

事業の名称

浸出水循環システムによる効果的な pH 低下工法の社会実装

〔事業責任者〕

(自治体等側)

水戸市・生活環境部・清掃事務所・清掃工場長 石川 慶一
(大学側)

茨城大学大学院・理工学研究科・教授 小林 薫

連携先

茨城大学，水戸市生活環境部清掃事務所

プロジェクト参加者

小林 薫（理工学研究科・教授 担当：全体
総括責任者，報告会及び意見交換
会の主催・企画）

金子 卓寛（理工学研究科・学生 担当：室内
実験実施者，中間・最終報告）

武田 和馬（水戸市生活環境部清掃事務所・所
長 担当：事務所総括）

石川 慶一（水戸市生活環境部清掃事務所清
掃工場・工場長 担当：自治体側
事業担当責任者，自治体側のとり
まとめ，大学との連絡調整，関連
情報の提供）

原田 真幹（水戸市生活環境部清掃事務所清
掃工場・施設管理係長 担当：事
業担当）

高野颯一郎（水戸市生活環境部清掃事務所清
掃工場・施設管理係 担当：報告
会及び意見交換会の実施時の資
料・器機の準備）

プロジェクトの実施概要

①プロジェクトの目的

水戸市一般廃棄物第二最終処分場は，焼却
灰埋め立て完了（満杯）となり，閉鎖措置が進
められ平成31年1月にその工事が完了した。
また，閉鎖措置開始から既に26年が経過して
いる水戸市廃棄物第一最終処分場では，現在
でも浸出水は， $\text{pH}=10.5\sim11.0$ 程度の強アル
カリ性であり，外部に放流するためには水処
理施設で中和させることが必要である。今後，

廃止措置完了まで長期に渡る膨大な水処理費
等が必要である。加えて，最悪の場合には，水
処理施設の耐用年数を既に過ぎており，プラ
ント設備の更新時期も迫っている状況である。
水戸市としては，廃止措置に予想外の年月を
要しているのが現状である。この緊急性の高
い課題に対し，茨城大学では，現位置における
降雨量，覆土・埋立焼却灰への降雨浸透量，表
面排水量および浸出水量とその pH の変化を
継続的に計測した結果を基に検討し，浸出水
の pH 低下メカニズムに及ぼす降雨浸透量の
影響を明らかにした（H30年度 茨城大学都市
工学部システム工学科 卒業研究（安部加奈
子：廃棄物最終処分場廃止措置時の降雨浸透
能の把握と浸出水の pH 低下に関する研究）。
また，焼却灰への空気透気により浸出水の pH
を低下させることが可能であることを確認し
た（R1年度 茨城大学工学部都市システム工
学科 卒業研究（金子卓寛：廃棄物最終処分
場における浸出水の pH 低下促進に関する基礎
的研究）。しかし，浸出水の pH 低下メカニ
ズムを明らかにできたものの，研究成果を基に
試算した廃止措置完了までに要する期間は水
による洗い出しを行っても100年以上を要す
る結果となった（水戸市の事業担当責任者
にはH31年2月に報告済み）。このことから，効
率的・効果的かつ経済的な pH 低下対策方法を
早急に見出すことが求められた。そこで，廃棄
物最終処分場において，浸出水に中和剤を入
れて，再度廃棄物層へ循環させる方法を提案
する。この浸出水の循環により，廃棄物層の洗
い出しに加え，中和剤の使用により高 pH の原
因である水酸化カルシウム等の不溶化による
効果的な浸出水の pH の低下を図る。

以上より、廃止措置開始から26年が経過している水戸市一般廃棄物第一最終処分場を対象に、2021年度は水戸市清掃工場から排出される焼却灰を提供頂き、茨城大学工学部において室内実験によりpH低下促進対策法を研究・検討し、早期廃止措置を完了させる目途を立て、長期間に渡る膨大な維持管理費（主に水処理費用）の削減を実現する。今後は、本プロジェクトにおける研究を継続し、現地におけるpH低下促進対策法の効果を中型土槽実験により検証を行い、サステナブルな社会を構築するために水戸市と共に早期社会実装に繋げる。

②連携の方法及び具体的な活動計画

廃止措置から26年経過した水戸市一般廃棄物第一最終処分場の廃止措置完了のため、浸出水のpH低下を促進する方法に苦慮している状況下において、pH低下促進対策の方法を大学と連携して研究開発し、早期廃止措置を完了させるために水戸市は以下の役割を担う。

I. 本プロジェクトに関わるキックオフ及び

中間および最終ミーティングの招集と開催（開催に伴う開催会場の準備およびプロジェクトなどの必要機材準備含む）

II. 水戸市一般廃棄物第一、第二最終処分場の浸出水の水量、pHデータの整理と中和作業に要した薬品類の投入量、投入時期等の情報、各種データ類の整理と提供 など

III. 水戸市清掃工場から排出される焼却灰を実験用として提供および実験後の引取り・処分を行う。

IV. pH低下促進対策方法の社会実装のための、設計者、施工者などへのヒアリング時における協力および意見交換会への参画。

また、廃棄物最終処分場の早期廃止措置を完了させるために大学は以下の役割を担う。

I. 本プロジェクトに関わるキックオフ・中間および最終ミーティングの共同開催

II. 昨年度成果である「pH低下メカニズム」を考慮した、効果・効率的かつ経済的なpH

低下対策方法（案）の提案と実現可能性に関する研究を行う。

III. pH低下対策方法（案）の実験室内レベルでの効果確認のための実験計画書作成、実験装置の作製、pH低下効果の実験的検証および研究成果の学協会への公表を担う。

IV. 他の地方自治体の状況など情報収集を実施する。

③期待される成果

全国3千数百箇所に及ぶ廃棄物最終処分場において、類似課題を抱えている地方自治体は多数ある¹⁾。このような深刻な状況下において、廃棄物最終処分場の廃止措置時の浸出水のpHを計画的に低下させることを可能とするpH低下促進対策法が確立できれば、長期間に渡る水処理費用と水処理プラント設備の更新を不要とする廃止措置が可能となり、大幅な維持管理費の削減を実現できる。加えて、水戸市のみならず財政が厳しい類似課題を抱える全国の地方自治体へソリューションを水戸市発で提供（大いに社会貢献）できる。

プロジェクトの実施成果

① 活動実績

以下に、本プロジェクトにおける活動実績について示す。

I. 意見交換会などの活動実績

i)6/16 焼却灰の提供（水戸市清掃工場）：水戸市 石川慶一氏，茨城大学 M2 金子卓寛

以下には意見交換会，報告会などの実績を示す。

i)6/30 本研究プロジェクトの計画を水戸市生活環境部清掃事務所へ報告（水戸市清掃工場会議室）：水戸市 石川慶一氏，高野 颯一郎氏，茨城大学 小林 薫，M2 金子卓寛

ii)11/16 本研究プロジェクトの中間報告を水戸市生活環境部清掃事務所へ報告（水戸市清掃工場会議室）：水戸市 石川慶一氏，高野 颯一郎氏，茨城大学 小林 薫，M2 金子卓寛

iii)3/7 本研究プロジェクトの成果を水戸市生活環境部清掃事務所へ最終報告（オンライン）：水戸市 石川慶一氏，茨城大学 小林 薫，M2 金子卓寛

II. 調査・研究活動の実績

i) 廃棄物最終処分場の高 pH 浸出水の調査

全国に点在する廃棄物最終処分場の一部では，埋立終了後に高 pH の浸出水が課題となる事例が確認されている．茨城大学も属している特定非営利活動法人最終処分場技術システム研究協会（NPO・LSA）は，浸出水の pH に関し環境省実態調査に記載のある全国の廃棄物最終処分場を対象にアンケート調査を実施した．内容は，浸出水の pH の現状と共に，廃止に向けた課題を抱える自治体の存在などを調査することを目的に，浸出水原水の pH，及び関連水質項目などを調査した．

特定非営利活動法人最終処分場技術システム研究協会が全国の廃棄物最終処分場へ実施したアンケート調査の 1 つである浸出水原水の pH を示す（図-1）．環境省「一般廃棄物処理実態調査結果」（H29 年度）に記載されている，埋立中または埋立終了の一般廃棄物最終処分場 1,679 箇所を対象とした．回収率 26% となる 366 箇所からのアンケートを回収した．浸出水の pH について，pH が排水基準以内の pH=8.6 以下が全処分場の 67 %である．また，pH ≥ 10 は 6.4 %で，pH ≥ 8.6 では 14.5 %を占めている．旧処分場など浸出水処理施設の無い処分場は無回答となっていると考えられる

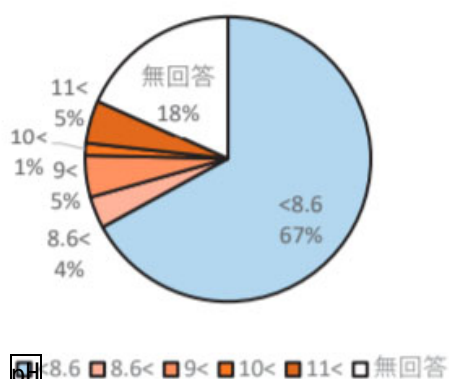


図-1 浸出水原水の pH アンケート集計結果¹⁾

が，高 pH の浸出水が流出する廃棄物最終処分場が水戸市同様に全国に一定数存在することが確認された¹⁾。

ii) 循環水による浸出水の pH 低下速度と焼却灰の透水性に関する実験概要と結果

1) 実験概要

本実験では，焼却灰へ循環させる水の pH を 3～7 まで 1 きざみで変化させ，浸出水の pH を 8.6 以下まで低下させる．焼却灰へ循環させる水の pH と浸出水の pH が 8.6 以下まで低下するまでに必要な時間や循環させる水量の関係を整理し，効果的な循環水の pH を明らかにする．

図-1 に実験器具の概要を示す．実験ケースは，焼却灰へ循環させる水の pH を 3～7 まで 1 きざみで変化させた全 5 ケースである．焼却灰へ循環させる水の pH を調整する中和剤には硫酸を用いる．

以下に実験手順の概要を示す．

1. 循環水を供給して，焼却灰を通過した浸出水を適宜採取する．
2. 図-1 に示す様な実験器具に焼却灰を乾燥密度 0.700 g/cm³，高さ 20 mm になるよう締めめる．
3. 焼却灰へ pH を調整した浸出水（循環水）を上部より注入し，実験器具の下部より浸出水を繰り返し採取する．
4. 硫酸を用いて浸出水の pH 調整を行う．
5. 前記の 3. ～ 4. を繰り返し，pH 調整を行った浸出水（循環水）を循環させる．

pH 計測は浸出水 20 ℓ 通水毎に行う．焼却灰には各種の固形物が確認されており，溶融物

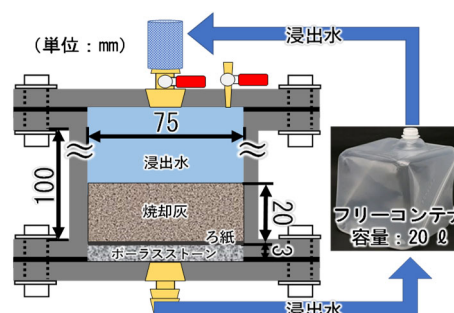


図-2 実験器具の概要⁵⁾

やガラス等が核として存在する²⁾。本実験では、2 mm ふるいを通した焼却灰を試料として用いた。

2) 実験結果と考察

図-3 に浸出水の pH の経時変化を、図-4 には浸出水の pH 低下速度の経時変化、図-5 に焼却灰の換算透水係数の変化を示す。pH の計測は、浸出水の pH が 8.6 以下に低下するまで継続した。また、焼却灰の換算透水係数は式(1)より求めた。

$$k_m = Q / (A \times t) \quad (1)$$

ここで、 k_m ：換算透水係数(m/s)、 Q ：通水流量(m^3) (本実験においては $Q = 0.02m^3$)、 A ：焼

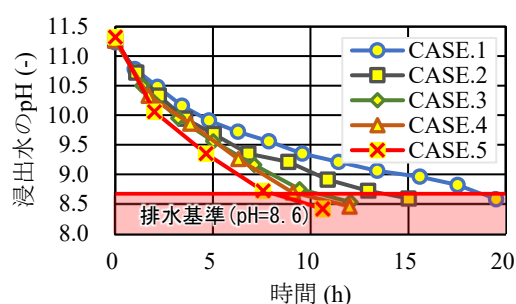


図-3 浸出水の pH の経時変化⁵⁾

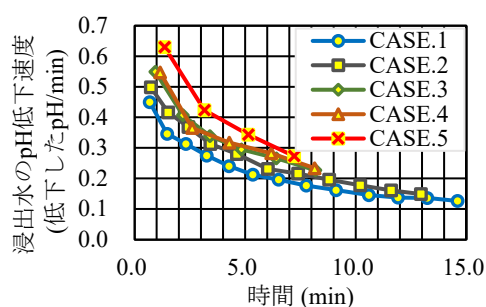


図-4 浸出水の pH 低下速度の経時変化⁵⁾

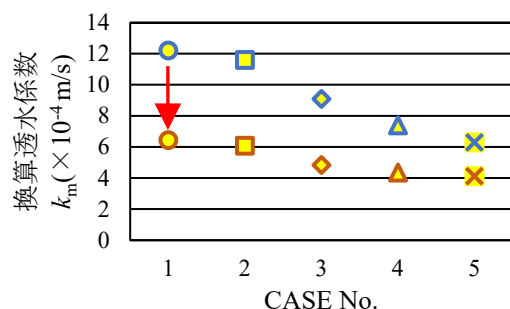
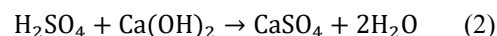


図-5 焼却灰の換算透水係数の低下傾向の比較⁵⁾

却灰の通水断面積(m^2) (本実験においては $A = 4.42 \times 10^{-3} m^2$)、 t ：通水流量を採取した時間(s)である。

焼却灰へ循環させる水の pH が低いほど pH 低下速度が速いが、焼却灰の換算透水係数は、逆に循環させる水の pH が低いほど遅くなった。式(2)に硫酸と水酸化カルシウムに関する反応式を示す。



本実験では、焼却灰へ循環させる水の pH の調整に、硫酸 (0.5 mol/l) を用いた。焼却灰へ水を循環した際に、水酸化カルシウムと硫酸が反応し硫酸カルシウムが発生したと考えられる。発生した硫酸カルシウムによって焼却灰中の粒子間の空隙が閉塞され透水性が低下し、調整した pH が高い場合より浸出水の pH が 8.6 以下に低下するまでに時間を要したと考えられる。

iii) 焼却灰の深度ごとの浸出水の pH 低下速度に関する実験

1) 実験概要

図-6 に実験器具の概要と pH 計測位置を示

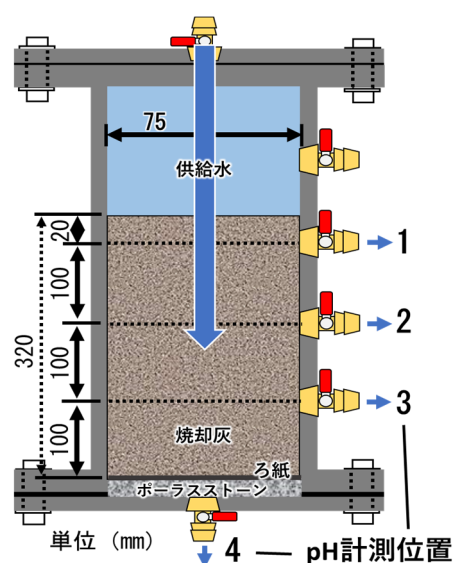


図-6 実験器具の概要と pH 計測位置⁵⁾

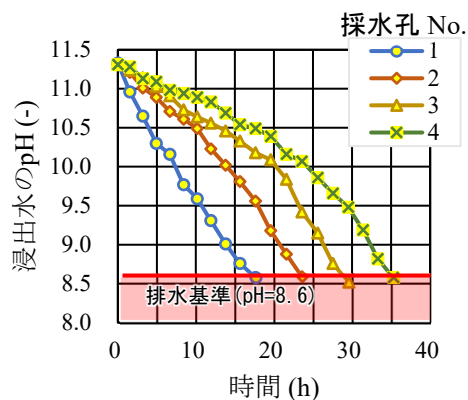


図-7 CASE.1 浸出水の pH の経時変化⁵⁾

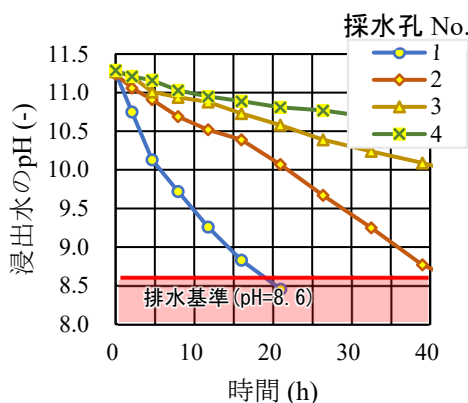


図-8 CASE.2 浸出水の pH の経時変化⁵⁾

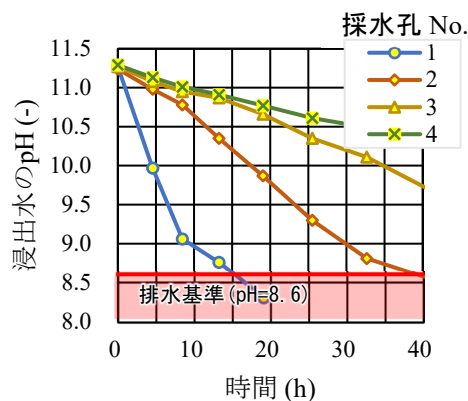


図-9 CASE.3 浸出水の pH の経時変化⁵⁾

す。本実験では、焼却灰へ供給させる水の pH を 3～7 まで変化させ、最下部の浸出水の pH を 8.6 以下まで低下させる。供給させる水の pH と浸出水の pH が 8.6 以下まで低下する時間や水量の関係を整理し、効果的な循環させる水の pH を明らかにする。また、焼却灰の深度ごとにおける浸出水の pH の低下速度についても明らかにする。

実験ケースとしては、焼却灰へ供給する水の pH を 3、5 及び 7 に変化させる。焼却灰へ

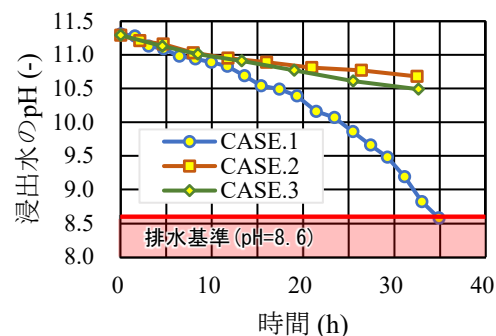


図-10 浸出水の pH の経時変化：pH 計測位置⁵⁾

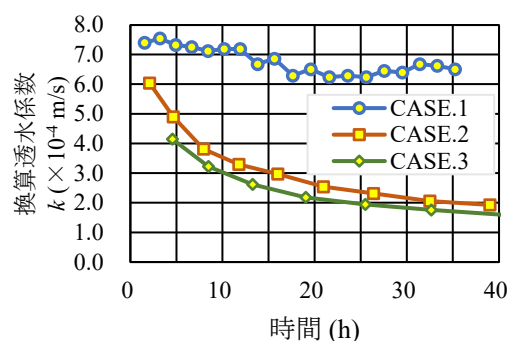


図-11 焼却灰の換算透水性の経時変化⁵⁾

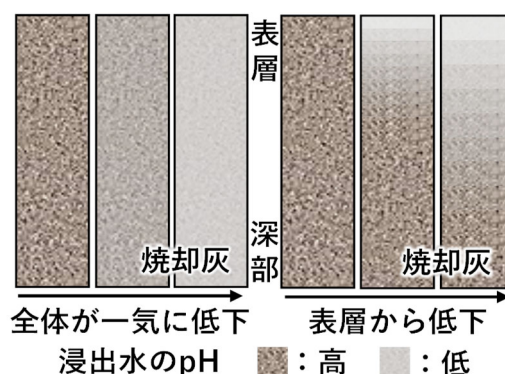


図-12 浸出水の pH 低下のメカニズムイメージ⁵⁾

循環させる水の pH の調整の中和剤には硫酸を用いた。

以下に実験手順の概要を示す。

1. 供試体は、焼却灰を乾燥密度 0.700 g/cm^3 を目標に、高さ 320 mm (10 層) になるよう締固めて作製する。
2. 採水した浸出水を基に、焼却灰へ循環させる水の pH を調整（制御）する。
3. 実験器具の上部より pH を調整した水を供給し、実験器具の下部より採水する。
pH の計測は、浸出水 20 l 通水毎に行う。試

料には、ii)と同じ焼却灰を用いた。

2)実験結果と考察

図-7、図-8、図-9 に浸出水の pH の経時変化を示す。図-10 に pH 計測位置 4 における浸出水の pH の経時変化を示す。凡例は図-6 の pH 計測位置の数字である。図-11 に焼却灰の換算透水性の経時変化を示す。図-12 に浸出水の pH 低下のメカニズムイメージを示す。焼却灰の換算透水係数は、循環水による浸出水の pH 低下速度と焼却灰の透水性に関する実験と同様に式(1)より求めた。pH の計測は、CASE.1 における焼却灰の最下部である pH 計測位置 4 の浸出水の pH が 8.6 以下に低下するまで続けた。

図-7～図-9 において、CASE.1 の浸出水の pH が 8.6 以下に低下したが、CASE.2、CASE.3 の浸出水の pH は 8.6 以下に低下しなかった。また、CASE.1 の浸出水の pH が 8.6 以下に低下した直後の焼却灰の換算透水係数 6.50×10^{-4} m/s と比較して、CASE.2、CASE.3 の焼却灰の換算透水係数は、それぞれ 1.93×10^{-4} m/s、 1.60×10^{-4} m/s と透水性が著しく低下した。さらに、CASE.1 の焼却灰の透水性は時間経過と共に、一定になる傾向を示すのに対して、CASE.2、CASE.3 の焼却灰の透水性は低下傾向にあった。したがって、pH を低く調整した循環水による浸出水の早期 pH 低下促進は本実験では比較的困難であることが明らかになった。

以上の実験結果から、浸出水の pH は一度の通水で焼却灰の全体が一気に低下していくのではなく、焼却灰の表層から深部にかけて徐々に低下していくことが明らかになった。

iv) 廃棄物最終処分場が廃止措置に至るまでに要する年数の概算予測

1) 概要

本研究では、長期的な問題に発展すると考えられる、浸出水を放流するための排水基準における pH の項目が基準を満たす年数を概算であるが予測する。中和剤を用いて pH を低くした水を焼却灰へ供給するより、水道水を焼却灰へ供給する方が、早く浸出水の pH が

8.6 以下に低下する結果が実験により得られたため、水道水による循環水を想定して年数を求めた。また、焼却灰の深度ごとの浸出水の pH 低下量に関する比較実験の結果より、当該廃棄物最終処分場の浸出水の pH が 8.6 に低下するまでの年数を概算予測する。

2) 当該最終処分場が廃止措置に至るまでに要する年数予測結果と考察

当該廃棄物最終処分場の浸出水の pH は 10.5 程度である。焼却灰の深度ごとの浸出水の pH 低下速度に関する比較実験の結果から、焼却灰の高さが 0.3 m 増加すると、浸出水の pH が 10.5 から 8.6 に低下するために必要な通水量が 0.04 m^3 増加した。当該廃棄物最終処分場の廃棄物層の深さは約 6 m であるため、浸出水の pH が 10.5 から 8.6 に低下するために必要な通水量が、焼却灰の高さが 0.3 m ごとに 0.04 m^3 ずつ増加すると想定すると、焼却灰の深度 6 m 地点における浸出水の pH が 8.6 以下に低下するために必要な通水量は、 0.94 m^3 と考えられる。式(3)に当該廃棄物最終処分場の浸出水の pH が 10.5 から 8.6 に低下するために必要な年数の予測式を示す。

$$Y = Q \times 1.7 / L \quad (3)$$

Y: 浸出水の pH が 8.6 に低下するまでの年数(year), Q: 焼却灰の深度が 6 m の場合に必要な浸出水の pH が 10.5 から 8.6 に低下するための通水量 (本試算においては $4,250,000 \text{ m}^3$), L: 当該処分場の年間の浸出水処理能 (本試算においては $14,600 \text{ m}^3/\text{year}$), 1.7: 実験条件から試算した係数である。

当該廃棄物最終処分場の埋立面積は $20,000 \text{ m}^2$ 、乾燥密度は原位置計測により 1.20 g/cm^3 程度であるため、焼却灰の量は、焼却灰の深度ごとの浸出水の pH 低下量に関する比較実験の条件と比較すると単位体積当たり 1.7 倍と想定される。この条件を用いて浸出水の pH が 10.5 から 8.6 に低下するために必要な通水量を算出すると、約 720 万 m^3 である。当該廃棄物最終処分場の水処理施設の 1 日の浸出水の

処理能力は 40 m³/day であるため、現在の当該廃棄物最終処分場の水処理施設の能力が継続されると仮定すると、浸出水の pH が 10.5 から 8.6 まで低下する期間は、対策方法としては現実性がない様な約 495 年と予測された。

② プロジェクトの達成状況

本研究による現地調査・計測および室内実験により、以下の知見が得られた。

- ・本研究に取り組む中で、NPO・LSA への参加により、より強固な推進体制で取り組むことができた。
- ・焼却灰へ循環させる水の pH が低いほど、浸出水の pH は大きく低下したが、逆に焼却灰の透水性が大きく低下する傾向を示した。
- ・焼却灰への通水量は同じであっても焼却灰内の深さにより pH は異なり、上面ほど pH の低下が早いことが明らかになった。このことから、廃棄物最終処分場の様な焼却灰の厚さが 10 数 m～数十 m の場合には、効果的に pH を低下させるためには、廃棄物層の深度を考慮した pH 低下促進計画を立案する必要がある。
- ・焼却灰へ供給させる水の pH が低い場合、焼却灰の透水性が大きく低下したため、浸出水の pH が 8.6 以下に低下するまでに時間を要した。実験結果から、pH を低くした循環水を用いるより、水道水を焼却灰へ循環させる方が、浸出水の pH を 8.6 以下に比較的早期に低下させるのに効果的であった。
- ・当該廃棄物最終処分場の浸出水の pH が排水基準に適合するまでの年数を概算予測すると、約 495 年となった。したがって、廃棄物最終処分場の廃止措置に向けては、経済性等を考慮した新たな浸出水の早期 pH 低下促進方法の検討・立案が必要と考えられる。
- ・得られた成果は、土木学会、地盤工学会及び全国都市清掃研究・事例発表会などへ発信しており¹⁾³⁾⁴⁾、類似課題を抱える地方自治体に大いに貢献するものであり、本プロジェクトの初期の目的を十分達成した。

③ 今後の計画と課題

- 本研究成果は、地方自治体が抱える類似課題の解決のための糸口を見出すために大いに寄与するものと考えられる。今後、以下の課題を解決し、水戸市と連携を図りながら、早期社会実装の目途を付けて行きたいと考えている。
- ・浸出水の pH 低下の促進効率を高めるための方法を新たに見出す必要がある。
 - ・類似課題を有する他の地方自治体の対策技術についても調査を行う。

謝辞：本研究は、茨城大学社会連携センター支援事業 戦略的地域連携プロジェクト並びに特定非営利活動法人最終処分場技術システム研究協会（NPO・LSA）の支援並びに協力を頂いた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1)宮脇健太郎，坂本篤，木村志照，小林薫，金子卓寛，肴倉宏史，田中裕一，平山涼一，松岡巨恒：一般廃棄物最終処分場の高 pH 浸出水アンケート調査，第 43 回全国都市清掃研究・事例発表会講演論文集，pp.241-243，2022..
- 2)大寺泰輔，島岡隆行，中山裕文：一般廃棄物焼却灰の粒子性状と生成過程に関する一考察，環境工学研究論文集，Vol.40，pp.473-479，2003.
- 3)金子 卓寛，小林 薫，米山 俊一：廃棄物最終処分場の浸出水循環による pH 低下に関する実験的研究，第 18 回地盤工学会関東支部発表会（GeoKanto2021），環境 2-5，p.59，2021.
- 4)金子 卓寛，小林 薫，米山 俊一：浸出水 pH と焼却灰の透水性低下に及ぼす循環水 pH の影響，第 49 回土木学会関東支部技術研究発表会，VII-22，2022.
- 5) 金子 卓寛：廃棄物最終処分場廃止措置に向けた循環水による浸出水の早期 pH 低下促進方法に関する研究，令和 3 年度茨城大学大学院修士論文，2022.3