

要約

本研究では、地球温暖化対策と処分場の早期安定化に対する CO₂ 固定技術の有効性を明らかにすることを目的とし、管理型海面処分場の保有水による CO₂ 吸収量を実測し、海面処分場の CO₂ 吸収源としてのポテンシャルを定量的に評価するとともに、廃棄物の埋め立て段階において CO₂ を活用することによる処分場の早期安定化への効果を検証した。

第 1 章では、海面処分場の役割と課題を整理し、海面処分場の保有課題である早期安定化を解決しつつ、地球温暖化対策であるカーボンニュートラルの実現に資する技術開発の可能性を示して本研究の方向性を設定するとともに、本論文の構成を概説した。海面処分場は廃棄物の埋め立てに伴い、処分場保有水の水質が悪化し、特に pH については廃止基準である pH 5.0~9.0 を長期間満足しないことが課題となっている。一方で、地球温暖化の原因の一つとされている CO₂ を保有水の中和材として活用することで、保有水の早期安定化とカーボンニュートラル実現の両方に貢献できる可能性がある。

第 2 章では、海面処分場保有水のアルカリ化および二酸化炭素の固定メカニズム、早期安定化対策の既往知見を整理した。海面処分場は埋立廃棄物含有の CaO や Ca(OH)₂ が主な要因となり保有水の pH が上昇し、pH 10 を超えるケースが確認されている。アルカリ化した保有水は大気中の CO₂ を一方向的に吸収し、廃棄物の埋め立てに伴い増加した Ca イオンと反応して CaCO₃ となり、処分場内に固定される。保有水は大気中の CO₂ を吸収し中和されているが、運用中の処分場では廃棄物の埋め立てが続くことで pH は再び上昇し、廃止基準を満足することができない。そこで本研究では、保有水の自然中和に加えて人工的に中和する方法として、二酸化炭素をウルトラファインバブル化し保有水の中和材として活用する工法（UFB 工法）を提案した。

第 3 章では、二酸化炭素の新たな吸収源としての可能性を検討するために、管理型海面処分場保有水の二酸化炭素の吸収量を、室内実験および現地計測によって評価した。室内実験では、高さ 6 m の塩ビパイプを用いた実験（実験 1）により、模擬保有水に大気から CO₂ が溶解することによる影響範囲を把握するとともに、風や水温変化のない室内環境下での吸収フラックスを計測した（実験 2）。現地計測では、実処分場の保有水と処分場外の実海水を対象に、季節ごとの CO₂ 吸収フラックスをアクリル製の密封容器を用いた密閉式チャンバー法によって調査し、管理型海面処分場の CO₂ 年間吸収量を評価した。アルカリ水への大気中 CO₂ の溶解は、水深 1.2 m 程度まで影響が確認された。また CO₂ 吸収フラックスは、pH、水温、植物プランクトン、大気 CO₂ 濃度および水面の攪乱により季節変動し、内水残余面積が 23 ha の衣浦港 3 号地廃棄物最終処分場では、本計測結果からは年間約 244 t の CO₂ が自然に吸収されていると推算され、管理型海面処分場が有力な CO₂ の吸収施設となる可能性を示唆する結果であった。

第 4 章では、UFB 工法の効果について、室内実験および現地実験にて検証した。室内実験では、複数種の灰のアルカリ化ポテンシャルや UFB 化した CO₂ による中和促進効果、UFB 水注水時の拡散挙動を検証した。灰由来の構成イオンが異なる保有水に UFB 化した大気（CO₂ を含む気体）で曝気することで、中和反応が促進され、pH を効率的に低下させられることが示された。特に、焼却灰やバイオマス灰を埋め立てた場合には保有水の pH が高くなり、例えば pH 11.0 から pH 9.0 まで CO₂ 曝気により中和させた場合、約 22 g-CO₂/ton-water の CO₂ が固定化される可能性があることも確認された。UFB 水の拡散挙動については、水温や密度、躍層の有無など注水条件により中和拡散が制御され、とくに表層の保有水が効果的に中和されるように注水することで排水施設の負担軽減に有効と考えられた。また UFB 水による中和反応が平衡状態に達するには、数日から 1 週間以上を要する可能性が示唆さ

れた。現地実験では、UFB 工法の現地適用可能性について、排ガス利用による保有水の pH 低下および UFB 水注水時の中和拡散挙動を検証した。発電装置から排出される排ガスの CO₂濃度は高負荷が無い状態では数%未満という低濃度であったが、曝気に用いる CO₂の濃度が必ずしも高い必要はなく、水槽や散気管の形状を工夫することで、中和効率を向上できる可能性が示された。現地保有水への UFB 水の注水実験により、UFB 水による保有水の中和や鉛直方向への拡散挙動を計測し、これらのデータを解析シミュレーションモデルへ組み込むことで、中和拡散係数の評価や今後の工法適用時の効果推定に資する知見も得られた。本実験条件下では UFB 水による中和効果が明確に確認されなかったが、限られた水量を対象とすれば中和効果は得られる可能性が高く、最適な対象水量や運用条件については、今後シミュレーションなどを通じて詳細な検証が必要である。

第 5 章では、UFB 工法の現地適用に向けた単セル・鉛直 1 次元・3 次元シミュレーションモデルを構築し、室内実験および実運用を想定した条件下で再現性と UFB 工法の適用性を検証した。単セルモデルは、CaCO₃ 生成反応のみの仮定で pH 誤差が概ね 0.5 以下、CaSO₄ 生成反応を考慮すると精度が向上し、実用上十分な精度を示した。鉛直 1 次元解析では、計算時間間隔 Δt を、中和平衡到達に要する時間を考慮して設定することが再現精度向上に適切であった。実験結果の厳密再現には反応速度や反応割合などの速度論的知見の導入が必要であった。3 次元モデルによる UFB 工法の効果検証では、実規模において水平拡散係数が処分場全体の中和促進に最も影響を与える主要パラメーターであることが確認された。室内と現場で気象や水質条件が異なるため、現地の水平拡散能を評価し解析パラメーターの妥当性を検証することが必要と考えられた。CO₂ 固定量の増加を目的とする場合には、保有水全体を対象とした UFB 水の注水および拡散が有効であり、保有水の pH が高いほど固定量は増加した。一般廃棄物処分場を想定し pH 10.73 とした条件では、水量 540 万 m³ に対して 4 年間で約 43.6t の CO₂ 固定量が推定されたが、この条件では保有水全量の pH は排水基準である 9.0 に到達せず、基準を満足するためにはさらに長期を要することが示唆された。一方、管理型海面処分場の早期安定化を目的とする場合には、浸出水を取水して排水する一区画を仕切る内水ポンドを造成し、同区画を対象とした UFB 水の注水による安定化処理を行うことにより、水処理施設の pH 負荷を軽減し、比較的短期間で排水基準および廃止基準の達成が可能となることが示唆された。

第 6 章では、上記の結果を総括し、得られた成果と今後の展開について述べている。管理型海面処分場は二酸化炭素の固定が可能な施設として位置づけられ、適切な運用設計の下で UFB 工法が早期安定化に資する技術となり得ると結論づけている。