太陽熱発電システム

堀米 孝*, 田中 忠良**
Takashi Horigome Tadayoshi Tanaka

1. まえがき

イランの政情急変などによりわが国の石油供給事情は著しく厳しい環境に置かれつつある。また、わが国のエネルギー供給は過度に石油に依存しているため石油供給の不安感がわが国の経済や社会生活に重大な影響を及ぼしていることは周知のところである。このような状況において、エネルギー問題に対する認識を高揚するとともに、石油に代わりうるエネルギー資源の研究開発をよりいっそう加速推進し、石油代替エネルギーの利用拡大をはかることは極めて重要な課題と考えられる。

代替エネルギーの一つとして、わが国では太陽エネルギーによる熱発電技術の新エネルギー技術研究開発の重要な課題の一つとして、熱発電システムの技術的可能性を追求するための基礎研究が、サンシャイン計画のもとで積極的に進められてきた。これらの総合的な研究成果をふまえ、昭和55年度完成を目途に、香川県仁尾町の塩田跡地に曲面集光方式とタワー集光方式による電気出力1000kW級パイロットプラントが建設されつつある。

周知のごとく、太陽エネルギーの地上への入射エネルギーは、時間および雲や大気状態によって影響されるため、熱源としては、非常に不安定な要素を有している。従って、現在利用されている各種のエネルギー源と質的に大きく異なっているため、ランキンサイクルのような発電の基本サイクルが同一であっても太陽熱発電システムと既存発電システムでは、システム構成、要素機器、制御方式などに相違がある。そのため太陽熱発電システムには新しい技術が導入されなければならないことになる。

ここではわが国における太陽熱発電の可能性を

明らかにするために行われてきた研究とその成果を踏まえて建設されつつあるパイロットプラントの概要および海外の太陽熱発電システムの開発状況について記し、更に将来の展望などについて述べる。

2. 太陽熱発電システム

太陽熱発電システムの基本形態は図1に示されるように太陽光を集光して熱を吸収する集光集熱部、その熱を気体あるいは液体などの流体によって輸送する熱伝送部、熱をたくわえると同時にタービンを駆動させる蒸気を発生する蓄熱熱交換部および電気を発生するタービン発電部の四つのサブシステムから構成されている。太陽熱発電システムといえども既存の火力発電システムとは本質的な違いはない。しかし、太陽光はエネルギー密度が低く広範囲のスペクトル分布をもつ光エネルギーであること、また、時間的空間的に不安定であることのためサブシステムの開発にいくつかの技術的問題点が含まれている。そのため、集光集熱部、蓄熱熱交換部のサブシステムは太陽熱発電システムにおいて特に重要な機器と考えられている。これらの研究およびパイロットプラントの概要について以下に述べることにする。

2.1 集光集熱サブシステム 太陽光は0.2~2 μm の波長に分布した約6000°Cの黒体にほぼ

図1 太陽熱発電システムの基本構成

* 電子技術総合研究所。

** 正員、電子技術総合研究所 (〒305 茨城県新治郡桜村梅園 1-1-4)。

近い光を放っており、この光エネルギーとそのエネルギーを吸収する物体が放射熱伝達する場合、これらの放射スペクトルは大きくずれた領域で熱伝達することになる。すなわち、太陽光をよく吸収し、受熱物体からの熱放射がほとんどないような受熱面を使用することにより効果的に太陽光を吸収することができる。このような特性を有する面を選択吸収面 (Selective Surface) と呼んでいる。図2は選択吸収面の分光特性例を示したものであり、約 $2.5 \mu\text{m}$ 以下の波長領域では反射率が低く (吸収率が大きい)、それ以上の波長領域では逆に反射率が大きく (放射率が小さい) になっている。このような性質を有する面の材料は製法上、構成上の点より分類することができ、各種の材料が研究対象となっているが、選択吸収面は高温下で使用されるため、分光特性値の耐久耐熱性について主として研究が行われている。

選択吸収面と同様の役割を果たす材料に、選択透過膜があり、太陽光をよく透過し、物体からの熱放射を反射させる性質を有しており、可視域での透過率が大きく、赤外域での反射率が大きいという分光特性をもっている。選択透過膜は通常ガラスを基板にして Ag, Au あるいは In_2O_3 などを蒸着したものが用いられている。

これらの材料は図3に示されたように、一般にコレクタと呼ばれる集光集熱装置に組み込まれている。この例の場合は、楕円放物面鏡により太陽光を集光し、エネルギー密度を高める方式のものである。放物面鏡の焦線に熱を吸収するために、表面を選択吸収面処理した集熱管が設置されている。加熱された集熱管からの風による対流損失を減少させるために、集熱管は内面が選択透過膜処

図2 選択吸収面の分光特性例

理されたガラス円筒内にそう入されている。また、ガラス円筒と集熱管との空間を減圧 (通常 10^{-2} Torr 以下) し、その空間内の対流損失も小さくしている。このような構成により、ふく射損失、対流損失を小さくすることができ、集熱管内を流れる流体に最大限のエネルギーを与えるように考慮されている。

以上是集熱管が太陽光を受け取るまでの現象であるが、集熱管から流体への熱伝達を向上させるために、管内にフィンの付いた管、あるいは乱流促進体がそう入された管が使われている⁽¹⁾。なお、乱流促進体などのそう入は集熱管の非定常不均一円周方向加熱によって生ずると考えられる熱応力現象による集熱管の曲りやき裂から保護する役割も同時に果たすことができる。

このように熱損失や熱伝達に対して注意深く構成されて集熱されるが、太陽光から流体に熱が与えられるまでに、反射鏡の反射率、ガラス円筒の透過率、選択吸収面の吸収率などの光学的な損失と追尾誤差や集熱管の反射鏡の焦線上への設置誤差などによる損失がある。そのためコレクタの性能を向上させるためには、これらの個々の性能および構成されたときの総合的な性能について検討しておかなければならない。また、この値の向上とともに太陽熱発電システムにおいて最も経費比率高いものはこの集光集熱部である。後述のアメリカでさえ、各種パイロットプラントの概念設計の中から選定するために経済性を一つの選定指標として採り上げたが、このサブシステムにかなりの費用がかかっている⁽²⁾。従って、今後の研究開発としては性能と経済性の両面より集光集熱部を構成する部材について特に改良研究を行い、光学的機械的精度を維持し、低価格化をはかることが重要な課題と考えられる。

図3 コレクタの構成

2.2 蓄熱熱交換サブシステム 蓄熱機能を有した熱交換器は太陽熱発電システムにとってとりわけ重要な機器の一つとなっている。すなわち、入射量が一時的あるいは数時間にわたってとだえたとき、蓄熱熱交換器から発生する蒸気の温度、圧力が変化しては、発電出力を一定に維持することが困難となる。そのため安定した発電システムにするには蓄熱器性能がシステム運用およびか動性に大きく影響を及ぼす。従って、蓄熱器の開発にあたっては、顕熱、潜熱による蓄熱方法や蓄熱物質の選定などの問題のみでなく、伝熱問題も含んだ蓄熱装置の構造上の問題と関連し、総合的有機的に研究する必要がある。顕熱を利用して蓄熱する場合、材料としては、砂、岩石、水および油などの固体や液体物質がある。水を除いては比較的蓄熱容量は小さいが、顕熱蓄熱器の熱計算はしやすい。

他方、潜熱蓄熱は、単位重量、単位体積あたりの蓄熱量が大きく、相変化時に温度が停留するため、一定温度で熱を取り出せる可能性がある。そのため、各種の材料を用いて熱特性についての研究がなされているが、現在、熔融塩が最も広く研究対象として取扱われている。表1⁽³⁾に熔融塩の例を示したが、表にあるような塩化物、ふっ化物をはじめ、硝酸塩、亜硝酸塩など種々の塩があり、その組合せ数は膨大である。また、表からもわかるようにこれらの塩についての熱物性値が完全に整備されていないため、使用温度領域で蓄熱材を選定して、蓄熱器の設計を行っているのが現状で

ある。

このような顕熱あるいは潜熱を利用してある温度に到達している蓄熱器から一定温度の蒸気を発生させることは構造上難しい問題を含んでいる。例えば、図4⁽³⁾はパイロットプラント用カプセル形熔融塩蓄熱器の基礎実験として行われた放熱実験の一例であるが、この蓄熱器は蓄熱器としての必要条件を満たすために数値計算により伝熱面積、蓄熱材重量、流体の通路断面積などを見積り、製作されたものである。このような手法により一定温度の蒸気を発生させることも、また、実験値と理論値が比較的良好に一致していることから蓄熱器の性能を評価することもできる。

このように蓄熱熱交換器を開発する場合、使用目的が具体的に決まっていれば、その設計手順が一義的に決められるが、例えば、表2⁽³⁾に示され

図4 蓄熱器出口蒸気温度の設計値と実験結果(カプセル形)

表1 熔融塩の例

混合塩名	組成比 mol%	融点 °C	融解潜熱 kcal/kg	比熱(固) kcal/kg°C	熱伝導率(固) kcal/m°C	比重量(固) kg/m³	比重量(液) kg/m³
KCl-LiCl	41.5-58.5	352	57.25	0.286	1.0	2000	1650
NaF-KF-LiF	11.5-42-46.5	454	95.0	0.368	4.0	2600	2160
KCl-NaCl-CaCl ₂	4-26-70w%	490	54.5			2362	
KF-LiF	50-50	492	93.0	0.285	2.1	2430	2100
NaCl-CaCl ₂	48-52	500	55.0	0.25	4.0	2400	1900
LiCl-NaCl	75-25	552					
LiF-NaF-MgF ₂	43-43-12	630	195.0			2610	2105
NaF-LiF	40-60	650	170.0	0.439		2530	2090
NaCl-KCl	50-50	658	91.0	0.26			
KF-NaF-MgF ₂	60-34-6	685	138.0	0.38		2090	

るように、蓄熱材料と装置との間にはさまざまな関係があるためこれらの関係をすべて満足させることは技術的に難しい問題を含んでいると思われる

表 2 潜熱利用蓄熱装置の性能と蓄熱材料の特性の関連

蓄熱装置の性能など	蓄熱材料の特性など
入出力温度	転 移 融 解 温 度
蓄 熱 密 度	潜 熱
入出力密度	転移融解時における体積変化 (凝固時のボイド形成)
負 荷 応 答 性 (動 特 性)	転 移 融 解 凝 固 の 挙 動
熱 効 率	熱 物 性 値
エクセルギ効率	価 格
製 作 費	資 源 量
寿 命	蒸 気 圧, 揮 発 性
信 頼 性	熱 安 定 性
システム安全性	容 器 へ の 腐 食 性
建 設 期 間	毒 性
	化学反応性 (爆 発, 発 火)

る。なお、相互関係は蓄熱装置の性能と蓄熱材料との特性が密接に関係するものについては実線で示され、蓄熱その構造や材質などによって蓄熱材料の特性に影響の差が生ずるものについては破線で示されている。これは一つの考察であるが、このように蓄熱材と装置との関係をみても、両者の材料の選定は極めて難しい因子を含んでいることがわかる。しかし、一つの選定の指標としては、実線で示されているように、熱物性値（比熱、融点、熱伝導率など）、化学的安定性、構造材との共存性、安全性および価格などが重要な因子であると考えられる。現在蓄熱の研究は十分であるとはいえないし、今後、蓄熱技術はますます重要になると思われるため、蓄熱材およびシステムの熱特性に対する地道な研究が必要であるし、化学エネルギーによる蓄熱技術の開発も今後重要となる。

2.3 太陽熱発電パイロットプラント

わが国が世界に先がけて建設しようとするパイロットプラントは曲面集光方式とタワー集光方式によるものである。表3⁽⁴⁾はこれらの二方式プラントの設備概要を表したものである。発電出力および蓄熱容量は同一であるが、集光方式による集熱特性の相違から設備は異なっている。なお、基本設計条件として曲面集光方式については春秋分、タワー集光方式については夏至の南中時より2時間後に法線面直達日射強度が 0.75 kW/m^2 のときを設計出力の基準としている。また、集熱媒体は水である。

図5は曲面集光方式パイロットプラントのシステム構成と集光方法を示したものである。曲面集光方式は図5の(b)に示したように、平面鏡と楕形放物面鏡によって太陽光を集光集熱する。すなわち、平面鏡が5段20列設置されており、各段20列の平面鏡によって反射された光が各楕形放物面鏡に入射するようになっており、平面鏡と楕形放物面鏡の二つによって集光度を上げている。この装置（ユニット）をプラントでは25台用い、集熱器出口で 410°C 、 4.7 MPa （最高）の過熱蒸気を発生する。

蓄熱システムは溶融塩 (KCl-LiCl ,

(a) システム構成

(b) 集光集熱器

図 5 曲面集光方式パイロットプラント

41.5~58.5 mol%) 蓄熱器 2 台とアキュムレータ 4 台との組合せを用いている。すなわち、集熱媒体（水）の蒸発潜熱に相当する熱はアキュムレータにたくわえられ、飽和蒸気から過熱蒸気への加熱に相当する熱量は溶融塩蓄熱器にたくわえられる。

図 6 はタワー集光方式パイロットプラントのシステム構成図である。概念図に示されたように、太陽追尾装置を付けた 16 m² の平面鏡（ヘリオスタット）を敷地内に設置し、それにより、中央部に建てられたタワー頂上部の集熱器に太陽光を集光集熱するものである。集熱器は図に示されたような円すい形をしており、内部に伝熱管が設置されている。集熱器で発生した飽和蒸気は集熱器上部にある気水分離器を通して地上の蒸気アキュムレータ 5 台に送られ、蓄熱される。蒸気アキュムレータは起動時の暖気に用いる長時間用と、雲が

一時的にかかったときのような短時間用とに分けられ、おのおのの容量が決められている。このシステムでは蓄熱として蒸気アキュムレータのみを用いているため、曲面集光方式と異なり、飽和蒸気でタービンを駆動する。

両システムの構成図からわかるように、わが国のように日射変動が比較的多いところでは集熱器で発生した蒸気で直接タービンを駆動することは難しいため蓄熱装置を仲介にしている。

現在、両システムの機器製作および建設地における機器設置基礎工事が進められているが、この地点における気象観測も併行して行われており、53 年度の気象データから各システムの年間総発電量を試算すると約 100 万 kWh で、発電可能日数は約 250 日との結果が得られている。

これらのプラントの発電システムとしての実験研究は建設後の昭和 56~57 年に予定されており、

表 3 二方式パイロットプラントの設備概要

名 場 敷	称 所 地	仁尾太陽熱試験発電所 香川県三豊郡仁尾町 約 10 万 m ²	
		曲面集光方式（2 号機）	タワー集光方式（1 号機）
設 計 出 力		1 000 kW (春分南中から 2 時間後) (直達日射強度 0.75 kW/m ²)	1 000 kW (夏至南中から 2 時間後) (直達日射強度 0.75 kW/m ²)
平 面 鏡 (ヘリオスタット)	鏡 寸 法 個 数	1.5×3 m (4.5 m ² /台) 2 480 台	□ 4 m (16 m ² /台) 807 台
曲 面 鏡	鏡 寸 法 個 数	3.8×3.6 m 124 台	
集 熱 器	種 寸 類 法	モノチューブ形 集熱管長さ 3.6 m×124 本	自然循環形 窓部寸法 φ 8.5 m
	圧 力 [最高]	2.94 MPa (30 ata) 4.70 MPa (48 ata)	3.92 MPa (40 ata) 4.31 MPa (44 ata)
	温 度 蒸 発 量	370°C [最高] 410°C 6 140 kg/h	249.2°C [最高] 254.9°C 9 185 kg/h
蓄 熱 器	種 類	圧力水蓄熱	圧力水蓄熱
	容 量	70 m ³ ×4 台	60 m ³ ×5 台
タ ー ビ ン	種 類	衝動式抽気復水減速形	衝動式単シリンダ単流形復水式
	蒸 気 圧 力	1.372 MPa (14 ata)	1.176 MPa (12 ata)
	蒸 気 温 度 蒸 気 流 量	346°C 6 140 kg/h	187.1°C 7 940 kg/h
発 電 機	容 量	1 130 kVA	1 111 kVA
	回 転 数	3 600 回/min	1 800 回/min

太陽熱による電力供給への貢献度が明らかとなる。また、この研究期間中には、太陽熱発電システムの技術的可能性を実証するための試験とともに、技術的諸問題の解決をはかり、太陽熱発電システムの実用化に向けた研究を推進するための先導的な試験も行われる予定でいる。

3. 海外における太陽熱発電システムの開発情況

海外で最も精力的に研究がなされているのはアメリカであり、材料、要素機器の開発研究およびシステム研究などが広く行われている。

アメリカでは1981年10月に電気出力10 MW タワー集光方式プラントをバーストウ（カリフォルニア州）に建設する予定であり、1979年の10月には建設が開始されようとしている。集熱器とタービン入口条件は 510°C (10.1 MPa) の過熱蒸気となっており、冬至の午後2時（設計点）において電気出力10 MW、春秋分の正午で電気出力

11.1 MW を発電できるものとなっている。蓄熱器は碎石と油（Caloria HT 43）による顕熱方式であり、蓄熱容量は熱出力103.8 MW [タービンの暖気用7.5 MW、発電用96.3 MW (7 MW $\times$ 3h)] である。また、プラント開発用の要素機器を試験するために、熱出力5 MW のタワー集光方式の太陽エネルギー試験施設（5 MW Solar Energy Test Facility）がサンディア研究所（ニューメキシコ州）に、また、先導的要素研究のために熱出力400 kW のタワー集光方式の要素機器試験施設（Advanced Components Test Facility）がジョージア工科大学に設置されている。

EC 諸国では、1980年までにイタリアのシシリ島に1 MWe タワー集光方式プラントを建設する予定である。このシステムのタービン入口条件は 450°C (60 bar) であり、蓄熱器はHITECを用いた30分容量のものである。

IEA（国際エネルギー機関）では加盟10箇国の負担により、1980年までに電気出力500 kW の曲面集光方式とタワー集光方式のプラントをスペインのタベルナス（アルメリア地方）に建設する予定である。曲面集光方式は南北配置と東西配置の楕形放物面鏡によって集光集熱する。集熱媒体は油であり、熱交換によりタービンの作動流体であるトルエンの蒸気を発生する。タワー集光方式の集熱媒体はナトリウムであり、熱交換器により蒸気を発生させる。

さらに、西ドイツ、フランスなどでも各種の容量の太陽熱発電プラントを自国あるいは発展途上国への輸出用として研究が進められているし、オーストラリア、ソ連、中国、東南アジア諸国および中近東諸国などにおいても太陽熱発電の研究開発が進められている。

このように世界各国で太陽熱発電システムの研究開発が独自のプロジェクトとして、あるいは国際協力下のもとで推進されている。

4. 将来の展望

太陽エネルギーが低密度で不安定な熱源であるため、所用量の発電を行おうとすると、それに見合った敷地面積が必要となる。そこで、わが国において太陽熱発電システムとして利用できる適地が潜在的にどの程度あるかの試算例⁽³⁾がある。各地の日射条件を考慮し、次の条件、す

(a) システム構成

(b) 概念図

図6 タワー集光方式パイロットプラント

なわち、① 将来他目的の利用が予想される土地と、② 1箇所でも10 ha以下の土地を除外し、かつ③ 発電所用地面積が集光面積の2~3倍必要とし、④ システム効率を22%とすると、発電可能推計量はピーク出力(毎日4時間)7200万~1億1000万kW程度となり、この場合の発電所用地総面積はわが国の総面積の約0.4%程度と報告されている。

このようにわが国においても太陽エネルギーによる電力供給に対して膨大な潜在能力を有している。従って、パイロットプラントの運転研究により熱発電システム技術が実証された以後、実用化に向けた研究を推進するために経済性、信頼性などを考慮し、要素機器および構成材料の基礎研究から大規模システムの概念設計などの研究が進められる予定になっている。

一方、わが国の総エネルギー消費分析⁽⁶⁾によれば、わが国における産業部門のエネルギー消費比率は非常に高く、各産業部門で消費する最終エネルギー形態として、電気エネルギーよりもむしろ熱エネルギーが圧倒的に多く消費していることが明らかになっている。また、将来のエネルギー消費比率傾向も大幅に変化しないと報告されている。このように大量にエネルギーを消費する産業に太陽エネルギーを導入しようとするシステムが新たに提唱されている。このシステムは熱・電気複合システムといわれ、事業所における電気、工業用プロセスヒート、冷暖房給湯を供給するシステムである。また、350°C以下の熱エネルギーが産業部門で消費するエ

ネルギー全体の約50%を占めていることから、この熱・電気複合システムの研究に期待が寄せられている。

このように太陽エネルギーによって高温領域まで利用できるシステムが技術的に克服されようとしているが、これらのシステムはいずれにしても現状のエネルギー供給システムと比して高価なものとなっている。従って、今後は性能を落とさないでいかにコストを下げることが重要な研究課題と考えられる。

熱発電システムおよび熱・電気複合システムは将来重要なエネルギーシステムと考えられるためコスト/性能を向上させるための研究開発を今後も積極的に進める必要がある。

(原稿受付 昭和54年8月27日)

文 献

- (1) 沢田・ほか4名, 第2回太陽エネルギー学会講演論文集, (昭51-12), 33.
- (2) Sandia Lab, Solar Project Div. 8132, SAND 77-8035, (1977).
- (3) 日本電機工業会, 昭和53年度サンシャイン計画委託調査研究成果報告書, 太陽エネルギー利用システム調査研究(蓄熱サブシステム), (昭54-3).
- (4) 通商産業省工業技術院サンシャイン計画推進本部, 昭和53年度サンシャイン計画成果報告書概要集(太陽エネルギー), (昭54-4).
- (5) 日本電機工業会, 昭和51年度サンシャイン計画委託調査研究成果報告書, 太陽エネルギー利用システム調査研究(太陽熱発電), (昭52-3).
- (6) 通商産業省資源エネルギー庁編, 我国エネルギー問題の長期展望—2000年への選択—, (昭52-10).