

7. 下水道資源の活用を考慮した水環境マネジメント推進 に関する調査

下水処理研究室 室長 山下 洋正
研究官 藤井 都弥子

1. はじめに

下水処理場における電力消費量は平成 27 年度の時点で 7,146 百万 kWh/年¹⁾、電力由来の温室効果ガス排出量は約 378 万 t-CO₂/年であり、公共団体が実施する事務事業のなかでも温室効果ガス排出量が多いことから、公的機関として率先した省エネ方策の推進が求められている。また、平成 26 年度に改訂された「流域別下水道整備総合計画調査 指針と解説」(以下、「流総指針」)²⁾や新下水道ビジョン、及び平成 27 年度に策定された下水道技術ビジョンにおいて、「エネルギー・資源の視点を取り入れた整備計画策定の促進」や「下水処理場でのエネルギー利用効率化技術の開発」、「下水道から排出される温室効果ガス排出量を削減するための技術や省エネ効果を評価する手法の開発」等が目標として定められた。

こうした動きをふまえ、水環境の保全と省エネルギー・創エネルギーとを両立するための取り組みが求められている。一方で、下水処理工程におけるエネルギー消費と下水汚泥のエネルギー利用によるエネルギー創出を一体的に検討する考え方や、エネルギー消費量、創出量の試算方法等については十分整理されていない。

そこで本調査では、下水汚泥のエネルギー利用促進による省エネルギー・創エネルギーの効果を検討するための第 1 段階として、既存の費用関数等を活用してエネルギー収支、コストの算出を行うための考え方を整理するとともに、水処理方法や流入水量規模、下水汚泥エネルギー利用方法を組み合わせた複数のケースについて試算を行い、各ケースの特徴を整理した。

2. 研究内容

2.1 試算ケース、試算条件等の設定

平成 28 年度に整理した水処理・汚泥処理にかかる電力消費量を試算する考え方^{3),4)}を元に、新たに消化工程及び下水汚泥のエネルギー利用工程を組み合わせた考え方を整理し、コスト及びエネルギー収支の試算を行った。本調査における試算範囲を図-1 に示す。本調査では、最初沈殿池から最終沈殿池までの水処理工程、汚泥濃縮設備から汚泥脱水設備までの汚泥処理工程と、消化ガス発電設備または固形燃料化設備を対象とした。

試算ケースを表-1 に、試算条件を表-2 に示す。設定の考え方は次の通りである。

消化工程や消化ガス発電の有無、脱水汚泥の処理方法の違いによってケースを設定し、4 つの流入水量規模でさらにパターン分けを行った。また、各パターンについて水処理方法を 4 つ設定して試算を行った。地域特性や排除方式等により、流入汚水の水質、発生する汚泥の有機分が異なるほか、発生する汚泥量とその汚泥性状により、コストやエネルギー消費量、創出量が大きく異なる。そこで本試算では、流入水質及び汚泥の有機分をパラメータとして、分流

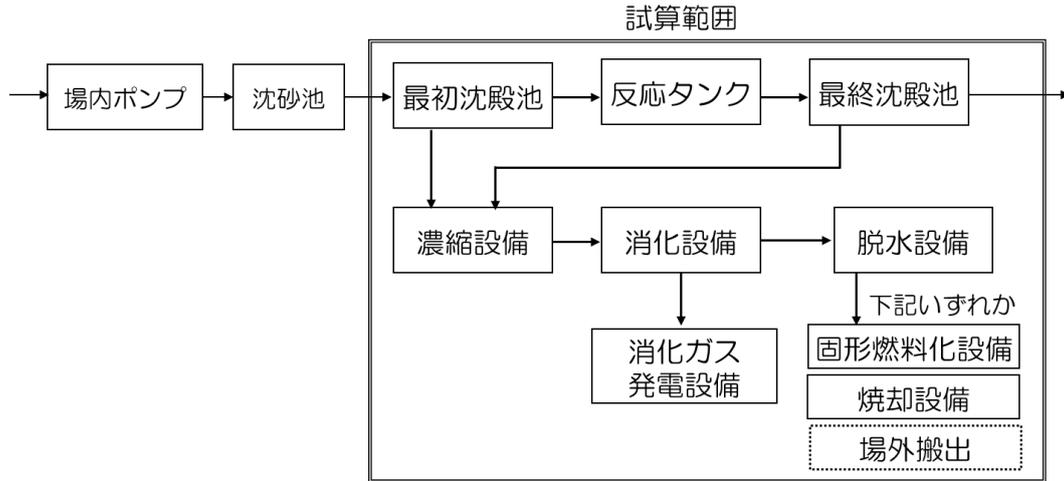


図-1 本調査における試算範囲

表-1 本調査における試算ケース

	ケース A	ケース D	ケース B	ケース C	ケース E
消化工程	○		○	○	×
消化ガス発電	○		×	×	
脱水後の汚泥処理	場外搬出	焼却	固形燃料化(乾燥)	固形燃料化(炭化)	
日平均流入水量(千 m ³ /日)	20(A-1) 40(A-2)	80(D-1) 160(D-2)	20(B-1) 40(B-2) 80(B-3) 160(B-4)	40(C-1,E-1) 80(C-2,E-2) 160(C-3,E-3)	
水処理方式	標準活性汚泥法・循環式硝化脱窒法・嫌気無酸素好気法・ステップ流入式多段硝化脱窒法				
負荷量	分流式の場合を想定した「高濃度」、合流式の場合を想定した「低濃度」の2条件				

表-2 本調査における試算条件

機器の仕様	稼働状況や採用実績から設定	
消化ガス発電方式	ガスエンジン方式	
固形燃料化設備、焼却設備の燃料	消化を行う場合(ケース B,C,D)は消化ガスを利用 消化を行わない場合(ケース E)は重油を利用	
消化槽の加温	消化ガス発電機・固形燃料化設備・焼却設備の廃熱、及び余剰消化ガスを利用	
汚泥処分費	処分委託費(ケース A)	16,000 円/t
	焼却灰処分費(ケース D)	8,000 円/t
	固形燃料売却益(ケース B,C,E)	100 円/t

式の場合を想定した「高濃度」、合流式の場合を想定した「低濃度」の2条件について試算を行った。これにより、最終的な試算パターンは112パターンとなった。

消化ガス発電を行うケースについては、脱水汚泥の処分方法の実態をふまえてケース A(日平均流入水量 20,000m³/日、40,000m³/日。脱水汚泥は場外処分)及びケース D(日平均流入水量 80,000m³/日、160,000m³/日。脱水汚泥は焼却処分)とした。発電方式は最も採用事例の多いガスエンジン方式とし、ケース A では消化ガスの全量をガス発電に使用し、ケース D では消化ガスを焼却設備補助燃料に優先的に使用し、余剰消化ガスで発電を行うものとした。

固形燃料化(乾燥)を行うケース(ケース B)については、消化設備を設置し、消化ガスは優先的に固形燃料化(乾燥)設備(以下、「乾燥設備」)で使用するものとした。流入水量は、4つの規模全てを対象とした。

固形燃料化(炭化)を行うケースについては、脱水汚泥量 10t-wet/日より大きな規模で実施されている状況をふまえ、日平均流入水量 40,000m³/日、80,000m³/日、160,000m³/日規模を対象とした。また、消化設備を設置し消化ガスを優先的に固形燃料化(炭化)設備(以下、「炭化設備」)の補助燃料として炭化を行うケース(ケース C)と、消化設備を設置せずに重油を炭化設備の補助燃料として炭化を行うケース(ケース E)の両方で試算した。

固形燃料化(乾燥)と固形燃料化(炭化)でケース設定が異なる理由は、固形燃料化(乾燥)を下水道事業として導入している下水処理場(平成29年3月時点で6箇所)は全て消化設備を有しているのに対し、固形燃料化(炭化)を下水道事業として導入している下水処理場(同11箇所)では消化設備を有している下水処理場と有していない下水処理場が混在している実態をふまえたためである。これは、脱水汚泥の含水率や臭気など消化工程の有無による汚泥性状の違いが、固形燃料化技術への適用性に影響しているものと考えられる。

ケース A,B,C,Dにおける消化槽の加温は、消化ガス発電設備や固形燃料化設備、焼却設備の廃熱及び消化ガスを利用することとした。なお、廃熱や消化ガスが不足した場合は、重油を利用することとした。

脱水汚泥の処分費については、「下水汚泥エネルギー化技術ガイドライン(平成29年度版)」(以下、「エネ化ガイドライン」)⁵⁾において検討されているケースに基づき、ケース A は外部への処分委託費(16,000円/t)を、ケース B,C,E は固形燃料の売却価格(100円/t)を、ケース D は焼却灰の処分費(8,000円/t)をそれぞれ計上した。

なお、本調査における試算ケースは、各方法の優劣を比較するものではなく、まずは各方法のエネルギー収支やコストの状況を把握するために設定した。

2.2 試算方法

各設備のコスト、エネルギー収支の算出にあたっては、まず試算条件や各処理方法の標準的な除去率等に基づいて物質収支を整理した。整理した物質収支から各機器の容量計算を行い、機器仕様、運転時間等を設定した。

水処理・汚泥処理設備の電力消費量については、これまでに消費電力が把握できている機器は運転時間を乗じて電力消費量とし、消費電力が明確でない機器は運転時間と電動機容量と負荷率を乗じて電力消費量とした。

水処理・汚泥処理設備の電力消費量以外(各設備のコスト、消化ガス発電設備・乾燥設備・炭

化設備・焼却設備の電力消費量、消化ガス発電量、固形燃料熱量)については、整理した物質収支から得られた汚泥量や消化ガス発生量と、流総指針やエネ化ガイドラインにてこれまでに整理されている費用関数を用いて試算し、コスト、エネルギー収支を整理した。

消化ガス発電設備以外の設備のコストについてはデフレーターを用いて平成 28 年度価格に補正した。消化ガス発電設備については、エネ化ガイドラインにてデフレーター補正されていないことや近年の価格動向をふまえ、今回はデフレーター補正を行っていない。

3. 研究結果

3.1 物質収支の整理

各ケースにおいて、「下水道施設計画・設計指針と解説」⁶⁾や過去の調査データ等をもとに流入から水処理工程、汚泥処理工程までの物質収支を整理した。一例として、「標準活性汚泥法・日平均流入水量 40,000m³/日・消化設備あり・高濃度」の物質収支を図-2 に、「循環式硝化脱窒法・日平均流入水量 40,000m³/日・消化設備あり・高濃度」の物質収支を図-3 に示す。高度処理は標準活性汚泥法より脱水ケーキ量が 3%程度減少する一方、返流水負荷は 8%程度上昇した。

なお、「低濃度」のケースについては、下水道統計の平均値から設定した流入水中の負荷量 (SS,BOD) が「高濃度」のケースの 7 割程度であったため、各工程における負荷量、汚泥量についても概ね 6 割～7 割程度の値となった。

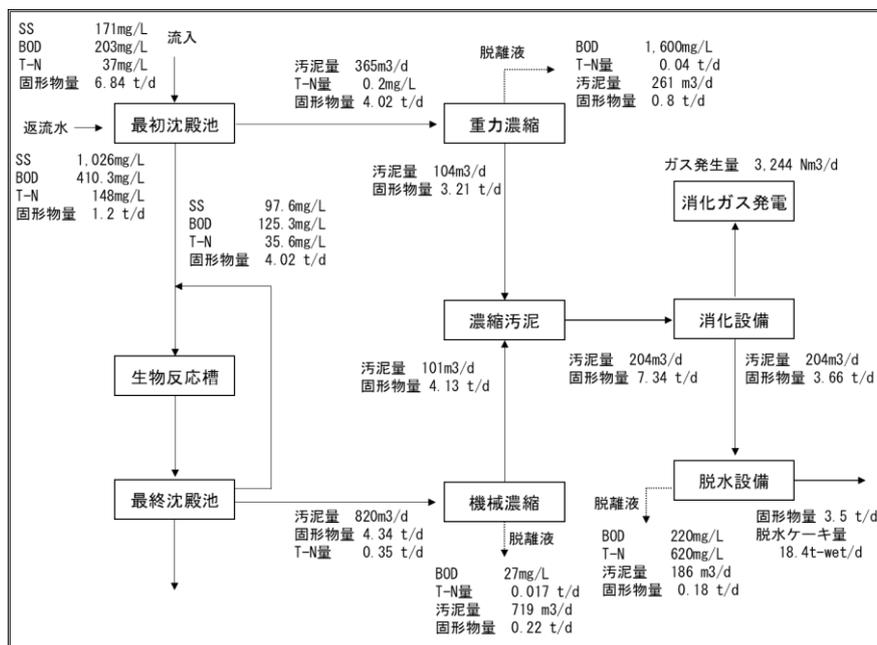


図-2 物質収支図の一例

(標準活性汚泥法・日平均流入水量 40,000m³/日・消化設備あり・高濃度)

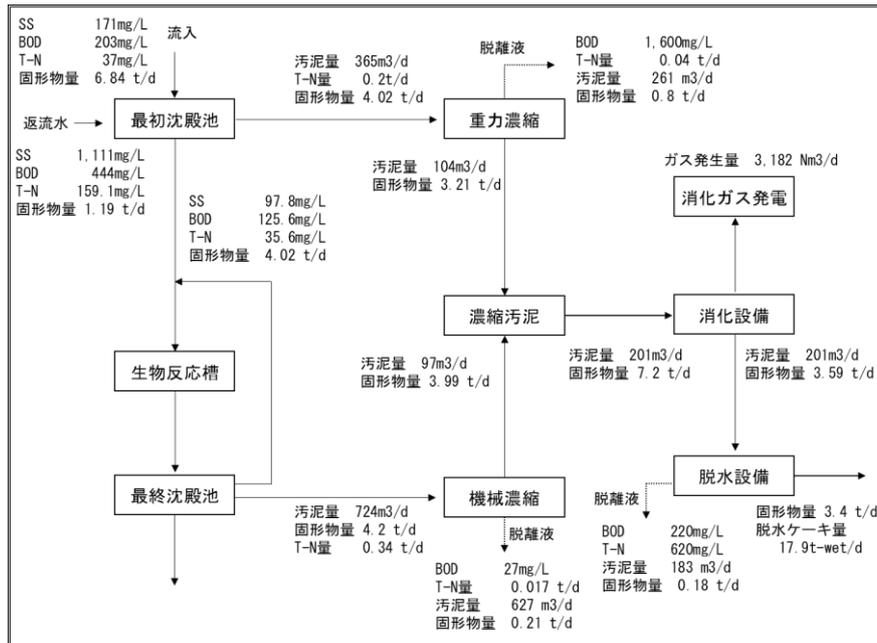


図-3 物質収支図の一例

(循環式硝化脱窒法・日平均流入水量 40,000m³/日・消化設備あり・高濃度)

3.2 電力消費量及びエネルギー収支の試算結果

試算結果の例として、標準活性汚泥法及び循環式硝化脱窒法における電力量及びエネルギー収支の結果を示す。

今回の試算においては、消化槽の加温に必要な熱量と各設備の廃熱の回収量、消化ガス発生量を試算した結果、全てのケースにおいて廃熱と余剰消化ガス(ケース B,C,D)で消化槽の加温をまかなえる(加温に要する燃料消費量 0)という結果となった。

図-4 は標準活性汚泥法における各ケースの電力量を、図-5 は循環式硝化脱窒法における各ケースの電力量を示したグラフである。値が下へ伸びているほど、電力消費量が大きいかを示している。循環式硝化脱窒法のほうが標準活性汚泥法より水処理・汚泥処理施設の電力消費量が大きいため、全体の電力消費量も大きいという結果となった。

図-6 は標準活性汚泥法におけるエネルギーの創出量と消費量を、図-7 は循環式硝化脱窒法におけるエネルギーの創出量と消費量を、それぞれ熱量で示したグラフである。エネルギー消費量は電力消費量及び補助燃料使用量から算出した値を、エネルギー創出量は消化ガス発電量及び固形燃料熱量から算出した値を示している。エネルギー量についても、値が下へ伸びているほど、消費量が大きいかを示している。また、これらの値を元に算出した、標準活性汚泥法における各ケースのエネルギー消費量に対する創出量の比率(以下、「創出量の比率」)を図-8 に、循環式硝化脱窒法における各ケースの創出量の比率を図-9 に示す。

消化ガス発電を行うケースのうち、汚泥を外部へ搬出するケース A では創出量の比率が約 40~50%だった一方、汚泥を焼却するケース D では消化ガスの一部を焼却設備の燃料として使用していることから発電量が小さくなるとともに焼却設備の電力消費量が増えるため、創出量の比率が 15%程度にとどまる結果となった。

固形燃料化(乾燥)を行うケース B は、固形燃料が持つ熱量が炭化による固形燃料より高いこ

と、乾燥設備の電力消費量が炭化設備より低いことなどから、創出量の比率は約 40～50%と高い値となった。

固形燃料化(炭化)を行うケースのうち、ケース E (消化を行わない場合)は炭化設備の補助燃料として重油を使用するケースでありエネルギー消費量が大きくなる結果となった。また、エネ化ガイドラインをふまえて固形燃料熱量を「脱水汚泥量×固形燃料転換率(単位量あたりの脱水汚泥から固形燃料が生成される量を示した割合)×単位発熱量」の式から算出しているが、ガイドラインに記載されている固形燃料転換率と単位発熱量の値と、別途算出した脱水汚泥量から算出した固形燃料熱量の値は、消化を行うケース C より小さくなることから、創出量の比率が小さくなる結果となった。ただし、ガイドラインに記載されている値は、硝化があるケースでは低温炭化、消化がないケースでは中温炭化による固形燃料の実態調査結果に基づいているため、今回用いている算出式や係数について今後検討が必要になる可能性がある。

なお、ここでは示していないが、嫌気無酸素好気法及びブステップ流入式多段硝化脱窒法の電力消費量やエネルギー量は、循環式硝化脱窒法とほぼ同程度という結果となった。また、「低濃度」は「高濃度」と比較してエネルギー消費量で約 20%、エネルギー創出量で約 40%低い結果となった。

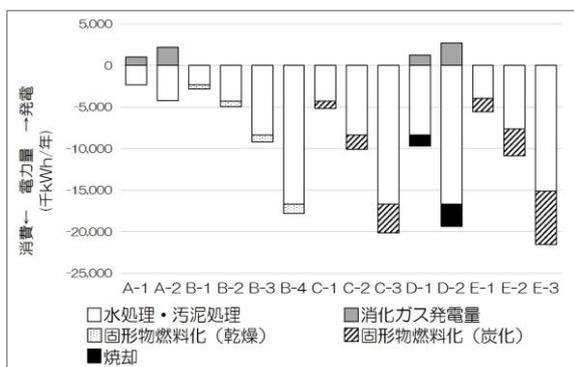


図-4 電力消費量(標準活性汚泥法)

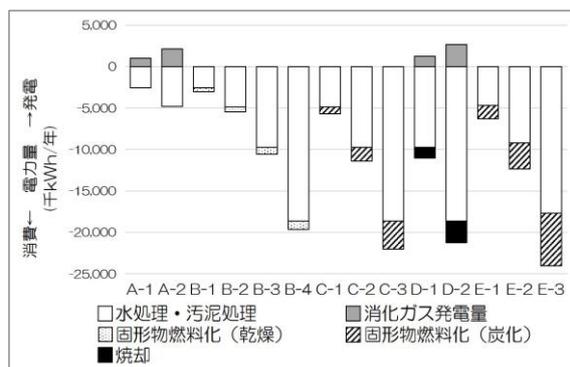


図-5 電力消費量(循環式硝化脱窒法)

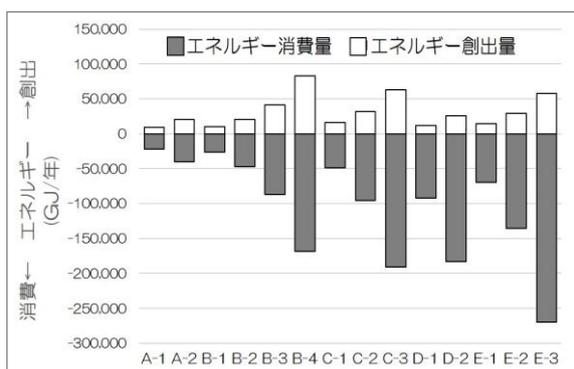


図-6 エネルギー創出量及び消費量(熱量)
(標準活性汚泥法)

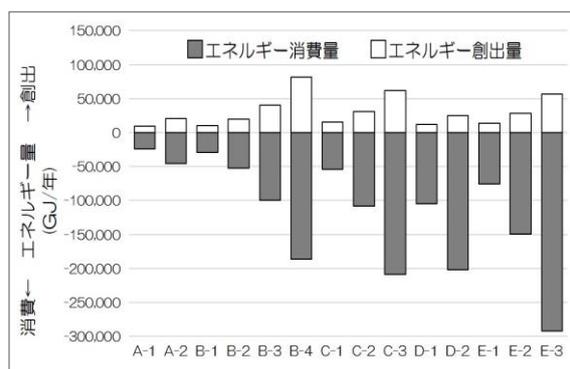


図-7 エネルギー創出量及び消費量(熱量)
(循環式硝化脱窒法)

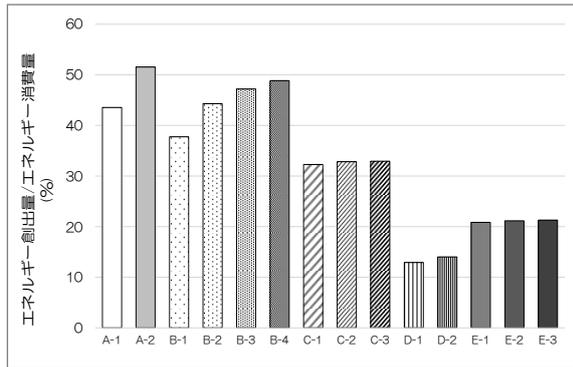


図-8 エネルギー消費量に対する創出量の比率（標準活性汚泥法）

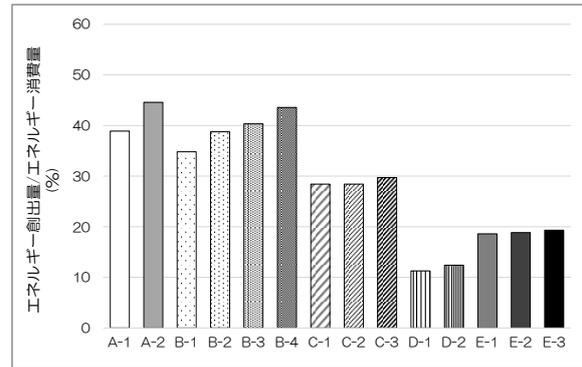


図-9 エネルギー消費量に対する創出量の比率（循環式硝化脱窒法）

3.3 コストの試算結果

コストについても、標準活性汚泥法及び循環式硝化脱窒法における「高濃度」の試算結果を例として示す。コストは建設費(年価)、維持管理費、汚泥処分費の合計で算出しており、今回の試算においては、消化ガス発電による電力は場内で利用し、消費電力の削減をコストに反映した。また、固形燃料は処理場で利用せず全て外部に売却するとした。図-10 は標準活性汚泥法における各ケースの処理水量あたりのコストを、図-11 は循環式硝化脱窒法における各ケースの処理水量あたりのコストを示したものである。循環式硝化脱窒法は標準活性汚泥法より 10～20%程度高い値となった。いずれのケースにおいても、流入水量が大きくなると処理水量あたりのコストが小さくなる傾向が見られた。

流入水量別に見ると、日平均流入水量 20,000m³/日(A-1、B-1)では、消化ガス発電のほうが固形燃料(乾燥)より低い結果となった。日平均流入水量 40,000m³/日(A-2、B-2、C-1、E-1)では、ケース A がやや低いが、ケース B,C,E は同程度となった。日平均流入水量 80,000m³/日及び 160,000m³/日(B-3、B-4、C-2、C-3、D-1、D-2、E-2、E-3)では、ケース D において他のケースより 10%程度コストが高くなる傾向が見られた。ケース B,C(消化あり・固形燃料化)は、設置する設備や汚泥発生量等にあまり違いがなく、建設費及び維持管理費に大きな差が見られないことから、全体コストも同程度の値になったと考えられる。また、ケース E(消化なし・固形燃料化)では、消化設備がないため建設費は他のケースより低くなるが、重油を固形燃料化設備の補助燃料として使用するため維持管理費が高くなることから、今回の試算では全体コストがケース B や C と同程度の値になったと考えられる。一方、ケース D(消化ガス発電・汚泥焼却)は水処理・汚泥処理設備、消化ガス発電設備のほかに焼却設備の建設費、維持管理費が追加となるため、他のケースよりコストが高くなったと考えられる。

なお、コストについても嫌気無酸素好気法及びステップ流入式多段硝化脱窒法は循環式硝化脱窒法とほぼ同程度という結果となった。また、「低濃度」の場合は汚泥発生量が減るため、ケース A,D(消化ガス発電)では維持管理費、汚泥処分費ともに「高濃度」より低くなり、全体コストで見ると「高濃度」より約 10%低くなる結果となった。一方、ケース B,C,E(固形燃料化)では汚泥発生量が少なくなることにより維持管理費は減るものの固形燃料売却益も減るため、全体コストで見ると「高濃度」と同程度という結果となった。

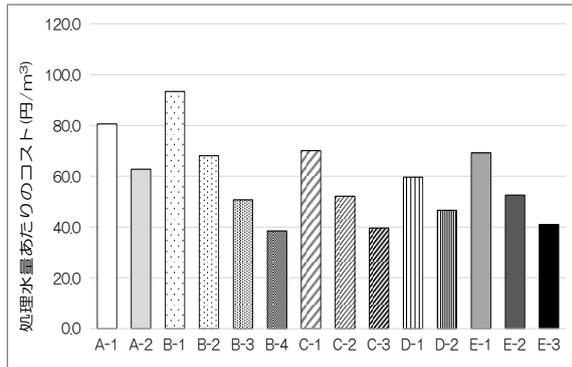


図-10 処理水量あたりのコスト
(標準活性汚泥法)

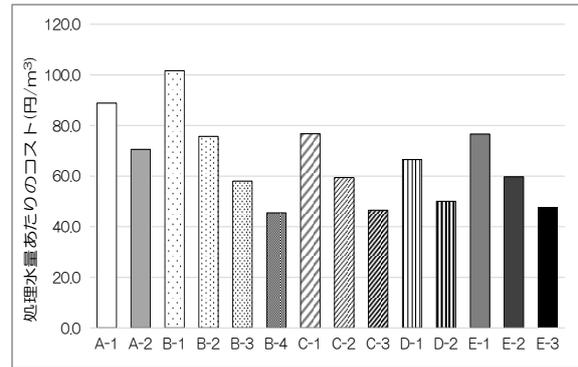


図-11 処理水量あたりのコスト
(循環式硝化脱窒法)

4. まとめ

既存資料等を活用して下水処理工程及び汚泥のエネルギー利用によるエネルギー収支、コストを算出する方法を整理し、流入水量規模や下水汚泥の利用形態の違いによる傾向を整理した。今後は、今回整理した算出方法に実下水処理場の情報を適用して試算し、今回の試算結果や実績値との比較分析等を行うとともに、流域における水環境の保全とエネルギーの最適化を検討するための考え方を整理していく予定である。

【参考文献】

- 1) 公益社団法人日本下水道協会;平成 27 年度版下水道統計, (2017)
- 2) 藤井都弥子,重村浩之,前田光太郎,山下洋正;原単位を用いた下水処理場における電力消費量削減にむけた検討手法に関する一考察, 第 54 回下水道研究発表会講演集, 522~524, (2017)
- 3) 藤井都弥子,浜田知幸,前田光太郎,重村浩之,山下洋正;下水道設備における電力消費特性をふまえた処理場全体の電力消費量削減検討手法, 土木学会論文集 G(環境)第 54 巻, 449~456, (2017)
- 4) 国土交通省水管理・国土保全局下水道部;流域別下水道整備総合計画調査 指針と解説, (2015)
- 5) 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 平成 29 年度版, (2018)
- 6) 社団法人日本下水道協会;下水道施設計画・設計指針と解説-2009 年版-後編,(2009)