

潜熱蓄熱材による未利用熱の農業への利用

Utilization of unused heat for agriculture by latent heat storage material

定塚徹治*

1. はじめに

第5次エネルギー基本計画において、再生可能エネルギーの主力電源化がうたわれ、「創エネ」への注目が集まっている中、これに加えて、創ったエネルギーを有効活用するための技術、「蓄電」や「蓄熱」への関心・必要性も高まっている。

このニーズへの対応技術として、当社では、潜熱蓄熱材（以下「PCM^{*}」という。）を用いた蓄熱システム「トランスヒートコンテナ」（以下「本シス

テム」と言う。）の開発、実用化に取り組んできた（図1）。2004年から開発に着手し、基礎研究から国内各地での実証試験を踏まえて、これまでに6か所の客先へ実設備を納入してきた。

ここでは、本技術の特長や仕組みの説明に加えて、未利用熱を農業に活用した事例として、下記2件の実証試験と実設備について紹介する。

- ・太陽熱のいちご栽培ハウスへの活用（実証試験）
- ・廃棄物焼却排熱のトマト栽培ハウスへの活用（実設備）

①200℃以下の未利用熱を

熱源A：清掃工場など



熱源B：工場、コージェネなど

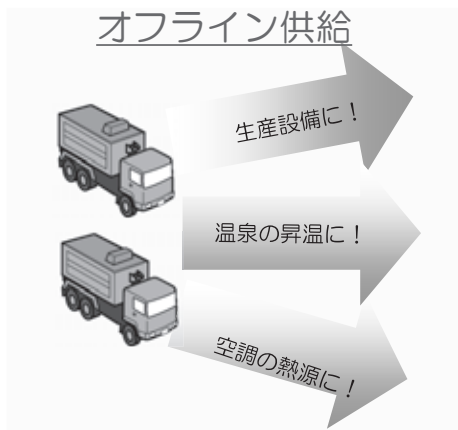


熱源C：太陽熱、地熱など



②コンテナに貯めて熱供給

オフライン供給



オンライン供給



③有効活用

給水予熱に！

乾燥に！



給湯に！
暖房に！



給湯に！
暖房に！
冷房に！

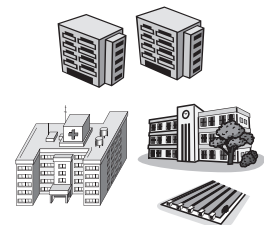


図1 本システムの概要

* Phase Change Material

* 三機工業株式会社

2. 蓄熱

まず、蓄熱方式の分類を図2に示す。蓄熱方式は大きく顕熱蓄熱、潜熱蓄熱、化学蓄熱の3つに分類される。

顕熱蓄熱は、物質の温度差を利用する方式で、温水や冷水、地盤、躯体蓄熱などがある。潜熱蓄熱は、物質の相変化エネルギー（固⇄液）を利用する方式で、水（氷）やパラフィン系、水和物、多糖類などを蓄熱材として活用する。化学蓄熱は、物質の可逆的な化学反応を利用する方式で、希釈／融解、脱水／水和反応、混合物の結晶／分離反応、金属水素化物の吸蔵／放出などを活用する。

それぞれを比較すると、蓄熱容量の面では、顕熱→潜熱→化学の順に大きくなるが、一般に、化学蓄熱は蓄熱時に必要な温度と放熱時に取り出せる温度の差が大きく、温度の活用といった面からはロスが大きいと言われている。これに比べて、潜熱蓄熱は、蓄熱時と放熱時の温度差を比較的小さく抑えることができるのが特長で、図3に示すように、産業分野

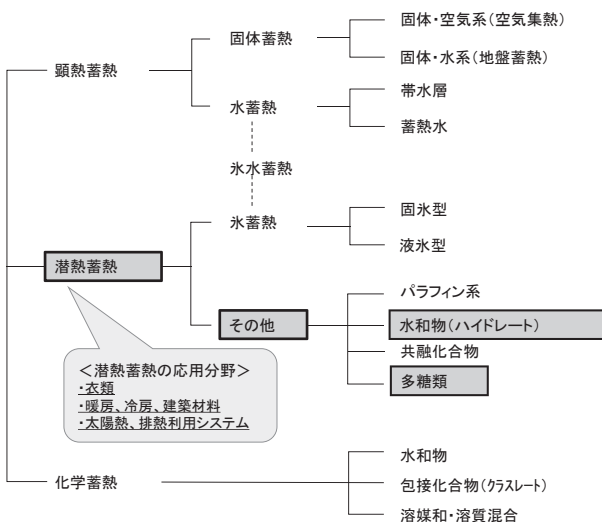


図2 蓄熱方式の分類

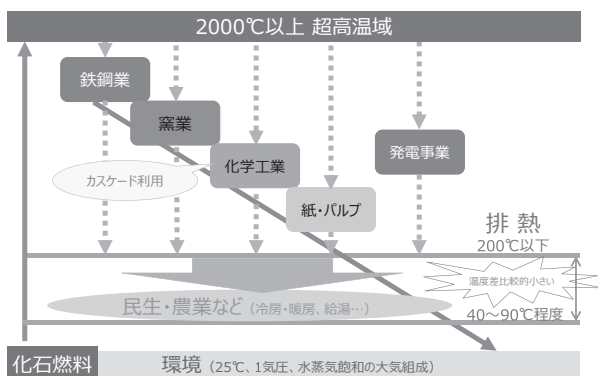


図3 低温排熱利用のイメージ

などでカスケード利用された後に余ってしまった「低温排熱」の活用においては、有効な手段の一つと言える。

3. 本システムの概要と主な特長

本システムは、創エネルギー関連施設や工場などで余った排熱を可搬型コンテナ内に充填した潜熱蓄熱材へ蓄熱し、車両で輸送して、主に民生用エネルギー（空調・給湯用など）として供給・利用することができる「熱の宅配便[®]」技術である。

下記に主な特長をまとめる。

1) 排熱の活用により CO₂ の削減が可能

今まで捨てられていた排熱を活用することで、熱利用側の施設で消費されていた化石燃料および CO₂ 排出量の削減が可能となる。

2) 時間と場所の熱供給 mismatch を解消

排熱の発生時間や温度にバラつきがあっても、PCM を充填した蓄熱コンテナがバッファタンクとなるため、利用側では、必要な時に比較的安定した温度を取り出せ、熱需給の様々な mismatch を解消することが可能となる。

また、車両で輸送できるため、排熱源と利用先が離れていても熱供給が可能となる。

3) 高密度蓄熱が可能

固体⇄液体の相変化に要するエネルギー（潜熱）を活用することができるので、温水の3倍（重量比）程度高密度に蓄熱が可能となる。

4) 低温排熱を有効に活用

潜熱蓄熱は、前述のように排熱源側と熱利用側の温度差を小さく抑えることができるため、温度が低くて利用しにくかった低温排熱の活用には非常に有効である。本システムのPCMの概要と適用温度を表1および図4にまとめる。

本システムでは、融点の異なる2種類のPCMを用意しており、この融点付近の温度帯の熱を蓄えることができ、排熱源側や熱利用側の温度条件・

表1 本システムのPCM

タイプ	高温タイプ	低温タイプ
PCM種類	エリスリトール C ₄ H ₁₀ O ₄	酢酸ナトリウム三水和物 CH ₃ COONa・3H ₂ O
他の用途	食品（甘味料）	食品添加物（保存料）
外観	白色粉末	白色粉末
融点	118℃	58℃
融解熱	340 kJ/kg	230 kJ/kg
排熱源	蒸気、排ガス、高温空気、高温水 など	蒸気、排ガス、高温空気、温水 など
熱利用	給湯、暖房、冷房 [※] など	給湯、暖房 など

※ 吸収式冷凍機との組合せによる

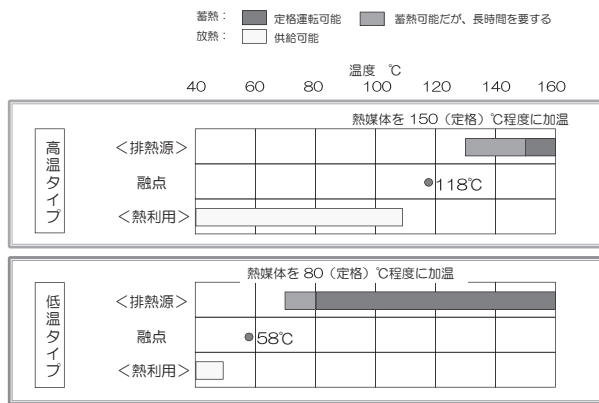


図4 本システムの適用温度

用途に応じて選択可能である。

高温タイプは融点が118°Cで、排熱源としては、蒸気、排ガス、高温空気、高温水などが対象となり、熱利用先としては、給湯や暖房、冷房（吸気式冷凍機との組合せ）などが対象となる。低温タイプは融点が58°Cのため、排熱源としては、上記に加えて温水なども対象となり、熱利用先としては、給湯や暖房等が対象となる。

4. システムの説明

4.1 設備構成

システムの構成を図5に示す。

本システムは、熱を蓄える「蓄熱コンテナ」と排熱源側施設に設置する「熱回収設備」、蓄熱コンテナを輸送する「輸送車両」、蓄熱コンテナから熱を

取出す「熱利用設備」により構成される。

PCMは熱を蓄えると液体状であるが、放出すると固体状となるため、ポンプ等での循環が困難になる。そこで、蓄熱コンテナからの熱の出し入れには、常に液体でポンプによる循環が可能な熱媒体（熱媒油もしくは温水）を用いている。

4.2 蓄・放熱機構

1) 蓄熱

蓄熱前、蓄熱コンテナ内のPCMは固体状である。ここに、熱交換器を介して排熱から熱を受けて加熱された熱媒体（熱媒油）を供給し、蓄熱コンテナ内のPCMを加熱して徐々に融解、熱エネルギーを蓄えていく。PCMは固体→固液混合→液体と相変化し、全て液体になったら蓄熱完了である（コンテナ内でのPCMと熱媒体の熱交換方法については、後述4.3 6)参照）。

2) 放熱

一方、放熱（熱利用）時は、蓄熱コンテナ内のPCMに蓄えられた熱エネルギーを熱媒体により取出し、この熱媒体の熱エネルギーにより、熱交換器を介して温水などの熱利用媒体を温めて空調や給湯などに利用する。放熱時、PCMは液体→固液混合→固体と相変化し、すべて固体状になったら放熱完了である。

4.3 ラインナップ

本システムのラインナップを図6にまとめる。本システムには、蓄熱コンテナの形状やコンテナ内で

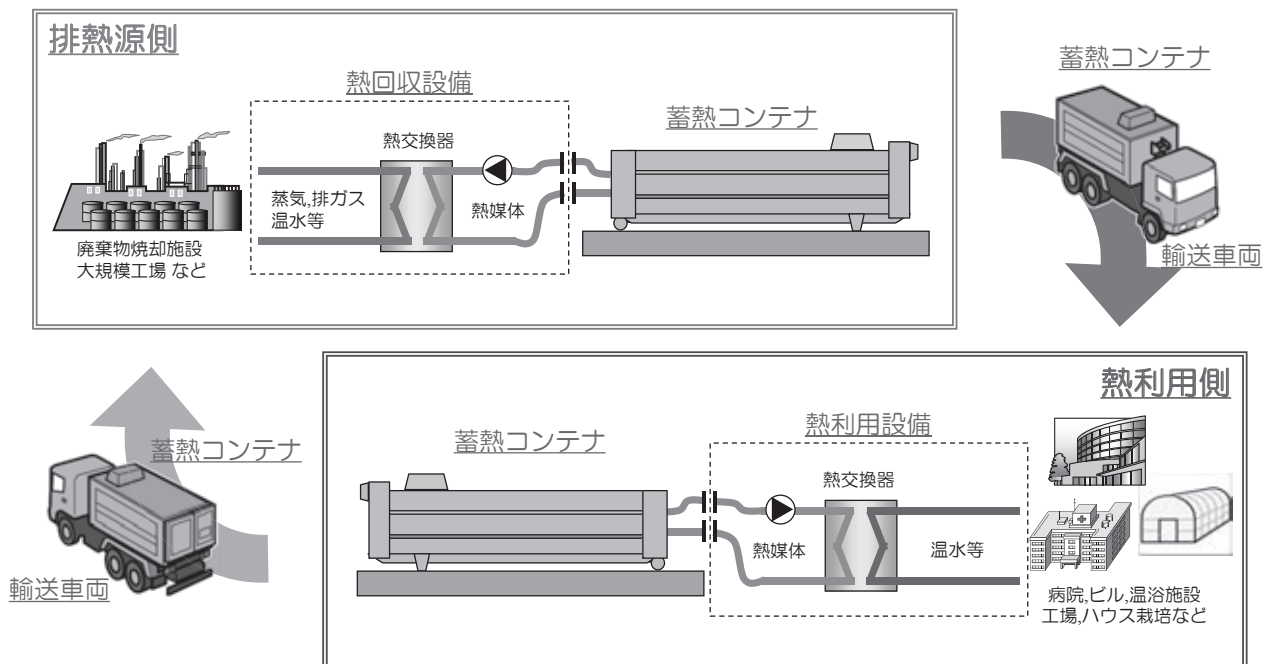


図5 本システムの構成

の熱交換方式、輸送車両等が異なる「大容量型（従来型）」と「標準容量型（簡易型）」がある。また、大容量型（従来型）、標準容量型（簡易型）ともに、車両による運搬によって離れた排熱源と熱利用先を結ぶ「輸送式」と、排熱源と熱利用先が近いために輸送を行わない「定置式」がある。両者の比較を表2および下記にまとめる。

1) PCM

大容量型（従来型）、標準容量型（簡易型）ともに、低温タイプ（酢酸ナトリウム三水和物：融点 58℃）と高温タイプ（エリスリトール：融点 118℃）の両者を用いている。

2) 熱媒体

大容量型（従来型）では、低温タイプ、高温タイプともに、PCM との分離性に優れた熱媒油を用いている。

標準容量型（簡易型）は、間接接触のため分離性を考慮する必要がないので、低温タイプでは温水を用いることができ、設備費も低減できる。高温タイプでは、温水の沸騰防止を考慮し熱媒油を用いている。

3) 輸送車両（輸送式）

大容量型（従来型）輸送式は、枠付きコンテナの規格を ISO20 フィートコンテナに合致させることで、既存のセミトレーラによって運搬することができる。





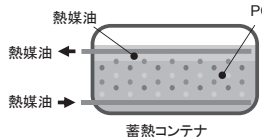
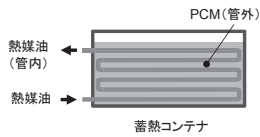
一方、標準容量型（簡易型）輸送式は、廃棄物運搬用の容器を用いるため既存の廃棄物運搬車両「脱着ボデー車」による積載・運搬が可能となり、排熱供給事業を廃棄物収集ネットワークに組み込み、ランニングコストやイニシャルコストの低減が図れる。

4) 蓄熱コンテナの設備への設置方法

大容量型（従来型）輸送式は、牽引車（トラクタ）の切離しは行うものの、蓄熱コンテナは、荷車（シャーシ）に載せたまま設備に設置するため、蓄熱コンテナ1台につき、1台の専用荷車が必要となる。

一方、標準容量型（簡易型）輸送式は、蓄熱コンテナ本体を荷おろし可能なため、専用の車両が必要なく、車両の使い回しが可能となる

表2 大容量型と標準容量型の比較

項目		大容量型（従来型）		標準容量型（簡易型）	
		高温タイプ	低温タイプ	高温タイプ	低温タイプ
内容物	蓄熱材 PCM	エリスリトール (融点118℃)	酢酸ナトリウム三水和物 (融点58℃)	エリスリトール (融点118℃)	酢酸ナトリウム三水和物 (融点58℃)
	熱媒体	油	油	油	温水
輸送車両		セミトレーラ（牽引車+荷車）		脱着ボデー	
設備への設置	<輸送式>  蓄熱コンテナを荷車に据置き		<輸送式>  ※蓄熱ユニット×4 → 蓄熱コンテナ 蓄熱コンテナを荷車に据置き		
	<定置式> 		<定置式>  蓄熱ユニット		
サイズ	コンテナ重量	24 ton/1台		1.7 ton/1台×4+付帯 ⇒ 10ton/1台	
	設置寸法	約 9.0~11.0 x 2.5 x 3.8 (荷車一体)		約 6.3 x 2.4 x 2.0 (本体のみ)	
蓄熱コンテナ内熱交換方法 (PCMと熱媒体)		<直接接触式> 蓄熱材と熱媒油が比重分離  蓄熱コンテナ		<間接接触式> シェル&チューブ熱交換器  蓄熱コンテナ	
能力	標準蓄熱量	1,400 kWh	1,100 kWh	500 kWh	350 kWh
	標準蓄・放熱時間	5~6時間	8~10時間	5~6時間	8~10時間
法令	消防関連	少危ローリー届出	危険物施設 許可申請or届出	不要	
	道路関連	通行許可申請		10ton積載の脱着ボデー車と同様	大型免許

5) 蓄熱コンテナの形状、重量、サイズ

大容量型（従来型）輸送式は、危険物ローリーの基準に準拠して製作する枠付きコンテナで、コンテナ形状は円筒型、標準で容量 21m³、重量 24ton である。

一方、標準容量型（簡易型）の輸送式は、形状が直方体型、容量 1.2m³、重量 1.7ton 程度の蓄熱ユニットを標準で 4 連結して廃棄物運搬用の容器内に設置し、重量 10ton 未満（1.7ton × 4 + 容器 + 付帯設備）である。

6) 蓄熱コンテナ内の熱交換方式

本システムでは、蓄熱すると液体、放熱すると固体となる PCM を用いているため、熱の出し入れには熱媒体が必要となる。

PCM と熱媒体の熱交換方式は、大容量型（従来型）では、「直接接触」を用いているが、標準容量型（簡易型）では、運用がより安定的な「間接接触」を用いている。

7) 能力

蓄熱コンテナ 1 台あたりの標準蓄熱量（ここでは利用側で取り出せる熱量）は、大容量型輸送式高温タイプが 1,400kWh、低温タイプが 1,100kWh、標準容量型輸送式高温タイプが 500kWh、低温タイプが 350kWh である。

蓄・放熱時間は、排熱源の温度や熱利用側の温度に大きく影響を受けるが、標準で、大容量型、標準容量型ともに、高温タイプが 5～6 時間、低温タイプが 8～10 時間である。

5. 導入事例

5.1 実証実験と実設備

本技術は、まず、2004 年から大容量型の開発に取組み、2008 年に実設備を導入した。その後、客先のニーズやコスト面や法令面等における導入のハードルを下げる目的で、2011 年から標準容量型の開発に取組み、2014 年に実設備を導入している。

これまで実施した主な実証試験および納入した実稼働設備の概要を表 3 および表 4 に示す。ここでは、この中から、農業に利用した例を 5.2 および 5.3 項で紹介する。

5.2 太陽熱の農業利用（実証試験）

1) 概要

昼間の太陽熱を回収して蓄熱ユニットに貯めておき、夜間のいちご栽培ハウスの暖房（温水循環）に活用する実験を下記にて行った。実証試験の概要と設備設置風景を図 6 に示す。

・場 所 福島県内某所

・試験期間 2013 年 3 月～4 月（撤去済）

2) 設備

本試験設備は、熱源である太陽熱集熱器、熱利用先であるいちごハウス内の温水循環装置、蓄熱ユニットで構成される。各々の概要を下記にまとめる。

・熱源

熱 源 太陽熱

表 3 主な実証試験

No	時期（状況）	場 所	形 式	PCM	蓄熱
1	2005年2月（撤去済）	群馬	大容量 定置	低温	コンテナ 0.7MMh/台×1台
2	2005年11月（撤去済）	群馬・埼玉	大容量 輸送	低温	コンテナ 1.0MMh/台×1台
3	2006年1月（撤去済）	東京	大容量 輸送	低温	コンテナ 1.0MMh/台×1台
4	2006年8月（撤去済）	東京	大容量 輸送	高温	コンテナ 1.2MMh/台×1台
5	2007年8月（撤去済）	神奈川	大容量 定置	低温	コンテナ 1.2MMh/台×1台
6	2007年11月（撤去済）	群馬	大容量 定置	高温	コンテナ 1.4MMh/台×1台
7	2009年3月（撤去済）	北海道	大容量 輸送	低温	コンテナ 0.7MMh/台×1台
8	2009年8月（撤去済）	北海道	大容量 輸送	低温	コンテナ 0.7MMh/台×1台
9	2013年3月（撤去済）	福島	標準容量 輸送	低温	ユニット 0.09MMh/台×1台

表 4 実稼働設備

No	時期（状況）	場 所	形 式	PCM	コンテナ
1	2008年4月（稼働中）	鳥取	大容量 定置	低温	コンテナ 1.4MMh/台×2台
2	2008年4月（休止中）	青森	大容量 輸送	高温	コンテナ 1.4MMh/台×2台
	コンテナ 1.1MMh/台×1台				
3	2011年4月（稼働中）	岐阜	大容量 輸送	低温	コンテナ 1.0MMh/台×2台
4	2011年5月（稼働中）	沖縄	大容量 輸送	高温	コンテナ 1.4MMh/台×3台
5	2014年5月（稼働中）	三重	標準容量 輸送	高温	コンテナ 0.5MMh/台×1台
6	2015年4月（稼働中）	富山	標準容量 輸送	高温	コンテナ 0.5MMh/台×2台

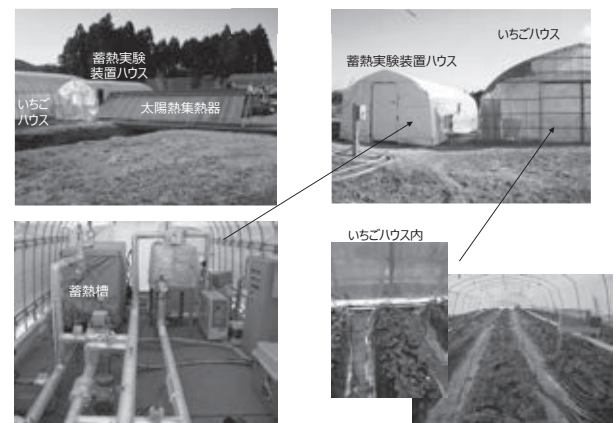
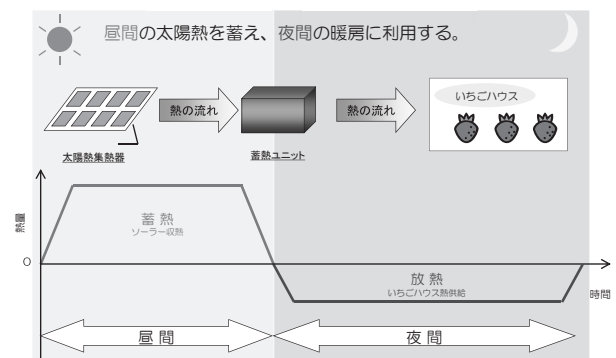


図 6 実証試験の概要と試験設備の設置風景

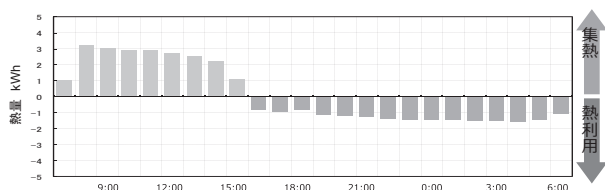


図7 システムの熱収支 (24時間)

- 集熱方法 ヒートパイプ真空管式集熱器
- 集熱温度 最高 90℃
- ・熱利用
 - 利用先 いちご栽培ハウス
 - 利用方法 温水循環暖房 (チューブによる局部加温)
 - 供給温度 20℃
- ・蓄熱
 - 型式 蓄熱ユニット
 - 標準容量型 定置式 低温タイプ
 - P C M 酢酸ナトリウム三水和物 (融点 58℃)
 - 蓄熱容量 90kWh
 - 設置数 1ユニット

3) 実証データ

晴天日の熱収支データ例を図7に示す。日が昇って日射量が増した7時頃から集熱が始まり、16時頃まで蓄熱が行われ、日が沈んだ後は、ハウスの暖房が始まり、翌日7時頃まで熱供給が行われるといったシステムの順調な稼働状況が確認できた。

5.3 廃棄物焼却排熱の農業利用 (実設備)

1) 概要

民間の廃棄物焼却施設の排熱を回収して蓄熱コンテナに貯めて車両で輸送し、利用先であるトマト栽培ハウスの空調に活用する実設備を納入した。冬場は温水循環の暖房、夏場は低温水吸収式冷凍機との組合せにより、冷水循環の冷房に活用することで、年間を通した排熱利用を実現している。実設備の概要を図8に示す。

- ・場所 富山県内某所
- ・稼働開始 2015年4月～ (現在も稼働中)

2) 設備

本設備は、廃棄物焼却施設からの熱回収設備、トマト栽培ハウスへの熱利用設備、蓄熱コンテナ、輸送車両で構成される。各々の概要を下記にまとめる。

- ・排熱源
 - 排熱源 民間の廃棄物焼却施設 余剰蒸気
 - 蒸気圧力 0.5MPaG (約 159℃)
- ・熱利用

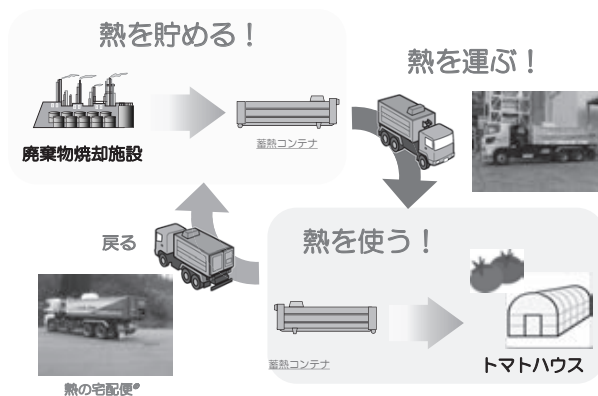


図8 実設備の概要

- 利用先 トマト栽培ハウス
- 利用方法 暖房 (温水循環)
- 冷房 (冷水循環) ※吸収式冷凍機と組合せ

- ・蓄熱
 - 型式 蓄熱コンテナ
 - 標準容量型 輸送式 高温タイプ
 - P C M エリスリトール (融点 118℃)
 - 蓄熱容量 500kWh
 - 設置数 2コンテナ

- ・熱輸送
 - 輸送距離 2km/片道
 - 輸送台数 1～2台分/日

熱利用側の暖房時、冷房時の放熱フローを図9および図10に示す。暖房時は、コンテナからの熱で温水を加熱して供給し、ハウス内のファンコイルユニットにて暖房に活用している。冷房時は、コンテナからの熱で加熱した温水を使って吸収式冷凍機で冷水を製造し、ハウスへ供給している。

3) 運用状況

本施設でも他の施設と同様に、車両の運転手が1人で、コンテナの移動や蓄熱・放熱運転の起動を行っている。起動後は自動運転となるため、運転手が本業務に携わるのは、1回の移動につき1時間弱程度で、それ以外は他の業務を行っている。

冷房時の放熱チャート例を図11に示す。当該日は、朝から昼に1台目、昼から夜に2台目のコンテナを運用していた。また、同図より、コンテナから供給した熱媒油で温めた75～85℃程度の温水 (熱交出口温度) により、吸収式冷凍機で8～16℃程度の冷水 (冷凍機出口温度) を製造して冷房運転を行っていた状況が確認できる。

暖房時フロー

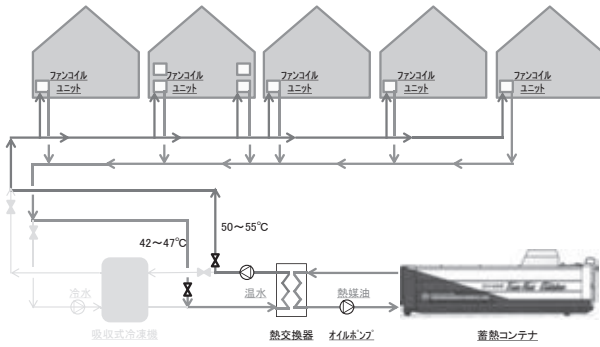


図9 暖房時 放熱フロー

冷房時フロー

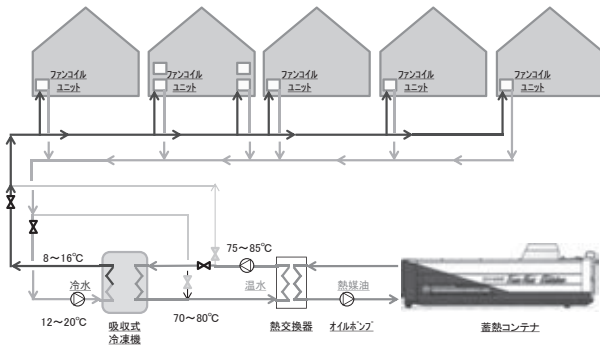


図10 冷房時 放熱フロー

6. おわりに

排熱はエクセルギーが低く、経済価値も低いため、事業化へのハードルが高い。しかし、利用すればするほど、単純に一次エネルギー使用量を削減でき、

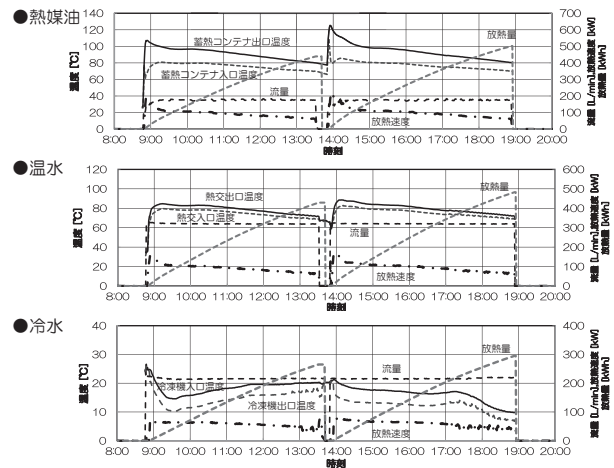


図11 冷房時の放熱チャート例

温暖化ガスの削減効果も大きい。

本システムに限らず、排熱をいかに活用するかは、国際的にも最も省エネが進み、「絞った雑巾をさらに絞らなければ」という我が国の省エネ事情における今後の大きな課題のひとつである。本技術は、この課題解決に向けた一つのアイテムになるものと考えている。

著者略歴



定塚 徹治 (じょうづか てつじ)

1995年 横浜国立大学大学院工学研究科博士課程前期修了

同年4月 三機工業株式会社 入社、環境関連技術の開発、営業に携わる。

技術士(上下水道部門)