

(40) 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

福島 俊貴^{1*}・宗宮 功²

¹メタウォーター株式会社 (〒105-6029東京都港区虎ノ門4丁目3番1号 城山トラストタワー)

²京都大学名誉教授・龍谷大学名誉教授

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

下水処理場プロセス全体を対象とし水処理と汚泥処理を連携して処理水質と使用エネルギーを総合的に評価する下水処理場機能評価システムを開発している。下水処理場の機能を除去環境負荷（有機物・窒素・リン）と温室効果ガス（電力・燃料・ N_2O ・ CH_4 ）排出量とから下水処理場環境効率という指標で評価した。処理量 $96,000\text{m}^3/\text{日}$ のモデル処理場を対象として、各種高度処理方式について流入水量を7段階、流入水質を7段階それぞれ変化させた場合の環境効率への影響を計算した。環境効率は流入水量の影響では $20\text{万}\text{m}^3/\text{日}$ を超えるとほぼ一定となり、流入水質の影響では流入水 $\text{BOD}250\text{mg/L}$ 程度で良好となっていた。水量・水質の同時評価として節水による効果を試算したところ、節水率の上昇に伴い環境効率も向上していた。

Key Words : greenhouse gas emission, eco-efficiency, influent quantity, influent quality, effluent quality

1. はじめに

2020年までに温室効果ガス（Greenhouse Gas；以下はGHGと略記）の1990年比25%削減を目標とする『地球温暖化対策基本法案』が平成22年3月に閣議決定され、地球温暖化対策は喫緊の課題となっている。わが国全体のGHG排出量の約0.5%（2004年度）を占める¹⁾といわれる下水道分野もその例外ではない。ただし、高度処理の実施や合流改善対策による公共用水域の水質保全や浸水対策、普及の促進といった下水道の本質的な役割のうえに成り立つと指摘されている²⁾。

下水道からのGHG排出量削減の評価に関してはGHG排出量の詳細把握やシミュレーションを活用した各種処理方式の評価が研究されている。汚水処理システムの総合評価指標としては「水処理GHG効率」が提案され、汚水処理整備について複数のシナリオの検討に利用されている³⁾。ここでは下水処理場で除去される環境負荷として有機物、窒素、リンを統一して扱う総合評価指標として下水処理場環境効率（＝除去環境負荷量／GHG排出量）を計算し、環境効率に及ぼす流入水量と流入水質の影響について検討した。

2 下水処理場機能評価システムのモデル

モデル処理場の仕様を表-1示す。 $96,000\text{m}^3/\text{日}$ 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（標準法）を基本とし、各種高度処理方式に変更した場合の処理水質とGHG排出量を計算した。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。

表-1 モデル処理場の仕様

運転条件	下水処理量	$96,000\text{m}^3/\text{日}$
	処理方式	標準活性汚泥法
	水温	20°C
	返送汚泥率	20%固定
滞留時間	初沈汚泥	下水処理量の2%引抜
	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
流入水質	終沈	2.0時間
	BOD	180mg/L （溶解性：35%）
	SS	160mg/L （VSS：60%）
	窒素	35mg/L （ $\text{NH}_4\text{-N}$ ： 25mg/L ）
汚泥処理	リン	4.0mg/L （ $\text{PO}_4\text{-P}$ ： 2.0mg/L ）
	濃縮	分離濃縮（重力＋遠心）
	消化	嫌気性消化
	脱水	遠心脱水機
	焼却	流動焼却炉（高温焼却）

表-2 下水処理場機能評価システムのモデル

No	設備	モデル化	計算式	数値
1	最初沈殿池	一次反応で表現	固形物除去率 $=1-\exp(-k \cdot t)$ t : 滞留時間 (hr)	$k=0.28$ (1/hr)
2	反応タンク			
①	BOD	一次反応で表現	溶解性BOD除去率 $=1-\exp(-k \cdot \text{MLSS} \cdot t)$ t : 滞留時間 (hr)	$k=0.00035$ (1/hr $\cdot$ mg/L)
			固形性BOD除去率 $=1-\exp(-k \cdot \text{MLSS} \cdot t)$ t : 滞留時間 (hr)	$k=0.00015$ (1/hr $\cdot$ mg/L)
②	SS	自己分解	SS分解率 $=1-\exp(-k \cdot t)$ t : 滞留時間 (hr)	$k=0.001$ (1/hr)
		MLSS計算	流入水+返送汚泥+増殖量(除去BOD $\cdot$ 収率)-自己分解	
③	窒素	硝化率で表現	$\text{NO}_3\text{-N}=\text{NH}_4\text{-N} \cdot \text{硝化率}$	硝化率; 99.9%
		脱窒率で表現	$\text{N}_2\text{ガス}=\text{NO}_3\text{-N} \cdot \text{脱窒率}$	脱窒率; 97%
④	リン	リン含有率で表現	汚泥中リン=MLSS $\cdot$ 含有率	含有率; 5% (9%除去時)
3	最終沈殿池	一次反応で表現	固形物除去率 $=1-\exp(-k \cdot t)$ t : 滞留時間 (hr)	$k=2.75$ (1/hr)
4	重力濃縮槽	濃縮汚泥濃度		濃度; 3%
5	遠心濃縮機	濃縮汚泥濃度	濃度(%) $=\alpha \cdot \text{余剰汚泥濃度} + \beta \cdot \text{凝集剤注入率}$	$\alpha \cdot \beta$ は定数(回帰式より設定)
6	遠心脱水機	脱水ケーキ含水率	含水率(%) $=100-(\alpha \cdot \text{濃縮汚泥濃度} + \beta \cdot \text{凝集剤注入率})$	$\alpha \cdot \beta$ は定数(回帰式より設定)
7	嫌気性消化	ガス化率で表現	投入汚泥中のVSSの60%がガス化	ガス化率; 60%
8	焼却炉	可燃分が減少	灰分 $=1-\text{可燃分(VSS)}$	
		燃料使用量	使用量(L) $=\alpha \cdot \text{含水率}-\beta$	$\alpha \cdot \beta$ は定数(回帰式より設定)

表-3 パラメーター一覧

No	設備	項目	値
1	反応タンク	収率係数	$\eta=0.55$
		増殖汚泥組成	汚泥重量の窒素; 16%, リン; 0.5%を固定
		脱窒炭素源	BODを $\text{NO}_3\text{-N}$ の3.1倍使用
2	固形物回収率	重力濃縮	90%
		遠心濃縮	90%
		遠心脱水	95%
3	嫌気性消化	消化ガス中のメタン率	60%
4	消毒槽	次亜注利率	3mg/L
5	遠心濃縮機	凝集剤注利率	0.2%
6	遠心脱水機	凝集剤注利率	0.7%

No	排出係数	項目	値
1	エネルギー	電力	0.555kg-CO ₂ /kWh
		都市ガス	0.0138kg-C/MJ
	下水処理	CH ₄ 排出量	0.00088t-CH ₄ /千m ³
		N ₂ O排出量	0.00016t-N ₂ O/千m ³
	汚泥焼却	通常焼却	0.00151t-N ₂ O/wet-t
		高温焼却	0.000645t-N ₂ O/wet-t
	汚泥埋立	準好気埋立	0.0667t-CH ₄ /ds-t
2	温暖化係数	CH ₄	21
		N ₂ O	310

汚泥処理は採用実績の多い、分離濃縮-嫌気性消化-脱水-流動焼却(高温焼却)とし、高度処理方式としては①循環式硝化脱窒法(循環法)②嫌気無酸素好気法(A₂O法)③嫌気好気法(AO法)④循環法+同時凝集法(同時凝集法)を検討し、標準法の反応タンクを改造し、嫌気・無酸素・好気の各タンクとして利用するものとした。

下水処理場機能評価システム(PES; Performance Evaluation System)で採用している水処理・汚泥処理のモデルを表-2に、具体的なパラメーター一覧を表-3にまとめた⁴⁾。PESは水処理における微生物反応は一次反応式で表現し、溶解性BODと固形性BODで分解速度に違いを持たせている。窒素に関しては硝化率・脱窒率で設定し、今回はほぼ完全硝化・脱窒としている。リンに関しては生物脱リンとして、MLSS中のリン含有率で設定している。汚泥処理における固液分離は固形物回収率で機器回収分を計算し、残りを脱離液流出分としている。

(BOD・窒素・リンも同様に計算)嫌気性消化は投入汚泥中VSSのガス化率で設定し、遠心濃縮機と遠心脱水機

の出口汚泥濃度は回帰モデルを作成し、焼却炉に関しても投入汚泥中の可燃分が減少するものとし、燃料使用量は含水率を入力とし、燃料使用量を出力する回帰モデルを作成した。

GHG排出量は下水道における地球温暖化防止推進計画策定の手引き³⁾に準拠して、表-3に示すように主要排出源として「電力・燃料といったエネルギー由来のCO₂」、「水処理工程からのCH₄・N₂O」、「汚泥焼却からのN₂O」を対象として計算した。(高度処理法の検討には凝集剤も対象とし、汚泥処理工程の検討には機械濃縮や脱水の高分子凝集剤も薬品使用CO₂として計算した。)

環境効率を下水処理場の機能評価に取り入れるにあたり、『環境負荷除去量』と『GHG排出量』を利用し、以下の式(1)で算出した。

下水処理場環境効率=

$$\text{除去環境負荷量} / \text{GHG排出量} \cdots (1)$$

なお、除去環境負荷量としてはBOD・T-N・T-Pを対象として、富栄養化係数⁵⁾を使用して統一的に計算した。

(富栄養化係数 BOD:0.00148, T-N:0.26, T-P:3.06)

3. 流入負荷を変化させた場合の環境効率の変化

(1) 流入水量を変化させた場合

流入水量を基本である96,000 m^3 /日から増加側に3段階(192,000 m^3 /日、288,000 m^3 /日、384,000 m^3 /日)変化させた場合と減少側に3段階(48,000 m^3 /日、36,000 m^3 /日、24,000 m^3 /日)変化させた場合の処理水質・GHG排出量・環境効率の変化を検討した。流入水量の増加は水処理系列の増加で対応し(1から4系列)、減少は1系列の処理施設容量(初沈・反応タンク・終沈)を減少することで対応し、反応時間は同一となるように設定した。処理水質の計算例を図-1に示す。窒素除去法である循環法・ A_2O 法・同時凝集法ではT-Nは10 mg/L まで処理され、リン除去法である A_2O 法・ AO 法・同時凝集法ではT-Pは0.5 mg/L 以下まで処理されていた。BODは窒素除去法で好気タンクでの反応時間不足から若干悪化していた。なお、反応時間がほぼ一定のため、下水処理量の増減に関らず処理水質は方式毎にほとんど同じであった。

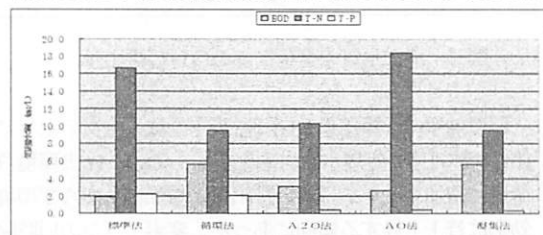


図-1 処理水質の計算例 (96,000 m^3 /日)

GHG排出量の計算結果を図-2に示す。下水処理量の増加に伴い電力消費 CO_2 ・汚泥焼却 N_2O が増加するためにGHG排出量は大幅に増加した。標準法は余剰汚泥発生量が多いため汚泥焼却 N_2O により最も排出量が多く、窒素除去法(循環法・同時凝集法)は硝化のための空気量により電力消費 CO_2 が多く高めとなっていた。一方、リン除去法の AO 法は電力消費 CO_2 が少なく比較的lowであった。 A_2O 法は硝化による電力消費 CO_2 は増加するものの汚泥焼却 N_2O が大幅に減少するために全体ではGHG排出量が最も少なくなっていた。

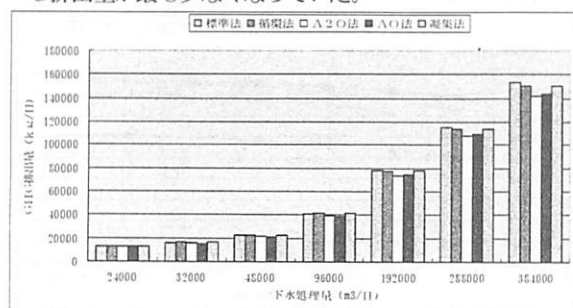


図-2 処理水量の変化によるGHG排出量

GHG原単位の計算結果を図-3に示す。下水処理量が増加するに従い、GHG原単位は減少する傾向にあり、特にリン除去法で顕著であった。 A_2O 法と AO 法との違いは電力消費 CO_2 の増加率の差と考えられた。 A_2O 法は1系列から4系列に処理量が4倍となった場合に電力消費 CO_2 が3.2倍であるが、 AO 法は3.5倍と増加が大きく、結果としてGHG原単位も A_2O 法が小さくなっていた。ただし、処理方式によらず20万 m^3 /日を超えるとほぼ一定となっていた。

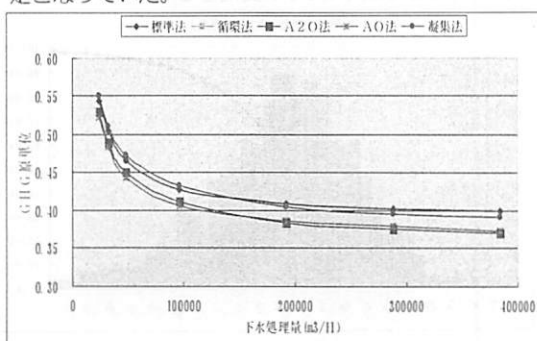


図-3 処理水量の変化によるGHG原単位

処理水質とGHG排出量を同時に評価する指標である環境効率の計算結果を図-4に示す。窒素・リンの同時除去法である A_2O 法と同時凝集法が高い環境効率となり、有機物除去法である標準法はもっとも低い環境効率となった。各処理方式とも下水処理量の増加に伴い、GHG排出量は増加するものの除去環境負荷量も増加するために環境効率は上昇する傾向にあった。この上昇傾向は環境効率の高い、窒素・リン同時除去法ほど大きくなっていた。ただし、GHG原単位と同じく、20万 m^3 /日を超えるとほぼ一定となっていた。一方、10万 m^3 /日を切ると急激に環境効率は低下していた。

流入水量の変化による環境効率の変化では10万 m^3 /日までは処理量の増加に伴い環境効率も上昇するが、規模のメリットも20万 m^3 /日程度まででそれ以上は顕著な上昇は見られなかった。

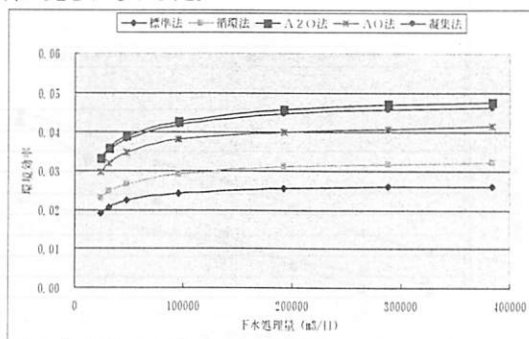


図-4 処理水量の変化による環境効率

(2) 流入水質を変化させた場合

流入水量を基本である96,000m³/日とし、図-5のような日本の流入水BODの分布を参考に、流入水BODを基本の180mg/Lから増加側に3段階（210mg/L、240mg/L、270mg/L）変化させた場合と減少側に3段階（150mg/L、120mg/L、90mg/L）変化させた場合の処理水質・GHG排出量・環境効率の変化を検討した。なお、流入水質の構成（溶解性BODの割合やNH₄-Nの割合）は同一とし、BODの変化と合わせてSS、T-N、T-Pも変化させた。

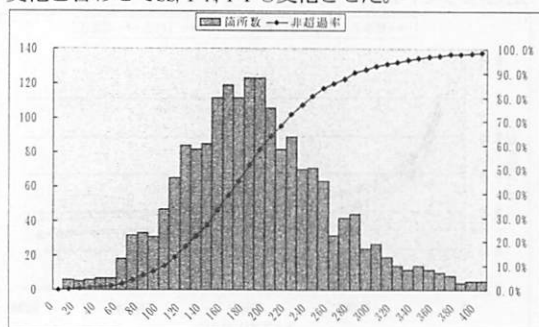


図-5 流入水BODの分布（H16年度下水道統計⑥）

処理水質の計算結果としてBODの例を図-6に示す。流入水の上昇に伴い、処理水質は悪化する傾向にあったが、比較的好気タンクの滞留時間の長い標準法とA₂O法は悪化が抑制されており、5mg/L以下をキープしていた。一方、窒素除去法では好気タンクでの反応時間不足から、大きく悪化していた。

窒素・リンの生物学的同時除去法であるA₂O法では両者の中間的な変化を示し、低濃度では最も処理水質が良好であるが流入水質の上昇に伴い急激に悪化し高濃度では窒素除去法と同程度となっていた。

T-Nも同様に流入水質の上昇に伴い処理水質は悪化する傾向にあったものの、窒素除去法では循環率100%でT-N15mg/L以下はキープされていた。T-Pはリン除去法では流入水質の上昇にも関わらず0.5mg/L以下がキープできていた。

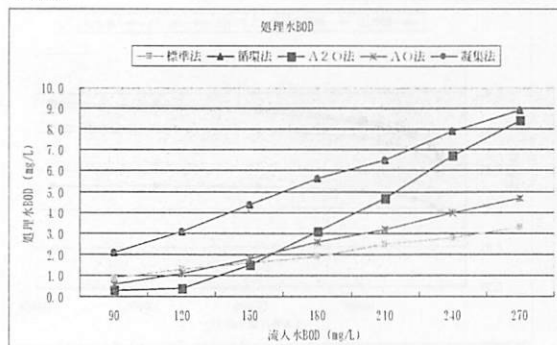


図-6 流入水質の変化による処理水質（BOD）

GHG排出量の計算結果を図-7に示す。流入水BODの上昇に伴い有機物分解や硝化に伴う電力消費CO₂や余剰汚泥量の増加による汚泥焼却N₂Oの増加によりGHG排出量は増加傾向にあった。処理方式では標準法と窒素除去法（循環法・同時凝集法）が高めで、リン除去法（A₂O法・A/O法）は相対的に低めであった。

下水処理量は96,000m³/日で同じためGHG原単位も同様に上昇していたが、流入水質が3倍に上昇しても2.2から2.4倍に留まっていた。

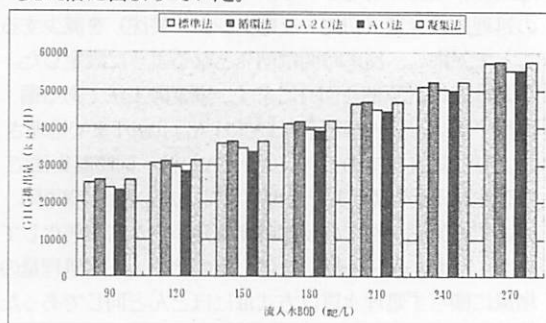


図-7 流入水質の変化によるGHG排出量

環境効率の計算結果を図-8に示す。流入水質の上昇に伴いBODやT-Nの処理水質は悪化するものの、除去環境負荷量は増加するためGHG排出量の増加にも関わらず環境効率は若干上昇する傾向にあった。窒素・リンの同時除去法であるA₂O法と同時凝集法が高い環境効率となり、有機物除去法である標準法は最も低い環境効率という状況は同じであったが、上昇傾向は環境効率の低い標準法のほうが大きくなっていた。なお、処理時間不足により流入水BOD270mg/Lまで上昇すると標準法や循環法では環境効率が低下していた。また、A/O法では流入水がBOD90mg/Lまで低下すると処理が極端に悪化し、環境効率も低下していた。

流入水質の変化による環境効率の変化では、流入水BOD200mg/Lから250mg/Lですべての処理方式で環境効率が良くなり、方式によっては高濃度や低濃度で低下する傾向にあった。

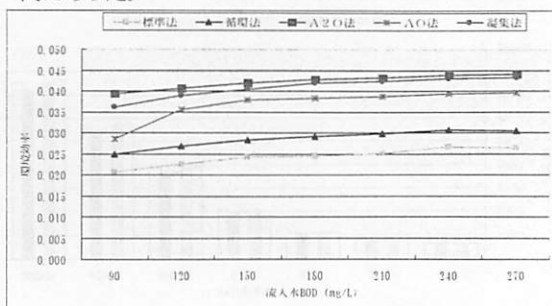


図-8 流入水質の変化による環境効率

(3) 流入水質と水量を合わせた検討

水量と水質の同時評価として、 A_2O 法を対象に節水による流入水量の減少とそれに伴う流入水質の上昇を検討した。基本パターンである96,000m³/日に対して節水率を10%、20%、30%とした場合（流入負荷は同じとする）の処理水質・GHG排出量を環境効率で評価した。

GHG排出量と環境効率の計算結果を図-9に示す。節水率の増加に伴い、GHG排出量は若干減少し、除去環境負荷量も増加するために環境効率は向上していた。GHG排出量の内訳を図-10に示すが、節水率の増加に伴い流入水量が減少するために水処理からのCH₄・N₂Oが削減されるとともに、汚水ポンプ電力消費CO₂も削減されていた。一方、汚泥処理量が増加し焼却N₂Oや燃料消費CO₂は増加していた。

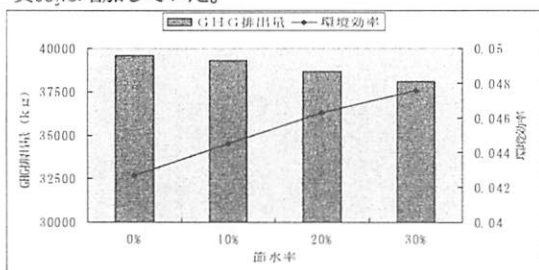


図-9 GHG排出量と環境効率

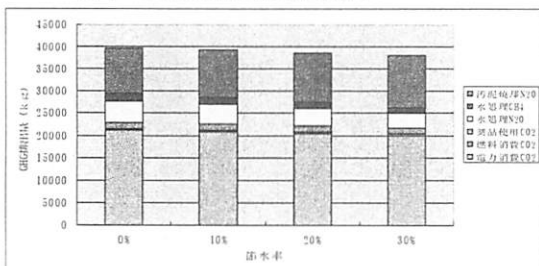


図-10 GHG排出量の内訳

4. おわりに

下水処理場における環境効率に及ぼす流入水量・水質の影響をモデル処理場を対象に検討した。得られた結果は以下のとおりである。

- ① 流入水量の影響では処理方式によらず10万m³/日までは処理量の増加に伴い環境効率も上昇するが、規模のメリットも20万m³/日程度まででそれ以上は顕著な上昇は見られなかった。
- ② 流入水質の影響では、流入水BOD200mg/Lから250mg/Lですべての処理方式で環境効率が良くなり、方式によっては高濃度や低濃度で低下する傾向にあった。
- ③ 水量と水質の同時評価として節水による効果（節水率10%、20%、30%）を検討したところ、節水率の増加に伴い環境効率は向上していた。

参考文献

- 1) 資源のみち委員会：資源のみちの実現に向けて報告書（案）（平成19年3月）。
- 2) 下水道における地球温暖化防止対策検討委員会：下水道における地球温暖化防止推進計画策定の手引き（平成21年3月）。
- 3) 高野昌宏・天野耕二：滋賀県の汚水処理システムを対象とした環境効率の評価, Journal of LCA Japan, Vol.4, No.1 pp. 59-66, 2008
- 4) 福嶋俊貴, 宗宮功：下水処理場機能評価システムによる運転管理の高度化に関する研究, EICA 学会誌 13 巻 2/3 号 pp85-92, 2008
- 5) 新井崇志, 惣田訓, 池道彦：環境影響を指標とした下水の生物処理システムの評価, 第46回下水道研究発表会講演集 pp173-175, 2009
- 6) 日本下水道協会：平成16年度下水道統計, 2004

(2010. 5. 21受付)

A study on the influence for eco-efficiency in sewage treatment plant by changing inflow quantity and quality.

Toshiki FUKUSHIMA¹ and Isao SOMIYA²

¹ METAWATER Co., Ltd

² Emeritus Professor of Kyoto University & Ryuukoku University

The performance evaluation system on comprehensive sewage treatment processes composed with water treatment process and sludge treatment process was developed to simulate the effluent quality, energy consumption and greenhouse gas emission with the whole sewage treatment plants. The influence of advanced treatment and energy recovery were evaluated by the nitrogen removal marginal value and energy independent ratio. As a result, the eco-efficiency became approximately constant from the viewpoint of flow quantity variation and best value at influent BOD 250mg/L. In the simultaneous simulation on both quantity and quality, the eco-efficiency is clearly improved with the increase of saving water ratio.