下水処理場の地域における 物質・エネルギー循環拠点化に関する研究

福嶋 俊貴¹

¹メタウォーター株式会社（〒101-0041東京都千代田区神田須田町1-25 J R 神田万世橋ビル）

* E-mail: fukushima-toshiki@metawater.co.jp

下水処理場を地域における物質・エネルギー循環の拠点として捉え、第二ステップとして流入下水中有機物の活用法として消化ガス発電と污泥焼却発電をその組合せ（複合発電）も含めて検討した。一方、物質循環拠点としてはリン回収を取り上げ、灰アルカリ法とMAP法でリン回収量を試算した。さらに、地域バイオマス活用として生ごみや尿・浄化槽污泥を受入れた場合の効果も試算した。下水処理量48,000m³/日のモデル処理場を対象として、固形性有機物回収技術として高効率固液分離を導入することにより、通常の消化ガス発電による電力自給率6.2%が13.0%まで増加し複合発電では18.6%と3倍に増加した。リン回収では水処理工程でリンを污泥に移行させるAO法の採用により灰アルカリ法では標準法の1割から3割まで回収量が増加した。地域バイオマスの嫌気性消化槽への受入では消化ガス発生量の増加により発電量の増加や返流水からのMAP法によるリン回収量の増加が期待された。各種施策を下水処理場における環境性能という観点から水環境効率で評価するとベンチマークとした消化ガス発電の1.62kg/kWhに対し、污泥焼却発電は1.96kg/kWh、リン回収は2.08kg/kWhであった。各種施策の組合せによる水環境効率3kg/kWhが目標となるのではと考えられた。

Key Words : sewage treatment plant, energy self-sufficient, phosphorus recovery, water eco-efficiency

1. はじめに

今後の水管理に係わる基本方向を示した「水循環基本法」が平成 26 年 7 月に施行され、特に流域連携の推進に関して「流域の総合的かつ一体的な管理を行うため、連携及び協力の推進に努める」とされている¹⁾。同じく平成 26 年 7 月に策定された新下水道ビジョンでは「循環のみち下水道の成熟化」のひとつとして、下水道システムの『水・資源・エネルギーの集約・自立・供給拠点化』が取り上げられている。そのなかで「下水道の有する資源・ポテンシャルを最大限活用することで、下水道が地産地消の地域づくりに貢献することを目指す」とされている²⁾。

同様の動きは海外でもあり、中国では新しい下水処理場のコンセプトとして、栄養塩類の回収や流入下水中有機物の回収によるエネルギー自立、再生水利用拡大等を打ち出している³⁾。欧州でも廃水（Wastewater）を「使った水（Used water）」として捉え、濃縮操作による有機物やエネルギー、栄養塩類の回収方法が報告されている⁴⁾。一方ではプラントワイドモデルを活用したエネルギー最適化オプションの検討により、エネルギー自立をほ

ぼ達成した事例も紹介されている⁵⁾。海外ではオーストリア・Strass 処理場のエネルギー自立率 100%を超える事例⁶⁾が有名であるが、日本でも電力エネルギー自給率のトップクラスとして62%が報告されている⁷⁾。

そこで、日本でも下水処理場を地域の物質・エネルギー循環の拠点とすべく、第二ステップとして流入下水中有機物の活用法として消化ガス発電と污泥焼却発電をその組合せ（複合発電）も含めて検討した。さらに、地域のバイオマスの活用として生ごみや尿・浄化槽污泥を受け入れた場合の効果も試算した。一方、物質循環拠点としてはリン回収を取り上げ、灰アルカリ法と MAP 法でリン回収量を検討した。

これからは流域単位での地産地消が重要になると考え、地方の下水処理場を想定し 48,000m³/日という中規模処理場を対象として、エネルギーや物質回収量を試算し、電力原単位（＝使用電力量／下水処理量）や水環境効率（＝水環境負荷除去量／使用電力量）で総合評価を実施した。ここで、水環境負荷量は COD・T-N・T-P を換算係数で COD に統一して計算する。

2. 物質・エネルギーのポテンシャル評価方法

下水処理場での挙動を把握するにあたり、表1に示すモデル処理場を対象に下水処理場シミュレータ（PES；Performance Evaluation System）を使用し、エネルギー回収や物質回収の各施策を処理水質と使用電力量とから検討した。PES は共通設備、水処理設備、汚泥処理設備、汚泥焼却設備といった下水処理場の全てを対象として水量・水質データを利用し、水処理・汚泥処理を連携して処理水質と使用電力量を総合的に計算するプラントワイドモデルである^{9)・10)}。

48,000m³/日という中規模処理場を対象として水処理方式は標準活性汚泥法（CAS 法）を基本とした。初沈汚泥は下水処理量の一定値（2%）を引き抜くものとし、余剰汚泥はMLSSが1500mg/Lで一定となるように引き抜くこととした。（返送汚泥率は20%で固定）汚泥処理は分離濃縮・嫌気性消化・脱水・焼却とし、各方式としては採用実績の多い遠心濃縮・中温消化・遠心脱水・流動焼却を選定した。流入水質としては平成18年度下水道統計データ¹⁰⁾から全国分布の中央値として「COD360mg/L、SS160mg/L、T-N35mg/L、T-P4.0mg/L」とした。（CODはBODから換算）

使用電力量に関しては主要な機器であるポンプ・ブロワ・汚泥処理設備を対象とし、ブロワ電力量は必要酸素量を有機物酸化・硝化・内生呼吸・DO維持から計算し、微細気泡の巡回流方式として酸素移動効率を15%と設定して算出した。

なお、PESの表下水処理場への適用性についてはモデル処理場とほぼ同規模の下水処理場に対して、月単位での水量・水質データを利用することにより標準法・高度処理法の処理水質が再現できることを確認している¹¹⁾。

表1 モデル処理場の仕様

運転条件	下水処理量	48,000m ³ /日
	処理方式	標準活性汚泥法
	水温	20℃
	返送汚泥率	20%固定
	初沈汚泥	下水処理量の2%引抜
滞留時間	余剰汚泥	MLSSを1500mg/L一定に引抜
	初沈	1.5時間
	反応タンク	8.0時間
	終沈	2.0時間
流入水質	COD	360mg/L(溶解性:35%)
	SS	160mg/L(VSS:60%)
	窒素	35mg/L(NH ₄ -N:25mg/L)
	リン	4.0mg/L(PO ₄ -P:2.0mg/L)
汚泥処理	濃縮	分離濃縮(重力+遠心)
	消化	嫌気性消化(重力濃縮汚泥のみ)
	脱水	遠心脱水機
	焼却	流動焼却炉

流入下水中有機物のエネルギーポテンシャル（EP）を、COD1gあたりのメタン量からエネルギー（電力量）換算し3.49kWh/kgCODとして計算し、各処理プロセスでのエネルギーポテンシャルと使用電力量（マイナス表示）の変化を図1に示す¹²⁾。

図1 モデル処理場のエネルギーフロー

下水中有機物のEPを大幅に失っている曝気槽と焼却炉で多くの電力が使用されている結果となっていた。下水処理場全体では流入下水中の有機物のEP60,000kWhの内、消化ガスとして回収される1割を除く9割（54,000kWh）のEPを損失するために、4割に相当する25,000kWhの電気エネルギーを追加投入しているという計算結果となっていた。

下水処理場が地域のエネルギー循環拠点となるためには少なくとも下水中有機物のEPの最大限の活用による電力自立を図る必要があると考えられる。消化ガス発電や汚泥焼却発電といった場内発電量を増加させる創エネルギー（以下は創エネと記載）のためには、プロセス毎のEP変化を見ると、水処理工程では初沈での有機物回収率の増加や曝気槽での好気的な有機物分解の減少が考えられ、水処理から有機物回収への発想の転換が求められる。汚泥処理工程では最もEP損失の大きい焼却炉からの電力回収（汚泥焼却発電）が考えられる。一方で、創エネに加えて徹底的な省エネの推進も重要である。

(1) エネルギー回収の検討

国土交通省下水道部のB-DASHプロジェクトを始め、下水処理場においても創エネ・省エネの観点から多くの試みが実施されている。ここでは下水処理場への導入や実証が進められている「消化ガス発電」と「汚泥焼却発電」を取り上げ、エネルギー回収技術を電力自給率で評価した。なお、一次処理（初沈）における固形物回収能力を向上させた高効率固液分離（固形物回収率が66%に向上）を導入したケースと比較検討した。

以下のふたつのエネルギー回収技術を検討した。

① 消化ガス発電¹³⁾

初沈汚泥（重力濃縮汚泥）のみを対象に嫌気性消化を行い、発生した消化ガスを発電効率の高い燃料電池で発電する。

② 汚泥焼却発電¹⁴⁾

脱水汚泥を対象に25B-DASHプロジェクトで実証され

ている「高効率排熱発電」を既設への導入の容易さから選定した。（100t/日で250kWh/hの発電能力）

(2) 地域のバイオマス拠点化の検討

下水処理場を地域のバイオマス拠点として捉え、生ごみ・し尿・浄化槽汚泥等を受け入れる検討が進められている。下水処理場は管渠を通じて、水や資源を集約できるので生ごみの一部を直接投入型ディスポーザーにより回収するシナリオを検討した。

モデル処理場の処理能力 48,000m³/日は中規模都市であるので、一人あたりの汚水量を 300L/日とすると処理人口は 16 万人となる。処理区の半分に直接投入型ディスポーザーを導入するものとし、8 万人分の生ごみ（厨芥）処理による水処理への影響とエネルギー回収効果を試算した。ディスポーザーに投入される生ごみ量と下水処理場流入水質への影響は北海道歌登町（現：枝幸町）の調査¹⁵⁾を参考に、生ごみ量 99g/人・日、生ごみ 100g 中の汚濁負荷量は SS：8.2g, BOD：11.3g, T-N：0.73g, T-P：0.11g とし、すべて固形性有機物と考えた。なお、水量は非常に小さいので影響を与えないものとした。

地方ではまだまだ下水道普及率の低い都市もあり、汚水処理施設として合併処理浄化槽や集落排水処理施設、し尿として汚泥処理再生センターが併用されている。下水汚泥のみでなく、地域バイオマスとしてし尿や浄化槽汚泥を嫌気性消化槽に受入した場合の効果を試算した。

モデル処理場の都市における下水道人口普及率を 50% とし、合併処理浄化槽普及率 20%, し尿や単独浄化槽 30% とした。し尿と浄化槽汚泥の発生量や嫌気性消化特性は下水処理場へのバイオマス（生ごみ等）受入マニュアル¹⁶⁾を参考に表 2 のように設定した。

表 2 地域バイオマスの特性¹⁶⁾

	汚泥量	TS	VS	VS分解率	ガス発生率
	L/人・日	%	%	%	Nm ³ /kg投入VS
浄化槽汚泥	2.6	1.0	80	40	0.35
し尿	2.3	1.5	60	50	0.5

(3) 資源回収の検討（リン）

リン回収量の試算にあたっては日本での適用実績も参考に 3 方式導入するものとし、リン回収効率は手引き¹⁷⁾の数値を参考に以下のように設定した。

- ① MAP 法；脱水ろ液（消化脱離液含む）を対象に導入し、リン回収効率は 85% とした。
- ② 灰アルカリ法；焼却灰を対象に導入し、リン回収効率は 50% とした。
- ③ コンポスト；脱水汚泥を対象に導入し、リン回収効率は 100% とした。

図 2 にリン収支フローの計算例をリン回収法の適用場所と併せて示す。

また、水処理工程でリン除去を行わない標準法とリンを積極的に回収する嫌気好気法（AO 法）との 2 つのシナリオとバイオマス拠点で集約されるリンを回収する 2 つのシナリオで各リン回収量を比較した。し尿・浄化槽汚泥中のリンに関しては下水道施設計画・設計指針と解説¹⁸⁾の生活污水の汚濁負荷量の数値を用いて、表 2 の TS 濃度から計算した。

3. 物質・エネルギーのポテンシャル計算結果

(1) エネルギー回収の計算結果

消化ガス発電と汚泥焼却発電、ふたつを組合せた複合発電についての電力自給率を電力原単位や処理水質とともに表 3 に示す。

ベンチマークとした基本パターン（初沈）は固形物回収率 34% であり、発電量 1580kWh/日、電力自給率は 6.2% であった。（電力原単位は 0.53kWh/m³）今回検討のポイントとした積極的な固形物回収による効果は大きく、高効率固液分離を導入することにより発電量 3100kWh/日、電力自給率は 13.0% と約 2 倍に増加していた。初沈代替として一次処理での固形物回収機能を強化した結果、曝気槽への有機物流入負荷が低下するため空気量が減少し、使用電力量も低減していた。

図 2 リンフローと回収法（フロー上の数値はT-P負荷量）

表3 電力自給率向上のための施策のまとめ

	消化ガス発電		汚泥焼却発電		消化ガス発電&汚泥焼却発電	
	初沈	高効率固液分離	初沈	高効率固液分離	初沈	高効率固液分離
特徴	初沈回収率: 34%	回収率が66%に向上	脱水汚泥を焼却		初沈汚泥は消化ガス発電 脱水汚泥を焼却発電	
電力原単位(kWh/m ³)	0.53	0.50	0.51	0.47	0.54	0.50
使用電力量(kWh)	25390	23910	24510	22670	25680	23980
発電量(kWh) 消化ガス	1580	3100	—	—	1600	3120
発電量(kWh) 汚泥焼却	—	—	1780	1780	1570	1340
発電量(kWh) 合計	1580	3100	1780	1780	3170	4460
電力自給率(%)	6.2%	13.0%	7.3%	7.9%	12.3%	18.6%
MLSS(mg/L)*	1490	1510	1490	1510	1490	1510
処理水質 COD(mg/L)	3.9	3.5	4.0	3.5	4.0	3.5
SS(mg/L)	15.7	15.4	15.7	15.4	15.7	15.4
T-N(mg/L)	22.6	24.7	20.8	21.4	22.5	24.6
T-P(mg/L)	2.2	2.6	1.8	1.9	2.2	2.6
出典	—	23B-DASH	25B-DASH		23&25B-DASH	

*:MLSSが1500mg/Lとなるように、余剰汚泥引抜量を調整

ただし、嫌気性消化槽への投入汚泥量の増加に伴い、窒素・リンの返流負荷が増大し、処理水質の悪化をもたらしていた。

汚泥焼却発電を単独で導入したケース（嫌気性消化なし）では発電量 1780kWh/日と、初沈汚泥を対象とした消化ガス発電と同等の結果であった。高効率固液分離を導入する効果はなく、発電量は 1780kWh/日に留まっていた。（ただし、使用電力量の減少により、電力原単位は 0.47kWh/ m³ と最も小さかった。）

消化ガス発電と汚泥焼却発電を組合せた複合発電の発電量が最も大きく、初沈汚泥を対象としたケースでは発電量 3170kWh/日、電力自給率は 12.3%と約 2 倍となり、高効率固液分離を導入することにより発電量 4460kWh/日、電力自給率は 18.6%と約 3 倍に増加していた。

図3 初沈汚泥と余剰汚泥の発生量

各シナリオでの水処理工程からの初沈汚泥と余剰汚泥の発生量を汚泥処理工程における消化による変化も含めて図3に示す。水処理工程から汚泥処理工程に移行される有機物（汚泥）は一次処理方法によらず、初沈汚泥と余剰汚泥と併せて約 8t/日であり、これは約 28,000kWh/日の発電ポテンシャルに相当する。

消化ガス発電では、重力濃縮された 3.2t/日の初沈汚泥のうち 60%にあたる 1.7t/日が消化ガスとなり発電に利用され、残りの消化汚泥と余剰汚泥の 6.5t/日は焼却炉で無機化されていた。高効率固液分離を導入すること

により嫌気性消化へ投入される汚泥が 6.2t/日と 2 倍となり、発電量も 3100kWh/日と約 2 倍に増加していた。汚泥焼却発電では、重力濃縮された初沈汚泥と機械濃縮された余剰汚泥を脱水した脱水汚泥を焼却し、焼却排熱を利用して発電する。今回のケースでは高効率固液分離を導入した場合、曝気槽へ流入する固形性有機物が減少することにより余剰汚泥発生量が減少し、汚泥処理工程へ移行される汚泥固形物量は 8.6t と初沈の場合とほぼ同じとなるため発電量は 1780kWh/日であった。複合発電では消化ガス単独では無機化により損失していた消化汚泥と余剰汚泥の発電ポテンシャルも利用できるため、高効率固液分離を導入した効果が大きく発電量が 4460kWh/日と最大となっていた。

なお、25B-DASHでは脱水と焼却を連携した汚泥処理全体での効率化を図っており¹⁴⁾、更なる電力自給率の向上が期待される。

(2) 地域のバイオマス拠点化の計算結果

消化ガス発電と複合発電における、直接投入型デイスポージャー導入による発電量の計算結果を増加分と分けて図4に示す。下水処理場へのSSの流入負荷量が 0.7t 増加する効果により発電量は初沈の消化ガス発電で 240kWh（15%）増加し、複合発電の高効率固液分離では最大の 540kWh 増加し、総発電量は 5000kWh/日となり自給率は 20%を超える結果となった。流入負荷量の増加は固形性と考えたため処理水質への影響は無かったが、特に汚泥処理工程での使用電力量が若干増加していた。

発電量の増加率は 15%程度に留まり、直接投入型デイスポージャー導入はエネルギー回収手法というよりは住民利便性の向上や含水率の高い生ごみの焼却処分の問題の解決といった総合的な観点¹⁹⁾から判断する必要があると考えられた。

図4 ディスポーザーによる発電量増加

嫌気性消化における消化ガスの発生ポテンシャルの計算結果を図5に示す。し尿のほうがTS濃度も高く、VS分解率やガス発生率も高いために消化ガス発生ポテンシャルが高く、発電量2200kWh/日と全体の35%を占めていた。浄化槽汚泥はいったん生物分解を受けているのでVS%は高いもののVS分解率やガス発生率が低く発電量1000kWh/日と16%に留まっていた。

し尿や浄化槽汚泥を受け入れた場合には総発電量として7660kWh/日（複合発電＋高効率固液分離）が期待できたが電力自給率は約30%程度であり、電力自立のためには一層の省エネ推進が必要と考えられた。なお、受入マニュアルにも記載されているが、特にし尿を受け入れる場合については返流水中のBODやNH₄-Nの濃度が高くなることが予想され水処理への影響について注意が必要である。

消化ガス発生ポテンシャル

図5 廃水由来の地域バイオマスのポテンシャル（消化ガス発生）

(3) 資源回収の計算結果（リン）

リン回収量の計算結果を図6に示す。下水汚泥のみを対象としたケースでは焼却灰を対象とする灰アルカリ法の回収量が多い結果となった。特に、水処理工程で積極

図6 リン回収計算結果

的にリンを汚泥（余剰汚泥）に移行させるAO法では回収量が65kgと流入水中の3割以上のリンが回収できていた。脱水ろ液を対象とするMAP法は消化脱離液中のリンの回収が主体となるために水処理方式の影響は小さく、リン回収量は20kg（流入水中の1割）に留まっていた。

一方、地域のバイオマスを受け入れるシナリオではし尿や浄化槽汚泥を嫌気性消化槽に投入するためMAP法の回収量が多くなった。受入汚泥中の窒素・リンは嫌気性消化槽において大部分が可溶化するために消化汚泥中のリン含有量が少なく、灰アルカリ法での回収量が少なかった。

いずれのシナリオにおいてもコンポストは脱水汚泥中のリンを100%回収できるとしたために最大の回収量となった。コンポストはリンのみでなく窒素も回収できるため資源回収としては有望な方式である。ただし、おがくず等の添加も含めて発生量自体が多くなるので輸送は課題となる。そのため地産地消といった、小さいループでの利用先を確保する必要はあろう。また、コンポスト中の窒素の形態による栽培作物への適否²⁰⁾も指摘されており、生産物としてのコンポストの品質管理（商品価値）²⁰⁾も留意が必要である。

4. 物質・エネルギー循環機能の総合評価

下水処理場は地域の物質・エネルギー循環拠点として高いポテンシャルを有していることが明らかとなった。そこで、物質回収（リン回収）とエネルギー回収（創エネ＋省エネ）を総合的に評価する指標として「水環境効率」を検討した。

水環境効率は「1kWhの電力量で何kgの水環境負荷を除去あるいは回収できるか」という指標であり、(1)式で計算する。

$$\text{水環境効率 (kg/kWh)} =$$

$$(\text{水環境負荷除去量} + \text{資源回収量}) / \text{使用電力量} \quad (1)$$
 水環境負荷量はT-N・T-Pを換算係数²⁰⁾を使用し、CODに統一して計算する。（換算係数；T-N:19.7, T-

表4 水環境効率の計算結果

施策	方式	水処理	一次処理	COD mg/L	T-N mg/L	T-P mg/L	水環境負荷除去量 kg	使用電力量 kWh	環境効率 kg/kWh	電力原単位 kWh/m ³
ベンチマーク		CAS	初沈	3.9	22.6	2.2	41130	25390	1.62	0.53
エネルギー回収	消化ガス発電	CAS	初沈	3.9	22.6	2.2	41130	23810	1.73	0.50
		CAS	固液分離	3.5	24.7	2.6	36428	20810	1.75	0.43
	焼却発電	CAS	初沈	4	20.8	1.8	45564	22730	2.00	0.47
		CAS	固液分離	3.5	21.4	1.9	44336	20890	2.12	0.44
	複合発電	CAS	初沈	4	22.5	2.2	41220	22510	1.83	0.47
		CAS	固液分離	3.5	24.6	2.6	36522	19520	1.87	0.41
リン回収	灰アルカリ法	CAS	初沈	3.9	22.6	2.2	48540	25390	1.91	0.53
		AO	初沈	5.8	24.1	0.5	69774	24620	2.83	0.51
	MAP法	CAS	初沈	3.9	22.6	2.2	47400	25390	1.87	0.53
		AO	初沈	5.8	24.1	0.5	58659	24620	2.38	0.51
	コンポスト	CAS	初沈	3.9	22.6	2.2	58230	25390	2.29	0.53
		AO	初沈	5.8	24.1	0.5	96849	24620	3.93	0.51

P:142.5) なお、創エネによる発電量は使用電力量から引くものとした。環境効率の評価には維持管理費（電力費・薬品費・汚泥処分費）や消費エネルギー、温室効果ガス排出量等も考慮すべきであるが、今回は東日本大震災以降の日本における電力供給の不安定さから使用電力量を使用して計算した。

水環境効率の計算結果を処理水質と使用電力量（発電分を考慮）と併せて表4に示す。ベンチマークとした消化ガス発電なしのケースでは水環境負荷除去量41130kg、使用電力量25390kWhであり水環境効率は1.62kg/kWhであった。

エネルギー回収施策として消化ガス発電を導入すると使用電力量が23810kWhまで減少するために水環境効率は1.73kg/kWhへ向上する。高効率固液分離を導入すると発電量がさらに増加するために使用電力量は20810kWhまで減少するが、嫌気性消化からの返流水の影響でT-NとT-Pの処理水質が悪化し（水環境負荷除去量が減少し）、水環境効率は1.75kg/kWhに留まっていた。この傾向は複合発電でも同様で水環境効率は初沈で1.83kg/kWh、高効率固液分離で1.87kg/kWhであった。一方、嫌気性消化のない污泥焼却発電のみを導入した場合は処理水質の悪化がないために水環境負荷除去量が約45000kgと多くなり、発電量は少ないものの水環境効率は初沈で2.00kg/kWh、高効率固液分離で2.12kg/kWhと最も高かった。

リン回収の施策ではベンチマークに対して灰アルカリ法によるリン回収量分の水環境負荷量が48540kgへ増加するために使用電力量は変わらないものの水環境効率は1.91kg/kWhへと上昇していた。MAP法でもリン回収量は少ないものの水環境効率は1.87kg/kWhとなり、エネルギー回収施策よりも高い結果であった。水処理工程で積極的にリンを回収するAO法では水環境効率の向上はさらに顕著となり（水環境負荷除去量が約50000kgと最も多いこともあり）、灰アルカリ法；2.83kg/kWh、MAP法；2.38kg/kWhと最高クラスであった。さらにリンを100%回収するコンポストの水環境効率は窒素分を考慮していな

いにもかかわらずAO法では3.93kg/kWhとベンチマークの2.4倍となっていた。

水環境効率の変化を使用電力量と水環境負荷量との関係から図7にまとめた。比較のために省エネ施策と高度処理法（AO法）の結果も併せて表示した。

ベンチマーク（×）に対し、エネルギー回収施策（◆）では発電量により使用電力量が減少し水環境効率は上昇する。ただし、高効率固液分離を導入すると発電量は増加するものの、返流水負荷で水環境負荷除去量は若干低下する。

リン回収施策（▲）では使用電力量は変わらないものの、リン回収量に伴う水環境負荷除去量の増加により水環境効率が上昇していた。

省エネ施策も使用電力量を低減するため水環境効率の向上につながる。そこで、比較的導入の容易な①擬似循環式硝化脱窒法②硝化抑制運転と、省エネ効果の大きな③無曝気循環式水処理法の3つの施策について検討した。

反応槽の前半の一部（1/4）の曝気を絞って擬似循環式硝化脱窒法として運転すると、流入水中の有機物の一部が返送汚泥中のNO₃-Nの脱窒炭素源として利用され、省エネとともに処理水質の向上にもつながる。使用電力量が24970kWhに減少するとともに、水環境負荷除去量が43728kgへと増加し水環境効率は1.75kg/kWhであった。

図7 使用電力量と水環境負荷除去量

今回は標準法であるもののほぼ完全硝化であったため、硝化抑制運転とすることにより硝化用の曝気量が大きく削減され、使用電力量は20940kWhまで減少し水環境効率^①は1.92kg/kWhとなった。さらに現在26B-DASHで実証の進められている無曝気循環式水処理法では水処理工程の使用電力量の70%削減が期待されており^②、水環境効率は2.30kg/kWhとなる。

技術の組合せによる水・物質・エネルギー循環拠点として各機能の水環境効率を試算してみた。エネルギー拠点としては創エネ技術である地域バイオマス（し尿・浄化槽汚泥）の受入を組込んだ複合発電と省エネ技術である硝化抑制運転の組合せにより使用電力量が13280kWhまで低減でき水環境効率は2.75kg/kWhと試算された。物質循環拠点としてはリンを対象として同様に地域バイオマスを組込んだ灰アルカリ法とMAP法の組合せにより資源回収を考慮した水環境負荷除去量が73621kgまで増加し水環境効率は2.99kg/kWhと試算された。水循環拠点としては再生水の農業用水や環境用水といった一過式の利用（再生水使用量は下水処理場へ帰ってこない）を30%広域循環するといったケースで計算すると、流入水量減少分による使用電力量の減少と下水処理場からの放流水による水環境負荷量が減少（水環境負荷除去量としては増加）する効果により水環境効率は2.93kg/kWhと結構高い数値となった。

いずれにせよ、当面は下水処理場の水環境効率として3kg/kWh程度を目標とした技術開発や組合せの実証が必要ではと考えられる。ちなみに、高度処理法のひとつである嫌気無酸素好気法（A₀O法）は窒素・リン除去による水環境負荷除去量が大きく、水環境効率は2.70kg/kWhと環境性能は高いと評価できる。

5. おわりに

下水処理場を地域の物質・エネルギー循環の拠点と捉え、48,000m³/日という中規模モデル処理場を対象に、下水処理場シミュレータを使用し、いくつかの施策についてエネルギー回収や資源回収を検討した。さらに、水環境効率という指標を提案し、物質・エネルギー循環機能について総合的に評価を試みた。得られた結果をまとめると以下ようになる。

- ① エネルギー回収法として消化ガス発電に高効率固液分離を導入することにより、電力自給率は13.0%と約2倍となった。さらに、汚泥焼却発電と組合せた複合発電とすることにより、発電量4460kWh/日電力自給率18.6%と約3倍になることが期待できた。
- ② 地域バイオマス拠点として生ごみを直接投入型ディスポーザーにより受入れる試算にとると、処理区の

50%に導入したケースでも発電増加率は15%程度に留まった。一方、し尿や浄化槽汚泥を受入れたケースでは総発電量として7660kWh/日が期待できた。ただし、し尿を受入れる場合には返流水による水処理への影響の配慮が必要である。

- ③ 資源回収としてのリン回収法では水処理工程で積極的にリンを汚泥に移行するA0法での回収量が多く、焼却灰を対象とする灰アルカリ法では3割に相当する65kgが回収できる結果となった。一方、消化脱離液を対象とするMAP法は地域バイオマスを嫌気性消化槽に受入れるシナリオで高い結果となった。
- ④ 物質・エネルギー回収機能を下水処理場の環境性能として水環境効率という指標で評価すると、エネルギー回収しない1.62kg/kWhが高効率固液分離を導入した消化ガス発電では1.75kg/kWhとなり、複合発電では1.87kg/kWhまで向上していた。リン回収法ではリン回収量を水環境負荷量として加算した効果で、A0法の灰アルカリ法で2.46kg/kWhとなりMAP法でも2.23kg/kWhとなりエネルギー回収よりも高い結果であった。
- ⑤ 技術の組合せによる物質・エネルギー循環拠点として各機能の水環境効率の試算によると、エネルギー拠点としては創エネ技術である地域バイオマスの受入を組込んだ複合発電と省エネ技術である硝化抑制運転の組合せにより水環境効率は2.75kg/kWhとなった。物質循環拠点としてはリンを対象として同様に地域バイオマスを組込んだ灰アルカリ法とMAP法の組合せにより水環境効率は2.99kg/kWhと試算された。当面は下水処理場の水環境効率として3kg/kWh程度を目標とした技術開発や組合せの実証が必要ではと考えられた。

なお、今後は実処理場への適用を視野に、より詳細な検討を具体的な地域を対象に実施したいと考えている。

- 1) 松井三郎；水循環基本法の成立と今後、環境衛生工学研究、Vol.28 No.3 pp8-12 2014
- 2) 国土交通省下水道部：新下水道ビジョン、2014
- 3) Jun Chen；Improving China's wastewater treatment with new concept, Water21, AUGUST 2014, pp53-54
- 4) Willy Verstrate et al；Maximum use of resources present in domestic "used water", Bioresource Technology, pp5537-5545, 2009
- 5) J.Sandino et al；Beyond Energy Neutrality and into Net positive Energy in a Wastewater Nutrient Removal Application, IWA-WWC, 2014
- 6) B. Wett, K. Buchauer, and C. Fimml；Energy self-sufficiency as a feasible concept for wastewater treatment systems, 7th IWA Leading-edge Technology, 2010

- 7) 工藤守；山形市浄化センターにおける消化ガス発電の運用について，再生と利用，Vol.38 No. 144 pp45-47 2014
- 8) Fukushima and Somiya: A study on the Environmental Efficiency Improvement of a Sewage Treatment Plant by Performance Evaluation System. Water Practice & Technology, Vol. 4 No. 3 © IWA Publishing doi: 10.2166/WPT.2009.050.2009
- 9) 福嶋俊貴，宗宮功：下水処理場の環境効率に及ぼす流入水量・水質の影響に関する研究，環境工学研究論文集，第47巻 pp315-319, 2010
- 10) 日本下水道協会：平成18年度下水道統計, 2006
- 11) 福嶋俊貴；水・物質・エネルギーの一体管理へのシミュレータの利用に関する検討，第51回下水道研究発表会講演集，pp505-507 2014
- 12) 福嶋俊貴，宗宮功：下水処理場の流域における水・物質・エネルギー循環拠点化に関する研究，土木学会論文集G，Vol.69 No. 7 pp III_445- III_451 2013
- 13) 宮田篤；超高効率固液分離技術を用いたエネルギーマネジメントシステム，再生と利用，Vol.39 No. 146 pp92-97 2015
- 14) 増井文典ら；脱水・燃焼・発電を全体最適化した革新的下水汚泥エネルギー転換システム，再生と利用，Vol.38 No. 142 pp58-63 2014
- 15) 吉田綾子他；北海道歌登町におけるデスポーザー排水の負荷量原単位に関する調査，下水道協会誌，Vol.41 No. 501 pp 134-146 2004
- 16) 日本下水道新技術機構；下水処理場へのバイオマス（生ごみ等）受入に関する共同研究，2010年度下水道新技術研究所所報，pp85-90
- 17) 国土交通省下水道部；下水道におけるリン資源化の手引き，平成22年3月
- 18) 日本下水道協会；下水道施設計画・設計指針と解説2009年版（前編）
- 19) 日高平，津森ジュン；汚泥リサイクルの新技術の課題と研究動向，下水道協会誌，Vol.51 No. 626 pp 17-19 2014
- 20) 古畑哲，井上恒久；野菜類の生育収量と有機質肥料の窒素形態別画分との関連性（その3），再生と利用，Vol.37 No. 141 pp 55-61 2013
- 21) 藤原拓；下水汚泥の利用促進に向けて～農業地域の面的水管理・カスケード型資源循環システムから考える～，再生と利用，Vol.38 No. 145 pp 6-11 2014
- 22) 石田整，花木啓祐，荒巻俊也；東京湾流域の下水処理場への排出権取引制度導入効果の推定，土木学会論文集No.804/VII 37 pp73-81, 2005
- 23) 国総研下水道研究部；B-DASHホームページ
<http://www.nilim.go.jp/lab/ecg/bdash/bdash.htm> 2015年5月アクセス

(2015. 5. 22 受付)

A Study on the Use of Sewage Treatment Plant as a Base for Circulation of Materials and Energy in a Region

Toshiki FUKUSHIMA

METAWATER Co.,Ltd

Based on the concept that a sewage treatment plant should serve as a base for the circulation of materials and energy in a region, a combined electric power generation system using both digestion gas and sludge incineration for power generation was studied as a second step in the use of organics in influent. To function as a base for the circulation of materials, the plant was assumed to employ phosphorus recovery, which was estimated individually for an ash alkali process and a MAP process. In addition, the effects of accepting garbage, night soil, and jyokaso sludge as regional biomass were estimated. Using a model treatment plant with a capacity of 48,000m³/day, it was found that introducing high-efficiency solid-liquid separation to recover solid organics proved effective in increasing the electric-power self-supply ratio attained in normal power generation. With digestion gas this ratio was raised from 6.2% to 13.0%, and with combined power generation, the ratio was raised three times higher to 18.6%. Phosphorus recovery was increased by 10% to 30% over the conventional process in an ash alkali process by introducing an AO process using the transfer of phosphorus to sludge as part of the wastewater treatment process. Taking regional biomass into the anaerobic digester was expected to achieve an increase in power generation through an increase in generation from the digestion gas and an increase in phosphorus recovery from the reject water by using the MAP process. When various measures are evaluated in terms of water eco-efficiency from a viewpoint of environmental performance in the sewage treatment plants, power generation using sludge incineration was 1.96 kg/kWh, compared to the benchmark, which was 1.62 kg/kWh of power generation with digestion gas, and phosphorus recovery was 2.08 kg/kWh. The target for water eco-efficiency may be set to 3 kg/kWh when various measures are combined.