

## 新しいケミカルヒートポンプの提案

Proposal of A New Chemical Heat Pump

斉藤 泰和\*

Yasukazu SAITO

有機化学触媒反応を利用した、低品位熱を昇温改質する新しいケミカルヒートポンプを提案している。アセトンの水素化発熱反応は 200°C で進み、その生成物である 2-プロパノールを 30°C 冷却で凝縮分離すれば、逆反応の液相脱水素吸熱反応を定常的に 80°C で進行させることに着目したシステムである。熱効率の高さと操作性の良さに特徴があり、優れた触媒の開発が鍵となる。地熱排熱水の蒸発熱供給を例に、経済性調査が行われた。

## 1. はじめに

わが国で消費される総エネルギーのおよそ半分は、未利用のまま排出されているといわれる<sup>1)</sup>。なかでも 100°C 以下の熱は利用の仕方が限られているため、その多くは無駄に捨てられてしまう。なんとか昇温して再利用できないかと考えるのは、筆者ばかりではないと思う。ヒートポンプには、強い社会的要請がある。

一般にヒートポンプというと、電力を使って昇温する圧縮式ヒートポンプを思い浮かべるであろう。あるいは、機械エネルギーを介させないで熱エネルギー改質のできる、吸収式ヒートポンプのことを考える人もあろう。いずれにせよ、100°C 以下の熱を 150~200°C にまで昇温できることが重要である。加熱・乾燥用など、現在、社会的需要の多い再利用温度はこの辺りにあるからである<sup>2)</sup>。しかし、何らかの技術的ブレイク・スルーなしには、在来のヒートポンプでは、その実現は困難であるように見える。

物質の化学変化に伴う熱の出入りを利用して温度を高めるのがケミカルヒートポンプである。筆者は、触媒を用い有機化合物を作動物質とする、新しいケミカルヒートポンプを提案している。30°C の冷却源を用いて、80°C の低品位熱から 200°C の昇温熱をつくり出すシステムである。

## 2. 2-プロパノール/アセトン/水素系ケミカルヒートポンプの動作原理

このケミカルヒートポンプでは、アセトンの水素化熱が利用される。

気体のアセトンは触媒をうまく選ぶと、速やかに 2-プロ

パノールに水素化される。その反応は化学平衡の制約から高温ほど不利になるけれども、1 気圧で定圧平衡定数  $K_p$  が 1 となる温度は 202°C である。したがって、200°C でもアセトンと水素は平衡組成となるまで 2-プロパノールに変化し、その温度で反応熱を出す。

一方、液体の 2-プロパノールは触媒をうまく選ぶと、還流加熱条件で速やかにアセトンと水素に変化する。水素の液相溶解量は極めて小さいので、液相で生成した水素は自発的に気相へ排出される。しかも沸点はアセトン (56.3°C) が 2-プロパノール (82.4°C) よりはるかに低い。そのため、反応生成物であるアセトンは 2-プロパノールより除去されやすい。したがって、蒸溜分離操作と組み合わせれば、外部から反応熱と蒸発熱を供給する限り、液相脱水素反応を永続的に進行させることができる。ただしその温度は、2-プロパノール・アセトン混合溶液が沸とうする程度でよく、たとえば 80°C なら十分である。

アセトン気相水素化反応で生成した 2-プロパノールと、液相脱水素反応の進行中に蒸発してくる 2-プロパノールは、冷却して凝縮させればアセトンとの混合気体からの分離が可能である。それには冷却源が必要で、たとえば 30°C の冷却であればよい。

外部から仕事を与えてはじめて、ヒートポンプは作動する。通常のヒートポンプは、作動気体の加圧過程で仕事を与えられる、いわゆる圧縮仕事方式である。このケミカルヒートポンプは、極めて特異的なことながら、分離仕事を賦与することによって駆動する。2-プロパノール・アセトン気相混合物から液相へ 2-プロパノールを凝縮分離し、また、液相反応媒質から生成物の水素を排出分離しているために、低温で液相吸熱、高温で気相発熱の正逆反応対が定常的に進行するのである。冷却除熱過程は、気相混合作動物質のエントロピーを下げ、ギブス

\*東京大学生産技術研究所 第 4 部

自由エネルギーを引き上げるために必要とされる。空冷温度でそれを達成するという点も、本ケミカルヒートポンプの特徴である。

表 1 に、ここで用いられる化学過程のエンタルピー変化をまとめた。ヒートポンプサイクルは、脱水素反応熱とアセトン蒸発熱を 80°C で吸収し、水素化反応熱を 200°C で回収し、2-プロパノール凝縮熱を 30°C で放出するという熱の出入りで構成されている。

なお表 2 に、在来技術を代表する第 2 種吸収式ヒートポンプ、および水素吸蔵合金という新素材を背景に提案された金属水素化物ケミカルヒートポンプと対比して、本ケミカルヒートポンプの特質をまとめた。

表 1 2-プロパノール/アセトン/水素系ケミカルヒートポンプにおけるエンタルピー変化

2-プロパノール	アセトン	水素	
$(\text{CH}_3)_2\text{CHOH}$	$\rightarrow (\text{CH}_3)_2\text{CO} + \text{H}_2$	$\Delta H = 100.4 \text{ kJ mol}^{-1}$	
[液相]	[気相]	[気相]	
アセトン	水素	2-プロパノール	
$(\text{CH}_3)_2\text{CO} + \text{H}_2$	$\rightarrow (\text{CH}_3)_2\text{CHOH}$	$\Delta H = -55.0 \text{ kJ mol}^{-1}$	
[気相]	[気相]	[気相]	
2-プロパノール	2-プロパノール		
$(\text{CH}_3)_2\text{CHOH}$	$\rightarrow (\text{CH}_3)_2\text{CHOH}$	$\Delta H = -45.4 \text{ kJ mol}^{-1}$	
[気相]	[液相]		

表 2 吸収式ヒートポンプと金属水素化物系および有機化合物系ケミカルヒートポンプの比較

	吸収式 (LiBr 水溶液系)	金属水素化物系	有機化合物系
ヒートポンプの駆動力	圧縮仕事	圧縮仕事	分離仕事
作 動 物 質	水蒸気 LiBr 水溶液	水素 金属水素化物	水素 有機化合物
状 態 変 化	液相/気相	固相/気相	液相/気相
化学変化 (反応対)	なし	水素吸収, 放出 (2 組)	水素化, 脱水素 (1 組)
熱 移 動	水蒸気発生 (2 ヲ所) 水蒸気凝縮 濃縮溶液の水蒸気吸収	水素発生 (2 ヲ所) 水素吸収 水素吸収	水素発生 (1 ヲ所) 有機化合物分離 水素化反応
システム上の特質	濃厚溶液と純水の補給	熱による水素の加圧	液相水素の気相放出 触媒の利用
操 作 上 の 特 質	連続式	サイクリック	連続式
蓄 熱 機 能	なし	あり	あり

3. 2-プロパノール/アセトン/水素系ケミカルヒートポンプの熱効率とシステム構成

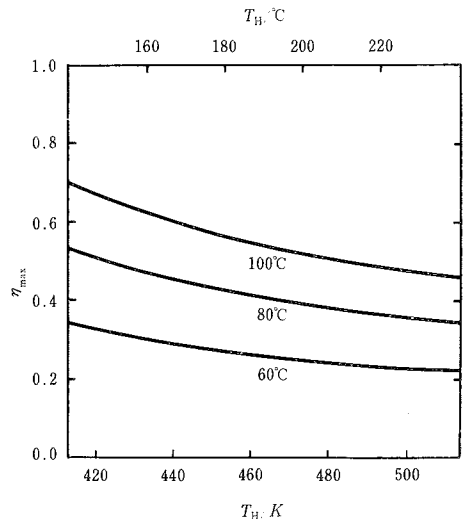
一般に、低品位熱  $Q_L$  を温度  $T_L$  で供給し、その一部  $Q_C$  を温度  $T_C$  で冷却除熱しつつ、残りを昇温熱  $Q_H$  として温度  $T_H$  で回収するヒートポンプに対しては、熱効率  $\eta = Q_H/Q_L$  は、熱量保存 (熱力学第一法則)、エントロピー保存 (熱力学第二法則) の条件下で、次式に示す  $\eta_{max}$  までの値が許される。

$$Q_L = Q_H + Q_C \quad (1)$$

$$Q_L/T_L = Q_H/T_H + Q_C/T_C \quad (2)$$

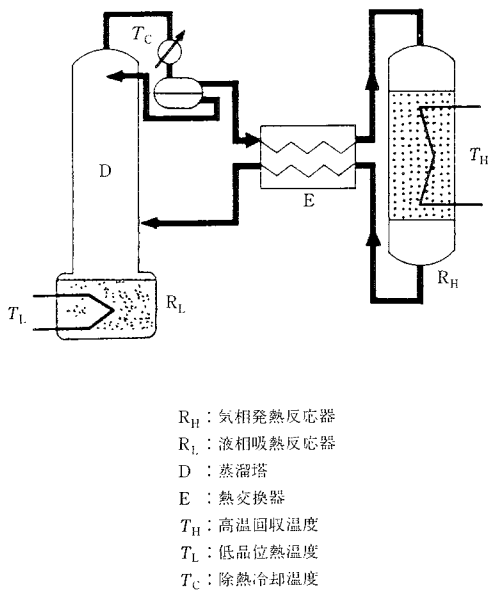
$$\eta_{max} = Q_H/Q_L = (1 - T_C/T_L)/(1 - T_C/T_H) \quad (3)$$

低品位熱の温度  $T_L$  を 60, 80, 100°C とし、冷却温度  $T_C$  を 30°C とした場合の、最大熱効率  $\eta_{max}$  と昇温熱温度  $T_H$  との関係 (3) 式から描くと、図 1 のようになる。 $T_L$  を 80°C、 $T_H$  を 200°C に選ぶと、 $\eta_{max}$  は 0.39 と求められる。すなわち、80°C の低品位熱を 200°C に昇温するには、どうしても 6 割強の熱を捨てなければならない。しかし、無駄に捨てている低品位熱を有効利用できるなら、低コストで分離仕事を賦与できるかぎり、その意義は大きいというべきであろう。



低品位熱温度:  $T_L$ : 60, 80 および 100°C  
 除熱冷却温度:  $T_C$ : 30°C  
 高温回収温度:  $T_H$ : 横軸 (140~240°C)  
 最大熱効率:  $\eta_{max}$ : 縦軸 (0.0~1.0)

図 1 冷却除熱操作によって低品位熱を昇温するヒートポンプの最大熱効率



- R<sub>H</sub> : 気相発熱反応器
- R<sub>L</sub> : 液相吸熱反応器
- D : 蒸溜塔
- E : 熱交換器
- T<sub>H</sub> : 高温回収温度
- T<sub>L</sub> : 低温位熱温度
- T<sub>C</sub> : 除熱冷却温度

図2 2-プロパノール/アセトン/水素系ケミカルヒートポンプのフローシート

このケミカルヒートポンプの基本システムは、図2に示すように、気相発熱反応器 R<sub>H</sub>、液相吸熱反応器 R<sub>L</sub>、蒸溜塔 D、熱交換器 E から構成され、液相反応器は蒸溜塔のリボイラーを兼用する。

蒸溜塔の塔頂から熱交換器を経て気相発熱反応器に送られる混合気体は、主にアセトンと水素からなる。蒸溜塔の操作条件で、ごく少量の2-プロパノール混入量が決まる。反応器内の触媒の働きにより、平衡組成が達成されるまでアセトンと水素は2-プロパノールに変化する。その反応温度で発生する水素化反応熱は回収し、再利用することができる。

気相発熱反応器を出た平衡混合気体は、熱交換器で反応気体を予熱したあと蒸溜塔へ移る。そこで2-プロパノールは凝縮し、リボイラーを兼ねる液相吸熱反応器に入ってくる。

液相吸熱反応器では、2-プロパノールは触媒の働きによりアセトンと水素に変化する。そこは蒸溜塔のリボイラーでもあるので、2-プロパノール・アセトン混合溶液は沸とうしており、塔底混合気体との間に気液平衡が成立している。水素は溶解平衡にあり、その平衡溶解量は極めて小さい。このようにして液相吸熱反応器では、反応熱と蒸発熱の供給を受けつつ、送りこまれた分の2-プロパノールをアセトンと水素に戻す役割を果たしている。

供給される低温位熱の温度と液相吸熱反応器の2-プロパノール・アセトン組成に応じて、蒸溜塔塔底の気相組成、温度、圧力が決まる。さらに蒸溜塔の段数と還流

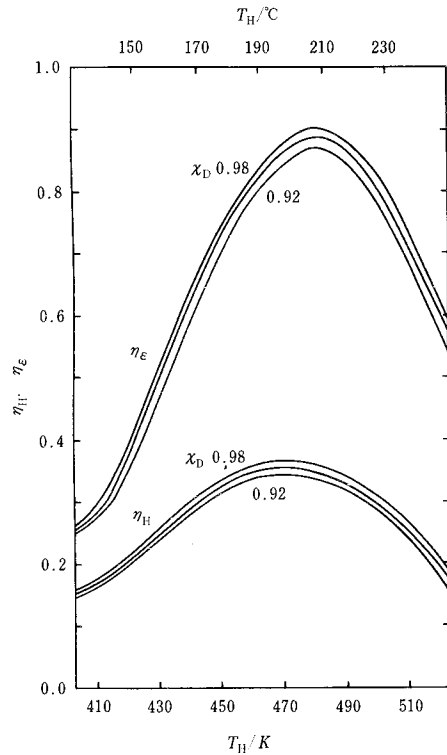


図3 2-プロパノール/アセトン/水素系ケミカルヒートポンプの熱効率およびエクセルギー効率

設定温度：供給熱 (T<sub>L</sub> 80°C)、冷却 (T<sub>C</sub> 30°C)、蒸溜塔塔底 (78°C)  
 気相組成 (発熱反応器入口)：水素/アセトン比 5.0  
 パラメータ x<sub>D</sub>：凝縮性成分中のアセトンモル分率

比を与えると、塔頂から熱交換器へ送られる気相混合物の2-プロパノール/アセトン比が一義的に決まる。一方、水素/アセトン比は任意に選ぶことができ、水素比を大きくとると、液相脱水素反応にはほとんど影響がないけれども、平衡上気相水素化反応のほうは有利になる。

供給熱源温度を 80°C、蒸溜塔塔底温度を 78°C、冷却温度を 30°C とし、全圧 1 気圧、水素/アセトン比 5.0 の気相混合物が発熱反応器に入るとして、蒸溜塔内での2-プロパノールおよびアセトンの気液平衡と発熱反応器での反応平衡の達成を前提に、図2のシステムの熱効率が求められた。高温回収熱量対低温供給熱量の比で与えられる熱効率と、定常的に維持される発熱反応器の温度との関係を図3に示す。図中のパラメーターには、蒸溜塔塔頂から気相発熱反応器に送られる気相混合物の [アセトン] / {[2-プロパノール] + [アセトン]} モル比 x<sub>D</sub> をとっている。

アセトン 98%、2-プロパノール 2% の混合物を水素化する場合には、図3から、昇温熱を 200°C で回収するとき

最も熱効率が高く、0.36に達することがわかる。式(3)に示された最大熱効率の約9割にあたる値である。

なお、高温回収熱量と低温供給熱量の比で与えられる熱効率  $\eta_H = Q_H/Q_L$  に加えて、 $30^\circ\text{C}(T_c)$ を基準に、次のようなエクセルギー効率を定義し、図3にあわせ示した。

$$\eta_e = Q_H(1 - T_c/T_H)/Q_L(1 - T_c/T_L) \quad (4)$$

図3にみるような高い熱効率あるいはエクセルギー効率の値は、化学変化や状態変化で作動するという、ケミカルヒートポンプの有利な特質に由来する。ただし、これらの評価にあたって熱リークや作動物質の搬送動力は無視されており、さらに、本ヒートポンプの目的に適う触媒のあることを前提としている。すなわち、高度に選択的であり、吸熱側では熱移動に匹敵するほどに反応速度が大きく、十分に長寿命で、扱いやすく、しかも安価な触媒が必要である。

#### 4. 金属ニッケル超微粒子の触媒作用

ガス中蒸発法<sup>5)</sup>で調製される超微粒子は、触媒材料という観点に立つと、次のような興味深い性質を持っている<sup>4)</sup>。

(1) 比較的良好な数nm~数十nmの粒径をもつ球型粒子で、極めて結晶性が高く、粒子内に細孔を含まないため、細孔内拡散に基づく逐次反応型の副反応が避けられるうえ、比表面積が大きく、したがって触媒重量当たりの反応速度が大きく、しかも濃厚な懸濁触媒を用意できるので、液相空間速度が極めて大きい。

(2) 化学的純度が高いために併発反応型の副反応を抑えやすいばかりでなく、新しい複合的效果を期待しての粒子内部組成や表面組成の修飾、あるいは多孔質担体を活用することによって、さらに触媒機能の改質をはかることが可能である。

(3) 調製の段階で高温熱履歴を受けているために、温和な条件で吸熱反応に使えば、熱的安定性に基づく長い触媒寿命が期待できる。

ガス中蒸発法で調製された金属ニッケル超微粒子の電顕写真を図4に示す。平均粒径20nm、比表面積 $43.7\text{ m}^2\text{ g}^{-1}$ で、空気中にとり出せるよう、酸化物層で表面を薄く覆う、安定化処理が施してある。そのため反応に先立ち、高温で水素還元を行う必要がある。

2-プロパノールやアセトンに極性溶媒なので、超音波分散処理により、あたかも墨汁のような外観をもった安定な懸濁溶液が得られる。そのまま加熱すると2-プロパノールの液相脱水素反応が進行し、特に沸とう状態では、水素が激しく発生する<sup>5)</sup>。アセトンを等モル混合した沸点 $64.4^\circ\text{C}$ の溶液からも、水素の生成することが確かめられている。

あらかじめビスアセチルアセトナト白金(II)錯体を2-プロパノールに溶かしておき、還元処理で表面に白金

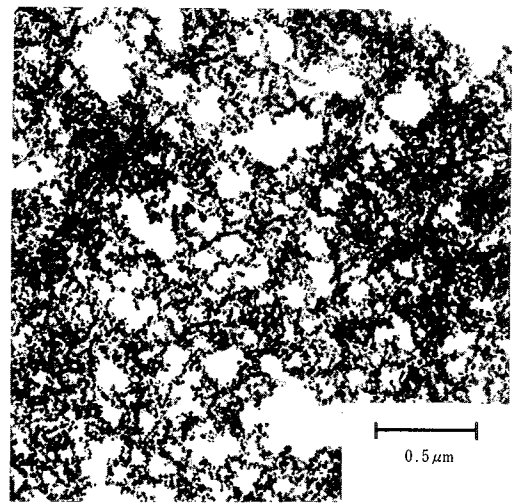


図4 2-プロパノール液相脱水素反応に使われるガス中蒸発法調製金属ニッケル超微粒子の電顕像

表3 2-プロパノール液相脱水素触媒の活性比較

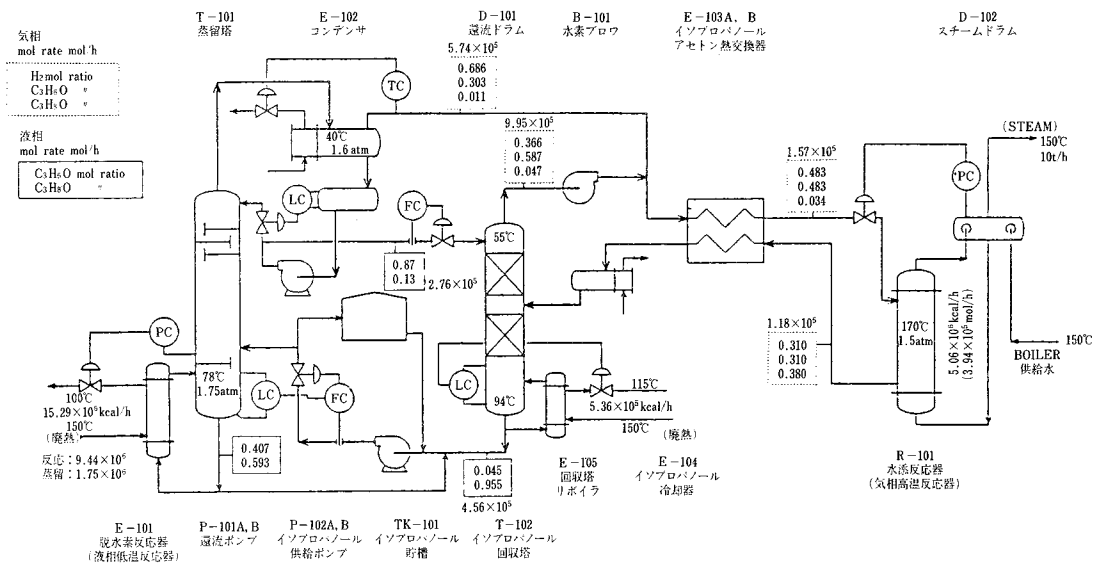
触 媒	活性/ $\text{mmolh}^{-1}\text{g}^{-1}$
金属ニッケル超微粒子	136
金属ニッケル超微粒子(白金つき)	286
ホウ化ニッケル粉末	60
ラネー・ニッケル	55
$\text{Rh}_2(\text{OAc})_2(\text{PPh}_3)_6$	17.3
$\text{Rh}(\text{OAc})_2(\text{CO})(\text{PPh}_3)_2$	14
シリカ修飾 $\text{Rh}_2(\text{OAc})_2(\text{PPh}_2(\text{CH}_2)_2)_6$	7.74
$\text{Rh}_2\text{Cl}_2(\text{SnCl}_3)_4$	4.0
樹脂固定 $\text{Ru}(\text{OAc})_2(\text{CO})(\text{PPh}_3)_2$	0.84

を沈積させたあと脱水素反応速度を調べると、顕著な活性促進効果を示すことが認められた<sup>6)</sup>。触媒活性向上の可能性を裏付けるものとして興味深い。

すでに報告のある、固体懸濁触媒、均一系錯体触媒、固定化錯体触媒を含めて、重量当たりの活性比較を表3にまとめた。金属ニッケル超微粒子、なかでも白金をつけたものは極めて高い活性を与える。懸濁濃度を高くできる点も考慮に入れて試算すると、伝熱律速になるほどの反応速度であるといえる<sup>7)</sup>。

アセトン気相水素化反応には、金属ニッケル、パラジウムあるいは炭化タングステンなどの触媒が知られている。反応温度が高いだけに、触媒としては、活性もさることながら選択性のよいことが重要である。多孔質炭素担体に金属ニッケル超微粒子を担持した触媒について、現在開発研究が進行中である<sup>8)</sup>。

#### 5. 2-プロパノール/アセトン/水素系ケミカルヒートポンプの経済性調査



供給熱源：150°C 熱排水，熱出力：150°C 加圧水蒸気 10 t/h  
 発熱反応：170°C (1.5 気圧)，吸熱反応：78°C (1.75 気圧)

図 5 地熱発電熱排水を利用し加圧水蒸気を得るための2-プロパノール/アセトン/水素系ケミカルヒートポンプシステムの流れ図

わが国は世界有数の火山国である。地熱は重要な国産エネルギー源の一つであり、水蒸気発電を中心に利用実績を重ねてきたものの、高圧水蒸気に随伴して噴出する熱水をどう活用するかは、なお残された技術的課題となっている<sup>9)</sup>。

150°Cの水蒸気を利用する地熱発電所において、150°Cの熱水に蒸発熱を与え150°Cの水蒸気を得るという想定で、本ヒートポンプの経済性調査が行われた。10 t/hの規模で、図5のようにプロセス設計されている<sup>10)</sup>。

液相吸熱反応器を150°Cで加熱するため、脱水素反応は加圧下で進行し、その圧力は、気体輸送用の動力に利用することができる。液相中の2-プロパノール濃度を59.3 mol%に設定すると、反応温度78°Cで圧力は1.75 atmとなり、投入される熱水熱量 $1.53 \times 10^7 \text{ kcal h}^{-1}$ のうち、62%が脱水素吸熱反応過程に、38%がアセトンと2-プロパノールの蒸発熱として使われる。

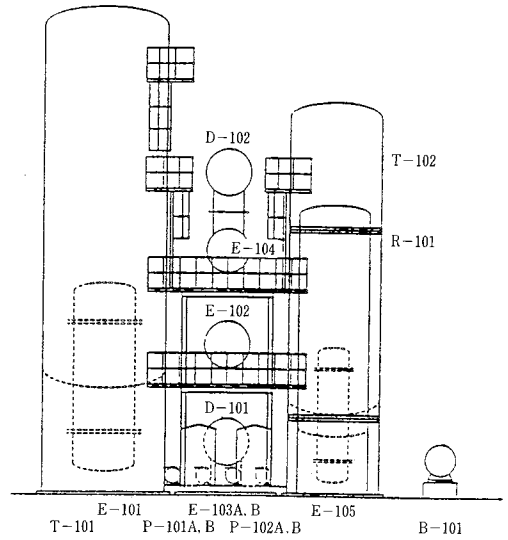
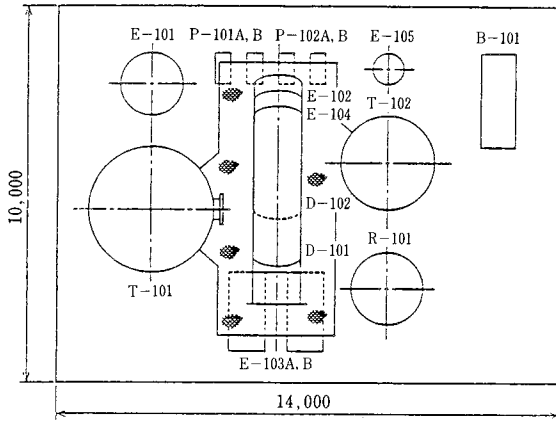
蒸溜塔上部の分縮器温度は40°C、還流比2.0で、分離効率90%と設定されている。蒸溜塔の塔頂から出る気体成分は熱交換器を経て気相発熱反応器に送られ、凝縮液は別に設けた2-プロパノール回収塔に導入する。アセトンと水素の比を1対1、反応温度170°C、圧力1.5 atmで水素化反応を平衡転化率の90%にまで進行させ、その反応熱を使って150°Cの熱水を蒸発させるのである。反応熱の一部は気相発熱反応器の入口気体を反応温度にまで昇温するのに使うので、外部に供給できる熱量は

$5.06 \times 10^6 \text{ kcal h}^{-1}$ となる。出口気体は熱交換器を経て、2-プロパノール回収塔に導入し、そこで2-プロパノールを99.5%にまで濃縮する。また、2-プロパノール回収塔では、アセトン濃度の高い溶液を上段へ、2-プロパノール含量の多い気体を中段へ供給し、他方、リボイラーを150°Cの熱水 $5.36 \times 10^6 \text{ kcal h}^{-1}$ で加熱している。

このように低温度熱は蒸溜塔のリボイラーを兼ねた液相吸熱反応器および2-プロパノール回収塔のリボイラーに供給され、高温熱は気相発熱反応器からとり出され、両者の比が本プロセスの熱効率を与える。その値は32%と算出された。理論的に期待できる最大熱効率の85%に相当する。

経済性調査において設定された供給熱と回収熱の温度はともに150°Cであり、図2および図3で述べたシステムとは設定温度が異なる。そのほかにも、次のような配慮がなされている。(1)気体輸送に必要な動力を節減するため、液相吸熱反応を加圧(1.75 atm)下で進行させ、さらに水素/アセトン比を1.0に抑えることによって、気体循環量を少なくしている。(2)蒸溜塔にかかる負荷を小さくするため、棚段型の蒸溜塔とは別に充填型の回収塔を設けている。(3)回収塔の塔頂気体を熱交換器に送り込むブローと、塔底液体を蒸溜塔の下部棚段に供給するポンプを設けている。

本プロセスのレイアウトを図6に示す。腐食性の物質は含まれていないので、機器構造材料はいずれも炭素鋼

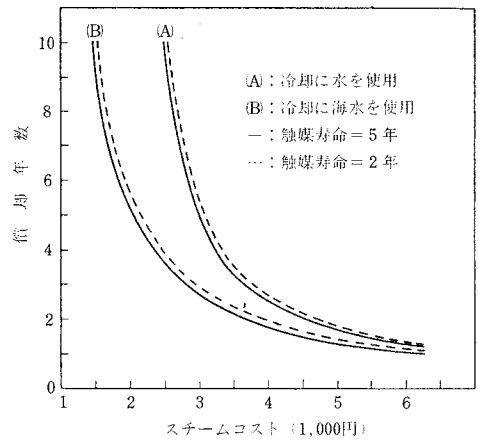


供給熱源：150℃熱排水，熱出力：150℃加圧水蒸気 10トン/h  
 発熱反応：170℃(1.5気圧)，吸熱反応：78℃(1.75気圧)

図6 地熱発電熱排水を利用し加圧水蒸気を得るための2-プロパノール/アセトン/水素系ケミカルヒートポンプシステムの配置図

表4 2-プロパノール/アセトン/水素系ケミカルヒートポンプシステムの経済評価表

設備費	(1) 装置機器費+建設費	400(百万円)
操業費	(2) 触媒費	4
	(3) 冷却水費	96
	(4) 電気代	17
	(5) 労務費+その他	20
	(6) 金利(6%)	24
	(7) 発生スチーム	240
	投資回収期間	
	(1) (7)- [(2)+(3)+(4)+(5)+(6)]	
評価計算ベース		
	冷却水費	12円/m <sup>3</sup>
	電気代	15円/kW
	スチーム価格	3,000円/t
	スチーム発生量	10t/h
	操業時間	8,000h/年



供給熱源：150℃熱排水，熱出力：150℃加圧水蒸気 10トン/h  
 発熱反応：170℃(1.5気圧)，吸熱反応：78℃(1.75気圧)

図7 地熱発電熱排水を利用し加圧水蒸気を得るための2-プロパノール/アセトン/水素系ケミカルヒートポンプの経済性評価

で十分であり，また熱交換器はコンパクトで高性能のものが選んである。

触媒価格をプラント設備費の5%，高温回収熱10<sup>6</sup> kcal 当たり400万円程度に設定し，延べ運転従事者を1名・年(8000h)，6%の金利のほか，冷却水費，電気代などの操業費を150℃の加圧水蒸気10t/h(3000円/t)でまかなうとすると，表4に示すように，償却年数は5.1年と算出される。冷却水費の占める割合の極めて大きくなることがわかる。

蒸留塔の冷却水を海水でまかなうとすると，凝縮器材質の変更に伴う設備費の加算と，海水用ポンプ動力のための操業費の追加はあるものの，全体として費用は著しく低減される。触媒を毎年20%ずつ交換する代わりに毎年半分ずつ交換するとしても，それによる節約分はあま

り大きくない。これらの事情は、水蒸気代と償却年数の関係を示す図7の評価曲線から、よく読みとることができる。

蒸溜塔のリボイラーから蒸発する気相成分は、できるだけアセトンが濃く、2-プロパノールの薄いものであることが望ましい。ヒートポンプシステムとしての熱効率がそれだけ高まるばかりでなく、蒸溜塔のコンデンサー負荷が下がり、問題の冷却水費を大きく低減できるからである。コンデンサー負荷を2割減らせば、償却年数は1年余り短縮されることになる。他方、2-プロパノール液相脱水素反応にとっては、生成物であるアセトンの濃度はむしろ低いほうが有利である。したがって、できるだけアセトンの濃い条件で2-プロパノール液相脱水素反応が速やかに進行するような、さらに高性能の触媒を開発していく必要がある。

## 6. お わ り に

ここに提案されたケミカルヒートポンプの要素技術は、多くの経験を長い間積み重ねてきた化学工業プロセスのそれと基本的に同じである。良い触媒が必要であり、また触媒がよくなればシステム自体一層よくなることも同じである。

地球のエネルギー資源は大切に使うべきであろう。特にその資源に恵まれない国々にとって、低品位熱の高次利用は重要な検討課題である。そのような国の一つ、日本にふさわしい、オリジナルな技術に育つことを期待し

たい。

なお、図3を含む化学工学的取扱いは東京農工大学・亀山秀雄助教授、また5節に述べた経済性調査は石川島播磨重工業㈱・佐藤誠二博士、豊山正道博士のご協力によっている。ここに記して厚く御礼申しあげる次第である。

(1986年7月23日受理)

## 参 考 文 献

- 1) 岡本秀樹, 「廃熱回収利用システム実務便覧」(フジ・テクノシステム, 1981) 29 頁
- 2) 亀山秀雄, 佐藤真士, 「ケミカルヒートポンプ設計ハンドブック」(サイエンスフォーラム, 1985) 159 頁
- 3) 賀集誠一郎, 化学工学 46 (1982) 530; 林 豊治, 触媒 27 (1985) 473
- 4) 林 豊治, 斉藤泰和, 化学 39 (1984) 667; 斉藤泰和, 日本化学会編・化学総説 No.48, 「超微粒子」(学会出版センター, 1985) 193 頁
- 5) 野田道雄, 篠田純雄, 斉藤泰和, 日本化学会誌 (1984) 1017
- 6) 野田道雄, 篠田純雄, 斉藤泰和, 触媒 27 (1985) 359
- 7) 斉藤泰和, 「ケミカルヒートポンプ設計ハンドブック」(サイエンスフォーラム, 1985) 55 頁
- 8) 中川紳好, 加藤之貴, 亀山秀雄, 野田道雄, 斉藤泰和, 「蓄熱・増熱技術」(化学工学協会シンポジウムシリーズ第8巻, 1985) 117 頁
- 9) 資源エネルギー庁監修「'85 資源エネルギー年鑑」(通産資料調査会, 1985) 755 頁
- 10) 佐藤誠二, 豊山正道, 「ケミカルヒートポンプ設計ハンドブック」(サイエンスフォーラム, 1985) 131 頁

