

廃棄物最終処分場地盤中への CO₂ 固定と同時に早期安定化を加速させる技術開発可能性 評価プロジェクト

水戸市生活環境部清掃事務所・清掃工場長

石川 慶一

茨城大学大学院理工学研究科（工学野）・教授

小林 薫

連携先

水戸市生活環境部清掃事業所

プロジェクト参加者

小林 薫（茨城大学大学院理工学研究科・教授 担当：全体総括、報告会及び意見交換会の企画）

原 龍正（茨城大学工学部・学生 担当：各種の室内実験の実施、データ整理 他）

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：大学との連絡調整や技術的アドバイス、事業関連の焼却灰、各種データの提供 他）

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：報告会及び意見交換会の準備等）

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）

橘内 敏郎（浅野アタカメンテナンス株式会社、担当：水戸市からの依頼による関連データの提供協力）

プロジェクトの実施概要

① プロジェクトの目的

閉鎖措置開始から既に概ね 27 年が経過している水戸市一般廃棄物第一最終処分場では、現在でも廃棄物最終処分場から排水される浸出水は、 $\text{pH}=10.5\sim 11$ の強アルカリで、外部の河川等に放流するためには水処理施設で中和（排水基準に適合）させる必要があり、長きに渡り水処理費等の維持管理費が投入され

ている。本事業では、焼却灰等の廃棄物地盤の強アルカリを逆に活用し、焼却灰内に CO₂ を固定することで pH を低下させ、早期安定化を目指すと共に、脱炭素化社会の実現に向けた自治体と連携したカーボンニュートラルの取り組みに貢献する技術の開発可能性を明らかにすることを目的とする。具体的には、焼却灰等の埋立て地盤への CO₂ 固定方法は、CO₂ を気体で送り込む（通気）、または、CO₂ 溶解水を地盤内に注水（通水）し、CO₂ 溶脱後に強制的に吸引、揚水する方法（強制循環型システム）についての実現可能性を判断するための基礎的研究である。本年度は、通気または通水により、焼却灰内に CO₂ を本当に固定化することが可能なかを室内実験結果を基に評価し、「(仮) 強制循環型システムによる CO₂ 固定と効果的 pH 低下技術」の開発可能性を見極める。

② 連携の方法及び具体的な活動計画

自治体側と大学側の役割を明確にしたうえで連携を図り、以下の様な具体的な活動計画を両者で立案した。次に、「(仮) 強制循環型システムによる CO₂ 固定と効果的 pH 低下技術」の開発可能性を協同で判断すると共に、今後の社会実装の実現可能性についての検討を担う。

- 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招集と開催（開催に伴う調整、会場の準備及びプロジェクトなどの機材準備含む）
- ii) 実験用焼却灰の提供（役所内の各種手続きを含む）及び実験後の引取りなど
- iii) 大学が提案する強制循環型システムに対

する意見、指摘およびアドバイスなどを担う
iv) 他の地方自治体の pH 低下方法などに関するヒアリング、情報収集に関する調整等の大学側の協力依頼の対応

また、大学側としては、本技術の実現可能性の評価・判断を行なう際に重要となる室内実験、熱分析（焼却灰内の CO₂ 量分析）による各種データの取得などを行う。

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企画・共同開催

ii) 「(仮) 強制循環型システムによる CO₂ 固定と効果的 pH 低下工法」に関連する室内実験等は卒業研究として取り組む。その後、開発可能性と判断されれば、継続して修士論文の研究テーマにして取り組む

iii) 実験計画書の作成、小型ドラフトチャンバー等の製作、実験結果の評価・検証 (V&V) および関連した研究成果を含めて成果の公表

③ 期待される成果

全国 3 ケ所以上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等は複数ある（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.）。廃棄物最終処分場の廃止措置時の浸出水 pH を計画的に低下させることを可能とする「(仮) 強制循環型システムによる CO₂ 固定と、効果的 pH 低下技術」の開発ができれば、大幅な維持管理費（廃止処置までの期間短縮は経費削減に寄与）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地方自治体へのインパクトのあるソリューションを水戸市（茨城県）発で提供（社会貢献）できる。

さらに、茨城県が掲げる脱炭素地域への貢献や工学部が位置する日立市が掲げるゼロカーボンシティ構想の実現にも大いに寄与で

きるものである。加えて、茨城大学においてもグリーン化推進計画（案）にある様に、「茨城大学は、環境に関する教育・研究の推進に努め、また、その教育・研究を生かした地域社会やその他関係者とのコミュニケーションを積極的に展開する」という点においても貢献できる。

プロジェクトの実施成果

① 活動実績

(1) 意見交換などの実績

i) 2022/9/5 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清掃工場へ報告

（清掃事務所清掃工場の会議室）：水戸市 石川 慶一、茨城大学大学院 小林 薫、都市システム工学科 4 年 原 龍正

ii) 2022/9/5 焼却灰の受け取り実施（清掃事務所清掃工場）：水戸市 石川 慶一、茨城大学大学院 小林 薫、都市システム工学科 4 年 原 龍正

iii) 2022/10/24 焼却灰の成分分析データ提供（清掃事務所清掃工場）：水戸市 石川 慶一、茨城大学大学院 小林 薫、都市システム工学科 4 年 原 龍正

iv) 2022/12/5 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清掃工場へ報告（メール）：2022/9/5 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清掃工場へ報告：水戸市 石川 慶一、茨城大学大学院 小林 薫、都市システム工学科 4 年 原 龍正

v) 本研究プロジェクトの最終報告（メール含む）：2023/3/9 本研究プロジェクトの研究成果を水戸市生活環境部清掃事務所清掃工場へ報告（2022 年度末に対面での報告も予定）：水戸市 石川 慶一、茨城大学大学院 小林 薫、都市システム工学科 4 年 原 龍正

(2) 調査・研究活動の実績

1) 炭酸水通水による pH 低下量の測定実験

i) 実験概要

焼却灰に水道水と炭酸水をそれぞれ通水し、それぞれの浸出水の pH 計測と通水にかかる時間の計測をする。そして、炭酸水による浸出水の pH 低下効果と炭酸水通水による透水性の変化を把握する。

ii) 簡易実験装置の概要およびその手順

表-1 に実験条件を、図-1 に簡易型実験装置の概要を示す。以下に実験方法（通水が水道水の場合）を示す。まず、焼却灰を表-1 の実験条件になるように締め固め供試体を作製する。次に、通水する水道水の pH を計測する。その上で、簡易実験装置の上部より水道水を通水する。実験装置の下部には空のフリーコンテナを設置し浸出水を集水する。所定の水を通水後、通水にかかった時間と浸出水の pH を計測する。前記の作業を 3 回繰り返し、総通水水量が 6 リットル（以下、6L と記す）になるまで続ける。また、通水する水を炭酸水にした場合も同様の実験手順で実施する。

iii) 実験結果・考察

表-2 に実験結果（通水が水道水の場合）、表-3 に実験結果（通水が炭酸水の場合）を示す。浸出水の pH 上昇値について、水道水を通水した場合と炭酸水を通水した場合を比較

表-1 実験条件

焼却灰の乾燥密度 ρ_d (Mg/m^3)	0.70
焼却灰の重量 (g)	61.9
焼却灰の高さ (mm)	20.0

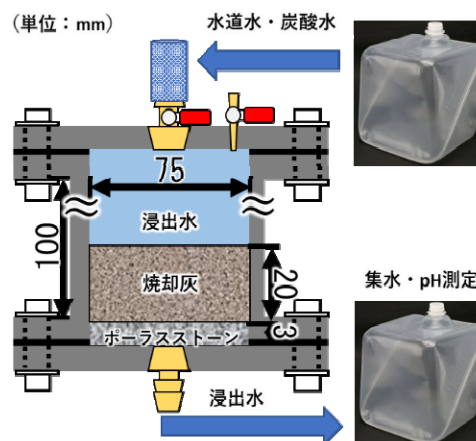


図-1 簡易型実験装置の概要図

した。その結果、水道水と炭酸水を 6L 通水した場合、浸出水の pH は各々 3.49 と 1.67 の上昇が見受けられた。この pH 上昇量の差は、約 1.8 であった。加えて、通水後 pH については、水道水、炭酸水共に総通水水量が増えるほど pH はわずかながら低下している様子が見受けられる。

表-2 実験結果(通水が水道水の場合)

通水溶液	通水回数	通水時間 (m)	通水前 pH (-)	通水後 pH (-)	pH 上昇値 (-)	総通水水量 (L)
水道水	1 回目	12:09	7.24	11.02	3.78	2
水道水	2 回目	16:26	7.32	10.93	3.61	4
水道水	3 回目	19:40	7.28	10.77	3.49	6

表-3 実験結果(通水が炭酸水の場合)

通水溶液	通水回数	通水時間 (m)	通水前 pH (-)	通水後 pH (-)	pH 上昇値 (-)	総通水水量 (L)
炭酸水	1 回目	49:47	4.65	6.53	1.88	2
炭酸水	2 回目	54:31	4.52	6.25	1.73	4
炭酸水	3 回目	51:11	4.56	6.23	1.67	6



写真-1 気泡(実験器具下部)

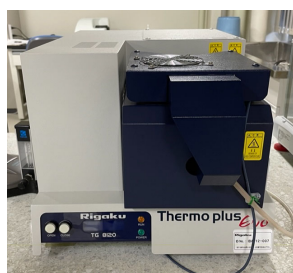


写真-2 高分解能差動型熱分析装置の外観

また、所定の水量が供試体を通水完了するまでの時間（以下、通水時間と記す）については、炭酸水は水道水の通水時間に比較して、多少バラツキはあるが3～4倍程度であった。

通水に炭酸水を用いた方が、通水時間が長くなった主な要因の1つとしては、通水時に焼却灰の中に多数の大きな気泡が生じている可能性がある。写真-1に供試体下部からの浸出水と共に、多数の比較的大きな気泡が見受けられる。この現象については、水道水を通水させた場合には見受けられなかった。このことから、炭酸水を通水した場合、焼却灰の中に多数の比較的大きな気泡が生じ、供試体内の不飽和状態が顕著になり、焼却灰の透水係数が低下したことによるものと推察される。このことから、今後は炭酸水については、焼却灰の中で生じる気泡を小さくするために、マイクロバブルなどの微細な気泡による炭酸水の生成についての検討が必要であると考えられる。

2) 焼却灰のCO₂固定化量の測定実験

i) 実験概要

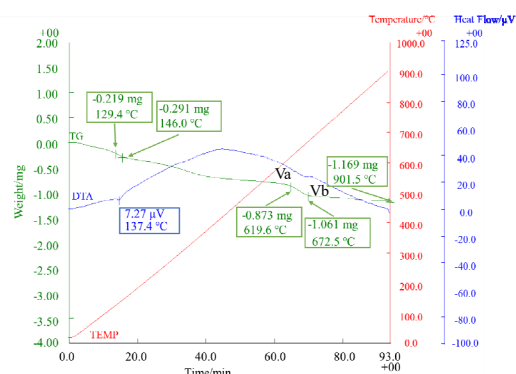


図-2 焼却灰の熱分解挙動(炭酸水通水前)

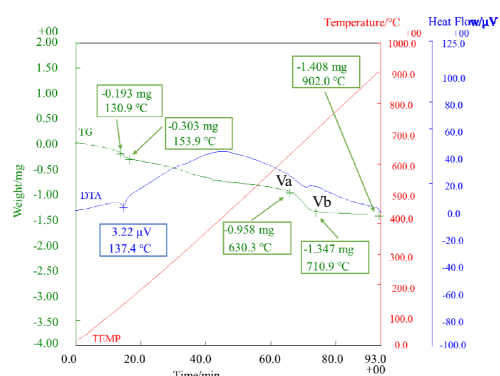


図-3 焼却灰の熱分解挙動(炭酸水通水後)

炭酸水を焼却灰に通水し、焼却灰中に固定化されたCO₂量を把握するために、熱分析装置を用いて定量的にCO₂量の測定を行う。

ii) 実験装置およびその手順

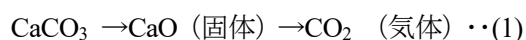
写真-2は、今回使用した熱分析装置である高分解能差動型熱分析装置（Thermo plus EVO）を示す。実験の概略手順は以下に示す通りである。まず、通水前の焼却灰を用いて熱分析を行いCO₂含有量の初期値を測定する。また、炭酸水を通水前のpHを測定する。その上で、炭酸水6Lを通水した後、焼却灰を乾燥させ10mgを採取して前述同様に熱分析装置を用い定量的にCO₂量の測定を行う。なお、得られた実験データの再現性を確認するため、炭酸水の通水前と通水後の焼却灰で各々3回熱分析実験を実施した。

iii) 実験結果・考察

図-2に炭酸水通水前の焼却灰の熱分解挙動を、図-3に炭酸水通水後の焼却灰の熱分解

挙動を示す。同図における記号は、TG は焼却灰の重量減少量、DTA は反応の状態および TG が温度を示す。

図-3 の Va～Vb 間の重量減少量は、図-2 の Va～Vb 間の重量減少量に比較して、明らかに大きくなっていることが分かる。炭酸水を通水することで、焼却灰中のカルシウムと反応して炭酸カルシウムが発生する。そのため、炭酸水通水後の焼却灰には、通水前の焼却灰と比較して多くの炭酸カルシウムが存在することになり、焼却灰に炭酸水を通水させた方が、重量減少量が大きくなったものと考えられる。以下に熱分解の反応式(1)を示す。



今回の熱分析においては、Va～Vb 間の重量減少量が、固定化された CO₂ 量である⁵⁾。

表-4 に熱分析による炭酸水通水前の CO₂ 量、表-5 に炭酸水通水後の熱分析による重量減少量を示す。表中の初期重量は、熱分析開始前の焼却灰の重量で、V は Va～Vb 間の重量減少量を示す。重量減少率は、下式(2)の様

に定義した。

$$\text{重量減少率 (\%)} = V / \text{初期重量} \times 100 \cdots (2)$$

6L の炭酸水通水によって、表-4 と表-5 を基に、焼却灰（初期重量＝10mg）には 0.17mg（＝0.333 mg（通水後の重量減少量）－0.163 mg（通水前の重量減少量））の CO₂ が固定化されたことになる。

参考文献

- 1) 総理府・厚生省令：一般廃棄物の最終処分場及び産業廃棄物の最終処分場に係る技術上の基準を定める命令、
<http://www.env.go.jp/hourei/11/000018.html>
(2023 年 3 月 9 日閲覧)。
- 2) 環境省：最終処分場跡地形質変更に係る施行ガイドライン、
http://www.env.go.jp/recycle/misc/guide_wds/
(2023 年 3 月 9 日閲覧)。
- 3) 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、茨城大学工学部都市システム

表-4 熱分析による重量減少量（炭酸水通水前）

	初期重量 (mg)	Va (mg)	Vb (mg)	V (mg)	重量減少率 (%)
Sample1	9.523	0.873	1.006	0.133	1.40
Sample2	10.302	0.788	0.965	0.177	1.72
Sample3	10.296	0.782	0.960	0.178	1.73
平均				0.163	1.61

表-5 熱分析による重量減少量（炭酸水通水後）

	初期重量 (mg)	Va (mg)	Vb (mg)	V (mg)	重量減少率 (%)
Sample1	10.412	0.958	1.347	0.389	3.74
Sample2	9.238	0.954	1.251	0.297	3.21
Sample3	10.237	1.008	1.320	0.312	3.05
平均				0.333	3.33

工学科卒業論文、45p、2019.

- 4) 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、茨城大学工学部都市システム工学科卒業論文、38p、2020.
- 5) 下野 功、小林孝紀：ホタテ貝殻の熱分解挙動、北海道立工業技術センター研究報告No.7、pp.56-58、2002.

② プロジェクトの達成状況

「(仮) 強制循環型システムによるCO₂固定と効果的pH低下技術」の開発可能性を見極めるための室内実験を行った。その結果、以下の知見が得られた。

- (1) 焼却灰のCO₂含有量は、炭酸水を通水前後でCO₂含有量に違いが生じており、通水により焼却灰にCO₂がキャプチャーされて含有量が増加した。
- (2) 通水による焼却灰のCO₂含有量は、通水する炭酸水の水量が多くなるほど増加する傾向を示した。

以上より、「(仮) 強制循環型システムによるCO₂固定と効果的pH低下技術」の開発の可能性を確認することができたことから、当初の目標を概ね達成することができた。

② 今後の計画と課題

i) 本研究では、「(仮) 強制循環型システムによるCO₂固定と効果的pH低下技術」の開発可能性を見極めるための実験を行い、当初の目標を概ね達成することができ、社会実装に向けて具体的なシステム開発に取り組んでいく所存である。

まずは、CO₂固定化について、固定化性能を評価するための定量的な試験装置を作製する必要がある。その上で、効果的・効率的な通水による強制循環型システムについて、経済性を考慮したシステムを構築していきたい。現状においては、強制循環型システムの根幹となる通水（注水と揚水）機構については、近

年の建設工事で活用が増加しているウルトラディープウェル（UD）工法を組み合わせた独自のCO₂固定と効果的pH低下技術を実現する強制循環型システムを確立していく予定である。

ii) 課題

焼却灰への炭酸水通水でCO₂固定化（pH低下も同時改善）を実現可能であることを確認した。しかし、現状の研究成果では可能性はあるものの、CO₂固定化のための通水時間が長期間に渡る可能性が高く、この点は開発するシステム構築における最大の課題であると認識している。現状では、マイクロバブルなどを活用することで、焼却灰に炭酸水を通水する場合に生じる気泡を微細にする（極力小さくする）工夫で、対処可能かを早急に検討し、この課題の早期解決を図ることが必要である。本研究の成否は、この課題解決にかかっていると言っても過言ではないと考える。

よって、本システム構築においては、マイクロバブルによる炭酸水の製造方法や注水・揚水井の構造と共に、前述したウルトラディープウェル（UD）工法を開発したメーカー等を含めた異業種との連携も必要と考える。