

消化ガスを燃料とする 燃料電池の実用化研究

1. 目的

汚泥処理過程で発生する消化ガスは多量のメタンを含み、有用なエネルギー源である。大阪市では、高濃度消化プロセスの拡大を図っていく計画であり、ここで発生する消化ガスの有効利用の一つとして、消化ガスを用いた燃料電池の実用化を目指している。消化ガスには、電池燃料として有用成分であるメタンの他にCO₂ およびH₂S等の有害な成分も存在する。このため大阪市では、これら有害物質の除去を目指し、平成5年度より湿式アルカリ2塔式吸収法による実験を行ってきた結果、燃料電池の燃料としての消化ガス精製の見通しを得た。

そこで、平成7年度よりオープンした大阪市下水道科学館向けに200kW級の燃料電池を導入し、5年程度の性能確認運転を行うことにより、今後の大規模施設建設にむけての技術的検討を行う。今年度の研究は、今後の実証実験を行うにあたり、燃料電池導入の意義を明らかにし、システムの評価並びに設計条件・手法の検討を行うことを目的とする。

2. 燃料電池の概要

2.1 リン酸型燃料電池

燃料電池は、水の電気分解の逆反応により、都市ガスやメタノール等を改質して造った水素含有ガスと

空気によって、燃料を燃焼させることなく直接電気エネルギーとして取り出すことができる装置である(図-1)。燃料電池の燃料としては、天然ガス、メタノール、炭化水素(メタン)などを使用できる。燃料電池の構造は図-2に示すように、燃料極、酸素極という2つの電極と電解質板で構成された、厚さ6mm程度の単電池セルが直列に積み重ねられている。燃料電池にはリン酸型(PAFC)、熔融炭酸塩型(MCFC)、固体電解質型(SOFC)、アルカリ型(AFC)、高分子電解質型(PEFC)などがある。

本研究では、民生用として開発され、ほぼ商業化の

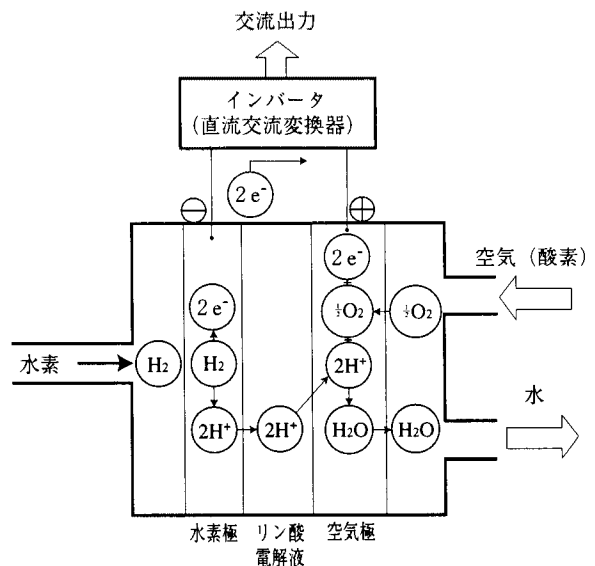


図-1 燃料電池の原理(リン酸型)

段階に達しているリン酸型燃料電池 (PAFC) を対象とする。リン酸型燃料電池は、他のタイプの燃料電池より発電効率はややおちるものの、作動温度が 200℃ と比較的低いため、取扱いが容易である。

また、発電、熱回収とも効率がよく、排ガスがクリーンであり、また、騒音振動が低く、維持管理が容易である。現時点では更なる信頼性 (寿命)、経済性 (量産化および安価な触媒の開発あるいは白金使用量の低減など) に重点をおいた開発が進められている。

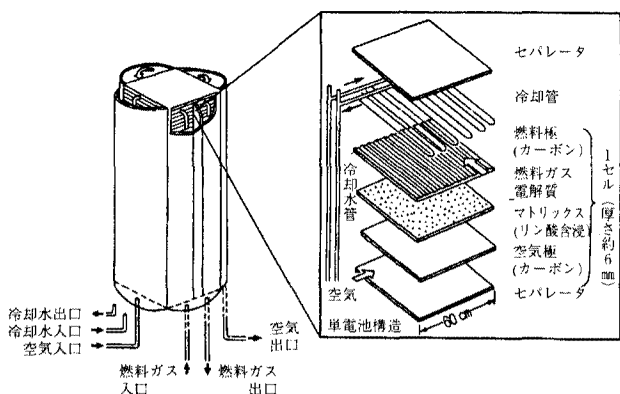


図-2 燃料電池の構造

2.2 消化ガスを燃料とする燃料電池の課題点

(1) 消化ガスの精製

消化ガスには燃料としての有用成分であるメタンの他に二酸化炭素および燃料電池に有害な微量成分が含まれているため、燃料電池の燃料とするためには、これらの物質を表-1のレベルまで除去する必要がありますが、この精製方法の確立が重要である。

大阪市では、この消化ガスの精製方法の確立を目指して平成5年度より小型実験装置による実験を行っており、湿式アルカリ2塔吸収方式 (1段目: 下水処理水, 2段目: 水酸化ナトリウム水溶液) の採用によって、水酸化ナトリウム消費量を抑え、効率良く精製する技術にはほぼ目処がついている。

表-1 燃料電池用ガスの制限値

有害物質	制限値	燃料電池への影響
H ₂ S	5.5ppm以下	内部触媒の短寿命化
HCl	十分な知見は無いが	内部触媒の能力低下
SO _x	可能な限り0に近く	内部触媒へ悪影響
NO _x	する必要がある	同上
F化合物		内部触媒の能力低下
O ₂	1.0%以下	脱硫触媒へ悪影響
ばいじん	0.003g/Nm ³ 以下	触媒の圧力損失増大
CO ₂	可能な限り低濃度	電池の出力低下
CH ₄	可能な限り高濃度	90%以上

(2) 信頼性 (寿命)

燃料電池の信頼性は、長期間にわたる安定した運転性能と、高い利用効率の実現である。燃料電池は、その開発の当初からこの信頼性の目標として、実際に設置されているプラントの中には3万時間を超えているものも出てきているが、当面は運転時間4万時間の達成を目指している。

また、現時点では短期間で燃料電池の寿命を確認できる加速試験法が確立されていないため、5年の寿命を確認するために5年の運転を行っているが、近年、机上シミュレーション技術、電池セル内の腐食電流の測定技術等の開発によって、設計段階からその信頼性を予測・評価できる技術も開発されてきている。

(3) 経済性

燃料電池本体は、メーカーによる技術革新、単一機種で量産化等により、その経済性の伸長が図られてきている。一方、消化ガスを燃料とする燃料電池発電システムは、消化ガス精製用の前処理装置を設置して、消化ガスを天然ガスレベルまで精製し、燃料電池発電を行うことを考えているため、経済的には、天然ガスを燃料とした場合より若干割高になると考えられる。

今後は、前処理装置を含めたトータルシステムとしての改良・開発により、最適な消化ガス適応の燃料電池システムの確立を行うことで、コストダウンを図る必要がある。

3. 消化ガス燃料電池導入の意義・必要性

3.1 高濃度消化法

大阪市が開発した高濃度消化プロセスは、初沈汚泥と余剰汚泥を分離して消化槽に投入することにより、消化槽投入汚泥の濃度を高めようとするものである。このため消化槽に投入する汚泥量が減少し、消化槽の加温に要するエネルギーも削減することが可能となり、消化ガスを消化槽の加温用以外の用途に利用できる機会が拡大した。

3.2 燃料電池とガスエンジンの比較

燃料電池 (リン酸型燃料電池) と従来のガスエンジンによる発電設備の比較を表-2に示す。

表-2 燃料電池とガスエンジンの比較

	燃料電池	ガスエンジン
①効 率	送電端効率40% 熱回収率41~44% 総合熱効率80%	同30.4% 同36.5% 同65%
②排 ガス	NOx 10ppm程度 SOx 0.001ppm以下	同80ppm以下 同15ppm以下 (排ガス対策含む)
③騒 音	騒音 70dB以下 (防音対策不要)	同95dB以下 (防音対策必要)
④維持管理	点検 2,200時間毎 (運転停止点検は 1回/年)	同500時間毎 (500時間毎に 運転停止点検)
⑤電池触媒 の寿命	約40,000時間 1~2年には、4万時 間の実績がでる見込	-

燃料電池はガスエンジンに比較して、効率、排ガス、騒音・振動、維持管理等の多くの面で優れており、また建屋は不要である。しかし、本体経費は現時点ではやや高価であり、寿命延長が課題である。システムとしての経済性の比較では、発生電力量およびランニングコストの総合では若干有利であるが、余り大きな差はない。

3.3 導入の意義・必要性

実証プラントの設置場所としては、平成7年度に海老江処理場に隣接してオープンした下水道科学館に、導入すれば、下水道の未来の姿を示す科学館の趣旨とも合致し、PR効果が高いものと考えられる。科学館に200kW級の燃料電池を設置し、その後の大規模施設建設の検討に役立つ知見を得ることとする。

なお、今後の大規模施設の導入にあたっては、

- ① 消化槽を有している
- ② 焼却炉（溶融炉）を有していない

処理場への適用が意義が高い。この条件に合致する処理場は、現在のところ、①大野処理場、②海老江処理場、③住之江処理場の3処理場であり、将来、④津守処理場も加わることになり、今後、これらの処理場で高濃度消化法の整備状況にあわせて燃料電池の導入を検討して行くものとする。

4. 大阪市の燃料電池システムの特徴および評価

4.1 大阪市の燃料電池システムの特徴

大阪市の燃料電池システムは、消化ガス精製方法の前処理設備にその特徴がある。消化ガス精製方法には、①水または水酸化ナトリウム水溶液に溶解させる吸収法、②ゼオライトなどの吸着剤を使用するPSA法、③CH₄とCO₂の浸透速度差を利用する膜法がある。これら精製方法の比較結果を表-3に示す。

表-3 消化ガス精製方法の性能比較

評価項目	①吸収法	②PSA法 (前処理含)	③膜法 (前処理含)	
経済性	ランニングコスト	小	大	大
	イニシャルコスト	小	大	大
	CH ₄ 濃度	90~95%	90%程度	80~90%
	敷地面積	小	大	大
安定性	消化ガス組成変動への影響	容易	煩雑	煩雑
	性能劣化	なし	吸着剤劣化あり	膜劣化あり
維持管理	操作量	少	多	多
	メンテナンス	容易	煩雑	煩雑
安全管理	供給ガス圧力 (kgf/cm ² ・G)	0.1程度	0.5~10	25~30
総合評価	○	△	△	

大阪市が採用している吸収法は、システムが簡略なため、イニシャルコストも低く操作も少ない。またCH₄回収率も高く、安定的な運転が可能である。大阪市が採用を計画している消化ガス精製フローを図-3に示す。二塔式吸収法では1塔目の吸収塔に

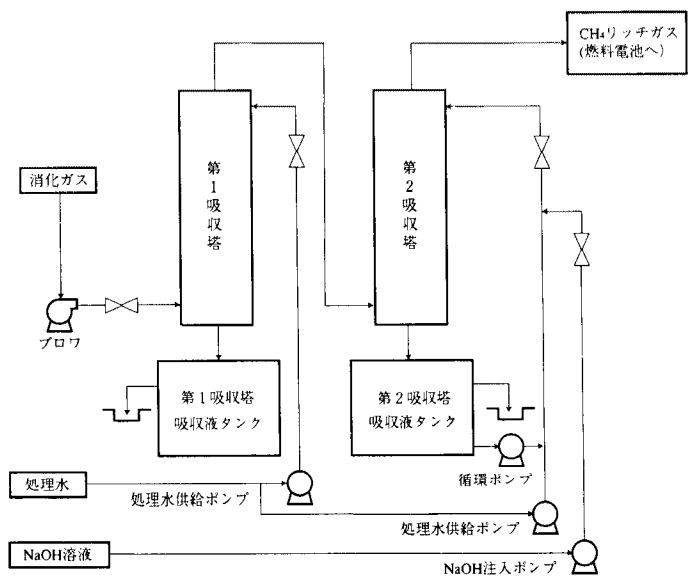


図-3 二塔式吸収法による消化ガス精製システムフロー

において処理水を用いて大部分のCO₂とH₂Sを吸収させ、2塔目の吸収塔においてNaOH水を用いて残りのCO₂とH₂Sを吸収させることにより、NaOH溶液の消費量を抑さえ、効率良く精製ガスを得ることができる。

4.2 本システムの経済性評価

大規模施設として流入水量200,000m³/日（流入SS濃度120mg/l, SS除去率90%）を仮定し、発生する消化ガス量から、燃料電池発電システムでは発電効率40%として800kW級を、ガスエンジン発電システムでは発電効率30%として600kW級の発電を行うものとし、経済比較を行った。表-4のように、燃料電池の方がガスエンジンに比べて削減電力代(A)では有利であるが、ランニングコスト(B)では高くなっており、総合的には若干有利という結果になっている。

表-4 消化ガスエンジン経済性試算

消化ガス利用量(Nm ³ /日)	6804		
	燃料電池 (200kW×4)	ガスエンジン (600kW)	
発電量(kWh/年)	56.1×10 ⁵	44.2×10 ⁵	
補機使用電力量(kWh/年)	3.3×10 ⁵	3.6×10 ⁵	
供給電力量(kWh/年)	52.8×10 ⁵	40.6×10 ⁵	
削減電力代(A)(万円/年)	△7,392	△5,684	
建設費(万円)	72,000	71,000	
ランニングコスト	苛性ソーダ	388	—
	アンモニア	—	159
	減価償却	1,620	1,328
	金利	600	591
	人件費	1,000	1,500
	発電設備補修	2,000	884
	補機維持管理	640	330
	脱硝触媒交換	—	264
合計(B)(万円/年)	6,248	5,056	
(A)+(B)	△1,144	△628	

5. 設計条件および手法の検討

5.1 200kW級施設の検討

(1) 設計仕様

設備規模の検討結果より、以下の設計仕様を得た。

① 燃料電池

200kW リン酸型燃料電池 1台

② 前処理装置

精製方式 二塔式吸収法

消化ガス 82.4Nm³/hr

第一吸収塔 処理水 130m³/hr

第二吸収塔 処理水 0.3m³/hr

苛性ソーダ (NaOH) 12.5kg/hr

(2) 発電電力利用計画

下水道科学館に200kW級燃料電池発電システムを導入したとき、常時定格運転を行う場合には、夜間に余剰電力が発生する。一方、昼間は、発電電力だけでは電力量が不足する。したがって、この電力需要の日変動に応じた電力利用方法を検討する必要がある。

基本的に燃料電池は低負荷運転を行うことができるため、大きな対策をとること無しに需要変動に対応可能であるが、現状では常時定格運転を行い、余剰電力は海老江処理場に送電する方向で次年度実施設計を行う。

(3) 排熱の利用計画

① 比較的低レベルの熱であるため、消化槽加温システムに使用する。

② 回収熱量は188,100kcal/h, 回収効率は約40%となる。

③ 投入汚泥温度を8.4℃昇温可能となる。(全要求昇温幅の内、夏期26%, 冬期15%)

5.2 大規模施設の検討

(1) 消化ガス発生量

流入下水量 200,000m³/日

汚泥発生量 21,600kg/日

消化ガス発生量 6,804Nm³/日

(2) 設計仕様

① 燃料電池

200kW リン酸型燃料電池 4台

② 前処理装置

精製方式 二塔式吸収法

消化ガス 8,160Nm³/日

第一吸収塔 処理水 9,100m³/日

第二吸収塔 処理水 15m³/日

苛性ソーダ (NaOH) 610kg/日

(3) 発電電力利用計画

電力利用計画については、供給側と需要側でそれぞれ以下のようなことがいえる。

① 供給側

燃料電池を定格で運転するかどうかで、以下の2つのパターンが考えられる。

(A案) 消化ガス発生量の最大値を基準に燃料電池の稼働台数を決定し、消化ガス発生量に対して負荷変動運転を行う。

(B案) 消化ガス発生量の最小値を基準に燃料電池の稼働台数を決定し、常に燃料電池は定格(100%)運転とし、余剰ガスは、ボイラー等の燃料とする。

表-5 処理場における平均電力使用量および消化ガス発電量

処理場名		大野	中浜	放出	住之江	津守
平均電力使用量 (A)	(kW)	3,123	1,730	3,528	2,521	4,819
最小電力使用量 (推定値)(A)×0.7	(kW)	2,186	1,211	2,470	1,765	3,373
平均消化ガス発生量	(Nm ³ /日)	17,217	10,281	10,501	9,367	16,726
平均発電量 (B)	(kW)	1,741	1,040	1,062	947	1,691
最大発電量(推定値) (B)×1.2	(kW)	2,089	1,247	1,274	1,137	2,029
発電電力供給率 (B)/(A)×100	(%)	56	60	30	38	35

- ※1) 平均電力使用量及び消化ガス発生量は平成4年度下水道統計による
- 2) 大野、放出、津守の各処理場は他処理場の汚泥を受け入れている
- 3) 住之江処理場は、し尿の流注がある

② 需要側

燃料電池による発電電力量は、処理場内の電力需要量よりも常に少ないと考えられる。したがって余剰電力が生じることはなく需要側には特に制約はない。

(4) 発電電力の試算例

大阪市内で全量消化を行っている処理場について、平均電力使用量および消化ガス燃料電池発電量を表-5に示す。ただし、平均発電量は平均消化ガス発生量の全量に対して発電効率を加味して推定した値であり、現実の消化ガス使用形態とは異なる。例えば大野、放出、津守の各処理場は他処理場から汚泥を受け入れており、ガス発生量が多く、また、中浜処理場では近接するゴミ焼却場から蒸気を受け入れており、プロアを回して買電量を減らし、電力供給率が高くなっているという特殊性があり、これらを除くと概ね30%程度の数値になるものと考えられる。

一方で、場内電力使用量について30%、消化ガス発電量について20%の変動幅を考慮しても、消化ガス発電量が場内電力使用量を上回ることはない。したがって余剰電力はほとんど発生しないと思われる。

(5) 蓄電の可能性検討

下水処理場でも夜間と昼間で電力使用量の変動がある。そこで、夜間の電力使用量の比較的少ない時間帯の発電電力を蓄電して、昼間のピークカットに利用することにより、契約電力量の削減が期待できる。しかしながら蓄電を導入するためには設備コストが大幅に増加するので、現状では採用は困難である。ただし、将来的に蓄電池価格が低下した場合には、導入メリットは大きいといえる。

(6) 排熱利用計画

排熱を利用した消化槽加温システムについて検討した。なお、対象とした消化システムが高温消化法であるので、引き抜き汚泥および燃料電池排熱利用

水により投入汚泥を予熱して消化槽に投入する消化槽加温システムとした。

表-6の消化槽加温システム設定条件を基に、夏季および冬季について検討を行った。

表-6 消化槽加温システム設定条件

		単位	夏季	冬季
燃料電池 運転形態	台数(台)		200kW×4	200kW×4
処理場 流入水量	日平均(m ³ /日)		200,000	200,000
投入汚泥	SS濃度(%)		4	4
	DS(t/日)		21.6	21.6
	温度(℃)		27	10
	比熱kcal/(kg℃)		1	1
密度kg/m ³		1,000	1,000	
燃料電池 熱利用水	比熱kcal/(kg℃)		1	1
	密度kg/℃		1,000	1,000
消化槽	温度(℃)		52	52
	滞留時間(日)		15	15
	熱損失(%)	電池排熱による 入熱の30		電池排熱による 入熱の30
熱交換器	熱損失(%)		5	5
	U値kcal/(m ² h℃)		500	500

表-7 消化槽への熱供給状況 (kcal/h)

	夏季	冬季
消化槽必要熱量	763,000	1,145,000
燃料電池供給熱量	668,000	668,000
引き抜き汚泥供給熱量	95,000	477,000

表-7に示すように、夏期・冬期ともに燃料電池の排熱と引き抜き汚泥との熱交換により消化槽加温システムの必要熱量を賄うことができる。

また、夏期には引き抜き汚泥による予熱により汚泥温度が上がり過ぎるので一部をバイパスすることにより対応する。

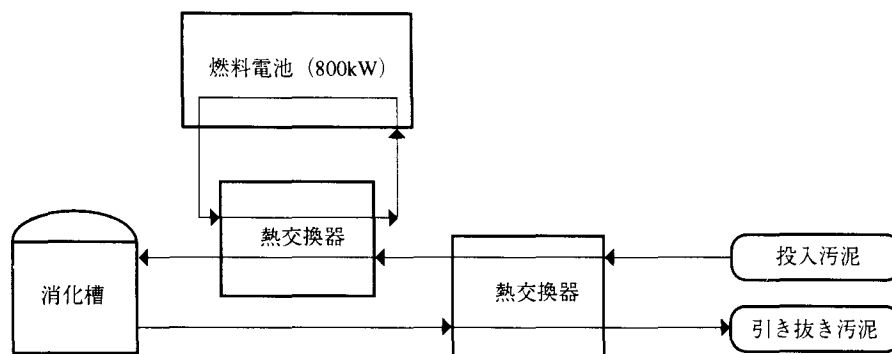


図-4 消化槽加温システムフロー図

6. まとめおよび今後の課題

6.1 まとめ

本年度の実用化研究により、次のような評価および検討結果を得た。

- (1) 消化ガスによる燃料電池発電システムは、①発電効率が、②排ガスがクリーンである、③騒音・振動が非常に少ない等、特に環境面でのメリットが大きい。
- (2) 消化ガスを燃料電池の燃料として使用するための前処理法は、下水処理水およびアルカリ水による二塔式吸収法が、吸収能力、コスト面、システム構成面、運転面等において優れており最適である。
- (3) 発生する消化ガスの全量使用を前提とした大規模施設に消化ガス燃料電池発電システムを導入することによって高効率の電力回収が可能となる上、さらに排熱により消化槽の加温に必要な熱量の全量を賅うことができる。

6.2 今後の課題

今後の課題として以下の事項があげられる。

- (1) 消化ガスを燃料とした燃料電池システムの運転実績は少なく、長期性能確認が必要である。
- (2) 前処理装置を含め消化ガス適応の燃料電池システムの確立を行い、コストダウンを図る必要がある。
- (3) 消化ガスには硫黄の他、リン、フッ素等が微量に含まれる可能性がある。天然ガスなどでは生じない問題であるため、その影響の程度および対策については未解明な部分があり、検討の必要がある。

7. 今後の予定

今年度、新技術活用モデル事業により200kW級の燃料電池発電システムの建設に着手し、平成10年度中の完成を目標としている。同施設完成後5年間にわたり、長期的な性能評価研究を行う予定である。

●この研究に関する問い合わせは 研究第一部長 山根 昭
 研究第一部主任研究員 関根 富明
 研究第一部研究員 王尾 和寿