

# 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3：ユーティリティタイプによる実用化実験

DEVELOPMENT OF A SEMI-FORCED CIRCULATING-TYPE COLLECTION STORAGE HOT-WATER SPACE-HEATING SYSTEM BY APPLYING VACUUMED DOUBLE GLASS TUBE  
PART 3 : PRACTICAL EXPERIMENT ON UTILITY-TYPE SYSTEM

金山公夫<sup>\*1</sup> 馬場 弘<sup>\*1</sup> 遠藤 登<sup>\*1</sup>  
Kimio KANAYAMA Hiromu BABA Noboru ENDOH

趙 春江<sup>\*2</sup> 川上英樹<sup>\*2</sup> 梅津将広<sup>\*2</sup>  
Chunjiang ZHAO Hideki KAWAKAMI 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 fundamental experiment on an elementary-type apparatus, and then a unit-type system and a prototype system were made of the improved collector of vacuumed double glass tube. Based on the experimental results of the prototype system, a utility-type system for practical use which consists of the improved collector, storage tank, circulation pump, pipings and so on was manufactured at a factory. The utility-type system could well work by the assistance of an automatic controller, consequently the stable performance and the high efficiency could be attained even in winter in Hokkaido.

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

## 1. まえがき

著者らはこれまで取り扱いやデザイン性に優れ、集熱効率の高い真空二重ガラス管（以下真空ガラス管という）式コレクターを素材とするエレメントタイプ<sup>(1)</sup>、ユニットタイプ及びプロトタイプ<sup>(2)</sup>の装置を組み立てて、半強制循環式集蓄熱・給湯・暖房システムの実用化のための基礎及び予備実験を行なってきた。その結果、日中日射がある時の集熱及び給湯は自然循環式、日射の弱い朝夕の集熱及び暖房は小型ポンプを用いた強制循環式の二通りの作動を組み合わせた半強制循環式にすることにより、寒冷地の冬期間を含めた通年の利用に耐え得る効率的で実用的なシステムが構築でき

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

る見通しが得られた。

この報告では、本システムを完成するに当たって、必要な制御の条件及び指令等に関して予備実験によつて把握し、それによって設計、開発された制御装置をシステム本体に組込んだユーティリティタイプの装置を作製し、自動運転のもとで、冬期を含めた長期の実験を行なってユーティリティタイプ装置を実用化につなげようと試みたものである。

## 主な記号及び性能値

$q_s$ 、 $Q_s$	傾斜面日射量	$W/m^2$ 、 $W$
$q_c$ 、 $Q_c$	コレクター集熱量	$W/m^2$ 、 $W$
$t_a$ 、 $T_a$	外気温度	$^{\circ}C$ 、 $K$
$t_s$	室外貯湯槽温度	$^{\circ}C$
$t_i$ 、 $T_i$	ガラス管内温度	$^{\circ}C$ 、 $K$
$t_o$ 、 $T_o$	コレクター出口温度	$^{\circ}C$ 、 $K$



れる。その際集熱量を正確に測定し、集熱効率を精度よく算出できるように室内の床暖房パネルの出入口のバルブは閉じる。

実験は平成6年5月下旬から6月中旬にかけて行なわれ、それらの測定結果から主要要素の熱的性能を算出する。

### 3.1.1 室外貯湯槽の熱損失

前回の予備実験<sup>(2)</sup>では室外貯湯槽の温度低下係数は  $0.025^{\circ}\text{C}/(\text{°C h})$  があり、相当に大きいことが分かった。これを断熱施工することにより  $0.016^{\circ}\text{C}/(\text{°C h})$  に低減させることができた。すなわち室外貯湯槽の温度低下速度は式(1)で示される。

$$d t_s / d \tau = -0.016 (t_s - t_a) \quad ^{\circ}\text{C}/\text{h} \quad (1)$$

よってその熱損失  $q_{sL}$  は

$$\begin{aligned} q_{sL} &= 4.186 \times 0.016 (t_s - t_a) \cdot V_s \\ &= 14.7 (t_s - t_a) \quad \text{kJ/h} \end{aligned} \quad (2)$$

となり、前回の64%に減少したが、さらに貯湯槽及び室外配管等の保温性を高める必要がある。

### 3.1.2 コレクターの集熱効率

直接集熱式ガラス管コレクターの横向き設置の場合、自然循環にある程度の脈動現象があるので、集熱量を「流量 × 温度差」から求めたのでは正確な値を算出しがたい。そこで式(3)に示すようにシステムの熱バランスの式によって計算する。

コレクター集熱量  $Q_c = \text{貯湯槽蓄熱量 } Q_s$

+ 貯湯槽熱損失  $Q_{sL} + \text{ガラス管蓄熱量 } Q_g$   
したがって実測値を整理して得られる集熱効率  $\eta_c$  は

$$\begin{aligned} \eta_c &= Q_c / Q_j = (Q_s + Q_{sL} + Q_g) / Q_j \\ &= 4.186 \{ \Delta t_s \cdot V_s + 0.016 V_s (t_s - t_a) \Delta \tau \\ &\quad + \Delta t_g \cdot V_g \} / (3.6 \bar{q}_j \cdot A_c \cdot \Delta \tau) \\ &\quad \text{kJ/kJ} \quad (3) \end{aligned}$$

ここで  $3.6$  : 測定時間  $10^3 \text{ s}$

$\Delta \tau$  : 日射サンプリングの時間間隔  $\text{h}$

$\bar{q}_j$  : 日射量の平均値  $\text{W/m}^2$

ガラス管コレクターの場合、ガラス管同士が影にならない範囲においては日射の入射方向へのガラス管の投影面積は太陽高度により変化を受けないが、コレク

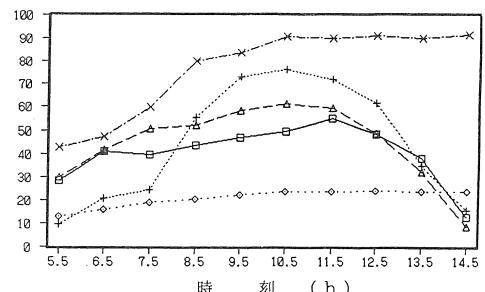


図2 ユーティリティタイプ自然循環の実験結果  
(H6.6.1)

ター棒面積は変化する。実験結果から太陽高度を考慮した集熱効率  $\eta_c$  の近似式は

$$\begin{aligned} \eta_c &= [\tau_s \cdot \alpha \cdot q_j \cdot A_c / \cos\{(h - (90 - \theta))\} (6 - \\ &\quad |11.5 - T|)/6] - c_1(t_s - t_a) A_c - \varepsilon \cdot \sigma \\ &\quad \{(c_2 \cdot q_j + T a^4) A_c\} / (q_j \cdot A_c) \end{aligned} \quad (4)$$

ここで  $q_j$  :  $\Sigma q_j$  の平均値 ( $= \Sigma q_j / n$ )  $\text{W/m}^2$

11.5 : 北見市 ( $43^\circ 49' \text{N}, 143^\circ 55' \text{E}$ )  $\text{h}$

の太陽南中時  $\text{h}$

$T$  : 5時半と17時半の間で  $\Sigma q_j / n$  の測定値  $\text{h}$

に対応する時刻  $\text{h}$

$c_1$  : 実験により求める熱伝達率 ( $= 0.45 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ )

$c_2$  : 実験により求める熱抵抗係数 ( $= 0.12^\circ\text{C m}^2/\text{W}$ )

が得られる。

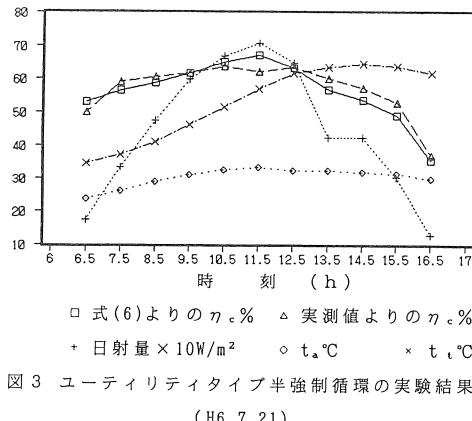
集熱効率はコレクター棒面積を基準に算出されるので、ガラス管コレクターの集熱効率は太陽高度によって影響を受けることになる。

以上の値を式(4)に代入して整理すると

$$\begin{aligned} \eta_c &= 0.597 / \cos\{(h - 30)(6 - |11.5 - T|)/6\} \\ &\quad - [0.45(t_s - t_a) + 0.347 \times 10^{-8} \{(0.12 q_j \\ &\quad + T a^4) A_c\}] / q_j \end{aligned} \quad (5)$$

を得る。

ユーティリティタイプについて自然循環集熱の実験結果(H6.6.1)を図2に示す。図中  $\eta_c$  の△印は実測データを用いて式(3)より、実線の  $\eta_c$  は式(5)により計算した。図中、集熱効率の計算値は午前中は実測値よりやや小さいが全体によく合っている。



## 3.2 半強制循環式集熱・暖房

ユーティリティタイプの実験装置に関する半強制循環の場合は、流量が自然循環より大きく、ガラス管内に蓄えられる熱量が少ないため、管内温度が自然循環ほど高くならない。また再放射熱損失も小さく、そのためには集熱効率は高い値を示す。

実験結果によれば集熱効率 $\eta_c$ は

$$\eta_c = 0.597 / \cos((h-30)(6 - |11.5 - T|)/6) \\ - [0.45(t_i - t_a) + 0.347 \times 10^{-8} \{(0.04q_j \\ + T_i)^4 - T_a^4\}] / q_j \quad (6)$$

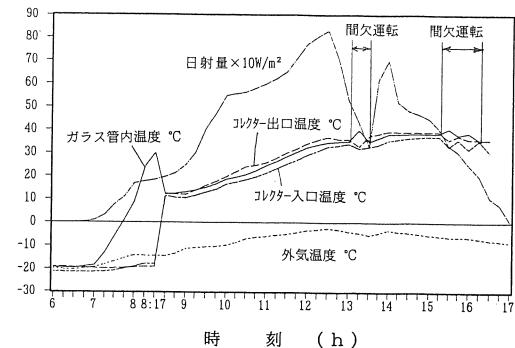
となる。式(6)から半強制循環の場合のガラス管の熱抵抗係数 $c_2$ は0.04で自然循環の0.12より1/3に低下し、そのことは再放射損失が低減したことを意味する。

式(5)及び式(6)において集熱効率は季節、時刻によって変化する太陽高度によって影響を受けることになるが、これに関する詳細な検討は改めて報告したい。

半強制循環式ユーティリティタイプの夏の快晴日の実験結果(H6.7.21)を図3に示す。図中集熱効率の計算値は実測値とよく合い、高い値を示す。

自動制御された半強制循環式ユーティリティタイプは冬期間も凍結を起すことなく順調に作動した。自動制御による冬期間の実験結果(H7.2.7)を生の測定データで図4に示す。

図4において朝6:30の外気温度は-20.5°C、ガラス管内温度-19.7°Cであったが、日射を受けて8:17には管内温度が30°Cに達してシステムは稼働し、コレクター出入口温度は上昇する。15:00にコレクター出口温



度39.3°Cの最高温度に達するが、その後は日射が低下して間欠循環に入り、さらに日射が弱まって16:40には排湯プロセスに入る。

## 4. システム制御の条件

本システムの作動を制御するために、まずコレクターへの送水開始の条件を決めなければならない。

日射量は天候によって大きく、かつ微妙に変化するのでこれを指令の信号に用いると制御は複雑になる。それゆえガラス管内の温度を検出して制御する。

まずガラス管内に熱電対温度計を挿入しておき、早朝に日射が当り始める時の空管内温度を測定した。その結果、管内温度の変化は50°C以下の範囲に式(7)に従う。

$$t_{i2} = 0.02Q_j + 0.0003Q_j^2 + t_{i1} \quad (7)$$

ここで  $t_{i2}$ : 到達温度 °C

$t_{i1}$ : 初期温度 °C

$t_a$ : 外気温度 °C

$Q_j$ :  $t_{i1} \sim t_{i2}$  の間の日射量 kJ/m²

式(7)から管内温度は外気温度にわずかに影響されるが、主に日射量で定まることが分かる。またこの特性は安い熱電対が高い日射計の代りに制御に使用できることを示唆している。その結果快晴日において夏は70W/m²の時、冬は120W/m²の時に管内温度は約30°Cに到達する。またこれらの日射量は本システムの損失熱量に見合うエネルギー割合である。

ガラス管が空管の場合、管内温度は早朝の日射により容易に上昇し、ガラス管が高温時に送水されるとヒートショックで破壊する恐れがある。実測によれば管内温度200°Cまでは破壊することはなかったが、253°Cの時に送水したら、たまたま欠陥があったと思われるガラス管が1本破壊した。その状況を図5に示す。

システムが自動制御で正常に作動している時は問題はないが、停電の場合または手動運転の場合に管内が高温の状態にある時いきなり送水すればガラス管破損の危険がある。

日常の作動状況から判断して、午前9時までは管内温度が200°Cまで上昇することはないので、手動の場合は安全上午前9時までに送水することが肝要である。

### 5. 全天候制御フロー

これまでユーティリティタイプの実験装置に簡易な制御システムを組込んで半強制運転のもとで実験が行なわれた。今回測定値及び経験値をもとにシステム全体を制御する全天候制御システムを開発し、半強制循環式システム本体に組込まれた。

自然循環及び半強制循環のための制御プロセスシートを図6(a)及び(b)に示す。ここで自然循環フロー及び半強制循環における操作法及び作動原理の概要を説明する。

#### 5.1 自然循環の制御プロセス

- 1) 電源SWをON、方式選択SWを「自然」にする。
- 2) 判定①はガラス管内温度を検出し  $t_g > 30^\circ\text{C}$  になればシステムが起動する。
- 3) 判定②は室内貯湯槽レベルがLより高ければポンプが起動し、室内貯湯槽の水を室外貯湯槽に移送する。
- 4) 判定②で室内貯湯槽レベルがLより低くなればポンプが停止して自然循環に入る。判定③で室外貯湯槽レベルがHより低く、判定④で室外貯湯槽レベルがLより低ければ⑤に進む過程で水道水が補給される。
- 5) 頻繁に電磁弁が作動して補水しないように判定③と判定④で室外貯湯槽レベルがHとLの間にあれば判定⑥に進む過程で自然循環集熱を行なう。
- 6) 判定③で室外貯湯槽レベルがHにあれば直ちに⑥に進む過程で自然循環集熱を行なう。
- 7) 判定⑥で外気温度が  $5^\circ\text{C}$  以上であれば判定③に戻り、5、6項に従って自然循環集熱を継続する。

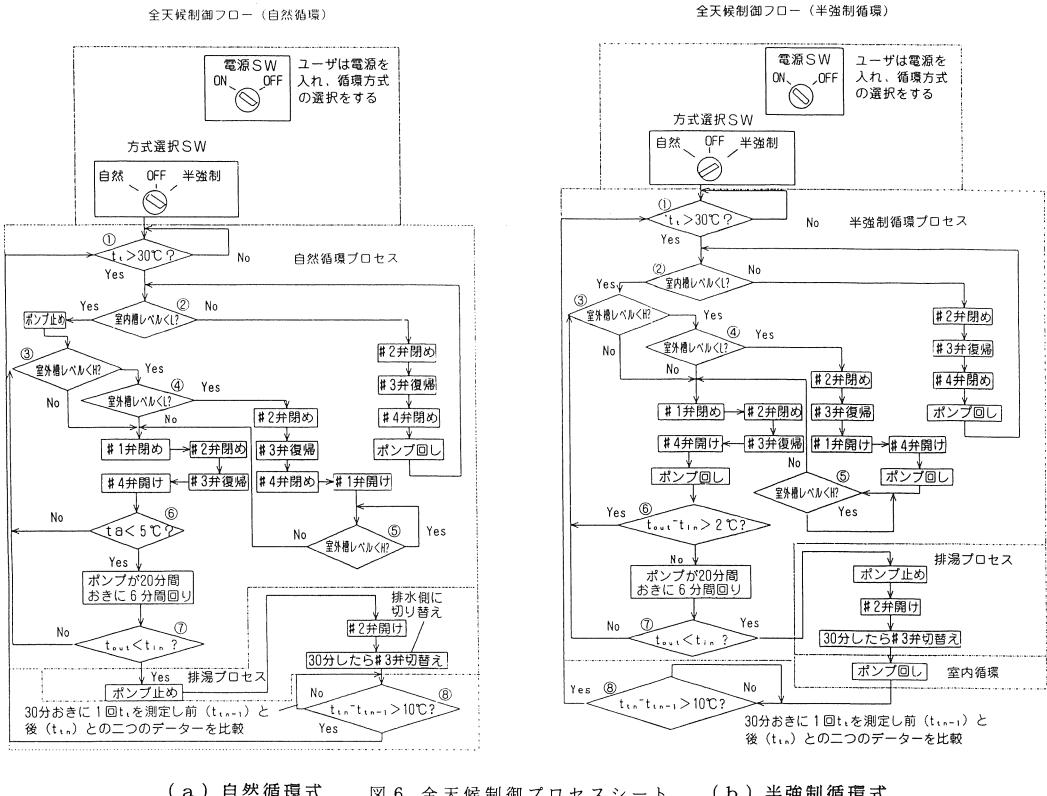


図5 ヒートショックで破壊したガラス管

- 8) 判定⑥で外気温度が  $5^\circ\text{C}$  以下であれば、ポンプが間欠循環して判定⑦に入り、コレクター出入口の温度差で集熱するか集熱を停止するかの判断に入り、出口温度が入口温度より高ければ、判定⑧に戻り、5)、6)項に従って自然循環集熱を継続する。出口温度が入口温度より低ければ、ポンプが停止してシステムは排湯プロセスに入る。
- 9) その時バルブ#2が開き室外貯湯槽及び室外にあるシステム中の水は全部室内貯湯槽に回収される。30分後に#3は排水側に切替えられ残留水を排水する。
- 10) 判定⑧でガラス管内の温度を30分おきにチェックし、前回のチェックした温度より  $10^\circ\text{C}$  高いときに判定①に入り同様の制御プロセスを繰り返す。

#### 5.2 半強制循環の制御プロセス

- 1) 方式選択SWを「半強制」にする。
- 2) 判定①、②、③、④及び⑤は「自然循環」の場合と同じ判断をする。半強制循環では②から⑤へはポンプの発停に関係なく直接的に進む。
- 3) 判定③、④及び⑤で室外貯湯槽レベルがHより高ければ半強制循環に入り、集熱(暖房)を開始する。
- 4) 判定⑥でコレクター出口温度が入口温度より  $2^\circ\text{C}$  高ければ集熱を続け、 $2^\circ\text{C}$  より低ければポンプの間欠運転に入る。
- 5) 判定⑦でコレクター出口温度が入口温度より高ければ再度半強制循環を続け、低ければポンプが停止し排湯プロセスに入り室外貯湯槽の温水は室内貯湯槽に回収される。
- 6) 排湯開始後30分たらば#3をドレン側に切替え残水を排水し、ポンプを回し室内循環による暖房を行なう。
- 7) ガラス管内の温度を30分おきに測定し、前回の温度より  $10^\circ\text{C}$  高ければ判定①に戻り、ガラス管内温度が  $30^\circ\text{C}$  以上であれば半強制循環プロセスを繰り返す。



(a) 自然循環式

図6 全天候制御プロセスシート (b) 半強制循環式

## 6. むすび

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目標に、「その1：エレメントタイプ」、「その2：ユニットタイプとプロトタイプ」及び「その3：ユーティリティタイプ」と段階を追って、その技術開発の経過を述べてきた。本論文に示されたユーティリティタイプのシステムは、前報のプロトタイプシステムの断熱保温性を高め、自動化のための全天候制御装置を組込んだ寒冷地対応型に仕上げられた。ゆえにユーティリティタイプシステムは設置環境やユーザーの使用条件による若干の改良はあっても、基本的には寒冷地にも供し得る適応性のあるシステムであると考えられる。

以下にユーティリティタイプのシステムの研究開発における結論を要約する：

- (1) ユーティリティタイプの室外貯湯槽の断熱性が高まり、温度低下速度が減少したが、さらに貯湯槽を含む室外システム全体の保温性の向上がなされれば、システム全体の性能も向上するものと思われる。

(2) ユーティリティタイプシステムは手動運転のもので自然循環及び半強制循環によるそれぞれ単独の集熱が行なわれ、高い集熱効率が得られた。

(3) その際、空管の真空ガラス管内温度と日射量の測定によってシステム始動時の制御条件が明確にされた。

(4) その他、手動運転のもので得られたデータからシステム制御に必要な信号の検出及び設定値が定められ、それに基づいて全天候制御装置が設計、製作された。

(5) 真空ガラス管コレクターの集熱効率はその定義から太陽高度の影響を受けることが確かめられ、真空ガラス管同士が影になる朝夕及び太陽高度の低い時の集熱効率は見掛け上増加することが明らかになった。

(6) しかし、北見市においてコレクター横向き設置の場合、架台傾斜角が60°であれば夏至の太陽高度に対してもガラス管同士は影になることなく、年間を通して入射した日射を有効に集熱することができる。

(7) 全天候制御装置をシステムに組込んで自然循環及び半強制循環によりシステムは順調に作動し、真冬の-20°C以下の低温大気中でも凍結等のトラブルがなく自動的に連続運転が行なわれている。これまでの研究開発で明らかになったように、寒冷地適用の半強制循環式実用化システムの開発は、水集熱に対する凍結防止対策、集熱効率及び断熱保温能力の向上等のハード技術の研究はもちろん、システム全体を設置環境及び用途に合わせた適切な制御のもとに作動させるソフト技術の研究を併行させ、両者の組合せによってはじめて達成できるものと考える。

謝辞： 本研究で使用した供試機器類の一部は㈱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・趙春江・川上英樹・梅津将広、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、太陽エネルギー、投稿中。