

管理型海面処分場におけるCO₂による 中和固定技術

山崎 智弘¹

¹東洋建設株式会社 土木事業本部 土木技術部 部長。

管理型海面処分場は港湾域に築造される一般廃棄物や産業廃棄物を埋立処分する施設である。特に焼却灰や鉱さいにはカルシウムが多く含まれ、CO₂による炭酸塩化が可能である。処分場内の保有水は埋立進捗とともにアルカリ化する場合が多く、著者らはこのような保有水には大気中のCO₂が一方向的に溶解していることを調査¹⁾により明らかにしている。本稿では、管理型海面処分場でのCO₂固定とその特徴について、またCO₂貯留施設として活用するための課題について紹介する。この技術は、処分場の早期廃止・早期跡地利用にも貢献することが期待できる。

キーワード：管理型海面処分場、廃棄物、保有水、CO₂固定、早期廃止

1. 管理型海面処分場とは

廃棄物の埋立処分場は、陸上処分場と海面処分場に大別される。さらに安定型、管理型、遮断型があり、埋立廃棄物の特性に応じて処分場の外周や底面の構造が異なる。管理型処分場には、水と接触して有害な物質が溶出する廃棄物が埋め立てられる。そのため外周は二重の遮水工で囲まれ、底面と合わせて場内水（保有水）が漏出しない構造となっている。管理型海面処分場では、場内水位が一定に管理され、廃棄物の埋立や降雨により余剰となる水（浸出水）は、水処理施設で適切に排水基準に適合した状態に処理した後に、一般的には海外に放流されている。

(1) 廃棄物量と処分場

管理型処分場には、例えば、地域の焼却場から運搬される一般廃棄物の主灰や飛灰、工場や発電所等から排出される鉱さいや石炭灰などが搬入され、埋め立てられている。国内の廃棄物の排出量と最終処分量を図-1(a)(b)(c)に示す。これらを受け入れる処分場の残余年数は20年余となっている²⁾。そのため、今後、リサイクル率を高めるなどさらに努力をしたとしても、処分場は今後も新規造成が必要となる施設である。

(2) 処分場の課題

管理型海面処分場は港湾域に建設され、埋立完了後は工場や荷役施設等の高度な跡地利用が望まれている。しかし浸出水が、例えばpHが2年間継続して廃止基準の5.0～9.0とならず、廃止できないことが課題となっている。

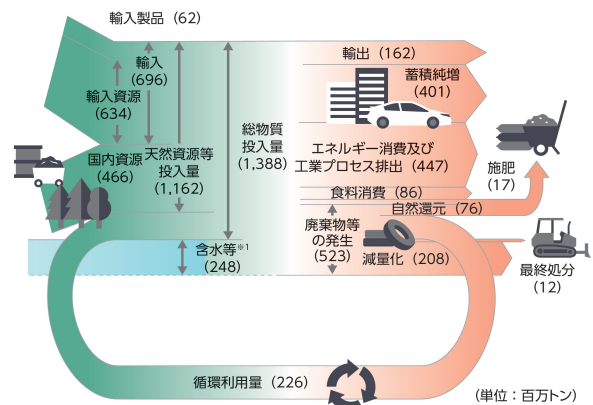


図-1(a) 日本における物質フロー(2022年)²⁾

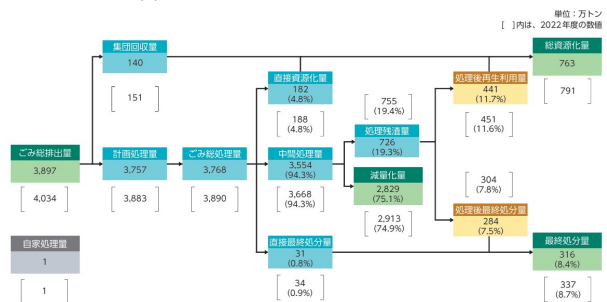


図-1(b) 一般廃棄物の排出量と最終処分量(2023年)²⁾

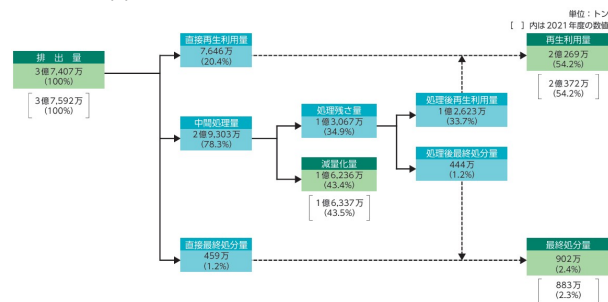


図-1(c) 産業廃棄物の排出量と最終処分量(2022年)²⁾

2. 廃棄物へのCO₂固定メカニズム

廃棄物を対象にCO₂により炭酸塩化する研究は近年多く実施されている。著者らは2016年頃より複数品目の廃棄物を対象としたCO₂固定の室内実験や現地実証実験を実施しており、多くの知見を有している^{3),4),5)}。

(1) 廃棄物とカルシウム含有率

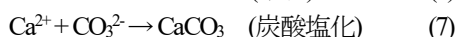
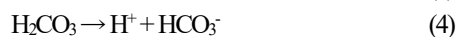
埋立廃棄物の中の、例えば飛灰には、排煙処理として消石灰(Ca(OH)₂)が噴霧された状態で集塵機にて回収されている。そのため、比較的カルシウム含有量が多い廃棄物となっている。鉱さいも多くカルシウムを含んでいるが、粒子外部のみならず内部まで満遍なくカルシウムが分布しているため、内部のカルシウムが二酸化炭素(CO₂)と反応するのに時間を要し、短時間に炭酸塩化する量は飛灰と比較して小さいと想定されている。表-1に著者らが対象とした廃棄物の物理化学特性⁵⁾を示す。

表-1 著者らが対象とした廃棄物の物理化学特性⁵⁾

廃棄物		飛灰	主灰	鉱さい
粒度	粗砂分(%)	0.1	13.6	13.2
	中砂分(%)	20.9	37.4	29.3
	細砂分(%)	16.1	20.5	29.1
	シルト分(%)	26.2	14.1	19.6
	粘土分(%)	36.6	14.5	8.8
含水比(%)		37.5	29.5	10.2
COD(mg/L)		25	3.3	8.8
TN(mg/L)		3.2	0.12	0.12
蛍光線分析	Na ₂ O	4.0	2.7	<0.007
	Al ₂ O ₃	1.1	16	14
	SiO ₂	3.5	19	17
	SO ₃	4.1	1.8	1.4
	Cl	39	12	7.2
	K ₂ O	5.7	1.8	0.03
	CaO	39	39	51
	Fe ₂ O ₃	1.0	2.6	2.9
初期CO ₂ 含有量(kg-CO ₂ /t)		50	32	25

(2) 反応メカニズム

CaOやCa(OH)₂を含む廃棄物は、適切な水分を加えることで、式(1)～(7)の反応が生じ、炭酸塩化する。ただし、この反応が瞬時に全モル数が平衡に達するかは、環境条件や処理条件により異なることが著者らの研究⁶⁾で確認されている。



3. 処分場でのCO₂固定

東洋建設(株)では、管理型海面処分場の建設はもとより、浮桟橋による薄層埋立技術を有している。また搬入される廃棄物と保有水を対象にCO₂を固定する技術の実用化検討を実施している。

(1) 搬入廃棄物

処分場内に搬入された廃棄物を水中埋立する前に散水養生し、大気中のCO₂や工場や発電所等から回収したCO₂を廃棄物に固定する工法開発を行っている。既往の実績では、CO₂を固定しやすい廃棄物、例えば飛灰に、適切な量の散水を行い含水比調整すると、3日間～7日間の養生で30～100kg-CO₂/t が固定されることが確認されている。

(2) 保有水

管理型海面処分場内の保有水は、埋立当初のpHは8程度であるが、埋立進捗が2～3割を超える段階からpH10を超過し、埋立終盤にはpH11以上となる場合がある。このように一般海域と隔離された施設内の海水がアルカリ化することで、大気中のCO₂が一方向的に溶解する状態となる。著者らは、そのCO₂溶解量の季節変動を調査し、概ね5～10t-CO₂/ha/年 が処分場内に溶解していると推定している。

さらに、当社では回収したCO₂をウルトラファインバブル(UFB)化して保有水中に曝気することで、効率よく保有水にCO₂を溶解・固定させる工法を実処分場にて実証している。

4. 搬入廃棄物へのCO₂固定実験の紹介

(1) 概要

実処分場における飛灰を対象とした実験では、スプリンクラーやミストによる散水を施し、28日間までの大気中のCO₂の固定状況を測定した⁴⁾。室内実験ではCO₂が固定する盛土深さを検証した⁵⁾。それぞれの実験状況を図-2(a)(b)に示す。

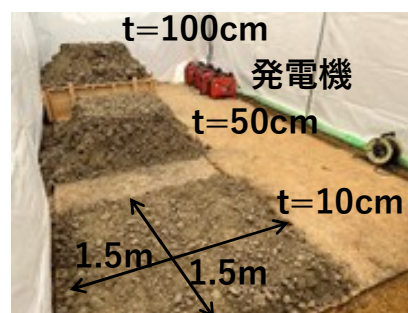


図-2(a) 実処分場での廃棄物へのCO₂固定実験状況⁴⁾



図-2(b) 室内でのCO₂固定実験状況⁵⁾

(2) 結果

現地実験の結果を図-3に、室内実験の結果を図-4に示す。盛土表層数センチの範囲に多くのCO₂が固定されていることが確認できた。飛灰へのCO₂固定量が大きくなる含水比は概ね40%程度であった。ただしCO₂固定のための最適含水比は廃棄物の種類や、廃棄物に含まれるカルシウムの割合により異なる³⁾ため、それぞれの廃棄物により確認する必要がある。

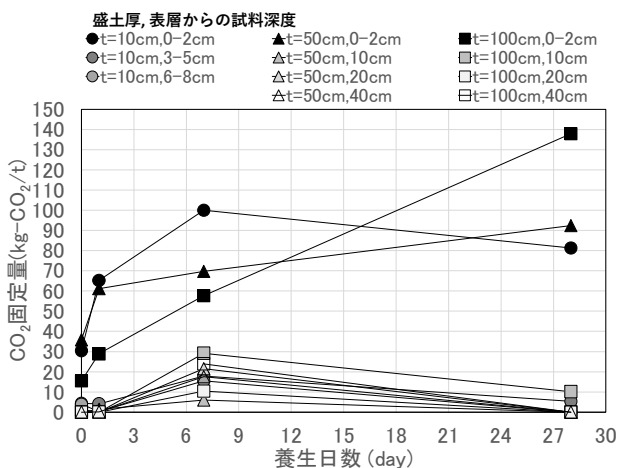


図-3 現地実験におけるCO₂固定量の経時変化⁴⁾

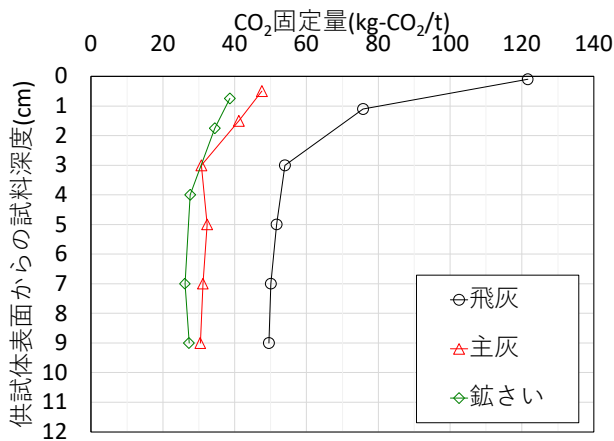


図-4 室内実験におけるCO₂固定量の深度分布⁵⁾

5. 保有水へのCO₂溶解フラックス調査の紹介

(1) 概要

管理型海面処分場内の保有水のpHは、廃棄物の埋立に起因してアルカリ化し、9～12となっている場合がある。また保有水中には廃棄物から溶出したカルシウムイオンが豊富に含まれている。そのため、保有水はCO₂が溶解しやすく、かつ、炭酸カルシウムCaCO₃が生成しやすい環境にある。CO₂の溶解は、pHのみならず水温や、大気と水中のCO₂分圧差などの影響を受けるため、実処分場での調査を実施した。保有水へのCO₂溶解フラックスの計測は図-5に示す計測器を用いた¹⁾。

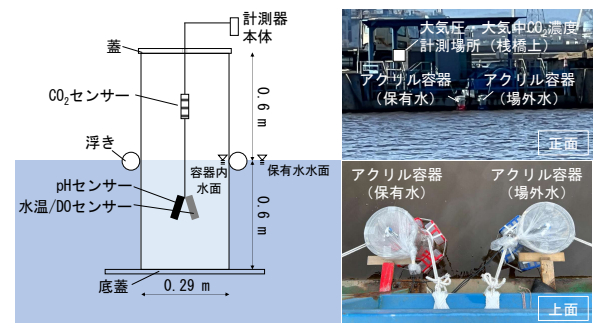


図-5 実処分場保有水のCO₂溶解フラックス計測器¹⁾

(2) 結果

2023年度の実処分場内の保有水におけるCO₂溶解フラックス調査の結果を図-6に示す¹⁾。保有水は、夏季には温度躍層が生じ、冬季にかけて解消する傾向がある。大気から水面を通じて溶解するCO₂は概ね水深1mまでは速やかに拡散し、表層水のpHは低下し、以深にかけて濃度勾配に応じて徐々に中和範囲が広がる傾向が確認された。夏季は中和の拡散深度が温度躍層上に留まるため、表層水のpHが低い状態となりCO₂溶解フラックスが比較的小さくなっていた。一方、冬季では表層水温が低くなり、また風による擾乱の影響により、水深方向の水質が均一化しやすい。そのため水面から溶解したCO₂は水深方向

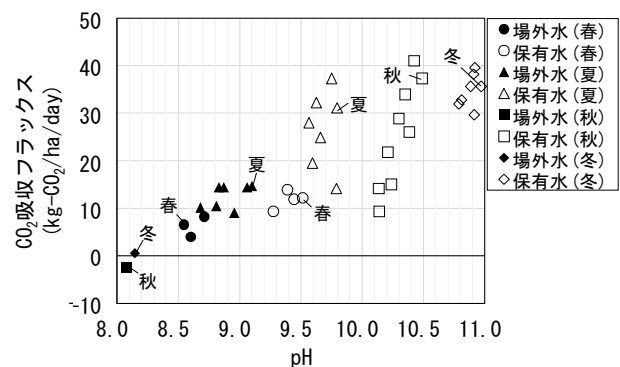


図-6 実処分場保有水のCO₂溶解フラックスの調査結果¹⁾

全層に拡散しやすく、深部の高アルカリ水塊が表層に持ち上がるなどの効果もあり、CO₂溶解フラックスは大きくなると考えられた。

このようにCO₂溶解フラックスは、季節ごとの気象・海象、水質の影響を受けて変動する。著者らはさらに水温や植物プランクトンの影響についても考察を行っている¹⁾。

6. まとめ

(1) 処分場でのCO₂貯留ポテンシャル

埋立容量200万m³、埋立面積20ha、埋立期間20年間、年間埋立廃棄物量を8万m³（10万t）の管理型海面処分場を例として試算する。

受入廃棄物の炭酸塩化処理を1万t/年実施し、50kg-CO₂/tの固定が可能とする。この場合の固定量は500t-CO₂/年となる。

埋立進捗が20%の場合は保有水のアルカリ化が顕著でないとし水面からのCO₂溶解フラックスを5t-CO₂/ha/年とする。20～40%では8t-CO₂/ha/年、40～80%では10t-CO₂/ha/年、80%以上は陸上埋立になるとする。埋立率80%までは浮桟橋による薄層埋立を行い、可能な限り水面を残すものとする。このような埋立方法を採用した場合、20haあたりのCO₂溶解量は、20～40%では160t-CO₂/年、40～80%では200t-CO₂/年となる。

すなわち、廃棄物への炭酸塩化処理で500t-CO₂/年、保有水への溶解量は160～200t-CO₂/年となり、計700t-CO₂/年程度が処分場内に貯留・固定されることが期待できる。

(2) 認定に向けた現状と課題

これらの研究取り組みは、現時点では港湾空港技術研究所や京都大学との共同研究として実施している。今後は固定量の公的な認証値とするための方法論やスキームの確立を行っていく必要がある。

(3) 実用化に向けて

管理型海面処分場において、本稿で紹介した廃棄物や保有水にCO₂が固定する事象はこれまでも生じていることである。当社ではこれらの固定量の見える化の検討や、固定化する特徴の把握より、さらにCO₂固定量を増

大化する工法開発を特許出願・取得の上、実施している。この固定化処理を行う際に必要となるエネルギーは自然再生エネルギーを用いることでカーボンニュートラルに向けた取り組みとしたい。

この技術は、現在当社が取り組んでいる処分場のみならず、全国の同様の課題を抱えている処分場にも適用可能な技術である。

単年度での観点では、CO₂固定量のクレジット化や、港湾での脱炭素計画量の達成などが目標となる。一方で、長期的な観点では、埋立過程から処分場内をある程度中和させることができるため、埋立完了後から廃止までの維持管理期間の短縮に寄与できる可能性が高い。管理型処分場の埋立完了後の維持管理期間は、無対策の場合、30年、もしくはそれ以上の長期間になると言われている。そのため本技術の適用により維持管理費の削減や、早期跡地利用による港湾域の土地活用が図れるメリットは大きいと考えられる。

謝辞：本技術開発において、UFB曝気実験はNEDO委託業務(JPNP16002)の結果得られたものである。また現地実証実験や廃棄物の提供では(公財)愛知臨海環境整備センター様のご協力をいただいた。ここに深謝申し上げます。

参考文献

- 1) 納庄一希, 山崎智弘, 渡辺研, 勝見武: 管理型海面処分場アルカリ保有水の二酸化炭素吸収量に関する現地調査, 土木学会論文集, Vol.81, No.5, 24-00178, 2025.
- 2) 環境省: 令和7年版 環境・循環型社会・生物多様性白書, https://www.env.go.jp/policy/hakusyo/r07/pdf/2_3.pdf
- 3) 長央雄貴, 加藤智大, 高井敦史, 勝見武, 山崎智弘, 納庄一希: 大気曝露による埋立前廃棄物の炭素固定ポテンシャルの評価, 第58回地盤工学研究発表会, 講演集, 11-3-5-07, 2023.
- 4) 山崎智弘, 渡辺研, 長央雄貴, 水口駿, 福田慶吾, 勝見武: 管理型廃棄物への散水養生による二酸化炭素固定実験, 第59回地盤工学研究発表会, 講演集, DS-9-10, 2024.
- 5) 山崎智弘, 渡辺研, 福田慶吾, 大熊広樹, 納庄一希: 廃棄物の二酸化炭素固定量とアルカリ溶出特性, 第30回地下水・土壤汚染とその防止対策に関する研究集会, 2025.
- 6) 田山康一, 納庄一希, 山崎智弘, 加藤智大, 高井敦史, 勝見武: 海面処分場を想定した二酸化炭素によるアルカリ溶液の中和実験, 第60回地盤工学研究発表会, 講演集, 24-7-3-06, 2025.