

■ 論 説 ■

欧米の吸収ヒートポンプの開発状況とローレンツサイクル化について

R & D of Absorption Heat Pumps in Europe and America

一 色 尚 次*

Naotsugu Isshiki

1. はじめに

最近の吸収式ヒートポンプの研究開発の進歩は極めて著しいものがある。それは、吸収式ヒートポンプはとくに大型ヒートポンプに対して機械式にくらべて容量メリッと水の利用性が高くシンプルとなるなど色々の点から有利であること、一般での温度上昇幅がかなり大きいこと、静粛であること、エネルギーの蓄積(Storage)の能力があること、等の利点が再確認されてきたためである。

とくに蓄積能力については他の方法より遥かにすぐれているので、例えば深夜電力の蓄積のための熱的方式としては吸収ヒートポンプは、その延長上にあるケミカルヒートポンプとともに大きな有用性があると考えられる。

そのため我が国では、スーパーヒートポンププロジェクトの一部に吸収方式に似た方式も考えられようとしている。またこれらの研究の進歩に刺激されて極めて多種類の媒体の組み合わせ(Pairs)についての提案と研究が出現してきたと思われる。

筆者はたまたま今年の3月にパリで、フランスガス公社(GDF)と同石油公社(IFP)によって主催された吸収工学専門家会議に出席し、また他の欧米諸国を回るなどして最近の吸収ヒートポンプの研究開発の欧米における活発な実情の一端を知ることができたので、ここにそのすう勢と幾つかのトピックスを示し、またとくにローレンツサイクル化についての私見も示して会員諸氏への参考としたい。

とくにパリで行われた吸収工学専門家会議 (Absorption Experts Meeting '85 Paris)は1985年3月20日から22日までパリで開かれたもので、GDFとIFPの主催により、フランス、イギリス、ドイツ、オランダ、スイス、イスラエル、アメリカ、日本から約50

人、42論文を集めて一室で円卓会議風に開かれた。その主項目は、1. 流体ペアーズ、2. 熱・物質伝達、3. 各種サイクル、4. 応用 に分れていて熱心な討議が行われた。我が国からは私以外に日立、東京ガス、大阪ガスからも参加し、論文が出された。

会議のふんい気は極めて家族的であって、また討議時間も長く、大へんていねいなものであった。とくに筆者には、1980年のストックホルムにおけるサーモケミカル反応によるエネルギー変換の国際会議以来知り合ったメンバーが多く、極めて興味深いものであった。

2. 流体ペアの改良と探索

2.1 在来ペアの改良

従来の主流である水~LiBr系はとくに低温での吸熱において水の凍結や、溶液の固化等が生ずる欠点があり、またアンモニア~水系は逆に高温化が難かしくかつ安全上の多くの規制を受ける欠点があった。

しかしいずれも実績をふまえた多くの利点があり捨てがたいものであるので、両者を改善する動きは強い。

その一つは両者の混合型で、アンモニア/水/LiBrの三者を使用するものであり、フランス、アメリカ、等で熱心な研究が行われ、最も当面の前進方向としては極めて有力なものである。

この三者を合わせるときは、アンモニアの領域を低温側、LiBr水溶液は高温側にシフトできるので大きい温度差を一段で生じ得るとし多くの提案がなされている。またトレーン(Trane)社の出した各種流体の経済性比較でもトップにランキングされている。

またアメリカでは、吸収冷凍で有名なフィリップ社も三者混合形の研究を行っている。

また水~LiBrに他の塩(ZnCl₂等)を入れて固化点を下げる研究もある。

2.2 オルガニックス系の探索

上記のアンモニアに代るべきものとして多くの低沸点有機液体が提案かつテストされ、また溶質としても

* 日本工学工部教授 (東京工業大学名誉教授)
〒963 郡山市田村町定

多くの高沸点有機液体(オルガニックス)が出されている。

前者としては R123A, R22, 等のフロンや $\text{CH}_3\text{-NH}_2$ 等であり, また後者としては ETFE や DME や DMETEG 等があり, これは世界各国で熱心な研究が発表されている。フランスの IFP や GDF においても中型や小型の装置で熱心な実験研究や試作研究がされていてそのデモンストレーションがあったが, それらがフランスにおいての会議が開かれた大きな目玉であることがわかった。

また我が国からも, 東京ガス, 大阪ガス, 日立等からオルガニックス利用の各種新ペアーによる吸収ヒートポンプの研究成果が発表されたのは大へん力強いものであった。

2.3 強酸, 強塩の利用

とくに工業用の AHP として特殊用途に対して硫酸や硝酸などを使用するペアーがアメリカやイギリスで根強く続けられている報告があって大へんおどろきであるが, 強アルカリも考えられよう。

強酸, 強塩は保有エネルギーと温度上昇幅が大きいので, 耐食材料さえあれば極めて面白いものである。材料としては強化ガラスを含めたセラミックスが考えられている。

筆者は LiCl と CaCl_2 を使用する水溶液によるヒートポンプと動力発生サイクルを示し, 大いに注目をひいた。この方式は深夜電力のような電気エネルギーを濃度上昇によって蓄積し, 動力化して電力として再び放出することが可能で, エクセルギー的には極めて有利であると考えられ, その全効率も60%以上となり得ると考えられるので今後の研究を続行したい。

2.4 固体系の探索

固体系のヒートポンプとしてはヨーロッパにおいては金属水素化物(MH)とゼオライトがその双壁である。かつて1930年にスウェーデンで発表されたテビダシステムは NaS_2 と水をペアーとする固体系であるが, 始めから一年に一度, すなわち夏期の太陽熱で NaS_2 を乾燥させ, 冬になってそれに水蒸気を吸収させて発熱させようとするものであり, 世界のケミカルヒートポンプのさきがけとなったものであるが, 今回の見学で筆者は創始者のブルンベルグ教授に会見した結果, 一年に一度の使用率ではあまりにコストが高すぎて実際のでなかったもので, 現在は一日ないし数日で一度の使用という短時間ストレージに考え方を変えて小型のものを試作し出直すところであると述べていた。

また金属水素化物(MH)は, スウェーデンの STU-D VIC 等において熱心に研究されており, とくに固体の MH から水素と水冷管へ熱伝達を良好にするため MH を棚状の円板に乗せるものや, MH を多孔質サーメットにする方法など多くの工夫がなされていた。同所は日本(工学院大など)との共同研究を開始している。

MH のシステムはふ食のおそれが極めて小さい点と機械工学的に洗練できる点が大なる利点であるが, 現状での MH は水素を吸収すると最大約25%の体積膨張を生ずるためにその膨張逃げをどうするかということ, MH 自体が粉碎劣化し易い点が難点であり, また MH 以外の構造金属が大き過ぎると総合的溫度上昇が低下する点や, まだ MH 自体の性能にばらつきが大きい点等が一層の開発研究対象である。

それに対しゼオライトはとくにミュンヘン工科大学やアメリカなどで熱心に研究されていて, その使用温度範囲はあまり高くない(130°C 以下)が温度上昇幅が大きい(約 50°C 以上ないし 70°C)ので常温を含めた低温域で極めて有望視されている。また水蒸気吸収によっての体積膨張が極めて小さい(0.3%)点も有利である。

ゼオライト自体はアルミ, シリカ, 酸素, 等の複合無機化合物であって自然界から人工まで極めて多くの種類があり, 最近ではヨーロッパで極めて安定で性能のよい A 型ゼオライトが生産されているとのことであり 2,000 回の吸収テストに合格している。

図-1 にミュンヘン工科大学でなされているゼオライト, 水蒸気システムを示す。

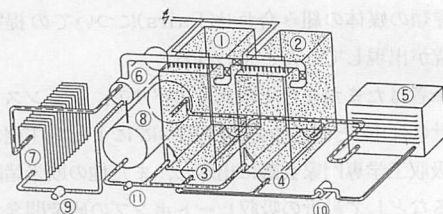


図-1 ゼオライト～水系ケミカルヒートポンプ
(ミュンヘン工科大学)

3. 吸収熱伝達と熱交換器

3.1 立て型熱交換器の台頭

今回の見学及び会議によって極めて大きな感銘を受けたのは吸収ヒートポンプの蒸発器, 吸収器, コンデンサ等の主要熱交換器がすべて立て形指向であることである。

これらは従来は横置形が主流であったが, 立て形にすると設置面積が小さくなることと, 対面流形の熱交

換が容易となるので後述のようなローレンツサイクル化が可能となりシステム全体のCOP改善に役立つことにある。

図-2にGDFで実験されている立て形100kW吸収式第一種工学排熱用ヒートポンプのシステム図を示すが、図のように三つが立て形で示されているのが参考となる。

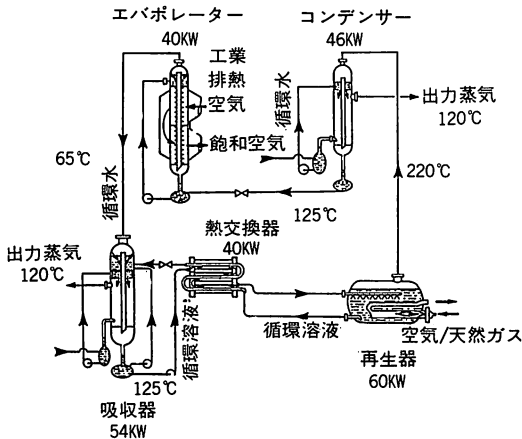


図-2 フランスGDFにおける100kW工業用吸収ヒートポンプ(水~LiBr)における立て形熱交換器を示す略図(第一種)

また図-3にやはりフランスで研究されている立て形ひれ付き吸収管の図を示す。

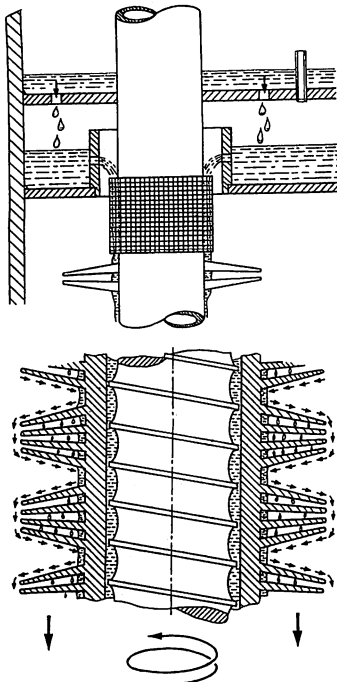


図-3 立て型吸収熱交換器の一例

またその他にも内部らせん状ひれ付き管やねじれ管(Corrugated tube)なども研究され、また内面に遠心力で液が伸びるように切線状液吹き込みを行う方式も考えられている。

また極めて面白い例としてやはりフランスのナンシーで研究されている立て形対面液流のヒートポンプシステムを図-4に示す。

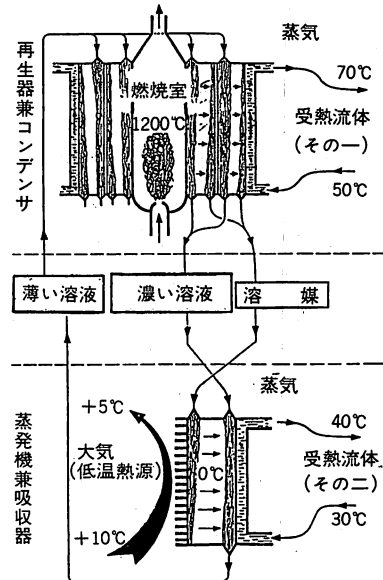


図-4 立て形流路の複合熱交換器の提案(ナンシーCNRS)(第一種吸収ヒートポンプ, 暖房用)

図のように同一二重円環状空間の内外に蒸発液面と凝縮液面を対向させて流下し、一方から一方へ蒸気だけを移すものであってその通りであれば装置を極めてコンパクト化できるものである。実際には液面が安定であるかどうか不確かであるが、フランス人らしい実に天才的で面白い創案である。このような考え方がまだ可能であることは、従来四つの熱交換器を有し複雑であるとされてきた吸収式ヒートポンプに大きな光明を与えるものである。

3.2 熱伝達の研究

今回の会議では、吸収熱伝達の特殊性と重要性が強く浮き出された。そしてイスラエル始め多くの研究発表がなされた。

吸収熱伝達は、蒸気吸収のさいも蒸気放出の際も同じ層内に流れと温度の両境界層以外に物質伝達による濃度差もしくは拡散境界が重なっていることが、他の単一液の沸騰や凝縮の場合と大きく異なる。

とくに表面濃度の変化とともにその平衡蒸気圧が変

化し、通常熱、物質伝達をさまたげる方向に働く、一方においてマラゴニヤ効果のように表面の境界層の変化が層内部対流を生じて熱・物質伝達を促進することが可能であって、イスラエルや我が国の柏木の多くの研究があるのは注目値する。

3.3 溶液に向くひれの考察

さて筆者の考えの一端を述べたいが、水~LiBrのような溶液の蒸発や吸収熱伝達を向上するためには、水管の外部にひれを付けることが当然考えられ、その形状としては、単一成分の流体(純水やフロン)の場合にはできるだけ薄い液膜部分が生ずるように考えられる形状が望ましいのに反し、蒸発や吸収によって濃度が増加し、蒸発や吸収をさまたげる方向に働くので、むしろ均一液膜が生ずるか、液膜内の流動が大きくなるようにする必要があると考えられる。その点から、水平横管の際には図-5のA, B, CのうちBかCが望ましいこととなる。今後の研究実験が望まれる。なおこの考え方は多種液混合形の圧縮式ヒートポンプにも同様に適用できよう。



図-5 蒸発・吸収用ひれ付き伝熱面(水平管)の形状選択

4. ローレンツサイクルの開発

4.1 ローレンツサイクルとは

最近ヒートポンプに関する多くの新サイクルが提案されているが、その中で最も優れているのがローレンツサイクルの提案である。

ローレンツサイクルとは図-6のバッティングに示すような、T~S線図上で平行四辺形を示すサイクルであって、カルノーサイクルが長方形であるのにくらべて、仕事の量が小さくても流体温度が若干変化すればかなりの熱量をポンプアップできるものであり、とくに高温熱源の流体温度の変化を考慮しなければならない時はこの方がCOPが優ることとなる。

4.2 ローレンツサイクルのCOP

ここでローレンツサイクルのCOPに関する筆者の考察を示したい。いま前の図-6のように、低温熱源がT₆からT₇に変動し、高温熱源がT₇からT₈に上昇するさい、ローレンツサイクルを12'34'のように動かすと、逆カルノーサイクルを1234とする場合にくらべて明ら

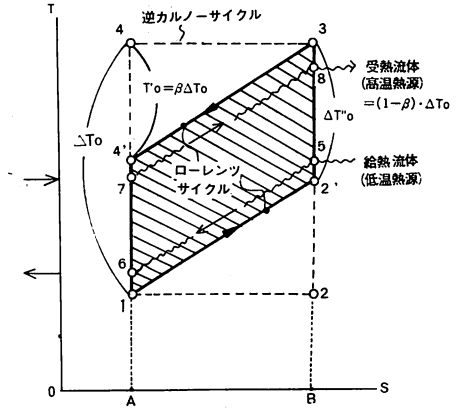


図-6 ローレンツサイクルと逆カルノーサイクル

かに必要入力Wが小さくてすむ。

いまカルノーサイクルの湿度上昇幅をΔT₀=T₄-T₁、各流体の温度変化幅をΔT₀'とするとローレンツサイクルの温度上昇幅はΔT₀"=ΔT₀-ΔT₀'=ΔT₀(1-β)となる。ここでβはΔT₀'とΔT₀の比である。またカルノーサイクルとローレンツサイクルのCOPをそれぞれCOP_c, COP_Lとすると、両者の関係は

$$COP_c = \frac{A43B}{1234} = \frac{T_3}{\Delta T_0} \tag{1}$$

$$COP_L = \frac{A4'3B}{12'34'} = \frac{T_3 + T_4'}{2\Delta T_0'} = \frac{T_3}{\Delta T_0} \frac{(2-\beta/COP_c)}{2(1-\beta)} \tag{2}$$

$$COP_L = COP_c \frac{(1-\beta/2 \cdot COP_c)}{(1-\beta)} > COP_c \tag{3}$$

となって、ローレンツサイクルの方が明らかに逆カルノーサイクルよりそのCOPが大きい。

図-7に同じ温度上昇幅として見掛け上の温度上昇幅ΔT₀をとるときの両サイクルのCOPの値の傾向を示す。(但しT₃=27°C(室温))とする。同図のようにβの値が大きくなる程急激にCOPが上がるのがわかる。

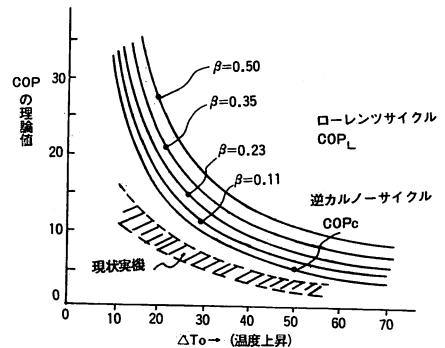


図-7 ローレンツサイクルと逆カルノーサイクルのCOPの比較及び現状実機のCOP

従来のヒートポンプの理論上限値としては逆カルノーサイクルによる COP_c が用いられていたが、今後は高、低熱源の温度変動幅を考慮したローレンツサイクルの COP_L の値を採用する必要がある。

現在の各種ヒートポンプのCOPの値のきめ方や基準もこの点はまだあいまいであるのでさらに厳密化が望まれる。またエンジンヒートポンプとローレンツサイクルの結合も興味があるが、未研究領域である。図-7には現状の実機のCOP範囲も示しておく。

4.3 ヒートポンプのローレンツサイクル化

4.3.1 圧縮式ヒートポンプ；

フロンなどを使用する圧縮式ヒートポンプをローレンツサイクル化としては、多段圧縮式と多液混合式とがある。前者は、圧縮機を多段に置き、同一フロンを何段にも圧縮させるもので原理的に可能であるが装置が複雑化し過ぎる欠点がある。

それに対して後者は、飽和温度変化を生ずる成分の混合液を使用し、実際のシステムとしては図-8のように、長くかつ広い温度変化範囲を持つエバポレーターとコンデンサーに、はしから逐次飽和温度を変えながら流下させるものである。

実際の混合液としては、通常フロンを二種混合だけではなく数種類のフロンを混合する場合が考えられる。

また、ストックホルムの王立工科大学では従来のフロンにとけ易い適当なオイルを組み合わせ、オイルに潤滑油の性質と役目を持たせるとともにオイルの濃度変化による飽和温度の変化を利用したローレンツサイクルを適用しようという研究が始められているが、これも革新的で極めて注目している。

4.3.2 吸収式ヒートポンプ；

LiBr と水、NH₃ と水とのペアー等を使用する吸収

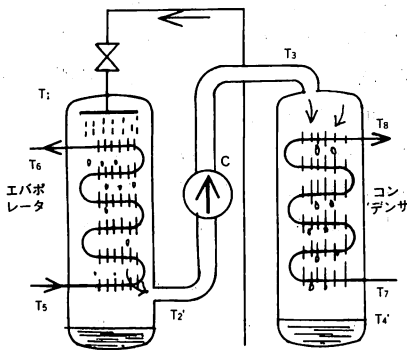


図-8 圧縮式ヒートポンプにおけるローレンツサイクル化システム(多液混合型)

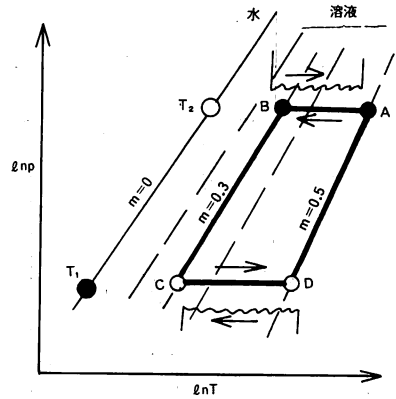


図-9 溶液のデューリング線図例

式や一般のケミカルヒートポンプでは、同一圧力でもペアー物質の濃度 m の変化があれば温度が変化するので、圧縮式にくらべてローレンツサイクル化はむしろ容易である。

いま図-9に溶液のデューリング線図例を示すが溶液は圧力一定でも濃度 m の変化になって $A \rightarrow B$, $C \rightarrow D$ と温度が変化するのでそれに合わせて熱源流体を対向に送ればよい。

いま第二種吸収式ヒートポンプに対してその一部にローレンツサイクル化を施したもののシステム図を示すと図-10 のようになり、立形の長い再生器と吸収器を置いたものとなる。

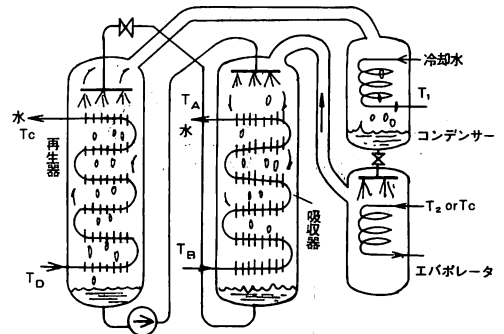


図-10 吸収式第二種ヒートポンプの一部をローレンツサイクル化するときのシステム例

また溶液系のこのような利点を生かして、溶液を圧縮式のヒートポンプに使用した研究例として図-11 のような水～アンモニア系を作動流体とする単純ヒートポンプのシステムがフランスのリヨンにて提案されているが大へん興味がある。

5. アドバンスドサイクル

ローレンツサイクル化以外のアドバンスドサイクル

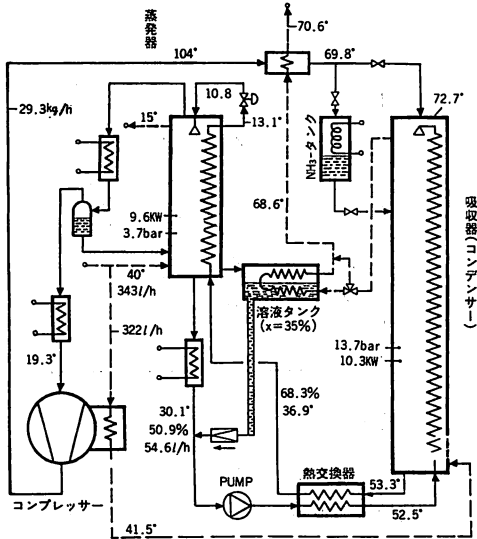


図-11 立て形再生器と吸収器を有してローレンツサイクルを行う圧縮式システム(水~NH₃系)の例(xは濃度)

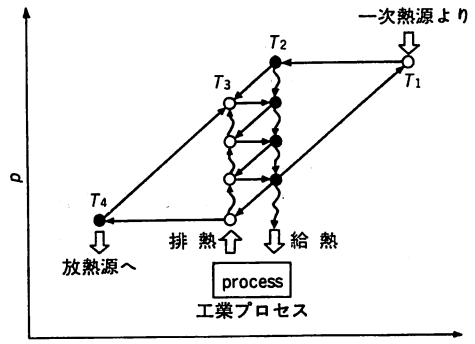


図-13 第三種吸収式ヒートポンプ(仮称)

流体の凝縮点を示す。

図のように組むと、理論上 T_1 における $1Q$ の入熱は T_2 における $7Q$ の放熱、 T_3 における $7Q$ の入熱、 T_4 における $1Q$ の放熱(コンデンサーへ)となり、COP は7に達する(実際は3くらい)。

このようにプロセス温度を中にはさむ吸収ヒートポンプサイクルは全く新しいものであり、4ヶの吸排熱源を持つ第三種の吸収ヒートポンプと言ってよいものである。

6. まとめ

以上のように筆者は、パリの吸収専門家会議及びドイツ、スウェーデン等をめぐることにより多くのトピックスを得ることができた。

新しいオルガニックサイクルの適用、立て型熱交換器の台頭、新しいアドバンスドサイクルの登場、等々吸収ヒートポンプは新しい時代に入ろうとしており、その活発な研究にはおどろくばかりである。

そのうちとくにローレンツサイクル化等に関しては筆者の若干の考察も加えて参考とした。

我が国は在来形の LiBr~水吸収ヒートポンプに関しては最も生産量が大いことは欧米でもよく知られている所であるが、新しいヒートポンプ時代に対しての研究は欧米にくらべてまだ見劣りする所である。吸収ヒートポンプは機械的にくらべてとくに大型に対して極めて有利であって、それがさらに新しい技術によって高度化されればその将来は極めて有望なものとなる。我が国の多くの関係者の奮起をうながしたい。

参考文献

- 1) Absorption Specialist Meeting '85 Paris, Proceeding. March 1985.
- 2) IECEC '85 Miami, Proceeding. August 1985.

として多くの研究がされているが、そのうち興味あるものとしてミュンヘン工科大学のアリフェルドが二つの提案を行っている。

その一つは図-12 に示すように、濃縮系を作動流体として吸収式サイクルと圧縮式サイクルを重ね合わせるものである。

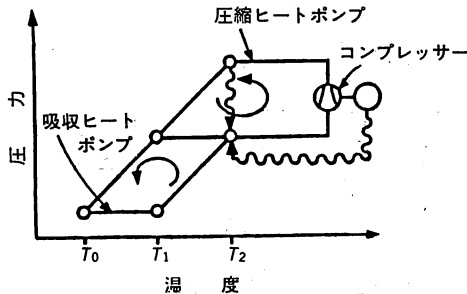


図-12 吸収~圧縮複合ヒートポンプ(水~LiBr) (アリフェルド)

とくに水溶液系では低圧側だけで式とし、蒸気コンプレッサーを高温高圧側だけで用いればよいので小型化が計れる。

また他の一つは図-13 の p - T 線図上にて示すように、温度 T_1 なる一次熱源、温度 T_4 なる大気放熱源がある一般系で、温度 T_2 で吸熱し、温度 T_3 で放熱する任意工業プロセス S があるさい、濃度の異なる溶液ペアーを逐次用いて多段の熱交換器によって何重にも一次熱を利用しようとするもので白丸は流体の蒸発点、黒丸は