HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	スーパーヒートポンプ・エネルギー集積システムにおける経済性の検討
Author(s)	中村, 卓司; 小林, 昌弘
Citation	衛生工学シンポジウム論文集, 1, 102-105
Issue Date	1993-11-01
Doc URL	http://hdl.handle.net/2115/7430
Type	bulletin (article)
Note	第1回衛生工学シンポジウム（平成5年11月17日（水）-18日（木） 北海道大学学術交流会館）. 3 測定・評価. 3-7
File Information	1-3-7_p102-105.pdf

Instructions for use

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

3－7

スーパーヒートポンプ・エネルギー集積システムにおける経済性の検討

中村卓司（清水建設㈱）　　小林昌弘（清水建設㈱）

1. はじめに

通商産業省・工業技術院によるムーンライト計画の一環であるスーパーヒートポンプ・エネルギー集積システム（以下、SHPシステム）は、初期の目標を達成し、'93年7月をもって開発を終了した。SHPシステムでは、高効率ヒートポンプ、および、ケミカル蓄熱システムの要素技術開発と、その結合システムの研究が行われた。

システムの応用技術の研究としては、SHPトータル・システム化研究があるが、本報はそのうちの大型事務所ビルの空調、地域冷暖房・給湯システムを対象とした3万kW級プラントの概念設計を行うために開発された経済性検討用シミュレータとその実行例の報告である。

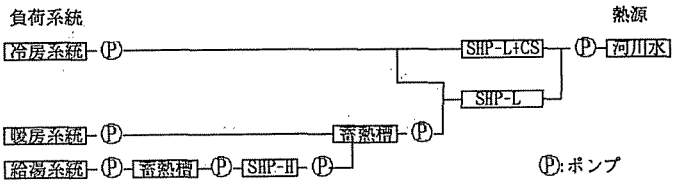
既報[1]では、システムを自由に設定可能な汎用シミュレータの報告を行った。本報のシミュレータは、これまでの概念設計、および、'90年度からの1,000kW級パイロットプラントでの実証実験結果を踏まえ、より現実に近いシステムを評価しようとするものである。本報では、その概要を述べるとともに、建物用途別にモデル地区を想定し、シミュレーションを行った結果について報告を行う。

計算例としては熱出力3万kW級の地域冷暖房とし、負荷としては①業務施設を中心とするもの、②業務・住宅の複合施設、③住宅施設を中心とするものの3種類を想定した。また、機器コスト・負荷原単位についても検討を加え、現時点で想定している性能・機器コスト・負荷原単位データを使用した。

2. 対象システムの概要

(1) 対象施設

図－1にシステムの系統図例を示す。対象施設は、業務・商業・宿泊・住宅の混在施設であるが、負荷系統は冷房・暖房・給湯の3系統とした。冷房用の熱源機としては、冷温兼用SHP-Lの専用機（以下、専用機）とSHP-Lとケミカル蓄熱（クラスレート蓄熱、以下CS）を直列もしくは並列に結合したSHP-CS結合機（以下、結合機）の2種類を併用する。暖房はSHP-Lと顕熱蓄熱槽で賄う。この蓄熱槽は温水専用であり、冷房用には使用しない。給湯は顕熱蓄熱槽に蓄えた温水を熱源として、温熱専用のSHP-Hにより昇温し、給湯用蓄熱槽に蓄え使用する。SHP-Lの熱源は、河川水とした。また、結合機はCS蓄熱時のSHP出熱量とCS蓄熱量のバランスをとり、SHP-L2,500kW1台にCS500kW5基（計2,500kW）を配置した。



図－1　システム系統図

システムは、SHPとCSの結合法と負荷側供給冷水温度の違いにより4種類設定した。各々の結合法、温度レベルを表－1に示す。

表－1　システムの結合法と温度レベル

システム	結合	CS出力	SHP出力	負荷側温度
Ⅰ	直列	9.5℃	5.0℃	7℃／12℃
Ⅱ	直列	9.5℃	5.0℃	7℃／14℃
Ⅲ	並列	7.0℃	7.0℃	9℃／16℃
Ⅳ	並列	9.5℃	9.5℃	12℃／19℃

(2) 負荷パターンおよび施設規模

住宅、業務、商業、宿泊施設の面積比率を地域の特性に合わせ変え、A.業務施設主体、B.複合型施設、C.住宅施設主体の3施設を用意した。各負荷パターンは冷熱出力のピークを3万kWに合わせてある。各負荷パターンの施設別面積を表－2に示す。

表－2　建物用途別床面積　　[m²]

負荷名 / 施設名	A．業務施設主体		B．複合型施設		C．住宅施設主体	
	延面積	空調面積	延面積	空調面積	延面積	空調面積
住宅施設	0	0	210,000	150,000	420,000	300,000
業務施設	250,000	177,000	150,000	103,700	50,000	34,400
商業施設	70,000	50,000	70,000	50,000	70,000	50,000
宿泊施設	30,000	20,000	30,000	20,000	0	0
合計	350,000	247,000	460,000	323,700	540,000	384,400

(3) 熱負荷算出法と熱負荷原単位

負荷は、各施設の熱負荷原単位に空調面積を乗じて算出する。

負荷[kcal/h]＝熱負荷原単位[kcal/(m²・h)]
×空調床面積[m²]

3. シミュレータ概要

本シミュレータは、採熱源・SHP-L・循環ポンプなどの使用機器とその結合構成はシステム構造上固定となっており、設計者が入力可能な事項は各機器の容量（台数）のみである。計算では、1時間ごとに負荷または蓄熱の要求に応じて各機器が運転され、その結果、各機器の1時間ごとの電力消費量がファイルに記録される。SHP-Lの温度レベルはシステムにより異なってい

るため、それぞれの温度レベルでのCOP算出式が必要となる。本シミュレータは、パイロットプラントの成果より熱源水温度の関数としてシステムごとのCOP算出式を内蔵している。また、負荷系統は各負荷種類ごとに１系統にまとめ、冷房・暖房負荷の１時間値の形で月代表日ごとの年間データを負荷ファイルに格納している。負荷ファイル内には、熱源水温度データとして年間の河川水温も記録してある。

（１）運転法の基本設定

①共通設定条件

a. 一日を夜間電力料金が適用可能な夜間（22:00～翌8:00）と昼間（8:00～22:00）に分けて考える。

b. 夏季の電力平準化のため、昼間負荷は可能な限り蓄熱によって賄う。

c. 蓄熱は冷房、暖房とも夜間にのみ行い、昼間の追い蓄熱は行わない。

d. SHP-L、循環ポンプとも制御方法は（台数制御＋部分負荷制御）とし、最後の１台のみが部分負荷運転を行う。また、部分負荷運転時の効率低下はないとする。

e. 採熱源は河川水のみとする。

f. 冷房用に使用されない結合機はCSを切り離し暖房用専用機として転用可能である。

②冷房運転

夜間の負荷は、専用機で賄う。また、昼間の負荷は、基本的にCSが利用可能な結合機で賄うものとする。しかし、夜間負荷用の専用機の存在を考慮し、昼間の負荷が専用機の定格運転可能な負荷パターンであれば、専用機が定格運転可能な台数だけ運転し、残りの負荷を結合機で賄うものとする。

CSの蓄熱量は、昼間に放熱するのに丁度必要な量だけ夜間に蓄熱し、蓄熱分が残ることも不足することもない。

結合機の放熱は、SHP-LとCSが同時運転するものとし、CSの蓄熱量が無くなった時点でSHPの運転も停止するとした。また、結合機でSHPを停止し、CSのみで放熱することは行わないとした。

③暖房運転

夜間負荷は専用機で賄う。昼間の負荷は夜間電力の使用を考慮すると、可能な限り蓄熱分で賄うのが望ましい。しかし、実際にはプラント面積により蓄熱槽容積に制限があり、また経済性の面から昼間負荷全てを賄う蓄熱槽を設けるのは得策ではない。そこで、本シミュレータでは適切と思われる蓄熱槽容積を予め定め、放熱時はその蓄熱分を優先して使用し、不足分を専用機が暖房単独運転し賄うとした。

④熱回収運転

熱回収運転は夜間に結合機のみで行う。冷房時は、夜間負荷が少ないため、夜間の冷房用専用機可動率はきわめて低くほとんど熱回収が望めない。また、冬期暖房用専用機からの冷熱回収は可能であるが、暖房用にSHPが運転されるのは蓄熱を行う夜間が大部分であり、冷水蓄熱槽の無い本システムでは、夜間の回収冷熱を昼利用できないためである。

プログラム上では結合機でCSに蓄熱を行うとき、暖房負荷もしくは温水蓄熱要求が存在すれば熱回収運転を、無ければ通常のCS蓄熱運転を行う。

（２）各要素機器のモデル化

①SHP

SHPの熱出力は、圧縮機動力を固定し、これにCOPを乗じ算出する。ただし、部分負荷運転時は熱出力と圧縮機動力の変化をリニアとした。COP算出式はSHP２次側（冷房では蒸発器、暖房では凝縮器）冷媒入出力温度ごとに、メーカーによる実験式を用いた。また、本システムでは熱源側熱交換器での熱損失を考慮し、SHP１次側循環水温を（河川水温度＋２℃）としている。

表－３　SHP2500kW級諸元

	冷房定格運転	暖房定格運転
冷熱出力	2,625kW	－
温熱出力	－	3,000kW
圧縮機動力	375kW	500kW
ＣＯＰ	7	6

②CS（クラスレート蓄熱）

時間当たりの蓄熱量は定格500kWであり、蓄熱の総量は500kWで10時間（500kW×10時間＝5,000kWh＝18GJ）である。単位時間当たりの放熱量は定格500kWの最大150%まで出力可能である。総放熱可能量は、蓄熱量に蓄熱効率を乗じた熱量である。また、CS500kW１基にはクラスレート攪拌機として6.3kWの攪拌ポンプが付属している。CSとSHPの放熱比率は固定し、部分負荷運転時も変わらないとした。

（３）消費エネルギーおよび経常費の計算概要

①電力量の計算と料金計算

受電は産業用20kVとし、産業用蓄熱調整契約料金を適用した。基本料金は1,600円／kW、電力従量料金は夏季11.17円／kWh、その他の季節10.15円／kWhである。また、蓄熱調整契約料金は、4.36円／kWhである。

契約電力の算出は、プラントの冷房運転を主に考え、冷房用電力消費量が最大となる８月を基準に一日の電力使用量カーブを求めその最大値を契約電力とした。計算は月代表日で行なっているため、各月の運転日数を乗じて、電力量を算出する。

②機器コスト

機器コストは決定されたものではないが、以下の価格としている。

- SHP-L本体　2,500kW級　14,500万円
- ｸﾗｽﾚｰﾄ蓄熱槽 2,500kW　42,775万円（CS）　（500kW×5）
- ﾌﾟﾗﾝﾄ内設備　280百万円／SHP１台（含、配管・電気・熱交換器・ポンプ）
- 顕熱蓄熱槽　4万円／m³
- 熱回収設備　240百万円／ﾌﾟﾗﾝﾄ
- 地域配管設備　2,000百万円／ﾌﾟﾗﾝﾄ

③経常費計算法

年間経常費は固定費と運転費の合計である。

固定費は、減価償却費、税金、金利、保険料を含み次式で一括して計算した。

固定費＝設備費×0.1174

設備費はSHP、CS、プラント内設備、顕熱蓄熱槽、熱回収設備、地域配管設備を合計したものである。

運転費は、年間電力料金であるエネルギー費、要員の人件費、プラント保守のための外注費、スペースコストの合計である。本報告では、以下の費用を用いた。

- スペースコスト：単価　39,700円／(m²・年)
- 保守人件費　：単価　456万円／(人・年)
- 保守人員　：12人／年
- 外注費　：設備費の２％

4．シミュレーション

（1）要素機器構成

機器台数の設計は機器容量の過剰な設計を防ぐため、夏・冬ピーク日による設計ではなく、冷房側は８月負荷で設計し、暖房に足りない分を後から追加する形で行った。設計順序は、まず８月冷房負荷より結合機・専用機のSHP台数を決め、次にSHPの同時可動率を考え、SHPの入出熱量よりポンプを設計した。暖房用の顕熱蓄熱槽の容量は、昼間の暖房負荷を全て賄える容量分存在するのが望ましいが、建物条件から可能と思われる最大量を設定した。

①SHPおよびCS

SHPの台数の決定は、１つの負荷パターンに対し運転パターン４種類の台数をそれぞれ決めた後、熱単価の評価で各運転パターン間で差が大きくならないように、機器台数が最大となる構成を４システム全てに用いた。負荷パターンごとのSHP、CS台数を表－４に示す。CSの蓄熱効率は、0.94を用いた。

②顕熱蓄熱槽（温水用）

蓄熱槽の容量については、プラント（床面積：2,520m²、２Ｆ）の地下基礎梁空間を利用した連通管方式の蓄熱槽を設置することを考慮し、

表－４　各システムのSHP、CS台数

負荷パターン	結合機	専用機	ＣＳ
A．業務施設主体	８台	１台	40基
B．複合型施設	６台	２台	30基
C．住宅施設主体	３台	３台	15基

その容積を2,520m²×0.8×4.0m(水深)≒8,000m³と考えた。蓄熱効率は0.9と想定した。

③深夜電力

深夜電力は、冷熱蓄熱、温水蓄熱とも考慮し、負荷側への搬送動力を除いた他の全ての動力に適用した。

（2）計算結果および考察

年間のシミュレーション結果例を以下に示す。評価指標とその定義は最後にまとめて示す。

図－２は"B．複合型施設・システムⅣ"（表－１参考）の月別熱源COPである。このシステムのポイントは、冷熱蓄熱時の温熱回収にある。中間季では、冷房負荷と暖房負荷が均衡し、暖房負荷は大部分熱回収により賄われている。そのため、熱源COPは、SHP単体での最高値8.5を越え10.0以上に達している。

図－３は"B．複合型施設"のシステム別の昼夜電力消費量である。蓄熱利用率の高い並列結合のシステムⅢ、Ⅳで夜間電力の使用割合が高くなっている。

図－４は"B．複合型施設"のシステム別のエネルギー効率、一日平均エネルギー効率である。エネルギー効率はCS蓄熱時の機器効率であり、SHPの放熱温度の高いシステムⅣ（並列12/19℃）が高くなった。しかし、一日平均エネルギー効率は、影響を与える因子がSHP放熱温度、CS利用率（蓄熱効率、CS攪拌ポンプ動力）、熱回収運転（負荷の平均、COP低下）と多く判断が難しい。ただ、この負荷パターンでは、蓄熱利用の少ないシステムⅠが最も効率が良くなっている。

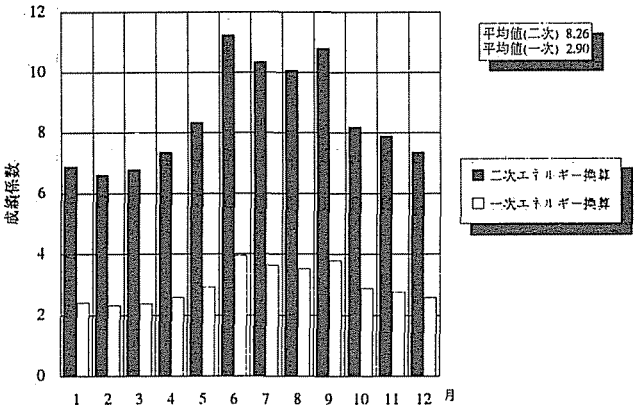
図－５は"システムⅣ"における施設別の熱量単価とその内訳である。各施設とも、供給熱単価の大部分は初期投資によるものであり、電力料金の占める割合は10％前後である。また、負荷の平準化効果の大きい"B．複合型施設"で25.0円／Mcalと最も単価が安くなった。

5．おわりに

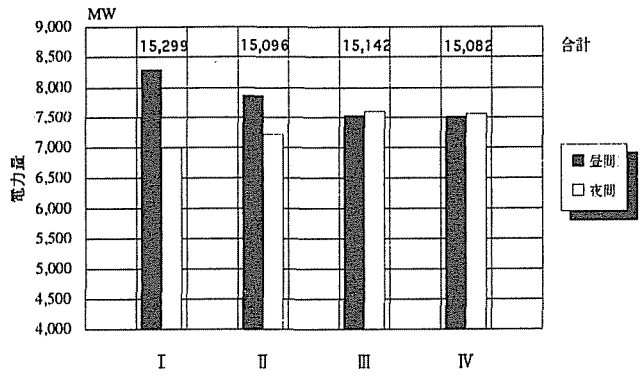
SHP・CSの結合法を考慮し、最新の機器性能・コストを取り入れた民生用３万kW級地域冷暖房プラント専用の評価シミュレータの開発を行った。本シミュレータの使用目的は、予め設計されたシステムの評価用であり、最適設計用ではない。また、従来の概念設計用に比べ汎用性は少ない。しかし、従来は不可能であったSHPとCS、または、SHPと温水蓄熱槽の同時放熱といった熱源の混合

運転が可能であり、機器の実際に近い結合を模擬している。そのため、システムごとに対応することにより、実システムに近い評価が可能となる。

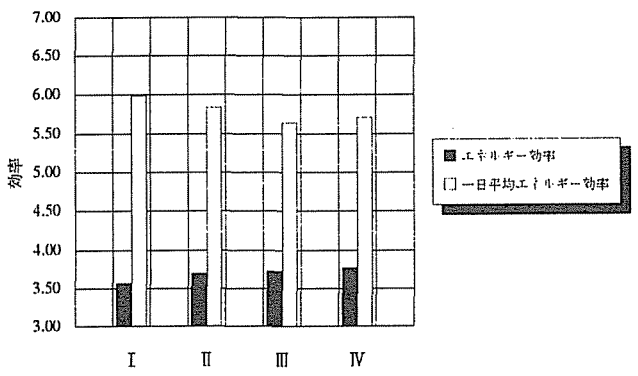
本報告は、(財)エンジニアリング振興協会が新エネルギー・産業技術総合開発機構から受託したシステム化研究（平成４年度）の報告の一部であり、筆者らが担当した部分についてその概要をまとめたものである。発表するについて、ご許可を頂いた関係各機関に深く感謝致します。



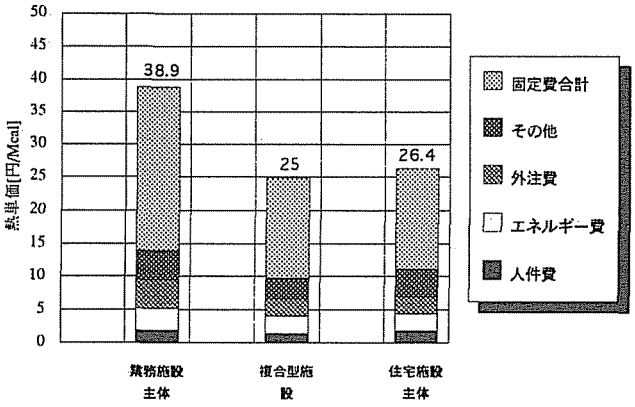
図－２　月別熱源ＣＯＰ



図－３　システム別年間電力消費量



図－４　システム別エネルギー効率



図－５　施設別熱量単価

(参) SHP評価項目および計算法

①熱量単価

単位熱量を製造するのにどれだけ経費がかかったかを示す値である。

熱量単価（円/Mcal）＝年間経常費／年間総供給冷暖熱量

②夜間移行率

ここでいう夜間移行率とは、CSによる移行率である。

$$\text{夜間移行率} = \frac{\text{(CSの放熱量)}}{\text{夜間を除く [(従来熱源機の放熱量)+(SHPの放熱量)+(CSの放熱量)]}}$$

（注）夜間とは22時から翌8時までの時間帯のこと。

③エネルギー効率

エネルギー効率ｅはCS評価用の効率であり、次式より求める。

$$e = \frac{\text{(CSの放熱量)}}{\text{(蓄熱時SHP軸動力積算値＋蓄熱時SHP補機用電力量＋蓄熱時結合用補機電力量＋CS運転に要した蓄放熱時補機電力量)}}$$

④一日平均エネルギー効率

一日平均エネルギー効率$\overline{e}_{day}$は、暖房を除いた冷房システム用の評価項目であり、次式より求める。

$$\overline{e}_{day} = \frac{\text{結合システムからの一日当たりの全出熱量}}{\text{結合システムの運転に要する一日当たりの全電力量}}$$

$$= \frac{\text{(CS放熱量)+(CS蓄熱分を除くSHP出熱量)}}{\text{(SHP軸動力積算値＋SHP補機用電力量)+CS運転に要した補機電力量+(蓄熱時結合用補機電力量)}}$$

⑤夜間電力移行率

夜間電力移行率は、次の定義式を用いる。

$$\text{夜間電力移行率} = \frac{\text{夜間電力消費量}}{\text{全電力消費量}}$$

⑥ＣＯＰ

COPの定義には、１次エネルギー換算（換算値860kcal/kWh）と２次エネルギー換算（換算値2450kcal/kWh）があり、システムの対象範囲の違いにより、熱源COP、システムCOPのふたつを用いることができる。COPの定義式は次のようになる。熱出力は、冷房・暖房・給湯出力の合計値である。

$$\text{熱源COP} = \frac{\text{熱出力(kcal)}}{\text{\{熱源電力量(kWh)×換算値\}}}$$

$$\text{システムCOP} = \frac{\text{熱出力(kcal)}}{\text{\{全電力消費量(kWh)×換算値\}}}$$

・全電力消費量は、負荷側の２次ポンプ動力を除いた消費電力量。

～参考文献～

中村ほか：ｽｰﾊﾟｰﾋｰﾄﾎﾟﾝﾌﾟｴﾈﾙｷﾞｰ集積ｼｽﾃﾑにおける経済性の検討、第１報、空気調和衛生工学会講演論文集（1993.10、大阪）