

1. 研究背景

我が国は石油等のエネルギーのほとんどは海外からの輸入に依存しているため、2016 年でのエネルギー自給率は 8%とほぼない¹⁾。また、再生可能エネルギーの割合は 8%を占め、4 番目に位置する(図 1)²⁾。そのため更なる再生可能エネルギーの利用促進が必要であり、下水道でも平成 17 年 9 月に制定された「下水道ビジョン 2100」³⁾により下水道が持つエネルギーの利用による自立型処理場を目指し、エネルギーを地域へ供給する目標を掲げた。

下水は外気温と比べ、夏季は低く、冬季は高い特徴を持ち、その温度差を利用することで空気熱源より効率良い熱回収が期待される。下水から回収された熱を「下水熱」と呼ばれる。下水熱の利用場所として管渠等があるが、中でも下水処理場は下水が安定的で大量に流入するため、下水熱のポテンシャルを大きく持つが、地方都市の下水処理場近傍では大きな熱需要家が少なく、距離が長いとポテンシャルを損なうため、利用はほぼない。本研究では下水処理場内で得た下水熱の活用方法として植物工場による植物栽培を検討し、冷熱と温熱の両方を活用する、通年を通した下水熱利用を目的とする。

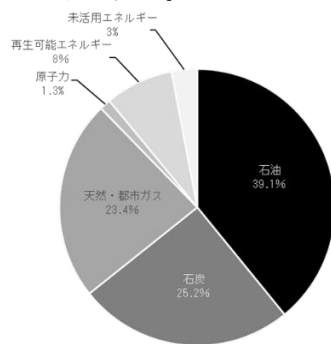


図 1 H29 年度のエネルギー国内供給割合²⁾

2. 研究の課題と目的

昨年度は下水冷熱によるワサビ栽培を行いその評価と塩素混和池の下水放流水からの直接熱回収による温熱回収と下水熱ポテンシャルの試算を行った。しかし、冷熱の下水放流水からの直接回収の検討や温熱利用は事業性がある植物での評価等が行われていない。そのため本研究では冷熱の下水放流水からの直接的な冷熱回収結果と温熱を利用した植物として温かい環境が必要で冬季での事業性があるスイートバジルの栽培を検討し、ランニングコスト等を加味した事業性の評価を目的とした。

3. 実験方法

本研究は新潟市の西区を処理区分とする新潟県西川流域下水道西川浄化センターに、下水熱回収設備と植物栽培用ビニールハウスを設置し実験を行った。

図 1 に下水熱回収フローを示す。蛇管状のコイル式熱交換器を塩素混和池に浸透させて下水熱を回収、ヒートポンプにより夏季は冷水、冬季は温水を作成し、蓄熱槽に貯蓄、各ハウスの熱交換器や空調設備に供給しワサビ用栽培水の冷却やバジル栽培用ハウスの空調として利用する。

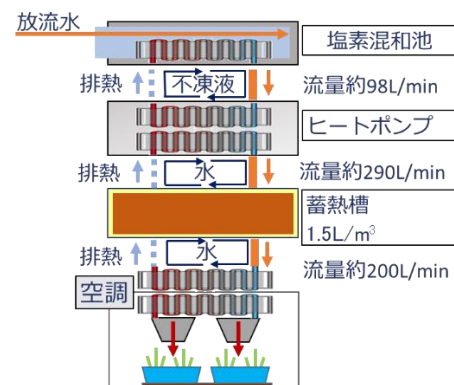


図 1 下水熱回収フロー(温熱)

4. 実験結果

4-1. 下水放流水からの直接熱回収結果

下水放流水からの下水熱回収結果の一つとして COP を示す。COP(Coefficient Of Performance)はヒートポンプの運転効率であり、高いほど消費電力に対し生産熱量が大きいことを示す。以下の式により算出する。

$$COP = \frac{\text{ヒートポンプの生産熱量}}{\text{ヒートポンプの消費電力}} \\ = \frac{((\text{ヒートポンプと蓄熱槽往還温度差}) [K] \times \text{熱媒の比熱} [J/g \cdot K] \times \text{熱媒の比重} [g/cm^3] \times \text{循環流量} [L/min])}{\text{ヒートポンプ消費電力} [kW]} \cdots \text{式}(1)^4$$

図 2 に 2018 年 10 月 23 日～2019 年 2 月 25 日の下水温熱回収結果を示す。COP は外気温より高く推移し採熱も安定的に行えた。そのため HP の消費電力が抑えられ、平均 COP が冷熱 2.9、温熱 4.6 であった。空気熱源と比較すると冷熱が平均 2.9、温熱が平均 3.5 と冷熱は同等で温熱ではより高く推移し、通年を通して高効率で生産出来たといえる。

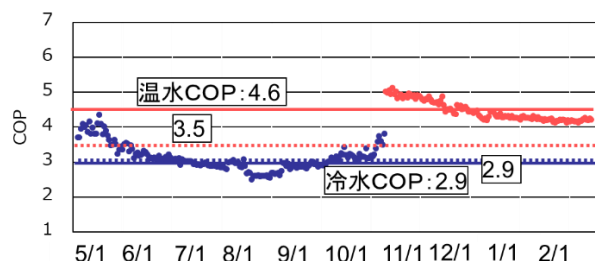


図 2 COPの推移

4-2. バジルの環境構築結果

冬季における下水温熱利用による事業性評価のため、スイートバジルの栽培環境を構築した。図 3 に栽培環境を示す。三列の棚により、発泡スチロールに穴を開け、苗を定植し 2880 株を生育する。水道水を水源とし、液肥を添加した栽培水を循環させ水耕栽培を行う。光源は太陽光を用い、下水熱を熱源とした空調設備によりバジルに必要な温度 20℃を維持する。

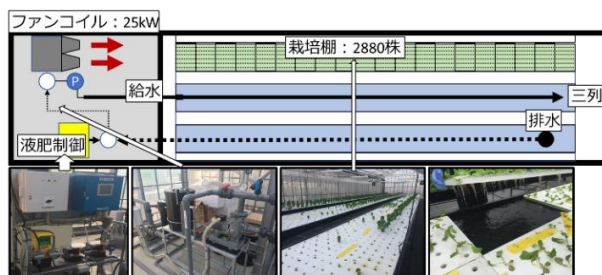


図 3 バジル栽培環境構築結果

図 4 に環境構築結果を示す。この図はバジルの各棚の両端にバジルの高さ付近に温度センサを設置し、温度を測定したものとなる。日中は生育条件である 20℃以上を保ち最大 35℃まで上昇するが、22 時～10 時までの間は目標温度に到達しない地点が存在した。そのため、温度が不足ではなく、温度分布に斑があると考えられた。そのため、サーモカメラによる温度分布の測定を行った (図 5)。結果、横方向ではファンコイルから中央付近の温度が低く、縦方向ではバジルが栽培されている高さより下側は温度が低いことがわかった。原因としてファンコイルの風量が強く、また送風機の風向がハウス内全体に届くような配慮がないことから。今後は風向きの調整やダクト等の設置、必要だと分かった。

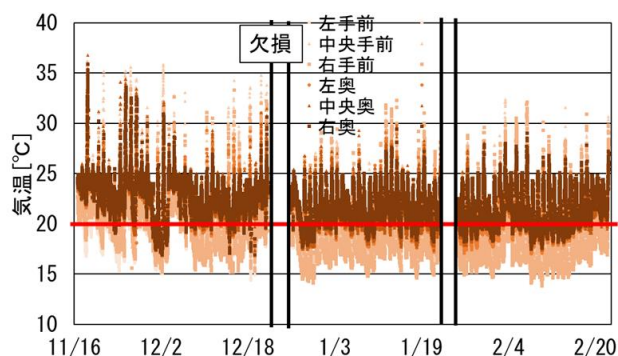


図 4 バジル栽培棚の各温度

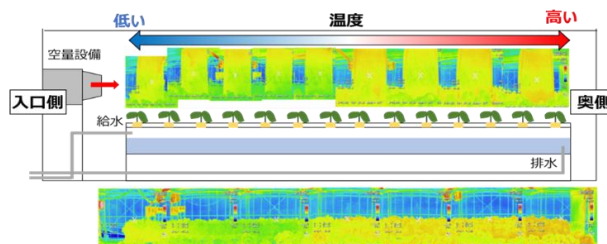


図 5 バジル栽培ハウスの温度分布

4-3. バジルの栽培結果

図 6 にバジルの栽培結果を示す。温度斑はあったものの正常に生育が進み 10 月下旬から定植を始め、12 月から収穫を行った。収穫方法は一つの株を育て続け、成長した分を刈り取る方式となる。収穫時は茎ごと収穫するが、最終的には葉のみの重量を測定した。12 月では約 55kg の収穫量を達成し、予測した量となった。また、実際にバジルを栽培している植物工場と取引業者へ試験販売を行ったところ、実際に販売されている価格帯と同程度で売却出来たため、品質は販売可能までに保たれていることがわかった。



図 6 バジル栽培経過

4-5. 栽培に必要なヒートポンプ出力の検討

2018 年 10 月 23 日から 2019 年 1 月 31 日までのバジル栽培時に空調設備が消費した熱量の時間別の推移と消費代表値を図 7 に示す。6 時～16 時までの間は消費熱量が少なく、17 時～5 時の間は 10kW 以上の消費傾向があることから外気温の影響が大きいことが分かる。しかし、時間帯によらず消費熱量が高い日も存在し、最大消費熱量である 25kW 以上のタイミングが存在するため、必要な H P 出力は最大の 25kW であることが分かった。

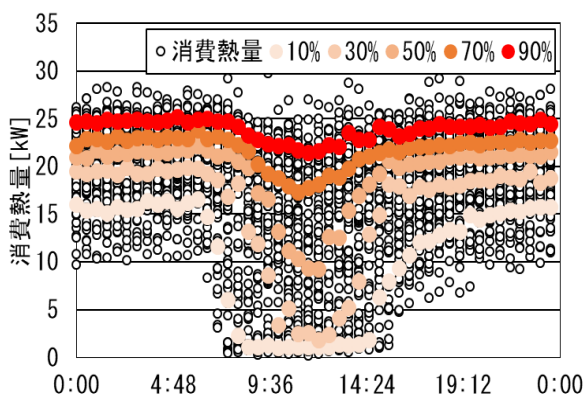


図 7 バジル栽培の時間別消費熱量

4-6. バジル栽培に掛かるエネルギーコスト

バジル栽培に必要なエネルギーコストを算出するため、ヒートポンプを 27kW とした場合を 12 月のバジル栽培時の消費熱量から 1 ヶ月に掛かる電気代を算出した。また、比較するためビニールハウスで植物栽培の加温に用いられる灯油暖房機を同程度の出力の市販品から燃料代を算出し、比較を行った。表 1 に算出結果を示す。結果ヒートポンプは約 65,000 円の電気代、灯油暖房機は約 140,000 円の燃料代がかかり、下水熱源 H P システムのエネルギーコストが灯油暖房機の約 46% 程度であることが分かり、ヒートポンプがエネルギーコスト面で有利であることが分かった。

表 1 ヒートポンプと暖房機のエネルギーコスト

	H P	暖房機	備考
①熱出力[kWh]	27	27	カタログ
②燃料消費量[L/h]	-	3	カタログ
③消費電力[kWh]	8	-	
④総消費熱量[kwh]	20	20	実測値
⑤電力量料金[円/kWh]	13	-	東北電力
⑥灯油価格[円/L]	-	90	全国平均
⑦一時間の電気代[円]	76	-	$(4 \div 1) \times 3 \times 5$
⑧一時間の燃料代[円]	-	186	$(2 \times 4 \times 6) \div 1$
⑨一ヶ月のコスト[円]	56,000	140,000	$7(8) \times 24 \times 31$

また、本栽培方法の比較として実際に完全人工型の植物工場とエネルギーコストの比較を行った。完全人工型植物工場は本施設と異なり(図 8)、熱損失の少ない建物で空調にかかるコストは低いが、光源は蛍光灯を用いるためそのコストが追加される。栽培方法は縦に棚を三段重ね、収穫量を確保している。収穫は株ごとに行い、毎日収穫するようスケジュールを決める。表 2 に算出結果を示す。収穫方法の違いにより収穫まで必要な日数植物工場は 26 日、本施設では 48 日かかった。その際にかかった収穫量あたりの電気代はほぼ

同等であることが分かった。そのため空調としてはエネルギーコストが低くても光源としての蛍光灯が多くかかっていることが分かる。

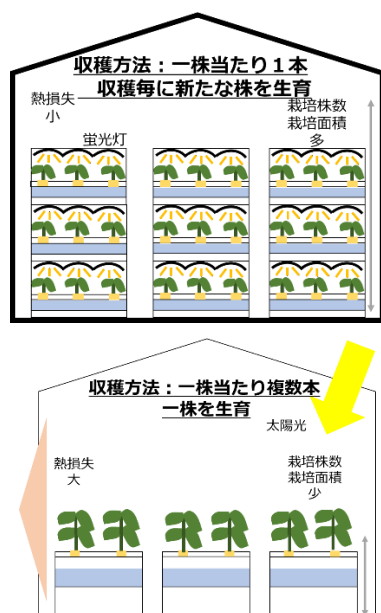


図8 植物工場(上)と本施設(下)の違い

表2 各植物工場のエネルギーコスト比較

	基本料金なし		基本料金あり	
	植物工場	本施設	植物工場	本施設
収穫日数(日)	26	48	26	48
電気代(円)	250,000	87,000	360,000	109,000
収穫量(kg)	174	55	174	55
収穫量当たりの電気代(円/kg)	1400	1600	1700	1700

5. 結論

下水放流水からの直接的な下水熱回収により冷熱、温熱ともに空気熱源よりも効率よく熱生産を行うことが出来た。また、スイートバジルの栽培環境を構築し、育成条件温度である20℃以上を、下水温熱により達成する事ができたが、温度分布に斑があるため、風向の調整やダクトの設置等改善の必要があることが分かった。スイートバジルの生育は正常に行われ、取引業者と植物工場により販売品と同等の品質と価格を得ることが出来た。また、スイートバジルに必要な空調の消費熱量

からビニールハウスの農作物育成用の灯油暖房機と完全人工型植物工場との比較を行い、下水熱源ヒートポンプシステムがエネルギーコスト面でどちらも有利と分かった。

参考文献

- 1) 経済産業省・資源エネルギー庁, エネルギー基本計画、2018
- 2) 資源エネルギー庁 総務課戦略企画室、平成28年度(2016年度)におけるエネルギー需給実績(確報)、2018
- 3) 国土交通省水管理・国土保全局下水道部、新下水道ビジョン加速戦略～実現加速へのスパイラルアップ～、2017
- 4) 環境省水・大気環境局 総務課環境管理技術室 地中熱・下水等を利用したヒートポンプ空調システム実証要領、2017