熱・電気複合ソーラシステムの開発* (電気負荷優先モードにおける実験)

田中忠良**, 津田 泉***, 谷 辰夫***

Development of Solar Total Energy System (Experimental Results of Operation by Electric Load Control Mode)

by Tadayoshi TANAKA, Izumi TSUDA, and Tatsuo TANI

Basic research has been made on the solar total energy system (STES) for multipurpose and effective utilization of solar energy. As part of a National Project on R & D of STES, an experimental STES facility which generates electric power and heat for process heat and domestic heat, has been constructed at the Tsukuba Second Research Center, Agency of Industrial Science and Technology. This has the aim of introducing STES into various industrial sectors consuming a vast amount of energy in Japan. This facility is constructed to improve the operating rate and to collect solar energy effectively considering the prevalence of fairly bad weather conditions, such as in Japan. The experiments are also being continued under various weather conditions. In this paper, the outline of this facility is described, and the aforementioned characteristics are shown from experimental results.

Key Words: Solar Total Energy System, Solar System, Solar Industrial Applications

1. 緒 言

高温の太陽熱を利用して発電する太陽熱発電システムが、わが国⁽¹⁾や主要先進諸国⁽²⁾で建設され、わが国ではすでに研究は終了しているが、他は現在も研究が進められている。このような太陽熱の電気エネルギーへの変換のみでなく、産業用や家庭用の熱エネルギーも供給することによって、太陽熱の多目的有効利用とシステム効率の向上を図ることができる。そこで、太陽熱による熱電併給システムである熱・電気複合ソーラシステムがわが国でも開発されることとなった。この種のシステムはすでにアメリカのジョージア州にある毛織物工場⁽³⁾に設置され実用化試験が行われているが、わが国でも当面エネルギーを最も多く消費している種々の産業分野への導入について検討されている。

これらのシステムにおいて、建設地での日射条件がシステムの性能に最も大きく影響する。そのため、既設の熱発電プラントでは、建設地の日射特性に基づいて設計日射強度を設定し、その日射強度以上で一定の

集熱温度で集熱する。そして、システムが熱平衡状態になった時、定格出力が得られるように設計されている。しかし、文献(4)、(5)ですでに報告したように、雲により入射光が大きく変動したり、日射が弱い日には、設計熱平衡状態に達しなかったり、長時間維持しえないことがある。また、数日間悪い天気が続いて蓄熱装置の温度が著しく低下している場合、太陽熱を集熱しても、補助熱源を持たない熱発電システムでは、その熱を利用しえないこともある。そこで、日射条件と蓄熱装置の熱的条件に応じて、集熱温度と運転方法を選択し、補助熱源がなくても太陽熱を集熱することによって有効に利用することが可能と考えられる。このような方法で運転できる熱・電気複合ソーラシステムの実験設備を昭和57年3月に工業技術院筑波第2研究センタ内に建設し、運転研究を開始した。

本報では、実験設備の概要と運転法について述べ、これまでにに行った実験結果より、本実験設備のように構成したシステムにおいて太陽熱の有効利用とシステムの稼働率の向上を図ることができることを本報で明らかにした。

2. 実験設備の概要と運転法

熱・電気複合ソーラシステム実験設備は、表1の設

* 昭和60年10月2日 第63期全国大会講演会において講演。
原稿受付 昭和60年2月4日。

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

*** 工業技術院電子技術総合研究所。

計日射強度のもとで熱平衡状態に達した時、表中の出力が得られるように設計され、図1のように構成されている。なお、表中の熱出力は、工程用の熱をいい、わが国における産業分野のエネルギー消費調査⁽⁶⁾に基づいて、その温度を決定した。このような設計方法は、既設の太陽熱発電システムと同様であるが、設計日射強度よりも小さい時でも、本設備では低温で集熱ができるように集光追尾形の東西形と南北形のコレクタ（図中のE-WとN-S）のほかに、非集光固定形の改良逆平板形コレクタ（IRFP）が配置されている⁽⁴⁾。また、フロンタービン（作動媒体はR-11）を設置し、低温の熱により単独で発電ができるようになっている。すなわち、表1に示した設計日射強度は、建設地近傍における春秋の平均値であり、このような日射条件が運転時間の太陽時午前8時から午後4時まで、あるいは、そのような日が数日間続くことは少ない。そのため、日射が弱い時は、直達光が少なく、集光追尾形コレクタで図中に示した高温の熱を集熱できないことがある。したがって、そのような場合でも、散乱光をも集熱する非集光固定形のコレクタを配して、蒸気タービンによる発電や工程熱の供給ができなくても、低温の熱によってフロンタービンによる発電と給湯・空調を行う。したがって、本実験設備では、表2に示したように三つの運転モードが用意され、日射と蒸気アキュムレータの条件によって選択される。運転開始時の太陽時午前8時において、日射強度が快晴日のように

1日中表1の値より大きくなると予想される時には表2に示したように通常日射とStand byの二つの運転モードの選択が可能となる。このような日に、どちらか一方のモードを選択したとしても、集光追尾形コレクタで構成した高温ループで高い温度の熱が集められ、蒸気発生器で工程熱用としての210°Cと蒸気タービンを駆動するための170°Cの蒸気を発生させることができる。そして、この二つの運転モードの一方を決める条件として蒸気アキュムレータ(U)あるいは(T)の器内温度が規定の温度より低くても、その日に得られる熱によって工程熱の供給や蒸気タービンによる発

表1 基本設計条件

Item	Description
Design point	Maximum out-put at the time of insolation of 0.65 kW/m ² for nonconcentrating-nontracking collector and 0.50 kW/m ² for concentrating-tracking collector at the solar noon on equinox day.
Collector	north-south oriented 12 units (3 m(W) x 6 m(L)) east-west oriented 12 units (3 m(W) x 6 m(L)) improved reverse flat plate 16 units (1.5 m(W) x 8 m(L))
Heat storage	material : pressurized water capacity : 1 hour (maximum)
Out-put (maximum)	electric 15 kW heat 45 kW (saturated steam at 200°C)

図1 熱・電気複合ソーラシステム実験設備の構成

電が可能と考えられる時は、通常日射運転モードが選択され、表3に示したように、本実験設備の最大出力での運転が可能となる。一方、数日間悪い天気が続いて、高温の熱が集められない時は、蒸気アキュムレータ(U)と(T)の器内温度が著しく低下する。器内温度が規定の温度より50°C以上低下している時は、Stand by 運転モードが選択される。このモードでは、蒸気アキュムレータ(U)と(T)への蓄熱は、通常日射運転モードと同様に行われるが、高温ループを流れる集熱媒体(ジフェニール系の熱媒体)は、図1に示した蒸気発生器(T)を出た後、対向流二重管式の熱交換器(2)にも送られる。そこで、貯水タンクから送られた水を約105°Cの熱水とし、改良逆平板形コレクタで構成した低温ループの熱により熱交換器(1)で発生した熱水とともに熱水タンクに送られる。いったん蓄えられた後、熱水はフロン蒸発器に送られ、フロンタービンを駆動するためのフロン蒸気を発生する。フロン蒸発器を出た熱水は、給湯タンクに送られ、空調と給湯のために使用される。

低日射運転モードは、晴れた日でも雲により日射がよく変動する日、あるいは薄曇りで設計日射強度より小さい日に選択される。このような時は高温ループで200°C以上の熱を得ることが困難であるため、図1に

示したように高温ループの集熱温度を低温ループと同様の120°Cとして集熱する。各ループの熱は各々熱交換器(1)と(2)で約105°Cの熱水を発生し、表3に示したようにStand by 運転モードと同様にフロンタービンによる発電と空調・給湯用に使用される。

以上述べたように、三つの運転モードを表2の条件で選択し、集熱ループで120°C以上の熱が集められれば、表3のように電気と熱を供給することができる。なお、最大発電出力として、通常日射運転モードでは15 kW(蒸気タービン5 kW, フロンタービン10 kW), Stand by と低日射運転モードでは、5 kW となっている。また、図1に示した低温と高温の各ループに配置した補助熱源は、コレクタの使用台数を低減させるために使用され、コレクタ群の出口温度に追随し、熱を供給する装置である。

実験設備では、表3に示した熱と電気を同時に供給することができるが、一方のエネルギーを優先して多く供給することができるようになっている。すなわち、実験設備の運転モードと負荷制御は表4のようになっている。表4において、通常日射運転モードの熱負荷は工程熱を、低日射運転モードのそれは空調・給湯用の熱をいう。ここで、例えば、通常日射運転モードにおいて、電気負荷優先モードとは、高温ループで得た

表2 運転モードの選択条件

Operating Mode	Weather Condition		Temperature of Pressurized Water in Accumulator	
	Good	Bad	Higt	Low
Ordinary	○		○	
Low Insolation		○		
Stand-by	○			○

表3 運転モードによる供給エネルギー

Operating Mode	Power Generation		Process Steam Supply	Air Conditioning Hot Water Supply
	Steam Turbine	Freon Turbine		
Ordinary	○	○	○	○
Low Insolation		○		○
Stand-by		○		○

表4 運転モードと負荷制御モード

熱を図1に示した蒸気発生器(U)の側路管を通して蒸気発生器(T)に多く与えるようにし、工程熱用よりも蒸気タービン駆動用の蒸気を多く発生するようにして行うことをいう。表4で、モードIとモードJは蒸気アキュムレータや熱水タンクに蓄熱するのみで負荷の供給は行わないモードである。これらの蓄熱装置に規定以上の熱が蓄えられると次のモードに移行して負荷の供給が開始される。そして、十分に熱が蓄えられている時には、モードAにより本設備の最大出力を得ることができる。運転モードは起動時の日射と蒸気アキュムレータの条件によって選択されるが、負荷優先モードは集熱ループの集熱温度が図1に示した値近く

まで昇温した時、手動で選択する。その後の運転は手動で行うことも可能であるが、計算機による監視と指令により負荷制御モードが自動的に移行するようになっている⁽⁷⁾。なお、実験設備の構成機器の詳細および特性については、文献(4)、(5)を参照されたい。

3. 実験結果と考察

以上述べた設備において、運転法および構成上の特徴を明らかにするために、試運転、調整後の昭和57年9月より実験を開始した。気象は非再現性の現象であるため、平均的な特性を把握できるように実験は1ヶ月以上連続して行った。

表5 電気負荷優先モードにおける実験結果

		RUN(1) (SEP.14-NOV.4,1982)	RUN(2) (MAY.9-JUNE.17,1983)	RUN(3) (AUG.8-OCT.27,1983)	RUN(4) (JAN.23-MAR.31,1984)
NET NUMBER OF DAYS IN EACH RUN (DAYS)		50	40	65	69
AVERAGE INTENSITY OF INSOLATION (w/m ²)	INCLINED GLOBAL INSOLATION	429	560	394	561
	NORMAL DIRECT INSOLATION	263	289	185	407
HEAT COLLECTION EFFICIENCY (%)	LOW TEMPERATURE LOOP	23.1	25.1	21.8	18.4
	HIGH TEMPERATURE LOOP	31.9	30.8	38.8	35.4
AMOUNT OF POWER GENERATION (kwh)	ORDINARY OPERATING MODE	304.1	210.1	0	1,126.3
	LOW INSOLATION OPERATING MODE	13.5	110.9	251.1	70.0
	STAND BY OPERATING MODE	-	62.5	191.5	188.2
EQUIVALENT HOURS OF MAXIMUM POWER OUTPUT (h.)	ORDINARY OPERATING MODE	20.3	14.0	0	75.1
	LOW INSOLATION OPERATING MODE	1.4	11.1	25.1	7.0
	STAND BY OPERATING MODE	-	6.3	19.2	18.8
NUMBER OF DAYS PERFORMED POWER GENERATION (DAYS)	ORDINARY OPERATING MODE	7	4	0	32
	LOW INSOLATION OPERATING MODE	4	11	19	4
	STAND BY OPERATING MODE	-	4	13	10
	TOTAL	11	19	32	46

AVERAGE INTENSITY OF INSOLATION

$$= \frac{\text{TOTAL AMOUNT OF SOLAR ENERGY SHONE IN EACH LOOP}}{\text{TOTAL NUMBER OF DAYS OF EXPERIMENTS X TOTAL AREA OF COLLECTORS X PERIOD OF OPERATION (8HR.)}}$$

$$\text{HEAT COLLECTION EFFICIENCY} = \frac{\text{TOTAL AMOUNT OF HEAT GAIN IN EACH LOOP}}{\text{TOTAL AMOUNT OF SOLAR ENERGY SHONE IN EACH LOOP}}$$

$$\text{EQUIVALENT HOURS OF MAXIMUM POWER OUTPUT} = \frac{\text{TOTAL AMOUNT OF POWER GENERATION}}{\text{MAXIMUM POWER OF GENERATION}}$$

表5は昭和59年3月までに行った実験の代表的結果を示したもので、実験はすべて上述の電気負荷優先モードで行った。

平均日射強度の欄に示したように、傾斜面全天日射強度が大きく、法線面直達日射強度との差が小さい。すなわち、散乱日射が少ない実験(1)と(4)が比較的良好な日射の時に行われた実験であり、実験(3)が最も日射条件が悪い時に行われた実験となっている。日射条件が特に良い実験(4)では、晴天日が数日間続いたことが多く、通常日射運転モードでの運転がよくなされた。そのため、発電を行った日数が実験日数の7割にも達し、発電量が著しく増加している。このように、日射条件が良い時には、高温ループで高温の熱を集熱することができ、設備の最大出力で運転が可能となり、発電量も増加する。上述の太陽熱発電システムでは、本実験設備の通常日射運転モードに相当する運転モードで運用されるため、このように良い日射条件のもとでは、実験(4)のような結果が得られるものと考えられる。しかし、他の実験結果で示されたように、わが国では実験(4)のように良い日射条件に恵まれることはまれである⁽⁹⁾。そのため、通常日射運転モードで発電される日数が他の運転モードで発電される日数より少なくなっていることが表5からわかる。なお、Stand by 運転モードは実験(2)の期間中に見出された運転モードであるため、実験(1)では行われていない。例えば、表5の実験(3)で示されたように、65日間のうち、通常日射運転モードで発電された日が一度もなく、他の二つの運転モードでしか発電が行われていない。この実験期間中では、晴天日が2日間続いたのが一回だけで、通常日射運転モードによる発電条件が満たされるまでに至らなかった。したがって、上述のほとんどの太陽熱発電システムでは、本実験設備の集熱温度より高くなっているため、実験(3)のような状況下では、発電を行うことは不可能と考えられる。このように、日射条件に関係なく一定の温度でしか集熱しないシステムでは、規定の温度まで昇温することができなかつたり、あるいは、昇温できても蓄熱のみで発電することができなかつたりする⁽⁴⁾⁽⁵⁾。そのため、晴天日が続かないような時は蓄熱装置に蓄えた熱が無効になる。そこで、短期間における気象予測が現状で可能であるとしても、日射の変化に対応して集熱することにより最も太陽熱を有効に利用することが表5の結果からわかる。したがって、本実験設備のように表1に示した設計日射強度を規準にして表2の選択条件で運転モードを選択することによって、発電量とシステムの稼働率が向上することがわかる。

なお、集熱ループの性能として、低温と高温の各ループの集熱効率を表5に示されたように実験時期の相異による変化は顕著でない。また、表中に示した定義よりわかるように、集熱効率の算定に配管部からの熱損失が含まれているため、コレクタ1台の性能に比べて小さくなっている⁽⁴⁾。

以上、表5の結果の考察で述べたように、本実験設備のように構成し、日射と蓄圧器の条件で運転することにより発電量と稼働率が向上することは図2でより明確に示すことができる。ここで図の横軸は表5に示した法線面直達日射強度 Q_d と傾斜面全天日射強度 Q_g との比であり、縦軸は次のようにして求めた値である。

$$R_s = \frac{\text{晴天日の日数}}{\text{実験日数}}$$

$$R_o = \frac{\text{通常日射運転モードで発電した日数}}{\text{実験日数}}$$

$$R_g = \frac{\text{発電を行った日数}}{\text{実験日数}}$$

この図に示されたように、日射強度の比が増加するとともに、晴天日の日数および発電を行った日数がほぼ比例して増加することがわかる。しかし、通常日射運転モードで発電できる日は、日射強度の比が0.5以上に限られていることが示されている。これは、表5の考察で述べたように、この値以下では散乱日射が支

図2 日射強度と発電頻度との関係

図3 日射強度と運転モードの選択との関係

配的になるため、高温ループで高い温度の熱を十分に集熱できず、蒸気タービンによる発電ができなれと考えられる。しかし、本実験設備では、曇って日射が弱い日や日射が変動する日でも発電できるため、その日数が著しく増加し、実験(2)と(3)で示されたように発電した日数が晴天日数より著しく多くなっていることがわかる。したがって、この図からも既設の太陽熱発電システムに比べて本設備のほうが太陽熱の利用率高いシステムであることが示されている。

図3は、日射強度と運転モードの選択との関係を示した図である。 $\bar{Q}_d$ 、 $\bar{Q}_g$ は運転時間中の平均法線面直達日射強度と平均傾斜面全天日射強度である。図に示したように、 $\bar{Q}_d$ と $\bar{Q}_g$ はほぼ直線的な関係にあり⁽⁵⁾⁽⁷⁾、直線は実験値から最小自乗法によって求めた。各運転モードは、上述のごとく起動時の気象状況によって選択しているが、図に示されたような日射強度の領域で選択されている。起動から停止までの間、気象変化を予測することは困難であるが、運転中に運転モードを変更することはほとんどなく⁽⁷⁾、このように運

転モードが起動時に選択できるのは、天候が急激に変化することが少ないため、本実験設備のように日射強度に応じて運転ができると考えられる。なお、通常日射とStand by運転モードが表1に示した設計日射強度より小さい強度で選択されているが、これは高温ループにおける性能が設計性能より優れているためと考えられる。また、直線と横軸との交点以下は、散乱光のみで、運転が不可能な領域である。

4. 結 論

熱・電気複合ソーラシステムの基礎研究を行うために実験設備を建設し、熱と電気の負荷のうち、電気負荷優先で行った実験より次の結論を得た。

(1) 本実験設備のような構成と運転により既に建設された太陽熱発電システムより太陽エネルギーの利用効率を向上させることができることを示した。

(2) 天候が運転中に急変することが少ないため、起動時の日射条件で運転モードは容易に選択できることがわかった。

本報では、負荷に対する最適な集熱量、蓄熱量に対する考察を行っていないが、これらの結果を踏まえて検討する予定である。また、熱負荷優先モードでの実験を行っており、本報との結果と比較を行う予定でいる。

文 献

- (1) 最勝寺, 新・省エネルギー研究会, (電気学会) ESC-84-12 (昭59), 49.
- (2) 例えば, Bartel, J. J. and Skvarna, P. E., *Trans. ASME, J. of Solar Energy Eng.*, **106**, No. 1 (1984), 54.
- (3) Ney, E. J., *Solar Total Energy Project Shenandoah, Georgia Site*, ALO-3994-83/1 (1983).
- (4) 田中・ほか3名, 電学論, **104-B**, (昭59), 505.
- (5) 文献(4)の513ページ.
- (6) 田中・ほか4名, 電総研集報, **47-5** (昭58).
- (7) 田中・ほか3名, 電学論, **105-B** (昭60), 523.