MCFC を基幹とする都市型バイオマス利用エネルギーシステムの開発

The Novel Urban Biomass Energy System using MCFC as a Core Technology

○学 谷川 慶太 (阪市大院)
中村 敦 (阪市大院)

正 西村 伸也 (阪市大)
正 伊與田 浩志 (阪市大)

Keita TANIKAWA, Nobuya NISHIMURA, Atsushi NAKAMURA and Hiroyuki IYOTA
Osaka City University, 3-3-138, Sugimoto, Sumiyoshiku, Osaka, Japan

Digestion gas that is generated by anaerobic digestion of wet biomass such as raw sludge and garbage consist of 40% CH₄ and 60% CO₂. At first, molten carbonate fuel cell running on the digestion gas was proposed and a simple prediction model about performance of MCFC cogeneration system was developed in order to examine the characteristics of the system. As results, it turned out generating efficiency of MCFC-CGS is about 42% when the stack operating temperature was 700 degree Celsius and its thermoelectric ratio could be set up according to the stack operating temperature. Next, 5 basic urban buildings model were developed in order to examine capability of innovating MCFC-CGS to those buildings. As results, it turned out that MCFC-CGS could purvey 100 % thermal demands of hotel and public facility and generate over 0.5% of the digestion gas used as a fuel of MCFC-CGS at apartment house, office building and commerce facility.

Key Words: Wastes exploitation, Biomass gasification, Digestion gas, MCFC Cogeneration, Urban energy system

1. はじめに

現在, 我々の生活は, 石油, 石炭, 天然ガスなど, 将来枯渇が予想される化石資源に大きく依存している. そこで, そのような化石資源に頼らず, 廃棄物を削減, 再利用し, なおかつ限りある資源を有効に利用する低炭素社会への移行が強く求められている. そこで, スマートグリッド, スマートエネルギーといった, IT 技術を駆使することで分散型エネルギーと集中電源を統合し, エネルギー利用形態およびエネルギーの需要と供給の効率的なマッチングを図り, 都市内でのエネルギー利用の高効率化を実現させる概念が提案されている. 本研究では, スマートグリッドやスマートエネルギーといった概念に基づいて構築される都市の次世代エネルギーシステムを都市型エネルギーシステムと考え, そのシステム内にバイオマス利用エネルギーシステムを組み込むことを考えた. そこで, 都市内で発生する廃棄物系バイオマスをガス燃料化したバイオガスを燃料とする MCFC-CGS の開発を目標とした.

2. 廃棄物系バイオマスのガス燃料化

2.1 バイオマスの乾式ガス燃料化

熱分解によるガス化では, 無酸素または低酸素状態でバイオマスを高温に加熱することにより, まず乾燥, 熱分解が進行し, 揮発物と炭化物が生成される. 次に, これらがガス化剤 (酸素, 水蒸気などの酸化剤) と反応することで, 最終的な可燃性ガスを生成する手法である. 熱分解ガス化では, 熱分解温度にもよるが, H₂, CH₄, CO₂ が主成分となる. このガス化方法は, 木質ペレットや RDF といったような低含水率であるドライバイオマスに適している.

2.2 バイオマスの湿式ガス燃料化

消化ガスとは, 生ごみ, 下水汚泥などの有機性廃棄物の発酵, 嫌気性消化によって生成されるガスである. 生ごみ, 下水汚泥などの有機性廃棄物から, 加水分解過程, 酸生成過程, メタン発酵過程という 3 段階の過程を経て, 消化ガスが生成される. 消化ガスの成分構成は CH₄ が約 60%, CO₂

が約 40% である.

2.3 バイオガスの成分構成

前節に述べた消化ガスおよび筆者らが行った過熱水蒸気を用いた木質ペレットおよび RDF の熱分解ガス化実験⁽¹⁾により得られたバイオガスのガス化条件および成分構成を表 1 に示す. また比較対象として都市ガス 13A の成分構成も示す. なお, 木質ペレット熱分解ガスについての成分構成については, 同様のガス化条件で実験を行った報告⁽²⁾から引用した.

Table1 Components and Properties of Bio Gases

	Digestion gas	Woody pellet pyrolysis gas	RDF pyrolysis gas	Town gas 13A
Biomass species	Raw Sludge	Wood	RDF	-
Atomosphere gas	-	Superheated steam	Superheated steam	-
Gasifying condition	Anaerobic digestion	Pyrolysis(873K)	Pyrolysis(823K)	-
Component %				
H ₂	0.0	15.7	10.5	0.0
CO	0.0	35.2	18.0	0.0
CO ₂	40.0	27.2	47.6	0.0
CH ₄	60.0	16.6	9.3	88.5
C _m H _n	0.0	5.7	10.9	11.5
Density	kg/Nm ³	1.22	1.18	1.38
Higher Heating Value	MJ/Nm ³	24.6	18.5	46.0
Lower Heating Value	MJ/Nm ³	21.6	15.3	41.6

3. バイオガスを燃料とする MCFC-CGS の性能予測

本研究では, ガス中に CO や CO₂ を含んでも直接燃料として用いることができ, 発電に燃焼反応を含まないのでスケールに関わらずに高効率運転が可能な MCFC に着目し, バイオガスを燃料とする MCFC-CGS の開発を目指した. そのため, バイオガスを燃料とする MCFC-CGS の解析モデルを構築してシミュレーションを行い, その性能特性を調べた. 本報では, 主にスタック運転温度が性能に及ぼす影響について述べる.

3.1 システム構成

MCFC-CGS の概要を図 1 に示す。燃料ガスは燃料加湿器で水蒸気を添加された上で、燃料加湿器および燃料予熱器でスタック運転温度の 50℃手前まで予熱され、改質器に供給される。そして、改質器内で H₂ リッチなガスに改質される。本モデルでは改質器に必要な熱を MCFC スタックからの発熱で補うこととした。こうして処理された改質ガスは MCFC スタック内のアノード極に送られ、一定量の水素が消費され、残された燃料は触媒酸化器で空気と混合されて燃焼する。アノード排ガスはここで予熱されるとともに、燃焼によって CO₂ を添加され MCFC スタック内のカソード極へと送られる。カソード極では一定量の CO₂ と O₂ が消費され、残りはカソード排ガスとして、燃料予熱器と燃料加湿器において燃料ガスに熱を与えたあとと排出される。また、スタック熱出力から改質器に供給する熱を差し引いた分と排ガス熱出力を回収して有効利用するものとした。

Fig.1 Analytical Model of MCFC Cogeneration

3.2 構成機器のモデル化

3.2.1 改質器

改質器の概要を図 2 に示す。

Fig.2 Analytical Model of Reformer

改質用の燃料ガスは水蒸気を添加されて改質器へと送られる。そして、改質器内で加熱されることで、以下の改質反応およびシフト反応を起こす。

これらの反応を経て、改質用の燃料ガスは H₂ リッチな改質ガスへと変化する。この時に必要な熱量はスタック熱出力でまかなう。式(1), (2)の化学反応式について平衡計算を行い、改質器性能およびエネルギーバランスを求めた。

3.2.2 MCFC スタック

MCFC スタックの概要を図 3 に示す。

Fig.3 Analytical Model of MCFC Stack

MCFC セルでは、アノード極で H₂、カソード極で O₂ および CO₂ を消費することによって発電反応が起こる。この反応を通して、一定の発電出力を得られるように、システムに投入する消化ガス量を求めた。また、セル電圧に関する各種損失は、文献⁽³⁾を参考に計算した。

3.3 シミュレーション条件

MCFC スタックのモデルを FCE 社の出力 10kW 級⁽⁴⁾のものとした。さらに、シミュレーションを行うにあたって、以下の仮定を用いた。(1)物質の系外への漏れはない。(2)化学反応は平衡に達するまで進行する。(3)MCFC 内での温度、圧力、ガス組成に分布は無い。(4)アノードおよびカソード出口のガス温度はスタック温度と等しい。(5)触媒酸化器において、ガスは完全燃焼する。(6)システムは定常運転されている

3.4 シミュレーション結果

3.4.1 システム効率の変化

MCFC-CGS の燃料に消化ガスを適用したときの、スタック運転温度変化に対する発電効率、熱効率、総合効率(L.H.V 基準)および熱電比の変化を図 4 に示す。

Fig.4 Effect of Stack Operating Temperature on MCFC CGS Performances

同図に示すように、MCFC スタック温度の上昇に伴い発電効率(図中◇のプロット)は上昇し、熱効率(図中□のプロット)は低下することがわかった。また、熱電比については、MCFC スタック温度が 660℃付近で 1.0 を下回った。このことから、消化ガスを燃料とする MCFC-CGS においては、スタック運転温度の変化によって熱電比を調節できることがわかった。

3.4.2 システム熱出力の温熱利用

Fig.5 Effect of Stack Operating Temperature both on Heat recovery amount and Hot water Flow Rate

消化ガスを燃料とする MCFC-CGS のシステム熱出力を温水発生に利用することを考えた。ここで、発生させる温水の温度は 80℃と設定した。また、システム最終排ガス温度は 100℃とした。MCFC-CGS のスタック運転温度に対する温水発生量の変化を図 5 に示す。同図に示すように、スタック運転温度に応じて、温熱 8.3~17.4kW、温水発生量にして 129.4~270.5kg/h が得られた。

3.4.3 システム熱出力の冷熱利用

消化ガスを燃料とする MCFC-CGS からのシステム熱出力を用いて二重効用吸収式冷凍機を駆動し、冷房用の冷水を作ることを考えた。そこで、システム熱出力を吸収式冷凍機の駆動に用いて冷水を発生させた。ここでは、高温再生器の溶液出口温度を 150℃に設定し、冷水温度は 5℃、システム最終排ガス温度を 160℃に設定した。また、このとき、吸収冷凍サイクルの性能予測結果より、二重効用吸収式冷凍機の COP は 1.14 に設定した。消化ガスを燃料とする MCFC-CGS のスタック運転温度に対する冷水発生量の変化を図 6 に示す。

Fig.6 Effect of Stack Operating Temperature both on Chilled Water Amount and Cooling Capacity

図 6 に示すように、スタック運転温度に応じて、冷熱 8.0~17.3kW、冷水発生量にして 340.0~738.5kg/h が得られた。

4. 消化ガスを燃料とする MCFC-CGS の実用化検討

4.1 建物用途別モデルの設定とエネルギー需要の計算

Table2 Energy Demand Pattern of Buildings

Model Number	1	2	3	4	5
Model of Building	Apartment House	Office Building	Commerce Facility	Hotel	Public Facility
Ground-Floor Area	m ² 3000	6000	6000	3000	6000
Building-to-land Ratio	- 40	50	80	80	60
Building Area	m ² 1200	3000	4800	2400	3600
Floor Number	- 15	20	10	15	10
Floor-Area Ratio	- 600	1000	800	1200	600
Total Floor Area	m ² 18000	60000	48000	36000	36000
Electric Load(EL)	kW 540	4200	3360	1800	1800
Pattern A (Cooling)					
Cooling Load(CL)	kW 828	6300	5040	3132	3780
CL/HA	% 71	91	87	52	74
Hot-water Load(HWL)	kW 342	660	768	2916	1332
HWL/HA	% 29	9	13	48	26
CL+HWL(=HA)	kW 1170	6960	5808	6048	5112
HA/EL	- 2.17	1.66	1.73	3.36	2.84
Pattern B (Heating)					
Heating Load(HL)	kW 360	2400	4560	2808	3420
HL/HA	% 51	78	86	49	72
Hot-water Load(HWL)	kW 342	660	768	2916	1332
HWL/HA	% 49	22	14	51	28
HL+HWL(=HB)	kW 702	3060	5328	5724	4752
HB/EL	- 1.30	0.73	1.59	3.18	2.64

消化ガスを燃料とする MCFC-CGS の実用化を検討するにあたり、都市内の建物モデルとして集合住宅、オフィスビル、商業施設、宿泊施設、公共施設の 5 つのモデルを設定し、各建物モデルのエネルギー需要パターンを求めた。その結果を表 2 に示す。ここで、熱需要に関して、冷房需要と暖房需要は同時に需要がないとし、どちらか片方と温水需要を合わせたものを熱需要とし、熱需要を冷房需要と温水需要としたものをパターン A、熱需要を暖房需要と温水需要としたものをパターン B とした。

4.2 MCFC-CGS の規模選定とエネルギー供給量の計算

Table3 Performance of MCFC-CGS Installed to Buildings

(a) Pattern A

Model Number	1	2	3	4	5
Model of Building	Apartment House	Office Building	Commerce Facility	Hotel	Public Facility
Electric Load	kW 540	4200	3360	1800	1800
Electric Supply	kW 270	2100	1680	900	900
Load Factor	% 50	50	50	50	50
Cooling Load	kW 828	6300	5040	3132	3780
Cooling Supply	kW 650	3814	3051	3132	3780
Load Factor	% 79	61	61	100	100
Hot-water Load	kW 342	660	768	2916	1332
Hot-water Supply	kW 0	0	0	1055	487
Load Factor	% 0	0	0	36	37
Operating Temperature	°C 600	620	620	600	600
Thermoelectric Ratio	- 2.18	1.63	1.63	2.18	2.18
Feed Rate of Bio Gas	Nm ³ /day 4534	29397	23518	30224	30224
Generated Bio Gas	Nm ³ /day 19	115	132	40	29
Self-sufficient Rate	% 0.419	0.391	0.561	0.132	0.096

(b) Pattern B

Model Number	1	2	3	4	5
Model of Building	Apartment House	Office Building	Commerce Facility	Hotel	Public Facility
Electric Load	kW 540	4200	3360	1800	1800
Electric Supply	kW 270	2100	1680	900	900
Load Factor	% 50	50	50	50	50
Heating Load	kW 828	6300	5040	3132	3780
Heating Supply	kW 348	1974	2745	3132	3780
Load Factor	% 42	31	54	100	100
Hot-water Load	kW 342	660	768	2916	1332
Hot-water Supply	kW 0	0	0	690	122
Load Factor	% 0	0	0	24	9
Operating Temperature	°C 640	700	620	600	600
Thermoelectric Ratio	- 1.29	0.83	1.63	2.18	2.18
Feed Rate of Bio Gas	Nm ³ /day 3299	20696	23518	30224	30224
Generated Bio Gas	Nm ³ /day 19	115	132	40	29
Self-sufficient Rate	% 0.576	0.556	0.561	0.132	0.096

まず、各建物モデルのエネルギー需要パターンに対する MCFC-CGS の規模の選定を考えた。電力需要に着目し、その電力需要の 50%を MCFC-CGS でまかなうこととし、MCFC-CGS の機能を決定した。また、このとき、MCFC-CGS の性能はその規模に関わらず、3 章で示した 10kW 級の MCFC-CGS の性能と同等であると考え、スケールアップした。各建物モデルに対する MCFC-CGS の規模、各建物モデル、各エネルギー需要パターンに対して選定した MCFC-CGS の運転条件を表 3 に示す。ここでは、熱利用に関して、空調負荷需要を満たすことを優先した。

さらに、各建物モデルから排出される紙類、厨芥類、下水汚泥の量を、排出原単位を用いて計算し、その量から発生しうる消化ガスの量を求め、各建物の MCFC-CGS の消化ガス自給率を求めた。

エネルギー需要パターン A について述べる。このとき、宿泊施設と公共施設において、表の上から 4・5 行目の冷

房需要と冷熱供給量からわかるように、冷房需要(Cooling Load)を 100%満たすことができた。また、消化ガス自給率をみてみると、商業施設において 0.561%と最も高くなることがわかった。これは、商業施設から排出される有機性廃棄物が多く、それにともない、多くの消化ガスを得られるからである。

次にエネルギー需要パターン B について述べる。このときも、同様に宿泊施設と公共施設において、暖房需要(Heating Load)を 100%満たすことができた。また、消化ガス自給率をみてみると、集合住宅、オフィスビル、商業施設において 0.55%以上が得られた。

4.3 各建物モデルへの導入評価

各建物モデルのエネルギー需要の熱電比を調べると、特にパターン A において、熱電比が大きくなる傾向が得られた。3 章より、消化ガスを燃料とする MCFC-CGS の性能をみると、スタック運転温度を下げると、熱電比が比較的高くなる傾向が得られている。したがって、各建物モデルに消化ガスを燃料とする MCFC-CGS の導入を考える場合、スタック運転温度を低めに設定することで、エネルギー需要パターンと MCFC-CGS によるエネルギー供給のマッチングを図ることが可能であると考えられる。

また、消化ガスを燃料とする MCFC-CGS の駆動において、その消化ガスを単一の建物モデルでまかなうことは難しく、比較的消化ガスの発生量が多い商業施設やオフィスビルと他の建物を組み合わせて、地域レベルで消化ガスや熱の融通を図ることが有効であると思われる。

5. 結言

都市内で発生する廃棄物系バイオマスをガス燃料化したバイオガスを燃料とする MCFC-CGS の開発を目的に、システムのモデル化と、利用用途のことなる 5 種類の建物モデルへの導入検討を行い、以下の結論を得た。

- (i) 消化ガスを燃料とする MCFC-CGS の性能予測を行った結果、スタック運転温度を変化させることで、MCFC-CGS の熱電比を 0.83~2.18 の間で自由に調節できることがわかった。
- (ii) 建物用途別エネルギー需要モデルを設定し、その建物モデルへのバイオガスを燃料とする MCFC-CGS の導入可能性について検討した結果、消化ガス自給率を評価基準とすると、単一の建物で MCFC-CGS の燃料をまかなうことは難しいことがわかった。
- (iii) 消化ガスを燃料とする MCFC-CGS の都市型バイオマス利用エネルギーシステムへの適用を考える場合、消化ガスの発生量が比較的多い商業施設やオフィスビルと他の建物を組み合わせて、地域レベルでの消化ガス利用、熱利用を図ることが有効である。

NOMENCLATURE

F	: Amount of Flow	kg/h
H/E	: Thermoelectric Ratio	-
T	: Operating Temperature	°C
η	: Efficiency	-

SUBSCRIPT

c	: Cooling
cw	: Chilled Water
E	: Electric Power Output

H	: Heat Output
hw	: Heated Water
s	: Stack
T	: Total
t	: Heat from System

REFERENCES

- (1) 梁俊世, 西村伸也, 伊與田浩志, 野邑奉弘, 井上保; 過熱水蒸気を用いたバイオマスのガス燃料化と小型コージェネレーションへの適用研究(小型コージェネレーションへの適用研究), 第 18 回環境工学総合シンポジウム 2008 講演論文集, (2008), 201-204.
- (2) 中村幸子, 安座間信暁, 藤井淳, 山田修; 木質系バイオマスによる小規模分散型ガス化発電設備の開発(第 1 報), クリモト技報, No.50(2004), 24-27.
- (3) 君島真仁, 笠木伸英, マイクロガスタービン・熔融炭酸塩形燃料電池ハイブリッドシステムのサイクル解析, (2003), 日本機械学会論文集 B 編, 第 69 巻 680 号, 249-256.
- (4) Wolf Vielstich, Arnold Lamm, Hubert A. Gasteiger, Fuel cell technology and Applications, Volume4, (2003), John Wiley & Sons, Inc, 916