

環境制御システム

Environmental Control System

バイオテクノロジーでの環境制御は、主として遺伝子組換え、細胞融合などの技術によって生じた生成物の培養、早期育成、保存に必要不可欠のものである。

本稿では、環境制御システムの代表例として、植物培養・栽培システムについて実施例を掲げて紹介するとともに、環境制御システム機器の開発状況について述べる。

バイオテクノロジーでの環境制御対象因子として、広義には培養での培地成分、植物栽培での施肥も含まれるが、本稿では温度、湿度、照度、CO₂・O₂ガス濃度、空気清浄の空気に関係する項目を対象としている。

本稿で紹介するシステム及び機器は、近年のバイオテクノロジーの普及とともに実用的に用いられており、各方面に採用されている。

永浦正行*	Masayuki Nagaura
吉田昭一**	Shōichi Yoshida
細江義久***	Yoshihisa Hosoe
潮江敏弘****	Toshihiro Shioe
長野敬助*****	Keisuke Nagano
丸山昌也*****	Masaya Maruyama

1 緒 言

遺伝子組換え、細胞融合、細胞大量培養、バイオリアクターに代表されるバイオテクノロジーで、新しい要素技術の開発が注目されている。バイオテクノロジーの工業化、事業化には、高効率生産、大量培養、早期育成、生体保存などの技術が重要である。環境制御技術は、これらの技術を支える必要不可欠のものである。

本稿では、環境制御の制御対象因子を温度、湿度、照度、CO₂・O₂ガス濃度、空気清浄の空気に関係する項目とした。これらの制御対象因子を最適に制御することによって、培養速度、育成速度及び生体生存率の向上が図れ、事業化を促進することが可能となる。

環境制御の制御対象因子を上記とした場合に、より多くの効果がもたらされるのが植物である。本稿では主に植物の培養、栽培システムについて実施例を掲げて紹介する。

2 植物培養・栽培システム

環境制御技術の導入による人工的な植物の培養、栽培が普及しつつある。

以下に、研究用の植物用高性能環境試験装置(ファイトロン)、及び生産用設備として植物組織培養システム、キノコ人工栽培システムの環境制御システムについて紹介する。

2.1 植物用高性能環境試験装置(ファイトロン)

植物の環境要因には、温度、湿度、光、大気ガス組成などの地上部の要因と、土壌水分、土質など地下部の要因がある。ファイトロンは、これら環境要因を任意に変化させること

ができる人工環境試験装置で、植物の生理、品種改良、施肥効果、病虫害防除などの研究を行う装置である。しかし、すべての要因を装置に組み込むことは容易ではなく、研究内容によりどの要因を制御すべきかを選択する必要がある。一般に最も多く取り上げられる要因は温度、湿度、光である。

2.1.1 装置の説明

図1、2にクミアイ化学工業株式会社生物化学研究所に納入した装置の外観とシステム機能を示す。

本システムは、互いに関連した五つの要素、すなわち(1)生育室、(2)温湿度制御装置、(3)日長・日短制御装置、(4)遮熱装置、(5)コンピュータ制御装置によって構成されている。以下に各要素の環境制御技術について述べる。

(1) 生育室

生育室は4棟で構成され、総ガラス張り構造である。各棟の規模は、幅4.5m、長さ6.3m、軒下高さ2mである。屋根の形状は、従来、室内気流分布を均一にしやすい片屋根形が多く採用されていたが、これは太陽光分布が不均一になりやすい。本装置では、太陽光分布が良好な両屋根形を採用したので均一な植物の成育が期待でき、かつ室内幅を広くとることができた。

気流分布については、屋根面に風向板を設けるなど気流の循環を良好にする工夫を行い、風速0.3~0.8m/sの下降流を実現した。片屋根形生育室と両屋根形生育室の形状及び気流の比較を図3に示す。生育室ガラスは、太陽光による空調負荷を軽減させるため熱線吸収ガラスを採用した。

* 日立製作所商品事業本部 ** 日立製作所中条工場 *** 日立製作所清水工場 **** 新明和工業株式会社伊丹工場
***** 日立プラント建設株式会社 ***** 日立冷熱株式会社



図1 ファイトトロン実施例 クミアイ化学工業株式会社生物化学研究所納めの装置外観を示す。

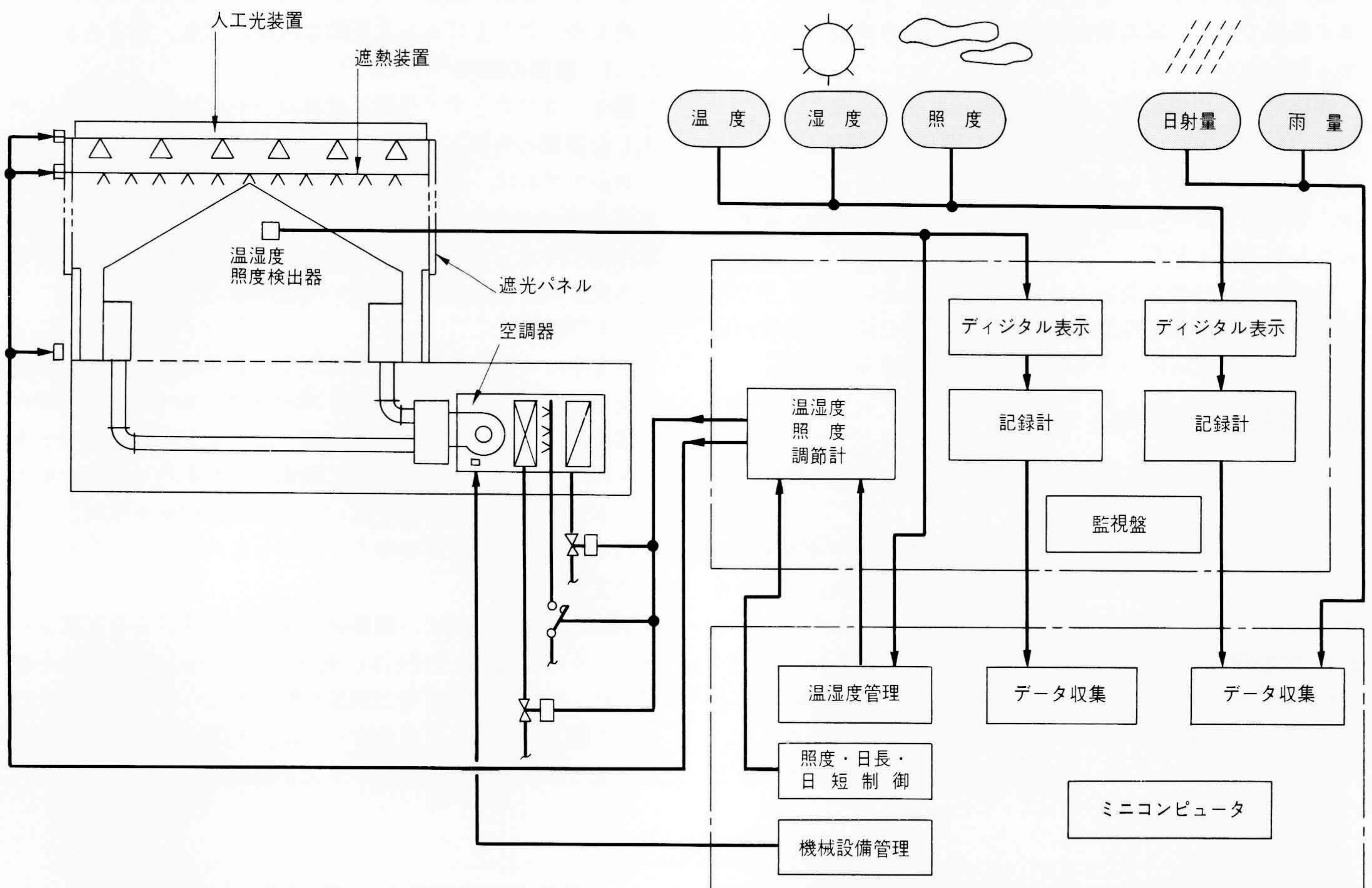


図2 ファイトトロン実施例 クミアイ化学工業株式会社生物化学研究所納めのシステム機能図を示す。

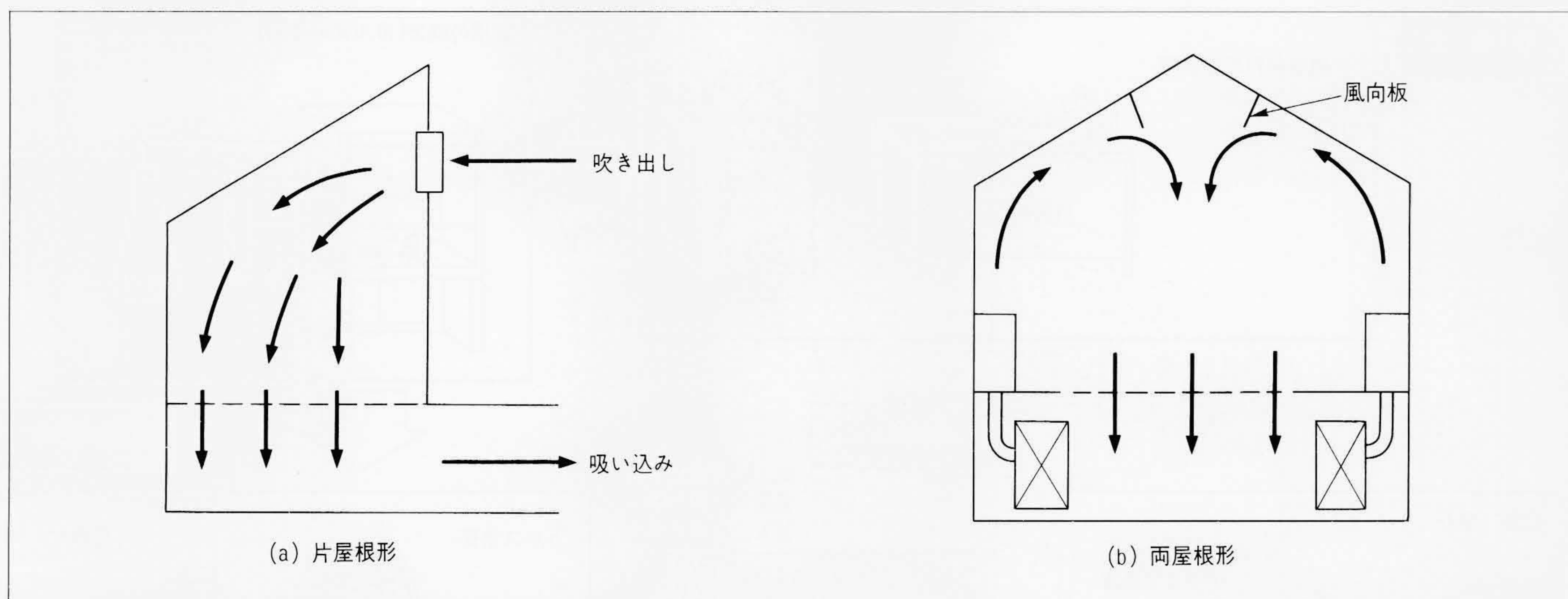


図3 生育室形状と気流 片屋根形生育室と両屋根形生育室の形状、及び気流の比較を示す。

(2) 温湿度制御装置

生育室内温湿度は、 $15\sim 40^{\circ}\text{C}$ 、 $40\sim 90\%\text{RH}$ の範囲で設定を変えることができ、制御精度は $\pm 1.5^{\circ}\text{C}$ 、 $\pm 7\%\text{RH}$ 以内としている。熱負荷変動に追従可能とするため、最大温湿度変化率が $\pm 5^{\circ}\text{C/h}$ 、 $\pm 5\%\text{RH/h}$ の装置性能としている。

(3) 日長・日短制御装置

(a) 人工光

本装置の光源は、太陽光に近いメタルハライドランプを採用し(1棟当たり $400\text{W}\times 144$ 灯)、照度範囲は $0\sim 4$ 万lxで5段階の照度制御が可能である。人工光不要時は、隣接北側建屋屋上に移動できる構造としている。

(b) 遮光

植物を人為的に暗黒下($5\sim 10\text{lx}$)に置く日短制御は、従来、幕構造のものが多く採用されているが、幕方式ではコーナ一部の光漏れ、耐候性、寿命などの問題がある。本装置では、鋼板製の上下スライドパネルを採用している。

(4) 遮熱装置

遮熱方法として、すだれ、寒冷しゃ(紗)、ブラインドが一般的である。これらは風によるまくれ、寿命などに問題がある。本装置では、屋根面に散水して水膜を作り負荷を軽減する方式としている。

(5) コンピュータ制御装置

温湿度制御は、1日の温湿度基本パターンを数十種類、フロッピーディスクに収録している。1日のパターン及び週パターンを任意に取り出し、最大20週間のプログラム制御が可能である。

人工光制御は日長時間を入力すると、自然光の照度変化により人工光の点灯、消灯を自動的に行い、遮光装置と連動して日長、日短制御を行う。また、日報作成機能を持ち、省力化及び記録の解析が容易となる。

2.2 植物組織培養システム

植物を繁殖させる方法として、従来、種をまいて育成する方法、あるいは株分けする方法などがあった。最近では植物の一部を切り取り、雑菌のない栄養分に富んだ人工の培地へ

植えて育てるという繁殖方法が新しい種苗技術として脚光を浴びている。この方法は植物組織培養と言われ、遺伝子組換え、細胞融合などと並ぶバイオテクノロジーの一つの手法となっている。

組織培養には、ウイルスに感染されていない細胞分裂が盛んな生長点などの組織を用いる。これを無機塩類、糖、ホルモンなどを含む培地上で無菌培養を行う。短期間で多数の芽を作り出すために適した培地成分、及び環境条件を見いだすことが重要である。現在では、花き(卉)類のほかに芋類、野菜類が実用化されている。

2.2.1 システムの構成と環境条件

組織培養の基本的技術要素として、

(1) 無菌的条件の設定

(2) 各々の植物の育成に適した環境条件の設定

がある。無菌的条件を得るには、除菌、殺菌、隔離の三つの手法があり、その目的にあった設備、器材が必要である。

図4に培養工程を示す。本工程は準備室、無菌作業室、培養室、育成順化室及び温室により構成される。準備室では培地の造成、植物材料の粗調整が行われ、滅菌用のオートクレーブなどの機器が必要である。無菌作業室では植物組織の分離、移植などの作業を無菌状態で行う必要があるためバイオクリーンルームとし、室内にはクリーンベンチを設置する。培養室内は、植物の培養、生長に最適な環境条件を保つ必要がある。育成順化室は、培養を終えた苗を自然界の環境に慣らすための室であり、環境条件を可変とする必要がある。

種苗生産用の組織培養施設の実施例(レイアウト)を図5に示す。本施設は、細胞融合などにより新品種を開発することもできる最新の施設で、建屋から生産設備、ユーティリティ、空気調和、セキュリティ、機器備品に至る諸設備一式をシステムの的にまとめたものである。

2.3 キノコ人工栽培システム

最近の自然食品ブームによって需要が増大しているキノコは、環境制御システムの導入による設備の近代化によって周年人工栽培へと移行されてきている。

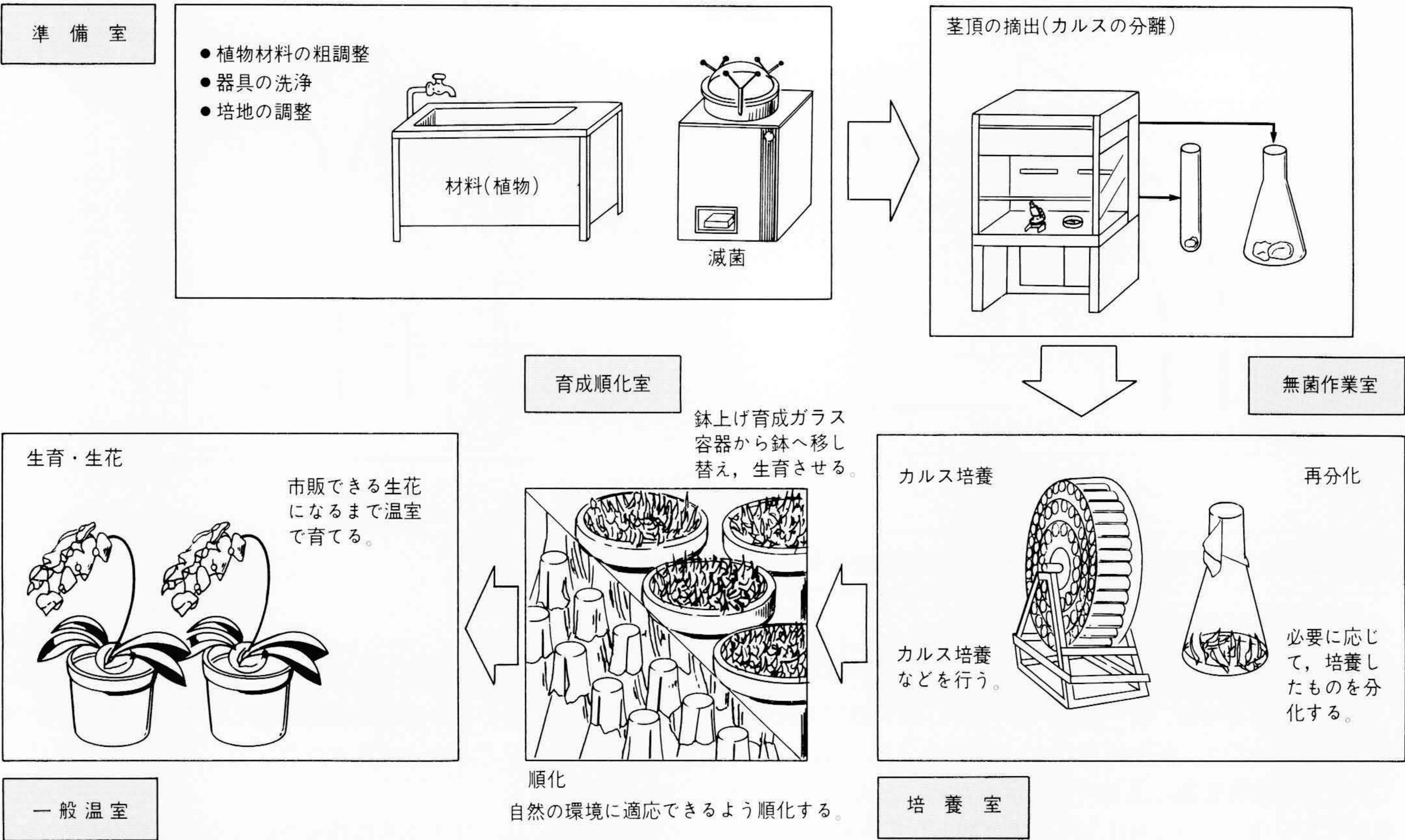


図4 植物組織培養(メリクロン培養)の培養工程 メリクロン培養工程と作業内容を示す。

キノコの人工栽培は、一般的におがくず(おが屑)と米ぬかを混合した培養基をポリエチレン瓶に詰めて殺菌し、これにキノコ種菌を植え付けて培養する。主要施設として接種室、培養室、芽出室、抑制室〔エノキだけ(茸)だけ〕、生育室、種菌研究室などがあり、各々環境制御装置が導入される。エノキだけを例に各々の室の環境条件を表1に示す。

3 培養・保存装置

遺伝子組換え、細胞融合などの技術で作り出した微生物や細胞の増殖を主目的とする培養装置、また必要時まで生体で保存する保存装置は、環境制御技術により性能、信頼性が左右される。

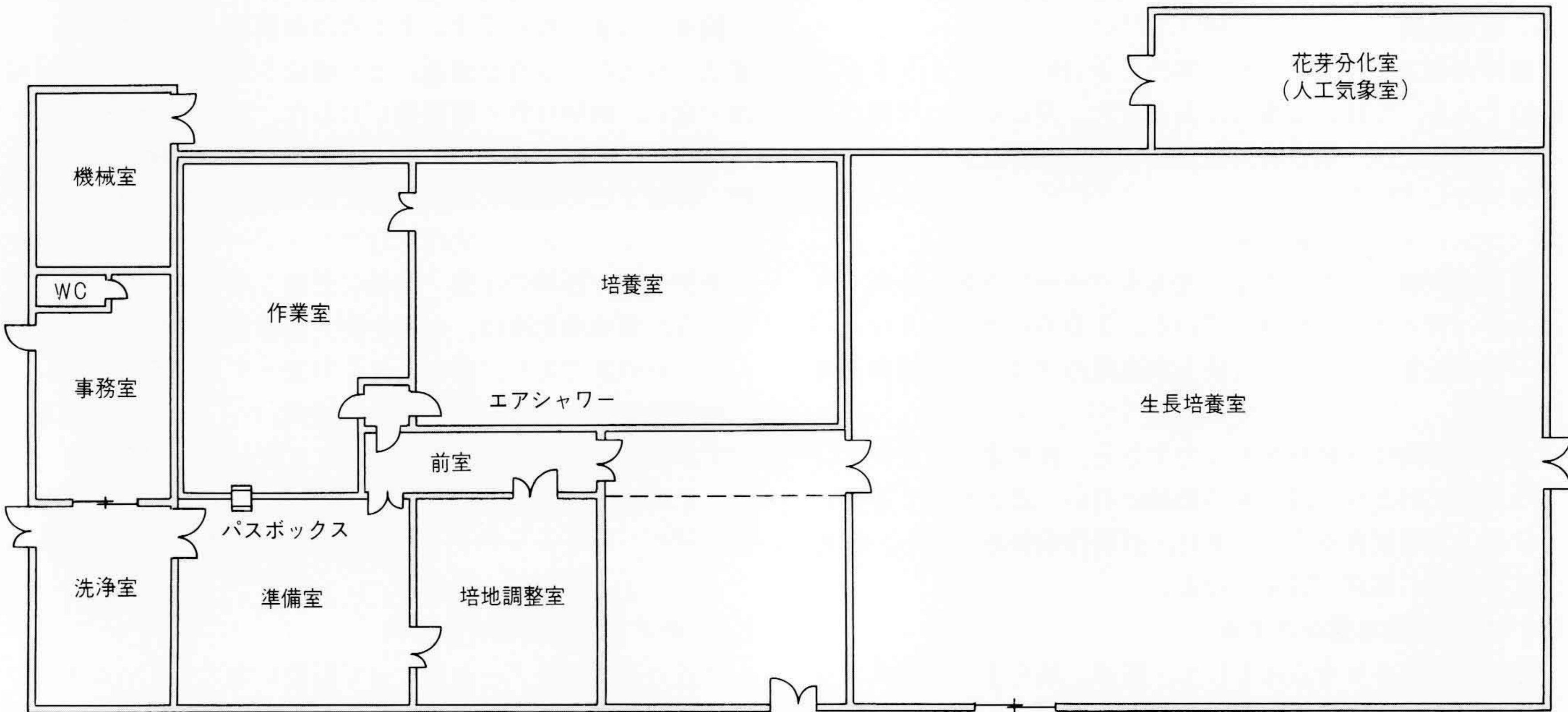


図5 植物組織培養施設実施例 植物組織培養施設納入事例レイアウト図を示す。

表1 キノコ人工栽培施設環境条件 キノコ〔エノキだけ(茸)〕の各工程での最適環境条件を示す。

工 程	温度 (℃)	湿度 (%RH)	留 意 点
接 種 室	18	60	バイオクリーンルームとし、雑菌の混入を防ぐ。
培 養 室	18	70	5～6時間に1回の換気が必要である。
芽 出 室	13	90	太陽光線、人工光の照射を避ける。 酸素不足にならぬよう、換気が必要である。
抑 制 室	3	80	大量の新鮮空気が必要である。 2時間に15分程度の換気が必要である。
生 育 室	5	70	酸素不足にならぬよう、換気が必要である。
種菌研究室	可変	可変	バイオクリーンルームとする。

以下に、日立製作所が開発した各種の培養装置、保存装置について述べる。

3.1 培養装置

培養装置は、培養する微生物や細胞の種類によって培養条件が異なるため、種々のものが考案されている。

以下、代表例としてインキュベータ、シェーカ及びインキュベータシェーカの技術要素と特長について紹介する。

3.1.1 インキュベータ(冷凍機内蔵形)

インキュベータは、器内の温度を一定に保ち細胞、組織を培養する装置で、冷凍機内蔵形の本装置は、周囲温度(0～35℃)にかかわらず、器内温度を-10～+50℃の間で任意に設定でき、安定した性能を実現する。

特長を以下に述べる。

- (1) マイクロコンピュータによるPID(比例・積分・微分)演算制御を採用している。器内温度分布は±0.5～0.7degである。また、器内設定温度が周囲温度より高い場合は冷凍機を運転せず、電気ヒータだけの通電制御が可能である。この場合、通常の二位置制御に比べて消費電力量は約 $\frac{1}{3}$ で済む。
- (2) 3ステップのプログラム機能を装備している。培養→保存、保存→培養といった操作を自動的に行うことができる。
- (3) シェーカ、スターラなどの機器を器内で使用可能である。

3.1.2 CO₂インキュベータ(CO₂・O₂・N₂の3ガス形)

組織細胞培養などでは培養中のpHを維持させるため、CO₂濃度をコントロールする必要がある。また、ヒト2倍体繊維芽細胞やヒト血管内皮細胞などの培養では、体内条件と同じ低酸素条件(酸素濃度: 5～10%)で通常の2～3倍の培養効果が得られる。本装置はCO₂、O₂及びN₂の3ガス濃度をコントロールするマルチガスコントローラを採用した装置であり、その外観を図6に示す。

特長を以下に述べる。

- (1) ウォータージャケット方式により、温度分布は±0.2℃と精密な制御が可能である。
- (2) 低酸素濃度設定(20.9%未満)ではCO₂とN₂、高酸素濃度

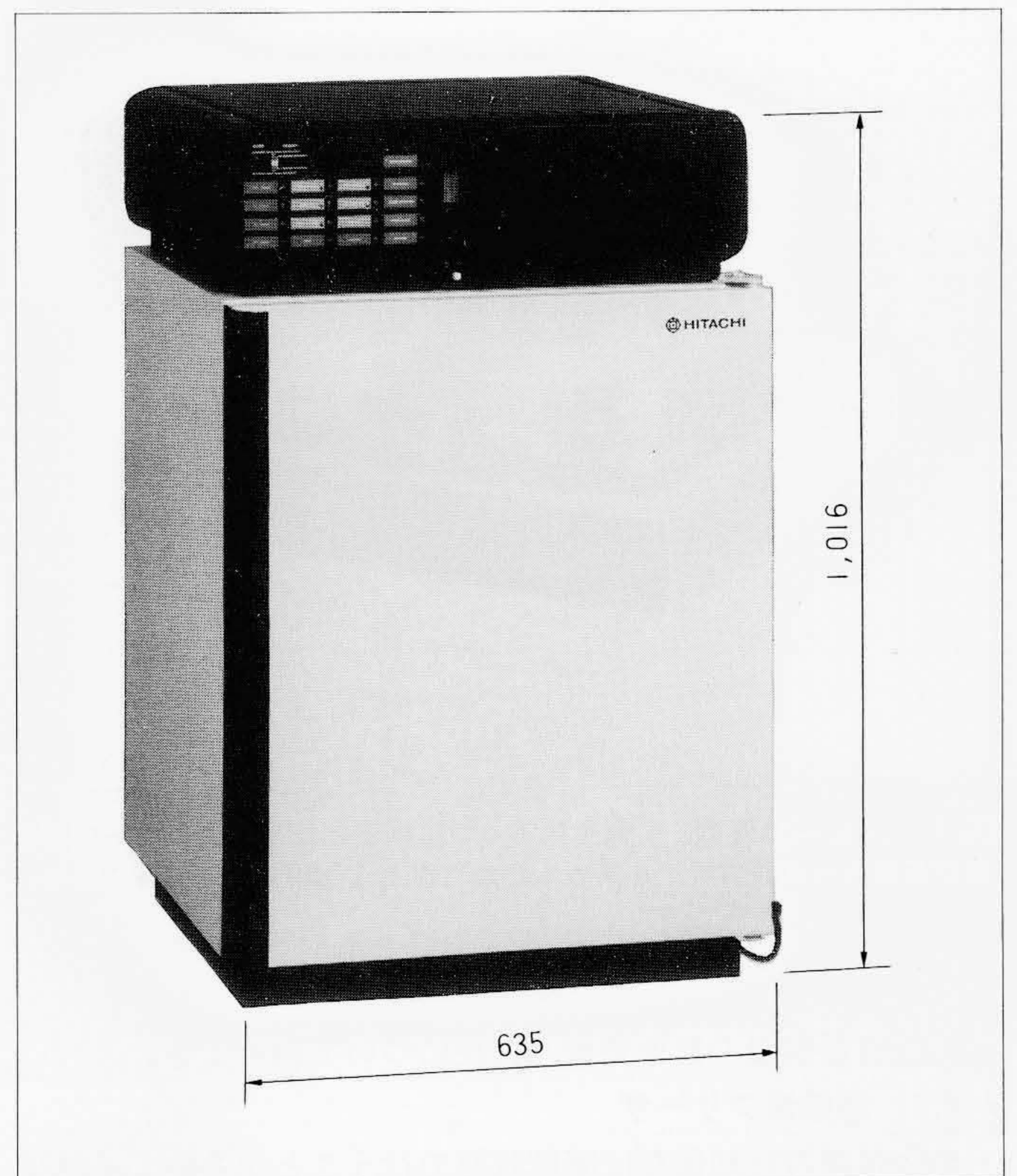


図6 CO₂インキュベータ外観 CO₂、O₂及びN₂の3ガス濃度をコントロールするインキュベータの外観を示す。

設定(20.9%以上)ではCO₂とO₂の各々二つのガスボンベでコントロールする空気を利用した低消費タイプである。

3.1.3 照明付きインキュベータ

植物の培養、育成で光合成を行うものがある。照明付きインキュベータは、インキュベータ(冷凍機内蔵形)に照明機能を付加したもので、照度は最大7,000 lxとし、4段階の制御が可能である。

3.1.4 シェーカ、インキュベータシェーカ

シェーカ及びインキュベータシェーカは、細菌類の振とう(盪)培養、ラン(藍)藻類の浮遊培養、植物細胞の液体懸濁培養などに用いられる。微生物あるいは細胞、培地成分の均一な接触、及び培地内への酸素供給を高めるために振とうを行う装置がシェーカで、かつこのシェーカに培養温度を一定に保つ機能を加えたものがインキュベータシェーカである。シェーカの外観を図7に示す。

特長を以下に述べる。

- (1) 回転数の設定は確実なデジタル式で45～400rpmの幅広い制御が可能である。設定精度は±1%以内としている。
- (2) 磁気回転駆動方式を採用しているため、可動部分はテーブルを支える軸受部だけで、電動機駆動方式に比べ、ベルト、プーリ、ギヤなど回転伝達部が不要であり、低騒音と高信頼性を実現している。

3.2 保存装置

バイオテクノロジーの保存装置は、生体で保存する超低温フリーザと、生成物の性質を損なうことなく保存する真空凍結乾燥装置が多く用いられる。以下に、超低温フリーザと真

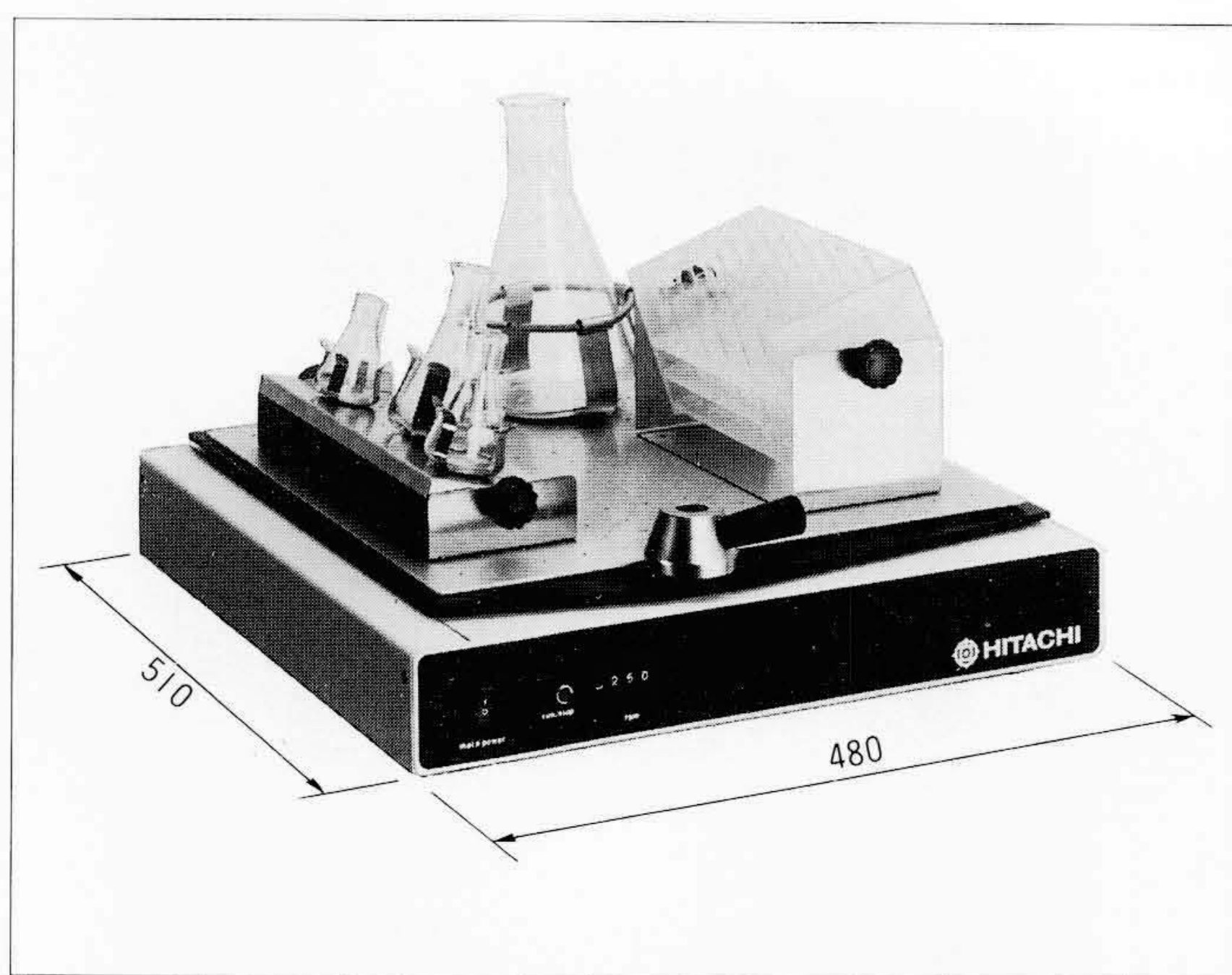


図7 シェーカ外観 微生物あるいは細胞と培地成分の均一な接触、及び培地内への酸素供給を高めるために振とう(盪)を行う装置である。

真空凍結乾燥装置の技術要素と特長について紹介する。

3.2.1 超低温フリーザ

生物材料の長期保存は凍結状態で行うことが多い。凍結保存で重要な点は融解後再培養が可能であり、その生存率が高いことである。生体を凍結する場合、細胞内外の水分が問題である。緩慢に凍結すると細胞外の水分が凍結し、浸透圧が高まり細胞内の水分が引き出され、細胞が変形する。急速に凍結すると細胞内に氷晶が形成され、細胞膜を破壊する。このような障害を防止するためグリセリン、ジメチルサルファオキシドなどの凍害防御物質を使用する。

冷凍機を採用した超低温フリーザは、冷却方式の違いにより二つの方式がある。日立製作所では -85°C 仕様の装置に、冷媒R-13, R-502の二つをそれぞれ独立した冷凍サイクルによって低温を作る二元冷凍方式を採用している。また、 -135°C のフリーザは、新たに開発した混合冷媒方式を採用している。混合冷媒方式は数種の非共沸冷媒を混合し、相対的に蒸発温度の高い冷媒を蒸発温度の低い冷媒の凝縮に用い、これを数段階繰り返すことによって超低温を得る方式である。 -85°C タイプは1年以内の保存に使用され、 -135°C タイプは氷の再結晶点(-130°C)以下で保存されるので、安定であり長期保存に使用される。

特長を以下に述べる。

- (1) 停電などのトラブル時、庫内温度の上昇を防止するバックアップ機構として、バッテリー内蔵の「液化炭酸ガス用自動噴射装置」が取り付け可能である。
- (2) 電子温度制御方式を採用し、庫内温度をデジタル表示としている。
- (3) 温度制御、温度警報、温度記録(オプション)の三つの機能がそれぞれ独立したセンサで作動する高信頼性タイプである(-135°C タイプ)。

3.2.2 真空凍結乾燥機

物質のエッセンスや保持しなければならない性質を失うことなく乾燥が可能な真空凍結乾燥機は、製薬、生化学、医学の研究分野及び食品業界で広く用いられている。

本機の冷凍サイクルは二元冷凍方式を採用し、トラップ温度 -85°C を実現している。本機の冷凍サイクル系統図を図8に、また外観を図9に示す。

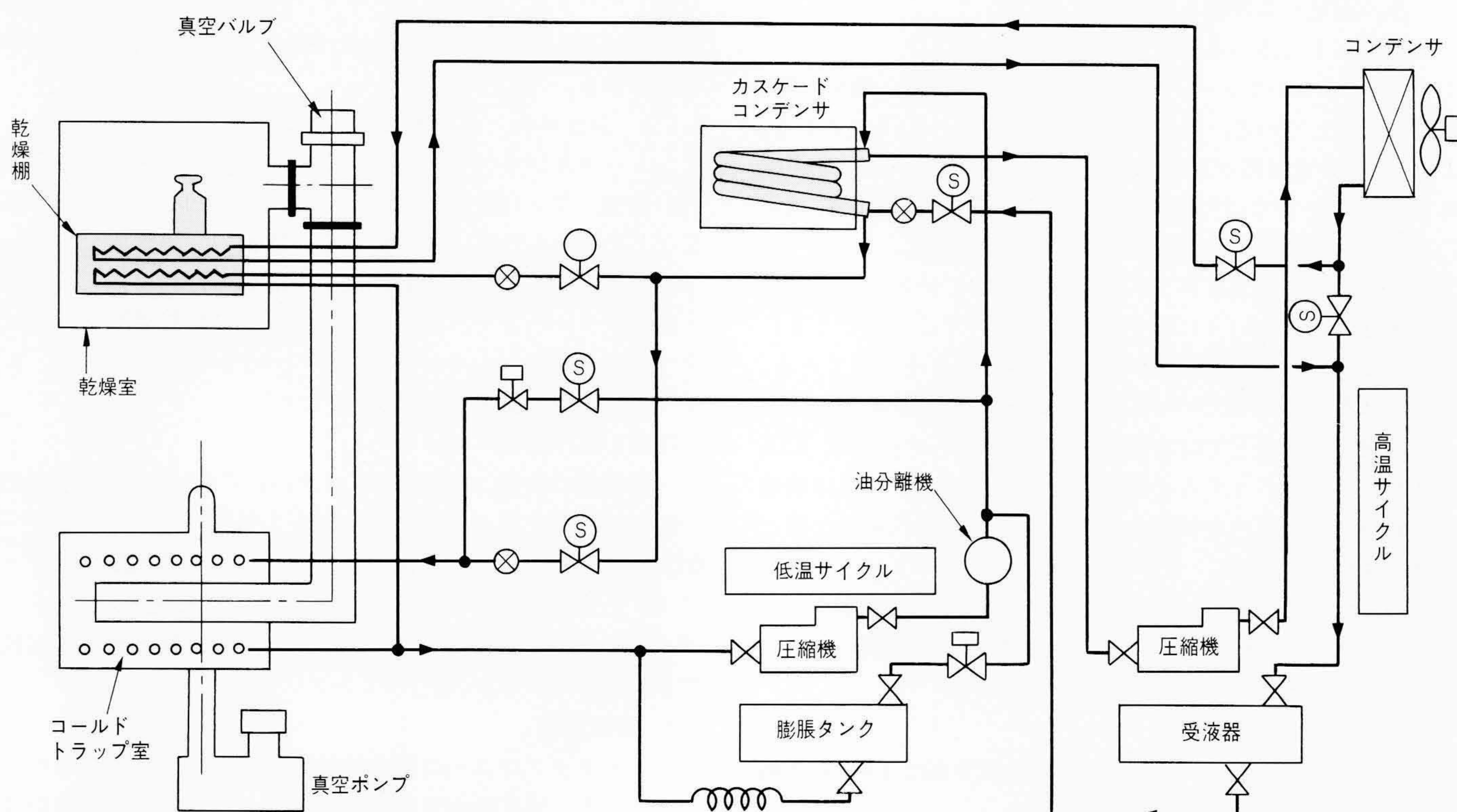


図8 真空凍結乾燥機冷凍サイクル系統図 二元冷凍サイクルを採用した真空凍結乾燥機の冷凍サイクル系統図を示す。

表2 日立真空凍結乾燥機の主な仕様 日立真空凍結乾燥機の標準シリーズの主な仕様を示す。冷却温度や凝結能力により、それぞれ3タイプずつ合計9機種をシリーズアップしている。

形 式 項 目			高 温 用			中 温 用			低 温 用		
			RFD-5H	RFD-10H	RFD-20H	RFD-5M	RFD-10M	RFD-20M	RFD-5L	RFD-10L	RFD-20L
コールド トラップ	凝 結 能 力	l/バッチ	5	10	20	5	10	20	5	10	20
	冷 却 温 度	℃	-45			-65			-85		
	到達真空度	Pa	6.7(5×10^{-2} Torr)			1.1(8×10^{-3} Torr)			1.3×10^{-1} (1×10^{-3} Torr)		
乾 燥 棚	面積(有効)	m ²	0.25	0.50	1.0	0.25	0.50	1.0	0.25	0.50	1.0
	冷 却 温 度	℃	-40			-55			-75		
	加 熱 温 度	℃	50			50			50		
冷 凍 機 出 力		kW	1.5	2.2	3.75	1.1/1.5	1.5/2.2	2.2/3.0	2.2/3.0	3.0/3.75	5.5/7.5
製品寸法	幅	mm	1,540	1,540	1,840	1,540	1,540	1,840	1,840	1,840	1,840
	奥 行	mm	1,217	1,217	1,417	1,217	1,217	1,417	1,217	1,217	1,417
	高 さ	mm	1,750	1,750	2,050	1,750	1,750	2,050	1,750	1,750	2,050
製 品 重 量		kg	500	600	800	600	800	1,000	800	1,000	1,200



図9 真空凍結乾燥機の外観 凝縮能力10l/バッチ，コールドトラップ冷却温度-65℃タイプを示す。

特長を以下に述べる。

- (1) トラップ温度-45℃，-65℃，-85℃と3シリーズを開発し，共晶点の低い物質の乾燥にも対応できる。
- (2) 棚の加熱には冷凍機のホットガスを利用する方式を採用し，電気加熱方式に比較し約30%の省エネルギー化を実現している。
- (3) 分離形トラップの採用により，棚の洗浄やトラップの融氷が容易である。

標準シリーズ9機種の主な仕様を表2に示す。

5 結 言

バイオテクノロジーでの環境制御システムとして，主に植物培養，栽培システムについて述べた。植物培養，栽培システムは，高度な精密制御よりも温度，湿度，照度，CO₂・O₂ガス濃度及び空気清浄の要因をシステム的に取りまとめ，最適環境条件を作り出すために，これらの要因を複合的にコントロールすることが重要である。

日立製作所及び日立グループは，植物培養，栽培施設を実際に設け，要素機器，制御装置，トータルシステムの構築，最適環境条件の実証を行っている。

Boundary-Fit曲線座標変換法の 機械工学への応用

日立製作所 三木一克・高木敏行・他1名

日本機械学会誌 89—810, 549—555 (昭61-5)

電子計算機の飛躍的な発展により、計算機を高度に利用して製品性能を高精度に予測することが可能となり、新製品の開発や従来製品の大幅な改良などに効果的に活用されつつある。

Boundary-Fit曲線座標変換法(以下、BF法と略す。)は、1970年代の後半に航空機の流体特性を解析する手法として米国で開発された。本手法では、実平面上の解析領域を正方格子から成る形状の簡単な領域に座標変換し、写像平面で物理現象を支配する偏微分方程式を解く。また、写像平面から実平面への逆座標変換によって、境界形状に沿った曲線座標格子を自動的に生成することができ、更に物理量が大きく変化する境界領域に格子を集中することができるため、境界近傍の物理現象を高精度に解析することができる。

本論文では、BF法の概要及び米国での研究状況を紹介するとともに、機械工学への応用のために著者らが新たに開発した手法を、下記の流体解析及び構造解析の例を挙げて示した。

一般の熱流体機器内の流体解析への応用例として、U字形の二重曲り管部と熱交換器の円筒シェル部から成る構造内の3次元非圧縮性乱流の解析結果を示した。本例では、複雑な複合立体形状を扱うため、3次元領域を複数の部分領域(六面体)に分割し、個々の六面体ごとにBF法を適用する手法を開発し、二重曲り管部を通過した偏流のシェル部での流動特性を解明した。

また、移動境界問題に応用した例として、回転する翼周り2次元非圧縮性層流の解析結果を示した。BF法では、移動する境界に沿って曲線座標格子を各時間ステップごと

に自動的に生成でき、かつ物理現象を写像平面上の固定された座標格子を用いて解析することができる。解析により、翼の回転によって生じる周方向の流れとともに、翼先端部に局所的な渦が生じ、更に翼がバツフルを通過することによって渦が縮小する様子を明らかにした。

構造解析への応用例として、薄肉シェル構造物を対象に、有限要素法の自動要素分割に利用した例を示した。本例では、BF法を拡張して、自由曲面上に格子を自動生成する手法を開発し、沸騰水型原子炉の格納容器に応用した。本手法により、曲面上の応力集中領域に格子を自動的に集中することができ、同一の格子点数で解析精度を向上することが可能となった。

GIS(ガス絶縁開閉装置)の技術開発動向

日立製作所 細川正男・佐々木幸司

電気学会雑誌 106—6, 24—27 (昭61-6)

GIS(ガス絶縁開閉装置)は、空気よりも優れた絶縁・消弧能力を持つSF₆(六フッ化硫黄)ガスを用い、接地された金属製のガス密閉容器内に、遮断器、断路器、接地開閉器、母線、避雷器、計器用変圧器、計器用変成器などを収納してガス絶縁化した縮小形開閉装置である。

GISは昭和40年代の初めに、ヨーロッパや我が国で使用され始め、その後は高電圧・大容量化の一途をたどり、我が国では550kV、外国では800kVまで実用化され、我が国の次期送電電圧1,100kV級(UHV)にはGISの適用が考えられている。

GISの発展を特徴づけるものとして、形態の変遷が挙げられる。当初は、各構成機器の高電圧充電部を各相ごとにそれぞれ独立の接地金属タンク内に収納した相分離形から出発し、主母線だけ三相分を同一タンク

に収納した主母線三相一括形を経て、各構成機器ごとに三相分を同一タンクに収納した全三相一括形へと進展してきた。更に、複数の機器を同一タンク内に収納する複合化の考え方があり、低電圧のものに適用され始めている。

GIS構成機器の三相一括化は、GISの据付面積や容積の縮小化に加えて、輸送・据付けを容易にする利点がある。母線の三相一括化は、既に550kVまで実用化され、遮断器、断路器、母線、その他を含めた全三相一括形GISは、204kVまで実用化され、300kVの試作器も開発されている。

複合化の例としては、遮断器タンク内に分岐母線、接地開閉器、主母線タンク内に母線断路器を収納し、ガス区画と容器数を低減した構成のものが、既に145kVまで開発されている。GISの複合化を極限まで進

めたものとして、一つの箱形容器の中に各機器を収納したものが72～84kV用に適用され、外観をキュービクル形に構成して形状の環境調和が図られている。

GISの事故率は、気中絶縁変電所に比べ約 $\frac{1}{6}$ 程度で低いが、事故が発生した場合のダウンタイムが長い。このため、事故の未然防止による電力供給の安定化を図るため、密閉容器内の状態を監視する外部診断技術の研究開発も進められ、一部実用化されている。

GISは小形・軽量で、高信頼性、保守点検の省力化など多くの特長を持ち広く使用されているが、今後更に経済性、環境調和、無保守化の技術開発が加速され、いっそう普及発展していくものと考えられる。