

## 第5章 太陽熱利用システムの設計

### 5.1 シミュレーションによる評価

太陽熱利用システムのシミュレーションには、簡易計算と詳細計算がある。検討の初期段階では簡易計算による方法で行うが、最終段階には詳細計算によるシミュレーション評価を行ない実施設計につなげる。

簡易計算では指定地域の月平均の気象データや日合計負荷を使って全日集熱効率線図により求める方法と、月平均の時刻毎の気象データ、月平均の時刻毎の熱負荷を用いて瞬時集熱効率線図より時刻毎の計算で求める方法がある。全日集熱効率線図を用いた簡易計算では、月平均の気象データや集熱温度条件を基に全日集熱効率線図の横軸 ( $\Delta t_d / J T$ ) を計算し、効率線図により集熱効率を求めて熱収支を計算する。精度は良くないが簡単に平均日の集熱量を得ることができる。この概算結果を基に詳細計算のためのシステムの設計因子 (集熱器の設置条件や集熱面積、蓄熱容量など) を設定する。

詳細計算では、1年365日の気象データや熱負荷データを時間毎に入力して365日を連続して熱収支の計算を行い、太陽熱利用熱量や太陽依存率などを求める。

シミュレーションの概念は図 5.1.1 に示すように、建物の建設地の気象データ、熱負荷データ及び太陽熱利用を含めた構成機器の仕様を取り込み、太陽熱利用熱量や太陽依存率を計算し、その有効性を確認し実施設計に進める。

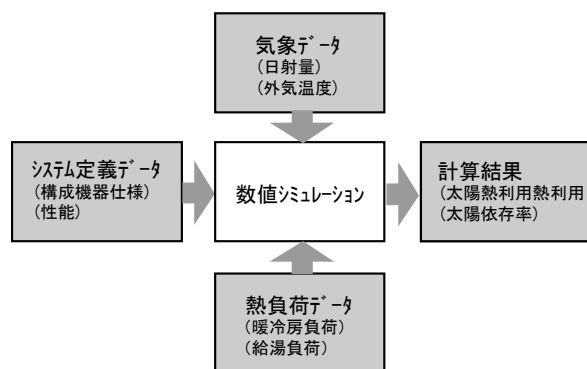


図 5.1.1 ソーラーシミュレーションの概念

一般的な計算のステップは図 5.1.2 に示すように建物の、全体計画⇒環境条件⇒負荷計画⇒システム設計⇒機器設定⇒熱収支計算⇒評価を行う。評価結果が不十分であれば、条件を変えて検討し満足のいく結果になったところで実施計画へ進める。

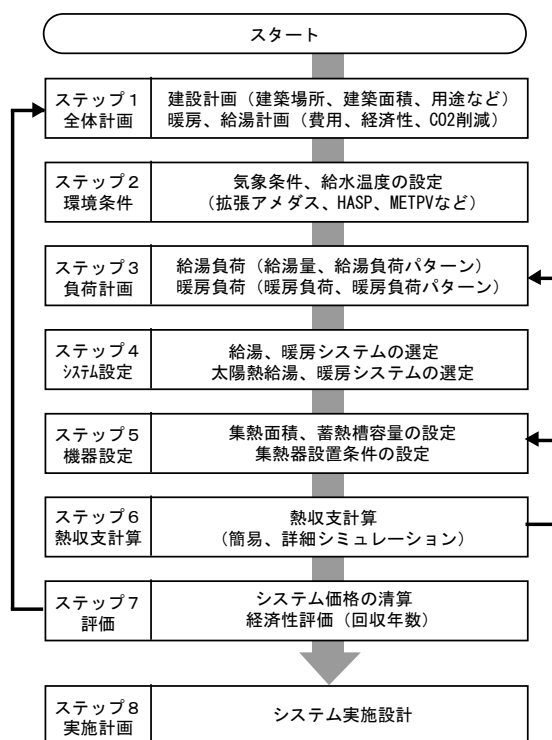


図 5.1.2 シミュレーションのステップ

### 5.2 気象データ

太陽熱利用システムのシミュレーションに使える気象データは種々のものがあるが、計算に用いる主な気象データを次に示す。シミュレーションでは入手可能な気象データを使って、集熱器に入射する太陽エネルギー量や環境条件を計算する。

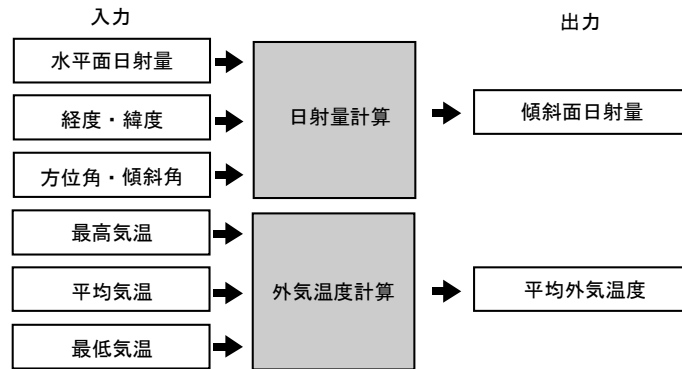


図 5.2.1 日射量計算の入出力

- 1) 拡張アメダス気象データ：気象庁が公開しているアメダス気象データの欠測データを補完し、日本建築学会でまとめたもので15年間の平均的な気象データとして標準年EA気象データが用意されている。
- 2) 標準気象・日射データ (METPV)：(独) 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) が気象庁へ委託して作られた標準気象・日射データベースで水平面データをはじめ任意方位・傾斜面日射量も計算、表示が可能である。データは平均年、極端年の時刻別データとして収録されている。
- 3) 全国日射関連データマップMONSOLA05\*(801)：日本気象協会が新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO)の委託により作成した全国801地点のアメダスの日射量平年値データベースである。
- 4) HASP：空気調和・衛生工学会が開発した空調負荷計算用標準気象データである。

ソーラーシステム振興協会では、全国日射関連データマップの月平均日積算集熱面日射量や標準年EA気象データによる月平均気温、日照時平均気温及び標準晴天日の気象データをまとめてデータベース化しており、簡易計算ではこれらのデータが活用できる (9.1参照)。

### 5.3 給水温度

給水温度は季節変動 (外気温度変動) や水源、水源からの距離などにより異なるため現地で計測された月毎の給水温度を使うことが望ましいが、現実には給水温度調査は面倒で年によって異なるため標準的なデータを使うことが多い。標準的給水温度データはソーラーシステム振興協会が浄水場水温、給水栓水温を調査しまとめた給水栓水温データ (198 地点) がある。(9.2 参照)

### 5.4 集熱計画

簡易計算による集熱量計算は、月平均気象データを用いて全日集熱効率線図 (図 5.4.1) より計算する方法や、月平均時刻毎の気象データを用いて瞬時集熱効率線図 (図 5.4.2) で時刻毎に集熱量計算して積算する方法がある。

詳細計算では 1 年間の時間毎の気象データや 24 時間の熱負荷データ、及び瞬時集熱効率線図を用いて時間毎、または数分毎の計算を行なって年間の熱収支を計算する。瞬時集熱効率の式は ISO と JIS では若干異なるため使用に当たっては注意が必要である。集熱量計算は蓄熱槽に無関係ではなく、集熱や負荷による熱収支により蓄熱槽温度が変化し、次の時刻の集熱効率に影響する。

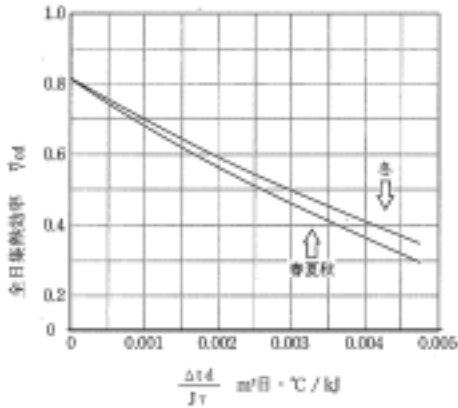


図 5.4.1 全日集熱効率線図の例 (Y 社)

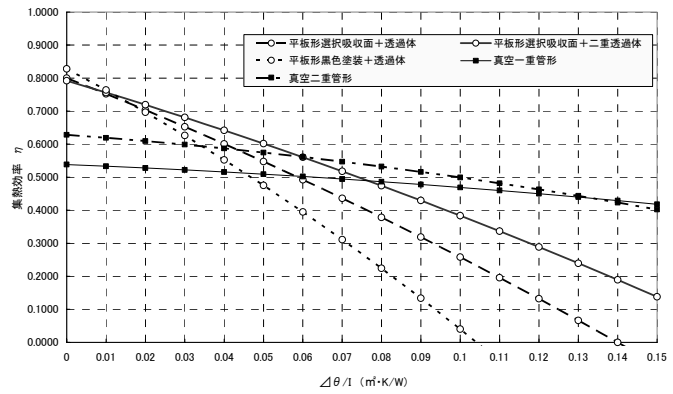


図 5.4.2 瞬時集熱効率線図の例

図 5.4.3 に集熱量計算だけを取り出して入出力の関係を示す。

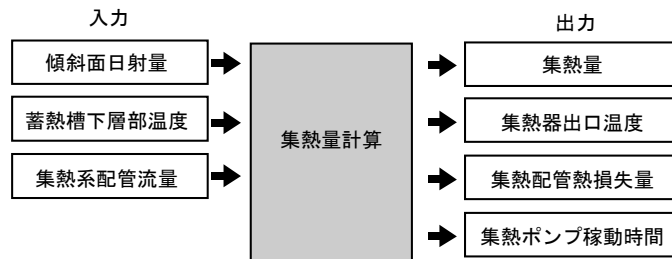


図 5.4.3 集熱量計算の入出力

## 5.5 熱負荷

建築物の計画段階では、当然のことながら詳細な熱負荷を求めることが出来ない。建物や施設の熱負荷は図 5.5.1 に示す情報を入力して熱負荷を算定する。従来の熱負荷計算は機器選定の目的で行うためピーク時熱負荷を検討する機会が多いが、太陽熱利用の場合は1日の時刻別負荷パターン及び全負荷がシステム設計の重要な要素になる。

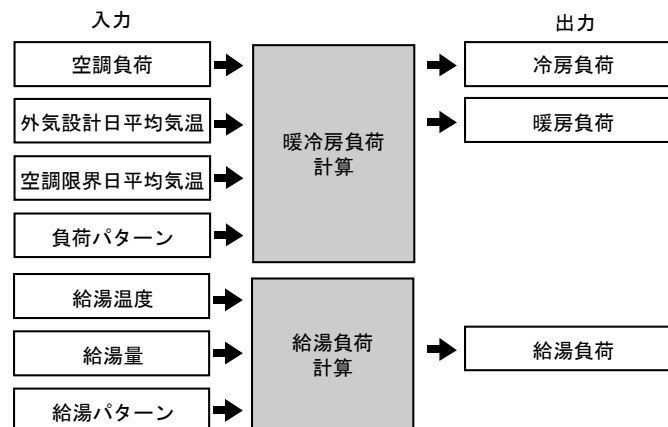


図 5.5.1 熱負荷計算の入出力

### 1) 給湯負荷

給湯量や負荷パターンの推算には、各々の給湯器具の個数から算出する方法、一人あたりの所要給湯量から求める方法、建物用途毎の床面積あたりの給湯量より求める方法などがある。給湯負荷を簡略に計算

するためには一日の負荷量と給湯温度で熱量を計算するが、詳しく計算するには時間毎の負荷パターンを用いる。住宅用については家族人数や日によって給湯負荷が変わることを想定して（財）建築環境・省エネルギー機構などで給湯負荷モードが提案されている。1日の給湯負荷の算出は給湯量を給水温度から給湯温度まで加熱するため必要な熱量として下式のように算出する。

$$Q_w = C_w \cdot \rho_w \cdot W \cdot (T_w - T_s)$$

- $Q_w$  : 給湯負荷 (kJ/日)、(MJ/年)
- $W$  : 給湯量 (L/日)、(L/年)
- $C_w$  : 水の比熱 (MJ/t・K)
- $\rho_w$  : 水の密度 (t/m<sup>3</sup>)
- $T_w$  : 給湯温度 (°C)
- $T_s$  : 給水温度 (°C)

## 2) 暖冷房負荷

熱負荷の概算を求めるためのツールとしては日本建築学会「ソーラー建築設計データブック（日本建築学会編）」や空気調和衛生工学会などで建物用途別、単位床面積あたり熱負荷原単位と日熱負荷パターンが示されている（9.3参照）。

詳細計算のための時刻毎の暖冷房負荷の計算を含めた建物熱負荷計算及び空調システムのエネルギーシミュレーションプログラムには、EESLISM（工学院大：宇田川）、HASP（空気調和・衛生工学会）、TRANSYS（wisconsin 大学）、The BESTなどのプログラムを用いて計算することができる。

## 3) 熱収支計算

太陽熱利用システムの熱収支は、図 5.5.2に示すように蓄熱槽に対する熱の入力と出力のバランスで得られる。結果的に蓄熱槽温度の上昇、下降によりバランスする。集熱量と熱負荷量の出入りにより蓄熱槽温度の変化や太陽熱利用熱量、補助熱量の必要量が計算でき太陽依存率が求められる。

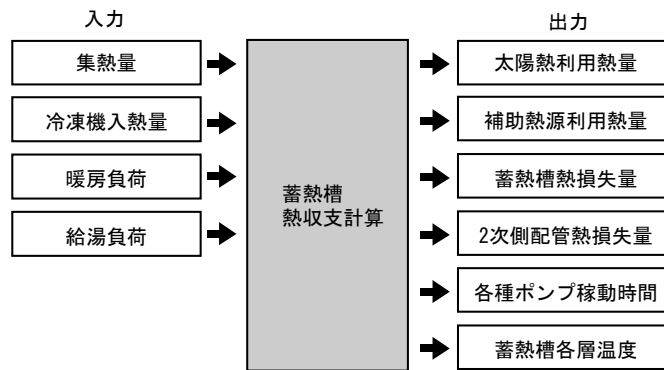


図 5.5.2 熱収支計算の入出力

集熱するときの外気温度や蓄熱槽の温度変化などは、集熱効率に影響を与えるため1時間間隔の計算では精度が出しにくい。従って詳細計算では、日射量計算⇒集熱計算⇒負荷計算⇒熱収支計算を数分毎の繰り返しで計算して熱収支を計算する。太陽依存率などが想定した結果と異なる場合は、最初のプロセスに戻って集熱器や蓄熱槽の仕様や設置条件を変更し、繰り返し計算を行って、最適な集熱面積や蓄熱容量を求める。

## 5.6 蓄熱計画

太陽エネルギーは間欠的で不確実であるため、太陽熱利用システムには蓄熱槽が必要となる。蓄熱槽はシステムの種類や設置スペース、使用条件、コストなどにより、単槽または複数の槽を組み合わせで計画する。集熱時間に負荷が集中している場合や夜間に負荷が無い場合、あるいは熱負荷に対して太陽熱設備が比較的小さい場合などは比較的小さい蓄熱槽を設置する、もしくは蓄熱槽が無いシステムも考えられる。冷房を行う場合は、高温の1次側に蓄熱槽をおく場合と、2次側に冷水蓄熱槽を置く場合がある。

蓄熱槽容量は検討する建物の熱負荷量と集熱量が、どの時刻にあるかで大きく異なってくる。図 5.6.1 は主に日中に給湯負荷がある場合で、図 5.6.2 は夜間を含め 24 時間にわたって給湯負荷がある場合を想定して計算した例である。

- 1) 図 5.6.1 は、日中の負荷は大きいですが夜間に負荷が無い場合で、日中集熱した熱量をほとんど日中消費するため大きな蓄熱槽容量は必要ないことになる。わずかに日中負荷を上回る集熱があった量のみ蓄熱する。
- 2) 図 5.6.2 は、日中の負荷と比較して日没後の負荷が大きい場合で、日中集熱した熱量を蓄えて日没後の負荷に備えるために蓄熱容量を大きくする。日中、集熱するが熱負荷が小さいため、多くが蓄熱槽に蓄えられ、夕方から夜間の給湯負荷に割り当てて使用している。

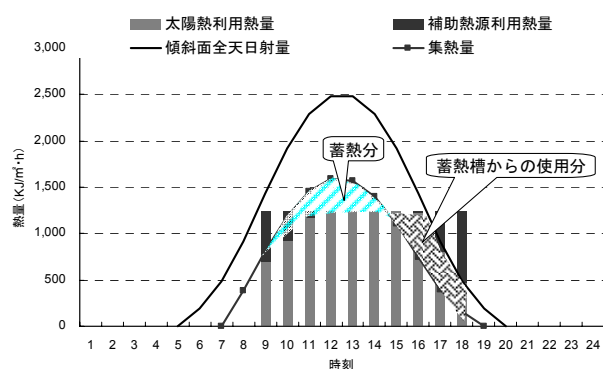


図 5.6.1 日中に負荷がある例

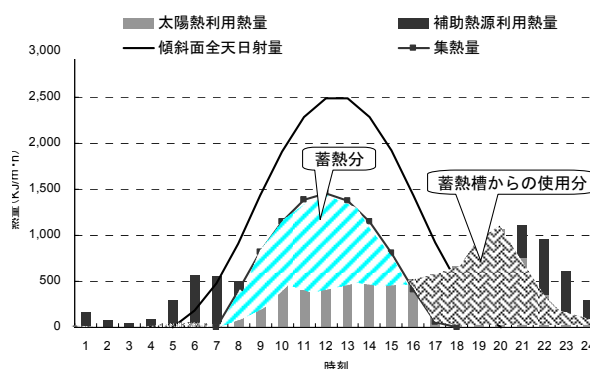


図 5.6.2 24 時間負荷がある例

図 5.6.2 のように集熱時間帯外にも負荷が存在し、しかも集熱面積が十分に取れる場合に、集熱した熱量を夜間にも使うとすれば、蓄熱容量は簡易的に次式で表される。

$$V = (JT \times \eta_{cd} \times A_c \times (1 - \eta_L) - QLT) / (C_w \times \rho_w \times t)$$

- V : 蓄熱容量  $m^3$
- JT : 受熱面日射量 ( $MJ/m^2 \cdot \text{日}$ )
- $\eta_{cd}$  : 集熱効率
- $A_c$  : 集熱面積 ( $m^2$ )
- QLT : 集熱時間帯の負荷 ( $MJ/\text{日}$ )
- $\eta_L$  : 熱損失率
- $C_w$  : 比熱 ( $MJ/t \cdot K$ )
- $\rho_w$  : 密度 ( $t/m^3$ )

$$\Delta t = t_{end} - t_{st}$$

- $\Delta t$  : 蓄熱温度差 K  
 $t_{end}$  : 集熱終了時の蓄熱槽温度 °C  
 $t_{st}$  : 集熱開始時の蓄熱槽水温 °C

## 5.7 熱交換量・伝熱面積

熱交換器内の熱収支について、外部からの熱の出入りがないと仮定すると、高温側が失う熱量と低温側が得る熱量は等しく、単位時間当たりの熱収支は次式で表される。

$$Q = M_1 \times C_1 \times (T_{1in} - T_{1out})$$

$$= M_2 \times C_2 \times (T_{2out} - T_{2in})$$

ここで、M : 質量流量

C : 比熱

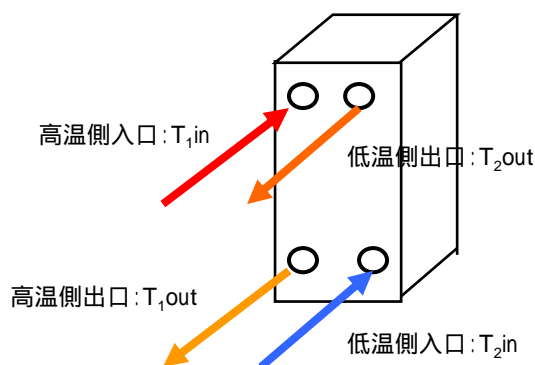
T : 温度

1 : 高温側

2 : 低温側

in : 入口

out : 出口



上記の熱収支は、流体側から見たものであるが、熱交換は伝熱プレートを介して行われ、伝熱面積を A とすると、交換熱量は次式で表される。

$$Q = U_1 \times A_1 \times \Delta T_m = U_2 \times A_2 \times \Delta T_m$$

ここで、U : 熱通過率、A: 伝熱面積、 $\Delta T_m$  : 対数平均温度差

対数平均温度差は 次式で表される。  $\Delta T_m = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln(\Delta T_1 / \Delta T_2)}$

熱交換器の選定等に関する計算においては、上記の基本式等を用いて複雑な計算が行われるが、簡易的な方法で伝熱面積を計算し、熱交換器選定の目安を確認することもできる。

### 【伝熱面積の簡易計算】

#### (1) 交換熱量の計算

$$Q = M_1 \times C_1 \times (T_{1in} - T_{1out}) = M_2 \times C_2 \times (T_{2out} - T_{2in})$$

(水の場合は、比熱=4.18605kJ/kg°C)

#### (2) 対数平均温度差の計算

$$\Delta T_m = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln(\Delta T_1 / \Delta T_2)} \quad (\text{但し、}\Delta T_1 = \Delta T_2 \text{ の場合は、}\Delta T = \Delta T_1 = \Delta T_2)$$

#### (3) 伝熱面積 (A) の計算

$$A = \frac{Q \text{ (交換熱量)}}{\Delta T_m \times U}$$

U (熱通過率) の目安 : (水-水の熱交換の場合)  $U = 2000 \sim 8000 \text{ (W/m}^2 \cdot \text{K)}$

(プレートの仕様及び流量・圧力等の使用条件により異なる。)

### <留意点>

- 伝熱面積設定の計算仮定で判るように、同じ仕様のプレートを用いても、流量・圧力等の使用条件によって、交換熱量、U（熱通過率）、 $\Delta T_m$  の値が変わる。結果として、熱交換器の選定を誤ることになるため、ポンプの仕様選定には十分注意する必要がある。
- 熱交換器メーカーによっては、伝熱面積を計算できるシュミレーションソフトを準備しているところもあり、実際の設計の参考となるものもある。

## 5.8 制御

太陽熱利用システムが他の熱源システムと異なる点は集熱システムであり、集熱システムは、集熱器、蓄熱槽、循環ポンプ、配管及び計装機器で構成され、使用目的によって各種の制御が行なわれる。

制御に係る項目として以下のようなものがある。

- ① 効率的に集熱を行うための循環ポンプの運転制御
- ② 集熱器、循環ポンプ、配管など屋外に設置される機器の凍結予防対策
- ③ 負荷が少ないときの集熱温度上昇による安全対策

### 1) 集熱制御

太陽熱を無駄なく、効果的に集熱するために、日射量の多いときにはできるだけ多くの熱を吸収し、日射量が少なくなるときには放熱運転にならないような循環制御が要求される。集熱制御は温度を感知して集熱ポンプを発停する方式と日射量を感知して発停する方法がある。一般的には次のような制御が行なわれる

#### ① 差温サーモスタット方式

集熱器出口の熱媒温度（集熱板温度）と蓄熱槽下部の蓄熱媒体温度を感知し、両者の温度が熱媒（集熱板）>蓄熱媒体のときにポンプを運転する。温度差の設定は3~7℃が良く使われる。温度差が小さくなるとポンプを停止する。停止時の温度差は設定により様々であるが0.5~4℃程度が一般的である。

#### ② 集熱器出口温度で発停する方式

空気式集熱でよく用いられる方式で、集熱器出口の熱媒温度が一定以上（暖房に使える温度）になれば、集熱ファンを運転し集熱が始まる。暖房の場合に低温でも可能で、できるだけ建物内に取り込んだほうが有利なため、このような方式が使われる。

#### ③ 日射量を検知して集熱ポンプを発停する方式

光を感知する半導体などを使ってポンプの発停を行うもので、集熱器や蓄熱槽温度と関係しないため、比較的簡単な制御である。しかし、タイマーによるものほどではないが、蓄熱槽の温度が高いときなどはポンプを運転して放熱することもある。

### 2) 凍結予防

水式集熱システムは屋外で外気に曝されるため、集熱器や配管、弁類は凍結対策が必要になる。凍結対策には主に水を抜く方法と、不凍液を使う方法がある。図5.7.1~図5.7.3に一般的な凍結予防方式と対応の概要を示す。

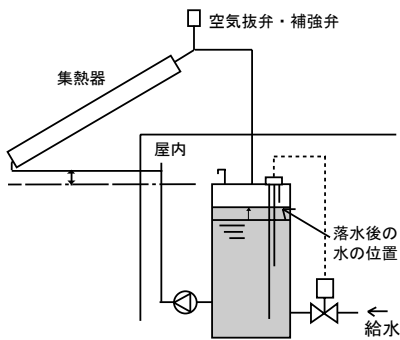


図 5.8.1 落水方式

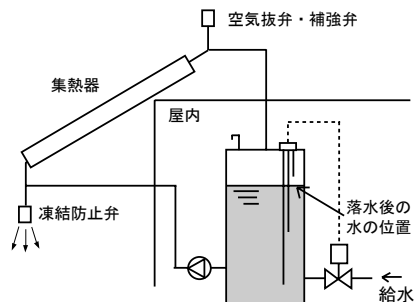


図 5.8.2 取水方式

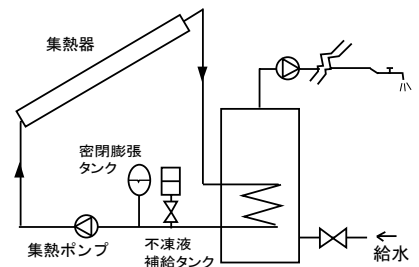


図 5.8.3 不凍液方式

出所)「ソーラー建築デザインガイド 太陽熱利用システム事例編」新エネルギー・産業技術総合開発機構

### ① 落水方式

集熱系統の水を蓄熱槽に落水させる方式である。水を抜く方法には集熱ポンプが停止したときに水を抜く方法で、集熱器や配管に保有する熱媒水を集熱ポンプが停止した時に蓄熱槽に落水させる。蓄熱槽は開放型である。集熱器から水が戻りやすいように配管上部に給排気弁を設け、集熱運転開始時には集熱器や配管内の空気を排気し、集熱ポンプ停止時には、空気を取り込んで熱媒水と置換する。重力で水が排出されるため、配管部分に勾配を設けた施工をする必要がある。一般に、集熱器や配管内に空気が出入りするため、耐食性の良い材料が使われる。この方式は、集熱ポンプの発停により作動するため、特に制御を行う必要はない。

### ② 取水方式

外気温度が下がり、凍結の危険がある場合にバルブを開けて水を抜く方法である。集熱システム全体のうち最も低い温度を代表する部分に凍結予防弁を設け、外気温度を感知してバルブを開放して水を抜く。バルブを開く設定温度は、凍結温度より若干高めに設定しておく必要がある。

### ③ 不凍液方式

集熱系統に不凍液を入れて凍結を防止する方式である。制御による対策ではなく、不凍液を使って凍結予防する方法であり、不凍液には安全のため食品添加剤であるプロピレングリコール水溶液を使うことが多い。給湯の場合は熱交換器を用いた間接加熱方式になる。不凍液の場合でも、濃度が薄くなれば凍結し、同時に腐食抑制剤の濃度が薄くなることで、腐食による水漏れの危険が発生する。従って、定期的な不凍液の濃度管理や漏れ管理が必要になる。

### 3) 過集熱、空焚対策

蓄熱は一般に水で行われることが多い。中間期の負荷が少ないときや、施設が休日で負荷がないときなどに集熱運転が行われると、蓄熱槽の温度が上昇して100℃を超える場合がある。よって、安全のために、集熱ポンプを停止する必要がある。もしくは、集熱回路に放熱器を取り付けて熱を逃がすなどして安全を確保しなければならない。集熱器への熱媒循環が停止した空焚状態で、集熱板温度は平板形で150～200℃、真空ガラス管形で200～300℃に達することがある。集熱器の種類やシステムによっては問題を起こすことがあるので注意が必要である。

不凍液を用いた密閉式では集熱回路の圧力が上昇し、集熱器や配管にダメージを与える可能性がある。よって、膨張タンクや安全弁を設置して圧力を逃がす必要がある。また、真空ガラス管形の機種によっては、空焚き状態で急に集熱ポンプを運転し、冷たい熱媒を流すことで、ガラス管が破損するものもある。



過集熱や空焚き対策として次の方法がとられる。

- ① 平板形集熱器で開放式の場合、蓄熱槽の温度や集熱板の温度を検知して集熱ポンプの運転を停止し、集熱器内の水を蓄熱槽に落水させ集熱器を空焚状態にする。
- ② 密閉式の場合、同様に循環ポンプを止め、熱媒の膨張を膨張タンクに逃がし、集熱器は空焚状態にする。
- ③ 密閉式で膨張タンクだけで圧力が逃げられない、または集熱ポンプを停止した空焚き状態で不具合が生ずる場合は、配管途中に冷却用の放熱器を設け、循環ポンプを停止せず放熱器を使って放熱させる。
- ④ 真空ガラス管形集熱器の機種によっては、空焚状態から集熱ポンプを運転するときに熱衝撃で集熱ガラス管が破損することがあるので、集熱器の温度が十分低下したことを確認してから運転する制御を追加する。