太陽熱発電システムにおける集熱温度の最適設定に関する考察

正員 藤原 正純 (電総研)
正員 谷 辰夫 (電総研)

1. はじめに

太陽エネルギーの一つの特徴として、日射の非定常性がある。日射入力とは太陽の日周運動や雲の影響により時間的に変動するエネルギー源である。太陽熱発電システムは、このような変動する入力を熱エネルギーとして収集し、熱機関を用いて発電するシステムである。熱機関への入力温度を一定とするために、集熱温度は通常、一定値に設定される。従って、集熱フィールドでは、変動する日射入力を一定温度の熱出力に変換して集熱する必要がある。しかしながら、熱機関への入力温度に融通性がある場合には、日射入力に応じて集熱温度を調節し、その温度で熱機関を駆動し発電を行ったほうが、一定温度で集熱・発電した場合よりも電気出力が増大することが期待される。例えば、熱機関を二段にカスケードした複合発電システムを採用した場合には、日射強度に応じて集熱温度が二段階に選択できることになる。また、日射入力に応じて常に最適な集熱温度で集熱し、補助熱源による追加熱で熱機関へ一定温度の熱を供給するシステムも考えられる。

本論文は、このように集熱温度の選択可能なシステムを構成した場合の有効性を定量的に評価することを目的としている。複合発電を導入したソーラーシステムの実験設備に関する設計と運転特性に関する報告は既に行われているが^{(1)~(3)}、これらの報告は気象条件、集熱器特性、集熱温度、発電容量などのパラメータを限定したうえでの考察である。本論文では、集熱系のエクセルギー出力により評価を行っているため、

集熱温度の設定方法に関してより広範なパラメータカバーが可能である。

エクセルギーとは、系と外界との状態差を利用して取出し得る最大の力学的エネルギーと定義される⁽⁴⁾。太陽熱集熱器では、日射入力と外気温を与えた場合に、エクセルギー出力を最大にする集熱温度は、一意的に定まることが示されている^{(5)~(7)}。従って、環境条件に応じて集熱温度を選択した場合の有効性は、集熱系のエクセルギー出力を比較することにより、定量的に評価できることになる。集熱系の出力をエクセルギーを用いて評価することは、蓄熱系や発電系などの集熱系以外のサブシステムを非可逆性のない理想的なシステムと仮定することに相当する。

このようにエクセルギーを用いることにより、集熱系と他のサブシステムとを分離して評価し得ることになり、評価手順が大幅に簡略化される。このため、複数の集熱温度設定値を持つような複雑なシステムの評価も可能となる。当然、全体のシステムをモデル化しシミュレーションを行うことにより、より厳密な評価は可能であるが、そのようなシステムの最適化を図り相互に比較することは容易ではない。日射条件と集熱系は、システム全体にとり最も重要な要素であり、本論文では、これら二つの要素の組合せについて評価を行っており、太陽熱発電システムの設計にあたって有意義な指針を与え得ると考えられる。

2. システム構成と計算手順

〈2・1〉 システムモデル 本論文では、集熱システムとして東西一軸追尾の楕型放物面集光集熱器⁽²⁾⁽⁹⁾を集熱フィールドに配列したものを考える。具体的には幅 2.49 m、長さ 6.4 m の楕型放物面鏡によるシステム⁽⁹⁾を想定している。東西一軸追尾とは、追尾の回転軸が東西方向に平行で、その軸と開口面法線と太陽とが同一平面上にあるように追尾する方式である。シス

Optimum Plan for Setting the Heat Collection Temperature in Solar Thermal Power Plants. By Masanori Fujiwara, Member & Tatsuo Tani, Member (Energy Division, Electrotechnical Laboratory).

藤原正純：正員，電子技術総合研究所エネルギー部
谷 辰夫：正員，電子技術総合研究所エネルギー部

テムモデルとしては次のような Hottel-Whillier-Bliss モデル⁽⁸⁾を採用した。

$$T_c = T_i + \tau\alpha H_T A_a / U_L A_r + (T_i - T_a - \tau\alpha H_T A_a / U_L A_r) \times \exp(-F' U_L A_r / \dot{m} C_p) \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 T_c : 集熱温度 (集熱系出口温度),
 T_i : 集熱系入口温度, T_a : 外気温, $\dot{m}$: 質量
 流量, H_T : 日射入力, A_a : 集熱器開口面積,
 A_r : 集熱部表面積, C_p : 熱媒体比熱, F' : 集
 熱器効率係数, U_L : 熱損失係数, $\tau\alpha$: 透過
 率-吸収率積

このモデルでは、通常、熱損失係数 U_L は一定値として扱われる。しかしながら、放射損失が顕著な集熱器では、熱損失の温度依存性が強い。そこで、 U_L の温度依存性を考慮したモデルについても検討を行うこととし、 U_L について次のような二通りのモデルを設定した。

$$\text{モデル I: } U_L = \text{const} \dots\dots\dots (2)$$

$$\text{モデル II: } U_L = \sigma \varepsilon (T_m^4 - T_i^4) / (T_m - T_i) \dots\dots\dots (3)$$

$$T_m = (T_c + T_i) / 2 \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 σ : ステファン・ボルツマン定数
 $(5.67 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4})$, ε : 実効放射率

モデル I は熱損失として伝導損失が顕著な場合をモデル化しており、モデル II は放射損失が顕著な場合をモデル化している。通常の集熱器では、放射・対流・伝導の3種の熱損失が混在しており、 U_L の温度依存性はモデル I と II の中間的な振舞をすると考えられる。

また、集熱器効率係数 F' については一定値としているが、 F' は集熱部の形状と熱損失係数 U_L および集熱管と熱媒体の熱伝達率により定まる性能パラメータであり、熱伝達率は熱媒体の物性値と流速に依存する。従って、厳密には F' を温度・流量の関数として与えるべきであるが、集熱系全体の質量流量より個々の集熱器の流速を与えるには、集熱管の管径および集熱器の直並列に関する配列方法を与える必要があり、個々のケースに応じて詳細なモデル化が必要となる。また、 F' の U_L に対する依存性を考慮に入れるためには、集熱部の具体的形状を与える必要がある。本論文では、このような問題の詳細に立入るのを避けるため、 F' は一定値として計算を行った。

集熱系からの瞬時熱出力 ε_i は、次式で与えられる。

$$\varepsilon_i = \dot{m} C_p (T_c - T_i) \dots\dots\dots (5)$$

(5)式では、比熱 C_p の温度依存性は無視してい

る。その場合、集熱系の瞬時エクセルギー出力 ε_e は次式となる⁽⁶⁾。

$$\varepsilon_e = \dot{m} C_p \{T_c - T_i - T_a \log_e(T_c/T_i)\} \dots\dots\dots (6)$$

ただし、(6)式では温度単位として絶対温度を用いる必要がある。また、エクセルギー効率 η_e は次式で定義した。

$$\eta_e = \varepsilon_e / H_T A_a \dots\dots\dots (7)$$

(1)~(7)式において、 $\dot{m}$ と C_p は常に熱流量 $\dot{m} C_p$ の形で表れており、 $\dot{m} C_p$ を一括して一つの変数として扱うことが可能である。これらの式の導出において

$$\int_{T_i}^{T_c} C_p dT = C_p (T_c - T_i) \dots\dots\dots (8)$$

と仮定しているが、右辺の C_p は $T_i < T < T_c$ の温度領域における比熱の実効値を与えるものとすれば、相比熱に温度依存性がある場合にも適用し得る。その場合、 C_p は平均温度の関数となるが、計算上は $\dot{m} C_p$ を一つの変数として取扱うため、その関数形を与えなくても計算は可能である。結局、(1)~(7)式における変数は、 T_c , T_i , $\dot{m} C_p$ の3個であり、環境条件である日射入力 H_T と外気温 T_a とが与えられた場合、3個の変数のうち2個を定めれば(5)、(6)式の出力は定まることになる。以下、本論文では集熱系入口温度 T_i が外気温 T_a と等しい場合を取扱うこととし、 T_c の目標値を満足するように、日射入力に応じて熱流量 $\dot{m} C_p$ が制御されるシステムについて考察を行うこととする。 T_i を T_a よりも高温に設定するシステムや、 T_i が蓄熱量に応じて変動するシステムも当然考えられるが、本論文では T_i については最も簡単なケースとして $T_i = T_a$ の場合を取扱うこととした。

集熱系の性能パラメータは、次のように設定した。

$$F' = 0.95, \tau\alpha = 0.7, A_a/A_r = 20 \text{ (集光比)}, \\ U_L = 10 \text{ W/m}^2\text{K (モデル I)}, \varepsilon = 0.7 \text{ (モデル II)}$$

ここで、開口面積 A_a 、集熱部表面積 A_r の具体的な数値については、日射入力およびエクセルギー出力を単位開口面積あたりの値で与えるため必要がない。 C_p の値も $\dot{m} C_p$ を変数として取扱うため、同様である。これらの性能パラメータは、Hexcel 社の槌型放物面集光集熱器と同程度の性能となるように設定した⁽⁹⁾。ただし、報告されている実験結果は $T_c \leq 550 \text{ K}$ の領域に限られているため、それ以上の温度領域においてはモデル I と II とでは集熱性能にかなりの差がある。図 1(a), (b)に、それぞれのモデルについてのエクセルギー効率曲線を示した。同図では、 $T_a = T_i = 300 \text{ K}$

図 1 エクセルギー効率曲線
Fig. 1. Exergy efficiency curve.

とした。同図より、日射入力の増大に伴い、エクセルギー効率も増大するが、一定の日射入力の下では、エクセルギー効率を最大にする集熱温度は一意的に定まることがわかる。モデル I では、 U_L が一定であるため高温部での効率の低下が緩やかになっている。

次に、一定温度で集熱した場合と日射入力に応じて集熱温度を調節した場合の比較を図 2 (a), (b) に示す。同図には、一定温度 ($T_c = 670, 600$ K) で集熱した場合のエクセルギー効率 $\eta_e (T_c = \text{const})$ と、一定日射入力下におけるエクセルギー効率の最大値 η_e^{opt} およびそのときの集熱温度 T_c^{opt} を示した。図 2 における一定集熱温度は、後の計算結果からわかるように、日本の気象条件においてエクセルギー出力がほぼ最大となる値を選定した。同図より、 η_e^{opt} と $\eta_e (T_c = \text{const})$ の差は $H_T \leq 200$ の低日射時と $H_T \geq 800$ の高日射時において顕著であるが、モデル II のほうが高日射時における効率差は小さいことがわかる。これはモデル II では温度上昇に伴い熱損失係数が急激に増大することに起因している。以上より、日射入力に応じて集熱温度を調整し、常にエクセルギー効率が最大となるように集熱すれば、エクセルギー出力の積算値は増大し、この傾向はモデル I のほうが顕著であることがわかる。

〈2.2〉 気象データ 気象データとしては、HASP 標準気象データ⁽¹⁰⁾の札幌、新潟、(新)東京、高松、高知のデータを用いた。この気象データは 1 時間間隔の

図 2 エクセルギー効率と集熱温度の最適値
Fig. 2. Optimum value of exergy efficiency and heat collection temperature.

データであるため、日射入力の算出の際必要となる太陽位置は、気象データの中心時刻での位置を用いた。太陽位置の計算には Walraven 氏⁽¹¹⁾⁽¹²⁾のサブルーチンを用いた。集熱器への日射入力 H_T は、法線面直達日射量 I_{BN} と水平面散乱日射量 I_{DN} を用いて、次式により算出した⁽⁸⁾。

$$H_T = I_{BN} \sqrt{1 - \sin^2 \delta \cos^2 \theta} + I_{DH} A_r / A_a \quad \dots\dots\dots (9)$$

ここで、 I_{BN} : 法線面直達日射量、 I_{DH} : 水平面全天日射量、 δ : 太陽赤緯、 θ : 太陽時角

日射入力 H_T の頻度分布と年間累積日射入力の強度別分布とを図 3 (a), (b) に示す。図 3 (a) において、 100 W/m^2 以下の日射時間が極端に多いのは、(9)式第 2 項の散乱光の影響である。この項のエネルギー入力全体に占める割合は、かなり小さいことが図 3 (b) よりわかる。また、図 2 において効率差の著しい 200 W/m^2 以下の低日射入力は、生起確率が高いが入力エネルギー量としては小さいことがわかる。

〈2.3〉 集熱モード 以上のシステムモデルと気象条件を用いて、1 時間ごとの出力を算出するわけであるが、そのためには集熱温度 T_c の目標値を設定する必要がある。本論文では、集熱温度の設定方法として、次の三とおりのモードを考えた。

(a) 日射入力の頻度分布
(a) Frequency distribution of input solar radiation.

(b) 年間累積日射入力の強度別分布
(b) Intensity distribution of yearly cumulative input solar radiation.

図 3
Fig. 3.

- (i) SINGLE モード (S モード) 一段階の集熱温度を設定し、日射条件により設定温度が満足できない場合には、出力を 0 とする。
- (ii) DOUBLE モード (D モード) 二段階の集熱温度を設定し、日射条件によりエクセルギー出力の高いほうの設定温度で集熱を行う。
- (iii) FREE モード (F モード) 常にエクセルギー出力を最大とする集熱温度で集熱を行う。

(2.4) システム構成

以上のように集熱温度の設定方法が異なると、集熱系以外のサブシステムの構成も異なったものとなる。各集熱モードに対応するシステム構成図の例を図 4 (a)~(d)に示す。(a)図は S モードに対応するシステム構成図であり、一定温度で集熱・蓄熱を行い、熱機関へ一定温度の一定熱流量を供給するシステムである。(b)図は D モードに対応するシステム構成図であり、熱機関を 2 段にカスケードした複合発電システムを導入した場合である。日射入力に応じて 2 段階に集熱温度を選定し、集熱・蓄熱・発電を行うシステムである。(c)図は F モードに対応するシス

(a) S モードに対応するシステム構成図
(a) System composition corresponding to S mode.

(b) D モードに対応するシステム構成図
(b) System composition corresponding to D mode.

(c) F モードに対応するシステム構成図(I)
(c) System composition corresponding to F mode (case I).

(d) F モードに対応するシステム構成図(II)
(d) System composition corresponding to F mode (case II).

図 4
Fig. 4.

テム構成図であり、エクセルギー出力を最大にする温度で集熱した熱を直接熱機関へ供給するシステムである。この場合には、熱機関への入熱温度・入熱流量は日射入力に応じて変動する。このシステムでは集熱温度の変動する熱を混合せずに蓄熱することは困難であるため、蓄熱器は備えていない。(d)図も F モードに対応するシステム構成図であり、エクセルギー出力を最大にする集熱温度で集熱を行った後、補助熱源で追加熱を行い一定温度の熱として蓄熱し発電するシステムである。

このように集熱モードの違いに応じてシステム全体の構成も異なったものとなるが、本論文では集熱系以外のサブシステムには非可逆性のない理想的なものを想定しており、それらのモデル化は全く行っていない。蓄熱器・熱機関などの特性を考慮に入れる場合には、

それらの容量を集熱面積に応じて最適値に設定したうえで、各システムの出力を比較する必要がある、膨大な作業量を要することになる。本論文のように集熱系の特性のみを用いて各システムの優劣をある程度の精度で評価することは、システムの構成法を検討するうえで有意義な指針を与え得る。以下、図4の各システムの出力を比較するうえでの問題点について簡単に考察する。

集熱系以外での非可逆性については、図4の各システムが同程度の非可逆性を有すれば、出力の相対比較を行なううえでは特に問題とはならない。集熱系以外での非可逆性は(c)図のシステムが熱機関への入力が高不安定であるため、最も大きいと考えられる。(b)図のシステムも(a)図、(d)図のシステムと同一の規模を考えれば、蓄熱器・熱機関が二段に分割されるため、相対的に熱損失が大きくなり非可逆性も大きくなると考えられる。図4(a)、(b)のシステムの非可逆性は同程度と考えられる。

また、本論文では(1)式のように定常状態の式を用いて計算を行っており、システムの熱容量に起因する非定常性については無視している。熱容量が大きい場合には、システム全体が所定の温度に到達するまでに余分の熱量が必要となり出力の低下をもたらす。この点に関しても、図4の各システムが同程度の熱容量を有する場合には、出力の相対比較のうえで、特に問題とはならない。図4(c)のシステムでは蓄熱器を備えていないため熱容量は小さくなるが、他のシステムにおいても熱機関への入熱流量が変動することを許せば、蓄熱器を除外することが可能である。また、図4(d)のシステムは補助熱源を備えているため、出力が安定化し非定常性に起因する損失が減少するが、他のシステムにおいても補助熱源を導入すれば、同様の効果が期待し得る。従って、熱容量に関しては各モードにおける出力の相対比較を行なううえでは無視しても差しつかえないと考えられる。

なお本論文では、熱機関の排熱温度は外気温と等しく、排熱の有効利用という観点からの複合発電の長所については考察していない。そのような観点から複合発電を導入することは、図4(b)以外の各システムにおいても可能であり、熱機関単独の問題として扱われる。

〈2・5〉 計算手順 気象データが1時間間隔で与えられているため、計算の時間間隔も1時間とした。従って、システムの状態は、環境条件に応じて1時間ごとにステップ状に変化することになる。これはシステムの熱容量が小さく、その熱応答時間が1時間に比し

十分に短いと仮定することに相当する。各モードにおける年間エクセルギー出力 E_e は、1時間ごとのエクセルギー出力を積算することにより得られる。なお、日射入力として 1 m^2 あたりの値を与えるため、 E_e も 1 m^2 の開口面積あたりの値を算出することになる。

3. 計算結果と考察

まず、Sモードの年間エクセルギー出力 E_e を求めた。この値は当然、集熱温度 T_c の設定値により異なる。図5に東京における年間エクセルギー出力 E_e の集熱温度 T_c に対する依存性を示した。同図より、モデルⅠでは $T_c=650\text{ K}$ において、モデルⅡでは $T_c=600\text{ K}$ において E_e が最大となることがわかる。

次に、東京におけるDモードの年間エクセルギー出力 E_e の計算結果を図6(a)、(b)に示す。同図では、横軸に低温集熱温度 T_{c1} 、縦軸に高温集熱温度 T_{c2} を取り、 E_e を等高線で示した。図6(a)より、モデルⅠでは $T_{c1}=765\text{ K}$ 、 $T_{c2}=490\text{ K}$ において、図6(b)よりモデルⅡでは $T_{c1}=655\text{ K}$ 、 $T_{c2}=490\text{ K}$ において E_e は最大となることがわかる。図5および図6(a)、(b)におけるピークの形状はかなり緩やかであるため、気象条件の年々の変動により、S、Dモードにおける集熱温度設定値が、最適値よりずれることによる影響は小さいと考えられる。

各モード、各地域における年間エクセルギー出力 E_e の計算結果をまとめると表1のようになる。同表におけるS、Dモードの集熱温度は E_e の最大となる値を選択した。すなわち、各地域における図5、図6の最大値を抽出して比較を行った。集熱温度はSモードではモデルⅠで $640\sim 700\text{ K}$ 、モデルⅡで $590\sim 620\text{ K}$ であった。同表より、Dモードを採用することにより、Sモードに対しモデルⅠで $7\sim 10\%$ 、モデルⅡで $5\sim 7\%$ の出力の増大が見込まれ、Fモードでは、モデルⅠで $19\sim 27\%$ 、モデルⅡで $13\sim 20\%$ の増

図5 Sモードにおける年間エクセルギー出力

Fig. 5. Yearly exergy output of S mode.

(a)

(b)

図6 Dモードにおける年間エクセルギー出力
Fig. 6. Yearly exergy output of D mode.

大が見込まれることがわかる。モデルⅡのほうが出力の増大する割合が小さいのは、図2における高日射時の効率差がモデルⅠに比して相対的に小さくなっていることに起因している。すなわち、モデルⅡでは集熱温度の増大に伴い急激に熱損失係数 U_L が増大する

ため、図1に示すように高温部での効率の低下がモデルⅠに比べ著しいことに起因している。通常の集熱器の U_L はモデルⅠとⅡの中間的な温度依存性をもつと考えられるので、D、Fモードの有効性も両者の中間の値になると考えられる。

このように熱損失係数 U_L の温度依存性がD、Fモードの有効性にかかなり影響を及ぼすことが判明したので、次に集熱器の断熱性能が向上し熱損失係数が低減した場合について計算を行った。その結果を表2に示す。表2は $U_L=5 \text{ W/m}^2\text{K}$ (モデルⅠ)、 $\varepsilon=0.4$ (モデルⅡ) の場合の計算結果である。熱損失係数が低減したことにより、Sモードにおける集熱温度はモデルⅠで $860\sim 1,000 \text{ K}$ 、モデルⅡで $670\sim 710 \text{ K}$ と表1に比して高くなる。また、D、Fモードでの E_e の増大する割合は、表2のほうが表1よりも全体的に小さくなっており、熱損失係数の減少に伴いD、Fモードの有効性は低下する傾向のあることがわかる。

以上より、日本の標準的気象条件の下でのDモードの有効性は4~10%程度、Fモードの有効性は9~27%程度と見積られる。これらの値は気象条件および集熱器性能により異なるが、その傾向として熱損失係数の小さいほど、あるいは放射損失が相対的に顕著なほど有効性が低下することが判明した。このように集熱温度を調節することの効果は、さほど顕著ではない。図2に示すようにその効果は低日射時と高日射時に顕著であるが、図3(b)に示すようにそのような日射入力積算値は比較的小さく、出力全体に対する寄与が小さいことが、その主な理由である。図3(a)に示すように低日射状態の生起確率が高いので、集熱温度を調節するシステムでは集熱可能な時間は長くなるが、出力の積算値にはあまり寄与しないことがわかる。

次に、以上の結果と図4の各システムとの対応について考察する。図4(b)のシステムはDモードに対応し、複合発電システムを導入しているが、この場

表1 年間エクセルギー出力の比較 $U_L=10$ (モデルⅠ)、 $\varepsilon=0.7$ (モデルⅡ)

Table 1. Comparison of yearly exergy output $U_L=10$ (model I), $\varepsilon=0.7$ (model II).

		年間日射入力 (MJ/m ²)	年間エクセルギー出力 (MJ/m ²)		
			S モード	Dモード (対Sモード比)	Fモード (対Sモード比)
札幌	モデルⅠ ($U_L=10$)	4,017	553	611 (1.10)	666 (1.20)
	モデルⅡ ($\varepsilon=0.7$)		611	653 (1.07)	688 (1.13)
新潟	モデルⅠ ($U_L=10$)	2,984	413	451 (1.09)	526 (1.27)
	モデルⅡ ($\varepsilon=0.7$)		446	473 (1.06)	533 (1.20)
東京	モデルⅠ ($U_L=10$)	3,210	466	507 (1.09)	588 (1.26)
	モデルⅡ ($\varepsilon=0.7$)		494	523 (1.06)	585 (1.18)
高松	モデルⅠ ($U_L=10$)	4,082	614	664 (1.08)	730 (1.19)
	モデルⅡ ($\varepsilon=0.7$)		642	678 (1.06)	727 (1.13)
高知	モデルⅠ ($U_L=10$)	4,384	695	746 (1.07)	833 (1.20)
	モデルⅡ ($\varepsilon=0.7$)		714	750 (1.05)	812 (1.14)

表 2 年間エクセルギー出力の比較 $U_L=5$ (モデル I), $\varepsilon=0.4$ (モデル II)
 Table 2. Comparison of yearly exergy output $U_L=5$ (model I), $\varepsilon=0.4$ (model II).

		年間日射入力 (MJ/m ²)	年間エクセルギー出力 (MJ/m ²)		
			S モード	Dモード (対Sモード比)	Fモード (対Sモード比)
札幌	モデルⅠ (U _L =5)	4,017	800	869 (1.09)	922 (1.15)
	モデルⅡ (ε=0.4)		738	781 (1.06)	814 (1.10)
新潟	モデルⅠ (U _L =5)	2,984	597	642 (1.08)	723 (1.21)
	モデルⅡ (ε=0.4)		539	568 (1.05)	605 (1.12)
東京	モデルⅠ (U _L =5)	3,210	667	714 (1.07)	803 (1.20)
	モデルⅡ (ε=0.4)		595	625 (1.05)	668 (1.12)
高松	モデルⅠ (U _L =5)	4,082	872	933 (1.07)	1,002 (1.15)
	モデルⅡ (ε=0.4)		772	809 (1.05)	844 (1.09)
高知	モデルⅠ (U _L =5)	4,384	980	1,039 (1.06)	1,134 (1.16)
	モデルⅡ (ε=0.4)		853	890 (1.04)	927 (1.09)

合、蓄熱系・配管系・熱機関などが二段に分割されることになり、熱損失が相対的に増大するため、その有効性は本解析結果よりも更に低下する。従って、二段構成の複合発電システムの導入は、システム構成が複雑になりコスト増を招くうえに、出力の向上も1割以下と見込まれるので、積極的に導入する根拠に乏しいと考えられる。熱機関を更に三段、四段と結合させるシステムも考えられるが、そのようなシステムの出力増大の上限は F モードで与えられ、9~27%と算定される。従って、熱機関を多段に結合しても経済性向上に対する寄与は小さいと結論される。ただし、排熱の有効利用という観点より熱機関の多段結合が必要な場合には、蓄熱系を分割すれば D モードあるいは F モードに近い値の出力の増大が期待し得るが、その割合はあまり大きくないので蓄熱系、配管系の設計には十分に配慮することが必要である。

図 4 (c) のシステムについては、熱機関への入力が高不安定であるため、熱機関の性能が低下し F モードの採用による 2 割程度の出力増大の可能性は相殺されてしまう可能性が強い。

図 4 (d) のシステムについては、非可逆性と熱容量が図 4 (a) のシステムと同程度であるので、F モードの有効性がそのまま当てはまると考えられる。このシステムはシステム構成が単純であるため、コスト増を招く要因が少ない、補助熱源を導入しているため出力が安定化する、既設の火力発電設備に導入することが可能であるなどの長所を有しており、有望なシステム構成法であると考えられる。特に、図 4 (b) のシステムと比較した場合、出力の向上と建設費の低下が可能であり、経済性に優れたシステムであると結論される。また、太陽エネルギーを中低温加熱に、化石燃料などの補助熱源を高温用の加熱に用いることは、エネルギーの有効利用の面からも望ましいシステムである。

4. ま と め

太陽熱発電システムにおける集熱温度の最適設定法に関してエクセルギーを基に考察を行った。日本各地の一年間の標準気象データを入力として、2種類の集熱系のモデルを設定し、集熱温度の設定値が一段階の場合、二段階の場合および集熱温度に制限がない場合について、集熱系からの年間エクセルギー出力を求めた。

その結果、日本各地の標準的気象条件の下では、一段階の集熱温度を設定した場合に比し、二段階の集熱温度を設定し、日射入力に応じてエクセルギー出力の高いほうの集熱温度を選択した場合には、年間エクセルギー出力の増大は 4~10% 程度であることが判明した。また、常にエクセルギー出力を最大とする集熱温度で集熱を行った場合には、年間エクセルギー出力は 9~27% 程度の増大が見込まれることが示された。これらの値は気象条件および集熱器性能により異なるが、その傾向として熱損失係数の小さいほど、あるいは放射損失が相対的に顕著なほど有効性が低下することが判明した。

これらの結果より、二段階に集熱温度を設定するために二段構成の複合発電システムを導入することは、出力の増大が 1 割以下と見積られ、システムの複雑さを勘案するとシステム構成上の有効性に乏しいと結論される。一方、集熱フィールドでエクセルギー効率を最大とする集熱温度で集熱を行い、補助熱源で追加熱を行った後、熱機関へ一定温度の熱を供給するシステムでは、2 割程度の出力の増大が可能であるうえに、システム構成が単純である、出力が安定化するという長所があり、有効性の高いシステム構成法であると結論される。ただし、本論文では複合発電の導入に伴う排熱の有効利用に関する効果は考慮に入れていない。しかし、この観点より複合発電を導入する場合にも、

後者のシステム構成を採用するほうが有効性は高くなる。

終わりに、本研究を進めるにあたり終始有益な御助言をいただいた本所エネルギー部太陽エネルギー研究室の方々に厚く感謝の意を表します。

(昭和61年1月8日受付, 同61年7月3日再受付)

文 献

- (1) 谷:「熱・電気複合ソーラシステムの設計に関する一考察」, 電学論B, **103**, 159 (昭58-3)
- (2) 田中・沢田・津田・谷:「熱・電気複合ソーラシステムの開発(第1報 実験設備の構成と基礎特性)」, 同上B, **104**, 505 (昭59-8)
- (3) 田中・津田・沢田・谷:「熱・電気複合ソーラシステムの開発(第2報 実験設備の電気負荷優先モードにおける運転特性)」, 同上B, **104**, 513 (昭59-8)
- (4) エネルギー変換懇話会: エネルギー基礎工学, 6 (昭54-12)

オーム社

- (5) A. Bejan, et al.: "Second Law Analysis and Synthesis of Solar Collector Systems", *ASME Journal of Solar Energy Engineering*, **103**, 23 (1981)
- (6) 鈴木:「平板型コレクターの最適温度・流量条件」, 太陽エネルギー, **8**, 5 (1982)
- (7) M. Fuziwara: "Exergy Analysis for the Performance of Solar Collectors", *ASME Journal of Solar Energy Engineering*, **105**, 163 (1983)
- (8) J. A. Duffie & W. A. Beckman: *Solar Energy Thermal Processes*, 146, 185 (1974) John Wiley and Sons
- (9) V. E. Dudley & R. M. Workhoven: "Performance Testing of the Hexcel Parabolic Trough Solar Collector", Sandia Laboratories, SAND 78-0381 (1978)
- (10) 松尾・横山・石野・川元: 空調設備の動的熱負荷計算入門, 131 (昭55) 日本建築設備士協会
- (11) R. Walraven: "Calculating the Position of the Sun", *Sol. Energy*, **20**, 393 (1978)
- (12) B. J. Wilkinson: "An improved FORTRAN program for the rapid calculation of the solar position", *ibid.*, **27**, 67 (1981)