

施設園芸用透明断熱壁体の開発

Development of Transparent, Thermally-Insulated Walls for Horticulture

園芸施設のキーポイントである壁体について、その特性を大幅に改良する方式を開発した。これは熱線反射フィルムを活用した密閉パネル形の透明断熱壁体であり、その断熱特性は従来の可動二層カーテン付きガラス温室を上回る。また、その高い熱抵抗値が常に不変であるため、これを用いた温室の冬季の集熱特性が優れている。さらに、この壁体は近赤外線の入射を阻止するので、温室の夏季の遮熱特性が優れている。すなわち、この透明断熱壁体化温室は、従来のような壁体調節機構を付加しなくても、そのまま通年の省エネルギーを発揮する。

このほか、長寿命のため省資源的であり、また常に明るくてきれいであるためメンテナンスフリーでもある。

阿部和彦* Kazuhiko Abe

樫村俊正** Toshimasa Kashimura

1 緒言

わが国の園芸施設の設置状況は¹⁾昭和62年度で45 khaに達し、その伸び率はこの10年間で1.7倍である。施設の設置面積ではイタリア(18 kha)、オランダ(8.8 kha)、フランス(7.1 kha)などを抜いて世界的水準にある。

この施設で生産される野菜が全生産に占める割合はイチゴでは87%、以下ピーマン63%、キュウリ53%、トマト51%などである。このように施設園芸の担っている役割は大きく、今後もその発展が期待される。

一方、施設園芸の発展とともにエネルギー問題がクローズアップしている。加温設備を持つ園芸施設での使用エネルギーの形態は、石油が95.7%、以下、石油代替燃料(石炭、LNGなど)2.3%、地下水1.4%、太陽熱0.06%である²⁾。また、石油製品である施設そのものの寿命が短く、1～2年で廃棄されるものが多い。

この状況は、石油への高依存および資源の多消費であり、その対策が急務となっている。農林水産省では、今年度も施設園芸での省エネルギーの推進、および地域での自然エネルギーなどの活用を重要施策としている³⁾。

施設でまず重要なものは、温室あるいはハウスすなわち壁体であり、これにかかわる省エネルギーとは壁体からの熱損失を低減することである。ところが、壁体の現状は、安価ではあるが熱損失が大きく、また1、2年程度の短寿命であるものが多い。

この懸案をできるだけ大幅に解決することが本テーマの目

的である。そのためには、まず壁体が透明で高断熱であることが望ましいので、これを基本的に満たすものとして透明で熱線反射の機能を持つ材料(フィルム)に着目した。

この熱線反射フィルムと他の透明フィルムとを組み合わせ、密閉パネル形の透明断熱壁体を実現した⁴⁾。この壁体を、あらゆる形態の施設に応用してゆきたい。

2 透明断熱壁体の断熱特性⁴⁾

2.1 基本構成

園芸施設用壁体は、光合成の点からはできるだけ透明であることが、そして省エネルギーの点からは高断熱であることが要求される。この両立しにくい二点を同時にできるだけ満足させるために、図1に示すように、相対する二重透明フィルムSの中間に透明な熱線反射フィルムRを距離Dをもって配置する壁体構成とした。

この壁体での伝熱は、次節2.2でも言及するように、主として空気の対流や伝導による成分(気体伝熱)と放射による成分(放射伝熱)から成る。気体伝熱を低減するには、壁体のフィルム間を密閉空間層にして、この層を厚くする。一方、放射伝熱を低減するにはフィルム表面に熱線反射機能を持たせる。

この熱線反射フィルムの特性の例を図2に示す。これによれば、可視域 $0.4\mu\text{m} \leq L \leq 0.7\mu\text{m}$ では透過率 τ が高く、赤外域 $L > 0.7\mu\text{m}$ での反射率 ρ が高い。すなわちこのフィルムは、可視光の入射をそれほど損なうことなしに赤外に対しては高

* 日立製作所 機械研究所 ** 日立冷熱株式会社 環境技術研究所

抵抗を示すので放射伝熱を抑制する。そして、 $L > 2 \mu\text{m}$ の遠赤外域(低温放射線)ではもちろんのこと近赤外域(高温放射線) $0.7 \mu\text{m} < L < 2 \mu\text{m}$ でもかなりの反射率を持ち、夏季、太陽光中の大部分の熱線の入射を抑制する。

2.2 伝熱の機構

水平、平行な二面を設定し、その二面間の距離を D 、対流発生限界距離を D_c 、有効放射率を ϵ_{12} 、そして熱抵抗を r とする。このとき実用の範囲内、例えば空気温度が $0 \sim 20^\circ\text{C}$ 、二面間温度差が $2 \sim 10 \text{ deg.}$ では次式が成り立つ。

$$r = \{ (41D)^{-1} + 5.30 \epsilon_{12} \}^{-1} \quad D < D_c$$
$$= \{ 2.12 + 5.30 \epsilon_{12} \}^{-1} \quad D \gg D_c \dots\dots\dots(1)$$

(1)式の第一項は気体伝熱にかかわる成分であり、その熱抵抗は、距離 D が対流発生限界距離 D_c 以下では D に比例し、距離 D が十分に大きい場合はほぼ一定の値となる。この熱抵抗をさらに上げるには、空気よりも熱伝導率の小さな気体、例えばArガスやCO₂ガスを用いればよい。

第二項は放射伝熱にかかわる成分であり、その熱抵抗は有効放射率 ϵ_{12} に反比例する。この ϵ_{12} は、それぞれの面の放射率を ϵ_1, ϵ_2 、同様に反射率を ρ_1, ρ_2 とし、熱線透過率を省略すれば、次の関係式で表わせる。

$$\epsilon_{12} = (\epsilon_1^{-1} + \epsilon_2^{-1})^{-1}$$
$$= (1 - \rho_1)(1 - \rho_2) / (1 - \rho_1 \cdot \rho_2) \dots\dots\dots(2)$$

(2)式から、二面のうちいずれか一方でもその反射率を大きくとれば、 ϵ_{12} を小さくすることがわかる。すなわち、熱線反射特性を持つフィルムを用いることによって、面間の放射伝熱を抑制できる。

2.3 実験および結果

種々の供試壁体を作製し、この熱特性を熱箱法によって計測した。

供試壁体の第一のグループは、図3に示すようにフィルム構成としては5タイプがあり、それらの枠材としては木質角柱と鉄角パイプの2種である。同図中、記号のSは硬質ポリエステルの透明フィルム、Rは透明な熱線反射フィルム、そしてAは完全反射はくである。二面間距離 D は20 mm、壁体寸法は560 mm×420 mmである。

供試壁体の第二のグループは、タイプをS²Rの一種としたまま、距離 D については5 mm, 10 mm, 22 mm, 40 mmの4種の壁体から成る。そして、この壁体にはAr, CO₂などのガスの入れ替えができるようにした。

熱箱は厚さ100 mmの断熱材で構成し、有底で上部開口の箱である。底部にはヒータ、放熱板、ファンなどを設置し、上の開口部では供試壁体を着脱する。この装置を環境実験室の中で運転し、定常状態での壁体内外の温度、ヒータ電力などの計測値を得れば壁体の熱抵抗を算出できる。

実験は壁体が水平設置で熱流が上向きの状態で行ったものであるから、得られる熱抵抗は最小(熱貫流は最大)値である。

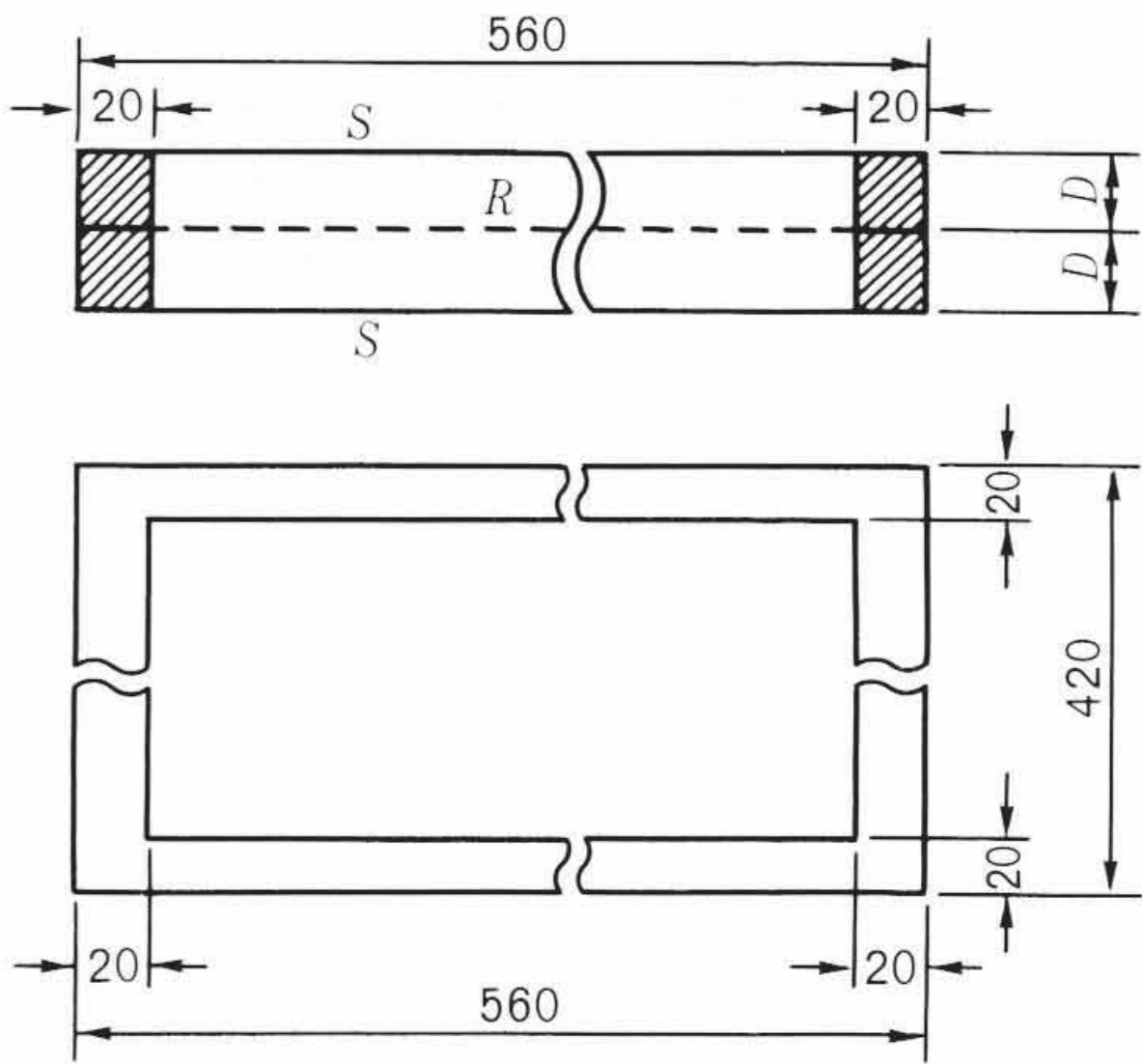


図1 透明断熱壁体の基本構成 上は断面図、下は平面図を示す。二重透明フィルムSの中間に、距離Dをもって熱線反射フィルムRを配置した構成を示す。

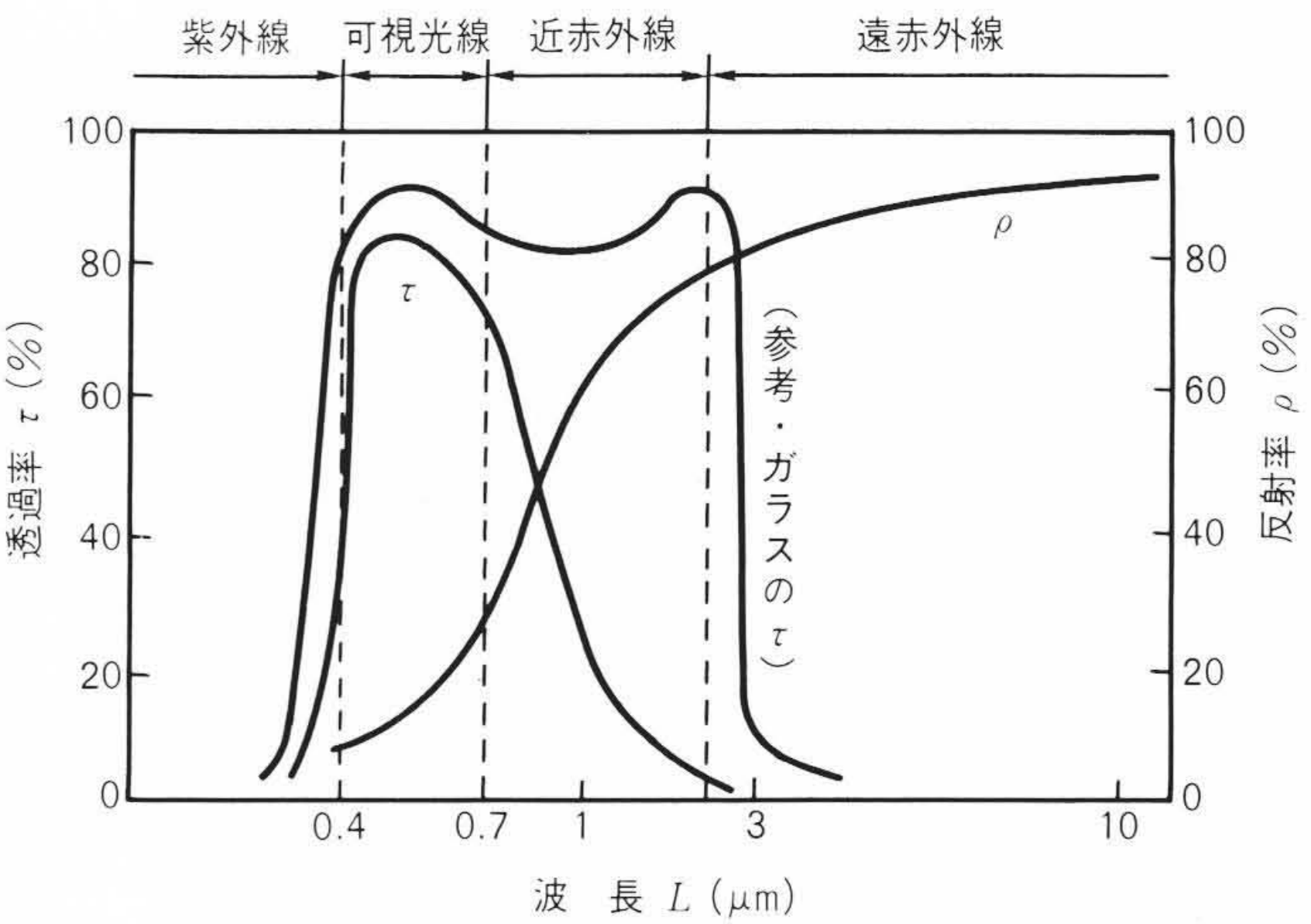


図2 熱線反射フィルムの光学特性 可視域での透過率 τ が高く、近赤外域での反射率 ρ が約50%、遠赤外域では ρ が90%である。

枠材 タイプ	木質角柱	鉄角パイプ
S		
S ²		
S ³		
S ² ・R		
S ² ・A		

図3 供試壁体のタイプ S：透明フィルム、R：熱線反射フィルム、A：完全反射はくを示す。木枠は乾燥檜(ひのき)材の角柱、鉄枠は厚さ2 mmの角パイプである。

この値に既知の換算率を乗じて、任意の壁体角度での値が求められる。

実験の結果、第一グループの壁体の熱特性を図4に示す。フィルム枚数の増加とともに熱抵抗値は増加するが、同じ枚数の場合、 $S^2 \cdot R$ と S^3 の両タイプ間の比較からわかるように熱線反射フィルム R を用いたほうが大きい。この差は前述の(1)式、(2)式からわかるように、有効放射率 ε_{12} の値の差異によるものである。 ε_{12} の値は R を用いたタイプでは0.2~0.3、 S だけのタイプでは約0.8と見積もられる。

枠の材質を木から鉄に変えると、熱抵抗値は14~27%減少(熱貫流率は16~35%増加)した。枠材が熱の良導体であるほど、この周辺での熱架橋が発達して熱損失が増える。

図4の右端には、比較するために各種方式の位置を記号で示した。すなわち、 T はトンネルハウス、 G はガラスハウス、 GC は G +一層カーテン方式、 GC^2 は G +可動二層カーテン方式である。

$S^2 \cdot R$ タイプ(木枠)の熱抵抗 $0.45 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ (熱貫流率 $2.22 \text{ W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$)は可動二層カーテン付きガラス温室の値を超える。しかし、前者 $S^2 \cdot R$ は常に透明で、しかもこの値は不変であるが、後者は熱抵抗の最大となるカーテン全閉時(GC^2)には不透明となる。透明であるが、半開時 GC には $0.3 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ 弱、そして全開時 G には熱抵抗は $0.17 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ 程度に低下する。ゆえに透明断熱壁体は、常時最高の省エネルギーを発揮する状態にある。

供試壁体第二グループについての実験結果を図5に示す。同図から、二面間距離 D とともに熱抵抗の増大するようすがわ

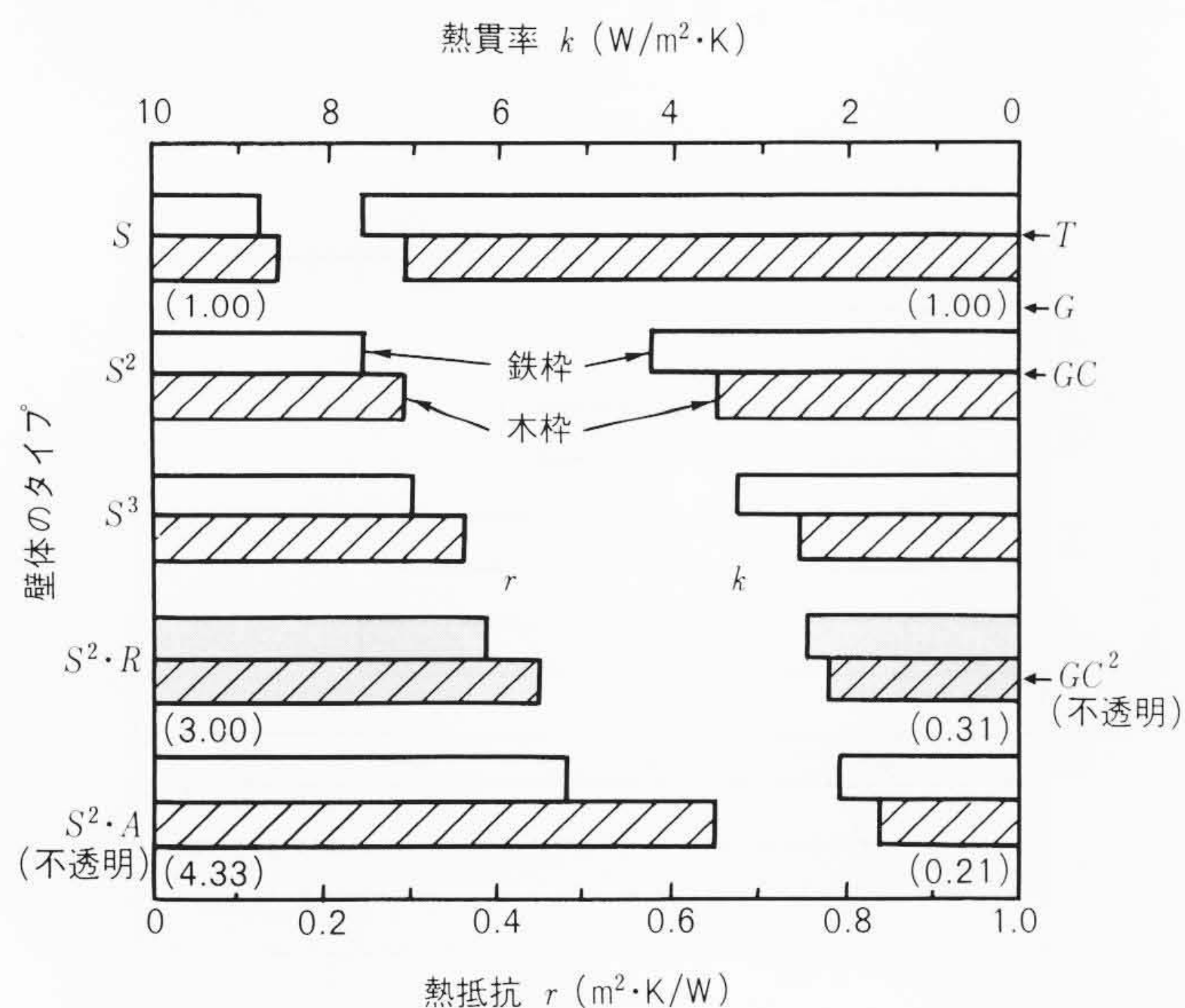


図4 壁体のタイプ別熱特性 熱抵抗は、透明体では $S^2 \cdot R$ タイプが S タイプ(あるいはトンネルハウス T)の3倍ある。 $S^2 \cdot A$ タイプは4.33倍あるが不透明である。枠材質の差による影響は15~30%生じている。可動二層カーテン付きガラスハウスの熱特性は、全閉時 GC^2 →半開時 GC →全開時 G と変化する。

かる。空気の場合、 D が15~20 mmの前後で熱抵抗値が飽和的になっており、前章で検討した事柄とも合致するので、この距離が実用的であると考ええる。

封入ガスによる熱抵抗の向上の効果は、 $D > 30 \text{ mm}$ では、空気 $< \text{CO}_2 < \text{Kr} < \text{Ar}$ 、また $D = 5 \text{ mm}$ では、空気 $< \text{CO}_2 < \text{Ar} < \text{Kr}$ の順番である。気体伝熱抑止効果は明らかであるが、価格などの点で実用には検討を要する。

3 透明断熱壁体化温室の集熱特性と遮熱特性⁵⁾

3.1 集熱特性

昼間、集熱によって室内を適度に維持し、余分の熱は夜間暖房用に蓄積するなど、省エネルギー効果を上げるため温室の集熱力はできるだけ大きいことが要求される。その集熱力は、日射量 $I \text{ W}/\text{m}^2$ と、最大室内外温度差 $\Delta T_{io} \text{ K}$ の関係

$$\Delta T_{io}/I = X_c \text{ (到達限界値)} \dots\dots\dots(3)$$

によって評価できる。

これを用いて、温室としての最適な壁体配置を検討するため、図6(a)に示すように、6種類のタイプのモデル温室について実験を行った。その寸法は幅800 mm、奥行き1,600 mm、高さ800 mmで、放熱比すなわち壁体と床との面積比が2.37である。温室の設置方向は、冬季の集熱力向上のため東西棟にした。床面は断熱的で黒色である。

記号の意味は次のとおりである。 S :硬質フィルム、 R :熱線反射フィルム、 A :完全反射はく、 S^2 :間隔30 mmの S 二重、 S^3 : S の三重、 $S^2 \cdot R$: R を含む三重、 $S^2 \cdot A$: A を含む三重である。タイプ①~④は南、北、屋根の各面とも同じ壁体

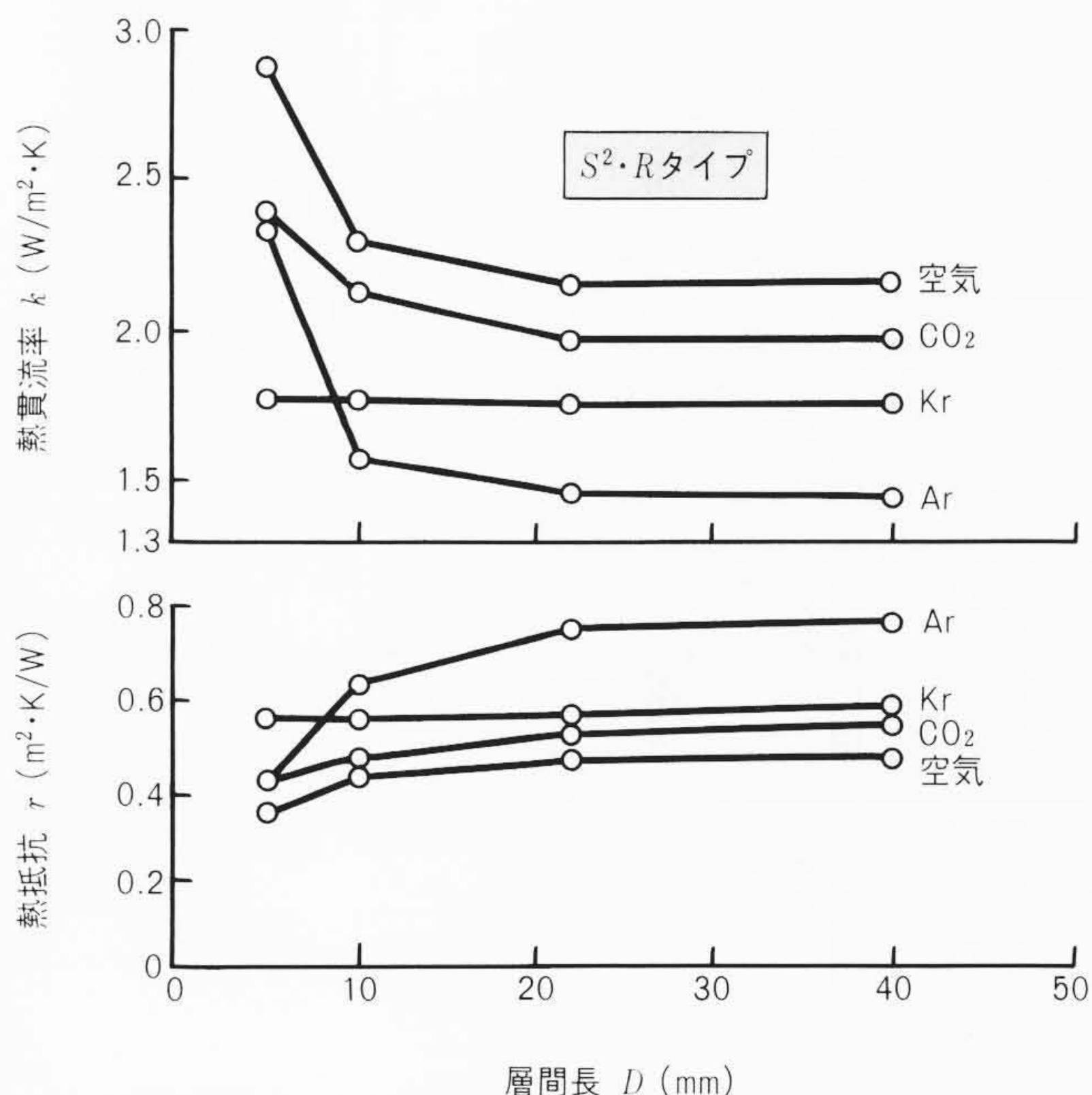


図5 S^2R タイプ壁体の熱特性 空気の場合、距離 D が20 mm前後で特性が飽和する。封入ガスの効果は、 $D > 30 \text{ mm}$ では空気 $< \text{CO}_2 < \text{Kr} < \text{Ar}$ 、 $D = 5 \text{ mm}$ では空気 $< \text{CO}_2 < \text{Ar} < \text{Kr}$ の順である。

で構成し、タイプ⑤は北面だけを $S^2 \cdot A$ で、タイプ⑥はさらに南面だけを S^3 で構成した。

実験結果を周日温度変化として図6(b)に示す。温度はタイプ①から⑥の順に高くなっている。同じ三重構成でもタイプ③と④の差は、 R を用いたか否かにある。また、 R を用いた構成でもタイプ④と⑤の差は、北面を反射的にして入射光線を有効に活用したか否かにある。さらにタイプ⑤と⑥の差は南面を全光入射的にしたか否かにある。

この結果を基にして、(3)式の X_c を算出して図7に示す。予想どおり集熱力 X_c はタイプ①から⑥の順に大きくなった。括弧内に示した集熱力の比較によると、タイプ⑥は①の2.71倍の集熱力を持つ。

従来のトンネルハウス T はタイプ①に、ガラスハウス G はタイプ①と②の間にそれぞれ位置する。可動二層カーテン付きガラス温室は、半開時 GC にはタイプ②に位置し、全開時 GC^2 には不透明になるから $X_c = 0$ である。よって、透明断熱壁体化温室は冬季の集熱力に優れる。

3.2 遮熱特性

夏季、特に昼間は温室への熱の流入を抑制するための能力

が要求される。可視光線は当然必要であるが、熱線の流入は抑制したいので従来の遮光とは区別して、この能力を遮熱力と呼ぶ。

透明熱線反射フィルムは優れた遮熱力を持つことが2.1節での図2の説明からも了解できる。同図によれば、熱線(近赤外線、高温放射線)の約50%を反射する一方、可視光線の70%以上を透過し、太陽エネルギーの透過率としては60%である。 $S^2 \cdot R$ の壁体構成では太陽エネルギーの透過率は50%になるので、この壁体は静止体のまま労せずして冷房負荷を半減する。

可視光透過率 τ_v と太陽エネルギー透過率 τ_s との比 ρ_τ

$$\rho_\tau = \tau_v / \tau_s \cdots \cdots \cdots (4)$$

を透過効率と呼び、これも遮熱力の指標の一つである。

透過効率 $\rho_\tau \leq 1$ に属するものは、ほとんどの一般のフィルムや遮光材であり、可視光を熱線と同率以下しか通さない。 $\rho_\tau > 1$ に属するものは熱線反射材と熱線吸収材であるが、後者は自身が吸熱昇温するので、その分、放熱の手立てが必要になる。

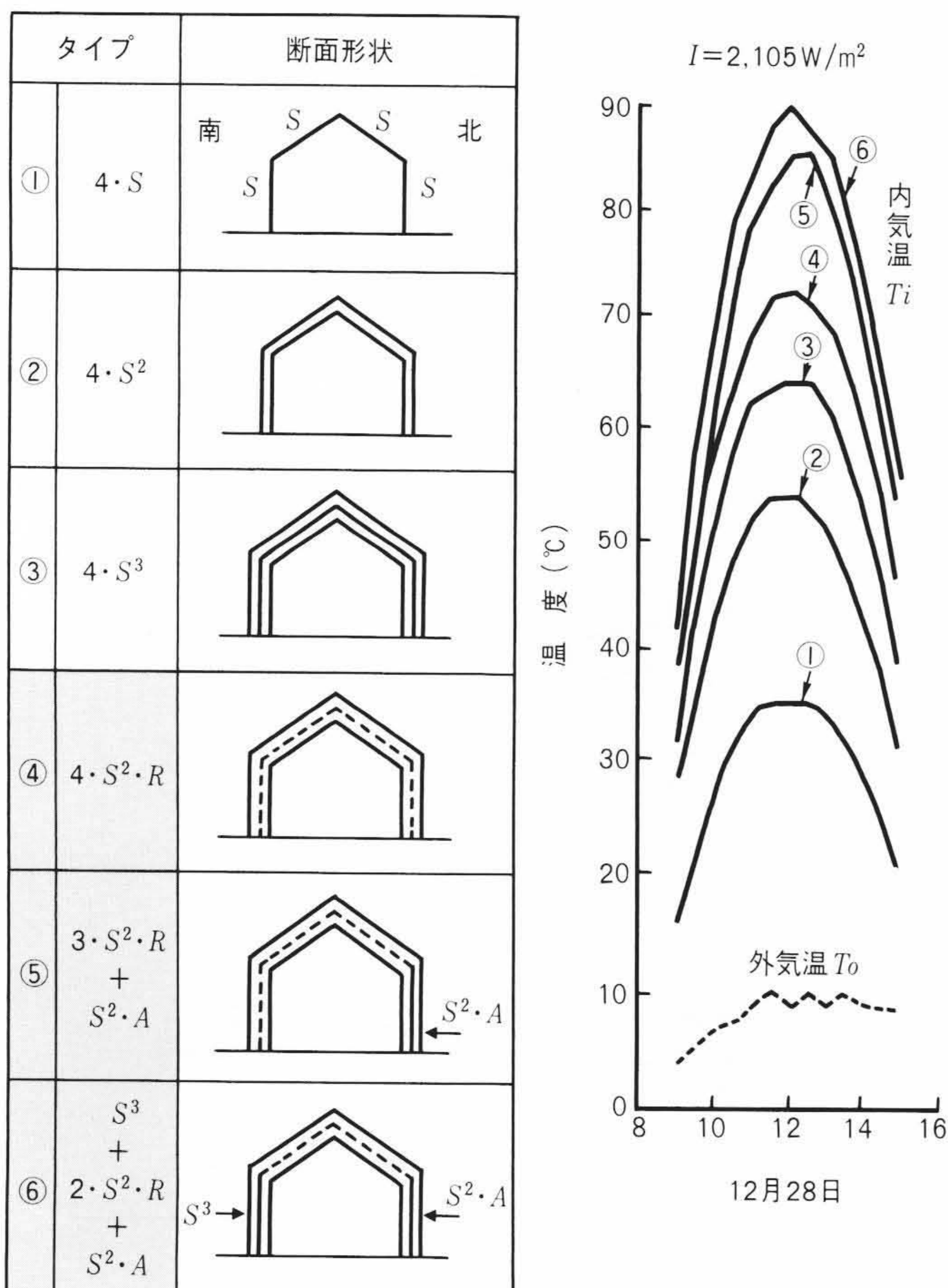
したがって、遮熱には熱線反射材が好適である。本壁体構成での ρ_τ は1.1~1.3である。したがって、透明断熱壁体は遮熱力に優れるのは明らかであるが、その配置は図6のタイプ⑥の断面形状に示すように屋根面を主とすべきである。

以上により、透明断熱壁体化温室は冬季の集熱と夏季の遮熱とに優れ、従来のような可動形の壁体調節機構を付加しなくても、静止体のまま通年の省エネルギーを発揮する。

4 施設への応用

4.1 ソーラーグリーンハウス

この新形の壁体を北海道上川郡、東川町農業協同組合のソーラーグリーンハウスに最初に適用した⁶⁾。その概要は図8に



(a) 温室タイプ

(b) 周日温度変化

図6 温室のタイプと温度変化 冬季昼間の室温は、タイプ①→⑥の順に高くなる。

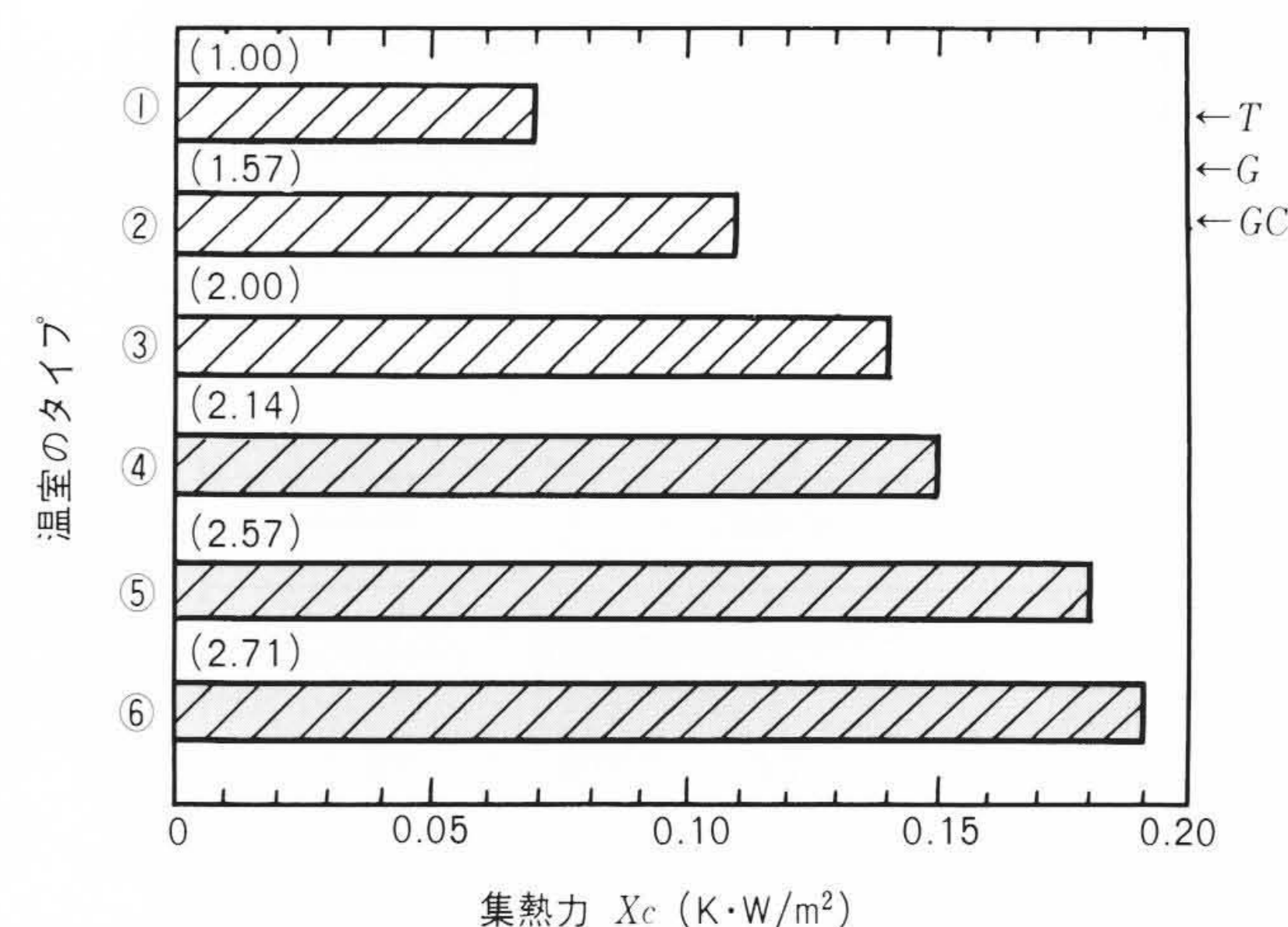


図7 温室タイプと集熱力 タイプ⑥は①(あるいはトンネルハウス T)の2.71倍の集熱力がある。可動二層カーテン付きガラスハウスは全開時には不透明であるから $X_c = 0$ 、半開時 GC にはタイプ②と同等、全開時 G には①と②の間に位置する。

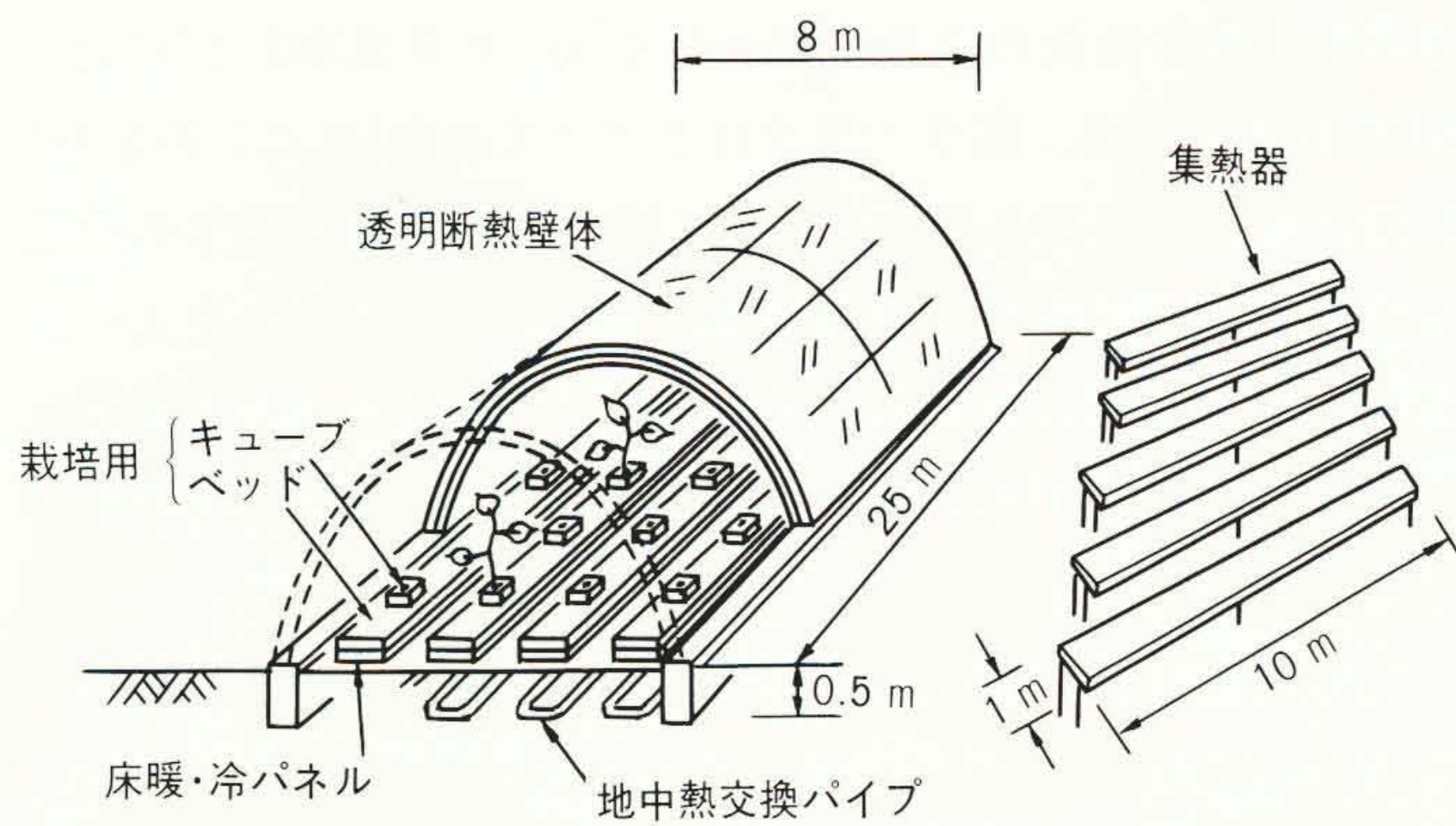


図8 ソーラーグリーンハウス 上図は概念図を，下図は概観を示す。ハウスは透明断熱壁体の $(3 \cdot S^2 \cdot R + S^2 \cdot A)$ タイプで構成し，これに地中熱交換器と集熱器とを組み合わせた。



図10 メロンの栽培状況 上図は第一作，2月上旬種まき，6月上旬収穫したものを，中図は第二作，6月上旬種まき，9月上旬収穫したものを，下図は第三作，9月上旬種まき，1月中旬収穫したものを示す。

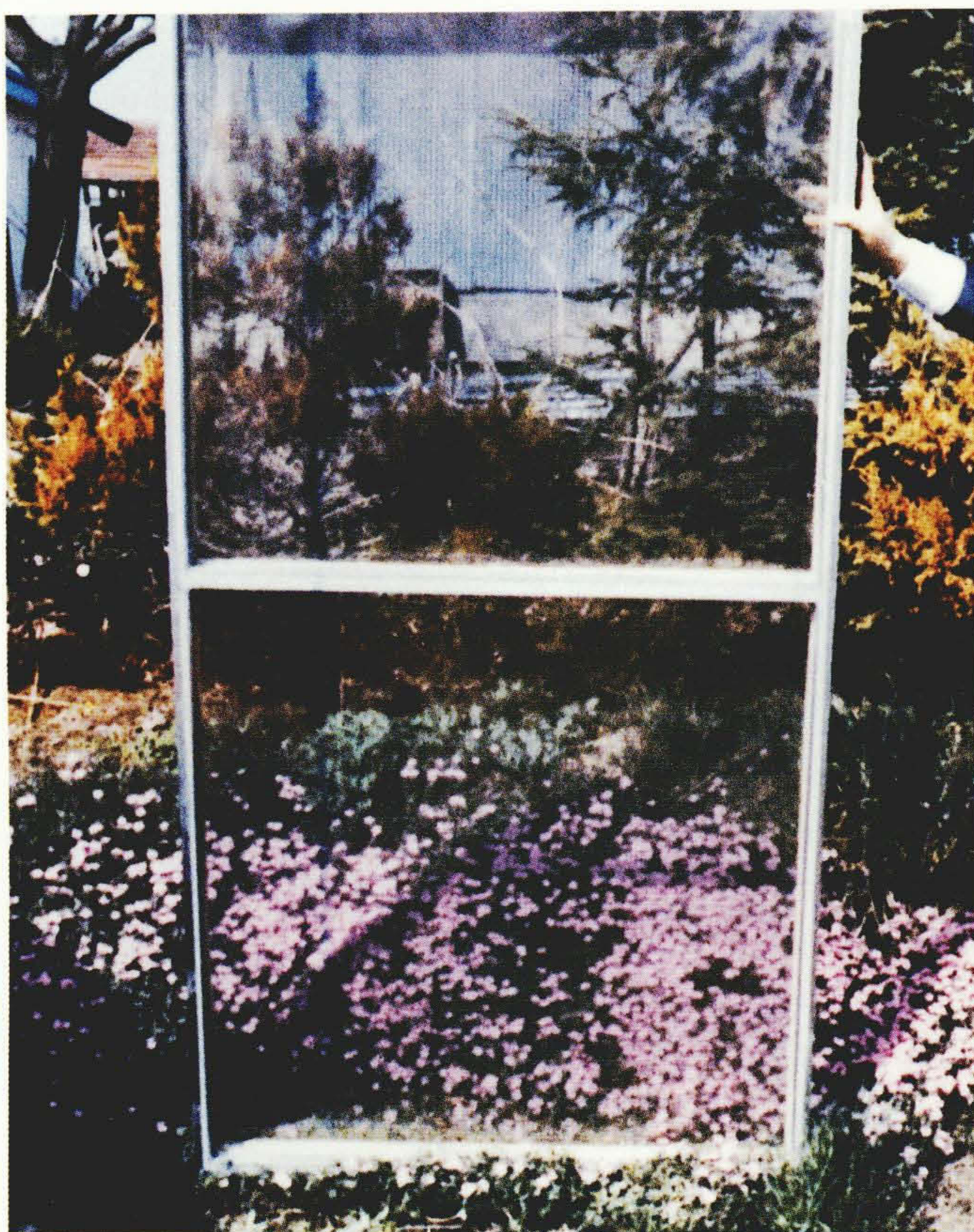


図9 壁体の概観 S^2R タイプ，密閉パネル形透明断熱壁体の一例を示す。幅1 m×高さ2 mのユニットで，枠部は木質と鉄角パイプの2種類で構成する。

示すとおりで，大きさが間口8 m，奥行き25 m，床面積が200 m²の透明断熱壁体化温室に，地中熱交換器と集熱器を組み合わせた。

温室の壁体構成をタイプ⑤($3 \cdot S^2 \cdot R + S^2 \cdot A$)とし，その面積を約300 m²とした。壁体 $S^2 \cdot R$ の代表例を図9に示す。大きさは幅1 m，高さ2 mとし，枠部は断熱と強度の両面から木質と鉄材の2種類で構成し，その枠部断面形状はいずれも30 mm角である。

実証試験を3年間行い，その省エネルギーなど，熱特性を確認し^{6),7)}，またメロン，キュウリ，イチゴなどの栽培に成功した。特に，図10に示すように，この透明断熱壁体化温室を

用いて、このような北国でメロンの年3作を実証できたことは意味深い⁸⁾。

4.2 省エネルギー以外の特長

この実証試験を通じて、このハウスは次のような脱5K(きつい、危険、汚い、暗い、かさばる)とでも称すべき特長も備えていることを確認した。すなわち、(1)水滴や泥などが貯留しないから、室内は汚なくなることがない、(2)壁体にかかわるきつい作業は伴わない、(3)支柱などの資材が少なくて済むので、室内が暗くならない、(4)壁体の厚みが常に一定でかさばらないので、室内はすっきりする、(5)壁体は軽量で、そのうえ割れたりしないので、取り扱いには危険ではない。降雹(ひょう)にも強く、安全性が高い。

また、この壁体用の厚質ポリエステルフィルムは長寿命(10年以上)であるから、資源を大切に使用していることになる。焼却廃棄するにしても有害ガスの発生の心配はない。さらに、この壁体は長寿命に加えて静止体であるから、ハウスの保守管理をほとんど必要としない。すなわち、省資源、クリーン、省力的と言える。

これらの特長は、今後の社会的ニーズに十分合致するものである。

4.3 総括

このほかにも、他のソーラーグリーンハウス、植物工場など数件に応用した⁹⁾。この新形の壁体化温室は、その高断熱ゆえに、高温性の作物栽培あるいは寒冷地での栽培に好適であることはもちろんのこと、夏季の空調栽培にも適している。すなわち、太陽光を必要とする植物育成装置すべてに応用可能である。

植物育成システムの第一のかなめは壁体にあるといっても過言ではないと思われる。壁体が優れていれば、入射エネルギーはむろんのこと、供給されるあらゆる形のエネルギーをも有効に活用するから、システムに組み込んだ種々の環境調節装置も効果的に機能することにつながる。どのようなシステムでも、通年省エネルギー、省力、省資源、クリーン、脱5Kなどを指向するならば、そのために透明断熱壁体が大いに貢献するであろう。また、初期投資が多少大きくなる場合でも、長期的にみれば魅力的な経営が期待できる。

5 結 言

透明フィルムと熱線反射フィルムを組み合わせた園芸施設用の密閉パネル形透明断熱壁体を開発した。壁体の断熱抵抗

は水平上向き熱流のとき $0.45 \text{ m}^2 \cdot \text{K} / \text{W}$ (熱貫流率 $2.2 \text{ W} / \text{m}^2 \cdot \text{K}$)であり、可動二層カーテン付きガラス温室(ただし密閉時)を超える。この壁体を主材にして構成した透明断熱壁体化温室は、冬季の集熱力(到達温度限界値)がトンネルハウスやガラスハウスの約2.7倍ある。一方、夏季の遮熱力は近赤外線反射率では50%、日射エネルギー透過率では50%、透過効率では1.1~1.3である。

この壁体および温室は、通年の省エネルギー効果のほか、省資源、省力、クリーン、脱5Kなどの諸効果を持っている。この壁体をソーラーグリーンハウスに適用し、寒冷地でのメロンの年三作以上の可能性を実証したほか、数件に応用した。日立グループでは、この新しい壁体を核にして、あらゆる形態の植物育成装置(簡便施設、空調機付き施設、ソーラーグリーンハウス、植物工場など)の需要にこたえ、施設栽培の発展に寄与してゆきたい。

今後の課題としては、(1)栽培ノウハウ(地域、品種、作形)の蓄積、(2)高機能フィルム(全日射透過、遠赤外反射)の開発、(3)最適化(軽量、簡便化)が重要である。

終わりに、本研究の推進にあたり、農林水産省農業工学研究所の奈良 誠博士から種々ご指導をいただいた。また、ソーラーグリーンハウスによる実証試験では、東川町農業協同組合の各位に多大のご協力をいただいた。あわせて深謝の意を表す次第である。

参考文献

- 1) 農林水産技術会議事務局：農林水産研究文献解題，16，施設園芸編，454~461(1990)
- 2) 農林水産省食品流通局：園芸用ガラス室，ハウス等の設置状況(1988)
- 3) 農林水産省：平成2年度において講じようとする農業施策，(社)農林統計協会，86~87(1990)
- 4) 奈良，外：透明断熱壁体の研究，農業施設，17，1，46~64(1986)
- 5) 阿部，外：透明断熱壁体—温室における集熱効果ならびに不可視光遮へい効果—，農業施設，18，1，47~60(1987)
- 6) 奈良，外：ソーラ・グリーンハウスの試作とその熱解析，農業施設，19，2，19~35(1988)
- 7) 阿部，外：ソーラ・グリーンハウスの長期熱特性，農業施設，20，2，174~184(1989)
- 8) 盛永：ソーラ・グリーンハウスによるメロン栽培，施設園芸新技術実用化促進事業—高度集約生産分科会報告書—，(社)日本施設園芸協会，57~64(1989)
- 9) 植物工場システムとソーラーグリーンハウス，日立評論，71，1，51(昭63-1)