

〈研究発表〉

下水処理場におけるリン回収と地産地消に関する研究

福嶋俊貴<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>メタウォーター(株) (〒101-0041 東京都千代田区神田須田町1-25 JR 神田万世橋ビル  
E-mail: fukushima-toshiki@metawater.co.jp)

概要

下水処理場は流域の「水・物質・エネルギー循環拠点」となることが期待されている。下水処理場機能評価システムをベースに、統合評価の基盤としての活用のために、資源回収の対象としてリンを取りあげ下水処理場におけるリン回収と流域内での農業利用についていくつかのシナリオに基づき解析した。リン回収方法として選定した①焼却灰からの回収②脱水ろ液からの回収③返流水からの回収は、各種方式により水処理法の選択にも影響を与え、効果的な汚泥処理法には差異があることがわかった。また、流域での地産地消としてはリンを積極的に回収するとリン肥料使用量の30%程度をカバーできると試算された。

キーワード：下水処理場、リン回収、再利用、流域

1. はじめに

平成25年10月から始まった下水道政策研究委員会では新下水道ビジョン(案)として「循環のみち下水道」の成熟化を図るために「循環のみち下水道」の『持続』と『進化』を二つの柱に位置づけている<sup>1)</sup>。

「循環のみち下水道」の進化のひとつとして Fig. 1 に示す、水・資源・エネルギーの集約・自立・供給拠点化が取りあげられている。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、より一層の効率化、機能の高度化を促進するために、水・バイオマス関連事業との連携・施設管理の広域化、効率化を実現し、広い意味での水管理システムとして

進化させ、下水道が地産地消の地域づくりに貢献することを目標とする。」とされている。

資源のひとつとしてリンが取りあげられているが、その有効利用は約1割(主にコンポスト)であり、ほぼ横ばいで推移している。わが国はリンのほぼ全量を輸入に依存しており、農業・食品に関わるリンの輸入量は年間約56万tあり、このうち約1割にあたる5.5万tが下水道に流入していると推定されている<sup>2)</sup>。

下水道事業におけるリン資源化の取組みとしては、博多湾の水質保全と連携した福岡市のMAP法<sup>3)</sup>や岐阜市の焼却灰からのリン回収<sup>4)</sup>等が実施されている。

更なるリン資源化促進には導入した際のリン回収量や維持管理費の事前評価が有効と考えられる。下水処

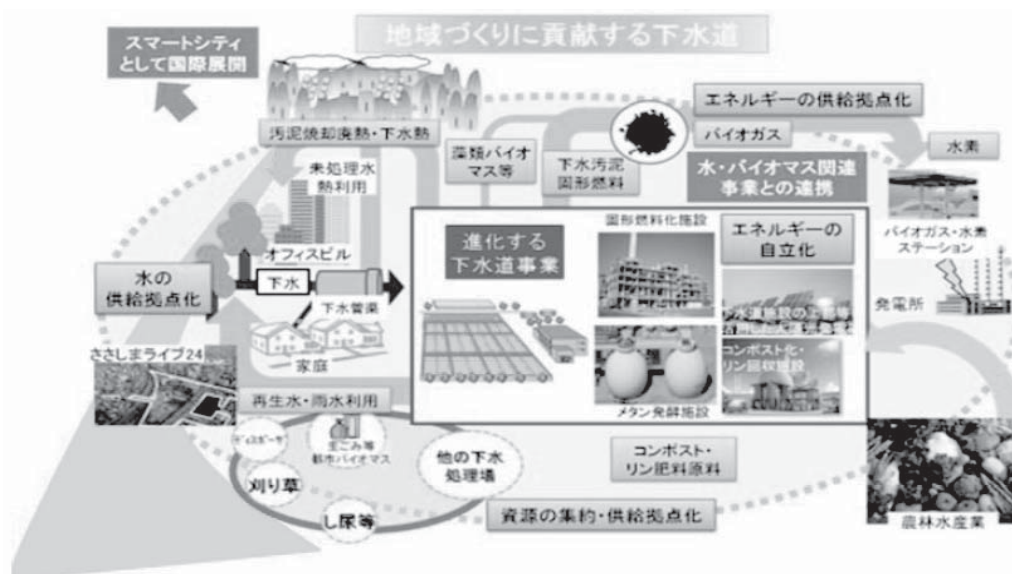


Fig. 1 The concept of New Sewage Treatment Plant<sup>1)</sup>

理システムに仮想的に適用した報告例<sup>5)</sup>によると全体システムの中で考えなければならないと指摘されている。

そこで、下水処理場機能評価システム<sup>6)</sup>を利用してリン回収を評価し、流域での地産地消も試算したので報告する。

## 2. 下水処理場におけるリン回収

### 2.1 リン回収技術

国土交通省下水道部によりまとめられた「下水道におけるリン資源化の手引き<sup>7)</sup>」を参考に、日本における稼働実績から以下の3方式を選定した。

- ① HAP法；水中に溶解しているリン酸の除去技術として用いられおり、副生成物としてリン含有率15%以上のカルシウムヒドロキシアパタイトが得られ、これがリン資源となる（下呂市、北塩原村で稼働）。
- ② MAP法；水中のリン酸およびアンモニアの除去技術として用いられおり、副生成物としてリン含有率20%程度のリン酸マグネシウムアンモニウムが得られ、これがリン資源となる（福岡市、島根県、大阪市で稼働）。
- ③ 灰アルカリ法；焼却灰にNaOH溶液を添加して50~70℃に保持し、リンを溶出、消石灰と反応させ、リン含有率30%程度のリン酸塩として回収できる（岐阜市で稼働）。

### 2.2 モデル処理場

各種方式によるリン回収量を試算するためにTable 1に示すモデル処理場を設定した。48,000 m<sup>3</sup>/日という中規模処理場を対象として水処理方式はリン除去法である嫌気好気法（AO法）を基本とし、対照として標準法も計算した。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

Table 1 Model sewage treatment plant

運転条件	下水処理量	48,000m <sup>3</sup> /日
	処理方式	嫌気好気法
	水温	20℃
	返送汚泥率	20%
	初沈汚泥 余剰汚泥	下水処理量の2%引抜 MLSSを1500mg/L一定に引抜
滞留時間	初沈	1.5時間
	反応タンク	嫌気: 2.75時間 好気: 5.25時間
	終沈	3.0時間
流入水質	BOD	180mg/L(溶解性: 35%)
	SS	160mg/L(VSS: 60%)
	窒素	35mg/L(NH <sub>4</sub> -N: 20mg/L)
	リン	4.0mg/L(PO <sub>4</sub> -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(中温)
	脱水	遠心脱水機
	焼却	流動焼却炉

が1500 mg/Lで一定となるように引き抜くこととした。流入水質としては平成16年度下水道統計データから、全国分布の中央値としてBOD180 mg/L, SS160 mg/L, T-N35 mg/L, T-P4.0 mg/Lと設定し、PESの内部計算で使用している内訳（溶解性BODの割合やVSSの割合）は従来の値<sup>6)</sup>を使用した。

汚泥処理は分離濃縮-消化-脱水-焼却を基本とし、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。

### 2.3 リン回収量計算方法

リン回収量の試算にあたっては3方式の適用実績も参考に以下のように導入するものとし、リン回収効率を手引きの数値を参考に設定した。

- ① HAP法；返流水を対象に導入し、リン回収効率は40%とした。
- ② 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。
- ③ 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。

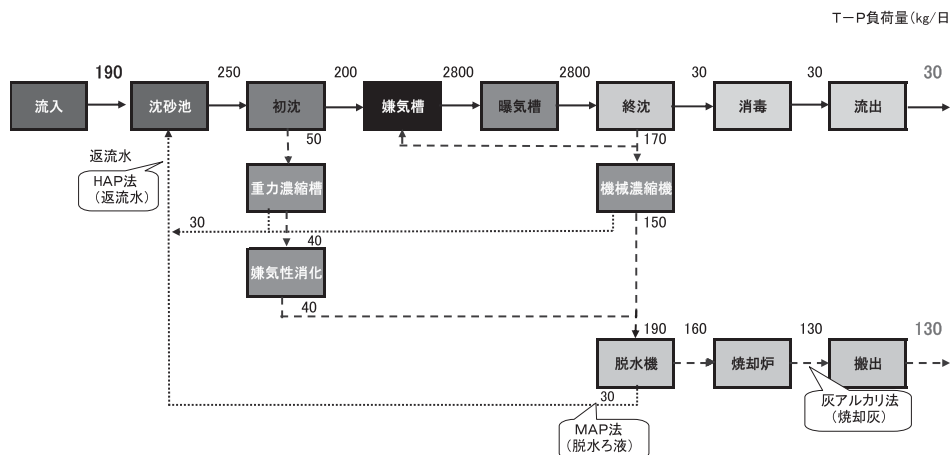


Fig. 2 The phosphorus material flow (scenario1)

また、汚泥処理として消化の有無による2シナリオと対照として水処理でリン除去を行わない標準法（消化有）との3つのシナリオで各回収法を比較した。

Fig. 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。

### 3. 下水処理場におけるリン回収の計算結果

リン回収量の計算結果を Table 2 および Fig. 3 に示す。全てのシナリオにおいて焼却灰からの回収法である灰アルカリ法の回収量が最も多くなった。特に、水処理工程にリン除去法であるAO法を採用しているシナリオ1・2では30%以上の回収率となっていた。脱水ろ液を対象としたMAP法は嫌気性消化を導入した場合の回収量が大きくなっていった。返流水を対象としたHAP法は総合的な返流水への対応となるためシナリオによる差は小さかった。

Table 2 Phosphorus recovery

	シナリオ1 (消化+焼却)	シナリオ2 (焼却のみ)	シナリオ3 (標準法)
灰アルカリ法	65	70	35
MAP(脱水ろ液)	26	9	26
HAP(返流水)	24	16	20

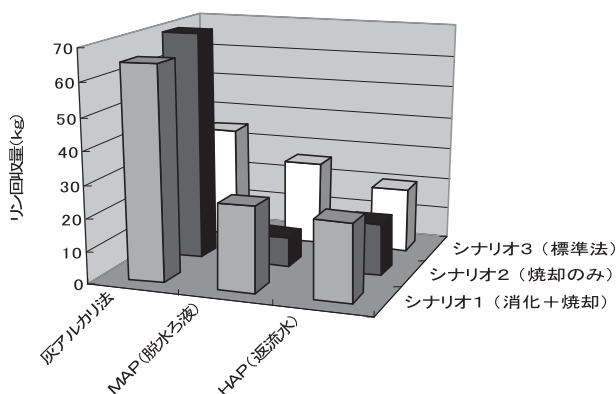


Fig. 3 Phosphorus recovery

回収法の違いを下水処理場内でのリンフローと対応させて検討するために、シナリオ1を例に返流水も含めたリン総量と、どの部分を回収しているかをまとめて Fig. 4 に示す（未回収分は白抜きで表示）。

リンは流入水の190 kgに対し、返流水負荷として60 kgが増加し総量では250 kgとなっていた。AO法を採用しているために流出負荷は30 kg (T-P; 0.5 mg/L) となり、160 kgが脱水汚泥として回収されていた。このため焼却灰を対象とした灰アルカリ法の回収量が多くなったものと考えられた。MAP法・HAP法は24%しか占めない返流水負荷を対象とするために回収量が少なくなっていた。

シナリオ間のリン回収量の違いを回収量の最も多い

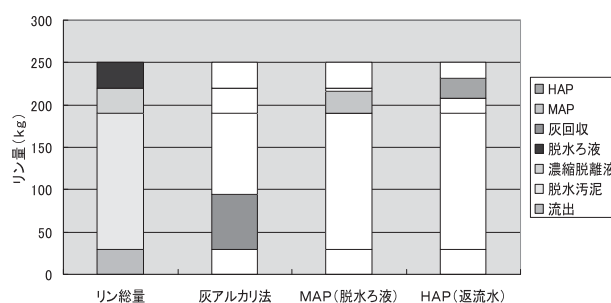


Fig. 4 Phosphorus recovery (detail)

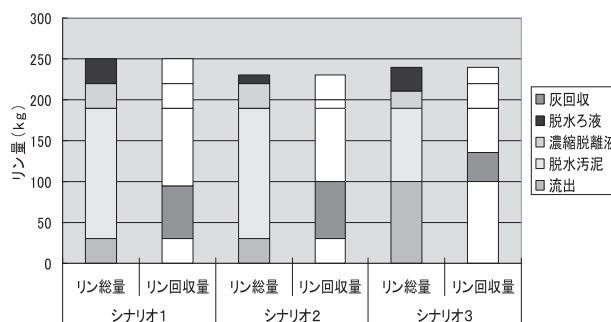


Fig. 5 Phosphorus recovery (scenario)

灰アルカリ法を対象に整理し Fig. 5 に示す。嫌気性消化の有るシナリオでは返流負荷量が多くなっていたが、灰アルカリ法が対象とする脱水汚泥としての回収量の影響が顕著であった。消化・焼却の併用であるシナリオ1に対し、焼却のみのシナリオ2では嫌気性消化による有機物の分解に伴うリンの溶出による脱水ろ液としてのロスが無く、リン回収量が70 kgと最も多くなっていた。一方、水処理工程でリンを積極的に回収していないシナリオ3では、そもそも汚泥処理工程へ移行しているリン量が90 kgと少なく、半分以上の100 kgが放流水として流出していた (T-P; 2.2 mg/L)。このため、リン回収量も35 kgに留まっていた (回収率18%)。

なお、同様にリン回収手引きの費用関数を使用し、建設費・維持管理費を試算し Table 3 に示す。灰アルカリ法はモデル計算結果の灰処理量 (3 t/日) から、MAP法・HAP法は処理量 48,000 m<sup>3</sup>/日から算出した。

建設費はHAP法が若干安いものの回収法による差は小さかった。一方、維持管理費は灰アルカリ法が約20百万円と他の2方式より一桁高い結果となった。灰アルカリ法は、リン回収量が多いものの、維持管理

Table 3 Cost

	建設費 (百万円)	維持管理費 (百万円)
灰アルカリ法	353	20.62
MAP(脱水ろ液)	352	3.99
HAP(返流水)	292	6.77

費は高いため回収法の選定にあつては留意が必要と思われる。

シナリオにより下水処理場全体での使用電力量も異なり、資源回収のみならず、エネルギー回収拠点としても評価するためには使用電力量と創エネ（発電量）の把握も必要である。各シナリオの使用電力量を設備単位に整理して Fig. 6 に示す。消化設備の有無により汚泥処理設備の使用電力量に差が生じるが、それ以外にも消化脱離液に含まれる  $\text{NH}_4\text{-N}$  の影響により送風機設備の使用電力量にも差が生じていた。結果的に消化設備の無いシナリオ 2 が 23,110 kWh/日（原単位；0.48 kWh/m<sup>3</sup>）で最も少なくなっていた。

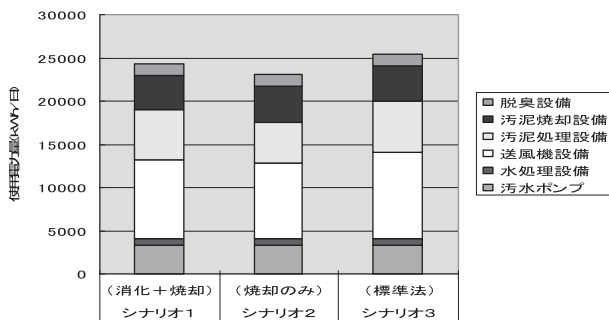


Fig. 6 Electricity consumption

ただし、シナリオ 1 でも消化ガス発電を導入すると実質的な使用電力量は 22,730 kWh（原単位；0.47 kWh/m<sup>3</sup>）となり、最も少なくなる。標準法であるシナリオ 3 は有機物を好氣的に分解するために送風機設備使用電力量が増加するのみならず、余剰汚泥発生量も増加し汚泥処理設備使用電力量も多くなっていた。

## 4. リンの地産地消

### 4.1 下水処理場におけるリン収支

平成 23 年度下水道統計データ<sup>8)</sup>を利用して M 市の 4 つの下水処理場におけるリン収支を試算した（M 市は S 浄化センターで汚泥集約処理を実施している）。処理量の最も多い M 浄化センターへの流入負荷量が最も多く、116 t/年と市全体の 60% 以上を占めていた。リンが高度に処理されており処理水質（流出）は 1 mg/L 以下となっていた。このため回収量（＝流入－流出）量も多く、全体では 146 t/年（回収率 85%）と

Table 4 Phosphorus balance in STP

	リン濃度(mg/L)		処理量 (m <sup>3</sup> /日)	流入負荷量 (kg/日)	年流入量 (t/年)	回収量 (kg/日)	年回収量 (t/年)
	流入	流出					
C 浄化センター	3.2	0.59	99,556	319	116	260	95
S 浄化センター	6.6	0.56	21,229	140	51	128	47
HB 浄化センター	3.9	0.16	2,827	11	4	11	4
HJ 浄化センター	4.7	0.36	6,360	30	11	28	10
合計			129,972	470	171	399	146

なっていた。

### 4.2 S 川流域でのリン肥料使用量推定

S 川流域においては市街地の拡張に伴い『田』の割合は低下しており、平成 9 年には 11% となっていた。一方、『畑・果樹園』の割合は変化がなく 10% であった。リン肥料の使用量を推定するために、E 県の施肥基準（米・みかん）よりリン肥料量を推定すると Table 5 のように計算され、約 1000 t/年（P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> として）となり、リン量としては 443 t/年となった。

Table 5 Phosphorus manure consumption

	面積	割合	施肥基準	面積(a)	肥料量(kg)	リン量(t)
水田	48.95	11%	6	489500	293700	129
畑	44.5	10%	16	445000	712000	313
合計					1005700	443

### 4.3 リンまかない率の試算

下水処理場へのリン流入量（171 t/年）と肥料使用量からのリン量（443 t/年）とから計算すると S 川流域における下水処理場による「リンまかない率」は 39% と試算された。また、汚泥移行量（回収量）ベースでも 33% と、全体の 1/3 は流域で自給できる可能性が示唆された。

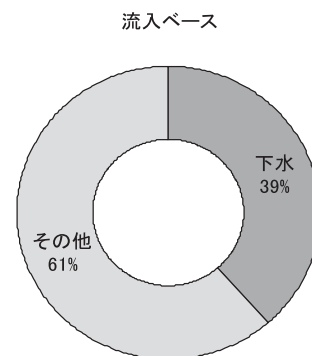


Fig. 7 Phosphorus recovery ratio in a watershed

## 5. あとがき

下水処理場が流域の水・物質・エネルギー循環拠点となることを目指して資源回収の観点からリンに着目し、いくつかのシナリオに基づき回収量を試算した。

- ① 焼却灰を対象とした「灰アルカリ法」の回収量が最も多く、リン回収率 30% 以上が期待できた。
- ② リン回収を導入する場合には水処理工程で積極的にリン除去を実施する必要があるが、標準法では回収率は 20% 以下に留まった。
- ③ 建設費では 3 方式で大きな差がなかったが、維持管理費は灰アルカリ法が 1 桁大きく留意が必



要である。

- ④ 流域における「リンまかない率」を計算したところ、下水処理場で約30%がカバーできる結果となった。

#### 参考文献

- 1) 下水道政策研究委員会；新下水道ビジョン(案)  
[http://www.mlit.go.jp/mizukokudo/sewerage/mizukokudo\\_sewerage\\_tk\\_000307.html](http://www.mlit.go.jp/mizukokudo/sewerage/mizukokudo_sewerage_tk_000307.html)
- 2) 山口裕司；下水道におけるリン資源化について，下水道協会誌，Vo. 47 No. 573 2010/07, pp8-11
- 3) 工藤修一；福岡市のMAP法によるリン回収の現状について，下水道協会誌，Vo. 47 No. 573 2010/07, pp23-25
- 4) 中村亮太；下水汚泥焼却灰からのリン回収技術の実用化について，下水道協会誌，Vo. 50 No. 607 2013/05, pp25-28
- 5) 高岡昌輝；リン資源の現状と下水からの回収，再生と利用，Vol. 34 No. 127 2010/03, pp23-31
- 6) 福嶋俊貴・宗宮功；下水処理場運転計画支援システムの開発，学会誌「EICA」第17巻第2・3合併号(2012)，pp11-18
- 7) 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
- 8) 日本下水道協会；平成23年度下水道統計(2011)