

下水処理場の高度処理方法・規模の違いによる 水処理設備のエネルギー消費特性

濱田知幸・田嶋 淳・山下洋正

1. はじめに

下水道整備により生活環境の改善、公共用水域の水質保全という点では、一定の成果が得られたが、閉鎖性水域では水質環境基準未達成の水域が残っており、赤潮、青潮等は依然として発生している。そのような中、下水道の流域別下水道整備総合計画¹⁾では、水質環境基準が定められた閉鎖性水域において下水処理場から放流される窒素、リンの削減目標量及び削減方法を定め、**高度処理**^{*}を推進している。

一方で、下水処理場における電力使用量は平成24年度の時点で6,201百万kWh/年²⁾であり、我が国の総電力量の約0.63%に相当する。近年の電力逼迫や温室効果ガス排出量削減という観点から、下水処理場におけるエネルギー削減に関する対応が求められている。

窒素等を除去する高度処理は、通常の沈殿池、反応槽に加えて、脱窒のための無酸素槽における水中攪拌機（全ての窒素除去技術）や循環ポンプ（ステップ流入式多段硝化脱窒法以外の窒素除去技術）が必要となること等から、通常処理に比べてエネルギー消費が大きい。そのため、通常処理よりエネルギーを使用する高度処理推進とエネルギー削減の相反する課題を両立する必要性がある。

下水処理場のエネルギー消費は、処理方法、処理規模、設備種類など個別下水処理場の特性により異なるため、対象処理場の特性を踏まえた合理的な省エネルギー対策の策定が重要である。しかし、これら下水処理場の特性を踏まえたエネルギー消費について検証するための技術資料は整理されておらず、下水道事業管理者が高度処理に係る下水道計画を策定する際、「エネルギー消費の現況把握」及び「エネルギー消費に配慮した計画策定」が難しい現状である。そのため、高度処理方法や規模毎に水処理設備の標準的エネルギー使用量を示す。

本調査では、高度処理に係る下水道計画策定時の技術資料とするため、処理法や処理規模毎に単位窒素除去量あたりのエネルギー消費（以下「エネルギー原単位」という。）を整理した。具体的には、処理法や処理場規模毎に下水道水処理設備の概略設計を行った。容量計算を行った後、容量計算結果に応じた設備を割り付け、個別設備の電力量からエネルギー消費（重油換算）を算出した。これを窒素除去量で除してエネルギー原単位とし、処理法毎に窒素除去量を変数とするエネルギー原単位式を作成した。高度処理に関する標準的エネルギー使用量としての活用が見込まれる。

2. エネルギー原単位の算出

2.1 概略設計によるエネルギー原単位の算出

水処理方式毎にエネルギー原単位を算出するため、水処理設備の概略設計を行い、個別設備の電力量を積み上げた。設計水量は1万m³/日、5万m³/日、10万m³/日の3条件とした。概略設計の対象水処理方式は標準活性汚泥法（標準法）、高度処理法として循環式硝化脱窒法（循環法）、嫌気無酸素好気法（A2O法）、ステップ流入式多段硝化脱窒法（多段法）の4処理方式[※]とした。実下水処理場では流入水量、汚濁負荷が時間変動するが、本検討では変動しない理想的な条件で設計した。 [※]用語解説参照

① 容量計算条件

表-1に反応タンクの容量計算の水質条件設定を示す。容量設計方法・各係数については、下水道施設計画・設計指針と解説³⁾に記載された容量方法により実施した。主な条件を以下に示す。

【共通】

- ・ 冬期の流入水量は、夏期の0.8倍とした。
- ・ 冬期の流入水質は設計指針記載の流入水質で設定、夏期は流入水量を考慮し、冬期と同じ負荷量となるよう設定。

【反応タンク】

- ・ 水温は夏期24℃、冬期13℃とした。

表-1 水質設定条件

項目	計画流入水質 [mg/l]	処理水質 [mg/l]				
		標準法	循環法	A2O	多段法	
夏期	C-BOD	96	2.9	2.5	2.5	2.8
	SS	72	8	8	8	8
	T-N	28.8	22.4	9.3	9.3	8.9
	Kj-N※	28.8	1.6	1.6	1.6	1.6
	NOx-N	0	20.8	7.7	7.7	7.3
	T-P	2.4	2.4	2.4	1.6	2.4
冬期	C-BOD	120	3.6	3.2	3.2	3.5
	SS	90	10	10	10	10
	T-N	36	28.0	11.8	11.8	11.1
	Kj-N※	36	28.0	2.0	2.0	2.0
	NOx-N	0	0.0	9.8	9.8	9.1
	T-P	3	3.0	3.0	2.0	3.0

※ 有機態窒素とアンモニア態窒素の総和

表-2 設計対象設備

分類	設計対象施設	標準法	循環法	A ₂ O法	多段法
最初沈殿池	汚泥掻寄機	○	○	○	○
	スカムスキマ	○	○	○	○
	生汚泥ポンプ	○	○	○	○
反応タンク	水中攪拌機		○	○	○
	循環ポンプ		○	○	
最終沈殿池	汚泥掻寄機	○	○	○	○
	スカムスキマ	○	○	○	○
	返送汚泥ポンプ	○	○	○	○
	余剰汚泥ポンプ	○	○	○	○
送風機設備	送風機	○	○	○	○
脱臭設備	脱臭ファン	○	○	○	○

※ 送風機は消費電力が大きいため反応タンクと分けて記載した。

- ・ 反応タンク容量について、標準法は水理学的滞留時間(HRT)が諸元となるため、流入水量の多い夏期条件で算定した。高度処理は窒素除去をベースに検討するため、冬期条件で算定した。
- ・ 有機物とNH₄-Nの酸化、微生物の内生呼吸により算出される必要酸素量(AOR)については、標準法では夏期は硝化進行(NH₄-N酸化有)、冬期は硝化なし(NH₄-N酸化無)と考え設定した。高度処理法は年間を通じて硝化進行するものと考え設定した。
- ・ 反応タンク末端のDOは1.5mg/Lとした。

【最初沈殿池・最終沈殿池】

- ・ 計画日最大汚水量で設計した。
- ・ 最初沈殿池水面積負荷は分流式を想定し、設計指針掲載値の中間値から、50m³/(m²・d)を採用した。
- ・ 最終沈殿池水面積負荷は、設計指針掲載値の中間値から、標準法は25m³/(m²・d)、高度処理法は20m³/(m²・d)を採用した。
- ・ 沈殿池の形状は矩形の1階層とし、反応タンク1槽に対し沈殿池2池とした。反応タンク水深は5m、幅は5～8mとした。

② 設備能力及び電力量の設定

容量計算結果を踏まえ、表2に示す各設備を設定した。近年導入が進んでいる省エネルギータイプの設備ではなく、多くの処理場で採用されている標準的な能力の設備を採用した。各設備の定格電力と稼働時間から電力量を算定した。

寄せ機1池1駆動、スカムスキマは電動シリンダー方式1池1駆動、汚泥ポンプ(φ100×1.0m³/min)は運転時間が12時間を超える場合に複数系統化した。

反応タンクにおいては、攪拌機は水中機械攪拌方式とし、嫌気槽・無酸素槽の縦横比が1:2を超える場合は複数台設置した。送風機について、反応タンクの必要風量に対して送風機3台構成とし、必要風量に応じて機種選定した。夏期と冬期で必要酸素量AORが大きく変わる標準法(冬期は硝化抑制であるため)については1台を硝化促進専用として、冬期6ヶ月間だけ運転することとし年平均の電力量を計算した。

2.2 エネルギー原単位計算結果の検討

エネルギー原単位の算定結果について、全体の結果を表3に、個別設備の内訳を図-1にそれぞれ示した。まず全体として、窒素除去技術のエネルギー原単位はA2O法が高く、多段法が最も低くなった。1万m³/日と5万m³/日のエネルギー原単位では1万m³/日が高くなったのに対し、5万m³/日と10万m³/日のエネルギー原単位はほとんど変わらなかった。

次に個別設備として、各設備のエネルギー原単位の傾向を以下に示す。

表-3 エネルギー原単位計算結果

	A2O法			循環法			多段法		
	1万m ³	5万m ³	10万m ³	1万m ³	5万m ³	10万m ³	1万m ³	5万m ³	10万m ³
エネルギー原単位 (重油kL/t-N)	4.2	3.2	3.2	4.1	3.1	3.1	3.2	2.4	2.2

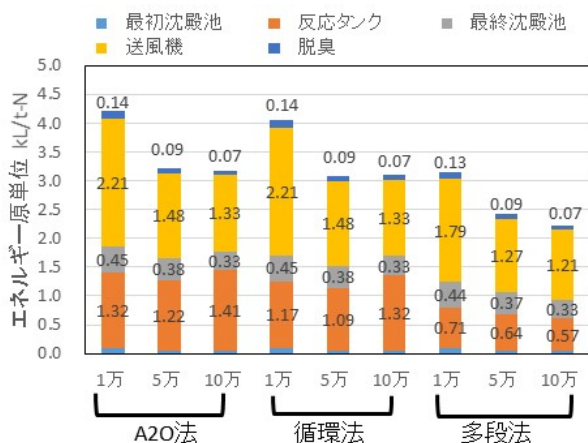


図-1 個別設備毎のエネルギー原単位

① 最初沈殿池・最終沈殿池

沈殿池の構成設備である掻き寄せ機、スカムスキマ、汚泥返送ポンプは、一定のスケールメリットが見られたが、本算定条件では送風機に比べて当該設備のエネルギー使用量自体が少なく、エネルギー原単位への寄与は軽微であった。

② 反応タンク

水中攪拌機は流入水量が増えたとき、設置台数も増えるため、スケールメリットがない結果となった。一方で、全体のエネルギー原単位に占める反応タンクの比率は大きく、高度処理方法のエネルギー原単位に影響した。循環水ポンプに係る動力が不要となるため、多段法のエネルギー原単位が低くなった。また、A2O法はリン除去のための攪拌機を多く設置する必要があるため、エネルギー原単位が高くなった。

③ 送風機設備

1万m³/日から5万m³/日にかけてエネルギー原単位が大きく下がった。全エネルギー原単位に占める送風機の割合も大きく、スケールメリットが大きかった。それに対し、5万m³/日と10万m³/日のエネルギー原単位はほとんど変わらなかった。送風機は、吸込風量の増加とともに全断熱効率が大きくなり、吸込風量当たりの電動機出力が小さくなるが、吸込風量が大きくなると全断熱効率の増加率が減少する。5万m³/日と10万m³/日でエネルギー原単位が変わらなかった理由の1つとして、送風機が一定規模以上になるとスケールアップによる全断熱効率の増加が限定的となるためと考えられる。

④ 脱臭ファン

一定のスケールメリットが見られたが、本算定条件では送風機に比べて当該設備のエネルギー使用

量自体が少ないため、全体のスケールメリットへの寄与は軽微であった。

2.3 エネルギー原単位式の作成

エネルギー原単位式を表-4に示す。個別設備のエネルギー原単位計算結果を踏まえ、送風機に係るスケールメリットが大きかったことから送風機についてスケールメリットを見込み、その他の設備については各処理規模の平均値から一定値とした。

表-4 エネルギー原単位式

処理方式	設備	原単位[重油kL/t-N]※	
循環法	送風機	$1.59X^{-0.227}$	$1.59X^{-0.227} + 1.740$
	攪拌機	0.487	
	循環ポンプ	0.705	
	返送汚泥ポンプ	0.328	
	その他	0.220	
A2O法	送風機	$1.59X^{-0.227}$	$1.59X^{-0.227} + 1.862$
	攪拌機	0.608	
	循環ポンプ	0.705	
	返送汚泥ポンプ	0.328	
	その他	0.220	
多段法	送風機	$1.38X^{-0.177}$	$1.38X^{-0.177} + 1.178$
	攪拌機	0.641	
	循環ポンプ	—	
	返送汚泥ポンプ	0.322	
	その他	0.216	

※ Xは除去T-N (t-N/日)

3. 実処理場実績値との比較によるエネルギー原単位の標準的エネルギー消費量としての活用検討

エネルギー原単位について、下水道統計から試算した実処理場実績値と本調査において概略設計より得られた値（以下「概略設計値」という。）の比較を行い（図-2）、標準的エネルギー消費量としての活用について検討した。

窒素除去負荷量が低い範囲では、エネルギー原単位について実処理場実績値より概略設計値が低くなった。一方で窒素除去負荷量が高い範囲では、実処理場実績値とほとんど変わらなかった。

概略設計は負荷変動のない理想的な条件で実施されたのに対し、実処理場は負荷変動に対応した送風量制御が求められるため、特に負荷変動が激しい小規模処理場のエネルギー原単位が高くなったものと推察される。また、いくつかの実処理場で、理想的な条件で実施した概略設計値より低いエネルギー原単位となった理由として、反応タンク末端のDOを本概略設計より低く設定していること、高効率攪拌機、高効率ブロワ、微細気泡散気装置などの省エネ設備の採用が寄与したこと等が想定される。

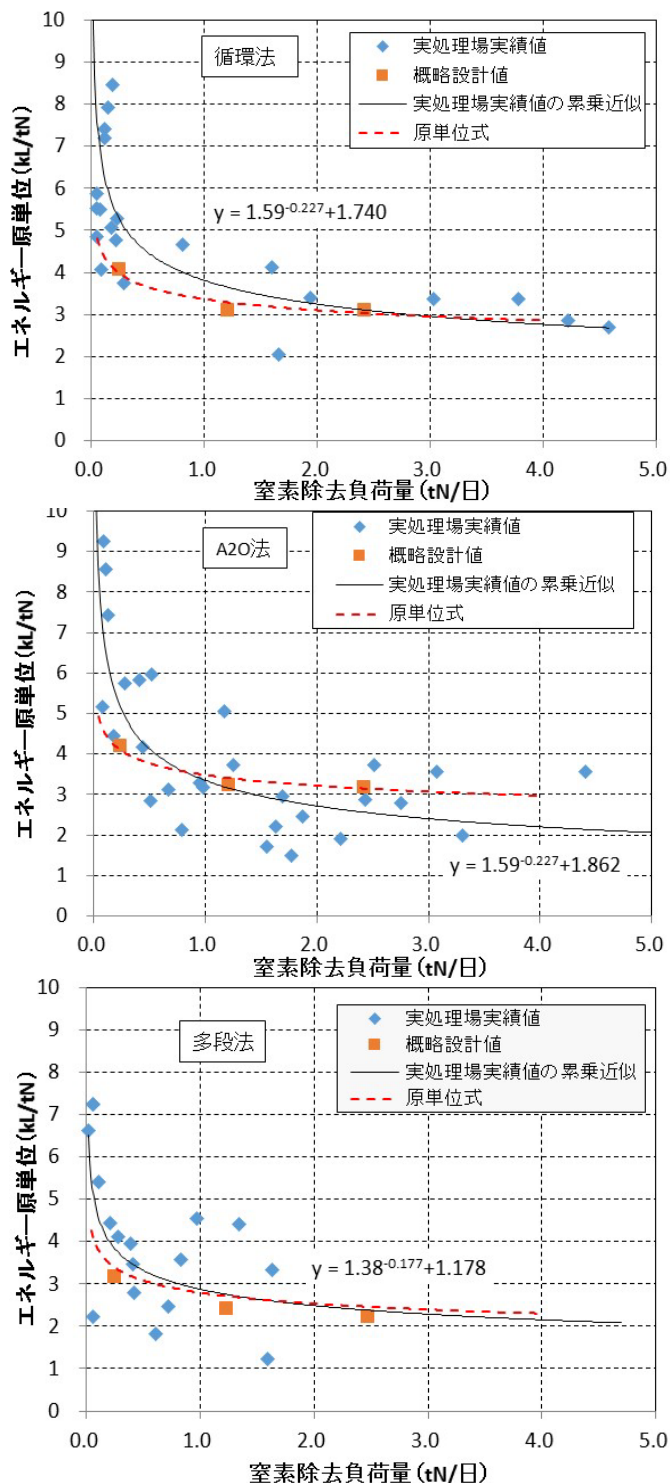


図-2 実処理場実績値と概略設計結果の比較

本調査における設計に際しては、流入負荷変動がない理想的条件で設備の稼働条件を設定した。対象下水処理場の設備毎のエネルギー原単位について、エネルギー原単位式と比較することで、エネルギー消費の現況を把握できる。流入汚濁負荷の変動に応じた送風量制御等の適正な運転管理がなされているか、下水処理場の運転管理に係る標準的エネルギー消費量としての活用が見込まれる。

また、本調査では下水処理場で広く普及している一般的な設備で設計した。高効率攪拌機、高効率ブロワ、微細気泡散気装置などの省エネ設備を導入する際、一般的な設備による本エネルギー原単位式と比較することで、エネルギー消費削減効果の推定ツールとして有効である。

4. まとめ

処理規模・処理法毎に水処理設備の概略設計を行い、処理法毎に除去窒素量を変数とするエネルギー原単位式を整理した。エネルギー原単位の傾向として、低流入水量の処理場ではエネルギー原単位が高いこと、一定規模以上（本調査では5万m³/日）になるとエネルギー原単位のスケールメリットは小さくなることがわかった。

高度処理を実施する下水処理場において、各設備のエネルギー消費状況を調査したうえで、本検討結果を用いて現況把握・省エネ効果等を検討することにより、エネルギーに配慮した下水道計画の策定に資するものと考えられる。

参考文献

- 1) 国土交通省水管理・国土保全局、「流域別下水道整備総合計画調査 指針と解説」、2015
- 2) 社団法人日本下水道協会、「平成24年度版 下水道統計」、2014
- 3) 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-」、2009

濱田知幸



国土交通省国土技術政策総合研究所下水道研究部下水処理研究室 研究官
Tomoyuki HAMADA

田嶋 淳



国土交通省国土技術政策総合研究所下水道研究部下水処理研究室 主任研究官
Atsushi TAJIMA

山下洋正



国土交通省国土技術政策総合研究所下水道研究部下水処理研究室長
Hiromasa YAMASHITA