下水処理施設におけるリン資源回収の環境保全効果
－地球温暖化影響と富栄養化影響についての評価－

鶴巻 峰夫[1]・辻 浩典[2]・星山 英一[3]・吉原 哲[4]

[1]正会員 博(工) 和歌山工業高等専門学校 教授 環境都市工学科
（〒644-0023 和歌山県御坊市名田町野島77）E-mail:tsurumaki@wakayama-nct.ac.jp
[2]非会員 (前) 和歌山工業高等専門学校専攻科（〒644-0023 和歌山県御坊市名田町野島77）
[3]正会員 修(工) 八千代エンジニヤリング 九州支店（〒810-0062 福岡県福岡市中央区荒戸2-1-5）
[4]正会員 修(理) 八千代エンジニヤリング 総合事業部（〒161-8575 東京都新宿区西落合2-18-12）

リン資源は枯渇が心配される資源であり，現在利用されている高純度のリン鉱石はこの数十年以内に枯渇するとの説がある．一方で，リンは閉鎖性水域の富栄養化の原因とされる物質である．したがって，リン資源の循環は，リン資源の確保と環境保全の両面にとって有効な施策である．筆者等はこれまでにリン資源回収の効果を地球温暖化影響の面で検証を行った．本研究では，さらに富栄養化影響の評価も加えて検討を行ったものである．東京湾流域の下水処理施設においてリン回収を行うことを想定して地球温暖化影響と富栄養化影響の負荷量の変化を予測し，LIMEを用いて統合評価を行った．その結果，リン資源回収に伴う富栄養化影響軽減効果が大きく寄与して，総合的には環境保全効果があることが確認された．

Key Words : *Phosphorus resource, GHG, Eutrophication, Resource recycling, Sewage treatment, Life cycle assessment*

1. はじめに

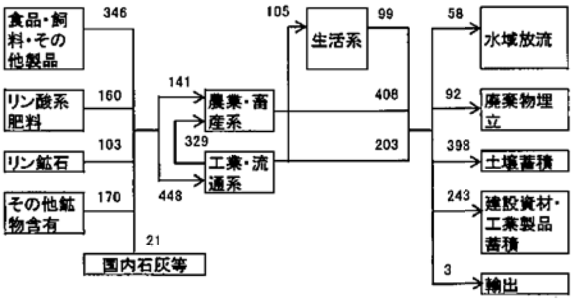
リンは肥料の三要素の一つであるため，その原料として必要不可欠な資源であるが，世界的に枯渇が心配されている状況にある．工業用に利用されるリン酸含有率30%(as P_2O_5)以上の優良なリン鉱床は国内にはなく，我が国は全量を輸入に頼っている[1]．一方，リンは窒素と並んで閉鎖性水域の富栄養化の原因物質であり，リン排出量の削減は水質汚濁防止の観点からも重要である．

このような状況を反映して，近年下水道等の生活排水処理分野ではリン資源回収技術の開発が多方面で行われており，そのいくつかは実用化されている[2]．

我が国におけるリンの収支を図-1に示すが，リン鉱石やリン酸系肥料としての輸入量が2006年ベースで263千t-Pである[1]．一方で生活排水からのリン排出要因となる人への摂取量では105千t-Pであり[1]，このリン排出を有効に再資源化ができれば，リン鉱石やリン酸肥料の輸入を大幅に削減できる可能性を有していることを意味している．

筆者等はこれまでリン資源回収技術の地球温暖化影響の観点での評価[3]や下水処理施設のリン収支を考慮した検討[4]を行ってきている．これまでの研究の成果として，既存の下水処理施設にリン資源回収を適用する場合，リン高度処理のない施設ではリン回収過程における汚泥や汚水のリン濃度が低いために，技術開発時に想定したリン回収効率を確保できず温室効果ガス削減につながらない場合があることを明らかにした．ただし，これらの検討では富栄養化影響や枯渇資源（リン資源）の観点での評価は行っていないため，総合的な評価とは言い難い．

本研究では富栄養化が問題となる流域として東京湾流域を対象として下水処理施設でのリン資源回収を想定し



単位：千t-P/年

図-1 我が国におけるリン収支の概要(2006年ベース)
(既往データ[1]を参考に作成した)

て地球温暖化影響，富栄養化影響を主な観点として環境負荷のライフサイクル分析を行い，環境保全効果の検証を行ったものである．また，参考として枯渇資源に関する評価も加えて検討を行った．

2. リン資源循環に関する既往研究・施設整備等

近年リン資源回収の重要性の認識から数多くのリン回収技術が開発されており，加藤らは44種類の技術についてレビューを行うとともに[2]，下水処理システムへの最適な適用についての検討を行っている[5]．

実機としては福岡市や島根県の下水処理施設があり，新規の稼動施設として岐阜市公共下水道のほかし尿や浄化槽汚泥を処理する汚泥再生処理センターでは秋田県仙北市及び福島県双葉町（建設中）の施設がある．技術的には，福岡市，島根県の施設では脱水ろ液に対してMAP法による回収が行われており[6-7]，岐阜市では汚泥焼却灰からの抽出回収[8]，仙北市の事例では生物処理膜分離水に対してHAP法による回収が行われている[9]．福島県双葉町では前処理水に対してMAP法が適用されている．

3. 検討の方法

(1) 対象地域・対象施設

検討対象地域は富栄養化が問題となっている東京湾の水質総量規制の指定地域（図-2 に示す）とし，その地域内に存在するすべての公共下水道の終末処理施設でのリン回収を考慮する．対象施設は汚泥専用処理施設を含めて 96 施設となった．

なお，横浜市では水処理は流域外の施設で行われるが汚泥処理は対象地域内の処理施設に輸送されている施設がある．この場合，リン資源回収としては算定対象とするが，排水中のリン削減には寄与しないとして取り扱う．

図-2 検討対象地域（東京湾総量規制地域）

(2) 適用するリン回収技術

本検討ではリン回収技術として次の2種類を適用する．

a) MAP法

MAP法は，リン含有水からリンをMAP（リン酸マグネシウムアンモニウム）の6水塩として抽出する方法である．既存の福岡市，島根県の下水処理施設のリン回収設備で採用されている．両施設では水処理過程で生物学的リン除去プロセスが適用され，汚泥処理過程で嫌気性消化が適用されている．この結果として脱水分離液に高濃度で含有するリンを回収対象としている．処理フローは図-3に示すとおりである．本検討では汚泥処理過程に嫌気性消化の処理設備を有している処理施設にはMAP法を適用することとする．

b) 汚泥焼却灰からの回収法

汚泥焼却灰からリンを回収する方法はいくつか提案されているが，本検討では岐阜市の処理施設に適用されている方式を対象とする．この方法の処理フローは図-4に示すとおりであり，焼却灰を温水中でアルカリを添加してリン酸塩としてリンを回収する．

(3) 検討対象環境要素と影響評価

検討対象とする環境要素としては表-1 にまとめる 4 項目とする．環境負荷量の算定は，現状をベースライン（±０）として増減量を定量化する．各項目の環境負荷

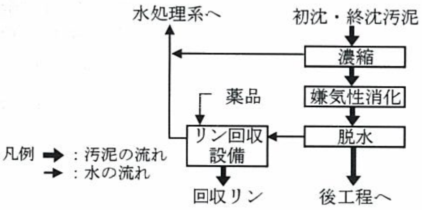


図-3 下水処理施設でのＭＡＰ法の処理フロー[6-7]

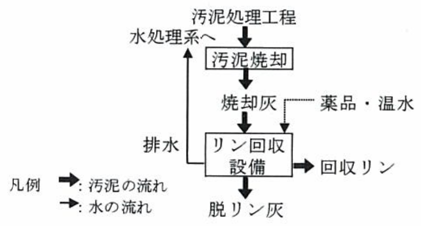


図-4 アルカリ性溶液添加による焼却灰からのリン回収処理のフロー[10]

表-1　検討対象とする環境要素と環境負荷定量化の方針

地球温暖化影響	現状をベースラインとしてLCI分析でCO2量換算のGHGの増減量を定量化する.
(参考) エネルギー資源	現状をベースラインとしてLCI分析で一次エネルギー消費量の増減量を定量化した後，原油量に換算して評価を行う.
富栄養化影響	現状をベースラインとしてリン高度処理によって排出が削減されるリン量を定量化する.
(参考) 枯渇資源	リン資源回収によって削減できるリン鉱石量を定量化する.

量算定方法は以下のとおりである.

a) 温室効果ガス（GHG）量

(a) リン回収に伴う環境負荷

地球温暖化影響に関わる GHG（kg-CO_2）量の算定は，既存のライフサイクル分析結果である図-5 に示す値[4]を用いる．ただし，図-5 に示す値は技術開発図書等[10,11]に記載された物質収支にもとづく数値である．本検討では，対象汚水や焼却灰でリン濃度が低くなり回収効率が低下することを想定して，回収リン量当たりの数値は用いず回収装置流入の投入量当たりの数値に変換して用いる．また，既報[4]ではリン回収を行うことにより汚泥量を削減できるなどの下水処理過程での環境負荷削減効果を考慮した数値を報告していたが，このような効果には不確実性が大きいため，本検討では環境負荷削減効果を期待しない数値を利用する.

(b) リン高度処理に伴う環境負荷

現状に対して水処理過程でリン高度処理を付加する場合には，既報[4]で報告した削減量当たりの原単位を用いて GHG 量を計算する.

(c) リン肥料製造削減に伴う環境負荷量

環境負荷削減効果としてリン含有量が同等のリン単肥肥料を製造する場合，環境負荷が削減できると考える．肥料製造の原単位は既存の文献[12]の値を用いる.

(d) 現状における脱水分離液から回収したリン量の扱い

汚泥処理過程における嫌気性消化汚泥の脱水分離液に対するMAP法の適用により，水処理過程へ返流されるリン量が減少する．この量による収支変化の予測が必要であるが，実態として凝集剤添加等により水処理過程で高度処理を行っている場合があり，リン高度処理対応が不要になり，GHGやエネルギー消費量の削減に寄与すると考える.

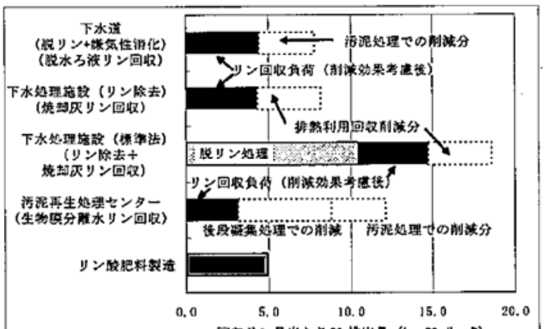


図-5　回収リン 1 kg 当たりでの CO_2 排出量[4]

環境負荷量算定におけるベースラインからの増減要因は表-2 にまとめるとおりである．また，利用する原単位を表-3 にまとめる.

b) エネルギー資源消費（原油消費量・参考）

エネルギー資源消費量は，GHG量の計算と同様の方法により，一次エネルギー消費熱量（MJ）として計算を行う．ただし，統合化を考慮して発熱量によって全量に対して原油量換算を行う.

c) 富栄養化影響

富栄養化影響はリン回収に伴い下水処理施設の排水から削減できるリン量を定量化する.

d) 枯渇資源（リン鉱石・参考）

現在輸入されているリン鉱石のリン酸含有量を実績[2]から30%として回収リン量からリン鉱石に換算する．ただし，この数値に対する統合化係数がないため参考数値として扱う.

e) 統合化評価

統合化手法としてはLIME(日本版被害算定型ライフサイクル環境影響評価手法：Life cycle Impact assessment Method based on Endpoint modeling)を利用する．エネルギー資源消費については換算値であるため参考として扱う.

また，参考として資源枯渇について市場価格を特性化係数としてリン鉱石保全量と原油消費量の比較を行う．市場価格としては財務省貿易統計[13]に掲載されている2003年以降の平均価格を用いる.

以上，本検討で用いる係数値を表-4にまとめる.

(4) 下水処理施設でのリン収支，水収支，固形物収支

各処理施設の検討に必要な物質収支（リン収支，水収

表-2　検討におけるベースラインからの環境負荷増減要因

ベースラインとなる施設条件	リン回収条件	内容
リン高度処理＋嫌気性消化を有する下水処理施設	脱水ろ液からのリン回収	リン回収設備
リン高度処理を有する下水処理施設	焼却灰からリン回収	リン回収設備
標準法＋嫌気性消化を有する下水処理施設	脱水ろ液からのリン回収	リン回収設備，リン高度処理設備，汚泥量増加対応
標準法の下水処理施設	焼却灰からリン回収	リン回収設備，リン高度処理設備，汚泥量増加対応

表-3　GHG 排出量及びエネルギー資源消費量算定に用いる原単位[13-18]

種類	基本単位　＊	原単位数値		備考
		CO2排出量 kg-CO2/＊	エネルギー MJ/＊	
MAP法リン回収	m3-脱水分離液	0.78	15.42	他の工程の負荷削減効果を考慮していない
焼却灰リン回収	kg-焼却灰	0.51	4.74	
リン高度処理	kg-除去P	9.78	117.48	
リン単肥肥料製造	kg-回収P	4.5	65.0	

表-4　統合評価に用いる係数値[12]

環境問題の区分	環境負荷要素	統合化係数[12)		特性化係数（市場価格）[14)	
		単位	係数値	単位	係数値
資源消費	エネルギー資源（原油換算）	円/kg	2.99	円/kl	38,172
	リン鉱石	・　－		円/MT	19,428
地球温暖化影響	CO_2排出	円/kg-CO_2	3.20	-	
富栄養化影響	T-P	円/kg-P	974	-	

表-5　既設の下水処理施設のリン収支例
出典：既存資料[15-16]をもとに筆者が作成した.

単位（流入量に対する%）

項目		A処理場	B処理場	C市全体
MAP回収		あり	あり	なし
流入		100	100	100
汚泥	初沈・終沈汚泥	125	200	84
	濃縮汚泥	121	123	64
	脱水汚泥	82	89	58
汚泥系循環水	濃縮分離水	5	77	39
	脱水分離水	38	34	7
	洗煙排水等	4	-	4
放流		2	7	38
汚泥系系外排出	焼却灰	46	89	53
	MAP回収	20	5	-
	その他	33	-	-
水処理		ステップ流入式二段A2O法	嫌気好気法	標準法，A2O法等の併用
汚泥処理		濃縮～消化～脱水～焼却	濃縮～消化～脱水～場外（焼却）	濃縮～脱水～焼却

支，固形物収支）は基本的に平成19年度版下水道統計[14)によるが，東京都区部では東京都下水道事業年報[15)で補足した．また，データの不足や不整合については下記の方法により補正・補足した．

a) リン収支

リンは排水から除去されたリン量が汚泥処理の最終段階に移行すると考えて濃縮・脱水分離水の循環を考慮して収支計算を行う．MAP法を適用した場合の，リン収支は既設の処理施設の収支データでの濃縮から脱水汚泥への移行する量（表-5参照）を参考に濃縮段階のリン量の70%が固形物に移行するとして設定した．

b) 水収支・固形物収支

下水道統計で水収支・固形物収支が不明または矛盾のある処理施設は「下水道施設計画・設計指針と解説」[18)に記載された参考値及び固形物収支事例の数値を採用して計算した．

(5)リン回収量の計算方法

リン回収効率は，回収のために添加される薬剤の量や，対象汚水や焼却灰中のリン濃度によって変化するため，個別の施設ごとに検討を行う必要がある．ただし，公開されている実施設や技術開発図書等のデータでは，種々の条件の組み合わせに応じた回収効率の設定は困難である．このため以下のような考え方で回収量を計算する．

a) MAP法

既存施設の稼動実績[5)-7)では，薬品添加量等の操作により回収量を90%以上にコントロールできるようである．ここでは図-5の検討に際して利用した文献[11)の実験データにおいてリン回収後の処理水のT-P濃度が30mg/ℓ 前後であったことを参考として，T-P濃度が30mg/ℓ 以上の濃度分のリンが回収できるものとした．

b)汚泥焼却灰からの回収法

図-5の検討に際して利用した文献[10)では，リン酸（P_2O_5）25%含有の焼却灰を処理して66%のリンが回収できるとしている．このとき脱リン灰のリン含有濃度は3.7%（リン量，残存P_2O_5=25%×34%）となる．ここでは3.7%以上の含有分のリンが回収できるものとする．

(6) 検討ケース

富栄養化影響の効果は水域へのリン排出量の削減による．そのため，水処理過程におけるリン除去機能を現状より向上させたケースを検討に加え，次の2ケースの検討を行う．

a)現状設備リン収支ケース（現状設備ケース）

下水処理施設の設備は現状のままで，リン回収設備のみ付加する場合．

b)リン収支改善ケース（設備改善ケース）

リン回収は汚泥を対象に行う技術が適用されている．そのため，リン回収量を増加させるには汚泥中のリン含有量を上げる必要がある．その対策として対象の全施設の水処理過程においてリン高度処理を行う．このときリン放流濃度を1.0mg/ℓ まで処理するものとして設定する．

設備改善ケースでは，排水中から除去したリン量について，以下のように考える．

汚泥処理過程に嫌気性消化を用いる施設ではA2O法等の生物学的リン除去プロセスで高度処理が行われる可能性が高いと考えられる．この場合，水処理のリン除去過程で汚泥に過剰摂取されたリンは嫌気性消化で溶出するものと考えられるため，嫌気性消化を有する施設では，リン増加分はすべて脱水分離液に移行すると考えてMAP法での回収対象とする．その他の処理施設では，増加した汚泥中のリン量はすべて焼却灰に移行すると考える．

4. 検討結果

(1)物質収支

資料をもとに検討した固形物及びリンの現状（平成19年度）での収支を表-5及び図-6，7に示す．統計値に不整合があり，かつ概略の計算であるため細部で整合の取れた収支にはなっていないが，結果として評価の精度を考慮すると十分に検討に利用できる値と考えている．

表-6　対象地区内下水処理施設での概略の物質収支

物質	項目	処理施設流入	放流	濃縮設備投入	消化設備投入	脱水設備投入	焼却灰
固形物	量(t-DS/年)	590,920	15,482	997,962	170,889	651,115	120,346
	構成比(%)	100.0	2.6	168.9	28.9	110.2	20.4
リン	量(t-P/年)	15,001	4,037	21,577	5,769	12,993	9,172
	構成比(%)	100.0	26.9	143.8	38.5	86.6	49.0

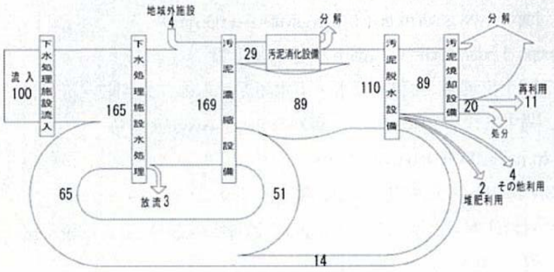
出典：文献 15-18) を用いて計算
計算誤差や統計値の矛盾等で収支は完全には一致していない

表-7　統合化に関連する環境負荷量計算結果

検討ケース	リン回収量	リン回収負荷量		リン高度処理	
		CO2	エネルギー	CO2	エネルギー
	t-P/年	t-CO2/年	GJ/年	t-CO2/年	GJ/年
現状設備	3,632	49,440	480,728	-1,309	-15,723
設備改善	4,562	43,020	436,119	9,227	110,865

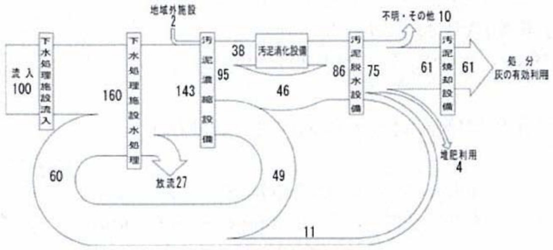
検討ケース	リン肥料製造削減		リン排出削減量	リン鉱石削減量
	CO2	エネルギー		
	t-CO2/年	GJ/年	t-P/年	t/年
現状設備	16,343	236,072	0	12,106
設備改善	20,528	296,512	944	15,206

リンの収支では，焼却灰への移行が流入の約61%なのに対して脱水分離液への移行が約11%であり，回収対象のリン量の賦存量は，焼却灰の方が大きいことがわかる．



単位：%
出典：文献 15-18) を用いて計算
計算誤差や統計値の矛盾等で収支は完全には一致していない

図-6　現状での対象下水処理施設での概略固形物収支



単位：%
出典：文献 15-18) を用いて計算
計算誤差や統計値の矛盾等で収支は完全には一致していない

図-7　現状での対象下水処理施設での概略リン収支

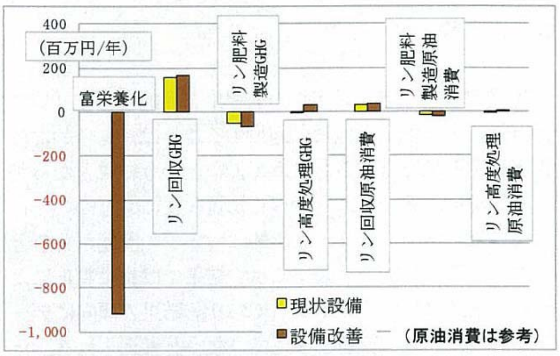


図-8　LIME[13]による統合化評価結果

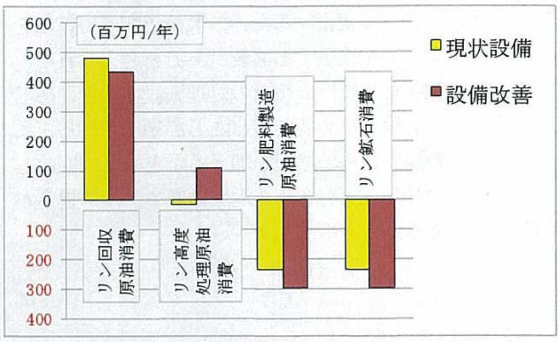


図-9　市場価格[14]による枯渇資源の特性化の結果（参考）

(2)環境負荷量計算結果

統合化に関連する環境負荷量の計算結果を**表-6**に示す．

リン回収量は現状でも，流入の約24%の量に当たる．これは，東京都区部，横浜市，千葉市などの大都市での回収量が寄与している．

(3)統合化評価

LIME[13]の統合化係数等を利用した統合化評価の結果を**図-8**に，市場価格[14]による枯渇資源に関する特性化による比較を図-9に示す．

設備改善ケースでは放流リン量の削減が寄与して総合的な環境保全効果が期待できる結果となった．このことは，リン回収効率を上げるためのリン高度処理は環境保全上有意義であることを表している．

枯渇資源の特性化係数での比較では，リン回収の効果が上回っている結果となった．

二つの評価を組み合わせて考えると，統合化評価で環境負荷増加としてリン高度処理の原油消費の寄与が設備改善ケースでは大きいが，枯渇資源のみでの特性化による比較ではリン鉱石保全効果で相殺されており，全体としては富栄養化影響の緩和効果が大きな寄与となり，環境負荷削減となると考えることができる．

なお，本検討ではリン高度処理の環境負荷量と富栄養化影響の環境負荷量だけの比較でも環境改善効果があるという結果になった．

5. まとめ

本検討によってリン回収の効率化を目的としてリンの高度処理を下水処理施設に適用することは，総合的には環境保全効果を有すると考えてよいという結果となった.

検討は統計データにもとづく物質収支にもとづいて行った概略の検討であり，数値的には多少の問題があると考えられる．ただし，図-8に示す結果では富栄養化による負荷削減効果が大きくなっており，結果の傾向にデータの誤差は大きな影響を与えていないと考えられる．ただし，富栄養化現象ではリン・窒素の水中での構成比等で，それらの寄与は変化するため，数値予測等で精度を上げた検討で結果を検証する必要があると考えられる.

検討上の課題としては，個々の処理施設の状況に応じた詳細な数値的検討が必要であることが挙げられる．また，経済性の観点からの検討を加えるとともに，回収したリン資源の有効利用も含めた地域循環モデルの提示が必要となると考えている.

参考文献

1) (独)石油天然ガス・金属鉱物資源機構：金属鉱物資源ﾏﾃﾘｱﾙﾌﾛｰ2006, 平成 18 年度調査レポート, pp.265-271,2007（http://www.jogmec.go.jp/mric_web/jouhou/material/2007//P.pdf）

2) 加藤文隆, 高岡昌輝, 大下和徹, 武田信生：下水処理システムからのリン回収技術の展望と現状, 土木学会論文集 G, Vol.63 , No.4 , p.413-424, 2007

3) 鶴巻峰夫, 吉田綾子, 星山英一: リン資源循環を実現するシステム構築のための基礎的条件に関する研究, 環境システム研究　論文集, Vol.36, pp.217-226 , 2008

4) 鶴巻峰夫, 星山英一: 生活排水処理におけるリン資源回収の環境保全性について, EICA 環境システム計測制御学会誌 Vol.14, No.1, pp.3-7 , 2009

5) 加藤文隆, 大下和徹, 高岡昌輝,, 武田信生: 下水処理システムからの各種リン回収技術の仮想的適用および評価, 土木学会論文集 G, Vol.63 , No.1 , p.27-40, 20076) 飯島　宏：島根県における下水汚泥からのリン資源の回収についてー造粒脱リン設備の現況および課題ー, 再生と利用 vol.26, pp.38-44 2003

7) 柳橋唯信：福岡市の MAP 法によるリン回収の現状について, 再生と利用, vol.117, pp.24-27, 2007

8) 岐阜市:広報資料(http://www.city.gifu.lg.jp/c/40127491/40127491.html) 岐阜市 HP (2010)

9) アタカ大機(株)：広報資料(http://www.atk- dk.co.jp/xml/docs/ATK_15.pdf) (2006)

10) 下水道技術開発プロジェクト委員会：下水汚泥焼却灰からのりん回収技術に係る技術評価書, p.41, 2006

11) (財)日本環境衛生センター：廃棄物処理技術検証　第5号 MAP法によるリン資源回収資源化システム, p.110, 2003

12) 小林久，佐合隆一：窒素およびリン肥料の製造・流通段階のライフサイクルにわたるエネルギー消費量とCO2排出量の試算, 農作業研究, 36(3), pp.141-151, 2001

13) (社)産業環境管理協会：　ＪＬＣＡ-ＬＣＡデータベース (http://www.jemai.or.jp/lcaforum/index.cfm) 2008

14) 財務省　貿易統計　（http://toukei-is.com/h/?p=21301&f=00 2010.8.22閲覧）

15) (社)日本下水道協会　平成18年度版下水道統計

16) 東京都下水道局　東京都下水道事業年報　平成19年度 http://www.gesui.metro.tokyo.jp/gijyutou/j-nenpo/jn19/nenpo_1.pdf#search='東京都下水道 事業年報'

17) 国土交通省：第2回下水・下水汚泥からのリン回収・活用に関する検討会配付資料　資料３ (http://www.mlit.go.jp/common/000034506.pdf) (2009)

18) 川崎市: 平成18年度水質管理年報（2007）

19) (社)日本下水道協会　下水道施設計画・設計指針と解説　後編　2001年版, pp.340-341, 2001

ENVIRONMENTAL PROTECTIONEFFECTS OF PHOSPHORUS RESOURCE RECOVERY IN SEWAGE TREATMENT PLANTS -EVALUATION FOR GLOBAL WARMING AND EUTROPHICATION-

Mineo TSURUMAKI, Kosuke TSUJI, Eiichi HOSHIYAMA,Satoru YOSHIHARA

Phosphorus resources are finite resources, and there are opinions that the excellent phosphorus ore which are used now shall be entirely exhausted in near future. On the other hand, phosphorus is a material considered to be a cause of the eutrophication of the closed water area. Therefore, the recycling of phosphorus resources is the important measure for resource and environmental protection.

On this study, the change of the quantity of loads of global warming and eutrophication by phosphorus recovery in the sewerage treatment facilities in Tokyo Bay basin were examined and the environmental protection effects were evaluated by LIME. As a result, the environmental protection effects of the phosphorus recovery were confirmed.