

都市内水資源の熱エネルギーを利用した地域冷暖房システムの費用効果分析

Life Cycle Cost and Effects of District Heating and Cooling System using Thermal Energy of Urban Water Resources

木内 豪¹

吉谷純一¹

河原能久²

Tsuyoshi KINOUCHI

Junichi YOSHITANI

Yoshihisa KAWAHARA

ABSTRACT: Life cycle cost and effects of district heating and cooling system (DHC) in 23 wards of Tokyo using thermal energy of sewer water, river water and groundwater is quantified in terms of life cycle energy (LCE), life cycle CO₂ emission (LCCO₂) and life cycle cost (LCC). The effect of reducing CO₂ and NO_x emission, and cooling water is also evaluated as monetary benefit. All these indices are compared among three scenarios of DHC using water resources (case A, B and C) and a case of without DHC. LCC is estimated to be minimum for case B, while LCE and LCCO₂ decrease as the dependency of DHC on the water energy is high.

KEYWORDS: DHC, life cycle assessment, water heat pump, Tokyo

1. はじめに

都市におけるエネルギー消費の増大や二酸化炭素等の温室効果ガスの排出量増加は、都市の熱環境のみならず地球環境にまで影響を及ぼしており、省エネルギーの推進や高効率システムの導入等による効果的な対策を行うことが急務となっている。本研究では都市内の水資源を活用した地域冷暖房システムを取り上げ、システム導入によるライフサイクルで見た環境負荷削減効果とコストを算定し、水熱エネルギー活用型の地域冷暖房システムの有効性を検証する。

既報^{1) 2)}において、東京都23区内における2010年の熱需要予測を行い、水熱エネルギー利用の地域冷暖房システムを導入した場合における、運用時の省エネルギー量とCO₂、NO_x、人工排熱の削減量を定量化した。本報では、運用時のみならず、施設の建設、更新、修繕、廃棄の各段階も含めて、下水、河川水、地下水の水熱エネルギー利用システム（集中型熱供給）と比較システム（個別分散型の熱供給）におけるLCC（ライフサイクルコスト）、LCE（ライフサイクルエネルギー）、LCCO₂（ライフサイクルCO₂）を算出し、比較システムに対する削減効果を定量化する。このような費用と効果の分析は個別の地域冷暖房システムを対象に行われているが、未利用エネルギーを活用することによる都市全体での環境負荷削減のメリットが明らかになれば、今後、熱供給システムの施設更新に際して適切な誘導を行うための拠り所になると考えられる。

2. 検討条件の設定

本報で対象とする熱需要と熱供給に関する検討条件を表一1に示す。河原ら²⁾の検討では、水熱エネルギー利用地区の設定にあたり、水熱エネルギー源から周囲1メッシュの範囲内のうち、大規模な開発計画のあるメッシュ（開発メッシュ）及び既存の地域冷暖房地区（DHCメッシュ）のみを供給対象とした。本論文では、需要側の条件として周囲1メッシュの範囲内にある全てのメッシュを対象とするケースを加えた。これ

¹ 土木研究所水工研究グループ Hydraulic Engineering Research Group, Public Works Research Institute

² 香川大学工学部 Department of Safety Systems Construction Engineering, Kagawa University

は、既成市街地での熱供給事業や個別建物レベルでの利用まで含めた場合を想定したものである。また、供給側（水熱エネルギー源）の条件としては、下水処理場、下水ポンプ所、下水幹線、河川、地下水の利用を前提とした。地下水と河川水の可採量に関しては、河川水、地下水の利用量と水熱エネルギー利用地区における省エネ率との関係についての感度分析等に基づき、それぞれの利用量を定めた結果、河川水についてはほぼ需要が頭打ちとなる量（荒川、隅田川、神田川、日本橋川、渋谷川あわせて4,008GJ/日）及びその50%の値とした。地下水は面的な水源であるため、利用量の増大に伴い省エネ効果も増大するが、地下水環境への影響も考慮してケースBで揚水井戸1箇所あたり5.3GJ/日、ケースCでその10倍とした。いずれのケースにおいても、周囲1メッシュ範囲内の熱需要に対して、可採量の範囲内で、熱需要の高いメッシュから順次利用地区として設定する。このようにして推定されるケースBとCの水熱エネルギー利用地区を図-1に示す。図中の記号は当該メッシュにおいて利用する水源の種類を示す。ケースAの利用地区は既報²⁾と同じである。

表-1 費用効果分析の検討ケース

ケース	条件
A) 現実的な普及促進を図るケース	周囲1メッシュのうち、開発メッシュとDHCメッシュのみを供給対象とする。熱源別の優先順位を1)下水処理場、2)ポンプ所、3)河川とする。
B) 積極的に利用拡大を図るケース	周囲1メッシュの範囲内にある全てのメッシュを供給対象とする。熱源別の優先順位を1)下水処理場、2)ポンプ所、3)下水幹線、4)河川、5)地下水とする。
C) 地下水・河川水利用拡大ケース	供給対象はケースBと同じ。地下水の可採量はケースBの10倍、河川水の可採量はケースBの2倍とする。水源の位置、数はケースBと同じ。

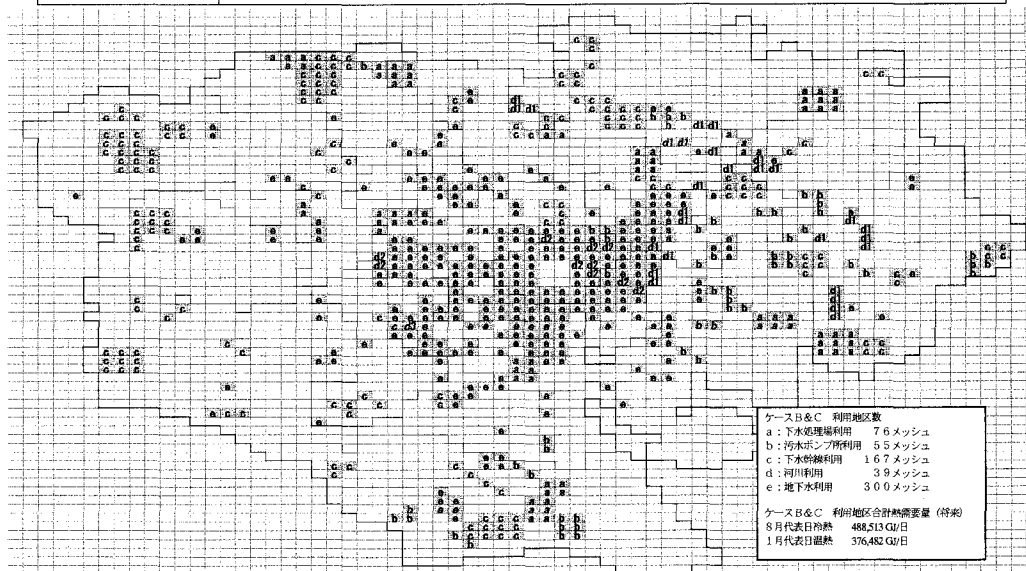


図-1 ケースBとケースCにおける水熱エネルギー利用地区（合計で637メッシュ）
a:下水処理場 b:汚水ポンプ所 c:下水幹線 d:河川(d1:荒川・隅田川, d2:神田川・日本橋川, d3:渋谷川) e:地下水

3. ライフサイクルでみた水熱エネルギー利用効果の検討

3.1 分析対象の設定

水熱エネルギー利用地区に熱供給を行う集中供給型の「水熱エネルギー利用システム」と、水熱エネルギー利用を行わない地区において熱供給を行う個別分散型の「比較システム」を設定する。水熱エネルギー利用システムについてはプラント（建屋、熱源機器）および熱搬送に必要な地域導管を対象とする。比較

システムについては個別の熱源機器を対象とする。各需要家内での熱搬送システム（建物内配管、ポンプ）は水熱エネルギー利用システムと比較システムに共通したものであるため、分析の対象から除外した。

熱供給システムの構成や規模は、熱需要側の特性や利用する未利用エネルギー熱源の特性によって異なる。本検討においては23区全体を対象とした評価を目的としており、個別の熱供給システムの性能を評価するものではないことから、水熱エネルギー利用システムおよび比較システム各々に標準的なモデルシステムを設定した。水熱エネルギー利用システムについては、各検討ケースにおける水熱エネルギー源別の可採量と熱供給対象地区の規模を考慮して、大規模プラント、中規模プラント、小規模プラントの3種類を設定し、それぞれの規模に応じて熱源機器容量と建屋の規模を表一2のように設定した。地域導管については、供給対象メッシュ数に応じて主要導管本数などの配管規模を設定する。なお、地下水利用については供給熱量の規模を考慮して建物単位の供給方式（小規模プラント）のみを想定する。

表一2 モデルシステムにおけるプラント諸元

項目		小規模プラント	中規模プラント	大規模プラント	備考
熱源機器	可採量 (MJ/h)	50	3,029	195,961	日平均可採量より設定
	供給能力 (USRT)	3	195	12,504	季節別・水熱種別のWHPの成績係数(COP)を考慮して設定
建屋	延床面積 (m ²)	80	470	2,890	概算法（地域冷暖房技術手引き書参照）を用いて設定
ケース別・ 水熱種別適用システム	ケースA	—	下水処理場(1.5) 下水ポンプ場(1) 下水幹線(1) 河川水(1)	—	熱供給規模を考慮して分類 括弧内の数字は1水源あたりの供給メッシュ数である。
	ケースB	地下水(1)	下水ポンプ場(3) 下水幹線(3) 河川水(3)	下水処理場(5)	

比較システムについては、住宅系のモデルシステムと非住宅系のモデルシステムを設定する。住宅系のシステムについては、空調用機器として個別ヒートポンプ（エアコン）、給湯用機器として瞬間湯沸器を想定し、各機器の普及状況や平均的な能力を考慮して機器台数や容量を設定した。非住宅系のシステムについては、地域熱供給の対象としての熱需要規模を考慮して10,000 m²クラスの事業所建物を想定し、既存調査³⁾における熱源容量や冷熱源方式の構成を参考としてモデルシステムを設定した。本検討においては冷熱源方式を空冷パッケージエアコン、直焚吸収式冷温水機、空冷電動チラーの3種類とした。

3. 2 分析手法

ライフサイクルでみた水熱エネルギー利用による省エネルギー性、環境保全性、経済性の評価指標として、評価期間におけるエネルギー供給システムの建設・修繕・改修・廃棄ならびに運用のプロセスを通じたエネルギー消費量LCE、CO₂排出量LCCO₂及び費用LCCを用いる。ライフサイクルコスト等の定量化手法としては産業連関表を用いる手法に基づく。各システムの構成要素の耐用年数は、実例や法廷耐用年数から、水熱エネルギー利用システムの建屋、地域導管で60年、熱源機器で20年、比較システムについては住宅系で6年、非住宅系で15年と設定した。評価期間は地域導管などの耐用年数である60年とした。LCCに計上されない水熱エネルギー利用による社会的効果（社会的費用削減量）として、CO₂削減効果、NO_x削減効果、冷却水補給水削減効果を費用に換算した。CO₂削減効果に関しては、LCCO₂排出量に応じて炭素税を支払うと仮定し、ケース毎の課税金額を算出する。NO_xの削減効果としては、本来、脱硝設備設置に要する費用が運用時のNO_x削減によって軽減される分を計上する。脱硝設備設置に要する費用の原単位は30,000円/tと設定した。WHPにより冷水を供給する場合、冷却水補給水が削減されるため、熱供給事業者にとっては、

上下水道費の軽減になる。冷却水補給の費用は上下水道費の原単位として 760 円/m³を用いて算定した。

供給熱量と燃料消費量の算定手順は既報²⁾と同じとした。省エネルギー効果と環境保全効果 (CO₂ 排出削減効果, NO_x 排出削減効果) の算定等に用いる燃料種別の各種原単位のうち、電力については平成 11 年の東京電力実績に基づき、一次エネルギー換算値を 2320kcal/kWh, CO₂ 排出原単位は 0.318kg-CO₂/kWh, NO_x 排出原単位は 0.11g/kWh とした。都市ガス、灯油、LPG、重油の原単位は既報²⁾と同じとした。

3. 3 水熱エネルギー利用による効果の算定

水熱エネルギー利用による社会的効果の算定結果のうち、水熱エネルギー利用地区で集計したエネルギー消費量、CO₂、NO_x、建物排熱の運用時試算結果を表一 3 に示す。省エネルギー率や CO₂ 削減率などは、水熱エネルギー無しのケースに対する削減量の割合を意味する (表一 4 も同じ)。また、建物排熱量は建物熱需要に起因する人工排熱を対象としており、照明・動力等による排熱は含まれない (表一 4 も同じ)。ケース A では省エネ率 29.5%, CO₂ 削減率 40.3%, NO_x 削減率 46.9% といずれも高い数値を示す。ケース B では、ケース A と比較して利用範囲が広がり、かつ、他の水源よりも水熱エネルギー量の小さい地下水の可採量が増加しているため、省エネ率 10.6%, CO₂ 削減率 14.5%, NO_x 削減率 16.9% といずれもケース A より下回っている。ケース C では、ケース B と利用範囲は同じものの、地下水の増加が寄与し、ケース B よりも省エネ率で 3.2 ポイント、CO₂ 削減率で 4.1 ポイント、NO_x 削減率で 4.5 ポイント向上している。人工排熱の削減効果が CO₂ や NO_x の削減効果に較べて小さいのは、11 月～4 月の温熱供給期において排熱量が削減されないことによる。

表一 3 水熱エネルギー利用による年間の省エネルギー・環境保全・排熱削減効果 (利用地区)

	ケース A		ケース B・C		
	利用無	利用後	利用無	ケース B	ケース C
利用地区数 (メッシュ)	59		637		
冷温熱合計需要量 (TJ/年)	11,482		106,349		
WHP 供給冷温熱量 (TJ/年)	—	7,331	—	22,178	28,680
1 次エネルギー消費量 (TJ/年)	14,633	10,314	135,186	120,877	117,215
省エネルギー量 (TJ/年)	—	4,319	—	14,309	18,699
省エネルギー率 (%)	—	29.5	—	10.6	13.8
CO ₂ 排出量 (t-CO ₂ /年)	683,295	407,673	6,323,963	5,404,175	5,177,261
CO ₂ 削減量 (t-CO ₂ /年)	—	275,622	—	919,788	1,181,158
CO ₂ 削減率 (%)	—	40.3	—	14.5	18.6
NO _x 排出量 (t/年)	322	171	2,990	2,485	2,361
NO _x 削減量 (t/年)	—	151	—	505	645
NO _x 削減率 (%)	—	46.9	—	16.9	21.4
建物排熱量 (TJ/年)	9,422	6,994	87,411	81,452	79,707
建物排熱削減量 (TJ/年)	—	2,428	—	5,959	7,704
建物排熱削減率 (%)	—	25.8	—	6.8	8.8

23 区全体でみた場合の LCE, LCCO₂, NO_x、建物排熱に関する推定結果を表一 4 に示す。水熱エネルギーの利用量が大きいほど、プラント建設分と個別熱源建設分 (いずれも更新・修繕・廃棄を含む) のみを合算した LCE や LCCO₂ も大きくなる傾向が見られる。しかし、運用時も含めた場合、水熱エネルギーの利用量が大きいケース C では、LCE, LCCO₂, NO_x、建物排熱の削減率がケース A の 3.3～4.2 倍ある。ただし、ケース B とケース C では削減率に大きな違いは見られない。なお、東京都 23 区における年間の CO₂ 排出量は 1990 年度実績で 56 百万 t-CO₂ であり、今回の一連の試算により算出された運用に係る CO₂ 削減量 (ケース C で 1.2 百万 t-CO₂) はその約 2% に相当する。

表－4 水熱エネルギー利用による年間の省エネルギー・環境保全・排熱削減効果（23区全体）

	水熱利用なし	ケースA	ケースB	ケースC
LCE（プラント建設分）（TJ）	—	9,284	36,472	92,254
LCE（個別熱源建設分）（TJ）	259,085	253,075	233,520	229,084
LCE（運用時分）（TJ）	17,565,169	17,333,460	16,778,578	16,598,412
LCE削減率（合計分）（％）	—	1.3	4.4	5.1
LCCO ₂ （プラント建設分）（t-CO ₂ ）	—	1,000	5,735	9,782
LCCO ₂ （個別熱源建設分）（t-CO ₂ ）	16,808	16,416	15,149	14,859
LCCO ₂ （運用時分）（t-CO ₂ ）	848,984	833,111	797,547	782,288
LCCO ₂ 削減率（合計分）（％）	—	1.8	5.5	6.8
NO _x 排出量（t/年）	6,657	6,506	6,152	6,012
NO _x 削減率（％）	—	2.3	7.6	9.7
建物排熱量（TJ/年）	179,961	177,533	174,002	172,257
建物排熱削減率（％）	—	1.3	3.3	4.3

3. 4 水熱エネルギー利用のライフサイクルコスト

23区全体におけるLCCの計算結果を表－5に示す。熱供給プラントの建設・更新・修繕・廃棄時におけるLCCは、ケースAでは377,858百万円、ケースBではその4.7倍に、ケースCでは7.7倍になる。個別熱供給システム建設時のLCCは、水熱エネルギー利用熱量の多いケースで、小さくなっている。ただし、ケースBとケースCの差はごく僅かである。燃料種別の運用時コストの算出結果によると、電力はWHPの駆動用エネルギーとして使用されるため、水熱エネルギー利用が進むことによりコストも増大するが、それ以外の燃料の運用時コストが減少するため、運用時分のLCCも減少傾向が現れている。建設、更新、修繕、廃棄、運用にわたる合計のLCCは、水熱利用無しでは62兆5500億円、ケースAで61兆7900億円、ケースBでは59兆6700億円、ケースCでは59兆8800億円となり、ケースBのLCC削減額が最大となっている。これは、ケースCで地下水を利用した熱供給プラント建設時（建設の他、更新、修繕、廃棄を含む）のコストがケースBに比して格段に増大しており、ケースCにおけるプラント建設時の費用増に見合うほどの個別建設コストや運用時のコスト低減が期待できないことによる。このことは、水熱源別の供給熱量当たりのコスト（表－6）でみても明らかである。平均的に見ると、ケースAでは0.859円/MJ、ケースBでは1.34円/MJ、ケースCでは1.69円/MJで、個別熱供給システムの場合の供給熱量当たりコストの算定結果（2.35～2.39円/MJ）よりもコストが削減される。

表－5 各ケースのライフサイクルコスト（23区）

	水熱利用無	ケースA	ケースB	ケースC
プラント建設時（百万円）	—	377,858	1,776,524	2,914,988
個別建設時（百万円）	30,813,668	30,117,803	27,778,094	27,273,632
運用時（百万円）	31,737,267	31,292,075	30,110,662	29,692,113
合計（百万円）	62,550,935	61,787,736	59,665,280	59,880,733
LCC削減額（百万円）	—	763,199	2,885,655	2,670,202
LCC削減率（％）	—	1.2	4.6	4.3

表－6 熱供給プラント建設・更新・修繕・廃棄時のコスト

	ケースA			ケースB			ケースC		
	供給熱量 (TJ)	原単位 (円/MJ)	コスト (百万円)	供給熱量 (TJ)	原単位 (円/MJ)	コスト (百万円)	供給熱量 (TJ)	原単位 (円/MJ)	コスト (百万円)
下水処理場	70,624	1.22	86,161	203,792	0.46	93,744	203,792	0.46	93,744
ポンプ場	110,610	0.79	87,382	240,082	1.69	405,738	240,082	1.69	405,739
河川	258,626	0.79	204,315	311,745	0.79	246,278	368,423	0.79	291,054
下水幹線	—	—	—	538,012	1.69	909,241	538,012	1.69	909,240
地下水	—	—	—	37,049	3.28	121,522	370,491	3.28	1,215,210
合計	439,860	—	377,858	1,330,680	—	1,776,524	1,720,800	—	2,914,988
供給熱量当たり コスト（円/MJ）			0.859			1.34			1.69

3. 5 総合的費用効果の分析

建設～廃棄時までの LCC に加えて、社会的効果として、東京 23 区全体の 60 年間における CO₂ 削減効果（炭素税換算値）、NO_x 削減効果（脱硝設備設置コスト削減費）、冷却水補給水削減効果（上下水道使用量削減費）を算定した結果を表－7 に示す。ケース A、B、C の欄にはそれぞれ水熱利用無しの場合からの増減量を示した。今回設定した炭素税等の原単位条件においては、CO₂ 削減効果と冷却水補給水削減効果が同程度で、NO_x 削減効果はそれよりもかなり小さい。LCC だけで見た場合、削減率はケース A では 1.2%、ケース B では 4.6%、ケース C では 4.3% であったが、総合的費用効果で見た場合、削減率はケース A では 1.3%、ケース B では 4.8%、ケース C では 4.6% といずれもライフサイクルコストだけで考えた場合よりも削減効果が向上する。以上のように、水熱エネルギーを積極的に利用することにより、LCE、LCCO₂、LCC とともに削減できるとともに、水資源の節約にもつながる。

表－7 総合的費用効果の分析 (単位：百万円)

	水熱利用無し	ケース A	ケース B	ケース C
ライフサイクルコスト	62,550,935	-763,199	-2,885,655	-2,670,202
炭素税 (6,500 円/t-c の場合)	1,534,813	-27,060	-83,958	-104,348
炭素税 (30,000 円/t-c の場合)	7,083,754	-124,893	-387,499	-481,608
NO _x 削減効果費用	0	-272	-909	-1,161
冷却水補給水削減費	0	-47,887	-126,484	-167,033
合計 (炭素税 6,500 円/t-c の場合)	64,085,748	-838,418	-3,097,006	-2,942,744
総合的費用の削減率(%)		1.3	4.8	4.6

4. 水温や都市気温に与えるインパクト

水熱エネルギーの利用は公共用水域における水温変化をもたらす。この点について河原ら²⁾の設定した河川水熱エネルギー利用シナリオで河川水温の上昇量を試算し、荒川で 0.4℃程度になると報告している⁴⁾。また、水熱エネルギー利用による排熱削減がもたらす都市高温化の抑制効果に関する直接的な試算は行っていないが、2010 年の東京 23 区においては現状の約 1.4 倍の人工排熱量が発生するとした試算結果¹⁾を用いてメソスケールの気象シミュレーションを実施し、東京都心部で約 0.35℃の気温上昇になると推定しており⁵⁾、今回の水熱エネルギー利用による東京 23 区全体における人工排熱削減量はケース C で約 4%であることを考えると、23 区全体で気温を大きく低下させる効果はないと判断される。ただし、利用地区でみるとケース A では約 25%の排熱削減が推定されており、街区スケールでの熱環境改善効果は期待できると考えられる。

5. おわりに

2010 年の東京 23 区で下水、河川水、地下水の水熱エネルギーを利用する地域冷暖房システムを広域的に導入した場合の費用と効果について、個別分散型の熱供給システムとの比較を行い、水熱エネルギー利用により LCE、LCCO₂ が削減されるばかりでなく、LCC も軽減されることを明らかにした。

参考文献

- 1) 河原能久、小林裕明、末次忠司、木内豪：東京都 23 区における人工排熱の時空間分布の推定、環境システム研究、Vol.27、715-720、1999。
- 2) 河原能久、小林裕明、末次忠司、木内豪：水熱エネルギーを利用した地域冷暖房システムによる排熱・排ガスの削減効果の算定、第 28 回環境システム研究論文発表会講演集、443-448、2000.10
- 3) 牧村功他多数：事務所建築における竣工設備データ、建築設備士、p.82、1994.12。
- 4) 木内豪、河原能久、末次忠司、小林裕明：都市河川感潮域における水熱エネルギー利用が河川水温に与える影響に関する研究、水工学論文集、第 44 巻、1017-1022、2000.2。
- 5) 木内豪：将来の人工排熱増大が都市のヒートアイランドに及ぼす影響の試算、日本気象学会 2001 年春季大会講演予稿集、196、2001.5。