階で集約化する条件を設定し、それぞれの計画ごみ量、計画ごみ質を推計し、ケーススタディの基となる施設規模の設定を行う。

(1) 地域内のごみ量及びごみ質の推計

2006年度から2010年度における多摩地域における可燃ごみのごみ量及びごみ質の推移を図-3、図-4に示す。

将来のごみ量の推計は、これを基に人口予測を考慮して算出する。多摩地域の人口は2015年度をピークとして大きな変動はみられないが、緩やかな減少傾向を示しているため、現在の人口あたりのごみ量に将来人口を乗じ、20年後に向かって、第1ブロック約44万トン/年、第2ブロック約27万トン/年、第3ブロック約9万トン/年まで緩やかに減少していくものと推計した。

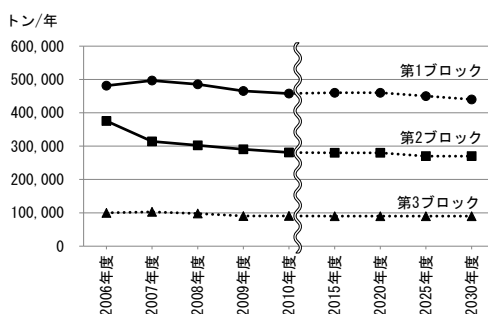


図-3 多摩地域のごみ量の推移

ごみ質の推計は、第1及び第2ブロックの焼却施設は2010年度の発熱量を基に、第3ブロックの焼却施設については、データが少ないため平均値⁴⁾を基に、それぞれ容器包装リサイクルによる分別を実施していない自治体が今後プラスチックごみの分別回収を実施することを想定し、当該自治体のプラスチックごみの発熱量を差し引

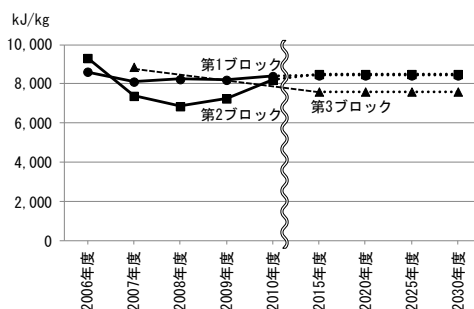


図-4 多摩地域のごみ質の推移

き、各施設及びブロック別の発熱量を算出した。多摩地域全体の発熱量の平均値は約 8,400kJ/kg であり、各施設のそれは個別にはここに記さないが約 6,200～9,600 kJ/kg の範囲となっている。

(2) 広域化の条件及び都市ごみ焼却施設の施設規模

現状の多摩地域の 16 か所の施設をそれぞれ現状の施設規模で更新するケースを含め、図-5 に示すように 3 ケ所にまで施設を集約する条件を 5 段階で設定し、発電、熱供給、バイオガス発電の検討を行った。

各施設の焼却能力は、上記で算出した年間ごみ量を用い、年間稼働日数を 280 日、調整稼働率 0.96 から約 36% の予備率を見込んだ上で求めた。なお、集約化する施設は、各処理区域において同規模であると仮定した。

集約化の際の焼却施設の立地は具体的な場所を特定しないが、収集運搬におけるエネルギー消費やコストへの影響を考慮し、本分析では処理区域の端に立地する場合と中央に立地する場合を想定した。また、収集運搬において中継輸送の設定を考慮⁶⁾するか否かについては、多摩地域の面積条件などを検討した結果、ここでは焼却施設への直送のみを想定した。

4. 広域化に伴うエネルギー回収効果及び総費用への影響と評価

(1) 広域化に伴う施設の大規模集約化と高効率発電導入への影響

可燃ごみの焼却に伴う熱エネルギーを可能な限り発電に利用する場合について検討する。焼却施設の集約化に伴い、施設規模は大きくなることにより発電効率が高くなるとともに施設内消費電力量が削減される一方で、集約化に伴う広域での収集運搬エネルギーは増

加する⁷⁾ことが想定されるため、以下の順に定量化を行っていく。

まず、3.(1)で推計したごみ量とごみ質から年間のごみ発熱量を算出し、発電効率を乗じて各施設の発電電力量を推計した。発電効率については循環型社会形成推進交付金⁸⁾の適用条件(図-6)を基準とした。

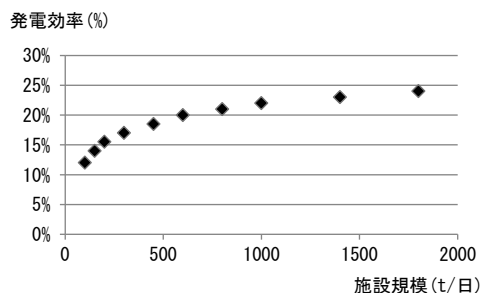


図-6 循環型社会形成推進交付金の適用条件となる発電効率

次に、焼却施設の外部に供給できるエネルギー量を算出するため、施設内使用電力を求める。施設内使用電力は、全ての焼却施設で発電を行っている東京都内 23 区の清掃工場(溶融施設を併設しているものを除く。)の実績から、図-7 に示すごみ量と施設内使用電力の回帰式を用いて推計した。

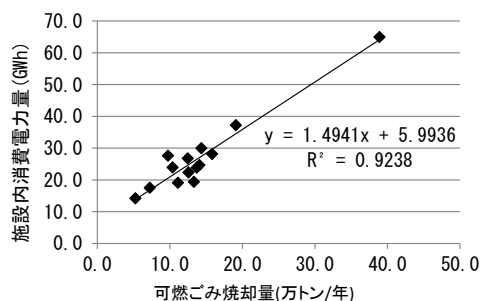


図-7 可燃ごみ焼却量と施設内消費電力量の関係

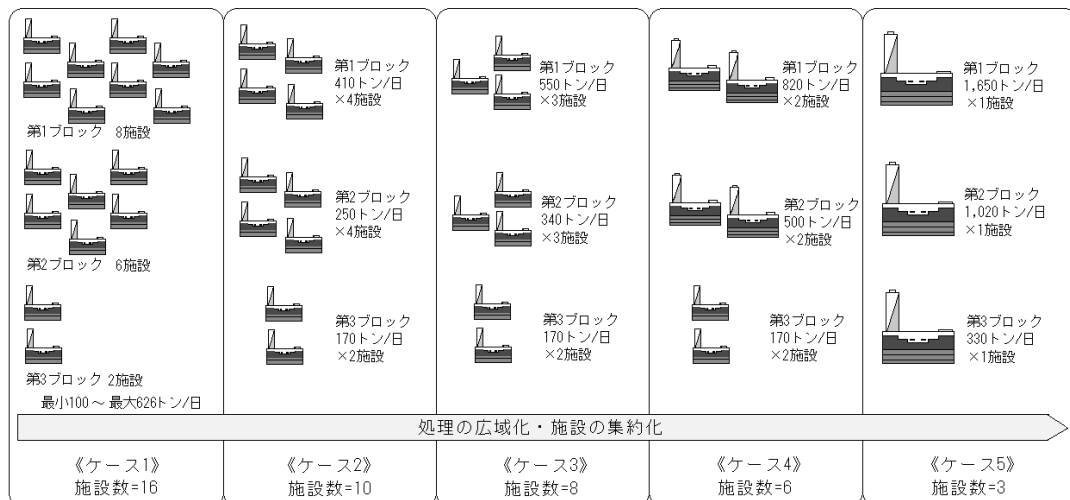


図-5 処理の広域化と施設集約化のモデルケース

収集運搬に伴うエネルギー消費量は、焼却施設の立地が処理区域の端にある場合と中央にある場合を幅広く把握するために、図-8に示す考え方を用いて燃料消費量から推計した。

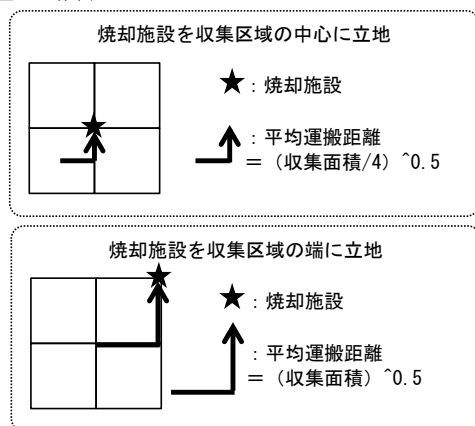


図-8 焼却施設の立地と平均運搬距離

実際の焼却施設の立地は、図-1から読み取れるように、収集区域の端に立地することが多く、実際の運搬距離についても、より長い側に偏ることが想定されるため、これ以降では端に立地する例を示す。

一方、コストの算出に関しては、焼却施設の建設費用については過去5年間の国内における発注状況⁹⁾から回帰式を用いて推計し、焼却施設の維持管理費用については、次式

〔処理費 (円/年)〕 = $25.29 \times 10^3 \times [\text{処理量 (トン/年)}]^{0.95}$ から¹⁰⁾30年間の総費用を推計し、収集運搬費用については、車両費、人件費、燃料費等を含むパラメータを基に同じく30年間の総費用を推計し、その比率をケース1の総費用を1.0として示した。

これらの推計結果を、それぞれケース1～ケース5まで行った結果を図-9及び図-10に示す。

本ケーススタディの結果から、焼却施設の集約化による発電効率の向上は、広域化に伴う収集運搬エネルギーの増加を差し引いても、全体としてのエネルギーの回収効果を高めることが示された。例えば、16施設建て替えのケースに対して3施設集約のケースでは、3倍以上の利用可能なエネルギーが得られることが明らかとなった。

また30年間の売電収益等を含めたコストについても広域化に伴う収集運搬コストの増加を差し引いた上で、地域全体としての低コスト化が見込まれることが示唆され、同じく16施設建て替えのケースに対して3施設集約のケースでは、30年間に負担していく総費用の面でも、1割以上の低減効果が見込まれるなど、集約化の優位性が認められた。これらの結果は既往の研究結果^{11), 12)}とも概ね符合している。

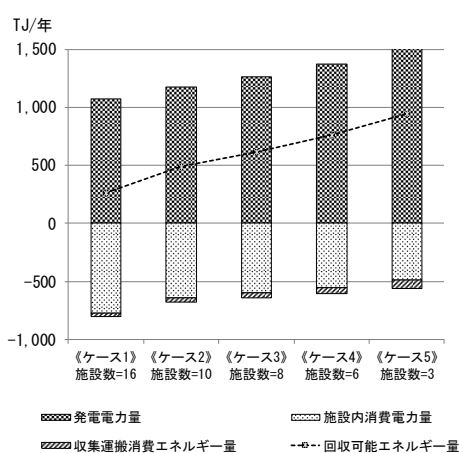


図-9 施設の集約化と回収可能エネルギー量

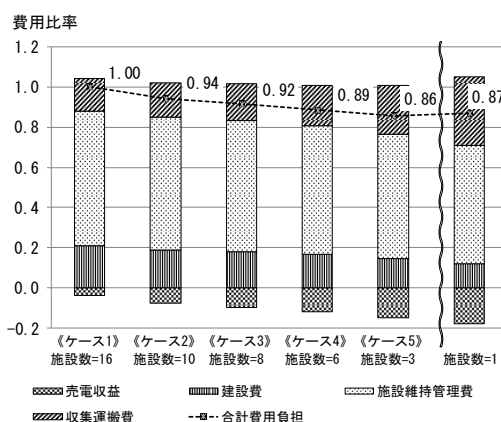


図-10 施設の集約化に伴う費用負担の削減効果

施設の集約化と発電との関係について更に考察すると、図-9に示した回収可能エネルギー量の傾向からみた場合には、多摩地域全体を3施設に集約する場合に上限が見えず、さらに集約した場合に、より最適な領域があることが見て取れる。近年、欧州や中国、シンガポール等において焼却能力1,000～4,000トン/日の焼却施設が建設されており¹³⁾、施設規模とエネルギー回収のみを考えた場合には、より大規模の施設が適していることが想定される。

一方、建設費に加え将来的に発生する施設の維持管理費及び収集運搬費用を含む総費用について、ケーススタディの条件設定からやや外れるが、図-10中に多摩地域全体を仮に1施設に集約したケースを算出したところ、最適領域は、概ね3施設付近にあることが見て取れた。これらのことから多摩地域においては、エネルギー回収効率とその経済性の両面から考えた場合、概ね3施設程度に集約した施設規模が地域全体としてのエネルギー利用の効率性とその経済性が高いことが示唆された。

(2) 熱供給など余熱の直接利用によるエネルギー回収効率への影響

熱需要は供給先施設の種類のより様々な時間変化があり、オフィスビル、病院、ホテル・旅館などでピークになる時間帯は異なるがそれぞれ数時間以内のピークの他の時間は、急激にその需要が減少する。一方で焼却施設においては、処理の安定性が重要であり、発生熱量は熱需要と比較して、一般的には時間変動が少ない。このため焼却施設の排熱を熱供給に利用する際には、複数の熱需要を組み合わせたモデルケースを設定する。熱需要施設としては、前述の施設の他、商業施設、スポーツ施設、共同住宅、データセンターを想定し、これらが焼却施設の概ね2km以内に立地しているものとした。蒸気の利用施設としては、排熱利用が可能な吸収式冷水温水機を想定し、冷凍機COPを1.3、ボイラ効率を0.9と設定した。

また、発電と熱供給のバランスについては、全量を熱供給せず、それぞれの立地特性等により発電と熱供給のベストミックスが存在すると考えられるが、ここでは焼却施設内使用電力のみを発電し、余熱をすべて蒸気で熱供給する場合を検討した。受電電力量をゼロにしつつ施設内使用電力のみを発電することは事実上不可能であるが、発電の効率性と比較するために、熱供給を最大限導入する条件を設定しケーススタディを行った。この結果を図-11及び図-12に示す。

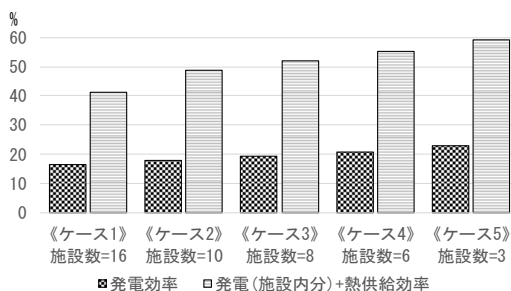


図-11 熱供給を最大限導入した場合のエネルギー回収効率

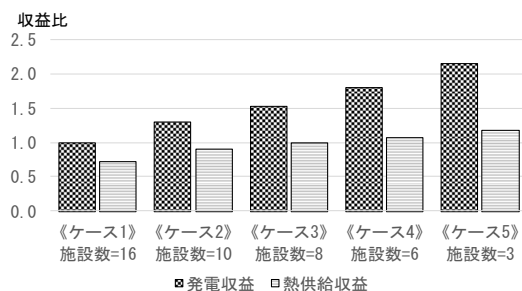


図-12 熱供給を最大限導入した場合の収益性

熱利用の場合のエネルギー効率は41%～59%の範囲であるのに対し、全量発電の効率は16%～23%であり、場内利用電力以外をすべて熱供給による熱の有効利用を行った場合には、全量を廃棄物発電とした場合と比較すると、2倍以上のエネルギー回収効率が見られる結果が得られた。

一方で、収益性については、熱利用の収益は全量を発電とした場合の収益に対して、それぞれのケースごとに55%～73%に留まる結果となった。なお、熱供給は熱供給配管等の設備が必要となること、熱需要の時間変動が大きいことにより熱需要のピークに対して、ボイラ等設備能力の稼働率が低くなることから、発電と比較して収益性は更に低くなると考えられる。また、実際に焼却施設のエネルギーを熱供給事業と組み合わせて利用するためには、焼却施設の地域計画策定開始と同時期に熱供給事業の計画策定を開始することが要求され、自治体の廃棄物担当とまちづくり担当とが連携しながら計画策定を進める必要があり、更に施設の更新時期とまちの更新時期との調整も必要とされる。

以上のように熱供給は発電と比較した場合にはコスト面からは不利であるが、エネルギー面での効率性が高いだけでなく、地域冷暖房への熱供給は、集中的に大規模熱源設備を設置できることから、副次的に大気汚染防止効果にも寄与する。

更に、見える社会貢献という観点からは、プールや福祉施設等の公共施設で焼却施設からの熱エネルギーが利用できるとともに、災害時においても温水供給機能等のエネルギーセンター機能が期待できることから、熱供給についても可能な範囲で拡大していく価値があると考えられる。

(3) バイオガス発電の導入可能性

バイオマスには木質等のいわゆるドライ系バイオマスや、畜産農業において発生する動物のふん尿等によるいわゆるウェット系バイオマスがあり、メタン発酵方式にも湿式メタン発酵や乾式メタン発酵など様々な材料と発酵方式がある。ここでは住民負担と収集運搬エネルギーを考慮し、都市ごみと生ごみを別々に収集運搬せず、焼却施設に付帯する機械選別装置で生ごみ及び紙ごみ等を選別し、乾式メタン発酵方式を用いてバイオガスを発生させ、ガスエンジンで発電するものとし、発酵残さの処理は焼却施設によるものとするケースを想定した。発酵後の脱水残量を45%、投入ごみ1トン当たりのバイオガス発生量を150m³_Nと設定し、16施設のケース（分散システム）と6施設のケース（集約システム）について、バイオガス発電導入によるエネルギー、コストを試算した。併せて、ケース毎に全量廃棄物発電との比較を行った。この結果を整理し図-13及び図-14に示す。

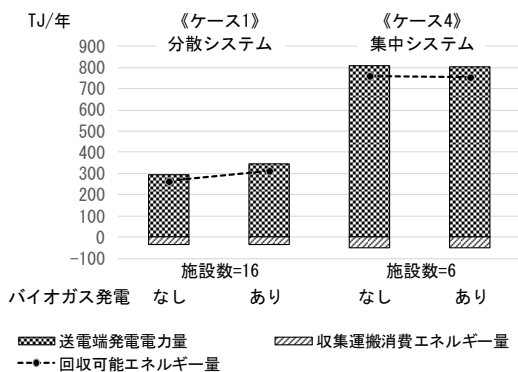


図-13 バイオガス発電導入によるエネルギー回収効果

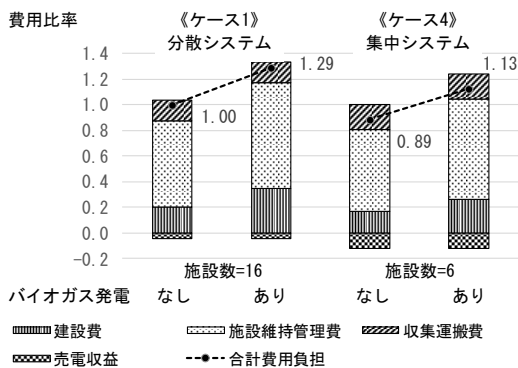


図-14 バイオガス発電導入による費用負担への影響

バイオガス発電の導入効果は、16施設に導入したケースでは回収されるエネルギーについては約2割増加するが、建設費及び将来的に発生する維持管理費・収集運搬費を含めた費用負担は約3割増加すると試算された。6施設に集約したケースでは、回収されるエネルギーの効率性はほとんど変わらず、費用負担のみが約3割増加する試算結果となった。これは、廃棄物発電に用いられる蒸気タービンが大規模化することによりエネルギー回収効率が高まっていくのに対して、バイオガス発電に用いられるガスエンジンは大規模化しても複数機を並設する方式によることから、エネルギー回収効率の大きな上昇が見込まれないことなどが寄与していると考えられる。

これらの結果から、都市ごみを用いたバイオガス発電については、集約システムよりも分散システムで導入するケースが相対的には優位になることが示唆された。

なお、本検討の事例では、都市部におけるバイオガス導入事例が非常に少なく、検討に用いた建設費には、市街地での建設事例が反映しきれていない。特に、市街地に立地する場合には、高度な臭気対策などが必要とされることなどから、更にエネルギーの消費や追加的なコストが必要になる可能性があるため、施設の導入判断に当たっては高い技術力が必要とされる。

5. おわりに

本研究では、焼却施設の更新等に当たって、広域化のシナリオにより各々の最適なエネルギー回収手法が選択し得ることを明らかにした。以下に得られた主要な知見を整理する。

- 1) 処理の広域化による施設の集約化に伴う発電効率については、それに伴う収集運搬の消費エネルギーの増加分を差し引いても、3か所に集約したケースがエネルギー回収効果が高いことが明らかとなり、買電収益、建設費、施設維持管理費、収集運搬費などを合わせた総費用についても3か所に集約したケースが最も経済性が高いと試算された。
- 2) 熱供給を最大限導入した場合には、5段階のすべてのケースで発電のみの場合と比較し、理論上2倍以上のエネルギー回収の見込みがある。一方、収益性については、発電のそれと比較して5〜7割程度に留まる結果となった。
- 3) バイオガス発電の導入ケースについては、16か所に分散設置する場合には回収されるエネルギーは発電のみと比較して約2割向上するのに対し、総費用は約3割の経済的負担が増加すると試算された。処理を広域化し施設を集中させたケースでは、回収されるエネルギーは、発電のそれとほとんど変わらず、総費用のみ約3割増加する試算結果となった。

都市ごみ処理の処理区域とその施設配置に際しては、基礎的自治体によるきめ細やかな地域への配慮と、都道府県単位で見た広域的な効率性の視点とが、相互に緩やかな連携を持ちつつ計画を立案していくことにより、都市ごみが持つエネルギーの効率的な回収や、それに伴う経済性の観点から地域全体のメリットにつながると考えられる。

ここに報告した研究結果が、資源の循環的利用と都市ごみに由来するエネルギーの効率的・経済的な利用が両立した循環型社会の構築に向け、議論の一助となれば幸いとする。

謝辞

本調査研究を進めるに当たっては、官学の委員で構成する「廃棄物処理施設におけるエネルギーセンター機能調査検討会」から多大なご協力を頂いた。委員として参加された、ふじみ衛生組合 荻原正樹氏、町田市役所 水島弘氏、東京二十三区清掃一部事務組合 大塚好夫氏、西山正彦氏、一般財団法人日本環境衛生センター 速水章一氏、また、本調査研究業務を受託したエックス都市研究所 仁井田恵氏、長谷川誠氏、西川光善氏並びに検討会に関わられた関係各位に、深く感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 平山直道：ごみ焼却とエネルギー，総合都市研究 No.53 東京都立大学，pp.5-15，1994
- 2) 永島公明，鈴木貞夫，吉葉正行，平山直道：高率廃棄物発電材料に関する東京都プロジェクトの概要と成果，第 10 回廃棄物学会研究発表会講演論文集，pp.743-745，1999
- 3) 東京都環境局：東京都廃棄物処理計画，2011
- 4) 環境省：一般廃棄物処理実態調査結果 平成 22 年度，2012
- 5) 東京都清掃局：東京都ごみ処理広域化計画，1999
- 6) 松井康弘，藤原健史，藤井実，大迫政浩，村上進亮，田中勝：分別収集・中継輸送に関する費用対効果・費用便益の分析，平成 20 年度廃棄物処理等科学研究費補助金 総合研究報告書，2008
- 7) 荒井康裕，河村永，小泉明，茂木敏：産業系プラスチック廃棄物の広域循環システムに関する輸送計画モデル，土木学会論文集 G，Vol.67，No.6（環境システム論文集 第 39 巻），pp.449-458，2012
- 8) 環境省：高効率ごみ発電施設整備マニュアル，2010
- 9) 公共投資ジャーナル社：環境施設：2007-2012 各夏号
- 10) 荒井康裕：都市ごみの管理計画に関するシステム論的研究，博士論文 東京都立大学，2006
- 11) 小北浩司，増田孝弘：ごみ発電の観点からみたごみ処理の広域化，廃棄物資源循環学会誌，Vol.21，No.6，pp.358-367，2010
- 12) 戸敷浩介：可燃ごみの広域処理に関するシナリオ分析：静岡県中部地域を事例に，第 24 回廃棄物資源循環学会研究発表会講演論文集，pp.69-70，2013
- 13) 廃棄物研究財団：ごみ焼却施設台帳，2009

(2014. 7. 11 受付)

CASE STUDY AND ANALYSIS OF WIDE AREA DISPOSAL SYSTEM AND ENERGY RECOVERY METHOD OF MUNICIPAL COMBUSTIBLE WASTE

Satoshi MOGI and Yasuhiro ARAI

Starting half a century ago, the enormous thermal energy resulting from the burning of municipal combustible waste has been recovered in various ways, the reduced energy supply capacity as a result of the Great East Japan Earthquake, society now has an even greater need for highly efficient recovery of energy from municipal combustible waste.

This research attempted a model analysis for the Tama Region of Tokyo (area 783.94km², population approximately 4 million, combustible waste approximately 850,000 tons/year). We analyzed the benefits of introducing high-efficiency electricity generation by means of wide-area municipal combustible waste processing with large-scale concentrated combustion facilities. We further performed case studies as to the benefits of combining electricity generation from waste combustion with heat supply and electricity generation from biogas. Through these studies we considered the efficiency and cost-effectiveness of energy use throughout the region as a whole.

As a specific approach to wide-area processing, we divided the region into three blocks and set as a condition the consolidation of waste combustion facilities from the current 16 locations to an eventual three locations, in five phases. The results showed that even considering the increase in energy consumed for collecting and transporting waste, the energy recovery benefits from wide-area electricity generation efficiency were greatest when facilities were concentrated in three locations.