

(S2-1) 土壌汚染調査・対策におけるLCCO₂の算出方法と位置づけ

大村啓介¹・神谷光昭¹・石井亮¹・土壌環境センターCO₂排出量検討部会¹

¹土壌環境センター

1. はじめに

地球温暖化対策に伴う国内排出権取引等の諸制度が推進されるなか、土壌・地下水汚染対策におけるCO₂排出量の見える化は今後重要な課題である。そこで、筆者らは、平成20年12月より『土壌汚染調査・対策におけるCO₂排出量の把握』をテーマとして検討を行ってきた¹⁾。今年度は、国内他分野および海外の情報を収集し、土壌汚染調査・対策におけるライフサイクルアセスメント(LCA: Life Cycle Assessment)の考え方を整理した。その考え方にに基づきライフサイクルCO₂(LCCO₂)の算出方法を提案する。

2. LCCO₂算出方法の提案

LCAの構成・要素・手順を規定しているISO14040規格に準拠してLCCO₂の算出方法をまとめた。

2.1 目的と適用範囲

(1)実施目的の設定

土壌汚染調査・対策による環境負荷(地球温暖化への影響)を定量的に評価することで、環境負荷に配慮した工法選定を行う際の意思決定ツールとすることが第一に挙げられる。また、1つの工法でも規模・汚染濃度・使用機械の違いによる感度分析を行うことで、環境負荷に配慮した施工計画の立案に活用できる。

(2)調査範囲の設定

LCAを行う上での基本的な条件を以下に示す。

1)検討対象

検討対象の名称(サイト名)を示す必要がある。

2)調査対象の機能

製品の機能(性能特性)を明記する必要がある。機能を明記することで、LCAの調査を行うシステム境界やプロセスの範囲の妥当性が評価可能となる。

土壌汚染対策では、調査・分析・対策工事の一連のサービスを機能として考え、「汚染された土壌を土壌汚染対策法の“汚染状態に関する基準”に適合させることを」を機能とする。

3)調査単位の機能単位

機能単位とは、「ライフサイクルアセスメント調査において、基準単位として用いられる定量化された製品システムの性能」と定義されており、機能単位は明確に定義され、計量可能な単位を設定する必要がある。機能単位を明記することで、複数の製品・サービスのLCAの比較が可能となる。

土壌汚染対策では、複数の工法やサービス総体を比較する上で、「対象とする土量あたり」を機能単位とした。検討内容によっては「対象とする面積あたり」とした方が適切な場合もある。

4)インベントリデータ項目

本報告では、全世界的な問題として取り組みが行われている地球温暖化への影響を評価するため、温室効果ガスの中で寄与率の高いCO₂をインベントリの対象とした。

その他の温室効果ガスはデータ入手が困難であることから対象外とした。

(3)LCA手法に関する設定項目

システム境界

インプット・アウトプットの全体像の把握を目標として、資材の調達(原料の採取から廃棄まで)、土壌汚染調査、分析、対策工事の実施、工事実施後のモニタリング、廃棄の一連のプロセスを対象にシステム境界を設定する。工法の比較を目的することから、セメント原料としてリサイクルする場合も、システム境界に組み入れた。資機材の廃棄は、リサイクルではなく全て最終処分されると仮定した。

Calculation of Life-Cycle CO₂ for Site Investigation and Remedial Treatment of Contaminated Land

Keisuke Omura¹, Mitsuki Kamiya¹, and Ryo Ishii¹ (¹GEPC)

連絡先: 〒102-0083 東京都千代田区麹町4-2 (社)土壌環境センター

TEL 03-5215-5955 FAX 03-5215-5954 E-mail info@gepc.or.jp

単位プロセスの初期選択基準

LCCO₂ 算出にあたっての単位プロセスの選択基準として、ボーリング調査・分析・工事の仮設・掘削など、工種を単位プロセスとして着目し、各プロセスでの資材の消費や運搬、重機の使用燃料や維持・修繕を個別に積み上げる。なお、土壌汚染調査・対策は、個別の部品を製造・組み立てるような製品製造と異なっており、中間的な製品が原則として存在しない。

データ品質要件

土壌汚染調査・対策の LCCO₂ 検討にあたり、データの品質要件として配慮すべき点は以下のとおりである。

原単位：一般に入手可能なデータベースの原単位を活用する場合は、土木工事に関連して提案された原単位を活用する。

資機材：土壌汚染調査・対策では、輸入した資材を利用する場合も多いことから、原単位把握のためのデータ収集は国内に限らず海外も含め可能な限り行う。

施工条件：LCCO₂ 算定の目的が実態把握や工法の比較検討であることから、特定のデータの収集や条件を仮定する場合は、平均的なデータの収集に努める。

前提条件

検討時点では、標準的な工法で土壌汚染調査・対策が行われると仮定して算出を行う。個別の工事を対象に詳細な検討を行う場合は、個別の工事の条件で別途検討することが必要である。

また、5年に1度の調査で作成される産業連関表を元にした原単位データを利用する場合、産業構造の変化の影響で原単位が実態と乖離していないことを前提とする。

限界

使用した原単位や標準的歩掛りのデータベースの品質に依存し、データベースに起因した限界がある。

負荷の配分手順

検討にあたり、負荷の配分を行った場合はその内容を記述する。

例えば、土壌汚染調査・対策において想定される配分として、1つの発電機を利用して、複数の機器を運転するような場合が想定される。この場合は、投入するエネルギーや発電機の損耗を利用する電力量で適宜配分する。

2.2 インベントリ分析

CO₂ 排出量を算定するにあたっては、以下の大きく6つの段階に分けて考えることができる。

段階	計画・設計	資材調達	調査・工事		土壌場外処分		運用	廃棄	
活動量	計画設計者の移動に伴うエネルギー使用量、オフィス等での使用電力等	土壌浄化工事等に用いる資材重量・数量	調査や工事で使用するエネルギー量、運搬時の燃料使用量、機械損耗量	汚染物質の分解等から生成するCO ₂ 発生量	汚染土壌処理施設等で処分される土壌の重量	汚染物質の分解等から生成するCO ₂ 発生量	地下水処理設備等で使用されるエネルギー量	廃棄物の重量	廃棄物そのものから発生するCO ₂ 量
原単位等	CO ₂ 排出原単位	CO ₂ 排出原単位	CO ₂ 排出原単位、CO ₂ 排出係数		CO ₂ 排出原単位		CO ₂ 排出原単位	CO ₂ 排出係数	



図-1 CO₂ 排出量に関する評価概念図

CO₂ 排出量は対象とする LCA 調査範囲内における各プロセスでの活動量に CO₂ 排出量原単位を乗じたものを足し合わせることで算定できる。

$$\text{CO}_2 \text{ 排出量} = (\text{活動量} \times \text{CO}_2 \text{ 排出量原単位})$$

活動量とは各段階での各プロセス(工程)における機械の種類・稼働時間・運搬距離、投入する資材の量・使用時間等の数量を意味する。この活動量の算出には以下の資料を用いて抽出する。

- 「全国標準積算資料(土質調査・地質調査)」
- 「環境測定分析業務積算資料」
- 「土木工事積算基準」
- 各工法標準歩掛
- 各社が独自に把握している歩掛

(1)計画(設計)

調査の計画や浄化工事の設計段階にかかわる CO₂ 排出量を算定する。例として、「建物の LCA 指針」では設計管理委託費に金額あたりの環境負荷原単位を乗ずることで算定している²⁾が、土壌調査や対策工事の環境負

荷原単位は、現時点で未整備であることから本報告からは除外する。

(2) 資材調達

土壌汚染調査・対策に使用される資材の製造時に発生する CO₂ 発生量について算定する。「建物の LCA 指針」に代表される国内外の文献では、主な工事資材の数量あたりの CO₂ 排出量 (CO₂ 排出原単位) がまとめられている。これらの原単位に、土壌汚染調査・対策で使用する資材数量 (活動量) を乗じることで、資材調達にかかわる CO₂ 排出量を算定することができる。以下に計算式を示す。

$$\text{CO}_2 \text{ 排出量 (kg-CO}_2) = \text{資材重量 (ton)} \times \text{CO}_2 \text{ 排出原単位 (kg-CO}_2/\text{ton-資材)}$$

$$\text{CO}_2 \text{ 排出量 (kg-CO}_2) = \text{資材体積 (m}^3) \times \text{CO}_2 \text{ 排出原単位 (kg-CO}_2/\text{m}^3\text{-資材)}$$

また、土留に使用する鋼矢板は、当該工事だけでなく複数の工事で使用されることが多い。鋼矢板の製造時に発生する CO₂ 量をすべて算入することは不適切である。その場合は、当該工事での損耗分を算入する。具体的には以下の二つの方法で求めることができる。基本的に耐用時間等は、(社)日本建設機械化協会「建設機械等損料算定表」の値を用いるが、他の値を用いる場合には根拠を明記する。以下に計算式を示す。

耐用時間を使用時間で除することで使用率を求める場合

$$\text{CO}_2 \text{ 排出量 (kg-CO}_2) = \text{資材重量 (ton)} \times \text{CO}_2 \text{ 排出原単位 (kg-CO}_2/\text{ton-資材)} \\ \times \text{使用時間 (h)} \div (\text{耐用年数 (y)} \times \text{年間標準運転使用時間 (h)})$$

耐用使用回数を使用回数で除することで使用率を求める場合

$$\text{CO}_2 \text{ 排出量 (kg-CO}_2) = \text{資材重量 (ton)} \times \text{CO}_2 \text{ 排出原単位 (kg-CO}_2/\text{ton-資材)} \\ \times \text{使用回数 (回)} \div \text{耐用回数 (回)}$$

(3) 調査・工事

調査・工事とは調査・対策実施者が対象サイト内で活動するプロセスを対象とする。調査・工事の内訳として以下の5つの項目を計上する。

1) 施工機械のエネルギー消費による CO₂ 排出量

抽出した活動量である使用機械の稼働時間、数量から燃料消費量を求め、それに燃料ごとの CO₂ 排出係数を乗ずることにより CO₂ 排出量を算出する。燃料消費量は実際の稼働データや「建設機械等損料算定表」の数値から求める。また CO₂ 排出係数としては「建物の LCA 指針」に示されているような原料採掘～消費までを考慮した LCCO₂ の値を用いる。下記に燃料消費と電力消費の計算式を示す。

内燃機関の燃料消費による CO₂ 排出量

$$\text{時間あたり燃料消費量 (L/h)} = \text{定格出力 (kW)} \times \text{燃料消費量 (L/kWh)}$$

$$\text{燃料使用量 (L)} = \text{稼働時間 (h)} \times \text{時間当たり燃料消費量 (L/h)}$$

$$\text{CO}_2 \text{ 排出量 (kg-CO}_2) = \text{燃料使用量 (L)} \times \text{燃料ごとの CO}_2 \text{ 排出係数 (kg-CO}_2/\text{L)}$$

電動機、電気設備の電力消費による CO₂ 排出量

(「燃料」を「電力」に置き換えて計算する。)

$$\text{実負荷出力 (kW)} = \text{定格出力 (kW)} \times \text{負荷率 (\%)}$$

$$\text{電力使用量 (kWh)} = \text{稼働時間 (h)} \times \text{実負荷出力 (kW)}$$

$$\text{CO}_2 \text{ 排出量 (kg-CO}_2) = \text{電力使用量 (kWh)} \times \text{電力 CO}_2 \text{ 排出係数 (kg-CO}_2/\text{kWh)}$$

2) 運搬のエネルギー消費による CO₂ 排出量

抽出した運搬車両、運搬重量、運搬距離の数量から、運搬に用いる車両が消費するエネルギーを求め、それに燃料ごとの CO₂ 排出係数を乗ずることにより CO₂ 排出量を算出する。運搬には機械・資材搬入搬出のそれぞれ往復分を計上する。算出方法としては平成 18 年 4 月「エネルギーの使用の合理化に関する法律の一部を改正する法律」に示されている以下の三つの方法がある。

1.燃料法 2.燃費法 3.改良トンキロ法

精度としては燃料法 > 燃費法 > 改良トンキロ法である。しかし燃料法は実際に車両ごとの燃料使用量が把握できる場合しか用いることができない。調査・対策実施前にデータを把握する事は困難である為、燃費法、改良トンキロ法を用いる。

燃費法

運搬距離と運搬車両の燃費を乗じて燃料消費量を求める。CO₂ 排出量はその値に燃料ごとの CO₂ 排出係数を乗じて算出する。運搬車両ごとの燃費が把握できていればその値を用いるが、燃費が不明の場合は「貨物輸送事業者に行わせる貨物の輸送に係るエネルギーの使用量の算定の方法」に記載されているような燃料別最大積載量別燃費を利用する方法もある。運搬車両に合致する二次データがない場合は、同一種のより小さい規模の運搬車両を選択する。下記に計算式を示す。

燃料使用量(L) = 運搬距離(km) × 車両毎の燃費の逆数(L/km)

CO₂ 排出量(kg-CO₂) = 燃料使用量(L) × 燃料ごとの CO₂ 排出係数(kg-CO₂/L)

改良トンキ口法

運搬重量を運搬車両の最大積載量で除して得た率を積載率、運搬重量に運搬距離を乗じて得られる量を運搬負荷(トンキ口)とする。また次に示す数式に基づいて算出される値を運搬負荷あたりの燃料使用量とする。

A: 揮発油を燃料とする車両

$$\text{Ln } x = 2.67 - 0.927 \text{ Ln } (y / 100) - 0.648 \text{ Ln } z$$

B: 軽油を燃料とする車両

$$\text{Ln } x = 2.71 - 0.812 \text{ Ln } (y / 100) - 0.645 \text{ Ln } z$$

x: 運搬負荷あたりの燃料使用量(L/t・km)

y: 積載率(%)

z: 運搬車両の最大積載量(kg)

そして運搬負荷(トンキ口)に、運搬負荷あたりの燃料使用量を乗じて燃料消費量を求める。CO₂ 排出量はその値に燃料ごとの CO₂ 排出係数を乗じて算出する。下記に計算式を示す。

燃料使用量(L) = 運搬負荷(t・km) × 運搬負荷あたりの燃料使用量(L/t・km)

CO₂ 排出量(kg-CO₂) = 燃料使用量(L) × 燃料ごとの CO₂ 排出係数(kg-CO₂/L)

3) 機械の損耗による CO₂ 排出量

施工・運搬で使用される機械は、長期間に亘り数々のサイトで使われる。対象サイトのみで消費・廃棄処分されることはまずない。そこで本部会としては、製造時に発生する CO₂ 排出量のうち、耐用時間に対する使用時間の割合、もしくは耐用回数に対する使用回数の割合を損耗分として算出する。基本的に耐用時間は「建設機械等損料算定表」の値を用いるが、他の値を用いる場合には根拠を明記する。また機械を構成している全ての材料を把握することは不可能であるので、その機械重量のうち占める割合の高い原料の CO₂ 排出原単位を用いることとする。下記に計算式を示す。

製造時に発生する CO₂ 排出量(kg-CO₂)

$$= \text{資材} \cdot \text{機械の自重(kg)} \times \text{原料の CO}_2 \text{ 排出原単位(kg-CO}_2\text{/kg)}$$

損耗による CO₂ 排出量(kg-CO₂)

$$= \text{製造時に発生する CO}_2 \text{ 量(kg-CO}_2\text{)} \times \text{運転時間(h)} \\ / (\text{耐用年数(y)} \times \text{年間標準運転使用時間(h)})$$

損耗による CO₂ 排出量(kg-CO₂)

$$= \text{製造時に発生する CO}_2 \text{ 量(kg-CO}_2\text{)} \times \text{使用回数(回)} / \text{耐用回数(回)}$$

4) 汚染物質由来による CO₂ 排出量

原位置浄化が行われる場合は、汚染物質の成分中の C(炭素)が全て CO₂ となって排出されるという想定に基づき、化学量論から算定した CO₂ 排出量も汚染物質由来の CO₂ 排出量として計上する。

5) 分析作業による CO₂ 排出量

抽出した分析検体数に分析項目ごとの CO₂ 排出量を乗じて算出する。分析項目ごとの CO₂ 排出量のデータとしては、分析作業でのエネルギー起源 CO₂ 排出量のみであるが、本部会が昨年度に算出した「土壤汚染対策法が定める分析項目毎のエネルギー起源 CO₂ 排出量」がある。下記に計算式を示す。

$$\text{CO}_2 \text{ 排出量(kg-CO}_2\text{)} = \text{分析検体数(検体)} \times \text{分析項目ごとの CO}_2 \text{ 排出量(kg-CO}_2\text{/検体)}$$

(4) 土壌場外処分

汚染土壌を場外の汚染土壌処理施設等で処理する段階について述べる。一般に固定資本減耗分については対象とせず、場外施設で処分する際に使用される燃料等からの CO₂ 排出量を対象とする。また、セメント処理施設での処分のように汚染土壌がリサイクルされる場合は、後段のプロセスの原料としての CO₂ 排出量に含まれ、浄化工事で発生する CO₂ には含まれない。しかし、土壌汚染調査・対策各技術を同じ条件で評価することができなくなるため、本報告における算出では、どのような施設であっても発生する CO₂ 量を含める。場外処理における原単位は処理土壌重量あたりの CO₂ 排出量として示される。この原単位に処分土壌重量を乗ずることで土壌場外処分にかかわる CO₂ 排出量を算出する。また、場外処理施設までの運搬時に発生する CO₂ 量は工事の段階で求めることとする。以下に計算式を示す。

$$\text{CO}_2 \text{ 排出量 (kg-CO}_2\text{)} = \text{土壌処分重量 (ton)} \times \text{CO}_2 \text{ 排出原単位 (kg-CO}_2\text{/ton-土壌)}$$

(5) 運用

運用とは調査・対策実施者が対象サイト内に設備・装置を設置したのち長期に亘りその設備・装置を稼働させるプロセスを対象とする。

土壌・地下水汚染調査・対策において運用(使用・維持管理)に分類されるプロセスとは揚水処理の水処理

設備運転や揚水井戸ポンプ運転、継続的に使用される薬剤の運搬等が該当する。時間当たりの CO₂ 排出量が小さくても運用期間が長期であると LCCO₂ 排出量としては大きな値となる為、評価対象期間の設定には注意が必要である。また工事の項目と混同しやすいので、二重計上や計上抜けがない様に注意しなければならない。算出方法としては(3) 調査・工事に示した工事費積算手法を用いる。

(6) 廃棄・リサイクル

廃棄・リサイクルでは調査・対策を行うことにより発生する副産物を、実施者が廃棄してから最終的に処理されるまでの運搬および処理プロセスを対象とする。しかし、資材の原単位に廃棄・リサイクルまで含まれている場合は、計上する必要はない。

廃棄・リサイクルの運搬に係わる LCCO₂ 排出量は、(3) 調査・工事に示した方法で LCCO₂ 排出量を算出する。

処理方法として焼却、埋立処理される際に発生する CO₂ 排出量は、廃棄物の重量に処理量ごとの CO₂ 排出係数を乗じることにより算出する。廃棄物であっても材料としてリサイクルされるものについては処理にかかわる CO₂ 排出量は対象外とする。廃棄物の処理に関する二次データとしては社団法人産業環境管理協会「平成14年度新エネルギー・産業技術総合開発機構委託 製品等ライフサイクル環境影響評価技術開発 成果報告書(2003)」がある。また、焼却処理に関しては、廃棄物の成分中の C (炭素) が全て CO₂ となって排出されると想定し、化学量論から算定した CO₂ 排出量も焼却される廃棄物由来の CO₂ 排出量として計上する。ただし、紙などのバイオマス由来の廃棄物は、カーボンニュートラルとみなし算入しない。下記に計算式を示す

廃棄物が処理施設で焼却されることにより発生する CO₂ 排出量

焼却処理による CO₂ 排出量(kg-CO₂)

= 廃棄物重量(kg) × 処理量ごとの CO₂ 排出係数(kg-CO₂/kg)

+ 廃棄物由来の CO₂ 排出量(kg-CO₂)

廃棄物が処理施設で埋立されることにより発生する CO₂ 排出量

埋立処理による CO₂ 排出量(kg-CO₂)

= 廃棄物重量(kg) × 処理量ごとの CO₂ 排出係数(kg-CO₂/kg)

2.3 データベース

LCCO₂ のデータベースとして、以下に示すように各種団体での研究成果が報告されている。本部会においても下記、に示す土壌地下水の調査・対策工事にかかわる主な資材および分析の CO₂ 排出原単位をまとめた。

(社)日本建築学会 LCA 指針小委員会による CO₂ 排出原単位

産業連関表による環境負荷原単位データブック(3EID)(独)国立環境研究所)

土壌汚染調査・対策における特異項目のヒアリング等調査結果(本部会の調査結果)

土壌汚染対策法が定める分析項目毎のエネルギー起源 CO₂ 排出量(本部会の調査結果)

LCA 日本フォーラムの LCA データベース

LCA システム MiLCA ver.1.0 の LCI データベース IDEA ver.1.0 (社)産業環境管理協会)

米国「Site Wise」における原単位

2.4 環境影響評価

温室効果ガスの中で寄与率の高い CO₂ についてインベントリ分析を行うことで地球温暖化への影響を把握することができる。

3. 今後の課題

- ・各データベースは不定期に変更・改訂が行われるので、更新および妥当性の確認が必要である。
- ・CO₂ 排出原単位が不明な項目についての調査収集を引続き行う。
- ・本 LCCO₂ 算出方法を使用して試算作業を行い、土壌汚染調査・対策の地球温暖化への影響を把握する。

4. 謝辞

本検討に際して、名古屋大学環境学研究科 加藤博和准教授をはじめ種々の方々にアドバイスや資料の提供を頂くなどご協力を頂いた。ここに記して感謝致します。

参考文献

- 1) 土壌環境センターCO₂ 排出量検討部会(2010)：土壌汚染調査・対策における CO₂ 排出量の把握, 第16回地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会講演集
- 2) 社団法人日本建築学会(2003)：建物の LCA 指針