

温泉未利用熱の面的利用システムに関する研究

-熱源水ネットワークシステムと集中型の熱供給システムの導入効果の比較-

STUDY ON AREA-WIDE UNUSED HOT SPRING HEAT UTILIZATION SYSTEM -COMPARISON OF INTRODUCTION EFFECTS BETWEEN HEAT SOURCE WATER NETWORK SYSTEM AND HEAT SOURCE PLANT SYSTEM-

地域環境計画分野 終本 一成

Division of Regional Environmental Planning Kazunari HIRAGIMOTO

現在、温泉が豊富な地域において温泉熱の面的利用が着目されている。本研究では温泉・排湯熱を利用した熱源水ネットワークシステムを提案し、既存の面的利用システムである集中型の熱供給システムと導入効果の比較を温泉熱の利用量を変化させた複数の条件で行った。結果として本研究でシミュレーションした全ての温泉熱利用量条件において熱源水ネットワークシステムは集中型の熱供給システムに対して一次エネルギー消費量の削減効果があることが確認された。

Recently area-wide unused hot spring heat utilization system is thought to contribute energy reduction for hot water supply. In this study, we proposed a heat source water network system utilizing hot springs heat and drainage heat, and compared introduction effects under multiple conditions between heat source water network system and heat source plant system which is the existing area-wide unused hot spring heat utilization system. As a result, it was confirmed that the heat source water network system has larger effect of reducing the primary energy consumption than the heat source plant system under all winter conditions simulated in this study.

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。設備面では、給湯用に化石燃料を用いたボイラーを使用している場合が多く、高効率のヒートポンプ(以後「HP」)を用いた給湯システムもあまり普及していない。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に大気への放熱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。

1.2 研究目的

本研究では温泉熱(源泉および排湯の熱)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、温泉熱の新たな面的利用方法として「熱源水ネットワークシステム(以後「熱源水 NWS」)」を提案し、既存の面的利用システムである「集中型の熱供給システム」と導入効果を比較する。本研究では熱源水 NWS と集中型の熱供給システム、温泉熱利用を行わない「個別給湯システム」のモデルを構築し、給湯熱需要量に対する温泉熱利用量(以後「温泉熱比」)を変えた場合の3つのシステムの一次エネルギー消費(以後「PEC」)とシステム COP の比較を行う。

1.3 各システムの導入を検討する街区

本研究ではある街区に各システムを導入した際の導入効果を比較する。その街区(図1)には10軒の温泉宿がある。10軒の宿は大規模の温泉宿と小規模の温泉宿の2種類あり、それぞれ5件ずつ存在している。大規模温泉宿は源泉を所有し、小規模温泉宿は源泉を持たずに温泉組合から源泉を購入しているものとする。10軒の宿は街区に350mに等間隔で並んでいる。また給湯熱需要量は給湯熱需要量原単位¹⁾に各宿の延床面積(大規模温泉宿11,500m²、小規模温泉宿2,160m²)を乗じて算出している。本研究では年間を通じて給湯熱需要量が最も大きい冬期の検討をおこなう。

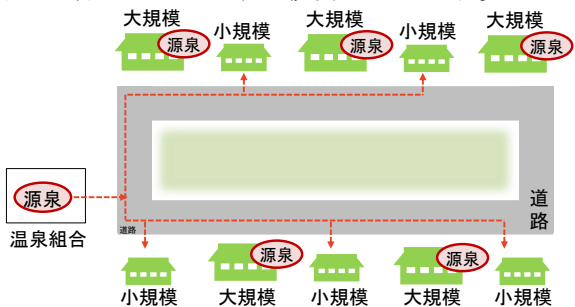


図1 システムを導入する街区

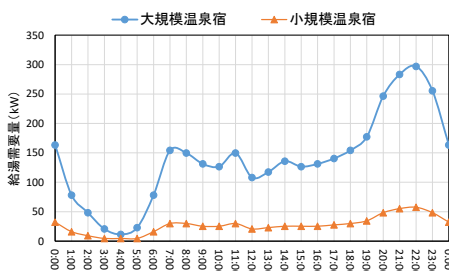


図2 1日の給湯熱需要量の推移(冬期)

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

熱源水NWSは温泉地域において複数の温泉施設を基幹ネットワーク配管(以後「基幹NW」)で接続し、温泉・排湯と熱交換した熱源水を循環させ各施設に融通し、熱源機器の熱源として利用するシステム(図3)である。大規模温泉宿内のシステム(図4)は排湯熱を回収する排湯用熱交換器、水を熱源に温水を生成するHP、源泉熱を回収する源泉用熱交換器、施設内配管に流れる熱源水を用いて上水を予熱する上水加温用熱交換器、基幹NWと熱授受を行う熱交換器をループ配管(以後「施設内配管」)で接続して構成されている。小規模温泉宿内のシステム(図5)は大規模温泉宿内から源泉用熱交換器を除いたシステムである。温泉熱は各施設内での利用を優先し、余剰分を基幹NWに供給することを基本とする。尚、本研究における「施設内配管温度」とは基幹NWと熱授受を行う前の施設内配管の熱源水温度とする。

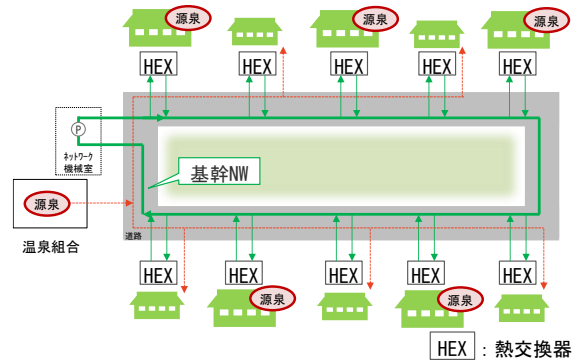


図3 街区に熱源水NWSを導入した場合

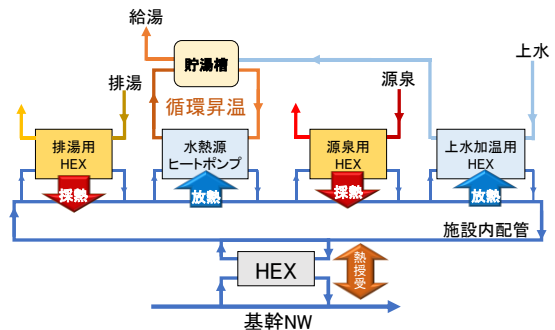


図4 大規模温泉宿の施設内配管

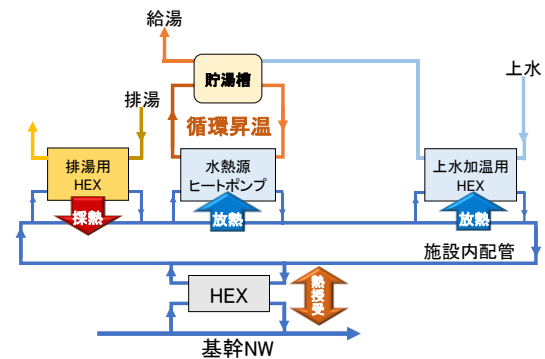


図5 小規模温泉宿の施設内配管

2.2 集中型の熱供給システムの概要

このシステムは、複数の温泉施設が建ち並ぶ地域において1ヶ所(または数ヶ所)に熱源プラントを設け、高温源泉から得られる熱で上水を加熱し、温泉と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と、エネルギーの有効利用・安定供給、設備の経済性向上、大気汚染の防止などのメリットがある。地域の源泉採取箇所が集的な配置で、源泉温泉熱利用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の熱供給システムの温泉熱利用が挙げられる。

本研究における集中型の熱供給システムでは、プラントから源泉を持たない小規模温泉宿に温泉を供給するとともに、給湯用の60℃温水を供給する。本システムでは各宿の給湯熱需要をプラントに設置されたHPのみで賄うことができない場合を想定し、補助熱源として重油を用いたボイラーを使用する。また、温泉組合のプラント内の源泉は、小規模温泉宿の温泉需要を満たす十分な湯量があるものとする。

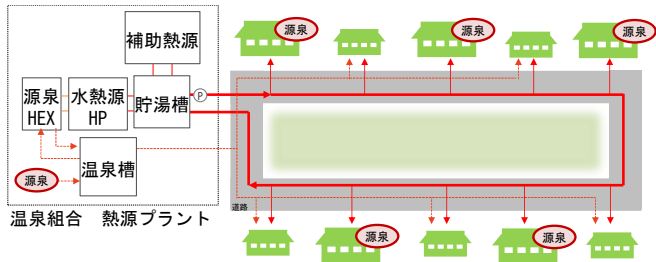


図 6 街区に集中型の熱供給システムを導入した場合

2.3 個別給湯システムの概要

本システムはここまで紹介したシステムのような源泉の熱利用は一切せず、各宿の給湯熱需要量をボイラーのみで賄うシステムとする。

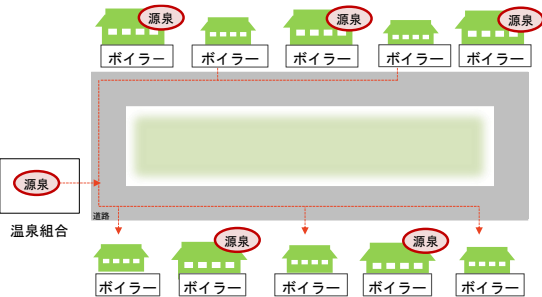


図 7 街区に個別給湯システムを導入した場合

3 ベースモデルの与条件

康らが行った実測調査²⁾で得た群馬県の温泉宿の源泉流量、温度等を境界条件として熱源水 NWS と集中型の熱供給システムのモデルに与え、そのモデルを「ベースモデル」とする。ベースモデルの街区では大規模温泉宿と小規模温泉宿が交互に並んでいるものとする。実測調査は群馬県のある大規模の温泉宿と小規模の温泉宿で行われ、それらを基にベースモデルの与条件である源泉・排湯・上水の流量や温度を決定する。

前述の実測結果より、熱源水 NWS のベースモデルでは熱利用する源泉流量は大規模温泉宿一軒当たり 2.7kg/s とする。集中型の熱供給システムでも熱利用する源泉流量を等しくするため、プラントで熱利用する源泉流量を 2.7kg/s×5=13.5kg/s とする。源泉温度と排湯温度はそれぞれ 53℃と 38℃一定、上水温度は 10℃一定とする。排湯流量はそれぞれの宿で図 8 のような日変動を与える。

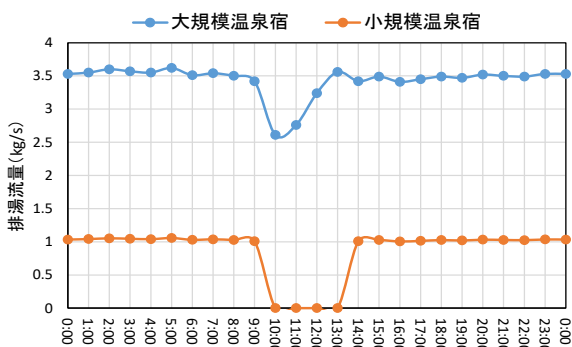


図 8 1日の排湯流量の推移 (実測結果²⁾)

表 1 ベースモデルの境界条件

	熱源水NWS		集中型の熱供給システム
	大規模温泉宿	小規模温泉宿	
源泉温度	53℃	53℃	53℃
源泉流量	1軒あたり2.7 kg/s 2.7 kg/s × 5軒 = 13.5 kg/s	熱利用しない	13.5 kg/s
排湯温度	38℃	38℃	38℃
排湯流量	右図より		熱利用しない
上水温度	10℃	10℃	10℃

4 各システムの制御

4.1 熱源水 NWS の基幹 NW と施設内配管の熱授受

施設内配管と基幹 NW 間の熱授受はそれぞれの温度 (図 9 の T_1, T_2) の差の絶対値が 3℃以上になると熱授受を行う制御となっている。また、熱授受を行う状態から T_1 と T_2 の温度差が 1℃を下回ると熱授受を停止する。

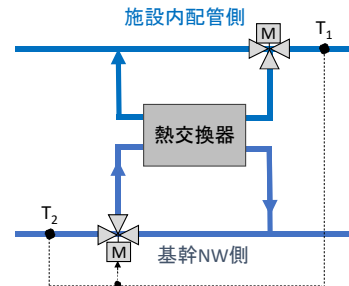


図 9 基幹 NW と施設内配管間のシステム図

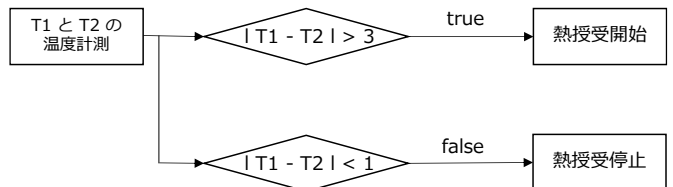


図 10 基幹 NW と施設内配管間の制御フロー図

4.2 集中型の熱供給システムの補助熱源起動制御

補助熱源となるボイラーは貯湯槽内の温水が 60℃以下になった場合に稼働するような制御を設けている。また、貯湯槽内温水が 60℃以下になった場合は更にボイラーの出湯温度が 75℃となるようボイラーの負荷を調整する PID 制御でボイラーを稼働させる。

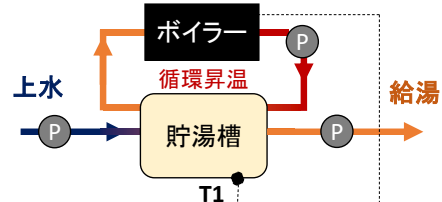


図 11 補助熱源のシステム図

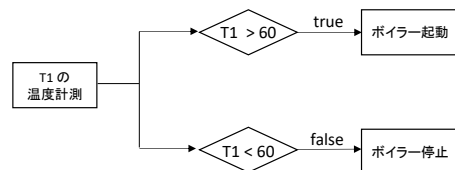


図 12 補助熱源の制御フロー図

5 シミュレーションツール

物理モデリングツール Dymola® 上に、制御システムを含めた給湯システムを構築し、1次元非定常シミュレーションを行う。以下にシステムを構築する機器類のモデル概要を示す。

5.1 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 5.2)

■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。

5.2 水熱源 HP 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・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可能な実在する水熱源 HP 給湯機を選定し、運転時の COP と消費電力の関係性をメーカーから入手した。図 13 にメーカー資料と同条件で運転した場合の熱源水入口温度と COP の関係性を示す。熱源水入口温度と 5~20°C の範囲で概ね一致していることが確認された。

$\eta_{PL} = COP / COP_{Carnot} / \eta_{Carnot,0}$	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)

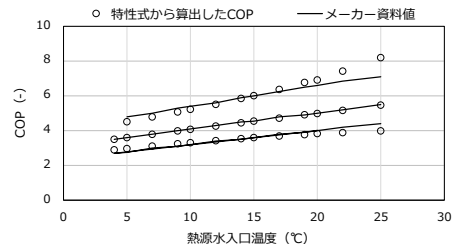


図 13 HP の熱源水入口温度と COP の関係

6 ベースモデルのシミュレーション結果

熱源水 NWS と集中型の熱供給システムのベースモデルのシミュレーション結果を示し、各システムの制御等の動作確認を行う。

6.1 熱源水 NWS のベースモデル

図 14 に大規模・小規模温泉宿の施設内配管温度と基幹 NW 温度の推移を示す。熱源水 NWS の大規模温泉宿と小規模温泉宿との間の熱授受を確認する。各宿の図 15~図 20 に示す熱収支は施設内配管へ入る熱(源泉や排湯からの熱量等)を正の値で示し、施設内配管からの出る熱(HP や上水加温等)を負の値で示す。熱収支で示す値は施設内配管に係る各熱交換器の交換熱量と HP の熱源水側交換熱量である。図 15~図 20 に示す文字の定義は表 2 に示す。給湯熱需要量が小さい 7:00 では施設内配管温度と基幹 NW が 40°C 程度まで上昇したため、どちらの宿も 38°C の排湯からの放熱は無かった。また、図 15 図 16 より大規模温泉宿は基幹 NW に放熱し、小規模温泉宿は基幹 NW から熱を得ているという関係が確認された。12:00 の熱収支ではどちらの宿も 7:00 に対して給湯負荷が大きいため、 Q_{HP} が大きくなったことで施設内配管温度が低下し、排湯からの放熱が生じていた。大規模温泉宿では 7:00 の Q_{HS} よりも 12:00 の Q_{HS} が大きくなっていった。小規模温泉宿では、10:00~14:00 に小規模温泉宿では排湯からの放熱はないため(図 8) Q_{NW} が大きくなっていった。23:00 の熱収支ではどちらの宿も Q_{NW} が 0kW となっていた。この時間帯は給湯熱需要量が大きく、どちらの宿も源泉や排湯からの放熱のみで給湯熱需要を賄っていることが確認された。

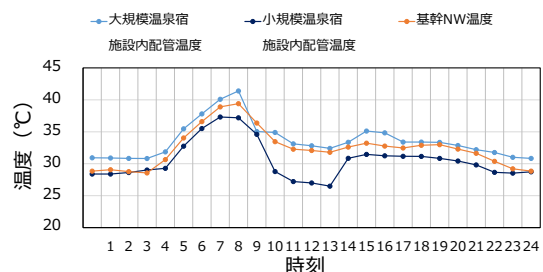


図 14 大・小規模の施設内配管温度と基幹 NW 温度

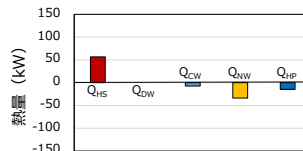


図 15 大規模温泉宿の 7:00 の熱収支

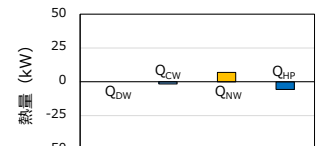


図 16 小規模温泉宿の 7:00 の熱収支

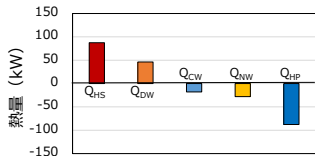


図 17 大規模温泉宿の 12:00 の熱収支



図 18 小規模温泉宿の 12:00 の熱収支

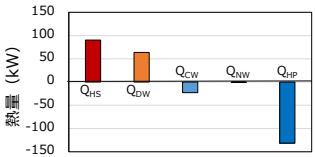


図 19 大規模温泉宿の 23:00 の熱収支

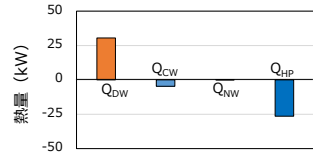


図 20 大規模温泉宿の 23:00 の熱収支

表 2 熱収支の文字の定義

Q_{HS}	: 源泉からの放熱量 (正)
Q_{DW}	: 排湯からの放熱量 (正)
Q_{CW}	: 上水加温HEXへの放熱量 (負)
Q_{HP}	: ヒートポンプの消費熱量 (負)
Q_{NW}	: 基幹NWの熱授受
	基幹NWから施設内配管への熱移動 (正)
	施設内配管から基幹NWへの熱移動 (負)

6.2 集中型の熱供給システムのベースモデル

集中型の熱供給システムの補助熱源起動制御が 4.2 で示した条件に従って作動しているか確認する。図 21 と図 22 よりタンク内温度が 60°C程度まで下がった際にボイラーが起動し、60°Cから再び温度が上昇していることが分かる。

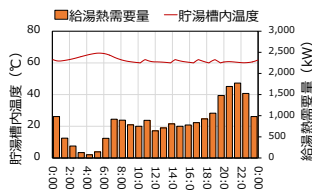


図 21 貯湯槽内の温水温度の推移

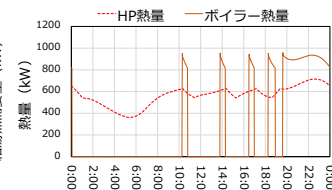


図 22 ボイラーの熱量の推移

7. 温泉の利用熱量変えた条件でのシミュレーション

給湯熱需要量に対する温泉熱利用量の比率(以後「温泉熱比」とする)を変えた条件でシミュレーションを行う。目的は以下の 2 点である。

(目的1) 温泉熱比を変えた条件の熱源水 NWS の PEC、システム COP を比較

(目的2) 温泉熱比を変えた条件の 3 つのシステムの PEC とシステム COP 比較

$\alpha = Q_H / Q_d$ 式 6	
α : 温泉熱比 (-)	Q_H : 温泉熱利用量 (kW)
Q_d : 給湯熱需要量 (kW)	

7.1 温泉熱比を変えた条件一覧

温泉熱比 (給湯熱需要量に対する温泉熱の比率) を変えた条件の一覧を表 3 に示す。条件名は Case①~⑤となっており、各 Case の熱源水 NWS と集中型の熱供給システムの源泉の利用熱量は同じで、①から⑤にかけて各 Case の源泉利用熱量が小さくなる。Case④がベースモデルとなっている。各 Case で熱利用する排湯と源泉の流量が異なる。表 3 に示す「源泉」は源泉の利

用熱量を示し、式 6 に示す式によって決定する。この時、源泉温度 T_s を 53°C、熱利用し終えた源泉温度 (源泉基準温度) $T_{s,0}$ は 45°C とする。源泉流量 G_s を決定すると源泉利用熱量 Q_{Ps} が導出できる。各 Case のモデルには $T_{s,0}$ が 45°C となるように制御を設けている。表 3 に示す「排湯」は排湯の利用熱量を示し、式 7 によって計算する。この時、排湯温度 T_d は 38°C、排湯基準温度 $T_{d,0}$ は 33°C とする。排湯流量 G_d を決定すると排湯利用熱量 Q_{Pd} が導出できる。また、各 Case で温泉熱比を変化させる際に G_s と G_d の比がベースモデルと同じになるように変化させている。 $T_{d,0}$ に制御は設けていないため、熱利用温度差を 5°C と仮定して排湯利用熱量を計算している。ただし、各 Case の施設内配管の温度によって排湯利用熱量は変化するため、シミュレーション結果の排湯利用熱量は異なると考えられる。

表 3 シミュレーション条件

	熱源水NWS			集中型の熱供給システム			給湯熱需要量 [GJ/day]
	利用可能な温泉熱 [GJ/day]		温泉熱比	利用可能な温泉熱 [GJ/day]		温泉熱比	
	源泉	排湯		源泉	排湯		
Case①	5.1	15.8	1/3.5	5.1	-	1/14	71.2
Case②	8.7	18.5	1/3	8.7	-	1/8.2	71.2
Case③	21.7	20.8	1/2	14.5	-	1/5	71.2
Case④	39.1	40.7	1	39.1	-	1/1.8	71.2
Case⑤	57.9	54.5	1.5	57.9	-	1/1.2	71.2

$Q_{Ps} = C \cdot G_s \cdot (T_{s,1} - T_{s,0})$ 式 7	
$Q_{Pd} = C \cdot G_d \cdot (T_d - T_{d,0})$ 式 8	
Q_{Ps} : 源泉利用熱量(kW)	C : 比熱[kJ / (kg · K)]
G_s : 源泉流量(kg/s)	$T_{s,0}$: 源泉基準温度(°C)
T_s : 源泉温度(°C)	Q_{Pd} : 排湯利用熱量(kW)
G_d : 排湯流量(kg/s)	$T_{d,0}$: 排湯基準温度(°C)
T_d : 排湯温度(°C)	

7.2 目的 1 のシミュレーション結果

熱源水 NWS の各条件のシステム COP と PEC のシミュレーション結果を図 23 に示す。シミュレーションは年間を通じて給湯負荷の大きい冬期のある 1 日で行った。図 23 より、温泉利用熱量が大きさに比例してシステム COP が大きくなることが確認された。温泉熱比が 1/3 以下になると施設内配管温度の低下により、システム COP が 1.0 を下回ることがわかった。

■ HP □ 補器動力 ○ 日平均施設内配管温度 ● システムCOP

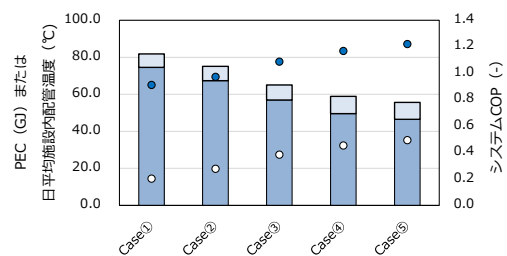


図 23 熱源水 NWS の各条件のシステム COP

7.3 目的 2 のシミュレーション結果

図 24~図 28 より温泉熱比が大きくなるに伴って 2 つのシステムに対する熱源水 NWS の PEC 削減量が高くなることが確認された。これは熱源水ネットワーク

システムが集中型の熱供給システムに対して源泉だけでなく、排湯の熱も利用できることに起因する。温泉熱比が最も小さい Case①では熱源水 NWS の PEC の削減量は集中型の熱供給システムに対して 5.2%、個別給湯システムに対しては 2.1% となった。温泉熱比が最も大きい Case⑤では熱源水 NWS の PEC の削減量は集中型の熱供給システムに対して 19%、個別給湯システムに対しては 33.4% となった。

図 24 と図 25 より温泉熱比が 1/3 以下の場合には集中型の熱供給システムと個別給湯システムのシステム COP にあまり差が生じなかった。Case①と Case②の集中型の熱供給システムでは熱需要量のほとんどを補助熱源であるボイラーで賄っていたため、このような結果になった。また、集中型の熱供給システムの場合は更に補器動力の数が個別給湯システムよりも多い為、PEC は個別給湯システムに比べて集中型の熱供給システムの方が大きくなっている。

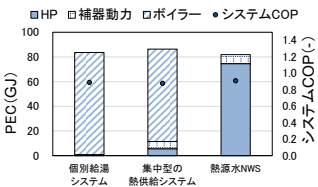


図 24 Case①の場合

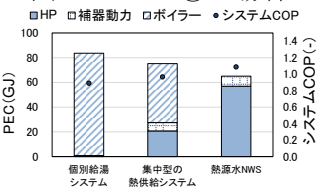


図 25 Case②の場合

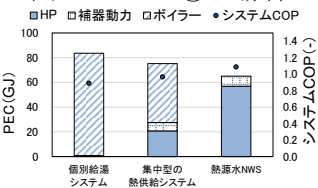


図 26 Case③の場合

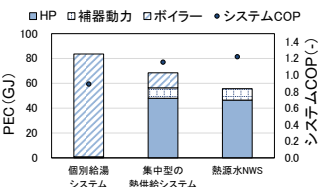


図 27 Case④の場合

図 28 Case⑤の場合

8 熱源水 NWS の宿位置の変化による HP の COP

熱源水 NWS を導入する街区において小規模温泉宿と大規模温泉宿の並び方によってシステム COP や各宿の HP の COP に変化が見られるのか検証。並び方は大規模温泉宿と小規模温泉宿が「交互」に配置される場合(図 29)または規模ごとに「集中」している場合(図 30)のモデルを構築してシミュレーションを行う。

シミュレーションを行うモデルはベースモデルである。小規模温泉宿と大規模温泉宿を交互に配置した条件を「交互」、規模ごとに集中させた条件を「集中」とする。図 32 より、交互に配置する場合は大規模と小規模の宿が交互に並んでおり、大規模温泉宿を通過した基幹 NW 内の熱源水は 0.2°C 程度上昇し、小規模温泉宿を通過した後は 0.2°C 程度低下するという傾向が見られた。一方、図 33 より集中させる場合は

大規模温泉宿が集中する部分では 0.3°C 上昇し、小規模温泉宿が集中する部分で 0.7°C 低下することがわかった。ただこれらの 1°C 未満の基幹 NW の温度差が各宿の HP の COP に与える影響は少なく、各宿の一日の HP の COP の平均値は 3.7~3.8 であった。従って今回の熱源水 NWS の流量条件では熱源水ネットワークシステムのベースモデルにおける宿位置による各宿の HP の COP の偏差はほとんどないということがわかった。

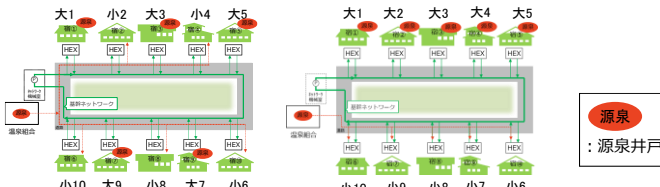


図 29 温泉宿の並び方「交互」

図 30 温泉宿の並び方「集中」

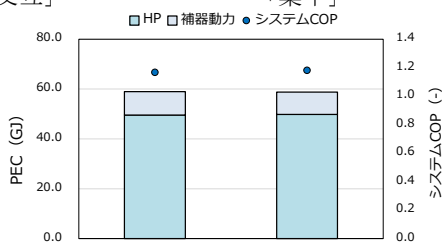


図 31 PEC とシステム COP 比較

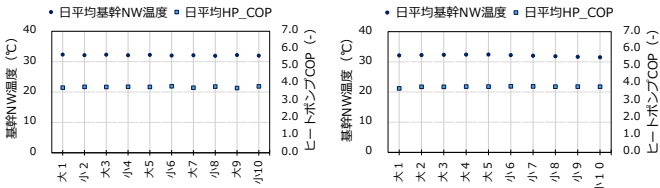


図 32 「交互」の各宿間の日平均基幹 NW 温度

図 33 「集中」の各宿間の日平均基幹 NW 温度

9 本研究のまとめ

本研究で得られた知見を以下に示す。

- (1) 熱源水 NWS では温泉の熱利用量の増加に伴って各宿の施設内配管温度が上昇し、PEC が削減され、システム COP が増加する。
- (2) 冬期では本研究でシミュレーションした全ての温泉熱比条件において熱源水 NWS は集中型の熱供給システムと個別給湯システムに対して PEC の削減効果がある。
- (3) 今回の熱源水 NWS の流量条件では熱源水 NWS を導入する街区において宿の並び方による各宿のヒートポンプの COP の変化はほとんど生じない。

[参考文献]

- 1) 都市ガスコージェネレーションの計画・設計と運用
発行所：公益社団法人 空気調和・衛生工学会
平成 27 年 3 月 25 日(初版第 1 刷発行)
- 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