

## 温室の省燃料暖房技術の 実用化に関する研究

佐々木皓二\*

Kozi SASAKI

Practical Studies on Heating Systems  
that Decrease Heating Oil Use in  
Greenhouse.

### 緒 論

わが国の施設園芸は施設構造や内部諸装備の充実、環境制御技術の開発改良、作型・品種の組合せによる利用効率の向上、また栽培管理技術の改善等により著しい発展をとげ、生鮮野菜の周年安定供給に大きな役割を果たしている。また施設園芸は、農業経営においては高収益生産による経営の安定化、周年的な就労の場の確保、農作業の改善、あるいは中核農家の育成、都市近郊農業の振興等の重要な役割を担っており、今後もわが国農業の重要な一部門として位置づけられよう。

このように、施設園芸に大きな期待がかけられているなか、1973年と1979年の二度にわたる石油ショックは、生産諸資材なかでも暖房用燃料油の著しい高騰を招き、生産者に大きな打撃を与えた。果菜類の促成栽培では、生産のための投入エネルギーのうち暖房用燃料が60～80%を占めており<sup>(14)</sup>、その節減対策は急を要する課題となった。

本来温室は、露地栽培が不可能な冬期に最もその機能を発揮するが、この期間、温度が不足する夜間の暖房は欠くことのできない環境調節技術であり、その装置として温風暖房機や温湯暖房機が備えられてきた。神奈川県では、温室の重装備化が進み、野菜温室の全面積のうち約80%に温風暖房機、約5%に温湯暖房機が装備されている<sup>(22)</sup>。これらの暖房装置はいずれもA重油か灯油を燃料とし、温風暖房機を使用した場合には、10a当り、

トマトで6～13kl、キュウリで8～17klの燃料が消費されてきた<sup>(14)</sup>。

これらの燃料を節約する方法としては、温室の保温性の向上のため、カーテン被覆の多層化とそれに用いる資材の選択、暖房機の熱効率の向上、温風暖房機に装着する節油器の利用、変夜温管理法の採用等があげられ<sup>(3,14,20,35,46,61,80,81,86,93)</sup>、これらは当面講じられる実効ある対策技術として相当な普及をみた。一方、石油燃料に頼らない抜本的な暖房技術の開発もこれらに並行して推し進められ、それまで暖房用としては未利用資源であった太陽熱、地熱水、都市ゴミの燃焼熱、廃タイヤ、温泉熱等が熱源の対象になった<sup>(9,24,38,79,94)</sup>。

このような実態を背景に、本研究ではそれまで暖房熱源を石油燃料だけに頼っていた現状を少しでも打破し、石油燃料を全く使用しないか、ごく少量の使用にとどめた新しい暖房方式の実用化試験を1978年から1986年にわたって実施した。これら暖房方式の選定にあたっては、温室に大きな構造変更をもたらすことなく、現状の温室に直ちに取入れられ、運転や保守管理が容易で、温度の制御性能が高く、また装置に一定の経費を要しても長期的には経済効果の見通しが得られる可能性を持つことを基本的な条件に設定した。

これらの条件に合致する熱源として、まず太陽熱を選定した。この理由は、太陽熱は最も普遍的に利用できる可能性を持ち、個々の農家に取入れやすく、また過去に研究実績があること等による。太陽熱利用の手法として

\* 現農業技術課

は、実用化への容易さから判断して温室自体を集熱器に用いる内部集熱型を前提にした。さらに、装置の設計にあたっては過去の研究実績を重視して、まず温室地下土壌を蓄熱体とする地中熱交換方式を取上げ、次いで化学物質の相変化に伴う熱の出入りを利用する潜熱蓄熱方式の実用化に取組んだ。これらの暖房装置については、暖房性能の把握を主に装置の熱的性質、室内環境特性、作物の生育特性、補助暖房との併用方法、装置の設計基準、現地経済施設における実証効果、運転管理上の留意点及び経済効果等つい明らかにした。その後はさらに暖房熱源の多様化や適用作物の拡大をはかるため、自然大気を熱源とする空気-空気型ヒートポンプの温室利用について検討を進め、暖房性能、成績係数、効率的な運転管理法及び運転経費について明らかにした。

温室暖房の省エネルギーに関する研究の多くは、気象や環境工学の分野に属するところであろうが、課題の緊急性から計測や解析手法を熟知しないまま試験を進めたため、内容に整合性が欠けたり、欠落している部分があると思われる。しかし、太陽熱暖房に関しては実用化をはかることができ、またヒートポンプではその見通しを得ることができたので、ここに総括して報告することとした。

本研究の大部分は既報<sup>(65-75)</sup>されており、ここにあらためて取りまとめた。

## 第1章 地中熱交換方式による温室暖房

### 地中熱交換方式の原理と基本構造

本方式は1969年山本<sup>(94)</sup>によって考案された暖房方式で、その実験装置を第1図に示した。装置は、送風ファン、送風ピット、熱交換パイプ及び吹出し口から成っている。作動原理は、日中昇温した温室内空気をファンにより吸引し、送風ピットから温室地下に埋設されたパイプ内を通して、その周辺土壌の温度を上昇させ（蓄熱作用）、夜間、室温が低下したなら、再びファンにより地中一室内を強制循環させて熱を取出し（放熱作用）温室内を暖房しようとするものである。従って、本方式は温室自体を集熱装置とし、温室地下土壌を蓄熱体に、またパイプを熱交換器とする内部集熱型太陽熱暖房方式となる。

### 第1節 ビニルハウスおよび一層被覆カーテン条件下に取入れた試験装置と暖房特性

## 謝 辞

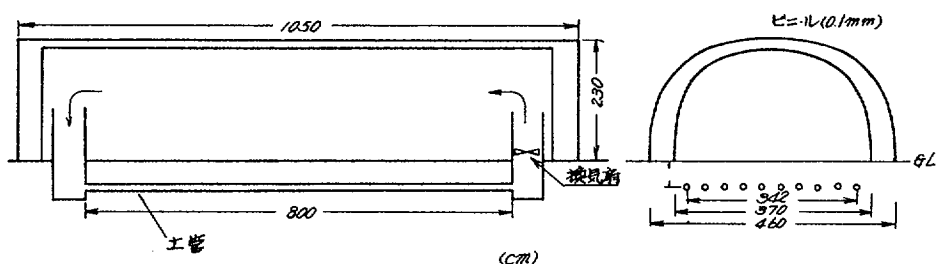
本研究を行うにあたり、多くの方々から御指導、御協力をいただいた。

本研究を取りまとめるに当たって、御校閲の労を賜り、有意義な御助言をいただいた千葉大学教授伊東正博士には謹んで感謝の意を表す。また、千葉大学教授平田尚美博士、同大学助教篠原温博士、同大学助教北宅善昭博士、同大学丸尾達並びに北条雅章助手には多くの御示唆、御指導を賜った。謹んで感謝の意を表す。また、終始御指導、御助言を賜った元筑波大学教授鈴木芳夫博士、元神奈川県農業総合研究所長板木利隆博士、千葉大学教授古在豊樹博士、大阪府立大学助教池田英男博士、愛媛大学助教仁科弘重博士には心から感謝の意を表す。

本研究の遂行に当たり、元神奈川県園芸試験場長高橋基氏、同基果菜科長佐藤紀男氏（現、農業技術課）には適切な助言と数々の便宜が与えられ、また研究の実施に当たっては果菜科職員の多大な御協力をいただいた。さらに、現地試験の実施及び現地調査に当たっては、横浜、横須賀、相模原、伊勢原、平塚農業改良普及所及び神奈川県農業技術課担当職員の協力を仰いだ。ここに、記して深謝の意を表す。

## 1 緒 言

山本<sup>(94,95)</sup>は約50m<sup>2</sup>のビニルハウスに本装置を取入れ、暖房性能や室内気象特性、適用条件等について検討を行い、暖房方式としての可能性を明らかにした。しかし、この装置は石油暖房方式に比べて多額の経費を要し、また当時は石油価格が安価で安定した状況にあったので、直ちに実用化へ結びつける方向へとは進まなかった。その後、石油資源の節約に対する認識の高まりと、価格高騰による生産経費の上昇を回避する必要性が生じ、再び本方式が見直されるようになった。森ら<sup>(42)</sup>や山崎<sup>(99)</sup>は、ビニルハウスに本装置を設置して暖房効果を検討したところ、内外気温差は15℃を保持し、トマトに対しては十分な暖房能力を持っていることを認めた。しかし、これらの実験に用いられてきた温室は、床面積が50~100m<sup>2</sup>であり、また保温性能を高めるため屋根面は二重固定張りに被覆されており、野菜生産で一般に用いられ



第1図 地中熱交換ハウスの構造

ている温室とは規模、形態が大きく相違していた。従って、本方式の実用化をはかるためには、実際の温室栽培に近い条件で、暖房効果や設置基準また利用場面等を明らかにする必要があると考えられた。

そこで本試験は、野菜栽培に広く使用されている型式の大型単棟温室を用い、内部保温は一般的に使用されているカーテン開閉方式を採用し、当地方においてトマトの必要暖房効果といえる内外気温差15℃を目標に、1977年秋より試験を開始した。この試験は'77年秋～'79年春までの2か年にわたって実施したものである。

## 2 材料および方法

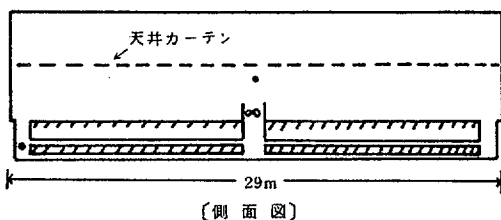
### 1) 供試温室・地中熱交換装置及びその運転方法

供試温室と地中熱交換装置の構造を第2図に示した。温室は床面積314m<sup>2</sup>、保温比0.6の硬質塩化ビニルを被覆した単棟ハウスである。内部は天井部に塩化ビニル(0.05mm)を一層、側壁部に塩化ビニルとシルバー系フィルムを二層被覆した。地中熱交換装置は、このような大型温室での設置事例がないため、山本<sup>(95)</sup>、森<sup>(42)</sup>、山

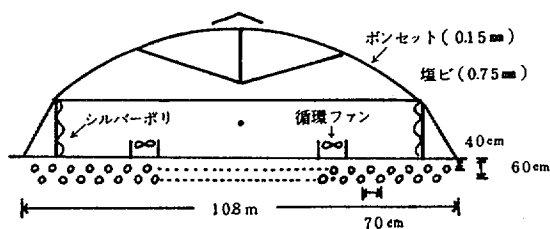
崎<sup>(99)</sup>の装置と機器資材の性能を参考に設計し、初年度('77～'78年)は内径10cm、肉厚2.5mmのポリエチレンパイプを深さ60cm、平均間隔70cmに合計21列埋設した。循環ファンは羽根径50cmの有圧ファン(200V、400W、定格風量90m<sup>3</sup>/min)を用い、温室中央部のピット(送風口)に2基取付けた。ピットは深さ60cm、幅50cm、長さ9mの側溝型式とした。次年度('78～'79年)は、前年度の成績をもとに必要な本数を計算し、前年埋設したパイプの上20cmに13列増やし、合計34列とした。循環ファンの性能、台数は前年と同一である。

日中の蓄熱開始設定温度は、初年度は温室内気温25℃とし、次年度は蓄熱量をさらに高めるため20℃に設定した。暖房設定温度は両年も10℃の恒夜温管理とした。初年度は多くの蓄熱量を確保するため、日中温室を密閉状態にしてファンを運転した。しかし、1月中旬以降トマトに疫病が発生したので室内の湿度を下げるため、朝方1時間程度天窓換気を行った。次年度は、日中の過大な高温を抑制し、湿度低下をはかるため、晴天日は若干天窓を開けて(手動操作)換気を行った。

### 2) 風量調査

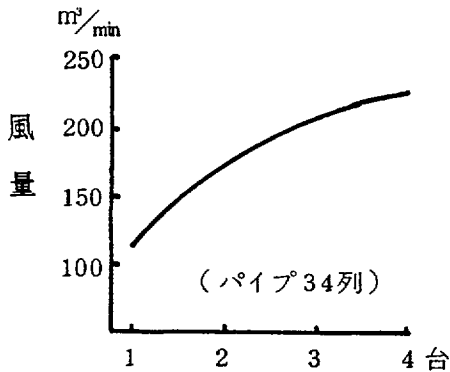


(側面図)

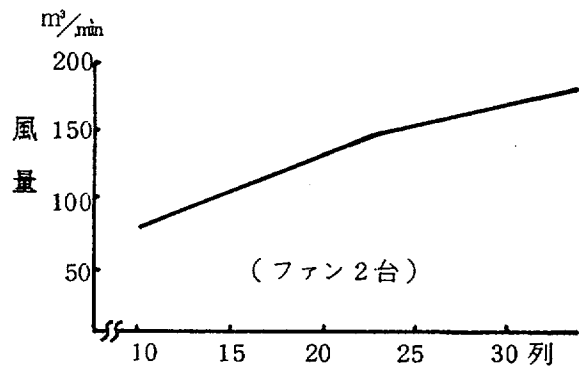


(正面図)

第2図 供試ハウスの構造と地中熱交換装置(・は温度測定位置)



第3図 ファン台数と風量



第4図 パイプ本数と風量

アネモマスターを用いて、各パイプの吹出し口の風速を測定し、排出空気容積の総量を風量として表した。

3) 気・地温、湿度の測定および蓄熱、放熱量の算出  
 気・地温の測定は第2図に示したように、温室中央部(ファン吸入口)、パイプ吹出し口、屋外の高さ1.5mの測点およびファンと吹出し口の間地点における地中のパイプ側壁から水平に10cm離れた地点について行った。これらの温度測定には抵抗式多点自記温度計を用いた。湿度の測定は、通風式自記湿度計を用い、温室中央部について行った。

蓄熱量・放熱量の算出は、顕熱交換量について、風量×空気比熱×吹出し口とファン吸気口の温度差×時間の式より求めた。暖房必要熱量は、地中熱交換暖房運転日において室温を10℃に保持するために必要な熱量を意味し、これにより本暖房装置の不足熱量を推定した。その算出法は、まず数日間10℃設定で温風暖房機だけを運転してその重油消費量から放出熱量を知り(重油1ℓの発

熱量8,770 kcal, 燃焼効率0.75で計算), 次に外気温と室温の積算温度を地中熱交換運転日の10℃設定値と外気温の積算温度とを比較して推定した。

電力消費量は、積算電力計を用いて測定した。

4) 供試作物および耕種概要

初年度は、トマト‘ほまれFR’を使用し、10月7日に播種、12月6日に定植した。

次年度は、トマト‘ほまれFR’他4品種を用い、9月11日に播種、11月6日に定植した。両年とも作物の管理は当地の慣行法に準じた。

### 3 結 果

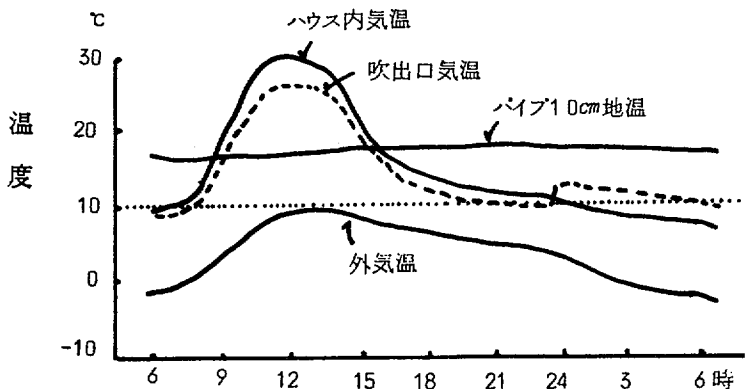
#### 1) 風量調査

第3～4図にパイプ本数と風量およびファン台数と風量の関係を示した。パイプ本数が増加するに従い、風量はほぼ比例的に増大した。しかし、ファン台数を増加させても、風量は比例的には増大せず、一台当たりの風量は低下した。

初年度のファン台数2台、パイプ列数21列の場合、風量は130m³/min(定格風量の72%)で、パイプ吹出し口の平均風速は7.4m/secであった。次年度のファン台数2台、パイプ列数34列では風量175m³/min(定格風量の97%)、平均風速は6.1m/secであった。

2) 初年度の装置における暖房性能および熱収支

晴天日で最低外気温が0℃で以



第5図 各部温度の日変化(1月5～6日)

第1表 加温熱量，不足熱量，パイプ放熱量およびパイプ不足列数（1977～'78年）

月 日	最 低 気 温	蓄 熱 量	暖房必要量	不 足 量	不 足 量 / 時 間	放 熱 量	放 熱 量 / 時 間	パイプ 1 列 当 り 放 熱 量	パイプ 不 足 列 数
	°C	kcal	kcal	kcal	kcal/h	kcal	kcal/h	kcal/h	列
12. 21—22	-4.0	—	231,348	20,752	2,025	76,008	7,474	356	5.7
23—24	-2.0	—	255,102	55,778	4,291	85,403	6,211	296	14.5
26—27	-3.0	44,150	241,029	23,296	2,118	64,764	6,318	301	7.0
1. 19—20	-2.0	86,108	24,179	51,441	4,227	80,338	7,146	340	12.4
23—24	-2.5	76,759	256,090	23,326	1,624	95,256	7,572	361	4.5
25—26	-0.5	72,072	198,701	30,890	2,522	72,349	6,116	291	8.7
2. 2—3	-6.0	82,382	320,305	80,447	5,746	105,638	8,234	392	14.7
3—4	-8.0	101,884	361,261	96,716	7,344	103,291	8,147	388	18.9
4—5	-5.5	107,608	305,518	74,243	5,987	90,342	7,637	364	16.4
5—6	-2.5	—	267,326	57,590	4,430	89,611	6,893	328	13.5
6—7	-4.0	—	230,489	37,625	2,894	92,912	7,147	340	8.5

下に低下した日における温室内外各測定位置の温度経時変化の例を第5図に示した。この例では、蓄熱運転時ファンにより送りこまれた空気はパイプ内を通る間に最大5～6℃温度が降下して吹出され、その結果地中温度（パイプ側壁から10cm離れた地点）はファン作動前よりも1～2℃上昇した。夜間は室温が10℃以下になると再びファンが作動を始め、10～13℃の温風が吹出された。前夜半、ファンはON-OFF運転をくり返しているが、外気温の低下とともに連続運転となり、室温は次第に低下して、外気温が0℃以下になると設定室温の10℃を保てなくなった。

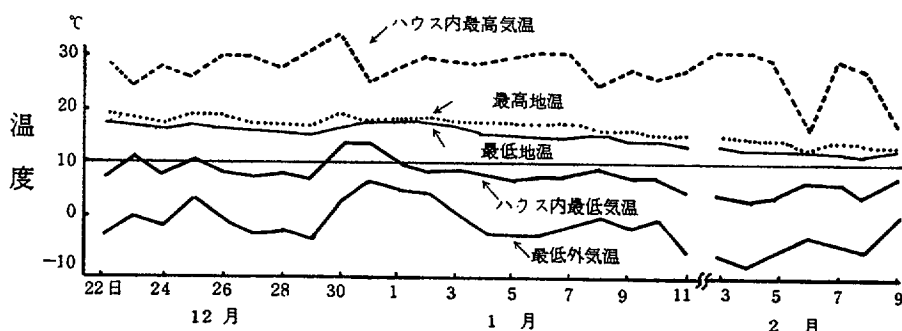
次に、各測定位置の最高・最低温度の経日変化を第6図に示した。温室最低気温は設定値の10℃より低下する日が多く、10℃を保持できたのは最低外気温が0℃以上の日だけであった。また、12～1月中旬は8℃をほぼ維持できたものの、1月中旬～2月は放熱量の増大に

伴って地温が低下し、このため8℃を保持できない日も相当数出現した。試験期間中の室温の最低極値は5.0℃（2月4日）で、この時の最低外気温は-7.0℃、地温は12℃であった。最低外気温が0℃以下の日における内外気温差は9～12℃で、目標とした15℃には達せず、試験装置の暖房能力は不足した。

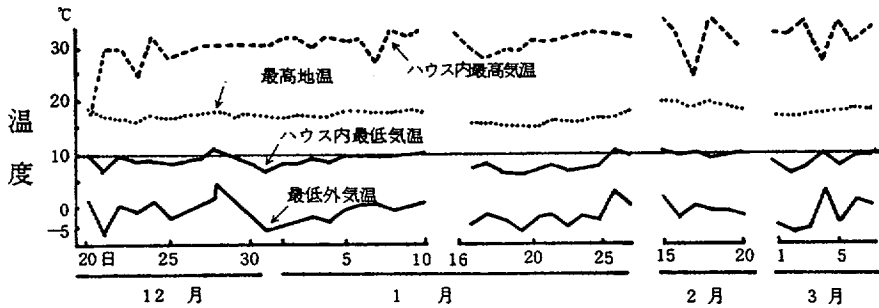
一方、日中の温室最高気温は温室を密閉状態にして装置を運転した場合、蓄熱作用による昇温抑制が認められるが、晴天日は25℃を越え、多くの余剰熱量を残していた。

パイプ近辺の地温は、蓄熱量および放熱量の多少によって変化し、12～19℃と変動幅が大きかった。地温が低下したのは、外気温の低下が著しく、放熱量が増大した日が続いた場合であった。

以上の結果から、本装置では暖房設定温度である10℃および当初設定した内外気温差15℃を保持するには明ら



第6図 ハウス内外各部位最高，最低気温（1977～'78年）

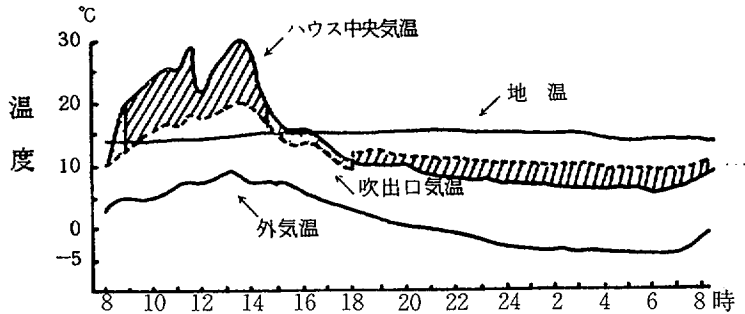


第7図 ハウス内外各部位最高, 最低気温 (1978~'79年)

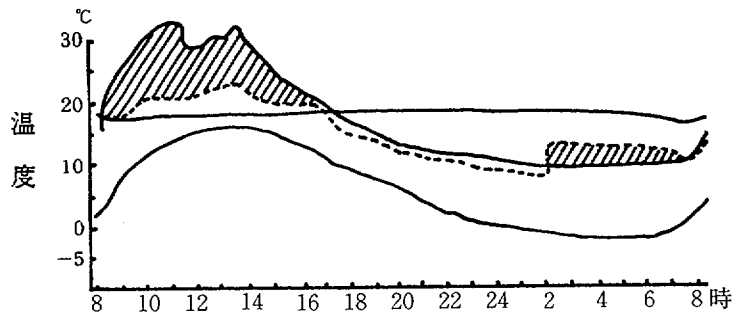
かに能力が不足することが分った。次年度、装置の性能向上をはかるため蓄熱量、暖房必要熱量、放熱量および不足熱量を求めた結果を第1表に示した。日々の蓄熱量、放熱量は気象条件によって当然異なるが、ともに最大では約10万 kcalであった。また、パイプ一列当りの放熱量は300~400 cal/hで、日による差は小さく、(不足熱量÷パイプ一列当りの放熱量)よりパイプ不足列数を求めたところ、内外気温差を15℃とすれば15~17列と推定された。実際には、パイプ列数が増えると循環風量も増大するので、これよりも少ない列数で足りると考え、次年度は13列増加させることにした。

3) 2年度の装置における暖房性能および熱収支

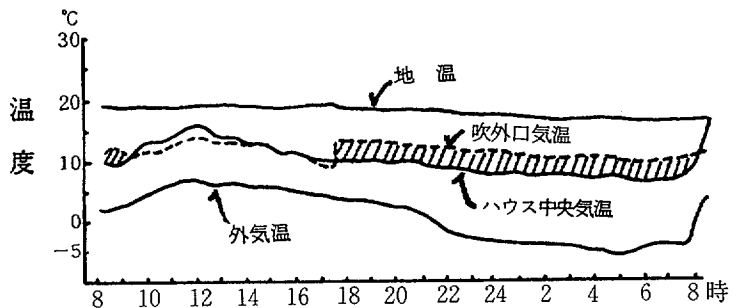
第7図に2年度目における各測定位置の最高、最低温度の経日変化を示した。2年度はパイプ列数を34列に増加させ、循環風量および熱交換部を増大させた結果、常時設定値の10℃は保持できなかったものの、ほぼ8~10℃は保ち、暖房性能の向上効果は認められた。特に、2月



第8図 各部位の温度経時変化 ('79年1月19日~1月20日, 晴)



第9図 各部位の温度経時変化 ('79年2月19日~2月20日, 晴)



第10図 各部位の温度経時変化 ('78年12月20日~12月21日, 日中くもり夜間晴)

は最低外気温が0℃以下の日は10日間だけであり、しかも最低極温が-2.9℃であったことから、設定値の10℃は確実に保てた。期間を通して8℃を保持でなかった日は10日間であった。しかし、最低外気温が0℃以下の日の内外気温差は10~13℃で、目標とした15℃にはやや不足であり、安定した暖房効果を得るためには、さらに性能向上をはかる必要があった。

日中晴天日は若干の天窓換気を行ったにもかかわらず最高室温は30℃を越え、なお多くの蓄熱できる熱量を残していた。

第8~9図に晴天日における各位置の温度経時変化を2例示した。日中のファン吸気口-吹出し口の温度差は最大6~8℃となり、夜間のその差はほぼ一定して2.5~3.5℃であった。ファンの作動時間は日中約6時間、夜間では最大14時間であった。地温の変化は気温とはずれがあり、最高温度は19~20時に、また最低温度は10~11時に記録された。

第10図は日中曇天で蓄熱がまったくなく、しかも夜間晴れて外気温が著しく低下した(-5℃)日の温度経時変化の例である。このような場合、装置の著しい能力不足が懸念されるが、この例においては前日までに蓄熱量が確保され、地温が18.5℃まで上昇していたので、最低室温は6.2℃の低下にとどまった。しかし、ほとんどの場合、曇雨天日は夜間の外気温がそれほど低下せず、室内気温は7~8℃に保持された。

第2表は暖房運転時における温室中央部気温(吸気口

第2表 各部位間の温度差と必要地中温度の推定 (1978~'79)

期 間	A	B	C	D	E	F	F+10
	パイプから10cmの地温	吹出口気温	ハウス内気温	A-B	B-C	B+E (A-C)	10℃維持するに 必要な地 中温度
月 日	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C
12. 20-31	16.7	11.9	8.6	4.8	3.3	8.1	18.1
1. 1-15	16.1	11.6	8.6	4.5	3.0	7.5	17.5
1. 16-31	14.8	10.4	7.7	4.4	2.7	7.1	17.1
2. 1-28	17.4	12.5	9.4	4.9	3.1	8.0	18.0
3. 1-9	16.5	11.0	8.0	5.4	3.1	8.5	18.5

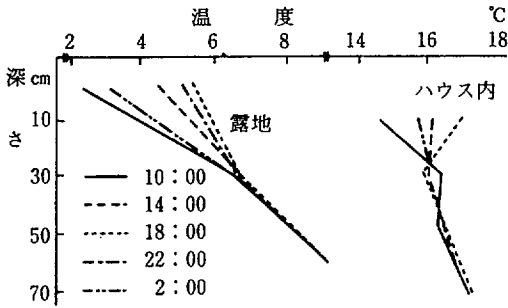
数値は平均値

近辺)と吹出し口気温および地温との差をみたものである。いずれの日とも各温度差は一定しており、地温と吹出し口では約5℃、吹出し口と温室中央では約3℃の差であった。このことは、温室中央部の気温を10℃に維持するためには、地温は17~18.5℃まで上昇させておく必要があることを示唆している。

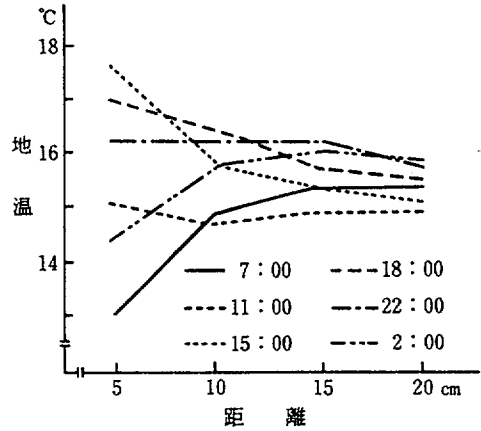
第3表は本装置による蓄熱量、放熱量および不足熱量を求めた結果である。この年の蓄熱量は最大18~19万kcalとなり、前年とは気象条件が異なるので正確な比較はできないが、総体的にみれば約70%の増大であった。また放熱量は10~12万kcalでやはり約30%増加した。しかし、パイプ一列当たりの放熱量は約10%低下した。

第3表 蓄熱量、放熱量、不足熱量および必要循環風量 (1978~'79年)

月 日	最 低 気 温	蓄 熱 量	放 熱 量	放 熱 量 / 時 間	不 足 熱 量	パイプ1列当り放熱量	必 要 循 環 風 量
	°C	kcal	kcal	kcal/h	kcal	kcal/h	m <sup>3</sup> /min
12. 20-21	-5.5	0	164,399	12,223	48,280	359	242
22-23	-1.0	59,882	105,494	9,377	16,197	276	202
24-25	-2.2	169,880	92,957	10,624	16,150	312	210
30-31	-4.8	151,421	128,772	11,446	24,427	337	216
31-1.1	-3.3	156,051	103,919	10,392	20,292	306	213
1. 2-3	-1.8	158,067	85,239	9,295	8,540	273	193
7-8	-0.5	36,855	46,557	9,969	6,499	293	201
16-17	-3.3	180,180	86,659	9,629	19,978	283	217
19-20	-5.1	131,387	168,293	11,809	49,923	347	240
20-21	-2.6	158,193	93,650	8,143	27,311	240	219
22-23	-4.2	120,173	70,529	10,076	20,540	296	230
24-25	-3.0	195,174	67,379	8,984	9,387	264	199
3. 1-2	-5.6	150,602	112,329	10,617	19,876	312	210
2-3	-4.4	181,881	93,398	10,286	15,823	303	208



第11図 露地およびハウス内地温の垂直分布



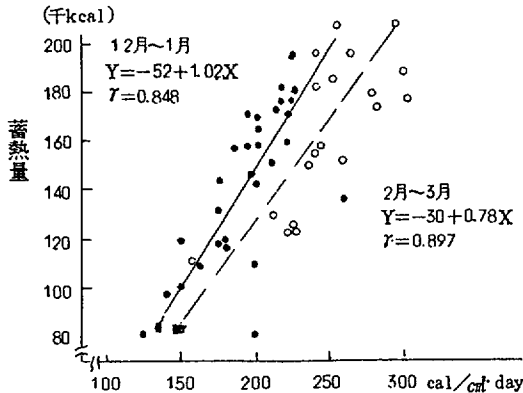
第12図 パイプ側壁からの地温分布

目標温度に対する不足熱量の割合は、最低外気温が0～-5℃の日についてみると設定温度を10℃とした場合10～23%、8℃では0～10%と推定された。

第11図に装置の運転を一時停止させて温室地下土壌の温度を深さ別に調査し、それを時間帯別に示した。温室下地温は深さ30cmまでは室内気温の影響を受けて、温度の変動幅は大きい、それ以下になると一定温度の地温域になる。また、第12図は装置運転時におけるパイプ側壁からの温度分布を水平方向にみたもので、20cm程度離れると温度の変動幅が小さくなっており、この距離がパイプ側壁からの熱伝導範囲とみることができる。

4) 日射量と蓄熱量との関係

2年目の装置において、1日の屋外日射量と蓄熱量との関係を求めた結果を第13図に示した。12～1月と2～3月ではやや傾向が異なるが、両者間には高い相関が認め



第13図 日射量と蓄熱量との関係

められ、本温室で10～12万 kcal 以上の安定した蓄熱量を得るためには150～200 cal/cm²・day 以上の日射量が必要と推定された。

5) 暖房熱量と消費電力との比

2年目の装置において、日中晴天で最低外気温が0℃以下の比の主な放熱量と消費電力(蓄熱、放熱運転の合計値)およびその比を第4表に示した。蓄熱、放熱のため消費した1日の電力は10～15 kw であり、これを熱量換算(1 kw = 860 kcal)して、放熱量との比を求めると1:8～12となり、少ない消費エネルギーで多大な熱量を獲得できることを認めた。

6) トマトの生育・収量

初年度においては、定植後3～4段花房開花までの期間は順調な生育を示したが、その後疫病が発生したことや本装置の暖房能力が不足したことから、後半草勢弱

第4表 暖房熱量と消費電力との比 (1978～'79年)

月 日	総放熱量 kcal	使用電力 kw	同 換	左 カ ロ リ 算 kcal	効率
12. 31—1. 1	103, 919	13. 1		11, 266	9. 2
1. 1—1. 2	88, 389	12. 2		10, 492	8. 4
2— 3	85, 239	11. 6		9, 976	8. 5
3— 4	72, 387	10. 0		8, 600	8. 4
16— 17	86, 657	12. 6		10, 836	8. 0
17— 18	93, 524	9. 5		8, 170	11. 4
18— 19	88, 421	9. 8		8, 428	10. 5
19— 20	168, 273	15. 3		13, 158	12. 8
20— 21	93, 650	14. 2		12, 212	7. 7



し、第5表に示したように収量は標準よりやや低かった。2年目は、全期間を通じて良好な生育状態を保ち、収穫期間虫灰色カビ病の発生が認められたが、収量に大きな影響を及ぼすほどではなかった。各品種の収量を第14図に示した。総収量では‘ほまれFR’がほぼ標準といえ、良果率も高かった。他品種はすじぐされ症の発生が多く良果率が低かったが、これは暖房装置とは無関係な品種特性によるものと思われる。

4 考 察

本試験の第一の目的は、一般型式の野菜温室を用いた場合における地中熱交換装置の暖房効果を確認することであり、また暖房性能にかかわる要因を求め、今後の実用化の可能性を明らかにすることにある。また、装置の設計基準を確定するための基礎資料を求めることも重要な課題である。

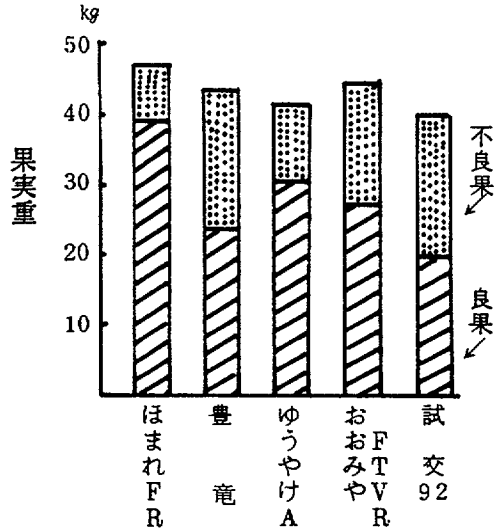
初年度の装置は、内径10cmのポリエチレンパイプを深さ60cmの位置に70cm間隔で合計21列埋設し、送風ピットは温室中央部に設けて、そこに200V、400Wの有圧ファンを2基取付け、試験を開始した。その結果を考察すると次のとおりである。本試験で測定された循環風量は130m<sup>3</sup>/minであり、晴天日では日中昇温したハウス内の空気はファンからパイプ内を通る間に最大6～8℃降下してパイプ周辺の地中温度を上昇させる蓄熱効果が認められた。また、夜間はファン吸気口よりも2～3℃高い温風が吹き出されることが分った。この放熱による室温保持能力は、当然気象要因等の影響を受けるが、最低気温が0℃以下の日については、得られた内外気温差は9～12℃であった。しかし、当初目標とした内外気温差15℃には達せず、また必要最低気温と考えた室温8℃を保持できない日も度々あった。一方、日中晴天日の温室内気温は密閉状態のままでは30℃を超え、相当量の蓄熱可能な熱量を残していた。

夜間の外気温低下が著しく、暖房負荷が増大すると、日中の蓄熱量よりも放熱量の方が大きくなり、しかも連続するとパイプ周辺の地温が次第に低下していき、試験期間中では最低12℃が測定された。

このように初年度の装置では、温室内の余剰熱量を十分蓄熱しきれず、トマトの暖房に必要な放熱量を確保できない日が多く、次年度はさらに熱交換量の増大をはかるため装置改善の必要性があった。この場合、循環風量を増大させるためには、ファン台数を増す方法とパイプ列数を増やす2通りが考えられる。ファンについてはそ

第5表 収量 (1977～'78年, 10株当り)

良果		奇型果		空胴果		小果		総計	
個	kg	個	kg	個	kg	個	kg	個	kg
135.6	25.70	8.3	1.98	24.2	3.50	30.8	2.47	198.9	33.65



第14図 各品種の収量 ('78～'79年, 10株当り)

の数を増しても風量は比例的には増大しないのに対し、パイプ列数は増加するに従い風量はほぼ比例的に増大することが分った。またパイプ列数の増加は熱交換部分の増大も意味し、性能を向上させる効果が大いだと判断し、次年度はファン台数は変更せずパイプ列数を増すこととした。パイプの増加列数は、暖房必要熱量、不足熱量およびパイプ一列当りの放熱量より求め、次年度はさらに13列増して34列として検討を行った。

その結果、循環風量は前年より35%増えて175m<sup>3</sup>/minとなり、また蓄熱量、放熱量ともそれぞれ70%および30%増大した。夜間の温室内気温はほぼ8～10℃に維持できるようになり、8℃設定とした場合の不足熱量は0～10%にまでに暖房性能は向上した。しかし、内外気温差は最大13℃までであって、目標とした15℃には到達せず、安定した暖房効果を得るためには、さらに熱交換量を高めるか、温室の保温性を向上させて暖房負荷を低減させる等の措置が必要であった。

森<sup>(42)</sup>は床面積100m<sup>2</sup>の二重固定張りハウスに取入れた装置で、内外気温差15℃を達成しているが、この場合

の循環風量は $70\text{m}^3/\text{min}$ で、これを単純に本温室面積に換算すると $220\text{m}^3/\text{min}$ となり、本試験に用いた装置よりも25%多い。また山崎<sup>(99)</sup>は、やはり $100\text{m}^2$ のハウスに約 $40\text{m}^3/\text{min}$ の循環風量で内外気温差 $15\sim 20^\circ\text{C}$ を得ているが、本温室面積に換算すると $126\text{m}^3/\text{min}$ となり、本装置よりも26%少ない。この場合の本装置との性能差は、温室内部の保温方法の違いによって暖房負荷が異なることによるものと思われる。本暖房方式においては、循環風量は直接熱交換量を定める要素なので、今後は暖房負荷との関係を明らかにすることは、装置の設計基準を決めるうえで欠かせない事項であり、重要な課題である。

暖房能力を向上させるためには、日中の蓄熱量を十分確保することが必須条件である。この蓄熱作用により温室室内を $10^\circ\text{C}$ に維持するために必要な地温は、地温と吹出し口気温、吹出し口気温と温室中央部（ファン吸気口気温）との各温度差から、 $17.5\sim 18.5^\circ\text{C}$ と推定された。1月における本温室の地下 $60\text{cm}$ の地温は約 $16^\circ\text{C}$ であり、地温を常時 $17\sim 19^\circ\text{C}$ に維持するためには、常に多くの蓄熱量を確保しなければならない。蓄熱量不足や放熱量の増大に伴う地温の低下は、暖房能力の低下だけでなく、作物に対する影響も予測され、実用場面への適用に当たっては何らかの補助暖房との併用方法を考えておく必要がある。

日射量の少ない曇雨天日は、日中の蓄熱を期待できないので、試験開始当初は相当な暖房不足が懸念された。しかし、実際はそのような日は夜間の外気温がそれほど低下せず、暖房負荷は小さくなるので、ほとんどの日で温室室内気温は $6\sim 8^\circ\text{C}$ に保持できた。森<sup>(42)</sup>も曇雨天日の朝は気温低下が小さいので、作物に対する実害はなかったと報告している。しかし、日中曇天であっても、夜間晴れて外気温が著しく低下する事例も認められ、本試験の場合は前日までの蓄熱により一定の地温が保持されていたので温室室内は $8^\circ\text{C}$ までの低下にとどまった。しかし、曇雨天日が相当日数続く場合も想定しなければならず、先にも述べたように補助暖房との併用法を明らかにする必要がある。

パイプの適正な埋設位置を明らかにするため、装置の運転を一時停止させて（この間は温風暖房機を使用）温室地下土壌の温度を深さ別に調べてみたところ、深さ $30\text{cm}$ までは室内気温の影響を受けて地温は変動するが、それ以下では一定な地温域になることが分った。また装置運転時のパイプ周辺の温度分布を調査した結果、パイプ側壁から $20\text{cm}$ 程度離れると温度の変動幅はごく小さく

なり、この距離が熱伝導範囲と認められた。従って、径 $10\text{cm}$ のパイプを用いた場合の適切な埋設位置は、深さについては室内気温の影響を受けなくなる地温域に熱伝導距離を加えた $50\text{cm}$ 以下となろう。またパイプ間隔は、パイプ相互間の熱伝導の影響が及ばない距離とすれば、最低 $50\sim 60\text{cm}$ （パイプの中心間）となる。ただし、パイプの埋設量は一段配列とすると、温室の間口との関係から列数は制限されるので2年目の装置のように、必要数を確保するためには2段配列にしなければならない。この場合上下のパイプ間隔は、先の熱伝導距離からいえば $50\sim 60\text{cm}$ 離すことが必要であるが、下段パイプの深さは $1\text{m}$ 以下となり、埋設のための作業労力は多大になる。このため上下のパイプ間隔は埋設作業の面から制約を受け、 $30\text{cm}$ 程度に調整せざるをえないと思われる。

地中熱交換装置の性能は、当然ながら日射量の影響を受ける。1日の日射量と蓄熱量との関係を見ると、両者間に高い相関があり、本装置の場合では、 $10\sim 12$ 万 $\text{kcal}$ 以上の安定した蓄熱量を得るためには、 $150\sim 200\text{cal}/\text{m}^2\cdot\text{day}$ 以上の日射量が必要と推定された。従って、本暖房方式の適用地域は $12\sim 3$ 月の平均日射量がこの値以上に確保できるところでなければ装置の性能を十分発揮できない。

ファン運転による消費電力を調査したところ、晴天日には蓄熱・放熱のため合計 $5\sim 13\text{kw}$ /日消費されていた。この消費電力を熱量換算し、総放熱量との比を暖房のための効率として表すと $1:8\sim 12$ となり、少ないエネルギー消費で多大な暖房エネルギーを獲得ができ、エネルギー利用効率の高い装置として、本来の目的を十分達成できることを確認できた。森<sup>(42)</sup>は1日の平均消費電力を熱量換算した値とそのエネルギーを慣行の温風暖房機で暖房可能な値との比較から、本方式は温風暖房機よりも $4\sim 5$ 倍効率的であるとしている。

トマトの生育、収量については、慣行の暖房方式による対照温室を設けなかつたので正確な比較はできないが、過去の栽培実績から判断して、初年度は草勢がやや弱く、収量は標準より若干低いと思われた。また、次年度は全期間とも生育は順調で、品種間差はあるものの、ほぼ標準的な収量が得られた。

## 5 摘 要

地中熱交換方式による施設暖房の実用化をはかるため1977～1979年にわたり、一般の野菜栽培型式の温室内（床面積、 $314\text{m}^2$ ）に本装置を取入れて、暖房性能、熱収支、

設置基準、適用条件、エネルギー効率、およびトマトの生育・収量について検討を行った。

1) 地中熱交換装置の構造は、初年度は地下60cmのところに径10cmのポリエチレンパイプを70cmの間隔で計21列埋設し、温室中央部に送風ピットを設けて、そこに200V、400Wのファンを2基取付けた。次年度はパイプを34列に増やした。

2) 熱交換パイプ列数と循環風量の関係は、パイプ21列の場合130m<sup>3</sup>/min、34列では175m<sup>3</sup>/minであった。

3) パイプ21列の場合、温室を設定値の10℃に保持できたのは最低外気温が0℃以上の時であった。最低外気温が0℃以下の日における内外気温差は9~12℃であった。一方、日中の温室内気温は25℃を越え、蓄熱可能な多くの熱量を残していた。

4) パイプ34列の場合、温室内気温はほぼ8~10℃を維持し、得られた内外気温差は10~13℃であった。しかし、目標の15℃には達せず、さらに装置を改善する必要があった。

5) 曇雨天日は日中の蓄熱が少なくても、朝方の外気温がさほど低下せず、温室内は6~8℃に保てた。

6) 温室内を10℃に保つために必要なパイプ周辺(側壁から10cm離れた地点)の温度は、温室内気温-吹出し口気温-地温の各温度差から17.5~18.5℃と推定された。

7) 地下の安定した地温域及びパイプ側壁からの熱伝導範囲より、パイプの埋設位置を求めたところ、深さは50cm以下、パイプ間隔は50~60cmが適切と判断された。

8) 1日の日射量と蓄熱量との間には高い相関を認め、安定した蓄熱量を確保するためには、150~200 cal/m<sup>2</sup>・day 以上の日射量が必要であると推定された。

9) 本装置では消費電力に対して、8~12倍の暖房エネルギーが得られた。

10) トマトの収量は初年度は標準よりやや低く、次年度はほぼ標準的な収量が得られた。

## 第2節 ガラス室、二層被覆カーテン条件および改良装置における暖房特性

### 1 緒言

前節においては、地中熱交換装置をカーテン一層被覆したビニルハウス内に取入れて暖房性能を検討した結果、最大13℃の内外気温差を示したが、目標とする15℃には暖房熱量がやや不足した。しかし、さらに装置を改

善し、また内部保温装備を高めれば目標の達成は十分可能と思われた。

本試験では、前節までのビニルハウスから、新たに建設したガラス温室内に地中熱交換装置を設置し、またそれに伴って内部保温効果を高めるためカーテン装備の二層被覆化をはかった。地中熱交換装置は前節の成績をもとに熱交換パイプを大幅に増やし、また送風ピットの位置は、栽培管理の作業性を考慮して温室の妻側に設ける等の改良をはかった。温度管理も前節までの恒夜温管理法から、作物生理の研究<sup>(6,97)</sup>をもとに次第に一般化しつつある変夜温管理法に変更した。

このように本試験を進めるにあたって、試験温室、地中熱交換装置および温度管理法に大幅な改善を加えたので、本節ではこの条件下における暖房性能や温室内環境特性およびトマト生育・収量に及ぼす影響について検討し、本装置の実用化への方向を明らかにしようとした。

### 2 材料および方法

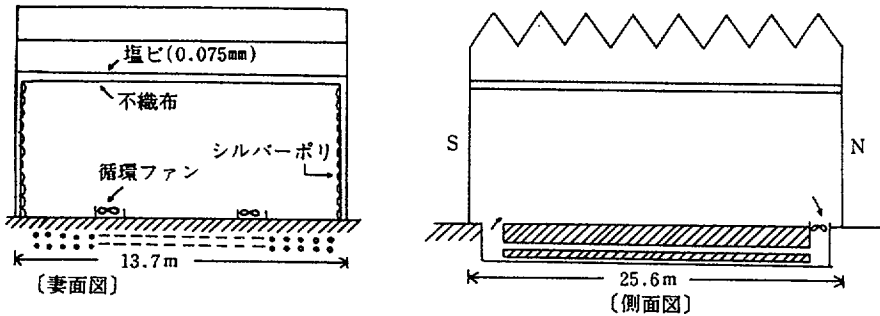
#### 1) 供試温室、地中熱交換装置およびその運転方法

供試温室は第15図に示した床面積352m<sup>2</sup>、保温比0.63のフェンロー型ガラス温室である。カーテン被覆に、天井部は塩化ビニル(上層)と不織布(下層)、側壁部は塩化ビニル(内側)とシルバー系ポリフィルム(外側)を用いた。

地中熱交換装置は、内径10cm、肉厚2.5mmのポリエチレンパイプを平均60cm間隔で、深さ50cmと80cmの位置に合計46列埋設し、温室北側に送風ピットを設けて、そこに1979~'80年は前節と同一機種種の200V、400Wの有圧ファン(定格風量90m<sup>3</sup>/min)を2基取付けた。次年度は200V、400W型に変わりはなく、パイプ内の通風抵抗が高くとも風量を大きく出せる地中熱交換専用型(三菱電機製)として作製された機種を2基使用した。吹出し口は温室南側で、送風ピットと同型の側溝型にした。

換気および蓄熱・放熱設定温度は第16図に示したとおりである。日中の午前(8.00~12.00)は30℃、午後(12.00~17.00)は28℃設定で天窓換気をし、また9.30~10.00の30分間は室温20℃以上の場合天窓を全開させて室内空気の交換を行った。蓄熱開始設定温度は20℃とし、夜間の暖房設定温度は第16図に示したような変温管理法を適用した。この場合、17.00~21.00、21.00~23.00の前後半設定温度は第6表に示したように当日の日射量の多少によって4段階に変動させた。

これらの温度制御のための天窓の開閉、カーテンの開



第15図 供試施設と地中熱交換装置

閉、ファンのON - OFFはすべてマイクロコンピュータ(山武ハネウエル製)によって行った。

2) 温度、湿度、炭酸ガス濃度調査および蓄熱・放熱量の算出

気温、地温の測定は、室内中央、ファン吸気口、吹出し口、温室中央部における地中のパイプ側壁から10cm離れた点および屋外の高さ1.5mの側点について行った。これらの温度は、側温抵抗式自記温度計を用いて測定した。また、相対湿度は通風式自記湿度計を用い、室内中央部で測定した。炭酸ガス濃度は赤外線ガス分析計により、同一位置で測定した。

蓄熱量・放熱量の算出は顕熱交換量について、循環風量×空気比熱×吸気口と吹出し口との温度差×ファン作動時間の積から求めた。

3) 供試作物および耕種概要

1979年～'80年はトマト‘ほまれFR’を用い、10月1日に播種し、12月6日に定植した。1980～'81年はトマト‘ほまれFR’他5品種を用い、10月1日に播種し、12月6日に定植した。栽培は当地の慣行法により、両年とも第6果房まで収穫した。

### 3 結 果

1) 循環風量

各パイプ吹出し口の平均風速は、1979～80年は5.9m/secで総循環風量は127m<sup>3</sup>/minとなり、また次年度の新機種のファンを用いた場合には、平均風速6.8m/secで循環風量は147m<sup>3</sup>/minであった。

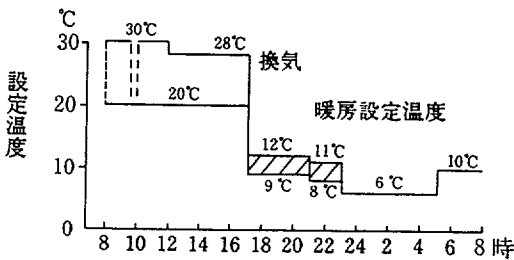
2) 暖房性能・温度環境

1979～80年における温室内外各位置の温度、温度差、蓄熱量、放熱量および集熱効率を第7表に示した。本装置の暖房性能を示す指標である室内最低気温および内外気温差は、暖房設定温度が10℃で、外気温が最も低下しやすい5.00～8.00の時間帯で表した。

本試験では、内部保温性の向上や装置改善の効果が顕著に現われて、設定温度の保持が容易になった。5.00～8.00の時間帯では、設定値の10℃はほぼ確実に維持され、10℃を保てなかったのは外気温が-5℃以下に低下した数日間だけで、しかも設定値を0.1～0.5℃下回った程度であった。外気温が0℃以下の日における内外気温差は10～15.7℃となり、本試験の当初の目標であった15℃を達成することができた。また表には示さなかった

第6表 日射量と前夜半設計温度

日 射 量	17.00～21.00	21.00～23.00
cal·cm <sup>2</sup> /day	°C	°C
180～240	12	11
120～180	11	10
60～120	10	9
0～60	9	8



第16図 換気およびファン作動設定温度

第7表 暖房効果、蓄熱・放熱量および集熱効率 (1980年)

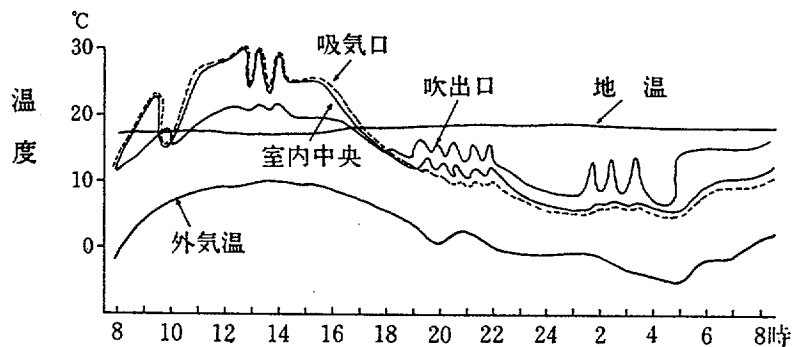
月 日	最低 外気温 °C	最低 室温 °C	内 外 気温差 °C	地 温 °C	吹出口 気温 °C	蓄熱量 kcal	放熱量 kcal	室内到達 日射量 kcal	集熱 効率 %
1月17~18日	-4.9	10.0	14.9	17.5	14.5	82,200	57,800	500,300	16.4
18~19	-5.4	9.8	15.2	17.4	14.0	94,900	62,100	490,800	19.3
20~21	-2.9	11.3	14.2	17.8	14.5	105,900	28,200	541,000	19.6
21~22	-4.9	10.8	15.7	18.0	14.6	79,100	35,400	533,900	14.8
24~25	-5.5	9.9	15.4	17.5	14.5	100,300	52,700	543,400	18.5
25~26	-5.4	10.0	15.4	17.5	14.3	121,500	52,900	584,100	20.8
26~27	-4.6	10.5	15.1	17.7	14.5	113,800	48,300	529,100	21.5
2月1~2日	-3.8	10.5	14.3	17.6	15.6	109,300	86,300	598,500	18.3
5~6	-3.7	11.3	15.0	19.1	15.6	59,900	36,900	474,000	12.6
6~7	-2.5	11.7	14.2	18.5	15.5	37,500	18,600	416,600	9.0
11~12	-3.5	11.2	14.7	18.5	15.6	105,100	29,800	670,300	15.7
12~13	-2.3	10.7	13.0	18.5	15.6	105,200	29,100	591,300	17.8
14~15	-4.0	10.0	14.0	18.0	14.6	121,900	59,000	723,000	16.9
15~16	-5.1	10.0	15.1	17.8	14.5	76,500	74,400	514,700	14.9
16~17	-5.1	10.0	15.1	17.3	14.6	81,800	66,900	598,500	13.7
17~18	-5.9	9.5	15.4	17.5	14.2	119,200	54,600	711,000	16.8

が、暖房設定温度が6℃の時間帯はもとより、17.00~23.00の前夜半の時間帯においても設定値以下になることはなかった。

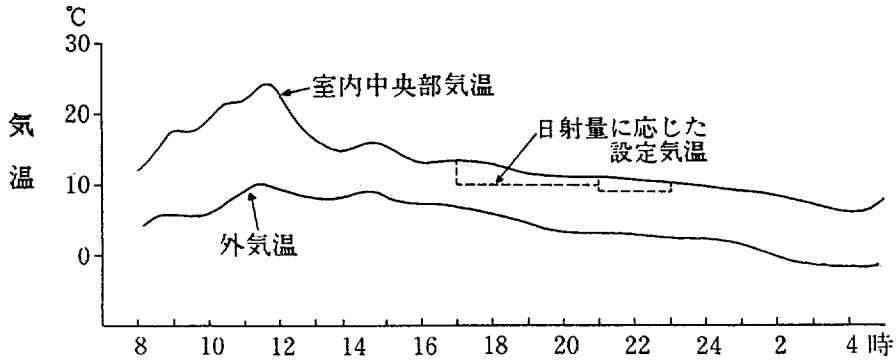
第17図に晴天日における温室内外各位置の温度経時変化の例を示した。日中の室内気温はほぼ設定値どおりに推移し、午前8時は以降次第に上昇して11~12時には30℃に達し、午後は天窓がたびたび開いて22~28℃の範囲で変動をくり返した。日中、ファンは連続的に作動し、その運転時間は最大5~6時間であった。夜間も室内気温は設定値に従った温度変化を示した。ファンの運転時間は外気温の高低によって一定せず、前夜半(17.00~23.00)および早朝加温時間帯(5.00~8.00)は、ON-OFFまたは連続運転されるが、6℃設定時間帯(23.00~5.00)は作動しない場合の方が多く、作動しても短時間であり、本温室の保温性が高いことが示された。

また、第7表に示したよ

うに、パイプ周辺の地温は2月までは17~19℃の範囲内で推移し、放熱時の吹出し口気温はそれより3~3.5℃低く、14~15.5℃の温風が吹き出された。蓄熱量は、晴天日で8~12万kcalが確保され、室内に透過した日射量に対する集熱効率は15~20%と推定された。これに対し、夜間の放熱量は最大で約9万kcalであり、ほとんどの日において放熱量が蓄熱量にまさることはなかった。曇雨天日では、蓄熱がまったくないかごくわずかであるが、そのような日は外気温の低下程度が小さいので、



第17図 各位置の温度変化 (1980.2.14~15)



第18図 曇天日における温度経時変化 (1980. 2. 21~22)

第8表 カーテン被覆条件の違いと暖房性能・蓄熱・放熱量 (1980~'81)

カーテン条件	月 日	最低外気温 °C	室内最低気温 °C	内外気温差 °C	地温 °C	吹出口気温 °C	蓄熱量 kcal	放熱量 kcal
二層	12月29~30日	-4.4	10.2	14.6	18.7	15.0	124,000	52,900
	30~31	-4.7	10.1	14.8	18.7	15.0	113,400	61,500
	31~1月1日	-4.4	9.9	14.3	13.8	15.0	128,800	47,200
	1月3~4日	-1.8	10.3	12.1	18.8	15.3	—	46,300
	4~5	-5.2	9.7	14.9	19.0	14.9	151,800	54,500
	5~6	-5.8	9.7	15.5	19.0	14.9	146,000	57,200
一層	1月6~7日	-4.0	8.7	12.7	18.3	14.3	114,500	118,300
	7~8	-5.8	8.3	14.1	18.0	14.0	125,800	112,900
	8~9	-4.2	8.7	12.9	18.0	14.0	122,600	96,300
	9~10	-0.5	10.2	10.7	18.1	14.6	126,400	58,300
	10~11	-3.9	9.1	13.0	18.3	14.2	126,300	59,600
	11~12	-6.1	7.8	13.9	17.8	13.5	81,200	129,700
二層	12~13	-6.4	7.6	14.0	17.5	13.0	124,800	138,800
	1月14~15日	-6.1	8.7	14.8	16.7	13.3	128,900	97,100
	17~18	-4.2	10.2	14.4	17.4	14.0	132,600	52,900
	18~19	-4.4	9.5	13.9	17.5	13.8	103,800	40,200
	20~21	-4.9	9.7	14.6	17.5	13.6	68,100	38,600
	21~22	-5.6	9.0	14.6	17.4	13.5	84,300	41,300
一層	22~23	-7.2	8.7	15.9	17.3	13.4	121,900	76,200
	1月26~27日	-6.4	6.0	12.4	16.5	12.0	—	96,900
	27~28	-3.8	8.0	11.8	16.0	12.5	86,100	105,600
	28~29	-2.1	8.9	11.0	16.3	13.2	115,900	23,700
	29~30	-5.1	8.4	13.5	16.4	12.5	144,900	93,100
30~31	-2.4	9.1	11.5	16.2	13.1	85,700	75,500	

放熱量も少なくなり、多くの場合3万 kcal 以下であった。

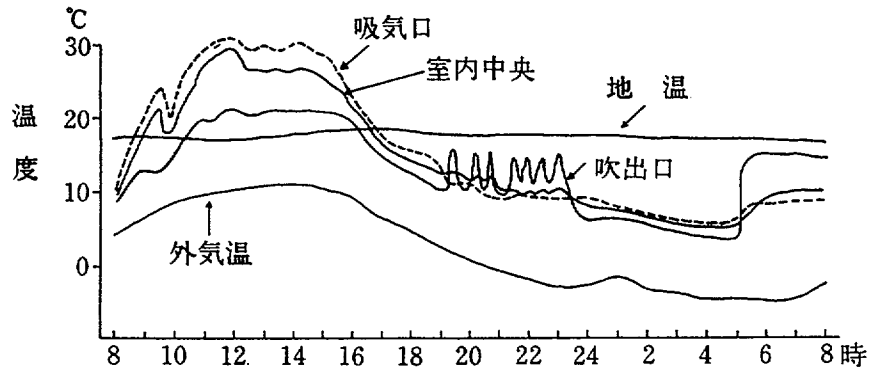
また、第18図は曇天日における室内気温と外気温の経時変化を示した例である。日射の少ない日は前夜半の室温が設定値まで低下しないことが多く、従って日射量に応じた夜温管理という複合環境制御の確実な適用にはならなかった。

翌年の1980～81年における暖房性能、蓄熱量、放熱量を第8表に示した。前年は、夜間は常にカーテンを二層被覆にして試験を進めたが、次年度は一定日数毎に天井カーテンを一層と二層被覆をくり返して温度変化の違いをみた。カーテン二層被覆の場合、最低外気温が $-5^{\circ}\text{C}$ までの低下ならば、5.00～8.00の時間帯の室温をほぼ $10^{\circ}\text{C}$ に維持することができ、設定値以下になっても $0.1\sim 0.5^{\circ}\text{C}$ 程度で、内外気温差は最大 $15.9^{\circ}\text{C}$ を示した。この暖房性能は前年とほぼ同様な結果であった。しかし、カーテン一層被覆では、最低外気温が $-2^{\circ}\text{C}$ 以下に低下すると、室温は $6\sim 9^{\circ}\text{C}$ となり、 $10^{\circ}\text{C}$ の保持が困難になった。ただし、外気温が $-5^{\circ}\text{C}$ までの低下であれば室温が $8^{\circ}\text{C}$ 以下になることはなかった。内外気温差は最大 $14.1^{\circ}\text{C}$ であった。

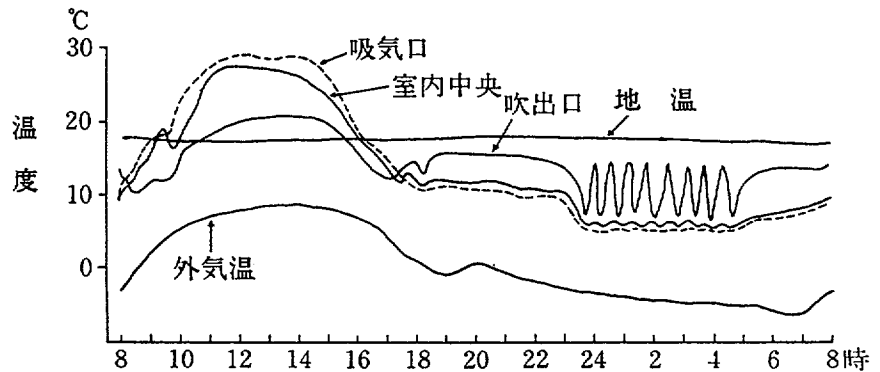
地温は、カーテン二層被覆の場合同一温度を保っているが、一層被覆では外気温の低い日が続くとやや低下する傾向にあった。蓄熱量は、前年とほぼ同様な $10\sim 15$ 万 kcal が確保されている。一方、放熱量はカーテン二層被覆の場合 $4\sim 9$ 万 kcal であるのに対し、一層被覆では

$6\sim 13$ 万 kcal となり、両者の最低外気温が近似した日で比較すると約1.5倍に増大している。

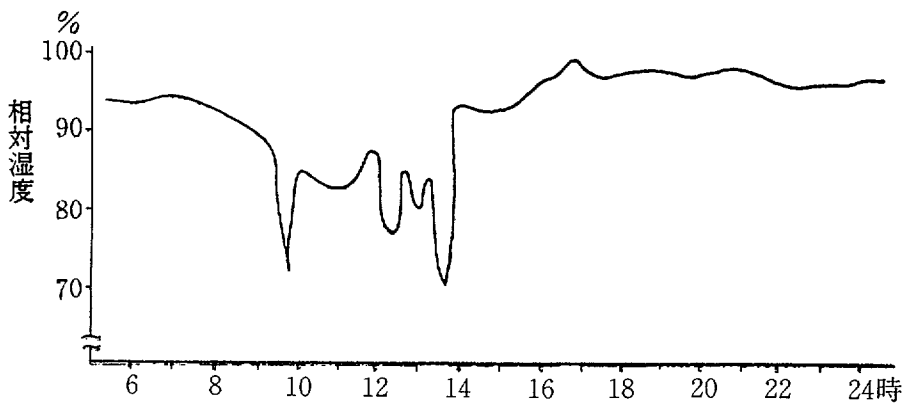
第19～20図にカーテンが一層及び二層被覆における温室内外各位置の温度経時変化の例を示した。カーテン二層被覆の場合、室内気温は日中、夜間とも設定値どおりに推移している。夜間、ファンは室温と外気温の温度差が大きくなる17.00～23.00および5.00～8.00の時間帯は作動するが、 $6^{\circ}\text{C}$ 設定の時間帯は作動しないことが多かった。この時間帯でファンが作動するのは外気温が $-4^{\circ}\text{C}$ 以下の時であった。これに対し、カーテン一層被覆では、夜間ファンが作動を始める時刻が早く、また外気温が $-2\sim -3^{\circ}\text{C}$ 以下になると $6^{\circ}\text{C}$ 設定の時間帯においてもファンはON-OFF運転をくり返した。このファンの作動時間の違いが二層被覆との放熱量の差となって現れている。



第19図 各位置の温度経時変化 (カーテン二層, 1981. 1. 4～5)



第20図 各位置の温度経時変化 (カーテン一層, 1981. 1. 12～13)



第21図 湿度変化 (1980年2月11日~12日)

### 3) 湿度環境

第21図に晴天日における相対湿度の経時変化の例を示した。午前中(8.00~12.00)はカーテン開放後室温の上昇とともに徐々に低下し、強制的に天窓を全開させると80%以下になったが、天窓閉鎖後は80~90%まで上昇した。午後(12.00~17.00)は換気設定温度を午前より低い28℃としたので、天窓はたびたび開き75~85%で推移した。カーテン閉鎖後は90~95%でほぼ一定していた。朝方、天井の上部カーテンに相当量の水滴付着が観察され、また、トマト葉面に水滴が結露する状態もしばしば認められた。

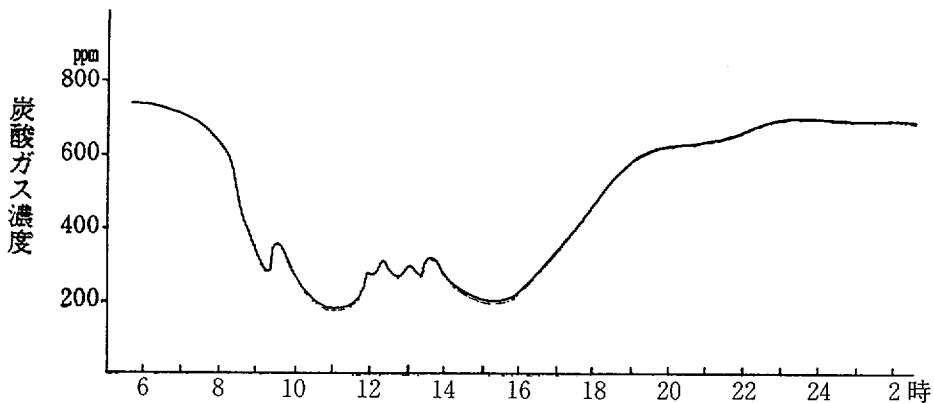
### 4) 炭酸ガス濃度環境

第22図に晴天日における室内炭酸ガス濃度の経時変化

の例を示した。室内の炭酸ガス濃度は、夜間作物体の呼吸や土壌中からの発生により700~750 ppmまで上昇するが、日の出後光合成の開始とともに急速に低下し、密閉状態では最低150~180 ppmと外気の約1/2濃度になった。換気をすると外気と同等の濃度に回復するが、天窓閉鎖後再び200 ppm前後まで低下した。

### 5) トマトの生育・収量

トマトの生育は、両年とも全般に順調で、特に問題となるような生育障害等は認められなかった。第23図は1980~'81年における品種別収量を示したもので、10a当りに換算すると10~12tとなり、当地方の平均的な値であった。

第22図 CO<sub>2</sub> 濃度変化 (1980年2月11日~12日)



### 4 考 察

前節までのビニルハウス内に取入れた地中熱交換装置では、目標とした設定温度や内外気温差を確実に保持するまでには至らなかったが、装置の改善や内部保温装備の充実また温度管理法等の改善次第によっては十分目標を達成できる可能性を得た。本試験はこれらの結果をもとに、新たにガラス温室を建設して実用化への方向を明らかにしようとしたものである。

内部保温装備は、保温性能を高めるため、今日一般化しつつあるカーテンの二層化をはかった。地中熱交換装置は、前年までの試験で、地下の安定した地温域とパイプ側壁からの熱伝導範囲より、パイプの適切な埋設位置を求めた結果をもとに設計した。ファンの位置は、前節では温室中央部としたが、耕運等の作業性を損ねたことから、本装置では温室の妻側に設け、その反対の妻側を吹出し口にした。暖房設定温度は、前年までは温度設定が一定な恒温管理法であったが、本試験では現在広く普及しつつある変夜温管理法を適用した。また、これに加えて前夜半の暖房設定温度を当日の日射量によって比例制御する複合環境制御方式を取入れた。

その結果、1979～'80年、1980～'81年の両年ともカーテン二層被覆条件下ではほぼ暖房設定値を維持することができ、試験期間中の最低極温である-7.2℃を記録した日においても室温は8.7℃までの低下にとどまった。内外気温差は最大15℃を超え、試験当初の目標値を達成することができた。このような高い暖房性能が得られた要因を要約してみると、(1)カーテンの二層化、変夜温管理法の適用により暖房負荷が軽減され、(2)暖房必要熱量に応じた循環風量が確保され、(3)ほとんどの日において蓄熱量が放熱量をまさり、地温が17～20℃に保持され、(4)ファンから吹出し口までのパイプ長が25mと長かったので熱交換効率高く、パイプ周辺の地温に接近した温風を得られた、こと等があげられる。これらの各々の要因を解析すると次のとおりである。

温室の暖房必要熱量は次式(57)から求められる

$$Q_g = \{A_q (q_t + q_v) + A_s \cdot q_{sol}\} \cdot f_w$$

$Q_g$ ; 暖房必要熱量 kcal/h

$A_q$ ; 温室表面積  $m^2$

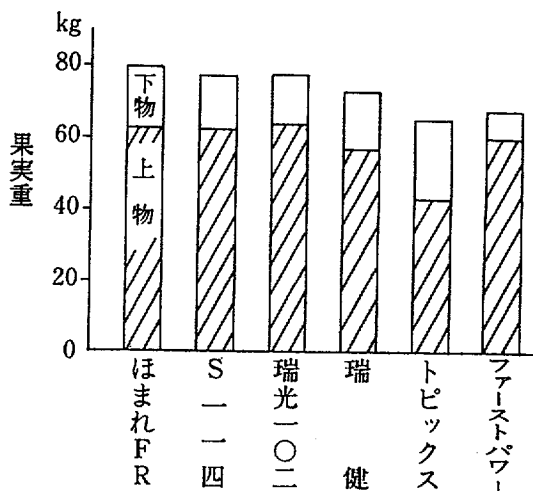
$q_t$ ; 慣流熱量 =  $ht (\Theta_{in} - \Theta_{out}) (1 - fr)$

$ht$ ; 熱慣流率 kcal/ $m^2 \cdot h \cdot ^\circ C$

$\Theta_{in}$ ; 室内気温  $^\circ C$ ,  $\Theta_{out}$ ; 室外気温  $^\circ C$ ,

$fr$ ; 保温被覆の熱節減率

$q_v$ ; 換気伝熱量 =  $hv (\Theta_{in} - \Theta_{out})$



第23図 各品種の収量 (1980-'81, 20株当り)

$hv$ ; 換気伝熱係数 kcal/ $m^2 \cdot h \cdot ^\circ C$

$A_s$ ; 温室床面積  $m^2$

$q_s$ ; 地中伝熱量 kcal/ $m^2 \cdot h$

$f_w$ ; 風速に関する補正係数

この式において、 $A_q = 563$ ,  $ht = 5.0$ ,  $\Theta_{in} = 10$ ,

$\Theta_{out} = -5$ ,  $fr = 0.5$ ,  $hv = 0$ ,  $q_s = -15$ ,  $f_w = 1$ , として暖房必要熱量を求めると、 $Q_g = 15,832$  kcal/h が得られる。同様にして一層被覆の場合における暖房必要熱量を求めると  $Q_g = 22,166$  kcal/h ( $fr = 0.35$ ) となり、二層被覆の場合より約30%増大する。第7表の最低外気温が近似した日の両者の比較においても総放熱量で一層被覆の方が25～65%の増大が認められ、この値と一致する。内部被覆方法の違いや各種保温資材と熱節減率に関する試験は数多くあり<sup>(3,35,80,81,86)</sup>、資材の組合わせによって効果に差はあるものの、いずれも二層化による熱節減率の低減への貢献は顕著である。現在、慣行の暖房方式を備えた温室においてはカーテンの二層化は広く普及しつつあり、本暖房方式においてもその熱節減効果が高いことから取入れられるべき装備といえよう。

変夜温管理法の採用も暖房負荷の低減に貢献した。本来、変夜温管理法は作物の生理機能をもとに明らかにされた温度管理法であり、必ずしも暖房負荷の軽減を目的としたわけではないが、後夜半の呼吸抑制の時間帯の温度を低く設定するため、結果として恒夜温管理法の場合より暖房負荷は小さくなる。実際、二層被覆の条件下では6℃の設定時間帯は、外気温が-4℃以下に低下しないとファンは作動せず、放熱量を減少させる一要因となった。慣行の暖房方式においても、内藤<sup>(46)</sup>は変夜温

管理法は恒夜温管理法より約10%の暖房熱量が低下すると述べている。

このように、内部保温性能を高めたことと変夜温管理法の適用が暖房負荷を低減させ、相対的に本暖房装置の温度保持能力を高めることに大きく貢献した。

これに対し、一層被覆条件では設定温度の保持がやや困難になり、早朝の5.00~8.00の時間帯では、外気温が-2℃以下に低下すると設定値の10℃は維持できなくなった。内外気温差は地温が17℃以上の場合最大14℃であったが、それ以下では12~13℃となった。

すなわち、カーテン一層被覆条件においては、外気温が-5℃時に室温を8℃に保つ内外気温差13℃が、本装置で維持しうる暖房能力の限界と判断される。一層条件下でこれ以上に性能を向上させるためには、さらにパイプ本数を増やすかファン台数を増す必要がある。しかし、パイプをこれ以上増やすためには3段埋設としなければならず、その作業量は膨大となって現実的ではない。また、ファン台数を増すことは運転経費の増加を伴う。この点から、これ以上装置の手直しを行うよりもカーテンの二層化をはかった方が簡便であり、また実用化にあたっては、気象変動に伴う安全確保のため補助暖房の備えが欠かせないと思われるので、若干の不足熱量はそれによって補うと考えるべきであろう。

暖房負荷に応じた放熱量が得られたことは、必要循環風量が確保されたことを意味する。1979~'80年の装置では127m<sup>3</sup>/min、次年度は性能のやや高いファンに変えたので147m<sup>3</sup>/minとなり、これをもとに外気温が-5℃前後であった時、例えば1980年2月15~16日および1981年1月4~5日の放熱量を求めてみると13,716 kcal/h、15,876 kcal/hとなり、先の暖房必要熱量とほぼ一致する。

日中の蓄熱量は両年とも晴天日には10万 kcal 以上となり、1月でも最大値は15万 kcal が確保されており、曇雨日を除いたほとんどの日において蓄熱量は放熱量より大きかった。したがって、地温は常に17~20℃を保持し、15℃以下の日は計測されなかった。また、本装置のファン吸気口~吹出口のパイプ長は25mあって熱交換効率がよく、放熱時に地温に接近した14~15℃の温風を得たことも必要温度の保持を可能にした要因と考えられる。ただしパイプの長さについて、山本<sup>(96)</sup>はパイプ内の通風抵抗を10 mmAq 以下に抑えるよう設計する必要があると述べており、この点においては本装置の通風抵抗を求めてみると約9 mmAq となり、パイプ長の25mはほぼ限界に近い長さであった。

前記の蓄熱量・放熱量の算出にあたっては、吸気口と吹出口との気温差に循環風量および空気比熱を乗じた顕熱交換量について求めた。しかし、北条<sup>(10)</sup>、古在<sup>(29)</sup>、山本<sup>(96)</sup>は空気がパイプ内を通過する際に水の凝縮や蒸発に伴う熱収支、すなわち潜熱交換量もは握る必要があることを指摘し、パイプ出入り口のエンタルピー差で熱交換量を計測しなければならないと述べている。この場合、パイプ出入口の温度は乾球だけではなく、湿球温度を求める必要があり、しかも通風計測しなければ高精度な値を得られないことから、本試験では顕熱交換量の測定に限った。北条<sup>(10)</sup>の測定例では、蓄熱量のうち約50%、放熱量では約15%を潜熱量が占めると報告している。この値からいえば、本試験における熱交換量の把握は実際値よりも低く測定している可能性が大きい。

本温室は、日中蓄熱時の冷房作用により換気の手がかりが減少し、土面や作物体から蒸発散した水分は室内にとどまりやすいこと、また日中パイプ内に凝縮した水分が夜間放出されて、内部は多湿化しやすい。無換気状態では相対湿度は80~90%、わずかな換気をした場合でも75~85%の値を示した。朝方、トマト葉面や上部カーテンに水滴が付着する状態がしばしば観察された。温室内が多湿状態にあることは、トマトの生育にとって必ずしも不適な条件ではなく、鴨田<sup>(21)</sup>の試験では多湿区(90±5%)で茎伸長、光合成量とも少湿区(60±5%)よりまさる結果を示し、また、藤本<sup>(11)</sup>も夜温が高ければ多湿条件で生育量はすぐれると述べている。Tibbitt<sup>(88)</sup>もレタスの生育において同様な傾向があることを報告している。しかし、病害発生の危険性からみれば、多湿条件は明らかにマイナス要因となり、疫病、灰色カビ病、葉カビ病等を発生させやすい条件となる。このため、蓄熱効果を落とさず、効果的に除湿し、また作物体への結露を防止する方法を明らかにすることが重要となる。山本<sup>(96)</sup>はパイプに土管を用いると夜間は例外なく100%で経過するが、塩ビパイプを使用すると65~85%に低下すると報告している。この場合、パイプに一定間隔で小孔を設けており、パイプ内の凝縮水はこの小孔を通して排出されたと推測している。このようにパイプに孔を開けることは一考すべき方法と思われるが、反面パイプ周辺の土壌水分量が増大した場合、逆にこの孔より水が侵入することも考えられ、その是非についてはなお検討が必要である。

室内の炭酸ガス濃度は、夜間高く、日の出後低下し、日没後再び上昇する推移を示し、これまでの測定例と変わらないが、本温室で顕著なのは午前中ほとんど密閉状

態にあるため濃度低下が著しいことで、最低150~180 ppmと大気濃度の1/2にまで低下した。桐村ら<sup>(26)</sup>やMori<sup>(43)</sup>の地中熱交換装置においても、炭酸ガス濃度低下が著しいため、その施用試験を実施したところ増収になり品質向上に有効であったとしている。炭酸ガス施用効果を認める研究は多い<sup>(18,92,100)</sup>が、慣行の暖房方式では普及が伸び悩んでおり、その一因として換気開始時間が早いこと、十分な効果をあげないことが指摘されている<sup>(15)</sup>。本暖房装置を使用した場合、密閉時間が長く、炭酸ガス施用の効果を発揮しやすい条件になり、この特長を生かした有効な管理法が可能になる。

天窓の開閉、ファンのON-OFF、天井カーテンの開閉また日中・夜間の温度管理はマイクロコンピュータを用いて制御した。特に、夜温設定においては前夜半の設定値を当日の日射量によって4段階に変更を加えた。しかし、この温度制御法では、晴天日の室温は設定値に従った推移を示して問題なかったが、曇雨日は外気温がさして下がらないうえ、温室の保温性が高いため室温は設定値まで下がらず、複合環境制御の確実な適用とはならなかった。天井カーテンは日射量の多少にかかわらず時刻(16.00~17.00)と室温(20℃以下)によって閉鎖させたが、低日射量の日には閉鎖時刻を遅らすなどプログラム内容に検討を加える必要があった。

マイクロコンピュータは、前記の制御の他、炭酸ガス施用やかん水管理、アラーム警報また補助暖房との組み合わせ等の多様な機能も有しており、個別制御方式に比べてはるかに能率的である。施設園芸への適用に関する研究<sup>(29,30)</sup>も進み、地中熱交換方式への適用例もみられるようになってきている<sup>(27)</sup>。今後も好適環境を作出し、省力化を進める新しい制御装置として発展が期待できる。

トマトの生育は両年とも順調で、収量もほぼ標準的な値であった。他の成績<sup>(56)</sup>をみても慣行の暖房方式とほとんど変わらない生育、収量を得ている場合が多い。

## 5 摘 要

1979~'81年にわたり、供試施設にガラス温室を用い、内部保温カーテンは二層被覆とし、また日中、夜間とも管理温度を変えて、地中熱交換装置の暖房性能、室内環境特性およびトマトの生育、収量について明らかにした。

1) パイプ列数46列、ファン2台で得られた循環風量は、1979~'80年は127m<sup>3</sup>/minであり、次年は高性能のファンを用いたので147m<sup>3</sup>/minとなった。

2) カーテン二層被覆の場合、室温は各設定値を維持

し、内外気温差は最大15℃を保った。

3) 温室の内部保温性能が高く、また夜間の暖房設定温度を最低6℃まで下げたので放熱量が減少し、ほとんどの日で蓄熱量が放熱量にまさった。地温は17~20℃を維持し、放熱時の地温と吹出口との温度差は3~4℃で、13.5~15℃の温風が得られた。

4) カーテン一層被覆の場合、外気温が-2℃以下になると10℃の保持は困難になるが、-5℃まで低下しても8℃前後は保った。また、放熱量は二層被覆の場合と比較して25~65%増大した。

5) 室内の相対湿度は、日中密閉状態では90%、換気をするると75~80%、また夜間は90~95%で推移した。

6) 室内の炭酸ガス濃度は、夜間700~750 ppmまで上昇するが、日中は150~240 ppmとなり、低炭酸ガス濃度の状態が続いた。

7) 当日の日射量に応じて前夜半の設定温度を変えたが、曇雨天日は設定値まで室温が低下せず、複合環境制御の確実な適用にならなかった。

8) トマトの生育は両年とも順調で、収量も標準並であった。

## 第3節 温風暖房機併用における暖房特性、重油節減効果およびキュウリの生育・収量

### 1 緒 言

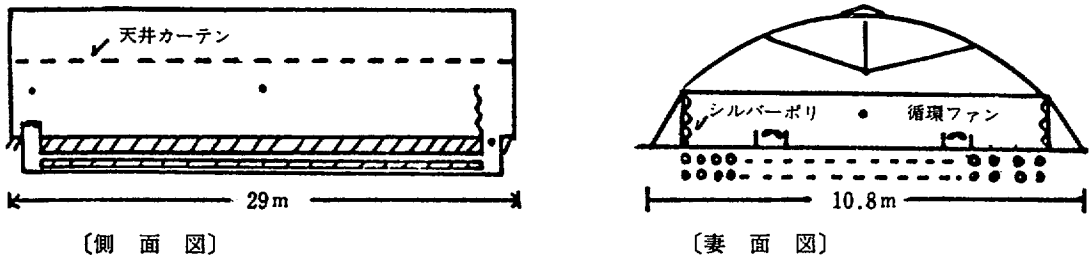
前節で地中熱交換装置だけの単用運転では、外気温を-3~-5℃とした場合、保持できる室温の限界は8~10℃であることを明らかにした。したがって、これ以上の暖房温度を必要とする作物に適用させるためには、他の暖房装置から不足熱量を補給しなければならない。そこで、本試験は地中熱交換装置だけでは明らかに必要温度を維持できないキュウリを用いて、従来一般に使用されている温風暖房機と併用運転させ、その場合の暖房特性、室内環境、重油節減効果およびキュウリの生育に及ぼす影響について明らかにしようとした。併用運転法が可能であれば、本装置の利用場面の拡大が期待できる。

### 2 材料および方法

1) 初年度(1978~'79)における試験

(1) 供試温室および地中熱交換装置と運転方法

本試験に供試した温室と地中熱交換装置の構造を第24



第24図 供試ハウスと地中熱交換装置 (1978~'79年, ・は温度測点位置)

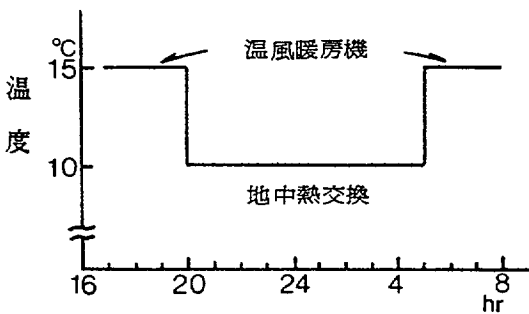
図に示した。供試温室は床面積 314m<sup>2</sup>、保温比0.64の硬質塩化ビニルを被覆した単棟温室である。内部保温装置は天井部に塩化ビニル (0.05mm) を一層、側壁部に塩化ビニルとシルバー系ポリフィルム (0.05mm) を二層被覆した。地中熱交換装置は、内径10cmのポリエチレンパイプを深さ50cmと80cmの二段に平均55cm間隔に合計38列埋設した。循環ファンは羽根径50cmの有圧ファン(200V, 400W, 定格風量90m<sup>3</sup>/min)を温室北側に2基取付けた。吹出口はピット型式とし、温室南側に設けた。

温風暖房機 (ネボンKK製) は、熱容量47,000 kcal/hで、熱効率は0.75である。

ファンは、日中8:00~17:00の時間帯は室温20℃以上で作動させた。夜間の暖房は両装置の同時運転をさけるため、変夜温管理法を採用して、第25図に示したように17:00~20:00と翌朝の5:00~8:00の時間帯は15℃の設定で温風暖房機を、その間の20:00~5:00の時間帯は10℃の設定で地中熱交換装置を作動させた。

日中は室温30℃を目標に (手動操作) 天窓を開けて換気を行った。

#### (2) 風量調査



第25図 変温管理法

アネモマスターを用い、各パイプ毎に風速を測定し、排出空気容積の総量を風量として表した。

#### (3) 温度、湿度の調査および放熱・蓄熱量の算出

気、地温の測定は、温室中央部、ファン吸気口、吹出口、室外の高さ1.5mにおける点および温室中央部のパイプ側壁から10cm離れた点について行った。なお、12~1月は温度記録計の不備のため、温室中央部と外気温だけを測定したが、2月以降は前記の地点全てを測定した。温度測定は抵抗式自記温度記録計を用いた。相対湿度は通風式自記湿度計を用い、温室中央部で測定した。

蓄熱量、放熱量の算出は、風量×空気比熱×吹出口と吸気口との温度差×ファンの作動時間の式より求めた。

#### (4) 重油節減率の推定

温風暖房機だけを備えた対照温室がないため、重油節減率は次のような方法で推定した。まず、数日間 (1月6日~12日) 温風暖房機だけを運転して1夜毎の重油消費量と、その間の運転時間帯における室温と外気温との温度差積算値 (温度記録用紙から面積に表す) から、単位温度差積算値当りの重油量を基準値として求めておく。次に、地中熱交換運転日において、室温と外気温度差積算値を測定し、前記の基準値との比較から、重油換算値を推定した。この値と実際に消費した重油量の和との比を節減率として示した。

#### (5) 供試品種および耕種概要

キュウリは '王金促成' 他4品種を用い、11月8日に播種し、12月4日に定植した。台木にクロダネカボチャを用いた。作物の管理は当地の慣行法に準じ、収穫は4月30日まで行った。

#### 2) 次年度 (1979~'80) における試験

##### (1) 供試温室および地中熱交換装置と運転方法

第26図に次年度の試験に供試した温室と地中熱交換装置の構造を示した。供試温室は前年の試験に隣接した同

型、同規模の単棟温室で、被覆資材、内部保温カーテンは前年と同一にした。地中熱交換装置は、内径10cmのポリエチレンパイプを深さ50cmと80cmの2段に平均55cm間隔で合計40列埋設し、循環ファンは羽根径60cmの有圧ファン（200V、400W、定格風量120m<sup>3</sup>/min）を温室中央部に2基取付けた。吹出口は両妻側に設けた。

ファンの運転方法および昼夜の温度管理は前年と同様とした。

(2) 風量と温度調査、蓄熱・放熱量および重油節減率の算出

いずれも前年と同一の機器、方法によって行った。

(3) 併用運転方法

前年実施した変夜温管理法以外に、暖房設定温度を13℃とし、温風暖房機と地中熱交換装置を同時に運転させる方法と外張りビニルとカーテンの間を地中熱交換装置で空気循環させ、作物の栽培されているカーテン内部を温風暖房機で加温（設定温度13℃）する方法（層間運転法と略）とを比較した。この場合、重油節減率を求める対照として隣接した単棟温室（床面積230m<sup>2</sup>、キュウリ栽培、暖房設定温度13℃）を基準に用いた。

(4) 供試品種および耕種概要

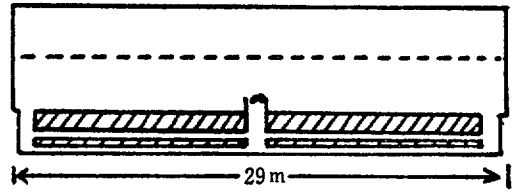
‘王金促成’他5品種を用い、11月6日に播種し、12月17日に定植した。いずれもクロダネカボチャに接木した。栽培は慣行法により、収穫は5月16日まで行った。

### 3 結 果

1) 初年度（1978～'79）の成績

(1) 風量調査

各パイプ吹出口の平均風速は6.2m/secで、総循環



第26図 1979～'80年における地中熱交換装置側面図

風量は111.4m<sup>3</sup>/minとなり、定格風量の約62%であった。

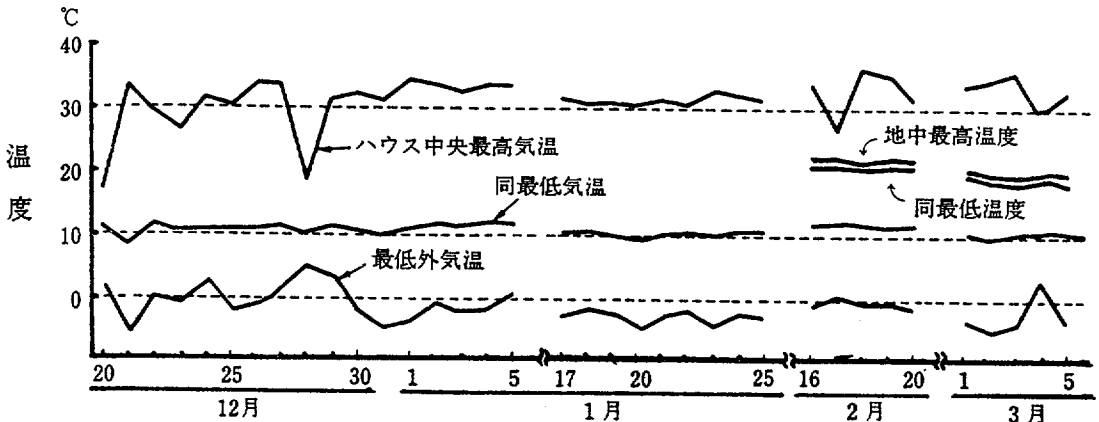
(2) 暖房性能・温度特性

第27図に12～3月の最低外気温、温室内および地温最高・最低温度の経日変化を示した。地温については、測定器の不備により1月までは測定できなかったため2～3月について示した。また、最低外気温と温室内最低気温は地中熱交換装置の運転時間帯である20:00～5:00の測定結果を示した。

本装置は高い暖房性能を示し、最低外気温が0℃以上の日はもとより、0℃以下の日においても暖房設定温度の10℃を保持した。設定温度を保てなかったのは、最低外気温が-5℃以下に低下した3日間だけで、設定温度を0.5～1.0℃下回った程度であった。最低外気温が0℃以下の日における内外気温差は10～15℃であった。

日中の最高気温は、やや換気量が少なかったため晴天日には30℃を越えることが多く、なお相当な蓄熱可能な熱量を残していた。地温は2月以降の調査ではあるが、17～20℃を保った。

第28図に、晴天日における外気温および温室内各位置

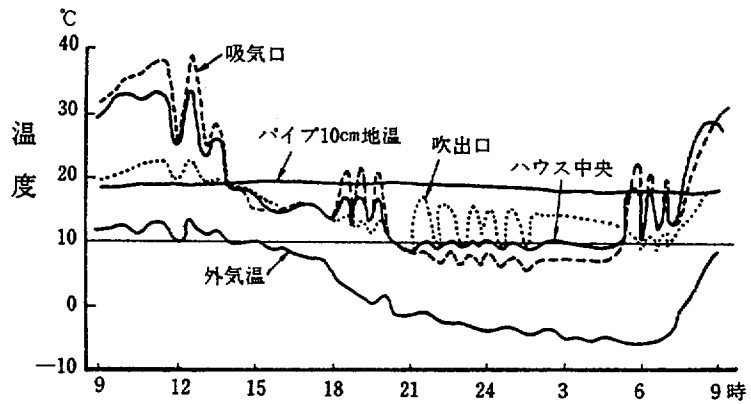


第27図 ハウス内外各位置別最高、最低温度

別の温度経時変化の例を示した。

ファンは9:00～9:30に作動を始め、3:30～4:30に停止し、日中の最大作動時間は約7時間であった。吸気口部の気温は温室中央部より常に1～5℃高く、また吹出口との温度差は最大15℃に達した。夜間の地中熱交換装置の運転時間帯では、外気温が0℃以下の場合、始めON-OFF運転を繰り返すが、気温の低下とともに後半連続運転になることが多かった。

第9表は、2月以降の主に外気温が0℃以下に低下した日を選んで、ハウス内位置別の温度、温度差（3:00～5:00の時間帯）および蓄熱量、放熱量を表したものである。蓄熱量は日による変動が大きい、晴天日では10～19万kcalとなり、これに対して放熱量は最大9万kcalで、ほとんどの場合蓄熱量が放熱量より大きかった。したがって、地温は放熱による低下よりも蓄熱によ



第28図 ハウス内外各位置の温度経時変化 (1979年3月1～2日)

る上昇の方が大きく、常に17～21℃を保った。地温と吹出口との温度差は3～4℃でほぼ一定しており、夜間のファン運転時の風温は15～17.5℃であった。放熱時におけるファン吹出口と吸気口との温度差は6～8℃であった。

#### (2) 湿度環境

第29図に晴天日における相対湿度の経時変化の例を示した。日中は天窓を若干開けて換気をしたので室内の相

第9表 各位置別温度、温度差および蓄熱、放熱量

月	日	最低外気温	吸気口A	地温B	吹出口C	ハウス中D	B-C	C-D	A-C	蓄熱量E	放熱量F	E/F
		°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	kcal	kcal	
2月	1～2日	0.5	9.5	18.5	15.6	10.8	2.9	4.8	6.1	95,136	24,062	4.0
	2～3	-2.9	8.8	18.3	15.0	10.5	3.3	4.5	6.2	153,821	60,998	2.5
	3～4	-1.0	9.5	18.6	15.8	11.0	2.8	4.8	6.3	167,791	37,987	4.4
	4～5	0.5	11.0	19.3	17.0	11.8	2.3	5.2	6.0	182,028	13,250	13.7
	15～16	-2.4	9.5	20.8	17.5	11.5	3.3	6.0	8.0	145,934	16,058	9.1
	16～17	-0.1	9.8	21.0	17.8	11.6	3.2	6.2	8.0	175,344	13,764	12.7
	17～18	-1.2	9.0	20.4	16.6	11.2	3.8	5.4	7.6	13,034	29,645	0.4
	18～19	-1.2	9.4	20.4	17.5	11.5	2.9	6.0	8.1	195,618	19,250	10.2
	19～20	-1.9	9.5	20.6	17.5	11.7	3.1	5.8	8.0	188,979	28,875	6.5
	27～28	-1.9	9.0	20.0	16.0	11.0	4.0	5.0	7.0	—	40,433	—
	28～3.1	-3.5	8.0	19.3	15.3	10.5	4.0	4.8	7.3	96,495	66,990	1.4
3月	1～2	-5.6	7.8	18.8	14.8	10.2	4.0	4.6	7.0	129,313	91,926	1.4
	2～3	-4.4	8.0	18.5	15.0	10.3	3.5	4.7	7.0	144,352	81,811	1.8
	4～5	-4.5	8.0	18.5	15.0	10.5	3.5	5.0	7.0	43,936	75,267	0.6
	5～6	0.6	9.5	18.7	16.5	11.4	2.2	5.1	7.0	191,652	22,571	8.5
	6～7	-0.8	9.3	18.5	16.5	11.2	2.0	5.3	7.2	109,082	23,020	4.7

対湿度は80~90%で推移した。夜間は、温風暖房機運転時は50~55%まで低下し、停止すると95%まで上昇し、上下の変動幅が大きかった。また、地中熱交換装置の運転時は80%前後、停止時は約95%の値を示した。このように併用運転法では、夜間顕著な湿度低下が認められ、単用運転の場合とは異なる湿度環境にあった。朝方もキュウリ葉面に水滴が付着するような状態は観察されなかった。

(3) 重油節減効果

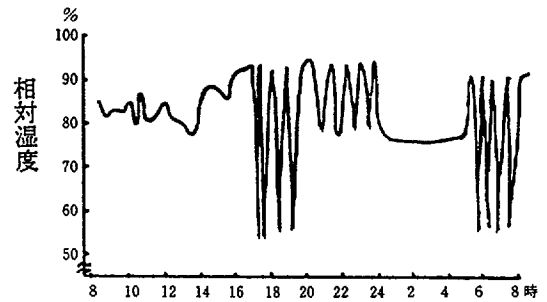
温風暖房機だけを使用した場合に消費したと推定される重油の量と併用運転法で実際に消費した重油量から求めた節減効果を第10表に示した。併用運転法で消費した重油の量は1夜15~23ℓであるのに対し、温風暖房機だけで暖房した場合には30~45ℓの重油が必要であり、本法による重油節減率は40~60%と推定された。

(4) キュウリの生育・収量

地中熱交換装置のファン作動時は、吸気口と吹出口との間に昼夜逆の温度勾配が生じるが、第11表の例に示し

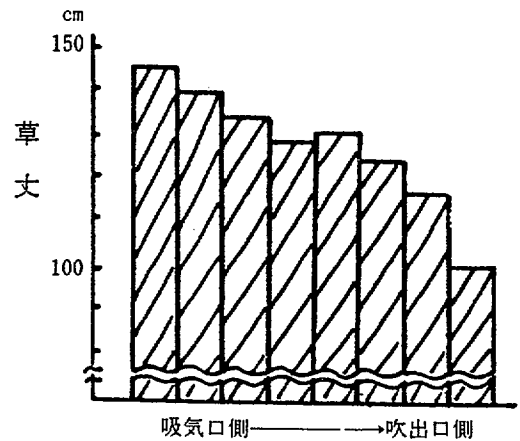
第10表 重油節減効果

月 日	重油消費量	13°C維持推定重油量	節減効果
2月2-3日	23.4	41.4	43.5%
3-4	20.8	35.6	41.6
18-19	14.0	29.2	52.1
19-20	15.0	34.2	56.1
27-28	15.0	31.6	52.5
28-3.1	15.0	31.8	52.8
3月1-2	18.9	46.0	59.0
2-3	17.7	43.8	59.6
4-5	19.9	44.0	54.8



第29図 相対湿度経時変化 (1979年1月19~20日)

たように1日の温度積算値では吸気口の方が大きい。このため第30図のキュウリの草丈で示したように、吸気口から吹出口にそって顕著な生育差が生じ、その差は最大30cmにも達した。このため、1月中旬より吹出口にそってビニルカーテンを張り、風が直接作物体に当たるのを



第30図 ハウス位置別生育差 (品種貴緑)

第11表 吸気口及び吹出口における積算気温の違い\*

	9時 — 16時			20時 — 5時		
	平均気温	積算気温	温度差	平均気温	積算気温	温度差
	°C	°C	°C	°C	°C	°C
吸気口	30.2	4,525	1,471	7.8	1,488	1,063
吹出口	20.4	3,054		13.4	2,551	

\* 30分毎の積算値 1月23日

防ぐ措置をとった。

各品種の収量を第12表に示した。4月末までに10株当り51~55kg得られ、10a当りに換算すると約9tとなり、本作型ではほぼ標準的な収量であった。

## 2) 第2年目(1979~'80年)の成績

1年目の装置では、循環ファンから吹出口までの距離が長かったため温度勾配が大きく現れ、キュウリの生育に影響を及ぼした。このため2年目は、ファンをパイプの中間部に取付け、両妻側に吹出口を設けた。したがって、吸気口から吹出口までのパイプ長は前年の1/2になり、またファン1台当りのパイプ口数は19から38に増加する。

### (1) 風量

吸気口-吹出口のパイプ長が短くなったことと、ファン1台当りのパイプ口数が増えたことから、パイプ内の通風抵抗が減少し、循環風量は前年より80%多い200m<sup>3</sup>/minとなった。

### (2) 暖房性能・温度特性

第13表に地中熱交換装置運転時における最低外気温、温室内位置別温度、温度差および1日の蓄熱量・放熱量を示した。外気温が0℃以上の場合には暖房設定温度の

第12表 各品種の収量(10株当たり)

品 種	2月28日 まで		4月27日 まで		良果率 %	良果数 本
	本	kg	本	kg		
王金促成	142	15.0	514	51.3	84.3	433
貴 緑	175	16.4	544	53.5	83.2	453
光3号P	176	17.5	532	54.7	80.7	430
光 促成	164	18.2	528	54.7	77.4	408
さとぶえ	157	15.3	530	53.9	83.2	441

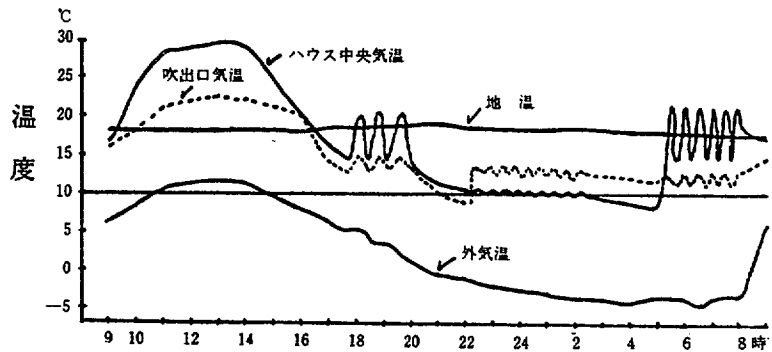
10℃を確実に保持したが、1月中旬および2月中、下旬の0℃以下に下がった日の場合では、設定値より0.2~2℃程度ではあるが設定温度を保持できない日が相当数出現した。最低外気温が0℃以下の日における内外気温差は10~14℃であった。晴天日のハウス内最高気温は30℃前後で推移した。蓄熱量は、晴天日には最大約15万kcalとなり、一方放熱量は最大9万kcalで、蓄熱量は放熱量と同等か最大5倍大きかった。地温は常に17~20℃に維持された。地温と吹出口気温との温度差は4.5~6.0℃であり、温風温度は12~14.5℃で、ともに前年の装置より約3℃低かった。

第13表 各位置別温度、温度差、蓄熱と放熱量および集熱効率

月 日	最低 外気温 ℃	吸気口A (ハウス 中央) 気温 ℃	地 温 ℃	吹出口C 気温 ℃	B-C ℃	C-A ℃	D 蓄熱量 kcal	E 放熱量 kcal	D/E	室内到達 <sup>F</sup>	
										日 射 量 kcal	D/F %
1月11-12日	-2.1	9.5	19.5	13.0	6.5	3.5	92,960	30,744	3.0	375,544	24.8
15-16	-4.2	8.5	19.0	13.4	5.6	4.9	88,920	82,973	1.1	461,304	19.3
16-17	-3.1	9.5	18.3	12.3	6.0	2.8	102,800	48,485	2.1	444,938	23.1
17-18	-4.0	9.5	18.0	13.1	4.9	3.6	93,200	46,886	2.0	426,569	21.8
23-24	-0.7	10.3	18.0	13.0	5.0	2.7	91,760	21,923	4.2	400,036	22.9
24-25	-4.4	10.0	19.3	14.0	5.3	4.0	120,520	45,792	2.6	463,307	26.0
25-26	-3.9	10.0	19.3	14.0	5.3	4.0	147,480	27,864	5.3	498,004	29.6
26-27	-3.7	9.8	19.5	14.2	5.3	4.4	125,040	33,034	3.8	451,016	27.7
2月5-6日	-2.5	11.2	19.7	14.7	5.0	3.5	61,960	35,482	1.7	404,118	15.3
9-10	-2.5	11.5	18.3	13.8	4.5	2.3	150,600	27,750	5.4	565,357	26.6
10-11	-1.6	11.5	18.6	14.3	4.3	2.8	144,520	33,120	4.4	579,644	24.9
14-15	-2.7	9.5	18.2	13.0	5.2	3.5	158,520	88,200	1.8	616,382	25.7
15-16	-4.7	8.0	18.0	12.0	6.0	4.0	119,040	80,820	1.5	438,815	27.1
16-17	-3.7	9.8	18.0	13.3	4.7	3.5	102,880	89,460	1.2	510,250	20.2
17-18	-5.3	8.5	17.5	12.5	5.0	4.0	144,640	94,290	1.5	606,177	23.9
21-22	-2.1	10.0	17.5	12.8	4.7	2.8	75,360	59,220	1.3	410,241	18.4
23-24	-2.0	9.8	17.5	12.8	4.7	3.0	147,360	72,180	2.0	598,013	24.6



第31図は、晴天日における温室内外の位置別温度経時変化を示した例である。ファンの作動時間は前年とほぼ同様で、日中は最大約6時間、夜間は約5時間であった。吸気口と吹出口の温度差は、パイプ長が前年の1/2になったため前年ほど大きく現れず、蓄熱時の最大値は約7℃、放熱時は3~4℃であった。また、この例では、最低外気温が-4.7℃まで低下し、地温は18℃を保持していたが、3:00~5:00の時間帯には設定値の10℃を保持できず8℃まで低下した。



第31図 ハウス内外位置別温度経時変化 (1980年1月15~16日)

(3) 重油節減効果

第14表に前年と同様な方法で求めた重油節減率を示した。併用運転法で消費した重油量は18~20ℓであったのに対し、温風暖房機だけで暖房した場合に必要な重油量は35~40ℓであり、節減率は45~55%と推定され、前年とほぼ同様な値であった。

(4) 併用運転方法の違いと重油節減効果

第15表に各併用運転方法と重油消費量および基準温室の消費量との比を示した。変温管理法における5日間の平均重油消費量は15.1ℓで、基準温室の49%であった。これに対し、同時運転法では基準温室の85%となり、ま

第14表 重油節減効果

月 日	重油消費量 ℓ	13℃維持推定重油消費量 ℓ	節減効果 %
1月11-12日	18.3	36.6	50.0
15-16	20.2	42.9	52.9
16-17	19.9	36.9	46.1
17-18	18.2	34.2	46.8
24-25	21.6	40.0	46.0
25-26	18.7	39.3	52.4
26-27	20.4	39.7	48.6
2月3-4日	16.8	35.4	52.5
6-7	21.3	38.7	45.0
9-10	18.1	33.5	46.0
11-12	14.1	31.0	54.5

た層間運転法では79%になり、後者2方法の節減率はいづれも変温管理法よりも低い値になった。

しかし同時運転法において、温風暖房機のダクト先端部をファン吸気口に近いところに配列したため温風が

第15表 併用運転方法と重油消費量

月 日	運転方法	最低気温 ℃	重油消費量 ℓ	基準ハウス
3月5-6日	変温	2.8	18.0	33.2
11-12	〃	1.5	17.5	36.4
12-13	〃	-1.0	16.9	35.0
13-14	〃	3.5	11.1	21.1
16-17	〃	0	12.0	28.8
平均		1.4	15.1	30.9
比			49	100
3月17-18日	同時	1.6	27.6	31.4
19-20	〃	0	25.5	31.1
23-24	〃	3.2	19.5	17.7
24-25	〃	0.8	25.2	35.0
25-26	〃	1.2	24.3	28.9
平均		1.4	24.4	28.8
比			85	100
3月27-28日	層間	2.8	22.3	31.1
28-29	〃	5.4	14.3	24.5
4月2-3日	〃	4.7	21.4	17.9
3-4	〃	2.4	15.4	19.2
4-5	〃	5.4	9.6	11.7
平均		4.1	16.6	20.7
比			79	100

第16表 併用方法と節油効果 (1981)

月 日	運 転 方 法	最 低 温	重 油 消 費 量
		℃	ℓ
1. 28—29	変 温	-1.8	23.9
30—31	"	-1.2	24.1
2. 6—7	"	1.6	17.4
8—9	"	-2.1	20.4
10—11	"	-1.4	20.8
平 均		-1.0	21.3
(100)			
2. 18—19	同 時	0.7	21.4
19—20	"	-1.1	19.9
20—21	"	0.2	24.2
21—22	"	-1.1	18.0
22—23	"	-0.3	21.6
平 均		-0.3	21.0
(98.6)			

ファンに吸引されて一部蓄熱され、暖房の能率が低下したことが考えられた。このため、さらに翌年ダクト先端部を吸気口から離して再試験を行った。その結果を第16表に示した。この年は基準温室がなかったため、温風暖房機だけを運転した場合との比で表した。この表から、変温管理による交互運転法と同時運転法とについて比較すると、前者は平均最低外気温が $-1.0^{\circ}\text{C}$ で重油消費量は27.4ℓとなり、後者は $-0.3^{\circ}\text{C}$ で21.0ℓの値を示し、両者間の差はきわめて小さかった。この結果より、同時運転法もダクト配置に注意するならば、有効な併用法と考

第17表 各品種の収量 (10株当たり)

品 種	3月31日まで		5月16日まで		良果率 %	良果数 本
	本	kg	本	kg		
王金湊成	379	37.9	752	77.6	81.8	615
久留米	106	36.9	749	78.9	79.6	596
日 輪	301	29.7	672	68.6	76.9	517
さとぶえ	365	35.6	690	72.1	81.3	561
試 交 25	295	29.4	640	65.0	74.8	479
試 交 15	355	35.2	710	72.6	81.0	575

えられた。

#### (5) キュウリの生育・収量

全般に順調な生育状態を示したが、やや節間の短い草姿となった。また、吹出口に沿ってカーテンを張ったことや吸気口-吹出口の温度差は前年ほど大きくなかった。ので、顕著な生育差が生じることはなかった。

収量は第17表に示したように品種間差が認められるものの、10株当り65~80kg得られ、10a換算で12~13tであった。前年より増収となったのは、収穫期間が長かったためと考えられる。

## 4 考 察

低日照時の温室栽培におけるキュウリの好適夜温は $13\sim 15^{\circ}\text{C}$ 、地温は $18\sim 20^{\circ}\text{C}$ の範囲にあることが明らかにされている<sup>(13)</sup>。したがって、これまでの成績から判断して、地中熱交換装置の単用運転でこの暖房温度を確保することは困難であり、他の暖房装置との併用が必要になる。本試験では、その暖房装置に野菜温室の利用実態や、室内の気温上昇が早いなどの点を考慮し、温風暖房機を選んだ。この場合、両者の併用運転法が問題となるが、本試験では両装置の特性を発揮させ、また作物生理に合った温度管理法として、変夜温管理法を適用させることにした。すなわち、前夜半の高夜温時間帯と早朝加温時間帯は温風暖房機によって加温し、その間の低夜温時間帯は地中熱交換装置によって暖房する方法である。このような併用運転方法による暖房性能は、初年度と次年度の装置構造の違いによる差は若干生じたが、実用上その効果を十分確認できた。

初年度の地中熱交換装置は、パイプ列数38列とし、ファンは温室の妻側に寄せ、反対の妻側に吹出口を設けた。その結果、温風暖房機運転時の設定値はもちろん、地中熱交換装置運転時において、設定温度の $10^{\circ}\text{C}$ は確実に保持し、設定値以下となったのは期間中3日間で、しかも $0.5\sim 1.0^{\circ}\text{C}$ 下回っただけであった。内外気温差は最大 $15^{\circ}\text{C}$ であった。

本装置がこのような高い暖房効果を示した理由として、次のような要因があげられる。1. 地中熱交換装置の暖房運転時間を9時間に限定したので、蓄熱量に対して放熱量が少なくすみ、2. 外気温が最も低下しやすい早朝時間帯は、温風暖房機を運転させ、3. 蓄熱量を十分確保できたので、地温は $18\sim 20^{\circ}\text{C}$ に保て、4. 装置の熱交換効率がよく、暖房時は地温に近接した $15\sim 18^{\circ}\text{C}$ の温風を得たこと、などである。

翌年は、パイプ列数を40列とし、またファンの位置をパイプ間の中央部において両妻側に吹出口を設ける型式に変えた。この方法により前年の装置に比べ、吸気口から吹出口までのパイプ間長は1/2になり、またファン1台当りのパイプ口数が倍に増加するのでパイプ内の通風抵抗が減少し、吐出風量は増大した。この型式での風量の実測値は200m<sup>3</sup>/minで、前年の装置に比べ約80%の増となった。

この装置における暖房性能は、装置運転時の暖房設定温度10℃に対して保持できた室温は8~11℃となり、外気温が-2℃以下に低下すると設定値より0.2~2℃程度下回る日が相当数認められた。しかし、設定値を下回っても短時間であり、キュウリの生育に直ちに影響を与えるほどではなかった。

暖房性能を向上させるためには、日中十分な蓄熱量を確保し、地中の温度を高めておく必要があるが、両年の循環風量に大きな差があったのにもかかわらず、蓄熱量にはほとんど差は認められなかった。これは、吸気口と吹出口との温度差の違いによるもので、初年度はその差が最大15℃にも達したが、翌年は5~7℃であった。放熱時も同様で、初年度の6~8℃に対し、翌年は3~4℃の温度差であった。このように、吸気口-吹出口のパイプ間長が短くなって、循環風量が増大しても温度差が小さくなり、結果として蓄熱量や放熱量に差が生じなくなる。一方、蓄熱量が同程度で、17~20℃の地温を保てたが、放熱時の吹出口気温をみると、初年度は15~17.5℃であるのに対し、翌年は12~14℃になり、両年に2~3.5℃の差が生じた。この差はやはり吸気口-吹出口のパイプの長さの違いによると考えられ、パイプが長いほど熱交換の効率が向上し、パイプ周辺地温に接近した温風が得られることになる。

先に、地中熱交換装置では吸気口と吹出口との間に温度勾配が生じ、その差はパイプが長くなる程大きくなることを述べた。この温度勾配は日中と夜間では逆になるが、両者間の1日の積算温度を調べると吸気口の方が大きい。この積算温度の違いは、キュウリの生育に大きな影響を及ぼし、初年度の装置では、吸気口から吹出口に向かって顕著な生育差となって現れた。本来、キュウリは果菜類のなかでも温度に対して最も敏感に反応する作物であり、特に弱光条件下では2~3℃の差でも生育に影響を与えることが知られている<sup>(15)</sup>。また、鴨田ら<sup>(21)</sup>は果菜類の生長を連続測定し、このなかでキュウリは昼夜の別なく伸長することを明らかにしており、このため1日の積算温度の違いが生育差となって顕著に現れてく

ると理解される。このような温度勾配は、地中熱交換装置では必然的に生じる構造的特性であり、キュウリの生育に対する影響を極力小さくするためには、吹出口部分に沿ってカーテン障壁を設けて、風を直接作物体に当たらないなどの工夫が必要となる。

温室内の夜間の相対湿度は、本装置単用運転の場合とは著しく異なる状態にあった。日中の湿度は80~90%で単用の場合と大差ないが、夜間は温風暖房機運転時に50~55%まで低下し、また早朝加温により葉面への結露は全く観察されなかった。病害は両年とも一部にべと病が発生した程度であった。この結果より、温風暖房機との併用運転においては、夜間の多湿が大きな問題になるとは思われなかった。

温風暖房機だけを使用した場合と比較した重油節減効果は、両年ともほぼ同様な値を示し、40~60%と推定された。この値は日本園芸生産研究所<sup>(49)</sup>における、温風暖房機と地中熱交換装置とを交互運転する方法で示された30~60%の数値と概ね一致した。

本試験では、両者の暖房時間帯を変えた変夜温管理法を採用したが、これを両者の同時運転法および層間運転法とを比較してみたところ、これらの方法はいずれも重油節減率が低く、有効な方法とはいえなかった。先の、日本園芸生産所の試験<sup>(44)</sup>でも、同時運転では温風暖房機の熱は地温上昇に使われて重油消費量が多くなり、特に地温が低い場合にその傾向が顕著であるとしている。しかし同時運転の場合、温風暖房機のダクト配置が問題であると思われたことから、ダクトの先端部を吸気口から離し、温風が直接吸引されないよう配置して再試験を実施したところ、変夜温管理法の場合と変わらない結果を得た。温風暖房機との同時運転が可能ならば、設定温度の保持が確実になる利点がある。

層間運転では、外張り被覆が一層であったため、地中熱交換装置による循環空気の流れが温室外部への放熱を促進させて保温効果が低下し、重油消費量を増大させたと推測される。この方法に対して、土岐ら<sup>(90)</sup>はピーマンを供試し、ハウスの二重固定張り被覆とカーテン間を地中熱交換装置による温風を通し、カーテン内部を温湯加温する方法で、対照ハウス(温湯加温)と比較したところ、ボイラー稼働時間は平均36%ですんでおり、層間保温の効果は高いと述べている。二重固定張り被覆では、作物によっては光線透過率の減少が問題になるだろうが、方法を変えて二層カーテン間に温風を通すようにすれば、層間保温は地中熱交換装置の有効な応用手段になると考えられる。

キュウリの収量は、兩年とも本作型では標準的な値であった。日本園芸生産研究所の成績<sup>(49)</sup>では、地中熱交換温室は対照温室に比べて、初期収量は20%、総収量は10%、上物収量は20%増収になった報告している。増収の要因として、空気循環による微風が光合成作用に有効に働いたことや、パイプ埋設の際の深耕の効果などを推測している。しかし本試験では、対照温室がなかったためこれらの効果について適確な判断はできなかった。

## 5 摘 要

地中熱交換装置だけでは暖房温度を保持できないと考えられるキュウリに対して、本装置と温風暖房機とを暖房時間帯および設定温度を変えて併用運転させ、その場合の暖房性能、室内環境特性、重油節減効果およびキュウリの生育・収量について検討した。

供試温室は天井部一層、側壁部二層の保温カーテンを装備した床面積314m<sup>2</sup>の単棟温室を用いた。

1) 初年度は、パイプ列数38列(55cm間隔、2段)でファン(200V、400W900m<sup>3</sup>/min)を温室妻側に取付け反対側に吹出口を設けた。その結果、111.4m<sup>3</sup>/minの循環風量が得られた。

2) 地中熱交換装置が作動する20:00～5:00の時間帯では、暖房設定温度の10℃を確実に保持し、設定値以下となったのは3日間だけで、しかも0.5～1.0℃下回った程度であった。内外気温差は最大15℃であった。

3) 日中の蓄熱量はほとんどの日で夜間の放熱量を上回り、地温は18～20℃を保った。放熱時の地温と吹出口の温度差は3～4℃で15～17.5℃の温風が得られた。

4) 蓄熱時の吸気口-吹出口の温度差は最大10℃以上に達し、また放熱時では6～8℃であった。この間の1日の温度積算値では吸気口部で大きく、吹出口部に向かってキュウリに生育差が生じた。

5) 室内の相対湿度は、日中80～90%で推移したが、夜間温風暖房機運転時は50～55%まで低下し、本装置単用運転の場合とは著しく異なる湿度環境にあった。

6) 併用暖房法により、温風暖房機単用の場合に比べて40～60%の重油が節減できると推定された。

7) 翌年は、隣接する同型、同規模の温室を用い、パイプ列数は40列、ファン(120m<sup>3</sup>/min)は温室中央部に取付け、吹出口は両妻側に設けた。その結果、循環風量は前年より80%増大して200m<sup>3</sup>/minとなった。

8) 暖房性能はやや低下し、10℃を0.2～2℃下回る日が相当数あった。内外気温差は10～14℃であった。

9) 併用暖房法を検討した結果、運転時間帯を変えた変夜温管理法と両者の同時運転法はほぼ同等の重油節減効果を示すが、同時運転の場合温風暖房機からの温風が直接ファンに吸引されないようダクトの配置に注意が必要である。

10) キュウリの収量は、初年度は約9t/10a、翌年度は10～12t/10となった。

## 第4節 経済温室に適用した現地実証試験

### 1 緒 言

これまで、場内のビニルハウスおよびガラス室を試験ほ場にして、地中熱交換装置の暖房性能、熱収支、室内環境特性、補助暖房との併用方法およびトマト、キュウリの生育反応について検討を行ってきた。その結果、暖房性能としては、外気温が-3～-5℃までの低下であれば室内を8～10℃に保持でき、内外気温差は最大15℃を示し、実用化への可能性を見出した。しかし、これらの試験に用いた温室の規模は、床面積で314m<sup>2</sup>および352m<sup>2</sup>で、当県内の平均農家温室の1/3程度の規模であり、実際の普及にあたってはさらに経済規模の温室を用いて、これらの効果を実証し、暖房諸特性をは握するとともに、経済効果についても明らかにする必要がある。

そこで、本試験は県内の代表的な生産農家の大型温室を選定して、場内試験で得られた効果の現地実証化をはかろうとしたものである。

### 2 材料および方法

#### 1) 試験実施場所

神奈川県海老名市中野1902 清水澄雄氏ほ場

#### 2) 供試温室、地中熱交換装置の構造およびその運転方法

本試験に供試した温室と地中熱交換装置の構造を第32図に示した。供試温室は床面積 1,185m<sup>2</sup>、保温比0.67の硬質ポリエステルフィルムを被覆した5連棟ハウス(菱日NS型)で、内部保温カーテンは天井部一層(0.07mm塩化ビニル)、側壁部二層(塩化ビニル+0.05mmシルバー系ポリフィルム)被覆である。地中熱交換装置は、これまでの場内試験の成績をもとに設計し、内径10cmの塩化ビニルパイプを平均60cm間隔に、深さ60cmと90cmの二段に合計140列(全長3,670m)埋設した。送風ピットは作業性を考慮した園主の希望により、温室南の妻側に設置

し、北側に立上がり方式の吹出口を設けた。循環ファンは、200V、750Wの有圧ファンを6基用いた。場内試験では、400Wファンを使用した。本装置のパイプ長は25mを超えたため、風量をより多く出せる750Wファンを選定した。

日中の蓄熱開始温度は22℃、暖房設定温度は1979年は8℃の恒夜温管理、また翌年は前夜半(17:00~21:00)10℃、後夜半(21:00~800)7℃の変夜温管理法を適用した。

日中の温度管理は、原則として午前中はほぼ密閉状態、午後は26℃前後を目標に、手動操作によって天窓を開閉させた。

補助暖房に温風暖房機を備え、兩年とも室温6℃以下になった場合作動するように設定した。

3) 温度、湿度、炭酸ガス濃度調査および蓄熱・放熱量の算出

気・地温の測定は、温室中央部、ファン吸気口、吹出口、地中のパイプ中間点のパイプ側壁から10cm離れた点および室外の高さ1.5mの位置について行った。これらの温度測定には、測温抵抗式自記温度計を用いた。

相対湿度は、通風式自記湿度計を用い、温室中央部で測定した。炭酸ガス濃度も同一位置において赤外線ガス分析計を用いて測定した。

蓄熱量と放熱量の算出は、循環風量×空気比熱×吸気口と吹出口との温度差×ファン作動時間の式から顕熱交換量について求めた。循環風量はアネモスタを用い、各吹出口毎に風速を測定して、総排出空気容積からこれを算出した。

4) 供試作物および耕種概要

1979~'80年は、トマト‘ほまれFR’を用い、10月25日に播種し、1月14~16日に定植した。栽植様式はうね

幅120cm、株間30cmの1条植えとした。翌年もトマト‘ほまれFR’を用い、9月23日に播種、12月9~11日に定植した。栽植様式は前年と同一である。兩年とも収穫は第6果房まで行った。トマトの栽培管理は当地域の慣行に従った。

3 結 果

1) 循環風量

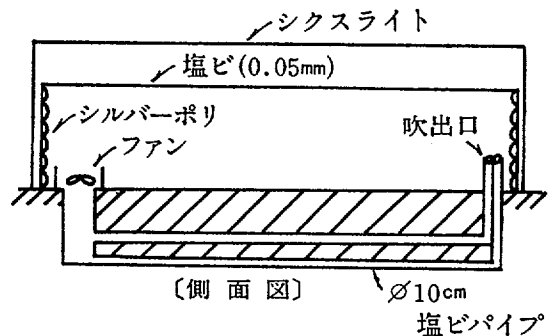
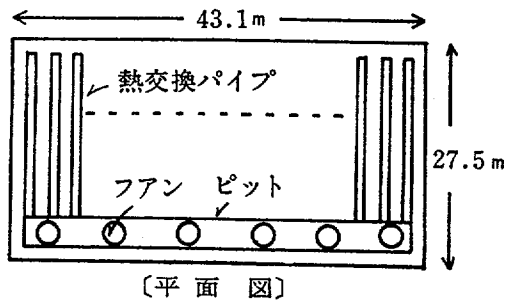
各パイプの吹出口の風速を測定したところ、平均風速は6.4m/secで総循環風量は420m<sup>3</sup>/minであった。

2) 暖房性能・温度特性

第18表に1980年1月~2月におけるハウス内外の各測定位置の温度、温度差、補助暖房の重油消費量および蓄熱・放熱量を示した。

本装置は高い暖房性能を示し、室内最低気温は外気温が-5℃までの低下であれば、暖房設定温度の8℃をほぼ維持し、-5℃以下の日においても設定値を0.5~1.5℃下回る程度であった。外気温が0℃以下の日における内外気温差は10℃以上を保持し、最大は16.4℃(1月22~23日)であった。補助暖房の温風暖房機が稼働したのは、最低外気温が-7~-9℃と著しく低下した7日間だけであり、しかも1夜当りの重油消費量は3~25ℓ程度で、総消費量は85ℓにとどまった。外気温が-6℃以上の日では、強風が吹いた1日(1月25日)を除き補助暖房が作動することはなかった。

蓄熱量は、晴天日では40~60万kcalとなり、また放熱量は30~60万kcalであり、両者はほぼ同等か蓄熱量の方がやや大きい日が多かった。したがって、1月~2月の地温は14~16℃の範囲で推移し、著しく上昇したり下降することはなかった。試験開始時点の地温が15℃と



第32図 供試ハウスと地中熱交換装置

第18表 暖房効果・重油消費量・蓄熱・放熱量および集熱効率 (1980年)

月日	最低	ハウス内気温		内外地*		吹出口*重油 気温消費量	放熱量	蓄熱量	室内到達 日射量	集熱 効率	
	外気温	最高	最低	気温差	温						
	°C	°C	°C	°C	°C	°C	l	×10 <sup>3</sup> kcal	×10 <sup>3</sup> kcal	×10 <sup>3</sup> kcal**	%
1. 20~21	-5.6	35.4	7.5	13.1	15.0	12.9	0	457.0	399.2	1,874.7	21.3
21~22	-6.8	30.5	7.0	13.8	14.8	12.8	0	545.8	577.7	1,849.8	30.1
22~23	-8.9	31.8	7.5	16.4	15.0	13.8	20	557.5	655.2	1,941.0	33.8
23~24	-5.5	31.5	8.0	13.5	15.0	13.4	5	498.7	439.5	1,625.8	27.1
24~25	-4.3	32.2	8.1	12.4	14.9	13.3	20	549.4	587.6	1,883.0	31.3
25~26	-7.0	32.3	7.5	14.5	14.9	12.6	5	533.6	598.8	2,024.0	29.7
26~27	-7.0	33.7	7.5	14.5	15.0	13.0	3	564.6	675.0	1,832.2	36.9
2. 3~4	-3.6	28.5	8.3	11.9	15.1	12.3	0	363.6	477.0	2,007.4	23.9
5~6	-3.3	27.2	8.4	11.7	15.8	10.4	0	130.6	279.4	1,642.4	17.0
6~7	-4.3	29.5	8.5	12.8	15.5	13.8	0	563.2	426.2	1,443.3	29.6
8~10	-5.3	30.3	7.3	12.6	14.7	12.7	0	341.1	558.3	2,297.7	24.3
10~11	-4.3	31.3	8.2	12.5	15.0	13.0	0	391.5	564.8	2,355.8	24.0
11~12	-5.5	29.3	7.6	13.1	15.0	13.0	0	373.5	613.3	2,322.6	26.4
12~13	-3.7	31.9	8.5	12.2	15.5	13.8	0	208.5	524.5	2,048.9	25.7
14~15	-6.4	24.4	7.0	13.4	15.0	12.5	0	644.0	87.5	2,505.1	3.5
15~16	-7.0	32.2	6.7	13.7	14.5	12.4	0	594.1	255.6	1,783.4	14.4
17~18	-8.4	29.7	6.9	15.3	14.3	12.4	25	582.4	454.1	2,463.6	18.5

\*最低外気温出現時

\*\*日射量は二宮にて測定

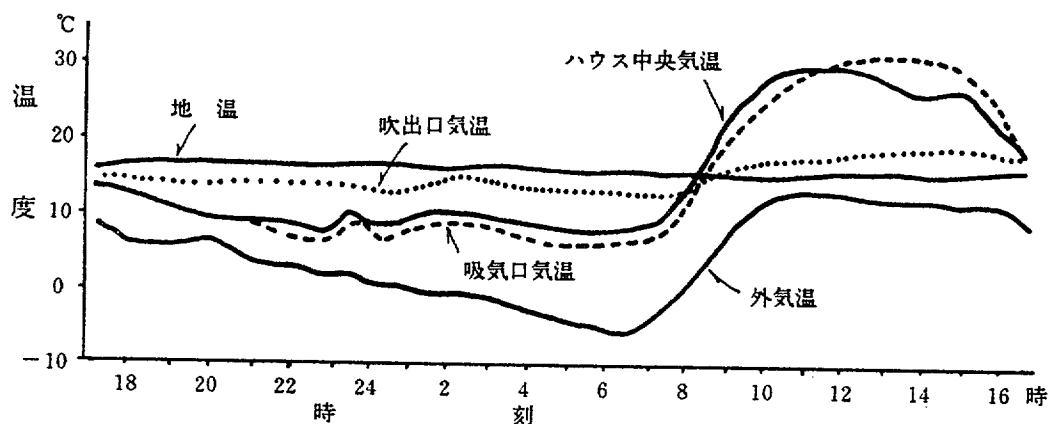
やや低かったのは、トマト定植前に蓄熱運転を行わなかったため、次年度の改善点として残された。

第33図に晴天日における各測定位置の温度経時変化の1例を示した。日中の室内気温は、午前中は密閉状態にしたので30℃まで達し、午後は天窓換気により25~28℃で推移した。吸気口側は温室中央部より2~4℃高く、一方吹出口は吸気口側よりも10℃以上低くなり、最大気温差は13℃に及んだ。これに対し、夜間の暖房運転時の吸気口-吹出口の気温差は6~7℃でほぼ一定していた。蓄熱および放熱運転により上昇または下降する地温は最大約2℃であった。夜間暖房時の吹出口気温は、運転開始時では地温と同一温度を示し、最低外気温出現時にはそれより約2℃低い13~14℃であり、夜間の吹出口気温から地温の推定が可能なが示唆された。

第19表に翌年の温室内外の各温度、温度差、重油消費量および電力消費量を示した。この年は前年とは変え、暖房設定温度を10~7℃の変夜温管理法を適用したので、第19表の温室最低気温は後夜半の7℃設定時について表した。この年の最低外気温は-5℃以下に低下する日が多数出現し、最低極温は-9.8℃(1月12日)を

記録した。このように気温低下の著しい年であったが、温室内はほぼ設定値を保持でき、また設定値以下となっても1~2℃以内の範囲であった。内外気温差は最大15℃を保ち、前年と同等の暖房性能を示した。第34図は晴天日における各測定位置の温度経時変化を示した例である。日中の温室室内気温は最高30℃に達し、夜間は暖房設定温度に従って推移している。吸気口-吹出口の温度差は最大15℃、夜間6~7℃であり、地温-吹出口の温度差は2℃で前年と同様な傾向にあった。

試験開始時の12月中旬における地温は18℃を保っていたが、運転開始後、日数の経過とともに次第に低下していき、1月中旬には12℃の最低温度を記録した。前年14~16℃の範囲を保っていたのとは、大きく異なる結果となった。これは、蓄熱量と放熱量の差が大きいことから生じる現象である。第35図に示したように、外気温低下が著しく、しかも夕方の早い時間から降下して暖房負荷が増大したため、蓄熱量より放熱量の方が大きい日が続く、地温を次第に低下させていった。地温の低下は、暖房性能に影響を及ぼすだけでなく、トマトに対して低温障害を生じさせる恐れがあり、実際生育遅延の徴候が



第33図 各位置の温度変化 (1980年2月12~13日)

認められた。このため、2月4日より装置の暖房運転を停止させて補助暖房に切替え、ファンは日中の蓄熱運転だけとする措置をとった。その結果第36図に示したように、切替え前は12.5℃であった地温は、6日後には15℃にまで回復した。このような措置を構じたため、重油消

費量は総計240ℓになり、前年の3倍に増大した。

2月中旬以降の地温は最低14℃を確保し、3月に入ると16~17℃に上昇した。

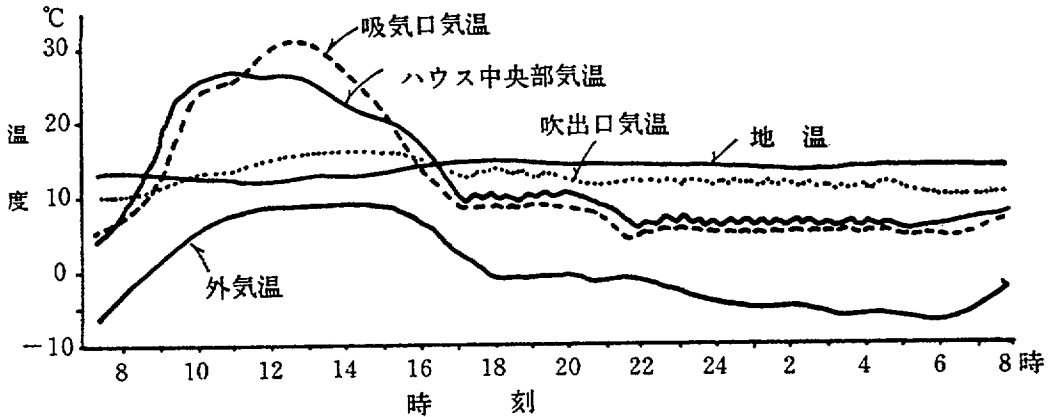
3) 湿度環境

晴天日における温室内の相対湿度の経時変化を第37図

第19表 暖房効果、重油および電力消費量 (1980~'81年)

月 日	最低 外気温 ℃	ハウス内気温		内外 気温差 ℃	地 温		重 油 消費量 ℓ	電 力 消費量 kW
		最高 ℃	最低 ℃		最高 ℃	最低 ℃		
12. 10~11	2.5	29.5	10.0	7.5	18.0	17.5	0	13
15~16	-6.8	24.0	8.0	14.8	16.0	15.2	0	35
21~22	-7.8	28.0	7.7	15.4	14.5	14.0	0	43
27~28	-6.7	26.0	6.3	13.0	15.2	14.3	0	57
29~30	-9.2	30.8	6.0	15.2	14.7	13.0	0	55
30~31	-6.3	28.8	7.8	14.1	14.7	14.0	0	55
1. 4~ 5	-8.2	26.2	6.2	14.4	15.0	14.0	5	65
5~ 6	-7.8	25.5	5.7	13.5	14.2	13.7	0	66
7~ 8	-9.2	28.0	5.7	14.9	14.2	13.0	0	69
8~ 9	-7.7	27.8	6.0	13.7	13.8	13.2	0	48
11~12	-9.8	28.7	5.2	15.0	13.8	12.7	0	78
13~14	-9.7	26.2	4.7	14.4	13.2	12.0	10	81
2. 4~ 5*	-8.8	17.7	5.2	14.0	13.2	12.5	120	64
6~ 7*	0.0	28.2	9.6	9.6	14.0	12.0	35	27
7~ 8*	-5.7	26.2	7.5	13.3	14.3	14.2	70	35
8~ 9	-5.8	21.7	7.5	13.3	14.3	14.2	0	61
9~10	-4.5	26.2	7.0	11.5	14.8	14.8	0	63

\*夜間ファンを止め補助暖房使用



第34図 各位置の温度変化 (1981年1月5～6日)

に示した。日中の相対湿度は85～95%の範囲にあり、天窓を開けた12時に最低となったが、午後は次第に上昇する傾向にあった。夕方、カーテン閉鎖後は一時100%に達するが、ファンのON-OFF運転に伴って95～100%の変化を示した。早朝、カーテン内側の水滴付着は相当量認められた。

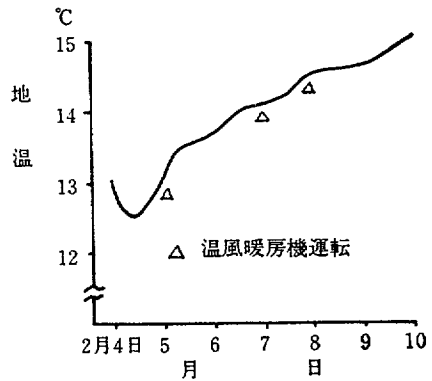
4) 炭酸ガス濃度環境

第38図に晴天日における温室内の炭酸ガス濃度経時変化の事例を示した。炭酸ガス濃度は、夜間840～890 ppmの高濃度状態にあり、日の出後濃度は急速に低下していき、12時前後には250 ppmと大気濃度以下の値となった。午後には次第に上昇し、カーテン閉鎖時の16～17時には500 ppmに達した。

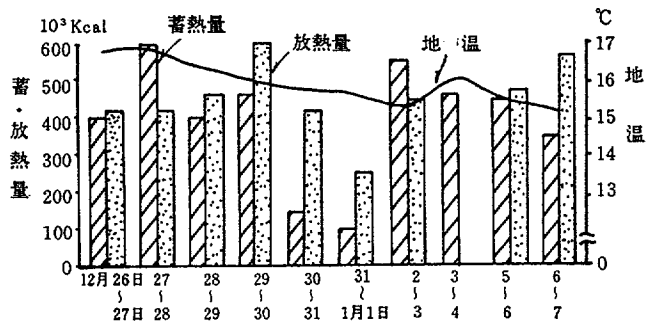
5) トマトの生育・収量

初年度は、定植日が適期より5日程度遅れたため活着不良で初期生育はやや劣ったが、第2～3段花房開花後の生育は順調であった。しかし、生育後半は頂部の茎が細くなり、肥料あるいは水分不足と思われる草姿になった。このため、上位果房の果実肥大が不十分で、空胴果の発生もやや多かった。特定病害の発生はほとんど認められなかった。

翌年は1月中旬以降低温の影響を受けて生育はやや抑制され、また適期防除を怠ったこともあって灰色カビ病の発生をみ

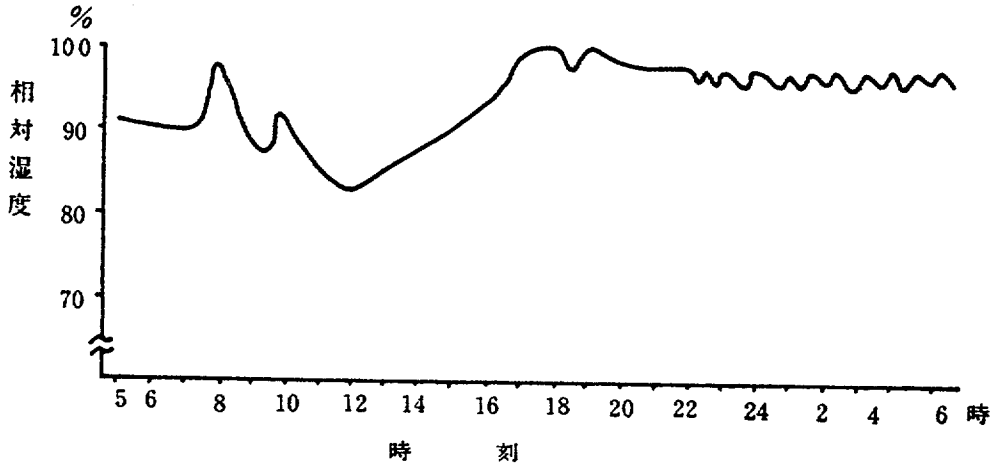


第36図 補助暖房の運転と地温変化



第35図 蓄熱量、放熱量と地温変化 (1981年)





第37図 室内の相対湿度変化 (1981年2月2～3日)

た。

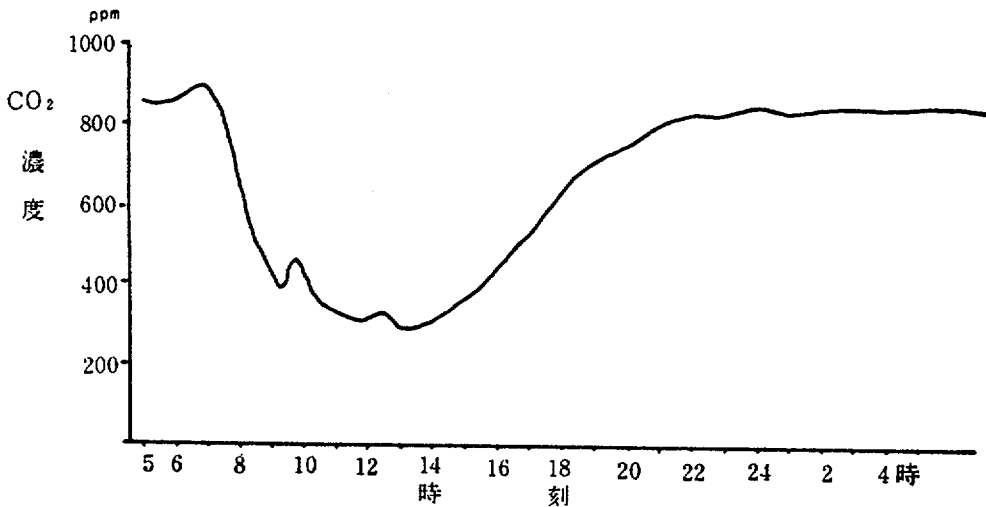
先に本装置運転時は、吸気口と吹出口との間に昼夜逆の温度勾配が生じ、その差は日中最大15℃、夜間6～7℃に及ぶことを述べた。このような温度勾配は、トマトの生育に対しては夜温の影響が表れ、第39図に示したように、夜間温風の当たる吹出口部分の生育が進み、草たけ、葉の大きさ、莖径ともに吸気口部分より大きくなった。

第20表は初年度の収量を月および等級別に表したものである。総収量は13.8t (10a換算11.7t)であり、当地域の本作型ではほぼ標準的な収量であった。しかし、

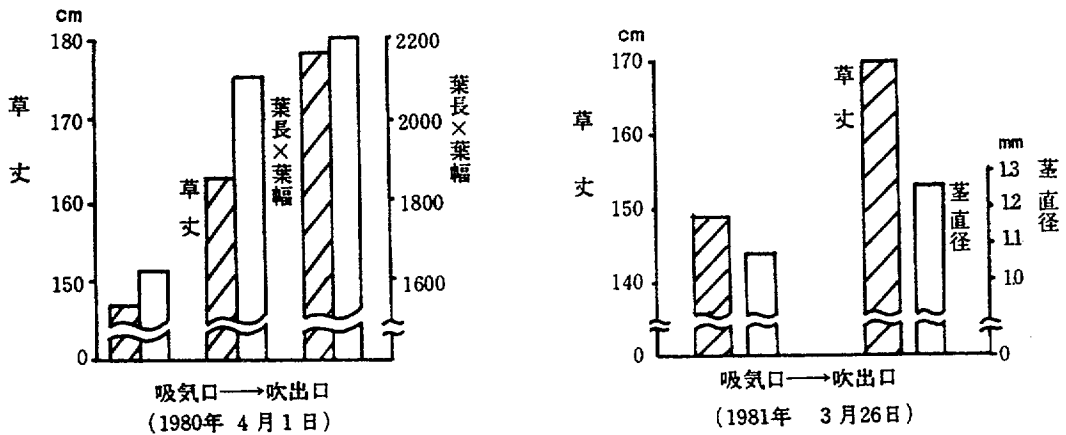
4月の秀品率が76%であったのに対し、5月以降は空胴果の発生が多かったため50%以下に低下した。翌年の収量は第21表のとおりで、総収量は11.8t (10t/10a)となり、前年より約14%減収した。しかし、空胴果等の不良果の発生が少なく、各月とも秀品率は60%を越えた。

#### 6) 経済効果

第22表に本装置を設置するために要した費用の内訳および償却費を示した。施設費総額は施工労賃を含め312万円 (10a換算263.3万円)を要した。このうち資材費が約63%で、なかでもパイプ代金が49%と投資額の半分



第38図 室内のCO<sub>2</sub>濃度の経時変化 (1981年2月2～3日)



第39図 ハウス内の位置による生育差

を占め、ついで送風ピット、ファン、掘削機のリース代金、労務費の順であった。各資材の償却年数は、ファンは一般的に用いられる耐用年数の8年<sup>(22)</sup>とし、他は事例はないが消耗部分が極めて少ないので、温室と同一の20年とするなら、年間の償却費総額は約18.6万円と試算される。これに対し、慣行の温風暖房機の費用と償却費を第23表に示した。費用総額は67.5万円、年間償却費は8.4万円となった。したがって、地中熱交換方式は温風暖房方式に比べ、設置費総額で約4.6倍、年間償却費で約2.2倍大きいことになる。

地中熱交換方式の経済効果を装置償却費＋運転経費で表し、温風暖房方式と比較して示すと第24表のようになる。なお地中熱交換方式の償却費には、数日間ではあるが温風暖房機が稼働したので、それも含めて表した。また、温風暖房方式の重油消費量は隣接するガラス室(1,320m<sup>2</sup>、カーテンは同一条件)の実績から求めた。初年度についてみると、地中熱交換方式は温風暖房方式に比べて、償却費は3.2倍また電気代は4.2倍になるが、重油代金は1/60と極めて少なく、年間経費では約20%の節減となった。翌年は、電気料金が値上がりしたため前年の約2倍に、また重油代金も2.8倍に増大したが、重油消費量が著しく少ないため、年間経費では約32%の節減効果となった。

4 考 察

地中熱交換暖房方式の広範な普及をはかるため、本装置を現地農家の経済規模の温室に設置して、暖房性能、室内環境特性、トマトの生育反応および経済効果のは握

に努めた。その結果を考察すると次のとおりである。暖房性能は1979～'80年、'80～'81年の両年とも外気温が-5℃までは暖房設定温度の8℃(79～80年)、10-7℃(80～81年)を保ち、-5℃以下の日においても0.5～1.5℃下回る程度であり、内外気温差は最大15℃を示した。このような暖房能力は、場内における成績とほぼ同様であった。補助暖房が作動したのは、初年度は7日間で、重油消費量は85ℓ、次年は5日間で240ℓであった。このような高い暖房効果が得られた要因を装置の面から次のようにみることができる。

第20表 トマトの収量 (1979～'80)

月	秀 品		優 品		B 品		計
	収量	率	収量	率	収量	率	
	kg	%	kg	%	kg	%	kg
4	2,644	76.1	588	16.9	244	7.0	3,476
5	3,160	41.0	3,760	48.9	784	10.2	7,704
6	1,148	43.4	964	36.4	536	20.2	2,648
計	6,952	50.3	5,312	38.4	1,564	11.3	13,828

第21表 トマトの収量 (1980～'81)

月	秀 品		優 品		B 品		計
	収量	率	量収	率	収量	率	
	kg	%	kg	%	kg	%	kg
3	1,294	63.4	592	30.0	156	7.6	2,042
4	3,796	68.7	1,320	23.9	412	7.5	5,528
5	2,608	63.5	832	20.3	668	16.3	4,108
6	96	70.6	20	14.7	20	14.7	136
計	7,794	66.0	2,764	23.4	1,256	10.6	11,812

本温室の暖房必要熱量は次式(57)から求められる。

$$Q_g = A_q \{ht (\Theta_{in} - \Theta_{out}) (1 - fr) + hv (\Theta_{in} - \Theta_{out})\} + A_s \cdot q_{so}$$

( $Q_g$  : 暖房必要熱量 kcal/h,  $A_q$  : 温室表面積  $m^2$ ,  $ht$  : 熱慣流率 kcal/ $m^2 \cdot h \cdot ^\circ C$ ,  $\Theta_{in}$  : 室内気温  $^\circ C$ ,  $\Theta_{out}$  : 室外気温  $^\circ C$ ,  $fr$  : 保温被覆の熱節減率,  $hv$  : 換気伝熱係数 kcal/ $m^2 \cdot h \cdot ^\circ C$ ,  $A_s$  : 温室床面積  $m^2$ ,  $q_{so}$  : 地中伝熱量 kcal/ $m^2 \cdot h$ )

この式で内外気温差を  $13^\circ C$  とし,  $A_q = 1,778$ ,  $ht = 5.5$ ,  $fr = 0.3$ ,  $hv = 0$ ,  $q_{so} = -5$  として暖房必要熱量を求めると  $Q_g = 59,900$  kcal/h となる。

一方, 地中熱交換装置からの放熱量を,  $W = a \cdot c \cdot (P1 - P2)$

( $W$  : 放熱量 kcal/h,  $a$  : 空気比熱 kcal/ $m^3 \cdot ^\circ C$ ,  $c$  : 循環風量  $m^3/h$ ,  $P1$  : 吹出口気温  $^\circ C$ ,  $P2$  : 吸気口気温  $^\circ C$ ) の式から, 外気温  $-5^\circ C$  時における 1 例 (1980 年 1 月 24 日) を求めると,  $W = 56,700$  kcal/h が得られる ( $a = 0.3$ ,  $c = 25,200$ ,  $P1 - P2 = 7.5$ )。

このように両者の値は近似しており, 温室の暖房負荷に応じた放熱量が本装置から得られ, 埋設パイプ量および循環風量が適切であったことを示している。

地中熱交換装置の設計諸元のうち, パイプの埋設位置および量は径 10cm のプラスチックパイプを用いた場合, 深さ 50cm 以下, 間隔 50~60cm の二段配列が適当であること, また必要循環風量は温室の暖房負荷をもとに算出すればよいことを明らかにしたが, このことは経済規模の大型温室に適用しても問題ないと判断された。装置の設計基準において, 山本ら<sup>(95)</sup>は, 熱交換パイプは 10~13cm の硬質パイプが好適で, その埋設量はパイプの総内壁面積がハウス床面積と 1 : 1 の対応をなすことが適切であると述べている。本装置において, その比を求めてみると 0.97 : 1 となり, 山本らの基準値とはほぼ一致した。

パイプの材質は, 場内試験ではポリエチレン製を使用した。本実証試験では価格の点から塩化ビニル製を選定した。材質の違いについて, 高倉ら<sup>(83)</sup>は鋼鉄, ポリエチレン, 塩ビ間では, 室内気温に与える影響はきわめて小さいことを明らかにし, また伊藤ら<sup>(17)</sup>もパイプは材質よりも埋設の仕方が重要であると述べている。したがって, パイプは主に強度と価格の面から選定すればよいといえる。

山本ら<sup>(96)</sup>は蓄熱への余剰熱量をできる限り確保するため, 温室は昼間二重被覆にする必要があると述べている。しかし, 場内および現地試験とも通常の一重被覆条件においても密閉状態では室内は  $28 \sim 30^\circ C$  を越え, むし

第22表 装置費用の内訳と償却費

項目	内訳	金額	償却	
			年数	償却費
		千円	年	円
塩ビパイプ	$\phi 100mm$ 980本	1,470	20	73,500
同 L	140個	63	20	3,150
制御装置	2台	73	20	3,650
ファン	200V, 750W 6基	372	8	46,500
サーモスタット	2基	15	8	1,875
コンクリート	$60cm \times 1m$ $\times 40m$	700	20	35,000
掘削機リース代	8日	240	20	12,000
労務費	27人	203	20	10,150
計		3,121		185,775

第23表 温風暖房機の費用と償却費 (推定)

項目	内訳	金額	償却	
			年数	償却費
		千円	年	円
暖房機本体	1台	600	8	75,000
ポリダクト	1式	50	5	10,000
計				85,000

第24表 経済性比較 (1979~'80)

項目	地中熱交換方式		温風暖房方式	
	円	円	円	円
償却費	270,775		85,000	
重油代	5,950		350,000	
電気代	84,250		20,000	
計	360,975		455,000	
比	79.3		100	
(1980~'81)				
償却費	270,775		85,000	
重油代	16,800		546,000	
電気代	153,673		30,000	
計	441,248		661,000	
比	66.8		100	

る若干の換気を行うほどであって, 二重被覆の必要性は認められなかった。二重被覆により蓄熱量が増大しても, フィルムを固定するため多くの資材や止め具を要することや, 光線透過量の減少がさげられないので, 必須条件とはいえない。

初年度, 装置の完成が遅れたため試験開始前に蓄熱運

転を行って地温を上昇させておくことができず、15℃の地温でスタートした。その後、地温は2月末まで14~16℃の範囲で推移し、著しく上昇したり、下降することはなかった。しかし、翌年は地温を18℃まで上昇させて試験を開始したにもかかわらず、1か月後の1月中旬には12℃まで低下した。初年度の蓄熱量、放熱量をみると、両者はほとんど同一か蓄熱量の方がやや大きい日が多く、1日の地温は1~2℃の範囲で変化している。これに対し、翌年はトマト定植後の12月中旬から外気温の低下が著しく、最低気温が-5℃以下の日が度々出現したため放熱量が蓄熱量を超え、地温を降下させる原因となった。地温の低下により、トマトの下葉が黄化したり、先端部が細くなる等の徴候が観察された。このため、2月4日より一時夜間の放熱運転を停止させて日中の蓄熱運転だけとし、地温を回復させる措置をとった。本装置の放熱量が蓄熱量を超える日が続いたため地温が低下した例は、果樹試気象研究室、徳島農試、愛媛農試<sup>(56)</sup>においても認めている。今後は、常に地温を計測しながら運転管理を行うことが極めて重要と考えられ、一定地温以下になった場合は、放熱運転を停止させて補助暖房に切替える必要がある。トマトの地温は経済栽培では13℃付近が養分吸収や生育速度からみた実用限界とされており<sup>(11)</sup>、本装置を利用する場合においてもこの温度を最低限において安全を期すべきと思われる。

地中熱交換装置の運転時は吸気口と吹出口との間に昼夜逆の温度勾配が生じる構造的な特性があり、トマトの生育に対しては夜間の温度差の影響が大きく、温風の当たる吹出口近くの生育が旺盛になり、吸気口部分は抑制される傾向を示した。キュウリの場合とはまったく逆の現象であった。この原因は、両者の昼夜の温度に対する生育反応の違いによるものと思われる。鴨田ら<sup>(21)</sup>は、果菜類の生長を連続測定し、キュウリは昼夜の別なく伸長する性質があるのに対し、トマトは夜間に伸長が著しく、日中は逆に収縮することを明らかにしている。したがって、キュウリの場合、1日の積算温度が大きい吸気口部分の生育が促進されるのに対し、トマトは伸長の進む夜間に温風が当たる吹出口部分の生育が促進されると考えられる。このような温度勾配によるトマトの生育差を消去するためには、吹出し口に沿ってカーテンを張り、直接作物体に風を当てないような措置が必要と思われる。

温室内の相対湿度は、日中85~90%、夜間のファン作動時は95~98%となり、従来の成績とはほぼ同様な傾向にあり、大型温室においてもやや多湿な状態に推移した。

多湿条件は、トマトの生育にとって必ずしもマイナス要因ではないが、病害の発生を助長することは明らかであり、実際次年度は灰色カビ病による被害を受けた。近年、温室におけるトマト栽培では、灰色カビ病が多発する傾向にあり、大きな被害を受けている。本病は特定薬剤に対する耐性菌が出現しやすいことが明らかにされており<sup>(45)</sup>、今後は防除薬剤や防除装置を組合わせた総合防除法の早期確立が望まれる。

温室内の炭酸ガス濃度は、これまでの測定例同様、夜間高く、日の出後急速に低下する推移を示した。特に、午前中温室内を密閉した場合、低炭酸ガス濃度の状態が続き、換気直前には最低の250 ppmとなった。本試験では炭酸ガス施用は行わなかったが、このような低炭酸ガス状態が続く場合には施用の必要性があったと思われる。従来の慣行暖房方式温室における炭酸ガス施用は、日の出後から2時間程度で、その後換気が必要となるのが実態である。これに対し、本暖房方式温室では、午前中はほぼ密閉状態にあるので長時間施用が可能であり、また室温は28~30℃に保持されており、さらに空気流動による炭酸ガスの取込みが促進されて、これまで以上に炭酸ガス施用の効果を高めることが期待できる。

トマトの生育は、初年度は定植が適期より遅れたため活着不良で初期生育が劣ったが、中期は順調であった。しかし、生育後期は頂部がやや細くなった。このため、当地域における標準収量は得られたものの、第3段果房以上に空洞果の発生が多かった。パイプ埋設の際の深耕の影響により、水の横浸透が不十分であったこと等がその一因と考えられる。茨城農試<sup>(56)</sup>においてもパイプの埋設によって耕土が不均一になり、ピーマンの初期収量の低下を招いたことが報告されている。

翌年は、1月中旬以降に低温の影響を受けて生育はやや抑制され、また灰色カビ病の被害のため、収量は前年より約14%減収した。しかし、かん水量を前年より増すなど栽培管理を改善した結果、空洞果等の不良果が減少し、秀品率は向上した。

温室内の吸気口-吹出口の間の生育差が収量に与えた影響は明らかではなかったが、おそらく吸気口部分の減収分は吹出口部分が補ったと思われる。

このように、地中熱交換暖房を用いた大型温室においても必要な暖房温度を確保し、かん水や日常の一般管理に注意を払うならば、慣行の暖房方式と変わらない収量や品質のトマトが得られることを示している。

地中熱交換装置を設置するために要した経費は、総額312万円(10a換算、260万円)であった。奈良農試の調

査例<sup>(56)</sup>では、206～260万円で、本試験装置とほぼ同額な値であった。本装置の広範な普及をはかるためには、初期投資額を低く抑えることが極めて重要であり、そのためには安価なパイプや送風ピットの開発、また能率的な施工技術の考案が望まれる。

本暖房方式の経済効果を装置償却費＋運転経費で表し、温風暖房方式と比較したところ、償却費では3.2倍、電気代では4.2倍となるが、重油代金は1/30～1/60と著しく少なく、その結果年間20～30%の経費減になることが分った。他にこのような方法で経済効果を調べた例は見当たらず、多くは運転経費だけの比較でみているが、それによれば石油＋電気料金は温風暖房方式の20～30%ですんでいることを認めている<sup>(46,56)</sup>。今後本暖房方式の設置事例が増加するに従い、慣行暖房方式との総合的な比較検討が進み、長期的にみた場合における経済評価がなされると思われる。

## 5 摘 要

現地農家の経済規模の面積を有するプラスチックハウスに地中熱交換装置を設置して、暖房性能、室内環境特性、トマトの生育収量および経済効果について調査し、実用化に当たっての問題点を明らかにしようとした。

1) 供試温室には床面積1,185m<sup>2</sup>の5連棟ポリエチレン被覆ハウスを用いた。内部保温カーテンは天井部一層側壁部二層とした。地中熱交換装置は、内径10cmの塩ビパイプを合計140列埋設し、200V、750Wの有圧ファンを6基用いた。実測した循環風量は420m<sup>3</sup>/minであった。

2) 最低外気温が-5℃までは、暖房設定温度である8℃(1979～80年)、10～7℃(80～81年)を保持でき、内外気温差は最大15.3℃を示した。

3) 補助暖房(温風暖房機)の作動による重油消費量は初年度85ℓ、次年度は240ℓであった。

4) 地温は、初年度は14～16℃の範囲で推移したが、次年度は放熱量が蓄熱量よりまさる日が続いたため最低12℃まで低下した。

5) 室内の炭酸ガス濃度は、夜間840～890ppmを保っているが、日ので後急速に低下し、最低は250ppmを示した。

6) 室内の相対湿度は、日中85～95%、夜間95～98%の推移を示した。

7) トマトの生育は、夜間温風の当たる吹出口部分が旺盛となり、吸気口部分は抑制された。

8) トマトの収量は初年度13.8t(10a当り11.7t)得られたが、空胴果の発生が多かった。次年度は11.8t(10a当り10t)で前年より低収となったが、秀品率はすぐれた。

9) 地中熱交換装置の施設費総額は312万円(260万円/10a)で、このうちパイプ代金が全体のほぼ半分を占めた。経済効果を装置償却費＋運転経費で表し、温風暖房方式と比較したところ、地中熱交換方式の償却費と電気料金は大きいですが、重油代金は著しく少なくて済み、年間20～30%の経費減と試算された。

## 第5節 現地の利用状況調査事例と運転管理上の留意点

### 1 緒 言

地中熱交換方式の経済温室への導入は、前述した現地実証試験として実施した海老名市の農家が最初の事例である。その後、石油価格の上昇や供給不安定に伴う省エネルギー意識の高まりとともに、本方式を取入れる生産者が次第に増加し、また1979年には国の助成事業である「施設野菜省エネルギーモデル団地設置事業」の一型式にも指定され、全国各地に広まりをみせるようになった。これらの装置は、これまでの場内試験や現地試験の成績を基に設計されているならば高い暖房性能を示すはずであるが、地域による気象条件や、温室の形態・規模、内部保温カーテンの設置状況等の違いによっては必ずしも目的とした成果が得られていない場面や、新たな問題が生じている可能性があり、利用実態の把握が必要である。そこで、本調査は神奈川県内の現地で稼働している装置の利用実態を明らかにするために実施したもので、これにより省石油暖房方式として機能している程度や装置の運転管理上における問題点の所在を知り、今後の改善方向を求めようとしたものである。

### 2 調査方法

#### 1) 調査年度

地中熱交換装置の設置状況は、1979年以降県内の各農業改良普及所を通じて随時把握した。個々の農家の詳細な利用実態の調査は1980～81年に稼働した装置について、県農業技術課及び各普及所の協力を得て実施した。

#### 2) 調査項目

調査項目は次の通りである。

- (1) 温室の形態・規模
- (2) カーテンの装備状況・被覆資材
- (3) 地中熱交換装置の構造（パイプの径・種類、埋設位置、ファンの性能・台数等）
- (4) 蓄熱・暖房設定温度、補助暖房の設定温度
- (5) 作目・作型・品種
- (6) 装置の設置経費
- (7) 補助暖房による重油消費量
- (8) 電力消費量または電力料金
- (9) 利用上注意した点、問題となった点

これらの項目について、聞き取りにより記述した。

また一部農家については、熱電対または抵抗式の自記温度計を持込んで温度調査を実施した。

### 3 調査結果および考察

#### 1) 普及経過

神奈川県内における設置戸数および面積は、1979年に11戸、約2.2万㎡であったのが81年には40戸、約5.2万㎡にまで増大した。導入作目は野菜では、トマトが主であり、一部キュウリ、サラダナが取入れられていた。また、洋ランやカーネーションの花き類にも広まりをみせるようになった。

#### 2) 利用状況

第25表は1980～81年に稼働した本装置の利用状況の一覧を示した。この表では、補助暖房による重油消費量を把握できた農家、及び何らかの問題が生じたトマト栽培農家を抜粋して示した。

##### (1) 装置構造の特徴

ほとんどが内径10cmの塩ビまたはポリエチレンのプラスチックパイプを使用しているが、一部でスパイラル状の鉄線に有孔のポリフィルムを被覆したスパイラル管を用いている事例もあった。埋設の深さは50～90cmで、2段配列されている。埋設位置を深くした場合の理由は、今後深耕の実施に支障をきたさないことを考慮したためであった。パイプ間隔は50～60cmであった。ファンは200V、400Wの有圧ファンを5～6台/10a使用している例が多い。以上のことから、これらの装置はスパイラル管を使用した場合を除き、大部分は場内試験の成績を基に設計されていた。

装置のファン運転設定温度は、日中の蓄熱は20～25℃、夜間の暖房は6～10℃の範囲であり、補助暖房は大部分6℃に設定されていた。

##### (2) 重油消費量

調査年の気象状況の特徴は、12～2月は例年に比べ外気温低下の著しい日が多く出現したことで、現地実証試験における測定では最低極温-9.8℃が記録されており、また簡易な温度計による測定ではあるが、-10℃以下に低下した日が度々あった地域もあった。一方、曇雨天日は少なく、比較的日照には恵まれた年であった。

このような気象状況のもとで、補助暖房の作動による重油の消費量は、10a当りに換算して0～1,100ℓであった。これを、これまで調べられた各作型の標準使用量との比較から節油率として示すと80～100%となり、ほぼ目的とした成果をあげたといえる。重油の使用量に農家間の格差が大きいのは、地域差や温室の保温性の違い、また補助暖房の稼働は室温が設定値まで低下した場合だけではなく、室内の湿度を下げる目的で早朝一定時間強制的に運転した例があったこと等による。補助暖房が全く稼働しなかった事例もあり、これは水耕施設で培養液加温をしていたため栽培槽からの放熱が、熱補給に貢献した結果と思われる。

先の節油率は、標準の使用実績に対する実際の使用量から求めた単純な率であり、経済性については消費重油量に電力消費量を加えた運転経費で比較しなければならない。しかし、ほとんどの農家は、地中熱交換装置だけの電力消費量を計測しておらず、また電力計があっても他の電力消費量も加わっているため正確な値をは握できなかった。

##### (3) 装置の設置経費

装置の施工は、専門の温室業者の場合や、自家施工の例などがあり、また安価なパイプを入手した例がある反面、高価な厚肉パイプを使用した事例等がある。設置経費は10a当り160～380万円と大きな開きが認められた。しかし、220～280万円/10aの範囲で施工した事例が最も多かった。

##### (4) 生育状況、利用上の問題点および改善点

トマトの生育状況は、各農家とも慣行の暖房方式を用いた場合とほとんど変わらないと観察しており、収量や品質もほぼ同等と述べている。しかし、一部では温室内の位置によって生育差が生じたことや、大型の温室では、第40図に示したように室内中央部と側壁部との間に温度勾配を認め、外気温が低いほどその差が広まり、このため側壁部に近いところの生育が遅れたり、着色不良や裂果の問題を指摘したところがあった。この対策として側壁部のカーテンの二層化をはかり、そのうちの一層は保温性の高い資材を使用して対応していた。

また先にこの年の気象条件の特徴として、外気温低下

第25表 1980～'81年に稼働した地中熱交換暖房の利用結果

農家 No	温室規模	カーテンの状況(天井)	地中熱交換装置の仕様	ファン作動設定温度	品 種 耕種概要	重油消費量 ℓ / 10a	設置経費 万円/10a	生育の状況 利用上の問題点等
1	ガラス室 1,736 m <sup>2</sup>	ポリ + 不織布	塩ビ管 径10cm * 50・70、60cm **床面積比 1.01 ファン 0.4kW 8台	昼 20~25 夜 8~10 暖*** 6	瑞秀・水耕 播種 8.5 定植 9.20	740 (91)	330	生育は順調
2	ガラス室 1,934 m <sup>2</sup>	ポリ + 不織布	塩ビ管 10cm 50・70、50cm 1.04 0.4kW 10	22~25 8~10 6	S 1 1 4 11.1 1.10	1,035 (83)	288	生育は良好 灰色カビ病予防
3	ガラス室 924 m <sup>2</sup>	ポリ + 不織布	塩ビ管 10cm 50・75、55cm 1.11 0.4kW 6	22~25 6~8 6	瑞秀・水耕 11.15 12.26	1,080 (82)	228	生育は順調
4	ガラス室 1,658 m <sup>2</sup>	塩ビ + 不織布	ポリ管 10cm 50・70、55cm 1.01 0.4kW 10	20~25 6~12 6	瑞 秀 7.15 8.20	1,000 (88)	220	生育は良好 室内に温度勾配
5	ガラス室 1,700 m <sup>2</sup>	塩ビ + 不織布	ポリ管 10cm 50・70、55cm 1.05 0.4kW 8	20~25 6~12 6	瑞 秀 9.1 10.15	1,100 (85)	220	同 上
6	ガラス室 1,134 m <sup>2</sup>	ポリ + 不織布	塩ビ管 10cm 50・70、60cm 0.95 0.4kW 6	20~25 10 6	瑞秀・水耕 9.1 10.3	0 (100)	380	生育は良好 補助暖房は作動せず
7	ガラス室 495 m <sup>2</sup>	ポリ + ポリ	スパイラル管 9cm 60、80cm 0.35 0.2kW 4	20~25 10 8	育苗 専用 9.28	670 (-)	-	苗の生育は良好 パイプから土中に空気がもれる
8	硬質フィル ムハウス 1,186 m <sup>2</sup>	塩ビ 一層	塩ビ管 10cm 70・90、55cm 0.96 0.75 kW 6	20~22 7~10 6	ほまれ 1 1 4 9.28 12.11	210 (93)	260	生育は概ね良好だが、 地温が低下した
10	ガラス室 891 m <sup>2</sup>	ポリ 一層	塩ビ管 10cm 80・90、60cm 0.94 0.4kW 5	20~22 8 6	瑞光 1 0 2 9.10 11.10	- (-)	250	1月中旬より生育不良 地温低下、収量減
11	ガラス室 1,000 m <sup>2</sup>	塩ビ + 不織布	ポリ管 10cm 50・70、55cm 0.81 0.4kW 6	20~22 8~10 6	瑞 秀 7.15 8.20	700 (94)	220	生育良好 灰色カビ病多発
12	ガラス室 1,320 m <sup>2</sup>	塩ビ + 不織布	塩ビ管 10cm 50・70、60cm 0.95 0.75kW 6	20~22 8~10 6	ファースト パワー 7.20 8.14	700 (94)	160	生育は良好 灰色カビに注意

\* 深さ、上段・下段、間隔

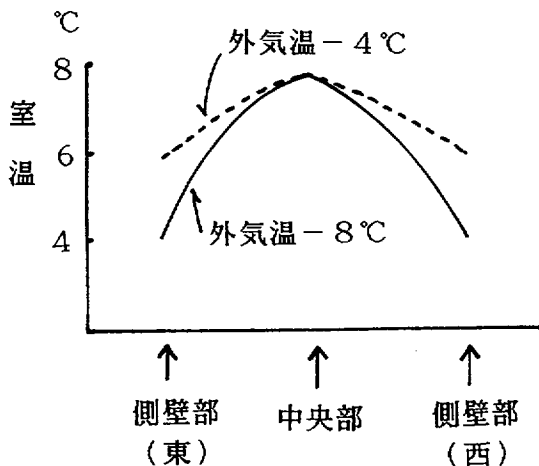
\*\*床面積比：パイプ表面積/温室床面積

\*\*\* 暖：温風暖房機設定温度

の著しい日が多数出現したことを述べたが、暖房負荷の増大に伴い、内部保温性能の低い温室では、日中の蓄熱量より夜間の放熱量の方が大きかったため、地温が次第に低下していく例が認められた。このため、ごく一部ではあるが、地温低下に気づかず運転を続けた農家では、根の低温障害による生育抑制や下位葉の黄化症状が現れ、収量に影響を及ぼした例があった。

このように地温の低下は、装置の性能だけでなく、作物の生育にも影響を与える大きな問題であり、常に地温測定をしながら運転操作を行うことが、本装置の重要な管理技術であった。地温が一定値以下になった場合は、ファン運転は日中の蓄熱時だけにとどめ、夜間は補助暖房に切替えて地温上昇をはかる必要がある。一方、第41図(場内試験)に示したように、地温が20℃を超えると室温との温度差が接近して蓄熱運転を続けても上昇する温度幅はごくわずかであり、蓄熱効率は著しく低下する。このような場合は日中のファン運転は停止させ、消費電量を節約する方が得策であろう。このように、本装置では、地温の推移を見ながら運転管理を行うことがきわめて重要である。その簡易な測定方法として第42図のように、パイプを埋めこみ、それに棒状温度計を吊下げて計測している例があった。

全般に、室内の多湿化に伴う灰色カビ病の発生を問題にするところが多かった。しかし、ほとんど発生を見ない農家もあり、またこの年は慣行の暖房方式を用いている温室においても多発傾向にあり、これが本暖房装置を



第40図 温室位置別温度勾配 (No 4, 5)

使用した場合の特徴的な問題点といえるかどうかは、今回の調査の限りでは判断できなかった。

本装置の構造上また利用にあたっての問題として指摘された点は、まずパイプ内へ水が浸入し、通風を妨げる事例があった。特に、水田地帯に建設された温室では、夏期に浸入した水がそのままパイプ内に残っているように推測された。装置の運転前に吸引式のバキュームで水を抜取る対策をたてたところもあった。

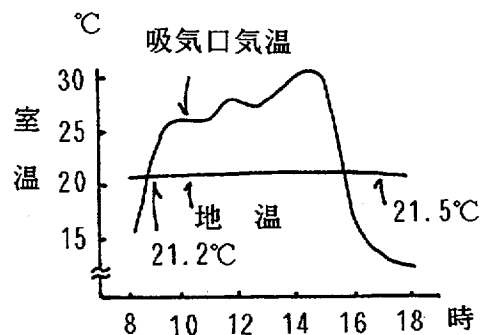
構造上の大きな問題点は、先に述べたようにファン吸入口側と吹出口側とに昼夜逆の温度勾配が生じ、それが長い装置では夜間の温度勾配に沿った生育差となって現われることである。ただし、この現象は吸入口-吹出口の長さが25mを超えた装置で認められ、それ以下の装置では顕著な生育差は観察されなかった。温度勾配に伴う生育差の解消は吸気口部分の温度を上げない限り解決しない難しい課題であるところから、装置の設計にあたってはパイプ長が25mを越えないよう留意すべきであろう。

#### 4 摘 要

神奈川県内における地中熱交換装置の普及状況や利用実態の調査を行い、省石油暖房方式として機能している程度や装置の運転管理上の問題点の把握および今後の改善方向を明らかにしようとした。

1) 神奈川県における導入戸数は、1981年現在40戸施設面積は約5.2万 $\text{m}^2$ であった。栽培作物はトマトが最も多いが、花き類にも広まりをみせていた。

2) 地中熱交換装置は、スパイラル管を用いた特殊事



第41図 高地中温時の温度変化



例もあるが、大部分はプラスチックパイプを使用し、埋設位置・量またファン台数ともこれまでの試験成績に準じて設計されていた。

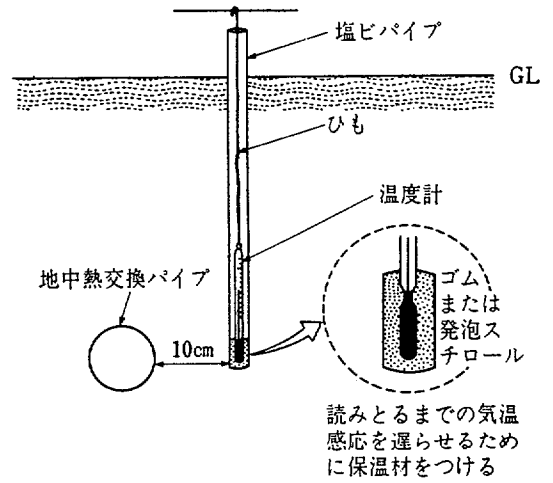
3) 装置の設置経費は、10a 当り160～380万円と農家間で開きが大きかったが、多くは220～280万円の範囲にあった。

4) 調査を実施した年は、外気温低下の著しい日が多かったが、補助暖房作動による重油消費量は10a 換算で0～1,400ℓで、節油率は80～100%となった。

5) トマトの生育状況は、慣行の暖房方式を用いた場合とほとんど変わらない事例が多かった。問題点としては室内の温度勾配に伴う生育差が生じた例があった。

6) 蓄熱量より放熱量がまさる日が続くことによる地温の低下を招いた例がいくつかあり、地温の推移を見ながら運転管理を行うことの重要性を認めた。

7) 灰色カビ病の発生を指摘する農家が多かったが、本装置特有の問題点といえるかは判断できなかった。



第42図 パイプ付近の地中温度の簡単なはかり方

## 第2章 潜熱蓄熱方式による温室暖房

### 潜熱蓄熱方式による温室暖房の原理

地中熱交換暖房は、温室内空気の熱を温室地下の土壤に蓄熱する方式であり、またその後実用化された対向流式水蓄熱方式（商品名、グリーンソーラ）は、水を媒体とした蓄熱方式であり、それぞれ蓄熱体の温度変化を利用することから、顕熱蓄熱方式といえる。

これに対し、潜熱蓄熱方式は化学物質の相変化に伴う熱、すなわち固相から液相へ変化する時の融解熱と液相から固相への変化する時の凝固熱を利用しようとするものである。本方式の最大の特徴は、単位面積当りの蓄熱・放熱可能性が顕熱蓄熱の場合よりもきわめて大きいことにあり、装置を小型化することが可能になる。

潜熱蓄熱による温室暖房の概念図を示すと第43図のとおりで、日中温室内の熱を蓄熱材に与えて固体から液体に変化させ（蓄熱作用）、夜間は蓄熱材が凝固する際の熱を取出して（放熱作用）温室を暖房する。

現在、温室暖房用として開発された潜熱蓄熱材は、次の2種類の無機化合物がある。

- a. 塩化カルシウム6水塩,  $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$
- b. 硫酸ナトリウム10水塩  $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$

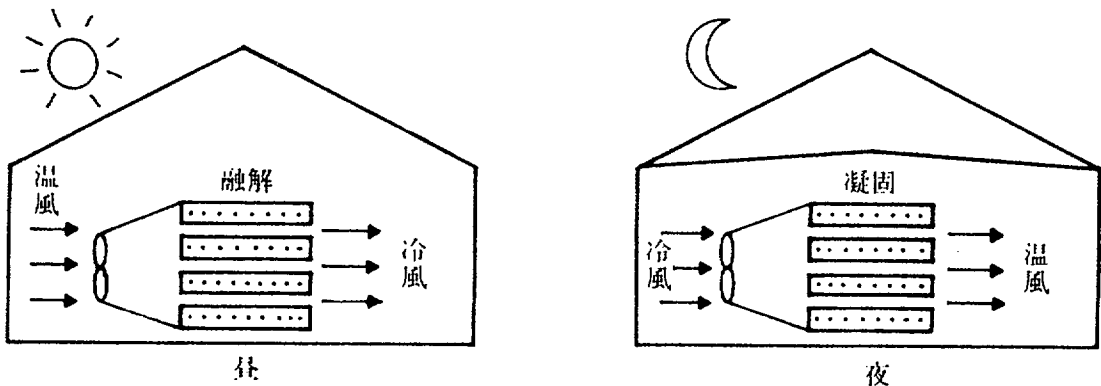
ただし、塩化カルシウム6水塩と硫酸ナトリウム10水塩は、それぞれ29℃と32℃に融点を持ち、このままでは温室暖房用としては高過ぎるので、融点を下げるため他の物質が混合されている。また、安定した融解-凝固を繰返させるために核生成剤やゲル化剤などが加えられている。

### 第1節 試験装置と暖房特性

#### 1 緒言

地中熱交換方式の暖房性能は、内外気温差13~15℃を保持し、また80~100%の石油節減効果を得られことや、長年月にわたる利用が可能であるなどの利点が評価され、1983年には本県では、約50戸、5.2haの普及をみている<sup>(22)</sup>。一方、本方式の欠点としては、温室下土壤を蓄熱体とするため、パイプの埋設に多大な労力を要することや、地下水位の高いところ、また既設の養液栽培温室など立地条件と温室内部の形態によっては施工困難なことがあげられる。

このため、太陽熱利用暖房の適用範囲を広げるためには、装置を地上部に設置でき、蓄熱槽はできるだけ小型化した新たな太陽熱利用型の暖房方式の実用化が望まれる。その対象として、高倉ら<sup>(82)</sup>が小型温室を用いて実験を進め、一定の暖房効果を認めている潜熱蓄熱方式が有望と想定される。高倉らの実験開始当初は温室内気温で融解可能な蓄熱材はなかったが、その後いくつかのメーカーの開発・改良により蓄熱材の融点温度は20℃付近にまで下がり、実用化への可能性は高まりつつある。本試験は、温室暖房を目的に製造された硫酸ナトリウムを主成分とする蓄熱材を使用し、暖房性能、蓄熱材の熱特性および温室内の気象特性とトマトの生育について調査を行った。



第43図 潜熱蓄熱暖房の原理

## 2 材料および方法

### 1) 供試蓄熱材および蓄熱装置の構造

供試蓄熱材は、松下技研KK製の硫酸ナトリウム10水塩 ( $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ) - 炭酸ナトリウム10水塩 ( $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ) - 塩化ナトリウム ( $\text{NaCl}$ ) の3元共融混合物を主成分とし、これにゲル化剤 (架橋型ポリアクリル酸Na塩) と過冷却防止剤が混合されたものである。比重は  $1.4 \text{ g/cm}^3$  であり、融解潜熱は  $40 \text{ cal/g}$  ( $56 \text{ cal/cm}^3$ ) である。蓄熱材はアルミラミネートポリフィルムに封入されており、その容器の大きさと形状を第44図に示した。

蓄熱槽の構造は第45~46図のとおりで、容器を2枚横に並べて1段とし、空気流路として1.7cmの間隔をあけ、4列、25段に積重ね、外側をベニヤ板で覆った。熱交換ファンは200V、400Wの有圧ファンを装置の一端に取付け、その反対側に吸入口を設けた。この蓄熱槽を温室北側に2基設置した。蓄熱材の総重量は2,500kgである。蓄熱材の量は、一夜の暖房必要熱量を  $10 \text{ 万 kcal} / 330 \text{ m}^2$  として求めた。

第26表 暖房設定温度

時 間	設定温度
17.00 ~ 20.00	12°C
20.00 ~ 23.00	11
23.00 ~ 5.00	8
5.00 ~ 8.00	10

### 2) 運転方法および温度管理

日中の蓄熱開始温度は、蓄熱材の融点に合わせて22°Cとした。暖房設定温度は第26表に示したような変夜温管理法とし、前夜半二段階は日射比例制御とした。なお、運転開始後装置の性能から判断して、1月14日以降早朝の10°Cは8°Cに変更した。日中は室温28°Cで天窓換気を行い、これらの温度制御にはマイコンを用いた。

補助暖房機は使用しなかった。

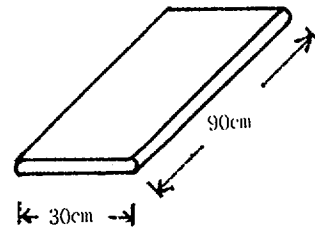
### 3) 供試温室および作物

供試温室は床面積352m<sup>2</sup>、保温比0.63のフェンロー型ガラス室で、保温カーテンは天井部を二層被覆 (塩ビ+不織布)、側壁部は一層被覆 (塩ビ) とした。

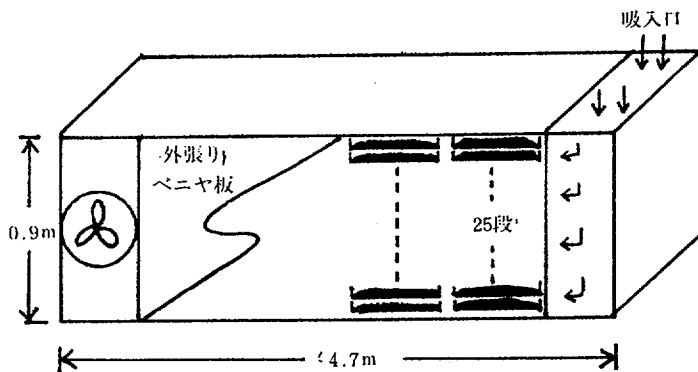
供試作物はトマト (品種 '瑞秀' 他) を用い、9月16日に播種し、11月22日に定植した。

### 4) 温度、湿度、日射量の測定および蓄熱、放熱量の算出

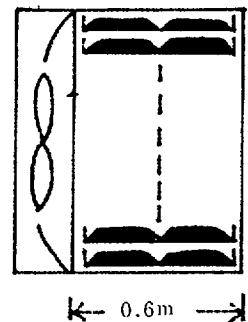
温度の測定は、室内中央部、蓄熱槽吸入口、同吹出し口、蓄熱材3点 (吸入口付近、槽中央部、吹出し口付近) および外気温について行った。これらの温度測定にはC-



第44図 蓄熱材封入容器の構造



第45図 蓄熱槽の構造 (正面図)



第46図 蓄熱槽の構造 (側面図)

C熱伝対を使用した。

相対湿度は室内中央部において、露点計により測定した露点温度と室内気温から求めた。日射量は屋外の全天日射についてネオ日射計により測定した。蓄熱量および放熱量は、風量、空気比熱、蓄熱槽吸入口と吹出し口の温度差および運転時間との積から顕熱交換量について求めた。

### 3 結 果

#### 1) 循環風量

蓄熱槽吹出し口の風速をアネモマスターにより計測し、循環風量をもとめたところ $150\text{m}^3/\text{min}$  ( $75\text{m}^3/\text{min}/\text{台}$ )であった。

#### 2) 暖房性能・温度特性

第27表に室内外の時間帯別最低気温および内外気温差をカーテンの被覆条件別に示した。この表には示さなかったが前夜半の時間帯(17~23時)は、カーテンの被覆条件の違いにかかわらず暖房設定温度を確実に保持し、設定値以下になることはなかった。8℃設定時間帯(23~5時)においては、カーテン二層被覆ではもとより、一層被覆条件においても設定値はほぼ維持でき、それ以下

下となったのは期間中2日間だけで、しかも $0.5^\circ\text{C}$ 下回った程度であり、本装置は高い暖房性能を示した。

しかし、早朝の $10^\circ\text{C}$ 設定時間帯(5~8時)では、カーテン二層被覆でも外気温が早い時間から低下して放熱量が増大すると、設定値の保持が困難になり、それより $0.5\sim 4.5^\circ\text{C}$ 下回り、一層被覆では最低室温 $4.5^\circ\text{C}$ を記録した(1月3~4日)。このため、1月14日以降この時間帯の設定温度を $10^\circ\text{C}$ から $8^\circ\text{C}$ に変更した。その結果、前日蓄熱不足であった1日(1月22~23日)を除き、カーテン一層被覆でも設定値を保持できるようになった。内外気温差はカーテン二層被覆では最大 $15^\circ\text{C}$ 、一層被覆では $13^\circ\text{C}$ であった。

第47図は晴天日における温室内外各位置の温度経時変化を示した例である。朝方9時~9時30分に強制的に天窓換気したので、ファンは10時頃から蓄熱運転を開始し、15~16時に停止した。ファンの作動時間は1~2月で最大約6時間であった。ファンの作動開始当初、前日の放熱により蓄熱材温度が低下している場合、蓄熱槽吸入口と吹出し口との温度差は約 $10^\circ\text{C}$ となるが、蓄熱材の温度上昇とともにその差は次第に接近していき、ファン停止時には $1^\circ\text{C}$ 以内となった。蓄熱運転時、室温と蓄熱材融点との温度差は最大 $6\sim 7^\circ\text{C}$ を確保でき、蓄熱材温度も

第27表 時間帯別最低外気温、室温および内外気温差

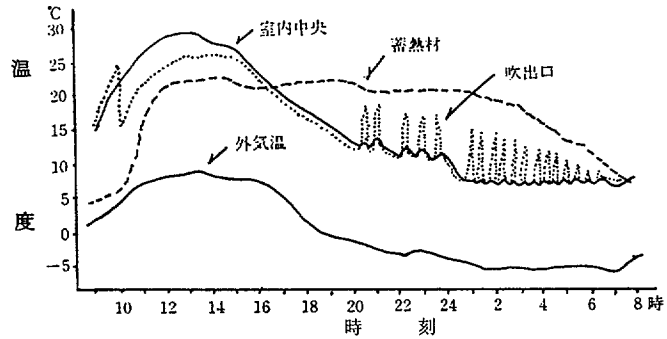
カー テン 被 覆	月 日	23~5時	同 左	同 左	同 左	5~8時	同 左	同 左	同 左
		最 低 外 気 温	設 室 定 温	設 室 定 温	設 室 定 温	最 低 外 気 温	設 室 定 温	設 室 定 温	設 室 定 温
	月 日	$^\circ\text{C}$	$^\circ\text{C}$	$^\circ\text{C}$	$^\circ\text{C}$	$^\circ\text{C}$	$^\circ\text{C}$	$^\circ\text{C}$	$^\circ\text{C}$
二 層	1. 10~11	-6.0	8.0	8.5	14.5	-6.5	10.0	7.5	14.0
	11~12	-4.5	〃	8.5	13.0	-4.6	〃	8.5	13.1
	14~15	-4.0	〃	8.5	12.5	-4.5	〃	9.5	14.0
	21~22	-3.5	〃	8.5	12.0	-5.5	8.0	8.5	14.0
	22~23	-7.7	〃	7.5	15.2	-8.5	〃	4.5	13.0
	23~24	-5.3	〃	8.5	13.8	-5.5	〃	7.5	13.0
	24~25	-4.5	〃	8.5	13.0	-4.6	〃	8.5	13.1
一 層	1. 3~4	-4.2	8.0	7.5	11.7	-5.2	10.0	4.5	11.7
	4~5	-1.3	〃	8.5	9.8	0.2	〃	10.0	9.8
	16~17	-3.5	〃	8.5	12.0	-4.0	8.0	8.5	12.5
	26~27	-3.0	〃	8.5	11.5	-3.5	〃	9.0	12.5
	28~29	-2.5	〃	8.5	11.0	-3.0	〃	8.5	11.5
	2. 5~6	-2.5	〃	9.0	11.5	-3.0	〃	8.5	11.5
	10~11	-4.0	〃	9.0	13.0	-3.5	〃	9.5	13.0
13~14	-6.0	〃	9.0	15.0	-5.5	〃	8.0	13.5	

吸入口付近では23~24℃まで上昇した。

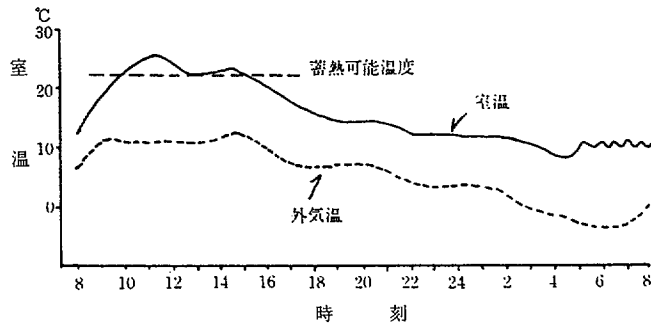
夜間は、室温が暖房設定温度まで降下すると、ファンはON-OFF 運転を繰り返し、早朝1~3時間は連続運転となることが多かった。蓄熱装置から得られる温風温度は蓄熱材より3~4℃低く、前夜半は16~20℃、後夜半は10~16℃であった。吸入口と吹出し口との温度差は5~9℃あり、熱交換の効率が高いと判断された。蓄熱材の温度は放熱に伴って次第に低下するが、その降下速度は前半は緩慢であるが、朝方には急速に低下した。この朝方の急速な低下は、潜熱放出後の顕熱変化によるものと思われる。

第28表は蓄熱および放熱過程における温室内外気温と蓄熱材の位置別温度を示した例である。運転開始1時間後の11時には、蓄熱装置吸入口付近の蓄熱材温度は融点に近い20℃にまで上昇しているが、吹出し口付近では17℃であり、その差は3℃であった。また、停止直前の14時においても吸入口付近の蓄熱材温度は融点を超えているが、吹出し口付近では融点温度にとどまっておらず、このことから吸入口から離れるに従い、蓄熱材の融解程度は低下していると思われる。夜間の放熱時においても吹出し口付近の蓄熱材の温度降下が早く、日中の融解の不完全さ、即ち蓄熱不足が示されている。

曇雨天日のような低日射日は蓄熱不足が懸念されるが、第48図に示したように、このような日は夜間の放射冷却現象がなく、外気温があまり低下しないので暖房負荷が小さくなり、それまでの蓄熱量により二層カーテン被覆ではもとより、一層被覆においてもほとんどの日で設定値は保持できた。しかし、第27表の1月22~23日の例のように、日中曇天であっても夜間晴れて外気温が著しく低下する場合があります。このような時は放熱量が不足して、設定値を保持できなかつた。このような日は期間



第47図 温室内各位置の温度経時変化



第48図 低日射日における室温、外気温経時変化

第28表 蓄熱および放熱過程における温度状態

位 置	1月24日		1月25日	
	11時	14時	2時	6時
外 気 温	7.3	12.5	-3.5	-4.7
室 内 中 央	26.0	28.0	8.0	8.0
槽 入 口 (A)	25.5	27.0	7.0	7.0
*蓄 熱 材 ①	20.0	23.3	20.8	17.0
〃 ②	19.0	22.5	20.5	17.0
〃 ③	17.0	22.1	19.4	15.1
槽 出 口 (B)	19.5	22.5	16.0	13.5
(A) - (B)	6.0	4.5	9.0	6.5

\* ①:槽吸入口付近 ②:中央部 ③:槽吹出口付近

中2日間認められた。

3) 蓄熱量および放熱量

1～2月における1日の蓄熱量および放熱量を第29表に示した。この場合の蓄・放熱量は蓄熱材の潜熱と顕熱交換量を明確に区分できなく、両者の合計量となる。また、熱交換の際、蓄熱材容器表面に凝縮あるいは蒸発する水分については高精度に測定できなかったため、その潜熱交換量は明らかではなかった。本装置の蓄熱可能量は10万 kcal であるが、実際に蓄熱できた量は最大6～7万 kcal で、可能量の60～70%であり、装置の性能を十分発揮しているとはいえなかった。放熱量も同様に5～7万 kcal であった。放熱量が前日に蓄熱量より多い場合があるが、これはその日以前の蓄熱量が持越されたことを示している。

4) 室内相対湿度

第49図に晴天日における室内の相対湿度の推移を示した。この日は午後15時程度天窓が開いただけであったので日中の相対湿度は80～85%と高く、また夜間は90～100%の範囲にあった。早朝および夕方は室内に‘もや’の発生を認めることが多かった。

5) 日射量と蓄熱量

屋外の全天日射量と蓄熱量の関係を第50図に示した。日射量が200 cal/cm<sup>2</sup>・day までは蓄熱量はほぼ比例的に増大したが、日射量がそれ以上に増加しても換気量が多くなるため、蓄熱量の増大は伴わなかった。

6) トマトの生育・収量

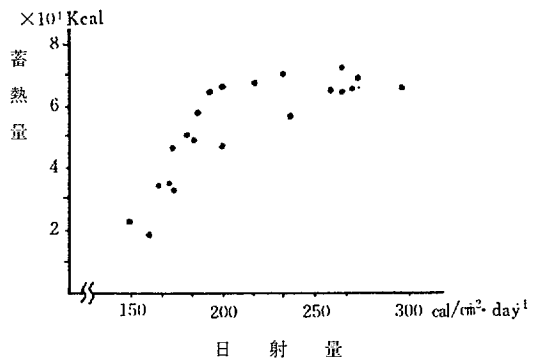
生育初期から中期にかけてトマトは順調な生育状態を示した。しかし、装置のダクトから吹出される風が当たる株は葉先が枯れ上がる症状を呈し、ダクト配置に工夫が必要と考えられた。トマトの収量は第51図に示したように、第6果房までで株当たり4～4.5kgであった。やや、低収であったのは生育後期に土壌病害（根腐れ萎凋病）が発生したためである。

4 考 察

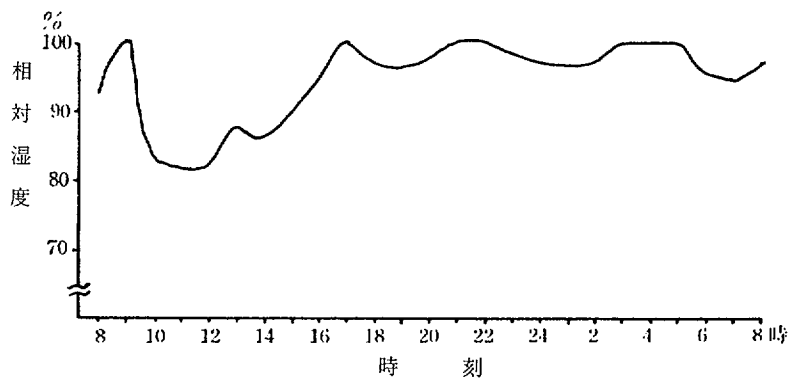
本方式において、夜間の暖房熱量を得るためには、日中蓄熱材を十分融解させておくことが前提であり、その融解程度すなわち蓄熱量によって放熱量が決

第29表 蓄熱量および放熱量

月 日	A		B		B/A
	蓄熱量	対蓄熱可能量比	放熱量	対蓄熱可能量比	
	×10 <sup>3</sup> kcal	%	×10 <sup>3</sup> kcal	%	
1. 20～21	25.50	25.5	29.16	29.2	1.14
23～24	66.40	66.4	47.35	47.4	0.71
24～25	65.52	65.5	43.82	43.8	0.67
26～27	58.57	58.6	43.20	43.2	0.74
2. 10～11	46.75	46.8	58.32	58.3	1.24
13～14	69.17	69.2	68.85	68.9	1.00
14～15	66.98	67.0	42.12	42.1	0.63
15～16	49.23	49.2	32.40	32.4	0.66
19～20	65.02	65.0	58.59	58.6	0.90
20～21	64.46	64.5	66.75	66.8	1.04
21～22	69.50	69.5	63.45	63.5	0.91



第50図 日射量と蓄熱量



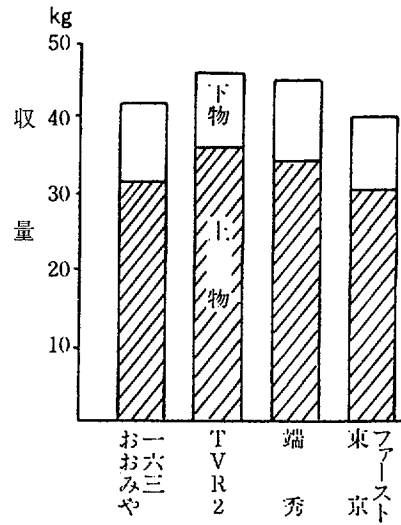
第49図 相対湿度変化 (1月23～24日)

まる。蓄熱材の融解を促進させるためには、日中高温を与えればよいわけであるが、内部集熱方式の場合、その管理温度は作物の側から制限される。このため、蓄熱材の融解量を高めるためには、蓄熱材の融点、蓄熱材封入容器の形状、蓄熱材の装置内へ収納方法および熱交換方法が重要なポイントとなる。本試験の前に実施した予備試験の成績<sup>(73)</sup>では、融点27℃の塩化カルシウムを主成分とし、これを径10cmの円筒状容器に封入した蓄熱材を用いたところ温室空気ではほとんど融解せず、目的とした暖房効果は得られなかった。同様なことは千葉農試<sup>(79)</sup>においても報告されている。

これに対し、本試験に供試した蓄熱材は融点が22℃で、封入容器は薄い(1.8cm)平板状であり、また蓄熱装置は内部に均一な空気を通る構造としたことが蓄熱材の融解量を高めたといえる。日中蓄熱材の融解を促進できたことにより、暖房性能としては、前夜半の11~12℃設定時間帯(17~23時)および後夜半の8℃設定時間帯(23~5時)では各設定温度をほぼ確実に保つことができた。しかし、設定温度が10℃の早朝時間帯(5~8時)では外気温の低下が著しい場合、放熱量が増大すると設定値の保持が困難となり、0.5~5.5℃の温度不足を認めた。このため、試験途中から(1月14日)この時間帯の設定温度を8℃に変更して対応した結果、設定値を維持できるようになった。内外気温差はカーテン二層被覆で最大15℃、一層被覆で13℃となり、この値は地中熱交換方式に相当した。

曇雨天日は蓄熱不足が問題と考えられるが、通常そのような日は、外気温はあまり低下せず暖房負荷は小さくなるので、カーテン一層被覆でもほとんどの日で設定値を保持できた。しかし、日中曇雨天であっても夜間晴れて外気温が著しく低下した例があり、このような日は明らかに暖房熱量が不足した。地中熱交換方式の場合では、日中の蓄熱が無くともそれまでの蓄熱により地温が一定値に保たれているなら暖房能力を発揮したが、本方式では蓄熱量は限定されており、蓄熱-放熱のサイクルは短日数で繰返されるため、地中熱交換方式以上に気象変動の影響を受けやすかった。太陽熱利用暖房においては常にこのような気象条件を想定しなければならず、実用化にあたっては必ず補助暖房を備え、安全を期す必要がある。

本方式によりほぼ目的に近い暖房効果を得たものの、蓄熱装置で集熱された蓄熱量は最大でその能力の約70%であり、装置に改善の余地があった。蓄熱材の温度を蓄熱槽内の位置別に調査した結果では、装置の吸入口から



第51図 トマトの収量 (10株当り)

離れるに従い、日中の温度上昇が遅れ、特に吹出し口付近では融点以上には上昇せず、また放熱時はこの部分の温度降下が早いことを認めた。蓄熱材の融解は吸入口付近が最も進み、吹出し口に向かって次第に不十分となる勾配が生じていたと推定され、装置の性能を十分発揮したとはいえなかった。このことは、設定温度を保持した日においても、蓄熱材温度は朝方には室温とほぼ同一にまで低下し、余剰熱量がほとんどなかった場合が多かったことから推測される。

装置を改善するために必要は検討内容は、一基の蓄熱槽に収納する蓄熱材の量、蓄熱材の配置の仕方、通風方法などが考えられ、また蓄熱材の融点をさらに1~2℃下げて融解を容易にすることも重要であろう。

室内の相対湿度は、晴天日で日中80~85%、夜間は95~100%となり、地中熱交換温室同様やや多湿な状態で推移した。日中の蓄熱に伴う冷房作用により、換気回数が減少することや、日中蓄熱材表面に凝縮した水分が夜間蒸発して室内に放出されることが考えられる。

日射量が200 cal/cm<sup>2</sup>・dayまで増大すると、蓄熱量もそれと比例して増加した。しかし、日射量がそれ以上に増しても、換気量が多くなるため蓄熱量の増加は認められなかった。特に、本温室は換気時に外気が装置内に吸収されて蓄熱効果を著しく低下させ、蓄熱量の増加を阻害する大きな要因となった。この外気の吸入を抑制すれば、日射量と蓄熱量の比例関係をさらに高い値まで引き

上げることが可能であろう。堀口<sup>(9)</sup>も小型装置の実験で、時期により日射量と蓄熱量との相関が異なることを明らかにしている。

トマトの生育は、初期化ら中期までは順調であった。しかし、ダクトから吹き出される風が当たる株の葉先が枯れ上がる症状を呈し、ダクトをいくつかに分散させて風速を弱めるなどの対策が必要であった。生育後期に土壤病害(根腐萎凋病)が発生し、収量は1株中り4~4.5kgでやや低収であった。

## 5 摘 要

硫酸ナトリウム10水塩-炭酸ナトリウム10水塩-塩化ナトリウムの3元共融混合物を主剤とし、融点が22℃の蓄熱材を収納した装置をガラス室内に設置して、暖房性能、室内の気象特性およびトマトの生育反応について調査した。

1) 蓄熱材はアルミラミネートポリフィルム内に封入されており、1個の重量は6.2kgである。これを、0.9m×0.6m×4.7mの容積をもつボックス内に計200個収納し、200V、400Wの有圧ファンを一基取付けて蓄熱槽とした。この蓄熱槽を床面積352m<sup>2</sup>のフェンロー型ガラス室に2基設置した。蓄熱材の総重量は2,500kg、蓄熱可能量は10万kcalである。

2) 暖房設定温度が11~12℃の時間帯(17~23時)および8℃(23~5時)は、設定値をほぼ維持し、それを下回っても0.5℃程度であった。10℃の時間帯(5~8時)は設定温度の保持が困難な日が多く、途中設定温度を8℃に変更し、その結果設定値の保持が可能になった。

3) 内外気温差はカーテン二層被覆で最大15℃、一層被覆では13℃であった。

4) 蓄熱槽内の吸入口~中央部の蓄熱材の融解量は高いが、吹出し口部分は不十分であると推測された。

5) 蓄熱量は最大6~7×10kcalで、装置の能力の60~70%であった。放熱量は最大5~7×10kcalであった。

6) 室内の相対湿度は、晴天日には日中80~85%、夜間95~100%の範囲で推移した。

7) 日射量が200cal/m<sup>2</sup>・dayまでは、蓄熱量は比例的に増大したが、日射量がそれ以上に増大しても換気量が増すため蓄熱量の増加は伴わなかった。

8) 吹出し口からの風が当たるトマトの葉先が枯れ上がる症状を呈し、ダクト配置に注意が必要であった。

## 第2節 改良蓄熱装置と暖房特性

### 1 緒 言

前節では、硫酸ナトリウム10水塩を主成分とする融点22℃の蓄熱材を平板状の容器に封入し、これを多段に積み重ねて循環ファンを取付けた装置を蓄熱槽とし、トマトを栽培したガラス温室内で暖房性能の検討を行った。その結果、外気温が-3~-5℃までの低下であれば、室温を8~10℃に保持でき、内外気温差13~15℃を示す暖房効果を認めた。しかし、蓄熱装置内の位置によって蓄熱材の融解程度に差が生じたこと、また蓄熱量は装置の可能容量に対し、最大で70%にとどまったことから、蓄熱材、蓄熱装置ともさらに改良が必要であった。

本試験では、融解を容易にするため融点、凝固点を前試験の場合よりも下げた新たな蓄熱材を用い、また蓄熱装置は融解の均一化をはかるため1基当りの容量を少量化し、蓄熱材の収納法も吊り下げ方式にして簡易化した改良装置を供試し、暖房性能の検討を行った。

### 2 材料及び方法

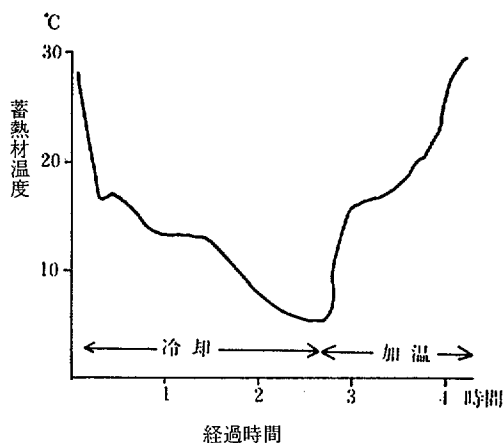
#### 1) 供試蓄熱材及び蓄熱装置

本試験に用いた蓄熱材は、竹田ら<sup>(83)</sup>により改良された資材で、主成分は硫酸ナトリウムと尿素の混合物であり、これに過冷却防止剤や増粘剤が添加されている。蓄熱材の融点は、16℃と21℃、凝固点は18℃と13℃のそれぞれ異なる2点にある。竹田ら<sup>(83)</sup>による通風試験から測定された蓄熱材の融解~凝固過程の温度変化を第52図に、蓄熱材温度と融解量の関係を第53図に示した。蓄熱材の封入容器はアルミラミネートポリエチレンフィルムで、その形状は第54図のとおりであり、容器の1個重は7.5kgである。蓄熱装置の構造は第55図に示したように、蓄熱材容器を一面20列にして、三面に計60個を風の流れと平行に吊り下げ、空気流入口の反対側に200V、200Wの送風ファン(定格風量63m<sup>3</sup>/min)を1台取り付けた。蓄熱装置1基当りの蓄熱材総重量は450kgであり、これを計4基(総重量1,800kg)を温室内北側に設置した。本装置の最大蓄熱可能容量は85,000kcalである。

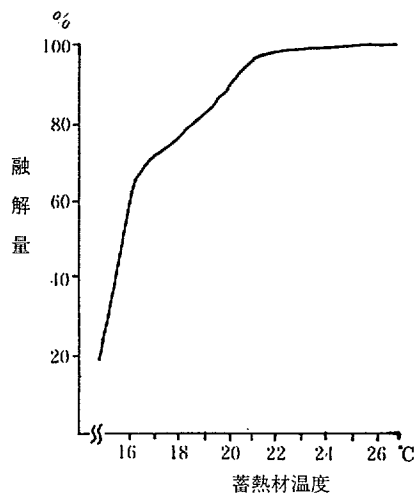
#### 2) 供試温室及び作物

供試施設は前節と同一の床面積352m<sup>2</sup>、保温比0.63のフェンロー型ガラス室を用い、内部保温カーテンは天井部二層(塩ビ+不織布)、側壁部二層(塩ビ二層)被覆とした。





第52図 融解～凝固過程における蓄熱材温度変化



第53図 蓄熱材温度と融解量

供試作物はトマトで、品種‘瑞秀’および‘瑞健’を9月20日に播種し、11月16日に温室内に定植した。

3) 運転方法及び温度管理法

日中の蓄熱開始設定温度は20℃とした。ただし、15～17時は室内気温が蓄熱材温度より低いにもかかわらずファンが運転される場合があったので、この時間帯は運転を停止させた。日中は26℃の設定で天窓換気を行った。夜間の暖房設定温度は、12℃(17～21時)～11℃(21～23時)～8℃(23～8時)の変夜温管理法とした。補助暖房に温風暖房機を備え、室温が7℃以下になった時作動させた。

4) 温度・湿度・炭酸ガス濃度の調査及び蓄熱・放熱量の算出、節油率の推定方法

温度の測定は、室内中央部、蓄熱装置吸入口、吹出し口、蓄熱材の材温3点(吸入口付近、槽中央部、吹出し口付近)及び外気温について行った。これらの温度測定にはC-C熱電対を用いた。

相対湿度は、室内中央部において通風式自記温湿度計によって測定した。

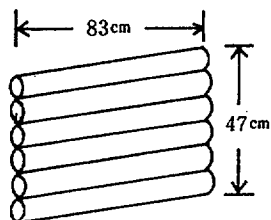
炭酸ガス濃度は、湿度と同一位置において赤外線ガス分析法により測定した。

蓄熱・放熱量は、第53図の蓄熱材温度と融解量との関係をもとに、蓄熱(放熱)運転開始前及び運転終了後の蓄熱材の温度差から算出した。

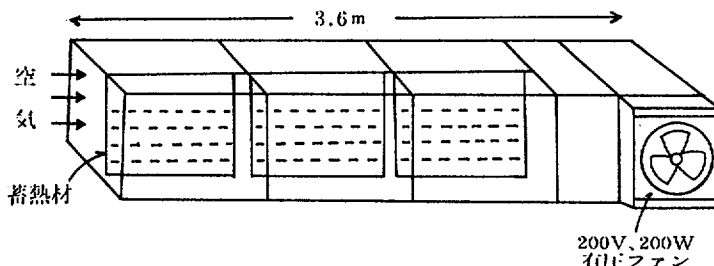
節油率は、数日間温風暖房機だけを運転して、日暖房デグリアワーと重油消費量をあらかじめ求めておき、実際本装置運転した日の暖房デグリアワーとの比較から、温風暖房機だけを使用したと仮定した場合の重油量を算出し、これと実際の重油消費量との比から推定した。

3 結 果

1) 循環風量



第54図 蓄熱材容器の形状



第55図 蓄熱槽の構造

第30表 暖房性能, 補助暖房稼働時間, 節油率

月 日	23~5時 最低気温 °C	同室 左温 °C	5~8時 最低気温 °C	同室左 室温 °C	内外 气温差 °C	補助暖房 稼働時間 時間	重油 消費量 l	必要 重油量 l	節油 率 %
12. 26—27	-5.2	6.8	-6.1	*	12.0	4.0	8.1	32.0	75
28—29	-4.0	7.5	-4.5	*	11.5	3.0	7.1	20.4	65
31—1.1	-3.5	7.6	-4.3	*	11.1	4.6	10.5	24.3	57
1. 1—2	-3.0	8.0	-3.1	7.0	11.5	0	0	9.6	100
2—3	-2.1	8.0	-3.5	7.0	10.5	0	0	10.1	100
4—5	-4.0	7.2	-5.3	*	11.2	5.0	13.5	24.7	47
6—7	-4.0	7.4	-4.5	*	11.4	2.7	6.6	23.6	72
8—9	-4.0	7.5	-4.7	*	11.5	2.7	6.8	19.8	66
9—10	-3.0	7.5	-3.9	*	10.5	2.0	4.9	20.6	76
2. 1—2	-1.2	8.0	-1.7	8.0	10.4	0	0	4.7	100
2—3	-1.8	8.0	-2.4	8.0	10.4	0	0	3.5	100
7—8	-4.5	7.0	-8.0	*	11.5	7.2	15.5	31.5	51
8—9	-5.3	7.3	-7.0	*	12.6	4.2	7.2	27.2	75
9—10	-5.5	7.3	-6.5	*	12.8	4.5	9.5	27.0	65
10—11	-4.0	8.0	-4.6	*	12.0	1.5	2.6	20.7	87

\* 補助暖房稼働

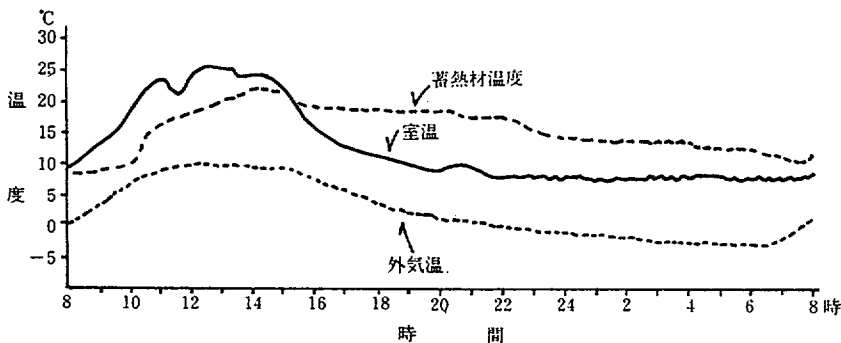
ファン吹出し口の風速をアネモマスターで計測し、循環風量を求めたところ、 $192\text{m}^3/\text{min}$  ( $48\text{m}^3/\text{min} \times 4$ )であった。

## 2) 暖房性能・温度特性

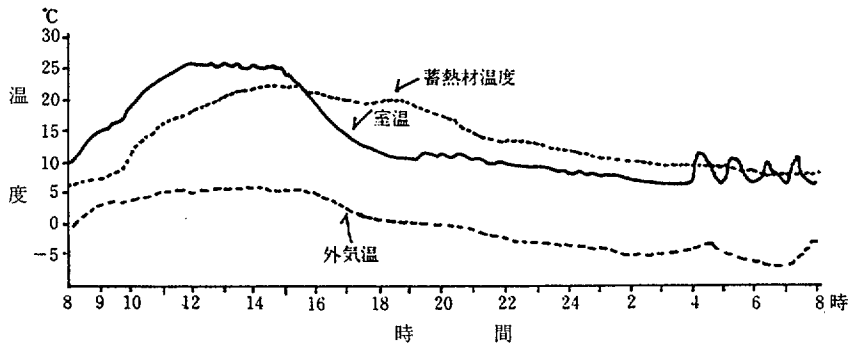
暖房設定温度を $8^\circ\text{C}$ とした後夜半(23~8時)の時間帯における最低外気温、室内気温、内外気温差、重油消費量及び節油率を第30表に示した。この年は、例年に比べて外気温の低下が著しく、しかも夜間の早い時間帯から低下した。このような気象条件下での装置の暖房性能をみると、前夜半(17~21時, 21~23時)は本表に示さ

なかったが、設定温度( $12\sim 11^\circ\text{C}$ )は確実に保持でき、それ以下になることはなかった。23~5時の時間帯では、大部分の日で設定温度を保持しており、それ以下となっても $0.5\sim 1.2^\circ\text{C}$ 程度であった。しかし、5~8時の時間帯では、外気温が $0^\circ\text{C}$ 以下に低下した場合は設定温度を保った日は少なく、ほとんどの日で補助暖房が稼働した。この年の本装置が示した内外気温差は $10\sim 13^\circ\text{C}$ であった。

補助暖房の稼働時間は3~4時間の日が多く、最大は最低極温( $-8^\circ\text{C}$ )を記録した日(2月7~8日)の7



第56図 各位置の温度経時変化(1月1~2日)



第57図 各位置の温度経時変化 (2月8～9日)

時間であった。補助暖房稼働による重油消費量は1日当たり平均8ℓ，最大15.5ℓであった。

蓄熱装置が示した節油率は平均約75%であり，最大では100%，最少では47%と推定された。

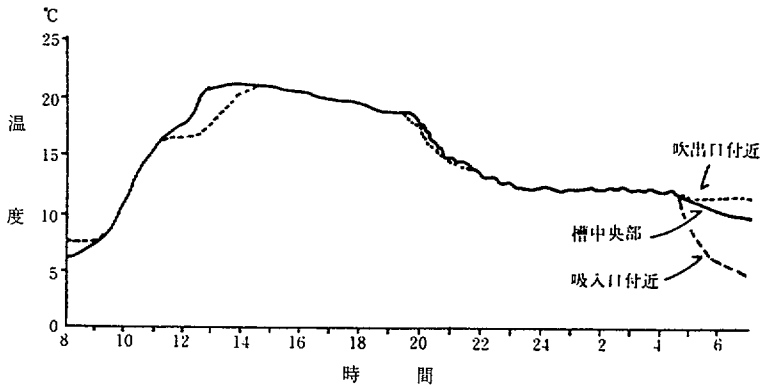
第56～57図に，晴天日における外気温・室内中央部気温及び蓄熱材温度（装置中央部）の経時変化の例を示した。9時～9時30分の間は室温20℃以上の場合，除湿のため強制換気をしたので，ファンは10時頃から蓄熱運転を開始し，15時に停止した。蓄熱運転開始後約30分で蓄熱材は，低温部の融点温度（16℃）に到達し，その後約2時間で高温部の融点（21℃）に達した。夜間は，室温が暖房設定温度まで低下すると，放熱のためON-

第31表 低日照日における運転状況

月 日	蓄熱時間	蓄熱材温度	蓄熱材高度	放熱時間	補助暖房時間	屋外最低気温
	時間	℃	℃	時間	時間	℃
1. 3—4	2.7	16.5		5.0	0	-1.0
12—13	2.0	19.0		5.0	4.0	-4.5
16—17	0	17.0		6.5	1.5	-5.0
20—21	2.6	16.5		4.8	8.5	-2.0
21—22	0	14.5		7.6	0	2.0
25—26	2.4	15.5		5.4	6.6	-4.0
2. 12—13	0.5	17.0		10.0	0	0.5
13—14	0	14.5		3.6	0	0
15—16	0	14.5		6.4	5.0	-4.0

第32表 最高室温，蓄熱運転時間，蓄熱材温度，蓄熱量，放熱量

月 日	最高室温	蓄熱運転	蓄熱材温度		蓄熱量	設計値比	放熱量	設計値比
			最高	最低				
	℃	時間	℃	℃	×10 <sup>9</sup> kcal	%	×10 <sup>9</sup> kcal	%
1. 1—2	25.0	5.6	22.3	7.1	83.6	98	75.5	89
2—3	25.0	5.9	22.4	9.5	76.0	89	62.0	73
4—5	25.6	4.2	21.6	6.8	74.1	87	81.4	96
5—6	25.5	4.2	21.9	7.2	77.8	92	77.6	91
6—7	24.0	5.6	21.8	6.5	83.1	98	82.6	97
7—8	25.3	5.4	22.3	13.4	83.7	98	55.6	65
8—9	24.6	5.4	22.5	6.9	56.2	66	84.3	99
9—10	25.5	5.2	22.5	6.9	83.9	99	83.2	98
26—27	26.5	4.2	22.5	6.6	82.1	97	82.4	97
27—28	26.5	5.1	22.8	7.1	85.7	101	82.7	97
28—29	26.5	4.2	23.0	6.2	82.8	97	86.0	101
2. 7—8	26.0	4.5	22.8	5.1	28.1	33	86.5	102
8—9	26.5	5.2	23.0	5.9	86.7	102	86.1	101
9—10	26.5	5.0	22.6	5.5	86.1	101	86.6	102
10—11	26.5	5.3	22.6	11.0	86.2	101	85.0	100



第58図 蓄熱材の位置別温度変化 (1月24~25日)

OFF 運転をくり返し、3時以降になると連続運転になることが多かった。

低日照日で蓄熱運転が行われないか、ごく短時間の場合における本装置と補助暖房の運転状況の関係を第31表に示した。蓄熱運転がないか、短時間の場合でも、その当日までの蓄熱により蓄熱材温度が14℃以上に保持されているなら、本蓄熱装置により相当長時間設定温度を維持できた。また、曇雨天日は夜間の外気温が比較的高く推移し、暖房負荷は小さくなるので、補助暖房が稼働することはほとんどなかった。

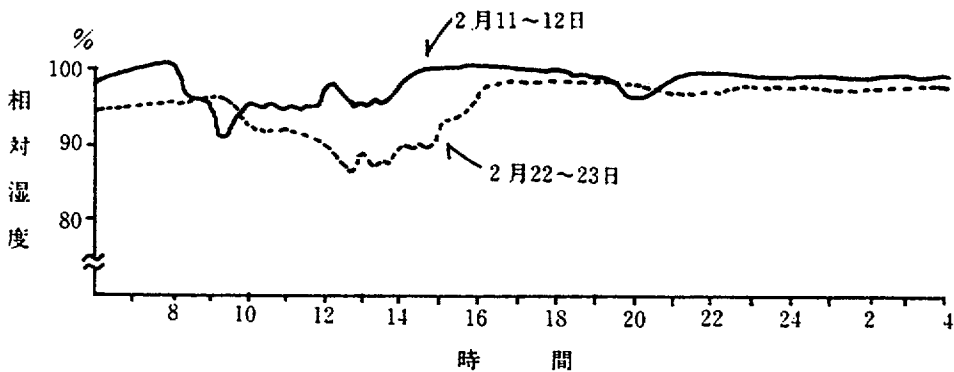
3) 蓄熱材の熱特性

第32表に晴天日における日中の最高室温、蓄熱運転時間、蓄熱材最高・最低温度および蓄熱量、放熱量について

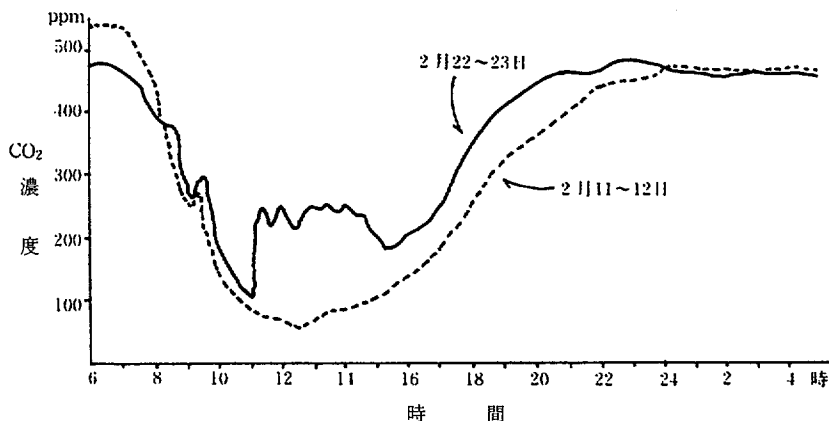
示した。なお、蓄熱材最高温度は蓄熱運転終了後、最低温度は放熱運転終了後の測定値である。この年は、夜間の気温低下が著しいだけでなく、日中の気温も低く推移したため、1月中旬頃までは室内気温が換気温度の26℃に達する日はほとんどなかったが、蓄熱運転時間は晴天日で4~5.5時間を確保でき、蓄熱材の最高温度は21℃を超えた。

蓄熱運転前後の蓄熱材上昇温度から求めた蓄熱量は、晴天日では7万kcalを超え、最大値は8.6万kcalとなり、蓄熱可能容量の100%に達した。また、放熱量も最大8.6万kcalで、これも可能容量の100%の値を示し、本蓄熱槽の持つ性能を最大に発揮させることができた。

第58図は、蓄熱槽内各位置における蓄熱材温度の経時



第59図 相対湿度変化



第60図 CO<sub>2</sub> 濃度変化

変化を示した例である。吸入口、装置中央部、吹出し口付近の蓄熱材とも低温部の融点に到達するまでは、ほとんど温度差がなく、均一に融解しているが、次の融点に達するまでは吹出し口の蓄熱材では、温度上昇がやや遅れ、吸入口付近のそれに比べ、最大3℃の温度差が生じた。しかし、融点まで上昇した後は全く温度差は生じなかった。放熱時は、後半吸入口付近の蓄熱材温度の降下がやや早い。大部分の時間帯は位置による差はきわめて小さい。このように、本蓄熱槽はほぼ均一な融解・凝固していると判断された。

4) 室内の相対湿度

第59図に晴天日における天窓が閉鎖されたままの状態(2月11~12日)及び午後度々開放された場合(2月22~23日)の相対湿度の経時変化を例示した。天窓が閉鎖されたままの状態では、日中の相対湿度は常に90%以上の値で推移し、また天窓が開いてもその時間が短かったため85%以下に低下することはなかった。夜間はいずれも95~100%の状態を保ち、朝夕は室内に‘もや’の発生が観察された。

5) 室内の炭酸ガス濃度

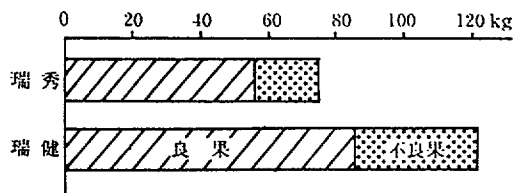
第60図に前記の相対湿度変化測定と同一日における炭酸ガス濃度の経時変化を示した。室内の炭酸ガス濃度は、夜間は450~500 ppmまで上昇するが、早朝の光合成開始とともに急速に低下し、天窓開放前には約100 ppm、閉鎖状態では約50 ppmとなり、外気の約20~30%までに低下した。換気をして短時間で回復せず、また閉鎖状態では著しい低炭酸ガス濃度の状態が続いた。

6) トマトの生育・収量

定植後から生育中期にかけてはトマトは順調な生育を示した。しかし、1月中旬から根腐れ萎ちょう病が発生し、特に‘瑞秀’で被害が大きく、このため第61図に示したように6果房収穫で2.5kg/株の収量を示したにとどまった。一方、抵抗性品種の‘瑞健’は発生が見られず、4.1kg/株の収量を、本作型では、ほぼ標準的な値であった。

4 考 察

本試験に使用した蓄熱材は、融点が16℃と21℃、凝固点は18℃と13℃のそれぞれ異なる2点にあり、前節の融点22℃の蓄熱材に比べさらに低く改良されている。蓄熱装置は、前節の装置では吸入口-吹出口の長さが4.7mであったのに対し、本試験のそれは3.6mと短く、1基当りの収納蓄熱材重量も1,250kgから450kgに減少させた。また、蓄熱材の配置は、平板状の容器を多段に積重ねる方式から吊り下げ方式に簡易化した。このように、本試験は蓄熱材の融解を容易にし、熱交換機能の向上を



第61図 トマトの収量 (30株当り)

はかって、蓄熱装置内位置による融解むらを解消し、また装置を簡易化することによる設備費の軽減を目的に、蓄熱材、蓄熱槽とも改良を加えて、暖房性能の検討を行った。

暖房性能は、暖房設定温度を12~11℃とした前夜半(17~21, 21~23時)は設定値を確実に保持し、また後夜半の23~5時の時間帯においても大部分の日で設定温度の8℃を保ち、それ以下となっても0.5~1.2℃の範囲内であった。しかし、早朝の5~8時の時間帯では、外気温が0℃以下の場合、設定温度(8℃)を保持した日は少なく、ほとんどの日で補助暖房が稼働し、後半放熱量の不足を認めた。この原因は、この年の外気温の低下が著しく、当初の設計値以上に暖房負荷が増大し、それに見合う蓄熱材の量が確保されていなかったことによる。

本試験に供試した蓄熱材の量は、前回の成績をもとに一夜の暖房必要熱量を85,000 kcal とし、蓄熱材の蓄熱量を顕熱も含めて46 kcal/kg<sup>(84)</sup> (85,000 ÷ 46 = 1,800kg)として求め、前試験より約30%減らした。しかし、この年は暖房負荷がこの試算値を超える日が多数出現し、前回(6~7万 kcal)以上の蓄熱量を確保された(最大8.6万 kcal)にもかかわらず、早朝の5時以前には当日の蓄熱量をほとんど放出し、それ以後の必要熱量は補助暖房によって保持された。このように不足熱量が生じる暖房特性は、蓄熱量・放熱量が限定されている本方式の構造的な特徴といえる。従って、このような気象条件の下で補助暖房の稼働時間を短縮し、節油率を高めるためには蓄熱材の量をさらに増さなければならない。しかし、蓄熱材の増加は、装置費を増大させることになり、常にこの年のような気象条件を想定することが適切かどうか問われる。また、補助暖房は、様々な気象変動に対応するため、その備えが不可欠なだけに、実用場面では一定の稼働をはかって、利用効率を高めることも重要と考えられる。地中熱交換方式の調査事例によれば、暖房必要熱量の10~20%は補助暖房によって補充されている例が多く、その場合でも慣行の温風暖房方式より優れる経済効果を認めている。このような例からいえば、本試験が示した節油率の70~75%は決して低い値ではなく、必要熱量のうち25~30%程度を補助暖房に求めることは実用上許容範囲に入ると考えられる。

蓄熱装置の性能を示す指標に、蓄熱可能容量に対して日中確保した蓄熱量及び夜間放出した熱量との比がある。蓄熱装置の蓄熱可能容量は85,000 kcalであり、晴天日における蓄熱量は7万 kcal以上の日が多く、最大では8.6万 kcalを超え、可能容量の100%に達している。

放熱量も同様に最大では8.6万 kcalを示し、可能容量の100%に達している。このように、蓄熱量・放熱量の値から本蓄熱装置はその性能を十分発揮したといえる。

また、蓄熱装置内の位置別温度調査では、融点到達時と凝固終了時に短時間位置による温度差が生じたが、大部分の時間帯は各位置の蓄熱材とも温度差がなく経過した。このことは、蓄熱装置内の蓄熱材は、均一に融解、凝固していることを意味している。前節の試験では、融解、凝固むらを装置の問題点として指摘したが、本装置ではこれがほぼ解消され、高蓄熱量・放熱量を確保できた大きな要因と思われる。

蓄熱装置がこのような高い性能を発揮した理由としては、試験目標であった蓄熱材と蓄熱装置の改良効果が達成されたためといえる。なかでも、蓄熱材の融点、凝固点温度を低くしたことが有効に作用し、1月中旬までは最高室温が換気温度の26℃まで達しなかったのにもかかわらず、高い蓄熱量を確保できた。また、低日照日でも、蓄熱材温度が14~17℃に保たれていれば相当長時間の暖房が可能であった。また、蓄熱槽の小型化や、吸入口一吹き出し口長さの短縮も性能向上に大きく貢献したと思われる。蓄熱装置の構造について、仁科ら<sup>(54)</sup>による空気流路に関する研究があり、蓄熱装置内は吸入口から吹き出し口に向かうに従い、熱交換率、熱交換量とも低下していく傾向にあるので、同一容積であれば蓄熱槽は分割した方が効率的であるとしている。前節及び本試験の成績はこれを裏づける結果となった。

室内の相対湿度は日中85~95%、夜間は97~100%の値を示し、やや多湿な状態で推移した。本年は換気温度を26℃としたのもかわかわらず、日中の室温があまり上昇せず、天窓の開放時間が短かったことが、一つの要因と思われる。また、蓄熱材を吊り下げ方式としたので、日中蓄熱材容器表面に凝縮した水分の大部分を回収(約25ℓ/日)でき、いわば除湿機の役割を果たしたが、湿度低下の効果については明らかにできなかった。

室内の炭酸ガス濃度は、日ので後急速に低下し、閉鎖状態では最低50 ppmと大気の約1/6の濃度まで低下した。このような、低炭酸ガス濃度の状態は、蓄熱運転による冷房作用により換気量が減少することに起因するが、反面地中熱交換ハウス同様炭酸ガス濃度を任意に調節しやすいことも意味している。この特徴を積極的に利用し炭酸ガス施用を行うなら増収及び品質向上の効果が期待できる。

トマトの収量は根腐れ萎ちょう症の被害を受けた‘瑞秀’は低収であったが、抵抗性品種の‘瑞健’はこれま

での実績に相当する収量を得た。なお、低炭酸ガス濃度の影響や空気流動の効果については生育状況から明確な判別はできなかった。

予備試験を含め3年にわたる試験により、潜熱蓄熱方式の暖房性能が明らかになり、また空気集熱方式に適した低融点蓄熱材が選定され、性能を十分発揮し得る蓄熱槽の構造のついてはほぼ確定することができた。これらの成績から実用化に向けて明るい見通しを得たが、さらに本システムの確立にあたって必要な検討課題を述べると次のとおりである。

経済規模温室における現地実証 地熱交換方式の実用化の場合と同様、場内試験の結果をもとに現地実証試験を実施し、大型施設における暖房特性のは握、経済効果の検討、また普及場面における利用上の留意点等を整理し、現地農家への普及にあたって必要な資料を整えておく必要がある。

経済効果の算出本方式の実用化にあたっては経済効果のは握は欠かせない課題である。しかし、本方式はまだ試験途上にあり、経済効果を求めるための確定的な数値は提示できないが、その検討にあたって必要な項目は(1)装置の設備費、(2)蓄熱材の耐用年数、(3)運転経費、の三点である。(1)のうち蓄熱材の価格については、仁科ら<sup>(52)</sup>は200円/kgと試算しているが、装置全体としての費用はまだ明らかでない。しかし、目標としては、地中熱交換方式との比較からその実績(250~300万円/10a)以下であることが望まれる。(2)は一定年数経過後でなければ正確な判定はできないが、竹田ら<sup>(84)</sup>の繰り返し試験によれば1,000サイクルまでは蓄熱材の性能はほとんど変わらないことを認めている。この値は、使用期間3ヵ月、1サイクル/日で稼働するとすれば10年間使用できることを示している。(3)の電気料金は、地中熱交換方式の実績値をほぼ適用できると思われる。

補助暖房との効率的な組合せ 太陽熱利用暖房方式においては補助暖房の備えは欠かせない。したがって、蓄熱装置だけで100%の節油効果をねらうのではなく、補助暖房の一定稼働をはかり、その場合の設備費、運転経費、石油代の値が最小になるよう節油率を求め、蓄熱材の量を決定する必要がある。

劣化した蓄熱材の処理 本方式が普及に移され、蓄熱材が耐用年数に達した後の問題であるが、性能が低下した蓄熱材の処理についても明らかにしておく必要がある。竹田ら<sup>(84)</sup>によれば蓄熱材の劣化の主因は、融解・凝固の繰り返しとともに $\text{Na}_2\text{SO}_4$ の結晶粒が次第に成長することにあるが、再処理により元の性能を回復するこ

とは可能であると述べている。したがって、新蓄熱材と再処理蓄熱材の流通システムが確立すれば個々の農家による廃棄の問題は生じないことになる。

## 5 摘 要

融点が16℃と21℃、凝固点が18℃と13℃のそれぞれ異なる二点にもち、硫酸ナトリウム10水塩と尿素を主成分とする蓄熱材を用い、これを吊り下げ方式で収納した蓄熱装置を4基設置し、暖房性能、蓄熱材の熱特性について検討を行った。

1) 蓄熱材はアルミラミネートポリエチレンフィルムに封入されており、1個の重量は7.5kgである。これを0.63×1.0×3.6mの容積をもつボックス内につり下げ方式で合計60個収納し、200V、200Wの有圧ファンを1台取りつけて蓄熱槽とした。この蓄熱槽を床面積352m<sup>2</sup>、保温比0.63のフェンロー型ガラス室内に4基設置した。蓄熱材の総重量は、1,800kg、設計蓄熱容量は85,000kcalである。

2) 暖房設定温度を12~11℃とした時間帯(17~23時)は設定温度を確実に保持し、また23~5時の時間帯においてもほとんどの日で設定温度の8℃を保った。しかし、5~8時の時間帯では、外気温が0℃以下の場合、設定値の保持が困難で補助暖房が稼働することが多かった。本年は、外気温の低下が著しく、設計値以上に暖房負荷が増大したため後半放熱量が不足した結果によるものである。

3) 蓄熱装置から得られた内外気温差は10~13℃であった。

4) 蓄熱装置の運転による節油率は平均75%と推定された。

5) 蓄熱量はともに最大8.6万kcalが得られ、可能容量の100%に達した。蓄熱槽内における蓄熱材の融解極めて小さかった。蓄熱材、蓄熱槽とも前報に比べて顕著な改良効果が認められた。

6) 室内の相対湿度は日中80%以上、夜間は97~100%の状態推移した。

7) 室内の炭酸ガス濃度は、日の出後急速に低下し、閉鎖状態のままでは最低50ppmまで低下した。

8) ほ場内に根腐れ萎ちょう症が発生したため、トマト‘瑞秀’の収量は低かったが、抵抗性品種の‘瑞健’は標準的な収量を得た。

### 第3節 経済規模温室を用いた暖房試験

#### 1 諸 言

前節までの試験で、内部集熱に適する低融点の蓄熱材の選定や熱交換効率の優れた蓄熱装置の確定、またこれら装置を用いた場合の暖房性能、室内気象特性及びトマトの生育に対する影響について検討を行ってきた。その結果、硫酸ナトリウム10水塩と尿素の混合物を主成分とする蓄熱材を平板状容器に封入し、これを一定間隔でつり下げ、一端にファンを取り付けた装置を蓄熱装置として供試したところ、内部の蓄熱材は均一な融解・凝固を繰返してほぼ目標とする蓄熱・放熱量を得、又促成トマトに対して70~100%の節油効果を認め、実用化への可能性を見出すことができた。

本試験はこれらの結果をもとに、更に実用化を推し進めるため、蓄熱装置を県内の生産農家の経済規模温室に導入して現地実証を行い、普及利用に当たって必要な基礎資料を得ようとしたものである。

#### 2 材料及び方法

##### 1) 試験実施場所

平塚市土屋 蓑島 信昭氏ほ場

##### 2) 供試温室

本試験に供試した温室は床面積1,033m<sup>2</sup> (間口 8.2m × 3連棟 奥行42.0m)、保温比0.70のガラス温室で、保温カーテンは天井にはウレタン樹脂の両側をポリエチ

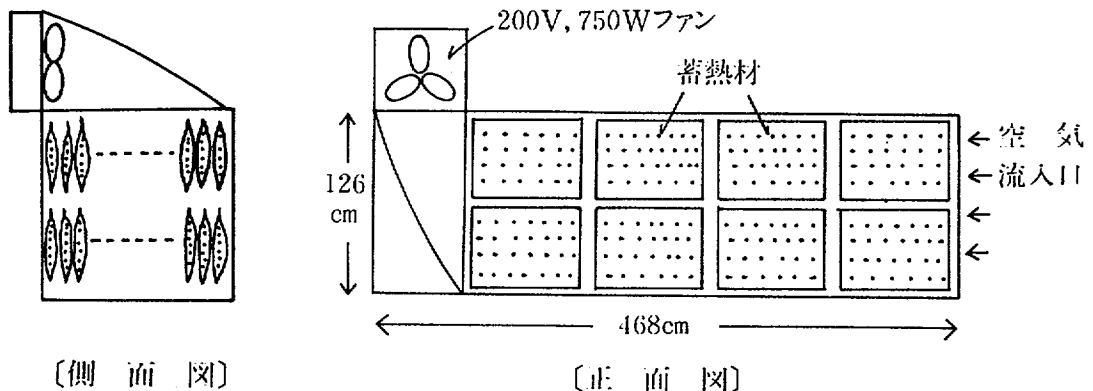
レンフィルムで被覆した資材 (商品名ローデンマット) を、側壁部にはポリエチレンフィルム (一層) を用いた。試験には同型同面積、同一保温カーテンの2棟の温室を使用し、1棟は潜熱蓄熱装置を設置した蓄熱温室、もう1棟は温風暖房機だけを備えた対照温室とした。また蓄熱温室にも対照温室と同型の温風暖房機 (熱出力87,000 kcal/h、熱効率0.86) を備え補助暖房とした。

##### 3) 供試蓄熱材、蓄熱装置の構造及び運転方法

供試蓄熱材 (農畜産技研K K製) は前節に用いたものと全く同一で、硫酸ナトリウム10水塩と尿素の混合物を主成分としている。蓄熱材の融点は16℃と21℃、また凝固点は18℃と13℃である。蓄熱材は前節同様アルミラミネートポリフィルム内に封入されている。

蓄熱装置の構造は第62図に示したとおりで、蓄熱材容器を3.5m間隔で20個吊り下げたものを1ユニットとし、このユニットを上下2段に積み重ね、更に空気の流れ方向に四つ並べて、その一端に有圧ファン (200V、750W) を1台取りつけ、反対側を空気吸入口とした。装置の外側は厚手のビニルシートで覆った。蓄熱材重量は蓄熱装置1基当たり1,250kgであり、この蓄熱装置を温室北側に4基設置した。蓄熱材総重量は5,000kgである。蓄熱材の蓄熱可能量は、潜熱40 kcal/kg、顕熱5 kcal/kgで、4基合計では225,000 kcalである。蓄熱材量は、一夜の暖房負荷を30~35万 kcalと推定し、その必要熱量のうち70%は蓄熱装置で供給し、残り30%は補助暖房で補うことを前提にした。

日中の蓄熱開始温度は18℃に設定した。暖房設定温度は11℃ (18-5時) -10℃ (5-8時) とし、補助暖房



第62図 蓄熱装置の構造



の設定値は8～9℃にした。なお、補助暖房が稼働した場合、蓄熱装置には暖房能力がないとみなして、その夜はそれ以降蓄熱装置が作動しないよう制御した。

日中の天窓換気は、初年度は1月上旬まで灰色かび病の発生をみたため湿度低下を目的に22℃としたが、それ以降は24～25℃で管理した。次年度では、午前中は密閉状態にし、午後は25℃の設定で換気をした。

4) 供試作物

供試作物は両温室ともトマト、品種‘瑞秀’を用い、初年度は9月15日に播種し、11月25～27日に定植した。次年度は9月16日に播種、11月25日に定植した。トマトの栽培は、当地の慣行に従った。

5) 調査項目、測定方法

温度測定は、蓄熱温室については外気温、室内中央、蓄熱装置入口、出口の間球、湿球及び蓄熱材5点について行った。対照温室は室内中央部の乾球、湿球温度を測定した。これらの温度測定にはC-C熱電対を用いた。地中伝熱量は熱流板を地表面下0.5cmのところに埋めこんで測定した。蓄熱量、放熱量は各日ごとに蓄熱材の最高最低温度から算出した。温風暖房機の重油消費量はアワメータ及び油糧計により調査した。なお、蓄熱装置入口、出口及び蓄熱材温度は蓄熱装置1基だけを代表して測定し、他も同一な温度変化しているものとみなした。蓄熱装置の消費電力量は、次年度において積算電力計に

第33表 最低外気温、最高・最低室温、重油消費量

月 日	最低 外気温	蓄 熱 温 室		対 照 温 室		重 油 消 費 量		節 油 率
		最 高	最 低	最 高	最 低	蓄 熱 <sup>④</sup>	対 照 <sup>⑤</sup>	
12. 28	-1.9	20.9	7.8	19.9	7.9	10.6	27.7	62
29	-4.3	20.0	7.9	18.3	7.7	36.7	54.3	32
1. 1	-3.4	20.2	7.7	19.1	6.8	27.0	41.5	35
3	-1.2	14.7	9.1	14.3	8.0	71.4	69.2	—
8	0.4	20.3	7.4	20.3	8.5	15.4	36.2	57
9	-0.1	20.5	7.3	20.9	8.9	15.4	40.4	62
10	-2.0	21.4	8.2	22.3	8.7	24.1	43.6	45
12	0.0	20.1	8.1	22.3	8.9	17.4	38.3	55
15	1.0	21.5	7.7	21.3	10.0	15.4	54.3	72
18	-2.8	18.5	9.3	20.5	9.6	35.7	55.3	35
19	-2.1	21.9	9.3	20.4	10.0	27.0	56.4	52
12. 28—1. 19						296.1	548.0	46
22	-0.3	23.3	7.9	22.3	11.0	10.6	57.5	82
23	0.6	22.9	8.4	21.8	11.2	1.9	46.8	96
24	-1.1	15.4	8.0	15.7	9.9	22.2	53.2	58
25	-5.1	23.0	8.4	21.2	10.0	40.5	76.6	47
28	-0.9	24.1	7.9	22.9	10.5	6.8	43.6	84
29	-3.4	17.0	7.6	17.7	10.5	56.0	87.3	36
2. 1	2.4	25.3	7.9	21.8	10.1	7.4	30.1	75
2	0.7	25.2	9.6	22.6	10.1	4.1	16.5	75
3	-0.4	24.9	6.9	22.8	10.1	15.3	38.4	60
4	4.0	26.1	10.7	24.9	9.5	0.4	11.4	96
7	4.2	26.1	11.9	23.9	11.0	0.0	0.0	—
8	5.0	16.9	9.3	16.2	9.4	0.0	7.4	100
1. 22—2. 8						194.1	544.7	64
12. 28—3. 4						550.9	1,635.4	66

より測定した。

### 3 結 果

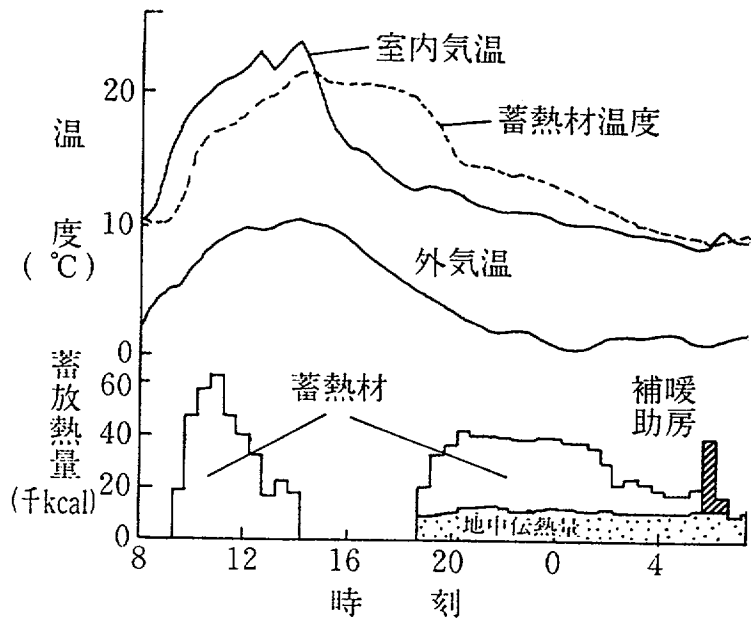
#### 1) 蓄熱装置の循環風重

アネモマスターにより吹出口の風速を計測して循環風量を求めたところ蓄熱装置1基当り $117\text{m}^3/\text{min}$ となり、蓄熱装置間にはほとんど差は認められなかった。

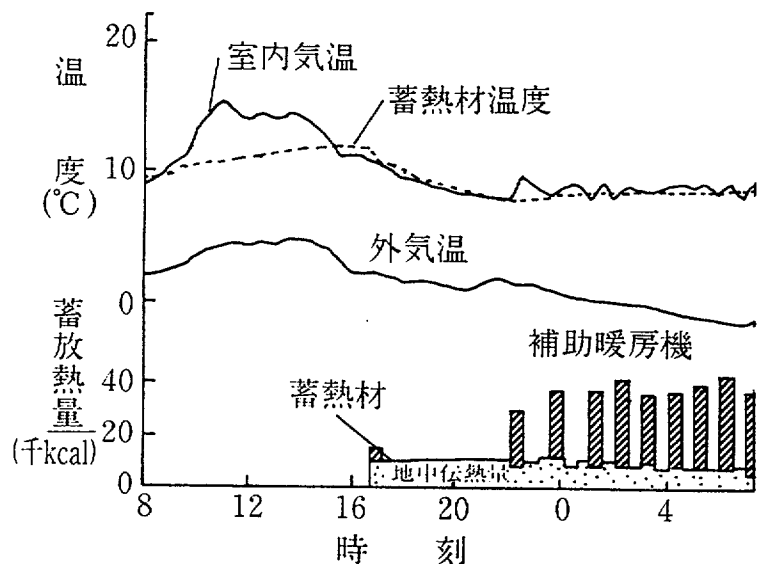
#### 2) 暖房性能

第33表に初年度における蓄熱温室及び対照温室内外の最高・最低気温及び重油消費量について示した。この年は屋外の最低気温は比較的高く経過し、試験期間中の最低極温は $-5.1^\circ\text{C}$ (1月25日)で、 $0^\circ\text{C}$ 以上の日が多く出現した。蓄熱温室の最高室温は、1月中旬(1月19日)までは灰色かび病の発生によりで換気量をやや多くしたため $20\sim 21^\circ\text{C}$ までの昇温にとどまっているが、1月中旬以降は午前中天窓を密閉するようにしていたので室温は $24\sim 26^\circ\text{C}$ まで上昇し、蓄熱量の増大をはかることができた。一方、対照温室の日中の温度管理は園主の慣行法によってなされ、最高室温は $22^\circ\text{C}$ 前後でやや低温な管理法であった。夜間における蓄熱温室の最低室温は $8\sim 10^\circ\text{C}$ に保持されているが、蓄熱装置だけで設定室温を保たれた日はごくわずかで、後夜半には多くの日で補助暖房稼働した。蓄熱温室の補助暖房稼働による重油消費量は、 $0\sim 71\text{l}$ と日により大きな差が生じ、特に1月19日までの消費量が多い傾向を示した。

2月28日から3月4日までの総計では $551\text{l}$ であった。これに対し、対照温室の重油消費量は $30\sim 60\text{l}$ の日が多く、3月4日までは $1,635\text{l}$ となった。両温室の重油消費量から比較した節油率は個々の日では $30\sim 100\%$ とな



第63図 晴天日における各経時変化(1月23日)



第64図 曇天日における各経時変化(1月24日)

り、日中の室内管理温度が低く、蓄熱量が不足した1月19日までは蓄熱温室の消費量296.1ℓに対し対照温室は548ℓで節油率は46%の低い値であったが、それ以降日中の温度管理を改善してからは節油率64%に向上した。3月4日までの総計では66%となり、ほぼ設計節油率(70%)に近い値を示した。

第63図は晴天日、また第64図は曇天日における蓄熱室内外の気温、蓄熱材温度(装置中央部)、蓄熱量、放熱量、地中伝熱量及び補助暖房機からの放熱量の各経時変化を示した例である。晴天日においては、日中の最高室温は23℃まで上昇し、蓄熱材温度は20℃を越え総蓄熱量では、可能容量のほぼ100%に達している。したがって、夜間は蓄熱装置からの放熱によって暖房設定温度(11~10℃)が保持され、補助暖房が稼働したのは朝方のごく短時間であった。これに対し、曇天日では室温は蓄熱開始温度の18℃まで達せず、日中の蓄熱が全くなかったため、夜間蓄熱装置からの放熱がほとんどなく、室温は大部分補助暖房機によって保持された。また、この両図から夜間の暖房必要熱量に対し、地中伝熱量の占める割合がかなり高いことが示され、第63図の場合では全体の39%であった。

3) 蓄熱装置の性能特性

初年度における蓄熱材の上昇及び下降温度差から求めた蓄熱装置の蓄熱量、放熱量を装置内の位置別及び合計を第34表に示した。蓄熱可能容量(225,000 kcal)に対

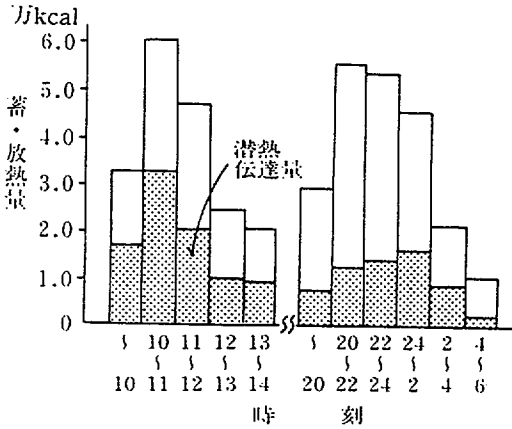
して得られた蓄熱量は日中の管理温度がやや低かった1月19日までは80%以下であったが、温度管理改善後は増大して最大100%に達するようになり、本蓄熱装置の熱交換効率の高いことが示された。また、放熱量をみると前日確保された蓄熱量とほぼ同一の値になっており、日中確保した熱はその日の夜間にほとんど放出している。蓄熱装置の蓄熱、放熱システムは基本的には1日サイクルであった。しかし、2月8日の例のように、その日に蓄熱がない場合でも、それ以前に蓄熱があれば十分利用可能であった。

蓄熱装置内の位置別蓄熱量は、空気流入口側2列と流出口側2列との間にやや差が生じ、1月10日の例では流入口側2列の平均値49.0千kcalに対し、流出口側2列は41.6千kcalで約15%、また1月23日では57.6千kcalに対し56.1千kcalとなって約3%の差があった。28日間の平均では約10%の差となって現れた。放熱量についてもほぼ同様な傾向にあった。

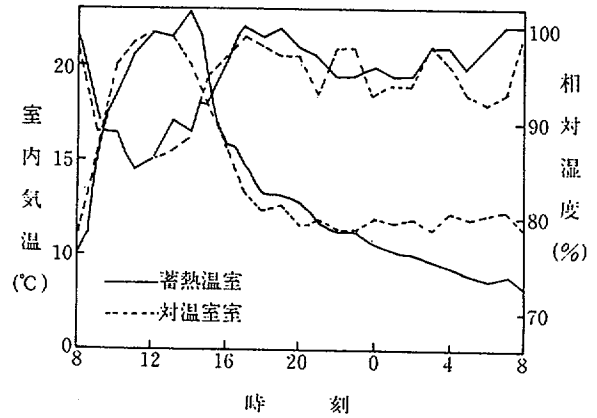
第65図は蓄熱、放熱量を入口-出口の空気温度変化に伴う熱(顕熱)と空気中水分の蓄熱材容器表面への凝結、蒸発に伴う熱(潜熱)とにわけて分けて時間帯別に示した例である。蓄熱時では収集された全熱量に対し潜熱伝達量が47%を占め、水の凝結に伴う熱量のの大きいことが分り、また放熱時においても30%の値を占めた。放熱時の潜熱伝達量が蓄熱時よりもやや低かったのは凝結水の多くを蓄熱装置外へ排出したためであろう。排出量に

第34表 蓄熱槽位置別及び合計蓄・放熱量

月 日	蓄 熱 量				放 熱 量				蓄熱量 合計	同左設 計値比 %	放熱量 合計
	入 口 ①	→ ②	出 口 ③	④	入 口 ①	→ ②	出 口 ③	④			
	× 10 <sup>4</sup> kcal				× 10 <sup>4</sup> kcal				10 <sup>4</sup> kcal		10 <sup>4</sup> kcal
12. 28	4.3	4.3	3.7	3.8	4.3	4.3	3.8	3.9	16.2	72	16.3
1. 1	3.6	3.8	3.1	3.3	3.9	3.8	3.1	3.3	13.8	61	13.6
8	3.9	3.9	3.4	3.4	3.8	3.9	3.0	3.1	14.7	65	13.8
10	5.0	4.8	4.1	4.2	4.9	4.7	4.0	4.1	18.1	80	17.7
15	4.2	4.1	2.1	2.0	4.3	4.3	3.9	4.0	12.4	55	16.5
19	4.7	4.6	4.2	4.2	4.6	4.6	4.2	4.1	17.7	79	17.5
23	5.8	5.7	5.6	5.6	5.7	5.7	5.6	5.6	22.7	101	22.6
25	5.4	5.2	5.0	4.8	5.3	5.0	3.9	3.3	20.4	91	17.4
28	5.8	5.8	5.7	5.7	5.7	5.6	5.3	4.6	23.2	103	21.2
31	5.7	5.6	5.4	5.4	5.8	5.7	5.6	5.0	22.3	99	21.9
2. 1	5.8	5.7	5.6	5.0	5.7	5.6	4.3	4.0	22.2	99	19.6
4	5.7	5.6	4.5	4.5	5.7	5.7	5.6	5.7	20.3	90	22.7



第65図 時間帯別蓄放熱量・潜熱伝達量 (1月23日)



第66図 室内相対湿度及び温度の変化 (1月23日)

ついては正確に計測できなかった。また、この図は全蓄熱量に対し、午前中の蓄熱割合が極めて高いことを示しており、この例では76%に達している。

4) 室内の相対湿度変化

第66図に晴天日における蓄熱温室と対照温室の相対湿度変化を示した。両温室とも日中は80~90%の範囲にあり、夜間は95%前後で推移した。両温室間の湿度差は小

さく、蓄熱温室が特に多湿状態にあるとはいえなかった。

5) トマトの生育

両年とも試験開始時の12月下旬には、トマトは両温室とも4~5段果房が開花していた。試験開始後、蓄熱温室は夜間温室北側の気温が高く、南側の気温が低い温度勾配が認められ、南側のトマトの生育が劣る傾向にあった。このため、蓄熱装置のダクトを南妻側まで伸ばし、

第35表 節油率・運転経費の比較 (1985~'86年)

月 日	重油消費量		節油率	消費電力	運転経費*		対照温室比
	蓄熱温室	対照温室			蓄熱温室	対照温室	
	ℓ	ℓ	%	kW	円	円	
1. 12-13	27.3	62.5	56.3	29.8	2,383	3,750	0.64
14-15	48.5	90.0	46.1	31.6	3,700	5,400	0.69
15-16	0.3	41.4	99.3	52.0	1,318	2,484	0.53
17-18	20.3	53.6	62.1	27.6	1,908	3,216	0.59
23-24	30.1	82.1	63.3	28.0	2,506	4,926	0.51
24-25	36.3	72.2	49.7	32.4	2,988	4,332	0.69
28-29	30.2	79.8	62.2	30.0	2,562	4,788	0.54
30-31	13.1	62.8	79.1	30.6	1,551	3,768	0.41
2. 1- 2	30.3	101.8	70.2	32.2	2,623	6,108	0.43
2- 3	21.0	64.5	67.4	32.4	2,070	3,870	0.53
3- 4	14.4	62.2	76.8	40.0	1,864	3,732	0.50
6- 7	28.0	91.5	69.4	35.8	2,575	5,490	0.47
平均	25.0	72.0	65.3	33.5	2,337	4,332	0.54

\* 重油代金 1 ℓ = 60円 電力料金 1 kW = 25円

また、補助暖房機のダクトも北側へ向かう風量を抑える措置をとった。収穫は2月中旬から始まり、両温室ともその差はほとんどなく、果実肥大も差はないと観察された。また、温室別の収量調査は行わなかったが、両者に大きな差はないという園主の判断であった。灰色かび病の発生は両温室とも認められ、蓄熱温室でやや多発する傾向にあった。

6) 装置の運転経費

第35表に、次年度において調査した蓄熱温室・対照温室の重油消費量、節油率、蓄熱装置の電力消費量及び両温室の運転経費を示した。これらの値を求めるにあたり、重油代金は1ℓ=60円、電力料金は1kw=25円として試算し、温風暖房機の電力量はともに測定できなかったため、この数値は加えていない。この年の対照温室の一夜の重油消費量は、最大100ℓを超えたのに対し、蓄熱温室では、50ℓであった。節油率では、ほぼ70%前後の値を示すことが多かった。消費電力は、30~50kw/日の範囲にあった。蓄熱温室の一夜の運転経費(重油代金+電力料金)は、対照温室のそれ(電力料金)に対し約40~60%に納まった。

7) 蓄熱装置の設置費用

本蓄熱装置を設置するに当たって要した費用を第36表に示した。蓄熱材や運搬費、組立て費用等総額は約372万円であった。総費用のうち蓄熱装置本体が約331万円で全体の約90%を占め、次いで運搬費、制御器の順となった。この費用は地中熱交換方式の実績値に比べ約30%高額であった。

4 考 察

潜熱蓄熱暖房に関する研究は、高倉ら<sup>(82)</sup>によるポリエチエングリコールを用いた小型温室の実験から始まり、その後塩化カルシウム6水塩や硫酸ナトリウム10水塩など蓄熱材の選定が進み<sup>(20,25,73)</sup>、特に内部集熱に適する蓄熱材が開発されて<sup>(53,84)</sup>実用化の可能性が生じ、前節までの成績では、ほぼ地中熱交換方式に相当する暖房効果を認めた。本試験は、これまでの成績をもとに本暖房方式の実用化を推し進めるため、潜熱蓄熱装置を経済規模温室に導入して実証試験を実施した。装置の設置にあたっては、一夜の暖房負荷のうち70%を蓄熱装置に求め、残り30%は補助暖房機(温風暖房機)で補うことを前提にした。この理由は、太陽熱利用暖房においては、異常低温や日照不足等様々な気象変動に対応するため、補助暖房の備えは欠かせず、その利用効率を高める

第36表 蓄熱装置設置費用

項 目	単 価	金 額
	円	円
蓄熱装置一式	828,000	3,312,000
制 御 器	133,000	133,000
組立て設置一式	79,000	79,000
電気配線一式	52,000	52,000
運 搬 費	140,000	140,000
総 額		3,716,000

ためには一定の稼働をはかり、また蓄熱材量を最少限に抑えて設備費を低減させた方が得策と考えたことによるものである。

初年度における気象条件の特徴は、最低外気温が-5℃以下に低下する日はほとんどなく、0℃以上の日が多く出現し、いわゆる暖冬と呼ばれる年であった。また、3~4月は晴天日が少なく、日照不足の日が続いたので、結果の考察は3月4日までとした。このような気象条件のもとにおける本暖房装置の暖房性能について述べると次のとおりである。

当初、試験の実施にあたり日中の室温管理は25~26℃を目標としたが、試験開始時において蓄熱・対照温室ともトマトに灰色カビ病が多発し、この対策として室内の湿度低下をはかるため、園主の希望もあって、換気量を多くした。このため、1月中旬(1月19日)までは最高室温は20~21℃までしか上昇せず、日中の蓄熱量はその可能容量の80%以下にとどまった。従って、夜間の暖房時では、蓄熱装置からの放熱量が少なく、補助暖房の稼働時間が長く、相当量の重油を消費する結果となった。この期間の重油消費量は、蓄熱温室296ℓ、対照温室548ℓで節油率は46%の低い値であった。当初設計では、一夜の暖房負荷が30~35万kcalであれば、重油の発熱量8,770kcal/ℓ、暖房機熱効率0.86(実測値)として対照温室の重油消費量が40~46ℓ  $\{(30\sim35\text{万kcal}) \div 8,770 \times 0.86\}$  なら70%の節油率が得られるはずであるが、1月9日及び15日に、それに近い値を示した以外は、設計値に達しなかった。

1月20日からは午前中蓄熱温室の天窓を密閉し、室温管理の改善をはかったところ、最高室温は24~26℃まで上昇した。その結果、蓄熱量は増大し、可能容量の100%までに達した。これにより、夜間の放熱量も増大し、補助暖房の運転時間は短縮された。1月22日以降の節油率をみると、1月23、28日のように70~95%の値が得られ

たように、ほぼ目標値かそれ以上の日が多く認められ、2月8日までの節油率では64%となった。このように、本蓄熱装置は室温を一定値以上に保ち、蓄熱量を確保されるなら、目標とする性能は十分発揮できると判断された。しかし、12月28日から3月4日までのトータルで見ると、節油率は66%で設計値に近い数値であるが、やや暖冬に推移した気象条件のもとで、対照温室の重油消費量が平年値以下であったことを考えるなら、決して高い暖房効果を示した値とはいえない。この原因は、先に述べたように1月中旬までの室温管理にあり、また暖房設定温度が11~10℃の恒温管理としたため、放熱終了時間が早まったことがあげられる。

次年度は、午前中蓄熱温室の天窓をほぼ密閉して運転したので、晴天日には可能容量の100%に達する蓄熱量が確保され、対照温室では平均72ℓ/日の重油消費量に対し、25ℓ/日の消費量となり、約65%の節減効果を示した。

蓄熱装置の熱的性能は、装置内の位置別蓄熱・放熱量及び蓄熱可能容量に対して得られた総蓄熱・放熱量によって表される。装置内の位置別蓄熱量は、室内から吸入された空気が流出口に向かうに従い、次第に冷やされていくので当然差は生じることになるが、その差は流入側2列と流出口側2列の間でやや大きくなる傾向にあった。前節の装置では、1基当りの蓄熱材量を少なくした(450kg)ので装置内の蓄熱材はほぼ均一に融解したが、本蓄熱装置はその約2.7倍の量を収納しており、全体を均一に融解させることはやや困難になった。しかし、その差は平均で約10%程度であり、装置の構造を見直す必要があるほど大きい数値とは思われない。一方、総蓄熱量は最大で20万kcalを超え、蓄熱可能容量の100%に達しており、位置による蓄熱量差も小さい。放熱量も同様であり、日中確保した蓄熱量は夜間にほとんど放出している。この点において、本蓄熱装置がもつ性能は十分発揮したといえる。前節及び仁科ら<sup>(54)</sup>の試験では、蓄熱装置は小単位に分割した方が、蓄熱材を均一に融解させやすいという結果が示されているが、実用場面の適用にあたっては、設備費や組立て作業また設置面積の点から一定容量を保持せざるをえない。その収納重量は本試験の結果から、1基当り1,000~1,200kgが限度と思われる。

蓄熱装置内を空気が通過する際、蓄熱材容器表面に水分が凝結、蒸発する現象が認められる。このことは前節においても報告し、水分の凝結、蒸発に伴う潜熱が蓄熱・放熱に重要な役割を果たすと考えられたが、その量につ

いては正確に把握できなかった。本試験では、蓄熱装置入口-出口の乾湿球温度をもとにこれら潜熱伝達量を求めたところ、蓄熱時では全熱量に対して47%に達し、また放熱時では30%を占めることが明らかになった。放熱時が蓄熱時よりやや低い値を示すのは、凝結した水を落下させて装置外に排出したためと思われる。

日中の蓄熱量を時間帯別に分けてみたところ、午後よりも午前中の蓄熱割合がきわめて高く、晴天日の調査事例では、全蓄熱量に対し76%であった。これは、朝方放熱終了後の蓄熱材温度が低く、蓄熱運転開始後、蓄熱材が融点温度に達するまで、室温との間の温度差が大きく、また蓄熱材容器表面への水分凝結量が多くなるので、その潜熱伝達量が大きいためと考えられる。したがって、蓄熱運転においては、午前中の室温上昇を重視して、蓄熱量の増大をはかることが重要であり、換気は午後を主とする方が、作物生理の面からも望ましい管理法といえる。

室内の相対湿度は、蓄熱・対照温室との間に昼夜とも大きな差は認められなかった。一般に、地中熱交換温室では換気量が少ないことや、パイプ内に凝結した水分が夜間蒸発して室内の相対湿度を高めているが、本方式では午後における換気や蓄熱装置内の凝結水を外部に排出したことが有効であったと考えられる。

灰色カビ病の発生は両温室で認められ、蓄熱温室でやや発生が多いと観察された。この原因には、蓄熱装置による空気循環が、菌を飛散させ、発生を助長させたことが考えられ、今後も発生状況の調査が必要である。また、蓄熱装置や補助暖房機のダクト配置に仕方によって温室内に温度勾配が生じたので、その配置法には注意が必要となる。両温室のトマトの生育に顕著な差は認められず、また収量にも差はないという園主の判断であった。蓄熱温室の運転経費(重油代金+電力料金)は、対照温室の電力料金と比較すると、40~60%の範囲内にあり、暖房経費の節減を見込める。しかし、この値は、地中熱交換温室の運転経費が温風暖房方式のそれに対し、25~30%程度であったのに比べるならかなり大きく、重油価格が相当に上昇しなければ、この差は小さくならない。蓄熱装置の設置経費は、総額で372万円を要し、地中熱交換方式の実績値に比べ、約1.5倍の経費であった。仮に蓄熱材の耐用年数を10年<sup>(54)</sup>とすれば、蓄熱装置の年間の償却費は37.2万円となり、地中熱交換方式では約16万円と試算されたのに対して約2倍であり、温風暖房機の3倍以上となる。しかも、先に述べた運転経費が地中熱交換方式よりも大きく、現状の重油価格のもとでは、経済

効果を見出すことは困難と思われる。ただし、先の設置経費は決定した額ではなく、装置が広く普及する見通しがあるなら、当然価格はこれよりも下がる可能性はある。当面の期待額は地中熱交換方式が目安となろう。

## 5 摘 要

潜熱蓄熱暖房方式の実用化を進めるため、蓄熱装置を経済規模温室に導入して、暖房性能や蓄熱装置の熱的特性、温室内気象環境等について検討した。

1) 供試温室は、床面積1,033m<sup>2</sup>のガラス温室で内部カーテンは天井、側壁部とも一層被覆とした。試験には同型、同面積の温室を2棟使用し、1棟は蓄熱温室、もう1棟は温風暖房機だけを備えた対照温室とした。蓄熱温室には補助暖房として温風暖房機も備えた。

2) 蓄熱材は硫酸ナトリウム10水塩と尿素の混合物を主成分とし、融点は16℃と21℃、凝固点は18℃と13℃である。蓄熱装置は、1個7.8kgの蓄熱材容器を20個吊り下げたものを1ユニットとし、これを上下2段に4ユニット並べて、その一端に有圧ファンを取付け、反対側を空気流入口とした。蓄熱装置は温室北側に4基設置した。

3) 蓄熱材総重量は5,000kgで、総蓄熱容量は225,000

kcalである。暖房設定温度は10～11℃、補助暖房設定温度は8～9℃である。節油率は70%を目標にした。

4) 1月中旬までは、換気量を多くしたため室温は20～21℃までしか上昇せず、蓄熱量が不足し、この間の節油率は46%にとどまった。しかし、その後午前中天窓を密閉したところ室温は24～26℃まで上昇して蓄熱量が増大し、節油率は64%に向上した。全期間での節油率は66%であった。

5) 蓄熱装置内の蓄熱材に空気流入口側2列と流出口側2列との間に、平均10%の蓄熱量差が生じた。室温が24～26℃まで上昇した場合、蓄熱量はその可能容量の100%に達し、装置の性能を最大に発揮させることができた。

6) 蓄熱材容器表面の水分の凝結、蒸発に伴う潜熱伝達量は、蓄熱時で47%、放熱時では30%であった。1日の全蓄熱量に対し、午前中に占める割合は70%以上であった。

7) 室内の相対湿度は、蓄熱・対照温室との間に大きな差は認められなかった。

8) 蓄熱温室の運転経費は、対照温室のそれに対し、40～60%の範囲にあった。

9) 蓄熱装置の設置経費は総額372万円であった。

### 第3章 空気-空気型ヒートポンプによる温室暖房

本方式による温室暖房の原理

ヒートポンプは、フロン22など熱媒の蒸発および凝縮潜熱を利用して、低温側から高温側へ熱を汲み上げる装置であり、その機能は暖房、冷房、冷凍、除湿、乾燥と幅広い。

ヒートポンプの基本構造を第67図に示した。装置は、圧縮器、蒸発器、凝縮器、膨脹弁および四方弁から構成されている。この機器内を流れるのが熱媒のフロン22である。フロン22は圧縮器により凝縮器内で凝縮されて放熱をし、膨脹弁を通して蒸発器に入ると蒸発作用により熱を奪い、四方弁から圧縮器を経て再び蒸発器に戻る。四方弁を切替えてフロン22の流れを変えると、先の凝縮器は蒸発器に、蒸発器は凝縮器の働きをする。温室暖房では、温室外に置いた蒸発器により熱を獲得し、それを温室内の凝縮器から放出させる。この場合、熱源の種類（空気または水）や熱の供給方法（温風または温水）あるいは蓄熱槽の有無などによって多様なシステムが構成される。空気-空気型は熱源を空气中に求め、その熱を温風として温室内に放出させる暖房システムである。

#### 1 緒言

前章まで、地中熱交換及び潜熱蓄熱方式による温室暖房の実用化試験を実施してきたが、この間やはり太陽熱暖房方式として水蓄熱方式<sup>(19)</sup>や保温カーテン上に地下水を流すウオータカーテン方式<sup>(4)</sup>等が考案され、一定の普及をみるようになった。さらに近年は、これらに加えてヒートポンプを温室の暖冷房に利用する試みがある。ヒートポンプに関心が高まっているのは、それが暖

房に使用できるだけでなく、夏期の冷房にも使用可能であるからであり、年間を通した温室の環境制御装置とし期待は大きい。

ヒートポンプはその利用熱源により、水熱源型と空気熱源型とに分けられ、水（地下水）熱源型の温室への利用についてはいくつかの報告<sup>(5,59,76)</sup>があり、また実際の稼働例も相当数認められている。しかし、空気熱源型については、小酒井ら<sup>(28)</sup>による報告が見られる程度でその数は少ない。暖房は夜間の屋外気温が低い時の温度制御であり、低温外気を熱源とした場合は効率的な運転が期待できないと考えられ、その利用が遅れたためであろう。しかし、空気熱源型はその熱源は無限であり、また空気-空気型では装置は室内機と室外機だけを備えればよく、システムを単純化できる長所がある。

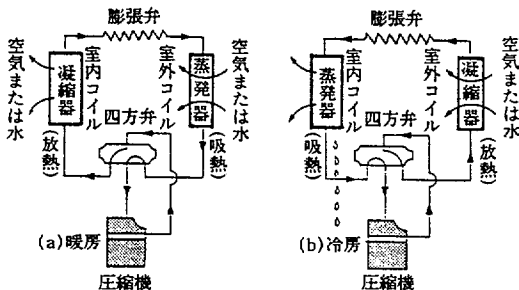
そこで本試験は、空気-空気型ヒートポンプを温室に取入れて、その利用の可能性や、利用場面また本ヒートポンプに適した運転法を明らかにするために実施したものであり、本報では暖房試験の結果について報告する。

#### 2 材料および方法

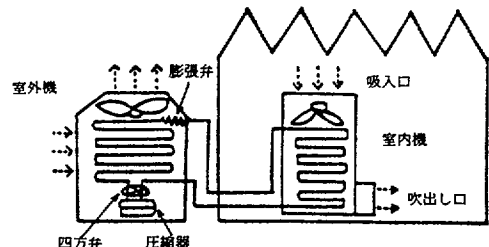
##### 1) 供試ヒートポンプの仕様

本試験に供試したヒートポンプは三菱重工KK製の空気-空気型機種で基本構造を第68図に、また装置の主な仕様を第37表に示した。

本ヒートポンプは室外機と室内機から構成されている。室外機は、蒸発器・圧縮器・膨脹弁・四方弁および熱交換ファンから成り、室内機は凝縮器・熱交換ファンおよび温風吹出し口から成っている。室外機内の四方弁



第67図 ヒートポンプの主要構成機器（古在，原図）



第68図 供試ヒートポンプの基本構造



を切替えて、冷媒の流れを逆にすることにより、室外機内の蒸発器は凝縮器として、室内機内の凝縮器は蒸発器として機能する。この切替えにより温室内を冷房したり、また暖房運転時において室外機表面に付着した霜を融解することができる。圧縮器の定格出力は7.5kwである。

ヒートポンプの室内機は温室南側に設置し、吹出し口から温室中央部に向けてダクトを配置した。

2) 供試温室および作物

供試温室は、間口13.5m、奥行26m、床面積352m<sup>2</sup>、保温比0.63のフェンロー型ガラス室で、内部保温カーテンは、天井部は二層（不織布+0.05mm厚塩ビ）、側壁部は一層（同塩ビ）を被覆とした。

温室内ではペピーノ（*Solanum muricatum* Ait）を栽培した。

3) 暖房設定温度

暖房温度の設定は、15℃、13℃の恒夜温管理と16（17-21時）-13（21-24時）-10℃（24-8時）の変夜温管理を一定日数ずつ交互に繰返した。

4) 測定方法

温度測定点は、温室内中央部（高さ、1.5m）・室内機空気吸入口・同吹出し口および屋外の4点である。温度測定にはC-C熱電対を用いた。

ヒートポンプの消費電力は、圧縮器をはじめ装置すべての電力量を積算電力計により計測した。

室内機より放出される風量は、ダクト中間部の風速を3点計り、その平均値にダクト断面積を乗じて求めた。また室内機吸入口の風速と吸入口面積からも算出したところ、両者の値はほぼ一致した。風速はアネモスタに

第37表 本試験で用いたヒートポンプの主な仕様

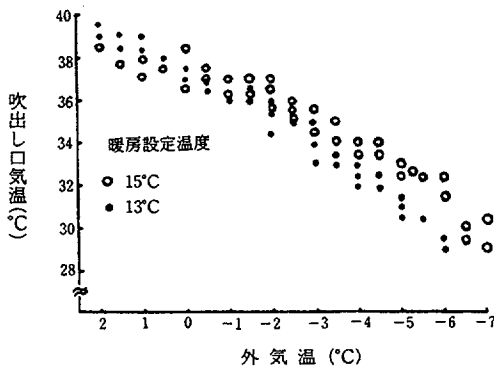
項目	室内ユニット	室外ユニット
電源	3相 200V	50/60Hz
能力	冷房	24,000/26,000kcal・h <sup>-1</sup>
	暖房	26,000/28,000kcal・h <sup>-1</sup>
	除湿	5/5.5l・h
圧縮機	全密閉型	
圧縮器定格出力	7.5kW	
空気熱交換器	銅パイププレートフィン式	
送風機風量	75/90m <sup>3</sup> /min	200/240m <sup>3</sup> /min
送風機定格出力	1.5kW	0.35kW

より計測した。ヒートポンプからの放熱量は、風量・空気比熱・室内機吸入口-吹出し口の温度差および運転時間との積から顕熱交換量について求めた。成績係数（COP）は、主に連続運転されている時間帯において、放熱量と消費電力を熱量換算（1KWh = 860kcal）した値との比で表した。

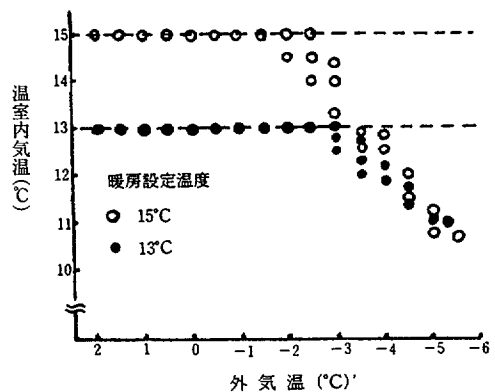
3 結 果

1) 室内機からの吹出し風量

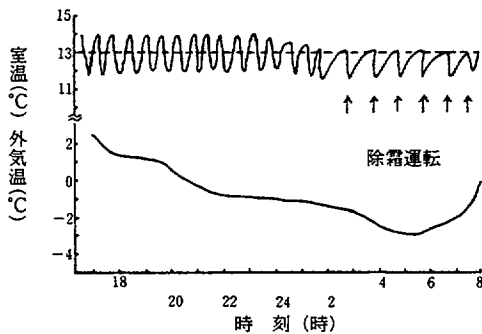
室内機の送風機定格風量は75m<sup>3</sup>/minであるが、ダクト等による圧力損失があり、実際はこれよりも減少する。そこで、室内機の吹出し風量をダクトと吸入口において実測した結果、53m<sup>3</sup>/minと測定された。



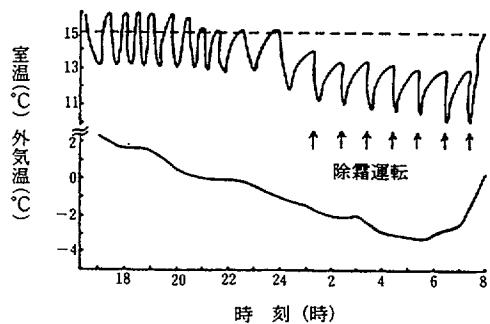
第69図 外気温とヒートポンプの室内機の吹出し口気温との関係（1～2月）



第70図 外気温と温室内気温との関係（1～2月）



第71図 温室内外気温経時変化と除霜運転  
(設定値15℃, 1月18～19日)



第72図 温室内外気温経時変化と除霜運転  
(設定値13℃, 1月7～8日)

## 2) 温風温度

室内機の凝縮器で熱交換されて吹出される温風の温度は、外気温および室内気温の影響を受けた。第69図は暖房設定温度を15℃および13℃とした場合の外気温と温風温度との関係を表したものである。

両設定温度とも外気温が0～2℃の時の温風温度は35～39℃であるが、外気温の低下とともに温風温度も次第に低下していき、温風温度の降下は15℃設定の場合よりも13℃設定の場合においてより大きかった。しかし、外気温が-6℃まで低下しても15℃設定では32℃、また13℃設定では29℃の温風が得られた。

## 3) 暖房性能

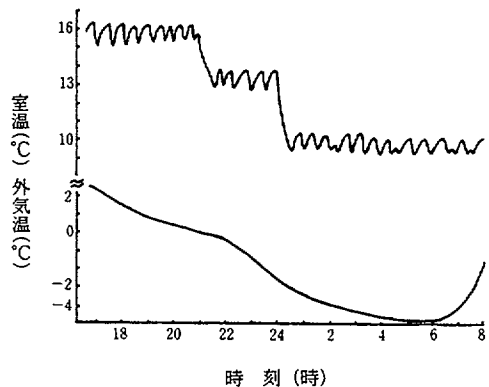
第70図に暖房設定温度が15℃および13℃場合の外気温と室温との関係を示した。15℃設定では、外気温が-1～-1.5℃までの低下であれば設定値をほぼ確実に保持でき、-2～-2.5℃になると保持できない日が出現し、-3℃以下では設定値の保持は困難となった。内外気温差は最大17℃であった。13℃設定においては、外気温が-2.5℃までは設定値を保持し、-3℃以下で設定値を保てなくなった。内外気温差は最大16℃であった。両設定温度の場合とも、外気温が-5℃まで低下しても室温は10℃以上に保たれた。

暖房設定温度の保持を困難にする要因として、温室の暖房負荷が本ヒートポンプの能力を越えた場合と、空気-空気型ヒートポンプの特性といえる除霜運転がなされた場合があった。すなわち、本ヒートポンプは暖房運転途中室外機表面に霜が付着すると、室外機と室内機の機能が自動的に切替わって、室外機の温度を上げ、霜を融解する。この場合、温室内は一時的に冷房状態になる。

この除霜運転時間は一時間毎最大10分にセットされており、着霜があれば各時間毎稼働する。第71図は15℃設定における除霜運転の状況を示した例で、後夜半室温が設定値まで上昇する以前に各時間毎除霜運転があり、設定値の維持を困難にした。

しかし、設定温度が13℃の場合では、第72図に示したように外気温が-3℃までの低下であれば除霜運転頻度が高くともほぼ設定値を保持することができた。

以上は暖房設定温度を一定とした恒夜温管理における暖房性能である。次に変夜温管理の場合の外気温と室温との関係の例を第73図に示した。前夜半(17～21時)の設定温度は16℃であるが、この時間帯は外気温がまだ比



第73図 変夜温管理をした場合における温室内外気温経時変化(2月7～8日)

第38表 最低外気温、ヒートポンプの一夜の放熱量、消費電力およびCOP

月 日	最低外気温 °C	HP放熱量 10 <sup>3</sup> kcal	消費電力量 kWh	熱量換算値 10 <sup>3</sup> kcal	COP
1.10~11	-4.4	231	100.7	87	2.7
11~12	-3.1	238	103.4	89	2.7
13~14	-0.5	191	70.7	61	3.1
14~15	0.0	183	66.7	57	3.2
17~18	-1.5	170	68.4	59	2.9
2.7~8	-5.3	227	109.8	94	2.4
8~9	-4.6	227	102.6	88	2.6
12~13	-3.0	231	99.2	85	2.7

較的高いので設定値の保持は容易であり、また13℃の時間帯（21~24時）もほぼ確実に保たれた。後夜半（24~8時）は外気温が最も低下する時間帯であるが、設定温度も10℃と前夜半より低く設定されており、室温は容易に保持された。

4) 成績係数 (COP)

第38表に主要な日の最低外気温、ヒートポンプによる一夜の放熱量、消費電力とその熱量換算値およびCOPの値を示した。最低外気温が0.0~-5.3℃の条件下では、放熱量は17.0万kcal~23.8万kcalであり、消費電力の熱量換算値は5.7万kcal~9.5万kcalとなり、COPは2.4~3.2の範囲にあり、COPは最低外気温が高いほど大きくなる傾向にあった。

また、第74図は暖房設定温度が13℃および15℃の場合で、ヒートポンプがほぼ連続運転されている状態におい

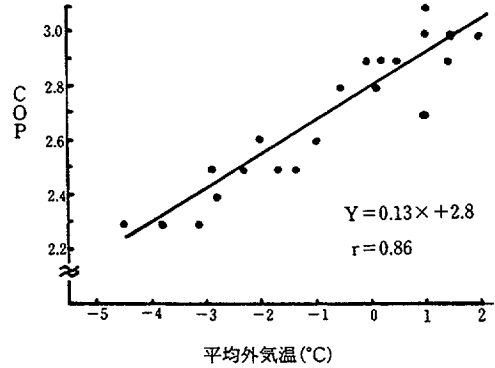
第39表 ヒートポンプの放熱量、消費電力量および推定必要重油量、重油単価

月 日	HP放熱量 10 <sup>3</sup> kcal	消費電力量 kWh	電力 <sup>(1)</sup> 料金 円	必要 <sup>(2)</sup> 重油量 l	重油 <sup>(3)</sup> 単価 円/l
1.10~11	231	100.7	2,518	33.0	76
11~12	238	103.4	2,585	33.9	76
13~14	191	70.7	1,768	27.2	65
17~18	170	68.4	1,710	24.3	70
2.7~8	227	109.8	2,745	32.4	85
8~9	227	102.6	2,565	32.3	79
12~13	231	99.2	2,480	32.9	75

注(1)25円/kWh

(2)重油だき温風暖房機を使用した場合に必要と推定される重油量

(3)電力料金と一致する重油単価



第74図 夜間平均外気温とヒートポンプのCOP

て、運転時間を3時間毎に区切ってこの間のCOPを求め、その値と平均外気温（30分毎の平均値）との関係を表したものである。

COPと平均外気温との間には高い相関が認められ、平均外気温が-4℃前後の場合ではCOPは、2.3付近にあるが、気温が上がるに従ってCOPも上昇し、平均外気温が1℃を越えるとCOPは3の値に接近した。連続運転ではCOPが3を越えることが少なかったのは、外気温が低い時の運転であることと除霜運転のため放熱が一時停止されるためである。

5) 運転経費

ヒートポンプの電力料金と本ヒートポンプより得た放熱量を重油だき温風暖房機で得ようとした場合の推定重油量および電力料金に見合う重油単価を第39表に示した。ここで、電力料金は25円/kWh、重油発熱量8,770kcal/l、暖房機熱効率0.8として各値を求めた。その結果、電力料金に見合う重油単価は65~85円/lと試算された。このことは、重油単価が65~85円を越え、電力料金が変わらないとすれば、ヒートポンプの電力料金の方が重油だき温風暖房機の重油料金より安くなることを意味する。

第40表 外気温と室内機吹き出し口気温との関係

外気温 (°C)	2	1	0	-1	-2	-3	-4	-5
15度設定 (°C)	39	38	37	36	36	35	34	33
13度設定 (°C)	39	39	37	36	35	34	32	31

#### 4 考 察

本ヒートポンプの暖房性能は、室内機より吹出される風量とその温風温度によって決まる。このうち変動要因である温風温度は外気温と高い相関があり、暖房設定温度を15℃とした場合、屋外気温2℃付近では38～39℃の温風を得るが、気温低下とともに温風温度も低下した。しかし、外気温が-6℃になっても温風温度は32℃前後までの低下にとどまり、夜間の屋外大気を熱源とする本ヒートポンプにおいても高い暖房性能を示す主要因となった。

室温の保持能力は、カーテン天井部二層、側壁部一層とした被覆条件のもとで、外気温-1～-1.5℃までの低下であれば設定値15℃、-2.5℃まででは設定値13℃を保つことが可能であった。最大内外気温差は15℃設定で17℃、13℃設定では16℃を示した。

以上の結果をもとに、ヒートポンプの設置容量の設計にあたって必要な放熱量は、次式により求めることができる。

$$H_p = a \cdot c \cdot (P_1 - P_2)$$
 (ここで、 $H_p$  : 放熱量 kcal/h,  $a$  : 空気比熱 kcal/m<sup>3</sup>/℃,  $c$  : 風量 m<sup>3</sup>/h,  $P_1$  : 室内機吹出口気温℃,  $P_2$  : 室内機吸入口気温℃)。

ここで、 $P_1$ の値は外気温および暖房設定温度により変化するので、第69図より、第40表が作成でき、この表より必要な値を適用する。

例えば、外気温が-2℃の条件で室温を15℃に保持するために必要な放熱量は、 $H_p = 20,000$  kcal/h が求まり ( $a = 0.3$ ,  $c = 3,180$ ,  $P_1 = 36$ ,  $P_2 = 15$ ) ヒートポンプの導入にあたってはこの能力を有する機種を選定することになる。

このように、本温室の保温条件下では、暖房設定温度を13～15℃とすると外気温-1～-2.5℃までが設定値を保持できる限界であり、それ以下では本機種の能力を越えた。一方、空気-空気型ヒートポンプの特性による暖房性能に影響を及ぼす要因として、除霜運転があった。除霜運転は、温室内を一時的に冷房状態にするため、それが室温上昇途中にあると設定値の保持を妨げた。特に、暖房設定温度が15℃と高い場合に、除霜運転の影響が大きく表れた。ヒートポンプの除霜運転は空気-空気型機種の構造的な特性であり、その頻度は外気温が低いほど高まるので、本機種の利用は気温低下の著しい地域には向かない理由の1つである。

このように、空気-空気型ヒートポンプの暖房性能は外気温の影響を強く受けることから、温度管理法として

は恒夜温管理法よりも変夜温管理法が本ヒートポンプに適した温度制御法になる。暖房設定温度を一定とする恒夜温管理法では、外気温の最も低下する早朝の時間帯に最大暖房負荷が出現し、また除霜運転頻度も高まる。これに対し、変夜温管理法は外気温がまだ比較的高い前夜半は設定温度を高く保ち、その後外気温の低下に伴って室温も低く設定するので、最低気温出現時に恒夜温管理法の場合ほど内外気温差を大きく保つ必要はなく、室温の保持は容易になる。後夜半の10℃設定時では、屋外気温が-5℃まで低下しても設定値を維持できた。本来、変夜温管理法は作物の光合成生産物の転流促進および呼吸抑制を合理的に進める作物生理の研究から提唱された温度管理法であり、その後省エネルギー効果も認められて広く普及するに至っており、さらに本管理法は空気-空気型ヒートポンプの温室暖房における最適な管理法であるともいえる。

一夜の放熱量および消費電力から求めたCOPは2.4～3.2の範囲にあり、最低外気温が高いほどCOPも高くなる傾向にあった。また、連続運転時間帯を単位時間毎に区切って、その間の平均外気温とCOPの関係をみると両者に高い相関を認め、平均外気温が高くなるほどCOPは大となった。COPが3を超えるのは平均外気温が1～2℃以上の時であった。機種および設定温度は本試験とやや異なるが、小酒井<sup>(28)</sup>は空気-空気型ヒートポンプでほぼ近似したCOPの値を得ており、また外気温が低下するほどCOPも低くなる傾向を認めている。また、林<sup>(5)</sup>は水-空気型ヒートポンプにおいては、熱源水温の高いほどヒートポンプのCOPが高くなる同様な結果を報告している。

空気-空気型機種のCOPが外気温に左右されるのは、外気温が高いほど室内機吸入口-吹出口の温度差が大きくなって放熱量が増大し、COPが高くなることによる。また、外気温の低下は除霜運転の頻度を高め、電力が消費されていても室内機からの放熱がない状態(実際は室内の熱が奪われていることになるが短時間のため、その量は計測できなかった)になり、COPをいっそう低下させる原因となった。本ヒートポンプのCOPは外気温が高いほど大きくなることは、利用地域は温暖地により有利なることを示すもう一つの理由である。

ヒートポンプの電力消費は、本温室の条件下で暖房負荷が増大した場合、一夜に最大100 kWhを越え、同一規模温室における地中熱交換装置の4～5倍の電力量を要した。運転経費を重油だき温風暖房機の重油料金と比較した結果、ヒートポンプの電力料金と一致する重油料

金は65～85円/ℓと試算された。すなわち、重油料金が65～85円/ℓを越え、電力料金を不変とするなら、ヒートポンプの電力料金の方が重油だき温風暖房機の重油料金より安くなり、経済効果を見出だすことが可能になる。小酒井ら<sup>(28)</sup>は、ヒートポンプと石油暖房機のランニングコストの比較を、COPの値と電力料金の価格を数段階に設定し、試算している。それによると、COPが2.5～3で電力料金を25円/kWhとするなら、石油単価が68～83円/ℓの場合に両者のランニングコストは見合うとしており、本報告と同様な結果を得ている。

これらの試算値は運転経費だけの比較なので、今後は装置の償却費を含めた総合的な比較検討が必要であり、またヒートポンプとしての評価は当然冷房機能を加えて検討されなければならない。

暖房機能に限って見た場合、石油価格や電力料金（特に、夜間電力）の動向によっては、温暖地域を主にその利用がはかられる場面は十分想定される。この場合、これまで実用化されてきた省石油暖房方式は、トマトを主体とした比較的低温性の作物への適用に限定されたのに対し、ヒートポンプは補助暖房を必要とせず高温性作

物まで適用できる点において、その利用価値は高いといえる。

## 5 摘 要

床面積352m<sup>2</sup>のガラス温室に圧縮器出力7.5kwの空気-空気型ヒートポンプを取入れ、暖房性能、効率的運転管理法、成績係数及び運転経費について検討を行った。

- 1) 外気温が-1～2.5℃までの低下であれば、13～15℃の設定値を保持でき、内外気温差は最大17℃を得た。
- 2) 外気温の低下が著しい場合は、除霜運転の頻度が高まり、設定値の保持を困難にすることがあった。
- 3) 運転管理法は、外気温の低下に伴って設定値も下げていく変夜温管理法が本ヒートポンプの好適制御法と認めた。
- 4) 成績係数(COP)は、2.4～3.2の範囲にあり、外気温が高いほど大となった。
- 5) 運転経費を重油だき温風暖房機の場合と比較したところ、重油料金が65～85円/ℓでほぼヒートポンプの電力料金と等しくなると試算された。

## 第4章 総合考察

施設園芸は、冬期間ほとんど利用されることのなかった太陽エネルギーを積極的にとらえ、農業生産に役立てるといふ点からみれば、それ自体、エネルギーの効率的利用技術システムといえる。しかし一方で、被覆、保温や暖房燃料等の生産資材に多くの石油製品を使用するため、エネルギー多消費型農業であるという批判も受けている。施設園芸において使用される石油エネルギーは、我が国全体の石油消費量からみれば、きわめてわずかであり<sup>(62)</sup>野菜の周年安定供給や農業経営の安定化等その大きな貢献度からみれば、十分社会的役割は果たしているといえよう<sup>(15)</sup>。しかし、有限な化石資源を節約利用し、また国際情勢の変化により石油価格が変動しやすいことなどから、消費をできるだけ抑える方向に進んでいる社会情勢に、施設園芸においても協調する必要性は高い。さらに、価格高騰や供給不安定な場面を常に想定し、農業経営の悪化防止のため技術的な適応の仕方を明らかにしておくことも重要である。

本研究は、二度にわたって見舞われた石油ショックを契機に、それまで石油燃料だけに頼っていた暖房方式を、石油をまったく使用しないか、ごく少量にとどめることができる方式の実用化に取り組んだものである。試験開始時は、省エネルギー化は社会的課題であり、とりわけ施設園芸では急を要する課題であったので、その暖房方式は、現状の温室に直ちに取入れられ、暖房の実効性が高く、また汎用性ができるだけ広いことを条件に選定した。

### 1. 地中熱交換暖房

本装置の考案は山本<sup>(94)</sup>によるものであり、その後、森ら<sup>(42)</sup>や山崎<sup>(99)</sup>による小型温室の実験において高い効果を認めた。本研究は、これらの結果に着目し、広範な普及をはかるため、一般形式の大型温室に取り入れて実用化試験を開始した。装置の改良試験を続け、暖房性能や、装置の設計基準値、室内環境特性等がほぼ明らかになった段階で、現地実証試験を実施した。この実証試験において設置した地中熱交換装置が、生産者の温室に取り入れられたわが国最初の実用方式となった。

実証試験においても高い暖房効果を認めたこと、さらに石油価格の上昇と供給不安定な情勢を背景に、その後本方式を導入する生産者が増大し、1983年には神奈川県では47戸、5.5 haの栽培面積<sup>(22)</sup>となり、また全国的には約50 ha<sup>(55)</sup>までに広まり、本方式に対する関心の高さが示された。

また、本研究以後、全国各地の研究機関においても地中熱交換暖房に関する試験が数多く取組まれ、適用作物もトマトだけではなく、イチゴ、キュウリ、ナス、ピーマン等の野菜から、洋ラン、カーネーション、ガーベラ等の花き類、ブドウ、ミカン等の果樹類までに広がりをみせた<sup>(2,7,12,24,39,64,85,90,91)</sup>。さらに、試験は温暖地だけではなく比較的寒冷な地域においても実施され、効果的な利用法が明らかにされた<sup>(12,78)</sup>。本方式の変法として、エアカーテン方式<sup>(90,101)</sup>や、蓄熱体を水に変えた水蓄熱方式への試みもいくつかみられるようになった<sup>(31,41,58)</sup>。

このように、地中熱交換方式が高い関心がもたれ、一定の普及をみるようになった理由には、次のようなことが考えられる。

まず、太陽熱を暖房熱源とし、比較的単純な構造で、高い暖房性能を得たことが最も大きい要因であろう。暖房熱源としての太陽熱は日射量が豊富であれば、広い地域で利用でき、個々の農家が単独で取入れやすい特徴がある。暖房熱源の多様化がはかられるなか太陽熱以外に、都市ゴミ燃焼熱、温泉熱、地下水、風力等の検討が進み、一部は実用技術として導入されたが、これらの多くは利用には地域的な限定があったり、集団あるいは地域ぐるみで利用計画を立てなければ使用できない等の難点があった。この点において、太陽熱は格段に利用しやすい利点がある。

また太陽熱暖房方式には、内部集熱型と別途集熱器を用いる外部集熱型とがあり、外部集熱型暖房についても研究もされた<sup>(40,44,47,77)</sup>が、集熱器の設置に広い面積を要することや、最高60℃程度の温湯式になるため熱効率が低いという問題点を克服できず、実用化には至らなかった。内部集熱型は、温室自体を集熱器とするので、特別な装置を必要としないところに最大の特長があり、その後の試験に取組んだ潜熱蓄熱方式や、他の研究機関で開発試験が行われたいくつかの水蓄熱方式を含め、太陽熱暖房方式のほとんどが内部集熱型であった。

地中熱交換方式の暖房性能は、カーテン二層被覆条件下では、内外気温差は最大15℃（外気温-5℃時、室温10℃）、一層被覆では同じく13℃（同-3℃時、同10℃）がほぼ限界であった。現地の実態調査においてもほぼ同様な結果であり、いずれも安全確保のため補助暖房を備えていたが、まったくそれが稼働しないか、稼働しても

慣行の温風暖房方式に対して最大20%程度の重油消費量ですんだいた。

消費する電力量に対して獲得できる暖房熱量が大きく、その比は最大12となり、エネルギー効率の高い装置であることを認めた。また、本装置を設置するには相当な初期投資額を要し、電力消費量も大きい、重油消費量がきわめて少なく、長期的にみるなら高い経済効果が得られると判断された。現地実証試験の結果では、本方式の経済性を運転経費に装置の償却費を加えて、慣行の温風暖房方式と比較してみたところ、重油節減の効果が大きく表れ、トータルコストは67~82%ですんだ。両者の運転経費+償却費が同一になる重油価格を求めると、約40~60円/ℓと試算される。すなわち、重油価格が40~60円/ℓ以上に上昇した場合、本方式に経済性が生じることを意味する。重油価格は一時100円/ℓにまでに上昇し、これが普及を速めた大きな要因となった。

本方式は温度の制御性能が高く、任意な時間帯に暖房設定温度の変更が可能であり、慣行の暖房方式と同様に変夜温管理法を採用することができる。また、日中温室を密閉して蓄熱運転を続けると炭酸ガス濃度の低下を招くが、このことは、炭酸ガス施用により慣行暖房の温室では、実現しにくかった高温、高炭酸ガス濃度管理を可能にし、これらにより、いっそうの高位、高品質生産を期待できる。

さらに、本方式は構造上消耗部分が少なく、長年月にわたって使用が可能であり、また保守管理が容易なことも大きな特色といえよう。

これらに対して、問題点や運転管理上留意しなければならない点もいくつか認めた。

本方式は、太陽熱利用暖房である以上、気象変動の影響を受けることは避けられない。先の暖房性能の指標である内外気温差13~15℃を得るためには、日中十分な蓄熱量を確保して地温を16~18℃以上に保持する必要があった。蓄熱量に対して放熱量の大きい日が続くと、地温が低下して低温障害を受けるおそれもあり、地温を測定しながら運転管理をすることがきわめて重要であった。

試験開始当初、最も懸念したのは、曇雨天日における暖房性能で、このような低日射日は、蓄熱不足により暖房能力が発揮できないと推測された。しかし実際は、このような日の夜間は外気温があまり低下せず、温室の暖房負荷が小さくなり、設定値の保持は比較的容易であった。しかし、日中曇雨天であっても夜間晴れて外気温が著しく低下する気象条件の日もあり、また先の地温低下

や異常気象等も想定しなければならず、生産農家への導入にあたっては補助暖房の備えが欠かせなかった。

安定して蓄熱量を確保するためには、150~200 cal/m<sup>2</sup>/day以上の日射量が必要と推定され、藤森ら<sup>(12)</sup>や川田ら<sup>(24)</sup>も同様な値を明らかにしている。したがって、冬期このような日射量が安定して得られるのは関東以西の太平洋沿岸地帯であり、ここが本方式の適用地域となる。これ以外の地域では、低日照期をさける等の措置が必要になる。

本方式の室温保持限界は最大10℃にあり、トマトやイチゴにおいて最もその性能を発揮できる。暖房必要温度がそれ以上の作物では、あらかじめ補助暖房との併用法を考えなければならない。この場合、キュウリのように暖房温度が15℃前後の作物では、温風暖房機との併用運転により、温風暖房機単独運転に対して約50%の節油効果が得られた。しかし、平木ら<sup>(7)</sup>が明らかにしたように、さらに暖房必要温度が高い作物では本方式の寄与率が著しく低下し、基本的には高温性作物の適用には向かないといえよう。

太陽熱暖房方式は、広い地域で利用可能であるが、地中熱交換方式の場合、温室の立地条件や温室内部の状態によっては設置が困難なことがあった。地下水位が高く、埋設したパイプ内に水の進入が予想されるところや、養液栽培装置がすでに設置されている温室等がその例である。また、パイプの埋設やピットの設置に大がかりな土木工事を要し、既設の温室では大型機械を導入しにくい。ため、相当部分は人力に頼らざるをえないことも問題点の一つであった。このため、太陽熱暖房方式をさらに広範に普及させるためには、蓄熱装置を地上部に設置できる方式の開発が望まれた。

## 2. 潜熱蓄熱暖房方式

蓄熱装置を地上部に設置できる太陽熱利用暖房の方式として、メーカーによって開発、実用化された空気-水型対向流式水蓄熱方式(商品名、グリーンソーラ)がある。本方式は、大がかりな土木工事を必要とせずに設置でき、また地中熱交換方式とほぼ同等な暖房効果を認めた<sup>(16,48)</sup>ことなどが評価されて、1983年には約26 haの普及面積をみた<sup>(50)</sup>。

地中熱交換方式は土壌の温度差、また水蓄熱方式は水の温度差にもとづく熱交換方式であり、この点においてはともに顕熱蓄熱方式といえる。したがって、水蓄熱方式の場合、暖房に必要な熱量を確保するためには、多量の水を要し、先の方式では10 a当り13.2 tを保有させることを原則としていた。また、蓄熱槽内の水は上層部と下

層部との間に温度勾配が生じるため、対向流型では、日中の蓄熱運転では蓄熱槽内の下層部の冷水を、夜間の暖房運転では上層部の温水を熱交換機に送込むように朝夕2回水流を変える操作を必要としていた。

このように、水蓄熱方式は設置が容易な利点はあるものの、多量の水を必要とすることから、さらに蓄熱装置を小型化できる新たな方式の開発、実用化が望まれた。

これを可能にする方式として、高倉ら<sup>(82)</sup>が小型温室で実験を行っていた潜熱蓄熱方式に着目した。潜熱蓄熱暖房は、物質の固相と液相との間で相変化するときに取り出す熱を利用するもので、顕熱蓄熱の場合よりも単位容積当りの熱量ははるかに大きく、蓄熱装置を小型化できる可能性をもっている。

本試験では、まず松下技研KKが開発した硫酸ナトリウム10水塩-炭酸ナトリウム10塩-塩化ナトリウムの3元共融混合物を主成分とし、融点22℃の蓄熱材を用いた。次いで、同社製でさらに融点を16-21℃に下げた硫酸ナトリウム10水塩と尿素の混合物を主成分とする蓄熱材を供試した。試験では、蓄熱材を効率的に融解させる装置の構造について明らかにし、その場合の暖房性能、室内環境特性について検討を行い、その後実用化の見通しが得られたところで装置を生産者の温室に入れた現地実証試験を実施した。

これらの試験の結果から本方式の特性について述べると次のとおりである。

内部集熱型太陽熱利用暖房方式である点においては、地中熱交換方式と全く同様であり、その特徴は基本的にはそのままあてはまる。しかし、日照、気温等の気象変動に対する影響は地中熱交換方式以上に受けやすかった。地中熱交換方式では、曇雨天日であっても地温が一定値以上に保持されているなら、暖房能力を発揮したが、本方式は前日の放熱終了後当日日射が少なく、蓄熱量が不足すると暖房能力は著しく低下した。蓄熱が無い場合には、暖房能力を全く発揮できないこともあった。蓄熱-放熱のサイクルは1日または数日の短い単位であり、同様なことは西口ら<sup>(51)</sup>も認めている。

このように、潜熱蓄熱方式においては補助暖房として温風暖房機の備えが欠かせない。このことは、装置の設計段階の蓄熱材量を定める際、日暖房負荷の100%をそれで満たすよう求めるのではなく、一定熱量は補助暖房で補うハイブリット方式にすることが望ましいと考えられる。その寄与率は現地実証試験の装置設計にあたっては、日暖房負荷のうち蓄熱装置が70%、残り30%は補助暖房による熱量と設定した。地中熱交換方式では、パ

イプ本数やファン台数を減らしても経費節減に寄与する割合が小さいのに対し、潜熱蓄熱方式では、蓄熱材量の多少は設置経費に大きく影響する。このように、補助暖房を備える必要がある以上両者の特性を生かした運転管理を行い、また装置への初期投資額を抑えることが重要であろう。

蓄熱材量は10a当り5,000kgで、水蓄熱方式の水量よりはるかに少ないが、蓄熱装置の作製にあたっては蓄熱材間に空気流路を設ける必要があるため、総容積は水蓄熱方式の場合とほとんど変わらなくなり、この点における優位性は強調できなかった。

現地実証試験は1984年より開始し、ほぼ目的とする暖房効果を認めたが、神奈川県においては現地農家へはこれ以上に導入されなかった。この理由に、石油価格がこの頃より次第に低下傾向を示し、多額の初期投資に対して経済効果を見出しにくくなったことにある。本方式の場合、設置経費が地中熱交換方式の1.5倍、また年間の償却費も約2倍と試算されたことも積極的な普及へと進めることはできなかった。しかし、全国的には設置の容易さが評価されて散在的に取入れられ、1989年では約4haの普及面積となっている。

### 3. ヒートポンプ

以上述べたように、内部集熱型太陽熱暖房方式では維持できる室温の限界は外気温を-5℃とした場合10℃であり、また気象変動に対応し、安全を期すためには補助暖房の備えが欠かせなかった。そこで、より高温性の作物に適用でき、しかも補助暖房を必要としない方式として、ヒートポンプによる暖房試験に着手した。ヒートポンプによる暖房としては、水熱源方式に関する研究があり、一部ではすでに普及していたが、本研究では汎用性が大きいと考えられる空気熱源型の機種を選定した。暖房性能は、地中熱交換方式と同規模温室において内外気温差18℃を認め、地中熱交換方式よりも3℃高く室温を保持できることが可能であった。また本ヒートポンプ暖房の特徴として、夜間外気を熱源とするため、夜温の低下は暖房負荷を増大させるだけではなく、室外機に霜を付着させ、それを融解除去するデフロスト運転により、暖房を一時中断させ、室温の保持に影響を与えた。この点において、石油を燃料とする暖房方式より、安定性に欠けることになる。しかし、夜温管理に変夜温法を適用するならば、外気が最低極温に達する時には暖房温度も低く設定され、デフロスト運転の影響を小さくすることは可能であった。夜温外気温度とヒートポンプのCOPには高い相関があり、外気温が高いほどCOPは大となっ



た。このことは先のデフロスト運転と合わせていうなら、空気熱源型ヒートポンプの適用地域は、外気温度の低下程度が小さいほど有利になることを示している。

#### 4. 今後の展望

最後にこれらの結果をまとめ、今後を展望してみた。

地中熱交換暖房方式は、それまで石油燃焼方式だけに限られていた暖房形態を、自然エネルギーを利用し、石油を使用しないかわずかな使用だけで暖房を可能にする実用方式の先がけとなった。その後、本研究で進めた潜熱蓄熱や空気-空気型ヒートポンプ、さらには水蓄熱暖房やウォーターカーテンへと広まりをみせ、これに地熱水や都市ゴミ・廃タイヤ・もみがら等の燃焼熱方式などを加えるなら、ひとつおりの省石油暖房技術のメニューがとりそろったことになる。これらの技術適用にあたっては、地域のエネルギー実態に合わせて選定されよう。ウォーターカーテン方式は地下水の豊富な北関東を主に発展し、地下水の汲み上げ規制のある神奈川県ではほとんど導入されなかったのが、その例である。

これらが広範に普及するかどうかは、石油価格、熱源供給の安定性、装置の設備費、運転管理や保守管理の容易さ、室内環境への影響等にかかわる。これらのほとんどの方式では、石油価格が一定値以下で安定しているなら、石油燃焼方式（特に、温風暖房機）に比べて一步劣る点が多いことは否めない。このため、石油価格が下落に転じた1994年前後を堺にこれら方式の導入事例は減少している。したがって、現在は省石油暖房方式の普及に大きな進展は望めないことになるが、石油価格の変動は常に予測されることであり、今後も有効な暖房方式の開発に努め、メニューを一段と豊富にしていく必要がある。

#### 引用文献

1. 青柳光昭・菅沼健二・長尾周幸. 1983. 地中熱交換温室の暖房効率向上に及ぼす2、3の要因. 愛知総農試研報, 15: 196-203.
2. 段正幸・奥田義二・重田保・加藤彰宏. 1983. ブドウハウスにおける地中熱交換暖房とブドウの生育促進. 園学要旨 昭56秋: 92-93.
3. 橋本博好. 1980. ハウスの多層被覆方式と燃費節減効果. 農及園, 55: 1135-1140.
4. 原 道宏・小倉祐幸. 1982. 井水散水2重ハウスにおける温度環境の形成機構(1) 冬期夜間における地上部伝熱機構のシステム解析. 生物環境調節, 20: 77-86.
5. 林真紀夫・古在豊樹・中村潤・渡部一郎. 1983. 温室におけるヒートポンプ利用(1) 暖房システム. 農業気象, 38: 379-389.
6. 久富時男・川島信彦・森岡和之. 1979. 良品多収のための環境管理基準の設定に関する研究(第4報) トマトに対する日射量に応じた夜温管理. 奈良農試研報, 10: 28-37.
7. 平木永二・佐野洋・高橋英生・竹前 江藤忠育・内田好則・後藤義昭・津田安敬. 1986. 暖地における地中熱交換ハウスの実用化. 宮崎総農試研報, 20: 47-64.
8. 堀口郁夫・干場信司・谷 宏. 1983. 札幌郊外におけるゴミ焼却利用温室団地建設のための基礎研究. 北大農邦紀, 14: 11-25.
9. 堀口郁夫. 1984. 潜熱蓄熱材による温室暖房のための基礎試験. 北海道大農学部紀要, 14: 234-241.
10. 北条雅章・伊東正. 1982. 温室の地中熱交換暖房に対する一考察. 千葉大園芸学部学術報告, 30: 47-52.
11. 藤本幸平. 1971. 施設園芸の環境と土壌. 位田藤久太郎編: 37-46.
12. 藤森基弘・土屋弘道・長瀬嘉 小林隆. 1983. 野菜・花きの施設栽培における地中熱交換方式の実用化に関する研究. 長野野菜花き試報, 3: 21-38.
13. 板木利隆. 1976. 施設栽培における暖房方式ならびにトマト、キュウリの気・地温制御に関する研究. 神奈川園試研報別冊1976.
14. 板木利隆. 1980. 施設園芸における省エネルギー技術の解説. 農業改良資金協会.
15. 板木利隆. 1983. 施設園芸 装置と栽培技術. 誠文堂新光社.
16. 市村 尚. 1983. 太陽熱利用型水蓄熱装置(グリーンソーラ). 施設園芸要覧(1983): 35-38.
17. 伊藤実・岩根和夫. 1982. 地中熱交換方式による排気温の算出法について-地中熱交換管外径114mmについて-. 農業施設, 13: 21-28.
18. 伊東 正. 1973. そ菜の生育に及ぼす炭酸ガス環境の影響. 千葉大園学特報, 7: 1-134.
19. 岩崎雄次郎・高根明雄・今村孝彦・木下耕一. 1984. 空気対向流方式による熱交換機の施設暖房実用化に関する研究(第1報) 集熱能力と暖房効果について. 園学要旨昭56春: 282-283.
20. Jaffrin, A. and P. Cadier. 1982. Latent heat storage applied to horticulture. Solar Energy, 28:313-321.

21. 鴨田福也・内藤文男. 1975. 野菜の光合成及び蒸散に関する研究Ⅱ差動トランス利用による生長記録装置及びこれを用いてのトマト、キュウリなどの伸長肥大の測定. 野菜試報A 2 : 33-47.
22. 神奈川県農業技術課. 神奈川の野菜. 昭和57年.
23. 神奈川県農業総合研究所. 1983. 野菜作の作目別、作型別経済性標準指標一覧. 神奈川総農試、経済試験科資料、第50号.
24. 川田富雄・町田治幸. 1983. 地中熱交換暖房方式による施設野菜栽培の実用化に関する研究(第2報)促成ナス栽培における地中熱交換暖房方式の実用化試験. 徳島農試研報, 21 :
25. Kecn, M. and P.A. Aidric. 1979. Phase change energy storage in a greenhouse solar heating system. ASEA paper No.79:4087.
26. 桐村義孝・森俊人・久保雄之介・中川勝也・沢正樹・藤原辰行・藤本治夫. 1979. 太陽熱利用蓄熱ハウスに関する研究 第2報 トマトに対する密閉型施設での炭酸ガス施用. 兵庫農総研報, 28 : 49-56.
27. 桐村義孝・久保雄之介・永井耕介・森俊人・中岡利郎・藤本治夫. 1983. 太陽熱利用蓄熱ハウスに関する研究 第4報 マイクロコンピュータによる非密閉型蓄熱ハウスの環境制御. 兵庫農総研報, 31 : 13-20.
28. 小酒井一嘉・上原毅. 1986. 空気熱源ヒートポンプ利用による温室暖房試験. 農業電化, 39(6) : 16-20.
29. 古在豊樹. 1981. 施設園芸省エネルギーの手引き No.3 : 37-41.
30. 古在豊樹・伊東正・稲山光男・小林肇. 1982. マイクロコンピュータによる温室環境管理システムの開発と実用化試験. 農業気象, 38 : 45-50.
31. 古在豊樹・武内英雄・岡崎誠司・渡部一郎・林真紀夫・志田憲一. 1983. 内部集熱型水蓄熱方式による太陽熱利用温室の熱的性能. 農業気象, 38 : 361-369.
32. 古在豊樹・林真紀夫・児玉友孝・権在永・渡部一郎・大沢英夫. 1985. 温室におけるヒートポンプ利用(3)夏期夜間冷房システムの運転特性. 農業気象, 41 : 231-240.
33. 古在豊樹. 1987. ヒートポンプ. 施設園芸ハンドブック. 日本施設園芸協会,
34. Mears, D.R., W.J.Roberts and J.C.Simpkins. 1977. Solar energy and its utilization to heat greenhouse. Proc. of the international symposium on controlled environment agriculture, Arizona:85-95.
35. 三原義秋・林真紀夫. 1979. 温室の保温に関する研究(1)カーテンの有無および種類と温室の熱貫流率. 農業気象, 35 : 13-19.
36. 葦原義和. 1979. 地熱水の農水産業への適用(1)農及園, 54 : 188-192.
37. 葦原義和. 1979. 地熱水の農水産業への適用(2)農及園, 54. 273-276.
38. 宮川逸平. 1972. ベレットハウスの構造と効果. 農業気象の実用技術, 養賢堂 : 55-66.
39. 望月太・原田昭・青木幹雄・佐久間信夫. 1984. ブドウ栽培における地中熱交換ハウスの適用. (1)農及園, 59 : 1149-1154.
40. 望月正之・中村宏・平岡達也. 1983. 太陽熱利用(外部集熱方式)による温室の暖房技術に関する研究1. 神奈川農総研研報, 124 : 23-33.
41. 守田伸六・深井誠一. 1982. 水槽蓄熱ハウスの性能試験. 大阪農林技セ研報, 19 : 1-15.
42. 森 俊人. 1977. 地中熱交換方式による冬季ハウストマト栽培の実用性. 農及園, 52 : 41-45.
43. Mori, T., Utilization of solar energy for winter cropping greenhouse tomato. Acta Horticulturae, 87:321-327.
44. 村上里美・奈良誠・佐瀬勘紀. 1986. ゴムロールを用いた簡易太陽熱集熱機の性能. 農業施設, 17 : 80-85.
45. 村越重雄. 1981. トマト灰色カビ病のベンツイミタゾール系剤耐性菌に対する各種殺菌剤の防除効果. 神奈川園試研報, 28 : 50-58.
46. 内藤文男. 1981. 施設園芸ハンドブック, 環境制御技術と機器装置, 日本施設園芸協会.
47. 奈良誠・盛永光義・阿部和彦・押方利郎・櫻村俊制正. 1988. ソーラー・グリーンハウスの試作とその熱収支解析. 農業施設, 19 : 19-35.
48. ネボンK K. グリーンソーラー技術資料. ネボン株式会社.
49. 日本園芸生産研究所. 1980. 太陽熱の地中一熱交換ハウスのすすめ. 日本園芸資材研究会 : 10-19.
50. 日本施設園芸協会. 1986. 園芸用ガラス室、ハウス等設置状況. 農林水産食品流通局野菜振興課編.
51. 西口郁夫・伊藤重雄・山口省吾. 1985. 潜熱蓄熱材を利用した太陽熱温室暖房に関する研究. 三重農技セ研報, 13 : 21-30.
52. 仁科弘重・高倉直. 1983. 潜熱蓄熱方式による太陽熱暖房に関する研究(1)潜熱蓄熱材の特性試験と

- 小型温室における暖房実験. 農業気象, 39(3): 201-211.
53. 仁科弘重・高倉直・竹田武司・町田育彦. 1984. 潜熱蓄熱方式による太陽熱温室暖房に関する研究(2) 空気集熱方式による模型温室の暖房実験. 農業気象, 39(4): 311-314.
54. 仁科弘重・高倉直・後藤英司. 1982. 潜熱蓄熱方式による太陽熱利用温室の実用化に関する研究(1) 潜熱蓄熱槽の熱交換特性の実験的解析. 昭和58年度日本農業気象学会大会講演要旨.
55. 農林水産省食品流通局. 1986. 園芸用ガラス室、ハウス等の設置状況.
56. 農林水産技術会議事務局・野菜試験場. 1980. 施設園芸における省エネルギー対策に関する試験成績概要.
57. 岡田益巳. 1980. 温室設計の基礎と実際, 三原義秋編: 182-204.
58. 岡野利明・山本雄二郎. 1986. 水蓄熱式太陽熱温室(1) 水耕栽培用システムの熱特性. 農業気象, 42: 19-28.
59. 小国研作. 1982. 温室用ヒートポンプに関する研究. 農業気象, 37: 303-308.
60. 小倉祐幸・川又虎好・竹永博・中島教博. 1982. 二重屋根ハウスの井水散水による加温性. 農業施設, 12: 24-27.
61. 大原源二. 1980. 暖房系の熱効率向上技術, 施設園芸の省エネルギー新技術農林水産技術情報協会: 66-86.
62. 太田成美. 1981. 施設園芸ハンドブック. 日本施設園芸協会, 137-139.
63. 権 在永・古在豊樹・村瀬圭一・鈴木秀章. 1984. 地中熱交換温室エアカーテン方式の熱的性能. 関東の農業気象, 7: 2-6.
64. 埼玉園試. 1980. 施設園芸における省エネルギー対策技術に関する試験研究成績概要. 農林水産技術会議事務局・野菜試験場: 57-58.
65. 佐々木皓二・板木利隆. 1979. 地中熱交換方式による施設暖房の実用化に関する研究(第1報) ハウス内環境特性、熱収支およびトマトの生育・収量について. 神奈川園試研報, 26: 26-34.
66. 佐々木皓二・板木利隆. 1980. 地中熱交換方式による施設暖房の実用化に関する研究(第2報) 温風暖房機併用における暖房性能・重油節減効果およびキュウリの生育、収量について. 神奈川園試研報, 27: 35-44.
67. 佐々木皓二・板木利隆・高橋基. 1981. 地中熱交換方式による施設暖房の実用化に関する研究(第3報) 二層カーテンおよび複合環境制御方式を用いた場合の暖房特性について. 神奈川園試研報, 28: 39-49.
68. 佐々木皓二・高橋基・金目武男・佐藤紀男・板木利隆. 1982. 地中熱交換方式による施設暖房の実用化に関する研究(第4報) 現地大型施設における暖房性能、室内環境特性、トマトの生育収量および経済効果について. 神奈川園試研報, 29: 29-38.
69. 佐々木皓二. 1982. 地中熱交換方式の暖房効果と運用上の問題点. 農業施設, 12: 41-47.
70. 佐々木皓二・高橋基・板木利隆. 1983. 潜熱蓄熱方式による施設暖房の実用化に関する研究(第1報) 低融点蓄熱材を用いた装置の暖房性能、温度特性および蓄熱材の熱特性について. 神奈川園試研報, 30: 46-43.
71. 佐々木皓二・高橋基・板木利隆. 1984. 潜熱蓄熱方式による施設暖房の実用化に関する研究(第2報) 新蓄熱装置の暖房性能および熱交換特性について. 神奈川園試研報, 31: 26-34.
72. 佐々木皓二・高橋基. 1985. 潜熱蓄熱方式による施設暖房の実用化に関する研究(第3報) 経済規模温室を用いた暖房試験. 神奈川園試研報, 32: 26-34.
73. 佐々木皓二. 1983. 潜熱蓄熱方式による施設暖房について. 関東の農業気象, 4: 2-4.
74. 佐々木皓二・高橋基・板木利隆. 1985. 空気熱源型ヒートポンプの温室利用(2) 夏期夜間冷房について. 関東の農業気象, 9: 2-7.
75. 佐々木皓二. 1989. 空気-空気型ヒートポンプによる温室環境調節-温室暖房について. 農業施設, 20: 121-127.
76. 瀬古龍雄. 1984. ヒートポンプについて、とくに現地事例を中心として. 施設と園芸, 44: 102-111.
77. 菅沼健二・青柳光昭・永尾周幸. 1985. コレクタによる太陽熱の集熱と温室暖房への利用. 愛知総農試, 17: 207-214.
78. 庄子孝一・佐々木丈夫・日野義一・鈴木信隆・高橋伸. 1982. 寒冷地の施設野菜栽培における太陽熱の有効な蓄熱暖房の実用化に関する研究. 宮城園試研報告, 4: 17-42.
79. Short, T.H. and P.C.Badger. 1977. A solar pond for heating greenhouse and rural redidences. Proc. of the international symposium on controlled en-

- viroment agriculture, Arizona, 312.
80. Sims, T., 1978. Saving on cost with the use of thermal screens. Hort. Industry, November 1978:53-54.
  81. 高橋英生. 1984. アルミ蒸着フィルム利用による施設野菜の燃料節減. 農及園, 59:1033-1038.
  82. 高倉直・仁科弘重. 1980. 潜熱蓄熱グリーンハウス施設農業への新エネルギー利用 (太陽・風編). フジノテクノシステム:236-241.
  83. 高倉直・山川健一. 1981. 地中熱交換ハウスの設計 1. 定常一次元モデルによる解析. 農業気象, 37:187-196.
  84. 竹田武司・工藤康夫・町田育彦. 1984. 硝系蓄熱材を利用した温室暖房. エネルギー・資源, 5:484-489.
  85. 谷口哲徹・岡田正道・小田原実・野呂徳男. 1980. カンキツ類の施設栽培に関する研究 (第2報) カンキツ栽培における地中熱交換ハウスの暖房能力と発育生態及び果実の品質. 園学要旨 昭55春:14-15.
  86. Tantau, H.J. 1978. The influence of single and double shelters on the climate and heat consumption of greenhouses. Acta Horticulturae, 87:119-123.
  87. 千葉農試. 1982. 潜熱蓄熱暖房ハウスの省エネルギー効果の確認試験. 千葉試野菜試験成績書, 292-241.
  88. Tibbitt, T. W and G. Bottenberg. 1976. Growth of lettuce under controlled humidity levels. J. Amer. Soc. Hort. Sci. 101:70-73.
  89. 土岐和久. 1970. 施設栽培における適環境条件の生理的研究 (第1報) キュウリ栽培温度の解析. 千葉農試研報, 10:62-72.
  90. 土岐和久・井上満. 1980. 地中熱交換方式の改良に関する研究 (第1報) エアカーテン方式の構造と配管間隔の温度特性. 園学要旨 昭55秋:232-233.
  91. 津田佳久弥・真子伸生・河淵明夫・伊沢房雄. 1984. 早生ウンシュウミカンの早熟栽培に関する研究 (第3報) 地中熱交換方式暖房ハウスにおける熟期促進と省エネルギー効果について. 愛知総農試研報, 16:183-193.
  92. White, R.A.J. 1977. Response of tomatoes to night-high day temperature with CO<sub>2</sub> enrichment. Acta Horticulturae, 76:141-145.
  93. Winspear, K.W. and B.J. Bailey, B. 1977. Greenhouse thermal screens save fuel. Proc. of the international symposium on controlled-environment agriculture, Arizona:284-291.
  94. 山本雄二郎. 1966. 地中-空気熱交換の応用例. 農業気象, 22:77-79.
  95. 山本雄二郎. 1977. 地中熱交換方式による栽培用ハウスの暖房に関する研究. 電力中央研究所報告, 476007:1-67.
  96. 山本雄二郎・青木清・岡野利明. 1981. 地中熱交換ハウスの基本設計. 電力中央研究所報告, 481011:1-31.
  97. 山本雄二郎. 1985. 地中熱交換温室. 農業気象, 41:273-280.
  98. 山本雄二郎. 1980. 地中熱交換方式 施設園芸の省エネルギー新技術. 農林水産技術会議事務局:87-113.
  99. 山崎肯哉. 1980. 太陽熱の地中-熱交換方式によるハウスの施設栽培. 日本園芸資材研究会報, 2:1-9.
  100. 野菜試験場. 1977. 野菜の炭酸ガス施用に関する試験成績概要.
  101. 湯橋 勤・土岐和久. 1983. エアカーテン方式による地中熱交換暖房ハウスの現地調査結果と今後の課題. 関東の農業気象, 4:21-24.

## Summary

The total area of greenhouse in Japan reached 45,000ha in 1992, the largest in the world. This protected cultivation can supply fresh vegetables in winter as well as guarantee a high and stable income to farmers. Thus it has become an important part of Japan agriculture. The crops produced cultivation are mainly those that normally cannot be produced in outdoor fields during the winter. Therefore, a greenhouse heating is a technique for environmental control. The required amount of oil fuel for heating, per 10a per one winter growing season, was 6 to 13kl for tomato cultivation and 8 to 17kl for cucumber cultivation.

However, the oil crises of 1973 and 1979 considerably raised the price of oil and dealt a heavy blow to the greenhouse industry. It became urgently necessary to investigate method to reduce the need for heating oil in protected cultivation. Experiments were conducted to investigate oil use reduction methods or, indeed, methods requiring no use of heating oil.

In this study the author investigate three type of heating systems.

- 1) A solar greenhouse heating system using an earth storage heat exchange system
- 2) A solar greenhouse heating system using latent energy storage materials
- 3) A greenhouse heating system using an air to air type heat pump.

- 1) A solar greenhouse heating system using an earth storage heat exchange system :

Greenhouses themselves are devices collect solar energy. During the day, they maintain the temperature necessary for cultivation of the crops. They discharge any surplus quantities of heat by means of ventilation. In the system studied, this surplus heat passes through pipes buried under the greenhouse by use of fans and is stored underground in the soil that surround the pipes. When the internal temperature of the greenhouse falls at night, the fans operate again, this time bringing the stored heat back into the greenhouse.

The system consists of fans, an absorption pit, a series

of pipes and blowing pits.

The earth storage heat exchange system was equipped in the greenhouse of 314m<sup>2</sup> area.

The amount of circulating air was 127m<sup>3</sup>/min when 46 rows of the heat exchange pipes with two flowing fans were used in 1979-'80. In the next year, that was 147m<sup>3</sup>/min. because of using the high efficient fans.

When the double layer thermal screens was applied, room temperature was maintained at the designed degree (12-11-6-10°C) and the maximum inside-outside air temperature difference was higher than 15°C every year.

As this greenhouse was very efficient to insulate the heat and the midnight minimum temperature was regulated to 6°C, amount of heat radiation from soil into the air was low. Amount of stored heat under the ground was more than the radiated heat, in general.

Soil temperature was maintained at 17-20°C. Temperature of warm air blowing in greenhouse was 13.5-15°C

When the thermal screen was single layer and outside air temperature was below -2°C, room temperature was not always maintained at 10°C but maintained at 6-9°C.

In cloudy and rainy days, as the temperature was not so dropped even early in the morning, the lowest temperature in greenhouse could be maintained at 6-9°C.

When the top ventilators were not operated, relative humidity in greenhouse rised over 90%. But when they were operated, relative humidity fell down to 75-80%.

Concentration of CO<sub>2</sub> in greenhouse was maintained to 700-750ppm at night, but fell 150-180ppm in the daytime.

As the greenhouse heating energy was more than octuple as much as consumption of electric power for driving fan, energy efficiency of this system was proved to be economical enough.

As it was impossible to maintain necessary night temperature for growing cucumber only by this system, an efficient use of warm-air heating system was conducted. Investigation was done for the heat efficiency of the system, environmental conditions in the house, consumption of oil and the growth and yield of cucumber.

When the fans of this system were running from 20.00 to 5.00, air temperature was certainly maintained at 10°C. Number of days when minimum temperature was recorded below 10°C were three. Even these days, minimum temperatures were 0.5-1.0°C lower than 10°C.

As the difference of temperature of air at the point of drawing in and that of blowing off reached as much as 15°C at daytime, growth of cucumber was repressed at the site near the point of blowing off.

As compared with use of the warm-air heating system alone, it was possible to cut down the oil consumption to 40-60% by this improved system.

The earth storage heat exchange system was equipped in the commercial greenhouse of 1185m<sup>2</sup> area. From 1979 to 1981 experiments were carried out to investigate heating efficiency, atmospheric and thermal condition, growth and yield of tomato and economic effect.

The greenhouse was provided with a layer overhead thermal screen and double side screens. The amount of circulating air was 420m<sup>3</sup>/min when 140 rows of heat exchanging pipes with six fans (200V, 750W).

The temperature in the greenhouse was maintained at designed degree 8°C (1979~'80) and 10-6°C (1980~'81), when outside minimum temperature was not lower than -5°C. The maximum difference of temperature between inside and outside of the greenhouse was more than 15°C.

The oil was consumed 85 ℓ (1979~'80) and 240 ℓ (1980~'81) for operating the air-warm heating.

The growth of tomato was advanced at the side near the point of blowing off and was repressed at the point of drawing in.

The yield of tomato in 1979~'80 was about 11.7 tons per 10 a. But a lot of puffy fruits was found. In the next year, it was about 10 tons per the same area, however the ratio of good fruits was higher than the previous year.

The depreciation fund of equipments and electric charges is more necessary than air-warm heating. However it is possible to reduce the expenses 20~30% per year as the oil charges are very low.

2) A solar greenhouse heating system using latent energy storage materials :

In this system the greenhouse itself is used as a device to collect solar heat as well as earth storage heat exchange system. The surplus heat in the greenhouse is stored in phase change materials (PCMs). In the PCMs are CaCl<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O, Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>·10H<sub>2</sub>O, etc. The PCMs are wrapped in thin bags and set on shelves in heat storage boxes. These PCMs have melting and hardening points between 18 to 23°C. The PCMs store the heat as they are melting in the daytime and release it as they are hardening at night. Air is circulated by fans between the greenhouse and the heat storage units.

From 1982 to 1983, experiments were carried out to investigate heating efficiency, thermal properties of the heat storage material and growth and yield of tomato. The latent heat energy was made mainly from Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>·10H<sub>2</sub>O and the melting point was 22°C.

The heat storage material of 6.2kg in weight was wrapped in a aluminium laminated plastic film bag (2×60×90cm) and 200 bags were set on the shelves in the heat storage box. At the end of the box an electric fan (200V, 400W) was attached. Two heat storage boxes were installed in the glasshouse of 352m<sup>2</sup>.

In daytime, two fans were operated to store heat when glasshouse temperature was above 22°C. At night, fans were operated to radiate heat when air temperature was below the set point (12°C for 17.00-21.00, 11°C for 21.00-23.00, 8°C for 23.00-5.00 and 10°C for 5.00-8.00). During 17.00-23.00, the temperature was certainly maintained above the set point, and during 23.00-5.00 it was kept except a few days. But during 5.00-8.00 the temperature could not be maintained at the set point when outside air temperature declined extremely. Considering these facts, the point for the time was set to 8°C. After that, the temperature was kept above the set point.

When the double layer thermal screens were applied in the glasshouse, the maximum inside-outside air temperature difference was maintained at 15°C. When a layer screen was used the difference was 13°C.

It was considered that the storage materials at the drawing parts and center of the box melted almostly in daytime, but those near the blowing parts melted insufficiently.

Using a newly developed phase change material (PCM) which have melting points of 16°C and 21°C, freezing points of 13°C and 18°C, and a heat of fusion of 40cal·g<sup>-1</sup>, an experiment of solar heating was carried out in a venlo type greenhouse from 1983 to 1984. The PCM is made mainly from Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>·10H<sub>2</sub>O and CO(NH<sub>2</sub>)<sub>2</sub>. The floor and surface areas of the greenhouse were 352m<sup>2</sup> and 560m<sup>2</sup> respectively, and two layers thermal screens were furnished for heat insulation at night. Tomatoes were grown in this greenhouse.

Batches of PCM weighting 7.5kg were wrapped in an aluminium laminated plastic film (2×47×83cm), and 60 bags were hung in the heat storage box. At the end of the box, an electric fan (200W, 200V) was attached and the other end was used for drawing hole for air intake. Four heat storage boxes were installed in the greenhouse. The total amount of the PCM was 1,800kg and the potential value of heat to be released was 85,000 kcal.

In daytime, the fans of the heat storage units were operated to store heat when the inside air temperature was above 22°C. At night, the fans were operated to radiate the heat of PCM, when the inside air temperature was below the set point (12°C for 17:00-21:00, 11°C for 21:00-23:00 and 8°C for 23:00-8:00). During 17:00-21:00 and 21:00-23:00, the inside air temperature was certainly maintained above the set point, and during 23:00-5:00 it was kept the set point except a few days. But during 5:00-8:00 the temperature could not be maintained the set point, when the outside air temperature declined sharply. Therefore at time period hot air heating operated frequently.

The maximum inside-outside air temperature difference was maintained at 10°C-13°C.

The coefficient of oil reduction was over 70%.

The maximum amount of stored heat into the PCM and radiated heat from the PCM was both of 86,000kcal on fine days. The thermal effectiveness of heat storage unit amounted to 100%. The PCMs were melted almost equally in the heat storage boxes.

A solar heating system using latent energy storage materials was installed in the commercial glasshouse and assessed. From 1984 to 1985, the experiments were carried out to investigate heating efficiency, thermal con-

ditions of phase change materials (PCM) and growth of tomatoes.

Two glasshouses were used in experiments, one was provided with the solar heating system and warm-air heating, and the other was provided only with the warm-air heating. The floor and surface areas of glasshouses were 1,033m<sup>2</sup> and 1,476m<sup>2</sup> respectively. In the glasshouses a layer thermal screen was furnished for heat insulation at night. Tomatoes were grown in both of glasshouses.

The PCM is made mainly from Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>·10H<sub>2</sub>O and CO(NH<sub>2</sub>)<sub>2</sub>. The PCM have melting points of 16°C and 21°C, freezing points of 13°C and 18°C and a heat of fusion of 45cal·g<sup>-1</sup>. Batches of PCM weighting 7.8kg were wrapped in an aluminium laminated plastic film. Twenty bags of PCM were used for one unit and 8 units were hung in the heat storage box. At the end box, an electric fan (200V, 750W) was attached and the other end was used for drawing hole for air intake. Four heat storage boxes were installed in the glasshouse.

The total amount of the PCMs was 5,000kg and the potential value of heat to be released was 225,000kcal. The amount of PCMs calculated with an aim of 70% oil reduction. During the daytime, the fans of the heat storage boxes were operated to store heat when the inside air temperature was above 18°C. At night, the fans were operated to radiate the heat PCMs, when the inside air temperature was below 10-11°C. The warm-air heating in solar glasshouse was operated when the inside was below 8-9°C.

Until the middle of January, the inside air temperature in solar glasshouse was confined to 20-21°C in the daytime because of considerable amount ventilation and amount of stored heat was not obtained to the maximum possible value, so that at night the warm-air heating operated frequently. In this period the coefficient of oil reduction was 46%. But since the top ventilation of solar glasshouse was shut completely in the morning, the inside air temperature rose to 24-26°C in the daytime and the amount of stored heat increased to maximum potential. The coefficient of oil reduction was improved above 60%. In the period of 28 December-4 March the coefficient was 66%.

3) A greenhouse heating system using an air to air type heat pump.

Experiments were carried out to analyze the heating efficiency and coefficient of performance (COP) of an air type heat pump with 7.5kW compressor used in a greenhouse 352m<sup>2</sup> in area along with the development of methods for efficient and economic operation of the pump.

The air temperature in the greenhouse was maintained at 15 or 13°C, when the ambient air temperature was not lower than -1~-2.5°C. The maximum difference between the temperature inside the greenhouse and the ambient air temperature was 17°C.

When the ambient air temperature decreased markedly, the heat pump was operated frequently to remove the frost covering the outer part of the instrument. When

the defrosting operations were carried out too frequently, the air temperature in the greenhouse could not be maintained at 15°C.

When the set point of the night temperature was varied 16→13→10°C the air temperature in the greenhouse could be easily maintained at the set point. Therefore it was considered that modification of the set point of the night temperature was the most suitable method to control the temperature by the air to air type heat pump.

The values of the COP of the heat pump ranged from 2.4 to 3.2, and there was a high correlation between the values of the ambient air temperature and the COP.

Assuming that the electricity charge is 25 yen per kW and heavy oil charge is 65~85 yen per liter the electricity charge for heat pump is equivalent to the heavy oil charge required for heating the air.