

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26

博士論文

LCA と SROI によるインドネシアの工場における オンサイト型排水処理システムの評価

2022 年 3 月 14 日

北九州市立大学 国際環境工学研究科

環境システムコース 松本研究室

金子 愛里

要 旨

1
2
3 2015年に Sustainable Development Goals (SDGs)が策定されて以来、政府や NGO だけで
4 なく民間企業においても SDGs に対する取り組みが加速している。また、環境
5 (Environment)、社会 (Social)、ガバナンス (Governance)の 3 つの基準を投資判断に用い
6 る ESG 投資が増えるにつれて、民間会社は ESG への取り組みを定量的に示すことが求
7 められている。その評価手法として、欧米を中心に社会的投資収益率 (SROI: Social Return
8 on Investment) の適用事例が増えているが、評価手法として確立はされていない。また
9 開発途上国のような多様な環境条件や経済状況において SROI が実施された事例は多く
10 なく、その適用可能性については検証が必要である。

11 さて SDGs のゴール 6 では「すべての人々の水と衛生の利用可能性と持続可能な管理
12 を確保する」ことが掲げられており、特に開発途上国における適切な排水処理システム
13 の普及・運用が課題になっている。インドネシアでは、他の東南アジア諸国と同様に、
14 家庭や事業所等の生活系排水の処理に septic tank(腐敗槽)を用いることが一般的である。
15 しかし septic tank は、運転時に大量の温室効果ガス(GHG)や、高 BOD を含む排水を直接
16 環境中に排出することが懸念されている。そこで従来の septic tank に代えて、日本の技
17 術である浄化槽の導入が期待されている。

18 本研究では、インドネシアの工場における生活系排水処理設備の改善に向けて、septic
19 tank と浄化槽の環境面・社会面の評価手法を検討した。まず septic tank と浄化槽のライ
20 フサイクルアセスメントにより、それぞれの GHG 排出量を求め、環境効率を比較した。
21 またグローバルスケールの被害算定型影響評価手法である LIME3 (LIME は、life cycle
22 impact assessment method based on endpoint modeling の略)を用いて、GHG 以外の環境影響
23 を含めた環境影響評価を行った。さらにインドネシアにおいて従来式の septic tank を日

1 本式の浄化槽に転換した実例2件をもとに、SROIを用いて評価した。

2 本研究によるLCAの結果、septic tankからのGHG排出量は浄化槽の1.8倍であり、septic

3 tankに替えて浄化槽を導入することでGHGを削減できる可能性があることが示唆され

4 た。またLIME3による評価の結果、septic tankの環境影響被害額は1.04USD/人・年、浄

5 化槽は0.47USD/人・年となった。つまり既存のseptic tankを浄化槽に替えると、約51%

6 の環境影響が軽減される結果となった。さらにLIME3評価結果を環境影響の参考にしな

7 がら、その他社会への影響を含めてSROI分析を行った。その結果、SROIは1.2と投資

8 効果があるとされる1.0を上回った。

9

Abstract

1

2

3 Since the Sustainable Development Goals (SDGs) were set up in 2015, efforts against
4 SDGs have accelerated not only in governmental and NGOs but also in private companies.
5 In addition, as the number of ESG investments that use the three criteria of environmental,
6 society and governance in their investment decisions increases, private companies are
7 required to quantitatively show their efforts on ESG. The application cases of the Social
8 Return on Investment (SROI) are increasing mainly in Europe and America, but it has not
9 been established as an evaluation method. Also, there are not so many cases of SROI
10 application in a variety of environmental and economic conditions, such as developing
11 countries, and its applicability needs to be verified.

12 To achieve SDGs Goal 6, stipulates that " Ensure availability and sustainable
13 management of water and sanitation for all." dissemination and operation of appropriate
14 wastewater treatment systems, particularly in developing countries, are required. In
15 Indonesia, as in other Southeast Asian countries, it is common to use septic tanks to treat
16 domestic wastewater from households and factories. However, septic tanks are concerned
17 about the direct environmental release of large amounts of greenhouse gases (GHGs) and
18 wastewaters containing high BODs during operation. Therefore, the introduction of the
19 *Johkasou*, a Japanese technique, is expected to replace the conventional septic tank.

20 In this study, an assessment method of environmental and social aspects of septic tank
21 and *Johkasou* was examined to improve domestic wastewater treatment facilities in
22 Indonesian plants.

23 At first, life cycle assessment (LCA) was implemented to find out the GHG emissions

1 from septic tanks and *Johkasou*, and the environmental efficiencies were compared. And
2 then, the environmental assessment including the environmental impact other than GHG
3 was carried out using LIME3 (LIME: life cycle impact assessment method based on
4 endpoint modeling). In addition, SROI was evaluated on the basis of 2 actual cases in which
5 the conventional septic tank was converted to a Japanese-style *Johkasou* in Indonesia.

6 The results of LCA showed that GHG emissions from septic tank were 1.8 times higher
7 than those from *Johkasou*, suggesting that GHG could be reduced by replacing septic tank
8 with *Johkasou*. As a result of the assessment by LIME3, the environmental impact of septic
9 tank became 1.04USD/ person-year, and *Johkasou* became 0.47USD/ person-year. In other
10 words, replacing existing septic tank with *Johkasou* can reduce the environmental impact
11 by about 51%. In addition, SROI was analyzed including the social impact and
12 environmental impact based on the results of LIME3 assessment. The results of SROI in
13 this study was 1.20, higher than 1.00, which is evaluated as effective for investment.

14

目次

| | | |
|----|-------|--|
| 1 | | |
| 2 | | |
| 3 | 1. | はじめに・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 10 |
| 4 | 1.1 | 研究の背景と目的・・・・・・・・・・・・・・・・ 10 |
| 5 | 1.2 | アジアにおける排水処理設備の現状と浄化槽・・・・・・・・ 12 |
| 6 | 1.2.1 | アジアの発展途上国における排水処理の現状と課題・・・・・・・・ 12 |
| 7 | 1.2.2 | 日本の浄化槽普及の歴史と現状・・・・・・・・・・・・・・・・ 14 |
| 8 | 1.2.3 | 浄化槽の海外展開・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 15 |
| 9 | 1.3 | 既往レビュー・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 15 |
| 10 | 1.3.1 | 途上国におけるオンサイト型生活系排水処理システムの技術評価に関する 11 研究・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 15 |
| 12 | 1.3.2 | 環境分野における SROI 研究・・・・・・・・・・・・・・・・ 17 |
| 13 | | |
| 14 | 2. | オンサイト型生活系排水処理システムの LCA による環境効率比較・・・・・・・・ 19 |
| 15 | 2.1 | 分析対象資材およびインベントリデータの集計・分析方法・・・・・・・・ 19 |
| 16 | 2.1.1 | 調査対象システムの仕様・・・・・・・・・・・・・・・・ 19 |
| 17 | 2.1.2 | 調査対象設備の利用状況・・・・・・・・・・・・・・・・ 21 |
| 18 | 2.1.3 | 機能単位・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 22 |
| 19 | 2.1.4 | システム境界・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 22 |
| 20 | 2.1.5 | 流入水・処理水のサンプリング・分析方法・・・・・・・・ 25 |
| 21 | 2.1.6 | ガスのサンプリング・分析方法・・・・・・・・・・・・・・・・ 26 |
| 22 | 2.1.7 | 素材重量、運搬・製造にかかるエネルギー、運転時の電力消費量及び汚泥 23 発生量に関する情報収集・・・・・・・・・・・・・・・・ 28 |
| 24 | 2.1.8 | 原単位データと地球温暖化係数(GWP)・・・・・・・・ 29 |
| 25 | 2.2 | 環境効率の算定方法・・・・・・・・・・・・・・・・ 30 |
| 26 | 2.3 | インベントリデータの集計・分析結果・・・・・・・・ 30 |
| 27 | 2.3.1 | 水質・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 30 |
| 28 | 2.3.2 | 温室効果ガス (CH ₄ 、N ₂ O)・・・・・・・・・・・・・・・・ 31 |
| 29 | 2.2.3 | 電力使用量と汚泥発生量・・・・・・・・・・・・・・・・ 33 |
| 30 | 2.2.4 | インベントリデータ・・・・・・・・・・・・・・・・ 34 |
| 31 | 2.3 | 排水処理システムの環境効率比較・・・・・・・・ 36 |
| 32 | | |
| 33 | 3. | LIME3 を用いたオンサイト型生活系排水処理システムの LCA 環境影響評価・・ 38 |
| 34 | 3.1 | 評価の概要・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 38 |
| 35 | 3.1.1 | 分析対象資材、機能単位とシステム境界・・・・・・・・ 38 |
| 36 | 3.1.2 | インベントリ分析対象項目と分析結果・・・・・・・・ 38 |
| 37 | 3.1.3 | データ収集方法・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 40 |

| | | |
|----|--|----|
| 1 | 3.2 LIME3 の評価方法 | 41 |
| 2 | 3.3 LIME3 を用いた環境影響評価結果 | 42 |
| 3 | 3.3.1 被害評価結果 | 42 |
| 4 | 3.3.2 統合化結果 | 44 |
| 5 | | |
| 6 | 4. SROI によるオンサイト型排水処理システムのライフサイクル影響評価 | 47 |
| 7 | 4.1 SROI 評価の評価対象 | 47 |
| 8 | 4.2 SROI 分析による評価手法 | 47 |
| 9 | 4.2.1 SROI 分析の手順 | 47 |
| 10 | 4.2.2 SROI と費用便益分析(CBA: Cost-Benefit Analytics)の比較 | 48 |
| 11 | 4.2.3 評価対象（スコープ）とステークホルダーの確定 | 48 |
| 12 | 4.2.4 アウトカム及び貨幣価値換算の方法 | 49 |
| 13 | 4.3 SROI 評価結果 | 54 |
| 14 | 4.3.1 費用便益算定結果 | 54 |
| 15 | 4.3.2 SROI 値 | 57 |
| 16 | | |
| 17 | 5. まとめと今後の課題 | 58 |
| 18 | 5.1 まとめ | 58 |
| 19 | 5.2 今後の課題 | 60 |
| 20 | | |
| 21 | 6. 参考文献 | 62 |
| 22 | | |
| 23 | 7. 謝辞 | 66 |
| 24 | | |
| 25 | 8. 付録 | 67 |
| 26 | | |

| | |
|----|---|
| 1 | 図表一覧 |
| 2 | |
| 3 | 表 1 調査対象システムの概要 |
| 4 | 表 2 原単位の比較 |
| 5 | 表 3 原単位一覧 |
| 6 | 表 4 水質分析の結果 |
| 7 | 表 5 運転時の N ₂ O, CH ₄ 排出量 (槽あたり) |
| 8 | 表 6 一人あたりの運転時の GHG 排出量 |
| 9 | 表 7 septic tank のインプットインベントリ |
| 10 | 表 8 浄化槽のインプットインベントリ |
| 11 | 表 9 septic tank の LCI 分析結果(LIME3 評価用) |
| 12 | 表 10 浄化槽の LCI 分析結果 (LIME3 評価用) |
| 13 | 表 11 統合化結果 (物質別) |
| 14 | 表 12 統合化結果 (保護対象別) |
| 15 | 表 13 投入設備の概要 |
| 16 | 表 14 評価軸、主な評価内容とデータ収集方法 |
| 17 | 表 15 LIME3 の結果に基づいた費用便益算定結果 |
| 18 | |
| 19 | 図 1 septic tank の構造 |
| 20 | 図 2 対象浄化槽の処理フロー |
| 21 | 図 3 septic tank のシステム境界 |
| 22 | 図 4 浄化槽のシステム境界 |
| 23 | 図 5 septic tank の排水サンプリング位置 |
| 24 | 図 6 浄化槽の排水サンプリング位置 |
| 25 | 図 7 septic tank のガスサンプリング方法 |
| 26 | 図 8 浄化槽のガスサンプリング方法 |
| 27 | 図 9 一人あたりの運転時の GHG 排出量 |
| 28 | 図 10 GHG 排出量と運転・メンテナンス時内訳 |
| 29 | 図 11 被害評価結果 (人間健康) |
| 30 | 図 12 被害評価結果 (生物多様性) |
| 31 | 図 13 被害評価結果 (一次生産) |
| 32 | 図 14 被害評価結果 (社会資産) |
| 33 | 図 15 統合化結果 (物質別) |
| 34 | 図 16 統合化結果 (保護対象別) |
| 35 | 図 17 浄化槽普及推移 (算定前提用) |
| 36 | |
| 37 | |
| 38 | |

1 付録一覧

2 付録 A-1 インドネシアの5か年計画における排水処理設備の現状と目標

3 付録 A-2 アジア諸国における腐敗槽普及率

4 付録 A-3 浄化槽の処理能力

5 付録 A-4 LIME3 算定対象項目(septic tank)

6 付録 A-5 LIME3 算定対象項目 (浄化槽)

7

1. はじめに

1.1 研究の背景と目的

2015年に持続可能な開発目標(Sustainable Development Goals; SDGs)が国連で採択されて以来、政府や自治体だけではなく、民間企業によるSDGsへの取り組みが加速している。民間企業がその経営戦略において、従来のように売上高や営業利益だけではなく、SDGsへの取り組みを重要視するようになった背景には、ESG投資が拡大していることが挙げられる。ESG投資とは、投資家が企業に投資する際に、金銭的な財務情報だけではなく、環境(Environment)、社会(Social)、ガバナンス(Governance)の3つの観点を投資判断の基準として、投資先の選別を行うことである。ESG投資の普及を行うグローバル連合である世界持続可能投資連合(GSIA)にれば、投資全体におけるESG投資の割合は、一部の国では減少しているものの、世界的には着実に増え続け、2020年時点でカナダでは61.8%、米国では33.2%、日本では24.3%がESG投資とされている¹⁾。こうしたESG投資の増加に伴い、企業はますますSDGsへの対応が迫られている。

さてSDGsの17つのゴールのうち、ゴール6では「すべての人々の水と衛生の利用可能性と持続可能な管理を確保する」ことが掲げられ、開発途上国における適切な排水処理システムの普及と運用が求められている。インドネシアでは下水道普及率は全人口の5%以下(2018年)²⁾と低く、そのため一般家庭では約60%がオンサイト型システムに分類されるseptic tankを利用している。民間企業においても、工場等で従業員が利用するトイレや手洗い場などから排出される生活系排水は、産業廃水とは経路を分けて処理することが義務付けられており³⁾、生活系排水の処理にはseptic tankを用いることが一般的である。このように民生部門、産業部門ともにseptic tankが広く普及しているが、その処理方式は、固液分離槽での嫌気性処理のみであるため、処理過程においてメタン(CH₄)を多く排出する。また処理能力が不十分であるために、排出基準を満たさない処理水が河川や土壌へ放流されることにより、環境汚染を引き起こすことが懸念されて

1 いる。

2 インドネシア共和国環境林業省によると、同国の75%の河川は深刻に汚染されており、
3 その汚染源の約60%は生活系排水によるものである。インドネシアの5か年計画では、
4 民生部門における目標ではあるが、2019年までに衛生設備を利用できる人口を100%に
5 することを掲げ、そのうち下水道普及率は15%、残りの85%はseptic tankを含むオンサ
6 イト型システムの普及を目標としている⁴⁾。付録A-1に、インドネシアの民生部門にお
7 ける排水処理設備整備状況の現状と目標値を示す。

8 また産業部門では、企業に対して環境対策に関する企業業績評価プログラム(PPPER
9 と呼ばれる)において、生活系排水の適正処理を必須項目の一つに定めている。その参
10 加企業数は過去5年間で1,764社(2017年)⁵⁾から2,642社(2021年)⁶⁾へと年々増加傾
11 向にあり、これに伴って産業部門においても生活系排水処理システムの整備が進むもの
12 と考えられる。またインドネシアは人口2.7億人を超え、特に都市部においては人口密
13 度が高く、建物が密集していることから大規模な工事が困難であるため、オンサイト型
14 システムによる整備が現実的であると考えられる。

15 今後、企業においてオンサイト型排水処理システムの整備が進められるにあたり、環
16 境負荷の高いseptic tankの代替システムとして、日本仕様の浄化槽の普及が期待されて
17 いる。当面はオンサイト型を中心に整備が進められることを考えると、インドネシアに
18 おける生活系排水処理システム全体の環境負荷低減に向けては、下水道だけではなく、
19 septic tankや浄化槽についても環境影響評価が求められている。

20 ところで、インドネシアのGHG排出量は、森林伐採と泥炭地荒廃等による二酸化炭
21 素(CO₂)排出量を含むと世界第4位であり、主要排出国の一つになっている。同国政
22 府はコペンハーゲン合意に対する目標として、2020年までに自国による取り組みで26%、
23 国際的援助下で41%(2005年比)の削減を掲げている^{7),8)}。排水処理の分野では、民生
24 部門と産業部門の両方における、下水道システム及びオンサイト型システムが検討の対
25 象となる。そのため今後インドネシア全域で生活系排水処理システムが整備されるにあ
26 たり、コストや処理能力とともに、GHG排出量もまた重要な検討項目である。

1 一方、企業が SDGs や ESG への対応として生活系排水処理システムを導入・改善する
2 にあたっては、GHG 削減だけではなく、その他の環境影響や、社会への影響も配慮す
3 ることが求められている。それらに対応するためには、設備選定のための判断材料が求
4 められている。企業による活動の環境・社会への影響を含めた評価に、SROI の手法を
5 用いる事例が増えているが、発展途上国での活動評価への適用事例は少なく、その適用
6 可能性を検証する必要がある。

7 本研究では、インドネシアの生活系排水処理を対象に、その環境面・経済面・社会面
8 の評価手法を提示することを目的に、septic tank と浄化槽を対象として、LCA による環
9 境効率比較、LIME3 による環境影響被害額を算出した上で、実際に septic tank に替えて
10 浄化槽を導入した2件の事例をもとに SROI を求めた。なお LCA におけるインベントリ
11 データの集計においては、より正確な算定を行うために、インドネシアの工場において
12 各設備の運用時の排水及び排ガスの実測を行った。また本研究の成果は、インドネシア
13 以外の類似した途上国の生活系排水処理システムの導入効果を総合的に評価する手法
14 に展開されることを目的とする。

15

16 1.2 アジアにおける排水処理設備の現状と浄化槽

17

18 1.2.1 アジアの発展途上国における排水処理の現状と課題

19 経済発展に伴い、アジア諸国の衛生設備のインフラ整備は徐々に進んできている。
20 アジア水環境パートナーシップ (WEPA)が発行する 2018 年報告書⁹⁾によると、現在、日
21 本、韓国及び中国都市部では全国の生活排水集合処理設備の普及率は 80%以上、マレー
22 シア (マレー半島及び直轄市のみ) では 60~70%台、タイでは 20%台である⁹⁾。一方、
23 ベトナム、フィリピン、ミャンマー、ネパール、インドネシア、カンボジア、ラオス、
24 スリランカでは、普及率は 5%を下回っている。これらの国の集合処理設備にアクセス
25 できないエリアでは、septic tank 等のオンサイト型 (分散型) 処理設備を用いて処理す
26 ることが一般的であるが、付録 A-2 のとおり septic tank 普及率もそれほど高くはない。

1 また septic tank の処理能力が不十分なことにより、高濃度の BOD を含む排水を環境中に
2 放出し、環境汚染を招いていることが懸念される。さらにほとんどの septic tank はトイ
3 レのし尿のみを処理対象としており、その他の台所排水・風呂排水・洗濯排水などの生
4 活雑排水は処理されていないケースが多い。

5 世界銀行の調査報告書(2008)³⁾によると、カンボジア、インドネシア、フィリピン、
6 ベトナムのアクセス率は、その他の東南アジア諸国と比較して著しく低い。同4か国に
7 おける衛生設備の不整備による、人間健康、水資源、環境、観光、その他福祉への影響
8 を対象とした経済損失は、年間約 90 億ドル(2005 年価格)と試算されている。その
9 内訳は、インドネシアが約 63 億ドルと最も大きく、次いでフィリピンで 14 億ドル、ベ
10 トナムで 7.8 億ドル、カンボジアで 4.5 億ドルである。またこれは同4か国の GDP 合計
11 の 2%に相当する。国別には、カンボジアが 7.2%と最も高く、次いでインドネシアで 2.3%、
12 ベトナムで 1.5%、フィリピンで 1.5%である。

13 衛生設備の整備が喫緊の課題となっているアジア諸国において、日本における浄化
14 槽導入の経験が役立つと考えられる。特に人口密度が高い都市部では、建物が密集して
15 おり、下水道工事のような大規模工事を行うことが困難である。そのため日本のように
16 下水道が普及するまでは浄化槽における分散型の処理が不可欠である。しかしこれらの
17 アジア諸国の現在の経済水準は低く、また日本のような助成金制度が整備されていない
18 ため、導入コストが大きな障壁となっている。

19 経済的な課題の他に、衛生設備の整備が進まない理由として、政府による規制取り
20 締まりが不十分であることや、環境意識が低いことが考えられる。各国において排水基
21 準や排水処理に関する法令が設けられているが、現状では守られていないケースが多数
22 ある。また環境に関する教育が十分に行われていないため、排水処理に関する理解が重
23 要である。

24 このように発展途上国における生活系排水処理設備の改善には、様々な要因が絡み
25 合っているため、民間企業が設備投資をする際に判断基準となる定量的な指標が求めら
26 れる。

1

2 1.2.2 日本の浄化槽普及の歴史と現状

3 日本における浄化槽の普及は、戦後復旧における住宅建設とトイレの水洗化とともに
4 広がり始めた。1950年に建築基準法が制定され、その後の一部改正により、「腐敗槽＋
5 酸化槽＋消毒槽」で構成される「屎尿浄化槽」として普及が始まった¹⁰⁾。1955年ごろに
6 は、軽量のガラス繊維強化プラスチック（FRP）を素材とした曝気型浄化槽が生産され
7 るようになり、FRP製単独浄化槽が普及するようになった。同時に公共下水道の整備も
8 拡大してきたが、1983年頃までは浄化槽利用人口と下水道利用人口はほぼ同数であった
9 ¹¹⁾。

10 単独浄化槽の利用者は増えたが、一方で、し尿以外の生活雑排水は未処理のまま環境
11 中へ放流されていたため、環境問題が指摘されるようになった。単独浄化槽は、合併浄
12 化槽と比べBOD総量で約8倍の汚濁物質を環境へ排出しており、これにより家庭レベ
13 ルでの合併処理浄化槽の開発・普及が進められるようになった¹¹⁾。

14 国土交通省は、平成13年の「浄化槽法の一部を改正する法律」により単独浄化槽の
15 新設を原則禁止とした。以降、し尿と雑排水を合わせた生活排水を処理する合併処理浄
16 化槽のみを浄化槽と呼び、し尿のみしか処理しない単独処理浄は「みなし浄化槽」と呼
17 ばれ、徐々に減少する傾向になった。合併浄化槽の普及を図るために、政府は昭和62
18 年度から様々な補助事業を実施してきた。なお下水道の整備が進むにつれて、合併浄化
19 槽の普及率も徐々に減少した。

20 現在では、日本の汚水処理人口普及率は92.1%(2020年)¹²⁾であり、そのうち下水道が
21 80.1%、浄化槽が9.3%を占めている。しかしいまだに約1,000万人が単独処理浄化槽や
22 くみ取り便槽を利用しており、未処理の生活雑排水による環境汚染が問題となっている。
23 その対策として、市町村が管理する浄化槽整備を支援する「循環型社会形成推進交付金」
24 （2021年度浄化槽分で総額86億円）や、民間企業や公的団体が保有する既存浄化槽の
25 省エネ改修や本体交換による低炭素化を支援する「二酸化炭素排出抑制対策事業費等補
26 助金」（2001年度浄化槽分で総額18億円）などの補助金が設けられている¹³⁾。

1

2 1.2.3 浄化槽の海外展開

3 SDGs の前身として位置づけられる「ミレニアム開発目標 (MDGs: Millennium
4 Development Goals)」において、安全な飲料水と基礎的な衛生施設の整備が目標の一つに
5 掲げられたことを受け、日本の環境省は 2009 年度に「し尿処理システム国際普及推進
6 業務」を開始した。それ以降、環境省や独立行政法人国際協力機構 (JICA) などによる
7 政府開発援助 (ODA) の一環として、近隣アジア諸国の水環境の改善を図ることを目的
8 として、水処理技術を持つ日本企業の海外展開を支援する様々な施策が行われてきた¹⁴⁾。
9 日本企業の進出先としては、各国の潜在的な市場規模から、中国、インド、ベトナム、
10 インドネシアが有望視されている。過去には日本企業によって、これらの支援施策を通
11 じ、中国における分散型生活系排水対策のための高度処理浄化槽の実用化技術の開発、
12 インドネシアにおける戸建て住宅への浄化槽導入や、ベトナムにおける浄化槽運営事業
13 の実証などが実施されている¹⁵⁾。一般社団法人浄化槽システム協会 (JSA) の調査によ
14 ると、2020 年までに海外で設置された浄化槽は累計 3 万 7255 基であり、国別では中国
15 が 2 万 6247 基と最多である¹⁶⁾。導入先は住宅、店舗、事務所などが多い。これらの海
16 外展開により、アジアの発展途上国における浄化槽導入が進むことが期待される。

17

18 1.3 既往研究レビュー

19 1.3.1 途上国におけるオンサイト型生活系排水処理システムの技術評価に関する研究

20 Ali ら(2018)による LCA を用いた生活排水処理の環境影響の定量化に関するレビュー
21 ¹⁷⁾によれば、世界的には 1990 年から排水処理分野の評価に LCA が用いられ始め、それ
22 以降多数の研究事例が報告されている¹⁸⁾。しかし開発途上国における septic tank や浄化
23 槽の LCA は、ほぼ実施されていない。また設備運転時に直接排出される GHG の実測調
24 査を含めた LCA が行われた事例はない。

25 インドネシアにおいては Rininta ら(2018)¹⁹⁾が septic tank を含む 3 種類のオンサイト型
26 排水処理システムの LCA 評価による比較を行っているが、評価対象は製造及び運転の

1 段階に限られており、廃棄までを含めたライフサイクル全体を対象とした評価は行われ
2 ていない。また運転段階における排ガスは計算式を用いて算出している。

3 日本においては、研究機関や浄化槽メーカー等により排ガスの実測や、LCA 評価が行
4 われてきた。西村らによる「合併処理浄化槽の整備におけるライフサイクルアセスメン
5 ト的評価の応用」(2004)²⁰、井村, 水野による「浄化槽およびプロワの省資源・省エネ
6 化」(2007)²¹、山崎らによる「ディスポーザ対応浄化槽の LCCO₂ 評価」(2008)²²や「ディ
7 スポーザ対応浄化槽の高度処理化と LCCO₂ 評価」(2010)²³などにおいて LCA 算定事例
8 が報告されている。

9 IPCC 第 5 次報告書 (R5)²⁴によると、排水処理の過程で発生する CH₄ の地球温暖化係
10 数 (GWP) は 28、N₂O は 265 と高く、少量の排出であっても影響が大きい。そのため
11 排水処理システムの評価にあたっては、投入される資源・エネルギー、それに伴う CO₂
12 排出量以外にも、運用段階に発生する CH₄、N₂O 排出量を正確に把握することが重要で
13 ある。日本では、蛭江や山崎らにより「浄化槽における CH₄, N₂O 排出量に及ぼす原水
14 流入変動と嫌気-好気循環の影響解析」(2012)²⁵、“Development of Emissions Factor for the
15 Decentralized Domestic Wastewater Treatment for the National Greenhouse Gas Inventory”
16 (2014)²⁶、「節水機器の導入が浄化槽からの温室効果ガス排出量に及ぼす影響」(2017)²⁷、
17 また増田、西村により「水処理工程における N₂O の発生特性」(2010)²⁸などの研究にお
18 いて浄化槽からの N₂O と CH₄ の実測調査が行われてきた。しかしガス排出量は、気象条
19 件や排水の組成等、地域の固有条件に左右される変数であり、日本とインドネシアの違
20 いを考慮すると、正確なガス排出量の把握のためには現地における実測が不可欠である。

21 またアジア諸国で導入されている浄化槽は、基本的には日本の浄化槽と同じ構造であ
22 るが、日本と比べて気温の高い東南アジア向けには、浄化槽内の菌が活発になるためコ
23 ンパクト化されているものもある。気温、形状、利用状況の違いなどによってガス排出
24 量は異なると考えられ、正確な把握のためには実際の利用状況における実測が不可欠で
25 ある。

26 また前述の既往論文はすべて一般家庭における排水処理設備を対象としているが、一

1 般家庭と産業施設では排水組成や流入パターンが異なるため、運用段階におけるガス発
2 生量は異なるはずである。なお本研究における排ガスの実測調査においては、これらの
3 既往研究の手法等を参考にした。

5 1.3.2 環境分野における SROI 研究

6 本研究では、投資収益率 (ROI: Return on Investment) の社会拡大版といえる SROI の
7 分析²⁹⁾により評価を行った。SROI は企業や NPO 等の事業・活動による社会インパクト
8 の指標であり、事業・活動による社会的成果を定量化・数値化する。以下の数式³⁰⁾のと
9 おり、目的のための投じられる費用と、それによって達成された便益 (アウトカム) の
10 比較で計算される。SROI 値が 1.0 を超えることで、投資を上回る成果があると評価され
11 る。

$$\text{SROI (社会的投資収益率)} = \frac{\text{総便益 (total present value)}}{\text{総費用 (total inputs)}}$$

14 総費用 (インプット) は、当該事業・活動に投じられた費用である。一方、総便益 (ア
15 ウトカム) には、事業や活動の結果として生じた環境便益と社会便益が含まれる。分子・
16 分母すべての便益は貨幣価値に換算される。

17 SROI の手法は、1997 年から米国のロバーツエンタープライズ開発基金 (REDF: Roberts
18 Enterprise Development Fund) が費用便益分析 (CBA: Cost-Benefit Analytics) と ROI の考えを
19 応用したことから開発が始まった。その後、イギリスやオランダで SROI の活用や研究
20 が積極的に行われてきた。SROI 手法はまだ開発の途上であるが、2009 年には The SROI
21 Network らにより SROI 運用のガイドライン (A Guide to Social Return on Investment)³¹⁾
22 が発行されている。

23 このように SROI は欧米を中心に研究や運用が行われてきたが、まだその歴史は浅く、
24 発展途上国での研究事例はあまり多くない。発展途上国における研究事例としては、イ
25 ンド CSR ネットワークによる学校における衛生改善プログラム、インド農村部における

1 水質改善プログラム、ボルチモアでの病院による住宅支援プロジェクト等の SROI 評価
2 の実施が報告されている³²⁾。しかし発展途上国が抱える課題は多種多様であり、また地
3 域固有のもの多いため、発展途上国における SROI の適用手法はまだ十分に検討されて
4 いない。また発展途上国ではデータ取得が困難であることや、SROI 評価のニーズが認
5 知されていないことから、SROI 評価の実施が進まなかったことも考えられる。

6 インドネシア、または東南アジアにおける排水処理システムの改善にむけた SROI 評
7 価が行われた事例はなく、そのため本研究において SROI の評価手法を適用することに
8 は意義があると考ええる。

9

2. オンサイト型生活系排水処理システムの LCA による環境効率比較

2.1 分析対象資材およびインベントリデータの集計・分析方法

2.1.1 調査対象システムの仕様

インドネシア共和国ジャカルタ首都特別州（以下、ジャカルタ）の工場内に設置された septic tank と浄化槽、それぞれ一基を対象とした。二基はどちらもインドネシア国内で製造され、同じ工場敷地内に設置されている。調査対象とした排水処理システムの概要を表 1 に示す。使用人数による負荷率が異なるが、septic tank は現地における一般的な性能設計であるため、実際の使用状況において比較を行った。

表 1 調査対象システムの概要

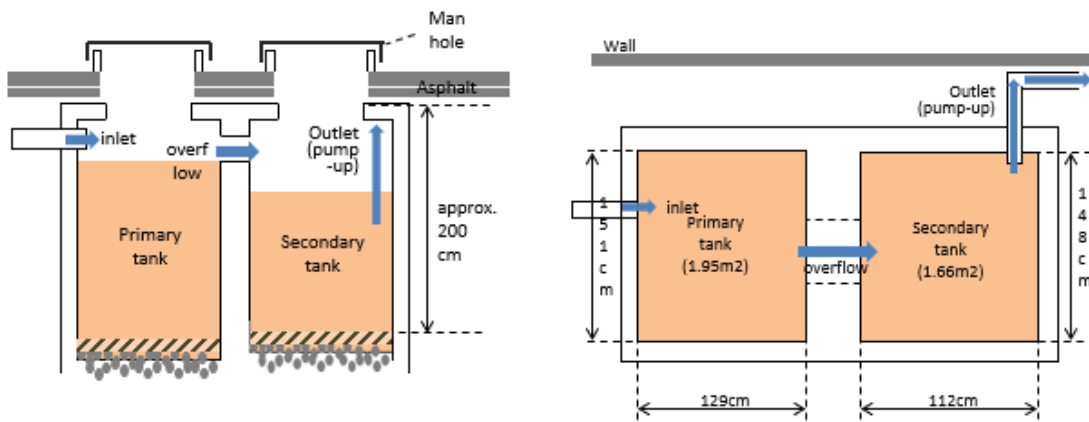
| 対象システム | 処理能力 (m ³ /日) | 容量 (m ³) | 平均流入量 (m ³ /日) | 使用人数 (人) | 処理システム |
|-------------|-----------------------------|-------------------------|------------------------------|-------------|-------------------------|
| septic tank | - | 7.22 | 0.44 | 164 | 固液分離 |
| 浄化槽 | 30.00 | 21.04 | 0.97 | 357 | 固液分離担体流動方式 (窒素高度処理型) |

(1) 対象 septic tank の仕様

調査対象とした septic tank は、現場打ちのコンクリート製であり、インドネシア及び近隣の東南アジア諸国で一般的に使用されている仕様である。インドネシアにおいては 2017 年にインドネシア国家基準(SNI)³³⁾にて septic tank の構造が定められている。調査対象の septic tank はそれよりも前に設置されたものであるが、ほぼ同様の形状である。septic tank の設置については記録が残っておらず不明であるが、少なくとも 10 年以上前に設置されたものとみられる。対象 septic tank の現場での採寸、設備管理者へのヒアリング及び SNI で定められた septic tank の材料の情報もとに、推測される septic tank の形状を図 1 のとおり作成した。対象の septic tank は、2 つの沈殿槽から成り、1 層目の上澄みが 2

1 層目へオーバーフローし、2 層目の上澄みはポンプにより引き揚げられて、工場内の中
 2 央設備にて二次処理が行われている。SNI では、septic tank の処理水を直接環境中に排出
 3 することは禁じられており、沈殿方式、アップフローフィルター、人工湿地などによる
 4 二次処理を行うことが定められている。同工場は、PROPER にて優良企業に認定されて
 5 おり、生活系排水の適性処理のために浄化槽の導入や septic tank 処理水の二次処理など
 6 の先進的な取り組みを行っている。しかしインドネシア全土をみると、一般的な工場等
 7 では、二次処理設備の導入が経済面や土地の確保において困難であることから、septic
 8 tank からの排水は二次処理を行わずにそのまま環境に放出されることが多い。
 9 なお septic tank は設計図が残されていないため地中の構造は不明であるが、一般的に
 10 は底面はセメントで固めずに砂利等が敷き詰められているため、槽内水が地下に浸透し
 11 ている可能性が高い。

12



13

14

図1 septic tank の構造

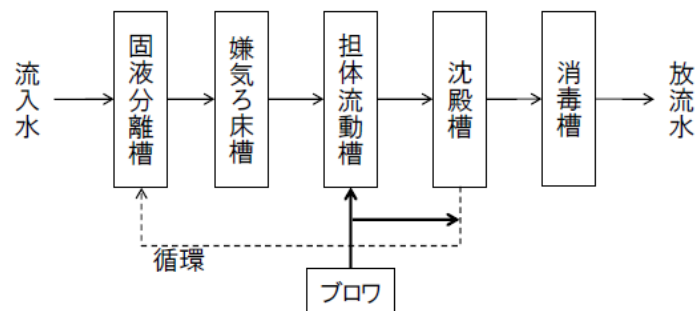
15

16 (2) 対象浄化槽の仕様

17 日本の浄化槽メーカーである株式会社ダイキアクシスのインドネシア法人 PT Daiki
 18 Axis Indonesia 社が製造・販売する浄化槽 (BJ30 型) を調査対象とした。製品の設計処
 19 理能力を A-3 に示す。

1 処理方式は、窒素高度処理型の固液分離担体流動方式である。浄化槽の処理フローを
2 図1に示す。5つの槽から成り、源水は固液分離槽（1層目）、嫌気ろ床槽（2層目）、
3 担体流動層（3層目）、沈殿槽（4層目）の順に処理された後、4層目から1層目へ戻り、
4 同じ工程が4回繰り返される。単体流動層では、ブロワから空気が送られ、好気性処理
5 が行われる。また同ブロワから送られる空気は、処理水の循環にも利用される。1層目
6 から4層目までの4回の循環を経た処理水は、消毒槽にて殺菌処理が行われた後、放流
7 される。

8



9

10 図2 対象浄化槽の処理フロー

11

12 2.1.2 調査対象設備の利用状況

13 調査対象の septic tank 及び浄化槽は、それぞれ別のトイレに接続されているが、気候、
14 原水の水質や流入パターンはほぼ同じ条件である。処理対象の排水は、トイレから排出
15 されるし尿及び雑排水等を含む生活系排水である。浴室排水や台所排水は含まれないが、
16 従業員の9割以上はイスラム教徒であるため、終業時間内の礼拝に際して手足や顔等の
17 体の一部を洗浄した排水が含まれる。工場の稼働は日中の約8時間である。なお本調査
18 は、工場に設置された生活系排水処理システムを対象としており、その利用状況は一般
19 家庭のものとは異なるため、住宅に設置された浄化槽や下水処理場に関する既往データ
20 との単純比較は避けた。

21 連続した10日間の処理量を測定した結果、septic tank は一人当たり平均2.65L、浄化槽

1 は 2.71L であった。流入量と処理量が同量だとすると、二基の一人当たりの流入量はほ
2 ぼ同等である。使用人数は、それぞれの処理対象トイレを使用する従業員の平均出勤者
3 数とした。汚泥引き抜き等の過去のメンテナンス状況については不明であるが、管理者
4 によると、少なくとも 1 年以上は汚泥清掃がなされていない。浄化槽は 2017 年 1 月に
5 稼働を始め、その後、2018 年 1 月に初回の汚泥引き抜きが行われた。

6

7 **2.1.3. 機能単位**

8 機能単位は、工場における 1 年間の生活系排水（約 2.71L/人・日）の処理とする。な
9 お 2.1.2 節の水量測定結果を基にすると、septic tank の一人当たりの処理量が、浄化槽に
10 比べて 0.06L/日少ない。つまり槽あたり処理量のうち約 2%が地下浸透している可能性が
11 考えられるが、正確な実態把握には流入地点での計測が必要である。ただし浄化槽との
12 差が全体の 2%とそれほど大きくないことを考慮し、本研究では地下浸透している汚水
13 については評価対象に含めないこととした。要するに、処理水準についての統一は図ら
14 れていない。これについては水質基準までの処理を行うための二次処理を含めることで
15 統一化を図ることも考えられるが、ここでは 2.2 節で示す環境効率の考え方で比較を行
16 うこととする。

17

18 **2.1.4 システム境界**

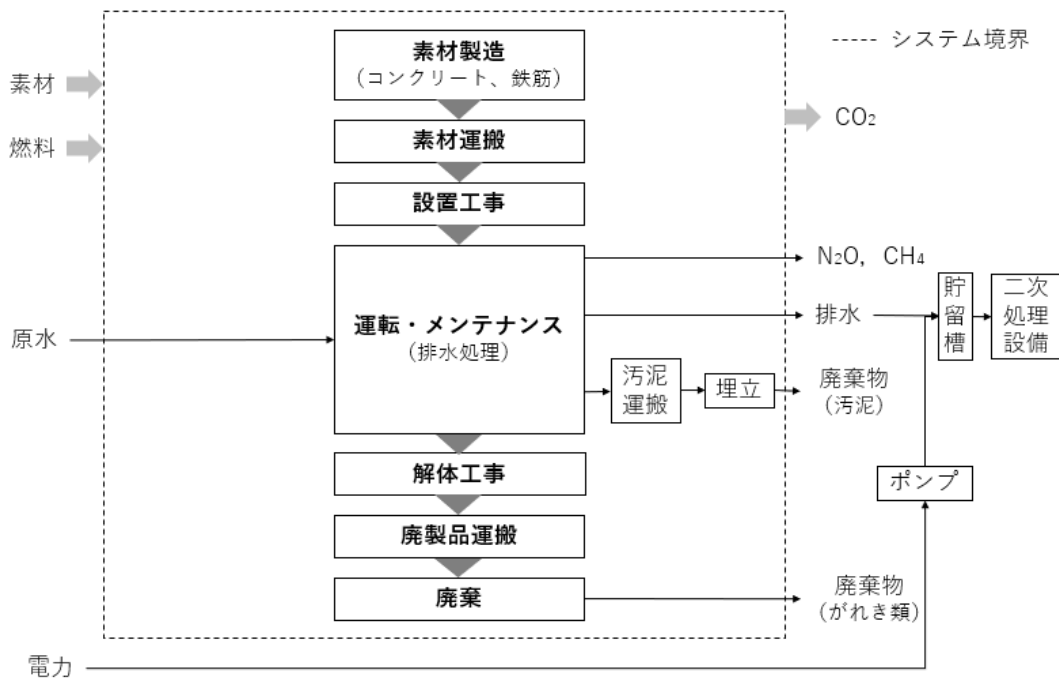
19 septic tank、浄化槽のそれぞれについて、原料調達から製造、使用、廃棄までの各ステ
20 ージにおける GHG 排出量、及び廃棄物の排出量を求めた。septic tank、浄化槽それぞ
21 のシステム境界を図 3、図 4 に示す。

22

23

24

1 図3 septic tank のシステム境界

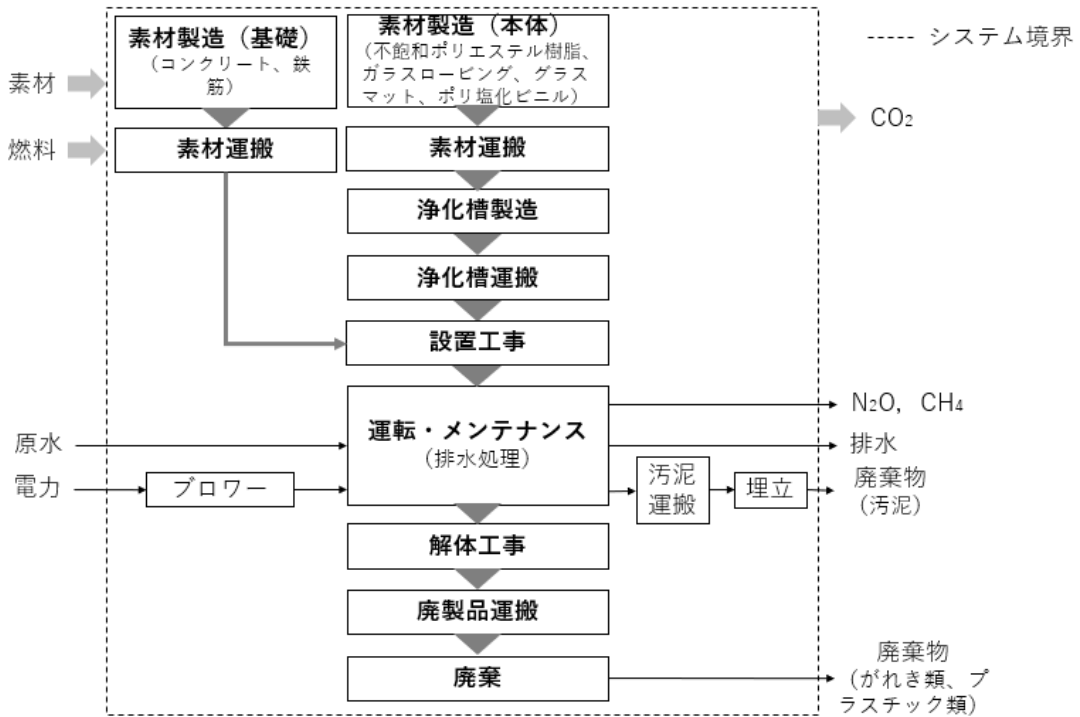


2

3

4

5 図4 浄化槽のシステム境界



6

7

1 運転中に排出される温室効果ガスとしては、二酸化炭素 (CO₂)、メタン (CH₄) と亜
2 酸化窒素 (N₂O) があるが、生活排水中の有機物は生物由来であるため、CO₂ はカーボ
3 ンニュートラルとされ評価対象にならない³⁴⁾。そのため、CH₄、N₂O のみを評価対象と
4 した。

5 その他の使用段階の環境負荷としては、放流水の水質が挙げられる。インドネシアに
6 おける放流水の水質基準は、生活排水の水質基準に関する環境林業省大臣令 2016 年第
7 68 号にて、pH 6-9、BOD 30mg/L、COD 100mg/L、TSS 30mg/L、油脂 5mg/L、アンモニ
8 ア態窒素 10mg/L、大腸菌群 3000 個/100mL 以下と定められており³⁵⁾、ジャカルタではこ
9 の基準値が適用されている。水処理装置の性能を見るという点では T-N (硝酸、亜硝酸
10 性窒素) を測定することが望ましいが、協力現場の都合上かなわなかったため、本調査
11 ではこの 7 項目のうち、環境負荷として BOD を評価対象とし、その他の COD、SS、ア
12 ンモニア態窒素、pH を参考値として計測した。

13 なお 2.1.1(1)節で述べた通り、調査対象の septic tank から排出される処理水は、実際に
14 は二次処理が行われている。しかしインドネシア全土では二次処理は行わずに septic tank
15 のみで処理されているケースが大多数であるため、本調査では septic tank の処理水がそ
16 のまま環境に排出されると仮定した。したがって septic tank のポンプによる消費電力は
17 評価対象外とした。また排水の自然界における分解により放出する温室効果ガスについ
18 ては、推計の対象範囲に含めない。

19 また 2.1.3 節で述べたとおり、septic tank から地下浸透している可能性のある汚水につ
20 いては評価対象外とした。

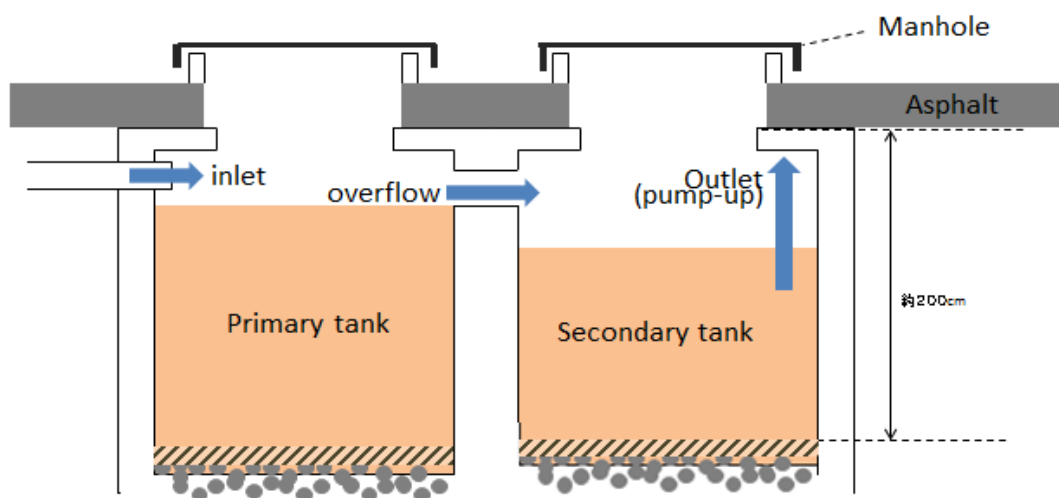
21 廃棄物として、発生する汚泥量と、使用済みの廃棄製品の素材ごとの重量を調査した。
22 汚泥に関しては、IPCC ガイドライン²⁴⁾をもとに埋め立て処理された場合の CH₄ 排出量
23 を求めた。

24 なお septic tank 及び浄化槽はどちらも耐用年数を 30 年として、原料製造、原料輸送、
25 製造、製品輸送、設置工事、汚泥輸送、製品廃棄にかかる投入資源・エネルギー量をそ
26 れぞれ求め、耐用年数 30 年で除した。

1

2 2.1.5. 流入水・処理水のサンプリング・分析方法

3 流入水と放流水のサンプリングは、一回目は2017年10月11日から19日間、二回目
4 は2018年1月8日から25日間、朝9時頃に行った。pH、COD、TSSは一日一回、BOD
5 は5日に一回、アンモニア態窒素は二回目のサンプリング時のみ不定期に二回のサン
6 プリングをした。septic tankにはトイレから地中の配管を通して直接原水が流入するため、
7 septic tankの一次槽を流入水(inlet)としてサンプリングした。Septic tankの処理水(outlet)
8 は二次処理設備に流入する前の貯水槽から採取した。Septic tankの排水サンプリング位
9 置を図5に示す。



10

11 図5 septic tankの排水サンプリング位置

12

13 浄化槽の流入水(inlet)は、トイレから排出された後の貯水槽から採取した。処理水
14 (outlet)は浄化槽出口の管理升から採取した。浄化槽の排水サンプリング位置を図6に
15 示す。

16

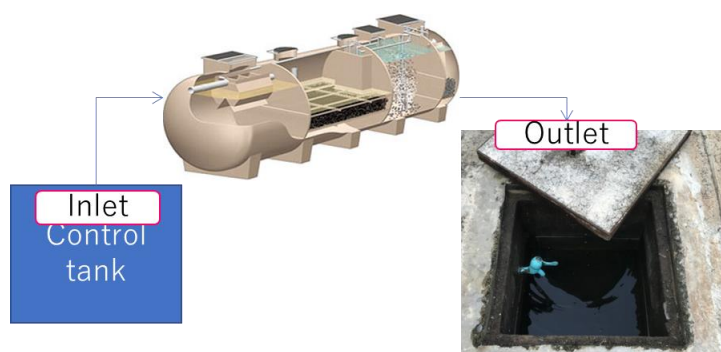


図6 浄化槽の排水サンプリング位置

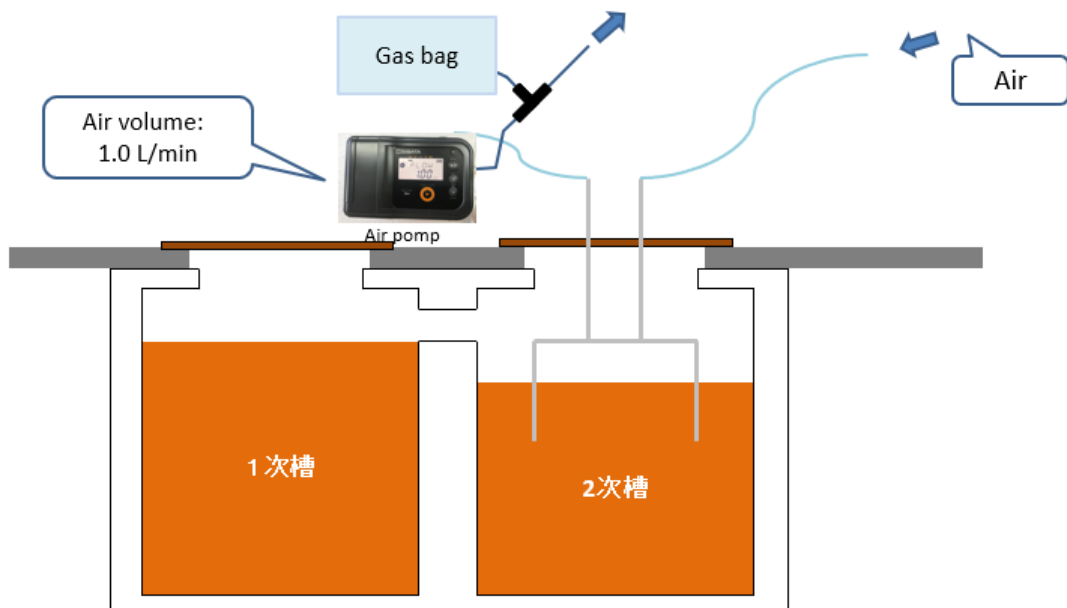
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21

採取したサンプルは冷蔵保存し、インドネシア国家基準（pH: SNI06-6989.11-2004、BOD: SNI 06-6989.72-2009、COD: SNI 6989.2-2009、SS: SNI 06-6989.3-2004、油脂: SNI 06-6989.10-2004、アンモニア態窒素: SNI 06-6989.30-2005、大腸菌: SNI 2897-2008）に準じて分析した。

2.1.6. ガスのサンプリング・分析方法

ガスサンプリングは2018年5月7～8日の2日間にわたり実施した。また、ガス排出量が時間帯によって変化する可能性があるため、朝から夕方の日中に複数回行った。サンプリング方法は既報の論文^{25, 26, 27)}を参考にした。

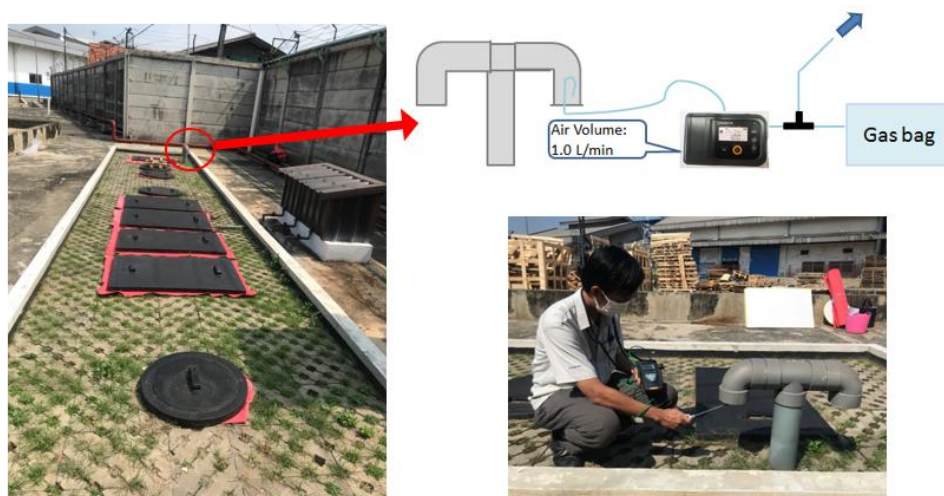
septic tank では、一次槽と二次槽それぞれ数回のサンプリングを行った。塩ビパイプを加工したチャンバー（底面積：0.051m²）を水面に浮かべ、チャンバーにつないだチューブ2本のうち片方は外気を吸うように設置し、もう片方をミニポンプ（SHIBATA MP-Σ100HN型）につなぎ、吸引した。ポンプの風量は1L/minに設定した。サンプリング装置をセットした後、気液平衡に達する1～2時間後にガスバッグへのサンプリングを開始した。ガスサンプルは、原則として5分おきに計4検体を採取するとともに、周辺空気をバックグラウンドとして採取した。Septic tank のガスサンプリング方法を図7に示す。



1
2
3
4
5
6
7
8

図7 septic tank のガスサンプリング方法

浄化槽では、流入口とマンホールを密閉することで、ブロワにより槽内に吹き込まれた空気が臭突管のみから排出されるようにした。ガスサンプルは臭突管の内部から3回、原則として5分おきに計4検体を採取した。浄化槽のガスサンプリング方法を図8に示す。



9
10

図8 浄化槽のガスサンプリング方法

1

2 CH₄ガスは、FID（水素炎イオン化検出器）を検出器とした GC-8A（島津製作所）、N₂O
3 は ECD（電子捕獲型検出器）を検出器とした GC-8A（島津製作所）にて分析を行った。
4 分析条件は、既往研究²⁵⁾に準じて設定した。1回のサンプリングで得られる4検体のN₂O、
5 CH₄濃度の測定値から、バックグラウンドの測定値を差し引き、4つの値の平均濃度を
6 求めた。平均濃度に一日の風量を乗じ、チャンバー面積あたりの対象ガス排出量（体積）
7 を求め、以下式によりガス重量を求めた。

8

9

10

$$w=pVM/RT$$

w=重量、p=気圧、V=体積、M=分子量、R=モル気体定数、T=熱力学温度

11

12

13 2.1.7. 素材重量、運搬・製造にかかるエネルギー、運転時の電力消費量及び汚泥発生量 14 に関する情報収集

15 septic tank の製造段階においては、インドネシアでの一般的な septic tank の工事仕様を
16 もとに、レンガを積み上げた上に、径 10mm の鉄筋で補強したセメントを 5cm の厚さで
17 塗った場合に使用するレンガ、セメント、鉄筋の量を算出した。浄化槽の製造段階につ
18 いては、本体の主な素材として不飽和ポリエステル樹脂、ガラスロービング、ガラスマ
19 ット、ポリ塩化ビニル樹脂の使用量、基礎素材としてセメント、鉄筋の使用量を求めた。

20 浄化槽製造時の電力使用量は、工場の年間電力使用量に、年間生産量のうち対象浄化
21 槽が占める比率を乗じて算出した。運転時のブロワ稼働にかかる電力消費量は、ブロワ
22 の仕様から算出した。消毒剤として使用される次亜塩素酸カルシウムの量については、
23 添加濃度を 5mg/L として算出した。

24 septic tank の汚泥発生量については、インドネシアの septic tank に関する既往の論文³²⁾
25 を参考に、湿重量で 0.5kg/人/日として、一日のうちの工場での滞在時間を考慮して算出
26 した。浄化槽の汚泥発生量については、2018年1月の工場内全体の汚泥引き抜き量を参

1 考に算出した。septic tank、浄化槽ともに汚泥の含水率を 99.2%とした。また IPCC ガイ
 2 ドライン³⁰⁾をもとに、汚泥が埋め立て処理された場合の CH₄ 排出量を求めた。
 3 廃棄物の輸送および素材輸送時の軽油消費量に関しては、輸送重量と走行距離から、
 4 トンキロ法を用いて CO₂ 排出量を算出した。施工時および解体時の軽油消費量について
 5 は、重機の燃費を 1.42L/h として、平均的な作業時間から算出した。

6

7 2.1.8. 原単位データと地球温暖化係数(GWP)

8 インドネシアは急速な経済発展の途上にあり、人口増加や都市化、工業化に伴う CO₂
 9 排出量の増加が問題視されているが、CO₂ 排出原単位については入手できるデータが限
 10 られている。その正確な把握は困難であるが、製造工程、生産効率等により先進国であ
 11 る日本とは異なることを考慮し、電力³⁶⁾、製品材料の大部分を占めるセメント、鉄筋、
 12 プラスチックのみインドネシアの現状を反映させるため、両国のエネルギー原単位を比
 13 較し、その比率を IDEA ver.2³⁷⁾の原単位に乗じた。原単位の比較を表 2 に示す。

14

15 表 2 原単位の比較

| 項目 | 単位 | インドネシア | 日本 | 比率 |
|--------|-----------------------------------|-----------------------|-----------------------|------|
| セメント | セメント産業エネルギー原単位 kcal/kg clinker | 800 ³⁸⁾ | 773 ³⁸⁾ | 1.03 |
| 鉄鋼 | 鉄鋼産業エネルギー原単位 kWh/トン | 650 ³⁸⁾ | 350 ³⁾ | 1.86 |
| プラスチック | エネルギー消費量(千BOE) | 12,504 ³⁹⁾ | 29,100 ⁴¹⁾ | |
| | 生産量(千トン) | 2,300 ⁴⁰⁾ | 7,651 ⁴¹⁾ | |
| | プラスチック産業エネルギー原単位 | 5.44 | 3.80 | 1.43 |

16

17
 18 セメントと鉄筋については、インドネシア共和国エネルギー鉱物資源省の発表資料³⁸⁾
 19 における日尼のエネルギー原単位の比較を参考にした。プラスチックについては、既存
 20 の資料^{39, 40, 41)}を参考に、両国のプラスチック製造にかかる消費エネルギーをそれぞれの
 21 生産量で除し、エネルギー原単位を求めた。その他の素材、及び軽油については、ライ
 22 フサイクル全体に占める割合が非常に少ないため、IDEA ver.2 または参考文献から原単
 23 位をそのまま用いた。原単位一覧を表 3 に示す。また CH₄、N₂O の地球温暖化係数 (GWP)

1 は、IPCC 評価報告書（2013 年）AR5 にしたがひ、それぞれ 28、265 を用いた。

2

3

表 3 原単位一覧

| 項目 | 原単位 | |
|----------------|-------------------------------|-----|
| 電力 | 0.90 kg-CO ₂ /kWh | 19) |
| セメント | 表2、IDEAv2(セメント) | 24) |
| レンガ | IDEAv2(普通れんが) | 24) |
| 鉄筋 | 表2、IDEAv2(鑄造(鉄鑄物)) | 24) |
| 不飽和ポリエステル樹脂 | 表2、IDEAv2(不飽和ポリエステル樹脂) | 24) |
| ガラスロービング | 2.06 kgCO ₂ /kg | 9) |
| グラスマット | 2.81 kgCO ₂ /kg | 9) |
| ポリ塩化ビニル(PVC) | 1.36 kgCO ₂ /kg | 9) |
| 塩素(次亜塩素酸カルシウム) | 表2、IDEAv2(次亜塩素酸カルシウム) | 24) |
| 軽油(燃料法) | 2.62 kgCO ₂ /L | |
| 軽油(トンキロ法) | 0.08 トンCO ₂ /トン・km | |

4

5

6

7 2.2 環境効率の算定方法

8

9 環境影響負荷削減量（分子）として BOD 除去量（kg/人/年）、また環境影響（分母）
10 として GHG 排出量（kg-CO₂eq/人/年）を算出し、以下の式により環境効率を求めた。

11

$$\text{環境効率} = (\text{BOD 除去量 (環境負荷削減量)}) / (\text{GHG 排出量 (環境影響)})$$

12

13

14

15 2.3 インベントリデータの集計・分析結果

16

17 2.3.1 水質

18 水質分析の結果を表 4 に示す。septic tank の放流水は pH を除くすべての項目が基準値を
19 超過していた。一方、浄化槽の放流水は、アンモニア態窒素を除くすべての項目が基準

1 値を満たした。アンモニア態窒素については、一回目は現場の都合により分析を実施せ
 2 ず、二回目は基準値を超過していた。その原因は不確定ではあるが、一つには対象の浄
 3 化槽は稼働開始から1年以上、汚泥の引き抜きが行われていなかったことが挙げられる。
 4 また流入水はし尿が主体であり、アンモニア態窒素含有量が設計値のおよそ2倍であっ
 5 たため、除去率は高かったものの、通常よりもアンモニア態窒素が多く残留したと考え
 6 られる。

7 なお septic tank のそれぞれの項目の除去率は、BOD 23%、COD 12%、SS 10%、アンモ
 8 ニア態窒素 40%であったのに対し、浄化槽は、BOD 91%、COD 82%、SS 94%、アンモ
 9 ニア態窒素 80%と高い処理能力を発揮した。浄化槽は、従来システムの septic tank より
 10 も大幅に環境負荷を低減できると考えられるが、同国の基準値を満たすには、定期的な
 11 汚泥引き抜きや、循環量の管理を適切に行うことが重要である。septic tank についても
 12 その処理性能は、過去のメンテナンス状況等に左右されることが考えられ、精緻なデー
 13 タを得るにはさらなる調査が必要である。

14
15 表4 水質分析の結果

| 対象システム | No. | 項目 | 水質基準 | ※基準値超過 | | | | | | |
|-------------|-----|--------------------|----------|--------|--------|-------|--------|-------|--------|---------|
| | | | | 一回目平均 | | 二回目平均 | | 合計平均 | | 除去率 (%) |
| | | | | inlet | outlet | Inlet | outlet | inlet | outlet | |
| septic tank | 1 | pH | 6-9 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | - |
| | 2 | BOD | 30 mg/L | 130 | 92* | 146 | 119* | 138 | 106* | 23 |
| | 3 | COD | 100 mg/L | 257 | 220* | 275 | 250* | 266 | 235* | 12 |
| | 4 | SS | 30 mg/L | 173 | 156* | 245 | 221* | 209 | 188* | 10 |
| | 6 | NH ₄ -N | 10 mg/L | - | - | 111 | 67* | 111 | 67* | 40 |
| 浄化槽 | 1 | pH | 6-9 | 7 | 6 | 7 | 7 | 7 | 7 | - |
| | 2 | BOD | 30 mg/L | 150 | 16 | 209 | 17 | 179 | 16 | 91 |
| | 3 | COD | 100 mg/L | 301 | 54 | 316 | 56 | 308 | 55 | 82 |
| | 4 | SS | 30 mg/L | 309 | 20 | 326 | 19 | 317 | 19 | 94 |
| | 6 | NH ₄ -N | 10 mg/L | - | - | 107 | 21* | 107 | 21* | 80 |

16
17
18 **2.3.2 温室効果ガス (CH₄、N₂O)**

19 ガス分析の結果を表5に示す。septic tank の N₂O 排出量は 0.06kg/tank/年、CH₄ 排出量
 20 は 262kg/tank/年となった。一方、浄化槽の N₂O 排出量は 3.51kg/tank/年、CH₄ 排出量は
 21 42kg/tank/年となった。

1

2

表5 運転時の N₂O, CH₄ 排出量 (槽あたり)

| 対象システム | 項目 | 1回目 (g/tank・日) | 2回目 (g/tank・日) | 3回目 (g/tank・日) | 4回目 (g/tank・日) | 平均 (g/tank・日) |
|------------------|------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|------------------|
| septic tank(一槽目) | N ₂ O | 0.12 | 0.07 | N/A | N/A | 0.09 |
| | CH ₄ | 613.87 | 325.45 | N/A | N/A | 469.66 |
| septic tank(二槽目) | N ₂ O | 0.02 | 0.08 | 0.12 | 0.08 | 0.08 |
| | CH ₄ | 113.48 | 185.74 | 474.21 | 219.11 | 248.13 |
| 浄化槽 | N ₂ O | 6.34 | 8.21 | 14.30 | N/A | 9.62 |
| | CH ₄ | 119.58 | 115.18 | 109.91 | N/A | 114.89 |

3

4

5 対象職員一人当たりの年間 GHG 排出量を表 6、図 9 に示す。septic tank の一人当たり
6 の N₂O 排出量は浄化槽より約 26 倍低く、CH₄ 排出量は約 14 倍高かった。浄化槽におけ
7 る N₂O 発生は、好気処理におけるアンモニア態窒素の硝化の他に、その後の汚泥貯留槽
8 における亜硝酸の脱窒化による増加が考えられる。一方、septic tank からの N₂O 排出量
9 が低い原因としては、排水中のアンモニア態窒素が嫌気性の雰囲気下では十分に硝化さ
10 れず、そのまま放流されているためと考えられる²⁸⁾。

11 CH₄ 及び N₂O の排出量それぞれの GWP を乗じた結果、septic tank の GHG 排出量は一
12 人当たり 44.83kg-CO₂eq/年、浄化槽の GHG 排出量は一人当たり 5.89 kg-CO₂eq/年であり、
13 運転段階のみを比較すると septic tank は浄化槽の約 7.7 倍の GHG 排出量となった。

14 今回は、septic tank、浄化槽ともに一現場ごとの単発の調査結果であり、精緻なデータ
15 を得るにはさらなる実地調査が必要と考えられる。しかし septic tank と浄化槽との差は
16 大きく、本調査結果は、処理機構の違いを如実に反映されていることが示唆された。

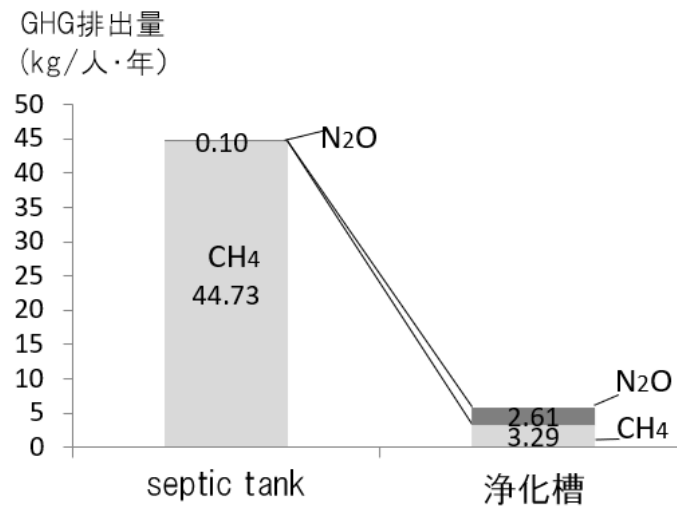
17

18

1
2
3
4

表6 一人あたりの運転時の GHG 排出量

| 対象システム | 使用人数 (人) | 項目 | 平均排出量 (kg/人・年) | GHG排出量 (kg-CO ₂ eq/人・年) | GHG排出量合計 (kg-CO ₂ eq/人・年) |
|-------------|-------------|------------------|-------------------|---------------------------------------|---|
| septic tank | 164 | N ₂ O | 0.00 | 0.10 | 44.83 |
| | | CH ₄ | 1.60 | 44.73 | |
| 浄化槽 | 357 | N ₂ O | 0.01 | 2.61 | 5.89 |
| | | CH ₄ | 0.12 | 3.29 | |



5
6
7
8

図9 一人あたりの運転時の GHG 排出量

9 **2.2.3 電力使用量と汚泥発生量**

10 対象の浄化槽はブロワ（240W）を24時間稼働で計3台使用しており、年間の電力使
 11 用量は6.3MWh/tank/年、対象職員一人あたりでは18kWh/年である。2018年1月の浄化
 12 槽の汚泥引き抜き量は、対象の浄化槽を含めた工場内の5基を合計して5m³であった。
 13 個別の汚泥量の記録が得られなかったため、それぞれの計画処理能力の比率から、調査
 14 対象とした浄化槽からの引き抜き汚泥量は1.7m³と推定した。引き抜き汚泥量のうち水
 15 分を99.2%とすると、固形物の乾燥重量は1.36kg-DS/tank/年、対象職員一人あたりでは
 16 0.03kg-DS/人/年である。一方、septic tankの汚泥発生量は、インドネシアの湿重量で一人

1 当たり 0.5kg-WS/日として年間に換算すると、乾燥重量は 182.5kg-DS/tank/年、一人当た
2 りでは 1.5kg-DS/人/年となった。

3

4 **2.2.4 インベントリデータ**

5 本調査で収集した septic tank と浄化槽それぞれのインベントリデータを表 7、表 8 に
6 まとめた。これに、CO₂排出原単位を乗じることで、一人あたりの排水処理にかかる GHG
7 排出量を算出した。

8

9

1

表7 septic tank のインプットインベントリ

| ステージ | 項目 | 使用量 (槽あたり) | 使用量 (槽あたり/年) | |
|--------|-----------|------------------|------------------|---------------------------|
| Input | 素材調達 | セメント | 957.00 kg | 31.90 kg |
| | | レンガ | 828.57 個 | 27.62 個 |
| | | 鉄筋 | 112.00 kg | 3.73 kg |
| | 素材運搬 | 軽油 | 157.02 (トン x km) | 0.01 (トン x km) |
| | 施工 | 軽油 | 22.72 L | 0.76 L |
| | 運転・メンテナンス | 軽油 | | 1.04 (トン x km) |
| | 廃棄 | 軽油 | 157.02 (トン x km) | 5.23 (トン x km) |
| Output | 大気への放出 | CO ₂ | | 542.77 kg-CO ₂ |
| | | CH ₄ | | 262.00 kg-CH ₄ |
| | | N ₂ O | | 0.06 kg-N ₂ O |
| | 水域への放出 | BOD | | 16.83 kg |
| | 廃棄物 | 汚泥埋立 | | 79.81 kg-DS |
| | | がれき類 | 3,140.43 kg | 104.68 kg |

2

3

4

表8 浄化槽のインプットインベントリ

| ステージ | 項目 | 使用量 (槽あたり) | 使用量 (槽あたり/年) | |
|----------------|------------------|---------------|------------------|-------------------------|
| Input | 素材調達 | 不飽和ポリエステル樹脂 | 1,835.00 kg | 61.17 kg |
| | | ガラスロービング | 406.00 kg | 13.53 kg |
| | | グラスマット | 145.00 kg | 4.83 kg |
| | | ポリ塩化ビニル(PVC) | 35.00 kg | 1.17 kg |
| | | セメント | 3,921.50 kg | 130.72 kg |
| | | 鉄筋 | 96.91 kg | 3.23 kg |
| | 素材運搬 | 軽油 | 321.97 (トン x km) | 10.73 (トン x km) |
| | 製造 | 電力 | 1,350.00 kWh | 45.00 kWh |
| | 製品運搬 | 軽油 | 32.67 L | 1.09 L |
| | 施工 | 軽油 | 11.36 KL | 0.38 KL |
| | 運転・メンテナンス | 電力 | | 6,307.20 kWh |
| 塩素(次亜塩素酸カルシウム) | | | 0.06 kg | |
| 軽油 | | | 0.18 (トン x km) | |
| 廃棄 | | 軽油 | 83.71 (トン x km) | 2.79 (トン x km) |
| Output | | 大気への放出 | CO ₂ | |
| | CH ₄ | | | 42 kg-CH ₄ |
| | N ₂ O | | | 3.5 kg-N ₂ O |
| | 水域への放出 | BOD | | 5.7 kg |
| | 廃棄物 | 汚泥埋立 | | 14 kg |
| | | がれき類 | 4,018.4 kg | 134 kg |
| 廃プラスチック類 | | 80.70 kg | 3 kg | |

5

2.3 排水処理システムの環境効率比較

2.3.1 の水質分析の結果から、それぞれの処理システムによる BOD 除去量は、septic tank で 20.4kg/人/年、浄化槽で 105.3kg/人/年であった。また 2.3.2 のガス分析の結果から、septic tank のライフサイクルにおける一人当たりの GHG 排出量は 48.1kg-CO₂eq/人/年、浄化槽は 26.2kg-CO₂eq/人/年であった。本研究では、septic tank の環境効率は 0.4、浄化槽は 4.0 であり、浄化槽は septic tank に比べて 10 倍環境効率が高い結果となった。

素材調達、運搬においては浄化槽が septic tank を上回るが、全体の排出量に比べるとごく僅かである。どちらも運転段階における GHG 排出量がライフサイクル全体のほとんどを占めたが、その要因は異なった。septic tank では排ガスに含まれる N₂O、CH₄ が全体の 93% を占めた一方、浄化槽ではブロワの電力使用による CO₂ 排出量が 61% と最も高い結果となった。表 5 の運転・メンテナンス時に直接排出されるガスだけを比較すると、septic tank は 44.8kg-CO₂eq/人/年、浄化槽は 5.9kg-CO₂eq/人/年と、約 7.6 倍の差があった。GHG 排出量と運転・メンテナンス時内訳の比較を図 10 に示す。

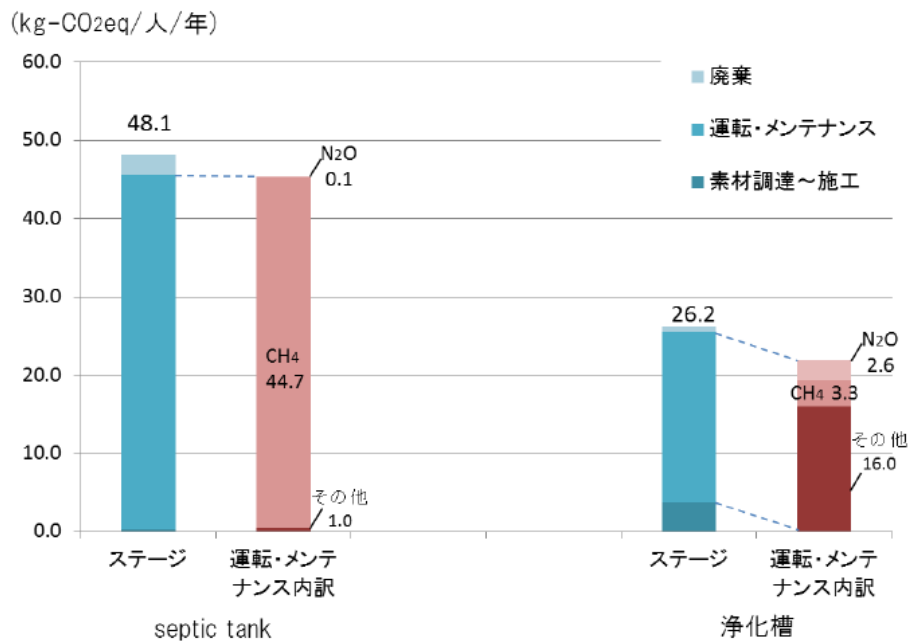


図 10 GHG 排出量と運転・メンテナンス時内訳

1 ガス発生量は、メンテナンス状況、流入水質、水量等により変動し得るが、現地では
2 まだ浄化槽の普及数が少ないため、比較できる実測データが不足している。今回は単発
3 調査であり、一般性を高めるためにはより多くの事例が求められるが、本調査において
4 は、septic tank の代替システムとして浄化槽を導入することで、運転時の N_2O 、 CH_4 の排
5 出量を大幅に削減し、さらにライフサイクル全体では GHG 排出量を 46%削減できる結
6 果となった。一方で、浄化槽によるさらなる GHG 削減に向けては、ブロワの省エネ化
7 等による電力使用量の削減が求められる。1 か所における調査結果であり、一般解とは
8 言えないが、十分に実用性のある結果を示している。

9

1 3. LIME3を用いたオンサイト型生活系排水処理システムのLCA環境影響評価

2

3 3.1 評価の概要

4

5 3.1.1 分析対象資材、機能単位とシステム境界

6 分析対象資材は、第2章の対象資材と同一の septic tank 1 台、浄化槽 1 台（表 1、図 1、
7 2）である。

8 機能単位は第2章における調査と同様に、工場における1年間の生活系排水（約 2.71L/
9 人日）の処理とする。また第2章における調査のシステム境界（図 3, 4）をそのまま引
10 用した。

11

12 3.1.2 インベントリ分析対象項目と分析結果

13 GHG に関連する項目については基本的には第2章のインベントリデータ（表 7, 8）
14 をそのまま引用したが、本章における LIME3 による評価においては土地利用を新たに分
15 析対象に加えた。また基準を満たさない放流水による環境影響を算定に含めるために、
16 放流水の COD を分析対象に加えた。表 9、10 に septic tank と浄化槽のライフサイクルイ
17 ンベントリ(LCI)分析の対象とした項目と分析結果の一覧を示す。

18

19

20

21

1

表9 septic tank の LCI 分析結果(LIME3 評価用)

| ステージ | 項目 | 使用量 (槽あたり) | 活動量 (/人・年) | |
|--------|------------|------------------|------------------|------------------|
| Input | 素材調達 | セメント | 957.00 kg | |
| | | レンガ | 828.57 個 | |
| | | 鉄筋 | 112.00 kg | |
| | 素材運搬 | 軽油 | 157.02 (トン x km) | 0.0364 (トン x km) |
| | 施工 | 軽油 | 22.72 L | 0.0046 L |
| | 運転・メンテナンス | 軽油 | | 0.0000 (トン x km) |
| | | 土地利用 | | 0.0008 m2 |
| 廃棄 | 軽油 | 157.02 (トン x km) | 0.0319 (トン x km) | |
| Output | 大気への放出 | CO2(電力以外) | 5.7117 kg-CO2 | |
| | | CH4(運転時排ガス) | 1.5976 kg-CH4 | |
| | | CH4(運転時放流水) | 0.0062 kg-CH4 | |
| | | CH4(汚泥埋立) | 0.1995 kg-CH4 | |
| | | N2O(運転時排ガス) | 0.0004 kg-N2O | |
| | | N2O(汚泥埋立) | 0.0046 kg-N2O | |
| | 水域への放出 | COD(放流水) | 0.2326 kg | |
| 廃棄物 | 汚泥(埋め立て処分) | | 1.5000 kg-DS | |
| | がれき類 | 3,140.43 kg | 0.6383 kg | |

2

3

4

5

6

7

8

9

10

11

12

13

14

表 10 浄化槽の LCI 分析結果 (LIME3 評価用)

| ステージ | 項目 | 活動量 (槽あたり) | 活動量 (/人・年) | |
|--------|-----------|---------------|------------------|------------------|
| Input | 素材調達 | 不飽和ポリエステル樹脂 | 1,835.00 kg | 0.1713 kg |
| | | ガラスロービング | 406.00 kg | 0.0379 kg |
| | | ガラスマット | 145.00 kg | 0.0135 kg |
| | | ポリ塩化ビニルPVC | 35.00 kg | 0.0033 kg |
| | | セメント | 3,921.50 kg | 0.3662 kg |
| | | 鉄筋 | 96.91 kg | 0.0090 kg |
| | 素材運搬 | 軽油 | 321.97 (トン x km) | 0.0301 (トン x km) |
| | 製造 | 電力 | 1,350.00 kWh | 0.1261 kWh |
| | 製品運搬 | 軽油 | 32.67 L | 0.0031 L |
| | 施工 | 軽油 | 11.36 KL | 0.0011 KL |
| | 運転・メンテナンス | 電力 | | 17.6672 kWh |
| | | 塩素(次亜塩素酸カリウム) | | 0.0002 kg |
| | | 軽油 | | 0.0000 (トン x km) |
| | | 土地利用 | | 0.0020 m2 |
| | 廃棄 | 軽油 | 83.71 (トン x km) | 0.0078 (トン x km) |
| Output | 大気への放出 | CO2(電力:製造) | | 0.1138 kg-CO2 |
| | | CO2(電力:プロフ) | | 15.9535 kg-CO2 |
| | | CO2(電力以外) | | 4.1552 kg-CO2 |
| | | CH4(運転時排ガス) | | 0.1176 kg-CH4 |
| | | CH4(運転時放流水) | | 0.0010 kg-CH4 |
| | | CH4(汚泥埋立) | | 0.0051 kg-CH4 |
| | | N2O(運転時排ガス) | | 0.0098 kg-N2O |
| | | N2O(汚泥埋立) | | 0.0002 kg-N2O |
| | 水域への放出 | COD | | 0.0544 |
| | | 汚泥 | | 0.0381 kg-DS |
| 廃棄物 | がれき類 | 4,018.4 kg | 0.3752 kg | |
| | 廃プラスチック類 | 80.70 kg | 0.0075 kg | |

3.1.3 データ収集方法

(1) フォアグラウンドデータ

浄化槽の素材・資源・エネルギーの投入量については、第2章の調査結果を引用した。

Septic tank 及び浄化槽の運用時の CH₄ 及び N₂O 排出量、排水の COD 含有量、汚泥を含

1 む廃棄物発生量については、同調査における実測データを採用した。

2

3 (2) バックグラウンドデータ

4 Septic tank の素材・資源・エネルギー投入量については、第 2 章の調査で実施した現
5 場での対象設備の実寸と、一般的な製造工程に関する文献・聞き取り調査結果を引用し
6 た。GHG 排出係数は既存文献³²⁾および IDEA ver.2 を参照した。

7

8 3.2 LIME3 による評価方法

9 本研究の評価には、環境影響評価手法である LIME3 を利用した。LCA の主要ステッ
10 プであるライフサイクルインベントリ分析(LCIA)の手法は、20 年以上にわたって欧州、
11 米国、日本などで研究が行われてきた。しかし現在、国際的に認知された環境影響手法
12 が少なく、また欧米や日本がそれぞれ独自の強化手法を提案しているが、いずれも評価
13 対象地域が限られているため、発展途上国における正しい影響評価は困難である³⁴⁾。

14 LCIA の手法は大きく分けて、ミッドポイントタイプの特性化手法、エンドポイント
15 タイプの特性化手法（被害評価）、エンドポイントの被害評価結果を基にした被害算定
16 型の統合化手法の 3 つがある。LIME は被害算定型の統合化手法に分類され、日本で開
17 発された手法である。

18 2005 年の LIME1、2009 年の LIME2 の後継版として、2015 年に LIME3 が開発された。
19 LIME3 の主な構成は LIME2 に沿っており、特性化、被害評価、統合化の 3 段階により
20 評価を行う。LIME3 では、人間健康、生物多様性、社会資産、一次生産の 4 つの保護対
21 象の被害量を、それぞれ損失余命(DALY)、絶滅種数増分期待値(EINES)、社会資産(USD)、
22 一次生産(NPP)の被害指標で評価し、さらにそれら 4 つを貨幣換算(USD)により統合化す
23 る⁴²⁾。

24 LIME2 と LIME3 の主な違いは、LIME2 では日本国内の環境条件をもとに被害係数、
25 また日本国民の環境意識に基づいて統合化係数が算定されているが、LIME3 ではインド
26 ネシアを含む世界 193 か国の環境条件に基づいた評価が可能となった。また LIME3 では

1 影響領域の評価対象として新たに水資源消費が追加されたが、一方、LIME2 で含まれて
2 いたオゾン層破壊、人間毒性、水域生体毒性、陸域生体毒性、酸性化、富栄養化、室内
3 空気室汚染、騒音が LIME3 では含まれていない。

4 LIME3 を用いた研究事例はまだ多くないものの、LCA 日本フォーラムにより LIME3
5 活用検討研究会パート 1 (2016~2019 年)、パート 2 (2020~2021 年) が開催され、そ
6 れぞれ研究事例が報告されている^{43,44)}。

7 本研究では、同研究会パート 2 における著者らの研究成果³⁶⁾をベースに、評価対象項
8 目などを見直した。評価対象は、気候変動、土地利用、資源消費(化石燃料、鉱物資源)、
9 廃棄物とした。なお、septic tank から基準値を超えた排水が土壌や河川に放流されるこ
10 とにより、富栄養化等の環境被害を及ぼしていると考えられるが、LIME3 には水環境負
11 荷の被害額算定のための係数が掲載されていないため、排水中の COD 量による環境影
12 響については LIME2 を用いて評価し、LIME3 の社会資産の被害評価結果に合計するこ
13 とで補完した。

14 算定方法は、表 9、10 のインベントリをもとに、算定対象項目それぞれに LIME3 の被
15 害係数を乗じた。算定対象の項目及びその被害領域を示した図を、付録 A-4、A-5 に添
16 付する。

18 3.3 LIME3 を用いた環境影響評価結果

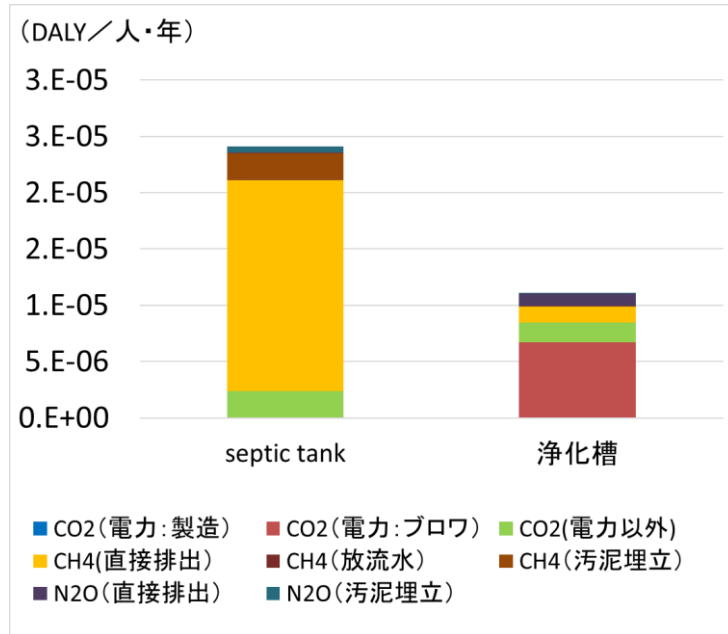
20 3.3.1 被害評価結果

21 人間健康、生物多様性、一次生産、社会資産の 4 つの保護対象に対する被害評価結果
22 (物質別内訳) の比較を図 12~15 に示す。すべての保護対象において septic tank は浄化
23 槽よりも環境影響が 2 倍以上大きい結果となったが、septic tank、浄化槽それぞれの主な
24 要因は異なる。

25 生物多様性と人間健康においては、septic tank では運転時に排水処理過程で直接ガス
26 として排出される CH₄ がそれぞれ全体の約 70%以上を占めた。一方、浄化槽では運転

1 時のブロワの電力消費による CO₂ 排出が全体の約 60%以上を占め、主な要因となった。

2

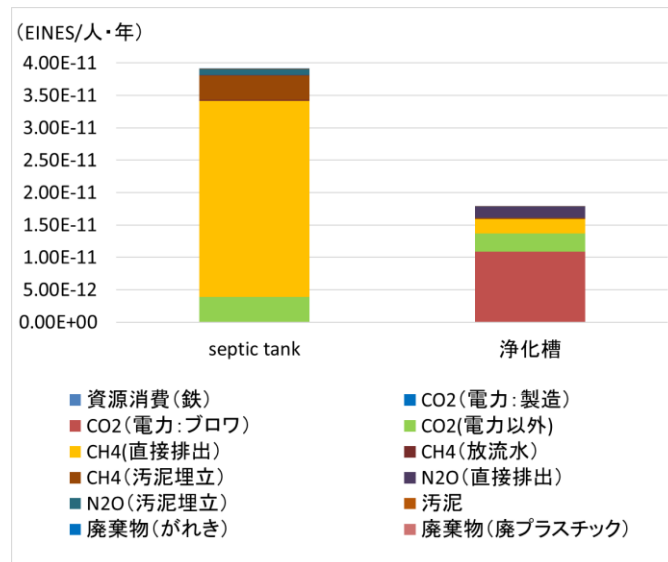


3

図 11 被害評価結果(人間健康)

4

5



6

図 12 被害評価結果 (生物多様性)

7

8

1 一次生産および社会資産においては、septic tank の運転時に排出される汚泥による影
 2 響が、浄化槽と比べて顕著に大きく表れた。ただし 3.3.2 節で示す統合化結果では、全
 3 体からみると一次生産及び社会資産の影響は少なく、汚泥による影響は大きくない。

4

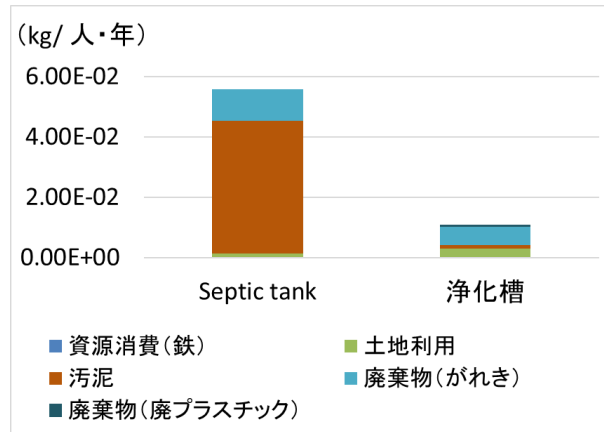


図 13 被害評価結果(一次生産)

5

6

7

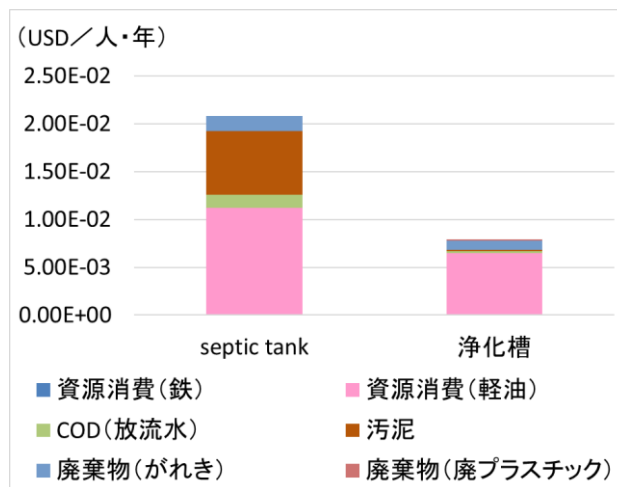


図 14 被害評価結果(社会資産)

8

9

10

11

12 3.3.2 統合化結果

13 統合化の結果、septic tank のライフサイクル全体の環境影響は一人当たり年間 1.04USD、浄化
 14 槽は 0.47USD であった。表 11 と図 15 に統合化結果(物質別)の比較を示す。それぞれのライフ
 15 サイクルにおける環境影響の主な要因は異なり、septic tank では運転時に直接排出される CH₄ (全
 16 体の約 74%)、浄化槽ではブロワ電力由来の CO₂ 排出(全体の約 58%)が主な要因となった。

1
2

表 11 統合化結果 (物質別)

単位:USD/人・年

| 物質 | septic tank | 浄化槽 |
|--------------------------|-------------|-----------|
| 鉄 | 2.00.E-04 | 7.97.E-05 |
| 土地利用 | 5.96.E-05 | 1.61.E-04 |
| 軽油(運搬) | 2.79.E-02 | 1.61.E-02 |
| CO ₂ (電力:製造) | 0.00.E+00 | 1.95.E-03 |
| CO ₂ (電力:ブロフ) | 0.00.E+00 | 2.73.E-01 |
| CO ₂ (電力以外) | 9.76.E-02 | 7.10.E-02 |
| CH ₄ (直接排出) | 7.65.E-01 | 5.63.E-02 |
| CH ₄ (放流水) | 2.95.E-03 | 4.55.E-04 |
| CH ₄ (汚泥埋立) | 9.55.E-02 | 2.42.E-03 |
| N ₂ O(直接排出) | 1.66.E-03 | 4.45.E-02 |
| N ₂ O(汚泥埋立) | 2.09.E-02 | 7.91.E-04 |
| COD(放流水) | 1.35.E-03 | 2.21.E-04 |
| 汚泥 | 2.09.E-02 | 5.30.E-04 |
| がれき | 4.93.E-03 | 2.90.E-03 |
| 廃プラスチック | 0.00.E+00 | 3.49.E-04 |
| 計 | 1.04.E+00 | 4.70.E-01 |

3
4
5
6

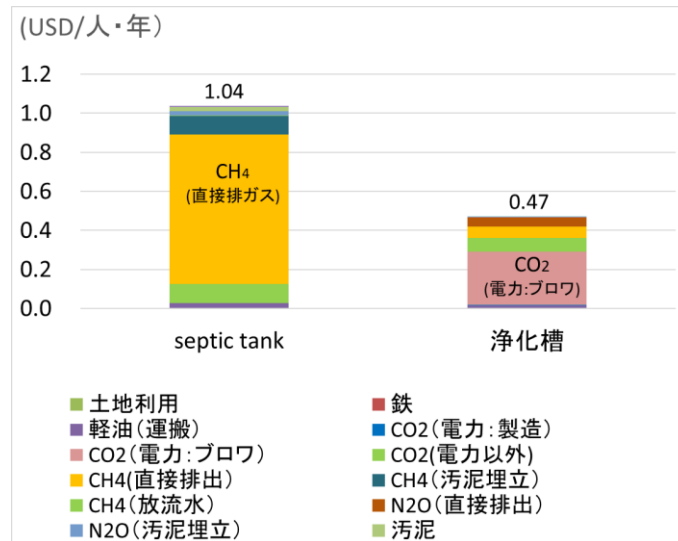


図 15 統合化結果 (物質別)

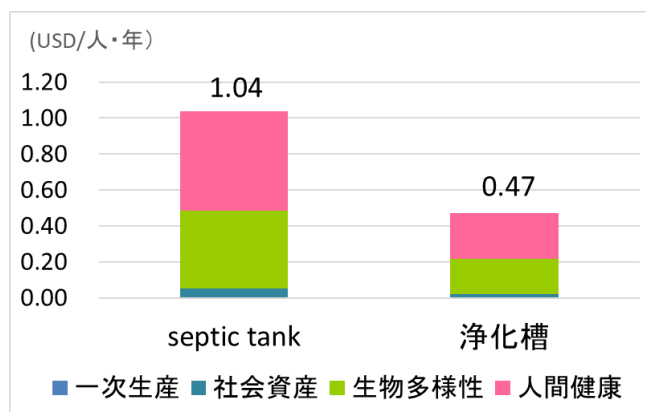
7
8
9
10

1 また表 12、図 16 に保護対象別の統合化結果を示す。保護対象別内訳をみると、どちらの対象
 2 設備においても人間健康と生物多様性の2つがほとんど全体を占め、人間健康が最も大きかった。
 3 一次生産と社会資産は、septic tank と浄化槽のどちらも、被害額全体の5%未満だった。
 4 人間健康、生物多様性における主要因は、septic tank では運転時に直接排出される CH₄（全体の
 5 約70%以上）、浄化槽ではブロー電力由来の CO₂ 排出（全体の約60%以上）だった。

7 表 12 統合化結果（保護対象別）

単位:USD/人・年

| 保護対象 | septic tank | 浄化槽 |
|-------|-------------|-----------|
| 一次生産 | 3.12E-03 | 6.12E-04 |
| 社会資産 | 4.88.E-02 | 1.92.E-02 |
| 生物多様性 | 4.31.E-01 | 1.97.E-01 |
| 人間健康 | 5.54.E-01 | 2.54.E-01 |
| 計 | 1.04E+00 | 4.70E-01 |



11 図 16 統合化結果（保護対象別）

4. SROIによるオンサイト型排水処理システムのライフサイクル影響評価

4.1 SROI の評価対象

インドネシア・メダン市近郊に位置する民間企業の工場 1 か所（拠点 A）及び非営利団体に運営委託されている政府施設 1 か所（拠点 B）の計 2 拠点において、実際に既存の septic tank に替えて日本式の浄化槽を導入し、さらに企業・非営利団体・政府が協同により排水処理に関する環境セミナーを実施した事例を基に、それにかかった費用と、それによって得られた環境・社会への便益を算定対象とした。つまり従来式の septic tank を利用し続けた場合（without case）と浄化槽導入及び環境セミナーが実施された場合（with case）を比較し、新たに生じた費用・便益から社会的投資収益率(SROI) を求めた。投入設備の概要を表 13 に示す。

表 13 投入設備の概要

| 対象拠点 | 処理能力 (m ³ /日) | 容量 (m ³) | 使用人数 (人) |
|------|-----------------------------|-------------------------|-------------|
| 拠点A | 1.00 | 3.18 | 15 |
| 拠点B | 2.00 | 4.27 | 30 |

4.2 SROI 分析による評価手法

4.2.1 SROI 分析の手順

本研究は、The SROI Network により発行された 2012 年改訂版 SROI 運用のガイドラインの SROI 評価手順に従って、1) 評価対象（スコープ）とステークホルダーの確定、2)インパクトマップの作製、3)アウトカムを証明するデータの収集と評価、4)インパクトの決定、5)SROI の計測、6)報告の手順で評価を行った。また評価において、同ガイドラインが示す 7 つの原則⁴⁵⁾である 1)ステークホルダーの関与(Involve stakeholders)、2) 変化に対しての理解(Understand what changes)、3) 貴重な物事を価値づける(Value the things

1 that matter)、4)重要な物事のみを評価の対象にする(Only include what is material)、5) 過剰
2 な主張をしない(Avoid over claiming)、6) 透明性の担保(Keep transparent)、7) 結果の検証
3 (Verify the result)に留意した。

5 4.2.2 SROI と費用便益分析(CBA: Cost-Benefit Analytics)の比較

6 CBA と、その発展型として開発された SROI は、ともに費用 (インプット) と便益 (ア
7 ウトカム) の両方を貨幣価値に換算して、費用便益費を算出するという点では共通して
8 いる。しかし両者の算定方法には違いがある。

9 CBA は公共プロジェクトの評価のために開発された手法であり、社会全体の便益・費
10 用を評価対象とすることが大原則である。

11 一方、SROI は事業・活動の実施主体が、当該事業・活動の投資効果を評価するため
12 に用いられてきた手法であり、費用 (インプット) には評価対象の事業・活動に投じら
13 れる費用のみが計上される。また SROI の特徴として、ステークホルダーが関与する参
14 加型評価であることがあげられる。SROI では、ステークホルダーとの対話を通して重
15 要なアウトカムを特定し、評価に含めるべき対象を決める。このプロセスにより、資金
16 投資する企業はステークホルダーと当該事業・活動の社会的価値を共有できる。つまり
17 SROI は自社の経営の改善についてステークホルダーと協議するツールにもなる。また
18 自ら実施することによりその改善のプロセスを内部化することができる。

19 ただし便益 (アウトカム) の評価範囲を上げすぎると、結果が過大評価となり得るた
20 め、注意が必要である。

22 4.2.3 評価対象 (スコープ) とステークホルダーの確定

23 本研究の評価対象は、2.1.1 節で述べた通り、対象2 拠点における浄化槽2 台の導入と、
24 それに伴い実施された住民説明会、環境セミナーである。費用 (インプット) は、これ
25 ら活動のために投じられた費用として、浄化槽の本体購入費、設置費用、運転・メンテ
26 ナンス費用や、住民説明会・環境セミナー実施にかかる費用を算定した。環境便益・社

1 会便益（アウトプット）は、これらの活動により得られた環境改善効果（回避された環
2 境影響）、住民説明会・環境セミナー実施をきっかけに新規浄化槽導入が増えたことに
3 よる経済効果、また参加住民の機会費用を算定した。

4 ステークホルダーは、浄化槽ユーザー（対象 2 拠点の設備管理者）、浄化槽の販売代
5 理店、浄化槽のメンテナンス業者、浄化槽の説明会及び環境セミナーに関わる現地政府
6 及び NGO と特定した。それぞれのステークホルダーと E-mail やオンライン会議を通じ
7 て直接コミュニケーションをとり、情報収集、意見聴取を行った。

8

9 **4.2.4 アウトカム及び貨幣価値換算の方法**

10 本研究の評価対象となる項目のインプット、アウトプット、アウトカムとアウトカム
11 指標（貨幣価値換算方法）について、表 14 のインパクトマップにまとめた。また表 15
12 に、環境便益、社会便益、費用それぞれの評価対象と、データ入手方法を示す。

13

1

表 14 インパクトマップ

| ステークホルダー | インプット | アウトプット | アウトカム | アウトカム指標 (貨幣価値換算方法) |
|----------|--------------------|----------------------------|---------------------------------------|-----------------------|
| ユーザー | 浄化槽導入(本体・施工費) | 浄化槽2台(処理能力45人)が導入される | 自社からの生活系排水が放流基準値を順守できる | 回避された環境負荷(LIME3評価) |
| | 浄化槽の維持管理(汚泥処理、電気代) | 適切な維持管理が実施される | | |
| | 地域住民への説明会開催 | 住民80人が説明会に参加する | 地域住民の浄化槽について学ぶ機会を得る | 機会費用(参考:メダ市最低賃金) |
| | 廃棄物処理 | 使用済み浄化槽が適切に廃棄される | 使用済み製品の廃棄にかかる環境負荷が軽減する | 回避された環境負荷(LIME3評価) |
| 販売代理店 | 従業員への技術教育実施 | 従業員5人が技術教育を受ける | 従業員の技術知識が高まり、浄化槽が売れる | 付加価値(利益)向上額 |
| メンテナンス業者 | — | — | 汚泥引き抜き量が増えたことにより、メンテナンス業者の付加価値(利益)が向上 | 付加価値(利益)向上額 |
| 政府・NGO等 | 環境セミナー開催 | 政府職員・企業・住民3,980人がセミナーに参加する | 政府職員・企業・住民が浄化槽について学ぶ機会を得る | 機会費用(参考:メダ市最低賃金) |

2

3

4

表 15 評価軸、主な評価内容とデータ収集方法

| 評価軸 | 主な内容 | データ収集方法 |
|-----------|---|---------------------------------|
| 環境面(便益) | ・回避された環境被害 | LIME 3 評価結果 |
| 社会面(便益) | ・販売、メンテナンス業者の利益向上 ・住民説明会(導入時のみ) ・環境セミナー(継続的に開催) | ステークホルダーとの協議 |
| 経済面(投入費用) | ・浄化槽導入、維持費用 ・住民説明会、環境セミナーの開催費用 | 浄化槽メーカー(1社)、対象設備管理者(2拠点)へのヒアリング |

5

6 (1) 環境便益分析

7 環境便益の分析では、第3章のLIME3による評価結果を引用し、下記式のとおり回避
8 された年間当たりの環境影響被害額を求めた。

9

- A: 回避された環境影響被害額 (USD)
B: Septic tankのライフサイクル環境影響被害額 (USD/人・年)
C: 浄化槽のライフサイクル環境影響被害額 (USD/人・年)
D: 評価対象設備の利用人数 (人)

$$A = (B-C) \times D$$

1

2 なお本来は評価対象設備の利用人数の変動を考慮すべきであるが、ここでは 45 人に
3 固定した。

4 また SROI の評価対象であるメダン市の 2 拠点に導入された浄化槽と、第 3 章の LIME
5 3 の評価対象である浄化槽は、処理対象人員の違いにより規模は異なるが、同一製品の
6 サイズ違いであり、浄化槽の基本構造や処理方式は同じである。また調査対象の工場に
7 おける勤務時間、利用状況はほぼ同じであり、一人当たりの容量 (総容量/使用人員)
8 はほぼ同等であるため、援用することに問題ないと考えられる。

9

10 (2) 社会便益分析

11 浄化槽販売業者、メンテナンス業者の利益向上については、with case で想定される浄
12 化槽関連の売上から、without case で想定される septic tank 関連の売り上げを差し引き、
13 両者の利益をそれぞれ 10% ずつとした。設備導入後 1~3 年目は、販売代理店へのヒア
14 リングをもとに、実際の浄化槽導入実績から算出した。4 年目以降は、SDGs の目標達成
15 年である 2030 年までに、メダン市のすべての労働者が職場において浄化槽にアクセス
16 できるようになることを前提とし、普及推移が概ね S 字カーブになるよう、最初の数年
17 はゆるやかに、以降普及が急速に進み、2030 年のピークに達する前で再度緩やかになる
18 よう設定した (図 17、付録 A-6)。なお実際には事業所等の利用人数によって浄化槽の
19 サイズは異なるが、本研究では一律に 30 人槽が導入されることとした。

20

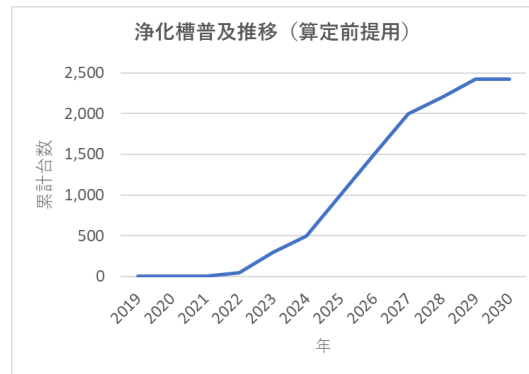


図 17 浄化槽普及推移前提 (SROI 算定用)

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21

住民説明会は、導入時に1拠点につき1回開催されるものである。メダン市の最低賃金をもとに、参加者の機会費用を算出した。参加者数は、ヒアリングにより実際の参加者数を反映させた。

環境セミナーは、評価対象である2台の浄化槽を教材として、企業・政府・NPOが共同で継続的に開催するものである。設備導入後1~3年目は、実際の参加人数、開催回数を反映させた。4年目以降は、導入された浄化槽2台が適切に維持管理され、また政府等による環境セミナーが定期的実施されることを想定した。環境セミナーの実施に関しては、今後も対面に代わってオンラインによる開催が引き続き実施されることを想定し、年間計4回の開催のうち2回を対面、2回をオンラインと想定した。

なお4.2.2節で述べたとおり、従来の費用便益分析は、分子・分母ともに社会的費用・便益を計上することが原則であるが、SROIは投資した企業にとっての投資収益率を評価するという目的で開発された手法であるため、分子は「社会的便益」であるが分母は必ずしも「社会的費用」ではない。例えば、「SAVE JAPANプロジェクト」では、プロジェクト目標を市民の環境保全活動への参加機会の提供としており⁴⁵⁾、SROI分析において「環境保全イベントへ市民の参加」を主要な成果としている。本研究において参加者がセミナーや説明会への参加に参加せずに当該時間を労働に費やせば得られたはずの賃金、つまり機会費用は、参加者自身がセミナー・説明会に参加することにそれだけの価値があると判断していることになるため便益額と捉えられる。そのため本研究では、

1 参加者の機会費用がすなわち企業にとっての投資効果であるとして便益に計上した。
2 また浄化槽が普及するにつれて、評価対象の浄化槽 2 台による影響が減少すると考え、
3 各年の予測される総浄化槽設置台数のうち 2 台が占める割合（寄与度）を処理人数から
4 算定し、費用・便益に乗じた。

5

6 (3) 費用分析

7 調査対象の 2 拠点の管理者、導入した浄化槽のメーカー及び関連する行政機関にヒア
8 リングを行い、可能な限り現状に即して導入費用、人件費、セミナー等の開催費等を算
9 定した。

10 浄化槽導入費用は、浄化槽メーカーへのヒアリングにより情報収集し、支払い期間を
11 15 年として均一に分割した。

12 維持管理費用のうち汚泥処理費は、汚泥の発生量から引き抜き回数を算定し、メダン
13 市下水道公社へのヒアリングをもとに、1m³あたり Rp.1,750,000 として処理費を算出し
14 た。なお septic tank では汚泥の引き抜きが行われないケースが多いが、機能単位をそろ
15 えて評価を行うために、septic tank、浄化槽ともにメンテナンスが正しく実施された場合
16 を想定した。ただし、septic tank は構造上の理由により、さらに汚泥が漏洩・地下浸透
17 している可能性があるが、これについては評価対象に含めていない。

18 住民説明会は、浄化槽の導入時に管理者によってそれぞれ 1 回開催された。開催にか
19 かる費用は、拠点 B で実際に開催された際にかかった費用を参考にした。なおこの住民
20 説明会は、環境省が定める環境影響評価（AMDAL）の実施プロセスにおいて、民間企
21 業は自社設備・事業に関する住民説明会の実施が義務付けられているために実施される
22 ものである。

23 製品の廃棄においては、メダン市清掃公園局へのヒアリングをもとに、廃棄物 1m³ あ
24 たり処理費を Rp.38,500 として処理費用を計算した。なお廃棄物の処理業者によって
25 は処理費が異なるが、本研究ではメダン市清掃公園局により回収され、最終処分場で埋
26 め立て処分された場合の金額を算定した。

1 環境セミナーの開催費は、拠点 B へのヒアリングをもとに、1年目に実際にかかった
2 費用を参考に算出した。

3

4 **4.3 SROI 評価結果**

5

6 **4.3.1 費用便益算定結果**

7 算定結果を、表 15 に示す。経年別の算定結果は、付録 A-7 に添付する。

8 なお評価対象期間（アウトカムの持続時間）は、投入設備である浄化槽の耐久年数で
9 ある 30 年とした。その間の費用と便益は、割引率を用いて現在価値に修正した。割引
10 率はインドネシアの現状を踏まえ、5.75%⁴⁶⁾ に設定した。なお 2020 年には新型コロナウ
11 イルス感染症（COVID-19）の感染拡大の影響を受け、活動が制限されたことにより費
12 用・便益ともに全体に減少しているが、実績をそのまま反映させた。

13

14

表 15 LIME3 の結果に基づいた費用便益算定結果

| ステークホルダー | 評価項目 | 導入後の年数 | | | | | | | | | | 計(USD) | | |
|----------|-------------------------|--------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|--------|-------|--------|
| | | 0 | 1 | 2 | 5 | 10 | 15 | 20 | 25 | 29 | | | | |
| ユーザー | 浄化槽本体費 | 218 | 218 | 218 | 218 | 218 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 3,276 |
| | 維持管理費用(汚泥、電気) | -114 | -114 | -114 | -114 | -114 | -114 | -114 | -114 | -114 | -114 | -114 | -114 | -3,420 |
| | 住民説明会 | 146 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 146 |
| | 廃棄費用 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | -30 |
| | 従業員への技術教育 | 96 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 96 |
| 政府等 | 環境セミナー開催費 | 7 | 44 | 13 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 64 |
| | 計 | 353 | 148 | 117 | 104 | 104 | -114 | -114 | -114 | -114 | -144 | -144 | 132 | |
| | 割引率(5.75%)による 現在価値換算 | 353 | 140 | 105 | 79 | 60 | -49 | -37 | -28 | -28 | -28 | -28 | 871 | |
| 販売業者 | 利益向上 | 59 | 59 | 59 | 59 | 59 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 886 | |
| | メンテナンス業者 利益向上(汚泥清掃) | -20 | -20 | -20 | -20 | -20 | -20 | -20 | -20 | -20 | -20 | -20 | -585 | |
| 政府・住民 | 住民説明会参加 | 153 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 153 | |
| | 政府・住民 環境セミナー受講 | 15 | 103 | 41 | 0.1 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 161 | |
| 政府・住民・企業 | 環境改善効果 | 26 | 26 | 26 | 26 | 26 | 26 | 26 | 26 | 26 | 26 | 26 | 770 | |
| | 計 | 233 | 168 | 106 | 65 | 65 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 1,384 | |
| | 割引率(5.75%)による 現在価値換算 | 233 | 159 | 95 | 49 | 37 | 3 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 1,012 | |

1 **(1) 環境面の便益**

2 septic tank の被害額（一人当たり 1.04USD/年）から浄化槽の被害額（一人当たり
3 0.47USD/年）を除すと、回避された環境影響負荷は一人当たり 0.57USD/年である。これ
4 に利用人数（45 人）を乗じると、調査対象の 2 拠点合計では、25.65USD/年となった。た
5 だし 3 章の LCA による評価結果には、二次処理設備による処理、未処理水の地下浸透
6 に関する評価が含まれていない。そのため、これらの評価を加えると浄化槽導入による
7 環境改善効果はより高くなるものと推測される。

8
9 **(2) 社会面の便益**

10 評価した項目のうち、浄化槽の販売に伴い向上した製造・販売業者の利益向上が最も
11 大きな便益となった。一方、メンテナンス業者の向上利益は、汚泥の引き抜き量が減少
12 するため、本調査ではマイナスの結果となった。製造・販売業者の利益向上に次いで、
13 環境改善効果が最も大きな影響となった。

14 環境セミナーは継続して毎年同じ回数を実施されることを前提にしたが、4.2.4(2)で説
15 明したとおり浄化槽が普及するにつれて、対象 2 台の寄与度は年々減少するため、5 年
16 目以降の影響は 1USD 以下となった。そのため影響が表れるのは導入後数年のみである
17 が、30 年間の合計においても全体の 16%を占めており、社会面における重要な要素の一
18 つとなっている。

19
20 **(3) 投入費用**

21 浄化槽本体の購入費が、投入費用のほとんどを占めた。浄化槽本体価格から septic tank
22 本体価格を差し引いているが、現地業者へのヒアリングによると septic tank は
23 1,925,000IDR (134USD) と安価であるため、浄化槽本体価格が大きな費用となっている。

24 一方、septic tank に比較して浄化槽の汚泥発生量は少ないため、汚泥引き抜き量が減
25 少したことにより、汚泥処理費がマイナスになった。

26 また製品の廃棄では、FRP 製の浄化槽は、コンクリート製の septic tank よりも軽量で

1 あり、廃棄費用が安価であるため、投入費用はマイナスとなった。

2

3 **4.3.2 SROI 値**

4 表 15 の算定結果に基づき SROI 値を求めた結果は 1.20 であり、投資効果があると評
5 価される 1.00 を上回った。ただし 4.3.1(1)節で言及したように、すべての環境被害額を
6 含んでいないと考えられる。

7 まず地下浸透している可能性のある汚水や、基準に満たない高濃度 BOD を含む排水
8 の環境中への放出については、今回の算定に含めることができなかったが、これらを評
9 価に含めることで、より正確な評価ができると考えられる。

10 その他に、便益として評価すべき可能性のある項目として、国土交通省の「下水道事
11 業における費用効果分析マニュアル（令和 3 年 4 月改定）⁴⁷⁾を参考にすると、水回りの
12 利便性向上による居住環境の改善、イメージアップによる地域活性化や観光振興の効果、
13 浄化槽設置場所（土地）を駐車場などに活用できる価値などが考えられる。

14 また今回の評価では 1.0 を超える結果となったが、septic tank、浄化槽ともにメンテナ
15 ンスが正しく実施された場合を想定している。つまり投資効果があるとされる 1.0 を超
16 えるためには正しくメンテナンスが行われる必要があり、そのためには排水処理設備管
17 理者への行政による取り締まりの強化や、メンテナンスの指導、環境保全に対する理解
18 促進などが不可欠である。

19

1 5. まとめと今後の課題

3 5.1 まとめ

5 本研究では、インドネシアの生活系排水処理を対象に、その環境面・経済面・社会
6 面の評価手法を提示することを目的に、septic tank と浄化槽を対象として、LCA による
7 環境効率比較、LIME3 による環境影響被害額を算出した上で、実際に septic tank に替え
8 て浄化槽を導入した2件の事例をもとに SROI を求めた。

9 まず、第2章の LCA による環境効率比較の結果、以下の点を明らかにすることがで
10 きた。

11 1) Septic tank (1基) と浄化槽 (1基) それぞれの運転時における排水の水質分析を行
12 った結果、BOD 除去量は septic tank で 20.4kg/人/年、浄化槽で 105.3kg/人/年であった。

13 また septic tank の BOD、COD、SS、アンモニア態窒素除去率は浄化槽と比べてかな
14 り低く、その含有量は同国の放流基準を満たしていなかった。一方、浄化槽は高い
15 処理能力を示したが、アンモニアのみ基準値を超過していた。

16 2) Septic tank (1基) と浄化槽 (1基) それぞれの運転時におけるガス排出量の実測を
17 行った結果、septic tank では一人当たり 44.83kg-CO₂eq/年、浄化槽では 5.89 kg-CO₂eq/
18 年であり、運転段階のみを比較すると septic tank の GHG 排出量は浄化槽の約 7.7 倍
19 であった。

20 3) septic tank のライフサイクルにおける GHG 排出量は、浄化槽と比較して 1.8 倍高い
21 結果となった。どちらも運転時に直接排出される GHG が要因であるが、septic tank
22 では 93% が CH₄ 排出に由来する一方、浄化槽では 61% が運転時のブロワの電力使用
23 による CO₂ 排出が原因だった。

24 4) 浄化槽の環境効率は、septic tank と比較して 10 倍高い結果となった。

25
26 次に、上記の第2章における Septic tank (1基)、浄化槽 (1基) を対象とした排水・

1 排ガスの実測結果およびインベントリデータをもとに、LIME3 を用いた評価を第 3
2 章における LIME3 を用いた環境影響評価の結果、以下の点が明らかになった。

3 5) Septic tank のライフサイクル環境影響は一人当たり年間 1.04USD、浄化槽は年間
4 0.57USD であった。本調査では、インドネシアの工場において生活系排水処理シス
5 テムとして浄化槽を導入すると、従来式の septic tank に比べてライフサイクル環境影
6 響を約 55%削減できるという結果が得られた。

7 6) 4つの保護対象すべてにおいて septic tank は浄化槽よりも環境影響が2倍以上大きい。
8 どちらにおいても人間健康と生物多様性の2つがほとんど全体を占めた。

9 7) septic tank では運転時に直接排出される CH₄ (全体の約 74%)、浄化槽ではブロワ電
10 力由来の CO₂ 排出 (全体の約 58%) が主な要因となった。

11

12 最後に、第 3 章にて LIME3 を用いて求めた環境影響をもとに、メダン市の 2 拠点にお
13 ける浄化槽導入事例を対象に SROI 評価を行った結果、以下の点が明らかになった。

14 8) 2 拠点において septic tank に替えて浄化槽を導入することによる環境改善効果は、約
15 26USD/年である。ただし LIME 3 の評価結果には、septic tank からの基準値を満たさ
16 ない排水が自然界に流出することによる環境影響、二次処理設備による処理、未処
17 理水の地下浸透に関する評価は含まれていないため、これらを含めると環境便益は
18 より大きくなると推測される。

19 9) SROI の値は 1.20 であり、投資効果があるとされる 1.00 を上回った。ただし上記 8)
20 のとおり評価に含まれていない環境影響がある。また今回の算定は、septic tank、浄
21 化槽のどちらにおいても適正な頻度で汚泥処理が行われることを前提としている。

22 10) 環境面の他に、社会面においても十分な評価対象項目が含まれていなかった可能性
23 がある。

24

25

26

5.2 今後の課題

5.1 節の結果を踏まえ、今後の課題として以下のような点を指摘することができる。

まず第2章のLCAによる環境効率比較における課題として、以下の点が挙げられる。

- 1) 原水の流入量、流入パターンにより、BOD 転換率が変動するため、今後、より正確な原水の流入量、流入パターン、汚泥発生量などの把握を行うことにより、BOD 転換率のより具体的な比較が可能になる。
- 2) Septic tank の環境影響の主な要因である CH₄ 発生量は、メンテナンス状況、流入水質、水量等により変動し得るが、現地では比較できる実測データが不足している。今回は過去の単発調査のデータを用いているが、一般性を高めるためにはより多くの実測データが求められる。
- 3) Septic tank から基準値を超えた排水が土壌や河川に放流されることによる環境被害については、把握が困難なことから調査対象外としたが、septic tank から未処理の排水が土壌や河川に放流されることにより、富栄養化等の被害を及ぼしていると考えられる。ライフサイクル全体におけるより正確な環境影響を評価するためには、これらの評価を含める必要がある。

次に、第3章のLIME3を用いた環境影響評価の結果、以下の課題が挙げられる。

- 4) 上記3)で指摘した septic tank から未処理の排水が放流されることによる被害について、第3章ではCODを評価対象に含めることで補填した。しかしより正確な被害量の算定のためには、BODを測定し、評価に含めることが望ましい。

最後に、SROI評価を行った結果から、以下の課題が挙げられる。

- 5) 回避された環境影響額によってSROI値が変動するため、上記3)、4)で指摘したとおり、今回の評価対象に含まれなかった未処理の排水が流出することによる影響を含めて評価を行う必要がある。

- 1 6) 便益として、居住環境の改善、地域活性化や観光振興など、評価すべき可能性のある
- 2 項目について、ステークホルダーを含めたさらなる検討が求められる。

3

6. 参考文献

- 1) Global Sustainable Investment Alliance (2021): GLOBAL SUSTAINABLE INVESTMENT REVIEW 2020 (<http://www.gsi-alliance.org/wp-content/uploads/2021/08/GSIR-20201.pdf>), 2022年2月6日17:15参照
- 2) The Ministry of Environment and Forestry, the Republic of Indonesia (2016): Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia No. 68/Menlhk/Setjen/Kum.1/8/2016 tentang Baku Mutu Air Limbah Domestik, 11
- 3) World Bank (2008): Economic Impacts of Sanitation in Southeast Asia, Research Report February 2008
- 4) Directorate of Environmental Sanitation Development (2015): Strategic Plan Book 2015-2019 (Buku Renstra 2015-2019) (<http://ciptakarya.pu.go.id/plp/upload/renstra/Buku%20Renstra%20PLP%202015-2019.pdf>), 2022年2月6日17:30参照
- 5) Secretariat of PROPER, Ministry of Environment and Forestry, the Republic of Indonesia Official Website: Penetapan Peringkat PROPER periode 2016-2017 (<https://proper.menlhk.go.id/proper/berita/detail/186>), 2022年02月05日21時40分参照
- 6) Secretariat of PROPER, Ministry of Environment and Forestry Official Website: Penetapan Peringkat PROPER periode 2020-2021 (<https://proper.menlhk.go.id/proper/berita/detail/348>), 2022年02月05日21時48分参照
- 7) National Council on Climate Change of the Republic of Indonesia (2010): Indonesia Voluntary Mitigation Actions, E-03/EC-NCCC/01/2010
- 8) National Council on Climate Change of the Republic of Indonesia (2010): Indonesia's Plan to Reduce GHG Emission, E-01/EC-NCCC/01/2010
- 9) 環境省水・大気環境局水環境課、公益財団法人地球環境戦略研究機構自然資源・生態系領域サービス (WEPA事務局) (2018) : アジア水環境パートナーシップ (WEPA) アジア水環境管理アウトLOOK 2018
- 10) 水浄化フォーラム (2017) : 浄化槽のあゆみ (http://water-solutions.jp/domestic_wastewater/jyokaso/jyokaso-history/), 2022年2月7日15:40参照
- 11) 公益財団法人日本環境整備教育センター(2013) : 浄化槽読本 ～変化する時代の生活排水処理の切り札～ (<http://www.jeces.or.jp/download/pdf/dokuhon.pdf>), 2022年2月7日15:30参照
- 12) 国土交通省 (2021) : 報道発表「令和2年度末の汚水処理人口普及状況について」 (<https://www.mlit.go.jp/report/press/content/001421074.pdf>), 2022年2月7日15:20参照
- 13) 環境省環境再生・資源循環局廃棄物適正処理推進課浄化槽推進室 (2021) : 浄化槽整備推進関係令和4年度予算(案)概要資料

- 1 (http://www.env.go.jp/recycle/jokaso/data/koufu/pdf/r04_yosan.pdf) , 2022年2月7日21:30
2 参照
- 3 14) 環境省水・大気環境局水環境課 (2013) : アジアにおける水環境ビジネスについて
4 (https://www.env.go.jp/water/asia_business/pdf/s_moe.pdf) 、2022年2月7日22:00参照
- 5 15) 独立行政法人日本国際協力機構 (JICA) (2016) : ベトナム国浄化槽維持・管理技術
6 の導入による生活排水処理水準の向上に向けた案件化調査業務完了報告書
7 (https://openjicareport.jica.go.jp/pdf/12268918.pdf) 、2022年2月8日18:30参照
- 8 16) 環境情報 (2021) : JSA調査、浄化槽海外設置基数は3万7255基 (2011年06月11日掲載)
9 (http://kankyojoho.co.jp/archives/572#:~:text=%EF%BC%88%E4%B8%80%E7%A4%BE
10 %EF%BC%89%E6%B5%84%E5%8C%96%E6%A7%BD%E3%82%B7%E3%82%B9%E3
11 %83%86%E3%83%A0%E5%8D%94%E4%BC%9A,6247%E5%9F%BA%E3%81%A8%E3
12 %81%AA%E3%81%A3%E3%81%9F%E3%80%82) 、2022年2月8日23:00参照
- 13 17) Ali Hussein Sabeen, Zainura Zainon Noor, Norzita Ngadi, Saqer Almuraisy, Ademola
14 Bolanle Raheem (2018): Quantification of environmental impacts of domestic wastewater
15 treatment using life cycle assessment: A review, Journal of Cleaner Production 190, 221-233
- 16 18) Mary E. Schoen, Xiaobo Xue, Alison Wood, Troy R. Hawkins, Jay Garland, Nicholas J.
17 Ashbolt (2017): Cost, energy, global warming, eutrophication and local human health impacts
18 of community water and sanitation service options, Water Research 109, 186-195
- 19 19) Rininta Triananda Noor, Prayatni Soewondo (2018): Selection of Domestic Wastewater
20 Treatment Technology Alternative Using Life Cycle Assessment (LCA) Approach (Case
21 Study: Settlement Area of Riverbank Karang Mumus of Samarinda City, East Kalimantan):
22 Indonesian Journal of Urban and Environmental Technology, Volume 1, No.2, 164-184
- 23 20) 西村和之, 渡辺孝雄, 木曾祥秋 (2004): 合併処理浄化槽の整備におけるライフサイク
24 ルアセスメント的評価の応用, 浄化槽研究, Vol.16, No.5, 33-41
- 25 21) 井村正博, 水野雄次 (2007): 浄化槽およびブロワの省資源・省エネ化, 月刊浄化槽, 12
26 月号
- 27 22) 山崎宏史, 鈴木理恵, 蛭江美孝, 稲森悠平, 西村修 (2008): ディスポーザ対応浄化槽の
28 LCCO₂評価, 日本水処理生物学会誌, 第44巻, 第3号, 129-138
- 29 23) 山崎宏史, 鈴木絵里, 蛭江美孝, 徐開欽, 稲森悠平, 西村修 (2010): ディスポーザ対応
30 浄化槽の高度処理化とLCCO₂評価, 日本水処理生物学会誌, 第46巻, 第2号, 99-107
- 31 24) Intergovernmental Panel on Climate Change (2014) : Climate Change 2013 The Physical
32 Science Basis, Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report (A5) of the
33 Intergovernmental Panel on Climate Change
- 34 25) 蛭江美孝, 山崎宏史, 小椋有未永, 徐開欽 (2012): 浄化槽におけるCH₄, N₂O排出量に及
35 ぼす原水流入変動と嫌気-好気循環の影響解析, 水環境学会誌, 35 (2), 27-32
- 36 26) Ebie Y., Yamazaki H., Inamura S., Jimbo Y., Kobayashi T., Ueda H. (2014): Development of
37 Emissions Factor for the Decentralized Domestic Wastewater Treatment for the National
38 Greenhouse Gas Inventory. Journal of Water and Environment Technology, 12 (1), 33-41

- 1 27) 山崎宏史, 豊貞佳奈子, 蛭江美孝, 西村修 (2017): 節水機器の導入が浄化槽からの温
2 室効果ガス排出量に及ぼす影響, 土木学会論文集 G (環境), Vol. 73, III_71-III_77
- 3 28) 増田周平, 西村修 (2010): 水処理工程における N₂O の発生特性. 用水と排水, Vol. 52,
4 No.3, 41-51
- 5 29) National Standardization Agency, the Republic of Indonesia (2017): Procedure for planning a
6 septic tank with advanced processing (infiltration wells, fields infiltration, up flow filter,
7 sanitary pool) Indonesia National Standard, SNI 2398:2017
- 8 30) Intergovernmental Panel on Climate Change (2006): 2006 IPCC Guidelines for National
9 Greenhouse Gas Inventories, IPCC, pp. 20
- 10 31) The Ministry of Environment and Forestry, the Republic of Indonesia (2016): Peraturan
11 Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia No.
12 68/Menlhk/Setjen/Kum.1/8/2016 tentang Baku Mutu Air Limbah Domestik, 11
- 13 Satmoko Yudo, Nusa Idaman Said (2017): Policy and Strategy of Domestic Wastewater
14 Management in Inodnesia, Jurnal Rekayasa Lingkungan, 10 (2), pp.58-75
- 15 32) Institute for Global Environmental Strategies (2017): IGES List of Grid Emission Factors,
16 Update version 9.2
- 17 33) 国立研究開発法人産業技術総合研究所安全科学研究部門社会とLCA研究グループ, 一
18 般社団法人産業環境管理協会(2017): Inventory Database for Environmental Analysis
19 (IDEA), v2.1.3
- 20 34) Farida Zed, Least-cost Solutions for a Clean Energy Future, International Energy Agency ホ
21 ームページ, 入手先
- 22 35) Yales V., Widodo W. P., Asep H. S. (2016): Tracing the Energy Footprints of Indonesian
23 Manufacturing Industry. Energy Science & Engineering, 4(6), 394-405
- 24 36) インドネシア共和国工業省公式ホームページ, 入手先
25 <[http://www.kemenperin.go.id/artikel/10778/Industri-Petrokimia-Indonesia-Tertekan-Petroki-
27 mia-Thailand](http://www.kemenperin.go.id/artikel/10778/Industri-Petrokimia-Indonesia-Tertekan-Petroki-
26 mia-Thailand)>, 参照(2018-11-05)
- 28 37) 済産業省資源エネルギー庁 (2017): 平成 27 年度エネルギー消費統計結果概要
- 29 38) 伊坪徳宏・稲葉敦(2018): LIME3グローバルスケールのLCAを実現する環境影響評価手
30 法, 丸善出版
- 31 39) LCA 日本フォーラム LIME3 活用検討研究会 (2019) : LIME3 活用検討研究会成果報
32 告書 (https://lca-forum.org/research/pdf/LIME3_results_report.pdf), 2022 年 2 月 8 日 22:00
33 参照
- 34 40) LCA 日本フォーラム (2021) : LIME3 活用検討研究会成果報告パート 2, LCA 日本
35 フォーラムニュース No.81 (https://lca-forum.org/topics/pdf/JLCA_NL_81.pdf), 2022 年 2
36 月 8 日 22:00 参照
- 37 41) 松本亨(2021): 環境ビジネス 2021.SP, 日経 BP, pp.86-89
- 38 42) 塚本一郎・関正雄(2020): インパクト評価と社会イノベーション—SDGs 時代におけ
39 る社会的事業の成果をどう可視化するか—, 第一法規
- 43) The SROI Network (2012): A Guide to Social Return on Investment

- 1 (<https://socialvalueuk.org/wp-content/uploads/2016/03/The%20Guide%20to%20Social%20>
2 Return%20on%20Investment%202015.pdf)、2022年2月8日23:00参照
- 3 44) Social Value Japan (2018): 7つの原則
4 (<http://socialvaluejp.org/impactassessment/aboutsroi/>)、2022年2月8日23:00参照
- 5 45) 加賀裕也 (2021) : SROIとインパクト評価が社会を変える, *みらいパブリッシング*2021
6 年7月21日
- 7 46) Interest Rates, Discount Rate for Indonesia, 2013年10月04日, Federal Reserve Bank of St.
8 Louis (<https://fred.stlouisfed.org/series/INTDSRIDM193N>), 2021年10月08日15時38分参照
- 9 47) 国土交通省 (2021) : 下水道事業における費用効果分析マニュアル (令和3年4月改定)
10 (https://www.mlit.go.jp/mizukokudo/sewerage/mizukokudo_sewerage_tk_000485.html) ,
11 2022年2月9日22:00参照
- 12

1 7. 謝辞

2
3 本研究の実施にあたり、多数の方々から多大なご協力を賜りました。

4
5 指導教官である北九州市立大学国際環境工学部の松本亨教授には、長年にわたり多くの有益なご助言と辛抱強いご指導を賜りました。心から感謝申し上げます。

7
8 また副査を引き受けてくださいました北九州市立大学国際環境工学部の野上敦嗣教授、加藤尊秋教授、並びに城戸將江准教授には、多くの有益なご指摘とご助言を賜りました。厚く御礼申し上げます。

11
12 国立環境研究所の蛭江美孝氏には GHG 排出量の実測調査において多大なご指導を賜り、深謝いたします。

14
15 東京都立大学の伊坪徳宏教授には LIME 3 を用いた評価手法のご指導を賜り、厚く御礼申し上げます。

17
18 北スマトラ大学工学部の Irvan 教授はじめ、Maya SARAH 教授、Novrida Harpah HASIBUAN 先生、また同学部学生の Ms. Rifa Salsabila、Ms. Mutiara Firany、Mr. Muhammad Alkausar、Mr. Muhamad Jodi Alfayed、Ms. Hani Suhastifa Rambe にはインドネシア現地の情報収集において多大なご協力を賜りました。感謝申し上げます。

22
23 PT Daiki Axis Indonesia の皆様には浄化槽に関するデータを提供いただき、また分析において貴重なご意見を賜りました。心から感謝申し上げます。

25
26 Ms. Diah Tri Handayani と Ms. Fauzia Rahmiyati Yazid には現場でのサンプリングにおいて多大なご協力を頂き、感謝申し上げます。

28
29 北九州市立大学松本研究室の皆様には、常に温かい激励と支援を賜りました。心から御礼申し上げます。

31
32 江藤敏郎社長はじめ、株式会社新菱の上司や同僚には、本研究を支援くださったことに感謝申し上げます。

34
35 最後に、常に温かく支援くださった両親に感謝いたします。

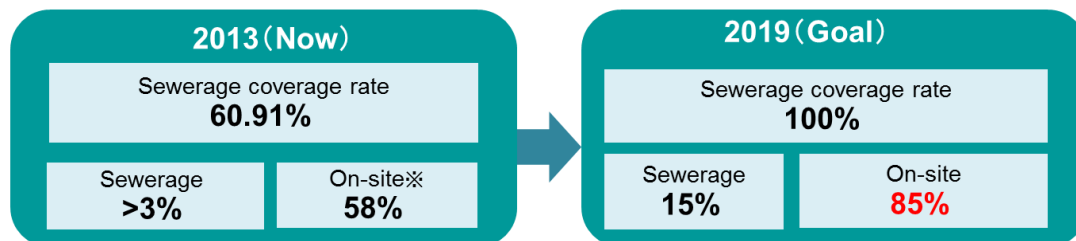
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24

8. 付 録

1 付録 A-1 インドネシアの 5 か年計画における排水処理設備の現状と目標

2

Current situation and government goal of sewerage coverage rate in Indonesia



3

4 Strategic Plan Book 2015-2019⁴⁾ を参考に、著者作成

5

6

7

1 付録 A-2 アジア諸国における腐敗槽普及率

2

| 国 | 年 | 地域 | 普及率 (%) |
|--------|------|------|---------|
| カンボジア | 2008 | 全国平均 | 43 |
| ベトナム | 2008 | 全国平均 | 41 |
| マレーシア | 2010 | 全国平均 | 21 |
| インドネシア | 2011 | 全国平均 | 60 |
| フィリピン | 2010 | マニラ | 71 |

3

WEPA 報告書⁹⁾から引用

4

1 付録 A-3 浄化槽の設計処理能力

2

| 項目 | 単位 | 流入水 | 処理水 | 基準 ²⁾ |
|-------|----------|-----|------|------------------|
| pH | - | 6-9 | 6-9 | 6-9 |
| BOD | mg/L | 300 | 20 | 30 |
| COD | mg/L | 400 | 80 | 100 |
| TSS | mg/L | 240 | 20 | 30 |
| アンモニア | mg/L | 50 | 10 | 10 |
| 窒素 | mg/L | 40 | 5 | 5 |
| 大腸菌 | 総数/100ml | n/a | 3000 | 3000 |

3 PT DAIKI Axis Indonesia 社製品パンフレットから引用

4

5

1 付録 A-4 LIME3 算定対象項目 (septic tank)

| ステージ | 項目 | 一次生産 kg./kg | 統合化 (USD) | 社会資産 US\$/kg | 統合化 (USD) | 生物多様性 EINES/年 | 統合化 (USD) | 人間健康 DALY/年 | 統合化 (USD) | |
|--------|---------------|----------------|--------------|-----------------|--------------|------------------|--------------|----------------|--------------|---|
| Input | 素材調達 | セメント | - | - | - | - | - | - | - | |
| | | レンガ | - | - | - | - | - | - | - | |
| | | 鉄筋 | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | - | - |
| | 素材運搬 | 軽油 | - | - | ○ | ○ | - | - | - | - |
| | 施工 | 軽油 | - | - | ○ | ○ | - | - | - | - |
| | 運転・メンテナ ンス | 軽油 | - | - | ○ | ○ | - | - | - | - |
| | | 土地利用 | ○ | ○ | - | - | - | - | - | - |
| | 廃棄 | 軽油 | - | - | ○ | ○ | - | - | - | - |
| Output | 大気への放出 | CO2(電力以外) | - | - | - | - | ○ | ○ | ○ | ○ |
| | | CH4(運転時排ガス) | - | - | - | - | ○ | ○ | ○ | ○ |
| | | CH4(運転時放流水) | - | - | - | - | ○ | ○ | ○ | ○ |
| | | CH4(汚泥埋立) | - | - | - | - | ○ | ○ | ○ | ○ |
| | | N2O(運転時排ガス) | - | - | - | - | ○ | ○ | ○ | ○ |
| | | N2O(汚泥埋立) | - | - | - | - | ○ | ○ | ○ | ○ |
| 水域への放出 | COD(放流水) | - | - | ○ | ○ | - | - | - | - | |
| 廃棄物 | 汚泥(埋め立て処分) | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | - | - | |
| | がれき類 | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | - | - | |

2

4 付録 A-5 LIME3 算定対象項目 (浄化槽)

| ステージ | 項目 | 一次生産 kg./kg | 統合化 (USD) | 社会資産 US\$/kg | 統合化 (USD) | 生物多様性 EINES/年 | 統合化 (USD) | 人間健康 DALY/年 | 統合化 (USD) | |
|--------|---------------|----------------|--------------|-----------------|--------------|------------------|--------------|----------------|--------------|---|
| Input | 素材調達 | 不飽和ポリエステル樹脂 | - | - | - | - | - | - | - | |
| | | ガラスローピング | - | - | - | - | - | - | - | |
| | | ガラスマット | - | - | - | - | - | - | - | |
| | | ポリ塩化ビニルPVC | - | - | - | - | - | - | - | |
| | | セメント | - | - | - | - | - | - | - | |
| | | 鉄筋 | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | - | - |
| | | 素材運搬 | 軽油 | - | - | ○ | ○ | - | - | - |
| Input | 製造 | 電力 | - | - | - | - | - | - | - | |
| | 製品運搬 | 軽油 | - | - | ○ | ○ | - | - | - | |
| Input | 施工 | 軽油 | - | - | ○ | ○ | - | - | - | |
| Input | 運転・メンテナ ンス | 電力 | - | - | - | - | - | - | - | |
| | | 塩素(次亜塩素酸カリウム) | - | - | - | - | - | - | - | |
| | | 軽油 | - | - | - | - | - | - | - | |
| | | 土地利用 | ○ | ○ | - | - | - | - | - | |
| Input | 廃棄 | 軽油 | - | - | ○ | ○ | - | - | | |
| Output | 大気への放出 | CO2(電力:製造) | - | - | - | - | ○ | ○ | ○ | ○ |
| | | CO2(電力:プロワ) | - | - | - | - | ○ | ○ | ○ | ○ |
| | | CO2(電力以外) | - | - | - | - | ○ | ○ | ○ | ○ |
| | | CH4(運転時排ガス) | - | - | - | - | ○ | ○ | ○ | ○ |
| | | CH4(運転時放流水) | - | - | - | - | ○ | ○ | ○ | ○ |
| | | CH4(汚泥埋立) | - | - | - | - | ○ | ○ | ○ | ○ |
| | | N2O(運転時排ガス) | - | - | - | - | ○ | ○ | ○ | ○ |
| | | N2O(汚泥埋立) | - | - | - | - | ○ | ○ | ○ | ○ |
| Output | 水域への放出 | COD | - | - | ○ | ○ | - | - | | |
| Output | 廃棄物 | 汚泥 | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | - | - |
| | | がれき類 | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | - | - |
| | | 廃プラスチック類 | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | - | - |

5

6

7

1 付録 A-6 浄化槽の普及推移前提

| 年 | 累積台数 | 追加台数 | 初期導入2台*の環境セミナーへの影響度(%) | 普及人口 (労働者数) |
|------------|-------|------|------------------------|----------------|
| 1年目(2018) | 0.2 | 0.2 | 0.6000 | 75 |
| 2年目(2019) | 1 | 1 | 0.1200 | 375 |
| 3年目(2020) | 1 | 0 | 0.0857 | 525 |
| 4年目 | 50 | 49 | 0.0020 | 7500 |
| 5年目 | 300 | 250 | 0.0003 | 45000 |
| 6年目 | 500 | 200 | 0.0002 | 75000 |
| 7年目 | 1,000 | 500 | 0.0001 | 150000 |
| 8年目(2025) | 1,500 | 500 | 0.0001 | 225000 |
| 9年目 | 2,000 | 500 | 0.0001 | 300000 |
| 10年目 | 2,200 | 200 | 0.00005 | 330000 |
| 11年目 | 2,420 | 220 | 0.00004 | |
| 12年目(2030) | 2,420 | -0 | 0.00000 | 1,088,947 |

2

3 ※2020年までは実績、2021年以降は想定

4