

第2章 スマート資源循環の提案

2.1 背景

一般廃棄物中のプラスチックや紙などの循環資源は、多様な処理やリサイクル方法の選択肢が存在し、更なる有効活用の余地も大きいと考えられる。これらの循環資源の有効利用に、容器包装リサイクル法（以下、容リ法）により実施されるリサイクルの果たしてきた役割は大きいですが、そのための費用が高額であることも課題となっている^{1,2)}。リサイクル効果を拡大するには、循環利用可能な資源の単位重量当たりの利用効率と、リサイクルされる循環資源量の双方を改善することが必要であり、これらの両立が可能な費用対効果の優れたリサイクルシステムを構築することも重要である。

現時点で費用対効果の高いシステムであるとしても、将来の人口の減少、国際的な景気動向による資源価格高騰などによって、循環資源の発生量や需要が大きく変化する可能性がある。また、リサイクルよりも優先されるべき、2R（リデュース、リユース）の推進によって、循環資源の発生量自体を削減することも、必要な対策である。このような、循環資源の需給バランスの変化にも対応できる、柔軟性のあるリサイクルシステムを構築しておく必要がある。

一方、鉄鋼や、セメント、製紙、化学等の素材製造を行う動脈産業施設では、原料や燃料として大量の化石資源を使用している。これらの製造工程を低炭素化することが求められるが、高温・高圧条件を安定して維持する必要があるため、これらのエネルギー源を太陽光や風力で代替することは難しく、また日本国内の工場では省エネルギー化も既に相当進んでおり、低炭素化を更に進めるには、循環資源やバイオマスを活用することが、有効な対策になると考えられる。

従って、有機系循環資源の資源循環には、以下のような課題が抽出される。

- 一般廃棄物中のプラスチック及び紙を対象に、最大限の CO₂ 削減量及び化石資源消費削減量が見込め、変動に対して頑強で長期的にも費用対効果の高いリサイクルシステムを検討すること。
- 既に省エネルギー化が進んでいる国内の動脈産業の、更なる低炭素化を促すリサイクルシステムを検討すること。

本研究では、これらの要求を満たすシステムを検討し、更に提案するリサイクルシステムの効果の基礎的な評価を行った。

リサイクルシステムの評価は、ライフサイクルアセスメント（LCA）やライフサイクルコスト分析（LCCA）の手法を用いて、これまでも豊富な研究例が存在する。プラスチック製容器包装のリサイクルについては、鉄鋼業におけるケミカルリサイクルに着目した CO₂ 削減効果の分析事例^{3,4)}や、各種ケミカルリサイクルの他、マテリアルリサイクルやエネルギー回収について、CO₂ 及び酸性ガスの排出量と資源消費の削減に関する分析を行った事例⁵⁾、更にこれらの評価項目に加えてコストも考慮した分析事例⁶⁾などがある。また、家電製品に含まれる廃プラスチックのリサイクル効果に関する分析なども行われている^{7,8)}。古紙

や食品残渣のリサイクルについても、焼却処理や埋め立て等と比較する形で、温室効果ガス削減効果が評価され、更に費用の増加額が評価されている場合もある⁹⁻¹⁴⁾。しかしこれらの研究は、既存のリサイクルシステムの効果を確認することが主な目的であり、本研究の目的である、廃棄物発生量の変動に対応し、将来におけるリデュースやリユースの進展とも整合するように、リサイクルシステムを再構築することについては、研究例がほとんど存在しない。一方産業界においては、例えば鉄鋼業とセメント製造の組み合わせのように、異業種間の連携により副産物を有効活用する産業共生¹⁵⁾の理念が提唱され、エコインダストリアルパーク（例えば川崎エコタウンや、デンマークのカルンボーがこれに相当する）などの建設による、資源の効率的利用が進められている。しかし、そこではパーク内に複数存在する施設の近接性を利用して施設間の物質交換を促進し、パークで処理される廃棄物や副産物の利用効率を高めることが主な目的であり¹⁶⁾、空間的に分散発生する一般廃棄物の長期的に安定、高効率なリサイクルの検討という、本研究の視点とは異なる場合が多い。

2.2 提案するシステム

2.2.1 循環資源供給側のポテンシャル

本章における検討では、大きな発熱量を持つため利用価値が高いと考えられる、一般廃棄物中のプラスチックと紙を主要な対象循環資源として設定した。食品廃棄物の有効活用については、4章で述べる。また、現状でも分別回収され再生紙へとリサイクルされている新聞や雑誌、単品で分別収集され、高品質なマテリアルリサイクルが実施されている飲料容器のPETボトルについては、現在のリサイクルをそのまま維持することが適切であると考えられるため、検討対象外とした。従って、容器包装、非容器包装を含むPETボトル以外のプラスチックと、容器包装や封筒に加え、分別されずに可燃ごみとして排出される新聞紙等を含む紙類（以下、雑紙）が対象となる。地理的には、人口密度が高いため分別収集の効率が比較的高いことと、動脈産業施設が集積していることから、東京都、千葉県、神奈川県、埼玉県の一都三県を対象とした。

リサイクルの対象となる一般廃棄物中のプラスチックと雑紙（ただし、異物の付着が多いと考えられるティッシュ、紙おむつを除く）のもつ総発熱量（計算方法は2.3.1に記載）のうち、容リ法で回収されているのは1割ほどであり（図2-1）、残りは大部分が焼却処理されている。最大ポテンシャルとして、一都三県において、残りの9割を総て有効利用した場合を想定すると、発熱量を基準にして石炭を代替したとすれば約260万t/年分に相当し、その燃焼回避によるCO₂削減効果は640万t/年にのぼる。このポテンシャルを極力活かし、同時にその発生量の変化にも対応できるリサイクルシステムが必要である。

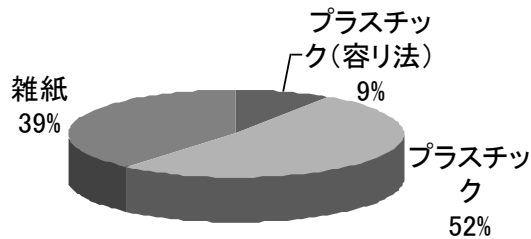


図 2-1 東京、千葉、神奈川、埼玉の一都三県における一般廃棄物中の PET ボトルを除くプラスチックと雑紙の構成（発熱量基準、平成 20 年度）

2.2.2 循環資源受け入れポテンシャル

リサイクルのための初期投資を抑え、費用対効果の高いシステムとするためには、できる限り既存の施設を活用できることが望ましい。動脈産業の低炭素化を促す観点からも、既存の動脈産業施設を活用したリサイクルが、まず望ましいシステムとして想定されるが、更に、循環資源の利用効率（循環資源 1kg 当たりの CO₂ 削減量や化石資源消費削減量）が十分高いことや、安定して大きな受け入れ能力があることが必要な条件となる。

(1) 循環資源の利用効率

新たなシステムを検討する際には、その効率の到達度や限界を知るための論理を持っていると、有用であると考えられる。エアコンや発電機の理論最大効率や、どのようにすれば効率が向上するかは、熱力学によって知ることが出来る。同様に、循環資源の利用効率が高いリサイクルシステムを検討する上で、リサイクル効果の理論的な限界を把握しておくことが、適切なシステム的设计に役立つと考えられる。リサイクルの理論最大効率は、1kg の循環資源が、それ自身と同じ種類の素材で、天然資源から新たに製造される新規素材 1kg を代替するリサイクルが、プロセスのためのエネルギー投入なしに達成される場合と考えることができる。これは、素材をそのままリユースする場合に相当する。

理論最大効率に比べて、動脈産業を活用したリサイクルの利用効率がどの程度であるかを図 2-2 に示す。図はプラスチック製容器包装のガス化、高炉還元剤、コークス炉化学原料化、セメント原燃料化の各事例の利用効率を、発電効率に換算して示したものである。この換算により、利用効率をごみ焼却発電の発電効率とおおよそ比較することができる。理論最大効率には、家庭から排出される中で占める割合の高いプラスチックの 1 つである、ポリプロピレンの新規樹脂、廃プラスチックの再生品によって代替される場合の値を示した。理論最大効率が計算上 60% 近い非常に高い発電効率換算値になる理由は、再生樹脂へとマテリアルリサイクルした場合、廃プラスチックのもつエネルギーが、新規樹脂の原料

として必要なエネルギーを代替するのに加えて、樹脂製造のためのエネルギーも節約されるため、化石資源の消費削減量が、廃プラスチックの持つエネルギー量以上に大きくなるためである。

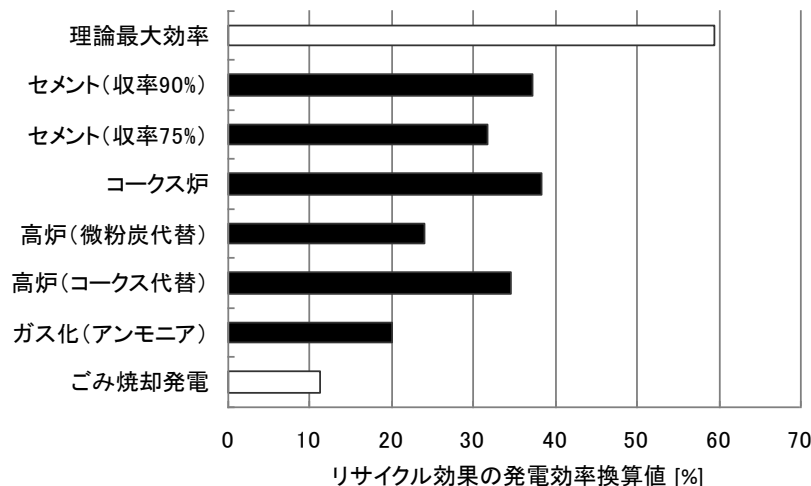


図 2-2 プラスチック製容器包装の動脈産業施設を利用したリサイクルの利用効率（発電効率換算値） 文献 5, 17 より作成

動脈産業施設を活用したリサイクルは、理論最大効率からは劣るものの、セメントや鉄鋼産業の既存炉を活用したリサイクルでは、30～40%程度と高い利用効率となっている。平均的な発電効率が 11%程度¹⁸⁾であるごみ焼却発電と比べると、現状ではその効率を大きく上回っている。従って利用効率の面で、動脈産業施設は十分な能力を有していると判断できる。

一方、動脈産業でのリサイクルは、循環資源の持つエネルギーを、化石資源の代わりに原料や燃料として活用するものであるため、マテリアルリサイクルのように、樹脂の製造エネルギーを含めた節約は出来ない。そのため利用効率は、発電効率換算値で 40%程度が限界となる。リサイクルシステムの利用効率を更に高めるには、プラスチックのマテリアルリサイクルを併用することが望ましいと考えられる。現在の容リ法ルートでのマテリアルリサイクルは、回収されるプラスチック製容器包装に様々な種類のプラスチックが混合し、異物も多いために収率や再生樹脂の品質の低さが問題となっているが¹⁹⁾、今後の企業や消費者意識の改善等により、分別収集の高度化や、企業の易リサイクル設計が進めば、利用効率が高まることが期待される。

(2) 受け入れのポテンシャルとその安定性

動脈産業施設を活用したリサイクルは、既に一部で実施されている。一般廃棄物中のプラスチック製容器包装のリサイクルは、容リ法ルートのケミカルリサイクルとして実施さ

れており、また産業廃棄物では、廃プラスチックと古紙を混合して、RPF と呼ばれる固形燃料に加工し、セメントや製紙工場等で利用するリサイクルが行われている。しかし、例えば鉄鋼連盟では、100 万 t/年の廃プラスチックの利用を自主行動計画に掲げているが、実績値は廃プラスチックと廃タイヤのを合計しても、32 万トン（2008 年）の利用に留まっており、十分な循環資源量を確保できていないのが現状である。また、一都三県に立地するセメント工場の石炭使用量は、セメント産業における日本全体の石炭使用量を、一都三県のセメント生産量²⁰⁾で比例配分して推計すると、59 万 t/年であり、更に一都三県の石炭火力発電所の石炭消費量は、270 万 t/年²¹⁾である。総合エネルギー統計によると、利用先を一都三県に限らなければ、日本全体では一般炭だけでも 1 億 2000 万 t/年の石炭が消費されており、前述の一都三県の最大供給ポテンシャルはこの 2%程度に過ぎない。仮に将来において一部の動脈産業が製造拠点を海外に移転するような事態を生じたとしても、潜在的には安定して大きな受け入れ余力あると考えられる。

素材産業等の動脈産業施設は化石資源を大量に利用しているため、循環資源の供給量が変化しても、その変化が全体のエネルギー消費に与える影響は小さく、化石資源の利用量を適宜増減させることで安定的に生産することができるため、柔軟な受け入れ先となり得る。実際に、容り法ルートにおけるプラスチック製容器包装の利用量は毎年大きく変動しており、例えば高炉還元剤としての利用量は、平成 19 年度から平成 20 年度にかけて 50%ほど低下したこともある²²⁾が、これによって鉄鋼の生産が滞った訳ではない。循環資源量の変化は各企業のリサイクル部門の収益が安定しない要因とはなるが、本業の製品製造が行えなくなる訳ではない。

2.2.3 供給側と需要側を接続するシステム

(1) 現在のリサイクルシステム

家庭から排出されるプラスチックと紙のうち容器包装であるものは、容り法に従って市町村により分別収集され、その選別保管施設において金属やガラス等の異物や、容り法の対象とはならないプラスチックや紙（使用済み製品や、厳密にはクリーニングの袋のようにサービスに伴って提供された包装）の選別が行われた後、圧縮梱包してプラスチック製容器包装、紙製容器包装をそれぞれリサイクルする再商品化事業者へと引き渡される。再商品化事業者は毎年入札で決定するため、どのようにリサイクルされるかは一年ごとに変化する可能性がある。また、再商品化事業者は再度選別を行うため、市町村と二重に選別が行われることになる。なお前述のように、プラスチックと雑紙の大部分は焼却処理されているが、熱回収装置を持つ焼却施設では発電や蒸気の利用が行われている。

(2) リサイクルシステムの要件

前述のように、動脈産業の既存施設は高い利用効率でプラスチックと紙をリサイクルすることが可能で、潜在的に大きくかつ柔軟に対処できる需要が存在する。従って、全体のリサイクル効果の拡大にとって、循環資源を利用する新たなリサイクル技術の開発や施設

の建設が重要なのではなく、循環資源の供給ポテンシャルと、その受け入れポテンシャルを上手く繋ぐことのできる、最小限のシステムを作成することが重要であると判断できる。

供給側と需要側の接続により作成されるリサイクルシステムは、以下の観点を満たすものが望ましいと考えられる。

- 循環資源の利用効率が高いリサイクルシステムであること。
- 可能な限り既存施設を利用することで、リサイクル費用が低減できること。
- 十分な受け入れキャパシティが有り、循環資源供給量の変動にも対応できること。
- 動脈産業の低炭素化に繋がること。
- 将来の分別の高度化や製品、容器包装の易リサイクル設計の進展など、循環資源の質的向上に合わせてより利用効率の高いマテリアルリサイクルが行えること。
- 特性の似た循環資源をまとめてリサイクルすることで、リサイクル量を拡大し、リサイクル単価を削減すること。

(3) 想定する資源循環システム

上述の観点を満たすものとして、想定されるシステムの概要を図 2-3 に示す。各地域に、地理的に分散発生する一般廃棄物と、偏在する動脈産業施設とを繋ぐための、拠点施設を設置する。一般廃棄物中の PET ボトルを除くプラスチックと雑紙のうち、食品等の汚れが軽微なものを対象に分別収集し、拠点に集積する。プラスチックと雑紙は同一の区分で収集するが、オプションとして、プラスチックの中で汚れがなく品質の高いものは、マテリアルリサイクル用に別に収集することも考える。現状の容り法の分別方法と比較して、容器包装であるかどうかに関わらず素材の種類で分別収集することと、プラスチックと紙が接合された容器や封筒なども、そのまま排出できるために、市民の分別が容易になり、リサイクル対象範囲の拡大と合わせて、分別収集量が大きく向上することが期待される。結果的に、焼却ごみの総量が大きく減少することが期待され、広域化も含めて地域で焼却施設の統廃合が可能になれば、焼却施設の建設、運転に伴う費用を削減することができる。ただし焼却ごみの量だけではなく組成も変化するため、焼却対象として残るごみが、追加燃料の投入なしに燃焼する発熱量が維持されることには留意する必要がある。

拠点では高品質なプラスチックのうち、容り法の再商品化で一般に再生樹脂に利用されている、ポリエチレンとポリプロピレンを選別してマテリアルリサイクルを実施し、破碎・洗浄されたフラフ、もしくは再生樹脂ペレットを製造する。これらは高炉還元剤など、ケミカルリサイクルの原料に供することも可能である。マテリアルリサイクルの残渣と、雑紙と一緒に収集したプラスチックを合わせ、異物の他、利用先で塩素による設備の腐食等の悪影響をもたらす可能性のある塩化ビニルを必要に応じて選別した後、動脈産業までの輸送性と、利用先でのハンドリング性を向上する目的で、固形原・燃料に成形する。残渣がその場で有効活用されるため、容り法のシステムのように、マテリアルリサイクルの収率を無理に高める必要がなく、結果的に樹脂の選別に要する手間を削減するとともに、異なる樹脂や異物の混入を抑制して再生樹脂が高品質化することも期待される。

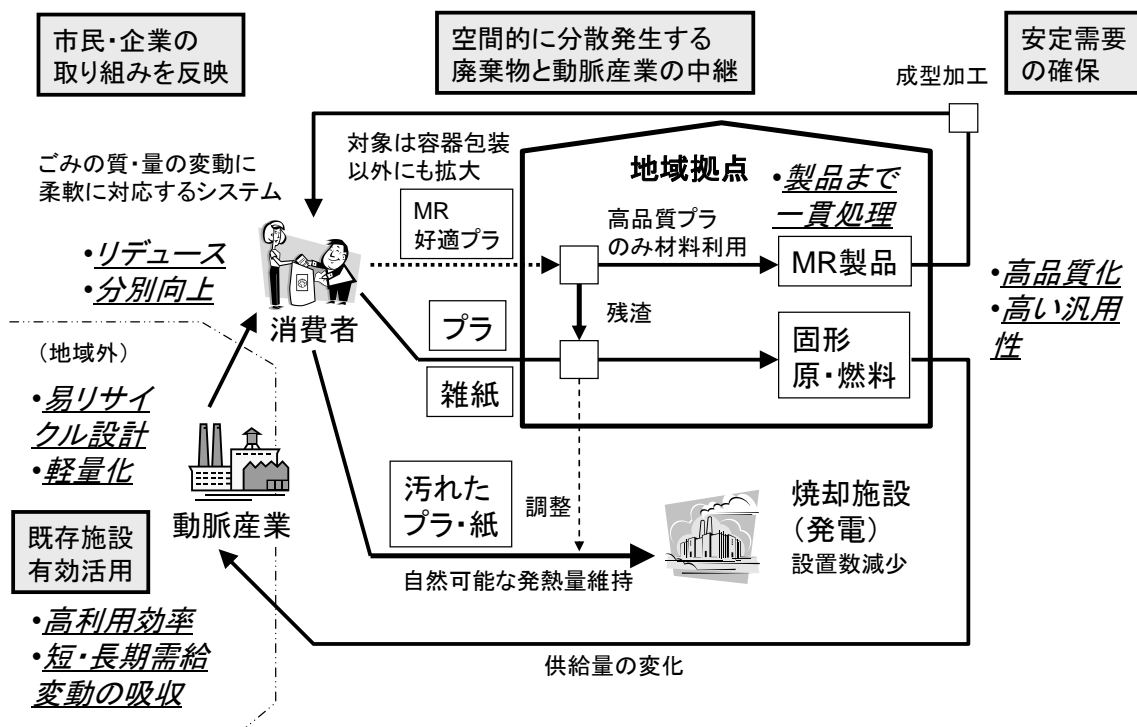


図 2-3 提案するリサイクルシステムの概略図

リサイクルの実施が遠方の再商品化事業者となってしまう場合もある容り法のシステムと異なり、各地域の拠点施設で再生樹脂やケミカルリサイクルの原料及び固形原・燃料まで一貫製造するシステムとすることで、地域で有価なりサイクル製品を生み出す構造を構築することができる。また、固形原・燃料は汎用性、輸送性が高いため、ある動脈産業施設で需要が減少しても、他の施設に回すことで、短期的、長期的な需要変動にも対応することができる。動脈産業の側では、選別等の大掛かりな前処理施設を設け、そのための人員確保を行う必要がなくなり、循環資源供給量の変動が事業性に与える影響を緩和することができる。このことは、1つの施設で大量の循環資源を集めて利用する必要性を低減させることになり、結果的に塩素濃度の許容量に応じて、固形原・燃料を幅広い動脈産業施設で薄く広く利用する可能性を高め、循環資源の需要を拡大することが期待される。

(4) スマートグリッドとの類似性

提案するシステムは、表 2-1 に整理するように、近年温暖化対策として注目される、スマートグリッド²³⁾との共通性が高いと考えられる。どちらのシステムも変動が大きく、地理的にも分散して低密度で得られる有機系循環資源や再生可能資源を最大限に受け入れることのできる調整機能を有し、既存施設を有効活用することで過剰な投資を抑制し、高い利用効率で利用することで、将来に渡っても高い費用対効果で環境負荷低減と資源消費の削

減効果を得ることを目指すものである。以下、提案するシステムをスマート資源循環と称する。

表 2-1 提案するシステム（スマート資源循環）とスマートグリッドの共通点

| 項目 | 提案するリサイクルシステム | スマートグリッド |
|--------------|---------------------------|------------------------|
| 低環境負荷 省資源 | 大容量の低環境負荷の有機系循環資源の導入 | 大容量の低環境負荷の再生可能エネルギーの導入 |
| 変動緩和 | 循環資源の需給変動の吸収 | 電力の需給変動への対応 |
| 地理的 分散性 | 分散排出される有機系循環資源の利用 | 太陽光や風力など分散エネルギー源の利用 |
| 既存施設 の利用 | 既存施設（動脈産業）の活用 | 既存施設（送電網）の活用 |
| 投資抑制 | リサイクル実施のピーク需要に合わせた設備投資の低減 | 電力のピーク需要に合わせた設備投資の低減 |
| 高品質化 | 再生製品の品質確保 | 供給電力の品質確保 |

2.3 スマート資源循環導入による CO₂削減効果と費用の概算方法

資源循環の効果を推定する詳細な計算については 5 章で述べるが、ここでは予備的な簡易計算によって、効果を概算する方法論を構築するという観点から、その方法について述べるものとする。

2.3.1 マテリアルフローの変化

一都三県の一般廃棄物の組成別収集量は、環境省の平成 20 年度一般廃棄物処理実態調査結果と、容器包装廃棄物の使用・排出実態調査平成 20 年度調査の結果を利用して推計した。ただし、使用・排出実態調査は全国から複数の市町村をピックアップしており、一都三県以外の値を含んでいる。表 2-2 に、関連する有機系循環資源について、スマート資源循環導入前の処理区分ごとの収集量と、導入後の収集量のそれぞれについて、一人当たりの重量と、一都三県の重量の合計及びそれらの低位発熱量を示す。この時点では、紙製容器包装のリサイクル量は少量であったため、表には反映していない。表に示したのは、スマート資源循環で収集対象とする循環資源のうち 7 割が分別され、残りは焼却ごみとして収集される場合を想定したものである。スマート資源循環導入後も、焼却ごみの発熱量は焼却炉で自然可能なレベルにあると考えられる。また、高品質プラスチックのリサイクル量は、リサイクル製品の需要にも配慮して設定する必要がある。現状の容り法によるリサイクル量分については、需要があると考えられることができるため、これと同じ量をマテリアルリサイクルすると設定した。検討対象外とした新聞、雑誌等の古紙のマテリアルリサイクルについては、これまでのリサイクル量が維持されるものと想定しており、この点を明瞭にするために表に示した。

表 2-2 スマート資源循環導入前後のマテリアルフロー

| シナリオ | | スマート資源循環導入「前」 | | | スマート資源循環導入「後」 | | | | |
|-----------------------|-----------|---------------|------|-------|---------------|---------|------|-------|-------------|
| | | 古紙(MR) | 容リプラ | 焼却ごみ | 古紙(MR) | 地域拠点 | | 焼却ごみ | |
| 処理区分 | 紙類 | | | | | プラスチック類 | 紙類 | | ブラ(MR+一部CR) |
| 包容 装器 | 紙類 | 15 MJ/kg | | 26.4 | | | 18.5 | 7.9 | |
| | プラスチック類 | 35 MJ/kg | 5.6 | 24.5 | | 2.8 | 18.3 | 9.0 | |
| 非 容 器 包 装 | 紙類 | 15 MJ/kg | 25.6 | 29.6 | 25.6 | | 13.0 | 16.6 | |
| | ティッシュ・おむつ | 15 MJ/kg | | 25.1 | | | | 25.1 | |
| | プラスチック類 | 35 MJ/kg | | 7.9 | | 2.8 | 2.8 | 2.4 | |
| | 厨芥類 | 3.4 MJ/kg | | 129.0 | | | | 129.0 | |
| | 木竹草類 | 11 MJ/kg | | 10.6 | | | | 10.6 | |
| | 繊維類 | 23 MJ/kg | | 12.9 | | | | 12.9 | |
| 合計 [kg/人/年] | | | 25.6 | 5.6 | 266.0 | 25.6 | 5.6 | 52.6 | 213.5 |
| 一都三県合計 [kt/年] | | | 888 | 193 | 9229 | 888 | 193 | 1823 | 7405 |
| 低位発熱量 [MJ/kg] | | | 15 | 35 | 12 | 15 | 35 | 23 | 9.4 |

*各低位発熱量は文献 5, 24 を参考に設定

2.3.2 CO₂削減効果と費用の簡易的な推算方法

スマート資源循環の導入によって、CO₂排出量が増加するプロセスと、減少するプロセスとが存在する。増加するのは、

- (i) 地域拠点に循環資源を集積するための分別収集による収集・運搬距離の増加や、固形原・燃料の地域拠点から動脈産業までの輸送に伴う CO₂ 排出。焼却工場の統廃合により、焼却ごみの運搬距離も増加する。
 - (ii) 地域拠点における機械の稼働等に伴う CO₂ 排出。
 - (iii) 焼却ごみの減少によるごみ発電量の低下により、外部の発電所から発生する CO₂ 排出。
- 反対に減少するのは、
- (iv) 焼却ごみの減少による、焼却工場の装置稼働等に伴う CO₂ 排出。
 - (v) 動脈産業において固形原・燃料が代替する、化石資源からの CO₂ 排出。

などである。しかし、既往の研究例等²⁵⁻²⁷⁾から、(i)、(ii)、(iv)の合計は、(iii)と(v)の合計に比べて CO₂ 排出量がせいぜい 10%程度以下と軽微であるので、ここでは(iii)と(v)のみを考慮するだけでも、CO₂ 削減効果がある程度正確に推算することができる。また前述のように、導入前の容リ法によるリサイクルと同量のリサイクルを、スマートリサイクル導入時にも行うと想定したため、これらのリサイクルによる CO₂ 削減効果は導入前後で相殺されることになる。

上記(iii)については、ごみ焼却発電は今後施設の更新や広域化のタイミングにおいて、発電設備が拡充されることを見込み、現状では発電設備を持たない焼却施設を含む全体の平均値として、発電効率 10%を仮定した。ただし、余熱利用は考慮しないものとした。スマート資源循環導入後の、焼却量の減少に伴う発電量の低下は、石炭火力発電に相当する 0.9

kg-CO₂/kWh の CO₂ 排出を伴う電力によって補われるものと想定する。このとき原子力や水力を含む全電源の平均値を用いないのは、スマート資源循環導入前後のどちらにおいても、可燃ごみが石炭を代替するものとして比較の条件を揃え、スマート資源循環導入“前”の CO₂ 削減効果を過小評価しないための措置である。(v)については文献⁵⁾を参考に、固形原・燃料は、動脈産業において、発熱量等価の石炭を代替するものとする。石炭の使用に伴う CO₂ 排出は、採掘や輸送に伴う CO₂ 排出²⁸⁾と、燃焼分を加えた 0.094kg-CO₂/MJ を用いた。

費用の算出では、分別収集費用の変化分、固形原・燃料の拠点から動脈産業への輸送費、固形原・燃料が代替する石炭価格、スマートリサイクルで一部置き換えられる焼却費用については文献^{25,27)}及び統計資料を参考に求めた。その際、拠点から動脈産業までの輸送距離は、一都三県の各市町村から動脈産業の集積する川崎市へ輸送する場合を想定し、その平均輸送距離（道路距離）である 50km を用いた。現状では拠点施設と全く同じ機能を持った施設は存在しないため、施設の建設、運転に係わる費用を実績データから得ることはできない。3章において拠点施設の詳細なプロセス設計を行っているが、ここではプロセスに共通点のある、産業廃棄物から RPF を製造している工場（マテリアルリサイクルは実施していない）へのヒアリングを行った。従来の容リ法ルートの商品化委託費用については、再商品化の CO₂ 削減量算出時の前提と同じ理由で、導入前後で相殺されるものとした。

2.4 計算結果

2.4.1 スマート資源循環の CO₂ 削減効果と費用

スマート資源循環の導入による一人当たりの CO₂ 排出量の削減効果を図 2-4 に示す。削減効果は市民の分別排出への協力度にも左右されるため、対象循環資源の分別率を 50% から 90% の範囲で変化させている。分別率 90% の際の、残りの可燃ごみの発熱量は約 8MJ/kg であり、発熱量の低下がみられるものの、自然可能な範囲内であると考えられる。導入によって焼却ごみが減少するため、ごみ焼却発電による CO₂ 削減効果が減少することになるが、固形原・燃料の動脈産業における高い利用効率での利用が進み、導入前後で比較するとトータルの CO₂ 削減効果が大きく向上する結果となっている。分別率 80% の場合で、一人当たりの CO₂ 削減効果が概ね 100kg/年となる。この値は、一都三県ではおよそ 3.5Mt-CO₂/年の削減効果（石炭消費では 1.4Mt の削減）に相当し、人口に比例させて全国に拡大推計すると、約 13Mt-CO₂/年となる。これは、国内の温室効果ガス（GHG）排出総量の約 1% に相当する。

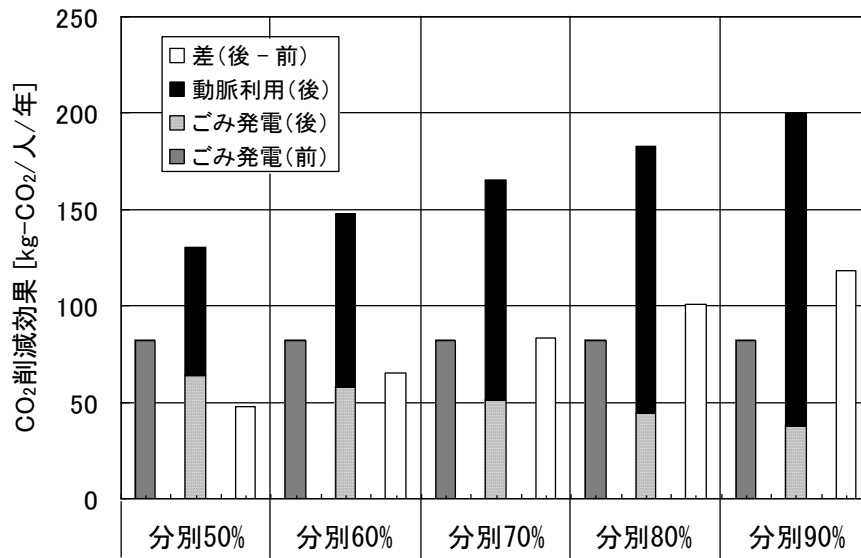


図 2-4 スマート資源循環導入前後の CO₂ 排出削減効果とその差分値

総ての一般廃棄物焼却施設における平均的な発電効率を 10%と設定することは、現状では過大評価である一方、将来においては発電設備の導入割合が増加し、各発電設備の発電効率も向上する可能性がある。そこで、分別率と同時に、焼却発電の平均的な発電効率を変化させて、導入による CO₂ 削減効果の増分を求めた結果を図 2-5 に示す。図に示した範囲では、スマートリサイクルの CO₂ 削減効果が顕著には低下しないことが分かる。

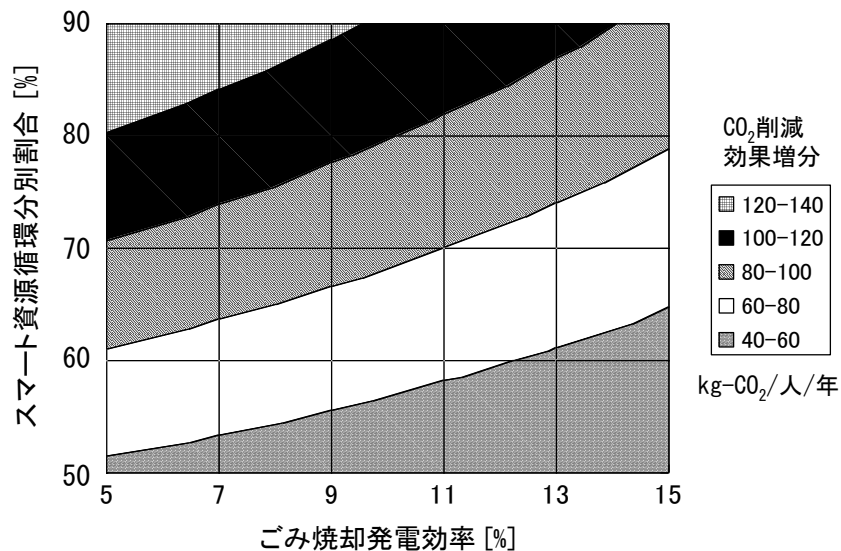


図 2-5 スマート資源循環導入による CO₂ 削減効果増加量の変化

次に、スマート資源循環の導入に伴って増減する費用の概算値を表 2-3 に示す。スマート資源循環の拠点施設は、一般廃棄物の焼却量を減らし、代わりに動脈産業で活用するための最小限の接続システムとして想定したものであるが、削減される焼却費用と、拠点施設における処理費用は同程度であると推定された。スマート資源循環の導入によって、分別収集や拠点から動脈産業施設への輸送に追加的費用が発生するが、石炭の代替による費用削減効果もあり、スマート資源循環の導入は、焼却炉の統廃合と組み合わせれば、大きな追加費用負担を要さない可能性が示唆された。

表 2-3 スマートリサイクル導入による対象循環資源 1kg 当たりの費用変化

| 項目 | 概算費用 円/kg | 根拠 |
|---------------------------|--------------|---|
| 収集・運搬費用増分 | 10 | 文献25, 人口密度約1000人/km ² 以上の値 |
| 動脈産業への輸送 | 6 | 0.12円/kg/km × 50km 輸送費用単価は、陸運統計要覧(H18)5トン, 20km, 300km輸送時の費用単価の内挿値 |
| 地域拠点の建設・運転 | 15 | 産廃の固形燃料化の処理単価(ヒアリング値) |
| 焼却ごみの減少 (焼却工場の統廃合) | -22 | 文献27より算出, 施設規模150t/日 |
| 固形原・燃料販売価格 (石炭購入費用削減分) | -10 | 貿易統計 |
| 合計 | -1 | |

2.4.2 スマート資源循環の変動に対する頑強性

将来において、供給側の循環資源発生量が減少した場合の、スマート資源循環の頑強性について考察する。需要側である動脈産業側の、循環資源の供給量変動に対する安定性は既に述べた通りである。従ってここでは、供給と需要を接続する地域拠点の頑強性について検討する。表 2-3 に示したように、地域拠点に要する費用が全体に占める割合はある程度大きく、地域拠点の費用構造が処理量の減少に対して硬直的であると、将来においてリサイクル単価が大きく膨らむ可能性も考えられる。3章に示すように、拠点施設では人件費の全体費用に占める割合が高い。選別という点で共通性のある、市町村のプラスチック製容器包装の選別保管施設でも、6割程度が人件費となっている²⁹⁾。このため、長期的には作業員数を調整できるとすれば、費用のうちの多くは処理量に合わせて低減させられることを示唆する。また、拠点施設でのプロセスはベルトコンベアー方式であるため、運転の停止、再開が容易であり、処理量に合わせて運転時間や処理速度を変えることも可能である。高い発電効率を得るためには、連続運転を行う全連式でなくてはならない焼却施設³⁰⁾と比較すると、ごみ量の変動に対する追随性は高いと考えられる。高効率発電のために、大量のごみを供給し続けなければならないとすれば、2R の推進とは相反するリサイクルシステムともなり得る。ただし、スマート資源循環導入後もなお大部分のごみが焼却される必要が

あり、また、スマート資源循環における循環資源の利用効率を高めるためにも、リサイクルに向かない汚れたプラスチックや雑紙は焼却処理されるべきであることから、ごみ焼却発電の効率も同時に向上される必要がある。それぞれの長所を活かし、短所を補う形で、両者が効率よく組み合わせられたシステムを構築することが望ましい。

2.4.3 スマート資源循環実現の可能性と課題

スマート資源循環は容リ法を大きく拡大したようなシステムであり、導入には法改正を視野に入れる必要がある。また、拠点施設を効率的な規模で設置することと、焼却施設の統廃合を実施するには、複数の市町村が境界を越えて連携する必要もある。また既存の、あるいは導入後の、市民、自治体、容器包装の製造・利用事業者、リサイクル事業者、動脈産業等の各主体の費用負担や利益分配の公平性も重要であり、導入には検討すべき課題が多い。一方、スマート資源循環は、既に一部で実績のあるリサイクル手法を組み合わせたものであり、技術的にはその実現の可能性は高いと考えられる。社会全体としては長期的にも高い費用負担を伴うことなく、大きな CO₂ 削減と化石資源の消費削減効果が得られる可能性も示唆された。

2.5 資源の有効利用度を測る LCA

スマート資源循環は、従来の資源循環に関する LCA よりも、時間的により俯瞰的な観点から費用対効果の高い資源循環システムを検討したものである。ここでは、空間的な観点で、資源循環効果のより適切な評価方法として、“資源の LCA”と呼ぶ評価方法について検討した結果を示す。従来の LCA（ライフサイクルアセスメント）では、循環資源や再生可能資源の利用方法として、部分最適な評価となる問題点があったが、資源の利用効率に着目した評価によって、全体最適に繋がる可能性の高い評価が行えると考えられる。図 2-6 に示すように、効果を比較する、異なるリサイクル・処理方法をとるシステム間で、機能単位を揃えると同時に、システム境界を拡大して、投入する資源量も一致させる。資源量はシステム間で完全には一致しないが、この差異を各システムとも共通の方法、即ちガス火力発電などの一般的な有機資源の利用方法によって埋めることで、システム間の資源の有効利用度を、共通の尺度（例えばガス火力発電）で測ることが可能となる。このとき共通のものさしとして利用するのは、化石資源の利用方法で大部分を占めるエネルギー用途を想定するのが合理的であり、更にエネルギー使用量の変化に応じて、その稼働量が変化する利用方法を選定することが望ましい。

日本容器包装リサイクル協会の実施した、プラスチック容器包装再商品化手法に関する環境負荷等の検討（2007）の報告書⁵⁾に記載されている事例（プラスチック製容器包装の高炉還元剤微粉炭代替、ガス化アンモニア原料用合成ガス代替、マテリアルリサイクルコンクリート型枠代替）を対象に、資源の LCA を適用した。

資源の LCA と従来型 LCA による評価結果を比較したものを図 2-7 に示す。社会全体にもたらされる CO₂ 削減効果は、従来の評価とは大きく異なる可能性のあることが、図から見

て取れる。従来の評価では、例えば発熱量当たりの CO₂ 排出係数の高い、石炭を代替するリサイクルは、CO₂ 削減効果の高いリサイクルであると評価されてきた。一方、廃プラスチックをガス化して、天然ガスを代替するリサイクルでは、天然ガスの炭素含有率が低いため、これを代替しても直接的な削減効果が低く評価されてきた。しかし、リサイクルによって節約された天然ガスがどのように社会で使用されるかを考慮した場合には、天然ガスは石炭よりも高い効率の発電に用いることが可能（石炭ボイラーの発電効率は 40%程度であるが、天然ガスの複合発電の効率は 50%超）であり、かつ燃焼時の CO₂ 排出も小さい。資源の利用効率を見ると、このケースでは総合的には、天然ガスを代替するリサイクルの方が、社会全体の CO₂ 削減に繋がる可能性が生じることになる。このように、資源の有効利用度を測る LCA を活用することにより、資源をより効率よく利用できるシステムの提案に繋がる可能性がある。

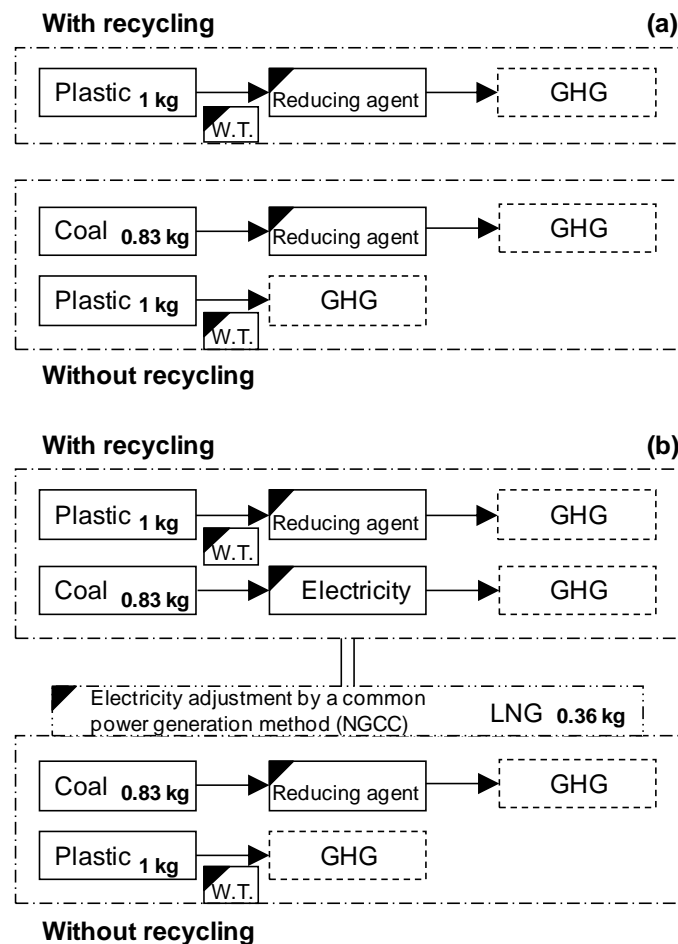


図 2-6 従来 LCA(a)と資源の LCA(b)のシステム境界（高炉還元剤の事例）

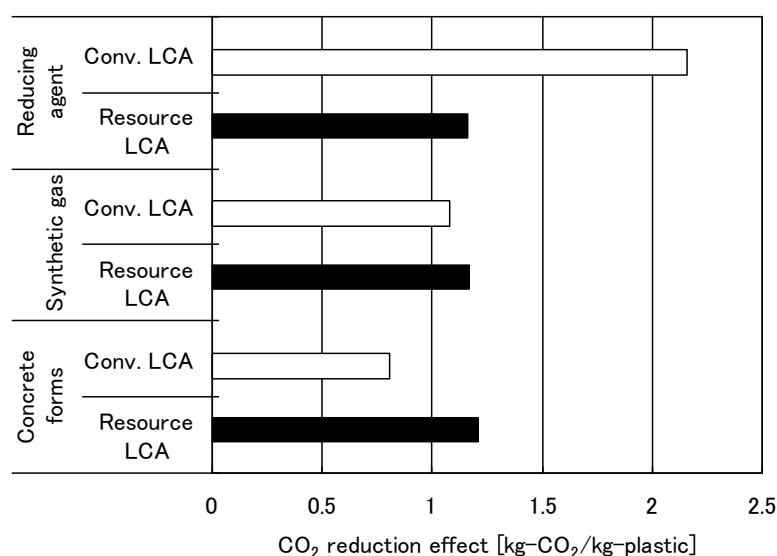


図 2-7 従来 LCA と資源の LCA の CO₂削減効果の評価結果の比較

参考文献

- 1) 環境省：中央環境審議会廃棄物・リサイクル部会（第 28 回），資料 4 ， 2005.
- 2) 李松林, 安田八十五：自治体における容器包装リサイクル費用の測定と評価，廃棄物学会論文誌，Vol.19, No.1, pp.26-34, 2008.
- 3) Sekine, Y., Fukuda, K., Kato, K., Adachi, Y. and Matsuno, Y. : CO2 reduction potentials by utilizing waste plastics in steel works, Int. J. LCA Vol.14, pp.122-136, 2009.
- 4) 稲葉陸太, 橋本征二, 森口祐一：鉄鋼産業におけるプラスチック製容器包装リサイクルの LCA：システム境界の影響，廃棄物学会論文誌，Vol. 16, No. 6, pp.467-480, 2005.
- 5) 財団法人日本容器包装リサイクル協会：プラスチック容器包装再商品化手法に関する環境負荷等の検討，2007.
- 6) プラスチック処理促進協会：プラスチック製容器包装の処理に関するエコ効率分析 2006 年度，2006.
- 7) Nakano, K., Aoki, R., Yagita, H. and Narita, N. : Evaluating the Reduction in Green House Gas Emissions Achieved by the Implementation of the Household Appliance Recycling in Japan, Int J LCA, Vol.12, No.5, pp.289 – 298, 2007.
- 8) Dodbiba, G., Takahashi, K., Sadaki, J. and Fujita, T. : The recycling of plastic wastes from discarded TV sets: comparing energy recovery with mechanical recycling in the context of life cycle assessment, J. Cleaner Production, Vol.16, pp. 458-470, 2008.
- 9) Morris, J. : Comparative LCAs for Curbside Recycling Versus Either Landfilling or Incineration with Energy Recovery, Int. J. LCA, Vol.10, No.4, pp.273–284, 2005.
- 10) 佐野奨, 加藤晃, 飯野智之, 柏崎伸夫, 松藤敏彦, 田中信壽：都市ごみのセメント原料・

- 燃料化による二酸化炭素排出量への影響, 廃棄物学会論文誌, Vol.16, No.5, pp. 333-341, 2005.
- 11) 山成素子, 島田荘平: LCA による RDF 発電事業の有効性に関する評価, 廃棄物学会論文誌, Vol.18, No.1, pp.37-48, 2007.
 - 12) 手島肇, 増田孝弘, 藤田泰行, 武田信生, 高岡昌輝: 都市ごみの組成変化に応じた中間処理・再資源化システムの検討, 廃棄物学会論文誌, Vol.17, No.6, pp.372-386, 2006.
 - 13) 楊翠芬, 志水章夫, 菱沼竜男, 玄地裕: ライフサイクルでの環境面と経済性を考慮した生ゴミ再資源化技術評価, 日本 LCA 学会誌, Vol.2, No.4, pp.370-378, 2006.
 - 14) Dahlbo, H., Ollikainen, M., Peltola, S., Myllymaa, T. and Melanen, M. : Combining ecological and economic as-sessment of options for newspaper waste management, Re-sources Conservation & Recycling, Vol.51, pp.42-63, 2007.
 - 15) Chartow, M.R., Lombardi, D.R. : Quantifying economic and environmental benefits of co-located firms, Environ-mental Science & Technology, Vol.39, No.17, 6535-6541, 2005.
 - 16) Lowe, E. A. : Eco-industrial park handbook for Asian de-veloping countries, A Report to Asian Development Bank, Environment Department, Indigo Development, Oakland, Ca, 2001.
 - 17) 石油連盟: 石油製品の LCI データの概要, 2003.
 - 18) 環境省大臣官房廃棄物・リサイクル対策部廃棄物対策課: 日本の廃棄物処理平成 20 年度版, 2010.
 - 19) 経済産業省: 産業構造審議会環境部会廃棄物・リサイクル小委員会第 25 回容器包装リサイクルワーキンググループ資料 5, 2005.
 - 20) セメント新聞社編集部編: セメント年鑑第 60 巻, セメント新聞社, 2008.
 - 21) 環境影響評価情報支援ネットワーク: 磯子火力発電所新 1・2 号機環境影響調査書, 1995.
 - 22) 日本容器包装リサイクル協会ホームページ, <http://www.jcpra.or.jp/>, 2011.
 - 23) 低炭素電力供給システムに関する研究会: 低炭素電力供給システムの構築に向けて, 低炭素電力供給システムに関する研究会報告書, 2009.
 - 24) 全国都市清掃会議: ごみ処理施設整備の計画・設計要領 2006 改訂版, 2006.
 - 25) 藤井実, 村上進亮, 南齋規介, 橋本征二, 森口祐一, 越川敏忠, 齋藤 聡: 家庭系容器包装プラスチックごみの収集と運搬に関する評価モデル, 廃棄物学会論文誌, Vol.17, No.5, pp.331-341, 2006.
 - 26) 藤井実, 橋本征二, 南齋規介, 村上進亮, 稲葉陸太, 森口祐一: リサイクルの LCI 分析結果の表記法, 土木学会論文集, Vol.63, No.2, pp.128-137, 2007.
 - 27) 松藤敏彦: 都市ごみ処理システムの分析・計画・評価, 付属 CD「マテリアルフロー・LCA 評価プログラム」, 技報堂出版, 2005.
 - 28) 社団法人産業環境管理協会: 製品等ライフサイクル環境影響評価技術開発成果報告書, 2003.
 - 29) 環境省: 平成 15 年度容器包装廃棄物の使用・排出実態調査及び効果検証に関する事業報告書, 効果検証に関する評価事業編, 2004.

- 30) 東レ経営研究所：高効率廃棄物発電技術開発周辺動向調査，2002.本間仁，安芸皓一：物部水理学，pp.430-463，岩波書店，1962.