

循環型社会に求められる 廃棄物の再生資源化技術

環境への影響など多くの関心を集める廃棄物問題だが、廃棄物は日常生活にともない大量に発生し、建築・建造物に代表される膨大なストック物も最終的には廃棄物となることから現代の物質文明の一つの象徴といえる。1990年代後半に社会問題化した焼却によるダイオキシン類の生成と排出は、焼却処理要素技術の改善に直接的な影響を与えたほか、循環型社会の形成を進める一つの契機ともなった。循環型社会において、廃棄物の効率的な排除と処理・処分は安全で快適な社会の必須の都市サービスであり、第3期科学技術基本計画の重要な政策課題の一つとしても、環境と調和する循環型社会の実現が挙げられている。

近年のキーワードである3R (Reduce, Reuse, Recycle) を推進すると予想される技術は、温暖化防止を背景に、多様なエネルギー供給パスの確保を組み込んだ持続型社会の形成を実現させる技術である。原油の価格高騰や枯渇の懸念から化石資源への依存度を低減することの必要性が一層認識されるようになり、従来は効率の面から必ずしも注目されなかったバイオマス素材としても活用する、バイオマスエネルギーへの注目が高まっている。地球温暖化対策がすべての分野で急がれる今、バイオマスなどの利活用を推進し、二酸化炭素 (CO₂) の排出削減を進めることが急務である。バイオマスの多くは廃棄物系バイオマスであり、廃棄物処理に係わる側からの取り組みが求められる。さらに、資源の循環利用による天然資源の消費抑制にも大きな役割を果たす。すでに一部実用化している循環型社会に求められる廃棄物処理技術として、資源化を考慮した場合、循環利用率が比較的低い生ごみや食品廃棄物が一つの焦点となる。そこで注目されるメタン発酵では、ガスが回収された後に液状、固形状の残渣が生じるため処理・処分を環境上適正に行う技術的工夫が要求される。これについての改善があって初めて、環境配慮型の再生資源化技術になると言えよう。ガス化は熱分解によっても生じ、エネルギー利用などへの適用が可能な水素などの可燃性ガスを取り出すガス化改質技術プロセスが一部実用化まで至っているほか、高度化を目指す研究開発が進められている。さらに、超臨界・亜臨界技術を応用した、有機性の有価物回収やプロセスの高速化などに向けた検討も行われている。

廃棄物の再生資源化において再生のための技術とともに重要なことは、再生物が有効に利用されることである。すなわち利用先が確保されることによって初めて資源循環のサイクルが形成される。廃棄物は原料組成において均一でない。前処理工程を必要とし、処理後になお発生する残渣の処理・処分を含めた総合技術としなければ、環境技術として完結しない。よって、技術開発および政策に向けて以下の提言をする。

① 安全を含めた総合的な観点でシステム設計を行うべきであり、前処理や残渣処理などおよび安全への配慮を高めた総合システムであるべきことを認識する必要がある。② 処理とリサイクルの効率を考慮すべきであり、再生資源化に要するエネルギーとコストを見積もり適切な評価を行うよう誘導していくことが必要である。③ 再生物の利用拡大を図るべきであり、科学的に適正な安全性評価にたち、また利用面での制約をできる限り取り除いて再生・資源化物の用途を拡大するべきである。

循環型社会に求められる 廃棄物の再生資源化技術

川本 克也
客員研究官

1 はじめに

第3期科学技術基本計画の重要な政策課題の一つに、環境と調和する循環型社会の実現が挙げられている。近年多くの関心を集める廃棄物問題もまた、循環型社会と密接不可分の関係にある。

廃棄物は、さまざまな社会の活動および人の日常生活における物の流れにともなって大量に発生する。その効率的な排除と処理・処分は近代における必須の都市サービスであり、時代の変遷とともに主たる目的を公衆衛生の確保、環境の保全、循環型社会の形成というように変えてきた。また、我が国の年間物質収支(2004年度)からは、19億トン強にのぼる物質投入のうち約半分の量が建物やインフラ施設として蓄積すると推定

されている¹⁾。このようなストックの典型である建築・都市構造物なども、いずれは廃棄物化する。

3R (Reduce, Reuse, Recycle) という概念で第一優先となる廃棄物の発生抑制は、ものの流れの言わば上流側での対応であり、廃棄物対策の基本である。一方で、生活や生産活動から日々排出される廃棄物の処理を進めることと同時に、物質やエネルギーの再生を図り、これらを両立させる下流側での対応も循環型社会の形成において重要である。発生抑制とともに再利用・再生利用を並行させた取り組みが現実的と思われる。

また、地球温暖化対策がすべての分野で急がれる今、バイオマスなどの利活用を推進し、二酸化炭

素(CO₂)の排出削減を進めることが急務である。我が国の場合、バイオマスの多くは廃棄物系バイオマスであり、廃棄物処理に係わる側からの取り組みが求められる。さらに、資源の循環利用による天然資源の消費抑制も大きな役割を果たす。

このような状況を踏まえて、本稿では、循環型社会の形成・実現という命題を与えられたときに廃棄物処理にどのような展開の方向性があり、実際にどのような事例が現れているのかをみることによって、近未来の廃棄物再生資源化技術を考えるとともにそれともなう課題を述べる。

2 廃棄物とその処理技術の変遷

2 - 1

量と質の変化

(1) 廃棄物とは

廃棄物とは不要物または汚物と定義されるが、具体的には工業製品や農産物などの「もの」であり、物質である。廃棄物の質と量はその時々々の経済の状況、人々のライフスタイルあるいは新たな製品の導入などに応じて変化する。諸要因が総合化された結果とし

て、一般廃棄物および産業廃棄物の排出量がどのように変化したのかを図表1に示す。一般廃棄物量は1995年以降あまり変化がないが、1975年と比較すると20%程度増加している。1人1日あたりの排出量(原単位)については、1985年以前が1,000 g/人・日前後、その後増加し1990年以降は1,100 g/人・日前後で推移したが、2001年からは減少している(1985~2000年は、人口増以上に排出量が増加したことによる)。

なお、ここで言う原単位は事業系一般廃棄物を含む量であり、純粋に家庭から出されている原単位はおおむね700~800 g/人・日程度である。一方、産業廃棄物についても、同様に1985年から1990年にかけて大きく増加した後は、大きな変化はない。現在、排出量年間4億トンのうちの約半分が循環利用されている。

また、質的な特性を表わす指標の一つとして、ごみ(一般廃棄物)の発熱量の推移を図表2に示す。

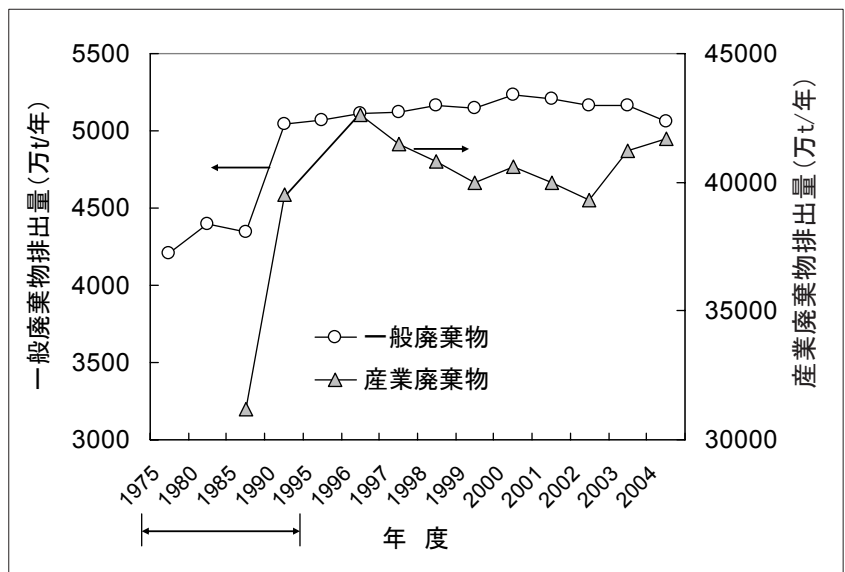
ごみの発熱量は、自治体により値の違いはあるものの一貫して増加している。これは、紙類の使用量、包装材などとしてのプラスチック材料の使用量の増加に起因すると思われる。

(2) バイオマス

バイオマスは①廃棄物系バイオマス、②未利用バイオマスおよび③資源作物の3つに区分される。それらの賦存量と利用率(炭素量換算)は、廃棄物系バイオマスが2億9,800万トンで利用率72%、未利用バイオマスが1,740万トンで利用率22%という現状にあり、現在は資源作物はほとんどない³⁾。

図表3に、各種バイオマスの賦存量と利用率の概略値を示す。廃棄物系バイオマスは、品目によって産業廃棄物であるもの、または一般廃棄物と産業廃棄物の両者を含むものがある。このうち、未利用の割合の比較的高い食品廃棄物、廃棄紙、建設発生木材、加えて、未利用分は若干であるが製材工場等残材が、循環利用を推進する上での直接の対象になり得る。水分が多く、また発生場所が地域的に偏りやすい家畜排せつ物、同じく水分の多い下水汚泥(2,250万トンが未利用量)を除くと、上記4項目の未利用バイオマス量は3,240万トン余りである。しかし、現在利用用途のある廃棄物系バイオマスであっても、必ずしも有効または有用な用途が開かれていない。廃棄物系バイオマス量の年間の賦存量は湿潤重量で約3億2,700万トン、乾燥重量で約7,600万トンと見込まれている。エネルギー換算では約1,270PJ(ペタジュール)に相当し⁴⁾、これは原油換算で約3,280万キロリットルとなり、また、我が国全体の一次エネルギー供給量22,751PJ(2005年度)の約5.6%に相当する量である。

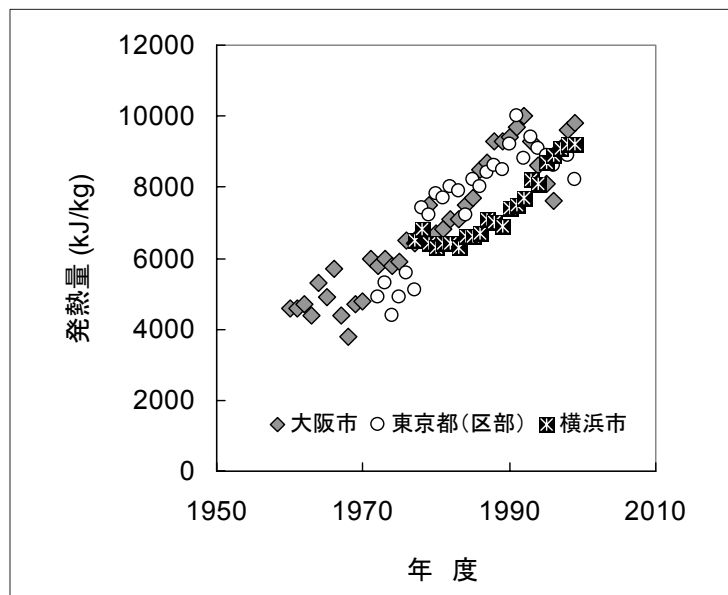
図表1 一般廃棄物および産業廃棄物量の経年変化



(1975~1995年度の間は5年おきのデータ。)

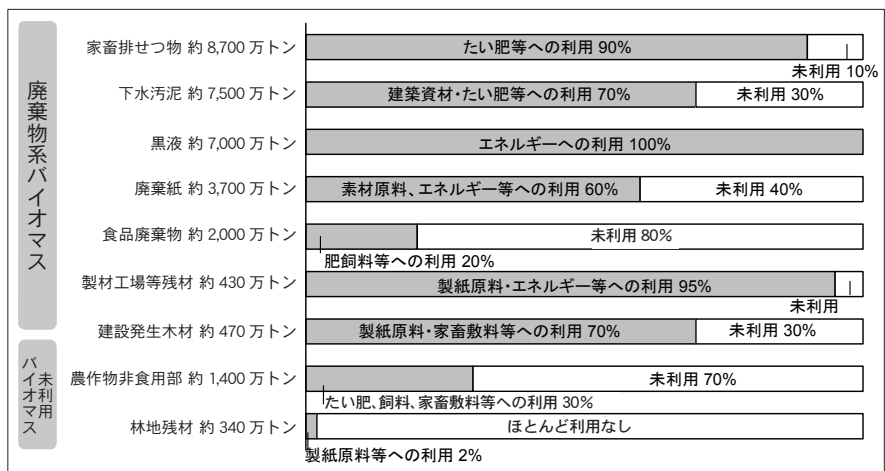
出典：参考文献¹⁾を基に科学技術動向研究センターにて作成

図表2 ごみの発熱量(低位発熱量)の経年変化



出典：参考文献²⁾を基に科学技術動向研究センターにて作成

図表3 我が国のバイオマス賦存量と利用の内訳



出典：参考文献³⁾

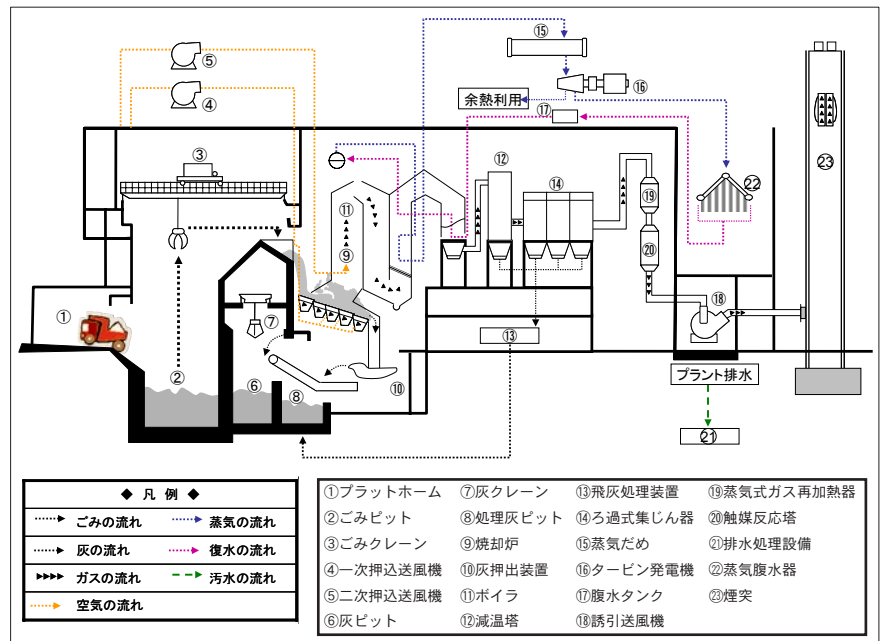
廃棄物処理技術の変遷

(1) 焼却処理技術の変遷

焼却処理の直接的な目的は、廃棄物を高温で燃焼処理することによって腐敗防止と安定化をはかり、合わせて減量と減容を進めることである。しかし、歴史的にみて広く焼却処理に求められる機能と役割として、衛生上適切な処理から始まり、減量・減容とともに、環境負荷の低減、さらに資源化など、時代の要請に応じて変化をしてきた。近年、特に大きな転換をもたらしたのがダイオキシン類の問題であった。循環型社会への動向と相まって、ガス化溶融炉などの新しい方式が導入され、また資源化への期待が一層高まることとなった。ごみ焼却施設数も次第に減少し、2005年度末現在で1,320であり、1998年度比で25%減少している。この数は、海外諸国と比較すると非常に多い。我が国では、図表4に例示するような規模の大きい全連続式施設数が約40%を占め、処理能力では80%強を占めている。このような大規模施設では、焼却炉以外の排ガス・排水処理設備、残渣(灰)の取り扱い設備、発電のための設備など多様な設備が設けられ、それらの方がより設備点数として多い。技術的には温度(Temperature)、滞留時間(Time)、十分な混合攪拌性(Turbulence)という3Tの徹底が、二次燃焼空気の注入方法の改良、人工知能の活用による高度な制御などのさまざまな技術的工夫によって進められている。

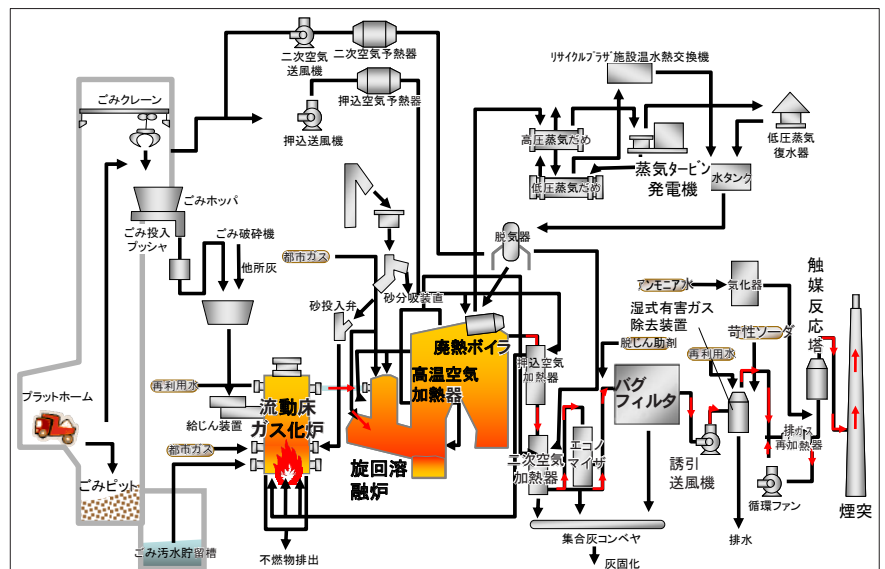
廃棄物を処理する目的では焼却の効果は大きい。しかし、焼却物量の10%程度発生する焼却灰、および3%程度発生する飛灰の処理が必要になる。これらを埋め立て処分する場合、処分場の確保、飛灰中有害物質溶出対策としての

図表4 典型的な全連続式ストーカ炉型焼却施設の構成例



出典：参考文献⁵⁾

図表5 典型的なガス化溶融施設（流動床ガス化方式の場合）の構成例



出典：参考文献⁵⁾

薬品処理が課題となり、また金属類の回収利用の向上、発電効率の向上(現在は総じて低い)などの課題も多い。

(2) ダイオキシン問題の影響

ダイオキシン類とは、ポリ塩化ジベンゾ-パラ-ジオキシンのうち4~8塩化物(PCDD)、ポリ塩化ジベンゾフランのうち4~8塩化物(PCDF)、およびポリ塩化ビフェニル(PCB)のうちPCDD、PCDFに類似の性状を有するダイオキシン様PCBである。これらは、次のような特徴をもつ環境

汚染物質である。一般に長期残留性、高蓄積性、種々の毒性という性状をもち、非常に低濃度で多様な環境影響を及ぼすが確実な予測が難しい。かつての農業使用にともなう排出も含め日常的な廃棄物処理過程から非意図的にダイオキシン類は排出され、環境への進入パターンが従来の産業公害とは異なっていた。1990年代中頃から非常に大きな問題となり、その後、燃焼性の向上や発電の高効率化などの技術の向上、集じん設備をバグフィルターに変更するなどの排ガス処理技術の向上などが焼却処

理要素技術として直接的な改善効果をもたらした。その他、いくつかの市町村にわたって広域的に一般廃棄物の収集・処理を行うことでダイオキシン類の削減や資源化を進めようとする広域処理、さらには焼却への安易な依存を見直して循環型社会の形成を進めることの契機にもなったと考えられる。次に、大きな影響となったガス化溶融処理について述べる。

(3) 溶融処理およびガス化溶融炉

ダイオキシン問題を契機にガス化溶融炉(図表5)の開発と導入が進んだ。これには、次のような特徴がある。

- ① 溶融工程において1,300～1,400℃での高温燃焼により、ダイオキシン類を低減でき、排出量を極小にできる。
- ② ガス化工程が還元雰囲気であることから、ごみ中に含まれる金属分の回収と有効利用が可能となる。
- ③ 空気比(燃焼に理論上必要な空気量に対する実際の空気量の比)が低くなり、排ガス量が削減されることから、排ガス処理設備などの付帯設備を小型化できるとともに発電効率が向上する。
- ④ ごみのもつ熱量が十分にあれば、この熱量によって溶融が行え、外部からの追加エネルギーの投入は不要である。また、建設と維持管理の経費が、一般的なストーカ炉と灰溶融炉の組み合わせに比較すると安価になる。

なお、ガス化溶融における溶融という工程は高温の完全燃焼を起こさせるものである。さらに一歩進めて、同様に高温で、雰囲気制御などによりガスの組成を改質して、一酸化炭素や水素のようなエネルギー源や化学合成原料として利用価値のあるガスを取り出す

のがガス化改質である。このガス化改質は、ごみ焼却施設への適用例が若干みられる段階である。

2 - 3

循環型社会への移行と技術の流れ

(1) 循環型社会の形成

従来の廃棄物処理は、環境に影響のないように行うが、一方向型の処理・処分にとどまるというものであった。しかし、近年、地球温暖化対策としてのCO₂の排出削減および物質とエネルギーの再生利用が重要課題であるとの社会共通の認識が進み、この考え方が従来の考え方を変革してきた。このため、2-2で述べたように焼却処理自体がエネルギーや資源の再生・回収を積極的に進めるように改善が図られてきた。

一方、廃棄物中に含まれる有害物質への対策においても、2004年5月に発効した残留性有機汚染物質に関するストックホルム条約(POP_s条約)に基づく対策など、地球規模に及ぶ化学物質の広がりとそのリスクの低減という視点から技術的な進展が図られてきた。PCB廃棄物の処理がその典型である。電池や蛍光管などに含まれる水銀、建材をはじめ多くの製品に含まれるアスベスト、あるいは感染性廃棄物などの対象についても、処理・処分技術の開発と導入が進められてきた。

3Rに寄与するという観点からは、原材料などの使用率の向上や製品の長寿命化などを内容とするリデュース(reduce)、複写機の部品などにみられるリユース(reuse)を指向する技術がある。さらに、リサイクル(recycle)時の解体のしやすさや再資源化の可能性を向上させるように配慮した設計手法の開発などがある。

再資源化、すなわち再生利用技術としては、容器包装廃棄物に分

類される廃ペットボトルや廃プラスチックを対象としてさまざまな技術が開発されている。廃プラスチックを再度成形品に加工利用する材料リサイクル、廃ペットボトルを再びペットボトル原料として用いる「ボトル to ボトルリサイクル」、高炉での還元剤として廃プラスチックを用いる利用方法、コークス炉で廃プラスチックを熱分解して油やコークス炉ガスを工業原料とする利用方法などが開発されてきた¹⁾。これらに関連する技術は3章で詳細に述べる。しかし、近年、ペットボトルに代表されるように、廃棄物が中国などへ輸出される量が増加している。このような状況は、国内での優れた再生資源化技術を活かせなくするだけでなく、資源循環全体をゆがめる懸念がある。

循環型社会システムの構築を目指した全体的な指標として、資源生産性(=GDP/天然資源等投入量)、循環利用率(=循環利用量/(循環利用量+天然資源等投入量))および最終処分量の3つが挙げられる。2010年度までに、各々を約39万円/トンに増加、約14%に向上、約2800万トンに減少させることが目標とされている¹⁾。循環型社会形成のための廃棄物再生資源化技術に求められる条件として、① 廃棄物の適正な処理を確実に果たせること(処理の有効性と実用性)、② 再生資源化物としてのエネルギー源もしくは素材を効率よく生産できること(再生過程の有効性と実用性)、③ 再生に必要なエネルギーまたはコストが適正であること(経済性)、④ 環境負荷を極力低くできること(低環境負荷)、⑤ 再生資源化物が有効に利用されること(再生物の有効性)、を挙げることができる。具体的な指標化は慎重に行われるべきであるが、今後は、わかりやすい技術の評価が求められると考えられる。

(2) バイオマスの利活用技術

我が国では、2002年12月に「バイオマス・ニッポン総合戦略」が閣議決定された。また国際的には、京都議定書が発効し、実効性のある地球温暖化対策の実施が喫緊の課題となり、さらに原油価格の高騰などを背景に化石資源への依存度を低減することの必要性が一層認識されるようになり、バイオマスエネルギーへの注目も高まる状況にある。2006年3月には「バイオマス・ニッポン総合戦略」が改定された⁶⁾。

改定された同「戦略」の中で、「バイオマス・ニッポン」実現の具体的な目標が技術的、地域的、全国

的観点から整理されており、技術的観点からは、含水率の低いバイオマスをエネルギーへ変換する技術としては直接燃焼とガス化プラントなど、含水率の高いバイオマスをエネルギーへ変換する技術としてはメタン発酵など、バイオマスを製品に変換する技術としてはバイオマス由来のプラスチック化について、それぞれ変換効率または原料価格に関する目標が掲げられている。

これを受け、環境省ではバイオエタノールに関連する技術、バイオディーゼルに関連する技術が重点的な技術開発の対象とされている。また、経済産業省による技術

戦略マップ2007の中に3R分野のロードマップがあり、金属資源3R以外のその他の主要3R技術にバイオマス関連技術が示されている(図表6)。

図表6より、微生物の機能を応用する発酵技術と熱化学的原理に基づく燃料化技術、および既存の発電を一層高効率化することがバイオマス利活用の主要な開発目標であり、バイオマスの再生資源化技術としてはメタン・エタノール発酵技術の向上、水素発酵技術の開発、高効率のガス化と液体燃料化などが重要な課題になると考えられる。以下、これらについて具体的にみていく。

図表6 バイオマスを対象とする経済産業省による個別技術の戦略マップ

| 大分類 | 小分類 | 重要テーマ | 短期 | | | | | 中期 | | 長期 | |
|-------------------------------|-------------------|---------------------------|--------|---------------|-------|-----------------------|-------|---|--------|-----------------------------|-------|
| | | | ~2006年 | 2007年 | 2008年 | 2009年 | 2010年 | 2015年 | 2020年 | 2025年 | 2030年 |
| バイオマス系 (木質系・食品系・畜産系・下水汚泥系) | 発電技術 | 高効率小規模発電 | | 高効率発電 | | | | | | | |
| | | 石炭混焼発電 | ①②③ | 石炭混焼発電 | | | | | | | |
| | 発酵技術 | エタノール発酵(木質系) | ①②③ | | | 高効率エタノール発酵技術 | | | | | |
| | | メタン発酵(食品/畜産/汚泥系) | | | | 高効率メタン発酵技術 | | | | | |
| | | 水素発酵(食品/汚泥系) | ③ | | | | | | 水素発酵技術 | | |
| | | 堆肥化(食品/畜産系) | ② | | | 堆肥化技術(大規模での高品質化) | | | | | |
| | 燃料化技術 | 高効率BDF製造(食品系) | ③ | BDF製造 | | | | | | | |
| | | ガス化技術(木質/汚泥系) | ①②③ | | | ガス化改質+燃料化(GTL 水素製造)技術 | | | | 高効率ガス化改質+燃料化(GTL 水素製造) | |
| | | 物質・エネルギー-併産 コプロダクション技術 | | | | | | CO ₂ フリーな水素とカーボンのコプロダクション 燃料製造とエネルギー(電力、熱)のコプロダクション | | 物質・エネルギー-再生の化学製造プロセス技術(ガス化) | |
| | | 家庭用エネルギー転換(食品系) | | | | | | | | 家庭用エネルギー転換技術(メタン、水素などへの転換) | |
| その他 | リグノフェノール用途開発(木質系) | | | リグノフェノールの用途技術 | | | | | | | |

出典：参考文献⁷⁾

3 循環型社会に求められる廃棄物再生資源化技術

3 - 1

各技術の概要と比較

循環型社会において望まれる要件を備え、将来的に有望と考えられる廃棄物再生資源化技術の概要と比較を図表7に示す。各技術については、次節以後で述べる。

図表7 廃棄物再生資源化技術の比較

| 評価項目 | 生物機能の活用技術 | ガス化技術 | 高温・高压流体技術 |
|--------------|--|---|---|
| 主な対象物 | ・食品を主とする湿潤系バイオマス：年間約2,000万トン | ・木質、紙などを主とする乾燥系バイオマス：年間約1,600万トン（一般廃棄物5,000万トン） | ・食品、動植物残渣などの湿潤系廃棄物。木質への適用も検討。有害廃棄物への適用も可とすることが特徴。 |
| 再生物 | ・メタンを主とするバイオガス ・水素 ・バイオマスプラスチック | ・水素、一酸化炭素 ・メタノール ・液体燃料 | ・メタン発酵原料などの中間物、化学品 |
| 技術原理とシステムの評価 | ・微生物による水素発酵、メタン発酵、エタノール発酵、乳酸発酵 ・バイオガス化と焼却のシステム化 | ・熱分解、ガス改質（高温から低温へ） ・ガスエンジン発電機、燃料電池などのシステム化 ・メタノール製造、液体燃料製造とのシステム化 | ・特殊な流体による反応の高速・高効率 ・メタン発酵、ガス改質などのシステム化 |
| コスト性 | ・従来技術とおおむね同等であるが、回収エネルギーの有効利用ができれば有利 | ・低温化の方が要するエネルギーの低減となり有利 ・熱分解チャーを熱源に利用することで全体コストを低減可能 | ・亜臨海流体の適用が、要する熱と加圧エネルギーの低減となって超臨界より有利 |
| 実用化の展望と課題 | ・一部施設あり。分別が容易でないため、一般廃棄物処理施設への拡大が課題。 ・プラスチック製品価格の低減 | ・高温改質方式は施設があるが、低温方式、液体燃料化とのシステム化が今後の展開。 | ・一部施設あり。材料の高圧、腐食環境への耐性などが課題。 |

科学技術動向研究センターにて作成

生物機能の活用技術

(1) バイオガス化

循環利用率が比較的低い資源として、生ごみ(厨芥)や食品廃棄物が一つの焦点となる。バイオマス系循環資源という観点でみた場合、生ごみ、木くず、汚泥、家畜排泄物などは廃棄物発生量の約半分を占めている。水分および有機物を多く含むため、循環利用率は16%であり、焼却や脱水による減量化率は53%にとどまっている。現状での循環利用例の多くは堆肥や飼料としての農業分野であるが、これが最適な利用手段かどうかについては疑問である。

このような中で、生ごみや紙ごみに対しメタン発酵法によるバイオガス化を行ってメタンガスを回収する方法が検討されている。濃厚な有機性廃液や下水汚泥スラリーなどのメタン発酵は従来から適用されている技術であり、ここには技術的な新規性はない。しかし、水分含有量が相対的に少ない固形状廃棄物への適用においては、今後各種の改良が必要である。

ただし、メタン発酵ではガスが回収された後に、液状および固体状の残渣が生じるため、環境への配慮として、この処理・処分を適正に行うことが望まれる。液状残渣とは、消化液と言われる高濃度の発酵後廃液である。下水汚泥などの減量率は現在40~50%程度が上限であることから、有機成分の分解率ならびにエネルギー効率を向上させる必要がある⁸⁾。一方、固体状残渣については、他の可燃性廃棄物とともに焼却することによって減量化する方法が効率向上の方向性の一つである。図表8は、バイオガス化と焼却を組み合わせた事例において、エネルギー回収効果を解析した例である。この方法によると、バイオガ

スと焼却の熱利用両方による発電が最新の効率のよい設備を用いて行えるため、焼却に発電を組み合わせただけの仕組みより、エネルギーの回収を効果的に行える。民間の廃棄物処理施設ですでに導入例がみられる。ごみの全量を焼却した場合と生ごみの一部を分別してメタン発酵させた場合のエネルギー収支を、ある条件で(バイオガスについては、ガスエンジンによって発電を行うと仮定)計算した例によると、発電量は約16%増加すると見積もられている。

ただし、焼却においては、ダイオキシン類をはじめ大気汚染対策を十分に採るべきであることは言うまでもない。

(2) 水素発酵およびエタノール発酵

図表6の戦略マップでは、中長期的技術として発酵技術の中の水素発酵の発展を予測しているが、これは来るべき水素社会を想定しているためと思われる。

有機化合物が嫌気性条件においてメタン発酵をする過程で、酸発酵の段階において水素が発生する。例えば、グルコースを基質とする場合、 $C_6H_{12}O_6 + 2H_2O \rightarrow 2CH_3COOH + 4H_2 + 2CO_2$

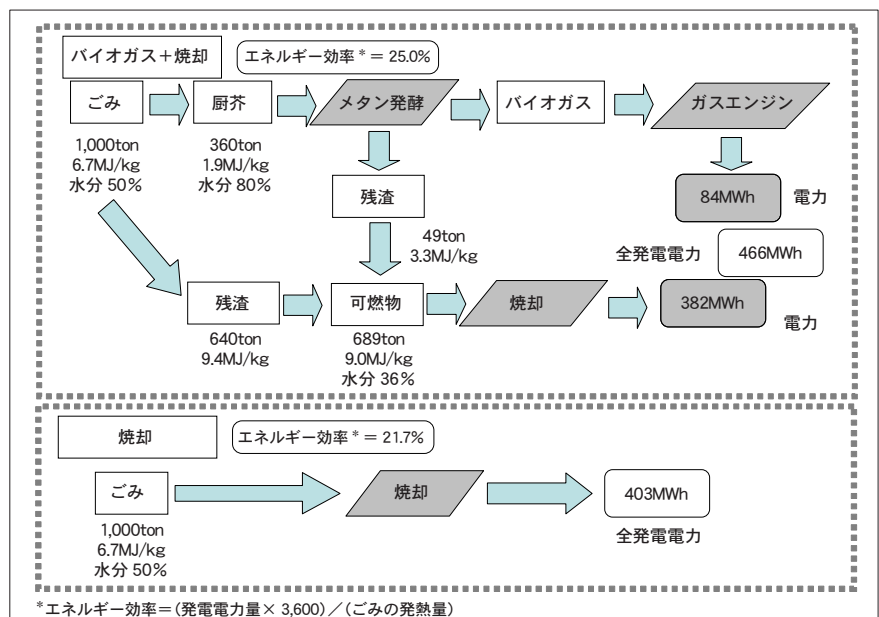
である。嫌気性条件下で水素を生成する細菌は数多く存在し、*Clostridium* 族、*Enterobacter* 族などがその代表である。

しかし、水素発酵は通常遷移的な過程であるために不安定である。安定した回収量を得るためには、培養のための環境条件を最適な範囲に整える必要がある。水素発酵技術の向上および実用化を目指す展開のポイントは以下のいずれかの点であると考えられる。

- ①混合微生物を用い、その環境条件を最適化し、水素回収の長期持続を図ること。
- ②水素発酵能の高い微生物を単離し、その能力を有効利用すること。

したがって、混合微生物から水素生成を効率よく進行させる発酵技術、回収するプロセス、あるいは水素生成能の高い微生物の探索などに関して研究開発が行われている。規模の大きな主な研究プロジェクト例¹⁰⁾として、(独)新エネルギー・産業技術総合開発機構を中核とし、民間企業および(独)産業技術総合研究所で行われた「有機性廃棄物の高効率水素・メタン発酵を中心とした二段発酵技術研究開発」(2001~2005年度)、東北大学を中核として行われた

図表8 メタン発酵プロセスによるエネルギー回収効果の試算例



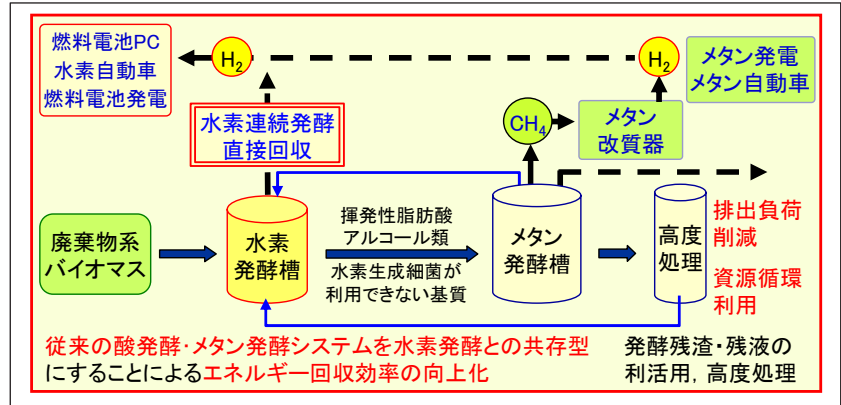
出典：参考文献⁹⁾

「葛巻バイオガス高度利用コジェネレーションシステムの開発」、および(独)国立環境研究所による技術開発事業「バイオ資源・廃棄物等からの水素製造技術開発」(2003～2007年度)などがある。また、その他の研究機関または民間企業による水素生成菌に関する研究例も多い^{11,12)}。図表9(a)(b)に、(独)国立環境研究所の開発した水素・メタン2段階発酵プロセスの開発概念と、(独)新エネルギー・産業技術総合開発機構による実規模の1/10～1/100規模のシステム構成を示す。(独)国立環境研究所の開発では、水素およびメタンガスを回収するとともに、窒素およびリンといった富栄養化塩類の除去も同時に目標としているところに特徴がある。図表10は、食堂からの生ごみを原料とした、約150日間にわたる連続的な水素回収の試験結果である。濃度が約50vol%の水素ガスが継続して得られている。また、メタン発酵後の消化汚泥を水素発酵リアクターに返送することによって、系内のpHをほぼ一定に保つことが重要な条件因子であることも明らかにされた。

一方、バイオマスからのエタノール製造に関しては、いわゆるエコ燃料の導入目標が原油換算50万キロリットル(輸送用燃料全体の約0.6%)と設定されており、バイオエタノール、バイオディーゼル(BDF)、バイオマス液化燃料(BTL)などの技術的検討が活発に行われている。我が国では廃棄物系バイオマスからの製造も目指され、建設廃木材を原料としたエタノール製造プラントが、2007年1月から大阪府内で年産1,400キロリットルの規模で稼働中である。近辺から収集された廃木材は、破碎後加圧下で希硫酸により加水分解される。特に、糖であるセルロースとともにヘミセルロースを発酵基質として利用することが

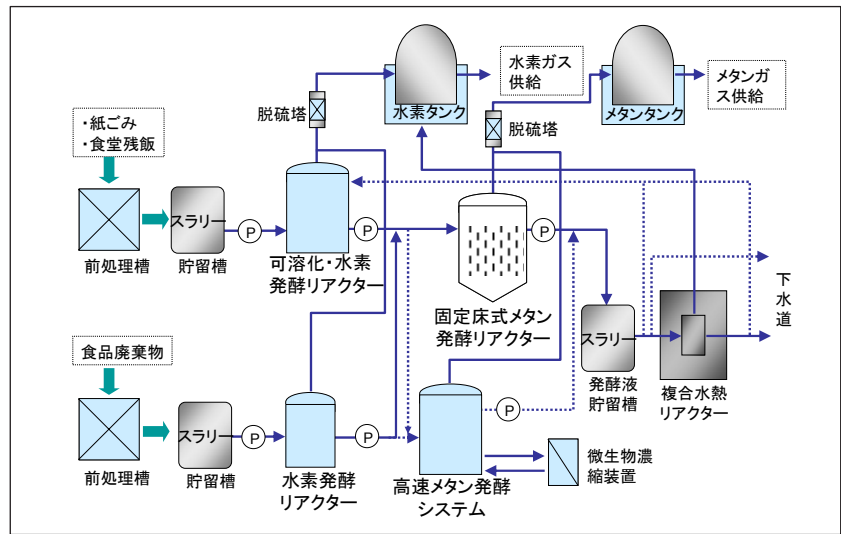
図表9 水素・メタン2段階発酵プロセスの開発概念の例

(a) (独)国立環境研究所による開発概念



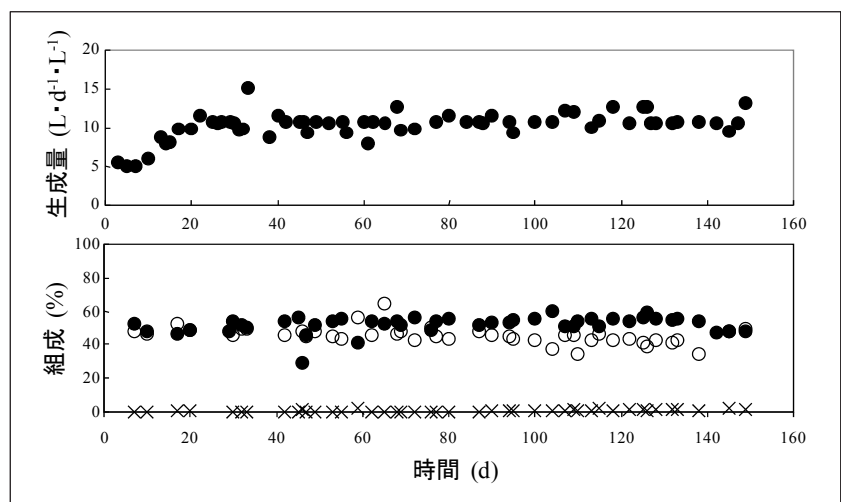
出典：(独)国立環境研究所

(b) (独)新エネルギー・産業技術総合開発機構によるシステム構成



出典：(独)新エネルギー・産業技術総合開発機構

図表10 水素発酵リアクターの長期試験における発生ガス組成と水素生成量(速度)



(● : H₂, ● : CH₄, ○ : CO₂)

出典：参考文献¹³⁾

可能な菌を用いていることが特徴である¹⁴⁾。その他、岡山県内において、未利用の製材廃材などを原料に、特殊な酵母を用いたエタノール発酵と分離膜を用いた生成

エタノールの無水化、さらにエタノールを容積比で3%含む混合燃料であるE3の実証試験が行われている。1日のエタノール製造量は250キログラムである¹⁰⁾。

(3) バイオマスプラスチック

バイオマスプラスチックとして最も期待を寄せられているのが、植物由来の多糖類を発酵させて作られるポリ-L-乳酸(PLLA)である。PLLAは、石油由来のプラスチックに比較すると加水分解などの分解を受けやすいことから、原料であるL-乳酸などに変換することが比較的容易である。したがって、PLLAは単に環境中での生分解が容易なプラスチックであるというだけでなく、再生利用が可能なプラスチック材料とみなすことができ¹⁵⁾、素材リサイクルとしては魅力的な対象と言える。

バイオマスからPLLAを生産するには、乳酸発酵液から高純度の乳酸を得る蒸留法などで精製工程のコストを削減することが重要な課題である¹⁶⁾。安価な石油由来プラスチック製品と競合可能な製品を得るには、低コストの製造プロセスの開発として、上記PLLAからのリサイクルが有用な方法の一つとなる。

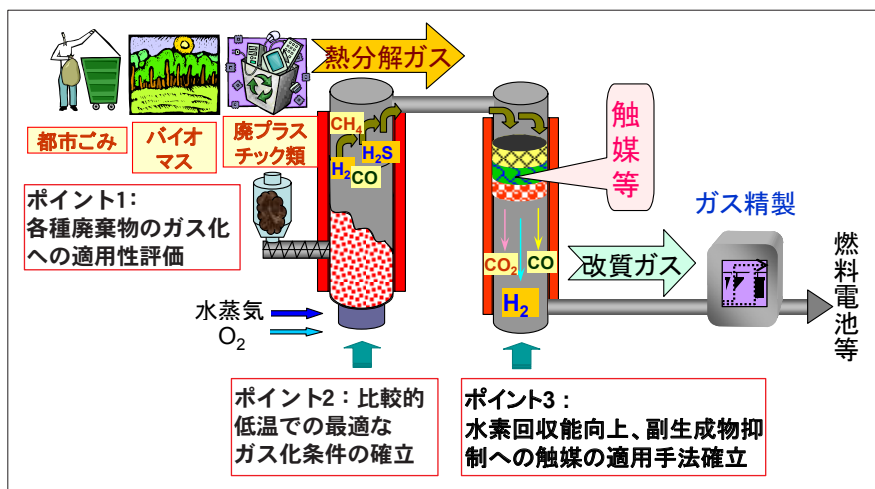
と、二次公害が抑制でき社会システムへの適合性が高いことなどに置かれた。しかし、ガス化技術は、設備費や運転費が非常に高く、酸性のタール状物質の処理ができななど多くの問題が残り¹⁷⁾、プロジェクトとして成功とは言い難い結果であった。

しかし、前述のようにその後のガス化溶解技術の導入が進められる過程で、ガス化技術や高温溶解技術などに関し大きな向上があった。さらに、資源化や水素エネルギーへの期待もあって、ガス化技術が再度注目されるようになった。例えば、ガス化改質方式と呼ばれ、廃プラスチック類を原料に水素を合成するシステム(EUPプロセス)として、アンモニア合成用水素の製造に実用化されている例がある¹⁸⁾。この例では、流動床方式の低温ガス化炉(600～

800℃)と高温(1300～1500℃)の巡回溶解ガス化炉が直結された加圧二段構成となっている。なお、少数ではあるがガス化改質方式の一般廃棄物処理への適用例もみられる¹⁹⁾。

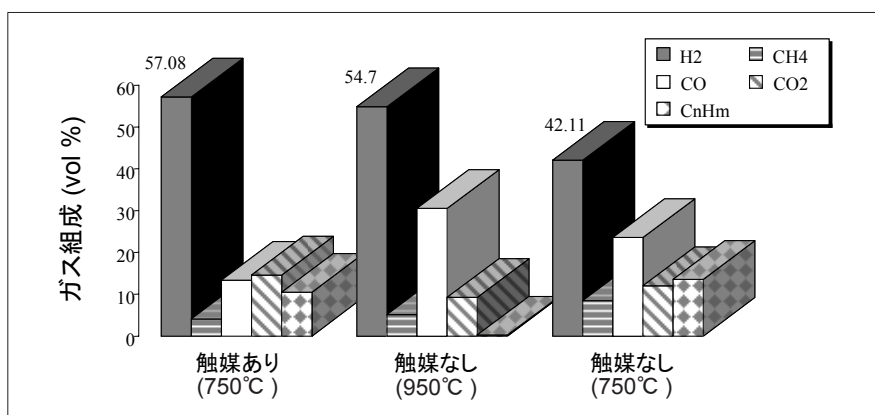
これらの方式は注目されているものの、高温溶解工程を必要とするため、原料のもつ熱量の多寡、コスト性能、プラント操作性などが制約となって、バイオマスや一般廃棄物への適用が広く進んでいるとは言い難い。そこで、バイオマス利活用の推進、水素ガスの供給源を広げるために、改質工程を中心に、従来より低温化しようという技術開発が行われている。図表11に示すよう、低温化による効率低下などの課題を触媒の適用で補うという概念で技術開発が行われている。この開発では、水素を主たる回収物質としたときの温

図表11 ガス化改質システムの開発概念



出典：参考文献¹⁰⁾

図表12 触媒適用の有無による生成ガス組成の違い



(横軸括弧内数字は温度を表わす。CnHm：炭化水素類)

出典：参考文献¹⁰⁾

ガス化技術の向上

廃棄物の有効利用は1970年代にすでに重要視され、当時の通商産業省工業技術院では、1973年度から1982年度までの10年間にわたって、「資源再生利用技術システム」に関する総合研究開発プロジェクト“スターダスト’80”が実施された。同プロジェクトでは、100トン/日の都市ごみ処理能力を持つ実証プラントが横浜市内に建設され、都市ごみを分別し破碎するための前処理、厨芥類の高速堆肥化、紙ごみからのパルプ再生、紙・プラスチックごみを油やガスへ転換する熱分解ガス化など合計6つのサブシステムが含まれていた。目標は、雑多な組成の都市固形廃棄物を物質資源あるいはエネルギー資源に再生するこ

度、水蒸気・酸素注入量、触媒組成と適用量、触媒再生方法およびガス精製効果などを検討し、廃棄物またはバイオマスへの最適な適用性を見出すことが目標である。

例えば、図表 12 は、触媒としてニッケルを有効成分として 20 wt% 含み、さらに酸化カルシウムを十数% 含む場合の適用効果の例である。廃木材を対象に行った実験でこの触媒を用いると、無触媒で 950℃ の場合に得られる水素ガス濃度と同等以上のガスが、750℃ において得られる¹⁰⁾。

同様に、ガス化を要素技術とするバイオマスの利活用技術に関するプロジェクトとしては、2003～2007 年度にわたる文部科学省リーディングプロジェクト「一般・産業廃棄物・バイオマスの複合処理・再資源化プロジェクト」が進行している²⁰⁾。ここではサブテーマの一つとして、廃棄物から高効率にエネルギーおよび資源を回収するプロセス技術開発が行われ、ガス化高効率変換技術の開発、高効率ガス化システム技術の開発、高効率発電技術の開発および水素化、液体燃料合成技術の開発に取り組んでいる。

熱を用いる処理技術では、系外へ排出される排ガスに関する環境配慮が特に重要である。熱分解ガス化技術は、開放環境へ直接排ガスを放出することはない。しかし、ガスの利用手段となる燃料電池やガスエンジン発電機などに、タールなどによる運転上の影響を与えることは避けなければならない。したがって、直接的な一般環境への排出を前提とする焼却などの場合とは考慮すべき対象は異なる。触媒の被毒を引き起こしやすい硫黄化合物(硫化水素など)やタール成分となる多環芳香族化合物類、炭素析出を起こす可能性のある炭化水素類などがここでは問題となる。このような排ガスの精製に関しては、基本的に従来の技術で対

応可能であるが、温度条件の最適化またはシステム全体での経済性の観点などから個々のケースで最適値が異なる。

3 - 4
高温・高圧流体の適用技術

高温・高圧の流体としての超臨界水および亜臨界水、あるいは超臨界二酸化炭素は、温度・圧力条件により高極性から無極性まで性状を変化させることができ、非常に特徴的な流体である。温度約 370℃ かつ圧力 22 MPa 以上の状態にある流体が、一般に超臨界超流体と呼ばれ、この状態の水は、油分や気体と混合状態にあることから、強い酸化力を有効に利用でき、有機塩素化合物などの難分解性物質や有害化学物質の分解・無害化に応用できる。一方、亜臨界状態の水は超臨界ほど高温・高圧状態ではなく穏和である。通常の水よりイオン積が大きく反応性が高いことから、加水分解反応が迅速に進む反応場に使える。従来は反応性の高い超臨界流体を物質の分解処理に用いることが主体であったが、この反応場を利用して、プラスチックのモノマー化やタンパク質系廃棄物からのアミノ酸の回収など物質回収を行う技術的検討が行われている。

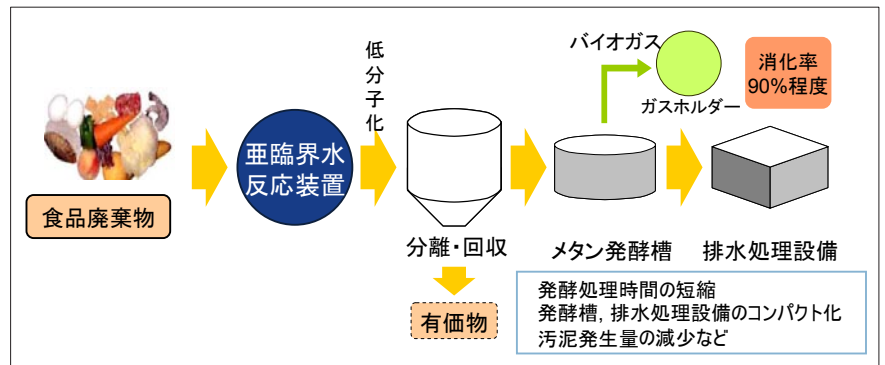
例えば、廃棄された魚肉を段階的に亜臨界水処理することによって資源化するプロセスが提案され

ている。200℃、1.6MPa 程度の条件で、約 5 分間反応させることによって、乳酸、リン酸およびヒスチジンを精製、分離、回収した後、270℃、5.5MPa 付近で約 30 分間反応させることによってピログルタミン酸、シスチン、アラニン、グリシンおよびロイシンの分離回収が行える²¹⁾。また、ポリウレタンの原料となるトリレンジイソシアネート(TDI)を対象に、残渣から回収したトルエンジアミンを元に TDI を製造する工程でも、TDI の回収に亜臨界水が用いられる。また、木質バイオマスに対し亜臨界水を適用し、分解速度を調整することでセルロースから効率よく糖類を得て、その後エタノール発酵へ進める方法などにも応用できる²²⁾。応用としては、前処理としての低分子化、有用成分の抽出、ガス化・油化などに利用できる。

図表 13 は、亜臨界水を利用して食品廃棄物中の高分子量有機化合物を低分子化し、その後メタン発酵に供する組み合わせシステムの概念である。この例では、メタン発酵において時間を要する加水分解を迅速に行い、質的にもメタン発酵に適した組成となるよう亜臨界水工程を適用している。

高温・高圧流体であることからの技術的課題もあり、反応装置類の耐久性、回収物質の分離・精製、コスト増などである。しかし、廃棄物の状態が乾燥したものは、超

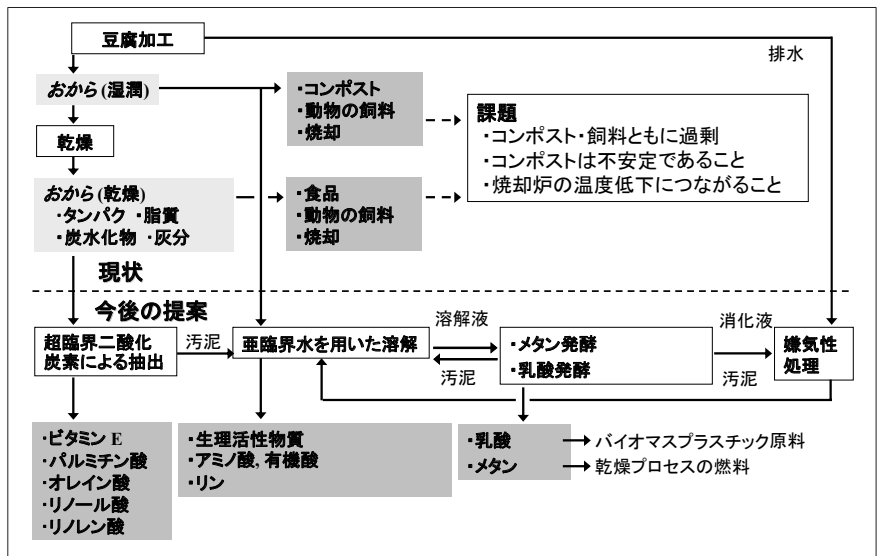
図表 13 亜臨界プロセスを応用した再生資源化の例



出典：参考文献²³⁾

臨界二酸化炭素抽出により生理活性成分などを回収することが可能である。また、水分を多く含む廃棄物では、亜臨界水を用いた可溶化により水溶性の生理活性成分などの回収が可能となり、また低分子化後のメタン発酵などへの展開も可能である。このように、廃棄物の水分や含有物などの特性に基づいて適切な処理を選択すれば、廃棄物を最大限に資源化することが可能になる。図表 14 は、このような考え方を豆腐製造工程から排出される残渣のおからに適用した場合の再生利用の流れである。

図表 14 おからの処理の現状と再生利用システムの提案



出典：参考文献²¹⁾を基に科学技術動向研究センターにて作成

4 課題と提言

4-1

総合技術としての廃棄物再生資源化技術の課題

廃棄物を再生資源化する場合の技術的課題として、以下の点を指摘したい。まず、廃棄物を対象とする技術には、従来の生産技術のために開発あるいは利用されてきた単位操作を基礎とし、これを修正して適用する場合がある。このようなことは、廃棄物だけでなく排水・排ガス処理など他の環境技術でも行われている。最も大きな留意点は、原料組成という点において廃棄物は均一性がほとんどなく、質・量ともに変動する可能性が大きいということである。設計段階で想定した組成と実際に運転が始まって集められる廃棄物の組成が大きく異なる場合もあり、それをあらかじめ精度よく把握することが難しい。

したがって、廃棄物を扱う場合、前処理工程が重要な役割を果たす。再生資源化の中心となる発酵槽またはガス化炉などの単位プロセスの機能や効率だけでなく、前処理での廃棄物の破碎や選別、混

入異物の除去あるいは後段での精製などの操作が適切かつ効果的に機能する必要がある。

また、発酵法において述べたように、この技術は、処理後になお発生する液状、固体状の各種残渣の処理・処分を含めた総合技術としなければ、環境技術として真の意味で完結しない。現状において、これらはリサイクルに付随する必要な処理・処分とみなされて実施されている。技術開発を行う研究機関や企業などは、今後はさらに、カスケード的な利用方法や残渣の有効な再生利用方法がないかという視点で検討し、改善を図ることが望まれる。また、技術の評価を行う行政機関なども、このような総合技術としての完成度を評価の指標として重要視すべきである。

4-2

技術開発上の注意点

(1)安全を含めた総合的な観点でのシステム設計

労働災害の観点からみると、例えば、2000年の100万延労働時間当たりの労働災害による死傷者数(度数率)の全産業分野平均が約

2であるのに対し、廃棄物を扱う施設は、約12である²⁴⁾。バイオマスを対象とする場合に、危険物の混入などの可能性はあまりないと思われるが、エネルギー源、あるいは燃料となる可燃性物質の回収を行うことから、それらを輸送または貯蔵する設備類に起こり得る発熱、発火などによる事故に対して、作業上の安全対策を十分に採る必要がある。ごみ固形燃料(RDF)貯蔵施設での事故例²⁵⁾、あるいはPCB処理施設において起こった事故例²⁶⁾などは、今後の安全面の対応に生かされなければならない²⁷⁾。

したがって、優れた中核技術とともに安全に対する配慮を高めた総合的観点でのシステムの設計が、技術開発の要諦として求められる。技術の導入を決定する立場にある行政または事業者は、エネルギーや素材回収の点だけに注目するのではなく、残渣の排出、安全確保の対応などに関する視点を幅広く持たなければならない。

(2)処理とリサイクルの効率の考慮

リサイクル、廃棄物の再生資源

化において陥りやすい対応の一つに、リサイクルを目的化してしまう、ということがある。国の循環型社会形成推進基本計画において、循環利用率(循環利用量/(循環利用量+天然資源等投入量):%)が指標となり目標値(2010年度に約14%とすること)が定められていることから、この比率を向上させることは重要である。食品リサイクル法などの個別法においても、再生利用等の量に関する目標が定められている。しかし、これらの数値だけを比較するのは適当とは思われない。大量消費と大量リサイクルは、必ずしも望ましい選択ではない。

すなわち、リサイクルに投じるエネルギーや新たな資源が、資源化対象物の量に不釣り合いに大きくなるのであれば、それは考慮されるべき問題となる。本来、人為的な生産、消費には多かれ少なかれエネルギーと資源が投入される。例えば、リサイクルへのエネルギー投入に関連して、最近、ペットボトルの再生利用の例において次のような指摘がなされた²⁸⁾。ペットボトルの消費量は2004年度で約51万トンあった。そのうち分別回収量は24万トン、そして再利用量(素材として再生利用された量のことと推定される。)は3万トンであった。51万トンを製造し、24万トンのリサイクルのため処理し、残り27万トンをごみとして捨ててわずか3万トンを再利用するための石油使用量と、全体での廃棄物発生量(ペットボトルがそのまま廃棄物となった場合も含めて)双方が、1993年度のまだ全くペットボトルの回収を行っていなかった時期と比較して約7倍になると試算された。なお、27万トンの中には中国などへ有償で引き取られる量も相当量あったとみられる。詳細は省くとして、この指摘には部分的に正しいところもある。一方、再生利

用についての内容の把握が不十分であり、また現時点での天然資源から生産する場合との比較がないなど全体的には的確さを欠いた議論との見方もできる。

リサイクルに要するエネルギー・資源の量およびコストと、不要物排出の負荷を減らすことの重要性は自明である。技術開発のみに焦点があるような場合に、ときとして陥りやすい投入物やコストの算定が不十分なりリサイクル・再生資源化技術の開発に対しては、適切な誘導を行っていくことが必要である。

(3) 再生物の利用拡大

廃棄物の再生資源化において再生のための技術と並んで重要なことは、再生物が有効に利用されること、すなわち利用先が存在することである。このことによって初めて、資源循環のサイクルが形成される。例えば、エネルギー回収の場合であれば、水素ガスまたはメタンなどの可燃性ガスが有効に利用されるように燃料電池システムまたは発電設備と組み合わせることで運転できることが必要である。さらに、そのような施設が立地するための社会的インフラも現実整備されていなければならない。来たるべき燃料電池社会の形成においては、特にこの点が重要であろう。すでに実証試験なども行われていることから、今後は、実社会導入への現実的な検討が必要である。

廃棄物からの発電に関しては、1997年に定められた「新エネルギー利用等の促進に関する特別措置法(いわゆる新エネ法)」によって、廃棄物発電・熱利用、バイオマス発電・熱利用によるリサイクル型エネルギーについて推進の道が開かれた。しかし、ごみ発電の場合、発電効率は平均10%程度に過ぎず、高くとも20%強程度までである。ボイラ効率の向上など技術開発の余地はまだかなり大

きい。加えて、電力系統連携技術ガイドラインの条件である一般高圧での発電量の上限(2,000kW)が制約となり、発電能力を十分に活用できない場合もある。したがって、技術開発とともに、運用上の制約を改善することも重要である。

一方、素材リサイクルにおいて直面する課題として、再生品特に建設系再生製品の使用拡大がなかなか進まないことが挙げられる。これは、溶融炉またはガス化溶融炉において生成するスラグを用いた骨材あるいは路盤材などの製品が当てはまる。建設系再生製品については、公共の場での使用が想定されるため、環境安全上の影響が不特定多数に及ぶ可能性がある。このため、安全性に関しては十分な慎重さが要求され、また適切な評価と管理も必要となる。一般廃棄物および下水汚泥からの溶融スラグなど一部の再生品については、JIS規格などによる品質保証と環境安全面での品質管理のための試験法整備が進められており、さらに試験規格として統合的な体系作りが進められている²⁹⁾。このような規格化によって実現可能な品質保証を広く利用者に伝え、再生品に対するイメージを向上させて利用拡大を進めることが望まれる。

同様のことは、ガス化工程で生成される炭素分に富む素材を炭化物として再生品とする場合、あるいは亜臨界水による反応から生成する有価物を製品または中間体として利用する場合などにも当てはまると思われる。これらはまだ量的に少なく、一定の市場が形成されるものではない。しかし、今後は、多様な再生物の流通と使用について環境安全面などに適正な配慮をしつつ、一層促進するための社会的制度の確立が必要である。そのために、まず、言わば静脈側で廃棄物の再生資源化に携わる事業者および行政機関と、動脈側で

再生品を利用する製造業および関連する行政機関などが情報の共有と連携への意思疎通を図ることが必要である。

参考文献

- 1) 環境省編：平成19年版環境循環型社会白書，pp.168-208，ぎょうせい，東京(2007)
- 2) 廃棄物情報研究会：Fact Book 廃棄物基本データ集2000，(財)日本環境衛生センター(2001)
- 3) 末松広行：「バイオマス・ニッポン総合戦略」とバイオマス利活用の推進，廃棄物学会誌，Vol.18，138-147(2007)
- 4) 藤本潔：新たなバイオマス・ニッポン総合戦略について，INDUST，Vol.21，No.10，19-22(2006)
- 5) 川本克也：廃棄物焼却技術の進展，季刊環境研究，No.143，80-89(2006)
- 6) 農林水産省：バイオマス・ニッポン総合戦略 平成18年3月31日閣議決定：http://www.maff.go.jp/j/biomass/pdf/h18_senryaku.pdf(2006)
- 7) 経済産業省：技術戦略マップ2007，3R分野，pp.172-193(2007)
- 8) 李玉友，西村修：メタン発酵法による廃棄物系バイオマスの循環利用，混相流 Japanese Journal of Multiphase Flow，Vol.21，No.1，29-38(2007)
- 9) 武田信生：都市ごみ処理-今後の技術動向について-，都市清掃，Vol.59(272)，pp.21-26(2006)
- 10) (独)国立環境研究所：平成15，16，17，18年度環境省受託業務報告書 バイオ資源・廃棄物等からの水素製造技術開発(2004，2005，2006，2007)
- 11) 渡辺久典，吉野秀吉：小麦フスマを基質とする水素発酵における初期pH及び培養温度の影響，環境技術，Vol.35，744-751(2006)
- 12) 片岡直明，菖蒲昌平，宮晶子，米山豊：水素・メタン二段発酵法による食堂残飯と紙ごみの処理性能解析，第18回廃棄物学会研究発表会講演論文集2007，506-508(2007)
- 13) C. F. Chu, K. Q. Xu, Y. Y. Li, Y. Ebie, Y. Inamori, H. N. Kong: A two-stage process for high-rate hydrogen and methane production from food waste, Proceedings and Abstracts of 11th IWA World Congress on Anaerobic Digestion, pp.96, Brisbane, Australia (2007)
- 14) 金子誠二：建設廃木材からの燃料用エタノールの製造，学会誌「EICA」，Vol.12，15-18(2007)
- 15) 西田治男：再生可能資源材料：ポリ乳酸の循環利用について，平成19年度廃棄物学会研究討論会講演論文集，27-29(2007)
- 16) 河本洋：植物由来プラスチックの研究開発動向-自動車用ナノ複合ポリ乳酸の視点から-，科学技術動向2006年8月号，No.65，13-22(2006)
- 17) 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，Vol.15，443-455(2004)
- 18) 昭和電工(株)：ECOANN 環境調和型アンモニア：http://www.sdk.co.jp/ecoann/index.html
- 19) オリックス資源循環(株)：最新のガス化改質施設：http://www.orix.co.jp/resource/plant/index.htm
- 20) 文部科学省：経済活性化のための研究開発プロジェクト(リーディングプロジェクト) 一般・産業廃棄物・バイオマスの複合処理・再資源化プロジェクト：http://mlp.biomass-leading-project.org/leading/index.html
- 21) 佐伯孝，川本克也：高圧流体を用いた食品廃棄物の資源化技術の現状と課題，廃棄物学会論文誌，Vol.18，219-229(2007)
- 22) 相馬隆宏：有害物質分解する”魔法の水” バイオマス燃料の製造にも期待，日経エコロジー，2007.01，51-53(2007)
- 23) 近畿環境興産(株)：亜臨界水技術情報：http://www.rematec.co.jp/about/arinkai_2.htm
- 24) 廃棄物研究財団：平成13年度廃棄物処理等科学研究総合研究報告書 化学物質の循環・廃棄過程における制御方策に関する研究，7-1～7-38(2002)
- 25) 環境省：ごみ固形燃料の適正管理方策について，ごみ固形燃料適正管理検討会報告書：http://www.env.go.jp/recycle/report/h15-01/all.pdf(2003)
- 26) 日本環境安全事業(株)(JESCO)：http://www.jesconet.co.jp/facility/toyota/pdf/toyotajikofinal.pdf
- 27) 松原美之，浦島邦子：消防防災に関する科学技術動向-安心・安全を目指す科学技術の特性と方向性の考察-，科学技術動向2005年3月号，No.48，24-33(2005)
- 28) 武田邦彦：環境問題はなぜウソがまかり通るのか，pp.12-64，洋泉社，東京(2007)
- 29) 肴倉宏史：建設系再生製品を対象とした環境安全性評価試験のシステム規格化に向けて，平成19年度廃棄物学会研究討論会講演論文集，20-24(2007)

執筆者



客員研究官
川本 克也

(独)国立環境研究所
循環型社会・廃棄物研究センター
資源化・処理処分技術研究室
室長

http://www.nistep.go.jp/index-j.html

工学博士。民間企業勤務、大学教員などを経て現職。化学物質の環境挙動評価、廃棄物焼却処理などに伴い排出される有害物質の測定と処理性の評価などに加え、現在ではガス化改質による廃棄物からのエネルギー回収を主とする資源化技術開発にも取り組んでいる。