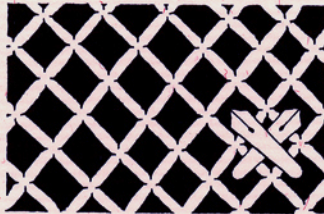
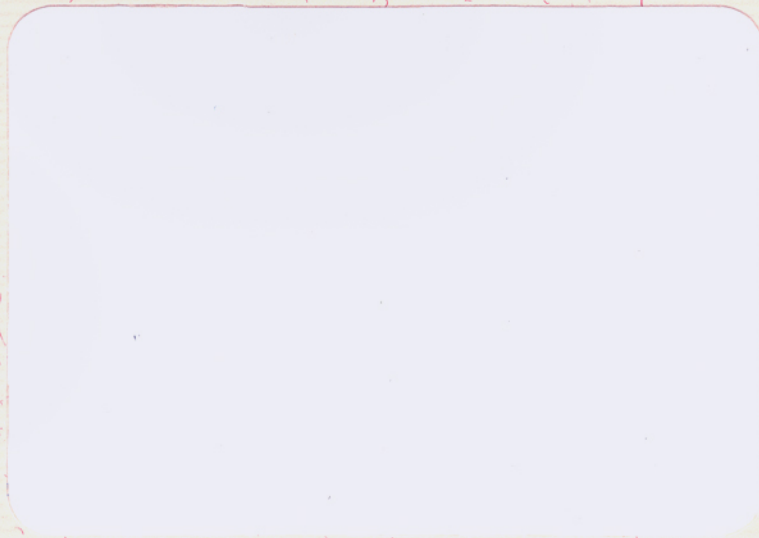


KEIO DISCUSSION PAPER



CALAMVS GLADIO FORTIOR

NO. 77

KEIO ECONOMIC OBSERVATORY

SANGYO KENKYUJO

KEIO UNIVERSITY

MITA MINATO-KU
TOKYO JAPAN

既存水道設備を利用した温水供給システムのLCA

足田浩一 中野 諭 吉岡完治

2002年8月

KEO Discussion Paper No. 77

既設水道設備を利用した温水供給システムのLCA

2002年8月

疋田 浩一^{*}、中野 諭^{**}、吉岡 完治^{*}

1 はじめに

近年のエネルギー消費の急速な拡大とこれに伴う環境問題の顕在化により、エネルギー資源の有効利用と環境負荷の逓減を目的とした技術開発が促進されている。その一つにエネルギーの多段階的利用（ヒートカスケーディング）システムがある。これは、従来廃棄されていたボイラー等からの廃熱を回収し、改めて別の用途に利用するという一種の熱エネルギーリサイクルである。革新的な技術を必要とせず、その下流のシステムにおいて燃料を削減することができる。

導入のための主な条件としては、回収される廃熱の質・量が下流の需要地にとって適当であること、配管等熱輸送の設備が整備されることが挙げられる。鉄鋼業をはじめ産業部門においては、既に特定事業所内や近隣工場間でのヒートカスケーディングが行われてきている。一方で民生部門（家庭部門及び業務部門）に関しては、こうした廃熱利用システムの導入は余り進んでいないのが現状である。

民生部門では現在も供給エネルギーの約3分の1が給湯向けに使用されており、これだけで国内最終エネルギー消費の約8%を占める。民生の給湯向けに限定すれば、熱エネルギーとして最終的に必要な温度はせいぜい100℃、家庭の風呂用なら50℃程度である。これ位の温度の廃熱ならば量としては豊富であり、熱供給用の配管網さえ整備されれば、大きな省エネ効果が期待できるはずである。これまでも、温水（或いは蒸気）、冷水の2重配管などが検討されてきたが、実際には新たな配管網の敷設には莫大な建設コストがかかるため、これが導入を進める際の大きな障壁となっている。

本研究ではこれらを踏まえ、民生部門における給湯向けエネルギー消費の削減対策として、新規の建設事業を極力避けながら既存の設備を利用し廃熱を輸送する温水供給システムを提案する。熱源としては、既存の大規模火力発電所の廃熱を利用する事が有効であろうと考えられる。我が国で消費される1次エネルギーの4分の1は電力転換時に失われるが、本システムでは低温かつ大量の廃熱を利用するため、通常海洋等に廃棄するほかなかったこの損失分を回収し有効利用することが可能となる。東京都に設置する場合を例として、設備の建設、素材、運用に関わる諸条件を調査検討し、コンピュータ上に基礎的なモデルを構築する。

^{*} 慶應義塾大学産業研究所

^{**} 慶應義塾大学大学院商学研究科

更にこれを利用して年間を通じての運転シミュレーションを行い、ライフサイクルアセスメントに基づく1次エネルギー消費量とCO₂排出量への影響を検討することによりその可能性を評価する。

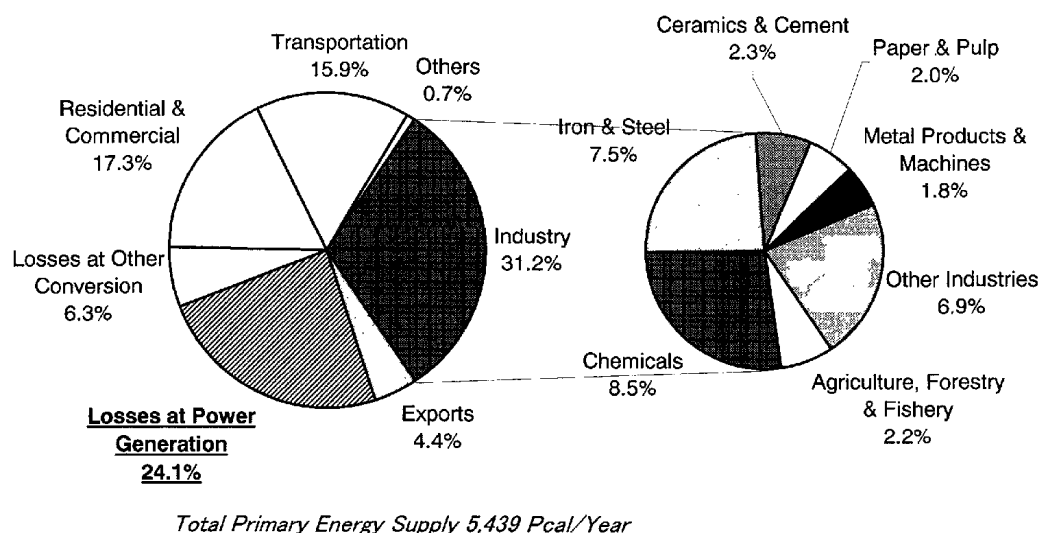


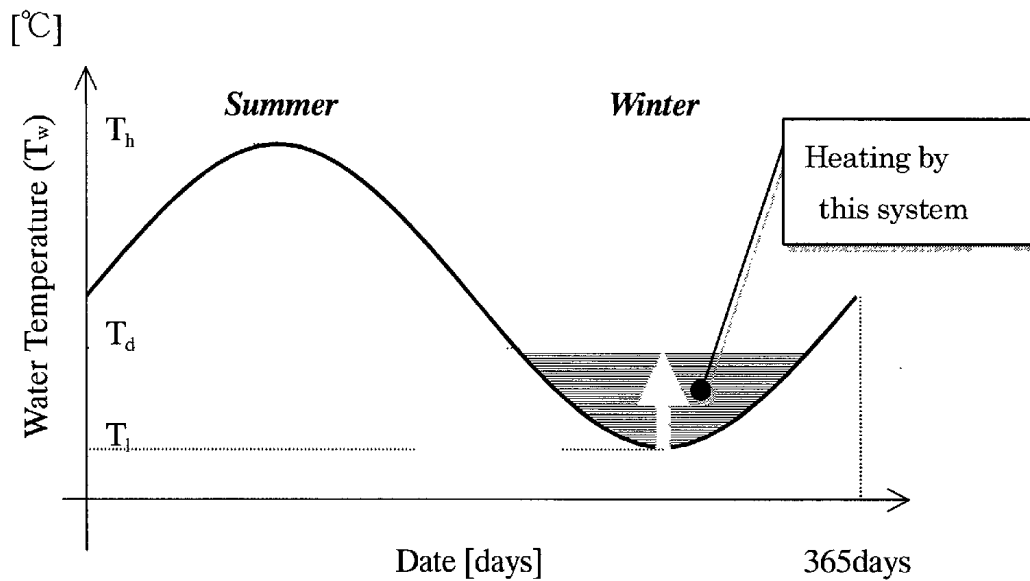
図1 我が国の1次エネルギー消費 (1995)

2 廃熱利用温水供給システム

2.1 概要

民生部門における省エネルギー対策として、工場廃熱等を回収し各需要地まで輸送する温水供給システムの検討を行う。理想としては温水（或いは蒸気）・冷水用2重配管を整備することであるが、新設配管網の建設コストが問題となるため、実際の導入にはまだ時間がかかるものとみられる。そこで、建設コストを抑えるため、既設の水道システムを利用する方法を検討する。

東京における水道水の水温は年間平均では15℃程度であるが、冬季は5℃前後まで低下する。従って、給湯の際、冬季はこの低下した水温を補いながら、他の季節より多くの電気やガスを使用していることになる。そこで、水道水をあらかじめ適当な水温まで暖めてから供給すれば、図.2-1に示すように、この部分のエネルギー消費を抑えることができるはずである。実際の給湯にはここから更に加熱する必要があるため部分的な削減となるが、当面の対症療法的な方策として期待できるであろう。あわせて、寒冷地における水道管破裂の防止といった付随的効果も期待される。



- T_h : Highest water temperature in a year [°C]
- T_l : Lowest water temperature in a year [°C]
- T_d : Water temperature Heated by this system [°C]

図 2.1 水温の年変化

既存の水道システムにおいて集中的に水温調整を行うには、図.2.2 に示すように浄水場或いは配水施設から水道水を送水管で廃熱源へ送り、加熱してまたもとの水道に戻すという方法をとる。新たに往路・復路 2 重の送水設備が必要になるが、集中的かつ大量に処理を行うため、建設コストに最も影響を与える新設配管の総延長は抑えることができる。具体的に有効性を検討するに当たり、本研究では東京都に設置することを前提に試算を行うこととする。東京都の大規模な浄水場は 10 個所で、それぞれの一日当りの浄水処理量と水温を表 2.1 に示す。

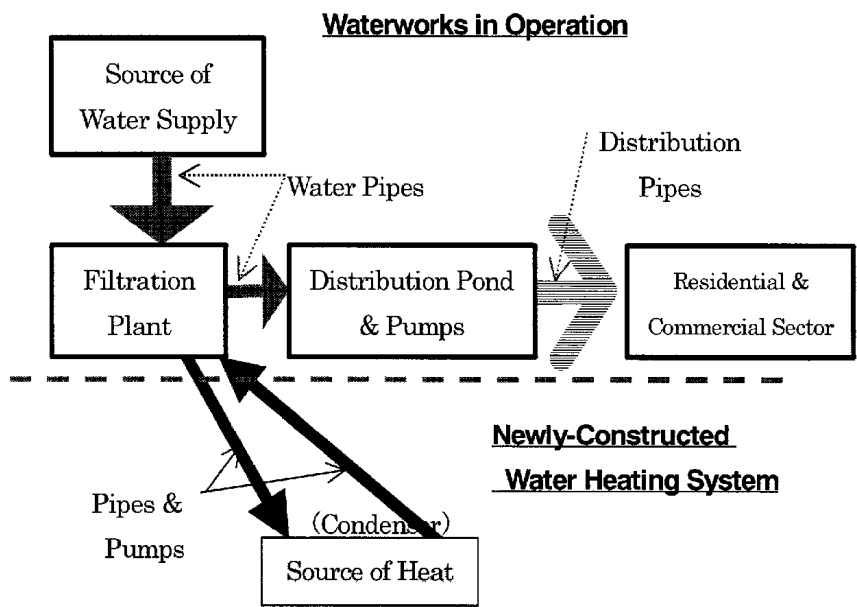


図 2.2 温水供給システムの概要^{2,3)}

表 2.1 東京都の浄水場における水道水の供給量と水温⁹⁾

Filtration plant	Quantity of Water-Purifying per Day [m ³ /day]	Water Temperature [°C]		
		Max.	Min.	Ave.
Misato	567,400	30.5	3.8	15.9
Kanamachi	921,600	30.9	4.8	16.2
Asaka	1,224,800	28.7	3.0	15.1
Misono	280,400	28.8	3.6	15.4
Ozaku	192,300	23.6	3.6	12.9
Higashimurayama	877,400	27.4	3.7	14.2
Sakai	104,000	26.7	4.7	14.2
Nagasawa	194,500	24.1	6.5	14.5
Kinuta-Ue	43,900	20.8	12.2	16.6
Kinuta-Shita	30,400	20.0	12.4	16.1

本システムで必要となる廃熱はせいぜい50℃程度であり、適当な熱源としては様々考えられる。ここでは東京近郊に数多く存在する大規模火力発電所（品川、大井、川崎、東扇島）を取り上げる。通常発電所からの廃熱は数十℃程度のもので、工場等での再利用には適さないため海洋に廃棄されている。現在、国内で消費される1次エネルギーの約4分の1は、こうした発電所における電力転換時のロスとして失われている。この損失分を回収し再利用することができれば、ヒートカスケーディングシステムとして非常に効率の良いものとなるだろう。東京近郊の大規模発電所としては大井石油火力（105万kW）、品川LNG火力（114万kW）、川崎LNG火力（105万kW）、東扇島LNG火力（100万kW×2）がある。品川・大井と川崎・東扇島とは直線距離で12kmほど離れているが、本論では第1次近似的な試算として、品川・大井発電所の場所にこれらの規模の石油火力発電所が存在するものと仮定

した。

ところで、水道水の用途を調べてみると(表 2.2)、トイレ向け等冷水のまま構わない用途も多い。さらに給湯の対象となる炊事や風呂であっても、需要家毎に望ましい温度や給湯向け水使用量などの諸条件は異なっている。従って、一律に水道水を暖める本システムでは、供給された熱エネルギーが全て給湯向けエネルギーの削減に直接つながるとはいいきれない。そこで、本システムにより供給される熱エネルギーのうち実際に有効に利用される割合、すなわち供給される水道水のうち給湯向けに使用される割合を、次の3ケースに仮定した。

＜給湯向けに利用される水道水の割合＞

Case1：11.1%（家庭部門での風呂向けに相当）

Case2：24.9%（家庭部門での炊事、風呂向けに相当）

Case3：48.4%（Case2 と業務部門での1／2に相当）

表 2.2 東京都における水道水の用途¹⁸⁾

Sector	Use	Quantity [10 ³ m ³]	Share
Residential	Cooking	252,993	13.8%
	Washing	233,532	12.7%
	W.C.	204,340	11.1%
	Bath	204,340	11.1%
	Others	77,844	4.2%
	Subtotal	973,050	53.0%
Commercial		863,425	47.0%
Total		1,836,475	100.0%

本システムを評価するために検討すべき項目を、以下に列挙する。

①給湯向けエネルギーの評価

現在の供給システムにおける給湯向けエネルギーについて、1次エネルギー消費量とそれに伴うCO₂排出量をライフサイクルアセスメントに基づき推計する。

②浄水場と排熱源の間の送水設備の評価

東京都における浄水場と火力発電所を調査し、必要となる送水設備を設計する。更に、建設・運用時の諸条件を検討する。

③廃熱源としての大規模火力発電所の評価

適切な温度の廃熱を回収するために若干運転条件を変更する必要があるため、これに伴う影響を評価する。

2. 2 給湯向けエネルギーの評価

本システムによる省エネ効果を評価するためには、その削減対象となる現状の給湯向けエネルギーについて検討しておく必要がある。

家庭部門及び業務部門における給湯向けのエネルギー消費量を、表 2.3.2 に示す。これに表 2.3.1 の世帯数及び業務部門の延べ床面積をそれぞれ乗じれば、最終エネルギー消費量が求められる(表 2.5)。東京都で年間 28,259Tcal のエネルギーが消費されており、これは東京都の最終エネルギー総消費量の 8.3%、全国での 0.78%を占める。

これらの各種エネルギーが、さらに給湯器を経て熱エネルギーに変換され、最終的に温水として消費される。従って、実質的に必要とされた熱量としては、給湯機器の熱効率を考慮する必要がある。この最終的に有効に利用された熱量を、「有効給湯熱量[cal] (=最終エネルギー消費量[cal]×給湯機器熱効率[%])」と呼ぶことにする。今回の試算に当たり設定した給湯機器効率と、民生部門で消費された有効給湯熱量の推計値を表 2.5 に示す。

次に最終エネルギー消費量をもとに、1次エネルギー消費量とそれに伴う CO₂ 排出量を推計する。エネルギー種別の 1次エネルギー原単位と CO₂ 排出原単位については、著者らがエネルギー供給システムのライフサイクルアセスメントに基づき別途算定した数値を利用した(表 2.4.1)⁸⁾。ここで用いる「総合エネルギー収支比(Overall Energy Output/Input Ratio、式 1)」とは、エネルギーの生産過程全体で投入された 1次エネルギーに対して、最終的に利用が可能であった割合を示す指標であり、エネルギー供給システム全体のエネルギー効率と捉えることができる。

$$\text{総合エネルギー収支比} = \frac{\text{対象エネルギー} - \text{自身の持つエネルギー} - \text{量}}{\text{対象エネルギー} - \text{の生産過程全体にわたる投入エネルギー} - \text{量}} \quad \dots \text{(式 1)}$$

これにより、ライフサイクルを考慮した 1次エネルギー消費量 (=「最終エネルギー消費量」/「総合エネルギー収支比」) が算定できる(表 5)。また、「CO₂ 排出原単位(CO₂ Emission per Unitary Energy、式 2)」は、最終的に利用が可能であったエネルギーに対して、そのエネルギーの生産・消費過程全体で排出される温暖化ガスの量を CO₂ に等価換算した指標である。

$$\text{CO}_2 \text{ 排出原単位} = \frac{\text{対象エネルギー} - \text{の生産・消費過程全体にわたる温暖化ガスの CO}_2 \text{ 等価換算排出量}}{\text{対象エネルギー} - \text{自身の持つエネルギー} - \text{量}} \quad \dots \text{(式 2)}$$

これにより、ライフサイクルを考慮した CO₂ 排出量 (=「最終エネルギー消費量」×「CO₂ 排出原単位」) が算出できる(表 5)。さらにこれらを用いて、素材製造の 1次エネルギー原単位と CO₂ 排出原単位が算定される(表 4.2)。

表 2.3.1 家庭及び商業部門に関する基礎データ

	Japan	Tokyo
Population [10 ⁴] ⁴⁾	12,557	1,177
Households [10 ⁴] ⁵⁾	4,411	500
Floor Space in Commercial Sector [10 ⁶ m ²]	1,524 ⁶⁾	156 ⁷⁾

表 2.3.2 燃料別家庭及び商業部門における給湯向けエネルギー消費量⁸⁾

Energy Sources	Energy Consumption per Year	
	Residential Sector [Mcal / Household · Year]	Commercial Sector [Mcal / m ² · Year]
Electricity	237	0.0
Gas	2,324	19.3
Oil	735	40.9
Coal	24	4.3
Solar	208	3.5
Total	3,527	68.0

表 2.4.1 燃料別単位当たり総合エネルギー収支と CO₂ 排出量⁸⁾

	Overall Energy Output/Input Ratio	CO ₂ Emission per Unitary Energy	
		[g-C / Mcal]	[g-CO ₂ / Mcal]
Electricity	0.328	121	444
Gas	0.836	74	272
Oil	0.905	89	325
Coal	0.948	109	400

表 2.4.2 素材別単位重量当たりエネルギー原単位と CO₂ 排出原単位^{8), 21)}

	Primary Energy Intensity [Mcal / kg]	CO ₂ Emission per Unitary Material	
		[g-C / kg]	[g-CO ₂ / kg]
Steel	6,287	573	2099
Concrete *	0.215	17	62

Note* : Specific gravity of Concrete = 2.3 [ton/m³]

表 2.5 東京都における給湯向けエネルギー消費量と CO₂ 排出量⁶⁾

	Final Energy Consumption [Tcal/Year]		Thermal Efficiency of Boiler	Effective Calorific Value as Hot Water ^[1] [Tcal/Year]	Primary Energy Consumption as Hot Water ^[2] [Tcal/Year]	CO ₂ Emission from Hot Water ^[3] [kton-C/Year]
	Total	Hot Water				
Electricity	71,829	1,185	64%	758	3,616	143
Gas	20,552	14,632	88%	12,876	17,493	1,084
Oil	206,712	10,064	88%	8,856	11,121	892
Coal	37,920	792	88%	697	835	86
Solar	3,862	1,587	100%	1,587	0	0
Total	340,875	28,259		24,774	33,066	2,206

Notes :

[1] Effective Calorific Value as Hot Water [Tcal / Year] = (Final Energy Consumption as Hot Water [Tcal / Year]) * (Thermal Efficiency of Boiler [%])

[2] Primary Energy Consumption as Hot Water [Tcal / Year] = (Final Energy Consumption as Hot Water [Tcal / Year]) / (Energy Output/Input Ratio by Sources)

[3] CO₂ Emission from Hot Water [kton-C / Year] = (Final Energy Consumption as Hot Water [Tcal/Year]) * (CO₂ Emission per Unitary Energy by Sources [g-C / Mcal]) / 1000

以上より、「給湯熱」の総合エネルギー収支比 (=有効給湯熱量 / 1次エネルギー消費量)

と CO₂ 排出原単位 (=CO₂ 排出量/有効給湯熱量) が算定される。給湯熱の総合エネルギー収支比は全国平均で0.752、東京都で0.749、CO₂排出原単位は全国平均で89.1 g-C/Mcal、東京都で89.0 g-C/Mcal となった。

2. 3 温水輸送設備

排熱回収温水輸送システムを設置・運用するために検討すべき項目を以下に列挙する。

- ①東京都における浄水場および発電所の調査
- ②温水輸送用送水管の設計
- ③送水管における運用時の諸条件 (圧力損失及び熱拡散による温度降下)
- ④発電所における運用時の諸条件 (廃熱温度の調節による効率への影響)

2. 3. 1 送水管

新設する温水輸送パイプは、湾岸の大規模発電所と各浄水場を地中埋設された鋼管で繋ぐ。水温が低いので特に断熱材は用いないこととする。建設コストを抑えるため総延長が最も少なくなるように送水管を配置すると、図.2.3 に示すように3系統の送水路が必要となる。各浄水場、発電所を直線で結ぶとして、各区間の管路長を計測すると表 2.6 のようであった。実際には直線で配管できないため幾分長くなるはずである。本研究での試算に際しては暫定的に一律2割延長して計算を行う。

次に、配管径について検討する。東京都における導水路と送配水管の配管径を調べてみると、導水路では山口貯水池の3,800mm、送配水管では朝霞上井草線の2,700mmが最大である³⁾。このことから3m程度のもので敷設することが出来ると考えられるが、実際の長距離送配水管では2m前後のものが多い。ここでは、配管径の最大値を2mと3mに設定することとする。



図 2.3 東京都周辺の浄水場と新設する送水管^{3,10)}

表 2.6 新設する送水管の延長

Water Pipes	Section	Length [km]
No. 1	Misato – Kanamachi	8
	Kanamachi – Shinagawa	20
No.2	Asaka – Misono	6
	Misono – Shinagawa	23
No.3	Ozaku – Higashimurayama	14
	Higashimurayama – Sakai	10
	Sakai – Kinuta Ue	11
	Nagawawa – Kinuta Ue	4
	Kinuta Ue – Kinuta Shita	2
	Kinuta Shita – Ohi	14

送水管及びポンプの素材・建設関わる負荷（以下、「設備負荷」）を計算するため、文献 19 を参考に推定した素材原単位を表 2.7 に示す。2重配管となるため、設備材料はこれより 2 倍、建設に関わる素材は 1.5 倍し、さらに耐用年数で除して 1 年あたりの負荷を算定する。ただし、管径については建設工事への影響が少ないためあらかじめ固定はせず、後のシミュレーションの際に運用時のエネルギーロスが少なくなるように選択することとする。配管の管径と厚さ及び重量については、文献 20 より配管用アーク溶接炭素鋼管のデータをもとに、管径 2,000mm を越える部分を外挿して用いる。これら素材別の 1 次エネルギー原単位と CO2 排出原単位には表 4 を使用する。

表 2.7 送水管とポンプの建設資材と耐用年数

	Materials	Quantity	Lifetime [Year]
Water Pipe	Steel	766 kg/m	50
	Concrete	64 m ³ /km	
	Gasoline	34 Mcal/km	
	Light Oil	613 Mcal/km	
Pump	Steel	2.3 kg/(m ³ /day)	30

2. 3. 2 圧力損失

管内面の摩擦抵抗による圧力損失があるため、これに相当するポンプ動力が必要となる。直管の摩擦抵抗による圧力損失 ΔP [kg/m²] は、ダーシー・ワイズバッハの式 (式 3) より計算される^{11,12)}。

$$\frac{\Delta P}{\gamma} = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{V^2}{2g} \quad \dots (式 3)$$

γ : 流体密度 [kg/m³], L : 管の長さ [m],

D : パイプ直径 [m], V : 流速 [m/s],

g : 重力加速度 [m/s²], f : 摩擦係数

ここで摩擦係数 f は、乱流の場合のムーディー近似式 (式 4) より求められる。

$$f = 0.0055 \left[1 + \left(20,000 \frac{k}{D} + \frac{10^6}{\text{Re}} \right)^{1/3} \right] \quad \dots \text{(式 4)}$$

k :管内面粗さ[m],

Re:レイノルズ数($\text{Re} = \frac{V \cdot D}{\nu}$)

ν :流体の動粘度 [m²/s]

これを用いて、ポンプ動力 Le [kW]は式 5 より求められる。

$$Le = \frac{W \cdot \Delta P}{6,120\eta} \quad \dots \text{(式 5)}$$

W :ポンプ流量[m³/min], η :ポンプ効率(0.75)

2. 3. 3 熱損失

管を流れる温水の温度降下を求める。定常状態における裸管の出口での温度降下は、管の入口温度と管外温度との温度差から式 6 によって計算される¹¹⁾。

裸管を流れる温水の温度降下

$$\Delta T = T_1 \left(1 - e^{\frac{-\pi \cdot D_i \cdot K_i \cdot L}{1,000W}} \right) \text{ [}^\circ\text{C]} \quad \dots \text{(式 6)}$$

T_1 :配管始点での管内温水と管外との温度差 [°C]

D_i :管内径 [m], L :管長[m], W : 流量 [m³/h]

K_i :管内面基準熱通過率 [kcal/m²·h·°C]

ここで、管内面基準熱通過率 K_i は次式から求められる。

$$\frac{1}{K_i} = \frac{1}{\alpha_i} + D_i \cdot \frac{1}{2\lambda_i} \log_e \frac{D_o}{D_i} + \frac{D_i}{\alpha_o D_o} \quad \dots \text{(式 7)}$$

α_o :管外面側表面熱通過率 [kcal/m²·h·°C],

D_o :管外径 [m]

λ_i :管材の熱伝達率 [kcal/m·h·°C],

α_i :管内面側表面熱通過率 [kcal/m²·h·°C]

ここで、管内面側表面熱通過率 α_i は、充分発達した円管内乱流に対するディッタスらの式より求められる。

$$\frac{\alpha_i \cdot D_i}{\lambda_w} = 0.023(\text{Re})^{0.8} (\text{Pr})^{0.4} \quad \dots \text{(式 8)}$$

λ_w :水の熱伝達率 [kcal/m·h·°C],

Pr: プラントル数

以上より、管を流れる際の熱損失が求められる。

浄水場に戻した後、各需要地に配水される間にもある程度熱損失があると考えられる。今回の計算では、浄水場では貯留時間をとらないこととし、ここでの熱損失を省略した。

2. 4 発電所

廃熱源として大規模火力発電所を想定しているが、必要な廃熱温度を得るために場合によっては発電効率を低下させる必要が生じる可能性がある。そこで、基本的な発電プロセスのモデルを作成し、発電所の運転時の影響を検討する。

図.2.4 に想定した発電システムの基本構成を示す。必要な熱量を持った温水を Condenser 2 より回収し、浄水場に戻す時点で冷水と混合して水温の調整を行うこととする。夏季等熱需要の少ないときは Condenser1 により従来の海水による熱交換を行う。ただし、今回の試算にあたっては、この Condenser 2 の設備建設に伴う負荷は検討していない。

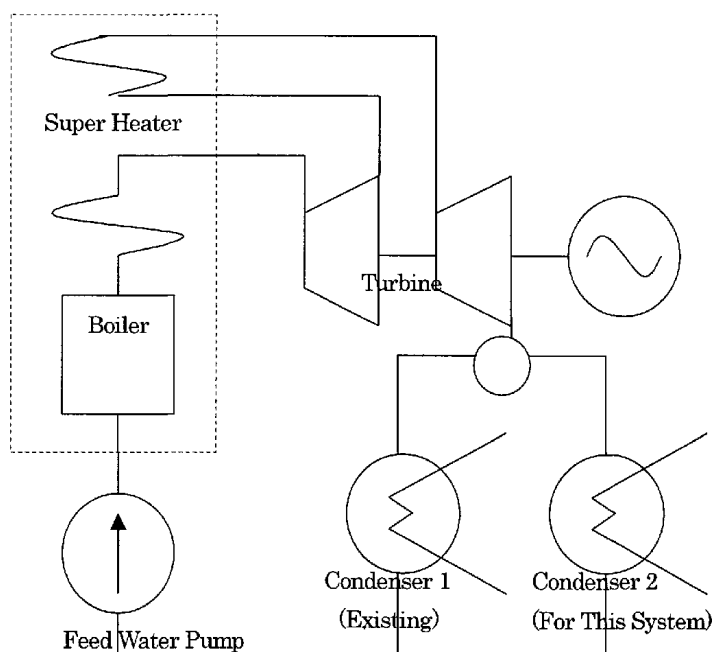


図 2.4 火力発電システムの基本構成図

タービン出口温度と発電効率及び廃熱回収効率との関係を調べるために、1 段再熱ランキンサイクルの基礎モデルを作成した^{13,14,15,16)}。この再熱サイクルを図.2.5 の $h-s$ 線図上に示す。縦軸が比エンタルピ h [kJ/kg]、横軸が比エントロピ s [kJ/(kg·K)]である。

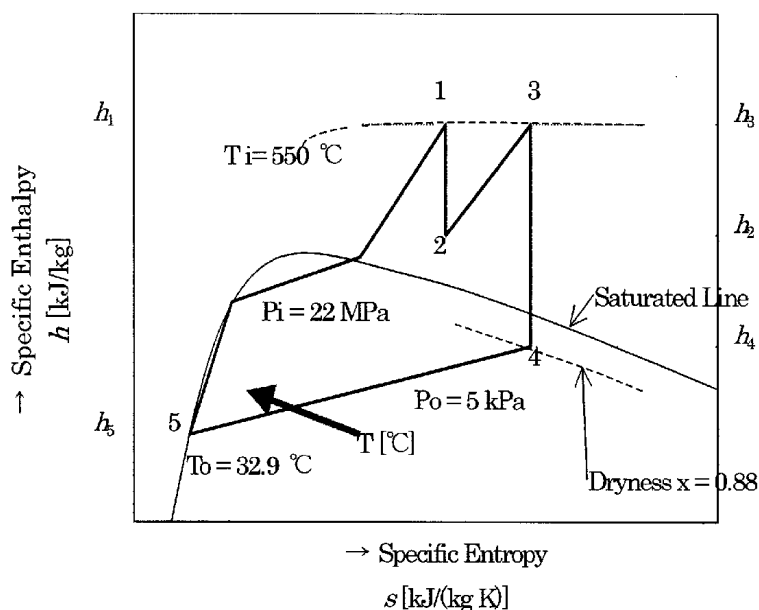


図 2.5 1 段再熱ランキンサイクルの h-s 線図

基礎モデルの特性値は次の通りである。

発電所規模	35 万 kW×3
ボイラー効率	$\eta_B = 0.95$
タービン出口蒸気乾き度	$x = 0.88$
	[kg-steam/kg-(steam+water)]
タービン初段入口温度	$T_i = 550^\circ\text{C}$
タービン初段入口圧力	$P_i = 22\text{MPa}$
タービン初段入口温度	$T_o = 32.9^\circ\text{C}$
タービン最終段出口圧力	$P_o = 5\text{kPa} \sim$
タービン内部効率	$\eta_T = 0.90$
発電機効率	$\eta_G = 0.98$
復水器効率	$\eta_C = 0.95$
発電効率	$\eta_R = \frac{(h_1 - h_2) + (h_3 - h_4)}{(h_1 - h_5) + (h_3 - h_2)} \times \eta_B \times \eta_G \dots$ (式 9)
廃熱回収効率	$\eta_W = \frac{h_4 - h_5}{(h_1 - h_5) + (h_3 - h_2)} \times \eta_C \dots$ (式 10)

図 2.5 で、4 から 5 にかけてが復水器での熱交換を行っている部分である。廃熱の回収量を増やすためにこの温度を上げようとする、タービン出口圧力を上げねばならず、これにつれて復水器入り口(図中 4)のエンタルピー h_4 が大きくなる。この変化量は復水器出口(図中 5)のエンタルピー h_5 の変化よりも大きいため、式 9 より効率 η_R が低下することになる。

実際の発電所で廃水は海洋に廃棄しており、その温度は現行の規制で海水温（約 15℃）±7℃とされている。タービン出口水温が 32.9℃であるから、復水器での熱交換の温度差は約 10℃と推定できる。これより、回収する廃水温が 23℃程度を超えると復水器における蒸気の背圧が高くなり、発電ロスが生じることになる。

廃水温度に対する発電効率 η_R （式 9）及び廃熱回収効率 η_W （式 10）の変化を図 2.6 に示す。廃水温度を上げるため発電効率が低下した場合、出力を補うために燃料の投入が増加するものとする。この増加した燃料分を発電所におけるエネルギーロスと評価する。

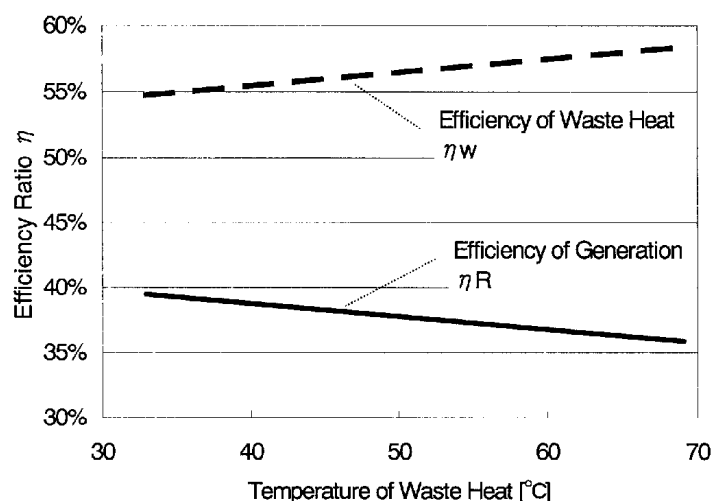


図 2.6 廃水温度に対する発電効率 η_R 及び廃熱回収効率 η_W の変化

3. 温水供給システムのシミュレーション

前節で検討した内容を考慮しながら、1年間の運転シミュレーションを行う。このシミュレーションで検討するのは、新設送水管での圧力損失と熱損失、発電所での効率低下、及び既設配管網での熱損失の4項目である。これらのエネルギーロスの合計が最小になるように廃熱回収時の水温と配管径を設定し、一年間でどれだけのエネルギー及び CO₂ 排出量の削減が期待できるかを調べる。

3.1 前提条件

以下にシミュレーションのための前提条件を述べる。

(1) 浄水場水温の年変化

各浄水場での水温データは年間の最高・最低・平均のみなので、これらをもとに一年間の水温を推定する。

一日の平均水温がサインカーブにしたがって推移すると仮定すると、

$$\text{もとの水温 } T_w = \left(\frac{T_h + T_l}{2} \right) + \left(\frac{T_h - T_l}{2} \right) \cdot \sin \left(\frac{\text{Date}}{365} \cdot 2\pi \right) \quad \dots \text{ (式 11)}$$

T_h :最高水温[°C], T_l :最低水温[°C]

Date :経過日数 (年間平均水温の日 $\text{Date} = 0$)

とあらわせる。今回は水温の日変化は考慮しないため、1日を通じて水温は一定とする。

(2) 地中温度の年変化

地中埋設とするため、地中温度の推定を行う。送水管の埋設深度は2mとする。小平における深度2mでの地中温度の年変化は、最低温度12°C、最高温度20°C、位相遅れ約2ヶ月¹⁷⁾であり、浄水水温と同様にサインカーブで年変化の仮定をした。

(3) 配管径

直径100mmから100mm、刻みで最大2,000mmと3,000mmの2ケースを想定する。

(4) 供給目標水温

浄水場から最終的に需要家に向けて供給する、目標の水温を「供給目標水温(T_d [°C])」とする。供給目標水温 T_d は15°C, 22°C, 28°Cの3ケースを想定する。15°Cというのは年間の平均水温程度で、28°Cは最高水温近く、22°Cはその中間という意味である。年間を通じて、浄水場の水温がこの供給目標水温より低くなるときに必要な熱量分だけ廃熱輸送を行う。

(5) 送水管で輸送する水温・熱量・水量

浄水場の水温を上げるために、必ずしも全ての水を廃熱源まで輸送する必要はない。目標とする水温より高めの水を廃熱回収用に送水管で輸送し、供給前に浄水場で混合して水温を調整すれば、輸送する水量を抑えることができる。ここで、廃熱源での熱回収直後の水温を「輸送水温(T_g [°C])」、このとき回収される廃熱熱量の総量を「輸送熱量(Q_T [Mcal/day])」、送水管で輸送する水量を「輸送水量(W_T [m³/day])」とする。さらに、浄水場で最終的に回収された熱量を「有効回収熱量 (=輸送熱量 - 熱損失)」とする。

圧力損失及び熱損失を計算するために、輸送水量 W_T を求める。第 j 経路にある第 i 浄水場について、熱需要は次のように計算できる。

$$\text{回収廃熱の需要: } Q_i = C_p \times \rho \times W_i \times (T_d - T_w) \quad \dots \text{ (式 12)}$$

Q_i :第 i 浄水場での熱需要量 [Mcal/day]

W_i :第 i 浄水場での浄水処理量[m³/day]

C_p :温水定圧比熱 [Mcal/(ton·°C)]

ρ :水の密度[ton/m³], T_d :供給目標水温[°C]

T_w :もとの水温[°C]

これより、第 j 経路の輸送熱量 Q_T ($=\sum \{Q_i\}$) が求められる。さらに輸送水温 T_g を適当に設定すれば第 j 経路の輸送水量 W_T は次のように計算できる。

$$\text{輸送水量} : W_{Tj} = \frac{Q_{Tj}}{C_p \times \rho \times (T_g - T_d)} \quad \dots \text{(式 13)}$$

W_{Tj} : 第 j 経路の輸送水量[m³/day]

Q_{Tj} : 第 j 経路の輸送熱量[Mcal/day]

T_g : 輸送水温[°C]

さらに、全ての経路についての1日当たりの総計として、輸送熱量 Q_T [Mcal/day] ($=\sum\{Q_{Tj}\}$) 及び輸送水量 W_T [m³/day] ($=\sum\{W_{Tj}\}$) が得られる。

(6) 既設配水管網での熱損失

浄水場で温度調整をした後、既設の配水管網を通じて温水を各需要家まで供給することになるが、ここでも 2.3.3 節で述べた熱損失が生じる。東京都に配水池は 134 カ所⁹⁾ あり、東京都の面積・世帯数・浄水量についての配水池 1 カ所当たりの平均は、それぞれ 16km²、37,302 世帯、36,702 m³/day となる。同様に配水管の延長は、管径 150~300mm で配水池 1 カ所当たり 87,291m、管径 100mm で 60,741m となる。これらをもとに、図.3.1 に示すような非常に単純化した配水管網のモデルを作成し、熱損失の推計を行う。このモデルにおいて、水道水は管径 1m の送水管で配水池まで送られた後、管径 300mm 及び 150mm の配水管を経て、各需要点に管径 100mm の引込管を通して供給される。ただし、配水池での滞留時間は考慮しないこととする。

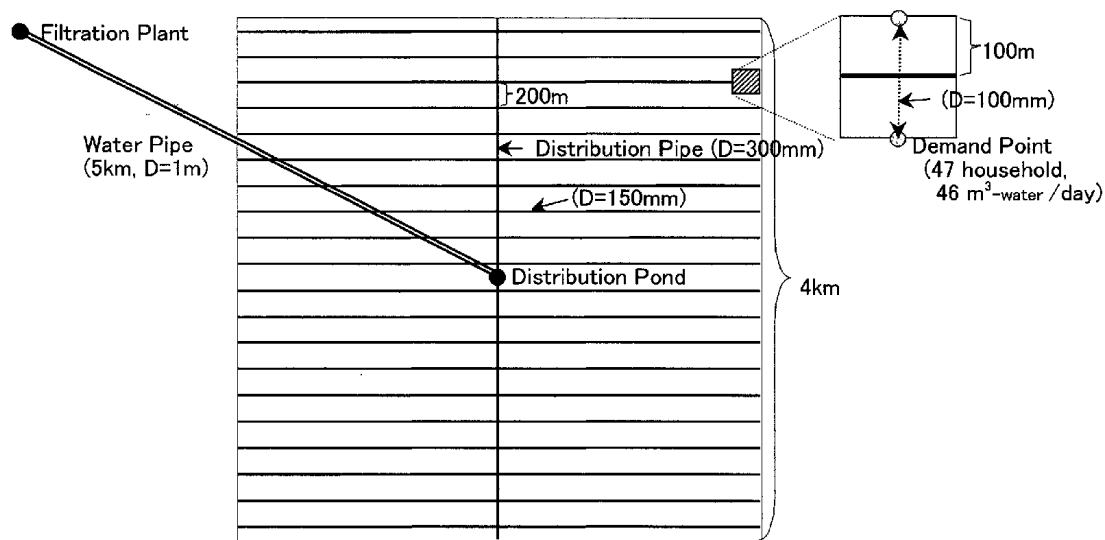


図 3.1 配水管網のモデル

3. 2 シミュレーションの手順

供給目標水温 T_d (15,22,28°C)、最大管径 D ($\leq 2,3$ m) の設定条件ごとに、エネルギー損失を最小にする条件を求める。まず 1 日毎の輸送熱量 Q_T (有効給湯熱量に相当) と、輸送水温 T_g をパラメーターとして圧力損失 (ポンプ動力)、熱損失 (有効給湯熱量に相当)、発電

ロス（燃料原油の増加分）、設備の材料・建設素材を計算し、それぞれ表.2.4 と 2.2 節の結果に基づき 1 次エネルギー相当に換算する。これらを用いて、ライフサイクルを考慮したシステム全体の熱輸送効率を評価する指標として「1 次エネルギー損失[Mcal/day](それぞれ 1 次換算した、新設温水輸送システムにおける 1 日あたりの熱損失、圧力損失、発電ロス、設備負荷の総和)」及び「1 次エネルギー損失率(= 1 次エネルギー損失 / 1 次換算した輸送熱量)」を計算する。

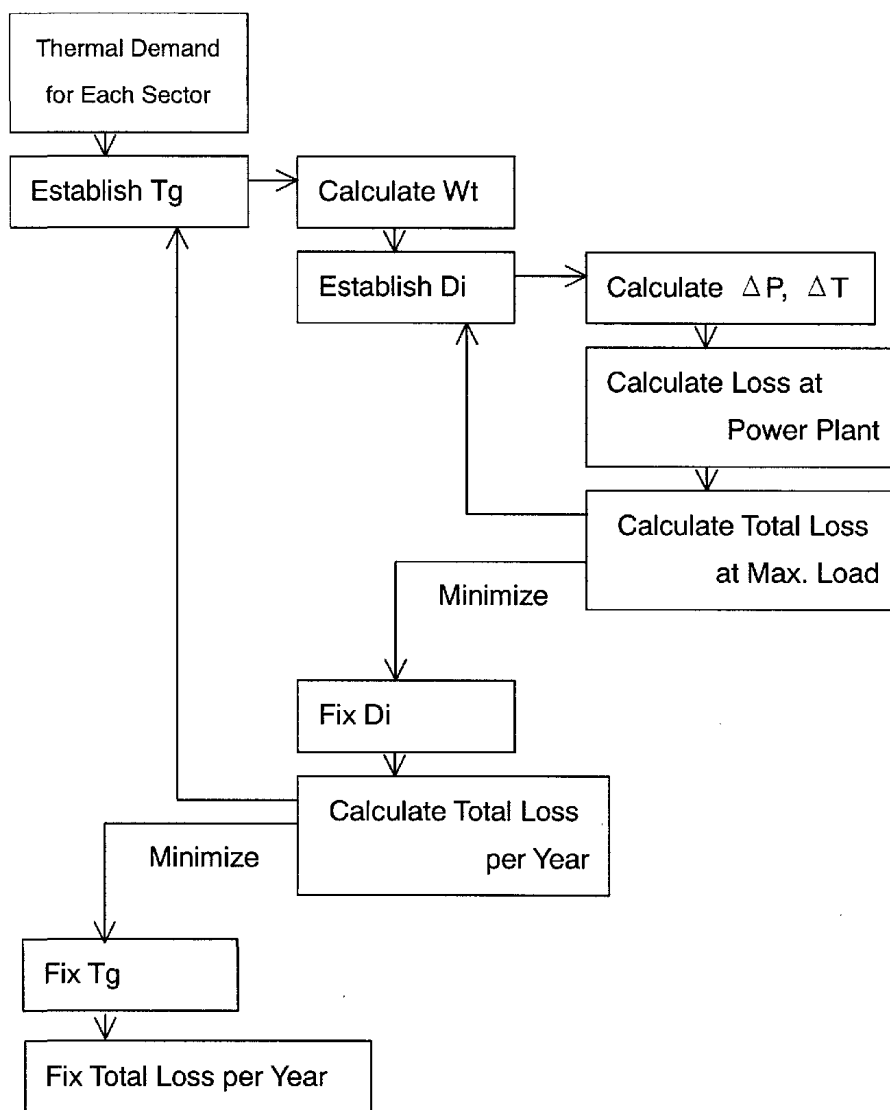


図 3.2 シミュレーションのフローチャート

シミュレーションは次のような手順で行った。(図.3.2)

- ① システムの規模（配管径）を定める。最大負荷日（1 年のうちで輸送熱量 Q_T が最大になる日）の 1 次エネルギー損失が最小になるように、水路の各区間毎に配管径 D_i を決定する。1 次エネルギー消費と CO_2 排出量による評価では、設備負荷が非常に小さく

評価されるため、設備の稼働率は余り問題にならない。このため、最大負荷日を基準に設備規模を決定した。

- ② 年間の運転シミュレーションを行う。1日毎に1次エネルギー損失が最小になるように輸送水温 T_g を決定し、これに基づいて熱損失、圧力損失、発電ロス、及び既設配水管網での熱損失を計算する。この際、エネルギー損失が大きくなりすぎて正味の削減効果が得られなくなる浄水場に関しては、熱輸送を行わないこととする。
- ③ 年間総計での輸送熱量と1次エネルギー損失（新設温水輸送システムにおける熱損失、圧力損失、発電所ロス、配管設備）、及び既設配水管網での熱損失を求め、東京都全体での1次エネルギー総消費量と CO_2 総排出量に対する削減効果を算出する。

3. 2 結果

一般に圧力損失は輸送水量が多く管径が小さくなるほど大きくなり、熱損失及び発電ロスは輸送水温が高くなるほど大きくなる。一定の輸送熱量に対し、輸送水温と輸送水量はほぼ反比例するので、圧力損失と（熱損失+発電ロス）との間にトレードオフが生じることが予想される。供給目標水温 T_d 、配管径 D の設定条件毎に、輸送水温 T_g に従った最大負荷日における1次エネルギー損失率の変化の様子を図3.3に示す。予想したとおり、輸送水温の最適値が求められる。このとき選択された区間毎の配管径の条件に基づき、年間の運転シミュレーションを行った。

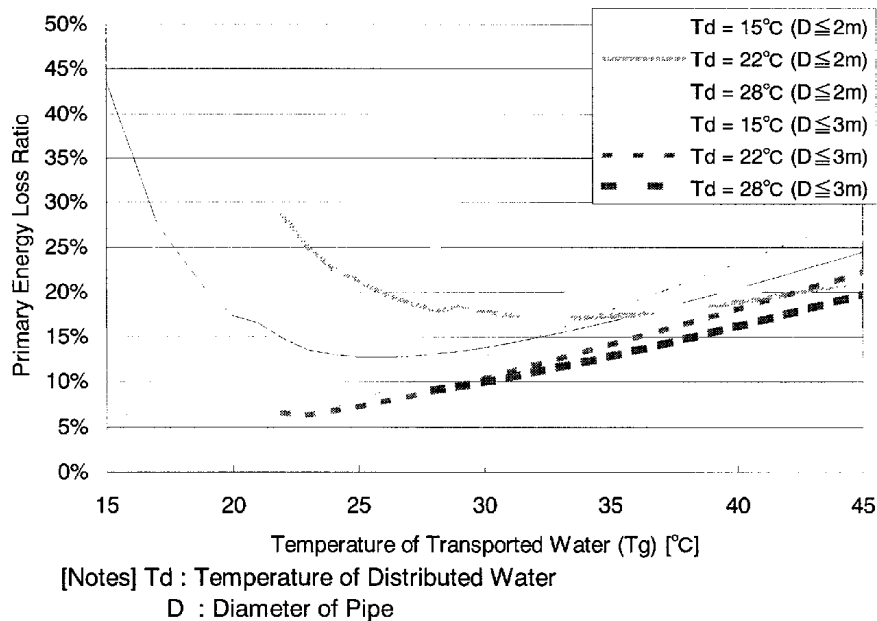


図 3.3 輸送水温 T_g に対する最大負荷日における1次エネルギー損失率の変化

年間総計での1次エネルギー損失率（熱損失、圧力損失、発電所ロス、配管設備）の内訳を図.3.4に示す。新設温水輸送システムに関しては、管径 $D \leq 3m$ の場合よりも管径 $D \leq 2m$ の場合のほうが供給目標水温の上昇に対するエネルギー損失の増加が大きい。これは、管径を絞ると圧力損失が大きくなるだけでなく、輸送水温が上昇するため発電所の発電効率が大きく下がることになるが、この発電ロスによる影響が大きいためであると考えられる。従って、配管径は出来るだけ大きくとることが、廃熱源のためにも重要であるといえる。一方、既設配水管網での熱損失は、供給目標水温の上昇に伴い大きく増加している。これを抑えるためには、配水管網を保温管に切り替える大規模な設備投資が必要となってしまうため、本システムにおいてはやむを得ないものであろう。

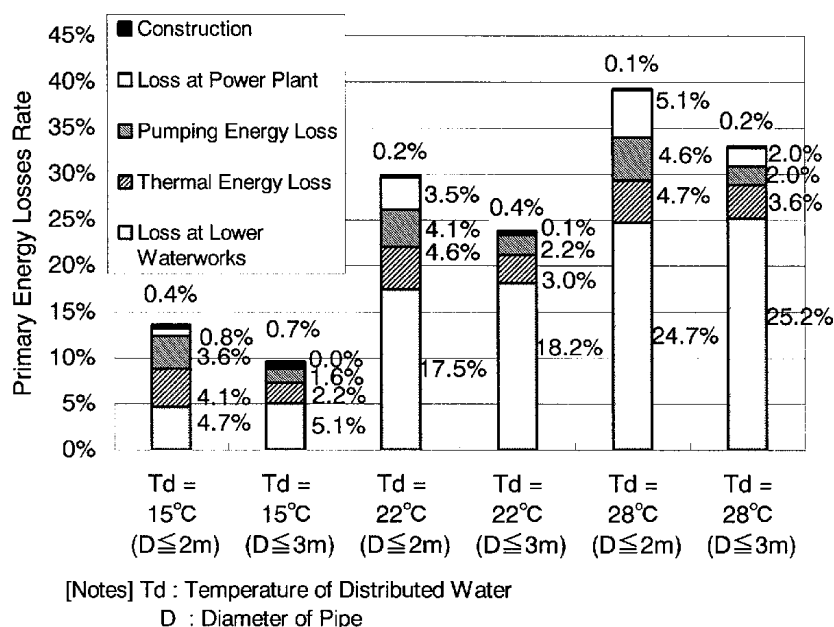
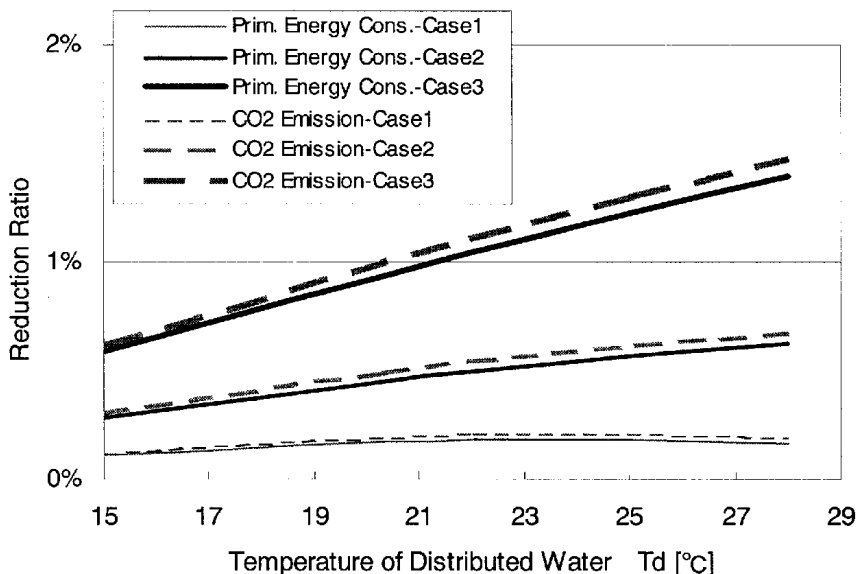


図 3.4 供給水温 Td、最大管径 D に対する年間総計 1 次エネルギー損失率

最後に、社会全体の1次エネルギー消費及びCO₂排出に与える影響を評価する。年間総計の有効回収熱量から既設配水管網での熱損失分を除き、これに2.1節で設定した水道水の給湯向け利用割合を掛けると、本システムによる最終的な給湯熱削減量が得られる。これを2.2節で算定した原単位を用い給湯熱として1次エネルギー量とCO₂排出量に換算し、それぞれの期待される削減量を算定した。一方、東京都の最終エネルギー消費量を表.2.4の原単位を用いて年間総1次エネルギー消費量及びCO₂排出量に換算し、これに対する削減割合を、給湯向け水使用割合の設定条件別に図.3.5及び表.3に示す。従来の水道水を一律に暖める本システムでは、実質的な効果の評価にはかなり幅がある。少なくともCase1（家庭用風呂向けの水使用割合）の、0.1~0.2%程度の削減は可能である。Case2（Case1+家庭での炊事向け）とCase3（Case2+業務部門での給湯向け）の場合では、それぞれの用途に対して

全て温水として利用しているわけではないため、この評価値のままの削減効果は期待できない。これら家庭での炊事向けと業務部門での給湯向け水使用の半分に効果があるものと仮定すれば、0.5%~1%程度の削減率が期待できるであろう。



[Notes] Diameter of Pipe(D) ≤ 3m
 Case1: Minimum Case (For Bath Use in Residential Sector)
 Case2: Medium Case (Case1 & For Cooking Use in Residential Sector)
 Case3: Maximum Case (Case2 & For Hot Water Use in Commercial Sector)

図 3.5 供給対象地域内（東京都）での、供給水温 Td に対する
1 次エネルギー消費量と CO₂ 排出量の削減率

表 3 1 次エネルギー消費量と CO₂ 排出量の削減率のまとめ^[1]

供給水温		廃熱輸送システム				現状	
		15℃以上 ^[2]		28℃ ^[3]			
		CO ₂ 削減量 [10 ³ t-CO ₂]	CO ₂ 削減率 ^[4]	CO ₂ 削減量 [10 ³ t-CO ₂]	CO ₂ 削減率	CO ₂ 排出量 [10 ³ t-CO ₂]	総排出量に 占める割合
家庭部門	風呂向け	145	0.12%	232	0.19%	5,047	4.21%
	炊事向け	221	0.18%	567	0.47%		
業務部門給湯向け		377	0.31%	967	0.81%	3,040	2.54%
合計(Case3)		742	0.62%	1,766	1.47%	8,087	6.75%

[1]最大管径 3m のケース
 [2]水温が年間平均水温(=15℃)を越える日は熱輸送を行わない
 [3]年間最高水温(=28℃)
 [4]東京都の CO₂ 総排出量 119,822[10³t-CO₂]に対する比率

4. コストの推計

4. 1 投資コスト

投資コストとして、本システムの配水管およびポンプの建設コストを推計する。まず、シミュレーションで計算された素材の投入量に単価を乗じて、原材料コストを計算する。その際、使用した単価は『産業連関表』「部門別国内生産額表」²²⁾から得たが、表 2-7 の各素材の産業連関表部門との対応と単価を表 4-1 に示した。ただし、この単価は生産者価格であり、商業および運輸マージンが考慮されていない。したがって、各素材の国内需要計に対する生産者価格投入額と購入者価格投入額の比率を上記の原材料コストに乘じ、購入者価格に変換した。

表 4.1 各素材の産業連関表部門との対応と単価²²⁾

項目	素材名	産業連関表コード	産業連関表部門名	生産者価格	単位
配管	鉄	2622011	めっき鋼管	122,645	yen/ton
	コンクリート	2522011	生コンクリート	11,831	yen/m ³
	ガソリン	2111011	自動車揮発油	9,036	yen/Gcal
	軽油	2111014	軽油	5,583	yen/Gcal
ポンプ	鉄	2621011	普通鋼形鋼	44,508	yen/ton

次に、求められた原材料コストから、建設コストを推計する。北米における天然ガスパイプラインの平均建設コストが、通行権コスト、原材料コスト、労働コスト、その他のコストという分類で得られるので、この情報を使用する²³⁾。表 4-2 に示す管径 36 インチのパイプラインのデータから、原材料コストとそれ以外のコストの比率を計算する。これを 4. 1 節で計算した原材料コストに乗じて、本システムの建設コストを推計した。日本の通行権コストは、北米に比べて高いという指摘もあろうが、本システムでは基本的に新規配管は川沿いに敷設するため、通行権コストはそれほど高くないと思われる。前節のシミュレーションでは 1 年当たりの負荷を計算しているので、建設コストも設備の耐用年数で除している。

表 4.2 Average Gas Pipeline Construction Costs in North America, 2000²³⁾

Diameter (inches)	Rights-of- way (\$/mile)	Material (\$/mile)	Labour (\$/mile)	Other (\$/mile)	Total (\$/mile)
36	195,848	454,764	779,527	442,122	1,874,260

4. 2 経常コスト

経常コストとしては、ポンプの動力として消費される電力コストと、発電ロスによって増加する燃料コストを考えている。電力消費量および燃料消費量に『産業連関表』「部門別国内生産額表」から得た電力と A 重油の単価をそれぞれ乗じ、1 年間の経常運転コストを計測した。ただし、A 重油については、国内需要計に対する生産者価格投入額と購入者価格投入

額の比率を上記の原材料コストに乘じ、購入者価格に変換した。

4. 3 CO₂削減コスト

シミュレーションから計算されたCO₂削減量を、投資コストと経常コストの合計で除し、本システムによるCO₂削減コストを計測した。その結果は、表4.3に示される。Case1（家庭用風呂向けの水使用割合）で供給水温15℃以上の場合の29,800円/t-CO₂から、Case3（Case1+家庭での炊事向け+業務部門での給湯向け）で供給水温28℃の場合の3,700円/t-CO₂というように、CO₂削減コストにはかなりの幅がある。

$$\text{CO}_2\text{削減コスト} = \frac{\text{CO}_2\text{削減量}}{\text{投資コスト} + \text{経常コスト}} \dots (\text{式} 14)$$

表4.3 廃熱輸送システムのCO₂削減コスト^[1]

		(1000yen/t-CO ₂)		
供給水温		15℃以上 ^[2]	22℃ ^[3]	28℃ ^[4]
Case1	家庭部門(風呂向け)	29.8	18.6	16.0
Case2	家庭部門(風呂+炊事向け)	13.3	8.3	7.2
Case3	家庭部門+業務部門	6.8	4.3	3.7

[1]最大管径3mのケース

[2]水温が年間平均水温(=15℃)を越える日は熱輸送を行わない

[3][2]と[4]のケースの平均水温

[4]年間最高水温(=28℃)

また、この結果を先行研究の温室効果ガス削減コストと比較するために、単位をドル/t-C(1ドル=115円)に変換してまとめたものが、表4.4と図4である²⁴⁾。もっとも削減コストが安価なCase3で供給水温28℃の場合の117ドル/t-Cであっても、世界銀行のプロトタイプ・カーボン・ファンド(PCF)が提示している排出権の期待価格20~30ドル/t-Cには及ばない。しかし、先進国の国内における温室効果ガス削減コストよりは低いことがわかる。したがって、本システムは温室効果ガス削減コストの面から見ても、日本の国内対策としては効果的であると言える。

表 4.4 廃熱輸送システムと先行研究の温室効果ガス削減コスト²⁴⁾

廃熱輸送システム ^[1]	ドル/t-C	他の温室効果ガス削減コスト	ドル/t-C
家庭部門(風呂向け,15℃) ^[2]	949	MIT限界削減コスト(日本) ^[4]	584
家庭部門(風呂向け,28℃) ^[3]	511	MIT限界削減コスト(EU)	273
家庭部門(風呂+炊事向け,15℃)	424	MIT限界削減コスト(アメリカ)	186
家庭部門(風呂+炊事向け,28℃)	228	S&P削減コスト(アメリカ) ^[5]	112
家庭部門+業務部門(15℃)	218	PCF排出権期待価格(上限) ^[6]	30
家庭部門+業務部門(28℃)	117	PCF排出権期待価格(下限)	20

[1]最大管径3mのケース

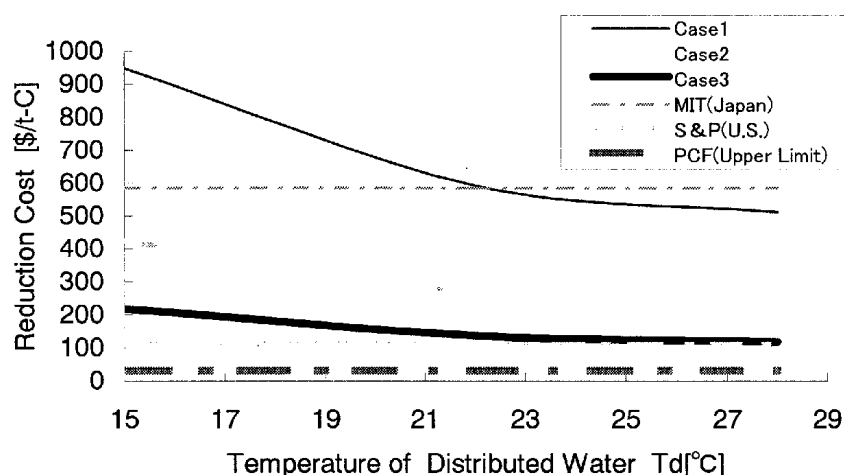
[2]水温が年間平均水温(=15℃)を越える日は熱輸送を行わない

[3]年間最高水温(=28℃)

[4]MIT:マサチューセッツ工科大学のスタディ(1998年9月)

[5]S&P:スタンダード&プアーズの分析

[6]PCF:世界銀行のプロトタイプ・カーボン・ファンド



[Notes] Diameter of Pipe(D) ≤ 3m

Case1:Minimum Case (For Bath Use in Residential Sector)

Case2:Medium Case (Case1 & For Cooking Use in Residential Sector)

Case3:Maximum Case (Case2 & For Hot Water Use in Commercial Sector)

MIT(Japan):MIT Study

S&P(U.S) :Standard & Poor's Study

PCF(upper bound):Prototype Carbon Fund

図 4 廃熱輸送システムと先行研究の温室効果ガス削減コストの比較²⁴⁾

5. おわりに

研究の成果を以下に述べる。

- ① 東京都における給水・給湯事情、既設の水道設備を調査し、新設する温水供給システムの各プロセスについて、特性の評価を行った。
- ② 検討システムの運転シミュレーションを行い、1次エネルギー消費及びCO₂排出量の削減効果の推計を行った。その結果導入を検討した地域において、1次エネルギー消費量

及びCO₂排出量を0.5～1%程度削減できることが試算された。

- ③ 検討システムの投資・運用コストを推計し、CO₂削減コストを試算した。その結果、日本国内において、低コストで温室効果ガスを削減できることがわかった。

今後の検討課題を次に述べる。

- 1) 本分析では供給対象を東京都、廃熱源を大規模発電所に限定したが、製鉄・ゴミ焼却等他にも様々な熱源があり、関東圏全体の温水供給システムを考えるには熱源確保のためにもそれらとのネットワークを検討する必要がある。
- 2) 本分析では1日の時間経過に伴う給湯需要の負荷変動を考慮していない。実際には給湯需要だけでなく排熱源である火力発電所の出力も1日の中で大きく変動している。また、既設配管網モデルも非常に簡略化したものであるため、今後これらを考慮したより詳細かつ正確なシミュレーションが必要である。

文献

- 1) 資源エネルギー庁, 総合エネルギー統計, 1997
- 2) 東京都水道局ホームページ, <http://www.tokyo-teleport.co.jp/tokyo-suido/>
- 3) 東京都水道局, 水質年報、平成8年度
- 4) 総務庁統計局統計センターホームページ, 国勢調査, 1995, <http://www.stat.go.jp/051.htm>
- 5) 朝日新聞社, 民力, 1997
- 6) 日本エネルギー経済研究所, 98'EDMC エネルギー経済統計要覧, 省エネルギーセンター
- 7) 東京都統計協会, 第47回東京都統計年鑑, 平成7年
- 8) 疋田浩一、石谷久、松橋隆治、吉田好邦, プロセス連関分析による電力・ガスシステムのLCA, 電気学会・電子情報システム部門誌9月号 Vol.118-9
- 9) 厚生省生活衛生局水道環境部水道整備課, 水道統計, 平成7年度
- 10) 水道産業新聞社編, 水道年鑑, 1997
- 11) 千葉孝男著, 蒸気・高温水システム, 省エネルギーセンター編
- 12) 東京大学工学部 長谷川秀夫、石谷久、松橋隆治, 熱輸送媒体に着目した各種熱輸送システムの分析に関する研究, 東京大学大学院修士論文, 1996
- 13) 資源エネルギー庁公益事業課編, 電源開発の概要, 平成8年度
- 14) 谷下市松監修、北方直方著, 熱力学の学び方, オーム社
- 15) 東京大学工学部 吉岡理文、石谷久、松橋隆治, 発電所の配置を考慮した廃熱利用による省エネルギー可能性の検討, 第10回エネルギーシステム・経済コンファレンス講演論文集
- 16) 日本機化学会, 1980SI 蒸気表
- 17) 建設産業調査会, 地下水ハンドブック, 1979
- 18) 国土庁, 水資源協会, '89 水資源便覧, 山海堂, 1989
- 19) 資源協会, 生活資源のライフサイクルエネルギーに関する調査, 科学技術庁委託調査報告書, 平成6年
- 20) 小栗富士雄著, 配管設計ガイドブック, 共立出版, 1979
- 21) 内山洋司, 発電プラントのエネルギー収支分析, 電力中央研究所報告, 1991
- 22) 総務庁, 平成7年産業連関表, 1999
- 23) IEA, World Energy Outlook 2001, 2001
- 24) 世界銀行, 炭素基金(プロトタイプ・カーボン・ファンド PCF)温室効果ガス排出権取引市場開発の触媒として, 東京セミナー資料, 2000