

バイオマスのガス化による水素製造

大下 孝裕

(株) 荏原製作所 環境エンジニアリング事業本部
108-8480 東京都港区港南 1-6-27

Hydrogen Production by Gasification of Biomass
Takahiro OHSHTA
EBARA CORPORATION
1-6-27 Kohnan, Minato-ku, Tokyo 108-8480, Japan

Gasification process for coal or waste plastics has been developed. Since in these conventional gasification technologies, partial combustion method is used, combustion gas is mixed in product gas. Therefore, in such partial combustion method, oxygen should be used for keeping high-concentration of valuable gas in the product gas. However, if you use a raw materials of low heat value such as biomass, although oxygen is supplied to gasifier, concentration of valuable gas cannot be high. It suggests that a new concept which is different from conventional technologies should be established to obtain high-concentration valued gas from raw materials of low heat value. Internally circulating fluidized bed gasification is one of such new concepts of gasification.

Key words : hydrogen production, gasification, biomass, fluidized bed

1. 緒言

石炭や廃プラスチックのガス化技術は完成されている。これらの技術は、部分燃焼ガス化法であり、生成ガスに燃焼ガスが混ざる。そのため、生成ガス中の有価ガス濃度を維持するため、通常酸素を用いる。しかし、バイオマスのような発熱量の低い原料では、酸素を用いても生成ガス中の有価ガス濃度は高くできない。よって、発熱量の低い原料から高濃度の有価ガスを得

るためには、従来の技術とは異なるコンセプトが必要である。その一例が内部循環型流動床ガス化法である。

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。第1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

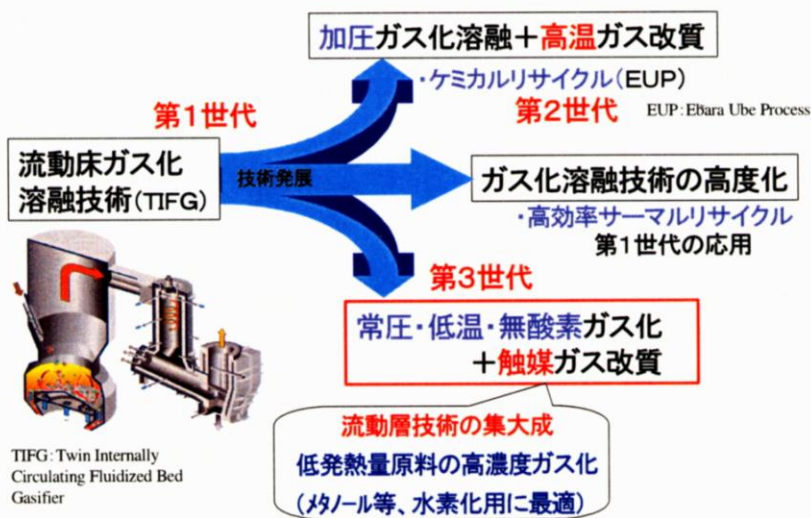


図1 ガス化技術の高度利用と進化

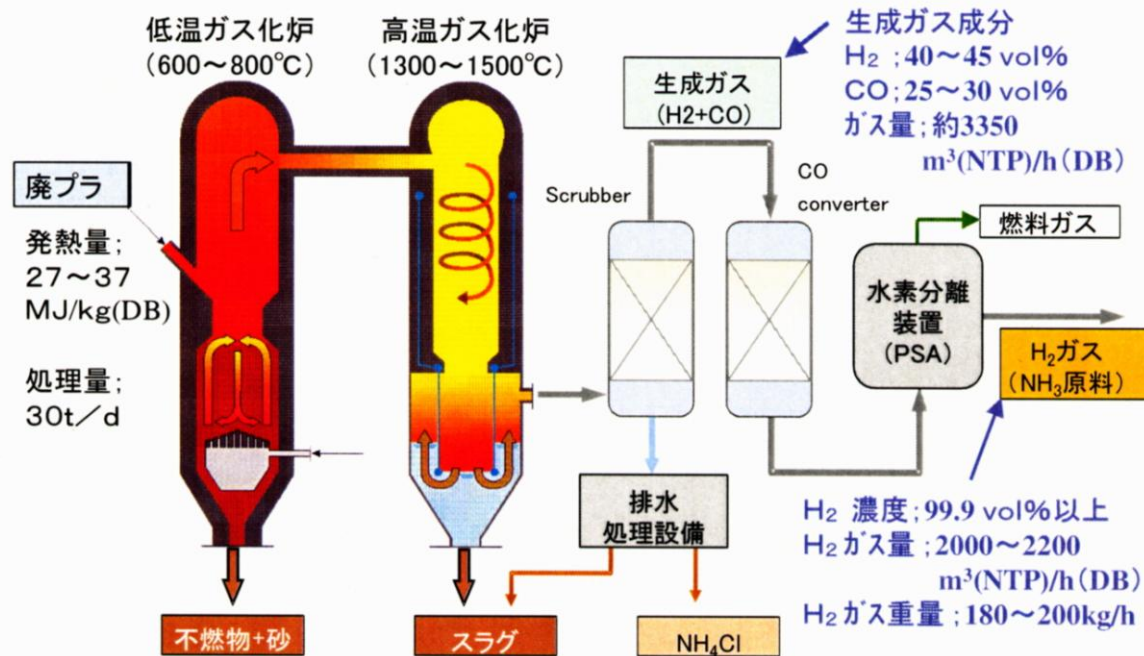
化（完全燃焼）し、ダイオキシン等を分解すると同時に灰分を自己熱溶融するものである[1, 2]。現在、酒田地区クリーン組合殿、川口市殿、宇部市殿、中農地域広域組合殿、南信州広域連合殿などで順調に運転されている。

第2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[3-5]。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合せた

「加圧2段ガス化溶融システム」で、廃棄物から水素やアンモニア等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3項に記す。第3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4項に記す。

3. 加圧二段ガス化によるケミカルリサイクル（第2世代）

3.1 技術の概要



生成ガスのダイオキシン濃度; 0.0001ng-TEQm³(NTP) 以下

図2 加圧二段ガス化システムによるケミカルリサイクル

基本システムは、図2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[3-5]。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、炭化水素等からなる生成ガスとチャー、タール等に熱分解される。炉底部には不燃物抽出装置を設け、金属等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、タール等は、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、灰分は溶融スラグ化する。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、溶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等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℃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。本開発はMETI/NEDO/(社)プラスチック処理促進協会の委託事業として、30 t/d規模で実証を行ったものである。現在は新設の65 t/dが運転中である。図3に運転チャートを示す。廃プラを原料として安定に水素、

一酸化炭素を得られている。昨年の10月から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している。廃プラから純水素を得、商品価値の高いアンモニアに転換している世界初めての事例である。また、経済産業省は「都市再生プロジェクト」の一環として「廃プラからアンモニア合成」を採択し、昭和電工(株)にて195 t/dを建設中である。

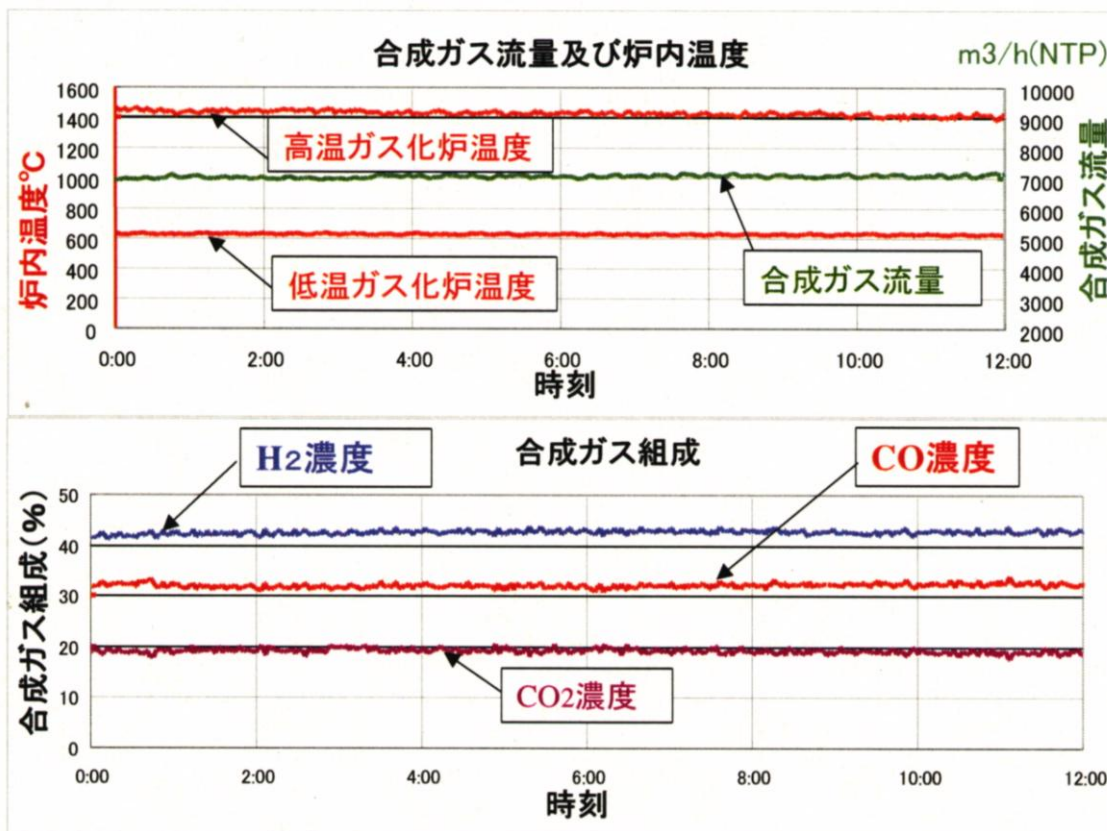


図3 運転チャート

3. 2 国内外の動向

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の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の実証兼商業設備の建設が計画された。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、木材等）をガス化している。本炉は現在稼働中で、処理量は 45,000t/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、タール等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 50,000t/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 720t/d で、原料投入口は 4ヶ所有り、2つが廃棄物用、1つが石炭用、1つが石灰石用である。廃棄物の性状変動等に伴う炉の温度等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. 21世紀に必要とされる転換技術（第3世代）

4.1 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、バイオマス等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、「燃焼ガスの混入が殆ど無い、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；高温ガス改質を不要とする低温ガス化炉。
- 3) 市場経済；多様な原料を用いることができるようにするため、常圧ガス化とし、前処理を簡素化できること。

4.2 内部循環型流動床ガス化炉（ICFG）[8, 9]

ICFG（Internally Circulating Fluidized Bed Gasifier）は一つの炉の中にガス化・チャー燃焼・層温制御の 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 [6]。図 4 に内部循環型流動床ガス化炉の原理図を示す。

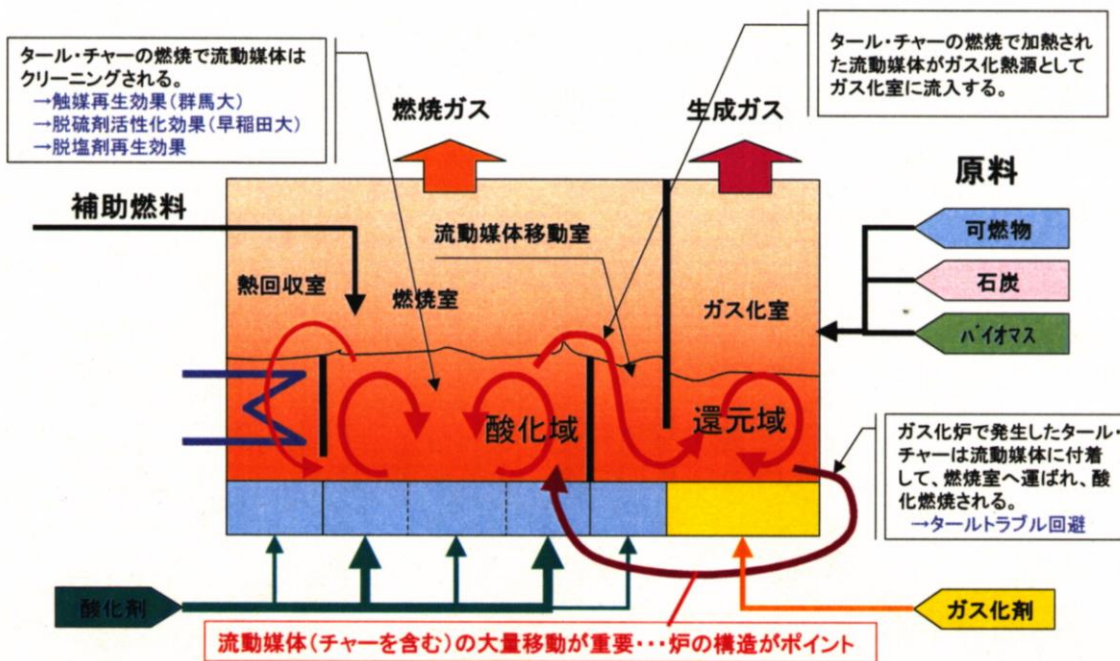


図 4 内部循環型流動床ガス化炉の原理図

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（マルチフェューエル）に対応できるガス化炉とすることである。そのために、チャー燃焼室を設け、チャーの選択燃焼を強化あるいはコントロールできるよ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

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ーに貢献できるものと考えている。

ICFGの最大の特徴は、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。

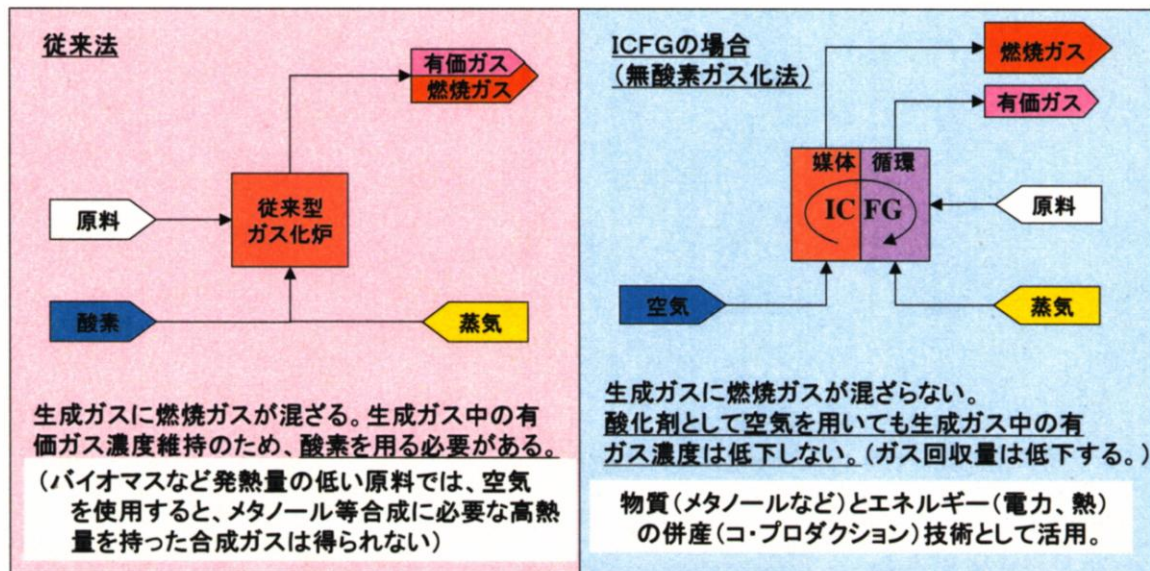


図5 従来法（部分燃焼法）との比較

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又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等に有効に機能する。

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。流動媒体は珪砂、または触媒、必要に応じて石灰石などを供給する。

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、触媒は再生される。すなわち、流動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（チャー燃焼室）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) ダイオキシンについて

ガス化室は無酸素ガス化のため、ダイオキシンのベンゼン環が形成されにくい。燃焼室はチャー・タール主体の燃焼のためダイオキシンの生成はほとんど無いと考えられる。

4. 3 エネルギーと化学原料の併産例

1) 本方式のガス化システムにおいて、自己熱による外部加熱の効果を持つが、発熱量の低い(水分多)バイオマス・廃棄物はガス化に要するエネルギーが大きくなるので、冷ガス効率が低くなる。原料の一部に石炭や残渣油等を利用すると、揮発

分がガス化し、タール・チャーがチャー燃焼室の貴重な熱源になる。

2) ICFG型のチャー燃焼室は、流動層ボイラである。チャー燃焼室に石炭や残渣油等を供給すれば、正に1つの炉でエネルギーと化学原料の併産が可能となる。補助原料は、蒸気(発電など)を得ると同時にバイオマスなどのガス化エネルギーとなる。

3) 昼間は発電主体、夜間は化学原料・液体燃料の生産主体など臨機応変な運営が可能である。図6にエネルギーと化学原料の併産例を示す。

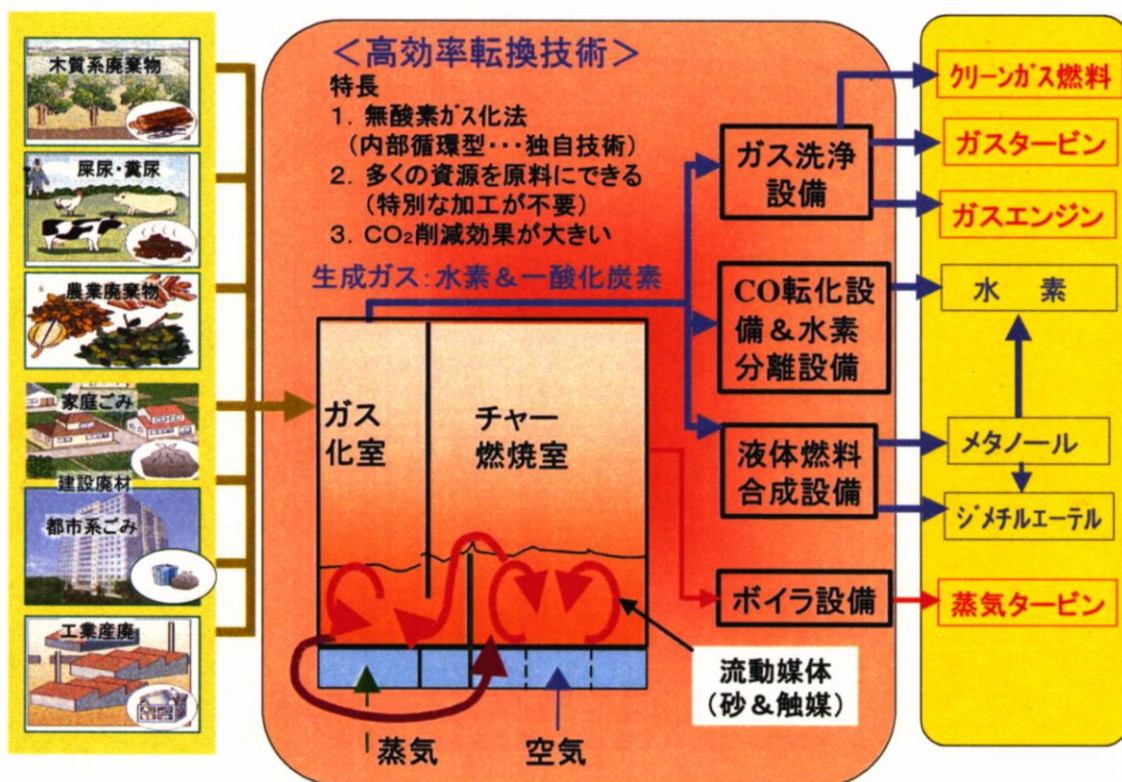


図6 エネルギーと化学原料の併産例

4. 4 二酸化炭素削減効果の比較

エネルギー高度利用の視点を明確にするため、システム毎のCO₂削減効果の比較を試みた。結果を図7に示す。

1) 試算の条件設定

・対象処理物; 木質系バイオマス 2100 万 t/年 (熱量 0.35 × 10¹⁸J/年)、一般廃棄物 5000 万 t/年 (熱量 0.4 × 10¹⁸J/年)、および産業廃棄物 1700 万 t/年 (熱量 0.26 × 10¹⁸J/年)の合計 8800 万 t/年 (熱量 1.1 × 10¹⁸J/年) と仮定した。

・既存設備の発電量; 一般廃棄物 75 万 kW、産業廃棄物 20 万 kW とした。

・新ガス化炉 (ICFG型) による発電、エネルギー変換効率; 対象処理物の平均効率は、LHV ベースで発電の場合 25.2% (送電端効率)、メタノール合成効率 39.5%、(所内動力を勘案した正味効率)、水素合成効率 41.35%、(所内動力を勘案した正味効率) と試算した [7]。

・CO₂排出量; 対象処理物に含まれる炭素分の排出による CO₂排出量として算出。但し、バイオマス由来分(紙、

木、有機物など)はカウントしない。一般廃棄物は10%-Wet ベース、産業廃棄物は30%-Wet ベースが廃プラと仮定し、廃プラの燃焼により発生するCO₂量を算出した。なお、メタノール製造の場合、処理物中の炭素の一部はメタノールに固定されるが、利用の過程でCO₂となり大気排出されるので、処理物中の炭素の全量が(焼却・ガス化の場合ともに)大気排出されるものと仮定した。

- ・発電によるCO₂削減量；ここでは火力平均値(0.190kg-C/kWh)を採用した。
- ・メタノール製造、水素製造によるCO₂削減量；以下の2ケースでのCO₂削減効果を算出した。

ケース1. 既存の化石燃料由来のメタノール、水素を置き換えると考えた場合；

バイオマス・廃棄物のガス化で得られたメタノールは天然ガス原料のメタノールを、水素はナフサ原料の水素を置き換えるものとしてCO₂削減効果を算出。図7の③で表示した。

ケース2. 燃料電池自動車として利用する場合；

バイオマス・廃棄物のガス化で得られたメタノール・水素を燃料電池自動車の燃料として利用し、既存のガソリン自動車を置き換えるとして算出。図7の④で表示した。

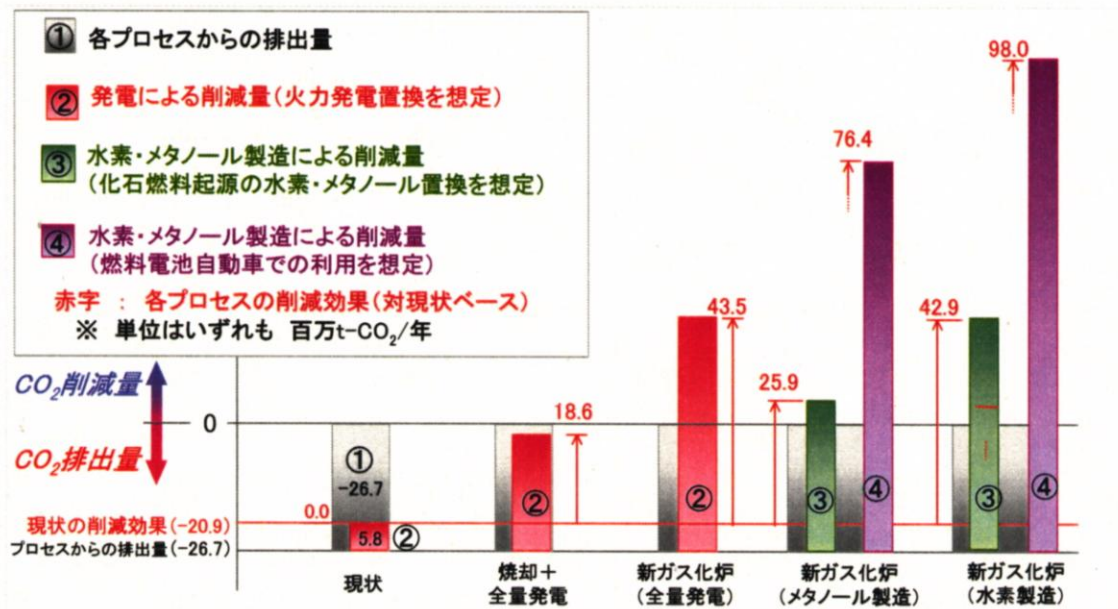


図7 CO₂削減効果の比較

2) 試算結果

- ・ケース1 (図7の③) の場合、メタノール合成、水素製造などのCO₂削減効果より 高効率発電(図7の②)によるCO₂削減効果が大きくなる。これは、既存の火力発電のCO₂排出原単位が大きく、一方でメタノール・水素製造のCO₂排出原単位が小さい(天然ガス、ナフサ等カーボンの少ない原料を用いているため)ことによる。
- ・CO₂削減効果が最も大きいのはケース2 (図7の④)である。これは燃料電池車とガソリン自動車の効率

差が影響している。

3) 所見

単純に比較すれば水素が優位である。但し、水素の場合は燃料電池車や家庭用燃料電池が普及することが前提である。従って、当面は高効率発電が最も効果が高いことになる。いずれが良いかは時代と共に変わるものであり、かつ規模・サイト事情にもよる。技術の完成と普及には時間を要するので、近未来と新時代の両方を睨み、高効率発電、液体燃料化、水素化を同時に進めるべきであると思う。

5. あとがき

本稿で述べた技術の第1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2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3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、バイオマス等の再生可能エネルギーから高効率にエネルギー変換し、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。しかし、バイオマス大量利用の時代はまだ先である。当面は石炭とバイオマス・廃棄物をうまく組み合わせ、エネルギーと化学原料の併産などによる産業の高効率化とCO₂排出量低減化を図るべきである。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。

技術がここまで進化してこれたのは、経済産業省、新エネルギー・産業技術総合開発機構、(財)石炭利用総合センター、(社)プラスチック処理促進協会各位の支援のお陰と思っている。ここに厚く感謝の意を表したい。

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. Proc. 14th World Hydrogen Energy Conference, Session A2.5 (2002)
- 8) 大下孝裕：材料と環境，第51巻，第11号，p487-491(2002)
- 9) 大下孝裕：化学工学会第67年会研究発表講演要旨集，G115(2002)