

キルン型熱分解ガス化改質システムの開発

千葉大学工学部都市環境システム学科

中込 秀樹

はじめに

廃プラスチックを熱分解して一旦ガス化したのちに、冷却して油とする方法が油化である。一方、熱分解後にさらなる高温雰囲気中で熱分解ガスを改質して水素、一酸化炭素、メタンなどの可燃性の低分子ガスを取り出すのがガス化である。

ガス化技術は約200年前のロンドンにおける石炭のガス化に端を発した古い技術であるが、最近では廃棄物や固形バイオマスの有効利用には必須の技術となってきた。

筆者は企業において廃棄物ガス化プラントの研究開発と商品化に携わってきたが、近年さまざまな用途に対してスケールの異なる多くのシステムが立ち上がりつつあることは喜ばしい限りである。しかし可燃性ガスを生成するプラントとしての安全性の確保は最優先項目であり、そのためには今後経験主義的な方法論を極力排して、しっかりした技術的裏づけを持った基本設計技術を確立していくことが肝要となる。

前述のように確かにガス化は古くからの技術であるが、今後の地球環境問題やエネルギー問題の観点から考えると、将来のエネルギーシステムの中核を成す最重要技術のひとつとして捕らえざるを得ない。まだまだ残された長い道のりの中でガス化技術が着実かつ健全に発展していくことを願いつつ本稿を書き上げた次第である。

1. 競争後の研究

図1は「21世紀への科学技術教育」という本の中から吉川先生の書かれた図を引用したものである。

通常の研究開発のプロセスは大学における基礎研究に端を発して、応用研究から製品開発へと発展する(プリコンペティティブ研究:競争前の研究)。一方例えば比較的大型のシステムの場合、大学側におけるラボスケールでの基礎研究を実施することが困難なために、もっぱら企業主導

にて研究開発から製品化に至る場合がある。吉川先生の主張は、このような場合に特定の企業の中に技術が設計・製造に関わるノウハウとして留まってしまったため、学問体系化が成されないことが問題であるというのである。従って企業側に埋もれがちなノウハウを、改めて基礎研究から学問的体系化に結び付けていくポストコンペティティブ研究(競争後の研究)の重要性を指摘している。

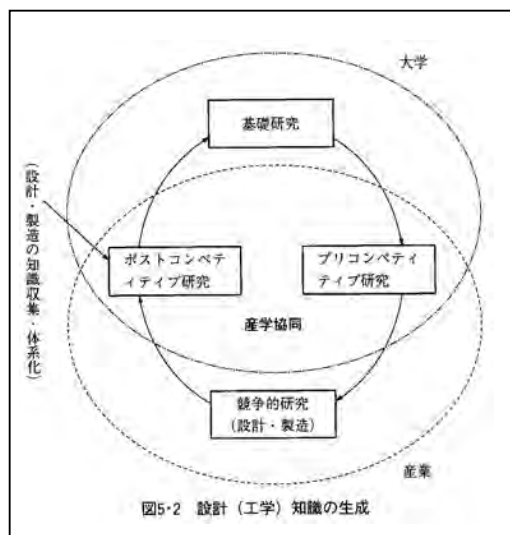


図1 競争前の研究と競争後の研究

21世紀への科学技術教育 (社)日本工学会編、日刊工業新聞社 第5章 歴史的転換期に対応した大学改革 (前東京大学総長 吉川先生)

著者も企業在籍中にこの「熱分解ガス化改質システム」の研究開発から製品化に携わる機会を得たが、まさにポストコンペティティブ研究の必要性を痛感した次第である。しかも必要とされる技術が一社に留まってる程度の製品であればまだ良いが、「熱分解ガス化改質システム」は将来的な廃棄物、バイオマスから石炭に至る固体有機化合物の高効率ガス変換技術の主要部分を占めると考えられるため、基本的な設計技術の確立・体系化によるシステムの信頼性、安全性の大幅な向上が必須となる。

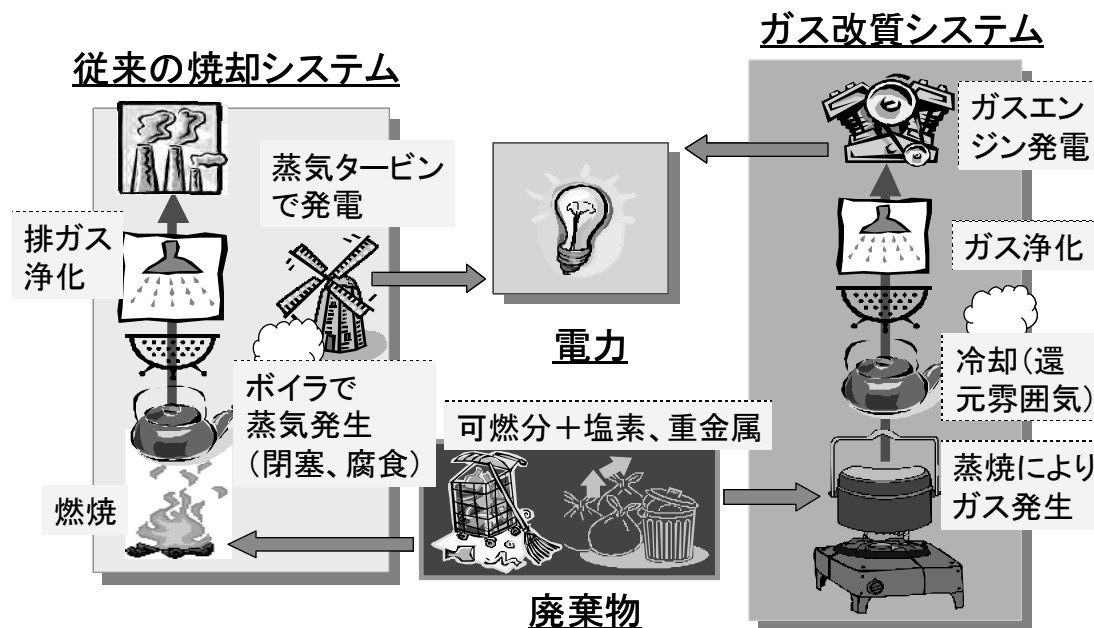


図2 従来焼却システムと熱分解ガス化改質システム

次節で幾つかの技術的に重要なポイントとなる点に関して言及するが、これが新たな基礎研究の展開のきっかけのひとつとなれば幸いである。

2. 熱分解ガス化改質システムの技術ポイント

図2は従来の焼却方式と熱分解ガス化改質方式による発電システムを比較したものである。ストーカー式や流動床式の焼却炉では廃棄物を燃焼した後の高温排ガスをボイラに通すことにより高温・高圧の蒸気を生成する。高温蒸気はタービン発電機により電気エネルギーに変換され、排ガスは塩素や重金属分等の微量有害物質を除去された後に煙突から大気中に放散される。焼却炉方式の最大の問題点はボイラにおけるガス中の塩素分による高温腐食の発生と、小規模発電の場合の蒸気タービン発電機の効率の低さである。

一方ガス化改質方式では廃棄物を500℃前後で蒸焼にして熱分解ガスを発生させ、次に1000℃前後で熱分解ガスを改質して水素、一酸化炭素、メタン(可燃分として)等の低分子量の燃料ガスとする。更にガス中の微量有害物質を除去した後にガスエンジン発電機で電力を発生させる。燃料ガス中の有害成分を除去した燃料ガスで発電するために腐食等の問題を起こさないこと、比較的小規模施

設でも冷ガス効率(ガスのエネルギー/廃棄物のエネルギー)とガスエンジン発電機効率が高いことが大きな利点である。しかし以下に挙げる本システムの開発過程で経験した幾つかの技術ポイントに関して細心の注意を払っていくことの重要性をここに示す。筆者の独善的な考えもあるかもしれないし、残念ながらまだまだ体系化には程遠い。これらをそのまま鵜呑みにするのではなく、是非技術的な検討や判断を行う際の参考資料として捉えて頂きたい。

① タールとすす(煤)

本システムではガスエンジンを筆頭とするさまざまな発電設備の安定稼働を妨げない清浄な燃料ガスを供給することが最も重要なポイントとなる。そのためには熱分解ガスを十分改質してタールと煤分を減らしておく必要がある。ただし煤分はバグフィルター等にて捕捉可能であるためまだ罪が軽い。一方タール分は分子量の大きいものから小さいものまでさまざまな構造、沸点、融点等を有するためやっかいとなる。各種分析結果等より、我々は洗浄後の改質ガス中のタール分と称する有機化合物成分に関して、一般的に分子量の大きいものより小さいものの方が存在量が多く、かつ一方が多い場合には他方も多い傾向を持つと考えている。

図3はメタン濃度の変化に対するエチレン、ベンゼンの

濃度の関係を示したものである。メタン濃度が10000ppm(1%)を超えるあたりからエチレン、ベンゼンの濃度が急激に増加していく様子が見られる。これよりエチレン、ベンゼン濃度を十分低く保つためには、メタン濃度1%程度にて改質炉の温度を1000℃以上に十分高く設定する必要があった。

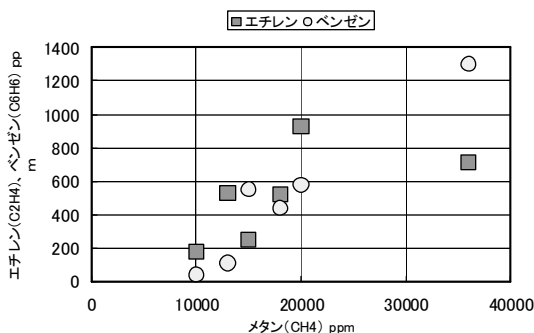


図3 メタン濃度とエチレン、ベンゼン濃度の関係

以上のことより触媒等を使用しない場合、改質炉の温度を十分高く維持することによりメタンの濃度を低く保つことが重要となる。メタンの濃度を低く保つと、分子量のより大きいタール成分の濃度も低いレベルに抑えこむことが見込まれる。

②スケールアップ則

このことはガス化改質方式に限らず一般のプラント全般で常に問題となる点ではあるが、重要なポイントとしてここに挙げた。後述のように我々は処理量4.6トン/日、10トン/日、60トン/日の三種類のプラントを経験したが、60トン/日の実用プラントを運転してみて始めて見えてくることの多さに驚きを隠すことができなかった。

例えばプラントの各機器容量の設計にはガス流量の推算が最も重要となる。しかし結論から申し上げますと、プラント規模が大きくなる程空気の相対的な漏れこみ量が減り(プラントは微負圧に保たれている)、一方放熱量は減るために流量の増加より単位立方メートル当たりの熱量増加の方が支配的となった。従って単純なスケールアップ則に基づいた場合はガス流量を多めに見込むため、機器容量の設定は安全側にはなったが、他方コストアップの要因となってしまう。

ロータリーキルンやガスクラッカー等熱機器のスケールアップでは、大きさによって容積と表面積の関係が変化して

いくために、その機器の目標性能を達成するのに容積と表面積のどちらが支配的になるかに注意を払う必要がある。例えば間接加熱式のロータリーキルンのような伝熱面(表面積基準)を持つ機器の場合、容積基準にて求めたスケールに対して十分な伝熱面積を確保できるような補正を検討すべきであった。

③ 塩化水素とアンモニア

ガス中の塩化水素濃度はももとの廃棄物中の濃度に支配されるために比較的推算しやすい。しかし有機化合物中の窒素成分に起因するアンモニアの生成量は熱分解ガス改質プロセスの条件に大きく影響される。従って窒素分を多く含む化合物を処理する場合には浄化系においてアンモニアを十分除去できるようなシステムをあらかじめ組んでおくことが望ましい。また塩素とアンモニアの化合物である塩化アンモニウムは腐食性が強いいため、残留量が微量でもやっかいであった。

④可燃性ガスの取り扱い

可燃性のガスを製造している点に細心の注意を払うべきである。特に負圧のシステムでは空気の漏れこみに気をつけなければならない。概ね300℃以上の部位では漏れ込んだ空気は瞬時に可燃ガスと反応、燃焼するために大きな問題とならないが、発火温度以下の低い温度レベルでの漏れ込みは防がなければならない。例えば酸素濃度を常にモニターして空気の漏れこみの有無を即検知可能とすべきである。

⑤ 水分

改質ガス中の水分は極力除去すべきである。ガスの温度変化や圧力変化に起因して結露を起こすと、必ず水分中に塩化アンモニウムの様な酸性成分が蓄積されて腐食発生の要因となった。もちろん浄化系にて十分微量成分の除去を行っておけば良さそうに思えるが、100%の除去は不可能である。一方水分を十分除去していれば多少の微量成分はエンジンを通過してしまい、トラブルの要因となることは比較的少ない。

以上熱分解ガス化改質システムにおけるいくつかの重要なポイントを挙げたつもりである。技術的なリスクを極小とするためにも、くれぐれも周到的な研究開発と製品基本設計を行うことが肝要である。

以下実際のプラント試験から得られたデータを示しながら

ら実際の稼動状況を説明していく。

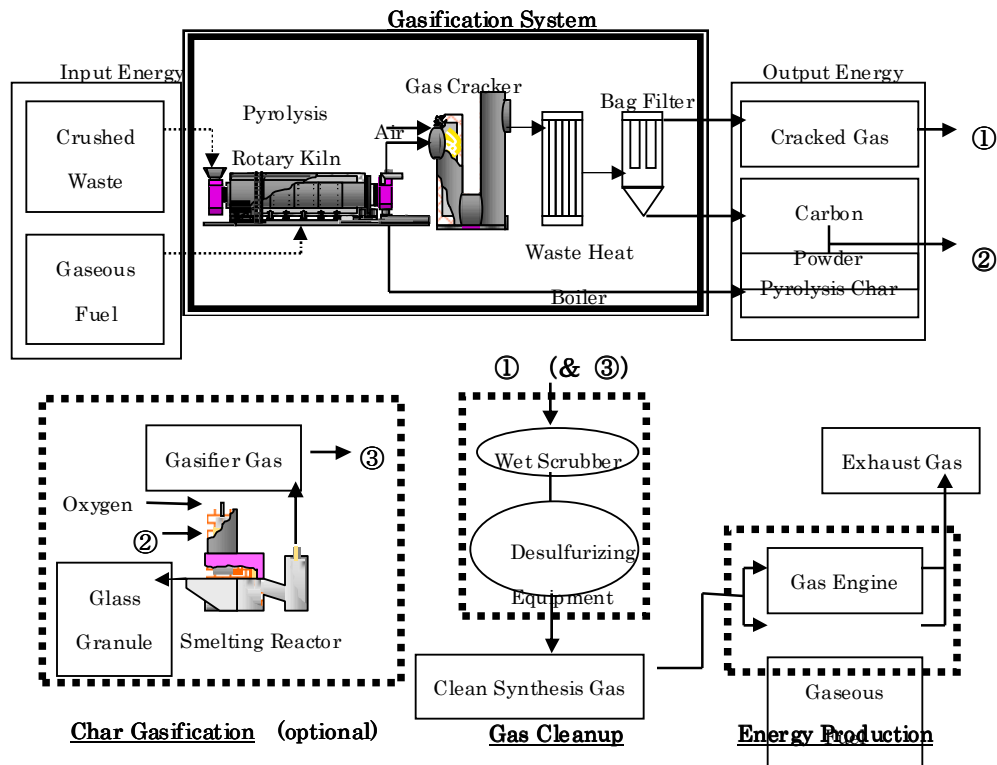


図4 キルン型熱分解ガス化改質システム

4. キルン型熱分解ガス化改質システムの概要

システムの概要を図4に示す。適当な大きさに破砕された廃棄物は熱分解キルンに連続的に投入される。温度550℃にて約一時間蒸焼にされて熱分解ガスと熱分解チャーが生成される。熱分解ガスはさらにガスクラッカーで空気をを用いて部分燃焼させることにより1100℃の環境で可燃分として水素、一酸化炭素、メタン等の低分子量のガスに改質される。改質ガスはスクラパーと脱硫塔にて塩素分、重金属分、硫化水素等を除去されてガスエンジンと熱分解キルンの燃料に供される。一方熱分解チャーとクラッカーで生成したカーボンパウダー(煤)はガス化溶融炉に投入されて、酸素による部分燃焼により1400℃の雰囲気中で一酸化炭素を主成分とする溶融炉ガスと溶融スラグを生成する。溶融炉ガスは改質ガスと合流して燃料として有効利用される。

最初に建設された処理量4.6トン/日のパイロットプラント(表1:編集部注・7ページにあります)で多くの種類の廃棄物を処理することにより基本的なデータを取得した。その後溶融炉付の実証プラント(10トン/日)により長期の

連続運転データを蓄積し、60トン/日の処理容量を持つASR処理プラントを建設して現在に至っている。

5. 廃棄物の性状

図5は試験に用いた都市ごみ、自動車シュレッダーダスト(ASR)並びに比較のための褐炭に関する三成分の比較図である。

家庭から発生する都市ごみは、生ごみを含むため水分が多く、低位発熱量も低い。一方プラスチック類を多く含むASRは水分が少なく、揮発分と固定炭素の比率が高く、低位発熱量も褐炭並の値となっている。またASRは灰分が多い特徴を持つ。

図6は可燃分の比較を行ったものである。三種とも炭素と水素の量はほぼ同オーダーであるが、都市ごみと褐炭は窒素分が多い。前述のように、この窒素分の一部は熱分解ガス化改質のプロセスを経てアンモニアとなり、水処理系の大きな負担となるために注意が必要である。都市ごみ、ASRともに褐炭に比べて硫黄分は少ない。またASR中の塩素分は都市ごみの一桁上の値となっている。

重金属分の分布は図7に示される。都市ごみに比較して

ASRの重金属分の割合は大きく、中でもCd, Pb, Hgが特に多い。従ってASRの処理時には、これらの重金属分と塩素分を十分除去できる十分な能力を有した浄化系を持つ必要がある。

6. 改質ガス、熱分解チャー、カーボンパウダー

以上の性状を有する廃棄物が熱分解ガス化改質のプロセスを経て、熱分解チャー、改質ガス、カーボンパウダー(煤)となる。

改質ガス成分(図8)よりASRの方が都市ごみより水素分が多く、一酸化炭素と二酸化炭素が少ない。コークスを空気と水蒸気にてガス化させて生成した発生炉ガスの成分と比較すると、いずれも水素成分が多いことがわかる。また低位発熱量に関しては概ね1000kcal/m³N程度の値となっている。

本データは10トン/日実証プラント(都市ごみ)、60トン/日商用プラント((ASR)からのデータであるが、前述のようにプラント規模が小さくなるほど改質ガスの発熱量が低くなる傾向があった。またガス中の窒素ガス分がかなり多いが、これは廃棄物中の窒素分とガスクラッカーの部分燃焼用の空気中の窒素分の合計にて、全体で50%近くとなる。従ってこの中のごく一部分がアンモニアとなっただけで、もともとppmオーダーの微量成分を想定している浄化系にとっては大きな負担となってしまうことが理解いただけるであろう。キルンから排出される熱分解チャー(図9)は、当然揮発分が少なく、固定炭素分が多くなる。またASRの場合は灰分の比率が高く、その分低位発熱量の値も低くなる。

一方ガスクラッカーにて熱分解ガスを改質するプロセスで生成されると考えられるカーボンパウダー(煤)は都市ごみ、ASRともにカーボン分が非常に多い。性状もコピーマシンのトナーのような細かい微粉状のものとなる。

熱分解チャーとカーบอนは混合してガス化溶融炉に投入して、一酸化炭素を主成分とする溶融炉ガスと溶融スラグを生成する。一方熱分解チャーとカーบอนの混合物を造粒して鉄、非鉄の精錬プロセスにて有効活用をはかることも可能である。この場合はプラント内に溶融炉を持たない簡略なシステムの構成が可能となる。

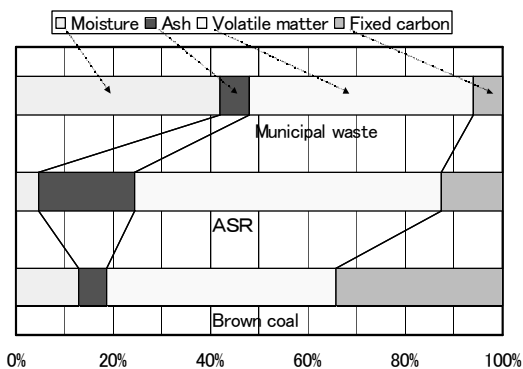


図5 都市ごみ (Municipal waste), 自動車シュレッダーダスト [ASR (Automobile shredder residue)], 褐炭 (Brown coal, for reference)の三成分の比較
 都市ごみの低位発熱量: 10,279kJ/kg (2,455kcal/kg),
 ASR: 22,233kJ/kg (5,310kcal/kg),
 褐炭: 21,186kJ/kg (5,060kcal/kg)

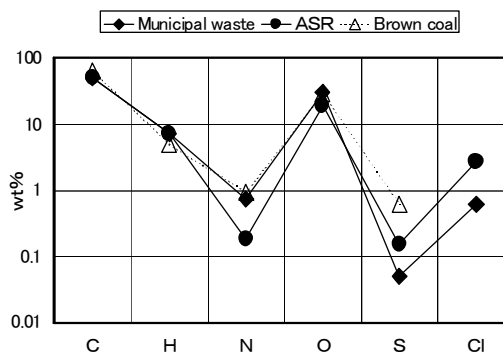


図6 都市ごみ、ASR、褐炭の可燃分の比

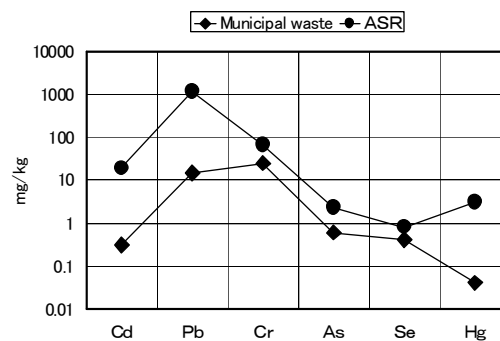


図7 都市ごみとASRの重金属分の比較

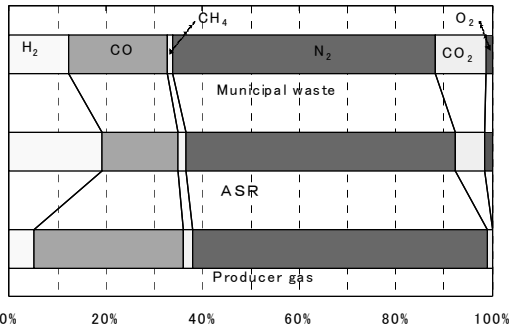


図8 改質ガス成分と発生炉ガス(producer gas, for reference)の比較、低位発熱量：都市ごみ 4,438kJ/m³_N (1,060kcal/m³_N)，ASR 4,723kJ/m³_N (1,128kcal/m³_N)，発生炉ガス 4,983kJ/m³_N (1,190kcal/m³_N)

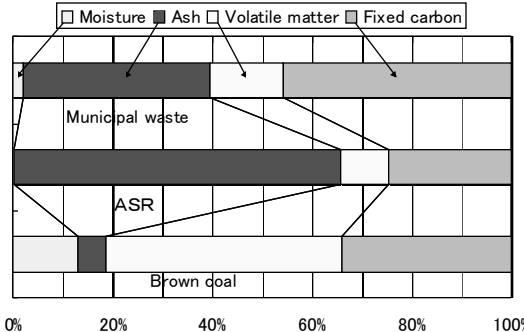


図9 都市ごみ、ASR熱分解チャー成分と褐炭の比較；低位発熱量：都市ごみ 18,130kJ/kg (4,330kcal/kg)，ASR 8,290kJ/kg (1,980kcal/kg)，褐炭 21,186kJ/kg (5,060kcal/kg)

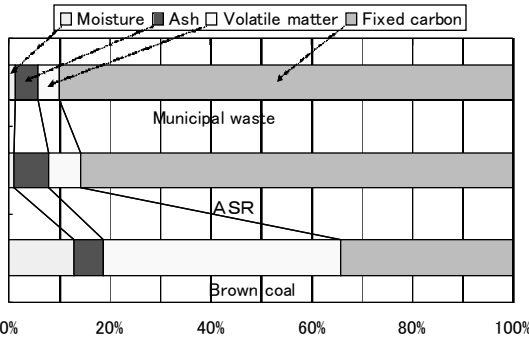


図10 都市ごみ、ASRカーボンパウダー成分と褐炭の比較 低位発熱量：都市ごみ 31,779kJ/kg (7,590kcal/kg)，ASR 30,816kJ/kg (7,360kcal/kg)

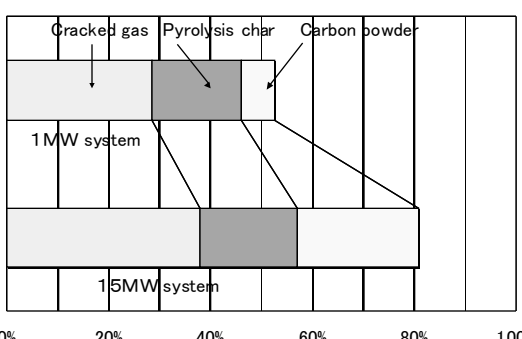


図11 1MW、15MWシステムのエネルギー変換効率(改質ガス+熱分解チャー+カーボンパウダー)

7. エネルギー変換効率

処理量10トン/日の実証プラントにて都市ごみ(～10000kJ/kg)を処理する場合、廃棄物の投入エネルギーは概ね1MW程度となる。一方60トン/日商用プラントにてASR(20000～30000kJ/kg)を処理した場合は15MWレベルとなるため、それぞれ1MW、15MWシステムと呼ぶこととする。図11は溶融炉を持たないシステムにおける、エネルギー変換効率を示したものである。改質ガス、熱分解チャー、カーボンパウダーの持つ合計エネルギーは投入廃棄物のエネルギーに対して、約50%(1MWシステム)～約80%(15MWシステム)となった。

一方溶融炉付のシステムのエネルギー変換効率は、35%(1MWシステム)～70%(15MWシステム)と溶融炉無しシステムより低い効率となる。これは、1400℃レベルの高温動作が必要な溶融炉の稼働時に熱ロスが生じた結果と考えられる。しかし、15MWシステムにおける70%の効率は決して悪い値では無い。例えばガスエンジンの

発電効率を35%と仮定すると、プラントの総合的な発電効率は：

$$\text{発電効率} = 70\% (\text{ガス化効率}) \times 35\%$$

$$(\text{ガスエンジンの発電効率}) = 24.5\%$$

となる。この値は中型の廃棄物発電システムとしては、スチームタービン方式では決して得られない高い効率である。

8. まとめ

以上、キルン型の熱分解ガス化改質システムの開発の過程の中から、留意すべきと思われる幾つかのポイントを列挙するとともに、関連するデータを示した。

最近の研究会や学会においては、廃棄物、バイオマス等の固形有機化合物のガス化システムの研究発表が増えつつある。そのような状況に対して本稿が何らかの技術的検討を行うための一助となれば幸いである。

一方基礎的な研究を主に行う場合は、実プラントにおける切実な諸問題をラボ実験の観点から整理、体系化することにより、基本設計手法確立のための強力な援護射撃と

なることを切にご期待申し上げる次第である。

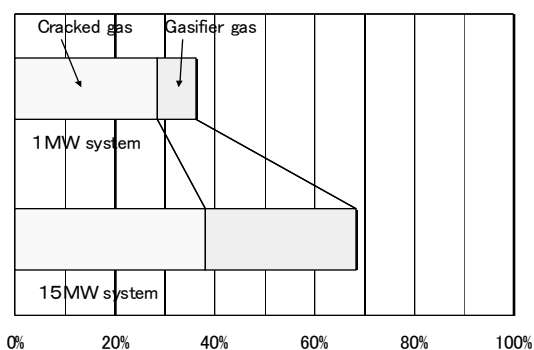


図12 1MW、15MWシステムのエネルギー変換効率(改質ガス+溶融ガス化ガス)

謝辞

本研究を進めるにあたり、(株)東芝 社会システム事業部、電力・社会システム技術開発センター、(株)ヤマナカ、横浜市、エネルギー総合工学研究所、NEDO(新エネルギー・産業技術総合開発機構)を始めとする多くの方々のご援助、ご協力を頂いた。

参考文献

1. Characterization of Chemical Components Produced by Pyrolysis of Automobile Shredder Residue: M.Sakano, K.Imai, T.Imai, R.Nakajima, H.Nakagome, S.Fujiwara, R.Noda, and M.Horio, International Conference on Incineration and Thermal Treatment Technologies (ITS-03) Conference, pp.1-11 (2004)
2. 廃棄物熱分解ガス化改質システム空気予熱器用伝熱材料の実機環境高温腐食挙動: 今井 潔、中島 良、仕入 英武、石毛 崇之、中込 秀樹、耐熱金属材料

- 123 委員会研究報告 Vol.45 No.1 (2004)
3. 高効率廃棄物ガス変換発電技術開発 平成15年度報告書: エネルギー総合工学研究所、三菱重工業、日本ガイシ、東芝、住友金属、IAE-C0327, pp171-225(2003)
4. Evaluation of the energy recycling and low-pollution performance of the waste gasification system using a pyrolysis rotary kiln: H.Nakagome, T.Noma, T.Amemiya, K.Imai, and R.Nakajima, Fuel, Else vier (投稿中)
5. 廃棄物ガス化改質システムによるエネルギーリサイクル: 今井 潔、中島 良、伊部 英紀、中込 秀樹、表面技術 第54巻 第12号(2003)
6. Development of waste gasification system: H.Nakagome, T.Noma, H.Matsui, T.Amemiya, K.Imai, and R.Nakajima, International Conference on Power Engineering (ICOPE)-03, pp.1-117-1-122 (2003)
7. 廃棄物ガス変換システムの顕熱回収・利用技術の開発: 石毛崇之、松井宏、伊部英紀、中込秀樹、今井潔、第3回高効率廃棄物発電に関するセミナー、pp.67-72 (2003)
8. A waste recycling system using a pyrolysis gasification process: R.Nakajima, K.Imai, T.Amemiya, and H.Nakagome, International Conference on Incineration and Thermal Treatment Technologies (ITS-03) Conference, pp.1-9 (2003)
9. A Study on Pyrolysis and Gasification System: T.Sato, T.Todoroki, T.Gotanda, H.Nakagome, R.Nakajima, and K.Imai, International Symposium on Waste Management (ISWA) World Congress 2001, pp.214-218 (2001)

著者連絡先 〒263-8522 千葉市稲毛区弥生町1-33

TEL/FAX:043-290-3466(直通)

E-mail: nakagome@tu.chiba-u.ac.jp

<http://nakagomelab.tu.chiba-u.ac.jp/>

表1 建設したプラントの履歴

Scale	Status	Waste Types	Operation	Specification			
				Gasification	Gas cleaning	Char gasification	Gas engine
4.6ton/day	Pilot	ASR Municipal waste Waste plastics	98/9~99/9	○	○	—	○
10ton/day	Demonstration	Municipal waste	00/4~	○	○	○	○
60ton/day	Commercial	ASR	01/7~	○	○	—	○