高温空気をを用いた石炭・廃棄物ガス化発電システム*

小林 宏 充^{*1}, 吉川 邦 夫^{*2}, 塩田 進^{*3}Gasification Power Generation Systems for Coal and Wastes
Using High Temperature AirHiromichi KOBAYASHI^{*4}, Kunio YOSHIKAWA and Susumu SHIODA^{*4} Tokyo Institute of Technology, 4259 Nagatsuta, Midori-ku, Yokohama, Kanagawa, 226-8502, Japan

A new concept of gasification power generation systems fueled by coal, RDF and various kinds of wastes using high temperature air is proposed. Cycle analyses of these IGCC and boiler systems are done. The calculation shows that heating value of syngas almost doubles when we increase the gasification air temperature from 25°C to 1000°C. More than 45% thermal efficiency is obtainable both for coal and RDF by employing the new high temperature air blown IGCC system. This IGCC system is applicable to various wastes including low grade wastes such as sludge.

Key Words: Gasification, Combined Cycle, Boiler, Solid Fuel, Coal, RDF, Wastes, High Temperature Air Combustion

1. 緒言

有限な資源である化石燃料を有効利用するためには、石炭や廃棄物などの低質な燃料による高効率かつコンパクトで安価な発電設備が今後重要となる。

石炭は、灰分や硫黄が比較的多く含まれるため、これらを除く必要があることが石油や天然ガスを燃料とする場合と異なる点である。現在の石炭火力発電の主流は、微粉炭燃焼ボイラによる蒸気タービン駆動方式であるが、更なる高効率発電として考えられているのが石炭ガス化複合発電(IGCC)方式である。この方式では、ガス化された燃料から硫黄や灰分を除去したクリーンな生成ガスを用いることにより、天然ガスなどで用いられているようなガスタービンと蒸気タービンを組み合わせたコンバインドサイクルを駆動することができる。空気吹きガス化システムの場合42%(送電端 HHV 基準)の高効率な発電が可能とな

る⁽¹⁾。酸素吹きガス化システムの場合は空気吹きの場合に比べて約2倍の発熱量を有する生成ガスが得られ、その生成ガス中に窒素をほとんど含まないので、ガス生成設備が半分以上の大きさでよい反面、空気から酸素を分離するための設備にかなりの動力が必要であるといった欠点がある。

一方、廃棄物発電に関しては、燃焼排ガス中に含まれる塩化水素によるボイラーチューブ腐食の問題から、これまでは蒸気温度を300°C程度までしか上げることができず、発電効率は15%程度であったが、腐食に強い新材料の開発⁽²⁾や外部流動床方式⁽³⁾など腐食の問題を回避することで、高効率化が図られてきている。廃棄物についても石炭同様、ガス化して発電を行えば更なる効率向上につながるのであるが、これまで低発熱量の廃棄物などでは酸素を使わない限りガス化してもその生成ガスの発熱量が低く、ガスタービンを駆動するだけの熱量を保有しない、あるいは燃焼できないほどの低発熱量ガスしか得られないということから、ガス化発電はあまり考えてこられなかった。

そこで、本研究では酸素の代わりに1000°C程度の高温空気をを使ってガス化し、比較的发熱量の高いガスを生成することにより、石炭はもちろんのこと、低質な

* 原稿受付 1998年12月28日。

^{*1} 正員, 科学技術振興事業団(☎226-8502 横浜市緑区長津田町4259) [現: 慶應義塾大学日吉物理(☎223-8521 横浜市港北区日吉4-1-1)]。^{*2} 正員, 東京工業大学大学院総合理工学研究科(☎226-8502 横浜市緑区長津田町4259)。^{*3} 正員, 静岡理科大学(☎437-8555 袋井市豊沢2200-2)。

E-mail: hkobayas@phys-h.keio.ac.jp

Fig. 1 Basic scheme of the MEET system

廃棄物でさえほぼ同様の機器構成により、コンパクトで安価に高効率発電を行えるシステムを提案する。

本論文では、まず平衡反応計算により、石炭および廃棄物 (RDF) のガス化に高温空気を用いた場合の優位性を示し、その生成ガスを冷却して環境汚染物質を除去した後、燃焼させることによりガスタービン、蒸気タービンを駆動して発電するシステムを検討する。さらに、低発熱量である代表的な廃棄物についても同様の方法を用いて発電システムを検討する。

2. MEET システム

本研究で提案する新たなシステムは、多段熱抽出技術 (Multi-staged Enthalpy Extraction Technology : MEET) を用いて、高温空気による石炭・廃棄物のガス化プロセスを構成することによって、石炭火力や廃棄物発電の高効率化をねらったものである。MEET システムの概念図を図 1 に示す。その基本的な考え方は、1000°C 程度に加熱された高温空気によって石炭・廃棄物をガス化し、生成ガスを廃熱回収ボイラを通して冷却し、環境汚染物質を除去してクリーンな燃料ガスとした後に、そのガスの一部を燃焼させて高温空気を生成し、燃料のガス化に利用すると共に、残りのガスを同じく高温空気で燃焼させて、ボイラでの蒸気発生やガスタービンの駆動を行うというものである。本システムは、以下のような利点を持つ。

- (1) 高温空気でガス化するため、低質の燃料でも、比較的低い空燃比でガス化でき、その結果として高い発熱量を持った生成ガスが得られる。
- (2) 燃料を完全燃焼させる場合に比べて、精製を要するガス量が半分程度となり、環境汚染物質を除去するためのガス精製装置が大幅にコンパクトになる。
- (3) ガス化炉において、燃料中の灰分のほぼ全量が溶融スラグとして抜き出され、固化してガラス状物

質となるため、灰分の減容化、無害化が行われる。

- (4) 排ガス再循環高温空気燃焼方式により、生成ガスの最終的な燃焼に伴って発生する NOx 量を大幅に抑制できる⁽⁴⁾。また、高温燃焼であることからダイオキシンの発生抑制も期待される。さらに低発熱量ガスも容易に燃焼させることができる。
- (5) 最終的にはクリーンな生成ガスを燃焼させてガスタービンの駆動やボイラでの蒸気発生を行うため、特に廃棄物発電で問題となっている機器の酸腐食や燃焼灰による機器の損傷の問題がなく、発電効率の大幅な向上が可能となると共に、設備費の低減化が期待できる。

なお、本システムで用いるガス化炉、高温空気予熱器、高温空気燃焼ボイラの研究開発の詳細については文献(5)(6)を参照されたい。

3. 高温空気を用いたガス化特性

石炭、RDF (Refuse Derived Fuel) の高温空気を用いたガス化特性を平衡反応計算により調べる。RDF とは、生活排出ゴミの 50 % 程を占める水分を乾燥させ、圧縮整形して固形化したものであり、可燃性廃棄物の新燃料として比較的高い発熱量を有する。表 1 に本論文で仮定した石炭、RDF の分析値を示す。平衡反応計算はギブスの自由エネルギーが最小となる組成を求め⁽⁷⁾、ガス化温度において入熱と出熱がバランスするように空気過剰率 (理論空気量に対する使用空気量の比) を決めた。また、ガス化炉の熱損失については、本研究ではすべての燃料に対してその燃料の保有熱量の 2.5 % と仮定した。図 2 に石炭および RDF に対して 1000°C あるいは 25°C の空気を用いてガス化した際に得られる生成ガスの発熱量のガス化温度依存性を示す。同じガス化温度において、石炭より低発熱量である RDF は生成ガスの発熱量も低い。空気温度が 25°C の場合には、石炭、RDF ともに良好な燃焼性の目安であ

Table 1 Analysis of coal and RDF

		Skyline Coal	RDF
C	wt%	71.75	42.0
H	wt%	5.47	5.6
O	wt%	11.23	33.2
N	wt%	1.55	0.7
S	wt%	0.62	0.1
Cl	wt%	—	0.6
Ash	wt%	9.38	17.8
Moisture	wt%	3.00	2.6
HHV	kJ/kg	29079	17154

る 4200 kJ/Nm^3 より低く、かなりの低発熱量である。しかし、 1000°C の高温空気を用いれば石炭、RDF ともに、生成ガスの発熱量が 1.5～2 倍となり、容易に 4200 kJ/Nm^3 を超える発熱量が得られる。石炭 IGCC ではガスタービン燃焼器用に圧縮されて $300\sim 400^\circ\text{C}$ となった空気の一部をガス化用に取り出して使用するの、同図では空気温度が 1000°C と 25°C の場合の中間くらいに発熱量があると考えられ、その発熱量は 4200 kJ/Nm^3 前後と考えられる。一方、空気ではなく酸素によるガス化の場合、 10000 kJ/Nm^3 程度の発熱量を有する生成ガスが得られるが、その場合空気から酸素を分離するために動力が必要となり、空気を用いた場合に比べて所内動力が多く必要となる。高温空気を用いたガス化は酸素を用いた場合より得られる生成ガスの発熱量は低い、酸素分離の動力を必要としないため高効率な発電が期待できる。また、RDF についても 1000°C の高温空気を用いることにより、従来の空気吹きによる石炭ガス化生成ガス並みの発熱量をもったガスが得られることがわかる。このことから RDF に関してはこれまであまり考えられてこなかった IGCC システムの構成が可能となり、高効率発電が実現できると考えられる。

図 3 に 1000°C あるいは 25°C の空気を用いた場合の石炭および RDF のガス化温度に対するガス化時の空気過剰率を示す。同図から、高温空気を用いることにより低空気過剰率でガス化できることがわかる。空気吹きによる石炭 IGCC では空気過剰率が 0.5 前後でガス化されることから考えても高温空気を用いることによりガス化空気量が減るので利点がある。低空気過剰率でガス化できるので、生成ガスの発熱量が高くなり、同時に生成ガス量が減少し、ガス精製機器がコンパクトになると考えられる。

図 4 に空気温度に対する石炭、RDF の生成ガス量を示す。灰分の融点の違いから、石炭、RDF のガス化温度はそれぞれ 1300°C 、 1200°C とした。同図中の生成ガス量は理論空気量（空気過剰率 = 1）で完全燃焼させ

Fig. 2 Effects of air temperature and gasification temperature on calorific value of syngas

Fig. 3 Effects of air temperature and gasification temperature on excess air ratio of gasification

た場合の排ガス量で規格化してある。同図から空気温度を上げることにより、生成ガスの量が少なくなることがわかる。高温空気によるガス化の場合、ガス化せずにボイラで燃焼させる方式に比べて生成ガス量は 0.5～0.6 倍程度となり、ガス精製設備がコンパクトになると考えられる。

4. 石炭発電システム

図 5 に高温空気を用いた石炭 IGCC システムを示す。図中には () 内にエンタルピ収支も併せて示した。また、システム計算で仮定した条件を表 2 に示す。本研究で用いたスカイライン炭の灰の融点は 1200°C 程度であり、ここではガス化温度を 1300°C とした。先にも述べたとおり、本システムではガス化温度が高い場合においても、比較的高い発熱量を有する生成ガスが得られるので、灰の融点が高い炭種においても、ガス化炉の温度を灰の融点以上にするか、フラックスを混ぜて灰の融点を下げることで対応できる。

石炭は加圧されたガス化炉に高温の空気とともに供給されガス化が行われる。その後、廃熱回収ボイラ

Fig. 4 Syngas volume as a function of air temperature

(後流の廃熱回収ボイラのエコノマイザなどの部分を設置)で 400°C程度まで温度を下げ、ガス-ガス再生熱交換器を通して 100°C程度まで温度を下げる。ガス精製には湿式を用い、脱硫、除塵、さらにガスタービン燃焼器において Fuel NO_x 発生の原因となるアンモニアやシアンの除去が行われたクリーンな生成ガスは、ガス化炉およびガス精製部での圧損(その他の機器および配管の圧損は単純化のためここでは無視した)を考慮してガスタービンでの所定圧力まで二次昇圧を行い、再生熱交換器で受熱した後、ガスタービン燃焼器へと導かれる。その際、クリーンな生成ガスの一部を高温空気予熱のため利用する。この高温空気予熱器は1対のハニカム型蓄熱体とその上部にそれぞれ燃焼室を設け、一方では燃焼を行ってハニカムに蓄熱し(燃焼室側つまりハニカム入口温度は約 1200°C程度とし、ハニカム出口は 450°C)、他方では低温の空気を蓄熱されたハニカムに通過させ、これらを数十秒で交互に切換えることにより約 1000°Cの高温空気を上部から連続的に生成するものである⁽⁶⁾。発電を行う部分は従来のIGCCと同様にガスタービンは 1300°C級のものを用い、ガスタービン駆動後の排ガスから廃熱回収を行い蒸気タービンを駆動する。ガスタービン部の計算は、

Table 2 Assumed condition for cycle analysis

Gasifier		
Gas Temperature	1300°C	
Gas Pressure	1.5MPa	
Excess Air Ratio	0.37	
Heat Loss	2.5%	
Pressure Loss	20%	
High Temperature Air Preheater		
Gas Temperature	Inlet	1200°C
	Outlet	450°C
Air Temperature	Inlet	389°C
	Outlet	1000°C
Heat Loss	1%	
Gas Turbine		
Gas Temperature	Inlet	1300°C
	Outlet	592°C
Gas Pressure	Inlet	1.5MPa
	Outlet	0.1MPa
Steam Turbine		
High Pressure	Temperature	522°C
	Pressure	17.2MPa
Middle Pressure	Temperature	522°C
	Pressure	4.21MPa
Low Pressure	Temperature	279°C
	Pressure	0.71MPa
Cycle Efficiency	33%	
Air Compressor		
Air Temperature	Inlet	15°C
	Outlet	389°C
Air Pressure	Inlet	0.1MPa
	Outlet	1.5MPa
Adiabatic Efficiency	90%	

タービン翼の空気冷却を考慮した手法を用いた⁽⁸⁾。本方式の発電効率は 45.8 % (以下本解析結果の発電効率は発電端 HHV) であり、湿式ガス精製を用いても、かなり高い効率を得られることがわかる。

5. RDF 発電システム

RDF を燃料として発電する場合、石炭における環境汚染物質に加えて塩化水素やダイオキシンなどの塩化物や重金属類の除去が必須となる。塩化水素は湿式ガス精製により除去できる。また、ダイオキシンはガス化炉などの高温還元性雰囲気ではほとんど生成されないことが知られており、高温でガス化することはダイオキシンの生成抑制に効果的である。銅や鉄、アルミは、熔融スラグといっしょにガス化炉から抽出される。灰分は熔融スラグ化することで無害化される。また、沸点の低い鉛、亜鉛、アルカリ金属類は熔融スラグよりむしろ飛灰中に多く含まれると考えられるが、これも湿式ガス精製部において除去される。

Fig. 5 MEET IGCC system fueled by coal

上で述べたように MEET IGCC システムを用いることにより、廃棄物の中でも比較的発熱量の高い RDF は高効率な発電が行えることがわかった。そこで更に低発熱量である種々の廃棄物の IGCC 発電を検討する。検討した廃棄物は段ボール (corrugated board)、繊維 (textile)、木材 (lumber)、ゴム (rubber)、汚泥 (sludge) であり、これらの分析値⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾を表 3 に示す。表 4 に MEET IGCC システムで予想される性能を示す。検討した廃棄物の中では段ボール、繊維、木材は RDF に近い発電効率が得られた。しかしながら灰分が多く、

Fig. 6 MEET boiler system fueled by RDF

Fig. 7 MEET IGCC system fueled by RDF

酸素を含有しないゴムではガスタービン入口温度が 1300℃に達しないので、1100℃とした。それでも約 42 %の効率が得られることがわかる。また、下水処理で問題となっている汚泥は水分が 80%であるので、廃熱回収ボイラから蒸気を抽気し、その熱で 10%まで水分を乾燥させたものを燃料とする。汚泥を燃料とした場合の MEET IGCC システムを図 8 に示す。ガスタービン入口温度は 1100℃であるが、汚泥の乾燥に要する熱損失を含めても 38%程度の発電効率が得られることがわかった。

これまで、廃棄物発電においても IGCC といった大規模発電を考えてきたが、小規模発電の場合には、蒸気タービンを駆動せず蒸気生成で廃熱回収のみを行う熱電併給型のコージェネレーションも高効率で実現できる。従来の廃棄物発電は 100t/日以上 の廃棄物処理量の大型プラントのみを対象としてきたが、高温空気をを用いたガス化と、ガスタービンコージェネレーションを組み合わせることで 10t/日程度の廃棄物処理量の小型

Table 3 Analysis of typical wastes

		Corrugated board	Textile	Lumber	Rubber	Sludge
C	wt%	43.0	48.0	49.5	69.7	28.2
H	wt%	5.9	6.4	6.0	8.7	5.17
O	wt%	44.8	40.0	42.7	—	21.62
N	wt%	0.3	2.2	0.2	—	4.23
S	wt%	0.2	0.2	0.1	1.6	0.94
Ash	wt%	5.0	3.2	1.5	20.0	33.84
Moist.	wt%	5.2	10.0	20.0	1.2	10.0
HHV	kJ/kg	16376	18514	15443	25330	12485

Table 4 Performance of MEET IGCC fueled by typical wastes

	Syngas HHV	Gas turbine inlet temp.	Thermal efficiency
	kJ/Nm ³	°C	%
Corrugated board	4983	1300	46.0
Textile	5197	1300	46.1
Lumber	3854	1300	44.4
Rubber	3234	1100	42.5
Sludge	4280	1100	37.6

発電プラントも可能となる。

7. 結言

石炭・廃棄物のガス化に高温空気を用いた場合の特性を調べ、その生成ガスを燃焼させることによりガスタービン、蒸気タービンを駆動して発電するシステムを検討した結果、以下のことが明らかになった。

- (1) 高温空気を用いてガス化することにより、常温空気に比べて少量の空気でもガス化が可能となり、比較的高い発熱量を有した生成ガスが得られる。RDFにおいても従来の石炭ガス化生成ガス並みの発熱量が得られ、ガスタービンを駆動することが可能となる。
- (2) 完全燃焼した場合の排ガス量に比べ、ガス化生成ガス量は 0.5~0.6 倍程度となり、ガス精製設備がコンパクトになる。
- (3) 石炭によるガス化複合発電システムでは、湿式ガス精製を用いても約 46 % 程度の高効率発電が可能となる。
- (4) RDF による発電システムでは高温空気ガス化と湿式ガス精製を組み合わせることによりクリーンな生成ガスが得られるので、燃焼ボイラシステムにおいては約 37 %、ガスタービン駆動を行う複合発電システムでは約 45 % と石炭ガス化複合発電に匹敵する高効率な発電が可能となる。
- (5) 本研究で提案した IGCC システムは汚泥のような

Fig. 8 MEET IGCC system fueled by sludge

きわめて低質の廃棄物にも適用でき、その乾燥に要する熱損失を含めても 38 % という高効率な発電が期待できる。

文献

- (1) 太田一広, 空気吹き石炭ガス化複合発電 (IGCC) プラント技術の現状, 第 6 回動力・エネルギー技術シンポジウム講演論文集, (1998), 45-48.
- (2) 川原雄三・他, 高効率廃棄物発電パイロットプラントの運転実績, 第 6 回動力・エネルギー技術シンポジウム講演論文集, (1998), 250-253.
- (3) 新型廃棄物固化燃料(RDF)利用発電技術開発, 電源開発株式会社配布パンフレット.
- (4) 田中良一・他, 省エネルギー, 48-10 (1996-9), 2-36.
- (5) 小坂仁・他, 高温空気を用いた石炭・RDF ガス化発電システムの研究開発(その 2: 高温空気吹きガス化炉の開発), 第 6 回動力・エネルギー技術シンポジウム講演論文集, (1998), 231-235.
- (6) 岩橋崇・他, 高温空気を用いた石炭・RDF ガス化発電システムの研究開発(その 3: 高温空気予熱器・高温空気燃焼ボイラの開発), 第 6 回動力・エネルギー技術シンポジウム講演論文集, (1998), 236-240.
- (7) 日本機械学会編, 燃焼工学ハンドブック, (1995), 8-12, 丸善.
- (8) 吉川邦夫, 塩田進, クローズドサイクル MHD をトッパとするガスタービンコンバインドサイクル発電システム, 機論, 55-513 (1989-5), 1477-1484.
- (9) 田中勝・他, 廃棄物処理総論, エヌ・ティー・エス, (1998), 66-67.
- (10) 廣瀬高志, 下水汚泥の固化燃料化, 東芝機械株式会社配布資料.