

月面基地居住者のための CELSS —植物棟のバイオハザード対策の総合システム—

A Study of Biohazard Protection for Farming Modules of Lunar base CELSS

緑川義教, 藤井隆宏, 柴 光昭, 寺井 稔*, 大政謙次**, 新田慶治***
Yoshinori Midorikawa, Takahiro Fujii, Mituaki Shiba,
Minoru Terai*, Kenji Omasa**, Keiji Nitta***

日揮(株), 〒100 東京都千代田区大手町 2-2-1
JGC Corp, 2-2-1 Ohtemachi, Chiyodaku, Tokyo 100, Japan

*東京都立科学技術大, 〒191 東京都日野市旭ヶ丘 6-6
**Tokyo Institute of Science & Technology*

6-6 Asahigaoka, Hinoshi, Tokyo 191, Japan

**環境庁国立環境研究所, 〒305 茨城県つくば市小野川16-2
***National Institute for Environmental studies*

16-2 Onogawa, Tsukuba, Ibaraki 305, Japan

***航空宇宙技術研究所, 〒182 東京都調布市深大寺東町 7-44-1
****Natioal Aerospace Laboratory*

7-44-1 Jindaiji-Higashimachi, Chofu, Tokyo 182, Japan

Key Words: CELSS, Lunar base, Biohazard protection

Abstract

For the Closed Ecological Life Support System (CELSS) of a manned lunar base which is planned to be built on the moon early in the 21st century, a program exists to grow vegetables inside a farming module. Table 1 shows other proposed farming modules.⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾ At the 40th IAF (Malaga, 1989) the author et al presented a proposal for supplying food and nutrients to a crew of eight members, a basic concept which is based on growing four kinds of vegetables.⁽⁶⁾ This paper describes measures for biohazard protection in farming modules. In this study, biohazard protection means prevention of the dispersion of plant diseases to other plant species or other portions of farming beds.

(Received October 3, 1990)

1990年10月3日受付

はじめに

21世紀初頭に人類は月面基地を建設しそこに長期的に滞在すると考えられるが、月面基地においてはCELSSによって食物の自給、水及びガスのリサイクルがおこなわれるであろう。

月面基地における食物自給は、先ず植物の生産にたよることが考えられ、いくつかの提案も行われている (Table 1)。⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾

著者らは40th IAF (マラガ1989)において、8人のクルーを対象とした食品/栄養の供給について、4種の植物栽培を基本とした提案を行い⁽⁵⁾、さらに28th COSPAR (ハーグ1990)において

Table 1 Examples of Proposed Lunar Farming Module

Culture Bed	Plant	Configuration	Reference
Sand Gravel Regolith	Wheat Rice Potato Soybean Lettuce Spinach		K.Sezaki et al IAF-89-576 1989 (1) K.Nitta Symposium on a lunar base and exploitation of lunar resources 1990 (2)
Rock wool	Lettuce Turnip		K.Kiyota et al IAF-89-580 1989 (3)
Sand Gravel Rock wool Hydro-aeroponics	Rice Soybean Lettuce Strawberry		Y.Midorikawa et al Workshop on CELSS 1989 (4) Y.Midorikawa et al IAF-89-579 1989 (5)

植物棟のバイオハザード対策の総合システムについて提案をおこなった⁽¹³⁾。本報ではこれにその後の知見を加えたもので、植物のバイオハザード対策についての提案とする。

1. 検討条件および検討方法

月面基地における植物棟は CELSS の代表的シナリオ⁽⁶⁾に従って、Table 2 のように 60 m² 6 棟として設定した。植物棟内外の条件は Table 2 の通りと考えられる。栽培植物としては Table 3 に示すように、イネ、ダイズ、レタス、イチゴの 4 種とし合計の栽培面積はクルー 1 人当たり約 40 m²

とした。バイオハザード対策としては、①植物の生態学的諸条件の把握、②植物障害の様態、防除法の把握、③バイオハザード対策の具体的設備、制御法の検討——モニタリング、制御、緊急シャットダウン、バックアップシステム等——を順次考察し、全体として、『有人月面基地栽培植物バイオハザード対策のシステム』が構築されるよう工夫を行った (Fig. 1)。

2. 検討および結果

2-1 植物の生態学的諸条件

月面基地での栽培予定植物、イネ、ダイズ、

Table 2 Data of Farming Module

Atmospheric pressure	1 atm. (equivalent to that on earth)
Gravity	1/6 G
Location	Under regolith
Size of the unit	4m X 15m
Number of units	6
Number of crew to be supported	8
Species of plant	Rice, soybean lettuce, strawberry

レタス, イチゴについて, 光・温度・空気湿度・培地PH・光周性・CO₂ 効果などを検討した (Table 4)⁽⁷⁾⁽⁸⁾。

また, 植物の発芽・生長・花芽分化・開花・結実の一生の間に, 生長段階に応じた栄養要求がある。イネの生長段階に応じた栄養要求量についてFig. 2に示す。カリウムについては幼穂形成期に, 窒素については出穂期に, リン酸・ケイ酸については成熟期に要求量のピークがある。

2-2 植物障害の様態, 防除法の把握

イネ (イネ科——単子葉植物), ダイズ (マメ科——双子葉植物), レタス (キク科——双子葉植物), イチゴ (バラ科——双子葉植物) は互いに, 植物分類学的にも類縁ではなく, “種” 特有の病害 (例えばイネのいもち病・ばか苗病) については種が異なることによる病害の伝播阻止の効果が考えられる。反面“種” に関係なく広く伝播する共通の病害 (例えばべと病) などもある (Table 5)。また障害の原因としては数多くあり種子由来のもの, 土壌由来のもの, 環境劣化によるもの等から, 病原菌感染による病害, ウイルス罹患, こん虫, せん虫,

Table 3 Nutrition Supply

FOOD No.	FOODS	SUPPLY	BED.	ENERGY	CARB.H	PROT.	FAT/OIL
		g/DAY-MAN	m ² /MAN	kcal	g	g	g
1-41-a	RICE	603	18.8	2,117	439	45	18
7-19	SOYBEAN	179	16.6	782	56	64	42
12-72	LETTUCE	128	1.8	15	3	2	0
13-6	STRAWBERRY	75	1.3	26	6	1	0
TOTAL		985	38.5	2,940	504	112	60
REQUIREMENT		600	40	2,700	439	101	60

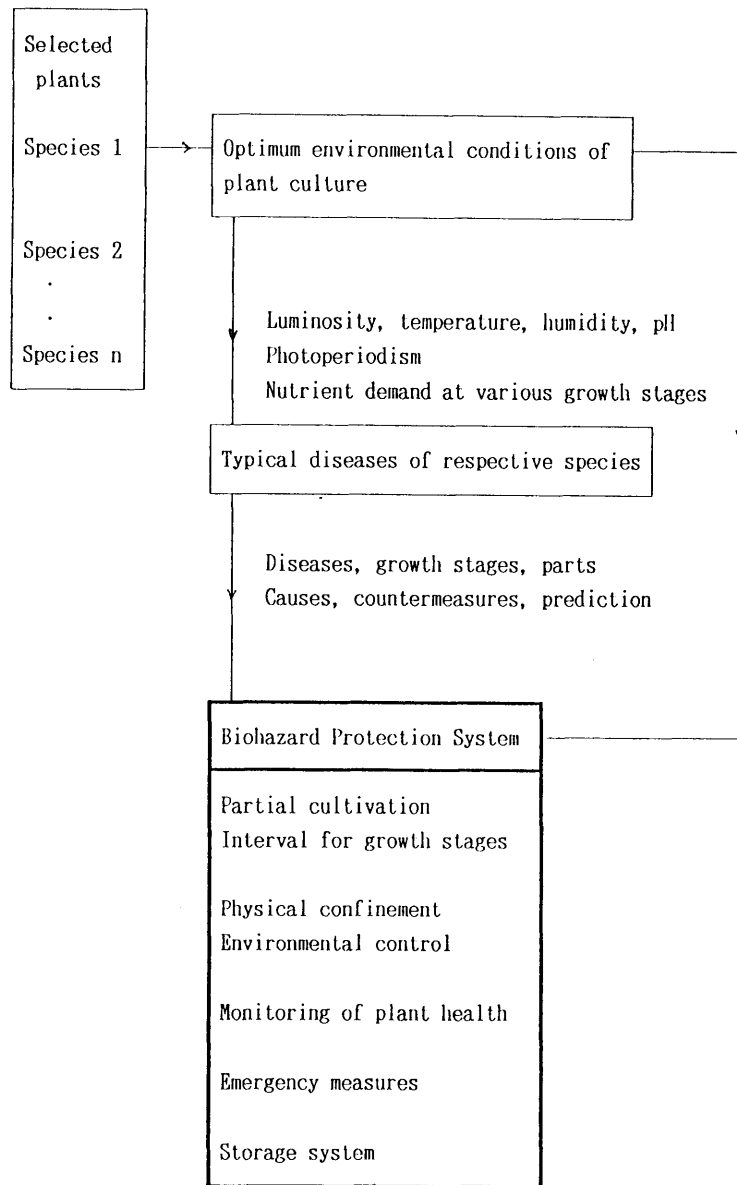


Fig. 1 Biohazard Protection System

ダニ類，アリマキ類の食害，寄生による損傷，衰弱，生理的原因による衰弱等がある。

このうち土壌由来の植物障害としては連作障害があり，ナス科植物などにたいする障害が有名である。これは土壌中に，せん虫や病原菌が残存したり，特定の元素が欠乏することなどが原因としてあげられている。月面基地植物棟では砂・礫・ロックウール耕，水気耕等が考えられているので，収穫後の栽培ベットの殺菌や栄養給源としての欠乏元素の補給が土壌栽培より

容易でありさらに土壌栽培固有の障害はほとんど考慮しなくて良いと考える。

環境上の諸因子は，日照・気温・空中湿度・根圏の酸素濃度・PHまたアクシデントとしての大雨や強風などによるものであるが，施設農業という立場から見るとこれらの因子はほとんどコントロール可能のものである。ただ環境コントロール装置の選定に際しては，月面重力1/6という条件を十分に考慮する必要がある。

ウイルス性の植物障害は，種子・苗にその原

Table 4 Optimum Environmental Conditions of Plant Culture

	Rice	Soybean	Lettuce	Strawberry
Luminosity (lux)	3.5x10 ⁴ (saturation)		1.8x10 ⁴ (minimum)	2.0 ~3.0x10 ⁴ 1.5x10 ⁴ (minimum)
Temperature (° C)	25	30~35(Germination) 25~30(Anthesis) >20(Night after anthesis)	20	15 ~23(Day) >8 (Night) <17(Floral bud 25(Pollen germination)
Humidity (%)			80 95(night)	70
pH (nutrient solution)	5.0 ~6.0	5.5 ~7.0	5.5 ~6.8	5.5 ~6.8
Photo- periodism	Short- day	Short- day	Long- day	Long- day (Anthesis) Short- day(Floral bud differen- tiation)
Effect of CO ₂	Effective		1000 ppm optimum	
Others			Optimum wind velocity 60 cm/sec Optimum electric conductivity of nutrient solution 1.1 ~1.3 (milli mho)	Optimum electric conductivity of nutrient solution 0.8 ~2.0 (milli mho)

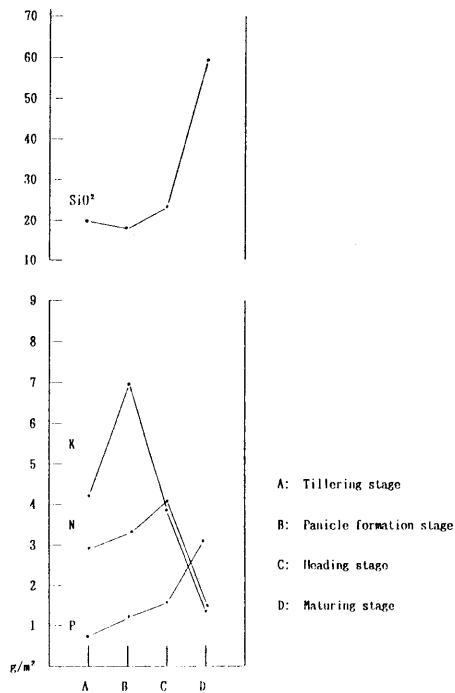


Fig. 2 Nutrients Demand of Rice at Growth Stages

因を持つものが多いのでウイルスフリー種子やウイルスフリー苗の採用と、罹患個体の早期除去、処分が必要である。

微生物起源の障害にたいしては、クリンルームに近い考え方で封じ込め設備を考えることができる。

大型こん虫（コガネムシ等）の侵入は考えられないが、アリマキ、せん虫、ダニ等小動物の発生については、これら生物の生態を十分に知って（例えばアリマキの単為性殖、アリとの共生）対応すると共に天敵など生物的防除法（例えばこの虫に対する線虫の天敵効果⁽¹⁾、アリマキにたいするナナホシテントウムシの捕食性の利用）も検討する必要がある。近來、遺伝子組み替え植物の研究が進み⁽¹⁰⁾ウイルス耐性トマト（その他こん虫耐性、耐病性、除草剤耐性など）等が研究されているが、これら手法も病虫害対策として充分考慮されるべきである。

Table 5 Typical Plant Diseases of Respective Species

Disease	Susceptible Period	Susceptible Part	Cause	Susceptibility in Lunar Base
For Rice				
Blast (seedling)	Seedling stage	Seedling	Piricularia	A
Neck rot	Heading stage	Panicle	Piricularia	A
Blast (leaf)	Vegetative stage	Leaf	Piricularia	A
Bakanae	Seedling	Seedling	Gibberella	B
Insect damage	Vegetative stage	Stem	Rice stem borer	B
For Soybean				
Bacterial wilt	Vegetative stage	Root	Microbe	B
Mosaic	Vegetative stage	Whole	Virus	A
Downy mildew	Vegetative stage	Leaf	Pseudoperonospora	A
Purple speck	Matured stage	Bean	Cercospora	A
Insect damage	Vegetative stage	Leaf	Soybean beetle	C
For Lettuce				
Leaf edge rot	Vegetative stage	Leaf	Lack of calcium	A
Downy mildew	Vegetative stage	Whole	Mildew microbe	A
Leaf rust	Vegetative stage	Leaf	Rust microbe	A
Insect damage	Vegetative stage	Whole	Chafer Cabbage armyworm	B
For Strawberry				
Mosaic	Vegetative stage	Whole	Virus	A
Red stele	Seedling	Seedling	Continuous cropping	B
Yellows	Flowering stage	Whole	High temperature	A
Gray mold	Vegetative stage	Fruit	Gray mold	A

A: High B: Middle C: Low

2-3 バイオハザード対策の設備および制御法

2-3-1 作付の工夫による障害発生危険の分散

月面基地での栽培予定の植物、イネ、ダイズ、レタス、イチゴについて、それぞれ複数の畑に分割して栽培し、分割した区分畑毎に播種/植付時期を順次ずらすこと、隣接する区分畑については互いに別種の植物を植えることを検討した。結果を Table 6 および Fig. 3 に示す。イネ、ダイズについてはそれぞれ 30 m² の区分畑 6 個づつ 10 日毎にずらした作付けを行い、レタス、イチゴについてはそれぞれ 3 m²、2 m² の区分畑 6 個づつ 5 日毎にずらした作付けを計画した。いずれの植物も播種/植付けから収穫までの期間を 6 等分しているため、各区分ともそれぞれ段階的に異なった生育段階を持つことになる。したがって生育段階に特異的な病害発生については、被害面積を最小限に留める効果が期待される。また、隣接した区分畑に異種の植物を作付けすることによって“種”に特異的な病害の伝播を阻止する効果が期待される。

2-3-2 植物栽培後の環境制御

6 棟の植物棟それぞれについては、物理的封じこめの考え方をとりハザードの棟内封じ込め

を基本とする。

棟内壁面、天井面などは結露を防止し、天蓋により水滴の直接落下を防ぎ、壁面シャワーを行う。

棟内換気は 60 cm/sec の風速を標準とし植物に適した、あるいは障害を与えない程度のものとする。これは自然系に模して植物周辺のマイクロのガス環境を新鮮に保持することを目的とし、呼吸ガス、光合成に伴うガス交換を円滑にし、また植物から発生する考えられるエチレン等の微量ガス(トレースコンタミ)を排除するためである。できれば区分畑毎に空気が循環するように設置する。

栽培植物に影響する環境諸因子は、制御系設備として設置する。即ち照明、温度、空中湿度、CO₂ などである (Fig. 2)。この他に循環ガス中のトレースコンタミの蓄積が予測され、この除去設備が必要と考える。トレースコンタミについてはまだ十分に解明されていないが今後研究開発を進める必要がある。空気、水の棟内への供給についてはフィルター等による除菌、人間の出入りに関しては更衣、踏み込み水、エアーカーテンなどによる汚染防除策が必要である。

2-3-3 栽培植物の健康モニタリング

生育中の植物の生理的活性をモニタリングす

Table 6 Data of Partial and Interval Cultivation

	Culture period (days)	Interval of cultivation (days)	Area of one section of bed (m ²)	Number of partitions	Total area (m ²)
Rice	56	10	30	6	180
Soybean	56	10	30	6	180
Lettuce	30	5	3	6	18
Strawberry	30	5	2	6	12
Total	-	-	-	24	390

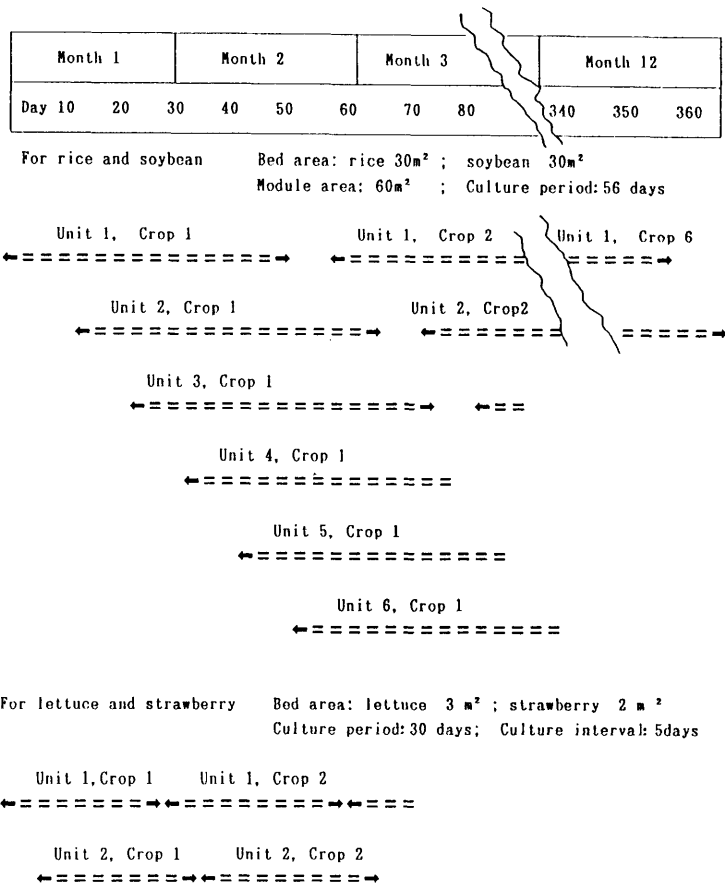


Fig. 3 Concept of Cultivation with Partition and Interval

る方法は種々考えられている。著者らは植物の光合成、呼吸に関連する葉の生理に着目し、熱的・光学的測定法について提案している⁽⁹⁾。植物は葉で呼吸し、さらに太陽光や人工光の受容エネルギーに応じた炭酸同化作用を行っている。また葉の気孔は水分の蒸散をコントロールする為に開閉する仕組みとなっている。気孔の開によって放熱し、閉によって温度が上昇する仕組みであり、この原理を利用した葉表面温度の測定の例を Fig. 4 に示す。また大気汚染などの環境劣化によって葉の光合成阻害がおこった場合とその回復後の蛍光画像を示す (Fig. 4)。

植物の健康モニタリングのもう一つのポイントは根圏の環境である。2～3年植え替えを怠った植木鉢の観葉植物が枯死するのは良く経験する事であり、これは根圏の環境変化、特に酸素不足によることが多いと考えられる。すでに述

べたように根圏での酸素濃度、温度、PHなどが植物の生存・生育に重要な因子であり、これらに対するモニタリング・コントロールの設備が重要である。

また、窒素、リン酸、カリウムその他の栄養成分を含んだ養液は、根圏に注入されまた葉面散布もされる。これらの養液システムは根圏の成分濃度モニタリングシステムとも連動するサブシステムを持ちたい。

2-3-4 エマージェンシー対策

以上のような諸対策を行ったにも係わらず不幸にして、ある植物棟に最悪の汚染が起こった場合、その植物棟を他の植物棟およびクルーの居住棟から切り放す事を、もっとも厳しい処置法として考える必要がある。最悪のケースに致る以前の緩やかな処置としては棟内のエマージェ

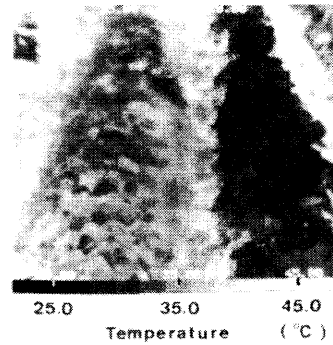


Fig. 2 Diagnosis of stomatal opening and gas exchange by thermal imaging.

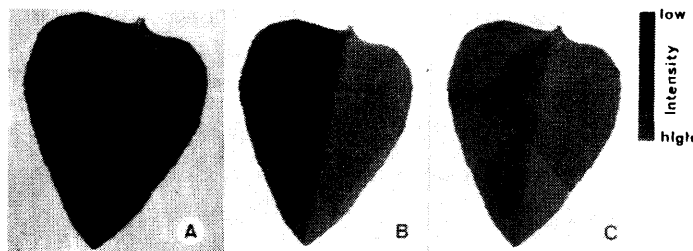


Fig. 3 Diagnosis of air pollutant effect on photosynthesis by dynamic imaging of chlorophyll fluorescence induction. A, photograph at the end of fumigation; B, fluorescence image at the end; C, fluorescence image at 6 hr after the end.

Fig. 4 Measuring of Plant Health

ンシ用洗浄・殺菌が必要である。この場合、消毒薬の残留性など十分に考慮して、生物農薬¹²⁾の使用などを考慮すべきである。

2-3-5 貯蔵システム

エマージェンシ対策や常備として種子および収穫物の貯蔵システムは非常用の食料植物の確保の観点から極めて重要である。ウイルスフリー種子や苗、場合によっては組織培養による成長点などの一定期間の保存も必要であろう。

以上のバイオハザード対策についてのモデルをFig. 5 に示す。

3. 討 論

月面基地における植物棟のバイオハザード対策は、すでに述べてきたように植物の生態、病原微生物や病原こん虫、せん虫、ダニなどの生態、生活環境を十分に知り尽くして対応する必要がある。

また、防除法としての抗生物質等を利用した分

解性の高い農薬や天敵を利用した生物農薬の技術、さらに遺伝子組み替え技術を行った耐性植物などの知見を集積し適用する事が望ましい。

その他に、完全な閉鎖系から考えられる微量ガス成分（トレースコンタミ）の解明とその除去法についての研究が必要であろう。

【引用文献】

- (1) K. Sezaki et al : A Study on Culturing Modules for CELSS in Lunar Base IAF 40th congress, Malaga, IAF-89-576. (1989)
- (2) 新田慶治 : 月面基地と有人宇宙活動 月面基地と月資源開発シンポジウム, 東京, (3), (1990)
- (3) M. Kiyota et al : Plant Cultural System Incorporated into the CELSS, IAF 40th congress, Malaga, IAF-89-580. (1989)
- (4) 緑川義教 他 : 月面基地における栄養供給の研究, CELSS研究会, 東京, (32) (1989)
- (5) Y. Midorikawa et al : A Food/Nutrition

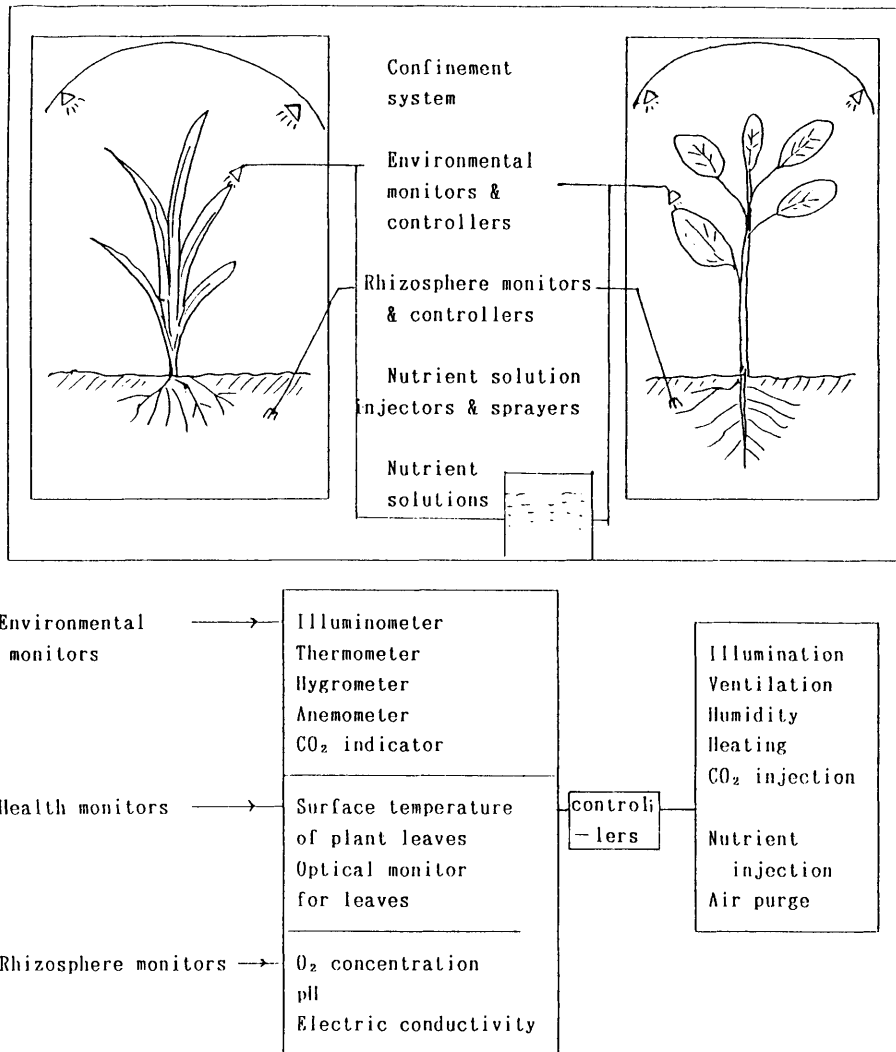


Fig. 5 Equipment and Systems for Biohazard Control

Supply Plan for Lunar Base CELSS, IAF 40th congress, Malaga, IAF - 89 - 579. (1989)

- (6) 新田慶治：CELSSのシステム構築上の諸問題，CELSS Journal, Japan. Vol.1. No.1, p5-2 (1989)
- (7) 武川満夫：水耕栽培百科，富民協会 (1986)
- (8) 施設園芸ハンドブック，日本施設園芸協会，(1987)
- (9) 大政謙次：植物のガス代謝機能と画像診断，CELSS Journal. Japan. Vol.1. No.1, p13-17. (1989)
- (10) 貝沼圭二：遺伝子組み替え微生物の安全評価

をめぐる諸問題，第一回機能性微生物応用シンポジウム 9 (1990)

- (11) 石橋信義：新しい微生物殺虫剤の開発と有用線虫による病害虫防除の実際 (1990)
- (12) 正田 誠：殺菌性蛋白質によるバイオ農薬製造法，第一回機能性微生物応用シンポジウム 3 (1990)
- (13) T. Fjii et al : A Study of Biohazard Protection for Farming Modules of Lunar Base, 28th COSPAR (1990)