

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2：ユニットタイプ及びプロトタイプ による予備実験

DEVELOPMENT OF A SEMI-FORCED CIRCULATING-TYPE COLLECTION STORAGE HOT-WATER
SPACE-HEATING SYSTEM BY APPLYING VACUUMED DOUBLE GLASS TUBE
PART 2 : PRELIMINARY EXPERIMENT ON UNIT-TYPE AND PROTOTYPE SYSTEM

金山 公夫*¹
Kimio KANAYAMA

馬場 弘*¹
Hiromu BABA

遠藤 登*¹
Noboru ENDOH

趙 春江*²
Chunjiang ZHAO

川上 英樹*²
Hideki KAWAKAMI

梅津 将広*²
Masahiro UMETSU

Abstract

In order to make up a practical system for hot water supply and space heating, the useful data and the control conditions have been obtained through the basic experiment on an elementary apparatus, and then a unit-type system was made of the vacuumed double glass tube collector. Based on the results obtained by the unit-type system, a prototype system which consists of the improved collecting panel, storage tank, circulation pump, pipings and so on was constructed. The prototype system could well be performed by an assistance of manual control, and also the high and stable collecting efficiency could be attained.

Key words : Vacuumed double glass tube collector, Semi-forced circulation, Heat collection, Space heating, Unit-type, Prototype

1. まえがき

著者らは前報⁽¹⁾において単純な太陽温水器にみられる集熱の原現及び構造をもとにして、これに性能の良い真空二重ガラス管（以下真空ガラス管という）集熱器の素材を適用して、水集熱による新しい集熱システムを完成させるための要素技術及び基本的な原理、構造等に関する基礎的な実験を行なった。

それによると改造された直接集熱式真空ガラス管を水平に配置したコレクターを60°程度の急傾斜で横向きに設置し、日射の強い日中の集熱は主として自然循環で、日射が弱い朝夕の集熱及び暖房時には小型ポンプで循環力を付加させる半強制循環式のシステムが適

当なことが実験的に確認された。しかも重要な要素とされる真空ガラス管集熱部は集熱終了時には落水できる構造で、かつ管内に残水があってもガラス管は凍結破壊が起きないなど、耐寒性能が優れていることも明らかにされた。

本報告はこれらの事実を踏まえて、本システムの実用化に向けての要素開発とシステム化のため、単純なユニットタイプ及びプロトタイプの実験装置に関する予備実験の結果をまとめたものである。

主な記号及び性能値

q_j : 傾斜面日射量 W/m^2

q_c : コレクター集熱量 W/m^2

t_a, T_a : 外気温度 $^{\circ}C, K$

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

- t_s : 室外貯湯槽温度 $^{\circ}\text{C}$
- T_w : ガラス管内の水温 K
- t_o, T_o : コレクター出口温度 $^{\circ}\text{C}, \text{K}$
- σ : ステファン・ボルツマン定数
 $[= 5.67 \times 10^{-8} \text{W}/(\text{m}^2 \text{K}^4)]$
- τ : 時間 h
- τ_g : コレクターガラスの透過率
 (厚さ $\delta = 1.5\text{mm}$ で 0.91)
- α : 選択吸収膜の吸収率 $(= 0.93)$
- A_c : コレクター面積 $(= 1.26\text{m}^2/\text{枚})$
- A_t : ガラス管の垂直方向への投影面積
 $(= 0.889\text{m}^2/\text{枚})$
- C_w : 水の比熱 $(= 4.186 \times 10^3 \text{J}/\text{kgK})$
- ρ : 水の密度 $(= 1 \times 10^3 \text{kg}/\text{m}^3)$
- V : 水の流量 $\text{cm}^3/\text{min}/\text{枚}$
- V_s : 室外貯湯槽水量 m^3
- q_F : 床暖房放熱量 W
- q_{sL} : 室外貯湯槽の熱損失 W
- q_{LL} : 室外配管の熱損失 W
- η_c : コレクターの集熱効率
- $(\text{COP})_s$: システム成績係数

2. ユニッタイプによる集熱・暖房

2.1 システム構成

改造された直接集熱式真空ガラス管コレクターの単体からなるユニッタイプの装置を用い、横向き設置の実用性を究明するために実際に近い使用条件のもとで実験が行われた。

直接集熱式真空ガラス管コレクターは、自然エネルギー実験室屋上に真南に向けて傾斜角50度で既に設置されている架台の一部を使って横向きに設置された。実験用システムは供試コレクター1枚、給水タンク、室内外貯湯槽、循環配管、ポンプ、バルブ類などを組み合わせて構成され、ほかに熱電対温度計、流量計などの計測器具が取付けられている。屋上集熱部周辺の状況及び室内の機器類も含めたシステム全体の構成は図1に示す。

実験は自然循環式集熱及び半強制循環式集熱・暖房の二つのカテゴリーに分けて行われた。

2.1.1 自然循環式集熱実験

自然循環式集熱の実験は平成5年12月の真冬に行われた。図1に示すシステム図において細い破線矢印

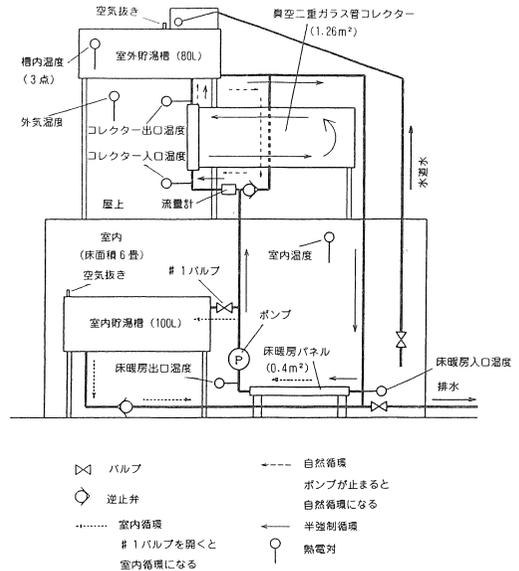


図1 ユニッタイプ実験用システムの全体構成

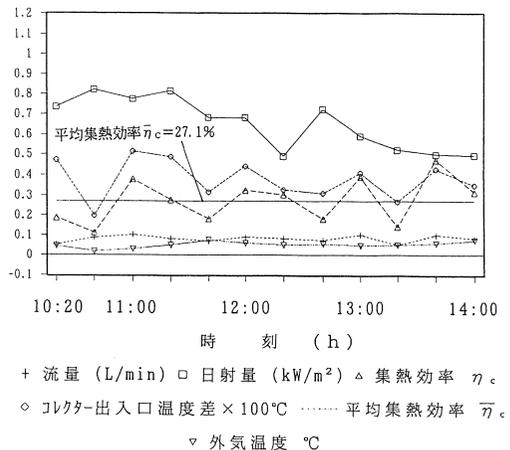


図2 ユニッタイプ自然循環集熱の実験結果 (H5.12.8)

の回路で行なわれる。コレクター本体の集熱効率は基礎実験⁽¹⁾のそれのおよそ1/2、約27%に低下した。コレクター自身からの再放射による損失は小さく、ヘッダー入口、出口間の対流損失もあまり大きくなく、前回とほぼ同様であった。それ故にこの原因は日中、氷点下の大気中に露出された微小流量計中の水が凍結して、作動不良を起したためと分かった。

今回の予備実験は前回と異なり、コレクターは屋上の架台に設置された関係で、コレクターと貯湯槽間の高低差が小さくなり、自然循環力が低下したため、流量が減少して流量計中で凍結する障害が生じた。流量計を取り外すと流量は正常に戻るので、基礎実験に近い集熱効率が得られるものと推察される。

自然循環式集熱実験の結果(H5.12.8)を図2に示す。図において流量は小さく、コレクター出入口温度差及び集熱効率に変動が見られ、しかも値は小さい。

2.1.2 半強制循環式集熱・暖房実験

上記の実験で微量流量計が挿入されている関係で冬期間は自然循環力だけでは作動が不十分なことが分かった。そこで図1のシステム図において小型ポンプを組み入れた室内循環システムを含む実線矢印で示す半強制循環式集熱・暖房回路に切替えて平成5年12月～平成6年1月の真冬に実験が行なわれた。小型ポンプの容量は消費電力15W(50Hz)、定格出力3Wで、これにより弱い循環力が付加され集熱は良好となった。このポンプ1台で並列配置の4枚のコレクターからなるシステムを循環させることが可能であるが、流量が小さいのでこれだけでは暖房負荷に見合う熱供給は困難である。なお図1の太い破線矢印は室内貯湯槽に熱源がある場合の暖房回路を示す。

半強制循環式集熱・暖房実験の結果(H5.12.30)を図3に示す。図において流量が回復し、コレクター出入口温度差の変動がなくなり、集熱効率は正常な値で安定した。

以上ユニットシステムについて実験結果をまとめると次のとおりである。

- (1) 半強制循環に切替えたことによりシステムは安定して作動し、集熱効率は40%以上に上昇した。
- (2) 流量は水温の上昇とともに増大し、流量の増加分がポンプのない場合の自然循環流量に相当する。
- (3) 集熱中の循環配管などの熱損失を除いてもシステムCOPは約50の大きな値に達した。

また実験によれば、日射量が約150W/m²の時、コレクター出入口温度差が+1℃となるので、いま仮りにこれを集熱の限界日射量とする。午前及び午後限界日射量で囲まれた時間帯を集熱時間とし、その間の平均日射量500W/m²、集熱効率55%、循環配管などの熱損失100W、暖房も考慮して45Wのポンプ1台で4枚のコレクター(1.26m²×4=5.04m²)のシステムを循環駆動するものとする、システムCOPは

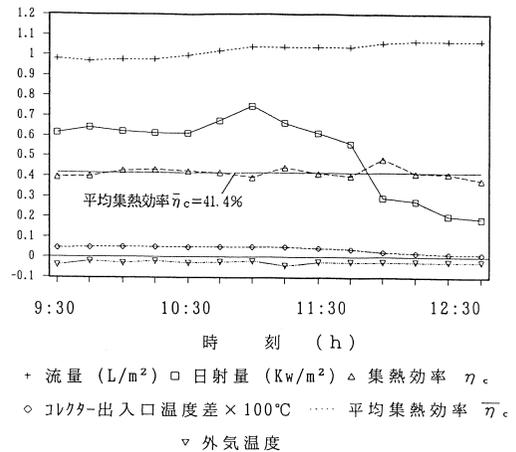


図3 ユニットタイプ半強制循環の実験結果 (H5.12.30)

$$\begin{aligned}
 (COP)_s &= (E_c + E_p) / E_p \\
 &= (500 \times 1.26 \times 4 \times 0.55 - 100 + 45) / 45 \\
 &= 29.6
 \end{aligned}$$

ここでE_c:コレクター集熱量 W、E_p:ポンプ動力 W

を得る。よって半強制循環式集熱・暖房におけるシステムCOPは約30程度が期待される。

3. プロトタイプによる予備実験

ユニットタイプの装置を用いた半強制循環式集熱・暖房の実験が安定に作動し、よい性能を示すことが分かった。その結果をもとに、つぎに実規模に近い半強制式プロトタイプシステムを構築して、実用化のための予備実験を行なう。

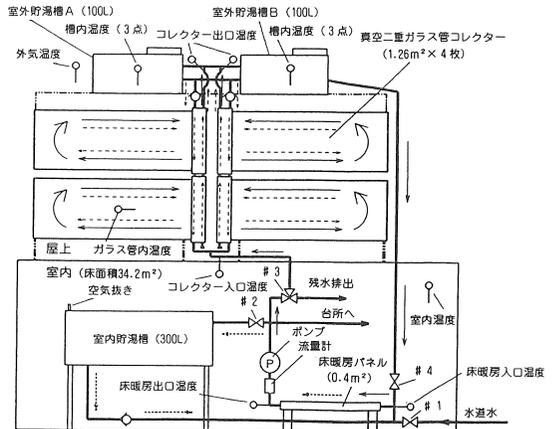
3.1 システム概要

本システムは直接集熱式真空ガラス管コレクター、室外貯湯槽A及びB、室内貯湯槽、床暖房パネル、ポンプ、循環配管及びバルブ類などから構成される。コレクターは4枚用い、自然エネルギー実験室の屋上に真南に向けて横向きの蝶型配置にして傾斜角60°の架台に取付けた。本システムの仕様は次のとおりである。

システム仕様：

熱媒	水
コレクター	1.26m ² ×4枚
室外貯湯槽	0.1m ³ ×2個
室内貯湯槽	0.32m ³ ×1個
床暖房パネル	0.4m ² ×1枚
ポンプ	定格消費電力45W×1個
循環配管 (PT1/2)	約20m
バルブ	4個
逆止弁	3個

プロトタイプの実験用システムの室内外の全体構成を図4に示す。



3.2 実験結果

プロトタイプ装置に関する半強制循環の予備実験は平成6年4月下旬に実施された。代表的な測定結果 (H6.4.23) を図5及び図6に示す。(H6.4.21及び4.22の結果もこれとほぼ同様) 図5において日射量に変化するにもかかわらず集熱効率はあまり変化せずほぼ一定の高い値を維持するが、これは真空ガラス管コレクターの特徴である。図6は集熱効率の実測値及び式(3)による計算値を比較して示すが、両者はよく一致する。またプロトタイプ自然循環集熱の実験は後 (H6.5) に行なわれ良い性能が得られた。

これらの実験データからシステムの主要部分の性能として、室外貯湯槽の熱損失、コレクターの集熱効率及びシステムの熱収支を概算して以下に示す。

3.2.1 室外貯湯槽の熱損失

室外貯湯槽の温度低下の速度は実験データより

$$d t_s / d \tau = -0.025 (t_s - t_a) \quad ^\circ\text{C} / \text{h} \quad (1)$$

を得た。よって室外貯湯槽の熱損失 q_{sL} は

$$\begin{aligned} q_{sL} &= 4.186 \times V_s \times 0.025 (t_s - t_a) \\ &= 4.186 \times 200 \times 0.025 (t_s - t_a) \\ &= 20.93 (t_s - t_a) \quad \text{kJ/h} \end{aligned} \quad (2)$$

この熱損失の速度は貯湯槽と外気温度の温度差を40℃とすると蓄熱熱量の損失による温度低下は毎時1℃となり、かなり大きな値である。したがって貯湯槽の



図4 プロトタイプ実験用システムの全体構成

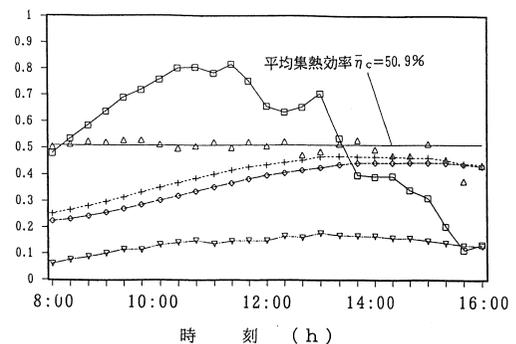


図5 プロトタイプ半強制循環の実験結果 (H6.4.23)

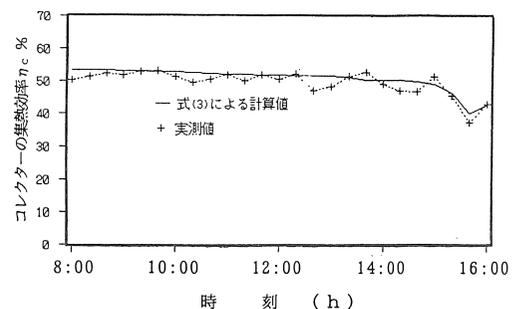


図6 プロトタイプの集熱効率の実測値と計算値の比較

材料、形状、寸法などを吟味して保温性を高める必要がある。

3.2.2 コレクターの集熱効率

真空ガラス管コレクターの集熱パネル自身は熱損失が小さいため、その集熱効率は高い値を示す。実験結果によれば集熱効率 η_c は式 (3) で表わされる。

$$\begin{aligned} \eta_c &= \{ \tau_g \cdot \alpha \cdot q_j \cdot A_c - [c_1(t_o - t_a) \cdot A_c \\ &\quad + c_2 \cdot \sigma \{ (f(q_j) + T_o)^4 - T_a^4 \}] \\ &\quad \cdot A_c \} / (q_j \cdot A_c) \\ &= \tau_g \cdot \alpha \cdot A_c / A_c - [c_1(t_o - t_a) \\ &\quad + c_2 \cdot \sigma \{ (0.1q_j + T_o)^4 - T_a^4 \}] / q_j \\ &= 0.597 - [0.205(t_o - t_a) + 0.318 \\ &\quad \times 10^{-8} \{ (0.1q_j + T_o)^4 - T_a^4 \}] / q_j \quad (3) \end{aligned}$$

ここで、係数0.597は日射が集熱面に直角に入射する時の反射板のない真空ガラス管コレクターの最大集熱効率及び c_1 、 c_2 は実験により求められる定数である。

式 (3) 中、再放射項の第1項目は、放射に関与する選択吸収膜付きガラス管表面の温度 T_g はコレクター出口温度 T_o より高く、 $T_g = 0.1q_j + T_o$ となることを表わす。式 (3) により集熱効率を計算し、日射量及び外気温度をパラメータにとって図7に示す。これによると真空ガラス管コレクターの集熱効率は高温集熱で大きな値を示し、また q_j 及び t_a による影響は少ない。

真空ガラス管コレクターの選択吸収膜の表面温度は日射量によって大きく変化する。たとえば日射量 800 W/m^2 、コレクター出口温度 50°C のとき、その表面温度は 130°C に達する可能性がある。よって真空ガラス管コレクターからの再放射熱損失は日射の弱い時には小さく、日射の強い時には大きい。そのために集熱効率は平板型集熱器⁽²⁾のように日射量の増減に即応して増減することなく、ほぼ一定値を保つものと考えられる。この事実は図5と図7において見られた通りである。

3.2.3 床暖房のための熱収支概算

実用化を目標にした本装置の性能実験で得られたデータから適当な数値を与えて、本システムで床暖房を行なう場合を想定して、晴天日における熱収支を概算する：

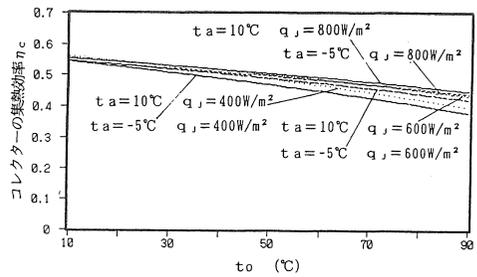


図7 プロトタイプの集熱効率曲線[式(3)より]

室外貯湯槽の熱損失を 50 W 、室外配管の熱損失を 50 W 、4枚の床暖房パネルの放熱量を日中 600 W (暖房負荷 $\div 63 \text{ kJ/m}^2\text{h}$)、平均日射量 450 W/m^2 、集熱効率 50% とし、1日8時間の集熱をして昼間室内 (34.2 m^2) の暖房を行なった後の余剰熱量 ΔQ は

$$\begin{aligned} \Delta Q &= (q_j \times \eta_c \times A_c \times N - q_{sL} - q_{LL} - q_F) \\ &\quad \times \tau_H \times 3.6 \\ &= (450 \times 0.5 \times 1.26 \times 4 - 50 - 50 - 600) \times 8 \times 3.6 \\ &= 12499.2 \text{ kJ} \div 12.5 \text{ MJ} \quad (4) \end{aligned}$$

ここで N : コレクター枚数、 τ_H : 暖房時間 h

となり、残余の熱量は 3470 Wh である。夜間の床暖房パネルの放熱量を 1200 W とすると、あと3時間弱分しかない。

いま室内を 1200 W のパネル放熱量で、残りの13時間を室温 18°C 程度の低めの暖房を維持するために追加を要するコレクター枚数 N' は

$$\begin{aligned} N' &= (1200 \text{ W} \times 13 \text{ h} / 8 \text{ h} + 100 \text{ W}) / (450 \text{ W/m}^2 \\ &\quad \times 0.5 \times 1.26 \text{ m}^2) \\ &= 7.23 \div 8 \text{ 枚} \end{aligned}$$

合計12枚となる。故に一般住宅において本システムを設置する枚数は8枚程度が限度とすると、これは過大なシステムとなる。さらに曇天日も考慮に入れて不足分は小さな補助熱源で賄わなければならない。

4. むすび

真空ガラス管を用いた半強制循環式集蓄熱・給湯・暖房システムの実用化をめざした要素開発及びシステム化の実験をユニットタイプ及びプロトタイプ装置に

ついて行なって次のような結論を得た。

- (1) 改造された直接集熱式真空ガラス管コレクター1枚からなるユニット装置では、計測のために取付けられた流量計の保温性不足のため冬期間の自然循環集熱は不調であったが、半強制循環で集熱することにより正常に作動することが分かった。
- (2) 同上コレクターを4枚用いたプロトタイプ半強制循環の集熱効率は日射量及び外気温度の変化にあまり影響されず一定の大きな値が得られた。
- (3) プロトタイプ装置はコレクター集熱効率は良い値を得たが、室外貯湯槽の熱損失が大きく、これを半分程度に低減しなければことが分かった。
- (4) ユニットタイプ装置に関する予備実験によって、システムの熱的特性とともに集熱できる限界日射量及びそのときのコレクター出入口温度差などシステム制御のための条件が示唆された。

- (5) 冬期間本システムで夜間の暖房を行なうためにはコレクター12枚を必要とし、設備として過大になるので他の補助熱源を併用すべきである。

謝辞： 本研究で使用した供試機器類の一部は関アズマからご提供いただいたもので、ここに感謝します。

文献

- (1) 金山公夫・趙春江・馬場弘・遠藤登，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，太陽エネルギー，投稿中。
- (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，21-2，(1995)，pp.40~44.