

第2章 技術の概要と評価

第1節 技術の概要

§5 技術の目的

本技術の目的は、消化槽と汚泥脱水設備の間にリン除去・回収設備を設置し、消化汚泥中のリンを MAP として除去・回収することにより、消化汚泥および返流水のリン負荷を低減するとともに、回収したリンの資源利用を図るものである。

【解 説】

下水処理場では、地球温暖化対策としての省エネルギー対策やエネルギー回収が求められており、汚泥の減量化とエネルギー回収を図ることのできる嫌気性消化が改めて注目されている。しかし嫌気性消化では有機物の分解にともない窒素・リンが液中に溶出し、高濃度のリン酸、アンモニアが汚泥処理系統より水処理系統へ返流され、水処理への負荷が増大するという課題がある。また、条件によっては、消化汚泥系統や脱水設備において、リンに起因するスケールによる配管閉塞や機器トラブル等が発生する課題もある。

一方、肥料・工業原料の一つであるリンは、世界的な枯渇資源でありながら、我国においては、その必要量全量を輸入しているという貴重な資源でもある。

従来法として、資源化可能な形態でリンを回収可能な返流水リン負荷削減技術としては、脱水ろ液から MAP としてリンを除去回収するろ液 MAP 法がある。しかし、従来法では処理対象を脱水ろ液としていることから、脱水設備でのスケールトラブル低減を図れないことや、脱水機の運転状態（使用薬品や SS 回収率）の影響を受けやすいという課題があった。

本技術では、消化汚泥中のリンを直接 MAP として除去・回収するため、上記の課題を解決しつつ返流水のリン負荷を低減することが可能である。また、脱水ろ液に比べてリン濃度の高い消化汚泥から直接回収するため、MAP 回収量の増加を図ることができ、加えて、リン除去による消化汚泥固形物量の削減による汚泥処理処分費の低減も期待できる。

本技術および従来法（ろ液 MAP 法）の適用箇所を図 2-1 に示す。

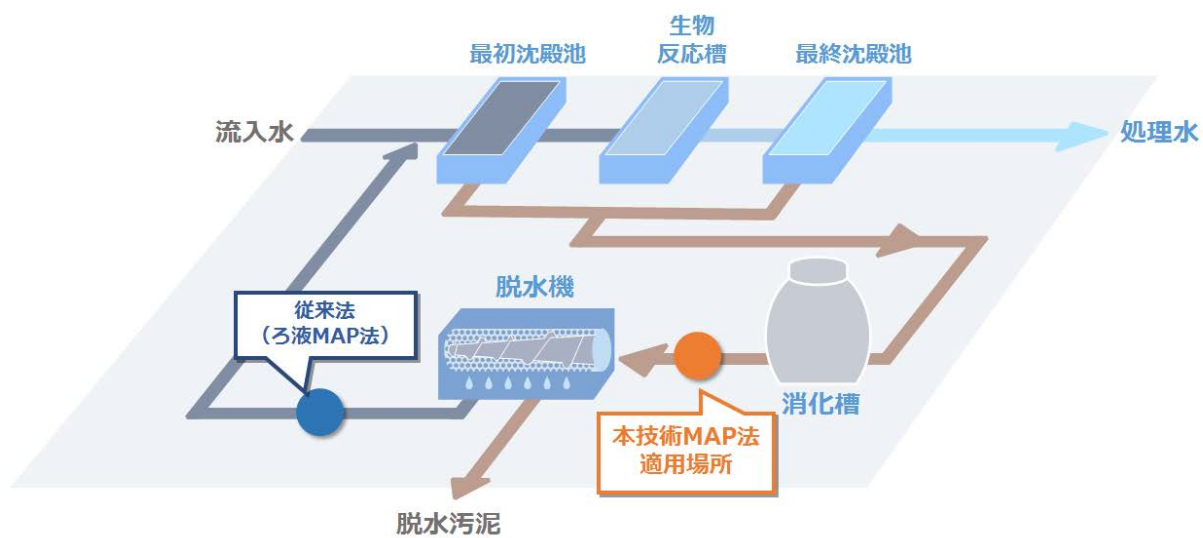


図 2-1 本技術の適用箇所

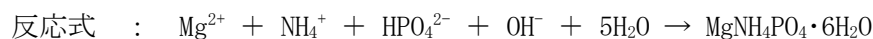
§6 技術の概要

本技術は消化槽からの消化汚泥引抜きラインにリン除去・回収設備を設け、消化汚泥中のリン酸態リン（ $\text{PO}_4\text{-P}$ ）を MAP に晶析させ、除去・回収するとともに、消化槽内で既に MAP となっている粒子の一部を回収するものである。回収 MAP は肥料として利用可能である。

【解 説】

（1）晶析反応

消化汚泥中には $\text{PO}_4\text{-P}$ の他にアンモニウムイオン（ NH_4^+ ）も豊富に含んでいる。MAP はリン酸水素イオン（ HPO_4^{2-} ）、アンモニウムイオン（ NH_4^+ ）、マグネシウムイオン（ Mg^{2+} ）の晶析反応により生成する物質であるため、消化汚泥に適正量のマグネシウムイオンを添加し、晶析に適した環境に制御することで MAP として晶析させる。



（2）自然生成した MAP の回収

図 2-2 に消化汚泥中のリンの形態と回収対象例を示す。消化汚泥中のリンの形態は、実際には処理場毎に異なるため個別の調査が必要であるが、およその内訳としては、T-P のうち約 15～45% 程度が $\text{PO}_4\text{-P}$ であり、5～15% 程度が自然発生 MAP であると推測される（詳細資料編 1 項（3）参照）。

実証施設での自然発生 MAP の参考を写真 2-1 に示す。従来法では、脱水工程により殆どの固形物が除去された脱水ろ液を対象とするため、前述のリン形態のうち、脱水ろ液として流出する $\text{PO}_4\text{-P}$ のみを処理対象とするが、本技術では、自然発生した MAP の一部についても回収対象となるため回収量が大幅に向上する。

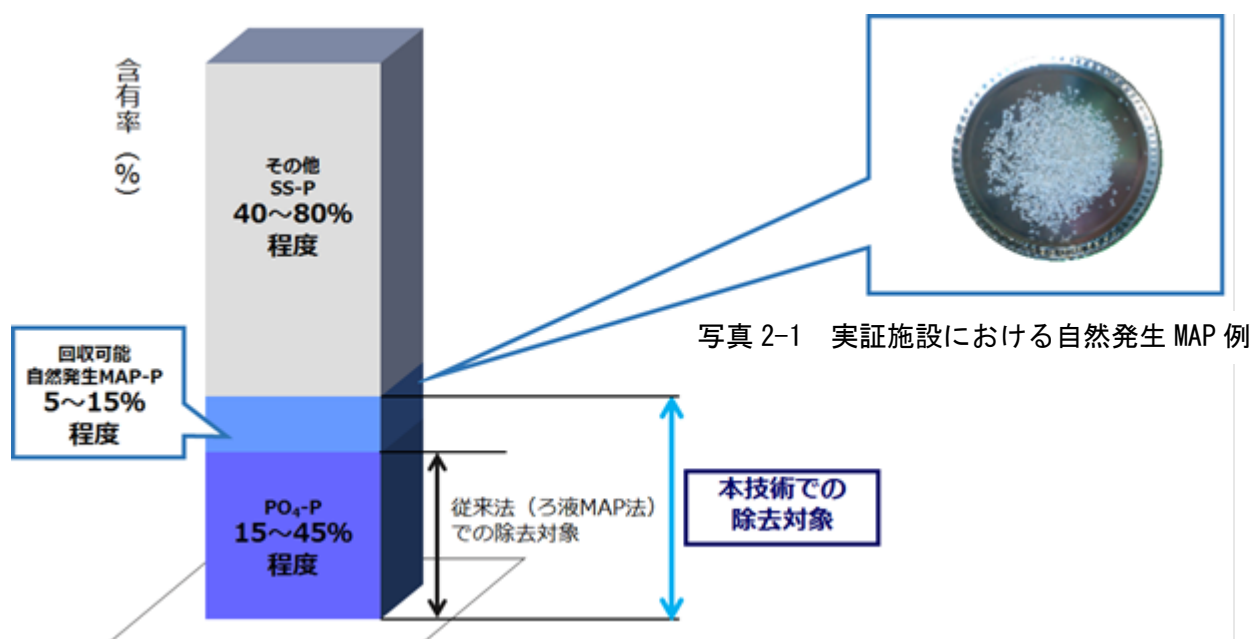


図 2-2 消化汚泥中のリンの形態と回収対象例

(3) プロセス概要

本プロセスは消化汚泥中に MAP を晶析させて汚泥から分離・回収する「リン除去・回収装置」と、分離回収した MAP 中に残留している汚泥分を除去する「MAP 洗浄装置」により構成される。リン除去後の処理汚泥は既存の汚泥脱水機で処理する。また、回収リンの引取り先等の条件に応じて MAP 洗浄装置の後に「MAP 乾燥・貯留設備」を付加する。図 2-3 にプロセス概略フローを、写真 2-2 に実証施設写真を示す。

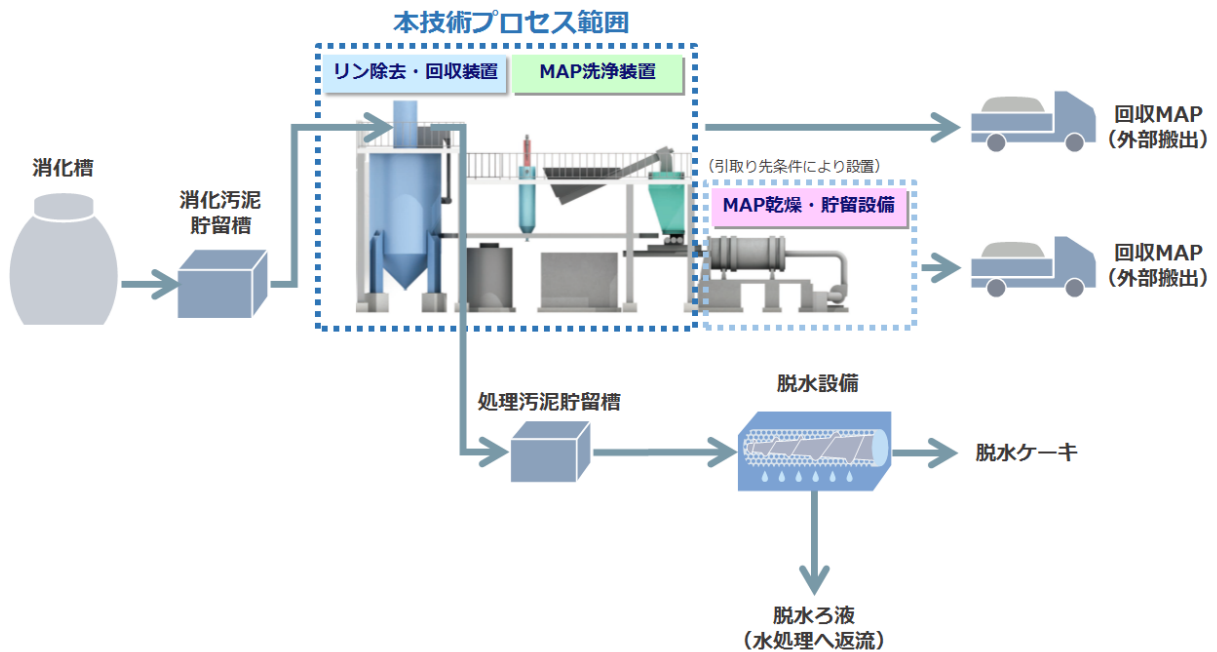


図 2-3 プロセス概略フロー

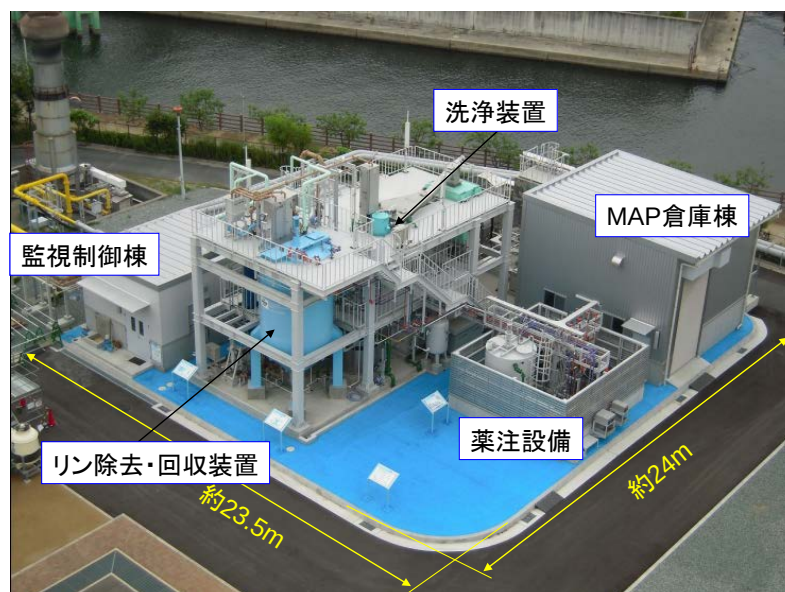


写真 2-2 東灘処理場リン除去回収実証施設

(4) 回収 MAP の肥料原料としての利用

実証施設で回収された MAP とこれを原料にして試作した肥料例を写真 2-3、2-4 に示す。本技術で回収される MAP は $100\sim700\mu\text{m}$ の顆粒状で粒径が安定しており、肥料原料として適している（詳細資料編 1 項（8）参照）。

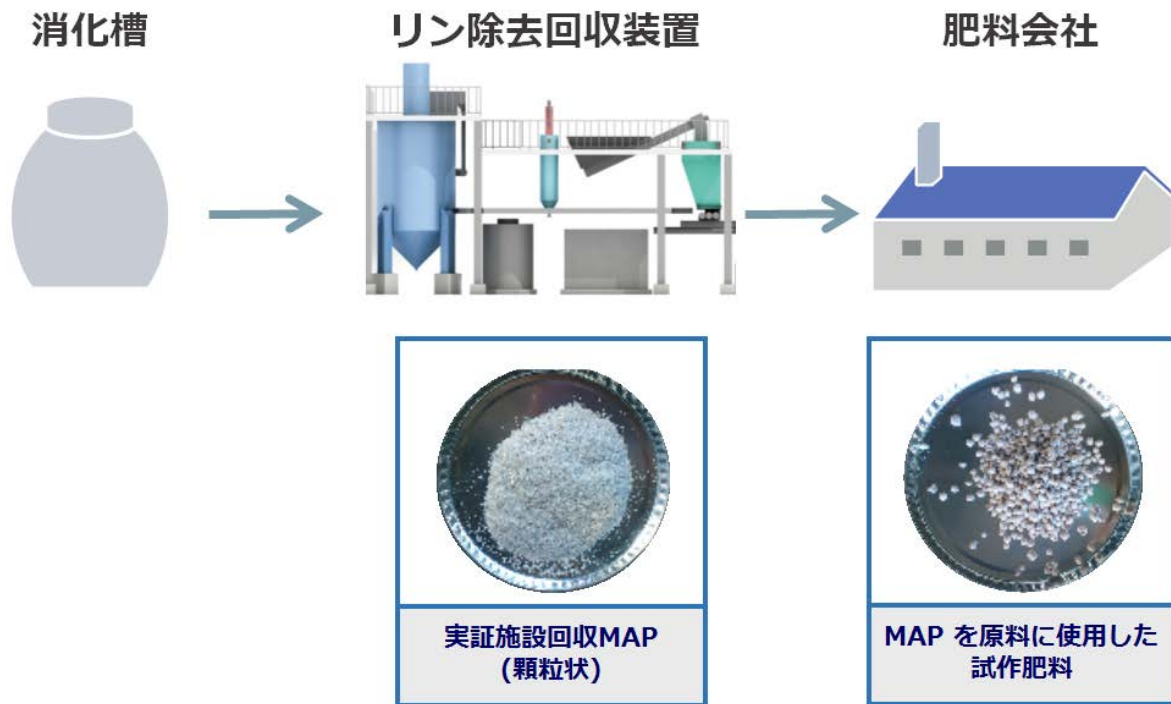


写真 2-3 回収 MAP

写真 2-4 試作肥料

§7 技術の特徴

本技術の特徴は以下のとおりである。

- (1) ろ液 MAP 法よりリン回収量の増加
- (2) ろ液 MAP 法より高いリン除去率により返流水リン負荷を低減
- (3) 脱水処理工程でのリン除去用薬品添加量の削減
- (4) スケールトラブルの低減
- (5) 汚泥発生量の低減
- (6) 肥料または肥料原料として利用可能な MAP の製造

【解説】

従来のろ液 MAP 法は適用流体が比較的低 SS、低粘度である液体に限定されることから原則として脱水ろ液を対象としている。本技術は、従来の MAP 法では適用が困難であった消化汚泥そのものを処理対象とすることが可能であるため、従来法では得られなかった様々な導入メリットを得ることが可能となる。図 2-4 に本技術導入によるメリットを示す。

(1) ろ液 MAP 法よりリン回収量の増加

本技術は、処理場系内で最も溶解性リンが高濃度となる消化汚泥を対象とするため効率良くリンを除去・回収することが可能である。消化汚泥を対象とすることにより、消化汚泥中の溶解性リン ($\text{PO}_4\text{-P}$) のほかに、自然発生 MAP についても回収することが可能となるため、従来ろ液 MAP 法に比べリン回収量を増加させることができる。回収 MAP を肥料として利用することで、より高いリンの資源循環が可能である。

また、従来のろ液 MAP 法は汚泥脱水処理の後工程であるため、脱水工程で使用する薬品（主に無機凝集剤）によるリン濃度の変動や脱水機の SS 回収率等の影響を受けるが、本技術は汚泥脱水処理工程の前工程となるため脱水処理の影響を受けない。なお、実証研究において本技術導入に伴う汚泥脱水性の変化は認められなかった。

(2) ろ液 MAP 法より高いリン除去率により返流水リン負荷を低減

本技術は、消化汚泥からリンを除去・回収することで、脱水ろ液中のリン濃度を従来ろ液 MAP 法と同等以上に低減することが可能である^{※1}。これにより水処理へのリン負荷を低減することができ、水処理でのリン除去の安定化や、放流水リン濃度の低減にも寄与する。また、水処理で凝集剤を使用してリンを除去している場合はその使用量の削減が期待できる。

※1 従来のろ液からの MAP 法でのリン回収率＝脱水ろ液中の $\text{PO}_4\text{-P}$ の 70%^(*) に対して、本技術での脱水ろ液 T-P 除去（縮減率）は 85% 以上であることが確認されている（§15 参照）。

(*) 出展：下水道におけるリン資源化の手引き（平成 22 年 3 月 国土交通省都市・地域整備局 下水道部）

（３）脱水処理工程でのリン除去用薬品添加量の削減

汚泥脱水機へ投入する消化汚泥に鉄塩等の無機凝集剤を添加し、脱水ろ液リン負荷低減や、脱水ケーキ含水率低減を行っている場合、本技術の導入により、リン除去に消費される無機凝集剤添加分が不要となり、リン由来の汚泥増加、および脱水ケーキ中のリン含有率の増加を防ぐことができる。

参考）高分子凝集剤で凝集・濃縮した後に無機凝集剤を添加し、より低含水率とする脱水技術を適用する場合は、濃縮ろ液のリン濃度の抑制が課題となるが、本技術との組み合わせにより返流水負荷の増大を抑えられる。

（４）スケールトラブルの低減

本技術は従来のろ液 MAP 法と異なり、脱水処理前の消化汚泥から直接リンを除去回収する技術であるため、従来のろ液 MAP 法では解決できなかった脱水設備の配管スケールの抑制や、脱水機でのスケールトラブルの低減にも効果がある。ただし、消化槽からリン除去・回収装置晶析リアクタ間の配管・設備については、リン除去処理前の消化汚泥であるので、従来同様の MAP スケール対策が必要である。

（５）汚泥発生量の削減

一般的な消化汚泥※²には溶解性リン（ $\text{PO}_4\text{-P}$ ）のほか自然発生している MAP が含まれている。本技術はこの自然発生 MAP の一部を回収することが可能である。自然発生 MAP は汚泥固形物の一部であるため、その一部が回収されることによって脱水工程にかかる汚泥固形物量が減少する。本技術によって回収される自然発生 MAP は一般的な消化汚泥固形物量の約 3%程度であり、これに見合う削減効果が脱水、焼却、ならびに埋立等の最終処分で見られることとなる。汚泥処理処分に係る費用、エネルギーは下水処理場の運転費用および消費エネルギーの中で大きな割合を占めるため、その意義は大きい。

※² 一般的な消化汚泥：汚泥濃度：下水道統計中央値、リン濃度：メーカー経験値

（６）肥料または肥料原料として利用可能な回収 MAP の製造

本技術は、消化汚泥中のリンを晶析反応により、リン酸マグネシウムアンモニウムとして除去・回収するものである。通常の下水消化汚泥から得られる MAP は、重金属等の有害物質の含有量が少なく、化成肥料の公定規格値を十分に下回ることが確認されている（詳細資料編 1 項（５）参照）。なお、肥料登録を行う際には、回収 MAP の成分分析を行い、肥効成分含有量および、重金属等の有害物質の含有量が安定的に一定の範囲内に収まっているかについて確認する必要がある。

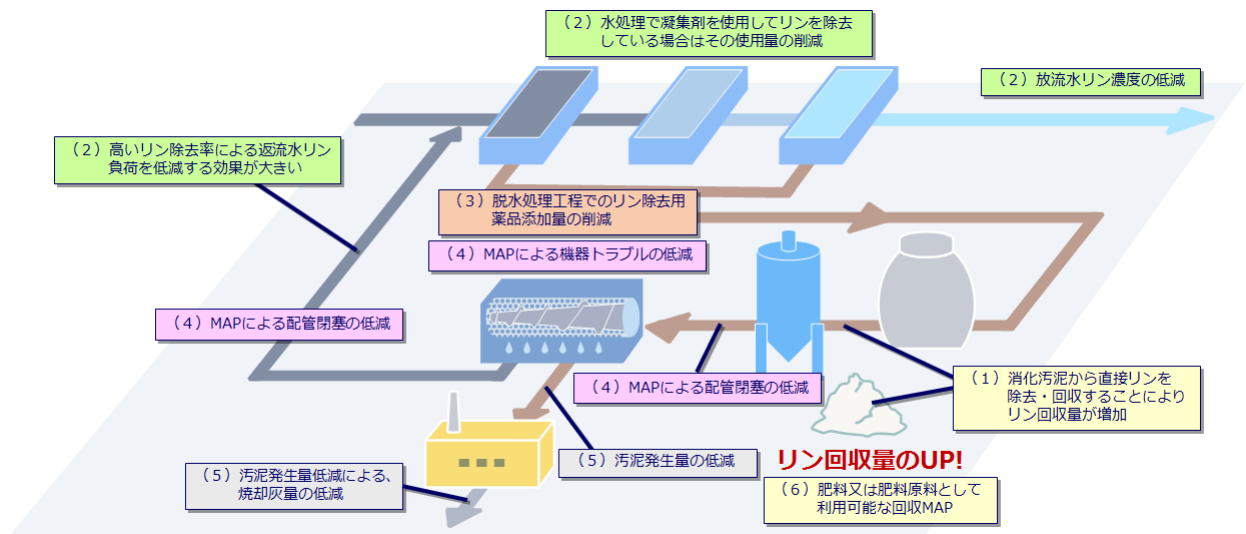


図 2-4 本技術導入によるメリット

§8 リン除去・回収装置の概要・特徴

リン除去・回収装置は、機械攪拌式の完全混合晶析リアクタであり、脱水ろ液に比べ粘性の高い消化汚泥に対しても効率よく MAP 晶析、回収が可能な装置である。その特徴は次のとおりである。

- (1) 機械攪拌式完全混合型反応槽による高い反応効率
- (2) 安定したリン除去・回収性能と容易な運転管理

【解 説】

本装置は、消化汚泥中の $\text{PO}_4\text{-P}$ を MAP として晶析させ、消化汚泥中に自然発生している MAP と共に回収する装置である。本装置は、従来法では適用が困難であった高 SS、高粘度の消化汚泥に対しても効率の良い MAP 晶析反応と晶析 MAP の回収を可能としている。以下に本装置の特徴を示す。

(1) 機械攪拌式完全混合型反応槽による高い反応効率

消化汚泥は、高濃度の $\text{PO}_4\text{-P}$ や自然発生 MAP を含有している一方、高 SS、高粘度であるという性質も持っている。そのため、一般的な流動層型リアクタでは反応効率を高めることが困難であった。本装置は機械攪拌式の完全混合リアクタを採用したため、粘性の高い消化汚泥でも PO_4^{3-} 、 NH_4^+ および Mg^{2+} イオン、ならびに MAP 種晶を均一に接触させて反応効率を高めることができ、リアクタ内のイオン濃度に偏りがある場合に生じる回収困難な微細 MAP（数 μm 程度）の生成が少ないという特徴を有する。また、消化槽内で自然発生した MAP の一部も回収可能であるため MAP 回収量はろ液 MAP 法より増加する。図 2-5 にリン除去・回収装置の概略図を示す。

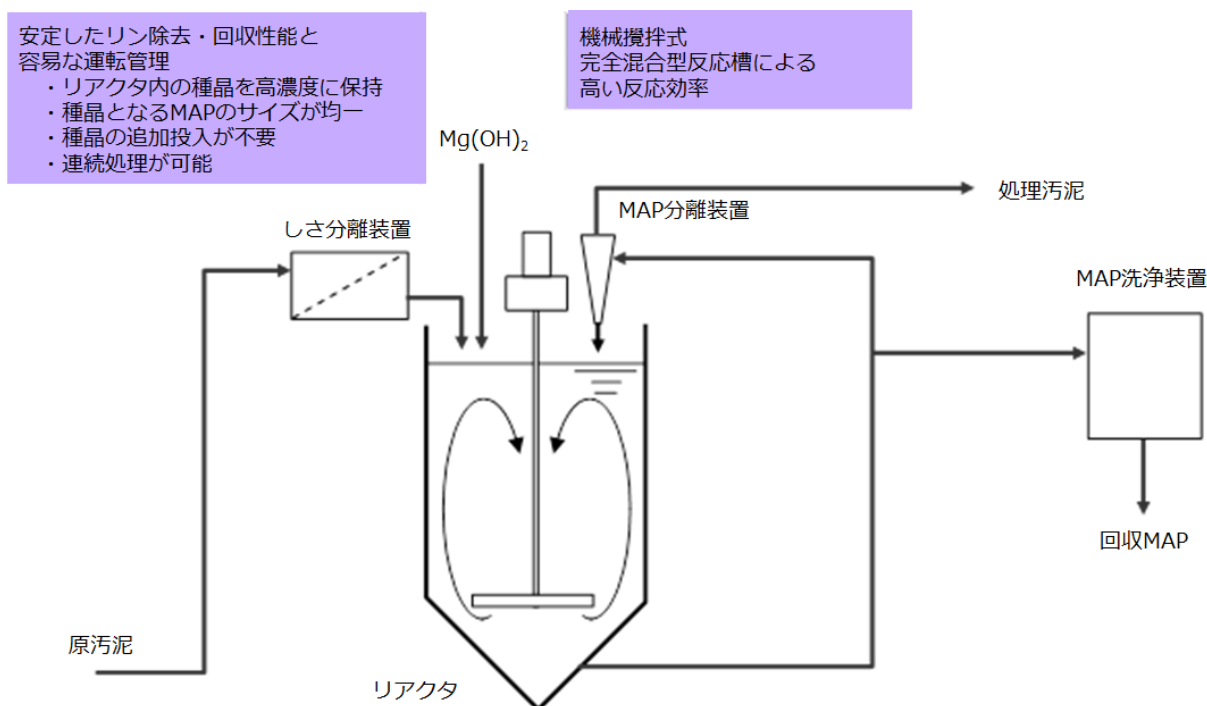


図 2-5 リン除去・回収装置の概略図

本装置の処理原液となる消化汚泥に対するリン除去・回収性能の目安は以下のとおりである。

- ・ $\text{PO}_4\text{-P}$ 除去率は 80%以上
- ・ T-P 除去率（＝リン回収率）は 30%以上（水処理で生物学的リン除去を行っている処理場の場合）

（2）安定したリン除去・回収性能と容易な運転管理

本技術は、リアクタ内に種晶を高濃度に保持することができ、同時に種晶となる MAP のサイズを均一に維持できることから、MAP 晶析反応に必要な種晶表面積が安定的に維持されることとなり、安定したリン除去・回収性能を発揮することが可能である。また、種晶の追加投入等の操作は不要であり、種晶濃度が所定の範囲になるよう、引抜き（回収）回数を設定するだけでよい。なお、引抜き工程においても、装置への流入を停止する必要は無く、常時連続処理が可能である。写真 2-5 にリン除去・回収装置の外観を示す。



写真 2-5 リン除去・回収装置の外観

§9 MAP 洗浄装置、貯留設備の概要・特徴

MAP 洗浄装置は、回収 MAP の資源利用価値向上の為、リン除去・回収装置で晶析・高濃度化された MAP を洗浄する装置である。洗浄・水切りした MAP はホップで一時貯留する。その特徴・概要は以下のとおりである。

- (1) 肥料利用に必要な洗浄機構を有する MAP 洗浄装置
- (2) 洗浄 MAP に適した機構を有するスクリーコンベヤ式水切り装置
- (3) 水切りした MAP を一時貯留する MAP 貯留ホップ

【解 説】

MAP 洗浄装置は、リン除去・回収装置から引き抜かれた MAP を洗浄および水切りする装置である。水切りした MAP は MAP 貯留ホップで一時貯留する。写真 2-6 に MAP 洗浄装置の外観を示す。

- (1) 肥料利用に必要な洗浄機構を有する MAP 洗浄装置

MAP 洗浄装置は、リン除去・回収装置から引き抜かれた MAP 中に残存している汚泥と MAP を高度に分離し、回収 MAP の純度を向上させる。リン除去・回収装置からの均一な粒径の MAP を濃縮する機構と適切な上昇流速と旋回流による水洗浄機能を有しており、MAP と混在している消化汚泥 SS 等を洗浄排除するものである。回収 MAP を肥料として利用するには、本洗浄装置による洗浄が必要である。

- (2) 洗浄 MAP に適した機構を有するスクリーコンベヤ式水切り装置

水切装置はスクリーコンベヤ方式の水切装置であり、洗浄装置底部から引き抜かれた MAP 粒子間の水を切るものである。水切り直後の MAP の含水率は、概ね 15～25%程度となる。

- (3) 水切りした MAP を一時貯留する MAP 貯留ホップ

水切後の MAP を一時貯留するものである。ホップ貯留期間中の自然乾燥により MAP の含水率を 10～15%程度に低減させる。この状態で搬出可能な場合は、本ホップより輸送車へ MAP を搬出する。更に MAP の水分を低減させるために後段に乾燥装置を設ける場合は、本ホップより乾燥装置へ MAP を供給する。

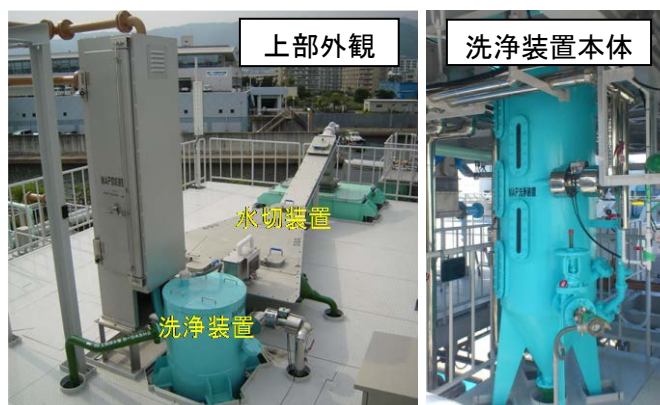


写真 2-6 MAP 洗浄装置の外観

§ 10 MAP 乾燥装置、乾燥 MAP 貯留設備の概要・特徴

回収 MAP の引渡し条件として、乾燥が必要な場合には、MAP 乾燥装置、乾燥 MAP 貯留設備を設ける。

- (1) MAP の性状に適した乾燥装置
- (2) 乾燥 MAP 貯留設備

【解 説】

MAP 乾燥・貯留設備は、洗浄・水切り後の MAP を乾燥し、貯留する設備である。

(1) MAP の性状に適した乾燥装置

洗浄後の回収 MAP を乾燥させる設備である。MAP はアンモニアと水和物を含むため、乾燥時に熱を加えすぎると変質する。約 60℃以下に品温管理が可能な乾燥装置を使用する。

MAP を乾燥することで、MAP のハンドリング性を向上させることができ、MAP の流通を容易にすると共に、肥料価値を向上させることが期待される。乾燥熱源としては、消化ガスの利用が可能である。写真 2-7 に MAP 乾燥装置の例を示す。



写真 2-7 MAP 乾燥装置の例

(2) 乾燥 MAP 貯留設備

乾燥 MAP を貯留する設備である。貯留方法は、ホップ貯留、フレキシブルコンテナバック（以下、フレコンと略記する）による貯留等が考えらる。乾燥 MAP への雨水の浸入を防止するとともに、MAP 回収量と引き取り頻度・量とのバランスを考慮した容量を確保する。写真 2-8 にフレコンに投入した乾燥 MAP の例を、写真 2-9 に乾燥 MAP 保管倉庫の例を示す。



写真 2-8 フレコンに投入した乾燥 MAP の例



写真 2-9 乾燥 MAP 保管倉庫の例

§ 11 回収 MAP の特徴

回収 MAP の特徴は以下のとおりである。

- (1) 回収 MAP の形状は均一な丸みを帯びた顆粒である
- (2) 化成肥料登録が可能な組成である
- (3) 肥料原料に適した性状である

【解 説】

- (1) 回収 MAP の形状は均一な丸みを帯びた顆粒である

リン除去・回収装置での完全混合による均一な晶析反応の進行と連続 MAP 濃縮循環機構による MAP 種晶どうしの衝突磨耗効果により、回収 MAP は粒径が 100～700 μm 程度の丸みを帯びた均一な（乳）白色の（顆粒状）結晶（体）になる。

- (2) 化成肥料登録が可能な組成である

回収 MAP の成分は、化成肥料の公定規格を満足する品質が確保される。また、植物の生育上有害とならないことが植害試験の結果で確認されている。なお、回収した MAP は化成肥料として登録実績がある。

- (3) 肥料原料に適した性状である

回収 MAP は肥料原料として適していることが確認されている。**写真 2-10** に回収 MAP の例を示す。また、化成肥料原料としての利用や（**写真 2-11** 試作肥料例 A（チッ素-リン酸 - カリ-マグ＝8-8-8-1））、複合肥料（ペレット）肥料原料としても利用可能（**写真 2-12** 試作肥料例 B（チッ素-リン酸 - カリ＝12-3-3））である。



写真 2-10 回収 MAP 例



写真 2-11 試作肥料例 A



写真 2-12 試作肥料例 B

§ 12 技術の適用条件

本技術は下水処理場における嫌気性消化汚泥に含まれるリンの除去・回収に適用する。本技術の適用に際しては、消化汚泥中のリン酸態リン濃度が目安として 50mg/L 以上であることを基本とする。

【解 説】

本技術は、表2-1に示すように、下水処理場における嫌気性消化汚泥に含まれるリンの除去・回収に適用する。本技術の適用に際しては、消化汚泥中のリン酸態リン濃度が50mg/L以上であることを基本とする。リン酸態リン濃度が低い場合はリン除去・回収率が低下し、本技術導入のメリットが小さくなることによる。本技術の導入が効果的である処理場は、消化汚泥中のリン酸態リン濃度が高い処理場、例えば、流入リン濃度の高い傾向にある分流式の処理場、嫌気好気運転等生物学的リン除去を行っている処理場、消化槽の新設や外部からバイオマス等を受入れる、等により返流水リン負荷の増大に対応する必要がある処理場、などである。その他、基本条件に適合する処理場であって、処理水のリン除去が必要な総量規制区域にあり、凝集剤添加によるリン除去を実施しているか、実施する計画となっている場合、本技術の導入により凝集剤使用量や汚泥発生量が減少する効果を期待できる。また、MAPによる機器や配管のスケールトラブルを抱える処理場では、本技術の導入によりMAP由来のスケールトラブルの低減が期待できる。

本技術導入によって対応可能な処理場の課題の例と他の方式による対応との比較を表 2-2 に示す。なお、消化汚泥中に砂分が多い場合には、回収 MAP 中に砂分が混入する可能性があるため、消化汚泥中の砂分の濃度を把握し、必要により汚泥の除砂設備を設けることや、消化汚泥引抜き管位置を選択可能な場合は、砂分の少ない中層以上とすること、などを検討する。

表 2-1 本技術導入の基本適用条件

基本適用条件
消化槽を保有、または新規に設置する。
消化汚泥のリン酸態リン濃度が 50mg/L 以上ある。

表 2-2 本技術によって対応可能な処理場の課題の例と他の方式による対応との比較

課題	本技術による対応	従来法（脱水ろ液からのMAP 法）による対応	返流水への凝集剤添加による対応
資源化可能な形態でリンを除去・回収したい ※流入下水に対する回収率は水処理で生物学的リン除去を適用する場合の目安の値	○	○	×
	流入下水に対する回収率 約 30% (従来法より約 30%向上)	流入下水に対する回収率 約 10~20%	
返流水のリン負荷を低減したい	○	○	○
リン除去用凝集剤の添加量を削減したい	○	○	×
汚泥脱水設備（機器・配管）のスケールトラブルを軽減したい	○	×	×
脱水汚泥処理固形物量を低減したい	○	×	× 凝集剤由来の汚泥が増加
し尿やバイオマスの受入により増大するリン負荷を削減したい	○	○	○
新規に消化設備を導入する	○	○	○

§13 導入シナリオ例

本技術の導入目的の例と期待できる導入効果を示す。

- (1) 消化設備を有している処理場において、返流水リン負荷の削減のために導入する。
 - 1) 返流水リン負荷が減少し、水処理でのリン除去が安定化するとともに、回収リンの資源化が可能となる。水処理系でリン除去用凝集剤を使用している場合は凝集剤使用量を削減できる。
 - 2) 消化汚泥中の自然発生 MAP の一部が回収されることにより汚泥固形物処理量が削減される。
 - 3) 汚泥脱水設備のスケールトラブルが軽減されるので、スケール防止等のための維持管理費が減少する。
- (2) 今後新規に消化設備を導入する計画がある処理場や、消化設備へ外部バイオマス受け入れを計画している処理場において、増加する返流水リン負荷を削減するために本技術を導入する。
 - 1) 消化槽からのリン負荷増大に伴う返流水リン負荷の増大等を防止する。
 - 2) 汚泥脱水設備においてスケールトラブル発生等のリスクを軽減する。

【解 説】

本技術の導入目的と期待できる導入効果を以下に解説する。

- (1) 消化設備を有している処理場において、返流水リン負荷削減のために本技術を導入する。
 - 1) 返流水リン負荷を 80%以上低減することによって、水処理でのリン除去が安定化する。除去されたリンはMAP 結晶として回収され、化成肥料等としての資源化利用が可能であるため、リン除去汚泥が発生しない（従来法であるろ液 MAP 法でも同様である）。また、水処理系でリン除去用凝集剤を使用している場合は返流水リン負荷削減によって水処理系の流入リン濃度が低下するため、凝集剤使用量が削減され、相当分の凝集汚泥発生量が減少する。

放流水質確保のため生物学的リン除去等を採用している処理場では、消化によって可溶化したリンが水処理系に戻ることによって水処理系のリン負荷が高まり、処理の不安定化などが懸念される。そのため返流水リン負荷低減の目的で凝集剤を添加している処理場等において、改築更新の際などに消化汚泥からリンを除去・回収する本技術を適用することが考えられる。この場合は、返流水のリン負荷が低減することによる水処理でのリン除去運転の安定化効果は同等であるが、回収 MAP の資源化利用に伴い、リン除去凝集汚泥が発生しないこととなり、次の 2) の効果も加わって、脱水処理以降の汚泥処理固形物量が減少する。

特に、他処理場の汚泥を受け入れている場合は返流水リン負荷が水処理の規模に比べて大きくなるため、本技術適用の効果も大きくなる。

2) 消化汚泥中で自然発生している MAP の一部が除去・回収されることで、消化汚泥固形物の数%に相当する汚泥固形物量が除去される。このことにより、本法ではろ液 MAP 法を適用する場合に比べ脱水処理の低コスト化および脱水ケーキ量の削減が期待される。また、脱水工程において無機凝集剤と高分子凝集剤を併用している場合には、消化汚泥中の溶解性 $\text{PO}_4\text{-P}$ と凝集剤が反応して生成される新たなリン由来の汚泥の発生量も減少すると考えられる。

これらの汚泥量の減少によって、汚泥脱水設備の運転や脱水ケーキの輸送および処分、ならびに汚泥焼却に関するコスト、エネルギー消費量、温室効果ガス排出量の削減が期待できる。

3) 消化汚泥からリンを除去・回収することで、後段の消化汚泥移送管、脱水設備での MAP スケールの生成が抑制されることが実証により確認されている。スケール付着対策として配管や脱水設備の洗浄等を実施している処理場では、本技術の適用によりその頻度が低減するため、維持管理費の低減および運転安定性の向上が期待できる。

(2) 今後新規に消化設備を導入する計画がある処理場や、消化設備へ外部バイオマス受け入れを計画している処理場において、増加する返流水リン負荷を削減するために本技術を導入する。

1) 今後新規に消化設備を導入する場合や、既存の消化設備にリンを含む外部バイオマスを導入する場合、返流水のリン負荷が増大する。本技術を導入することで返流水リン負荷増大を防止することが可能となる。

本技術を導入して対応する場合と、他の方法によって対応する場合を比較すると、凝集剤によって対応する場合は汚泥量の増加に伴う課題が生じ、ろ液 MAP 法によって対応する場合はリン除去効果が多少低めであり、MAP 回収量の点で劣ることから、本技術による対応が優れており、消化工程の導入や外部バイオマス受け入れのメリットをより多く享受できることとなる。

2) 消化工程導入により汚泥処理設備での MAP スケールトラブルが発生するリスクがある。本技術を導入することでリスクを低減することが可能となる。

凝集剤添加で対応する場合、汚泥貯留槽など、添加位置を適切に選択することによって高い MAP スケール防止効果を得ることができると考えられる。本技術はろ液 MAP 法では対応困難であった脱水機の MAP スケール防止が可能であるが、消化槽から本技術までの間はスケールが付着する可能性が残るため、わずかながら、スケール防止のための配管洗浄は必要である。

第2節 実証研究に基づく評価の概要

§ 14 技術の評価項目

本技術の実証研究において評価された項目は以下に示すとおりである。

- (1) コスト、エネルギー消費量および温室効果ガス排出量（施設規模との関係）
- (2) 汚泥固形物量削減効果
- (3) リン除去・回収機能
- (4) その他の効果
- (5) ろ液 MAP 法との対比による LCC、エネルギー消費量および温室効果ガス排出量

【解 説】

新技術の導入促進に際しては、各技術の性能指標を定量的に比較し、性能の優れた技術を選定できるように、技術の目的に応じて、性能指標の評価項目、評価方法並びに評価結果を設定、提示することが重要である。本項では、本技術による返流水中のリン除去・回収における性能指標の評価項目および評価方法について解説する。

(1) 経済性、エネルギー消費量および温室効果ガス排出量（施設規模との関係）

本技術導入に伴うコスト、エネルギー消費量、温室効果ガス排出量について試算を行い、施設規模との関係を示す。算出に用いる各原単位については第3章に記載する。なお、MAP 乾燥装置はこれらの試算には含まれない。

1) コスト（建設費、維持管理費、廃棄費、LCC）

①建設費

本技術の建設に関わる費用として、機械設備・電気設備・土木設備（基礎）について算出。

②維持管理費

本技術の維持管理に関わる費用として、薬品費・動力費・消耗品・オーバーホール等定期点検費および日常の点検に関わる人件費等について算定。

③本技術適用による他設備への効果

i) 汚泥固形物量の低減

本技術では消化汚泥中の自然発生 MAP の一部を除去・回収するため、消化汚泥固形物量が減少する。リン除去回収装置の有無による脱水機への固形物投入負荷量の違いを比較し、脱水ケーキ固形物負荷量の減少量として評価する。評価方法の詳細は資料編1項（4）に示す。

固形物量の減少に伴い汚泥脱水、焼却で固形物量減少分相当の維持管理費が削減されるので、その額を算定し本技術適用による低減効果として加味する。

ii) リン除去凝集汚泥の削減

返流水リン負荷対策として凝集剤を使用している処理場では、本技術適用により返流水リン負荷がカットされるため、リン除去用凝集剤使用量が減少する。これに伴ってリン除去凝集汚泥発生量も減少するので、薬品費の他に脱水・焼却の維持管理コストも減少することになる。

これらの減少額を算定し本技術適用による削減効果として加味する。

④廃棄費

本技術導入に伴う建設費に係数を乗じて、廃棄費を算出する。

⑤LCC

建設費、維持管理費、廃棄費を合算し、LCC とする。

2) エネルギー消費量

本技術の稼働時に使用される動力・薬品等に由来するエネルギー消費量を算出する。

また、前記1) ③ i)、ii) における本技術適用による消化污泥固形物量削減、リン除去用凝集剤使用量減少とこれに伴う凝集污泥量削減を考慮する場合は、これらに起因するエネルギー消費削減量を算定し、本技術適用による削減効果として加味する。

3) 温室効果ガス排出量

本技術の稼働時に使用される動力・薬品等に由来する温室効果ガス発生量、およびリン除去・回収設備の建設・廃棄に伴う温室効果ガス排出量を算出する。

また、前記1) ③ i)、ii) における本技術適用による污泥固形物量削減、リン除去用凝集剤使用量減少とこれに伴う凝集污泥量削減を考慮する場合は、これらに起因する温室効果ガス削減量について算定し、本技術適用による削減効果として加味する。

4) リン除去・回収量当りのコスト、エネルギー消費量、温室効果ガス排出量への換算

本技術と他技術との比較を行うため、1)、2)、3) で試算したコスト（建設費、維持管理費、LCC）、エネルギー消費量、温室効果ガス排出量を除去・回収リンの単位量当りの値に換算する。

(2) 污泥固形物量削減効果

本技術では消化污泥中の自然発生 MAP の一部を除去・回収するため、消化污泥固形物量が減少する。リン除去回収装置の有無による脱水機への固形物投入負荷量の違いを比較し、脱水ケーキ固形物負荷量の減少量として評価する。評価方法の詳細は資料編1項(4)に示す。

(3) リン除去・回収機能

リン除去機能は本技術導入前後での脱水ろ液 T-P による返流負荷量を比較し、返流負荷の縮減効果进行评估する。またリン回収については本技術に流入する消化污泥 T-P 量と本技術処理後の污泥 T-P 量の差から回収効果进行评估する。評価方法の詳細は資料編1項(4)に示す。

(4) その他の効果

1) スケールトラブルの低減

リン除去回収運転を行った場合とリン除去回収しないバイパス運転を行った場合で、テストピースおよびテスト配管を用いて、スケール物質の付着状況の違いを比較し評価する。

2) 肥料原料として適した性状の MAP の回収

第三者機関において、回収 MAP の成分分析、植害試験を実施し、成分が化成肥料公定規格を満

たすことを確認し、植物の生育の害にならないことを確認する。そして、回収 MAP を化成肥料として肥料登録を行う。また、肥料メーカーにて肥料試作を行い、肥料の原料利用として問題無いことを確認する。これらの確認および肥料登録によって回収 MAP が肥料原料として適していることを評価する。

(5) ろ液 MAP 法との対比による LCC、エネルギー消費量および温室効果ガス排出量の縮減効果

(2) で評価された本技術の T-P 除去率と、ろ液 MAP 法の T-P 除去率（脱水ろ液リン負荷量の 70%と仮定^{※3}）に基づき、各々の技術を同一施設に適用した場合の LCC、エネルギー消費量および温室効果ガス排出量を算定して比較し、本技術による縮減率を評価する。評価方法の詳細は第3章第2節を参照。

※3 出典：「下水道におけるリン資源化の手引き」（平成 22 年 3 月 国土交通省都市・地域整備局）

§ 15 技術の評価結果

実証研究に基づく本技術の評価結果は以下のとおりである。

- (1) 本技術導入に伴うコスト（建設費、維持管理費、LCC）、エネルギー消費量、温室効果ガス排出量が算定された。
- (2) 自然発生 MAP の一部を除去・回収することで、汚泥固形物量が平均 3.3%減少する。
- (3) 脱水ろ液として返流する T-P の 85%以上を除去することができ、従来法よりリン回収量が 50%以上増加する。
- (4) その他の効果
 - 1) 本技術で処理後はスケール付着の低減効果が認められる。
 - 2) 本技術で回収された MAP は肥料原料として適した性状であると認められる。
- (5) ろ液 MAP 法に対する縮減率は、LCC で 19.4%、エネルギー消費量で 45.2%、温室効果ガス排出量で 67.4%と推定される。

【解 説】

- (1) コスト（建設費、維持管理費、LCC）、エネルギー消費量、温室効果ガス排出量

1) 算出条件

実証結果等を基に、本技術の施設規模ごとの算出条件を表 2-3 のとおり設定した。

表 2-3 本技術のコスト、エネルギー消費量、温室効果ガス排出量の算出条件

項目	ケース 1	ケース 2	ケース 3
日最大消化汚泥量 (m ³ /日) (建設費算出用)	125	200	250
日平均消化汚泥量 (m ³ /日) (維持管理費算出用)	100	160	200
消化汚泥性状 ・ 汚泥濃度(TS) ・ T-P 濃度 ・ PO ₄ -P 濃度 ・ 自然発生 MAP-P 濃度	・ 1.7% ・ 600mg/L (実証による) ・ 200mg/L (実証による 水処理：生物学的リン除去) ・ 60mg/L (実証による)		
リン除去・回収設備 ・ T-P 除去率 ・ PO ₄ -P 除去率 ・ 返流水 T-P 削減率 ・ Mg 添加率 ・ 固形物削減率	・ 35% (実証による) ・ 90% (実証による) ・ 80% ・ 1.0 (モル比 実証による) ・ 3% (実証による)		
脱水設備 ・ ケーキ含水率 ・ 固形物回収率 ・ 薬注率 ・ 薬品溶解濃度 ・ 洗浄水量	・ 80% ・ 95% ・ 1.5% (高分子凝集剤 1 液調質) ・ 0.2% ・ 15m³/日		
リン除去凝集剤添加設備 ・ 凝集剤 ・ 添加モル比 ・ 添加 Al に対する汚泥発生量	・ PAC ・ 1.5 ・ 5 倍 (平成 6 年 高度処理マニュアル 社団法人日本下水道協会)		

2) LCC、エネルギー消費量、温室効果ガス排出量の試算結果

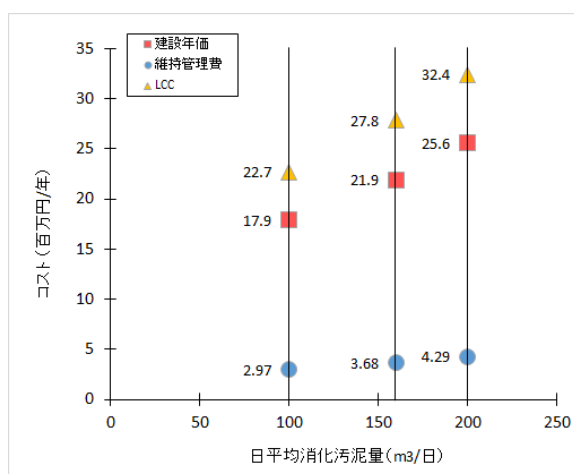
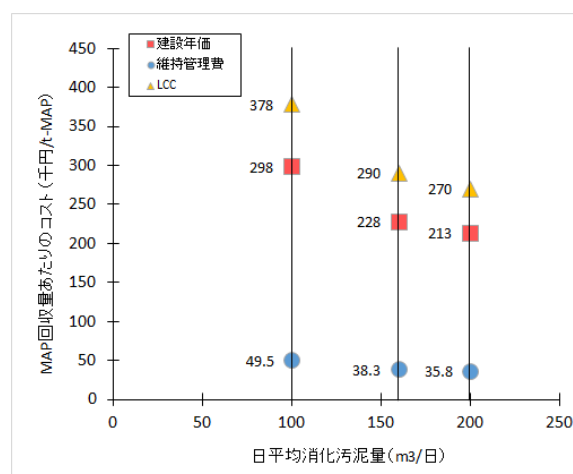
表 2-4 にリン除去・回収技術単独での試算結果を、表 2-5 に汚泥固形物削減効果を見込む場合の試算結果を示す。なお、試算内訳詳細については資料編 2 項に示す。

MAP 回収量あたりの試算結果について、表 2-4（リン除去・回収技術単独）、表 2-5（汚泥固形物削減効果を見込む場合）どちらの場合においても、スケールメリットが得られる結果となった。

表 2-4 LCC、エネルギー消費量、温室効果ガス排出量（リン除去・回収技術単独）

項目	単位	ケース 1	ケース 2	ケース 3
建設年価	百万円/年	17.9	21.9	25.6
維持管理費	百万円/年	2.97	3.68	4.29
LCC	百万円/年	22.7	27.8	32.4
供用段階のエネルギー消費量	GJ/年	1,197	1,284	1,406
温室効果ガス排出量	t-CO ₂ /年	91.2	101.4	112.6
MAP 回収量	t-MAP/年	60	96	120
建設年価／MAP 回収量	千円/t-MAP	298	228	213
維持管理費／MAP 回収量	千円/t-MAP	49.5	38.3	35.8
LCC／MAP 回収量	千円/t-MAP	378	290	270
エネルギー消費量／MAP 回収量	GJ/t-MAP	20.0	13.4	11.7
温室効果ガス排出量／MAP 回収量	t-CO ₂ /t-MAP	1.52	1.06	0.94

以下に各試算結果のグラフを示す。

図 2-6 各ケースのコスト
（リン除去回収技術単独）図 2-7 各ケースの MAP 回収量あたりの
コスト
（リン除去回収技術単独）

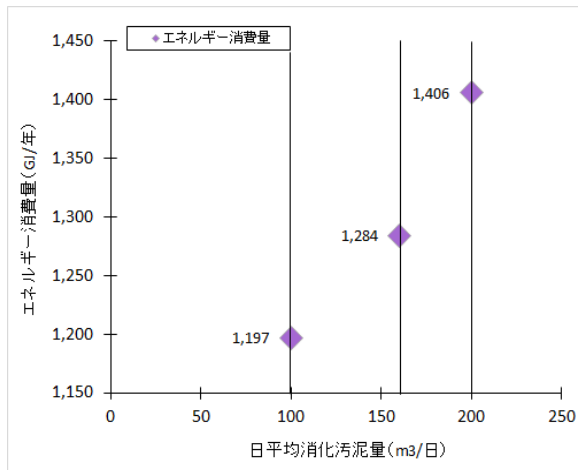


図 2-8 各ケースのエネルギー消費量
(リン除去回収技術単独)

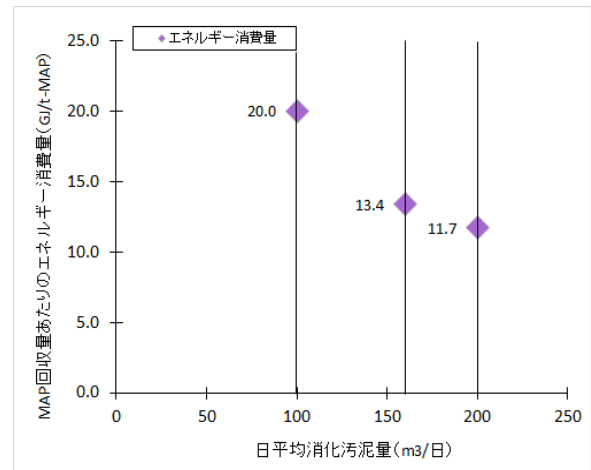


図 2-9 各ケースの MAP 回収量あたりの
エネルギー消費量
(リン除去回収技術単独)

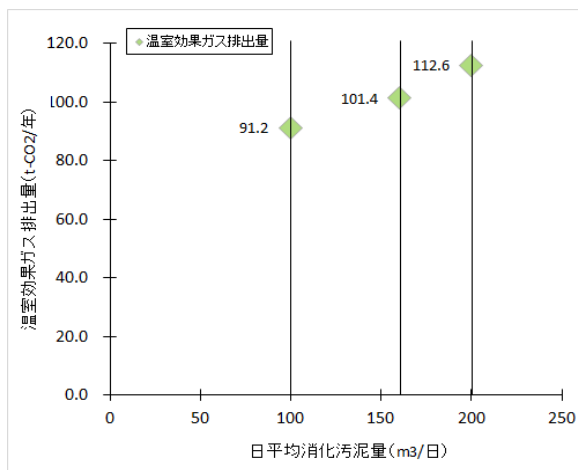


図 2-10 各ケースの温室効果ガス排出量
(リン除去回収技術単独)

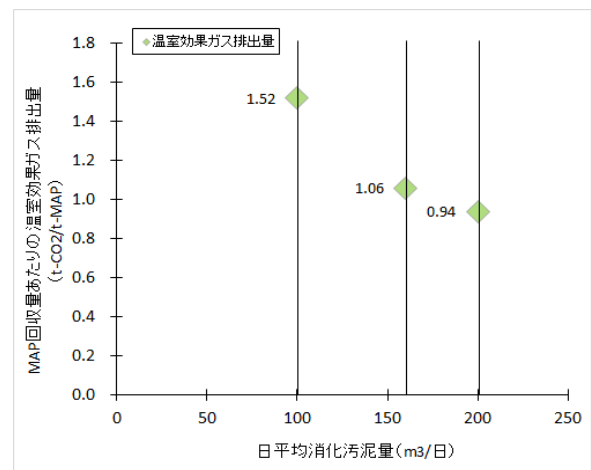


図 2-11 各ケースの MAP 回収量あたりの
温室効果ガス排出量
(リン除去回収技術単独)

表 2-5 LCC、エネルギー消費量、温室効果ガス排出量（汚泥固形物削減効果を見込む場合）

項目	単位	ケース 1	ケース 2	ケース 3
建設費年価	百万円/年	17.9	21.9	25.6
維持管理費年価	百万円/年	0.690	0.590	0.720
LCC 年価	百万円/年	20.4	24.7	28.9
供用段階のエネルギー消費量	GJ/年	843.2	718.1	698.0
温室効果ガス排出量	t-CO ₂ /年	50.2	35.8	30.7
MAP 回収量	t-MAP/年	60	96	120
建設年価／MAP 回収量	千円/t-MAP	298	228	213
維持管理費／MAP 回収量	千円/t-MAP	11.5	6.15	5.80
LCC／MAP 回収量	千円/t-MAP	340	257	240
エネルギー消費量／MAP 回収量	GJ/t-MAP	14.1	7.48	5.82
温室効果ガス排出量／MAP 回収量	t-CO ₂ /t-MAP	0.837	0.373	0.256

以下に各試算結果のグラフを示す。

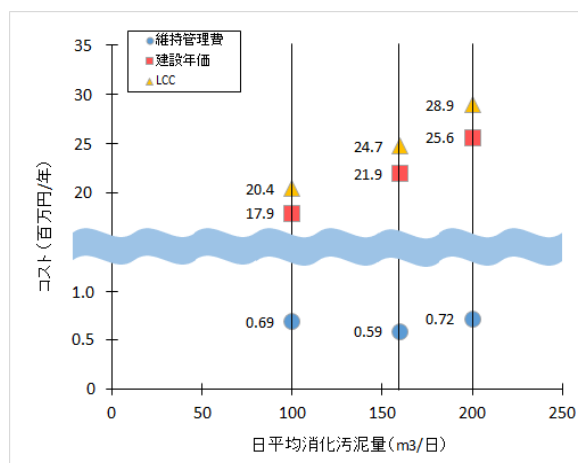


図 2-12 各ケースのコスト
(汚泥固形物量削減効果を見込む)

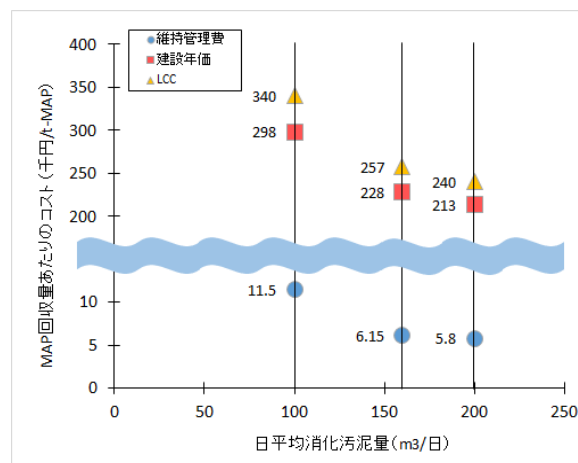


図 2-13 各ケースの MAP 回収量あたりのコスト
(汚泥固形物量削減効果を見込む)

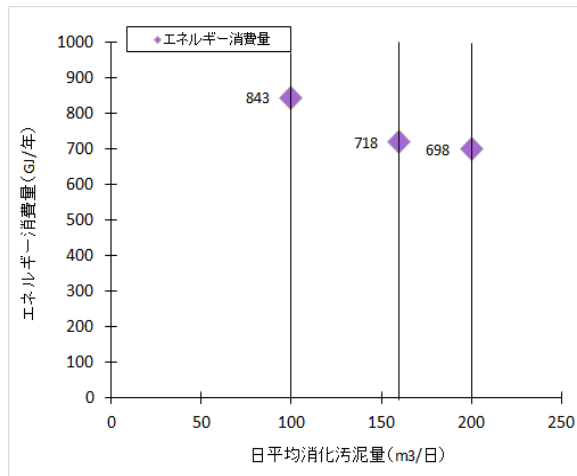


図 2-14 各ケースのエネルギー消費量
(汚泥固形物量削減効果を見込む)

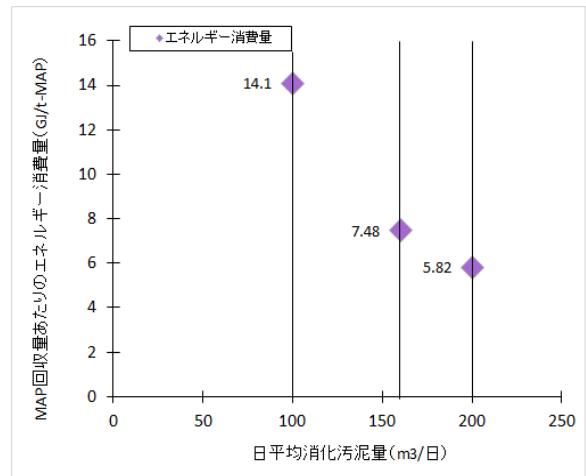


図 2-15 各ケースの MAP 回収量あたりの
エネルギー消費量
(汚泥固形物量削減効果を見込む)

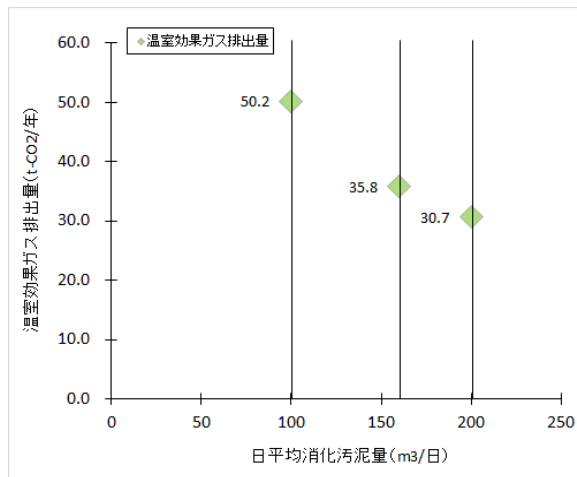


図 2-16 各ケースの温室効果ガス排出量
(汚泥固形物量削減効果を見込む)

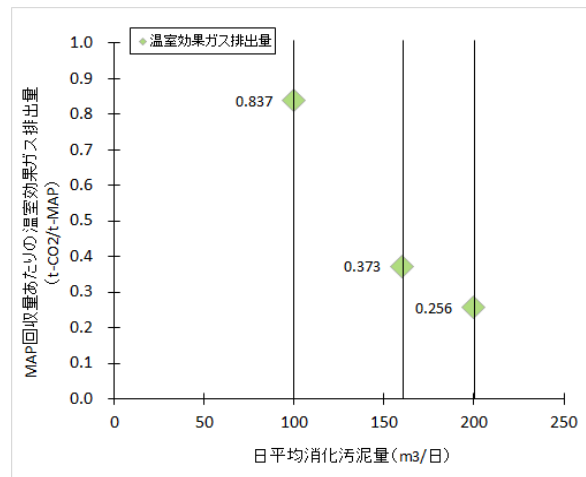


図 2-17 各ケースの MAP 回収量あたりの
温室効果ガス排出量
(汚泥固形物量削減効果を見込む)

(2) 自然発生 MAP の一部を除去・回収することで、汚泥固形物量が平均 3.3%減少する。

図 2-18 に実証試験での固形物削減率の経時変化を示す。

汚泥固形物中の自然発生 MAP (無機性リン) が除去されることにより、汚泥固形物量が平均 3.3%減少することが実証された (詳細資料編 1 項 (5) 参照)。

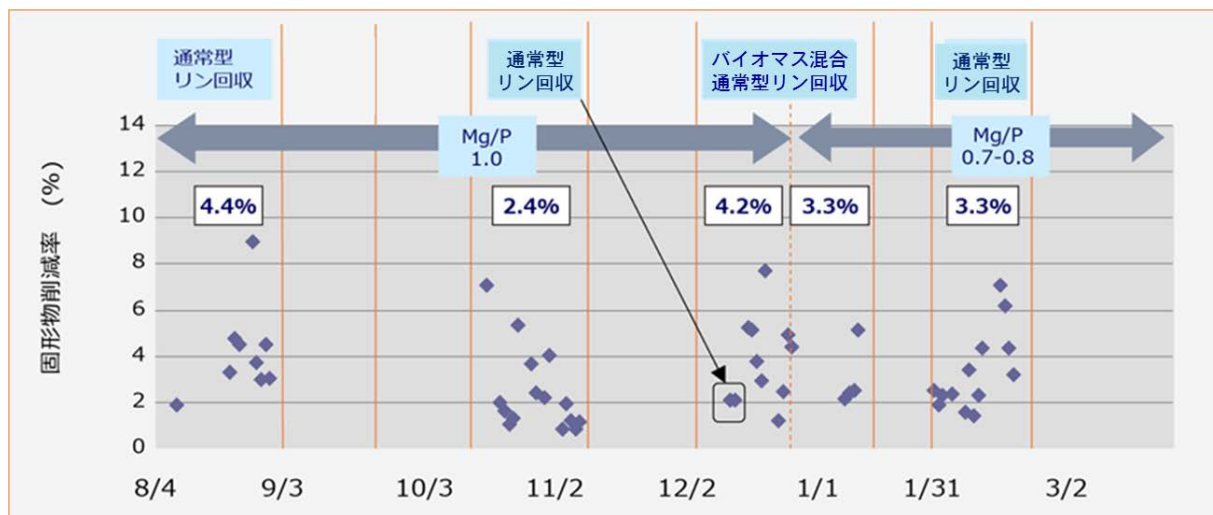


図2-18 固形物削減率

(3) 脱水ろ液として返流する T-P の 85%以上を除去することができ、従来法よりリン回収量が 50%以上増加する。

図 2-19 に実証試験での脱水ろ液の T-P 除去率の経時変化を示す。

Mg/P 比が 0.7~0.8 の場合、脱水ろ液 T-P 除去率が低下することがあったが、苛性ソーダを使用して pH 調整することで、脱水ろ液の T-P 除去率が改善された (詳細資料編 1 項 (5) 参照)。

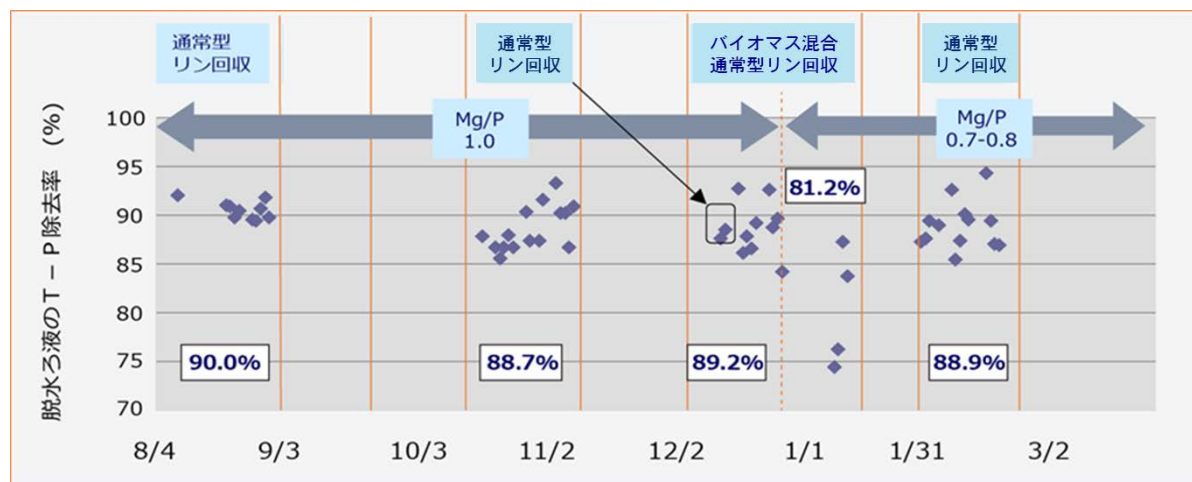


図2-19 脱水ろ液のT-P除去率

図 2-20 に実証試験での MAP 回収量増加率の経時変化を示す。なお、脱水ろ液 MAP 法の回収量は脱水ろ液リン負荷量の 70%※⁴として、本技術での回収量の増加率を実証結果より算出した。

ばらつきは大きいものの、Mg/P 比の増加に伴い概ね MAP 回収量増加率が増加する傾向が見られた。また、Mg/P 比が低い場合でも苛性ソーダにより pH 調整することで MAP 回収量増加率は約 50%以上増加する結果となった（詳細資料編 1 項（5）参照）。

※4 出展：「下水道におけるリン資源化の手引き」（平成 22 年 3 月 国土交通省都市・地域整備局）

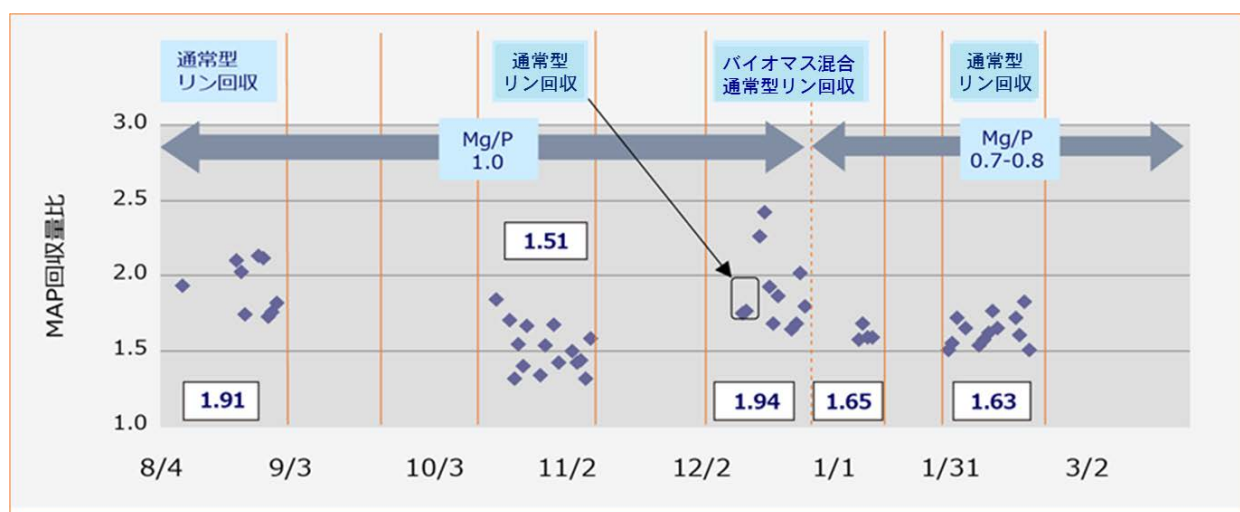


図2-20 MAP回収量増加率

（4）その他の効果

1）スケール付着の低減

実証におけるテスト配管、テストピースを用いたリン除去有無によるスケール付着量比較試験結果の代表例としてテスト配管を用いたスケール付着状況の違いを写真 2-13 に示す。

リン除去・回収装置をバイパスさせた運転で使用したテスト管には延べ 47 日間使用後に約 10mm にスケールが成長した（写真右）のに対し、リン除去・回収運転で使用したテスト配管には、延べ 119 日間使用後もスケール付着は確認されなかった（写真左）。よって、リン除去・回収処理によりスケール生成リスクが大幅に低減されることが確認された。このことから、消化汚泥処理施設（配管・貯留設備、汚泥脱水設備等）および返流水管等のスケール対策に要する作業が必要な処理場では、リン除去・回収装置の後段においては、その頻度、労力等が大幅に低減できる可能性が示唆される。

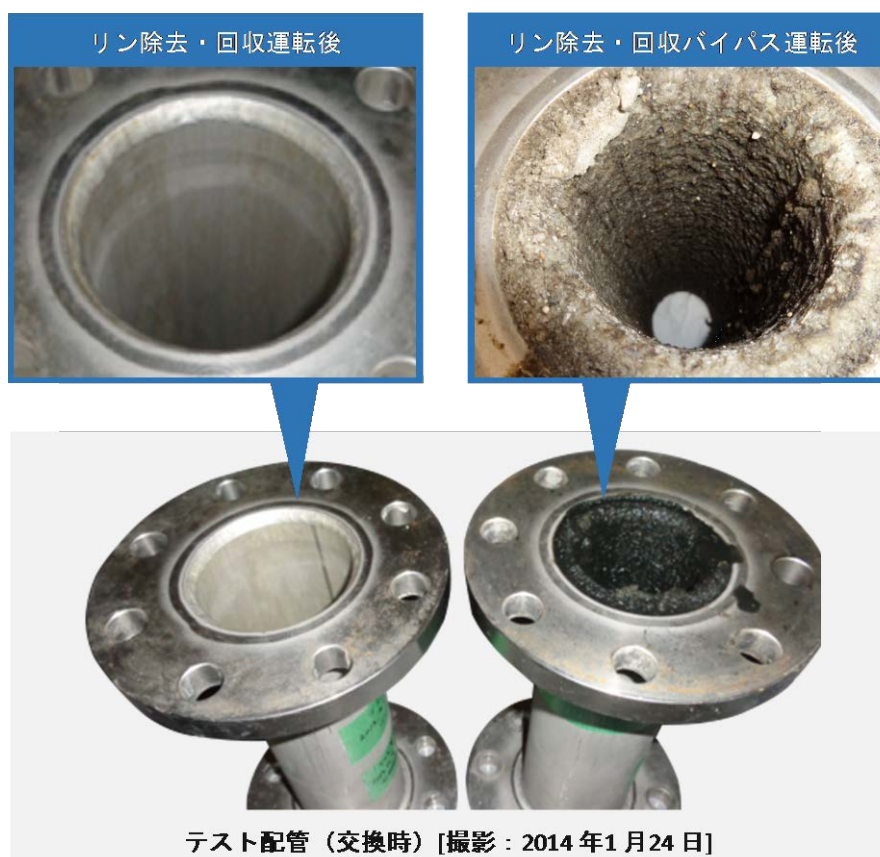


写真 2-13 テスト配管・リン除去有無でのスケール生成状況

2) 肥料原料として適した回収 MAP 性状

①肥効分析および重金属分析結果

分析結果は化成肥料の公定規格を満たした（公益財団法人 日本肥糧検定協会に依頼）。

②植害試験結果

こまつなの発芽と発芽後の生育への支障の有無およびその程度について、幼植物試験を実施した（公益財団法人 日本肥糧検定協会に依頼）。

その結果、有害物によると考えられる植物の生育上の異常症状は認められなかった。

③肥料試作評価

肥料メーカーによる肥料試作の結果、本技術回収 MAP は肥料原料として以下のような適した性状を持つことが確認された。

- i) 不快な臭いはなく、外観はさらさらの粉状で、非常に取り扱いしやすい性状。
- ii) 造粒時に異常は認められず、目的とする肥料が得られた。
- iii) 造粒物の物性は、回収 MAP 使用の場合と従来原料を使用した場合で同等。

④本技術回収 MAP は肥料登録された。

本技術実証施設で登録した肥料登録証を写真 2-14 に示す。

3

230204 1001

登 録 証

氏名又は名称及び住所

東京都港区港南一丁目7番18号

水ing株式会社

登 録 番 号	生第 100063号
登 録 年 月 日	平 成 2 6 年 4 月 2 5 日
登 録 の 有 効 期 限	平 成 2 9 年 4 月 2 4 日
肥 料 の 種 類	化成肥料
肥 料 の 名 称	神戸MAP肥料1号

保 証 成 分 量 (%)	アンモニア性窒素	4.4
	く溶性りん酸	23.0
	く溶性苦土	12.7

そ の 他 の 規 格 普通肥料の公定規格中化成肥料の「含有を許される有害成分の最大量」及び「その他の制限事項」のとおり。

肥料取締法第7条の規定に基づき上記のとおり登録したことを証する。

平 成 2 6 年 4 月 2 5 日

農林水産大臣 林 芳 正



写真 2-14 肥料登録証

(5) ろ液 MAP 法に対する縮減率は、LCC で 19.4%、エネルギー消費量で 45.2%、温室効果ガス排出量で 67.4%と推定される。

汚泥固形物量削減に伴う脱水・焼却における維持管理費の削減効果を加味した場合のろ液 MAP 法との LCC 比較結果を表 2-6 に示す。比較計算方法、算出条件については第 3 章第 2 節を参照されたい（概ね表 2-3 のケース 2 に相当する）。

表 2-6 より、すべての項目において縮減効果が見込まれ、LCC における縮減率は 19.4%となった。特に維持管理費については、汚泥固形物量削減に伴う脱水・焼却における維持管理費の削減効果を加味することで 0.79 百万円/年となり、ろ液 MAP 法（4.75 百万円/年）と比べて 83.4%縮減される結果となった。

表 2-6 ろ液 MAP 法との LCC 比較結果

項目	単位	本技術	ろ液 MAP 法	増減率
建設費年価	百万円/年	22.83	24.91	-8.35%
リン除去回収技術単独の維持管理費年価	百万円/年	3.73	4.75	-10.3%
汚泥固形物量削減に伴う脱水・焼却設備の維持管理費削減分	百万円/年	-2.94	—	—
廃棄費年価	百万円/年	2.28	2.49	-8.35%
合計（LCC）	百万円/年	25.90	32.15	-19.4%

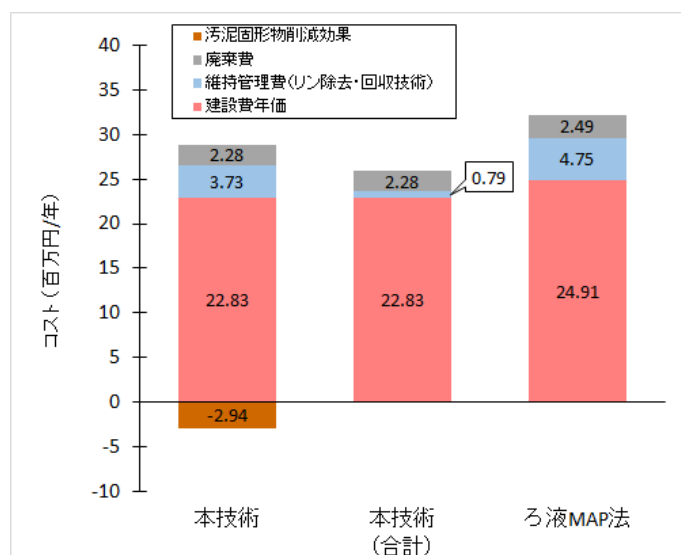


図 2-21 ろ液 MAP 法との比較結果（コスト）

また、本技術とろ液 MAP 法とのエネルギー消費量の比較結果を表 2-7 に、温室効果ガス排出量の比較結果を表 2-8 に示した。

本技術はろ液 MAP 法に比べてエネルギー消費量は 7.71%増大する結果となった。しかし、汚泥固形物量削減に伴う脱水・焼却におけるエネルギー消費量の削減効果を加味することで、ろ液 MAP 法と比べて 45.2%縮減される結果となった。

温室効果ガス排出量についても 5.40%増大する結果となったが、汚泥固形物量削減に伴う脱水・焼却における温室効果ガス排出量の削減効果を加味することで、ろ液 MAP 法と比べて 67.4%縮減される結果となった。

表 2-7 ろ液 MAP 法とのエネルギー消費量比較結果

項目	単位	本技術	ろ液 MAP 法	増減率
リン除去回収技術単独のエネルギー消費量	GJ/年	1,181	1,097	7.71%
汚泥固形物量削減に伴う脱水設備のエネルギー削減分	GJ/年	-206	—	—
汚泥固形物量削減に伴う焼却設備のエネルギー削減分	GJ/年	-374	—	—
合計	GJ/年	601	1,097	- 45.2%

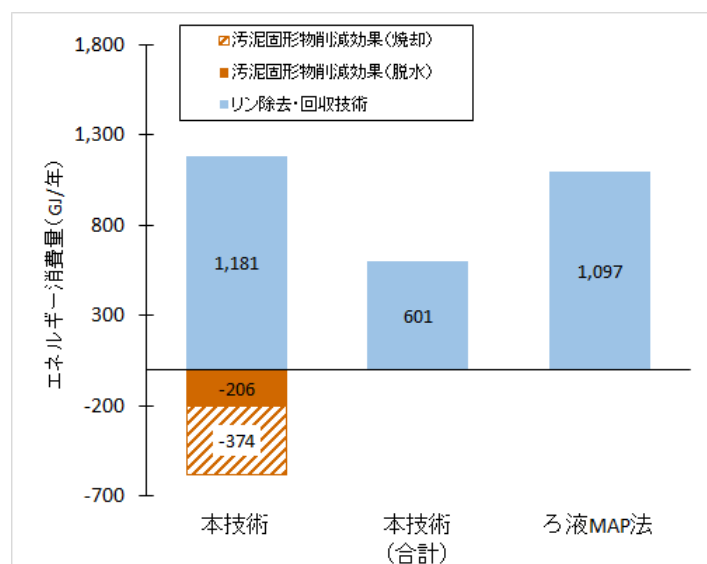


図 2-22 ろ液 MAP 法との比較結果(エネルギー消費量)

表 2-8 ろ液 MAP 法との温室効果ガス排出量の比較

項目	単位	本技術	ろ液 MAP 法	増減率
リン除去回収技術単独の 温室効果ガス排出量	t-CO ₂ /年	79.23	75.17	5.40%
設備の建設に伴う温室効果ガス排出量	t-CO ₂ /年	19.07	18.09	2.75%
設備の廃棄に伴う温室効果ガス排出量	t-CO ₂ /年	0.49	0.47	4.26%
汚泥固形物量削減に伴う脱水設備の 温室効果ガス排出削減分	t-CO ₂ /年	-8.51	—	—
汚泥固形物量削減に伴う焼却設備の 温室効果ガス排出削減分	t-CO ₂ /年	-59.6	—	—
合計	t-CO ₂ /年	30.68	94.2	-67.4%

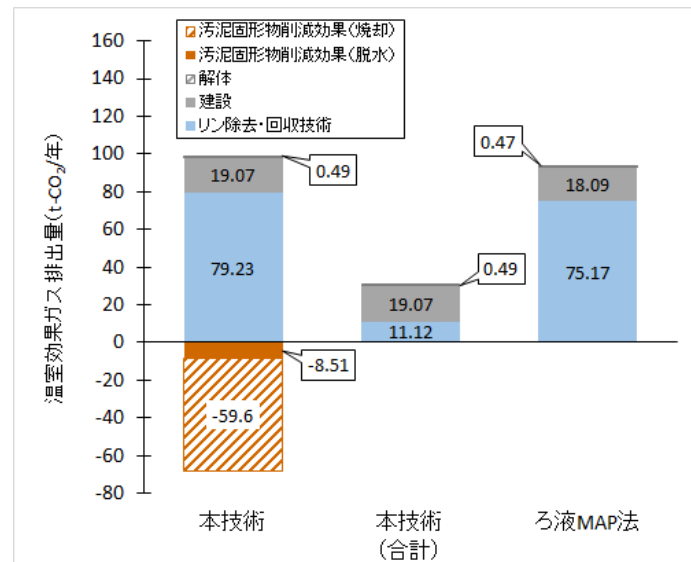


図 2-23 ろ液 MAP 法との比較結果（温室効果ガス排出量）