

■ 特 集 ■ 省エネルギー

省エネルギー機器としてのヒートポンプ

Heat Pump as a Heat Recovery System

中 西 雄 *

Takeshi Nakanishi

古 川 哲 郎 **

Tetsuro Furukawa

井 上 司 朗 ***

Shiro Inoue

1. 緒 言

第1次石油ショック以来産業界では省エネルギー対策がかなり実施され、その成果をあげているが、一昨年末以来、石油価格は再値上げの状況にあり、総エネルギー使用量の90%近くを海外からの輸入に頼る我国では、益々省エネルギーは重要度を増していると思われる。

しかしながらこれ迄の省エネルギー対策により、温度の高い、回収しやすい廃熱はほとんど回収されており、更に省エネルギーを飛躍的に進め、1次エネルギーの使用量を減らすためには、環境との温度差が小さい（以後低温と称す）廃熱の回収とその有効利用を図らなければならないと思われる。

最近ヒートポンプと言う言葉をよく耳にするようになったが、ヒートポンプはそのような低温廃熱の再生利用に最も有効な要素技術の1つと考えられるばかりでなく、エネルギーの有効利用の見地からも注目すべき技術であり、今後の発達が期待される技術と思う。

そこでここでは、ヒートポンプの一般的特性およびそこから導かれる省エネルギー機器としての適性用途分野、利用方法について説明する。又筆者らはここ数年間ムーンライト計画の中のヒートポンプの研究に携わり、IEAの会議にも出席する機会を得たので、現在われわれが実施しているヒートポンプの研究内容およびIEAにおける共同研究等、欧米の動向についても簡単に紹介する。

2. ヒートポンプの基本的特性

* 日立造船(株)技術研究所 熱・機構研究室 部長

〒554 大阪市比花区桜島1丁目3番22号

** 日立造船(株)技術研究所 熱・機構研究室 主事

2.1 圧縮式ヒートポンプ

圧縮式ヒートポンプの原理は冷媒の飽和温度が圧力により変化することを利用したもので、低温、低圧の状態から熱を奪い蒸発した蒸気を圧縮機で圧縮し、高温、高圧状態として、凝縮させ熱を放出するものである。図-1は圧縮式ヒートポンプの基本サイクル

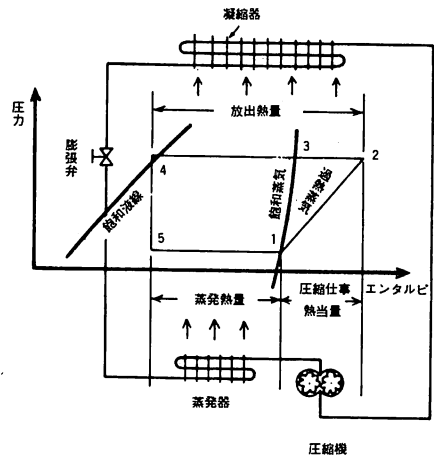


図-1 圧縮式ヒートポンプの基本サイクルと構成機器

をモリエル線図上に表わしたものである。明らかなように、このサイクルは逆ランキンサイクルとなっている。圧縮式ヒートポンプの性能を表わすパラメータとしては(1)式で定義される成績係数を用いるが、その成績係数の最大値は逆カルノーサイクルの効率である(2)式で与えられる。従って圧縮式ヒートポンプの性能は(2)式より昇温幅 $(T_2 - T_1)$ が増すと急激に悪くなることが推定される。

$$\eta_{c.o.p.h} = \frac{Q_c}{A \cdot L_w} \dots \dots \dots (1)$$

Q_c : kcal/H 発生熱量
 A : kcal/kW 仕事の熱当量
 L_w : kW 圧縮機による仕事

$$\eta_{max} = \frac{T_2}{T_2 - T_1} \dots\dots\dots(2)$$

T_2 : °C 高熱源の温度
 T_1 : °C 低熱源の温度

図-2は、媒体としてR-114を用い、圧縮機としてス

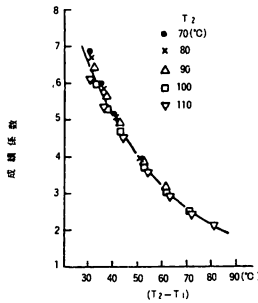


図-2 圧縮式ヒートポンプの特性(昇温幅と成績係数)

クリュー圧縮機を用いた場合の成績係数と昇温幅の関係を示したものである。⁶⁾ 作動レベルによる相違は少なく、成績係数は昇温幅により、ほぼ決ってしまうことを示しており、さらに昇温幅が小さいと非常に成績係数は良くなり、昇温幅が40°Cで`5`、60°Cで`3`程度となることがわかる。

2.2 吸収ヒートポンプ

吸収ヒートポンプの原理は、冷媒の同一蒸気圧力下において、冷媒の飽和温度より吸収液の平衡する温度の方が高いことを利用し、ある温度で、蒸発器で蒸発した冷媒は吸収液に吸収され高い温度で発熱することを利用したものである。この時吸収液自体は希釈されるので、その液を再生して閉サイクルとするため、再生-凝縮行程が必要となる。

図-3はLiBr水溶液のDühring線図上に吸収ヒートポンプのサイクルを示した。蒸発器で T_E の温度レベルで熱を吸収し、 $T_2 \sim T_3$ の温度レベルで吸収器で発熱させることが、ヒートポンプと呼ばれるところである。同図よりほぼ $\overline{EC}/\overline{21}$ 又は $\overline{EC}/\overline{34}$ であるから、 $T_2 - T_E \doteq T_1 - T_C$ となる。従って $(T_2 - T_E)$ の温度差により昇温される吸収ヒートポンプの昇温幅は、再生器の加熱源温度と凝縮器の冷却源温度との差(仮にこゝでは駆動温度と称す)以上には出来ない。

また同図では蒸発-吸収行程の圧力(P_E)が再生-

凝縮行程の圧力(P_C)より高い場合で示したが、加熱源、被加熱源の温度の選定により、どのようにもなり得る。次節で示すようにヒートポンプの利用の仕方において $P_E > P_C$ と $P_E < P_C$ ではかなり相違してくるため、図-3に示したようにDühring線図上で $P_E > P_C$ すなわち、吸収液が反時計回りに循環するサイクルを第2種ヒートポンプサイクル、逆の時計回りにまわるサイクルを第1種ヒートポンプサイクルと称し、区別することもあるが基本的には全く同一である。

図-4は吸収ヒートポンプの基本構成を示した。このように吸収ヒートポンプは熱交換器の集合であるから、昇温幅に余裕が出た場合(駆動温度-昇温幅)を大きくとれる場合)個々の熱交換器での熱交換のため

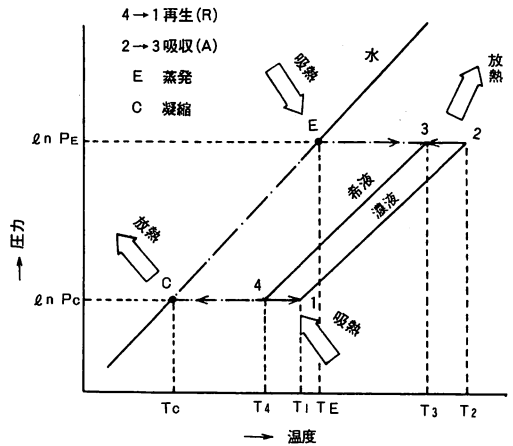


図-3 吸収ヒートポンプのサイクル

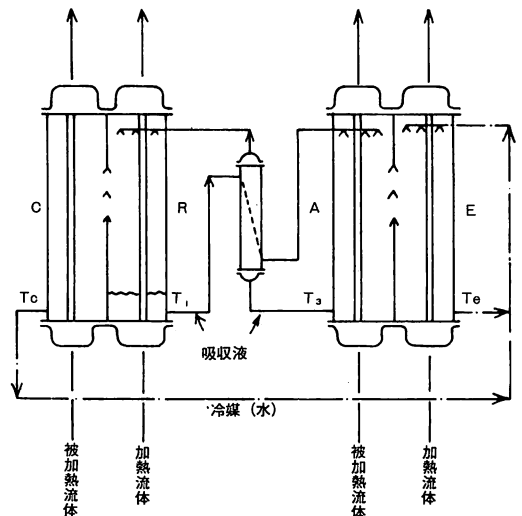


図-4 吸収ヒートポンプの基本構成と系統

の温度差が大きくなり交換熱量すなわち発生熱量が増大する。又、限度いっぱい昇温させようとすると、非常に大きな伝熱面積を必要とすることになる。

3. ヒートポンプの適性用途と省エネルギー効果

3.1 圧縮式ヒートポンプ

圧縮式ヒートポンプの基本的特性から導き出される、適性用途分野を一言で述べるならば「熱源（低熱源）とそれより余り温度が高くない用途（高熱源）とが結び付けられる分野」と言えると思う。

表1は大阪湾沿岸の工場に対するアンケート調査の結果である。¹¹ 同表より明らかなように、一般の産業分野においても150℃以下での熱需要が半数程度以上あることがわかる。これらのデータは、熱量価格が未だ高くない頃の設備に対するものであり、実際にはさらに低い温度で良いものと思われる。表2は低温熱源を使用するプロセス例²⁾とその温度を示したものである。ヒートポンプの個々の採用に際しては、熱源と用途との温度差が余り大きくなければ、表1、表2に示すようなかなり広い温度範囲の用途で熱の再生利用が可能となることが期待できる。

表1 業種別熱需要温度レベル¹¹⁾ 単位%

業 種	温 度	100℃ 以下	～ 150℃	～ 183℃	183℃ 以上
食料、たばこ製造		2.5	62.3	16.6	18.6
繊維工業		0.4	50.3	49.3	0
木材木製品製造		1.1	9.3	6.6	83.0
パルプ紙加工業		0	85.9	4.1	0
化学工業		4.8	26.5	50.0	18.8
ゴム製品製造		0	26.3	53.4	20.4
皮革製品		0	100.0	0	0
窯業土石製造		0	85.6	14.4	0

表2 適性プロセスの例と温度

プ ロ セ ス	温度(℃)
洗濯、消毒	60
調理	100～116
染色	88
金属の洗濯、メッキ	60～88
塗装、乾燥	82～116
殺菌	110
ボイラ給水予熱	30～150
蒸溜	40～200

実際利用する熱源としては、工場からの廃熱、環境熱（空気、湖水、海水等）、地熱（地下水、地熱水、温泉等）等が考えられるが、これらは一部工場からの廃熱と地熱水を除けばその温度レベルは0℃～50℃程度であ

り、従って適性用途分野としては民生用（暖房、給湯）、および作動温度が低い産業分野が第1に挙げられる。

1例として43/37℃の温排水の熱を回収し、モータ駆動2段ターボ圧縮式ヒートポンプを用いて82℃の高温水を得る場合²⁾について述べる。図-5にそのヒートバランスの比較を示したが10⁶ kcal 当りの従来ボイラによる場合と比較してみると

$$\text{燃料の節約量} = (1.25 - 0.88) \times 10^6 = 0.37 \times 10^6 \text{ kcal} / 10^6 \text{ kcal}$$

$$\text{燃料の節約率} = 1 - 0.88 / 1.25 = 0.30$$

従ってヒートポンプの使用により燃料の節約率は3割にもなるので社会全体としてはヒートポンプの使用が奨励されるべきであろう。又ヒートポンプをディーゼルエンジン駆動とすると、エネルギー変換効率は同等以上であり、更にエンジンのジャケット冷却熱、排ガス顕熱も利用可能であるから同図に示すように同

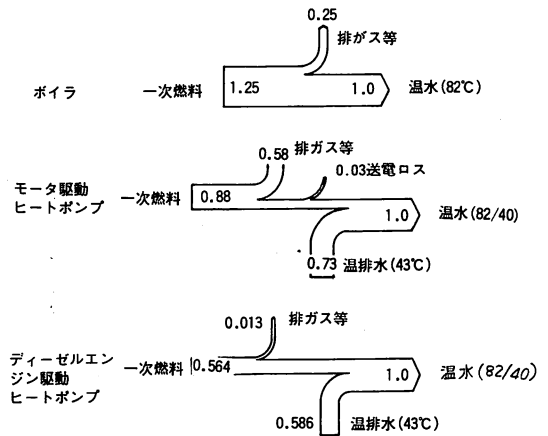


図-5 圧縮式ヒートポンプとボイラのヒートバランス比較例

様な条件では一次エネルギー節約率は従来ボイラに比し50%以上にもなり注目される。しかし、この場合年間稼働時間が長いと現状においてはエンジンの耐久性に多少問題があり、今後の技術開発を待たねばならない点もあると思われる。

3.2 吸収ヒートポンプ

第1種吸収ヒートポンプサイクルの利用

中温度の熱を使用するプロセスにおいて、これ迄蒸気圧力を減圧弁で落して使用していたような場合には、第1種ヒートポンプサイクルを利用することにより従来の蒸気消費量を45%程度少なくすることが可能であ

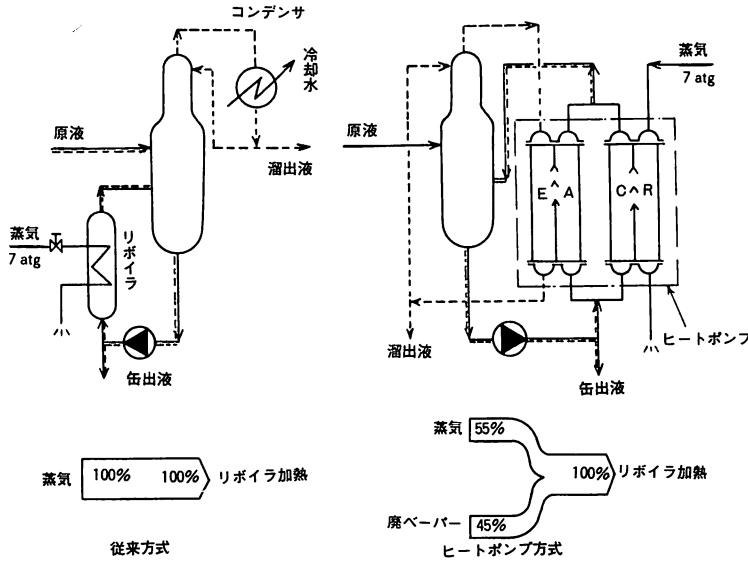


図-6 第1種ヒートポンプによる蒸溜塔塔頂蒸気潜熱の再生利用

る。すなわち、凝縮器および吸収器の作動温度をプロセス加熱温度とし、加熱蒸気温度とこの凝縮器の温度との差により吸収液を再生すると共に、凝縮熱をプロセス加熱に用い、更に蒸発-吸収行程により回収昇温した熱も利用する方式である。

図-6は化学、食品、薬品等の工業においてよく見られる⁴⁾蒸溜塔の塔頂蒸気廃熱をこの方法により再生利用をする場合について従来の加熱方法と比較して示したものである。図より明らかなようにこのような方法により塔頂蒸気の潜熱相当分の加蒸蒸気消費量を低減できることだけでなく、コンデンサ冷却水も不要となるメリットがある。但し、現在実用化されている吸収液としてのLiBr水溶液の特性により、昇温幅（吸収器と蒸発器の温度差）は50℃程度以下である。従って図示した蒸溜プロセスではリボイラ加熱温度と塔頂ガスの凝縮温度との差は50℃程度以下の場合しか使用できない。

この他の利用方法としては蒸発器の吸熱効果を利用した吸収冷凍器および蒸発器の吸熱、凝縮器の発熱効果の両方を利用する冷温水同時発生器などがある。

第2種ヒートポンプサイクルの利用

第2種ヒートポンプサイクルは廃熱と冷却水との温度差を駆動力として、廃熱をより高い温度の熱として回収利用しようとするもので、廃熱以外のエネルギー

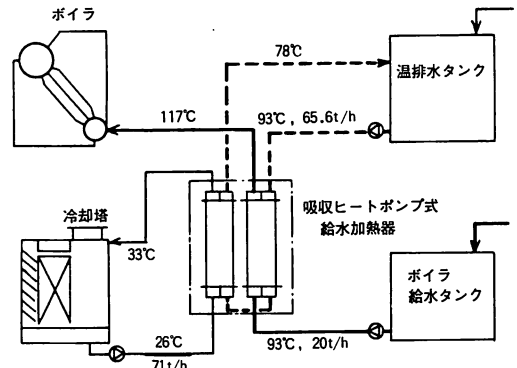


図-7 第2種ヒートポンプサイクルによるボイラ給水予熱実施例

をほとんど必要としないと云う特長を有した利用方法である。

図-7に第2種ヒートポンプによる廃熱回収の利用例を示した。すなわち従来白煙防止のため冷却水で冷やしていた高温温排水をヒートポンプの熱源として用い、ボイラの給水を加熱し、加熱熱量相当分の燃料使用量を削減するものである。この方式では温度条件に余り関係せず温排水より回収した熱のほぼ50%が昇温され有効熱として利用できる。

以上のヒートポンプ方式の概略を表3にまとめて示した。

表3 各種ヒートポンプの方式による比較

	方式の概要			性能	
	駆動	熱源 (低熱源)	用途	発生温度	発生熱量
圧縮式	電力(モータ) 燃料(エンジン) 廃熱(フロンタービン)	廃熱 環境熱 地熱	低温加熱 プロセス (暖房, 給湯, ボイラ給水, 予熱等)	フロン媒体で は120°C以下	昇温幅が大きく変り ○モータ駆動 40°C昇温で $\eta = 5$ 60 " $\eta = 3$ (η : 成績係数) ○エンジン駆動 50°C昇温で 一次燃料熱の2倍
吸収式	第1種 蒸気 (5~10atg) 又は燃料	同上	同上	80°C~120°C 程度	駆動熱の 180%程度
	第2種 廃熱 (80°C程度以上)	廃熱	同上	150°C 以下	廃熱回収量の 50%弱

4. ヒートポンプの技術開発動向

以上ヒートポンプの特性と利用方法について述べたが、これまでのヒートポンプは、2, 3の特例を除き空調を対象としたもので発生温度は55°C程度以下である。表1, 表2に示したように、技術的に可能ならば、ヒートポンプを使用することにより、エネルギー消費率を格段に下げることが出来ると思われる分野がかなりあり、ヒートポンプの性能の向上と使用可能な条件範囲を広げるための研究開発が現在精力的に進められている。

4.1 ムーンライト計画の中での研究開発⁵⁾

ムーンライト計画では昭和51年以来、圧縮式ヒートポンプ、吸収式ヒートポンプの研究が進められている。吸収式ヒートポンプでは、第1種ヒートポンプ、第2種ヒートポンプ、製水サイクル等の研究が実施されて

表4 IEAにおける今後の改良ヒートポンプの研究項目

1. ヒートポンプセンターによる情報収集
2. 垂直管地中熱源ヒートポンプ
3. 蒸発器の改良
4. 低コスト吸収ヒートポンプシステム
5. 地域暖房への大形ヒートポンプの適用
6. ヒートポンプ用駆動熱機関の改良
7. 高温産業用ヒートポンプ

いる⁵⁾が、こゝでは我々が実施している圧縮式ヒートポンプの研究開発について簡単に述べる。

工場等から最も多く排出されている30°C~60°Cの温排水廃熱を回収し、100°C~150°Cに効率よく昇温することが出来るならば、回収熱の用途が拡がり、省エネルギーの合理的な計画が可能になる。そこで昇温幅が大きくなると性能が低下する欠点を補うため一部吸収式ヒートポンプの原理により昇温する図-8に示すシステムを考案した。

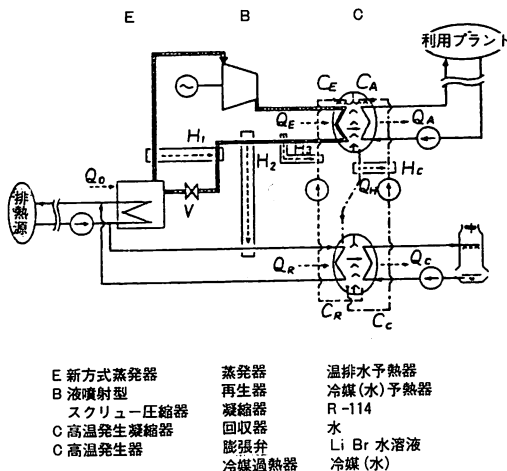


図-8 高温ヒートポンプシステム

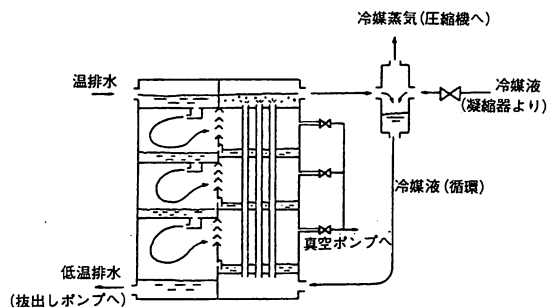


図-9 新方式蒸発器概念図

蒸発器については一般に温排水はよごれや腐食性があることを考慮して、いったんフラッシュ蒸発させ、その蒸気で冷媒を蒸発させる図-9に示す新方式蒸発器を考案した。その特長は

- ① 温排水に含まれるスケール成分、懸濁物質あるいは腐食性物質の水蒸気中へのキャリオーバは微量に押えることができるので、蒸発伝熱管の管外加熱側の汚れあるいは腐食を軽減し、信頼性を飛躍的に向上させることができる。
- ② フラッシュ蒸発によって熱交換のための温度差は小さくなるが、フラッシュ蒸発を多段化することにより、またこの蒸発器の伝熱面では清浄な水蒸気の凝縮と冷媒の蒸発による熱交換のため、伝熱促進技術が有効に利用できるため、総合性能は逆に良くすることができる。
- ③ 縦形であるため設置スペースが少なくなる。又冷媒が高圧で管側となり、大容量のものに有利となる。

図-10はこの蒸発器の総合性能を示す対数平均温度差に対する熱通過率を示した。温度差が10℃程度あれば熱通過率が1,000 kcal/m²h℃以上となり、従来の熱交換器に比べ十分良い性能を有していると云える。

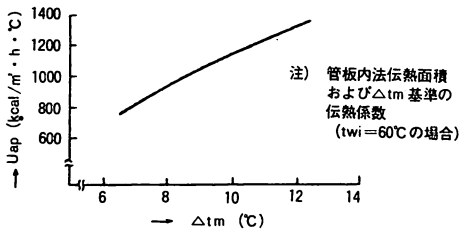
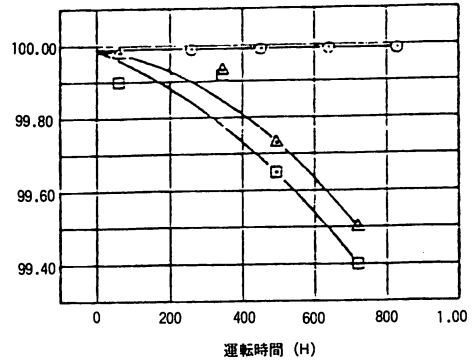


図-10 蒸発器の性能

圧縮機については、容量の範囲、部分負荷特性、信頼性を考慮してスクリー圧縮機を用いることとしたが、従来ヒートポンプ用ではローター間等のシールを油に噴射して行なっていたが、ここで使用する120℃程度の温度条件では冷媒と油が共存する状態では冷媒の熱安定性が低下し、耐久性がないと考えられたため、ローターのシールを冷媒液自体で行なう圧縮機とした。この液シール式圧縮機は次のような特長を有する。

- ① 作動最高温度が120℃程度迄高められる。
- ② 油分離器、油冷却器、油ポンプなど油に関する付属機器が不要又は縮少できる。
- ③ 熱交換器に油が混入しないため、伝熱特性が向上し、装置全体がコンパクトになる。



- 液噴射式液・ガス相
- △ 油噴射式液相
- 油噴射式ガス相

図-11 冷媒の純分変化

図-11は従来の油噴射式圧縮機と試作圧縮機における高温運転時の冷媒の純分変化を示したものである。⁶⁾ 試作機では冷媒の純分変化はほとんど見られず高温作動条件に適していることがわかる。

4.2 国際エネルギー機関(IEA)における研究開発

欧米諸国では我国より寒いので、暖房給湯用のエネルギーの使用量が、全エネルギー使用量の40%程度にもなる。従って、エネルギー使用量の低減化には暖房等に使用するエネルギーの低減化が最も重要となっている。これ迄述べて来たように、このような分野においてはヒートポンプが最も有効な要素技術と考えられ、我国も加入しているIEAの省エネルギー作業部会においてもこのような事情が反映されて調査研究が実施されている。これ迄、考えられる熱源、サイクルの方式、駆動方式、用途等を組合せた種々のAdvanced Heat Pump (AHP) に対して、現状の技術と研究開発に対する技術的検討および1981-2000の間の各加盟国における市場予測の研究が行なわれた。その結果として今後表4に示した新たな研究が提案されている。我国としてはヒートポンプセンタ、ヒートポンプの産業用への応用、低コスト吸収ヒートポンプシステム等の研究に特に関心が持たれているところであろう。又EC等では性能の良い大形ディーゼルエンジン駆動による性能向上⁸⁾や0℃近傍の水の潜、顕熱利用熱交換器等熱源とその回収方法、高効率化、信頼性の向上等の重要性が認識され研究開発が実施されている。

5. 結 言

ヒートポンプは低温の加熱プロセスにおけるエネルギー

ギーの有効利用, 低温廃熱の再生利用に最も有効な注目すべき技術であり今後の発達が期待される技術と思う。さらにエネルギーの有効利用を少しでも多く進めるためには, ヒートポンプの性能の向上, 使用可能条件範囲の拡大はもちろんであるが, 加熱プロセスにおいては出来るだけ加熱温度を下げ, 冷却プロセスにおいては冷媒温度を出来るだけ上げることも重要であると思う。

以上ヒートポンプの省エネルギー機器としての有効性, 利用方法, 技術動向について述べたが, 省エネルギーの実施に少しでも役立てば幸です。

最後に本資料はムーンライト計画の研究成果, IEAの資料を一部使用させていただいたことを記し資料を提供いただいた工技院の担当官および前川製作所の方々に謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 工場排熱の広域的利用に関する調査
大阪科学技術センター S51. 3
- 2) High-temperature heat pumps make waste heat profitable Pulp Paper Canada Vol 80 No 1 1979 p37
- 3) HEAT PUMP SYSTEMS Experimental building project per 1979-05-01 Swedish Council for Building Research
- 4) 省エネルギー蒸溜技術 ケミカル・エンジニアリング 1980 7 p76
- 5) 廃熱利用技術システム 土屋徹 工業技術 Vol.20 No 7 p23
- 6) 圧縮式ヒートポンプによる熱回収技術 富田幸雄 笠原敬介 省エネルギー Vol. 32 No10 1980
- 7) '80省エネルギー技術開発シンポジウム資料 古川哲郎 省エネルギーセンター
- 8) Cogeneration And Heat Pump Plants
Incorporating M.A.N Diesel And Gas Engines by Erwin Dischinger Diesel And Gas Turbine Prog Nov. '78

「エネルギー・資源」 第6号 目次予定 (刊行 56年3月5日)

〔展 望〕

- 原子力発電の現状と将来 東京芝浦電気(株)原子力事業本部原子力技師長 大村 達郎
電気エネルギーの輸送について 住友電気工業(株)開発企画部部長補佐 勝矢 寛雄

〔解 説〕

- 電気エネルギー需給システムにおけるエネルギー問題 京都大学工学部電気工学科教授 上之園親佐
省エネルギー診断, 分析, 対策のためのシステム的手法
..... 大阪府立工業技術研究所化学工学研究室室長 吉田 総夫

〔特 集〕 採鉱技術から見た資源開発

- (1) マンガンノジュールの採鉱技術について 公害資源研究所資源第4部第一課長 伊藤 福夫
- (2) 海水より核燃料資源の回収について 大分工業大学土木工学教室教授 古屋伸芳男
- (3) バクテリアを利用した低品位鉱よりの金属資源の回収...京都大学名誉教授福井工業大学教授 伊藤 一郎
- (4) 採炭技術と保安技術 公害資源研究所資源第4部部長 大場 重美
- (5) 金属鉱物資源の採鉱技術 秋田大学鉱山学部採鉱学科教授 天野 勲三
- (6) 石灰岩に対する露天掘採鉱 小野田セメント(株)鉱業部次長 神山 真澄
- (8) 石油技術からみた地下資源開発 秋田大学鉱山学部採鉱学科教授 田中 正三

〔シリーズ特集〕 各部門における省エネルギー対策 (4)

- 化学工場における省エネルギーとその考え方 ... 住友化学工業(株)千葉製造所省エネルギー室室長 馬場 進

〔技術報告〕

- 日韓大陸棚石油試掘について 資源開発投資(株)社長 田丸 博文
藤原鉱山におけるモービルクラッシャーの操業について ... 小野田セメント(株)藤原鉱業所所長 仲尾 徹
平面鏡と曲面鏡を使った太場熱発電システム (株)日立製作所エネルギー研究所主任研究員 隅田 勲

〔書 評〕

- 沢田 照夫・坪村 宏
〔グループ紹介〕 (財)電力中央研究所・三菱重工業(株)・大阪大学レーザー核融合研究センター
〔会員の声〕 加瀬 晋・浅川 勇吉