

下水道事業における水素製造・利活用の可能性-経済的側面から-

(株)NJS 庄司有理 亀田由季子 森智志

本研究は下水処理施設において水素製造・供給を行う場合の経済性に対する検討を行い、処理規模に適した水素製造・利活用方法の組合せについて提案を行うものである。大中小の 3 規模で水素の製造・供給のコスト分析を行った結果、大規模であれば組合せに関わらず水素の市場価格（100 円/N m³）を下回ることが可能であり、中規模および小規模では鋼板製の消化工程に生ごみを投入することで大幅なコスト改善を図れることが明らかとなった。また、生ごみ投入率を 40%以上にすることで小規模でも市場価格を下回ることができ、水処理への影響もさほど大きくはないことが示された。

Key words : 下水汚泥、生ごみ、消化、水素、費用比較

1. はじめに

近年、資源の枯渇や地球温暖化による地球環境の危機からエネルギーシフトの重要性が叫ばれている。我が国においては、2014 年 4 月に第四次「エネルギー基本計画」が閣議決定されている。この計画では水素社会の実現について、重要な取り組みの 1 つであると位置づけられており、これを受けて経済産業省では 2040 年までを見越した水素・燃料電池戦略ロードマップを策定している。

下水処理施設は、エネルギーを利用する都市部に近く、その都市から出る汚水を処理した結果排出される下水汚泥を原料に水素を製造することで、都市内の廃棄物およびエネルギーの循環を行うことが可能となる。B-DASH プロジェクト（下水道革新的技術実証事業）の平成 26 年度採択技術において下水汚泥を原料とした水素製造が実証され、下水処理施設での水素製造は技術的に可能であることが示された。また、国土交通省では「水素社会における下水道資源利活用検討委員会」を設置し、2015 年度～2016 年度に計 6 箇所のモデル自治体について水素利活用の実現可能性調査を行っている。

そこで、本研究では下水処理施設において水素製造・供給を行う場合の経済性に対する検討を行い、下水処理施設の処理規模に適した水素製造・利活用方法の組合せについて提案を行う。さらに下水処理施設における水素利活用に対する課題の抽出を行い解決策の検討を行うこととする。

2. 検討方法

(1) 検討ケースの設定

本研究における下水処理施設は大規模（100,000 m³/日）、中規模（50,000 m³/日）、小規模（10,000 m³/日）の 3 ケースとし、処理方法は標準活性汚泥法と仮定する。水素製造方

法は福岡市で行われた B-DASH 事業で採用されている消化ガスの水蒸気改質技術を想定する。嫌気性消化工程（以下「消化工程」という。）については消化工程を有している場合と有していない場合の 2 通りとし、消化工程を有していない場合は消化工程を導入するものとする。消化工程で新設する消化槽は「下水汚泥エネルギー化技術ガイドライン」²⁾ において示されている従来型消化槽、鋼板製消化槽、高効率高温消化槽の 3 方式にて検討を行う。ただし、高効率高温消化槽は中・小規模への使用を前提とした技術のため、大規模においては検討ケースから除外する。設定した検討ケースを表-1 に示す。水素製造設備の稼動時間は設備の効率性を考慮して 24 時間稼動（製造）とする。設備の耐用年数はガイドラインに従い、土木・建築構造物を 45 年、機械・電気設備は従来型で 10 年、鋼板製で 20 年、高効率では 15 年とした。

また、国土交通省の「新下水道ビジョン加速戦略」においても下水道に対する地域のバイオマスステーション化の推進を目指していることから生ごみの消化工程への投入についても検討を行うものとし、生ごみの受入・前処理施設はすべて新設するものとする。生ごみの受入・前処理施設の建設費および維持管理費は「下水処理場へのバイオマス（生ごみ等）受入マニュアル」⁴⁾ の費用関数を用い、耐用年数は機械：20 年、電気：15 年、土木建築：40 年とした。

表-1 検討ケースの設定

(2) 検討・比較方法

経済性については各ケースにおける消化ガス製造および水素製造・供給にかかる費用から製造水素 1N m³ 当りのコスト（供給コストを含む、

以下に同じ）およびコスト構成割合を算定する。算定結果の分析は規模や、製造・利活用の各工程がコストに対する影響度などを比較し、その要因等を検討する。さらに、本研究で算定した水素製造・供給コストを市場価格（水素ステーションからの水素供給）と同等程度とするためにはどのような方策が必要であるかを検討する。なお、消化工程の導入による汚泥処分費の削減効果については本研究では省略する。

表-2 固形物収支の緒元

3. 結果

消化ガスの発生量を固形物収支計算より求め、消化ガスを改質して出来る水素ガスを試算した。収支計算に用いる緒元等を表-2 に示す。

費用の算定に当たっては消化槽、水素製造・供給の 2 工程、生ごみを投入する場合は生ごみ受入・前処理を含めた 3 工程における建設費および維持管理費を算定するも

項目	工程等	単位	設定	備考
SS濃度	流入	mg/L	200	設定
固形物濃度	初沈汚泥	%	1	実績値
	余剰汚泥	%	0.5	設定
	重力濃縮汚泥	%	3	設定
	機械濃縮汚泥	%	4	計画値
	脱水ケーキ	%	20	実績値
SS転換率	汚泥/回収SS	%	100	設定(OD)
除去率	初沈	%	50	設定
	反応タンク	%	98	設定
回収率	重力濃縮	%	85	設定
	機械濃縮	%	90	計画値
	脱水	%	95	設定
嫌気性消化	投入VS/TS	%	80	設定
	消化率	%	50	設定
	引抜きVS/TS	%	67	設定
	ガス発生倍率	Nm ³ /t-投入VS	550	設定
濃縮投入汚泥比	重力:機械	%	50	設定
	水素/消化ガス	%	137.5	
生ごみ	消化率	%	80	設定※1
	投入VS/TS	%	90	設定※1
	ガス発生倍率	Nm ³ /t-投入VS	700	設定※1

のとした。各工程における建設費および維持管理費の算定項目については表-3 に示すとおりである。維持管理における電力費の単価については従来料金の 15 円/kWh と仮定した。

(1) 水素製造・供給コストの算定および比較

消化槽の建設費および維持管理費は「下水汚泥エネルギー化技術ガイドライン」の費用関数により算定を行い、水素製造・供給工程の建設費および維持管理費は「B-DASH ガイドライン」³⁾により算定を行った。なお、水素製造のみを考慮し CO₂ の液化回収は行わないものとした。

結果を図-1 に示す。費用の内訳を見ると、製造水素 1N m³あたりのコストは消化工程が既設のケースで大規模および中規模の場合は市場価格である 100 円/N m³を下回る結果となった。また、大規模であれば消化工程を新設するケースであっても市場価格を下回る結果となった。一方、小規模の場合は消化工程が既設であっても市場価格を上回る結果となった。

(2) 生ごみの消化工程への投入

下水処理工程から発生する濃縮汚泥と生ごみ（投入汚泥量に対して 10% 程度）を消化槽へ投入した場合の水素製造可能量の算定結果を表-4 に示す。生ごみを 10% 投入することによって、消化ガス発生量が増加し、水素の製造可能量はおよそ 2 倍となることが示された。

表-3 対象とする費用算定項目

費目	嫌気性消化工程			水素製造・供給設備	生ごみ投入前処理施設
	従来型	鋼板製	高効率高温		
建設費	土木建築物、機械電気設備	土木建築物、機械電気設備	一式	土木建築物、機械電気設備	機械設備、電気設備、土木、建築
維持管理費	電力、燃料、薬品、補修、人件費	電力、点検補修	電力、その他	電力、上水、薬品、消耗品、点検補修	電力、補修

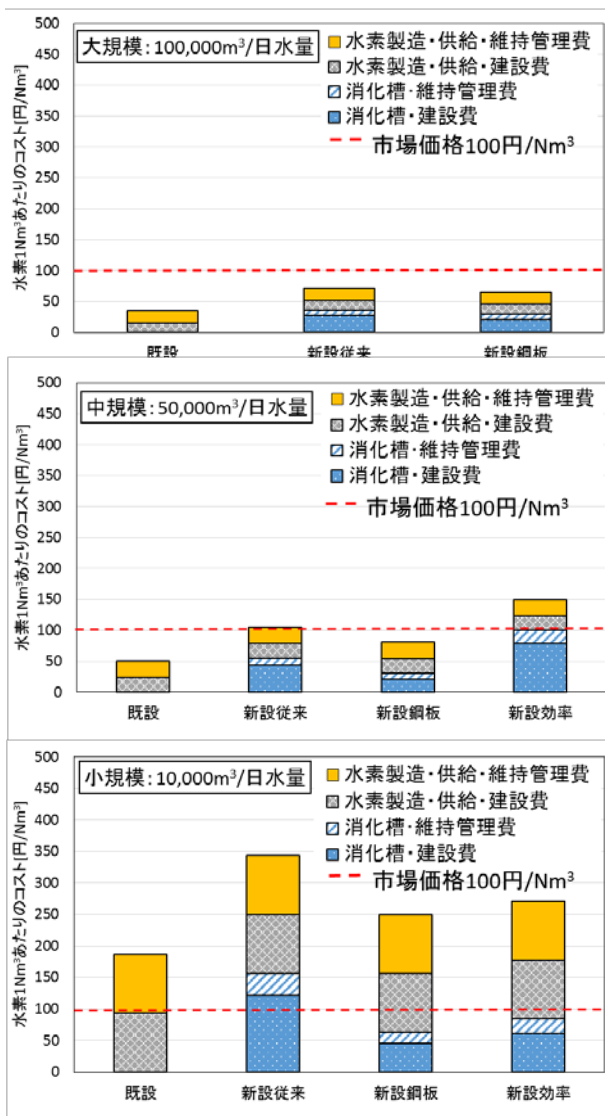


図-1 水素製造・供給コストの内訳

生ごみを 10% 投入した場合の消化ガス発生量（水素製造可能量）より水素 1N m³あたりの規模別水素製造・供給コストを算定した結果を図-2 に示す。

表-4 生ごみを投入した場合の水素製造可能量の比較

項目		検討ケース					
		小規模		中規模		大規模	
		下水のみ	生ごみ10%	下水のみ	生ごみ10%	下水のみ	生ごみ10%
日平均汚水量	m ³ /日	10,000		50,000		100,000	
消化ガス発生量	Nm ³ /日	900	1,750	4,480	8,720	8,960	17,300
水素製造可能量	Nm ³ /日	1,080	2,220	5,910	11,620	11,950	23,180
増加倍率	-	2.06		1.97		1.94	

生ごみを投入することにより、生ごみの受入・前処理工程の建設・維持管理コストが発生するが、表-4 に示したとおり水素の製造可能量が増加することで水素 1N m³あたりの製造・供給コストは抑制できることが示された。下水処理場に生ごみを受入、水素製造・供給を行う際のフローを図-3 に示す。

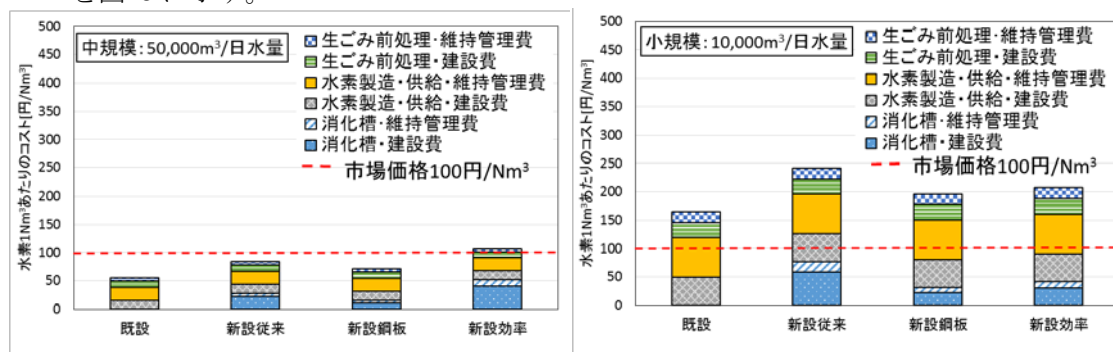


図-2 生ごみ投入時の水素製造・供給コストの内訳

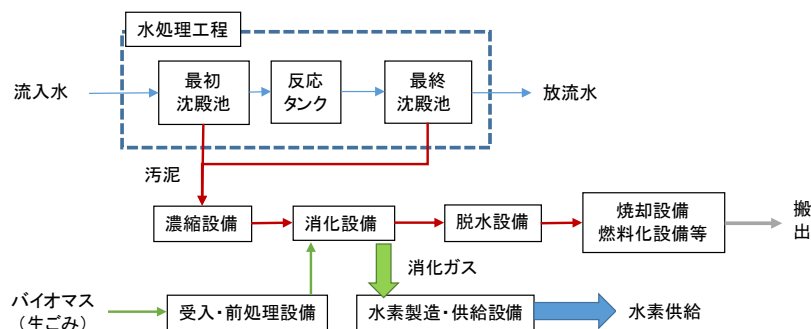


図-3 生ごみを受入れた際の水素製造・供給フロー

(3) 考察

大規模と小規模の消化工程建設費および水素製造・供給工程の建設費を比較したものを図-4 に示す。消化工程の建設費を比較すると、小規模施設では従来型はかなりの割高となっているが、鋼板製では従来型ほどの大きな違いはないことが示された。小規模施設で消化槽を新設する場合は鋼板製または高効率の方式を採用することが望ましいといえる。

また、2-（2）より下水処理事業において水素の製造・供給を行う際、中規模および小規模施設では消化工程の新設はコストが割高となるが、生ごみを投入することにより消化ガスの発生量（水素製造可能量）が大幅に増加し、水素 1N m³あたりのコストを抑制できることが明らかとなった。以上の結果を踏まえ、小規模施設で消化工程（鋼板製）を新設し生ごみも投入した場合の水素の製造・供給コストについて、生ごみ投入率 5%ごとの消化ガス発生量（水素製造可能量）を求め、水素 1N m³あたりのコストが市場価格よりも下回るラインを求めた。結果を図-5 に示す。図-5 より、小規模の下水処理場で水素製造・供給を行う場合、生ごみを 40%以上投入することで市場価格を下回ることが確認できた。

生ごみを 40%投入することによる水処理への影響を確認するための算定条件を表-5 に示し、その結果を表-6 に示す。生ごみの投入による水処理への負荷量は BOD が 17.3kg/日、窒素が 34.6kg/日、リンが 2.6kg/日、SS が 62.2kg/日という結果となり、生ごみ投入後の水処理への負荷量増加率は BOD が約 0.9%、窒素およびリンが約 9%となり水処理への影響はさほど大きくはないと考えられる。

表-6 生ごみを 40%投入した場合の水処理への影響

項目	下水処理施設由来の負荷量			生ごみ由来の負荷量		投入後濃度
	濃度	負荷量	返流水	負荷量	流入水比	
	mg/l	kg/日	kg/日	kg/日	%	
T-BOD	200	2000	-	17.3	0.86	202
T-N	40	400	47.5	34.6	8.64	43
T-P	3	30	16.3	2.6	8.80	3
SS	200	2000	397	62.2	3.11	206

※生ごみ負荷量原単位：LOTUSプロジェクトでの平均値

（4）まとめ

下水処理施設において、水素の製造・供給を行う場合のコスト分析を行った結果、小規模処理場では消化工程の建設および水素製造・供給工程設備のコストが高く、スケールメリットを見込むことができないため、不利な傾向となることが示された。しかし、生ごみを消化槽に投入することによりコスト改善を図れること、水処理への影響もさほど大きく

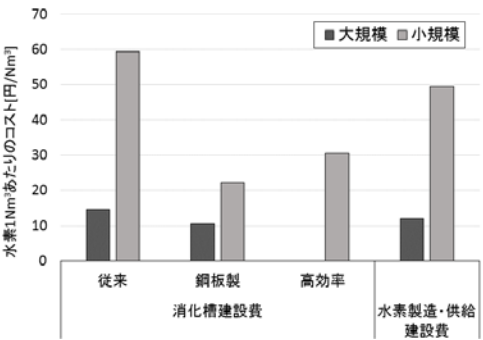


図-4 水素 1N m³あたりの建設費用の比較

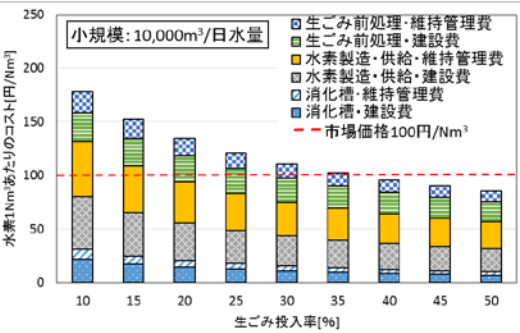


図-5 生ごみ投入によるコストの変化

表-5 生ごみ由来負荷量の算定条件

項目		単位	設定値
流入水量		m ³ /日	10,000
濃縮汚泥量		m ³ /日	60
生ごみ受入		t-wet/日	24
濃縮汚泥比		%	40
生 ご み 来 原 単 位 負 荷 量	T-BOD	kg/t-wet	0.72
	T-N	kg/t-wet	1.44
	T-P	kg/t-wet	0.11
	SS	kg/t-wet	2.59

無いことが示され、今後の検討・研究のヒントが得られた。ただし、生ごみ等は、地域により回収方法や性状が異なること、廃棄物処理事業にも関わることから地域全体での検討や取り組みが必要となることを考慮する必要がある。

4. 課題

(1) 投入する生ごみの安定確保

小規模処理場における水素製造・供給の経済性の改善にあたって、必要となる生ごみ量は 1 日あたり 24t-wet（本検討の場合）以上である。家庭からの生ごみの回収は小規模の下水処理施設の地域の場合、人口が少なく生ごみの量の確保が課題となる。この解決策としては食品工場や飲食店など、事業系からの回収が有力である。

(2) 生ごみ投入による水処理および汚泥処理への影響

生ごみの投入による消化処理後の脱水設備や下水汚泥の焼却設備等への影響については十分なデータがないため、データの収集および影響の有無や対策を検討する必要がある。また、生ごみ等は下水汚泥よりも有機物が多いため、発生する硫化水素も下水汚泥に比べて高い可能性がある。これにより消化工程設備の腐食が懸念されるためその対策も合わせて検討する必要がある。

(3) 水素供給先の確保

周辺に水素ステーション等、水素を利用する施設がある場合には供給施設を設けずに水素を販売する方法も選択肢となるが、現状では FCV（燃料電池自動車）のみによる水素需要は当面低いことが予想される。製造した水素を 100%利用することが本研究の算定コストの前提としていることから FC バスや FC フォークリフトへの供給等も合わせて考えるべきである。また、現在は燃料電池ごみ収集車の開発・実証が進められており、これが実現すれば生ごみ等の運搬にかかるエネルギーを CO₂フリーエネルギーに転換することも可能となる。

参考文献

- 1) 森智志、亀田由季子「下水処理施設からの水素利活用に関する費用構造分析と考察」、第 54 回下水道研究発表会講演集
- 2) 国土交通省水管理・国土保全局下水道部「下水汚泥エネルギー化技術ガイドライン-改訂版-」、平成 27 年 3 月
- 3) 国土技術政策総合研究所資料「B-DASH プロジェクトNo.11 下水バイオガス原料による水素創エネ技術導入ガイドライン（案）」、平成 28 年 10 月
- 4) 財団法人下水道新技術推進機構「下水処理場へのバイオマス（生ごみ等）受入マニュアル」、2011 年 3 月