直接蒸気発生 (DSG) 集熱器を用いた太陽熱利用ハイブリッド型 CO₂ 回収 H₂O タービン発電システムの特性と経済性評価

正員 朴 炳 植 (大阪大学大学院工学研究科)

非会員 有 馬 剛 (日本電気(株))

正員 小 杉 隆 信 ((財)地球環境産業技術研究機構)

Characteristics and Economics Evaluation of a CO₂-Capturing Hybrid-Type Power Generation System Using Direct-Steam-Generation Solar Collector

Pyong Sik Pak, Member (Osaka University), Takashi Arima, Non-member (NEC Corporation),
Takanobu Kosugi, Member (Research Institute of Innovative Technology for the Earth)

A direct-steam-generation (DSG) collector is expected to make it possible to improve solar thermal collection efficiency and the economics of a solar thermal power generation system. In this paper, characteristics and economics of two kinds of power generation systems using a DSG and a conventional collector are investigated: a CO₂-capturing hybrid-type power generation system (Hybrid system) and a conventional solar thermal power generation system (STPG system). In evaluation, the total area of collector is assumed to be 10 ha and the capacity of each system was determined so as to minimize the unit power generation (UPG) cost. It has been shown through simulation study under assumed premises that for the STPG system the UPG cost is improved from 24.4 to 19.4 yen/kWh and that the net generated power quantity is increased by 30.8% by using a DSG collector. For the Hybrid system the UPG cost is improved from 15.8 to 14.9 yen/kWh and the net generated power quantity is increased by 17.5%. It has also been shown that CO₂ reduction amount is increased from 2,106 to 2,759 t-C/y in STPG system and from 6,282 to 7,380 t-C/y in Hybrid system. The Hybrid system using a DSG collector is expected to be one of the most desirable power generation systems under the CO₂ emission constraint in the future, since among investigated systems (a) it has the highest fuel-base power-generation-efficiency as high as 67.2%; (b) its UPG cost is the lowest; (c) it emits no CO₂; and (d) its CO₂ reduction effect is the largest.

キーワード：太陽熱エネルギー、DSG 集熱器、ハイブリッド型発電、CO₂回収、H₂O タービン、発電単価

1. はじめに

化石燃料の消費量を大幅に削減し、CO₂排出量を大幅に削減することは地球温暖化防止のためおよび持続可能な社会の構築のために、極めて重要度の高い課題となっている。CO₂排出の少ない持続可能な社会の構築のためには、太陽エネルギーを利用する発電システムの構築が不可欠となる。しかし、今のところ大規模発電では太陽光発電に比べ経済性の点で優れている太陽熱利用発電システムにおいても、日射条件に極めて恵まれた地域を除いて経済性の点で大きな問題がある⁽¹⁾。このため、太陽熱エネルギーと化石燃料の両方を利用するハイブリッドタイプの発電システムを構築し、広範囲に利用してゆくことは、現在の化石燃料依存の発電システムから持続可能な発電システムの構築の橋渡し

をする発電システムとして、極めて重要なシステムになると考えられる。

このような観点から、筆者らは太陽熱エネルギーを利用する CO₂回収ハイブリッド型発電システムについて研究してきた^{(2)~(5)}。

太陽熱利用ハイブリッド型発電システムでは太陽熱集熱器を用いて飽和蒸気を製造して利用する構成となっているので、集熱器の特性はハイブリッド型発電システムの経済性、発電特性に大きな影響を与える。近年、ドイツ等を中心とした欧州などで、太陽熱を利用して水から蒸気を直接発生させる集熱器 (DSG 集熱器) の研究が盛んに行われており、太陽熱発電システムの経済性を大幅に改善できるものと期待されている⁽⁶⁾。

本論文では、太陽熱利用 CO₂回収ハイブリッド型発電シ

システムにおいて DSG 集熱器を用いたときの発電特性および経済性の改善の度合いについて検討した結果について論じる。また、比較のため従来型太陽熱発電システムにおいて DSG 集熱器を用いたときの発電特性および経済性の改善の度合いについて検討した結果についても述べる。

検討に当たっては、日射条件により発電システムの立地が強く制約されるようでは太陽熱利用発電システムの普及性に問題が生じる。このことを考慮し、発電システムは世界の平均日射量以下の地点に立地するものとして検討することとした。

2. DSG 集熱器の特徴

SEGS など従来の太陽熱発電用ソーラー集熱器では、集熱管内部を流れる熱伝達媒体として高温耐性に優れた油が用いられている。このため、集熱器を利用して太陽熱から蒸気を生成する際には熱交換器が不可欠となる。これに対して、DSG 集熱器では熱媒体は水あるいは蒸気 (H_2O) であり、熱交換器を介すことなく太陽熱により水から直接蒸気を発生させることができる。このような特性から DSG 集熱器には利点として次のような特徴が挙げられる。⁽⁶⁾

- 熱交換器における温度差による熱損失をなくすることができる。
- 熱交換器が不要であるのでその分の設備コストを削減することができ、発電コストの削減につながる。
- 熱媒体として H_2O を用いているので、油を熱媒体として用いている従来の集熱器と比べて、環境汚染・火災の危険性がない。
- 熱媒体に油を用いている集熱器では製造蒸気温度は 400°C がほぼ上限となるが、DSG 集熱器を用いることでこの上限を超えることも可能である。
- 熱交換用の油の交換費用や不凍用の費用を削減でき、発電コストの削減につながる。

上記のように DSG 集熱器を利用すると熱交換器における温度差による熱損失をなくすることができるため、他の条件が同一ならこの温度差だけ集熱器での集熱温度を下げることも可能となり、これは集熱器の効率を向上させることになるので⁽⁷⁾、仮に太陽熱利用発電システムの発電効率が同一で良いなら、その分だけ日照条件が悪くても立地できると言えることになり、日射条件による立地制約が大幅に緩和されることに注意されたい。

従来型集熱器と DSG 集熱器を用いた場合の蒸気発生装置の構成の相異を図 1 に示す。太陽熱利用蒸気発生プロセスについては、図 1(a) のように従来型集熱器を用いる場合には、熱媒体が油であるために熱交換器を用いて蒸気を製造する。DSG 集熱器を用いる場合には、熱媒体は H_2O であり、図 1(b) のように熱交換器なしで直接蒸気を製造する。

集熱器の太陽熱集熱効率は、集熱管内の熱媒体平均温度に大きく依存することが知られている⁽²⁾⁽⁷⁾。この平均温度を T_{ave} で表すと、従来型集熱器では熱媒体 (油) の比熱が近似的に一定であると見なせるので、 T_{ave} は熱媒体の入口温

度と出口温度の単純平均となる。すなわち、図 1 に示すシステム投入蒸気の温度を T_s 、システムからのリターン水の温度を T_w とし、熱交換器における高温側および低温側の温度ドロップをそれぞれ ΔT_h および ΔT_l とすると、従来型集熱器の集熱管平均温度 T_{ave}^{conv} は単純に次式で表される⁽³⁾⁽⁷⁾。

$$T_{ave}^{conv} = \{(T_s + \Delta T_h) + (T_w + \Delta T_l)\} / 2 \quad \dots\dots (1)$$

一方、DSG 集熱器では熱媒体である H_2O が液体から気体へと相変化するので、集熱管平均温度の算出にあたっては H_2O の比熱の変化、言い換えると水・蒸気の温度・エンタルピ特性を考慮して推定する必要がある。すなわち、システム投入蒸気 (ここでは飽和蒸気) のエンタルピを H_s 、システムからのリターン水 (一般には圧縮水) のエンタルピを H_w 、リターン水が飽和水の状態になるときのエンタルピを H_{sw} で表し、そのときの温度を T_s で表すと (これはシステム投入蒸気温度と等しい)、DSG 集熱器の集熱管平均温度 T_{ave}^{DSG} は、集熱管での集光エネルギーが一樣と仮定すれば

$$T_{ave}^{DSG} = \frac{(T_s + T_w)(H_{sw} - H_w) + 2T_s(H_s - H_{sw})}{2(H_s - H_w)} \quad (2)$$

で求められる。

以上のことから、太陽熱利用蒸気発生装置への入・出口温度が同一であっても T_{ave} の値は従来型集熱器と DSG 集熱器とで異なり、従って太陽熱集熱効率も異なることに注意する必要がある。

3. 検討対象システムの構成

本論文で検討の対象とした二種の太陽熱利用発電システムの構成を図 2 に示す。図 2(a) に示す従来型太陽熱発電シ

(a) 従来型集熱器を利用する場合

(b) DSG 集熱器を利用する場合

図 1 集熱器による太陽熱利用蒸気発生装置の構成の相異

Fig. 1. Difference in structure of steam generation device for utilizing solar thermal energy according to collector.

システムでは、太陽熱利用蒸気発生装置によって過熱蒸気を製造し、これを蒸気タービン発電システムの作動流体として用いて発電を行う。図2(b)に示すハイブリッド型CO₂回収H₂Oタービン発電システムでは、太陽熱利用蒸気発生装置によって飽和蒸気を製造し、これをCO₂回収H₂Oタービン発電システムの作動流体として用いる。ここで、両システムで太陽熱利用製造蒸気の状態を過熱蒸気と飽和蒸気と異なった状態としているのは次の理由による。即ち、太陽熱利用蒸気製造量あたりの発電出力を増大させるためには、タービンでの膨張仕事が大きくなるように製造蒸気の圧力を高くする、すなわち製造蒸気の状態を飽和蒸気に近づけることが望まれる。ただし、製造蒸気により蒸気タービンを直接駆動する場合には、タービン入口蒸気の圧力が高すぎるとタービン出口付近での蒸気の湿度が増加してタービン材料の強度上問題となるので、湿度を10%以下とする必要がある。一方、提案CO₂回収H₂Oタービン発電システムでは、燃焼器で太陽熱利用製造蒸気を高温のH₂Oガスとするので、太陽熱利用製造蒸気の状態が飽和蒸気であってもタービン内部で蒸気の凝縮は起こらないからである。図2(b)中のCO₂回収H₂Oタービン発電システムの構成は図3に示す通りである。CO₂回収H₂Oタービン発電システムに関しては文献(8)に詳しい説明があるので省略する。

なお、太陽熱利用ハイブリッド型発電システムでは、図2(b)に示すように、太陽熱利用蒸気発生装置とCO₂回収H₂Oタービン発電システムの間に蒸気アキュムレータを設置し、蒸気を過剰に製造できる場合には蒸気アキュムレータに蓄熱し、逆に日射量が少ない時には蒸気を取り出すことを可能としている⁽⁴⁾。蒸気アキュムレータでは、蓄熱時にアキュムレータ内部の圧力が上昇し流入蒸気は飽和水の状態になって蓄えられ、放熱時には内部圧力が低下し飽和水が飽和蒸気の状態になって取り出される。従来型太陽熱発電システムで蓄熱装置を設けていないのは、蓄熱装置から過熱蒸気を取り出すことは困難であるからである。

4. 発電特性と経済性推定結果

〈4・1〉 推定にあたっての前提条件 特性の評価は検討システムを日射条件のそれほど良くない地点に立地するものとして検討することとし、仮想的に大阪と同一の日射条件を持つ地点に立地する場合を想定することにした。日射データとしては大阪地区の標準気象データから得られる日射データを用いて、1時間毎の年間の運転シミュレーションを行うこととした。表1に大阪地区の標準気象データから得られた季節別の直達日射量のデータを示す。同表に示すように年間平均全日射量は3.63 kWh/m²dで、これは世界の平均的な値である4.2 kWh/m²dに比べ14%小さい値となっていることが分かる。

従来型集熱器およびDSG集熱器を用いる場合の各システムの種々の特性についての推定に当たっては、集光面積を10 ha一定という条件下で発電単価を最小とする発電機

端出力値を探索し、最適条件下における特性を推定することにした。

従来型発電システムの特性推定のために用いた外生変数・外生パラメータを表2に示す。また、CO₂回収H₂Oタービン発電システムの特性推定のために用いた外生変数・外生パラメータを表3に示す。

発電単価を求めるのに用いたコストデータは表4に示し

図2 検討システムの構成
Fig. 2. Structure of systems investigated.

図3 CO₂回収H₂Oタービン発電システムの構成
Fig. 3. Structure of CO₂-capturing H₂O turbine power generation system.

表1 大阪市における日射データ
Table 1. Solar radiation energy in Osaka city.

夏期平均直達日射量 (kWh/m ² d)	3.01
冬期平均直達日射量 (kWh/m ² d)	2.55
中間期平均直達日射量 (kWh/m ² d)	2.80
年間平均直達日射量 (kWh/m ² d)	2.79
年間平均全日射量 (kWh/m ² d)	3.63

た通りである。これらのデータは、文献(9)～(14)などを基にして、以下に述べるように筆者らが特に想定したものを除いて、これらの文献からそのまま引用したものである。

従来型の集熱器単価については、アメリカ・ネバダ州に設置されている最新の SEGS で用いられている集熱器では 200 ドル/m²(1ドル=110円として換算すると 2.2万円/m²)程度であるが、今後のシステムの標準化・大規模化、導入量の増大、メーカー間の競争等により、さらに 40 % 程低下すると予測されている例もあることなどを考慮して⁽⁹⁾、熱交換器を含む建設コストを 1.4 万円/m²と想定した。DSG 集熱器は熱交換器を必要としないことから従来型の集熱器と比べて建設コストを低くすることができると推測されるが、特性の相違による経済性の比較が行えるよう、ここでは DSG 集熱器と従来型の集熱器の建設コストは同値とした。

酸素製造装置および CO₂ 液化装置を除く H₂O タービン発電システムの機器単価は、最近の天然ガスコンバインドサイクル発電システム設備費が 750 ドル/kW であるとの報告⁽¹⁰⁾を参考にして 10 万円/kW と想定し、このほかに酸素製造装置および CO₂ 液化装置の建設費⁽¹¹⁾を加えることとした。

蒸気アキュムレータは内容積が数千 m³以上の大容量となることを考慮して、その建設単価は文献(12)の値(内容積 50m³のとき 800 万円)から 2/3 乗則により内容積 2000m³規模の建設費を推計した値である 4.7 万円/m³とした。2000m³規模以上の大規模では、技術的問題、信頼性の問題から 2000m³程度の規模の蒸気アキュムレータを複数設置するのが現実的であると考えられることから、蒸気アキュムレータのこれ以上の大規模化に対する規模の経済性はないものとした。

燃料単価 0.8 円/MJ は現状の LNG 輸入単価 (CIF) の

表 2 従来システムの特性推定のための外生変数・外生パラメータ

Table 2. Exogenous variables and parameters used for estimating characteristics of the conventional system.

(a) 外生変数	
発電機端出力	1~10 MW
蒸気タービン入口過熱蒸気圧力	14 kg/cm ² a
蒸気タービン入口過熱蒸気温度	346 °C
復水器出口圧力	0.1 kg/cm ² a
集熱器面積	10 ha
(b) 外生パラメータ	
集熱器の光学的効率	0.77
集熱器の集光比	26
集熱管表面の放射率	0.19
熱交換器高温側温度ドロップ*	20 °C
熱交換器低温側温度ドロップ*	20 °C
タービン断熱効率	90 %
タービン出口湿度	10 % 以下
ポンプ断熱効率	75 %
発電機効率	98 %
所内動力消費率	5 %

*:従来型集熱器のみ

約 2 倍になるものと想定した。石油や天然ガスなどの化石燃料資源の枯渇が顕在化してくるより将来時点においては、燃料単価はより高騰するものと思われるが、このようなときには太陽熱を利用する本提案システムが化石燃料のみを利用する発電システムに比べ、より有利となることはいうまでもない⁽¹³⁾。

回収した CO₂ の処理方法としては立地地点からここでは 100 km 離れた地点へ輸送して地中貯留あるいは海洋投棄を行う場合を想定し、そのコストを 8000 円/t-C とした⁽¹⁴⁾。

〈4・2〉集熱器による製造蒸気量の相異の推定結果 同じ日射量でも従来型集熱器と DSG 集熱器では製造可能蒸気量が異なる。1 例として、システム投入蒸気温度すなわち蒸気アキュムレータ入口蒸気温度を 270 °C、発電機端出力を 7 MW、蒸気アキュムレータの容積を 5000 m³と

表 3 ハイブリッド型発電システムの特性推定のための外生変数・外生パラメータ

Table 3. Exogenous variables and parameters used for estimating characteristics of hybrid-type power generation system.

(a) 外生変数	
発電機端出力	1~10 MW
集熱器面積	10 ha
太陽熱利用製造飽和蒸気温度	270 °C
蒸気アキュムレータ入口 飽和蒸気温度	270 °C
蒸気アキュムレータ流出側 蒸気圧力 (終圧)	8 kg/cm ² a
復水器出口圧力	0.2 kg/cm ² a
復水器出口温度	45.45 °C
タービン入口温度	1300 °C
燃料ガスの成分とその容積組成	CH ₄ のみ
燃料ガスおよび燃焼用酸素の温度	15 °C ; 25 °C
(b) 外生パラメータ	
集熱器の各種パラメータ	表 2(b) と同じ値
熱交換器温度ドロップ*	同上
蒸気アキュムレータ容器内全容積	3000~6000 m ³
流入側圧力損失	0.7 kg/cm ²
流出側圧力損失	0.4 kg/cm ²
蓄熱完了時の蒸気部容積比	0.1
放熱損失による圧力損失率	0.5 %/d
タービン断熱効率	90 %
タービン出口湿度	10 % 以下
燃焼器燃焼効率	99 %
燃焼器での酸素過剰率	1 %
燃焼器圧力損失率	5 %
ノズル圧力損失率	20 %
酸素製造原単位	0.34 kWh/Nm ³
酸素圧縮機断熱効率	75 %
再生器の温度効率	75 %
再生器蒸気および燃焼ガス圧力損失率	2 % ; 10 %
排熱ボイラターミナル温度差	30 °C
排熱ボイラ排ガス圧力損失	0.05 kg/cm ² a
発電機効率	98 %
従来式補機の動力消費率	5 %
冷凍機 COP	3.5
冷凍機出口ガス温度	7 °C
CO ₂ 圧縮機断熱効率	80 %
CO ₂ 圧縮機中間冷却温度	60 °C

*:従来型集熱器のみ

した場合のハイブリッド型 CO₂回収 H₂O タービン発電システムの5月15日における1時間毎の製造蒸気量・集熱効率の変化を図4に示す。図に示すように従来型集熱器で製造可能な蒸気量の約10%増の蒸気量をDSG集熱器では製造できると推定されており、これは熱交換器における熱落差に起因する熱損失がないことによる効率向上による増加である。

表4 経済性評価に用いたコストデータ
Table 4. Data used for evaluation of economics.

従来型集熱器建設単価 (熱交換器を含む)	1.4 万円/m ²
DSG 集熱器建設単価	1.4 万円/m ²
H ₂ O タービン発電システム 機器単価	10 万円/kW
蒸気タービン発電システム 機器単価	7 万円/kW
酸素製造装置建設単価	8200 万円/(t-O ₂ /h)
CO ₂ 液化装置建設単価	31000 万円/(t-C/h)
蒸気アキュムレータ建設単価	4.7 万円/m ³
耐用年数	15 年
資本の金利	5 %
保守費率	5 %/年
燃料単価	0.8 円/MJ
回収 CO ₂ 処理単価	8000 円/t-C

(a) 製造蒸気量

(b) 集熱効率

図4 集熱器における製造蒸気量および集熱効率の時間的変化の例(5月15日)

Fig. 4. Example of steam quantity generated in collectors and their thermal collection efficiency (on May 15).

〈4・3〉 従来型太陽熱発電システムの特性推定結果 図5に集光面積10 ha一定で発電機端出力を変化させた場合の従来型太陽熱発電システムの特性変化を示す。

図5(a)は正味発電電力量と設備利用率について、図5(b)は正味エクセルギー効率について示してある。発電電力量とエクセルギー効率は発電機端出力を上げていくと、従来型集熱器からDSG集熱器に変える場合の増加量が增大する。これは、発電機端出力を上げることにより利用出来る蒸気量が増え、その結果、DSG集熱器による製造蒸気量の増加の影響が大きくなるためである。しかし、発電機端出力を上げることは、設備利用率を低下させることになり、経済性を悪化させるので経済性の観点からは最適な発電機端出力を決定する必要がある。

(a) 正味発電電力量および設備利用率

(b) 正味エクセルギー効率

(c) 発電単価

図5 従来型太陽熱発電システムの特性

Fig. 5. Estimated characteristics of the conventional solar thermal power generation system.

次に、発電単価の推定を行った。発電単価の推定に当たってはここでは発電機端出力を 1 MW から 10 MW の間で 1 MW 単位で変化させて行った。図 5(c) にその推定結果を示す。図 5(c) から、従来型集熱器を用いた場合より DSG 集熱器を用いた場合の方が、発電単価が安くなっているのが分かる。

〈4・4〉 太陽熱利用ハイブリッド型発電システムの特性推定結果 太陽熱利用ハイブリッド型発電システムでは、発電機端出力のほか蒸気アキュムレータの容積によっても発電特性および経済性が大きく変化する。

図 6 に蒸気アキュムレータの容積 5000 m³一定で発電機端出力を変化させた場合のハイブリッド型発電システムの特性変化を示す。図 6(a) は正味発電電力量と設備利用率について、図 6(b) は正味エクセルギー効率と燃料ベースの発電効率 (正味発電電力量を燃料熱量で除した値) について示してある。燃料ベースの発電効率を除いたいずれの特性も発電機端出力を上げていくと、従来型集熱器から DSG 集熱器に変える場合の増加量が增大する。この理由については、従来型太陽熱発電システムの場合と同じである。一方、燃料ベースの発電効率に変化がないのは、CO₂回収 H₂O タービン発電システム自体は同じであるので燃料ベースで見た場合の発電効率の変化は H₂O タービン発電システムへの投入蒸気の条件の影響をうけ発電出力の変化は表 3 のパラメータが一定という条件下では影響を受けないからである。

本システムでは、経済性の観点から、最適な発電機端出力のほかに蒸気アキュムレータの容積を決定する必要がある。

発電単価の推定を行った結果は次のとおりである。発電単価の推定に当たっては、蒸気アキュムレータ全容積を 3000 m³から 6000 m³の間で、発電機端出力を 5 MW から 8 MW の間で 1 MW 単位で変化させて行った。図 7 に推定結果を示す。図から分かるように、従来型集熱器を用いる場合には、蒸気アキュムレータ容積が 4000 m³で発電機端出力 6 MW、DSG 集熱器を用いる場合には、蒸気アキュムレータ容積が 5000 m³で発電機端出力 7 MW という条件が経済性の観点から見た場合の最適条件になると推測される。

〈4・5〉 検討システムの特性推定結果の比較 従来型太陽熱発電システムおよびハイブリッド型発電システムの発電単価最小化条件下において求められた種々の特性をまとめた結果を表 5 に示す。

表 5 に示すように、従来型太陽熱発電システムに対しては、従来型集熱器を用いる場合には発電機端出力が 8 MW の時に発電単価が 24.4 円/kWh となるのに対し、DSG 集熱器を用いる場合には発電機端出力が 9 MW の時に発電単価が 19.4 円/kWh という結果が得られた。すなわち、発電単価は 20.5 % の低減効果があり、正味発電電力量は年間 11.7GWh から 15.3GWh へと 30.8 % の増大効果があると推定された。

ハイブリッド型発電システムに対しては、従来型集熱器

(a) 正味発電電力量および設備利用率

(b) 正味エクセルギー効率および燃料ベースの発電効率

図 6 ハイブリッド型発電システムの特性 (蒸気アキュムレータ容積 5000m³の場合)

Fig.6. Estimated characteristics of hybrid-type power generation system when steam accumulator volume is 5000 m³.

表 5 発電単価最小下における検討システムの特性比較

Table 5. Comparison of characteristics of the two systems when unit power generation cost is minimized.

検討システム	従来型太陽熱発電システム		ハイブリッド型発電システム	
集熱器の種類	従来型	DSG	従来型	DSG
発電単価 (円/kWh)	24.4	19.4	15.8	14.9
発電機端出力 (MW)	8	9	6	7
正味発電電力量 (GWh/y)	11.7	15.3	34.9	41.0
設備利用率 (%)	17.3	20.1	81.6	82.2
蒸気アキュムレータ容積 (m ³)	—	—	4000	5000
入口蒸気温度 (℃)	—	—	—	270
出口蒸気終圧 (kg/cm ² a)	—	—	—	8
太陽熱利用製造蒸気エンタルピ (Tcal/y)	44.6	58.8	52.9	61.2
投入蒸気エンタルピ (Tcal/y)	43.0	56.1	45.2	53.1
利用燃料エンタルピ (Tcal/y)	—	—	44.6	52.5
エクセルギー効率 (%)	12.2	16.0	24.8	27.5
燃料ベースの発電効率 (%) (真発熱量ベース)	—	—	67.2	67.2
CO ₂ 削減量 (t-C/y)	2106	2754	6282	7380

を用いる場合には、発電機端出力が6 MWの時に発電単価が15.8円/kWh、DSG集熱器を用いる場合には発電機端出力が7 MWの時に発電単価が5.7%安価な14.9円/kWhという結果が得られ、DSG集熱器を用いるハイブリッド型発電システムの発電単価が最も小さくなると推定されることを示した。一方、正味発電電力量は年間34.9GWhから41.0GWhへと17.5%の増大効果があると推定されている。また、ハイブリッド型発電システムでは発電を行うのに、従来型集熱器を用いるシステムでは45.2 Tcal/y、DSG集熱器を用いるシステムでは53.1 Tcal/yの太陽熱エネルギーを活用でき、共に発電システムでの投入化石燃料エネルギー以上のエネルギーを太陽熱エネルギーでまかなえること、およびDSG集熱器を利用する場合は従来型集熱器を利用する場合よりも同じ集熱器面積で17.5%多い太陽エネルギーを活用できると推定されていることも分かる。

さらに、本研究では太陽熱利用によるCO₂削減効果の推定も行った。CO₂削減量の推定に当たっては従来型石油火力発電システムとの比較を行うことにし、CO₂排出原単位は0.18 kg-C/kWhとした⁽¹⁵⁾。

2種類の検討システムのDSG集熱器導入によるCO₂削減効果を比較すると、従来型太陽熱発電システムでは2,106から2,754と648 t-C/yの増大、ハイブリッド型発電システムでは6,282から7,380と1,098 t-C/yのCO₂削減量を

増加させることができるという結果となった。すなわち、従来型太陽熱発電システムよりもハイブリッド型発電システムにDSG集熱器を用いた場合の方がCO₂削減効果が1.69倍高いと言える。

5. おわりに

本論文では、太陽熱発電に用いられる集熱器として直接蒸気を製造できるDSG集熱器を導入したシステムの特性の推定を行った結果について述べた。検討システムとしては、太陽熱利用ハイブリッド型CO₂回収H₂Oタービン発電システム(ハイブリッド型発電システム)のほか従来型太陽熱発電システムも取り上げた。

検討システムの特性比較の際には集光面積10 haという前提条件のもとで、世界平均の日射量より少し低めの大阪の日射データを利用して両システムの経済性を考慮し、発電単価を最小とする条件を探索し、その条件下における比較を行った。検討結果から従来型太陽熱発電システムに対しては、従来型集熱器を用いる場合の24.4円/kWhからDSG集熱器を用いる場合の19.4円/kWhと発電単価は20.5%の低減効果があり、正味発電電力量は30.8%の増大効果があると推定された。

ハイブリッド型発電システムに対しては、従来型集熱器を用いる場合には15.8円/kWh、DSG集熱器を用いる場合には14.9円/kWhと発電原価は5.7%の低減効果があり、DSG集熱器を用いるハイブリッド型発電システムの発電単価が最も小さくなると推定されることを示した。また、正味発電電力量は年間34.9GWhから41.0GWhへ17.5%の増大効果、CO₂削減効果は6,282から7,380 t-C/yへ1,098 t-C/yの増大効果があると推定された。

検討した結果から、DSG集熱器を用いるハイブリッド型発電システムは、発電に際し半分以上の太陽熱エネルギーを利用することができ、消費する化石燃料の燃料ベースの発電効率は67.2%の高効率であり、検討システムの中では最も発電単価が安く、発電電力量も最も大きく、CO₂削減量も最も大きいので、CO₂排出制約下あるいは石油や天然ガスなどの化石燃料資源の枯渇化が顕在化してくる将来時点における有望な発電システムの1つとして期待される。

(平成11年12月6日受付、同12年10月13日再受付)

文 献

- (1) 田中・土井ほか:「21世紀に亘る環境・エネルギー問題解消に太陽熱発電システムが果たす役割 - 第1部 太陽熱発電システム技術の現状 -」, 太陽エネルギー, 22, 5, 32~38 (平8-9)
- (2) 朴・八川・鈴木:「太陽熱利用ハイブリッド型CO₂全回収火力発電システムの提案とその評価」, 電学論B, 115, 6, 669~675 (平7-6)
- (3) 朴・鈴木:「太陽熱利用ハイブリッド型CO₂フリー火力発電システムの特性評価 - 大阪市の日射条件に基づいて -」, 電学論B, 116, 6, 671~677 (平8-6)
- (4) 朴・小杉・鈴木:「蓄熱槽を持った太陽熱ハイブリッド型CO₂回収火力発電システムの特性と経済性評価」, 電学論B, 117, 12, 1545~1552 (平9-12)
- (5) 小杉・朴・鈴木:「世界各地の異なった日射条件下における太陽エネ

発電単価(円/kWh)

発電単価(円/kWh)

図7 ハイブリッド型発電システムにおける
発電単価の推定

Fig. 7. Estimated unit power generation cost of hybrid-type power generation system.

- ルギー利用発電システムの出力および発電単価の評価」, 電学論 B, 118, 3, 246~253 (平 10-3)
- (6) E.Zarza, J.I.Ajona, K.Hennecke: "PROJECT DISS Development of a New Generation of Solar Thermal Power Stations", *Proceedings of the Eighth International Symposium on Solar Thermal Concentrating Technologies*, 397~415 (1996-10)
- (7) 日本太陽エネルギー学会編: 太陽エネルギーの基礎と応用, オーム社 (昭 53)
- (8) 朴・鈴木: 「飽和蒸気を作動流体として利用する CO₂回収無公害高効率発電システム」, 電学論 B, 113, 3, 266~272 (平 5-3)
- (9) Pilkington Solar International: *Status Report on Solar Thermal Power Plants*, Köln (1996)
- (10) H. Ishitani and T. B. Johansson (Eds.): *Energy Supply Mitigation Options*, IPCC Working Group II, IPCC Second Assessment Report, 589~647 (1996)
- (11) 本藤・内山: 火力発電プラントの環境対策コスト分析, 電力中央研究所研究報告, Y92009 (平 5-8)
- (12) 鈴木・伊東編: エネルギー貯蔵システム, エネルギー・資源学会 (平 4-9)
- (13) 小杉・朴・鈴木: 「炭素排出制約下における太陽エネルギー利用発電システムの経済性の比較評価」, 電学論 B, 119, 5, 541~549 (平 11-5)
- (14) (財) エネルギー総合工学研究所: 地球環境から見た総合的化石燃料サイクル分析調査手法の調査 (III), 新エネルギー・産業技術総合開発機構 平成 7 年度調査報告書 NEDO-GET-9507 (平 8-3)
- (15) (財) 新エネルギー財団: 新エネルギー等導入促進基礎調査 (3) -近畿地域における新エネルギーの導入促進策に関する調査, 平成 9 年度通商産業省資源エネルギー庁委託業務成果報告書 (平 10-3)

朴 炳 植 (正員) 昭和 19 年 9 月 18 日生. 43 年 3 月大阪大学工学部電気工学科卒業. 同大学院博士課程を修了して, 48 年 4 月同大学工学部電気工学科助手, 63 年 1 月助教授, 平成 4 年 4 月情報システム工学科勤務となり, 現在に至る. 各種システムのモデリングやアナリシスに関する研究に従事. 工学博士. エネルギー・資源学会, ガスタービン学会, 計測自動制御学会などの会員.

有 馬 剛 (非会員) 昭和 50 年 8 月 26 日生. 平成 10 年 3 月大阪大学工学部情報システム工学科卒業. 同大学院前期課程を修了し, 12 年 4 月日本電気 (株) に入社して現在に至る. 社会問題解決のためのコンピュータソフトウェア技術の応用に関する研究開発に従事.

小 杉 隆 信 (正員) 昭和 45 年 9 月 21 日生. 平成 5 年 3 月大阪大学工学部情報システム工学科卒業. 同大学院前期課程を修了して, 7 年 4 月同大学先端科学技術共同研究センター助手. 12 年 4 月 (財) 地球環境産業技術研究機構勤務となり, 現在に至る. コンピュータモデルによるエネルギーシステムの評価に関する研究に従事. 博士 (工学). エネルギー・資源学会, 国際太陽エネルギー学会などの会員.