潜熱蓄熱方式による太陽熱暖房温室に関する研究

(1) 潜熱蓄熱材の特性試験と小型温室における暖房実験

仁科弘重・高倉 直

(東京大学農学部)

Studies on Solar Greenhouses with Latent Heat Storage Systems.

(1) Tests of Phase Change Materials and Heating Experiments
in Small Greenhouses.

Hiroshige NISHINA and Tadashi TAKAKURA

(College of Agriculture, University of Tokyo)
Yayoi, Bunkyo-ku, Tokyo 113, Japan)

1. 序 論

施設園芸，特に冬季の温室暖房において，石油に代るエネルギーとして最も一般的に利用できるのは，太陽エネルギーであろう。太陽エネルギーの利用に関する研究は急速に進められつつあり，既にある程度の有効性が実証され実用化の段階にあるものもあれば，まだ試験段階にあるものもある。

その中で，山本の考案による地中熱交換ハウス(山本，1973；1979)は，温室暖房に有効な省エネルギーシステムとして，現在各地に導入されつつある。しかしながら，地中熱交換ハウスの場合，工事費が予想以上に高く，1m²あたり3000～4000円程度にもなると言われており，また，夜間の温室内気温を15℃以上に保つことが困難であることから，ピーマン，ナス，メロンなどの高温性作物の暖房を，補助暖房なしで本方式単独で行うことは困難であろう。さらに，温室下の土壌を蓄熱媒体に用いるために，地下水位が高いなどの立地条件によっては導入困難な場合もある。

そこで，筆者らは，より普遍的で，高温性作物にも適用可能な，より効率的な太陽エネルギー利用システムの開発を目指して，化学物質の融解の潜熱を利用して蓄熱を行う「潜熱蓄熱方式による太陽熱暖房温室」に関する研究を行った。

2. 潜熱蓄熱の特徴

潜熱蓄熱は，化学物質の凝固－融解の相変化に伴う潜熱，すなわち融解熱(heat of fusion)を利用する蓄熱であり，潜熱蓄熱に用いる化学物質を，特に潜熱蓄熱材(相変化物質，Phase Change Material，PCM)という。

潜熱蓄熱の主な特長としては，

(1) 単位体積あたりの蓄熱量，すなわち蓄熱密度を，顕熱蓄熱と比べて大幅に上げられる。

(2) はば一定の温度で蓄熱・放熱ができる。

の2点が挙げられる。したがって，潜熱蓄熱を温室暖房に適用した場合の主要な利点は，次の2点となる。

(1) 必要な蓄熱槽の大きさをかなり小さくできる。

(2) 作物の種類に応じた蓄熱材の選択やシステム設計ができる。

(1)の蓄熱槽のコンパクト化については，床面積300m²で2重被覆(一層カーテン)の温室では，蓄熱槽を設置するのに必要な床面積は4m²程度になると予想され，これは地中熱交換ハウスのファンおよびピットの部分の面積より小さい。(2)については，トマト，キュウリ，ナスなど夜間の温室内最低維持気温が8～13℃のものであれば，蓄熱材として15～20℃に融点をもつものを用いればよく，したがって，空気集熱方式(昼間，温室内と蓄熱槽の間で空気を循環させて温室内空気から集・蓄熱する)が可能である。ピーマン，メロン(最低維持気温15～18℃)では，蓄熱材として20～25℃に融点をもつものを用いなければならないため，空気集熱だけでは不十分であるが，専用のソーラコレクタを用いるか，ダイレクトゲイン方式(蓄熱体に直接日射を受けさせて蓄熱する)

を採用すれば、十分暖房可能である。

以上のように、潜熱蓄熱では、蓄熱槽をコンパクト化できるだけではなく、作物の種類に応じた蓄熱材の選択とシステムの設計を行うことによって、トマトからメロンまで、様々な種類の作物の暖房が可能となる。

3. 潜熱蓄熱材の特性試験

3.1 潜熱蓄熱材の種類と問題点

潜熱蓄熱材に要求される性質は、次のようなものである(例えば、甲斐, 1978)。

- (1) 融点が所望の温度範囲内にあること。
- (2) 体積あたりの融解熱が大きいこと。
- (3) 過冷却が許容される範囲内であること。
- (4) 可逆的かつ確実に相変化すること。
- (5) 熱伝導率が大きいこと。
- (6) 相変化に伴う体積変化が小さいこと。
- (7) 蓄熱容器に対する腐食性が小さいこと。
- (8) 人体に対する毒性や危険性がないこと。
- (9) 長期にわたって凝固-融解のサイクルを繰り返しても、上記の性質に変化がないこと。
- (10) 入手が容易で、安価であること。また、資源的にも問題が少ないこと。
- (11) 使用済後廃棄する時、処理が困難でないこと。

これらの条件のうちで問題となるのは、(3)、(4)、(9)、(10)である。(3)の過冷却とは、蓄熱材を凝固させるときに、蓄熱材を融点以下に冷却しても凝固しない現象をいい、著しい過冷却は潜熱蓄熱材として致命的な欠点となる。(4)は主に無機水和塩で問題となり、相分離が起きないことがポイントとなる。相分離とは、例えば硫酸ナトリウム 10 水塩 $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ は、融点 32.4℃で融解して無水の Na_2SO_4 (固相) と不飽和溶液(液相) とに分かれるが、 Na_2SO_4 は比重が大きいため容器の底の方にたまることになる。そして、再び凝固するときには、底の方にたまっている Na_2SO_4 と不飽和溶液とが再結合して $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ にならなければならないわけだが、この両者の間の物理的な距離によっては、再結合しなくなってしまうことがある。そして、底の方の Na_2SO_4 (固相) と上の方の不飽和溶液(液相) とに分離したままになってしまうことがある。このような現象を相分離といい、無機水和塩は大なり小なりこの傾向を持っている。

(9)は耐久性の問題であり、償却年数を 10 年とすると、1000~2000 サイクルの間は上述の特性に変化が生じないことが必要となる。(10)は主に設備費の問題であり、地中熱交換ハウスの工事費(3000 円/㎡)を 1 つの目安と考えると、容器を含めた価格が、蓄熱材 1 kg あ

たり 200 円以下であることが望ましい。

暖房用として現在研究されている潜熱蓄熱材は、主に次の 2 つに大別できる(例えば、甲斐, 1978)。

- (1) パラフィン、ポリエチレングリコールなどの有機化合物。
- (2) 塩化カルシウム 6 水塩、硫酸ナトリウム 10 水塩などの無機水和塩、および、これらの無機水和塩と他の無機塩との混合物。

このうち、パラフィン、ポリエチレングリコールは種類も多く、必要な温度レベルに応じた選択が行い易く、また、過冷却や相分離の問題も少ないなどの長所をもつ反面、単位体積あたりの融解熱は 35~50 cal/cm³ とあまり大きくなく、石油産品で価格も高いという問題もある。一方、無機水和塩は、単位体積あたりの融解熱は 60~150 cal/cm³ と比較的大きいが、大なり小なり過冷却の傾向を示し、相分離の問題もある。過冷却に対しては、結晶核の作用をもつ異種物質(核生成剤)を重量比で数%混合させる方法が用いられている。また、相分離に対しては、ゲル化材を加えて蓄熱材を細かく区分したような形で保持する方法、蓄熱材の垂直方向の高さを制限する方法などが用いられている(例えば、Telkes, 1974)。また、単一の無機水和塩(単純塩)の中に希望の融点をもつものが見出されない場合、無機水和塩に他の無機塩を加えて融点を低下させて(凝固点降下)、適当な融点をもつものを作ることでもできる(例えば、神本, 1979)。

3.2 潜熱蓄熱材試験装置

潜熱蓄熱材の特性を試験するために、今回新たに潜熱蓄熱材試験装置を製作した。この試験装置は一種の恒温恒湿槽であるが、空気を循環させる方式であり、2パス方式を採用している。中央部の試料室(30 cm×30 cm×50 cm)をはさんで、上部と下部にそれぞれ独立した空調部があり、4つのダンパーによって空気の流れを変えることができる。上部と下部の空調部にはそれぞれ、冷凍機、ヒータ、噴霧式加湿器が設置されている。上部と下部の空調部で温湿度の異なった空気を作っておけば、ダンパーを開閉させることによって、試料室に流入する空気の温湿度を瞬時に変えることができる。各部の温度はサーミスターまたは熱電対で、湿度は露点計で測定される。

3.3 試験方法

潜熱蓄熱材の特性の試験は、凝固試験、融解試験、耐久性試験、および、融解熱の測定に分けられる。

凝固試験とは、試料室に入れた蓄熱材を予め高温にして完全に融解させておき、そこへ低温の空気を流入させて蓄熱材を凝固させ、そのときの蓄熱材の温度変化を測定するものである。反対に融解試験では、蓄熱材を予め

低温にして完全に凝固させておき、そこへ高温の空気を流入させて蓄熱材を融解させ、そのときの蓄熱材の温度変化を測定した。耐久性試験は、試料室に流入する空気の温度を3時間ごとに低温と高温とで変化させて(1サイクル6時間)、蓄熱材を繰り返し凝固、融解させるもので、凝固、融解の繰り返しは蓄熱材の特性にどのような影響を与えるかを調べるものである。これらの試験では、蓄熱容器として長さ230mm、外径30mm(内径26mm)の試験管を用い、この中に蓄熱材を200mmほど入れ、蓄熱材の温度は試験管の中心で測定した。

融解熱の測定では、蓄熱容器として直径37mmのピンポン球を用い、この中に蓄熱材を24cm³入れ、これと、温水300cm³を魔法瓶に入れて、蓄熱材が10℃温度上昇するときの温水の温度降下から、融解熱を求めた。蓄熱材の温度の測定はピンポン球の中心で行い、魔法瓶から逃げる熱については補正を行った。今回の試験の場合、ポリエチレングリコールなどのように融点に温度幅をもつものがあるので、融解の潜熱と比熱(0.5cal/cm³℃前後のものが多い)による顕熱とを合わせて、蓄熱材が融点をはさんで10℃だけ温度上昇するときに吸収する熱量を、融解熱と定義した。したがって、今回測定した融解熱は、真の融解熱より10℃分の顕熱(5cal/cm³前後)だけ大きなものである。

なお、温度の測定にはすべて0.3mmの銅-コンスタンタンの熱電対を用いた。

3.4 試験結果

今回試験を行った潜熱蓄熱材の中で、温室暖房用として有望と思われるものの、融点と融解熱の文献値(例えば、Hale *et al.*, 1971)と実測値をTable 1に示す。また、凝固試験の結果をFig.1に示す。

Table 1の(A)～(C)は、有機化合物の潜熱蓄熱材であって、融点から考えて、低・中温性作物のための空気集熱方式の蓄熱材に適すると考えられる。(D)、(E)は、無機水和塩の潜熱蓄熱材であって、融点から考えて、高温性作物において、ダイレクトゲイン方式か、ソーラコレクタを用いる場合の蓄熱材として用いることができると考えられる。

Table 1. Results of measurements of melting points and heats of fusion of several phase change materials.

Phase Change Material	Value on literatures***		Measured value	
	Melting point (°C)	Heat of fusion (cal/cm ³)	Melting point (°C)	Heat of fusion** (cal/cm ³)
(A) Paraffin (n-Hexadecane, C ₁₆ H ₃₄)	17	44	18	46
(B) Polyethylene Glycol (PEG) (#600 and #400)	10~20	39	10~20	36
(C) Polyethylene Glycol (PEG) (#600)	19~23	39	18~22	30
(D) CaCl ₂ ·6H ₂ O (96*) BaCl ₂ ·2H ₂ O (4*)	29	68	27~28	70
(E) Na ₂ SO ₄ ·10H ₂ O (96*) Na ₂ B ₄ O ₇ ·10H ₂ O (4*)	32	93	31~33	64

* Percentage in weight.

** Including sensible heat due to the temperature change (10°C) around the melting point.

*** From Hale *et al.*, 1971.

Fig. 1. Changes in temperatures of phase change materials during freezing process.

(A)のパラフィン、Fig.1からもわかるように、過冷却もなく、凝固・融解とも完全であった。融解熱も、文献値とほとんど同じ値が得られた。

(B)と(C)はポリエチレングリコールで、(C)は#600(融点19~23℃)だけのもの、(B)は#600と#400(融点4~8℃)とを混合して、10~20℃の間で徐々に相変化するようにしたものである。(B)、(C)とも、過冷却もなく、凝固・融解とも完全であった。

(D)は、塩化カルシウム6水塩に、核生成剤として塩化バリウム2水塩を4% (重量比)混合したものである。核生成剤を用いない場合は2~5℃過冷却するが、核生成剤を混合した場合はほとんど過冷却しない。凝固・融解時の挙動も安定していた。核生成剤としては、水酸化ストロンチウム8水塩(Sr(OH)₂·8H₂O)、水酸化バリウム8水塩(Ba(OH)₂·8H₂O)も有効であった。

(E)は、硫酸ナトリウム10水塩に、核生成剤として

ホウ酸ナトリウム 10 水塩を 4% (重量比) 混合したものである。若干相分離を起こしていたため、融解熱も文献値より小さくなっている。ゲル化剤を加えて蓄熱材をシャーベット状にし、融解時にも固相と液相が分離しないようにするなどの対策が必要である。

耐久性試験は 52 サイクルまで行ったが、この範囲内では、Table 1 に示した蓄熱材は融点、融解熱ともほとんど変化しなかった。長期にわたる耐久性についてはさらにサイクルを繰り返す必要があるが、耐久性のよくないものは十数回程度の繰り返しでも融解熱が低下してくることから (Lorsch *et al.*, 1975), Table 1 に示した蓄熱材は、少なくともある程度の耐久性はもっていると考えられる。

3.5 考 察

(A) のパラフィン、熱的な特性については全く問題はない。熱伝導率が低いことが問題とされることもあるが、これは熱の出し入れを急速に行う必要がある場合で、太陽熱暖房温室のように 1 サイクルが 24 時間のような場合には、ほとんど問題とならないであろう。問題となるのは価格の点で、現在のところ純度の高いパラフィンはほとんど需要がないために、一級試薬の n-ヘキサデカンでは 1 kg あたり 1 万円もする。そこで今回、純度は若干低いが安く生産できるパラフィンを 5 種類作り、試験を行った。しかし、特性が不安定なものが多く、蓄熱材として採用できそうなものは見出せなかった。将来実用化されて需要が大幅に伸びた場合は、純度の高いパラフィンでも数十円/kg になると見積られている (Lorsch *et al.*, 1975) ことを考えると、安価で、特性が安定しているパラフィンの生産技術の開発が望まれる。

(B) と (C) のポリエチレングリコールは、熱的な特性も安定しており、使い易い蓄熱材といえる。ただ、需要が大量になっても価格は 300 円/kg 以下にはならないだろうと見積られていることを考えると、蓄熱材としての将来性には若干疑問が残る。より好ましい蓄熱材が見出されるまでの、暫定的な蓄熱材と考えたい。

(D) の塩化カルシウム 6 水塩と (E) の硫酸ナトリウム 10 水塩は、基材だけでは熱的な特性に若干不安定さが残るが、核生成剤、ゲル化剤などを加えることによって、特性の安定した蓄熱材とすることができる。現在蓄熱材を開発中の各社も、主にこの 2 つの蓄熱材を中心に研究を進めており、数千回にも及ぶ耐久性試験を行っている所もある。さらに最近になって、これらの蓄熱材に他の無機塩を混合して、20℃ ぐらいまで融点を低下させる方法も見出されつつある。蓄熱材の価格も安く (数十円/kg)、融解熱も大きいことから、この 2 つが最も有望な蓄熱材であろう。

4. 小型温室における暖房実験

4.1 3 つのタイプの太陽熱暖房温室

1979 年冬季と 1980 年冬季に、次のようなタイプの異なった 3 つの太陽熱暖房温室を建設して暖房実験を行い、それらの比較、検討を行った。

まずタイプ I は、温室自体をコレクタとし、温室の北側に蓄熱槽を設け、温室内と蓄熱槽の間で空気を循環させて、温室内の空気から集・蓄熱するものである。ここでは「空気集熱方式」ということにする。

タイプ II は、温室自体をコレクタとするとともに専用のソーラコレクタを温室の外部に設け、温室-コレクター蓄熱槽の間で空気を循環させて、蓄熱するものである。ここでは「コレクタ方式」ということにする。これは一番大掛りなシステムで、暖房熱量には余裕が出るはずであるが、システムの大部分が温室の外にあるために、システム全体としての熱効率はあまり高くない可能性がある。

タイプ III は、温室の北側妻面の内側に蓄熱パネルという集・蓄熱板を設けて直射日光から蓄熱するとともに、温室内に小型の蓄熱槽を設けて、温室内の空気からも集・蓄熱するものである。ここでは「蓄熱パネル方式」ということにする。これはシステム全体が温室の内にあり、システムからの無効な熱損失を極力抑え、温室内に入ってきた日射をより有効に利用しようとするものである。

4.2 供試温室

実験には、東京大学農学部構内にある南北棟の小型ガラス温室 (床面積 7.2 m², 外表面積 25.2 m²) 2 棟を用いた。1979 年冬季は 1 棟を太陽熱暖房温室 (タイプ I), もう 1 棟を無暖房の対象温室として用い、1980 年冬季は 2 棟とも太陽熱暖房温室 (タイプ II とタイプ III) として用いた。

この温室は非常に小さく、保温比も 0.29 と実用規模の温室と比べて著しく小さい。そこで、放熱面積を減少させるとともに、床面に到達する日射量が少しでも増加するように、北側妻面 (4.8 m²) にロックウール断熱材とアルミ箔を張って断熱した。保温比は受熱面積と放熱面積の比を表していると考えられるから、保温比がこのように小さいということは、太陽熱による暖房を行うには、この温室はかなり苛酷な条件下にあると言える。

なお、温室内では植物の栽培は行わなかったが、床面があまり乾燥しないように適宜散水した。

4.3 タイプ I (空気集熱方式)

4.3.1 システムの概要

空気集熱方式であるから、蓄熱材には融点が 10~20℃ のポリエチレングリコール (＃600 と＃400 との混合物)

を用いた。

製作した蓄熱槽の概略図をFig. 2に示す。蓄熱槽は、外りの2.7m×1.0m×1.3mの木製の箱で、全面に厚さ100mmのロックウール断熱材を施してあり、空気の流れ・流出部や整流部を除いた実際の蓄熱部は1.5m×0.8m×1.1mである。この蓄熱部に、ポリエチレングリコール600kgを、直径30mm、長さ2.1mのポリエチレンチューブ390本につめ、外径20mmの鉄パイプ20本を用いてつるした。空気は、温室内から吸引口を通して蓄熱槽内に流入し、蓄熱部を通過する際に蓄熱材と熱交換し、有圧ファンによって温室内に戻っていく。

Fig. 2. Schematic diagram of the heat storage unit of the Type I solar greenhouse system.

なお、保温カーテンは用いなかった。また、もう1棟の温室を無暖房の対象温室として用いた。

4.3.2 実験方法

実験は1979年2～3月に行った。

測定事項は、温室外では温湿度、水平面全天日射量、純放射量、温室内では温湿度、水平面全天日射量、土壌温度(3点)、蓄熱槽については空気温度(4点)、湿度(2点)、蓄熱材温度(9点)である。温湿度の測定には通風式乾湿計および露点計を用いた。日射量の測定にはネオ日射計、純放射量の測定にはフंक型純放射計を用いた。温度の測定には、すべて0.3mmの銅-コンスタンタン熱電対を用いた。また、換気率、蓄熱槽を通過する空気の風量、土壌の体積熱容量の測定も行った。

空気を循環させる有圧ファンは、温室内気温が昼間16℃以上の時と、夜間10℃以下の時運転した。

4.3.3 実験結果

本システムによる暖房実験の結果の一例(1979年3月2～3日)をFig. 3に示す。温室の換気率は約1.2回/h、蓄熱槽を通過する空気の風量は0.33m³/sであった。

3月2日の天気は昼夜とも晴れで、昼間の温室外の積

Fig. 3. Diurnal changes in temperatures of a phase change material, the inside air in the Type I solar greenhouse, the inside air in the control greenhouse and the outside air on a clear day.

算水平面全天日射量は4310 kcal/m²、夜間の純放射量は平均-0.15 cal/cm² minであった。太陽熱暖房温室内の最低気温は5.1℃(3日6時)で、そのときの外気温は0.0℃、無暖房の対象温室内気温は-1.3℃であった。小型温室で保温カーテンも用いなかったために、対象温室の内気温は外気温より低くなっており、太陽熱暖房温室も内外気温差は平均7℃であった。

昼間蓄熱槽に貯えられた熱量は9990 kcal、夜間蓄熱槽から放出された熱量は11060 kcalであった。蓄熱効率を計算すると、温室外の水平面全天日射量を基準とし、受熱面として床面と北側妻面を考えると、蓄熱効率は9990 kcal/{4310 kcal/m² × (7.2+4.8) m²} × 100 = 19 %であった。

夜間の熱の流れを計算すると、蓄熱槽からの放熱が11060 kcal、有圧ファンの消費電力が1520 kcal、地中伝熱量が1690 kcalで、これらの和14270 kcalによって暖房が行われており、暖房熱量の77%が蓄熱槽から供給された。14270 kcalのうち、換気損失熱量は660 kcalで、残りの13610 kcalが熱貫流によって失われた。

おおむね晴天の日について蓄熱効率を計算すると、平均20%(17～25%)であった。

4.4 タイプⅡ(コレクタ方式)

4.4.1 システムの概要

コレクタによって高温空気を作れることから、蓄熱材には若干融点の高い塩化カルシウム6水塩(核生成剤として塩化バリウム2水塩を4%加えたもの)と、ポリエチレングリコール(≒600のみ)の2つを用いた。2種類の蓄熱材を用いることにしたのは、コレクタから戻ってきた高温の空気ですでに融点の高い塩化カルシウム6水塩に蓄熱し、その後、少し温度の下がった空気でもポリエチレングリコールにさらに蓄熱することによって、より多くの熱を貯え、蓄熱効率を少しでも高めようとしたため

である。夜間は、空気の流れを昼間と反対の方向にすることによって、蓄熱槽内を通過する際の空気の温度上昇度を大きくできる。

システム全体の概略図をFig. 4に、蓄熱槽の概略図をFig. 5に示す。蓄熱槽は、タイプI(空気集熱方式)のシステムで使ったものを改造して用いた。蓄熱材の量は、塩化カルシウム6水塩が300 kg(潜熱量12200 kcal)、ポリエチレングリコールが200 kg(潜熱量7000 kcal)である。潜熱量の合計は19200 kcalで、これは2晩分の暖房負荷に相当する。蓄熱材は、ポリプロピレン製の複層板(厚さ12 mm、幅730 mm、長さ1430 mm)の両端を熱融着させて、封入した。この複層板は2~3 cm間隔で仕切り板が入っているため、蓄熱材の垂直方向の高さを制限することができ、相分離を起こし易い無機水和塩には適している。蓄熱板はそれぞれ20枚、合計40枚をFig. 5のように並べた。また、昼間と夜間の空気の流れを変えるために、ダンパーを設けた。

コレクタは、60~70%の高い集熱効率を期待できる(斉藤, 1978)、黒色塗装したセラミックフォームを集

熱体に用いた、空気式のもの(集熱面積1.6 m²)を3台、南向きで傾斜角50°で設置した。

送風ファンは、昼夜とも運転する(反対方向)3相200 Vの有圧ファンと、ソーラコレクタに送風するために昼間だけ運転するシロッコファンの、2つを用いた。送風用のパイプには薄肉の塩ビパイプを用い、そのまわりに20 mm厚の発泡スチロール保温筒をまいた。

温室には一層の保温カーテン(ポリエチレンフィルム)を設置した(側壁は固定式、屋根面は自動開閉式)。

4.4.2 実験方法

実験は1980年2月に行った。

測定事項は、温室外では温湿度、水平面全天日射量、純放射量、温室内では温湿度、水平面全天日射量、地中伝熱量、蓄熱槽については空気温度(3点)、湿度(2点)、蓄熱材温度(9点)、さらに、コレクタについては入口・出口空気温度、セラミックフォーム表面温度である。地中伝熱量の測定には熱流板を用い、その他の測定にはタイプIの場合と同じ測器を用いた。また、換気率、各部を通過する空気の風量は、ファン運転時(順方向および逆方向)、ファン停止時ともに測定した。

システムの制御にはマイクロコンピュータを用いた。有圧ファンおよびシロッコファンは、昼間コレクタの出口の空気温度が蓄熱材の温度より高ければ順方向へ、夜間温室内気温が10℃以下ならば逆方向へ送風するように運転した。ただし、夜間の逆方向送風時にはコレクタを切り離し、温室と蓄熱槽の間だけで空気を循環させた。また、温室屋根面の自動開閉式保温カーテンは、朝7時に開き、夕方5時に閉じるようにした。

4.4.3 実験結果

温室の換気率は、昼間ファン順方向運転時7.2回/h、夜間ファン逆方向運転時2.8回/h、夜間ファン停止時0.7回/hであった。昼間のファン順方向運転時の換気率が大きいのは、コレクタで空気の漏れがあったためである。

2月3日の天気は晴れで、昼間の温室外の積算水平面全天日射量は2920 kcal/m²、夜間の純放射量は平均-0.11 cal/cm² minであった。温室内の最低気温は8.0℃(4日7時)で、そのときの外気温は-0.6℃であった。

蓄熱材の温度は、塩化カルシウム6水塩は3日11時から4日0時まで約28℃で一定であった。これは、後述する蓄熱量からもわかるが、昼間完全に融解しないうちに夜間の放熱過程に入ってしまったためである。ポリエチレングリコールは、昼間も18~19℃で固相の状態にあり、潜熱蓄熱には有効に働いていないことがわかった。

次に、昼間の集・蓄熱量を計算すると、コレクタで

Fig. 4. Schematic diagram of the Type II solar greenhouse system.

Fig. 5. Schematic diagram of the heat storage unit of the Type II solar greenhouse system.

集められた熱が12060 kcal, 蓄熱槽に貯えられた熱が8380 kcal (塩化カルシウム 6 水塩 7520 kcal, ポリエチレングリコール 860 kcal), 送風用パイプから逃げた熱が4710 kcalであった。集・蓄熱を行った時間帯について温室外の水平面全天日射量からコレクタへの傾斜面(50°)日射量を推定すると3610 kcal/m²となり, これからコレクタの集熱効率を計算すると, 70%と高い値を示した。蓄熱槽に貯えられた熱8380 kcalは蓄熱目標量(19000 kcal)の半分以下であったが, これはコレクタでの空気の流れによる熱損失と送風用パイプでの熱損失が予想より大きかったため, 昼間蓄熱材を十分融解させることができなかったのもこのためである。したがって, システム全体としての蓄熱効率は, 温室外での日射量を基準とし, 受熱面として温室床面, 北側妻面, コレクタ集熱面を考えると, $8380 \text{ kcal} / \{2920 \text{ kcal/m}^2 \times (7.2 + 4.8 + 4.8) \text{ m}^2\} \times 100 = 17\%$ と低い値を示した(Takakura and Nishina, 1981)。

おおむね晴天の日について蓄熱効率を計算すると, 平均17%(12~23%)であった。

4.5 タイプⅢ(蓄熱パネル方式)

4.5.1 システムの概要

蓄熱パネルの表面温度は, 日射を直接受けることから, 昼間は40~50℃になると予想される。そこで, 蓄熱パネルの蓄熱材には, 塩化カルシウム 6 水塩(塩化バリウム 2 水塩を4%加えたもの)を用いた。また, 小型の蓄熱槽には, 温室内の空気から集熱することから, ポリエチレングリコール(＃600のみ)を蓄熱材として採用した。

蓄熱パネルには, タイプⅡ(コレクタ方式)と同様のポリプロピレン製の複層板(厚さ15 mm, 幅620 mm, 長さ1220 mm)を4枚用いた。この複層板に, 塩化カルシウム 6 水塩を1枚あたり14 kg, 4枚で56 kg封入した。蓄熱パネルは片側を黒色塗装し, この面が南に向くように温室の北側妻面の内側に設置した。

小型の蓄熱槽は, 外のり1.8 m×0.5 m×0.8 mの木製の箱で, 全面に厚さ50 mmのロックウール断熱材を施しており, 整流部を除いた実際の蓄熱部は1.5 m×0.4 m×0.7 mである。蓄熱材であるポリエチレングリコール200 kgは, 外径38 mm(内径32 mm), 長さ(キャップを含めた)700 mmの水道用塩ビパイプ360本に封入し, 蓄熱部に並べた。空気を循環させるために, 3相200 Vの有圧ファンを設けた。

温室にはタイプⅡと同じ保温カーテンを設置した。

4.5.2 実験方法

実験は1980年2月に行った。

測定事項は, タイプⅡの場合とはほぼ同じであるが, 蓄熱パネルについては蓄熱材温度(2点), パネル表面温度

(2点), 小型蓄熱槽については入口・出口空気温度, 蓄熱材温度(5点)とした。換気率, 蓄熱槽を通過する空気の風量は, ファン運転時(順方向および逆方向), ファン停止時ともに測定した。

システムの制御にはマイクロコンピュータを用いた。有圧ファンは, 昼間温室内外気温が蓄熱材の温度より高ければ順方向へ, 夜間温室内外気温が10℃以下ならば逆方向へ送風するように運転した。また, 保温カーテンの制御は, タイプⅡと同一とした。

4.5.3 実験結果

本システムによる暖房実験の結果の一例(1980年2月22~23日)をFig. 6に示す。温室の換気率は, 昼間ファン順方向運転時1.7回/h, 夜間ファン逆方向運転時1.1回/h, 夜間ファン停止時0.8回/hであった。

Fig. 6. Diurnal changes in temperatures of phase change materials, the inside air in the Type III solar greenhouse and the outside air on a clear day.

2月22日の天気は晴れて, 昼間の温室外の積算水平面全天日射量は3510 kcal/m², 夜間の純放射量は平均-0.09 cal/cm² minであった。温室内の最低気温は8.0℃(23日7時)で, そのときの外気温は0.1℃であった。

蓄熱パネル内の塩化カルシウム 6 水塩は, 昼間は40℃以上になって十分に蓄熱し(2860 kcal), 夜間は17時から21時の間に25~26℃で凝固して放熱している。今回のパネルは厚さ15 mm(実際の蓄熱材の厚さは13 mm)であったが, 今回の実験結果および日射量から考えて, 20~25 mmまで厚くすることは可能であろう。蓄熱槽内のポリエチレングリコールは, 昼間22~23℃になって蓄熱し(7560 kcal), 夜間は21時以降放熱過程に入っている。蓄熱効率は, 温室外の日射量を基準とし, 受熱面としては床面と北側妻面を考えると, $(2860 + 7560) \text{ kcal} / \{3510 \text{ kcal/m}^2 \times (7.2 + 4.8) \text{ m}^2\} \times 100 = 25\%$ であった。

夜間温室に放出された熱量を熱源別に計算すると, Fig. 7 のようになる。これからわかるように, 夜の前半

(21 時頃まで)は、暖房熱量の大部分を蓄熱パネルが供給しており、蓄熱槽からの熱はわずかである。これに対して、夜の後半(22 時頃以降)になると、蓄熱パネルからの熱はほとんどなくなり、蓄熱槽からの熱が大部分となる。18~7 時の積算値を計算すると、蓄熱パネルからの熱が 2200 kcal (22%)、蓄熱槽からの熱が 6200 kcal (63%)、ファンの消費電力が 480 kcal (5%)、地中伝熱量が 920 kcal (10%)となり(括弧内は割合)、夜間全体を考えると、蓄熱槽の果たしている役割が大きいことがわかる。

Fig. 7. Changes with time in heat released for heating greenhouse. Q_p is the heat released from the heat storage panel, Q_u is from the heat storage unit, Q_f is from the electric fan and Q_s is from the soil.

実験期間中の積算水平面全天日射量、夜間の純放射量(平均)、最低外気温、温室内最低気温、蓄熱量、蓄熱効率などを Table 2 に示す。おおむね晴天の日の蓄熱効率は平均 24%で、3 つのシステムの中で最も高い値を示した。

4.6 考 察

今回の暖房実験は無栽植状態で行ったため適宜散水を行ったが、栽植状態と比べれば蒸発散量は少なく、した

がって、温室内に透過してきた日射のうちで顕熱化している部分の割合が大きくなっていると考えられる。また、北側妻面やコレクタ集熱面に入射する日射量は水平面日射量より多いため、補正を行うべきであるが、簡単のため水平面と同じ日射量が入射していると仮定して、蓄熱効率を計算した。したがって、実際の栽培温室での蓄熱効率は、前節まで求めた蓄熱効率より小さくなると考えられる。

まず、タイプ I (空気集熱方式)は、蓄熱槽が温室外にあるにもかかわらず、用いた蓄熱材の融点が一番低かったために、蓄熱効率も高くなったと考えられる。

次に、タイプ II (コレクタ方式)であるが、断熱性、気密性の施工が十分でなかったために、コレクタの性能を十分に引き出せなかったばかりでなく、システム全体の蓄熱効率も低下してしまった。しかし、施工を完全にしたとしてもシステム全体の蓄熱効率がどの程度高くなるかは疑問で、また、経済性、コレクタの設置面積などの問題もある。

タイプ III (蓄熱パネル方式)は、建設費、ファン動力費などの点からは 3 つのタイプの中で最も経済的なシステムであるが、蓄熱効率の点からも、内外気温差の点からも最もよい結果が得られた。4.5.3 でも述べたが、蓄熱パネルの厚さは 20~25 mm まで厚くすることができ、その分だけ夜間の放熱量も増やすことができる。また、昼間の温室内気温がタイプ I より 3~4℃ 高く経過していることから、蓄熱槽の蓄熱材にあと 2~3℃ 融点の低いものを用いれば、蓄熱効率をさらに高めることも可能である。

ここで、コレクタを設置することの経済性について考察する。潜熱蓄熱材には無機水和塩のものを考え、コレクタは空気式の安価なものを考える。蓄熱材の価格(容器なども含めた)を 200 円/kg、融解熱を 40 kcal/kg と

Table 2. Daily integrated solar radiation, net radiation at night, minimum outside and inside air temperatures, stored heat and efficiency of heat storage.

Date (1980)		2/3	2/22	2/27	3/2
Weather		Fine	Fine	Cloudy	Fine
Integrated solar radiation at horizontal surface outside greenhouse (kcal/m ²)		2920	3510	1580	4180
Net radiation at night (cal/cm ² min)		-0.11	-0.09	-0.02	-0.03
Minimum outside air temperature (°C)		-0.6	0.1	0.1	2.2
Minimum inside air temperature (°C)		9.0	8.0	6.0	9.2
Incident solar radiation to greenhouse (kcal)		35040	42120	18960	50160
Stored heat	Heat storage panel (kcal)	2860	2860	1460	2860
	Heat storage unit (kcal)	7000	7560	1520	6630
	Total (kcal)	9860	10420	2980	9490
Efficiency of heat storage (%)		28	25	16	19

すると、蓄熱材の単位蓄熱量(kcal)あたりの価格は、 $200/40=5$ 円/kcalとなる。一方、コレクタの価格を30000円/m²、集熱効率を0.5、コレクタ入射日射量を4000kcal/m²dayとすると、コレクタの単位集熱量(kcal)あたりの価格は、 $30000/(4000 \times 0.5)=15$ 円/kcalとなる。石油による暖房として温風暖房を考え、温風暖房によるA重油からの発熱量を7000kcal/l、A重油の価格を94円/l(昭和58年3月実績、農林水産省統計情報部、1983)とすると、温風暖房の単位熱量(kcal)あたりの価格は、 $94/7000 \div 0.013$ 円/kcalとなる。したがって、蓄熱材では、 $5/0.013 \div 380$ 回の蓄熱を行えば(1年に100回蓄熱するとして約4年)償却できるのに対し、コレクタでは、 $15/0.013 \div 1150$ 回の集熱を行わないと(1年に100回集熱するとして約12年)償却できないことがわかる。さらに、簡単なシミュレーションモデルを作成して検討してみたが、やはり、コレクタを用いると償却年数が大幅に長くなってしまいうという、同様の傾向が見られた。したがって、高温空気を必要とするなどの特別な場合を除いて、コレクタは用いない方がよいと考えられる。

また、集・蓄熱方法については、タイプⅢで用いた蓄熱パネルは、運転経費もかからず経済的なシステムであり、メロン温室のように北側表面の割合が大きく(単棟で、スリークォーター温室も多い)、必要な夜温も高い場合には適していると考えられる。さらに、蓄熱パネルからの放熱の形態は放射によるものが半分以上であると計算されるので(実測によっても確認した)、保温カーテンに長波放射不透過性のフィルムを用いれば、蓄熱パネルからの熱をより有効に利用できる。また、夜間だけ蓄熱パネルに強制通風することによって、温室内気温をあと2～3℃高く維持することも可能であろう。

しかし、4.5.3で述べたように、今回実験に用いた小型温室のように蓄熱パネルを設置できる北側表面の割合が大きい場合でも、夜間全体を通して考えると、蓄熱パネルが供給する熱量は少なく、蓄熱槽からの熱が暖房熱量の半分以上を占めている。したがって、床面積が大きい実用規模の温室では、蓄熱パネルの果たす役割りはさらに小さくなり、暖房熱量の大部分は蓄熱槽が供給することになる。また、主要な施設野菜であるトマト、キュウリ、ナスなど(夜間の最低維持気温8～13℃)は、空気集熱方式でも十分暖房可能である。以上より、将来潜熱蓄熱方式による温室暖房が実用化された場合は、潜熱蓄熱槽を用いる空気集熱方式が、主要な集・蓄熱方法になると考えられる。この場合、蓄熱材の融点としては17～20℃が望ましく、熱損失を少なくするためにも蓄熱槽は温室内に設置した方がよいと考えられる。

5. 今後の展望

本研究では、潜熱蓄熱方式による太陽熱暖房温室の開発のために、潜熱蓄熱材の特性試験、およびタイプの異なる3つのシステムによる暖房実験を行った。

潜熱蓄熱は、一般住宅での太陽熱暖房においてもまだ初期の実験段階にあり、温室暖房については全く研究されていなかったと言っても過言ではない。しかし、ここ数年、潜熱蓄熱材の研究・開発は急速に進展しつつあり、また温室暖房についても、蓄熱材として塩化カルシウム6水塩を用いた例が報告された(Kern and Aldrich, 1979; Jaffrin and Cadier, 1982)。このように、潜熱蓄熱は、太陽熱暖房において注目を集めつつある技術であり、今後のより一層の研究が期待される。

今後の課題としては、

- (1) 特性が安定していて、潜熱が大きく、安価な潜熱蓄熱材の開発。特に、空気集熱方式に適した、融点が17～20℃の蓄熱材の開発。
- (2) 蓄熱容器および蓄熱材封入技術の開発。
- (3) 空気集熱方式における潜熱蓄熱槽の最適設計。
- (4) 作物の種類に応じた暖房システムの最適設計。

などが考えられる。

いずれにせよ、潜熱蓄熱は、地中熱交換方式などの他の太陽熱暖房システムと比べて、用いる蓄熱材の特性やシステム設計の良否によって、得られる暖房効果に大きな差が生じると考えられる。特性のよくない蓄熱材を効率のよくないシステムで用いても、暖房効果はあまり期待できないだろう。反対に、特性の優れた蓄熱材を効率のよいシステムで用いれば、地中熱交換方式以上の暖房効果を得ることも十分に可能であろう。したがって、上述の問題点を一つ一つ解決しつつ、慎重な研究・開発を行っていくことが望まれる。

謝 辞

本論文は、筆者の一人である仁科が東京大学農学部環境調節工学研究室における修士論文として行った研究をもとにしている。研究を進めるにあたって多くの御指導をいただいた立花一雄教授(現、北里大学獣医畜産学部教授)に慎んで感謝の意を表する。また、実験を行うにあたって有益な御助言をいただいた岡田益己博士(現、農業技術研究所)に厚く謝意を表する。なお、本研究は、農林水産省グリーンエナジー計画の委託研究費によって行った。関係諸氏に感謝する次第である。

引用文献

- 1) Hale, D. V., Hoover, M. J. and O'Neill, M. J., 1971: *Phase Change Materials Handbook*. NASA CR-61363, 215p.
- 2) Jaffrin, A. and Cadier, P., 1982: Latent heat storage applied to horticulture. *Solar Energy*, **28**, 313–321.
- 3) 甲斐潤二郎, 1978: 潜熱蓄熱について, 空気調和・衛生工学, **52**, 885–890.
- 4) 神本正行, 1979: 潜熱蓄熱, 太陽エネルギー, **5**, 37–45.
- 5) Kern, M. and Aldrich, R. A., 1979: Phase change energy storage in a greenhouse solar heating system. ASAE Paper No. 79–4028.
- 6) Lorsch, H. G., Kauffman, K. W. and Denton, J. C., 1975: Thermal energy storage for solar heating and off-peak air conditioning. *Energy Conversion*, **15**, 1–8.
- 7) 農林水産省統計情報部, 1983: 農村物価指数(昭和58年3月), 18p.
- 8) 斉藤義和, 1978: 多孔質物体を用いた空気式太陽集熱器の性能について, 日本太陽エネルギー学会第4回研究発表会講演論文集, 21–24.
- 9) Takakura, T. and Nishina, H., 1981: A solar greenhouse with phase change energy storage and a microcomputer control system. *Acta Horticulturae*, **115**, 583–590.
- 10) Telkes, M., 1974: Storage of solar heating/cooling. *ASHRAE Transactions*, **80** Part 2, 382–392.
- 11) 山本雄二郎, 1973: 地中熱交換ハウスの温度環境および熱特性, 農業気象, **29**, 11–15.
- 12) 山本雄二郎, 1979: 地中熱交換ハウスに関する研究, 農業気象, **35**, 47–50.

Summary

As the first step of a study on solar greenhouses with latent heat storage systems, thermal properties of phase change materials (PCMs) were tested and solar heating experiments applying these PCMs to small greenhouses were performed.

Several PCMs which have melting points between 10–30°C were selected from the literatures (e.g. Hale *et al.*, 1971), and measurements of melting points and heats of fusion were made. Considering these test results (Table 1 and Fig. 1), and because of the extremely high price of paraffin, we chose polyethylene glycol (PEG) and calcium chloride hexahydrate as the most suitable PCMs for solar heating greenhouses at the present time.

Three types of solar greenhouse systems were constructed, and solar heating experiments were performed in both 1979 and 1980. We used two small identical glasshouses (floor area is 7.2m², surface area 25.2m²) with the north wall (4.8m²) insulated.

In the Type I solar greenhouse (without thermal screen), polyethylene tubes (3.0cm in diameter) were filled with 600kg of PEG (#600 and #400) and hung by steel bars in the insulated heat storage unit. Air was circulated by a fan between the greenhouse and the heat storage unit, and solar heat was collected from the air inside the greenhouse (Fig. 2). Typical patterns of diurnal changes in temperatures in the Type I solar greenhouse on a clear day are shown in Fig. 3. Solar heat stored in the daytime was 9,900kcal and heat released in the nighttime was 11,060kcal. The average efficiency of heat storage on clear days was 20%, based on the outside solar radiation.

In the Type II solar greenhouse (with one layer thermal screen), three 1.6m² air-type solar collectors were attached. PCMs, 300kg of CaCl₂·6H₂O and 200kg of PEG (#600), were encapsulated in double-layered polypropylene panels (1.2cm in thickness) and were installed in the heat storage unit. In the daytime, air was sucked from the greenhouse to the collectors, and heated air was then sent to the heat storage unit and was returned to the greenhouse. In the nighttime, the path to the collectors was closed by a damper, and air was circulated between the greenhouse and the heat storage unit, although the direction of the air flow through the heat storage unit was opposite to that in the daytime (Figs. 4 and 5). The heat collected in the collectors was 12,060kcal, and the heat stored in the heat storage unit was 8,380kcal (7,520kcal to CaCl₂·6H₂O, 860kcal to PEG) on Feb. 3, 1980. The temperatures of CaCl₂·6H₂O and PEG were kept almost at the melting point of each, which indicated that the storage capacity of latent heat was not yet filled. The inside air temperature was kept at 8.0°C in the early morning on Feb. 4, when the outside air temperature was

-0.6°C. The average efficiency of heat storage on clear days was 17%, taking into account the receiving area of both the collectors and the greenhouse.

In the Type III solar greenhouse (with one layer thermal screen), double-layered polypropylene panels (1.5cm in thickness) which contained 56kg of $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ were installed in front of the inside surface of the north wall. They could be called a heat storage panel. In addition to this, 200kg of PEG (#600) was encapsulated in PVC pipes (3.2cm in diameter) and was installed in the small heat storage unit. The heat storage panel can store heat from direct solar radiation. In the heat storage unit, heat was collected from the inside air by circulating air between the greenhouse and the heat storage unit. Typical patterns of diurnal changes in temperatures in the Type III solar greenhouse on a clear day are shown in Fig. 6. The heat stored in the heat storage panel and the heat storage unit was 2,860kcal and 7,560kcal, respectively. Changes in heat released for heating the greenhouse in the nighttime are shown in Fig. 7. The heat storage panel released heat from 17:00 to 22:00 (total released heat 2,200kcal), and after this time period the greenhouse was heated by the heat from the heat storage unit (total released heat 6,200kcal). Daily integrated solar radiation, minimum outside and inside air temperatures, stored heat and efficiency of heat storage during the experiment period are shown in Table 2. The average efficiency of heat storage on clear days was 24%.

The solar heating experiment in the Type II solar greenhouse showed that the collectors did not produce good results. Also from the economic point of view, the use of collectors can not be recommended, except when high-temperature air is required. From the result of solar heating experiment in the Type III solar greenhouse, the heat storage panel seems a simple, economical and highly efficient heat storage medium. But considering the amount of heat released in the nighttime, the heat storage panel did not play an important role in heating the greenhouse, and most of the heat was supplied by the heat storage unit. Therefore, we conclude that collecting heat from the air inside the greenhouse will be the most promising way to collect and store heat in the solar greenhouse.