

# 1 有機廃棄物の再資源化技術の研究開発

森 滋勝（名古屋大学）

## 1. 5年間の総括

### 1. 1 研究概要

近年、新エネルギーの一つとして、プラスチックなどの有機系廃棄物に加え、木質バイオマスが再生可能エネルギー源として注目されている。本研究では、Fig. 1に示すように地域分散型廃棄物高温ガス変換燃料電池発電システムの開発を実施した。本システムでは、地域に分散して発生・回収されるプラスチック類や木質系バイオマスを原料として、環境負荷を抑制しながら高効率で小規模発電を行うために、一炉処理型気流層型高温ガス変換炉を使用し、乾式ガス精製を行った後、熔融炭酸塩型（MCFC）または固体酸化物型（SOFC）の燃料電池を使用して高効率発電を行う。また、エネルギー総合効率向上を目指して、本ガス化プロセスで発生する排熱は、都市生活系において空調用熱源として有効利用するために長距離輸送およびヒートポンプによる冷熱生成技術開発を行った。

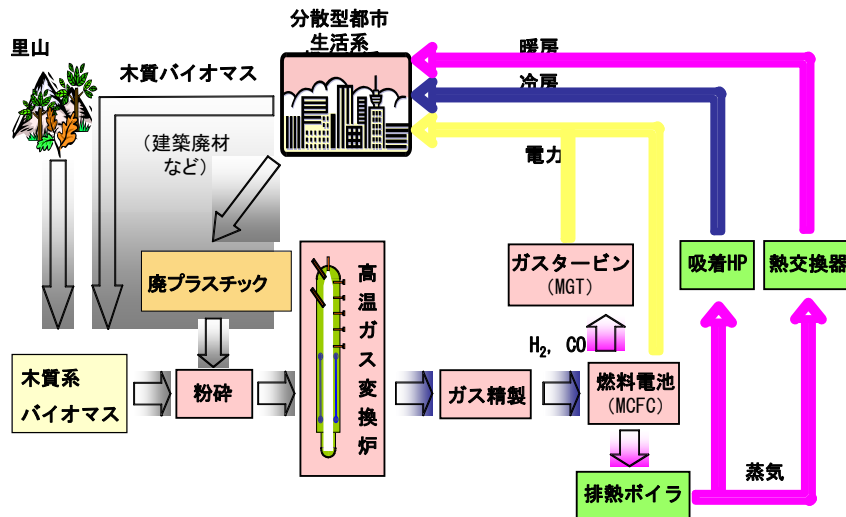


Fig.1 分散型廃棄物高温ガス変換燃料電池発電システム概念図

### 1. 2 研究目標

本研究は、1) 廃棄物の高温ガス変換分散型エネルギーシステムの研究開発、2) 排熱の高度利用技術の研究開発、に大別される。前者については、①廃棄物の高温ガス変換燃料電池発電プロセスの研究開発、②PSAによる酸素製造技術の研究開発、③乾式脱硫用活性コークスの製造プロセスの研究開発、④ガス化前処理脱塩素化技術の研究開発、後者については、①排熱利用型高性能吸着ヒートポンプの実用化開発、②高性能吸着ヒートポンプ技術の研究開発、③広域常温熱輸送システムの研究、を目標としている。Figs. 2および3は、これらの具体的数値目標を模式的にまとめて示したものである。

### 1. 3 主な研究成果

#### 1-1-1① 廃棄物の高温ガス変換燃料電池発電プロセスの研究開発

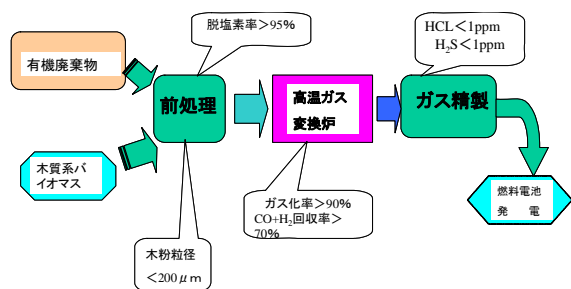


Fig. 2 ガス化プロセス開発目標

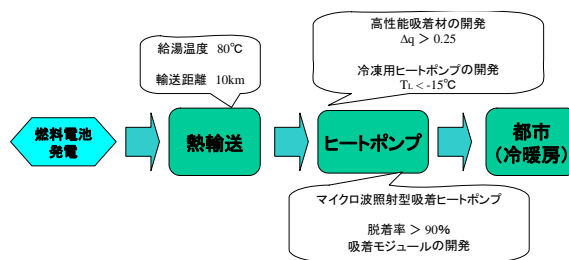


Fig. 3 排熱有効利用プロセス開発目標

具体的な研究項目を要約すると以下の通りである。1) 流動性の極めて低い木粉のような繊維質微粒子状物質を原料としてガス化する場合に、原料供給が不安定になり、ガス化運転に大きな影響を与えるため、木粉の供給技術を開発。2) 有機廃棄物を原料とするガス変換では、タール等の不純物を発生せず燃料電池の燃料に利用可能な高品質ガスを得るために、1200°C以上の高温領域を保持する操作方法を検討し、高いガス変換効率を得るために搬送窒素を含む不活性ガスを削減する手法を検討し、一炉型タウンフロー式有機廃棄物高温ガス変換炉を開発。3) バグフィルターなどの設備の閉塞原因となる生成ガス中のタールを制御するために、不活性粒子（本研究では微粉炭燃焼飛灰を使用）をガス化炉下部（炉内温度1000°C程度の位置）に供給して、タールの吸着を行いプラントの連続安定運転を確保。4) 低カロリー物質または小規模処理量のガス化では、メタンガスを助燃ガスとして炉内に投入して、1200°C以上の高温領域を確保。5) 石灰石、消石灰、生石灰などの塩化水素との反応性を化学平衡論および速度論の観点から検討し、各種燃料ガス成分が共存する系で塩化水素を10ppm以下にまで精製することが可能な反応系および操作条件を解明。6) ラボスケールの流動層型脱塩化水素試験装置を用いて、塩化水素の吸収破過特性の検討ならびにガス精製の実証試験を行うことによりガス精製技術の確立。7) 木質系廃棄物活用高温ガス化ガス利用燃料電池コージェネレーションシステムについてフィージビリティスタディーを行い、事業化の可能性について検討。

以上の成果により、ガス変換温度1200°C以上の高温ガス化が可能となり、PPおよびPEのガス化率が95%以上、PETおよび木質バイオマスのガス化率が90%以上を達成した。またCO+H<sub>2</sub>の生成率は、PPやPEで80%、PETや木質バイオマスで60%以上が得られ、木粉のガス化でも生成ガスの発熱量が2000kcal/m<sup>3</sup>となった。ガス精製は、消石灰を吸収剤に用いて200~300°C程度の温度で操作することにより、10ppm以下に塩化水素を低減することができることを明らかにした。また吸収剤の反応率が約60%までは十分早い反応速度を示し、本流動層型精製装置の有効性を確認するとともに、装置設計のため基礎データが得られた。本研究で提案しているシステムでは、処理量3.4t/日の小規模かつ原料の微粉化への粉碎動力を含んでも送電端効率10.4%、総合効率80.2%の高い効率が得られ、これの10倍および30倍にスケールアップした場合には、ガス変換効率の改善効果を加味して送電端効率が24.0%に向上することが明らかとなった。

#### 1-1-1② PSAによる酸素製造技術の研究開発

具体的な研究項目を要約すると以下の通りである。1) 酸素発生量13L/minの小型試験装置を用い、PSAとしての基本特性を評価すると共に、同データを基にパイロットプラントの設計/製作を実施。

2) 酸素発生量 120L/min のパイロットプラントを用いて、酸素を製造するための基礎評価を実施し、PSA の操作条件を決定。3) PSA と酸素ポンベを組合せ、酸素流量増加時にはポンベから酸素を補充できるよう改良し、常に酸素濃度が一定となるようなシステムを構築。4) 同システムとガス変換炉とのマッチングについて評価を実施し、酸素ポンベから供給した場合と同等のガス変換特性が得られることを実証。

これらの成果の具体的な内容として、PSA 製造酸素とポンベ供給酸素混合による酸素濃度の変動評価では、酸素供給方法の切替え制御を実施したところ、目標通りの制御性能が得られ、PSA で製造された酸素を最大限活用できることがわかった（酸素使用量 200L 時、PSA : ポンベ=65% : 35%）。また、上記操作によって、供給酸素濃度 90~95%、バッファタンク内圧力 0.43~0.55MPa、供給圧力は 0.3MPa で安定することを確認した。一方、PSA で製造した酸素による高温ガス変換炉の実証評価試験では、昇温過程での昇温速度は PSA 酸素においても純酸素を用いた場合とほぼ同等であった。原料投入後のガス化過程では、PSA 製造酸素を用いた時の炉内温度は 1,180℃であり、純酸素と比較し 80℃程度低くなるが、生成ガス組成は、特に大きな差は見られなかった。また、PSA 酸素供給時のポンベ切替え制御は、ガス化運転の酸素供給増大時（200L/min 以上）において正常に機能することを確認した。ガス変換炉への供給圧力は、約 0.29MPa 程度で安定しており、酸素濃度も 90~95%程度で安定していた。以上の結果より、PSA で製造された酸素のガス変換炉への適用は可能であり、その有効性を実証した。

#### 1-1-1③ 乾式脱硫用活性コークスの製造プロセスの研究開発

具体的な研究項目は以下の通りである。1) ラボスケール固定層型活性コークス製造装置による有機汚泥および木質系廃棄物を原料とした活性コークスの製造、2) 活性コークスの連続製造を目的として流動層型活性コークス製造装置の開発、3) 活性コークスの TG 分析装置による硫化水素吸着性能評価試験、4) 活性コークスの連続流通式固定層吸着装置による硫化水素吸着試験。

これらの成果の具体的な内容として、有機汚泥を原料として活性コークスの製造を行ったところ、処理温度 650℃、処理時間 60 分、処理雰囲気窒素を用いた場合が最適製造条件であった。木質ペレットを原料として活性コークスの製造を行った場合には、水蒸気処理雰囲気処理温度 650℃、処理時間 40 分が最適製造条件であることが明らかになった。ただし、木質活性コークスの製造の場合、処理温度が高くなるにつれて、吸着速度、吸着量ともに増加するが、収率が低下する結果となる。いずれの活性コークスも、硫化水素吸着性能がヤシガラ活性炭よりも優れており、また安価で製造できることからワンススルースを目的とした乾式脱硫硫化水素処理に有効であることが示された。また、活性コークスの連続製造を目的とし、流動層型活性コークス製造装置の開発を行ったところ、流動層で製造した活性コークスの方が固定層で製造した活性コークスよりも硫化水素除去性能が良いことが明らかになった。さらに、流通式固定層での脱硫硫化水素試験を実施した結果、ガス中の硫化水素を容易に 10ppm 以下に低減させることができ、ガス化発電プロセスでの脱硫硫化水素プロセスに十分利用が可能であることが実証された。

#### 1-1-1④ ガス化前処理脱塩素化技術の研究開発

具体的な研究項目は以下の通りである。1) 熱天秤(TG 分析)装置による基礎的な PVC の熱分解特性評価、2) 実証機を想定したスクリュウ押し式加熱脱塩素装置による、廃棄物原料の脱塩素条件に関する基礎検討、3) PVC 含有廃棄物(インパネ廃材、使用済み自動車廃棄物(ASR))の脱塩素試験による、ASR 中に含まれる重金属類の脱塩素反応に対する阻害要因の検討、4) 二軸スクリュウ式脱塩素装置による農業用塩化ビニール/ポリプロピレン混合物をサンプルとした時の最適運転条件の検討、

#### 5) 同装置における造粒方式の検討.

これらの成果の具体的な内容として、PVC含有廃棄物の脱塩素基礎試験および重金属類の脱塩素反応への影響評価から、1) PVC含有廃棄物 (PVC, ポリウレタン, ポリプロピレンの複合物) の脱塩素性能は、破碎粒径との関係はほとんどなく、加熱温度と加熱時間(滞留時間)に大きく依存している、2) インパネ廃材単体とASRをサンプルとして用い、熱分解条件を加熱温度 350℃, 加熱時間 1 時間のとき、インパネ廃材の脱塩素率は 95%以上に対し、ASRは 20%となり脱塩素率に大きな差が見られる。3) ASRの熱分解残渣中の塩素はほとんどが無機(水溶性)塩素状態である。4) ASR中に含まれる物質の中で、脱塩素反応を阻害する因子は、重金属類 (Fe、Al、Cu、Pb、...) であり、特にPbCl<sub>2</sub>への転化により脱塩素が阻害されることを確認した。また、二軸スクリー脱塩素装置製作および脱塩素基礎試験により、農業用塩化ビニールをサンプルとした脱塩素率は、99.8%という高い値が得られ、その有効性を実証した。さらに、二軸スクリー脱塩素装置の装置特性として、脱塩素率には脱塩素温度(シリンダ温度)の影響が大きく、滞留時間(スクリー回転数)の影響は小さいのに対して、炭素および水素の残留率は、温度条件や滞留時間によらず、混合樹脂の熱分解温度に依存することが明らかとなった。処理後残渣の造粒化は、ダイス温度 160℃, せん断による造粒方式が最適であり、開発した造粒装置により、10mm程度の樹脂粒を安定的に製造できることを確認した。

#### 1-1-2① 排熱利用型高性能吸着ヒートポンプの実用化開発

具体的な研究項目は以下の通りである。1) マイクロ波照射場の脱着過程の熱・物質移動機構の解明、2) 吸着材充填吸着器におけるマイクロ波照射の脱着操作の課題抽出、3) 吸着材充填吸着器におけるマイクロ波照射の脱着促進効果の把握、4) マイクロ波照射型吸着器装填吸着材モジュール構造の最適化。

これらの成果の具体的な内容として、1) マイクロ波脱着ではマイクロ波が吸着材内部に直達することにより、通常の加熱脱着に比べて脱着速度は速く、熱脱着を上回る脱着が達成される、2) 吸着材の種類を問わず、充填層形式のマイクロ波脱着では層内の定在波の存在による脱着むらが生じるが、これを許容しても熱脱着に比べてマイクロ波脱着の脱着速度が速く、熱脱着を上回る脱着量の増大が観察される、3) ゼオライトに比べてシリカゲルにおけるマイクロ波照射による吸着材層の温度上昇が小さい、マイクロ波照射型吸着ヒートポンプにはシリカゲルを吸着材として使用することが好ましい、4) マイクロ波照射型吸着ヒートポンプの吸着器装填吸着材モジュール構造として、吸着材充填部中心軸及び側面にマイクロ波通路を配したフィン型モジュールが適している、等の結果が得られた。

#### 1-1-2② 高性能吸着ヒートポンプ技術の研究開発

具体的な研究項目は以下の通りである。1) 吸着ヒートポンプ用高性能吸着材の開発、2) 高速吸・脱着吸着材モジュールの吸着器装填による熱出力の向上を目指したシリカゲル充填のフィン付き熱交換モジュール (FT モジュール) による水蒸気系吸着ヒートポンプの開発、3) シリカゲル/水蒸気系吸着ヒートポンプ (AHP-1) と活性炭/アンモニア系吸着ヒートポンプ (AHP-2) で構成されるマルチ吸着ヒートポンプ (マルチ AHP) の開発。

これらの成果の具体的な内容として、1) 市販のヤシ殻活性炭やフェノールホルムアルデヒド樹脂を原料とする活性炭細孔内シリカゲル添着や低温薬品賦活、活性炭の酸化処理などは、シリカゲルと同程度またはそれ以上の吸着性を確保、2) FT モジュール装填吸着器で構成されるシリカゲル/水蒸気系吸着ヒートポンプはリン酸型燃料電池の排熱 (90~60℃) を利用して稼働でき、その熱出力は伝熱管一体型熱交換モジュールの最大 10 倍になるとともに、吸・脱着過程の熱・物質移動におけるシミ

ュレーターの開発により、本モジュールを用いた場合、シリカゲル粒子径が 100~400 $\mu\text{m}$  のとき、FT モジュールのフィンピッチ 1~2mm、フィン長さ 12~14mm のとき、熱出力が最大となる、3) 最適 FT モジュールに最も近い市販のモジュール (フィンピッチ 2.32、フィン長さが 11mm) 装填吸着器で構成される 2kW 級-吸着ヒートポンプ試作機の運転により計画熱出力が得られることを確認、4) AHP-2 用吸着材には、市販のヤシ殻活性炭および高比表面積を有するスーパー活性炭が最も有効、5) AHP-2 を環境温度 5 $^{\circ}\text{C}$ 、1MPa 以下で作動させることにより -20 $^{\circ}\text{C}$  以下の冷凍冷熱生成を実証、6) AHP-2 および AHP-1 と AHP-2 で構成されるマルチ AHP の COP は、環境温度 5 $^{\circ}\text{C}$  でそれぞれ最大 0.75 および 0.23 となり、本マルチ AHP の有効性を検証、等の結果が得られた。

### 1-1-2③ 広域常温熱輸送システムの研究

具体的な研究項目は以下の通りである。1) アンモニア水溶液の濃度差により熱を輸送する広域常温熱輸送システムのフィジビリティスタディー、2) 広域常温熱輸送システム原理機による実証試験、3) 混合を利用した冷熱発生型の化学ヒートパイプの熱力学的検討、4) 各種の混合系の冷熱発生特性に関する実証試験および本システムの有効性の検証。

これらの成果の具体的な内容として、広域常温熱輸送システムは、従来型の熱輸送システムと比較して、パイプラインの直径が 1/4 以下となるとともに、10km 以上の熱輸送の実現性があることを示した。また、原理機を用いた試験により、100 $^{\circ}\text{C}$  の熱源で常温熱輸送システムの動作が可能であることを確認し、熱供給側プラントの非定常シミュレーションモデル解析から冷房、暖房、給湯の各需要が時間変動した場合の常温熱輸送システムの挙動を把握した。一方、混合を利用した冷熱発生は、熱力学的に固-液系では硝酸アンモニウム/水系、液-液系ではイソブチルアルコール/アセトニトリル系において最大の混合熱が得られ、固-液系の硝酸アンモニウム/水系、尿素/水系、液-液系のイソブタノール/アセトニトリル系でも十分な冷熱発生が確認された。このような系では、前者では蒸発操作、後者では蒸留操作によって再生可能であり、これらの混合系が熱輸送に適用できることを明らかにした。

## 2. 今後の取り組み

有機廃棄物高温ガス変換技術の研究で開発された原料供給技術、高温ガス変換技術、タール発生の制御技術等の要素技術は、実用化への技術移転を図る上で極めて重要となる。今後は、現在の 20kg/h 実験室規模からスケールアップして 100kg/h (2.4t/d) 規模の実証プラントでも安定運転が可能になることを検討する必要がある。また、このような技術を実用化に結びつけていくためには、本プロジェクトで提案している発電プロセスだけでなく、木質系バイオマスを多角的に再利用、リサイクルする総合システムを構築する必要があり、そのための実証研究を行っていく必要がある。

以下に、フェーズⅢとしての取り組みおよび提案公募事業で最近採択され、実施を開始している課題を挙げる。

### 1) 廃棄物高温ガス変換燃料電池発電システムの愛知万博への出展

本事業で得られた成果を基に、高温ガス変換システムの実機を設計/製作し、愛知万博に出展する。また、MCFC (熔融炭酸塩型燃料電池) と組み合わせることにより、得られた電力と熱は博覧会会場でエネルギーの一部として使用される。

### 2) NEDO 新エネルギー・産業技術総合開発機構: 「新エネルギー等地域集中実証研究」

博覧会会場で発生した廃棄物から得られたエネルギー (電気、熱) を会場へ戻すことにより、循環型社会の具現化を目指す。このように、新エネルギー設備集中導入による、分散型エネルギ

一技術・エネルギー需給制御技術の総合的な実証研究・フィールドテストを実施する。

- 3) NEDO 新エネルギー・産業技術総合開発機構：産業技術研究助成事業「木質バイオマスの高温ガス化発電システムの事業化に対する実証研究」

木質バイオマスの微粉木粉から空気吹き高温ガス化により高効率燃料製造を行い、種々の発電システムに応用しうるシステムを構築する。

- 4) NEDO 新エネルギー・産業技術総合開発機構：バイオマス等未活用エネルギー実証試験調査事業(FS)「移動式小型バイオマスガス化発電事業調査」(平成15年度)

本事業で得られた成果を空気吹きのコンパクト型高温ガス変換システムを構築し、トレーラー積載して移動式にすることにより、ダム流木発電の稼働効率向上と発電・送電コスト低減を図ることを目指して、移動式小型バイオマス発電事業化のためのフェジビリティスタディーを実施する。

- 5) 中部経済産業局：地域新生コンソーシアム研究開発事業「マイクロ波を利用した木質バイオマス液化プロセスの開発」(平成16～17年度)

本事業で提案のバイオマス活用高温ガス変換エネルギーシステムの事業化を図る上で、トータルのバイオマス活用センターの構築が不可欠なる。このようなバイオマス活用センターでガス化発電および熱エネルギーを利用しつつバイオマスの液化を行い高い付加価値材料の創出を図るために、木粉の水スラリーをマイクロ波加熱で急速に200℃程度まで昇温し、水熱分解で液化することにより、付加価値の高い生分解プラスチック等の合成技術の開発を目指す。

- 6) NEDO 新エネルギー・産業技術総合開発機構：バイオマスエネルギー転換要素技術開発「バイオマス直噴燃焼式高効率小型発電システムの開発」(平成16～18年度)

本事業で得られた木粉の部分燃焼用バーナー技術を完全燃焼用バーナーへ応用して、外熱式エンジンであるスターリングエンジン用の木粉の直噴燃焼バーナーおよび燃焼炉を開発し、50kW級高効率小型スターリングエンジン発電システムの構築を目指した実証試験を実施する。

- 7) NEDO 新エネルギー・産業技術総合開発機構：バイオマスエネルギー転換要素技術開発「マルチ振動ミルによる木質バイオマスの高効率微粉碎技術の研究開発」(平成16～18年度)

本事業の高温ガス化プロセスに必要な木質系バイオマスの高効率微粉碎技術の確立を図るために、ロッドとボールを併用する2段式のマルチ振動ミル内で木質チップの乾燥を併用して、高効率微粉碎技術の開発木粉製造のトータルの粉砕エネルギーを40%削減する。

- 8) 「吸着ヒートポンプ用吸着材のマスプロダクションに関する検討」

実験室規模の吸着材製造技術のさらなる展開によるこの大量生産技術の確立に向けた検討を行う。

- 9) 「吸着ヒートポンプの実用化試験評価」

試作吸着ヒートポンプによる実排熱の温度レベル、供給量、供給変動などを考慮に入れた最適運転制御法の確立を行う。

- 10) 「常温熱輸送システム実現に関する検討」

アンモニアの取り扱いに関する規制緩和や、地域の省エネルギーに対する動向をふまえ、常温熱輸送システムを実現すべきかどうか検討する。