

## 20. 地下水熱源ヒートポンプシステムを利用した 農業施設の実証試験結果について

### —園芸栽培作物の低コスト・高品質・周年安定供給技術の確立(その2)—

藤縄克之(信州大学), 大井美知男(同), ○岩本淳(八千代エンジニアリング株式会社),  
久我幸史(同), 富樫聡(同), 福宮健司(株式会社アグリクラスター),  
加納一啓(未来工業株式会社)

#### 1. はじめに

現在, 農林水産省は, 消費者ニーズや輸出需要などに応える強みのある農林水産物の生産を実現するため, 高品質で競争力のある農林水産物を低コストで生産する新たな技術体系の確立をすすめており, 生産現場の強化や需要フロンティアの拡大等を基軸とし, 産業政策と地域政策を両輪とする「攻めの農林水産業」事業を展開している。特に, 施設園芸ではこれまで化石燃料による温風暖房が主に利用されてきたが, 原油価格の高騰による営農コスト上昇により一部の施設園芸従事者にとって農業の継続や健全な経営が困難になってきている。

そこで, 信州大学工学部では産官学連携によるコンソーシアムを組織し, (独) 農業・食品産業技術総合研究機構『攻めの農林水産業の実現に向けた革新的技術緊急展開事業』の一環として, 2014~2015年度に実証試験プロジェクト『施設園芸栽培作物の低コスト・高品質・周年安定供給技術の確立』(研究代表者: 藤縄克之)を実施することになった。本実証試験の研究項目は, ①新品種や効率的栽培方法の導入, ②最適低コスト生育環境の開発, ③統合的運用システムの確立となっている。

前報<sup>1)</sup>では, 地下水熱源ヒートポンプを用いた施設園芸栽培システムに係る実証試験の概要と2015年1~3月の冬季結果を報告した。本報では, その後の実証試験の成果として, 冬季および夏季の冷却状況, 年間を通じたエネルギー効率の推移, 慣行栽培との比較結果について述べる。

#### 2. 研究方法

##### 2.1. 実証試験の目的

施設園芸における低コスト・高品質・周年安定供給技術の確立を目的として, 地下水を熱源として局所温度制御を行う地下熱ヒートポンプシステムを設計した。地下熱利用方式には, 地上で熱交換する地下水熱利用型(オープン方式)のほかに地中熱交換型(クローズド方式)があるが, オープン方式は初期コストの低減や容易な採熱量コントロールにより, 今後の施設園芸への適用が期待されている<sup>2)</sup>。一方, オープン方式の地下水熱源ヒートポンプと局所温度制御を組み合わせた栽培管理システムはこれまでにほとんど例がなく, その効果は明らかにされていない。

そこで, オープン方式の地下水熱源ヒートポンプを用いた施設園芸栽培システムによる温度制御状況および省エネルギー効果を把握した。

##### 2.2. 施設園芸ハウスの概要

実証試験ではイチゴとトマトのハウス栽培をすることとし, 2014年11月に長野県安曇野市にそれぞれを栽培する施設園芸用ハウス(20.5m×9m)各1棟を建設した。施設園芸用ハウスの熱管理システムの模式図を図1, イチゴとトマトの栽培イメージを図2にそれぞれ示す。

温度制御には, 揚水井(深度82m, スクリーン区間35~82m)から汲み上げた約13℃の地下水を熱源としたヒートポンプシステムにより加熱および冷却を行う。表1はヒートポンプの運転条

件を示したもので、局所温度制御に関しては、イチゴでは循環水パイプによる培地温度制御とダクト送風による生長点温度制御を、トマトでは全空間と生長点の2系統のダクト送風温度制御を実施した。熱交換後の地下水の一部は、作物の灌水や高温時のミスト噴霧の水源に使用され、残りはすべて還元井（深度 60m, フルスクリーン）より地下に戻される。ちなみに、実証試験サイトは複合扇状地の扇央部に位置しており、一部細粒分を含むものの主として砂礫層からなり、地下水水位が G. L. -50m と深い。

前述のように、本実証ハウスの温度制御はハウス全体を対象とせず、作物およびその近辺のみを最適温度に制御する局所加温・冷却方式を採用し、イチゴでは培地上の水循環パイプと生長点（クラウン部分）付近の送風ダクトにより、また、トマトでは全空間と生長点それぞれ送風ダクトで加温・冷却を行うことが本システムの特長である。ヒートポンプの稼働・停止温度は表1のとおりであり、2015年5～9月は冷却、その他の月は加温を行った。なお、天窗および側窓の開閉、ミスト散布等の環境制御も同時に実施している。

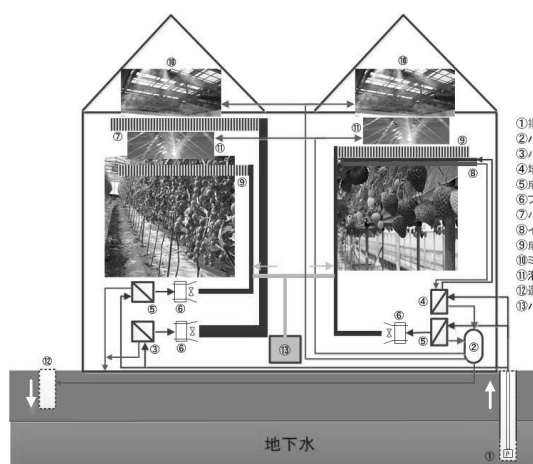


図1 栽培システムの模式図

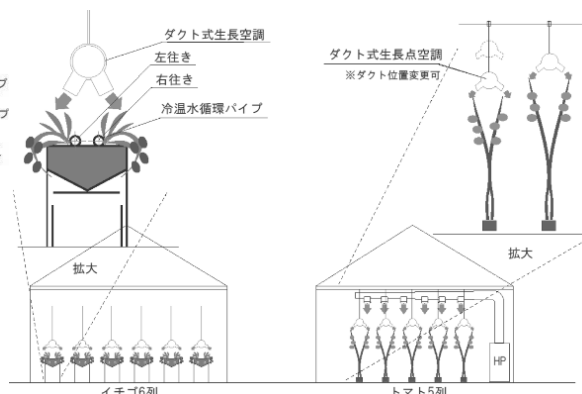


図2 イチゴとトマトの栽培イメージ

表1 ヒートポンプの稼働・停止温度 (°C)

項目	モード	イチゴ		トマト			
		培地・生長点		全空間		生長点	
		稼働	停止	稼働	停止	稼働	停止
2015年1～4月	加温	10	15	10	11	13	14
2015年5～6月	冷却	20	15	35	32	30	28
2015年7～9月				31	30	28	27
2015年10～2016年3月	加温	17	20	17	21	17	21

### 2.3. モニタリング方法

地下水ヒートポンプシステムの効果を把握するため、表2のとおりモニタリングを行った。測定項目は温度、流量、消費電力等であり、約90のセンサにより1～5分ごとに計測した。

表2 モニタリング項目

	項目	摘要
生育環境	温度 (°C)	培地地温, 生長点近傍等の室温
	CO2濃度 (ppm)	—
	湿度 (%)	—
エネルギー効率	温度 (°C)	一次側: ヒートポンプ出入口, 熱源水 (地下水) 二次側: ヒートポンプ出入口, 循環水出入口, ダクト出入口
	流量 (L/分)	熱源水, 各ヒートポンプ流入水, 還元水
	消費電力 (kW)	ヒートポンプ, エアハンドリングユニット, 揚水ポンプ

### 3. ハウスの温度制御状況

地下水熱ヒートポンプシステムによる、冬季および夏季の温度制御状況を図3～4に示す。

冬季は外気温が最低-12℃まで低下する中、局所加温によりイチゴの培地およびトマトの室温を概ね10℃以上に保つことができた。また、夏季には最高35℃まで上昇し日射もある中、局所冷却によりイチゴの培地およびトマトの室温を概ね30℃以下を保つことができた。これらの年間を通した温度制御の結果、イチゴおよびトマトの周年栽培が可能となり、収量の増加が実現した。

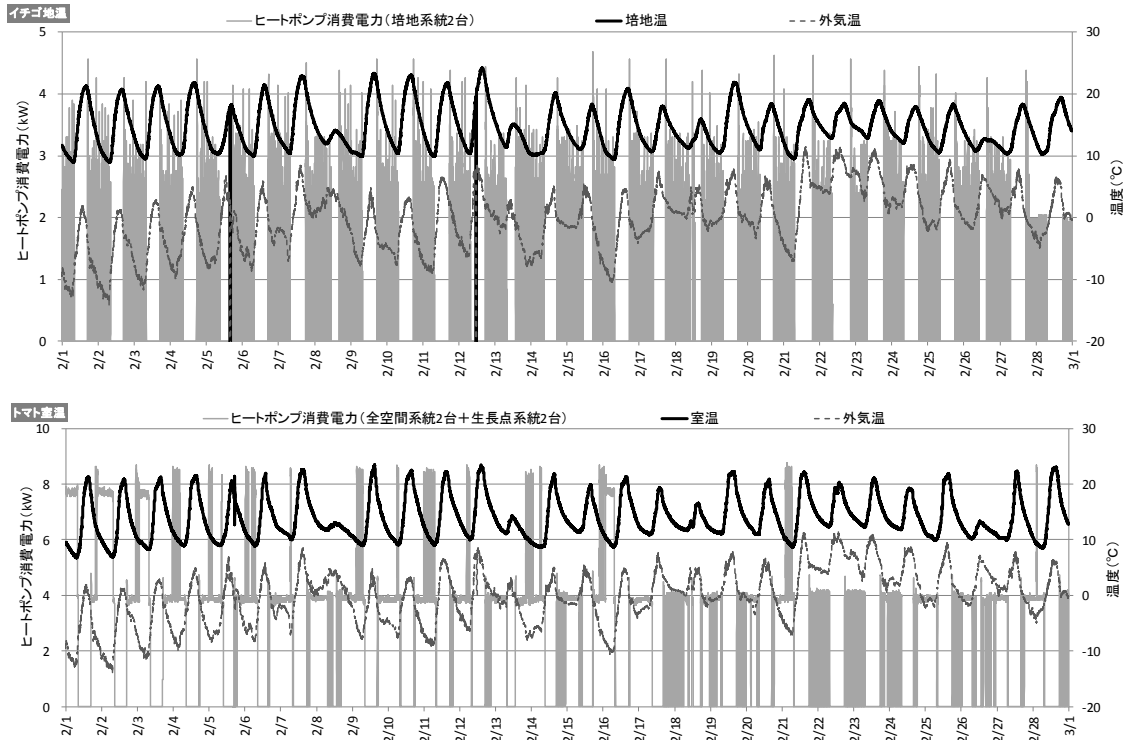


図3 冬季の加温状況 (2015年2月、上：イチゴ、下：トマト)

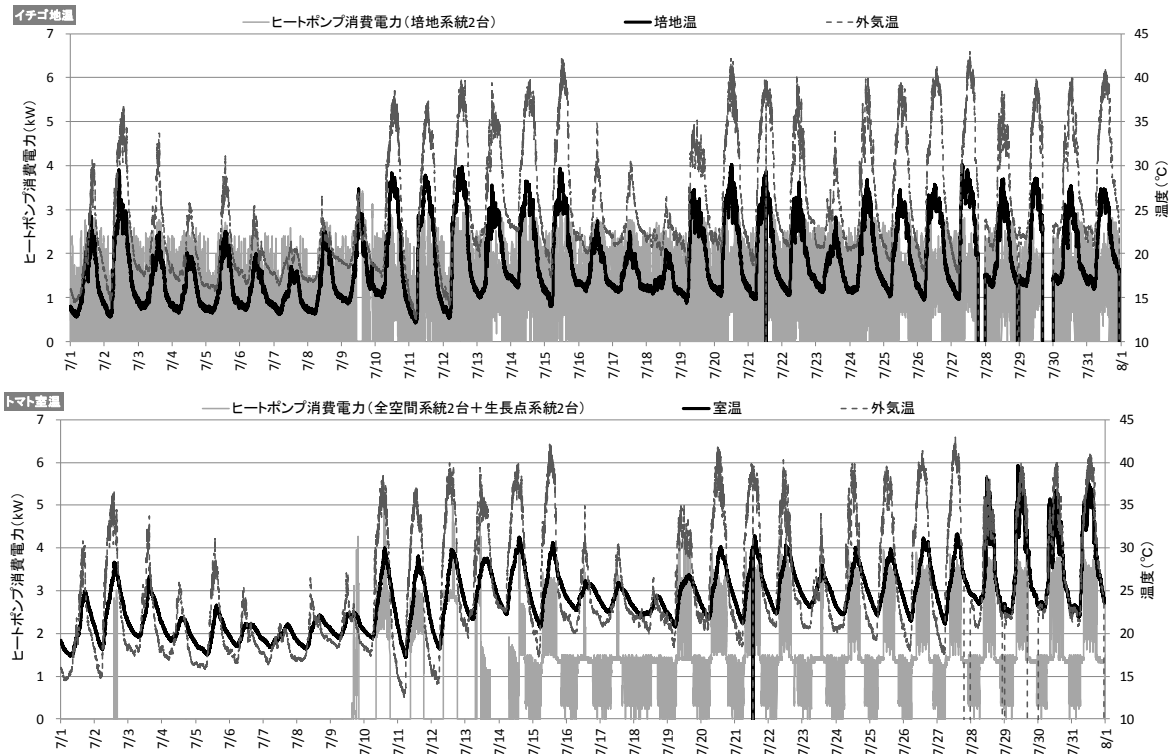


図4 夏季の冷却状況 (2015年7月、上：イチゴ、下：トマト)

## 4. エネルギー効率

### 4.1. COP等の推計方法

エネルギー効率に関する指標は下式により算出した。

$$H_o = H_w + E_{HP} \quad (1)$$

$$H_w = \frac{T_d Q \rho c}{60} \quad (2)$$

$$COP = \frac{H_o}{E_{HP}} \quad (3)$$

$$SCOP = \frac{H_o}{E_{HP} + E_{WP}} \quad (4)$$

ここで、 $H_o$ はヒートポンプの熱出力[kWh]、 $H_w$ は熱減水取得熱量 (kWh)、 $E_{HP}$ はヒートポンプ消費電力量 (kWh)、 $T_d$ は熱源水出入口温度差[°C]、 $Q$ は熱減水流量[L/分]、 $\rho$ は水の密度[kg/L]、 $c$ は水の比熱[J/kg/°C]、COPはヒートポンプ成績係数[-]、SCOPはシステム成績係数[-]、 $E_{WP}$ は揚水ポンプ消費電力量[kWh]を示す。

### 4.2. COP等の推計結果

熱出力(図5)および消費電力量(図6)は厳冬期と厳暑期に大きく、中間期に小さい傾向があった。また、冷却時(5~9月)のヒートポンプ稼働開始温度はイチゴの方がトマトより高いため、冷却時の熱出力および消費電力量はイチゴの方が高くなっている。

COP(図7~8)は2~7の範囲で推移し、加温時(1~4月および10~12月)と比べて冷却時(5~9月)の方が高い値となった。また、作物別に見ると、トマトよりイチゴで高い傾向がみられた。

SCOPは1~4の範囲で推移し、COPと比べて低下している。特に揚水ポンプの消費電力量割合が高いイチゴ培地系統では、全消費電力量のうち最大70%を占めていることから、揚水ポンプの消費電力が大きいことが要因と考えられる。

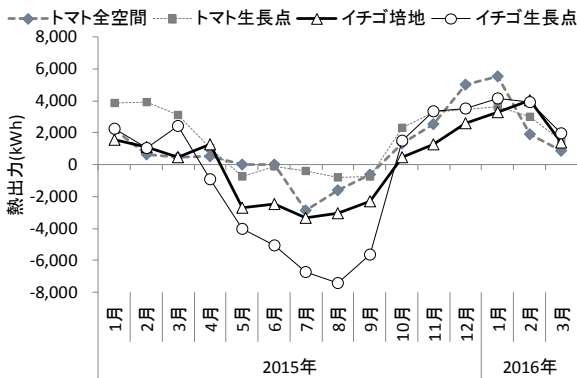


図5 熱出力の推移

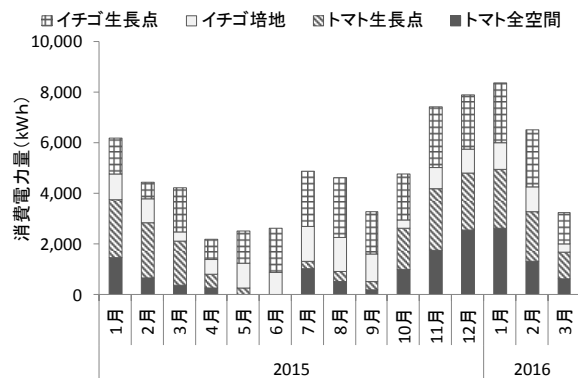


図6 消費電力量の推移

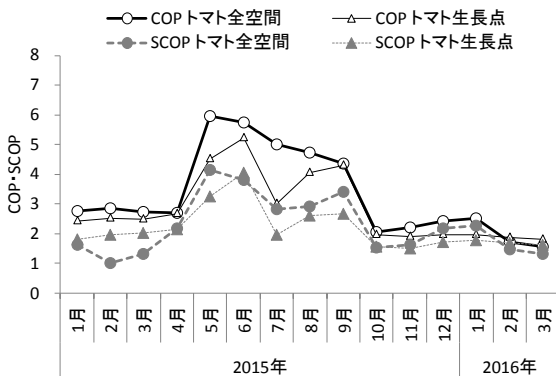


図7 COPおよびSCOPの推移(トマト)

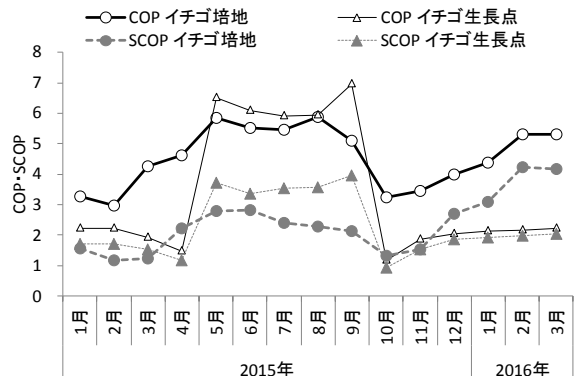


図8 COPおよびSCOPの推移(イチゴ)

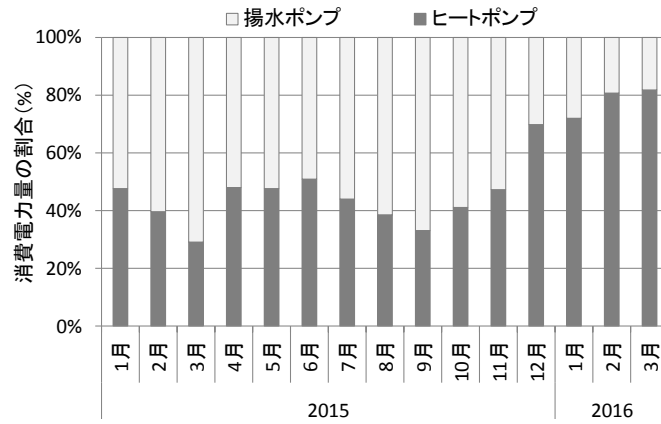


図9 機器別消費電力量割合の推移 (イチゴ培地の例)

## 5. 慣行栽培との比較

ハウス全体の温度制御を、ASHP で行うケースを「慣行 A」、灯油ボイラで行うケースを「慣行 B」とした。比較期間は、冬季の加温は 2015 年 1~2 月、夏季の冷却は 2015 年 7~8 月とした。

### 5.1. 慣行栽培によるエネルギー消費量等の推計方法

慣行栽培によるエネルギー消費量の推計式は以下に示すとおりで、熱貫流負荷と日射負荷から熱負荷を推計し、熱負荷を COP またはボイラ効率で除することで算出した。

$$E_e = \sum_{i=1}^n \frac{H_L}{COP} \quad (1)$$

$$E_o = \sum_{i=1}^n \frac{H_L}{C_B} \quad (2)$$

$$H_{L,H} = L_p - L_R \quad (3)$$

$$H_{L,C} = L_p + L_R \quad (4)$$

$$L_p = (T_o - T_M) P_H A_C \quad (5)$$

$$L_R = \frac{R \sin(AL) P_S A_B}{3.6} \quad (6)$$

ここで、 $E_e$  は空気熱源ヒートポンプのエネルギー消費量 [kWh]、 $H_L$  は熱負荷 [kW]、COP は空気熱源ヒートポンプの成績係数 [-] (外気温によって変化)、 $E_o$  は灯油ボイラのエネルギー消費量 [kWh]、 $C_B$  はボイラ効率 [-]、 $H_{L,H}$  は加温時の熱負荷 [kW]、 $H_{L,C}$  は冷却時の熱負荷 [kW]、 $L_p$  は熱貫流負荷 [kW]、 $L_R$  は日射負荷 [kW]、 $T_o$  は外気温 [°C]、 $T_M$  は管理温度 [°C]、 $P_H$  は熱貫流率 [W/m<sup>2</sup>/°C]、 $A_C$  はハウス被覆面積 [m<sup>2</sup>]、 $R$  は全天日射量 [MJ/m<sup>2</sup>]、 $AL$  は太陽高度 [rad]、 $P_S$  は透過率 [-]、 $A_B$  はハウス底面積 [m<sup>2</sup>] を示す。

ただし、COP はチラーのカタログ値 (ダイキン工業 UWXY1500DL, 50 馬力, 毎時の外気温によって変化)、ボイラ効率  $C_B$  は 0.7、外気温  $T_o$  はアメダス穂高観測所データ (毎時, 長野県安曇野市)、管理温度  $T_M$  は加温ではトマトとイチゴともに 10.0°C、冷却ではイチゴ 15.0°C、トマト 28.5°C、熱貫流率  $P_H$  は 6.6W/m<sup>2</sup>/°C (P0 フィルム)、ハウス被覆面積  $A_C$  は 375m<sup>2</sup>、全天日射量  $R$  はアメダス長野観測所データ (毎時, 長野県長野市)、透過率  $P_S$  は 83% (P0 フィルム)、ハウス底面積  $A_B$  は 184.5m<sup>2</sup> とした。

## 5.2. 慣行栽培との比較結果

実証試験と慣行栽培との比較結果を図 10～11 に示す。慣行 A に対する実証試験のエネルギー消費量の削減率（（慣行栽培のエネルギー消費量－実証試験のエネルギー消費量）/慣行栽培のエネルギー消費量）はトマト加温 60%，イチゴ加温 71%，トマト冷却 68%，イチゴ冷却 66%であった。慣行 B に対する実証試験の消費電力量の削減率はトマト加温 88%，イチゴ加温 91%であった。

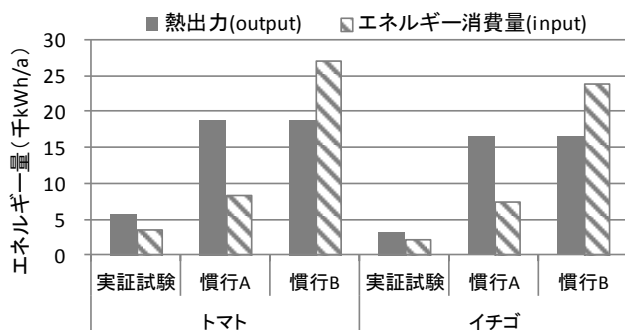


図 10 慣行栽培との比較結果（加温）

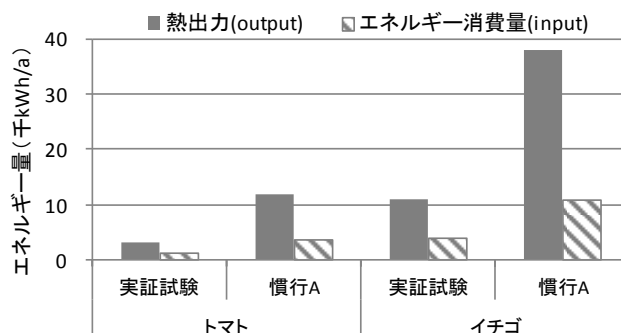


図 11 慣行栽培との比較結果（冷却）

## 6. おわりに

地下水熱源ヒートポンプと局所温度制御を組み合わせた施設園芸栽培システムについて実証試験を実施した結果、慣行栽培と比べたエネルギー消費量が削減できること、夏季の冷却で特に高い COP を達成できること、夏季の冷却により園芸作物の周年栽培が可能となることが明らかとなり、施設園芸において経営効率化と生産性向上を図る技術としての栽培システムの有用性を確認した。

また、揚水ポンプの消費電力量が大きいことが明らかとなったことから、地下水の揚水方式を工夫することで、更なるエネルギー消費量の削減が期待できる。

### 参考文献

- 1) 藤縄克之, 岩本淳, 富樫聡, 福宮健司 (2015): 地下水熱源ヒートポンプシステムを利用した農業施設の建設と冬期実証試験結果について —施設園芸栽培作物の低コスト・高品質・周年安定供給技術の確立(その1)—, 日本地下水学会 2016 年春季講演会予稿, 32～35
- 2) 奥島里美, 吉田弘明, 森山英樹, 石田聡(2010): 水熱源ヒートポンプによる農村地域の地中熱エネルギーの利用性, 農業農村工学会誌, 78(8), 669～672