

第6回 下水熱利用推進協議会 情報提供

【NEDO次世代型ヒートポンプシステム研究開発】 都市域における下水管路網を活用した 下水熱利用・熱融通技術

＜公立大学法人大阪市立大学, (株)総合設備コンサルタント, 中央復
建コンサルタンツ(株), 関西電力(株), 三菱重工業(株), (株)NTTファシリ
ティーズ総合研究所, (株)トヨックス＞

研究開発期間:平成22年7月1日～平成26年2月28日

平成26年11月11日

1. 研究概要

(1) 背景と課題

下水熱利用の動向と課題

全国の下水熱利用プラント

処理水の熱利用は処理場周辺に縛られる

未処理水の熱利用

盛岡駅西口: 大規模

後楽一丁目: 大規模

幕張: 大規模

品川: 大規模

東京都内 所内利用 11

名古屋市内 所内利用 6

下水熱利用におけるわが国の現状は、利用箇所が**処理場とその周辺**に限定的。→以下のような課題がある。

- ・ 大規模なシステムは、下水処理施設に近接した熱需要地に限定
- ・ 小規模なシステムでは、処理場内での利用にとどまる
- ・ 夾雑物対策、バイオフィルム対策
- ・ 耐食性の高い機器や材料の使用
- ・ 悪条件下でも高性能な熱交換器
- ・ 下水利用は下水道事業者に限定
- ・ **管路網を対象とした簡易・低コスト手法が未開発**
- ・ 大規模なケースでは、熱輸送管（冷温水管）が長くなるほど、管路敷設費と管路からの熱ロスの増大

**国内では、下水熱利用の普及が行き詰っている。
下水管路の途中から熱回収を行うシステムの開発が重要！**

海外の下水熱利用の動向

処理水を熱源とするもの

- ・ドイツなどで多数(20年前から)
- ・大型のシステムはドイツ・スイスの他、ルウェー・カナダなどで採用されている。システム自体はわが国のものと大差ない。
- ・家庭排水から熱回収する小規模なものは欧州各地で散見

未処理水を熱源とするもの

- ・ドイツ・スイスでは下水管路から直接熱回収を行うタイプが多数採用、導入事例が増えている。
- ・ドイツ・スイスを中心に**110地点への導入**(計画中含め)が判明
- ・現在は、**未処理水からのコンパクトな直接排熱回収システム**任意地点の下水管路から地域の排熱を回収利用可能に(容量は200~1000kW程度/2005年代頃から開発)が**主流**に

スイス
80地点

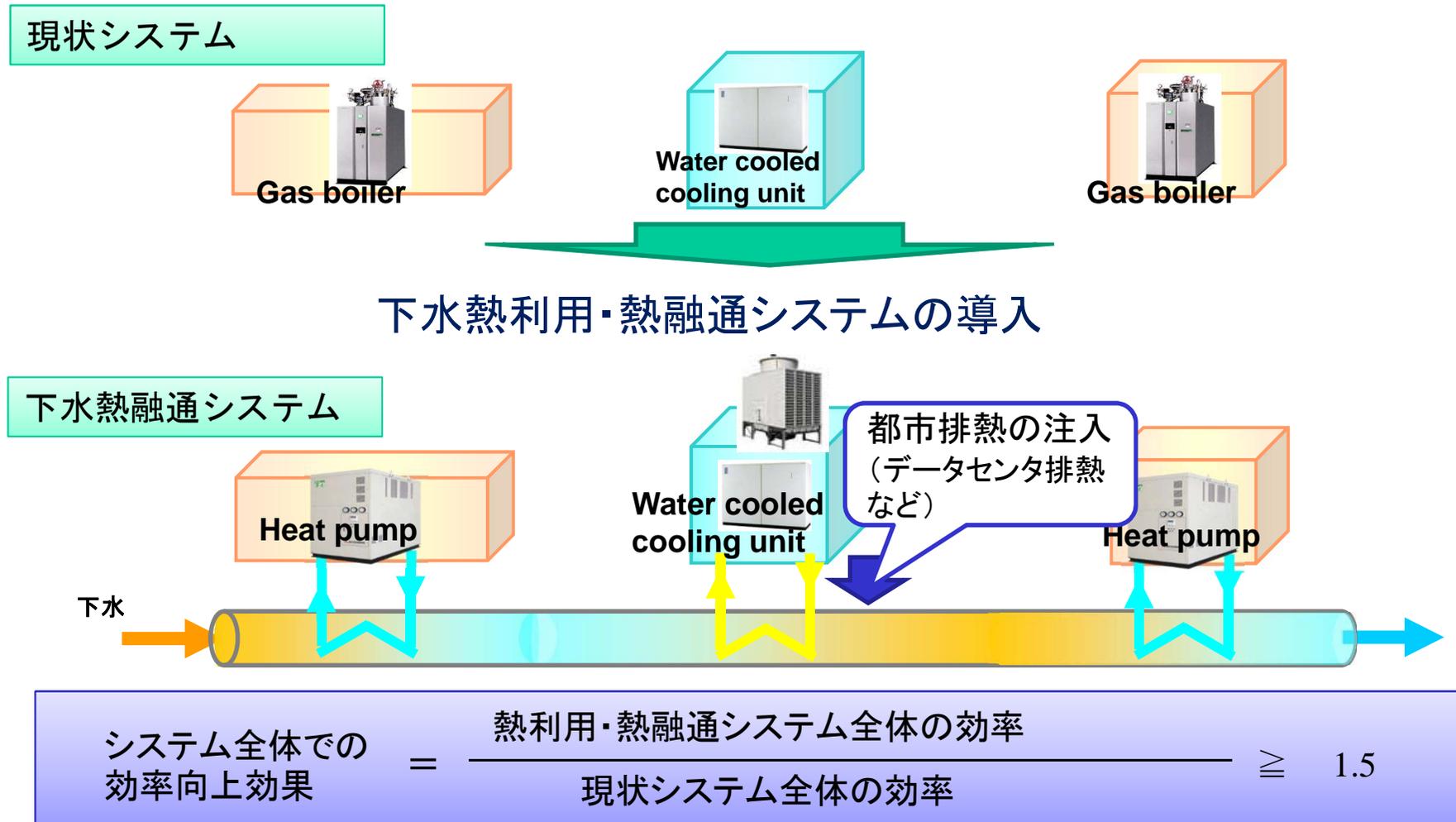
ドイツ
30地点

様々なタイプの管内設置型熱交換器

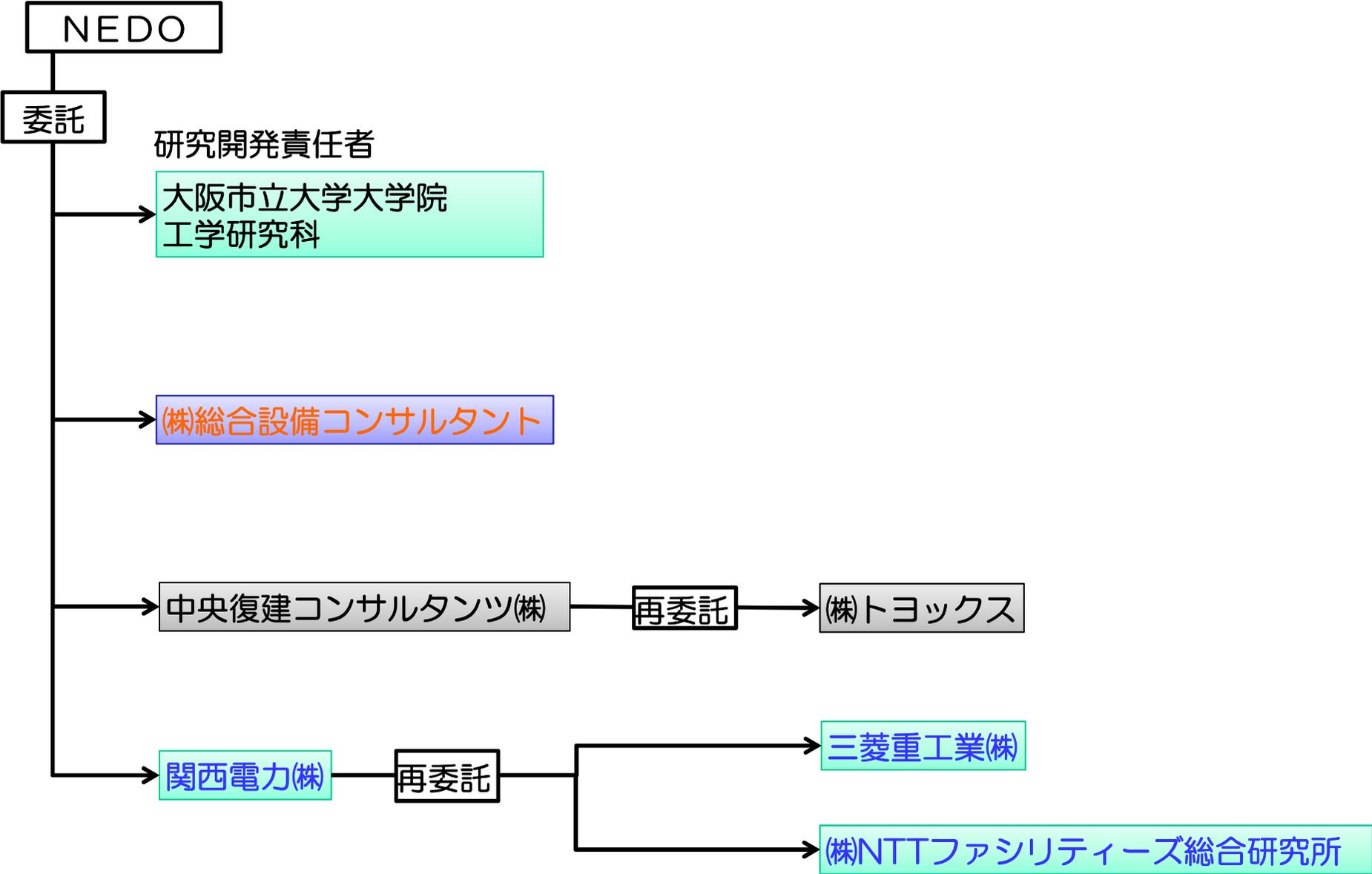
海外では下水管路における下水熱利用の導入が進みつつあるが、低コスト化が課題！

(2) 目的

下水熱利用技術開発とともに、下水熱利用・熱融通の企画計画手法を開発する。
ボイラによる加熱システムと比較して、一次エネルギー換算効率を1.5倍以上となることを実証する。

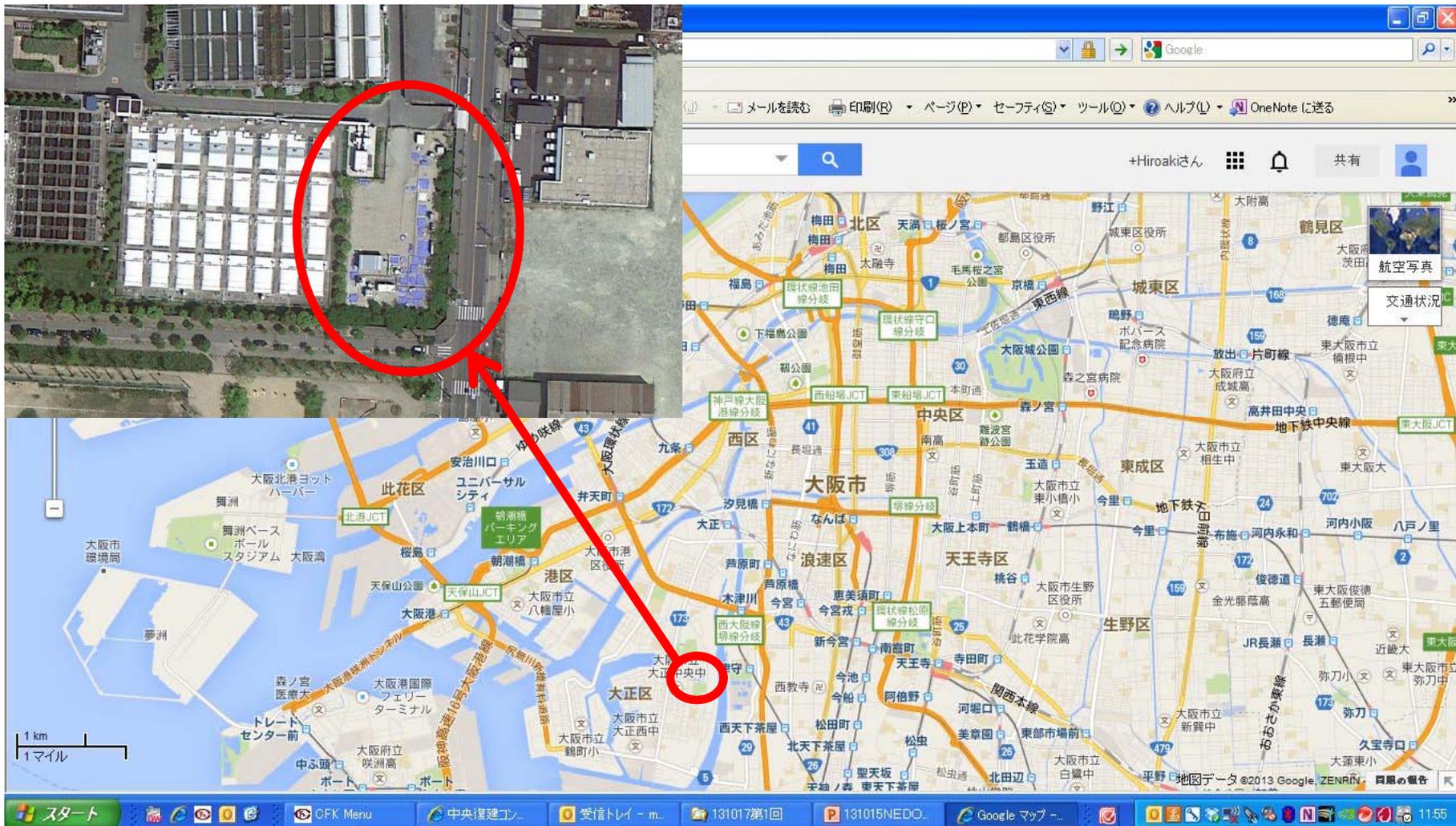


(3) 研究開発体制



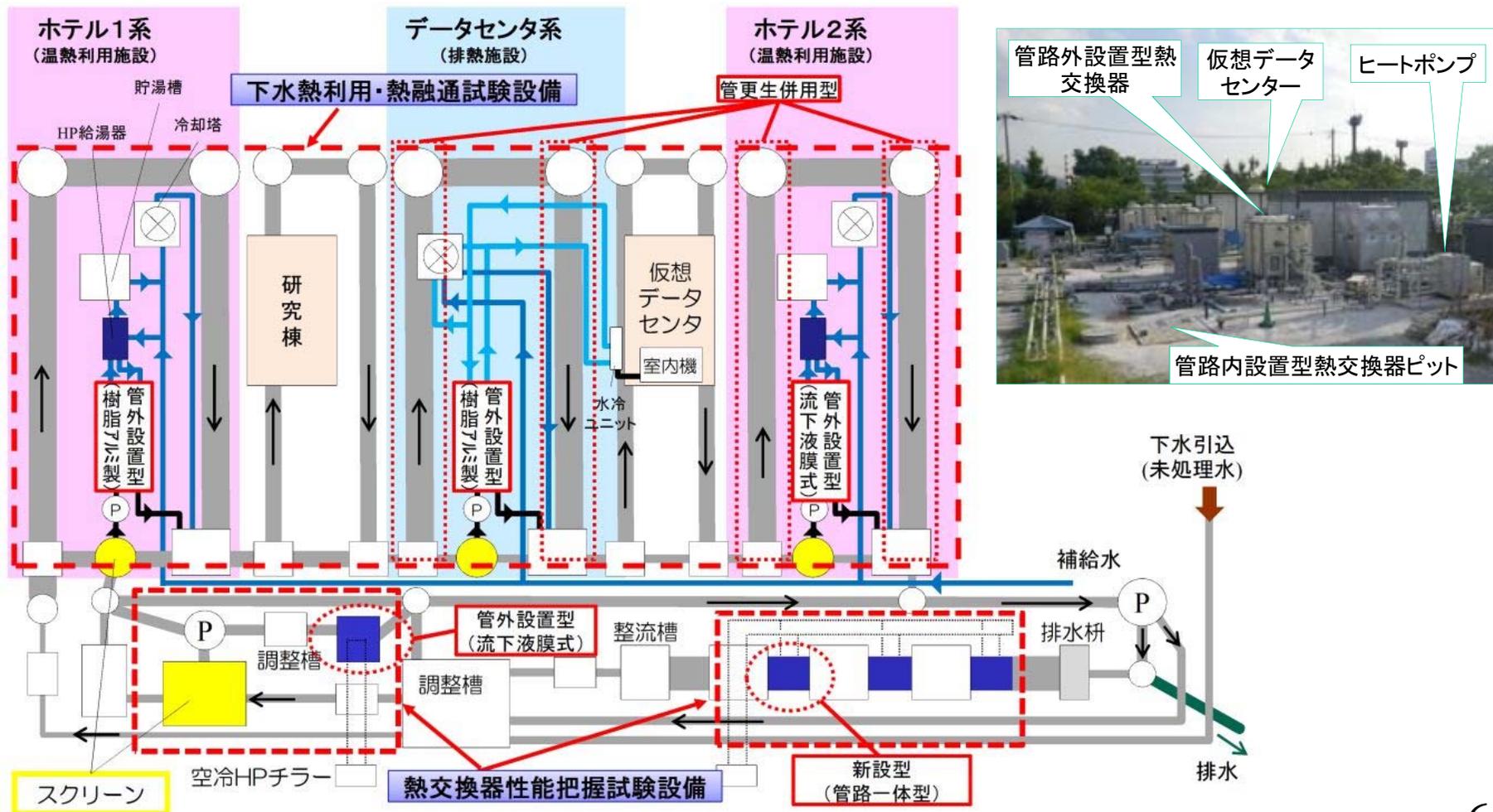
(4) 実環境試験

- 大阪市千島下水処理場(大阪市大正区)において未処理下水を用いた実環境試験を実施



(4) 実環境試験

- 大阪市千島下水処理場(大阪市大正区)において未処理下水を用いた実環境試験を実施



2. 個別技術の研究開発

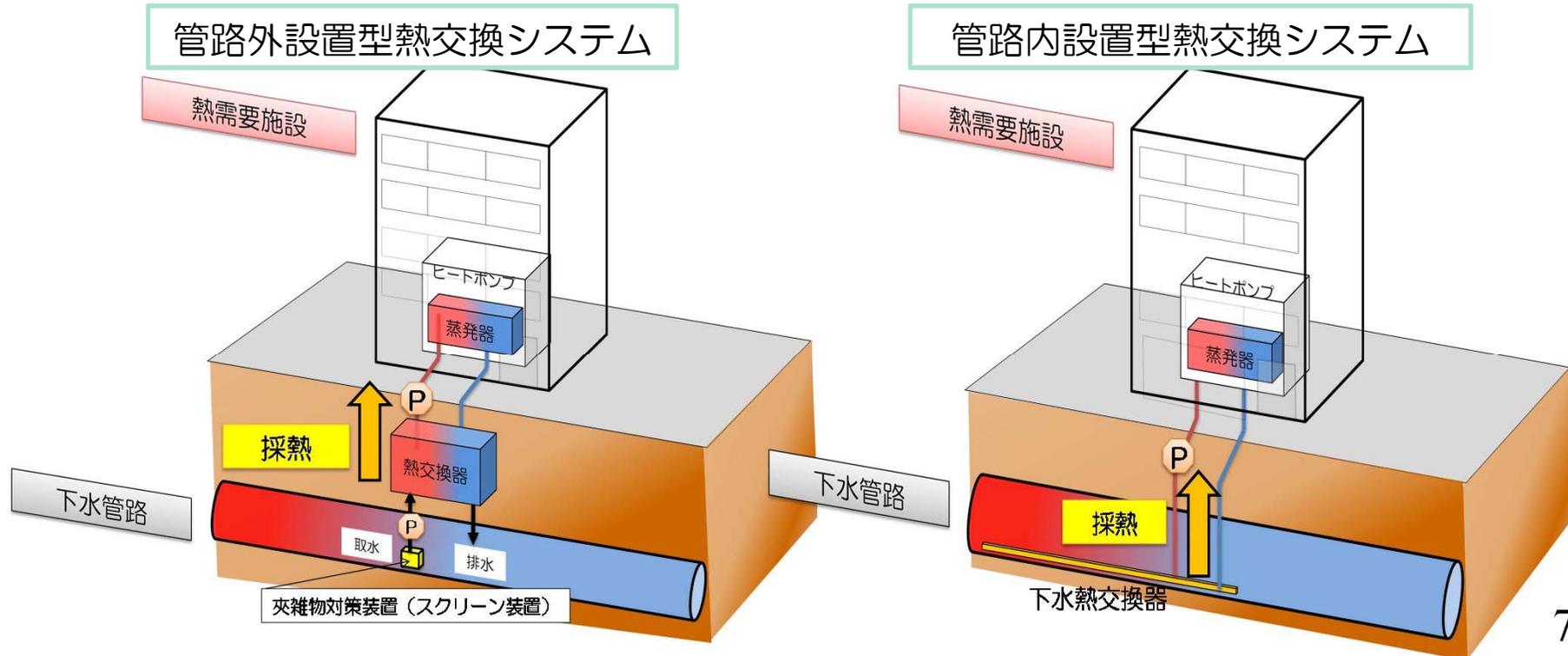
(1) 機器開発について

① 熱交換器

- ・管路外設置型熱交換器：海外品と比べ低コストの流下液膜熱交換器を開発、二重管熱交換器の初期性能、性能低下特性、洗浄による性能回復特性を把握
単管実験により、下水流速、温度等による熱伝達率低下特性を把握
- ・管路内設置型熱交換器：既製のステンレス円管と高分子材料のU字管、接合管を用いて、下水管内で組立てる熱交換器により低コスト化が可能となった。

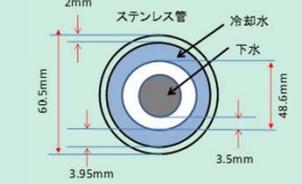
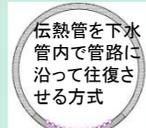
② 夾雑物対策装置：下水管内に夾雑物を残す方式により低コスト化できた。

③ ヒートポンプシステム：低圧縮比でCOPの高いヒートポンプの優位性を実証した。



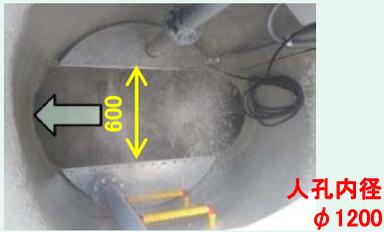
(2) 熱交換器の開発成果

設置条件を考慮した様々な導入シナリオに対応する熱交換器を試作し、未処理下水試験により初期性能および汚れによる性能低下を計測し、水温・水質・流速などと性能低下との関係を明らかにした。また洗浄条件と性能回復との関係を明らかにした。導入検討するシステムにおいて、最適な方式を選択する必要があるが、管路外設置型では流下液膜式熱交換器、管路内設置型では管路底部設置型(並列型)の性能(熱通過率)が高い。

分類		管路外設置型			管路内設置型		
熱交換器方式		樹脂+アルミ	流下液膜式	二重管式	管路底部設置型	管路一体型(樹脂)	
外観写真							
流速条件		熱源水側:0.25m/s 下水側 :0.10m/s	熱源水側:2.7 m/s 下水側 :0.52 kg/(m・s) 	熱源水側:0.75 m/s 下水側 :1.0 m/s 	下水断面流速:0.3m/s 熱源水流速: 並列型 2.8m/s 直列型 1.4m/s  	熱源水側:0.24m/s 下水側 :0.13m/s	
熱通過率 (W/m ² ・K)	①	180	2000	800	並列型 850	直列型 800	120
	②初期性能	120	1300(120h経過時)	350(120h経過時)	350	280	100
	③生物膜成長後	180	1700	650	600	400	—
洗浄方法		散水:配管単位長さ当りの流量0.52(L/min・m)	流量1.0 kg/(m・s)の下水により3分間継続	流速1.5m/sの工業用水により5分間継続	約1分間流速を0.9m/sに上昇させる		洗浄しない
熱通過率用伝熱面積の定義		熱交換コイル外径基準(下水との接触面)	熱源水伝熱管外径基準(下水との接触面)	下水管内径基準(下水との接触面)	熱交換器と下水との接触面(外径の上半分)		熱源水が流れているリブ部分の下水接触面

(3)スクリーンの開発成果

- ・底面からの取水の実用性を確認した。
- ・スプレー洗浄併用式が、夾雑物除去能力及び取水の安定性に優れ、ドイツ製品より1/2以下のコストと推定

洗浄方法	油圧駆動移動式スプレー洗浄	電動モーター回転レーキ掻き取り	電動モーター回転レーキ掻き取り	電動モーター回転レーキ掻き取り
取水スクリーン	底部φ3mmパンチングメタル	底部2.5mm縦型水流平行スリット	側部2.5mm横型水流平行スリット	側部2.5mm横型水流平行スリット
適用対象	<ul style="list-style-type: none"> ・試作器取水能力=14L/s（水深14cm） ・最小人孔幅=ポンプ、配管スペース600mm（本管径により異なる）+下水本管径。 ・油圧スプレー設置スペースとして管底高-100mm必要。 ・一般的には直線状の中間マンホールに限定される。 ・強度面から維持管理用人孔としての使用頻度は少ない方が良い。 	<ul style="list-style-type: none"> ・試作器取水能力=50L/s（入口水深19cm、長さ55cm） ・最小人孔幅=減速機スペース600mm（本管径により異なる）+本管径+片側余裕。 ・レーキ設置スペースとして管底高-400mm必要。 ・繊維質やシート状の夾雑物を許容できる熱交換に適用可。 ・一般的には直線状の中間マンホールに限定される 	<ul style="list-style-type: none"> ・試作器取水能力=14L/s（水深11cm） ・最小人孔幅=スクリーン設置幅500mm+下水道本管径+片側余裕。 ・据え付け高さ=管底高 ・スクリーンは片側のインバート部分に設置する。 ・スクリーン設置側から流入下水管がないこと。 ・繊維質やシート状の夾雑物を許容できる熱交換に適用可。 	<ul style="list-style-type: none"> ・試作器取水能力=10L/s（水深9cm） ・最小人孔幅=機器設置幅500mm+本管径+片側余裕。 ・スクリーン据え付け高さ=管底高（一体型ポンプ高さ=管底高-50mm） ・スクリーンは片側のインバート部分に設置する。 ・スクリーン設置側から流入下水管がないこと。 ・機器が大きいので円形人孔より矩形人孔の方が収まりが良い。 ・繊維質やシート状の夾雑物を許容できる熱交換に適用可。
給湯負荷*	500世帯	1,900世帯以上	500世帯	350世帯
機器外観				
構造概要	インバートと同じ形状のスクリーンで損失は少ない。管軸方向に移動するノズルから出るスプレー洗浄水で目穴の夾雑物を吹上げ、下水で排出。	管底に設置したレーキにより除塵しながら落下取水。管底下部に、排水管に導水するための取水室と減速機設置スペースが必要。	水平に回転するレーキにより固定スクリーン板スリットを除塵しながら取水する。	水平に回転するレーキにより固定スクリーン板スリットを除塵しながらポンプ（本体と一体型）にて取水する。
施工性 維持管理性	<ul style="list-style-type: none"> ・ドライ化施工（据え付けは1日） ・常時水没している油圧シリンダーの耐食、短命化リスクがある。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ドライ化施工（据え付けは1日）。 ・レーキの真上を流体が通過するので歯やスリットの損傷リスクが大きい。 ・取水中であっても点検は可能 	<ul style="list-style-type: none"> ・片側通水しながらの施工・点検が可能（据え付けは1日）。 ・捕捉夾雑物が乾燥すると回転レーキ損傷の原因になる。 	<ul style="list-style-type: none"> ・片側通水しながらの施工・点検が可能（据え付けは1日）。 ・掻き出された夾雑物が堆積し、歯の移動障害や変形の原因になる。
評価	◎：夾雑物除去効果に優れ、安定取水が可能。	○：熱交換器への夾雑物流入が許容できるシステムなら適用可、大流量向き	○：既製品の応用のため、故障リスクは少ない	△：他機種と同等の取水量を得るための機器設置スペースが、他機種に比べて大きい。ポンプ一体型のため、工事は簡易

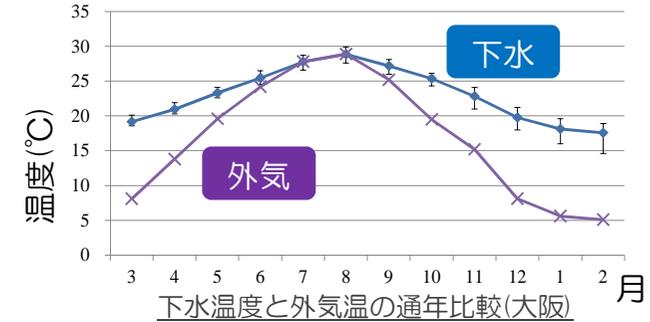
* 集合住宅において、深夜時間帯の8時間にヒートポンプを運転する場合（下水温度差5K）。1日20時間運転の場合は表の2.5倍となる。

(4)ヒートポンプの開発成果

下水熱特性(流量・温度の実測結果)や需要家の特徴などから下水熱利用に適したヒートポンプを開発し、下水熱を高効率に活用できる熱源システム構成を見だし、その省エネルギー性を評価した。

熱源システムのコンセプト

- ◇宿泊施設や集合住宅は給湯需要が大きく、化石燃料の利用も多い。
→ヒートポンプ容量(30kW程度)。
- ◇下水は18°C(冬)~28°C(夏)と、外気の0°C(冬)~35°C(夏)より温度が高く変動幅が小さい。
→外気温が低い地域でも温度は外気ほど低下せず、寒冷地ほど利用価値が高い。



給湯時の下水熱利用ヒートポンプの通年一次エネルギー効率

給湯温度は約65°Cと高いため、空気熱源では従来、比較的効率のよい45°C程度までをヒートポンプで加温し、その後65°Cまでボイラで昇温するカスケード利用が行われている。
下水熱利用では、ヒートポンプの熱源水入口温度が上がることにより、

- シンプルな熱源システム構成が可能なヒートポンプのみでの昇温の方が、カスケード利用より効率が良い。
- この傾向は、重みづけ*通年熱源水入口温度(≒下水温度)が高くなるほど顕著となる。
- 札幌より熱源水入口温度が下がる地域では、カスケード利用が有利である。

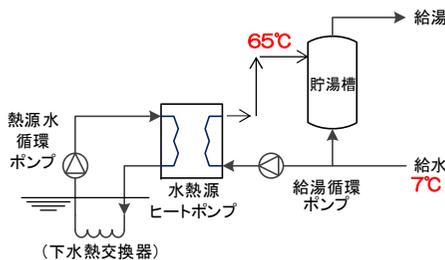
検討概要

- ①春・夏・秋・冬において、下水温度などから給湯の一次エネルギー効率を求める。
- ②文献の年間給湯負荷に対する季節ごとの給湯負荷の割合を重みとし、各季節の一次エネルギー効率にかけ、通年一次エネルギー効率を求める。

検討システム

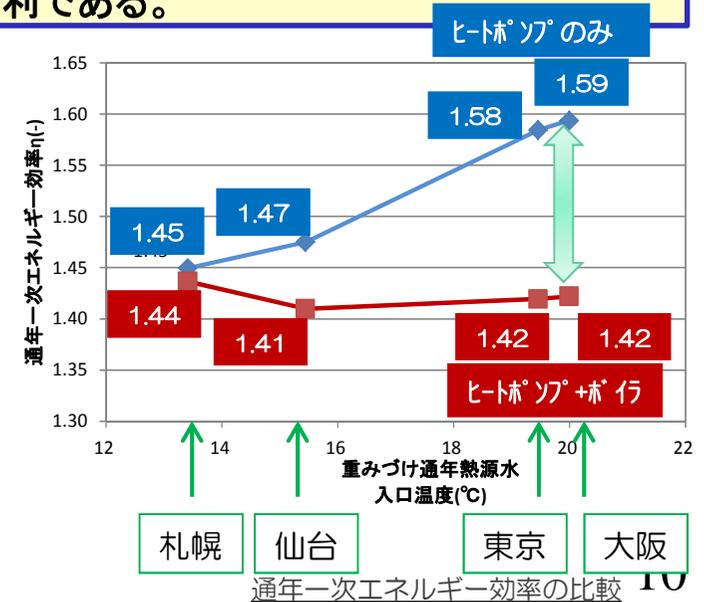
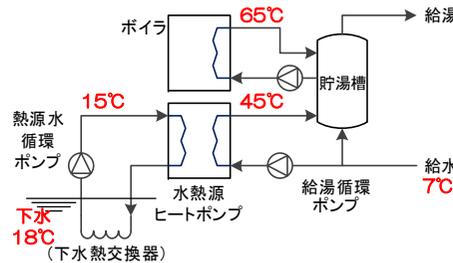
ヒートポンプのみ

ヒートポンプで給水温度から貯湯温度まで加温



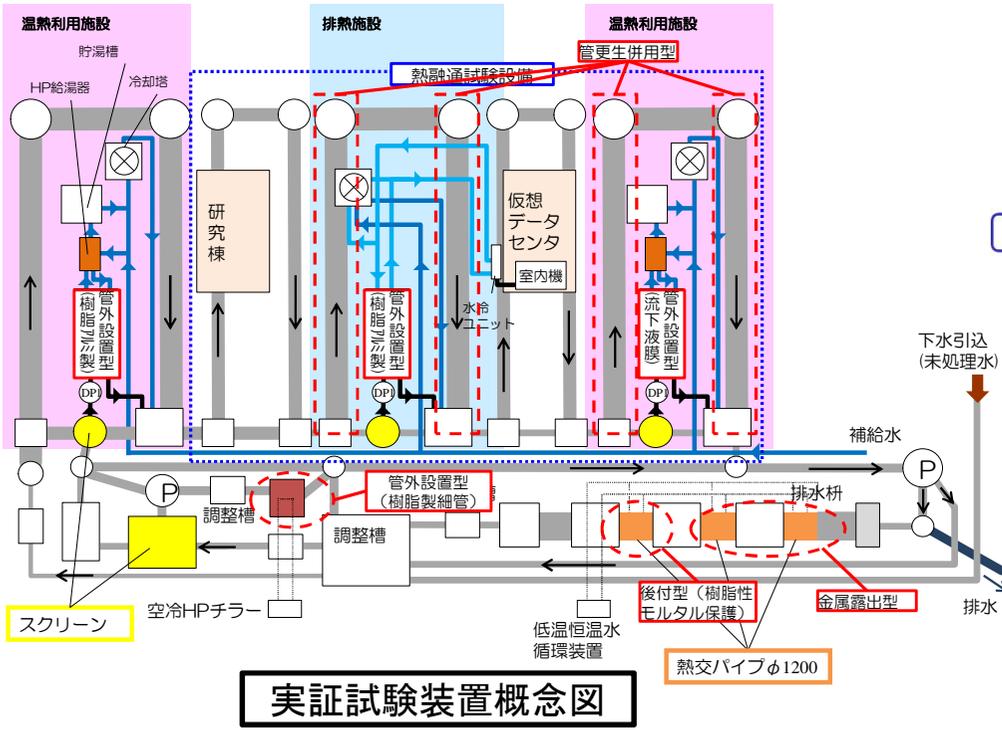
ヒートポンプ+ボイラ(カスケード利用)

ヒートポンプとボイラを直列配置
ヒートポンプ: 給水→45°Cまで加温
ボイラ: 45°C→65°Cまで昇温

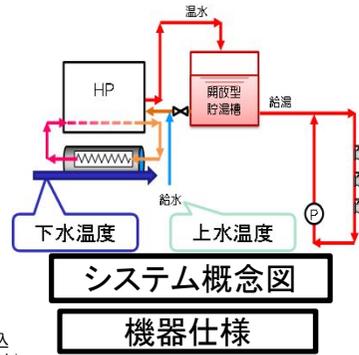


(5) 実証試験

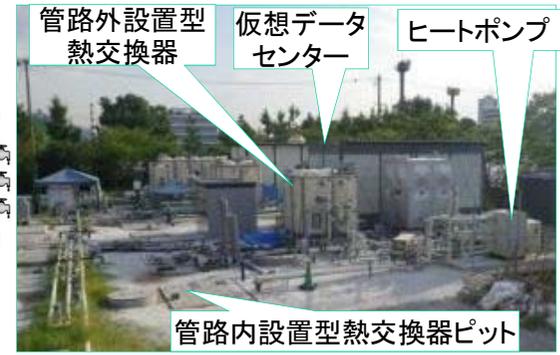
- 大阪市千島下水処理場（大阪市大正区）において未処理下水を用いた実環境試験を実施し、季節ごとのCOP, SCOPを計測した。
- 試験の結果、ホテル系のCOPは4.1~4.6となり、データセンタ系は3.1~6.2となった。



実証試験装置概念図



システム概念図
機器仕様



		ホテル I 系	ホテル II 系	データセンタ系
能力	kW	39	30	41.5
温水出口温度	°C	60	65	-
温水入口温度	°C	15	9	-
温水流量	L/min	12.4	8.3	-
熱源水/冷却水出口温度	°C	10	12.3	40
熱源水/冷却水入口温度	°C	15	15.0	35
熱源水/冷却水流量	L/min	85.1	125	163.3
定格COP	-	3.98	4.01	3.39
定格消費電力	kW	9.8	7.48	12.25
運転モード	-	瞬間給湯	貯湯	冷房

現状システム(ボイラCOP=0.9)に比べ、効率は向上する。

季節	下水温度(°C)	上水温度(°C)		ホテル1系	データセンタ系	ホテル2系
夏期	30	25	COP	4.64	3.13	4.50
			SCOP	3.77	2.47	3.34
中間期	25	20	COP	4.58	3.37	4.60
			SCOP	3.73	2.67	3.10
冬期	15	10	COP	4.10	6.21	4.17[6.4]
			SCOP	3.32	3.70	3.11[3.6]

※65°C出湯の場合([]内は45°C出湯(暖房)の部分負荷運転)
※ホテル2系は試製作したHPであり、熱源と温水の温度差が小さい場合に運転可能で、温水温度が暖房の場合に特に効率が良い仕様。

(6) システム評価

- 実証試験により得られた性能とシミュレーションにより、実証試験設備規模の小規模宿泊施設で導入効果を算出し、現状システムとして、ガスボイラまたは空冷HPにて給湯を行っている2つの場合を想定し比較

1次エネルギー消費量の比較

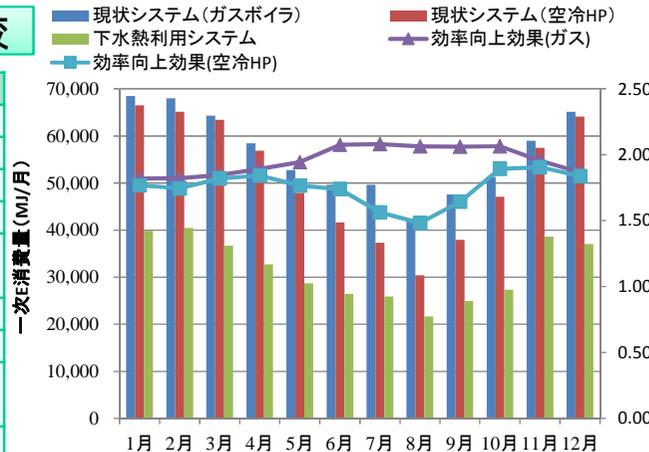
項目		
想定建物条件	建物用途	宿泊施設
	延床面積	1800(m ²)
	使用用途	給湯利用
熱源機条件	温水出口温度	65(°C)
	温水入口温度	負荷の大きさで変動
	温水流量	12 (L/min)
	熱源水流量	100 (L/min)
下水条件	下水温度	時刻別 下水温度
	下水流量	100(L/min)

試算条件

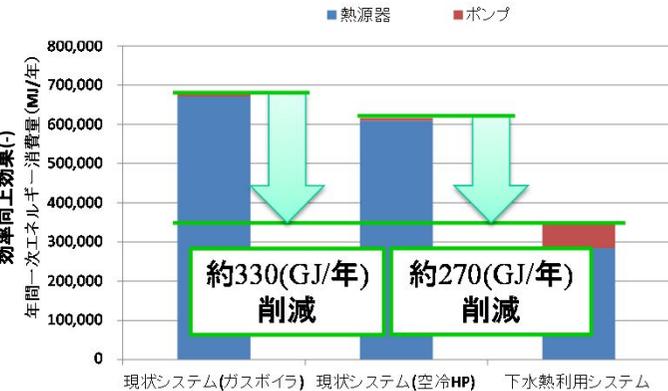
ランニングコストの比較

電力料金(高压電力AS-TOU)		
基本料金	1,685.25	円/kW
重負荷時間	17.29	円/kWh
昼間時間	12.21	円/kWh
夜間時間	8.05	円/kWh

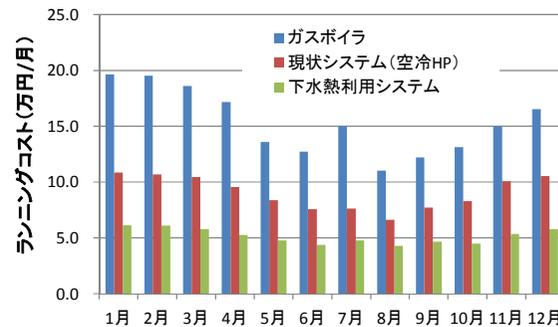
適用期間	料金区分	ガス料金	
夏期 5月~12月	定額基本料金	22,730.00	円/月
	流量基本料金	1,077.30	円/m ³
	単位料金	86.06	円/m ³
冬期 1月~4月	定額基本料金	22,730.00	円/月
	流量基本料金	1,077.30	円/m ³
	単位料金	98.36	円/m ³



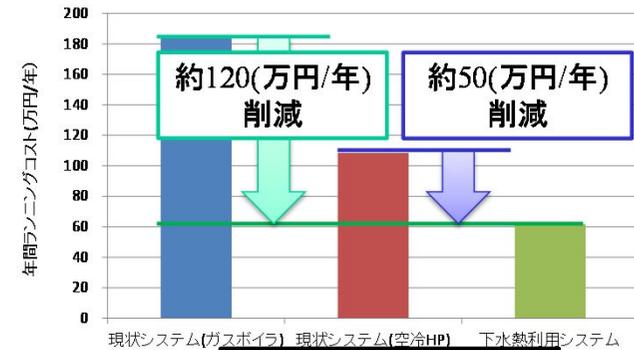
月別の試算結果



年間の試算結果



月別の試算結果



年間の試算結果

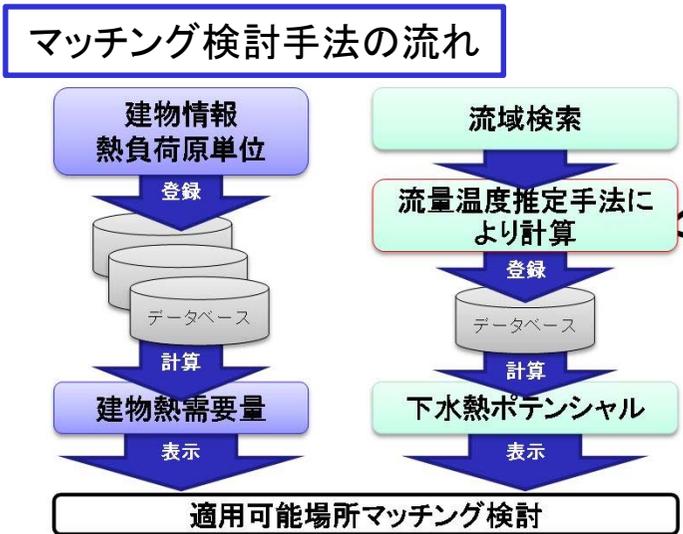
- ガスボイラシステムに対する一次エネルギー換算効率の向上効果は1.8~2.1倍
- 下水熱利用システムでは補機類の消費エネルギーが増加するが、ガスボイラシステムと比較した場合、一次エネルギー削減量は年間で約330GJとなった。
- 年間では効率向上効果は約1.9倍となった。
- 現状システム(ガスボイラ)に比べてランニングコストが約120万円/年削減

システム全体での
効率向上効果
= 1.9 > 1.5 (目標値)

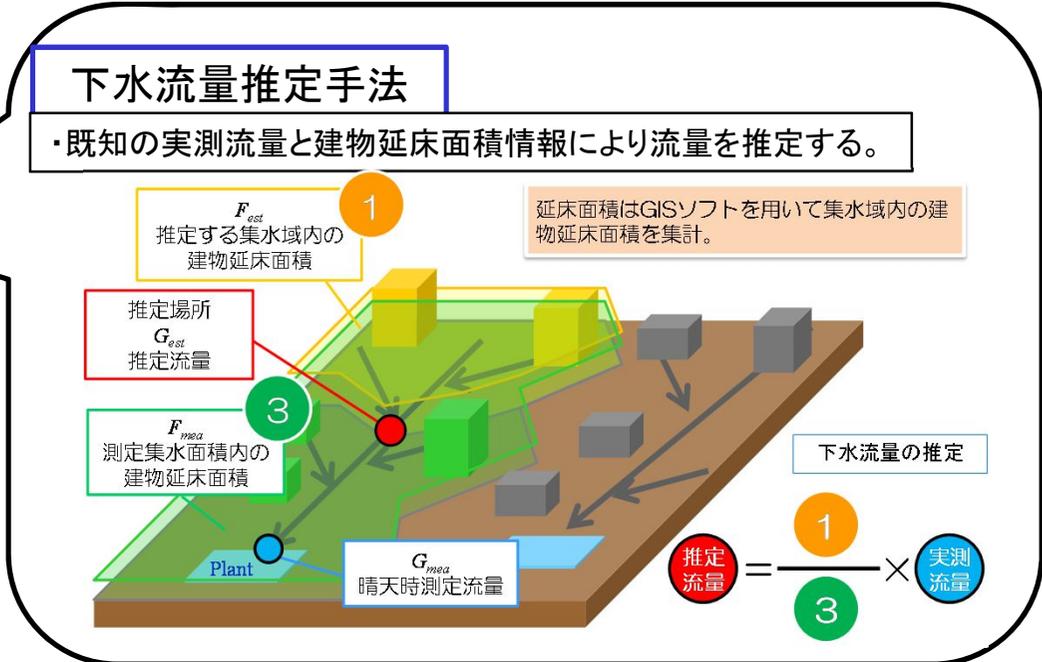
目標達成

(7) システム評価手法

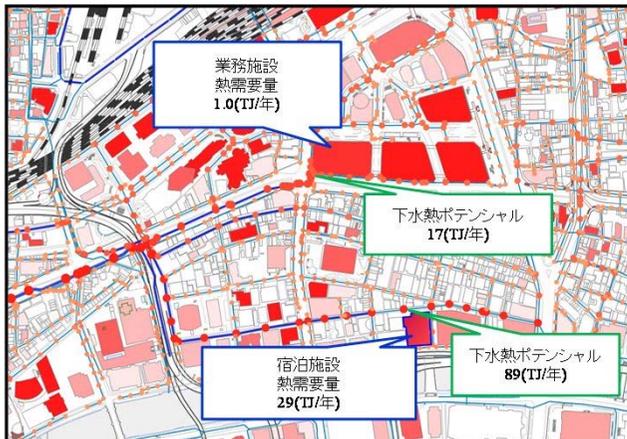
- 下水熱ポテンシャル推定手法を開発し、熱利用可能な建物を抽出する手順を示した。
- 大阪市内において下水熱利用可能な建物を10建物抽出した。



$$\text{熱需給比率} = \frac{\text{近傍管路の下水熱ポテンシャル}}{\text{建物熱需要量}}$$



マッチング検討結果(例)



※熱需給比率が1.0以上の建物を有望箇所として抽出

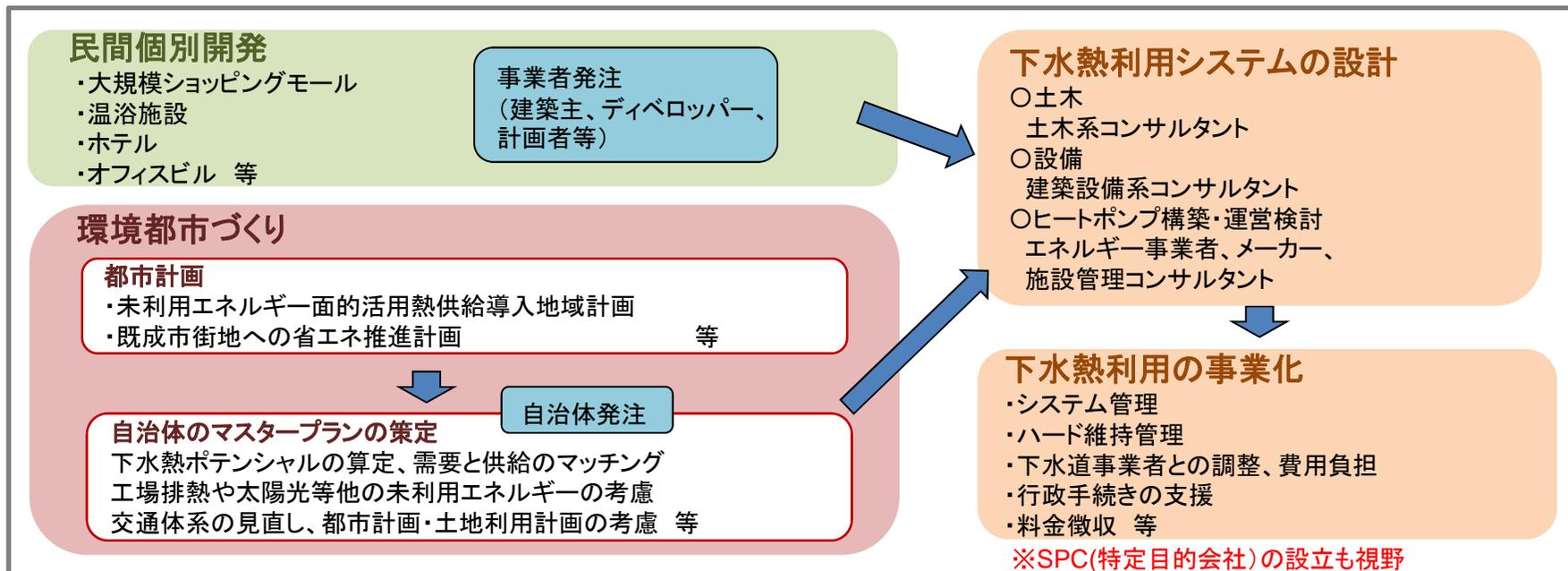
No	1	2	3	4	5
施設名	Aホテル	Oビル	H百貨店	SHホテル	Uビル
建物用途	宿泊施設	業務施設	業務施設	宿泊施設	業務施設
延床面積(m2)	85,338	105,588	75,710	45,706	78,174
給湯熱需要(GJ/年)※1	28,578	972	697	15,306	720
下水熱ポテンシャル(GJ/年)※2	89,289	17,611	3,493	36,078	3,101
熱需給比率(-)	3.12	18.12	5.01	2.36	4.31
評価	○	○	○	○	○

※1熱需要は、空気調和衛生工学会熱負荷原単位と建物延床面積より算出。
 ※2下水熱ポテンシャルは下水利用温度差を1℃とした年平均値を示す。

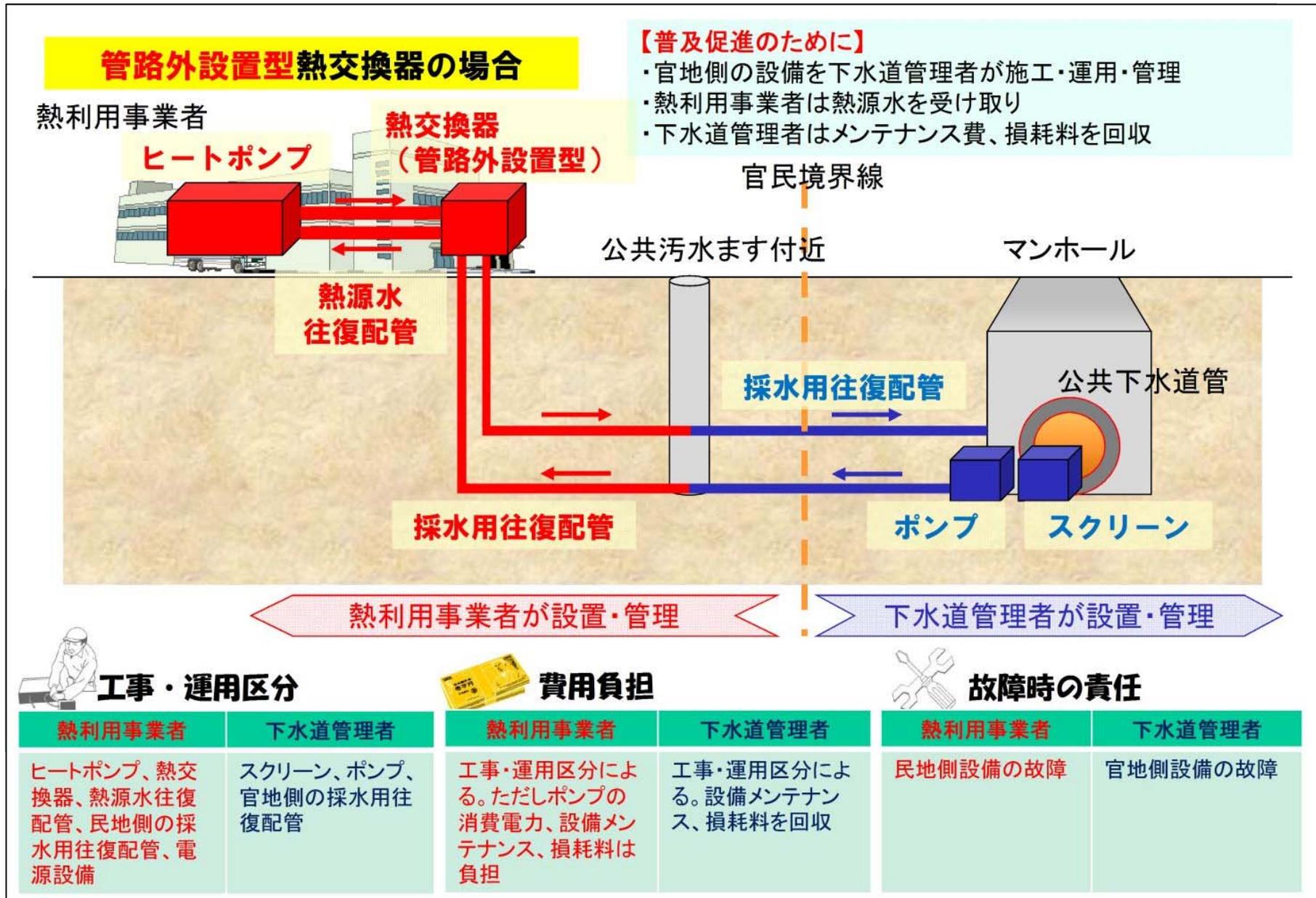
3. 下水熱利用システムの事業化に向けて

(1) 事業化シナリオ

- 事業構想段階において、エネルギー事業者が開発事業者(ディベロッパー)へ働きかける。
- 事業企画段階において、土木コンサルタントが自治体における下水熱ポテンシャルや需要家立地などを踏まえ、需要と供給のマッチング、工場排熱やソーラー等の他の未利用エネルギー等を考慮した、都市全体のマスタープランを作成する。
- 事業計画段階において、土木コンサルタント、建築設備系コンサルタント、エネルギー事業者、メーカー、施設管理コンサルタントと協働して具体的なシステムを設計する。
- また、大規模開発においては、事業主から直接JVにシステム設計を受注するアプローチがある。



(2) 事業形態の例(管路外設置型熱交換器の場合)



4. 普及に向けての課題

(1) 施工性

