

特集 未利用エネルギー

# 都市排熱(地下鉄等)の利用システム

## Utilizing System of Urban Waste Heat - Utilization of Subway Waste Heat

角谷修二\*  
Shuuji Kakutani

### 1. はじめに

未利用エネルギーの活用は、地球環境保護とりわけ地球温暖化の抑制策として、冷暖房用エネルギー源として使用する化石燃料使用量の削減を目指し、国内外で活発に検討ならびに実用化が図られている。

空気熱源ヒートポンプによる大気熱利用は、古くから行われていた未利用エネルギー活用の一型式であるが、適用下限温度(成績係数低下)や除霜エネルギー損失増大から利用可能地域が東北以南に限られるなど制約があった。こうした中で未利用エネルギー活用は、冷凍機サイクル(ヒートポンプと同じ)の低、高温側(ヒートソースあるいはヒートシンク)として大気を基準にし、大気の年間気温変化に較べて、熱容量の違いや蒸発、あるいは太陽熱などによって、冬暖かく夏冷たい変化をする媒体(海水、河川水、都市排熱)を活用することによって、冷凍機サイクルの作動温度差を小さくし、必要とする投入仕事の省エネルギー化と同時に、温熱利用時は汲み上げた熱エネルギーによる一次エネルギー削減を目指すものである。

未利用エネルギーの中で都市排熱として着目されているものは、都市生活の中で必然的に発生する排熱エネルギーで、ゴミ焼却排熱などの高温未利用エネルギーと、下水排熱、送電、変電排熱、地下鉄排熱、更にはビルの冷房排熱などの低温未利用エネルギーの2種に分類される。本稿では、これら都市排熱利用の概説と中でも地下鉄排熱の特徴と利用実施例について紹介する。

### 2. 都市排熱エネルギー利用の概説

#### 2.1 海外での実施例

筆者は1991年10月に、日本冷凍協会主催の欧州エネルギー有効活用調査団に参加し、この内印象深かった

\*三菱重工業㈱高砂製作所冷熱装置部主務  
〒676 兵庫県高砂市荒井町新浜 2-1-1

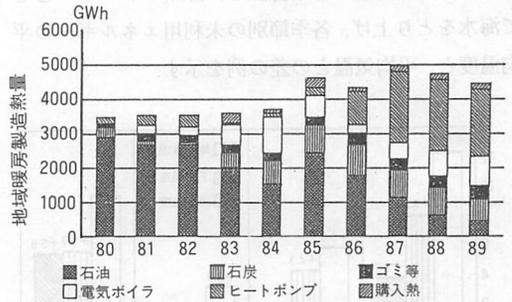


図-1 ストックホルムエネルギー社の地域暖房エネルギー (1980~1989)

ストックホルムエネルギーAB社の実績<sup>1)</sup>を紹介する。同社はストックホルム市に電力、ガスと熱の供給を行っている。1982年の下水利用ヒートポンプ導入から現在に至るまで10プラント合計383MW (329Gcal/h) , 22基のヒートポンプを設置し図-1に示すように、同市の'89年度年間暖房需要の内43%をヒートポンプによってまかない、石油依存度を'80年度83%から'89年度10%までの低減に成功している。ヒートポンプ設備の内、27%が下水排熱利用で残りは、海水熱源ヒートポンプ設備主体となっている。また、温熱の供給温度は夏期60℃、冬期ピーク時120℃通常80~100℃変温度供給でヒートポンプをベースに効率的な運営を行っている。CO<sub>2</sub>発生を伴わない豊富な水力発電と原子力発電による電動圧縮式ヒートポンプが主であるが、昨今のフロン問題からR-134aの試用や吸収式ヒートポンプの開発などが盛んに行われている。また同社は'90年に電力、ガス、熱の各供給会社を再編して設立された会社であり、ピーク時発電を石炭による加圧流動床方式の熱供給複合発電プラントで行い、熱負荷がない時は運転しないなど徹底したエネルギー管理と最新の技術導入によって、エネルギーを一元化して活用し一層の省エネルギーを図っている。このように都市排熱利用から始まったスウェーデンの事例から、日本においても早急に普及されるべき問題と言える。

### 2.2 都市排熱の温度レベル

都市排熱の質は、その温度レベルによって評価することができる。ゴミ焼却排熱は、ゴミとして出される化石燃料を燃焼させて得られるエネルギーで40kg/cm<sup>2</sup>gの蒸気を取り出すことができ、最も質の高い排熱であり発電後の排熱が対象となる。送変電排熱はその機器によって水冷式、空冷式があるが温度レベルは水冷式の場合、下水より高く利用容易であるが、空冷式の場合地下鉄排熱と同レベルである。図-2に、地下鉄排熱、下水排熱の都市排熱と、自然エネルギーとして海水をとり上げ、各季節別の未利用エネルギーの平均温度と、平均気温との差の例を示す。

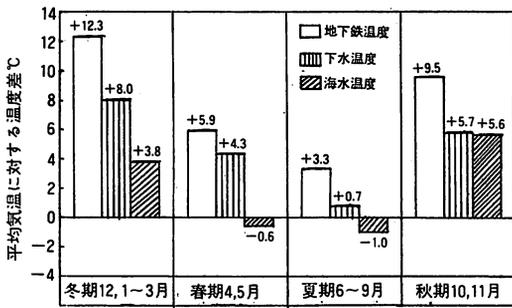


図-2 未利用エネルギーの各期平均気温差

図-2から、海水は、夏期に気温より低く、冬期中間に気温より高く、冷凍サイクルの作動温度差を小さくする省エネルギー効果のあることが判る。また下水排熱は夏期+0.7℃高くなっているが、気温の日間変動±5℃に対し、下水の熱容量と地下管路の土壌との熱授受によって日間では、ほぼ一定であり昼間冷房負荷増大時には気温より低く海水と同じ効果を有する。一方冬期は海水より温度差が大きく、より有効な熱源と言える。地下鉄排熱は、年間を通じて気温より高く、

また、空気に排熱される事から、その比熱差だけ、下水や海水に較べて高い温度レベルとなっており有効利用がのぞまれる。

### 2.3 都市排熱の賦存量<sup>2)</sup>

東京都23区の都市排熱エネルギーは、約15,000Tcal/年で、業務用、家庭用の冷暖房給湯需要4万4千Tcal/年の34%に当たる。都市排熱の内訳は、ゴミ焼却27%、下水53%、送変電13%、地下鉄7%である。地下鉄排熱の賦存割合は少ないが、地下鉄駅周辺はビル等が多く、モデル事業地区(丸の内)で低温排熱賦存割合は、地下鉄25%、送変電所9%、ビル排熱66%、下水、ゴミ0%、商業地区で地下鉄28%と試算され、需要に密着した未利用エネルギーであることが判る。一方ビル排熱は主として冷房排熱であり、温熱需要の少ない夏期に発生するため、その利用に当たって温暖地区では、より高度な技術開発が必要とされる。

### 3. 地下鉄排熱利用の特徴

地下鉄排熱は、列車動力、照明、換気動力、人体発熱などからなり、駅構内やトンネル部で発生し構内の温度を高める。一方、地下鉄は、地上建屋と異なり、構造物が地中にあることから、構内の温度変動に応じて、地中と熱授受を行うこととなる。この熱授受は、駅構内の季節的な温度変動を、1年間を1周期とする単振動の温度変動に置き換え、地中を半無限固体としてモデル化すると、定常周期熱伝導問題として扱うことができる。図-3<sup>3)</sup>に、地中温度を16℃一定とし、換気方式を想定した駅構内温度と冷房期間の半分の時間遅れを有する深さの地中温度の相関図を示す。駅構内の冷房設定温度を29℃とし①線とすると、地中の冷房時温度影響は②線の通りとなる。夏期駅構内温度ピーク点(5,700H)では、①線温度と地中の温度②線の

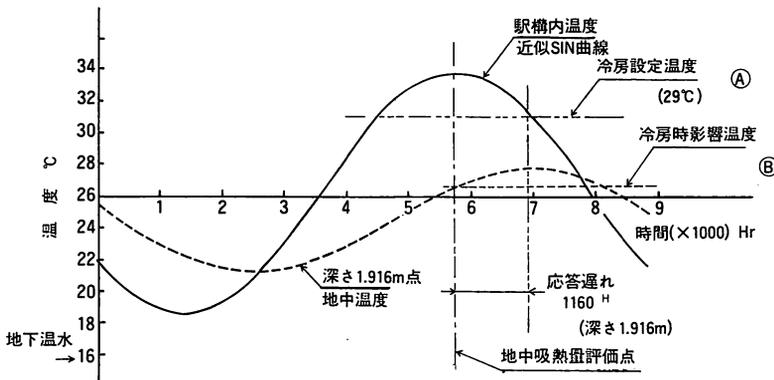


図-3 換気方式駅構内温度と地中温度相関

温度差に比例した地中への熱流が生じ、冷房負荷の軽減が期待される。

冬期、中間期に排熱回収によって駅構内温度を10℃前後まで（外気温度より高目）下げると地中温度も低下し夏期の地中吸熱量増加が図れ（一種の期間蓄熱効果）冷房負荷軽減という省エネルギー効果を発揮することとなる。この様に地下鉄排熱利用は、その都市排熱利用本来のメリットの他に、駅構造物周囲の地中の蓄熱効果という副次効果によってより高い省エネルギー性を有している。地下鉄内熱環境シミュレーションによれば、冬期中間期に換気を行い夏期冷房を行う場合に較べて、排熱回収によって冬期駅構内を12℃まで下げることによって10～15%夏期の冷房負荷削減を図ることができる結果を得ている<sup>3)</sup>。

4. 地下鉄排熱利用システムの実施例

地下鉄排熱を地域冷暖房プラント（D. H. C）に適用した例として、札幌地下鉄排熱利用DHCプラントを紹介する。同プラントは1989年4月に営業運転を開始し現在に至っている。需要家増により1992年に1部増設を行っているが本稿ではシステム概要と第1期の需要家への供給実績について述べる。

4.1 地下鉄排熱利用システム

図-4<sup>1)</sup>に、地下鉄排熱利用地域冷暖房システムのシステムフローと最高効率点成績係数（COP）を示す。

地下鉄駅構内の第1種換気系の排気側に空気熱源ヒートポンプの空気熱交換器を設置し、冬期駅構内からの熱回収を行う。夏期も同様に排熱回収を行い熱回収後の冷風を給気側に再循環し駅構内の冷房を行う。

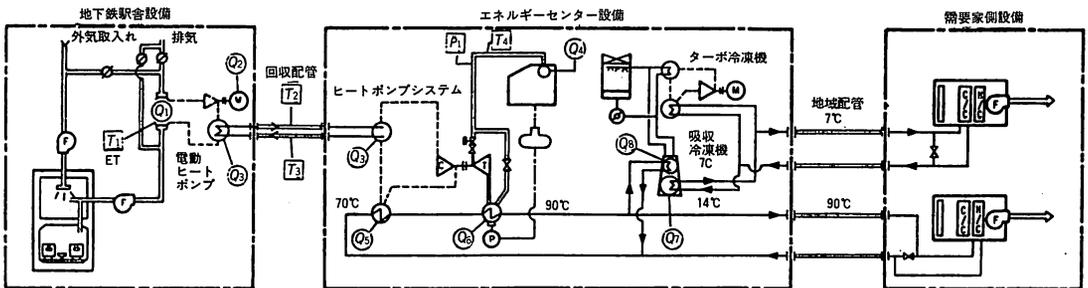
同ヒートポンプから温水をエネルギーセンター（E/C）に送り、E/Cでは更に蒸気タービン駆動ターボヒートポンプによって77℃まで昇温し、後、蒸気タービン排気によって85～90℃レベルの温水を地域に供給する。また、夏期はこの温水を使って吸収冷凍機を駆動し7℃の冷水を供給する。

表1<sup>1)</sup>に1986年12月事業計画時のプラント建設計画を示す。I期工事では温熱供給能力5Gcal/h冷熱供給能力7Gcal/hであり、この内ヒートポンプ容量5Gcal/h、最終工期は冷温とも20Gcal/h内ヒートポンプ容量は10Gcal/hである。

4.2 システムの成績係数（COP）

低温度レベルの排熱回収を行うシステムでは、そのヒートポンプサイクルに高いエクセルギーのエネルギーが必要とされる。夏期に、排熱回収を行って温水を製造し吸収冷凍機の熱源とするためには、ヒートポンプCOPは十分高くなければならない。その様な観点で8kg/cm<sup>2</sup>Gの蒸気を使用する2重効用吸収冷凍機と較べて、システムのCOPを検討した。結果を表2に示す。

蒸気吸収冷凍機は、その経済性の有利さと部分負荷



	駅舎側電動ヒートポンプ						蒸気タービン駆動ターボヒートポンプ					吸収冷凍機			総合成績係数
	Q <sub>1</sub> (%)	Q <sub>2</sub> (%)	Q <sub>3</sub> (%)	T <sub>1</sub> (°C)	T <sub>2</sub> (°C)	T <sub>3</sub> (°C)	Q <sub>4</sub> (%)	Q <sub>5</sub> (%)	Q <sub>6</sub> (%)	T <sub>4</sub> (°C)	P <sub>1</sub> (kg/cm <sup>2</sup> abs)	Q <sub>7</sub> +Q <sub>8</sub> (%)	Q <sub>7</sub> (%)	Q <sub>8</sub> (%)	
夏期	100	70.2	122.8	12	40	32	215.4	161.6	161.6	425	31	323.2	232.6	555.8	COP <sub>T</sub> = $\frac{(Q_1+Q_7)}{(Q_1+Q_4)} = 1.165$
冬期	100	87.3	128.4	-0.8	35	27	256.8	183.8	183.4	425	31	367.2	-	-	COP <sub>T</sub> = $\frac{(Q_1+Q_8)}{(Q_1+Q_4)} = 1.067$
名称	冷却力	一次エネルギー入力	温水熱量	蒸発温度	回収温水温度		ボイラ一次エネルギー	ヒートポンプ熱量	復水器熱量	蒸気温度	蒸気圧力	温水入熱量	冷凍能力	冷却塔排熱	

一次エネルギー基準の成績係数を示す。電動機入力端発電効率35%、ボイラ効率93%（LHV）で換算。熱収支は空気熱回収量を100%と示す。

図-4 札幌地下鉄排熱利用地域冷暖房プラントの総合成績係数

表1 建設計画

項目		年度	'89	'92	'95	'98	'01
延床面積		(m <sup>2</sup> )	88,000	170,000	244,000	309,000	350,000
ピーク熱	高温水	(Gcal/h)	4.93	8.76	13.37	17.1	19.51
	冷水	(Gcal/h)	4.66	8.57	12.44	15.79	17.68
熱需要量	高温水	(Tcal/年)	3.73	10.67	16.21	20.80	24.24
	冷水	(Tcal/年)	6.83	9.52	11.76	14.07	15.54
高温水製造能力		(Gcal/h)	5 (10)	10 (15)	15 (20)	20 (25)	20 (25)
冷水製造能力		(Gcal/h)	6.9	10.5	15.3	20.0	20.0
回収温水ポンプ設備		(m <sup>3</sup> /h)	420	620	620	620	620
蒸気タービン駆動ターボヒートポンプ		(Gcal/h)	5	10	10	10	10
水管ボイラ設備 32kgf/cm <sup>2</sup> G425°C		(t/h)	6	12	12	12	12
炉筒煙管ボイラ設備(温水)		(Gcal/h)	5	5	10	15	15
吸収冷凍機設備		(Gcal/h)	3.63	7.26	7.26	7.26	7.26
ガス吸収冷凍機設備		(Gcal/h)	0.91	0.91	0.91	0.91	0.91
ターボ冷凍機設備		(Gcal/h)	2.37	2.37	7.12	11.87	11.87
冷水地域送水ポンプ設備		(m <sup>3</sup> /h)	1040	1560	2600	2860	2860
高温水地域送水ポンプ設備		(m <sup>3</sup> /h)	500	750	1000	1250	1250
受変電設備30kV		(kVA)	10500	10500	10500	10500	10500
駅舎ヒートポンプ (温水出力)	冬期	(Gcal/h)	2.22	2.85	2.85	2.85	2.85
	夏期	(Gcal/h)	2.51	4.07	4.07	4.07	4.07

\*: ( ) 内は常用予備機を含めた合計能力を示す。温水需要量はロードヒーティング負荷を含む。  
 1989 : 1.1Tcal/年, 1993 : 2.2Tcal/年, 1995 : ~3.3Tcal/年にて夜間20時~6時

表2 冷水供給時理論COP

No.			計算条件				理論COP
			駆動側サイクル		冷凍機サイクル		
			高温部	低温部	高温部	低温部	
1	札幌地下鉄排熱利用DHCシステム	地下鉄-HP	650°C	33°C	40°C	14°C	4.81
		E/C-HP	425°C	85°C	77°C	7°C	
2	ガス吸収冷凍機, 蒸気二重効用吸収冷凍機		9ata 174.5°C	33°C	33°C	7°C	3.40
3	電動圧縮式冷凍機		650°C	33°C	33°C	7°C	6.08

注-1. 電力は650°C超臨界圧蒸気タービンサイクルにもとづいた。 -2. 表はカルノーサイクル, 逆カルノーサイクルにより算定した。

特性の良さから地域冷暖房に広く採用されている。また昨今ではフロム問題から更に普及しつつある。こうした中で、本システムは、冬期用として導入されるヒートポンプを、夏期に排熱を利用して冷水を製造することによって、経済性を高めるとともに、コンベンショナルな機器より高いCOPを得る一つの熱利用形態であると言える。

4.3 札幌地下鉄排熱利用DHCの実績

(1)熱供給実績と排熱回収実績

熱供給対象建屋は4棟(88,000m<sup>2</sup>)の計画に対し4棟(85,350m<sup>2</sup>)で、建屋種別として1部事務所ビルが地下商店街に変更となった他、インテリジェントビルのコンピューターセンターテナント規模が小さく

なったことを除いて、ほぼ計画を満足されるものであった。図-5に、I期供給対象需要家が出そろった'89年10月から'90年9月に亘る1ヶ年間の熱需要実績と、E/Cヒートポンプの製造熱量と排熱回収利用実績を計画値との比較で示す。冷熱ならびに温熱の供給実績は、計画に対し冷熱需要が減少し温熱需要が増大している。この第1要因としてビルNo.1コンピューターセンター規模縮小に伴って冷熱需要が低下し、温熱需要が増大したこと。第2要因としてNo.3ビルが地下商店街になった点があげられる

つぎに、E/Cヒートポンプの温熱出力ならびに利用回収熱量について述べる。前述の温熱供給容量とヒートポンプ容量の関係にみられるごとくヒートポンプ容

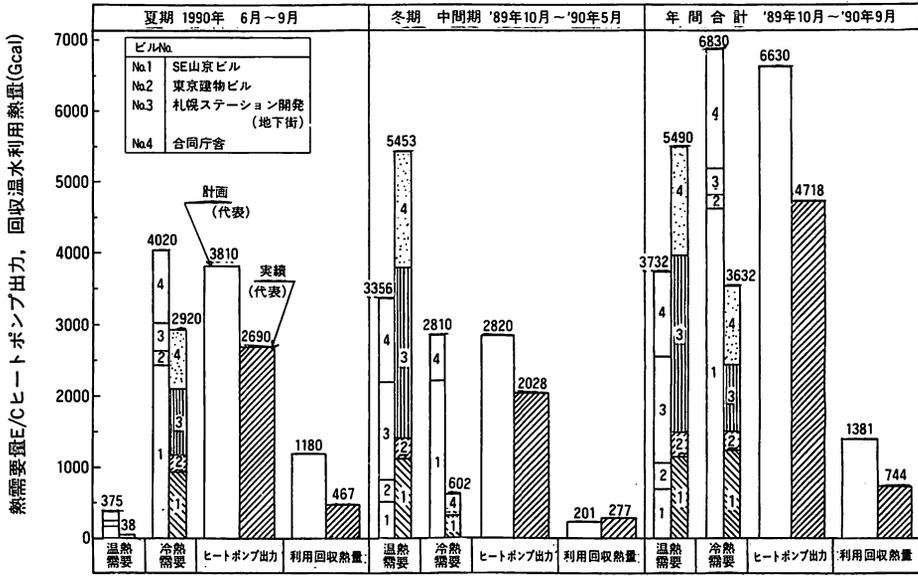


図-5 熱需要量ならびにE/Cヒートポンプ出力と利用回収熱量計画と実績

量は、最終年次に亘る計画検討を経て定めている。

このため第I期供給対象需要下ではヒートポンプの稼働率、負荷率ともに低く計画利用回収熱量は小さい(特に冬期、中間期)。

実績値をみるとE/Cヒートポンプの年間温熱出力合計は、計画値に対し30%減となっている。また、E/Cヒートポンプ温水出力に対する利用回収熱量の寄与率は計画21%に対し16%にとどまっていることが見られる。この主要団として午前7時から午前9時の間、地下鉄設備の電力ディマンド制限のために地下鉄ヒートポンプ停止となりE/Cヒートポンプの稼働率低下に繋がったことがあげられる。一方、夏期とその他期に分類してみると、夏期は冷熱需要低下にともなって、E/Cヒートポンプ負荷率低下を招き利用回収熱量低下をきたしている。しかしながら冬期は逆に温熱需要増加に伴って、負荷率向上があり計画利用回収熱量の約40%良化する結果となっており、今後の熱需要の増加に伴って排熱寄与率向上が期待される。

(2)年間一次エネルギーCOPと消費内訳

次にI期需要家を対象とした年間の一次エネルギーCOPの計画と実績の比較を図-6に示す。図-6は、出力であるE/C製造冷温熱量と地下鉄設備の6月~9月の冷房熱量の合計を、E/Cプラント主機、補機の消費エネルギーと地下鉄ヒートポンプ動力ならびにプラント建屋の照明、換気動力を含む全ユーティリティ消費量で除して一次エネルギーCOPとしている。実績

は、冷熱需要が低下し、温熱需要が増加したこと、吸収冷凍機がベースに使用されたことからガス消費割合が増大しているが、一次エネルギーCOPは計画値に一致していることが得られた。

(3)年間ユーティリティ費用の実績比較

図-7に、'86年12月事業計画時のユーティリティ費用計画と実績の比較を示す。ユーティリティの費用は、計画に対する冷熱需要低下割合よりも若干大きな低下率となっている。このことは、計画時費用発生見込みよりも良化していることを示しており、計画を満足していることが判る。また、実績費用の内、温熱購入費用が計上されている。この費用は地下鉄側施設の保守費用等の固定費的なものであり1ヶ年間の利用回収熱量実績からみれば、まだ経済的には割高であり、熱需

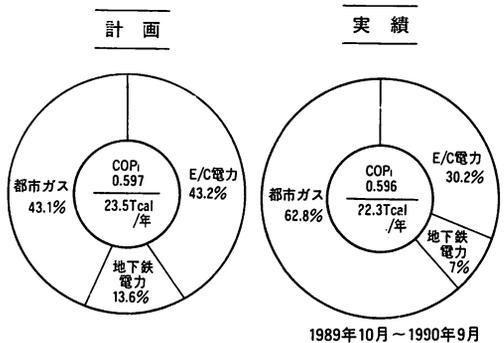


図-6 年間総合COP (1次エネルギー) とユーティリティ内訳、比較

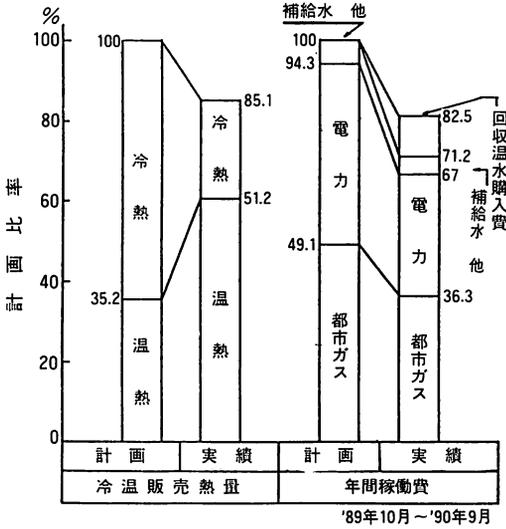


図-7 年間熱販売量とユーティリティ費用比較

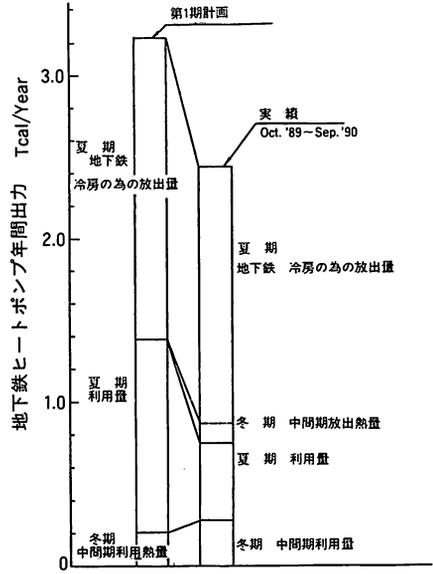


図-8 地下鉄ヒートポンプ出力年間実績

要量増大を待つばかりでなくヒートポンプの負荷分担率向上や、起動停止自動化、更には蓄熱槽の導入等によって、ヒートポンプの負荷率ならびに稼働率向上を図ることが望まれ、これに協力して行きたい。

(4)地下鉄側ヒートポンプ排熱回収実績

図-8に年間の地下鉄側ヒートポンプの排熱回収による温熱出力の計画と実績値を示す。また、図-9に地下鉄駅構内の温熱環境予測（2001年度）シミュレーション結果と'89年5月から'91年1月までの給気温度と駅構内温度（5換気系統）の月間営業時間平均実績温度

の比較を示す。回収熱量の年間実績の内、大通駅の夏期実績は冷房優先の運転下のもので駅構内の温度は8月のピーク時においても29℃以下の平均温度を保つことができている。また、'90年8月の最も高い温度を示すゾーンの実績として28℃を超える日数は10日間有り、内29℃となる日数は3日間、設計条件の超過確率5%以内であることが得られた。図-9の温熱環境シミュレーション結果は'01年の排気温度予測を示すがファン動力の温度上昇を差引いても図-8の計画対比冷房実

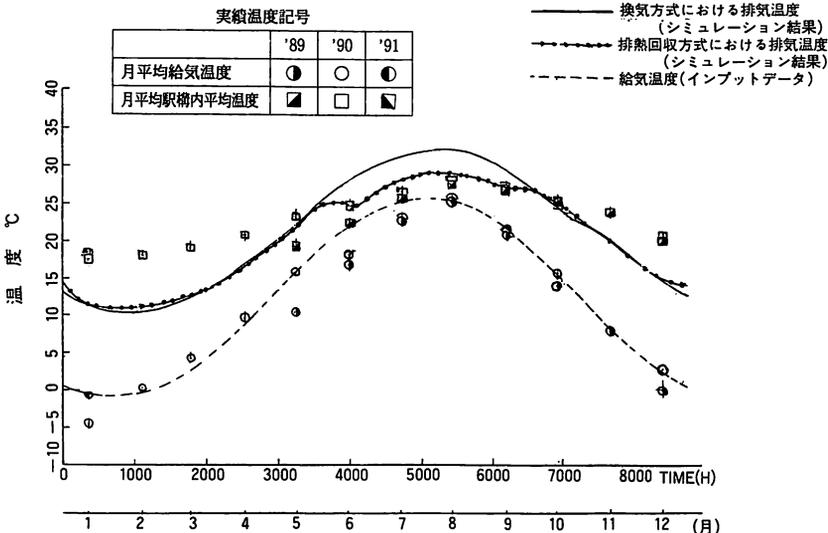


図-9 2001年地下鉄大通駅温熱環境状態予測と'89年~'91年排熱回収実績（営業時間帯平均）

績から将来の交通量増大に伴う構内温度上昇にも十分対処できることが判る。

次に冬期の実績をみると図-5から計画値の約40%増の回収利用量であるにもかかわらず、駅構内温度実績は'90年1月の給気平均温度-4℃下においても熱回収リサイクルシステム<sup>1)</sup>の外気取入量削減に伴う排熱閉じ込めによって17℃前後が得られ、今後の地域温度需要増加に伴う回収利用量増加にも設計温度10℃(従来換気時の実績温度)までの余裕は十分有り最終計画段階まで熱回収可能と判断される。

年度毎の駅構内温熱環境推移の観点で図-9を見ると冬期高目の温度で維持された'90年の夏期温度は'89年5月~10月と比較すると若干高目の温度であり期間蓄熱効果の前兆と見ることもでき、今後のデータ分析が望まれる。

## 5. おわりに

以上のとおり、未利用エネルギー活用の中で都市排熱利用の国内外の事例紹介と、特に地下鉄排熱利用の特徴と実績について紹介した。北欧では未利用エネルギー活用は実用化され普及段階に入っており、日本においても早急に普及されるべき問題と言え、特に電力、ガス供給と熱供給の有機的なエネルギーマネージメン

トは今後のあるべき方向を示唆するものと考えられる。

エネルギーは資源であり熱力学の第1法則の示す通り、エネルギーもリサイクル使用されるべきものである。低温未利用エネルギーの内、都市排熱、特に地下鉄排熱は、空気からの熱回収というハンディキャップがあるが駅構造物囲りの地中の熱特性を生かした利用により、より高い省エネルギー性が見込まれ、他都市に於いても普及が望まれる。札幌地下鉄排熱利用地域冷暖房プラントの実績は、全体として計画値を満足しているが、稼働率の向上や負荷率の向上等、より一層の改善に協力して行きたい。最後に紙面をお借りして、同プラント実現に携わられた関係各位の方々の御努力に敬意を表すとともに、深く感謝いたします。

## 参 考 文 献

- 1) Stockholm Energy Annual Report of Stockholm Energy for 1990
- 2) 通産省資源エネルギー庁; 21世紀を目指す未利用エネルギー活用システム(1990), 通産政策広報社
- 3) 山口保男ほか15名; 地下鉄排熱を利用したコージェネレーション等による最適空調システムの調査研究報告書(平成3年3月), 都科技大, 東京ガス, 三菱重工, 大気社
- 4) 角谷修二ほか4名; 札幌地下鉄廃熱利用地域冷暖房プラントの計画概要, 三菱重工技報, Vol.26 No.3 (1989-5)

協賛行事ごあんない

㈱日本能率協会主催

## 「ニュービルディング関西'92」開催ごあんない

〔会 期〕1992年5月21日(木)~23日(土)

〔会 場〕マイドームおおさか(大阪市中央区)

〔後 援〕

近畿通商産業局, 大阪市, ㈱関西経済連合会,  
大阪商工会議所他 (申請予定)

〔協 力〕㈱人間生活工学研究センター他  
(申請予定)

〔協 賛〕エネルギー・資源学会他(申請予定)

〔催しの構成〕

### ①展示会

ビル・オフィスのインテリジェント化, ア  
メニティ化のための建築関連技術, システ  
ム・機器, ソフトウェア等の展示。

### ②特別企画「人間生活工学フェア」

人間生活工学からみた快適環境づくりなら  
びに製品開発のための装置・システムの展  
示。

### ③シンポジウム

都市を創造し、企業文化の象徴であるビル、  
そして知的生産の場としてのオフィス等經  
営にインパクトを与えるビジネススペース  
としてのビル・オフィスの在り方、課題を  
テーマに学識経験者ならびに産業人による  
発表、交流を行う。

### ④見学会

最新のビル・オフィスの見学と関係者との  
情報交換を行う。

〔入場料〕¥1,000

### ■ 実施運営・問い合わせ先

㈱日本能率協会 関西地域本部内

「ニュービルディング関西」事業局

〒541 大阪市中央区安土町2-3-13

大阪国際ビル28F

TEL 06-261-7151(代) FAX 06-261-5852