

消化ガスを燃料とする 燃料電池システムの性能評価研究

1. はじめに

下水処理場の汚泥処理プロセスで生じる消化ガスは多くのメタンを含む有用なエネルギー源である。大阪市では、市内の各下水処理場の汚泥消化施設に高濃度消化方式を順次採用しているため、汚泥処理プロセスに使用するエネルギーが減少し、汚泥処理プロセス以外に利用可能な余剰ガス量が増加しており、この余剰ガスの利用用途の拡大が重要な課題となっている。

消化ガスの有効利用の一つとして消化ガスを燃料とする燃料電池がある。しかし、消化ガスには、有用成分であるメタンの他にさまざまな物質が含まれている。このうち、二酸化炭素(CO₂)は含有濃度が高いと相対的にメタン濃度を下げ、電池の出力を低下させる。また、硫化水素(H₂S)等は燃料電池にとって阻害物質であり、燃料電池の劣化を早めることになる。このため、大阪市においては、二酸化炭素と阻害物質の同時除去を目指し、平成5年度より湿式アルカリ2段吸収装置による実験を行ってきた結果、燃料電池の燃料として、消化ガスを精製したガスが利用できる見通しを得た。

そこで、この技術の実証実験を行うにあたり、平成8年度に大阪市と(財)下水道新技術推進機構の共同で実用化研究を実施した。その後、平成9年度から実証プラントの建設に着手し、平成15年度に完成した。

本研究は、この完成した実証プラントを用いて、平成15、16年度の2カ年にわたり、燃料電池システムの有用性、維持管理性、経済性について性能評価研究を実施したものである。

2. 対象技術の概要

2.1 設備概要

本性能評価研究の対象となる消化ガスを燃料とする燃料電池システムの全体フローを図-1に、ガス精製設備および燃料電池設備仕様を次ページの表-1に示す。本システムは、下水処理場に潤沢に存在する下水処理水によりガス精製を効率的かつ効果的に行い、この精製ガスを使用することによって都市ガス用に開発された燃料電池を運転するものである。

2.1.1 ガス精製設備

消化ガス精製方法には、湿式吸収法、PSA法、膜法等があるが、本システムはこのうち湿式吸収法を採用している。

この湿式吸収法は、第1吸収塔で下水処理水を用いて二酸化炭素と硫化水素を吸収させ、第2吸収塔でNaOH溶液を用いて、残存した二酸化炭素と硫化水素を吸収させることにより、消化ガスを精製するものである。

2.1.2 燃料電池設備

燃料電池設備は、消化ガス中に含まれる微量有害物質を除去する前処理設備と商用化されているりん酸型燃料電池本体からなる。

前処理設備は、消化ガス中に微量含まれている硫化水素、アンモニア、有機炭化水素類(シロキサン)等を燃料電池に影響がない程度まで除去するものであり、標準活性炭と機能性活性炭を充填した2種類の吸

着塔が設置されている。表-2に各吸着塔における吸着対象物質を示す。

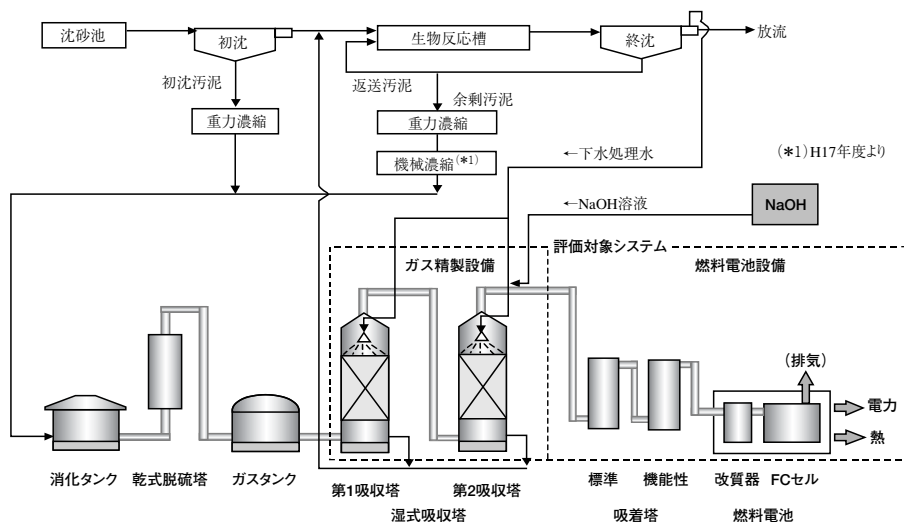
表-2 吸着対象物質

吸着塔	吸着対象物質
標準活性炭	有機炭化水素類 (シロキサン)
機能性活性炭	アンモニア, 硫化水素, 全硫黄, 塩化水素, 全塩素

2.2 性能評価研究の概要

2.2.1 性能評価研究の位置づけ

本性能評価研究は、平成15、16年度の2ヵ年にわたって、「消化ガスを燃料とする燃料電池システムの性能評価研究」を新世代下水道支援事業制度の機能高度化促進事業（新技術活用型）として実施したものである。



(処理場施設規模)

流入水量 174千 m^3 /日
 消化ガス発生量 7,900 Nm^3 /日
 (燃料電池)
 導入台数 1台 (200kW)
 発電量 4,800 kWh /日
 燃料電池精製ガス使用量 2,105 Nm^3 /日 (汚泥処理の状況)
 現在は高温中濃度消化を行っているが、平成17年度より高温高濃度となる。

図-1 消化ガスを燃料とする燃料電池システムのフロー

表-1 ガス精製設備および燃料電池設備の仕様

(ガス精製設備)

項目	単位	第1吸収塔	第2吸収塔	備考
内径	mm	1,750	497	—
充填高	mm	4,000	4,000	—
断面積当たりのガス量	$\text{Nm}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h}$	44.5	384	設計条件
ガス空塔速度 (20℃)	m/min	0.796	6.87	設計条件
断面積当たりの液量	$\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h}$	85	3.0	設計条件
消化ガス供給能力	Nm^3/h	120	120	ブロー供給能力による
吸収液供給能力	下水処理水	m^3/h	195	ポンプ供給能力による
	苛性ソーダ	kg-NaOH/h	—	ポンプ供給能力 (20%溶液)

(燃料電池設備)

名称	仕様
吸着塔	標準吸着塔No. 1 標準活性炭190kg, 常温70 Nm^3/h , 0.1MPa 塔径I.D.600×充填高1,100mm
	標準吸着塔No. 2 標準活性炭190kg, 常温70 Nm^3/h , 0.1MPa 塔径I.D.600×充填高1,100mm
	機能性吸着塔 機能性活性炭210kg, 常温70 Nm^3/h , 0.1MPa 塔径I.D.600×充填高1,700mm
燃料電池	燃料電池 出力: AC100V, 60Hz, 440V, 200kW, 3相3線
	改質器 能力0.16 t/h
	燃料電池セル りん酸形, 常圧, 水冷式
	冷却モジュール 0.75kW×3台

2.2.2 性能評価項目

年間を通じた運転により、本システムの性能・能力、環境性、経済性、維持管理性等について評価する。

2.2.3 スケジュール

スケジュールを表-3に示す。

表-3 スケジュール

	H15年度	H16年度
性能確認手法協議	■	
試運転	■	
設備の性能・能力評価		■ ■
環境評価		■ ■
維持管理性の評価		■ ■
経済性の評価		■ ■
その他検討		■
研究のとりまとめ		■
委員会開催	▲	▲ ▲ ▲

2.3 性能目標および評価方法

2.3.1 性能・能力評価

ガス精製設備および燃料電池設備において次にあげる処理目標を満足し、さらに環境性、維持管理性、経済性について評価する。

(1) ガス精製設備

評価期間での運転データを基に、運転条件と設備能力（精製ガス組成、発電効率等）の関連を整理し、性能目標と比較して評価する。

表-4 ガス精製設備出口での精製ガス組成目標値

成分	湿式吸収塔出口（目標値）
メタン	85 vol%-DG程度
二酸化炭素	10 vol%-DG程度
窒素	4 vol%-DG以下
酸素	0.8 vol%-DG以下
硫化水素	5.5 ppm以下

(2) 燃料電池設備

① 吸着塔

吸着塔出口での精製ガス組成（微量有害ガス）を目標値と比較して評価する。

② 燃料電池

精製ガス組成を変動させ、発電効率、熱回収率等を評価する。また、都市ガスと同等の運転性能が安定して得られることを確認する。

表-5 活性炭吸着塔出口での精製ガス組成目標値

成分	吸着塔出口（目標値）
メタン	85 vol%-DG程度
二酸化炭素	10 vol%-DG程度
窒素	4 vol%-DG以下
酸素	0.8 vol%-DG以下
硫化水素	0.1 ppm以下
全硫黄	0.1 ppm以下
アンモニア	0.05 ppm以下
塩化水素	0.05 ppm以下
全塩素	0.05 ppm以下
有機炭化水素類（シロキサン）	1.0 ppm以下

表-6 燃料電池の効率目標値

項目	目標値	備考
発電効率	39%	定格（初期設定能力）
熱回収率	高温水	18%
	低温水	23%
総合効率	80%	発電効率+熱回収率

2.3.2 環境性

排ガス、騒音および排水の測定を実施し、大気汚染防止法、騒音防止法の規制値および処理場からの排水基準と比較して周辺環境への影響を評価する。

2.3.3 維持管理性

評価期間での運転データおよび既往文献等をもとに、保守点検項目、頻度を整理し、運転操作性、保守管理性について評価する。

2.3.4 経済性

年間資本費とランニングコストを含む維持管理費を算出し、他の発電設備と比較評価する。

3. 性能評価結果

3.1 性能・能力評価

3.1.1 ガス精製設備

図-3に吸収液量（L）と消化ガス量（G）の比（以下、L/G比という）と第1吸着塔出口精製ガス組成（CH₄、CO₂、N₂、O₂）の関係を示す。

第1吸着塔出口の精製ガス組成は、L/G比と高い相関があり、適切なL/G比で運転を行えば、燃料電池の運転の目安となる濃度の精製ガスを得ることが確認できた。しかし、L/G比が大きくなると二酸化炭素の除去（メタン濃縮）とともに、燃料電池の運転に

支障をきたす窒素の濃度も増加し、処理目標値を超える可能性があることが分かった。また、L/G比は、吸収液温の影響を強く受けるので、安定した施設性能を發揮させるためには吸収液温に配慮した運転管理方法の確立が必要である。

図-4に第2吸収塔のガス組成変化を示す。第2吸収塔では二酸化炭素のみが吸収(メタンが濃縮)され、窒素および酸素についてはほとんど変化せず、硫化水素については、定量下限値以下まで除去できることを確認した。また、苛性ソーダの反応率は夏期90%程度、冬期60%程度と水温が低い冬期には反応率が低下する

ことが分かった。

3.1.2 燃料電池設備吸着塔の性能・能力

表-7に活性炭吸着塔における微量有害物質の除去性能の結果を示す。活性炭吸着塔は表-1に示したように標準活性炭と機能性活性炭に分けられているが、活性炭吸着塔として評価を行っている。

精製ガス中の微量有害物質については、活性炭吸着塔出口で一部全塩素を除いて処理目標値を満足していた。

また、定期検査時(約半年運転)に吸着塔内の活性

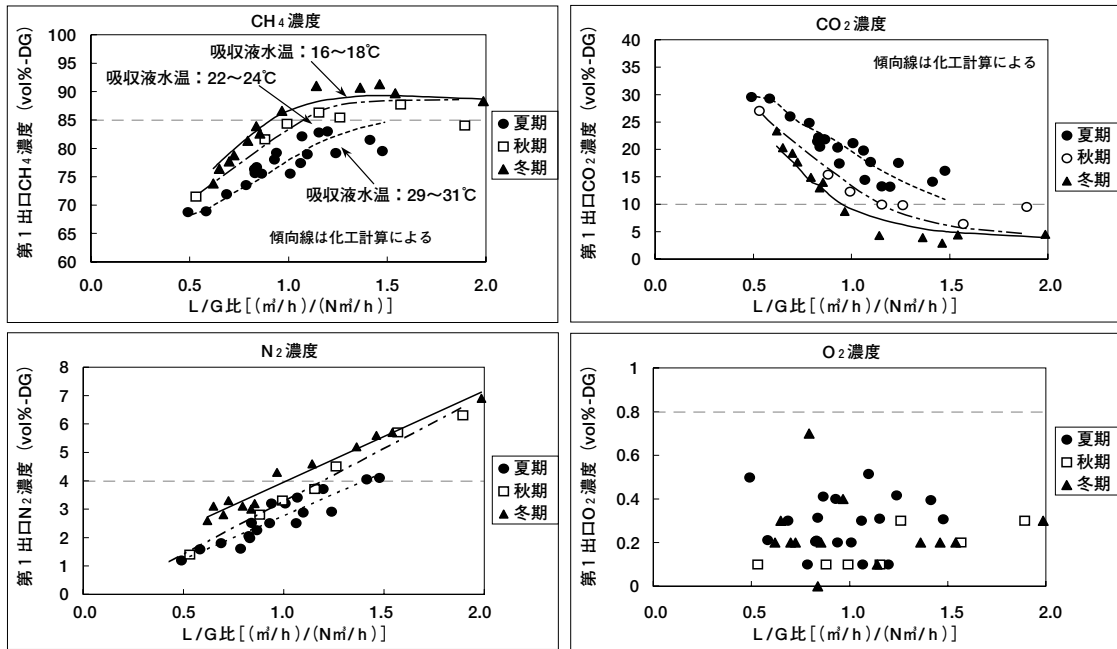


図-3 L/G比と第1吸収塔出口精製ガス組成の関係

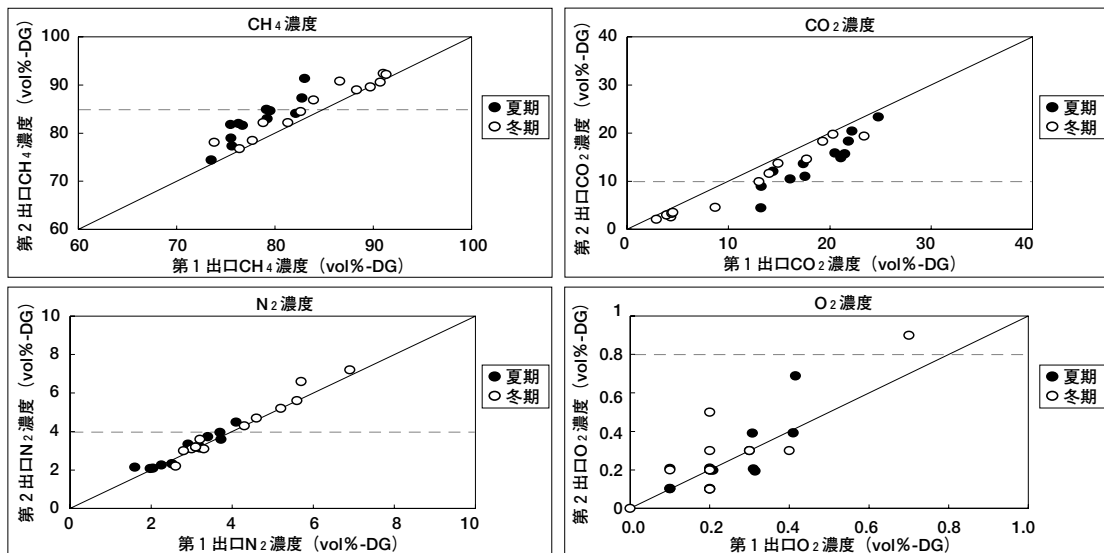


図-4 第1吸収塔出口と第2吸収塔出口のガス組成変化

表-7 吸着塔の微量有害物質除去性能

項目	単位	補足調査		冬期調査		目標値
		入口	出口	入口	出口	
全硫黄	ppm	0.2	<0.1	0.1	<0.1	≤0.1
アンモニア	ppm	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	≤0.05
塩化水素	ppm	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	≤0.05
全塩素	ppm	<0.05	<0.05	0.3	0.3	≤0.05
シロキサン*1	ppm	<0.9	<0.3	<0.6	<0.3	≤1.0

*1 シロキサンは、オクタメチルシクロテトラシロキサン (D₄)、デカメチルシクロペンタシロキサン (D₅)、ドデカメチルシクロヘキサシロキサン (D₆) の合計

表-8 活性炭寿命の推計

項目	単位	測定値	設計値	寿命*1	
燃料電池 運転状況	ガス量	Nm ³	192,500	613,200	
	運転時間	hr	2,250	8,760	
	メタン濃度	vol%-DG	85	80	
標準, 機能性 活性炭計	シロキサン	kg	29.7	95.0	0.9年
	硫黄分	kg	0.37	6.8	5.2年
	アンモニア分	kg	ND	4.1	—
	塩素分	kg	0.59	8.0	4.0年

*1 活性炭寿命 = 設計値 / 測定値 × ガス量の年換算 × メタン濃度の換算

炭の交換を行い、交換した活性炭の微量有害物質吸着量を測定し、これより、標準活性炭の寿命を推計した結果を表-8に示す。標準活性炭の寿命は、シロキサン吸着量から約1年、機能性活性炭は塩素分吸着量か

ら約4年と推定された。

3.1.3 燃料電池の効率・熱回収率

図-5に燃料電池の発電出力と効率を示す。発電効率については、目標の発電効率(39%)をほぼ達成した。しかし、熱回収効率の面では、高温水は11~19%程度と目標値18%をほぼ達成しているが、低温水は16~20%と目標値23%を下回り、総合効率は73%~80%となった。これは、海老江下水処理場では、図-6に示すように高温水の熱回収は、高温水槽で常時回収されているのに対し、低温水の熱回収は、ポンプ類の計画吐出量が実汚泥量に対して大きいことにより、1時間に30分程度の間欠運転であるため、熱回収効率が低下する方向になったためである。

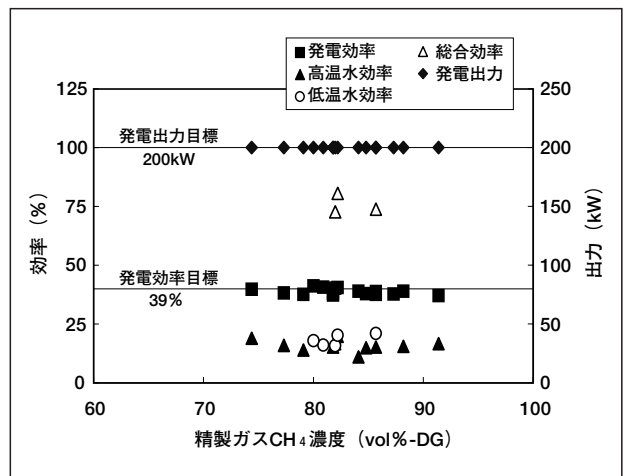


図-5 効率および出力

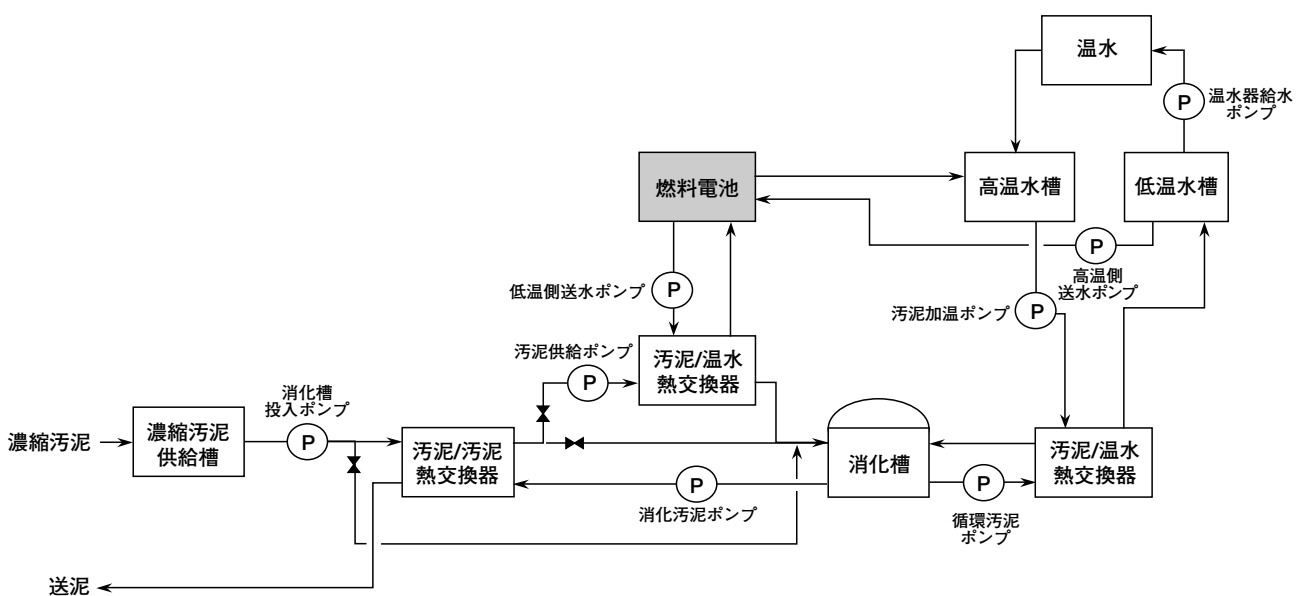


図-6 熱回収フロー

3.2 環境性

燃料電池システムの稼働による周辺環境への影響について、排ガス、騒音および排水について調査した。その結果を表-9に示す。

表-9 排ガス、騒音および排水測定結果

	場所	項目	測定値	備考	
大気	燃料電池排気口	ばいじん(g/Nm ³)	<0.001	ガスエンジン	
		SOx (ppm)	<1		<15
		NOx (ppm)	<5		<80
騒音	敷地境界	昼 (dB)	53~55	暗騒音	
		朝・夕 (dB)	52~54		50~54 48~53
水質	ガス精製設備排水	pH	5.5~6.2	施設流入	
		BOD (mg/ℓ)	7~15		7.1~6.7 4~16
		SS (mg/ℓ)	<2~6		3~8
		T-N (mg/ℓ)	9~12		9.7~12

3.2.1 燃料電池からの排ガス

燃料電池は消化ガスを直接燃焼しないため、従来の熱機関であれば燃焼過程で生じていた窒素酸化物等の大気汚染物質の排出がごく微量であった。

3.2.2 燃料電池における騒音

燃料電池は化学反応による発電のため、駆動部分がなく騒音が少ないなど、環境負荷低減の面でも優れていることが確認された。

3.2.3 ガス精製設備からの排水

ガス精製設備からの排水はpHを除き、放流水質を満足した。なおこの排水は、塩素混和池へ流しているが、下水処理水に希釈されるため、pHは放流水質を満足した。

3.3 維持管理性

ガス精製設備および燃料電池設備の運転実績をもとに、維持管理性について検討した。

3.3.1 ガス精製設備

ガス精製施設の運転については吸収液温に見合った適切なL/G比の管理が必要であり、さらに日常の中央監視制御装置での監視、巡視とともに、月単位での消化ガス成分濃度の確認等の作業が必要になる。

3.3.2 燃料電池設備

燃料電池は駆動部が少ないため、設備の耐久性に優れ、自動運転となることから日常的な保守管理をほとんど必要としない。ただし、吸着塔の吸着剤の定期的な交換と電池本体(セル等)の交換が必要になる。

3.4 経済性

燃料電池システムの経済性について、連続運転実績、各期の効率・熱回収データをもとに、ランニングコストを算出し、現在の電力購入価格との比較を行って検討した。検討結果を表-10に示す。

運転実績のユーティリティ消費量から見た運転費は、約3円/kWhであった。建設費等を含んだ総合コストの観点から見た発電コストは、約36円/kWh(熱回収を見込むと約26円/kWh)であり、現在の電力購入価格(12円/kWh程度)より高価となった。項目として保守費が大きく、今後燃料電池システムの普及が進んでいくにつれ、建設費、保守費が改善されることにより発電コストが安価になっていくと考えられる。

表-10 発電単価内訳

費用内訳	単位	実績
		燃料電池200kW
建設費	円/kWh	10.7
運転費	円/kWh	3.0
保守費	円/kWh	19.5
人件費	円/kWh	2.3
合計A	円/kWh	35.5
熱利用回収B	円/kWh	9.5
年経費C=A-B	円/kWh	26.0

3.5 今後の普及に向けた検討

3.5.1 大規模燃料電池システムの検討

大阪市海老江下水処理場を対象として大規模化の検討を行った。検討結果を表-11に示す。

同下水処理場では、200kWの燃料電池設備が5台導入可能であり、年間を通じて発電効率39%、熱回収率41%、総合効率80%(熱供給側でみた効率)が達成され、消化ガスはほぼ全量有効利用で運転が可能となる。

表-11 燃料電池大規模化導入

	項目	単位	夏期	中間期	冬期
施設規模	計画流入水量	千m ³ /日	245	245	245
	消化ガス発生量	Nm ³ /日	11,840	14,800	17,760
燃料電池	導入台数	台	5	5	5
	発電量	kWh/日	24,000	24,000	24,000
消化ガス利用	燃料電池使用量	Nm ³ /日	10,524	10,524	10,524
	温水器使用量	Nm ³ /日	1,197	4,260	6,195
	余剰ガス量	Nm ³ /日	119	15	1,040

3.5.2 ガスの利用用途

表-12に都市ガス12Aと精製ガスの組成割合について

て示す。

湿式吸収法では、 $\text{CH}_4 > 90\%$ も可能であり、精製ガ

スは都市ガス12Aとほぼ同じ成分組成となっていることが確認され、都市ガスの代替利用が可能である。

表-12 都市ガスおよび精製ガスの組成割合

組成	単位	都市ガス		
		12A	通常精製	高度精製
メタン	Vol%-DG	84.4	84.9	92.4
その他可燃ガス	Vol%-DG	9.2	—	—
二酸化炭素	Vol%-DG	0.1	11.0	2.6
酸素	Vol%-DG	0.9	0.7	0.2
窒素	Vol%-DG	5.4	3.3	4.7

4. おわりに

本性能評価研究において、消化ガス精製設備および燃料電池設備の性能・能力は一部全塩素の確認は残っているものの、ほぼ処理目標を満足していた。また、環境への影響、維持管理性についても問題なく運転が可能であった。経済性については、普及が進むにつれて改善されていくことが考えられる。

●この研究を行ったのは

研究第一部長
研究第一部主任研究員
研究第一研究員

堀江 信之
駒井 篤
内田 浩

●この研究に関するお問い合わせは

研究第一部長
研究第一研究員
研究第一研究員

堀江 信之
坪田 恵介
熊野 晋