

# 再生可能エネルギー利用高効率ヒートポンプシステム ReHP<sup>®</sup> の開発

## Development of High-Efficiency Renewable Energy Heat Pump System (ReHP)

三浦 克弘 小野 永吉  
下 泰蔵 寺西 智博<sup>1)</sup>

### 要 約

社会的な省エネと CO<sub>2</sub>削減要求の高まりを受けて、再生可能エネルギー熱利用に対する期待が増している。開発した複合型水熱源ヒートポンプシステムである ReHP<sup>®</sup> (リヒーブ/Renewable Energy Heat Pump System) は、再生可能エネルギーや未利用エネルギーを複数組み合わせることで採熱量の安定的確保とシステム内の熱回収を利用した高効率な運用を目指しており、同時にシステム規模の拡大による経済合理性の実現を意図している。ReHP の性能予測に必須であるシミュレーションには当研究所が開発した ENe-ST<sup>®</sup> (エネルギーネットワーク計画ツール) を活用し、地中熱交換器に関しては計算負荷の小さいモデルを新たに開発した。また、再生可能エネルギーに関わる技術開発として地中熱交換器と太陽熱利用に関わる機器および施工法を開発した。実際の建物において地中熱と空調排熱を建物の冷暖房と給湯に利用する ReHP の運用実績を解析したところ、ベースラインである一般的な空調熱源方式に比べて年間で約 35% の省エネルギーを達成していた。また、20 年間のライフサイクルコストはベースラインよりも少なく、複数の熱源を組み合わせることでシステム規模を拡大することで省エネ量と CO<sub>2</sub>削減量は地中熱単独システムの約 6.6 倍になると試算された。

### 目 次

- I. はじめに
- II. ReHP の構築方法
- III. 再生可能エネルギー利用技術の高度化
- IV. 実際の建物における ReHP の運転実績
- V. おわりに

#### I. はじめに

近年、社会的にエネルギー使用量・CO<sub>2</sub>排出量の削減要求が高まっている。再生可能エネルギーに関しては発電利用とともに熱利用に対する期待が増しており、空調・衛生分野においてもその利用が求められている。地中熱や太陽熱等は比較的立地条件を問わず利用可能であるが、地中熱は敷地面積などの制約によって採熱量が限られ、太陽熱は天候によって採熱量が変動するなど、熱源として安定的に利用するには課

題があった。また、再生可能エネルギーの利用は初期投資額が大きく、導入規模を拡大し「省エネ量」を増やすことも困難であった。

今回、開発した複合型水熱源ヒートポンプシステムである ReHP (リヒーブ/Renewable Energy Heat Pump System) は、再生可能エネルギーや未利用エネルギーを複数組み合わせることでそれぞれのポテンシャルを活かしながら、熱利用機器間の熱回収効果も期待して、経済合理性を追求した上で採熱量の安定的確保と高効率な運用を実現することを目指したものである。特徴の異なる複数の熱源を運用時に選択利用して高効率化と省エネ量の最大化を追求している。

#### II. ReHP の構築方法

##### 1. ReHP の概念

Fig.1 に ReHP の概念を示す。熱源側には立地条件に応じ

1) 環境本部 Environment Division

**キーワード:** 再生可能エネルギー, ヒートポンプ, 省エネルギー, CO<sub>2</sub>削減, 空調システム, 給湯システム

**Keywords:** renewable energy, heat pump, energy conservation, carbon dioxide reduction, air-conditioning system, hot water supply system

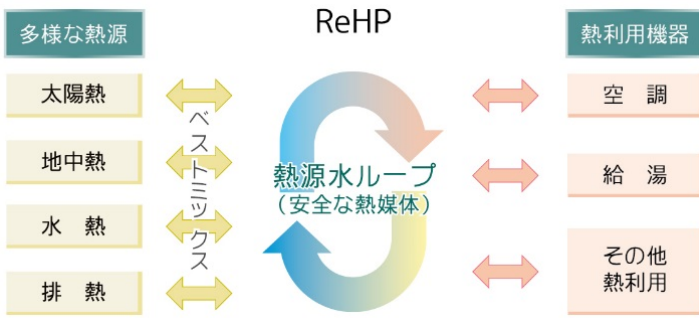


Fig.1 ReHP の概念 (Concept of ReHP)

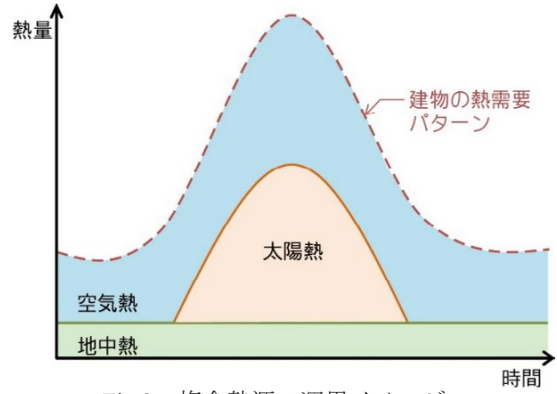
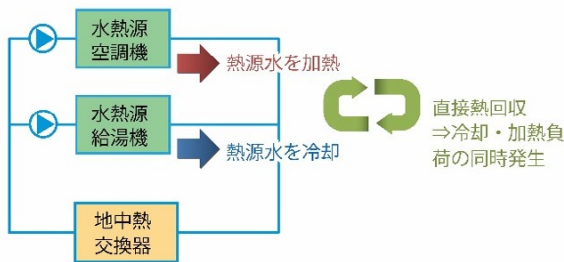


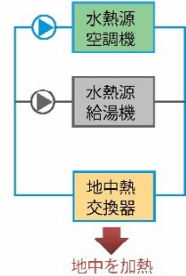
Fig.2 複合熱源の運用イメージ (Image of Operation for Combined Heat Source)

<冷房・給湯同時運転>

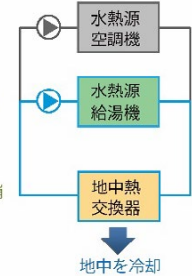


(a) 熱源水ループによる直接熱回収 (Direct Heat Recovery by Heat Source Water Loop)

<昼間:冷房運転>



<夜間:給湯運転>



(b) 熱源水ループと地中熱交換器による間接熱回収 (Indirect Heat Recovery by Heat Source Water Loop and Geo-thermal Heat Exchanger)

Fig.3 熱源水ループによる熱回収 (Heat Recovery by Heat Source Water Loop)

て、太陽熱、地中熱、河川水熱等の再生可能エネルギーや排熱等の未利用エネルギーを接続し、季節や時間帯に応じて高効率に運転できる最適な熱源の組み合わせ(運転モード)を選択する。一方、熱利用側には空調(冷暖房)、給湯、及び生産設備への熱利用など多様な汎用型の水熱源ヒートポンプを熱源水ループに接続する。これによって、同一建物内で冷房と暖房、あるいは冷房と給湯が共存する場合のように負荷の異なる熱利用機器を接続することで、各々の排熱を有効利用することも可能となる。熱媒体は常温(5~35℃)の上水であり各機器へは一般的な水配管で供給でき、増設・変更が容易で、自然災害により漏洩が生じた場合でも土壤汚染の懸念がない。また、空気熱源に依存しないためヒートアイランド抑制効果があり、保有水量を増大すれば蓄放熱機能による電力消費のピークカットも実現可能である。

2. ReHP の構築方法

ReHP はシステム構築の考え方が複雑であるため、安定運用と環境負荷削減効果の最大化を図るためには基本的な考え方に立ち戻ってシステムを構築する必要がある。以下に、システム構築、容量設計、運用方法の考え方を説明する。

なお、本論文では水熱源ヒートポンプ空調機と水熱源ヒ-

トポンプ給湯機をそれぞれ水熱源空調機、水熱源給湯機と省略して表記する。

(1) システム構築の考え方

再生可能エネルギー熱源と水熱源ヒートポンプの特長を最大限引き出すために、以下の3つの観点からシステム構築の基本である。

a. 熱源の複合化

再生可能エネルギー熱は立地条件、建築条件などによる採熱量の制約や経時的な採熱量の変動があるため、複数の熱源で熱需要を分担すれば、互いの欠点を補い合いながら運用することができる(Fig.2)。

b. 冷却運転-加熱運転間の熱回収

複数の水熱源ヒートポンプで熱源水を共有する場合、冷却運転するヒートポンプと加熱運転するヒートポンプが同時に稼働すれば、熱源水ループを介して熱回収を行うことができる。冷却・加熱運転にタイムラグがある場合においても、地中を蓄熱体として利用すれば数時間~数か月の時間スケールで熱回収を行うことも可能である(Fig.3)。

c. システム規模の拡大

一般的に再生可能エネルギー熱源のみでピーク負荷を

まかなおうとすると、敷地条件や経済性の制約で実現が不可能となる場合が多い。そのため、環境負荷削減効果と経済合理性の向上の観点から、冷却塔などの汎用機器を積極的に利用し、システム規模（熱供給能力）を大きくすることを考える。これにより地中熱交換器などによるシステムのインシヤルコストの増加を抑え、同時にエネルギー消費量、ひいてはCO<sub>2</sub>排出量を削減させることができる。

### (2) 再生可能エネルギー熱源の容量設計と接続順序

上述のように、空気熱源ヒートポンプなどの安価な汎用機器を含めた熱源の複合化によりピーク負荷に対処すれば、熱源容量を確保しつつ環境負荷削減効果、経済合理性を確保できる。一方、機器の接続順序は各熱源の温度レベルや設置場所を考慮して決定する必要がある。例えば冷却熱源として地中熱交換器と冷却塔を比較すると、盛夏期には外気湿球温度が地中熱温度よりも高い可能性がある。また、バックアップ用温熱源を熱源水ループの最後に設置すれば、一定の温度レベルを保証することが可能になる。冷房期と暖房期の運転時における熱源の組み合わせとそれぞれの熱源容量を考慮して接続順序を検討する必要がある。

### 3. ReHP の性能予測

ReHP のような複合型システムの運転は季節、負荷、各熱源の温度レベルに応じて切り替えていく必要があり、最適な運用方法を考えるにはシステムシミュレーションが必須となる。本技術開発では性能予測手法として米国 Math Works 社のプログラミング環境である MATLAB をベースとして開発したエネルギーネットワーク計画ツール ENe-ST (Energy Network Simulation Tool) を活用した<sup>1)</sup>。その際に課題となったのは、設計者、施工者ともに経験をもって予測することが難しい地中熱交換器の熱性能予測である。シミュレーションツールの要件としては、①地中熱交換器の熱性能を予測できること、かつ②年間を通じてシステムの制御方法・運用方法を検討できること、が必要となるが、国内で公開されている汎用ツールやモデルはほとんどないのが実情である。そこで、本技術開発では熱負荷計算に用いられる応答係数法を用いて計算負荷の小さい地中熱交換器モデルを開発した<sup>2,3)</sup>。

地中熱交換器の計算モデルは数値解法を用いるものと解析解法を用いるものの大きく2通りがある。開発した計算モデルは両解法を組み合わせ、それぞれの利点を併せ持つもので、地盤と熱交換器の熱物性値、形状、配置に関わる熱特性については数値解法 (FEM) にて予め計算しておき、得られた熱応答パラメータを応答係数法モデルに入力し、システムシミュレーションの計算負荷を低減している。

## Ⅲ. 再生可能エネルギー利用技術の高度化

### 1. 地中熱交換器の高性能化と施工の合理化

地中熱交換器の高性能化と施工の合理化を目指して、高密

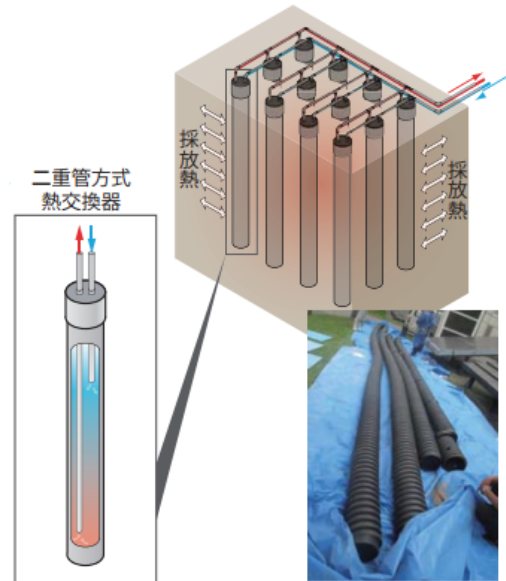


Fig.4 高密度大容量型二重管式地中熱交換器  
(High Density Geothermal Heat Exchanger with Twofold Tube)

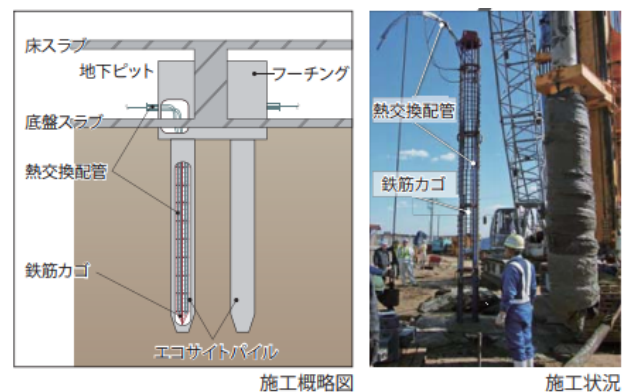


Fig.5 エコサイトパイル式地中熱交換器  
(Construction Method for Geothermal Heat Exchanger  
with Ecosite Pile)



Photo 1 PHC 杭利用地中熱交換器プレセット工法  
(Preset Construction Method for Geothermal Heat Exchanger  
with PHC Piles)

度大容量型の二重管式地中熱交換器を開発し、基礎杭を利用した2種類の地中熱交換器施工法を開発した。

高密度大容量型二重管式地中熱交換器は熱容量を期待できる二重管方式の地中熱交換器のさらなる大容量化を図るとともに、それらを高密度(1~2m 間隔)に設置することで蓄熱体として利用するものである (Fig.4) 4)。基礎杭を利用した地中熱交換器施工方法の一つは場所打ち杭工法である「エコサイトパイル<sup>®</sup>工法」を利用している 4)。①鉄筋カゴの設置に先駆けてコンクリートを先行充填する、②杭頭のはつり作業がほとんどない、といった特徴に着目し、鉄筋かごに地中熱交換器を予め設置しておくことで、鉄筋かご全長の一体地組みによる作業効率の向上と施工不良の低減を実現している (Fig.5)。他方はPHC杭(コンクリート製既成杭)を活用した地中熱交換器で、打設前にPHC杭内部に地中熱コイルをプレセットすることで、地中熱コイルの設置本数を増やしている (Photo 1)。

## 2. ソルエアヒートポンプ (SAHP) の開発

SAHP<sup>®</sup>はソルエアパネル表面で日中は太陽熱を採熱、夜間は赤外線放射による放熱、パネル裏側のフィンでは昼夜を問わず採放熱を行うハイブリッドな採放熱システムである (Fig.6, Photo 2) 5)。日射や赤外線放射の恩恵を受けにくい曇天でも5kW以上の能力を確保できることを環境試験室で確認している。

## IV. 実際の建物における ReHP の運転実績

### 1. 施設の概要と ReHP の構成

#### (1) 施設の概要

栃木県に立地する製薬会社の研究施設において、ReHPを実際の建物に適用した<sup>6)</sup>。本建物はラムサール条約に登録されている渡良瀬遊水地に隣接しており、緑豊かな自然環境に立地する。立地がもたらす豊富な水資源は、地下水により安定した地中温度の形成に寄与している。創薬研究施設である本施設には機能性とサステナビリティが求められる。施設は、創薬研究を行う「実験棟」と、事務厚生機能を有する「事務棟」の2つの建物、およびこれら研究施設をサポートする「エネルギー棟」から構成される (Photo 3, Table 1, Table 2)。

空調設備は多量にエネルギーを消費する実験棟の冷熱源にインバーターボ冷凍機と冬季低負荷対応の水冷チラーを組み合わせ高効率化を図っている。一方、事務棟では多様なアクティビティを考慮して個別分散方式を用いている。異なる空調方式を熱源水ループで統合し、設備的にも一体となった施設を構築している。

#### (2) ReHP の構成

省エネとそれによる環境負荷の削減を図る手段として、立地と施設運用がもたらす再生可能エネルギー等の利用を考えた。再生可能エネルギー等は安定した地中温度を活用した

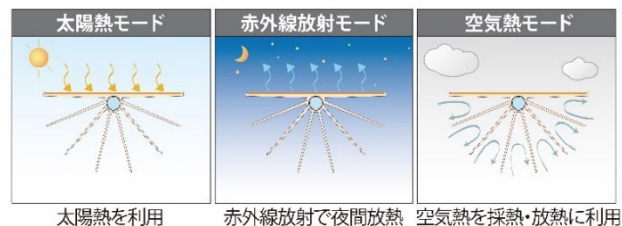


Fig.6 SAHP の動作原理 (Operational Principle of SAHP)

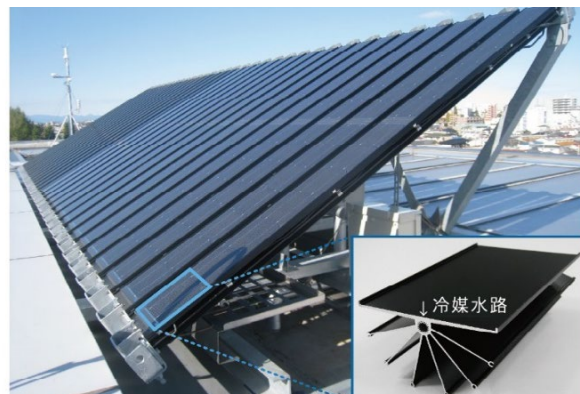


Photo 2 SAHP の外観 (Exterior View of SAHP)



Photo 3 施設外観 (Appearance of Facility)

Table 1 施設概要 (General Information of Facility)

■ 施設概要	
設計 施工会社	KAJIMA DESIGN (建築・設備)鹿島建設株式会社 (電気)株式会社サンテック (空調)高砂熱学工業株式会社 (衛生)高砂熱学工業株式会社
建物用途 所在地 竣工	研究所 栃木県下都賀郡野木町野木1848 2015年4月30日

Table 2 建物概要 (General Information of Buildings)

	実験棟・事務棟	エネルギー棟
用途	事務所・研究所	事務所
構造	SRC造(免震)	S造
階数	地上4階	地下1階/地上1階
建物高	20.9m	6.28m
建築面積	6,800㎡	600㎡
延べ床面積	19,700㎡	880㎡

地中熱と実験棟の恒温恒湿空調により発生する冷却水排熱である。これらの再生可能エネルギー等を熱源水に取り込み、熱量バランスの観点で事務棟の空調と実験棟の給湯に熱利用する、複合型水熱源ヒートポンプシステムの構築を考えた。地中熱は冷熱源と温熱源のいずれにも利用し、実験棟の冷却水排熱を温熱源、冷却塔を冷熱源に用いる構成である (Table 3, Fig.7)。熱源水をループ配管として熱利用側、熱源側それぞれで機器を直列接続してエネルギーネットワークを形成している点が特徴である。熱利用機器である水熱源空調機と水熱源給湯機の接続順序は、空調機の方が給湯機よりも容量が大きい点を考慮して、冷房期には冷房排熱により温度上昇した熱源水を給湯機で使用することで給湯機の効率向上を狙っている。また暖房期に最終的な熱源水下限温度の補償をバックアップ熱源で担保している。これらにより熱源機器と熱利用機器、熱利用側 (冷房・給湯)、建物間の多面的な熱融通が可能となる。

地中熱交換器に建物の基礎杭を用いるため総杭長の制約がある中、杭内に挿入する熱交換配管 (Uチューブ) の本数や離隔を工夫することで熱交換容量の増大を図り、シミュレーションにより目標と同等の採放熱量が得られることを確認している。但し、冷却側、暖房側ともに不確実性がともなうため、冷却塔やバックアップ回路の熱交換器容量は余裕を見て選定している。基本的な制御を以下に示す。

- 熱利用機器である空調機と給湯機は熱需要に応じて熱源水を要求する。
- 熱供給に必要な熱源水をポンプが供給する。
- 熱利用機器への供給温度を満たすように熱源側機器を選定して熱源水温度を調節する。

なお、熱源水ポンプは変流量制御であるが、水熱源空調機や給湯機が変流量制御に対応していないため、空調機・給湯機の運転台数に応じて段階的に全体の熱源水流量が変化する。熱源水ポンプ運転台数を負荷流量で決定し、ポンプ回転数をループ本管から空調機への分岐部における往還差圧で制御している。ただし、本システムのように複数の機器を直列に配置したループ配管では、機器の発停 (通水するもしくはバイパス) によって、抵抗曲線が大きく変化する点が通常の2次ポンプシステムとは異なる。そこで、各ポンプ運転台数の範囲として、配管抵抗が最大となる曲線で流量最大値を決定し、抵抗が最小となる曲線で流量最小値を決定している (Fig.8)。

熱負荷の年間変動から運転時期を空調の冷房期、暖房期、中間期に大きく分けて、熱源側機器の組み合わせを計画している。また、システム全体の制御として年間各時期の切替えを年間スケジュールで行い、熱源側機器毎に運転時の出口温度を設定して独立に制御している。

## 2. 省エネルギー性能の検証

運用開始後2年半 (2015年9月~2018年3月) の月平均外気温度および2次側処理熱量 (冷房, 暖房, 給湯) の月積算値を Fig.9 に示す。若干の年変動はあるものの、毎年ほぼ安定して負荷が発生していることがわかる。同期間の1次側処理熱量を Fig.10 に示す。2次側処理熱量と同様に安定した運用がなされていることがわかる。全期間を通して冷房時は地中熱, 暖房時は地中熱および排熱でほぼすべての負荷を賄えている。2017年度の実績では、冷却・加熱合計熱量に対し、地中熱43%で排熱40%の割合であった。なお、図中で

Table 3 設備機器表  
(List of Equipment for ReHP)

機器名称	仕様
水熱源空調機-1~23	マルチパッケージ型空調機及び直膨式空調機, 全23台, 合計冷却能力653kW, 合計加熱能力754kW
水熱源給湯機	加熱能力85.8kW
地中熱交換器	PHC基礎杭利用, 11.2m×160本, プレート式, 冷却水排熱回収用, 熱交換能力1,006kW
水-水熱交換器	プレート式, 蒸気バックアップ用, 熱交換能力1,006kW
蒸気-水熱交換器	プレート式, 蒸気バックアップ用, 熱交換能力1,006kW
熱源水ポンプ	526L/min, 750kPa×5台
冷却塔	密閉式, 冷却能力917kW

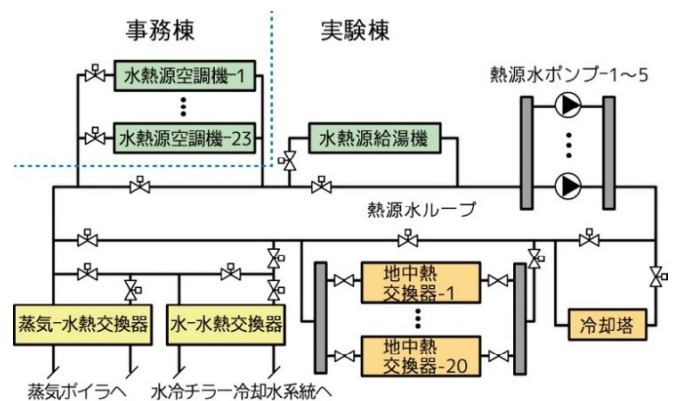


Fig.7 システム系統図  
(Schematic Diagram of ReHP System)

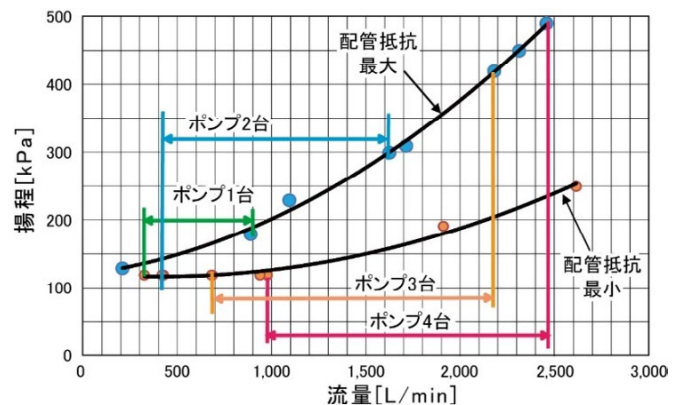


Fig.8 配管抵抗曲線とポンプ運転台数範囲  
(Resistance Curve of Heat Source Water Piping and Ranges of Numbers of Operating Pumps)

は表示していないが、冷房-給湯間の熱回収効果は1次側処理熱量全体に対して15%と小さくなく、熱源側機器の負担軽減に寄与していることを確認している。以上より、1次側処理熱量全体に対して再生可能エネルギー等(地中熱、排熱)および熱回収により98%を賄えており、効率的な運用を行っていることがわかる。

システム全体の1次エネルギー消費量と省エネ率をFig.11に示す。「空気熱源(計算値)」とは外気・負荷条件の実測値を用いて、一般的な空気熱源システムのエネルギー消費量をシミュレーションにより求めたベースラインである。空気熱源空調機モデルは国土交通省監修のLCEMツールから特性を引用し、空気熱源給湯機モデルはメーカ提供の特性データに基づいて作成している。実績では水熱源ヒートポンプシステムの効率的な運用によって、ベースラインに対して各月積算値で23.4~44.3%の省エネ効果が得られた。2015~2017年

度の各年度の省エネ率はそれぞれ33.4%、35.0%、36.3%となり、気象条件や負荷条件の影響も考えられるが、継続的な運用性能の検証・調整により省エネルギー性能は毎年少しずつ向上してきている。

### 3. 環境負荷削減効果とライフサイクルコストの試算

従来の地中熱利用ヒートポンプシステムと比較することで、熱源を複合利用する本システムの「省エネ(CO<sub>2</sub>削減)量」の向上効果とライフサイクルコスト(LCC)の試算結果について説明する。比較を行う地中熱単独利用システムは、実際に導入した地中熱交換器容量を前提に釣り合いの取れる規模の空調面積・空調負荷へ熱供給を行う空調システムとする。したがって、熱源を複合化しない分、システム規模は小さくなる。ここで言う「釣り合いの取れる規模」とは、設計時に想定した運用負荷条件に対し、熱源水温度が年間を通じて水熱源ヒートポンプの許容温度範囲(5~40℃程度)に



Fig.9 二次側(熱利用側)処理熱量 (Amount of Thermal Energy in Demand Side)



Fig.10 一次側(熱源側)処理熱量 (Amount of Thermal Energy in Supply Side)

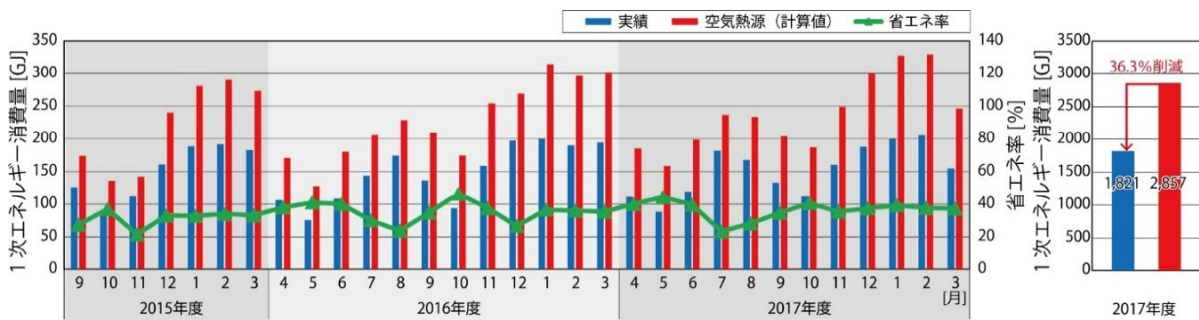


Fig.11 空調一次側処理熱量 (Amount of Primary Energy Consumption by HVAC System)

入ることを指す。使用するエネルギー消費量は設計時に想定した負荷条件を与条件としたシミュレーション結果を用いる。

年間エネルギー消費量を Fig.12 に示す。比較基準としている「空気熱源」は、一般的な空気熱源システムである。地中熱単独利用では地中熱交換器で期待できる採熱量が約 200kW であるため、地中熱のみで成立する規模は実システムに対して 1/4 となる。建物間の熱融通や排熱の利用などにより省エネ率はやや向上し、省エネ量・CO<sub>2</sub>削減量は 6.6 倍になる。また、取得できる可能性のある省エネ・再エネ利用促進の補助金を想定したライフサイクルコスト（20 年間）を比較すると、地中熱単独利用は補助金を得ても空気熱源と同程度にしかならないが、本システムは補助金がなくても空気熱源を下回る水準まで縮減させることができる (Fig.13)。特に、本システムのイニシャルコストは、地中熱単独利用の半分程度まで削減できていることがわかる。

### V. おわりに

一般的な再生可能エネルギー熱の利用方法である地中熱単独利用システムは、経済的な理由から小規模施設に留まらざるを得ず量的な拡大に繋がっていない。一方、複合型水熱源ヒートポンプシステムである ReHP は地中熱、太陽熱、排熱などの複数の再生可能エネルギー・未利用エネルギーに加えて、冷却塔などの一般的な熱源を組み合わせることでシステム規模を拡大し、省エネルギーの観点から適切な熱源を選択して運用する。これにより、経済合理性を高めるとともに再生可能エネルギー熱利用の普及拡大を通して省エネルギー量を増やすことを意図している。本論文で示した適用事例では、研究施設と事務施設が設備的に一体となった、地中熱と排熱を有効利用する熱融通型空調・給湯システムを ReHP により構成しており、実績では一般的な空気熱源システムに対して 35% 程度の省エネ効果を実現していた。

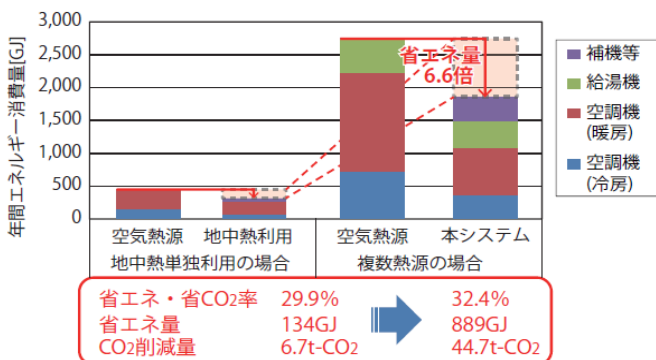


Fig.13 年間エネルギー消費量・CO<sub>2</sub>削減量 (Annual Energy Consumption CO<sub>2</sub> Reduction)

ReHP により技術的にも経済的にも実用的でフレキシブルな対応が可能な再生可能エネルギー熱利用システムを構築・普及・展開していくことにより、ZEB 実現などの社会的要請に対応できるものと考えている。

### 謝 辞

本研究の一部は、経済産業省「地産地消型再生可能エネルギー面的利用等推進事業」による補助を受けて実施した成果である。また、運転実績の評価に関しては杏林製菓株式会社 村山 淳様、小川 覚三様、薄 広美様にご協力を頂いた。記して、感謝の意を表す。

### 参考文献

- 1) 荒井良延ほか；エネルギーネットワーク計画ツール「ENE-ST」の開発（第 1～2 報），空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集，2014.9，pp.193-200.
- 2) Ono, E. et. al.; Development and Application of Ground Heat Exchanger Model using Response Factor Method, International Congresses of Refrigeration 2015, 2015.8.
- 3) 小野永吉ほか；応答係数法を用いた地中熱交換器の計算モデルの開発と適用，鹿島技術研究所年報第 62 号，2014.9.30，pp.133-138.
- 4) 藤井義久ほか；再生可能エネルギー利用高効率ヒートポンプシステムの適用，建築設備士，2013.1，pp.26-31.
- 5) 藤井義久ほか；太陽熱、長波長放射熱、及び空気熱を熱源とする冷温熱供給ヒートポンプの運転特性，日本機械学会熱工学コンファレンス 2012 講演論文集，2012.11.
- 6) 三浦克弘ほか；地中熱と排熱を利用する複数建物間熱源水ネットワーク（第 1 報）～（第 2 報），空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集，2016.9，pp.145-152.

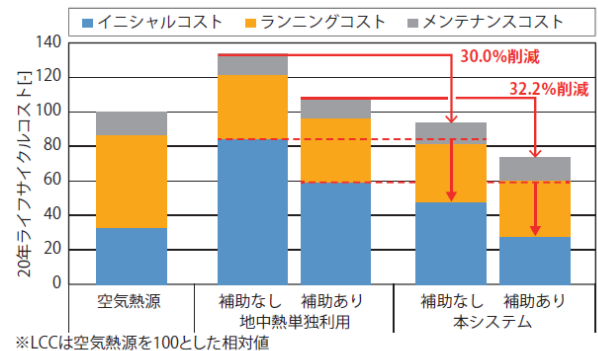


Fig.14 20 年ライフサイクルコスト (Estimation of Life Cycle Cost in 20 Years)

## **Development of High-Efficiency Renewable Energy Heat Pump System (ReHP)**

*Katsuhiro Miura, Eikichi Ono, Taizo Shimo and Tomohiro Teranishi<sup>1)</sup>*

There are increasing expectations for the use of thermal renewable energy in order to save energy and reduce carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) emissions. A newly-developed renewable energy heat pump system (ReHP) aims to achieve stable heat utilization by combining several heat sources and highly efficient system operation by heat recovery between cooling energy and heating energy in the system. We intend to achieve economical rationality of ReHP by expanding the system capacity. To estimate the performance of ReHP in operation, it is necessary to conduct system simulations. We developed a procedure for modeling geothermal heat exchangers with light calculation load to enable system simulation. Geothermal exchangers and their construction methods were newly developed as heat sources for ReHP. The Sol-Air Heat Pump system utilizing solar thermal energy was also developed. A ReHP system which utilizes geothermal energy and air-conditioning exhaust heat for cooling, heating and hot water supply saves about 35% energy compared to the baseline of a typical air source system. Its life cycle cost over 20 years was less than the baseline. The amounts of energy saving and CO<sub>2</sub> reduction were 6.6 times those of the exclusive geothermal system.