

# 超臨界 CO<sub>2</sub> を用いた太陽熱発電利用システムの特性評価

山口 博司, 張 信榮, 采野 大介

## Performance estimation of solar Rankine system using super-critical CO<sub>2</sub> for power generation

Hiroshi YAMAGUCHI, XingRong ZHANG, and Daisuke UNENO

In order to effectively utilize renewable energy and settle environmental pollution problem, solar energy is used to power Rankine cycle of employing carbon dioxide as working fluid for power generation, heat supply, and air conditioning etc. The paper presents a study on some basic characteristics of the Rankine cycle, including the effect of solar radiation on power generation, heat quantity obtained from the cycle, and environmental aspect. The experimental prototype has been designed and constructed. The set of experimental set-up is mainly comprised of evacuated solar collector, pressure relief valve, CO<sub>2</sub>-water heat exchangers, CO<sub>2</sub> feed pump, and cooling tower. The test was carried out in November, which approximately represents an average solar radiation and air temperature during one year. The results show that power generation, heat recovery and saved petroleum quantity are all directly proportional to the solar radiation and are increased with the value of solar radiation. In addition, the objective of this study is to investigate system behavior and to estimate its efficiency.

**Key Words :** Solar Energy, Rankine Cycle, Carbon Dioxide, Solar Collector, Supercritical

### 1. 緒言

近年, 温室効果ガスによる地球温暖化などの環境汚染問題や, 化石燃料の枯渇問題を背景に化石燃料に代わる新しいエネルギー源の開拓, 実用化に関する研究が行われている. その中で, 太陽エネルギーは, 地球上ほぼ全体に降りそそいでおり, そのエネルギー量は他の自然エネルギーと比較して圧倒的に大きく無尽蔵であるため, 有効利用に関する多くの研究および実用化<sup>(1) (2) (3)</sup>がなされている. 一方, 温室効果ガス排出量の削減を達成するために, エネルギーを効率的に利用するコージェネレーションシステムや, 空調システムにおける, CO<sub>2</sub> そのものを自然媒体として利用するヒートポンプに関する研究および実用化<sup>(4)</sup>がなされている. 本研究では再生可能エネルギーの有効利用と環境汚染問題の同時解決に貢献することを念頭に置き, 太陽エネルギーを用い, CO<sub>2</sub> を自然媒体として利用した, ソーラーCO<sub>2</sub> ランキンシステム (SCRS) を構築し, そのシステムとしての, 熱出力特性, 電力出力特性, システム効率, 環境保全効果の評価といった基礎的な調査を行うことを目的とした.

### 2. SCRS の概要

図 1. に SCRS の概要図を示す. 提案する SCRS は, 真空管式ソーラーコレクタ, 発電タービン, 高温熱交換部, 低温熱交換部および CO<sub>2</sub> ポンプの 5 要素により構成される. 全体は閉じた系であり, CO<sub>2</sub> が作動流体として封入されている. 動作原理について以下に述べる. 太陽エネルギーはソーラーコレク

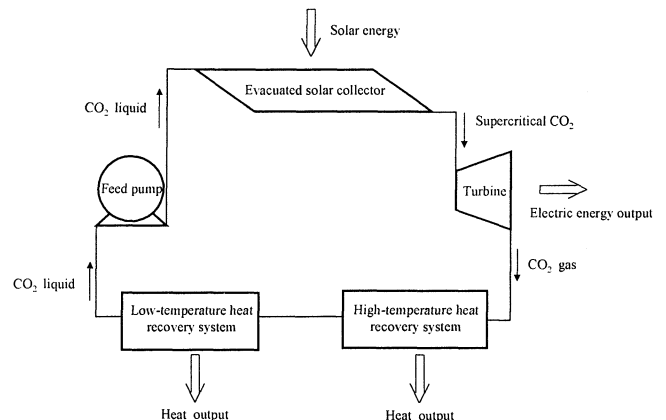


Fig.1 Outline of Solar CO<sub>2</sub> Rankine system

タによって熱エネルギーとして収集され, CO<sub>2</sub> を加熱する. この過程において, コレクタ内において CO<sub>2</sub> は高圧となり, 超臨界状態に達する. タービンを回転させ, 発電機を駆動させることで電気エネルギーを出力すると同時に CO<sub>2</sub> は膨張し, 減圧される. 高温側, 低温側の熱交換部により CO<sub>2</sub> の熱を吸収し液化させる. 吸収した熱を, 給湯および空調などに利用する. CO<sub>2</sub> ポンプにより加圧し, 液化 CO<sub>2</sub> をソーラーコレクタに送る. 以上の過程の繰り返しにより, CO<sub>2</sub> ランキンサイクルが形成される. また, SCRS の特徴としては, 太陽エネルギーから電気エネルギーと熱エネルギーを同時に取り出すことができる点, 作動流体である CO<sub>2</sub> の性質上, 200°C程度の中温度でランキンサイクルを形成できる点, および, 発電において CO<sub>2</sub> による直接発電を行うことにより発電用

の作動流体を用いないため、2 次系を必要とせず、装置の小型化が図れる点<sup>(5)</sup>があげられる。

### 3. SCRS 実験試験機および実験方法

#### 3.1 SCRS 実験試験機

実験試験機は、閉ループ構造となっており、図 2 にその概形を示す。CO<sub>2</sub> 充填量は 6.8kg である。現在、発電タービンは開発検討中であるため、装置にはタービンが設置されていないが、CO<sub>2</sub> を減圧させるために、膨張弁を代替として設けている。弁の開度は任意に調節できる。ソーラーコレクタは真空管式で設置面積 30 m<sup>2</sup>、有効面積 9.6 m<sup>2</sup> であり、熱を吸収する表面には選択吸収膜処理を施し、熱の吸収率は 92.7%、放射率は 1.93% である。熱交換器 1 および 2 は、ともにシェルアンドチューブ型熱交換器を用い、伝熱面積はそれぞれ 0.14m<sup>2</sup>、0.62m<sup>2</sup> である。熱交換器 1 では、循環させた水により CO<sub>2</sub> と熱交換を行い、水が吸収した熱はクーリングタワーによる冷却水により熱交換器 3 で熱交換され放熱される。熱交換器 2 では、外部設備によりあらかじめ冷却された冷水により CO<sub>2</sub> と熱交換を行い、CO<sub>2</sub> を液化させる。CO<sub>2</sub> を流動させるポンプはダイヤフラムポンプを用い、CO<sub>2</sub> の流量はポンプのインバータにより回転数を調節することで、変化させることが可能である。CO<sub>2</sub> の温度と圧力を、ソーラーコレクタ出口、膨張弁出口、熱交換器 1 および 2 出口、CO<sub>2</sub> ポンプ出口の合計 5 箇所にて測定し、各測定位置を番号 1 から 5 で示す。CO<sub>2</sub> ポンプ出口に質量流量計を設け、質量流量を測定する。気象データは、全天日射量と外気温度を測定する。また、SCRS による発電量と比較するための太陽電池（有効面積 0.96m<sup>2</sup>）を設け、その出力電力をパワーメータにより測定する。各測定データは、コンピュータに格納する。実験装置の詳細は参考文献<sup>(6)</sup> <sup>(7)</sup> に示します。

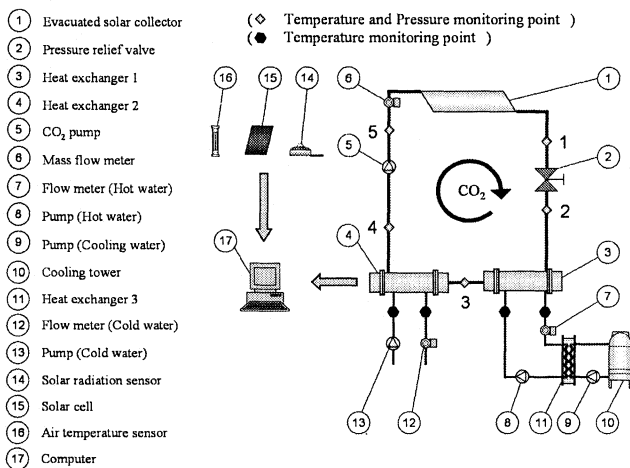


Fig.2 Experimental equipment

#### 3.2 実験方法

今回の実験は SCRS の基礎的な挙動を知るために、膨張弁の開度、各冷却水の流量、冷水の温度、CO<sub>2</sub> ポンプの出力を一定とした。

### 4. 実験結果と考察

#### 4.1 運転挙動について

例として、快晴であった 11 月 8 日の運転状態（9 時から 17 時まで）における日射量、CO<sub>2</sub> の圧力、温度、質量流量の時間変化を図 3~5 示す。

図 3 より、日射は滑らかな変化を示し、陰りが少ない。日照時間は 6 時 30 分頃から、17 時までであった。図 4 より、高圧側は日射の時間変化に伴った変化を示しており、12 時付近において最高 9.8MPa を示した。図 5 より、T<sub>1</sub> は、圧力と同様に日射に時間変化に伴った変化を示しており、12 時付近において最高 135°C を示した。また、質量流量も緩やかでは

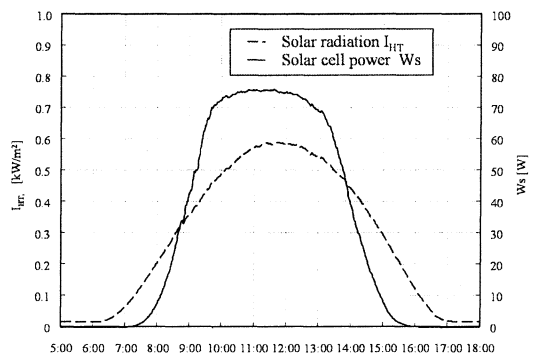


Fig.3 Solar radiation and solar cell power data

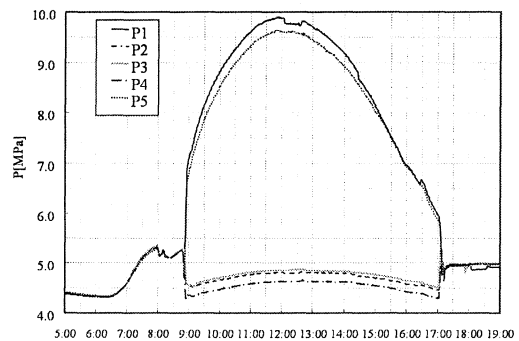


Fig.4 CO<sub>2</sub> pressure

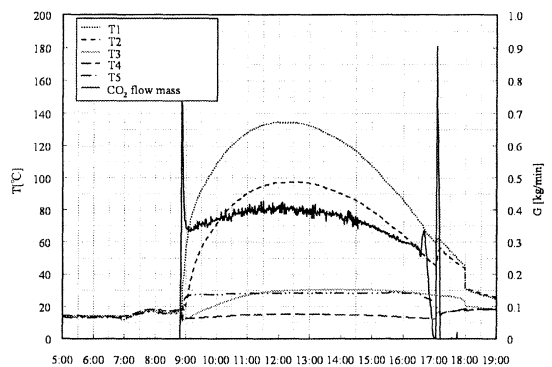
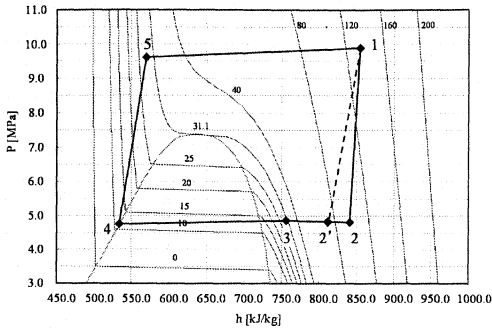


Fig.5 CO<sub>2</sub> temperature and flow mass


 Fig.6 Mollier diagram of CO<sub>2</sub> at 12 o'clock

あるが、日射の時間変化に伴った変化を示した。

圧力、温度および質量流量は、日射量の変化が影響することが分かる。つまり加熱量が増加すると、液体からの状態変化が促進され、ソーラーコレクタ内の圧力が上昇し、流動も促進されることで、質量流量も増加すると考えられる。

#### 4.2 サイクルの能力評価手法（1）について

本研究において、CO<sub>2</sub>の熱物性値は熱物性プログラム PROPATH V12.1 によって求める。これより、各測定部におけるCO<sub>2</sub>のエンタルピ  $h_{1\sim 5}$  [kJ/kg] を求め、SCRS の評価を行う。例として、11月8日の12時におけるモリエル線図を図3に示す。集熱量  $Q_{in}$  [kW] はCO<sub>2</sub>の質量流量  $G$  [kg/s] を用いて、

$$Q_{in} = G(h_1 - h_5) \quad (1)$$

で表される。また、発電量の評価において、仮想的にタービン効率85%の1段タービンがあると考えた。図3の  $h_2'$  はタービンがある場合である。予想発電量  $W_t$  [kW] は、

$$W_t = G(h_1 - h_2') \quad (2)$$

で表される。

図3より、高圧側ではCO<sub>2</sub>は超臨界状態に達し、超臨界CO<sub>2</sub>ランキンサイクルが形成できていることが示された。CO<sub>2</sub>の質量流量は0.007kg/sであったため、 $Q_{in}=1.94$  kW、 $W_t=0.25$  kWであった。このときの日射量から、変換効率を求めると、集熱効率34.6%、発電効率4.5%であった。このときの、太陽電池の変換効率は13.4%であるので、総合的には、SCRSの方が高効率に太陽エネルギーを変換できていることが判明した。また、太陽電池の変換効率の最大値は13%程度までであるが、最適運転状態においては、SCRSの変換効率は総合65%程度まで高められることが可能である。

#### 4.3 サイクルの能力評価手法（2）について

コレクタの1日当たりの日射量  $Q_I$  [MJ] は、単位面積あたりの日射量  $I_{HT}$  [kW/m<sup>2</sup>] と有効面積  $A$  [m<sup>2</sup>] との積より導出できる。

$$Q_I = \int_I I_{HT} A dt \quad (3)$$

また、物性プログラム PROPATH を用い、各測定部

より得た温度と圧力のデータより各点のCO<sub>2</sub>のエンタルピを導出した。これより、コレクタ集熱量  $Q_{in}$  [MJ] は、CO<sub>2</sub>の質量流量  $G$  [kg/s] とコレクタ前後のエンタルピ差より導出した。

$$Q_{in} = \int_I G(h_1 - h_5) dt \quad (4)$$

また、PROPATH を用いコレクタ出口の温度  $T_1$  [K] と圧力  $P_1$  [MPa] よりコレクタ出口のCO<sub>2</sub>エンタルピ  $S_1$  [kJ] を導出する。膨張弁は等エンタルピ変化であるので、膨張弁出口のCO<sub>2</sub>エンタルピ  $S_2'$  [kJ] は  $S_1$  と等しくなる。 $S_2'$  と膨張弁出口圧  $P_2$  [MPa] よりタービン予想出口温度  $T_2'$  [K] を導出し、 $P_2$  [MPa] と  $T_2'$  [K] よりタービン予想出口エンタルピ  $h_2'$  [kJ/kg] を導出した。

タービンの1日当たりの予想発電量  $W_T$  [MJ] は、コレクタ出口のエンタルピ  $h_1$  [kJ/kg] とタービン予想出口エンタルピ  $h_2'$  [kJ/kg] との差より導出できる。タービンの発電効率を80%と仮定すると以下の式となる。

$$W_T = 0.80 \times \int_I G(h_1 - h_2') dt \quad (5)$$

これより、システムの1日当たりの予想発電効率  $\eta_{II}$ 。すなわち、太陽エネルギーを電気エネルギーに変換する効率は以下の式より得られる。

$$\eta_{II} = \frac{W_T}{Q_I} \quad (6)$$

システム効率  $\eta_s$ 、すなわち、吸収した太陽エネルギーと日射量  $Q_I$  の比率は以下の式より得られる。

$$\eta_s = \frac{Q_{in}}{Q_I} \quad (7)$$

SCRS の環境保全効果を考える。先に述べたように、SCRS は太陽エネルギーから電気エネルギーと熱エネルギーを同時に取り出すことができる。すなわち、太陽エネルギーよりタービンによる発電量  $W_T$  [MJ] と給湯器に使用できる伝熱量  $Q_w$  [MJ] が取り出せるのである。SCRS により得られた電気エネルギーと熱エネルギーの総熱量を原油量に換算して原油量をどの程度削減できたかを見積もる。ここで、発電は一般的な火力発電を想定し、その発電効率を40%として発電量を換算した。また、給湯はボイラを想定し、その効率を80%として水への伝熱量を換算した。原油の1Lit 当たりの発熱量は38.2MJ である。以上より、SCRS を1日稼働させた場合における原油換算量  $G_c$  [Lit] は、以下の式より得られる。

$$G_c = \left( \frac{W_T}{0.4} + \frac{Q_w}{0.8} \right) / 38.2 \quad (8)$$

SCRS の基本的なシステム特性に気象条件が及ぼ

す影響を評価するため、冷水の温度および流量、温水の流量を一定値に調節し、さらに CO<sub>2</sub> ポンプの回転数を一定値に固定した。本実験においては、冷水の温度を 7°C、流量を 300l/h、温水の流量を 300l/h と設定した。また、ポンプの回転数は 60Hz とした。代表的な 1 1 月のデータを用い SCRS の挙動を示す。気象条件がシステムに及ぼす影響を評価する。気象条件は様々な天候における 1 日の積算日射量とした。

図 7 に 1 日の積算日射量と積算コレクタ集熱量との関係を示す。日射量が大きいとコレクタ内の CO<sub>2</sub> がより温められ、コレクタ前後でエンタルピ差が増加する。また、日射量が大きければ、コレクタ内

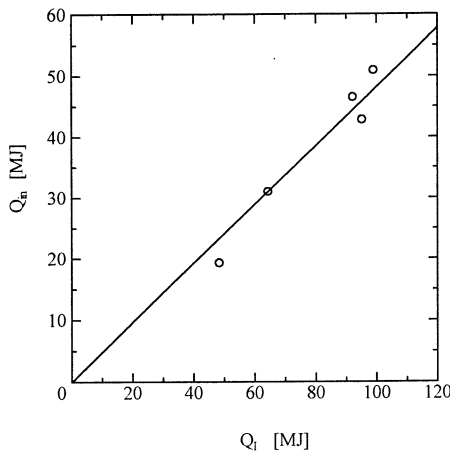


Fig. 7 Heat quantities absorbed into CO<sub>2</sub>

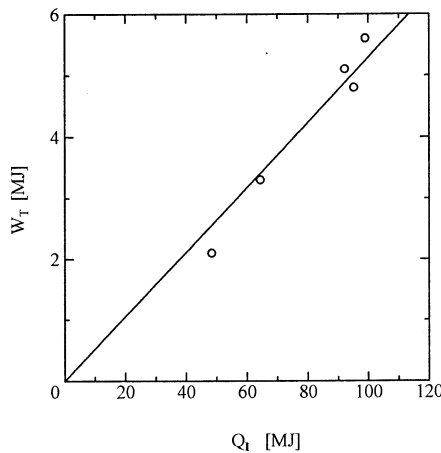


Fig.8 Variation of power generation

で完全な超臨界状態が形成されるため、CO<sub>2</sub> 流量も増加する。コレクタ集熱量はコレクタ前後のエンタルピ差と CO<sub>2</sub> 流量に依存することが (2) 式からも言えるので、これらの要因により、図 7 のように日射量とコレクタ集熱量は正の相関を示すと考えられる。図 7 のデータをまとめた。このシステムの効率

$\eta_s$  は 48.0%をとることができ。

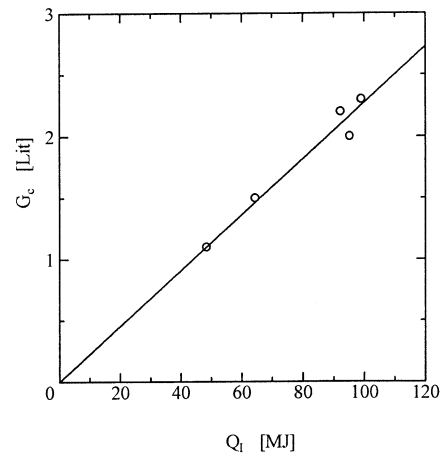


Fig. 9 Petroleum quantity possibly saved

図 8 に 1 日の積算日射量と積算タービン予想発電量との関係を示す。日射量が増えるとコレクタ内の CO<sub>2</sub> がより温められ、コレクタ出口の圧力が高まる。よって、コレクタ出口エンタルピとタービン予想出口エンタルピとのエンタルピ差が増加する。また、日射量が大きければ CO<sub>2</sub> 流量も増加する。(5) 式からも、タービン予想発電量はコレクタ出口とタービン予想出口のエンタルピ差と CO<sub>2</sub> 流量に依存するといえるので、以上より、図 8 のように日射量とタービン予想発電量は正の相関を示すと考えられる。図 8 のデータをまとめた。予想発電効率  $\eta_{TI}$  は 6.0%をとることができ。

図 9 に 1 日の積算日射量と 1 日の原油換算量との関係を示す。(8) 式より原油換算量は、システムの出力であるタービンによる発電量  $W_T$  [MJ] と熱交換器における水への伝熱量  $Q_w$  [MJ] より換算している。日射が高まると、発電量は増加し、また、系内の CO<sub>2</sub> がより熱せられるため熱交換器への伝熱量も増加する。よって、図 9 のように、日射量と原油換算量も正の相関を示す。

## 5. 結言

新方式の自然エネルギー利用の発電方法である、SCRS の試験機の運転実験の結果、

- ・ CO<sub>2</sub> の圧力、温度および質量流量は日射量の変化に伴った変化を示し、その最高値は 9.8MPa, 135°C, 0.42kg/min (0.007kg/s) であった。
- ・ 集熱効率は 34.6%, 予想発電効率は 4.5%であり、太陽電池の変換効率 13.4%と比較して、総合的な変換効率においては SCRS の方が高効率であった。

今後、SCRS の稼働時間における知見、より高効率にするための運転方法の検討、およびシステムとしての熱収支の解析、ソーラーコレクタにおける CO<sub>2</sub>

への伝熱メカニズムの解明などを実施したい。

### 謝辞

本研究は、文部科学省学術フロンティア推進事業「次世代ゼロエミッション・エネルギー変換システム」の支援を受けた。ここに記して謝意を表す。

### 参考文献

- 1) 星朗, 齋藤武雄; 高効率ソーラーランキンサイクルシステムの開発, 太陽/風力エネルギー講演論文集, (2002), 343-346.
- 2) 齋藤武雄; ソーラーパルスタービン発電システムに関する研究, 太陽/風力エネルギー講演論文集, (2003), 75-76.
- 3) 齋藤武雄; ソーラーオーガニックランキンサイクルシステムに関する研究, 太陽エネルギー, (2004), 55-60.
- 4) 橋本克巳; CO<sub>2</sub> ヒートポンプの開発研究, 伝熱, 39, (2000), 16-19.
- 5) 荒井康彦; 超臨界流体のすべて, (2002), テクノシステム.
- 6) H. Yamaguchi, X. R. Zhang, K. Fujima, M. Enomoto, and N. Sawada; An experimental investigation on thermodynamic cycle powered by solar energy using carbon dioxide, Solar Energy, in press.
- 7) X.R. Zhang, H. Yamaguchi, K. Fujima, M. Enomoto, and N. Sawada; A Feasibility Study of CO<sub>2</sub>-based Rankine Cycle Powered by Solar Energy, JSME International Journal, Ser. B, 2005, in press.