

■ 展望・解説 ■

スーパーヒートポンプ・エネルギー集積システム 研究開発の現状

Present Status of Super Heatpump Energy Accumulation System R & D



竹内 元*

Hajime Takenouchi

1. はじめに

エネルギー需給は世界的な脱石油、省エネルギーの施策の推進により緩和してきた。しかし、近年になりエネルギー消費のGNP弾性値が1を越すなど省エネルギーのムードにかげりが見えてきた。この背景にはゆとりと快適性を求める風潮が影響していると思われる。化石燃料資源の有限性は否定できるものでなく、先進諸国が脱石油、省エネルギーの努力を怠るならば、再びエネルギー危機の再来を招かないとも限らない。

一方地球規模の環境問題、即ちフロンによるオゾン層破壊あるいは炭酸ガスによる地球温暖化などの問題が世界的に関心を持たれている。この様な状況から、本年6月の総合エネ調中間報告でも2010年迄に11%の省エネを目標とし、従来にました省エネルギーの努力が必要である。

ヒートポンプ（以下HPと略記）の性能は一般に

出力エネルギーの駆動エネルギーに対する比（COP）で表現している。この値は熱源の温度や出力する温度によって変わるものであるが、このプロジェクト発足当時は一般に3程度といわれていた。このCOPをさらに高め、また出力温度をさらに高めれば利用範囲が広まり、HPの利用は著しく促進され、省エネルギーの効果が倍増するものと期待されている。

一方、電力の使用量は季節により、又時間によって変動するもので、特に夏では深夜の電力需要は昼間のピークの4割程度しかない。そこで電気事業では蓄熱調整契約制度を設け深夜の電力料金を割り引くなど、料金制度により深夜需要を開拓し、電力負荷の平準化を図っている。とくに平成元年4月からの料金改定では深夜料金の割引率を大きくして深夜電力の利用を促進している。このような状況から、HPの高効率化と相まって、よりコンパクトな蓄熱装置が開発できれば、蓄熱式HPのより広範な普及が期待でき、省エネルギー

表1 開発目標

項 目			目 標		
			出力温度	成績係数	
要素技術	超高性能圧縮式ヒートポンプ	高効率型	温熱専用 85℃	8	
		高温出力型	冷温兼用 (温) 45℃ (冷) 7℃	6 7	
	ケミカル蓄熱技術		低温熱源用 高温熱源用	~150℃ ~300℃	3以上 3以上
			出力温度	蓄熱能力	熱回収率
トータルシステム	適用対象	高温蓄熱機能	~200℃	50kcal/kg以上	75%以上
		冷熱蓄熱機能	10℃以下	30kcal/kg以上	75%以上
	事務所ビル空調	出力温度	(温) 45℃ (冷) 7℃		4.5 5.3
		エネルギー効率	(温) 45℃ (冷) 7℃ 85℃		4.5 5.3 6
産業プロセス加熱	150~300℃			2.3以上	

* スーパーヒートポンプ・エネルギー集積システム技術研究組合常務理事

〒101 東京都千代田区神田小川町1-6宝ビル5F

の一段の促進が期待できる。

2. スーパーヒートポンプ・エネルギー集積システム (SHP) の研究開発計画の概要

2.1 研究開発の目標

本プロジェクトはムーンライト計画の一つであり、夜間電力を用いて大気、河川水中の熱や排熱を、高い効率で高品位の熱とし、高密度に貯蔵し、昼間のエネルギーが必要なときに、これを温熱または冷熱として取り出せる、極めて高効率な蓄熱式HPシステムを開発しようとするものである。

この計画では、表1に示すように、超高性能圧縮式HPおよびケミカル蓄熱技術（以下CSと略記）の各要素技術の研究開発を進め、これらの成果を結集して、1000kW級のパイロットシステムの試作運転研究を行うこととしている。このパイロットシステムでも、1万㎡程度の中規模ビルの空調に充分の能力を持っている。さらに、3万kW級のシステムのプロトタイプ設計を纏めることとしている。

2.2 研究開発工程と開発体制

この研究開発は昭和59年度より平成3年度までの8ヶ年、予算総額約100億円と見込み見足したが、中間評価の実施時期が平成元年7月まで遅れたことと、フロン規制の影響で1ヶ年延長することとなった。表2はこの改訂された開発計画の工程表である。

スーパーヒートポンプ・エネルギー集積システム技術研究組合は2.の「システム試作運転研究」のうち「要素技術の研究」、「ベンチプラントの試作運転研究」、「パイロットシステムの試作運転研究」等、主としてハード面の研究を新エネルギー・産業技術総合開発機構より受託して研究している。

3. 適用対象と開発効果

3.1 適用対象

SHPの適用する対象としては、大型ビル空調、地域冷暖房、給湯、産業プロセス加熱等、大容量のシステムを想定している。

3.2 開発の効果

この研究開発の効果は次のように期待される。

①. 省エネルギー効果

現在の石油等の1次エネルギーから電力への変換効率は受電端で36%程度である。したがってCOPが3

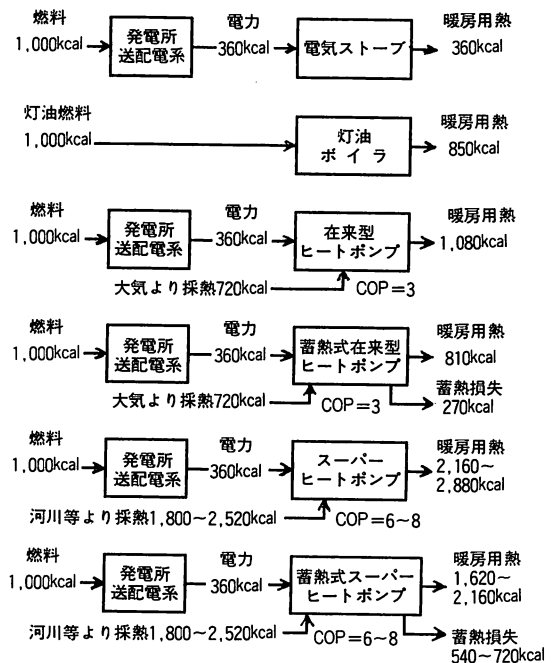


図-1 ヒートポンプ等のエネルギーフロー

表2 研究開発工程表

項目	昭和59年度	昭和60年度	昭和61年度	昭和62年度	昭和63年度	平成元年度	平成2年度	平成3年度	平成4年度
1. 媒体, 材料の研究・評価	作動媒体, 化学反応系, 機構, 材料等の研究評価, 寒冷地用等システムの研究評価, 総合評価								
2. システム試作運転研究	システム最適化, 制御技術の研究 3万kW級概念設計								
(1)システム化研究									
(2)要素技術の研究	要素機器, 媒体, 材料等の研究, 開発技術に基づく					中間評価	要素機器の製造技術		
(3)ベンチプラントの試作運転研究	ベンチプラントの試作運転研究						(100kW級, 10,000kcal級)		
(4)パイロットシステムの試作運転研究						パイロットシステム(1,000kW級)の試作運転研究			
3. トータルシステムの研究	設計研究								

註記 ~~~以外の部分はNEDOの実施項目 ~~~部分は国立研究機関の実施項目 太線 —— 部分は研究組合の受託項目

表3 エネルギーコスト（暖房用）の比較（円/1,000kcal）

灯油ボイラ	ガスボイラ	在来型ヒートポンプ蓄熱なし	在来型ヒートポンプ蓄熱式	超高性能圧縮式ヒートポンプ蓄熱なし	超高性能圧縮式ヒートポンプ+ケミカル蓄熱
5.02	11.81	9.05	4.87	4.52	2.43

表4 エネルギーコスト（冷房用）の比較（円/1,000kcal）

在来型ヒートポンプ単独	在来型ヒートポンプ蓄熱式	超高性能圧縮式ヒートポンプ蓄熱なし	超高性能圧縮式ヒートポンプ+ケミカル蓄熱
9.04	7.16	3.87	2.44

程度であると、総合したエネルギー効率率は100%程度であるが、COPを6~8とすれば、図-1に示すごとく未利用の熱を回収利用し、エネルギーを倍以上に有効利用できる。

②. エネルギーコストと電力負荷平準化効果

効率の高いヒートポンプとコンパクトな蓄熱装置が開発されると、表3および表4に示すように、深夜電力利用のエネルギーコストは他の方式のコストに比し廉価と成り、深夜電力の利用が促進され、電力の負荷平準化の効果が期待できる。

4. 研究開発の内容と進捗状況

SHPの研究は、表2の開発工程表で示した如く、国立研究所等で実施しているところもあるが、ここでは当研究組合で実施している部分について述べる。

4.1 超高性能圧縮式ヒートポンプ

現在のHPの性能は、COPで3程度であるが、この研究開発では表1に示した如く、COPを現状の2倍以上に飛躍的に向上させる高効率型と、産業用に需要の多い150℃乃至300℃程度の熱を、昇温巾100~150℃、COPを3以上で取り出す高温出力型の、二つの型のHPを開発する事としている。HPはある意味で成熟した技術であり、このように高い性能を実現するには一つの技術改善では達成できるものでなく、表5の様に多くのきめこまかい技術の積み重ねで実現できるも

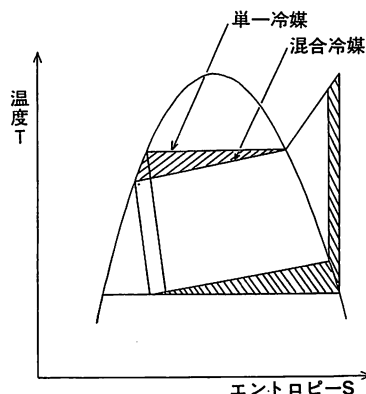


図-2 単一媒体と非共沸混合媒体のTS線図

のであり、その内の幾つかを例示的に説明する。

(1) 高効率型圧縮式HP

高効率型HPでは温熱専用、冷温兼用の両者共、非共沸混合媒体を利用して性能を向上させた。一般に蒸発器で媒体を加熱する流体は、熱を奪われると共に温度が下がる。一方加熱される媒体が単一媒体の場合では蒸発温度が一定であるので過熱流体入口では出口より大きな温度差が必要である。これに対して非共沸混合媒体では蒸発温度がエントロピとともに変化するので加熱流体と媒体とを対向流に蒸発器を設計すると加熱流体と媒体との温度差をいつも小さく出来、図-2に示すように非可逆過程により生ずる損失が、斜線の部

表5 各ヒートポンプシステムの特徴と開発内容

	高効率型ヒートポンプ		高温出力型ヒートポンプ	
	温熱専用	冷温兼用	低温熱源用	高温熱源用
システムの特徴	多段ターボ圧縮機 多段凝縮システム	単段スクリュウ圧縮機 2段エコマイザーシステム	スラスト相殺型2段スクリュウ圧縮機 動力回収膨張機の採用	高速往復動圧縮機 凝縮水フラッシュ蒸気による蒸気過給機
熱媒体	非共沸混合媒体 (R-113/114)	非共沸混合媒体 (R-22/114)	TFE/水系	水蒸気/水系
その他の主な開発技術	液噴射技術 密閉電動機 高性能凝縮器、蒸発器	液噴射技術 高効率新歯形プレートフィン凝縮器 プレートフィン蒸発器	高効率新歯形縦型流下液膜式蒸発器 直接式中間冷却器	吸排気弁の改良 液噴射技術 潤滑油の研究

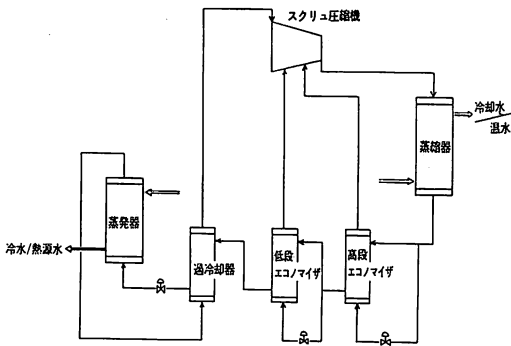


図-3 エコノマイザーサイクルシステムフロー図

システムのフロー図で、凝縮器で凝縮した媒体の一部をバイパスし、エコノマイザを通して蒸発させ、圧縮機の中間段に入れることにより、図-4に示すように、これより低圧の圧縮機動力が不要になり、動力の削減が可能になる。冷温兼用HPのベンチプラントではこのエコノマイザサイクルを二段にして効果を上げている。

(2) 高温出力型HP

HPに広く使われているフロンは高温では安定性に問題があるので、安定性の高い媒体を選択することが肝要である。そのため耐熱性の優れた媒体の研究や安定剤の研究を進めた。しかも高い昇温巾にも拘らずCOPを3以上とするために二段圧縮システム等、夫々のシステムに適した効率向上の工夫を行なっている。

図-5は高温熱源用HPのシステム図で、媒体として水-水蒸気系を使用する高速往復動圧縮機を中心に、圧縮器シリンダー内への水噴射による温度制御、凝縮水をフラッシュした蒸気による回収動力で駆動した過給機で中間圧力まで水蒸気を圧縮してCOP向上を図った。

4.2 要素機器及び媒体

(1) 要素機器

高性能圧縮式ヒートポンプあるいはケミカル蓄熱機能の開発には熱交換器の研究開発が必要である。特に非共沸混合媒体を利用するときには、性能の良い熱交換器でないとその特質を生かし切れない。そこで、HPの開発分担組合員のところでも研究を進めているが、さらに性能の良い熱交換器の開発を目指して、非共沸混合媒体用蒸発器として、完全対向流逆流逆転式蒸発器を開発した。また、高い熱伝達率を実現するEHD凝縮器を開発し、通常の凝縮器に比し約4倍の伝熱促進効果が有ることを確認した。

さらに、圧縮式HPシステムの蒸発器、凝縮器、或はCSの反応器として、コンパクトで高性能なステンレス製プレートフィン型熱交換器の試作に成功した。

(2) 媒体

本プロジェクトでは、まず高温用の媒体、安定剤の研究開発を行い、中間評価試験の結果、評価基準を達成していることが確認された。

一方フロン規制に鑑み、特定フロンを使用する研究開発は適当でないので、パイロットプラントでは代替フロンを使用することとし、代替フロンの基礎物性および応用特性の研究を進めている。

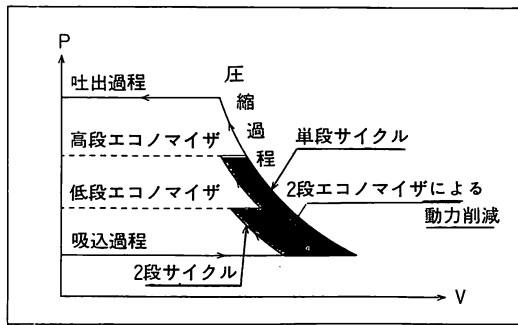


図-4 2段エコノマイザーシステムの動力削減効果

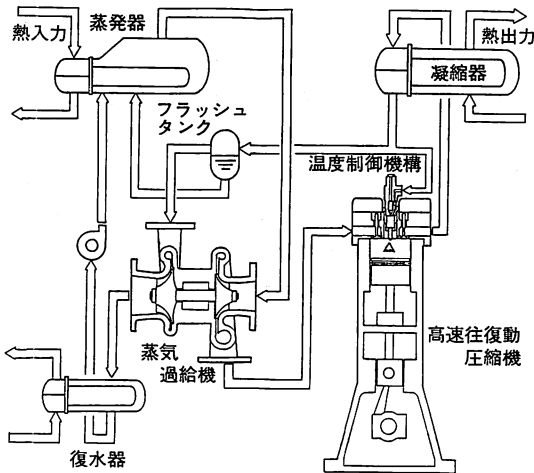


図-5 高温出力型高温熱源用ヒートポンプシステム図

分だけ減少し、HPの効率を高めることが出来る。また凝縮器においてもこれと同様のことが言える。但し非共沸混合媒体は熱伝達が低下することがあり、蒸発器、凝縮器の性能向上が肝要である。

図-3は冷温兼用HPで採用された2段エコノマイザー

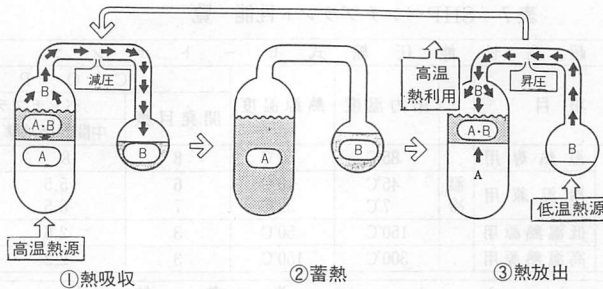


図-6 ケミカル蓄熱技術原理図

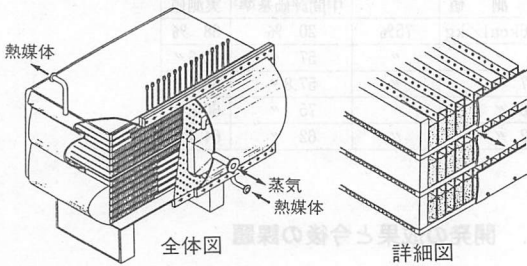
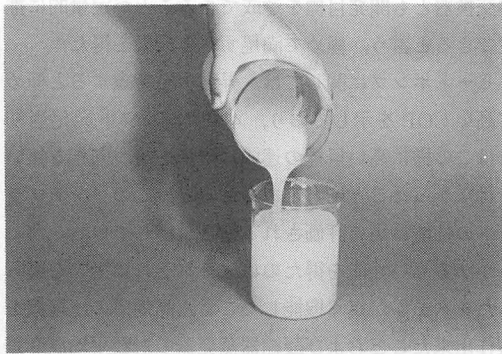


図-7 プレートフィン型固相反応器



写1 クラスレートの性状

4.3 ケミカル蓄熱技術

蓄熱技術としては水蓄熱あるいは氷蓄熱が実用化されているが、本プロジェクトでは、未だ実用化されていないケミカル蓄熱技術により、コンパクトな蓄熱の技術を開発している。

ケミカル蓄熱装置は図-6に示すように一般には化合物A・Bを加熱してAとBに分解し、AとBとを分離して蓄えておき、熱の必要なときにAとBとを反応させ、その時発生する熱を利用するものである。熱により分解したAとBとを分離するために、一般にBは分解時に気体になり、これを貯蔵するために、液状に転換できるものが選定される。

スーパーヒートポンプ・エネルギー集積システムにおいて開発しているCSは、高温蓄熱3種類、冷熱蓄熱2種類で、その反応は表6に示した通りである。紙数に限りがあるので例示的に高温用CSと冷熱蓄熱一例づつを説明する。

(1) 高温蓄熱機能

図-7は水和反応ケミカル蓄熱のプレートフィン型反応器を示す。150℃の熱で、蓄熱媒体CaBr₂・nH₂Oを加熱すると脱水する。この時生じた水蒸気は凝縮蒸発器で冷却して水とし排除する。屋間は70℃程度の低温の熱源を利用して凝縮蒸発器で水蒸気を発生させ、蓄熱媒体CaBr₂に水和反応を行わせることにより、150℃の高温の熱を発生させる。

(2) 低温蓄熱機能

クラスレートは図-6で示したCSの一般原理図と若干異なり、氷蓄熱に類似したCSとなっている。R11と水との混合物を冷却して得られるクラスレートは写1に示すような流動性のあるシャーベット状の物である。この時の分解熱は約80Kcal/kgで氷の融解熱

表6 ケミカル蓄熱反応一覧

反 応	A	B	貯蔵の為の変換
水和反応	CaBr ₂	H ₂ O	冷却による凝縮
アンモニア錯体	NiCl ₂	NH ₄	NaSCN・nNH ₄ (液状)
溶媒和	E181	TFE	TFE/E181の濃度差
溶質混合	LiBr/CaCl ₂	H ₂ O	膜分離, 冷却凝縮
クラスレート	水とR11による包接化合物の生成		

表7 SHPベンチプラント性能一覧

超 高 性 能 圧 縮 式 ヒ ー ト ポ ンプ							
研究項目		出力温度	熱源温度	C O P			
				開発目標	ベンチプラント		
					中間評価基準	実測値	
高効率型	温熱専用	85℃	50℃	8	8	7.7	
	冷温兼用	45℃	10℃	6	5.5	5.8	
高温出力型	低温熱源用	7℃	32℃	7	6.5	6.7	
	高温熱源用	150℃	50℃	3	2.8	2.8	
	高温熱源用	300℃	150℃	3	2.2	2.4	

ケ ミ カ ル 蓄 熱 技 術						
研究項目	蓄 熱 能 力			熱 回 収 率		
	開発目標	ベンチプラント		開発目標	ベンチプラント	
		中間評価基準	実 測 値		中間評価基準	実測値
アンモニア錯体	50 kcal/kg	26 kcal/kg	37.6kcal/kg	75%	20 %	38 %
水和反応	"	41 "	50 "	"	57 "	72.6 "
溶媒和反応	"	34.5 "	37.7 "	"	57.8 "	60.5 "
溶質混合水和反応	30 "	34 "	35.6 "	"	75 "	60.8 "
クラスレート生成	"	30 "	31.2 "	"	62 "	64.4 "

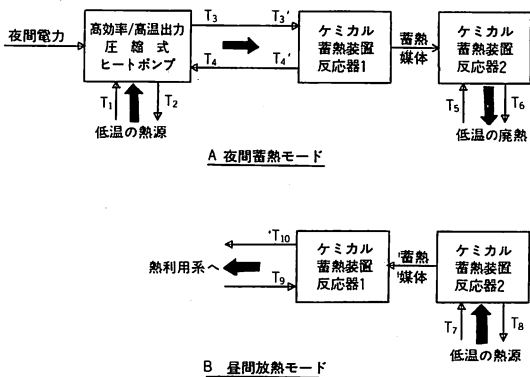


図-8 ヒートポンプとケミカル蓄熱の結合システムの概念図

とほぼ等しい。しかも生成分解が冷房で必要とする7~10℃付近で起こり、また伝熱性能が氷より良いので、氷蓄熱の場合に比し冷凍機の消費電力が少ない利点がある。

4.4 ヒートポンプとケミカル蓄熱の結合について
電力の負荷平準化のためのHPとCSの結合したシステムの概念的構成を図-8に示す。

深夜はA図のように圧縮式ヒートポンプで低温の熱源から熱を汲み上げ、発生した高温の熱を反応器1に送り、分解してできた蓄熱媒体を反応器2で液化して蓄える。このときには低温の廃熱を出すことになる。

昼間の熱必要時にはB図に示すように、低温の熱源を利用して蓄熱媒体を気化して反応器1に送り、ここで反応して生ずる熱を利用する。

5. 開発の成果と今後の課題

ベンチプラントの試作運転研究の結果、表7に示す性能を得て、パイロット規模にすれば各HP、CS、熱交換器とも開発目標を達成できることが定量的に推定できると言う、極めて満足すべき成果を得た。

ヒートポンプに関しては、昇温巾を考慮すると極めて高いCOPを示しており、本プロジェクト発足当初ではこの様に高い目標の達成に疑念を持つ向きも無いではなかったことを考えあわせると、このベンチプラントの性能は高く評価される物と確信している。

かかる高い性能を得たのは、それぞれに工夫を凝らしたシステムが良く機能したこと、高効率の圧縮機を製作出来たことおよび凝縮器蒸発器の対数平均温度差が2℃と言う高い性能の熱交換器を製作でき、非共沸混合媒体を上手に使ったこと等に有ると考えている。

ケミカル蓄熱に関しては、かかる方式の考えは広く知られていたものであるとは言え、実際にこの様な規模でシステムとして実現されたことはなく、これを実現したのみでなく、媒体当りの蓄熱密度、蓄熱効率は満足すべき値として、これまたその成果は高く評価されるものと信じている。

このような成果を得たのは、それぞれのシステムに適切な媒体を選択したことおよび性能の良い反応器を製作出来たこと等に有ると考えている。

本プロジェクトは今後パイロットプラントの試作運転研究を行い、更にこれを結合してパイロットシステムを構築し、その性能を実証する計画である。特にパイロットでは実際の負荷に接続し、そこで生じた諸問

題を解決することによって、実用に供しうるヒートポンプシステムとすることができると考え、電気事業者各社等に協力を要請したところ、多くの所より協力のお申し出を頂き、実負荷実証試験を各所で行う計画としている。

一方、開発したヒートポンプが、表1の開発目標で示されている出力温度、熱源温度に固定されたもの、と誤解する向きもあるので、ヒートポンプがニーズに応じた広い適用範囲に対応でき、且つ高いCOPが出せることを実証する計画である。特に高温出力型では開発目標のCOPが3以上とされており、これでは最近の燃料価格を勘案するとボイラと競合したとき、経済性が成り立ち難いので、昇温巾を少なくすれば、COPとして5~6が出せることを実証しようと考えている。

またベンチプラントでは、高効率型HP二機種およびクラスレートで、特定フロンを使用したのが、フロン規制が施行されるのに伴い、パイロットプラントではこれらについては、媒体を代替媒体に変更する計画で

ある。

SHPはエネルギーコストが低いことは確かめられたが、これを実用化するに当たっては設備費の低減が肝要で、機器のコンパクト化、コスト低減の努力が必要であり、また信頼性、操作性についても利用者の要望に応えるものにせねばならないと考え、今後一層努力する所存である。

6. 結び

蓄熱式ヒートポンプとりわけSHPは、利用者にとって有利なシステムであるのみでなく、省エネルギーに貢献し、電力負荷平準化の効果も期待され、併せて地球規模の問題であるCO₂問題への貢献も期待される。試算に依れば2000年時点でSHPのシェアを10%と想定すると約13MtonのCO₂削減が出来るとされている。今後パイロットシステムの試作運転研究を経て、SHPの実用化に向けて努力するので、関係各位の御指導、御援助をお願いする。

協賛行事ごあんない

「実用触媒の進展」合同シンポジウム

主 催： 触媒学会

I. 第10回触媒燃焼に関するシンポジウム

日 時：平成2年11月1日(木) 10時30分~15時40分

会 場：KKR京都くに荘 大会議室

〒602 京都市上京区河原町通荒神口上る東入東桜町27-3

TEL 075-222-0092

II. 合同討論会

日 時：平成2年11月1日(木) 16時~20時

集合場所：くに荘(触媒燃焼に関するシンポジウムに引続き行います)

16時~18時 自由討論(於：鴨川べり、哲学の道、白沙村荘など)

18時~20時 懇親会(於：白沙村荘 〒606 京都市左京区浄土寺石橋町37)

TEL 075-751-0446)

III. 実用触媒の学理的基礎研究会第6回セミナー(3年次の最終回)

日 時：平成2年11月2日(金) 9時00分~16時15分

会 場：KKR京都くに荘 大会議室

参加費 会員 20,000円, 非会員 30,000円

申込方法 10月15日(月)までに、葉書またはFAXで、氏名、所属、連絡先、所属学協会名を明記のうえ下記あてにお申込み下さい。

〒606 京都市左京区吉田本町 京都大学工学部石油化学科 乾 智行

TEL 075-753-5682 FAX 075-771-7285