

温泉未利用熱を活用した熱源水ネットワークシステムの研究
-シングルループシステムの導入による省エネルギー効果の検討-

**STUDY ON HEAT SOURCE WATER NETWORK SYSTEM UTILIZING
HOT SPRING UNUSED THERMAL ENERGY
-ESTIMATION OF ENERGY SAVING EFFECT BY INTRODUCING
SINGLE LOOP SYSTEM-**

地域環境計画分野 康 尚義

Division of Regional Environmental Planning Naoyoshi KOH

温泉熱の有効利用はあまり進んでいない現状にある。温泉・排湯熱を利用した熱源水ネットワークシステムは給湯用エネルギー削減に貢献する。本研究は集中型熱供給システムと比較し、温泉未利用熱が省エネルギー効果に与える影響を試算する。給湯には実在するヒートポンプの機器特性を再現したモデルを、単一配管は熱損失を考慮したモデルを使用した。結果として、熱源水ネットワークシステムは集中型熱供給システムに対して約 17.6%の消費電力削減効果があることを示した。

The heat source water network system using hot spring and drainage can contribute to energy reduction for hot water demand. The purpose of this study is to estimate the influence of hot spring unused thermal energy on the energy saving effect compared with the heat source plant system. We construct a simulation model connecting accommodation facilities with single loop piping. We used models that reproduces the equipment characteristics of real heat pumps and that considers convective heat transfer with heat source water and heat loss from piping heat capacity. Through simulation study with this model, the heat source water network system has about 17.6% reduction in power consumption compared to the heat source plant system.

1. 研究背景・目的

1.1 研究背景

平成 23 年 3 月 11 日に発生した東日本大震災及び東京電力福島第一原子力発電所事故を受け、我が国のエネルギー施策の見直しが求められている。近年、未利用のエネルギーとして太陽光、風力、水力、地中熱、太陽熱、その他自然界に存在する熱等の再生可能エネルギーが注目されており、その有効活用への期待が高まっている。再生可能エネルギーは資源が枯渇せず、繰り返し利用でき、地球温暖化の原因となる二酸化炭素の排出量も少ない等の利点があるものの、安定したエネルギー供給と導入効果、初期・維持費用などの懸念が払拭されず、利用技術の普及が進んでいないものもある。特に、我が国は全国に 27,000 以上の源泉井戸が分布しており、そのうち温度が 42°C以上の源泉井戸が約 52%存在するため、温泉熱の未利用エネルギーとしてのポテンシャルは高い。しかし、高温源泉を保有する温泉施設では温泉熱の有効利用はせず大気への

放熱や加水により浴場での利用温度まで調温することが多い。例えば群馬県草津町の草津温泉では湯畑や湯もみによる大気への放熱で温度を調節している。また浴場の排湯からの熱回収もほとんど行われておらず、温泉熱のポテンシャルの活用は十分なされていない。設備面では、給湯用に化石燃料を用いたボイラを使用している場合が多く、高効率のヒートポンプ(以下 HP)を用いた給湯システムもあまり普及していない。

1.2 研究目的

本研究では温泉未利用熱(源泉および排湯未利用熱)に着目し、エネルギーの有効利用による温泉地域全体での省エネルギー化を促進させるため、温泉熱源が点在する温泉地域の特徴を活かし、温泉熱の面的な有効利用を実現する「熱源水ネットワークシステム(以下熱源水 NW)」について検討する。本研究では温泉熱利用が可能な複数の温泉施設からなる熱源水 NW モデルを構築し、集中型熱供給システムを比較対象として、1 次元の動的シミュレーションにより熱源水 NW の省エネルギー効果を確認する。

1.3 温泉熱利用システム

温泉施設では一般的な給湯システムとしてボイラを使用する機会が多いが、温泉熱(源泉・排湯の温度差エネルギー)を熱交換器(以下 HEX)と HP 給湯機により利用するシステムも存在する。しかし、このような温泉熱を利用したシステムの普及が進んでいないことが現実である。また源泉が集中する温泉地域では面的な集中管理方式のシステムが導入されることもあるが温水を供給すること、集中管理のために保温工事を含めた配管の敷設コストが高価になってしまう点が課題として挙げられる。

熱源水 NW は温泉施設が点在する地域においても適応可能であり、温泉熱利用の HP 給湯機システムにより省エネルギー効果が期待される。しかし国内での導入事例が無く導入効果の検討がなされていない。

1.4 先行研究の到達点と本研究の新規性

先行研究として温泉地域における熱源水 NW の導入効果の検証が行われた。このシステム(図 1)は、2 管(高温側と低温側)セットで埋設され、高温側から HP 給湯機用の熱を汲み上げ低温側に戻し、源泉・排湯からの回収熱を低温側から汲み上げた熱源水に与え、高温側に戻す仕組みである。2 管の両端は接続されており熱源水は地域を循環する。

本システムを用いて実測調査を行った温泉施設をベースとして数種類の規模の温泉施設を設定し、6 施設での熱源水 NW 導入効果をシミュレーションにより明らかにした。結果として熱源水 NW は、既存システムより 16.9GJ/day、集中型熱供給システムより 8.9GJ/day の 1 次エネルギー消費量(以下 1 次 E 消費量)を削減できることが確認された。

先行研究において熱源水 NW の省エネルギー性能は明らかにされたが①温泉熱の各施設での利用よりもネットワークへの投入を優先していること②2 重配管により配管・ポンプの導入コストが高いことが課題として挙げられる。そこで本研究では単一配管を用いた熱源水 NW(図 2)を提案した。温泉熱は各施設での利用を優先し、HP での採熱、上水予熱を行った後に余剰分をネットワークに投入する。投入された熱は施設間で多段階的に利用される。単一配管に変更したことでネットワーク内の熱源水温度が平均化されてしまうが、施設とネットワークの接続口が減少し、ポンプ台数が減ること、配管総延長が短縮できることにより大幅にインシヤルコストを低減できる。また源泉を保有する施設だけではなく源泉を保有しない施設も熱源水 NW に導入し、より温泉地域の実状に近い想定で検討する。

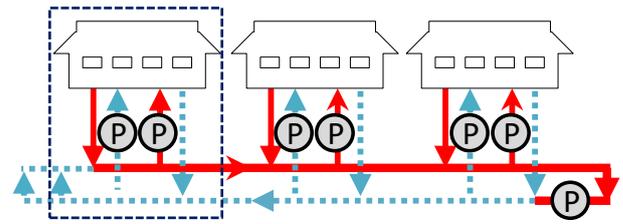


図 1 ダブル配管システム

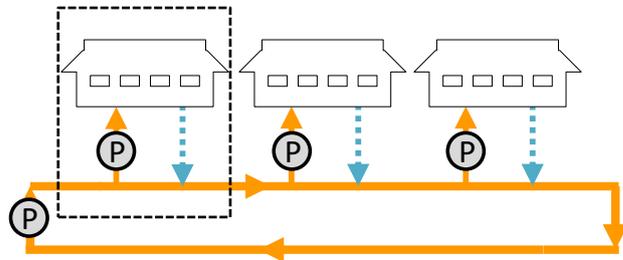


図 2 シングルループ配管システム

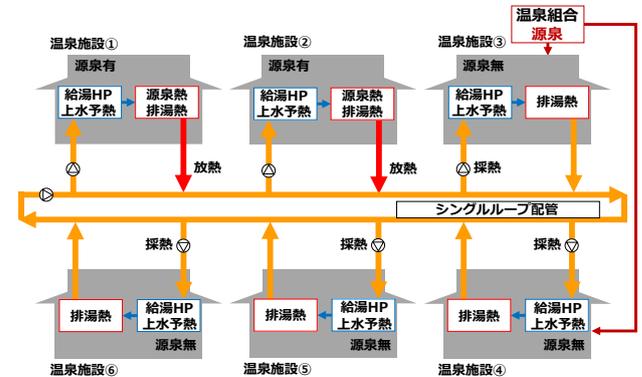


図 3 熱源水ネットワークシステム

2. 各システムの概要

2.1 熱源水ネットワークシステムの概要

本研究で提案する熱源水 NW(図 3)は温泉地域において複数の温泉施設を単一のネットワーク配管で接続し、各施設の源泉や排湯からの熱回収により 25~30℃程度に昇温した熱源水を循環させ、熱源機器の熱源として利用するシステムである。温泉熱は各施設内での利用を優先し、余剰分をネットワークに供給することを基本とする。熱源水ネットワークに繋がる各施設では、HP 給湯機の熱源として利用し、既存設備がボイラの場合でも上水予熱の熱源として利用することができるので省エネルギー効果が見込まれる。本研究で提案する熱源水 NW は温度・流量が変化する源泉のみではなく、排湯も利用する仕組みにより、温泉熱利用のための源泉汲み上げ量が增大しない。また源泉量が少ない、温度レベルが低いような温泉地域であっても浴場からの排湯温度は一定温度以上で安定的であり、排湯熱回収によりシステム全体での COP の向上が期待される。

2.2 熱源水ネットワークシステムを構成する施設

図4に熱源水NWを構成する施設を示す。この施設は源泉井戸を保有する。施設内を流れる熱源水は排湯と熱交換を行いHP給湯機で採熱される前に温度レベルを上げる。これによりHP給湯機の熱源水の採熱温度が上昇し、COPが向上するため消費電力が低減される。また給湯需要量の変動に関しては蓄熱槽で調整し、採熱量が増加したことによる熱源水の温度低下は源泉熱回収によって賄う。このときの熱源水温度は上水よりも温度レベルが高いため上水予熱に利用することができる。予熱された上水はHP給湯機に送水されるので給湯温度までの加熱量を低減できる。このように施設内では温泉熱の有効利用によりHP給湯機の消費電力を抑えるシステムが組み立てられている。また施設内で利用された後の余剰の熱はネットワーク配管内の熱源水と熱交換し他の施設に融通される。

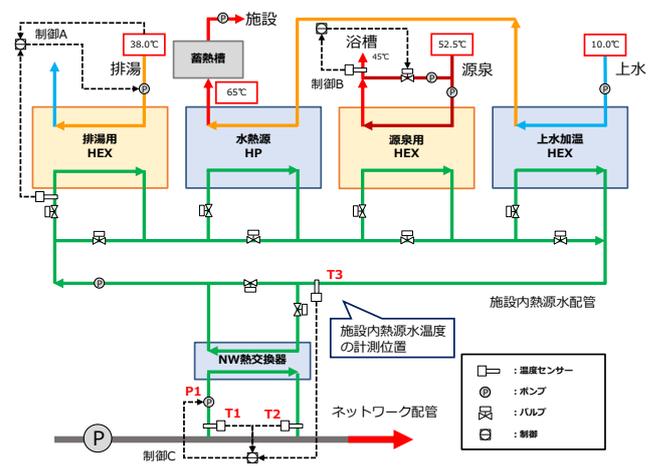


図4 熱源水NWを構成する施設例

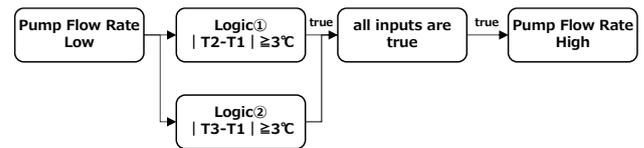


図5 熱融通に関する制御フロー

2.3 施設間熱融通に関する制御

温泉熱は各施設内での利用を優先するので、熱が余剰に存在する場合にのみネットワークに熱を供給する制御が必要である。図5に熱融通に関する制御フローを示す。Logic①では施設内に余剰に熱が存在するか(あるいは不足している状況か)を判定しており、Logic②では施設とネットワークで熱交換するために温度差が生じているかを判定している。温度条件は熱交換器の熱源水流量を調整するポンプの消費電力を考慮し、温度差が殆ど無い場合に融通される熱量よりもポンプの消費電力が大きくなることを避けるため、温度差を3°C以上と設定している。Logic①・②を共に満たす場合のみ熱融通を行い、その際は、低流量で稼働しているポンプ1(図4)の流量を増大させ熱交換を行う。

2.4 集中型熱供給システムの概要

集中型熱供給システム(図6)は、複数の温泉施設が建ち並ぶ温泉地域において1ヶ所(または数ヶ所)に熱源プラントを設け、浴場用の温泉と給湯用の温水を供給するシステムである。集中して熱源プラントを設けることで、エネルギーの有効利用・安定供給、設備の経済性向上、大気汚染の防止等のメリットがある。地域の源泉採取箇所が集中的な配置で、源泉熱供給量が豊富であり熱効率が高くなる地域で適用される。国内における導入事例としては、北海道洞爺湖や群馬県草津町など全国約90箇所における集中型熱供給システムの温泉熱利用が挙げられる。特に草津町では約90°C以上の高温源泉からの熱回収により温水をつくり、町内全域に供給している。本研究では熱源水NWの比較対象として、従来の温泉熱利用による集中型熱供給システムのシミュレーションモデルを構築する。

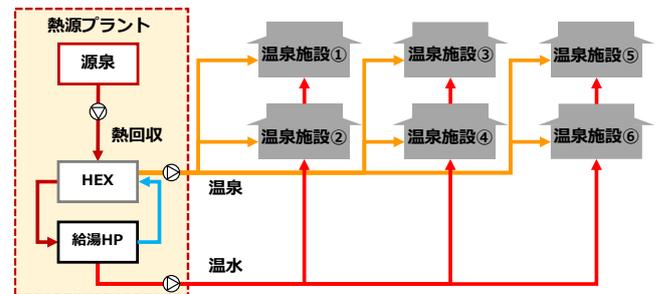


図6 集中型熱供給システム

3. システム構築に伴う設備・制御モデル

3.1 シミュレーションツール

物理モデリングツール Dymola®(以下ツール)上に、制御システムを含めた温泉熱利用システムを構築した。ツールにより非定常状態での1次元の動的計算を行う。システムを構築する機器類はツール上でモデル化されており、その機器モデルを使用する。

3.2 設備条件

■ ヒートポンプ

HPの部分負荷特性を考慮する。(詳細は3.3)

■ 配管

熱源水NWは無断熱配管、集中型熱供給システムは断熱配管を使用する。(詳細は3.4)

■ ポンプ

配管・機器抵抗に関する計算は行わず、定流量で吐出する。定格運転時の消費電力と稼働時間から日積算消費電力を算出する。

■ 熱交換器

2流体の流れ方向は向流とし、機器由来の熱損失は考慮しない。

3.3 水熱源ヒートポンプ給湯機モデルの設定

HP 給湯機は Modelica Buildings Library のモデルを利用し、実在する HP 給湯機の特性を反映する。この HP モデルの特性式は給湯時の温水・熱源水出口温度から、定格運転時の逆カルノーサイクル効率を基準として、式 1 に示す部分負荷時の効率比で表現されている。実機の特性を反映するため、効率比を式 5 に示す部分負荷率の関数で表し、予め最小二乗法により回帰係数を決定しておく。式 2~5 で求めた値を式 1 に代入し、COP が決定する。

機器特性を表現する回帰係数を決定するために、想定した温泉施設の給湯需要量を賄うことができる実在する水熱源 HP 給湯機を選定し、運転時の COP と消費電力の関係をメーカーより入手した。図 7 にメーカー資料と同条件で運転した場合の負荷率と COP の関係を示す。機器特性の確認に当たり給湯温度を 65°C、熱源水流量を定格値で一定とし、熱源水温度、温水流量を変化させて HP を運転した場合のシミュレーションを行った。温水入口温度は 20°C としている。この結果より、本シミュレーションで想定した水熱源 HP 給湯機の機器特性と概ね一致するような HP 給湯機モデルを得ることができた。このモデルを温泉施設モデルに組み込みシステムシミュレーションを行う。

3.4 配管モデルの設定

本研究で比較する 2 つのシステムでは各施設へ送水する搬送距離が長くなるため、配管での熱損失が大きくなる。搬送距離が延長するほど、配管熱容量由来の熱損失は大きくなり、放熱量も増加する。そこで Modelica Buildings Library に用意された配管モデルをカスタマイズし、配管熱容量由来の熱損失と対流熱伝達による損失を組み込んでいる。

式 6~11 に配管内の水の熱収支式を示す。配管は土壤内に埋設されているとし各月の土壤温度を使用する。

$\eta_{PL} = COP/COP_{Carnot}/\eta_{Carnot,0}$	式 1
$\eta_{Carnot,0} = COP_0/COP_{Carnot,0}$	式 2
$COP_{Carnot} = T_{con_out}/(T_{con_out} - T_{eva_out})$	式 3
$COP_{Carnot,0} = T_{con_out,0}/(T_{con_out,0} - T_{eva_out,0})$	式 4
$\eta_{PL} = a_1 + a_2 \cdot y_{PL} + a_3 \cdot y_{PL}^2 + \dots$	式 5

η_{PL}	:部分負荷時の効率比(-)
$\eta_{Carnot,0}$:定格 COP とカルノーサイクル効率 COP の比(-)
COP	:成績係数(-)
COP_{Carnot}	:カルノーサイクル効率 COP(-)
T_{con_out}	:温水出口温度(°C)
T_{eva_out}	:熱源水出口温度(°C)
y_{PL}	:負荷率(-)
a_i	:回帰係数(-)

※添え字の 0 は定格値を意味する。

以下に、配管の前提条件を示す。

- ① 埋設深さを 0.6m とし土壤の熱容量は考慮しない。
- ② 集中型熱供給システムは高温の温泉・温水を送水するため配管を断熱し、熱源水 NW は断熱しない。
- ③ 施設内配管は完全に断熱されているとし熱損失が無いものとする。
- ④ 対流熱伝達による熱損失を考慮する。(式 6)
- ⑤ 流体の熱容量による熱損失を考慮する。(式 7)
- ⑥ 配管熱容量由来の熱損失を考慮する。(式 8)
- ⑦ 分割数を設定し、配管内の温度成層の各部分ごとに温度や熱量を算出する。

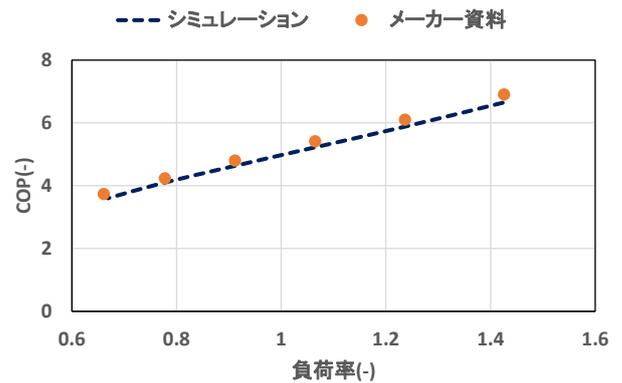


図 7 HP の負荷率と COP の関係

$$Q_c = h_c \cdot A_p \cdot (T_p - T_w) \quad \text{式 6}$$

$$Q_w = c_w \cdot \rho_w \cdot A_w \cdot L \cdot \frac{d}{dt} T_w \quad \text{式 7}$$

$$Q_p = c_p \cdot \rho_p \cdot A_p \cdot L \cdot \frac{d}{dt} T_p \quad \text{式 8}$$

$$Q_t = \frac{\lambda_{ins}}{l_{ins}} \cdot (T_{ambient} - T_p) \quad \text{式 9}$$

$$Q_c = Q_t + Q_p \quad \text{式 10}$$

$$c_w \cdot G_w \cdot \frac{d}{dx} T_w = Q_c + Q_w \quad \text{式 11}$$

Q_c	:対流熱伝達による損失(W)
Q_p, Q_w	:熱容量由来の損失(W)
Q_t	:貫流熱による損失(W)
G	:質量流量(kg/s)
h_c	:対流熱伝達率(W/m ² K)
c	:比熱(J/kgK)
ρ	:密度(kg/m ³)
A	:面積(m ²)
L	:配管長(m)
T	:温度(°C)
λ	:熱伝導率(W/mK)
l	:厚さ(m)

※添え字の p・w・ins は配管・水・断熱材を意味する。

4 シミュレーション概要

4.1 温度・流量条件

シミュレーションモデルを構築するに当たり源泉温度、排湯温度、給湯需要量等の設定条件は H26 年度に群馬県四万温泉地域での温泉施設における実測調査²⁾の4月、8月、10月、12月の1日分の結果を用いる。但し、源泉・排湯温度は一定とする。表1に月別給湯需要量を示す。給湯需要量は宿泊施設の原単位を参考に、上水・土壌温度は実測結果を基に各月ごとに設定する。図8、9に各施設の源泉・排湯流量を示す。源泉井戸を保有しない施設では源泉流入停止時間(10:00~14:00)を設け、その時間帯は源泉の浴場への流入が無くなるため排湯も無くなり排湯熱回収が行えない。

4.2 施設・設備条件

各システムを構成する温泉施設は6棟とする。表2、表3に各システムの設定条件を示す。施設①と施設③は実測調査を実施した施設を想定しており、施設①は源泉を保有するが施設③は源泉を保有せず温泉組合から源泉を購入し、加熱して利用している。施設②は施設①の200%規模、施設④、⑤は施設③と同規模、施設⑥は施設③の300%の規模と設定し、給湯需要量だけでなく源泉量、排湯量も規模に応じて設定する。施設規模・構成を変更することで施設単体では熱が不足しているが地域全体としては熱が余剰に存在するような場合を想定し、導入効果を把握する。

ネットワークを流れる熱源水は施設①→②…⑥→①の順に施設を循環し、集中型熱供給システムは熱源プラント内に参加する全温泉施設の給湯需要量を賄えるように HP 給湯機を複数設け同数の HEX を設置する。

HP 給湯機は熱供給側・熱源水側ともに定流量で運転し、2次側の負荷変動は蓄熱槽で調整する。HP 給湯機は、整備や連続運転を避けるため1日に2時間の停止時間を設定している。停止時間は7:00~19:00の間に施設ごとに順に設けている。

既存の温泉施設については給湯需要量を全量ボイラで賄うとする。1次E消費量は給湯需要量をボイラ効率で除して算出する。搬送動力は熱源水NWを参考にし、施設・ネットワークの熱源水循環や熱融通、排湯熱回収に関するポンプを除外して1次E消費量を算出している。

4.3 ケース設定

表1~3に示す設定をCaseAとする。熱源水NWは源泉温度が低く分散している場合に、集中型熱供給システムは源泉温度が高く集中している場合に、一方のシステムより明らかに有利となるため、このような設定に関しては本研究から除外している。

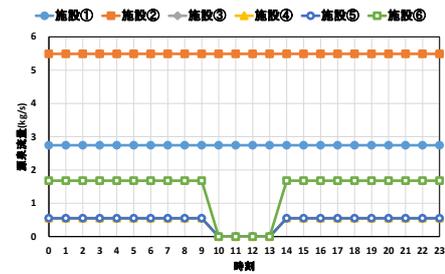


図8 各施設の源泉流量

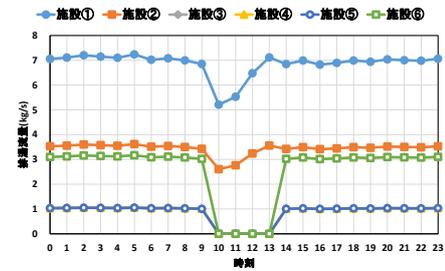


図9 各施設の排湯流量

表1 月別給湯需要量(GJ/day)

	4月	8月	10月	12月
給湯需要量	45.8	31.9	38.9	49.5

表2 熱源水NWの施設設定

施設	給湯需要量	購入源泉	源泉量	排湯量
単位	GJ/day	t/day	t/day	t/day
①	12.0	—	237	296
②	24.0	—	474	593
③	2.25	40.0	—	74
④	2.25	40.0	—	74
⑤	2.25	40.0	—	74
⑥	6.75	120	—	222
合計	49.5	240	711	1,333

表3 集中型熱供給システムの施設設定

施設	給湯需要量	源泉量	排湯量
熱源プラント	49.5GJ/day	951t/day	—

以下に、各ケースについて示す。熱需要量(給湯需要量+源泉加熱量)は全てのケースで同じとする。

■CaseA について

温泉未利用熱が熱需要量より過多の設定。他ケースと温泉未利用熱の変化によるエネルギー消費量を比較する。

■CaseB について

温泉未利用熱と熱需要量が同量の設定。CaseAの源泉・排湯量の67%とし、回収熱量の減少によるエネルギー消費量に及ぼす影響を把握する。

■CaseC について

温泉未利用熱が熱需要量より過少の設定。CaseAの源泉・排湯量の40%とし、回収熱量の減少によるエネルギー消費量に及ぼす影響を把握する。

5. システムシミュレーション結果 (源泉温度 52.5℃)

図 10 に CaseA の 1 次 E 消費量を示す。熱源水 NW の集中型熱供給システムに対する 1 次 E 消費量は給湯需要量が最も大きい 12 月に最大となり、17.6% の削減効果が、給湯需要量が最小である 8 月に 8.9% の増加となる。給湯需要量が小さい月において削減効果は小さくなり、HP の 1 次 E 消費量のみで比較した場合 9.4% の削減効果があるが、熱源水 NW では搬送動力が大きいため、システム全体の 1 次 E 消費量が增大する。4 月、10 月における削減効果は 13.5%、4% である。

図 11 に温泉熱採熱量・加熱量の関係を示す。各施設において施設内熱源水温度を基準とし、源泉・排湯からの採熱量と HP、上水予熱用 HEX での加熱量を把握する。施設内には HP、HEX に流入せず循環する熱源水があり、この熱源水の熱容量による熱損失が加熱量に含まれていない。加熱量に対する採熱量の割合は源泉を保有する施設で高くなり、保有しない施設で約 7% 小さくなる。全施設での加熱量に対する採熱量は概ね 8 割以上である。本システムは各施設を単一の配管で接続しており循環する熱源水温度が平均化されたため安定して熱の回収と融通が行われた。集中型熱供給システムは約 7 割となり、排湯からの熱回収を行っていないことが要因として考えられる。

図 12 に各ケースの 1 次 E 消費量を示す。熱回収できる熱量は源泉・排湯量が最も多い CaseA で最大であり、最も少ない CaseC で最小である。1 次 E 消費量は各月 CaseA で最小となる。12 月では CaseC が CaseA の 1 次 E 消費量の約 1.2 倍、8 月では約 1.1 倍となる。

HP 給湯機の COP は各月 CaseA で最も高く(12 月で COP4.56)、熱源水温度についても同様の挙動を示すので、源泉・排湯からの熱回収を進めることで 1 次 E 消費量を削減できることが確認された。

図 13 に既存システムとの比較を示す。既存システムに対し集中型熱供給システム・熱源水 NW は平均 25.5%、30.6% の削減効果があり、このことより各温泉熱利用システムの省エネルギー性が示された。

6. 本章のまとめ

複数の温泉熱源があり、施設での温泉熱利用による HP 給湯機の消費電力低減が図れる運転を最適であると考え、熱源水 NW を構築した結果を以下に示す。

- (1) 集中型熱供給システムに対し 8 月以外で省エネルギー効果を確認。12 月は 17.6% の削減効果がある。
- (2) 単一配管を用いたシステムにより熱源水温度が平均化され各施設 8 割以上の温泉熱回収が可能。
- (3) 12 月で温泉未利用熱の減少により CaseC は CaseA より 1 次 E 消費量が約 20% 増大する。

[あとがき]この成果は独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の委託業務の結果得られたものです。

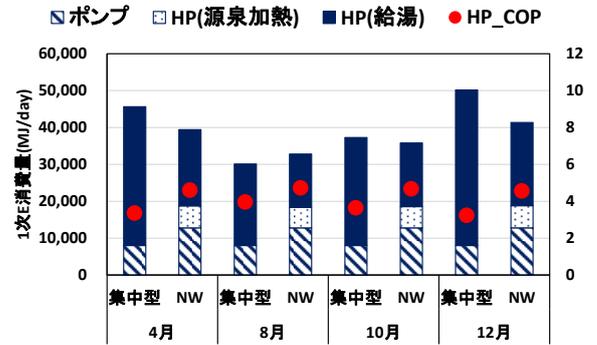


図 10 1 次エネルギー消費量_CaseA

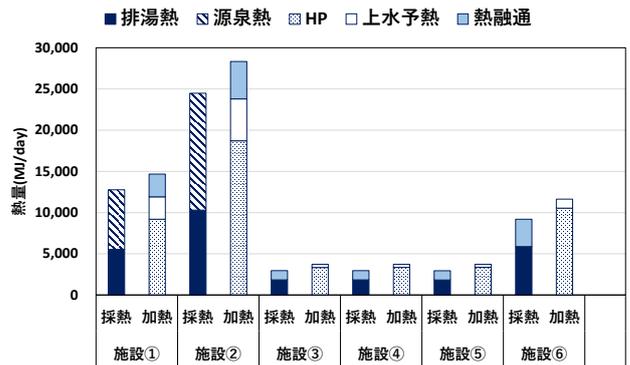


図 11 温泉熱採熱量と加熱量の関係

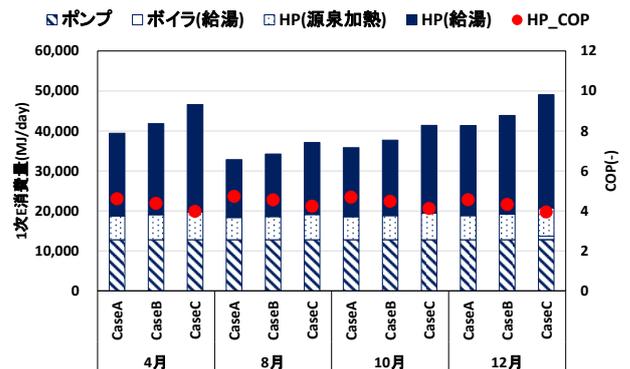


図 12 各ケースの 1 次エネルギー消費量

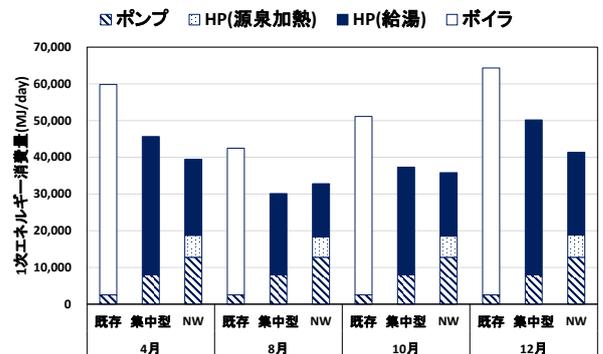


図 13 既存システムとの比較(CaseA)

- 1) 澤部孝一ほか「温泉と排湯を利用した熱源水ネットワークシステムの構築 (第 3 報) システム導入による地域全体でのエネルギー消費量削減効果の検討」
空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集第 10 巻 2016 年 9 月
- 2) 康尚義ほか「温泉と排湯を利用した熱源水ネットワークシステムの構築 (第 2 報) 宿泊施設の温泉・給湯需要および排湯温度に関する実測調査」
空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集第 10 巻 2016 年 9 月