

空間的・時間的に効率的なリサイクル・廃棄物 処理システムの計画と評価

藤井 実¹・藤田 壮²・大西 悟³・董 会娟⁴・董 亮⁵

¹正会員 博士（工学）主任研究員（独）国立環境研究所社会環境システム研究センター
（〒305-8506 茨城県つくば市小野川16-2）
E-mail:m-fujii@nies.go.jp

²正会員 博士（工学）センター長（独）国立環境研究所社会環境システム研究センター

³正会員 博士（工学）特別研究員（独）国立環境研究所社会環境システム研究センター

⁴非会員 博士（理学）特別研究員（独）国立環境研究所社会環境システム研究センター

⁵非会員 博士課程 名古屋大学 大学院環境学研究科（〒464-8601 名古屋市千種区不老町）

資源循環の効果的な推進には適切な空間規模におけるリサイクル・処理が重要である。一方我が国では、将来人口の減少による廃棄物量の減少、生産・消費構造の変化など、経時的に外部環境の大きな変化を受ける可能性がある。空間的にも時間的な変化にも最適化されたリサイクル・処理システムの設計と評価手法の構築が求められる。一般廃棄物中の有機系固体廃棄物を対象に、効率的で外部環境の変化に対して頑強なリサイクル・処理システムに求められる要件を、定性的に整理した。次に、これらの要件を満たすリサイクル・処理システムを想定し、適切な空間規模を考慮した上で、定量的に評価した。想定するシステムは、CO₂削減に大きな効果があるばかりでなく、廃棄物量の減少時において、単位処理費用の増加を相対的に軽減できるなどの利点が示された。

Key Words : recycling, waste treatment, robustness, low carbon, cost-effectiveness

1. はじめに

温暖化問題や資源枯渇問題への対応のため、循環可能な資源を効率的に利用できる資源循環システムの構築が急務となっている。リサイクルの効果を高めるには、循環資源の単位重量当たりの効果を高めるとともに、リサイクルの実施量を拡大する必要がある。特に実施量を拡大するには、地域循環圏¹⁾を構成するリサイクルシステムが、空間的に適切な規模で実施されて費用対効果に優れ、それが持続的な仕組みとなっていることが、重要な要件の1つになると考えられる。これまでに、廃棄物のリサイクル・処理分野において、情勢変化に対する対策はある程度採られてきているが、個々の対策となり得る要素を整理し、頑強なリサイクル・処理システムの設計指針として構造化することが重要である。これにより、不確定な情勢変化が生じる得る中、また資源循環と並行して実施され、リサイクルの阻害要因ともなり得る2Rの推進や省エネルギー化、再生可能エネルギーの導入が進展した際にも、資源循環を通して達成される環境負荷削減量や資源消費削減量の将来に渡る時間積分値の期待

値を拡大できることが期待される。

変動に対して頑強、あるいは柔軟なリサイクルについては、石川らの研究例²⁾が存在するが、ここで空間的・時間的に効率的なリサイクル・廃棄物処理システムとは、適切な収集の空間規模で実施され、投入する費用（初期費用と運転費用）に対して、現時点だけでなく、長期的（施設の一般的な耐用年数である数十年の期間を想定）にも高いリサイクル効果が得られるシステムであるとする。情勢の変化には、廃棄物発生量が人口減少や2R（リデュース、リユース）の進展によって漸減したり、組成が変化する場合、大きな経済変化によって廃棄物発生量が急激に減少したり、リサイクル製品の需要が大幅に落ち込む場合、省エネルギー技術や太陽光、太陽熱等の導入の進展に伴って、エネルギー回収の意義が相対的に低下する場合、大規模災害によって廃棄物発生量が大きく増加する場合など、様々なケースが想定される。本研究では、一般廃棄物中の有機系固体廃棄物を対象に、これらの変化に対して頑強なリサイクルシステムについての検討を行う。

2. 時間的に効率的（頑強）なシステムに求められる要件

まず、定性的、半定量的な考察から、情勢変化に強いリサイクル・処理システムの構築にとって重要と思われる要素を整理する。現時点では、以下に述べる4つの要素を挙げるが、今後の検討により拡充し、構造化することが必要である。

(1) エネルギー・資源の質の考慮と絶対効率の向上

今後社会でエネルギーシステムの効率化が進んだ際にも、高い競争力を保つリサイクル方法であることが重要である。リサイクルの環境負荷や資源消費削減の効果は、ライフサイクルアセスメント（LCA）の方法論に基づいて評価されるのが一般的である。効果の評価は、リサイクルの有無の違いによる2つのケースを比較する方法が一般的に用いられる。その際、廃棄物1kgがどのような種類の新規資源を何kg代替したかの相対的な関係（代替効果）でリサイクルの効果が決まる（図-1）。この場合、採用するリサイクル方法のエネルギー効率が悪い場合であっても、従来の新規資源から製造されるプロセスも同様に低い効率である場合、結果的に新規資源の削減効果は大きくなるため、代替効果は高くなる。一方、廃棄物がどのような絶対効率で利用されたのかを考えれば、相対的な関係によらずに、リサイクルの効率を算出することができる。絶対効率の尺度としては、例えばエクセルギー³⁾を用いることができる。リサイクルの効果を高めるには、まず代替効果の高い利用方法を選択することが必要条件であり、当面はこれだけでも大きな効果が見込めることになるが、将来の変化にも備える上では、代替効率が高く、かつ絶対効率も高い利用システムを選択することがより望ましい。

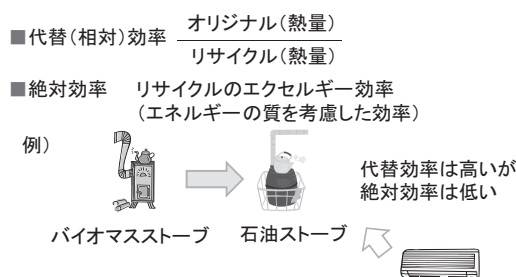


図-1 代替効率と絶対効率

(2) 既存高効率施設の活用

将来の変化によって、建設したリサイクルや廃棄物処

理のための施設が不要になる可能性がある。このような可能性を低減するためには、施設の建設を抑制することが必要であるが、同時にリサイクル・処理のための機能も維持するためには、リサイクル・処理の機能を果たすことの可能な、既存の施設を利用することが有効である。ただし、低炭素化や省資源化が求められる今日において、廃棄物は貴重な資源でもあるため、無駄に消費されることは避けるべきである。そのため、リサイクルの最大理論効率⁴⁾などの基準に照らして、廃棄物を効率的に利用し得る施設のみを選択的に活用することが重要である。既報⁴⁾で示したように、素材産業等の既存炉（ガス化は一部新設）を用いて、プラスチック製容器包装をリサイクルする場合の効率を、発電効率に換算して理論最大効率と比較した場合、その効率は20-40%程度であり、異種プラスチックの混合物である点と、焼却発電の平均効率（10%強）を勘案すると、十分に高効率と判断される。

(3) 施設（機能）の多様性

廃棄物のリサイクル・処理を担う各施設は、それぞれ長所と短所を併せ持っている。焼却炉は低品質な廃棄物も幅広く受入れ適正処理できるのが長所だが、一般に建設費が高額であるために、廃棄物量が減ると単位費用（1kgの処理当たりの費用）が容易に増加する点が短所となる。また、現在稼働中の発電施設を持つ焼却炉における発電効率は、上述のように平均的には10%をやや上回る程度である。施設の大型化や蒸気条件の高温・高圧化によって効率を高めることは可能であるが、その効率は20%程度であり、高効率を維持するには廃棄物の安定供給が必要で、情勢変化への追従性が低下することにもなる。一方、選別施設の長所はそのプロセスがベルトコンベアー式の工程で構成されるため、処理速度調節が容易であり、建設コストも安価な点である。また、選別・前処理された廃棄物を適切に利用することで、高いリサイクル効果が得られる。ただし、ある一定品質以上の廃棄物のみが処理対象となる。

それぞれ、どちらか一方の施設に偏ると、短所を相互に補完することができない。現状では、国内における一般廃棄物の処理は焼却炉に大きく依存している。衛生的な処理や埋め立てる廃棄物を減少する観点からは大きな貢献を果たしているが、現状よりも大幅に分別・リサイクルを進め、焼却処理への依存度をある程度低下させることで、施設の機能の多様性を確保することに繋がると考えられる。

(4) 環境負荷削減確率の高いリサイクル

リサイクルによる環境負荷や資源消費の削減は、再生品が有効利用されて新規製品（あるいは新規原燃料）を代替し、天然資源の消費抑制に結びついてはじめて効果

を發揮することになる。リサイクルには、元と同じ製品に戻す閉ループのリサイクルと、違う製品を作る、開ループのリサイクルが存在する。また、元と同じ製品でなくても、生活に必要性の高い製品を製造するための原料や燃料として用いる場合を、準閉ループリサイクルと呼ぶものとする（図-2）。閉ループや準閉ループのリサイクルは、再生品に常に高い需要があることが期待できる。開ループのリサイクルは、一般により品質の低い製品へのリサイクルであり、比較的緩やかな条件でリサイクルが行えるために、プロセスの負荷が小さく、状況次第では環境面でも経済面でも効率となるが、再生品に常に需要が見込めるとは限らない。他の廃棄物から同様の再生品が製造できて競合する場合もある。廃棄物の性状によっては、閉ループリサイクルが難しい場合もあるが、同程度の効果やコストが見込まれる場合には、常に高い競争力を保てる可能性の高い、閉ループ、準閉ループのリサイクルを選択することが望ましいと考えられる。

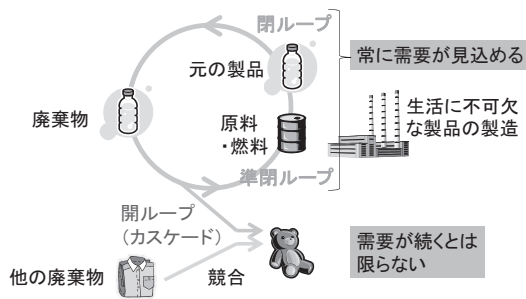


図-2 リサイクルの種類³⁾

3. 評価方法

前述の定性的要件を満たすシステムの一例を設定し、その効果を定量的に評価することで、有効性を検証する。資源の質を考慮する観点から、一般廃棄物中の有機系廃棄物を高品質（単一素材・高発熱量・低塩素濃度）と低品質（混合素材・低発熱量・高塩素濃度）で分けし、それぞれの質に合ったリサイクル方法とその効果を検討する（図-3）。ただし、PETボトルや新聞紙など、分別回収とマテリアルリサイクルが効率的に実施されていると思われる廃棄物は本検討の対象外とする。

(1) 高品質廃棄物のリサイクル

高品質なプラスチック、雑紙類を分別して地域の拠点に収集し、一部のプラスチックはマテリアルリサイクルを実施し、残りは固形原・燃料に加工して、素材産業や発電所等に輸送して利用することを想定する。できるだけ既存施設を活用して、発生量は変動するが活用できれば低炭素化に繋がる循環資源を、最大限受け入れる仕組みは、送電の仕組みであるスマートグリッドと共通するため、スマートリサイクルと呼んでいる⁴⁾。残りの低品質の廃棄物（厨芥等）の高効率利用法については、複合施設化を検討する（後述）。評価では、古い焼却炉も存在する東京都の3市域（人口115万人）を対象とし、GIS（地理情報システム）を活用した分別収集モデルと、地域拠点に関する設計情報、焼却炉のモデル⁷⁾、素材産業等への輸送と化石資源の代替効果を算定した。空間的、時間的な条件をより詳細に評価に反映させるため、以前の報告⁶⁾に比べ、GISを利用してグリッドシティモデル⁸⁾ベースの収集モデルを精緻化するとともに、施設の建

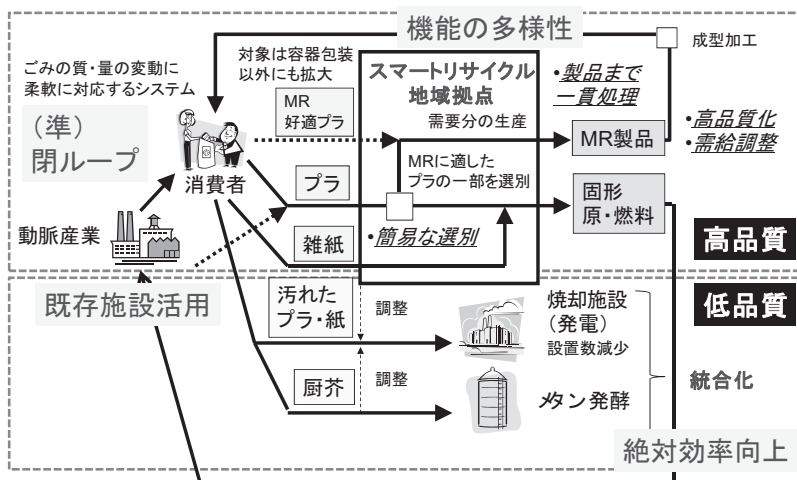


図-3 想定するリサイクル・処理のシステム構成

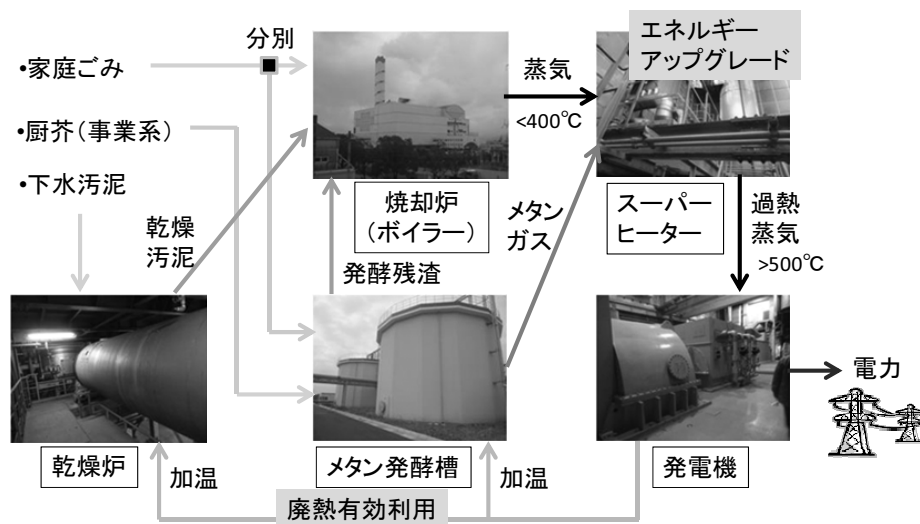


図4 低品質廃棄物のリサイクル・処理のための複合施設の例

設・運転に関する固定的費用，変動的費用を区別してモデル化し，廃棄物量変化に対する応答予測を可能とした。リファレンスとして，分別リサイクルのあまり進んでいない2006年の状況を採用上げるとともに，地域内の人口変化や近年の資源化の進展を考慮し，5基の焼却炉のうち2020年に1基を廃止，1基を縮小して更新するケース（ベースライン）と，1基の縮小更新施設の代わりに，スマートリサイクルの地域拠点を建設するケース（スマート）を比較した。既報⁹⁾により，対象地域の空間条件では，1つの拠点を建設することが効率的であることが示されている。なおベースラインケースにおいても，容器包装の分別収集が一定程度推進されることを想定した。将来の廃棄物発生量は，現在と同じ1人当たり発生原単位を想定した上で人口に比例するものとし，将来の人口は人口問題研究所の推定値を利用した。廃棄物量と分別方法や搬入先施設の違いに応じて，収集運搬に要する燃料消費やコストを，上述のモデルにより推計した。他の計算方法は既報⁹⁾に準じ，情勢の変化の事例として2030年に廃棄物発生原単位が減少した際の，ベースライン及びスマートにおける費用変化を評価した。

(2) 低品質廃棄物のリサイクル

分別リサイクルを進めると，残りの画分はより含水率や塩素濃度が高く，低位発熱量の低い廃棄物となる。これらをより高効率にリサイクルする方法が必要となる。方法には複数の方法が想定され得るが，ここでは厨芥類の分別収集・メタン発酵と，その他の廃棄物の焼却処理とを組み合わせ，複合施設の導入を想定する。

想定するシステムは，低品質廃棄物から厨芥を分別し

てメタン発酵させ，回収したガスで焼却炉ボイラーの蒸気をスーパーヒート（過熱）して，発電を高効率化するものである（図4）。必要に応じて，下水汚泥の乾燥・焼却も組み合わせる。一般的に焼却発電は，ボイラー配管の腐食抑制のために温度・圧力条件が低く制限されるために発電効率が低い，メタン発酵と複合化させることで，焼却と発酵施設の間で熱融通が可能になるとともに，メタンガスを用いた過熱によって蒸気温度を高めることで，発電効率を高めることが可能となる。焼却炉ボイラーの蒸気温度を高めている例としては，スーパーごみ発電の事例があり，そこでは都市ガス等を利用してガスタービンで発電し，タービン排ガスを利用して蒸気の過熱が行われている。想定するシステムは組み合わせの一例であり，メタンガスを利用して直接過熱する点で，やや簡素な仕組みとなっている。

本システムは，著者の一部が委員として参加した，環境省による川崎市・瀋陽市「環境にやさしい都市構築モデル事業」検討会においてその効果が検討されており，本稿においてはその評価結果のみを簡単に紹介する。

4. 結果と考察

対象地域における，高品質廃棄物を対象とした2006年のリファレンス及び2020年のベースライン，スマートリサイクルの各ケースにおける，費用（図5）とCO₂排出量（図6）を示す。ただし，各ケースで共通する廃棄物自身の燃焼によるCO₂排出は含めていない。スマートリサイクルでは，分別収集費用が増加するが，施設建設に

関わる固定的費用が低下する効果と、素材産業等における石炭使用の回避効果によって、全体としては費用が低減する結果となった。また、石炭使用の回避によって、CO₂排出量は大幅に削減されることが分かる。対象地域では、2030年まで大幅な人口減少は予想されていないが、今後2R（リデュース、リユース）が大きく進展した場合を想定し、2030年にごみ発生原単位が大幅に減少した場合を想定した計算結果（図-7）では、廃棄物量が減少しても、スマートリサイクルにおいては、ベースラインと比較して単位処理費用の増加が大幅に抑制できることが示され、頑強性を備えていることが確認された。

低品質廃棄物を対象とした複合施設については、前述の環境省検討会による中国・瀋陽市における廃棄物処理を想定した評価結果によると、条件次第ではあるが、スーパーヒーターによる過熱によって、発電効率が最大で8%程度上昇することが推定された。また、焼却・発電、厨芥のメタン発酵・発電、下水汚泥の乾燥・焼却の各リサイクル・処理をそれぞれ単独で実施する場合と比較しても、発電量の増加や、補助燃料消費の削減による大きなCO₂排出量の削減が見込まれる結果となった。ただし、複合施設への運搬プロセスや、建設・運転コスト等の経済的な分析はまだ実施されておらず、今後の課題である。

5. 結言

今後の廃棄物処理計画を策定する上で有用な情報となる、高効率・低コストで、持続的（頑強）なリサイクル・処理システムについて、その条件を整理すると共に、望ましいと考えられるシステム例を具体的地域に当てはめてシミュレーションを実施し、その効率性や頑健性を確認した。

上記のリサイクルは、エネルギー・資源の質の考慮と絶対効率の向上、既存高効率施設の活用、施設（機能）の多様性、環境負荷削減確率の高いリサイクルにより構成される。

高品質廃棄物のリサイクル・処理を実施する上で、コスト面で大きな割合を占める収集プロセスを、GISを利用して高精度に推計した上で、廃プラスチックや雑紙を現状よりも大幅に分別・リサイクルを行うケースについて、焼却施設、リサイクル前処理拠点、素材産業等を活用するリサイクル工程を含めて評価を実施し、高いCO₂削減効果、経済的なコスト低減の可能性、ごみ量変動に対する頑健性を確認した。

高品質廃棄物を分別利用した残りの廃棄物は、水分、塩素分、発熱量等の観点でより低品質化することになるが、一例として想定した複合施設化により、これらの廃棄物からも高い発電効率で利用できる可能性が示された。

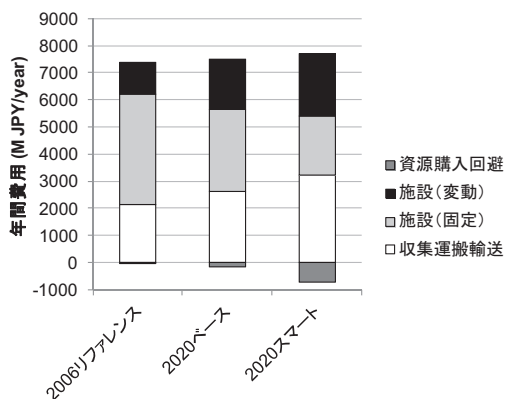


図-5 年間処理費用の比較

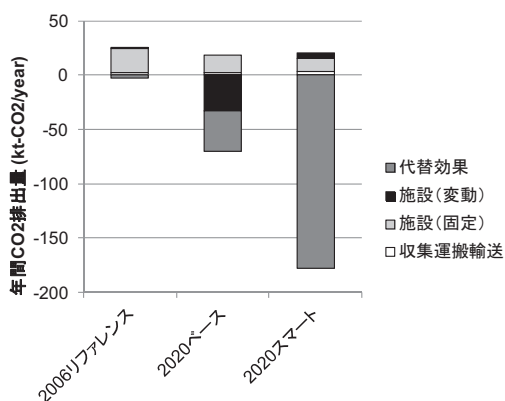


図-6 年間CO₂排出量の比較

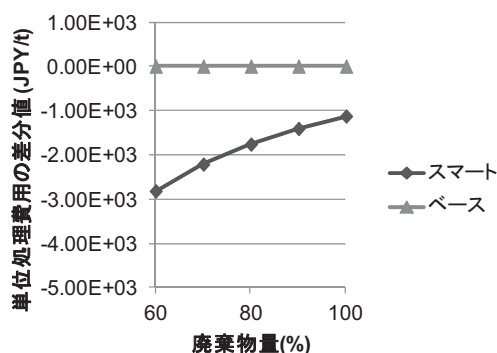


図-7 廃棄物量変化時の処理単価の比較

謝辞：本研究の一部は、環境省環境研究総合推進費補助金（K 22013, K113002）により実施されました。

参考文献

- 1) 環境省：地域循環圏形成推進ガイドラインの概要，2012.
- 2) 石川晴菜，中谷隼，菊池康紀，平尾雅彦：変動に対する頑健性・柔軟性を考慮したリサイクルシステム設計，第 8 回日本 L C A 学会研究発表会講演要旨集，pp.328-329. 2013.
- 3) 宿谷昌則編著：エクセルギーと環境の理論，北斗出版，2004.
- 4) 藤井実，藤田壮，陳旭東，大西悟，大迫政浩，森口祐一，山口直久：長期的視点からのプラスチック及び雑紙のリサイクルシステムの検討，環境システム研究論文集，39，pp.II_439-447，2011.
- 5) 藤井実：廃プラスチック類の効率的・安定的なリサイクルと処理に向けて，日廃振センター情報，2013.7 夏号，pp.12-15，2013.
- 6) Fujii, M., Fujita, T., Chen, X., Ohnishi, S. and Yamaguchi, N. : Smart recycling of organic solid wastes in an environmentally sustainable society, *Resources, Conservation and Recycling*, Vol.63, pp.1-8, 2012.
- 7) 松藤敏彦：都市ごみ処理システムの分析・計画・評価，技報堂出版，2005.
- 8) Ishikawa, M. : A Logistic Model for Post-Consumer Waste Recycling, *Journal of packaging science & technology*, Vol.5, No.2, pp.119 – 130, 1996.

(2013. 7. 19 受付)

PLANNING AND EVALUATION OF SPATIALLY AND TEMPORALLY EFFICIENT RECYCLING AND WASTE TREATMENT SYSTEM

Minoru FUJII, Tsuyoshi FUJITA, Satoshi OHNISHI, Huijuan DONG and Liang DONG

To promote an effective recycling and waste treatment, a system which is spatially optimized is required. While in Japan, such a system may be affected in the future by external factors such as decrease of waste amount due to population decline and changes in production, consumption patterns and so on. Therefore, a planning and evaluation method for building a recycling and waste treatment system optimized both spatially and temporally is important.

First, we figured out conditions required for a robust recycling and treatment system to the change of external factors qualitatively. Then, we assumed a system which satisfies these conditions and evaluated it quantitatively with a consideration of an optimum spatial scale.

It was found that the system we assumed would contribute not only carbon dioxide reduction but also easing the increase of unit recycling and treatment cost along with the decrease of the amount of waste compared to baseline case.