循環型社会構築のための転換技術

大下 孝裕*, 成瀬 克利*

* 株式会社荏原製作所 環境・エネルギー開発センター

Energy Conversion Technology for Recycling Society with Minimized Impact on the Environment

Takahiro Oshita* and Katsutoshi Naruse*

* Environmental and Energy Technology Development Center, EBARA Corporation

1. ま え が き

ゼロエミッション社会へのアプローチは、新しい循環型技術（転換技術）の開発と、それらの技術を支える循環型社会の枠組みの両輪が必要である。近年「環境経営の実践なくして企業の存続はない」ということが認識され始めているが、さらに一步踏み込んだサステナブルな社会（将来にわたって自然を守りつつ発展持続可能な社会）に貢献する企業のみが存続を許される時代になると思われる。すなわち、様々な産業や消費者がお互いに連携し、資源を循環利用することである。

日本の廃棄物処理は焼却炉による焼却処理が主体であったが、近年ガス化溶融方式が台頭し始めている。この理由は、ダイオキシンと灰の無害化に対応しようとするものである。1996年に廃棄物行政機関が中心になり、「次世代型ごみ焼却処理施設の開発研究」がスタートし、18社が参加した。いくつかの方式案が出され議論された結果、ガス化溶融方式が次世代型に合致しているという方向性が出された。現在、各々の得意技術をベースに自社開発する企業、あるいは海外から技術導入して対応する企業、あわせて30にのぼる企業がこの分野の開発競争に参画している。

一方、2000年4月から容器包装リサイクル法が適用され、マテリアルリサイクル、油化、高炉還元、コークス炉化学原料化、ガス化の5方式が再商品化技術として認定されている。

さらに、2001年11月には、経済財政諮問会議の「循環型社会に関する専門調査会」から中間報告が提出されている。その中で、循環型経済社会のビジョンとして、第一に天然資源の使用量の低減、そのためにはバイオマス資源などの利用の拡大が必要であること、第二に環境への負荷低減、第三に持続可能な経済成長が重要な柱として提言されている。本稿では、これらの時代背景において、廃棄物やバイオマスの転換技術のあり方について述べる。

2. ガス化技術の高度利用と進化

図1に「ガス化技術の高度利用と進化」を示す。

何故焼却からガス化なのか。熱分解ガス化による転換技術が「循環型技術」の本命と考えているからである。

第一世代はガス化溶融技術である。本技術は、廃棄物をガス化させ、ガスの熱量を用いて次工程の溶融炉で高温化（完全燃焼）し、ダイオキシンなどを分解すると同時に灰分を自己熱溶融するものである^{1),2)}。この技術の応用として、高効率サーマルリサイクルがある。技術の詳細を第3項に記す。

第二世代は加圧ガス化溶融によるケミカルリサイクルである^{3),4),5)}。本技術は、前述のガス化炉を加圧型の低温ガス化炉とし、次工程の高温ガス化炉を組み合わせた「加圧二段ガス化溶融システム」で、廃棄物から水素やアンモニアなどの化学原料を回収することができるものである。技術の詳細を第4項に記す。

第三世代が、常圧・低温・無酸素ガス化システムである^{6),7)}。本技術の最大の特徴は無酸素ガス化により、CO₂が微量かつダイオキシン類を含まない高純度の生成ガスを得られるところにある。技術の詳細を第5項に記す。

3. サーマルリサイクル（第一世代の応用）

これまでごみ発電は、腐食の問題により過熱蒸気温度を高くすることができず、発電効率を低く抑えていた。一方、RDFは不燃物が除去され、乾燥され、ごみ質が均質化されるので燃焼が安定（低空気比運転が可能）し、ダイオキシン類の生成は抑制される。しかし、成分

図1 ガス化技術の高度利用と進化

* 〒108-8480 東京都港区港南1-6-27 (1-6-27, Kohnan, Minato-ku, Tokyo, 108-8480 Japan)

図2 過熱蒸気の間接過熱方式による高効率ごみ発電システム

生成ガスのダイオキシン濃度；0.0001ng-TEQm³(NTP)以下

図3 加圧二段ガス化システムによるケミカルリサイクル

は元の廃棄物と同じなのでダイオキシン類再合成（ボイラ部で、特に塩化銅の含有率に左右される）は避けられず、灰も多い。さらに、HCl濃度は減っても塩類は除去されていないので高温溶融塩腐食（HCl濃度の影響よりも塩濃度の影響が大きい）は避けられない。筆者らは過熱蒸気温度400～450℃（システムにより差がある）が許容限界（経済性も含めて）であると考えている。

筆者らは、発想を変え、700℃程度の高圧蒸気を熱媒体として400℃の過熱蒸気を500℃以上に間接加熱する技術を開発・実証中である^{8),9)}。図2に過熱蒸気の間接加熱方式による高効率ごみ発電システムを示す¹⁰⁾。熱媒体となる空気は、蒸気のような高圧は不要のため、空気加熱器管材質は高温強度は不要で、腐食に強い材料（耐熱鋳鋼やセラミックなど）を使用することができる。

これまで、METI/NEDO/(財)エネルギー総合工学研究所の委託事業により、確認テストを行ってきており、空気温度700℃以上で順調に運転してきた。本方式は、高温溶融塩腐食を避けて高い発電端効率と高い送電端効率を得ることができる。ちなみに、発電端効率の目安

は、炉の規模、ごみ質、蒸気仕様により異なるが、おおむね100～200 t/d規模の炉で22～25%、200 t/d以上の炉で25～30%である。

4. 加圧二段ガス化によるケミカルリサイクル（第二世代）

4.1 技術の概要

基本システムは、図3に示すように流動床方式の低温ガス化炉と、高温の旋回溶融ガス化炉を直結し、加圧二段構成としている^{3),4),5)}。低温ガス化炉では、炉下より酸素と蒸気の混合ガスを流動化ガスとして供給し、流動層温度を600～800℃に維持する。供給された原料はH₂、CO、CO₂、炭化水素などからなる生成ガスとチャー、タールなどに熱分解される。炉底部には不燃物抜出装置を設け、金属などの不燃物を流動媒体と共に抜き出す。高温ガス化炉の運転温度は1300℃以上であり、低温ガス化炉から供給される生成ガス、チャー、タールなどは、酸素及びスチームの供給下でさらに熱分解され低

分子化し、灰分は熔融スラグ化する。本実証機では、高温ガス化炉下部にはダイレクトクエンチ用の冷却水が滞留しており、高温の生成ガスは全量が冷却水中を通過して急冷されると共に、熔融スラグが分離される。また、廃プラ中の塩素分に起因する HCl などは急冷水により除去される。この急冷によりガス温度は 200°C 以下まで瞬時に冷却されるので、ダイオキシン類の再合成の懸念も合わせて解決できる。この技術は、荏原&宇部興産のプロセスということで、頭文字を取って EUP と称している。荏原と宇部興産という異業種の連携により初めて成し遂げることができたものである。

4.2 国内外の動向¹¹⁾

国内では約 20 年前に、二塔循環式熱分解ガス化装置の研究が 2 件行われた。一つは“スターダスト 80”と呼ばれたプロセスで、これは研究段階で終了した。もう一つは船橋北部清掃工場で実機として建設された。1981 年から 1989 年までの 9 年間ごみとの戦いを続けてきたが、1992 年に焼却方式に変更した。この 2 件の事例により、廃棄物からの製品ガス回収プロセスの難しさがクローズアップされ、その後しばらく国内においてこの分野の研究・開発は停止した。

近年循環型社会の構築が命題になり、ようやくケミカルリサイクル技術が再浮上してきた。ダイセル化学工業(株)は廃プラスチックから H₂、CO を回収し、メタノール製造の原料とする 5 t/d の実証設備にて 2001 年 1 月から実証試験を開始している。

欧州では、Texaco 社、ABB 社などが参画し、オランダのロッテルダムで 150 t/d の実証兼商業設備が計画された。このプロジェクトは、廃プラ原料を液状に加工し、高温炉にフィードする方式である。

ドイツでは、SCHWARZE PUMPE で SVZ 社による廃棄物ガス化プラントが運転中である。このプロジェクトは 1992 年～1996 年にかけて立ち上げ、現在 2 形式のガス化炉が稼働中で、新規ガス化炉 1 基が試運転中である。ガス化ガスは発電およびメタノール製造に使用されている。

稼働中の炉形式の 1 つは固定床式の旧式炉で、石炭と固体廃棄物(廃プラ、木材など)をガス化している。本炉は現在稼働中で、処理量は 45,000 t/y(7 基)である。

稼働中のもう 1 つの炉形式は噴流床式炉で、廃油、タービンなどの液体廃棄物をガス化している。本炉も稼働中で処理量は 50,000 t/y(2 基)である。

現状試運転中の炉は British Gas と Lurgi が開発した固定床方式の高温炉(シャフト炉方式に近い)で BGL プロセスと呼ばれている。2001 年 1 月から試運転が開始されている。処理量は 720 t/d で、原料投入口は 4 か所あり、2 つが廃棄物用、1 つが石炭用、1 つが石灰石用である。廃棄物の性状変動などに伴う炉の温度などの変動は石炭供給量にて調整している。

米国では、Biomass Technologists 社が廃プラ、バイオマスなどのケミカルリサイクルを提案しているが、方式は欧州オランダ方式と同じである。

4.3 本技術の特徴

本技術は、低温ガス化炉と高温ガス化炉を組み合わせ

て「加圧二段ガス化システム」としたことにより、以下の特徴が得られた。

- 1) 化石原料の節約： 廃棄物から高压の合成ガスを製造し、化学工業の原料としてケミカルリサイクルができる。
- 2) マテリアルリサイクル： 廃プラ中の金属および非鉄金属などの不燃物は、低温ガス化炉より未酸化状態で回収されるため、価値が高く再利用が容易である。
- 3) 分別の簡素化： 対象とするプラスチックの種類に制限がなく、PVC や ABS の処理も可能である。また、紙、木屑などのその他廃棄物も原料とすることができる。
- 4) 多種燃料に対応： 廃プラのほか、RDF、化石原料、液状物などとの併用が可能である。
- 5) 低ダイオキシン： ガス化温度が高温であり、プロセス全体が還元雰囲気にあるため、ダイオキシン類が生成する懸念がなく、またガス化後急冷するため、再合成の懸念もない。
- 6) CO₂削減効果： 廃プラ単純焼却と比較すると、廃プラ量 1,000 t/d 規模で年間約 60 万トンの CO₂削減量となる。また、廃プラ焼却・発電と比較すると、廃プラ量 1,000 t/d 規模で年間約 26 万トンの CO₂削減量となる。

現在は 30 t/d が運転中で、2002 年 10 月から 65 t/d 新設炉が運転開始する予定である。この時合成ガスを隣接工場の既設アンモニア製造施設へ供給し、アンモニア合成原料の一部とするものである。

5. 21 世紀に必要とされる転換技術(第三世代)

5.1 エネルギーの高効率変換の視点

環境問題はエネルギー問題である。現在、バイオマスなどの再生可能エネルギーからメタノールや水素などを合成し、発電や自動車用燃料として活用することが期待されている。しかし、バイオマスは発熱量が低く、生成ガスの有価ガス濃度も、冷ガス効率も低く、これまでの技術では難しい。すなわち、エネルギーの高効率変換の視点とは、下記の 3 点である。

- 1) ガス化炉： 発熱量の低い原料から、無酸素ガス化により、「CO₂が微量の、高純度の生成ガスを分離して得る」ことができること。
- 2) ガス改質： 高温ガス改質¹²⁾を不要とする触媒ガス改質。
- 3) 市場経済： 雑多な各種廃棄物をも原料とするため、常圧ガス化とし、前処理を簡素化できること。

5.2 内部循環型流動床ガス化炉(ICFG)

ICFG は一つの炉の中にガス化・チャー燃烧・層温制御(必要に応じて)の 3 つの機能を持った内部循環型の流動床ガス化炉である⁹⁾。図 4 に内部循環型流動床ガス化炉の原理図を示す。

この炉の目的は、廃棄物から石炭・バイオマスといった多種原料(マルチフューエル)に対応できるガス化炉とすることである。そのために、チャー燃烧室を設け、チャーの選択燃烧を強化あるいはコントロールできるよ

図4 内部循環型流動床ガス化炉の原理図

図5 従来法（部分酸化法）とICFG法の比較

うにしたものである。そしてその用途は高効率発電から化学原料合成まで複合的な利用（コ・プロダクション）を可能とし、CO₂削減対応だけでなく将来のエネルギーセキュリティに貢献できるものと考えている。

ICFGの特徴は、無酸素ガス化により、CO₂が少なく発熱量が高い高純度の生成ガスを得られるところにある。従来法（部分燃焼法）との比較を図5に示す。原料を供給するガス化室の流動化ガスには蒸気や炭酸ガスをガス化剤として用いる。ガス化残渣（チャーとタール）は流動媒体の循環に伴いチャー燃焼室に運ばれ、そこで燃焼する。

チャー燃焼室の流動化ガスには空気または酸素含有ガスが用いられる。ガス化残渣の燃焼熱によって加熱され、かつ吸着したタール分がクリーニングされた流動媒体及び触媒は再びガス化室へと移動し、ガス化に要する熱を供給する。

熱回収室はチャー燃焼室の温度調節のために設けられており、固定炭素の多い原料をガス化させる場合に、できるだけ高い層温に保ちつつアグロメレーションの発生

を防止する。また、ガス化温度を精密に制御する場合などに有効に機能する。

チャー燃焼室内には、ガス化室とチャー燃焼室との間のガスをシールしつつ、流動媒体の移動を可能にすべく、流動媒体移動室が設けられている。流動媒体はケイ砂、または触媒、必要に応じて石灰石を供給する。

以上のような構成により、下記の特徴を持つ。

- 1) 部分燃焼方式でありながら、発生した貴重なガスを燃焼させることがないので、ガス化効率を高く維持することができる。しかも燃焼ガスの混じらない高発熱量の生成ガスを得ることができる。すなわち、自己熱による外部加熱の効果を持つ。
- 2) 炉の温度と流動媒体の循環量を調節することで、反応性の異なる多種多様な原料をガス化することが可能になる。
- 3) 流動媒体として触媒を利用した場合、還元域（ガス化室）と酸化域（チャー燃焼室）を循環することによって、触媒の再生効果が可能である。すなわち、FCC（触媒接触分解）プロセスがひとつの

炉の中で行われる。触媒により、タールが完全に分解すれば、高温プロセスが不要になる。

- 4) 石灰石が、還元域（ガス化室）と酸化域（チャー燃烧室）を循環することによって脱炭酸反応や再炭酸化反応を繰り返し、脱硫反応活性を高める効果がある。

5.3 エネルギーの高度利用の視点

乾燥木質系バイオマス为原料とした場合の、従来型とICFG型の正味エネルギー回収効率を比較してみた。規模を100 t/d、発熱量を16.1 MJ/kgとした場合のFSでは、以下のことが言える⁷⁾。

- 1) ICFG型は、従来型の約3倍の回収効率が期待できる。バイオマスなど用には分離ガス型が必須である。
- 2) 効率だけの比較では、水素・メタノールが50%近い正味回収効率であり、発電より優位である。ただし、発電が目的の場合は合成ガスでの発電が優位である。水素・メタノールは化学原料または分散燃料向きである。どちらが良いかは、規模・サイト事情により決まる。

6. あ と が き

本稿で述べた技術の第一世代はガス化であるが、ガス化・溶融・焼却である。すなわち廃棄物処理技術である。そして第二世代の高温・混合ガスケミカルリサイクル（高発熱量廃棄物用）から、第三世代の低温・分離ガスケミカルリサイクルへと進化していく。これらは廃棄物処理技術というより、CO₂削減対応のエネルギー変換技術である。環境問題はエネルギー問題を含めた視点で考えないと袋小路に入ってしまう。宇宙船地球号を破壊

させないためには、バイオマスなどの再生可能エネルギーから高効率に化学原料や水素などを合成し、発電用、工業用、自動車用燃料として高度利用する時代にするべきである。ガス化技術は炭素循環を可能とする転換技術の基本技術であり、21世紀のキーテクノロジーに育てなければならないと思っている。

参 考 文 献

- 1) 大下孝裕：日本エネルギー学会誌，78，712（1999）
- 2) H. Fujimura, T. Oshita and K. Naruse：Proc. 12th Intl. conf. On Incineration and Thermal Treatment Technologies, Session 6（2001）.
- 3) 杉山秀子：日本エネルギー学会誌，81，178（2002）.
- 4) 寺内 誠，林 茂也：伝熱，40，8（2000）.
- 5) 杉山秀子，今泉隆司，福岡大作，佐藤隆夫：第18回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス要旨集，p.99（2002）.
- 6) 三好敬久：日本エネルギー学会誌，80，106（2001）.
- 7) K. Matsuoka and H. Inagaki：Proc. 14th World Hydrogen Energy Conference, Session A 2.5（2002）.
- 8) 野口 学，松岡 慶，藤村宏幸（M. Noguchi, K. Matsuoka, and H. Fujimura）：材料と環境 [Zairyo-to-Kankyo (Corros. Eng.)]，51，67（2002）.
- 9) 野口 学，松岡 慶，藤村宏幸，澤田義行，植田茂紀（M. Noguchi, K. Matsuoka, H. Fujimura, Y. Sawada and S. Ueda）：材料と環境 [Zairyo-to-Kankyo (Corros. Eng.)]，51，75（2002）.
- 10) 大下孝裕（T. Oshita）：材料と環境2002講演集（Proc. JSCE Materials and Environments 2002），p.16，腐食防食協会（JSCE）（2002）.
- 11) 大下孝裕：化学工学会第67年会研究発表講演要旨集，G 115（2002）.
- 12) 岩楯由貴，成瀬克利，佐々木香織，内野 章，廣勢哲久：第7回流動層シンポジウム講演要旨集，p.393（2001）.

（2002年8月24日受理）