作動流体として超臨界 CO₂ を用いたソーラーランキンシステムの研究 -発電部最適化研究-

Solar Rankine Cycle System using a Supercritical Carbon Dioxide as a Working Fluid -Optimization Study on Power Generation System-

○学 木戸春允 (同大院) 正 岩本悠宏 (同大)
牛小東 (STU) 山崎晴彦 (同大院)
正 山口博司 (同大)

Harunobu KIDO, Doshisha University, Tatara Miyakodani 1-3, Kyotanabe City, Kyoto 610-0332
Yuhiko IWAMOTO, Doshisha University, Tatara Miyakodani 1-3, Kyotanabe City, Kyoto 610-0332
Xiao-dong NIU, 243 Daxue Road, Shantou, Guangdong, P.R.China
Haruhiko YAMASAKI, Doshisha University, Tatara Miyakodani 1-3, Kyotanabe City, Kyoto 610-0332
Hiroshi YAMAGUCHI, Doshisha University, Tatara Miyakodani 1-3, Kyotanabe City, Kyoto 610-0332

Recently, Solar energy attracts much attention as a clean energy resource due to the increasing environmental concerns of human being. CO₂ is attractive as a working fluid instead of R134a, because GWP of CO₂ is much less than of R134a. Solar CO₂ Rankine System (SCRS) has been proposed by one of the authors, which can generate electrical and thermal energy by using solar energy as an energy resource and carbon dioxide as a working fluid. In order to optimize the SCRS, it is significantly important to investigate the performance of the turbine under the supercritical state of CO₂. In the present study, the turbine was made by our laboratory taking into consideration the effect of the supercritical CO₂. From the experimental results, it was found that the stable operation of the turbine was possible. And, the mass flow rate and the pressure difference between the inlet and outlet of the turbine affected to the performance.

Key Words: Solar energy, Carbon dioxide, Rankine cycle, Turbine

1. 緒言

近年、地球温暖化やオゾン層の破壊などの環境問題や化石燃料の枯渇などのエネルギー問題を背景に、化石燃料を用いない自然エネルギーを活用したクリーンなエネルギー開発が望まれる。自然エネルギーの中でも、太陽エネルギーのエネルギー量は他の自然エネルギーと比較して極めて膨大であるため、その有効利用に関する研究が行われてきた⁽¹⁾。また同時に、地球環境保全の観点から、代替フロンに替わる自然冷媒にも注目が集まっている。中でも CO₂ は、現在の冷媒の主流である代替フロンと比較して、地球温暖化係数が 1000 分の 1 以下であるため、環境負荷が非常に小さい。また、無毒、不燃性、常温で安定など優れた性質を示す。以上より、熱源として太陽エネルギー、作動流体として CO₂ を用いたソーラーCO₂ランキンシステム(SCRS)が提案され、SCRS の基本的なシステム特性の把握がなされてきた⁽²⁾。

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の両方を得ることが可能なシステムであり、集熱部、発電部、熱交換部および駆動部の 4 つの構成要素からなる。実用化を考えたシステム最適化運転のためには SCRS の各構成要素それぞれの特性把握および最適化が必要不可欠である。そのため、発電部に焦点を絞り、本研究では、超臨界 CO₂ を用いた際のタービンの駆動特性について調査した。

2. モデル装置

2-1 システムの概要

Fig. 1 に本研究で用いた装置の概略を示す。Fig. 1 に示すようにヒーター加熱管 (外径 21.7 mm, 厚さ 1.65 mm, 長さ 6 m の銅製の円管の周囲にシリコンゴムヒーター (坂口電熱製) を巻いたもの) を設置し、等熱流束条件での CO₂ の加熱を行った。ヒーターの最大出力は 3300W であり、その出力をスライダックにて調節した。タービンに関しては超臨界に適した反動型ラジアルタービンを試作した。タービンの構造については 2-2 節で詳述する。熱交換部は、2 つの熱交換器から構成され、CO₂ を安定して液化させるために、水により

2 段階に冷却した。また、駆動部にはフィードポンプを用い、CO₂ を閉ループ系でシステム全体に駆動させた。

測定項目は CO₂ の温度、圧力および質量流量である。CO₂ の温度と圧力はそれぞれ T 型熱電対 (測定誤差±1.0) および圧力発信器 (測定誤差±0.2) により、Fig.1 に示すヒーター出口①、タービン出口②、熱交換器 1 出口③、熱交換器 2 出口④、ポンプ出口⑤の計 5 箇所測定した。質量流量を流量計 (測定誤差±0.1) によって測定した。またエンタルピーやエントロピーなどの熱物性値は、熱物性計算ソフト (PROPATH⁽³⁾) を用いて、圧力と温度から算出した。

Fig. 1 Schematic of SCRS

2-2 試作タービン

SCRS において、タービン入口で CO₂ は超臨界状態となる。そのため、高温・高圧に加え低粘度の状態となり、超臨界 CO₂ に適したタービンの開発が必要となる。Fig. 2 に本研究で用いたタービンの概要を示す。本研究では、安定的に発電を行うために圧力差を運動エネルギーに変換する反動型ラジアルタービンを用いた。反動型ラジアルタービンは、Fig. 2 におけるノズル①により得られる衝動力に加え、流体が羽根

車②において膨張し、その圧力差で羽根車を回転させる構造である。外壁シェル④は耐圧を考慮し、SUS304 を用い、動力伝達には軸隙間からの漏れを考慮する為マグネットカップリング方式③(材質ネオジウム磁石、サイズ $\Phi 10 \times 20$ mm, 厚み方向着磁、表面磁束密度 560 mT の磁石を駆動部、従動部にそれぞれ 2 個、計 4 個用いた)を採用した。これにより、タービン内は完全に密閉された状態となる。次に、タービンのノズル機構を Fig. 3 に、ノズルを設置したタービン羽根車の関係を Fig. 4 に示す。Fig. 3 より、圧力差を維持し、かつ羽根車に効率よく噴射出来るようにする為、ノズル機構にはフランジに極細チューブを溶接したノズル一体型フランジを用いた。極細チューブの内径は $d=1.0$ mm である。Fig. 4 より、ノズルを出た CO_2 は羽根車に垂直に衝突する構造となっている。

Fig. 2 Schematic of turbine

Fig. 3 Nozzle

Fig. 4 Turbine impeller

3. 結果および考察

Fig. 5 にノズル内径 1.0 mm におけるタービンの入口と出口の圧力の比、および回転数の値の関係を示す。 P_1 はタービン入口圧力、 P_2 はタービン出口圧力である。実験条件は、ヒーターの熱入力を 100 W から 2000 W まで条件を替え入熱を行い、熱交換器の冷水温度は 10 °C とした。

Fig. 5 より P_2/P_1 が小さくなるにつれて回転数が大きくなることが確認できる。つまり、圧力差によるタービンの駆動を確認することが出来た。

Fig. 5 Relation with pressure ratio P_2/P_1 and rotation

また、Fig. 6 にはタービン入口と出口の圧力の比と、質量流量の値の関係を示す。Fig. 6 より CO_2 の質量流量は、圧力の比が 0.92 以下で一定となることが確認できる。これはノズル内部で CO_2 がチョーキングを起こしたことが原因であると考えられる。しかし、Fig. 5 ではチョーキング後 ($P_2/P_1 \leq 0.92$) においても回転数の増加がみられる。したがって、本試作タービンは、圧力差の依存を大きく受け駆動を可能とする事ができ、SCRS においては反動型ラジアルタービンを用いることが最適であるという事が知見として得られた。

Fig. 6 Relation with pressure ratio P_2/P_1 and mass flow rate

4. 結言

1. ノズル内径 1.0 mm における等熱流束加熱試験の結果、超臨界 CO_2 を用いた際にも本試作タービンの圧力差による駆動を確認することが出来た。
2. 本試作タービンは、チョーキング後も回転数の増加がみられ、圧力差の依存を大きく受け駆動を可能とする事を知見として得た。

謝辞

本研究は、文部科学省－私立大学戦略的研究基盤形成支援事業「ゼロエミッション技術を基盤とした環境調和型エネルギーグリッドの最適化」の支援、および The CREATIV project, performed under the strategic Norwegian research program RENERGI の支援を受けた。関係者の援助に謝意を表す。

引用文献

- (1) 日本太陽エネルギー学会, 「新太陽エネルギー利用ハンドブック」, (2000), pp.462-463.
- (2) 山口博司, 「太陽熱利用による超臨界 CO_2 ランキンサイクル」, (機械の研究), vol.60(10), pp.1025-1031, (2008)
- (3) PROPATH GROUP, PROPATH version 13.1, (2008)