

■ 技術報告 ■

平面鏡と曲面鏡を使った太陽熱発電システム

Solar Thermal Power Generation System with Flat Plate Mirror and Parabolic Trough Mirrors

隅 田 勲*
Isao Sumida

1. まえがき

1億5千万kmのなたから地球に降りそそぐ太陽エネルギーは太陽が放射している全エネルギーの20億分の1にすぎないが、それでも 1.56×10^{18} kWhに達する。これは現在の世界の年間総エネルギー需要の2万倍以上に相当する。

このように太陽エネルギーは供給量が膨大であり、かつ枯渇する恐れがないだけでなく、他の化石燃料と比べ地球の熱バランスを崩さないクリーンなエネルギーであるため将来のエネルギー源として期待されている。しかし太陽エネルギーを熱源として利用する場合には以下に述べるような問題がある。

- (1) 地上で得られる太陽エネルギーの量は、たかだか 1 kW/m^2 と低いため、広い集熱面積が必要である。また、高温蒸気などの質の良いエネルギーを得るためには、集光によってエネルギーを濃縮しなければならない。
- (2) 夜間のもとより曇天、降雨時には、太陽エネルギーを直接利用することができず、また晴天時の日中でも雲などによって日射が断続する場合があります、不安定なエネルギーである。このため蓄エネルギー装置が必要である。

本稿で述べる太陽熱発電システムは、この太陽エネルギーの欠点を技術的に解決し、新しいエネルギー源としての有効性を実証するために、通産省工業技術院の「サンシャイン計画」の中で推進されてきたものである。この研究開発は昭和49年、第1次オイルショックの直後に、他の地熱発電、太陽光発電などと共にスタートし、現在では香川県仁尾町に1000kweのパイロットプラントの建設を終え、調整・試運転の段階に到達している。

* (株) 日立製作所エネルギー研究所主任研究員

〒316 日立市森山町 1116

以下、太陽熱発電システムに関する技術開発状況と建設したパイロットプラントの概要について述べる。

2. 太陽熱発電システムの概要

太陽熱発電システムは太陽エネルギーにより高温の蒸気を発生させ、タービン発電機を駆動して発電するもので、高温蒸気を発生する集光・集熱システムは火力発電プラントのボイラーに相当する。このため太陽熱発電は、その集光・集熱の方式によって集中型システムと分散型システムに分類される。

集中型システムは地上に配置した多数の平面鏡で反射した太陽光を高いタワー上に設けた集熱器に集光し、そこで熱エネルギーに変換する方式であり、分散型システムは広い敷地一面に楕円放物面鏡などを用いた集熱器を配置し、それぞれの集熱器で熱エネルギーに変換する方式である。

本稿で述べる平面鏡と曲面鏡を使った太陽熱発電システムは集中型システムと分散型システムの中間に位

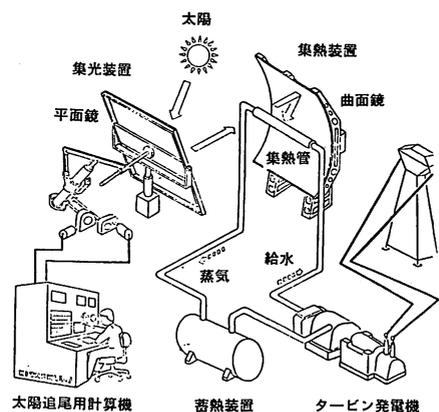


図-1 中間型システム概略図

置し、曲面集光方式システムと呼ばれる。このシステムでは平面鏡群で反射した太陽光をいったん楕形放物面鏡に入射し、さらに集光させ、集線上に配置した集熱管で熱エネルギーに変換する方式をとっている。図-1にこの中間型システムの概略図を示す。

この集光・集熱システムのほかに、太陽熱発電システムに共通して必要なシステムとして日射変動時や日没後も熱エネルギーを発電システムに安定に供給するための蓄熱システムおよび各システム間を繋いで熱エネルギーを移送するための熱輸送システムがある。特に蓄熱システムは、太陽エネルギーの欠点を解消するために不可欠なシステムであり、蓄熱材料として物質の顕熱を利用するもの、相変化に伴う潜熱を利用するものなどが考えられている。

3. 集光・集熱システム

集光・集熱システムは火力発電プラントにおけるボイラーに相当し、希薄な太陽エネルギーを集光してエネルギー密度を高め高温高圧の蒸気を発生する。曲面集光方式の集光・集熱システムの概略を図-2に示す。すなわち太陽光を集める集光部は南向きに傾斜した架台上に多数の平面鏡を水平方向（東西）に並べて1段とし、平面鏡1段に対して楕形放物面鏡を前方に1個配置する。1段の平面鏡からの反射光はこの1個の放物面鏡でさらに濃縮されて、その焦線上に設けた集熱管上に集められる。実機では1基の架台に20枚の平面鏡5段、これに相対して楕形放物面鏡5個が前方の架台の裏側に並びこれを1ユニットと呼ぶ。太陽の移動に対しては平面鏡のみが追尾する。太陽を追尾する平面鏡の駆動機構は図-3に示す構成となっている。ここで時角制御用ロッドは水平面に対して設置場所の緯度だけ傾けてあり、太陽指向ロッドは時角および赤緯制御用ロッドを調整して常時太陽を指向する。また時角制御用ロッドの先端と平面鏡の中心を通る直線は曲面鏡の所定位置に向けられており、太陽指向ロッドの回転に伴って、太陽光を常に曲面鏡の方向に反射する。時角および赤緯制御用ロッドの駆動は上端の2個のウォームギアを介して行い、1段20枚の平面鏡は2個のモータで駆動される。また、これらロッドの回転はエンコーダによって検出され、マイクロコンピュータによるフィードバック制御が行なわれる。

以上述べた集光部の特性を図-4に示す。ここで平面鏡有効利用率は平面鏡が実際に反射する太陽エネルギーと平面鏡に太陽光が垂直入射した場合の太陽エネ

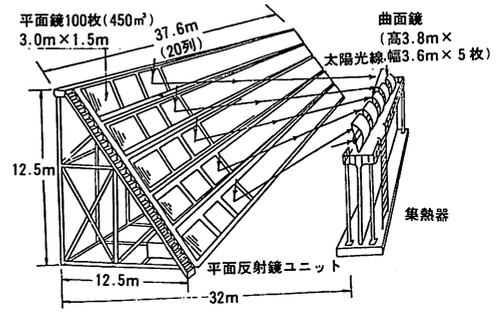


図-2 集光・集熱システムの構成（1ユニット）

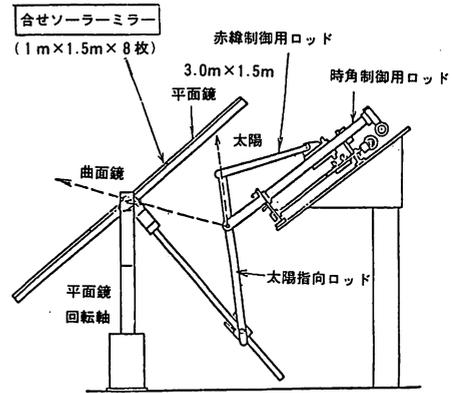


図-3 平面鏡太陽追尾機構

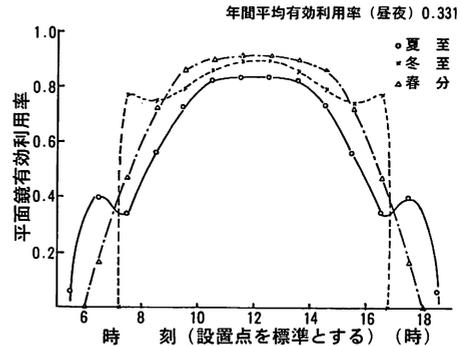


図-4 集光・集熱システムの集光特性

ルギーの比を表わす。なお図-2に示した機器の寸法・配置は、年間の集光量をできるだけ落さずに土地所要面積を減らすという観点から決定した。

一方集熱部の構造は図-5に示す通りで、集熱管の表面には選択面処理が施され、また周囲はガラス管で覆い、その内部を真空に保つことによって熱損失を防止している。集熱管の径、放物面鏡の寸法は平面鏡、放物面鏡の面精度、追尾制御精度、機器の据付精度等を考慮して決定した。図-6に示した結果は集熱管上に集光された太陽光分布の例であり、同時に行った解析か

ら最大集光比は約300となっている。

この集光・集熱システムの特徴は平面鏡と放物面鏡で太陽光が2回反射するため光の反射による損失が大きいが、集熱管は真空断熱されているため対流等による熱損失が小さいことである。この反射損失をさらに減少させるために平面鏡には厚さ0.5~0.7 mmの薄板ガラスの裏面に銀びきして母材となる厚板フロートガラスと貼合せた合せソーラーミラーを使用し、放物面鏡には光を吸収するガラス中の鉄分を少なくした白板ガラスミラーを採用している。いずれのミラーも反射率が91%以上であり通常のフロートガラスミラーの反射率~75%と比較して、大幅に改善されている。

一方集熱管からの熱損失をさらに減少させるために、集熱管表面に選択吸収面処理を施している。選択吸収面自体はすでに冷暖房用の太陽熱集熱器でも使用されているが、耐熱温度は、いずれも350°C以下であり太陽熱発電プラントの集熱管のように400~500°Cで使用するには不適當である。このため、耐熱性のある選択吸収面を長尺のパイプに比較的安価に加工できる方法を検討した結果、 Cr_2O_3 をプラズマ溶射する方法で耐熱性のよい選択吸収面を得ることができた。この選択吸収面の分光特性は図-7に示す通りで、太陽光に対する吸収率は92.5%、500°Cにおける放射率は72%であり、600°Cの温度にも耐えることができる。

以上述べた集光・集熱システムの集熱特性を評価するために図-8に示す縮小モデルによる実験を行い、18気圧、475°Cの過熱蒸気を発生できることを確認した。これらの実験データをもとに、実機ユニットの集熱効

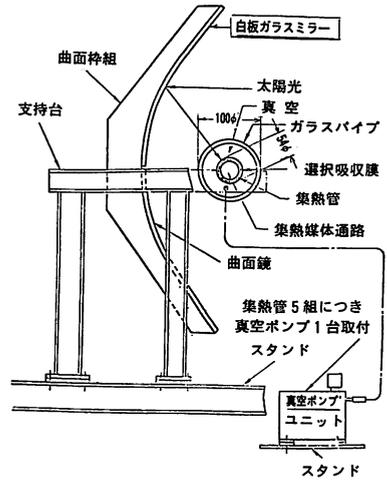


図-5 集光・集熱システム (集熱部) 構造

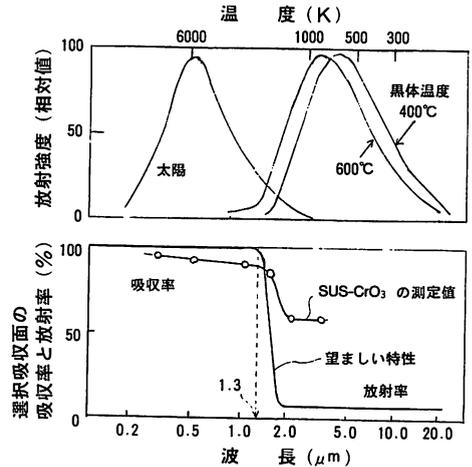


図-7 選択吸収面の分光特性

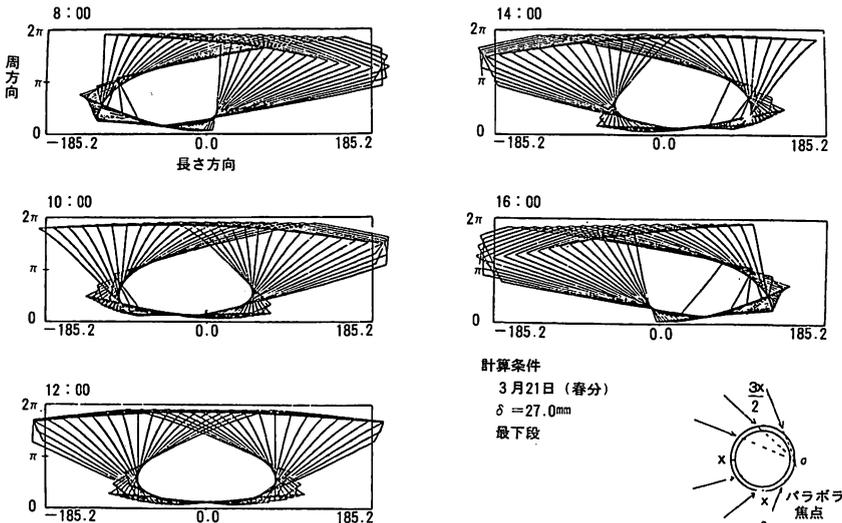


図-6 集熱管上集光分布例

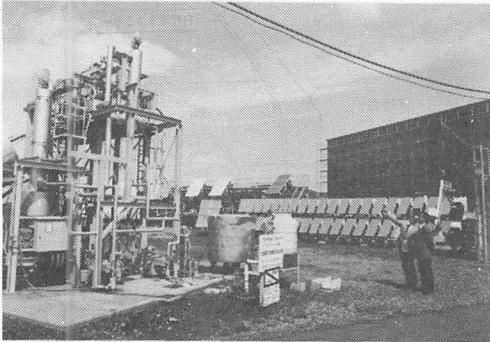


図-8 集光装置の縮小モデル

率を評価し、実験時の日射変動、風速変動、反射率の変化を考慮して1000 kWeパイロットプラントの平均集熱効率は $54.7 \pm 5.0\%$ と推定した。

4. 蓄熱システム

蓄熱システムは、火力発電プラントには見られない太陽熱固有のシステムである。これは太陽エネルギーの変動と関係なく蒸気を発電システムに安定に送り込むためのもので、太陽の入射量が過剰なときは余分な熱を蓄熱し、不足するときには放熱することによって、発電システムへの供給蒸気量を安定化する。

太陽熱発電プラントではこの蓄熱システムとして蒸気式アキュムレータ（蓄圧装置）と熔融塩蓄熱器を併用している。このうち蒸気式アキュムレータは集熱システムで発生した高温高压蒸気を圧力タンク内に熱水の形で貯え、放熱する場合には発電システム側低压ラインに接続し減圧によって蒸気を発生するものであり、技術的にも確立している蓄熱法である。しかし、この蒸気式アキュムレータは、原理的に飽和蒸気しか供給できないという欠点があり、過熱蒸気を使用して発電システムの効率をあげようとする場合には不十分である。

熔融塩蓄熱器は過熱蒸気を発生するためのもので熔融塩の融解潜熱を利用して蓄熱する。蓄熱材として熔融塩を選んだのは塩の組合せや組成を変えることによって希望する温度に近い融点のものを選定できるからである。1000 kWeパイロットプラントでは、その蒸気条件から融点 352°C の KCl-LiCl を使用している。選定に当っては温度条件のほかに、無害であること、容器材料に対する腐食性がなく化学的、熱的に安定であること、入手が容易であること等についても考慮した。

この熔融塩を用いる蓄熱器では、熔融塩が相変化するときに体積変化が起ること、また蓄・放熱時の温度変化が大きいことなどから信頼性のある構造にしなけ

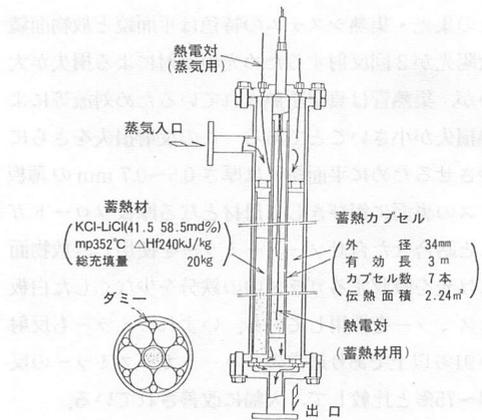


図-9 カプセル型試作蓄熱器構造

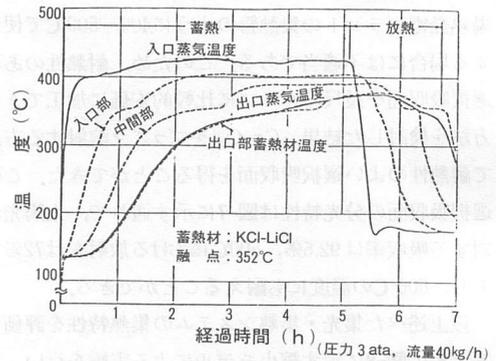


図-10 カプセル型蓄熱器の蓄・放熱特性例

ればならない。代表的構造としてシェル・チューブ型、カプセル型が考えられるが、これらの構造についての検討結果から信頼性が高く、蓄熱材の利用効率も高いカプセル型を採用した。カプセル型蓄熱器はパイプ状の容器に蓄熱材を充填し、融解による体積膨張を吸収するための空間を設けて密封したカプセルを多数本、タンク状の容器に挿入して構成される。集熱システムなどから供給される蒸気は上方から導入され、カプセル間の隙間を流れて熱伝達が行なわれる。図-9は小型試作装置の概略を示し、図-10に蓄・放熱実験の結果の一例を示す。この例では約5時間の蓄熱後放熱し 350°C の蒸気を約90分間発生している。この特性をもとに1000 kWeパイロットプラントの熔融塩蓄熱器の蓄・放熱特性を評価した結果、実機では装置が大型化するため熱損失が大幅に減少し、十分実用に供し得る性能に

なる見通しを得ている。

5. 熱輸送システム

太陽熱発電プラントを構成する各システムのうち、太陽熱固有のシステムとして集光・集熱システムと蓄熱システムがあり、その内容について述べた。熱輸送システムはこれらシステムを結ぶ配管系で構成されているが、太陽エネルギー密度が希薄であり集光・集熱に広大な敷地を要するため配管が非常に長くなるという欠点がある。熱輸送システムは蒸発器系と過熱器系および給水系にわかれ、蒸発器系一列の配管長は約700mにも達する。したがって熱輸送システムでは、二相流の流れる蒸発器系における流動振動が特に重要な問題と考えられる。このため図-11に示した縮小モデルによる二系列二相流実験および二相流安定性解析を進め熱輸送システムの流動安定性について評価した。図-12は、1000 kWeパイロットプラントの一つの運転モードに対する安定領域を示したものである。蒸発管系は1系列10段(台)の集光・集熱ユニットで構成されており、運転点では十分安定である。また図から起動・停止時に集光・集熱ユニットを何段投入すれば安定に運転できるかを知ることができる。

6. 1000 kWeパイロットプラントの概要

サンシャイン計画では昭和55年度末までに、電気出力1000 kWの太陽熱発電プラント(パイロットプラント)を香川県仁尾町に建設する計画である。

この太陽熱発電プラントは、これまで述べて来た各種要素機器・システムの研究開発をもとに設計され、以下の特徴をもつ。

- (1) 建築物として低い。
- (2) 集光・集熱システムはユニット方式で構成され、種々の発電規模に容易に対応できる。
- (3) 短い距離で集光するため高度な太陽追尾精度を必要としない。
- (4) 追尾駆動用モータが少数で済む。
- (5) 高温蒸気発生、高温蓄熱が可能のためプラント効率が高められる。

図-13にこの太陽熱発電プラントのシステム構成をまた図-14に集光・集熱システムの外観を示す。集光・集熱システムは蒸発器系、気水分離器および過熱器系からなる。蒸発器出口では20~30%の蒸気を含む気液二相流であり、気水分離器で分離された液の方は循環ポンプにより蒸発器入口に送られ、給水と合流して蒸発器

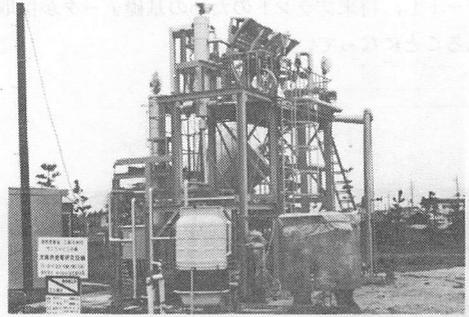


図-11 二系列二相流実験装置(縮小モデル)

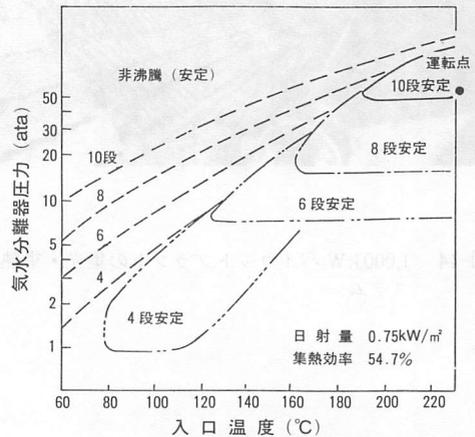


図-12 プラントの安定性領域図(例)

に入る。一方気水分離器で分離された蒸気は過熱器へ導びかれ、最高400°Cまで加熱される。過熱器を出た蒸気は熔融塩蓄熱器と蒸気式アキュムレータとからなる蓄熱システムへ入り、温度の高い蒸気の場合は、まず熔融塩蓄熱器へ流入し、熔融塩に熱を貯え、さらにタービンへ送られる。タービンの負荷が小さく蒸気量が余る場合には余剰分はアキュムレータに蓄積される。また過熱器からの蒸気量が少なく、タービンの負荷が大きい場合にはアキュムレータから飽和蒸気を発生させ、これを熔融塩蓄熱器に導いて過熱蒸気としてタービンへ送る。蒸気タービン以降、給水ポンプまでの系統は従来の火力発電プラントと同じ構成であり、説明は省略する。つぎに各主要構成機器についての設計条件、仕様および特性は表1に示す通りである。集光・集熱システムの集熱効率率は54.7%、タービンプラント効率は22%で総合効率は定格時12%、また年間発電量は約100万kWhで利用率は11.6%と予想される。

以上パイロットプラントの概要について述べたが、設計製作にあたっては自然環境、特に風に対する強度光公害等についても考慮されている。完成後は調整試運転の後、各種性能の評価を含む運転試験研究がス

タートし、将来プラントのための基礎データが採取されることになっている。

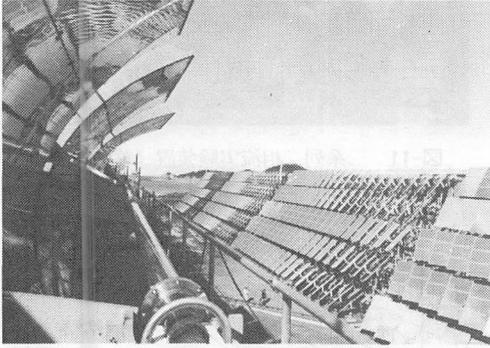


図-14 1,000 kW パイロットプラントの集光・集熱システム

表 1 1000 kWパイロットプラント主要機器仕様

集光器	
平面鏡	1.5 m × 3.0 m × 5 段 × 20枚 / スタンド
スタンド	25基 (うち 1 基は 4 段)
総集光面積	11,160 m ²
集熱器	
放物面鏡	3.8 m 巾 × 3.6 m 長 × 5 / スタンド (総数 124)
集熱管	54.0 mm φ
過熱器出口蒸気	
圧力	最大 46 kg/cm ² abs 最小 30 kg/cm ² abs
温度	最大 400 °C (定格値 370 °C)
流量	定格 6,140 kg/h
熔融塩蓄熱器	
蓄熱材	KCl-LiCl
カプセル	48.6 mm φ × 3.5 t × 10 m
カプセル本数	479本/基
蓄熱材充填量	10,000 kg/基
基数	2
蓄熱槽 (蒸気式アキュムレータ)	
圧力	18~40 kg/cm ² abs
内容積	70 m ³ / 基
基数	4
蒸気タービン	
入口圧力	14 kg/cm ² abs
入口温度	346 °C
流量	定格 6,140 kg/h
出力	1000 kW
特性	
集熱効率	54.7% (定格時)
タービンプラント効率	22%
総合効率	12%
年間総発電量	1,018,000 kWh (52 年度仁尾町日射データによる)
利用率	11.6%

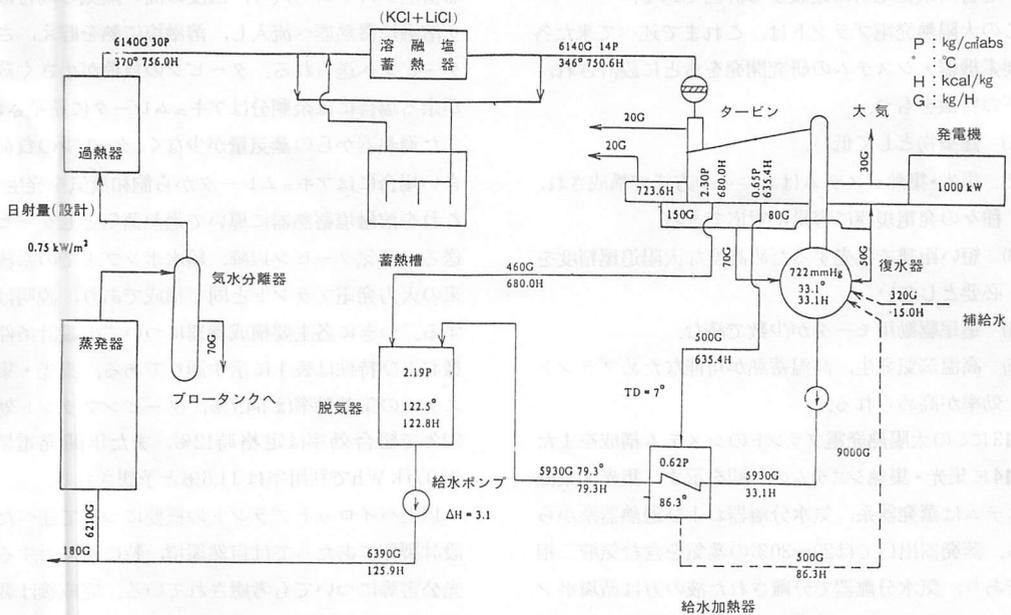


図-13 1,000 kW プラントのシステム構成

7. あとがき

1000k Weパイロットプラントの建設を第1段階の目標として昭和49年度から進めてきた開発研究およびプラントの概要について述べたが、太陽熱発電の実用化への見通しを得るためにも、このパイロットプラントの運転試験研究の成果に期待する所が大きい。

おわりに、本研究開発およびパイロットプラントの建設は、通産省工業技術院のサンシャイン計画の中で推進されたものであり、工業技術院をはじめ電子総合技術研究所および電源開発株式会社の関係各位には、多大の御指導を戴いた。こゝに厚く感謝します。

参 考 文 献

- 1) 坂元他, 日本機械学会講演論文集No.780-1, (1978)
- 2) 大島他, 太陽エネルギー, Vol. 3, No.2 (1977)
- 3) 坂元他, 工業材料, Vol. 26, No.9
- 4) 植西, 省エネルギー技術開発シンポジウム, (1978)
- 5) サンシャイン計画成果報告概要集 (太陽エネルギー) (昭和52, 53年度)

話 の 泉

21世紀の Solar house 井植邸完成

三洋電機の井植薫社長がソーラー時代のデモンストレーション用に建設していた新しい社長邸が大阪府守口市に完成、話題を集めている。熱源はヒートパイプ、電力はアモルファスシリコン太陽電池。神戸ポートピア博覧会のサンヨーソーラリアムでもPRしてソーラーのサンヨーを重点的に売り込んでいる。

同邸の吸収式冷凍機は毎時2万4000 Kcal能力。高温蓄熱槽(3000ℓ)、冷水蓄熱槽(1万5000ℓ)もある。補助ボイラ(毎時5万Kcal)は万一のため。a太陽電池はパネル513枚で有効集熱面積は、102.8 m²。DC24V、ピークで2kwを発電する。鉛電池にたくわえ、交流(100V, 60Hz)に変換し



て使う。冷房、照明負荷を3分の2節減しているというが、コスト度外視の社長邸に浪花雀はうらやむばかり。(K)