

# 太陽熱による吸湿液の濃縮特性

DYNAMIC CHARACTERISTICS OF CONCENTRATION PROCESS  
OF HYGROSCOPIC SOLUTION USING SOLAR ENERGY

平 荣 蔵<sup>\* 1</sup> 小 山 繁<sup>\* 2</sup> 中 山 隆<sup>\* 1</sup> 藤 井 哲<sup>\* 3</sup>  
Eizo HIRA Shigeru KOYAMA Takashi NAKAYAMA Tetsu FUJII

## Abstract

Dynamic characteristics of concentration process of hygroscopic solution(LiBr solution) by solar energy is investigated experimentally using a solar collector system and a concentration system of LiBr solution. The solar collector system is composed of 10 evacuated tubular solar collectors, a hot water storage tank and an auxiliary water heater. The concentration system is composed of a generator heated by hot water from the storage tank and a condenser cooled by city water. Experimental results of the following transient characteristics are presented: 1) the heating process of LiBr solution in the generator at atmospheric pressure, 2) the evaporating and condensing processes of water in the concentration system at reduced pressure, and 3) the concentrating process of LiBr solution when the hot water at a constant temperature is supplied to the generator and when the solar energy is used as heat source. The numerical calculation to predict these transient characteristics is also carried out. The results of the prediction agree well with the experimental ones.

**Key words:** Solar Energy, Evacuated Tubular Solar Collector System, Concentration Process, Unsteady State, Hygroscopic Solution(LiBr Solution), Numerical Calculation

## 1. 緒 言

太陽熱は無尽蔵でクリーンなエネルギーであり、地球環境保全などの観点から、その利用技術開発の重要性が再認識されつつある。しかしながら、太陽熱はエネルギー密度が小さく日射変動等の影響を強く受けるため、定常的な熱源としての利用が困難である。このようなエネルギーのより積極的な利用を図るために、集熱したエネルギーを直ちに固体吸湿剤の再生または吸湿液の濃度差エネルギーなどに変換して長期貯蔵するとともに、空調や乾燥の熱源に利用することが考えられる。

太陽熱を用いた吸湿液または吸湿剤の再生および除湿・乾燥システムの研究は、例えば Lof<sup>(1)</sup> の太陽熱によるトリエチレングリコール水溶液再生利用除湿シ

ステム、 Baum ら<sup>(2)</sup>、木村ら<sup>(3)</sup> および Choi<sup>(4)</sup> の開放式太陽熱集熱器を用いた LiCl 水溶液の直接再生式除湿システム、 斎藤<sup>(5)</sup> の固体吸湿剤を用いた除湿システムなどがある。しかしながら、これらのシステムでは、吸湿液または固体吸湿剤の加熱再生を大気圧下で行うため、吸湿液または固体吸湿剤の再生を十分に行うことができないものと考えられる。

そこで、本報では、太陽熱を用いて吸湿液の濃縮を高効率に行い長期貯蔵することを目的に、真空ガラス管形太陽熱集熱器 10 セットからなる太陽熱集熱装置ならびに減圧下で吸湿液 (LiBr 水溶液) を濃縮再生する実験装置を製作し、まず温水ボイラを用いて高温熱源側の温度を一定とした場合の濃縮再生装置の伝熱および濃縮過程を調べた。ついで太陽熱集熱装置と濃縮再生装置とを連動した場合の LiBr 水溶液の濃縮実験を行った。さらに、濃縮再生装置の伝熱および LiBr 水溶液の濃縮過程に関する数値計算を行い、その結果と実測値との比較を行った。

\* 原稿受付 平成 7 年 3 月 28 日

\* 1 宮崎県工業試験場 (〒 880 宮崎市恒久 1-7-14)

\* 2 九州大学機能物質科学研究所 (〒 816 春日市春日公園 6-1)

\* 3 東亜大学大学院 (〒 751 下関市一の宮学園町 2-1)

## 主な記号

C : 热容量	kJ/K
$c_p$ : 比热	kJ/(kg·K)
G : LiBr 水溶液および凝縮水の重量	kg
g : 水蒸気の重量流量	kg/h
h : 水蒸気, LiBr 水溶液, 凝縮水の比エンタルピ	kJ/kg
m : 温水, 冷却水および循環水溶液の流量	kg/h, l/h
P : 圧力	mmHg, Pa
Q : 热量	kW, kWh
T : 温度	°C, K
t : 時間	h, min, sec
X <sub>s</sub> : LiBr 水溶液の重量濃度	%
$\phi$ : 热交換系の温度効率 (式(1)および(2))	-
第1添字	
A : 太陽熱集熱器	
a : 周囲	
C : 凝縮器	
G : 再生器	
H : 温水 (高温熱源)	
I : 日射	
L : 冷却水 (低温熱源)	
s : LiBr 水溶液	
v : 水蒸気	
w : 水および凝縮水	
第2添字	
i : 初期値または入口	
o : 最終値または出口	

## 2. 実験装置および方法

図1に太陽熱集熱装置の概略を示す。装置は二重管式真空ガラス管形太陽熱集熱器(富士電機製,FES-8型)が5セット、ヘッダータイプの真空ガラス管形太陽熱集熱器(三洋電機製,STC-BH250型)が5セット、内容積0.5m<sup>3</sup>の蓄熱タンクおよび温水ボイラ(長府製作所製,IB-28S型、熱出力31.4kW)より構成されている。

図2(a)および(b)に製作した吸湿液濃縮再生装置の形状寸法および系統図を示す。本装置は外径406.4mm、厚み16.7mmの鋼管で構成され、高さ2.95mの再生器(左側)と高さ2.3mの凝縮器(右側)が塔頂部付近で外径318.5mm、厚み14.3mmの鋼管により連通されている。再生器および凝縮器内には外径22.2mmの銅製のコイル(蛇管式、伝熱面積1.8m<sup>2</sup>)がそれぞれの容器内の空間に保持されている。また、

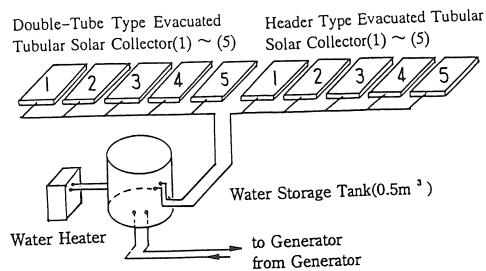


図1 太陽熱集熱実験装置の概略

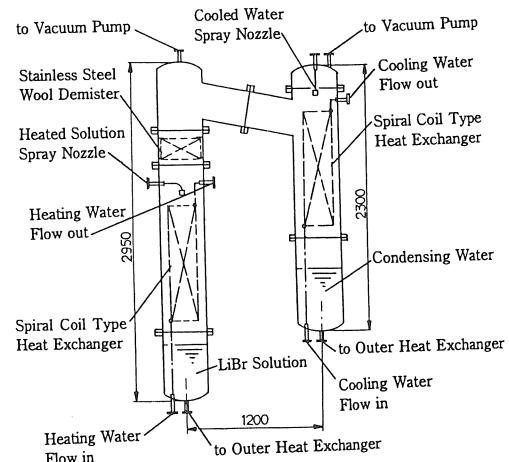


図2(a) 吸湿液濃縮再生装置の形状寸法

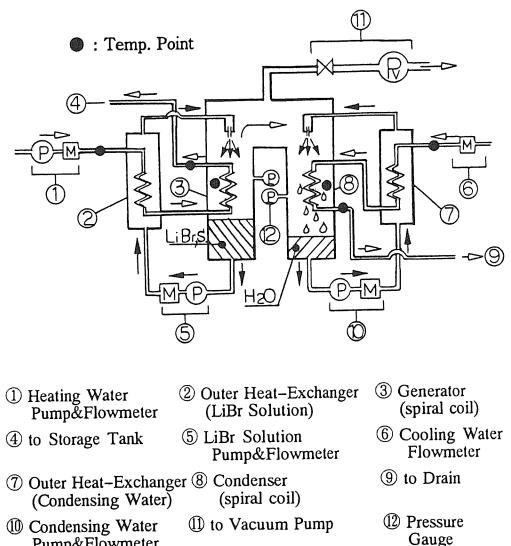


図2(b) 吸湿液濃縮再生装置の系統図

図 2(b) の②と⑦の位置に外径 22.2mm の銅製のコイル(蛇管式, 伝熱面積 1.0 m<sup>2</sup>)を内蔵した外部熱交換器が付設されている。装置全体の外表面は厚み 100mm のグラスウールにより保温した。

本装置の操作および実験方法を図 2(b)に基づき説明する。高温熱源水(温水)は蓄熱タンクから温水ポンプ・流量計①, 再生器側外部熱交換器②, 再生器③内の伝熱コイルを経由して蓄熱タンク④へ戻される。低温熱源水(水道水)は、流量計⑥から凝縮器側外部熱交換器⑦, 凝縮器⑧内の伝熱コイルを経由して排水⑨へ捨てられる。LiBr 水溶液は水溶液循環ポンプ・流量計⑤, 再生器側外部熱交換器②を経由して③内の伝熱コイルへ噴霧される。凝縮器内の凝縮水(一定量が補給してある)は凝縮水循環ポンプ・流量計⑩, 凝縮器側外部熱交換器⑦を経由して凝縮器塔頂部より⑧内の伝熱コイルへ噴霧される。各部の温度は●印で示した位置の配管, 再生器および凝縮器内に挿入した外径 0.65mm の T 型シース熱電対を用い, デジタル温度記録計(松下通信工業製, VS-4300A 型)により, 5 または 10min ごとに記録した。再生器および凝縮器内の水蒸気圧はピラニゲージ(島津製作所製, MP-12 型)により連続的に測定した。温水, 冷却水および水溶液循環流量の測定には体積流量計(オーバル製, LS5277)を用いた。

実験は濃縮再生装置の伝熱および濃縮過程を把握するため, 以下の 4 種類について行った。

#### (I) 大気圧下での LiBr 水溶液の昇温実験

③と⑧内を大気圧とした状態で, 再生器に温水をステップ的に供給した場合の③内の LiBr 水溶液の温度変化などを測定した。

#### (II) 減圧下における水の蒸発実験

③と⑧内に所定量の水を入れ, 凝縮器を冷却水により冷却しながら再生器および凝縮器内圧力を凝縮器内の凝縮水温度に対応した飽和水蒸気圧まで減圧した後, 再生器に温水をステップ的に供給した場合の③と⑧内の水の温度変化などを測定した。

#### (III) 減圧下での LiBr 水溶液の濃縮実験

③内に所定の重量および濃度の LiBr 水溶液を, また⑧内に水を入れる。凝縮器を冷却水により冷却しながら再生器および凝縮器内圧力を凝縮器内の凝縮水温度に対応した飽和水蒸気圧まで減圧した後, 再生器に温水をステップ的に供給した場合の③と⑧内の温度変化などを測定した。

#### (IV) 太陽熱による LiBr 水溶液の濃縮実験

(III) と同様に③内に所定の重量および濃度の LiBr 水溶液を, また⑧内に水を入れる。凝縮器を冷却水に

より冷却しながら再生器および凝縮器内圧力を凝縮器内の凝縮水温度に対応した飽和水蒸気圧まで減圧した後, 再生器に太陽熱集熱器 10 セットからなる太陽熱集熱装置で集熱した温水をステップ的に供給した場合の③と⑧内の温度変化などを測定した。

### 3. 濃縮過程の基礎式および計算方法

図 3 に濃縮過程の計算モデルを示す。高温熱源は流量  $m_{H1}$ , 入口・出口温度が  $T_{H1}, T_{H2}$  の温水である。再生器内の LiBr 水溶液の温度を  $T_s$ , その重量を  $G_s$ , 重量濃度を  $X_s$ , 再生器内水蒸気圧を  $P_s$ , LiBr 水溶液循環量を  $m_s$  とする。また, 再生器側構成要素(再生器, 外部熱交換器, 温水配管および水溶液循環系)の熱容量の和を  $C_g$  とする。一方, 低温熱源は流量  $m_L$ , 入口・出口温度が  $T_{L1}, T_{L2}$  の水道水である。凝縮器内の凝縮水の温度を  $T_w$ , その重量を  $G_w$ , 凝縮器内水蒸気圧を  $P_w$ , 凝縮水循環流量を  $m_w$  とする。また, 凝縮器側構成要素(凝縮器, 外部熱交換器, 冷却水配管および凝縮水循環系)の熱容量の和を  $C_c$  とする。再生器から凝縮器へ向かう水蒸気移動量を  $g$ , そのエンタルピを  $h_g$ , 再生器内の LiBr 水溶液のエンタルピを  $h_s$ , 凝縮器内の水のエンタルピを  $h_w$  とする。

以上のモデルに基づき濃縮再生装置の伝熱および濃縮過程の計算を行うが, その際以下の仮定をおく。

- (1) 本実験系と外界との間の熱の出入りは無視する。
- (2) 再生器および凝縮器の構成要素の熱容量とそれぞれの容器内の流体の熱容量を一体化した集中熱容量系とする。
- (3) 本濃縮装置内の再生器と凝縮器は, 空間に保持した伝熱コイルに流体を噴霧する方式であり, かつそれぞれの系統に外部熱交換器を付設しているため, 伝熱形態が複雑である。そこで, これらの熱交換系の熱移動を定義式(1) および(2) の温度効率  $\phi$  により簡単化する。

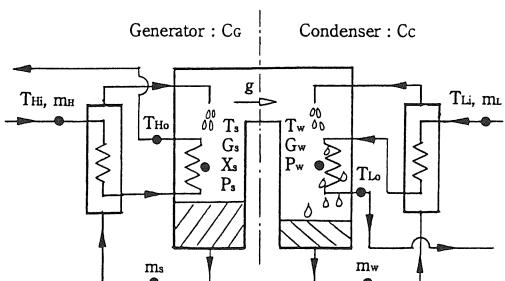


図 3 濃縮過程の計算モデル

$$\text{再生器側 : } \phi_G = (T_{Hi} - T_{Ho}) / (T_{Hi} - T_s) \quad (1)$$

$$\text{凝縮器側 : } \phi_C = (T_{Li} - T_{Lo}) / (T_{Li} - T_w) \quad (2)$$

(4) 再生器および凝縮器内の水蒸気圧は等しい。

### 3.1 基礎式

再生器側の熱バランス :

$$(c_{ps}G_s + C_C) \frac{dT_s}{dt} = c_{ph}m_H(T_{Hi} - T_{Ho}) - g(h_v - h_w) \quad (3)$$

ここに、 LiBr 水溶液量  $G_s$  は、

$$G_s = G_{si} - \int_0^t g dt \quad (4)$$

凝縮器側の熱バランス :

$$(c_{pw}G_w + C_D) \frac{dT_w}{dt} = c_{pl}m_L(T_{Li} - T_{Lo}) + g(h_v - h_w) \quad (5)$$

ここに、 凝縮器内水量  $G_w$  は、

$$G_w = G_{wi} + \int_0^t g dt \quad (6)$$

LiBr 水溶液の重量濃度  $X_s$  :

$$X_s = X_{si}G_{si}/G_s \quad (7)$$

再生器および凝縮器内水蒸気圧の平衡条件 :

$$P_s = P_w \quad (8)$$

初期条件 :

$$t \leq 0 : T_s = T_w = T_a \text{ (or } T_{Li}) \quad (9)$$

計算に用いる LiBr 水溶液、 凝縮水等の熱物性値は Mcnnely の文献<sup>(6)</sup>、 植村らの文献<sup>(7)</sup> および化学工学便覧<sup>(8)</sup>を参考にして、 以下のような関数で近似した。

$$h_v = f_{hv}(T_s, X_s) \quad (10)$$

$$h_s = f_{hs}(T_s, X_s) \quad (11)$$

$$h_w = f_{hw}(T_w) \quad (12)$$

$$c_{ps} = f_{cps}(T_s, X_s) \quad (13)$$

$$c_{ph} = f_{ph}(H((T_{Hi} + T_{Ho})/2)) \quad (14)$$

$$c_{pw} = f_{cpw}(T_w) \quad (15)$$

$$c_{pl} = f_{pl}((T_{Li} + T_{Lo})/2) \quad (16)$$

$$P_s = f_{Ps}(T_s, X_s) \quad (17)$$

$$P_w = f_{Pw}(T_w) \quad (18)$$

### 3.2 計算方法

LiBr 水溶液と凝縮水の温度は、 温水と冷却水の入口温度、 再生器と凝縮器の熱交換系の温度効率  $\phi$  (式(1), (2)) および初期条件 (式(9)) を与え、 再生器と凝縮器内水蒸気圧の平衡条件 (式(8)) を満足するまで、 基礎式(3) と (5) を前進差分近似した式を反復計算して求めた。 計算時間幅  $\Delta t$  は、 温度応答が比較的遅いため 6sec とした。 また、 反復計算は水溶液温度の反復前後の差が 0.0001 °C 未満のとき収束したとした。 なお、 実測値に基づく水蒸気移動量  $g$  と LiBr 水溶液濃

度  $X_s$  の計算は、 基礎式(3), (4), (7) に初期条件を適用して求めた。

### 4. 実験結果および計算値と実測値との比較

本章では、 高温熱源に温水ボイラを用い、 热源温度が時間的に変化しない場合の濃縮再生装置の伝熱および濃縮過程の動特性について検討する。

#### 4.1 大気圧下での LiBr 水溶液の昇温実験

再生器内を大気圧とした場合の LiBr 水溶液の昇温特性について検討する。 実験は再生器内を大気圧とした状態で、 再生器内に初期重量  $G_{si}=56.7\text{kg}$ , 初期濃度  $X_{si}=56.4\%$  の LiBr 水溶液を入れる。 LiBr 水溶液は水溶液循環ポンプ (流量  $m_s=250\text{l/h}$ )、 外部熱交換器を経由し、 再生器内の空間に保持された伝熱コイルへ噴霧される。 LiBr 水溶液の循環が安定したことを確認した後、 時刻  $t=0\text{min}$  より設定温度および流量 ( $T_{Hi}=53.8\text{ }^\circ\text{C}, m_h=318\text{kg/h}$ ) の温水を再生器側へステップ的に供給した。

図 4 は上記実験での再生器内各部の温度の時間的変化を示す。 図中の ■, ▲, ○ および △ 印はそれぞれ温水入口・出口温度  $T_{Hi}, T_{Ho}$ , 再生器内 LiBr 水溶液温度  $T_s$  および周囲空気温度  $T_a$  の実測値を示す。 ただし、 温水出口温度  $T_{Ho}$  (▲) は温水流れの時間的遅れを考慮し、 温水入口温度測定点の温水  $T_{Hi}$  (■) が出口温度測定点に達したときの温度を温水流れ遅れ時間さかのぼって図示している (以下に示す図 5, 図 6(a) および図 8(a) の場合の温水出口温度ならびに冷却水出口温度の場合も同様)。  $T_{Hi}$  (■) は約 15min 後に安定する。 $T_{Ho}$  (▲) は  $T_{Hi}$  の温度上昇時刻よりやや遅れて温度上昇を開始し、  $T_{Hi}$  に近づく。  $T_s$  (○) は  $T_{Ho}$  よりわずかに低温度であるが、 ほとんど同一の温度経過をたどり  $T_{Hi}$  に近づく。 実測値より求めた再生器側熱交換器の温度効率  $\phi_G$  は 0.80 ~ 0.95 の範囲にあった。一方、 図中の実線は基礎式(3) に熱交換器の温度効率  $\phi_G$  を適

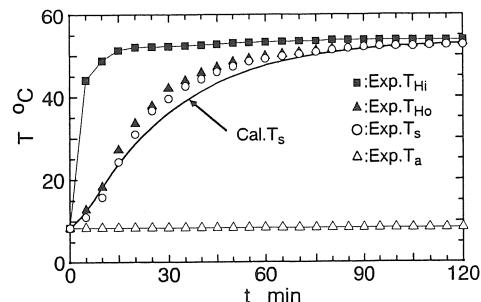


図 4 大気圧下での LiBr 水溶液の昇温実験

用した場合の LiBr 水溶液温度  $T_s$  の時間的変化の計算値である。計算は、基礎式(3)の右辺の  $(T_{Hi} - T_{Ho})$  を定義式(1)により  $\phi_G (T_{Hi} - T_s)$  に置き換え、水の蒸発がないので  $g=0$  とおき、さらに  $\phi_G=0.9$  一定とし、 $t=0\text{min}$  で  $T_s=T_a$  の初期条件を与えて行った。この際の再生器側構成要素の熱容量  $C_G$  は製作図より部材重量等を計算して得た値  $410\text{kJ/K}$  を用いた。 $T_s$  の計算値(実線)は実測値(○)よりやや低い。

#### 4.2 減圧下での水の蒸発実験

本節では、再生器および凝縮器内に水を入れ、減圧下での水の蒸発特性を検討する。実験は再生器と凝縮器にそれぞれ初期重量  $G_{Wi(G)}=90\text{kg}$  と  $G_{Wi(C)}=50\text{kg}$  の水を入れ、それぞれの水溶液循環ポンプ(循環流量  $m_s=m_w=250\text{l/h}$ )を作動させながら、凝縮器を冷却水( $T_{Li}=9.5^\circ\text{C}$ ,  $m_L=387\text{kg/h}$ )により冷却しつつ、再生器および凝縮器を真空ポンプで減圧する。そして、 $t=0\text{min}$  より設定温度および流量( $T_{Hi}=58.5^\circ\text{C}$ ,  $m_H=314\text{kg/h}$ )の温水を再生器側にステップ的に供給した。

図5は上記実験での再生器と凝縮器内の各部の温度の時間的变化を示す。図中の■, ●, ○, □, ▲および△印はそれぞれ温水入口・出口温度  $T_{Hi}, T_{Ho}$ 、再生器側の水の温度  $T_{w(G)}$ 、冷却水入口・出口温度  $T_{Li}, T_{Lo}$  および凝縮器側の水の温度  $T_{w(C)}$  の実測値を示す。 $T_{Hi}$ (■)は約10min後に安定する。 $T_{Ho}$ (●),  $T_{w(G)}$ (○),  $T_{Lo}$ (▲)および $T_{w(C)}$ (△)は $T_{Hi}$ よりやや遅れて温度上昇はじめ、それぞれがほぼ一定の温度差を維持しつつ、約90min後に平衡温度に達する。実験開始直後の $T_{w(G)}$ (○)は $T_{w(C)}$ (△)よりわずかに高い温度となるが、 $t=30\text{min}$ 以降ほとんど一致して推移する。一方、実験中の再生器および凝縮器内の圧力はそれぞれの容器内の水の温度に対応した飽和水蒸気圧にはほぼ一致して変化し、また再生器内の圧力は凝縮器内の圧力より200Pa程度高い圧力で推移していた。この傾向は以下

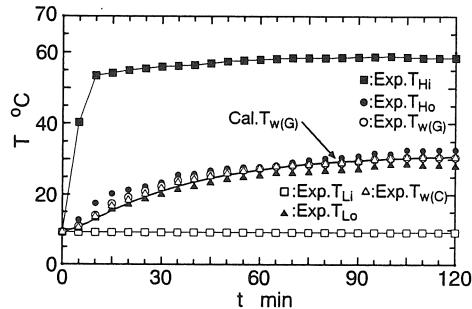


図5 減圧下での水の蒸発実験

に示す図6(a)および(b)、図8(a)および(b)の場合も同様であった。なお、再生器内の圧力が凝縮器のそれよりも高くなるのは水蒸気の移動に伴う圧力損失が生じているためである。一方、図中の実線は実測値の  $T_{Hi}$  と  $T_{Li}$  を用い、熱交換系の温度効率を  $\phi_G=\phi_C=0.9$  一定とした場合の  $T_{w(G)}$  の時間的変化の計算値である。計算は、まず定義式(1)と(2)を用いて、基礎式(3)と(5)の右辺の  $(T_{Hi} - T_{Ho})$  と  $(T_{Li} - T_{Lo})$  をそれぞれ  $\phi_G (T_{Hi} - T_{w(G)})$  と  $\phi_C (T_{Li} - T_{w(C)})$  に置き換え、再生器と凝縮器内の水蒸気圧を等しいとし、 $t=0\text{min}$  で  $T_{w(G)}=T_{w(C)}=T_{Li}$  の初期条件を与えて行った。また、再生器側および凝縮器の構成要素の熱容量は製作図より部材重量を計算して得た値  $C_G=410\text{kJ/K}$  および  $C_C=360\text{kJ/K}$  を用いた。再生器内の水の温度  $T_{w(G)}$  の計算値(実線)はその実測値(○)に比して、実験開始直後やや低い温度を予測するが、60min以降はよく一致している。

#### 4.3 減圧下での LiBr 水溶液の濃縮実験

(温水入口温度  $T_{Hi}$  がほぼ一定の場合)

本節では、再生器内に LiBr 水溶液を入れ、減圧下で加熱した場合の LiBr 水溶液の濃縮特性を検討する。実験は再生器内に初期濃度  $X_{Si}=24.3\%$ 、初期重量

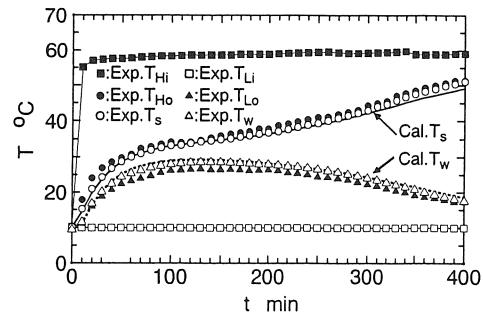


図6(a) 減圧下での LiBr 水溶液の濃縮実験  
( $T_{Hi}$  がほぼ一定の場合の温度変化)

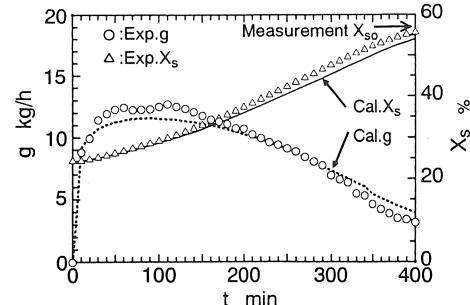


図6(b) 減圧下での LiBr 水溶液の濃縮実験  
( $T_{Hi}$  がほぼ一定の場合の  $g$  と  $X_s$  の変化)

$G_{si}=108\text{kg}$  の LiBr 水溶液を、また凝縮器には初期重量  $G_{wi}=50\text{kg}$  の水を入れ、それぞれの循環ポンプ ( $m_s=m_w=250\text{l/h}$ ) を作動させながら、凝縮器側に冷却水 ( $T_{Li}=10.0^\circ\text{C}$ ,  $m_L=381\text{kg/h}$ ) を供給する。再生器および凝縮器を真空ポンプで減圧し、装置各部の温度などが安定したことを確認した後、時刻  $t=0\text{min}$  より設定温度  $T_{Hi}=59.2^\circ\text{C}$ 、流量  $m_H=320\text{kg/h}$  の温水を再生器側にステップ的に供給した。

図 6(a) に上記実験の再生器内の LiBr 水溶液と凝縮器内の凝縮水などの温度の時間的変化を示す。図中の ■, ●, ○, □, ▲ および△印は、それぞれ温水入口・出口温度  $T_{Hi}, T_{Ho}$ , LiBr 水溶液温度  $T_s$ , 冷却水入口・出口温度  $T_{Li}, T_{Lo}$  および凝縮水温度  $T_w$  の実測値を示す。 $T_{Ho}$ (●) と  $T_s$ (○) は  $T_{Hi}$ (■) よりやや遅れて上昇はじめ、 $t=50\text{min}$  付近まで大きな上昇率を示し、その後  $t=200\text{min}$  付近まで緩やかに上昇する。さらに、 $t=200\text{min}$  を過ぎた付近から再び大きく上昇し、 $T_{Hi}$  に近づく。一方、 $T_{Lo}$ (▲) と  $T_w$ (△) は  $T_{Hi}$  の上昇時刻より約 5min 程度遅れて温度上昇を開始し、その後  $T_s$  と同様な温度プロファイルを描いて昇温する。そして  $t=120\text{min}$  付近で最高温度となった後、時間経過とともに温度降下し、 $T_{Li}$ (□) に近づく。図中の実線と破線は、本実験の実測値  $T_{Hi}, m_H, T_{Li}$  および  $m_L$  と製作図より算定した  $C_G=410\text{kJ/K}, C_{Cg}=360\text{kJ/K}$  を基礎式(3)～(7)に入力し、 $\phi_G=\phi_C=0.9$  とおき、 $t=0\text{min}$  で  $T_s=T_w=T_{Li}$  の初期条件を与え、再生器と凝縮器の水蒸気圧平衡条件式(8)により反復計算して求めた  $T_s$  と  $T_w$  の計算値である。 $T_s$ (実線) および  $T_w$ (破線)ともにそれらの実測値(○)および(△)と良く一致している。

図 6(b) は再生器から凝縮器への水蒸気移動量  $g$  と LiBr 水溶液濃度  $X_s$  の時間的変化を示す。横軸に経過時間  $t$  を、縦軸(左)に水蒸気移動量  $g \text{ kg/h}$ 、縦軸(右)に LiBr 水溶液の重量濃度  $X_s \%$  を示す。図中の○および△印は、実測値  $T_{Hi}, T_{Ho}, T_s, m_H$  と  $C_G$  を基礎式(3),(4)および(7)に適用し、初期条件  $t=0\text{min}$  で  $T_s=T_{Li}$  において求めた実測値に基づく  $g$  と  $X_s$  の計算値(図中では Exp. $g$ (○) および Exp. $X_s$ (△) と表示)である。 $g$ (○) は  $t=0\text{min}$  から急激に増加し、 $t=70\text{min}$  付近で最高値となる。その後、ほぼ一定値を維持した後、 $t=120\text{min}$  より緩やかに減少する。これは以下のように解釈される。すなわち、実験開始直後の再生器内の LiBr 水溶液は濃度が低くわずかな温度上昇でも水蒸気の発生が可能であること、および凝縮器内の水は温度が低く水蒸気圧が低いことより再生器から凝縮器への水蒸気の移動量は増加するが、時間の経過とともに

再生器内の LiBr 水溶液の濃度が高くなること、および凝縮器内の水の温度が高くなり水蒸気圧が高くなることより再生器から凝縮器への水蒸気の移動量はピークを迎えた後、次第に減少するものと考えられる。LiBr 水溶液濃度  $X_s$ (△) は  $t=0\text{min}$  からわずかに増加はじめ、 $100\text{min}$  以降時間経過に伴いほぼ直線的に高くなる。 $t=400\text{min}$  での LiBr 水溶液濃度は実験終了後に再生器より採取した LiBr 水溶液を、比重計を用いて測定した濃度  $X_{so}$ (大きな黒の矢印  $X_{so}=56.5\%$ ) より約 1.5% 低い。一方、図中の破線および実線は図 6(a) の計算と同様にして求めた  $g$  と  $X_s$  の計算値を示す。 $g$  の計算値(破線)は実測値に基づく計算値(○)に比して、 $t=30 \sim 200\text{min}$  の間はやや低い値を、 $t=300\text{min}$  以降はやや高い値を予測する。一方、 $X_s$  の計算値(実線)は実測値に基づく計算値(△)に比してやや低い濃度を予測するが、その差異は少なく良く一致している。

## 5. 太陽熱集熱系と連動した場合の濃縮実験

本章では、太陽熱集熱装置と吸湿液濃縮再生装置と連動した場合の太陽熱の熱収支および吸湿液の濃縮特性について検討する。

### 5.1 太陽熱集熱系の実験結果

本節では、図 1 に示した太陽熱集熱装置と吸湿液濃縮再生装置を同時に稼動した際の太陽熱の熱収支などについて検討する。太陽熱の集熱量、再生器への供給熱量および凝縮器の冷却熱量などの計算は、それぞれの装置の入口・出口の温度差とそれらの流量を用いて行った。

図 7 は太陽熱の集熱量、再生器への供給熱量などの時間的変化を示す。横軸は経過時間  $t \text{ min}$ 、縦軸は熱量  $Q \text{ kW}$  である。図中の△, ▲, □および●印はそれぞれ太陽熱集熱器面(集熱器 10 セットで、その受光

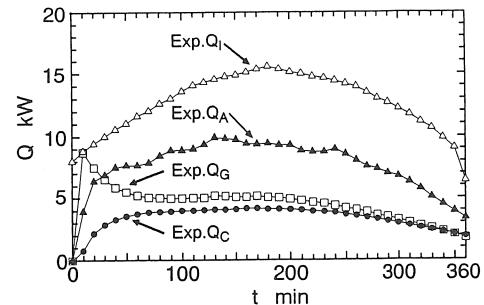


図 7 太陽熱集熱系と濃縮再生装置の連動実験  
(太陽熱の熱収支)

面積の和は  $17.8\text{m}^2$  )に入射した太陽日射量  $Q_i$ , 太陽熱集熱器が吸収した熱量  $Q_A$ , 再生器に供給した熱量  $Q_G$  および凝縮器の冷却水が持ち去った熱量  $Q_c$  を示す。本実験時間中のトータル熱量は,  $Q_i=77.9\text{kWh}$ ,  $Q_A=46.3\text{kWh}$ ,  $Q_G=27.5\text{kWh}$ ,  $Q_c=20.4\text{kWh}$  である。これらより集熱器の平均集熱効率は  $Q_A/Q_i=59.4\%$ , 集熱した熱量と再生器との間の熱利用率は  $Q_G/Q_A=59.4\%$ , 再生器への供給熱量  $Q_G$  と冷却水が持ち去った熱量  $Q_c$  との比は  $Q_c/Q_G=74.2\%$  である。 $Q_G/Q_A$  の値が低いのは、蓄熱タンク内温水の温度上昇による蓄熱量に加えて集熱器、蓄熱タンクおよび再生器のそれぞれの間の配管等からの放熱損失によるものである。実験開始直後の  $Q_G$  の急増は再生器に供給された熱量が再生器内の LiBr 水溶液や再生器構成要素などの温度上昇に用いられるためであり、逆に実験開始直後の  $Q_c$  が小さいのは再生器から凝縮器へ移動する水蒸気の熱量が凝縮器内の凝縮水や凝縮器構成要素などに吸収され、冷却水出口温度の上昇が遅れるためである。さらに、実験時間中の  $Q_G$  と  $Q_c$  のトータル熱量の差は基礎式(3)および(5)より理解されるように、再生器内 LiBr 水溶液、再生器構成要素、凝縮水および凝縮器構成要素の温度上昇により蓄熱された熱量に対応している。

## 5.2 太陽熱による LiBr 水溶液の濃縮実験

図 8(a) は図 1 の太陽熱集熱装置と連動して、LiBr 水溶液を濃縮した際の再生器内 LiBr 水溶液と凝縮器内凝縮水などの温度変化を示す。実験方法は前章 4.3 の場合と同様である。実験条件は  $T_{Li}=9.5^\circ\text{C}$ ,  $m_H=302\text{kg/h}$ ,  $m_L=378\text{kg/h}$ ,  $m_S=m_W=250\text{L/h}$  で、LiBr 水溶液の初期濃度  $X_{Si}=33.3\%$ 、その重量  $G_{Si}=85.5\text{kg}$ 、凝縮器内の水の初期重量  $G_{Wi}=50\text{kg}$  である。本図の横軸、縦軸と実測値のシンボルおよび線の意味は前章 4.3 の図 6(a) の場合と同様である。再生器側温水入口温度の実測値  $T_{Hi}$ (■)は、実験開始後急激に上昇した後やや低下し、 $t=90\text{min}$ 付近から再び上昇する。そして、 $t=300\text{min}$ 付近で最高温度となり、以後ゆるやかに低下している。再生器内 LiBr 水溶液温度の実測値  $T_s$ (○)と凝縮器内凝縮水温度の実測値  $T_w$ (△)は図 6(a) の場合と類似した温度プロファイルで推移している。一方、図中の実線と破線は前章 4.3 の図 6(a) の場合と同様の計算により求めた再生器内 LiBr 水溶液と凝縮器内凝縮水温度の計算値を示す。 $T_s$  の計算値(実線)とその実測値(○)とは、 $t=0 \sim 270\text{min}$ までは良く一致しているが、 $t=270\text{min}$ 以降の計算値は実測値よりもやや低い温度を予測する。また  $T_w$  の計算値(破線)はその実測値(△)に比して、 $t=0 \sim 60\text{min}$ の間では

やや低い温度を、 $t=300\text{min}$ 以降ではやや高い温度を予測する。

図 8(b) は再生器から凝縮器への水蒸気移動量  $g$  と LiBr 水溶液濃度  $X_s$  の時間的変化を示す。図の横軸、縦軸および図中のシンボルと線の意味は前章 4.3 の図 6(b) の場合と同様である。図中の○印と△印は実測値より求めた水蒸気移動量  $g$  と LiBr 水溶液の濃度  $X_s$  の計算値を示す。計算方法は図 6(b) の場合と同様である。 $g$ (○)は  $t=0\text{min}$ より急激に増加した後、 $t=20\text{min}$ から  $t=40\text{min}$ の間わずかに減少する。これは図 8(a) の  $T_{Hi}$ (■)の変化にほぼ対応している。そして、 $t=40 \sim 150\text{min}$ 付近までわずかに増加した後、 $t=150\text{min}$ 以降減少する。 $X_s$ (△)は  $t=0\text{min}$ からほとんど直線的に増加し続ける。 $t=360\text{min}$ での濃度は LiBr 水溶液濃度の実測値  $X_{So}$ (大きな黒の矢印  $X_{So}=54.3\%$ )より約 1.5%低い。一方、図中の破線と実線は図 6(b) の場合と同様にして求めた水蒸気移動量  $g$  と LiBr 水溶液濃度  $X_s$  の計算値を示す。 $g$  の計算値(破線)が実測値に基づく値(○)に比して、 $t=0 \sim 220\text{min}$ ではやや小さい値を、 $t=220\text{min}$ 以降ではやや大きい値を予測する。これは計算モデルの仮定(2)および(3)によるものと考えられる。一方、 $X_s$  の計

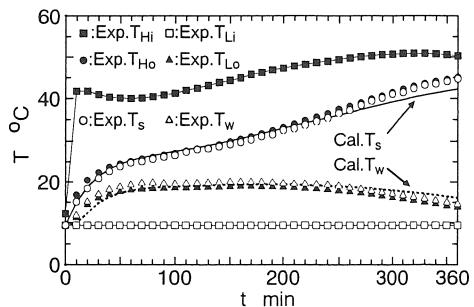


図 8(a) 太陽熱集熱系と濃縮再生装置の連動実験( $T_{Hi}$ が変化する場合の温度変化)

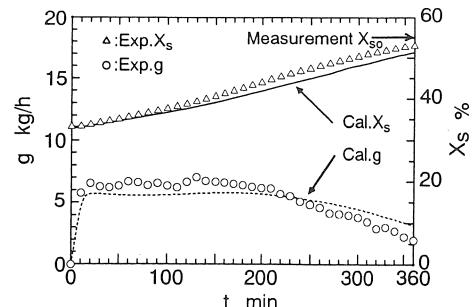


図 8(b) 太陽熱集熱系と濃縮再生装置の連動実験( $T_{Hi}$ が変化する場合の  $g$  と  $X_s$  の変化)

算値(実線)は実測値に基づく計算値(△)に比して、やや低い値を予測するが、両者の差異は小さくおおむね良く一致しているものと考えられる。

## 6. 結 言

太陽熱の熱変換および長期貯蔵のひとつの試みとして、LiBr水溶液を減圧下で濃縮再生する実験装置と真空ガラス管形太陽熱集熱器10セットからなる太陽熱集熱装置を製作し、それらの装置を用いてLiBr水溶液の伝熱および濃縮特性に関する実験を行った。そして、実験と同じ条件を与えた場合の濃縮過程の動特性解析を行い、①高温熱源である温水入口温度をほぼ一定としステップ的に再生器へ供給した場合および②高温熱源に太陽熱を用い温水入口温度が変化する場合の

各部の温度変化と濃縮過程を予測できることを示した。

終わりに、実験装置の製作および実験に協力いただいた宮崎県工業試験場の関係者はじめ、御支援いただいた皆様に感謝致します。

## 文 献

- (1)Lof,G.O.G, University of Wisconsin Press,33,1955.
- (2)Baum,V.A.ほか, *Applied Solar Energy*,8-26(1972).
- (3)木村・ほか、例えば、日本太陽エネルギー学会講演論文集 (No.13,1987).
- (4)Choi.K, 早稲田大学博士論文(1993.3).
- (5)斎藤、機論,59-566,B(1993),3230.
- (6)Mcnnely,L.A.,ASHRAE Trans.,85,Pt1(1979),413.
- (7)植村・伽場ほか、例えば、冷凍,36-405(1961),622.
- (8)化学工学協会、化学工学便覧(昭60-12).