

実態調査に基づく産業廃棄物処理施設の高度化および
地域課題解決に向けた有効活用に関する研究

令和5年3月

和歌山大学大学院システム工学研究科

山田 崇雄

Research on upgrading industrial waste treatment facilities
and their effective utilization to solve regional problems
based on actual conditions

March 2023

Graduate School of Systems Engineering

Wakayama University

Takao Yamada

概 要

本研究では、産業廃棄物処理施設の活用について実態調査を実施するとともに、その結果をふまえて、さらなる高度化や有効活用の方策を提案し、それらの効果について検証した。

第 1 章では、循環型社会の形成に向けた地域課題解決のための産業廃棄物処理業の役割の重要性を論じた。また、各章の構成を記した。

第 2 章では、産業廃棄物焼却施設における、維持管理の実態および ICT・AI の導入意向を調査した結果を示した。点検業務のデジタル化が進んでいない実態、ICT・AI の効果について、突発故障の減少への期待が高いことが明らかになった。

第 3 章では、産業廃棄物焼却施設を対象として、送風機およびバグフィルタのろ布に関する予防保全の実証を行った。取得したデータをもとに非線形回帰分析手法の 1 つである GPR を用いて正常値を推定し、異常度判定の精度を担保するために、一定のサンプリング周期が必要となることを示した。さらに、維持管理費用削減効果を推計した。

第 4 章では、産業廃棄物焼却施設における、一般廃棄物・災害廃棄物の処理実績およびエネルギー回収の実態を調査した結果を示した。カイ 2 乗検定の結果、一般廃棄物処理実績に関して、150[t/d]以上の施設と 150[t/d]未満の施設とで有意水準 5%で有意な差が認められた。災害廃棄物処理実績およびエネルギー回収に関しては、ロータリーキルン&ストーカ炉とそれ以外の炉形式とで有意水準 5%で有意な差が認められた。

第 5 章では、産業廃棄物処理事業者へ一般廃棄物処理を委託する場合と、一般廃棄物焼却施設を継続利用する場合との事業性を比較し、影響を与える要因を整理した。25[t/d]の一般廃棄物焼却施設では、産業廃棄物処理事業者への委託のほうが費用がかからず、また、産業廃棄物処理事業者の処理単価の影響が最も大きいことが明らかになった。

第 6 章では、産業廃棄物焼却施設にかわるエネルギー回収の方法として、埋立完了後の浸出水処理施設を湿式メタン発酵施設の水処理設備へ利用する場合の事業性を評価し、事例をモデル化した結果、水処理施設を建設する場合と比較し、建設費を 31.2%削減できることが明らかになった。また、全国での利用可能性を検証し、最大で 1,564[MWh/d]の発電、708[t-CO₂/d]の温室効果ガスの削減が可能であることが明らかになった。

第 7 章では、結論として、本研究のまとめと今後の課題を整理した。

Abstract

In this study, we conducted a fact-finding survey on the utilization of industrial waste treatment facilities, and based on the results, we proposed measures for further upgrading and effective utilization, and verified their effectiveness.

Chapter 1: The importance of the role of the industrial waste treatment industry in solving local problems to create a recycling-oriented society is discussed. The structure of each chapter is also described.

Chapter 2: The results of a survey on the actual status of maintenance management and the intention to introduce ICT and AI in industrial waste incineration facilities are presented. It was found that the digitalization of inspection work has not progressed, and that there are high expectations for the effects of ICT and AI in reducing the number of sudden failures.

Chapter 3: Preventive maintenance of blower and fabric filter filter filtration was demonstrated for an industrial waste incineration facility. The normal values were estimated using GPR, a nonlinear regression analysis method, based on the acquired data, and it was shown that a certain sampling period is necessary to ensure the accuracy of the determination of abnormality. In addition, we estimated the effect of reducing maintenance costs.

Chapter 4: Results of a survey on the actual status of general and disaster waste treatment and energy recovery at industrial waste incineration facilities are presented. The results of the chi-square test showed that there was a significant difference at a 5% level of significance between facilities with a general waste treatment rate of 150[t/d] or more and those with a rate of less than 150[t/d]. The results of the Kai-square test showed that there was a significant difference at the 5% level between rotary kiln & stoker furnaces and other types of furnaces in terms of disaster waste treatment performance and energy recovery.

Chapter 5: The business feasibility of outsourcing general waste treatment to an industrial waste treatment company versus continuing to use a general waste incineration facility was compared, and the factors affecting the business feasibility were summarized. The effect of the unit cost of industrial waste treatment was found to be the most significant.

Chapter 6: As an alternative energy recovery method to industrial waste incineration facilities, we evaluated the feasibility of using leachate treatment facilities after the completion of landfill disposal as water treatment facilities for wet methane fermentation facilities, and modeled a case study, which revealed that the construction cost could be reduced by 31.2% compared to constructing water treatment facilities. In addition, the feasibility of using the system nationwide was verified, and it was found that the system can generate up to 1,564 [MWh/d] of electricity and reduce greenhouse gas emissions by 708 [t-CO₂/d].

Chapter 7: In conclusion, a summary of this study and future issues are summarized.

目次

第1章 序論	1
1.1 研究の背景	1
1.2 一般廃棄物・災害廃棄物処理の責務の解説と法改正の状況	4
1.3 統計データの公開状況	4
1.4 既往関連研究	5
1.5 研究の目的	6
1.6 論文の構成	6
第2章 産業廃棄物焼却施設における維持管理の効率化・高度化に関する実態調査	10
2.1 はじめに	10
2.2 既往関連研究	11
2.3 調査方法など	12
2.4 調査結果	14
2.4.1 維持管理	14
2.4.2 ICT・AI導入意向	22
2.5 まとめ	24
第3章 産業廃棄物焼却施設におけるICTを用いた予防保全の高度化	27
3.1 はじめに	27
3.2 ICTを用いた予防保全モニタリングに関する実証試験	28
3.2.1 実証試験の対象設備・機器	28
3.2.2 モニタリングシステムの構成と特徴	29
3.2.3 モニタリング結果	33
3.3 予防保全効果の推計	37
3.3.1 予防保全効果の推計方針	37
3.3.2 送風機の予防保全効果	38
3.3.3 BFろ布の予防保全効果	39
第4章 産業廃棄物焼却施設における地域課題解決のための有効活用に関する実態調査	44
4.1 はじめに	44
4.2 既往関連研究	45
4.3 アンケート調査の概要とその結果	46
4.3.1 アンケート調査方法の概要	46

4.3.2	アンケート調査結果の概要.....	48
4.4	アンケート結果の詳細.....	49
4.4.1	焼却施設の概要に関するアンケート調査の結果.....	49
4.4.2	一般廃棄物・災害廃棄物処理に関するアンケート調査の結果.....	56
4.4.3	計画条件に関するアンケート調査結果.....	70
4.4.4	エネルギー回収に関するアンケート調査結果.....	71
4.5	まとめ.....	80
第5章	一般廃棄物処理支援のための産業廃棄物焼却施設の有効活用	83
5.1	はじめに.....	83
5.2	研究方法.....	84
5.2.1	可燃ごみ量の推計.....	84
5.2.2	既存一般廃棄物焼却施設における継続稼働に伴う費用の推計手法.....	84
5.2.3	可燃ごみ処理委託費用の推計手法.....	86
5.3	分析結果.....	88
5.3.1	既存一般廃棄物焼却施設の継続利用と可燃ごみ処理委託の比較.....	88
5.3.2	感度分析の結果.....	94
5.4	まとめ.....	100
第6章	カーボンニュートラルに向けた産業廃棄物焼却施設に代わる廃棄物バイオマスの利用	103
6.1	はじめに.....	103
6.2	研究手順.....	105
6.3	湿式メタン発酵施設のモデルケース分析.....	107
6.3.1	湿式メタン発酵施設の物質収支.....	107
6.3.2	費用算定.....	108
6.4	全国での適用可能性の検証.....	112
6.4.1	浸出水処理施設能力の推計.....	112
6.4.2	湿式メタン発酵施設の適用可能性.....	115
6.5	まとめ.....	122
第7章	総括	125
7.1	本研究のまとめ.....	125
7.2	今後の課題.....	126

第1章 序論

1.1 研究の背景

大量生産・大量消費・大量廃棄型の経済社会から脱却し、資源の消費が抑制され、環境への負荷が少ない循環型社会を形成するため、2000年6月循環型社会推進基本法[1]が公布された。循環型社会推進基本法では、形成されるべき循環型社会の姿を廃棄物等の発生抑制、循環資源の循環的な利用および適正な処分が確保されることによって、天然資源の消費を抑制し、環境への負荷ができる限り低減される社会と提示している。

循環型社会の形成に関する施策の総合的かつ計画的な推進を図るため、循環型社会推進基本法に基づいて2003年3月に第1次循環型社会形成推進基本計画[2]が閣議決定された。第1次から第4次に至る各循環型社会形成推進基本計画では、以下に述べるように、産業廃棄物処理業に関連する言及がなされている。

まず、第1次循環型社会形成推進基本計画では、循環型社会形成のための指標と数値目標が定められている。また、産業廃棄物処理事業者の役割について、循環型社会の形成を果たすには極めて重要であるとし、廃棄物等の適正な循環的利用および処分の実施、各主体間の調整を期待されている。

第1次循環型社会形成推進基本計画は3回にわたる進捗状況の点検が実施され、点検結果に基づき第2次循環型社会形成推進基本計画[3]が2008年3月に閣議決定された。第2次循環型社会形成推進基本計画では、低炭素社会、自然共生社会、循環型社会の統合的な取組の展開、地域の特性を活かし、かつ、循環資源の性質に応じた最適な規模の地域循環圏形成の推進などの実施が挙げられている。ここにおいて、地域循環圏形成を支える重要な静脈インフラの一つとしての産業廃棄物処理業の役割が示唆される。

2013年5月に閣議決定された第3次循環型社会形成推進基本計画[4]は、東日本大震災、東京電力福島第一原子力発電所の事故で発生した大量の災害廃棄物処理などの課題を踏まえ、質にも着目した循環型社会の形成を基本的方向とし、リデュース・リユースの取組がより進む社会経済システムの構築、有用金属の回収、新たな震災廃棄物対策指針の策定、循環資源・バイオマス資源のエネルギー源への活用などが政策の柱とされている。第3次循環型社会形成推進基本計画において強調された災害廃棄物処理に対しても、産業廃棄物処理業は重要な役割を果たしている。

2015年9月の国連サミットにおいて、持続可能な開発のための2030アジェンダが採択された。日本においては、人口減少・少子高齢化が進展し地域の衰退が懸念されている。経済的には、第四次産業革命のイノベーションをあらゆる産業や社会生活に取り入れることが求められている。これらの国内外の経済や社会の状況は循環型社会の形成に密接に関わっていると、環境的側面、経済的側面、社会的側面を統合的に向上させることを掲げ、2018年6月に第4次循環型社会形成推進基本計画[5]が閣議決定された。第4次循環型社会形成

推進基本計画では、7つの方向性ごとに国が実施すべき取組、指標が設定されている。今後の課題の一つとして、人口減少・少子高齢化が進行していく中で、廃棄物処理や資源循環の担い手の不足を懸念しており、一般廃棄物処理においては、市町村が統括責任を有していることを前提としつつ、適正な資源循環および処理を進めるためには、行政内他部門、他の地方公共団体、民間事業者との連携を図ること、さらに、災害廃棄物処理を適正に迅速に処理するためには、市町村や廃棄物処理事業者、団体等との連携体制の構築が必要であるとしている。そして、人口減少・少子高齢化の状況において循環型社会を構築していくためには、地域間で補完し合う地域循環共生圏を形成し、資源の循環、生物多様性の確保、低炭素化、地域の活性化等を目指す必要があるとしている。

特に、処理規模が100[t/d]未満の中小規模の一般廃棄物処理施設では、発電などの余熱利用が十分に行われていない状況であり、資源・エネルギーの利用の向上が不可欠である。環境省は、令和2年度中小廃棄物処理を通じた資源循環・エネルギー回収促進方策モデル調査検討委託業務報告書[6]の中で、中小規模の一般廃棄物処理施設を通して地域特性に応じて資源循環・エネルギー回収方策等を促進するためのモデルの作成および今後の普及促進のための調査・検討を行っている。同報告書では、さらに、資源循環分野における地域循環共生圏の形成に向けて、現状の一般廃棄物処理から地域循環共生圏に移行する上で課題を4つに整理し、課題の一つである官民連携の対応方針として、官民連携推進の必要性を挙げている。

2015年11月に開催された国連気候変動枠組み条約の第21回締約国会議の中で、パリ協定[7]が採択され、2020年10月の首相所信表明演説において、「2050年カーボンニュートラル、脱炭素社会の実現を目指す」ことが宣言された。2050年カーボンニュートラルの実現に向けて、国・地方脱炭素実現会議が2021年に定めた地域脱炭素ロードマップ[8]では、資源循環の高度化を通じた循環経済への移行として、廃棄物処理や下水道処理で得られる電気、熱、CO₂、バイオガス等の地域での活用の拡大を目指すとしている。また、環境省によって2021年に廃棄物資源循環分野における2050年温室効果ガス排出実質ゼロに向けた中長期シナリオ(案)[9]が提示された。その中では7つのシナリオが想定されており、重点対策領域Ⅲでは、一般廃棄物処理施設の各シナリオにおける想定条件とともに産業廃棄物処理施設における想定条件が記されている。

循環型社会の形成にむけた産業廃棄物処理事業者の取組について、環境省が2017年に取りまとめた産業廃棄物処理業の振興方策に関する提言[10]の中で、産業廃棄物処理施設は、廃棄物の適正処理による生活環境の保全および公衆衛生の向上を図る上で必要な施設であり、循環型社会の形成を目指すうえで欠かすことができないインフラであること、また産業廃棄物の収集運搬・処分に関わる事業自体が広い意味でのインフラであり、その社会的位置づけは年々重くなってきているとしている。先に述べた第1次～第4次の循環型社会形成推進基本計画における産業廃棄物処理業の位置づけも、ここで示されるインフラとしての産業廃棄物処理業の位置づけと軌を同じくするものと考えられる。また、地域社会と連携し

つつ、地域の雇用創出、地域経済の発展、地域循環圏の構築等に貢献することが、依然迷惑施設として認識されている現状から社会的地位を向上させるため、さらには循環型社会の構築を進める上で重要であるとしている。

公益財団法人全国産業資源循環連合会では、循環型社会の実現と低炭素社会への寄与のため、産業廃棄物処理業が担う役割は重要となっており、廃棄物処理の単なる受け手から、産業廃棄物から資源やエネルギーを製造する創り手へ変貌する必要があるとしている[11]。また、災害時の廃棄物の処理の担い手、途上国における廃棄物処理の人的・技術的な支援などより公的な役割を期待されるとしている。そこで、産業廃棄物処理業の業法を含めた振興策の検討に関するタスクフォースを設置し、産業資源の循環的な利用を促進するための産業廃棄物処理産業の振興に関する法律案[11]を取りまとめている。法案では、産業資源の循環的な利用および処分、地球温暖化対策等の環境負荷低減、安全および健康の確保、情報の公開、人材の育成、海外技術協力、技術開発の推進、地域社会の健全な発展への貢献、災害廃棄物処理への協力の 9 つの産業廃棄物処理業者が取り組むべき責務、産業廃棄物処理業界による国および地方公共団体の施策への協力、行政からの支援等について定められている。しかしながら、産業廃棄物処理業の実態を明らかにした調査報告や既往研究は多いとは言えない。

循環型社会形成に向け、産業廃棄物処理業は必要不可欠な事業であり、安定的に事業を継続する必要がある。しかし、人材確保、技術の維持・継承、安全確保・労働災害防止などの課題があり、その解決策として AI・IoT 等の活用による処理の高度化が期待されている。環境省は産業廃棄物処理の高度化に係る調査検討業務報告書（2021）[12]で、産業廃棄物の発生から処分までの各プロセスにおける AI・IoT 等の先進的な情報通信技術の導入状況や普及拡大方策等について整理・検討している。廃棄物処理における AI・IoT 技術活用事例を確認すると、収集運搬の最適化、選別・リサイクルの高度化に関しては産業廃棄物処理業界での技術開発、製品化が進んでいる。焼却施設の運用最適化に関しては、一般廃棄物焼却施設では、焼却対象の廃棄物の組成が比較的安定していることから、AI・IoT の導入や自動運転技術の開発がプラントメーカー各社で進んでいる。しかし、産業廃棄物焼却施設では、産業廃棄物のばらつきが大きく、AI の活用に堪えるデータ数が課題となることから、現時点での技術活用・導入事例は報告されていない。

以上に述べたとおり、人口減少・少子高齢化、増加する災害により発生する廃棄物の処理、地球温暖化対策、地域循環共生圏構築など社会変化に応じた地域社会からのさまざまな要請に対応するインフラとしての産業廃棄物処理施設の役割が重要視されており、そのための具体的な有効活用の方策の検討が求められている。また、このような役割や機能を果たすべく、AI・IoT などの技術導入による産業廃棄物処理施設の維持管理のさらなる効率化、高度化が求められている。

1.2 一般廃棄物・災害廃棄物処理の責務の解説と法改正の状況

廃棄物処理法では、事業活動に伴って生じた 20 種類の廃棄物を産業廃棄物として定めており、産業廃棄物以外の廃棄物は一般廃棄物に区分される。産業廃棄物と一般廃棄物とは、処理の責任主体が異なっている。産業廃棄物は、事業活動を行った事業者自らに処理責任（排出事業者責任）がある。一般廃棄物は、市町村に統括的処理責任があり、市町村自ら処理を行うか、他者に委託し処理しなければならない[13]。災害廃棄物も一般廃棄物に区分され、その処理責任は市町村にある。しかし、東日本大震災、西日本豪雨等、幾多の非常災害において、同時かつ多量に発生する災害廃棄物の処理が市町村の事前に整備した処理体制では間に合わなかったため、災害廃棄物を円滑、迅速に処理するために廃棄物処理法の改正が行われた。2015 年の改定で、一般廃棄物を産業廃棄物処理施設で処理するにあたり、事前に都道府県知事へ届け出ることが必要とされていたものが、非常災害により生じた廃棄物を処理するときは事後の届出で足りるとされた。さらに 2020 年の改定で、産業廃棄物処理施設で処理する産業廃棄物と同様の性状を有する災害廃棄物を処理することができることとされた[14]。2019 年東日本台風による長野市、千曲市の災害廃棄物は、自治体単独での処理ができないことから広域支援を実施し、富山県、三重県、愛知県の産業廃棄物処理事業者で処理されている[15]。

平常時の一般廃棄物処理についても、民間事業者へ委託されている事例が存在する。収集や最終処分の民間委託が多いとされている[16]が、市町村の一般廃棄物処理施設の運転管理を民間委託した事例がいくつか存在する[17]。埼玉県日高市のように新たな中間処理施設を計画せず処理を民間事業者へ委託する事例や、香川県観音寺市、奈良県斑鳩市、岐阜県羽島市、滋賀県高島市のように新施設稼働までの期間、緊急避難的に民間事業者へ処理を委託する事例も出てきている[18]。また、2019 年度に焼却処理されている一般廃棄物は 3,443 万 t であり、そのうち 128 万 t が民間事業者によって焼却処理されている[19]。

1.3 統計データの公開状況

産業廃棄物処理施設における情報公開の現状を確認すると、廃棄物処理法第 14 条第 2 項および第 7 項ならびに第 14 条の 4 第 2 項および第 7 項で規定される優良産廃処理事業認定制度に基づく優良基準に関するデータ（実績と遵守性、事業の透明性、環境配慮の取組、電子マニフェスト、財務体質の健全性）に関しては、公益社団法人産業廃棄物処理事業振興財団が公開するさんばいくん 産業廃棄物処理業者検索[20]や産業廃棄物処理事業者のホームページにて閲覧することが可能である。しかし、ここで閲覧可能なデータは、環境省が基礎資料を得るために行っている一般廃棄物処理実態調査[21]のような統計データではないので、これを環境省のような統計とするためには膨大な時間を要する。また、事業者によって適宜内容が更新されるため、一貫性を持ったデータ集計は容易でない。

1.4 既往関連研究

産業廃棄物処理施設の一般廃棄物処理への活用に関する先行研究を見ると、平林（1998）[22]は、一般廃棄物の収集・処理も民営化されて、廃棄物処理関連事業を複合的に営む大企業がいくつか誕生することでごみ問題は解決に向かうと述べている。

中村（2000）[23]は全国規模の廃棄物産業連関表モデルを推定し、広域化による集中処理、ごみ発電、廃プラスチックの高炉還元利用などが、産業生活活動、最終処分量、二酸化炭素排出量に及ぼす効果を評価し、一般廃棄物と産業廃棄物の統合広域処理に完全分別と廃プラスチック高炉還元利用を組み合わせたシナリオが埋立容積と二酸化炭素を同時に最小にすると示している。伊川ら（2015）[24]は、可燃系災害廃棄物の処理について、近畿圏を対象に一般廃棄物処理、産業廃棄物の広域連携効果を分析し、都市型の阪神直下型地震における災害廃棄物処理完了期間が連携せずに処理した場合は7.9年であるが、一般廃棄物処理事業および産業廃棄物処理業の広域連携水準、受入水準を高めることで2.8年に短縮できると推計している。秦ら（2021）[25]は人口5万人、ごみ排出量年間1万トン程度のエリアを想定し、焼却施設の整備、トンネルコンポスト施設の整備、民間業者への処理委託の3つのシナリオについて20年間の事業費を比較しており、民間業者への処理委託単価が一定の場合経済的メリットが生じる可能性があることを示している。山脇ら（2020）[26]は、ある地域を対象に産業廃棄物処理施設を設置する場合と、一般廃棄物処理を加えた施設を設置する場合について、事業性評価や実現に向けた課題整理を行っており、一般廃棄物を加えた施設の方が高い事業採算性を有することを示している。

産業廃棄物処理施設のエネルギー回収、脱炭素に関する先行研究では、大谷ら（2019）[27]は、サーモセレクト方式ガス化溶融炉における、エネルギー回収を導入した場合の温室効果ガス（GHG: Greenhouse Gas）削減効果および費用対効果について推計を行い、ガスエンジン発電設備の導入が最も優位な適用技術であることを明らかにしている。大谷ら（2020）[28]は、産業廃棄物処理施設の処理方式の中で採用事例の多いロータリーキルン&ストーカ炉において、熱収支モデルを作成し、複数のエネルギー技術を想定した場合のGHG削減効果を推計している。矢野ら（2022）[29]は、地域で発生する廃棄物系バイオマスの循環利用は脱炭素社会および脱炭素社会を内包する地域循環共生圏形成に大きな役割を担っていると、脱炭素社会実現化における代替物の変化、廃棄物系バイオマス中の化石由来炭素割合の把握と精微化、複雑化、多様化する炭素ストック・フローの把握を廃棄物系バイオマスの循環利用効果を定量化する上での課題にあげている。

しかし、これらの先行研究では、廃棄物処理業の実態についてはほとんど明らかにされていない。

1.5 研究の目的

循環型社会の形成に向けた地域の課題解決において、産業廃棄物処理業の役割は重要である。また、産業廃棄物処理施設を地域課題解決のためにより活用していくための下支えとして、施設を高度化させることが必要であるが、産業廃棄物処理業の施設の高度化や活動実態を明らかとした調査報告や既往研究は多いとは言えない。

そこで本研究では、産業廃棄物焼却施設の維持管理に関すること、さらに地域課題の中で一般廃棄物・災害廃棄物の処理、脱炭素化に向けた産業廃棄物処理施設の活用について実態調査を実施するとともに、その結果をふまえて、処理施設にかかる技術や施設運用の仕組みを含む、さらなる高度化や有効活用の方策を提案し、それらの効果について検証することを目的とする。

1.6 論文の構成

本論文は全7章で構成されている（図1-1）。

第1章では、研究の背景と目的を示すとともに、各章の構成を示す。

第2章と第3章は廃棄物処理施設の高度化について述べる。本論文では、産業廃棄物焼却施設の維持管理に焦点を当てる。

第2章では、産業廃棄物焼却施設を対象とした維持管理の実態調査の結果を述べる。

第3章では、第2章で実施した実態調査のICT・AIの導入意向結果を基に、産業廃棄物焼却施設でのICTを用いた予防保全の実証を行う。

第4章から第6章は、産業廃棄物処理施設の地域課題解決のための有効活用について述べる。本論文では地域の課題の中の一般廃棄物処理、エネルギー回収、脱炭素に焦点を当てる。

第4章では、産業廃棄物焼却施設を対象とした一般廃棄物・災害廃棄物の処理およびエネルギー回収の実態調査の結果を述べる。

第5章では、第4章で実施した実態調査の一般廃棄物の処理実績を踏まえ、産業廃棄物処理事業者へ一般廃棄物処理を委託する場合と、一般廃棄物焼却施設の継続利用との事業性を比較する。一般廃棄物焼却施設は稼働年数を3パターン、施設の処理規模を4パターン想定し、事業性に影響を与える要因を検証する。

第6章では、第4章で実施した実態調査のエネルギー回収の結果を踏まえ、産業廃棄物管理型最終処分場の浸出水処理施設の余力を活用したエネルギー回収、脱炭素について述べる。

最後に第7章で、本研究の結論を述べる。

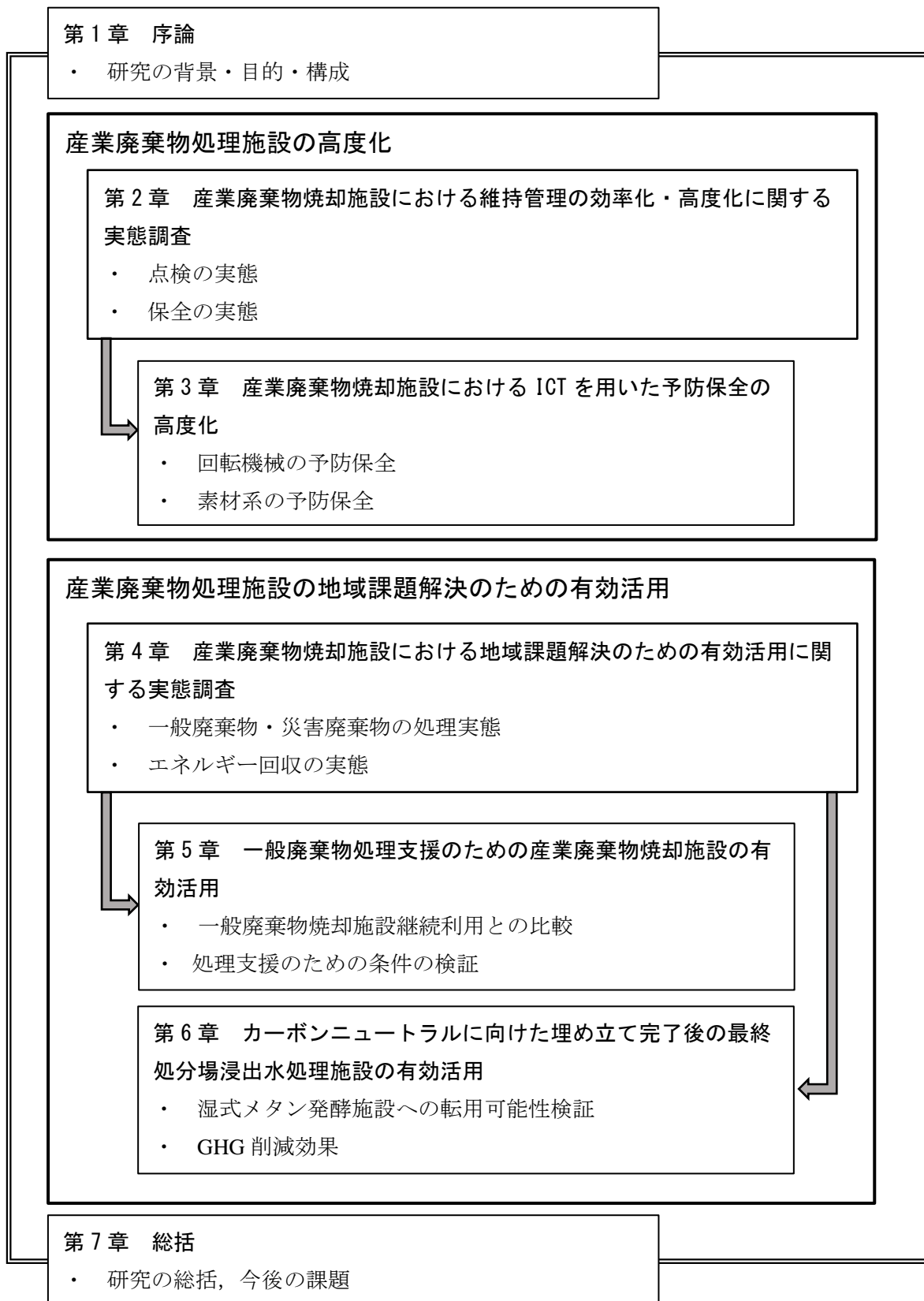


図 1-1 本論文の構成

第1章 参考文献

- [1] 環境省『循環型社会基本推進法』, <https://www.env.go.jp/recycle/circul/kihonho/law.html> (2022.12.17 閲覧).
- [2] 環境省『第一次循環型社会推進計画 (平成 15 年 3 月 14 日閣議決定)』, 2003 年, <https://www.env.go.jp/recycle/circul/keikaku/all.pdf>, (2022.12.17 閲覧).
- [3] 環境省『第二次循環型社会推進計画 (平成 20 年 3 月 25 日閣議決定)』, 2008 年, <https://www.env.go.jp/content/900532573.pdf>, (2022.12.17 閲覧).
- [4] 環境省『第三次循環型社会推進計画 (平成 25 年 5 月 30 日閣議決定)』, 2013 年, <https://www.env.go.jp/content/900532574.pdf>, (2022.12.17 閲覧).
- [5] 環境省『第四次循環型社会推進計画 (平成 30 年 6 月 19 日閣議決定)』, 2018 年, <https://www.env.go.jp/content/900532575.pdf>, (2022.12.17 閲覧).
- [6] 環境省『令和 2 年度中小廃棄物処理を通じた資源循環・エネルギー回収促進方策モデル調査検討委託業務報告書』, 2021 年, <https://www.env.go.jp/content/900536114.pdf>, (2022.12.17 閲覧).
- [7] 環境省『国連気候変動枠組条約第 2 1 回締約国会議 (COP21) 京都議定書第 1 1 回締約国会合 (CMP11) 等 (概要と評価)』, 2015 年, <https://www.env.go.jp/earth/cop/cop21/>, (2022.12.17 閲覧).
- [8] 国・地方脱炭素実現会議『地域脱炭素ロードマップ』, 2021 年, https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/datsutanso/pdf/20210609_chiiki_roadmap.pdf, (2022.9.28 閲覧).
- [9] 環境省『廃棄物資源循環分野における 2050 年温室効果ガス排出実質ゼロに向けた中長期シナリオ (案)』, 2021 年, https://www.env.go.jp/council/content/i_03/000048390.pdf, (2022.12.17 閲覧).
- [10] 環境省『産業廃棄物処理業の振興方策に関する提言』, 2017 年, <https://www.env.go.jp/press/files/jp/105876.pdf>, (2022.12.17 閲覧).
- [11] 公益社団法人 全国産業資源循環連合会, “産業資源の循環的な利用を促進するための産業廃棄物処理産業の振興に関する法律案,” <https://www.zensanpairen.or.jp/outline/>, (2022.12.17 閲覧).
- [12] 環境省『産業廃棄物処理の高度化に係る調査検討業務報告書令和 2 年度』, 2021 年, <https://www.env.go.jp/content/900535535.pdf>, (2022.12.17 閲覧).
- [13] 公益財団法人 産業廃棄物処理事業振興財団 『講習会テキストダイジェスト版 (産業廃棄物コース)』, <https://www.sanpainet.or.jp/service03.php?id=29>, (2022.9.28 閲覧).
- [14] 環境省『災害廃棄物処理のための制度整備』, <https://www.env.go.jp/recycle/waste/disaster/legislation/law1-1.pdf>, (2022.9.28 閲覧).
- [15] 環境省中部地方環境事務所資源循環課, “令和元年台風第 19 号の災害廃棄物処理支援一長野県の事例一,” 『INDUST』, Vol.35, No.6, pp.6-10, 2020 年.
- [16] 栗島英明” 地方小規模自治体における一般廃棄物処理の現状と課題,” 『廃棄物資源循環学会

- 誌』 vol.25, pp.430-438, 2014 年.
- [17] 栗原秀隆, “一般廃棄物処理施設の長期包括的運営の展望,” 『廃棄物学会誌』, Vol.19, pp.87-95, 2008 年.
- [18] 一般社団法人 廃棄物資源循環学会廃棄物焼却研究部会, “民間事業者と連携した廃棄物処理の可能性,” 『第 29 回廃棄物資源循環学会研究発表会 廃棄物焼却研究部会 企画セッション』, 2018 年.
- [19] 環境省 『日本の廃棄物処理』, 2021 年, http://www.env.go.jp/recycle/waste_tech/ippan/r1/data/d_isposal.pdf, (2022.9.28 閲覧).
- [20] 公益財団法人 産業廃棄物処理事業振興財団 『さんばいくん 産業廃棄物処理業者検索』, <http://www2.sanpainet.or.jp/zyohou/index.php>, (2022.9.28 閲覧).
- [21] 環境省 『一般廃棄物処理実態調査』, 2021 年, https://www.env.go.jp/recycle/waste_tech/ippan/index.html, (2022.9.28 閲覧).
- [22] 平林英一, “ごみ処理産業化論序説,” 『MACRO REVIEW』, Vol.10, No.2, pp.85-95, 1998 年.
- [23] 中村慎一郎, “廃棄物処理と再資源化の産業連関分析,” 『廃棄物学会論文誌』, Vol.11, No.2, pp.84-93, 2000 年.
- [24] 伊川純慶, 中久保豊彦, 東海明宏, “レジリエンス特性を踏まえた災害廃棄物(可燃系廃棄物)処理の対策効果分析ー近畿圏における広域連携を対象としてー,” 『土木学会論文集 G』, Vol.71, No.6, pp. II_253-II_262, 2019 年.
- [25] 秦三和子, 西村富男, 村上友章, 吉川克彦, 河井紘輔, “人口減少自治体におけるごみ処理方式と将来の事業費負担,” 『廃棄物資源循環学会研究発表会』, Vol.32, pp.89-90, 2021 年.
- [26] 山脇敦, 西田直史, “産業廃棄物等による地域共生型エネルギー化モデルと実現に向けた課題,” 『廃棄物資源循環学会研究発表会』, Vol.31, pp.101-102, 2020 年.
- [27] 大谷隆介, 山田崇雄, 中尾彰文, 山本秀一, 山本祐吾, 吉田登, “サーモセレクト方式ガス化改質炉でのエネルギー回収技術導入による GHG 削減効果と事業性の評価,” 『土木学会論文集 G』, Vol.75, No.6, pp. II_87-II_99, 2019 年.
- [28] 大谷隆介, 中尾彰文, 山田崇雄, 吉田登, “産業廃棄物処理炉でのエネルギー回収技術導入による GHG 削減効果の評価ーロータリーキルン・ストーカ炉を対象としてー,” 『土木学会論文集 G』, Vol.76, No.6, pp. II_47-II_59, 2020 年.
- [29] 矢野順也, 平井康宏, “廃棄物系バイオマスの役割と課題,” 『日本 LCA 学会誌』, Vol.18, No.1, pp.21-27, 2022 年.

第 2 章 産業廃棄物焼却施設における維持管理の効率化・高度化に関する実態調査

2.1 はじめに

第 4 次循環型社会形成推進基本計画（2018 閣議決定）[1]では、7 つの方向性ごとに将来像が描かれ、将来像からバックキャスト的に、2025 年度の目標値が設定されている。そして、それぞれの主体の連携や期待される役割と国が実施すべき取り組みが具体的に示されている。7 つの方向性のひとつである「循環分野における基盤整備」の将来像に焦点を当てると、「基盤の整備・更新，必要な技術の継続的な開発，人材育成」での「多様な主体が循環型社会づくりの担い手であることを自覚して行動する社会」とした将来像を描いている。その将来像を実現するために、国が実施すべき取り組みとして、「電子マネーを含む情報の活用」，「技術開発など（廃棄物分野の情報技術（IT：Information Technology）活用）」，「人材育成，普及啓発など」が示されている。そのなかでも特に、IT など技術力を生かした国の資源生産性¹を大幅に向上させるイノベーションを事業者が牽引していくことが期待されている。それは、日本経済低迷を打破するために、第四次産業革命²と呼ばれるモノのインターネット（IoT：Internet of Things），ビッグデータ³，人工知能（AI：Artificial Intelligence），ロボットなどの技術を活用した経済社会イノベーションが、より少ない資源で中長期的な成長を実現する鍵と目されているからである。

一方、視点を「資源循環および適正処理の担い手の確保」に移すと、国内全体として労働力人口減少が問題となるなか、行政においても業務効率化により、専門職員の配置人数が減少している。多くの民間企業においても人材不足は課題で、中小企業がほとんどである産業廃棄物処理事業者では慢性的な人手不足にさらに拍車を掛けている実態にある。産業廃棄物処理業の振興方策に関する提言(2017)[3]を確認すると、産業廃棄物処理業が抱える目下の

¹ 資源生産性＝GDP / 天然資源等投入量

天然資源等投入量とは国産・輸入天然資源および輸入製品の合計量（DMI：Direct Material Input）を指し、資源生産性は一定量当たりの天然資源等投入量から生み出される実質国内総生産（実質 GDP）を算出することによって、各産業がより少ない天然資源で生産活動を向上させているかや、人々の生活がいかにも物を有効に使っているかなど、より少ない天然資源でどれだけ大きな豊かさを生み出しているかを総合的に表す指標。

² 18 世紀末以降の水力や蒸気機関による工場の機械化である第 1 次産業革命，20 世紀初頭の分業に基づく電力を用いた大量生産である第 2 次産業革命，1970 年代初頭からの電子工学や情報技術を用いた一層のオートメーション化である第 3 次産業革命に続く，IoT およびビッグデータ，AI といったいくつかのコアとなる技術革新を指す。

³ 「ビッグデータ」についての確立した定義はない。2017 年版情報通信白書においては、「デジタル化の更なる進展やネットワークの高度化，また，スマートフォンやセンサーなど IoT 関連機器の小型化・低コスト化による IoT の進展により，スマートフォンなどを通じた位置情報や行動履歴，インターネットやテレビでの視聴・消費行動等に関する情報，また小型化したセンサー等から得られる膨大なデータ」としている[2]。

主要な課題認識としては、「人材確保が難しいこと：38.3%」、「技術力を維持・継承すること：26.7%」の2項目の合計が65%を占めており、人材育成・確保に苦戦していることがわかる。

さらに、プラント設備保守・保全の現場では、団塊世代の定年退職により、労働力の減少や技術伝承の断絶によって設備の管理が難しくなるという問題が大きく取り上げられ、高齢者の継続雇用などでその場を凌いでいるが、解決されたとは言えない。また、プラントメンテナンス業界はその他の業界に比べ、IoT技術の導入が十分に進んでいるとはいえない。作業者の経験に基づく技量に頼った現場、関係者間の情報伝達も紙媒体で共有化が進んでいないことで、情報伝達ミス、勘違いなどの人為ミスを起因とするトラブルも発生している現状にある[4]。こうしたなか、石油コンビナート等災害防止省連絡会議[5]によって、AIを用いたスマート保安技術の導入成功事例が紹介され、長年続いた設備保守・保安分野の大きな構造的な課題解決の糸口が見つかりつつある。石油コンビナートに集積する石油精製、石油化学などが保有する大規模プラント設備に対しては、こうしたAI技術導入の成功の声が聞こえてくる。しかし、その多くが中小規模プラント設備とも言える産業廃棄物焼却施設においては取り組み実態の情報が不足している。

そこで、本章では産業廃棄物処理事業者が保有する焼却施設における維持管理の実態を調査し、資源生産性の向上に資する人材不足の課題解決に期待されるICT・AI導入意向を明らかとする。

2.2 既往関連研究

産業廃棄物処理事業者が保有する焼却施設における保安・保全管理の実態を調査した事例は少ないのが現状である。佐藤(2014-a)[6]によるプラントの維持管理体系の概説、佐藤(2014-a)[7]と佐藤(2014-c)[8]による劣化管理と寿命予測の解説や、山下(2017)[9]、村上ら(2017)[10]によるプラント設備で生じた故障発生状況や故障対応の報告、藤原(2018)[11]によるプラント設備における保守・保全管理の報告などに留まる。

廃棄物処理施設におけるIoT・AI技術の活用事例や個別技術を概説した報告[12][13][14]は、プラントメーカーによりなされているが、IoT・AIの導入意向に関する既往研究は多いとはいえない。廃棄物処理事業者のみを対象としたものではないが、中国経済産業局が中国地域の環境ビジネスに取り組む企業を対象にIoT・AI活用事例を調査した報告[15]がある。いくつかの産業廃棄物処理事業者では、すでにIoT・AIを導入しているとの報告があり、その導入効果と課題、AIを活用した課題解決の模索と今後の方向性が事例ごとに取りまとめられている。

2.3 調査方法など

Web アンケート調査方法の概要を表 2-1 に示す。

調査対象は、公益財団法人 産業廃棄物処理事業振興財団が提供する「さんぱいくん」の優良認定業者検索（2020年1月時点）[16]で、優良産廃処理業者認定を受けている 1,305 事業者のうち焼却施設を保有する 176 事業者（北海道：1，東北：15，関東：59，中部：33，近畿：18，中国：18，四国：9，九州：23）を対象とする。地域ブロックの分類を表 2-2 に示す。地域ブロックの分類は、環境省が定める地域ブロック[17]に従った。

アンケート調査方法は、Google Forms を使用した Web アンケート調査を実施した。その結果、176 事業者のうち 31 事業者から回答が得られている（回答率：17.6%）。

表 2-1 Web アンケート調査方法の概要

調査対象		176 事業者 （「さんぱいくん」の優良認定業者検索[16]で、優良な産業廃棄物処理業者*として検索され、かつ、焼却施設を有する事業者）	
調査方法		アンケート調査の願いを事業者に郵送し、Google Forms で回答	
調査期間		2020年1月～2月	
質問項目	維持管理	人員配置	設備担当の人数，運転操作担当の班構成，運転操作担当の班あたりの人数
		点検方法	点検方法，1日の点検回数，1日の点検人数
		記録方法	点検結果の管理方法，点検結果の異常判断方法，タブレットなどによる点検・トラブル対応の認知度，タブレットなどによる「見える化」検討の有無，導入を断念した理由
		故障の発生状況	故障発生の把握方法，停止に至った故障の原因箇所，過去5年間の計画外の処理停止回数・合計停止日数・1回あたりの停止日数
	ICT・AI導入意向		早期発見で突発的な停止を防げた故障の有無，設備停止せずに機器異常を検知が可能なシステムの必要性，ICT・AIに期待する効果
有効回答数 (回答率)		31 事業者 (17.6%)	

*都道府県・政令市において、廃棄物処理法に基づき優れた能力と実績を有する産廃処理業者として認定され、環境省に報告された事業者

表 2-2 設定した地域ブロック

ブロック	都道府県
北海道	北海道
東北	青森県, 岩手県, 宮城県, 秋田県, 山形県, 福島県
関東	茨城県, 栃木県, 群馬県, 埼玉県, 千葉県, 東京都, 神奈川県, 新潟県, 山梨県, 静岡県
中部	富山県, 石川県, 福井県, 長野県, 岐阜県, 愛知県, 三重県, <u>静岡県</u>
近畿	<u>滋賀県</u> , 京都府, 大阪府, 兵庫県, 奈良県, 和歌山県
中国	鳥取県, 島根県, 岡山県, 広島県, 山口県
四国	徳島県, 香川県, 愛媛県, 高知県
九州	福岡県, 佐賀県, 長崎県, 熊本県, 大分県, 宮崎県, 鹿児島県, 沖縄県

*便宜上、本研究ではこのような分類をしたが、静岡県（関東ブロック、中部ブロック）と、滋賀県（近畿ブロック、中部ブロック）は、2つの地域ブロック協議会に参加している。

2.4 調査結果

2.4.1 維持管理

1) 人員配置

人員配置に関するアンケート調査結果を図 2-1～図 2-3 に示す。設備整備担当の人数は、2～4 名を配置する事業者が 38.7%（12/31）を占めておりもっとも多い。4 名未満の人員を配置する事業者では、全体の過半数となる 61.3%（19/31）を占めている。選任なしという回答も 12.9%（4/31）確認され、その他の業務と兼任しながら設備整備している実態も明らかとなった。設備の運転操作担当の班構成は、4～6 班で運用する事業者が 45.2%（14/31）を占めもっとも多い。運転操作担当の班あたりの人員は、2～4 名を配置している事業者が 61.3%（19/31）を占めている。

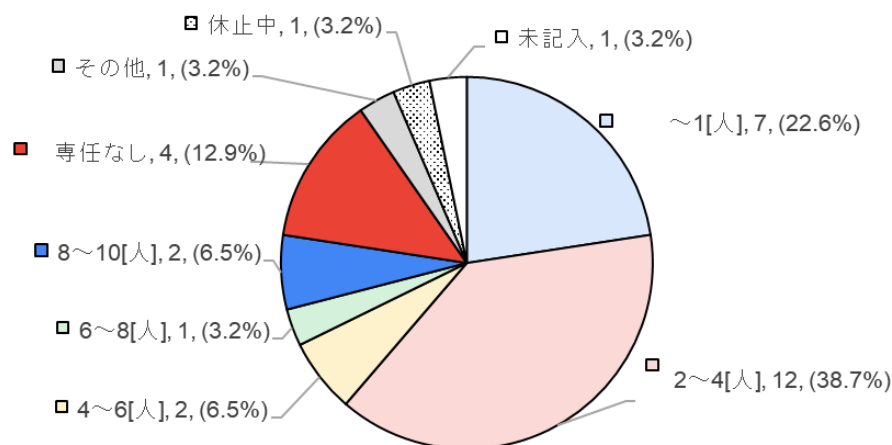


図 2-1 設備整備担当の人数

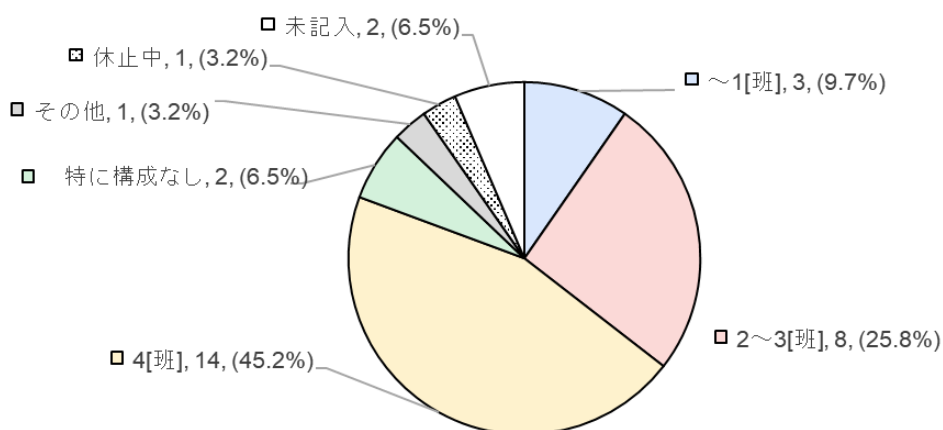


図 2-2 運転操作担当の班構成

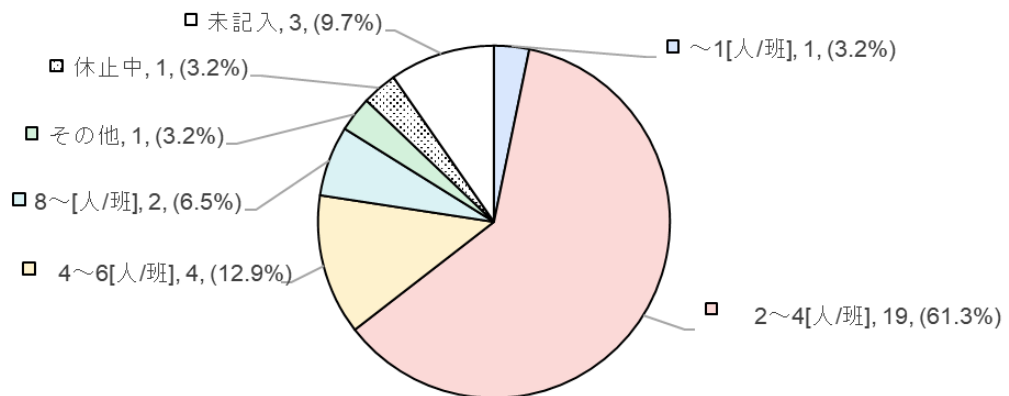


図 2-3 運転操作担当の班あたりの人員

前述した設備担当の人数は、1 炉単体のみならず複数の炉（2~4 炉）を保有する事業者からの回答が含まれている。そのため、全体的な傾向を把握するために、試算に必要なデータが整った回答サンプルを対象に 1 炉あたりの設備担当人数を試算する。併せて、1 炉あたりの運転担当人数も試算した結果を図 2-4 に示す。

1 炉あたりの設備担当の人員数は、中央値・平均値ともに 2.0 人で、1~5 人の範囲の人員が配置されていることが明らかとなった。また、1 炉あたりの運転管理担当の人員数は、中央値で 3.0 人、平均値で 3.2 人となる。配置人員の幅は大きく 1~8 人の範囲で配置されていることから、事業者によってプラントの運転方針に差があることが明らかとなった。

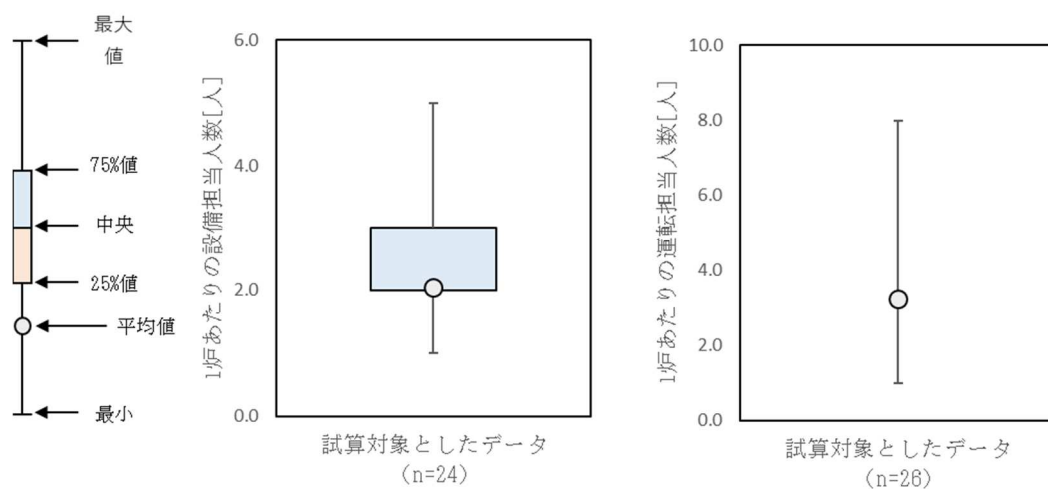


図 2-4 1 炉あたりの設備担当または運転担当の人数（試算値）

2) 点検方法

点検方法に関するアンケート調査結果を図 2-5～図 2-7 に示す。紙を用いた点検を実践する事業者が 87.1% (27/31) を占めている。タブレットを用いた点検を実践する事業者は 3.2% (1/31) に留まる。1 日の点検回数は「0～1 回」が 38.7% (12/31) で、「2～4 回」が 35.5% (11/31) となり、これらの 4 回未満の点検回数を採用する事業者の総和は全体の 74.2% (23/31) に達する。点検時における人員数は、1 名が 61.3% (19/31) で 2 名が 25.8% (8/31) となり、2 名以内での点検実施を採用する事業者の総和は全体の 87 (27/31) に達する。

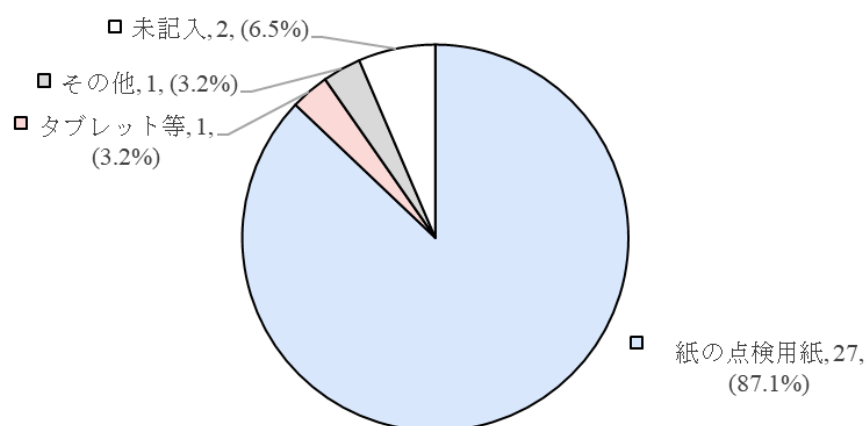


図 2-5 点検方法

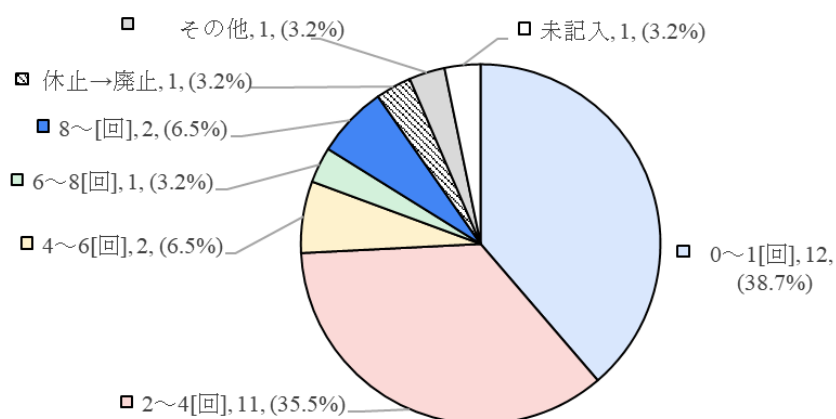


図 2-6 1日の点検回数

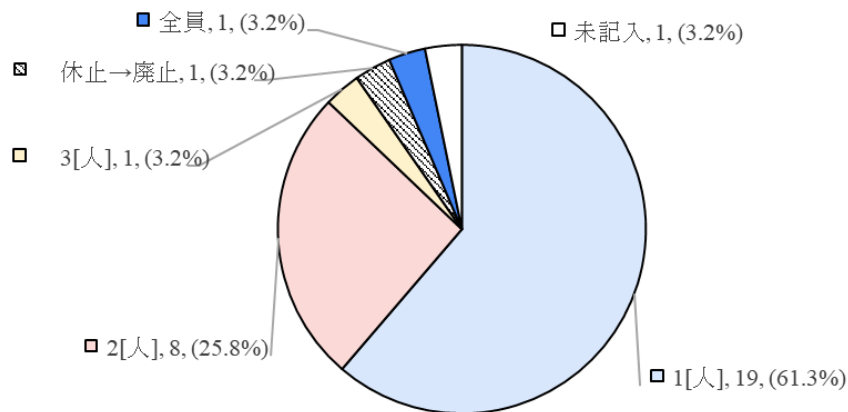


図 2-7 1回の点検人数

3) 記録方法

記録方法に関するアンケート調査結果を図 2-8～図 2-10 に示す。

点検結果の管理方法で、ファイルに綴じる事業者が 62.9% (22/31) を占めている。点検記録を Excel に転記して記録保存する事業者は 31.4% (11/31) である。

点検記録の異常判定の方法は、「決まった範囲からの逸脱」で異常判定する事業者は 46.4% (26/31) で、「過去の測定値からの変化」を確認し異常判定する事業者は 37.5% (21/31) を占めている。また、「トラブル発生後に対応」する事業者も一定数：12.5% (7/31) 存在することも確認できた。

点検業務におけるデジタル化(タブレットによる点検・トラブル対応の見える化システム)の認知度を確認すると、35.5% (11/31) が「ある程度知っている」と回答した。しかし、「聞いたことはあるがよく知らない」が 35.5% (11/31)、「聞いたことがない」が 9.7% (3/31) とその合計は 45.2% (14/31) となり、点検業務におけるタブレット活用の認知度が低いことが明らかとなった。

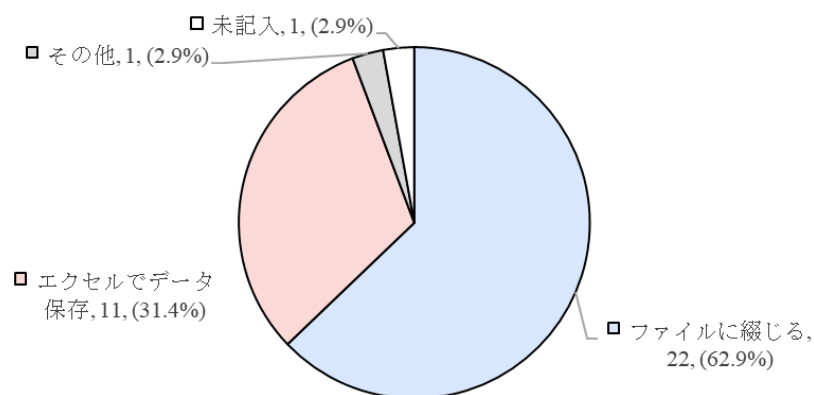


図 2-8 記録方法

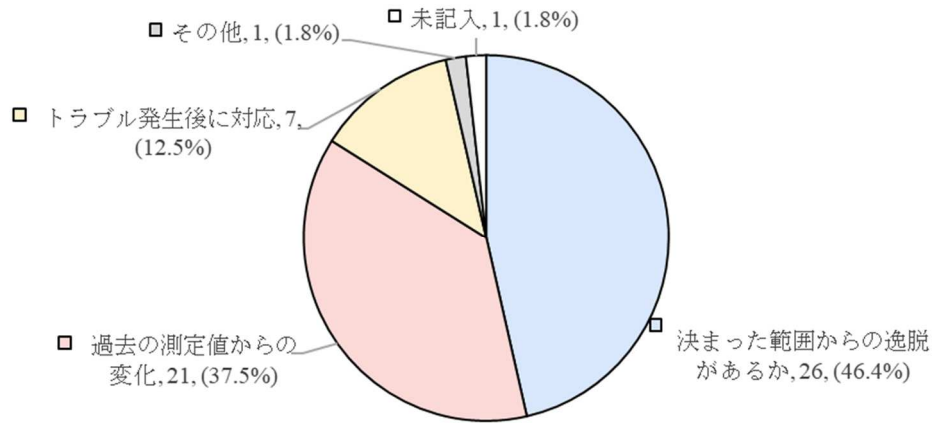


図 2-9 点検記録の異常判定方法

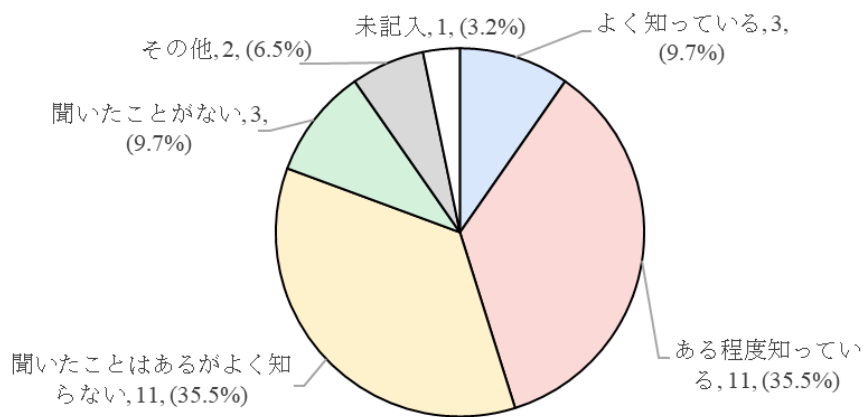


図 2-10 タブレットによる点検・トラブル対応の見える化を知っているか？

デジタル化による記録方法への取組意向に関するアンケート調査結果を図 2-11、図 2-12 に示す。

点検業務におけるデジタル化（タブレットによる「見える化」）の検討は、「無い」が 35.5%（11/31）を占めもっとも多い。「有り」と「今後検討する」は、ともに 19.4%（6/31）で、「検討したが導入を断念」が 12.9%（4/31）あることが確認された。「導入予定」は 3.2%（1/31）に留まる。

「導入断念の理由」は、イニシャルコストに関する課題として「初期費用が高い」が 22.2%（2/9）を占め「その他：33.3%（3/9）」以外でもっとも多い。そのほかの回答としては、ランニングコスト面に関する課題として「システム管理費が高い：11.1%（1/9）」やデジタル化に対する人的・物的体制の整備に関する課題として「社内に専門家がない：11.1%（1/9）」、「通信網の準備ができていない：11.1%（1/9）」、導入技術の機能に関する課題（業務改善方針の不一致）として「導入機器が業務に適していない：11.1%（1/9）」が挙げられた。

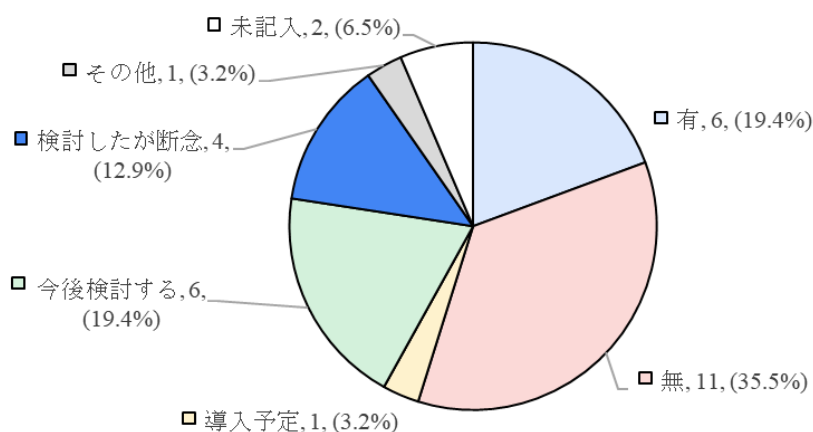


図 2-11 タブレットによる「見える化」を検討したことはあるか？

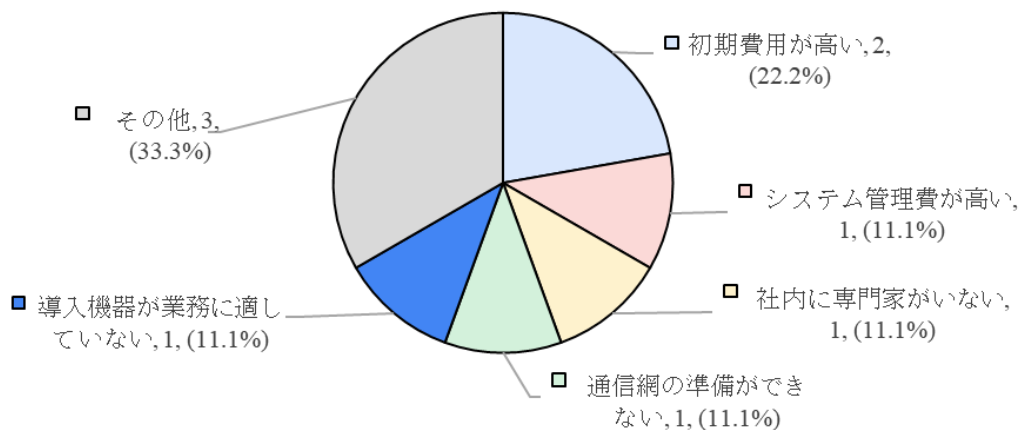


図 2-12 導入断念の理由

4) 故障の発生状況など

故障発生状況の把握に関するアンケート調査結果を図 2-13, 図 2-14 に示す。

故障箇所の把握方法で、「日常点検」により故障箇所を把握する事業者が 38.4% (28/73) で、「定期点検」により故障箇所を把握する事業者が 31.5% (23/73) を占める。その合計は 69.9% (51/73) となり現場の経験と技術によって故障を事前に把握していることがわかる。「中央制御室での監視」からの故障箇所把握も 23.3% (17/73) あることから、設備保全活動の現場と中央監視による運転支援の両輪で故障箇所の把握に努めていることが示唆された。また、「偶然気づく」との回答が 4.1% (3/73) 確認された。処理を停止した原因箇所は、焼却施設：27.0% (20/74)、ごみ・受入・供給設備：16.2% (12/31)、その他：13.5% (10/74)、焼却ガス冷却設備と排ガス処理設備ともに：12.2% (9/31)、灰出設備：8.1% (6/74)、通風設備：5.4% (4/74)、余熱利用設備と給水設備ともに：2.7% (2/74) の順となる。3 炉, 4 炉はサンプル数が少なく判断しづらいが炉数構成による差によって構成割合の順位は大きく変化しないものと考えられる。

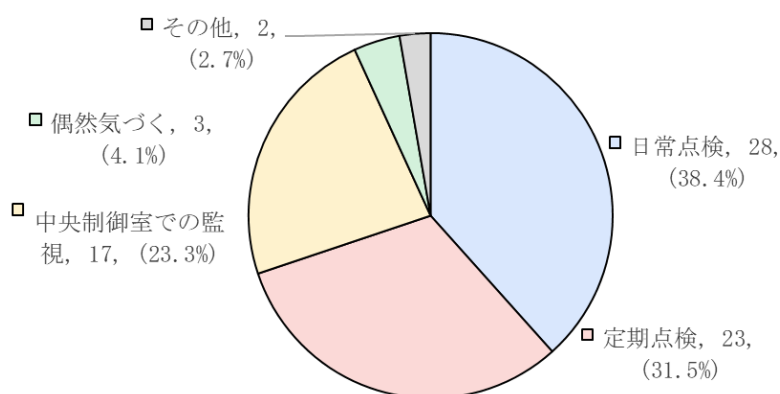


図 2-13 故障箇所の把握方法

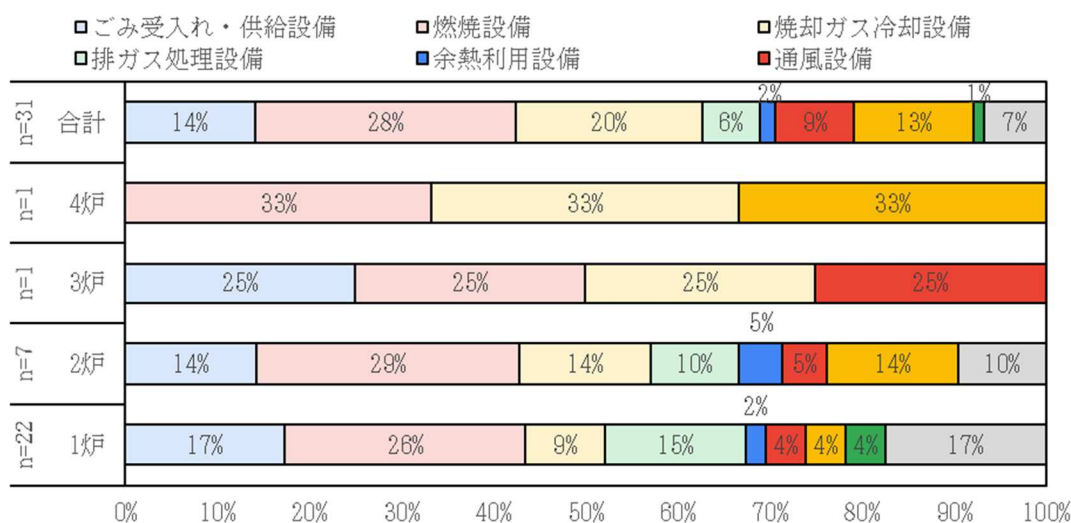


図 2-14 処理を停止した原因箇所

故障の発生状況に関するアンケート調査結果を図 2-15、図 2-16 示す。

過去 5 年間に計画外で処理を停止した回数は、1~5 回の事業者が 29.0% (9/31) ともっとも多くを占める。次いで、10~15 回:22.6% (7/31), 5~10 回:12.9% (4/31), 0 回:9.7% (3/31), 15 回以上:6.5% (2/31), 未記入:16.1% (5/31), その他:3.2% (1/31) の順となる。

過去 5 年間に計画外で処理を停止した総停止日数は、10~20 日と 30 日以上の事業者がともに 22.6% (7/31) ともっとも多くを占める。次いで、10 日未満と未記入:16.1% (5/31), 20~30 日とその他:6.5% (2/31) の順となる。

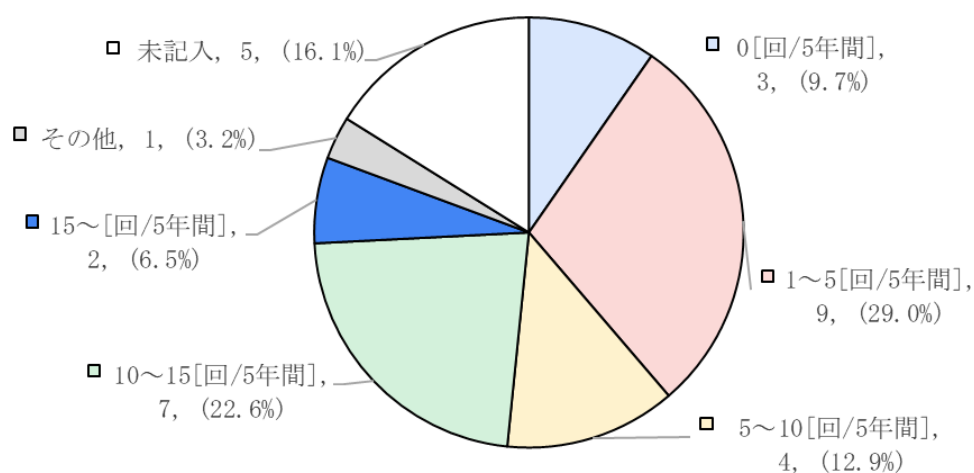


図 2-15 過去 5 年の停止回数

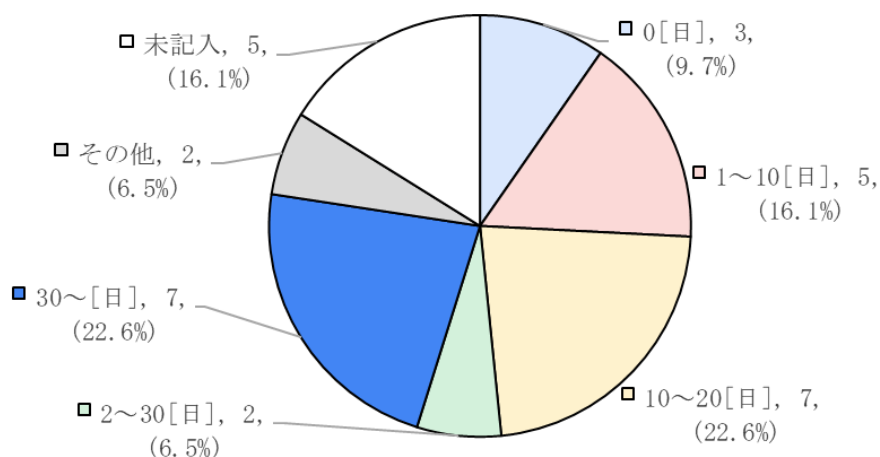


図 2-16 過去 5 年の総停止日数

これらの回答データをもとに、過去5年間における1回あたりの停止日数を試算した結果を図2-17に示す。1回あたり5日未満が32.3% (10/31)でもっとも頻度が高い。次いで、回答データからの試算不能:25.8 (7/31), 1日未満:12.9% (4/31), 15日以上:9.7% (3/31), 0日と5~10日と10~15日:6.5% (2/31)の順となる。累積相対度数で確認すると、1回あたりの停止日数は、5日未満で全体に占める割合が51.6%を占め、計画外停止したとしても再稼働までに比較的時間を要していないことが明らかとなった。

2.4.2 ICT・AI導入意向

ICT・AI導入意向に関するアンケート調査結果を図2-18～図2-20に示す。

早期発見で突発的な停止を防げた故障については、「無い」と回答した事業者が58.1% (18/31)と過半数を占める。

プラント設備を未停止で機器異常を予兆できるシステムの導入意向については、「価格によっては欲しい」と回答した事業者が61.3% (19/31)と過半数を占める。

ICT・AIに期待する効果については、「緊急時の作業員負荷減少や危険の回避」と回答した事業者が25.8% (24/93), 「操業ロスの削減」と回答した事業者が24.7% (23/93), 「機器の延命」と回答した事業者が19.4% (18/93)で、これら合計である69.9% (65/93)が突発故障の減少に期待していることが明らかとなった。さらに、ストックマネジメントの考え方に通ずる「過剰保全を回避した、効率的で計画的な保全によるコスト削減」と回答した事業者が18.3% (17/93), 「機器保全に関する熟知された知見の継承」と回答した事業者が11.8% (11/93)という回答を得た。

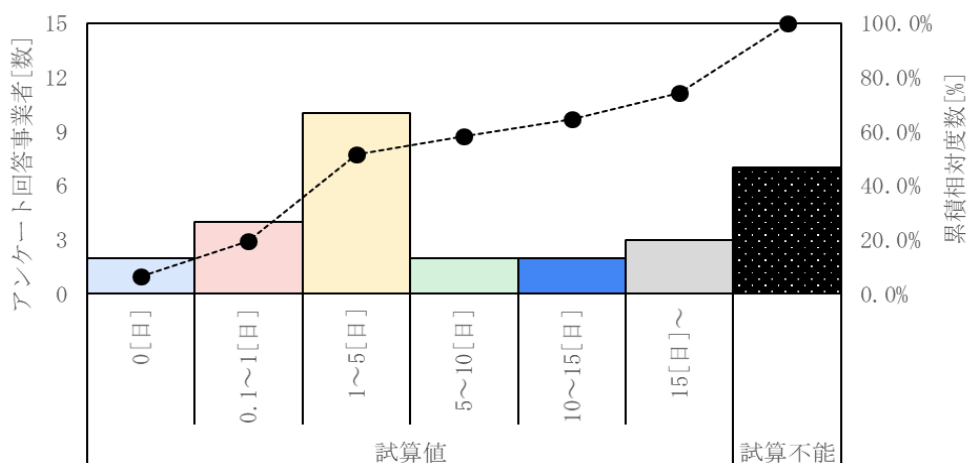


図2-17 過去5年における1回当たりの停止日数 (試算値)

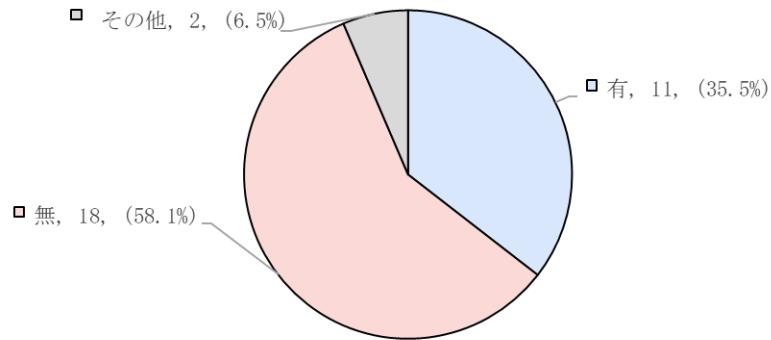


図 2-18 早期発見で突発的な防止を防げた故障

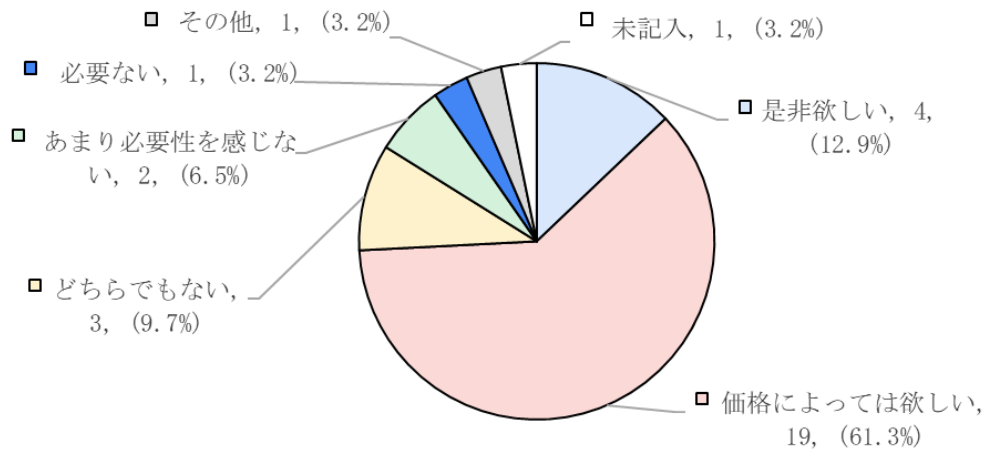


図 2-19 設備を止めずに機器の異常を予兆できるシステムがあれば欲しいか

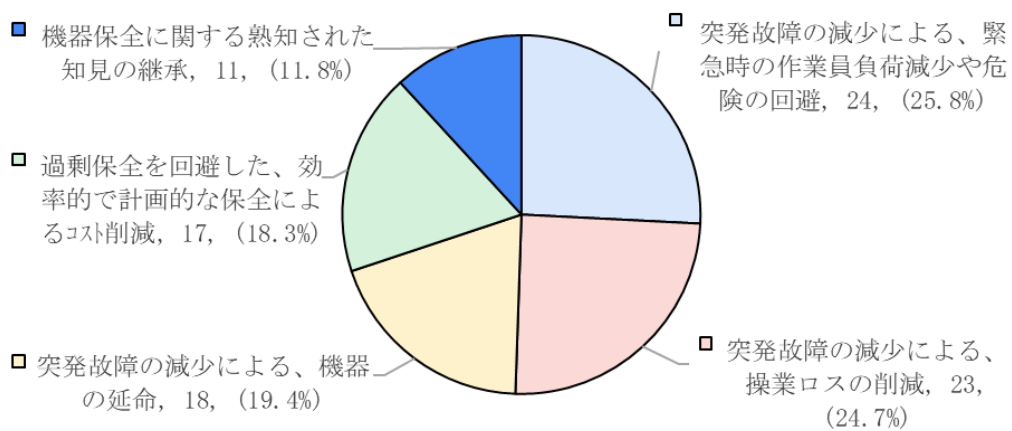


図 2-20 ICT・AI に期待する効果

2.5 まとめ

本章では、産業廃棄物処理事業者が保有する焼却施設の維持管理における実態を調査し、ICT・AIの導入意向を明らかにした。

産業廃棄物焼却施設の安定稼働において重要である、故障箇所の把握方法について、日常点検での把握が38.4%、定期点検での把握が31.5%と、全体の69.9%が点検で把握しており、点検業務の重要性が伺えた。点検の方法については、紙で実施している事業者が87.1%であり、その点検結果の管理も、ファイルに綴じるだけの事業者が62.9%を占めており、点検業務において、ICT・AIの導入などによる改善の必要性が示唆された。

ただ、点検業務のICT・AIの導入に関しては認知度も低く、タブレットによる点検・トラブル対応に関して、全体の45.2%が「よく知らない」、または、「聞いたことがない」との回答であった。タブレットによる見える化の検討についても費用面、専門的知識を持つ人員不足などの理由で断念しているケースも見られ、点検業務におけるデジタル化を進めるのは現状では難しいと考えられる。

産業廃棄物処理事業者がICT・AIに期待する効果について、69.9%の事業者が「突発故障の減少に期待」しており、61.3%の事業者が「プラント設備を未停止で機器異常を予兆できるシステムは価格によっては導入する意向がある」ことから、デジタル化が進まない点検業務以外へのICT・AIの導入に期待を寄せていることが伺える。

そこで、第3章でICTを用いた予防保全に関する実証について後述する。

第2章 参考文献

- [1] 環境省『第四次循環型社会推進計画（平成30年6月19日閣議決定）』, 2018年, https://www.env.go.jp/recycle/circul/keikaku/keikaku_4.pdf, (2022.12.17 閲覧).
- [2] 総務省『情報通信白書 2019』, 2018年, <https://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/r01.html>, (2021.7.28 閲覧).
- [3] 環境省『産業廃棄物処理業の振興方策に関する提言』, 2017年, <https://www.env.go.jp/press/files/jp/105876.pdf>, (2022.12.17 閲覧).
- [4] 前田純, “保全業務でのIoT活用の現状および今後の課題,”『第46回石油・石油化学討論会（京都大会）石油学会 年会・秋季大会講演要旨集』, pp.334-335, 2016年.
- [5] 石油コンビナート等災害防止3省連絡会議（経済産業省, 厚生労働省, 総務省消防庁）『プラントにおける先進的AI事例集~AIプロジェクトの成果実現と課題突破の実践例~』, 2020年, https://www.fdma.go.jp/relocation/neuter/topics/fieldList4_16/pdf/r02/jisyuhoan_shiryo_11_03.pdf, (2021.7.28 閲覧).
- [6] 佐藤信義, “特論 プラントにおける保守・点検 第1章 概説,”『環境技術会誌』, No.155, pp.56-246, 2014年.
- [7] 佐藤信義, “特論 プラントにおける保守・点検 第2章 プラント劣化の検査と寿命予測,”『環境技術会誌』, No.156, pp.23-29, 2014年.
- [8] 佐藤信義, “特論 プラントにおける保守・点検 第3章 静止機器の劣化管理と寿命予測,”『環境技術会誌』, No.157, pp.43-48, 2014年.
- [9] 山下竜生, “廃棄物焼却施設のトラブルに学ぶ,”『環境技術会誌』, No.169, pp.48-49, 2017年.
- [10] 村上慧, 柳信雄, “一般廃棄物処理施設のトラブル対策 第1章 概説及び故障等発生状況について,”『環境技術会誌』, No.170, pp.20-23, 2017年.
- [11] 藤原彰吾, “一般廃棄物処理施設のトラブル対策 第4章 故障等トラブルに対する予防保全と定期点検補修計画への対応,”『環境技術会誌』, No.170, pp.32-36, 2018年.
- [12] 竹田航哉, 山本浩, 青木勇, 富岡修一, 橋本隆史, 川端馨, “ごみ処理施設におけるICT, AI技術等の活用事例について,”『廃棄物資源循環学会誌』, Vol.29, No.3, pp.228-236, 2018年.
- [13] 市川淳一, “ごみ焼却施設に対する社会ニーズに応えるための最新の取り組み,”『日本エネルギー学会機関誌 えねるみくす』, Vol.97, No.6, pp.631-635, 2018年.
- [14] 秩父薫雅, “廃棄物処理施設の自動化と維持管理-自動化=制御=維持管理-ごみ焼却施設における自動化, 省人化の取り組み,”『環境技術会誌』, No.183, pp.49-51, 2021年.
- [15] 中国経済産業局, 『令和元年度中国地域におけるAI・IoT活用可能性調査報告書』, https://www.chugoku.meti.go.jp/research/kankyo/pdf/200408_1.pdf, (2021.7.28 閲覧).
- [16] 公益財団法人 産業廃棄物処理事業振興財団『さんばいくん 産業廃棄物処理業者検索』, <http://www2.sanpainet.or.jp/zyohou/index.php>, (2022.9.28 閲覧).

[17] 環境省『災害廃棄物対策情報サイト 各地域ブロックにおける取組』, http://kouikishori.env.go.jp/action/regional_blocks/, (2022.9.28 閲覧).

第3章 産業廃棄物焼却施設における ICT を用いた予防保全の高度化

3.1 はじめに

社会インフラ保全の高度化に向けて情報通信技術（ICT：Information and Communication Technology）や人工知能（AI: Artificial Intelligence）を適用する取り組みが進みつつある。第5次社会資本整備重点計画(2021)[1]では、社会資本の整備や維持管理に ICT¹やデジタルの新技术を活用することでその高度化・効率化を図るとともに、インフラ自体に新技术を実装することで、インフラのさらなる価値を発揮させることが求められている。

社会インフラの1つである、廃棄物処理施設への IoT（Internet of Things）活用は1990年代に遡る。竹田ら(2018) [2]は、ごみ焼却などの廃棄物処理技術の分野で、1990年代から2000年にかけてインターネットを利用した遠隔監視システム、エキスパートシステムやファジィ理論などによる制御技術を適用してきた系譜を示している。例えば、高畠ら(1990) [3]は熟練運転者の経験を知識ベースとして組み込んだ廃棄物焼却施設の運転エキスパートシステムを開発し、大西(1991) [4]や小野(1992) [5]はファジィ理論を廃棄物焼却施設の燃焼制御や異常診断に適用するなど、実際の運用を通じ継続的な開発や改良などを行っている。これに対し、近年では ICT、AI、ビッグデータ解析技術の進展により、さらなる廃棄物処理施設の高度化が進められている。例えば、藤本ら(2020) [6]は AI を用いたごみクレーンの高度自動化や燃焼の自動安定化への取り組みを紹介している。近藤(2020) [7]は、発電設備を有する廃棄物焼却施設に対応した、遠隔監視（トラブル対応、データ解析、遠隔調整）と安定的な運転（正常維持と異常回避の2つのモデルを用いた自動運転など）を支援する最適運転管理システムの開発を進めている。

施設の運転管理とともに機器の予防保全における高度化も重要な課題である。志田(2018) [8]は、機械・装置の保全において、従来、音や振動はセンサやマイクを用いた検出ではなく、メンテナンス時の検査員や通常稼働時の作業員といった人に依存している場合がほとんどであったが、少子高齢化による労働人口の低減を背景に、保全にかける人的工数の削減に対する期待は高まっており、音や振動を予兆保全のシステムに取り込み自動的に判断する仕組みが期待されると述べている。小岩ら(2018) [9]が、今後、人口減少、少子高齢化、地方から都市への人口流出などの社会情勢の変化に伴い、市町村において人材面や財政面での制約が予想される中で、IoT、AIなどの ICT の活用による廃棄物処理の効率化が必要不可欠と述べているように、廃棄物処理施設においても労働人口減少への対応は急務である。産業廃棄物の静脈サプライチェーンの中で、産業廃棄物の焼却は特に技術・装置の寄与が大きい。産業廃棄物焼却施設の現場は、一般廃棄物焼却と比較して施設や保有機器や人材に十分な余裕がない中、施設の稼働率を高め、かつ長期にわたり、一定の技術水準・品質を維持し

¹ 現実世界のさまざまなモノが通信機能をもち、ネットワークに接続して動作する仕組みや技術

つつ操業する必要があるという課題を抱えている。

最近の ICT の進展に伴い、これらの機器保全の高度化を図るために技術開発が盛んに進められている。例えば、千々岩ら(2020) [10]は水道施設において無線の振動加速度センサをポンプに取り付けて、ポンプの振動加速度値を測定し、センサ情報をクラウド上のアプリケーションにリアルタイムで渡すことによる設備保全の高度化の取り組みを紹介している。また、松島(2021) [11]は Raspberry Pi, LTE (Long Term Evolution) 通信モジュール, 太陽光パネルを用いた自立型のデータロガーを独自に製作して、野外の風況観測装置に組み込み、試験運用を実施している。これらは未だ端緒についた段階であり、今後、技術の改良や事例の蓄積が必要とされている。特に、産業廃棄物焼却施設でこのような ICT を用いた機器保全の実証事例は殆どない。さらに、これらの維持管理の高度化のためにはコストがかかるが、これらの技術導入コストが予防保全により得られる効果に見合うものかどうかについての知見は有用であり、例えば菊池ら(2016) [12]が風力発電を対象に故障復旧費とダウンタイムの不確かさを考慮した維持管理費の評価を試みているが、産業廃棄物焼却施設の機器において検討された研究事例は殆どみられない。

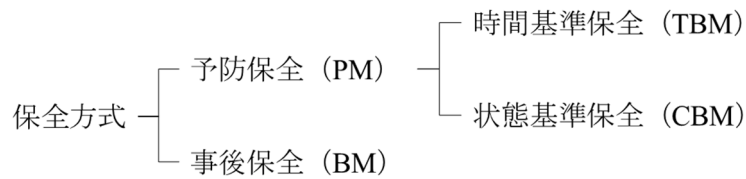
また、第 2 章で述べた通り、産業廃棄物処理事業者への実態調査の結果、ICT・AI の効果として、突発故障の減少に期待していることが明らかとなった。

以上の背景をもとに本章では、産業廃棄物焼却施設を対象として、ICT を用いてプラント機器故障の予防保全に関する実証試験を行い、さらにその効果について定量的な検討を試みる。

3.2 ICT を用いた予防保全モニタリングに関する実証試験

3.2.1 実証試験の対象設備・機器

産業廃棄物焼却施設はさまざまな設備・機器から構成されており、構成する設備・機器点数も多い。廃棄物処理施設長寿命化総合計画策定の手引き（ごみ焼却施設編）（以後、「手引き」という）[13]では、設備・機器に対してその重要性などを踏まえて、最適な保全方式の組合せを決定することとされている。図 3-1 に示すとおり、一般に保全方式は事後保全 (BM: Breakdown Maintenance) と予防保全 (PM: Prevention Maintenance) に大別される[14]。照明装置や予備系列のあるコンベヤ・ポンプ類に対しては、故障してもシステムを停止せず予備系列に切り替えるなどして容易に保全可能であることから BM が用いられる。一方、コンプレッサ、ブロワなどの回転機器類は具体的な劣化の兆候を把握しにくいいため、時間基準保全 (TBM: Time-Based Maintenance) が用いられ、耐火物やろ布などの素材系で摩耗、破損、性能劣化が判断できるものについては、状態基準保全 (CBM: Condition-Based Maintenance) が用いられる。本章では、TBM と CBM の 2 種類の PM に対応して、それぞれ回転機械の送風機、および素材系のバグフィルタ（排ガス中のばいじんをろ過捕集するために、廃棄物焼却施設などに設置される代表的なろ過式集じん装置を指す (BF: Bag filter)）のろ布を対象



(日本プラントメンテナンス協会[14]をもとに作成)

図 3-1 保全方式

に、ICT を用いた予防保全のためのモニタリングの実証試験を行う。実証試験の対象設備としては、故障した場合にプラント全体を停止せざるを得ない設備・機器を選定する。プラント操業の現場では、過去の補修・整備履歴、プラント操業への影響度などをもとにして、設備・機器ごとに重要度や設備更新の優先度を設定し、その度合いに応じて予防保全に努めることが望ましいが、事業者によって予防保全計画の取り組みに温度差がある。そのため、ここでは実証試験に協力頂いた産業廃棄物焼却施設を操業する事業者に、実証実験の趣旨を説明し、この要件（高い重要度・優先度）に該当した設備機器を対象とする。

3.2.2 モニタリングシステムの構成と特徴

1) 送風機の振動モニタリングシステム

(1) システム構成

産業廃棄物焼却施設（ロータリーキルン&ストーカ炉，95[t/d]）に設置されているストーカ冷風送風機に、振動モニタリング用のシステムを設置し、実証試験を行った。ストーカ冷風送風機の諸元を表 3-1 に、システム構成を図 3-2 に、システム諸元を表 3-2 に示す。

表 3-1 ストーカ冷風送風機の諸元

項目	仕様
電動機	22 k w 2P 440V 60Hz
風量	100 m ³ /min at 20°C
風圧	7kPa (入口-0.3, 出口+6.3) at 20°C
回転速度	3,520 min ⁻¹

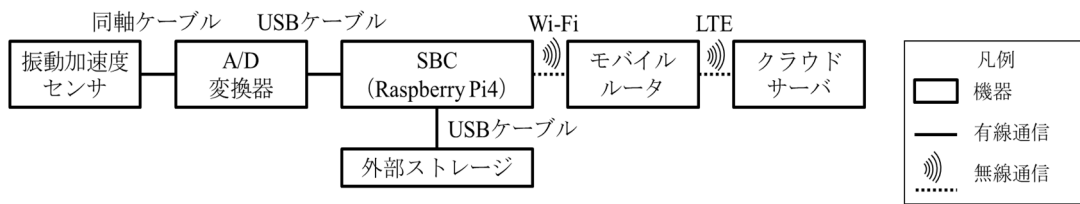


図 3-2 振動モニタリングのシステム構成

表 3-2 振動モニタリングのシステム諸元

項目	仕様
振動加速度センサ	3 軸圧電センサ, 周波数帯域~350Hz,
A/D 変換器	サンプリングレート 500kHz, USB 接続, 16 チャンネル
シングルボードコンピュータ*	OS: Ubuntu 21.10, CPU: ARM Cortex A-9 メモリ: 8MB, ストレージ: SD メモリーカード** 16GB
外部ストレージ	ストレージ: SSD*** 240GB
モバイルルータ	LTE 伝送速度 受信 Max150Mbps/送信 Max50Mbps
クラウドサーバ	商用クラウドストレージ

*SBC: Single Board Computer (使用モデル : Raspberry Pi4 Model B)

**フラッシュメモリーを用いた外部記憶媒体のひとつ

***SSD: Solid State Drive

(2) システムの特徴

本システムは、①計測：汎用の 3 軸振動加速度センサ（出力周波数：DC-350Hz）からの信号データを計測し、②処理：アナログ-デジタル変換（A/D 変換: Analog/Digital Conversion）の精度に影響を及ぼすサンプリングレート（アナログ信号からデジタル信号への変換時に、1sec 間あたりに実行する標準化処理の回数）を通常の 10 倍の頻度（500kHz）で安定的に取得する A/D 変換器で処理を行い、③記録：バイナリ形式で取得してファイル名を自動付与し、より少ない記憶容量で多くのサンプリングデータを保持できるよう gzip コマンドによりデータ圧縮し、外部ストレージに記録、④転送：モバイルルータを経由して rclone コマンドにより汎用のプライベートクラウドにデータ転送、という一連の機能を有する。

日常点検で用いられるポータブル振動計は、体温計で体温の瞬時値を測定するように、回転機械の振動加速度などの瞬時値を計測することが目的であり、簡素化され操作が容易である反面、データ蓄積や高速フーリエ変換（FFT: Fast Fourier Transform）解析などの機能はもたない。一方、精密診断で用いられるデータロガーは、現地でのさまざまな診断用途に対応して、マルチチャンネル、時間波形表示、FFT や主要な関数解析などの多くの機能がパッケージ化されて搭載されており、多機能ゆえに高価である。また、こ

うした振動計やデータロガーは、最大でも 51.2kHz 程度のサンプリングレートで、サンプリング周期はストレージ容量に依存するために、高サンプリング周期での中長期連続モニタリングを想定したものとはなっていないものが大半である。ある程度決められたニーズには有用であるが、データ活用型の予防保全や操作性向上に対応した機能拡張（例えば、高サンプリングレートや高サンプリング周期など A/D 変換機能の向上、自社サーバーやクラウドなど任意のストレージへの遠隔データ転送、転送効率を高めるためのデータ圧縮、データサンプリングに異常が生じた場合のアラームなど）は難しい。このような振動計やデータロガーなどの課題を踏まえて、本システムではサンプリングレートを 500kHz とし、ストレージ容量およびデータ転送の負担軽減の観点からデータサンプリング周期と記録間隔を 1min としている。

本システムは、多機能ゆえ高価な市販のデータロガーを使わず、センサデータを任意の SBC に入力して、デバイス上で動作し制御が可能となるよう、独自の制御プログラムを内部ストレージ（SD メモリーカード）に格納した、汎用の振動加速度計測システムのプロトタイプとして構築した。

2) BF ろ布の差圧モニタリングシステム

(1) システム構成

産業廃棄物焼却施設（ストーカ炉，50[t/d]）の BF に装填されるろ布の予防保全を目的として、集塵プロセスにおける BF での圧力損失（以後、「BF 差圧」という）を計測するために、BF の 1 室に差圧モニタリングシステムを設置し、実証試験を実施した。BF およびろ布の諸元を表 3-3 に、システム構成を図 3-3 に、システム諸元を表 3-4 に示す。

(2) システムの特徴

本システムは、①計測：耐震性・耐衝撃性に優れた小型シリコン・キャパシタスセンサを備えたデジタル微差圧計により差圧を信号データとして取得、②処理：市販データロガーによりデータを高サンプリング周期（1sec）でサンプリング、③記録：USB 接続で PC の内部ストレージにデータを記録、④転送：モバイルルータを経由して汎用のプライベートクラウドにデータ転送、という一連の機能を有する。

表 3-3 BF およびろ布の諸元

項目	仕様
室数	6
ろ布設置本数	72 本 (6 本×12 列) /室
ろ布素材	ポリテトラフルオロエチレン (PTFE: Polytetrafluoroethylene)
ろ布交換時期	差圧と引張強度により決定 (通常, 4 年毎に交換)

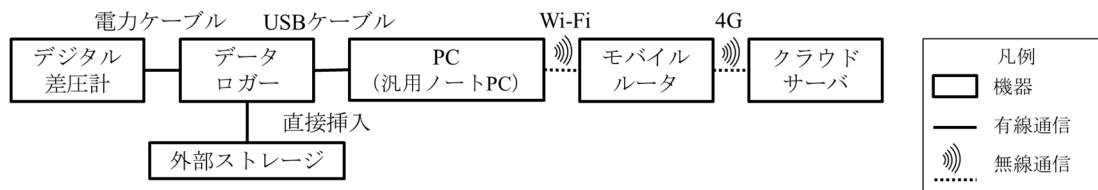


図 3-3 BF 差圧モニタリングのシステム構成

表 3-4 BF 差圧モニタリングのシステム諸元

項目	仕様
デジタル差圧計	微差圧計：差圧レンジ 0～50kPa, アナログ出力 1～5V
データロガー	入力アナログ:10Ch, 電圧測定:±100mV～±60V, 1-5V サンプリング周期:10ms～1hr
パーソナルコンピュータ*	OS: Windows10 64bit, CPU: Pentium Dual-Core P6200/2.13GHz メモリ: 4GB, ストレージ: SSD 500GB
外部ストレージ	ストレージ: CF**メモリーカード 2GB
モバイルルータ	4G 伝送速度 受信 Max300Mbps/送信 Max50Mbps
クラウドサーバ	商用クラウドストレージ

*PC: Personal Computer (使用モデル：汎用ノート PC)

**CF: Compact Flash

通常、BF ろ布については、1 年毎など定期的に、炉の休止時にろ布分析により引張強度や通気度などの機能診断を行い、強度劣化や目詰まりの状態を点検する、いわゆる CBM が推奨されている[13][15]。一方、ろ布の点検は、ラフタークレーンなどを使用して、ろ布およびリテーナーを BF 室内から取り出す作業が必要でコスト要因となるため、現場の状況に応じて実際には耐用年数が近づいた段階で機能診断に基づき更新時期を決定、或いは差圧による破れ確認のみで一定周期で交換する TBM を適用する場合も多い。また、中央制御室の分散型制御システム (DCS: Distributed Control System) では、リアルタイムの BF 差圧を計測 (サンプリング周期: 1～10sec 程度) し、帳票機能により日報やイベント報告 (記録間隔: 60min 程度で統計値のみ) のアナログ出力することは可能であるが、その出力データが CBM の判断材料と活かされることは多くない。こうした実態を踏まえて、本システムではサンプリング周期と記録間隔を 1sec としている。

本システムは、現状では BF 上部のマノメータを目視により毎日点検を行う保守・点検に対して、高サンプリング周期で差圧の変動を長期に遠隔監視可能なモニタリングシステムを構築した。

3.2.3 モニタリング結果

1) 送風機の振動モニタリング結果

(1) システムの特徴

3.2.2.1) に示した振動モニタリングシステムを、ロータリーキルン焼却炉の定期修理の間の稼働期間内において、ストーカ冷風送風機に設置した。約1ヶ月の連続測定により、3軸(X/Y/Zの3方向)の振動加速度データを取得した。これにFFT解析(Multiple Radix Fast Fourier Transform)を適用し、振幅が卓越する60Hz, 120Hz, 180Hzの3つの周波数成分を確認した。送風機の回転速度は $3,520 \text{ min}^{-1}$ であり、電動機の周波数60Hzとほぼ一致する。

この送風機は、許容値を上回る回転軸ずれ(ミスアライメント)を起こしやすい傾向があり、定期修理ごとに、軸芯出し(シャフトアライメント)により軸ずれの調整を行っている。シャフトアライメントには、高度で熟練した技能が必要とされるため、熟練者の作業時間をその都度投入している。振動加速度の振幅に最も変化の認められた120Hz成分の推移を図3-4に示す。定期修理での軸芯出し調整から1か月半経過するとx軸(送風機主軸に対し横方向)の振動加速度の振幅は定期修理直後の10倍のオーダーにまで拡大しており、軸ずれとの関係が伺われる。特に、年末の投入停止期間をはさみ、その前後で軸受温度も上昇し、軸受温度の管理値上限値(60°C)に近いレベルに達していることが分かる。その後も同様の振幅幅を継続する中、次の定期修理まで軸受部分を冷却しつつ稼働し、軸受温度は管理レベルを下回っている。

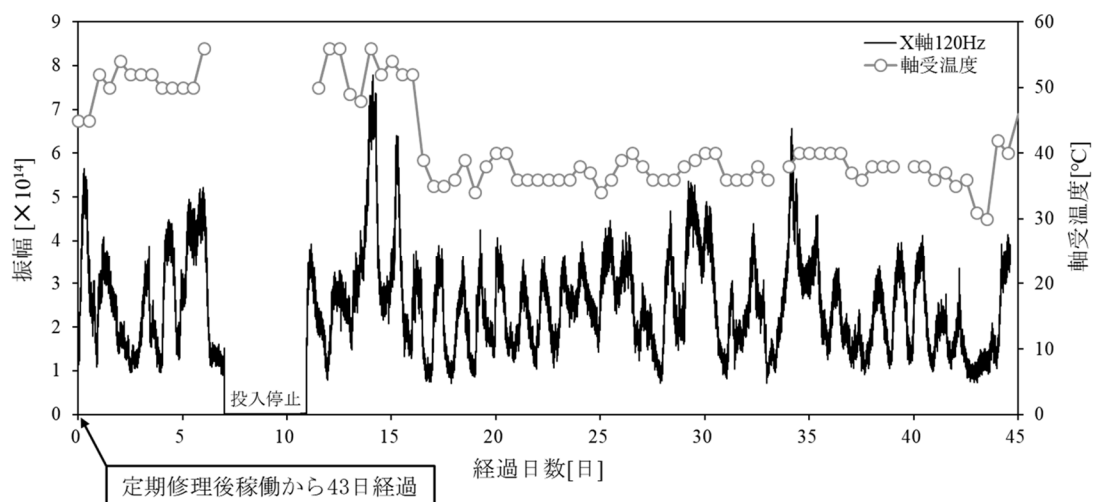


図3-4 振動加速度(主軸に対し横方向成分・周波数120Hz)振幅の推移

(2) 異常度の判定

振動加速度モニタリングの値をもとに異常度の判定を試みる。回転機械の振動データの変動は、環境条件の変化（外乱）に伴う正常範囲での緩やかな変動の中に瞬時的な値の逸脱（異常）を伴って推移するものと考えられる。そこで和田ら(2013) [16]の先行研究に従い、外乱の影響を表現できる非線形回帰計算として、ノンパラメトリックなカーネルベースの確率モデルである、ガウス過程回帰（GPR: Gaussian Process Regression）を用いてモニタリングの正常値を推計し、その推計値から一定の幅以上に逸脱する値を異常として検出する。GPR は、式(1)に示すとおり、入力 x を非線形高次元写像 ϕ により高次元化し、そのベクトルに対して線形回帰を計算する方法である。

$$y(x) = w^T \phi(x) \quad (1)$$

但し、 w は回帰係数ベクトルであり、GPR ではまず w の事前分布を、次式(2)に示す、平均 0 、分散 $\sigma^2 I$ の等方性 Gaussian と仮定する。

$$w \propto N(0, \sigma^2 I) \quad (2)$$

入力ベクトル x の学習データが N 個与えられているとき、行列 $\Phi = (\phi(x_1) \cdots \phi(x_n))^T$ と、各 x に対応する出力 $y_n = y(x_n)$ を要素にもつベクトル $y = (y_1 \cdots y_n)^T$ を考えると、式(1)より $y = \Phi w$ と表せる。

正常値が殆どである通常の観測値から異常を判定するため、ある時刻 t の観測値を y 、それより 1 時刻前の観測値と 1 時刻後の観測値を x としてガウス過程回帰を適用することにより正常値を推計する。さらに、式(3)に示すように、時刻 t の観測値に対して、その平均値との差の絶対値を標準偏差により除すことにより、観測値との乖離の大きさを正規化したものを、異常度と定義する。また、異常度は、標準得点の絶対値をとったものとみなすこともできる。

$$d(x_i) = |x_i - \mu_{GP}(x_i)| / \sigma_{GP}(x_i) \quad (3)$$

但し、 $d(x_i)$: 異常度、 $\mu_{GP}(x_i)$: 平均値、 $\sigma_{GP}(x_i)$: 標準偏差

GPR により得られた回帰曲線と異常度の推移を図 3-5 に示す。

モニタリングデータを用いることにより、時間とともに変化する環境条件の影響をふまえた上で、正常な推移からの乖離の大きい観測値を検出することが可能となる。

異常度は、通常の観測値の幅とみなされる標準偏差に対してある時点の観測値が何倍の変化を起こしているかを示す。つまり、異常度が高いということは正常な推移からのずれが大きく、通常とは異なる状態である可能性が高いことを示している。但し、現実的には、異常度がある値よりも大きい場合には異常と判定できるような閾値を、設備・機器の不具合や

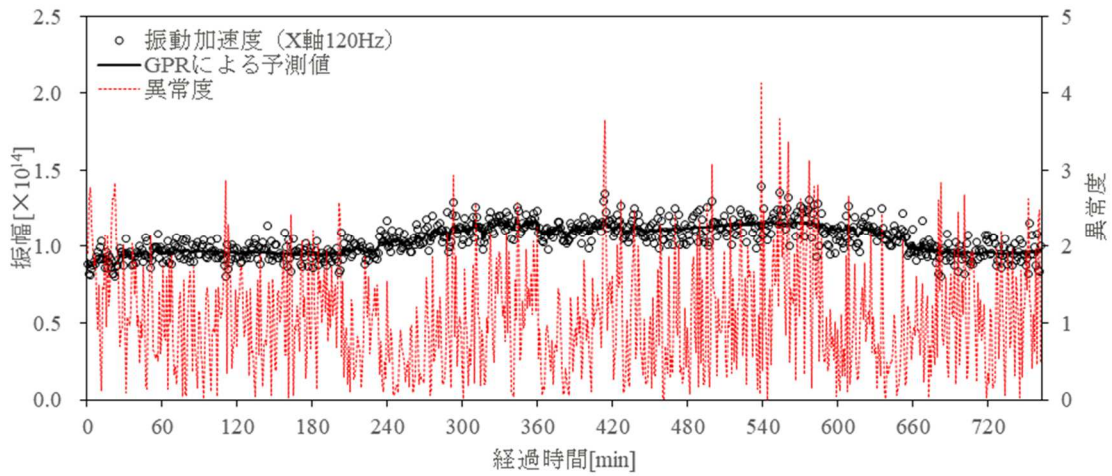


図 3-5 ガウス過程回帰を用いた異常度の判定（振動）

故障の状況を確認・整理しながら試行錯誤的に設定する必要がある。ここでは、閾値を設定するには至っていないことに留意する必要がある。

ここで、適切なサンプリング周期について考察する。ガウス過程回帰に適用するデータのサンプリング周期を元の 1min 間隔から、2min, 5min, 10min, 30min, 60min へと変化させた場合に、異常度がどう変化するかを分析した。結果を図 3-6 に示す。異常度 3 以上 4 未満 (<4) および 4 以上 (4=<) の割合については折れ線と右軸により示す。これによると、高サンプリング周期 1min のケースから周期が長くなるにつれて異常度 1 未満の割合が次第に増加した。異常度 3 以上 4 未満 (<4) の割合はサンプリング周期が長くなるにつれて変動し、30min および 60min 間隔のデータでは判定されていない。異常度 4 以上 (4=<) はサンプリング周期 2min 以上で判定されていない。このように異常度はサンプリング周期に影響を受けることから、予防保全に向けては一定頻度以上のサンプリング周期が必要とされることが示された。

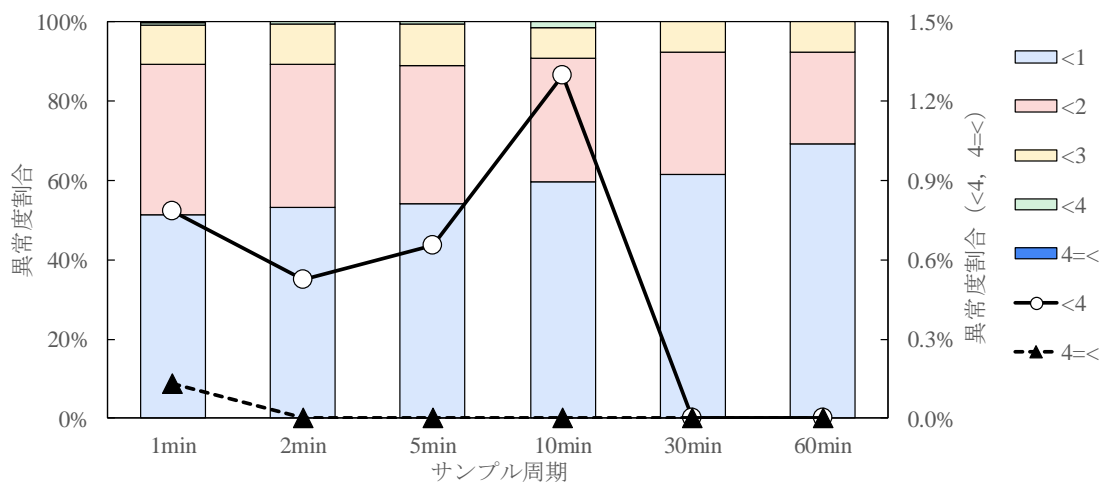


図 3-6 各サンプリング周期における振動異常度の割合

2) BFろ布の差圧モニタリング結果

(1) 差圧モニタリング結果

3.2.2 に示した差圧モニタリングシステムを、産業廃棄物焼却施設の BF に設置した。BF 差圧の推移を図 3-7 に示す。図中のプロットの多くは 1.0~2.0kPa 付近で推移しているが、パルスエアによるろ布に付着したダストの払い落としに伴い BF 差圧が低下する部分が生じる様子が示されている。

(2) 異常度の判定

振動加速度の異常度判定と同様の手法により、差圧計測値に対してガウス過程回帰を適用し、異常度の判定を行った。結果を図 3-8 に示す。

BF では、頻繁に断片的な差圧上昇（上昇幅 0.5kPa 未満）がみられるほか、約 77min 毎に行われる 3.5min 間の払い落とし（パルスジェット）の間に差圧低下（低下幅約 1.0kPa）が繰り返される。これにより GPR による推計値が瞬時的に大きく振れる部分があるが、全体として計測値を忠実にトレースできている。次に、差圧モニタリングにおけるサンプリング周期の影響について考察する。サンプリング周期を 1sec から 10sec, 1min, 10min, 60min と変化させた場合の BF 差圧異常度の割合を図 3-9 に示す。サンプリング周期を長くするにつれて異常度 1 未満 (<1) の割合が低下し、サンプリング周期 10min と 60min では元の 1sec の際の異常度とは大きく異なった異常度の分布となる BF 差圧モニタリングにおいても、予防保全に向けては一定頻度以上のサンプリング周期が必要であると考えられる。

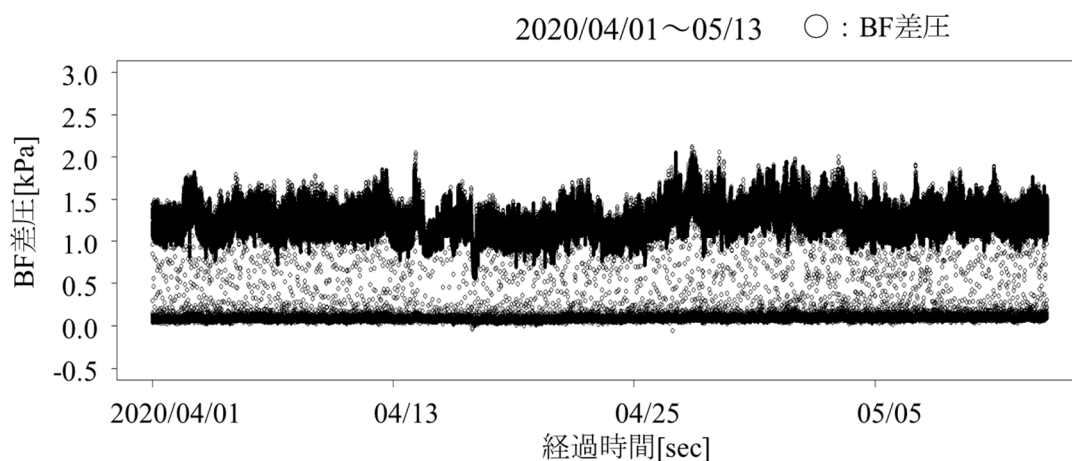


図 3-7 BF 差圧の推移

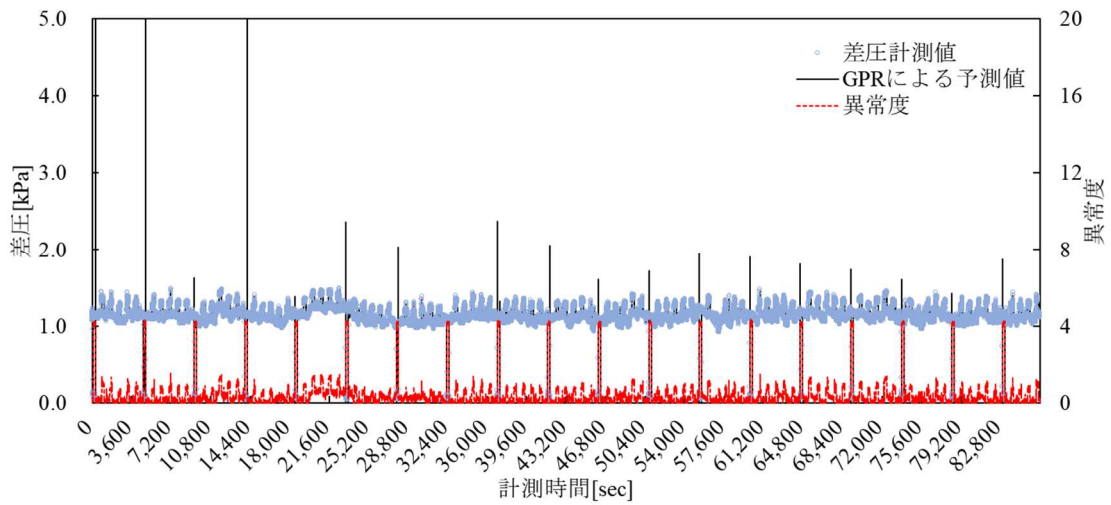


図 3-8 ガウス過程回帰を用いた異常度の判定 (BF 差圧)

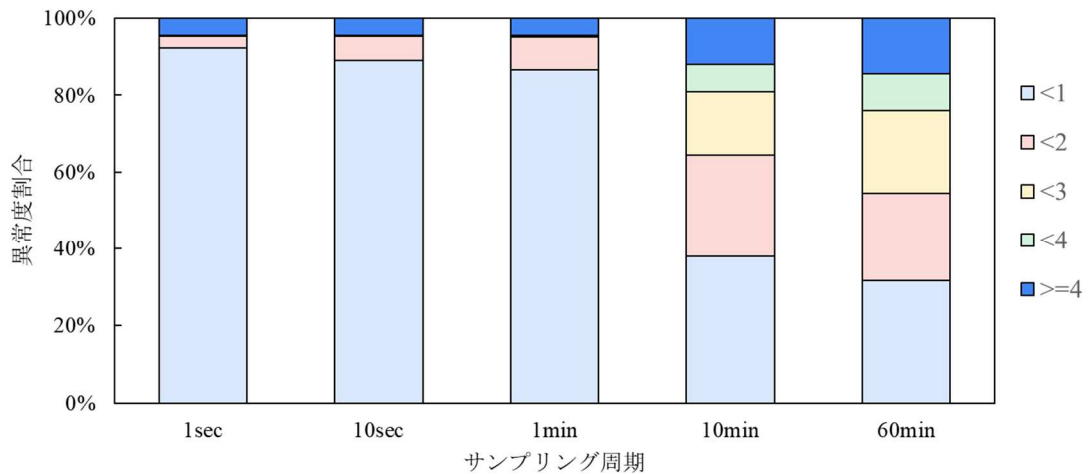


図 3-9 各サンプリング周期における BF 差圧異常度の割合

3.3 予防保全効果の推計

3.3.1 予防保全効果の推計方針

送風機の振動および BF ろ布の差圧モニタリングシステムを導入することにより得られる予防保全効果として、維持管理費用の削減効果を推計したうえで、費用対効果を把握・検証する。ここでは、導入することでどの程度のライフサイクルコスト削減効果（設備の耐用年数、BF ろ布交換の延伸）を実現すれば、費用対効果を見込むことができるかを定量的に明らかにすることを意図した推計である。そのため、異常度の判定結果がどの程度のライフサイクルコスト削減を図れるかについては、実証試験の継続的なデータ蓄積・分析による一般化が必要となる。この点は、本推計方法の限界となるので留意を要する。

3.3.2 送風機の予防保全効果

1) 対象機器

産業廃棄物焼却施設に装備されている回転機械は多種多様であるが、代表的な回転機械として送風機がある。山内(1988) [17]は、「送風機・圧縮機など回転や往復動によって流体を圧縮したり圧送する流体機械はプラントの心臓とも言うべき重要な機械」「これらの機械の性能や機能が損なわれたり低下することによってプラントは大きな損害を受けることになる」と述べている。山田ら(2021) [18]は産業廃棄物焼却施設において処理停止の原因箇所をアンケート調査しており、送風機などの通風設備もその原因箇所に含まれることを明らかにしている。送風機には燃焼室内に燃焼用空気を送り込むための押込送風機と、処理後の排ガスを煙突へ誘導するための誘引送風機は、炉形式に関わらず標準的な産業廃棄物焼却施設には全て装備されている。このほか、焼却炉上部に二次燃焼室を有する場合には二次送風機が配置される。山内(1988) [17]は調査結果をもとに回転機器の設備診断における最も関心の高い故障モードや、実際に送風機の故障で最も大きい現象が「異常振動」であることを示している。手引き[13]は、通風設備の機器別管理基準において、誘引送風機の軸受の診断項目として「異音・振動」が明記されている。以上をもとに本推計では誘引送風機を対象とする。

2) 推計方法

予防保全による維持管理費用の削減効果を推計する。送風機維持管理費用を式(4)と定義する。

$$MC = RC + OHC + TC \quad (4)$$

但し、*MC*:維持管理費用、*RC*:更新費用、*OHC*:オーバーホール費用、
TC:故障対応コスト 単位はいずれも万円/台・年

RC は一般廃棄物処理施設の基幹的設備改良や施設整備に関する報告書[19][20]をもとに0.6乗則法(能力ーコスト曲線法)に基づく積算技法[21]を適用して算定した設備費用を耐用年数で除して算定した。耐用年数は環境省[13]により10年と15年の平均値12.5年と設定した。*OHC*および*TC*は産業廃棄物処理事業者へのアンケート調査結果[18]をもとに中央値を設定した。

3) 推計結果

通常、時間基準保全で定期的な交換による保全を行っているのに対して、予防保全により、誘引送風機の交換時期の延命化を図る場合の効果を求めた結果を図3-10に示す。予防保全の誘引送風機の維持管理費用はプラントの処理規模により異なるが、例えば比較的小規模の100t/d炉で寿命が0.5%(半年程度)延びることによる年間の維持管理費用削減効果は8.1万円/年であり、1台の耐用期間全体では約111万円となる。一方で振動モニタリング装置の耐用年数を減価償却資産の耐用年数表に記載される測定機器の5年とすると、装置の更

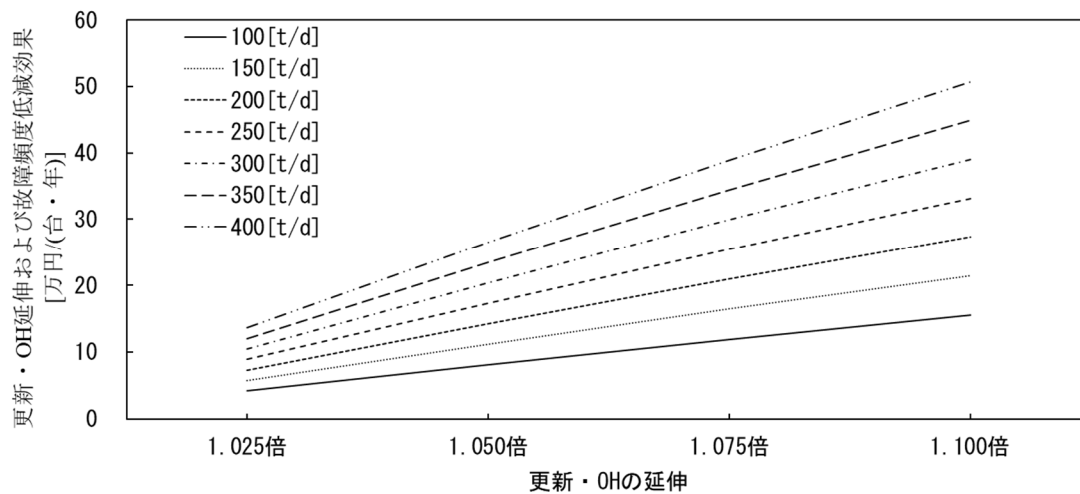


図 3-10 誘引送風機の耐用年数延伸による維持管理費用の削減効果

新とモバイルルータのデータ通信料を含めたモニタリング費用は耐用期間全体で約 95 万円であり、誘引送風機単体に適用するメリットを有するといえる。モニタリング費用の約 3 割をデータ通信料が占めているため、事業所のネットワークを用いる場合、費用対効果はさらに高くなる。また、耐用年数延伸による維持管理費用の削減効果は 200[t/d]炉では 100[t/d]炉の約 1.8 倍、400[t/d]炉では約 3.3 倍となるため、処理規模の大きい施設では費用対効果は高くなる。A/D 変換器の入力チャンネルには余裕があり 3 軸センサをさらに 4 台接続可能である。通常、誘引送風機周辺には押込送風機や二次送風機が配置されており、追加のセンサ設置費用のみで複数の機器に対して予防保全を図る効果は大きい。

3.3.3 BF ろ布の予防保全効果

1) 対象設備

BF のろ布を対象とする。一般に廃棄物焼却施設の排ガス処理における BF のろ布素材は、安価なガラス繊維が用いられる場合が多いが、投入廃棄物の組成や周辺地域への対応などによっても異なる。特に、協定に基づき排ガス規制を厳しく設定されるケースなどでは、安全側をみて耐熱性、耐薬品性、撥水性、剥離性に優れた PTFE が採用されることも多い。本推計では、2)に述べるとおり、ろ布素材を設定した積上げ計算ではないが、複数の処理施設の実績データをもとに費用関数を推計しているため、安価なガラス繊維と高価な PTFE 繊維との中間的な値を適用しているものと考えられる。

2) 推計方法

BF ろ布の予防保全による、ろ布交換費用の削減効果を推計する。ろ布交換は、ラフタークレーンなどを使用して、ろ布およびリテーナーを BF 室内から取り出す特殊作業を伴うため、BF 全室のろ布を一括して交換する場合が一般的である。ろ布本数は数百本単位となるため、一括取得に伴う規模効果もふまえた積算が妥当であり、また交換作業費用も伴うため、

単純にろ布本数に比例した費用とはならない。ここでは、一般廃棄物処理施設の基幹的設備改良、長寿命化計画、事業評価に関する資料[22][23][24][25]をもとに、処理規模とろ布交換費用との関係について傾向曲線によるあてはめを行い、実績に基づく費用関数を作成した。処理規模とBFろ布交換費用の関数を図3-11に示す。

3) 推計結果

この費用関数をもとに、BFろ布の耐用年数を延伸することによる維持費用削減効果を推計した結果を図3-12に示す。

予防保全によりろ布交換を現状の4年から半年（定期修理の間の稼働期間2回分）分延伸出来た場合の維持費用削減効果は100[t/d]炉で約400万円となる。デジタル差圧計やデータロガーなどの測定装置の耐用年数は、振動の場合と同様、減価償却資産の耐用年数に基づき5年とすると4年半での装置の更新はなく、4年半のBFろ布のモニタリング費用は、装置の設置とデータ通信料を含めて全体で約42万円ゆえ、ろ布に適用するメリットは大きいといえる。延伸3カ月（定期修理の間の稼働期間1回分）においても十分な費用対効果を有すると考えられる。さらに処理規模が200[t/d]炉、400[t/d]炉へと拡大した際には、同等のモニタリング費用に対して維持管理費用削減効果はそれぞれ約1.6倍、約2.2倍となり、より大きな削減効果を得る。

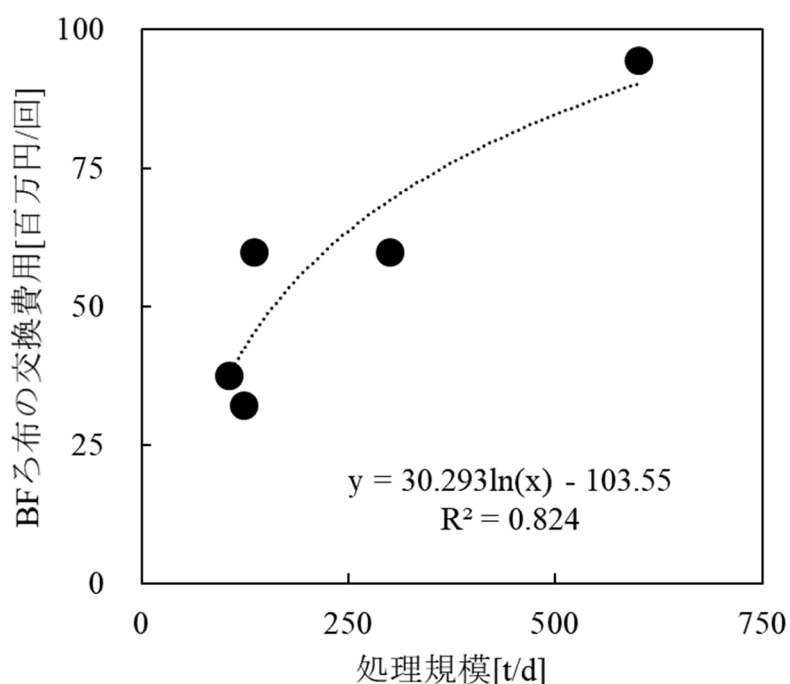


図3-11 処理規模とBFろ布交換費用の関数

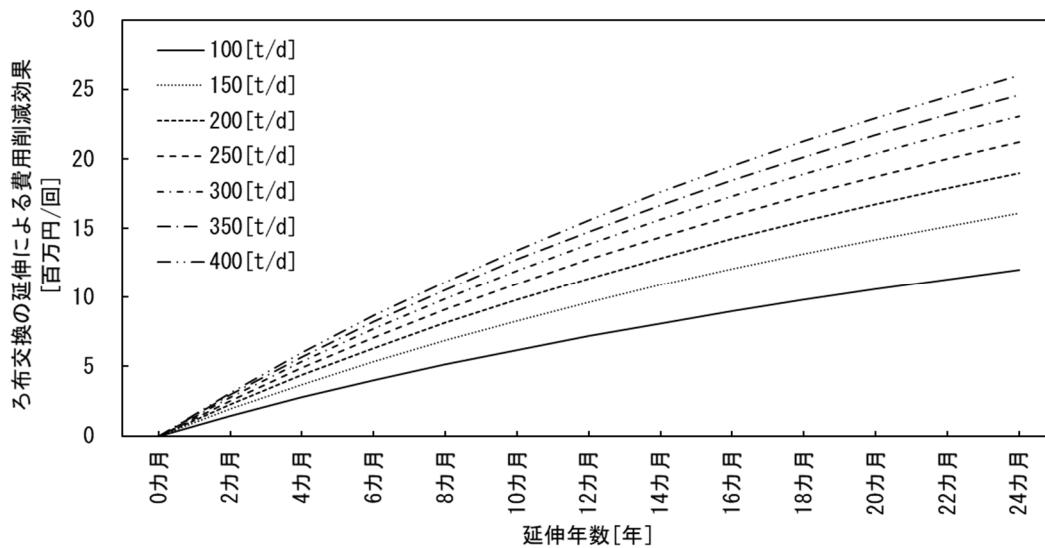


図 3-12 BF ろ布の耐用年数延伸による維持費用削減効果

3.4 まとめ

本章では、知見の少ない ICT を用いた機器保全および効果の推計のために、送風機の振動加速度および BF 差圧についてデータの計測、処理、記録、遠隔転送について一連の機能を有するモニタリングシステムを構築し、産業廃棄物焼却施設における実証を行った。

取得されたデータをもとに非線形回帰分析手法の 1 つである GPR を用いて正常値を推定し、計測値との乖離度合いを異常度として判定する分析を行い、一定のサンプリング周期が異常度判定の精度を担保することを示した。

さらに、処理規模に対応した送風機と BF ろ布の維持管理費用を推計して、機材の耐用年数を延伸することによる維持管理費用の削減効果を求めた。処理規模 100[t/d] で産業廃棄物焼却施設において、誘引送風機 1 台の耐用年数を半年延伸することにより約 16 万円の維持管理費用が削減でき、BF のろ布交換を半年延伸することにより約 358 万円の維持管理費用が削減でき、モニタリング機器を適用するメリットを有するといえる。特に BF のろ布に適用するメリットが大きいことを示せた。

産業廃棄物処理施設における ICT を用いた機器保全および効果の推計に知見が少ない中、本章の実証によりモニタリングシステムの有効性、導入の可能性が示唆された。

第3章 参考文献

- [1] 国土交通省『第5次社会資本整備重点計画』, 2021年, <https://www.mlit.go.jp/report/press/content/001406367.pdf>, (2022.9.28 閲覧).
- [2] 竹田航哉, 山本浩, 青木勇, 富岡修一, 橋本隆史, 川端馨, “ごみ処理施設における ICT, AI 技術等の活用事例について,” 『廃棄物資源循環学会誌』, Vol.29, No.3, pp.228-236, 2018年.
- [3] 高島義明, 今村文典, 鬼生田浩一, 井上芳郎, 寺尾康, “ごみ焼却炉の運転エキスパートシステム,” 『人工知能学会知識ベースシステム研究会要旨集』, pp.121-127, 1990年.
- [4] 大西巍, “都市ごみ焼却プラントのファジィ制御,” 『計測自動制御学会論文集』, Vol.27, No.3, pp.326-332, 1991年.
- [5] 小野秀隆, “ファジィ理論を応用したごみ焼却プラント異常診断システム,” 『日本機械学会論文集 C』, 1992年.
- [6] 藤本祐希, 井藤宗親, 池田広司, “AI・ICT を活用したごみ処理施設の高度化に関する取り組み,” 『環境技術』, Vol.49, No.4, pp.180-183, 2020年.
- [7] 近藤守, “AI・ICT を活用したごみ焼却発電施設の最適運転管理システムの開発,” 『環境技術』, Vol.49, No.4, pp.200-204, 2020年.
- [8] 志田雅昭, “IoT を活用した音や振動による機械・装置の予兆診断,” 『紙パ技協誌』, Vol.72, No.12, pp.1370-1373, 2018年.
- [9] 小岩真之, 大沼康宏, 谷山敬一, 高林祐也, 切川卓也, “これからの循環型社会と情報技術,” 『廃棄物資源循環学会誌』, Vol.29, No.3, pp.188-194, 2018年.
- [10] 千々岩利恭, 大岩浩和, “クラウドと無線振動センサを組み合わせた保全高度化への取り組み,” 『令和2年度水道研究発表会講演集』, pp.536-537, 2020年.
- [11] 松島, “Raspberry Pi を用いた LTE 通信対応データロガーの製作,” 『九州大学応用力学研究所技術室報告』, Vol.3, pp.27-31, 2021年.
- [12] 菊地由佳, 斎藤亮太, 石原孟, “故障復旧費とダウンタイムの不確かさを考慮した維持管理費の評価,” 『風力エネルギー利用シンポジウム』, Vol.38, pp.55-58, 2016年.
- [13] 環境省, 『廃棄物処理施設長寿命化計画策定の手引き(ごみ焼却施設編)令和3年3月改訂』, 2021年, https://www.env.go.jp/recycle/waste/3r_network/7_misc/gl-ple_prov.pdf, (2022.9.28 閲覧).
- [14] 日本プラントメンテナンス協会(編), 『設備診断技術』, 日本能率協会, 1990年, 216p.
- [15] 一般財団法人 日本環境衛生センター, 『廃棄物処理施設保守・点検の実際—ごみ焼却編』, 2014年, 330p.
- [16] 和田俊和, 尾崎晋作, 前田俊二, 渋谷久恵, “Gaussian Process Regression に基づく時系列データの異常モニタリング,” 『電子情報通信学会論文誌 D』, Vol.J96-D, No.12, pp.3068-3078, 2013年.
- [17] 山内真吾, “送風機・圧縮機の故障診断と予防保全,” 『ターボ機械』, Vol.16, No.12, pp.68

4-691, 1988 年.

- [18] 山田崇雄, 中尾彰文, 吉田登, “産業廃棄物焼却施設におけるエネルギー利用及び ICT・AI の導入意向に関する調査分析,” 『日本地域学会 第 58 回 (2021 年) 年次大会学術発表論文集』, 2021 年, http://jsrsai.jp/Annual_Meeting/PROG_58/proceedings2021.pdf, (2022.8.18 閲覧).
- [19] 久喜宮代, 『衛生組合八甫清掃センター基幹的設備改良事業に係る費用対効果分析結果報告書』, 2012 年
- [20] 十勝環境複合事務組合, 『一般廃棄物中間処理施設整備検討報告書』, 2017 年, <http://tokachiken.hokkaido.jp/pdf/effort/effort01.pdf>, (2022.8.18 閲覧).
- [21] 環境省, 『廃棄物処理施設建設工事等の入札・契約の手引き』, 2005 年, <https://www.env.go.jp/press/files/jp/8285.pdf>, (2022.8.18 閲覧).
- [22] 熊取町, 『熊取町環境センター長寿命化総合計画』, 2020 年, <https://www.town.kumatori.lg.jp/material/files/group/16/83175367.pdf>, (2022.8.18 閲覧).
- [23] 犬山市, 『犬山市一般廃棄物処理施設長寿命化総合計画 (都市美化センター)』, 2021 年, https://www.city.inuyama.aichi.jp/_res/projects/default_project/_page_/001/007/714/1.pdf, (2022.8.18 閲覧).
- [24] 尾張東部衛生組合, 『張東部衛生組合晴丘センターごみ焼却施設長寿命化総合計画書』, 2018 年, <http://www.haruoka-center.com/08kohyo/shiryo/kohyo180530.pdf>, (2022.8.18 閲覧).
- [25] 札幌市, “バグフィルタろ布交換事業費,” 『札幌市事業評価調書』, 2018 年, <http://www3.city.sapporo.jp/somu/hyoka/torikumi22/pdf/20091035107.pdf>, (2022.8.18 閲覧).

第4章 産業廃棄物焼却施設における地域課題解決のための有効活用に関する実態調査

4.1 はじめに

産業廃棄物処理施設は、廃棄物の適正処理による生活環境の保全および公衆衛生の向上を図る上で必要な施設であり、循環型社会の形成を目指すうえで欠かすことができないインフラである。広い意味で捉え直すと、産業廃棄物の収集運搬・処分に関わる業自体が人々の生活基盤や産業活動を支える社会インフラともいえ、その社会的な位置づけは年々重要になっている。しかし、産業廃棄物処理事業者を取り巻く環境はこれまで以上に厳しい。人口減少・高齢化による経済規模の縮小やそれに伴う地方財政の悪化を背景とする社会経済情勢の急速な変化によって、業界内での競争が過熱し経営環境が激変する時代に突入している。

こうした社会情勢の変化を踏まえつつ社会的な要請に対応するため、2014年より全国産業廃棄物連合会[1]が業界の将来ビジョンの検討を開始した。その後、環境省によって2015年より産業廃棄物処理業の振興方策の検討[2]がなされ、2017年には産業廃棄物処理業の振興方策に関する提言[3]が取りまとめられた。提言では、産業廃棄物処理業が我が国の社会経済システムに不可欠なインフラとして、地域と共生¹しながら持続的な発展を図るための方向性として「成長に向けた事業戦略」と、「底上げに向けた事業戦略」に大別され、方向性ごとに3つの戦略²が示された。この取組領域のなかでも「戦略4：地域との共生」は、産業廃棄物処理業にとっての成立要件であるとともに、企業活動を底上げするための戦略である。シルバー・障がい者雇用促進、施設などの情報公開、地域経済発展への寄与、地域の災害廃棄物処理支援（一般廃棄物処理の受託を含む）が具体的な戦略として示されている。

産業廃棄物処理業の地域の廃棄物処理支援の実態を社会に発信することは、地域と共生しながらの持続的な発展につながると言えるが、そうした実態を明らかとした調査報告や既往研究は多いとは言えない。

また、提言によると、産業廃棄物処理業界が資源循環や再生可能エネルギー供給を担う環境ビジネスとして確立すべきなのは明らかとしている。それは、あらゆる産業が排出する廃棄物、循環資源の再資源・処理の受け皿であり、そのプロセスにおける低炭素化を実現するための主導権を握っているからである。その主導権をもつ産業廃棄物処理業界が、「社会から確実な信頼を得て、廃棄物から資源とエネルギーを作ることを通じて、持続可能な社会に

¹ 産業廃棄物処理業そのものが、国内外での適地生産による生産性向上が可能な製造業などとは異なり、周辺住民などから理解を得ながら共生を図るべき地域産業であり、地域との共生は「業」としての成立要件と言える。

² 6つの取組領域は、「成長」に向けた事業戦略（戦略1：事業基盤の強化・拡大、戦略2：企業連携・業務提携・M&A、戦略3：マーケット拡大）、「底上げ」に向けた事業戦略（戦略4：地域との共生、戦略5：人材確保・育成、戦略6：CSR活動）である。

貢献できる業界」を目指す将来像を描き、その将来像を実現するために「全国産業廃棄物連合会 低炭素化実行計画」[4]で目標を掲げ、その目標達成に向けて取り組みを強化している。

しかし、1.3でも述べた通り、産業廃棄物処理事業者のデータを一貫性を持って集計することは容易でない。そこで本章では、産業廃棄物処理事業者が保有する焼却施設における運転状況と一般廃棄物・災害廃棄物処理の支援実態および、エネルギー回収の実態を明らかにする。

4.2 既往関連研究

吉川ら(2010)[5]は、発電・熱利用を行う産業廃棄物焼却施設を対象にアンケート調査を実施し、施設の稼働状況や発電・余熱利用の実態を明らかにしている。谷川ら(2015)[6]は、全国の111都道府県・政令都市に対してアンケート調査を実施し、産業廃棄物処理事業者が保有する焼却施設について、炉数、炉形式、処理規模、処理量、余熱利用などの現状を全国実態調査から明らかにしている。その後、廃棄物資源循環学会廃棄物焼却研究部会(2018)[7]では、環境省の統計データ(2016[8], 2017[9])や、谷川ら(2015)[6]の調査結果を用いて産業廃棄物と一般廃棄物の処理状況を整理したうえで、一般廃棄物処理を産業廃棄物処理事業者に委託するいくつかの事例を取り上げて紹介し、メリット・デメリットを考察している。さらに、掃部(2020)[10]は環境省の2015統計データをもとに、産業廃棄物焼却施設における炉形式、排ガス処理設備の種類、余熱利用の状況、発電能力、使用開始年度などを整理し、一般廃棄物焼却施設と比較している。また、大下(2020)[11]も掃部(2020)[10]と同様に環境省の2015統計データをもとに、産業廃棄物焼却施設データベースを構築したうえで、一般廃棄物焼却施設または産業廃棄物焼却施設での廃棄物混合焼却ポテンシャルを複数のシナリオ設定と制約条件を組み合わせて試算している。また、日本廃棄物コンサルタント協会(2017)[12]は、一般廃棄物と産業廃棄物の共同処理を進めるうえで、行政区域内での自区内処理の見直し、建設用地周辺の理解、産業廃棄物を受け入れることによる利益確保の意識の醸成などを課題とし、その課題の解決方法が示されている。

これらの基礎情報データや既往研究では、産業廃棄物焼却施設での一般廃棄物・災害廃棄物の受け入れ実績を定性的に把握することは可能であるが、どのような炉形式の焼却施設がどの程度の廃棄物を受け入れているかなど、詳細な部分に踏み込んだ処理実態は明らかにされていない。また、環境省の統計データ(2016[8], 2017[9])を確認すると、近年、産業廃棄物焼却施設数は減少傾向にあり、谷川らの調査(2015)[6]以降、産業廃棄物焼却施設の実態調査がなされておらず、情報アップデートの観点からも確認する必要がある。

4.3 アンケート調査の概要とその結果

4.3.1 アンケート調査方法の概要

アンケート調査計画の立案当初、紙のアンケート調査票を用いることを想定していたが、筆者自身がこれまでこの分野で実施したアンケート調査では、回答率が低くなる傾向を経験しているため、本アンケート調査前にプレアンケートをいくつかの民間事業者を実施した。そこで紙媒体よりも Web 上での回答の方が応えやすいとの意見を頂いたため、そうした現場の声を反映させて少しでも回答率を向上させるために、Web アンケートとして再設計した。また、Web アンケートへの誘導も QR コードを用いアンケート回答のご担当者への負担軽減を試みた。

Web アンケート調査方法の概要を表 4-1 に示す。

公益財団法人 産業廃棄物処理事業振興財団が提供する「さんぱいくん」[13]の優良認定業者検索（2020 年 1 月時点）で、優良産廃処理業者認定を受けている 1,305 事業者のうち焼却施設を保有する 176 事業者（北海道：1，東北：15，関東：59，中部：33，近畿：18，中国：18，四国：9，九州：23）を対象とし、炉形式、処理規模、一般廃棄物処理業の許可の有無、一般廃棄物処理委託および災害廃棄物処理委託実績の有無などについて、Google Forms を使用した Web アンケートを実施した。集計方法は、北海道大学廃棄物処分工学研究室が一般廃棄物焼却施設を対象として分析した事例[14][15]を参考に、地域別・炉形式別・規模別に実施した。

さらに、地域や処理規模などの処理施設の属性による変数の差異に関する検証のため、変数間の独立性の検定に用いられるカイ 2 乗検定を用いる。検定手法としては一般に t 検定とカイ 2 乗検定が用いられるが、本分析で比較する変数データは連続データではなく名義尺度のような質的データであるため、t 検定ではなくカイ 2 乗検定を用いる。カイ 2 乗検定は、名義尺度から得られた質的データ（異なる属性に分類するもの：例えば、性別・血液型など）を何かの要因で分類しその割合の差を比較できるので、こうした差が有意であるかを検証することができる[16][17]。仮説検証の具体的な方法として、一般廃棄物処理許可の保有、一般廃棄物処理の実績、災害廃棄物処理の実績について、地域・炉形式・規模の各属性に即して抽出された異なる 2 群の標本における比率（標本における許可の保有割合、一般廃棄物処理の実績を有する割合、災害廃棄物処理の実績を有する割合）について、カイ 2 乗検定により有意な差があるかどうかを検定する。

表 4-1 Web アンケート調査方法の概要

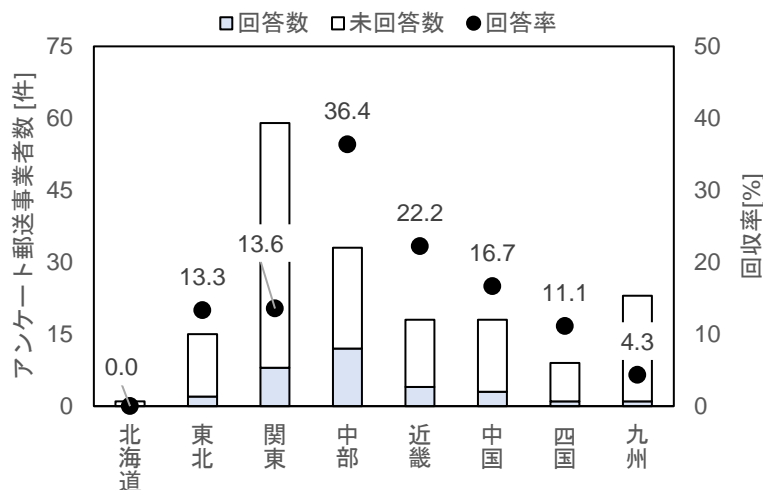
調査対象	公益財団法人 産業廃棄物処理事業振興財団が提供する「さんぱいくん」の優良認定業者検索[13]で、優良な産業廃棄物処理業者*として検索され、かつ、焼却施設を有する事業者を調査対象とした。	
対象事業者数	176 事業者	
調査方法	事業者にアンケート調査の願いを郵送**し、Google Forms にて回答を依頼	
調査期間	2020 年 1 月～2 月	
質問項目	施設概要	炉形式，処理規模，受入廃棄物など
	一般廃棄物 災害廃棄物処理	一般廃棄物処理業の許可の状況，一般廃棄物処理委託および災害廃棄物処理委託実績の状況
	計画条件	土地利用状況
	エネルギー回収	発電，余熱利用状況
有効回答数 (回答率)	31 事業者 (17.6%)	

都道府県・政令市において、廃棄物処理法に基づき優れた能力と実績を有する産廃処理業者として認定され、環境省に報告された事業者

**郵送先は、法人の場合は事業者の事務所・事業場の所在地となるため、焼却施設の設置場所とは異なる。そのため、後述する地域ブロック分類に基づいて再集計した結果の解釈にあたってはご留意されたい。

4.3.2 アンケート調査結果の概要

Web アンケート調査の回収率を図 4-1 に示す。アンケート調査願いを郵送した 176 事業者のうち 31 事業者から回答が得られた。回答率は 17.6% である。地域ブロックごとに回答率を確認すると、もっとも回答率が高い地域ブロックは中部の 36.4% で、続いて近畿の 21.2%、中国の 16.7%、関東の 13.6%、東北の 13.3%、四国の 11.1%、九州の 4.3%、北海道の 0.0% である。



*地域ブロックは表 4-2 に示す分類で行った。

図 4-1 Web アンケート調査の回収率

表 4-2 設定した地域ブロック

ブロック	都道府県
北海道	北海道
東北	青森県, 岩手県, 宮城県, 秋田県, 山形県, 福島県
関東	茨城県, 栃木県, 群馬県, 埼玉県, 千葉県, 東京都, 神奈川県, 新潟県, 山梨県, 静岡県
中部	富山県, 石川県, 福井県, 長野県, 岐阜県, 愛知県, 三重県, <u>静岡県</u>
近畿	<u>滋賀県</u> , 京都府, 大阪府, 兵庫県, 奈良県, 和歌山県
中国	鳥取県, 島根県, 岡山県, 広島県, 山口県
四国	徳島県, 香川県, 愛媛県, 高知県
九州	福岡県, 佐賀県, 長崎県, 熊本県, 大分県, 宮崎県, 鹿児島県, 沖縄県

*地域の災害廃棄物対策を強化すべく地方環境事務所が中心となって設置された 8 箇所の地域ブロック協議会の基本的な分類[18]に従った。

便宜上、本研究ではこのような分類をしたが、静岡県（関東ブロック、中部ブロック）と、滋賀県（近畿ブロック、中部ブロック）は、2 つの地域ブロック協議会に参加している。

4.4 アンケート結果の詳細

4.4.1 焼却施設の概要に関するアンケート調査の結果

保有炉数のアンケート調査結果を図 4-2 に示す。1 炉構成がもっとも多く 71%，続いて 2 炉構成が 22.6%でその合計は 94.2%となる。3 炉と 4 炉はそれぞれ 3.2%であった。

炉形式のアンケート調査結果を図 4-3 に示す。ロータリーキルン&ストーカ炉が 40%と最も多く採用されている。続いて、固定床炉の 19%で、ロータリーキルン炉の 16%，乾留ガス化燃焼炉の 9%，ストーカ炉の 7%，多段炉の 5%，流動床炉の 2%の順となる。掃部（2020）[10]の報告と比較すると、その傾向は異なる。この報告では、固定床炉：35.8%，その他：16.8%，ロータリーキルン：14.8%，流動床炉：7.9%，ストーカ炉：7.7%，乾留ガス化燃焼：6.7%，ロータリーキルン&ストーカ炉：6.0%，廃液蒸発：2.5%，多段炉：1.9%となる。この差は、アンケートを送付した優良な産業廃棄物処理事業者を母集団を対象した影響が大きいものと思われる。

竣工年のアンケート調査結果を図 4-4 に示す。49%が 1990 年～2000 年に竣工した焼却施設でもっとも多い。2000 年以降に竣工した焼却施設は 33%で、1990 年以前に竣工した焼却施設は 13%であることがわかった。各地域で 1990 年前後よりコンスタントに施設整備されていることも明らかとなった。

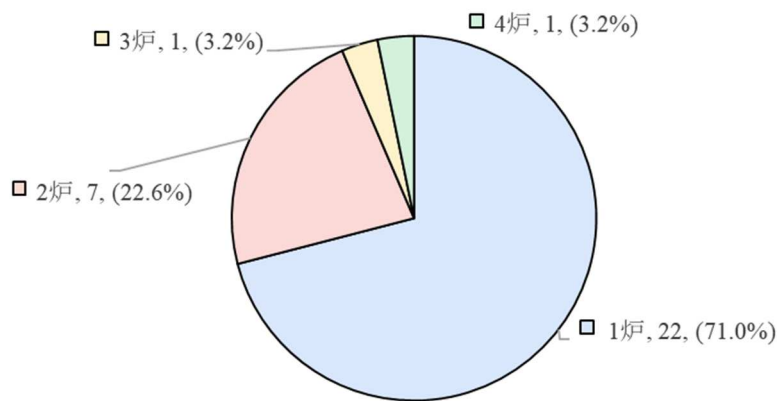


図 4-2 保有炉数

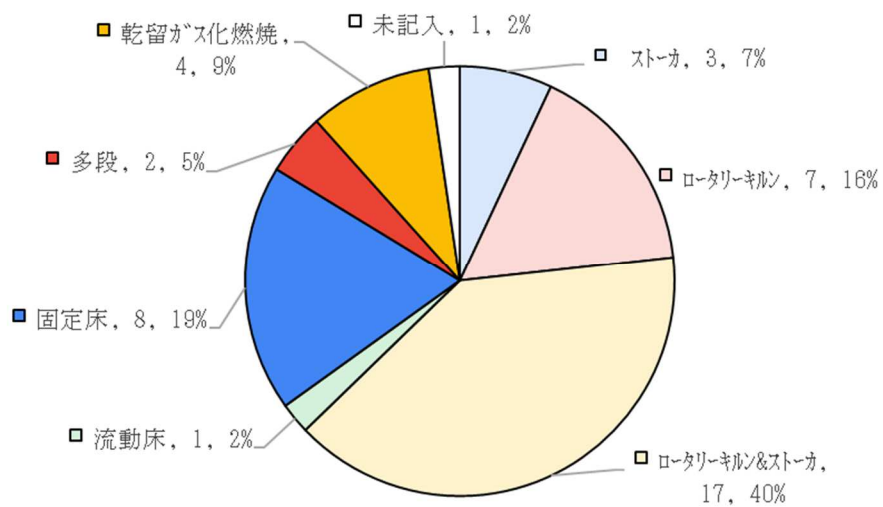


図 4-3 炉形式

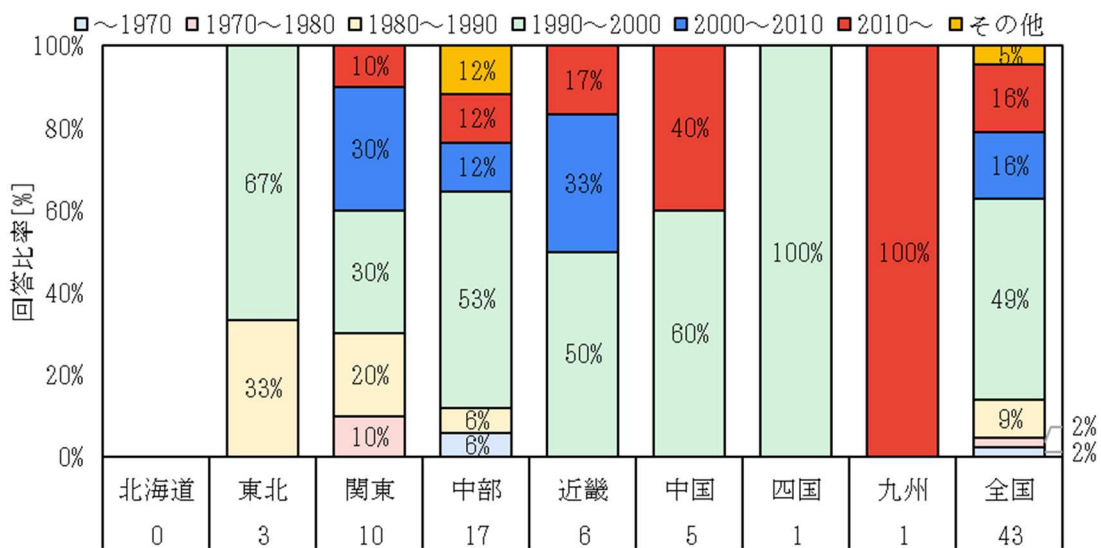


図 4-4 竣工年

プラント稼働期間（予定）のアンケート調査結果を図 4-5 に示す。30 年以上の稼働を予定する事業者が多いことが確認された。地域別での 30 年以上の稼働の予定は、東北ブロックで 67%，関東ブロックで 50%，中部ブロックで 65%，近畿ブロックで 83%，中国ブロックで 60%，四国ブロックで 100% となっており、九州ブロックだけが 30 年以上の稼働の予定を確認できなかった。

処理規模のアンケート調査結果を図 4-6 および図 4-7 に示す。100[t/d]未満の施設が 58%（50[t/d]未満：37%，50～100[t/d]：21%）であることがわかった。ロータリーキルン炉，ロータリーキルン&ストーカ炉，流動床炉は，その他の炉形式と比較して処理規模が大きい傾向にあることが確認された。地域別での 100[t/d]未満の施設の割合は，九州ブロックが 100%，中国ブロックが 40%，近畿ブロックが 67%，中部ブロックが 72%，東北ブロックが 33% であることがわかった。また，200[t/d]以上の施設の割合は，中国ブロックが 40%，中部ブロックが 12%，関東ブロックが 10%，東北ブロックが 33% であることがわかった。

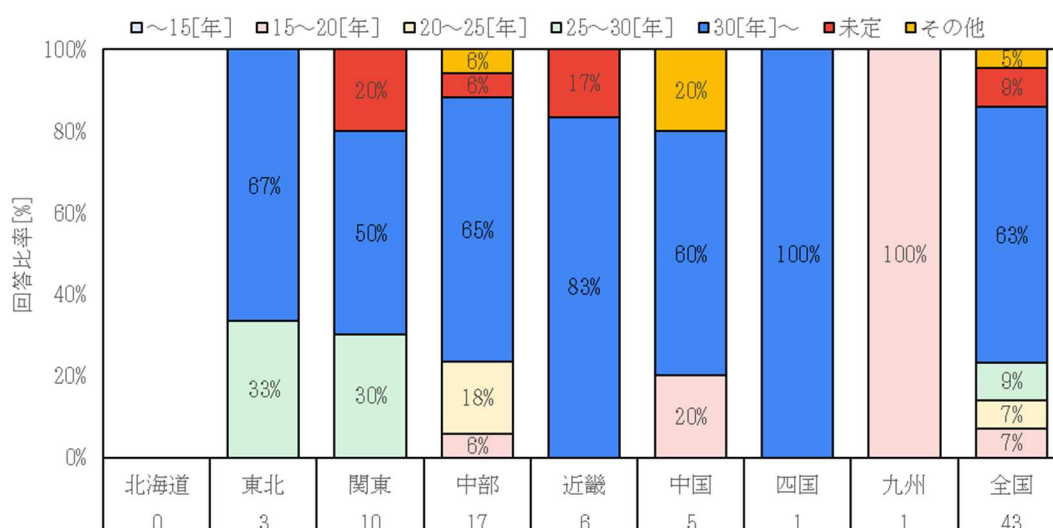


図 4-5 プラント稼働期間（予定）

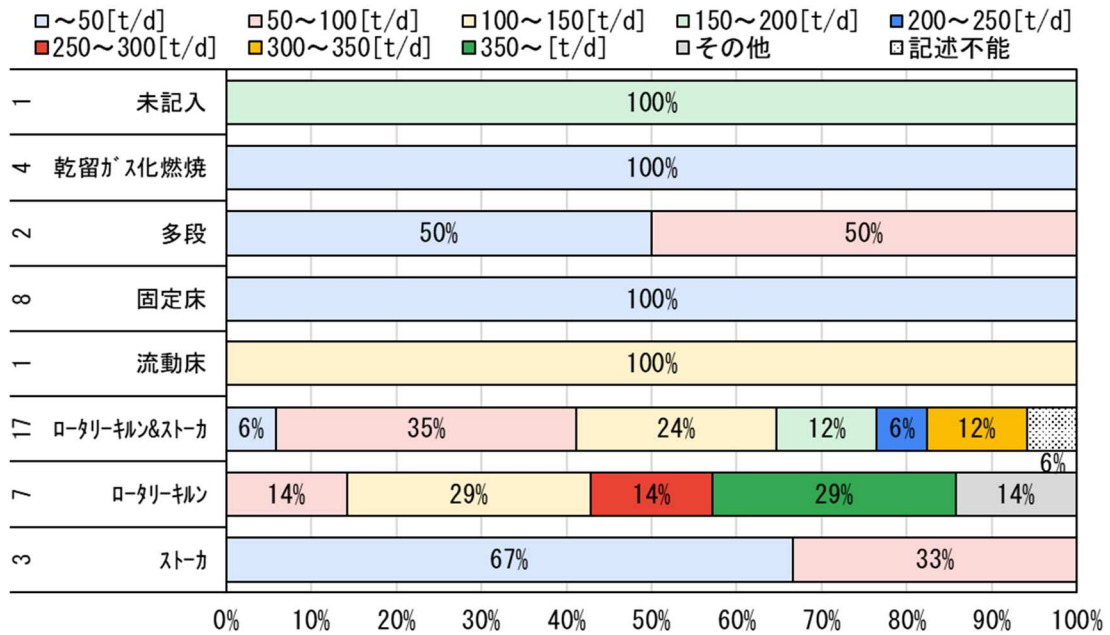


図 4-6 炉形式ごとの処理規模

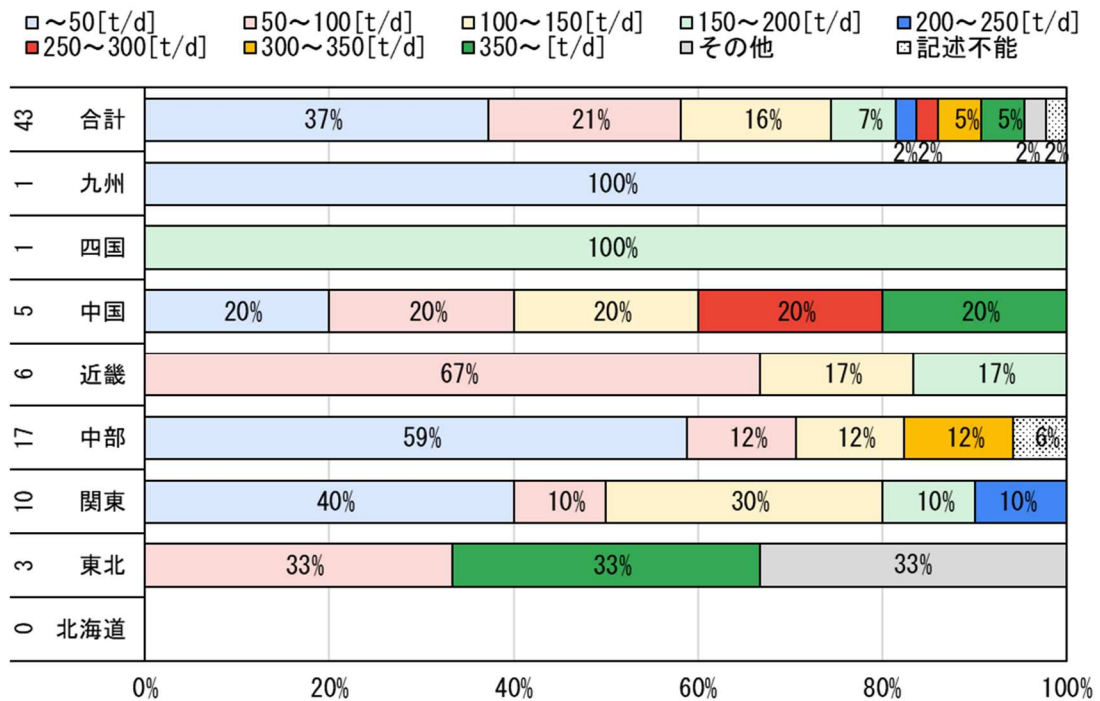


図 4-7 地域ブロック別における施設処理規模

白煙防止装置のアンケート調査結果を図 4-8 に示す。白煙防止装置を設置していない施設が 74%であった。ストーカ炉，乾留ガス化燃焼炉，多段炉で白煙防止を設置する施設は確認されなかった。

汚水の噴霧処理設備のアンケート調査結果を図 4-9 に示す。汚水の噴霧処理設備を設置する施設が 58%を占めていた。流動床炉，乾留ガス化燃焼炉で汚水の噴霧処理設備を設置する施設は確認されなかった。

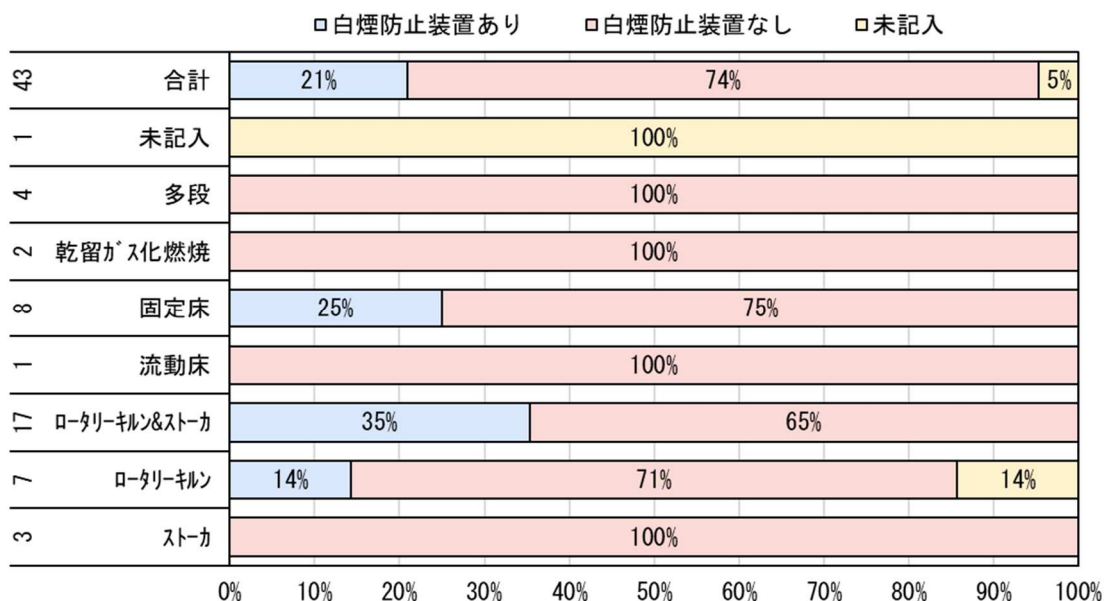


図 4-8 白煙防止装置の設置状況

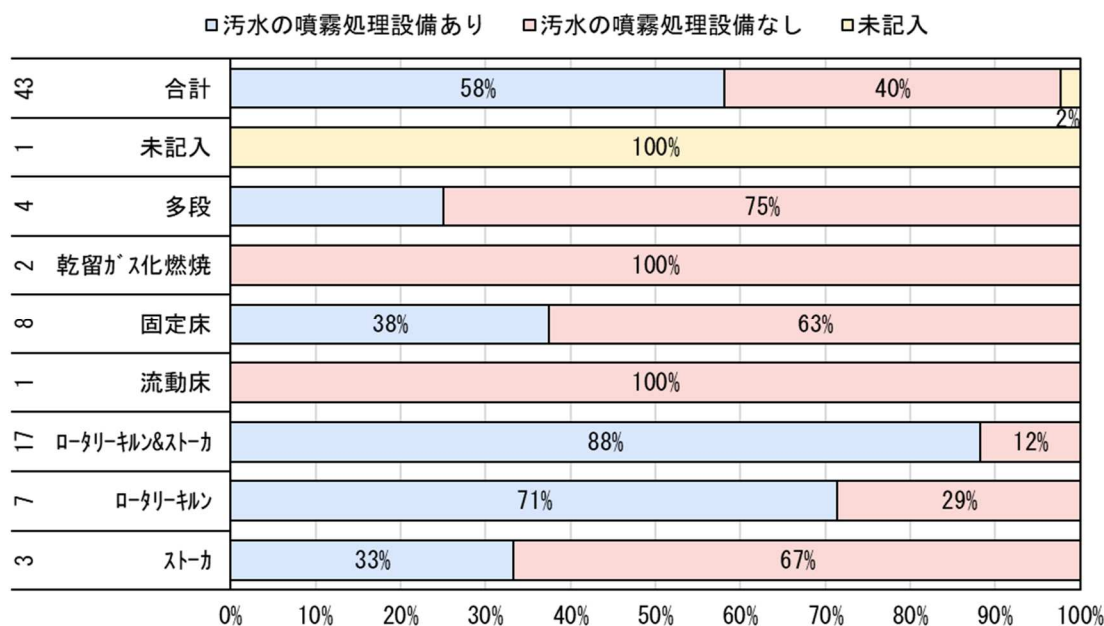


図 4-9 汚水の噴霧処理設備の設置状況

排ガス処理設備の種類に関するアンケート調査結果を図4-10に示す。バグフィルタを設置する施設が67%を占めていた。ロータリーキルン&ストーカ炉、ストーカ炉、多段炉は94%以上がバグフィルタを設置していることが確認された。

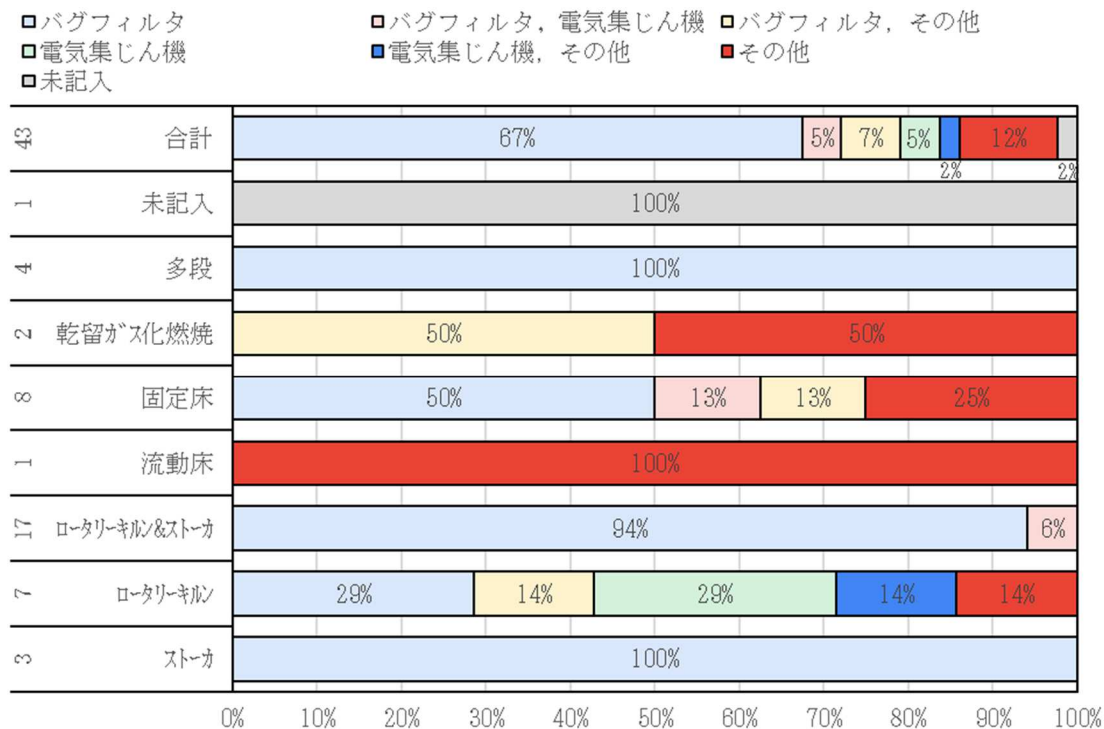


図4-10 排ガス処理設備の種類

産業廃棄物の受け入れ状況に関するアンケート調査結果を表 4-3 に示す。炉形式に問わず多種多様な産業廃棄物を受け入れていることが確認された。特にロータリーキルン炉とロータリーキルン&ストーカ炉はその傾向が顕著である。また、流動床炉では汚泥、廃プラスチック類、紙くず、木くずのみを受け入れており、その他の炉形式と比較すると限定的な受け入れ体制であることが確認された。

表 4-3 産業廃棄物処理対象物

単位：%

分類	項目	ストーカ	ロータリーキルン	ロータリーキルン&ストーカ	流動床	固定床	多段	乾留ガス化燃焼	未記入	合計
産業廃棄物	汚泥	0.0	7.7	7.7	25.0	8.3	16.7	11.8	33.3	8.5
	燃え殻	0.0	6.4	2.6	0.0	5.6	8.3	0.0	0.0	3.5
	廃酸	8.3	7.7	7.1	0.0	5.6	0.0	8.8	0.0	6.9
	廃アルカリ	8.3	7.7	7.1	0.0	5.6	0.0	11.8	0.0	7.2
	廃プラスチック類	16.7	6.4	8.7	25.0	8.3	16.7	11.8	0.0	9.1
	紙くず	16.7	6.4	8.7	25.0	16.7	8.3	8.8	33.3	9.6
	木くず	25.0	6.4	8.7	25.0	16.7	8.3	8.8	33.3	9.9
	動植物性残さ	8.3	9.0	8.7	0.0	11.1	8.3	8.8	0.0	8.8
	動物系固形不要物	8.3	2.6	5.1	0.0	2.8	0.0	0.0	0.0	3.7
	ゴムくず	8.3	6.4	8.7	0.0	5.6	0.0	8.8	0.0	7.5
	金属くず	0.0	7.7	7.7	0.0	5.6	16.7	5.9	0.0	7.2
	ガラス・コンクリート・陶磁器くず	0.0	7.7	7.1	0.0	5.6	8.3	5.9	0.0	6.7
	鉍さい	0.0	5.1	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.3
	がれき類	0.0	5.1	3.1	0.0	0.0	8.3	5.9	0.0	3.5
	動物のふん尿	0.0	0.0	1.5	0.0	0.0	0.0	2.9	0.0	1.1
	動物の死体	0.0	0.0	3.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.9
	ばいじん	0.0	5.1	1.0	0.0	2.8	0.0	0.0	0.0	1.9
	13号廃棄物	0.0	2.6	2.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.9
		合計	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0

*表中の**太文字**は、最頻値を示す。

4.4.2 一般廃棄物・災害廃棄物処理に関するアンケート調査の結果

一般廃棄物処理許可の保有状況に関するアンケート調査結果を図 4-11 および図 4-12 に示す。

炉形式別では、ストーカ炉、流動床炉、多段炉以外の施設で一般廃棄物処理許可を保有することが確認できた。ロータリーキルン炉、ロータリーキルン&ストーカ炉で許可を保有する割合が高かった。しかし、カイ 2 乗検定の結果、ロータリーキルン炉、ロータリーキルン&ストーカ炉とその他の炉形式とでは有意水準 5% で有意な差は認められなかった。

規模別では、規模が大きいからといって許可率が高まる傾向は確認できない。カイ 2 乗検定の結果でも 150[t/d] 未満の施設と 150[t/d] 以上の施設に有意水準 5% で有意な差は認められなかった。

地域別ではロータリーキルン炉、ロータリーキルン&ストーカ炉の施設数の多い、近畿ブロックで許可の保有を確認できず、東北ブロックでその他の地域より許可を保有する割合が高かった。しかし、カイ 2 乗検定の結果、東北ブロックとその他の地域では有意水準 5% で有意な差は認められなかった。

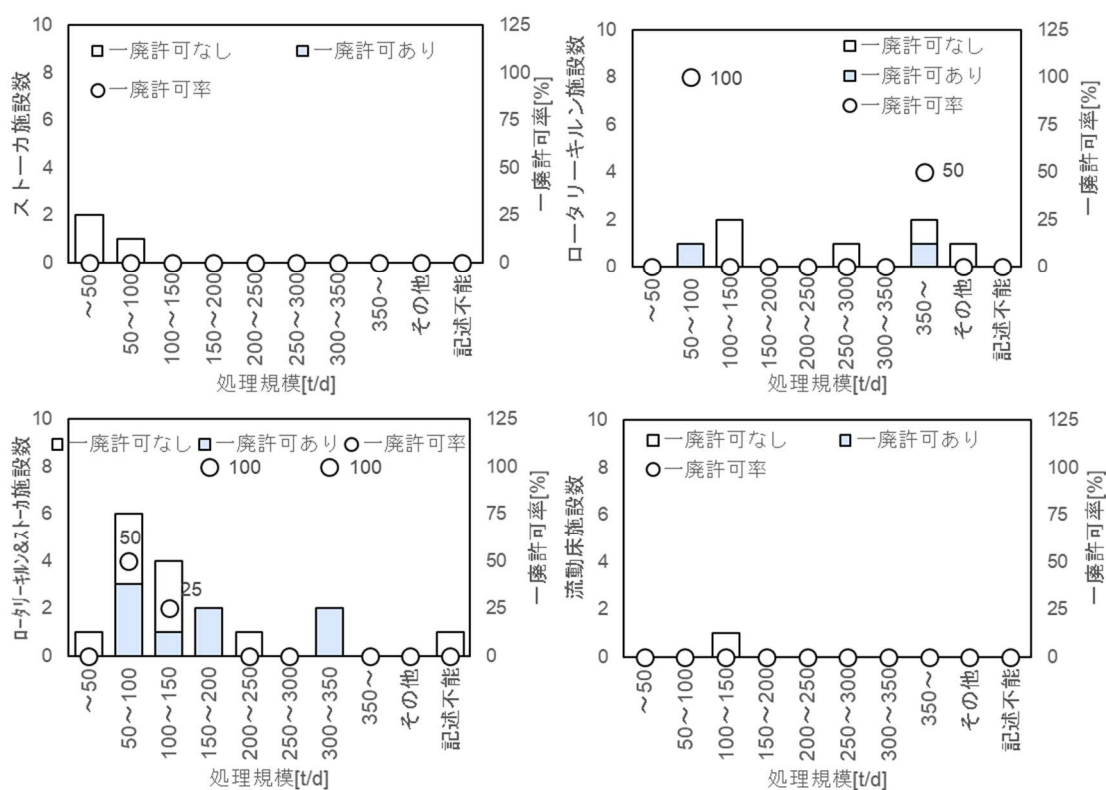


図 4-11 一般廃棄物処理許可保有状況および炉形式・処理規模

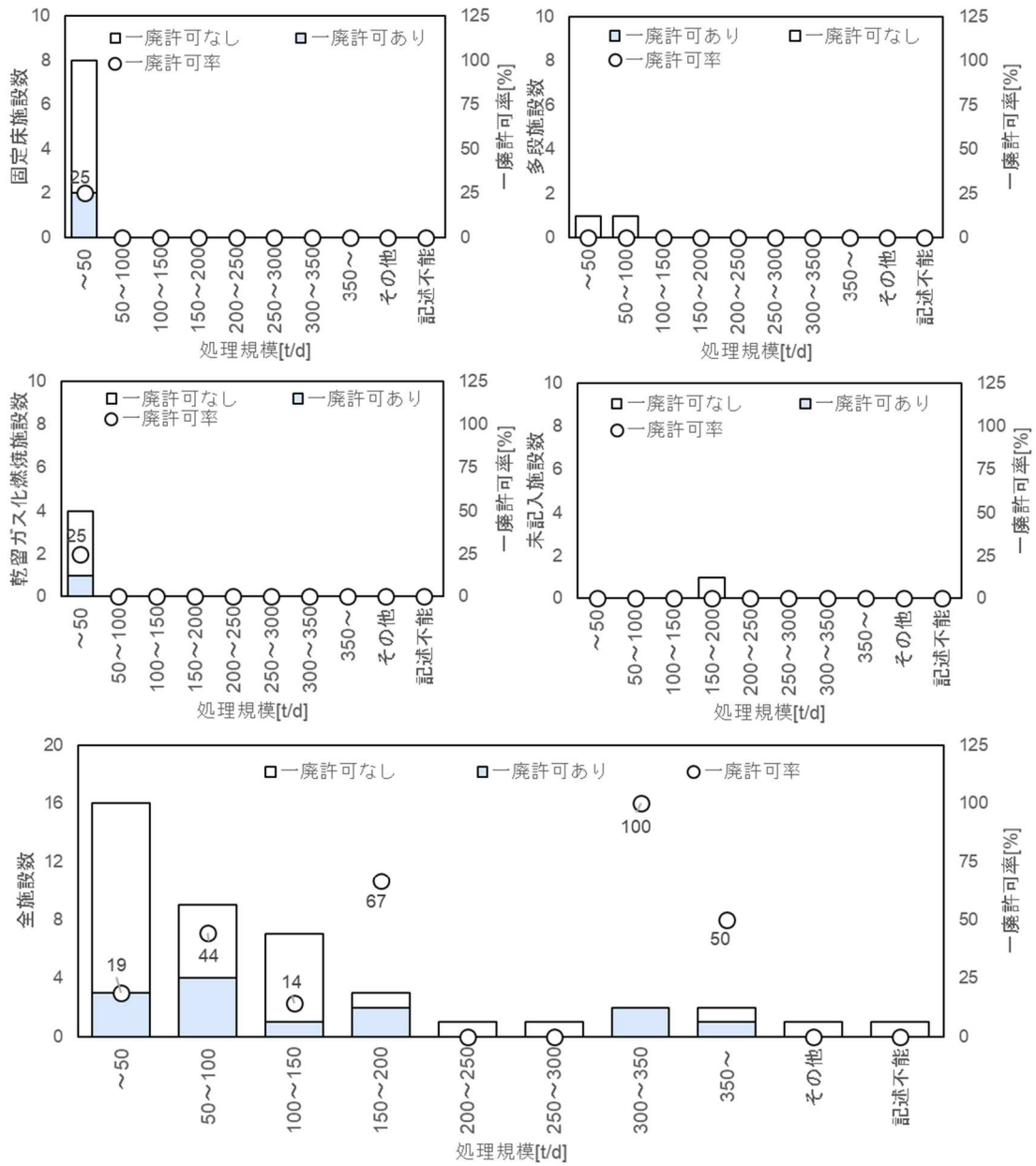


図 4-11 一般廃棄物処理許可保有状況および炉形式・処理規模 (つづき)

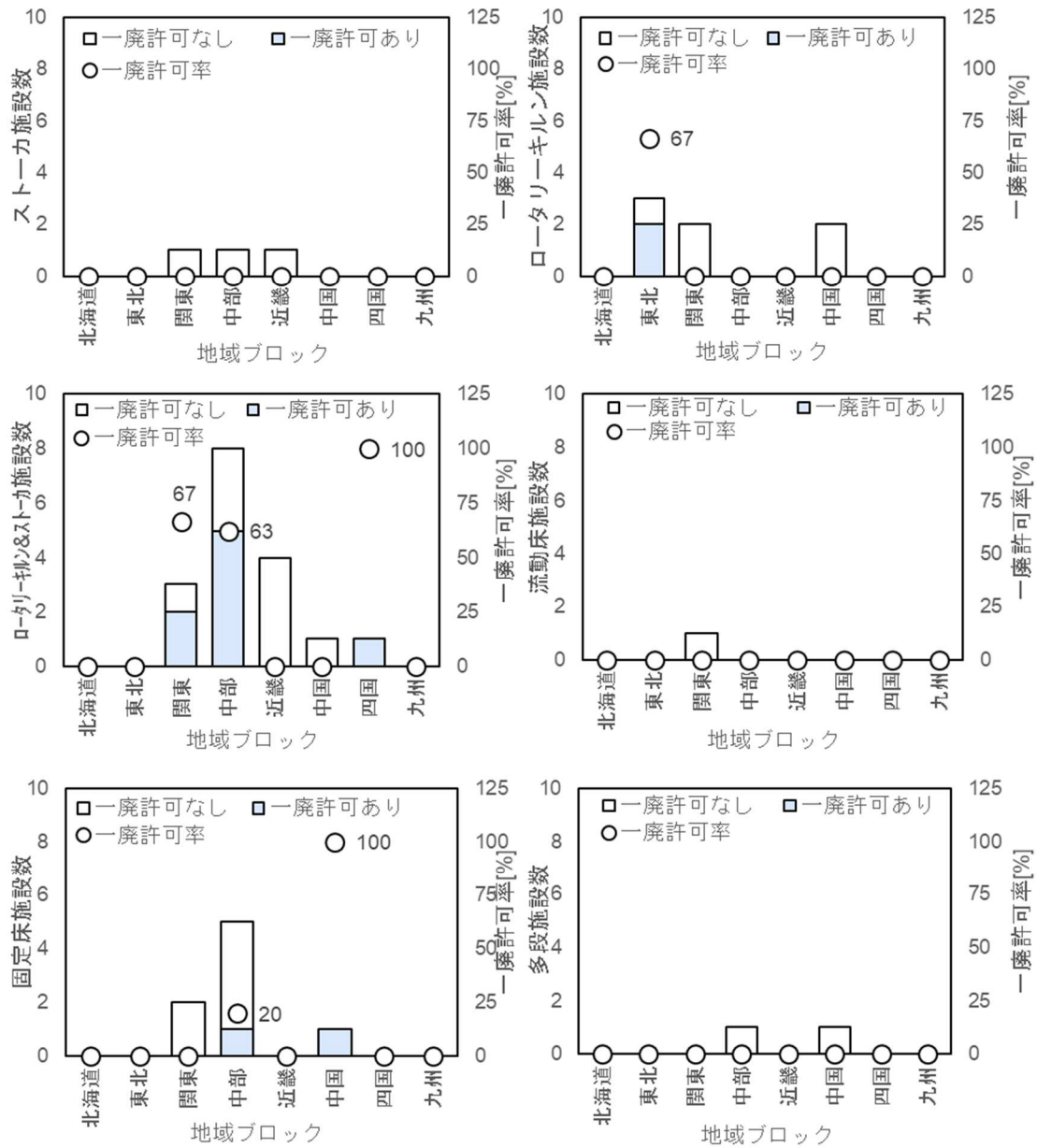


図 4-12 地域ブロック別における一般廃棄物処理許可の保有状況

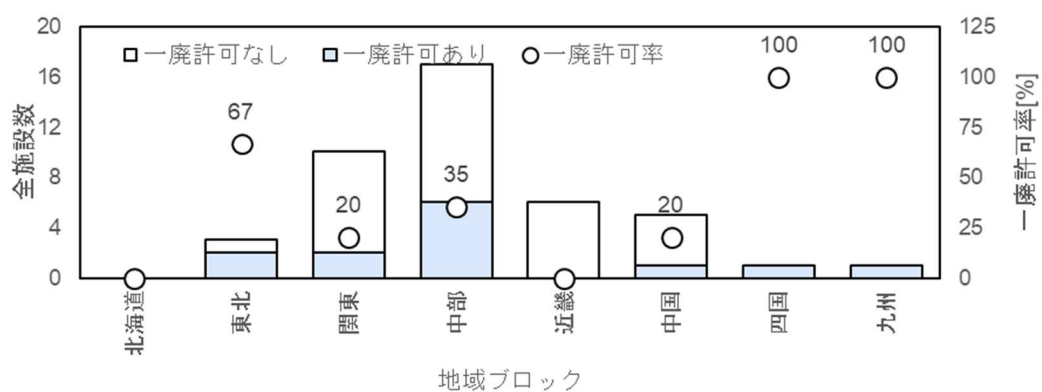
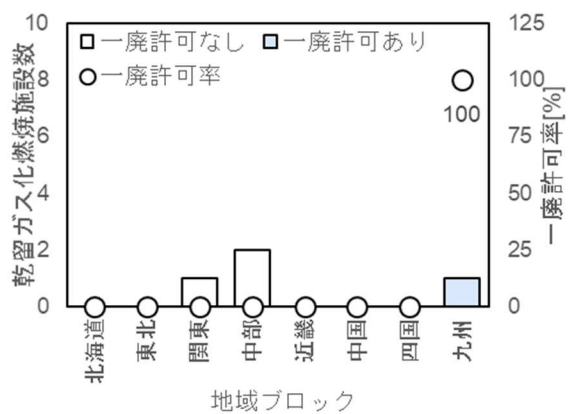


図 4-12 地域ブロック別における一般廃棄物処理許可の保有状況（つづき）

一般廃棄物処理実績に関するアンケート調査結果を図 4-13 および図 4-14 に示す。一般廃棄物処理許可の状況と概ね同様の結果が確認されたが、ロータリーキルン炉では 2 例だけ一般廃棄物処理許可を保有していないにもかかわらず処理実績が確認された。これは誤記入もしくは一般廃棄物処理許可の更新の時期による差異または過去実績による可能性が考えられるが、その事実は確認できていない。

炉形式別では、ロータリーキルン炉、ロータリーキルン&ストーカ炉で一般廃棄物処理実績の割合が高かった。しかし、カイ 2 乗検定の結果、ロータリーキルン炉、ロータリーキルン&ストーカ炉とその他の炉形式とでは有意水準 5% で有意な差は認められなかった。

規模別では、150[t/d]以上の施設の方が、150[t/d]未満の施設より一般廃棄物処理の実績が多く、カイ 2 乗検定の結果、150[t/d]以上の施設と 150[t/d]未満の施設とで有意水準 5% で有意な差が認められた。

地域別では、中国ブロックでその他の地域より一般廃棄物処理実績の割合が高く、カイ 2 乗検定の結果、中国ブロックとその他の地域とで有意水準 5% で有意な差が認められた。

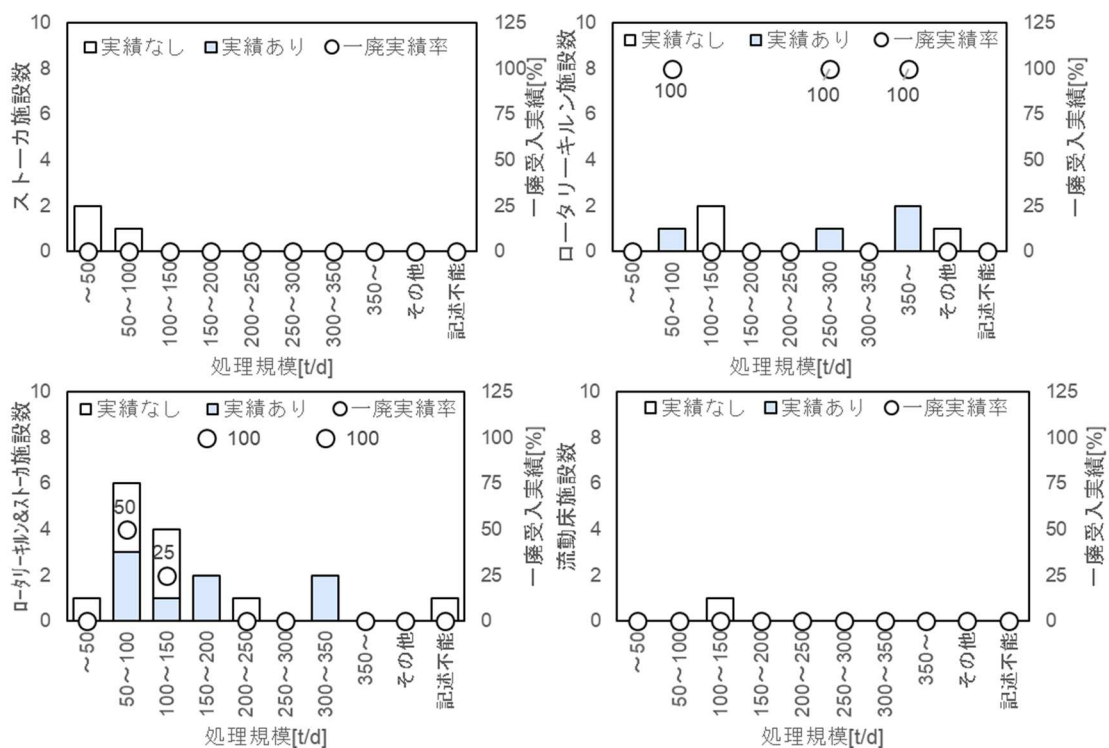


図 4-13 一般廃棄物処理委託実績および炉形式・処理規模

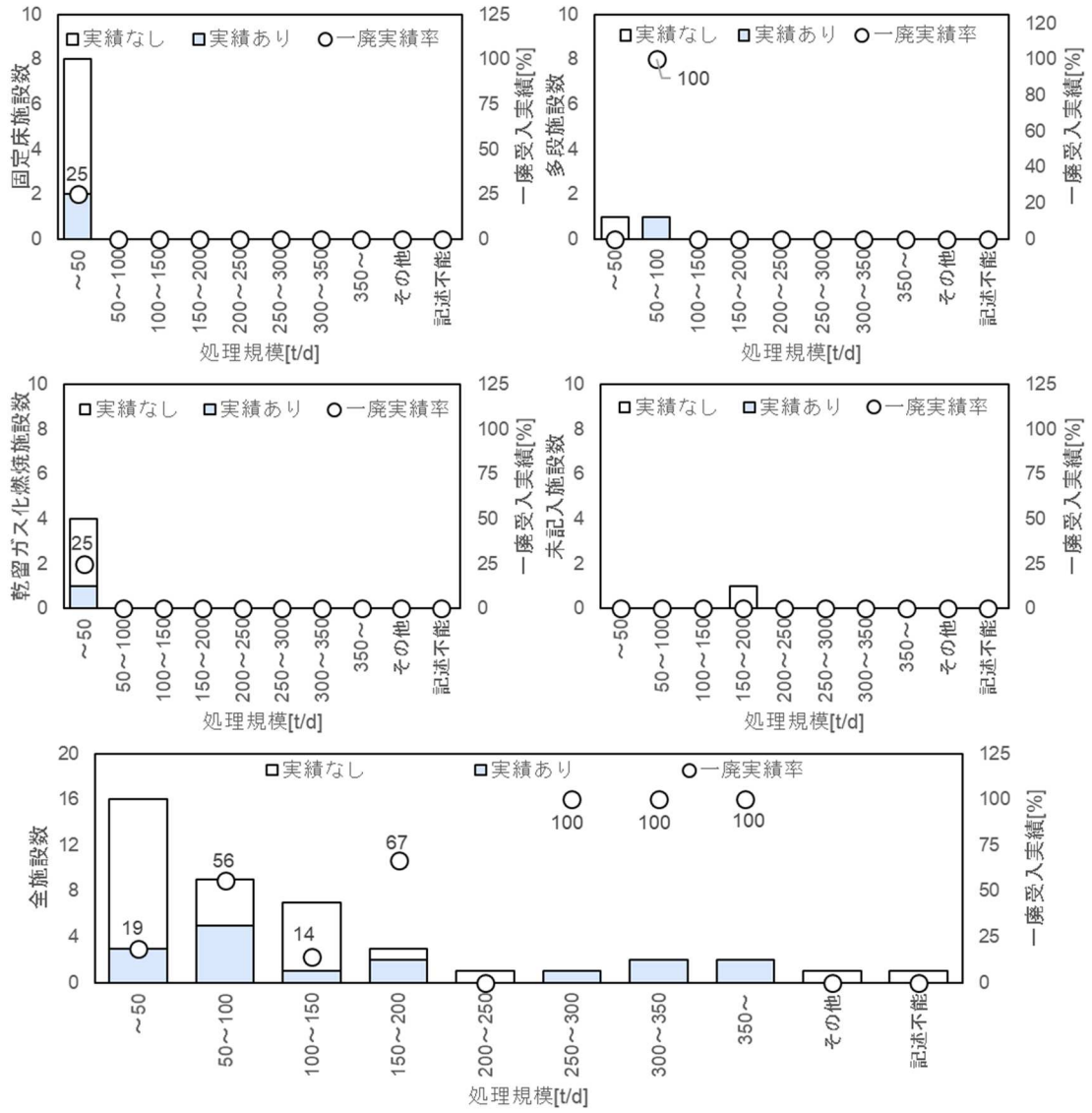


図 4-13 一般廃棄物処理委託実績および炉形式・処理能力（つづき）

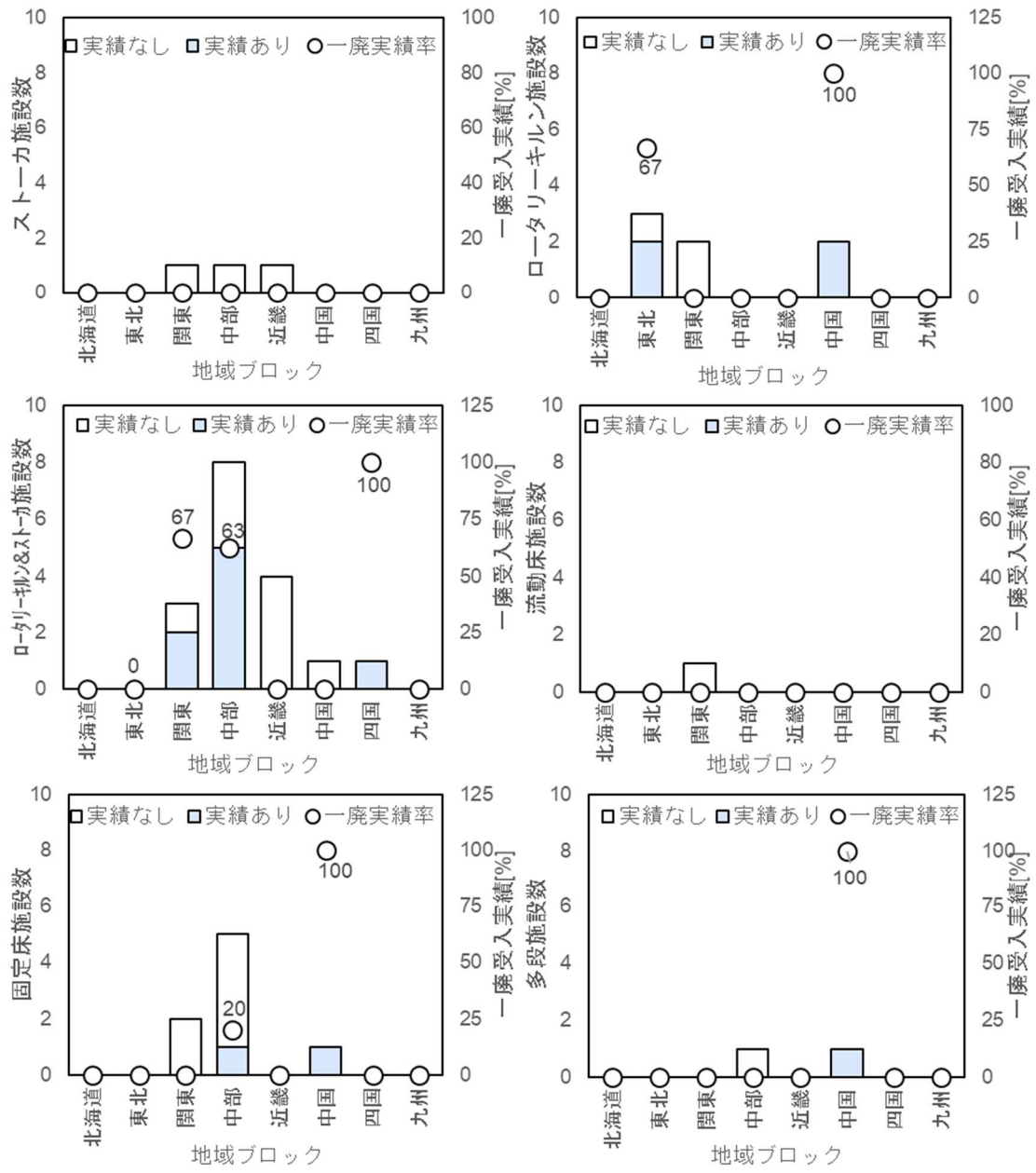


図 4-14 地域ブロック別における一般廃棄物処理委託実績

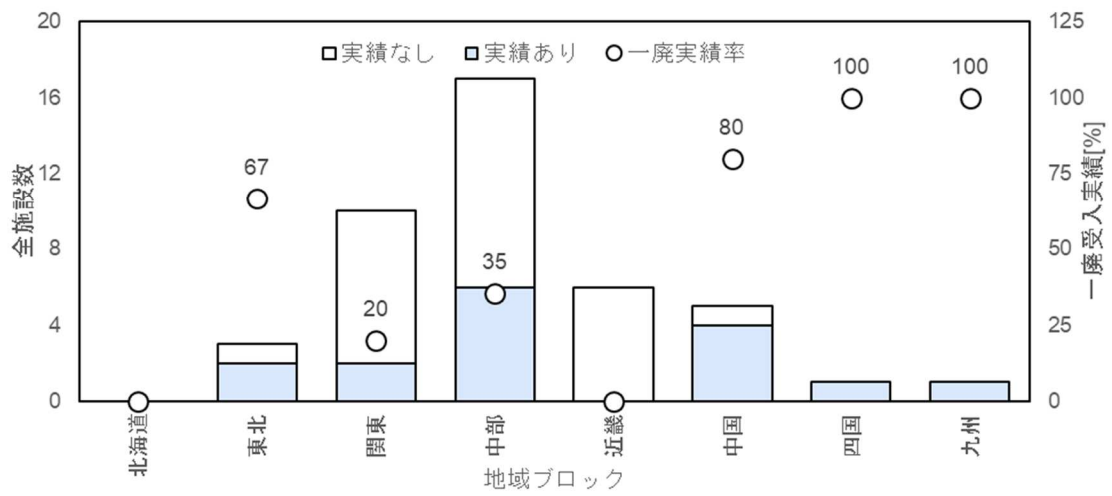
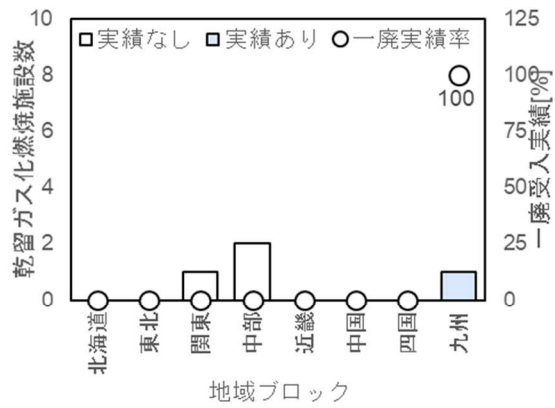


図 4-14 地域ブロック別における一般廃棄物処理委託実績（つづき）

災害廃棄物の受け入れ実績に関するアンケート調査結果を図 4-15 および図 4-16 に示す。ストーカ炉以外の施設で災害廃棄物を受け入れた実績を確認できた。

炉形式別では、ロータリーキルン炉，ロータリーキルン&ストーカ炉の受入実績の割合が高いことがわかる。カイ 2 乗検定の結果，ロータリーキルン炉，ロータリーキルン&ストーカ炉とそれ以外の炉形式とで有意水準 5% で有意な差が認められた。処理対象物が多様なロータリーキルン炉，ロータリーキルン&ストーカ炉はそのほかの炉形式に比べ，一般廃棄物の受入条件を満たすことが容易となることから処理実績が高い傾向が発現しているものと考えられる。非常災害により生じた廃棄物を迅速に処理する場合には，産業廃棄物処理施設において同様の性状である一般廃棄物を処理するときの届出は事後でよいと 2015 年に廃棄物処理法および災害対策基本法が改正[19]された。この法改正がさらにロータリーキルン炉，ロータリーキルン&ストーカ炉での処理を助長させていると考えられる。

規模別では，処理規模が大きくなるにつれ災害廃棄物の受入実績割合が高まる傾向が確認できた。しかし，カイ 2 乗検定の結果，150[t/d] 未満の施設と 150[t/d]以上の施設に有意水準 5% で有意な差は認められなかった。

地域別では，四国ブロック以外のブロックで災害廃棄物の受入実績が確認でき，施設が立地する地域の事情に応じた産業廃棄物処理事業者や市町村の対応が反映された結果であることが示唆されたが，カイ 2 乗検定の結果，地域による有意差は認められなかった。

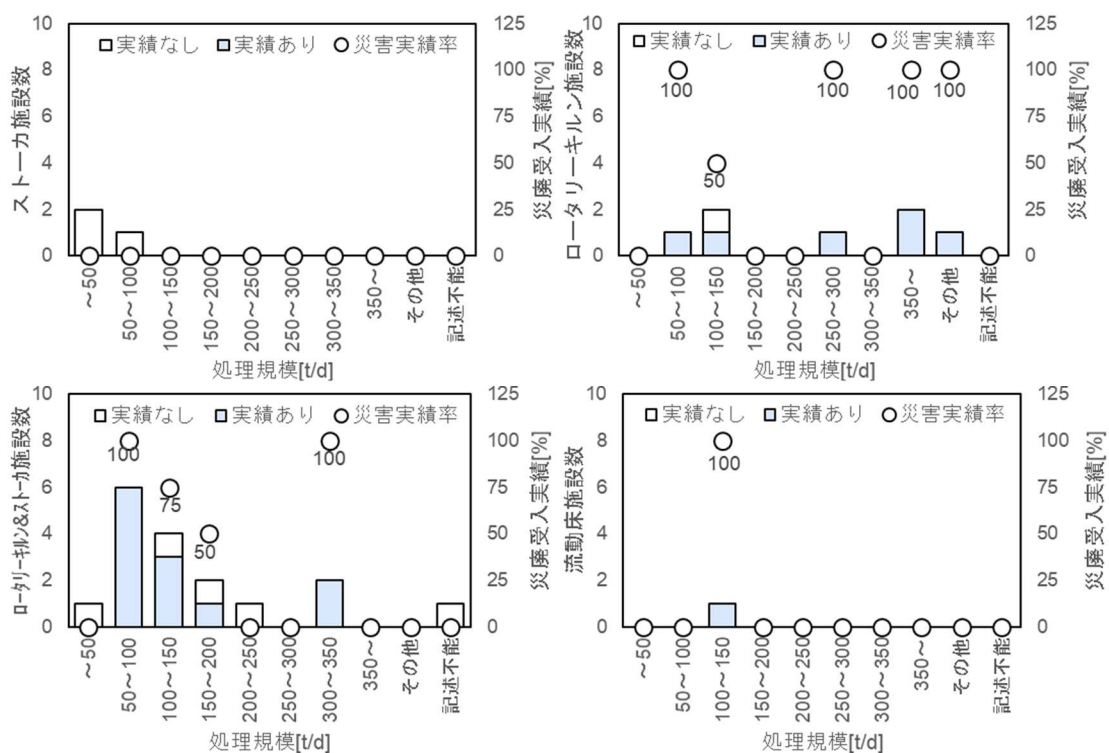


図 4-15 災害廃棄物処理委託実績および炉形式・処理能力

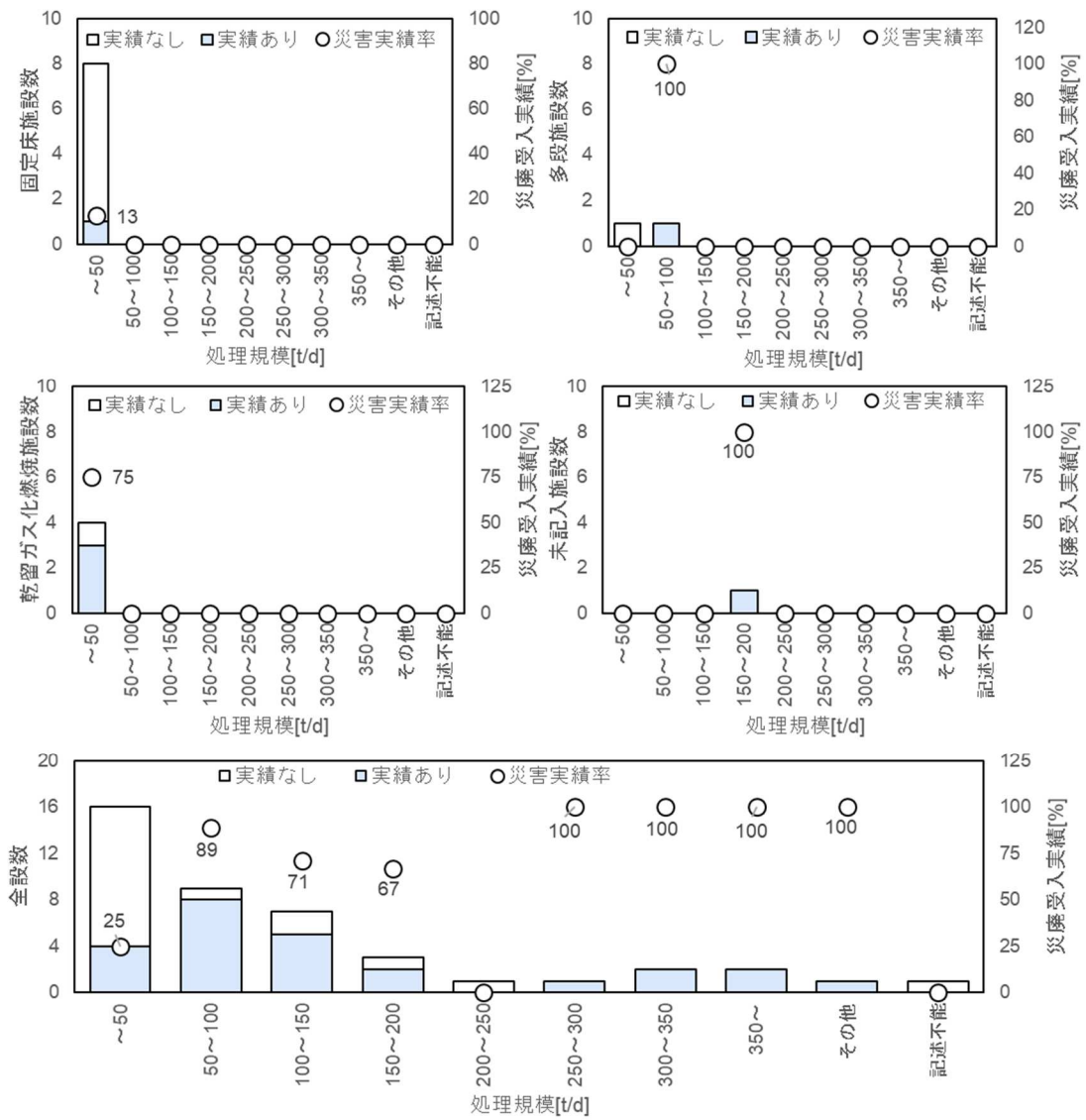


図 4-15 災害廃棄物処理委託実績および炉形式・処理能力（つづき）

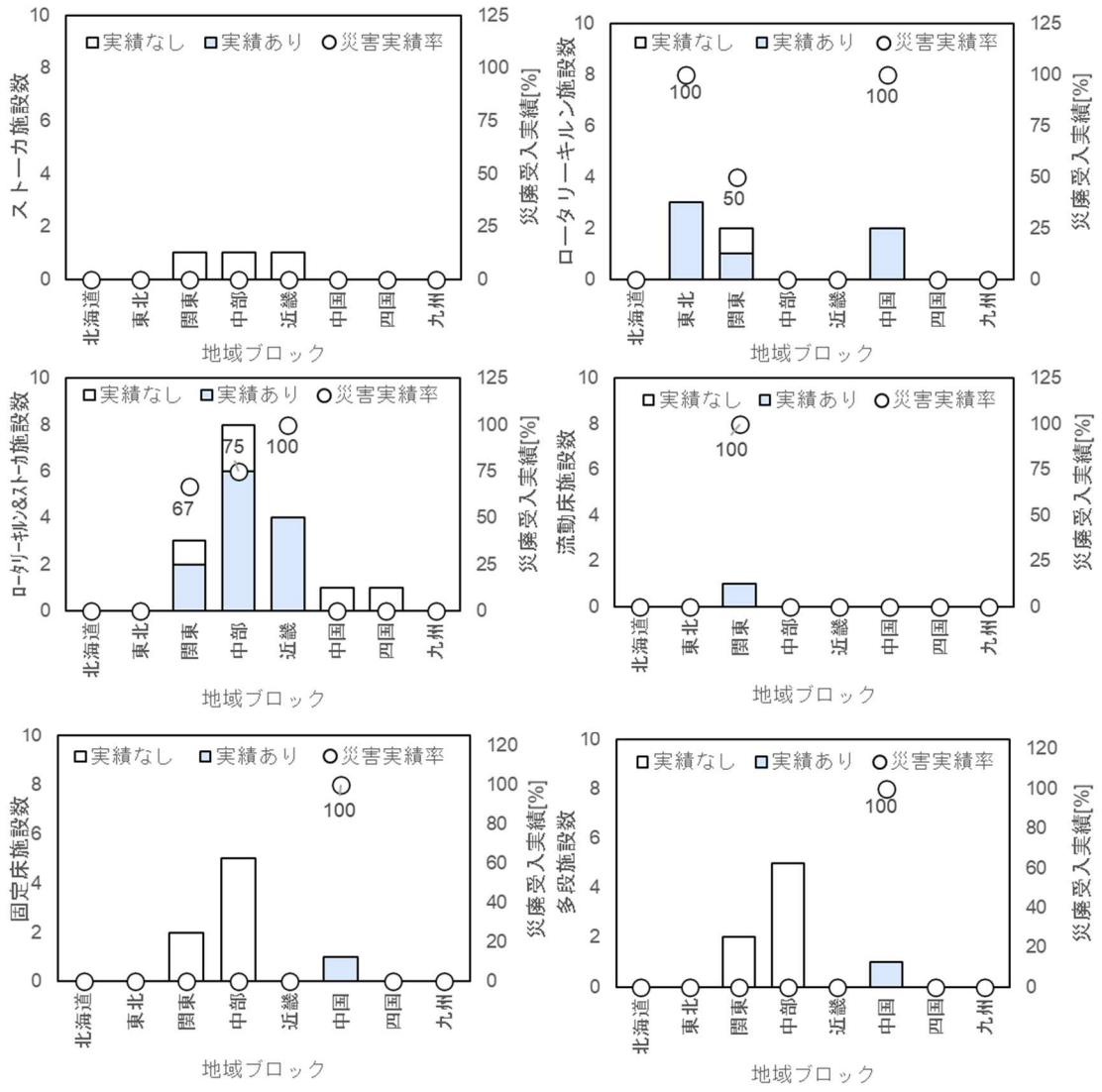


図 4-16 地域ブロック別における災害廃棄物処理委託実績

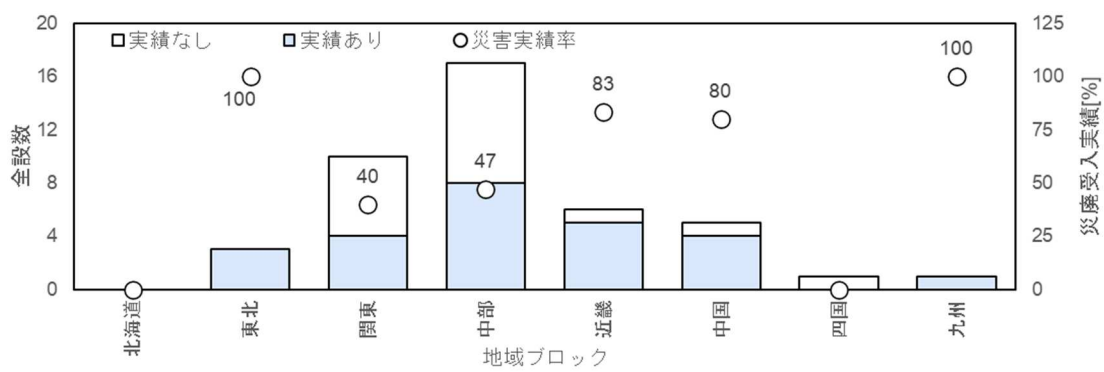
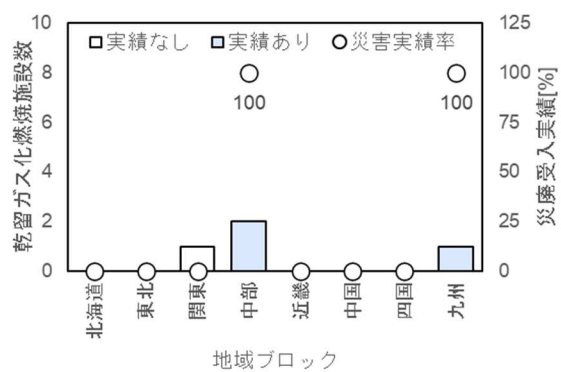


図 4-16 地域ブロック別における災害廃棄物処理委託実績（つづき）

地域ブロック別に一般廃棄物処理の許可および委託実績を集計した結果を図4-17に示す。中部ブロックでの一般廃棄物処理委託実績件数が238件（延べ件数）であった。その他のブロックの実績件数と比較するとオーダーが異なる実情が明らかとなった。中部ブロックに事業所が所在する産業廃棄物焼却施設が、一般廃棄物処理の継続が困難な市町村のからの一般廃棄物を受け入れている実態が推察される。

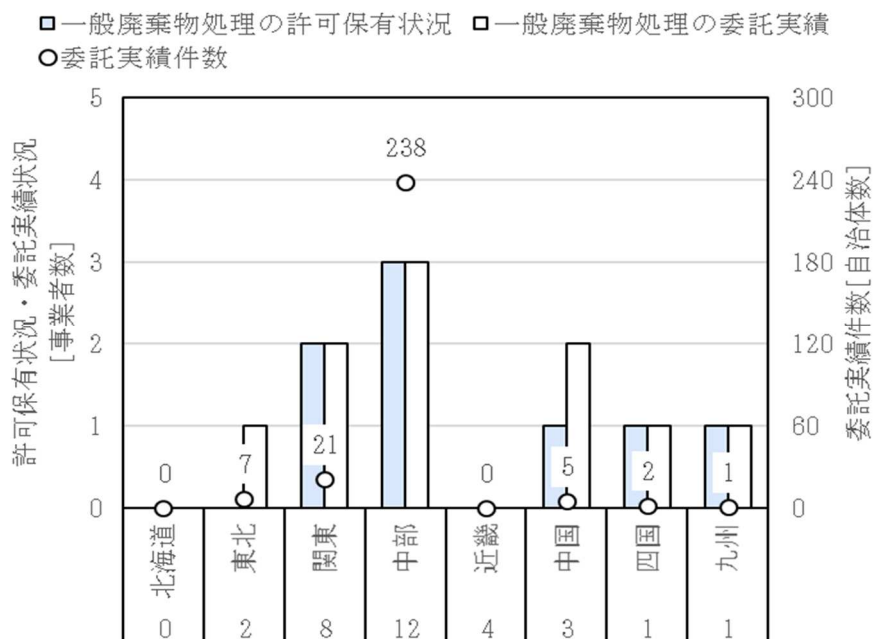
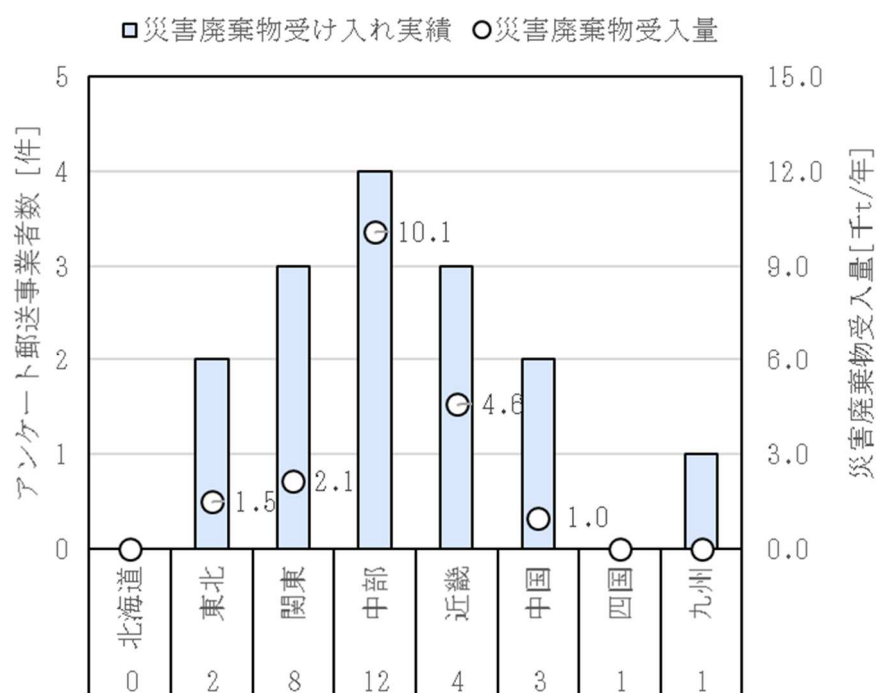


図4-17 地域ブロック別における一般廃棄物処理許可の保有状況・委託実績

地域ブロック別に災害廃棄物処理実績および災害廃棄物受入量を再集計した結果を図 4-18 に示す。災害廃棄物受入実績と災害廃棄物受入量は中部ブロックがもっとも高い値を示した。中部ブロックにある産業廃棄物処理事業者が、その他の地域で発生した災害廃棄物を受け入れていること[20]も要因の1つであると考えられる。また、北海道ブロックと四国ブロック以外のブロックで広く災害廃棄物の受入実績があることが確認された。そして、一般廃棄物処理の許可の有無によらず災害廃棄物処理を委託していることが明らかとなった。つまり、有事の際に産業廃棄物焼却施設を保有する産業廃棄物処理事業者が如何に地域に貢献しているかが読み取れる。



*災害廃棄物受入量は年間に受け入れた最大量を記載

図 4-18 地域ブロック別における災害廃棄物処理委託実績

4.4.3 計画条件に関するアンケート調査結果

新たな施設を設置する敷地確保の状況に関するアンケート調査結果を図4-19に示す。全国で見ると「余裕が有る」が38.7%、「同一敷地ではないが別の場所にある」が9.7%、「余裕がない」が51.6%と、過半数で全体的に余裕がないことがわかった。また、関東ブロックで「余裕がない」が50.0%、近畿ブロックで「余裕がない」が75.0%と、他の地域と比べ余裕がない。カイ2乗検定の結果、関東ブロックおよび近畿ブロックとその他の地域ブロックとで、有意水準5%で有意な差が認められ、施設用地周辺の理解に苦戦する実態が明らかとなった。地域共生に資する取り組みのひとつである災害廃棄物の処理実績を実践する産業廃棄物事業者で確認すると、敷地に余裕がないことが確認された。しかし、カイ2乗検定の結果、災害廃棄物処理実績有と実績無では、有意水準5%で有意な差は認められなかった。

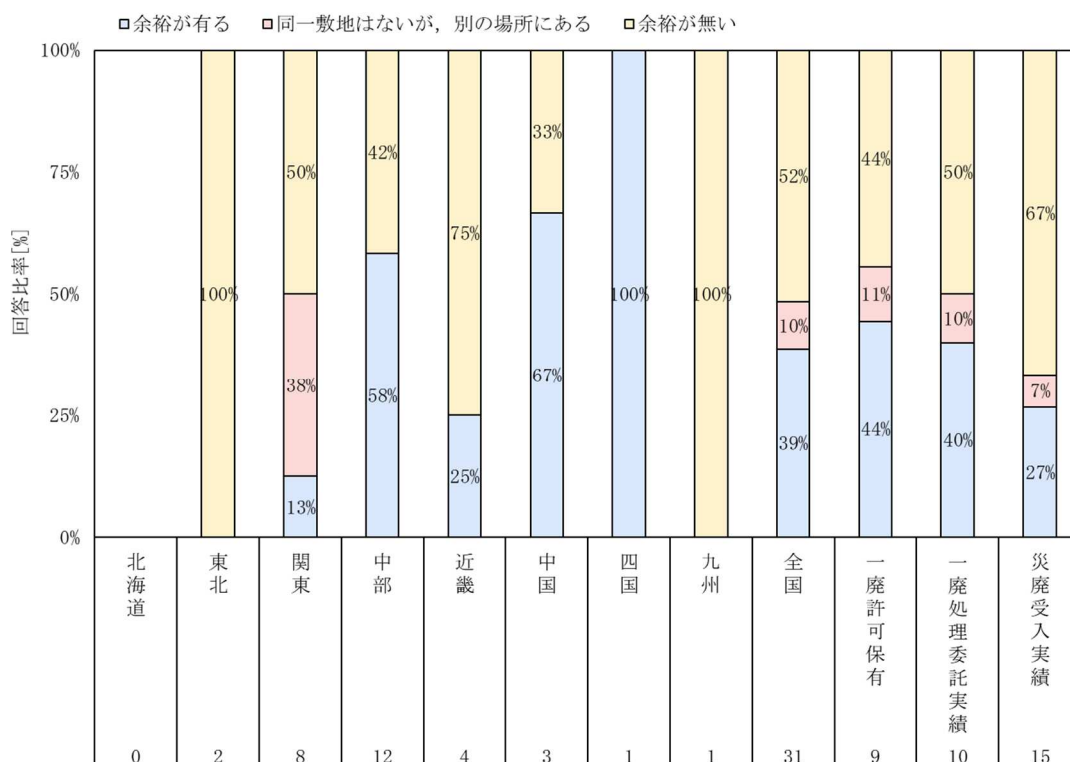


図4-19 新たな施設を設置する敷地の確保状況

4.4.4 エネルギー回収に関するアンケート調査結果

1) 発電設備

発電設備に関するアンケート調査結果（処理規模別）を図 4-20 に示す。発電設備を保有する施設は、ロータリーキルン炉、ロータリーキルン&ストーカ炉では確認できるが、その他の炉形式の施設では確認できない。

規模別では、50[t/d]以上の処理規模で発電設備を有する施設を確認することができ、カイ 2 乗検定の結果、100[t/d]以上の施設と 100[t/d]未満の施設とで有意水準 5% で有意な差が認められた。

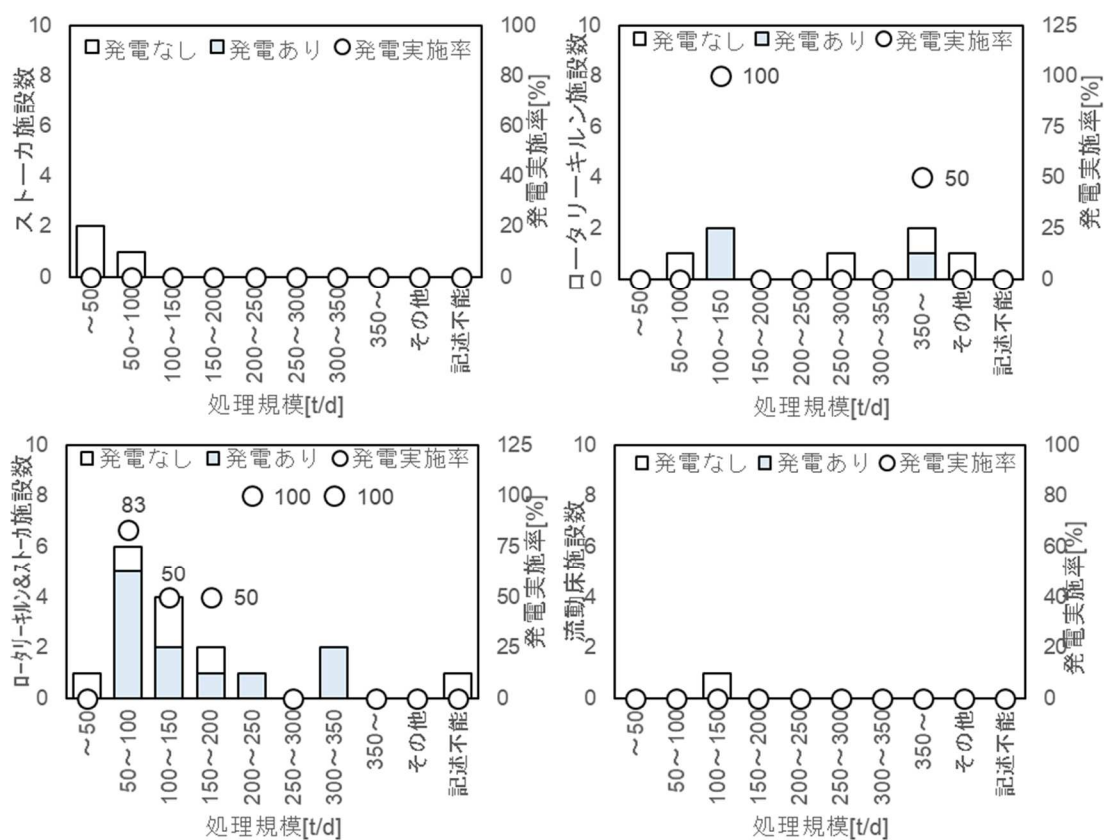


図 4-20 発電設備の設置状況（処理規模別）

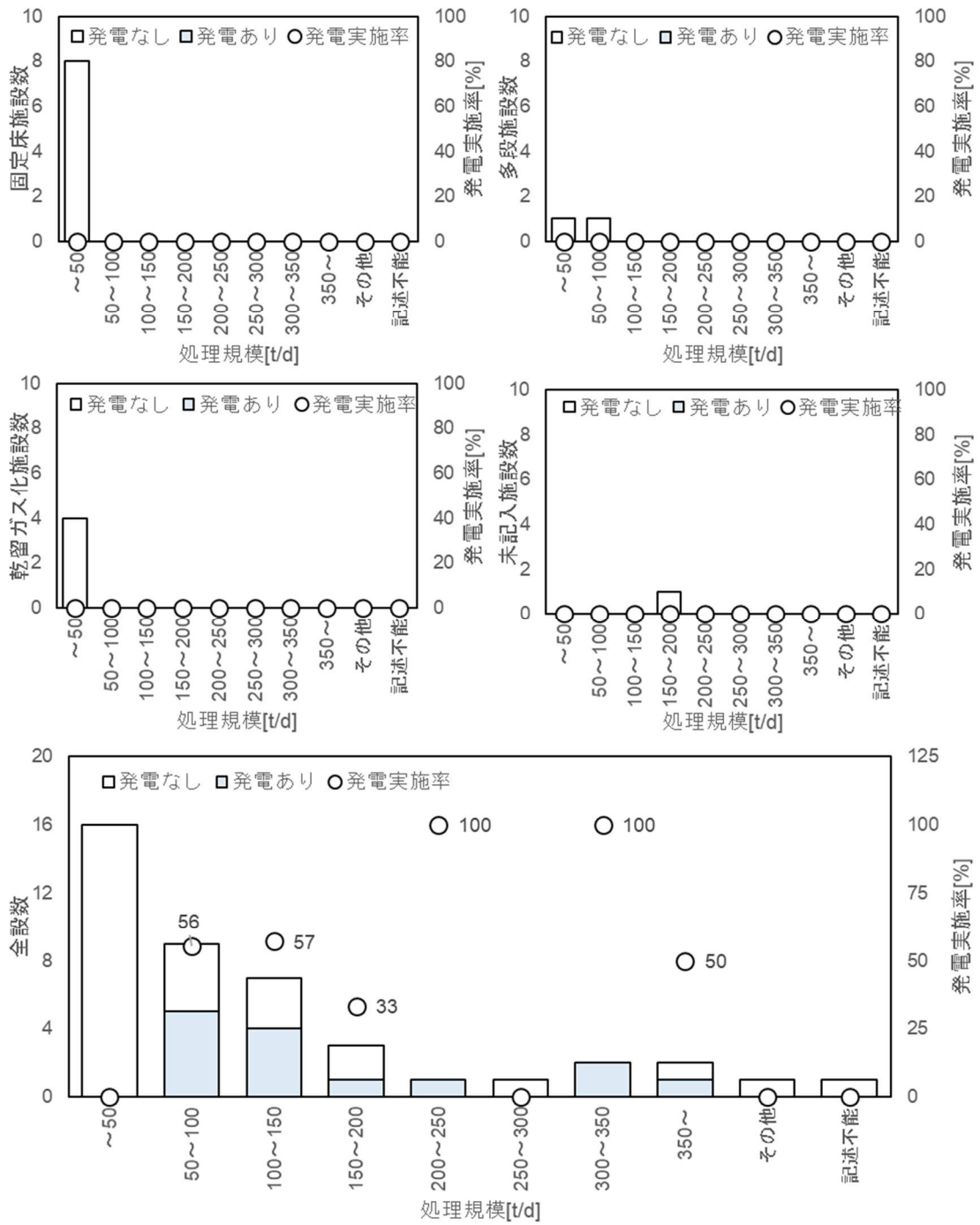


図 4-20 発電設備の設置状況（処理規模別）（つづき）

発電設備に関するアンケート調査結果（地域ブロック別）を図 4-21 に示す。関東，中部，近畿，中国ブロックで発電設備を保有する施設が確認できる。発電設備を保有する施設は，中部ブロックが 5 施設と最も多い。発電実施率では，近畿ブロック（67%：4/6），関東ブロック（40%：4/10），中部ブロック（29%：5/17），中国ブロック（20%：1/5）の順となる。

焼却施設の設置数に応じて発電設備の設置数が多い傾向が確認できるが，そのなかでも近畿ブロックの発電実施率はほかの地域ブロックに比べ特出しているように見える。近畿ブロックの事業者が積極的に発電設備を設置しているものと推察できる。しかし，カイ 2 乗検定の結果，近畿ブロックとその他の地域では有意水準 5% で有意な差は認められなかった。

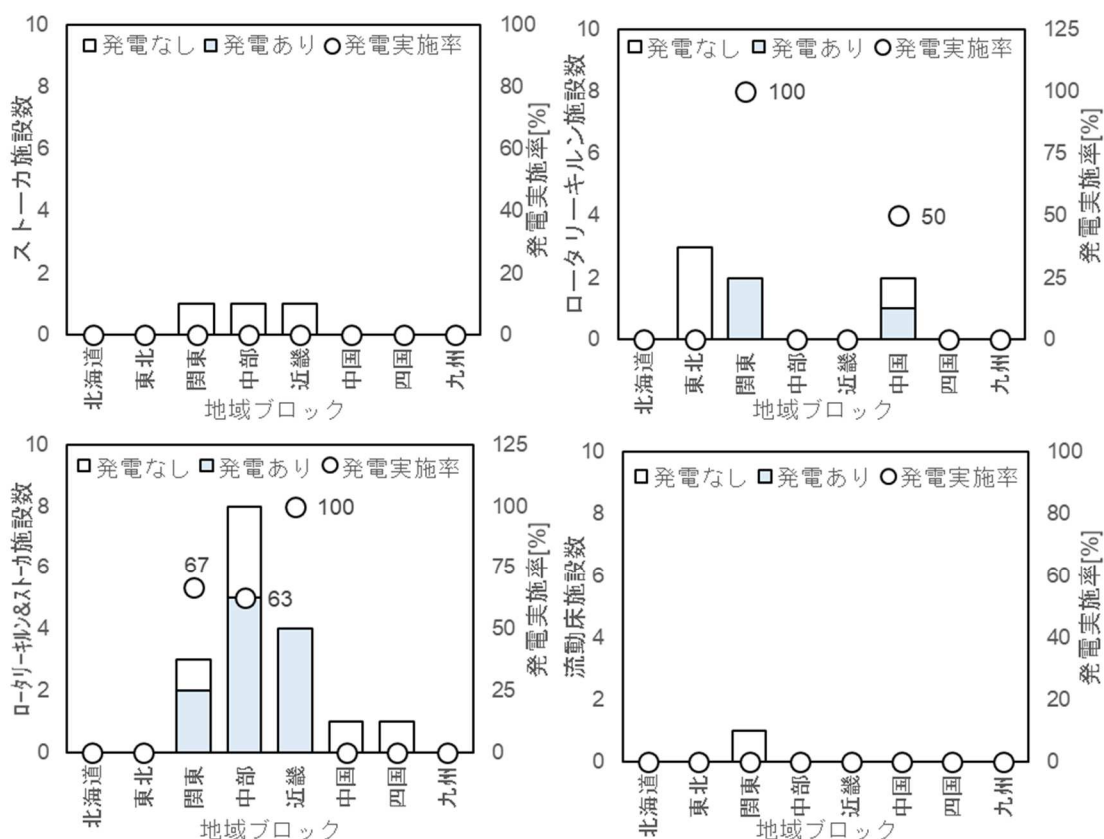


図 4-21 発電設備の設置状況（地域ブロック別）

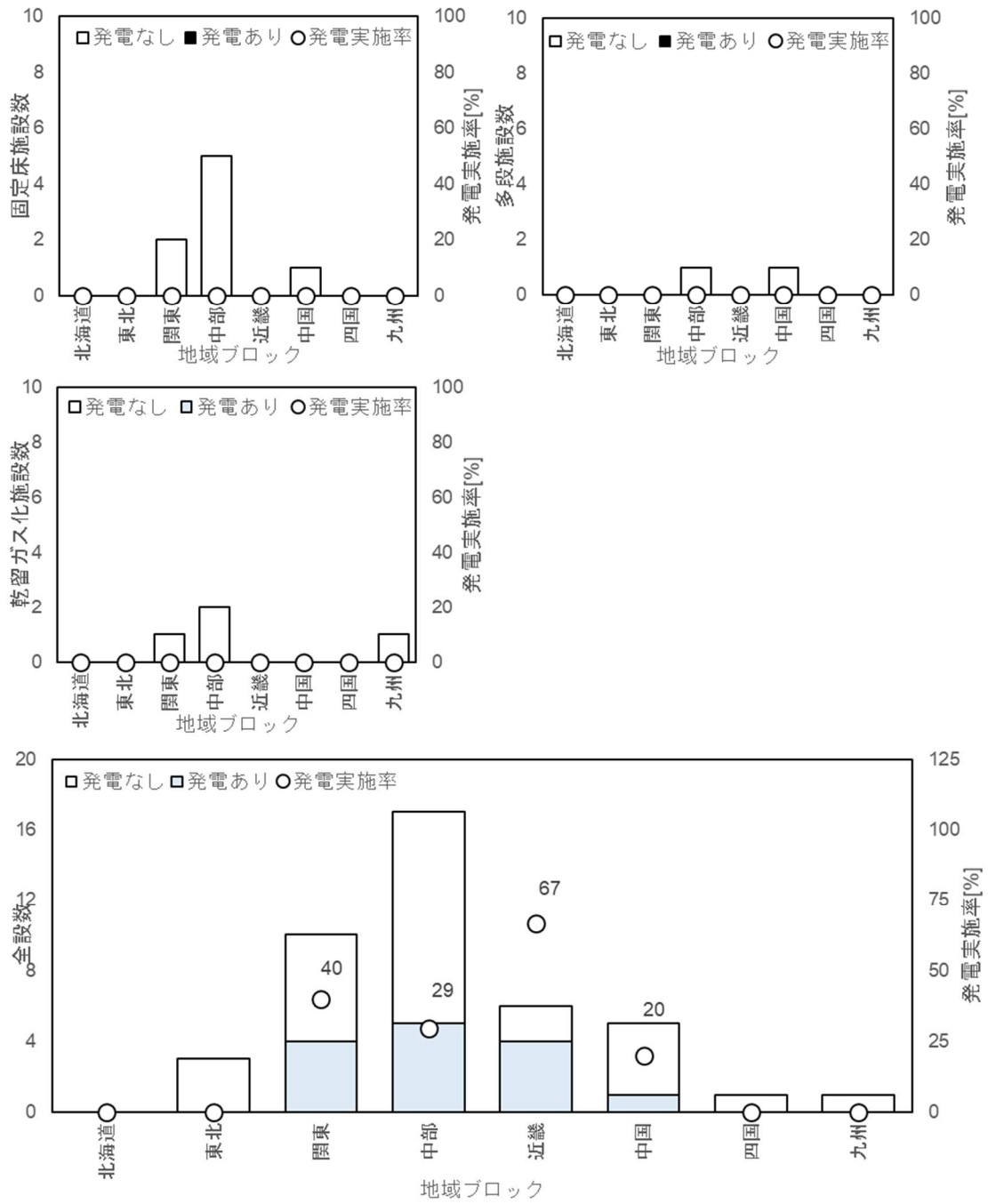


図 4-21 発電設備の設置状況（地域ブロック別）（つづき）

2) 余熱利用設備

余熱利用に関するアンケート調査結果（処理規模別）を図 4-22 に示す。流動床炉，多段炉以外の炉形式で余熱利用する施設が確認された。

処理規模が大きいほど，余熱利用率が高まる傾向にあり，カイ 2 乗検定の結果，100[t/d]以上の施設と 100[t/d]未満の施設とで有意水準 5%で有意な差が認められた。

炉形式別では，ロータリーキルン炉，ロータリーキルン&ストーカ炉において，余熱利用施設の設置が多くみられ，カイ 2 乗検定の結果，ロータリーキルン炉，ロータリーキルン&ストーカ炉とそれ以外の炉形式とで有意水準 5%で有意な差が認められた。

具体的な余熱利用の用途の質問に対しては，「汚泥乾燥機」の回答がもっとも多い。その他の回答としては，「再加熱器」，「蒸気式ストブロー」，「排水濃縮設備」，「空気予熱器」，「炭化炉」，「コンポスト製造プラントまたは福祉施設などの余熱利用施設」などが挙げられた。

熱利用していない理由は，3 つに大別できる。1 つ目は，設置許可申請に関する理由で，「51 条取得で設備を設置したため，変更不可能」，「余熱利用に必要な装置を付加しようとすると，廃掃法上，施設の大規模変更に該当するため許可要件を満たすのが容易ではないこと」，「許可上，改造が出来ないため」などの回答を得た。2 つ目は，設置費用に関する理由で，「バッチ炉であることと，処理規模が小さいため採算の合う熱量が取れないため」，「建設当初から余熱利用できる施設となっていないため，改造に費用がかかるため」，「敷地に余裕がないこととコスト的な問題」などの回答を得た。3 つ目は，処理規模に関する理由で，「余熱を利用できるほどの熱量がないため」，「処理規模が小さいため」などである。その他には，施設設置における社会的背景による影響による理由などで，「設置時にその発想がなかった」，「設置当時は，一般的ではなかった」，「余熱利用する施設がない」という回答が得られた。

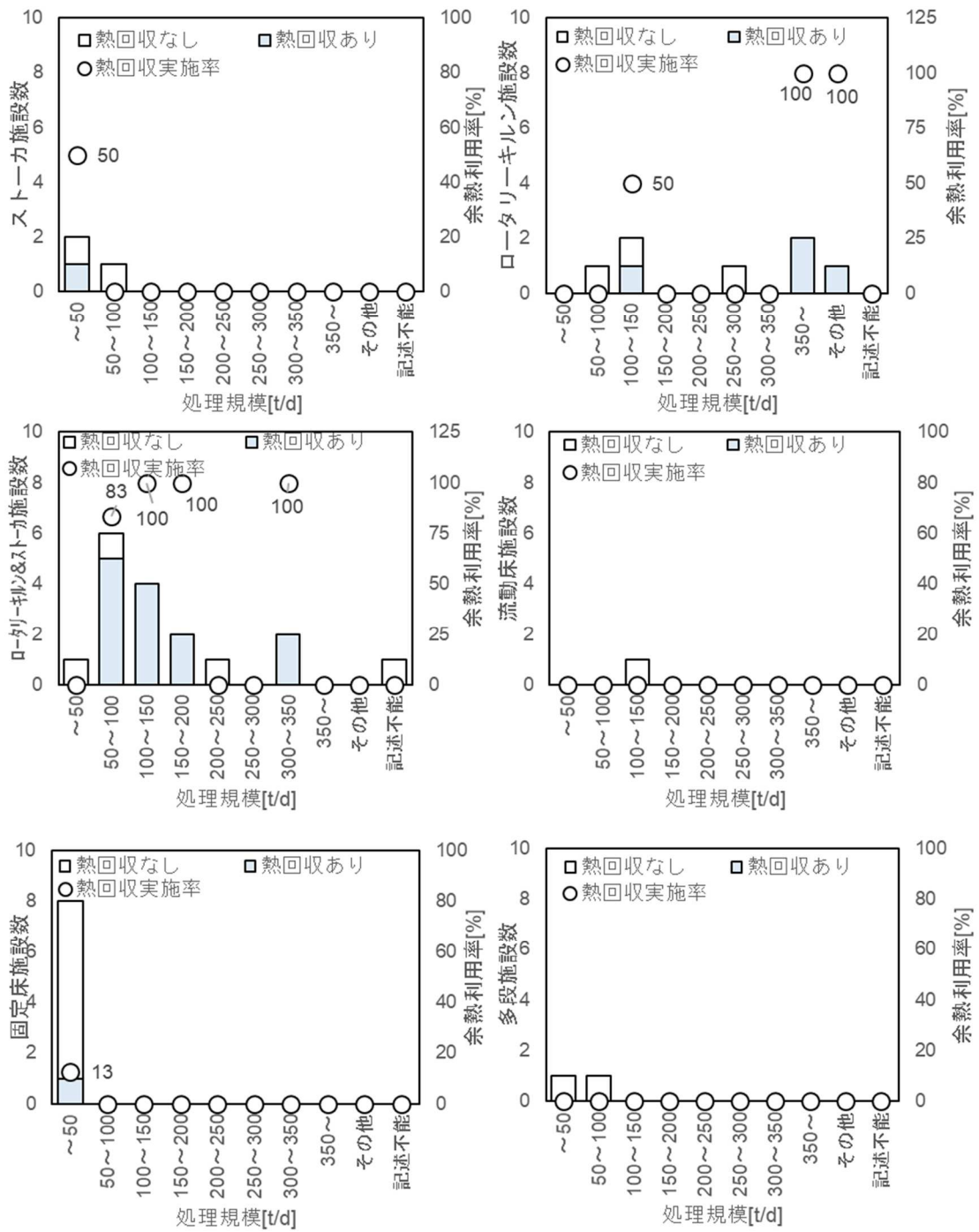


図 4-22 余熱設備の設置状況（処理規模別）

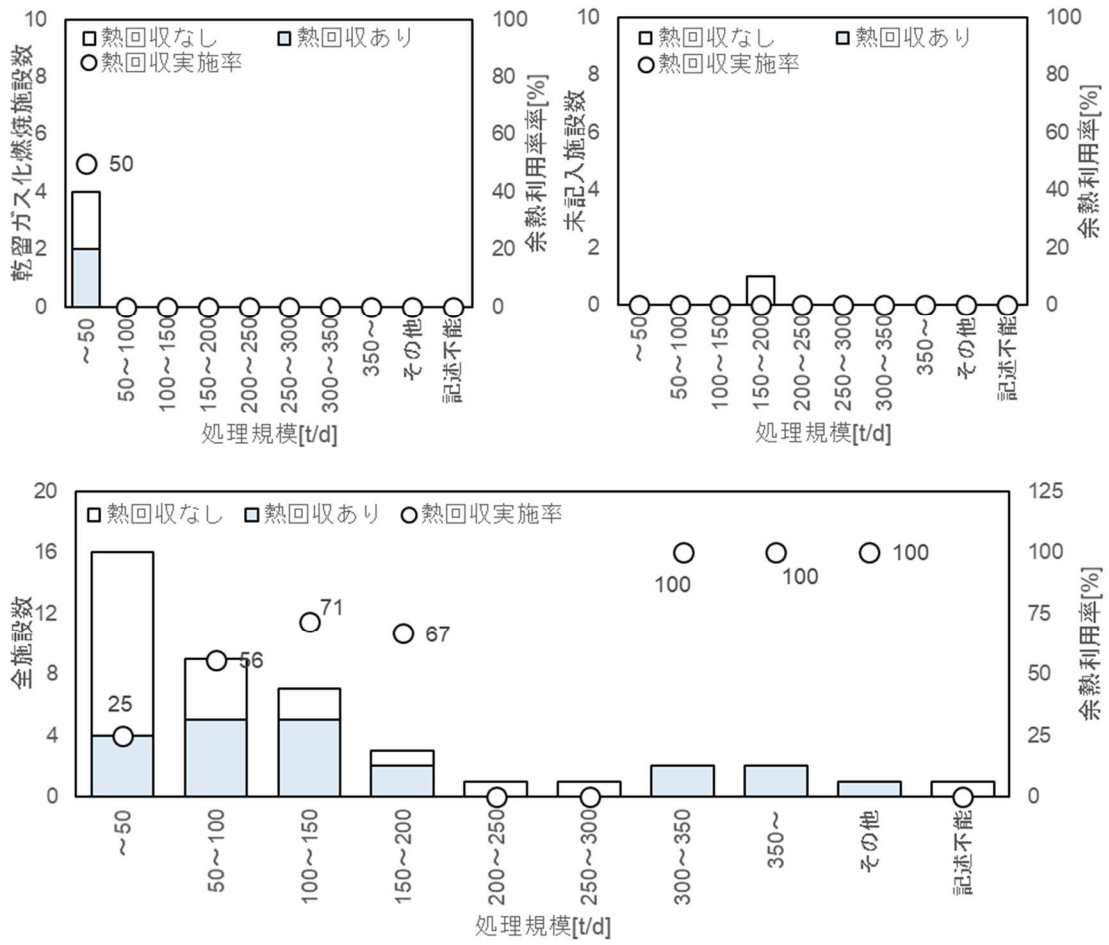


図 4-22 余熱設備の設置状況（処理規模別）（つづき）

余熱利用に関するアンケート調査結果（地域ブロック別）を図4-23に示す。回答がなかった北海道ブロック以外の地域ブロックでは、余熱利用設備を保有する施設が確認できる。余熱利用設備を有する施設は、中部ブロックが8施設と最も多い。余熱利用率では、四国ブロック、中国ブロックで（それぞれ100%：1/1）、近畿ブロック（67%：4/10）、東北ブロック（67%：2/3）、中部ブロック（47%：8/17）、中国ブロック（40%：1/5）、関東ブロック（30%：3/10）の順となる。しかし、カイ2乗検定の結果、有意水準5%で有意な差は認められなかった。

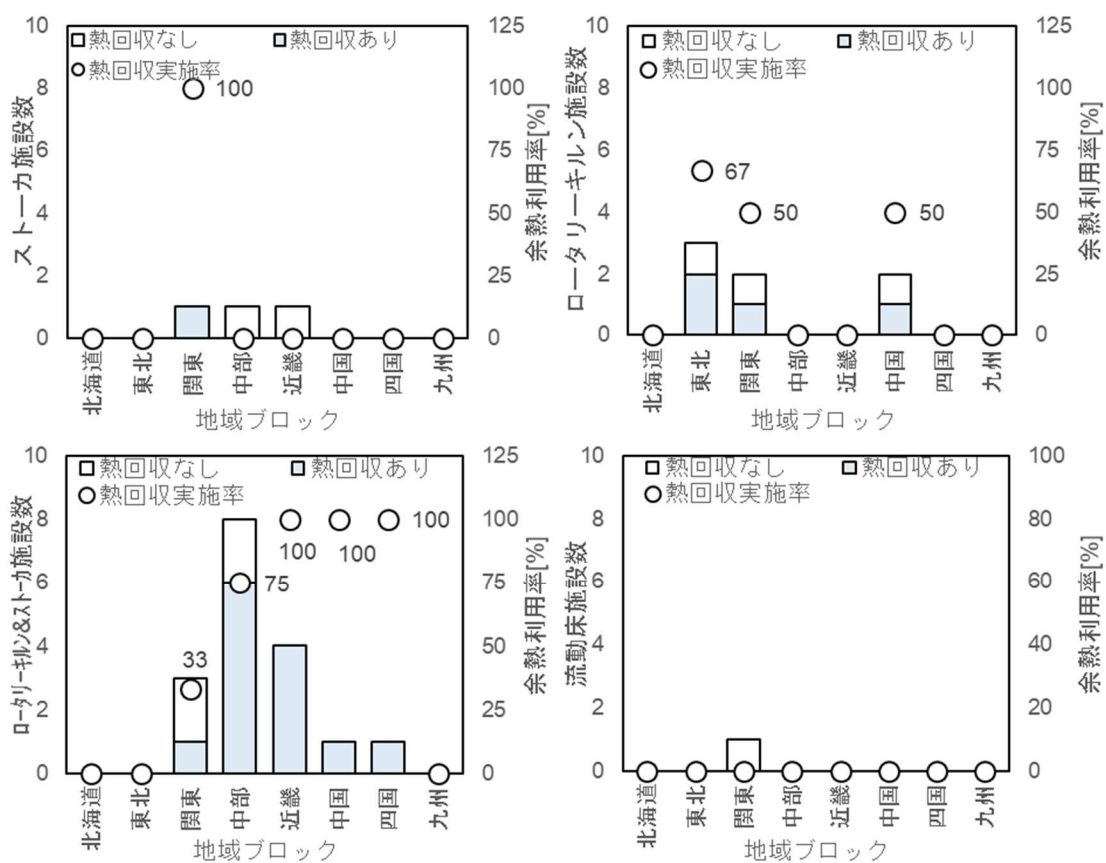


図4-23 余熱設備の設置状況（地域ブロック別）

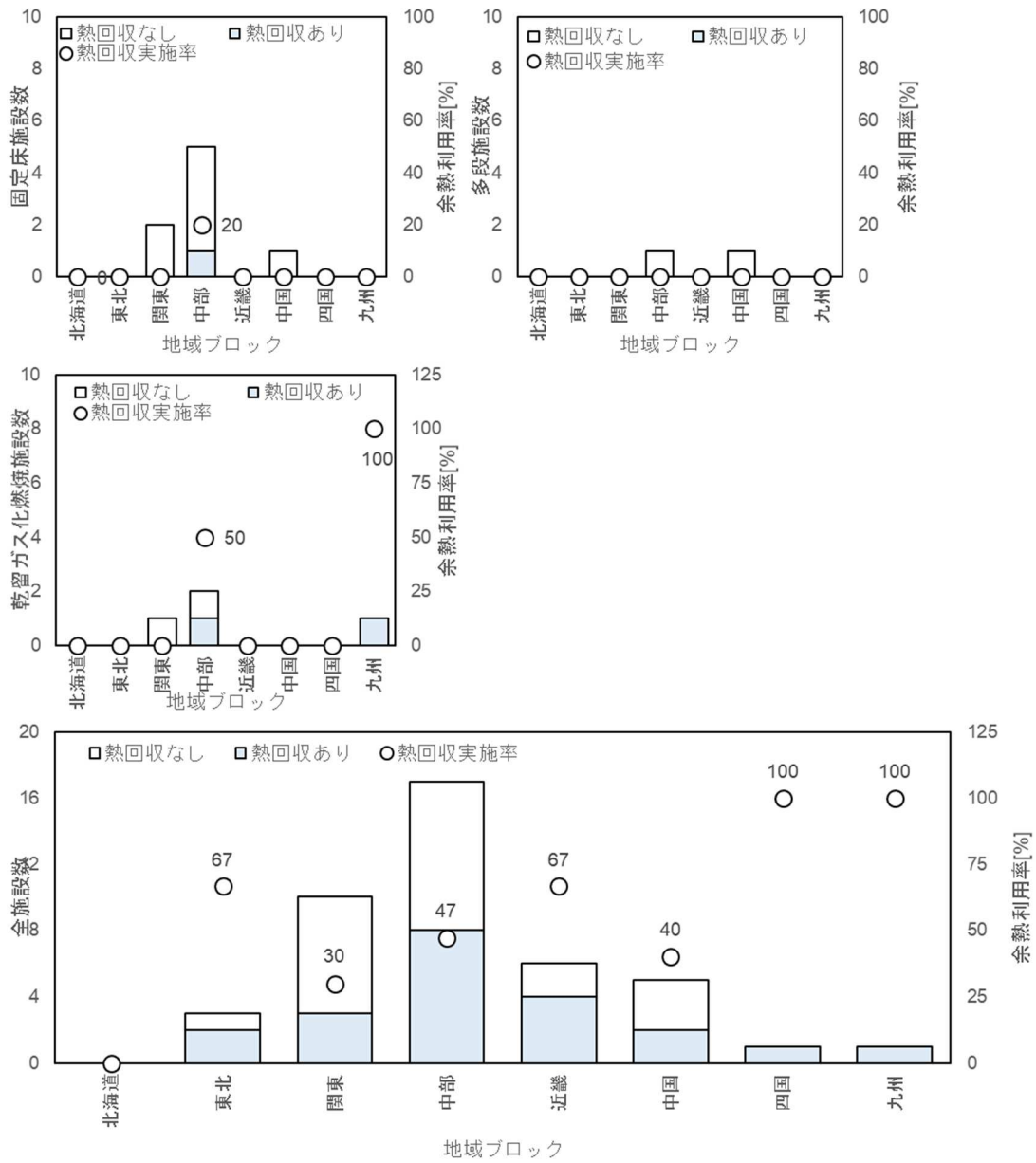


図 4-23 余熱設備の設置状況（地域ブロック別）（つづき）

4.5 まとめ

本章では、産業廃棄物処理事業者が保有する焼却施設における施設の現状を明らかにするとともに、一般廃棄物処理・災害廃棄物処理支援の実態、およびエネルギー回収の実態を明らかにした。

1990年以降に竣工された施設が全体の81%を占め、また、一般廃棄物焼却施設の耐用年数が一般的に20年程度[22]とされているところ、本章の実態調査より、産業廃棄物焼却施設稼働期間について、30年以上を予定する事業者が多いことが確認できた。

一般廃棄物の処理実績に関しては、カイ2乗検定の結果、炉形式では有意水準5%で有意な差は認められなかったが、処理規模では150[t/d]以上の施設と150[t/d]未満の施設とで有意水準5%で有意な差が認められた。処理規模が大きいほど一般廃棄物を受け入れるための調整が容易であることが想像できるが、処理規模が150[t/d]以上の施設は全体の21%しかなく、産業廃棄物処理業全体として一般廃棄物処理の支援を進めるためには、処理規模が150[t/d]未満の施設でのさらなる支援を進める必要があるが、処理規模が50[t/d]未満の施設では、多量の一般廃棄物の処理ができないことから、支援が進みにくいことが考えられる。

一般廃棄物処理支援の実態が確認できたため、第5章において、一般廃棄物処理を委託する際の条件を検証する。

災害廃棄物の処理では、ロータリーキルン炉、ロータリーキルン&ストーカ炉で受入実績が高いことがわかり、カイ2乗検定の結果でもロータリーキルン炉、ロータリーキルン&ストーカ炉とそれ以外の炉形式とでは有意水準5%で有意な差が認められた。ロータリーキルン炉とロータリーキルン&ストーカ炉を合わせると全体の56%あり、多種多様な産業廃棄物を受け入れることのできることから有事の際の支援について、今後の継続に期待ができる。

エネルギー回収の観点からは、ロータリーキルン、ロータリーキルン&ストーカ炉では発電設備の設置が確認できるが、その他の炉形式では確認することができなかった。

余熱利用に関しては、流動床炉、多段炉以外の炉形式で余熱利用する施設が確認された。発電、余熱利用ともに、処理規模が大きくなるにつれて設備の設置をしている事業者が多くなり、カイ2乗検定の結果、100[t/d]以上の施設と100[t/d]未満の施設とで有意水準5%で有意な差が認められた。しかし、設置許可申請、設置費用、処理規模などによる設備設置の制約が大きな課題として挙げられている。

継続して施設を使用すること、新たな設備の設置に課題があることを鑑みると、既存の産業廃棄物焼却施設でのさらなるエネルギー回収が困難であることが示唆された。

そこで、第6章で焼却施設にかわる新たな廃棄物系バイオマスの利用について後述する。

第4章 参考文献

- [1] 公益社団法人 全国産業廃棄物連合会『産業廃棄物処理業の業法を含めた振興策の検討に関するタスクフォース報告書 -処理の「受け手」から資源等の「創り手」への転換-』, 2015年, https://www.zensanpairen.or.jp/wp/wp-content/themes/sanpai/assets/pdf/activities/report_task_houkokusho.pdf, (2022.9.28 閲覧).
- [2] 株式会社 三菱総合研究所『平成 27 年度産業廃棄物処理業の振興方策の検討に関する基礎的調査業務 報告書』, 2016 年, https://www.env.go.jp/recycle/report/h28-07/report_h28-07.pdf, (2022.9.28 閲覧).
- [3] 環境省『産業廃棄物処理業の振興方策に関する提言』, 2017 年, <https://www.env.go.jp/press/files/jp/105876.pdf>, (2022.12.17 閲覧).
- [4] 公益社団法人 全国産業資源循環連合会『低炭素社会実行計画』, 2015 年, https://www.zensanpairen.or.jp/wp/wp-content/themes/sanpai/assets/pdf/activities/global_warming_eco_plan.pdf, (2022.9.28 閲覧).
- [5] 吉川克彦, 浦邊真郎, 西川光義, 澤地實, “産業廃棄物焼却施設における発電・熱利用の実態,”『第 21 回廃棄物資源循環学会研究発表会』, Vol.21, C5-3, 2010 年.
- [6] 谷川昇, 佐々木基了, 村上英明, 大久保伸, “一般廃棄物と産業廃棄物の焼却の現状,”『第 36 回全国都市清掃研究・事例発表会』, Vol.36, pp.1-3, 2015 年.
- [7] 一般社団法人 廃棄物資源循環学会廃棄物焼却研究部会, “民間事業者と連携した廃棄物処理の可能性,”『第 29 回廃棄物資源循環学会研究発表会 廃棄物焼却研究部会 企画セッション』, 2018 年.
- [8] 環境省『産業廃棄物処理施設の設置, 産業廃棄物処理業の許可等に関する状況』, 2018 年, <http://www.env.go.jp/recycle/waste/kyoninka.html>, (2021.2.23 閲覧).
- [9] 環境省『産業廃棄物処理施設の設置, 産業廃棄物処理業の許可等に関する状況』, 2020 年, <http://www.env.go.jp/press/107913.html>, (2021.2.23 閲覧).
- [10] 掃部宏文, “一般廃棄物焼却施設と産業廃棄物における全国的な余力の検討,”『廃棄物焼却部会公開セミナー』, pp.1-24, 2020 年.
- [11] 大下和徹, “施設間連携による一般廃棄物と産業廃棄物の混合焼却のポテンシャルの試算,”『廃棄物焼却部会公開セミナー』, pp.1-27, 2020 年.
- [12] 一般社団法人 日本廃棄物コンサルタント協会『日本における今後の廃棄物処理施設の整備のあり方』, 2017 年, http://suspcn.or.jp/pdf/f_index/f_all77.pdf, (2021.2.23 閲覧).
- [13] 公益財団法人 産業廃棄物処理事業振興財団『さんばいくん 産業廃棄物処理業者検索』, <http://www2.sanpainet.or.jp/zyohou/index.php>, (2022.9.28 閲覧).
- [14] 北海道大学廃棄物処分工学研究室『一般廃棄物処理事業実態調査データの詳細分析』, 2011 年.
- [15] 北海道大学廃棄物処分工学研究室『一般廃棄物全連続式焼却施設の物質収支・エネルギー収支コスト分析』, 2012 年.

- [16] 総務省『ビジネスパーソン向け統計データ利活用 1day セミナー公開資料』2020年, <https://www.stat.go.jp/rikatsuyou/pdf/seminar.pdf>, (2021.12.23 閲覧).
- [17] 吉澤康代・石村貞夫『Point 統計学:t分布・F分布・カイ2乗分布』東京図書, 2006年6月.
- [18] 環境省『災害廃棄物対策情報サイト 各地域ブロックにおける取組』, http://kouikishori.env.go.jp/action/regional_blocks/, (2022.9.28 閲覧).
- [19] 環境省『災害廃棄物処理のための制度整備』, <https://www.env.go.jp/recycle/waste/disaster/legislation/law1-1.pdf>, (2022.9.28 閲覧).
- [20] 中部地方環境事務所『民間事業者と連携した災害廃棄物処理』2020年, http://chubu.env.go.jp/recycle/mat/data/r_8/r8-R2semi_S4.pdf, (2022.9.28 閲覧).

第5章 一般廃棄物処理支援のための産業廃棄物焼却施設の有効活用

5.1 はじめに

一般廃棄物焼却施設の耐用年数が一般的に20年程度とされているなかで、25年以上稼働している施設が約半分を占めており、一般廃棄物焼却施設の更新は喫緊の課題であると考えられている[1]。2018年6月19日閣議決定された廃棄物処理施設整備計画では、廃棄物の広域的な処理や廃棄物処理施設の集約化を図るなど、必要な廃棄物処理施設整備を計画的に進めていくべきとしている[2]。しかし、広域化には関係市町村間での調整期間や新施設建設には建設工事に伴う整備期間などを要するために、整備計画が予定どおりに進展するとは限らない。ライフサイクルコストの観点から非効率に稼働せざるを得ない市町村などでは、新施設が稼働するまでの中長期的な期間において、一般廃棄物の可燃ごみ（以後、「可燃ごみ」という）の処理を暫定的に民間委託するケースが出てきている[3]。例えば、奈良県斑鳩町では広域化の実現までの期間、岐阜県羽島市や滋賀県高島市では新施設が稼働するまで期間、可燃ごみの処理を産業廃棄物処理事業者へ委託することで、ライフサイクルコストの縮減を図っている。

一方、環境省の廃棄物処理施設長寿命化総合計画作成の手引き（ごみ焼却施設編）（以後、「手引き」という）[4]では、適時の延命化対策を実施することにより、施設の長寿命化を図ることが重要であるとされている。

ここで、広域化・集約化や長寿命化に焦点を当てた既往研究を概観する。羽原ら（2002）[5]や伊川ら（2013）[6]は、ごみ処理の広域化に伴う効果を定量的に分析した。羽原ら（2002）[5]は、複数の処理シナリオに対して、広域化によるコスト、エネルギー消費量の変化を明らかにした。伊川ら（2013）[6]は、兵庫県を対象としたごみ処理広域化による効果の要因分析を実践した。道網ら（2019）[7]は、長寿命化を目的とした基幹的設備改良工事を経て、更新を検討する施設を想定し、大阪府泉州地域における事例分析を実践した。このように広域化・集約化や長寿命化に関する既往研究はあるが、既存一般廃棄物焼却施設の継続利用と可燃ごみ処理の産業廃棄物処理事業者への委託についての費用を定量的に比較した研究は多いとは言えない。

そこで本章では、既存一般廃棄物焼却施設を継続利用する場合と、産業廃棄物処理事業者へ可燃ごみの処理を委託する場合についての費用を比較し、それらに影響を及ぼす要因を明らかにする。

既存一般廃棄物焼却施設については、仮想的に2020年時点での継続稼働年数について3つのパターン、処理規模について4つのケースを想定する。

5.2 研究方法

5.2.1 可燃ごみ量の推計

国立社会保障・人口問題研究所の「日本の地域別将来推計人口（2018年推計）」[8]によると、2020年以降は人口が減少すると予測されている。本章では、仮想的な市町村の可燃ごみの処理を想定するため、可燃ごみも人口に比例して減少すると一定の仮定を置くことで、可燃ごみの減少傾向を表現する。本章における可燃ごみについては、日本の廃棄物処理[9]を参考に、一般廃棄物焼却施設で直接焼却している災害廃棄物を含んだ推計とする。

2020年を1とした場合の人口減少比[-]は、国立社会保障・人口問題研究所の「日本の地域別将来推計人口（2018年推計）」[8]の5年毎の人口推計より、2020年からの経過年数を T_1 [年] とすると、式(1)のように近似式が定義される(図5-1)。

$$\text{人口減少比[-]} = -0.000007 \times T_1^2 - 0.0044 \times T_1 + 1.0005 \quad (R^2 \text{ 値 } 0.9999) \quad (1)$$

5.2.2 既存一般廃棄物焼却施設における継続稼働に伴う費用の推計手法

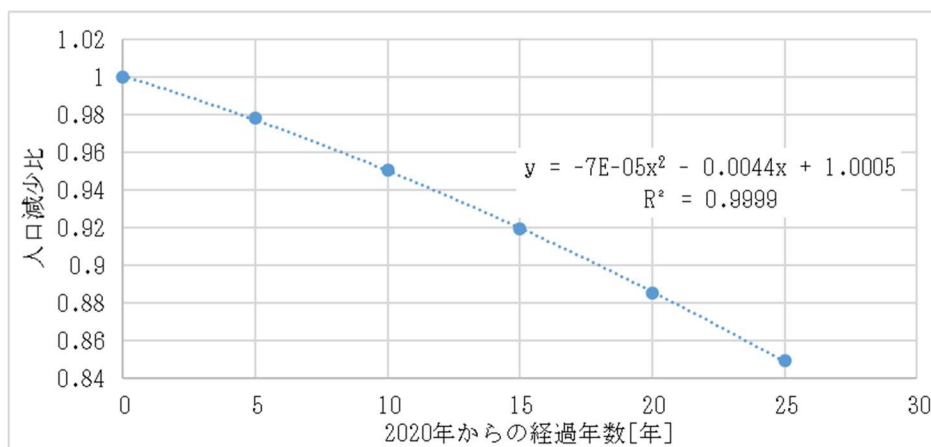
1) 既存一般廃棄物焼却施設の設定

仮想的に(2020年時点での継続稼働年数:3パターン)×(処理規模:4ケース)を想定した。

パターン1は、2020年時点で供用開始から20年(供用開始:2000年)、パターン2は、25年(供用開始:1995年)、パターン3は、30年(供用開始:1900年)である。既存一般廃棄物焼却施設における処理規模および運転方式の設定条件を表5-1に示す。なお、発電設備を設置した施設は想定しない。

可燃ごみ量は、ごみ処理施設整備の設計・計画要領[10]に基づき、式(2)から算定する。

$$\text{可燃ごみ量[t/年]} = \text{処理規模[t/d]} \times 280[\text{d/年}] \times 0.9 \quad (2)$$



国立社会保障・人口問題研究所「日本の地域別将来推計人口（2018年推計）」[8]より作成

図5-1 2020年からの人口減少比

表 5-1 処理規模と運転方式の設定条件

処理規模	25[t/d]	50[t/d]	75[t/d]	100[t/d]
運転方式	バッチ式	-	-	-
	准連続式	准連続式	-	-
	連続式	連続式	連続式	連続式

2) 建設費

後述する点検補修費の推計は、既存一般廃棄物焼却施設の建設費を用いる。そのため、環境省が推奨する 0.6 乗則法（能力-コスト）にもとづく積算技法を用いて、既存一般廃棄物焼却施設の建設費を算出する。具体的には、塩屋ら（2016）[11]が 2000 年以降に供用を開始した一般廃棄物焼却施設の建設事例をもとに算出した建設費が 100[t/d]の処理規模で 80 億円と示されているので、これに 0.6 乗則法を用いて、処理規模に応じた建設費を算出する。

本章では、全連続式を採用する既存一般廃棄物焼却施設だけでなく、バッチ式や准連続式の施設も取り挙げている。これら施設の稼働時間は、環境省の廃棄物処理施設の基幹的設備改良マニュアル[12]によると、バッチ式：8[時間/日]、准連続式：16[時間/日]である。バッチ式と准連続式の既存一般廃棄物焼却施設における建設費は、全連続式：24 時間稼働を想定した場合の処理規模をもとに算出する。

3) 点検補修費

道網ら（2019）[7]が、環境省の手引き[4]を参考に、供用開始後の経過年数を T_2 [年]として求めた式（3）を用いて点検補修費を算出する。点検補修費には、定期的な点検整備・補修費、突発的な補修・修理費、予備品消耗品費、法定点検費（受検費および受検に伴う点検整備費を含む）が含まれている。

$$\text{建設費に対する点検補修費累計}[\%]=0.156 \times T_2^2 + 0.5501 \times T_2 - 2.0138 \quad (R^2 \text{ 値 } 0.9962) \quad (3)$$

4) 用役費

ごみ量[t/d]あたりの用役費[千円/年]は、岡田ら（2016）[13]が算出した式（4）を用いて求める。用役費には、最終処分費、電力費、燃料費、上下水道費、薬品費が含まれる。

$$\text{用役費}[\text{千円/年}] = 669.12 \times \text{ごみ量}[\text{t/d}] + 20,683 \quad (R^2 \text{ 値 } 0.49) \quad (4)$$

5) 人件費

人件費は、既存一般廃棄物焼却施設の運転に必要な人員に人件費単価を乗じて求める。処理規模、運転方式による人員数は、松藤らのアンケート調査[14]をもとに整理した表 5-2 に示す人員数を用いる。人件費単価は、一人あたり 7,000[千円/年]とする。

表 5-2 処理規模・運転方式別の人員数

運転方式 \ 処理規模	人員[人]			
	25[t/d]	50[t/d]	75[t/d]	100[t/d]
バッチ式	9	-	-	-
准連続式	13	14	-	-
全連続式	17	18	19	20

5.2.3 可燃ごみ処理委託費用の推計手法

1) 中継施設の建設費

原らの調査[15]によると、稼働している 50 の中継施設のうち、33 施設がコンパクト・コンテナ方式である。そこで本章における中継施設はコンパクト・コンテナ方式を想定する。

中継施設の建設費は、境港市が可燃ごみ中継設備の必要性の検討資料（以後、「検討資料」という）[16]で求められたコンパクト・コンテナ方式の建設費単価の算定式を用いて算出する。新設の場合には式（5）を用い、既設改造の場合には式（6）を用いる。なお、中継施設の施設規模は、既存一般廃棄物焼却施設の処理規模と同じ規模とせず、可燃ごみの減少を考慮した処理規模とする。日本の廃棄物処理[9]のごみの処理状況によると、2020 年の直接焼却量は 2000 年の 79%である。2000 年に建設された既存一般廃棄物焼却施設の処理規模を 100%とすると、2020 年時点では 79%、1995 年の 84%、1990 年の 88%の可燃ごみを処理していることになる。

ここでは、既存一般廃棄物焼却施設の処理規模にこの減少率を乗じた処理規模を中継施設の施設規模とする。

$$\text{中継施設の新規建設単価[千円/t]} = 216,468 \times (\text{中継施設の施設規模[t/d]})^{-0.643} \quad (5)$$

$$\text{中継施設の既設改造単価[千円/t]} = 183,687 \times (\text{中継施設の施設規模[t/d]})^{-0.643} \quad (6)$$

2) 点検補修費

中継施設の点検補修費は、境港市検討資料[16]を参考に、中継施設の建設費の 2[%]を計上する。

3) 用役費

中継施設の用役費は、境港市検討資料[16]を参考に、可燃ごみ処理量に 2[千円/t]を乗じて求める。

4) 人件費

中継施設の人件費は、先行事例[17]を参考に人員数を 5[人]とし、それに人件費単価を乗じて求める。人件費単価は、一人あたり 7,000[千円/年]とする。なお、複数の先行事例を確

認すると、人員数は施設が採用する中継方式ごとに大きく異なるので、本検討で想定するコンパクタ・コンテナ方式の事例をもとに、過小評価とはならない人員を計上している。

5) 産業廃棄物処理事業者の可燃ごみ処理単価

産業廃棄物処理事業者の可燃ごみ処理単価は、公開されている事例が多いとはいえない。ここでは、委託費用情報の記述が確認できたヒアリング調査の結果をもとに産業廃棄物処理事業者の可燃ごみ処理単価を設定する。東大阪都市清掃施設組合の廃棄物処理施設整備事業に係る費用対効果分析結果[18]（以後、「分析結果」という）には、可燃ごみの処理が可能な産業廃棄物処理事業者（n=2）へのヒアリング調査結果が示されている。ここでは、産業廃棄物処理事業者の可燃ごみ処理単価は、産業廃棄物処理事業者 A：26.25[千円/t]、産業廃棄物処理事業者：36.75[千円/t]であり、産業廃棄物処理事業者間で10.5[千円/t]と大きな差があることがわかる。そこで、本章では委託単価の違いが総費用に及ぼす影響を確認するため、それぞれの産業廃棄物処理事業者の可燃ごみ処理単価ごとに費用を評価する。

6) 中継輸送費

ここでは、既存一般廃棄物焼却施設（中継施設）から可燃ごみの処理が可能な産業廃棄物処理事業者までの輸送費を設定する。中継輸送に関する設定値を表5-3に示す。なお、設定値は小北ら（2010）[19]、東大阪都市清掃施設組合の分析結果[18]をもとにしている。

また、本検討では、仮想的な市町村の可燃ごみの処理を想定することもあり、施設間の輸送距離が総費用に及ぼす影響を確認するために、最小距離と最大距離ごとに費用を評価する。最小距離は10[km]とし、最大距離は6時間で往復可能な距離である85[km]と設定する。

表 5-3 中継輸送に関わる設定値

項目	単位	値
運搬量	[t/d]	7
輸送速度	[km/h]	30
積込積下時間	[h/回]	0.33
一日あたり作業時間	[h]	6
輸送車費用	[千円/台/年]	3,000
車両整備費	[千円/台/年]	1,000
運転手	[千円/台/年]	7,000
燃費	[km/L]	3
燃料費	[円/L]	150

5.3 分析結果

5.3.1 既存一般廃棄物焼却施設の継続利用と可燃ごみ処理委託の比較

1) パターン 1 : 20 年稼働の施設

供用開始 21 年以降の既存一般廃棄物焼却施設の継続費用の累計と可燃ごみ処理委託費用の累計を図 5-2 に示す。可燃ごみ処理委託費用は、中継施設の建設費（新設または既設改造）、産業廃棄物処理事業者の可燃ごみ処理単価、輸送距離のパラメータ設定により結果が変化する。ここでは、複数条件で算定した結果の解釈が容易となるように、累計費用が最小となる場合（中継施設を既設改造、可燃ごみ処理単価が 26.25[千円/t]、輸送距離 10[km]）と、累計費用が最大になる場合（中継施設を新設、可燃ごみ処理単価が 36.75[千円/t]、輸送距離が 85[km]）の 2 つ条件を抽出した結果を示している。赤線で示した 2 条件の結果範囲にパラメータ設定を変更した場合の複数条件の結果が含まれていることになる。

処理規模 25[t/d]の場合には、運転方式がバッチ式と全連続式と間で、21 年目以降 10 年間の一般廃棄物焼却施設継続費用の累積で、21.5 億円の差が生じた。バッチ式と准連続式と間では、10 年間の累積で 16 億円の差が生じた。既存一般廃棄物焼却施設の継続費用がもっとも費用がかからない全連続式の場合と、可燃ごみ処理委託費用が最大になる場合を比較すると、5 年経過した時点で、委託費用の累計が既存一般廃棄物焼却施設の継続費用の累計を下回った。既存一般廃棄物焼却施設の継続費用がもっとも費用がかかるバッチ式の場合には、3 年経過した時点で可燃ごみ処理委託費用の累計が下回った。

処理規模 50[t/d]の場合には、運転方式が准連続式と間で、10 年間の既存一般廃棄物焼却施設の継続費用の累積で 9.3 億円の差が生じた。可燃ごみ処理委託費用が最大になる場合と准連続式を比較すると、6 年経過した時点で委託費用の累計が既存一般廃棄物焼却施設の継続費用の累計を下回った。しかし、全連続式では 10 年経過しないと委託費用の累計が既存一般廃棄物焼却施設の継続費用の累計を下回らなかった。

処理規模 75[t/d]の場合には、可燃ごみ処理委託費用が最大になる場合と既存一般廃棄物焼却施設での継続処理を比較すると、10 年経過しても、委託費用の累計は既存一般廃棄物焼却施設の継続費用の累計を下回らなかった。委託費用が最小となる場合と比較すると、5 年経過した時点で委託費用の累計が既存一般廃棄物焼却施設の継続費用の累計を下回った。

処理規模 100[t/d]の場合には、可燃ごみ処理委託費用が最大になる場合と比較すると、10 年経過しても、委託費用の累計は既存一般廃棄物焼却施設の継続費用の累計を下回らなかった。委託費用が最小となる場合と比較すると、6 年経過した時点で委託費用の累計が焼却施設継続費用の累計を下回った。

- 既存焼却施設での継続処理（バッチ式）
- — 既存焼却施設での継続処理（准連続式）
- — 既存焼却施設での継続処理（全連続式）
- - - 可燃ごみ処理委託（最小費用）
- — 可燃ごみ処理委託（最大費用）

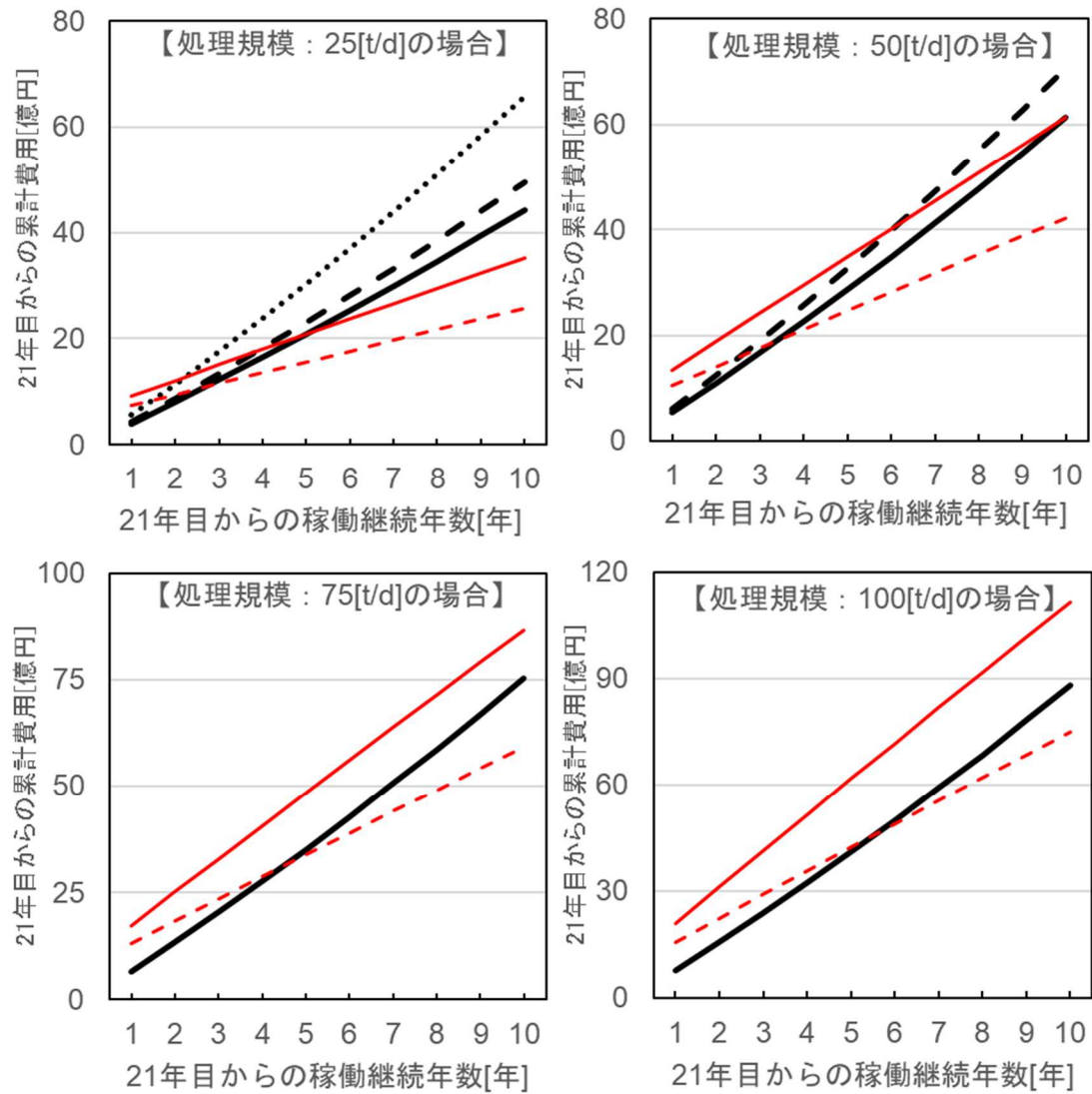


図 5-2 処理規模ごとの焼却施設（供用開始 20 年）継続費用の累計と
可燃ごみ処理委託費用の累計

2) パターン 2 : 25 年稼働の施設

供用開始 26 年以降の既存一般廃棄物焼却施設の継続費用の累計と可燃ごみ処理委託費用の累計を図 5-3 に示す。

処理規模 25[t/d]の場合には、運転方式がバッチ式と全連続式と間で、26 年目以降 10 年間の焼却施設継続費用の累積で、26.6 億円の差が生じた。バッチ式と准連続式と間では、10 年間の累積で 19.9 億円の差が生じた。既存一般廃棄物焼却施設の継続費用がもっとも費用がかからない全連続式の場合と、可燃ごみ処理委託費用が最大になる場合を比較すると、4 年経過した時点で、委託費用の累計が既存一般廃棄物焼却施設の継続費用の累計を下回った。既存一般廃棄物焼却施設の継続費用がもっとも費用がかかるバッチ式の場合には、2 年経過した時点で可燃ごみ処理委託費用の累計が下回った。

処理規模 50[t/d]の場合には、運転方式が准連続式と間で、10 年間の既存一般廃棄物焼却施設の継続費用の累積で 11.6 億円の差が生じた。可燃ごみ処理委託費用が最大になる場合と准連続式を比較すると、4 年経過した時点で委託費用の累計が既存一般廃棄物焼却施設の継続費用の累計を下回った。しかし、全連続式では 7 年経過した時点で可燃ごみ処理委託費用の累計が下回った。

処理規模 75[t/d]の場合には、可燃ごみ処理委託費用が最大になる場合と既存一般廃棄物焼却施設での継続処理を比較すると、10 年経過しても、委託費用の累計は既存一般廃棄物焼却施設の継続費用の累計を下回らなかった。委託費用が最小となる場合と比較すると、3 年経過した時点で委託費用の累計が既存一般廃棄物焼却施設の継続費用の累計を下回った。

処理規模 100[t/d]の場合には、可燃ごみ処理委託費用が最大になる場合と比較すると、10 年経過しても、委託費用の累計は既存一般廃棄物焼却施設の継続費用の累計を下回らなかった。委託費用が最小となる場合と比較すると、5 年経過した時点で委託費用の累計が焼却施設継続費用の累計を下回った。

- 既存焼却施設での継続処理（バッチ式）
- 既存焼却施設での継続処理（准連続式）
- 既存焼却施設での継続処理（全連続式）
- - - 可燃ごみ処理委託（最小費用）
- 可燃ごみ処理委託（最大費用）

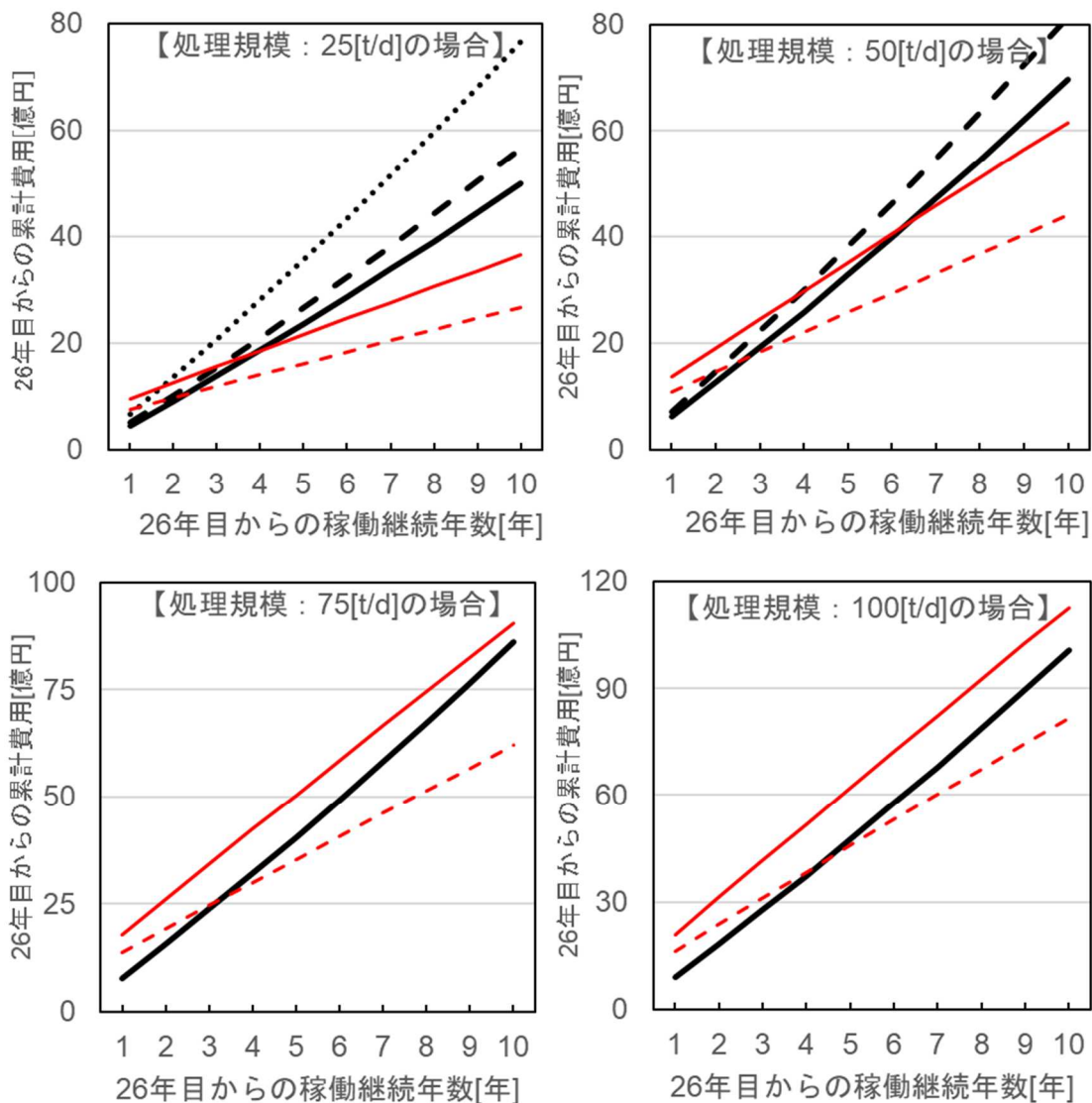


図 5-3 処理規模ごとの焼却施設（供用開始 25 年）継続費用の累計と
可燃ごみ処理委託費用の累計

3) パターン3：30年稼働の施設

供用開始31年以降の既存一般廃棄物焼却施設の継続費用の累計と可燃ごみ処理委託費用の累計を図5-4に示す。

処理規模25[t/d]の場合には、運転方式がバッチ式と全連続式と間で、31年目以降10年間の焼却施設継続費用の累積で、31.7億円の差が生じた。バッチ式と准連続式と間では、10年間の累積で23.5億円の差が生じた。既存一般廃棄物焼却施設の継続費用がもっとも費用がかからない全連続式の場合と、可燃ごみ処理委託費用が最大になる場合を比較すると、4年経過した時点で、委託費用の累計が既存一般廃棄物焼却施設の継続費用の累計を下回った。既存一般廃棄物焼却施設の継続費用がもっとも費用がかかるバッチ式の場合には、2年経過した時点で可燃ごみ処理委託費用の累計が下回った。

処理規模50[t/d]の場合には、運転方式が准連続式と間で、10年間の既存一般廃棄物焼却施設の継続費用の累積で13.9億円の差が生じた。可燃ごみ処理委託費用が最大になる場合と准連続式を比較すると、4年経過した時点で委託費用の累計が既存一般廃棄物焼却施設の継続費用の累計を下回った。全連続式では4年経過した時点で委託費用の累計が既存一般廃棄物焼却施設の継続費用の累計を下回った。

処理規模75[t/d]の場合には、可燃ごみ処理委託費用が最大になる場合と既存一般廃棄物焼却施設での継続処理を比較すると、10年経過した時点で委託費用の累計が既存一般廃棄物焼却施設の継続費用の累計を下回った。委託費用が最小となる場合と比較すると、3年経過した時点で委託費用の累計が既存一般廃棄物焼却施設の継続費用の累計を下回った。

処理規模100[t/d]の場合には、可燃ごみ処理委託費用が最大になる場合と比較すると、10年経過しても、委託費用の累計は既存一般廃棄物焼却施設の継続費用の累計を下回らなかった。委託費用が最小となる場合と比較すると、4年経過した時点で委託費用の累計が焼却施設継続費用の累計を下回った。

- 既存焼却施設での継続処理（バッチ式）
- 既存焼却施設での継続処理（准連続式）
- 既存焼却施設での継続処理（全連続式）
- - - 可燃ごみ処理委託（最小費用）
- 可燃ごみ処理委託（最大費用）

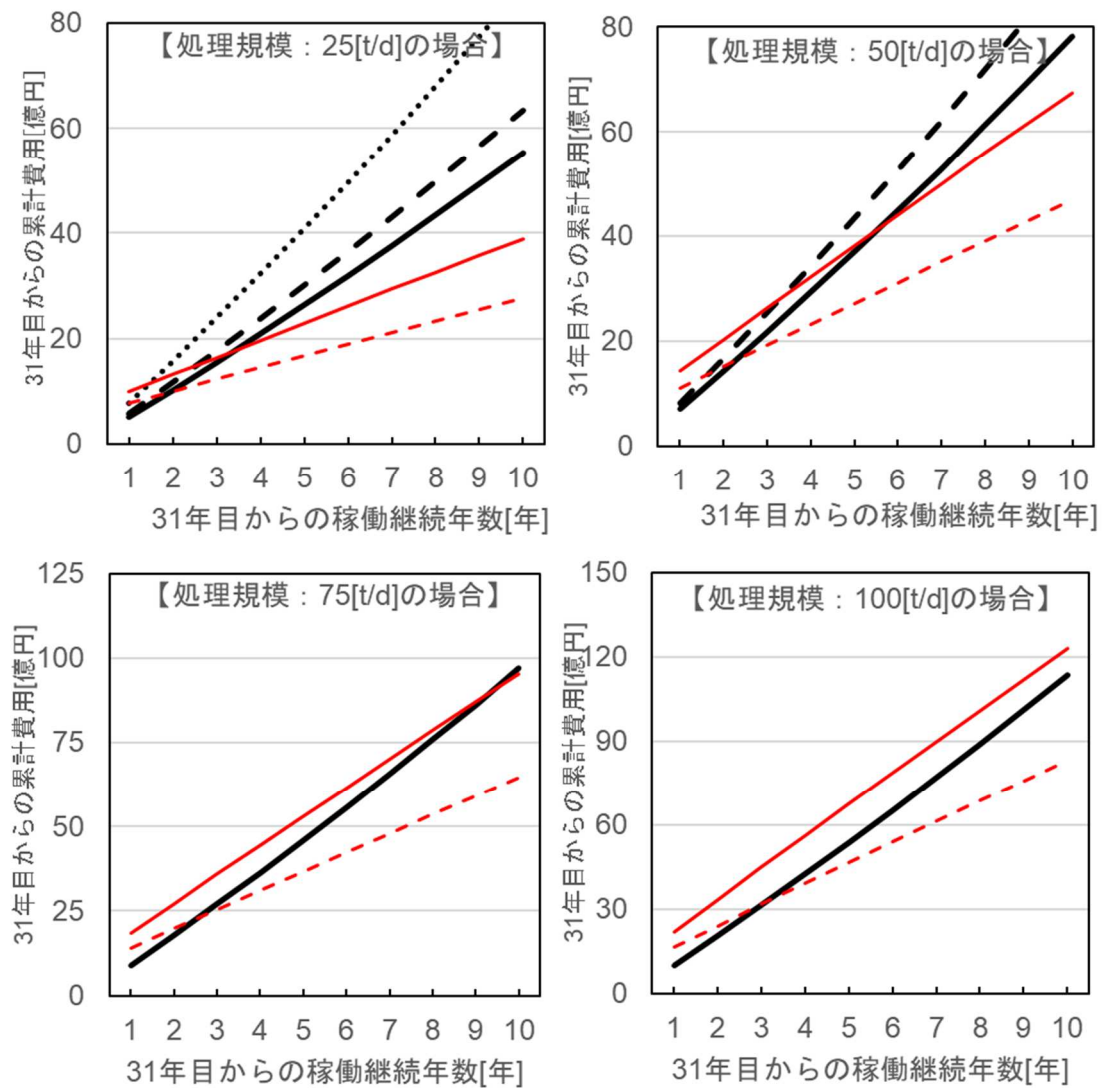


図 5-4 処理規模ごとの焼却施設（供用開始 30 年）継続費用の累計と
可燃ごみ処理委託費用の累計

5.3.2 感度分析の結果

1) パターン 1 : 20 年稼働の施設

可燃ごみ処理委託費用が最大になる場合（中継施設の新設，処分費 36.75[千円/t]，輸送距離を 85[km]）の結果を基準値として，パラメータの感度分析を行った。

供用開始 20 年経過した一般廃棄物焼却施設における感度分析の結果を図 5-5 に示す。

すべての処理規模の条件において，もっとも影響が見られたのは，産業廃棄物処理事業者の可燃ごみ処理単価であった。中継施設の建設方法が新設か既設改造かという整備方法による違いは，総費用への影響が認められなかった。

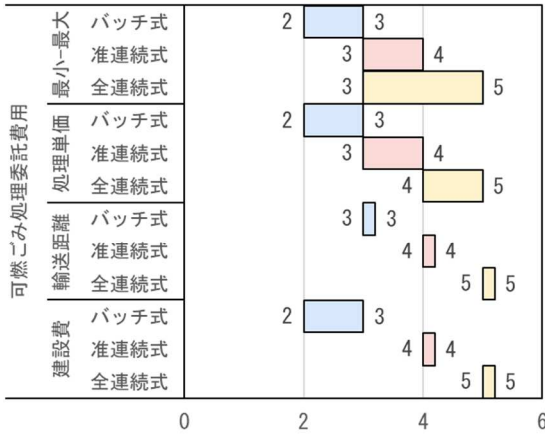
処理規模 25[t/d]の施設では，産業廃棄物処理事業者の可燃ごみ処理単価の影響は運転方式による違いはなく，いずれの場合においても産業廃棄物処理事業者への可燃ごみ処理委託費用の累計が既存一般廃棄物焼却施設の継続費用の累計を下回る経過年数が 1 年短縮された。輸送距離の違いでは影響が見られなかった。建設の違いでは，バッチ式でのみ焼却施設継続費用の累計を下回る経過年数が 1 年短縮されたが，それ以外の運転方式では影響が見られなかった。

処理規模 50[t/d]の施設では，産業廃棄物処理事業者の可燃ごみ処理単価の違いにより，准連続式で，委託費用の累計が焼却施設継続費用の累計を下回る経過年数が 3 年短縮された。全連続方式では経過年数が 4 年短縮された。輸送距離の違いでは，准連続式で，委託費用の累計が焼却施設継続費用の累計を下回る経過年数が 2 年短縮された。全連続方式では経過年数が 3 年短縮された。

処理規模 75[t/d]の施設では，産業廃棄物処理事業者の可燃ごみ処理単価の違いで，委託費用の累計が焼却施設継続費用の累計を下回る経過年数が 9 年短縮された。輸送距離の違いでは，6 年短縮された。

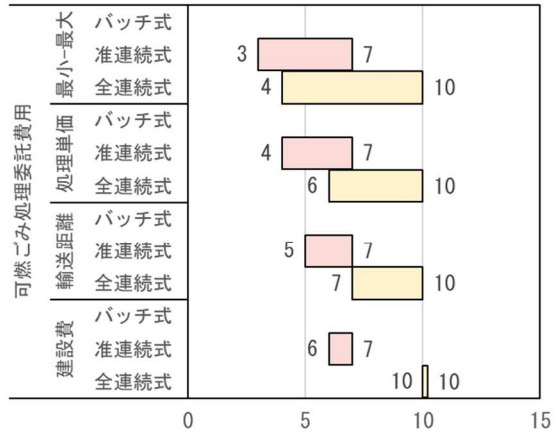
処理規模 100[t/d]の施設では，産業廃棄物処理事業者の可燃ごみ処理単価の違いで，委託費用の累計が焼却施設継続費用の累計を下回る経過年数が 11 年短縮された。輸送距離の違いでは，7 年短縮された。中継施設の建設方法の違いによる影響が見られなかった。

【処理規模：25[t/d]の場合】



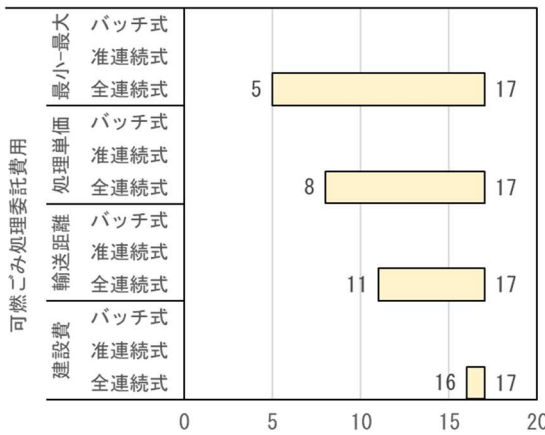
焼却施設（供用開始20年）継続費用の累計が
可燃ごみ処理委託費用の累計を下回る年数[年]

【処理規模：50[t/d]の場合】



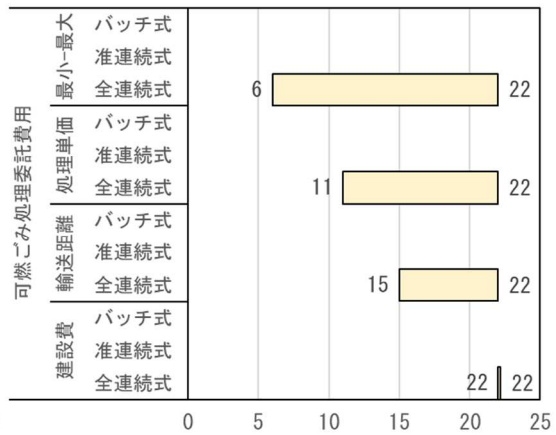
焼却施設（供用開始20年）継続費用の累計が
可燃ごみ処理委託費用の累計を下回る年数[年]

【処理規模：75[t/d]の場合】



焼却施設（供用開始20年）継続費用の累計が
可燃ごみ処理委託費用の累計を下回る年数[年]

【処理規模：100[t/d]の場合】



焼却施設（供用開始20年）継続費用の累計が
可燃ごみ処理委託費用の累計を下回る年数[年]

図 5-5 供用開始 20 年経過した焼却施設における感度分析の結果

2) パターン 2 : 25 年稼働の施設

供用開始 25 年経過した焼却施設における感度分析の結果を図 5-6 に示す。

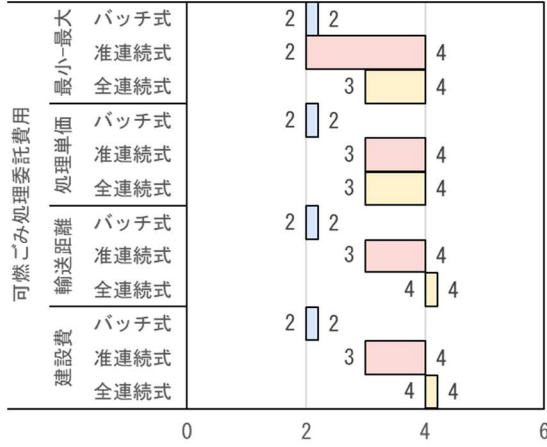
処理規模 25[t/d]の施設では、産業廃棄物処理事業者の可燃ごみ処理単価の違いにより、准連続式および全連続式で委託費用の累計が既存一般廃棄物焼却施設の継続費用の累計を下回る経過年数が 1 年短縮された。しかし、バッチ式では影響が見られなかった。輸送距離の違いでは、准連続式でのみ焼却施設継続費用の累計を下回る経過年数が 1 年短縮された。中継施設の建設方法の違いでも、准連続式でのみ焼却施設継続費用の累計を下回る経過年数が 1 年短縮されたが、それ以外の運転方式では影響が見られなかった。

処理規模 50[t/d]の施設では、産業廃棄物処理事業者の可燃ごみ処理単価の違いにより、准連続式で、委託費用の累計が焼却施設継続費用の累計を下回る経過年数が 1 年短縮された。全連続式では経過年数が 2 年短縮された。輸送距離の違いでは、准連続式では影響がみられなかった。全連続式では、委託費用の累計が焼却施設継続費用の累計を下回る経過年数が 2 年短縮された。中継施設の建設方法の違いでは、准連続式では影響がみられなかったが、全連続式では経過年数が 1 年短縮された。

処理規模 75[t/d]の施設では、可燃ごみの民間委託費用の違いで、委託費用の累計が焼却施設継続費用の累計を下回る経過年数が 7 年短縮された。輸送距離の違いでは、経過年数が 5 年短縮された。建設の違いでは、経過年数が 1 年短縮された。

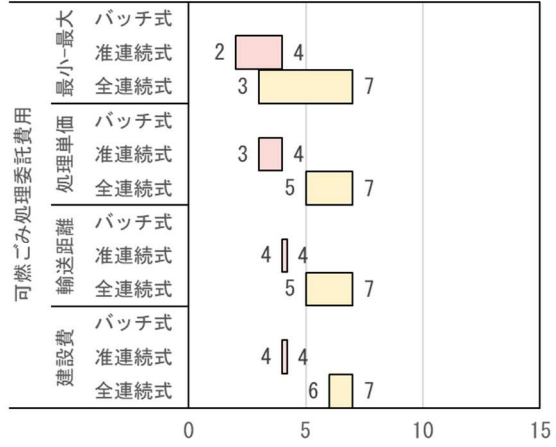
処理規模 100[t/d]の施設では、産業廃棄物処理事業者の可燃ごみ処理単価の違いで、委託費用の累計が焼却施設継続費用の累計を下回る経過年数が 11 年短縮された。輸送距離の違いでは、経過年数が 7 年短縮された。中継施設の建設方法の違いでは経過年数が 1 年短縮された。

【処理規模：25[t/d]の場合】



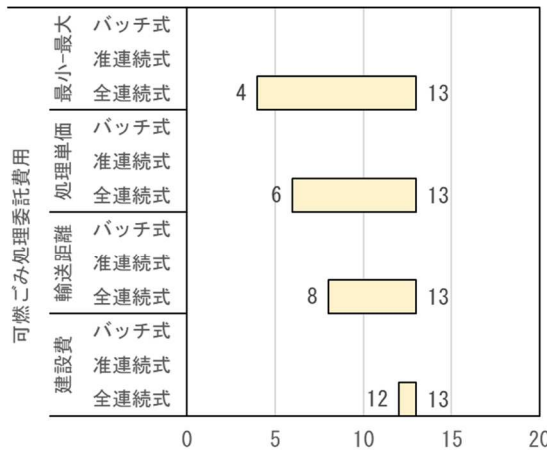
焼却施設（供用開始25年）継続費用の累計が
可燃ごみ処理委託費用の累計を下回る年数[年]

【処理規模：50[t/d]の場合】



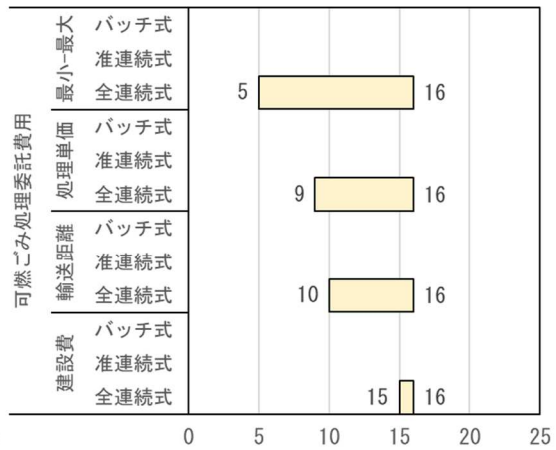
焼却施設（供用開始25年）継続費用の累計が
可燃ごみ処理委託費用の累計を下回る年数[年]

【処理規模：75[t/d]の場合】



焼却施設（供用開始25年）継続費用の累計が
可燃ごみ処理委託費用の累計を下回る年数[年]

【処理規模：100[t/d]の場合】



焼却施設（供用開始25年）継続費用の累計が
可燃ごみ処理委託費用の累計を下回る年数[年]

図 5-6 供用開始 25 年経過した焼却施設における感度分析の結果

3) パターン 3 : 30 年稼働の施設

供用開始 30 年経過した焼却施設における感度分析の結果を図 5-7 に示す。

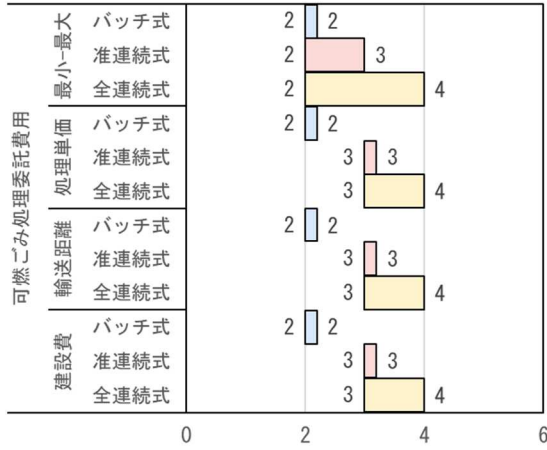
処理規模 25[t/d]の施設では、産業廃棄物処理事業者の可燃ごみ処理単価の違いにより、全連続式で委託費用の累計が既存一般廃棄物焼却施設の継続費用の累計を下回る経過年数が 1 年短縮された。しかし、バッチ式および准連続式では影響が見られなかった。輸送距離の違いおよび中継施設の建設方法の違いでも全連続式で委託費用の累計が既存一般廃棄物焼却施設の継続費用の累計を下回る経過年数が 1 年短縮された。しかし、バッチ式および准連続式では影響が見られなかった。

処理規模 50[t/d]の施設では、産業廃棄物処理事業者の可燃ごみ処理単価の違いにより、准連続式で、委託費用の累計が焼却施設継続費用の累計を下回る経過年数が 1 年短縮された。全連続方式では経過年数が 2 年短縮された。輸送距離の違いおよび建設の違いで、准連続式および全連続式で、委託費用の累計が焼却施設継続費用の累計を下回る経過年数が 1 年短縮された。

処理規模 75[t/d]の施設では、可燃ごみの民間委託費用の違いで、委託費用の累計が焼却施設継続費用の累計を下回る経過年数が 6 年短縮された。輸送距離の違いでは、経過年数が 4 年短縮された。中継施設の建設方法の違いでは影響が見られなかった。

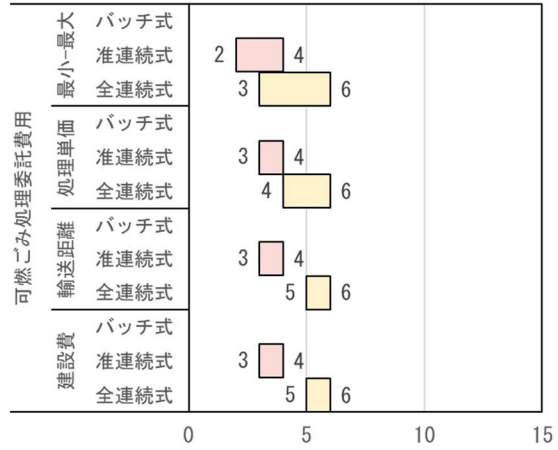
処理規模 100[t/d]の施設では、産業廃棄物処理事業者の可燃ごみ処理単価の違いで、委託費用の累計が焼却施設継続費用の累計を下回る経過年数が 8 年短縮された。輸送距離の違いでは、5 年短縮された。中継施設の建設方法の違いでは影響が見られなかった。

【処理規模：25[t/d]の場合】



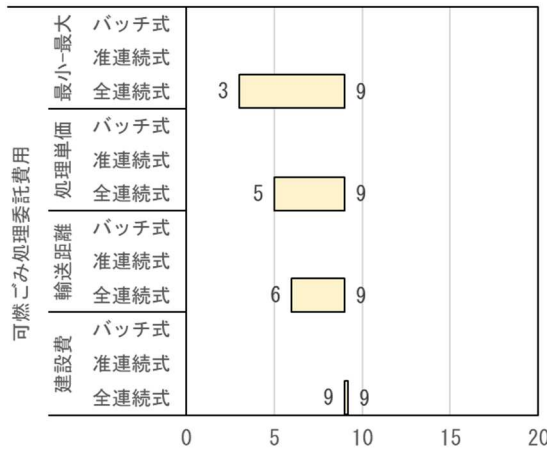
焼却施設（供用開始30年）継続費用の累計が
可燃ごみ処理委託費用の累計を下回る年数[年]

【処理規模：50[t/d]の場合】



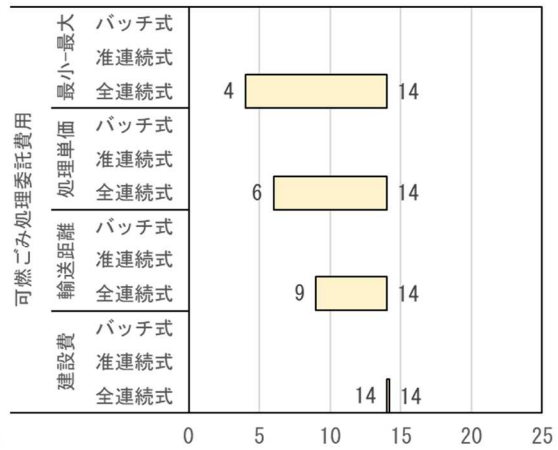
焼却施設（供用開始30年）継続費用の累計が
可燃ごみ処理委託費用の累計を下回る年数[年]

【処理規模：75[t/d]の場合】



焼却施設（供用開始30年）継続費用の累計が
可燃ごみ処理委託費用の累計を下回る年数[年]

【処理規模：100[t/d]の場合】



焼却施設（供用開始30年）継続費用の累計が
可燃ごみ処理委託費用の累計を下回る年数[年]

図 5-7 供用開始 30 年経過した焼却施設における感度分析の結果

5.4 まとめ

既存一般廃棄物焼却施設を継続利用する場合と、産業廃棄物処理事業者へ可燃ごみの処理を委託する場合についての費用を比較し、それらに影響を及ぼす要因を明らかにした。

処理規模 25[t/d]の一般廃棄物焼却施設においては、運転方式の違い、供用開始年の違いに関わらず、2020年からの経過年数が5年以下で、施設の継続利用よりも産業廃棄物処理事業者へ可燃ごみ処理を委託するほうが費用削減につながる。処理規模が75[t/d]、100[t/d]と大きくなると、可燃ごみ処理委託費用が最大になる場合においては、経過年数10年までに費用削減効果が期待できない。

可燃ごみ処理委託の費用に最も影響があるのは、産業廃棄物処理事業者の可燃ごみ処理単価である。処理規模25[t/d]の施設においては影響が少ないが、処理規模100[t/d]の施設においては、可燃ごみ処理単価によっては費用削減効果が期待できる。

処理規模が大きくなると、輸送距離の影響も見られ、費用削減効果が期待できる年数が最大で7年短縮できる。

産業廃棄物処理焼却施設による、一般廃棄物処理の支援として、可燃ごみ量が少ない場合は、比較的遠方の施設まで支援が可能であるが、可燃ごみ量が増えるにつれ、遠方の施設での費用削減効果が少なくなっていくことが示唆された。

第5章 参考文献

- [1] 環境省『広域化・集約化に係る手引き』, <http://www.env.go.jp/recycle/waste/kouiki-syuyaku-tebiki.pdf>, (2022.9.28 閲覧).
- [2] 環境省『持続可能な適正処理の確保に向けたごみ処理の広域化及びごみ処理施設の集約化について (通知)』, <https://www.env.go.jp/hourei/11/000652.html>, (2022.9.28 閲覧).
- [3] 一般社団法人 廃棄物資源循環学会『民間事業者と連携した廃棄物処理の可能性』, <https://jsmcwm.or.jp/mswi/files/2018/09/201809.pdf>, (2022.9.28 閲覧).
- [4] 環境省『廃棄物処理施設長寿命化総合計画作成の手引き (ごみ焼却施設編)』, https://www.env.go.jp/recycle/waste/3r_network/7_misc/gl-ple_prov.pdf, (2022.9.28 閲覧).
- [5] 羽原浩史, 松藤敏彦, 田中信壽, 井上真知子, “コストおよびエネルギー消費量による一般廃棄物広域化シナリオの比較に関する研究,” 『環境システム研究論文集』 Vol.3, pp.323-332, 2002 年.
- [6] 伊川純慶, 中久保豊彦, 東海明宏, “ごみ焼却施設更新に係るごみ処理広域化施策の効果要因分析: 兵庫県を対象として,” 『環境情報科学 学術研究論文集』, Vol.27, pp.163-168, 2013 年.
- [7] 道網亮佑, 山田崇雄, 中尾彰文, 山本秀一, 山本祐吾, 吉田登, “人口減少化での老朽化したごみ焼却施設における施設更新の事業性評価—施設の集約, 更新時期, 稼働率を考慮して—,” 『土木学会論文集 G』, Vol.75, No.6, pp. II_273-II_284, 2019 年.
- [8] 国立社会保障・人口問題研究所『日本の地域別将来推計人口 (平成 30 (2018) 年推計)』, <https://www.ipss.go.jp/pp-shicyoson/j/shicyoson18/t-page.asp>, (2022.9.28 閲覧).
- [9] 環境省『日本の廃棄物処理 (平成 10 年度～令和 2 年度)』, http://www.env.go.jp/recycle/waste_tech/ippan/stats.html, (2022.9.28 閲覧).
- [10] 社団法人 全国都市清掃会議編, “ごみ処理施設整備の計画, 設計要領 (2017 改訂版),” 2017 年.
- [11] 塩屋望美, 中村修, “焼却施設広域化の経済効果に関する研究—長崎県, 全国を事例として—,” 『九州地区国立大学教育係, 文系研究論文集』 Vol.3, No.2, 2016 年.
- [12] 環境省『廃棄物処理施設の基幹的設備改良マニュアル』, https://www.env.go.jp/recycle/misc/guideline/manual2_h30.pdf, (2022.9.28 閲覧).
- [13] 岡田進太郎, 石井一英, 藤山淳史, 古市徹, “ごみ減量によるコスト, エネルギー効率性への影響を踏まえた廃棄物処理システムの構築に関する研究—都市規模に応じたバイオガスプラントの有用性について—,” 『土木学会論文集 G』 Vol.72, No.6, pp. II_217~II_228, 2016 年.
- [14] 松藤敏彦・黄仁姫『一般廃棄物焼却施設の物質収支・エネルギー消費・コスト算出モデルの作成』, http://www.env.go.jp/policy/kenkyu/suishin/kadai/syuryo_report/pdf/K2323.pdf, (2022.5.19 閲覧).
- [15] 原嘉章, 井上護 “廃棄物の広域化を支える中継輸送システムの役割,” 『廃棄物資源循環学

会誌』 Vol.33, No.2, pp.115-123, 2022 年.

- [16] 境港市『可燃ごみ中継設備の必要性の検討資料』, <https://www.city.sakaiminato.lg.jp/upload/user/00007212-4E08.pdf>, (2022.5.14 閲覧).
- [17] 伊賀市『民間業者へ処理を委託している自治体の事例』, <https://www.city.iga.lg.jp/cmsfiles/contents/0000001/1307/1.pdf>, (2022.5.19 閲覧).
- [18] 東大阪都市清掃施設組合『廃棄物処理施設整備事業に係る費用対効果分析結果』, http://www.higashiosaka-toshiseisou.or.jp/maintenance/pdf/cost-effectiveness_analysis.pdf, (2022.5.19 閲覧).
- [19] 小北浩司, 増田孝弘, “ごみ発電の観点からみたごみ処理の広域化,” 『廃棄物資源循環学会誌』 Vol.21, No.6, pp.358-367, 2010 年.

第 6 章 カーボンニュートラルに向けた産業廃棄物焼却施設に代わる廃棄物バイオマスの利用

6.1 はじめに

2018 年に閣議決定された第四次循環型社会推進基本計画[1]における中長期的な方向性のひとつである「持続可能な社会づくりとの統合的取組み」では、環境的側面の中で、循環と低炭素に関して、これまで以上に廃棄物部門で温室効果ガス（GHG: Greenhouse Gas）排出量をさらに削減するとともに、他部門で廃棄物を原燃料としてさらに活用すること、廃棄物発電の発電効率を向上させることなどによりその他の部門での GHG 排出量の削減をさらに進めることを目指す[2]としている。

2020 年 12 月 25 日に開催された国・地方脱炭素実現会議（第 1 回）[3]のなかで環境省が地域脱炭素ロードマップ策定の趣旨・目的を発表した。そこには、ごみ処理などの生活インフラでの未利用エネルギーの活用や再生エネルギーの導入、さらなる高効率化の実施、汚泥や廃棄物などの生成物をエネルギーとして地域内で利用することが記されている。

廃棄物処理業界では、全国産業資源連合会低炭素社会実行計画[4]で 2030 年度における GHG 排出量を 2010 年度に対し 1 割削減、焼却時の発電量熱利用量を 2 倍にすることを目標としている。中間処理分野の具体的な目標達成の方策として、バイオマスエネルギーの製造、廃棄物発電の発電効率の向上などが例示されている。

しかし、第 4 章における実態調査で、50[t/d]以上の処理規模のロータリーキルン炉、ロータリーキルン&ストーカ炉でのみ発電設備を設置しており、また、施設を 30 年以上稼働させる予定であることから、さらなる廃棄物発電が難しいことが明らかとなった。

廃棄物発電以外でのエネルギー回収として、環境省ではカーボンニュートラルな廃棄物系バイオマスの利活用は、循環型社会の形成だけでなく、GHG 排出削減により地球温暖化対策にも資することから、地域の特性の応じた適切な再生利用などを推進することが必要だとしており[5]、メタン発酵施設による廃棄物エネルギーの回収が注目されている。

メタン発酵施設は、原料（投入物）の固形分濃度の違いにより乾式方式と湿式方式の 2 つに大別される。なかでも湿式方式のメタン発酵施設（以下、「湿式メタン発酵施設」という）は、低固形分濃度でも運転可能なこと、生ごみのような高分解率の原料に適したことから、国内での導入事例が多い。しかし、湿式メタン発酵施設が事業として成立するためには、消化液を適切に利活用するシステムの構築が不可欠であり、消化液を有効利用できない場合には水処理設備が必要となる[6]。水処理設備を導入する場合、導入に伴う建設費、ランニングコストが増加するため、水処理設備を必要としない場合と比べると経済性が成り立たないことが多い。そのため、消化液の水処理設備の敷設費用をどのように削減するかは、事業として成立するために重要なポイント[7]といえる。

一方で、管理型最終処分場の浸出水処理施設は、供用年数が経過することで原水の処理計

画値と実績値に大きな乖離があることを小山ら（2020）[8]が実態調査にて明らかにしている。処理水槽の耐用年数は50年[9]と長期に及ぶが、施設運用の実態に合わない。そのため、管理型最終処分場の浸出水処理施設が時系列で生じる余力を、その他用途への転用可能性と見込むことができる。その可能性のひとつとして、湿式メタン発酵施設から排出される消化液の水処理としての活用が考えられる。

メタン発酵に関する既往研究は、佐野ら（2007）[10]は、一般廃棄物をすべてガス化溶解で処理する場合と、生ごみとその他可燃ごみを分別収集し、生ごみをメタン発酵、可燃ごみをガス化溶解で処理する場合とでのライフサイクルコストおよびCO₂、SO_x、NO_x発生量の比較をおこなっている。天野ら（2007）[11]は、草津市の一般廃棄物処理を対象に、複数のシナリオでの温室効果ガス排出量、最終処分量、処理コストの分析を行っている。シナリオの一つとして、分別収集した生ごみをメタン発酵しバイオガス発電するとともに、それ以外の可燃ごみを焼却による熱回収、発電した場合を評価している。谷川ら（2008）[12]は、実稼働している生ごみバイオガス化施設を対象に、メタン回収量、排ガスおよび排水の環境への負荷、エネルギー収支、処理水の放流先の違いによる維持管理コストを明らかにしている。井上ら（2014）[13]は、乾式メタン発酵のコンバインドシステムについて、焼却施設高効率発電の導入。生ごみはメタン発酵、バイオガスをガスエンジンで発電、生ごみ以外は高効率発電を導入した焼却施設で焼却。メタン発酵のバイオガスを焼却施設廃熱ボイラの独立過熱器への利用。の3つのシナリオについて、エネルギー収支を算出し、焼却施設における電力消費削減、発電効率の向上がエネルギー回収増加に最も効果があることを明らかにしている。

また、既存の水処理施設を有効活用する事例として、製造工場などが場内の水処理施設を活用しメタン発酵するコープこうべ六甲アイランド食品工場食品廃棄物処理設備がある[14][15]。このほかにも、下水処理場の水処理機能を活用したメタン発酵の実践例として、珠洲市バイオマスメタン発酵施設がある[16]。こうした製造工場や下水処理場のほかの水処理施設である管理型最終処分場の浸出水処理施設での実践事例の検討に関連した研究事例は、ほとんど見当たらない。

現在、検討が進められている第五次社会資本整備重点計画の概要案[17]には、社会情勢の変化をふまえて、インフラ分野の脱炭素化とともにインフラの多面的な利活用が掲げられている。こうしたインフラ計画立案の動向を踏まえると、本章は既存インフラの使い方を見直して社会的な便益を向上させる既存ストックの活用検討に資するとして位置づけられる。

そこで、本章では、産業廃棄物焼却施設にかわる廃棄物系バイオマス利用のひとつとして、埋立完了後の管理型最終処分場の浸出水処理施設を湿式メタン発酵施設から生じる消化液の水処理設備として利用する計画をモデルケースとし、全国での適用可能性を検証する。

6.2 研究手順

研究手順を図 6-1 に示す。現在、大栄環境株式会社では、100%出資子会社である三重中央開発株式会社の敷地内に設置する浸出水処理施設（処理規模：300[t/d]）にばっ気ブロワ（風量：30[m³/min]）を増設したうえで、湿式メタン発酵施設の水処理設備として利用するバイオガス発電（1,980[kW]：990[kW]×2基）を計画している（以下、「A社事例」とする）[18]。この既存ストックを利活用する先進的な計画をモデル化し、全国の埋立完了後の最終処分場を活用した湿式メタン発酵の適用可能性を分析する。この分析では、産業廃棄物処理事業者にとって事業性などの検討で有益な情報を提示する兵庫県食品残渣等小規模地産エネルギー導入促進事業メタン発酵施設の導入ガイドライン（以下、「兵庫県ガイドライン」）[7]をもとにする。水処理設備を建設する場合の構成設備を図 6-2 に、浸出水処理施設を利用する場合の構成設備を図 6-3 に示す。

全国には、655社[19]の産業廃棄物最終処分業者が存在し、そのうち123社が優良産廃処理業者認定制度[20]に認定されている。そのなかで、本分析に必要な基本情報が入手可能な管理型最終処分場を保有する51社（61施設[21]）の最終処分業者を対象とする。対象とした最終処分場（61施設）の位置を図 6-4 に示す。アメダス気象データおよび最終処分場面積から浸出水処理施設の処理規模を推計し、適用可能性を検証する。

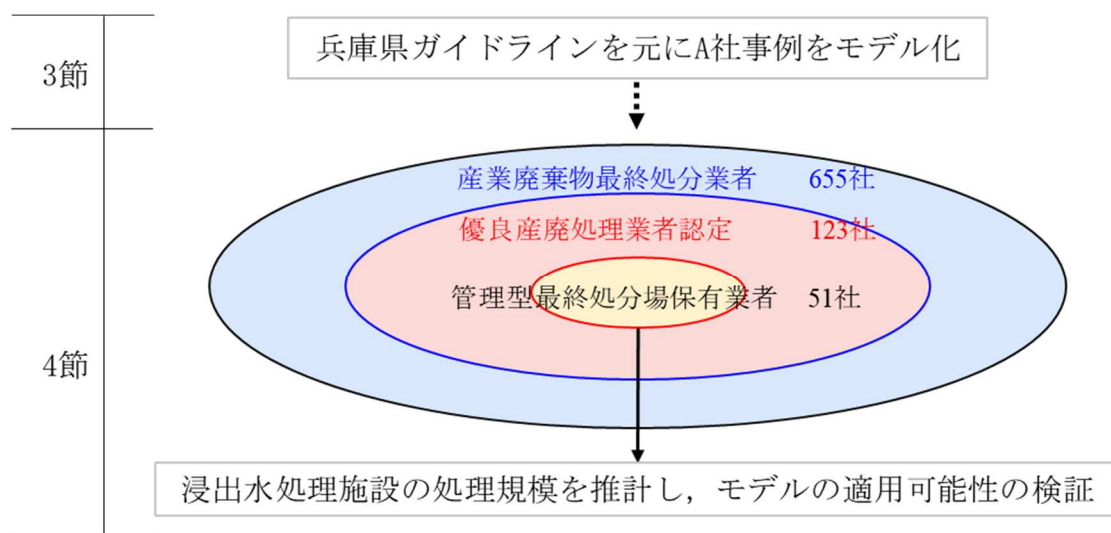


図 6-1 研究手順

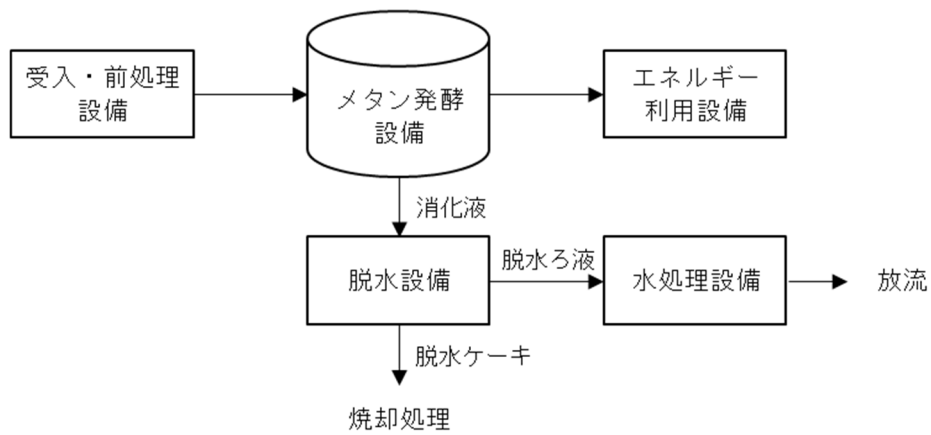


図 6-2 水処理設備を建設する場合

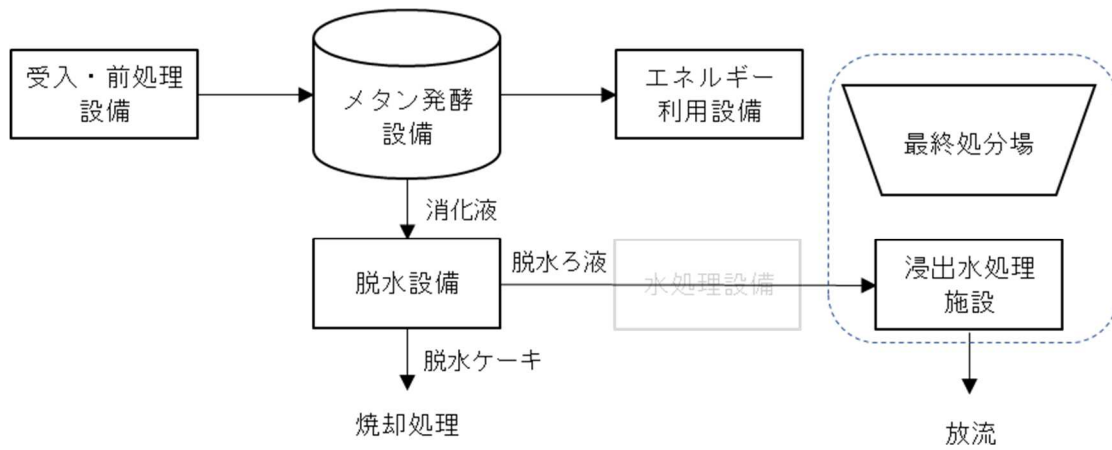


図 6-3 浸出水処理施設を利用する場合



図 6-4 対象とした最終処分場（61 施設）の位置

6.3 湿式メタン発酵施設のモデルケース分析

6.3.1 湿式メタン発酵施設の物質収支

湿式メタン発酵施設に投入可能な代表的な産業廃棄物は、動植物性残渣、有機汚泥、家畜排せつ物である[5]。それぞれの未利用割合に着目すると、炭素トン換算で動植物性残渣が約 70%、有機汚泥が約 20%、家畜排せつ物が約 10%となっている[22]。そこで本章では、その他の産業廃棄物と比較して未利用割合が約 70%と大きい動植物性残渣を投入廃棄物と設定した。動植物性残渣のバイオガス発生原単位は、 $150[\text{Nm}^3/\text{t}]$ [5] (固形物量: 20%[5]) と設定した。また、湿式メタン発酵施設の運転時の固形物量は 10%[7] (投入物の比重: $1[\text{t}/\text{m}^3]$ [7]) と設定した。発酵残渣の脱水後における含水率を 85%[7] と設定した。バイオガス中のメタン濃度を 55%[5] と設定し、メタンガスの低位発熱量を $35.7[\text{MJ}/\text{Nm}^3]$ [7] と設定した。

兵庫県ガイドライン[7]では、発電出力が 275[kW]以下の場合、小型発電機を複数台設置し、発電出力が 276[kW]以上の場合、発電機を 1 台設置する想定としている。小型発電機の発電効率は、こうした想定を踏まえ、275[kW]以下の場合、30%[23]、276[kW]以上の場合、39%[24] と設定した。メタン発酵施設の電力使用量は、兵庫県ガイドラインが用いた推計方法を参考に投入廃棄物量に比例するとした。水処理設備の電力使用量は、消化液発生量に比例するとした。増設するばっ気ブロワの電力使用量は、カタログ[25]に記載される標準吸込状態空気量 $[\text{m}^3/\text{min}]$ あたり $0.42[\text{kW}/\text{m}^3/\text{min}]$ (動力[kW]の平均値) をもとに算定した。メタン発酵施設における物質収支の算定式を表 6-1 に示す。これをもとに、動植物性残渣 150[t/d] をメタン発酵に投入した場合の発電出力を求めると 1,994[kW]となる。モデルケースの計画値である発電出力 1,980[kW]と比較するとその誤差は 1%未満となる。

表 6-1 メタン発酵施設における物質収支の算定方法

項目	単位	算定式
バイオガス発生量	[Nm ³ /d]	投入廃棄物量[t/d]×バイオガス発生原単位[Nm ³ /t]
消化液発生量	[t/d]	希釈原料投入量[t/d]-バイオガス発生量の質量換算値[t/d]
バイオガス発生量の質量換算値	[t/m ³]	バイオガスモル質量(g/mol)/22.4 (L/mol) /1,000
バイオガス発熱量	[MJ/d]	バイオガス発生量[Nm ³ /d]×メタンガス濃度[%]×メタンガス低位発熱量[MJ/Nm ³]
脱水ろ液発生量	[t/d]	消化液発生量[t/d]×(1-消化液のTS[%]) - 脱水ケーキ発生量[t/d]×脱水ケーキの含水率
消化液のTS	[%]	希釈原料投入量[t/d]×希釈原料のTS[%]-バイオガス発生量の質量換算値[t/d] / 消化液発生量[t/d]
脱水ケーキ発生量	[t/d]	(消化液発生量[t/d]×消化液のTS[%]) / (1-脱水ケーキ含水率)
発電出力	[kW]	バイオガス発生量[Nm ³ /d]×バイオガス発熱量[MJ/Nm ³]×発電効率[%]/3.6[MJ/kWh]/24
メタン発酵施設使用電力	[kW/h]	希釈原料投入量[t/d]×155[kWh]/93.7[t/d]
水処理設備使用電力	[kW/h]	
消化液発生量 52.3[t/d]未満		消化液発生量[t/d]×19[kWh]/17.4[t/d]
消化液発生量 52.3 ~87.9[t/d]		消化液発生量[t/d]×35[kWh]/52.3[t/d]
消化液発生量 87.9[t/d]以上		消化液発生量[t/d]×50[kWh]/87.9[t/d]
増設ブロワ使用電力	[kW/h]	0.42[kW/ m ³ /min-ブロワ風量] [22]
増設ブロワ必要風量	[m ³ /min]	希釈原料投入量[t/d]×30[m ³ /min]/300[t/d]

6.3.2 費用算定

1) 建設費

メタン発酵槽内の滞留時間は、モデルケースを参考に 25[d]と設定した。メタン発酵施設から排出される消化液の処理に、既存の浸出水処理施設を利用した場合には、消化液の高濃度アンモニア態窒素を処理する必要がある。ここでは、モデルケースで計画するばっ気ブロワの増設を想定する。さらに窒素処理施設が必要になる処分場を想定し、標準脱窒素処理設備の建設費を計上する。消化液の水処理設備の建設費は兵庫県ガイドライン[7]を参考に計

上し、増設するばっ気ブロワおよび標準脱窒素処理設備の費用については、中島ら（2015）[26]の研究を参考に計上した。なお、標準脱窒素処理設備の費用関数については、メタン発酵施設から排出される消化液の水処理設備の費用関数を試算した事例が少ないこともあり、高濃度アンモニア態窒素を水処理する類似事例ともいえる、し尿処理設備の事例[26]を参考に推計した。建設費の算定方法を表 6-2 へ示す。

表 6-2 建設費の算定方法[7]

設備	項目	単位	算定式
発酵槽	容量	[m ³]	希釈原料投入量[t/d]×滞留時間[d] ×希釈原料比重[m ³ /t]
	機械設備	[百万円]	124×(発酵槽容量[m ³]/500) ^{0.6}
	土木建築	[百万円]	44.1×(発酵槽容量[m ³]/500) ^{0.6}
発電機	275[kW]以下 の場合	全般	[百万円] 25×発電機台数
発電機	276[kW]以上 の場合	機械設備	[百万円] 4.5485×(発電量) ^{0.7556}
		土木建築	[百万円] 0.0407×(発電量) ^{1.288}
可溶化槽	容量	[m ³]	希釈原料投入量[t/d]×3[d]
	機械設備	[百万円]	8.26×(可溶化槽容量[m ³]) ^{0.400}
	電気設備	[百万円]	0.836×(可溶化槽容量[m ³]) ^{0.535}
	建築	[百万円]	2.01×(可溶化槽容量[m ³]) ^{0.583}
ガスホルダ	容量	[m ³]	1時間あたりのバイオガス発生量 [m ³]
	機械設備	[百万円]	10.4×(ガスホルダ容量[m ³]) ^{0.437}
ボイラ	全般	[百万円]	0.9993×投入廃棄物量[t/d] ^{0.4776}
破砕選別 他	全般	[百万円]	393×(投入廃棄物量[t/d]/30) ^{0.6}
水処理	新設の場合	全般	[百万円] 14.887× (希釈原料処理能力[t/d]) ^{0.8332}
	既存利用の場 合	増設ブロ ワ	[千円] 77.362×(消化液発生量[t/d]) ^{0.7309} [22]
	既存利用の場 合	標準脱窒 素処理	[千円] 57548× (脱水ろ液発生量[t/d]) ^{0.5274} [22]

2) 維持管理費

香川らの調査(2012)[27]によると、産業廃棄物および一般廃棄物の浸出水処理施設の放流先は7~8割が河川と報告されている。また、産業廃棄物最終処分場では、下水道への浸出水排出はほとんどないとされている。本章では、対象施設を産業廃棄物最終処分場とするので、消化液の排出先としては、下水道でなく河川への排出を想定した。メタン発酵施設の電力は、すべてバイオガス発電で賄うため電力費は発生しないとした。これらの費用関数の和にはプラントに必要な人件費も含まれている[7]。標準脱窒素処理設備の費用をし尿処理設備の事例[26]をもとに計上した。標準脱窒素処理設備維持管理費の費用関数の事例が少ないため、前処理設備全体の保守点検費とした。維持管理費の算定方法を表6-3へ示す。

表 6-3 維持管理費の算出方法 [7]

設備	項目	単位	算定式
メタン発酵槽		[百万円]	$0.171 \times (\text{希釈原料投入量}[\text{t/年}])^{0.390}$
発電機	275[kW]以下の場合	[百万円]	$1.054 \times \text{発電機台数}$
	276[kW]以上の場合	[百万円]	$0.0296 \times (\text{発電出力}[\text{kW}] + 5.9964)$
可溶化槽		[百万円]	$0.184 \times (\text{可溶化槽容量}[\text{m}^3])^{0.4}$
ガスホルダ		[百万円]	$0.283 \times (\text{ガスホルダ容量}[\text{m}^3])^{0.302}$
ボイラ		[百万円]	$0.9993 \times (\text{投入廃棄物量}[\text{t/d}])^{0.4776} \times 0.05$
破碎選別他		[百万円]	$0.8804 \times (\text{投入廃棄物量}[\text{t/d}])^{0.5665}$
消化液の水処理設備		[百万円]	$1.173 \times (\text{希釈原料投入量}[\text{t/d}])^{0.892} - 3.54 \times ((\text{希釈原料投入量}[\text{t/d}]/55))^{0.892}$
	脱水ケーキ処理費	[円]	$20,000[\text{円/t-脱水ケーキ発生量}]$
	標準脱窒素処理	[千円]	$7917.3 \times (\text{脱水ろ液発生量}[\text{t/d}])^{0.1586}$ [22]
メタン発酵施設	薬品費用	[円]	$300[\text{円/t-希釈原料}]$
	水道代	[円]	$250[\text{円/t-希釈水}]$

3) 収入

産業廃棄物の受け入れ単価を 15,000[円/t][7] と設定した。売電単価は、固定価格買取制度 (FIT: Feed-in Tariff) の利用を想定し 39[円/kWh][7] (メタン発酵ガス: バイオマス由来) と設定した。

4) その他算出条件

メタン発酵施設の新設には、国などによるさまざまな公的な補助金などの支援が存在するが、ここではそうした支援の利用を想定せず、施設稼働率は 100% とし算定した。

5) 算定結果

モデルケースにおける投資回収期間の算定結果を図 6-5 および表 6-4 に示す。消化液の水処理設備の建設費用を除くメタン発酵施設の建設費は 48.1 億円となる。仮に水処理設備を新規に建設した場合は、21.9 億円の建設費が必要となるため、既存の浸出水処理施設を利用した場合のメタン発酵施設の建設費は、新規に建設するより 31.2% の削減となる。既存の浸出水処理施設に脱窒素処理設備を増設した場合では、新規に建設するより 15.7% の削減となる。メタン発酵施設の新設によって見込める収入は年間 12.8 億円となる。維持管理費は、脱窒素処理設備を増設する場合は年間 4.1 億円となり、それ以外では 3.9 億円となる。建設費を収益で除して投資回収期間を確認すると、新規に水処理設備を建設した場合には 7.9 年となるが、浸出水処理施設を利用した場合には 5.5 年となり投資回収期間が 30% 短縮する。また、脱窒素処理設備を増設した場合には 6.8 年となり、投資回収期間が 14% 短縮する。

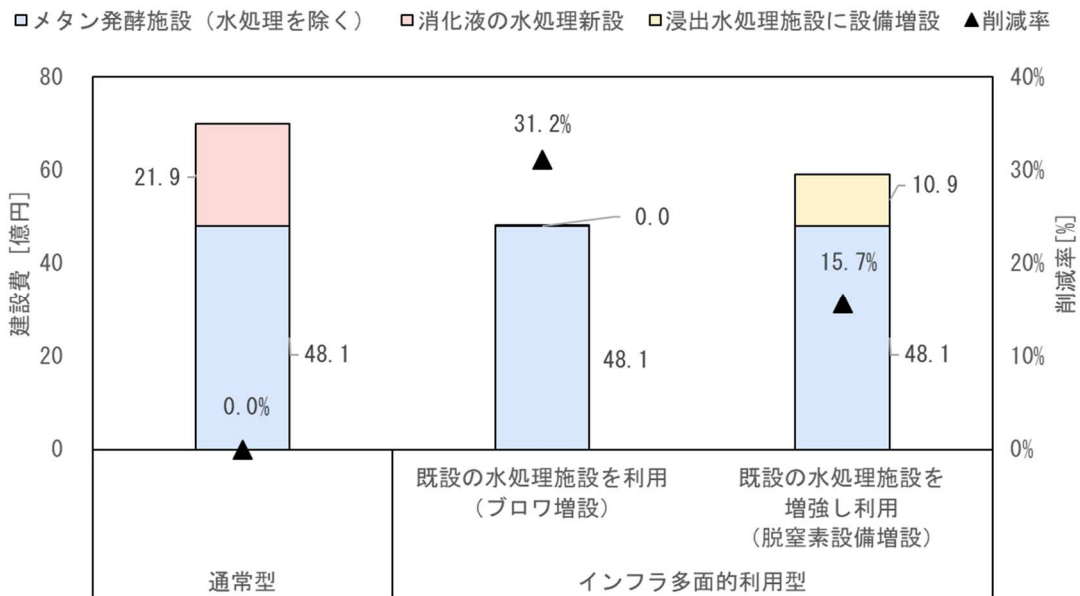


図 6-5 A 社事例の費用算定結果

表 6-4 モデルケースにおける投資回収期間の算定結果

項目	単位	通常型	インフラ多面的利用型	
			施設*の利用	施設*を増強し利用
収入	[億円/年]	12.8	12.8	12.8
維持管理費	[億円/年]	3.9	3.9	4.1
収益	[億円/年]	8.8	8.8	8.6
投資回収期間	[年]	7.9	5.5	6.8

*既設の浸出水処理施設

6.4 全国での適用可能性の検証

6.4.1 浸出水処理施設の処理規模の推計

産業廃棄物管理型最終処分場の浸出水処理施設における処理規模の情報は、ほとんど公開されていない。そのため、ここでは Web で入手可能な情報を使用し、廃棄物最終処分場整備の計画・設計・管理要領（以下、「設計・管理要領」とする）[28]をもとに浸出水処理施設の処理規模を推計した。浸出水処理施設の処理規模の推計手順を図 6-6 に示す。対象とした最終処分場の地域別の埋立許可面積を図 6-7 に示す。中部地方、近畿地方、中国地方には 20[万 m²]を超える最終処分場があるが、九州地方には 5[万 m²]未満の処分場しかない。

気象庁アメダス観測データは、最終処分場設置年（供用開始年）の前年からさかのぼって 15 年間分を使用した。最終処分場の最寄り気象庁アメダス観測データ[29]の気温、日照時間を用いて、Blaney Criddle 法[30]により各月毎に 15 年の平均浸出係数を算定し、さらに 15 年間の平均浸出係数を算定した。浸出係数の算定方法を表 6-5 に示す。平均浸出水量および最大浸出水量は、算定した浸出係数と最終処分場面積、気象庁アメダス観測データの降水量を用いて合理式[28]により算定した。設計・管理要領では、最終処分場面積は埋立計画に基づき、複数案を想定し埋立中と埋立終了後の区画の組み合わせで水量を算定し、そのうち最大となる水量を計画流入水量とするとされている。しかし、それぞれの事業者の実態を反映するのは困難であるため、本章ではすべてを埋立中（最終覆土前）とし計算している。そのため推計結果が実際より過剰な浸出水量となる場合があることに留意が必要である。浸出水量の算定方法を表 6-6 に示す。設計・管理要領[28]では、浸出水処理施設の処理規模は、浸出水調整設備などの水量調整対策を勘案し、平均浸出水量と最大浸出水量の間で設定する。浸出水調整設備と浸出水処理設備両者の規模は、個別に決定されるべきものではなく、両者間での水量収支を考慮したうえで、合理的な折り合い点を見つけ出して決定する必要がある。浸出水処理設備の稼働率や経済性、地域の実情などを勘案して、適切な浸出水処理設備計画流入水量を決定するとされている。しかし、それぞれの事業者の実態を反映するの

は、公式な計画データが公開されていないことからデータ取得が困難である。本章では、ほぼ全ての処分場で調整池が設置されている実情を反映し、各地域における平均浸出水量と最大浸出水量の平均値を浸出水処理施設の処理規模と設定した。これにより各処分場に対して一定の浸出水調整設備が考慮された設定となっているが、より正確には各処分場における浸出水調整設備の情報をもとに設定する必要がある。

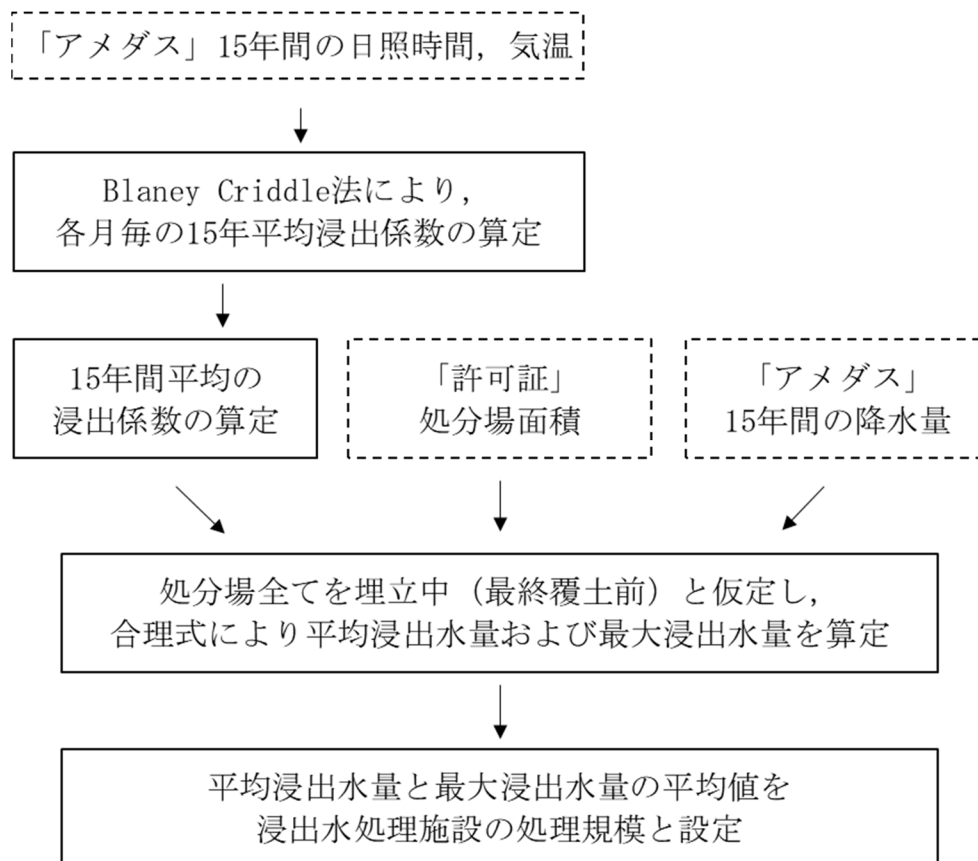


図 6-6 浸出水処理施設における処理規模の推計手順

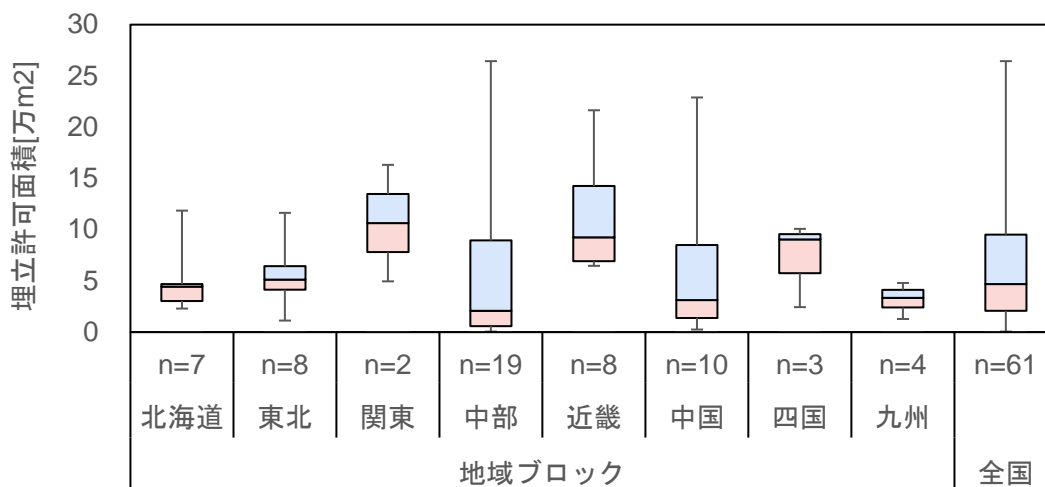


図 6-7 対象とした最終処分場 (61 施設) の埋立許可面積

表 6-5 Blaney Criddle 法による浸出係数の算定方法[30]

項目	単位	算定式
C_1 : 埋立中区画の浸出係数	[-]	$1 - ET/I$
C_2 : 埋立終了区画の浸出係数	[-]	$0.6 \times C_1$
I : 降水量	[mm]	アメダスデータ 15 年間平均[25]
ET : 月間蒸発量	[mm]	$Et \times 0.7$
Et : 月間可能蒸発量	[mm]	$0.254 \times K \times C_j \times t_j$
K : 植被による係数	[-]	0.6 と設定[24]
C_j : 年間日照時間に対する月間日照時間の割合	[%]	$d_j / \sum d_j \times 100$
d_j : 月間日照時間 (hr)	[hr]	アメダスデータ 15 年間平均[25]
t_j : 月間平均華氏気温	[°F]	$t_j = 1.8C + 32$
C : 摂氏の気温	[°C]	アメダスデータ 15 年間平均[25]

表 6-6 浸出水量の算定方法

項目	単位	算定式
Q_1 : 平均浸出水量	[mm/d]	$C_1 \times I_1 \times A / 1,000$
Q_2 : 最大浸出水量	[mm/d]	$C_1 \times I_2 \times A / 1,000$
I_1 : 平均日降水量	[mm/d]	アメダスデータ 15 年間平均[25]
I_2 : 最大月間降水量の日換算値	[mm/d]	アメダスデータ 15 年間のうちで最大月間降水量の日平均[29]
A : 最終処分場面積	[m ²]	埋立許可面積[21]

6.4.2 湿式メタン発酵施設の適用可能性

1) メタン発酵施設への利用可能量

設計・管理要領[28]では、埋立終了後の浸出水量は埋立期間中の浸出水量の60%とされているため、推計した浸出水処理施設の処理規模の40%をメタン発酵施設に利用可能であるとし、メタン発酵施設の処理規模と設定した。また、豪雨対策などで、浸出水処理施設の処理規模の40%すべてがメタン発酵施設に利用できない場合が想定される。ここでは、こうした豪雨対策がなされた対象施設での適用可能性を評価するために、処理規模の30%を利用した場合の条件についても算定した。算定したメタン発酵施設の地域別、処理規模ごとに整理したものを図6-8および図6-9に示す。

浸出水処理施設の40%を利用場合の算定結果を処理規模別に見ると、50[t/d]未満の施設が15施設、50[t/d]以上100[t/d]未満の施設が15施設、100[t/d]以上500[t/d]未満の施設が28施設、500[t/d]以上の施設が3施設となった。地域別に見ると、中部地方で50[t/d]未満の施設がもっとも多く、500[t/d]以上の施設があるのも中部地方のみである。また、近畿地方では8施設すべてが100[t/d]以上500[t/d]未満の施設である。近畿地方、中部地方に規模の大きな施設が多いこと、中部地方での降雨量が多いことが原因であると考えられる。浸出水処理施設の30%を利用した場合の算定結果を処理規模別に見ると、50[t/d]未満の施設が22施設に増加し、100[t/d]以上500[t/d]未満の施設が21施設に減少する。

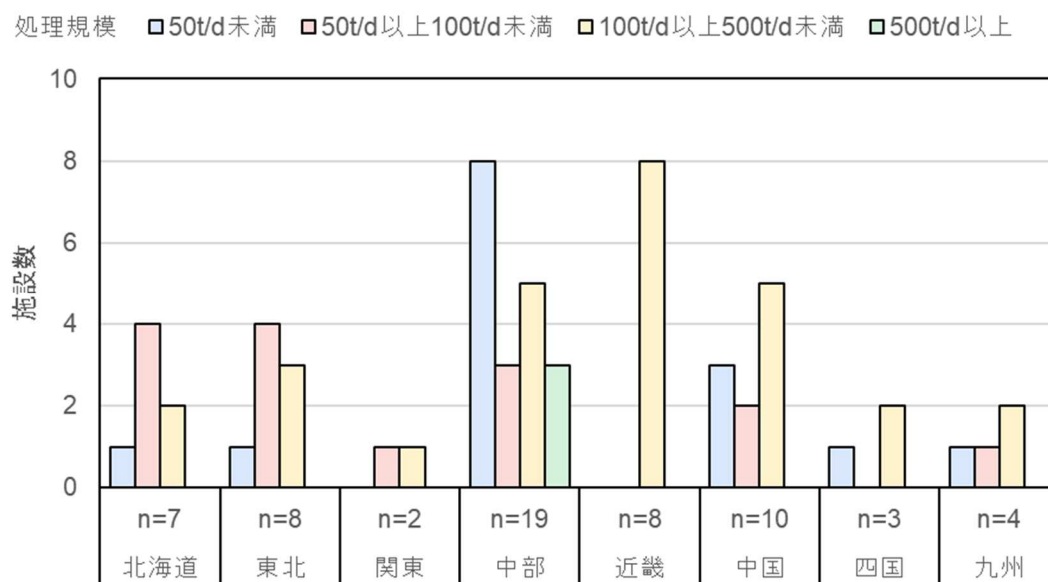


図6-8 地域別、処理規模ごとの施設数（浸出水処理施設：40%利用）

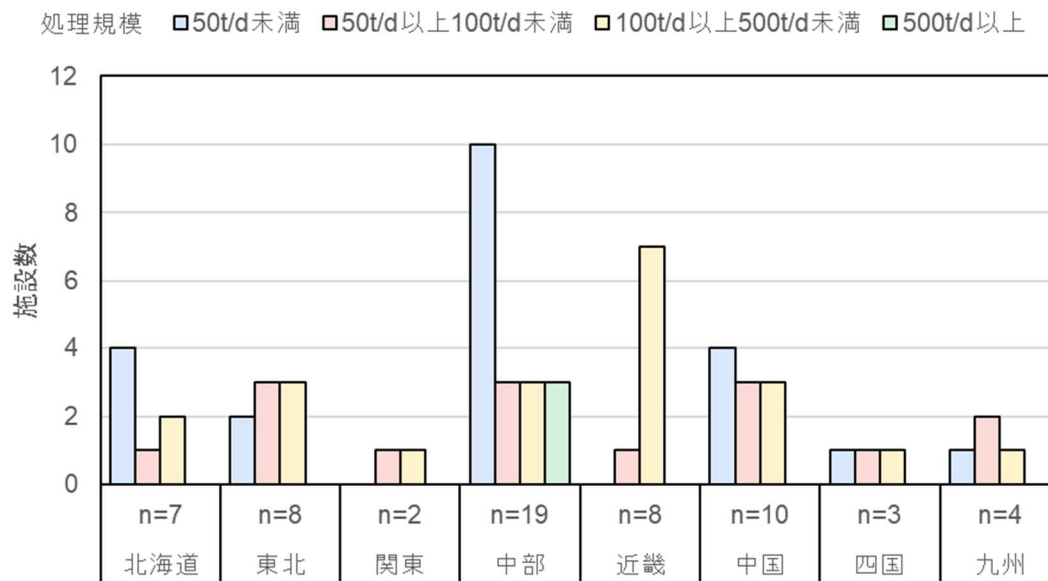


図 6-9 地域別，処理規模ごとの施設数（浸出水処理施設：30%利用）

石村らの調査（2018）[31]によると，産業廃棄物最終処分場の埋立期間の平均は10年であり，各年代での変化はあまりないとされている．先に述べたとおり，処理水槽の耐用年数は50年である．そこで，現在許可を保有している産業廃棄物最終処分場について，処分場設置年から10年で埋立が終了したと想定し，最終処分場設置年の11年後から50年後までの期間，浸出水処理施設の余力をメタン発酵施設に利用可能であると想定する．

2022年からのメタン発酵施設への利用可能量および発電量，売電量の合計値を図6-10および図6-11に示す．2022年から2032年までは毎年利用可能量は増加し，2032年には浸出水処理施設の40%利用で約9,800[t/d]，30%利用で約7,400[t/d]がメタン発酵施設として利用可能となる．その後は減少し，2053年には，浸出水処理施設の40%利用で約3,200[t/d]，30%利用で約2,400[t/d]と2032年の32.7%まで減少する．売電量に関しても，2032年には浸出水処理施設の40%利用で約1,000[MWh/d]，30%利用で800[MWh/d]が売電可能であるが，2053年には2032年の32.8%まで低下する．

推計した発電量にGHG排出係数を乗じてGHG排出削減量を算出する．GHG排出係数は電気事業者別排出係数一覧の代替値0.000453[t-CO₂/kWh][32]を用いる．2032年には浸出水処理施設の40%利用で708[t-CO₂/d]，30%利用で531[t-CO₂/d]のGHGの排出削減が可能であるが，2053年には浸出水処理施設の40%利用で232[t-CO₂/d]，30%利用で174[t-CO₂/d]までGHG排出削減量が減少する．

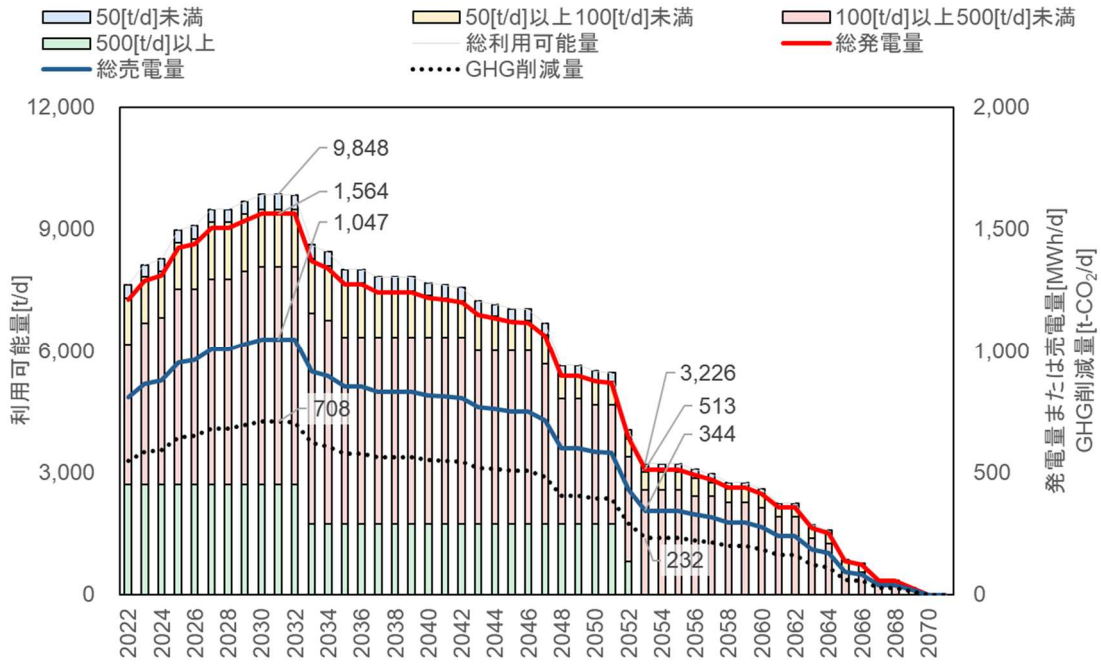


図 6-10 2022 年からのメタン発酵施設への利用可能量 (浸出水処理施設 40%利用)

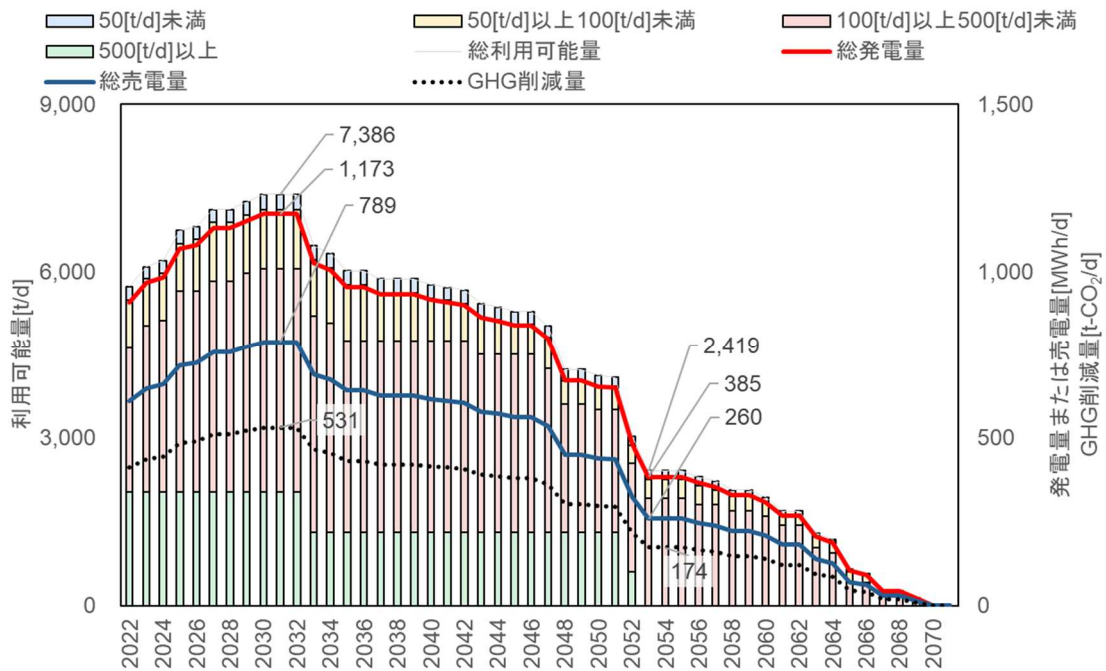


図 6-11 2022 年からのメタン発酵施設への利用可能量 (浸出水処理施設 30%利用)

石村らの調査(2018)[31]によると、産業廃棄物最終処分場の新規立地件数は、1988年においては年間200件程度あった。しかし2000年以降については、申請数が年間10~20施設程度で推移しているとされている。今後建設される処分場について評価が出来ていないが、新規の処分場の数が減少しているため、今後のメタン発酵施設への利用可能量も減少することが予想できる。

2) メタン発酵施設の事業性評価

既存の浸出水処理施設を利用した場合の、地域域別の設備投資回収期間の算定結果を図6-12および図6-13に示す。兵庫県ガイドライン[7]が示す経済性が成立する判定基準としては、設備投資回収期間が8年未満で経済性が成り立つ、8~12年で何とか成り立つ、12~15年で成り立ちにくい、15年以上で成り立たないとされている。浸出水処理施設の40%を利用した場合、経済性が成り立つとされる投資回収期間8年未満の施設は32施設ある。脱窒素処理設備を増設した場合には15施設に減少する。経済性が成り立たないとされる投資回収期間15年以上の施設は、浸出水処理施設を利用した場合、脱窒素処理設備を増設した場合共に11施設ある。処理規模50[t/d]未満の施設が多かった中部や中国地方では、収益が赤字となり、設備投資の回収が見込めない施設が2施設ある。脱窒素処理設備を増設した場合は6施設に増える。

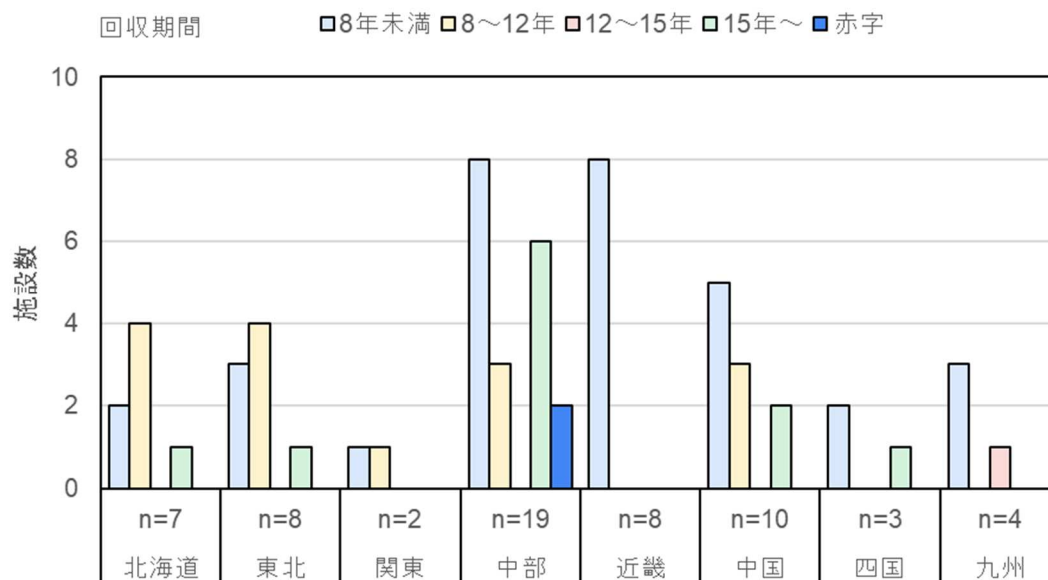
浸出水処理施設30%利用の場合を40%利用の場合と比較すると、投資回収期間8年未満の施設は23施設、脱窒素処理設備を増設した場合には10施設に減少する。投資回収期間15年以上の施設は12施設、脱窒素処理設備を増設した場合には19施設に増加する。地域別にみると、投資回収期間が8年未満の施設の多くが中部や近畿地方などに分布しており、これらの地域において浸出水処理施設の活用可能性が示唆される。

メタン発酵施設の処理規模と設備投資回収期間の関係を図6-14および図6-15に示す。浸出水処理施設を40%利用した場合、投資回収期間8年未満の施設は、水処理設備を建設する場合は処理規模が300[t/d]以上の10施設のみである。しかし、浸出水処理施設を利用する場合は処理規模が100[t/d]以上の32施設に増加する。脱窒素処理設備を増設した場合でも処理規模が200[t/d]以上の15施設ある。

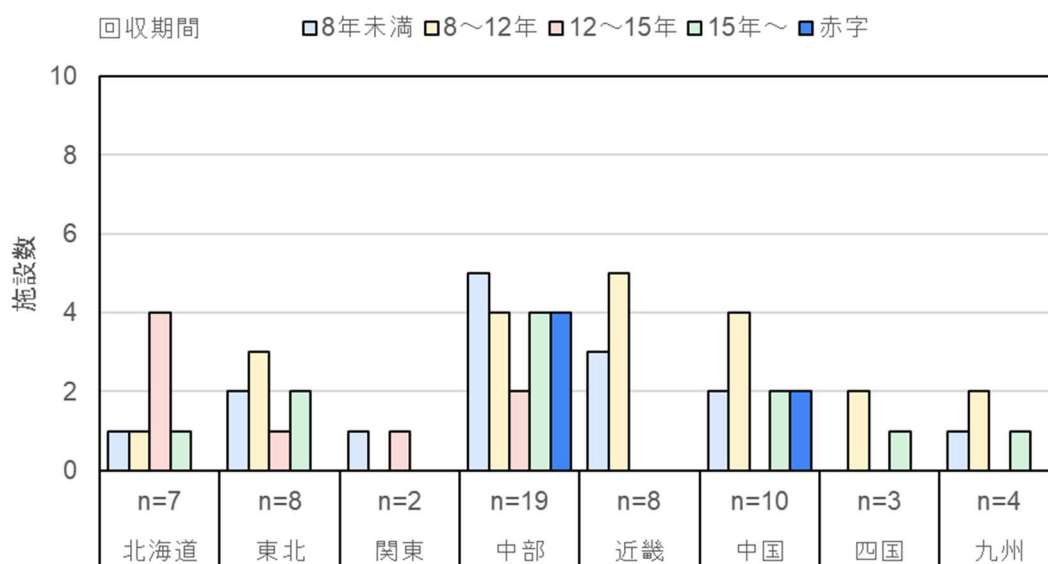
浸出水処理施設の40%を利用した場合では、水処理設備を新規に建設する場合は、全体の40%にあたる処理規模が70[t/d]未満の施設で、投資回収が12年以上となり、経済性が見込めないが、浸出水処理施設を利用する場合には、経済性を見込めないのは全体の20%にあたる処理規模が30[t/d]未満の14施設のみである。脱窒素処理設備を増設した場合は、水処理設備を建設した場合と同様に70[t/d]未満の施設で、投資回収が12年以上となり、経済性が見込めない。

浸出水処理施設を30%利用した場合では、投資回収期間8年未満の施設は、水処理設備を新規に建設する場合は6施設のみである。浸出水処理施設を利用する場合は23施設、脱窒素処理設備を増設した場合は10施設である。投資回収が12年以上となり、経済性が見

込めない施設は、浸出水処理施設を利用した場合は、全体の26%にあたる16施設であるが、脱窒素処理設備を増設した場合や、水処理設備を建設した場合は全体の50%の31施設となる。

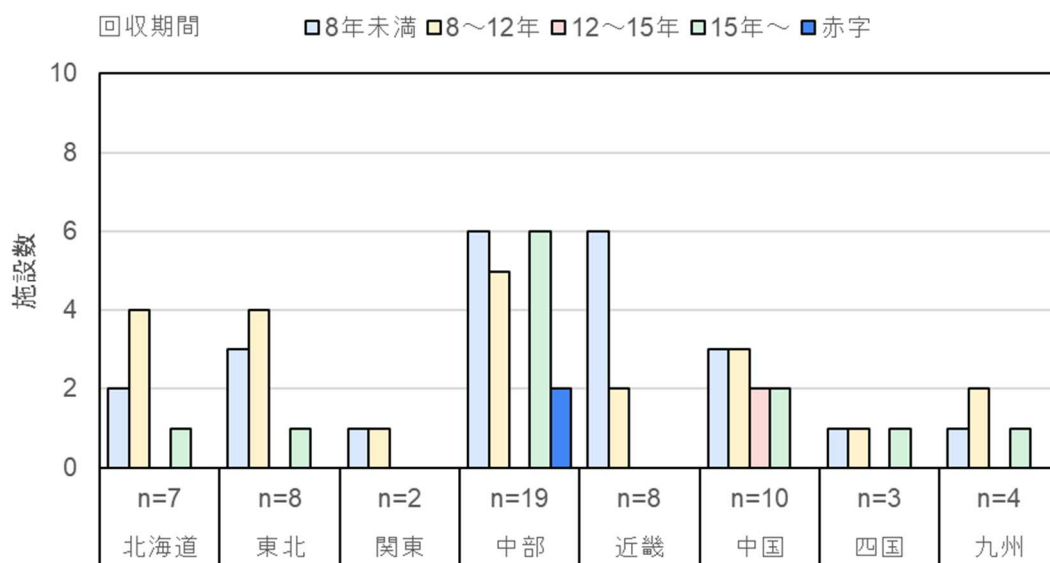


浸出水処理施設 40%利用

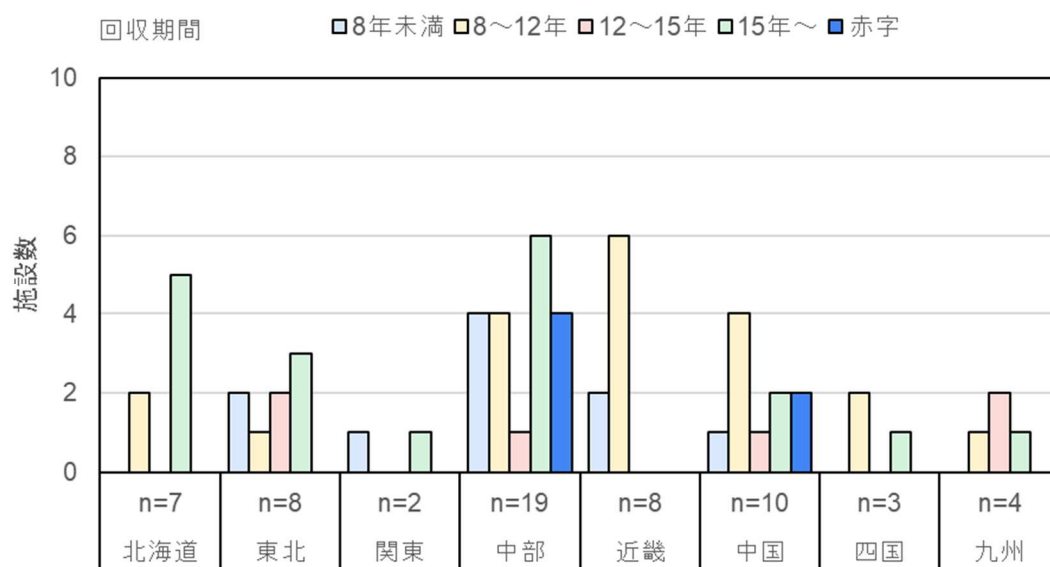


浸出水処理施設 40%利用+脱窒素設備増設

図 6-12 浸出水処理施設を 40%利用した場合の地域別メタン発酵施設投資回収期間



浸出水処理施設 30%利用



浸出水処理施設 30%利用+脱窒素設備増設

図 6-13 浸出水処理施設を 30%利用した場合の地域別メタン発酵施設投資回収期間

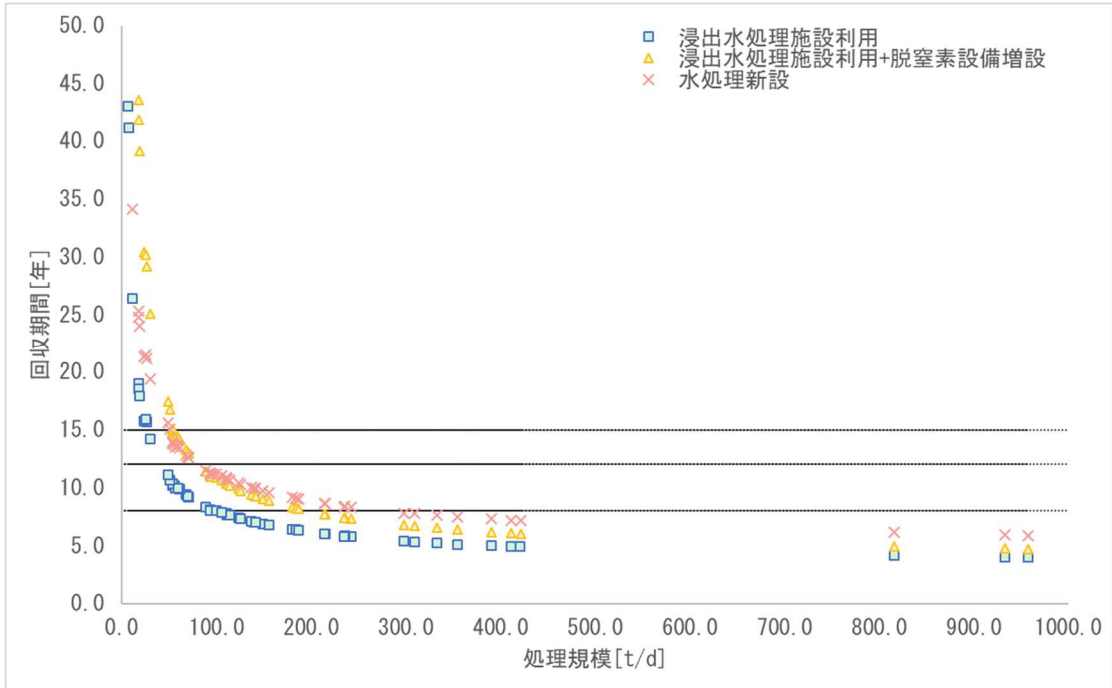


図 6-14 メタン発酵施設規模と投資回収期間（浸出水処理施設：40%利用）

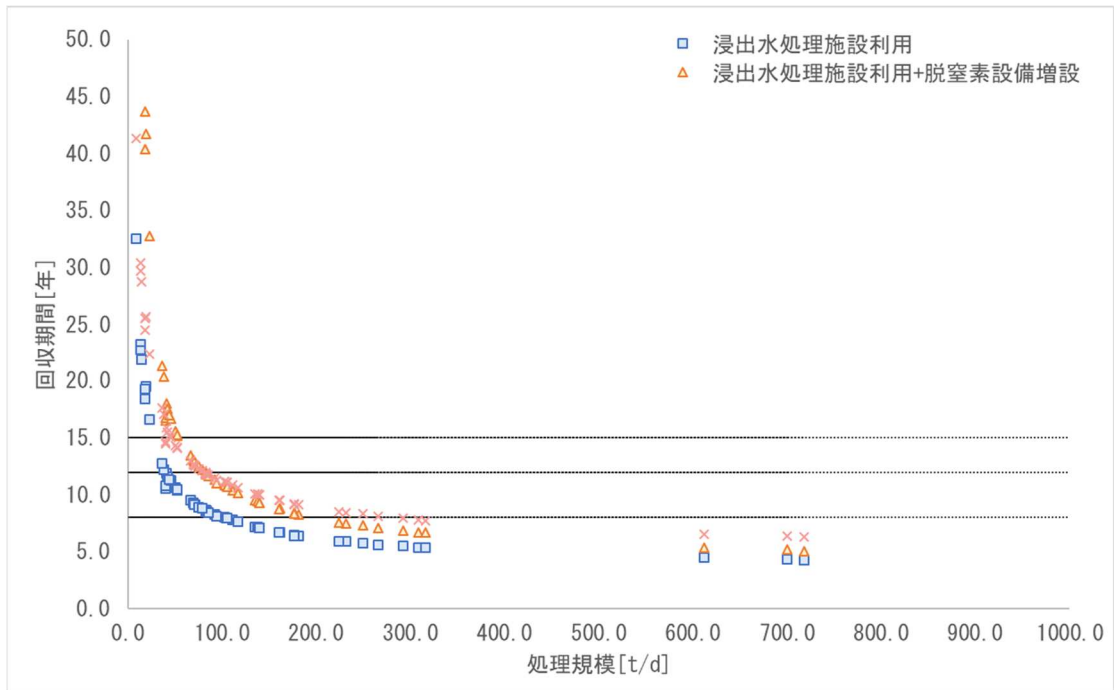


図 6-15 メタン発酵施設規模と投資回収期間（浸出水処理施設：30%利用）

6.5 まとめ

本章では、産業廃棄物焼却施設にかわる廃棄物系バイオマス利用のひとつとして、埋立完了後の浸出水処理施設を湿式メタン発酵施設の水処理設備とした計画をモデルケースとし、全国での適用可能性を検証した。

モデルケースでは、既存の浸出水処理施設を利用することにより、新規に水処理設備を建設する場合と比較し、建設費を 31.2%削減することが可能で、投資回収期間を約 30%短縮できることを示した。脱窒素処理設備を増設した場合でも、新規に水処理設備を建設する場合に対して建設費を 15.7%削減し、投資回収期間を約 14%短縮できることを示した。

全国の優良産廃処理業者認定制度を受けている産業廃棄物最終処分業者が保有する管理型最終処分場への適用可能性を分析した結果、2022 年から 2032 年まで湿式メタン発酵施設としての利用可能量が毎年増加する。浸出水処理施設の 40%を利用した場合、2032 年には、約 9,800[t/d]が利用可能で、1,564[MWh/d]の発電が可能であることを示した。また、25.8 万 [t-CO₂/年]の GHG 排出量の削減が可能である。これは、全国産業資源連合会低炭素社会実行計画[4]で目標としている 2030 年度における GHG 排出削減量（2010 年度に対し 1 割削減）の 18.6%にあたり、目標達成に向けた有効な取組みであると言える。

湿式メタン発酵施設の経済性については、浸出水処理施設の 40%を余力として利用する場合において、事業として成立する投資回収期間 8 年未満の施設が、新規に水処理設備を建設する場合では 10 施設のみであるところ、既存の浸出水処理施設を利用することにより、32 施設まで増加し、湿式メタン発酵施設の採算改善のための手段の一つとして有効であることが示せた。

浸出水処理施設の余力を活用することは、事業の面からも、GHG 削減の面からも有用性が高いと考える。

第6章 参考文献

- [1] 環境省『第四次循環型社会推進基本計画』, 2018年.
- [2] 環境省『令和元年版環境・循環型社会・生物多様性白書』, 2019年, <http://www.env.go.jp/policy/hakusyo/r01/index.html>, (2022.9.28 閲覧).
- [3] 内閣官房『国・地方脱炭素実現会議(第1回)議事次第』, <https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/datsutanso/dai1/gijisidai.html>, (2022.9.28 閲覧).
- [4] 公益社団法人 全国産業資源循環連合会『低炭素社会実行計画』, 2015年, https://www.zensanpairn.or.jp/wp/wp-content/themes/sanpai/assets/pdf/activities/global_warming_eco_plan.pdf, (2022.9.28 閲覧).
- [5] 環境省『廃棄物系バイオマス利活用導入マニュアル』, 2017年, <https://www.env.go.jp/recycle/waste/biomass/>, (2021.2.27 閲覧).
- [6] 北海道大学廃棄物処分工学研究室, “さまざまな有機性廃棄物を対象とする堆肥化施設・メタン発酵施設に関する調査分析,” p.35, 2011年, <https://www.eng.hokudai.ac.jp/labo/waste/wp-content/uploads/2014/03/report3.pdf>, (2021.3.18 閲覧).
- [7] 兵庫県『兵庫県食品残渣等小規模地産エネルギー導入促進事業メタン発酵施設の導入ガイドライン』, 2019年, <https://www.kankyo.pref.hyogo.lg.jp/application/files/6215/7189/4314/558ad48efab7aa379dc8e3f90469a61b.pdf>, (2021.3.9 閲覧).
- [8] 小山文敬, 石井一英, 阿賀裕英, 佐藤昌宏, 落合知, “廃棄物最終処分場における長寿命化および気候変動への問題対応の実態把握,” 『土木学会論文集 G』, Vol.76, No.6, pp.II_23-II_34, 2020年.
- [9] 総務省『別表 B2 基本耐用年数表』, https://www.soumu.go.jp/main_sosiki/kenkyu/chikoujiken/pdf/070730_1_1_2_04_B02.pdf, (2021.3.13 閲覧).
- [10] 佐野充, 森部総一, 加藤博和, 日比野高士, “生ごみバイオガス化によるごみ処理の最適なシステムの検討,” 『人間環境学研究』, Vol.5, No.1, pp.1-5, 2007年.
- [11] 天野耕二, 曾和朋弘, “中間処理方法の組み合わせに着目した一般廃棄物処理システムの包括的評価,” 『土木学会論文集 G』, Vol.63, No.4, pp.391-402, 2007年.
- [12] 谷川昇, 古市徹, 石井一英, 西上耕平, “生ごみバイオガス化施設におけるメタン回収量, 環境保全性, 経済性の検討,” 『廃棄物学会論文誌』, Vol.19, No.3, pp.182-190, 2008年.
- [13] 井上陽仁, 松藤敏彦, “乾式メタン発酵を用いた焼却施設とのコンバインドシステムのエネルギー評価,” 『土木学会論文集 G』, Vol.70, No.2, pp.32-41, 2014年.
- [14] 川島淳, “当社のメタン発酵技術,” 『神鋼環境ソリューション技報』, Vol.4, No.2, pp.2-6, 2007年.
- [15] 満石良三, “食品廃棄物の有効利用によるゼロエミッションへの挑戦,” 『廃棄物学会誌』, Vol.18, No.3, pp.166-171, 2007年.
- [16] 石田貴, 落修一, 藤川征宏, 谷口智彦, “珠洲市バイオマスメタン発酵に関する性能評価研究,” 『下水道新技術研究所年報』, pp.61-66, 2008年.

- [17] 国土交通省『第5次社会資本整備重点計画概要(案)』, 2021年, <https://www.mlit.go.jp/policy/shingikai/content/001386628.pdf>, (2022.9.28 閲覧).
- [18] 三重中央開発株式会社へのヒアリング(実施日:2020.10.7).
- [19] 環境省『産業廃棄物処理業者検索システム』, 2021年, <https://www.env.go.jp/recycle/waste/sanpai/statistics.php>, (2021.3.6 閲覧).
- [20] 環境省『優良産廃処理業者認定制度』, 2021年, <http://www.env.go.jp/recycle/waste/gsc/>, (2021.3.6 閲覧).
- [21] 優良さんばいナビ, <http://www3.sanpainet.or.jp/index.php>, (2022.9.28 閲覧).
- [22] 農林水産省『バイオマスをめぐる現状と課題』, 2012年, https://www.maff.go.jp/j/biomass/b_kenntou/01/pdf/1_1.pdf, (2021.3.18 閲覧).
- [23] 株式会社 大原製作所, “消化ガス発電機,” https://www.oharacorp.co.jp/products/sewage-treatment/digestive_gas_dynamo-2/#spec, (2021.3.18 閲覧).
- [24] JFE エンジニアリング株式会社, “バイオガスエンジン発電システム,” 2008年, https://www.jfe-eng.co.jp/products/aqua_solutions/pdf/CA4124.pdf, (2021.3.18 閲覧).
- [25] 株式会社 アントレット, “3葉アントレットルーツブロワカタログ,” 2020年, <https://www.anlet.co.jp/catalog/pdf/anlet005.pdf>, (2021.3.10 閲覧).
- [26] 中島英一郎, 小塚俊秀, 中野喜彰, 中園翔太, “污水处理システムのコスト・消費エネルギー等算定手法(費用関数)構築に関する研究,” 『下水道新技術研究所年報』, pp.175-180, 2015年.
- [27] 香川智紀, “産業廃棄物処分場の現状と課題,” 『廃棄物資源循環学会誌』, Vol.23, No.5, pp.356-365, 2012年.
- [28] 社団法人 全国都市清掃会議『廃棄物最終処分場整備の計画・設計・管理要領 2010 改訂版』, pp.341-374, 2010年.
- [29] 気象庁, 過去の気象データ, <https://www.data.jma.go.jp/gmd/risk/obsdl/index.php>, (2021.3.18 閲覧).
- [30] Blaney, H.F. and Criddle, W.D. , “*Determining Consumptive Use and Irrigation Water Requirements*,” Technical Bulletin No.1275, Agricultural Research Service, United States Department of Agriculture in cooperation with The Office of Utah State Engineer, pp.1-2, 1962.
- [31] 石村雄一, 竹内憲司, “産業廃棄物最終処分場の立地に関するパネルデータ分析,” 『廃棄物資源循環学会論文集』, Vol.29, pp.59-71, 2018年.
- [32] 環境省『電気事業者別排出係数一覧令和4年提出用』, https://ghg-santeikohyo.env.go.jp/files/calcr04_coefficient_rev3.pdf, (2022.9.28 閲覧).

第7章 総括

7.1 本研究のまとめ

本研究では、産業廃棄物焼却施設の維持管理に関すること、さらに地域課題の中で一般廃棄物・災害廃棄物の処理、脱炭素化に向けた産業廃棄物処理施設の活用について実態調査を実施するとともに、その結果をふまえて、処理施設にかかる技術や施設運用の仕組みを含む、さらなる高度化や有効活用の方策を提案し、それらの効果について検証した。

産業廃棄物処理施設の維持管理に関しては、従来通りの紙を使った点検業務が 87.1%を占めること、故障箇所の把握の 69.9%が点検業務によること、83.9%の事業者が点検での測定値を異常の判定に利用していることが明らかとなった。また、点検時における人員が2人以下の事業者が 87.1%を少ない人数で実施していることから、点検業務への ICT・AI の導入は省力化を図れると考えられる。しかし、認知度の低さや費用面、人員不足などの理由で導入を断念した現状では、点検業務への ICT・AI の導入は進まないことが示唆された。

そこで、点検業務以外での産業廃棄物処理施設への ICT・AI の導入として、ICT を用いた産業廃棄物焼却施設の回転機器、BF のろ布に対してモニタリングシステムを構築し、実証試験を行った結果、一定以上の周期でサンプリングすることでの異常度判定の制度の担保、費用削減効果が示された。予防保全における ICT 導入の効果は、産業廃棄物処理事業者が ICT・AI に期待する「突発故障の減少」に沿ったものであり、「プラント設備を未停止で機器異常を予兆できるシステムは価格によっては導入する意向がある」ことから、予防保全への ICT 導入の可能性が示唆された。このことは、産業廃棄物処理施設の安定稼働につながることから、地域課題解決への産業廃棄物処理施設の活用への下支えとなると考えられる。

地域課題の一つである一般廃棄物処理に関しては、産業廃棄物焼却施設での処理実績について、カイ 2 乗検定の結果、炉形式の違いによる有意水準 5%で有意な差は認められず、産業廃棄物焼却施設の処理規模が 150[t/d]以上と 150[t/d]未満とでは有意水準 5%で有意な差が認められた。また、一般廃棄物焼却施設を 2020 年から継続する場合と、産業廃棄物処理事業者へ処理を委託する場合とで費用を比較した場合、処理規模が 25[t/d]の一般廃棄物焼却施設では、供用開始年度や運転方式、施設の距離の違いによらず、5 年以内で費用削減効果につながる。また、産業廃棄物処理事業者の可燃ごみ処理単価が可燃ごみ処理委託費用累計に最も影響を与えることが示され、処理規模が 100[t/d]の一般廃棄物焼却施設でも、可燃ごみ処理単価によっては費用削減効果に期待できる。産業廃棄物焼却施設における ICT を用いた予防保全は、維持管理の費用削減効果に、操業ロスの回避、日常の点検業務の簡素化も含めた費用削減効果が期待できることから、可燃ごみ処理単価にも影響があることが推測される。

災害廃棄物処理に関しては、カイ 2 乗検定の結果、ロータリーキルン炉、ロータリーキルン&ストーカ炉とそれ以外の炉形式とでは有意水準 5%で有意な差が認められた。ロータリ

一キルン炉とロータリーキルン&ストーカ炉を合わせると全体の 56%あり、規模による有意な差が認められていないこと、施設の稼働予定が 30 年以上を予定している産業廃棄物処理事業者が多いこと、また四国ブロック以外では災害廃棄物処理の実績が確認できたことから、継続した災害廃棄物処理支援の可能性が示唆された。

脱炭素化に関して、発電設備の設置状況は、実態調査の結果、ロータリーキルン炉、ロータリーキルン&ストーカ炉以外では確認できなかった。しかし、余熱利用設備は流動床炉、多段炉以外で確認できた。発電設備、余熱利用設備ともに産業廃棄物焼却施設の処理規模が 100[t/d]以上と 100[t/d]未満とで有意水準 5%で有意な差が認められた。しかし、設置許可申請、設置費用、処理規模などによる設備設置の制約が大きな課題として挙げられていることから、産業廃棄物焼却施設以外での脱炭素に向けた取組も必要であることが示唆された。

そこで、埋立完了後の管理型最終処分場の浸出水処理施設を、湿式メタン発酵施設の水処理設備として利用する計画について、全国での適用可能性を検証した。浸出水処理施設の 40%を余力として利用することで、新規に水処理設備を建設する場合と比較し、事業として成立する投資回収期間 8 年未満の施設が、10 施設から 32 施設まで増加することから、湿式メタン発酵施設の課題の一つである消化液の水処理施設の費用削減について効果が示された。湿式メタン発酵施設としての利用可能量が最大となる 2032 年には、1,564[MWh/d]の発電、25.8 万[t-CO₂/年]の GHG 排出量の削減が見込まれる。産業廃棄物焼却施設で実証した回転機器への ICT を用いた予防保全は、湿式メタン発酵施設への転用も可能であり、安定稼働につながることも推測されることから、産業廃棄物焼却施設に代わる脱炭素へ向けた取組として有用であることが示唆された。

本研究での実態調査および検証から、処理規模 150[t/d]以上のロータリーキルン炉、ロータリーキルン&ストーカ炉が、地域課題解決に向けた活用に適していることが示唆された。浸出水処理施設余力を活用した湿式メタン発酵施設と合わせて、課題解決のための有効活用に期待できる。

7.2 今後の課題

本研究で実施した実態調査は、廃棄物処理法に基づき優良な実績を有する産業廃棄物事業者として認定され、環境省に報告された事業者を対象に実施したアンケート調査の結果である。そのため、調査対象を限定した結果であることから、対象とした事業者以外の、操業状況のより厳しい産業廃棄物処理事業者の実態やニーズも把握することが課題となる。また、アンケート回収率が低く、特に北海道ブロックでは実態調査ができておらず、情報開示を促す仕組みの検討なども含め今後の課題としたい。

ICT を用いた予防保全効果の推計については、操業ロスの回避、日常の点検業務の簡素化や熟練技能による経験値の一部を代替する効果などを含めて、定量的な推計が難しいものの、アンケートから明らかにされたニーズへの付加的な効果が期待される。しかし、ICT や

AI 活用による効果を体系的に捉えつつより潜在的な効果を含めた推計手法の開発を行っていくことが課題となる。また人材不足など費用以外の問題に対する検証についても今後の課題としたい。

一般廃棄物処理支援方策の検討における、可燃ごみ処理委託費用の算出については、産業廃棄物処理事業者の可燃ごみ処理単価の情報が少ないため今度のデータ蓄積による推計制度の向上、コンパクト・コンテナ方式以外での中継施設の積替方式も踏まえた事業性の評価が課題となる。

湿式メタン発酵施設に利用する管理型最終処分場浸出水処理施設の規模の推計については、すでに廃止された管理型処分場について評価できておらず、また、処分場の面積すべてを埋立中と仮定し分析しているため、現状より過大な評価になっているおそれがあり、これらについても今後の課題としたい。

本研究では産業廃棄物処理施設での継続的な受入れが可能であることを前提として、一般廃棄物・災害廃棄物の処理、脱炭素化へ向けた活用について検証を行ったが、産業廃棄物処理施設の更新がこれらの事業の安定的な継続に及ぼす影響を回避する事業継続計画(BCP)のようなシナリオを含めた詳細な検討が課題とされる。産業廃棄物処理施設の高度化および地域課題解決に向けた有効活用に関する研究は緒についた段階であり、産業廃棄物処理事業者の持つ収集運搬やそれ以外の余力を活用したサプライチェーン全体での効率化や脱炭素化の検討の余地が残されている。

さらに、今後の社会変化に応じた、官民連携(PPP)による一般廃棄物、産業廃棄物処理に向けた地域での新たな体制や制度設計のあり方を含めた計画論へと展開するさらなる研究の発展を今後の課題としたい。

研究業績一覧

I. 学会誌掲載論文（全文査読）

- 1) 山田 崇雄, 中尾 彰文, 吉田 登, “埋め立て完了後の最終処分場浸出水処理施設を活用した湿式メタン発酵の適用可能性,” 土木学会論文集 G, 77 巻, 6 号, pp. II_183-II_192, 2021.
- 2) 山田 崇雄, 中尾 彰文, 吉田 登, “産業廃棄物焼却施設の運転状況と一般廃棄物・災害廃棄物処理支援に関する調査分析,” 地域学研究, 第 52 巻, 1 号, pp.113-133, 2022.
- 3) 中尾 彰文, 山田 崇雄, 和田 俊和, 吉田 登, “ICT を用いた産業廃棄物焼却プラント機材の予防保全モニタリング手法の開発とその効果,” 環境科学会誌, (WEB ONLY), 35 巻 5 号, pp.292-303, 2022.

II. 国際会議（Abstract 査読）

- 1) Takao YAMADA, Akifumi NAKAO and Noboru YOSHIDA, “Feasibility of applying leachate treatment equipment from final disposal sites to methane fermentation facilities after completion of landfill disposal,” The 15th Biennial International Conference on EcoBalance, Fukuoka, October 2022.

III. 国内会議（査読なし）

- 1) 山田 崇雄, 中尾 彰文, 吉田 登, “産業廃棄物焼却施設におけるエネルギー利用, ICT・AI の導入意向及び地域共生に関する調査分析,” 第 48 回環境システム研究論文発表会講演集, 2020.
- 2) 山田 崇雄, 中尾 彰文, 吉田 登, “産業廃棄物焼却施設におけるエネルギー利用及び ICT・AI の導入意向に関する調査分析,” 日本地域学会 第 58 回(2021 年)年次大会 学術発表論文集, (WEB ONLY), 2021.
- 3) 山田 崇雄, 中尾 彰文, 吉田 登, “民間廃棄物処理施設を活用した一般廃棄物処理の事業性評価～新設・既設の中継施設の整備を中心として～,” 日本地域学会 第 59 回(2022 年)年次大会学術発表論文集, (WEB ONLY), 2022.

謝辞

本論文を作成するにあたり，多くの方々にご指導ご鞭撻を賜りました。

和歌山大学システム工学部環境科学メジャーの吉田登教授には，終始多大なご指導を賜りました。ここに深謝の意を表します。

また，和歌山大学システム工学部環境科学メジャーの井伊博行教授，並びに山本祐吾准教授には，副査として貴重なご助言を賜りました。感謝申し上げます。

紀伊半島価値共創基幹食農総合研究教育センターの中尾彰文特任講師には，自身の経験も踏まえた数々の助言をいただいたことに深く感謝いたします。

本論文の成果の一部は，環境研究総合推進費に支援を受けて行われました。関係者の方々，アンケートにご回答いただきました企業の方々に御礼申し上げます。

また，大栄環境株式会社には，実証試験の場を提供いただいたこと，専門的な視点から助言いただいたことに謝意を表します。

最後に，研究生活に理解を示し支えてくれた妻と娘に感謝いたします。