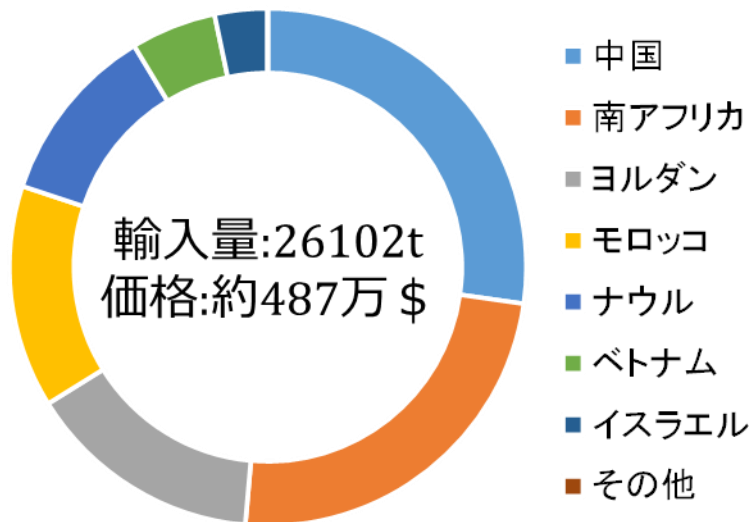


国内での資源循環への貢献を 目的とした排水からの リン析出・回収技術の開発

鳥取大学 工学部 社会システム土木系学科

准教授 高部 祐剛

背景 | 下水を対象としたリンの回収



- 主に肥料として消費
- 世界的に偏在している
- 日本では全量を輸入に依存

囲込が行われた場合
国内供給が不安定

図 リン鉱石輸入率(2017年)

出典：独立行政法人石油天然ガス・
金属鉱物資源機構



リン鉱石輸入量の約10%を含有¹⁾する
下水からのリン回収が試みられ、肥料利用として期待

背景 | 下水処理場におけるリンのフロー

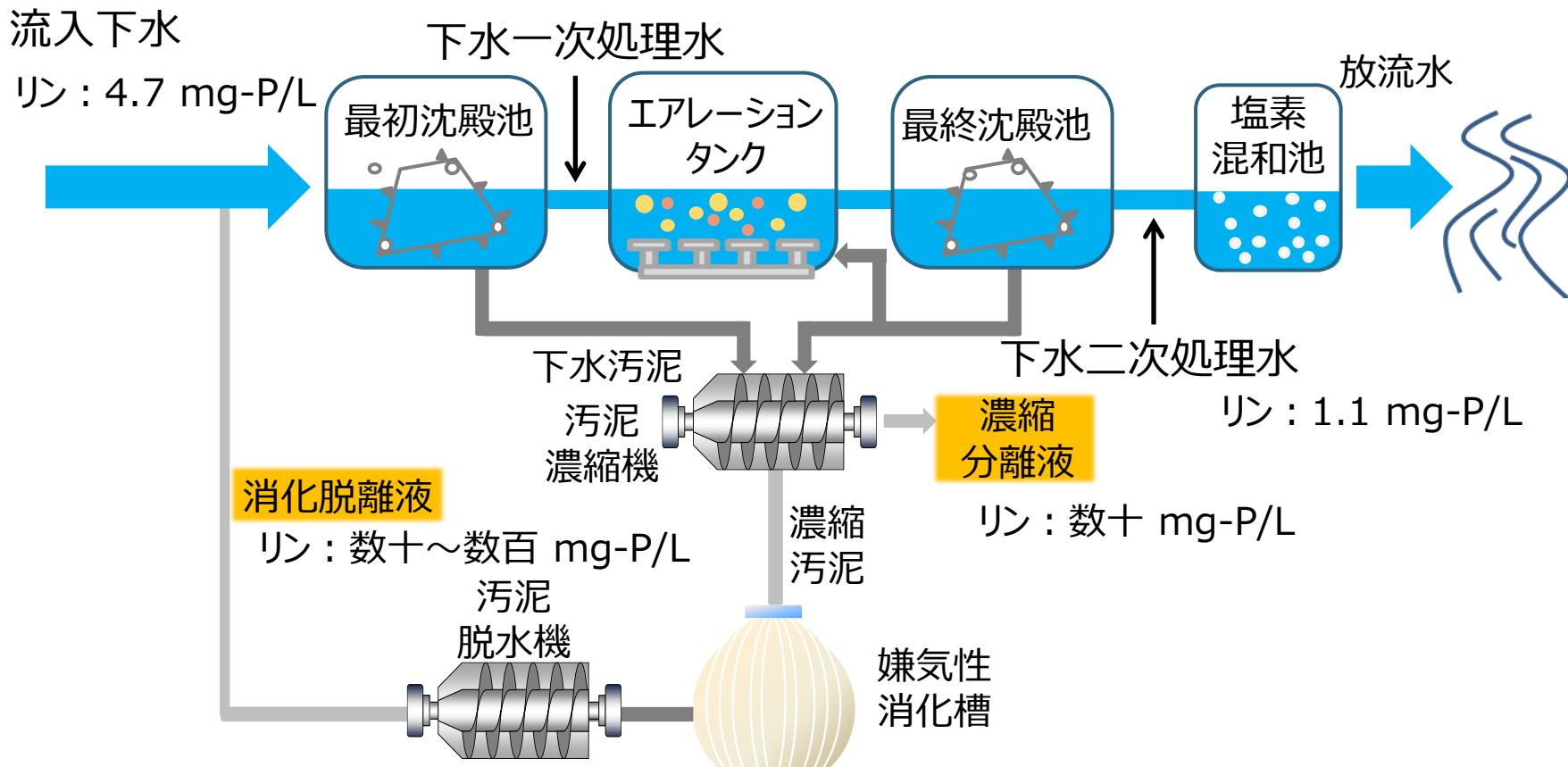


図 下水処理 (標準活性汚泥法) フロー (流入下水、下水二次処理水での窒素リン濃度は、下水道統計¹⁾記載のデータより、全国平均を算出)

背景 | 化学的凝集法によるリン回収

下水にアルカリ剤と種晶を添加することで、
下水中のリンが重金属（カルシウムやマグネシウム）と反応・結晶化
一部の下水処理場で、実機が稼働中

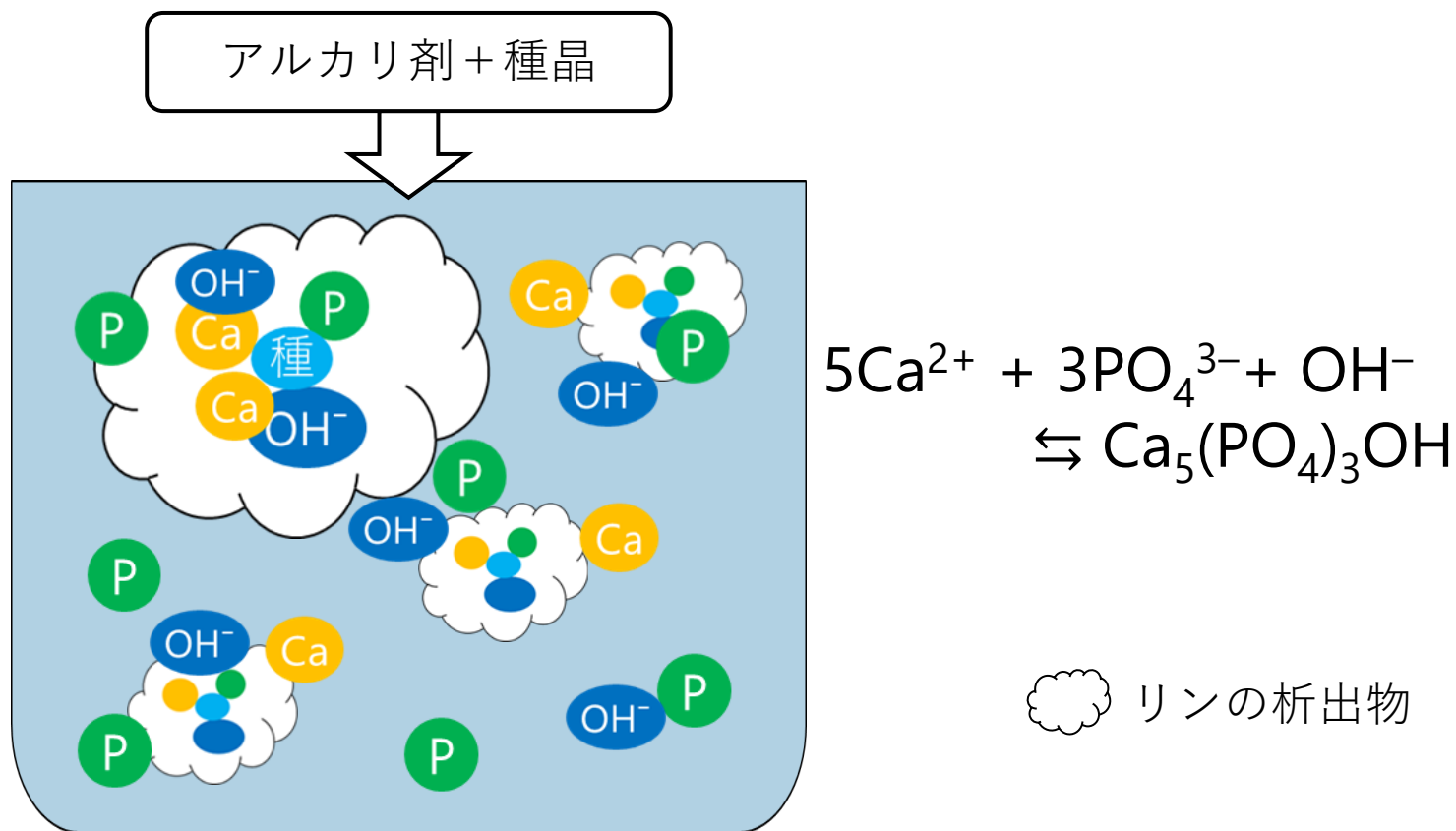


図 化学的凝集法

背景 | 化学的凝集法における下水へのカルシウムの添加

下水に元々存在するカルシウムのみでは、高い割合でのリン析出が困難

CaCl₂といった易溶性試薬を添加・カルシウムを下水に供給し、

リンの析出を促進

(難溶性カルシウム試薬の利用は困難)

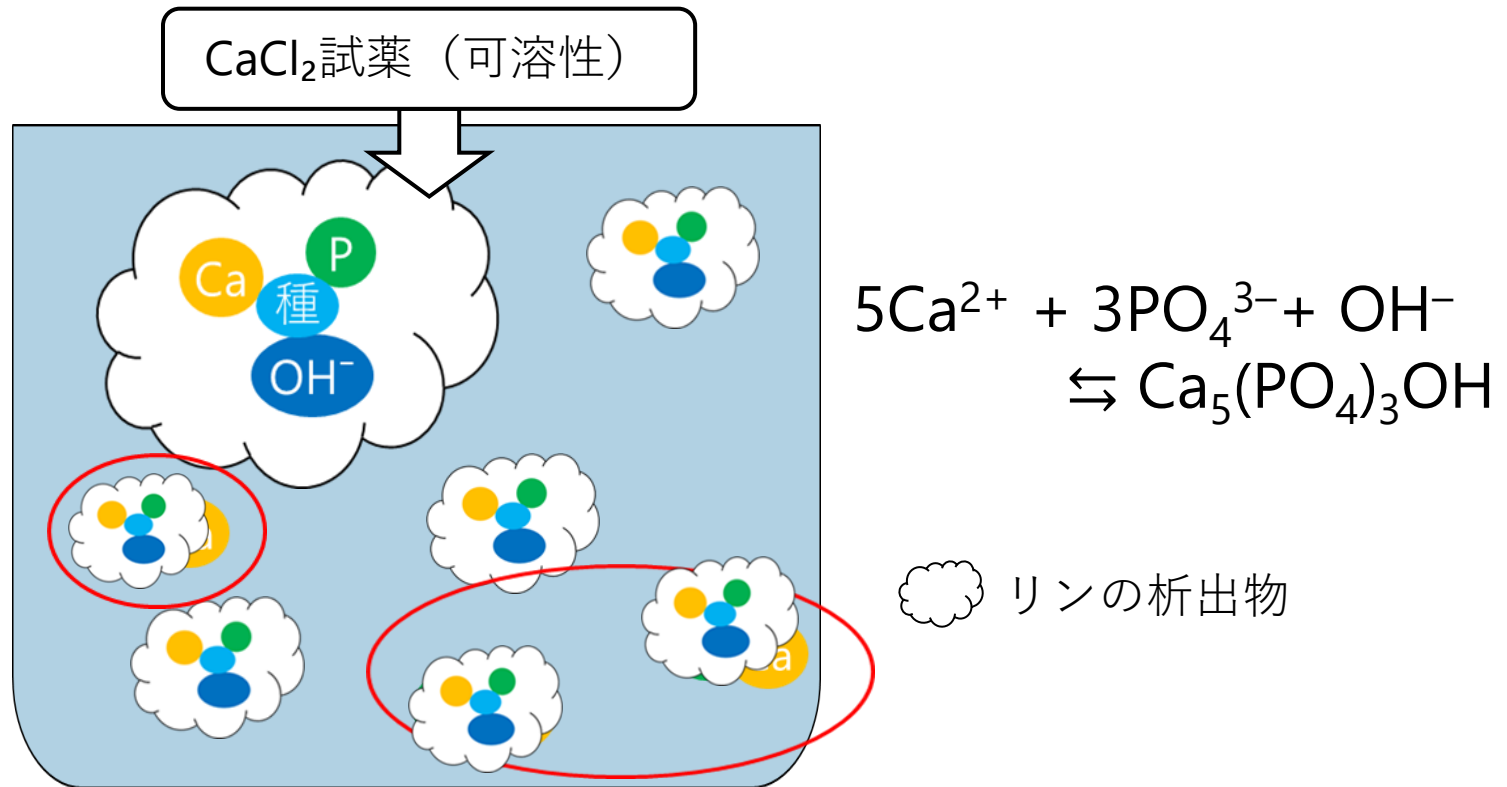


図 化学的凝集法

背景 | 電解晶析法によるリン回収

下水に通電することで、陰極近傍がアルカリ雰囲気に変化

陰極を核として、下水中のリンが
重金属（カルシウムやマグネシウム）と反応・結晶化

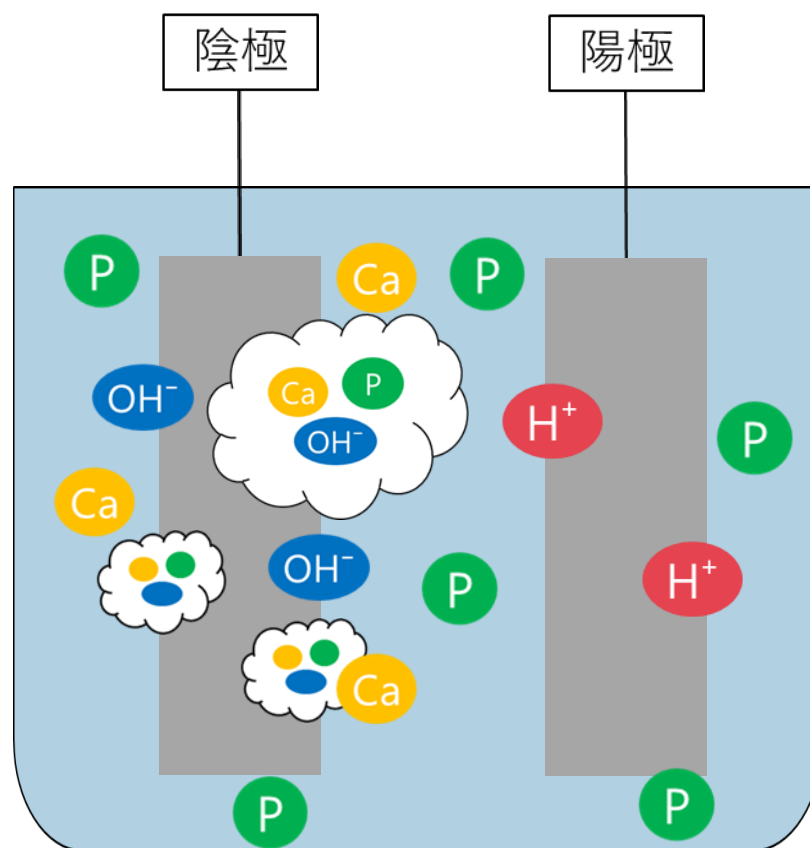


図 電解晶析法

背景 | 本研究で目指す電解晶析法

- ①炭酸カルシウムを下水に添加・浮遊させた状態で、陽極で溶解させ、カルシウムを供給
- ②貝殻（主成分：炭酸カルシウム）を添加←廃棄物の有効活用

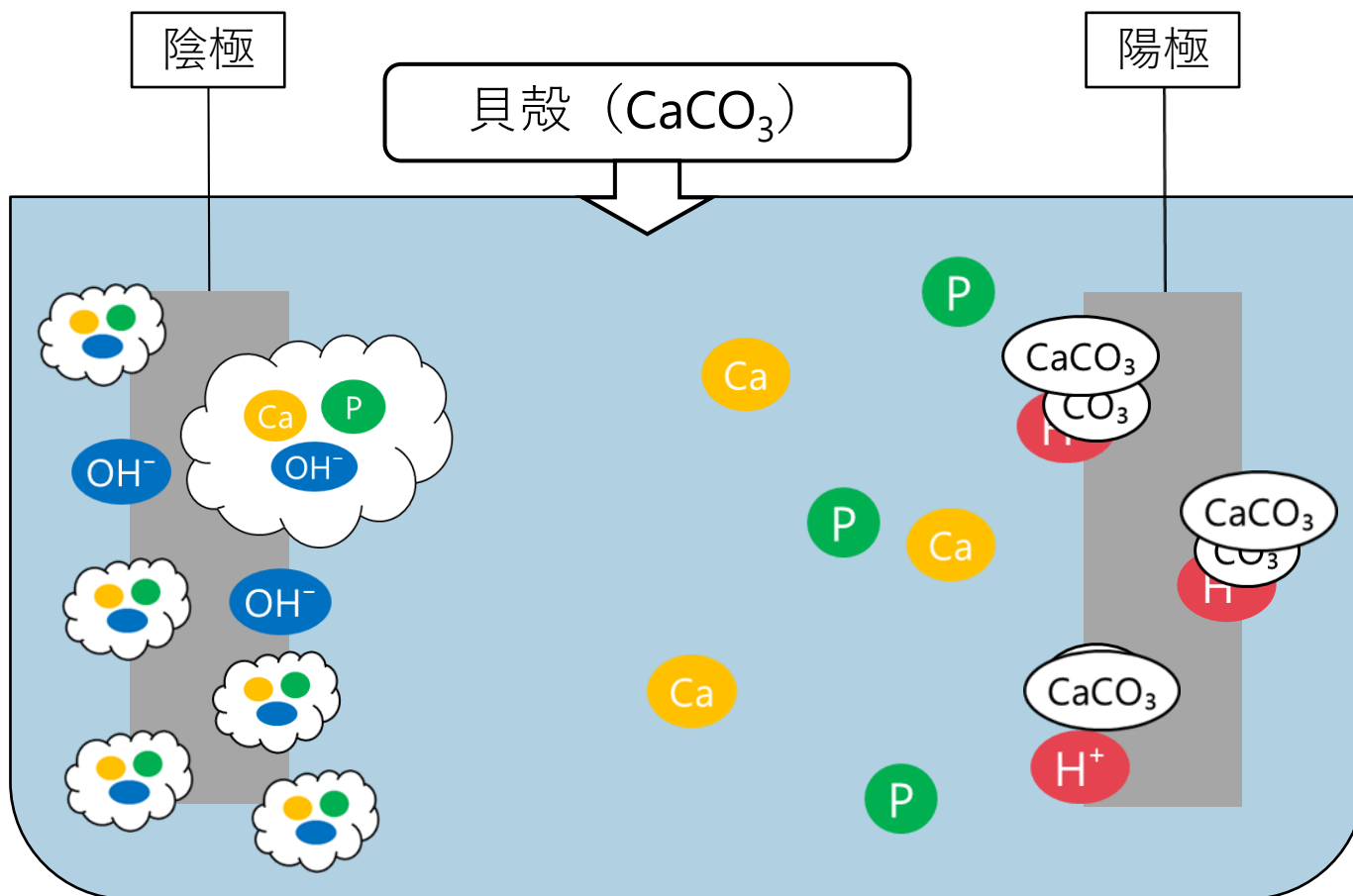


図 本研究で目指す電解晶析法

背景 | 対象とする下水試料

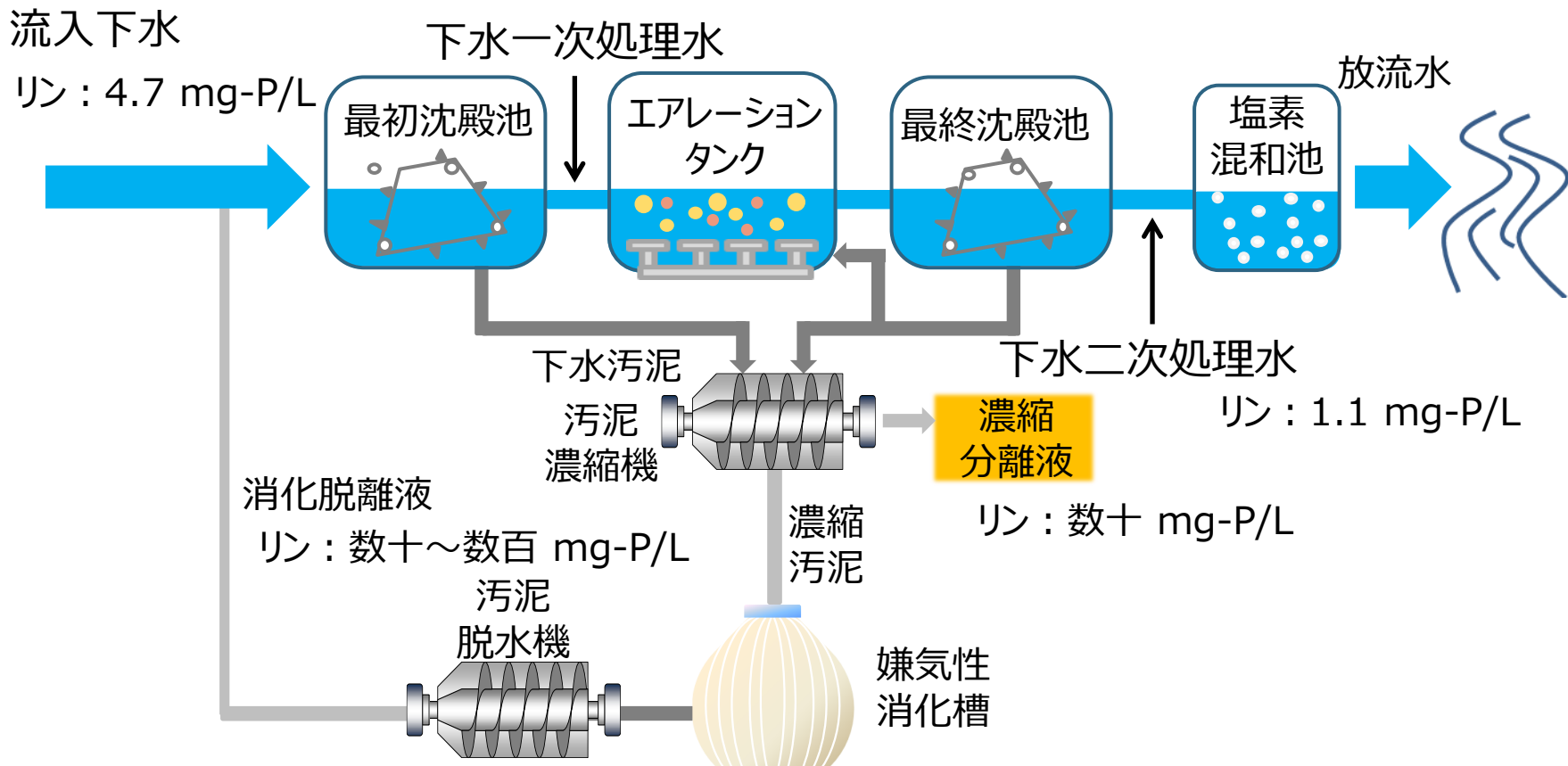


図 下水処理 (標準活性汚泥法) フロー (流入下水、下水二次処理水での窒素リン濃度は、下水道統計¹⁾記載のデータより、全国平均を算出)

リンを豊富に含有する濃縮分離液

濃縮分離液には、汚泥残渣 (SS) が存在

背景

本研究で目指す電解晶析法 I で生じると考えられる問題

炭酸カルシウムが核となりSSのフロック化を促進¹⁾

電解開始前に貝殻を濃縮分離液に添加した場合、
炭酸カルシウムがSSに覆われ、陽極での溶解効率が低下

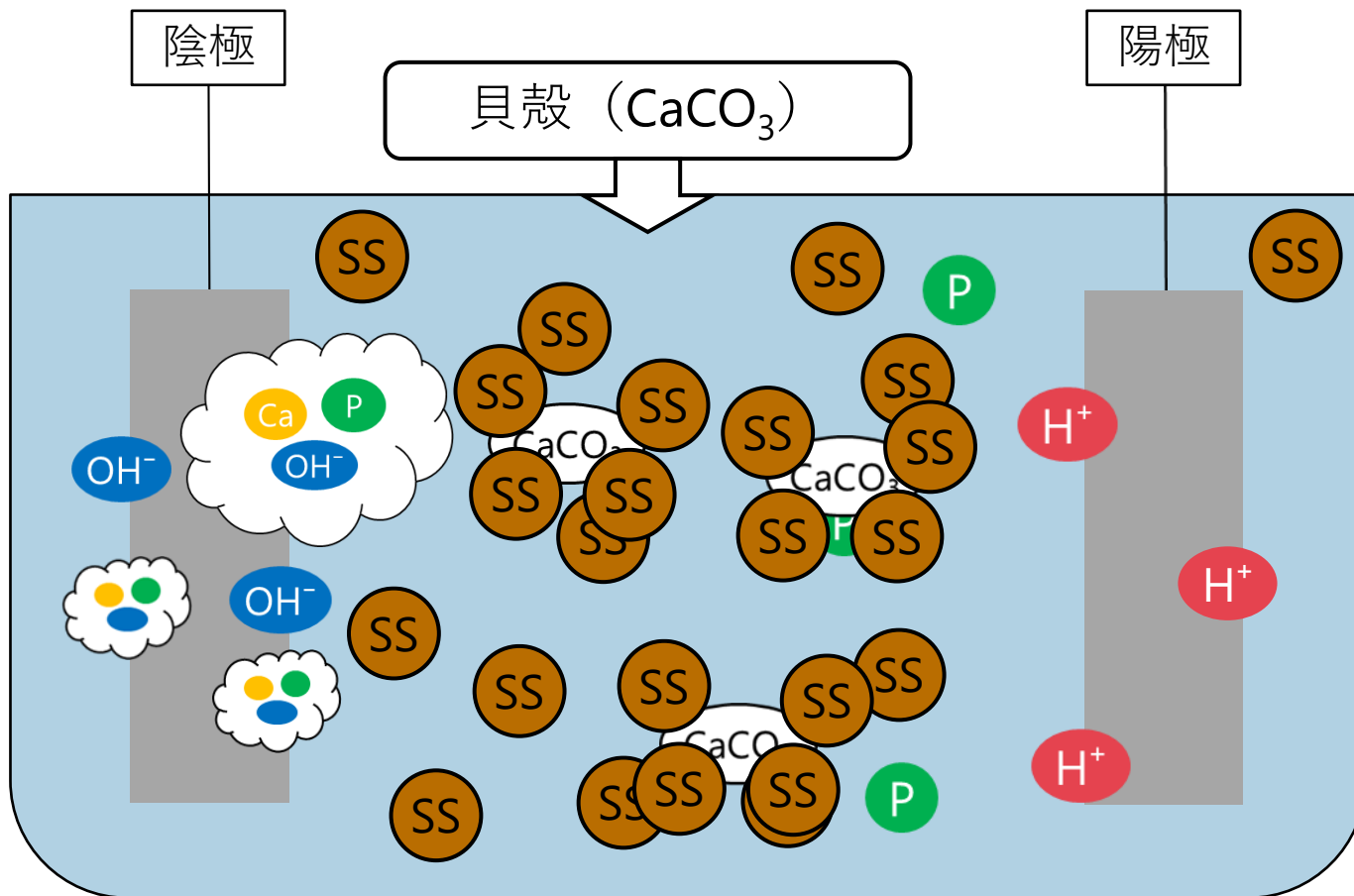


図 生じると考えられる問題

1)Qin et al., Water Sci. Technol. 77(11), 2677–2686 (2018)

背景 | 凝集剤が添加されたSSの浮上

電解晶析法では、電極から酸素・水素ガスが発生
酸素・水素ガスにより、SSが水面に浮上・濃縮¹⁾

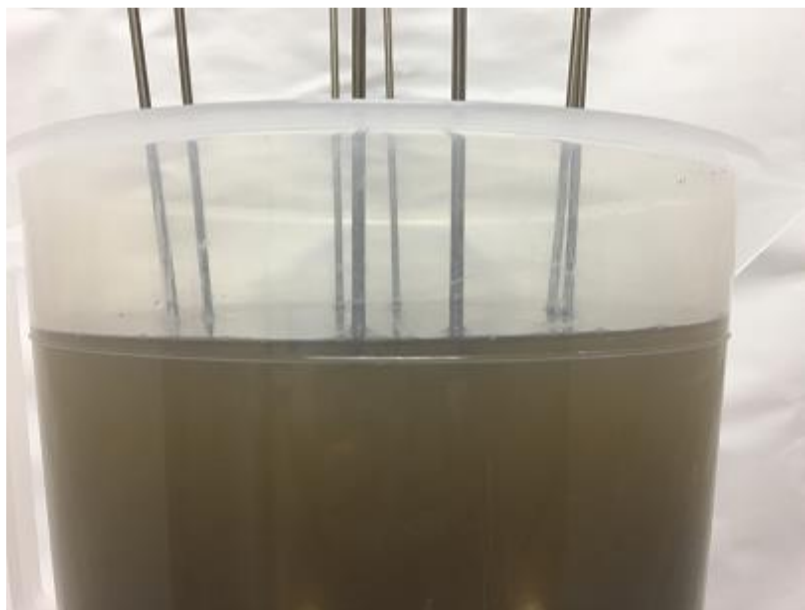
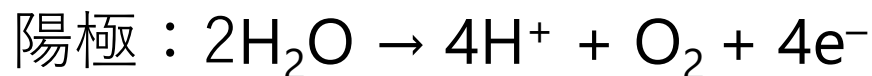


図 SSの浮上（消化液、左：実験前、右：実験開始30分後）



背景 | 本研究で目指す電解晶析法 I の実現

- (1) 酸素・水素ガスにより、水面に浮上・濃縮されたSSを除去
- (2) 貝殻を添加し、陽極で溶解・カルシウムを供給

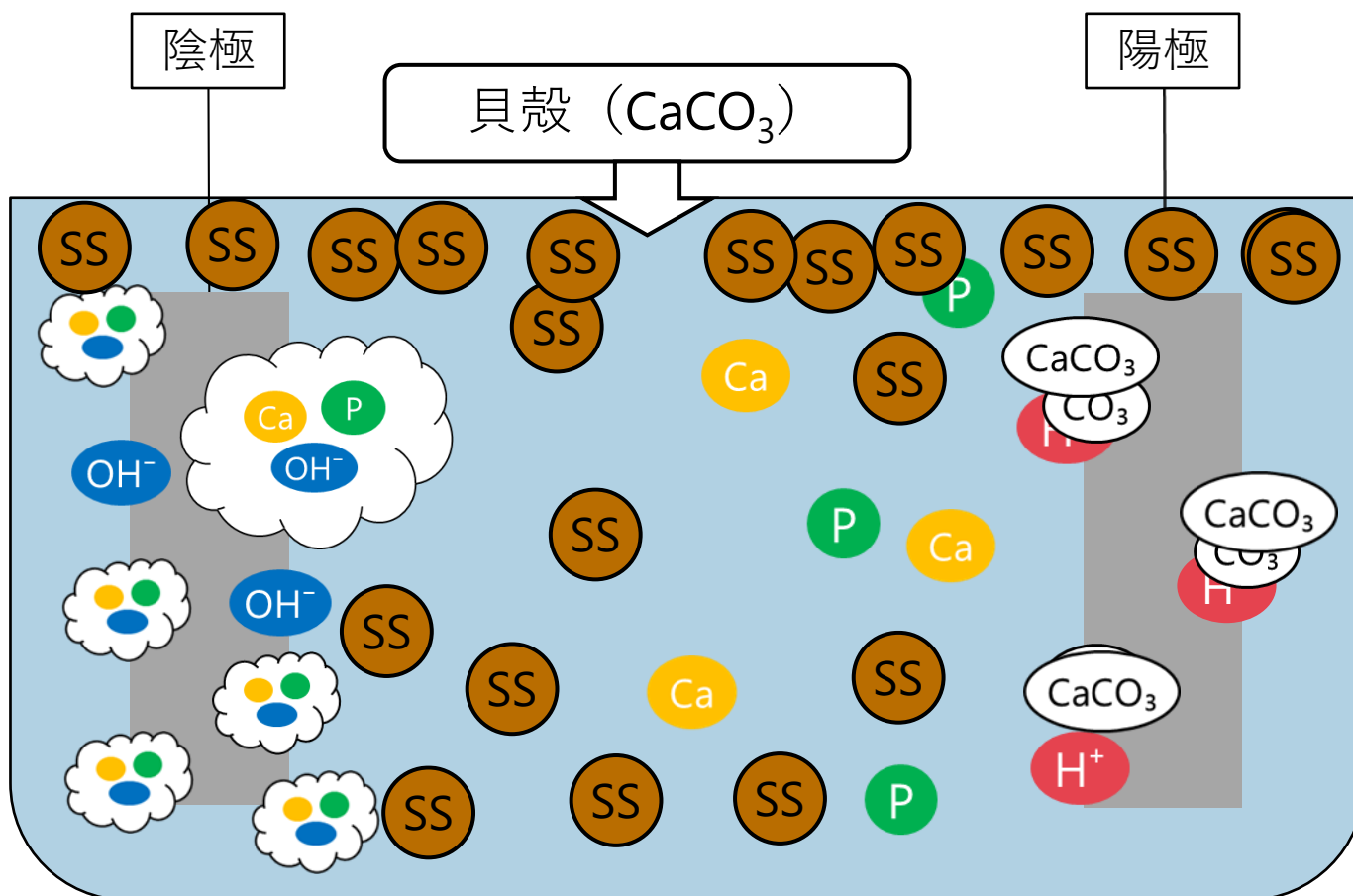


図 本研究で目指す電解晶析法 I の実現

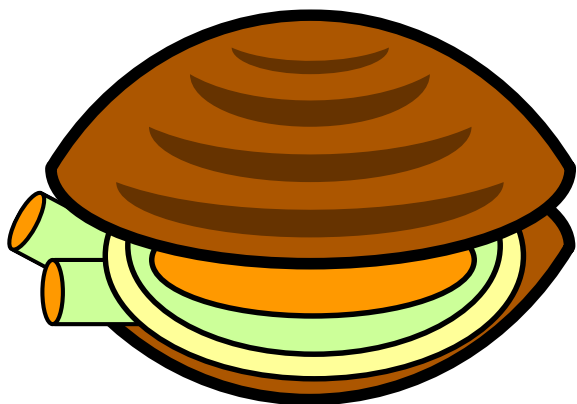
方法 | 実証実験の方法

濃縮分離液

鳥取市内A下水処理場の濃縮分離液を
未処理のまま直接実験に利用

貝殻

湖山池産のシジミの貝殻をミキサーで破砕し、
0.1 mm篩にかけて利用



実験方法 | 実証実験の方法

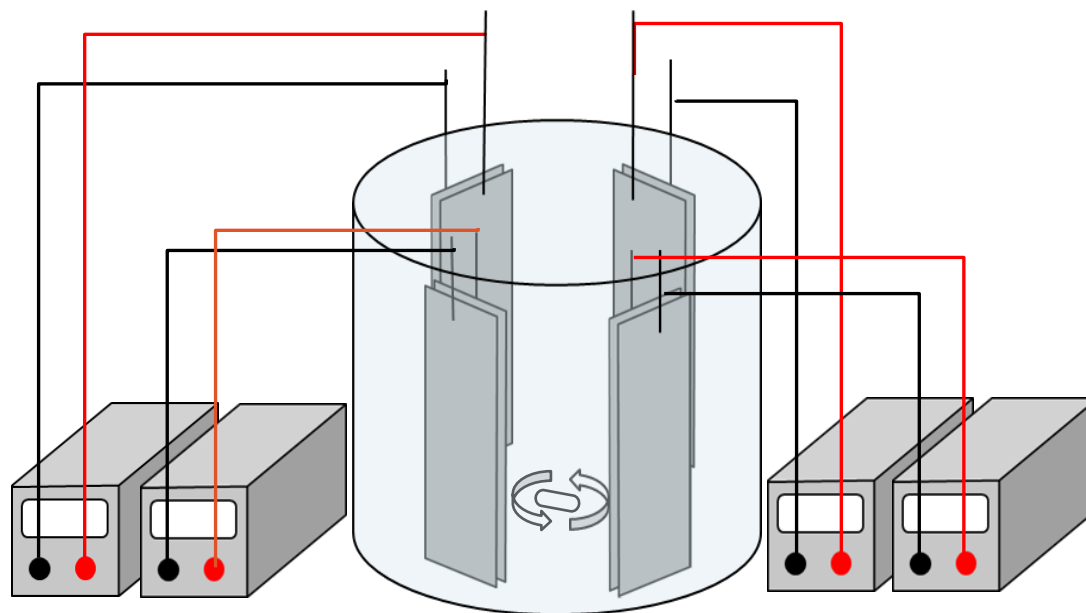


図 実験装置

- 電極板：白金コーティング（厚さ：0.1 μm ）チタン電極
（縦：180 mm、横：70 mm、厚さ：0.5 mm）
- 陽極・陰極セット：4セット（電極板間隔：1 mm）
- 直流電流：3 A
- 実験装置容量：5 L（実験中スターラにより脱水分離液を攪拌）
- 実験方式：回分式

実験 I | 貝殻利用における浮上・濃縮されたSS除去の有用性

表 実験 I の構成

実験名称	SS除去	貝殻添加	備考
実験 I -1	無	無	—
実験 I -2	無	実験開始前に 0.58 g※添加	—
実験 I -3	実験開始前に ろ紙（孔径1 μm ）で除去	実験開始前に 0.58 g添加	—
実験 I -4	実験開始後に 浮上・濃縮したSSを匙等で除去	実験開始後45分までに 0.58 g添加	—
実験 I -5	実験開始後に 浮上・濃縮したSSを匙等で除去	実験開始後45分までに 0.58 g添加	貝殻添加後 電気分解を停止

※貝殻0.58 g添加により、カルシウム0.2 g-Caが添加

実験 I | 貝殻利用における浮上・濃縮されたSS除去の有用性

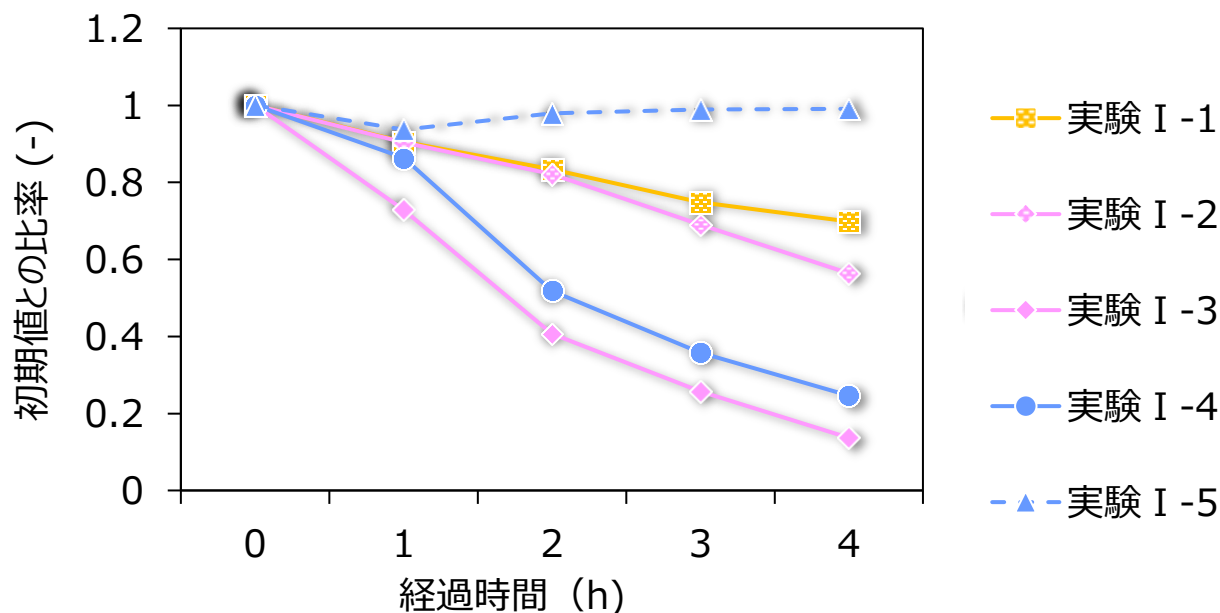


図 実験 I での PO_4^{3-} 濃度の変化 (n = 3、平均値 ± 標準偏差)

SS除去無 (実験 I -2) : 貝殻添加による PO_4^{3-} 除去 (リンの析出) 効果小

ろ紙によるSS除去有 (実験 I -3) : 貝殻添加による PO_4^{3-} 除去効果大

電極から発生する酸素・水素ガスにより浮上・濃縮したSSを除去後、
貝殻を添加することで、 PO_4^{3-} 除去効果大 (実験 I -4)

実験Ⅱ | PO_4^{3-} 除去促進を目的とした適切な貝殻添加量

表 実験Ⅱの構成

実験名称	SS除去	貝殻添加
実験Ⅱ-1	実験開始後に 浮上・濃縮したSSを匙等で除去	実験開始時に 0.29 g添加
実験Ⅱ-2	実験開始後に 浮上・濃縮したSSを匙等で除去	実験開始時に 0.58 g添加
実験Ⅱ-3	実験開始後に 浮上・濃縮したSSを匙等で除去	実験開始時に 0.87 g添加
実験Ⅱ-4	実験開始後に 浮上・濃縮したSSを匙等で除去	実験開始時に 1.16 g添加

実験Ⅱ

PO₄³⁻除去促進を目的とした適切な貝殻添加量

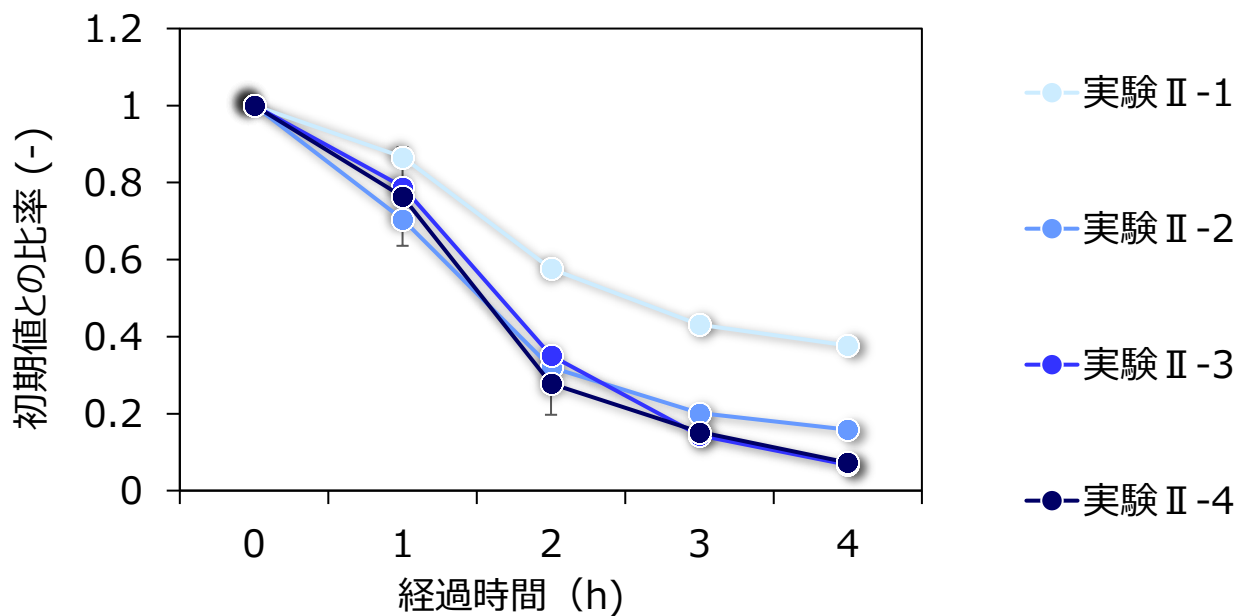


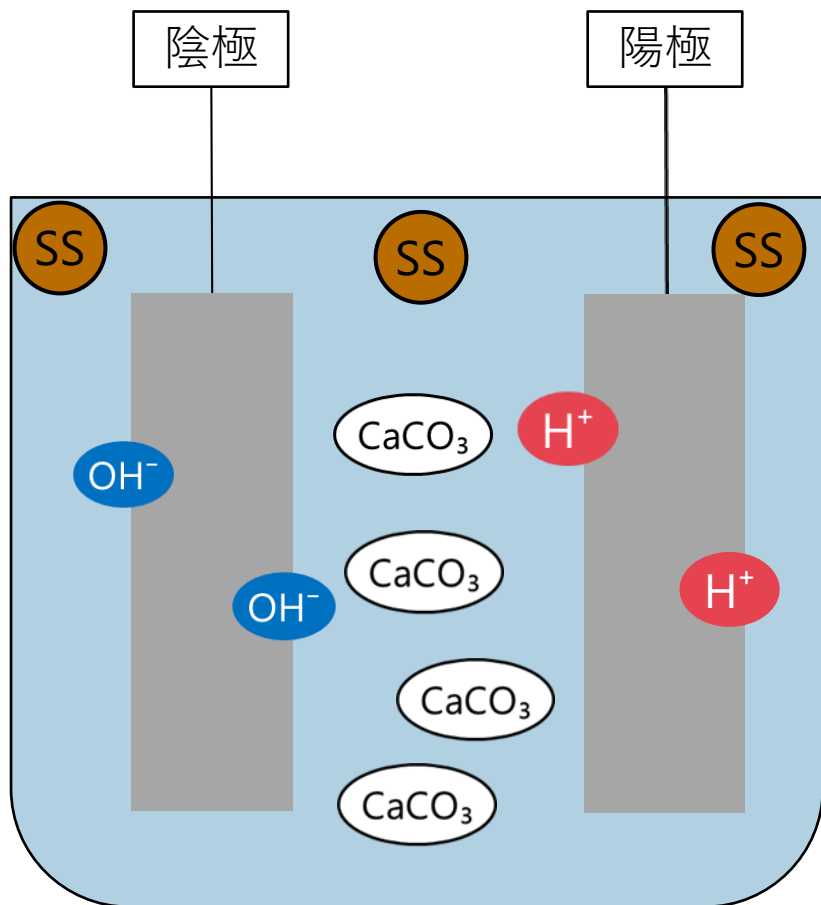
図 実験ⅡでのPO₄³⁻濃度の変化 (n = 3、平均値 ± 標準偏差)

PO₄³⁻除去促進の観点から、
貝殻添加量0.87 g (実験Ⅱ-3) が至適

背景 | 電解晶析法Ⅱの開発

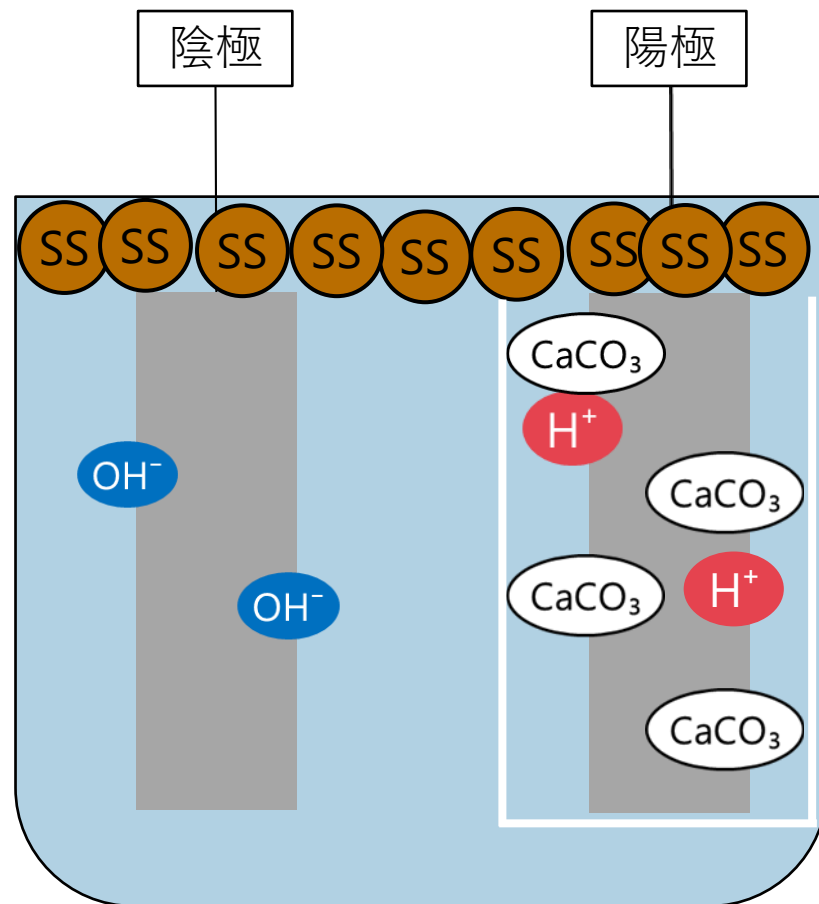
対象試料：下水汚泥濃縮後の濃縮分離液
(SS濃度低：26.7 mg/L)

貝殻：水中で浮遊



対象試料：下水汚泥そのもの
(SS濃度高：4300 mg/L)

貝殻：陽極近傍に充填



背景 | 電解晶析法 I の現場導入

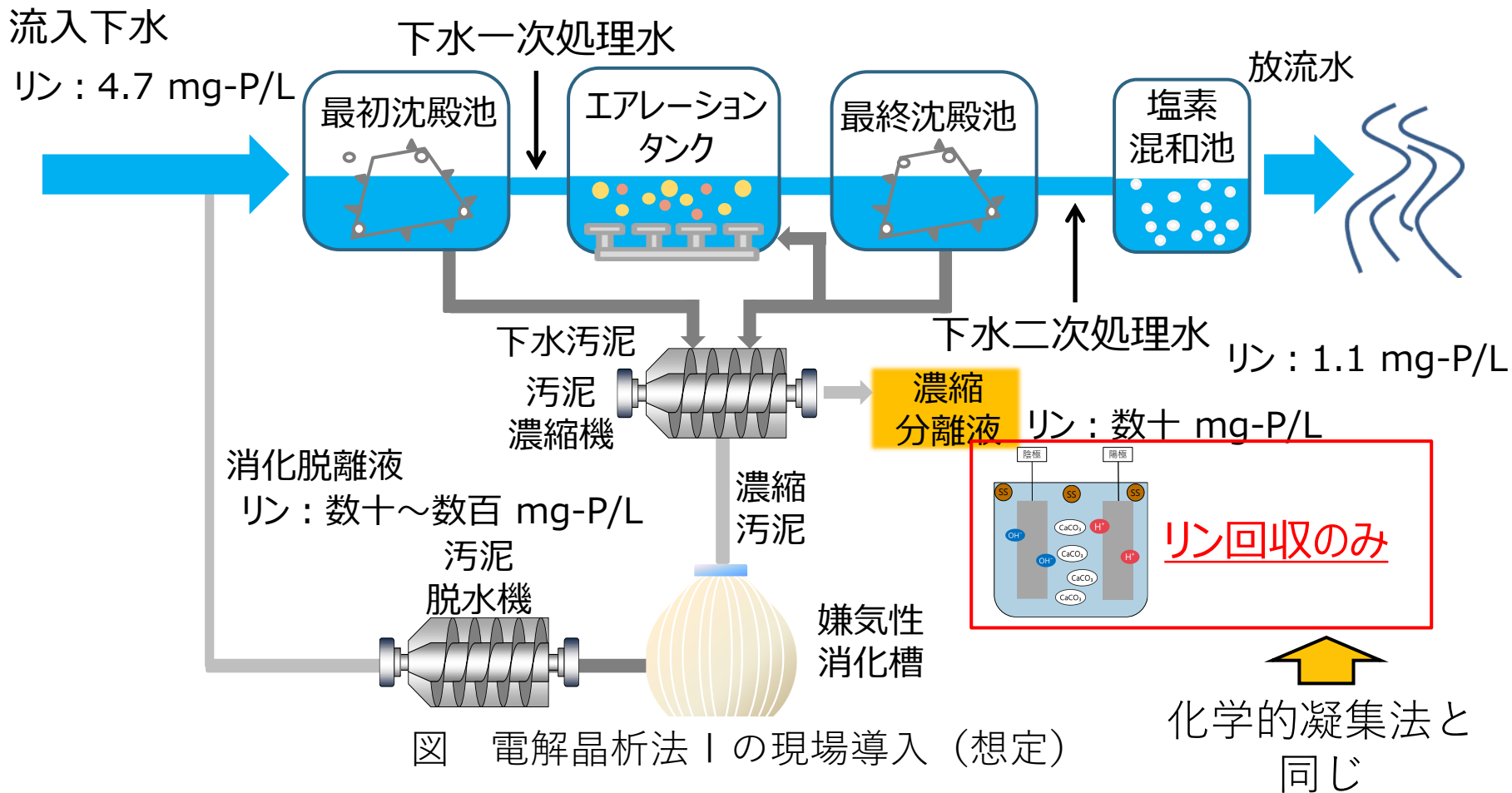


図 電解晶析法 I の現場導入 (想定)

自治体にとって下水処理場でのリン回収は必須ではなく、普及性の観点で若干の課題有

背景 | 電解晶析法Ⅱの現場導入

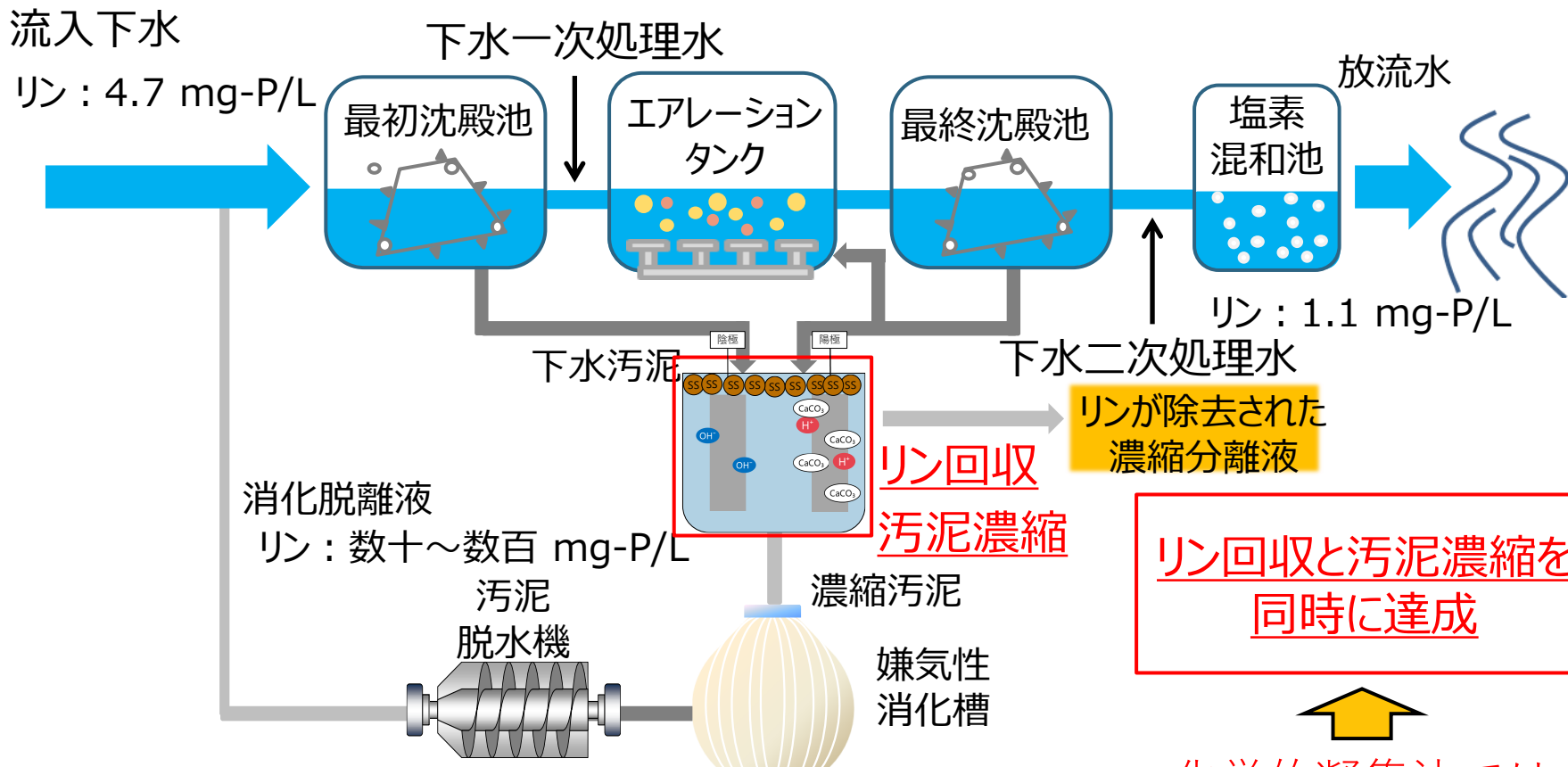


図 電解晶析法Ⅱの現場導入 (想定)

リン回収と汚泥濃縮を同時に達成

化学的凝集法では達成不可

下水処理場で必須な汚泥濃縮を、リン回収と同時に達成することで、普及性に強み

背景 | 貝殻の水中浮遊から陽極近傍での充填へのシフト

電解晶析法において、
汚泥の浮上（濃縮）に要する時間に比べて、
リン析出に要する時間が長い

貝殻の水中浮遊から
陽極近傍での充填にシフトすることで、
陽極での貝殻の溶解効率がより向上し、
リン析出に必要な①カルシウムイオンと
②水酸化物イオンの水中への効率的な蓄積



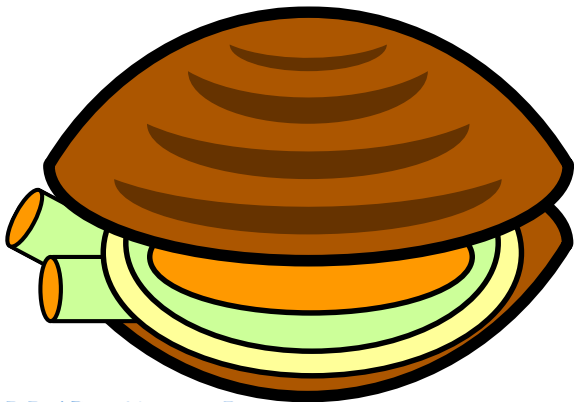
追加実験 I | 貝殻充填によるリン析出促進の確認

濃縮分離液

鳥取市内A下水処理場の濃縮分離液を
1 μm ろ紙でろ過して実験に利用

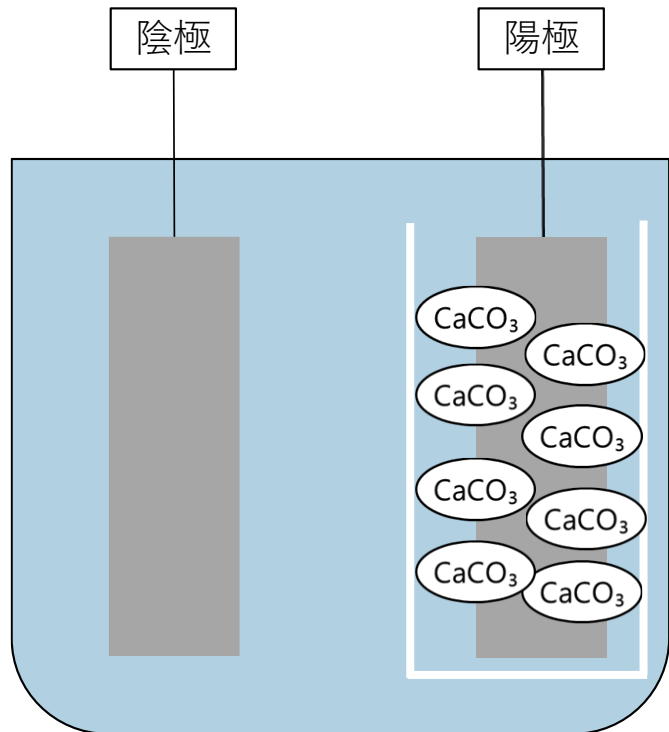
貝殻

湖山池産のシジミの貝殻をミキサーで破砕し、
0.3~0.5 mmの粒形のものを利用



追加実験 I

貝殻充填によるリン析出促進の確認



陽極



ナイロン
メッシュを
貼った
アクリル製
ケースに
陽極を入れ、
貝殻を充填

- 電極板：白金コーティング（厚さ：0.1 μm ）チタン電極
（縦：180 mm、横：70 mm、厚さ：0.5 mm）
- 陽極・陰極セット：1セット（電極板間隔：5 mm）
- 直流電流：0.25 A～0.75 A
- 実験装置容量：5 L（実験中濃縮分離液を攪拌）
- 実験方式：回分式 ➤ 貝殻添加量：150 g

追加実験 I | 貝殻充填によるリン析出促進の確認

実験名称	貝殻添加	電流
追加実験 I -1	陽極に充填	0.25 A
追加実験 I -2	陽極に充填	0.5 A
追加実験 I -3	陽極に充填	0.75 A
追加実験 I -4	水中で浮遊	0.5 A
追加実験 I -5	無	0.5 A

追加実験 I | 貝殻充填によるリン析出促進の確認

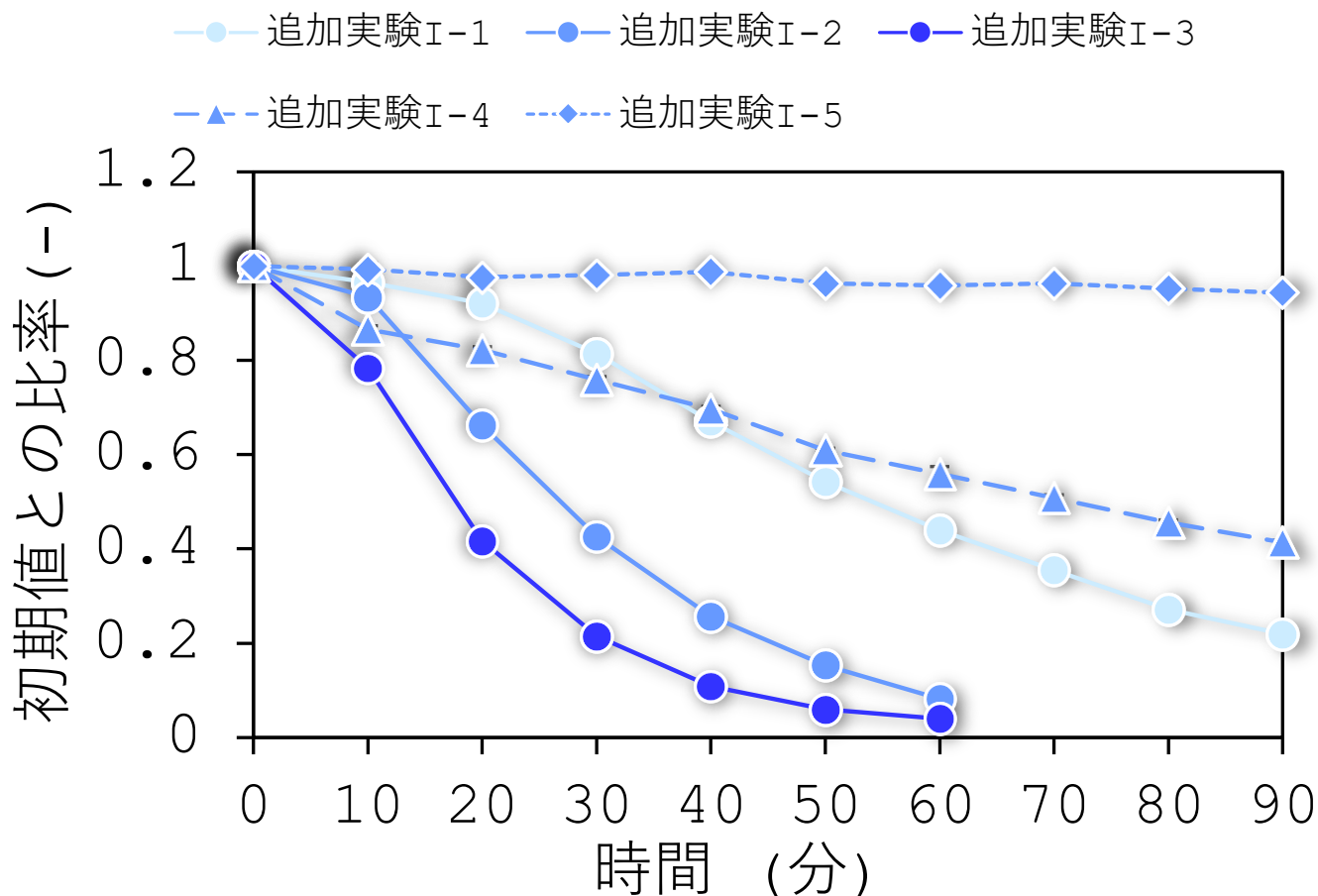


図 PO_4^{3-} 濃度の変化 (n = 3、平均値 ± 標準偏差)

貝殻の水中浮遊から陽極近傍への充填にシフトすることで、リン析出効率が向上

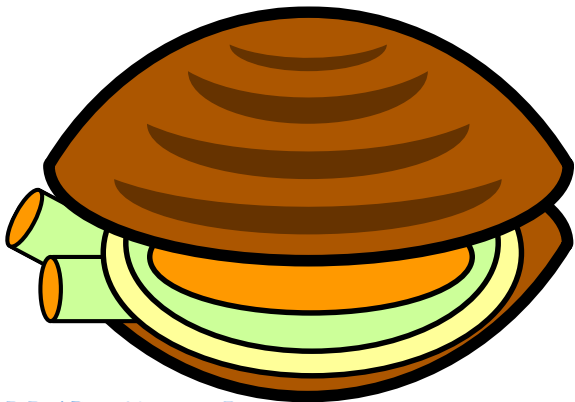
追加実験Ⅱ | リン回収と汚泥濃縮の同時達成の実証

下水汚泥

鳥取市内A下水処理場の最終沈殿池からの
余剰汚泥を実験に利用

貝殻

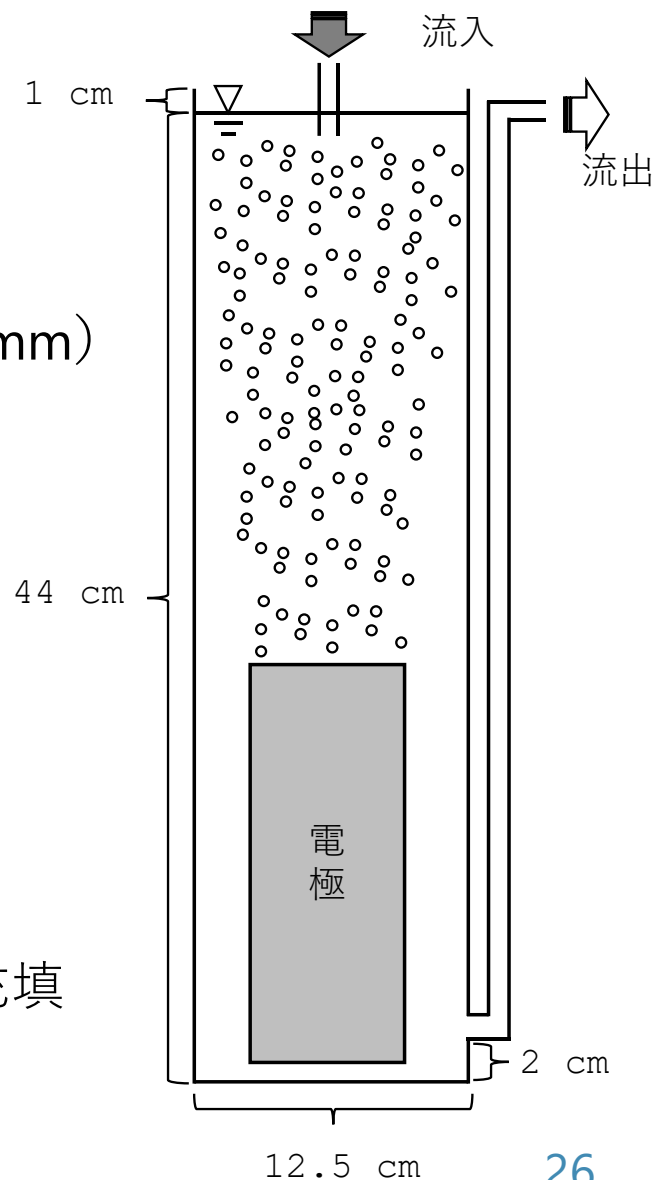
湖山池産のシジミの貝殻をミキサーで破砕し、
0.3~0.5 mmの粒形のものを利用



追加実験Ⅱ | リン回収と汚泥濃縮の同時達成の実証

- 電極板：追加実験①と同じ
- 陽極・陰極セット：1セット（電極板間隔：5 mm）
- 直流電流：0.25 A～0.75 A
- 実験装置容量：1 L
- 実験方式：連続実験
- 水理的滞留時間：30分
- 実施サイクル：10サイクル（30分/サイクル）
- 貝殻添加量：150 g

実験開始時は鳥取市内A下水処理場の
下水処理水（1 μm ろ紙でろ過）を装置内に充填



追加実験Ⅱ | リン回収と汚泥濃縮の同時達成の実証

実験名称	貝殻添加	電流
追加実験Ⅱ-1	陽極に充填	0.25 A
追加実験Ⅱ-2	陽極に充填	0.5 A
追加実験Ⅱ-3	陽極に充填	0.75 A
追加実験Ⅱ-4	無	0.5 A

追加実験Ⅱ | リン回収と汚泥濃縮の同時達成の実証

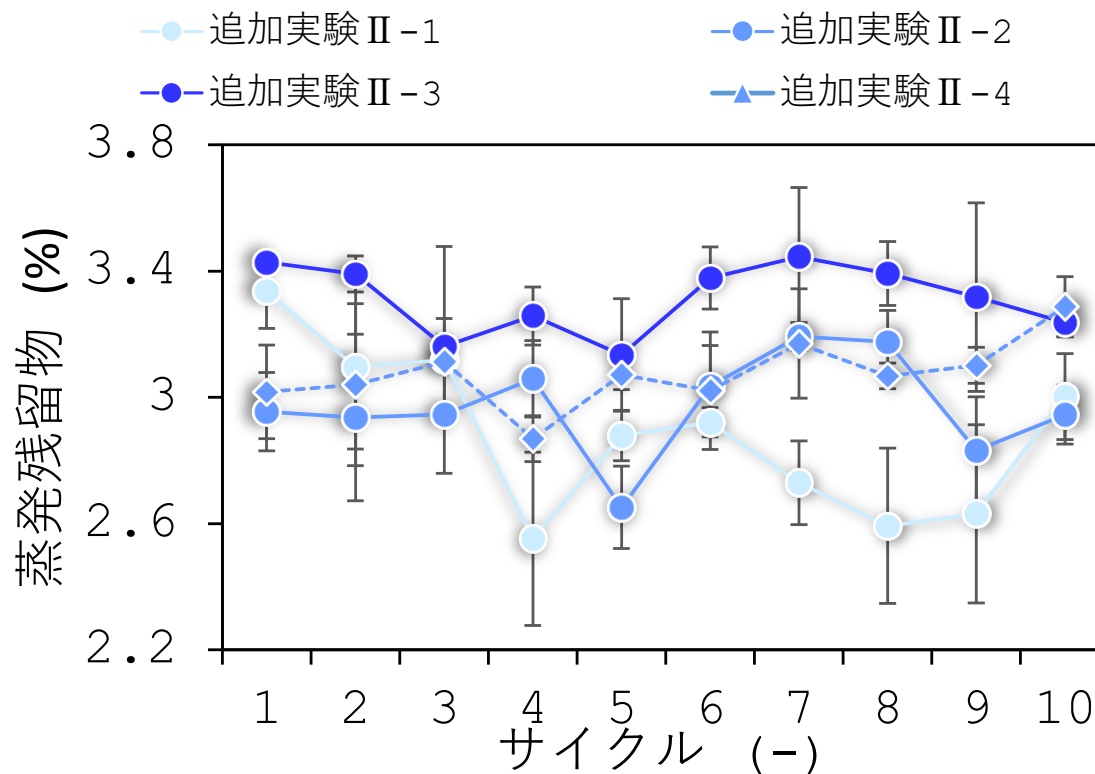


図 浮上汚泥での蒸発残留物の変化 (n = 3、平均値 ± 標準偏差)

余剰汚泥 (蒸発残留物：0.52%) に比べて、
各実験で汚泥浮上による濃縮に成功

(ただし、追加実験Ⅱ-1では装置内の底に汚泥の蓄積有)

追加実験Ⅱ | リン回収と汚泥濃縮の同時達成の実証

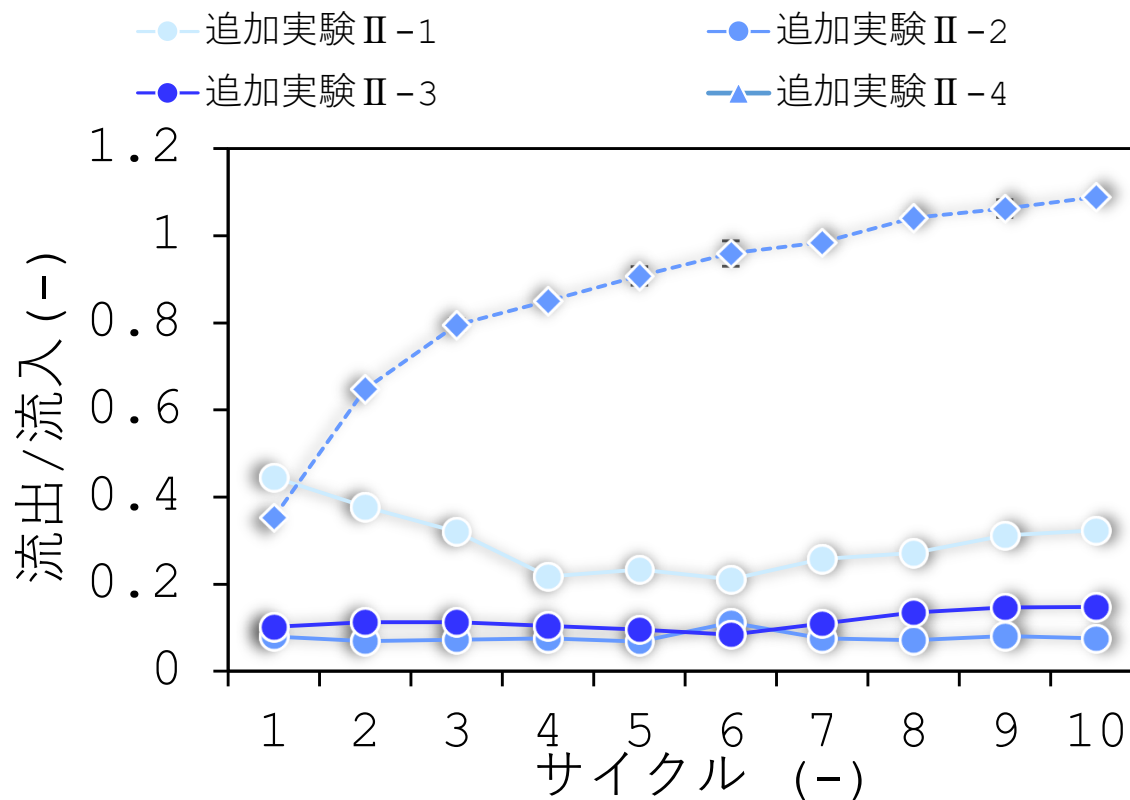


図 PO₄³⁻濃度の変化 (n = 3、平均値 ± 標準偏差)

貝殻を陽極近傍に充填することでリン析出も達成
(0.5 Aで最も高いリン析出効率)

追加実験Ⅱ | リン回収と汚泥濃縮の同時達成の実証

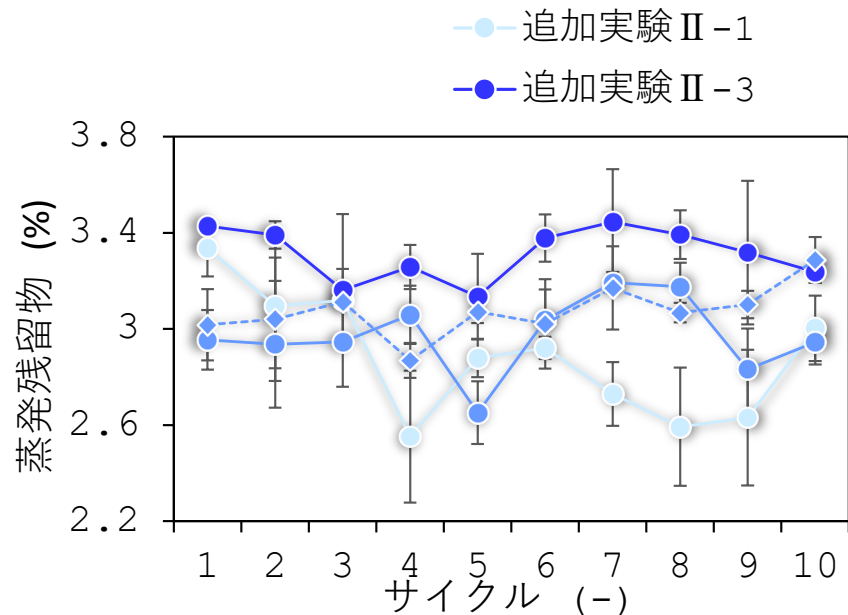


図 浮上汚泥での蒸発残留物の変化
(n = 3、平均値 ± 標準偏差)

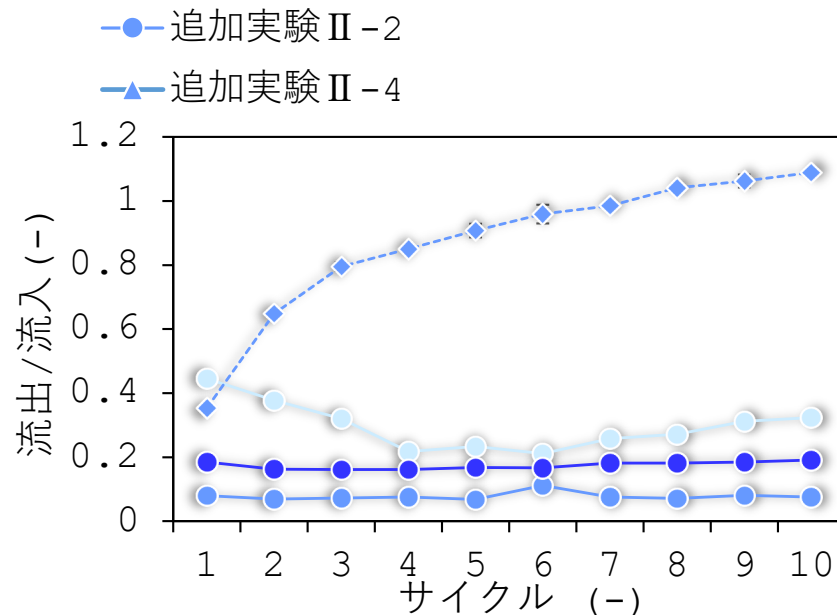


図 PO_4^{3-} 濃度の変化
(n = 3、平均値 ± 標準偏差)

リン回収と汚泥濃縮の同時達成の観点から、
電流値0.5 Aが適切

追加実験Ⅱ | リン回収と汚泥濃縮の同時達成の実証

- 装置内に残存した懸濁態リン
- 装置内に残存した溶存態リン
- 流出水中懸濁態リン
- 流出水中溶存態リン
- 下水処理水中溶存態リン
- 濃縮汚泥中全リン
- 流入水中懸濁態リン
- 流入水中溶存態リン

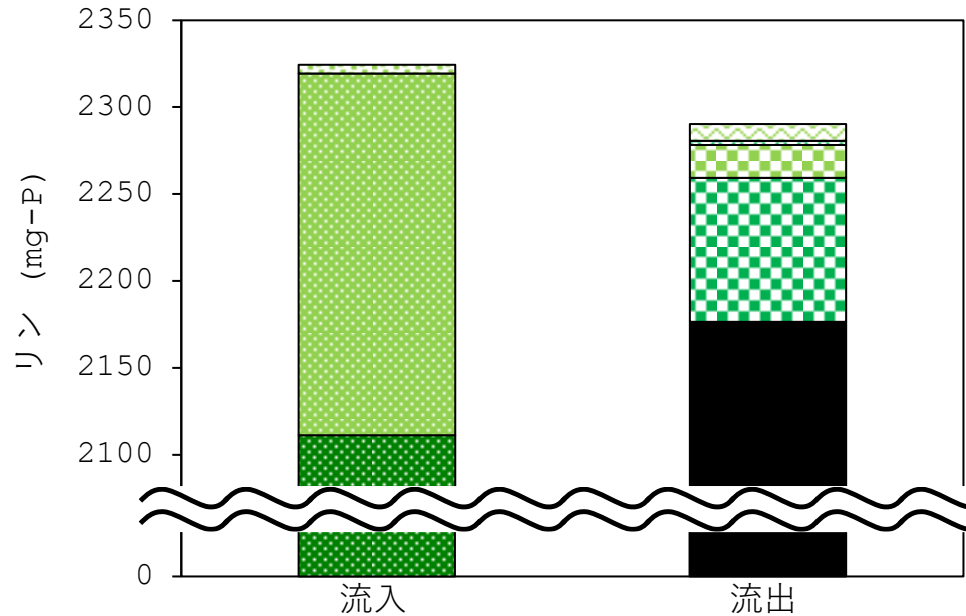
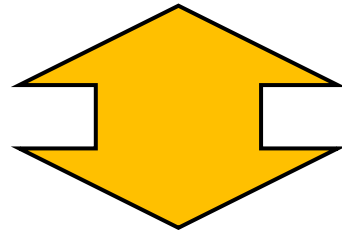


図 追加実験Ⅱ-2でのリン収支

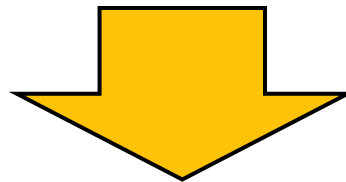
流出水中に懸濁態リン（リン析出物）を確認

まとめ

化学的凝集法ではリン回収のみ達成可能



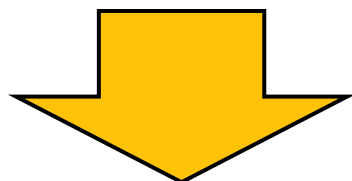
廃棄物（貝殻）をカルシウム供給資材とした上で、
下水処理場で必須な汚泥濃縮も達成可能な
電解晶析リン回収システムを開発



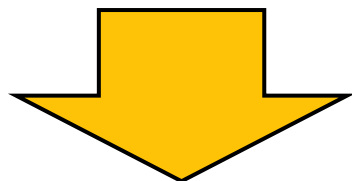
自治体にとって下水処理場でのリン回収は
必須ではない現状において、
現場へのリン回収システムの普及性に強み

実用化に向けた課題と企業様への期待

技術開発は、L単位の実験装置を利用して実施



開発した技術を実用化する上で、
今後、実験・実証装置のスケールアップ
(m^3 単位) が必要



実験・実証装置のスケールアップ
ならびに実証実験実施を目的に、
企業様との共同研究を希望しております

本技術に関する知的財産権とお問い合わせ先

- 発明の名称：リン回収装置及びリン回収方法
- 出願番号：特願2023-152739
- 出願人：鳥取大学
- 発明者：高部 祐剛

お問い合わせ先

鳥取大学 研究推進機構 研究戦略本部

電話：0857-31-5609

Eメール：ken-somu@ml.adm.tottori-u.ac.jp