

# 太陽熱発電

## R & D on Solar Thermal Electric Power Systems

谷 辰 夫\*

Tasuo Tani

### 1. はじめに

わが国の当面の石油代替エネルギーは、供給量、実用化時期などから原子力エネルギー、石炭エネルギー、天然ガスが中心になるものと考えられている。しかし、これらのエネルギー資源の大半は、いずれも輸入エネルギーであるため、供給の不安定さは否めず、また、大規模集中形のエネルギー供給システムの体系は、環境、立地、安全性などの面から必ずしも最適なシステムとは言い難い。このような状況のもとで、わが国が自主性を確保し、また安全保障を図っていくためには、上記エネルギーの利用を進めるとともに、国産エネルギーであり再生可能な自然エネルギーなど新エネルギー利用のための研究開発を進め、需要に応じたエネルギー供給のベストミックスの実現を図ることが重要である。

現状における自然エネルギーなど新エネルギー利用技術をとりにくく環境条件は必ずしも良好ではないが、当面の短期的なエネルギー情勢に目をうばわれることなく、将来のエネルギー源として導入出来るよう組織的総合的な取組みが肝要である。

太陽エネルギー利用技術は、技術的に目途が立っているが、経済性が今一つといった分野から、技術的なブレークスルーがあって初めて実用化に結びつく基礎研究の段階のものまで広い範囲に亘っており、今後の成果が期待される。太陽発電とは太陽エネルギーを電気エネルギーに変換する技術の総称であり、現在太陽熱発電と太陽光発電の研究が主として推進されている。

太陽発電の利点はクリーンで量的に豊富でしかも燃料費が無料の太陽エネルギーをエネルギー源としており、設置場所の制約条件も比較的少ないことである。一方、欠点としては、太陽エネルギーが低密度であることによって、まとまったエネルギーを取

得するには大きな面積が必要なこと、太陽エネルギーの特質に起因して不安定な電源となることなどが指摘できる。

本稿においては、太陽熱発電に焦点を当てて研究開発の現状と今後の展望について述べることにする。

### 2. 太陽熱発電の研究開発の現状

太陽熱発電は、周知のように希薄な太陽エネルギーを集熱し、蓄熱装置に貯蔵した後、タービン発電機に供給し電気エネルギーを発生するシステムである。世界各国で太陽熱発電の研究開発に着手したのは、昭和48年頃からであり、その後基礎研究を経てパイロットプラントの建設、運転研究が行われている。

太陽熱発電の研究開発の背景には次のようなものがある<sup>1)</sup>。

①既存発電プラントに類似しており、既存技術を最大限に活用できる。

②最近の材料並びにプラントの制御技術の進歩などによって、太陽熱発電のキーポイントである集光・集熱装置が構成でき、しかも発電に必要な温度の熱エネルギーを容易に集熱することが可能である。

③まとまった集熱量が得られれば、システム効率が高い他の利用システムのそれに比べ良好である。

わが国では、56年夏香川県仁尾町において出力1,000 kWのタワー集光方式、曲面集光方式の太陽熱発電パイロットプラントが定格出力の発電に成功し、引続いて59年3月末まで運転研究が行われた。このプラントの運転研究の目的は、①システムおよび各構成機器の性能の確認、②システムの最適運転法、保守方法の検討と耐久性の評価、③将来の大型実用化プラントに必要なデータの取得、解析などであった。

約2年7ヶ月の運転研究期間中、運転負荷パターン、蓄熱器の圧力条件、温度条件などを変化させ各種運転データを取得した。その結果、プラントの発電電力量向上を主体にしたタワー集光方式プラントの運転では

\* 電子技術総合研究所エネルギー部太陽エネルギー研究室長  
〒305 茨城県新治郡桜村梅園 1-1-4

次のようなことが明らかになった<sup>2)</sup>。

運転モードについては、①標準負荷パターン（集光・集熱中に可能な限り定格運転を行い、その後蓄熱量に応じて出力を漸減させる運転モード）、②日射追従負荷パターン（集光・集熱量に応じて発電する運転モード）、③1,000kW一定負荷パターン（定格運転のみの運転モード）の三つについて運転したが、その結果、これらの三つの運転モードの発電電力量に極端な相違が認められなかった。しかし、プラントの運転操作上から①の標準負荷パターンが有効であった。

発電電力量を増加させるための蓄熱装置の運用については、①日射変動に対して、プラントが安定して運転が可能な限り、小さな蓄熱容量にすること、②当日の蓄熱量は翌日に持越さず、発電で使い切ることが望ましいことが分かった。また、タービンの変圧運転（定格蒸気条件以下での運転）も集光・集熱した太陽エネルギーを有効に利用（発電電力量の増加）することに効果的であることも分かった。

さらに、タワー集光方式のプラントの1日の日射量( $\phi$ )、発生蒸気量( $g$ )及び発電電力量( $e$ )の間には、次の関係があることが分かった。

$$g-\phi \text{ の関係式：夏期(3\sim 9月) } g=9.26\phi-10.89$$

$$\text{冬期(10\sim 2月) } g=7.85\phi-13.15$$

$$e-\phi \text{ の関係式：夏期(3\sim 9月) } e=0.93\phi-1.28$$

$$\text{冬期(10\sim 2月) } e=0.73\phi-1.50$$

ここで  $\phi$  : 法線面直達日射量 ( $\text{kWh}/\text{m}^2 \cdot \text{日}$ )

$g$  : 集熱器蒸気流量 ( $\text{ton}/\text{日}$ )

$e$  : 発電電力量 ( $\text{MWh}/\text{日}$ )

これらの関係式からこのパイロットプラントでは発電が可能な日射量の下限値は、夏期が $1.38\text{kWh}/\text{m}^2 \cdot \text{日}$ 、冬期が $1.90\text{kWh}/\text{m}^2 \cdot \text{日}$ であり、年間発電電力量は約500MWhと予想できる。

一方、海外では6プラントの太陽熱発電プラントが建設され運転研究が行われている。発電容量が10MWと最も大きなプラントは、アメリカのソーラワンであり、フランスのテーミスが2.5MWでこれに次いでいる。これらのプラントは、IEA（国際エネルギー機関）の500kW分散型プラントを除き、いずれもタワー集光方式である。この方式では集光比を上げ熱吸収器の光束密度を高く取るようヘリオスタットの制御は二軸追尾方式を採用している。また、熱媒体として、取扱いが複雑であるが、性能向上に寄与すると考えられる熔融塩（フランス）や金属ナトリウム（IEA）を用いているプラントもある。これは、高温集熱によ

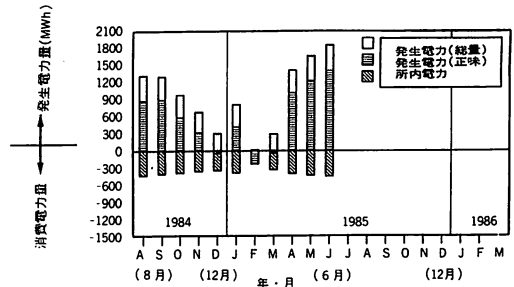


図-1 月別発生電力量の推移（米国ソーラ・ワン）

てシステムの高効率化を図り、発電コストを低減させることを目指したものと考えられる。

ソーラワンはアメリカのカリフォルニアの乾燥地帯に建設されたもので、昭和57年5月より運転研究が開始され以後順調に発電が続けられている。このプラントは夏期には10MWの電力を1日当たり7.8時間、冬期には4時間発電できるように設計されており、また、蓄熱装置を用いて7MWの電力を4時間連続して発電することが可能である。このパイロットプラントの運転研究期間は5年間であり、最初の2年間は、DOEとサウザン・カリフォルニア・エジソン社で決めた研究を主体にした運転スケジュールに従って運転された。残りの3年間はプラントに取って最も好ましいモードで運転されている。この間の1日当たりの最大発電電力量は約59MWhであった。図-1は最近の各月の発電電力量を示したものである。また、プラントの発電可能な最小日射強度として $450\text{W}/\text{m}^2$ を設計値としたが、運転研究の結果、日射強度が $300\text{W}/\text{m}^2$ あれば十分運転が可能であることが分かったと報告されている。

一方、1984年秋、このソーラワンの近くでラズ・インタナショナル社のSEG-1が世界初の商業プラントとして完成した。このプラントの定格容量は、13.8MWで楕型放物面鏡による分散型のプラントであり、サウザン・カリフォルニア・エジソン社を通して約1万世帯分の電力の供給を開始した。このプロジェクトでは、1985年にはSEG-2として30MWを、1994年までに3,000MW以上の発電容量を有する太陽熱発電プラントをこの地域に完成することにしている。

### 3. 太陽熱発電の解決課題

すでに述べたように、香川県仁尾町における太陽熱発電パイロットプラントの研究開発は終了したが、今後に残された課題を列記すれば次の通りである。

- ① 経済性の向上
- ② 効率の向上

- ③ 稼働率の向上
- ④ 太陽エネルギー有効利用率の向上

これらの課題はいずれも相互に関連しており、最終的には①の経済性の向上に帰着することになる。また、これらはわが国のみならず各国の太陽熱発電プラントの共通の課題と言って良い。

太陽熱発電の実用化へ向けての研究開発は、これらの課題の解決を前提として行う必要があり、パイロットプラントの次期プラントとして想定できる太陽熱発電プラントは次の3つであろう。

- ④ コストダウンを図った従来プラント
- ⑤ 従来技術思想をベースにした改良プラント
- ⑥ 発想の転換を図った将来プラント

④については、仁尾町のパイロットプラントの実験データに基づいて、設計基準の見直し、最適発電容量など検討課題は少なくない。しかし、従来プラントの技術をそのまま用いて大幅な経済性向上が図られると考えるのは楽観的過ぎるように思われる。それは、このパイロットプラントはテストプラントであり、実験データを取得、解析し、次期ステップの設計データを集積するためのものであったことによる。

ここでわが国の日射条件など環境条件について述べると次のようになる。

- ① 東京における傾斜面全天日射量は約1,300kWh/m<sup>2</sup>・年でそのうちの約1/3が散乱日射量である。従って、全天日射量に占める散乱日射量は多い。
- ② 晴天日の法線面直達日射量は、5kWh/m<sup>2</sup>・日(米国カリフォルニアでは8kWh/m<sup>2</sup>・日)程度である。
- ③ 毎年台風の影響を受ける。
- ④ 土地の制約条件が厳しい。

これらの条件の下で⑥のプラントを考える。このプラントは、従来の技術思想をベースに従来のプラントを大幅に改良し、構成するものである。このプラントの1つとして筆者らは、熱・電気複合ソーラシステムを提案している<sup>3)</sup>。このシステムは、当面産業部門へのエネルギー(電気エネルギーと熱エネルギー)供給を行うソーラシステムであり、その特徴は次のようである。

- ① 電気エネルギーと熱エネルギーを同時に供給できるシステムである。
- ② 非集光固定型、集光追尾型のコレクタを組み合わせたシステムである。
- ③ 複合発電システムである。
- ④ 中小容量分散型システムである。

表1 今後に残された課題と研究開発課題

項目	研究開発課題
効率向上	セグメントミラー型コレクタ 固定集光型コレクタなど
稼働率向上	潜熱蓄熱装置 化学変換など
太陽エネルギー有効利用率向上	新しいシステム構成 (コレクタの組み合わせ、複合発電など)
経済性向上	制御法の開発 (MRAC法など) システム解析 (補助熱源を導入したシステムなど)

今後に残された課題と、それに対応する研究開発課題の関係を表1に示す。これらの研究開発によって今後に残された課題が大幅に改善できれば、熱・電気複合ソーラシステムは、将来実用化の可能性が十分あるシステムと考えている。

これらの項目の中の「太陽エネルギー有効利用率の向上」とは、システムに補助熱源を導入することによって集熱した太陽エネルギーを熱損失を最小限に抑えて有効に利用することを意味している。図-2は、電気出力1MW級の熱・電気複合ソーラシステムの太陽エネルギー有効利用率と補助熱源分担率の関係のシミュレーション結果の1例である<sup>4)</sup>。図の横軸はシステムを設計する際に用いる法線面直達日射強度である。縦軸は、太陽エネルギー有効利用率で、(タービン、工程熱への供給量) - (補助熱源からの供給量) / (集熱量) である。図中のパラメーターの補助熱源分担率は(補助熱源からの供給量) / (タービン、工程熱への供給量) である。補助熱源を導入することによって、太陽エネルギー有効利用率が向上することは明らかである。例えば、設計点となる法線面直達日

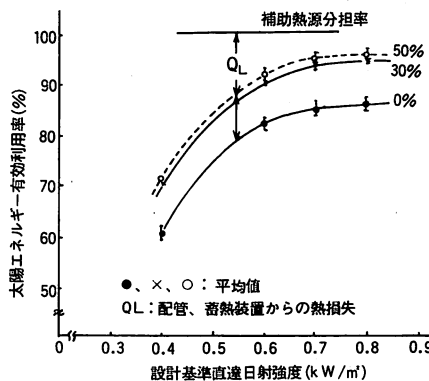


図-2 設計基準日射強度に対する太陽エネルギー有効利用率の関係の1例(定格発電出力1MW級)

射強度が0.7kW/㎡のとき、補助熱源に全体のエネルギー供給量の30%を分担させれば、太陽エネルギー有効利用率が約95%になることが分かる。

さらに③の発想の転換を図った将来性システムについては、現状の技術とはかなり異なった概念を導入する必要があり、わが国の気象条件などを考慮すると、①固定集光型コレクタによる集光・集熱系の構成、②化学反応による熱輸送、熱貯蔵系の構成などを取り入れたシステムが想定され、そのための研究開発が必要である。

4. 熱・電気複合ソーラシステムの展開

4.1 導入の可能性

わが国の長期的なエネルギー需要予測によれば、今後とも産業部門におけるエネルギー需要は大きな比重（2000年時点では、総エネルギー需要の60%程度）を占めるものと予想されており、熱エネルギーと電気エネルギーの割合も5対1と熱エネルギーの割合が高くなっている。

わが国の製造業における事業所のアンケート調査によれば、熱エネルギーの利用割合の高い部門は石油、石炭、窯業・土石、パルプ紙の業種であり、非鉄金属、電気機械、繊維の業種は比較的低くなっている。

一方表2は、各業種で使用される熱エネルギーの利用温度をまとめたものである<sup>3)</sup>。この表から明らかのように、180℃以下の温度の熱エネルギーが最も利用され、この温度領域のエネルギー源の種類はスチームとガスである。従って、鉄鋼、非鉄の高温度領域を除けば、太陽熱発電システムの研究開発で得られた成果を活用して、工程熱や照明、動力用の電力を供給することが可能である。

さらに、日射条件、事業所内の利用可能面積とそれに対するエネルギー需要量、利用温度、負荷特性などを加味してさらに詳細に熱・電気複合ソーラシステムの導入の可能性を調査すると、可能性の高い業種は、家具装備品、建設機械、金属加工機械、畜産、飲料、家具、発電機・電動機などであることが分かった。

4.2 熱・電気複合ソーラシステムの構成とその特性

筆者らは、昭和57年3月、熱・電気複合ソーラシステム実験設備を工業技術院筑波第2研究センターに完成し、現在運転研究を行っている。このシステムは、非集光固定型、集光追尾型のコレクタ、低温、高温蓄熱装置、蒸気タービン、フロンタービン発電機を備えた定格出力15kW(電気出力) + 45kW(200℃、飽和蒸

表2 熱エネルギーの利用温度例

特性 業種	1 低温型 60°~100°	2 低温型 100°~180°	3 中温型 180°~290°	4 高温型 300°~500°	5 高温型 500°以上
全業種	◎ ○	○ ◎ G S			
1 鉄鋼 非鉄	○ ○				◎ ○ ◎ E G ○
2 金属 機械	◎ ○	○ ○ E G			
3 紙 パルプ	◎ ○	◎ S	○ S		
4 化学 石油	○ E	◎ S	◎ S		◎ ○
5 ゴム なめし	◎ ◎ ◎ ◎ E G O S	◎ ◎ ◎ ◎ E G O S	◎ ○		○ ○
6 窯業 土石	○ ○	○ S			◎ ○
7 繊維 衣服	◎ ○	◎ ◎ G S			
8 家具 木材	◎ ○	◎ ◎ G S			
9 食料品	○ ○ E O	○ ◎ ◎ G O S			
10 出版 印刷	◎ ◎ E O	○ ○ ○ E G S	◎ E		

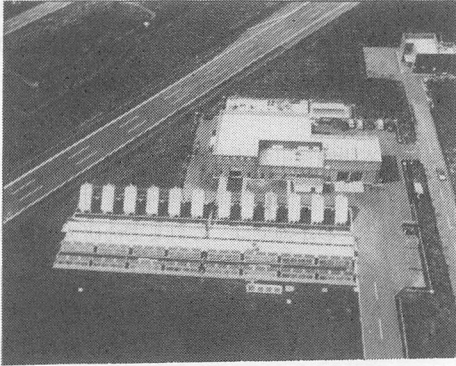
50%以上 ◎ E: 電気  
50~30% ◎ G: ガス  
30~20% ○ O: 石油  
○ S: スチーム

表3 熱・電気複合ソーラシステム(実験設備)の仕様

項目	仕	様
設計点	春秋分の南中時において集光追尾型集熱装置については、法線面直達日射強度が0.5kW/㎡、非集光固定型集熱装置については傾斜面日射強度が0.65kW/㎡を全体システムにおける設計基準とする。	
集熱装置	集光追尾型 非集光固定型 総集光面積	南北型(3m幅×6m長) 東西型(3m幅×9m長) 逆平板、真空ガラス管型 (1.8m幅×8m長) 約630㎡
蓄熱装置	蓄熱方式 蓄熱容量	熱水による顕熱方式 定格出力の1時間分
出力	電気 熱	15kW(蒸気タービン発電機5kW+フロンタービン発電機10kW) 200℃飽和蒸気45kW相当
備考	<ul style="list-style-type: none"> <li>設計値より弱い日射強度でも電気、熱エネルギーを発生しうよう構成されている。</li> <li>低温の熱エネルギーは吸収式冷凍機の駆動と給湯にも使用される。</li> </ul>	

気)の実験設備である。表3は主たる仕様をまとめたものである。この実験設備は、わが国の日射量など環境条件を考慮していくつかの工夫がなされている。例えば、次の3つの運転モードによる運転などがそれぞれである。

①通常日射運転モードは、日射条件が良く、その日



写1 熱・電気複合ソーラシステム実験設備の外観  
(筑波第2研究センター)

の集熱量で蓄圧器が規定の条件を満たすことが出来る時に用いる運転モードで、工程熱、発電（蒸気タービン、フロンタービン）、空調・給湯を行う。②低日射運転モードは、日射条件が悪く、工程熱、発電を同時に発生させることが出来ない時に用いる運転モードで、フロンタービンによる発電と空調・給湯を行う。この時は蓄圧器への蓄熱は行わない。③STAND-BY運転モードは、日射条件の悪い日が続き、蓄圧器の器内温度が相当低下している状態の後、日射条件が良くなり、コレクタによって十分集熱量が期待出来るときに用いる運転モードである。この運転モードでは、蓄圧器への蓄熱とフロンタービンによる発電、空調・給湯を行うことになる。

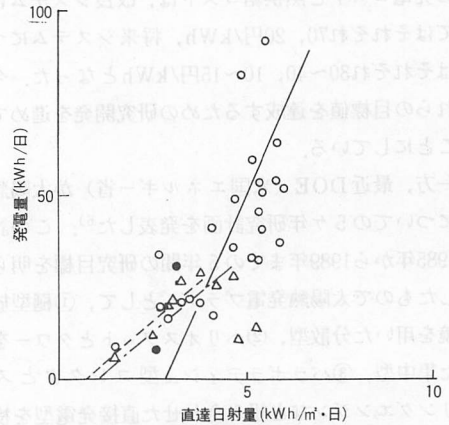
写1は熱・電気複合ソーラシステムの実験設備の全景であり、図-3は特性の例である<sup>5)</sup>。発電量と直達日射量の間には直線関係にある。これは、蒸気タービンとフロンタービンの出力が蒸気消費量と直達日射量が蒸気発生量と直線的な関係があることによる。これらの関係を式で表示すると

$$E_o = 22.73Q_d - 63.64$$

$$E_s = 9.52Q_d - 10.00$$

$$E_l = 9.52Q_d - 7.14$$

となる。ここでEは発電量 (kWh/日) で添字 o, s, l は通常日射, STAND-BY, 低日射の各運転モードを示し,  $Q_d$  は直達日射量 (kWh/m<sup>2</sup>・日) である。このシステムでは日射量のみならず蓄圧器の熱的条件を考慮して運転することにより、いわゆる太陽熱発電プラントの単一熱平衡状態で運転する運転モードより発電量の増加が望めることが分かった。また、集光追尾型にくらべ安価な非集光固定型のコレクタを組み合わせることによってシステム全体のコストダウンも



○ ——— 通常日射運転モード  
△ ——— STAND-BY 運転モード  
● ——— 低日射運転モード

図-3 直達日射量と発電量の関係の1例(熱・電気複合ソーラシステム実験設備の場合)

図っている。

### 5. 今後の展望

太陽熱発電パイロットプラントの運転研究により、その技術的可能性が実証され、また、今後解決すべき諸課題も明らかにされた。

筆者らは太陽エネルギーの多目的有効利用を目的とした熱・電気複合ソーラシステムの基礎研究を進めながら、改良システム、将来システム開発のための具体的な研究開発課題や経済性の目標値など検討した。表4はその試算結果の1部である。現状では大胆な仮定をせざるを得なかったが、改良システム、将来システム

表4 わが国における熱・電気複合ソーラシステムの経済性試算例

		改良システム	将来システム
年間稼働時間		1,200時間/年	1,600時間/年
熱供給	システム全体効率	36%	38~51%
	建設コスト	25万円/kW	13~17万円/kW
	熱供給コスト	20円/kWh	10~15円/kWh
発電	システム全体効率	9.1%	10~15%
	建設コスト	100万円/kW	44~68万円/kW
	発電コスト	70円/kWh	30~40円/kWh

- 1) 容量:100~1,000kW(熱), 数10kW(電気)
- 2) 設計基準日射強度 0.6kW/m<sup>2</sup>(直達), 0.7kW/m<sup>2</sup>(全天)
- 3) 補助熱源設備あり
- 4) システムの耐用年数: 20年

ムの発電コストと熱供給コストは、改良システムについてはそれぞれ70、20円/kWh、将来システムについてはそれぞれ30~40、10~15円/kWhとなった。今後これらの目標値を達成するための研究開発を進めて行くことにしている。

一方、最近DOE（米国エネルギー省）が太陽熱発電についての5ヶ年研究計画を発表した<sup>6)</sup>。この計画は1985年から1989年までの5年間の研究目標を明らかにしたもので太陽熱発電プラントとして、①楯型放物面鏡を用いた分散型、②ヘリオスタットとタワーを用いた集中型、③パラボラディッシュ型コレクタとスターリングエンジンなど組み合わせた直接発電型を検討し、次のような見解を示している。

①分散型は小規模プラントとして実用化を図るべきである。ただ、発電プラントとしてより産業用プロセスヒート用のプラント（熱利用プラント）として開発することが望ましい。②集中型は大規模発電プラントとして好ましいプラントである。③パラボラディッシュの直接発電型は規模の大小に大きく影響されないプラントであり、設備利用率の低い設備へ適用する発電プラントとして開発することが望ましい。

また、コストについては、1990年の目標値として熱供給システムの建設コストを9.8~11.5万円/kW、熱供給コストを8円/kWh、発電システムの建設コストを32.5~40万円/kW、発電コストを12.5円/kWhとしている。これらの目標値はいずれも既存のエネルギーコストに比肩しうる値となっており、太陽熱発電の実用化

への意気込みが窺える。なお、これらの経済性試算に併わせて、多目的計画法などによる経済性試算も行い、コスト目標値をさらに多面的に検討することも必要である。

ここ10年太陽熱発電の研究開発が積極的に行われたが、現在、国内外ともに今後の展開が注目されているところである。わが国では、これまでの研究開発の成果をベースにして太陽熱発電の実用化のための次の段階での研究計画、研究目標を設定し、その目標に向って研究開発を進める時期に来ているように思われる。

### 参 考 文 献

- 1) 堀 米孝, 谷 辰夫; 太陽熱発電の研究開発の現状と今後の展望 (総論), 昭和59年電気四学会連合大会 1-1 (1984) 1-1~1-4
- 2) 電気学会太陽エネルギー利用技術調査専門委員会; 電気学会技術報告 (II部) 第187号, (太陽エネルギー利用技術の進展) (1985) 51~54
- 3) 田中忠良, 津田 泉, 谷 辰夫; 太陽熱発電の研究開発の現状と今後の展望 (熱・電気複合ソーラシステムの現状と展望), 昭和59年電気四学会連合大会 1-4 (1984) 1-13~1-16
- 4) 谷 辰夫, 田中忠良, 沢田慎治; 熱・電気複合ソーラシステムの設計に関する考察 (補助熱源の導入) 電気学会論文誌投稿中
- 5) 田中忠良, 津田 泉, 谷 辰夫; 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結果) 電気学会論文誌 105巻 6号 (1985) 17~24
- 6) DOE Reviewing Draft Multi-Year Program Plan for Solar Thermal Electric Conversion: Solar Energy intelligence report (1985) 5~6

