ヒートポンプ・システムによる熱エネルギー有効利用*

谷 口 博^{*1}

Thermal Energy-conserving Technique by Heat Pump System

Hiroshi TANIGUCHI

Key Words: Thermal Engineering Equipment, Vapour Engine, Heat Pump, Energy Engineering, District Heating, Energy Conservation

1. ま え が き

暖房用あるいは工場作業用熱エネルギーが、我々の社会活動にとって重要なエネルギーの一種であることは周知のとおりであり、寒冷地における暖房用熱エネルギーは、食糧と同様に我々の生存に欠くことができないものといえよう。しかし、現在の熱エネルギー供給方式としては、大部分がストーブあるいはボイラなどによる化石燃料の直接燃焼によるものが採用されており、通常の熱効率の概念のみで性能の把握を行っている。その結果として、現在の熱効率0.9程度で満足し、さらに性能を向上させようとする努力はあまりなされていなかったのである。たとえ外部への熱放散によるエネルギー損失がなくても、燃焼により発生した温度レベルを下げて使用する方式であるから、その有効性は低下してエクセルギー損失が生じているのである。この点を改善するため、熱併給方式すなわちコージェネレーション方式による動力と熱エネルギーの併給を行って、暖房用あるいは工業作業用熱エネルギーを確保することが考えられている。しかし、動力と熱の2種類のエネルギーを同時に供給しているので、広範囲への適用には両者の過不足への対応など種々の問題点が残されている。一方、アーバン・エネルギーの見直しにおいて、都市内での廃熱による熱汚染への対策を検討する場合、その有効利用が重要課題として浮上してくるのである。

2. 熱エネルギー有効利用への ヒートポンプの導入

燃焼により発生した高温の熱エネルギーの有効利用を考え、熱エネルギーのみを供給するシステムとすることができれば、動力と熱エネルギーを同時に供給する熱併給方式より広範囲に適用されることになる。この目的のためには、高温の熱エネルギーで熱機関を駆動させて動力を発生し、この動力でヒートポンプを駆動して廃熱などをくみ上げる方式が有望であろう。この場合には、熱機関動力発生時の排熱とヒートポンプによるくみ上げ熱を加算して熱エネルギーの供給を行うこととなるので、より高い熱利用率すなわち1.0を超える条件での熱供給が可能となる。このようなシステムの一つとして、内燃機関を用いる方式が普及してはいるものの、アーバン・エネルギーに利用される広範囲の燃料（固体燃料も含む）あるいは熱源を対象として考えるならば、熱機関に蒸気タービンを採用する方式などの検討が必要であろう。著者は、これらの点に着目し、ボイラ、蒸気タービンによる動力発生と、ヒートポンプによる熱くみ上げを組合せるシステムを提案し、ヒートポンプ・ボイラ・システムと名付けたのである。

このように、ヒートポンプの熱エネルギー供給システムへの組み込みを考慮するならば、都市内での廃熱利用が可能になり、熱汚染の軽減に役立つものと思われる。約10年前より論議されてきた例として、札幌市地下鉄廃熱利用システムの実現について述べてみよう。積雪寒冷地とはいえ、地下鉄内での熱発生による隧道周囲への熱蓄積を防止する必要がある、これを地上に排出する際の廃熱の有効利用が検討されたのである。

* 原稿受付 昭和63年7月25日。

^{*1} 正員、北海道大学工学部 (〒060 札幌市北区北13条西8丁目)。

都心部の地下鉄駅舎付近には、地域冷暖房の対象となる施設が多く存在するので、上記のヒートポンプ・ボイラ・システムを導入して地下鉄の廃熱をくみ上げ利用するエネルギープラントの建設が進められ、関連施設の完成が間近である。

以上のように、ヒートポンプを熱供給システムに組み込むことにより、熱利用率の格段の向上と都市内の熱汚染の防止が可能となるのであるが、単なる既存の機器の組合せに頼ることなく、新たな機器の開発を考慮しつつ、システムの開発を行う必要がある。この目的のため、ヒートポンプでの絞り過程におけるエクセルギー損失を軽減する動力回収機の開発、蒸気タービンの代わりに回転容積形の膨張機を用いて負荷変動に対応させることなどがあげられる。前者は、液相から気相への移行過程で作動する機器であり、後者は、蒸気機関の代替えとの見方もあって、双方とも開発が行われていなかったのである。ヒートポンプ・ボイラ・システムのように、格段と熱利用率の向上を目指す必要がある場合には、新規開発機器の導入を考えなければ所定の性能が得られず、システムの開発そのものにも疑問が生じてくることを知っておいていただきたい。

3. ヒートポンプ・ボイラ・システム

暖房用あるいは工業作業用熱エネルギー供給を行う専用プラントとして、また熱利用率を格段と向上させる方式として、上記のヒートポンプ・ボイラ・システムが考えられる。しかし、実用化するに際しては、理論解析のみならず、あらかじめパイロットプラントなどによりその性能を実証することが望まれ、昭和55年度の新技術開発事業団の研究課題「ヒートポンプ・ボイラ併用による高効率熱利用温水供給システム」として採択され、北海道大学と前川製作所が担当したのである。このシステムは、図1に示すとおりで、まず燃料を燃焼させた高温の熱エネルギーによりボイラ、背圧タービンの組合せで動力と排熱を発生させる。つぎにこの動力によりヒートポンプを駆動して低熱源から熱をくみ上げ、これに背圧タービンの排熱を加算して供給熱エネルギーとすれば、エクセルギー損失が減少しくみ上げた熱の分だけ熱利用率が向上することになる。

ここで開発対象となったパイロットプラントは、図2のフローシートに示される熱供給規模900kWの温水装置であり、低熱源温度30°C、熱供給温度70°C、熱媒体R12の条件で計画された。当初は熱供給温度90°Cの条件で検討が進められていたが、北方圏諸国で

の地域暖房の供給温度レベルが低下しつつある現状をふまえて、70°Cに設定したのである。また、このシステムにおいては、通常のヒートポンプに設置されている膨張弁の代わりに図2に示されている動力回収機を新規開発して導入し、凝縮器で潜熱を放出して液化した熱媒体の保有する圧力エネルギーの有効利用を図っている。しかし、この動力回収機は、入力側で飽和あるいは過冷却の液が流入し、絞り過程に代わって内部での蒸発膨張による動力発生を行い、気液二相の混合液となって出口側より流出する極めて特殊な構造の機器であることから、回転容積形のスクリー式膨張機を採用することとした。同様に、蒸気膨張機についても検討を加え、熱供給負荷の変動に対応させるための可変速性能と、極めて出力の小さい機器への応用も想定し、回転容積形のスクリー式膨張機の適用を検討し採用したのである。

ヒートポンプ・ボイラ・システムのパイロットプラントとして試作された装置の性能測定結果を示すと、図3のとおりで、熱出力900kWと小規模の装置でありながら熱利用率 η_{HB} が1.4と高い値を得ることができた。このシステムのように熱エネルギーの有効利用を目的とする機器の場合には、通常のエネルギーフロ

図1 ヒートポンプ・ボイラ・システム

図2 パイロットプラントのフローシート

一のみでは性能把握に不十分であり、エクセルギーフローとの併用による検討が望まれる。図4、5は、このシステムにて実測した性能をエネルギーフローおよびエクセルギーフローに示したものである。図4において熱利用率 η_{HB} が1.4、熱のくみ上げ割合も燃料発熱量の約1/2に達してはいるものの、図5においてボイラでのエクセルギー損失が相当の量になっていることから、蒸気条件の改善による性能向上が今後の課題であることがわかる。また、図5には、諸機器における伝熱エクセルギー損失も詳しく示されており、熱交換器

内での温度差の減少によるシステムの性能向上が示唆されるのである。

図3 熱利用率に及ぼす負荷の影響

図4 エネルギーフロー

図5 エクセルギーフロー

4. スクリュー式二相流膨張機

上記のヒートポンプ・ボイラ・システムに導入したスクリュー式膨張機は、新規開発機種のため、その性能を事前に予測しておく必要があった。とくに、動力回収機として採用した二相流膨張機の場合には、内部効率が相当低いのではとの予想もあり、コンピュータによる数値解析を十分行って準備することにしたのである。スクリュー式膨張機では、図6のとおり漏れ通路がA~Gと多岐にわたり、その面積の複雑な変化とともに回転数による影響も考慮しなければならない。この場合、内部の圧力変化を実測して指圧線図を求めることもできるので、あらかじめ求めた解析結果とも比較して数値解析モデルの妥当性を確かめることとした。

試作機による熱媒体 R 12 での実測結果を示すと、図7, 8のとおりである。回転数の増加とともに漏れ量が減少するので、流量比すなわち理論流量と実際流量の比 η_v は図7のように減少するが、内部効率 η_i および有効効率 η_e はそれに伴って図8のように増加するのである。この傾向は、実際結果と数値解析結果とも同様であり、数値解析モデルの妥当性が確かめられたことになる。指圧線図についても同様であり、図9に示されているように実測結果と数値解析結果はいずれの回転数条件でも良く一致しており、スクリュー式膨張機内部での膨張過程を十分予測できることがわかった。一方、過冷却の影響についても検討し、従来から困難視されていた過冷却液からの動力回収についても、この方式によれば実用化し得ることを確かめた。

このスクリュー式二相流膨張機を採用することにより、ヒートポンプあるいは冷凍機における絞り過程のエクセルギー損失を大幅に低減することができ、さらに化学プラントなどにおける飽和液のフラッシュ過程での動力回収による省エネルギー効果なども期待できよう。

図6 漏れ通路

5. 地下鉄廃熱利用システム

昭和63年末には、札幌市に地下鉄第3線（東豊線）が開通されることとなり、地下鉄網がいちだんと整備

図7 流量比に及ぼす回転数の影響

図8 有効効率および内部効率に及ぼす回転数の影響

図9 回転数による指圧線図の変化

される見通しである。この地下鉄第3線の工事時期が上記の新技术開発事業団によるヒートポンプ・ボイラ・システムの開発委託時期と偶然一致したことも動機となり、札幌市においてヒートポンプ利用による地下鉄廃熱の地域暖房への活用が計画されたのである。

昭和57年には、「地下鉄廃熱利用による省エネルギー形地域冷暖房システムに関する基礎調査」、引き続き昭和59年には、通省産業省の依頼による「札幌市地域エネルギー開発利用事業化可能性調査」が行われた。その調査結果から、積雪寒冷地においても地下鉄隧道内の熱蓄積を防ぐ必要があること、地域冷暖房用熱供給源として表1に示されるように十分のくみ上げ熱が確保されることなどが確かめられた。また、エネルギー有効利用効果も図10に示されるとおりで、地下鉄からの熱回収に必要な動力も含めても、燃料換算の値で従来の専用ボイラの場合と比較し昭和65年の予想で年間石油550tの削減量に達することがわかった。

地域冷暖房の対象地区としては、JR札幌駅北口の都市再開発地区が選定され、昭和65年を目途に計画が進められている。地下鉄第3線に合せてこの廃熱利用地域冷暖房プラントが建設されているが、需要側に新築の合同庁舎ビルが含まれていることも幸いし、初期の方針に沿って実現へと近付いている。このプラントには他に例のない方式が採用されているので、「地下鉄廃熱利用地域冷暖房・ヒートポンプ温冷水供給システム」として新機械システム普及促進事業の対象となり、所定の援助を受けることができたのである。システムを構成する機器は、図11のように配置されており、夏冬ともに冷水・温水を必要とする需要者に対し、常時双方とも供給することができる。熱利用率は冷水と温水の供給割合および負荷率により変化するが、エネルギープラントのみを対象とすれば、冬期1.44、夏期1.50にも達する予想である。この事業は、第3セクタ方式の「札幌エネルギー供給公社」により

実施され、プラントの取りまとめは主として三菱重工が行っている。

6. 熱併給発電プラントへのヒートポンプの導入

各種の工業で通常採用されている熱併給発電プラントにおいては、ボイラ、蒸気タービンの組合せによる方式でエネルギー有効利用効果が十分認められているが、生産に伴って排出される廃熱の利用を考えるならば、ヒートポンプを導入して、いっそうのエネルギー有効利用を図る必要がある。王子製紙江別工場を例にとると、図12のとおり高圧6.4 MPa、中圧1.4 MPa、低圧0.4 MPaの系統に分け発電用および工場作業用として蒸気が供給されている。現状では中圧、低圧蒸気にて熱エネルギー供給を行っているが、70°C程度の温水利用設備もあることから、ヒートポンプによる工場廃熱くみ上げ方式の温水供給を検討し、その導入効果を調べることにした。ヒートポンプ・システムとしては、発生電力を消費する方式より蒸気駆動方式のほうが望ましいので、ここでは上述のヒートポンプ・ボイラ・システムを検討対象としたのである。

図12の例において、電力発生量と工業作業用熱供給量が常時釣り合うとは考えられず、その場合には電力の不足分を電力会社などから購入しなければならない。このようなプラントでは、ヒートポンプ・システム導入により熱エネルギーの消費が減ると、電力発生量も減少するので購入電力量が増えることになる。したがって、このことを考慮したヒートポンプ・システムの導入による経済性の検討が必要であり

表1 地下鉄廃熱回収可能量(1月)

駅舎名			設定風量	回収可能熱量
南 北 線	さっぽろ	北	90 500 m ² /h	1 323 MJ/h
		南	41 200	602
	大通	A	149 400	2 185
		B	141 100	2 064
		C	77 300	1 130
	すすきの	D	42 300	619
			21 600	314
第(東 3 豊 線 線)	さっぽろ	A・B	74 000	1 080
	大通	A・B	113 900	1 666
	すすきの	A・B	60 500	883
	計		811 800	11 866

図10 エネルギー有効利用効果

図 11 地下鉄廃熱利用システム

(a) 燃料消費量の減少による正の効果

(b) 購入電力量の増加による負の効果

の差を求めなければならない。

(1) HBS-CASE1 ヒートポンプ・システムの導入による燃料消費量の減少効果が、購入電力量の増加分より大きい場合、(a) > (b)。

(2) HBS-CASE2 (a) < (b) の場合、燃料消費量の減少効果はないが、発生電力量の増加分により購入電力量が減少することになる。

検討した温水製造システムは、図 13 に示すとおりでエネルギーフローも併記して理解しやすくしてある。

従来のシステムすなわち蒸気タービンの排気により温水を製造する場合と、ヒートポンプ・システムを導入した HBS-CASE 1, 2 の場合について、ヒートポンプ駆動用蒸気条件を変えて経済性の検討を行うこととした。当然のことであるが、燃料の価格も重要な因子となるので、あらかじめ最も有利な条件にしばって検討し、表 2 にその結果をとりまとめた。燃料単価 C_f が安いほどヒートポンプ・システムの導入効果は少なくなり、また蒸気条件の選定もより低圧側へと移行していることがわかる。

7. ま と め

ヒートポンプ・システムにより、都市廃熱あるいは生産に伴い排出される廃熱をくみ上げ熱利用率の向上

図 12 熱供給発電プラントへのヒートポンプの導入による温水製造

表 2 熱併給発電プラントへのヒートポンプの導入効果

使用燃料	燃料単価 C_f 円/10 ³ kJ	システム	HBS用蒸気	温水供給能力 180 t/h (30140 MJ/h) の設備が年間 330 日稼動した場合の経済性			削減コスト 円/温水 1 t
				燃料の増減 kl/年	買電の増減 MWh/年	節減金額 千円/年	
灯油	2.27	HBS-CASE 1	発電ボイラ発生 (6.4 MPa×733 K)	6 600(減)	14 900(増)	259 000	182
C重油	1.34	HBS-CASE 1	タービン抽気 (1.4 MPa×553 K)	3 530(減)	5 700(増)	91 000	64
石炭	0.72	HBS-CASE 2	タービン背気 (0.3 MPa×433 K)	燃料の増減は無い	4 200(減)	63 000	44

削減コスト・経済性は従来のシステムと比較した値

図 13 温水製造システムの比較

を図るとともに、熱汚染の防止に後立つことが今後の重要な課題となろう。北方圏地域では、暖房用熱エネルギーが食糧と同様に生存に欠くことができないことを知るならば、熱エネルギーの有効利用方策への模索は当然のことであり、各分野での努力を期待したいところである。

ここではヒートポンプ・ボイラ・システム、二相流膨張機、地下鉄廃熱利用システムなどの応用例について紹介したが、生活環境保持の暖房と機器冷却の共存、生産活動に伴う加熱工程と放熱工程の併設の可能性を考えると、いかに加熱側の熱効率の向上を図っても、

排熱回収方式を組み込まなければ無意味であることに気付いていただきたい。このような場合には、当然熱移動機器としてのヒートポンプを採用する必要があるといえよう。

今後、各方面へとヒートポンプの応用範囲を拡大するには、関連技術の進歩とともに必要な新規開発機器の導入も考慮する必要があるだろう。ともすればシステム開発には新機種の導入が不要であるとの意見もあり、単なる組合せの検討のみに終始しているならば、性能の格段の向上など期待できないことを知っておかなければならない。