

〈特集〉

都市内の埋蔵資源
—— 下水中のリン資源 ——岡本 誠一郎¹⁾, 宮本 豊尚²⁾¹⁾ 独土木研究所 材料地盤研究グループリサイクルチーム (〒305-0821 つくば市南原1-6 E-mail: s-okamoto@pwri.go.jp)²⁾ 独土木研究所 材料地盤研究グループリサイクルチーム (〒305-0821 つくば市南原1-6 E-mail: t-miyamo@pwri.go.jp)

概要

世界的な景気変動に伴い原油等の資源価格も乱高下する中で、産出国が限定されているリン資源については高値安定傾向が顕著である。下水汚泥の焼却灰中のリン含有率は鉱石と同等であり、量的にも豊富であることから、わが国においてその資源化は国家戦略としても重要である。資源化事業の一例として行った焼却灰の備蓄・貯蔵・製品化についての経済性評価の試算結果から、これらの事業が一定規模で実施されれば、既存の技術でも経済的に十分実現可能であることが明らかになった。

キーワード：下水汚泥，資源化，リン資源，備蓄，貯蔵
原稿受付 2009.5.18

EICA: 14(1) 8-14

1. はじめに

リンは生物の細胞中に必須の元素であり、動植物の組織中に多く含まれている。人体にも歯や骨の主成分のヒドロキシアパタイトなどとして多く含まれている。また、リンは言うまでもなく窒素、カリとともに肥料の3大要素であるが、わが国はその原料であるリン鉱石を全量輸入に頼っている。

リンは、海産物などを含む動植物を通じて自然界で循環しているイメージもあるが、リンの物性として常温常圧では窒素のように気相に移行して循環することが無く、実際にはあまり循環は行われておらず、拡散性の高い元素であると言われている^{1,2)}。

近年、新興国における食糧の増産や、地球温暖化対策としてのバイオマスエネルギー（バイオエタノール）の増産などにより、国際的なリンの需要動向に変化が生じている。リン鉱石は世界的に主要な産出国に限られており、産出国側では戦略物資としてリン鉱石の輸出に制限を加えるケースも見られるようになったことなどから、2008年には過去に例を見ない価格高騰を記録し、リン資源の動向は一躍注目を集めることとなった。

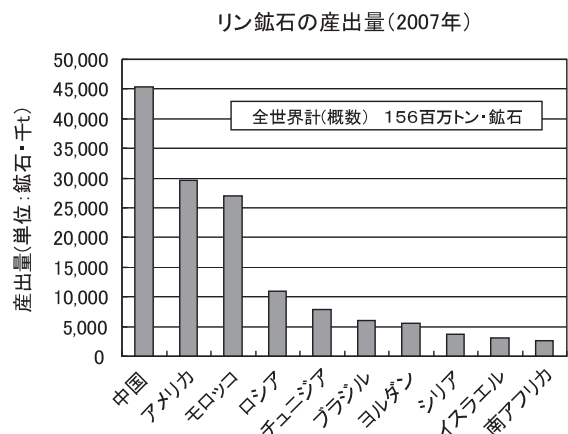
本稿では、こうした状況を踏まえ、国内におけるリン資源の循環利用に資することが可能な下水中のリン回収、資源化の可能性とその課題や対応方策について、ケーススタディ結果も交えながら考えていきたい。

2. リン資源を取りまく情勢

2.1 リンの資源量

米国地質調査所（USGS）の統計³⁾によれば、現在、リン鉱石の主要な産出国は中国、米国、モロッコ（西サハラを含む。以下同じ）、などの国々であり、この3カ国で全世界の産出量の約65%を占めている（Fig. 1）。また、埋蔵量ではモロッコ、中国、南アフリカ、米国の順に大きく、この4カ国の埋蔵量は実に全世界の80%以上を占めており、リンがいかにか地域的に偏在している資源であるかが分かる（Fig. 2）。

前述の通り、わが国はリン鉱石を全量輸入に頼っており、年間に70~80万トンを輸入しているが、その輸入先も鉱石の産出状況を反映して、限られた国から

Fig. 1 主要国におけるリン鉱石の産出量(2007年)³⁾

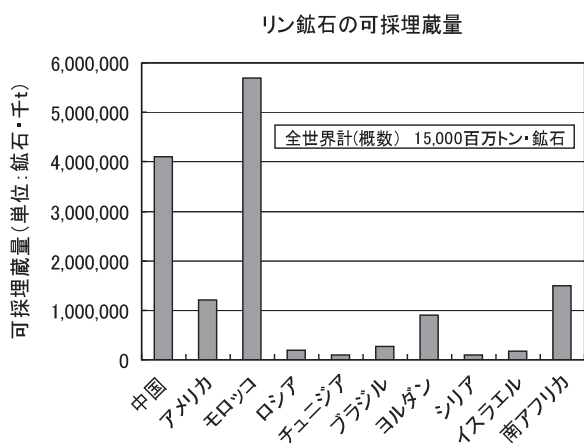


Fig. 2 主要国におけるリン鉱石の埋蔵量³⁾

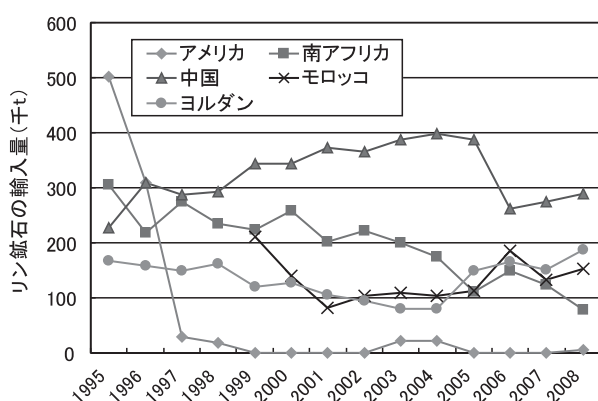
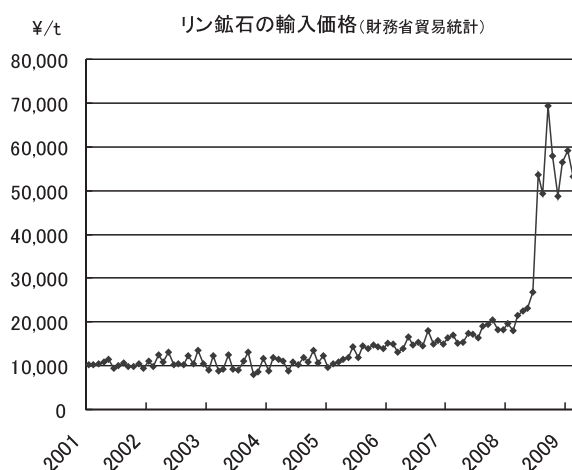


Fig. 3 主な国からのリン鉱石輸入量



Fig. 4 リン鉱石輸入価格と原油価格 (WTI) の推移^{4,5)}

のものとなっている (Fig. 3)。リンは、後述のとおり、その他、リン酸系肥料、食料・飼料、化学工業品など様々な形で国内に持ち込まれている。

2.2 価格動向

2008年度には、原油をはじめとして世界的に各種の資源が高騰した。とりわけリン鉱石については、もともと産出国が限られているなかで、主要産出国である中国において輸出関税率を大幅に引き上げるなどの動きも相まって価格が急騰した。昨年の急速な景気後退により、原油価格が暴落したことは記憶に新しいが、リン鉱石については、本稿執筆時点 (2009年3月) まで景気動向にさほど左右されることなく、高値圏内からほとんど価格が低下していないのが対照的である (Fig. 4)。

今後とも穀物の需要と生産高は着実に増加していくことが予想されており、世界的な肥料の需要についても増加が予想される。今後、リンについては世界各国が戦略資源としての取り扱いを強めることも考えられる。すでにリン鉱石産出量が世界第2位のアメリカではリンを戦略物資と見なして輸出を行っておらず、90年代後半にはわが国の輸入量も激減している (Fig.

3)。わが国においても、今後は資源の調達に現在以上に困難になる状況も予想される。

こうした中で、日本国内に持ち込まれ使用されたリンは、農地等の土壌への残留吸着や、製品等への固定化のほか、廃棄物や排水などとして環境中に散逸している。今後、わが国のリン資源の安定的な確保方策として、こうした利用されずに散逸しているリンの回収、再資源化が重要な意味を持つことになると考えられる。

3. 下水中のリンの資源化

3.1 国内のリンの物質循環フロー

下水中のリンの資源化について考える前に、わが国のリンの物質循環フローについて見ておきたい。

独石油天然ガス・金属鉱物資源機構によるリンのマテリアルフロー分析²⁾によれば、わが国には年間約800千トン・P (2006年) のリンが様々な形態で持ち込まれており、その主要なマテリアルフローは、リン鉱石や肥料のルート、食料や飼料のルート、化学工業や鉄鋼業のルートから成っている。国内へのリンの供

給（2006年の年間値）は化学工業品として176千トン・Pと最も多く、次いで食料・飼料（漁獲海産物を含む）及び鉄鋼原料等で各170千トン・P、リン酸系肥料が160千トン・P、リン鉱石としては103千トン・Pとなっている。これらのうちの約半分（384千トン・P）が肥料として農地等に撒かれ、その大部分が土壌中に蓄積されていると見られている。私たちの人体には、食料として103千トン・Pのリンが摂取される結果となっており、これはちょうどリン鉱石の輸入量分と同程度となっている。この食料由来のリンの大部分は、し尿や食品廃棄物として廃棄、排出され、拡散していくこととなる。

3.2 下水道に流入するリンの資源量

次にし尿、食品系の排水などとして、下水道に流入するリンの資源量はどうか。

わが国の下水道普及率（処理人口普及率）は、2007年度末現在で71.7%に達し、処理人口は9千万人を超えるまでに至っている。下水道の普及により、日々の都市活動により発生する生活排水、事業場排水等の大部分が下水道に集約されるようになった。こうした排水中に多く含まれている窒素やリンも同時に下水道に集約されていることから、その資源的な価値が目されるようになった。

先に紹介したマテリアルフロー分析²⁾結果では、人体から56千トン・Pが生活排水として排出されており、さらにこのうち16千トン・Pが河川、海域に流出している結果となっている。

佐藤⁶⁾は下水道統計（2002年）データをもとに、下水道に集約される窒素・リン量を算定し、食品需給表（農林水産省）、肥料要覧（農林水産省）をもとに算出した食糧生産・輸入等に関する窒素・リン量との関係について分析している。この結果では、し尿、排水等として排出され、下水処理場に流入する年間のリン量は52.2千トン・Pであり、国内生産食糧・輸入食糧のリン量（加工前の原料としてのリン量）126.4千ト

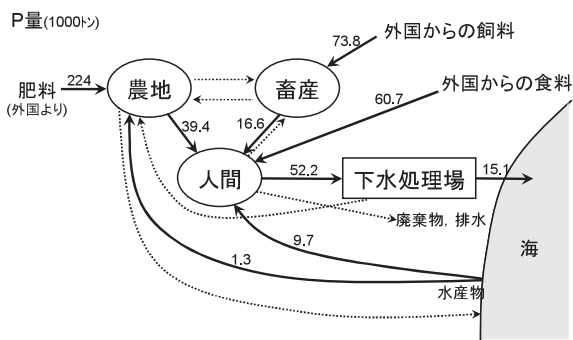
ン・Pに対して40%強が下水道に集約されている結果となっている（Fig. 5）。下水処理場に流入、水処理後、処理水として水域に流出する量は15.1千トン・Pであり、下水処理場における除去率は71%、除去されたリンは下水汚泥に移行していることになる。今日、下水道の普及と水処理の高度化に伴い、下水汚泥に含まれるリンの量は国内のマテリアルフローからみても相当の量を占めるに至っている。

3.3 下水汚泥中のリン資源化の可能性

下水汚泥中には各種の無機資源が含まれているが、前記のリンのフローの当然の結果として、下水汚泥焼却灰にはリン酸が多く含有している。一般にリン鉱石はリン酸の含有率が30%を超えると高品質の鉱石とされるが、下水汚泥焼却灰中の含有率はリン鉱石とほぼ同等とすることができる（Fig. 6）。

このため、従前より下水処理・汚泥処理系からの各種のリン回収技術が提案、開発されてきた。これらの回収技術の詳細については、別稿に譲ることとするが、例えば汚泥焼却灰からの回収方法としてアルカリ溶出法、還元溶融法、汚泥からのリン抽出法として加熱処理法、フォトリップ法などの技術が、また汚泥返流水など高濃度排水からの回収方法としてMAP法、カルシウム添加による晶析法などが知られている⁷⁾。

これまでのリン回収システムの最大のネックは輸入リン価格と回収費用の大幅な乖離であった⁷⁾。しかしFig. 4に示したとおり、リンを含有する製品の工業的な出発原料であるリン鉱石の価格はこの3年間に5倍にも跳ね上がっており、リン回収に関するコスト的な課題は急速に解消しつつあると思われる。近年のリンの国際的な戦略物資化の傾向を考えれば、必須資源の安定的な確保方策として下水汚泥中のリンの再資源化は量的にも質的にも有効な手法であると言えよう。



文献6)より許可を得て転載

Fig. 5 わが国の食料に関するリン収支と下水道（2002年度）

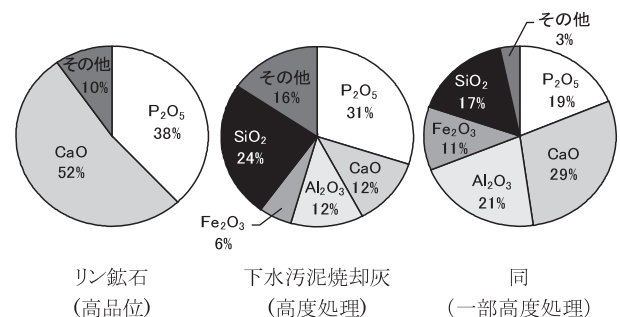


Fig. 6 リン鉱石と下水汚泥焼却灰の金属類含有量

4. 汚泥焼却灰資源化モデルの検討

4.1 リン資源の貯蔵・備蓄の重要性

Fig. 4 の下図に示すとおり、2007～2009 年は未曾有の原油価格の乱高下を経験することとなった。景気の過熱と後退局面のなかで、投機的資金が原油市場に流入、流出した影響も指摘されている。2008 年下期からの原油価格の暴落ではバイオエネルギー産業も大きな影響を受けたと言われている。

リンについては現在も鉱石の価格は高止まり状態となっている。しかし、この価格高騰によって、下水汚泥等からのリン回収システムは順調に進捗していくと考えるとよいのだろうか。以下では、リン回収による資源化において想定される問題点とその対処方策について考えてみたい。

21 世紀初頭までは、リン酸肥料の消費量は年間 2.8% の増加を続けるとした予測結果^{8,9)}などを考慮すればリンの高値傾向は継続するとも考えられ、長期的には資源の枯渇も懸念される状況も予想される。もう少し短期的な市場動向については、原油と同様の投機的な動きも予想され、不透明である。

こうした中で、天然のリン資源を持たないわが国にとっては、国内に持ち込まれ使用された残りのリンを散逸させず、将来的に再資源化が可能な形で備蓄することは、国家的な資源戦略として重要であり、できることならば一刻も早く実施すべき施策である。さらにリンの今後の市場動向の不安定さを考えれば、価格の乱高下や一時的な入手困難等に対応するためには、一定期間の貯蔵によるリスク回避も有効な方策であると考えられる。

4.2 汚泥焼却灰の貯蔵・備蓄事業の概念

(1) 下水汚泥からのリン資源化シナリオ

リンを多く含有する下水汚泥の資源化の手順としては、現時点で回収→利用（製品化事業）、一定期間の貯蔵→回収→利用（貯蔵・製品化事業）、備蓄→回収→利用（備蓄・製品化事業）の 3 つのシナリオが考えられる。

一定期間が経過した後には下水（汚泥）中のリン資源を回収する際には、焼却灰として下水汚泥を蓄えることが現実的である。焼却灰貯蔵の利点としては、①既にわが国で発生している下水汚泥の約 7 割が焼却されている、②無機質であり成分が安定しており、臭気等の問題もない、③無機物の濃度が高く資源価値が高い、④備蓄に必要な空間を小さくすることが可能、といった要素が挙げられる。

(2) 備蓄・製品化事業

焼却灰の備蓄・製品化事業は、リン資源の枯渇や将来的な高騰に対応するために、リンを含有する下水汚

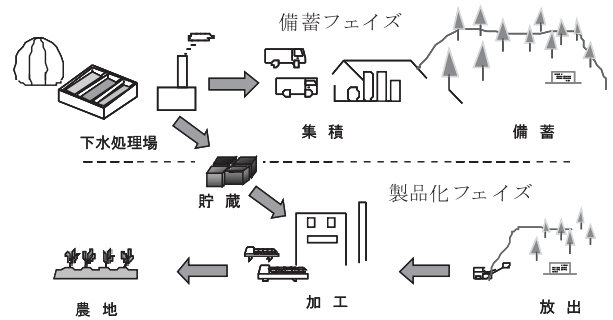


Fig. 7 下水汚泥焼却灰の資源化事業の概念

泥焼却灰を備蓄するものであり、その期間は数十年単位で行う事業となる。将来的に本格的な資源枯渇状態となるなど、天然資源の入手が困難となった状況下でリンの回収、製品化を行うものである。

本事業は備蓄（貯蔵）フェイズと製品化フェイズに分けられる（Fig. 7）。備蓄フェイズでは、下水処理場で発生する焼却灰を集積し、溶出や飛散の防止工を施し、長期間の保管が可能な状態にした上で蓄える。この際、大量かつ安価に貯留することが必要である。また、備蓄対象のリンはもちろん、土壌・水質環境の保全のために重金属類についても溶出を防止しなければならない。さらに製品化の段階で利用しやすいように、あらかじめ質・量ともに把握しておく必要がある。

(3) 貯蔵・製品化事業

貯蔵・製品化事業は、もうすこし短い期間で焼却灰を貯蔵しておいて、市場価格の極端な変動や、何らかの原因で一時的にリン鉱石等の入手が困難になった場合等に製品化して利用するものである。

本事業では、発生した焼却灰を貯蔵基地に一時的に集め、経済ベースに乗ると判断されたときから製品化していくため、備蓄ほど長期保管する必要がないので、焼却灰を何らかの容器に保管する方法が考えられる。容器については輸送のしやすさや耐久性の検討が、また貯蔵基地の立地についても検討が必要となる。

備蓄、貯蔵事業ともに、製品化フェイズでは貯えた焼却灰を肥料等に加工して利用する際に、高品位な製品を作ることと、発生する残渣を最小限にすることが肝要である。

4.3 経済性の評価

独土木研究所では、前述のようなリン資源を取り巻く状況を踏まえ、下水汚泥の焼却灰に含まれるリンの資源化事業のうち、焼却灰の備蓄・貯蔵事業の経済性評価のための試算を行ったので紹介する¹⁰⁾。

以下の試算は、いくつかの仮定の下に行っており、未算定のコスト等もあることから概算の域を出ないが、こうした備蓄や製品化などの事業が概念上のものではなく、既に経済的にも現実的な方策であることを示す

結果であると考えている。

(1) 備蓄フェイズ

① 吹付け圧密工法

吹き付け圧密工法は、**Fig. 8**に示すとおり、焼却灰を高圧で吹き付け、圧密状態の高密度な堆積物を形成して備蓄を行うものである。経済性評価の試算条件としては、備蓄年数50年、建設費は基盤及び建屋の施工・受け入れ設備・電気設備・備蓄施工設備・仕上げ緑化について計上し、稼動経費には動力費・人件費・副資材費・施工補助材費・設備補修費を計上して試算を行った。なお、土地代や輸送費、補助金及び発生する利子については考慮していない。

試算結果を**Fig. 9**に示す。国土交通省の主導により実施されてきた技術開発プロジェクト（下水汚泥資源化・先端技術誘導プロジェクト Lotus Project）における開発目標値の8,000円/t-灰¹¹⁾と比較すると、一年あたりの建設費と維持管理費の合計値がLotus Projectの目標値を下回る備蓄規模は概ね5,000t-灰/年であり、これは処理人口が約100万人規模の下水道施設における焼却灰を集積した場合に相当する。

② ブルドーザ敷き均しローラ締固工法

ブルドーザを使って焼却灰を締め固めて灰の層を作成し、大規模な焼却灰の山を形成し備蓄するものである。吹き付け圧密工法と同じ仮定のもと試算を行った結果、①よりも低廉な建設費を反映して、施設規模が1,000t-灰/年（約20万人の処理人口規模）で開発目標値に達している（**Fig. 10**）。なお、施設規模が1,000t-灰/年と5,000t-灰/年では稼動経費が増加している

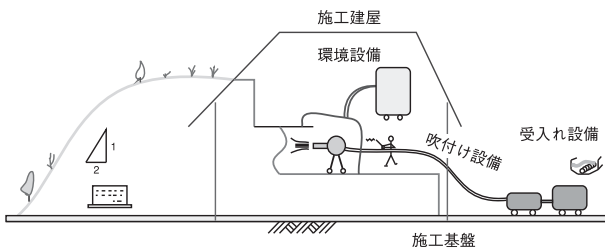


Fig. 8 吹き付け圧密工法のイメージ

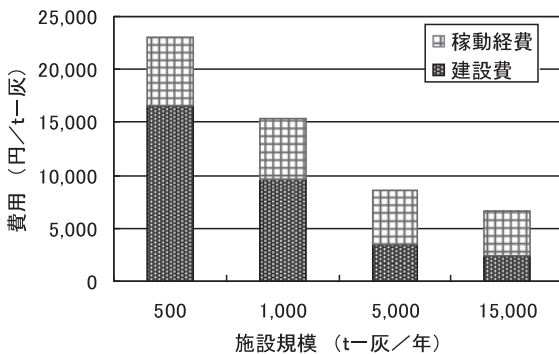


Fig. 9 吹き付け圧密工法による備蓄工の試算結果

のは、主としてスタッフの常駐化による人件費の増加によるものである。

(2) 貯蔵フェイズ

貯蔵・製品化事業における貯蔵フェイズの一例として、コンテナ中に焼却灰を貯蔵する方法について経済性の検討を行った。

一般的なコンテナである12ftコンテナは容量が約18m³、積載量5tであり、処理人口が5万人規模の処理場でちょうど1週間に1基必要となる。(1)で紹介した備蓄工とは異なり、コンテナの調達コストがかかるため、長期間にわたる大量の備蓄には向かない。比較的小規模の施設から焼却灰の運搬・収集にコンテナ輸送を想定し、灰を加工・製品化するまでの間、そのまま搬送したコンテナの状態で一時的に貯蔵し、一定期間後に製品化した後にコンテナは再利用するような形態が想定される。コンテナの耐用年数は10年以上であり、繰り返し使うことで経済性は向上する（**Fig. 11**）。

(3) 製品化フェイズ

下水汚泥焼却灰からリン肥料を製造する方法としては、岐阜市で行われているリン酸カルシウム¹²⁾や桑子らによる熔成リン肥を製造する方法¹³⁾などがある。ここでは製品化の一例として、熔成リン肥による製品化についての経済試算を行った。施設の耐用年数は10

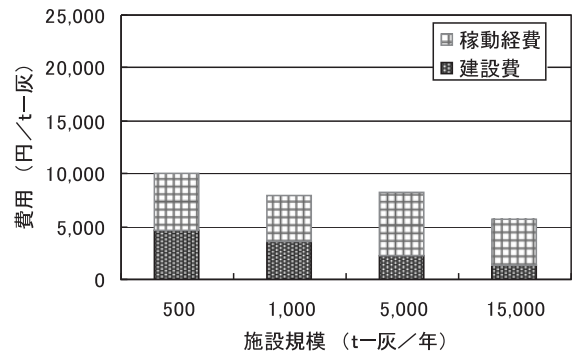


Fig. 10 ブルドーザ敷き均しローラ締固め工法による備蓄工の試算結果

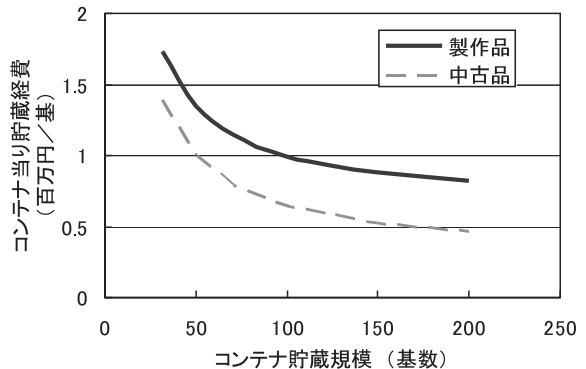


Fig. 11 コンテナによる貯蔵工の試算結果

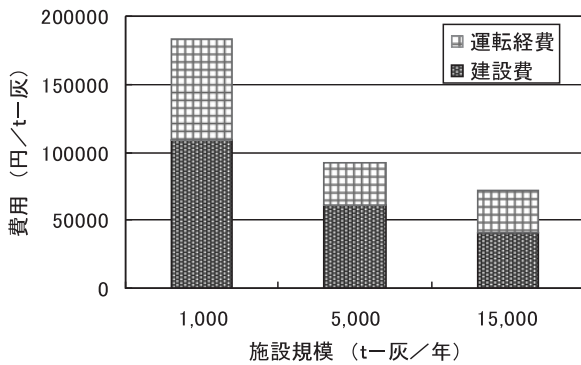


Fig. 12 熔成リン肥製造事業の試算結果

年とし、輸送費は考慮していない (Fig. 12)。

試算結果より、例えば5,000 t-灰/年の施設規模では、肥料を1,200 円/20 kg で売却すると収支が均衡すると試算された。2008年8月現在の熔成リン肥の市販価格は輸入品で約1,800 円/20 kg (粒状)、1,300 円/20 kg (砂状) 程度であり、国産品では2,000 円/20 kg であった (茨城県内)。リン製品の現状の高値圏内では、下水汚泥から製造した熔成リン肥は価格競争力を有することが明らかとなった。

5. おわりに

国際的なリンの戦略資源化への懸念と、その対応策としての下水汚泥のリン資源化研究の重要性については、以前から識者により指摘されており¹⁴⁾、そのための要素技術開発も進められてきた。しかし回収コストなどの問題から、一部の先駆的な取組みを除いてはその実用化の動きが広がることは無かった。今日、リン資源の高騰と主要産出国の戦略資源化という形で、懸念が現実のものとなり、下水道が有する豊富なリン資源量が各界から注目されるようになってきている。

下水道のリン資源化事業が置かれている状況は、1~2年前とは大きく変化している。焼却灰からのリンの回収、製品化は、天然資源の高騰により価格優位性を持つようになってきた。さらに、将来的な資源の枯渇や、今後の市場動向の激変緩和措置として、下水汚泥焼却灰の備蓄・貯蔵事業が有効であり、かつ経済的にも十分実現可能なものであることを本稿では提示した。

現在、下水汚泥はセメント原料として有効利用されている割合が高くなっているが、この場合、含有しているリンは全く活用されていないばかりか、再資源化が難しい形態になっており、さらにはリンの含有がセメントの品質にも影響を及ぼすことから、リンに着目した場合には課題の多い再利用方法である。

一方で、下水汚泥のリン資源化についても、これから解決すべき課題は多く、例えばリン回収後の残渣の

処理・利活用方策の確立や、備蓄・貯蔵事業の法令、制度面の整備などが必要である。

世界的に貴重な資源となりつつあるリンが国内に移入され、その利用された結果として下水に相当量が含有している。この下水中のリンを散逸させるのは、富栄養化など水環境への悪影響をもたらすだけでなく、今日、その資源的価値からみて社会的損失であると考えられる。下水汚泥焼却灰中のリンの備蓄や製品化を円滑に促進していくための環境整備を早急に行っていくことが望まれる。

謝辞

本稿で紹介した下水汚泥焼却灰のリン資源事業に関する経済性検討は、国土交通省下水道部から独立行政法人土木研究所への2007年度委託事業「下水汚泥中のリン等無機物資源の備蓄システムに関する調査」のなかで実施されたものである。検討に際しては本事業の一環として行われたリン等無機資源の備蓄システム勉強会における議論や示唆が参考となった。

リン資源を取り巻く情勢については、筆者らが委員、幹事として参加したNEDO平成20年度調査事業の未利用資源からのリン、カリウムの省エネルギー型回収技術開発の先導調査委員会における議論・資料等を参考にさせていただいた。また、下水道を取りまくリン収支に関して、日本上下水道設計(株)佐藤和明氏の検討成果の一部について掲載を快諾いただいた。ここに記して謝意を表する次第である。

参考文献

- 1) 津野 洋：下水道におけるリン回収技術の動向と展望、下水道機構情報、Vol. 3, No. 8, pp. 8-12 (2008)
- 2) Virtual 金属資源情報センター、鉱物資源マテリアルフロー平成19年度調査レポート (2007)
JOGMEC (銲石油天然ガス・金属鉱物資源機構) ホームページ
http://www.jogmec.go.jp/mric_web/jouhou/material_flow_frame.html#2007
- 3) Phosphate Rock Statistics and Information, USGS Mineral Commodity Summaries (2009)
USGS ホームページ
http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/phosphate_rock/mcs-2009-phosp.pdf
- 4) 財務省：財務省貿易統計概況品別推移表、財務省ホームページデータをもとに作成
- 5) U.S. Energy Information Administration: Cushing, OK WTI Spot Price FOB (Dollars per Barrel)
<http://tonto.eia.doe.gov/dnav/pet/hist/rwtdD.htm> をもとに作成
- 6) 佐藤和明：わが国の食糧生産、貿易量の窒素・リン収支と下水道の関係、再生と利用、Vol. 33, No. 122, pp. 82-88 (2009)
- 7) 蝦江美孝他：リン回収技術の現状と将来展望、再生と利用、Vol. 30, No. 117, pp. 6-10 (2007)
- 8) Valsami-Jones, E. Phosphorus availability in the 21st century

- (2004)
<http://www.nhm.ac.uk/mineralogy/phos/p&k217/steen.htm>
- 9) 黒田章夫, 滝口 昇, 加藤純一, 大竹久夫: リン資源枯渇の危機予測とそれに対応したリン有効利用技術開発, 環境バイオテクノロジー学会誌, Vol. 4, No. 2, pp. 87-94 (2005)
- 10) 宮本豊尚, 岡本誠一郎, 落 修一: 安定的リン資源確保のための下水道における資源化モデル, 学会誌 EICA, Vol. 13, No. 2/3, pp. 199-202 (2008)
- 11) 小野田吉恭, 西村寛信他: LOTUS Project の開発技術——スラッジ・ゼロ・ディスチャージ技術 下水汚泥焼却灰からのリン回収技術——, 再生と利用, Vol. 30, No. 117, pp. 43-46 (2007)
- 12) 後藤幸造: 下水汚泥焼却灰の有効利用 リン回収と無機質資材の実用化に向けて, 下水道協会誌, Vol. 45, No. 544, pp. 23-25 (2008)
- 13) 桑子松司, 小松貴司, 岩井良博, 定塚徹治, 高木禎史: 下水汚泥焼却灰の溶融処理によるリン肥料化技術, 廃棄物学会研究発表会講演論文集, Vol. 12, No. 1, pp. 286-288 (2001)
- 14) 三品文雄, 新保高之: 下水汚泥リン資源化の必要性, 再生と利用, Vol. 26, No. 98, pp. 13-18 (2003)