

令和 3 年度

脱炭素化・先導的廃棄物処理システム実証事業

(ごみ焼却施設の排熱を熱源とする化学蓄熱材を用いた熱輸送技術の実証事業)

委託業務

成果報告書

令和 4 年 3 月

エスエヌ環境テクノロジー株式会社

日立造船株式会社

株式会社東和テクノロジー

要 約

本委託事業は、エネルギー起源 CO₂ 排出量の削減および地域循環共生圏造りへの貢献に向け、一般廃棄物焼却処理施設での廃熱を利用したオフライン熱輸送の実現を目指した実証事業である。

具体的には、化学蓄熱材としての水酸化マグネシウムと酸化マグネシウムとの間での吸熱脱水反応と水和発熱反応に着目し、吸熱脱水反応に必要な熱量は一般廃棄物焼却処理施設での廃熱を利用し、吸熱状態である酸化マグネシウムを熱利用施設までオフラインにて輸送し、熱利用施設では酸化マグネシウムの水和発熱反応により発生する熱を利用する。熱利用施設にて熱を発生した後に生成する水酸化マグネシウムを一般廃棄物焼却処理施設に戻すことにより、吸熱と放熱を繰り返す。

本委託事業において実施する実証事業では、自治体の一般廃棄物焼却処理施設に熱回収装置を設置し、またこの施設から離れた温浴施設に熱利用装置を設置し、この間で化学蓄熱材を輸送し熱利用することによる一般廃棄物焼却処理施設の廃熱利用についてのシステムとしての評価を行うことを目的として行うものである。

令和 3 年度は、事業の初年度であり、主な成果は以下のとおりである。

1. 経済性の評価

- ・本システムで造り出す熱量の販売価格を 8.5 円～9.5 円/MJ とすることで、事業の継続性・持続性が見えてきた。
- ・事業の実現に向けては、さらなるコストの低減が必要であり、特に運営費の 60%を占める蓄熱材費用の低減化検討が必要である。

2. 市場性の確認

- ・本年度は、ごみ焼却施設の回収熱の外部利用先として、南島原市周辺の公共施設を調査した。本システムで利用できる温度は 200℃程度であるため、この温度領域の熱を使用する事業を把握した。
- ・また、企業、自治体への訪問による熱利用の需要調査を行った。その結果、コスト次第ではあるが CO₂ 排出削減および化石燃料の消費削減の観点から、本システム導入のニーズが大きいことも見えてきた。
- ・将来的には、さらに多量の熱回収を目標としており、その熱の利用先の確保も重要である。

3. 実証実験装置の設計

- ・熱回収の方法としては、ごみ焼却施設の炉とガス冷却室との間にある再燃室の上部に高温空気加熱器を設置し、その高温空気加熱器で作られた 350℃の空気を用いて蓄熱材への蓄

熱を行う。具体的には、 350°C 、 $500\text{m}^3\text{N/h}$ の高温空気を蓄熱材に2日間で流通させ、 1GJ の熱を、蓄熱材に蓄熱させるための設備を設計し、その設置場所を定めた。

・熱利用の方法については、まず温浴施設の熱供給システムの現地調査を行った。その結果に基づき、浴室内の浴槽水(約 5m^3)の加温および温水供給に係る放熱設備の概念設計を行った。

以上のとおり、本年度は、本システムの経済性・市場性を確認し、実証実験の基本条件を設定した。

Summary

This project aims to develop an off-line heat transport technology using waste heat generated at municipal solid waste (MSW) incineration plants, with the goal of reducing CO₂ emissions from energy use and creating a regional circular and ecological sphere.

We are targeting magnesium hydroxide Mg(OH)₂/ magnesium oxide (MgO) as a chemical heat storage system, focusing on their endothermic and exothermic reactions by dehydration and hydration.

Waste heat at MSW incineration plants is used for dehydration of Mg(OH)₂, and the transformed high-energy MgO is transported to other facilities for use.

These facilities utilize heat generated by the hydration of MgO, and after heat generation, the converted Mg(OH)₂ is returned to the MSW incineration plants. The cycle of heat absorption and dissipation is repeated.

To evaluate the system for practical use, we will conduct a demonstration test to place exhaust heat recovery equipment at MSW incineration plants and heat utilization equipment at spa facilities in distant areas. The chemical heat storage materials will be transported between the two locations.

This project started in the third FY of Reiwa, and the main results to date are as follows.

1. Economic evaluation

- Business continuity and sustainability could be achieved by setting the price of heat at 8.5-9.5 yen/MJ.
- For business operations, further cost reductions are required, especially for heat storage materials, which account for about 60% of total costs.

2. Confirmation of marketability

- We selected and surveyed public facilities for utilization of waste heat in Minamishimabara City, Nagasaki Prefecture. This proposed system generates heat at a temperature of about 200 degrees centigrade, and we identified businesses conducting operations that require heat input at about this temperature.
- We visited businesses and municipalities to grasp the demand for heat utilization and confirmed significant needs for this system from the aspects of reduction of CO₂ emissions and fossil fuel consumption.
- The project aims for further increase in heat recovery in the future. We confirmed that the key for the success is to find potential facilities to use the recovered heat.

3. Design of the experimental device

- The proposed design has a high temperature type gas-air heat exchanger installed on the upper part of a secondary combustion chamber set in between a furnace and a gas cooling chamber to produce air at 350 degrees centigrade; the heated air is then sent to the heat storage materials. Specifically, high temperature air (500 m³N/h at 350 degrees centigrade) is circulated for two days over heat storage materials to store 1 GJ of heat.

- A survey of current heat supply system was conducted. Then, heat radiating system was designed to provide hot water and heat it in a 5m³ tub.

We set basic conditions for the demonstration test in the first year.

目次

1. はじめに	1
2. 事業概要	1
2.1. 目的	1
2.2. システムの原理	3
2.3. 事業計画	5
2.4. 実施場所	6
2.5. 実施体制および実施内容	8
2.6. 実施工程	9
3. 実施内容	10
3.1. 国内の熱事情調査	10
3.2. 実施現場の調査結果	15
3.2.1. 熱回収施設	15
3.2.2. 熱利用施設	18
3.3. 現場調査結果に基づく実証試験計画の策定	26
3.3.1. 高温空気加熱器の基本設計	26
3.3.2. 蓄熱装置および放熱装置の仕様設計	32
3.4. 市場調査	34
3.4.1. 産業界における熱回収のポテンシャル	34
3.4.2. 産業界における熱利用のポテンシャル	38
3.4.3. 中小規模を中心としたごみ焼却施設における余熱利用状況	69
3.4.4. 南島原市における余熱利用先の調査	76
3.4.5. 本システム導入に係るヒアリング調査	82
3.4.6. 本システムの大規模ごみ焼却施設への適合性の検討	84
3.5. 化学蓄熱材による熱輸送の実態調査	85
3.5.1. 蓄熱技術	85
3.5.2. 国内実績	106
3.6. 経済性評価	120
3.6.1. 既往の熱供給事業	120
3.6.2. 本システムの熱供給コスト試算	125
3.6.3. 熱供給価格設定と投資額回収計画	127

3.6.4. 本システムと既往熱供給事業の料金比較.....	128
3.7. CO ₂ 削減効果の評価.....	131
3.7.1. 本システムを導入したときの CO ₂ 削減量.....	131
3.7.2. CO ₂ 削減量の年次推移推定量.....	134
3.8. 本システムの有効性評価.....	136
3.9. 技術的、制度的な課題の抽出と対策の立案.....	138
3.10. 検討会の実施	139
3.11. 「令和 3 年度脱炭素化・先導的廃棄物処理システム実証事業 審査当委員会」への出席.....	142
3.12. 「令和 3 年度廃棄物処理システムにおける脱炭素・省 CO ₂ 対策普及促進方策検討委託業務ヒアリング等への協力」.....	142
3.13. 実施内容のまとめ.....	143

添付資料

- (1) 製造業での事業所数及び製品出荷額
- (2) 一般廃棄物焼却施設での外部熱利用先

1. はじめに

本報告書は、ごみ焼却施設の排熱を熱源とする化学蓄熱材を用いた熱輸送技術の実用化に向け、長崎県南島原市にあるごみ焼却処理施設および同市内の温浴施設に熱回収及び放熱設備を設置し、両施設間にて化学蓄熱材を繰り返し輸送することによりごみ焼却施設にて回収した排熱を温浴施設にて熱利用するシステムの実証事業を行い、本システムの評価を行うことを目的として令和 3 年度よりの 3 年間をかけて実施するもので、令和3年度での実施内容についての報告を行うものである。

2. 事業概要

事業概要を次の 6 項目に分けて述べた：(1) 目的、(2) システムの原理、(3) 事業計画、(4) 実施場所、(5) 実施体制・内容、(6) 実施工程。

2.1. 目的

2050 年カーボンニュートラル社会の実現及び地域循環共生圏の形成に向けて、ごみ焼却施設における排熱を利用したエネルギーの効率的かつ有効な活用が喫緊の課題となっている。今日のごみ焼却施設においては、ごみの減量化、無害化及び二次公害の防止という基本機能に加え、ごみ焼却に伴う排熱の回収を通じて、地域の独立エネルギー源としての役割が期待されており、さらに回収されたエネルギーを地域経済等に役立つ方法で活用していくための横断的なシステム構築及びその導入が有効と考えられている。

廃棄物の焼却に伴って発生する熱(余熱)は、燃焼ガスという形態をとっているが、直接の利用により又はエネルギー変換を通して、事業所内外の様々な用途に利用されている(3.4.3. ごみ焼却処理施設での熱利用)。エネルギー変換方式としては、熱交換器により燃焼ガスの熱から温水を作る方式や廃熱ボイラによって得た蒸気を用いて蒸気タービンで発電する方式があり、燃焼ガス、温水、冷水、空気、動力、電力といったエネルギー形態がある。

廃棄物発電は、廃棄物の焼却により発生した燃焼ガスから廃熱ボイラーによって蒸気を作り出し、蒸気タービンによって電力を得る余熱利用の一形態である。発電した電力は、焼却施設や管理事務所等の事業所内にて利用するほか、余剰分を電力会社に売電することも可能であり、近隣に熱需要がない場合においても広く廃棄物エネルギーの利用が図られる。

焼却施設における発電設備の導入には、最低でも処理量が 100t/日以上であること及び 24 時間連続運転であることが条件となっており(環境施設 No.107、2007 年、P2～20)、発電設備の停止時においても安定的に電力を供給できるような体制づくりが必要である。

このように、廃棄物焼却施設の排熱の利用方法としては大型の焼却施設では施設内外への電気と温水・蒸気の供給が可能で、小型の焼却施設では温水・蒸気の供給が主となる。

廃棄物焼却施設からの排熱の利用率の向上に対しては、現状 15～20%程度にとどまっている発電効率を向上させることや、小型焼却炉への発電設備の導入なども検討はされているが、本事業では、小型炉から大型炉まで幅広く適用できる技術としての熱の直接利用を検討

することとした。

ごみ焼却施設からの一般的な熱供給方法である導管方式には、熱損失が大きいことから供給エリアに制限があること、導管敷設に際しての障害があること、施設移転等により導管の利用期間が制約的になることなどの課題がある。

これに対して、廃熱を蓄熱材に溜め、この蓄熱材を熱利用施設まで輸送した上で、熱を放出させ利用する、熱のオフライン輸送方式も古くから検討はされてきている(3.5.2. 熱輸送の実態調査)。

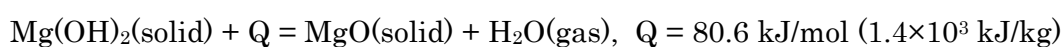
一部実用化はされているが、蓄熱材の単位重量・容積当たりの熱量が小さいために輸送単位当たりの熱量が少なく、また蓄熱材に蓄えられた熱は潜熱・顕熱の形での蓄熱が一般的で、自然に放熱するため輸送車は特別な保温が必要なことなどからコスト高となり普及が遅れている。

本事業では、以上の課題を踏まえ、蓄熱容量が大きく、自然放熱を起こさない化学蓄熱材による熱輸送システム(以下「本システム」という。)を用いた熱利用システムの有効性を実証することを目的とした。

2.2. システムの原理

本システムでの熱の蓄熱と放熱の原理は、以下に示したように、酸化マグネシウムに水を反応させることで水酸化マグネシウムへと化学変化させ、この水和反応の際に熱が発生する。

熱を発生し終えた水酸化マグネシウムを加熱すると、脱水反応により元の酸化マグネシウムへ化学変化し、この反応の際に熱を吸収する。この反応は可逆反応と呼ばれ、繰り返し何度も行いうことが可能である。吸熱量と放熱量は、酸化マグネシウムの 1 モル当りに 80.6kJ と等量である。脱水反応は 300℃程度から始まり、水和反応は 50℃程度から始まる。



本システムを用いた実証実験の流れは、図 2-1 のとおりである。放熱し終えた水酸化マグネシウムは、ごみ焼却施設の排熱により調整された高温(350℃)の空気により加熱され酸化マグネシウムに変換する(熱回収)。この酸化マグネシウムを運搬車両に積み込み、熱利用施設まで輸送し熱利用施設に設置した熱利用設備内で含水空気による水和反応を行い放熱させ利用する(熱利用)。

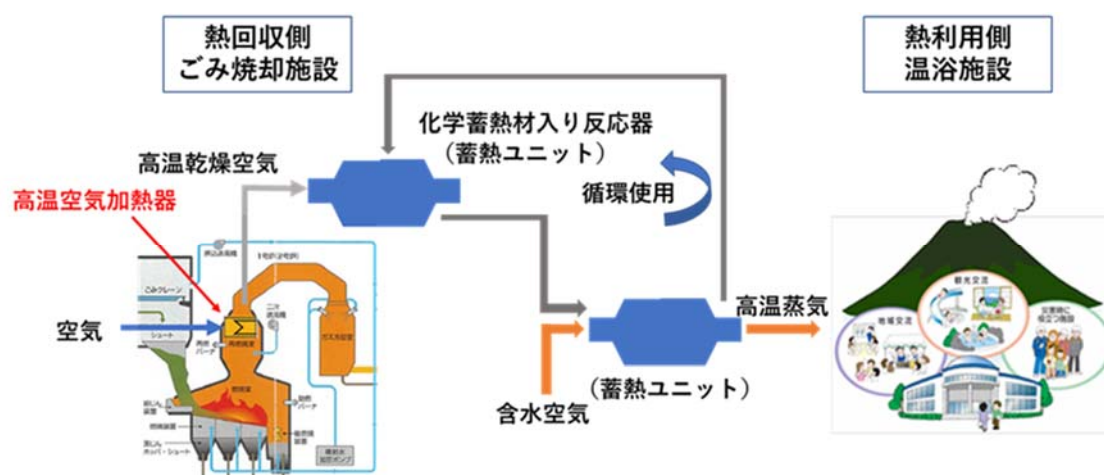


図 2-1 実証実験の流れ

本事業に用いる蓄熱材である酸化マグネシウム系の特徴は、蓄熱材の単位重量・容量当たりの蓄熱量が従来使用されてきた蓄熱材に比べて 2～5 倍大きいこと、自然放熱が起こらないこと、原料は海水で国内調達が可能であること等の利点があることから、システム全体としての経済性が高まること、すなわち一度に輸送できる熱量の増大、断熱対策などが不要なため特殊車両が不要なことからコストの低減が図れること、また熱を長期に保管できることから長距離移送も可能なため、地域偏在や季節変動への対応も容易であること、さらには熱の保管により災害等での緊急対応策の一つとしての熱供給も期待される。

従来の蓄熱材との違いを図 2-2 にまとめ、これまでに検討されてきた熱輸送システムについては「3.5.2. 熱輸送の実態調査」で述べる。

	化学蓄熱 (提案技術)	吸着系蓄熱材 NEDOニュースリリースより	潜熱蓄熱 (既存技術/事業化)
蓄熱材	Mg系	ゼオライト等	エリスリトール、酢酸Na等
蓄熱量	1GJ/m ³	蓄熱量向上 0.59GJ/m ³	蓄熱量向上 0.20GJ/m ³
利用温度	200~250°C	対応温度の差 80~120°C	60~120°C
熱媒 (安全性)	熱媒油（第4石油類）の輸送を 伴わない (安全性向上)	熱媒油（第4石油類）の 輸送を伴わない (安全性向上)	熱媒油（第4石油類）の 輸送を伴う

図 2-2 Mg系化学蓄熱材と従来型蓄熱材の相違の概要

内容の出典:新エネルギー・産業技術総合開発機構「ENEX 2020」開催
報告「戦略的省エネルギー技術革新プログラム」(2020年3月30日)
(<https://www.nedo.go.jp/content/100906320.pdf>)

2.3. 事業計画

本事業における課題、各課題に対する最終目標及び令和3年度の目標を図2-3に示す。

	項目	採択時の技術の状況	最終目標	令和3年度の目標
0	全体目標	各要素技術は、ほぼ確立されているが、全体システムとしては未完	全体システムとして機能することを確認し、経済性をより高める	①コスト低減への課題抽出と対策立案 ②出口戦略の確実な立案 ③実証試験装置の基本設計 ④中小規模ごみ焼却施設の実態調査 ⑤熱利用先の実態調査
1	経済性の向上	蓄熱・放熱および熱移送に係る設備費用及び運転費用が割高	現行の熱エネルギーコストとの競争力を持つ価格帯とする	本システムでの各要素技術に係る経費の低減方策立案
2	市場性の確認	類似の熱輸送では湯の供給に留まっている	熱需要先の利用方法に応じた熱供給システムの構築	蒸気の利用も含めての熱需要家の調査
3	実証試験装置の設計	協力企業での運転実績はあるも、運転条件の違いへの対応は不明	各設備の運転条件の違いに対して迅速に対応可能な設計手法の確立	実証試験を実施する焼却設備及び温浴施設に適応する各設備の基本設計

図 2-3 本事業の課題と解決に向けた方策

2.4. 実施場所

本事業の実証実験は、熱回収と熱利用の各 1 施設で実施する。具体的には、ごみ焼却施設で排熱を回収し、その回収熱は、温浴施設で利用する。各施設の概要は以下のとおりである。また、各施設の位置を図 2-4 に示す。

①ごみ処理施設

所在:長崎県南島原市南有馬町戊 1751

施設名称:南島原市南有馬クリーンセンター(旧南高南部衛生福祉組合ごみ処理施設)

規模:30 t/16h×2 炉(水噴射方式)

竣工:2000 年 3 月

施工:エスエヌ環境テクノロジー株式会社

②温浴施設

所在:長崎県南島原市加津佐町己 3521 番地 2

施設名称:南島原市加津佐総合福祉センター「希望の里」

所有者:南島原市

灯油使用量:平均 45 リットル/日

位置:ごみ焼却施設から 15.7km(直線距離 9.5km、トラックの走行時間約 23 分、消費燃料は運搬物の重量による、普通の乗用車であれば 1.2L)



図 2-4 実施場所の位置図

地図の出典:国土地理院 電子国土 Web

2.5. 実施体制および実施内容

本事業は、図 2-5 に示すとおり、エスエヌ環境テクノロジー株式会社(以下、SNTと記す。)が代表実施者とし、日立造船株式会社(以下、Hitzと記す。)および株式会社東和テクノロジー(以下、東和と記す。)の2社が共同実施者となり、東和は公益財団法人京都高度技術研究所(以下、ASTEMと記す。)を再委託先とした企業群により、実施する。また実証実験を実施する施設は、南島原市よりご提供いただいた。

酸化マグネシウム系を用いた熱輸送は、過去に経済産業省が主導する『戦略的省エネルギー技術革新プログラム』にて、トヨタ自動車、タテホ化学工業、森松工業、日本環境技研等の体制で、実証実験が行われている。当該各企業には、本事業が必要とするノウハウおよび資材、機器の提供を、お願いしているところである。

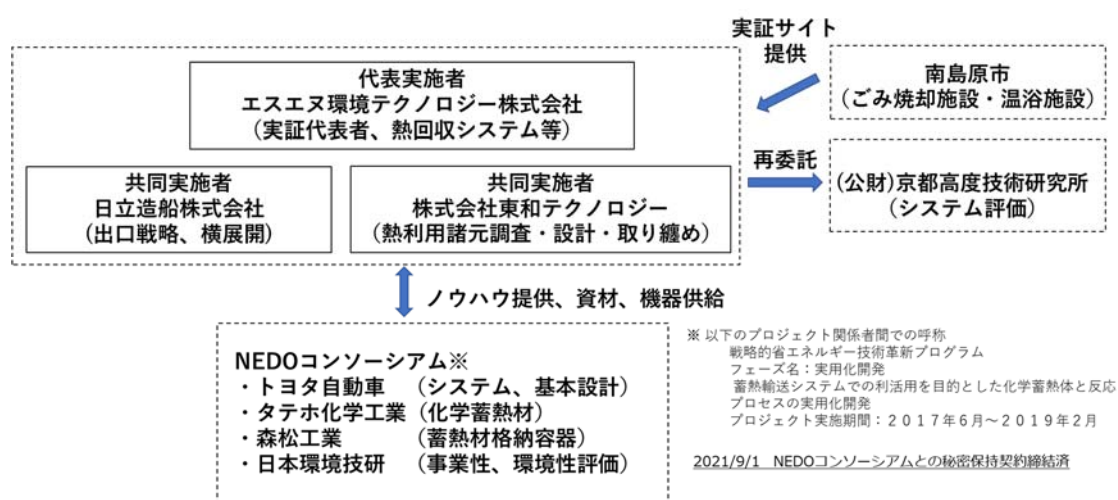


図 2-5 実施体制

次に、本事業における各企業の分担を、図 2-6 に示す。

	業務内容	エスエヌ環境テクノロジー	日立造船	東和テクノロジー	京都高度技術研究所
1	本システムの有効性評価	・ 熱回収に係る費用試算 ・ 回収熱移送に係る費用試算		・ 蓄熱放熱に係る費用の試算	・ 有効性評価についての助言指導を行う。
2	技術的、制度的な課題の抽出と対策立案	・ 熱回収設備に関わるもの ・ 回収熱移送に関わるもの		・ 蓄熱・放熱設備に関わるもの ・ 化学蓄熱材に関わるもの	
3	市場性の調査		・ 大規模焼却施設への適合性検討	・ 中小規模施設の実態調査 ・ 熱利用先の実態調査	
4	本システムの実証設備の設計	・ 高温空気加熱器		・ 蓄熱・放熱装置の仕様設計	

図 2-6 各企業の分担

2.6. 実施工程

本事業は、令和 3～5 年度の 3 年間で、図 2-7 に示す工程で実施する予定である。

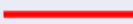
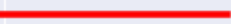
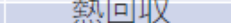
主なタスク	令和3年度	令和4年度	令和5年度
熱回収システムの設計			
熱利用システムの設計			
機器の製造、設置		 熱回収	 熱利用
熱輸送実証設備の運用			
システム評価			
出口戦略・横展開計画			

図 2-7 スケジュールの概要

3. 実施内容

本年度における本事業の実施内容を、次の 9 項目に分けて、報告する：(1) 国内の熱事情調査、(2) 実証試験の対象施設の調査、(3) 実証試験計画の策定、(4) 熱回収・熱利用の市場調査、(5) 本システムの経済性評価、(6) CO₂削減効果、(7) 本システムの有効性評価、(8) 技術的、制度的な課題の抽出と対策の立案、(9)検討委員会の実施内容、(10) まとめ。

3.1. 国内の熱事情調査

本事業を計画する背景として、日本のエネルギー事情を、世界的な傾向と比較して、要約する。世界のエネルギー総消費量は 601×10^{15} Btu(2019 年)であるが、日本は世界第 5 位の消費国で、全体の 3.2%を占める(図 3-1-1)。また、日本では、名目 GDP の 8.7%相当を、化石燃料の輸入に投資している[1]。

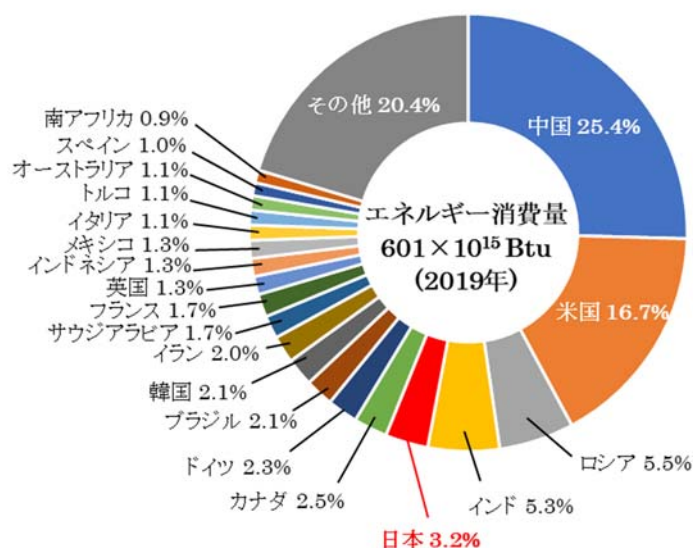


図 3-1-1 世界各国のエネルギー総消費量の割合 (2019 年)

データの出典: US Energy Information Administration

次に、1980 年以降の各国の年間エネルギー消費量の推移を、図 3-1-2 に示した。日本を含む多くの国では、エネルギー消費量が概ね横ばい～緩やかな増加傾向を示すが、例外的に、中国とインドが顕著な増加傾向を示し、ロシアが、旧ソ連邦末期に激減した後、横ばいで推移している。

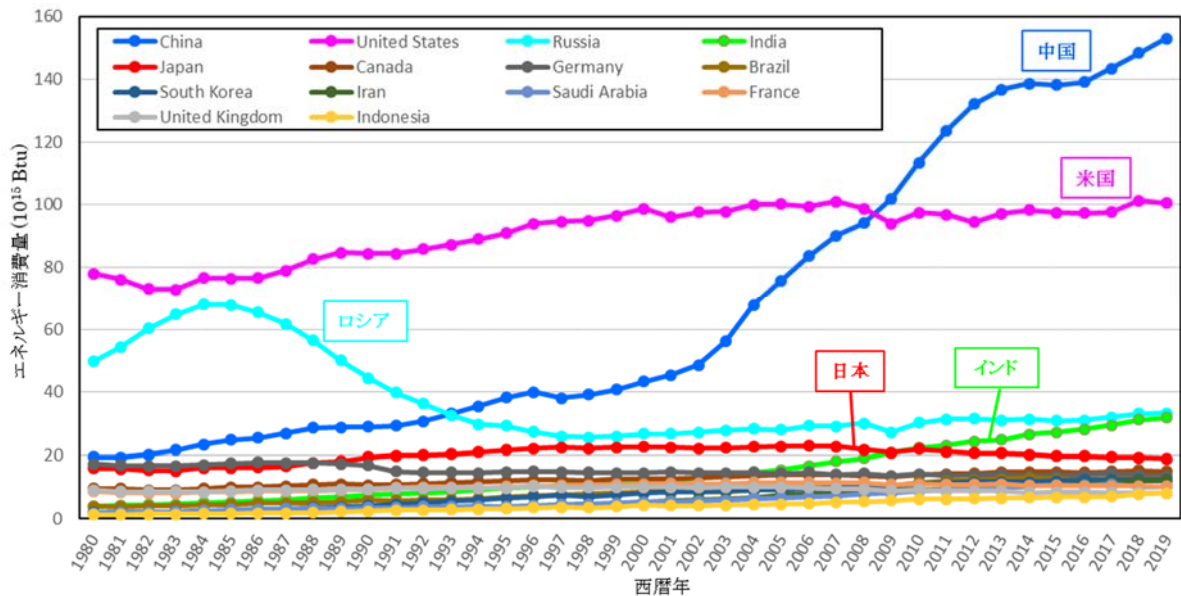


図 3-1-2 各国のエネルギー総消費量の推移 (1980-2019 年)

データの出典: US Energy Information Administration

次に、1953 年以降における日本国内のエネルギー消費量の推移について、述べる。国内エネルギー消費量は、図 3-1-3 に示すとおり、概ね GDP と正の相関関係を示す。そこで、両者の関係を直接比較すると(図 3-1-4)、時期により、正の関係、負の関係、無相関が認められる。これらは、6 時期に分類され、その各年代が次の経済イベントに対応する(図 3-1-3): (I) 高度経済成長期、(II) オイルショック期、(III) バブル経済期、(IV) バブル経済崩壊後の経済低迷期、(V) リーマンショック期、(VI) 原発稼働停止期。そのうち、II 期は、2 度のオイルショックを経験した時期で、省エネルギー化を進めた結果、経済成長期であるにも関わらず、エネルギー消費量は横ばいであった。VI 期は、東日本大震災後の原発稼働停止期で、より一層の省エネを推進した結果、景気が僅かに回復基調であるにも関わらず、エネルギー消費量が 20%程度減少している。その他の期間は、エネルギー消費量と GDP の間に明瞭な正の相関関係が認められ、時期によって、[エネルギー消費増加分]/[GDP 増加分]の勾配が異なる。ただし、その勾配の相違の原因については、GDP データが物価変動を考慮していないため、ここでは言及を避ける。

次に、エネルギー消費量のうち、熱エネルギーとしての消費について、述べる。熱エネルギーの消費は、図 3-4-1 に示すとおり、最終エネルギー消費全体の 7.5%程度(図 3-1-5)を占め、少なくとも 1990 年以降は、ほぼ横ばいである(図 3-1-3)。

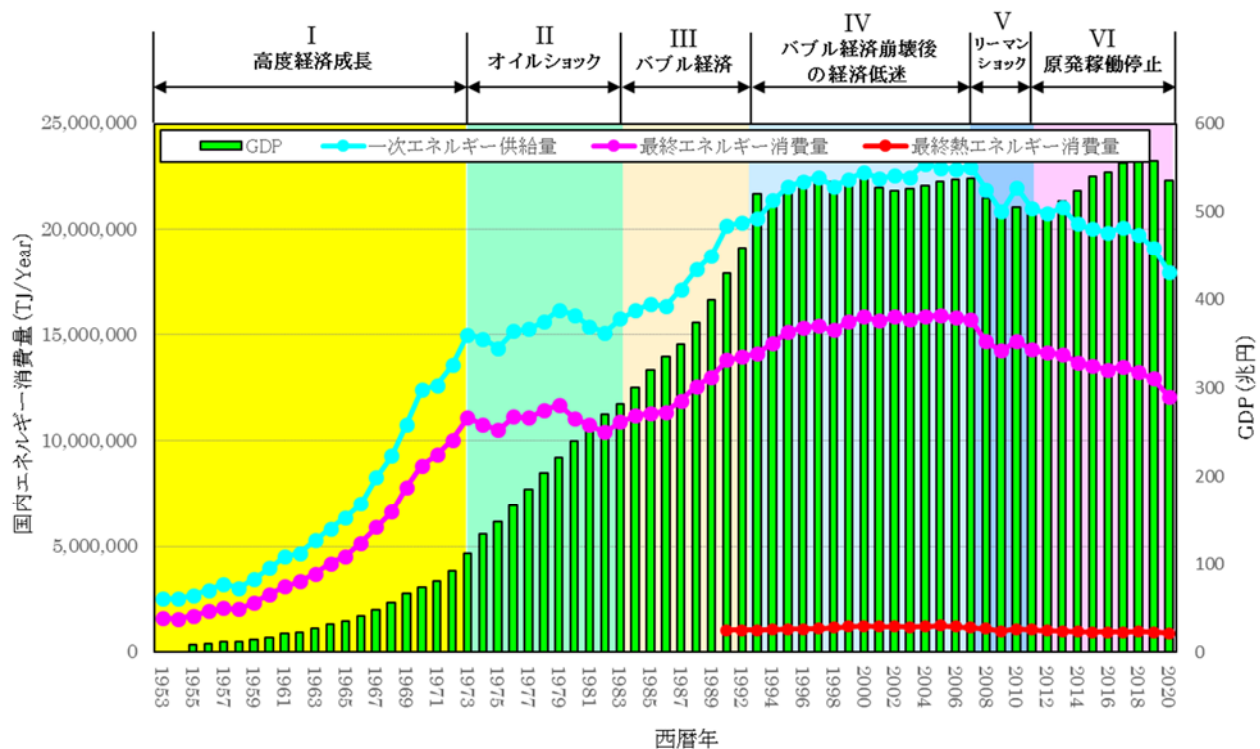


図 3-1-3 日本の名目 GDP および国内エネルギー消費量の推移 (1953-2020 年)

データの出典: 資源エネルギー庁[2-3]、内閣府経済総合研究所(GDP)

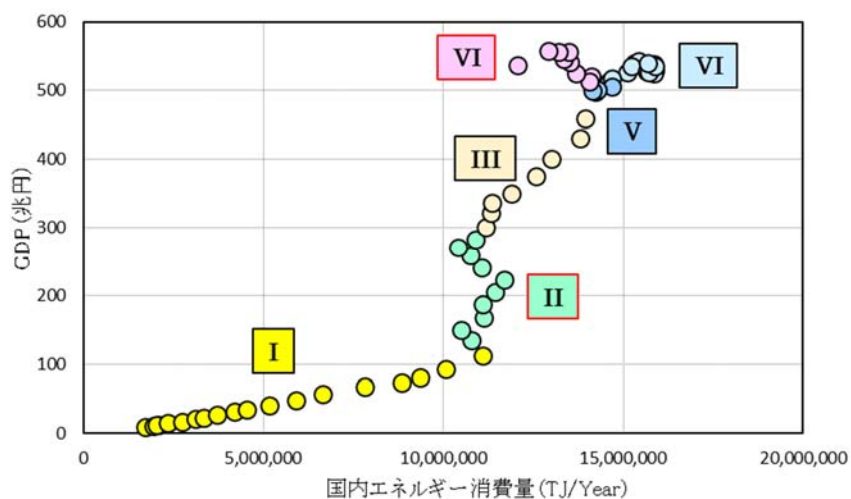


図 3-1-4 各国のエネルギー総消費量の推移 (1980-2019 年)

データの出典: 資源エネルギー庁[2-3]、内閣府経済総合研究所

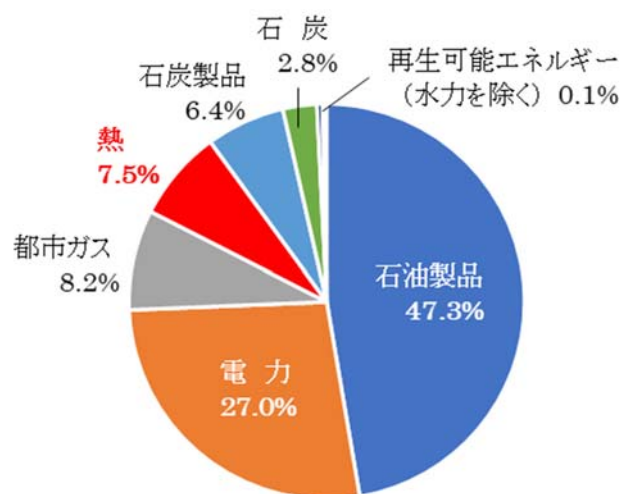


図 3-1-5 日本の最終エネルギー消費におけるエネルギー源別構成

データの出典: 資源エネルギー庁「2020 年度総合エネルギー統計 簡易表」[3]

次に、日本の熱エネルギーの利用効率について、述べる。日本においては、投入エネルギーに対する排ガス熱量は、業種により異なるが、概ね 5～20% 程度である(図 3-1-6 右)。一方、世界の投入エネルギーに対する排ガス熱量は、概ね 30～60% 程度である(図 3-1-7)。従って、日本はグローバルなトレンドと比較して、CO₂ 排出量を効果的に削減していることが、窺える。

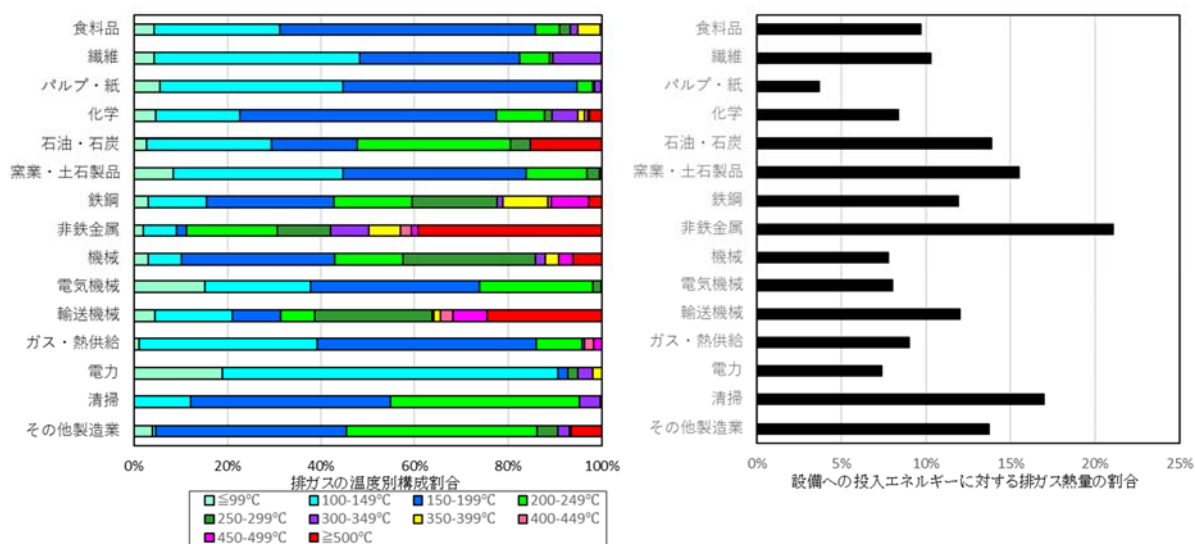


図 3-1-6 業種別、温度帯別の排ガス熱量の割合(左)、業種別の投入エネルギーに対する排ガス熱量の割合(右)

データの出典: 未利用熱エネルギー革新的活用技術研究組合
(2019)「産業分野の排熱実態調査報告書」[4]

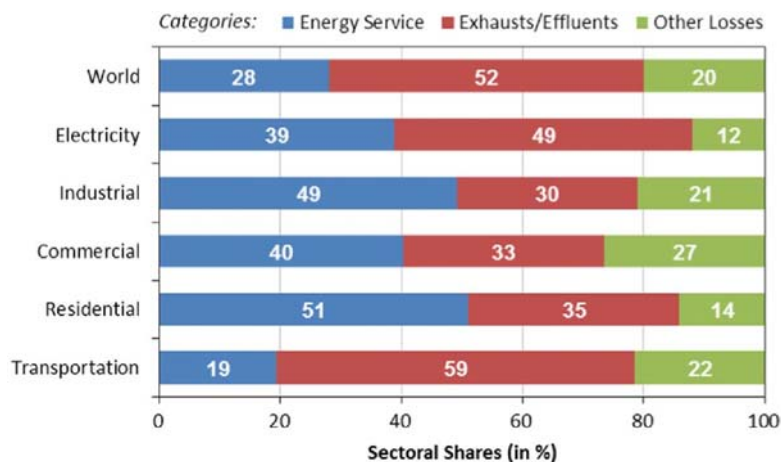


図 3-1-7 世界における分野別の熱エネルギー利用状況(利用、排出、その他のロス)

出典: Forman *et al.* (2016) [5]

以上の背景に鑑み、本事業では、近年研究開発の進展が著しい化学蓄熱材の技術を適用することで、これまで未利用のまま排出された熱エネルギーを回収・再利用するシステムを構築し、その有効性を実証し、利用を促進することで、更なる CO₂ 排出削減のイノベーションに寄与することを目的としている。本節では、本事業を実施する背景として、国内の熱事情の概要について述べた。本事業を進めるに当たって必要な議論、即ち更なる余熱回収・利用のポテンシャルについては、「3.4. 市場調査」にて、述べる。

引用文献

- [1] Lu, H.F. *et al.*, 2015, Interactions among energy consumption, economic development and greenhouse gas emissions in Japan after World War II. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 54, 1060-1072.
- [2] 資源エネルギー庁, 総合エネルギー統計 1953-2019 年度.
https://www.enecho.meti.go.jp/statistics/total_energy/results.html#headline2
 (最終アクセス日 2022/01/25)
- [3] 資源エネルギー庁, 2021, 2020 年度総合エネルギー統計 簡易表.
https://www.enecho.meti.go.jp/statistics/total_energy/results.html#headline2
 (最終アクセス日 2022/01/25)
- [4] 未利用熱エネルギー革新的活用技術研究組合 技術開発センター, 2019, 産業分野の排熱実態調査報告書.
- [5] Forman, C. *et al.*, 2016, Estimating the global waste heat potential. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 57, 1568-1579.

3.2. 実施現場の調査結果

3.2.1. 熱回収施設

本事業で熱回収するごみ焼却施設は、長崎県南島原市にある南有馬クリーンセンターである。その概要を表 3-2-1 に示す。

表 3-2-1 本事業に使用するごみ焼却施設の概要

施設名称		南島原市南有馬クリーンセンター (南島原市)
所在地		南島原市南有馬町戊 1751 番地
竣工年月		平成 12 年 3 月
公称能力		ごみ焼却炉 60t/日 (30t/16h×2 炉) 焼却残渣溶融炉 14t/日 (14t/24h×1 炉)
処理方式		准連続燃焼式焼却炉＋焼却残渣溶融炉
主要設備概要	受入供給設備	ピットアンドクレーン方式
	燃焼設備	ストーカ式
	ガス冷却設備	水噴射式
	集じん設備	ろ過式集じん器
	灰溶融設備	バーナ式表面溶融方式
運営管理		直営

南有馬クリーンセンターは、平成 12 年に竣工し、本年度で 22 年が経過する施設である。ストーカ式の准連続燃焼式設備(16 時間稼働)を 2 炉有し、処理能力は各 30t/16h で、合計 60 t/日の処理能力がある。施設の全景写真を写真 3-2-1 に示した。

ごみ処理施設のシステムの概略を、図 3-2-1 に示した。本施設が処理するごみは、主に一般廃棄物であり、産業廃棄物も一部処理されている。収集ごみは、ピットアンドクレーン方式にて炉に投入され、ストーカ炉にて燃焼する。燃焼ガスは、再燃焼室からガス冷却室および第 2 ガス冷却室、さらに、ろ過式集塵機を経た後に、煙突より排出される。本事業の熱回収装置は、燃焼ガスが通過する再燃焼室とガス冷却室の間に設置する。



写真 3-2-1 本事業に使用するごみ焼却施設の全景写真

ごみ処理施設のシステムを図 3-2-1 に示した。

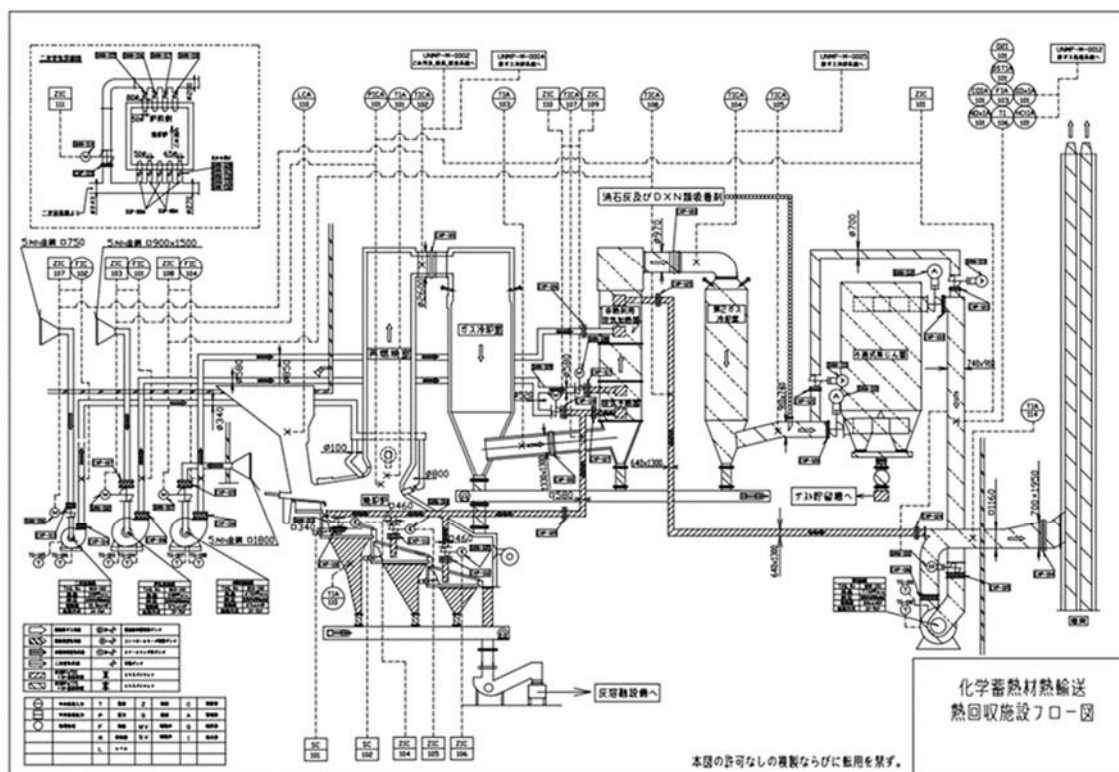


図 3-2-1 本事業に使用するごみ焼却施設の概略システム

次に、ごみ質について述べる。表 3-2-2 に、ごみ組成、三成分(水分、可燃分、灰分)の分析結果、低位発熱量(kJ/kg)を示し、図 3-2-2 に標準値との比較を示した。これによると、当施設のごみは、標準的なごみと比較して、次の 3 つの特徴が認められた。

当施設のごみの特徴(図 3-2-2)

- ・ちゅう芥類が標準の 2 倍と多く、不燃物類は標準の 0.5 倍と少ない。
- ・水分は標準の 1.3 倍と多く、灰分は 0.5 倍と少ない。
- ・低位発熱量は、標準の 70%程度である。

表 3-2-2 各種ごみ質分析結果のまとめ

組成項目	紙・布類	ビニール・合成樹脂、ゴム、皮革類	木、竹、わら類	ちゅう芥類	不燃物類	その他
分析結果(%)	46.4	22.6	7.7	20.3	1.5	1.5
三成分合計 (%)	水分 (%)	可燃分 (%)	灰分 (%)	低位発熱量		
				計算値 (kJ/kg)	実測値 (kJ/kg)	
100	52.4	42.2	5.4	6,635	7,750	

※低位発熱量は、過去数年間の平均値を示した。

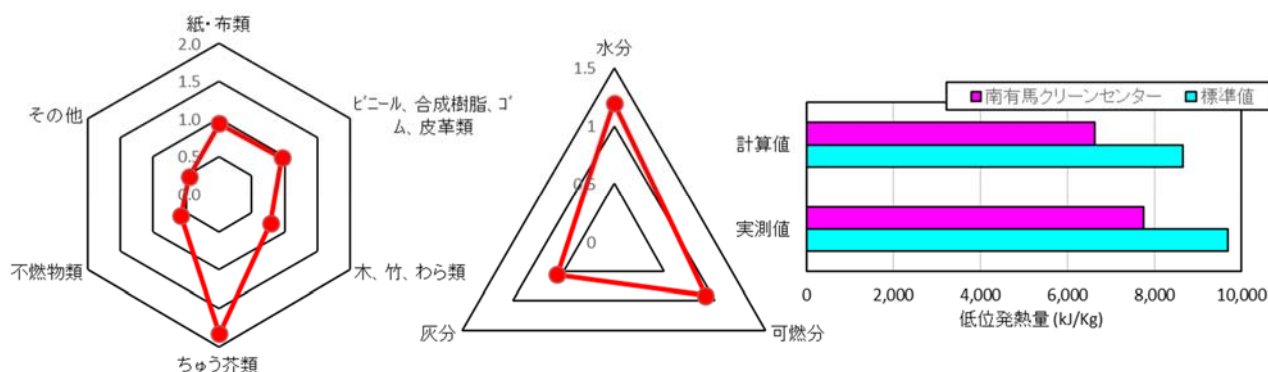


図 3-2-2 各種ごみ質分析値と標準値の比較:ごみ組成(左)、三成分(中)、低位発熱量(右)。

3.2.2. 熱利用施設

本事業の熱利用施設は、南島原市加津佐総合福祉センター『希望の里』である。熱回収施設からは、トラックの走行距離 15.7km (直線距離 9.5km、走行時間約 23 分)に位置する。

センター内には浴場があり、付属の熱供給ボイラーにより、湯船を加温し、センター内に温水を供給している。施設の概要は表 3-2-3、施設の全景写真は写真 3-2-2 に示すとおりである。男女別の浴室内(床面積約 27m²×2)には、各 1 槽の浴槽(面積約 10m²×2、容積 5m³×2)が設置されている(写真 3-2-3)。

表 3-2-3 本事業に使用する熱利用施設の概要

施設名	南島原市加津佐総合福祉センター
施設概要	社会福祉活動の拠点施設
所在地	〒859-2601 南島原市加津佐町己 3521 番地 2
開館時間	8 時 30 分～22 時 00 分 浴場 11 時 00 分～19 時 00 分



写真 3-2-2 本事業に使用する熱利用施設の全景写真



写真 3-2-3 温浴施設の内観(浴槽)

当施設における熱の利用状況を、次の 5 項目に分けて、説明する：(1) 熱供給ボイラーの概要、(2) 必要な熱量の見積、(3) 曜日・時間帯による需要変動の予想、(4) コロナ禍による需要変動幅の推定、(5) 温浴施設としての規模観。

(1) 熱供給ボイラーの概要

図 3-2-3 に温浴施設内設備タイムテーブルを、図 3-2-4 に温水ボイラー通常運転時における温度推移を示す。

当施設の営業時間は朝 11 時から夜の 19 時までとなっており、湯船の温水は施設に付属のボイラー室に設置されたボイラー(写真 3-2-4)を熱源としている。

夜 19 時に営業を終了すると同時に、ボイラーの運転も停止される。このため、翌朝まではボイラーからの熱の供給がないため、湯船の湯の温度は通常は 20℃まで低下する。この冷却した湯水を営業のために 42℃まで上昇させるために、毎朝午前 9 時頃から、ボイラーを起動させる。

温浴施設では、週に 2 回、湯船の水を新しい水に交換をしており、交換する場合には前日の夜に湯を抜き、翌朝 9 時から湯船の清掃と新しい水の張替を行い、水張が終了すると、湯船の水をボイラーで熱せられた水(70℃程度)との熱交換により所定の温度(42℃)まで上昇させ、湯船との間を循環させている。湯船の水交換を行わない日もシステムは同じである。

ボイラーの温水循環ラインは 3 つある。第 1 は洗い場の給湯ラインで、第 2 は浴槽水を温める熱交換器(写真 3-2-4)用の温水ラインである。第 3 は、浴槽水が熱交換器に流入する前段階で、ろ過装置(写真 3-2-4)を通過するための循環ラインがある。このシステムを図 3-2-5 に示した。システム①が浴槽と熱交換器間を循環するライン、システム②がボイラーと熱交換器間を循環するライン、システム③がシャワー水などを造り出すための給湯のラインである。

		お風呂				お風呂								お風呂					
		ボイラON	循環開始	利用開始(HP)						利用終了 (HP)				循環停止					
		▼	▼	▼						▼				▼					
		9:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00	20:00						
ボイラ	VEC50ESN	連続運転 (10min連続加熱。熱媒上限90℃で停止、すぐに発停を繰り返す。)																	
		間欠運転 (5〜6分間隔で1分加熱、80〜85℃でボイラ内熱媒(水)230Lを加熱)																	
給湯循環ポンプ		連続運転																	
男湯温水循環ポンプ		連続運転																	
女湯温水循環ポンプ		連続運転																	
男湯循環ポンプ		連続運転																	
女湯循環ポンプ		連続運転																	

図 3-2-3 温浴施設内設備タイムテーブル



図 3-2-4 温水ボイラー通常運転時における温度推移

温水ボイラーは、運転時間 1.5min、停止時間が約 5min のサイクルとなっている。運転の初期と停止直前には、プレパージの時間があり、実燃焼時間は、約 1min 程度となっている。



写真 3-2-4 ボイラー室(左)、熱交換器(中)、ろ過装置(右)

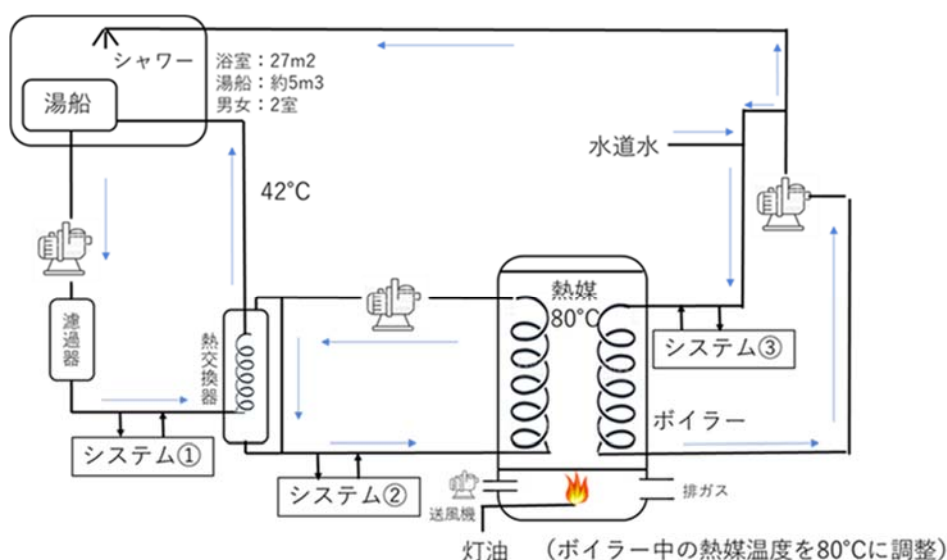


図 3-2-5 3つの温水循環ライン

(2) 必要な熱量の見積

温浴施設の運営に要する熱量は、今年度のボイラー室における灯油消費量及び利用者数データに基づいて見積もる。入手したデータは、本年度の4～11月分のものであるが、これに基づき見積もりを行う。

灯油消費量は、図 3-2-6(左)に示すとおり、季節により大きく変動する。冬に多く、12月は8月の2倍程度の灯油を消費する。これは、冬には利用者数が多く、かつ1人当たりの灯油消費量が多いことに起因すると考えられる。次に、灯油消費量と月間利用者数の関係には、図 3-2-4(右)に示すとおり、概ね正の相関関係が認められる。これに従うと、利用者数が0名の場合、つまり浴槽水の営業時間中の水温維持(週2回の換水を想定)に、月間50～200Lの灯油を消費すると考えられる。これを差し引いた灯油使用量は、洗い場における温水使用に起因し、利用者1名当たり、1.0～1.6L程度利用していると考えられる。以上をまとめると、当施

設の運営に要する熱量は、以下のとおりと考えられる。

$$\begin{aligned} \text{月間消費量 (L)} = & \text{基本消費量 } 105 \text{ (L)} + 1 \text{ 人当たりの消費量 } 1.17 \text{ (L/人)} \\ & \times \text{月間利用者数 (人)} + \text{変動リスクに伴う予備分 } 300 \text{ (L)} \end{aligned}$$

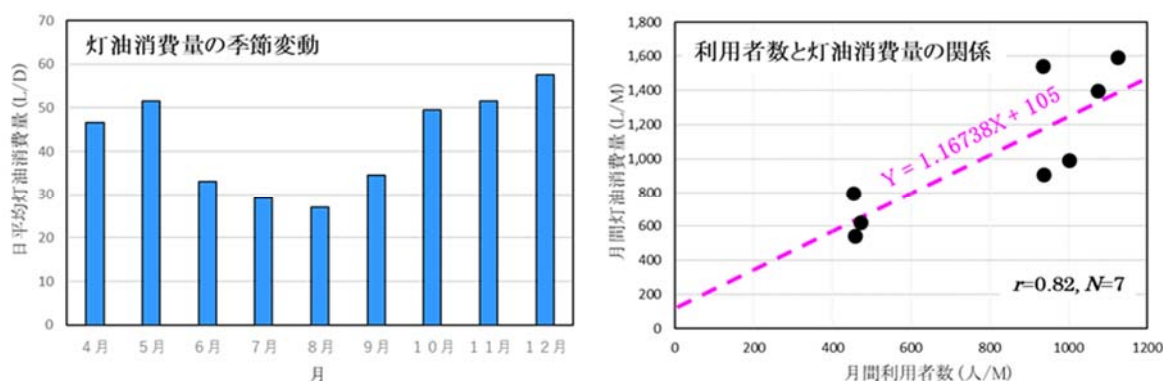


図 3-2-6 実証施設における灯油消費量の季節変動(左)、利用者数と灯油消費量の関係(右)

データの出典:南島原市

(3) 曜日、時間帯による需要変動の予想

希望の里における月間の熱需要量は、先に述べたとおりであるが、設計の都合上、時間帯や曜日別の需変動も、把握しておく必要がある。当施設における時間帯別の入場者数の記録はない。そこで、温浴施設にはある一定の来客パターンがあることを利用し、その規則性に基づいて推測する。

初めに、温浴施設の分類について、述べる。公衆浴場法では、公衆浴場を「一般公衆浴場」と「その他の公衆浴場」に分類する。前者は、いわゆる銭湯で、自宅に風呂がない者を対象とする公衆衛生施設である。固定資産税の免除や上下水道料金の特別枠などの優遇措置が適用される反面、都道府県知事により、利用料金の上限価格が設定される。年間利用者数は、典型的には数万人(～10 万人)程度である。後者は、自宅に風呂がある者を対象とし、レジャー産業施設として分類される。いわゆるスーパー銭湯と言われる施設が、これに含まれる。希望の里は、「その他の公衆浴場」である。

次に、スーパー銭湯の分類と来客パターンについて、述べる。スーパー銭湯は、遠方からの観光客を対象としたリゾート型施設と、地域住民を対象とする都市型施設に分類される。希望の里は、後者に属する。都市型施設は、その設備構成から次の 3 つに分類される(1) 老人福祉施設型、(2) 短時間滞在型、(3) 長時間滞在型。それぞれに、時間帯別の来客パターンに固有の特徴が認められる(図 3-2-7)。希望の里は、浴槽数が 1 つで、サウナのない最もベーシックな施設である。この設備構成は、老人福祉施設型に相当し、その来客パターンは、図 3-2-5(左)に示すとおり、閉店直前を除き、全ての時間帯でほぼ均等であることが特徴である。また、

利用者の標準滞在時間は、0.5～1 時間程度であると推測される。

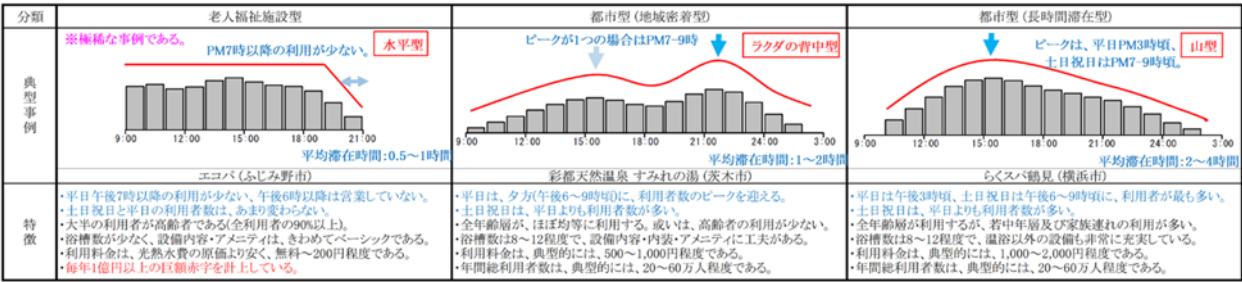


図 3-2-7 スーパー銭湯における時間帯による来客パターンの典型事例

出典: (株)東和テクノロジー調査資料、混雑度データは Google 検索エンジン)

次に、曜日別の来客パターンについて、述べる。図 3-2-8(左)に、希望の里の曜日別の平均利用者数を示した。1 日当たりの平均利用者数は 30～40 名程度で変動する。通常の都市型スーパー銭湯では、利用者が土日曜日に集中し、平日の昼間は比較的閑散としている。これとは対照的に、希望の里では、曜日による変動幅が小さく、老人福祉施設型と同様、平日と週末の利用者数に大きな相違が認められない(図 3-2-8 右)。恐らく、勤労者、学生や未成年者の利用・同伴が少ないことに起因すると推測される。これは、前述した設備構成による利用者層の推測と整合的である。従って、希望の里では、利用者の来館時間は、時間帯によらず、ほぼ均等であると推測することができる。この推測が正しいか否かは、必要に応じて、来年度以降、現場で調査することも可能である。

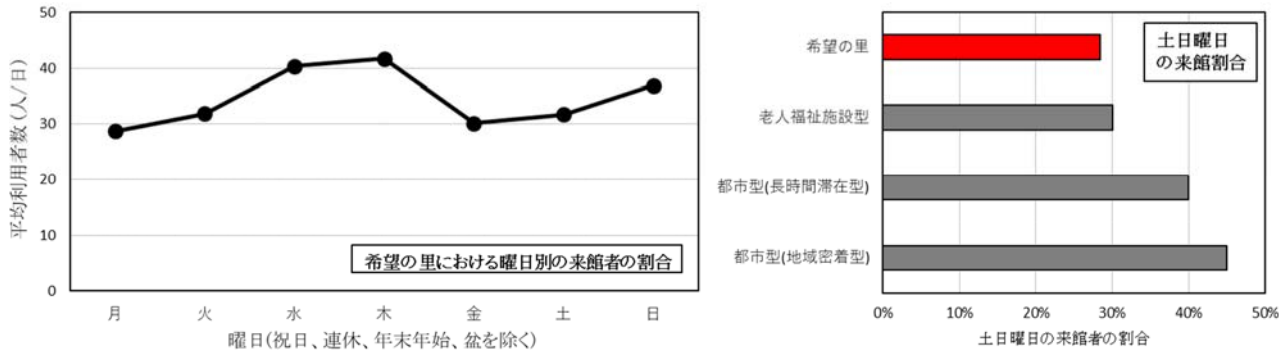


図 3-2-8 希望の里における曜日別の平均利用者数(左)、週末の来館数割合における他施設との比較(右)。希望の里のデータは、4～11 月の 1 日当たりの平均値を適用した(祝日、連休、年末年始、盆休暇は、計算から除外した)。

データの出典: (株)東和テクノロジー調査資料

(4) コロナ禍による需要変動の予想

希望の里におけるコロナ禍以前の利用者数は、不明である。ただし、大半の温浴施設においては、コロナ禍の外出自粛ムード及び都道府県の営業休止・時間短縮要請により、利用者が最大 4 割程度減少していると推測され、減少幅は施設により大きく異なる(図 3-2-9)。この範囲内で、どの程度の利用者数減少を見込むのが妥当であるかは、現時点で不明である。

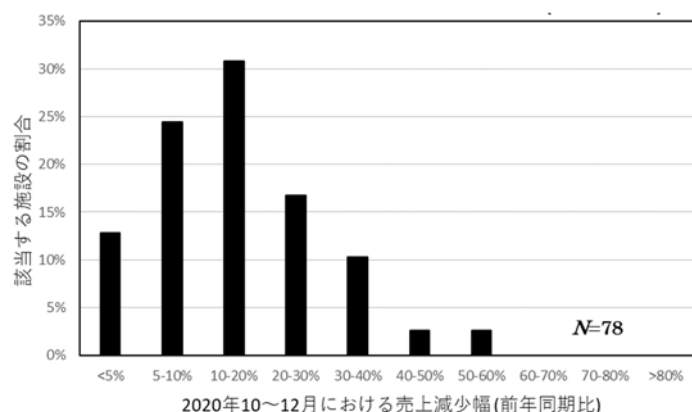


図 3-2-9 コロナ禍における公衆浴場業の売上減少幅 (2020 年 10～12 月、前年同期比)

データの出典: 日本政策金融公庫 2021 年 2 月 17 日ニュース

(5) 温浴施設としての規模観

希望の里の温浴施設としての規模観を、熱需要の観点から評価する。当施設は浴槽数 1、浴槽水の換水頻度は週 2 回、サウナが無く、年間利用者数が 1～1.2 万人である。温浴施設の集客力を決める因子は多様であるが、浴槽数はその最大因子の 1 つである。これに着目すると、浴槽数が多い程、利用者数が多い傾向が認められる(図 3-2-10)。つまり、希望の里は、最小規模の温浴施設である。

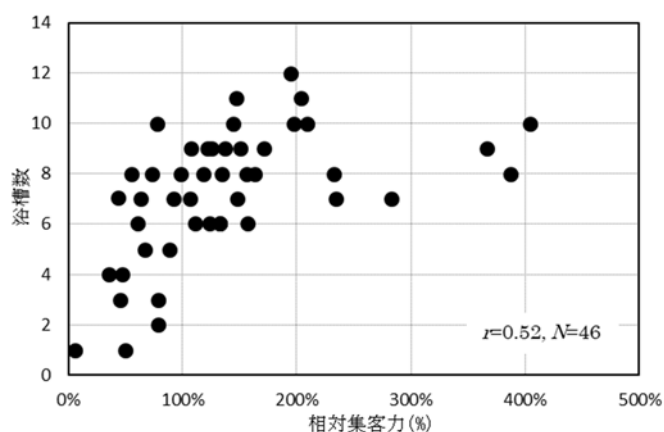


図 3-2-10 スーパー銭湯における浴槽数と集客力の関係

出典: (株) 東和テクノロジー調査資料

次に、より規模の大きいスーパー銭湯との規模を比較する。スーパー銭湯は主に、民間施設、非余熱利用の公営施設、余熱利用施設の 3 つに分類される。ここに根拠となる実測データは示さないが、大都市のスーパー銭湯では、浴槽数 8～10 が標準的である。浴槽水は毎日換水し、年間利用者数は典型的には 30～50 万人程度である(e.g., 図 3-2-11)。非余熱利用の公営施設の年間利用者数は、10～20 万人程度以下が一般的である。余熱利用施設の利用者数は、3～8 万人程度程度である。この条件を、前述した希望の里の月間灯油使用量の見積式に代入して、算出すると、表 3-2-4 に示す熱需要の規模観を推測することができる。これによれば、温浴施設における熱需要は、施設規模や利用者数に応じて、希望の里の 1～25 倍以上と、施設によって大きく異なると推測される。

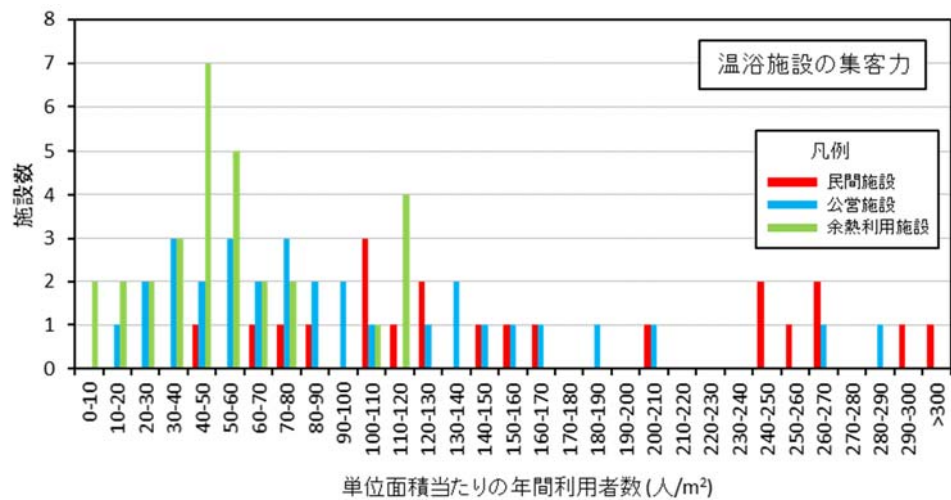


図 3-2-11 スーパー銭湯における集客力の分布

出典：(株)東和テクノロジー調査資料

表 3-2-4 温浴施設における熱消費量のおおよその目安(例):希望の里との比較

分類	浴槽数	浴槽の平均容積(1m ³)	換水頻度(回/週)	利用者数(万人/年)	希望の里との比較
民間スーパー銭湯	12	3	7	50	25倍
	10	3	7	40	21倍
	8	4	7	30	22倍
公営施設(非余熱利用)	7	3	7	20	15倍
	6	3	7	15	13倍
	5	3	3.5	10	5倍
余熱利用施設	4	2	3.5	8	3倍
	3	3	2	6	2倍
	2	4	1	4	1倍
希望の里	1	5	2	1.1	1倍

※サウナや岩盤浴の熱消費量は考慮していない。

3.3. 現場調査結果に基づく実証試験計画の策定

3.3.1. 高温空気加熱器の基本設計

本実証事業において使用のごみ処理施設のフローは以下のとおり。概略フローにおいて、ガス冷却室の後段にある熱交換器は、燃焼用空気予熱器と余熱利用空気加熱器の表記を簡略化している。

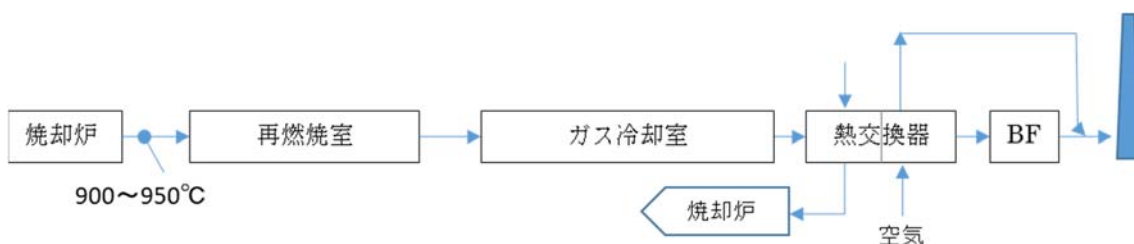


図 3-3-1 ごみ処理施設の概略フロー

図 3-3-2 に本実証事業での熱回収設備の概略フローを示す。熱回収設備として新たに追加されるものを赤色にて示す。既存の再燃焼室に高温空気を得るための熱交換器(以下、高温空気加熱器)を設置し、既存の熱交換器で加温された 170°Cの空気の一部を、高温空気加熱器にて蓄熱条件温度である 350°Cまで再加熱した後、化学蓄熱材の格納された蓄熱装置に送り、化学蓄熱材に蓄熱をさせた後、空気を屋外に放出する。

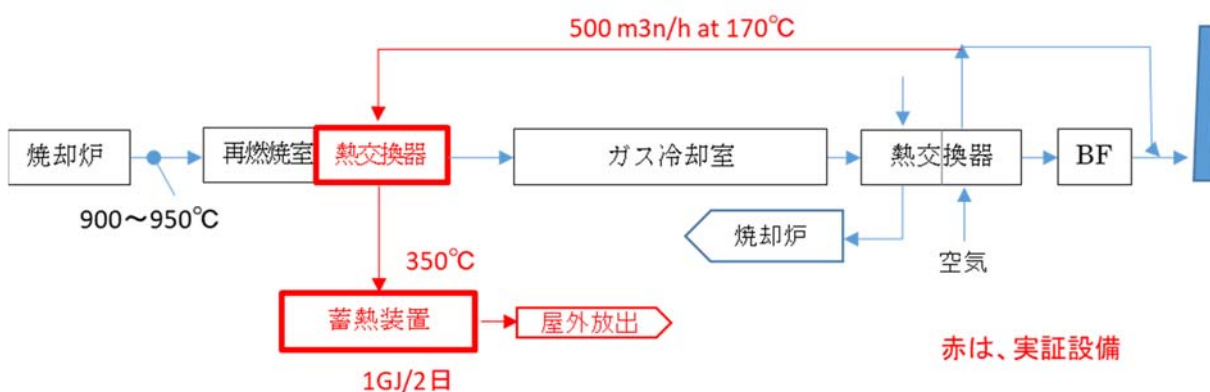


図 3-3-2 熱回収設備の概略フロー

表 3-3-1 に蓄熱装置の蓄熱条件を示す。基本設計の結果、熱媒体となる空気量は 500m³/hr とした。また、本実証事業にて使用するごみ処理施設の運転時間は 16hr/日であるため、2 日にて1GJ の蓄熱を完了するものとした。

なお、蓄熱時間は、空気温度と空気量により決まるが、2 つの因子の内、空気量とは比例関係にあることから、本実証事業の結果を元に、実機への規模拡張は容易に反映することができる。

表 3-3-1 蓄熱装置の蓄熱条件

項目	単位	実証条件
熱媒体	-	空気
温度	℃	350
空気量	m ³ /hr	500
蓄熱時間	日 (1GJ当り)	2
蓄熱容量	GJ	1
蓄熱材	-	Mg系
蓄熱材形状	-	ペレット

図 3-3-3 に本実証事業を含めた全体フローシートを示す。熱回収設備として新たに追加されるものを赤色にて示した。なお、図中の青色の部分は、現場指示計を示している。

本実証事業では、実機での想定と同様に、施設稼働中に蓄熱装置を着脱できるようにバイパス系統を設けている。なお、高温空気加熱器の保護のため、炉が操業している間は、実機においても、常時空気流通となる。高温空気加熱器の管理は、入口側空気温度及び流量と出口側の空気温度を常時計測し制御を行い、補完として、各種現場指示計にて、熱交換器の状況を把握することができるものとした。

蓄熱装置の詳細設計は次年度以降となるが、蓄熱装置の管理としては、蓄熱完了を蓄熱装置出口の空気温度で判断することとしている。

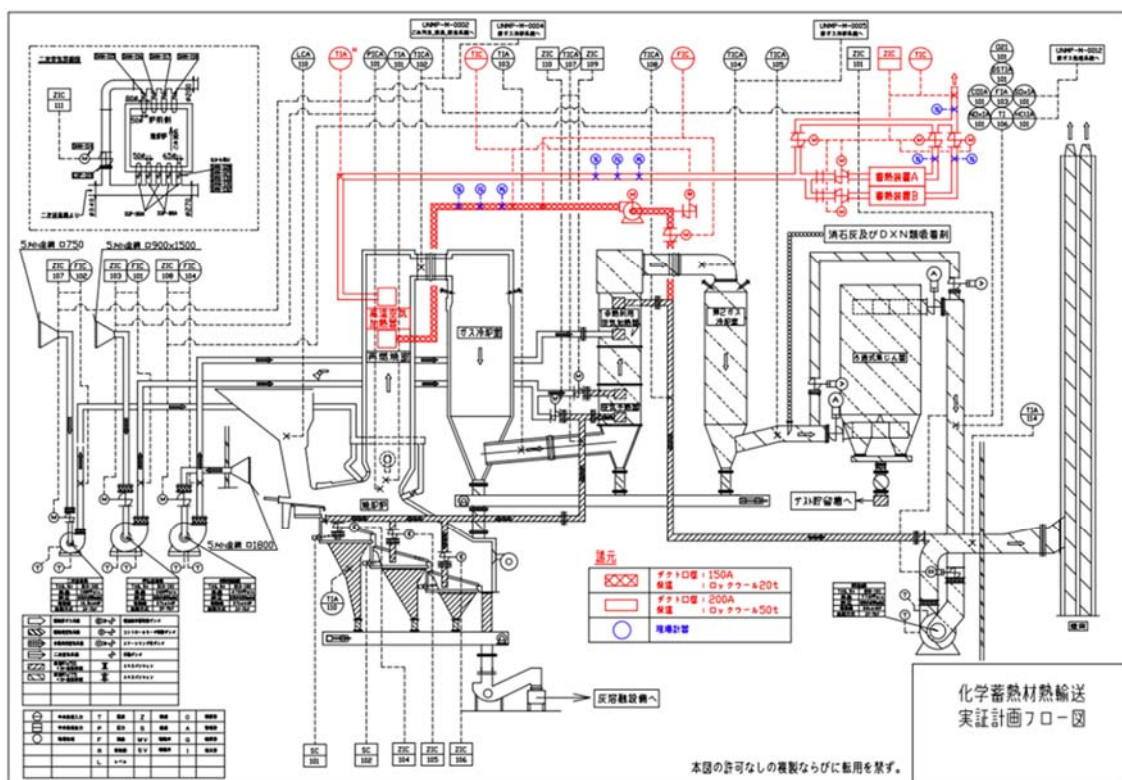


図 3-3-3 本実証事業の全体フローシート

図 3-3-4 に本実証事業における熱回収設備の立面配置計画図を示す。熱回収設備として新たに追加されるものを赤色にて示した。高温空気加熱器は、再燃焼室の出口側の側面に設置している。

本事業においては、時間当たりの熱交換量の関係で、再燃焼室における排ガス温度と滞留時間には影響がないが、実機の規模となれば、現在の設置位置より後段側へと拡張されることになる。

既存の余熱利用空気加熱器から高温用空気加熱器、高温空気加熱器から蓄熱装置の間のダクトは、保温施工を行い、熱損失の低減と火傷防止対策を施すものとする。

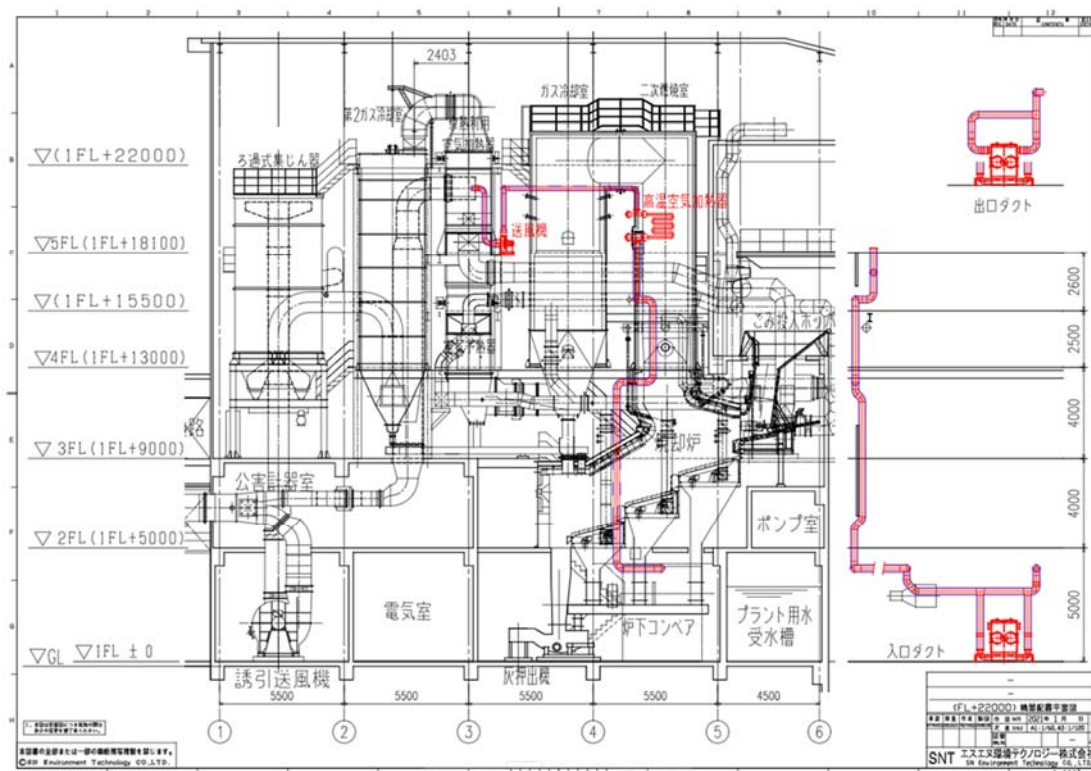


図 3-3-4 熱回収設備の立面配置計画図

図 3-3-5 に本実証事業における蓄熱装置のある 1 階平面配置計画図を示す。熱回収設備として新たに追加されるものを赤色にて示した。蓄熱装置は、既存の作業動線に配慮し、図内の④ー⑤間の既存のメンテナンス用搬入通路の脇に設置することとした。蓄熱装置の出口側の空気放出は、作業者、既存のシャッターを考慮したものとしている。なお、蓄熱装置はフォークリフトにて、図の上方向へ移動し、搬送車両に積載する。

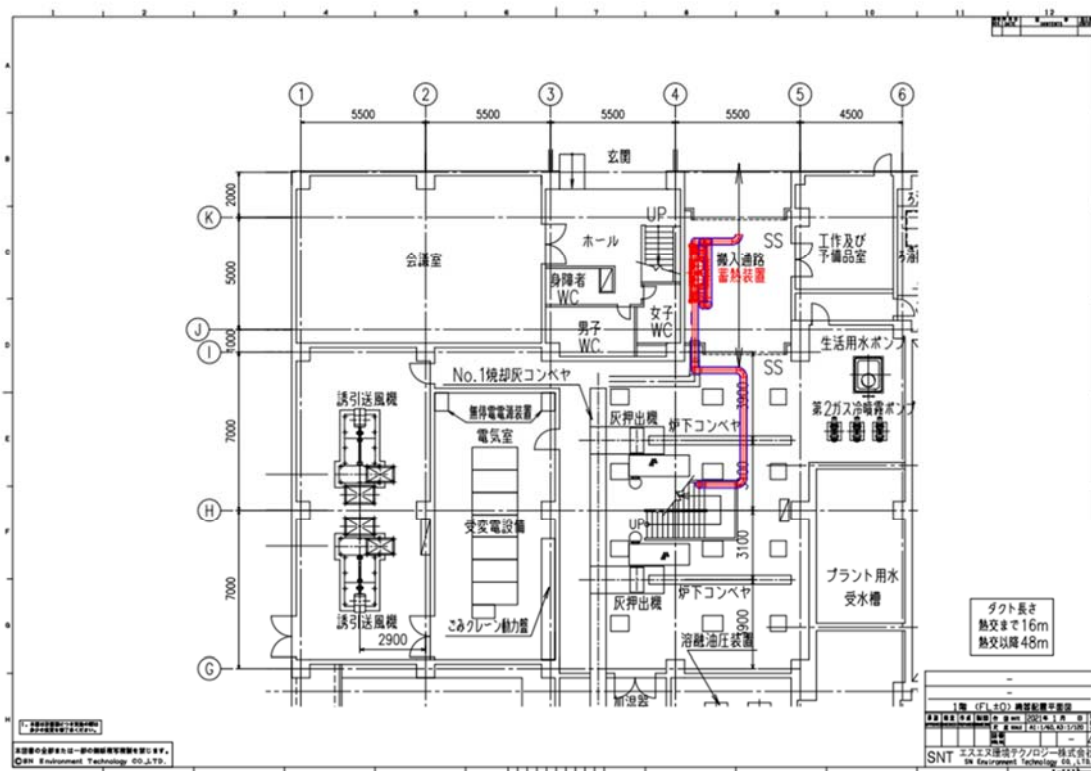


図 3-3-5 蓄熱装置のある 1 階平面配置計画図

図 3-3-6 に本実証事業における高温空気加熱器の計画図、及び表 3-3-2 に高温空気加熱器の設計諸元を示す。高温空気加熱器の設計において、使用条件が、排ガス温度が高くかつ酸性ガス及び付着ダストによる腐食環境下であることを考慮する必要がある。また、実機への規模拡張性の観点から耐火被覆チューブ型を選択した。

排ガスに接するチューブは 2 系統になっており、入口及び出口のヘッダにつながっている。既存の余熱利用空気加熱器からの空気が入り側のヘッダに入り、2 系統に分かれ、それぞれ排ガスから熱を回収した後、出口側のヘッダで集合し、蓄熱装置に送られる構造となっている。

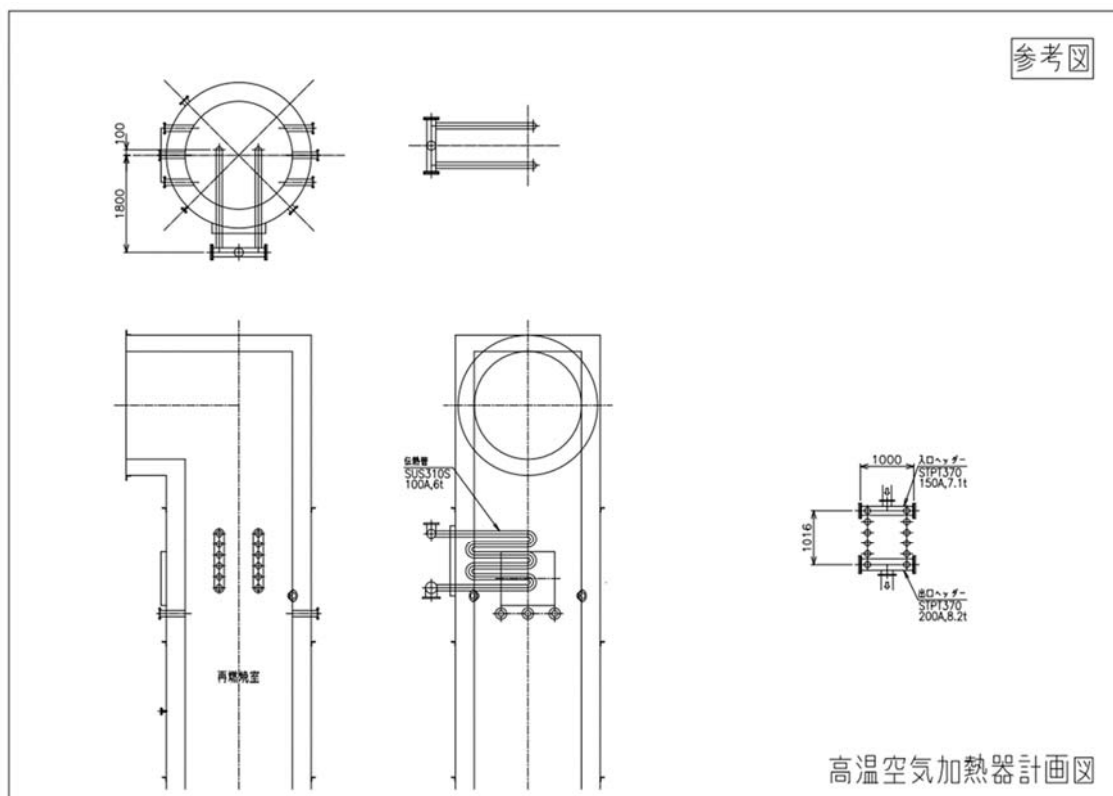


図 3-3-6 高温空気加熱器の計画図

表 3-3-2 高温空気加熱器の設計諸元

諸元	仕様
型式	耐火被覆チューブ型
	管外ガス/管内空気
設計温度	排ガス 850~950 °C 空気 350~370 °C
設計流量	排ガス 12,600 m ³ n/h 空気 500 m ³ n/h
材質他	伝熱部 SUS310S 100A t=6mm

3.3.2. 蓄熱装置および放熱装置の仕様設計

図 3-3-7 に本実証事業での熱利用設備側の温水の流れの概略フローを示す。

灯油炊きボイラーで約 80℃に加温された熱媒(温水)により、湯船の湯およびシャワー水が加温されるシステムである。

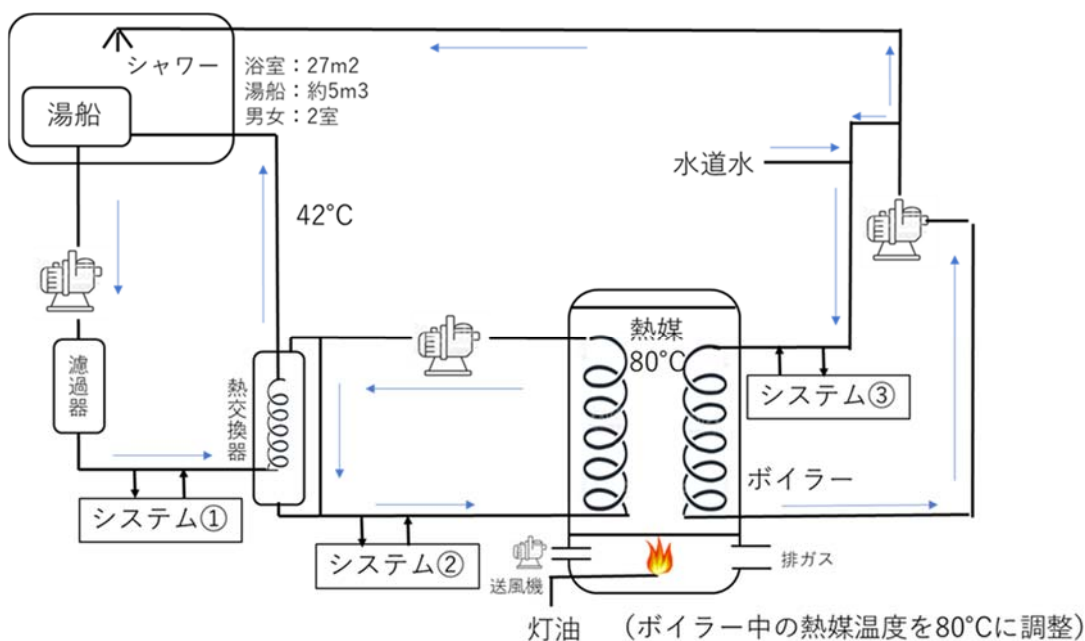


図 3-3-7 温浴施設での熱供給ポイント

現地で戴いた情報によると、灯油の一日平均使用量は約 40L であり、これは熱量換算で 1.47GJ の発熱量となる。ボイラーの効率を 90% とすると有効発熱量は 1.32GJ となる。

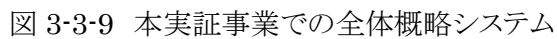
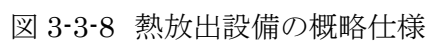
20℃、10m³ の湯水を 42℃ にまで上昇させるために必要な熱量は $5,000\text{L} \times (42-20)^\circ\text{C} \times 4.19\text{kJ}/^\circ\text{C} \cdot \text{L} = 0.46\text{GJ}$ となり、浴室 2 室分では 0.92GJ が必要となる。

熱量は全体で 1.32GJ 使用しているため、0.92GJ との差の 0.4GJ が浴室のシャワー等に使用するための給湯必要総熱量と想定される。

温浴施設の各設備での使用熱量は大まかに把握でき、本実証実験にて熱回収された 1GJ の熱量は湯船の温水を加温するためのシステム①にて使用することとし、使用方法の詳細等については、今後の検討とする。

熱利用側での熱放出設備システムの概略仕様を図 3-3-8 に示し、熱回収側の設備と合わせた実証事業全体の概略を図 3-3-9 に示す。

入水温度：30℃
 出水温度：40℃
 入水流量：5m³/h
 出力熱量：58.1kw



3.4. 市場調査

本事業を実施する背景としての国内の熱エネルギーの利用状況は、「3.1. 国内の熱事情調査」にて、概要を述べたとおりである。ここでは、本システムを産業界に導入するための、より具体的な議論を行う。即ち、本システム導入の実現可能性に係る熱エネルギーの市場調査結果を、次の5項目に分けて、述べる：(1) 産業界における熱回収のポテンシャル、(2) 産業界における熱利用のポテンシャル、(3) ごみ焼却施設における余熱利用状況(熱回収のポテンシャル)、(4) 本システム導入の実現可能性に係る自治体・建設会社へのヒアリング調査、(5) 大規模焼却施設への適合性の検討。

3.4.1. 産業界における熱回収のポテンシャル

日本における最終エネルギー消費の構成比は、図 3-4-1 に示すとおりである。各部門のうち、産業部門の熱利用は全体の4割程度であり、全部門の中で、排熱回収のポテンシャルが最も高い。従って、本事業では、産業部門における排熱回収のポテンシャルに着目し、考察する。

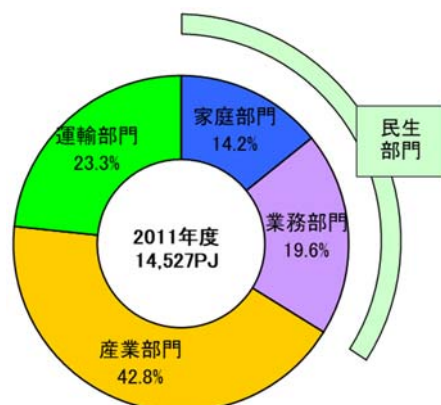


図 3-4-1 最終エネルギー消費の構成比(2011 年度)

出典:資源エネルギー庁 HP

産業部門におけるエネルギー消費の大半は、製造業によるものである(図 3-4-2)。従って、本事業では、製造業における排熱回収のポテンシャルに着目し、考察する。

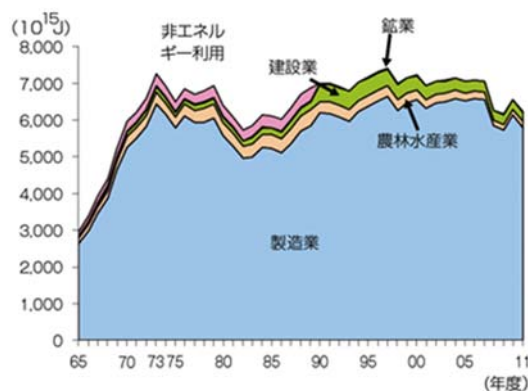


図 3-4-2 産業部門のエネルギー消費の推移 (出典:資源エネルギー庁 HP)

製造業の排熱エネルギーは、廃温水と排ガスに、ほぼ集約される。全体としては、消費エネルギーの 71%、排熱エネルギーの 68%は、電力産業によるもので[1-2]、投入エネルギーに対して 7%程度の熱エネルギーが排出され、その排出温度は、概ね 150℃以下である(図 3-1-6)。これは、グローバルなトレンド(図 3-4-3)とも概ね整合的であるが、日本の方が投入エネルギーに対する熱エネルギーの排出が、やや小さい。

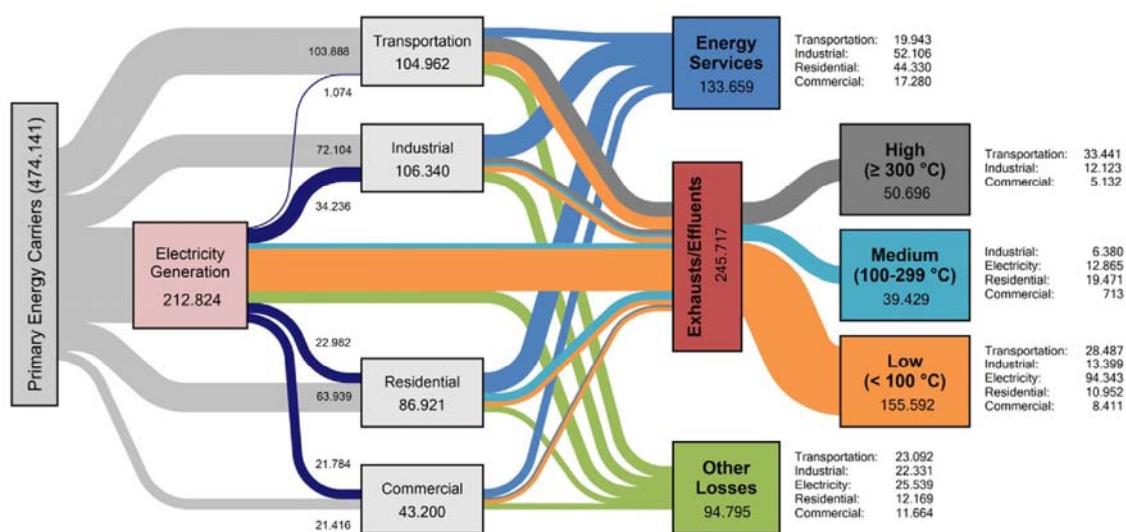


図 3-4-3 世界の未利用排熱エネルギーの定量的概念図(2012 年、単位は PJ)

出典: Forman *et al.* (2016) [3]

ここでは、未利用熱回収のポテンシャルが高い、電力以外の二次産業における熱回収を、排ガスに着目して、考察する。従って、以下に述べる議論は全て、電力産業を除外した製造業のものである。

第二次産業における未利用熱エネルギーの排出源の大半は、図 3-4-4 に示すとおり、鉄鋼業、化学工業、食品工業、紙・パルプ製造業の 4 業種である。先に示したとおり(図 3-1-6 右)、業種により、投入エネルギーに対して 5~15%の熱エネルギーが排出されている。図 3-4-5 に、各業種における温度帯別の排出熱量を示した。これによると、排出熱量が最も多いのは、100-250℃の温度帯で、主に機械工業、食品工業、窯業・土石製品業、ガス・熱供給業、清掃業、非鉄金属工業の 6 分野に、未利用の排熱回収ポテンシャルが存在する。特に、本事業における熱回収の対象である清掃業の排熱は 150~250℃の温度帯にある。清掃業における熱回収ポテンシャルについては、「3.4.3. ごみ焼却施設における余熱利用状況」で述べる。その他、非鉄金属工業による 500℃以上の温度帯における排熱回収ポテンシャルも無視できない。

これら各種事業所からの排ガス熱量は、全体として投入熱量の 8%相当であり、その確実な回収・利用により、家庭で消費するエネルギーの約 50%が賄える計算となる。

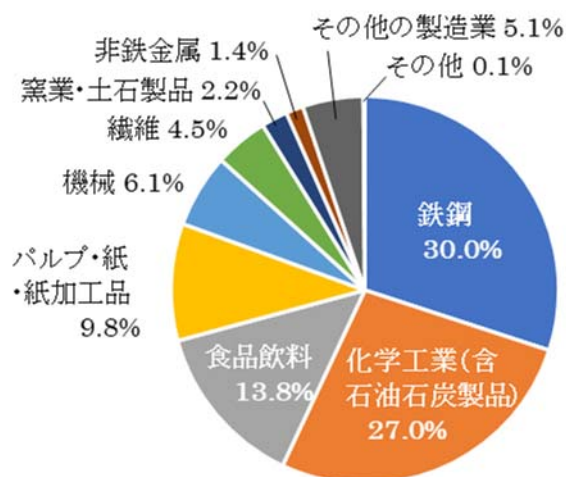


図 3-4-4 日本の最終エネルギー消費における排熱の産業別構成 (家庭、第三次産業、輸送を除外した。「その他」とは、農林水産鉱建設業をいう。)

データの出典:資源エネルギー庁「2020 年度総合エネルギー統計 簡易表」[2]

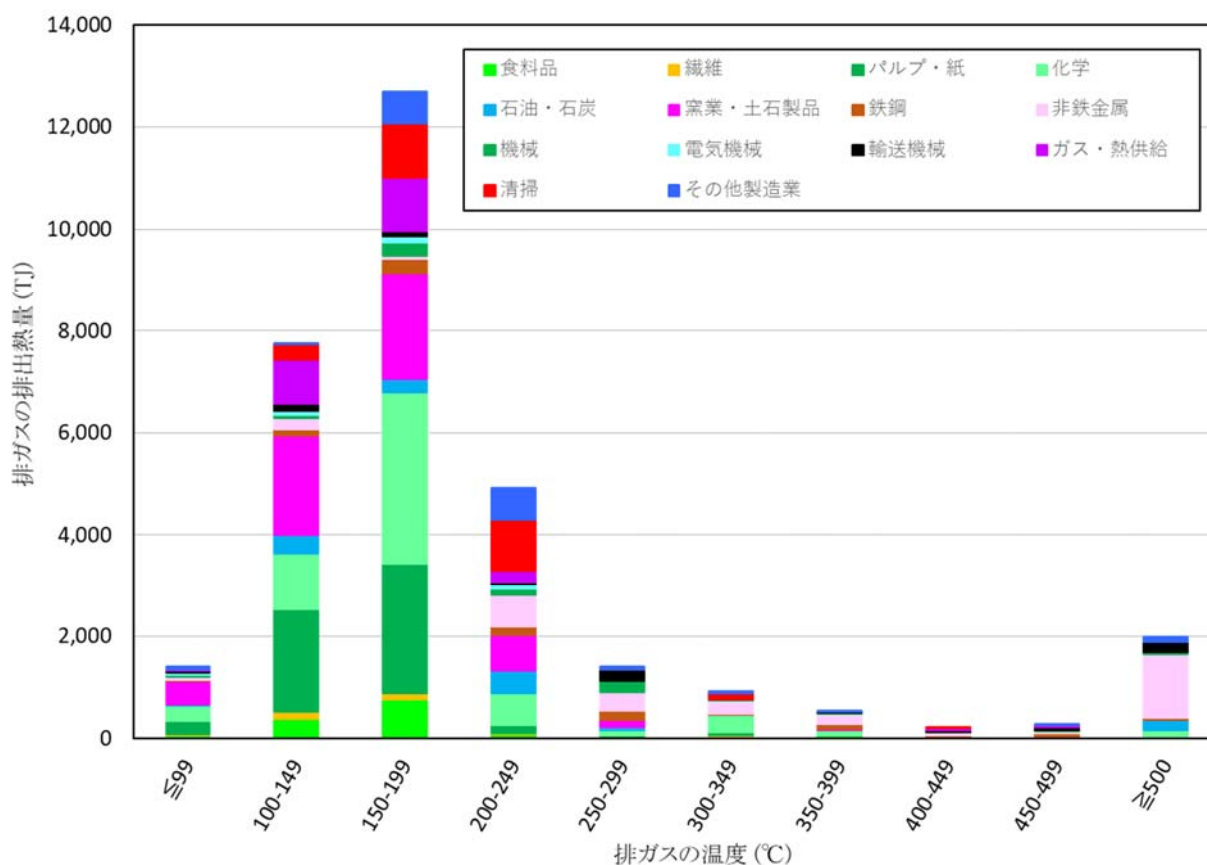


図 3-4-5 各製造業種における温度帯別の排ガス熱量(電力事業を除く)

データの出典:未利用熱エネルギー革新的活用技術研究組合(2019) [4]

各業種における化学蓄熱材を利用した排熱回収ポテンシャルの具体的事例は、事業所のヒアリング調査を必要とするため、必要に応じて次年度以降の課題とし、本年度は全体の概要を述べるに留めた。

引用文献

- [1] 資源エネルギー庁, 総合エネルギー統計 1953-2019 年度.
https://www.enecho.meti.go.jp/statistics/total_energy/results.html#headline2
(最終アクセス日 2022/01/25)
- [2] 資源エネルギー庁, 2021, 2020 年度総合エネルギー統計 簡易表.
https://www.enecho.meti.go.jp/statistics/total_energy/results.html#headline2
(最終アクセス日 2022/01/25)
- [3] Forman, C. *et al.*, 2016, Estimating the global waste heat potential. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 57, 1568–1579.
- [4] 未利用熱エネルギー革新的活用技術研究組合 技術開発センター, 2019, 産業分野の排熱実態調査報告書.

3.4.2. 産業界における熱利用のポテンシャル

産業界における熱需要の大半は、製造業にある。製造業における業種別、温度帯別の熱需要の分布を図 3-4-6 に示し、そのうち 0-200℃の温度帯における熱需要を、図 3-4-7 に示した。

これによると、熱需要は主に、低温度帯($\leq 300^{\circ}\text{C}$)と高温度帯($\geq 1,200^{\circ}\text{C}$)に分布し、中温度帯($300-1,200^{\circ}\text{C}$)の需要は少ない(図 3-4-6)。低温度帯においては、食品飲料、プラスチック・ゴム、パルプ・紙、機械、繊維製品の製造業に需要が多く、高温度帯においては、鉄鋼・金属及び窯業・土石製品の製造業に需要が多い傾向が認められる。特に、 $100-200^{\circ}\text{C}$ の需要は、食品、プラスチック・ゴム、紙・パルプおよび繊維の 4 業種で特に大きい(図 3-4-7、図 3-4-8)。

従って、本事業では、 200°C 程度までの熱供給が可能であることから、上記の 4 業種における熱需要の詳細について調査した結果を以下に示す。

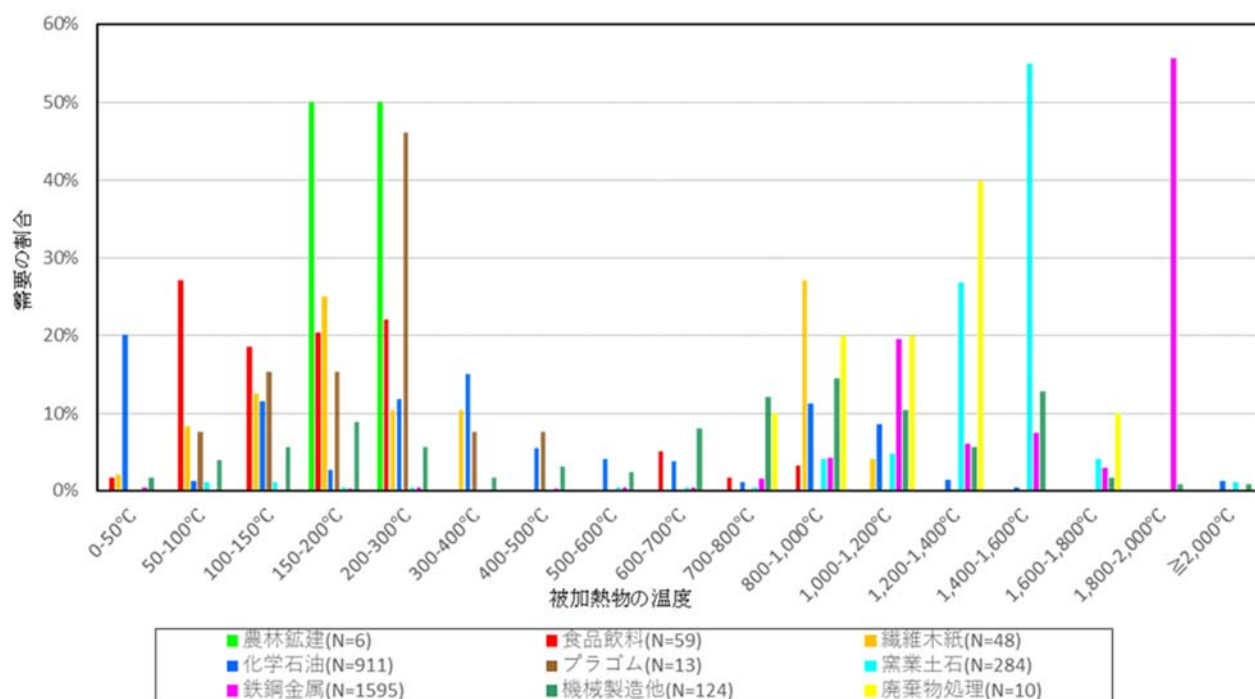


図 3-4-6 業種別・被加熱物の温度帯別の直接加熱(直接加熱、電気加熱)需要の分布

データの出典: 三菱総合研究所「平成29年度新エネルギー等の導入促進のための基礎調査」[1]

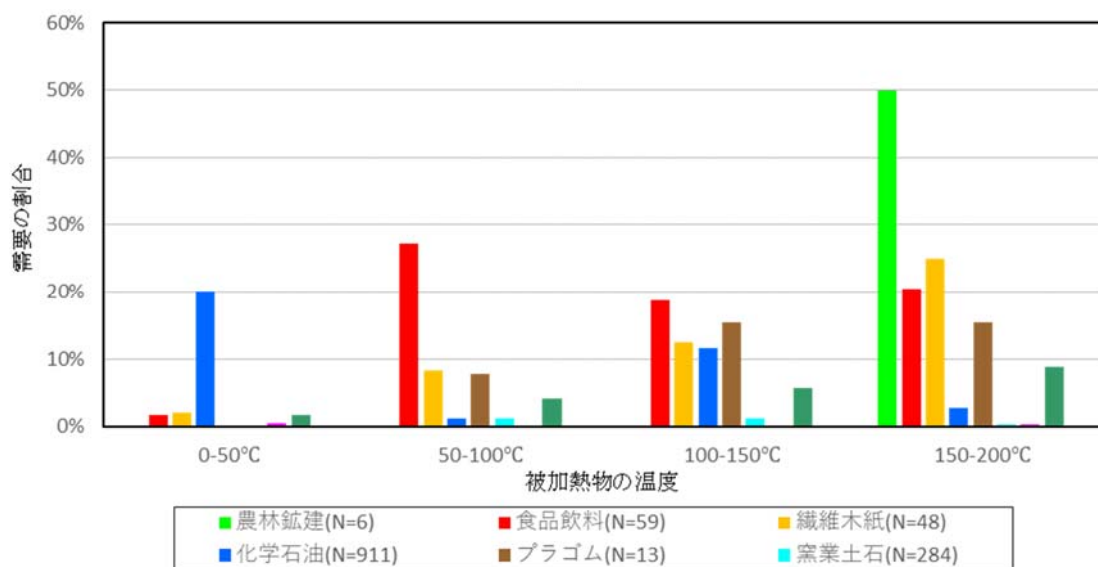


図 3-4-7 業種別・被加熱物の温度帯別の直接加熱(直接加熱、電気加熱)需要の分布 (≦200°C)

データの出典: 三菱総合研究所「平成29年度新エネルギー等の導入促進のための基礎調査」[1]

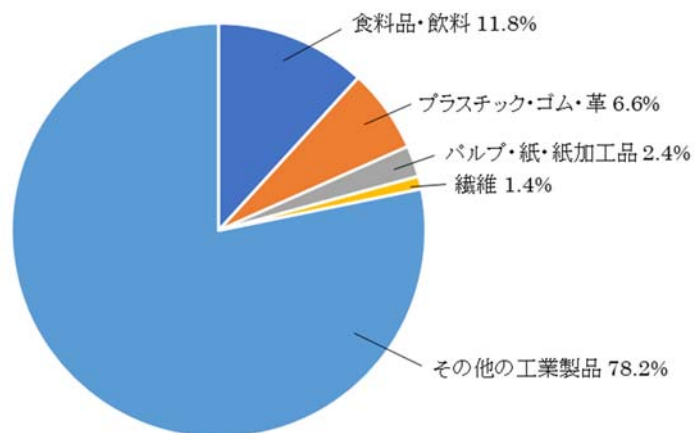


図 3-4-8 被加熱物の主な温度 100・200°Cの工業製品が工業製品全体の出荷額に占める割合

データの出典: 経済産業省 工業統計調査 2020 年品目別統計表 [2]

3.4.2.1. 食品工業

食品加工においては、焼く、炒める、揚げる、煮る、蒸す等で、食材を 50-300℃に加熱し、調理することが多い。その調理温度を主に制約するのは、図 3-4-9 に示すとおり、糖のカラメル化反応(図 3-4-10)、糖とタンパク質のメイラード反応(図 3-4-11)、タンパク質変性(図 3-4-12 ~3-4-13)である。

また、揚げ物の場合は、使用する油脂により、加熱温度が異なる(図 3-4-14)。その他、加熱殺菌などの各種要因により、加熱温度や加熱時間が大きく異なる。従って、加工食品の製造における熱需要は、品目ごとに考察する必要がある。

本節では、100-200℃の加熱を要する加工食品の製造工場について、次の 3 項目に分けて、考察した:(1) 加工食品の主要な生産品目の抽出、(2) そのうち、100-200℃の加熱を要する製品(細目)の抽出、(3) これらの細目の製造工場の規模と分布。

第 1 項目では、加工食品の主要 10 品目を抽出した。第 2 項目では、これら 10 品目の製造工程を調査し、100-200℃の加熱を必要とする製品を抽出した。第 3 項目では、100-200℃の加熱を必要とする食品について、それらの製造工場の規模や分布状況の概要を調査した。

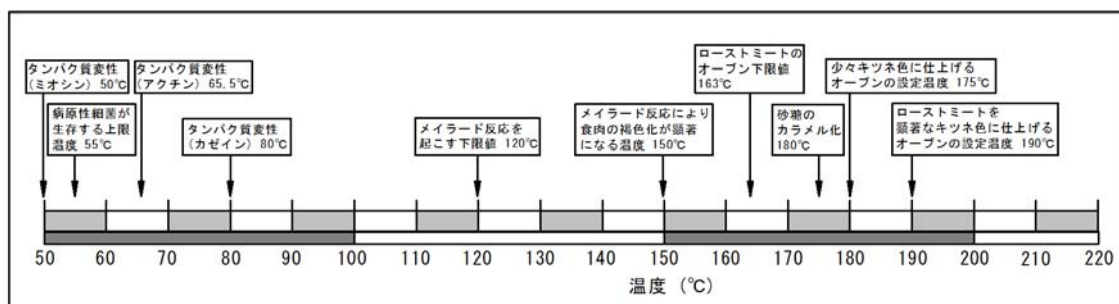


図 3-4-9 調理における加熱温度の概念図



図 3-4-10 砂糖の加温によるカラメル化。カラメル化反応とは、砂糖を高温に加熱すると、褐色物質のカラメルができることである。

出典：製糖工業会 HP



図 3-4-11 コーヒー豆の焙煎によるメイラード反応。メイラード反応とは、肉や魚、小麦粉などに含まれるアミノ酸が糖と結合して、褐色の香ばしい物質を生成する反応のことである。

出典：”Обжарка кофе. Что происходит во время обжарки кофе?” HP

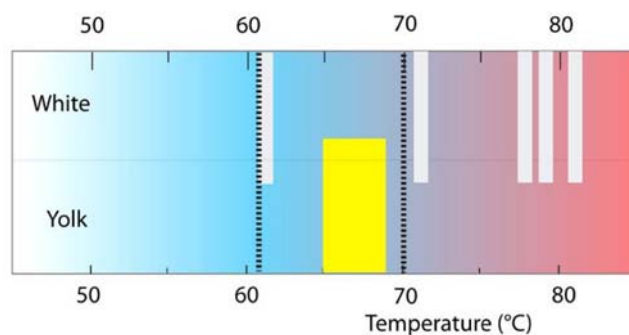


図 3-4-12 鶏卵におけるタンパク質変性温度と調理の最適温度の関係。横軸:温度、上半分:卵白、下半分:黄身、点線(左):卵白コナアルブミンの変性温度、点線(右):卵黄タンパク(複数種)の変性温度、灰色:卵白の最適温度(複数)、黄色:卵黄の最適温度。タンパク質の種類により変性温度が異なる結果、調理の最適温度も異なる。

出典: Vilgis (2015) [3]

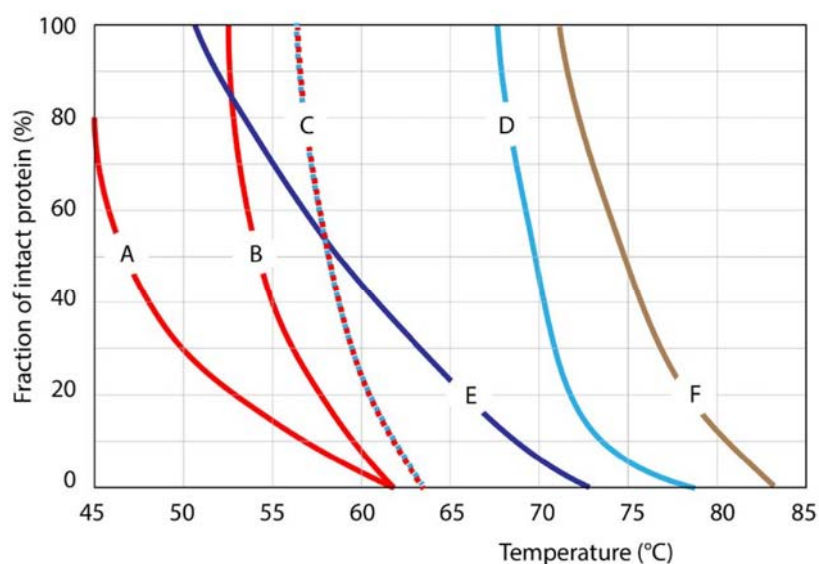


図 3-4-13 食肉を構成する代表的なタンパク質の変性温度。A: ミオシン軽鎖, B: ミオシン重鎖, C: コラーゲン, D: アクチン, E: 筋形質タンパク質, F: ヘムタンパク質、縦軸: 無傷の(変性していない)タンパク質の割合、横軸: 温度。筋肉の部位により、構成するタンパク質の種類が異なり、各タンパク質の変性温度が異なる結果、肉の部位により、調理の最適温度も異なる。

出典: Vilgis (2015) [3]

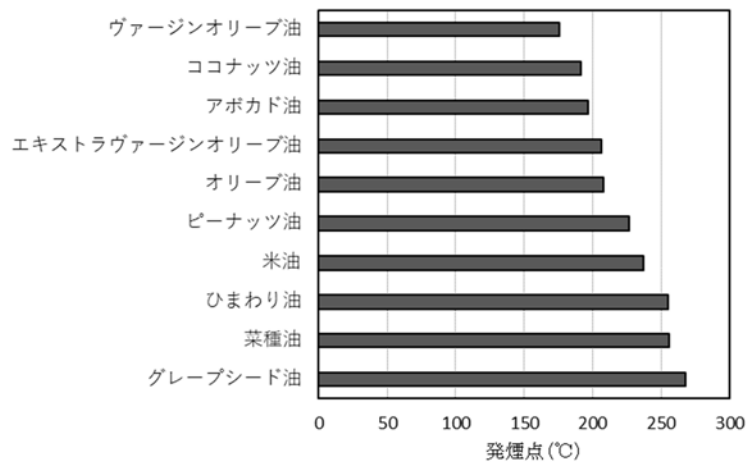


図 3-4-14 各種植物油脂の発煙点の違い。使用する油脂の種類により、調理温度が異なる。

データの出典: De Alzaa *et al.* (2018) [4]

3.4.2.1-1. 品目別生産高

食品工業における各品目の出荷額全体に占める割合を、図 3-4-15 に示す。これらのうち、上位 10 品目は、(1) 菓子類、(2) 肉製品、(3) 酒類、(4) 水産加工品、(5) 乳製品、(6) 清涼飲料・ミネラルウォーター・氷、(7) 惣菜・冷凍食品、(8) 弁当・調理パン・レトルト食品類、(9) 調味料、(10) パンである。これらの製造工程における熱需要を、次項にて考察する。

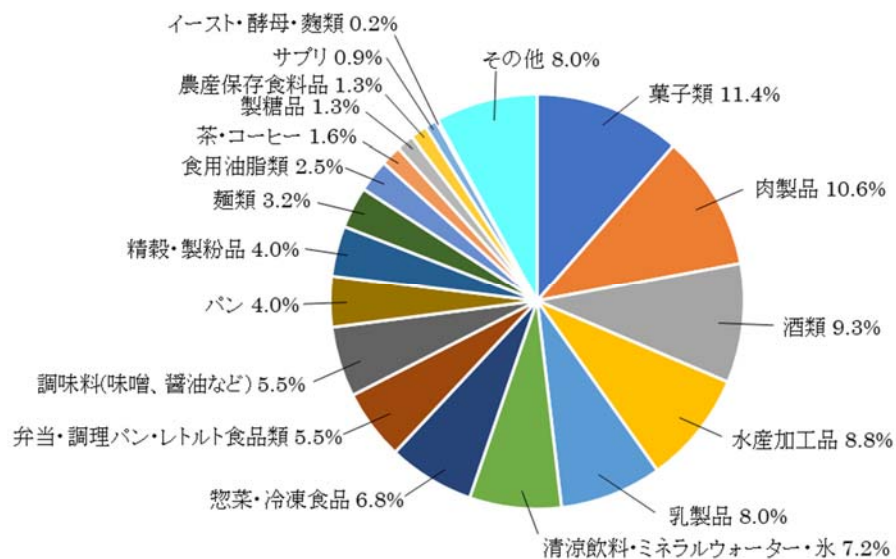


図 3-4-15 食品工業における各品目の出荷額全体に占める割合

データの出典: 経済産業省 工業統計調査 2020 年品目別統計表 [2]

3.4.2.1-2. 主要品目の生産工程・熱需要

前項で示した加工食品の主要 10 品目の熱需要を、以下に考察した。各品目の製造工程においては、100-200℃の加熱を伴うものと、そうでないものがある。その結果をまとめると、100-200℃の熱需要があるのは、次の品目である。

製造に 100-200℃の加熱を必要とする品目

- ・菓子類:スナック菓子、ビスケット、ケーキのスポンジ(洋生菓子)、ドーナッツ(洋生菓子)、飴菓子
- ・肉製品:ハム、ソーセージ
- ・水産加工品:練り製品の揚げ物、水産加工の冷凍食品の一部(調理内容による)
- ・乳製品:プロセスチーズ、練乳、ホエイパウダー
- ・惣菜・冷凍食品・弁当:ハンバーグ、カツ、から揚げ、フライドポテト、焼き魚、グラタン…等
- ・調味料:肉のエキ스調味料、新規みりん類
- ・パン:全てのパン

(1)菓子類

菓子類の生産高(重量)における各品目が占める割合を、図 3-4-16 に示した。そのうち、主要 8 品目について、100-200℃の加熱調理を伴う品目は、スナック菓子、ビスケット、米菓、洋生菓子(ケーキのスポンジ、ドーナッツ等)、飴菓子である。

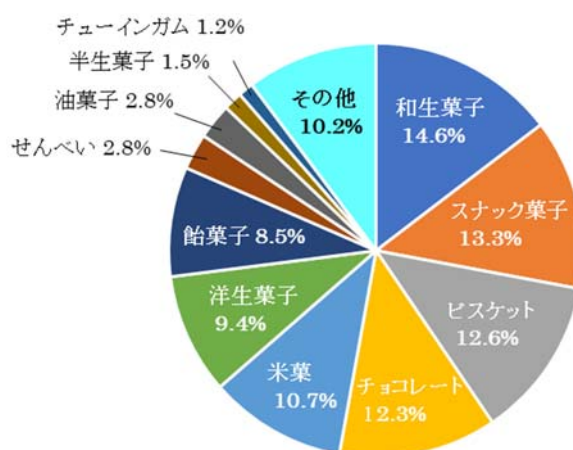


図 3-4-16 菓子生産高(重量)における各品目の占める割合

データの出典: 日本菓子協会「令和 2 年 菓子データ」[5]より平成 30 年データ

(2) 肉製品

食肉製品については、主な生産品目のうち、加熱を伴う品目は、ハムやソーセージである。これらは、食品衛生法の規格基準では、「63℃で 30 分間又は同等以上の加熱殺菌」が定められている。例えば、ハムは、燻製室で乾燥、桜のチップでスモークの後、蒸気で加熱する。このときの温度は、加熱装置の雰囲気温度と製品の中心温度(70℃を 2 分以上)で管理されている。正確な雰囲気温度は把握していないが、蒸気の温度は 100-200℃であると推測する(e.g., <https://www.pal.or.jp/palmeat/processing/>)。

(3) 酒類

酒類の主な生産品目は、清酒、ビール、発泡酒、リキュール、ウイスキーである。加熱は主に、麴原料を蒸す工程や、仕込みの後の蒸留工程で行われるが、いずれも管理温度が 100℃程度以下である。

(4) 水産加工品

水産加工品の生産高(重量)における各品目が占める割合を、図 3-4-17 に示した。そのうち、練り製品の中の、揚げ物は、160-180℃で加熱するが、竹輪や焼き蒲鉾は、200-350℃の気体中で焼き上げるのが一般的である。また、冷凍食品の一部は加熱品で、その品目により、加熱温度は異なる。塩蔵品は非加熱製品である。塩干品は、一般的に非加熱品で、20-25℃の冷風乾燥を行う。鰹節は、最大 98℃の湯で煮沸して、製造する。煮干品は、原料を約 95℃の海水で煮沸して、製造する。従って、本事業の対象となり得るのは、練り製品の揚げ物及び一部の冷凍食品であると考えられる。

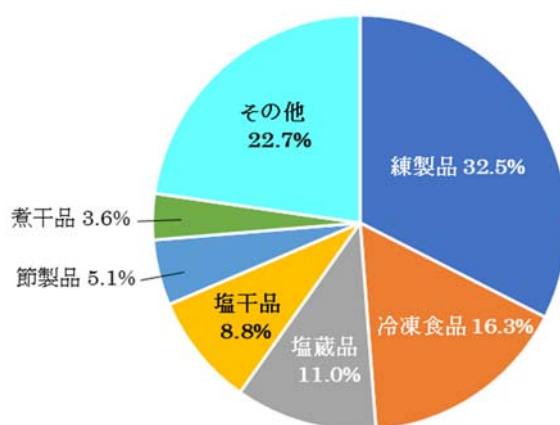


図 3-4-17 水産加工品生産高(重量)における各品目の占める割合

データの出典: 農林水産省大臣官房統計部「水産物流通調査
令和2年水産加工統計調査結果 [2]

(5) 乳製品

乳製品とは、生乳、チーズ、バター、ヨーグルト、アイスクリーム、練乳、粉乳、ホエイパウダー、乳酸菌飲料をいう。このうち、100-200℃の温度帯で加熱処理する品目は、次の3品目である。

(i) チーズのうち、乳化剤を使用するもの(プロセスチーズ)の製造では、75-120℃で溶融塩(リン酸ナトリウムなど)を添加する工程がある。(ii) 練乳は最後の工程で、115-118℃で15-30分間、加熱滅菌し、冷却する。(iii) ホエイパウダーの製造には、121-145℃で2秒～5分間、加熱保持する工程が含まれる。

(6) 清涼飲料・ミネラルウォーター・氷

清涼飲料、ミネラルウォーター、氷の製造において、100-200℃に加熱する工程は、含まれない。

(7) 惣菜・冷凍食品

(8) 弁当・調理パン・レトルト食品類

惣菜・冷凍食品及び弁当・調理パン・レトルト食品類については、その品目の調理内容に、揚げる又は焼く工程が含まれる場合(図 00)に、100-200℃の熱需要があると考えられる。具体的には、炒め物、揚げ物、焼き物で、ハンバーグ、カツ、から揚げ、フライドポテト、焼き魚、グラタン等である。

(9) 調味料

調味料のうち、肉のエキス調味料の製造には、原料を120℃で12時間程度、加熱抽出する工程が含まれている。新規みりん類には、120℃で1分～2時間加熱する工程が含まれる。

(10) パン

パンは全て、180-220℃、10-40分で焼き上げる。

3.4.2.1-3. 事業所数・規模

前述した各品目の製造工場の分布の詳細は、現時点で不明である。製造工場の規模については、品目に関わらず、従業員数100名以上の事業所が多い。ただし、製造企業の規模(資本金)は、品目により、ある程度バラツキがある。組合や個人事業による製造は、非常に少ないため、ここでは考察の対象外とした。食品加工業については、100-200℃の熱需要がある製品は、非常に多岐にわたるため、その全てを把握するのは困難である。従って、まずは、熱

需要先の候補を探す際には、各製品の工場数(表 3-4-1)、各都道府県における 1 人当たりの加工食品出荷額(図 3-4-18)、各品目の市場規模(添付資料 1)、生産工場の企業規模(添付資料 1)から、熱供給元の地域特性をある程度把握することが考えられる。これを基に、対象とする業種や製造品目をある程度絞り込んだ上で、候補者を探すのが、効率的であると考えられる。

表 3-4-1 各製品の製造事業所数(全国、従業員 4 名以上)

製造品目	事業所数
パン	425
冷凍水産食品	212
肉加工品	139
その他の調味料	113
その他のパン・菓子	107
そう(惣)菜	71
冷凍調理食品	60
乳製品 (処理牛乳・乳飲料を除く)	41
米菓	24
水産練製品	18
ビスケット類・干菓子	16

データの出典:経済産業省 工業統計調査 2020 年品目別統計表 [7]

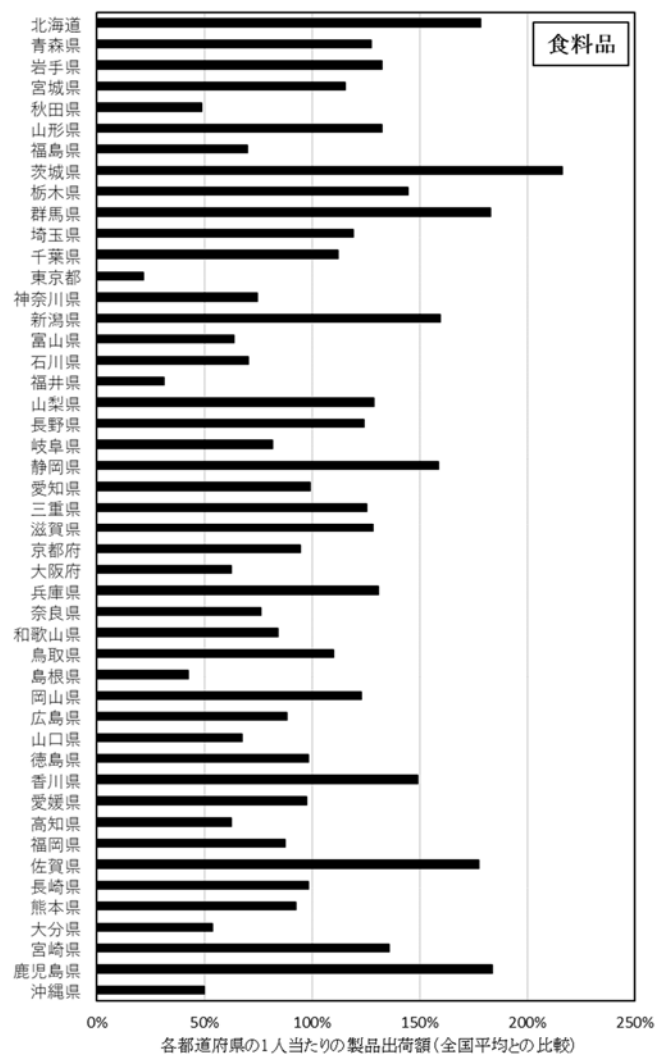


図 3-4-18 各都道府県における加工食品工業の 1 人当たりの製品出荷額

データの出典: 経済産業省 工業統計調査 2020 年品目別統計表 [2]

3.4.2.2. プラスチック・ゴム製造業

図 3-4-19 に、プラスチック・ゴム製造業より上流側のサプライチェーンの概念図を示す。まずは、石油精製工場において、原油からナフサがつくられる。そのナフサは、パイプラインを介してナフサ分解工場に輸送され、800-900℃の分解炉で、エチレン、プロピレン、ブタジエン等々の各種物質に熱分解される。それらの物質は、分留装置により、各物質に分けて抽出される。その各物質は、パイプラインを介して、石油化学誘導品工場に輸送される。ここでは、100-600℃程度の高温度で、様々な重合反応により、中間製品としての各種樹脂ペレットが製造される。これらのペレットは、袋詰めされ、トラックなどにより、各種関連工場(プラスチック、合成繊維等)に輸送される。輸送された中間製品は、プラスチック・ゴム製造工場にて、50-300℃程度に加熱され、各種プラスチックや合成ゴムの製品に成形加工される。なお、100-200℃の熱需要があると推測されるのは、下流の関連産業工場であり、上流側の石油化学誘導品工場における触媒重合反応は、発熱反応であるため、熱需要はないと推測される。

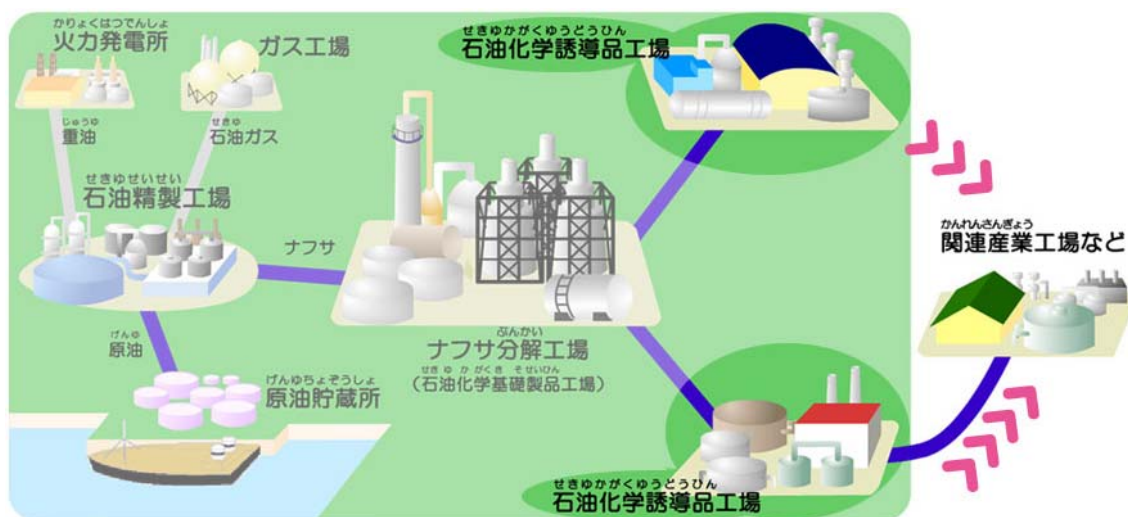


図 3-4-19 プラスチック・ゴム製造業の上流側のサプライチェーンの概念図

出典:石油化学工業協会 HP

3.4.2.2-1. 品目別生産高

図 3-4-20 に、プラスチック・合成ゴムの中間製品及び最終製品の相対規模(出荷額)を示す。中間製品(石油化学工業)は全体の 4 分の 1、最終製品(プラスチック・ゴム製造業)は全体の 4 分の 3 を占める。各種最終製品のうち、「成形機不使用の加工品」は、成形機をもたないで、成形品を受け入れて加工品を製造したもので、これには熱需要はない。それ以外の品目は、全て熱需要があり、必要な加熱温度を、次項目にて考察する。

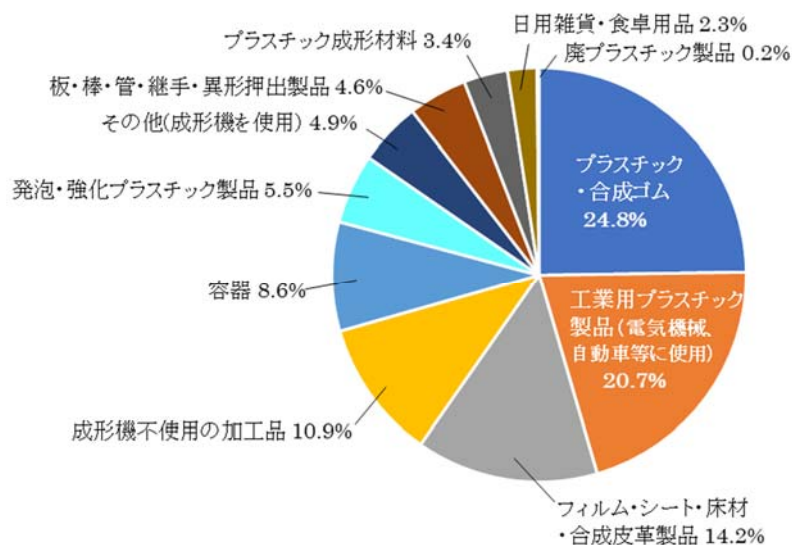


図 3-4-20 プラスチック・ゴム製造業における各品目の出荷額全体に占める割合。「プラスチック・合成ゴム 24.8%」は、プラスチック・ゴム製造工業の上流の、石油化学工業における中間製品である。

データの出典: 経済産業省 工業統計調査 2020 年品目別統計表 [2]

3.4.2.2-2. 主要品目の生産工程・熱需要

プラスチックの製造・加工では、原料樹脂を熔融し、成形する工程で熱需要があるが、加熱温度は素材の種類により、大きく異なる。その熱需要は、図 3-4-6 に示すとおり、主に 200-300℃の温度帯にあるが、全体の 3 分の 1 程度は、100-200℃(特に 150-200℃)側にある。一般に、同じ事業所内でも複数の素材を加工するため、温度帯の境界を 200℃で区切って考察するのは、恐らく現実的ではない。参考として、表 3-4-2 に主なプラスチック素材の熔融温度を示す。

表 3-4-2 主なプラスチック素材の金型温度及び熔融温度

素材名		温度範囲 (°C)	
名称	記号	金型	熔融
高密度ポリエチレン (T50-4400)	HDPE	20-95	180-280
ポリプロピレン (A-333)	PP	20-80	200-280
ABS樹脂 (6003)	ABS	25-80	200-280
アセタール樹脂、ポリアセタール (Tenac3010)	POM	40-90	190-210
アクリル樹脂、メタクリル樹脂 (KT-80)	PMMA	40-90	220-280
ポリカーボネート (PC X-1)	PC	70-120	260-293
ポリ塩化ビニル、塩化ビニル樹脂 (HTX6220)	PVC	21-37	180-210
ポリ塩化ビニル、塩化ビニル樹脂 (FPVCFN01)	PVC	20-70	160-220

データの出典: Fu and Ma (2015), DOI: 10.1080/16864360.2015.1059203 [6]

ゴム工業においては、射出成形の工程で、天然ゴム素材は 160℃、合成ゴム素材は 170-180℃の金型温度に加熱する必要がある。

3.4.2.2-3. 事業所数・規模

前述した各品目の製造工場の分布の詳細は、現時点で不明である。製造工場の規模については、品目に関わらず、従業員数 100 名以上の事業所が多い。ただし、製造企業の規模(資本金)は、品目により、ある程度バラツキがある。組合や個人事業による製造は、非常に少ないため、ここでは考察の対象外とした。プラスチック・ゴム製造業については、前述したとおり、同じ事業所においても、取り扱う素材が多岐にわたり、各素材に求められる加熱温度が 150-300℃の範囲内で、バラつくため、企業へのヒアリングなしで、必要とする熱量・温度帯を把握するのは困難である。まずは、熱需要先の候補を探す際には、各製品の工場数(表 3-4-3)、各都道府県における 1 人当たりのプラスチック・ゴム製品出荷額(図 3-4-21)、各品目の市場規模(添付資料 1)、生産工場の企業規模(添付資料 1)から、熱供給元の地域特性をある程度把握することが有効であると考えられる。これを基に、対象とする業種や製造品目をある程度絞り込んだ上で、候補者を探すのが、有効であると考えられる。

表 3-4-3 プラスチック・ゴム各製品の製造事業所数(全国、従業員 4 名以上)

製造品目	事業所数
ゴム製品	844
その他の工業用プラスチック製品	325
プラスチック成形材料	306
輸送機械用プラスチック製品	305
プラスチック製日用雑貨・食卓用品等	251
プラスチック製容器	224
電気機械器具用プラスチック製品	154
発泡・強化プラスチック製品の加工品	127
軟質プラスチック発泡製品 (半硬質性を含む)	115
廃プラスチック製品	77
プラスチック異形押出製品	46
強化プラスチック製容器・浴槽等	44
プラスチック板・棒	42
硬質プラスチック発泡製品	38
プラスチック管	26
プラスチック継手	23
強化プラスチック製板・棒・管・継手	19

データの出典: 経済産業省 工業統計調査 2020 年品目別統計表 [2]

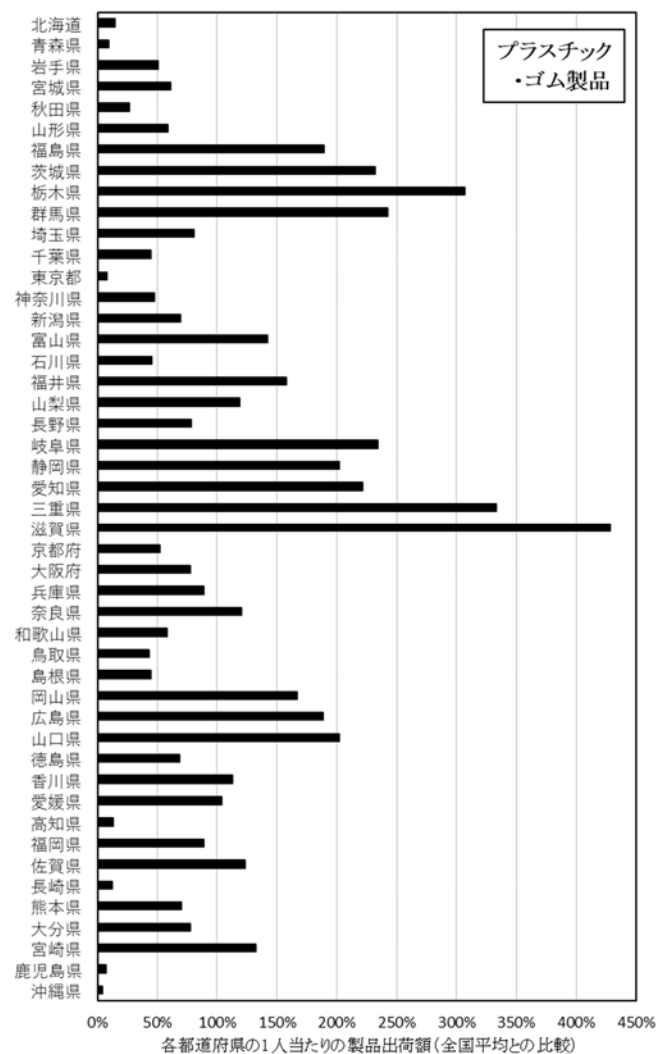


図 3-4-21 各都道府県におけるプラスチック・ゴム製造業の1人当たりの製品出荷額

データの出典: 経済産業省 工業統計調査 2020 年品目別統計表 [2]

3.4.2.3. 紙・パルプ工業

紙は主に、原料の木材から、中間製品のパルプを経て、紙が製造され、これを素材として、ノート、ダンボール、壁紙、紙おむつなどの最終製品に加工される。本節では、100-200℃の加熱を要する加工食品の製造工場について、次の3項に分けて、考察した：(1) 生産品目の分類と各品目の紙・パルプ工業出荷額全体に占める割合、(2) 100-200℃の加熱を要する製品(細目)の抽出、(3) これらの細目の製造工場の規模と分布。

3.4.2.3-1. 品目別生産高

紙・パルプ工業における各品目の出荷額全体に占める割合を、図 3-4-22 に示す。これらのうち、約8割は、紙製品、洋紙・機械すき和紙、板紙(ダンボール素材など)、紙衛生素材・製品(紙おむつなど)であり、原料となるパルプは、全体の1.3%である。これらの製造工程における熱需要は、次項目にて考察する。

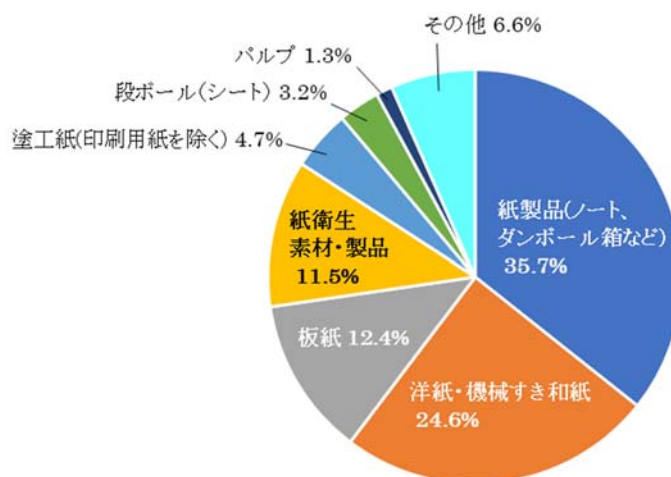


図 3-4-22 紙・パルプ工業における各品目の出荷額全体に占める割合

データの出典：経済産業省 工業統計調査 2020 年品目別統計表 [2]

3.4.2.3-2. 主要品目の生産工程・熱需要

パルプは、木材チップ等から分離した植物繊維(セルロース繊維)で、製紙用の主原料である。パルプは、機械パルプ、化学パルプ、古紙パルプに分類される(図 3-4-23)。機械パルプは、木材チップを機械ですり潰したパルプで、純粋なセルロース繊維ではなく、リグニンが残留している(歩留まり率 95%程度)。そのリグニンが、光で変色するため、低質紙の原料として利用される。化学パルプは、木材チップを、高温高压下(150-160℃程度)の蒸解窯(高さ 60m 程度)で、薬品(苛性ソーダ、硫化ソーダ)を加えて 5 時間程度処理することで、リグニンを除去した、純度の高いセルロース繊維である。歩留まり率は 40-50%程度である。古紙パルプは、古紙を原料として、異物やインクを除去したパルプで、歩留まり率 70%程度である。なお、パルプ用材の自給率は 16%程度であり、パルプの自給率は 93%程度である。

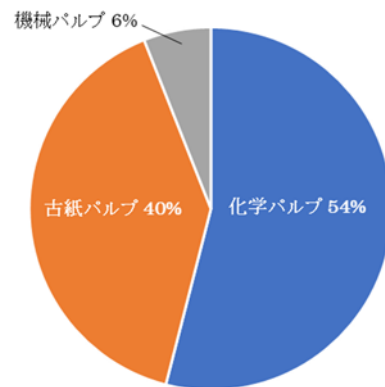


図 3-4-23 各種パルプの凡その消費割合 (各種資料から算出した推測値)

次の製紙工程においては、110-150℃の蒸気で、紙を乾燥させる工程がある。ここで生産された紙は、ノートやダンボール等の最終の紙製品に加工される。それらのうち、100-200℃の熱需要があると考えられるのは、塗工紙の製造工程である。これは、紙の表面に塗料を塗った後、50-500℃に加熱した金属ロールや熱風等を使用して、紙を乾燥する工程である(図 3-4-24)。

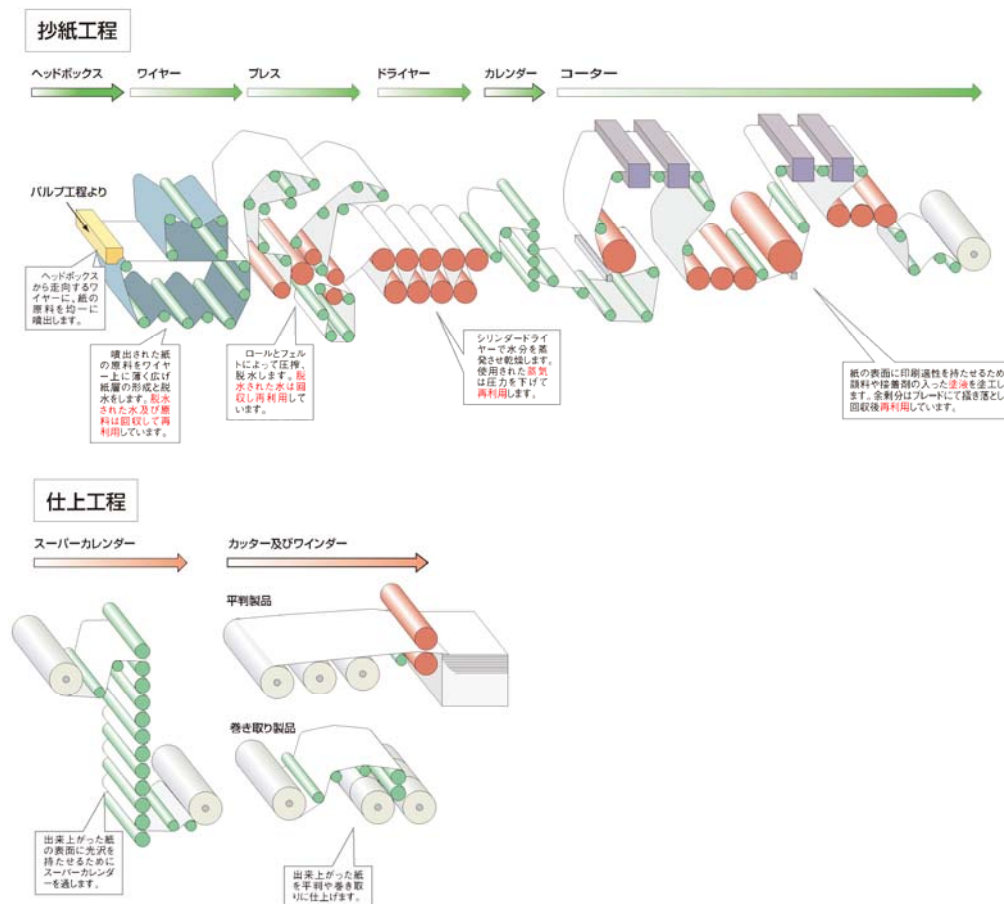


図 3-4-24 パルプ工程後の製紙工程の概念図

出典:三菱製紙株式会社 HP

以上、紙・パルプ工業において、100-200℃の熱需要があると推測されるのは、次の 3 工程である：(1) 化学パルプ製造の蒸解窯における処理工程、(2) 製紙の乾燥工程、(3) 塗工紙への加工の乾燥工程。

3.4.2.3-3. 事業所数・規模

製紙・パルプ工業において、100-200℃の熱需要がある製品は、次の 3 つである：(1) 化学パルプ(蒸解窯における処理工程)、(2) 製紙(乾燥工程)、(3) 塗工紙(塗料を塗った後の乾燥工程)。

これらの製品の製造は、大規模工場に集約されている(表 3-4-4、図 3-4-26)。また、パルプ工場は、製紙工場と同居している。従って、熱需要の候補先の把握は、比較的容易である。各製品の工場数(表 3-4-4)、各都道府県における 1 人当たりの紙・パルプ製品の出荷額(図 3-4-25)、主要製紙工場の分布図(図 3-4-26)、各品目の市場規模(添付資料 1)、生産工場の企業規模(添付資料 1)を基に、候補となる具体的な事業所を探すことができる。

表 3-4-4 各製品の製造事業所数(全国、従業員 4 名以上)

製造品目	事業所数
洋紙・機械すき和紙	44
塗工紙	40
溶解・製紙パルプ	18

データの出典：経済産業省 工業統計調査 2020 年品目別統計表 [2]

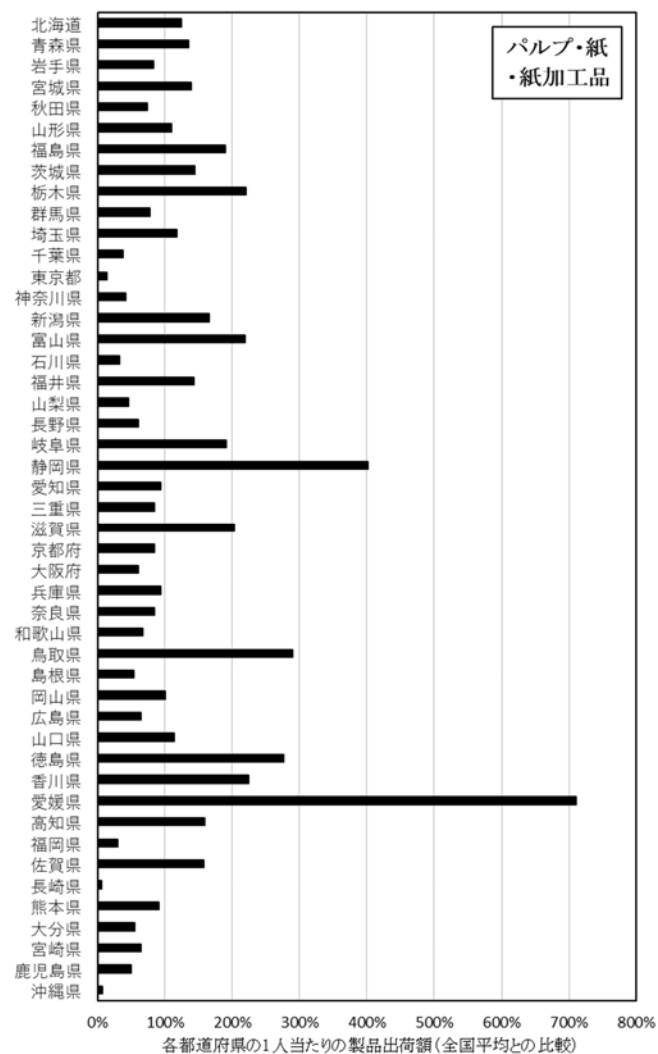


図 3-4-25 各都道府県における紙・パルプ工業の1人当たりの製品出荷額

データの出典:経済産業省 工業統計調査 2020 年品目別統計表 [2]

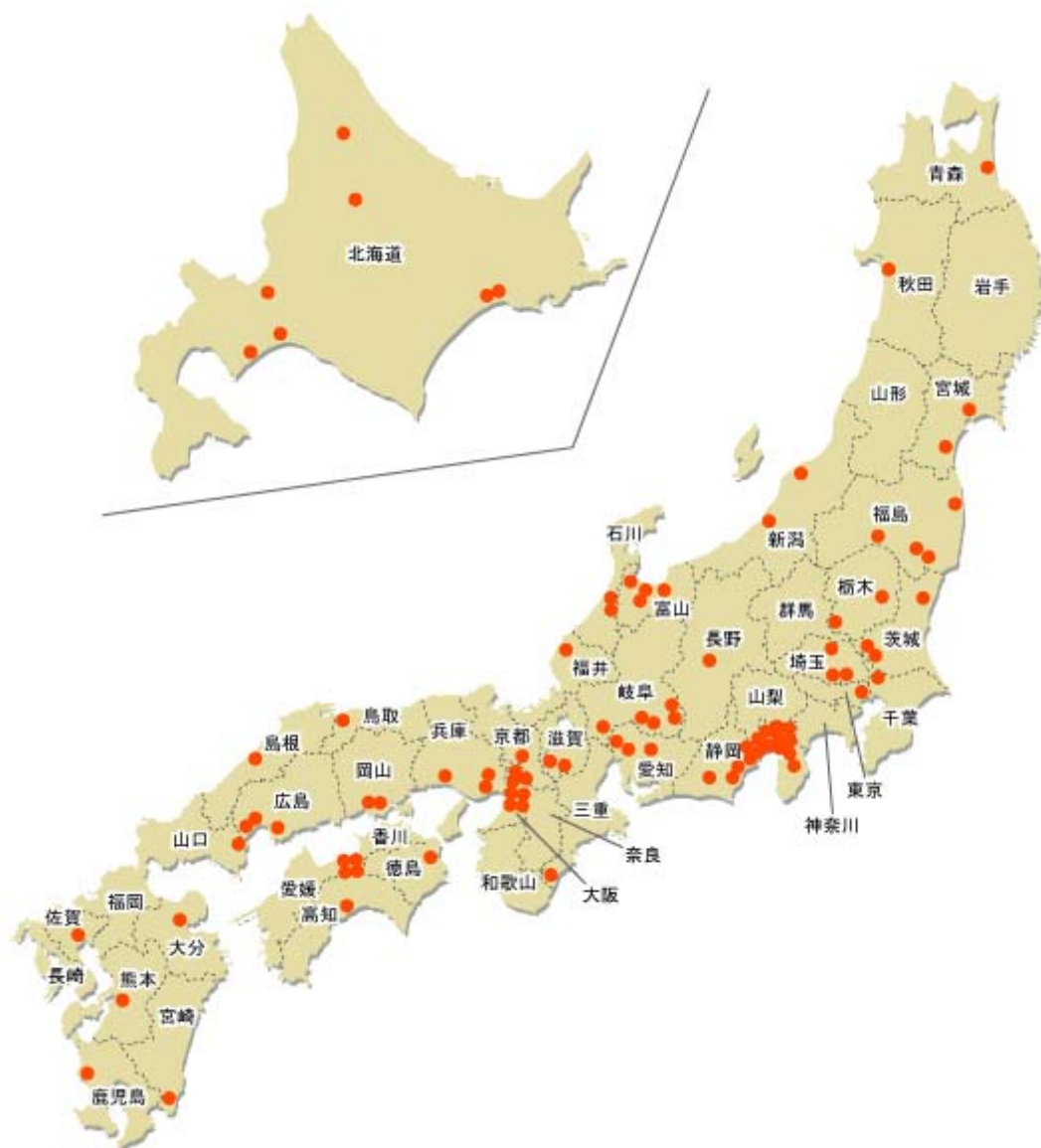


図 3-4-26 主な製紙工場の分布。これらの一部が、パルプ工場と同居する。

出典：日本製紙連合会 HP

3.4.2.4. 繊維工業

繊維工業は、年間総売上 20 兆円規模の市場である。化学繊維は総生産高の 70%強を占め、その製造工程に熱需要の多くがあると考えられる。図 3-4-27 に、繊維製品の製造工程及び熱需要の概念図を示す。化学繊維は、先に述べた石油化学誘導品工場にて製造された中間製品(各種樹脂ペレット)を主な出発原料として、150-250℃程度の温度下で、糸が製造されるが、その工程に主な熱需要があると考えられる。その紡糸が生地加工され、縫製を経て、衣料品などの最終製品となる。熱需要は、生地への加工工程の一部にもある。

ここでは、100-200℃の熱需要がある繊維製品の製造工場について、次の3項目に分けて、考察した:(1) 繊維製品の品目分類と各品目の繊維工業出荷額全体に占める割合、(2) 100-200℃の加熱を要する製品(細目)の抽出、(3) これらの細目の製造工場の規模と分布。

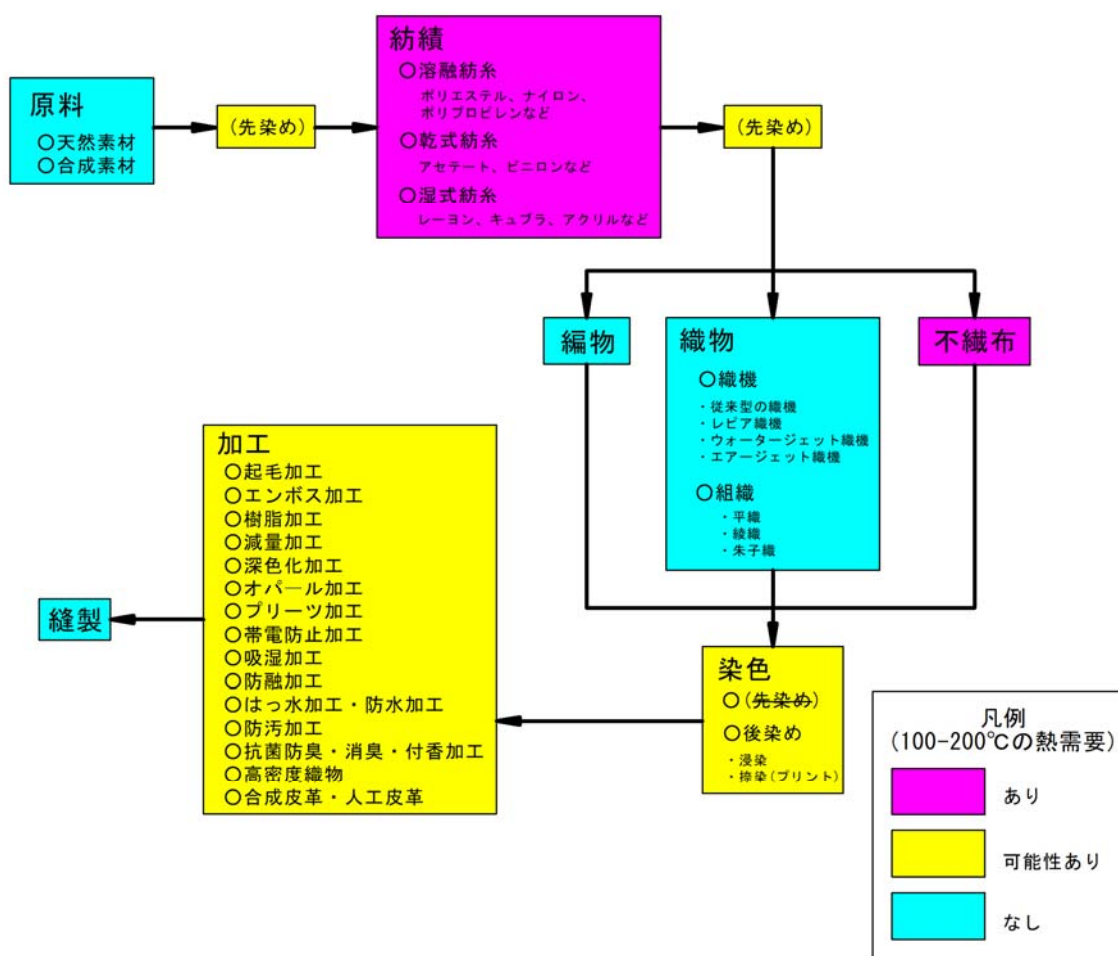


図 3-4-27 繊維工業(主に合成繊維)における製造工程及び熱需要の概念図

3.4.2.4-1. 品目別生産高

図 3-4-28 に、繊維製品の品目別のシェア(出荷額ベース)を示す。これらのうち、最大規模の衣類や、織物、ニット生地、レース生地の製造においては、100-200℃の大きな熱需要はない

と考えられる。この温度帯の熱需要があるのは、紡績糸・化学繊維、プレスフェルト、ふとん・毛布、医療用繊維製品、網、染色である。

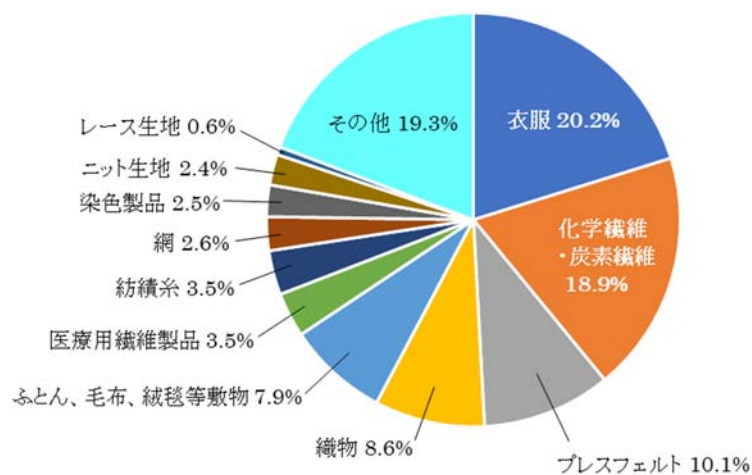


図 3-4-28 繊維工業における各品目の出荷額全体に占める割合（合成繊維素材は化学工業の製品）

データの出典：経済産業省 工業統計調査 2020 年品目別統計表 [2]

3.4.2.4-2. 主要品目の生産工程・熱需要

本項目では、100-200℃の温度帯で熱需要がある、次の製品の製造工程について、述べる：(1) 化学繊維、(2) プレスフェルト、(3) ふとん・毛布、(4) 医療用繊維製品(不織布)、(5) 魚網、(6) 染色製品。

(1) 化学繊維

化学繊維の製造は、先に述べたとおり、出発原料である樹脂ペレットを熔融することから始まる。加熱温度は150-300℃で、素材樹脂により異なるが、全体の3分の1程度が、150-200℃の温度帯であると推測される。詳細の把握には、企業へのアンケート調査・ヒアリングの実施が不可欠であり、次年度以降の課題となる。参考として、主な素材の熔融温度を、表 3-4-5 に掲載した。

表 3-4-5 各種合成繊維素材の溶融温度

素材			温度 (°C)	
分類	名称	記号	軟化点	溶融点
化学繊維	ポリエステル	E, Po, PL	238-240	255-260
	アクリル	Ac, An	190-240	明瞭でない
	アクリル系 (モダクリル)	MA	150	明瞭でない
	ナイロン	N, Ny	180	215-220
	ビニロン	V	220-230	明瞭でない
	ポリプロピレン	Pp	140-160	165-173
	ポリ塩化ビニル	PVC		200-210
	ポリエチレン	Pe	100-115	125-135
	ビニリデン		145-165	165-185
	ポリウレタン	Pu		150-230
再生繊維	レーヨン	R	軟化・溶融しない。260-300°Cで着色分解し始める。	
	ポリノジック	Po		
	キュプラ	Cu		
	リヨセル	CLY, MY, RI		
半合成繊維	アセテート	AC	200-230	260
	トリアセテート	TA	≥ 250	300
	プロミックス		270°Cで分解	
無機繊維	ガラス	GL	700-900	
	金属繊維	ME		
	炭素繊維	CF		3,650

データの出典:Johannaber (2007) [7]ほか

なお、炭素繊維は。その製造工程のうち、耐炎化・不融化処理を、200-300°Cの空気雰囲気で行い、炭素化・黒鉛化処理を 1,000-3,000°Cの不活性ガス雰囲気で行う。従って、加熱温度が 100-200°Cである本事業の対象外であると見なす。ガラス繊維、金属繊維についても、同様である。

(2) プレスフェルト

プレスフェルトは、図 3-4-29 に示す製造工程で数回、熱い鉄板やローラーで加熱する工程や乾燥する工程が含まれており、100-200°Cの熱需要があると推測される。製造法や加熱温度は、出発原料の種類(羊毛、麻、化学繊維、古着など)や最終製品の材質等により異なると推測される。

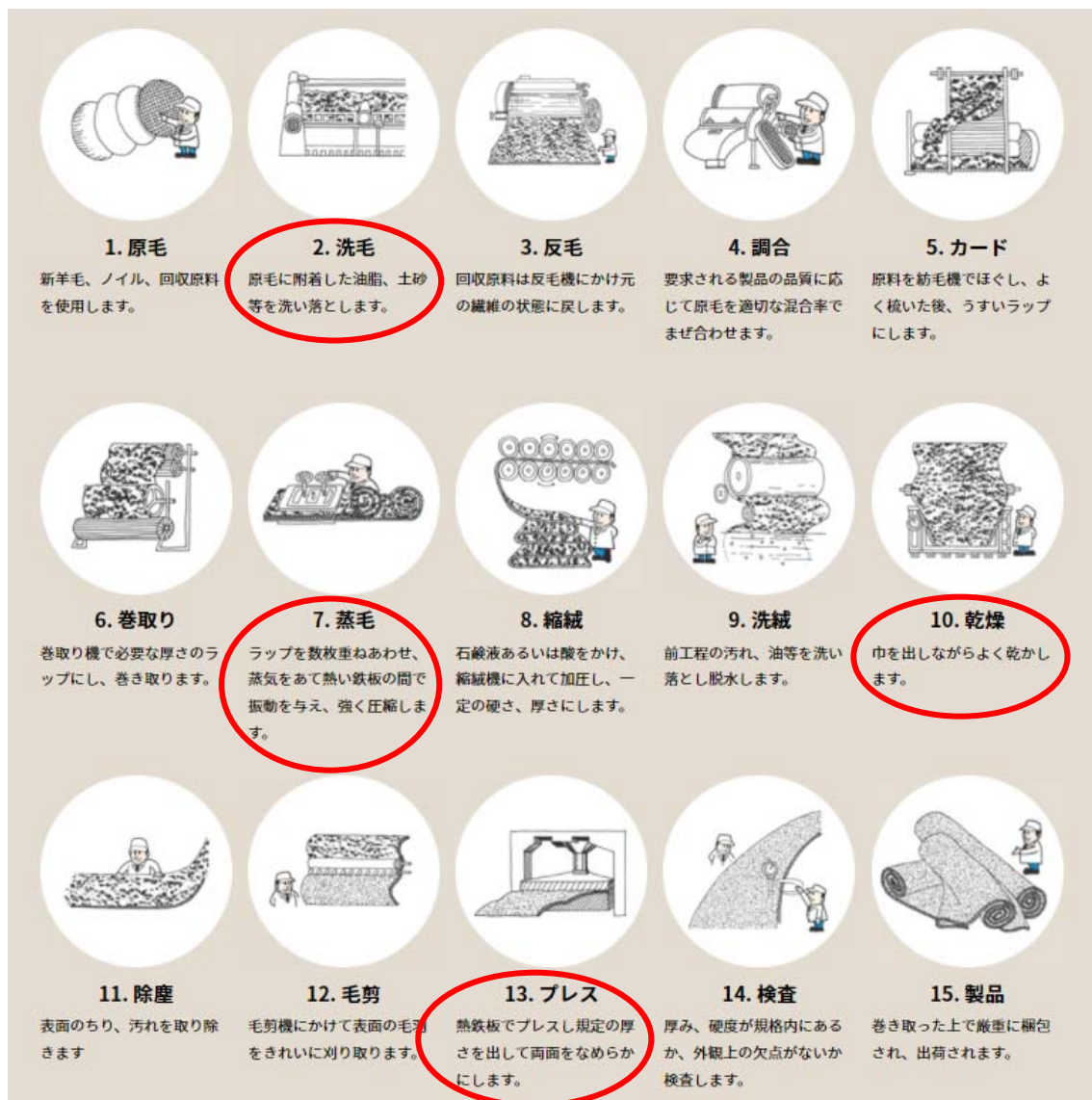


図 3-4-29 プレスフェルトの製造工程の概要

出典: 米島フェルト株式会社 HP

(3) ふとん、毛布

ここでは、羽毛布団、綿布団、毛布について、述べる。

・羽毛布団

素材である羽毛の乾燥工程で、熱需要がある。一般的には、120℃で 20-25 分で乾燥する。

・綿布団

素材である綿は、200℃付近の熱風で乾燥・殺菌・消臭するが温度や加熱時間の詳細は、現時点で不明である。

・毛布

毛布の製造は次の 4 工程で構成される:起毛、毛さばき、ポリッシャー、シャーリング。そのうち、第三のポリッシャー工程で、生地を 200℃程度に加熱し、光沢を出す。加熱温度や時間の詳細は、現時点で不明である。

(4) 医療用繊維製品(不織布)

医療用繊維製品としては、マスク、ガーゼ、生理用品、紙おむつ等を使用される不織布が挙げられる。図 3-4-30 に示す不織布の製造工程のうち、スパンボンド法の「①原料の熔融」及び「④熱ロールでの圧着(エンボス加工)」、スパンレース法の「⑤乾燥巻き取り」において、100-200℃の熱需要があると推測される。具体的な加熱温度は、原料素材により異なると推測される。

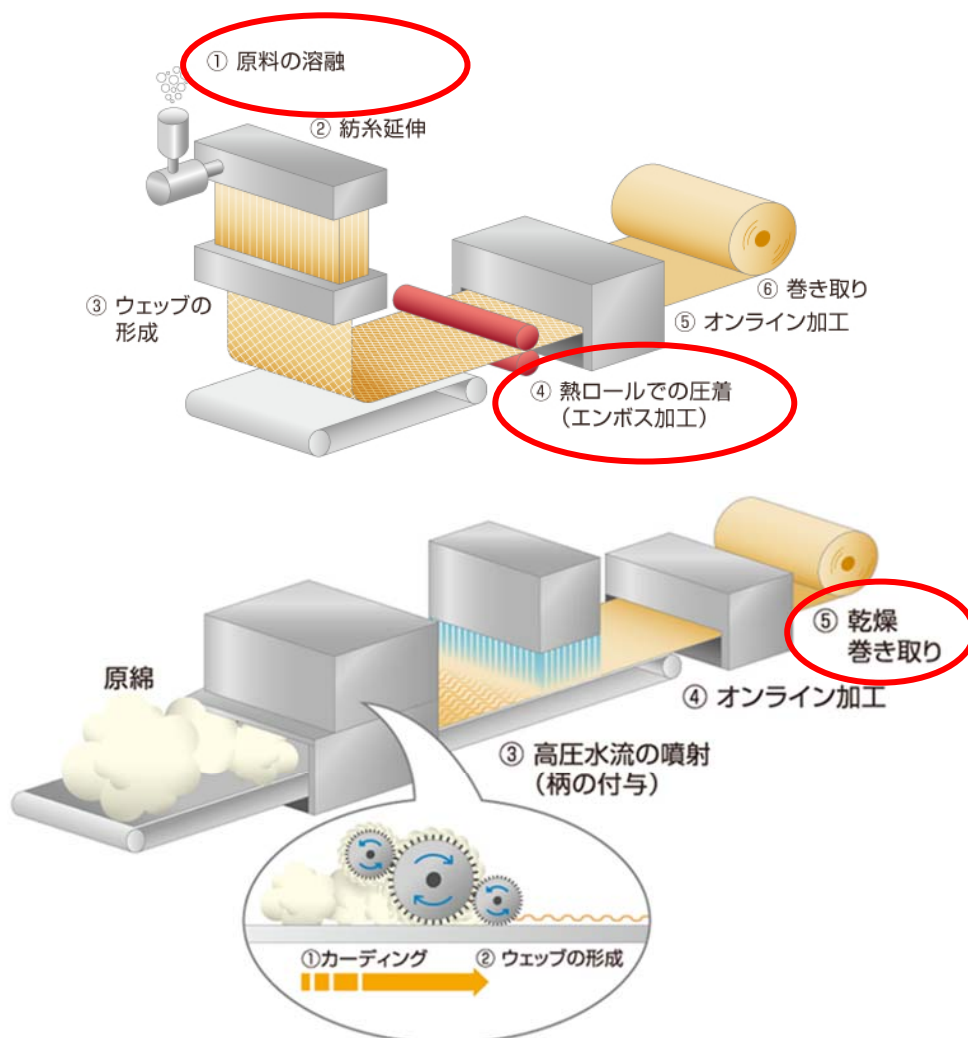


図 3-4-30 不織布の製造工程の概要:スパンボンド法(上)、スパンレース法(下)

出典:ユニチカ株式会社 HP

(5) 魚網

魚網の製造においては、網地の耐摩耗性を改善するための樹脂加工及び熱処理の工程あり、網地が 120℃程度で 30 分程度処理される。

(6) 染色

衣服の製造工程では、糸や生地、衣服の染色が、50-100℃の温度帯で行われるのが一般的であるが、100-200℃の温度帯にも熱需要がある。例えば、ポリエステル染色は 120-135℃で行われる。ただし、現時点では、詳細は不明である。

3.4.2.4-3. 事業所数・規模

繊維工業は、中小の事業所が多く、少なくとも 1990 年代以降は、事業所数が右肩下りの減少傾向を示している(図 3-4-31)。これに対して、製品出荷額は減少傾向に歯止めがかかっており、2009 年以降は横ばいの傾向が認められる。つまり、製造は比較的大規模な工場に集約化されていることが推測される。図 3-4-34 に、大企業の主な工場の分布を示した。これ以外の熱需要の候補先を探す場合は、各品目の工場数(表 3-4-6)、各都道府県における 1 人当たりの繊維製品の出荷額(図 3-4-33)、各品目の市場規模(添付資料 1)、生産工場の企業規模(添付資料 1)から、熱供給元の地域特性をある程度把握することが、恐らく有効である。これを基に、対象とする業種や製造品目をある程度絞り込んだ上で、候補となる具体的な事業所を探すのが、有効であると考えられる。

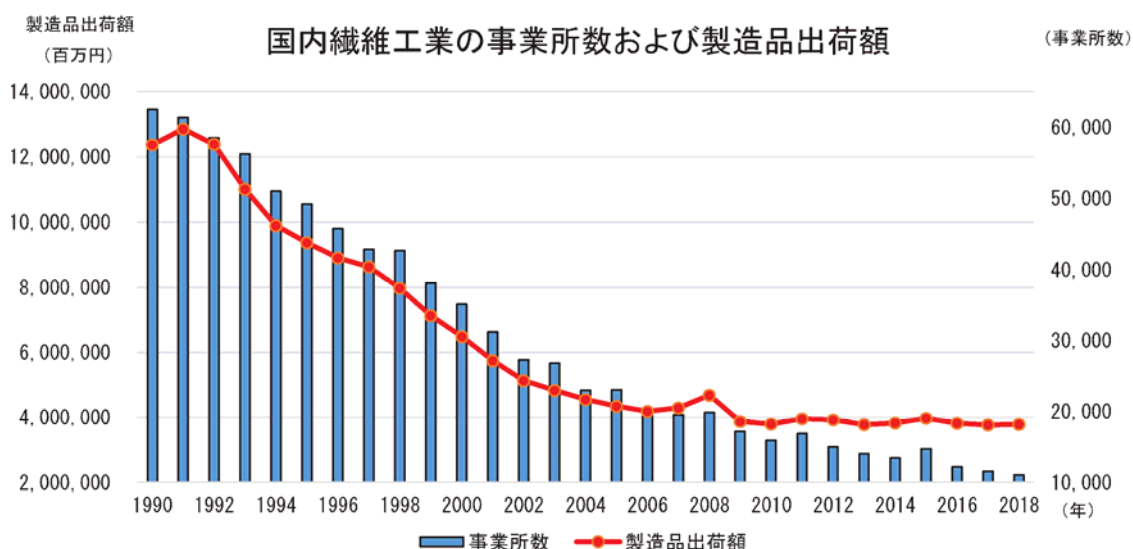


図 3-4-31 繊維工業の事業所数及び製品出荷額の推移(1990-2018 年)

出典:リスクモンスター株式会社 HP(データの出典は経済産業省「工業統計調査」)

なお、日本化学繊維協会によると、化学繊維製造各社は、CO₂ 排出抑制策を推進しており、繊維製品廃棄物を自社工場で使用する石炭ボイラーで燃料として使用するサーマルリサイクルなど、省エネルギーの更なる推進に取り組んでいる(図 3-4-32)。2010 年以降の成果は把握していないが、本事業のような取り組みは、繊維業界では歓迎されるものと推測される。

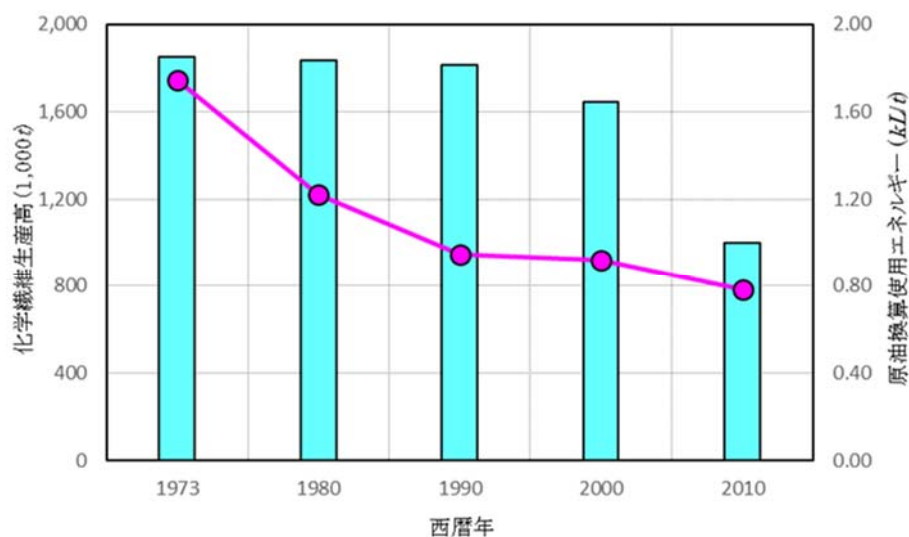


図 3-4-32 化学繊維生産高(棒グラフ)及び原油換算使用エネルギー(折れ線グラフ)の推移

データの出典: 日本化学繊維協会(2014)「化学せんい」 [8]

表 3-4-6 各製品の製造事業所数(全国、従業員 4 名以上)

製造品目	事業所数
寝具	234
繊維雑品染色・整理(起毛を含む)	123
フェルト・不織布	104
合成繊維糸・その他の糸染整理	68
合成繊維長繊維織物機械染色	54
化学繊維	42
漁網	37
化学繊維紡績糸	36
上塗りした織物・防水した織物	31
絹・人絹織物機械染色	30
合成繊維紡績糸織物機械染色	24
網地(漁網を除く)	23
毛布	8
毛風合成繊維織物機械染色・整理	5

データの出典: 経済産業省 工業統計調査 2020 年品目別統計表 [2]

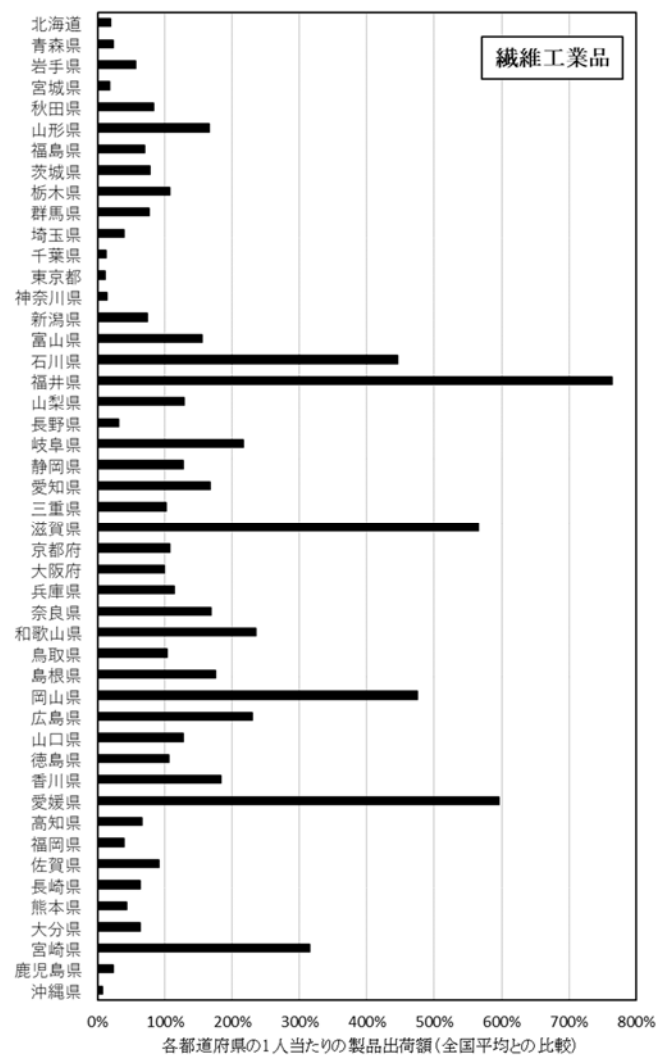


図 3-4-33 各都道府県における 1 人当たりの製品出荷額

データの出典: 経済産業省 工業統計調査 2020 年品目別統計表 [2]

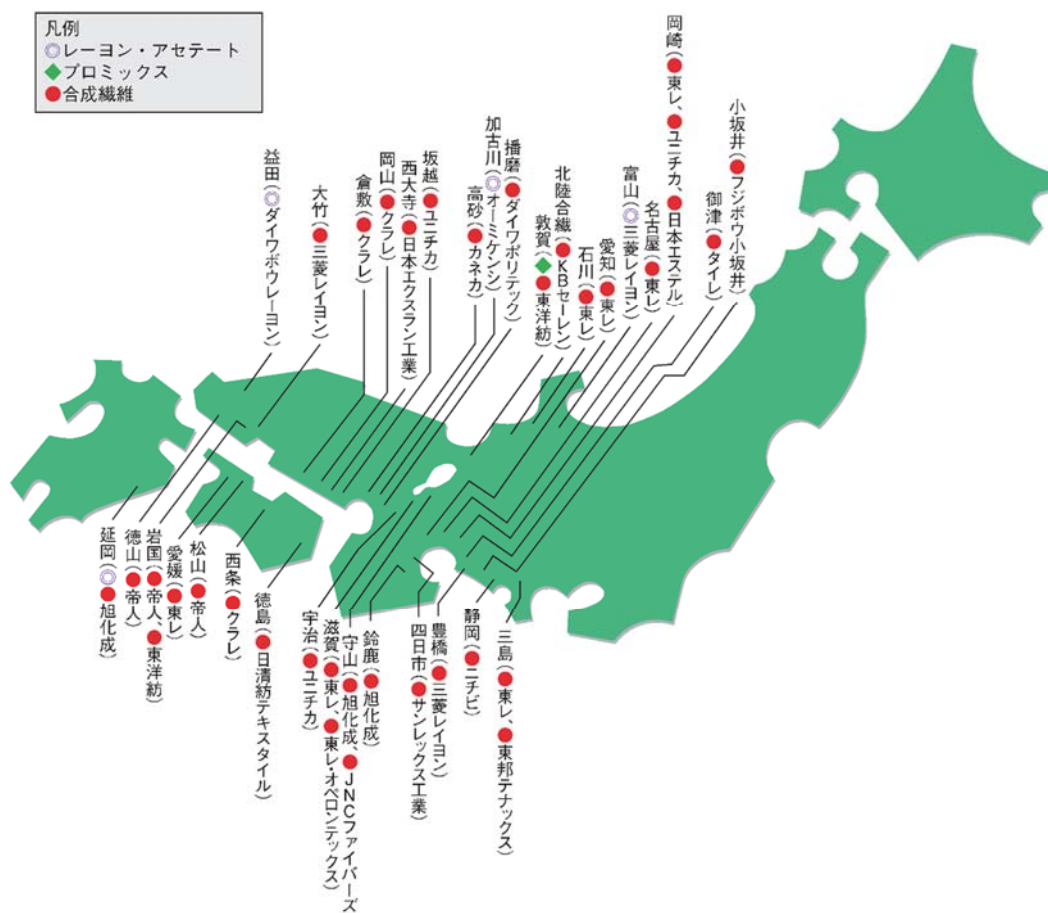


図 3-4-34 化学繊維の主な製造工場の分布

出典: 日本化学繊維協会(2014) [8]

3.4.2.5. 引用文献

- [1] 三菱総合研究所「平成29年度新エネルギー等の導入促進のための基礎調査」
https://www.meti.go.jp/meti_lib/report/H29FY/000206.pdf (最終アクセス
日 2022/01/31)
- [2] 経済産業省 工業統計調査 2020 年品目別統計表
[https://www.meti.go.jp/statistics/tyo/kougyo/result-
2/r02/kakuho/hinmoku/index.html](https://www.meti.go.jp/statistics/tyo/kougyo/result-2/r02/kakuho/hinmoku/index.html) (最終アクセス日 2022/01/31)
- [3] Vilgis, T.A., 2015, Soft matter food physics—the physics of food and cooking. Rep. Prog. Phys., 78, 124602
- [4] De Alzaa, F. et al., 2018, Evaluation of Chemical and Physical Changes in Different Commercial Oils during Heating. Acta Scientific Nutritional Health, 2, 2-11.
- [5] 全日本日本菓子協会, 2021, 令和 2 年 菓子生産数量・生産金額及び小売り金額推定。
- [6] Fu, J. and Ma, Y., 2015, Mold modification methods to fix warpage problems for plastic molding products. Computer-aided Design and Applications, DOI: 10.1080/16864360.2015.1059203
- [7] Johannaber, F., 2007, Injection molding machines – A users' guide. Hanser Publications, Munich, Germany.
- [8] 日本化学繊維協会, 2014, 化学せんい。

3.4.3. 中小規模を中心としたごみ焼却施設における余熱利用状況

清掃事業における余熱回収・利用のポテンシャルについて、次の 3 項目に分けて述べる(1) 背景説明、(2) 余熱の利用状況及び更なる余熱回収のポテンシャル、(3) 配管経由の余熱利用。

3.4.3.1 背景説明

以下、ごみ排出量及びごみ焼却施設の整備状況の推移について、説明する。

◆ごみ排出量の推移

日本においては、ごみ排出量を削減する努力が行われており、過去 20 年程度の間、ごみ排出量が、総排出量、1 人当たりの排出量共に、2 割程度減少している(図 3-4-35)。

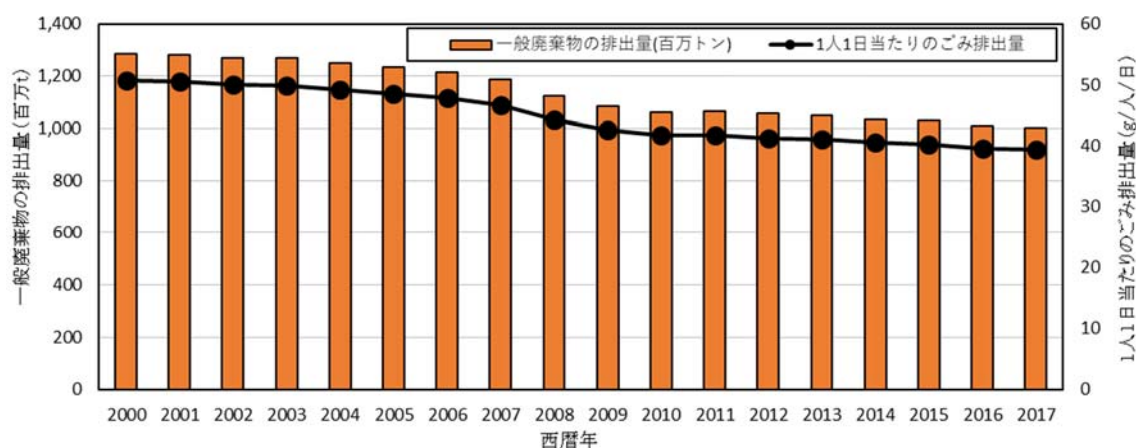


図 3-4-35 ごみ排出量の推移(2000～2017 年)

データの出典:環境省 令和元年環境統計集(試行版)

◆ごみ焼却施設の整備状況

1960～70 年代の日本では、高度経済成長に伴い、大量生産・大量消費型の生活様式が浸透したため、都市ごみが急増した。国土が狭く、最終処分場用地が不足しているため、埋立ごみを削減することを目的として、各都市でごみ焼却施設が整備された。その後、ごみ焼却の効率化を目的として、施設の集約化が図られており、前述したごみ排出量削減の努力も相まって、施設数が減少する傾向にあり、現在に至っている(図 3-4-36)。

図 3-4-37 に、ごみ焼却能力、焼却施設数及び最終処分量の推移を示した。1970 年代以降、ごみの中間処理の効率化が図られた結果、70 年代に全施設の 8 割程度を占めていた、バッチ式の施設は、2 割弱に激減し、現在では全連続式が主流となっている。また、ごみの最終処分量も、70 年代の 2 割弱に激減している。

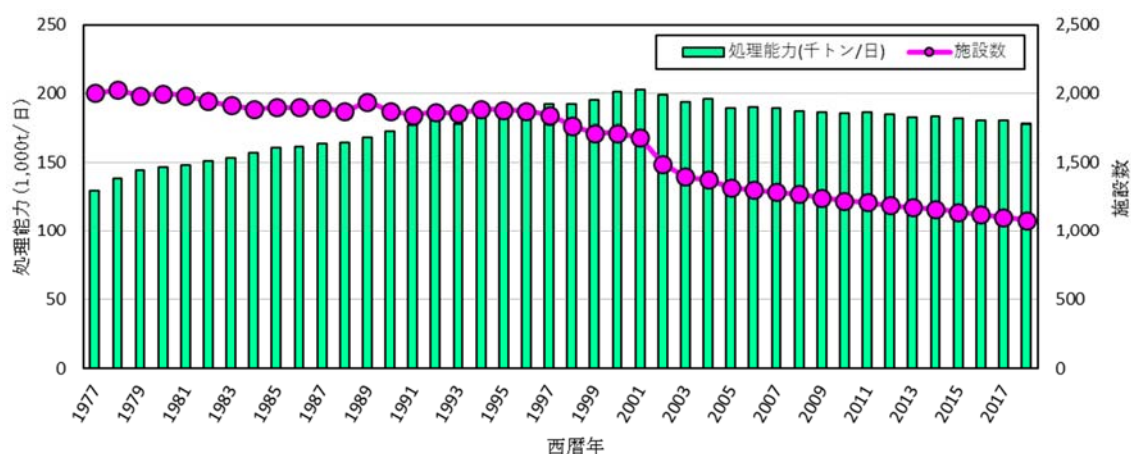


図 3-4-36 ごみ焼却施設の総処理能力および施設数の推移(1977～2018 年)

データの出典:環境省 令和 2 年環境統計集

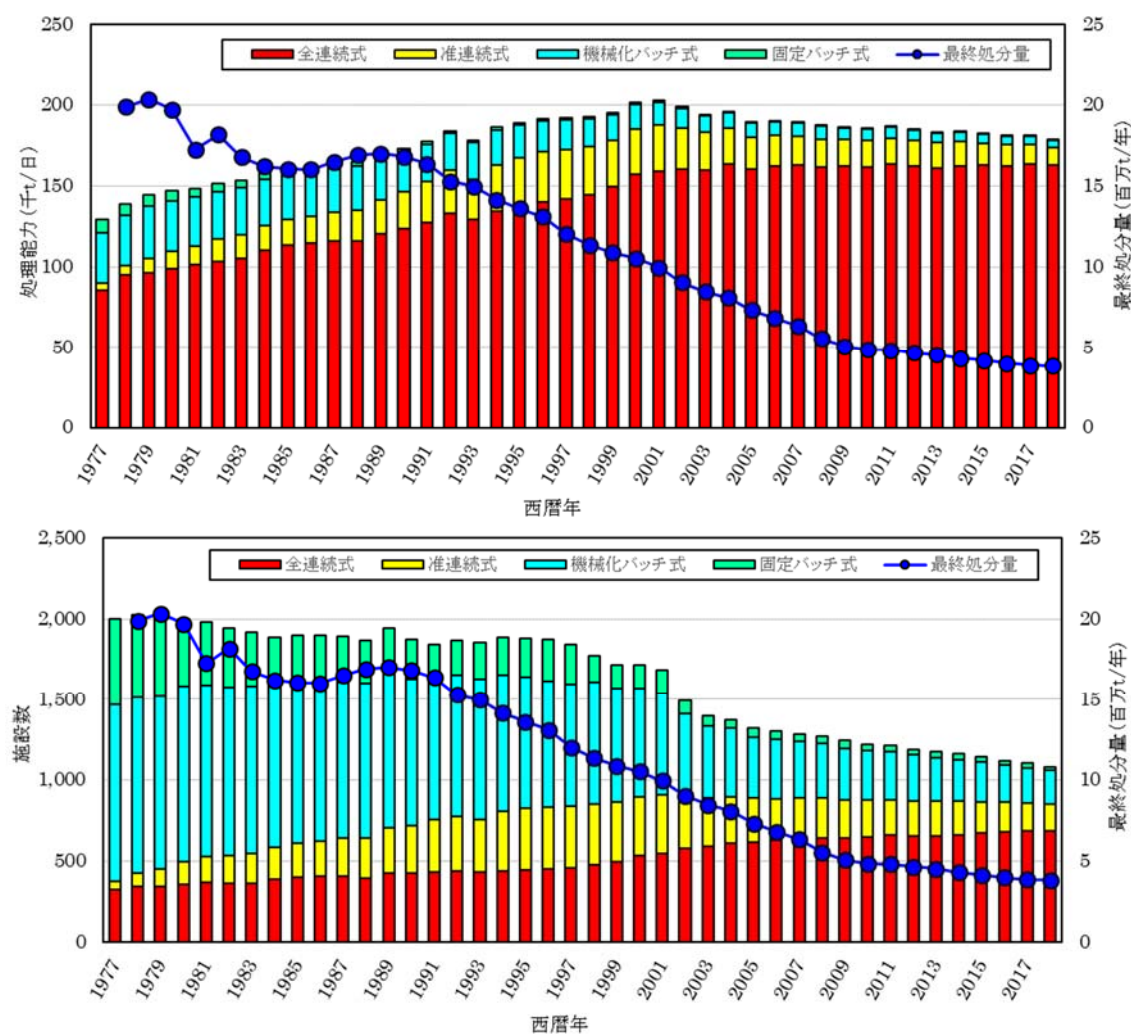


図 3-4-37 ごみ焼却能力、焼却施設数及び最終処分量の推移(1977～2018 年)

データの出典:環境省 環境統計集

図 3-4-38 に、2017 年における炉形式、処理能力別のごみ焼却施設の頻度分布を示した。これによると、処理能力は概ね、60t/日以下、100～200t/日、600t/日程度の 3 つに分布のピークが認められる。処理能力 60t/日以下の施設の 7 割程度はバッチ式で、2 割程度が准連続運転である。処理能力 100～200t/日の施設では、8 割以上が全連続運転で、残りは准連続運転である。処理能力 600t/日程度の施設は、全て全連続運転である。

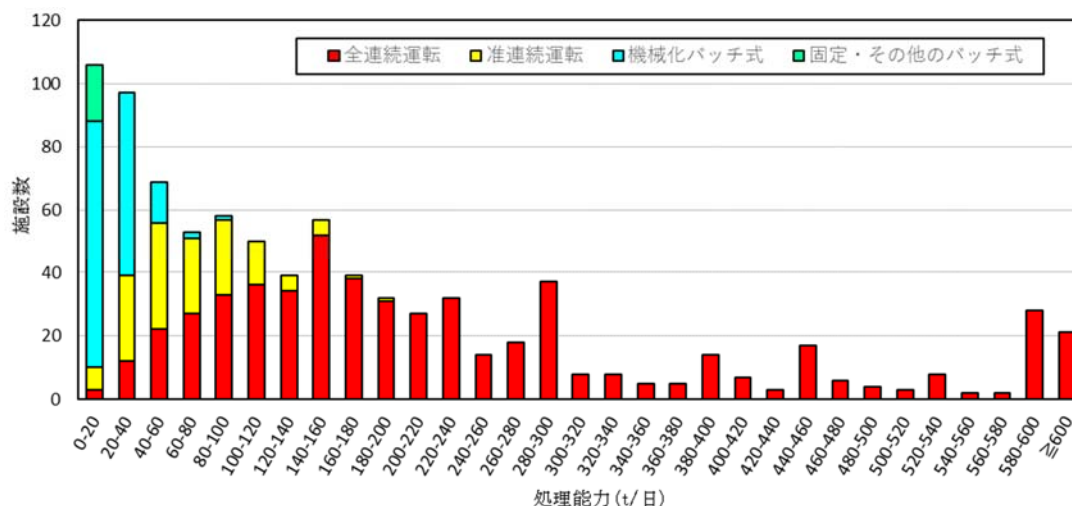


図 3-4-38 炉形式、処理能力別のごみ焼却施設の頻度分布図

データの出典: 環境省 環境統計集

図 3-4-39 に、ごみ焼却施設の周辺人口を炉形式、処理能力別に示した。これによれば、バッチ式の施設は、山間部や離島などの過疎地に立地している。即ち、これまで行っていた、より規模の大きい全連続運転型の施設への集約化は、限界に近づきつつあることが窺える。

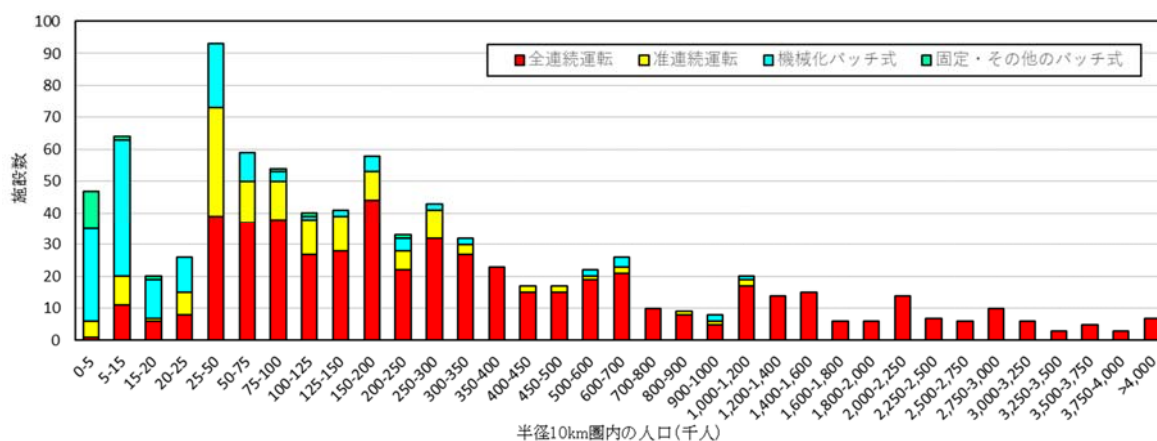


図 3-4-39 炉形式別のごみ焼却施設周辺の人口(半径 10km 圏内)の頻度分布図

データの出典: 環境省環境統計集、JSTAT Map

3.4.3.2 ごみ焼却施設における余熱利用状況

清掃事業由来の排熱の温度帯は、電力事業を除く他業種とほぼ同様、100～250℃付近が主体である。ボイラー付きの施設では 900℃程度の排熱を利用して蒸気を造ったのちに廃ガスとして放出している。ボイラーの無い施設では、高温の排ガスを直接冷却して放出している。

次に、ごみ焼却施設における余熱の利用状況の概要を図 3-4-40 に示した。80%強の熱が利用されずに排出されていると思われる。図 3-4-41 に、焼却能力別の余熱利用状況を示した。これによれば、大半の施設では何らかの形で余熱を利用している。焼却能力が 300t/日以上 の施設では、過半数がプールなどの余熱利用施設を附設している。余熱利用施設の大半は、風呂、プール、老人福祉施設又はその組み合わせである。全体として、プールを含む余熱利用施設は、焼却能力が 300t/日以上 の施設に多く、焼却能力がこれ以下の施設では、風呂や老人福祉施設が多い傾向が認められる。ただし、焼却能力が 60t/日未満の施設では、過半数が余熱を全く利用していない。清掃事業において、今後どの程度の余熱回収の上積みが可能であるかの定量的な議論は、必要に応じて、次年度以降の課題とする。

余熱の利用形態としては、表 3-4-12 に示すとおり、主に温水、蒸気、発電であり、場内外で利用している。場外利用の場合は、近隣住宅、園芸ハウス、隣接の公共施設(学校、美術館、病院など)、隣接工場などの施設・建物に、配管経由で余熱を供給している(表 3-4-13)。各施設での利用先は添付資料 2 に記載した。

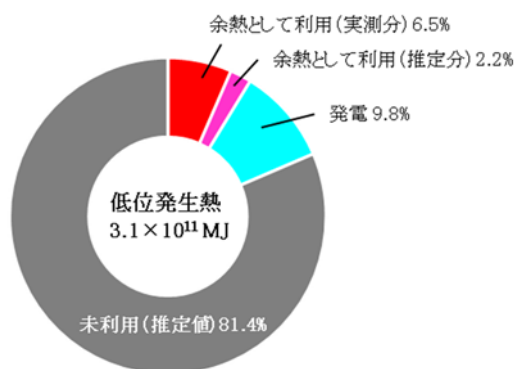


図 3-4-40 全国の一般廃棄物焼却施設における余熱の利用状況

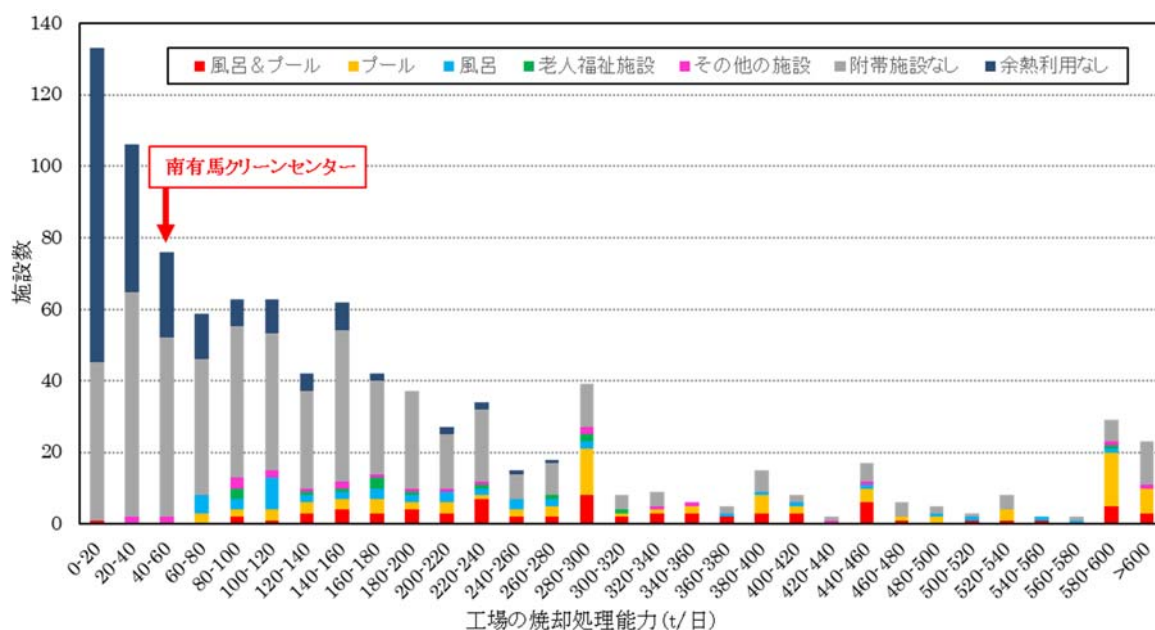


図 3-4-41 全国のごみ焼却施設における余熱の利用状況

データの出典:環境省環境統計集など

※ 環境省の統計データによれば、全国のごみ焼却施設数は、1,100 弱程度であるとされている。これは、休止施設、解体前の廃止施設を含み、同じ敷地内・建物内でも処理方式の異なる炉があれば、これを 1 施設又は複数施設と見なす場合などがあり、施設数の算定基準が一貫していない。そこで、算定対象を現在稼働中の施設に限定し、同じ敷地内の複数の焼却炉は形式や年代、建物に関わらず、全て単一施設に帰属するものとして再評価し、記載漏れなどを修正すると、全国に約 970 箇所の一般廃棄物焼却施設が存在することが判明した。図 3-4-36～41 は、この再評価による修正データを示している。

表 3-4-12 ごみ焼却施設の余熱利用状況

区分 年度	余熱利用あり								余熱利用 無し
	温水利用		蒸気利用		発電		その他		
	場内温水	場外温水	場内蒸気	場外蒸気	場内発電	場外発電			
H21	800	727	240	238	99	301	181	46	443
H22	792	720	238	240	100	304	247	44	429
H23	791	720	233	246	103	312	254	44	420
H24	781	708	228	243	102	318	264	46	408
H25	778	701	229	244	103	328	273	45	394
H26	764	688	222	249	102	338	285	43	398
H27	765	670	216	253	98	346	297	39	376
H28	754	657	208	246	96	352	299	38	366
H29	754	650	212	245	96	371	323	37	349
H30	748	636	209	242	93	376	267	38	334
(民間)	126	19	4	57	6	73	14	16	181

注)・(民間) 以外は市町村・事務組合が設置した施設で、当該年度に着工した施設及び休止施設を含み、廃止施設を除く。

・重複回答のため施設数の合計と一致しない。

データの出典:環境省環境統計集

表 3-4-13 ごみ処理施設での外部熱利用先

	温浴・プール施設	国芸ハウス	隣接工場での熱利用	不明
外部余熱利用施設	129	5	5	50

データの出典：環境省環境統計集など

図 3-4-42 にごみ焼却施設の周辺人口を示し、余熱利用のない施設と余熱利用施設が附属する施設の状況を比較した。これによれば、余熱利用のない施設は、主に人口密度が 160 人/km² 未満の地域に分布し、余熱利用施設は、主に人口密度が 640 人/km² 以上の地域に分布する。本事業で余熱を回収する南有馬クリーンセンターは、人口密度が小さい地域に立地する。

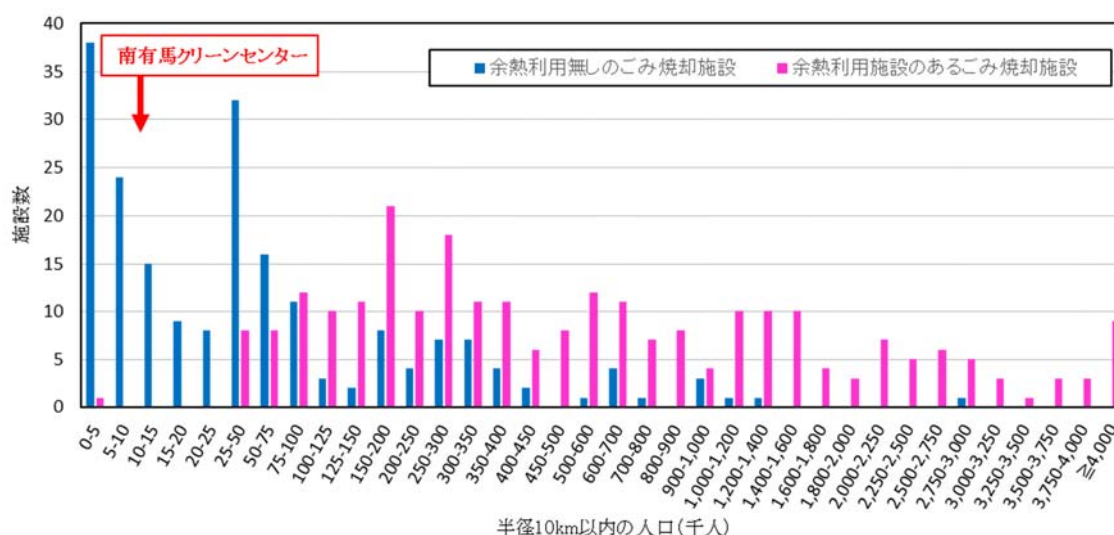


図 3-4-42 ごみ焼却施設から半径 10km 圏内の人口：余熱利用無し(N=211)、余熱利用施設あり(N=255)。ごみ焼却施設の半数強は、付属施設はないが、余熱利用がある。これらの施設は、ここに示していない。

データの出典：環境省環境統計集、JSTAT Map

余熱利用施設の設置は、2000 年成立の循環型社会形成推進基本法が影響しているものと考えられる。この法律により、廃棄物処理政策の方向性が、公衆衛生の向上と生活環境の保全から、循環型社会の構築に変わっている。この法律では、廃棄物の発生を抑制し、次に再生・再利用を行い、それでも発生するごみは、熱回収を行った上で適正に処分することが述べられている。この法律の制定を契機として、新たなごみ処理施設の設置の流れに変化が表れたものと推測され、これ以前に建設された施設には、余熱利用を行う設備が備えられていないものが多い。ただし、2000 年以降の稼働にもかかわらず余熱利用の実績のない施設は、5 箇所あり、その詳細の記述は省略するが、それぞれ固有の事情があるものと推測される。

3.4.3.3 余熱利用の事例：長崎市西工場

ごみ焼却施設の排熱を利用する動きは、先述したとおり、全国的な傾向である。その一事例として、長崎市の行った長崎市西工場の余熱利用に関する調査結果の概要を述べる(長崎市西工場余熱供給可能性調査(平成 30 年 6 月市議会環境経済委員会資料)。

この施設の回収熱の需要先を抽出し、近隣の下水汚泥の消化施設および陸上養殖施設の 2 か所を候補とした。消化施設では消化反応を安定的に行わせるための加温に利用し、養殖施設では冬季の水温低下への対策として利用することを想定し、それぞれへの供給の可能性等を検討したものであり、配管経由の熱利用先を見つけることに苦労していることが見て取れる。



図 3-4-43 長崎市西工場での廃熱利用検討

出典:長崎市議会環境経済委員会資料

3.4.4. 南島原市における余熱利用先の調査

本事業においては、南島原市における、オフラインの余熱利用先を検討した。立地条件として、南島原市は、図 3-4-44 に示すとおり、過疎地ではないが、人口が比較的少ない、標準的な地方都市である。図 3-4-45 に、余熱利用先の検討対象とした施設の分布を示す。今回の調査では、実証実験を行う『希望の里』と同様に、温水利用があると推定される施設を、抽出した。対象施設は、公共施設が中心であるが、民間施設(老人ホーム、ホテル、病院等)も含まれている。結果を簡潔にまとめると、オフラインの余熱利用先は、配管経由とは異なり、選択肢が非常に多く、人口が比較的少ない地域においても、これを見つけることは容易である。なお、今回の調査では、各施設の熱利用方法等の詳細な調査・検討は行っていない。これは、あくまでも地域にある熱利用施設とごみ焼却施設との位置関係を示すもので、人口が比較的少ない地方都市におけるオフラインの熱利用先の分布状況を示す参考事例として、位置付けられる。また、施設以外にも、農業ハウスにおける利用を検討することもできる。以下、次の検討項目の詳細を述べる:(1) 熱利用施設の業種別内訳、(2) 熱利用施設の立地、(3) 熱需要量が小さいときの対応、(4) 化学蓄熱材による熱輸送の利点、(5) 農業ハウスにおける利用、(6) 余熱輸送システムの将来像。

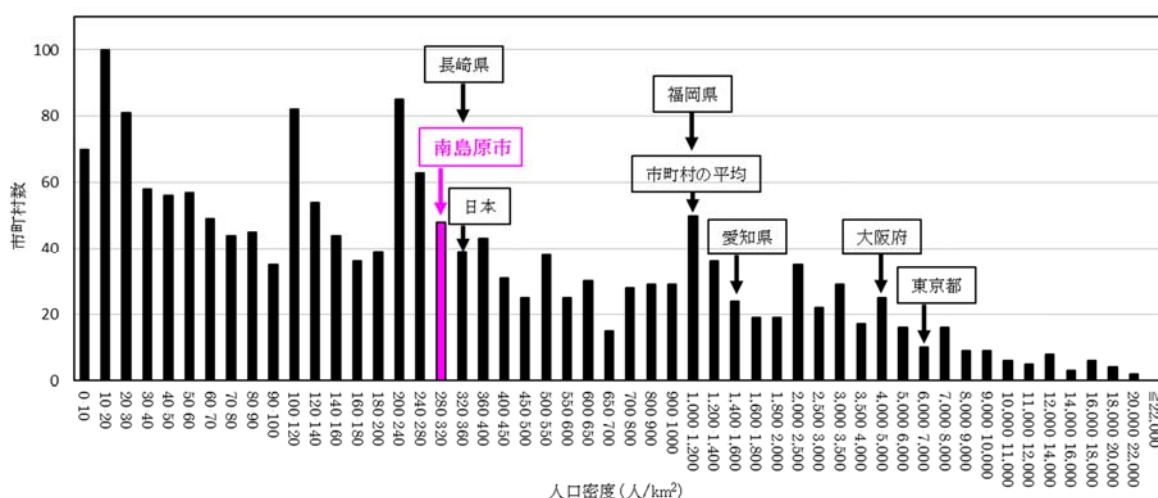


図 3-4-44 全国の市町村の人口密度の頻度分布図

データの出典: JSTAT

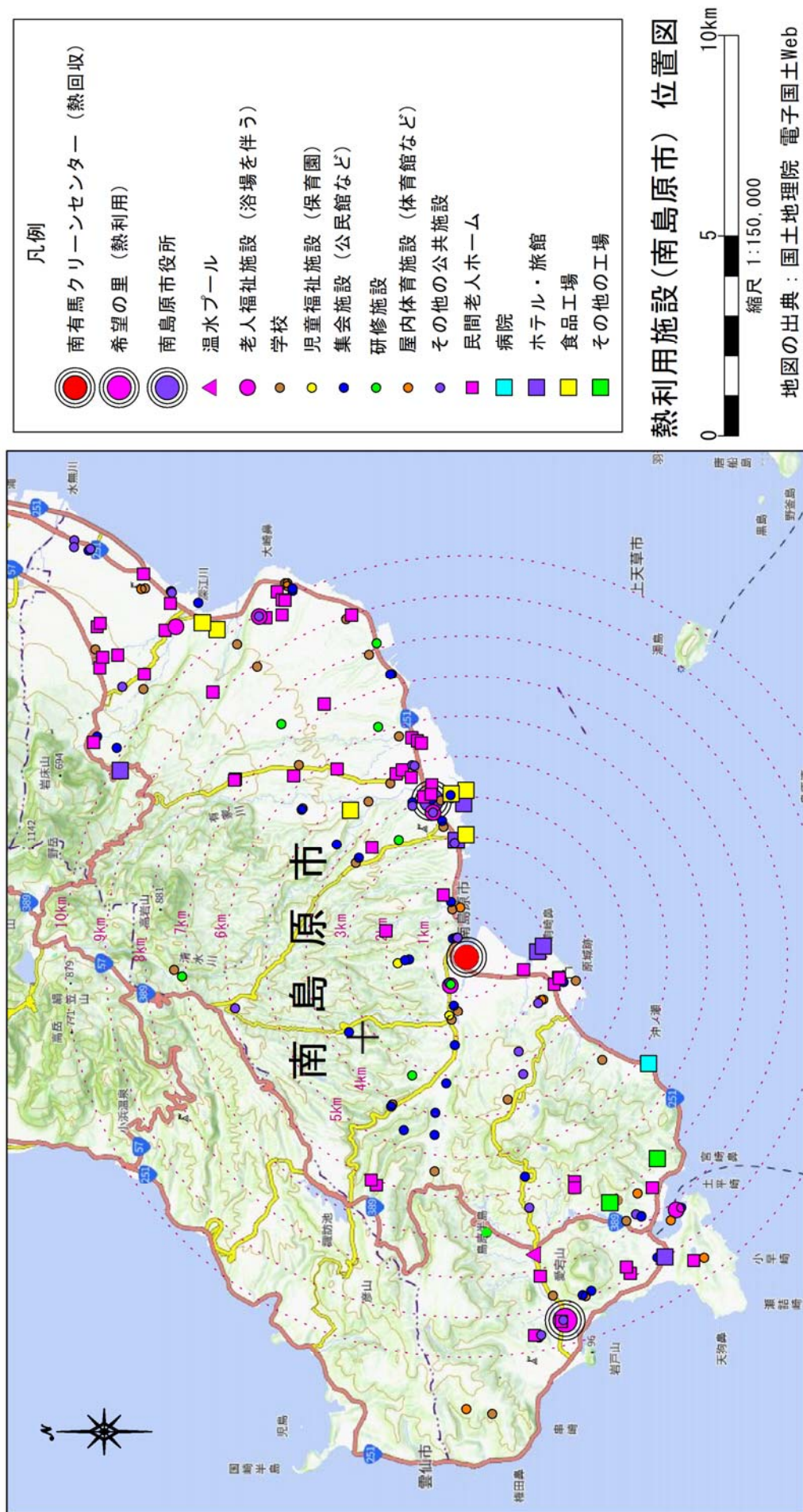


図 3-4-45 南島原市内における公共の熱利用施設の分布図

3.4.4.1 熱利用施設の業種別内訳

今回抽出した施設は、表 3-4-14 に示すとおり、公共施設 162 箇所、民間施設 65 箇所である。業種別では、集会施設、老人福祉施設、学校の順が多い。今回実証実験を行う『希望の里』と同様に、温水利用があると推定される施設は、老人福祉施設、温水プール、ホテル・旅館、病院である。その中でも特に、民間の老人福祉施設が多い。また、「3.4.2. 産業界における熱利用のポテンシャル」にて取り上げた食品工場は、6 箇所ある。なお、この地域には、スーパー銭湯が立地するほどの人口はない。

表 3-4-14 南島原市内の熱利用施設の概要

施設区分	学校	集会施設	研修施設	屋内体育施設	保育所	老人福祉施設	温水プール	ホテル・旅館	病院	食品工場	鉄工所等	その他
公共	38	69	8	12	2	8	1	1	0	0	0	23
民間	0	0	0	0	0	51	0	5	1	6	2	0

データの出典：南島原市 HP、Google Map など

3.4.4.2 熱利用施設の立地

検討対象施設は市内全域に分布し、南有馬クリーンセンターは、市のほぼ中心に位置している。地域内での任意の施設へのオフライン熱輸送として見た時には、最適な立地環境である。ただし、人口集積地は合併前の各町の中心部に位置するため、各施設は市内全域に均等に分布するという訳ではない。図 3-4-46 に、南有馬クリーンセンターから、検討対象施設までの、現実のトラックによる片道走行距離及び走行時間を示した。これによると、大半の施設は片道走行距離 20km 以内、走行時間 30 分以内に立地する。全体としては概ね、南有馬クリーンセンターから走行距離 9～18km 圏内(走行時間 16～28 分圏)と走行距離 9km 圏内(走行時間 16 分圏)に、大別される。必要に応じて、次年度以降の検討課題となるが、ここに示した立地に係る情報と各施設の熱需要・利用方法に係る情報を併せて考察することにより、複数個所への熱輸送を企画し、サプライチェーンマネジメントとして管理することで、輸送コストの最適化を図ることは、可能である。

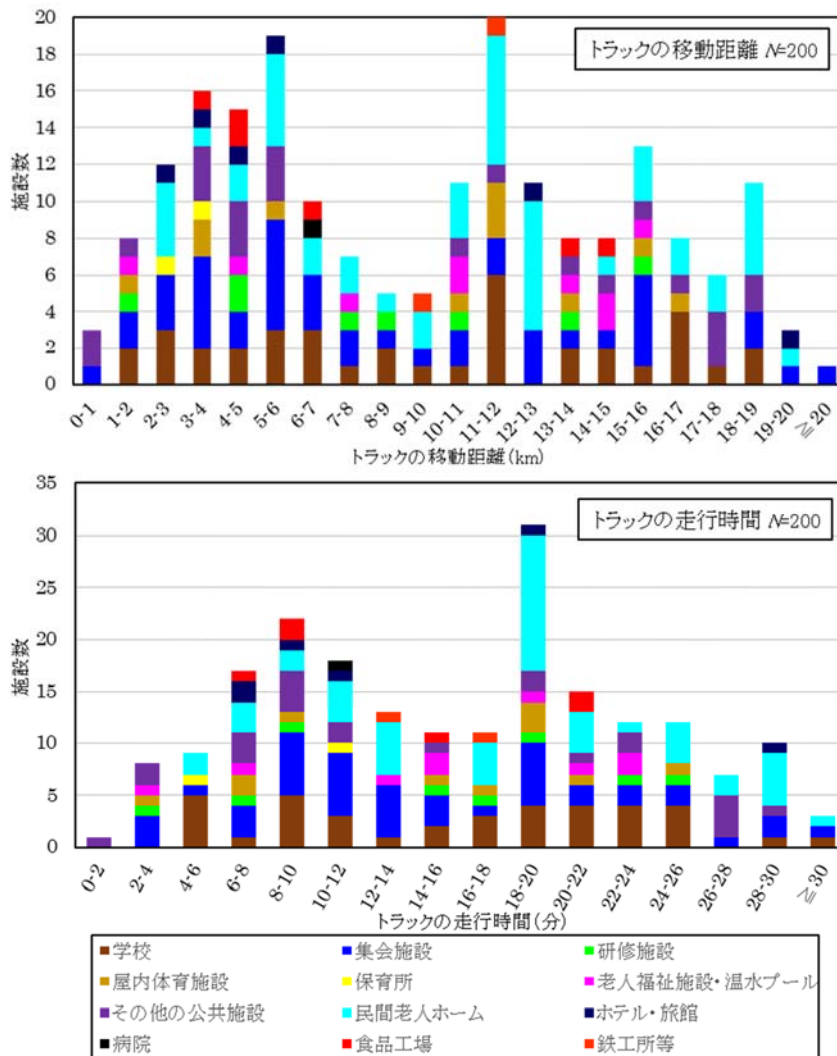


図 3-4-46 熱利用先検討対象施設までのトラック走行距離(上)及び走行時間(下)の頻度分布図

データの出典:ナビタイム

3.4.4.3 熱需要量が小さいときの対応

熱利用先の 1 日あたりの熱需要量が小さい場合、ミルクラン方式での輸送形態であれば、数か所以上を経由して供給することも可能である。例えば、本実証事業における熱利用先の温浴施設(浴槽水合計 10m³ 及び洗い場における温水)に用いる熱量は、2GJ/日程度(暫定値)である。1 日 2 回の供給であるならば、1GJ の蓄熱ユニットの重量を 1t として、最大積載量 10t の車両で、熱需要量が同規模の施設 10 か所を経由して、熱を定期供給することができる。

3.4.4.4 化学蓄熱材による熱輸送の利点

本システムにおける化学蓄熱材を用いた熱輸送の利点は、輸送コストにあり、その概要は以下のとおりである。

- ・蓄熱ユニットは、常温保管が可能、かつ安全性も高い。これにより、熱利用先周辺に貯留場所(以下、ハブ)があれば、これを拠点として熱輸送ができる。従って、熱利用先の立地条件に合わせた搬送車両を使うことが、可能である。
- ・蓄熱ユニットを混載便で送ることが可能であるため、ハブを利用して、地域内での拠点ごみ回収などと併用する他、リサイクル資材や一般資材との混載搬送ができる。このようなロジスティクスにより、輸送コストを大幅削減することができる。
- ・この熱輸送の見方を変えると、地域内で定期的なモノの移動を行っていることになる。モノの移動とハブを、他の行政サービスや民間利用も絡めたサプライチェーンマネジメントとして管理するならば、輸送コストの最適化が可能となり、地域活性化ならびごみ焼却施設を取り巻く地域循環共生圏の形成につながるものとなる。

3.4.4.5 農業ハウスにおける熱需要

南島原市の主要産業は、農業であることから、農業ハウスにおける熱需要を調査した。図 3-4-47 に南島原市の農業ハウスにおける消費エネルギーの分布を示す。南島原市は、農業が盛んな地域である。これらの農業ハウスにおいて、野菜や花きなどが生産されているが、品種により生育環境が異なるため、温度調節が必要であり、そのエネルギー源として、一般的に化石燃料が用いられている。エネルギーの使用量及び使用時間帯の詳細は、現時点で把握していないが、手元にあるデータによれば、生産者 1 件あたりの年間エネルギー消費量は、花き:4,500GJ/件、野菜/果物:260~1,540GJ/件と算出される。

農業ハウスにおける熱利用は、栽培の適正温度より低い季節及び時間帯に行われる。また、品種に応じて作付面積が異なる。従って、農業における余熱利用を検討する場合は、そのあたりの情報を把握する必要がある、次年度以降の課題となる。



図 3-4-47 地域における農業ハウスにおける消費エネルギーの分布

データの出典:南島原市提供資料

※本図は、地域の実情を概念的にまとめたものであり、存在する全ての農業ハウスを掲載したものではない。また、地図に示すバブルの中心は、実際の燃料使用場所ではない。

3.4.4.6 熱輸送システムの将来像

図 3-4-48 にオフライン熱輸送システムの将来像を示す。本実証事業で用いる化学蓄熱材は長期間の保存が常温で可能であること、またその安全性が高いことから、地震や台風などにより災害が発生した際の緊急対策用のエネルギー源としての利用が考えられる。また輸送の手段や形態に柔軟性があるため、船舶や鉄道さらにはドローンなどの航空輸送機を利用した輸送も可能と思われ、被災地域への輸送が道路のみに限定されることも無く利用可能な地域は広範囲となる。

ごみ焼却施設の廃熱を周辺地域で利用することで化石燃料の使用量削減および CO₂ 排出量削減を地域として進め、また災害時での防災の拠点となることで、ごみ焼却施設を取り込んだ地域循環共生圏づくりが期待される。

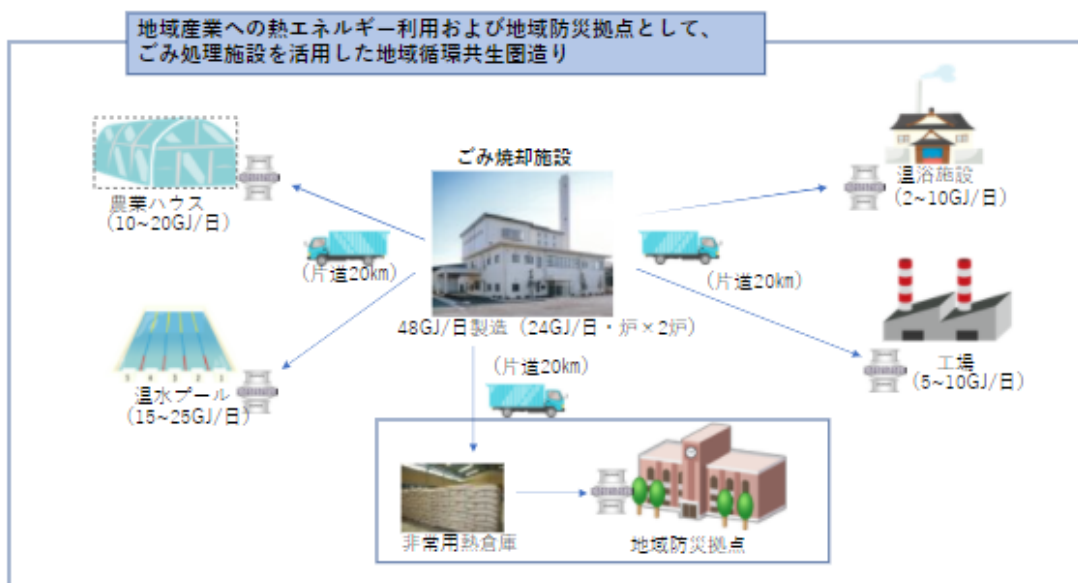


図 3-4-48 本システムの将来像

3.4.5. 本システム導入に係るヒアリング調査

ごみ焼却施設を管理或いは建設・運転を行っている自治体及び建設会社を対象として、本システムへの関心についてヒアリング調査を実施した。聞き取り内容を、表 3-4-15 にまとめた。

表 3-4-15 ヒアリング結果の概要（次頁につづく）

No	種類	訪問先	内容
1	企業 (製造) 沖縄県	プレキャスト製造	1. CO2削減は季節湯としても必要。官庁からも要請あり 2. 蒸気養生は冬場のみ必要。熱源のストックが出来れば有効 3. 製糖工場、食品加工、ホテルなどほとんどの事業所はボイラあり。普及すれば需要は多い 4. 離島でコミュニティが出来ているところも利用可能性あるかも
2	ゼネコン (中堅) 総合事業 沖縄県	建設業 ホテル：3 食品加工：1	1. ホテル、食品加工では利用できると思う 2. 必要性は感じる
3	ゼネコン (中堅) 東京都	建設業	1. 施主に医療施設、温浴施設、保養所が多い 2. 現在大型温浴施設建設中、利用できれば多くの施主には提案できる 3. 距離は？回答：10～30km範囲で可能。施主の範囲は広がるので実証後報告願う
4	企業 山形県	多角事業 ・建設業 ・廃棄物処理事業	1. 建設廃棄物中間処理（溶融）の事業も行っている。（国から直接認可の事業） 2. 新炉増設の認可待ち（2022.6頃）でこの技術は間に合わないが、担当技術者に検討させておく。 3. 寒冷地のためやはり熱源としての利用者はいるだろう。コストとインフラ（輸送など）次第か。
5	自治体 大阪府	広域組合	1. 環境省との実証事業について簡単に情報共有。 2. 公共施設の熱利用システムはガス会社がCHPコジェネシステムを売り込んでいるとの話あり。
6	自治体 長野県	K組合	1. 化石燃料代替として未利用熱の蓄熱・熱輸送には非常に興味はある。 2. 技術実証の状況を継続的に共有して、将来の需要先の可能性を探る。 3. 木曽町、上松町とも新役場を竣工させたところであり役場の冷暖房システムで地中熱利用システムや木材チップ吹き温水ボイラーシステムを採用していた（脱化石燃料・CN）。
7	自治体 鹿児島県	I市	1. 環境省との実証事業について地域循環共生圏・エネルギー供給と関連付けて簡単に情報共有。 2. 市長からは取り組まなければならないインフラ整備が多数ある。 新市役所建設、給食センター、焼却施設延命化整備など。 地域循環共生圏・エネルギー供給の考え方には賛同するものであり継続して情報提供をお願いするとのコメントあり。⇒市側インフラ整備に関連して提案できる可能性あり(今後3～4年かけて行われていく)。
8	自治体 長崎県	M市	1. 環境省との実証事業への参画に関してお礼を申し上げたところ市側からも参画することについて非常に意義あることとの話をいただいた。 2. 現有焼却施設はあと4年程度ではあるが「CO2ゼロ都市」宣言を11月行う予定であり将来の未利用蓄熱・熱輸送の可能性を自ら探るということで参加を決定したとの話。 技術実証の内容にとどまらずに情報を共有させてもらいたい。需要先の可能性も共有していく。
9	自治体 宮城県	S市	紹介のみ
10	自治体 秋田県	N市	紹介のみ
11	自治体	粟川地域行政事務組合	1. 全連なので12～15GJ/日は蓄熱出来そう。需要はあると思うが具体的には実感はわからない。 2. もし実用可能な技術として認可され、推奨されれば組合も考えていきたい。
12	企業 北海道	多角事業 ・収集運搬 ・産廃中間処理 ・特殊車両 ・商社	1. 札幌市の収集・運搬事業が主体だがグループ傘下に産廃処理も行う廃棄物処理総合企業 2. グループに50t/24hの産廃炉所有、余熱利用なし。余熱利用追設には興味あり 3. また主事業が収集・運搬のため、熱輸送は可能。特殊車両またはユニック車は必要か？ フォークリフトで可能なため一般車両で可と回答 4. 北海道の熱利用は歓迎、実証状況について再度説明を希望。 5. 実証完了は約3年後、コスト試算は現状化石燃料の2倍以上だが、随時連絡する、と回答。

表 3-4-15 ヒアリング結果の概要（前頁のつづき）

13	自治体		1. 56t/24h (28t/24h×2戸) BT (パッケージ発電200kW程度)と隣接下水処理場に蒸気供給している施設
	北海道	E市	2. 隣接施設ではなく遠方への熱供給は自治体として興味あり。(特に寒冷地として)
			3. 距離は?の質問に、輸送コスト・効率面で20~30kmまでか、と回答
			4. カーボンニュートラルは市にとっても課題であり実証状況を報告願うとのこと。2~3年後となるが報告すると回答
			5. 副市長から来年6~7月恵庭市花フェスタ開催のPRあり。この時期の合わせて中間報告するか
14	企業	多角事業	1. 北海道地区は需要が多い。特に冬場暖房、温室などの熱源として余熱利用は興味あり
	北海道	・運転委託	2. 熱輸送で遠隔地可能なら、JA関係温室利用が最も需要が多いと考える
		・ホテル経営	3. 実証完了はほぼ3年後の説明に、実証状況を途中で教えてほしいとの要望あり
		・ビル・機械メンテ	
15	自治体		1. 隣接するスポーツセンタ(温水プール付)で予熱利用を行っている
	滋賀県	Y市	2. 熱輸送で遠隔地可能なら、温室など需要は多い。(有名なイチゴ栽培あり)
			3. 滋賀県は企業の工場も多く、利用できる事業体はあると思う。
			4. 実証の途中状況を教えてほしい。
16	企業	多角事業	1. 寒冷地のため冬季の熱利用は多い。
	秋田県	・建設業	2. 興味はあるが熱供給の事業者が必要、秋田に来てもらって共同で事業できるか。
		・サービス業	
		・運転委託事業	

いずれの自治体・企業に於いても、本システムへの関心は高く、以下のようなコメントも戴いた。

- ・CO₂削減は自治体、企業にとっての命題。
- ・熱の貯蔵が出来ること、パイプラインなどのインフラ整備が不要なことは大きな利点。
- ・コスト、補助金の有無等が不明なので、今後も情報交換を行いたい。

3.4.6. 本システムの大規模ごみ焼却施設への適合性の検討

大規模ごみ焼却施設における化学蓄熱システムの市場ポテンシャルを、調査中である。現時点の概要を、以下に述べる。

3.4.6.1 化学蓄熱システムを大規模施設に導入する場合の留意事項

一般的に、大規模の焼却施設では、900～1,000℃程度の燃焼排ガスを、ボイラーおよびエコノマイザにより熱回収し 160～220℃程度まで減温している。ボイラーで発生した蒸気は、タービン発電や場内給湯への利用、場外施設に温水・高温水として熱供給している。これに化学蓄熱システムの導入を検討する場合は、以下 3 点に留意する。

(1) ボイラー併用による化学蓄熱量の制約

本実証のような化学蓄熱を行うときは、燃焼排ガスとの熱交換により 350℃の高温空気を作る必要がある。その結果、その空気加熱に使用された熱量分が、ボイラー吸収熱量から減少する。つまり、ボイラーでの蒸発量が減少するほか、過熱蒸気温度の低下にもつながることになり、発電量や施設全体での熱プロセスにも、影響が生じる。従って、ボイラー炉への化学蓄熱システムの適用は、ボイラー発生蒸気の量と質を確保できる範囲内の蓄熱量に制約される。

(2) 既設炉は、設備の改造が必要

既設炉の場合、送電上の制約などにより、全量発電ができずに余剰熱が生じている施設においては、さらなる熱回収率の向上を目的とした化学蓄熱システムの導入が考えられる。その場合は、高温空気加熱器の追設によるボイラー改造や、水循環への影響、メンテナンススペースの確保などの検討が必要となる。

(3) 使用温度域・熱輸送距離による従来型熱供給システムとの棲み分け

需要家側の熱用途が、近隣施設での給湯や冷暖房であれば、従来型のタービン抽気蒸気を熱源とした温水または高温水供給システムを採用する方が、エネルギー的にも効率的と考えられる。化学蓄熱は、その特性を活かした 200～250℃の温度域での熱利用や、遠距離輸送の必要がある場合、導入する意義があると考えられる。

3.4.6.2 自治体へのヒアリング結果

ある地方自治体の温暖化対策計画担当者に、本実証のコンセプトを説明した。「自治体側としては、脱炭素に活用できる革新的技術を必要としている状況である。採算面の検討に留まらず、様々な利活用状況を検討して、本システムの存在意義を見出してはどうか。」との意見が出された。「都市部は、大規模なインフラや集客施設を有するため、地方部よりも大口需要家を見つけられる可能性が高い。さらに大量の熱輸送が実現できれば、単位あたりコストを引き下げる可能性も見いだせるのではないか。」との前向きなご意見もいただいた。今後もさらなるヒアリング調査を進めて行くこととする。

3.5. 化学蓄熱材による熱輸送の実態調査

化学蓄熱材による熱輸送の実態について、前半に既往の蓄熱技術のレビューを、後半にその技術の国内適用事例を述べる。

3.5.1. 蓄熱技術

現在ある蓄熱技術について、次の3部に分けて述べる：(1) 全体概要、(2) 蓄熱技術の詳細、(3) 引用文献。

3.5.1.1 全体概要

産業革命以降、世界の平均気温は上昇を続け、大気中のCO₂濃度は産業革命以前と比較して40%も増加した。今や地球温暖化は周知の事実となり、温室効果ガス削減は人類の喫緊の課題とされている。日本も、2030年度の温室効果ガスを2013年度から46%削減する目標を掲げている。その達成のためには、各プロセスにおける省エネルギー、再生可能エネルギーの利用も重要であるが、未利用エネルギーを有効活用するシステムの構築が必要不可欠である。

現在、日本の産業界からは約 7.43×10^5 TJ/年の大量の熱が排ガスとして排出されている[1]。このうち清掃分野がおおよそ 0.58×10^5 TJ/年、約8%を占める。温度帯別に見ると、産業界全体では、100~200℃に約68%(500×10^3 GJ/年)が集中している。さらに温度域を250℃まで広げると、実に排ガス熱量の78%が含まれる。一方、清掃分野では150~250℃の範囲に83%が集中しており、次いで100~150℃(12%)、300~350℃(4%)である。もちろん、こうした未利用熱は、発電、空気予熱、給湯等として、発生箇所ではほぼ最大限有効利用された上で、排出されている。

このような大量の未利用熱を効率よく回収し、その熱エネルギーを必要時、必要箇所に移送し、これを利用する熱輸送技術・システムの構築が期待される。熱輸送には配管等を通して熱を運ぶ「オンライン熱輸送」と、配管等を通さず熱を運送する「オフライン熱輸送技術」があるが、「熱輸送」と言うときは、オフライン熱輸送を示すことが多い。

3.5.1.2 蓄熱技術の詳細

次に、蓄熱技術について、述べる。蓄熱には大きく、表 3-5-1 に示す 3 つの方式がある[2]。

- 顕熱蓄熱

顕熱蓄熱は、その簡単な原理と低コストにより古くから実用化されており、民生用にも太陽熱温水器や蓄熱型暖房機等として利用され、身近な存在である。代表的な蓄熱材は岩石、煉瓦、水等である。

- 潜熱蓄熱

潜熱蓄熱は蓄熱密度が高く、一定温度の熱出力が得られる。蓄熱材には、必要とする温度域で大きな潜熱を有する相変化が起こり、蓄熱、放熱が容易で、かつ化学的に安全、安定で安価なものが望ましい。代表的な蓄熱材はパラフィン、脂肪酸、アルコール、水和塩等である。

- 化学蓄熱

化学蓄熱は、潜熱蓄熱よりもさらに蓄熱密度が高い。所定の温度域において可逆な化学反応もしくは吸着が起こり、高温側で蓄熱、低温側で放熱が進む。ただし、仕組みが顕熱蓄熱、潜熱蓄熱と比較して複雑であり、適切な反応の制御が要求される。化学反応には水和塩や金属水酸化物の脱水反応、金属炭酸化物の脱炭酸反応、酸化還元反応等様々なものがある。反応物、反応生成物はともに化学的に安全、安定で安価なものが望ましい。

以下、潜熱蓄熱と化学蓄熱について述べる。

表 3-5-1 主な蓄熱方式[2]

蓄熱方式	顕熱蓄熱	潜熱蓄熱	化学蓄熱
蓄熱方法	物質の比熱と温度差を利用して蓄熱	物質の固液相変化の潜熱を利用して蓄熱(固→液のとき蓄熱, 液→固のとき放熱)	反応媒体と蓄熱材が接触したときの可逆的な化学反応の反応熱を蓄熱。吸着と化学反応の 2 タイプあり
蓄熱密度	低	高密度 潜熱は比熱に比して 10 倍以上大きい	超高密度
主な蓄熱材	固体蓄熱材：煉瓦, 土壌等の非金属系, 鋼, MgO, 熔融塩等の金属系 液体蓄熱材：水, 有機油, ブライン, 液体金属等 気体蓄熱材：高温高圧蒸気, 高温ガス	無機系固液相変化：氷 - 水 水和塩：Na ₂ SO ₄ ・10H ₂ O, CH ₃ COONa・3 H ₂ O 等 単純塩：LiH, LiF, NaOH 等 熔融共晶塩：NaOH・NaNO ₃ , NaCl・KCl・MgCl ₂ 等 有機系固液相変化：パラフィン, ワックス (n-デカン等) 脂肪酸類：カプリル酸, ステアリン酸, 高密度ポリエチレン, 尿素等 有機系固体の転移熱：ペンタエリスリトール等 気液相変化：蒸気アキュムレータ等 固気相変化：ドライアイスの昇華熱	水和物の水和・分解反応： $\text{CaO} + \text{H}_2\text{O} = \text{Ca(OH)}_2$ $\text{MgO} + \text{H}_2\text{O} = \text{Mg(OH)}_2$ 金属水素化合物の生成反応： $\text{MgH}_2 \rightarrow \text{Mg} + \text{H}_2$ 酸化還元反応 等
特徴	長期貯蔵不可 短い輸送距離 実用済み	長期貯蔵不可 短い輸送距離 実用済み 利用温度範囲が融点近傍に限定される	長期貯蔵可 長い輸送距離

◎潜熱蓄熱

潜熱蓄熱は、顕熱蓄熱と比較して蓄熱密度が高く、蓄熱プロセスが等温の相変化であるという利点を持つ。相変化は固体-固体、液体-気体、固体-液体という異なる様式で行われる。固体-固体の場合、異なる種類の結晶化形態間の遷移によって熱が蓄えられる。液体-気体の場合、潜熱は非常に大きい、相変化時の体積変化が大きいため蓄熱制御が難しい[3]。

最も普及しているのは固体-液体の相変化を利用した蓄熱で、潜熱交換時の体積変化が少なく(一般に 10%以下)、融解潜熱もかなり高い。顕熱蓄熱ではエネルギー密度が 25 kWh/m³が一般的であるのに対し、溶融プロセスでは 100 kWh/m³(例:氷)である。潜熱蓄熱材は、さまざまな技術や材料を用いて、短期、長期いずれのエネルギー貯蔵にも使用することができる。

潜熱蓄熱材に求められる要件として、適切な融点、大きな潜熱、大きな比熱、高い熱伝導率、優れた熱安定性と耐久性、小さい熱膨張、相分離や過冷却がない、不燃性かつ無害で安価と言ったことが挙げられる。

低い利用温度域では、潜熱蓄熱材としてパラフィン、脂肪酸、アルコール、エステル、水和塩が主に用いられ、空調、給湯等に広く利用されている[4]。

無機系の水和塩の固液相変化は、塩の水和/脱水反応であり、通常は融けて低水和物もしくは無水の塩になる。多くの塩水和物で、放出される晶析水が固相をすべて溶かすのに十分でないために、不均質な融解が起こり、密度差により低水和物(または無水塩)が容器の底に沈む。しかし、単位体積あたりの融解潜熱が大きい、熱伝導率が比較的高い(パラフィンのほぼ 2 倍)といった特徴から、増粘剤の添加、機械的攪拌、蓄熱材のカプセル化等の対策を用いて利用されている。

表 3-5-2 代表的な低温用潜熱蓄熱材の特徴

	有機系		無機系
蓄熱材	パラフィン	脂肪酸	水和塩
融点	≤120℃	≤100℃	≤100℃
長所	蓄・放熱が安定 過冷却しにくい 毒性、腐食性が低い 耐久性が高い	蓄・放熱が安定 過冷却しにくい 毒性、腐食性が低い	潜熱がやや大きい
短所	潜熱が小さい	潜熱が小さい	結晶化速度が遅い 過冷却しやすい 毒性、腐食性がある

利用温度が 100℃を超えて高くなってくると、蓄熱材の破損、強度低下、腐食の増加、熱伝達メカニズムの複雑化等の課題が発生するようになる。100℃を超える中高温度域においては、

金属もしくは無機塩が蓄熱材の候補となる。しかし、現在までに商用化されているとは言い難い。

金属や合金は単位体積当たりの蓄熱密度が高く、高い熱伝導率、高い安定性を有し、過冷却や体積変化は小さく、蒸気圧も低い。中高温度域における一般的な金属潜熱蓄熱材は、Al, Cu, Mg, Zn, Fe およびこれらの合金であり、特に Al や Si を多く含む合金の蓄熱密度が高い[5]。体積を考慮すべき蓄熱には有効であるが、単位重量当たりの融解潜熱が低いことが熱輸送の課題である。

無機塩は種類が多く、適用温度範囲(150-1680℃)も広く、潜熱(68-1041 kJ/kg)は高く、蒸気圧は低くて、明らかな過冷却/相分離がなく、安価であり、中高温度域用熱媒に適している。しかし、伝熱の悪さと腐食の問題があり、潜熱蓄熱材として利用するに注意が必要である。

硝酸塩とその共晶物は、通常比較的低い温度で溶融し、分解は 500℃以上で起こり、腐食性は低く、低コストで太陽熱発電の熱媒体として適している。硝酸塩と比べて、塩化物とその共晶物は融点が高く、腐食性が激しい。

炭酸塩およびその共晶物は、粘度が高く、高温で分解しやすい。フッ化物は、高融点で潜熱が大きい、700～1100℃の温度域での使用が望ましいが、深刻な過冷却と腐食の問題がある。

無機塩類は、一般的に熱伝導率が低い。その電熱促進対策として、金属粒子の添加が考えられるが、密度差による沈降や酸化劣化を防ぐために、耐食性と熱安定性に優れた SiO₂, CuO, MgO, Al₂O₃, ZnO, Fe₂O₃ 等の酸化物粒子や SiC の添加が有効である。熱伝導率が非常に高く、また比較的低密度で耐食性に優れている炭素材料も、添加材として多くの研究があり、その有効性が報告されている。

◎化学蓄熱

中高温度域での化学蓄熱では、主に(i) 金属や合金の酸化物/水酸化物、(ii) 金属/金属水素化物、(iii) 酸化物/炭酸化物の可逆反応や(iv) 酸化還元反応、(v) 金属塩化物とアンモニアの反応が利用されている。

André ら(2016) [6]は、反応ガス分圧 1atm の平衡温度と単位重量当たりの蓄熱量から、熱力学的に化学蓄熱材の候補を図 3-5-1 のように示した。この図を見ると、主な候補材は、金属の硫酸化物、炭酸化物、水酸化物、そして酸化物である。これらの候補の中から、適用温度範囲、優れた熱安定性と耐久性、小さい体積熱膨張、不腐食性、不燃性かつ無害で安価と言った条件を満足するものを選択することになる。例えば、図 3-5-1 によると、硫酸化物は蓄熱量、適用温度ともに高いが、腐食性の気体が反応に関与するという問題がある。

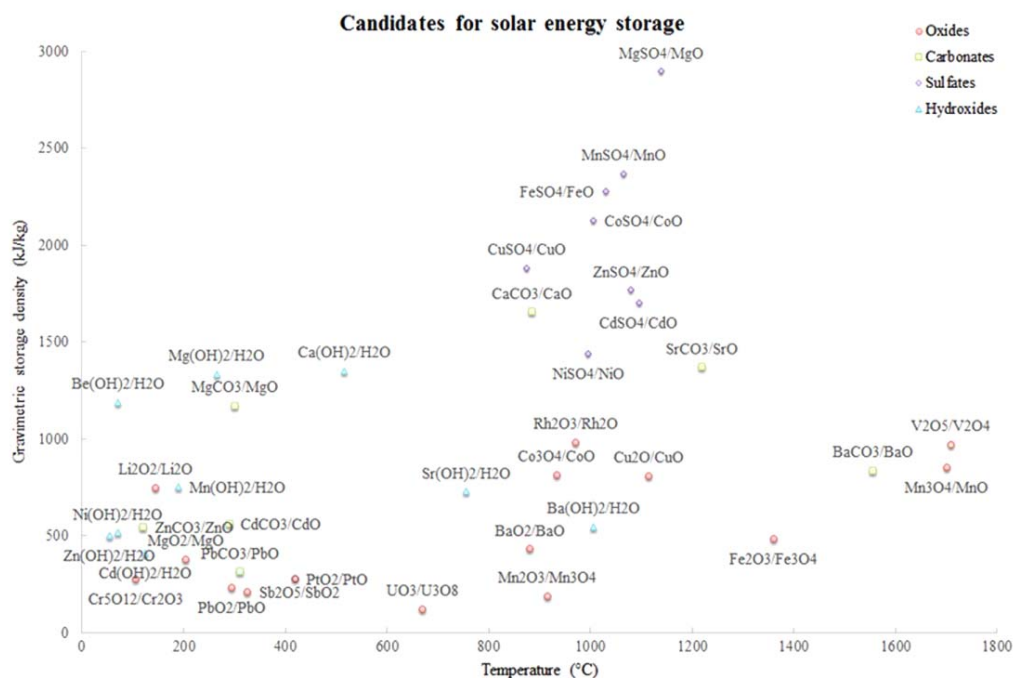


図 3-5-1 化学蓄熱の候補材[6]

(i) 金属酸化物/金属水酸化物

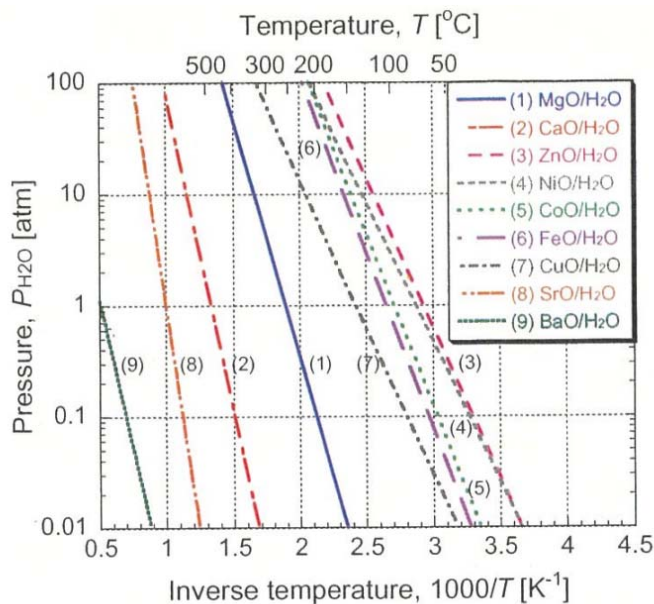
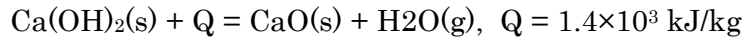


図 3-5-2 金属酸化物/金属水酸化物の平衡関係[7]

図 3-5-1 によると、 Ca(OH)_2 と Mg(OH)_2 が、比較的中温において高い蓄熱性を示すことがわかる。また、反応に関与するガスも水蒸気であり、硫酸化物や炭酸化物と比べて、毒性、腐食性の心配がないと言える。Kato ら(2016) [7]は、主な金属水酸化物の平衡水蒸気分圧と温度との関係を熱力学的に求め、これを図示した(図 3-5-2)。大気圧下 ($p_{\text{H}_2\text{O}} \leq 1\text{atm}$)での平衡反応を考えると、 Ca(OH)_2 は 500°C 以下、 Mg(OH)_2 は 300°C 以下での利用が可能である。

Ca(OH)_2 の脱水/水和の平衡反応は、次のように表される。 Q は単位重量あたりに必要な熱量(蓄熱量)である。



大気圧下において、 Ca(OH)_2 の脱水反応は450℃以上の比較的高温域で起こる。この反応に関しては早くから、水蒸気圧、温度や反応プロセス、ならびに他の金属の水酸化物や金属粒子の添加の影響を調べた多くの研究[8-15]があり、化学蓄熱に関してもっとも知られている反応である。

Schmidt ら(2014) [11]は、間接操作型反応炉で、およそ 20kg の Ca(OH)_2 を用いて、450℃での脱水と約 550℃での水和反応を繰り返した。10 回の繰り返し反応後の転換率は77%で、取り扱い中の炭化が影響したと報告している。Schaube ら(2012) [10]は、ラボスケールで100回以上の Ca(OH)_2 の脱水/水和反応を繰り返し、水蒸気分圧 1 bar(およそ 1 atm)、505℃における反応エンタルピーは、104.4 kJ/mol(= 1.41 × 10³ kJ/kg)であった。

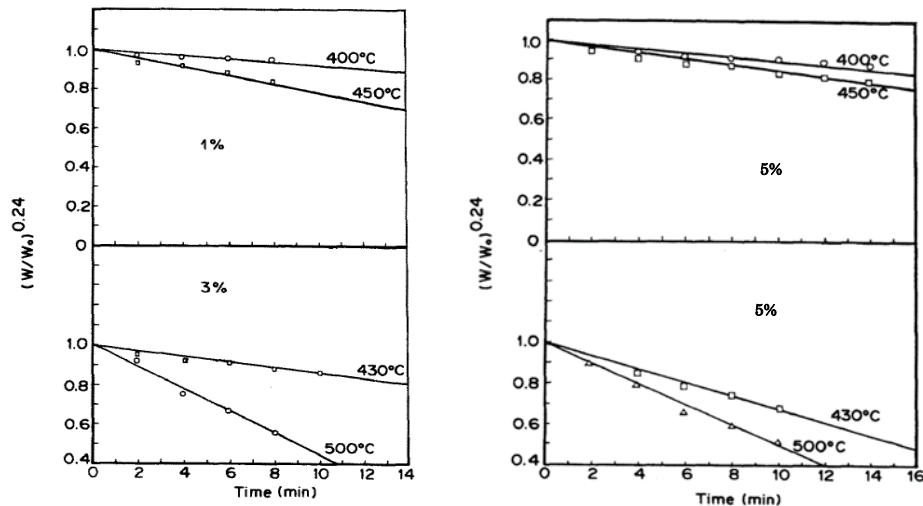
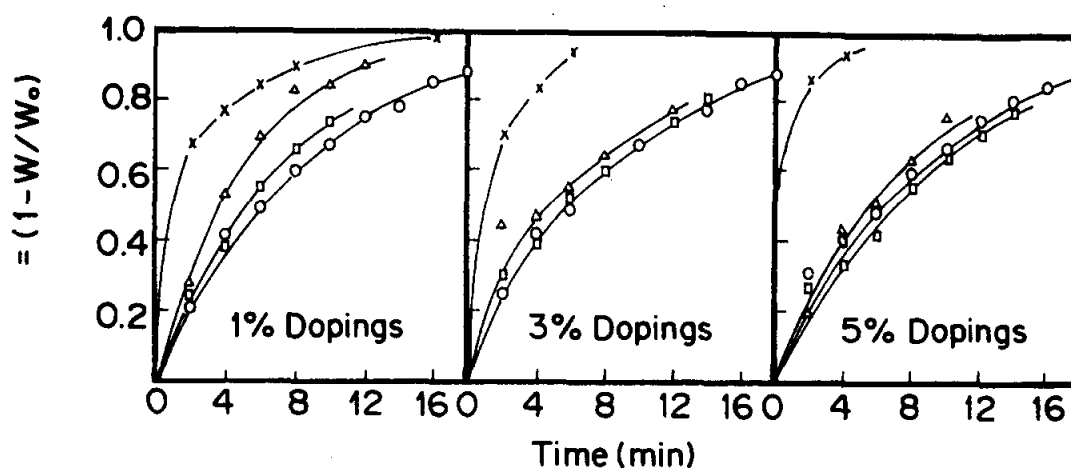


図 3-5-3 Ni(OH)_2 添加時の Ca(OH)_2 の脱水反応挙動[15]

Murthy ら(1986) [13]の研究によると、 Ni(OH)_2 , Zn(OH)_2 , Al(OH)_3 は、 Ca(OH)_2 の脱水速度を大きくするのみならず、脱水温度を下げる効果がある。図 3-5-3 は、 Ni(OH)_2 を添加した際の Ca(OH)_2 の脱水反応挙動を示したものである。これを見ると、5%添加時に430℃で最も効果がある。他の温度では、必ずしも添加量が多いほど反応速度が大きくなる訳ではない。400℃でも脱水が進んでいるが、15 分後でも重量比で 8 割に到達していない。また、金属粒子では Al と Zn の添加が、450℃における Ca(OH)_2 の脱水速度を大きくした。図 3-5-4 は Al, Zn, Ni の添加率を 1, 3, 5wt%と変化させた場合の重量変化を、Index で示したものである。特に Al の添加効果が大きいことがわかる。Fujii ら(1989) [14]は、Cu の添加は効果がなかったと報告している。



Wo:初期重量, ○:Ca(OH)₂ 単体, ×:Al 添加, △:Zn 添加, □:Ni 添加

図 3-5-4 450°Cにおける Ca(OH)₂ の脱水への Al, Zn, Ni 添加の効果[15]

Shkatulov ら(2017) [15]は、KNO₃ の添加効果について調べた。その結果が、図 3-5-4 である。KNO₃ の添加量の増加とともに脱水温度が下がり、その効果は添加量 5wt%で最大である。図 3-5-5 には、KNO₃ を 5wt%添加した Ca(OH)₂ と Ca(OH)₂ 単体の脱水挙動を比較して示す。Ca(OH)₂ 単体では、脱水が進まない 370°C から 400°C まで、KNO₃ の 5wt%添加により脱水が非常に促進されることがわかる。ただし、水和反応に対しては、これほどの効果はない。

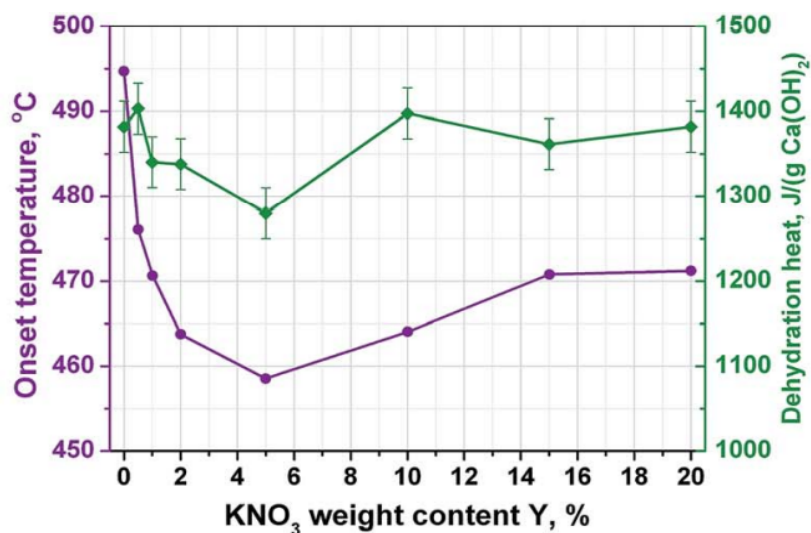
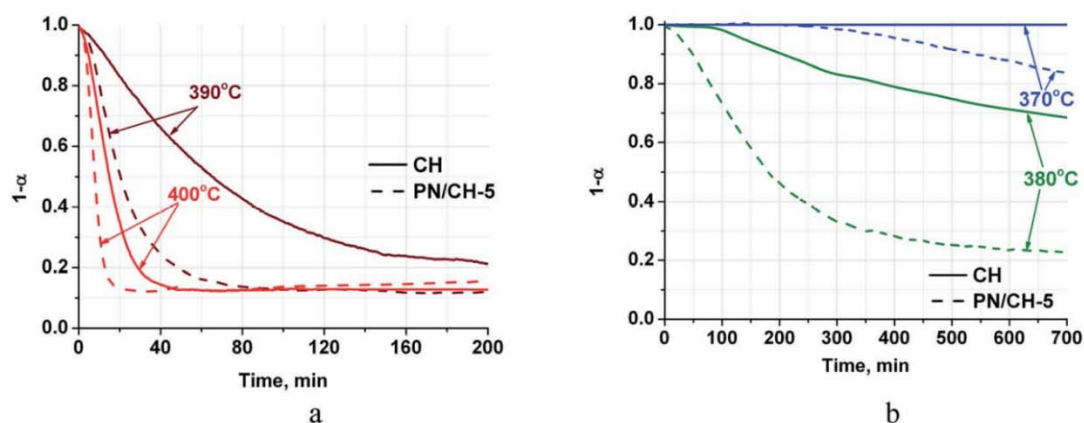


図 3-5-5 Ca(OH)₂ への KNO₃ 添加による脱水温度と反応熱の変化[15]



CH: $\text{Ca}(\text{OH})_2$, PN/CH-5: 5wt% KNO_3 添加 $\text{Ca}(\text{OH})_2$

図 3-5-6 脱水反応曲線(a: $T=390\text{--}400^\circ\text{C}$, b: $T=370\text{--}380^\circ\text{C}$, $p_{\text{H}_2\text{O}} = 23\text{mbar}$)[15]

$\text{Mg}(\text{OH})_2$ の脱水/水和の平衡反応は、次式で表される。

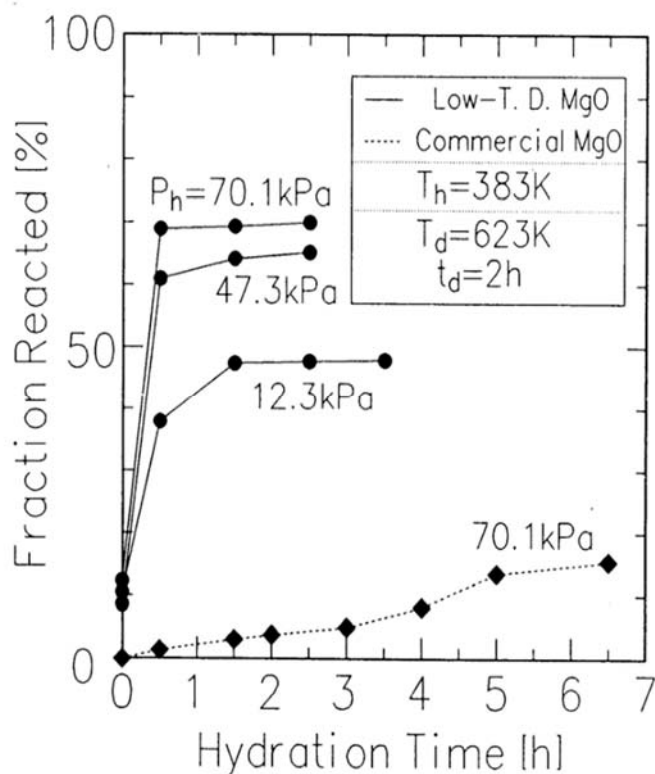
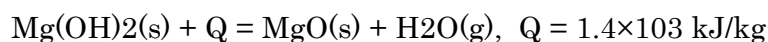


図 3-5-7 脱水条件の異なる MgO の反応活性[17]

Ervin (1977) [16] は、 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ と $\text{Ca}(\text{OH})_2$ について、それぞれ 500 回と 211 回の繰り返し反応実験を行った。その結果、 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ の脱水/水和能力は、最初の 40 回で 7 割程度減少するが、その後は安定した。脱水/水和の反応速度に大きな変化は見られなかった。 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ は、より安定しており、蓄熱能力はほぼ変わらないが、反応速度は徐々に減少し、190 回を超えてから安定した。

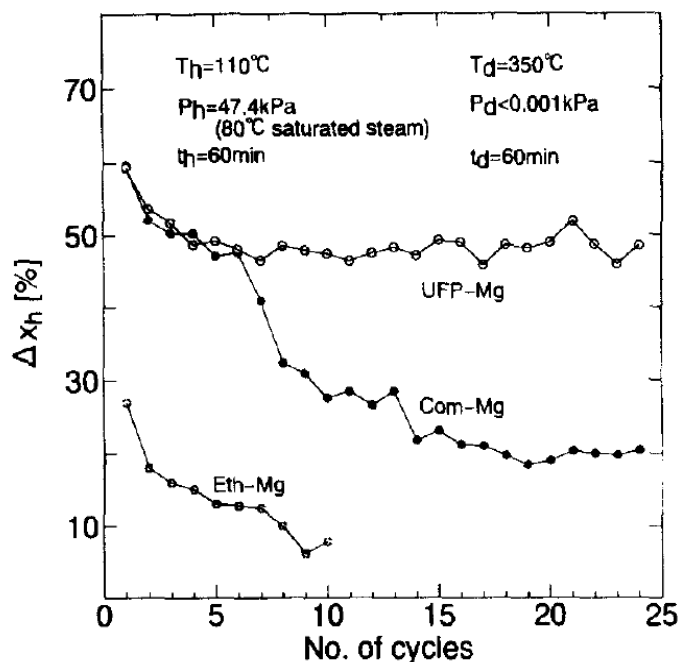
加藤ら(1993) [17] および Kato ら(1996) は、通常 700°C 以上の高温で $\text{Mg}(\text{OH})_2$ を脱水し製造される市販の MgO と、 350°C 以下で低温脱水した MgO の水和

反応を比較した(図 3-5-7)。図より明らかなように、製造する際の脱水温度により、その反応活性が異なり、低温脱水した MgO は水和反応の活性が高いが、高温脱水された市販のものは、

同じ条件でも反応がほとんど進まなかった。更に、これは両者の比表面積の差に由来することを明らかにした。また、100~180℃において、水和反応は飽和水蒸気圧が高いほど、温度が低いほどよく進んだ。

Katoら(1998) [19]は、超微粒の MgO 粉末、一般的な $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 、 $\text{Mg}(\text{OC}_2\text{H}_5)_2$ それぞれから作成した MgO を用いて、水和/脱水の繰り返し反応性を調べた。図 3-5-8 に示すように、超微粒(5nm)の MgO 粉末から作成した蓄熱材の反応性は、最初の 5 回の反応では低下したものの、その後 19 回の反応では比較的一定に保たれ、他の材料に比べて高い耐久性と高い熱出力性能を示し、ヒートポンプに最も適した材料であった。

Ervin(1977) [16]の研究以外の繰り返し反応回数は、数百回/年に及ぶと思われる実用の回数に比べて、はるかに少なく、実証レベルの研究が待たれる。



UFP:超微粒 (5nm の MgO 粉末から製造)

Com:一般 (5 μm の MgO 粉末から製造)

Eth: $\text{Mg}(\text{OC}_2\text{H}_5)_2$ と $\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_4$ から製造

図 3-5-8 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ の脱水/水和反応の繰り返し反応性[19]

450℃以上の比較的高温の $\text{CaO}/\text{Ca}(\text{OH})_2$ 反応と比べると、 $\text{MgO}/\text{Mg}(\text{OH})_2$ 反応は 200-400℃の典型的な排ガスの温度範囲で蓄熱が可能である。

$\text{Mg}(\text{OH})_2$ や $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の熱伝導率は低く、これがシステム全体の熱伝達を阻害している。 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ を一方向から加熱した場合、加熱表面近傍の粒子のみが温度上昇、分解し、層内部の粒子は分解しなかったとの報告もある[20]。そのため、これらの材料を用いた化学蓄熱システムには、効果的な伝熱促進対策が必要である。さらに、可逆反応を繰り返すうちに凝集や焼結により、蓄熱性能が劣化することがある。そのため、他の物質を添加したり、複合化合物を形成することで、 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ の蓄熱材としての反応性や繰り返し反応の安定性を向上させるい

くつかの研究が行われてきた。

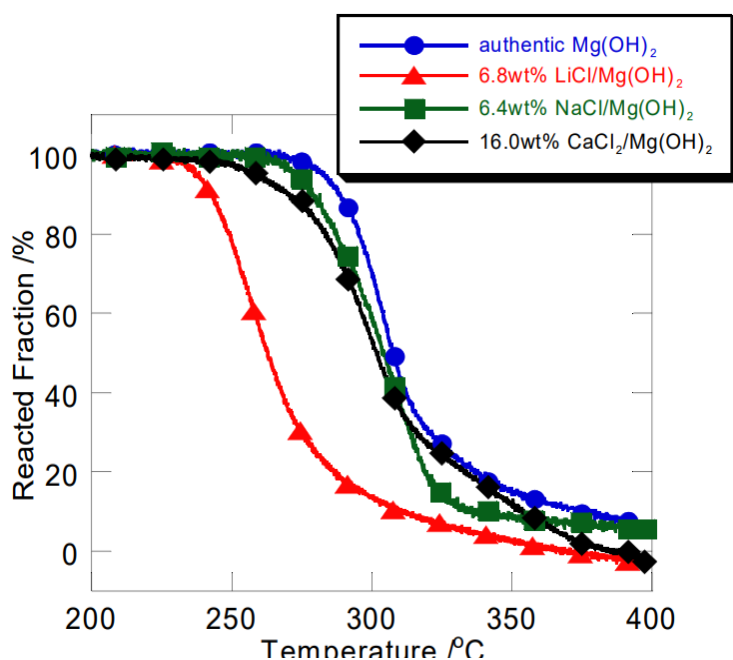
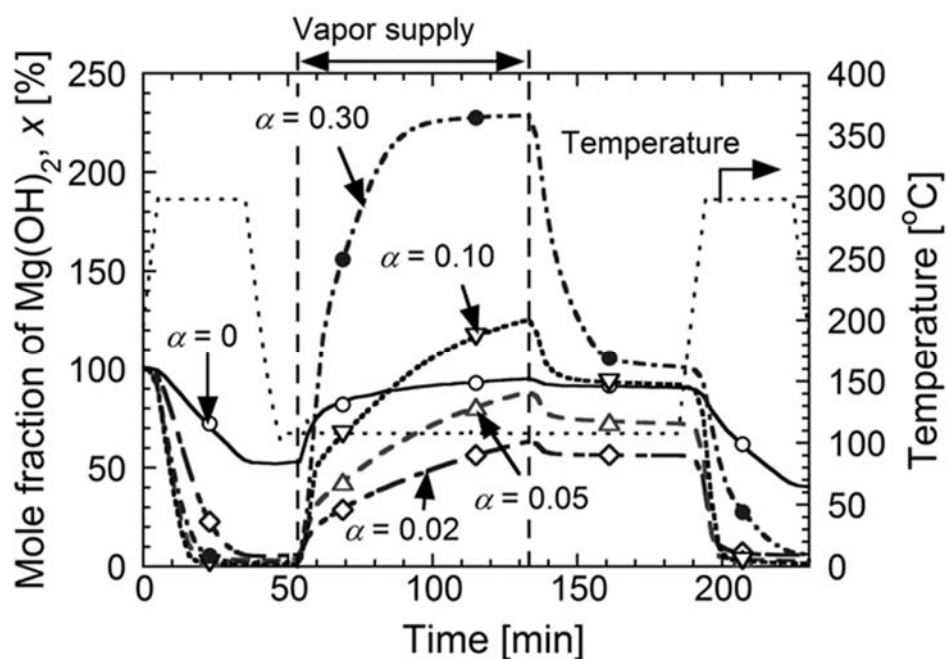


図 3-5-9 金属塩添加による $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 脱水反応温度の低下[21]

Ryu ら(2008) [21]は、図 3-5-9 に示すとおり、6.8wt%LiCl、6.4wt%NaCl、16.0wt% CaCl_2 を $\text{Mg}(\text{OH})_2$ に添加すると、その脱水開始温度が 277°C から、それぞれ 233°C 、 267°C 、 271°C に下がることを見出した。また、6.8wt%LiCl を添加した場合の 280°C での蓄熱量は、100wt% $\text{Mg}(\text{OH})_2$ の 11 倍に達した。これは、 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ の分解反応の活性化エネルギーを減少するとともに、高い水分吸着力を有するためと考えられる。Ishitobi ら(2012) [22]は、LiCl をモル分率

で 0.1 添加した $\text{Mg}(\text{OH})_2$ を用いて、 250°C での脱水と 110°C での水和を繰り返し、その耐久性を調べた。その結果、105 回の繰り返し反応で、 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 表面の LiCl 性状が変わり、放熱能力は、 $1.25 \times 10^3 \text{ kJ/kg}$ から 986 kJ/kg へと 21.1%減少したと報告している。また、Ishitobi ら(2013) [23]は、 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ の脱水/水和反応に及ぼす LiCl の添加量、温度、水蒸気圧の影響を調べた。その結果、水和の変換率は、LiCl 添加量が高いほど、水蒸気圧が高いほど、または水和温度が低いほど、熱出力密度が増加した。図 3-5-10 は、LiCl の添加量の影響を示す。



α : LiCl の添加率 (モル分率)

図 3-5-10 LiCl/Mg(OH)₂ の脱水/水和曲線 ($p_{H_2O} = 57.8 \text{ kPa}$) [23]

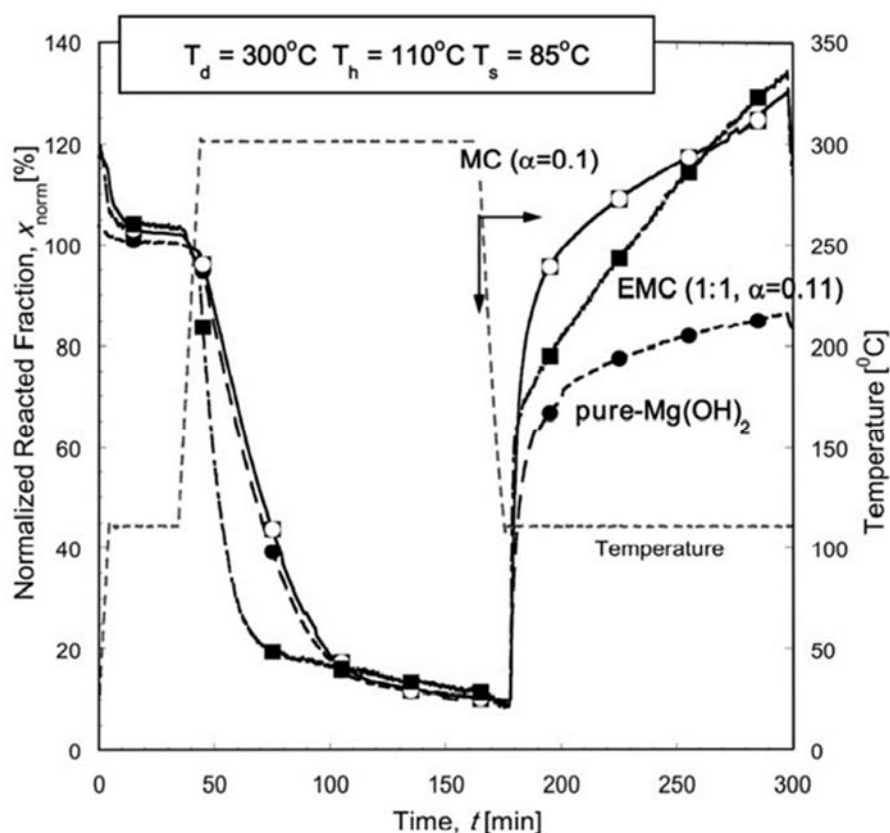
Shkatulov ら(2018) [24] は、Mg(OH)₂ への LiNO₃ 添加により、脱水開始温度が 76°C 低下したと報告した。これは、従来の報告の中で最大の温度低下である。さらに、Shkatulov ら(2019) [25] は、10 回の脱水/水和反応を繰り返して、この蓄熱材が有用であることを確認した。

他に、Ni(OH)₂ を添加すると、Mg(OH)₂ との質量比で分解温度が変化し、純粋な Mg(OH)₂ では脱水・蓄熱ができない約 200-300°C での蓄熱を可能にするという Kato ら(2009) [26] の報告がある。

熱伝導率を高める対策としては、膨張黒鉛の混合、圧密が有効である。Mg(OH)₂ にバーミキュライトや膨張黒鉛を混合、あるいは混合・圧縮、ペレットに成形することで、熱伝導率だけでなく、脱水・水和の反応性も向上したとの報告がある[27-32]。しかし、Mg(OH)₂ と膨張黒鉛との相溶性が弱いために、繰り返し反応に対する耐久性が弱い。この弱点を補うために、Mastronardo ら(2016) [33]、Mastronardo ら(2016) [34] は、蒸着-沈殿法で膨張黒鉛の表面に Mg(OH)₂ を蒸着することで相溶性を高め、単に混合したものよりも高い蓄熱性能、反応速度と耐久性を有し、ペレットへの成形性も高いハイブリッド材料を開発した。

Kim ら(2011) [28] は、Mg(OH)₂ に金属塩 (CaCl₂) 単独 (MC)、あるいは膨張黒鉛と CaCl₂ を混合 (EMC) した蓄熱材の脱水/水和挙動を調べた。その結果が図 3-5-11 である。図より、CaCl₂ のみの添加では脱水速度に影響を与えないが、そこに膨張黒鉛を加えた EMC では脱水速度が明らかに大きいことが分かる。これは、膨張黒鉛による熱伝導性と拡散性の向上が寄与していることによると考えられる。水和反応においては、初期段階では CaCl₂ のみ添加した MC の方が水和が促進されるが、最終的な転換率は EMC が最も高くなる。これには、

CaCl_2 の体積変化が影響していると考えられる。



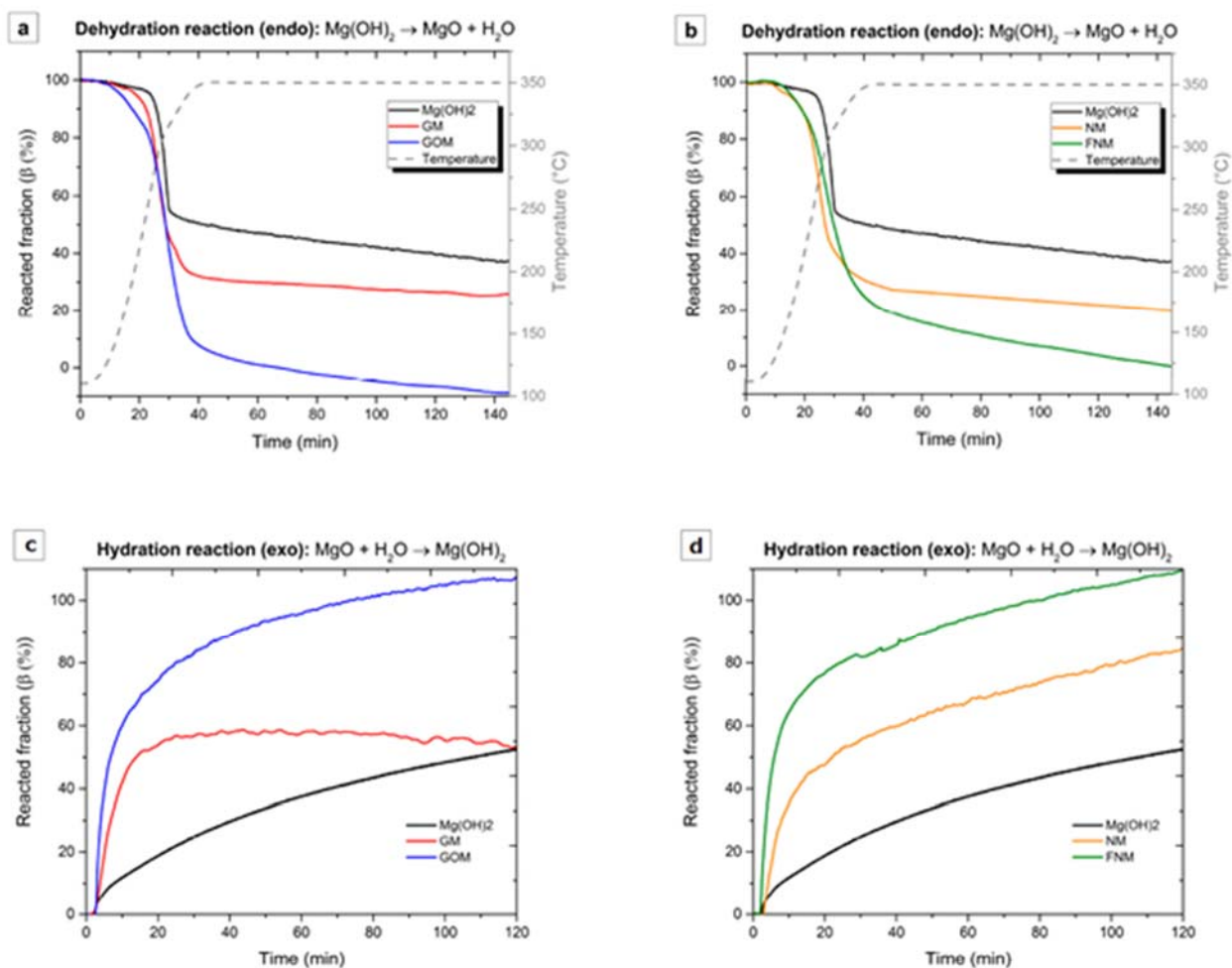
T_d:脱水温度, T_h:水和温度, MC:MgO+CaCl₂, α:CaCl₂/Mg(OH)₂のモル分率,

EMC:EG+Mg(OH)₂+CaCl₂ (EG:Mg(OH)₂ = 1:1, α = 0.11)

図 3-5-11 Mg(OH)₂の脱水/水和曲線:非添加、MC 添加、EMC 添加の比較 [28]

さらに Mastronardo ら(2017) [35]は、炭素質表面に酸素を含む官能基を形成することで、炭素と Mg(OH)₂ との親和性および蓄熱材の水蒸気との親和性も高めた膨張黒鉛 (EG) や、多孔質のカーボンナノチューブ (CNT) を用いたハイブリッド複合材料を開発した。このハイブリッド複合材料は、Mg(OH)₂ を 30% 程度しか含有していないにもかかわらず、純粋な Mg(OH)₂ 以上の体積蓄熱密度を有し、反応性も向上することが分かった。図 3-5-12 に、脱水/水和挙動を示す。Mg(OH)₂ 単体よりも、炭素質である EG や CNT を添加した方が、反応が促進され、表面に酸素を含む官能基を形成した酸化グラフェン (GO) や高機能 CNT は、さらに促進効果が高いことが分かる。今後、Mg(OH)₂ 含有率を高めた場合の性能、繰り返し反応の安定性の調査が期待される。

Piperopoulos ら(2018) [36]は、分散・湾曲した CNT (SN) と束状で直管の CNT (BN) の 2 種類の CNT を用いたハイブリッド複合材を作製し、反応特性を調べた。その結果、SN の場合は Mg(OH)₂ 粒子は CNT 中に均一に分散しており、蓄熱/放熱量は Mg(OH)₂ 単体よりも優れているが、BN では Mg(OH)₂ 粒子は密に凝集してしまい、蓄熱/放熱量は Mg(OH)₂ 単体より劣ることが分かった。



Sample Code	Carbon Type	Mg(OH) ₂ Load ($W_{\text{Mg}(\text{OH})_2}$ (wt %))	Density (ρ (kg/m ³))
Mg(OH) ₂	-	100	350
GM	EG	33.4	150
GOM	GO	34.7	423
NM	CNTs	35.5	207
FNM	F-CNTs	31.0	765

EG:膨張黒鉛, GO:酸化グラフェン, CNTs:カーボンナノチューブ, F-CNTs:高機能 CNT

図 3-5-12 ハイブリッド複合材の脱水/水和反応曲線[35]

Myagmarjav ら(2014) [37]は、 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ に LiBr と膨張黒鉛を混ぜた複合材 (EML) を開発した。この蓄熱材の脱水/水和挙動を、図 3-5-13 に示す。図 3-5-13(a)によると、240℃における $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 単体の脱水と比較して、EML は 200℃でも反応が促進されることが分かる。図 3-5-13(b)を見ると、EML は 110 ~ 200℃の範囲で、温度が低いほど水和反応が早くなる。

齋藤ら(2020) [38]は、クエン酸化合物を添加した $\text{Mg}(\text{OH})_2$ の反応性について調べた。その結果、添加した 3 種類のクエン酸化合物の中では、 $\text{C}_6\text{H}_5\text{Na}_3\text{O}_7 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ が、反応性向上に最も効果的であることが分かった。また、その効果は 2 回目の反応において向上する。これは、 $\text{C}_6\text{H}_5\text{Na}_3\text{O}_7 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ が 300℃の脱水温度で熱分解するためと考えられる。 $\text{C}_6\text{H}_5\text{Na}_3\text{O}_7 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$

の熱分解生成物は、 Na_2CO_3 であるが、純粋な Na_2CO_3 を添加しても、脱水温度の低下は見られなかった。このため、 $\text{C}_6\text{H}_5\text{Na}_3\text{O}_7 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ を $\text{Mg}(\text{OH})_2$ に混合した際の熱分解生成物は、 $\text{C}_6\text{H}_5\text{Na}_3\text{O}_7 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 単体の場合とは異なり、この熱分解生成物が反応性の向上に寄与している可能性がある。

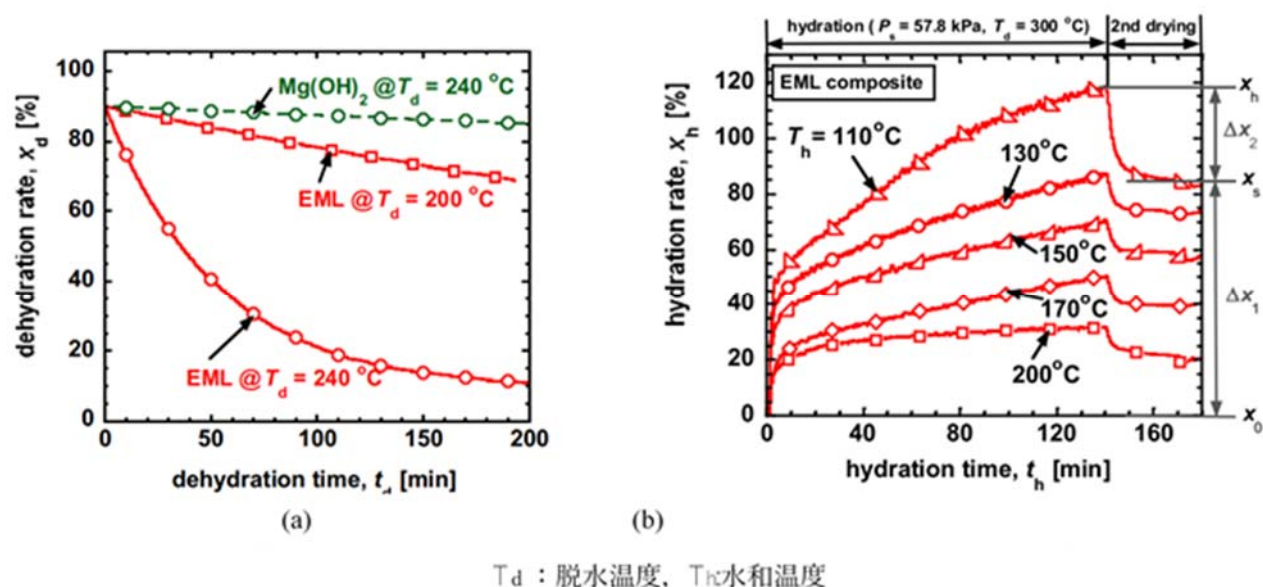


図 3-5-13 LiBr と膨張黒鉛を $\text{Mg}(\text{OH})_2$ に混合した複合材(EML)の脱水/水和挙動[37]

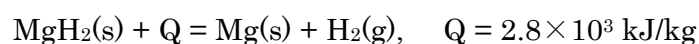
Kariya ら(2017) [39]は、ディーゼルエンジン車の排ガス中の粒子状物質除去用に多用されている SiC-ディーゼル粒子フィルター (SiC-DPF) に、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ を担持させて、反応特性を調査した。その結果、SiC-DPF は、熱伝導性と蒸気の拡散性を向上させ、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 単体よりも高い体積発熱量、高い繰り返し反応性、低い体積変化を示したと報告している。Funayama ら(2019) [40]は、SiC/Si 発泡体の細孔内に $\text{Ca}(\text{OH})_2$ を細分化させた複合材料を開発した。この複合材料の体積発熱量は、従来報告された純 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の 1.4 倍高い値を示し、繰り返し反応において高い反応性とバルク体積の維持を示した。

上述した一連の $\text{MgO}/\text{Mg}(\text{OH})_2$ 蓄熱材の開発を、時系列で表したのが表 3-5-3 である。Ervin[16]による繰り返し反応実験は 1977 年の発表で、この表からは除外した。こうして整理して見ると、金属、特に Li 塩の添加と炭素質材の添加による蓄熱材開発が進められてきたことが分かる。CaO/Ca(OH)₂ 系に SiC-DPF を適用した Kariya ら[39]の研究発表も、2017 年である。Li 塩はその毒性が懸念されるものの、 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ の表面において水分の吸着を促し、脱水開始温度を低下させる働きを持ち、炭素質材は $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 系蓄熱材の熱伝導および成形性を向上させる効果があるからと考えられる。

表 3-5-3 MgO/Mg(OH)₂ 蓄熱材の開発経緯

年	MgO/Mg(OH) ₂ 系蓄熱材の開発 【（ ）内は発表年】
1993	低温脱水MgOの反応性（1993）
⋮	
1998	超微粒MgO粉末の反応性（1998）
⋮	
2007	Ni(OH) ₂ , Co(OH) ₂ の添加（2007）
2008	金属塩（LiCl他）の添加（2008）
2009	金属水酸化物（Ni(OH) ₂ 他）の添加（2009）
2010	
2011	LiCl の添加（2011） CaCl ₂ 単独、および膨張黒鉛（EG）+ CaCl ₂ との混合（2011）
2012	LiCl 添加材の耐久性確認（2012） パーミキュライトの添加（2012）
2013	EG の添加（2013）
2014	LiBr と EG の添加（2014）
2015	
2016	カーボンナノチューブ（CNT）の添加（2016）
2017	高機能EG，高機能CNTの混合（2017）
2018	LiNO ₃ の添加（2018） 湾曲カーボンナノチューブ（CNT）の添加（2018）
2019	
2020	
2021	

(ii) 金属/金属水素化物



金属の水素化反応の中では、この反応が大きな蓄熱密度と適用温度範囲の広さで注目を集めている。Bogdanovic ら(1990) [41]によって、初めて蓄熱への適用が提案され、Ni 粉末の添加により反応が加速されることを見出した。

前述した Mg(OH)₂ に対する膨張黒鉛添加は、MgH₂ に対しても同様の効果が得られている [42]。

(iii) 酸化物/炭酸化物

金属の炭酸化反応は、主に CO₂ の回収反応として研究されている。そのため、特に CaO の炭酸化反応(CO₂ 吸着)の熱挙動に関する文献データが、数多く存在する。



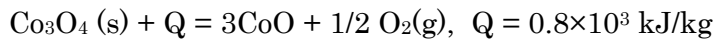
800℃以上の高温で、 CaCO_3 の分解と蓄熱が可能である。しかし、反応を複数回繰り返すと、 CaCO_3 の生成が著しく減少する[43-45]。他に、 PbO/PbCO_3 や SrO/SrCO_3 も、化学蓄熱材候補となる報告がある。

Kim ら(2019) [46], Takasu ら[47]は最近、 Li_4SiO_4 にゼオライトや K_2CO_3 を添加したペレットの炭酸化反応が 550～700℃の高温で高い蓄熱性能を示すことを見出した。

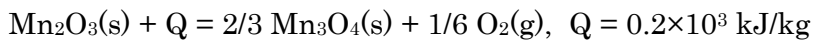
(iv) 酸化還元反応

金属の酸化還元反応は、500℃以上の高温で空気を直接使用できるのが利点であるが、反応が不可逆で、蓄熱密度が低いといった問題がある。

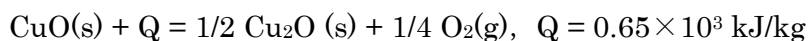
$\text{Co}_3\text{O}_4/\text{CoO}$ は、最も多く研究された金属酸化物の還元反応の1つである。



900℃以上の高温で良好な可逆性を示すが、すぐに焼結してしまい、繰り返し反応性が良くない。また、材料費が高く、毒性の問題がある。



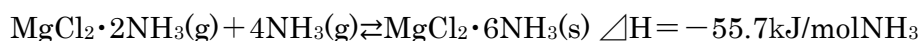
Mn_2O_3 は毒性がなく、比較的安価の材料であるが、蓄熱量が小さくほぼ不可逆である。



$\text{CuO/Cu}_2\text{O}$ は、還元温度と CuO の融点の差が 35℃程度しかなく、反応を繰り返すと大粒化が進む。また、還元速度は速いが、酸化速度は遅い。他に $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Fe}_3\text{O}_4$ は、非常に高い還元温度を有しているが、反応を繰り返すと簡単に、強く焼結してしまう。

(v) 金属塩化物とアンモニアの反応

金属塩化物とアンモニアとの反応を利用した蓄熱反応も研究されている[55]。脱離反応(吸熱)は 140℃から進行するため、100℃～200℃の排熱の利用が考えられている。



こうして見ると、ごみ焼却施設における中温度域の廃熱を有効利用して蓄熱しようとする場合、蓄熱密度、適用温度範囲や反応物、特にガス成分の毒性、腐食性等を考慮すると、金属酸化

物/水酸化物の化学蓄熱を利用するのは、妥当であると言える。特に 200~300℃の廃熱を活用するには、 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ の脱水/水和反応が適している。また、その反応性、熱伝達性を向上するための対策も、種々検討されている。ただし、実用化を考える場合、例えば Li 塩の配合や炭素質の機能化等の対策が、経済的に整合するか否かは、慎重に見極めなければならない。

蓄熱材の改良以外に、反応装置の熱伝達強化策案として、例えばフィンや金属発泡体などの熱伝達部材を反応炉床に追加する方法等がある。反応装置の熱伝達性の改善に関しては、工業分野に多くの知見があり、これを活かした実証レベルでの検証が期待される。

3.5.1.3 引用文献

- [1] 未利用熱エネルギー革新的活用技術研究組合技術開発センター, 「産業分野の排熱実態調査 報告書」(2019)
- [2] 稲場英男ら, 「高効率蓄熱技術の開発 ~材料開発・システム開発・熱輸送技術・利用技術~」(2013), S&T 出版
- [3] Sarbu, I., Sebarchievici, C., 2018, A comprehensive review of thermal energy storage. *Sustainability*, 10, 191.
- [4] Zhao, Y., Zhao, C. Y., Markides, C. N., Wang, H., Li, W., 2020, Medium-and high-temperature latent and thermochemical heat storage using metals and metallic compounds as heat storage media: A technical review. *Applied Energy*, 280, 115950.
- [5] Birchenall, C. E., Riechman, A. F., 1980, Heat storage in eutectic alloys. *Metallurgical transactions A*, 11, 1415-1420.
- [6] André, L., Abanades, S., Flamant, G., 2016, Screening of thermochemical systems based on solid-gas reversible reactions for high temperature solar thermal energy storage. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 64, 703-715.
- [7] Kato, Y., Koyama, M., Fukushima, Y., Nakagaki, T., 2016, Energy technology roadmaps of Japan. Springer, Tokyo.
- [8] Fujii, I., Tsuchiya, K., Higano, M., Yamada, J., 1985, Studies of an energy storage system by use of the reversible chemical reaction: $\text{CaO} + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{Ca}(\text{OH})_2$. *Solar Energy*, 34, 367-377.
- [9] Darkwa, K., Ianakiev, A., O'Callaghan, P. W., 2006, Modelling and simulation of adsorption process in a fluidised bed thermochemical energy reactor. *Applied Thermal Engineering*, 26, 838-845.
- [10] Schaube, F., Koch, L., Wörner, A., Müller-Steinhagen, H., 2012, A thermodynamic and kinetic study of the de-and rehydration of $\text{Ca}(\text{OH})_2$ at high H_2O partial pressures for thermo-chemical heat storage. *Thermochimica Acta*,

538, 9-20.

- [11] Schmidt, M., Szczukowski, C., Roßkopf, C., Linder, M., Wörner, A., 2014, Experimental results of a 10kW high temperature thermochemical storage reactor based on calcium hydroxide. *Applied Thermal Engineering*, 62, 553-559.
- [12] Criado, Y. A., Alonso, M., Abanades, J. C., 2014, Kinetics of the $\text{CaO}/\text{Ca}(\text{OH})_2$ hydration/dehydration reaction for thermochemical energy storage applications. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 53, 12594-12601.
- [13] Murthy, M. S., Raghavendrchar, P., Sriram, S. V., 1986, Thermal decomposition of doped calcium hydroxide for chemical energy storage. *Solar Energy*, 36, 53-62.
- [14] Fujii, I., Tsuchiya, K., Shikakura, Y., Murthy, M. S., 1989, Consideration on thermal decomposition of calcium hydroxide pellets for energy storage. *Journal of Solar Energy Engineering*, 111, 245-250
- [15] A. Shkatulov, Y. Aristov, 2017, Calcium hydroxide doped by KNO_3 as a promising candidate for thermochemical storage of solar heat. *Royal Society of Chemistry Advances*, 7, 42929-42939
- [16] Ervin, G., 1977, Solar heat storage using chemical reactions. *Journal of Solid State Chemistry*, 22, 51-61.
- [17] 加藤之貴, 山下理道, 吉澤善男, 1993, 酸化マグネシウム/水系ケミカルヒートポンプに関する研究 酸化マグネシウム水和反応の活性化. 化学工学論文集, 19, 1213-1216.
- [18] Kato, Y., Yamashita, N., Kobayashi, K., Yoshizawa, Y., 1996, Kinetic study of the hydration of magnesium oxide for a chemical heat pump. *Applied Thermal Engineering*, 16, 853-862.
- [19] Kato, Y., Kobayashi, K., Yoshizawa, Y., 1998, Durability to repetitive reaction of magnesium oxide/water reaction system for a heat pump. *Applied Thermal Engineering*, 18, 85-92.
- [20] Kanzawa, A., Arai, Y., 1981, Thermal energy storage by the chemical reaction augmentation of heat transfer and thermal decomposition in the $\text{CaO}/\text{Ca}(\text{OH})_2$ powder. *Solar Energy*, 27, 289-294.
- [21] Ryu, J., Hirano, N., Takahashi, R., Kato, Y., 2008, Dehydration behavior of metal-salt-added magnesium hydroxide as chemical heat storage media. *Chemistry Letters*, 37, 1140-1141.
- [22] Ishitobi, H., Uruma, K., Ryu, J., Kato, Y., 2011, Durability of Lithium Chloride Modified Magnesium Hydroxide on Cyclic Operation for Chemical Heat Pump. *Journal of Chemical Engineering of Japan*, 45, 58-63.
- [23] Ishitobi, H., Hirao, N., Ryu, J., Kato, Y., 2013, Evaluation of heat output densities of lithium chloride-modified magnesium hydroxide for thermochemical energy storage. *Industrial & Engineering Chemistry Research*,

52, 5321-5325.

- [24] Shkatulov, A. I., Aristov, Y., 2018, Thermochemical energy storage using LiNO_3 -doped $\text{Mg}(\text{OH})_2$: A dehydration study. *Energy Technology*, 6, 1844-1851.
- [25] Shkatulov, A., Takasu, H., Kato, Y., Aristov, Y., 2019, Thermochemical energy storage by LiNO_3 -doped $\text{Mg}(\text{OH})_2$: Rehydration study. *Journal of Energy Storage*, 22, 302-310.
- [26] Kato, Y., Takahashi, R., Sekiguchi, T., Ryu, J., 2009, Study on medium-temperature chemical heat storage using mixed hydroxides. *International Journal of Refrigeration*, 32, 661-666.
- [27] Shkatulov, A., Ryu, J., Kato, Y., Aristov, Y., 2012, Composite material “ $\text{Mg}(\text{OH})_2$ /vermiculite”: A promising new candidate for storage of middle temperature heat. *Energy*, 44, 1028-1034.
- [28] Kim, S. T., Ryu, J., Kato, Y., 2011, Reactivity enhancement of chemical materials used in packed bed reactor of chemical heat pump. *Progress in Nuclear Energy*, 53, 1027-1033.
- [29] Zamengo, M., Ryu, J., Kato, Y., 2013, Magnesium hydroxide-expanded graphite composite pellets for a packed bed reactor chemical heat pump. *Applied Thermal Engineering*, 61, 853-858.
- [30] Zamengo, M., Tomaškov, J., Ryu, J., Kato, Y., 2016, Thermal conductivity measurements of expanded graphite-magnesium hydroxide composites for packed bed reactors of chemical heat storage/pump systems. *Journal of Chemical Engineering of Japan*, 49, 261-267.
- [31] Zamengo, M., Kato, Y., 2017, Comparison of magnesium hydroxide/expanded Graphite composites for thermal energy storage in cogeneration nuclear power plants. *Energy Procedia*, 131, 119-126.
- [32] Mastronardo, E., Bonaccorsi, L., Kato, Y., Piperopoulos, E., Lanza, M., Milone, C., 2017, Strategies for the enhancement of heat storage materials performances for $\text{MgO}/\text{H}_2\text{O}/\text{Mg}(\text{OH})_2$ thermochemical storage system. *Applied Thermal Engineering*, 120, 626-634.
- [33] Mastronardo, E., Bonaccorsi, L., Kato, Y., Piperopoulos, E., Milone, C., 2016, Efficiency improvement of heat storage materials for $\text{MgO}/\text{H}_2\text{O}/\text{Mg}(\text{OH})_2$ chemical heat pumps. *Applied Energy*, 162, 31-39.
- [34] Mastronardo, E., Bonaccorsi, L., Kato, Y., Piperopoulos, E., Lanza, M., Milone, C., 2016, Thermochemical performance of carbon nanotubes based hybrid materials for $\text{MgO}/\text{H}_2\text{O}/\text{Mg}(\text{OH})_2$ chemical heat pumps. *Applied Energy*, 181, 232-243.
- [35] Mastronardo, E., Kato, Y., Bonaccorsi, L., Piperopoulos, E., Milone, C., 2017, Thermochemical storage of middle temperature wasted heat by functionalized $\text{C}/\text{Mg}(\text{OH})_2$ hybrid materials. *Energies*, 10, 70.

- [36] Piperopoulos, E., Mastronardo, E., Fazio, M., Lanza, M., Galvagno, S., Milone, C., 2018, Synthetic strategies for the enhancement of $\text{Mg}(\text{OH})_2$ thermochemical performances as heat storage material. *Energy Procedia*, 155, 269-279.
- [37] Myagmarjav, O., Ryu, J., Kato, Y., 2014, Lithium bromide-mediated reaction performance enhancement of a chemical heat-storage material for magnesium oxide/water chemical heat pumps. *Applied Thermal Engineering*, 63, 170-176.
- [38] 齋藤鴻輝, 黒沢諒, 劉醇一, 2020, 化学蓄熱のためのクエン酸化合物添加水酸化マグネシウムの脱水および水和反応性. *鉄と鋼*, 106, 549-555
- [39] Kariya, J., Kato, Y., 2017, Development of thermal energy storage material using porous silicon carbide and calcium hydroxide. *Energy Procedia*, 131, 395-406.
- [40] Funayama, S., Takasu, H., Zamengo, M., Kariya, J., Kim, S. T., Kato, Y., 2019, Composite material for high - temperature thermochemical energy storage using calcium hydroxide and ceramic foam. *Energy Storage*, 1, e53.
- [41] Bogdanović, B., Ritter, A., Spliethoff, B., 1990, Active MgH_2 -Mg Systems for Reversible Chemical Energy Storage. *Angewandte Chemie International Edition in English*, 29, 223-234.
- [42] Chaise, A., De Rango, P., Marty, P., Fruchart, D., 2010, Experimental and numerical study of a magnesium hydride tank. *International Journal of Hydrogen Energy*, 35, 6311-6322.
- [43] Wang, J., & Anthony, E. J., 2005, On the decay behavior of the CO_2 absorption capacity of CaO-based sorbents. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 44, 627-629.
- [44] Grasa, G. S., & Abanades, J. C., 2006, CO_2 capture capacity of CaO in long series of carbonation/calcination cycles. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 45, 8846-8851.
- [45] Feng, B., An, H., & Tan, E., 2007, Screening of CO_2 adsorbing materials for zero emission power generation systems. *Energy & Fuels*, 21, 426-434.
- [46] S.T.Kim, T. Nihei, C. Kurahashi, H. Hoshino, H. Takasu, Y. Kato, *Energy Storage* 1(2019),
- [47] Takasu, H., Nihei, T., Kim, S. T., Kato, Y., 2021, Additive effect on lithium silicate pellets for thermochemical energy storage. *Journal of Chemical Engineering of Japan*, 54, 195-200.
- [48] 金子純子, 吉田咲紀, 高須大輝, 加藤 之貴, 2019, 金属塩化物/アンモニア系向け化学蓄熱材料の開発. 日本機械学会 産業・化学機械と安全部門 研究発表講演会 2019 冬 講演論文集 No.19-377.

3.5.2. 国内実績

国内における化学蓄熱材の熱輸送に係る実績を、全体概要、事例紹介、引用文献に分けて、述べる。なお、事例紹介は、以下の 7 つである。

- (1) エリスリトール: 三機工業(株)
- (2) トランスヒートコンテナによるオフライン熱輸送: 奥羽クリーンテクノロジー(株)
- (3) その他の潜熱蓄熱材(PCM) : NEDO など
- (4) 無機多孔質吸湿材ハスクレイ: 高砂熱学工業(株)
- (5) カルシウム系化学蓄熱材: 日本ペイントホールディングス(株)
- (6) カルシウム系化学蓄熱材: 愛知製鋼(株)、(株)豊田中央研究所、近江鋳業(株)
- (7) 脂肪族ポリカルボン酸金属塩: 日産化学(株)

3.5.2.1 全体概要

国内の熱輸送の実績を表 3-5-4 に示す。現時点で実用化しているのは、潜熱蓄熱を利用した三機工業の「トランスヒートコンテナ」のみである。もともとは、1980 年代にドイツで開発された技術であり、潜熱蓄熱材を液体コンテナ内に貯蔵し、熱媒油を介して蓄熱・放熱を行う。当初は、酢酸ナトリウム三水和物($\text{CH}_3\text{COONa} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$)以外に、水酸化バリウム八水和物($\text{Ba}(\text{OH})_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$)や塩化マグネシウム六水和物($\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$)等も、潜熱蓄熱材の候補であった。しかし、 $\text{Ba}(\text{OH})_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ は、バリウム化合物として劇物に指定されており、 $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ は潜熱量が小さく、腐食性が高いことから、現在では利用されていない。現在利用されている潜熱蓄熱材は、 $\text{CH}_3\text{COONa} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ とエリスリトール($\text{C}_4\text{H}_{10}\text{O}_4$)である。 $\text{C}_4\text{H}_{10}\text{O}_4$ は、融点が高いことから、空調の冷房にも利用できる。熱交換も、直接接触式と間接接触式の両方を採用している。固液相変化の潜熱蓄熱材を用いる場合、直接接触式では、熱媒と蓄熱材の二液の比重差分離のために、コンテナの静置が必要となる。また、極微量で懸濁した蓄熱材が、蓄放熱を繰り返すうちに、熱媒の配管内で凝固・蓄積するという課題もある。

三機工業および神鋼環境ソリューションの熱輸送に関しては、環境パートナーシップ・CLUB(EPOC)が、病院、ホテル、プール、社員寮での熱利用を考慮した具体的なケーススタディで、経済性を検討している[49]。それによると、 CO_2 削減効果は認めるものの、経済性はマイナスであり、経済的に成り立たせるためには、蓄熱密度の向上や補助金の整備、熱輸送コストの削減(人件費の削減、熱需要量の拡大とネットワーク化、既存運行システムへの組み込み等)等が必要である。

三機工業は、アーム式コンテナ方式を採用することで、放熱時に人が張り付いていなくて済み、人件費の削減を進めていると考えられる。該社がどのような仕組みで本事業を成立させているか、参考とすべきである。

蓄熱密度を大きく向上させるために、化学蓄熱を用いた熱輸送システムの開発に取り組んだのが、高砂熱学工業ら[50-53]やトヨタ自動車ら[54, 55]である。これらは、いずれも NEDO の「戦略的省エネルギー技術革新プログラム」の中のプロジェクトとして、実証試験が行われた。

高砂熱学工業ら[50-53]は、オルトケイ酸ナトリウム(Na_4SiO_4)と塩化アルミニウム六水和物($\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$)から合成した非晶質アルミニウムケイ酸塩と低結晶性粘土を用いて、産総研が2008年に開発したハスクレイと呼ばれる無機系吸放湿材の量産技術を確立し、これを蓄熱材として、2t級の熱輸送検証試験を実施した。その結果、開発した蓄熱材は、吸放湿サイクル1200回後でも、初回の吸放湿量の4%減の性能を維持し、設計・制作した2t級の蓄熱材充填槽による日野自動車工場間の熱輸送に成功した。経済性に関する報告は、見られない。

トヨタ自動車ら[53, 54]は、 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ をLi塩で化学修飾し、約230℃で蓄熱開始、60℃飽和蒸気で水和完了できる、ペレット状の量産 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 系化学蓄熱材を開発し、新反応システムと組み合わせて、同社元町工場周辺地域に適用すれば、補助金なしでも10年程度で投資回収可能とした。

表 3-5-4 熱輸送の国内実績

事業者	三機工業		神鋼環境 ソリューション	NEDO, 高砂熱学, 石原産業, 東京電力エナジーパートナー, 森松工業, 日野自動車, 産総研, 羽村市	トヨタ自動車, 日本環境技研, タテホ化学工業
蓄熱方式	潜熱蓄熱	潜熱蓄熱	潜熱蓄熱	化学蓄熱	化学蓄熱
蓄熱材	酢酸ナトリウム三水合物 CH ₃ COONa・3H ₂ O	エリスリトール C ₄ H ₁₀ O ₄	エリスリトール C ₄ H ₁₀ O ₄	ハスクレイ Na ₄ SiO ₄ -AlCl ₃ ・6H ₂ O Base (水の化学吸着)	Mg(OH) ₂ 系 (脱水/水和反応)
蓄熱材融点・平衡温度	58℃	118℃	118℃		325℃ (純 Mg(OH) ₂ , p _{H2O} =1atm)
熱交換方式	直接/間接接触式	直接/間接接触式	直接接触式	直接接触式	直接接触式
熱媒	鉱油	鉱油	鉱油	水蒸気	水蒸気
蓄熱密度 (潜熱, 反応熱)	265 kJ/kg	340 kJ/kg	340 kJ/kg	約 1,000 kJ/kg (産総研発表) 565 kJ/kg? (585kJ/L 1.04kg/L)	1,400 kJ/kg
蓄熱側熱源温度	定格 90℃ 下限 70℃	定格 150℃ 下限 130℃		80～120℃	270 ～ 340℃
熱利用側供給温度	定格 45℃ 上限 50℃	定格 70℃ 上限 100℃			211℃
段階	実用	実用	開発中止	開発段階	開発段階

3.5.2.2 事例紹介

(1): エリスリトール【三機工業(株)】

三機工業(株)が進める、エリスリトールを蓄熱材とした熱の貯留・輸送が商業運転されていることから、その状況についてさらに調査を進めた。この熱輸送では、蓄熱材を充填したコンテナをトレーラー輸送して、熱供給元と熱需要先を結ぶ、オフライン熱輸送システムを用いる。この場合、供給元から需要先までを配管でつないで、水や蒸気などの熱媒体を圧送する方法と異なり、熱供給元と熱需要先はそれぞれ分離独立している。そのため、一方の運転変動が他方に直に影響を及ぼすことがなく、相互に、相手の事情が原因となる運転調整を常時求められることがない、という利点がある。

エンジニアリング会社の三機工業は、エリスリトール(糖アルコール)と酢酸ナトリウム三水和物(食品添加物)の2種類を潜熱蓄熱材に採用し、200℃以下の未利用排熱をオフライン熱輸送システムで活用する、トランスヒートコンテナ事業を展開している(表 3-5-6)。表 3-5-4 に、コンテナの標準性能を示す。コンテナの蓄放熱時間は、エリスリトールで 5~6 時間、酢酸ナトリウム三水和物で 8~10 時間である。コンテナ輸送は、片道 1 時間程度を目安に、10~30km の距離で行われている。

表 3-5-5 三機工業での移送用コンテナの仕様

潜熱蓄熱材	融点 融解熱	熱供給元 推奨温度	熱需要先 供給温度	コンテナ タイプ	容積 [L/台]	蓄熱量 [10 ⁹ J/台]	(A重油換算)	
							重油量 [L/台]	CO ₂ 発生量 [kg-CO ₂ /台]
エリスリトール	118℃ 340 kJ/kg	定格 150℃ (≥130℃)	定格 70℃ (≤100℃)	大容量	21,000	5.0	130	350
				標準	4,800	1.8	46	120
酢酸ナトリウム 三水和物	58℃ 230 kJ/kg	定格 90℃ (≥70℃)	定格 45℃ (≤50℃)	大容量	21,000	4.0	100	270
				標準	4,800	1.3	33	90

出典: 三機工業(株)HP

表 3-5-6 三機工業の熱輸送事業の状況

熱源側	熱利用先	設置時期	型	場所	熱源種別	商業運転	実証試験
三洋電機（株）東京製作所様 【低圧蒸気】	古河スカイ（株）深谷工場様 【蒸気ボイラ給水予熱】	2005年	従来	群馬	工場	-	●
清瀬水再生センター様汚泥焼却炉 【高温空気、低温水】	清瀬市民センター様 【暖房（温水循環）】	2006年	従来	東京	焼却施設	-	●
清瀬水再生センター様汚泥焼却炉 【高温空気】	清瀬市民センター様 【冷房（冷水循環）】	2006年	従来	東京	焼却施設	-	●
奥羽クリーンテクノロジー（株）様 産業廃棄物焼却炉 【低圧蒸気】	青森県栽培漁業センター様 【海水加温】	2008年	従来	青森	焼却施設	●	-
奥羽クリーンテクノロジー（株）様 産業廃棄物焼却炉 【低圧蒸気】	メディカルコート八戸西病院様 【給湯・暖房】	2009年	従来	青森	焼却施設	●	-
（株）日本製鋼所室壁製作所様 【低圧蒸気】	室壁工業大学 明徳寮様 【室内暖房】	2009年	従来	北海道	工場	-	●
（株）日本製鋼所室壁製作所様 【低圧蒸気】	室壁市内老人福祉施設様 【給湯】	2009年	従来	北海道	工場	-	●
中津川市環境センター様 一般廃棄物焼却炉 【温水】	中津川市民病院様 【給湯予熱・暖房】	2011年	従来	岐阜	焼却施設	-	●
（株）環境ソリューション様 産業廃棄物焼却炉 【低圧蒸気】	かりゆしカンナタラソラグーナ様 【温浴施設の海水加温】	2011年	従来	沖縄	焼却施設	●	-
三重中央開発（株）エネルギープラザ 様 産業廃棄物焼却炉 【蒸気】	ヒルホテルサンピア伊賀様 【温浴施設の給湯用熱源】	2014年	簡易	三重	焼却施設	●	●
（株）富山環境整備様 産業廃棄物焼却炉 【蒸気】	同左 【施設薬芸冷暖房用熱源】	2015年	簡易	富山	焼却施設	●	-

出典：三機工業（株）HP

次に、表 3-5-6 のうち、商業運転とされている 3 か所について、さらに詳細を調べた結果を以下に示す。

また、三機工業が提供する熱輸送用車両の仕様を表 3-5-7 に示した。

(1) 沖縄

熱源施設の排蒸気を利用して、約 28km 先の「かりゆしカンナタラソラグーナ」までオフラインで熱供給し、温浴施設の加温に利用している。使用している蓄熱材は、エリスリトール。

また、平成 21・22 年度環境省二酸化炭素排出抑制対策事業費等補助金(廃棄物処理施設における温暖化対策事業)を取得し、建設されている。



(2) 三重

エネルギープラザで発生する余剰蒸気を小型(10t)のトランスヒートコンテナに蓄熱し、産業廃棄物収集運搬車輛(脱着ボデー車)で約 10km 先の温泉宿泊施設「ヒルホテルサンピア伊賀」まで運び給湯用熱源として利用する。使用している蓄熱材は、エリスリトール。

この実証事業は、環境省の平成 23～25 年度環境省地球温暖化技術開発等事業実証事業「簡易移送型線熱蓄熱装置の開発」として採択され、三機工業(株)、三重中央開発(株)、極東開発工業(株)の 3 社で共同実施した。実証事業終了後、平成 27 年度より三重中央開発(株)の熱供給事業として再スタートしている。





(3) 富山

焼却施設で発生する余剰蒸気を小型（10t）のトランスヒートコンテナに蓄熱し、産業廃棄物収集運搬車輛（脱着ボデー車）で、同施設敷地内の約 2km 先の農業ハウスまで運び、フルーツマト栽培のための暖房・冷房用熱源として利用している。

この事業は、農林水産省の平成 25 年度次世代施設園芸導入加速化支援事業の一環で導入された。



なお、設備イニシャルは、熱回収/利用先の設備とも産廃業者が負担し、熱利用者は、熱量メータによる精算とのこと。小規模の熱利用先の場合には、ヒートコンテナによる熱で全て賄える

が、大規模の施設の場合には、全体のエネルギーの 1～2 割とのことである。2008 年に導入を開始し、耐用年数 15 年の設計で、熱がかかる時間が長いほど劣化が早くなるが、現在のところ交換等の実績はないとのこと。また、熱の回収には、ごみ処理施設の蒸気の利用が有利であるが、施設での発電が優先となり、70℃程度の機器冷水を使用せざるを得ず、温度差が小さいために長時間の蓄熱時間を要した。なお、事業概要については、三機工業 HP に掲載されており、運搬車両等の写真(写真 3-5-1)を引用した。



写真 3-5-1 蓄熱タンク、運搬車両などの写真

出典：三機工業(株)HP

表 3-5-7 熱輸送用車両の仕様

		従来型	簡易型	
			輸送仕様	単位ユニット
サイズ	重量 (t)	24t	10t	1.7t
	容量 (L)	21,000L/台	4,800L/台	1,200L/ユニット
	寸法 (m)	W2.5×H2.5×L6.0m	W2.4×H2.1×L6.0m	W2.2×H1.1×L0.7m
タンク設置方法		シャーシ上に据え置き	脱着ボデー車による積み卸し	-
関係法令	消防関連	設置許可申請 or 届出	該当しない（標準仕様の場合）	
	道路関連	通行許可（必須） 大型牽引免許	通行許可（一部） 大型免許	-

出典：三機工業(株)HP

(2):トランスヒートコンテナによるオフライン熱輸送【奥羽クリーンテクノロジー(株)】

トランスヒートコンテナによる熱のオフライン輸送としては、奥羽クリーンテクノロジー(株)が、平成 19 年度に青森県八戸市において、一般・産業廃棄物の焼却施設の余熱をトランスヒートコンテナにより水産関連施設に供給する施設を整備した。これは、水産関連施設において貯蔵された熱が放熱され、アワビ稚貝栽培のための海水加温に利用される。2 台のトランスヒートコンテナが運用され、1 日あたり 3 回(台)の熱輸送が行われている。なお、本施設整備事業は「廃棄物処理施設における温暖化対策事業」による国庫補助を受けている。本事業における熱輸送量等は、表 3-5-8 に示したとおりであり、これによる CO₂ 排出量削減効果は、次のとおり算出された

- ①供給先の燃料使用削減による CO₂ 排出削減効果: (同量の熱量を A 重油で賄ったと仮定) $44/12 \times 0.0189(\text{t} \cdot \text{C/GJ}) \times 2,710(\text{GJ/年}) \div \text{ボイラ効率 } 85\% = 221(\text{t} \cdot \text{CO}_2/\text{年})$
- ②輸送燃料(軽油)使用による CO₂ 排出量: $44/12 \times 0.0187(\text{t} \cdot \text{C/GJ}) \times 38.2\text{GJ/k}\ell \times 36\text{km/台} \times 3 \text{ 台/日} \times 180 \text{ 日/年} \div \text{燃費 } 2\text{km/}\ell = 25(\text{t} \cdot \text{CO}_2/\text{年})$
- ③熱源側設備動力(蓄熱時の電力使用)による CO₂ 排出量: $0.000441(\text{t} \cdot \text{CO}_2/\text{kWh}) \times (\text{廃熱ボイラ設備 } 67\text{kW} + \text{循環ポンプ } 5.5\text{kW}) \times \text{負荷率 } 0.7 \times 3.5\text{h/台} \times 3 \text{ 台/日} \times 180 \text{ 日/年} = 42(\text{t} \cdot \text{CO}_2/\text{年})$
- ④熱利用側設備動力(放熱時の電力使用)による CO₂ 排出量: $0.000441(\text{t} \cdot \text{CO}_2/\text{kWh}) \times \text{循環ポンプ } 11\text{kW} \times \text{負荷率 } 0.7 \times 4.7\text{h/台} \times 3 \text{ 台/日} \times 180 \text{ 日/年} = 9(\text{t} \cdot \text{CO}_2/\text{年})$

$$\text{CO}_2 \text{ 排出削減量} = \text{①} - (\text{②} + \text{③} + \text{④}) = 145\text{t} \cdot \text{CO}_2/\text{年}$$

表 3-5-8 トランスヒートコンテナにおける熱輸送(八戸市)

廃棄物の処理量等	処理量	最大200t/日
	稼働時間	24時間/日×300日
熱利用用途	アワビ稚貝栽培のための海水加温	
熱輸送量	熱容量	5.02GJ/台
	熱輸送量	15.06GJ/日(3台) 2,710GJ/年(年間180日)
	輸送距離	36km(往復)
	蓄熱に要する時間	3.5h/台
	放熱に要する時間	4.7h/台

(出典：環境省産業廃棄物課調べ)

(3):その他の潜熱蓄熱材(PCM)【NEDO など】

その他の潜熱蓄熱材としては熔融塩系がある。200℃以上のほぼ全ての温度域にわたって、PCM 候補材料が提案されている。熔融塩の融点、潜熱の一例を表 3-5-9 に示す。

表 3-5-9 PCM 候補材料としての熔融塩の性状

熔融塩	融点(℃)	潜熱(kJ/kg)
NaOH/NaNO ₂	265	313
NaOH	318	159
MgCl ₂	714	453

熔融塩系の利点は、次の 3 点である。

- ①単位重量当たりの潜熱量が大きい。
- ②比較的低コストである。
- ③使用実績、報告例が豊富である。

問題点は、次の 3 点である。

- ①熱伝導率が低い。放熱時に伝熱面で析出した場合には熱伝導率低下となる。
- ②声期待相変化時の熱膨張率が極めて大きく蓄熱槽の設計が極めて困難である。例えば、NaCl では融解時体積膨張率は 26.06%と大きく、カプセル化を考えた場合での設計も難しい。
- ③腐食性が大きいことが利用の拡大を阻む最大の課題と言われている。

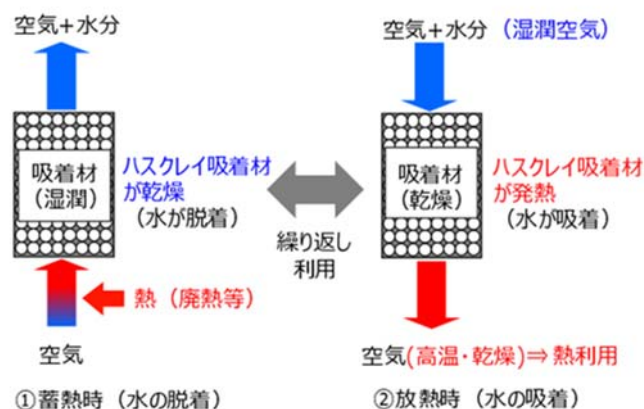
また、Mg-Zn などの合金系 PCM も報告されており、熔融塩と比較して、熱伝導率が極めて高い点が有利である以外は、利点、課題共に熔融塩と同様であり、特に腐食性が高いことから実用化の難しさが出ているようだ。

NEDO は、潜熱蓄熱材のエリスリトールを超える蓄熱密度を持つ、100～150℃の中低温域用の新規蓄熱材の探索・開発を進めている。詳細は、必要に応じて、今後調査する。

(4):無機多孔質吸湿材ハスクレイ【高砂熱学工業(株)】

高砂熱学工業らは、水の吸着熱を利用する無機多孔質吸湿材ハスクレイ(1,130kJ/kg)を採用し、実証実験を東京都羽村市にて図 3-5-14 に示すシステムにて、実証実験を行っている。

ハスクレイとは安価な工業用原料から合成される、非晶質アルミニウムケイ酸塩(HAS: Hydroxyl Aluminum Silicate)と低結晶性粘土(Clay) からの複合体の無機系吸放湿材である。蓄熱時は、ハスクレイに高温空気を供給し、ハスクレイ内の水分を脱着することで、熱を蓄え、放熱時は、乾燥したハスクレイに湿潤空気を供給し、水分を吸着させることで発熱する。本蓄熱システムは、ハスクレイが充てんされた蓄熱槽を、乾燥状態で維持すれば潜熱ロスは発生しない。また、従来の固液相変化による潜熱蓄熱に比較すると、2 倍以上の蓄熱密度(500kJ/L 以上)を実現することに加え、熱利用温度域が限定されないことなどが特長である。



戦略的省エネルギー技術革新プログラム
80℃以上の低温廃熱を用いる革新的蓄熱材料及びシステムの開発
プロジェクト実施者：高砂熱学工業株式会社 石原産業株式会社 森松工業株式会社
大塚セラミックス株式会社 日野自動車株式会社 国立研究開発法人産業技術総合研究所
プロジェクト実施期間：2015年7月～2018年3月

オフライン熱輸送型実証設備：羽村工場周辺

蓄熱サイト：日野自動車羽村工場

放熱サイト①：羽村市スイミングセンター

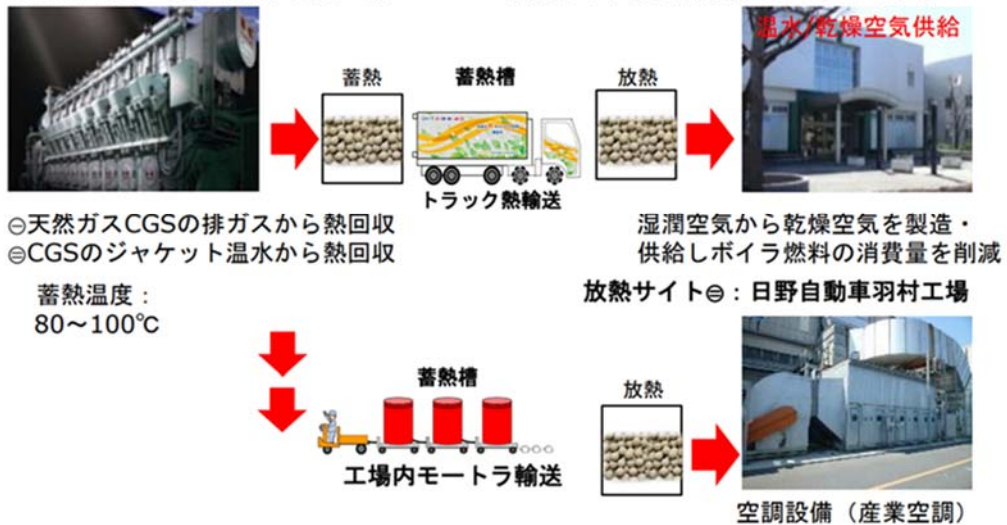


図 3-5-14 ハスクレイを用いた熱輸送システム

出典：NEDO News Release 2019.7.25

この実証実験について、羽村市スイミングセンターを管理する、羽村市教育委員会 生涯学習係にヒアリングを行った(令和 4 年 1 月 18 日)。熱供給については現在も実証事業を継続中という状況であり、事業化しているという状況ではなく、熱の購入コスト、購入量などについての回答は出来ない。このまま実証試験を続けていくということも難しいので、いずれかの時期には実用化するか判断をすることとなった。

(5):カルシウム系化学蓄熱材【日本ペイントホールディングス(株)】

日本ペイントホールディングス(株)は、カルシウム系の化学蓄熱材を開発している。詳細は、必要に応じて、今後調査する。

(6):カルシウム系化学蓄熱材【愛知製鋼(株)、(株)豊田中央研究所、近江鋳業(株)】

同じく、愛知製鋼株式会社、株式会社豊田中央研究所および近江鋳業株式会社は、温室効果ガスとしての CO_2 の排出量削減を目指し、世界一の蓄熱密度を有する反復利用可能なカルシウム系蓄熱材を開発し、それを用いて 400℃以上の工場排熱を利用できる蓄熱システムを世界で初めて工場に設置・実証したとのことである。システムの特徴については以下のとおりである(図 3-5-15)。

- ①蓄熱密度が高く反復利用できるカルシウム系蓄熱材で蓄えた熱を使いたい時に反復して利用できる。石灰を主原料として少量の粘土鉱物を分散させたものを高密度で成型・結着させてプレート状の形態とした。従来技術を遥かに凌ぐ数千回の反復利用が可能である。

②400℃以上の工場排熱を回収して蓄熱。愛知製鋼刈谷工場内に設置した。ステンレス鋼の加熱炉から発生する排熱を回収し、蓄熱装置に熱を蓄える。熱は酸洗工程の酸液を加熱するための蒸気として利用する。

③CO₂ 排出量は、燃焼式ボイラーによる蒸気利用に比べて約 80%削減でき、ランニングコスト削減にも貢献できることを試算した。

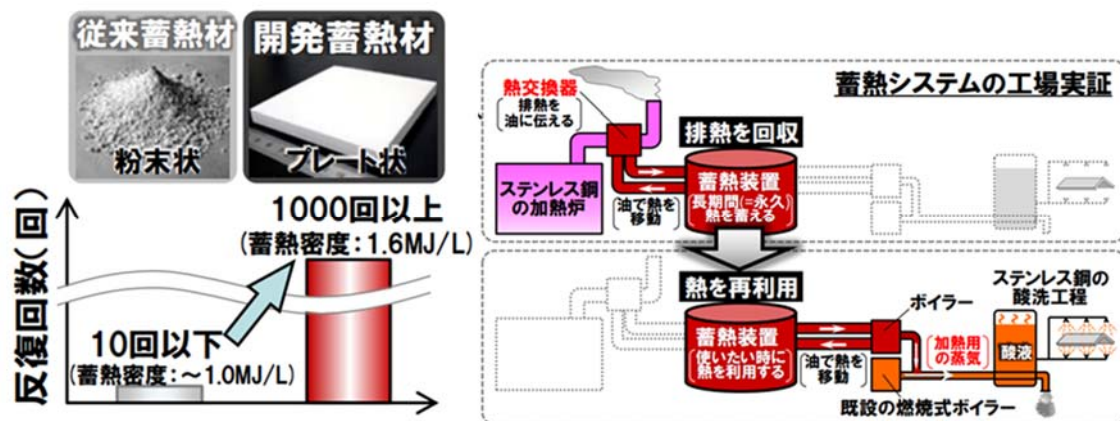


図 3-5-15 カルシウム系蓄熱材を用いた熱輸送システム

出典:愛知製鋼(株)報道資料 2019. 10. 25

ここで利用する水酸化カルシウムの分解温度は 500℃～600℃、それに対して水酸化マグネシウムは 350℃～500℃と分解温度が低く、水酸化マグネシウムに適度の水酸化リチウムを混合することで、分解温度はさらに低下する。これにより、効率的にごみ焼却施設からの排熱を回収可能としたのである。水酸化カルシウムでは、分解温度が高すぎるため、効率的な熱の回収は難しい。

(7):脂肪族ポリカルボン酸金属塩【日産化学(株)】

日産化学が化学蓄熱材の提案を行っている(図 3-5-16)。炭素原子数 2 乃至 10 の脂肪族ポリカルボン酸金属塩からなる、水蒸気(水)の吸着又は解離により発熱又は吸熱を示す化学蓄熱材とのことであるが、化学反応前後の状態、物性が現状不明であることから、本事業の検討対象からは除外した。

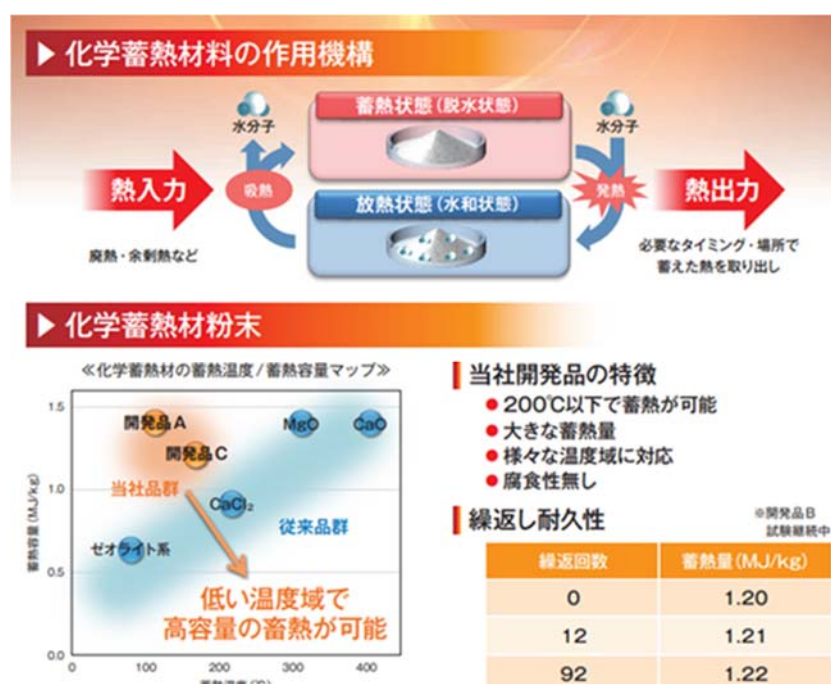


図 3-5-16 脂肪酸ポリカルボン酸金属塩蓄熱材の特徴

出典: 日産化学(株)化学蓄熱材料パンフレット

3.5.2.3 引用文献

- [49] 環境パートナーシップ・CLUB 温暖化・省エネ分科会, 「熱輸送ネットワークによる低温排熱の地域内利用研究(その2)」結果報告書<Feasibility Study 編> (2009)
- [50] 川上, 宮原, 川村, 丸毛, 山内, 鈴木, 陶, 谷野, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集 2018.9.12~14(名古屋), 141-144
- [51] 鎌田, 川上, 森本, 松田, 鈴木, 谷野, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集 2018.9.12~14(名古屋), 145-148
- [52] 川上, 鎌田, 鈴木, 中田, 大山, 谷野, 宮原, 山内, 名和, 佐藤, 鈴木, 松田, https://www.tte-net.com/lab/report/pdf/2020_14.pdf
- [53] 鈴木, <https://www.nedo.go.jp/content/100902072.pdf>
- [54] タテホ化学工業, <https://tateho.co.jp/labo/page012.html> 平成 30 年度 NEDO 戦略的省エネルギー技術革新プログラム蓄熱輸送システムでの利活用を目的とした化学蓄熱体と反応プロセスの実用化開発 (tateho.co.jp)
- [55] NEDO, <https://www.nedo.go.jp/content/100906320.pdf>

3.6. 経済性評価

本事業の経済性評価の一つとして、既往の熱供給事業(以下、「熱供給事業」という。)とのコスト比較を行うべく調査を行った。

3.6.1. 既往の熱供給事業

熱供給事業者は全国に 75 事業者があり、134 の地域で営業を行っている。熱供給事業は、熱供給事業法(昭和四十七年法律第八十八号)に従い、経済産業省への登録を行った者のみを実施できるものである。本事業と熱供給事業との大きな違いは、2 点である。1 点目は、熱供給事業が熱を導管により供給することである。2 点目は、熱供給事業の熱媒体が水又は蒸気と規定されていることであり、蓄熱材を熱媒体とするものではない。また、熱供給事業のエネルギー源は、ガス及び電力が中心で、ごみ焼却施設などの排熱利用は、極一部に留まっている。脱炭素化の潮流の観点からは、将来的な事業環境は厳しくなると予想される。

熱供給事業では、全国で年間 22,637,806GJ(令和 1 年度実績)が販売されている。これは、全国の消費熱量 17,964PJ(PJ=1015J=106GJ)=17,964,000,000GJ(図 3-6-1)の約 1.3%に相当する。一方、本事業が将来的に目標とする熱供給量は、1 施設当たり年間 6,720GJ である。全国の 164 施設から熱回収するとして、年間 1,102,080GJ の熱量回収を目論む。この数値は、熱供給事業(22,637,806GJ)の約 5%に相当する。

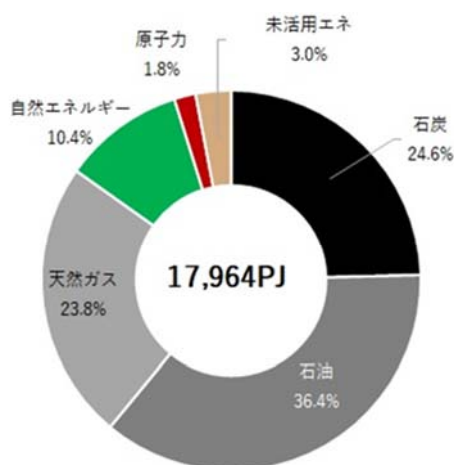


図 3-6-1 一次エネルギー供給の内訳(2020 年度)

データの出典:資源エネルギー庁「総合エネルギー統計」

まずは、熱供給事業とはどのようなシステムなのか、(株)千葉ニュータウン都心の事例を以下に示す。本事例の事業主は、(株)千葉ニュータウンセンターで、千葉県印西市大塚に拠点がある(図 3-6-2)。1993 年に事業を開始し、供給熱媒は温水及び冷水である。13 件の需要家に、年間 132,000GJ の熱を供給している。温水等の製造のための原燃料として、都市ガス、電気およびごみ焼却施設(印西クリーンセンター)の排熱を利用している。

No. (A6)	(千葉ニュータウン都心) 地区	気候区分	寒冷 (その他)
(熱供給事業・地点熱供給・建物間熱融通)		都市規模	大・(中)・小
		供給規模	超・大・中・小
		未利用エネルギー	(有)・無
低炭素ネットワーク (☆)	安全・安心ネットワーク (—)	地域活性化ネットワーク (—)	同 種別 (焼却工場廃熱)

事業主体	(株) 千葉ニュータウンセンター		
供給開始(西暦)	(1993) 年 (10) 月		
所在地	(千葉県印西市大塚)		
地区面積	(524,000) m ² (A)		
延べ床面積	(467,000) m ² (B)	(B)/(A) × 100 = (89) %	
需要案件数	業務 (13) 件	住宅	(0) 件
供給建物用途・床面積	業務 () m ²	住宅	() m ²
	商業 () m ²	その他 (ホテル)	() m ²
供給熱媒	温熱系 (温水)	冷熱系 (冷水)	
加熱・冷却能力	加熱能力 (77,685) MJ/h	冷却能力 (92,409) MJ/h	
コージェネレーション	発電能力 (—) kW	排熱利用量 (—) MJ/h	
年間販売熱量	(132,000) GJ (C)		
年間原・燃料使用量	ガス (1,115) × 1000m ³	電気 (7,484) × 1000kWh	計 (128,690) GJ (D)
	その他 (ゴミ焼却廃熱) (51,573GJ) () ()		
システムの概要	・業務施設等に必要な冷暖房用の熱源を集中・一元化し、近接する印西クリーンセンター（ゴミ焼却施設）の廃熱を有効活用。 ・電気、都市ガス、印西クリーンセンター（ゴミ焼却施設）からのゴミ焼却廃熱を熱源として利用し、水を加熱・冷却することによって、建物空調に必要な熱媒を製造。 ・需要家建物へは、冷水7℃、温水75℃を供給。 ・当地区において、住宅・業務施設・商業施設で発生した可燃ゴミは、印西クリーンセンター（ゴミ焼却施設）へ一括収集・焼却され、その焼却により発生した廃熱を、当熱供給プラント内に取り入れ、冷暖房用熱媒製造の熱源として有効活用し、再び当地区の冷暖房用熱媒を供給。 ・燃料消費に伴う大気の汚染防止や地球環境の保全および省エネルギーの推進に寄与。 ・熱源機器は、ガスボイラー、蒸気吸収式冷凍機、ターボ冷凍機、熱回収ヒートポンプ、冷水蓄熱槽、蒸気発生器（ゴミ焼却廃熱用）		
事業の成立経緯	・平成3年2月に都市計画決定、平成5年11月に熱供給を開始。 ・現在では千葉ニュータウン都心地区における業務施設・電算施設・研究所・ショッピングセンター等13社に、冷暖房・給湯用の熱の安定供給。		
事業の特徴	・環境の保全、省エネルギーの推進、都市防災、都市景観の向上を目的とした、先進都市にふさわしい安心・安全な地域熱供給を実施		
出典	・平成25年版 熱供給事業便覧 ・一般社団法人 日本熱供給事業協会ホームページ ・(株)千葉ニュータウンセンター ホームページ		

図 3-6-2 地域熱供給地区の事例詳細(事例シート)

出典:国土交通省 HP (<https://www.mlit.go.jp/common/001113135.pdf>)

システムの概略は、図 3-6-3 のとおりで、上記熱源を利用し、水を加熱・冷却することによって、顧客の建物の空調に必要なとされる熱媒(冷水 7℃、温水 75℃)を製造、配管経由で供給している。

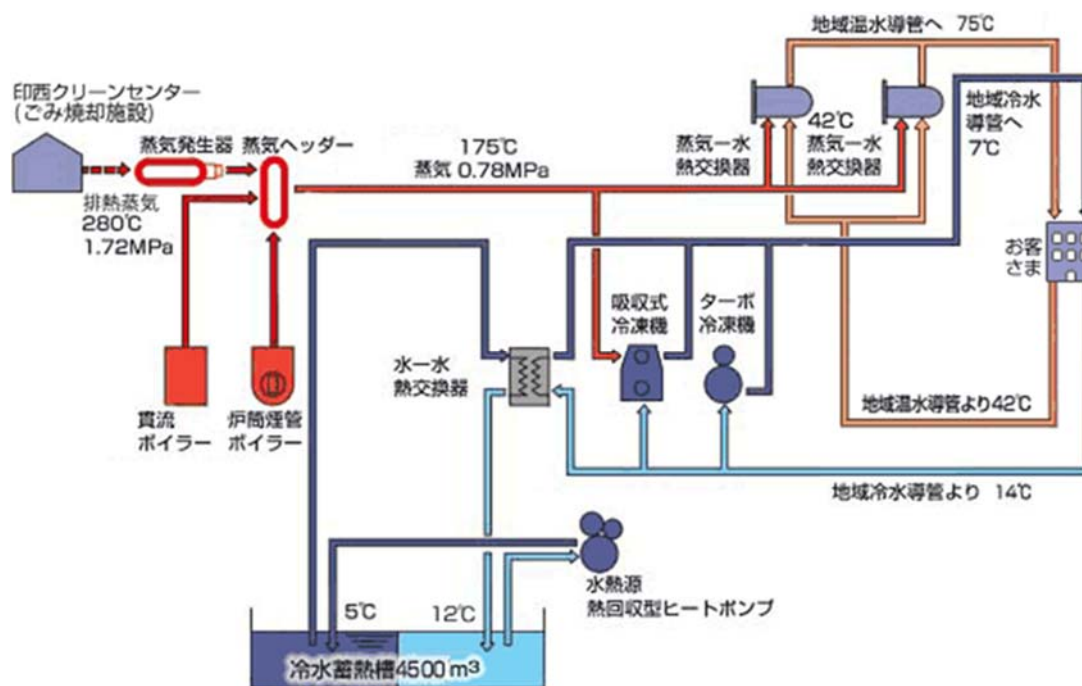


図 3-6-3 千葉ニュータウン都心熱供給システム概略

出典:(株)千葉ニュータウンセンターHP

また、ごみ焼却施設の排熱を利用したシステムのイメージは、図 3-6-4 のとおりである。即ち、ごみ焼却炉で発生した熱により、焼却炉と一体化した廃熱ボイラーで、高温蒸気がつくり出され、これが地域暖房用のほか、発電用、工場内使用などに分けられ使用される。地域暖房用の蒸気は、供給先で熱交換器によって冷やされ、温水となって清掃工場に戻り、廃熱ボイラーを循環してまた蒸気となる。このシステムで、一般家庭 40 戸から出るごみを、1 戸の暖房・給湯で使用する熱に変換することが可能である。

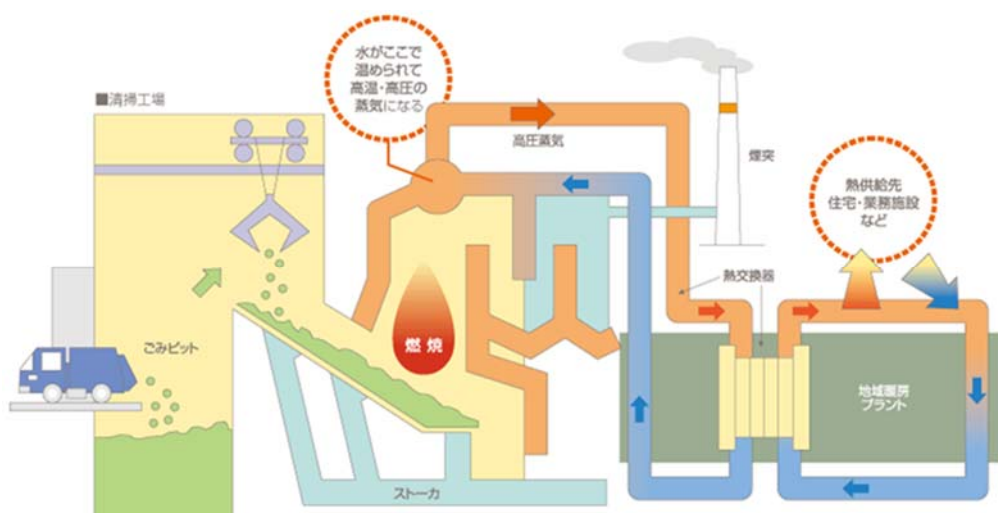


図 3-6-4 ごみ焼却施設の排熱を利用した熱供給事業システム

出典:北海道地域暖房(株)

次に、各事業者の料金事例を、表 3-6-1 に示した。熱の利用料金体系は、熱供給事業の自由化に伴い、事業者ごとに異なるが、基本料金と従量料金と呼ばれる 2 つの料金を足し合わせる構成が一般的である。基本料金は、熱の需要家が使用する熱量のピーク、すなわち単位時間あたりに使用する熱使用量のピーク値に基本単価を掛け合わせたものが月々の基本料金となり、これに従量料金、すなわちその月に実際に使用した熱量を基本単価(円/MJ)に掛け合わせたものの両者を合算したものを各月の料金とするものである。

表 3-6-1 各社の熱料金

営業地域名	事業者名	熱媒体	基本料金	従量料金
札幌市光星	北海道熱供給公社	高温水	暖房用 253.57円/MJ/h	1.663円/MJ
東京臨海副都心	東京臨海熱供給	冷水 温水	393円/MJ/h 243円/MJ/h	2.42円/MJ 2.22円/MJ
箱崎	東京都市サービス	冷水 温水	417円/MJ/h 417円/MJ/h	3.16円/MJ 3.40円/MJ
みなとみらい21中央	みなとみらい 二十一熱供給	冷水 蒸気	429円/MJ/h 250円/MJ/h	3.19円/MJ 2.31円/MJ
下川端再開発	福岡 エネルギーサービス	冷水 温水 蒸気	405円/MJ/h 275円/MJ/h 315円/MJ/h	3.10円/MJ 3.05円/MJ 2.10円/MJ

出典：(一社)日本熱供給事業協会『熱供給事業便覧 令和 2 年版』より抜粋

料金体系の考え方について、事業費は、熱供給プラントで使用するガス・電気・上下水道費用等からなる「変動費」と、プラント建設費、修繕費、人件費、租税課金、資金調達に係る資本コスト(支払利息等)等からなる「固定費」により構成されている(e.g., 図 3-6-6)。その固定費を基本料金で、変動費を従量料金として回収することを基本としており、このために各社の料金が異なる。その結果、例えば、燃料が値上がりすると、変動費が上昇するため、従量料金が値上がりし、需要家数が増加すると、1 需要家当たりの固定費が減少し、基本料金が値下がりする。図 3-6-5 に、熱料金の変動事例を示した。

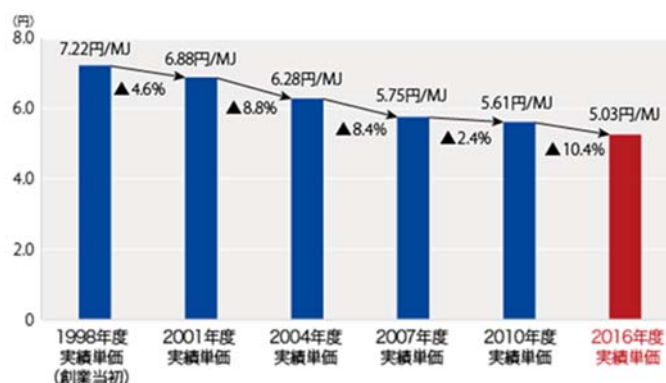


図 3-6-5 熱料金の変動事例

出典：みなとみらい 21 熱供給(株)HP

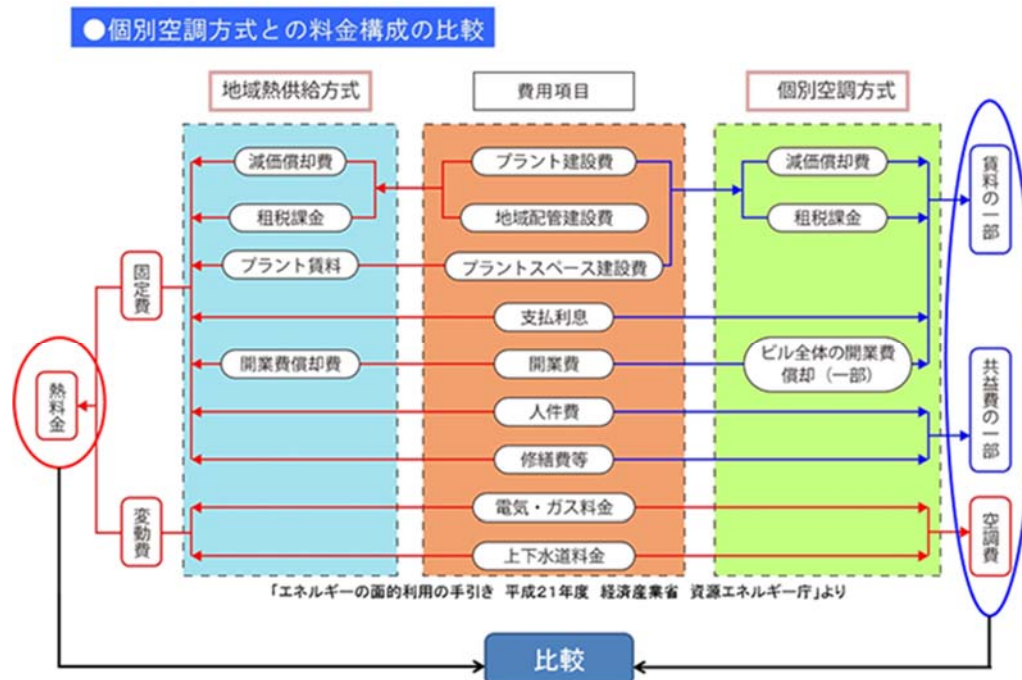


図 3-6-6 (株)立川都市センターの熱料金構成

出典:(株)立川都市センターHP

上述した熱供給事業の概要を、表 3-6-2 にまとめた。

表 3-6-2 熱供給事業の概要

項 目	内 容
事業の要件	需 要：一般の需要（導管で供給） 供給数：複数の建物 熱媒体：加熱され、若しくは冷却された水または蒸気 規 模：加熱能力21GJ/h以上
事業者数	全国で75事業者、134営業地域 （2地域ではごみ焼却施設の排熱を一部利用）（令和1年度）
原・燃料	ガス及び電力（排熱が極一部で利用）
販売熱量	全国合計：22,637,806GJ（令和1年度） ・本事業での目標：24GJ/日/施設×280日＝6,720GJ/年・施設 ・6,720GJ/施設×164施設/全国＝1,102,080GJ/全国 ・販売熱量の約5％
販売価格	基本料金：236～429円/MJ/h（営業地域で値段差あり。） 従量料金：2～5円/MJ（営業地域で値段差あり。）

3.6.2. 本システムの熱供給コスト試算

本システムで熱供給を行ったときの単位熱量当たりのコストを試算した。試算に当たっては、図 3-6-7 に示す条件を適用した。即ち、次の 5 条件を設定し、これを基に単位熱量当たりのコストを算出した結果を、表 3-6-3 に示した。

- ①熱回収施設であるごみ焼却施設のごみ処理能力を 48t/日(24t/日×2 炉)として、この施設全体から一日(24h)当たり 67GJ の熱を回収する。
- ②回収した熱は、4tトラックにて 20km 離れた 3 か所の熱利用施設に輸送する。
- ③熱利用設備の価格は、1 セット 5 千万円で、各 3 か所に設置するため 1 億 5 千万円となる。
- ④蓄熱材の運搬は 2GJ 用の蓄熱容器 34 個を準備し、熱利用施設 3 施設にそれぞれ 2～4GJ を 1 回(往復 1 時間)あたり輸送し、1 施設におよそ 20GJ を送り届ける。
- ⑤輸送車両は 4tトラックとし、年間 40 万円/台のリースとする。

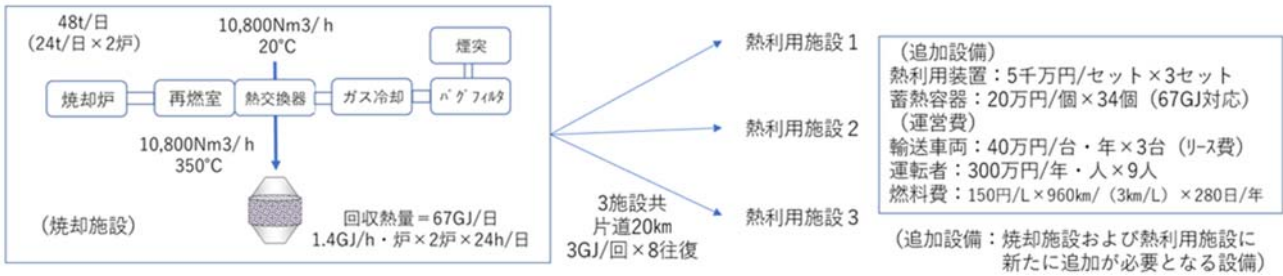


図 3-6-7 熱供給コストの試算条件

表 3-6-3 コスト試算結果

	費目	単価	個数	費用
設備費	蓄熱容器	20万円/個	34個	680万円
	放熱設備	5,000万円/セット	3セット	15,000万円
合計				15,680万円

	費目	単価	数量	年間費用
運営費	熱回収用電気代	20円/kwh	68Mwh/年	136万円
	熱利用用電気代	20円/kwh	201.6Mwh/年	403万円
	材料費その他			8,040万円
	車両リース費	40万円/台・年	3台	120万円
	運転者費用	300万円/人・年	9人	2,700万円
	燃料費	150円/L	268,800km/年	1,344万円
	メンテナンス費			600万円
合計				13,343万円

※熱回収には温水として回収する設備(18,000 千円)もあるが、本試算の設備には含めていない。

上述したコスト試算結果について、運営費のみでの単位熱量当たりのコストは7.09円/MJである(表 3-6-4)。これに設備の建設費を10年均等償却として、1年分を足し込んだ場合では、7.92円/MJである。

表 3-6-4 単位熱量当たりのコスト

	年間経費項目	年間経費 (円/年)	熱量当たりのコスト (円/MJ)
1	設備費 (10年償却) + 運営費	149,110,000	7.92
2	運営費	133,430,000	7.09

3.6.3. 熱供給価格設定と投資額回収計画

単位熱量当たりの単価(売価)を設定した上での投資設備費用の回収期間の試算を行った。熱供給費の原価(運営費のみのコスト)を7.09円/MJとした試算結果を受けて、売価を8.5円、9.0円および9.5円/MJとして試算を行った。結果は表3-6-5に示したとおりで、売価8.5円では5.1年、売価9.0円では3.9年、売価9.5円では3.2年で、設備費用が回収できる。

表 3-6-5 設備投資費用の回収に要する年月

(追加設備のすべてを補助対象とした。)

		①設備仕様事業者負担額	②補助対象経費	③総事業費
追加設備費用	(千円)	104,533 (=156,800×2/3)	156,800	156,800
投資回収年数	8.5円/MJで販売	3.4年	5.1年	5.1年
	9.0円/MJで販売	2.6年	3.9年	3.9年
	9.5円/MJで販売	2.1年	3.2年	3.2年

毎年の運営費(133,430千円)を年間回収熱量(18,816,000MJ)で賄うためには、7.1円/MJ以上の単価での販売が必要となる。

売値 (円/MJ)	年間総収入 (千円/年)	年間利益 (千円/年)
8.5	159,936	30,506
9.0	169,344	39,914
9.5	178,752	49,322

年間利益 = 年間総収入 - 運営費 (133,430千円)

(参考：I市向け焼却施設費用をベースとして設備費用を算出。)

(単位：百万円)

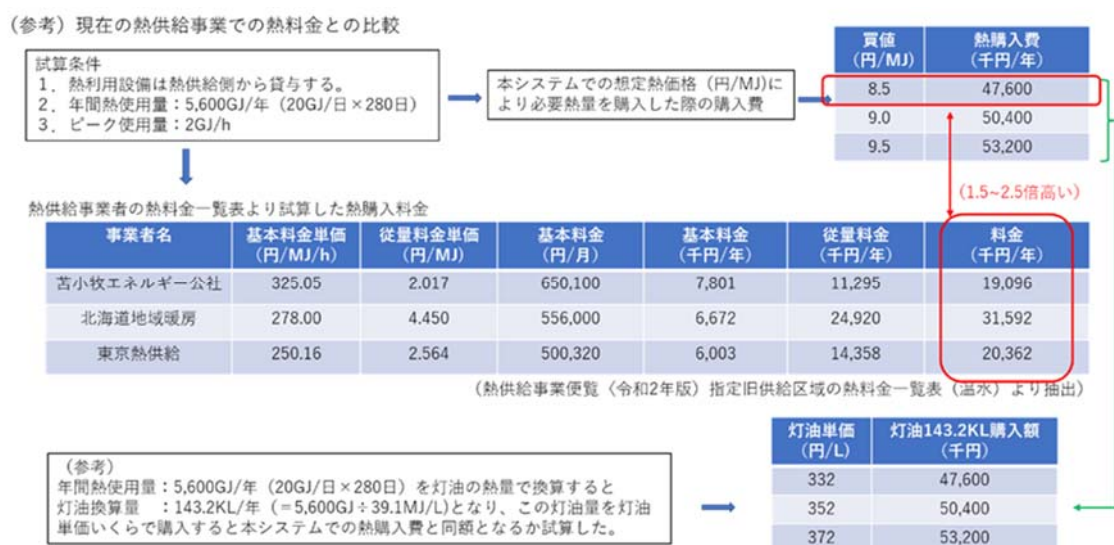
	基本設備費用	追加設備費用①	追加設備費用②	総設備費用	補助対象経費	補助金額 (1/3)
単純焼却	5,814	0	0	5,814	4,297	1,432
従来式	5,814	18	0	5,832	4,315	1,438
提案式	5,814	18	157	5,989	4,472	1,491

表3-6-5の中で、参考としてI市に納入した焼却施設の設備費用を示した。単純焼却すなわち、熱回収を行わない施設の設備費用が5,814百万円で、その施設に排ガスの一部を利用して湯として熱回収を行う場合(従来式)の追加設備費用が18百万円となる。さらに従来式の施設に本システムを追加するための費用としては157百万円が必要となる。それぞれの施設での補助対象経費および補助金額を示した。

3.6.4. 本システムと既往熱供給事業の料金比較

次に、この売価 8.5 円、9.0 円、9.5 円を、既往の熱供給事業の売価と比較し、その経済性を評価した。試算条件として、需要先の熱使用量を 1 日平均 20GJ とし、年間 280 日稼働するとして、年間 5,600GJ を使用するものとした。また、1 日 20GJ 使用の中で、1 時間のピーク使用量としては 2GJ/h と仮定した。これに従い、熱供給事業便覧に掲載の利用条件 3 事例にて、年間の利用料金の試算結果が表 3-6-6 である。

表 3-6-6 熱供給事業と本システムの熱コスト比較



すなわち、苫小牧エネルギー公社の利用料金体系では年間利用料が 10,096 千円であり、北海道地域暖房では 31,592 千円、東京熱供給では 20,362 千円となる。

一方、年間 5,600GJ の熱量を全て本システムの価格で購入したときは、売価 8.5 円で 47,600 千円となり、苫小牧エネルギー公社の 2.5 倍、北海道地域暖房の 1.5 倍の料金となる。

また、年間熱利用量 5,600GJ を灯油 (39.1MJ/L) に換算すると、灯油使用量は年間 143.2kL となる。これを、本システムで熱を購入したときの年間利用料を 143.2kL で割ると、灯油の値段としては 332 円/L~372 円/L と試算される。その価格は、ガソリンスタンドにおける灯油販売価格の 2.8~3.2 倍程度で、現在のエネルギー市場価格を大きく超えている。

しかしながら、脱炭素化社会を構築する上で、例えば現在の熱供給事業各社が熱を製造する際に発生する炭酸ガスの回収・貯留に要する費用を熱料金に上乗せするとした場合には、現状の熱料金からはかなり高くなることも明らかである。

また、化学蓄熱システムが将来汎用化される事態を想定すると、そのスケールメリットにより、蓄熱材・熱輸送システムの価格が、固定費・変動費共に大幅下落することが予想される。その下落幅は、現時点で予測不可能であるが、参考として、他製品の価格変動を、3 事例示す。

(1) 太陽電池モジュールにおいては、10 年間で生産台数が 5 倍上昇するとともに、価

格が 5 分の 1 に下落している(図 3-6-8 左)。また、半世紀間では、価格が 300 分の 1 程度に下落している(図 3-6-8 右)。

(2) コンピューター・メモリにおいては、価格が半世紀で 100 億分の 1 に下落している(図 3-6-9)。

(3) F-35 戦闘機においては、第 2 期(2010 年頃)～第 14 期(2017 年)の 10 年弱で、生産台数が 10 倍程度増加すると共に、価格が半額弱に下落している(図 3-6-10)。

従って、第 2 回検討会で有識者の加藤之貴教授からもご指摘頂いたとおり、化学蓄熱システムの経済性を、実証試験段階である現在価格で評価することは、妥当ではないと考える。

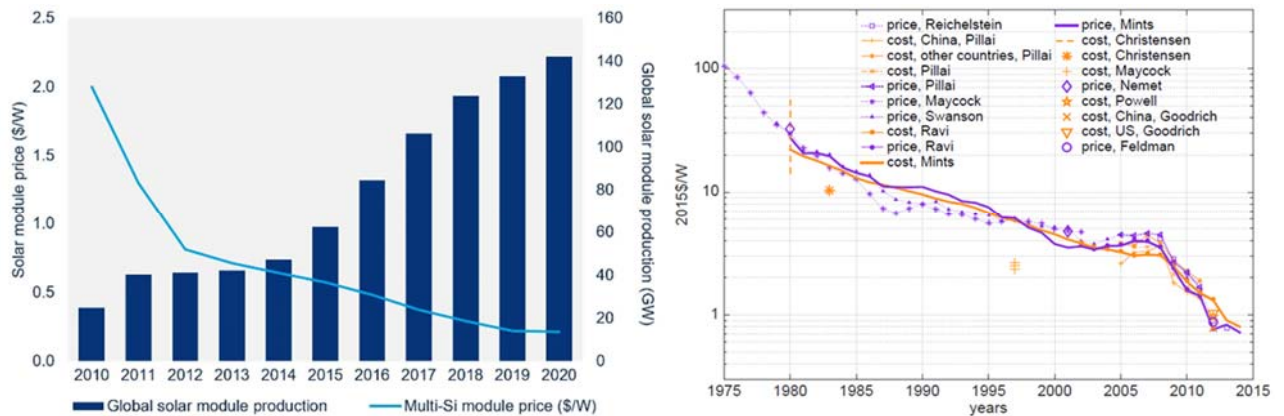


図 3-6-8 太陽電池モジュールの生産高および価格の推移 (1975～2020 年)

出典:Wood Mackenzie (左)、Kavlak *et al.*, 2018, Evaluating the causes of cost reduction in photovoltaic modules, *Energy Policy* 123, 700-710 (右)。

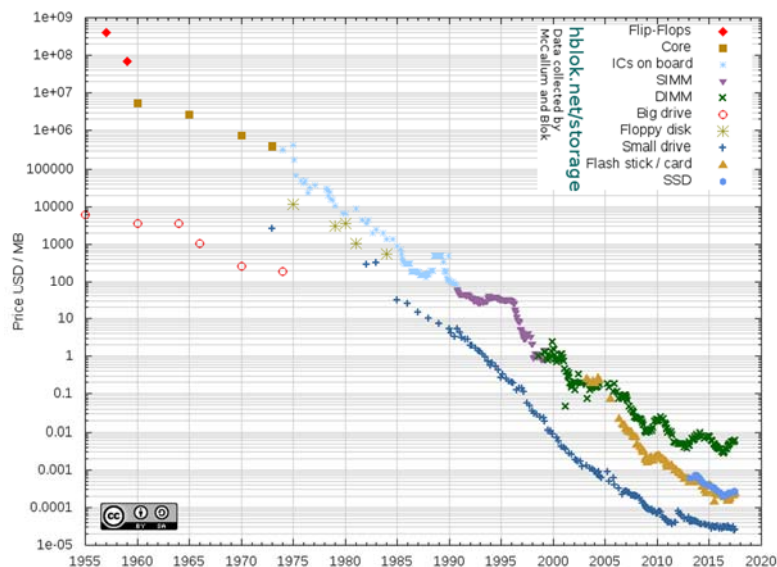


図 3-6-9 コンピューターメモリ価格の推移 (1955～2020 年)

出典:hblok.net

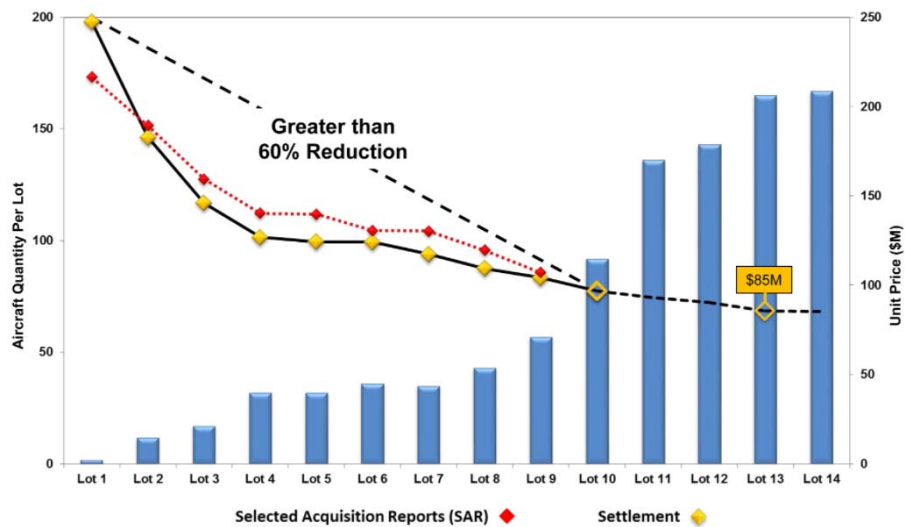


図 3-6-10 F-35 戦闘機(ロッキード・マーティン社製)における価格と生産台数の関係(第 1～14 期)。棒:生産台数(左縦軸)、赤点:米国政府の見積価格(右縦軸)、黄点:実績価格(右縦軸)、生産期番号:横軸。

出典:Aviation International News

3.7. CO₂削減効果の評価

3.7.1. 本システムを導入したときの CO₂削減量

本システムを導入することで期待される CO₂ 削減量の試算を行った。計算条件は、「3.6.2. コスト試算」における条件と同じである。

CO₂ 削減量は、ごみ焼却施設で回収した排熱量から、排熱の回収及び利用のために必要となるエネルギー量を差し引いたエネルギー量を、灯油換算した上で、灯油から発生する CO₂ 量を削減量とした。熱回収を行わない施設(単純焼却)に対して、一般的な熱回収を行う施設(従来式)および本システムを導入した施設(提案式)についての検討を行った。各システムにおけるマスバランスを図 3-7-1～3-7-3 に示す。

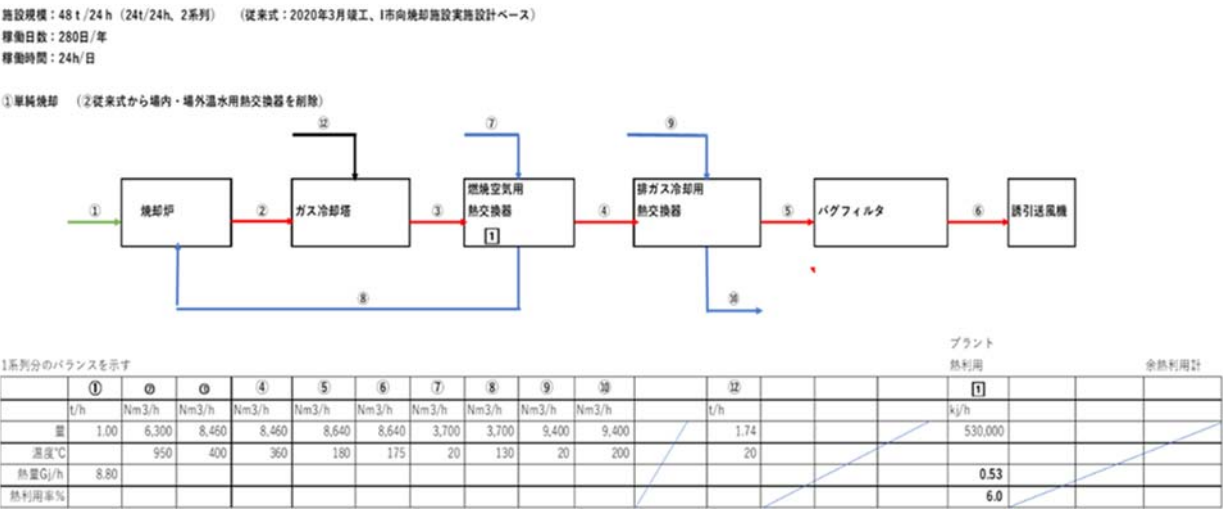


図 3-7-1 単純焼却のシステム及びマスバランス

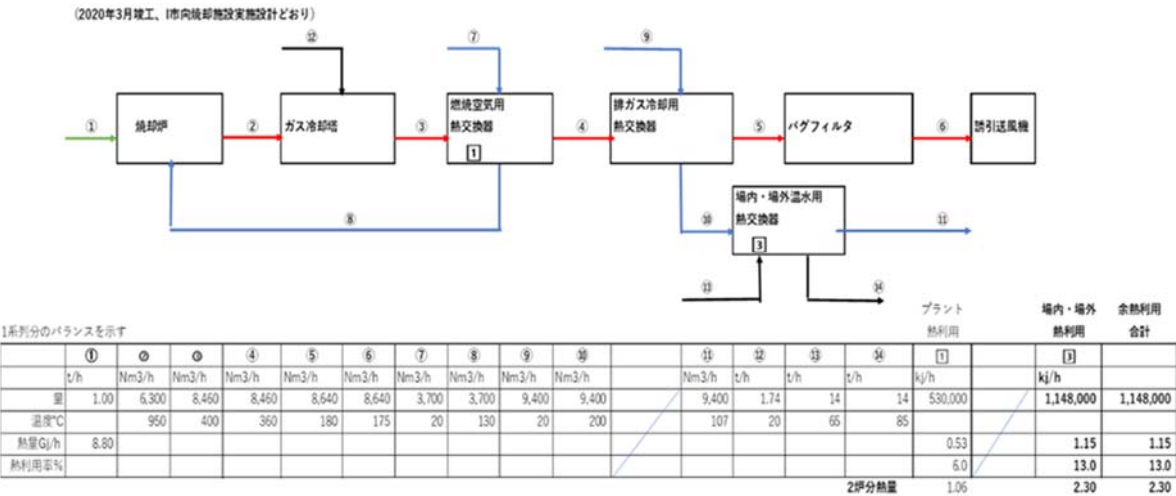


図 3-7-2 従来式のシステム及びマスバランス

焼却施設に投入するプラスチックの割合はごみ量の 10%とし、プラスチックの燃焼による CO₂ 発生量は 2.77t-CO₂/プラスチック・tとして計算した。

従来式では、単純焼却の施設に熱回収装置を設置し、年間 15,456GJ の熱を回収できるものとした。この数値は既に建設を終えた I 市のごみ焼却施設での数値を参考とした。

提案式では、従来式の施設にさらに本システムでの熱回収装置を設置した上で、熱回収を行うものとした。

提案式での CO₂ 削減ではごみ焼却施設での削減量に対して、回収した熱の輸送時に発生する CO₂ 量および熱利用施設で熱を放出する際に必要となる電力を CO₂ に換算した量を差し引いた量を示している。

試算結果は、表 3-7-1 に示したとおり、単純焼却で発生する CO₂ 量を基準として、その数値からの低下分を削減量としたところ、従来式では 1,071t-CO₂/年となり、提案式では 2,072t-CO₂/年となった。

従来式での削減量と提案式での削減量との差である 1,001tCO₂/年が熱輸送でのシステムの導入のみによる CO₂ の削減量となる。

3.7.2. CO₂削減量の年次推移推定量

本システムを導入したときの、2030 年度および 2050 年度における CO₂ 削減量を、次の 3 条件を設定・考慮し、予想した。

- ①本システムを導入するごみ焼却施設数の推移について、100t/日未満の焼却施設は 2015 年度で 552 施設あった。この施設数は、ごみ量の低下及び施設の集約化により 2030 年度では 524 施設に減少し、さらに 2050 年度では 469 施設まで減少すると予測した(図 3-7-4)。
- ②本システムも導入率は 2025 年度で 20%の 110 施設、2030 年度では 25%とし、2050 年度では 35%と見積もった(図 3-7-5)。
- ③本システムを導入することで、1 施設当たり年間 2,072t の CO₂ が削減されることから、2025 年度では全国で 227,920t、2030 年度では 271,432t、2050 年度では 339,808t の CO₂ が削減されると想定された(図 3-7-6)。

図 3-7-4 処理能力 100t/日未満の焼却施設数



図 3-7-5 本システムの導入施設数



図 3-7-6 本システム導入による CO₂削減量の推移



ちなみに、設備投資に要する費用を国の補助金で賄うことを想定し、本システムによる CO₂ 削減に対しての費用対効果を、「循環資源のリサイクル及び低炭素化に関する効果算出ガイ

ドライン」に基づき試算を行った。表 3-7-2 に設備費用（総事業費と表記）を 10 年間の CO₂ 削減量(1,001t-CO₂/年×10 年)で除した数値を示した。

表 3-7-2 CO₂削減に係る補助金の費用対効果

	CO2削減量 (t/10年)	総事業費（千円） CO2削減コスト(円/t-CO2)	補助対象経費（千円） CO2削減コスト(円/t-CO2)	補助金額（補助経費の1/3） CO2削減コスト(円/t-CO2)
単純焼却	0	—	—	—
提案式	10,010	156,800	156,800	52,266
		15,664	15,664	5,221

3.8. 本システムの有効性評価

1) 蓄熱/放熱システム

蓄熱方式として化学蓄熱を選択しているのは、蓄熱量の大きさ、放熱の少なさ、長距離輸送が可能という観点から適切である。数多くある蓄熱材候補の中で、ごみ処理施設から回収できる温度範囲の中で蓄熱量が高いものは $\text{CaO}/\text{Ca}(\text{OH})_2$ と $\text{MgO}/\text{Mg}(\text{OH})_2$ である。これらの蓄熱/放熱の化学反応は脱水/水和反応であり、熱媒・反応物として利用するガスは空気・水蒸気であるため、塩化物や硫化物等のように毒性、高い腐食性を有するガスでない点も好ましい。両者の単位重量当たり、単位体積当たりの蓄熱量にはさほど大きな差はないが、 $\text{MgO}/\text{Mg}(\text{OH})_2$ の方が低い温度域から脱水(蓄熱)反応が進む。また、資源の少ない日本の海水中に無尽蔵に含まれる物質で、安価である点も優れている。反応性や熱伝導性を高めるための多くの基礎研究と知見もあり、有効な化学蓄熱材として $\text{MgO}/\text{Mg}(\text{OH})_2$ を選択したのは適切である。

本実証事業では、余熱利用の難しい中小規模のごみ処理施設の排熱の利用を考慮している。実証施設は、ボイラのない既存のごみ処理施設であり、蓄熱にはガス冷後の熱交換器から一部分岐した 170°C の空気を、焼却炉の再燃焼室に設置する熱交換器で 350°C まで加熱し、蓄熱反応容器に送って利用する。蓄熱装置内では $\text{Mg}(\text{OH})_2 \rightarrow \text{MgO}$ の成分変化は起こるが、いずれも固体であり、熱伝導率が低いことを考えると、直接接触式の空気流通式反応システムを採用しているのは良い選択である。また、コンテナで蓄熱材を運ぶためにバッチ式のコンパクトな蓄熱/放熱容器とした点も評価でき、設備投資と必要スペースを小さくするのに有効である。

2) 概算コスト

コスト試算にあたり、熱回収施設であるごみ焼却施設のごみ処理能力を $48\text{t}/\text{日}$ ($24\text{t}/\text{日} \times 2$ 炉)として、この施設全体から一日(24h)当たり 67GJ の熱を回収し、4tトラックにて 20km 離れた3か所の熱利用施設に輸送するという前提を置いた。ボイラ・タービン設置困難な中小規模のごみ焼却施設からの熱回収、またオンライン熱輸送が難しい距離にある施設における熱利用として、この前提は妥当である。

試算の結果は、蓄熱容器と3か所の熱利用設備設置に $15,680$ 万円、運営費としては材料費他、設備の用役費に $8,579$ 万円/年、輸送用車両、人件費、燃料費およびメンテナンス費として $4,764$ 万円の $13,343$ 万円/年がかかる。その結果、運営費($13,343$ 万円/年)のみでの単位熱量当たりのコストは 7.09 円/MJ であり、これに設備の建設費を10年均等償却として、1年分を足し込んだ場合では 7.92 円/MJ となった。単位熱量当たりの熱供給単価を 8.5 円/MJ に設定すれば、5.1年で設備費が回収可能である。この試算に関しても希望等を含む無理な仮定はなく妥当であり、試算データは非常に有用である。

1つのケースでのコスト試算であるが、この熱供給単価を既往の熱供給事業のそれと比較すると $1.5 \sim 2.5$ 倍であり、また、灯油の熱量単価と比較しても2倍以上になる。この比較結果からは、残念ながら現時点の経済性では普及は難しいと言わざるを得ない。ただし、検討委員会

のコメントにもあったとおり、実証試験段階の価格で、化学蓄熱システムの経済性を評価することは、あまり意味をなさない。それは、これまでの多くの科学技術イノベーションにおいて、その技術が実用化・本格普及されるに伴い、製品価格が大幅下落した歴史的経緯があることによる。また、検討委員会の別のコメントにもあったように、実際には熱供給場所から 20km 離れた地点への導管による熱供給は不可能であり、単純にコスト比較はできない。もし、比較するならば 20km 離れた地点までの導管による熱供給単価と比較すべきである。灯油の熱量単価も、今後さらに上昇してくると予想される。さらに、炭素税導入もしくは「地球温暖化対策のための税」の増税も検討される中、今後、CO₂ 削減効果は経済的にも大きな意味を持つてくると言える。

とはいえ、本システムの普及のためには、さらなるコスト削減が必要である。

運営費の中で大きな割合を占めるのが、材料費その他、人件費（運転者費用）および燃料費である。本プロジェクト業務の中には含まれていないが、より蓄熱量が多く、蓄熱/放熱速度が大きく（短時間で蓄熱/放熱が可能となる）、寿命が長く（再生再利用も含む）、単位熱量当たりのコストが小さい蓄熱剤が求められる。また、運転者費用や燃料費を削減するためには、一つの熱供給施設から熱供給できる熱利用施設の数と距離（少ない走行距離の中に多くの熱利用施設がある）、効率的な輸送ネットワーク構築（最短距離・時間で熱輸送できるルートの構築や他の荷物との混載等）や再エネ EV、FCV の無人運転等のロジスティックスの検討が必要である。

無人運転には制度の変更が必要となると考えられるが、固定のルートを走るので適用は難しい。また、万一事故があった場合にも、液体の蓄熱材と比べて拡散は小さく、回収は容易である。

これらを考慮すると、脱炭素社会に向けて、本システムはますます有効性を増してくると言える。

3) 市場性

最近のごみ処理施設では、燃焼ガスの熱を利用して熱交換器による燃焼用空気の予熱や温水供給、廃熱ボイラーによる蒸気でタービンを回す発電等の余熱利用が進んでいる。特に 2000 年の「循環型社会形成推進基本法」公布以降は、このような余熱利用が積極的に行われている。こうして得た温水や電力は、事業所内で利用する以外に余剰分を場外へ供給（電力の場合は売電）することも可能である。しかし、導管による温水供給は管の敷設の難しさ、熱損失の観点から供給距離が限定され、この範囲に温水利用施設が存在する必要がある。電力は送電線を通して遠隔地への供給が可能であるが、発電にはごみ処理量 100t/日以上規模で 24 時間連続運転であることが条件となっており、全国のごみ処理施設の中で発電施設数は 3 割強に過ぎない。一方で、発電施設数よりも少し少ない、およそ 3 割の施設において余熱利用ができていない。これらの施設は 2000 年以前に建設された古いものが多く、今後減少して行くとは思いますが、現在余熱利用をしている施設においても CO₂ 削減、循環型社会形成の意欲があり、さらなる余熱利用に向けて熱輸送への関心は高い。

ただし、ボイラーを有し、発電や蒸気・温水供給に利用する大規模施設においては、ボイラ

発生蒸気の質と量を確保した上で、活用できる余剰熱があるかどうかは課題となり、案件ごとの最適熱エネルギーバランスの検討が必要である。

一方、産業界における熱需要のポテンシャルについて見ると、その大半は第二次産業にあり、特に 100~200℃の需要は食品、プラスチック・ゴム、紙・パルプおよび繊維の 4 業種で大きい。現時点では紙・パルプおよび繊維以外の製造工場の分布を詳細に把握するのは難しいが、経済性が良ければ、こうした業界に熱輸送システムの適用を拡充することは十分に期待できる。

3.9. 技術的、制度的な課題の抽出と対策の立案

ここまで酸化マグネシウム系蓄熱材の選定の是非、概算コストの試算、市場性について検討を進めてきた結果では、本システムの有効性は十分に期待ができるものとなった。

本システムをさらに実用的なものとするための課題として以下が見えてきた。

1) 技術的課題と対策

事業費の低減化に向けては、特に運営費に含まれる蓄熱材の輸送に係る人件費の削減および化学蓄熱材の寿命の延命化による材料費の低減が重要となる。

輸送に係る人件費の削減については、現状の試算条件では9名の運転手により3か所の熱利用施設とごみ焼却施設との間を往復することを計画しているが、運搬時間あるいは運搬量の最適化を検討することにより運転手の人数の削減も検討したい。

また、検討会の中での意見として、将来的には、移送ルートが決められているのであれば無人走行車による輸送の可能性もあり、今後の検討項目として残しておきたい。

化学蓄熱材の寿命の延命化については、材料の開発メーカーであるタテホ化学工業(株)との協議を進めながらのこととなるが、実験データを通しての意見交換による蓄熱材の改善を進めること、また検討会での意見にもあったが蓄熱材の再使用、再利用もコスト低減化につながる可能性はあるため、こちらについても検討は進めて行きたい。

2) 制度的課題と対策

オフラインによる熱輸送は、潜熱・顕熱を利用した事業が唯一国内では進められている。しかしながら、事業としての採算性は厳しいことから世の中に広まっているとは言えない。

単位重量・体積当たりの熱量が小さいことが採算性に影響を及ぼしていることは明らかではあるが、本システムを含めてオフラインでの熱輸送を広めるためには、検討会での委員の方々からも意見が出されたように、熱量当たりのコストの考え方を変えていく必要もあると思われる。本システムの特徴が化石燃料を燃焼させることなく熱を取り出せることにあり、化石燃料の消費量の削減、並びに CO₂ 発生量の低減化に貢献できるものである。このため、本システムを世の中に広める上では化石燃料の使用に対してのより厳しい制限策、CO₂の放出に対する規制策や炭素税の導入が進められることにより、本システムに代表されるような廃熱の利用システムの拡がりを期待したい。

3.10. 検討会の実施

第一回検討会

開催日時: 令和 3 年 12 月 22 日

開催場所: キャンパスプラザ京都第 6 講習室(オンライン併用)

出席者

検討会委員(オンライン)

吉岡 敏明 東北大学大学院環境科学研究科 教授

遠藤 光一 (公財)産業廃棄物処理事業振興財団 資源循環推進部 部長

中島 健史 南島原市 環境水道部 環境課 課長

有識者(オンライン)

酒井 伸一 京都大学名誉教授

加藤 之貴 東京工業大学 ゼロカーボンエネルギー研究所 教授

代表実施者

下田 栖嗣 エスエヌ環境テクノロジー(株) 顧問

中尾 毅 エスエヌ環境テクノロジー(株) M&P 室 室長

児玉 基希 エスエヌ環境テクノロジー(株) 統括本部 運営技術部 部長

共同実施者

朝枝 政利 日立造船(株) 環境事業本部 環境営業統括部 担当部長

伴 明浩 日立造船(株) 環境事業本部環境事業推進部 技術情報 G 部長代理

友田 啓二郎 (株)東和テクノロジー 代表取締役

大野 正之 (株)東和テクノロジー グローバル環境事業部 部長

吉田 直弘 (株)東和テクノロジー グローバル環境事業部 課長

長田 守弘 (公財)京都高度技術研究所 未来プロジェクト推進室

資源循環研究企画 担当部長

環境省(オンライン)

小林 純一郎 環境再生・資源循環局 廃棄物適正処理推進課 課長補佐

後藤 勇喜 環境再生・資源循環局 廃棄物適正処理推進課

各委員よりの主なコメント

1. 地域循環共生圏の構成を念頭に、実証実験周辺地域で熱利用先を検討すること。
2. 温浴施設での熱の利用時間帯、ピーク等も検討のこと。

3. 他の化学蓄熱材との違いを明確にしておくこと。
4. 温度域ごとでの利用方法などについても検討しておく方が良い。
5. CO₂削減量の算出に当たっては、熱輸送で発生するガス量も考慮すること。
6. 熱移送距離とコストとの関係も調べておくこと。
7. MgO の反応速度を上げる工夫も検討のこと。

第二回検討会

開催日時: 令和4年 3 月 2 日

開催場所: (株)東和テクノロジー関西支店 会議室(オンライン併用)

出席者

検討会委員 (オンライン)

吉岡 敏明 東北大学大学院環境科学研究科 教授

遠藤 光一 (公財)産業廃棄物処理事業振興財団 資源循環推進部 部長

中島 健史 南島原市 環境水道部 環境課 課長

有識者 (オンライン)

酒井 伸一 京都大学名誉教授

加藤 之貴 東京工業大学 ゼロカーボンエネルギー研究所 教授

代表実施者

下田 栖嗣 エスエヌ環境テクノロジー(株) 顧問

中尾 毅 エスエヌ環境テクノロジー(株) M&P 室 室長

児玉 基希 エスエヌ環境テクノロジー(株) 統括本部 運営技術部 部長

共同実施者 (一部オンライン参加)

朝枝 政利 日立造船(株) 環境事業本部 環境運営統括部 担当部長

伴 明浩 日立造船(株) 環境事業本部 環境事業推進部 技術情報 G 部長代理

友田 啓二郎 (株)東和テクノロジー 代表取締役

大野 正之 (株)東和テクノロジー グローバル環境事業部 部長

吉田 直弘 (株)東和テクノロジー グローバル環境事業部 課長

長田 守弘 (公財)京都高度技術研究所 未来プロジェクト推進室

資源循環研究企画 担当部長

高橋 正光 (公財)京都高度技術研究所 未来プロジェクト推進室

脱炭素研究企画 担当部長

環境省 (オンライン)

小林 純一郎 環境再生・資源循環局 廃棄物適正処理推進課 課長補佐

後藤 勇喜 環境再生・資源循環局 廃棄物適正処理推進課

各委員よりの主なコメント

1. 実用化に向けては薬剤費、輸送コストの削減が必要である。輸送コストについては、将来的には自動運転などの導入もあり得る。

2. 薬剤にはリチウムが添加されているが、反応温度を下げる目的ならば、リチウムに代わる物質の探索も今後検討してはどうか。
3. 熱利用先としては大型の公共施設以外、例えば集合住宅なども検討してはどうか。
4. 食品工場などでの洗浄、殺菌のための蒸気、温水への利用も考えられる。
5. 熱供給事業とはシステムも異なり、現時点でコスト比較の必要はないのではないか。
6. 発酵メタンガスでのガスエンジン排気も利用できるのではないか。
7. 蓄熱材のリサイクルも検討してはどうか。
8. ごみ焼却関係での熱供給ポテンシャルさらにはカーボンプライスといった面についても今後注視していただきたい。

3.11.「令和３年度脱炭素化・先導的廃棄物処理システム実証事業 審査当委員会」への出席

環境省が実施する「令和3年度脱炭素化・先導的廃棄物処理システム実証事業 審査委員会」中小廃棄物処理施設における先導的廃棄物処理システム化等評価・検証事業 審査等委員会へ出席し、業務報告を行った。

日時:令和４年２月１０日(木)13:50～14:20

場所:オンライン会議

内容:本事業内容についての審査等委員会への業務報告

3.12.「令和３年度廃棄物処理システムにおける脱炭素・省 CO2 対策普及促進方策検討委託業務ヒアリング等への協力」

環境省が別途実施する「令和３年度廃棄物処理システムにおける脱炭素・省 CO2 対策普及促進方策検討委託業務」に係るヒアリング、シンポジウムにおいて事業説明等に協力した。

3.13. 実施内容のまとめ

本事業の令和 3 年度分は、以下の 3 点を主眼に進めており、その結果と評価を以下にまとめた。

1. 従来の熱輸送事業からさらに経済性を高めた事業とする。

- ・本システムで造り出す熱量の販売価格を 8.5 円～9.5 円/MJ とすることで、事業の継続性・持続性が見えてきた。
- ・蓄熱材費用が事業費の 60%程度を占めるため、事業費低減に向けて、この費用を低減する必要があり、そのために、蓄熱材の材料費、製造費の低減と、耐用期間の延長が必要となる。
- ・蓄熱材に係る技術検討は、技術協力先のタテホ化学工業株式会社にて、実施中である。意見交換等を通して、技術開発を進めて行きたい。

2. 市場性の確認

- ・本事業では、回収熱を温浴施設で利用する計画である。将来的には、さらに多くの熱回収を目標としており、その熱の利用先を確保することが重要である。
- ・本年度は、ごみ焼却施設の回収熱の外部利用先として、南島原市周辺の公共施設を調査した。本システムで利用できる温度は 200℃程度であるため、この温度領域の熱を使用する事業を把握した。
- ・また、企業、自治体への訪問による熱利用の需要調査を行った。その結果、コスト次第ではあるが CO₂ 排出削減および化石燃料の消費削減の観点から、本システム導入のニーズが大きいことも見えてきた。

3. 実証実験装置の設計

- ・熱回収の方法について、ごみ焼却施設の炉とガス冷却室との間にある再燃室の上部に高温空気加熱器を設置し、その高温空気加熱器で作られた 350℃の空気を用いて蓄熱材への蓄熱を行う。具体的には、350℃、500m³N/h の高温空気を蓄熱材に 2 日間流通させ、1GJ の熱を、蓄熱材に蓄熱させるための設備を設計し、その設置場所を定めた。
- ・熱利用の方法について、温浴施設の現熱供給システムの現地調査を行った。その結果に基づき、浴室内の浴槽水(約 5m³)の加温および温水供給に係る放熱設備の概念設計を行った。

以上のとおり、本年度は、本システムの経済性・市場性を確認し、実証実験の基本条件を設定した。

以上

リサイクル適性の表示:印刷用の紙にリサイクルできます

この印刷物は、グリーン購入法に基づく基本方針における「印刷」に係る判断の基準にしたがい、印刷用の紙へのリサイクルに適した材料[Aランク]のみを用いて作製しています。