令和５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６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脱水吸熱反応と水和発熱反応に着目し、脱水吸熱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し行う。

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 5 年度は、本事業の最終年度であり、本報告書は、本事業の 3 年間の成果について報告するものである。

## １．実証実験設備の具体化

### １．１.蓄熱設備の製作およびごみ焼却施設への据付

ごみ焼却炉の上部に位置する再燃焼室内に高温空気加熱器を取り付け、この高温空気加熱器に清浄な空気を通気させることで水酸化マグネシウムの脱水反応（蓄熱）に必要な高温（350℃）の乾燥空気を作り出す。高温空気加熱器に通気される清浄空気は予め、ごみ焼却施設の排ガスの熱を利用し 200℃程度まで昇温しておき、再燃焼室に設置した高温空気加熱器を通ることにより 350℃まで昇温させる。高温空気加熱器を出た清浄な高温空気は水酸化マグネシウムが充填された反応器に通気され、脱水反応により酸化マグネシウムへと化学変化する。

本年度は、計画通りの設備の製作及び据付を完了し実証実験を実施した。

### １．２．放熱装置の製作および温浴施設への据付

放熱設備は、酸化マグネシウムを充填した反応器、反応器内の酸化マグネシウムに発熱反応を起こさせるための水分を含んだ 100℃程度の空気を送り込むためのブロワ、水分を含んだ空気を調整するための蒸気ボイラ、酸化マグネシウムの発熱により 200℃程度まで昇温させた空気の熱により温水を作り出す熱交換器、および反応の開始時のみの使用であるが、反応器に送り込む 100℃の空気を作り出すためのヒータより構成される。

本年度は、計画通りの設備の製作及び据付を完了し実証実験を実施した。

## ２．実証試験

### ２．１．蓄熱

再燃焼室内に設置した高温空気加熱器により、計画通りの温度（約 350℃）及び流量（約 700m³N/h）の空気を作り出せることを確認できた。また、この高温の空気を計画量の蓄熱剤を充填した反応器（2 基並列）に計画した時間（5 時間）通気させることで、計画量の熱量（0.25GJ/基）を蓄熱できることが確認できた。

### ２．２．蓄熱材の輸送

蓄熱反応と放熱反応を繰り返すため、ごみ焼却施設と温浴施設までの間の 16.5 km をトラックで約 30 分かけての往復を繰り返した。ごみ焼却施設で反応器に高温空気を通気する際での反応器入口と出口との圧力損失は、毎回の移送後に於いても大きな変化は見られず、移送により蓄熱剤が摩耗する等の影響は無いことが確認できた。また、蓄熱反応終了直後の蓄熱材の温度（顕熱）約 330℃は蓄熱を停止した後に徐々に低下はするが、16 時間経過後も蓄熱材の温度は 200℃を保持しており、この顕熱を放熱の際での循環空気の加熱に用いることで、反応の準備時間の短縮が図れることが確認できた。

### ２．３．放熱

計画通りの循環ガス温度（90～110℃）状態下にて水蒸気を投入することで、反応器出口の循環ガス温度 206℃を記録した。この高温空気から熱交換器により平均温度差 40℃以上の温水を作り、温浴施設に浴槽の湯としての供給を行った。作り出した温水の総熱量は蓄熱剤から放出される熱量（0.25GJ/基）の 1.2 倍で、過剰な熱量分は投入蒸気の凝縮の際の熱量とほぼ等しいことも判明した。

### ２．４．実証試験装置据付による施設への影響

#### １）ごみ焼却施設への影響

実証設備の設置前後における、ごみ焼却施設運転時の各温度、風量、CO 濃度等には特段の違いは見られなかった。また、昨年同時期での煙突排ガス中のダイオキシン類濃度分析結果比較からも、両者での濃度差は見られず、実証設備の取付けによる、ごみ焼却施設への影響は無いことを確認できた。

#### ２）温浴施設への影響

本実証実験においては、放熱設備で作り出した温水を、温浴施設の温水調整システムに直接接続することは行わず、このため、温浴施設のシステムへの影響についての確認は行っていない。しかしながら、放熱設備で計画通りに作られた温水については、温浴施設の男性用浴槽に直接投入することで熱利用先での利用について水質等も含めて問題の無いことが確認できた。

## ３．本事業の有効性

ごみ焼却施設で蓄熱した熱量と等量の熱量が温浴施設にて放熱され、放熱設備では最高温度 200℃以上、延べ時間で 5h 以上の平均温度 190℃の高温空気を供給できたことなどにより、本事業の有効性の確認はできた。

## ４．実証設備の撤去

令和 6 年 1 月に蓄熱装置及び放熱装置の撤去を行った。蓄熱装置の熱交換器の状況を確認したところ、燃焼排ガスが最初に接触する部分の耐火物の剥離は確認されたが、熱交換器本体部分の肉厚には変化はなく使用前の 6 ㎜と同一であった。また、実証実験終了後に、使用済み蓄熱材のリサイクルを行い、新品と同様の性能を確認した。

## ５．検討委員会の実施

令和 5 年 11 月および令和 6 年 3 月に検討委員会を開催し、各委員から実証実験結果に対しての考察並びに講評を頂いた。

以上

# 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 $CO_2$ 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 conducted 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 were transported between the two locations.

FY2023 was the final year of this project, and this report presents the results of the three years of work.


## 1. Implementation plan for demonstration test equipment

### 1.1. Design and installation of the heat recovery system in a MSW incineration plant

A high-temperature-type gas-air heat exchanger was installed on the upper part of the secondary combustion chamber of a MSW incineration plant; clean air can be fed into it to produce dry high-temperature air at 350 degrees C, which is needed for dehydration of $Mg(OH)_2$ (heat storage). The clean air fed into the exchanger is first preheated to about 200 degrees C using heat from exhaust gas generated at the plant, and it is then heated up to 350 degrees C in the exchanger. The heated air from the exchanger is sent to the reactor filled with $Mg(OH)_2$ to convert it to MgO by dehydration.

This year, we completed the planned production, installation, and demonstration test.

### 1.2. Design and installation of the heat-radiating system in a spa facility

A heat-radiating system was installed in a spa facility. The system consists of a reactor filled with MgO, a blower to feed 100 degrees C air containing moisture to cause an exothermic reaction with MgO, a steam boiler to adjust the humidity of the air, a heat exchanger to warm water using air heated to about 200 degrees C by the exothermic reaction of MgO, and a heater that is only used at the start of the reaction to warm the air fed into the reactor to 100 degrees C.

This year, we completed the planned production, installation, and demonstration test.

## 2. Demonstration test

### 2.1. Heat storage

The test results showed that the heat exchanger installed in the secondary combustion chamber could produce the planned air at 350 degrees C and a flow rate of around 700 $m^3N/h$. It was also confirmed that the planned amount of heat (0.25 GJ of heat/reactor) could be stored by feeding the high-temperature air for five hours into the two reactors (placed in parallel) filled with the planned amount of heat-storage materials.

### 2.2. Transport of heat-storage materials

The chemical heat-storage materials were transported for 30 minutes by truck over a distance of 16.5 km between the MSW plant and the spa facility to repeat the heat-storage and heat-release reactions at each facility.

There was no notable change in pressure loss after transport compared to the pressure observed at the inlet and outlet of the reactors when feeding high-temperature air at the MSW plant. In addition, no other effects were observed, such as the abrasion of the chemical storage materials due to the transfer process.

The temperature of the heat-storage materials gradually decreased from about 330 degrees C after the heat-storage process was stopped. However, the materials remained at 200 degrees C even after 16 hours, and using this sensible heat to heat the circulating air during heat dissipation was confirmed to reduce the preparation time for reaction.

### 2.3. Heat release

The gas circulating at the reactor outlet was measured at 206 degrees C. This was accomplished by adding water vapor under the planned circulating gas temperature, which ranged from 90 to 110 degrees C. The heat exchanger then produced hot water with an average temperature of 40 degrees C or higher from this high-temperature air. The hot water was then supplied to a hot tub at the spa facility. The total heat value of the hot water produced was 1.2 times that of the heat released from the heat-storage materials, which was 0.25 GJ per unit. This excess heat was approximately equal to the heat value during the condensation of steam fed into the reactor.

### 2.4 Impacts from the installation of demonstration test equipment

#### 1) Impact on MSW incineration facility

There were no noticeable differences in temperature, air volume, and CO concentration during the operation of the MSW incineration facility before and after the installation of the demonstration test equipment. Additionally, no differences in the dioxin levels in the stack exhaust gas were observed compared to results obtained at the same period in the previous year. It was confirmed that the installation of the demonstration test equipment had no impact on the MSW incineration facility.

#### 2) Impact on spa facility

We did not assess the impact of the heat-radiating system on the spa facility because the hot water produced by the system was not directly connected to the facility's hot water temperature control system. However, we confirmed that there were no problems with the use of the hot water produced and fed directly into the hot tub at the spa facility, including with the water quality.

## 3. Confirmation of the project’s effectiveness

The project's effectiveness was confirmed because the amount of heat dissipated at the spa facility was equal to the amount stored at the waste incineration facility. This allowed for a high-temperature air supply at the spa for a total of more than 5 hours with a maximum

temperature of over 200 degrees C and an average temperature of 190 degrees C.

4. Dismantling and removal of the demonstration test equipment

In January 2024, we dismantled and removed the heat recovery and radiating systems. During the process, we inspected the heat exchanger and found that the refractory material was peeling off near where the exhaust gas first contacted the heat exchanger. However, there was no change in the body part's thickness: 6 mm before and after use. In addition, after the demonstration test, the used heat storage material was recycled, and the performance was confirmed to be the same as that of a new one.

5. Technical review meetings

We held technical review meetings in November 2023 and March 2024 to receive advice and feedback from committee members about the demonstration test results.

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 ..... 2
2. 3. 事業計画 ..... 3
2. 4. 実施場所 ..... 4
2. 4. 1. ごみ処理施設 ..... 4
2. 4. 2. 温浴施設 ..... 4
2. 5. 実施体制および実施内容 ..... 6
2. 6. 実施工程 ..... 7
3. エネルギー収支、経済効果及び CO2 削減効果の予測（期待値） ..... 7
3. 1. エネルギー収支の予測 ..... 7
3. 2. 経済効果の予測 ..... 8
3. 3. $CO_2$ 削減効果の予測 ..... 9
4. 実証設備の設計、製作、設置 ..... 10
4. 1. 熱回収設備の製作・設置 ..... 11
4. 1. 1. 熱回収装置の設計 ..... 11
4. 2. 放熱装置の設計 ..... 16
4. 2. 1. 放熱装置の設計基本計画 ..... 16
4. 3. 実証試験設備設計のまとめ ..... 22
4. 3. 1. 規模縮小の影響 ..... 22
4. 3. 2. 既存施設の操業・運営への影響 ..... 23
4. 4. 反応器の輸送 ..... 24
5. 実証実験結果 ..... 25
5. 1. 実験準備 ..... 25
5. 1. 1. 反応器への蓄熱材充填 ..... 25
5. 1. 2. 管理項目の設定 ..... 29
（1） 蓄熱装置における管理項目と管理目標値の設定 ..... 29
（2）放熱装置における管理項目と管理目標値の設定 ..... 30
5. 2. 運転実績 ..... 31
5. 2. 1. 週間運転工程 ..... 31

5.2.2. 実証(7 か月間)運転スケジュール.....32
5.3. 実験結果.....33
5.3.1. 蓄熱反応結果.....33
(1)蓄熱の状況.....33
(2)蓄熱剤の温度推移.....34
(3)蓄熱材への投入熱量と蓄熱量.....35
5.3.2. 放熱装置.....36
(1)放熱装置の概略フローと計装機器の設置位置.....36
(2)放熱反応の手順.....37
(3)放熱装置の運転状況.....38
(4)放熱量と温水回収熱量.....38
(5)化学蓄熱材の耐久性.....39
(6)装置設置によるごみ焼却施設及び温浴施設への影響確認.....42
5.4. 実証試験のまとめ.....43
5.4.1. 蓄熱装置運転結果のまとめ.....43
5.4.2. 放熱装置運転結果のまとめ.....43
(1)エネルギー収支.....43
(2)放熱装置運転結果のまとめ.....45
5.5. 実証後の現状復旧及び使用後における主要材の考察.....46
5.5.1. 現状復旧について.....46
5.5.2 使用後における主要材の考察.....47
5.6. 運転結果の総括.....48
6. CO2 削減効果.....48
7. コスト試算.....50
8. 本事業の有効性と横展開.....52
8.1. 本実証事業の有効性.....52
8.2. 本事業の横展開.....53
8.2.1. 余熱利用可能な廃棄物処理施設.....53
8.2.2. 余熱利用施設.....55
8.2.3. 廃熱ボイラ付きの中規模～大規模焼却施設への設置可能性検討.....62
(1)焼却施設能力と回収熱量.....62
(2)CO2 削減量の推定.....62

8.3.本システムの利用先拡大に向けた検討 ..... 64
(1)熱利用先での熱需要季節変動への対応..... 64
(2)貯蔵熱の災害発生時への利用 ..... 66
9.検討会の開催..... 69
9.1.第一回検討会 ..... 69
9.2.第二回検討会..... 75
10.「令和5年度脱炭素化・先導的廃棄物処理システム実証事業　審査等委員会」への出席..... 81
11.「令和5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」 ..... 81
12.本事業の総括 ..... 82
12.1.事業の必要性..... 82
12.2.コストの妥当性 ..... 82
12.3.CO2 削減への貢献..... 82
12.4.設備の妥当性 ..... 83
12.5.事業の有効性評価 ..... 83

## 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 年間をかけて実施したもので、本年度が最終年度であり、これまでの実績と実証試験の成果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 項目に分けて述べる。(2.1) 目的、(2.2) システムの原理、(2.3) 事業計画、(2.4) 実施場所、(2.5) 実施体制・実施内容、(2.6) 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。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。

100t/日未満に目を向けると、近年、50t/日クラスで廃熱ボイラによる蒸気作成、70t/日クラスで廃棄物発電を行う施設も出てきているが、一般的に余熱利用としては、燃焼排ガスからの空気加熱器を用いた温水回収が多い。しかしながら、施設は、町の中心部からかなり距離が離れたところが多く、隣接した場所に熱利用先があるケースは少なく、余熱利用を行っていない施設が多い傾向にある。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、排熱を蓄熱材に溜め、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。

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。）を用いたごみ焼却施設の未利用排熱利用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、以下に示すように、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 モル当たりに 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。

$$Mg(OH)_2(solid) + Q = MgO(solid) + H_2O(gas), \quad Q = 80.6\ kJ/mol\ (1.4\times10^3\ kJ/kg)$$

本システムを用いた実証実験の流れは、図 2-2-1 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)。

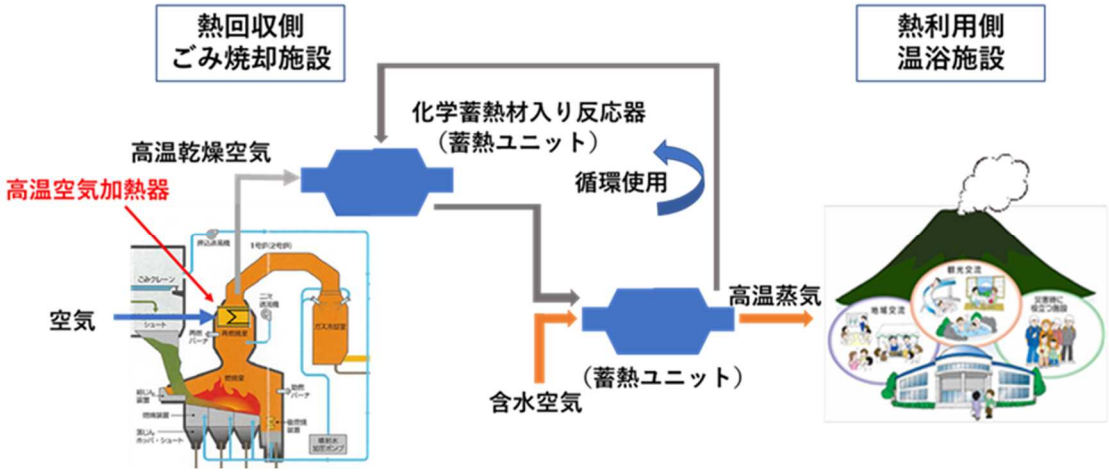



図 2-2-1　実証実験の流れ

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 2-2-2 にまとめる。

| | 化学蓄熱<br>（提案技術） | 吸着系蓄熱材<br>NEDOニュースリリースより | 潜熱蓄熱<br>（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/m³ ← 蓄熱量向上 | 0.59GJ/m³ ← 蓄熱量向上 | 0.20GJ/m³ |
| 利用温度 | 200~250℃ ← 対応温度の差 | 80～120℃ | 60～120℃ |
| 熱媒<br>（安全性） | 熱媒油（第4石油類）の輸送を伴わない<br>（安全性向上） | 熱媒油（第4石油類）の輸送を伴わない<br>（安全性向上） | 熱媒油（第4石油類）の輸送を伴う |

図 2-2-2　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

本事業における採択時での技術の状況（課題）と最終目標を図 2-3-1 に示す。

| | 項目 | 採択時の技術の状況 | 最終目標 |
|---|---|---|---|
| 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 | 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 |
| 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ての熱供給システムの構築 |
| 3 | 実証試験装置の設計・施工 | 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 |

図 2-3-1　本事業の採択時の技術の状況と最終目標

## 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 2-4-1 に示す。

### ２．４．１．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

| | | |
|---|---|---|
| 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）<br>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 |

### ２．４．２．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）

| | |
|---|---|
| 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<br>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<br>浴場 11 時 00 分～19 時 00 分 |
| 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<br>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<br>浴場 11 時 00 分～19 時 00 分 |

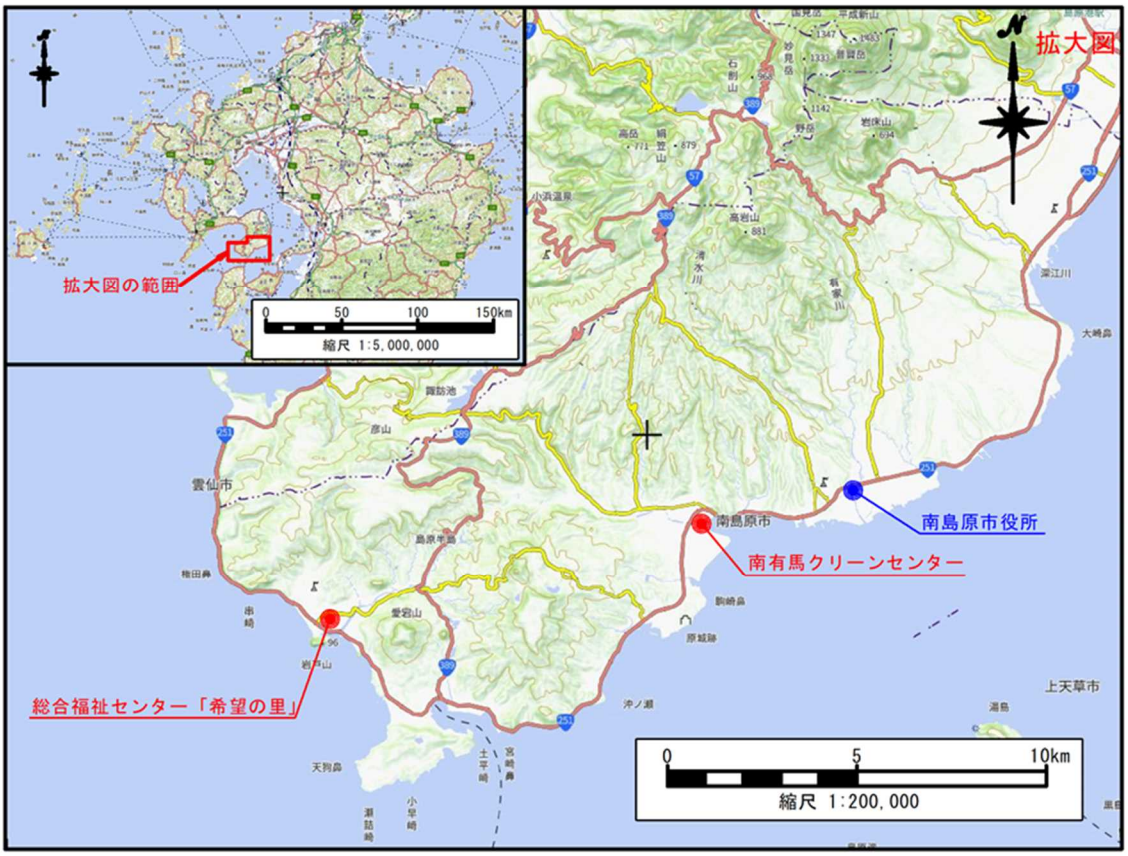



図 2-4-1　実施場所の位置図

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 2-5-1 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。

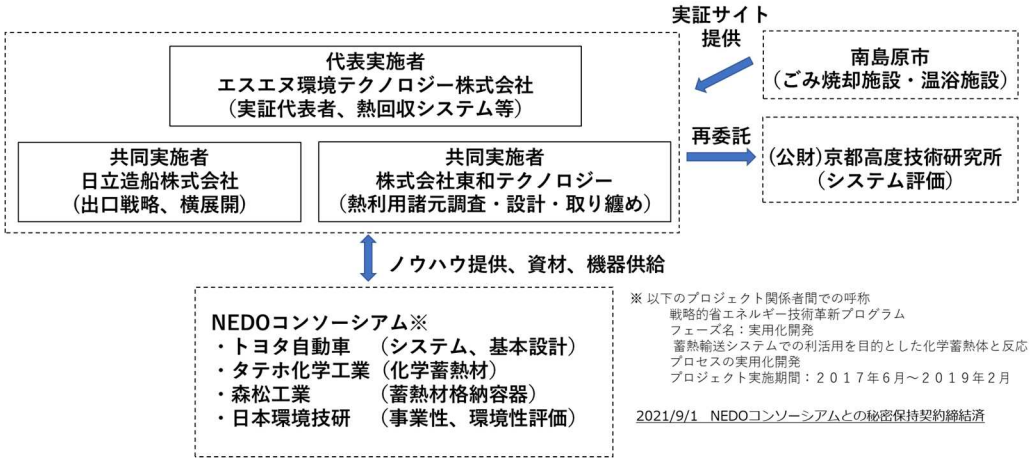



図 2-5-1　実施体制

次に、本事業における各企業の分担を、図 2-5-2 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 | 蓄熱・放熱に係る費用試算 | | システムモデルの構築 | 有効性評価について助言指導 |
| 2 | 技術的、制度的な課題の抽出と対策立案 | 蓄熱・放熱に関わるもの | | | |
| 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<br>熱利用先の実態調査 | |
| 4 | 本システムの実証設備の設計施工 | 蓄熱・放熱設備の設計施工 | | 放熱設備の概念設計 | |

図 2-5-2　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 2-6-1 に示す工程で実施した。

図 2-6-1　スケジュールの概要

## ３．エネルギー収支、経済効果及び CO2 削減効果の予測（期待値）

### ３．１．エネルギー収支の予測

反応器及び熱交換器での熱収支と物質収支の概略を表 3-1-1 に示す。

表 3-1-1　反応器、熱交換器での熱収支、物質収支

| | 単位 | 反応器 | | 熱交換器 | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 入口 | 出口 | 出口(空気) | 入口(水) | 出口(温水) |
| 流量 | m3N/h or l/h | 372 | 360 | 360 | 500 | 500 |
| 温度 | ℃ | 100 | 220 | 120 | 20 | 44 |
| 熱量 | MJ/h | 500 | 530 | 478 | 42 | 91 |
| | kw | 139 | 147 | 133 | 11 | 25 |
| 発生熱量or熱回収量 | kw | - | 8 | - | - | 14 |

放熱設備での定常運転時のエネルギー収支は表 3-1-2 に示す。

この系への入力エネルギーは、蒸気ボイラ（7kW）、ブロワ（2.5kW）、温水ポンプ（0.5kW）、計器類（0.05kW）の合計 10.05kW となる。

一方、出力エネルギーは、熱交換器の温水による熱回収量 14kw から系内熱損失（1kW）が差し引かれ、合計 13kw となり、差し引きの 3kw が放熱設備による獲得熱量と期待される。
なお、出力は、入力に対して約 3 割のエネルギーゲインになる。
また、蒸気ボイラによる投入エネルギーに対して、2 倍の熱エネルギーを得ていることになる。

表 3-1-2　エネルギー収支

| エネルギー収支 | | kW |
|---|---|---|
| 入力 | 蒸気ボイラ | 7 |
| | ブロワ | 2.5 |
| | 温水ポンプ | 0.5 |
| | 計器類 | 0.05 |
| | 入力合計 | 10.05 |
| 出力 | 温水回収 | 14 |
| | 系内熱損失 | ▲1 |
| | 出力合計 | 13 |
| 獲得熱量 | | 3 |
| 出力/入力 | | 1.29 |
| 温水回収/蒸気ボイラ入熱 | | 2 |

## ３．２．経済効果の予測

本システムを実施した場合での熱量当たりのコストを試算するにあたっての条件を図 3-2-1 に示し、設備費、運営費を表 3-2-1 に示す。
試算結果については表 3-2-2 に示すとおり、設備建設費を加えて 7.92 円/MJ となった。

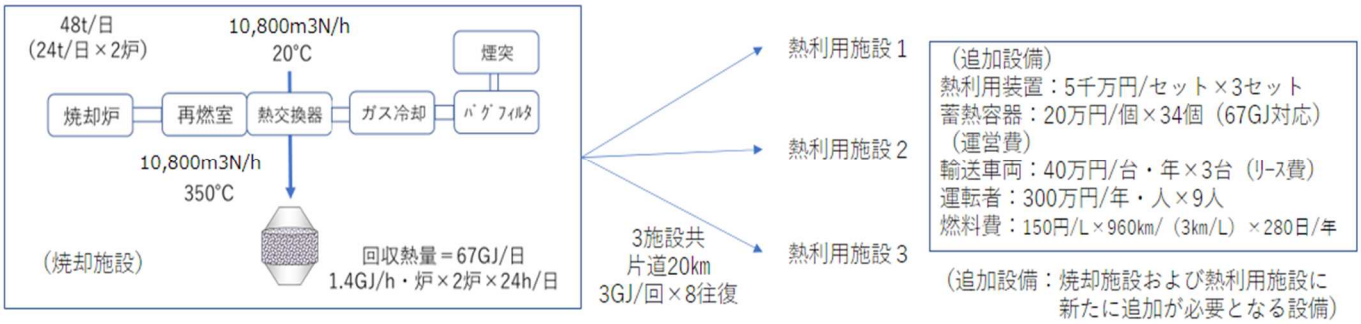



図 3-2-1　熱供給コストの試算条件

表 3-2-1　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 |

表 3-2-2　熱量当たりの単価

| | 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 |

## ３．３．$CO_2$削減効果の予測

本システムを 100t/日未満の処理能力を持つ焼却施設に順次適用させた場合での CO2 削減量を図 3-3-1 に示す。
2050 年度で 164 施設に設置した場合、年間で約 34 万トンの CO2 削減と試算された。

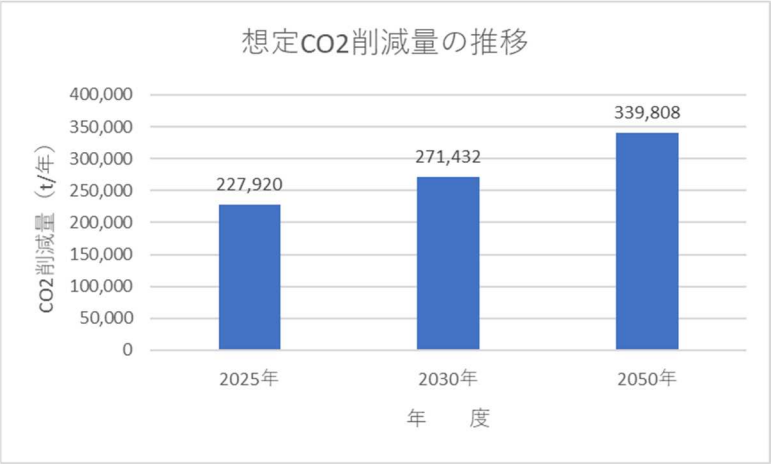



図 3-3-1　本システムの適用による CO2 削減量の推移

## ４．実証設備の設計、製作、設置

蓄熱設備は、化学蓄熱材（$MgO/Mg(OH)_2$）を充填した装置（以後、「反応器」と呼ぶ。）と、この反応器内に乾燥した高温の空気を流入させる設備（以後、熱回収設備と呼ぶ。）から構成される。
当初の計画では、反応器に充填した蓄熱材に高温の乾燥空気を通気させ、１GJ の熱を 4 日間（8 時間/日）で蓄熱（回収ともいう。）させる能力を持つ蓄熱設備とし、蓄熱された 1 GJ の熱を放熱設備にて 1 日、8 時間をかけて放熱させることとしていた。
以下の理由により、当初の計画を一部変更し、回収については設備規模に変更はないが、0.25GJ の熱を 1 日、5 時間（当初の 8 時間から 5 時間に短縮）で行い、反応器（1 基 0.125GJ を 2 基）で蓄熱した 0.25GJ の熱を放熱設備側にて 1 日、8 時間で放熱（1 基 4 時間放熱後、残りの 1 基を 4 時間で放熱）させる計画とした。

その主な理由は、

① 1GJ の熱の回収には 4 日間が必要であり、放熱が 1 日で終了することから、熱回収と放熱との時間的な差が生じることによる熱回収側での運転員等の無駄が生じること。
② 1GJ の放熱設備には、約 500 kgの酸化マグネシウムを充填できる大きさの反応器が必要であり、さらに約 60$m^3$N/min の循環ガス量を送風することのできるブロワなど、全体的に大きな設備が必要となり、予算的な面及び、設備を設置する敷地面積が課題。

当初計画からの変更点を表 4-1 にまとめた。

表 4-1　熱回収量・放出量の変更点

| | 昨年度計画 | 本年度計画 |
|---|---|---|
| 熱回収量 | 1GJ/4日＝0.25GJ/日（8時間） | 0.25GJ/日（5時間、反応器2基/並列同時） |
| 熱利用量 | 1GJ/日（8時間）反応器1基 | 0.25GJ/日（8時間、反応器2基/切替） |

また、当初の計画では、0.25GJ の熱を蓄熱させるために必要な時間を 8 時間と想定していたが、高温空気加熱器にて作り出す 350℃のガス量を 400$m^3$N/h としていたためで、改めて設計の見直しにより、700$m^3$N/h まで増量できると試算されたことから、5 時間での蓄熱時間に短縮可能となった。
本実証実験では、反応器を 2 基とするが、反応器をさらに増設させることで、例えば 6 基とすると 24 時間連続的な熱の放出も可能となり、放出熱量は 0.125GJ/基×6 基＝0.75GJ となる。

1GJ の熱を 8 時間で放出する計画から、0.125GJ の熱を 4 時間で放出する設備とすることにより、酸化マグネシウムの発熱反応に必要となる循環ガス流量は当初計画の 60$m^3$N/min から 6$m^3$N/min と 10 分の 1 の規模にまで小さくすることができ、設備全体を小さくすることができた。

なお、規模は縮小するが、ガス流量、ガス温度、電力量等の計測により、実装置の

設計に必要なデータの取得には問題はない。

## ４．１．熱回収設備の製作・設置

実証試験に用いる熱回収設備（0.25GJ/日（5 時間））の熱回収能力をもつ高温空気加熱器、高温空気加熱器と反応器を接続するための風道とその付帯設備を製作し、焼却施設に据付を行った。

### ４．１．１．熱回収装置の設計

熱回収設備のシステムフローを図 4-1-1 に示す。

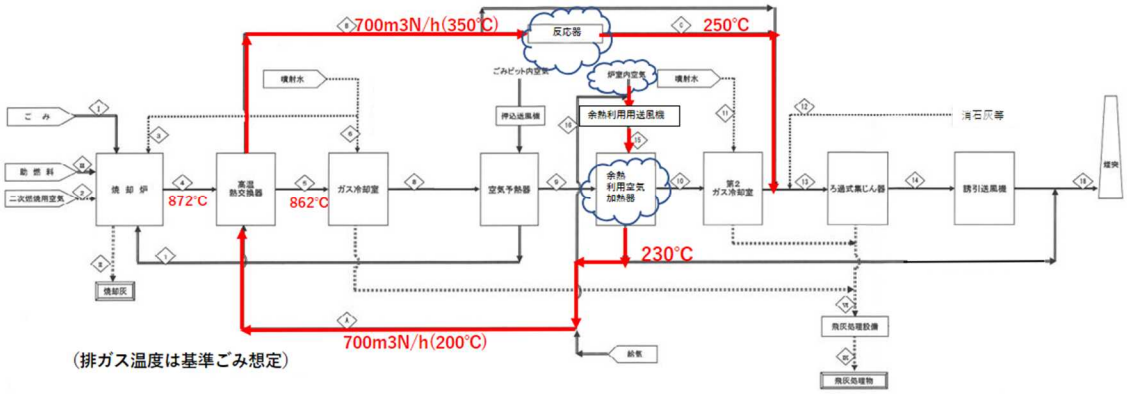



図 4-1-1　熱回収設備のシステムフロー

本実証試験では、上記のとおり、1 日 5 時間で 0.25GJ の熱の回収を計画しており、このためには酸化マグネシウム（MgO）は以下のとおり約 125 kg必要となる。

MgO 発熱量：$MgO + H_2O \rightarrow Mg(OH)_2 + \Delta H$（81kJ/mol）

0.25GJ=250,000kJ

0.25GJ 発熱させるために必要な MgO 量=250,000kJ/81kJ/mol=3,086mol

MgO モル分子量=40.3g

3,086mol の MgO 重量=40.3g/mol×3,086mol=124.4 kg

この酸化マグネシウムは放熱設備にて水と反応し水酸化マグネシウム($Mg(OH)_2$)となるため、重量は 181 kgとなる。

この水酸化マグネシウムの脱水反応には、これまでの実験結果より 350℃の空気を 700 $m^3N/h$ 送り込む必要がある。

ごみ焼却施設にての燃焼排ガス温度は 850℃程度以上となることから、この燃焼排ガスを直接使用できれば良いが、燃焼排ガスには塩酸、硫化水素さらには重金属などの有害物質が含まれており、さらには水分や炭酸ガスも含まれていることから、水酸化マグネシウム($Mg(OH)_2$)の脱水反応を効率的に起こさせることが難しく、燃焼ガスを直接使用することはできない。

このため、実証実験に必要な 350℃の清浄な空気を 700$m^3$/h ごみ焼却施設内で新たに作り出す必要がある。

このため、本計画では既設ごみ焼却炉での燃焼排ガスを「ろ過式集じん器」で排ガス処理を行うために前段階に設置された「余熱利用用空気加熱器」により約 230℃に加熱された清浄な空気の一部を取り出し、ダンパ制御により約 200℃に調整した清浄

空気を焼却炉上部の「再燃焼室」に本事業により新たに設置する「高温空気加熱器」に流通させる。

この「高温空気加熱器」の出口における空気温度が約 350～360℃となるように計画した。

「高温空気加熱器」の計画図を図 4-1-2 に示す。

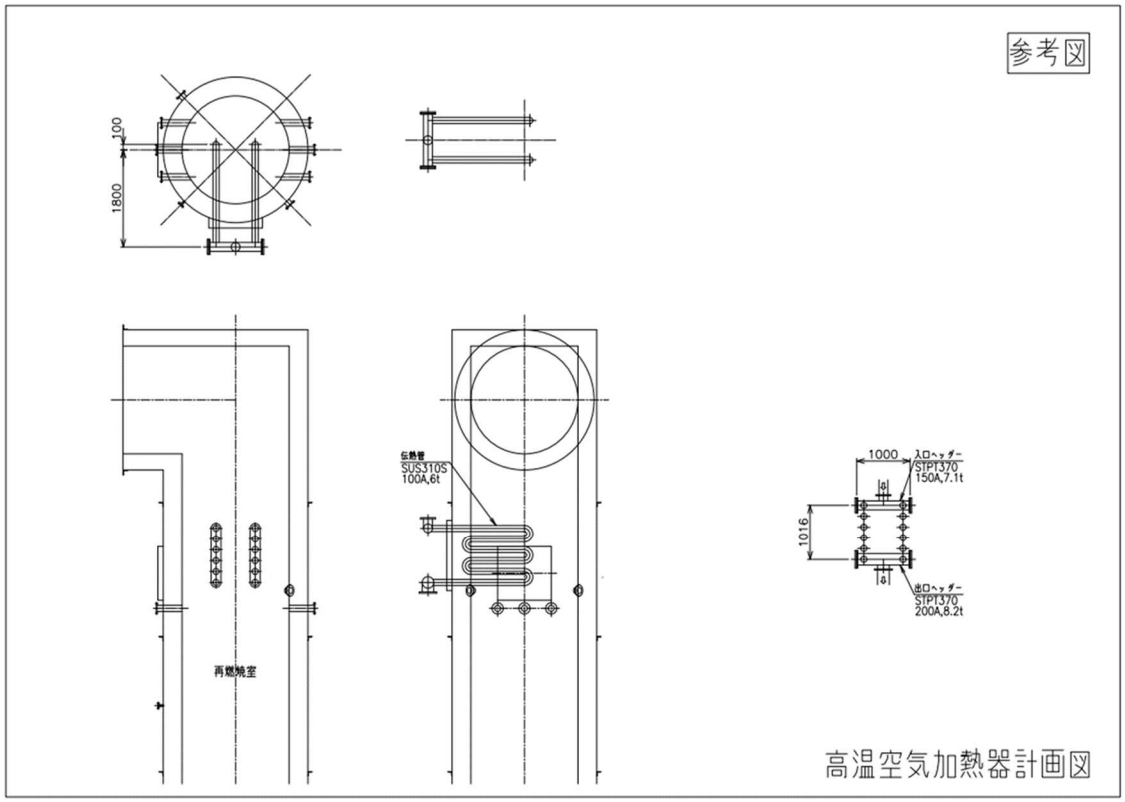



図 4-1-2　高温空気加熱器計画図

「高温空気加熱器」の設計諸元を表 4-1-1 に示す。

表 4-1-1　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℃<br>空気：　350～370℃ |
| 設計流量 | 排ガス：12,600m$^3$N/h<br>空気：　700m$^3$N/h |
| 材質等 | 伝熱部：SUS310S　100A　t=6 mm |

「高温空気加熱器」を出た 350℃・700m$^3$N/h の高温空気は、化学蓄熱材が充填された「反応器」に流入させ、反応器内に充填された水酸化マグネシウムの脱水反応に使用され、酸化マグネシウムへと化学変化し、蓄熱を行う。

蓄熱のために反応器に流入した高温空気は、蓄熱により減温されたのち反応器を出る。この空気は、当初の計画では外気に直接放出することを計画したが、空気温度は 250℃と高温であること、また、水酸化マグネシウムあるいは酸化マグネシウムなどの微粉末が混入していることも考えられることから、以下のとおりに計画変更した。

反応器にて水酸化マグネシウムの脱水反応のため熱を奪われた空気は、約 250℃まで減温され、このガスは、既設ごみ焼却炉の「第 2 ガス冷却室」の出口へ戻し、「ろ過集じん器」で排ガス処理された後、「煙突」より排出される。通常、「ろ過式集じん器」には 170℃の燃焼排ガスが 10,000～20,000m$^3$N/h で流入しており、本実証実験では化学蓄熱材にて蓄熱により、250℃の空気が流入するが、その空気量は 700m$^3$N/h (dry)と少量のため、「ろ過式集じん器」への影響はない。

熱回収設備での物質収支及び熱回収設備の概略フローを図 4-1-3、図 4-1-4 にそれぞれ示す。

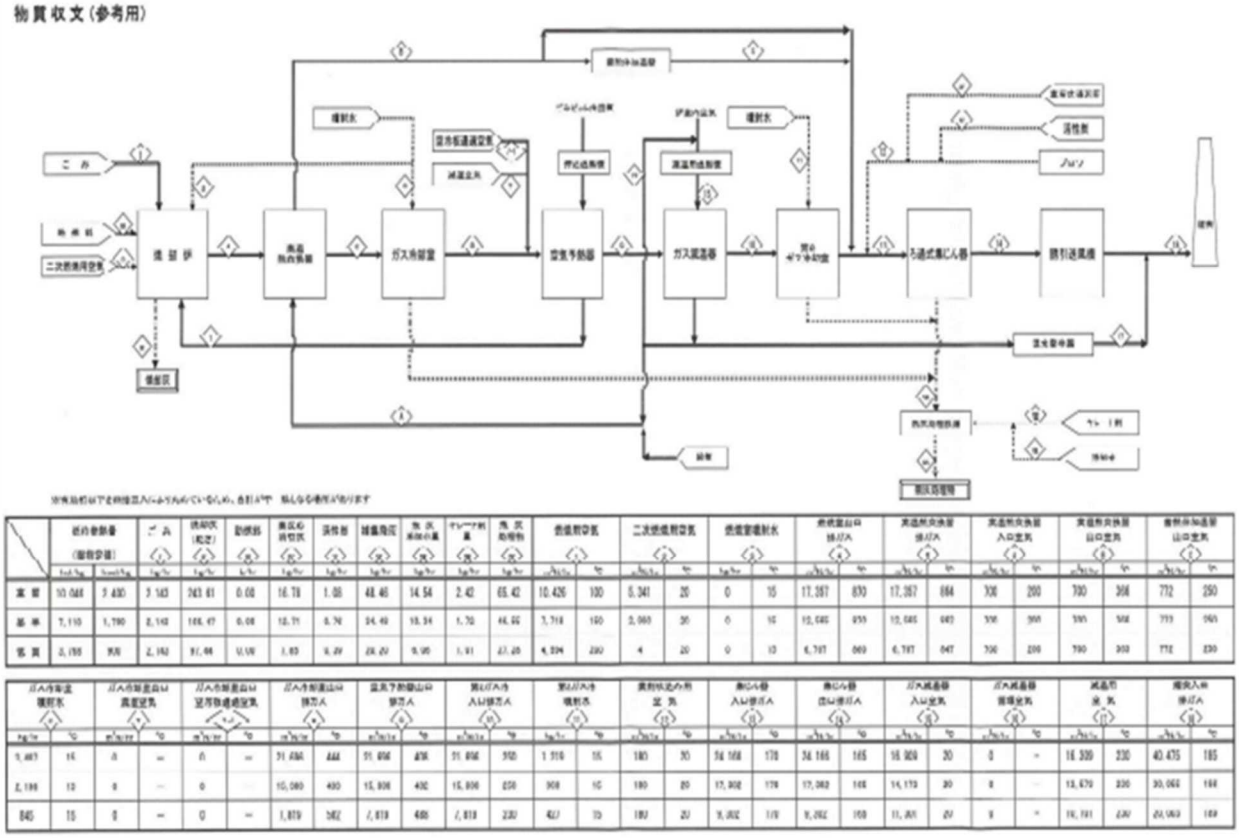



図 4-1-3　熱回収設備の物質収支

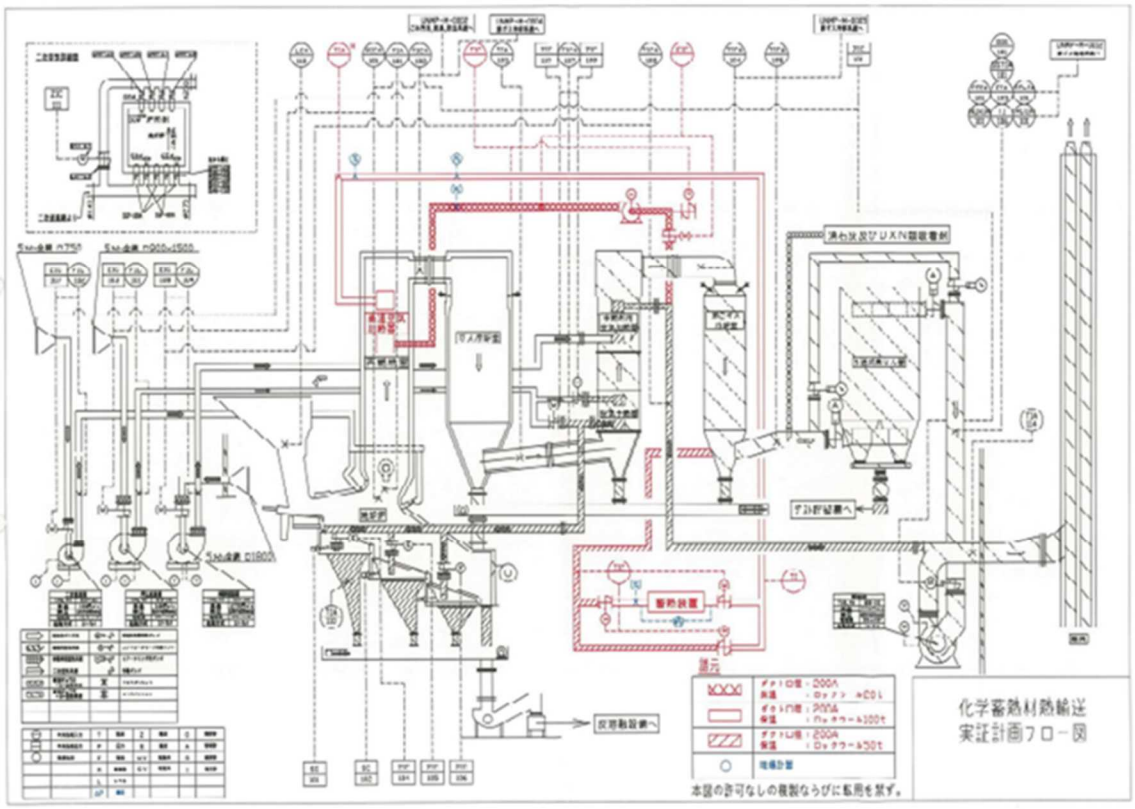



図 4-1-4　熱回収設備の概略フロー

熱回収設備のごみ焼却施設内各階の配置図等については、本事業令和 4 年度報告書を参照とされたい。

以下では、ごみ焼却施設内での熱回収設備の設置状況の現場写真を掲載した。

図 4-1-5　ごみ焼却炉再燃焼室への高温空気加熱器の設置状況

図 4-1-6　送風機設置状況

図 4-1-7　蓄熱装置（反応器）通気ダクト設置状況

図 4-1-8　反応器取付け後の状況

## ４．２．放熱装置の設計

0.125GJ の熱量を放熱する反応器を 2 基並列で備え、反応器を 1 基ずつ各 4 時間運転することにより、1 日（8 時間）当たり 0.25GJ の熱を放熱する装置を設計した。

### ４．２．１．放熱装置の設計基本計画

放熱装置は、化学蓄熱材が充填された「反応器（2 基）」と、この「反応器」に水分を含んだ空気を流通させる「ブロワ」、空気に水分を含ませるための「蒸気ボイラ」、反応器内での水との反応による発熱で高温（約 200℃）となった湿り空気により水を加熱させる「熱交換器」および立ち上げ時に反応器に流通させる空気を加温とするための「ヒータ」により構成される。高温の湿り空気で加熱した温水（約 40℃）は貯湯槽にて貯槽し、温浴施設への供給を行う。

当初の計画では、「反応器」は 1 基で 1GJ の熱を 1 日（8 時間）で放出させる装置とした。一方、熱回収設備は 4 日間で 1GJ を回収する計画としたため、1 日で熱放出を行った後に、反応器を焼却施設に移動させた後に、4 日間を掛けて 1GJ の熱を蓄熱材に蓄熱させるといった、放熱時間と蓄熱時間との不整合さによる時間的なロスによる実験作業の効率の悪さが懸念された。

また、反応器 1 基当たり 1GJ の熱を放出させるために必要となるガス量が 60m$^3$N/min となることや、反応器に充填する酸化マグネシウムの量が 500 kgとなることなど、大きな放熱装置が必要となることは、実証実験での予算上の問題に加え、実験場所の敷地の大きさも課題となることから、計画変更を行い、1 日（8 時間）当たりの放熱量を 0.25GJ とすることで、蓄熱設備の能力（1GJ/4 日間）を変更することなく、放熱反応と蓄熱反応とを 1 日おきに交互に実施出来る時間的に無駄のないシステムとすることが出来た。また、反応器を 2 基並列とし、1 基当たりの放熱量を 0.125GJ とすることで、システム内を循環するガス流量を 6m$^3$N/min に抑えた装置に変更ができるため、温水回収装置や蒸気ボイラ等の各機器のダウンサイジングにより装置の製作費用を抑えることを計画した。

放熱設備の概略フローを図 4-2-1 に示し、設備の系統図を図 4-2-2 に示す。

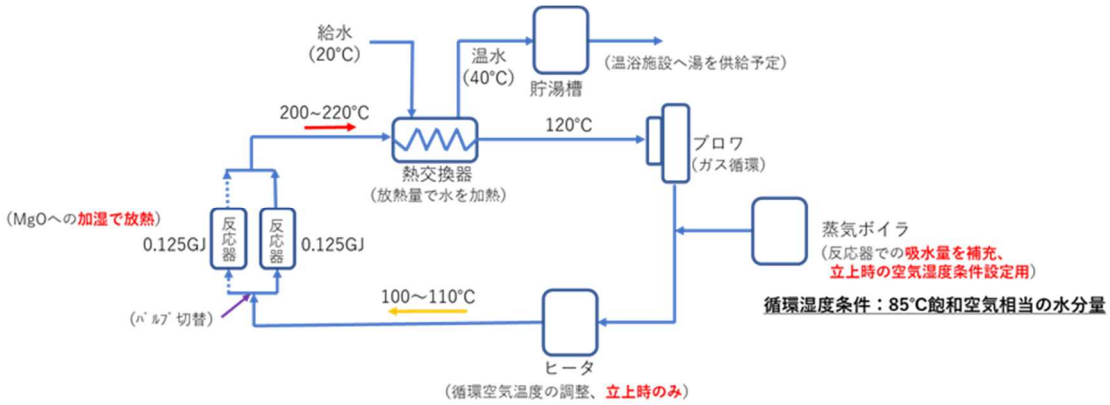



図 4-2-1　放熱設備の概略フロー図

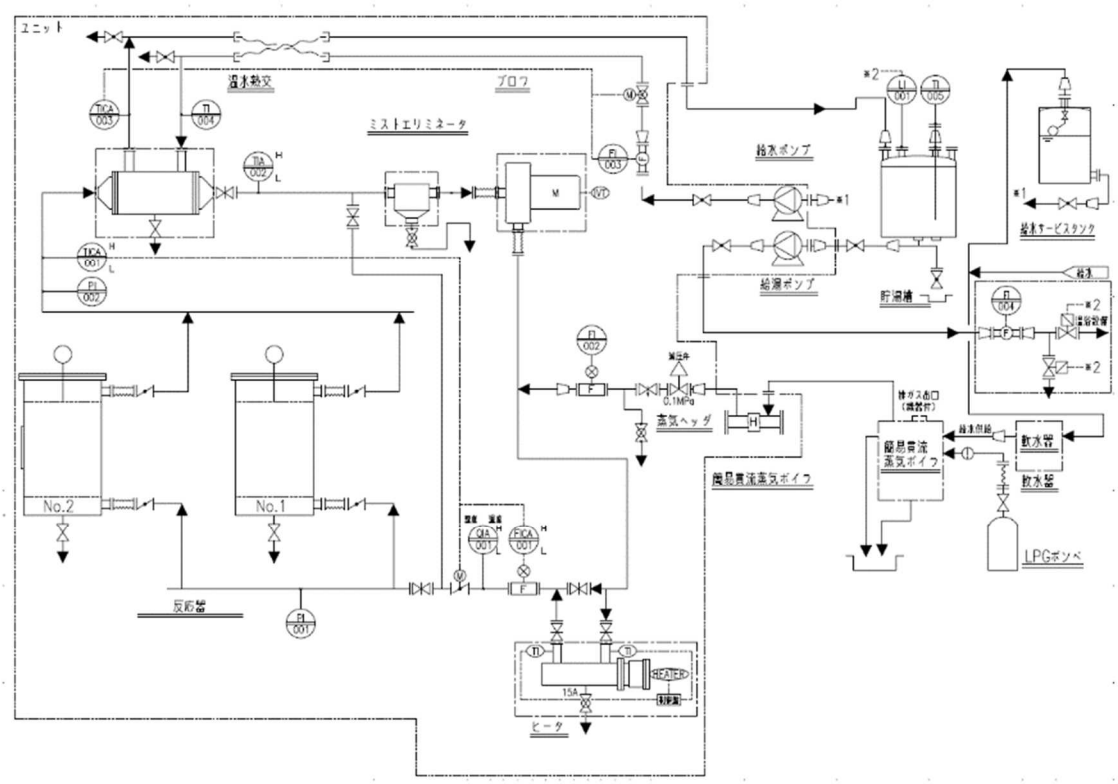



図 4-2-2　放熱設備系統図

放熱設備は、湿り空気を循環させたクローズドシステムとなっている。今回使用する化学蓄熱材は、適正な空気の温度かつ湿度条件下において、効率よく発熱（水和）反応させるため、温度、湿度の管理に注意をはらう必要がある。
まず、循環空気中の水分量として 85℃の飽和空気に含まれる水蒸気相当量を添加する必要がある。循環する空気に加湿を行う方法は、バブリング装置や直接水噴霧などがあるが、今回は、コンパクト化と加湿の安定性等を考慮して「蒸気ボイラ」による加湿方式を採用した。熱源としては、地方において供給しやすいプロパンガスを用いている。この蒸気ボイラは、立上時に循環空気の湿度を設定するために用いた後、化学蓄熱材が放熱の際失う水分量を、補充するのに用いられる。
なお、水蒸気は、放熱設備を活用する施設がすでに保有する低圧蒸気の一部を活用することや、再生可能エネルギー由来の熱源を用いた発生装置を用いることも可能である。
化学蓄熱材の充填された「反応器」へ送られた加湿空気は、「反応器」の内部で水蒸気と酸化マグネシウムとの水和反応による発熱により加湿空気を加熱する。なお、今回の化学蓄熱材は、85℃以上かつ適正な湿度の湿り空気で水和反応を起こすが、湿り空気温度が 100℃未満では、反応系内で結露が発生し、系内に投入した蒸気の無駄が生じる可能性がある。このことから、循環系内の湿り空気温度は、100～110℃程度に調整することとした。
反応器で発生する反応熱により、系内を循環する湿り空気は、「反応器」出口で 200～220℃まで上昇し、その後段にある「温水熱交換器」にて、「給水ポンプ」によ

り供給する水（20℃、0.5m³/h）との熱交換により、「温水熱交換器」の出口で湿り空気温度は120℃程度まで冷却され、給水した水は20℃から約40℃の温水となる。
温水は、「貯湯槽」（容量：2m³）に一旦貯蔵し、翌朝「給湯ポンプ」により温浴施設に給湯される。
給水は「水道水」を用いており、一旦「給水サービスタンク」に貯めた上で、温水熱交換器に供給する。「蒸気ボイラ」への給水は、水道水を軟水装置で処理し供給している。
　「温水熱交換器」を出た湿り空気は「ブロワ」により反応器に戻され、その間に、消費した水蒸気が補充される。
　なお、フローにある「ヒータ」は、冷間時の立上時に使用するが、反応が開始し、「反応器」出口の温度が上昇し、定常運転に入ると停止させる。

以降に、放熱設備外形図、全体配置図（平面図）、全体配置図（側面図）を示す。

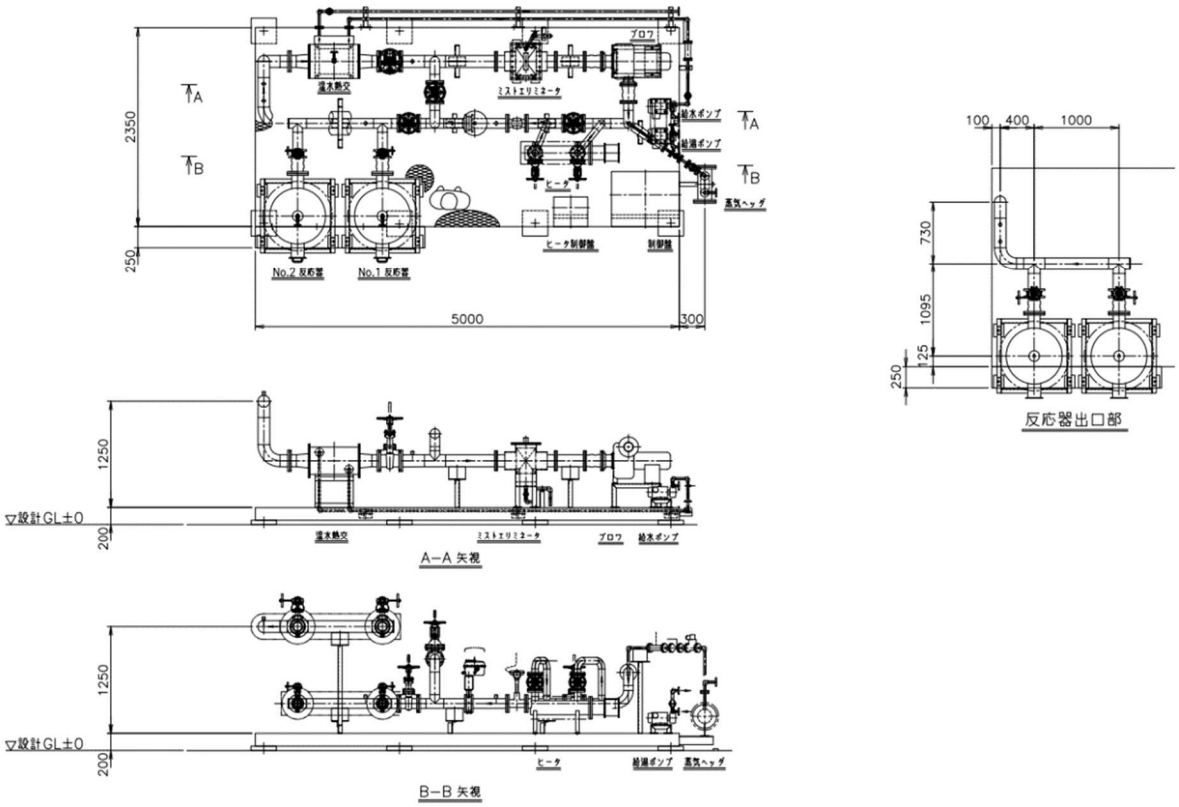


図 4-2-3　放熱設備外形図

　放熱設備本体は、蒸気ボイラ及び給水サービスタンクと貯湯槽などの付属機器を除いた主要設備の外形図を図 4-2-3 に示す。2,350mm×5,000mm の台座に設備を搭載し、温浴施設の空きスペースに設置するが、放熱能力の最適化を図った上で、反応槽などの脱着部分を共通台座から分離し、20 フィートコンテナなどへの搭載も検討する。
ISO で規定された 20 フィートコンテナの規格は、以下のとおりである。

外寸長さ　　6,058mm 幅 2,438mm 高さ 2,591mm
最小内寸長さ　5,867mm 幅 2,330mm 高さ 2,350mm
最大総重量　　30,480kg

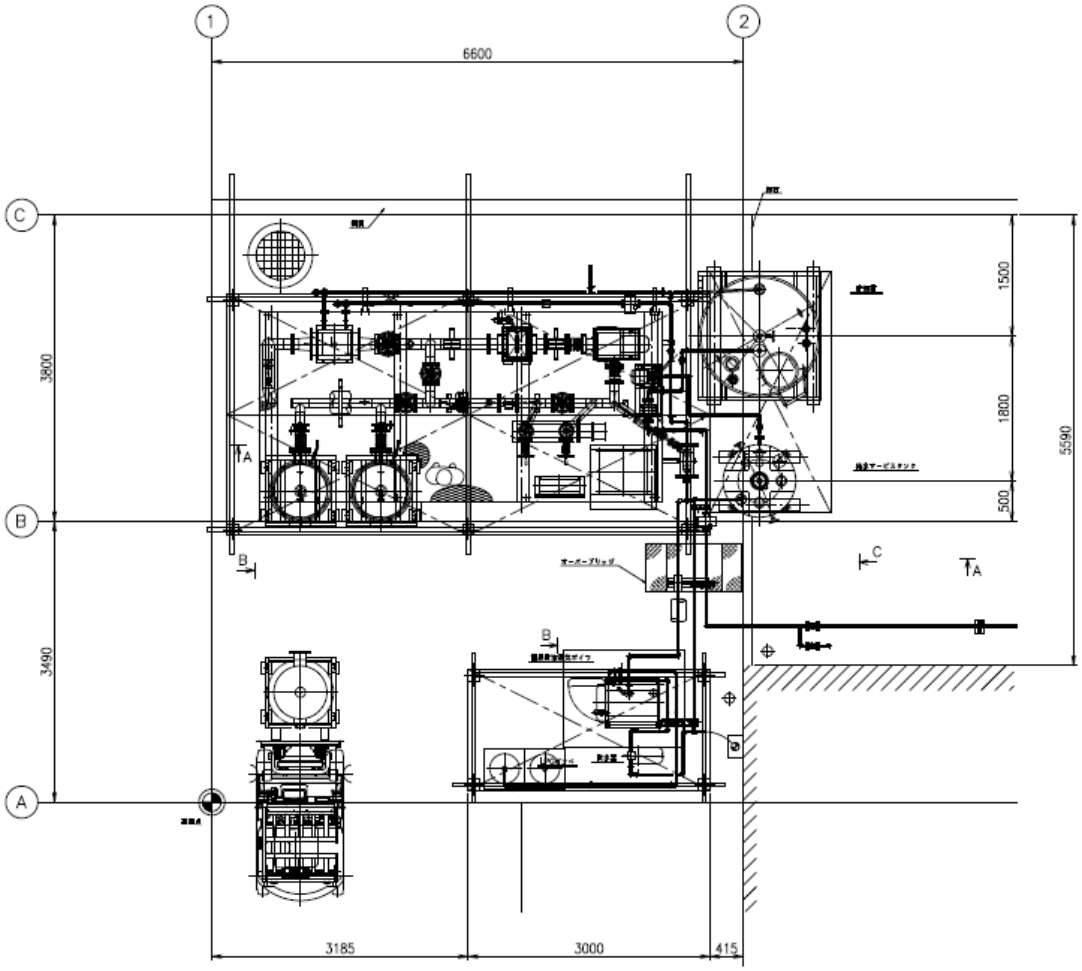



図 4-2-4　放熱設備全体配置図（平面図）

放熱設備の全体配置としては、今回、熱利用先の「加津佐総合福祉センター希望の里」の建物脇に設置し、放熱設備の雨除け対策として、仮設の囲いを設置した。
仮設の囲いの下には、蒸気ボイラとその熱源であるプロパンガスボンベを設置し、図の A 通りの部分にカーテンウオールにて、仕切りを設けた。
2 基の反応器は、図 4-2-4 の左下部に示すように、フォークリフトにて移動させ、放熱設備への脱着操作を行った。
放熱設備の側面図を図 4-2-5 に示し、放熱設備の主要部の設置状況、ボイラ、貯湯槽および温浴施設内の男性用浴室までの温水配管の状況を図 4-2-6～図 4-2-9 に示す。

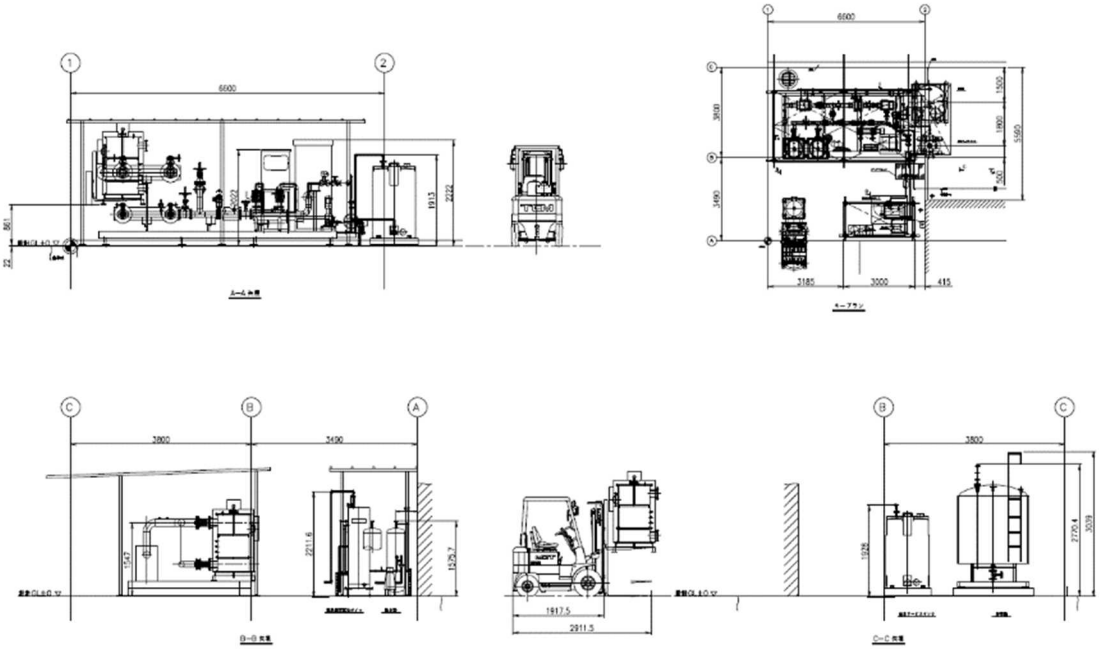


図 4-2-5　放熱設備全体配置図（側面図）

図 4-2-6　放熱設備主要部設置状況写真

図 4-2-7　ボイラ設置状況

図 4-2-8　貯湯槽設置状況

図 4-2-9　温浴施設内湯船への温水送水配管設置状況

図 4-2-10 に放熱設備の設置場所である「総合福祉センター希望の里」の敷地図面及び航空写真を示す。

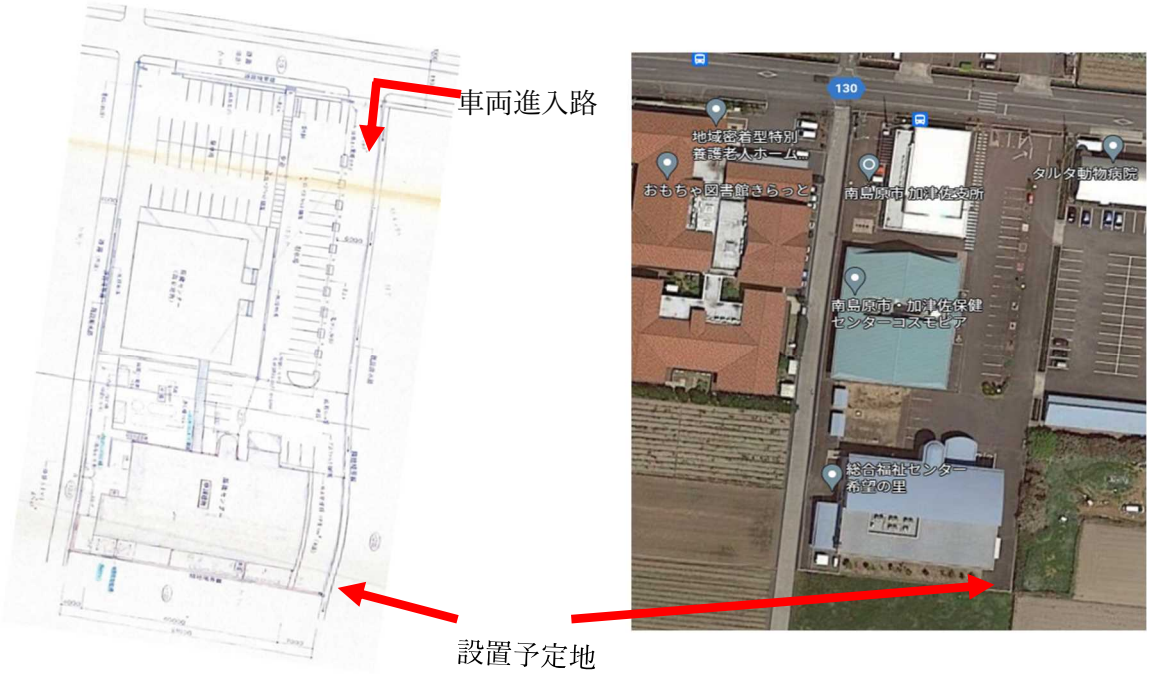



図 4-2-10　温浴施設の平面図および放熱設備の設置位置

## ４．３．実証試験設備設計のまとめ

### ４．３．１．規模縮小の影響

当初、実証試験設備は 1 GJ の熱の回収・蓄熱とその利用・放熱を計画していた。1 GJ の熱を蓄放熱するにはおよそ 500 kgの MgO を充填した反応器が必要となる。熱回収設備を設置する廃棄物処理施設（30t/16h×2 炉の焼却炉）では、蓄熱に 350℃の熱風 400m$^3$N/h を用いて 4 日間（8 時間/日×4 日）を要する。また、熱利用側の温浴施設（8h 営業で毎月 1000 人程度が利用。約 10m$^3$ の浴槽のお湯はりだけで 0.9GJ 程度必要）においては、反応器に 60m$^3$N/min の循環空気を流しても 1GJ の放熱に 1 日（8 時間/日×1 日）かかる。このため、当初計画では一連の蓄放熱の実証に 5 日かかり、熱利用（放熱）設備では蓄熱のための待ち時間が発生してしまう。

今年度の設計の見直しにおいて、1 日の蓄熱量と放熱量を整合させることを検討した。まず、ごみ処理性能を落とすことなく、熱回収のための送風量を 400m$^3$N/h から 700m$^3$N/h に増量できることが判明し、0.125GJ の蓄放熱が可能な反応器 2 基を並列に設置して同時に 5 時間/日×1 日で 0.25GJ の熱回収が可能となった。これは 1 日当たりの熱回収能力としては当初計画と同じである。また、0.25GJ の蓄放熱に必要な MgO 量は 1/4 になり、さらにこれを 2 基で分担するため反応器をコンパクトにでき、取り回しが楽になると考えられる。

一方、放熱（熱利用）設備では、2 基の反応器を 1 基ずつ運転（4 時間/基×2 基＝8 時間）することで、1 日で蓄熱した 0.25GJ の熱を 1 日で放熱する。これにより蓄放熱

の日数のアンバランスがなくなり、放熱のための循環空気流量も約 1/10 で済むため、ブロワを小さくすることができる。反応器を 2 基としたことで放熱設備はもとより、実証設備全体をコンパクトで効率的なものにすることが可能となる。

また、コンパクトな複数の反応器による熱輸送は、基数の調整により様々な熱量を必要とする複数施設への熱輸送への展開をしやすくすると考えられる。今回、2 基の同時蓄熱と 1 基ずつの切り替え放熱の両方を実証することで、必要に応じて反応器を増設した場合の装置や、連続運転方法の設計も可能になると期待される。

設備規模は小さくとも、空気流量、空気温度、消費電力等を計測し、物熱収支を得ることで今回の設計の検証を行い、実機（商用機）の設計が可能となる。

### ４．３．２．既存施設の操業・運営への影響

本実証設備では、蓄熱用の通風に燃焼排ガスではなく清浄な空気を用いる。

既設の「余熱利用空気加熱器」により加熱された清浄な空気の一部を、焼却炉上部の「再燃焼室」に新たに設置する「高温空気加熱器」に通し、350～360℃の高温空気を得る。この高温空気を 700m$^3$N/h の流量で「反応器」に流し蓄熱する。

当初は、反応器を出た空気は直接大気に放出する計画であったが、今の計画では「ろ過式集じん器」の前に戻される。この空気の温度は反応器を出た後で 250℃程度であるが、燃焼排ガスの 5%ほどの流量しかなく、合流した燃焼排ガスの温度上昇は 2℃未満である。したがって「ろ過式集じん器」の性能への影響はないことが、図 4－1-3 の物質収支からも確認できる。また、蓄熱材と直接接触することにより、その微粉末が万一混入していたとしても「ろ過式集じん器」によって取り除くことができる。

図 4-1-5～4-1-8 に示すように、焼却炉操業時の人の動線等にもほとんど影響がないコンパクトな蓄熱設備の設計になっている。

熱利用施設に設置する放熱設備は、蓄熱材が充填された「反応器（2 基）」と、この「反応器」に水分を含んだ空気を送るための「ブロワ」、空気を加湿するための「蒸気ボイラ」、蓄熱材からの放熱で高温となった空気により水を加熱する「温水熱交換器」および立ち上げ時に反応器に流す空気を高温とするための「ヒータ」により構成される。

放熱設備では蓄熱された MgO の水和（発熱）反応で熱を放出するため、反応器に流す空気の温度と湿度を安定して一定に保つ必要がある。その加湿の安定性を保ち、かつ小型の装置として「蒸気ボイラ」を採用している。また表 3-1-2 にあるように、定常運転時には、入力に対して出力が約 3 割のエネルギーゲインになることをエネルギー収支から確認している。

今回の設計で、放熱設備も図 4-2-6～4-2-9 に示すようにコンパクトにまとまり、図 4-2-5 に示すように、施設敷地内の隅の建屋外に仮設の雨よけを設け、設置可能となった。ここは施設運営上、人の動線がなく、フォークリフトによる反応器の移動を行っても施設職員や客との接触がなく、安全である。

以上のことから、本実証設備は実機設計データが取得でき、複数の熱利用施設への熱輸送も計画可能となる、コンパクトで効率的、かつ安全な設計が行われていることがわかる。令和 5 年度の実証試験を通じて本設計を検証し、実証設備の有効性を確認していきたい。

## ４．４．反応器の輸送

本事業での蓄熱材の輸送方法は、蓄熱材を充填した反応器自体を熱回収装置あるいは放熱装置から作業員の手で取り外し、フォークリフトにて運搬車両に積み込んだうえで、ごみ焼却施設と温浴施設との間を往復させた。

反応器をトラックに積み込んだ状態を図 4-4-1 に示し、ごみ焼却施設と温浴施設との運行ルートを図 4-4-2 に示す。

図 4-4-1　反応器を運搬車両に積み込んだ状態

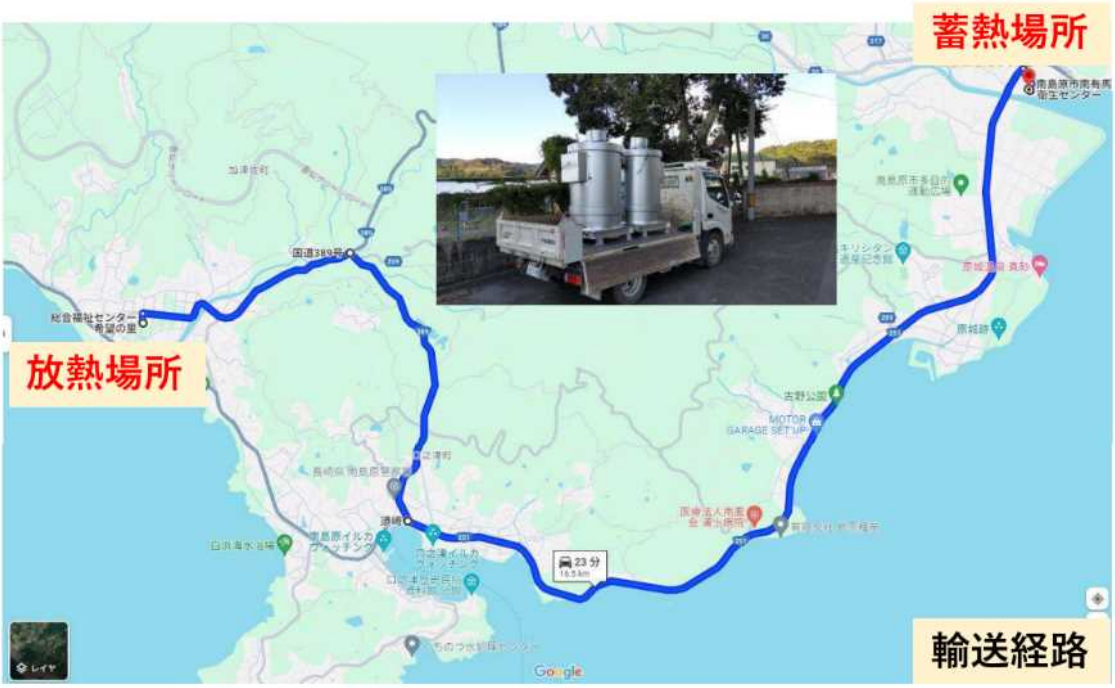



図 4-4-2　ごみ焼却施設と温浴施設間の運行ルート

ごみ焼却施設と温浴施設は車で約 20 分の距離に立地している。
本事業で利用するごみ焼却施設が間欠運転式（准連続運転:16h/日）ということで、焼却炉は毎朝立ち上げを行っており、立ち上げの開始時間はおよそ午前 9 時頃である。前日に、ごみ焼却施設に持ち込まれた反応器を熱回収装置と接続しておき、翌日の午前 9 時頃から蓄熱操作を開始する。蓄熱操作は午後 3 時から 4 時頃に終了し、反応器を熱回収装置から取外し輸送車両に積込み、午後 5 時頃に温浴施設に運び入れる。
温浴施設では、運び込まれた反応器の重量を測定した後、放熱装置に接続する。
翌日に放熱反応を約 8 時間かけて実施した後に、午後 3 時頃に反応器を放熱設備から取外し、重量測定を行った後、午後 5 時頃にごみ焼却施設に運び入れる。
詳細の工程、および実験スケジュール等については、５．実証実験結果にて報告する。

## ５．実証実験結果

### ５．１．実験準備

#### ５．１．１．反応器への蓄熱材充填

蓄熱材はタテホ化学工業より調達した PM-2 と呼ばれる製品である。タテホ化学工業では、各需要家の要求に沿った酸化マグネシウム、水酸化マグネシウムの製造を行っており、タテホ化学のホームページによると、PM2 は千葉大学劉醇一准教授（2014 年度まで東京工業大学に在籍）らとの共同研究により 300℃での蓄熱を可能とした水酸化マグネシウム系蓄熱材 CHARGEMAG® PM-1 の改良品のようである。
通常の水酸化マグネシウムを蓄熱材として利用する場合には、350℃以上の排熱しか利用できなかったところ、金属塩などを添加した CHARGEMAG® PM-1 を用いると、図 5-1-1 に示すように、これまで利用できなかった 300℃程度の排熱の有効活用が可能なことを特徴としている。

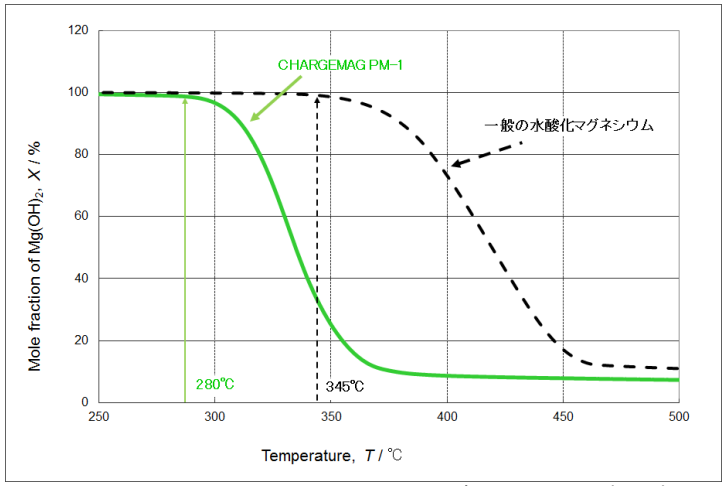


図 5-1-1　タテホ化学工業製水酸化マグネシウム（PM1）の特性

図 5-1-2　化学蓄熱材 PM2 の外観

PM2 の外観は、図 5-1-2 にみられるように、白色の粉末を直径 3 mm長さ 5 mm程度の円柱状に固めたペレット状態のものである。

蓄熱材の主成分は水酸化マグネシウムであるが、そのほかの添加物の種類や量については公表されていない。本事業で用いた PM-2 は PM-1 を改良し、蓄熱並びに放熱での反応に必要な温度をさらに低下できたとのことである。

化学蓄熱材 PM-2 を充填する反応器の内部構造を図 5-1-3 に示す。

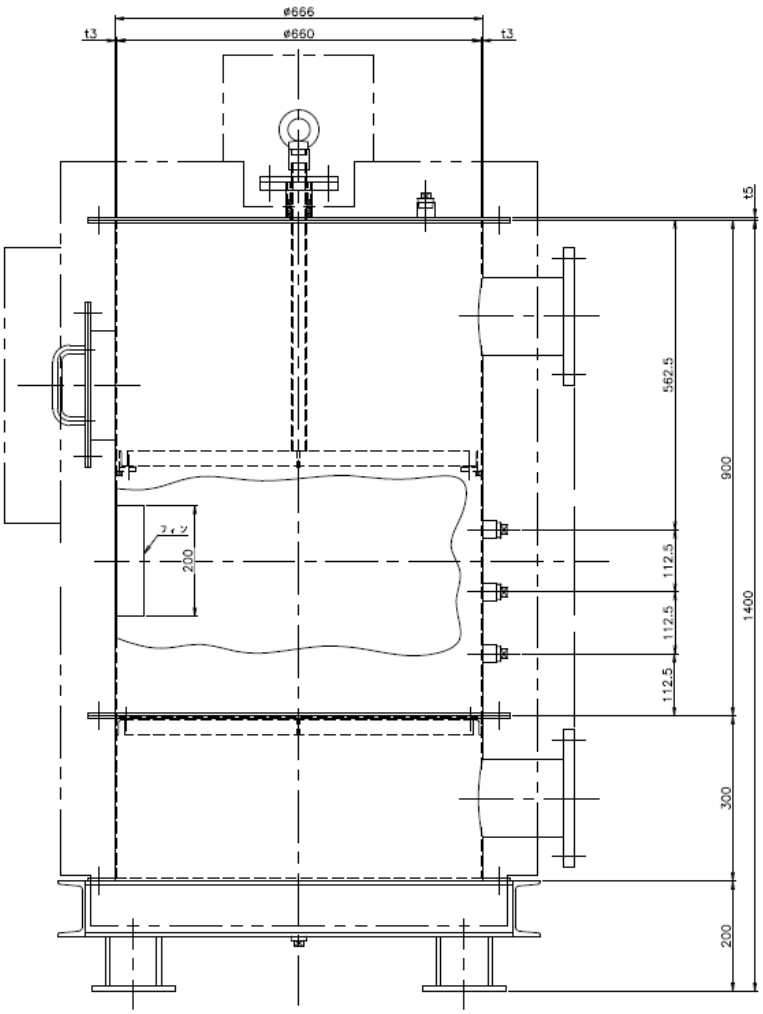



図 5-1-3　反応器の内部構造

反応器は内径 660 mm×高さ 1,200 mmの円筒状で、蓄熱材は円筒の底面から 300 mm上部に設置した 200 メッシュの金網より上に充填する。
表 5-1-1 に示すとおり、充填量は約 130 kg（初期充填容積：約 0.15m$^3$、初期充填層高さ：約 440mm）で、蓄熱量 0.125GJ に相当する。この熱容量で反応に必要な水分量は 28 kgとなっている。130 kgを反応器に充填した際の蓄熱材の層の高さは約 435 mmとなり、充填容積は 0.148m$^3$であった。
蓄熱材の反応器への充填状況を図 5-1-4、図 5-1-5 に示す。

表 5-1-1　蓄熱材の充填状況

| 蓄熱材諸元 | 単位 | 値 | 備考 |
|---|---|---|---|
| PM-2 | - | - | タテホ化学工業㈱製 |
| 充填重量 | kg | 約130 | 初期充填時 |
| 層高 | mm | 435 | 初期充填時 |
| 充填容積 | m3 | 0.148 | 初期充填時 |
| 反応水分量 | kg | 約28 | 理論値<br>(0.125GJに対して) |

図 5-1-4　蓄熱材充填状況

図 5-1-5　蓄熱材の反応器への充填状況

## ５．１．２．管理項目の設定

実証実験に当たっては、蓄熱装置及び放熱装置での管理項目及び管理目標値をそれぞれ定めた。

### （１） 蓄熱装置における管理項目と管理目標値の設定

表 5-1-2 に蓄熱装置運転における管理項目及び管理目標値を示す。

表 5-1-2　蓄熱装置運転における管理項目及び管理目標値

| 管理項目 | 管理目標値 | 目標設定の考え方 |
|---|---|---|
| 反応器入口空気温度 | 350°C | 化学蓄熱材1GJを2hで反応させるために必要とされる空気温度※ |
| 反応器入口空気流量 | 700m3N/h | 化学蓄熱材1GJを2hで反応させるために必要とされる空気流量5,400m3n/h※を元に、今回の規模（0.25GJ）を5hで蓄熱するために必要な空気流量<br>(蓄熱時間が流量に逆比例する知見※からスケールダウン<同条件(温度,材量)において>)<br>必要流量＝5,400×蓄熱量/1GJ×(2h/反応時間)×余裕率(1.3)<br>5,400*(0.25/1)×(2/5)×1.3≒700 |
| 反応時間 | 5h | 高温空気加熱器の規模決定のために設定した値 |

（イ）反応器への通ガス温度は、図 5-1-1 に示すように、水酸化マグネシウムの脱水反応の開始温度が蓄熱材 PM-2 では 300℃付近であるが、実装に向けた最適温度条件は 350℃である。一方、再燃焼室内に設置した高温空気加熱器の耐熱温度が 390℃であることから、上限温度を 390℃に設定し、この間での高温空気加熱器の温度調整を行った。

温度調整は、吸引ブロワにより高温空気加熱器に流入する室内空気（30℃程度）と余熱利用空気（250℃程度）との流量を調節することにより行った。高温空気加熱器への空気の流入と、反応器への接続の概念図を図 5-1-6 に示す。

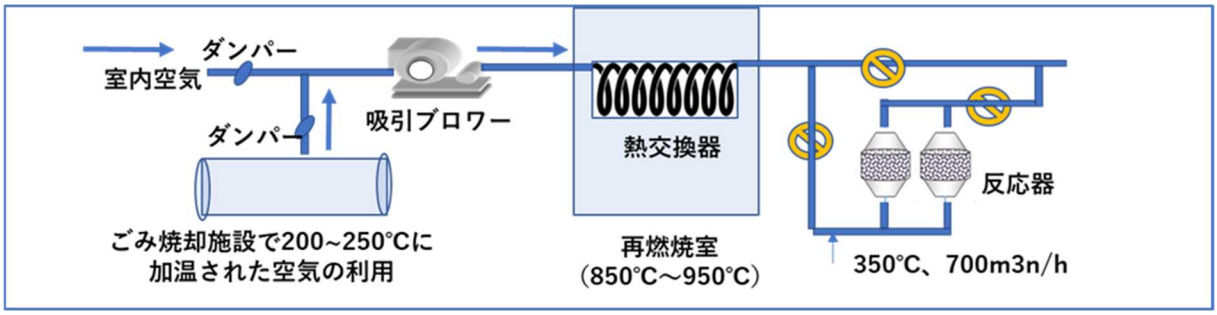



図 5-1-6　高温空気加熱器と反応器への高温空気の流入概念図

（ロ）反応器への通ガス流量はタテホ化学工業において事前に実施した蓄熱・放熱試験により、蓄熱材 PM-2 では通気ガスの温度が 350℃で流速を 700m$^3$N/h とした場合には、通気 5 時間で蓄熱反応が終了することを確認しており、本事業での通気空気流量の管理目標値を 700m$^3$N/h とした。

（ハ）蓄熱反応の終了までの時間についても、タテホ化学工業での予備的な試験結果から 5 時間を目標値と定めた。

## （２）放熱装置における管理項目と管理目標値の設定

放熱装置の概略フロー及び放熱装置の運転管理項目及び管理目標値をそれぞれ、図 5-1-7、表 5-1-3 に示す。

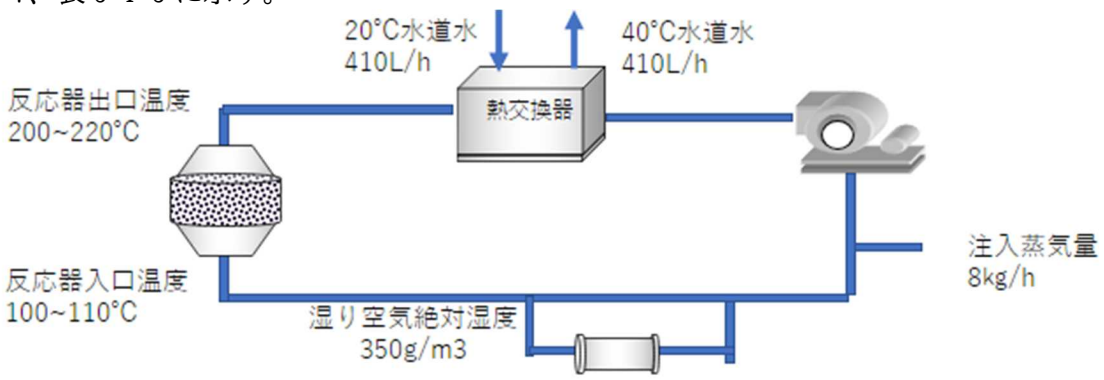



図 5-1-7　放熱設備の概略フロー

表 5-1-3　放熱装置運転における管理項目及び管理目標値

| システム管理項目 | 管理目標値 | 目標設定の考え方 |
|---|---|---|
| 反応器入口温度 | 100～110°C | 蓄熱材反応は85°C程度から開始※。湿り空気中の水蒸気の凝縮が起こらない100°C以上の設定値 |
| 反応器出口温度 | 200～220°C | 蓄熱材からの放熱反応により取り出せる湿り空気の最高温度域※ |
| 湿り空気の湿度 | 350g/m3 | 提供される化学蓄熱材に対する放熱反応に必要な湿り空気の絶対湿度※<br>(85°Cの飽和蒸気相当量を含む湿り空気) |
| 湿り空気流量 | 400m3/h | 提供される化学蓄熱材に対する放熱反応に必要な湿り空気の流量※ |
| 蒸気投入量 | 8kg/h | 反応器1基から0.125GJを4hで放熱させるために必要な時間平均水蒸気量<br>（理論上の時間平均水蒸気量　約28kg/4h=7kg/h※） |
| 温水流量 | 410ℓ/h | 温水熱交換器最大通水量（上記、混合気体の条件にて） |

（イ）反応器入口温度については、蓄熱材の反応が 85℃程度から開始されることは、タテホでの予備実験等でも確認されている。また、循環する湿り温度が 100℃を下回ると湿り空気中に存在する水蒸気の凝縮が起こることから、100℃以上とする必要があり、反応器に流入する循環湿り空気の入口温度は 100～110℃を管理目標値とした。

（ロ）反応器出口の湿り空気温度については、蓄熱材からの発熱反応熱量で定まるもので、循環空気量を 400m$^3$/h と設定した場合には、反応器出口での湿り空気温度の最高温度は、200～220℃となる。

（ハ）放熱反応後の湿り空気（温度 200～220℃、流量 400m$^3$/h）を温水熱交換器に通気させ、水（20℃、410L/h）を 40℃まで加温できる設計とした。

（ニ）反応器に通気される湿り空気中の絶対湿度を空気温度 85℃での飽和水蒸気量相当とすることで、反応器に充填した蓄熱材と水との最適な発熱反応が起こる。このため、反応器の手前で、蒸気ボイラから蒸気の注入を行う。注入量は 0.125GJ の発熱量を放出するために必要な水分量（約 28 kg）を反応想定時間の 4 時間での注入速度 8.25 kg/h となり、この蒸気注入量を管理目標値とする。

（ホ）循環する湿り空気流量は、湿り空気中の水蒸気濃度が 350g/m$^3$ 程度でかつ 85℃での飽和蒸気圧となる条件下において、400m$^3$/h を管理目標値とした。水蒸気濃度の

350g/m³については、タテホ化学工業での事前の試験において、蓄熱材の水和反応が起こる温度と、蒸気圧との関係から導かれたものである。

## ５．２．運転実績

### ５．２．１．週間運転工程

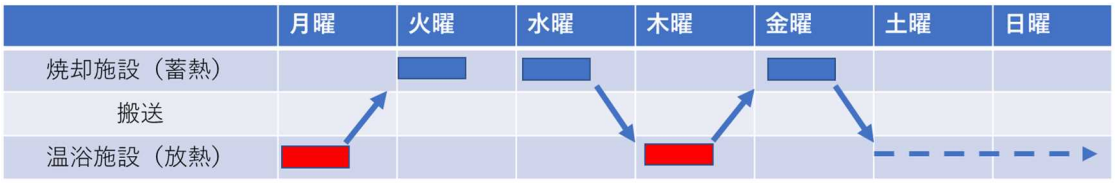
焼却施設での蓄熱操作と、温浴施設での放熱操作とについての当初の計画は、月曜日に放熱操作を行い、作成した温水を温浴施設に供給し、火曜日、水曜日で蓄熱操作を行う。木曜日に放熱を行い、温水を温浴施設に供給し、金曜日に蓄熱操作を行う。このサイクルを継続することで、月曜日と木曜日に温浴施設への温水の供給を行う計画とし実験当初はこのスケジュールに従った。

しかしながら、金曜日での蓄熱操作の後に、土曜日、日曜日を挟むことで、反応器内の温度が徐々に低下し、放熱反応を開始する月曜の朝には、ほぼ外気温となる。すなわち、蓄熱操作による反応器への蓄熱には、反応器内に充填された化学蓄熱材の脱水反応に伴う潜熱と、蓄熱材および反応器を室温から350℃程度まで温めた顕熱の両者が熱として反応器に蓄積されており、脱水反応による潜熱は水蒸気との反応を起こさない限り放熱による潜熱減少は起こらないが、顕熱部分は外気との温度差があるため、時間と共に外気への放熱により減少し反応器内の温度も低下する。

反応器内の温度が低下すると、温浴施設にての放熱反応を開始するために必要となるシステム内を循環する空気温度100℃程度を達成させるための熱供給量が多量に必要となり、この熱エネルギーは放熱反応の熱エネルギー効率の低下を招くこととなる。

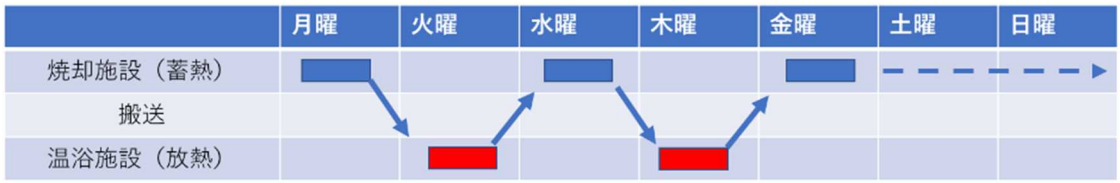
このため、蓄熱材及び反応器自体の温度上昇分である顕熱を放熱反応の開始時での熱エネルギーとして利用させるため、蓄熱反応を月曜日に再び実施し、翌日の火曜日に放熱反応を開始させ、反応器の放置時間の短縮を図ることで、反応器に蓄えられた顕熱を有効に利用する計画に変更した。

週間運転計画の当初計画及び変更後の運転計画パターンを図5-2-1に示す。




計画当初：
月曜に温浴施設に40℃の湯を送るため、金曜に蓄熱を完了し、月曜での放熱を計画。
この計画では、蓄熱材及び反応器に蓄えられた熱（顕熱）が土日の間に放熱するため、熱の無駄が生じた。

計画変更（8月28日以降）：
月曜と水曜に蓄熱と温浴施設までの搬送を行い、火曜と木曜に放熱させることで、熱の無駄を削減できた。




7/3蓄熱装置の高温AH運転開始。8/4蓄熱装置負荷運転。8/21放熱装置負荷運転開始。
上記の変更により、浴槽への定期のお湯供給は週1回に変更とした。（その結果、計6回に留まった。）

図 5-2-1　週間運転計画の当初計画及び変更後の運転計画パターン

### ５．２．２．実証（7 か月間）運転スケジュール

令和 5 年 8 月から蓄熱と放熱を繰り返す実証実験を開始すべく、蓄熱設備については、6 月中に完成させており、7 月は焼却炉の運転に伴い、再燃焼室に設置した高温空気加熱器への空気の通気のみを行う無負荷運転を述べ 21 日間実施した。
7 月中に、放熱設備を完成させ、8 月第 1 週目から放熱設備の試運転を実施し、8 月 21 日から A 系統のみでの 1 系負荷運転を開始した。

10 月からは放熱設備の A,B の 2 系統連続運転も実施し、12 月 22 日で放熱反応を終了させ、令和 6 年 1 月 12 日に蓄熱装置の取外しを行い、蓄熱・放熱反応を終了させた。

なお、蓄熱反応装置については、取外し後に設備の損傷状況等についての目視・計測を行い、蓄熱材については、反応器から回収した後、タテホ化学工業に持ち込み、劣化状況や再生処理のメーカ評価を行った。
各月での蓄熱・放熱の運転回数を表 5-2-1 に、詳細を表 5-2-2 に示す。

表 5-2-1　各月の蓄熱・放熱運転回数

| | 蓄熱 | | | 放熱 | |
|---|---|---|---|---|---|
| 月 | 無負荷 | 負荷 | 1系統のみ負荷 | 負荷 | 1系統のみ負荷 |
| 7 | 21 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 8 | 19 | 1 | 4 | 0 | 4 |
| 9 | 20 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| 10 | 13 | 4 | 3 | 4 | 3 |
| 11 | 21 | 1 | 0 | 2 | 0 |
| 12 | 13 | 7 | 0 | 6 | 0 |
| 1 | 7 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 計 | 114 | 13 | 8 | 12 | 7 |

表 5-2-2　各月の詳細運転状況

★　全体減圧
○　無負荷運転　☆　お湯はり送水
⊙　負荷運転　⊙1　1系のみ負荷運転

| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 | 31 | ⊙ | ⊙1 | ○ | 計 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 7月 | 蓄熱 | | | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | | | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | | | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | | | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | | | ○ | 0 | 0 | 21 | 21 |
| | 放熱 | | | ← | 放熱設備工事 | | → | | | ← | | 工事予備期間 | | → | | | | ← | | | | | | | 放熱設備工事 | | | | | | | | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 8月 | 蓄熱 | ○ | ○ | ○ | ⊙ | | | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | | | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | | | ○ | ⊙1 | ○ | ○ | ⊙1 | | | ○ | ○ | ⊙1 | ○ | 1 | 3 | 19 | 20 |
| | 放熱 | | → | ← | 放熱 | → | | | | ← | | | | | 夏季休暇 | | → | | ★ | | | ⊙1 | | | ⊙1 | | | | | ⊙1 | | ⊙1 | 0 | 4 | 0 | 0 |
| 9月 | 蓄熱 | ⊙1 | | | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | | | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | | | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | | | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | | | - | 0 | 1 | 20 | 20 |
| | 放熱 | | | ← | | | | | | | | | | | | | | | | | データ整理 | | | | | | | → | | | | - | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 10月 | 蓄熱 | | ○ | ○ | ○ | ○ | ⊙ | | | | ○ | ⊙1 | ○ | ⊙ | | | ○ | ○ | ⊙ | ○ | ⊙1 | | | | ○ | ⊙1 | ○ | ⊙ | | | ○ | ○ | 4 | 3 | 13 | 17 |
| | 放熱 | | | ★ | | ⊙ | ☆ | | | | ⊙1 | | ⊙ | ☆ | | | | ⊙ | ☆ | ⊙1 | ☆ | | | | ⊙1 | | ⊙ | | | | | | 4 | 3 | 0 | 4 |
| 11月 | 蓄熱 | ○ | ○ | ○ | | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | | | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | | | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | | | ○ | ○ | ⊙ | ○ | - | 1 | 0 | 21 | 22 |
| | 放熱 | ← | | | | | | | | | | | | データ整理 | | | | | | | | | → | | ★ | | | | ⊙ | | ⊙ | - | 2 | 0 | 0 | 2 |
| 12月 | 蓄熱 | ⊙ | | | | ○ | ⊙ | ○ | ⊙ | | | ○ | ○ | ⊙ | ○ | ⊙ | | | | ○ | ○ | ⊙ | ○ | ⊙ | | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | | | 7 | 0 | 13 | 20 |
| | 放熱 | ☆ | | | | ⊙ | | ⊙ | | | | | ⊙ | | ⊙ | | | | | | ⊙ | | ⊙ | ☆ | END | | | | | | | | 6 | 0 | 0 | 6 |
| 1月 | 蓄熱 | | | | ○ | ○ | | | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | END | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 0 | 0 | 7 | 7 |
| | 放熱 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 0 | 0 | 0 | 0 |

## ５．３．実験結果

### ５．３．１．蓄熱反応結果

#### （１）蓄熱の状況

反応器には、5.1.1 反応器への蓄熱材充填に示すように蓄熱材が充填されており、5.1.2 管理項目の設定　に従って、蓄熱装置の運転を実施した。

また、蓄熱装置の概略フロー及び温度測定地点を図 5-3-1 に再掲した。

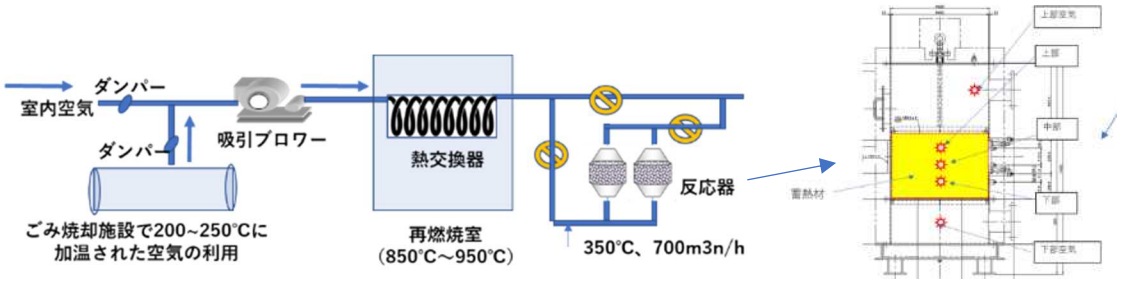



図 5-3-1　蓄熱装置の概略フロー及び温度測定地点（再掲）

蓄熱装置の概略フローを説明すると、再燃焼室に設置した高温空気加熱器には室内空気と焼却設備での余熱を利用した 100～200℃程度の清浄な空気が 700m$^3$N/h 程度の流量で流れている。高温空気加熱器で 350℃程度まで加熱された空気は反応器をバイパスするラインと反応器を流れるラインとに切り替えることが出来る。反応器への蓄熱を行う際に反応器への通気ラインに切り替え、反応器への蓄熱を行わない時にはバイパスラインを高温空気が流れている。

反応器の入口と出口の空気温度測定は、通気ライン上で行っている。

図 5-3-1 に示すように、再燃焼室に設置した高温空気加熱器に通気した空気が、出口で温度が 350～370℃程度の高温空気となった時点で、高温空気を反応器側に流れるように流路をバイパスラインから反応器側ラインに切り替える。

反応器内及び蓄熱装置各所の温度、流量についての結果の一例を図 5-3-2 に示す。高温空気加熱器の出口空気温度と反応器の入口空気温度には、およそ 20～30℃の差がある。これは高温空気加熱器と反応器までの配管部からの放熱が原因と考えられる。

反応器への高温空気の通気開始直後に反応器出口温度は急激に 70℃程度まで低下している。これは、蓄熱材に吸着している水分の蒸発に必要な熱が高温空気から奪われているためである。蒸発が終わり、その後は下層、中層、上層の順に 250℃程度まで 30 分程度を掛けて上昇する。この間に、蓄熱材に吸着する水分の蒸発と蓄熱材の温度上昇が起こっている。

蓄熱材は 250℃程度の温度を示した後は、またゆっくりとした温度変化へと推移する。なお、250℃の温度は、今回の化学蓄熱材の主成分である水酸化マグネシウムが脱水反応により酸化マグネシウムへと化学変化を開始する温度である。酸化マグネシウムに変換される間は、高温空気の熱が奪われる。

下層の水酸化マグネシウムが酸化マグネシウムへと変化し、ほぼすべての蓄熱材が酸化マグネシウムへと変換されると、蓄熱反応に必要となる熱が不要となり、反応器の通気後の空気温度は、次第に入口温度に近づき、理論的には、最終的には同温度となるはずであるが、反応器からの放熱による周囲温度の上昇も観測されており、この放熱により反応器出口温度は平均 300℃程度となっている。

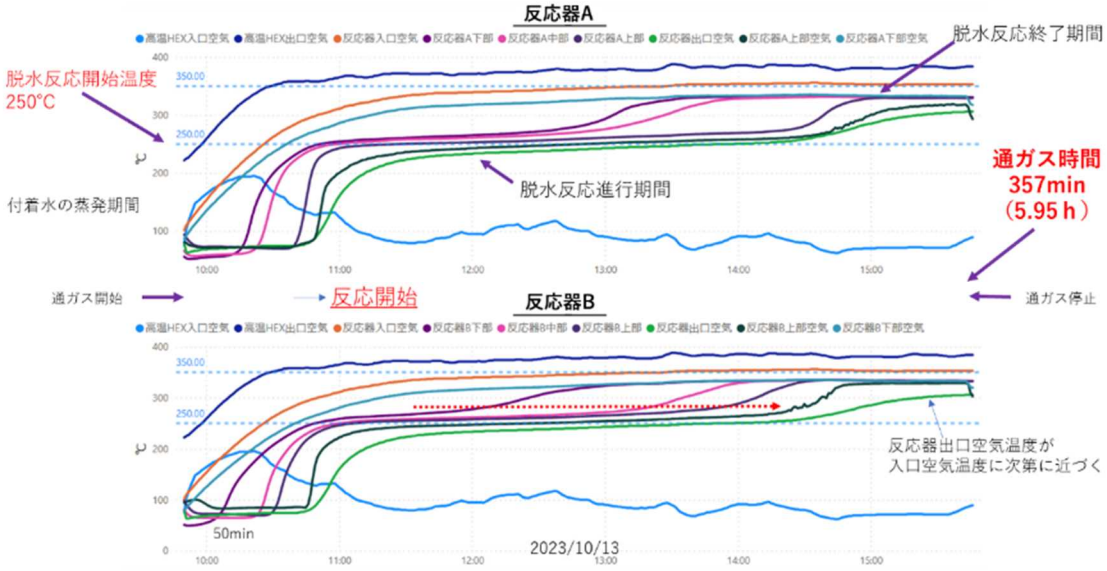



図 5-3-2　蓄熱反応の状況一例

この時、反応器の中の温度は、蓄熱材下層温度、中層、上層の温度がそれぞれ 330～335℃程度であり、一定の値となった時点が蓄熱反応の終了時点となる。反応器出口空気温度と蓄熱材各層における温度の差は、約 30℃程度で、外気への放熱により蓄熱材の温度が低下していると思われ、反応器の出口温度は平均的に 300℃を示すものと思われる。

### （2）蓄熱剤の温度推移

図 5-3-3 に蓄熱材の温度推移を示す。

蓄熱反応の終了を確認した後には、高温空気加熱器からの高温空気の反応器への通気をバイパスラインに切り替え、反応器への高温空気の通気を停止する。
この時点から、反応器内の温度は徐々に低下を始めるが、蓄熱反応終了時点で 330℃であった反応器内温度は 24 時間後でも 200℃を保持している。蓄熱材の主成分である酸化マグネシウム自体の熱伝達率の低さから、温めにくいが冷めにくい特質の表れである。

蓄熱材の潜熱については、水蒸気との反応を起こさない限り減少することは無く、遠距離への熱輸送が可能であること、また熱を長期間保存できることが特徴ではあるが、蓄熱材自体が持つ顕熱についての有効活用も考慮すべきであり、例えば蓄熱材の

温度が 200℃までに低下するまでの時間が 16 時間であるため、この間での移動可能距離は時速 15 kmで移送させるとすると、240 kmの距離まで移動可能となる。実際には、移送のための運転要員コストや燃料費との兼ね合いとなるが、利用用途先の幅は広がる。

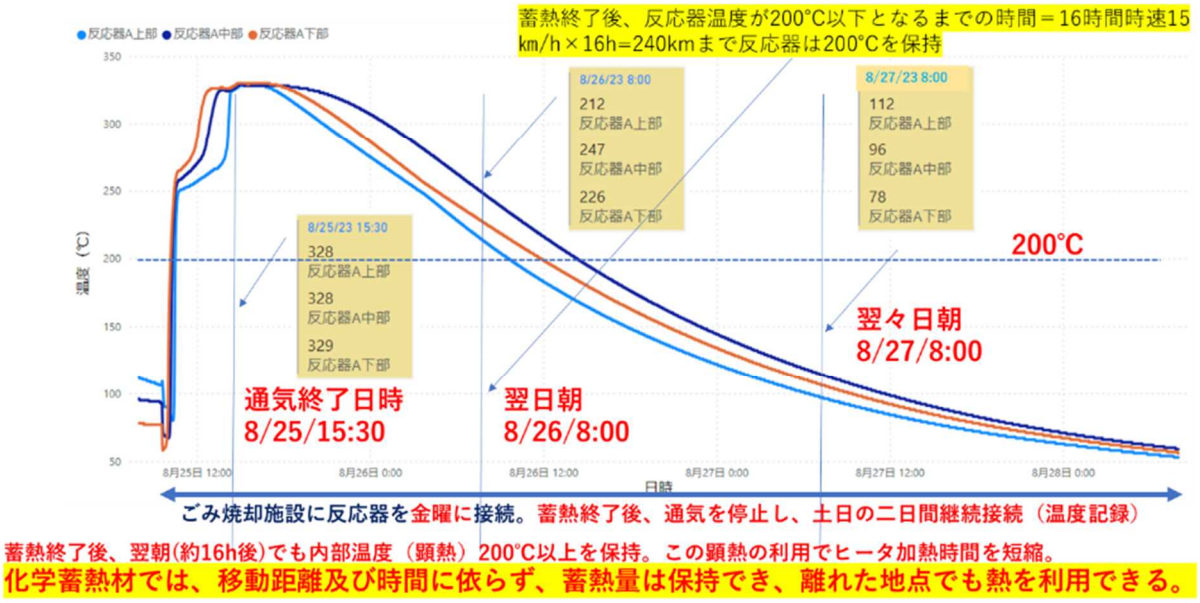



図 5-3-3　蓄熱材の温度推移

### （３）蓄熱材への投入熱量と蓄熱量

蓄熱反応を行う際に、高温空気の熱量の一部が消費され、その熱量が蓄熱材の蓄熱及び放熱量として消費される。この消費熱量をここでは投入熱量と呼ぶ。
投入熱量は、流入する高温空気が持つ熱量と反応器から流出する空気の熱量との差分であり、反応器下部の空気温度と反応器上部の空気温度との差と流入空気量を単位時間毎に積算した値となる。

図 5-3-4 には、蓄熱反応の際での反応器下部及び上部の空気温度を示しており、上部が A 系、下部が B 系である。
反応器からの放熱がない場合には、蓄熱反応の終了と共に、反応器の下部温度と上部温度とは同じ値になるものであるが、反応器からの放熱により、上下の温度には差が生じる。

実際、反応の終了時で約 15℃の温度差がある。
この温度差分を反応器からの放熱量とし、反応器の上部温度にこの差分を補正した数値を用いて計算した消費熱量は投入熱量から放熱量を差し引いた値であり、この値が蓄熱材に蓄積された熱量と考えられ、ここではこの消費量を実蓄熱量と呼ぶ。

上記に基づいて計算した結果によると、A 系では投入熱量は 0.200GJ で実蓄熱量は 0.131GJ であり、B 系ではそれぞれ、0.157GJ、0.127GJ となる。A,B 系合わせると投入熱量は 0.357GJ で実蓄熱量は 0.258GJ となり、投入熱量の 72%程度が蓄熱に使われ、28%程度は放熱としてロスされたと考えられる。

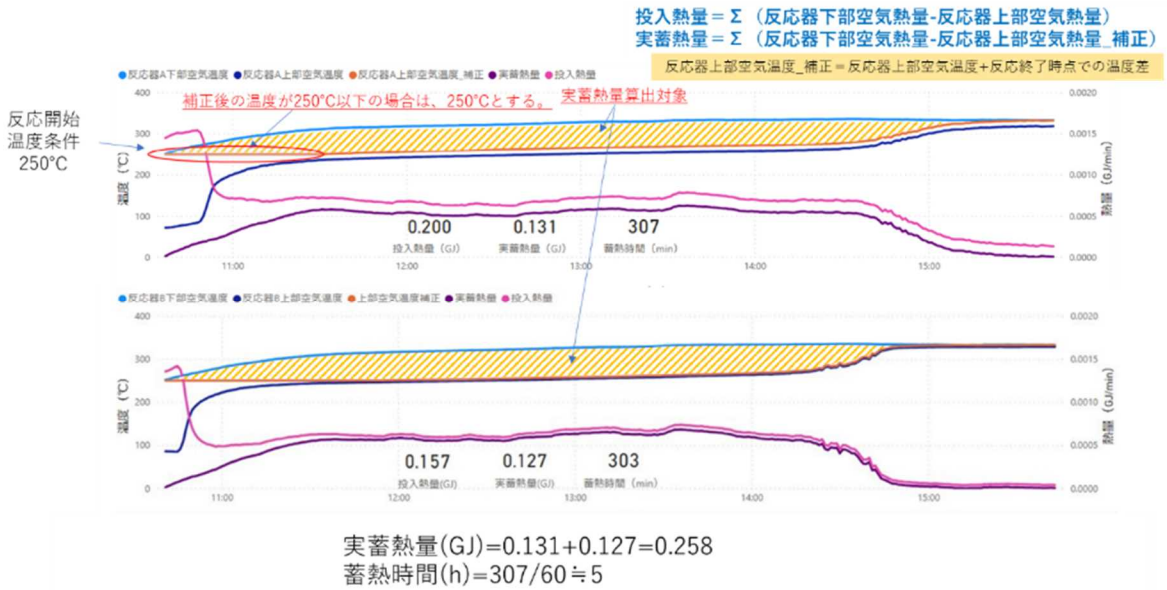



図 5-3-4　蓄熱反応の際での投入熱量と実蓄熱量

## ５．３．２．放熱装置

### （１）放熱装置の概略フローと計装機器の設置位置

放熱反応装置の概略フロー及び温度、流量、湿度の測定地点を図 5-3-5 に示す。

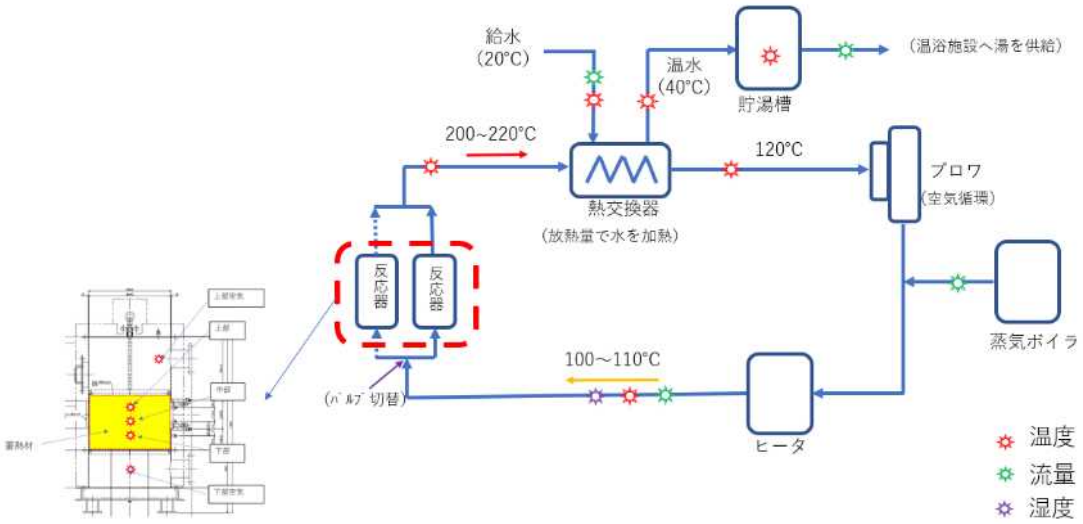



図 5-3-5　放熱装置の概略フローと計装設備の設置位置

（２）放熱反応の手順

図 5-3-5 に示す放熱装置の操作手順を下記に示す。

（ア）蓄熱反応を試験前日に実施し、その日のうちに反応器を温浴施設に移送させ、反応器の重量を測定した後に、放熱装置に取り付ける。反応器を含め、すべてのバルブは閉じた状態で、空気の移動はない。
このため、反応器内の温度は前日の蓄熱反応の際での顕熱の減少は小さく蓄熱材の温度は 250℃程度を保持している。

（イ）試験当日、反応器への空気の流入ラインは閉じたままで、バイパスラインを使用して、ブロワを立ち上げ 400m$^3$/h の循環空気流量を設定する。

（ウ）循環空気量が安定した時点で、反応器 A,B の入口出口のバルブを開き、循環空気を反応器に通気する。同時にバイパスラインを閉じる。
この時点で、反応器内には、放熱装置内の空気が流入するために、充填された蓄熱材の温度は 250℃程度から急激に低下する。

（エ）ヒータ電源を投入し、循環空気を加熱し、所定の温度（約 100℃以上）となるまで加熱する。

（オ）循環空気の温度が 100℃となった時点で、A 系あるいは B 系反応器の片方の出入り口バルブを閉とし、ボイラより蒸気を投入することで、A 系、あるいは B 系での放熱反応を開始する。
蒸気の投入量は、反応器の入口空気中の絶対湿度が 350g/m$^3$ 程度となるように注入量を調整する。この注入量は、予備的な実験に於いて反応が十分に開始される量として確認された値である。

（カ）蒸気の注入により、反応器内の温度が下部から上昇し、反応器出口温度も上昇する。

（キ）反応器の下流側に設置した温水熱交換器への流入する湿り空気温度が 120℃程度まで上昇したことを確認し、温水熱交換器へ水を注入し、温水の作成を開始する。
なお、120℃以下の時点で水の注入を行うと、熱交換により循環する湿り空気の温度が 100℃を下回り、蒸気の凝縮が起こり、ドレン化につながる。

（ク）定常運転に入った後、温水熱交換器への水の注入量は、温水熱交換器出口温度が 100℃を下回らない温度とすることで調整する。反応器内での放熱反応が激しくなり、循環空気の温度の上昇に伴い、熱交換器への水の注入量を増加させる。反応開始時では 0.05m$^3$/h 程度の少量の水量から、反応器出口温度が 200℃を超えるころには 0.4m$^3$/h 程度まで水量を上昇させる。

（ケ）反応時間の経過とともに、蓄熱材の温度の低下が起こり、反応器下部の温度が 100～105℃程度まで低下した時点で蒸気の注入を停止し、放熱反応を停止、終了させる。

（コ）設置された各機器の下部に取り付けたコックを開き、運転中に発生した凝縮水（ドレン水）を回収し、重量を測定する。

（サ）A 系あるいは B 系の反応の終了を確認後、続けて片方の反応器への空気流入バルブを開くと同時に、反応が終了した反応器は空気流入バルブを閉じる。

（セ）放熱反応が終了すると、反応器を放熱装置から取り外し、重量を測定する。

（ソ）反応器をごみ焼却施設に移送し、蓄熱装置に取り付け蓄熱操作の準備をする。

この手順に従い実施した結果が図 5-3-6 に示されている。

## （3）放熱装置の運転状況

図 5-3-6 に放熱運転の運転状況を示す。朝 7 時でのブロワ起動により、蓄熱材の温度は急激に低下する。反応器の B 系から放熱反応を開始し、B 系の下部温度が 100℃程度となった時点で蒸気を投入している。
蒸気投入直後から、蓄熱材の温度は上昇し、反応器の上部温度は 200℃を超えている。

下層部の温度が 100℃近くとなった時点で B 系の放熱反応を停止し、A 系に切り替えて反応を継続させた。
A 系、B 系ともに反応器内の温度の動きは同様であり、システム全体で見た場合は、立ち上げから終了までに要した時間は 7.7 時間で、蒸気投入から反応終了までの時間は A,B 系ともに 3.5 時間であった。

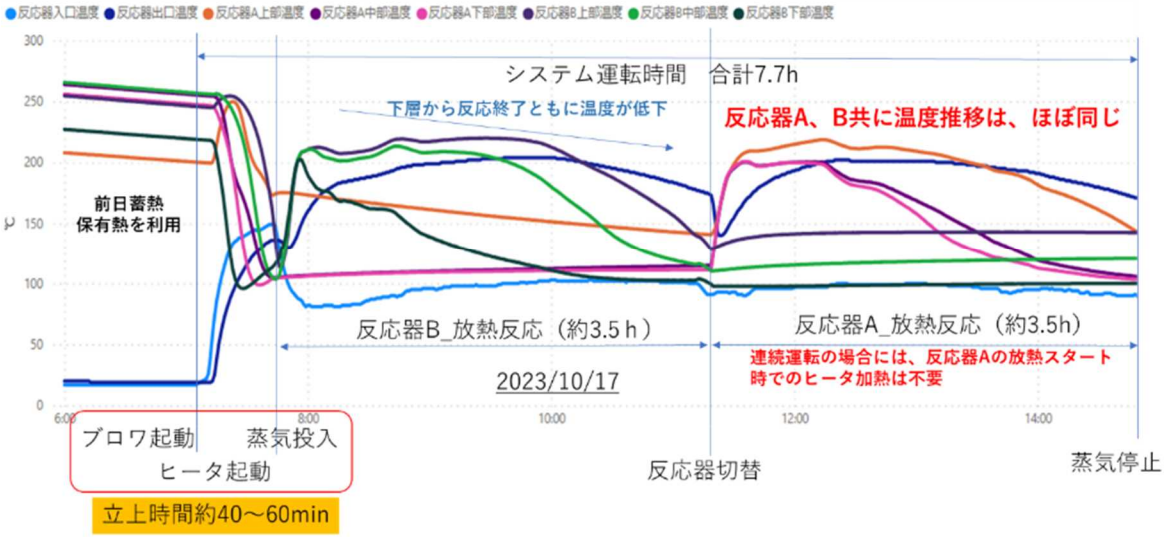



図 5-3-6　放熱装置の運転状況

## （4）放熱量と温水回収熱量

熱交換器への水の給水を始めた時刻を起点として、循環する湿り空気の反応器入口温度、反応器出口温度（温水熱交換器入口温度）、温水熱交換器出口温度および温水熱交換器への給水温度と熱交換後の温水温度の一例を図 5-3-7 に示す。
各時刻の温度を基にして、反応器の入口熱量と出口熱量との差分を反応器有効放熱熱量と呼ぶと、その熱量は 0.242GJ、温水として回収された熱量は 0.234GJ と算出された。

反応器有効放熱熱量（0.242GJ）は目標放熱熱量（0.25GJ）に対しての 97%となった。

蓄熱材から放出される総熱量は、反応器からの放熱ロス分を反応器有効放熱熱量に加える必要があり、蓄熱材からの放熱量は十分に大きいことが判る。

また、熱交換器への給水による温水の作成量は、2.79m$^3$ となり、計画値（2m$^3$）の 1.4 倍となった。この原因については、湿り空気が温水熱交換器で温水作成する際

に、熱交換器の伝熱面で凝縮する際に放出される潜熱の一部が温水熱交換器を通し、温水側へ移ったと考えられる。

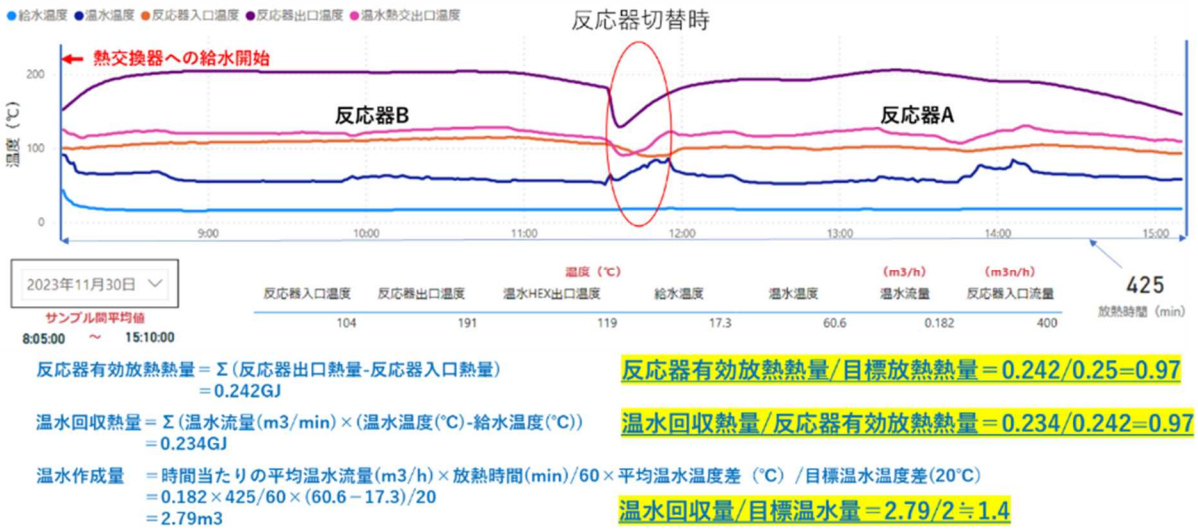



図 5-3-7　反応器と熱交換器での温度経緯

### （５）化学蓄熱材の耐久性

蓄熱操作と放熱操作の後で、A,B 系各反応器の重量を測定し、各操作による重量変化を算出した結果を図 5-3-8 に示す。図に示すとおり、蓄熱・放熱サイクルによる重量増減は規則的に見られ、同サイクルは、再現性が高いことがわかる。

しかしながら、蓄熱材への加熱、冷却を繰り返すことで、蓄熱材の一部はその形状を保持できず、当初の 3 mmφ×5 mm程度のペレット状態から 1 mm程度以下の粉末状態となる粉化が生じた。加熱、冷却が要因と考えたのは、反応器 A は蓄熱と放熱を 8 月から開始しており、11 回目の蓄熱放熱サイクルの際に粉化が生じたためである。
一方、反応器 B は 10 月から放熱操作を開始し、蓄熱、放熱サイクルの 3 回目には反応器重量の大きな減少がみられ、粉化が生じた。さらに粉化はむしろ A 反応器よりも早い時期に起こっている。このことから、粉化は蓄熱と放熱の際に生じる蓄熱材の結晶系変化に伴う体積変化によるものと考えられていたが、B 反応器の現象を見る限りでは、結晶構造の変化ではなく、化学蓄熱材の加熱と自然放冷の繰り返しにより生じている。

この現象の確認のためには、さらに詳細な分析が必要と思われる。

粉化は、反応器から蓄熱材を取り出し、蓄熱材の状態の観察により確認したが、粉化が起こったと思われる現象は蓄熱材の重量減少および蓄熱の際での圧力変動で確認された。

放熱反応では、酸化マグネシウムを主成分とする蓄熱材は水と反応して水酸化マグネシウムへと変化し反応した水分量に等しい重量分の増加が起き、蓄熱ではその逆反応により、等量の水分量が減少する。

平均 38.1 kgの水分の増加と減少が繰り返されており、この量は、0.125GJ の熱量を放出する蓄熱材が反応により吸収する水分量（約 28 kg）と比較して約 10 kg多い。

この現象は、放熱反応の際での蓄熱材と水との反応による増加分に加え、蓄熱材表面への物理的な吸着が起こったことによると考えられる。

蓄熱と放熱とを 11 回繰り返した際での重量変化は、約 55.4 kgの減少量を示す。明らかに、これまでの減少量よりも多い。

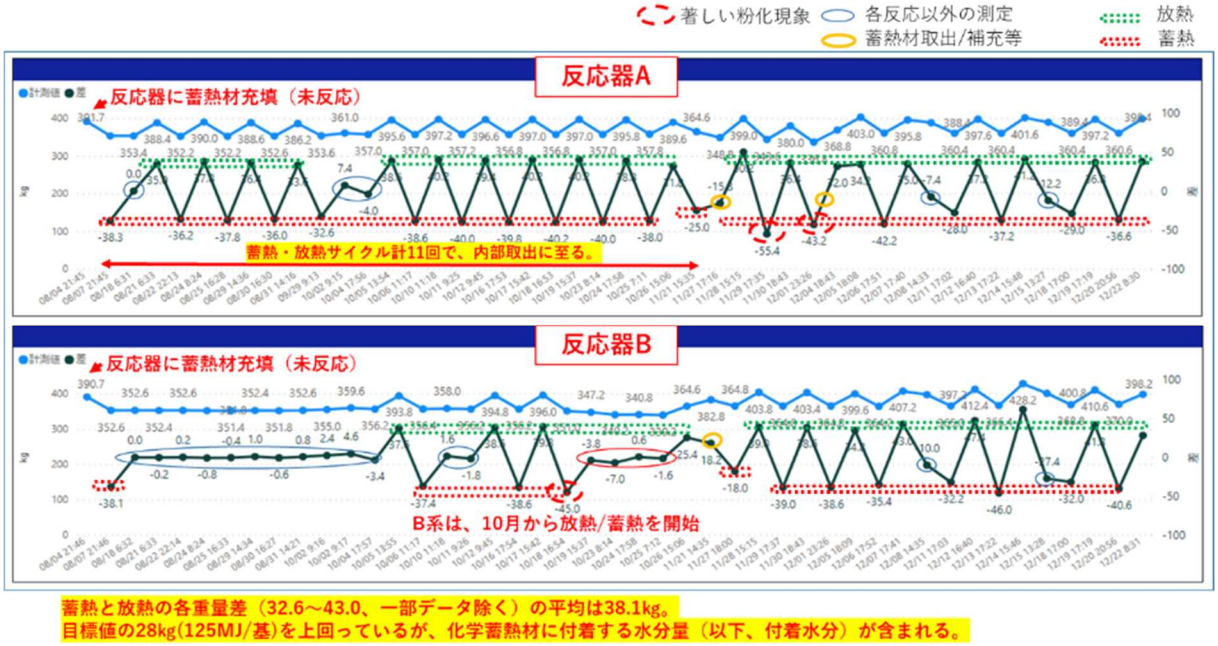



図 5-3-8　蓄熱・放熱操作後での反応器重量

A 反応器での 11 回サイクル後の蓄熱材を取り出し、粒形分布を測定した結果を表 5-3-1 に示す。

充填前のペレットは全て 2 mm以上の大きさのものであったが、11 回目のペレットでは 2 mm未満が 13%で、そのうち 1 mm以下が 8%の割合となっていた。

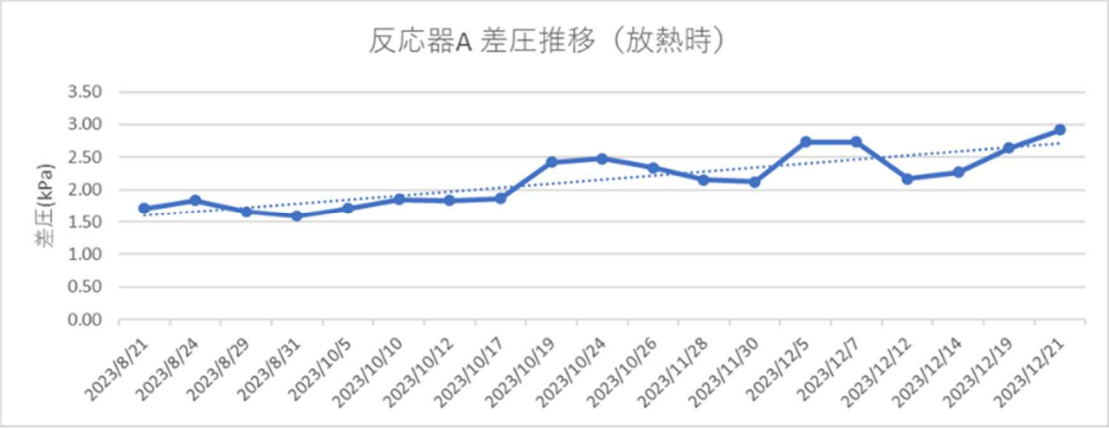
表 5-3-1　蓄熱材の粒度分布

| 粒度 | 分布(wt%) | |
|---|---|---|
| | 充填時 | 11回<br>終了後 |
| 2mm以上 | 100 | 86 |
| 1mm以上～<br>2mm未満 | 0 | 5 |
| 1mm未満 | 0 | 8 |

同様に、放熱時に於いての反応器入口、出口での圧力差を計測しており、その結果を図 5-3-9 に示す。

A 反応器では、8 サイクルまでは 2kPa 以下に収まっていた差圧が、それ以降では徐々に増加傾向となった。

B 反応器に於いても、A 反応器と同時期に差圧が 2kPa を超え、その後は増加傾向となった。



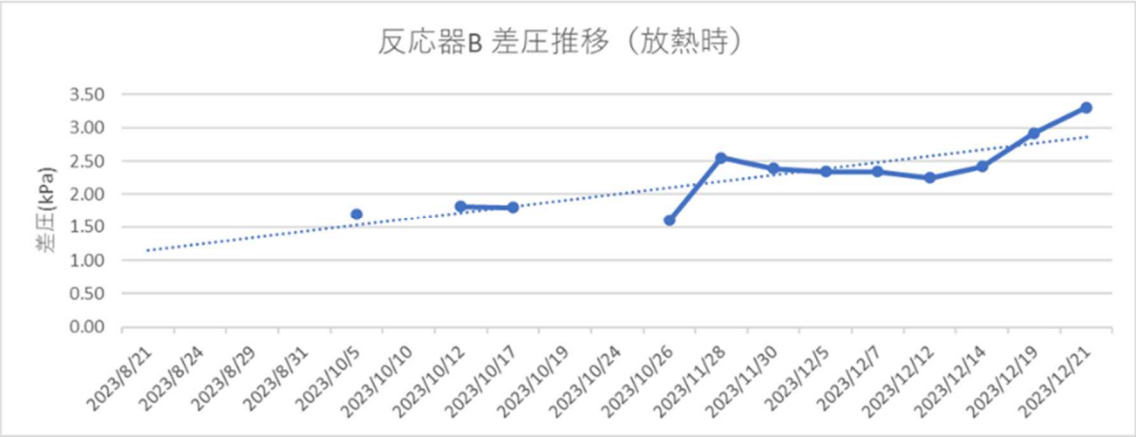




図 5-3-9　放熱操作時での反応器入口、出口圧力差

また、B 反応器での粉化の兆候は、蓄熱操作時での空気温度及び空気流量の計測データにも表れていた。

図 5-3-10 に蓄熱操作時での温度、流量トレンドを示す。試験の当初には見られなかった温度、流量のトレンド値へのわずかなノイズが現れており、蓄熱材が反応器の中で踊るような現象が生じていたことを示している。

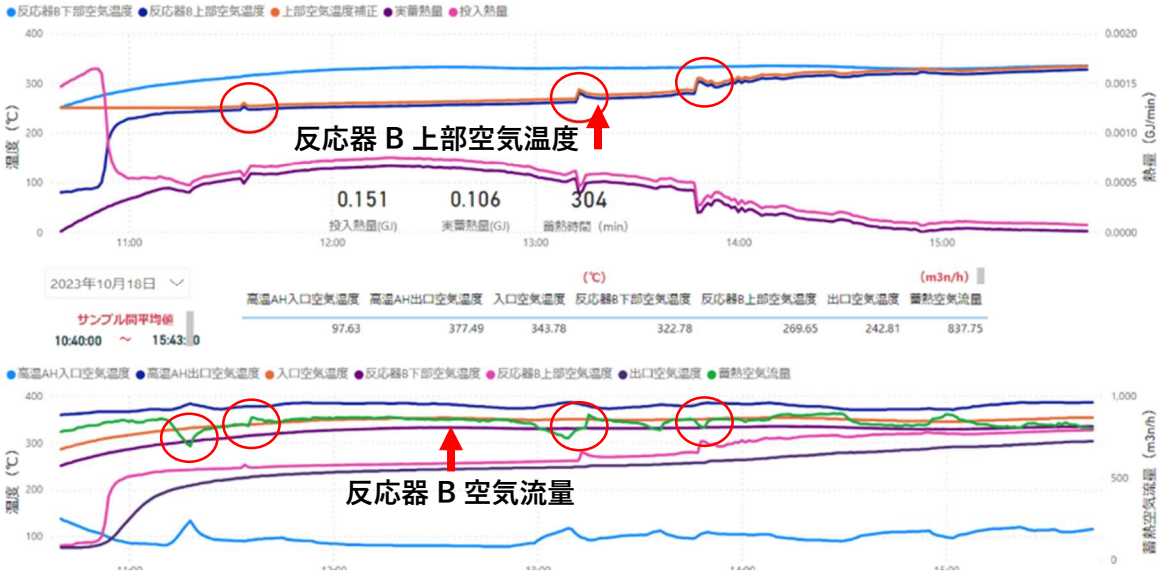



図 5-3-10　蓄熱操作時での温度、流量トレンド

## （６）装置設置によるごみ焼却施設及び温浴施設への影響確認

### （ア）ごみ焼却施設への蓄熱装置設置の影響

焼却施設の再燃焼室内に蓄熱装置の主要部となる高温空気加熱器を設置し、高温空気加熱器に室内空気等を流入させた運転状態での、ダイオキシン類並びに関係する排ガス成分等を焼却施設煙突入口で測定した結果を表 5-3-2 に示す。

昨年同時期での測定結果と比較してもほぼ変わらず、特にダイオキシン類の測定結果にも影響は無く、蓄熱装置の設置により、燃焼状態に影響がないことが確認できた。

表 5-3-2　蓄熱装置設置によるごみ焼却施設性能への影響確認

※酸素濃度12%換算値

| 測定項目 | 単位 | 2022年度7月 | 2023年度7月 |
|---|---|---|---|
| ダイオキシン類 | ng-TEQ/m3N ※ | 0.069 | 0.052 |
| 一酸化炭素濃度 | ppm ※ | <4 | 5 |
| 酸素濃度 | % | 16.3 | 17 |
| 水分濃度 | % | 21.6 | 22 |
| 湿り排ガス量 | m3N/h | 38,500 | 37,000 |
| 排ガス温度 | ℃ | 182 | 189 |

### （イ）温浴施設への放熱設備の設置の影響

温浴施設に放熱設備を設置し、放熱設備により作り出した約 1.5m³(50～60℃)の温水を貯湯槽に溜め、温浴施設の男性用浴槽への湯の張替時に、水道水で希釈し 6 回程度、ご利用いただいた。

本実証実験では、温浴施設の管理運営の方も踏まえ、協議し、放熱装置に貯留した温水を温浴施設の男性用浴槽へ直接に投入する方式としたため、温浴施設でのボイラ周りの配管等への接続は行わなかったため、施設側の装置への影響は確認出来ていないが、作り出した温水の利用には問題の無いことは確認している。

## ５．４．実証試験のまとめ

### ５．４．１．蓄熱装置運転結果のまとめ

蓄熱装置の運転結果を管理項目に従い、表 5-4-1 に示す。

反応器入口空気温度の管理目標値を 350℃と設定したが、実証での平均値は 325℃とやや下回った。

この原因としては、高温空気加熱器では 350～370℃までの昇温ができたが、反応器に至るまでの配管部での放熱が大きいことが挙げられる。

反応器入口空気流量の管理目標値は 700m³N/h に対して、実証では平均 769m³N/h を達成し、管理目標を達成した。

蓄熱時間の管理目標値の 5 時間に対して、実証では平均 5 時間を達成した。反応器入口空気温度は管理目標値を下回ったが、空気流量が計画値を上回ったことにより、反応時間は計画通りとなった。

蓄熱材への蓄熱量についても管理目標値である 0.25GJ を達成した。

実証期間中、運転状況は、再現性が高く、安定したものであった。

表 5-4-1　蓄熱反応での運転結果

| 管理項目 | 単位 | 管理目標値 | 実証平均値 | 運転結果 |
|---|---|---|---|---|
| 反応器入口空気温度 | ℃ | 350 | 325 | 焼却炉の運転状況にもよるが、立上げ約1時間後で高温空気熱交換器(以下、高温AH)出口における空気は、350℃～370℃まで昇温し、以降安定した温度を維持できたものの、反応器までの放熱が大きく影響した。 |
| 反応器入口空気流量 | m3N/h | 700 | 769 | 焼却炉の余熱空気（約220~250℃）を高温AHに通す場合（高温AH出口温度が350℃以上になるまで）は、700Nm3/を下回る場合もあるが、350℃での定常状態では、700～850Nm3/hを保持している。 |
| 蓄熱時間（乾燥除く） | h | 5 | 5 | 安定的な空気温度、空気流量となるまでの1時間弱は、蓄熱材への吸着水脱水が起こり、その後約5時間の安定的な通気により、蓄熱反応は終了した。乾燥時間は、焼却炉立上時の温度上昇カーブの影響を受けており、炉定常運転時には約0.5h程度に短縮されている。この結果、通ガス時間は、5.5～6hとなっている。 |
| 蓄熱量 | GJ | 0.25 | 0.26 | 0.21～0.29の範囲。目標蓄熱量に余裕を持たせた初期充填量としており、その範囲内である。 |

### ５．４．２．放熱装置運転結果のまとめ

#### （１）エネルギー収支

#### （ア）投入エネルギーと反応器出力

入力は蒸気投入及び装置運転のためのブロワ、ポンプ類での消費電力であり、出力は温水回収及び熱損失となる。

a）実証設備における収支

実証設備における収支を表 5-4-2 に示す。

蒸気投入量は計画値に対し、1.5 倍増加した。これは、温水として回収する際に、温水熱交換器の表面で湿り空気の水分の一部が凝縮したこと、蓄熱材表面の吸水による消費が加わったためと考えられる。

装置の運転に必要な動力は計画値より下がったため、入力合計値は計画の 0.79 倍の 2.12kw となった。

一方、出力は温水回収が計画値とほぼ同量となったが、熱損失量が大きく、出力としては 10.63kw となり、入力に対する出力の比率は 0.98 となった。

蒸気の入熱量に対する出力比率が 1.22、温水回収は 1.05 となり、蒸気投入量の増加のために、いずれも計画値に満たない結果となった。

表 5-4-2　放熱設備でのエネルギー収支　　（単位：kw）

| エネルギー収支 | | 計画 ※ | 実証 | 実証/計画 | 考察 |
|---|---|---|---|---|---|
| 入力 | 蒸気 | 5.76 | 8.71 | 1.51 | 温水回収時のドレン及び蓄熱材の吸湿により蒸気の消量が増加 |
| | 消費電力(ブロワ、ポンプ他) | 2.68 | 2.12 | 0.79 | 放熱の最適化条件により、負荷率が下がり、電力量が減少 |
| | 入力合計 | 8.44 | 10.83 | 1.28 | 蒸気量増加と消費電力減少の相殺はあるものの3割弱の入力増 |
| 出力（反応器） | 温水回収 | 9.42 | 9.16 | 0.97 | 放熱の最適化条件により、温水HEXの入出の熱量差が下がったことにより、温水回収量が減少、但し目標量は、達成。 |
| | 熱損失等 | 0.45 | 1.47 | 3.27 | 反応器等の放熱量が多いことによる |
| | 出力合計 | 9.87 | 10.63 | 1.08 | 温水熱回収が少ないものの放熱分を含む放熱は計画とおり |
| 出力/入力 | | 1.17 | 0.98 | 0.84 | |
| 出力/蒸気入熱 | | 1.71 | 1.22 | 0.71 | |
| 温水回収/蒸気入熱 | | 1.64 | 1.05 | 0.64 | |
| プロセス代表平均値 | | | | | |
| 反応器入口湿り空気温度(℃) | | 110 | 104 | | |
| 反応器出口湿り空気温度(℃) | | 200 | 191 | | 最大206℃ |
| 温水HEX出口湿り空気温度（℃） | | 115 | 119 | | |
| 反応器入口湿り空気流量(m3/h) | | 400 | 400 | | 化学蓄熱材メーカの最適化条件による |
| 反応器入口湿り空気湿度(g/m3) | | 350 | 302 | | プロセスの全体最適化による |
| 反応時間(h) | | (6.72) | 7.1 | | 3h(200℃以上)、5h(190℃以上)、5.8h(180℃以上) |
| 反応器差圧(kPa) | | 3.0 | 2.33 | | 最大2.72 |

b）蒸気源が熱利用側にある場合の収支

蒸気源が熱利用側にある場合の収支を表 5-4-3 に示す。

蒸気投入量は計画値に対し、1.5 倍増加した。これは、温水として回収する際に、温水熱交換器の表面で湿り空気の水分の一部が凝縮したこと、蓄熱材表面の吸水による消費が加わったためと考えられる。

装置の運転に必要な動力は計画値より下がったため、入力合計値は計画の 0.77 倍の 2.02kw となった。

一方、出力は温水回収が計画値とほぼ同量となったが、熱損失量が大きく、出力としては 10.63kw となり、入力に対する出力の比率は 1.08 となった。

蒸気の入熱量に対する出力比率が 1.36、温水回収は 1.17 となり、蒸気投入量の増加のために、いずれも計画値から下がる結果となった。

表 5-4-3　放熱設備でのエネルギー収支　　（単位：kw）

| エネルギー収支 | | 計画 ※ | 実証 | 実証/計画 | 考察 |
|---|---|---|---|---|---|
| 入力 | 蒸気 | 5.18 | 7.84 | 1.51 | 温水回収時のドレン及び蓄熱材の吸湿により蒸気の消量が増加 |
| | 消費電力(ブロワ、ポンプ他) | 2.61 | 2.02 | 0.77 | 放熱の最適化条件により、負荷率が下がり、電力量が減少 |
| | 入力合計 | 7.79 | 9.86 | 1.27 | 蒸気量増加と消費電力減少の相殺はあるものの1割弱の入力増 |
| 出力（反応器） | 温水回収 | 9.42 | 9.16 | 0.97 | 放熱の最適化条件により、温水HEXの入出の熱量差が下がったことにより、温水回収量が減少、但し目標量は、達成。 |
| | 熱損失等 | 0.45 | 1.47 | 3.27 | 反応器等の放熱量が多いことによる |
| | 出力合計 | 9.87 | 10.63 | 1.08 | 熱損失が多いものの反応器出力としては、ほぼ計画値となった。 |
| 出力/入力 | | 1.27 | 1.08 | 0.85 | |
| 出力/蒸気入熱 | | 1.91 | 1.36 | 0.71 | |
| 温水回収/蒸気入熱 | | 1.82 | 1.17 | 0.64 | |
| プロセス代表平均値 | | | | | |
| 反応器入口混合空気温度(℃) | | 110 | 104 | | |
| 反応器出口混合空気温度(℃) | | 200 | 191 | | 最大206℃ |
| 温水HEX出口混合空気温度（℃) | | 115 | 119 | | |
| 反応器入口混合空気流量(m3/h) | | 400 | 400 | | 化学蓄熱材メーカの最適化条件による |
| 反応器入口混合空気湿度(g/m3) | | 350 | 302 | | プロセスの全体最適化による |
| 反応時間(h) | | (6.72) | 7.1 | | 3h(200℃以上)、5h(190℃以上)、5.8h(180℃以上) |
| 反応器差圧(kPa) | | 3.0 | 2.33 | | 最大2.72 |

### （イ）反応器前後でのエネルギー収支

反応器の前後でのエネルギー収支を表 5-4-4 に示す。
入力については、湿り空気 11.79kw、消費電力 2.02kw、合わせて 13.81kw であり、出力は、湿り空気 20.75kw、熱損失 0.52kw、合わせて 21.27kw であった。

入力に対する出力の比率は 1.54 が得られた。湿り空気入力に対する出力の割合も 1.80 が得られており、計画通りとなった。

この結果からも、化学蓄熱材自体の反応に関しては、計画通りであったことがわかり、湿り空気が温水作成時において温水熱交換器表面での冷却による凝縮が起こったために投入する蒸気が計画に比べ 1.5 倍量が必要となったことが、システム全体での熱効率、熱収支が計画を下回る結果となったと言える。

表 5-4-4　放熱反応での反応器周りの熱収支

| エネルギー収支 | | 計画 ※ | 実証 | 実証/計画 | 考察 |
|---|---|---|---|---|---|
| 入力 | 湿り空気 | 12.45 | 11.79 | 0.95 | 反応器入口温度の差による。 |
| | 消費電力(ブロワ、ポンプ他) | 2.61 | 2.02 | 0.76 | 放熱の最適化条件により、負荷率が下がり、電力量が減少 |
| | 入力合計 | 15.06 | 13.81 | 0.92 | 補充蒸気量は増加も、運転条件調整にて計画より低減 |
| 出力（反応器） | 湿り空気 | 21.94 | 20.75 | 0.95 | 反応器出口温度が計画よりも低いことによる |
| | 内温水回収分 | 9.42 | 8.01 | 0.86 | 2.44m3(⊿T=20℃換算)、実回収との差はドレンからの熱回収 |
| | 熱損失等 | 0.37 | 0.52 | 1.41 | 反応器での熱損失が大きいことによる |
| | 出力合計 | 22.31 | 21.27 | 0.95 | 熱損失が多いものの反応器出力としては、ほぼ計画値となった。 |
| 出力/入力 | | 1.48 | 1.54 | 1.04 | |
| 出力/湿り空気入力 | | 1.79 | 1.80 | 1.01 | |
| 湿り空気出力/湿り空気入力 | | 1.76 | 1.76 | 1.00 | |
| プロセス代表平均値 | | | | | |
| 反応器入口湿り空気温度(℃) | | 110 | 104 | | |
| 反応器出口湿り空気温度(℃) | | 200 | 191 | | 最大206℃ |
| 温水HEX出口湿り空気温度（℃) | | 115 | 119 | | |
| 反応器入口湿り空気流量(m3/h) | | 400 | 400 | | 化学蓄熱材メーカの最適化条件による |
| 反応器入口湿り空気湿度(g/m3) | | 350 | 302 | | プロセスの全体最適化による |
| 反応時間(h) | | (6.72) | 7.1 | | 3h(200℃以上)、5h(190℃以上)、5.8h(180℃以上) |
| 反応器差圧(kPa) | | 3.0 | 2.33 | | 最大2.72 |

### （2）放熱装置運転結果のまとめ

放熱装置の運転結果を管理目標値に従い表 5-4-5 に示す。
反応器の入口温度は、管理目標を達成した。

反応器出口温度の管理目標値は 200℃であり、実証での反応器出口の湿り空気の最高温度は 206℃程度まで上昇した。反応の開始及び終了の時期には放熱量の低下に伴い、湿り空気温度が低下していくが、運転時間内での平均温度は 190℃程度となり、ほぼ達成できたものと考える。

湿り空気の湿度及び流量については、ほぼ管理目標値と同等であり、機器の動作の正常性が確認できた。

投入蒸気流量の管理目標値は 8 kg/h としたが、実証では 12 kg/h と増大した。最も大きな要因は、温水熱交換器での湿り空気中の水分凝縮のため、蒸気の補充が必要となったためである。

温水温度、温水流量、温水作成量、有効放熱量、放熱時間については、いずれもほぼ管理目標値通りとなっており、計画からの大きなずれは生じなかった。

実証期間中、運転状況は、再現性が高く、安定したものであった。

表 5-4-5　放熱装置の運転状況

| 管理項目 | 単位 | 管理目標値 | 実証平均値 | 運転結果 |
|---|---|---|---|---|
| 反応器入口温度 | ℃ | 110 | 100 | 96～108℃で運転している。 |
| 反応器出口温度 | ℃ | 200 | 189 | 最高温度は200℃強まで達するが、反応の進行により、温度は徐々に降下する。運転時間内の平均は約190℃程度となっている。 |
| 湿り空気の湿度 | g/m3 | 350 | 304 | 290～320g/m3で、設定値より低い。投入蒸気量の低減によるもの。<br>この条件でも安定した放熱反応を行っている。 |
| 湿り空気流量 | m3/h | 400 | 400 | 目標値を安定的に保持できている。 |
| 投入蒸気流量※ | kg/h | 8 | 12 | 蓄熱材の吸湿水、温水HEXでのドレン水発生のため、消費される水分が増加した。 |
| 温水温度※ | ℃ | 40 | 60.6 | 55～61℃の温水を作成。温度差は30～44℃で、目標温度の40℃、温度差(20℃)を超えた。 |
| 温水流量※ | l/h | 410 | 182 | 0.18～0.33の範囲で、目標に対して33%。温度差が大きくとれたため、必要とする温水作成量は確保。 |
| 温水作成量※ | m3 | 2 | 2.79 | 計画温水温度差(20℃)換算で、目標の湯量を確保。 |
| 有効放熱量※ | GJ | 0.25 | 0.242 | 目標の97%で、ほぼ予定どおりの放熱量を確保。 |
| 放熱時間※ | h | 8 | 7 | 放熱反応は、目標値以内。立上げを考慮して8h以内。 |

## ５．５．実証後の現状復旧及び使用後における主要材の考察

### ５．５．１．現状復旧について

令和 6 年 1 月にごみ焼却施設に設置した蓄熱装置及び温浴施設に設置した放熱設備の撤去を行なった。

蓄熱設備撤去後の現地写真を図 5-5-1、図 5-5-2 に、放熱設備撤去後の現地写真を図 5-5-3 に示す。各設備の解体撤去後に南島原市による現地確認をいただき、設備撤去並びに現地復旧を完了した。

図 5-5-1　高温加熱器撤去後

図 5-5-2　蓄熱ユニット撤去後

図 5-5-3　放熱設備撤去後

### ５．５．２　使用後における主要材の考察

（１）高温空気加熱器

熱交換器は熱交換器の金属部が直接高温の燃焼排ガスに触れないように耐火物で覆われた状態で再燃焼室に設置されている。実証実験の終了後に再燃焼室内部に設置した熱交換器の目視結果では、熱交換器が燃焼排ガスに最初に触れる部分の耐火物剥離を確認した。

再燃焼室から取り出した後に、熱交換器の金属部分の肉厚を計測したが、使用前6mmに対して、減肉は認められなかった。

耐火物ハクリの状況写真とハクリ位置の箇所を図 5-5-4 に示す。

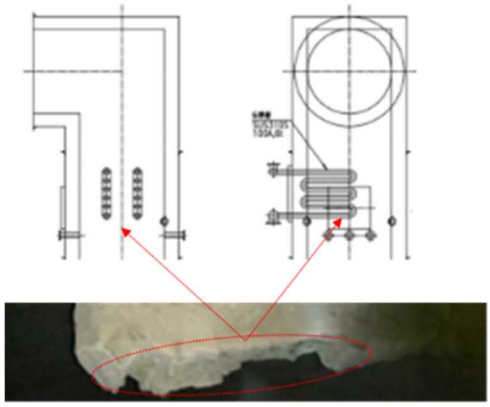


図 5-5-4　耐火物のハクリ状況とハクリ位置

（２）化学蓄熱材

使用後の化学蓄熱材（粉化物）の再利用についての可能性を、化学蓄熱材の供給メーカの協力を得て、メーカ工場内で、再生処理を行い、メーカ所有の試験機にて、蓄熱・放熱のサイクルで、再生品の性能評価を行った。その結果、新品と同じ性能を発揮することを確認した。実証運転で課題となった粉化物も再生利用でき、化学蓄熱材のコスト削減に期待ができる結果を得た。また、化学蓄熱材の蓄熱・放熱サイクルについては、製品の目標として 1,000 回とし、ラボ試験では、2,000 回においても性能を維持することの報告を受けている。

## ５．６．運転結果の総括

蓄熱装置：

・高温空気加熱器の性能について、目標値は達成し、7 月から約半年の期間であるが、清掃、メンテナンスフリーで運転を継続できた。解体後、耐火物の一部ハクリなどが見られ、長期間の運用実績は得られていないが、具体的な対応策もあることから、実装に向け十分な結果が得られた。

・目標値は、おおむね達成したが、反応器入口温度の未達、化学蓄熱材の付着水分の乾燥時間追加などで通ガス時間としては、6h 程度となった。施設が間欠運転であるため、焼却炉立上時の温度条件が影響しているが、反応器での放熱改善などにより、時間短縮は十分見込め、実装に向け、1GJ/3h(通ガス時間)が視野にはいった。

・ダイオキシン類については、今回規模が小さく高温空気加熱器の設置による焼却施設への影響は無かったが、実装に向けては、設置については、ダイオキシン類の発生抑制の観点を考慮する必要がある。

熱輸送：

・反応器の運搬（0.5h）と着脱（0.5h）の合計 1h は計画通りであった。
（データ収集のための計測器設置、重量測定などの時間を含み、実質は 2h 程度）
反応器接続部が高温のため、接続方法などの作業性の改善は必要である。

放熱装置：

・温水回収率ならびエネルギー収支が低い結果となったが、反応器から 200℃以上、平均で 190℃の湿り空気を安定して取り出すことができた。

・通ガス時間は、立上げを加味した場合は、0.25GJ/8h で、実反応時間は、0.125 GJ/3.5h(反応時間)となった。

・蓄熱材の粉化による圧力損失については、想定よりかなり早く発現した。この現象は、この化学蓄熱材の特徴でもあり、避けられない部分である。粉化が起こっても化学蓄熱材の性能は維持でき、また粉化物の再生処理も可能であることから、実装に向けては、耐久性などの更なる材料の改良の面もあるが、システム側でのそれらを前提とした改良・改善が重要で、その余地はあり、クリアできる課題と考えている。以上の検証の結果から、実装に向け、十分に応用できると考えられる。

## ６．CO2 削減効果

本実証事業で得られた成果を基にして、図 6-1 に示す蓄熱・放熱の運用システムを想定し、また図 6-2 に示す通りに蓄熱時間を短縮することで、表 6-1 に示す通り、1,884t/年の CO2 削減効果が期待できる。

以下では、削減効果の算出について説明する。

ケーススタディとして、48t/日の処理能力の連続運転式ごみ焼却施設の場合について試算した。1 日当たりの回収熱量は 48GJ となった。この数値は事業当初の 64GJ/日より少なくなったが、当初の 1GJ を蓄熱するための条件である 350℃、5,400m$^3$N/h が、実証運転結果から検証されたためである。

また、熱利用施設を 4 施設と想定し、2 施設を一度に配送するミルクラン方式として、ごみ焼却施設から 2 施設を通り、ごみ焼却施設に帰るまでの距離を 60 kmとした。熱利用装置は 4 施設それぞれに必要なため 4 セット、蓄熱容器はごみ焼却施設での蓄熱量 48GJ/日への対応として 44 個、輸送車両 2 台、車両運転手は 8 名とした。

放熱装置で必要な蒸気源もしくは湿り空気は、熱利用施設側にあるものとしている。

なお、事業当初の試算条件において、輸送車両を 8t とし、リース費用の金額を修正している。

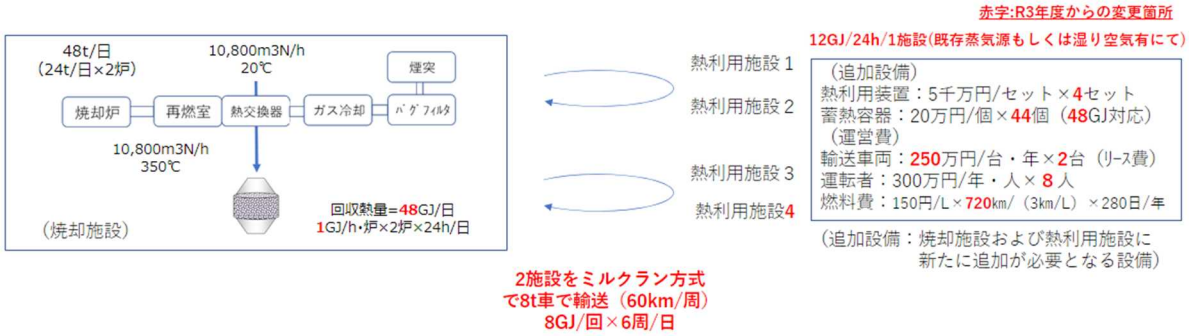



図 6-1　CO2 削減効果推定のための運用システム

図 6-2 蓄熱時間の短縮について

表 6-1 には CO2 削減量を算出するための数値が以下の順で示されている。

イ）ごみ焼却施設の運転による CO2 発生量
ロ）熱回収後の余熱空気を利用した場外用温水作成による CO2 削減量（A）
ハ）本事業での熱回収による灯油換算 CO2 削減量（B）
ニ）熱移送時での燃料燃焼による CO2 発生量（D）
ホ）熱利用先での装置等の運転による CO2 発生量（D）

本事業による CO2 の削減量は、上記に示すロ）とハ）の合計値からニ）とハ）の合計値を差し引いた数値となる。

表 6-1 の中の③提案式は本事業のシステムに場外用温水作成を加えたものであり、CO2 削減量（tCO2/年）＝1,884（tCO2/年）となる。なお、高温空気加熱器の設置により、従来式よりも場外用温水作成量が増加したため、233tCO2/年の CO2 削減効果もプラスされた。

表 6-1　ごみ焼却施設への熱回収設備追加による熱輸送事業での CO2 削減効果

赤字:R3年度からの変更箇所

CO2削減数値

：2炉運転48t/24h、280日/年　　48t/日×280日/年×10%×2.76　　①　↓排煙式③ GJ/h×24h/日×280日　　②　　焼却側　輸送・需要家側

| | | 1日間電力使用量 | 1日電力使用量 | 1年電力使用量 | 電力CO2 | プラCO2 | CO2発生足上げ | 温水利用回収熱量 | 灯油換算 | CO2削減量 | 熱輸送回収熱量 | 灯油換算 | CO2削減量 | CO2削減量 | 焼却側CO2排出量 | 輸送燃料足上げ | 熱輸送需要家電力足上げ | CO2総削減量 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | 0.429 | 2.76 | | | 39.1 | 2.71 | | 39.1 | 2.71 | | | 2.62 | 0.429 | |
| | | kW | kWh/日 | MWh/280 | tCO2/MW tCO2/年 | tCO2/t tCO2/年 | tCO2/年 | GJ/年 | GJ/kL kL/年 | tCO2/KL tCO2/年 | GJ/年 | GJ/kL kL/年 | tCO2/KL tCO2/年 | 合計 tCO2/年 | ①－② tCO2/年 | tCO2/kl 不明 | tCO2/年 不明 | tCO2/年 |
| ①半乾燥式 | プラント | 223 | 5,352 | 1,499 | 643 | | | | | | | | | | | | | |
| 温水P：-2 | 排煙 | 38 | 912 | 255 | 110 | | | | | | | | | | | 未測せず | 未測せず | |
| | 合計 | 261 | 6,264 | 1,754 | 752 | 3,709 | **4,462** | 0 | | 0 | 0 | | 0 | 0 | 4,462 | 0 | 0 | 0 |
| ②焼却式 | プラント | 225 | 5,400 | 1,512 | 649 | | | | | | | | | | | | | |
| | 排煙 | 38 | 912 | 255 | 110 | | | | | | | | | | | 未測せず | 未測せず | E' |
| | 合計 | 263 | 6,312 | 1,767 | 758 | 3,709 | **4,468** | 15,456 | 395 | 1.071 | 0 | | 0 | 1.071 | 3,396 | 0 | 0 | 1.071 |
| ③排煙式 | プラント | 235 | 5,640 | 1,579 | 677 | | | | | | | | | | | | | |
| IDF：-7 | 排煙 | 38 | 912 | 255 | 110 | | | 高温AH設置により回収量UP効果もあり | | | | | | | | | | |
| GCF：+17 | 合計 | 273 | 6,552 | 1,835 | 787 | 3,709 | **4,496** | **18,816** | **481** | **1,304** | **13,440** | **344** | **932** | **2,236** | **2,261** | 176 | 175 | **1,884** |
| | | | | | | | | | | A 場外余熱（隣接施設） | | | B 蒸熱 | C (A+B) | | | D 消費エネルギー（輸送,放熱） | E (C-D) |

国内での年間 CO2 削減量の推移について図 6-3 に示す。左の図は 100t/日以下のごみ焼却場の国内施設数で、人口減少や施設統合により年々減少するものと想定した。

中の図は、本事業でのシステム導入率が年々増加するものとして、システムを設置する焼却施設数を表した。右の図は、システムを設置することによる CO2 削減量を示す。2,050 年では約 31 万 t の CO2 削減が見込める想定である。

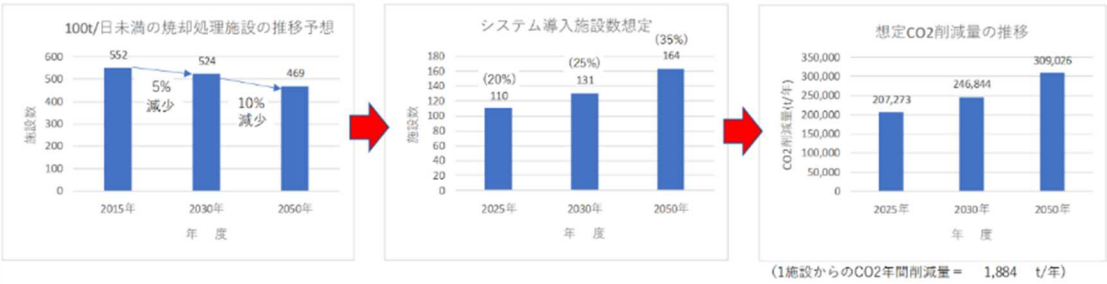



図 6-3　本事業による CO2 削減量の予想推移

## 7．コスト試算

本事業を運営する際でのコスト（円/MJ）を試算した。

年間に回収する熱回収量は 13,440,000MJ となり、表 7-1 には、年間経費項目で示す各費用から熱量当たりのコストを示し、運営費が 6.0 円/MJ で運営費と設備費（10 年償却）を合わせると 7.5 円/MJ となる。なお、コスト試算において、熱利用側設置費、一般管理費、その他経費は含んでいない。

試算に当たっての設備費及び運営費を表 7-2 に示す。

表 7-1　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 | 100,850,000 | 7.5 |
| 2 | 運営費 | 79,970,000 | 6.0 |

表 7-2　設備費及び運営費

| | 費目 | 単価 | 個数 | 費用 |
|---|---|---|---|---|
| 設備費 | 蓄熱容器 | 20万円/個 | 44個 | 880万円 |
| | 放熱設備 | 5,000万円/セット | 4セット | 20,000万円 |
| 合計 | | | | 20,880万円 |
| | **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 | 403.2Mwh/年 | 806万円 |
| | 材料費その他 | | | 2,347万円 |
| | 車両リース費 | 250万円/台・年 | 2台 | 500万円 |
| | 運転者費用 | 300万円/人・年 | 8人 | 2,400万円 |
| | 燃料費 | 150円/L | 201,600km/年 | 1,008万円 |
| | メンテナンス費 | | | 800万円 |
| 合計 | | | | 7,997万円 |

| | |
|---|---|
| 熱回収量（年間） | 13,440,000MJ |

設備費については、以下の仮定とした。なお、熱利用側設置費は、施設の状況により算定が困難であるので、試算対象からはずしている。しかしながら、6.CO2 削減効果の中では、放熱設備の電力使用による CO2 発生量は含んでいる。

・耐用年数を 10 年とする。

・蓄熱設備：水噴霧式焼却炉の従来型の各空気加熱器を、高温空気加熱器に置換でコスト相殺とする。

・放熱設備：熱輸送時は簡易格納容器を採用。化学蓄熱材は、消耗品として運営費にて計上する。

・熱輸送：車両をリースとし、運営費に計上する。

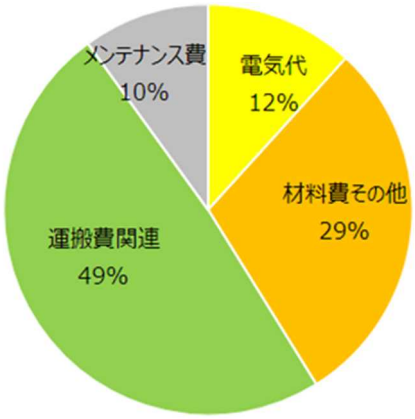



図 7-1　運営費の内訳

運営費は、約 8,000 万円となった。材料費に含まれる化学蓄熱材は、5.5.2.(2)より、化学蓄熱材の製品目標である蓄熱/放熱サイクル 1,000 回とし、ケーススタディでの蓄熱・放熱サイクル数から、約 3 年で材料費を負担するとして、年間における負担額を約 2,400 万とした。この結果、図 7-1 に示すように運営費の内訳では、輸送費が約 5 割のウエイトを占めており、熱輸送における課題となっている。このことは、従来の熱輸送においても指摘されているものの、本事業で使用した蓄熱材に比べて、蓄熱密度が大きいことから、より改善されると考えられる。

## ８．本事業の有効性と横展開

### ８．１．本実証事業の有効性

5.1 に記載のように、本事業では MgO 系蓄熱材 130kg を充填（初期充填容積：約 0.15m$^3$、初期充填層高さ：約 435mm）した反応容器 2 基を用い、廃棄物処理施設の排熱を使って 0.25GJ（0.125GJ/基×２基）の蓄熱を行い、16.5km 離れた温浴施設に２ｔトラックで熱輸送し、翌日に同量の放熱が可能であることを実証した。放熱は反応容器 1 基ずつ行い、最高温度 200℃以上、平均温度 190℃の高温湿り空気を延べ時間で 5 時間（うち 200℃以上が 3 時間）以上供給でき、熱交換により温水を温浴施設に提供した。熱利用設備でのエネルギー収支を見ると、蓄熱材の水和反応に必要な水蒸気を発生するボイラ、ブロワ、ポンプ等の入力 10.8 kW に対して、温水とドレンによる熱損失を合わせた出力は 10.6 kW 強であり、出力/入力＝0.98 であった。既存のプロセス蒸気利用を前提とすると、出力/入力＝1.08 となり、令和 3 年度当初計画していた出力/入力＝1.29 の 85%相当である。これは設備の放熱が大きかったことによる。化学蓄熱材に限って見ると、反応容器入口の高温湿り空気、ブロワ、ポンプ等の入力約 14kW の入力に対して、反応容器出口の湿り空気と熱損失を合わせた出力は約 21kW であり、約 7kW のエネルギーゲインで出力/入力＝1.54 となり、ほぼ計画値であった。

実証結果から、設計時、設備全体からの放熱を小さく見積もりすぎていたが、化学蓄熱材の蓄熱・放熱の量、速度はほぼ設計通りであり、装置設計の考え方は基本的に正しことが証明された。また、実証試験の間、廃棄物処理施設および温浴施設は安全、安定に運転・運営されていた。

このことから本熱輸送システムは実装可能であり、実設備も同様の考え方にもとづいて設計できることを明らかにし、GHG 削減量やコスト試算等のケーススタディを

行った。また、蓄熱材の強度や耐久性改善、設備への脱着や運搬を考慮した反応容器の改善、人件費を含めた輸送費の低減等実装に向けての課題も抽出することができた。

このように設計の検証と実証試験結果を反映したケーススタディ、実装への課題抽出ができたことで本実証事業は有効であった。

## ８．２．本事業の横展開

### ８．２．１．余熱利用可能な廃棄物処理施設

本熱輸送システムでは化学蓄熱材として MgO 系を用いているため、蓄熱に $Mg(OH)_2$ の分解温度である 350℃以上の高温排気を必要とする。本実証事業の熱源として考えているごみ焼却施設は、その規模に関係なく 800℃以上の高温排ガスを炉内に有しており、排ガス洗浄工程で冷却するほどなので熱源として適当である。

図 8-2-1 に日本のごみ焼却施設（1,028 施設）の処理能力別の余熱利用状況を示す[1)]。ただし、この 1,028 施設には休止中のものも含まれており[2)]、それを除くと 921 施設である。なお、この 921 施設には新設（建設中）のものも含まれている。

今の熱輸送システムの展開を保守的に評価するため、ここでは「余熱利用なし」の施設でのみ、このシステムを採用することにする。その場合、利用可能施設は 299 施設である。しかし前述のように、この中には休止中のものも含まれているため、それを除くと 227 施設となる。このうち 107 施設がバッチ運転、42 施設が准連続式（准連）運転である。本事業では 30t/16h の准連炉において、約 5 時間で 0.125GJ×２基=0.25GJ が問題なく熱回収できることを実証した。これはバッチ炉を含め、この 227 施設で同様の熱回収の可能性があることを示している。

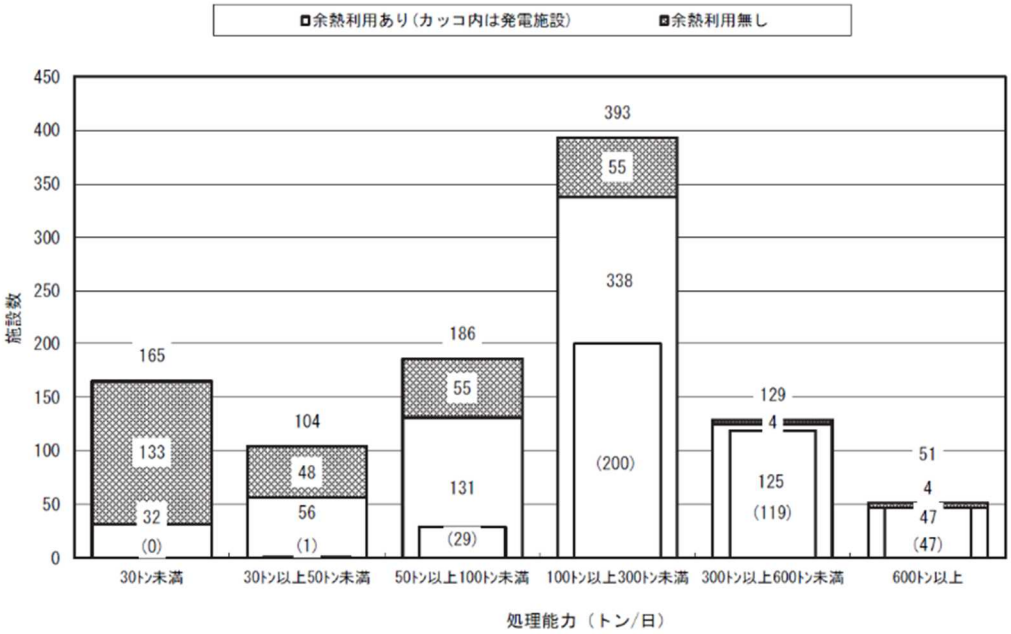



図 8-2-1　ごみ焼却施設の処理能力別の余熱利用状況[1]

次に、これらの施設で回収できる熱量を調べる。北海道大学では2012年に全連続式焼却炉の物質収支等について調査しており、施設規模当たりの排ガス発生量を図8-2-2のように整理している[3)]。図8-2-2（b）の実績値と割合から施設規模当たりの平均排ガス発生量を求めるとおよそ206（$m^3N/h$)/(t/日)となる。ここで准連続式やバッチ式の炉においても、定常運転中の平均排ガス発生量は全連続式と変わらないとし、かつ排ガス温度は800℃から400℃に下げるまで熱回収でき、その熱交換効率は60%、炉数が2基の施設では1.5/2基稼働、3基では2/3基稼働、4基では3/4基稼働として、1日の回収可能熱量を見積もった。ただし、バッチ炉の稼働時間は8h/日、准連炉の稼働時間は16 h/日とし、熱回収できるようになるまで立ち上げに1h、かつ炉の立ち下げにも1hを要すとした。つまり、実際に熱回収できる時間は稼働時間よりも2時間少ないとした。

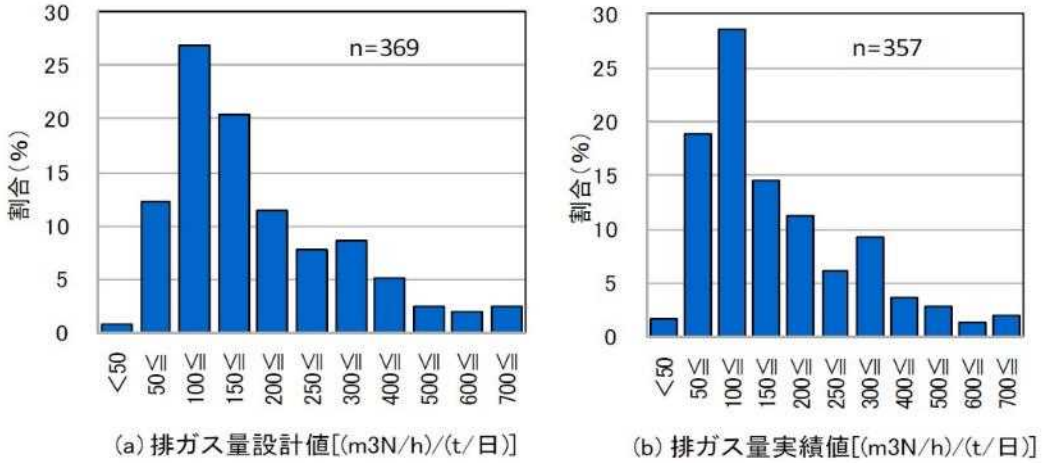



図 8-2-2　処理施設規模当たりの排ガス量[4]

算出した施設の処理能力・運転方式別の熱回収量を図8-2-3に示す。

本実証設備では反応容器の入口で350℃、出口で250℃の高温空気700$Nm^3/h$を用い、5hかけておよそ0.35GJの熱を投入し、反応容器2基で0.25GJの蓄熱ができている。このことから熱回収可能時間が6hのバッチ炉であっても0.35GJ/d以上(図中の赤線)の熱回収が可能であれば、最低限実証規模の化学蓄熱が可能であると言える。

図に示すように、余熱利用をしていない227施設のうち、赤い実線よりも上にある223施設が技術的には本熱輸送システムの熱源になり得る。ただし、1日に回収可能な熱量は、バッチ炉では実際に運転する日数、また運転方式に関わらず、全施設で自施設や周辺施設の熱利用状況等により熱回収する価値が変動するため、それぞれの条件に基づいた検討が必要である。

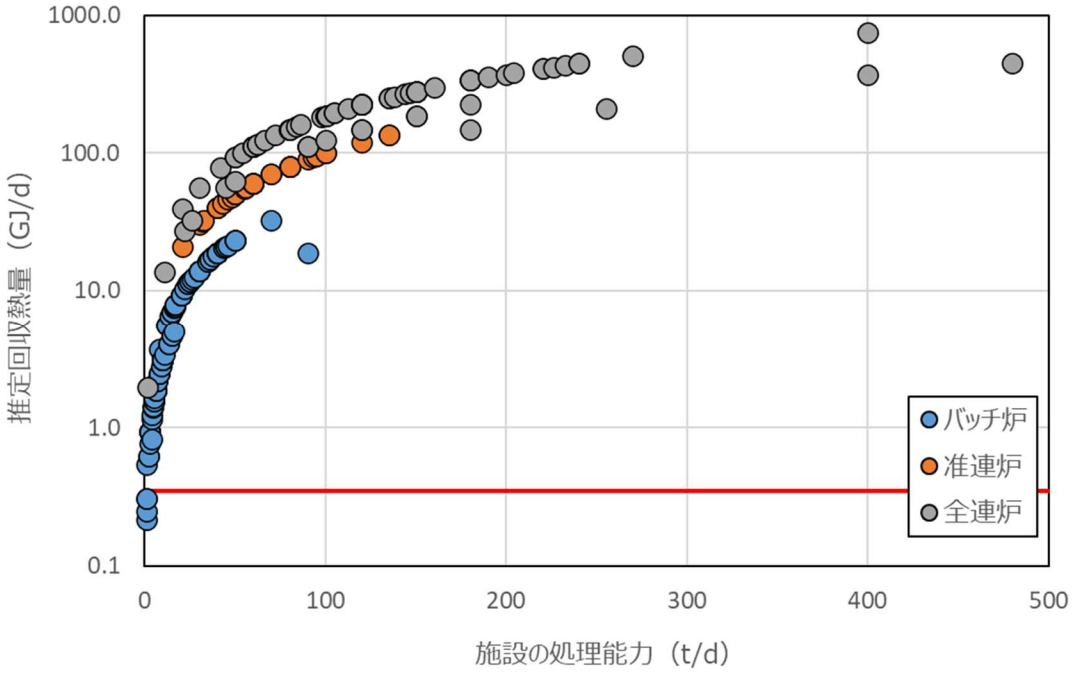



図 8-2-3　施設の処理能力別・運転方式別の予想熱回収可能量

### ８．２．２．余熱利用施設

8.1.本実証事業の有効性で述べたように、本実証事業においてごみ処理や温浴施設の運営に支障を来たすことなく、ほぼ設計通りの物熱収支を得ることができた。最高温度が 200℃を超える高温の湿り空気を得ることができたのは蓄熱密度の高い MgO 系化学蓄熱材を用いた本実証試験の大きな成果である。令和 3 年度、4 年度の報告書にも記載したが、水の物理吸着を利用し、蓄熱密度が高いと言われているゼオライトやハスクレイでも、熱利用側供給温度としてはせいぜい 150℃である。

従来の顕熱や潜熱を利用した熱輸送は、冷水や空気との熱交換による 100℃以下の温水回収（給湯）や暖房、吸水式冷温水機/冷凍機の冷媒加熱による冷暖房を利用対象としていた。本実証事業の結果から、MgO 系化学蓄熱材を用いた熱輸送においても上記の給湯や冷暖房に問題なく利用可能である。

なお、放熱設備を設置する余熱利用施設には水和反応用に湿り空気が不可欠である。実証設備では水和反応用にボイラを設置したが、熱交換を終えた高温空気を反応容器に戻すラインに加湿器を設置し、水和反応等で失った水分を補えば、このボイラは不要である。

藤井ら[4,5,6,7,8]はゼオライトを蓄熱材とした間接熱交換型の移動床を用いた放熱装置（ゼオライトボイラ）を設計し、産業用に 120℃、0.2MPa の飽和蒸気を供給する初めての実証研究を進めている。200℃の高温湿り空気を得られた MgO 系化学蓄熱材においても、産業用への利用が期待される。

令和 3 年度の報告書でも取り上げた三菱総合研究所「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（熱の需給及び熱供給機器の特性等に関する調査）調査報告書」[9]によると、産業部門、廃棄物処理業の生産工程への熱の供給方法として直接加熱（電気加熱・燃焼加熱）、蒸気および温水がある。報告書では集計上、図 8-2-4 のように業種を分類しており、業種別・温度別の直接加熱需要、蒸気利用量および温水利用量は表 8-2-1～8-2-3 に記載の通りである。それぞれの表から温度帯別の需要、

利用量の割合を図示すものが図 8-2-5～8-2-7 である。なお図 8-2-5、8-2-6 には 200℃以下の温度帯の合計割合も併せて示す。

直接加熱需要では 200℃以下の割合が 13%、うち 150～200℃の割合は 2%である。表 8-2-1 を見ると、使用温度帯は業種によって大きく 2 つに分かれる。食品飲料や繊維木紙、化学石油業では 400℃以下の比較的低温の利用が多く、窯業土石、鉄鋼金属では 800℃を超える高温の利用が多い。本実証事業で得られた約 200℃の高温湿り空気は食品飲料や繊維木紙、化学石油業の温度域 200℃以下の直接加熱に利用を拡大できる可能性がある。

また、200℃を超える直接/間接加熱においても、燃焼用空気や熱媒の予熱に利用し、燃料使用量を削減することができる。

図 8-2-6 の蒸気利用では 200℃以下の割合は全体の 68%もあり、中でも 150～200℃が 48%を占め、その割合は非常に大きい。表 8-2-2 によると、この 200℃以下の蒸気利用が多いのも食品飲料や繊維木紙、化学石油業である。一般的に工場で最も使用されるのは加熱や加湿に利用される飽和蒸気で、通常 0.1～5MPa、110～250℃程度であり、多くの設備で 0.8MPaA、約 170℃の蒸気を生成していると言われているが、それを裏付けるデータである。

吸着蓄熱材を用いても、蒸気利用量の 48%を占める、この 150～200℃の蒸気を発生させることはできない。このことから、MgO 系化学蓄熱材で得られる 200℃の高温湿り空気は食品飲料や繊維木紙、化学石油業等の生産工程で用いられる蒸気への大きな利用拡大が期待できる。

（集計上の分類）

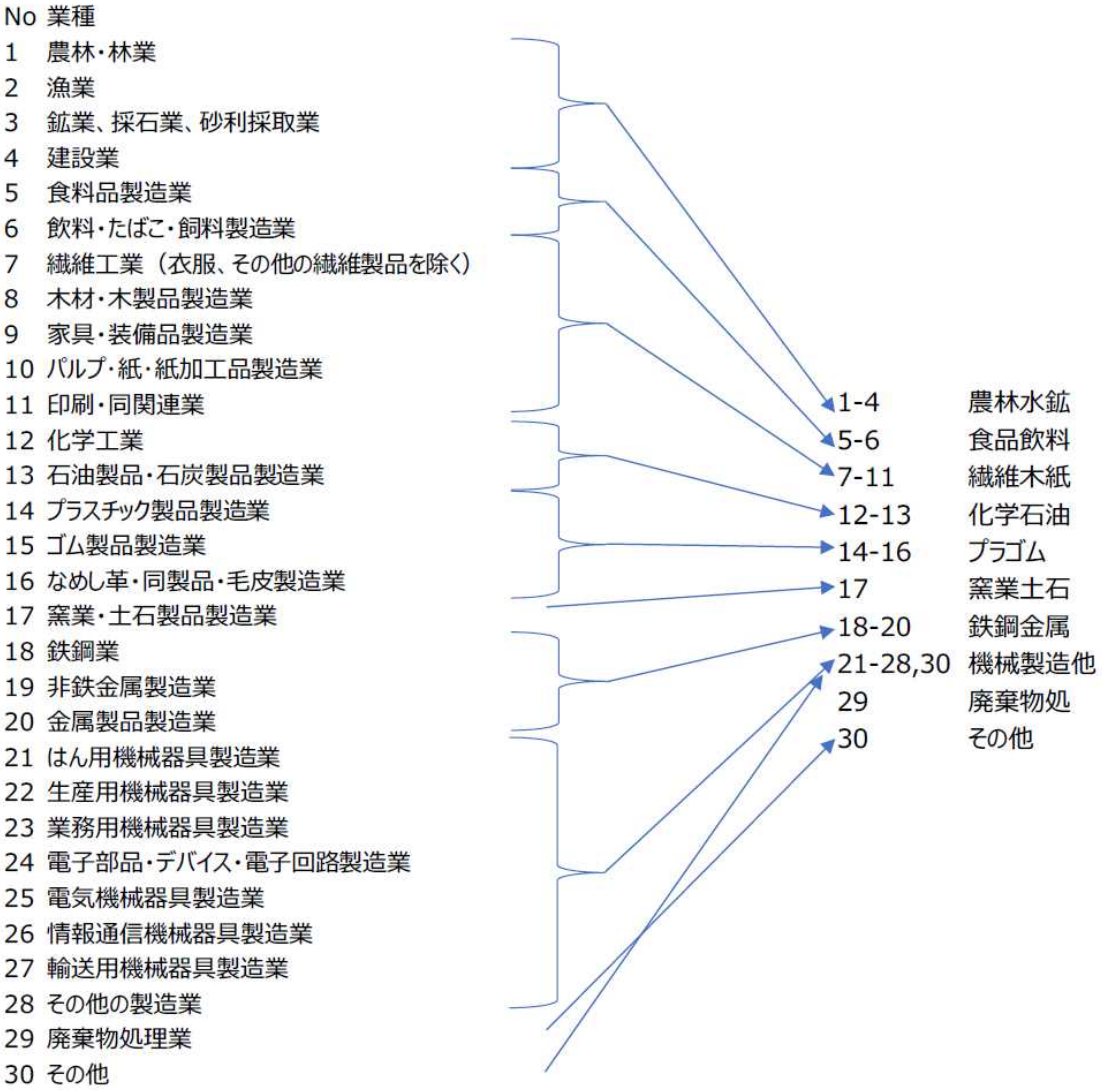



図 8-2-4　業種の集計上の分類[1)]

表 8-2-1　業種別・被加熱物の温度帯別の直接加熱（電気加熱＋直接加熱）需要（PJ）[1)]

| | 農林鉱建 | 食品飲料 | 繊維木紙 | 化学石油 | プラゴム | 窯業土石 | 鉄鋼金属 | 機械製造他 | 廃棄物処理 | 合計 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0～50°C | 0 | 1 | 1 | 183 | 0 | 0 | 6 | 2 | 0 | 193 |
| 50～100°C | 0 | 16 | 4 | 11 | 1 | 3 | 0 | 5 | 0 | 40 |
| 100～150°C | 0 | 11 | 6 | 105 | 2 | 3 | 1 | 7 | 0 | 135 |
| 150～200°C | 3 | 12 | 12 | 25 | 2 | 1 | 3 | 11 | 0 | 69 |
| 200～300°C | 3 | 13 | 5 | 108 | 6 | 1 | 7 | 7 | 0 | 150 |
| 300～400°C | 0 | 0 | 5 | 137 | 1 | 0 | 2 | 2 | 0 | 147 |
| 400～500°C | 0 | 0 | 0 | 51 | 1 | 0 | 5 | 4 | 0 | 61 |
| 500～600°C | 0 | 0 | 0 | 38 | 0 | 1 | 6 | 3 | 0 | 48 |
| 600～700°C | 0 | 3 | 0 | 35 | 0 | 1 | 6 | 10 | 0 | 55 |
| 700～800°C | 0 | 1 | 0 | 10 | 0 | 1 | 25 | 15 | 1 | 53 |
| 800～1000°C | 0 | 2 | 13 | 103 | 0 | 12 | 68 | 18 | 2 | 218 |
| 1000～1200°C | 0 | 0 | 2 | 79 | 0 | 14 | 313 | 13 | 2 | 423 |
| 1200～1400°C | 0 | 0 | 0 | 12 | 0 | 76 | 98 | 7 | 4 | 197 |
| 1400～1600°C | 0 | 0 | 0 | 3 | 0 | 156 | 120 | 16 | 0 | 295 |
| 1600～1800°C | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 12 | 48 | 2 | 1 | 63 |
| 1800～2000°C | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 887 | 1 | 0 | 888 |
| 2000°C以上 | 0 | 0 | 0 | 11 | 0 | 3 | 0 | 1 | 0 | 15 |
| 合計 | 6 | 59 | 48 | 911 | 13 | 284 | 1,595 | 124 | 10 | 3,050 |

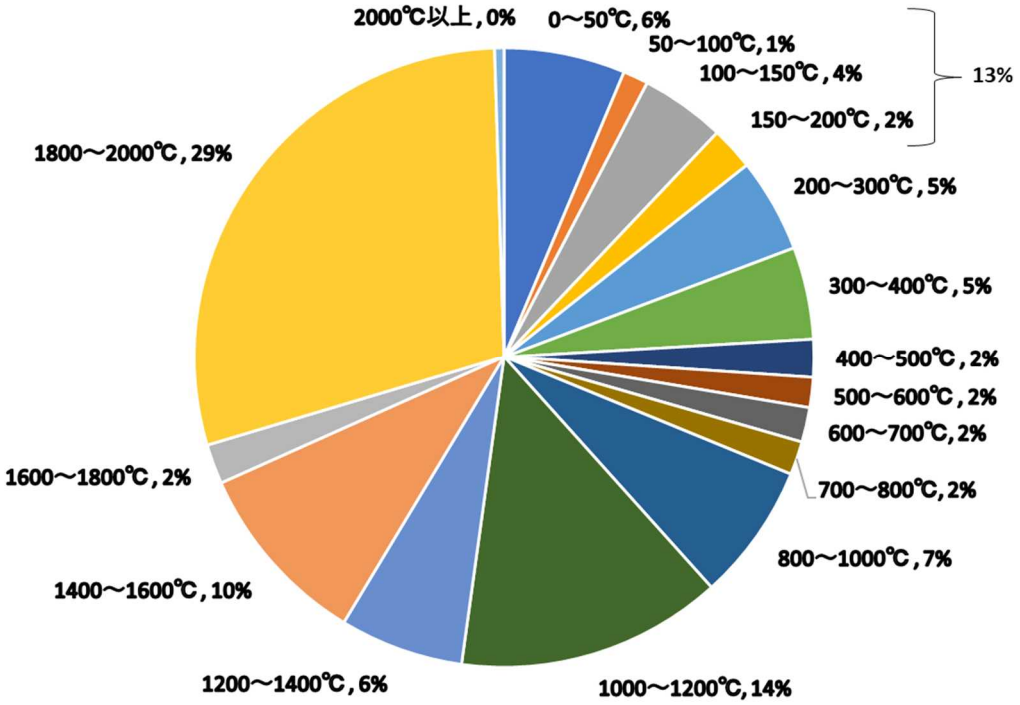



図 8-2-5　　直接加熱の温度帯別の需要割合（熱量ベース）（表 8-2-1 より作成）

表 8-2-2　　業種別・温度帯別の蒸気利用量（PJ）[1)]

| | 農林鉱建 | 食品飲料 | 繊維木紙 | 化学石油 | プラゴム | 窯業土石 | 鉄鋼金属 | 機械製造他 | 廃棄物処理 | 合計 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 100°C未満 | 0 | 4 | 2 | 1 | 0 | 0 | 5 | 4 | 0 | 16 |
| 100～150°C | 0 | 42 | 49 | 50 | 7 | 5 | 11 | 19 | 0 | 183 |
| 150～200°C | 0 | 34 | 167 | 176 | 13 | 12 | 55 | 31 | 2 | 490 |
| 200～300°C | 0 | 3 | 18 | 121 | 4 | 2 | 20 | 2 | 3 | 173 |
| 300～400°C | 0 | 0 | 28 | 50 | 0 | 0 | 26 | 1 | 1 | 106 |
| 400～600°C | 0 | 0 | 0 | 54 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 55 |
| 600～800°C | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 800～1000°C | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1000°C以上 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 合計 | 0 | 83 | 264 | 452 | 24 | 19 | 117 | 58 | 6 | 1,023 |

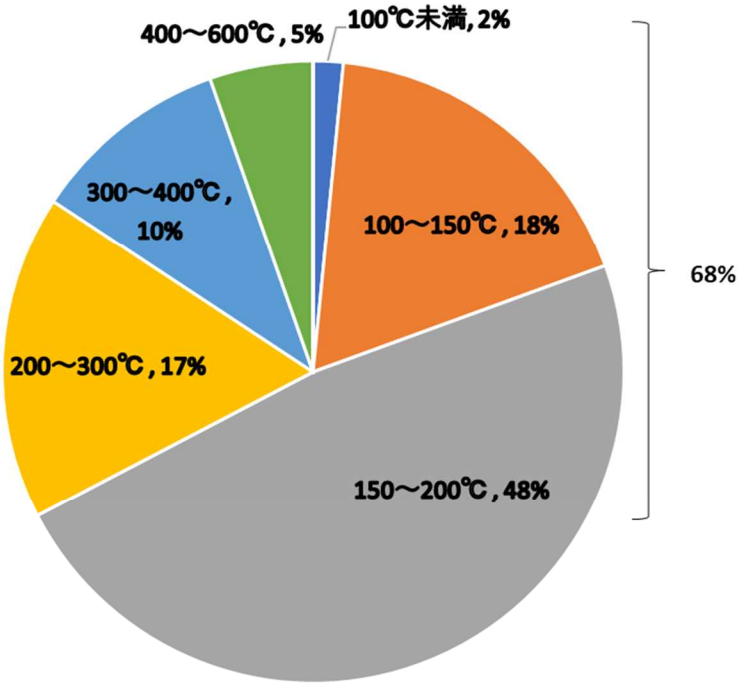



図 8-2-6　温度帯別蒸気利用量の割合（熱量ベース）（表 8-2-2 より作成）

表 8-2-3　業種別・温度帯別の温水利用量（PJ）[1)]

| | 農林鉱建 | 食品飲料 | 繊維木紙 | 化学石油 | プラゴム | 窯業土石 | 鉄鋼金属 | 機械製造他 | 廃棄物処理 | 合計 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 50°C未満 | 0 | 2 | 7 | 4 | 0 | 0 | 0 | 6 | 0 | 19 |
| 50°C 以上 | 2 | 54 | 3 | 27 | 4 | 0 | 1 | 9 | 1 | 101 |
| 合計 | 2 | 56 | 10 | 31 | 4 | 0 | 1 | 15 | 1 | 120 |

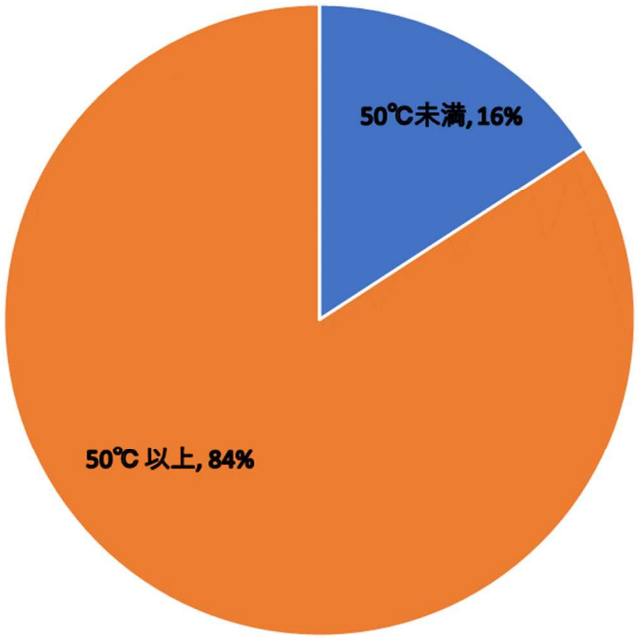



図 8-2-7　温度帯別温水利用量の割合（熱量ベース）（表 8-2-3 より作成）

ここで、200℃の空気を熱源として 20℃の水から 110～190℃の飽和蒸気を 1t/h 製造するために必要な空気量を求める。熱源の空気は 200℃で熱交換器に入り、110℃で出て行くとし、その熱交換効率を 85%とした場合の概算の結果が図 8-2-8 である。また、仮に流れは直交流で総括伝熱係数を 100W/($m^2$･℃）、補正係数を 0.9 とした場合に必要な伝熱面積を概算すると図 8-1-9 のようになる。公開情報によると 1t/h の蒸気を生成する汎用（化石燃料使用）大型ボイラの価格は 1,000～1,400 万円である [10)]。一方、図 8-2-9 に示す伝熱面積を有するボイラを製造すると、その価格はおよそ倍に近い値になると考えられる。その場合、この価格差を燃料費の削減やカーボンクレジットで埋められるかが大きな課題である。

すでにプロセス蒸気用ボイラを有している事業所では一部の蒸気を水和反応用に抽出し、生成する高温湿り空気を用いることで燃料使用量を低減することができ、また別途抽出分よりもさらに高いエネルギーを有する蒸気を生成するプロセスを構築することも可能である。

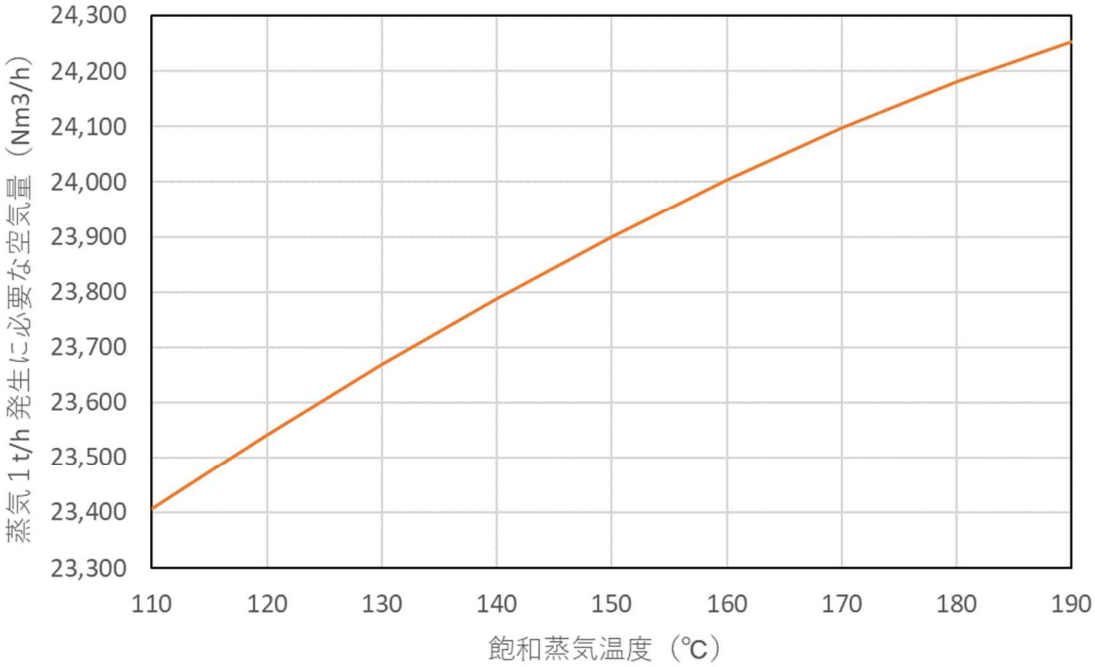



図 8-2-8　飽和蒸気 1t/h を製造するのに必要な 200℃の空気量（熱交換器出口 110℃）

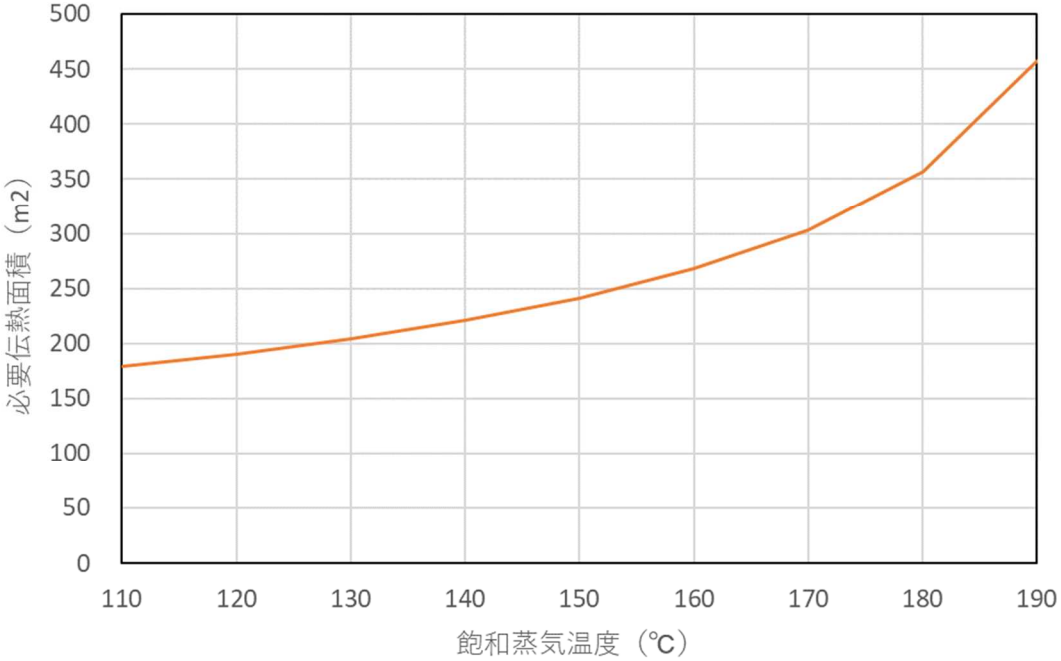



図 8-2-9　図 8-2-8 の条件における熱交換器の必要伝熱面積（直交流による熱交換と仮定）

### ８．２．３．廃熱ボイラ付きの中規模～大規模焼却施設への設置可能性検討

#### （１）焼却施設能力と回収熱量

本実証事業では、間欠運転式(16h)で廃熱ボイラの無い小規模施設での蓄熱運転であったが、連続運転式の施設にも適用はできる。
ごみ焼却施設で発電を目的とした廃熱ボイラは、50t/日クラスに於いても設置されており、さらに70t/日クラスでは売電施設もあるように、本実証事業での高温空気加熱器は、70t/日以下の小規模施設に対しての未利用熱の有効利用方式として十分に期待されるものである。

さらに、100t/日を超える施設には、すでに廃熱ボイラがほぼ設置されているため、本実証事業での高温空気加熱器の設置による熱回収の可能性については、これまで検討を行ってこなかったが、改めて、廃熱ボイラに高温空気加熱器を設置することで新たに熱の回収が可能であるかについて、ごみ処理量が100、150、200 t/日の規模の施設を例として、売電と高温空気加熱器による蓄熱を実施した際の蓄熱規模を試算した結果では、表8-2-4に示すように、処理規模に従い、12～24GJ/日の熱回収が可能となることが判明した。

但し、高温空気加熱器の設置場所は廃熱ボイラの設置状況により制限されるため、設置の可能性については個々の施設での検討は必要である。

表8-2-4　100t/日以上の施設規模で廃熱ボイラ発電と本システム併用での推定熱回収量

| t/d | m3n/h/炉 | ℃ | kW | GJ/2h/2炉 | GJ/d/2炉 |
|---|---|---|---|---|---|
| 処理量 | 高温空気加熱器空気量 | 高温空気加熱器出口温度 | 高温空気加熱器出口空気熱量 | 化学蓄熱材への蓄熱(1回当り) | 化学蓄熱材への蓄熱(1日当り) |
| 100(50x2) | 2,700 | 350 | 355 | 1 | 12 |
| 150(75x2) | 4,050 | 350 | 533 | 1.5 | 18 |
| 200(100x2) | 5,400 | 350 | 711 | 2 | 24 |

#### （２）CO2削減量の推定

上記のように、100t/日を超えるごみ焼却施設で既に廃熱ボイラによる発電が行われている施設に本設備を設置することで、ごみ処理施設の処理能力に応じた熱回収が可能であることが試算された。

この結果を基にして、100～300t/日のごみ処理施設に本設備を設置した場合でのCO2の削減効果を推定した。

推定の条件としては、100t/日～300t/日の規模の施設が現状では393施設（図8-2-１）あり、2030年までに施設数は、5%減少（373施設）、さらに2050年までには現在の施設数の15%が減少（334施設）するものとした。一方、2030年での本施設の導入率を25%（93施設）で、2050年には35%（117施設）まで上昇するものとした。
また、各施設での熱回収量は表8-2-1に示すように規模に応じて12～24GJであり、平均的には20GJ/日の熱量が回収できるものとした。

処理能力が100t/日の1施設当たりのCO2削減量2,236t/年（図8-2-1「ごみ焼却施設への熱回収設備追加による熱輸送事業でのCO2削減効果」）であり、この時の熱回収量が48GJ/日であるため、20GJ/日の熱回収量の場合には、単純比例するものとして

932ｔ/年の CO2 削減量が見込まれる。この数値から熱輸送時での CO2 排出量（176ｔ/年）および利用施設での CO2 排出量（175ｔ/年）を差し引いた値（581ｔ/年）が 1 施設からの CO2 削減量となる。

この結果を基に 2030 年、2050 年での CO2 削減量を図 8-2-10 に示す。

図 8-2-10　処理能力 100～300t/d のごみ焼却炉に設置した場合の想定 CO2 削減量

2050 年での CO2 削減量予想は 68,000t/年と算出された。
100t/日の処理能力施設での 2050 年想定 CO2 削減量が約 300,000t/年であるのに対し、その 22%程度の削減量となった。

これは、1 施設からの熱回収量が 100t/日での 48GJ/日に対して、20GJ/日と低下すること、また施設の数が 100t/日は 552 施設であるのに対し 100～300t/日では 393 施設と少ないことが理由である。

## ８．３．本システムの利用先拡大に向けた検討

### （１）熱利用先での熱需要季節変動への対応

ここまで、化学蓄熱材の特徴である高温空気を利用した給湯、冷暖房、産業用の直接/間接加熱および蒸気利用について述べてきたが、反応熱であるゆえに熱損失がなく長期保管が可能という、もうひとつの大きな特徴がある。

南島原市にある 6 つの公共福祉施設について、夏場と冬場での熱需要量を調査した。結果を表 8-3-1 に示す。

夏場の平均需要量約 19GJ/日に対し、冬場が約 30GJ/日と差がある。夏場の水温は 20℃程度であり、この水道水を 40℃程度まで温めるための必要熱量は、冬場での 10℃程度まで低下した水道水を 40℃まで上昇させるための熱量との比較となり、冬場での必要熱量は、夏場の 1.5 倍程度となる。

表 8-3-1　南島原市にある 6 公共福祉施設での熱需要季節変動

| 施設名称 | ごみ処理施設からの距離（km） | 日平均熱量 夏（GJ/日） | 日平均熱量 冬（GJ/日） |
|---|---|---|---|
| 加津佐町総合福祉センター 希望の里 | 12.90 | 1.41 | 2.10 |
| 北有馬老人福祉センター | 1.50 | 1.41 | 2.10 |
| 天然温泉健寿の湯 湯楽里 | 13.00 | 6.56 | 9.84 |
| 有家老人福祉センター | 7.90 | 1.58 | 2.68 |
| 深江町ふれあいの家 | 15.10 | 3.95 | 6.32 |
| 西有家保健センター | 4.20 | 3.95 | 6.32 |
| 合計 | | 18.86 | 29.36 |

熱需要の季節変動を他の施設で見る[11)12)]と、図 8-3-1～図 8-3-3 に示すように、ホテルなどでは夏場がもっとも熱需要が大きい。館内を冷房するための電力量の増大によるものであろう。冬場は暖房のための熱需要であり、春、秋は熱需要が低くなる季節である。温水プールや野菜栽培ハウスは、公共福祉施設と同様で夏場の熱需要が低い傾向にある。なお、図 8-3-3 については、ハウス内温度推移[12)]を元に、熱負荷を推定したものである。

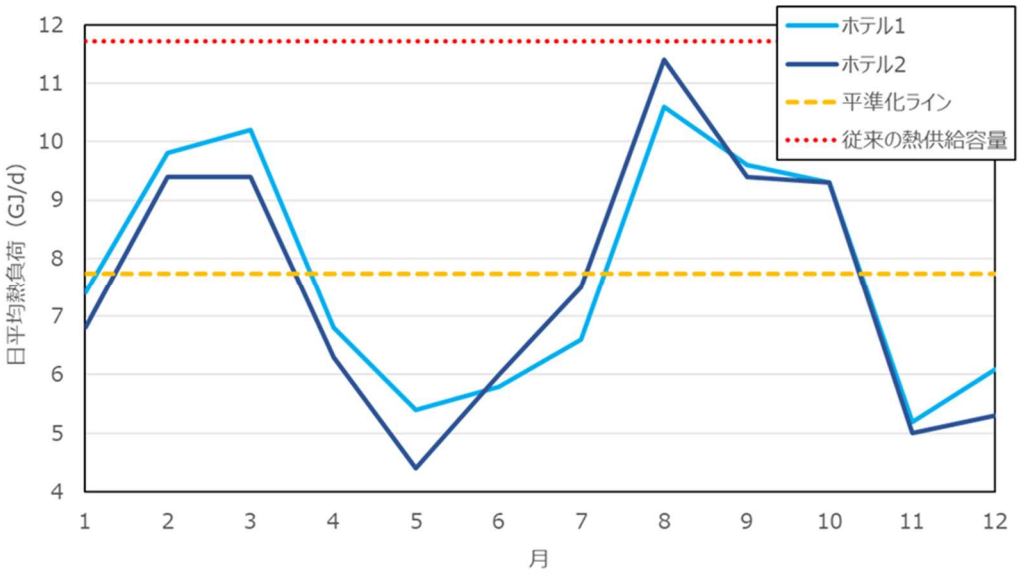



図 8-3-1　ホテルでの熱需要の季節変動

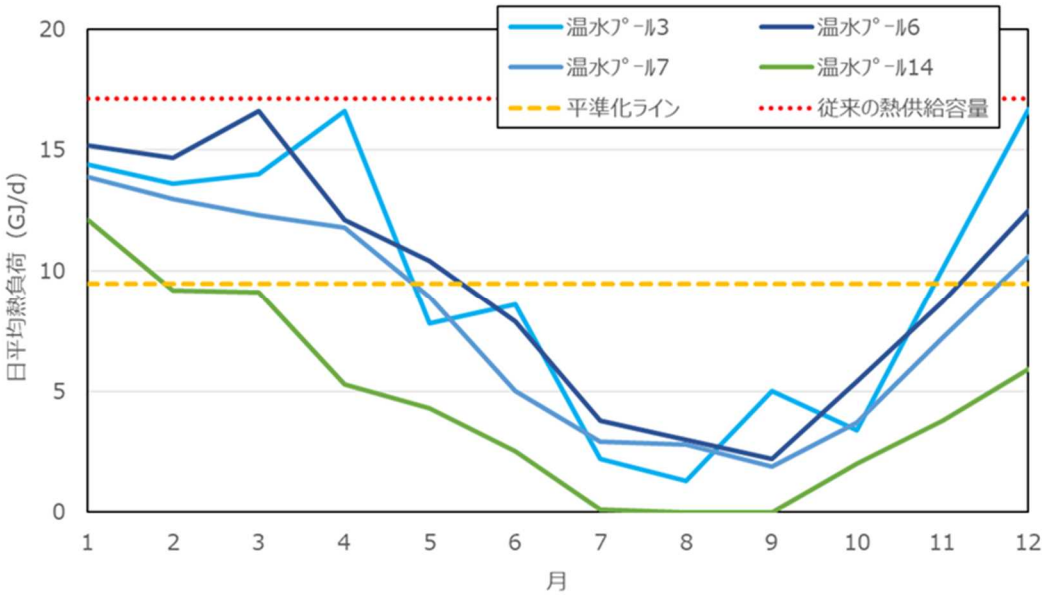



図 8-3-2　温水プールでの熱需要の季節変動

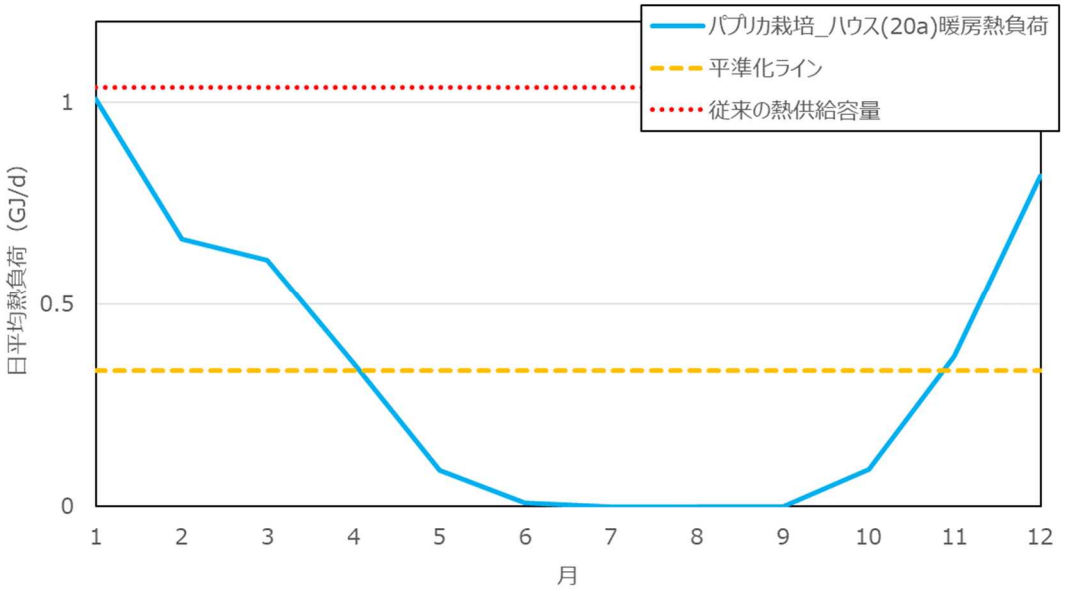



図 8-3-3　野菜栽培ハウスでの熱常用の季節変動

これらの施設での必要熱需要量の最大は温水プールでの 18GJ 程度であり、本実証事業で計画するごみ処理能力 100t/日クラスの焼却施設からの熱回収量 48GJ/日の場合では 2～3 施設を賄うことが出来る。

さらに、季節変動を平準化すると温水プールでの必要熱量は 10GJ/日、ホテルでは 8GJ/日となり、回収熱量 48GJ を想定した場合では 5～6 施設への供給が可能となる熱量となる。

熱供給量の平準化のためには、使用しない時期の熱量が貯蔵できるかであり、本システムでの化学蓄熱材では高温の水蒸気との接触がない限りは放熱がなく、貯蔵が可能である。

例えば、ホテルの熱需要曲線では 4 月～7 月までの約 100 日間での余剰熱量（平均 2GJ/日）の合計で 200GJ あり、この熱量を貯蔵しておき、8 月～10 月の夏場に利用することが考えられる。

貯蔵する熱量の 200GJ は、化学蓄熱材の量としては、およそ 200m$^3$（1GJ/蓄熱材 1m$^3$）となり、高さ 2m、10m 四方の貯蔵庫での貯蔵となり、技術的には可能な貯蔵システムといえる。

### （２）貯蔵熱の災害発生時への利用

本事業で蓄熱施設としたごみ焼却施設は、近年、大規模災害発生時の生活ごみや災害廃棄物の処理等、地域社会の維持や復興に大きな役割を果たすことが期待されている。蓄熱密度が高く、保管による熱損失のない蓄熱後の化学蓄熱材を備蓄しておけば、平時では平準化を目的とし、災害等の緊急時には貴重な熱源になりうる。

【参考文献】

[1]環境省環境再生・資源循環局　廃棄物適正処理推進課，“日本の廃棄物処理　令和 3 年度版，” 2023.

[2]環境省，“廃棄物処理技術情報　一般廃棄物処理実態調査結果　令和３年度調査結果施設整備状況，” [オンライン]. Available: https://www.env.go.jp/recycle/waste_tech/ippan/r3/index.html. [アクセス日: 3/8/2023].

[3]北海道大学　廃棄物処分工学研究室，“一般廃棄物全連続式焼却施設の物質収支・エネルギー収支・コスト分析，” 2012 年 3 月. report1.pdf (hokudai.ac.jp)

[4]S. Fujii, Y. Kanematsu, Y. Kikuchi, T. Nakagaki, J. NW. Chiu, V. Martin; Techno economic analysis of thermal energy storage and transport system utilizing “Zeolite Boiler”: case study in Sweden, Energy Procedia 149 (2018), 102-111, https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.08.174

[5]S Fujii, N Horie, K Nakaibayashi, Y Kanematsu, Y Kikuchi, T Nakagaki; Design of zeolite boiler in thermochemical energy storage and transport system utilizing unused heat from sugar mill, Applied Energy 238 (2019), 561-171, https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.01.104

[6]S Fujii, N Horie, K Nakaibayashi, Y Kanematsu, Y Kikuchi, T Nakagaki; Design of zeolite boiler in thermochemical energy storage and transport system utilizing unused heat from sugar mill, Applied Energy 238 (2019), 561-571, https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.01.104

[7]藤井，宮川，中垣，兼松，菊池，濱田；製糖工場の未利用エネルギーを蓄積する交流接触式ヒートチャージャーのベンチスケール実証試験と設計，化学工学論文集 47 (2021), 191-199, https://doi.org/10.1252/kakoronbunshu.47.191

[8]S Fujii, T Nakagaki, Y Kanematsu, Y Kikuchi; Prospective life cycle assessment for designing mobile thermal energy storage system utilizing zeolite, Journal of Cleaner Production 365 (2022), 132592, https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132592

[9]株式会社三菱総合研究所 環境・エネルギー研究本部 「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（熱の需給及び熱供給機器の特性等に関する調査）調査報告書」（2018 年 2 月），chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://dl.ndl.go.jp/view/prepareDownload?itemId=info%3Andljp%2Fpid%2F11222688&contentNo=1 （最終アクセス日 2023/11/08）

[10]“蒸気ボイラ（大型）の価格相場とおすすめメーカ” 蒸気ボイラ（大型）の価格相場とおすすめメーカ ｜ 機械比較ドットコム（kikai-hikaku.com） （最終アクセス日 2024/01/15）

[11] 「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 年 3 月 31 日）環境パートナーシップ・CLUB 温暖化・省エネ分科会
https://epoc.gr.jp/katudou_old/kenkyukai/20090331/pdf/20090331_01.pdf（最終アクセス日 2024/03/04）

[12]炭酸ガス施用による促成パプリカの増収技術/高知県農業技術センター/平成 20～22 年度研究報告
https://www.nogyo.tosa.pref.kochi.lg.jp/download/?t=LD&id=5701&fid=26689（最終アクセス日 2024/03/04）

## ９．検討会の開催

### ９．１．第一回検討会

開催日時：令和５年11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）

| 会　議　録 | |
|---|---|
| 会　議 | 令和５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）<br>第１回検討会 |
| 日　時 | 令和５年11月２日（木）10時00分～12時00分 |
| 場　所 | 株式会社東和テクノロジー　関西支店　大会議室（オンライン並行） |
| 議　事 | ＜議事次第＞<br>１．令和５年度実施内容、実施状況の報告<br>２．その他 |
| 配布資料 | １．【資料1】令和５年度第１回検討会次第<br>２．【資料2】令和５年度第１回検討会資料 |
| 出 席 者<br>（敬称略） | ＜検討会委員＞（オンライン参加）<br>吉岡　敏明　東北大学大学院環境科学研究科　教授<br>遠藤　光一　（公財）産業廃棄物処理事業振興財団　資源循環企画推進部　部長<br>加藤　之貴　東京工業大学科学技術創成研究院<br>ゼロカーボンエネルギー研究所　教授<br>平　　航也　南島原市　環境水道部　環境課　環境班　班長<br><br>＜有識者＞（オンライン参加）<br>酒井　伸一　京都大学名誉教授<br><br>＜代表実施者＞<br>児玉　基希　エスエヌ環境テクノロジー（株）　取締役<br>中尾　毅　　エスエヌ環境テクノロジー（株）　M&P室　室長<br><br>＜共同実施者＞<br>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<br>（オンライン参加）<br>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<br><br>友田　啓二郎　（株）東和テクノロジー　代表取締役（欠席）<br>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<br>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<br>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<br>資源循環研究企画　担当部長<br>（オンライン参加）<br>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<br>脱炭素研究企画　担当部長 |

| | |
|---|---|
| | ＜環境省＞（オンライン参加）<br>日垣　淳　　環境再生・資源循環局　廃棄物適正処理推進課　課長補佐<br>北垣　芳彦　　環境再生・資源循環局　廃棄物適正処理推進課　係長<br>則竹　愛弘　　環境再生・資源循環局　廃棄物適正処理推進課　環境専門員<br>後藤　勇喜　　環境再生・資源循環局　廃棄物適正処理推進課　環境専門員<br><br>＜傍聴＞（オンライン参加）<br>西畑　俊太郎　（一財）日本環境衛生センター　資源循環低炭素化部<br>企画・再生可能エネルギー事業課　技師<br>以上 |
| 事務局 | 【開会】<br>開会宣言。出席者紹介。環境省よりご挨拶。 |
| 環境省 | 先日は現地確認をさせていただき、その際には詳細な説明をいただき感謝いたします。<br>本実証事業はごみ焼却施設の廃熱を利用する技術で、回収した熱を輸送することに取り組んでいただいているものです。この熱輸送技術について、より効率的なエネルギー回収技術にしていただけることを期待しております。<br>今年度は 3 年間の最終年度になりますので、みなさまの活発な御意見を生かしていただき、より良いものにしていただければと思います。 |
| 事務局 | ・配布資料の確認<br><br>１．令和５年度実施内容、実施状況の報告【配布資料：資料２】<br>・エスエヌ環境テクノロジー中尾より説明<br><br>２．質疑応答<br><br>～以下、質疑応答～ |
| 吉岡委員 | まずは全体の目標を達成され、良い成果だったと思います。気になりましたのが、蓄熱と放熱のバランスがあっていないというところ。最終的に説明できる見通しがあるか。 |
| 事業者 | 今回の放熱設備につきましては、温水を作る際に熱交換機を使って熱交換を行うのですが、その時にドレンが発生しています。水蒸気が持っているエネルギーが温水側に移っているのではないかと考えている。 |

| | |
|---|---|
| 吉岡委員 | わかりました。実績、成果としては十分に得られていると思うのですが、蓄熱と放熱のバランスを説明できないと事業全体の信頼度にも関わると思う。仮にそのドレンの水蒸気分が合わないことが大きなファクターということであれば、あえてそこの条件を変えた実証をされてはいかがでしょうか。そのような実証を行う時間的な余裕があるかどうかも確認したいのですが |
| 事業者 | ドレンの量について、最初の頃は大量に発生していたが、直近ではその量は減っている。なぜかと考えると、空気を循環させて反応していくのですが、空気の循環温度を 100℃位にした場合と 110℃にした場合とでドレン量が変わってきています。その辺が今回の実証試験のある意味ネックでもありますので、実験の条件を変え、ドレンと反応の熱エネルギーがどうバランスするか、今後見ていきたいと思ってます。 |
| 吉岡委員 | よろしくお願いいたします。確認ですが、放熱反応 7.7h で、というのは交換のタイミング 3.5h の倍ということで A,B 使っているという理解でよいか。 |
| 事業者 | そのとおりです。データからはまだまだ熱量が残っているところで放熱反応を停止しております。これは空気温度が高い状態で止めていることであり、先ほどの説明の通りドレンの発生を抑制したいのと、化学蓄熱材にあまり負担をかけた状態で終わりたくないということもあります。放熱量としては十分とれていますので、熱量が残った状態ではあるが、そこで終了させたということです。 |
| 吉岡委員 | 実際には、さらに熱量を搾り取ることも可能で、もっと時間的には稼げるけど、熱量を残した状態で終了させた、ということですね。 |
| 事業者 | そのとおりです。 |
| 吉岡委員 | わかりました。気になった点は以上で、全体的には実証の成果が得られているな、ということが率直な意見です。 |
| 事務局 | ありがとうございました。 |
| 遠藤委員 | 貴重なデータの説明ありがとうございました。<br>実証の成果として、狙った 200℃以上の温度がとれたというのが良い点と思います。200℃というのは水蒸気を発生させる以上の温度であり、蓄熱を行い、この熱を移動させることができるというのは大きな成果と思います。 |

| | |
|---|---|
| | 放熱についても蓄熱とほぼ同じ容量ぐらいまでの熱が取り出せるというのは化学蓄熱の特徴と思われますが、排熱の利用先を拡大させることができるという意味では今後期待が持てる良い成果だと思われます。<br>この後実証試験が進んで将来的に実用化したときの放熱性能、輸送も含めたエネルギー効率についても提示されていくと思いますが、その結果として実用化が可能とされる熱輸送の範囲についても示されたらと思います。<br>放熱の時の水蒸気の影響というのは、今後明確にしていただければと思います。<br>蓄熱反応の際での顕熱を利用することで発熱時間の短縮につながったという点は良いと思います。反応工程の終了後に乾燥工程を入れてはどうかと思いますが、このあたりのお考えはありますか。 |
| 事業者 | 放熱側で乾燥工程を入れることは出来るだけ避けたいと考えています。と言いますのは、乾燥工程にごみ焼却施設での熱を利用することで放熱側での投入熱を削減することができると考えております。ただし、放熱設備側での乾燥工程の必要性につきましては、化学蓄熱材がどのような状態になるかという点も含め検討が必要と考えております。例えば、今回は 13km という短距離でしたので、次の日に放熱が出来ましたが、輸送に 1 日、2 日かけるような長距離の輸送が開始された場合、輸送コストを考えるとそこまで遠くということは難しいとは思いますが、そういった場合には材料の安定性を確保する上で乾燥した方が良いのではないか、といった事の検討が必要になるかと思っております。 |
| 遠藤委員 | 更に良い性能が出ることを期待しております。 |
| 事務局 | ありがとうございます。 |
| 加藤委員 | 成果に関しては、従来に無い、新たな成果が出たので非常に良いと思います。特に化学蓄熱材については同様の実証試験が無かったのでそれを先駆的に行ったということは価値があると思いました。特に 200℃を超えたということが評価されます。また反応器の下部、上部に加えて中部の温度を測定されたことでデータの信頼性も非常に高まったと思います。今のところ温水での利用ですが、評価に当たっては出力を時間で割ったワット数での評価をする必要が今後あるかと思っています。その辺いかがでしょうか。 |
| 事業者 | 今回お示しすることができませんでしたが、次の検討会においては（ワット）での評価をしたいと思います。 |

| | |
|---|---|
| 加藤委員 | それができるとさらに研究の価値も上がるかと思います。熱収支に関しては基本的に反応器が小さいので熱のロスが多くあり、より整合性のあるデータが求められますが、この反応器規模ですと熱収支のズレというのはある程度は仕方が無いと考えます。<br>一方で、将来的にスケールアップを図る際、最終的には「本実験結果を基にするとこのような大きさのものができます。」となると思いますので、スケールアップに必要なデータは報告できるようにしていただければと思います。「実際の需要に対してこのような反応器の大きさでしたらこのくらいの蒸気をつくれます。」ということが言えると良いので、時間に限りはありますが、何らかのスケールアップの可能性について言及いただければ、世界レベルで注目される技術になるのではないかと思いました。以上です。 |
| 事務局 | ありがとうございました。<br>それでは南島原市の平班長おねがいいたします。 |
| 平委員 | 私からは現地の実証試験の状況について報告いたします。現地の蓄熱作業については、通常のごみ焼却作業に支障をきたすことなく、順調に実証試験が行われていることを確認しています。放熱作業を行われている温浴施設においても問題なく実証試験が行われていることをご報告いたします。 |
| 事務局 | ありがとうございます。<br>最後に酒井先生から、ご講評をお願いいたします。 |
| 酒井先生 | まずはしっかりとした設計をされ、現地の建設から計画、実績等、関係者の努力に敬意を表したいです。<br>加藤先生への質問となりますが、回収熱 200℃を超えたということについては前例が無いということですが、過去の事例を関係者各位が十分に認識出来ているとは思っておりません。過去に例の無い成果であることについて、どのように主張していけば良いかについてアイデアをいただけませんか。 |
| 加藤委員 | 比較すべき対象はまず顕熱蓄熱で、これは 100℃しか蓄熱できない。化学蓄熱ではデータがないので本事業が最初である、ライバルは吸着式ヒートポンプで、これは 150℃が限界と言われている。今回化学蓄熱によって 200℃を超える熱を出せたというのはやはり「他に例が無い」という表現で良いのではないかと思います。<br>普及型の蓄熱装置としては潜熱蓄熱で、これは 150℃であり、200℃というのはない。200℃を超えると高圧スチームも使えますから圧倒的に価値がある。今回温浴施設の給湯に使っていますが、産業用のエネルギー供給システムとしても利用できると考える。先ほ |

| | |
|---|---|
| | どの説明の通りで、ワット数で表記すると産業界にも普及すると思う。やや定性的な意見ですが。よろしくお願いいたします。 |
| 酒井先生 | ありがとうございます。性能から、今回の方式のユニークさというところを再整理する、そしてご指摘いただいたスケールアップ、放熱輸送を含めたシステム収支についても数値化されて、最後に整理をしていただくと深みがでるかと思います。<br>いただきましたご発言、大変貴重なものなので、関係者最後の整理を進めていただければと思います。 |
| 加藤委員 | 輸送の部分は別途エネルギーを利用しますので、これは固定利用を仮定し検討をしたら良いと思います。熱供給を欲しい方には、今回は人件費がいるが今後は自動運転化、AI 化に伴い自動運転ができる、低コストでの輸送が可能になるということを言えば利用者もあまり文句をいわなくなる。輸送は決まった道なので、実証もしやすい。次に機会があれば「自動運転を導入した熱輸送の実証」というテーマで進めることが出来れば良いと思う。 |
| 酒井先生 | 将来を見越したご提案をありがとうございます。反応器の耐久性、寿命判断の報告がありましたが、無理な判断の必要はないが可能な範囲で検証を進めてほしいと思います。<br>あと、若干言葉足らずかと思っているのが、ダイオキシン濃度がワンポイントで「昨年と変わらない」という報告にとどまっているところですが、排ガス処理系統の温度変化との関係性を紐づけした材料で一定測定をされたら良いかと思いました。<br>以上、本検討会での意見を反映し、最終報告をまとめていただければと思います。 |
| 事務局 | ありがとうございます。 |
| 加藤委員 | 学会発表レベルの内容かと思います。学会発表の予定はないのでしょうか。興味があれば連絡ください。 |
| 事務局 | ありがとうございました。<br>では本日の検討会は終了いたします。<br>＜以上＞ |

## ９．２．第二回検討会

開催日時:令和６年３月１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)

| 会　　議　　録 | |
|---|---|
| 会　議 | 令和５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）第２回検討会 |
| 日　時 | 令和 6 年 3 月 1 日（金）10 時 00 分～12 時 00 分 |
| 場　所 | 株式会社東和テクノロジー　関西支店　大会議室（オンライン並行） |
| 議　事 | ＜議事次第＞<br>１．令和 5 年度審査等委員会の報告<br>２．令和 5 年度報告書の説明<br>３．その他 |
| 配布資料 | １．【資料 1】令和 5 年度第 2 回検討会次第<br>２．【資料 2】令和 5 年度第 2 回検討会説明資料 |
| 出 席 者<br>(敬称略) | ＜検討会委員＞（オンライン参加）<br>吉岡　敏明　東北大学大学院環境科学研究科　教授（欠席、書類審査）<br>遠藤　光一　（公財）産業廃棄物処理事業振興財団　資源循環企画推進部　部長<br>加藤　之貴　東京工業大学科学技術創成研究院<br>ゼロカーボンエネルギー研究所教授（欠席、書類審査）<br>門畑　祐紀　南島原市　環境水道部　環境課　課長<br><br>＜有識者＞（オンライン参加）<br>酒井　伸一　京都大学名誉教授<br><br>＜代表実施者＞<br>児玉　基希　エスエヌ環境テクノロジー（株）　取締役<br>中尾　毅　エスエヌ環境テクノロジー（株）　M&P 室　室長<br><br>＜共同実施者＞<br>朝枝　政利　日立造船（株）中部支社長<br>伴　明浩　日立造船（株）環境事業本部<br>資源循環事業推進部　担当部長　（オンライン参加）<br>友田　啓二郎　（株）東和テクノロジー　代表取締役（欠席）<br>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<br>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<br>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<br>資源循環研究企画　担当部長　（オンライン参加）<br>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<br>脱炭素研究企画　担当部長 |

| | |
|---|---|
| | ＜環境省＞（オンライン参加）<br>日垣　淳　　環境再生・資源循環局　廃棄物適正処理推進課　課長補佐<br>北垣　芳彦　　環境再生・資源循環局　廃棄物適正処理推進課　係長<br>則竹　愛弘　　環境再生・資源循環局　廃棄物適正処理推進課　環境専門員<br>後藤　勇喜　　環境再生・資源循環局　廃棄物適正処理推進課　環境専門員<br><br>＜傍聴＞（オンライン参加）<br>田口　愛　（一財）日本環境衛生センター　資源循環低炭素化部<br>企画・再生可能エネルギー事業課　主任<br><br>以上 |
| 事務局 | 【開会】<br>開会宣言。出席者紹介。環境省よりご挨拶。 |
| 環境省 | 皆様には本日もお忙しい中本検討会に参加いただきまして非常に感謝申し上げます。事業者の皆様におかれましてはあと一か月ございますが、3 年間事故なく実証事業を履行していただきまして感謝しております。南島原市さんのご協力含め、みなさまのご尽力のおかげと考えております。環境省では、廃棄物処理施設からの効果的なエネルギー回収技術の導入に係る取り組みを施策として推進しておりまして、その取り組みの一つとして本実証を行っていただいたと認識しております。課題はございますが、実際に南島原市の施設におきまして本実証が計画通りに行われ、成果をえられたことについては非常に有意義な実証であったと考えております。本実証の成果につきましては、現在検討中の地域循環共生圏構築推進のためのガイダンスの策定に活用していきたいと考えております。本日は最後の検討会となりますが、今後の発展性を見据え、委員の皆様へは忌憚のないご意見、ご議論をいただければと思います。本日はよろしくお願いいたします。 |
| 事務局 | ・配布資料の確認<br><br>１．令和 5 年度第 2 回検討会説明資料の説明【配布資料：資料２】<br>・エスエヌ環境テクノロジー中尾より説明<br><br>２．質疑応答 |
| 事務局 | ・冒頭、吉岡委員（欠席）から受領のコメント紹介<br><br>①蓄熱、放熱の実証の結果として、ごみ焼却施設から温浴施設の間で蓄熱材を充填した反応器を問題なく運搬できたこと、蓄熱、放熱装置にて計画通りの空気流量、温度、熱放熱時間を確保できたこ |

| | |
|---|---|
| | と、特に約 40℃の温水を温浴施設へ供給することが確認できたことの意義は大きい。関係者の尽力に敬意を表す。<br>②投資回収年数の算出においての電気料金の販売単価については現状のエネルギー事情を考慮すると 6 円/MJ 以上で十分に可能性のある事業と考えられる。<br>③横展開が成立する可能性のある地域・エリアの具体的な条件、要件を明示できると本事業の意義が高まると思う。<br><br>～以下、質疑応答～ |
| 遠藤委員 | 全体の得られた成果としては、200℃以上の出力、成果を得られたということで、これまでの蓄熱関係と比較しても、使い勝手が広がる実用性を持っていると思った。今回の実証では繰り返し安定的に利用できるということで今後の実用化に向けては有意義な成果を得られたと思う。又、13 kmという長い距離での輸送が可能であったことについて、需要の拡大につながる成果であると思う。吉岡委員のコメント同様、みなさまの尽力に敬意を表します。<br><br>エネルギー収支関係に関してですが、消費電力のところで、粉化が起こりつつ運用されると思いますが、消費電力への影響は小さいと考える。いかがでしょうか。 |
| 事業者 | 小規模の為、影響は少なかったが、入力の合計は 10kw ある。内消費電力は 2 割程度。実装についてはさらなる消費電力の低下を目指します。 |
| 遠藤委員 | エネルギーの効率を上げるために、湿り空気の説明がありましたが、日、週間での負荷変動のピークタイムの使い方、もともと既設のボイラの活用ということで水分の補強等についてはエネルギー収支の効率化が寄与しないかなと思いました。 |
| 事業者 | 一週間のピークタイムの提案について、既存の蒸気ボイラを使用している所であれば効率を上げることが可能であると思う。 |
| 遠藤委員 | 使い勝手の部分で季節変動においての説明がありましたが、こちらについては通常時だけではなく災害時に活用、被災地へのバックアップに使えるのではないか。今回の検討内容ではないが、そのようなアイデアがあればよいと思う。 |
| 事業者 | 能登震災においても、蓄熱材が活用できないかと考えた。水蒸気のエネルギー源をどこにもたせるか。規模を大きくすればするほど反応に必要な水蒸気量が多くなってしまいますのでいかにそれをおさえることができるか。反応に関する水蒸気量は、反応を起こすた |

| | |
|---|---|
| | めには絶対に必要なものになるので、それ以外にロスする蒸気をいかに減らすか。そして増幅していくような反応器構造ができないか、等についてアイデアを持ちながら、災害対応に向けてこの熱備蓄が最大限利活用できないかこれから考え続けたいと思います。 |
| 遠藤委員 | 事業の投資回収について、熱の蓄熱、そして供給についてどのような運用スキームを検討しているのか。ユーザーはどう考えるが。供給側がどう考えるか。 |
| 事業者 | 投資回収について。事業主体がどこにあるかというのが課題の一つです。熱の販売がどこになるかという点で、これが民間の熱供給会社だと一般管理費等の経費が掛かってくるので、この単価で運用するのはなかなか難しい。当面は、地方自治体で熱単価を決めていくことになるが、一方で、原油価格の高騰により、補助金を地域の方へお配りしている例を見て、お金を支払うのではなくエネルギーを供給するというような運用の工夫も可能かと思う。熱利用先については放熱システムの負担というものが大きいので、たとえば農業事業者ですと、設備投資に大きな負担がかかる。この負担費用の一部でも地域活性化を位置づけとした補助金で賄うことが出来れば熱利用システムというのはもう少し使い勝手がよくなるのではないかという考えを持っております。 |
| 門畑委員 | 今回の実証実験において、準備、設備撤去の間事故もなく安全に、又、実証期間中に置きましては、通常の業務に支障をきたすことなく実証事業者が適正な対応をしていただけました。このことを実証主体として、ご報告させていただきます。<br>本市においても 2050 年のカーボンニュートラルの取り組みに向け、日々このような実験で探っているということを垣間見ることが出来て良かったです。まだ課題はあるかと思いますが、今回の成果が実用化された際、この実証が南島原市で行われたということが振り返ることができたら喜ばしい限りです。今回はありがとうございました。 |
| 酒井先生 | 今回の実証結果総括、粉化等心配はされつつも影響から考えて大きく気を遣うこともなく今後使えるという見通しができたということは良いことですが、温水回収率及びエネルギー収支については今後の課題となった。とある。今後の課題のポイントはどのような点か。 |
| 事業者 | エネルギー収支でゲインを上げるためには無駄な水蒸気を使わないようなシステムで熱を回収するということが重要だと考えます。今回は、高温空気が非常に湿度を持った空気であることで、この空気から温水回収をしたのですが、ご存知の通り 20℃～40℃という温 |

| | |
|---|---|
| | 水を直接回収してしまったというところが実はエネルギー収支を悪化させた原因であったと考えております。まずはここのドレン化を防ぐには、もう少し高い温度で熱回収をする。100℃以上の沸点を持つ熱媒体から温水を回収すれば水蒸気のロスを抑えることが出来るので、そういった部分で十分改善できると考えます。もう一つは投入エネルギーの問題。反応器の差圧は高いと考えており、もっと低い差圧で効率よく放熱できないかと考えています。そのことは実証実験をすることで体感できた。そういったところを合わせますと、水蒸気のロス、それから投入電力を削減することによってエネルギーゲインが高まっていくこと、となるので、そういう先の見えたところを課題と認識しております。 |
| 酒井先生 | 実際現場での実証整理も出来ているので良かった。CO2 削減および今後の展開のことで確認ですが、規模別、CO2 削減効果の試算はしてないか。 |
| 事業者 | 試算しておりません。処理規模の分布がわかるので試算は可能です。 |
| 酒井先生 | 机上検討で良いので計算いただきたい。システム利用可能性について、小規模において、夏備蓄、冬活用という熱供給サイクル、ここはどのように理解したらよいか追加的説明を。 |
| 事業者 | ケーススタディでは、反応器は 24 時間、どこかの工程で動いている想定です。今回の熱備蓄という形では、それよりも多くの蓄熱材必要ですが、ごみ焼却施設は熱をほぼ一定に供給できますので、一方、需要先で熱は不要という季節帯がありまして、その時の差を備蓄するということです。例えば、夏に備蓄し、その熱を冬の需要ピーク時に放出するということができれば、有効的であるということになります。 |
| 酒井先生 | 了解。これについて経済性について裏付けをもって検証、もうひとひねりいると思いました。民間横展開について、ホテル、ビニールハウス等、もっと模索して良いと思う。そのあたりの追加の解析はよくやっていると思う。 |
| 事務局 | ありがとうございます。<br>では本日の検討会は終了いたします。 |
| 酒井先生 | 加藤委員にも今回の資料確認いただき、ご意見をいただければと思います。 |

| | |
|---|---|
| 事務局 | ありがとうございます。<br>３年間ご指導いただきありがとうございました。今後もまだ残っておりますが、検討課題についてまとめていきたいとおもいます。それではこれで終わります。<br><br>令和 6 年 3月5日　書面審査報告(原文複写)<br><br>脱炭素化・先導的廃棄物処理システム実証事業（環境省公募）<br>令和５年度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 第 2 回検討会(令和 6 年 3月1日（金）10:00～)<br>加藤之貴<br>東京工業大学科学技術創成研究院 ゼロカーボンエネルギー研究所<br><br>表記検討会について、資料を基にした書面審査を行った。<br>本事業は従来方式に比べ高い蓄熱量/単位容量が確保でき、かつ熱保存性に優れる化学蓄　熱材を用い、排熱源としてのごみ焼却施設での利用有効性の実証を行うことを目的に検討がなされている。　酸化マグネシウム系蓄熱材約 130kg を充填した反応器 2 基を用い、廃棄物処理施設の廃熱を使って 0.25GJ（0.125GJ/基×2 基）の蓄熱行い、約 16.5km 離れた温浴施設に 2t トラックで熱輸送し、翌日に同量の放熱が可能であることを実証している。<br>化学蓄熱の 放熱運転では最高温度 200℃以上、延べ時間で 5h 以上の平均温度 190℃の高温空気を供給できたことも先駆的である。<br>エネルギーゲインが運転計画より低かったことはシステムの熱損失であるので、今後の実用開発時の断熱の強化で技術的に克服できるものと判断できる。本熱輸送システムは、環境性、社会受容性が高い。<br>本事業は実装のための課題も明らかにしており、今後の蓄熱による熱利用分野の低炭素化に向けて極めて先進的な価値があると判断された。<br>＜以上＞ |

## １０．「令和５年度脱炭素化・先導的廃棄物処理システム実証事業　審査等委員会」への出席

環境省が実施する「令和５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 6 年 1 月 31 日（水）14：15～14：50
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

## １１．「令和５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」

「資源循環分野における脱炭素・循環経済に係るシンポジウム」に参加し、事業内容を公の場で説明した。また、(一財)日本環境衛生センターが実施する「令和５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」を受け、対応した。

「資源循環分野における脱炭素・循環経済に係るシンポジウム」
主催：環境省および(一社)廃棄物資源循環学会
日時：令和 6 年 3 月 6 日（水）13:30～17:10
開催方法：航空会館大ホール＆Zoom　Webinars　ハイブリッド形式

「令和５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」
主催：(一財)日本環境衛生センター
日時：令和 6 年 3 月 14 日（木）10:00～11:00
開催方法：Webex/ONLINE 形式

## １２．本事業の総括

### １２．１．事業の必要性

令和2年 10 月 26 日に菅総理大臣は所信表明演説で、「我が国は、2050 年までに、温室効果ガスの排出を全体としてゼロにする、すなわち 2050 年カーボンニュート ラル、脱炭素社会の実現を目指す」ことを宣言した。廃棄物分野においても一層の脱炭素・省 CO2 対策を進めることが喫緊の課題となる。 また、第 5 次環境基本計画で打ち出された「地域循環共生圏」は、自立・分散型 の社会を形成しつつ近隣地域等と地域資源を補完し支え合う考え方であり、廃棄物処理施設においても地域活性化に取り組むことが重要である。

一般廃棄物の焼却や埋立処分に伴う直接的な温室効果ガス排出のほか、収集運搬過程における燃料使用や、中間処理施設等の稼働に伴う電力使用等によるエネルギー起源 CO2 等の排出等があり、これらを総合的に抑えていく対策も求められている。また、廃棄物から回収されるエネルギーの利活用にあたっては、化石燃料代替による CO2 削減効果と併せて、地域の課題や地域活性化への貢献に向けた新たな価値の創出が求められている。

本事業は、化学蓄熱材等を用いた熱輸送実証事業であり、廃棄物から回収した熱の利用を目的としたものである。従来の熱供給事業では、遠方になるに従って熱損失が大きくなる導管敷設に係る道路・敷地利用等の手続きが煩雑化する等の課題があるため、蓄熱輸送の選択が考えられ、現状で十分に普及しているとは言えない。特に熱供給コストの多くは輸送費が占めるため、単位移動当たりの輸送熱量を大きくすることが重要となる。

本事業は、排熱源としてごみ焼却施設の排熱を活用し、従来の蓄熱材と比較して容積当たり 5 倍の蓄熱量を有する化学蓄熱材を利用することで、これまで利用されてこなかった熱の効率的な利用を促進することにより、脱炭素や自然共生への取組、災害対応、地域振興等の社会課題の同時解決を図ることを目標に進めるものである。

### １２．２．コストの妥当性

熱供給事業便覧（令和 2 年版）によると、熱供給事業者は全国に 75 事業者、134 営業地域にて熱の供給事業を行っている。総販売量は 22,637,806GJ（令和元年度）であり、販売価格については事業者によりその構成が異なり比較は難しいが、基本料金と従量料金の 2 つに分かれており、基本料金は設備投資費に対応し、従量料金が運営費に対応していると予想される。

各社での従量料金はおおよそ 2～5 円/MJ であるのに対し、本事業当初でのコスト予測の結果では運営費が 7.09 円/MJ、設備費（10 年償却）と運営費との合計で 7.92 円/MJ と算出された。

この段階では、運営費の内で蓄熱材などの材料費の割合が高いことが特筆されたが、本事業を進める間に、蓄熱・放熱を約 1,000 回繰り返しても蓄熱材の性能自体は低下しないことが判明し、これを考慮した結果、コストは運営費のみでは 6.0 円、設備費を加えた場合で 7.5 円と算出され、コスト面でも十分に期待できる。

### １２．３．CO2 削減への貢献

本事業では、ごみ処理能力 100t/日以下の施設に蓄熱設備を設置し、熱を回収することを想定した。100t/日以上の能力を有するごみ焼却施設の場合には、タービン設置による発電が有効であろうとのことからである。

ごみ焼却施設は、将来的な人口減少、施設の集約化などのために年々減少し、現在

は処理量 100t/日以下の焼却施設は 550 施設ほどあるが、2050 年には 470 施設程度と予測した。

処理量 50t/日の焼却施設への設置をモデルケースとして CO2 削減効果を推定したところ、事業当初では回収熱量は18,816ＧＪ/年で、熱回収設備からの排ガスをさらに利用して温水を作り出すことが計算に入れると、年間の CO2 削減量は 2,210t/年となる。新たに発生する CO2 量には熱の輸送に係る燃料の燃焼と、熱利用先での放熱設備の運転に係るエネルギーがそれぞれ 208t、95t で、差し引き CO2 の削減量は 2,072t/年となり、2050 年での 470 施設の内の 35%に本設備を設置することで、国内の CO2 発生量は年間約 34 万 t の削減になると想定した。焼却施設での熱回収量を当初は 64GJ/日と計画したが、実証試験の結果から、48GJ/日へと変更したため、13,440GJ/年に減少したことで、施設からの年間 CO2 削減量も 2,210t から 1,881t に減少し、2050 年での CO2 削減量は 31 万 t と推定された。

## １２．４．設備の妥当性

ごみ処理施設に設置する蓄熱装置に関しては、高温空気を反応器に通気させる際での配管からの放熱が予想以上に大きいこと以外は、ほぼ設計通りの性能を確認できた。放熱に関しては、保温対策をさらに充実させることで対策は可能と考えている。

輸送に関しては、蓄熱材を充填した反応器を蓄熱装置及び放熱装置から着脱させるための時間が想定以上に要した点以外は問題なく実証できた。着脱に際しては、設備と反応器との結合部がフランジでのボルト締めとなっており、このフランジ部が高温となる事、また結合の際での位置決めの難しさが課題となったが、反応器を装置に結合させる際でのガイドレールの追加などの対策により解決可能であると考えている。

温浴施設に設置する放熱設備に関して、反応器からの放熱量は設計通りであったが、放熱に必要となる水蒸気量が想定の 1.3 倍程度必要となったことから、投入熱量に対しての発生熱量の比が想定を下回る結果となったが、蒸気の入熱に対する出力は約1.3倍となったこと、また最大で206℃程度の高温空気を作り出した点などは大きな成果であったと言える。

水蒸気量が想定以上に必要となった理由としては、配管からの熱ロスが大きいことから、循環空気の温度が低下し、水蒸気の凝縮が起こったことが最も大きいと考えており、装置の保温対策をさらに充実させることで対策は可能と考えている。

## １２．５．事業の有効性評価

本事業に関しては、事業の必要性、コストの妥当性、CO2削減への貢献および設備の妥当性の確認ができたことから、事業の有効性は十分にあると判断できる。

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