

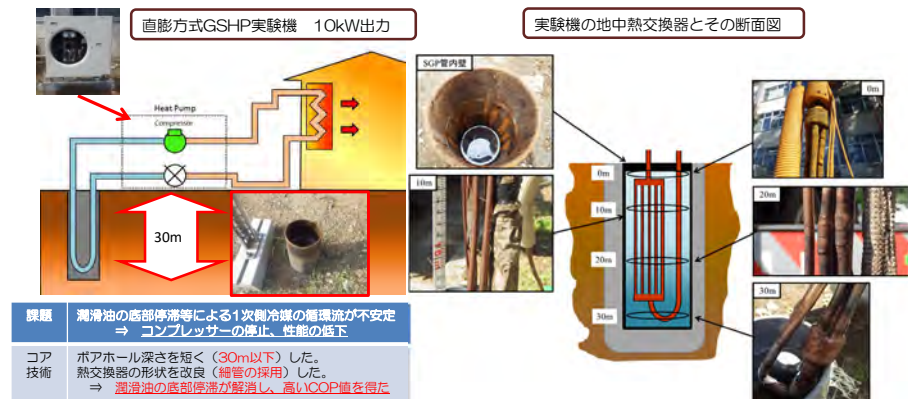
# 直接膨張方式の地中熱ヒートポンプに用いる 地中熱交換器について

山梨大学大学院 総合研究部 工学域 機械工学系  
武田哲明

日本冷凍空調学会調査研究プロジェクト  
「環境変化に対応するための先進熱交換技術に関する調査研究」  
第7回委員会  
令和元年12月2日(月)@北海道大学

## 研究背景

これまで、直接膨張方式地中熱ヒートポンプの採放熱方式は、過去に知られていたが、構造が複雑で地中配管における採放熱管の配管抵抗や潤滑油の底部停滞等により1次側の冷媒循環量が不安定となり、採放熱量の予測や地中熱交換器の最適形状が決定できず、地中熱交換器の設計手法も確立されてこなかった。そこで、これらの課題を①ボアホール深さを短く(30m以下)、②地中熱交換器の形状を改良(複数細管の採用)した結果、潤滑油の底部停滞や冷媒循環の不安定さは解消され、高い成績係数を得ることに成功してきた。



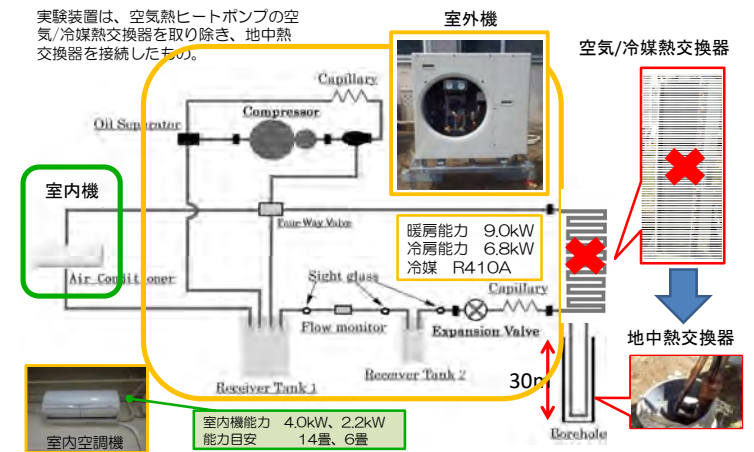
## 目次

- 研究背景
- 直接膨張方式地中熱ヒートポンプの概要
- 初期のボアホール型地中熱交換器
- ボアホール型地中熱交換器を並列に設置した場合
- ボアホール型地中熱交換器を給湯専用として用いた場合
- 農業ハウスに設置したボアホール型並列型地中熱交換器
- 住宅用鋼管杭を地中熱交換器に用いた場合

## 研究背景

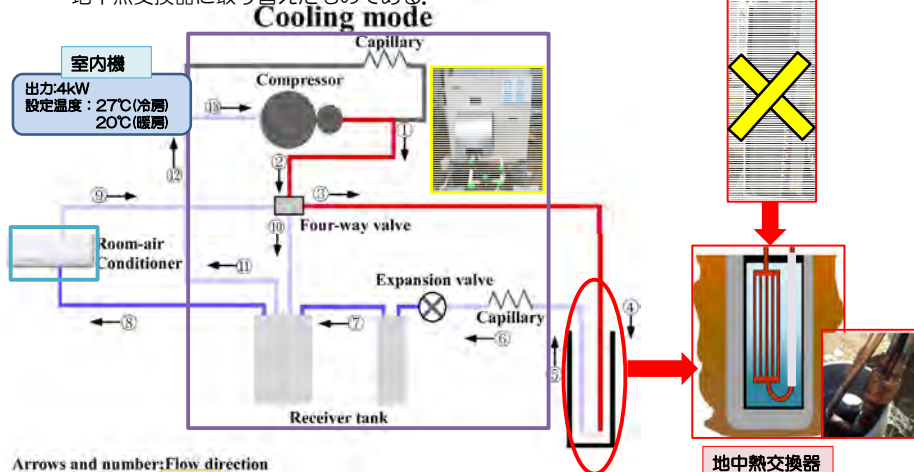
直接膨張方式地中熱ヒートポンプは、空気熱ヒートポンプの室外機に収められた空気-冷媒熱交換器の代わりに冷媒が流れる銅管を伝熱管として、地中に設けた①住宅用鋼管杭、②ボアホール内に挿入したケーシング管、に水を封入して、その中に伝熱管を挿入した地中熱交換器を利用して代替フロン冷媒(例えばR410AやR32)を直接地中に循環させて地盤と採放熱を行う方法。

方法の優位性  
①フラインャー冷媒熱交換器が不要で、消費電力が削減され、省エネルギー性能が向上、  
②冷媒の凝縮蒸発過程が地中熱交換器内で行われるため熱交換器単位長さ当りの採放熱量が増大し、ボアホール深さを短縮でき、掘削コストが削減。



## 初期の実験装置（空調利用）

本実験での実験装置は、市販の空気熱ヒートポンプ室外機内の空気/冷媒熱交換器を地中熱交換器に取り替えたものである。



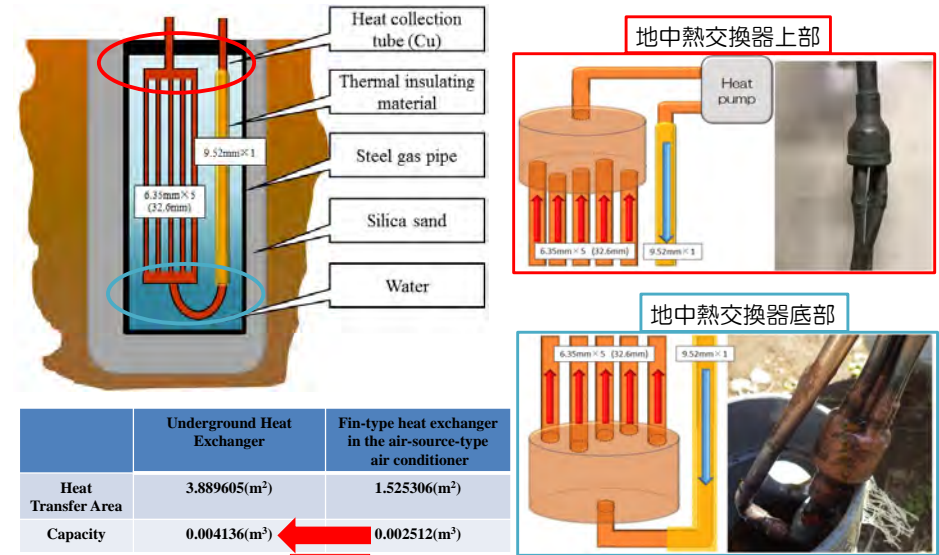
Arrows and number: Flow direction

冷媒: R410A (6.95kg+潤滑油1kg)  
能力: 冷房6.8kW、暖房9.0kW

地中熱交換器  
ポアホール30m  
材質 Cu  
寸法 1/4インチ銅管 5本  
戻り 3/8インチ銅管 1本

日本冷凍空調学会調査研究プロジェクト第7回委員会 令和元年12月2日(月) 北海道大学

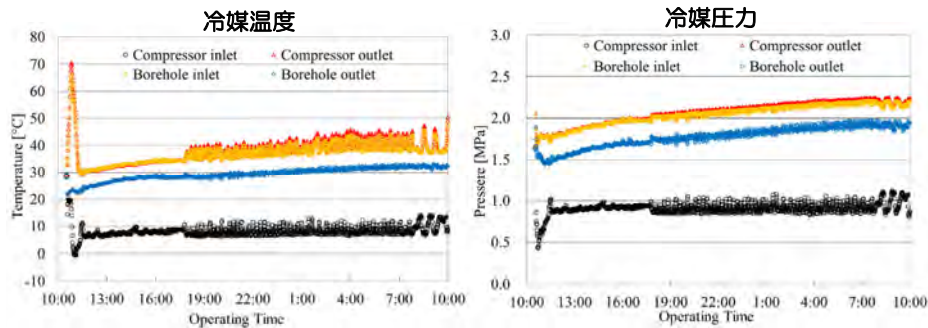
## 最初の熱交換器（5-1型）



	Underground Heat Exchanger	Fin-type heat exchanger in the air-source-type air conditioner
Heat Transfer Area	3.889605(m <sup>2</sup> )	1.525306(m <sup>2</sup> )
Capacity	0.004136(m <sup>3</sup> )	0.002512(m <sup>3</sup> )
		約1.6倍

日本冷凍空調学会調査研究プロジェクト第7回委員会 令和元年12月2日(月) 北海道大学

## 冷媒温度及び圧力変化（冷房運転）

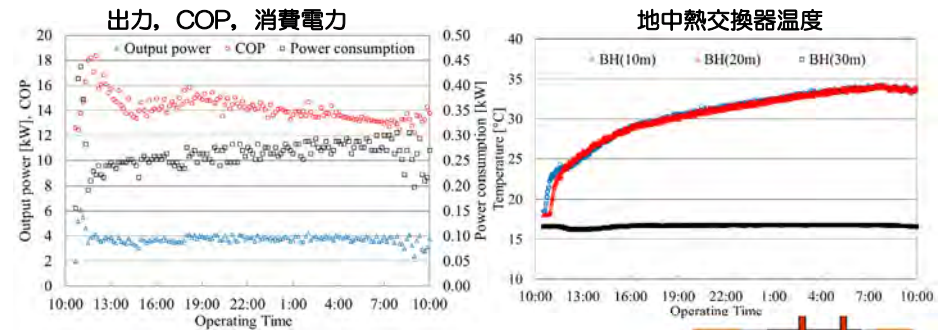


- 運転開始直後は、圧縮機出口及び地中熱交換器入口の冷媒温度が約70℃まで上昇した。
- その後30℃程度まで低下するが運転時間の経過とともに上昇し、各々24時間で約8~15K上昇した。

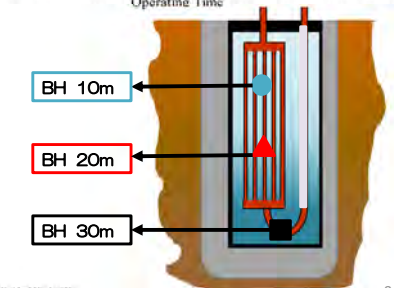
- 圧縮機出口及び地中熱交換器入口の圧力が2.1MPaまで上昇した。
- その後1.8MPa程度まで低下するが運転時間の経過とともに上昇し、24時間で約0.5MPa上昇した。

日本冷凍空調学会調査研究プロジェクト第7回委員会 令和元年12月2日(月) 北海道大学

## 性能及び地中温度変化（冷房運転）

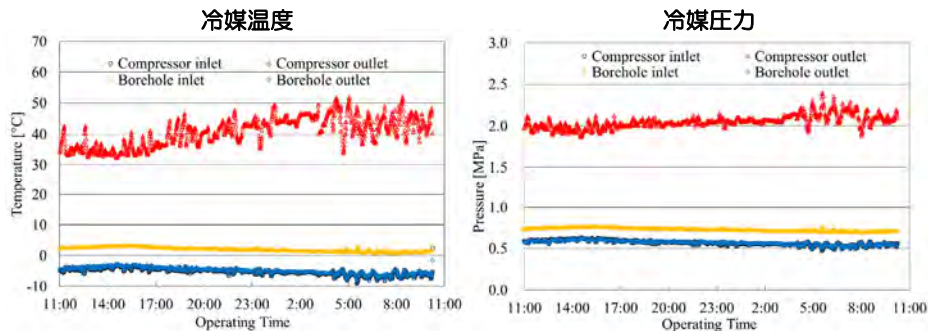


- 出力は4.0 kW程度で安定し、COPは10~12を得た。
- 地中熱交換器の放熱量は約133W/mであった。
- 地中熱交換器の温度変化から、30m付近での放熱は確認できないことから、凝縮過程は20m~30mの間でほぼ終了していることが予想される。



日本冷凍空調学会調査研究プロジェクト第7回委員会 令和元年12月2日(月) 北海道大学

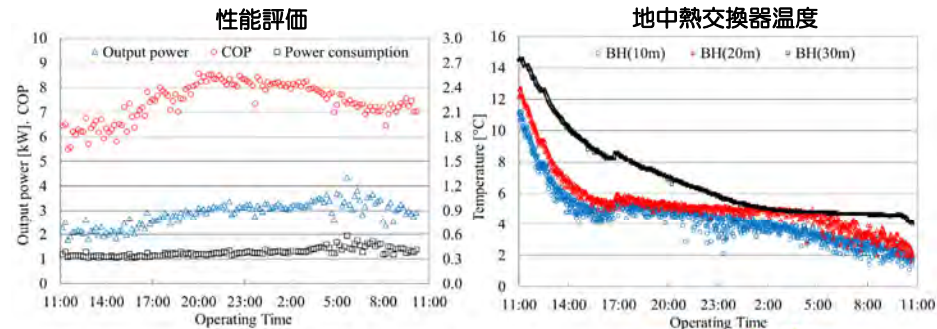
## 冷媒温度及び圧力変化（暖房運転）



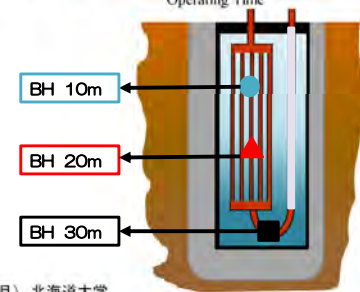
- 圧縮機入口および地中熱交換器出入口温度はほぼ一定である。
- 圧縮機出口温度は約34℃～51℃の間で変動し、これに伴い圧縮機出入口の温度差が変動するため、圧縮機に負荷がかかっている状態になると推測される。

- 圧縮機出口圧力は約1.9MPa～2.4MPaの間で変動するが、平均では約2.1MPaである。
- 圧縮機の入口、地中熱交換器出入口圧力はほぼ一定である。

## 性能及び地中温度変化（暖房運転）

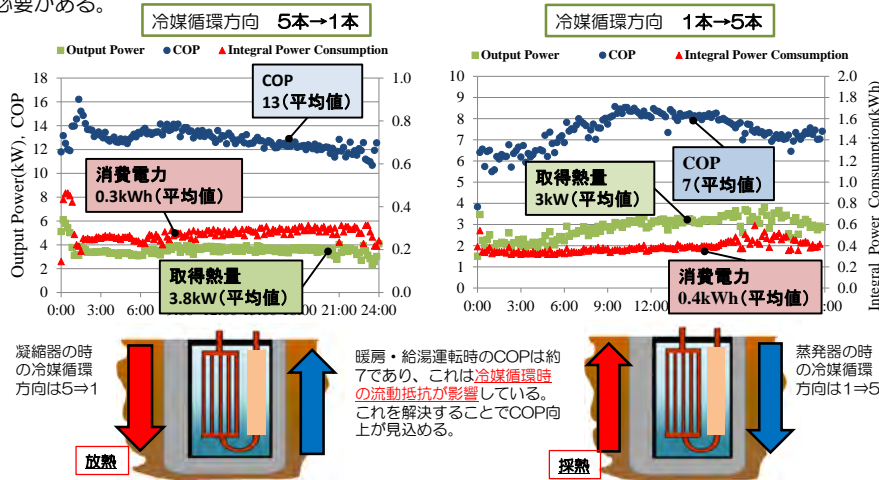


- 出力は2.0～3.8 kWの間を僅かに増大して行くが、COPは最大で8.5、低いところで6程度であり、その平均値は7.2であった。消費電力は約0.3～0.5kWであった。
- 冷房運転の場合と同様に熱交換器単位長さ当りの採熱量は約100W/mであった。



## 冷暖房運転（設定温度27℃, 20℃, 運転期間24時間）

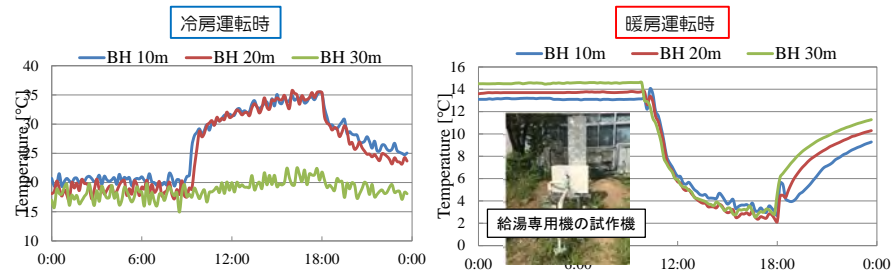
地中熱交換器のコストダウンについては、水や不凍液を用いる方式では、採放熱時のラインの流れ方向は一定であるが、直接膨張方式では熱交換器が冷房運転時/暖房運転時に凝縮器/蒸発器となるため、冷媒の流れ方向が逆転し、冷温熱に対応するためには気相/液相の変換点を考慮する必要がある。



## 地中温度変化

熱交換器の形状は冷暖房双方の性能を考慮する必要がある。ポアホール型では、冷房時に熱交換器内で相変化が終了しており、顕熱のみの伝熱となっている箇所が存在することは、流動抵抗の増大や成績係数が低下する原因にもなるため、3次元数値解析結果も考慮して、地中熱交換器の最適化に繋げる。

一方、給湯専用機に対しては、冷媒の流れ方向は一方だけとなり、蒸発器に特化した形状とすることで効率向上も見込むことができる。断熱に関しても蒸発器に特化することで、断熱材の材質、断熱材の施工箇所についても最適化できる。

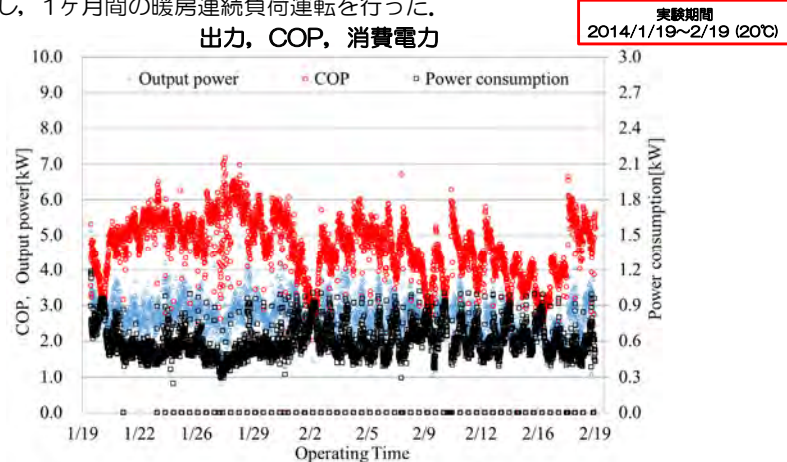


ポアホール深さ10m, 20mでの温度変化が大きい。  
→ 20m～30m地点の間で凝縮過程が終了。

ポアホール深さ全域にわたり温度変化。→ 採熱管内の上昇流となる部分で蒸発過程がほぼ終了。

## 連続運転時の出力, COP, 消費電力 (暖房運転)

- 連続運転が求められる工業及び農業分野における利活用を想定し, 1ヶ月間の暖房連続負荷運転を行った。



- 出力は約3.0kWを中心に, COPは3~7の間で変動し, 1ヶ月間のCOPの平均値は4.6となった。
- 今後, 連続運転が求められる工業及び農業分野等においても導入は可能である。

## 並列地中熱交換器 (4-1型)

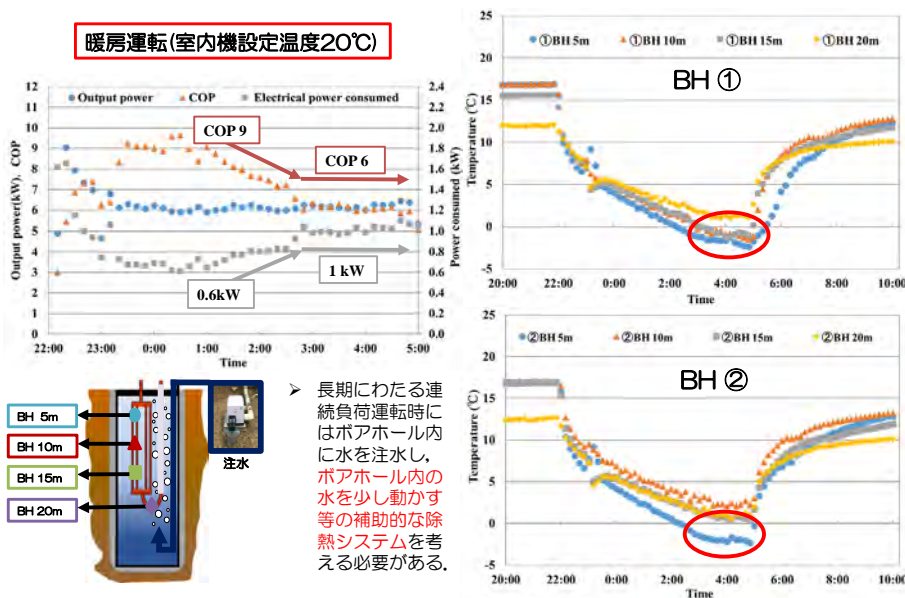
- 直接膨張方式地中熱ヒートポンプでは, これまでの実験により, 高性能化を実証してきたが, 熱交換性能が優れているため, 地中熱交換器深さを短縮できることから, 逆に地中熱交換器1本辺りの地盤環境負荷が大きくなるのが課題である。

- 本実験での実験装置は, 市販の空気熱ヒートポンプ室外機内の空気/冷媒熱交換器を地中熱交換器に取り替えたものである。

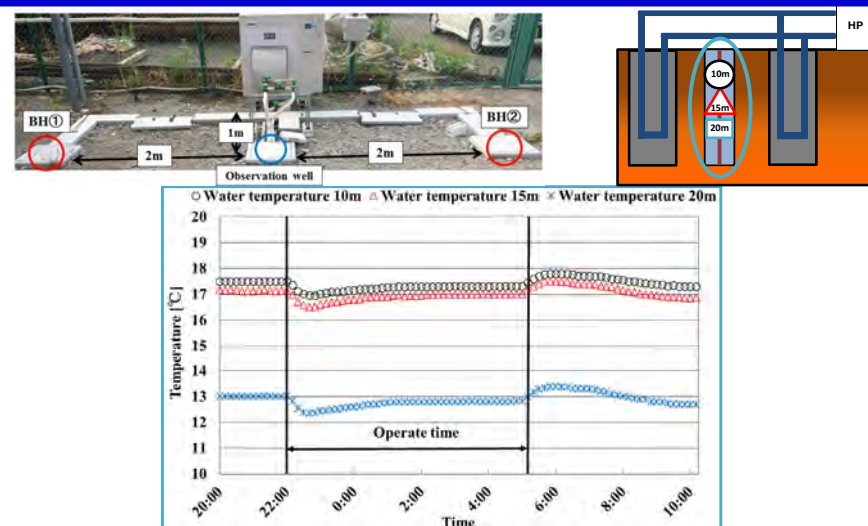


- 地中熱交換器を4m間隔で並列に2本設置し, その間に地盤への環境負荷影響を調べるため観測孔を設けた。

## 出力, COP, 消費電力と地中温度の変化

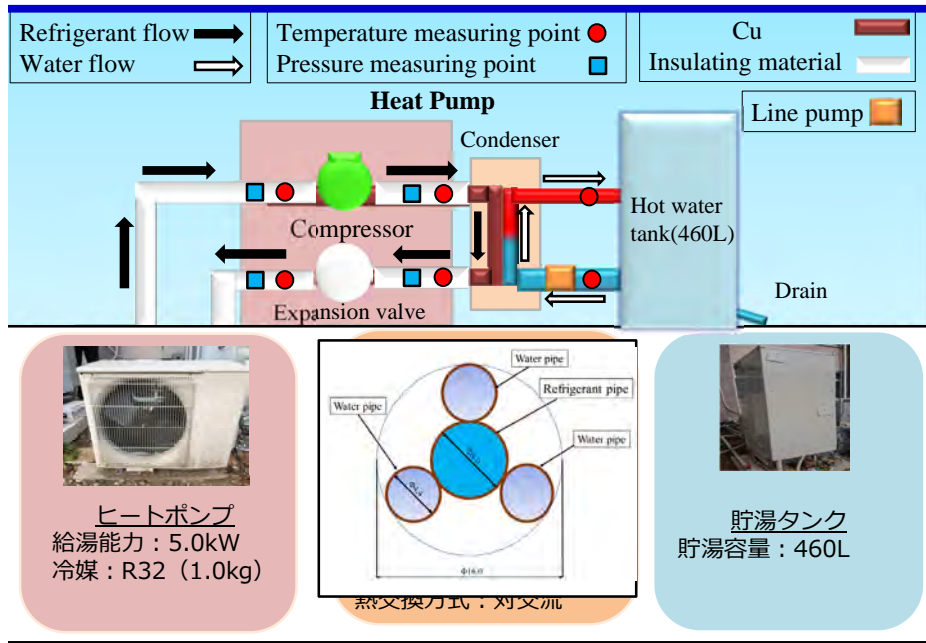


## 観測孔内の温度変化 (水平方向の熱拡散による影響) 暖房運転時

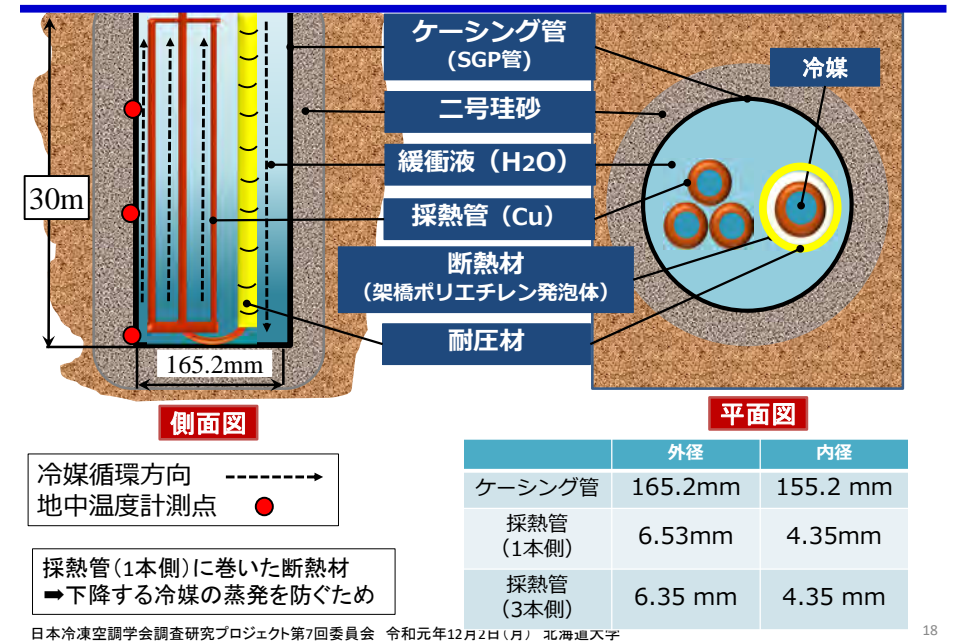


- 複数の地中熱交換器を設置した場合には, 互いの熱干渉を避けるため, 約4m以上の距離が必要とされる。
- 実験結果より, 地中熱交換器間の距離が2mあれば, 地中熱交換器間の熱干渉による地中温度変化への影響は比較的小さい。

## 給湯専用実験装置



## 地中熱交換器



## 実験条件

実験場所・日時	
実験場所	山梨大学甲府東キャンパス
実験期間	中間期 7日間 (2018/10/15~10/21)
運転開始時刻	23:00 (深夜電力を使用)
利用側	
入水温度	水道水温度[°C]
沸上温度	68.5[°C]
沸上水量	460[L]

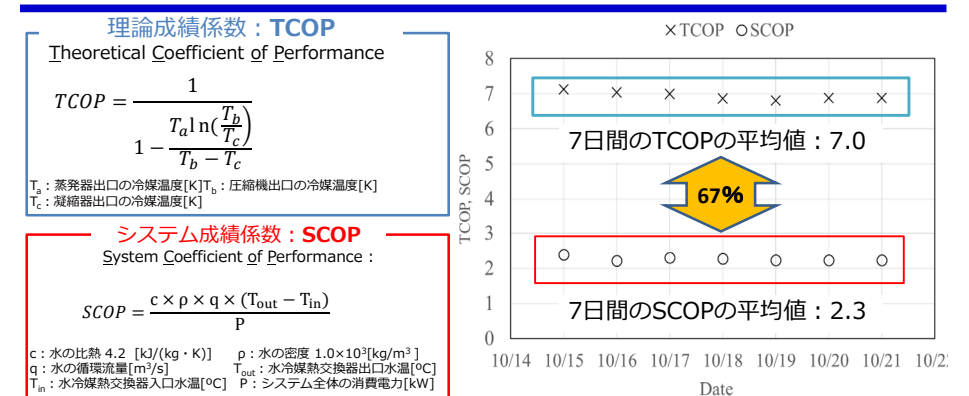
4人家族 1日のお湯使用量 (山梨県甲府市) : 380~510L

68.5°Cの温水460Lをすべて40°Cとして給水する場合

<夏季> 例	混合する水道水温度23°C	→1231L生成(40°C)
<中間期> 例	混合する水道水温度14°C	→964L生成 (40°C)
<冬季> 例	混合する水道水温度3°C	→814L生成 (40°C)

→最大負荷条件での7日間の運転

## システムの性能 (垂直埋設型)



7日間のTCOPの平均値: 約7.0

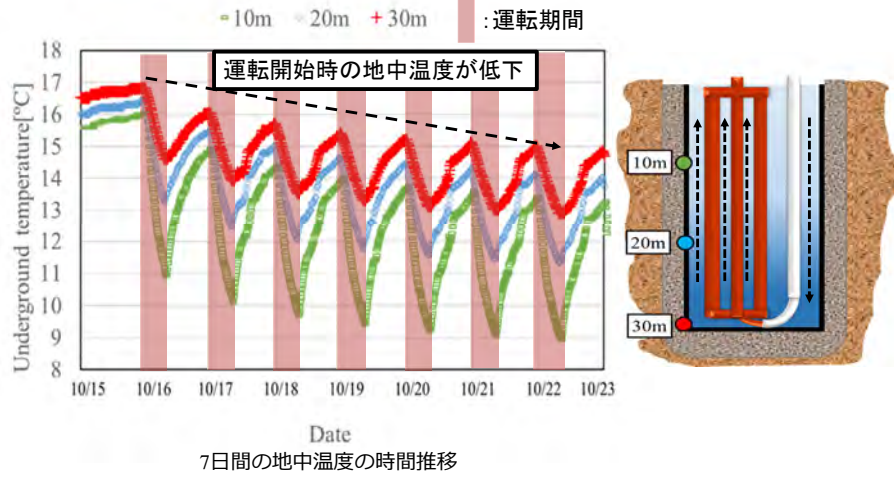
→地中熱ヒートポンプとして十分な性能を発揮している

TCOPとSCOPで約67%の差

→利用側での熱損失が大きい

→水冷媒熱交換器の伝熱面積を拡大し、温度効率を高めることでさらなる性能向上が見込める

## 7日間の地中温度変化



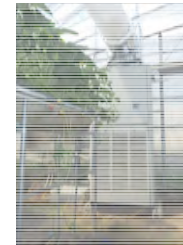
- ・10m地点が温度降下が大きく、30m地点での温度降下が小さい
- ・7日間を通して運転開始、終了時の地中温度は低下

## 3並列の地中熱交換器を用いた場合

地中熱ヒートポンプを山梨県の主要産業である農業分野にも導入するため、県が主導となり、環境省の補助金を利用して、これまで山梨大学で研究開発を進めてきた、直接膨張方式地中熱ヒートポンプによる夏秋イチゴのハウス冷暖房事業を実施している。

計画地(北社市大泉町)は標高800mの高地であり、これまでは夏季の冷房が不要であった。近年の温暖化の影響で、特に夜間の気温が下がらず、作物の結実に影響があることから、冷房の必要性が生じた。これにより、直接膨張方式地中熱ヒートポンプが導入されることになった。そこで、既築の高断熱式ビニールハウス(8×27=216m<sup>2</sup>)に対して、主に夏季の冷房用として地中熱ヒートポンプを2台導入し、φ100mm×30mの3本のポアホール内にそれぞれ地中熱交換器を収め、3本1組として、2組用いて稼働させている。

「廃熱・湧水等の未利用資源の効率的活用による低炭素社会システム整備推進事業」



(室内機+送風ダクト)

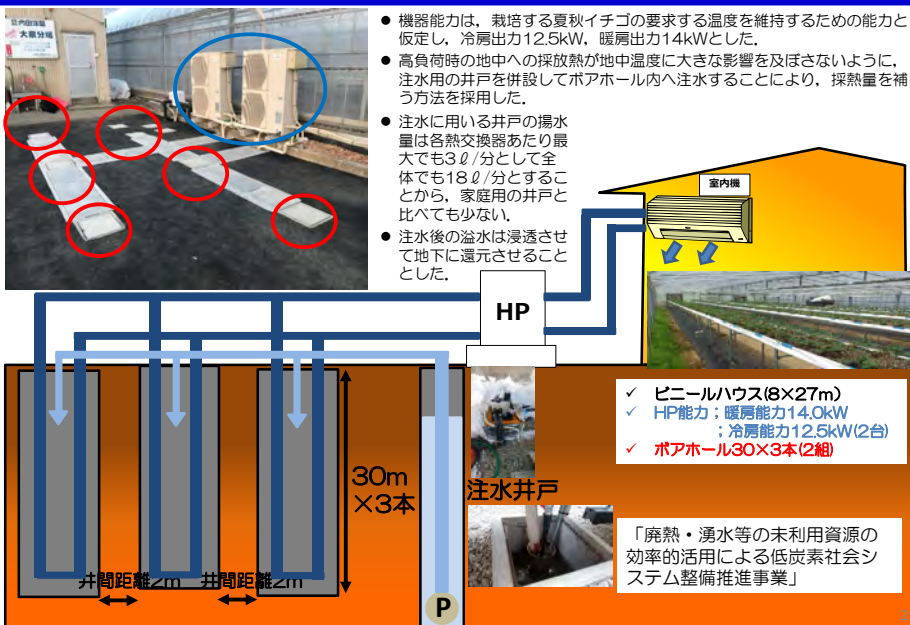


(室外機)

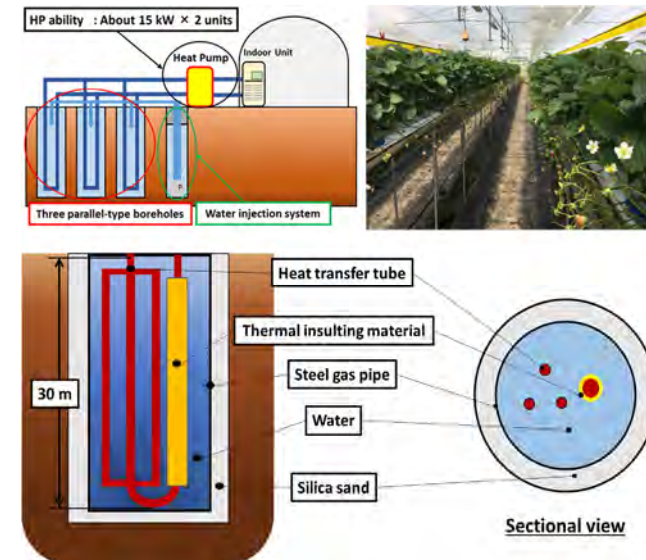


(ハウス内)

## 夏秋イチゴのハウス冷暖房実証試験装置

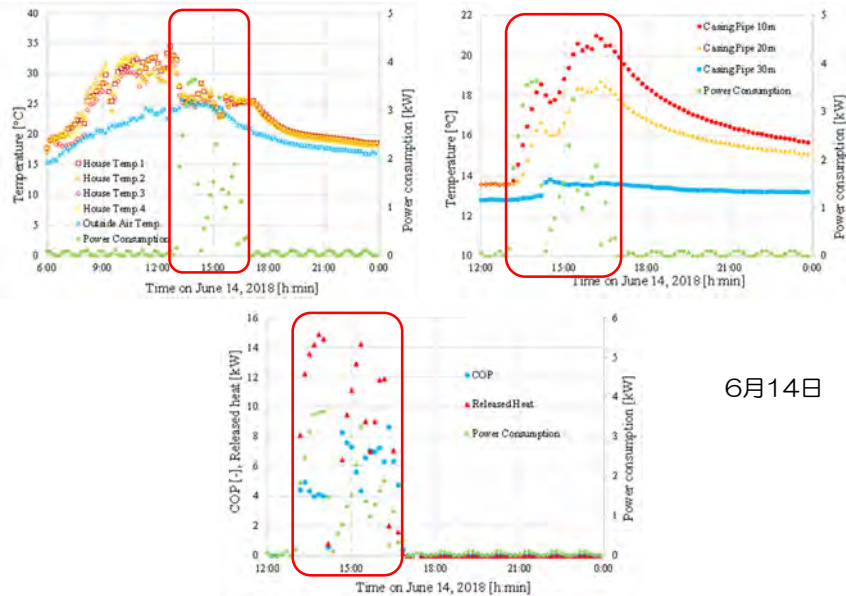


## 3並列型地中熱交換器(3-1型)





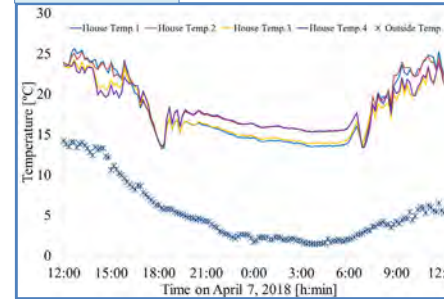
## 試運転の結果



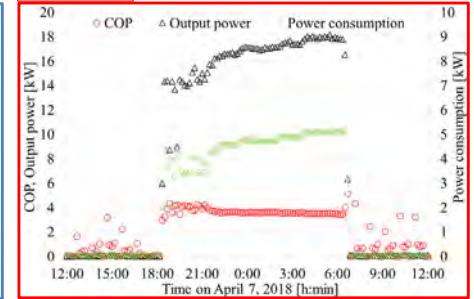
6月14日

## 運転結果 (暖房運転)

### ハウス内温度



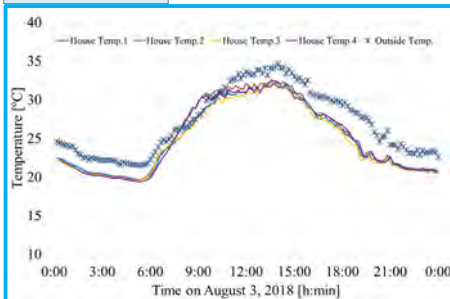
### 性能評価



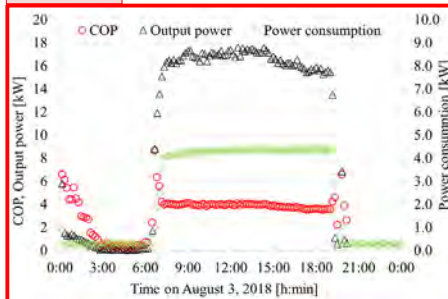
- 外気温が2℃程度まで低下した場合の暖房試験では、ハウス内温度を約14℃以上に維持することが可能であり、COPは約4であった。

## 運転結果 (冷房運転)

### ハウス内温度

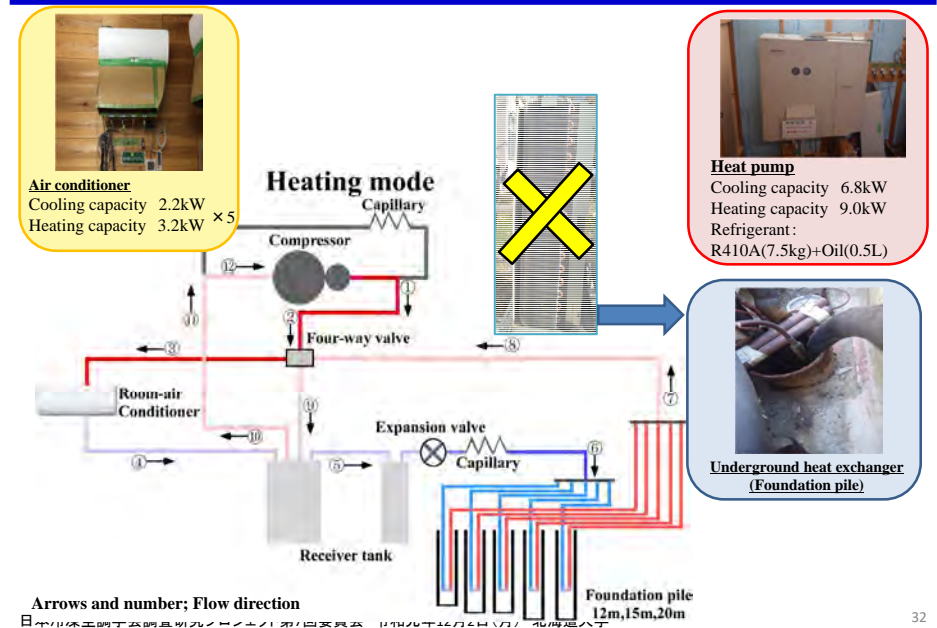


### 性能評価



- ✓ 外気温が約35℃の場合、ハウス内温度は約32℃に保つことができた。
- ✓ 参考までに外気温が約31℃の場合に、冷房運転を行わない場合は、ハウス内温度が35℃まで上昇した。

## 実験装置 (初期の鋼管杭システム)







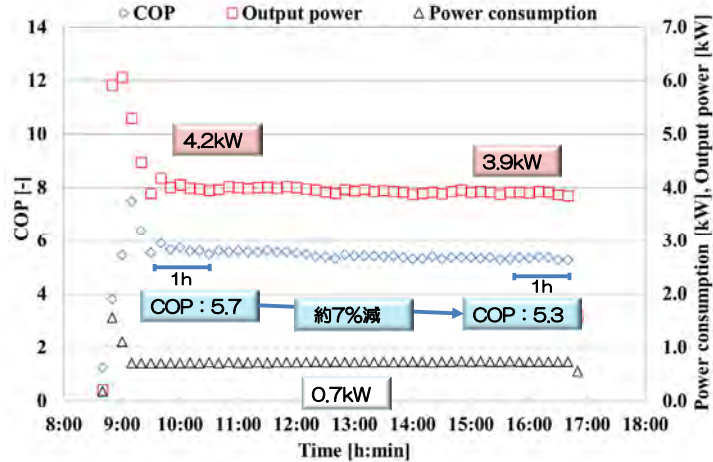
## 性能評価（暖房運転）

### 成績係数 COP

$$COP = \frac{\Delta h \times \rho \times A \times v}{P \times 6}$$

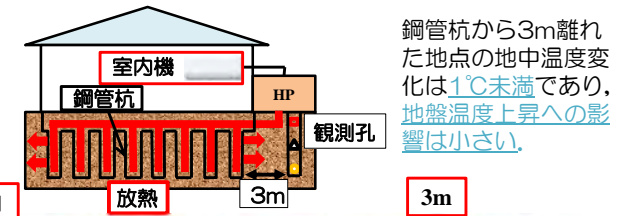
$\Delta h$ : 2次系室内機出口・入口のエンタルピー差 (kJ/kg)     $\rho$ : 空気密度 (kg/m<sup>3</sup>)  
 $A$ : 空調機出口ダクト面積 (m<sup>2</sup>)     $v$ : 風速 (m/s)  
 $P$ : 圧縮機の消費電力 (10分間の積算値) (kW)

暖房運転(8:30~17:00) 設定温度20°C

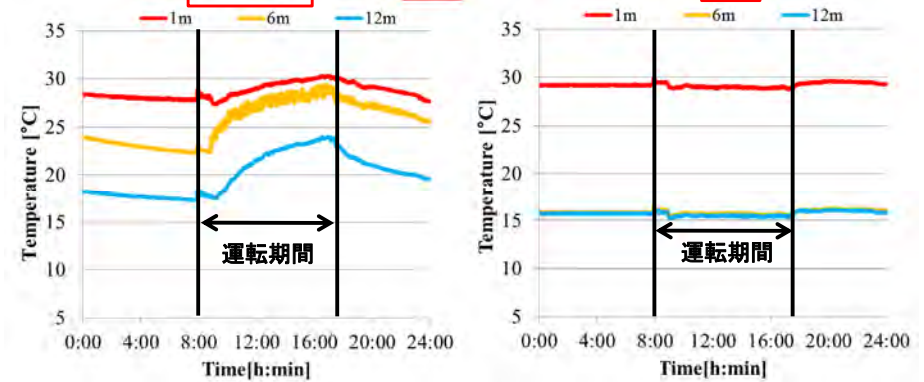


## 水平方向の地盤温度上昇への影響（冷房運転）

冷房運転では地中熱交換器が凝縮器となり、地中に熱を放熱する



鋼管杭から3m離れた地点の地中温度変化は1°C未満であり、地盤温度上昇への影響は小さい。

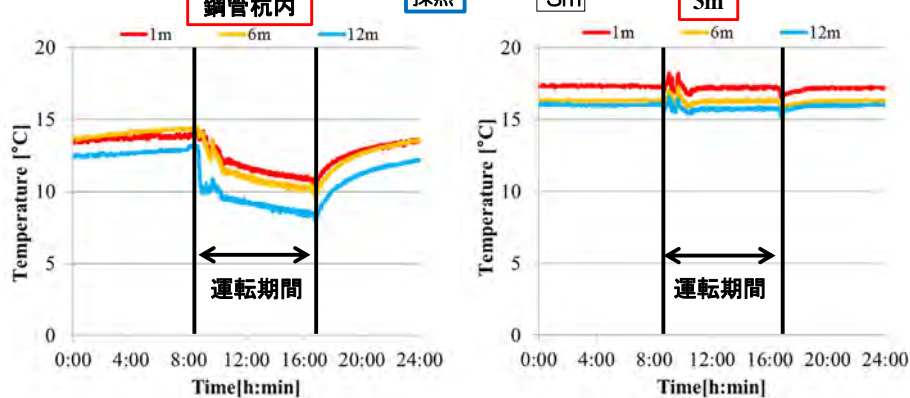


## 水平方向の地盤温度降下への影響（暖房運転）

暖房では地中熱交換器が蒸発器となり、地中から熱を採熱する



鋼管杭から3m離れた地点の地中温度変化は1°C未満であり、地盤温度降下への影響は小さい。



## 直接膨張方式地中熱ヒートポンプのシステム構成

室外機出力10kW級 (実験機)

シングルボアホールシステムの地中熱交換器

これまでの実験装置

3並列ボアホールシステムの地中熱交換器

室外機出力10~15kW級 (家庭用・産業用)

商用システム (大村記念館、ハウス空調)

実験機 (山梨大学)			
地中熱交換器	シングルボアホールシステムの地中熱交換器 (30m×1)	シングルUチューブ型ボアホール径100A	
HP能力	10kW×1台		
地盤温度計測	ボアホール温度計測点 深さ5m、30m		

商用システム (大村記念館、ハウス空調)			
地中熱交換器	3並列ボアホールシステムの地中熱交換器 (30m×3)	3本並列Uチューブ型ボアホール径150A	
HP能力	10~15kW×1台×2セット		
バックアップ冷却システム	水循環冷却用井戸または水道水		
地盤温度計測	ボアホール温度計測点 深さ5m毎		