

半円集光減圧管式太陽集熱器の屋外集熱特性試験

Thermal Performance Outdoor Testing of a Semi-circular Concentrating, Partially Evacuated Tubular Solar Collector

橋 本 俊 行*
Toshiyuki HASHIMOTO

宮 武 修**
Osamu MIYATAKE

澄 田 誠***
Makoto SUMIDA

Abstract

A semi-circular concentrating, partially evacuated tubular collector consists of a glass tube and an absorber enclosed in it. The outer surface of the glass tube has the lower half silvered to direct incoming solar radiation onto the absorber. The absorber is constructed in the form of a single fluid transport tube and a fin attached to the bottom of the tube.

Air or the low conductive gas (krypton) was confined between the glass tube and the absorber. The pressure of the confined gas was reduced to the range of 1.0–1.2 kPa so that the convection was fully suppressed. Thermal performance outdoor tests under full sunshine were carried out to determine the collector efficiency and following results were obtained. Efficiencies for the case of air confined in the glass tube were about 36% and those for the case of krypton were about 38% at an operating temperature of 100°C. Efficiencies for the case of krypton were clearly higher than those for the case of air. In addition, measured values of the heat loss coefficient of the collector were in good agreement with prescribed values.

Key Words : Tubular Collector, Semi-circular Reflector, Partially Evacuation, Krypton, Small Heat Losses, Outdoor Testing

1. 緒 言

著者らは新方式の半円集光減圧管式太陽集熱器を提案し、室内伝熱実験によってその低熱損失性を確かめた¹⁾。本集熱器では、熱損失を小さくするために次の三通りの方法を用いる¹⁾。

- (1) ガラス管下半周外面を銀処理して、断面が半円の裏面鏡とする。この半円鏡で集光することにより、ガラス管に内包される受光部の表面積を大幅に減少させる。
- (2) ガラス管内封入気体の圧力を数 kPa のオーダーとし、気体の対流を停止する。この圧力では気体は連続体である。従って、真空管式では必要であったガラス管内を希薄状態にするための高温長時間の排気工程が不要となり、大幅なコストダウンが期待される。
- (3) 封入気体として空気もしくは熱伝導率の小さな不活性ガス（クリプトンなど）を用いる。

また、前報²⁾においてその集熱器の光学効率、熱損失係数及び集熱効率などについて数値解析し、優れた集熱特性が得られることを理論的にも予測した。本報では、実際的な条件下での適用性を確かめるために試作した半円集光減圧管式太陽集熱器の屋外集熱特性試験とその検討結果について報告する。

2. 試 作 集 热 器

ガラス管を構成要素に取り入れた太陽集熱器は、一般にそれぞれ受光部を内包する複数のガラス管で構成

* 九州大学生産科学研究所 助手
Research Institute of Industrial Science,
Kyushu University

** 九州大学生産科学研究所 教授
Research Institute of Industrial Science,
Kyushu University Professor

*** 東洋鋼板株式会社
TOYOKOHAN Co., LTD

されている。このような集熱器を考察する場合、隣接管による反射光の影響は無視できるので³⁾、その構成要素としての1本のガラス管の設計が基本的に重要である。従って本報では、受光部とこれを内包する1本のガラス管より成る単管の集熱器を試験の対象とする。

受光部断面の形状及び寸法と集熱特性の関係に関する前報²⁾の数値解析結果を参考に、工作上の容易性も考慮して試作した集熱器を図1に示す。以下に、各構成要素の詳細について記述する。

ガラス管

現在市販されている真空管式集熱器に用いられている最大口径のガラス管は外径100mm、内径96mmなので、本集熱器にはこれに近い外径110mm、内径105mmの標準パイレックスガラス管①を用いた。集熱器端部からの熱損失を低減するためにガラス管の片側は丸封じにし、他端をフランジ②及び鏡板③で封じて熱媒体が通る集熱管④の取り出し口を設けた。実用的には、太陽光の吸収が無視できる安価な低鉄分のソーダライムガラス管を用いるべきであるが、本集熱器には工作上の容易性を考慮してパイレックスガラス管を用いた。市販集熱器の標準的なガラス管長さは2.7m程度あるが、本集熱器のガラス管長さは受光部の工作上の制約から1.8mとした。

受光部

受光部は外径16mm、内径14mmの標準品の銅管に厚さ1mmの銅板を巻き付けて(図1(b)参照)作った集熱管とフィン⑤より構成される。従って、集熱管の実質上の外径は18mmとなるが、この大きさは前報²⁾で計算した集熱管の外径15, 18, 21mmの3つの値の中間値である。この銅管は内部にもう一本の銅管を入れて往復流路を構成する二重管となっており、熱媒体は内管を流れたのち環状部を流れる。内管は外径11mm、内径9mmで、往復流路断面積が同程度の大きさとなるものを採用した。銅管と銅板との透き間には、はんだを流し込んで接触熱抵抗を低減させた。フィン先端とガラス管との透き間は6mmとした。この大きさは、前報²⁾で得た封入気体が空気の場合の最適透き間11mmとクリプトンの場合の最適に近い透き間1mmの中間値である。また、集熱管上端が最適位置²⁾のガラス管軸上に位置するようにした。受光部の表面すなわち受光面の全体に太陽光吸収率が0.90、放

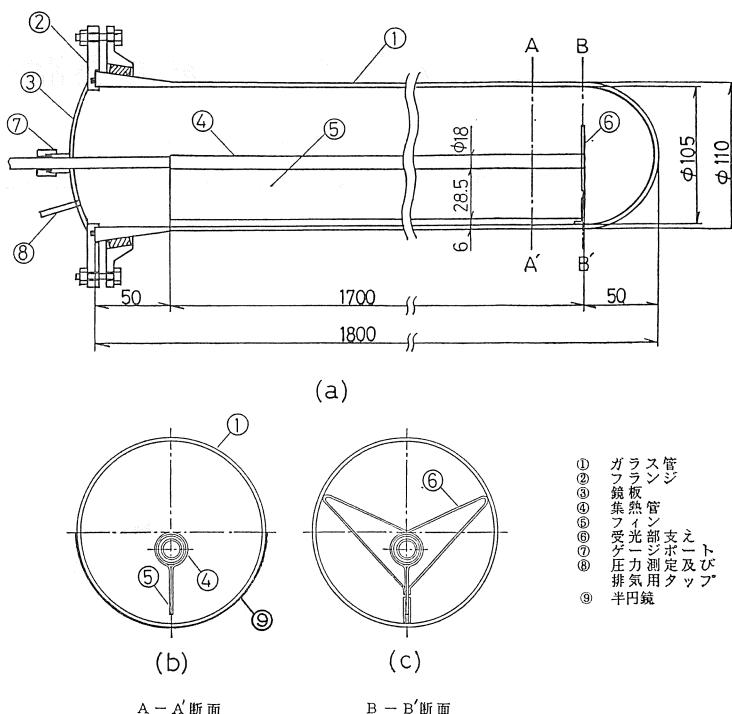


図1 試作集熱器の構造

射率が0.05⁴⁾の選択吸収膜((株)ULVAC成膜製)をはりつけた。

フィンのガラス管軸方向長さは1.7mとした。集熱管先端部での受光部支え⑥は直径1mmのステンレス線製で図1(c)に示す形状とし、ガラス管内表面に点接触させることによって、受光部とガラス管の間の熱抵抗の増大を図った。実用器ではこれらと異なる受光部支持方法が採用されると思われるが、集熱特性を検討するうえでは問題ない。

フランジ部

ガラス管とフランジをシリコンオーリングを介してボルト締めした。フランジには鏡板を溶接し、鏡板中央部の集熱管の通る部分にはゲージポート⑦を取り付けた。また、鏡板には圧力測定及び排気用のタップ⑧を設けた。熱損失を抑えるためにフランジ及び鏡板はステンレス製とし、鏡板中央部は集熱管から伝わる熱損失を低減するために厚さを2mmと薄くした。

半円鏡

ガラス管全長にわたり、下半周部分を裏面鏡⑨とするために、先ずスプレー方式によってガラス管外表面の下半周部分に銀メッキを、そのうえに保護用の銅メッキを施し、更に保護用の塗料を塗布する。この方法は鏡の形状や大きさによらず施工が容易で、耐候性、耐久性の点でも優れており、量産プロセスにも十分対応できるものと考えられる。

表1 気体の熱伝導率 λ の計算式 (1) における係数値

	a	b	c
空 気	$-0.338 \cdot 10^{-7}$	$0.7910 \cdot 10^{-4}$	$0.2403 \cdot 10^{-1}$
クリプトン	$-0.131 \cdot 10^{-7}$	$0.2981 \cdot 10^{-4}$	$0.8729 \cdot 10^{-1}$

封入气体

ガラス管内には空気もしくは熱伝導率が空気の約三分の一のクリプトンを封入した。両気体それぞれの熱伝導率 λ [W/(m·K)] と気体の温度 T [°C] の関係は次式で表される²⁾.

係数 a , b , c の値を表 1 に示す.

3. 試験装置及び試験方法

3. 1 試 驗 裝 置

系統図を図2に示す。集熱器はガラス管軸方向を東西に向け、開口面の水平面に対する傾角を、宇田川ら⁵⁾の報告による年間日射量が最大となる値の30°とした。100°C以上の集熱特性試験を可能にするために、熱媒体用の油としてダフニーサーミックオイル68(鶴岡光興産製)を用いた。熱媒体の集熱器入口温度の設定は、貯油槽内電気ヒータの出力を調節して行った。熱媒体の粘度が大きいので熱媒体循環用に歯車ポンプを用いた。ポンプの吐出側を集熱器と貯油槽に向かう管路に分岐させ、各々の管路系に挿入した弁を調節することによって集熱器の熱媒体流量を調節した。配管系統、貯油槽、混合室、集熱器フランジ側端部はすべてグラスウール断熱材で覆った。

3. 2 测 定 方 法

溫 度

温度成層効果によって集熱管内の熱媒体内で垂直方

向に大きな温度勾配が形成されるので、特に集熱器出口における熱媒体の混合平均温度の測定には工夫が必要である。本試験では、集熱器入口と出口のそれぞれの混合室出口に3本の熱電対を挿入して、熱媒体の混合平均温度を測定した。熱電対はクロメルーアルメル製で直径1mmのシース型である。熱媒体の集熱器入口温度と出口温度との差は5°C程度であるので、その3本の熱電対による温度測定値のはらつきが0.5°C以内であればそれらの値を算術平均してこれを混合平均温度とし、それ以上のばらつきがある場合には実測値として採用しなかった。

外気温度は試験装置の近くにおいて日よけ風防カバー内の温度とした。

なお、熱電対起電力はデータ集録器を介してマイコンに入力した。

熱媒体流量

熱媒体が集熱器を出て貯油槽へ循環してもどてくる途中に三方コックを設け、一定時間熱媒体を系外のメスシリンダーへ流し込んで流量を測定した。その際に、管路の途中に設置した流量計によって流量変化のないことを確かめた。

日射量

方位、傾角を集熱器開口面に一致させた全天日射計を用いて、集熱器開口面日射量を測定した。試験中は日射計からの出力電圧を A/D 変換器を介してマイコンに入力した。

封入气体压力

ガラス管端部の鏡板に取り付けたタップより検出した封入気体の圧力を、変換器を介して電圧に変換し、更にデータ集録器を介してマイコンに入力した。

風速及び風向

測定時刻における風速の瞬時値を無指向性の風速計

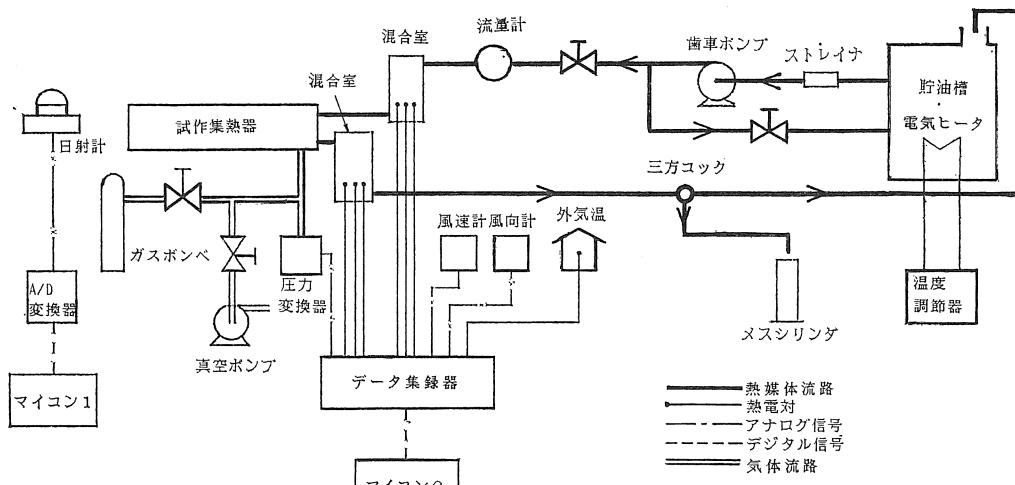


図2 集熱特性試験装置の系統図

で測定し、出力電圧をデータ集録器を介してマイコンに入力した。風向は試験装置が建物屋上に設置されているため無指向的であった。

3. 3 ガラス管内の圧力設定及び気体の封入

ガラス管内の圧力は、封入気体が空気及びクリプトンの場合とも、集熱状態において対流が停止すると予想される 1.0~1.2 kPa の範囲に設定した。封入気体が空気の場合には、単純に所定範囲の圧力まで真空排気してガラス管を密閉すれば良い。クリプトンの場合には、管内の圧力がおよそ 0.1 kPa 以下になるまで排気した後、ポンベからクリプトンをガラス管内に導き、所定範囲の圧力に到達した後ガラス管を密閉する。

3. 4 試験方法

試験は快晴日の南中前後、標準時10時から14時までの間に行った。これは雲の影響がなく太陽高度の変化も小さいという条件で、試験ができるだけ定常状態で行うためである。試験開始時刻の少なくとも1時間前から試験装置の運転を開始した。熱媒体の集熱器入口温度及び流量が安定して来たことを確認した後測定を開始した。日射量の測定は1秒毎に、その他の量の測定は5分間隔で行った。日射量の変動が小さい時間帯における測定値のうちで、前述したように混合室内の3本の熱電対による温度測定値のばらつきが0.5°C以内にある場合のみを有効とする。日射量の実測値の一例を図3に示す。この場合、変動が小さく有効な時間帯は10時から12時の間であるとした。

試験は熱媒体の集熱器入口温度 T_{in} を変えて行った。

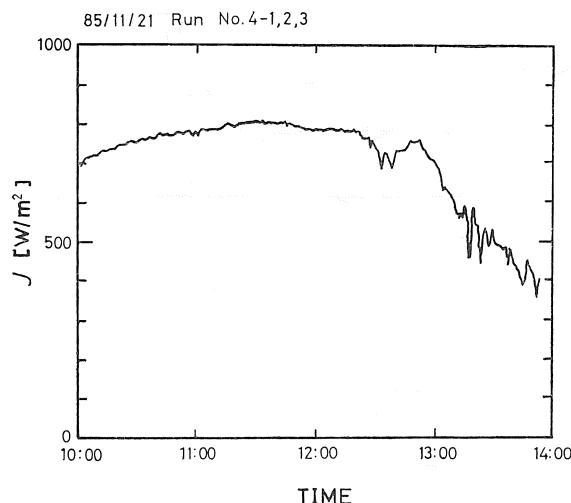


図3 日射量実測値の一例

4. 試験結果及び検討

集熱効率 η を次式から計算する。

$$\eta = \frac{c_p w (T_{out} - T_{in})}{JA} \dots\dots\dots(2)$$

ここで、 c_p [kJ/(kg·K)] は熱媒体の定圧比熱、 w [kg/s] は熱媒体質量流量、 T_{in} [°C]、 T_{out} [°C] は熱媒体の集熱器入口温度及び出口温度、 J [W/m²] は開口面日射量である。 A [m²] は開口面積で、 $A=b_0 l_p$ とした。 d_0 [m] はガラス管の外径、 l_p [m] は受光部フィンのガラス管軸方向長さである。 w 、 T_{out} 、 T_{in} には3.2で述べたように定常状態で取得した実測値を、また J には熱媒体の集熱器内滞留時間を考慮して T_{out} 、 T_{in} の測定直前の30秒間の平均値を採用した。

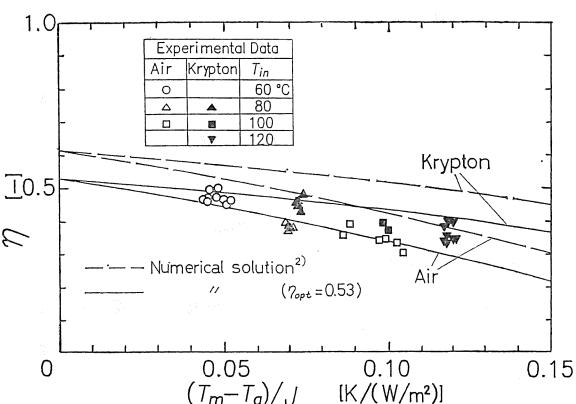


図4 集熱特性

図4に集熱効率 η とそれに関与する物理量 $(T_m - T_a)/J$ との関係の実測値を示す。ここで、 T_m は T_{in} と T_{out} の算術平均として算出した集熱器内熱媒体平均温度、 T_a は外気温度である。風速は次の理由によりデータ整理の参考にはしなかった。封入気体が空気の場合の最低風速 1.4 m/s の時、前報²⁾の解析結果によれば、熱媒体とガラス管の間の熱抵抗はガラス管と外気との間の熱抵抗の約 7 倍である。したがって、ガラス管温度と外気温度との差は熱媒体温度とガラス管温度との差に比べて小さく、集熱効率に及ぼす風速の影響は無視できる。文献 1) における実験でもガラス管軸に垂直な方向の風速 0 m/s と 5 m/s の両者の場合に、次式

$$U = \frac{\eta_{opt} - \eta}{(T_m - T_a)/J} \dots\dots\dots(3)$$

で定義される集熱器の熱損失係数 U [W/(m²·K)] が約 0.3 異なるだけである。ここで η_{opt} は光学効率である。 U の 0.3 は $T_m=80^\circ\text{C}$ 、 $T_a=20^\circ\text{C}$ 、 $J=600 \text{ W}$

/m² の時の集熱効率に換算して 0.03 にしかならない。また、封入気体がクリプトンの場合には熱媒体とガラス管との間の熱抵抗が空気の場合の約 3 倍と考えられるので、集熱効率に及ぼす風速の影響は無視できる。集熱器入口温度 $T_{in}=100^{\circ}\text{C}$ で、封入気体が空気の場合平均 0.36、クリプトンの場合平均 0.38 の有効な大きさの η が得られている。クリプトンの場合には空気の場合よりも大きな η が得られることが明瞭に認められ、 $T_{in}=120^{\circ}\text{C}$ でも平均 0.36 の有効な η が維持されている。このことによって本集熱器が低熱損失であることが実証された。

次に、前報²⁾の方法による図 4 に破線で示した数値解と実測値との比較をする。この数値解は、開口面日射量 J を試験条件の 750 ~ 950 W/m² の代表値である 850 W/m²、パイレックスガラスの屈折率を 1.74、外気温度 T_a を試験条件の 17 ~ 23°C の代表値である 20°C、熱媒体平均温度 T_m と受光面温度 T_p との差は無視できるとして得られた。 η の実測値が全体として数値解を下回っているのは、半円鏡の形状と仕上げの不完全さ及び受光部設定位置の不正確さという 3 つの理由によって、試作集熱器の光学効率 η_{opt} が数値解のそれよりも小さくなっていることが主な原因と考えられる。従って、実用器の η_{opt} は製造技術の改善によりもっと向上する可能性がある。そこで、 η_{opt} を数値解の 0.62 から 0.53 と小さくとった場合の数値解を図 4 に実線で示す。この場合の数値解は封入気体が空気及びクリプトンの双方の場合とも実測値と良く一致する。このことは熱損失係数 U の数値解が実測値と良く一致していることを意味する。

以上の結果に基づき、本集熱器の実際的条件下での適用性を検討する。以下の検討においては、標準的条件として $J=600 \text{ W/m}^2$ 、 $T_a=20^{\circ}\text{C}$ の場合を考える。封入気体がクリプトンの場合、破線の数値解では $(T_m-T_a)/J=0.15$ すなわち $T_m=110^{\circ}\text{C}$ の時 $\eta=0.45$ であり、本集熱器によって 100°C 程度での熱利用が可能である。次に封入気体が空気の場合、破線の数値解では $(T_m-T_a)/J=0.1$ すなわち $T_m=80^{\circ}\text{C}$ の時 $\eta=0.42$ であり、70°C 程度での熱利用が可能である。クリプトンを封入する場合は気体のコスト自体は無視できるが、その封入工程と空気のもれこみを防止するためのシーリングに工夫を要するのでその分コストが高くなる。一方空気を封入する場合はその対流

を停止させるためには圧力を 2 kPa 程度にすれば良く、排気は油回転ポンプで速やかに行えてシーリングも簡単である。

本集熱器と在来の平板式あるいは真空管式集熱器との比較は集熱温度、コスト、利用目的等の多くのパラメータがあるため困難であるが、新方式の集熱器として実用化のための今後の検討が期待される。

5. 結 言

半円集光減圧管式太陽集熱器の実際的な条件下での適用性を確かめるために、単管の集熱器を試作して快晴下の屋外集熱特性試験を行い、以下の結果を得た。

(1) 封入気体が空気及びクリプトンの双方の場合とも、熱媒体の集熱器入口温度が 100°C で有効な大きな集熱効率が得られた。

(2) 封入気体がクリプトンの場合には、空気の場合よりも明らかに大きな集熱効率が得られた。

(3) 热損失係数の実測値は数値解と良く一致した。

〔謝 辞〕

鏡の施工については(有)フクガミ化研(大阪府吹田市)の協力を得た。ここに記して謝意を表す。

参 考 文 献

- 1) 橋本俊行・宮武 修・原田照利・芥川竜太郎・麻生智倫、半円集光減圧管式太陽集熱器の研究、太陽エネルギー、Vol. 10 (1984), No. 6, p. 27
- 2) 橋本俊行・宮武 修・澄田 誠、半円集光減圧管式太陽集熱器の理論解析、太陽エネルギー、Vol. 13 (1987), No. 3, p. 2
- 3) 山東睦夫・藤井 篤・野口哲男・外山茂樹、真空ガラス管型集熱器の有効透過吸収係数に関する理論解析、太陽エネルギー、Vol. 10 (1984), No. 6, p. 34
- 4) 恵 昭彦・溝呂木広次・中村一男、太陽熱選択性膜被覆金属箔、真空、Vol. 25 (1982), p. 225
- 5) 宇田川光弘・石田建一、太陽熱集熱および給湯システムの簡易シミュレーション、日本太陽エネルギー学会第 7 回研究発表会講演論文集 (1981), p. 73
- 6) 日本機械学会編、伝熱工学資料改訂版 (1962), pp. 14~18, pp. 33~34, 日本機械学会、東京
(昭和 62 年 3 月 7 日、原稿受理)