

スーパーヒートポンプ・エネルギー集積システム

Super Heat Pump Energy Accumulation System.

植 田 稔*

Minoru Ueda

1. はじめに

「スーパーヒートポンプ・エネルギー集積システム」(以下SHPと略す)は通商産業省工業技術院においてムーンライト計画の一環として研究開発を進めている大型プロジェクトの一つである。このSHPについて既に幾つかの解説^{1,3)}が公表されている。しかし、NEDO(新エネルギー総合開発機構)事業として「スーパーヒートポンプシステム」(仮題)の執筆依頼を受けたことは、NEDOがこのプロジェクトの相当部分を担当していることが、及び/又は、SHPのプロジェクトの内容が、未だ広く知られていないことを示すと思われる。そこで、以上のことが世に更に広く知られることを願い、筆者の浅学を省みず執筆を承諾した。本稿でもSHPの研究開発の概要を説明するので、内容が既刊のものに類似することを御容赦願いたい。

2. ヒートポンプとその性能

ポンプが動力を使って低い位置にある液を汲み上げるように、ヒートポンプは、動力を使って低温度にある熱(ヒート)を高温度に汲み上げる装置である。最近、冷暖房兼用のヒートポンプエアコンが普及しているが、これは、夏には室内の熱を屋外に汲み出して冷房を行い、冬には屋外の熱を屋内に汲み上げて暖房を行う装置である。

ヒートポンプは、熱移動の仲介をする作動媒体の変化(例、液体→気体)を利用して、吸熱と放熱(液体の蒸発時に気化熱を奪い、液化時に凝縮熱を放出)を行うものである。圧縮式ヒートポンプは図-1に示すように蒸発器、圧縮機、凝縮器及び膨張弁などから構成され、作動媒体が循環している。ヒートポンプの仕組みを簡単に説明するため、作動媒体としてフロンを用いた暖房の場合を例として述べる。①蒸発器ではフロ

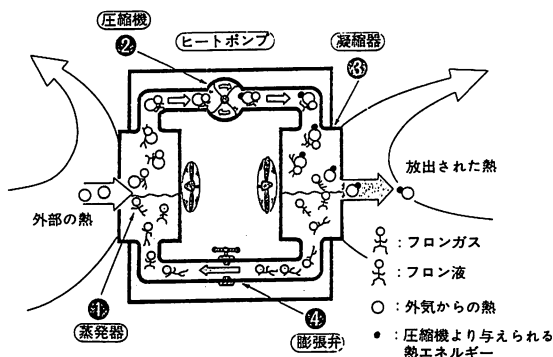


図-1 圧縮式ヒートポンプの構成と原理

ン液が外気から熱を奪い、フロンはその熱で気化してガスになる。②圧縮機でフロンガスは圧縮され、高圧になる。またガスは急速に断熱的に圧縮されるので、断熱圧縮過程(圧縮機から気体に仕事を加えられてエネルギーが増加し、気体の温度が上昇する)により高温になる。③凝縮器でフロンガスは熱を放出し、暖房に利用されると同時に、自身は液体になる。④膨張弁でフロン液の圧力を調整し、その後、①蒸発器に戻る。

ヒートポンプの性能は一般に汲み上げて出力されるエネルギーとこれに要したエネルギーとの比で表現される。この値は成績係数(COP)と呼ばれ、熱源温度や熱利用(出力する)温度などによって変わるものである。これは普通のポンプが汲み上げる高さによって、出せる液量が異なることに似ている。COPが高ければ、少しのヒートポンプ駆動エネルギーで多くの熱エネルギーを出力でき、省エネルギーの効果が増す。

3. 計画の背景

エネルギー需給は世界的な脱石油、省エネルギー施策の推進と景気の低迷とが相まって緩和してきた。しかし、化石燃料資源の有限性は明白であり、先進諸国が脱石油や省エネルギーの努力を怠ると、エネルギー危機の再来を招く心配が大きい。従って省エネルギー政策及び省エネルギー技術の開発は依然として重要

*新エネルギー総合開発機構燃料・貯蔵技術開発室主任研究員
〒170 東京都豊島区東池袋三丁目1-1 サンシャイン60

である。国際エネルギー機関 (IEA) はこのような状況の下で、石油への過度の依存を低減するためにヒートポンプを省エネルギーの重要課題として勧告し、かつ推進を促している⁴⁾。

電力の使用量は季節により、また時間によって変動する。首都圏での昨夏のように、使用量のピークの高さと増加の速さが過大であると、停電に至ることもある。使用量の変動は発電設備の効率的利用の上で好ましくない。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いて需要を開拓し、電力負荷の平準化を図っている。従来よりコンパクトな蓄熱装置が開発されれば、蓄熱式ヒートポンプのより広範な普及が期待でき、電力の負化平準化の促進が期待できる。

4. SHPの研究開発基本計画の概要

4.1 目標と計画

この研究開発計画の目標は、「夜間電力を用い、エネルギーを高効率・高密度に増倍貯蔵して、昼間のエネルギー必要時に温熱あるいは冷熱として取り出すことにより、大型ビル空調、大規模地域冷暖房、各種産業プロセス加熱等の大規模熱源として利用し、電力の負荷平準化に資することのできるスーパーヒートポンプ・エネルギー集積システムを開発する。このため、超高性能圧縮式ヒートポンプ及びケミカル蓄熱の各要素技術の研究開発を行い、これらの成果を統合した最適なトータルシステムの開発及び運転研究を行う。」となっている。基本的な目標は表1のとおりである。また、研究開発のスケジュールを図-2に示す。

本開発は、大別すると超高性能圧縮式ヒートポンプ

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
			低温熱源用 高温熱源用	～150℃ ～300℃	3以上 3以上
	ケミカル蓄熱技術		出力温度	蓄熱能力	熱回収率
		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
トータルシステム	適用対象	出力温度	エネルギー効率		
	事務所ビル空調	(温)45℃ (冷)7℃	4.5 5.3		
		地域冷暖房・給湯	(温)45℃ (冷)7℃ 85℃	4.5 5.3 6	
	産業プロセス加熱		150～300℃	2.3以上	

とケミカル蓄熱技術との二つの要素技術を中核として計画されている。ヒートポンプは、COPを現状の2倍以上に飛躍的に向上させる「高効率型」と、(COPは現状程度であっても)産業用に需要が多く、従来の出力温度の上限を越えた150～300℃程度の熱を取り出せる「高温出力型」の二種類である。また、ヒートポンプの出力を貯えるケミカル蓄熱技術は「高温蓄熱機能」及び「冷熱蓄熱機能」に大別され、従来よりも蓄熱密度が高く、様々な温度に対応できる蓄熱装置の開発を目指している。

この SHP は昭和59年度より昭和66年度までの8カ年計画で、3万kW級のシステムに適用できる技術の開発を狙っている。しかし、3万kW級は概念設計に止め、1,000kW級のパイロットシステムで試作運転研究を行う。このパイロットシステムでも、ビルの空調には充分の能力を持っている。この段階に進むため、更に一

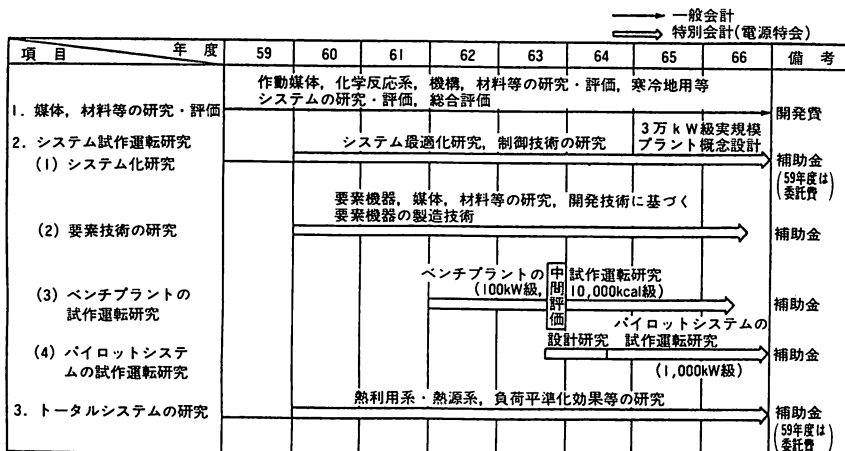


図-2 スーパーヒートポンプ・エネルギー集積システム研究開発計画

桁小規模のベンチプラントで、運転研究を行い、63年度末に中間評価して最適な組み合わせを選定する。これらを組み合わせるシステムが「スーパー」と呼ばれる所以である。また、各種熱源系、熱利用系の調査研究、システムの導入可能性及び導入による電力負荷平準化効果などトータルシステムの研究を行う。

4.2 開発体制

図-2の項目「1. 媒体、材料等の研究・評価」は国立研究所（化学技術研究所、機械技術研究所、北海道工業開発試験所、大阪工業技術試験所）で実施する。「システム試作運転研究」及び「トータルシステムの研究」の開発研究は、NEDOが担当しているが、国立研究所の基礎研究や技術的評価に依存するところが大きい。関係研究所と密接な連携のもとに研究を進めている。

5. 開発の効果

(1) エネルギー有効利用の推進

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現在36%程度と言われている。従ってCOPが3程度であると、表2¹⁾に示すごとく総合したエネルギー効率は100%程度であるが、COPを6~8とすれば、エネルギーを倍以上に有効利用できる。

表2 エネルギー効率の比較¹⁾

	石油	電気	COP	蓄熱効率	総合エネルギー効率
ストーブ	100	—	—	—	90%
在来型HP	100	0.36	3	—	108%
SHP	100	0.36	6~8	0.75	162%~216%

表3 暖房用熱価格の比較例¹⁾ (円/1,000kcal)

石油ボイラー	ガスボイラー	HP(昼間電力)	HP(深夜電力)
7.6	18.7	9.5	6.8
SHP(昼間電力)		SHP(深夜電力)	
4.7		3.4	

(2) 電力負荷平準化効果

高効率で蓄熱式のSHPが開発されれば、表3¹⁾に示すように、深夜電力利用の熱エネルギーの価格は他のそれに比し格段に廉価となる。このため、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。

(3) 開発技術の波及効果

小型ヒートポンプの性能向上による省エネルギーの推進、電力需要の開拓、産業における化学蓄熱材の利用、熱交換技術の向上、軸受技術による産業用動力の効率向上などの開発技術の波及効果は多方面

に及ぶ。

(4) 社会的効果

未利用のまま環境中に廃棄され、熱汚染を引き起こす原因となっている種々の排熱が回収されるため、環境保全効果が期待される。

6. 研究開発の内容と進捗状況

4.2で述べたように国立研究所で実施しているものもあるが、ここではNEDOで実施している主な部分について述べる。

6.1 システム化研究

図-2に示したように各種熱源・利用系を対象とした3万kW級実規模プラントの概念設計をまとめることを最終的目標としている。既に、現状の水蓄熱式ヒートポンプの技術的限界を明らかにすると共に、超高性能圧縮式ヒートポンプとケミカル蓄熱の組み合わせ素案を作り、両者の結合方式などを研究した。更に、下記の要素技術とトータルシステムの研究成果を踏まえたシステム構成の検討を開始し、現在、熱源・利用系の用途別（地域冷暖房、ビル空調、産業用）標準熱パターンを考慮して、検討を進めている。システムの制御技術や最適化の研究も行っている。

6.2 要素技術の研究及びベンチプラントの試作運転研究

項目は図-2に示したように別であるが、現在、要素技術の研究に基づき、ベンチプラントを試作して運転研究を行っているため、両者を併せて述べる。63年度末にはベンチプラントについて中間評価を受け、開発目標達成の可能性を検討する重要な時期である。以下に表1の要素技術の項目分類に従って、研究開発の内容と進捗状況を簡単に記述する。

6.2.1 超高性能圧縮式ヒートポンプ

(1) 高効率型（温熱専用）

この方式はターボ圧縮機を利用したヒートポンプであり、その特徴は非共沸媒体を用いた多段圧縮多段凝縮システムの採用（効率を高めるポイントは文献⁵⁾参照）及び密閉式電動機からの熱回収等である。今までに作成したシミュレーションプログラムを用い、システムの検討やサイクル性能の推算を行い、最適な非共沸混合媒体を選定した。また多段モデル熱交換器試験装置および供試圧縮機を製作し、それらの性能試験を実施した。この方式のベンチプラントの概略は図-3のようである。

非共沸混合媒体を用いて Lorenz Cycleを実現す

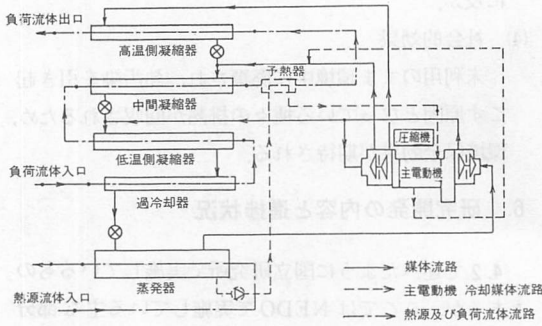


図-3 高効率型(温熱専用)超高性能圧縮式ヒートポンプのベンチプラント概略図

る蒸発器として、完全対向流の分割流路逆転式二相流型蒸発器を開発しつつある。今までに単管自然循環ループによる管内側流路の試験、管群強制循環ループによるシェル側流路の特性試験を行った。

また、フロン系熱媒体の熱安定剤の選定試験も実施し、高温で金属・潤滑油が共存する時のR11の熱分解率を1/3以下に抑制する安定剤が数種得られた。

2) 高効率型(冷温兼用)

この方式はスクリー圧縮機を利用したヒートポンプであり、その特徴は2段エコマイザースステムの採用、非共沸混合媒体の採用、高効率スクリー圧縮機の開発、液噴射冷却の採用等である。

現在までに液噴射実験装置を用いて、液噴射のテスト及び指圧線図の採取を行い、そのデータと性能シミュレーションとにより新歯形を採用した圧縮機を設計、試作した。また熱交換器実験装置を用いて、非共沸混合媒体を使用した場合の旋回流式及び拡大伝熱面式の二種の熱交換器の性能テストを実施し、開発目標値の達成に必要な改善対策を明らかにした。

圧縮式ヒートポンプシステムの蒸発器、凝縮器として、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(図-4参照)の試作に成功し、伝熱性能等、所期の目的を達成した。これはステンレ

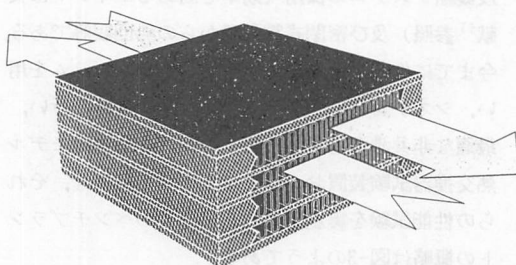


図-4 プレートフィン型熱交換器の内部の例

ス製のため、耐食性と耐熱性に優れている。この技術は汎用の熱交換器に用いられる波及効果の大きいものである。

ヒートポンプを設計する上で必要となる作動媒体の特性の内、P-V-T関係、臨界温度、粘度の各実測試験を非アルコール系候補媒体について実施した。また、熱伝導率測定装置を製作し、標準物質としてトルエンを用い、同装置の健全性を確認した。

3) 高温出力型(低温熱源用)

この方式は高温の出力を可能にするため、TFE(Tri-fluoroethanol)一水系を作動媒体として使用するスクリー圧縮式ヒートポンプであり、その特徴はスラスト相殺型(軸方向荷重を相殺する形式とし、スラスト軸受けの摩擦損失を減少させる)スクリー圧縮機と一体化したスクリー型二相流膨張機による動力回収の開発(図-5参照)、高い昇温中を得るための2段圧縮システムの採用である。

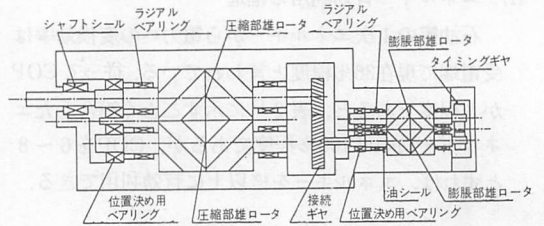


図-5 二相流膨張機と一体化したスラスト相殺型スクリー圧縮機

既に、スクリー圧縮機の圧縮部歯形を三種類、また、膨張部のロータ構造を二種類試作し、その各々の特徴を把握した。開発中のシステムの一部ではあるが、スラスト相殺スクリー圧縮機については商品化を検討している。

凝縮液を電極に吸い寄せる電気流体力学(EHD)効果を利用して、高い熱伝達率を実現するEHD凝縮器を開発している。高圧実験ループを製作し、電極の最終形状を評価すると共に、通常の凝縮器に比し約3倍の伝熱促進効果が生じることを確認した。また、実際の電極形状に即した3次元の電界解析を行った。

高温用のヒートポンプを開発するためには耐熱性の優れた作動媒体が必要になる。そのため、高温用媒体に適したフッ素系アルコールの熱力学状態式・圧力エンタルピ線図を作成した。作動媒体の熱安定性試験として実機ヒートポンプにおける連続運転を行い、媒体系の劣化等がないことを確認し、優れた

た特性を有することが知られた。

(4) 高温出力型 (高温熱源用)

本方式は高速往復動圧縮機による水蒸気圧縮式ヒートポンプシステムである。液噴射による温度制御、蒸気過給機による中間圧力までの圧縮を特徴とする。

今までに、高速往復動モデル圧縮機を試作し、空気運転によりその基本性能を把握し、高速化に伴う諸問題を明らかにして開発の方向付けを行った。液噴射による温度制御については、液滴蒸発による過熱蒸気冷却のための微粒化技術を確立した。また、蒸気過給機を試作し運転研究に着手した。

6.2.2 ケミカル蓄熱技術

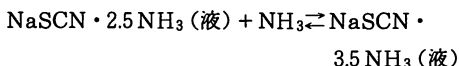
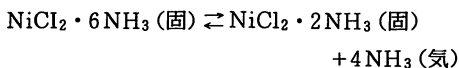
蓄熱技術としては水あるいは水を用いた蓄熱が実用化されているが、本プロジェクトでは、未だ実用化されていないケミカル蓄熱技術を開発する。ここで、この技術について以下に簡単に説明する。

化学反応によって、熱を物質中に化学的エネルギーとして貯蔵し、必要時に熱を放出するのがケミカル蓄熱である。これは蓄熱密度が大きく、物質中に化学的エネルギーとして貯蔵されるので常温で長期間蓄熱できるなどの特長を持つ。蓄熱に使用できる反応系として、次のような条件を有することが望ましいとされる⁶⁾。①別の物質などを生じる副反応を伴わない、②反応の速度が十分に速い、③反応が制御できる、④簡便に熱交換できる、⑤蓄熱前の物質および蓄熱反応によって生成した物質が共に安定で、容易に貯蔵できる、⑥毒性、可燃性、腐食性などの問題が少なく、かつ安価である。

本 SHP では高温蓄熱としてアンモニア化反応、水和反応及び溶媒和反応を、冷熱蓄熱として溶質混合による水和反応及びクラスレート生成の計5種類の反応(吸収)を採用している。

(1) 高温蓄熱機能 (アンモニア化反応)³⁾

下記の固体状アンモニア錯体と液体状アンモニア錯体のアンモニアガスの吸脱反応を利用した高温蓄熱技術を開発する。

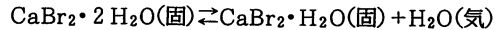


今までに、塩化ニッケルのアンモニア化反応を行わせる小型の固相反応器の試験、中型反応器の設計及びチオシアン酸ナトリウム錯体反応を行わせる中型液相反応器の試験を行った。また、構成機器の材

料選定のための固相、液相におけるアンモニア錯体の材料腐食試験を開始した。

(2) 高温蓄熱機能 (水和反応)

夜間、高温出力型圧縮式ヒートポンプにより発生した熱で水和物を脱水し、昼間は低温の熱源で水蒸気を発生させ、蓄熱媒体(脱水和物)に水和反応を行わせることにより、高温の熱を発生させる蓄熱装置である。なお更に高い温度が得られる昇温部を付設する計画である。



蓄熱媒体の水和反応熱の測定、反応繰り返し実験を行い、臭化カルシウムの水和物を最適媒体として選定した。水和部と吸収部の装置材料に関する腐食試験を実施すると共に、蓄熱部の伝導特性に関する設計基礎データを取得した。

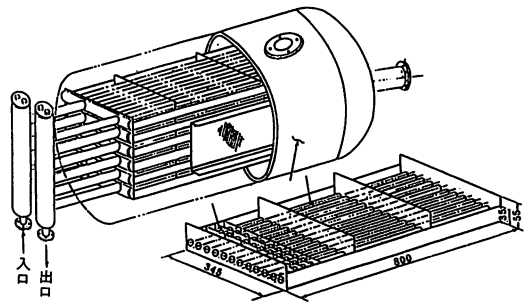


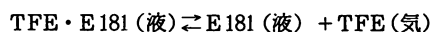
図-6 水和反応器の例

実用的な機器構造を検討するため、水和反応部(図-6参照)と吸収反応部についてそれぞれ要素機器試験を実施した。図-6の右下の棚状部に水和物を載せ、左上の容器内に組む。左端の入口から熱を加えると、水和物が脱水され、発生する水蒸気を右端のパイプから容器外に出して蓄熱する。放熱時は低温熱源で発生させた水蒸気を逆に右端のパイプから入れて水和反応を行わせ、発生する高温の熱を出口から出す。

ステンレス製プレートフィン型熱交換器の技術を応用した蓄熱反応器について、その基本構造から検討を行い、現在は性能を試験中である。

(3) 高温蓄熱機能 (溶媒和反応)

夜間は熱エネルギーを利用し、媒体濃度の異なる吸収剤を作って蓄め、昼間には媒体の吸収剤への吸収熱により高温の熱を発生する高温蓄熱装置を開発する。



これまでの研究で TFE (Tri-fluoroethanol) と

E 181 (Tetra-ethylene-glycol di-methyl ether)とを選択し、腐食性及び熱安定性試験を実施した。また、発熱反応器の伝熱性能を調べるため、要素試験装置を設計製作し、試験を実施した。さらに、種々の運転条件における蓄熱、放熱時のシステム性能について検討を行い、目標の蓄熱能力及び熱回収率を達成できる見通しを得た。

(4) 冷熱蓄熱機能(溶質混合による水和反応)

夜間に高効率型圧縮式ヒートポンプで発生した85～120℃の熱を利用し、蓄熱媒体を疎水性膜を利用して濃縮貯蔵し、昼間に希釈するときの冷熱を利用する冷熱蓄熱装置を開発する。

これまでに開発した混合蓄熱媒体を用いて、蓄熱放熱試験装置により実験を行い、冷熱出力に関するデータを取得した。また、混合蓄熱媒体の基本的物性である溶解度及び水蒸気圧特性の詳細検討を行い、より安価な媒体で、従来の臭化リチウムと同等の性能が得られることを確認した。各種構造要因を加味した腐食挙動を検討し、システム構成材料を選定してベンチプラントを製作している。

(5) 冷熱蓄熱機能(クラスレート)

クラスレート(包接化合物)の生成分解時の発熱、吸熱を利用した冷熱蓄熱機能を開発する。この反応は水の生成より高く、冷房で必要とする7℃付近で起こるので、ヒートポンプの効率向上が望める。クラスレートは流動性スラリー状で、比重も冷水とはほぼ同等であるから、極めて効率的に蓄熱できる。

今までにクラスレート生成分解試験装置の製作、組み立てを行い、種々の条件下にてクラスレートの生成分解試験を実施した。また、材料選定のため、腐食試験及び加水分解調査を行った。本蓄冷方法における最適システムを検討し、さらに、他種蓄冷システムと比較検討を行い、高濃度クラスレート生成の目途を得た。

6.3 トータルシステムの検討

熱利用系、熱源系を調査し、省エネルギー性、経済性、電力負荷準化に最も効果的なSHPのシステム構成、適用方法、適用形態について研究する。更に、熱利用の立場からSHPの具備すべき条件等についてシステム化研究への支援を行う。

これまでに、熱源系の基礎調査として、各種施設から発生する排熱の形態、温度レベル、排熱量の概要と試算方法及び大気、太陽、海水、地中などの熱の検討を行った。これらの人工系、自然系の各種熱源について、

利用可能な熱源系を選定するため、技術、環境、社会、経済の評価視点から検討して評価した。

熱利用系として、各種建物の熱需要量の調査データから、都市地域におけるビルエネルギーシステム特性、原単位を明らかにした。SHPの適用条件を持つ蒸溜、濃縮、分離、抽出、比較的低温の加熱などのプロセスの中から最適で波及効果の大きいものとその製品を選定した。現在、SHPの導入効果手法を検討している。

7. おわりに

SHPの研究開発にはハードウェアを主体とする研究開発にも、コンピューターによる各種のシミュレーションを活用して、予測・推算などを行っている。また、結合方式、システム、調査、導入効果などのソフトウェアの研究も行っている。本プロジェクトでは総合的な研究開発が要求されているので、ハードウェアを主体とする研究とソフトウェアの研究とが互いに助け、促進し合って進むことが不可欠である。

現在は、要素技術の研究をまとめて、ベンチプラントの中間評価を受け、開発目標達成の可能性を検討する重要な時期である。工業技術院ムーンライト計画推進室、国立研究所及び委託先など関係各位の協力を得て、本SHPプロジェクトの成功に向けて鋭意開発を進めている。

参考文献

- 1) 山崎 章, 竹内 元; 未来都市における高効率ヒートポンプ技術, 燃料協会誌, 66巻, 11号(1987), 915～923.
- 2) 秋葉悦男; スーパーヒートポンプ・エネルギー集積システム, エネルギーレビュー, 7巻, 7号(1987), 44～47.
- 3) 志村武彦; スーパーヒートポンプ・エネルギー集積システム, 化学工学, 51巻, 3号(1987), 203～206.
- 4) 工業技術院ムーンライト計画推進室監修「ヒートポンプシステム-IEA技術評価報告-(1983), (財)省エネルギーセンター刊.
- 5) 燃料・貯蔵技術開発室; ヒートポンプ効率アップのポイント, NEDO NEWS, Vol.8, No.81(1988), 印刷中.
- 6) 藤原一郎; 化学反応を利用する蓄熱技術, エネルギー・資源, 4巻, 4号(1983), 342～350.