

真空二重ガラス管を用いた半強制循環式 集蓄熱・給湯・暖房システムの開発 その1：エレメントタイプによる基礎実験

DEVELOPMENT OF A SEMI-FORCED CIRCULATING-TYPE COLLECTION STORAGE HOT-WATER
SPACE-HEATING SYSTEM BY APPLYING VACUUMED DOUBLE GLASS TUBE
PART 1: FUNDAMENTAL EXPERIMENT ON ELEMENT-TYPE APPARATUS

金 山 公 夫*¹ 趙 春 江*² 馬 場 弘*¹ 遠 藤 登*¹
Kimio KANAYAMA Chunjiang ZHAO Hiromu BABA Noboru ENDOH

Abstract

A vacuumed double glass tube used for an element of the efficient solar collector was improved from an indirectly collecting-type tube with a fine U-tube inside of the glass tube to a directly collecting-type tube without the U-tube.

According to the test on the set-up method, the horizontal method on the vacuumed double glass tube-type solar collector was selected to make up a new-type solar hot water and space heating system. Further, the safety proof for the breakage caused by residual water freezing inside the glass tube was confirmed even under atmosphere of -30°C .

Key words: Vacuumed double glass tube collector, Semi-forced circulation, Heat collection, Storage, Hot water supply, Space heating

1. まえがき

自然循環式集熱器、いわゆる太陽温水器は熱サイフの原理に基づくゆえ、構造、取り扱いが簡単で、特に平板式の場合は価格も安価なため本州方面の温暖地で相当普及し、また真空ガラス管式の温水器も市場に出つつある。しかし寒冷積雪地の北海道では低温時の水の凍結が障害になり、このままでは冬期の使用は一般に困難とされている。

それに対して強制循環式のいわゆるソーラーシステムは以前から導入され実用になっているが、強力な集熱ポンプにより熱媒を循環させて集熱するためエネルギー利得を高く保つことが難しく、ソーラーシステムの本来的特性であるところの省エネ性がそれだけ損なわれることになる。不凍液集熱を採用することにより

凍結防止の問題は解決されるが、低負荷時や空だき時の過集熱により不凍液の劣化が進行し早期の交換を余儀なくされる。水集熱の場合は落水式にして凍結に対処しているが、大雪や猛吹雪あるいは -25°C 以下の極寒など特殊な気象条件にさらされた場合には集熱器本体や配管中の水が停滞しそれが凍結して、システムの破損を招くこともある。

このような状況のもとで、昭和54、5年以降、北海道で主として実用になっている集熱装置は不凍液式または落水式の平板型ソーラーシステムであるが、その設置件数は多くはなく、普及しているとはいえない。

これに対して最近、ガラス管の直径が細くて長さが比較的短い「真空二重ガラス管」（以下真空ガラス管と略称）を用いた集熱器（コレクター）が市販され、集熱性能が高いほか、軽量で施工性がよく周囲建物との取り合わせやデザイン性に優れていることなどから、寒冷な北海道においても導入例を見ることができる。

原稿受付 平成7年2月20日

*1 北見工業大学機械システム工学科

*2 シロキ工業株式会社ソーラー技術部

しかし、その集熱方法は不凍液を用い強制循環式で行うため装置が大がかりになり、集熱ポンプの消費電力も大きいなど設備費及び維持費が高くつくこと、さらに高温集熱時の性能が良いことから逆に不凍液の管理が面倒なことなどの問題が提起されている。

このような実情を踏まえて著者らは強力な集熱ポンプの力を借りた不凍液による強制循環式の集熱方法を止めて、まず水集熱による自然循環主体の真空ガラス管を素材とした集熱部の基本形を実験により決定し、しかる後これをシステム化をすることを試みた。その際、凍結防止も兼ねて小型の補助ポンプを用いた弱い強制循環を組み合わせ、状況により自然循環と使い分けができる真空ガラス管を素材とする水集熱「半強制循環式」集蓄熱・給湯・暖房システムの開発へと発展させ、総合的実用機器としてのモデルを提示することができた。

半強制循環式システムに関しては著者ら^{(1),(2)}により既に平板型コレクターを用いて実験されており、本研究においてそれらの実験結果及び経験が参照された。

本システムには幾つかの凍結防止法など寒冷地技術が取り入れられており、 -20°C 以下の氷点下の外気温度のもとでも十分機能し、北海道の冬期間において十分使用に耐えるシステムであることが実験によって明らかにされた。

以下に、本システムの開発の段階を追いながら、この報告ではまず代表的な集熱部要素に焦点を当て、エレメントタイプの実験装置の原理、構造及び性能について実験結果に基づいた性能評価を述べる。

2. 集熱器の要素、構造及び設置法

まず、太陽集熱システムにおいて最も重要な部分に相当する集熱器の要素、構造及び設置法を決定しなければならない。いま集熱器の素材及び外見上の基本的構造は既製の真空ガラス管コレクターをできるだけそのままの状態で使用するものとする。

2.1 真空ガラス管の集熱部構造

改造前の既製の真空ガラス管コレクターの集熱部構造を図1の上部に示す。図のように集熱部は熱媒（不凍液）が流入、流出するための2本のヘッダー管から枝分かれした細いU字管（真鍮）がガラス管内に挿入

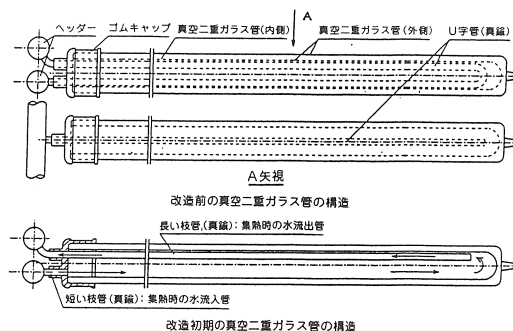


図1 改造前後の真空ガラス管の集熱部構造

された構造である。したがって集熱時の伝熱機構は次のように想像される。すなわち真空ガラス管の選択吸収膜つき内管の外表面で吸収された日射エネルギーは、主としてガラス管内の空気を介して細いU字管を加熱し、その熱がU字管内を流れる不凍液に伝達される間接集熱式である。

いま不凍液の代わりに水を熱媒に用いて真空ガラス管内に流入させ、ガラス管の内表面との直接接触による効率的な伝熱様式を採用する。そのためにU字管をガラス管を密封している入口ゴムキャップの根元で切断した短い枝管を水の流入管とし、もう一方はU字管の先端折返しの曲管部に近い直線部分で切断した長い枝管を水の流出管とすることにより、直接集熱式に改造される。横置きの場合、集熱終了時にはこれとは逆に短い枝管が流出管となり水を抜き取ることになる。

改造された初期の直接集熱式真空ガラス管の構造を図1の下部に示す。

2.2 集熱器の設置法と水の循環及び集熱性能

実験は既製の真空ガラス管を供試体に用いた場合（間接集熱式）と、改造した真空ガラス管を用いた場合（直接集熱式）の二通りについて行なった。いずれも真空ガラス管を既製のコレクター枠に固定し、単位の集熱器パネルを構成する。このパネルを傾斜角 60° で真南に向いた架台に設置する。エレメントタイプ実験装置におけるコレクターの集熱性能の測定法及び集熱パネルの架台の取付けは図2に示す方法によった。

すなわち、架台に取り付けられたパネル及び熱媒の供給タンク（60L）は地上に設置し、温水回収タンク（40L）は実験室1階屋上（地上約4.5m）に置き、サー

モサイフォンによる自然循環力を得るために約4.4mの高低差を取った。各部品の間を昇水管、降水管及びその他の配管で結合し、熱電対温度計、流量計、開閉弁、逆止弁等を取付け実験装置を構成し、温度は打点記録計に自動記録するが、流量計の目盛は目読み、弁の開閉による流量調節等も手動で行ないながら測定した。

集熱パネルの架台への設置方法は(1)逆向き(ヘッダー部下側)、(2)正常向き(ヘッダー部上側)及び(3)横向きの3種類で、熱媒の流れ状況、流量、各部の温度及び日射量等を測定して、パネル設置法と集熱性能の関係を明らかにした。集熱効率の算出は式(1)によった。

$$\eta_c = C_w \cdot \bar{V} \cdot \Delta t / (q_c \cdot A_c \cdot \tau) \quad (1)$$

ここで、 C_w ：水の比熱 ($=4.186 \times 10^3 \text{ J/kgK}$)

$\bar{V}$ ：平均流量 cm^3/min

Δt ：コレクター出入口の温度差 $^{\circ}\text{C}$

q_c ：傾斜面日射量 W/m^2

A_c ：コレクター面積 ($=1.26\text{m}^2/\text{枚}$)

τ ：時間 ($=60\text{s}$)

2.2.1 間接集熱式真空ガラス管コレクター

(1) 逆向き設置：実験結果(H5.8.10)では水の流れに対する抵抗が大きく、実験中流動音を伴う脈動が生じ、コレクター入口、出口の温度は大きく変動してばらついた。日射量 850W/m^2 の時、コレクター出入口の温度差は 50°C あるにもかかわらず、流量 4.5L/h と小さく、集熱効率は約24%の低い値しか得られなかった。

(2) 正常向き設置：実験結果(H5.8.16)では水の流れ抵抗は逆向き設置の場合より小さくなり、温度記録に変動はあるが、水の脈動は消えた。日射量 850W/m^2 の時、コレクター出入口の温度差は 65°C 、流量は 6L/h 、集熱効率は約42%に上昇した。しかしガラス管内の集熱U字管の円曲部が底部となるので管内水を排出することはできず、凍結防止上不適当である。

(3) 横向き設置：実験結果(H5.8.21)によれば、流れ抵抗が低下して流速が増大し、流れ自体が安定した。温度変動もほとんどなく、日射量 850W/m^2 の時、コレクター出入口の温度差が平均 65°C 、流量は 8.5L/h 、集熱効率は約60%に急増した。

このように、既製の真空ガラス管コレクターは横向き設置の場合が自然循環によるスムーズな水の流れと高い集熱効率を得られた。

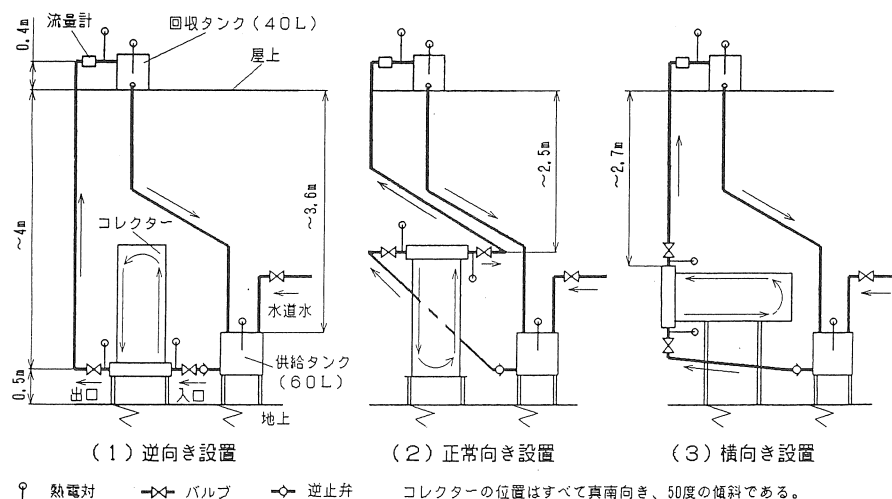


図2 コレクター集熱性能測定法及び集熱パネル設置法

2.2.2 直接集熱式真空ガラス管コレクター

(1) 逆向き設置：短い枝管から水が流入して管内を満たし、日射を受けて暖められた温水が自然循環によって細長い枝管を通して流出し、集熱が行なわれる。実験結果 (H5.10.5) によれば、流れ抵抗が改造前より大幅に低下したため、流れ脈動及び温度変動はあるが、その幅が著しく縮小され、周期が長くなった。流速が増大した分、集熱効率が増加した。10分間ごとに2分間データを採り、コレクター出入口の温度差、流量及び日射量を測定し、各脈動周期*について平均集熱効率を求めた。図3に測定結果を示す。周期1の集熱効率 $\eta_c = 60.6\%$ 、周期2の $\eta_c = 33.2\%$ 、周期3の $\eta_c = 57.0\%$ 及び平均集熱効率 $\bar{\eta}_c = 50.3\%$ 。

(2) 正常向き設置：前のケース同様、流れ抵抗は低下し一様流れになり、コレクター出入口温度差及び集熱効率は上昇した。しかし真空ガラス管の底部が下側にあるので排水は不可能で、凍結防止上不適当である。図4に測定結果 (H5.10.7) を示す。平均集熱効率 $\bar{\eta}_c = 57.7\%$ 。

(3) 横向き設置：流れの脈動は改造前の横向き設置の場合より大きくなったが、流れ抵抗は減少した。温度変動も現れるが、その幅はそれほど大きくない。流れが変動するため幾つかの脈動周期の間で連続的に測定した。図5に測定結果 (H5.11.11) を示す。周期1の集熱効率 $\eta_c = 55.3\%$ 、周期2の $\eta_c = 65.4\%$ 、周期3の $\eta_c = 52.5\%$ 、周期4の $\eta_c = 54.6\%$ 、周期5の $\eta_c = 57.7\%$ 、周期6の $\eta_c = 54.2\%$ 及び平均集熱効率 $\bar{\eta}_c = 56.6\%$ 。H5.11.2の平均集熱効率 $\bar{\eta}_c = 57.5\%$ 。

3. 測定結果の検討

以上、3種類の設置法について改造前の間接集熱真空ガラス管の場合と比較しながら、改造後の直接集熱真空ガラス管の場合の自然循環による流れ及び集熱性能に関する実験、観察を行なった。このうち正常向きの設置は排水が不可能な故、対象からはずし、主として直接集熱真空ガラス管の結果について検討する。

逆向き設置では流れ抵抗が大きく、日射が強い時コレクターは循環ポンプの作用をし上向きに水を押し上げる力によって流速が増し、集熱効率が増大する。しかし日射が弱くなると流速は減少し集熱効率が低下する。この場合、小型のポンプを用いて外部から循環力

* 脈動現象において流量極小値の時点から次の極小値の時点まで時間帯

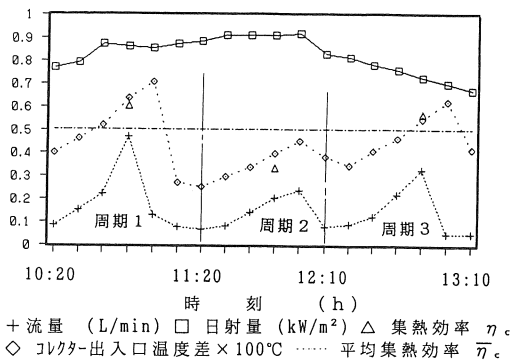


図3 直接集熱式真空ガラス管コレクターの集熱性能：逆向き設置の場合 (H5.10.5)

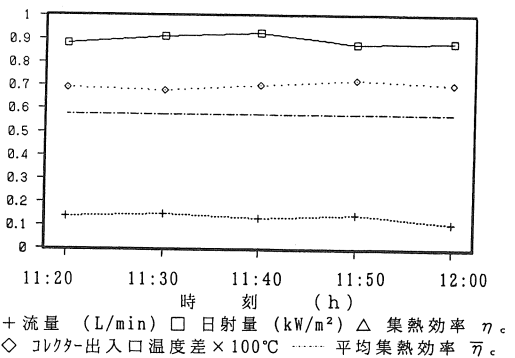


図4 直接集熱式真空ガラス管コレクターの集熱性能：正常向き設置の場合 (H5.10.7)

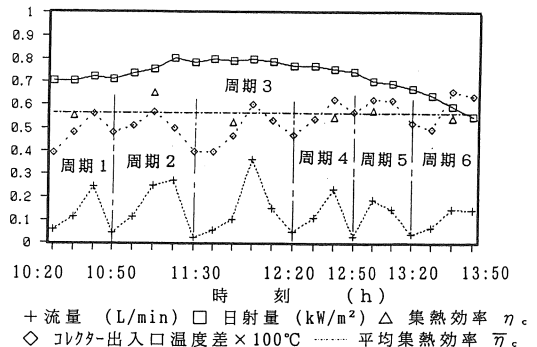


図5 直接集熱式真空ガラス管コレクターの集熱性能：横向き設置の場合 (H5.11.11)

を与える必要がある。

横向き設置では流れ抵抗は逆向きより小さく、温度変動の幅も狭い。日射が多少弱くても連続集熱が可能で、給湯のみの集熱ならポンプは不要である。この場合、真空ガラス管の短い枝管の直径を太くして抵抗を小さくし、排水を容易にする等工夫が必要である。

以上の実験結果から総合的に判断して、直接集熱真空ガラス管の横向き設置法を本研究で開発を試みるシステムの集熱部に採用することにする。

しかし横向き設置においてもシステムに組んだ場合の抵抗は大きくなるので、日射の弱い時も安定した作動ができるように小さなポンプを挿入して、いわゆる半強制循環式にすると実用性が高まるものと考えられる。

4. 真空ガラス管の凍結実験

直接集熱真空ガラス管が横向きに設置されたコレクターを使用した場合、その構造上排水後においても約40%の水が管内に残留する。この残留水の凍結によって真空ガラス管が真冬の -30°C の大気中に設置された場合に、凍結の進行により最終的に真空ガラス管が破壊に至る状況を実験により確かめた。

真空ガラス管の内容積は 1050cm^3 で、実験では図6に示すように水道水(10°C)を容積の半分程度注入してゴムキャップで管口を封じて、約 -30°C に設定された低温室に横置きにして放置する。その際、管口を管奥より若干高くする。凍結実験の状況を時間を追って図7に示す。

図7の結果から真空ガラス管内に真鍮管が挿入されていてもいなくても、管内にその容積の40%の水を保有し、 -30°C の低温大気中に放置して凍結させる場合、24時間以内では破壊しないことが明らかになった。北海道の冬期間にこのような超厳寒の条件が自然の状態で起ることはない。よって残留水による真空ガラス管の凍結破壊は起らないものと考えられる。

5. むすび

以上述べたように、エレメントタイプの実験装置を用いて、水を熱媒とするサーモサイフォンにもとづく自然循環に依存した直接集熱式真空ガラス管集熱器の開発のための要素技術に関する基礎実験を行なった。内容は、大別してパネル設置法と集熱性能の関係、真空ガラス管集熱部の改造及び管内に水を保有する真空ガラス管の凍結破壊の実験である。その結果、次のよう

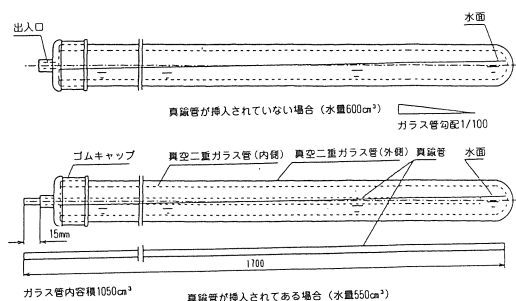


図6 凍結実験に供した内部に残留水を有する真空ガラス管

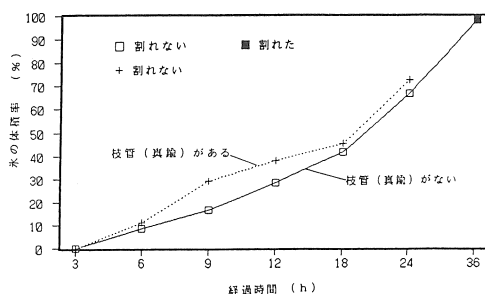


図7 内部に残留水を有する真空ガラス管の凍結実験結果 (雰囲気温度 -30°C)

な結論を得た。

- (1) 既製の間接集熱式真空ガラス管コレクターでは正常向き及び横向き設置の場合、自然循環による集熱は可能であるが、水の流動抵抗が大きい。逆向き設置では自然循環による集熱は期待できない。排水に対しては正常向き設置は全く不適当である。
- (2) 改造された直接集熱式真空ガラス管コレクターでは逆向き、正常向き及び横向き設置の場合、ともに自然循環による集熱は可能である。水の流動抵抗が減り、水の循環量が増して集熱効率が増大する。逆向き設置は日射量が減った場合に循環力が低下し、外部から循環力を付加する必要がある。正常向き設置は排水に対して不適切である。
- (3) 内部に水を封入した真空ガラス管を横置きにして、 -30°C の雰囲気中で行なった凍結実験の結果、内部の真鍮管の有無にかかわらず一昼夜24時放置しても破壊しなかった。

- (4) 以上の実験的事実から総合的に判断して、直接集熱式真空ガラス管を横向き設置にした場合が適応性があり、真空ガラス管を素材とする新型システムには当該コレクターの横向き設置法を採用するものとする。

文献

- (1) 金山公夫・趙春江・馬場弘・遠藤登・東誠之, 寒冷地における自然循環式ソーラーコレクターの実測による性能評価, 太陽／風力エネルギー講演論文集, (1993), pp.113~116.
- (2) 金山公夫・馬場弘・遠藤登, 半強制循環式平板型ソーラーコレクターによる給湯・床暖房システムの集熱特性と寒冷地性能, 太陽エネルギー, 21-1, (1995), pp.40~44.