

## 第5章 月面インフラストラクチャーの形成と展開

## 第5章 月面インフラストラクチャーの形成と展開

### 1. 月面活動のイメージおよび技術開発シナリオの概要

本検討では、月面活動が段階的に発展していくこととし、無人での活動を行うフェーズIと有人活動を行うフェーズIIに分けて各々のフェーズにおける活動のイメージを想定した。フェーズIは2000年から2015年、フェーズIIは2015年から2030年とし、さらにフェーズIIについては、昼間のみ滞在とする第1段階と常時滞在とする第2段階とに分けて検討を行った。以下に各フェーズにおける活動イメージの概要を記す。図5.1.1-(1)及び図5.1.1-(2)は、各フェーズにおける活動イメージをまとめたものである。なお、詳細な活動イメージについては、2節にて述べる。

#### (1)フェーズI

フェーズIにおいては、月の理解を目的とした科学探査ミッションが先行し、月の起源と進化を理解するための基礎データ収集が図られ、更に月からの科学としての天文観測のパイロットミッションが実施される。この間に地球帰還技術が確立され、フェーズIの末期にはより詳細な月地質データを得るため、サンプルリターンミッションが実施される。具体的には、次のような活動イメージとなる。

- 科学探査により月面の地形・地質データが得られるにしたがって、月の環境利用ミッションが開始される。まず、天文観測のパイロットミッションが実施される。その後、地球観測装置が設置され、グローバルな地球観測が行われる。これらのパイロットミッションにより、フェーズIIに実施される本格的な月面利用観測ミッションのための基礎データ収集が図られる。
- フェーズIIにおける有人活動に先行して、ライフサイエンスの基礎実験、及び月面物質から建築材料の製造、酸素の抽出等が無人実験により実施され、データ収集が行われ、月の科学探査による理解が進むに従って、地球への資源供給を目的としたヘリウム3等のパイロット実験が実施される可能性がある。

#### (2)フェーズII

有人活動が行われるフェーズIIでは、フェーズIで行われた実験や観測を、より本格的に実施するために、様々なシステムが導入される。システムは、居住系、電力系、熱制御系、通信管制系、実験/観測系、運用系、輸送系に大別され、月面における制約条件を考慮しながら第1段階から第2段階に進むに従って徐々に拡大・充実していく。

- 第1段階は初期の3年間とする。昼間(10日間)のみ滞在であり、居住モジュール内でのライフサイエンス実験(植物栽培、水棲動物飼育等)、及び屋外での観測、資源利用実験(酸素製造、ヘリウム3抽出等)とも比較的小型の装置を用いた活動となる。有人活動をサポートするためのロボットも導入され、各システムの運搬・設置作業等を補助する。また、各システムは、夜間における保温対策やモード切替機構、第

2段階での拡張を考慮した構造等を備えたものとする。システムの構築は、初期の無人輸送ミッションによってシステム立ち上げに必要な物資を輸送した後、有人ミッションにて行われる。

- 第2段階は第1段階に引き続いて実施される。基本的には第1段階で使用されたシステムを拡張して用いるが、夜間も含めて常時滞在することとなるため、新たなシステムを導入する部分も出てくる。実験専用モジュールや食糧生産/貯蔵モジュールが導入されることにより、ライフサイエンス実験はより本格的な屋内長期実験が可能となるほか、水やガスの再利用や食糧の自給も徐々に行われる。資源利用実験も酸素やヘリウム3に加えて、建築材料の製造実験等も行われるようになる。また、長期間の滞在となるため、居住モジュールをはじめとする与圧システムはレゴリスによる被覆が施される。そのための被覆作業等の土木工事も発生し、ロボット群の作業量も増すこととなる。さらに、フェーズIから実施されている科学ミッションを支援するための活動も月の高緯度地区や裏側へ範囲が広がる。これらの活動拡大による電力システムや熱制御システム等への負担増も考慮し、規模拡大や高効率化等が図られる。

フェーズIでは、月の科学探査/利用や有人拠点の構築に向けて多様な技術開発が行われる。地球-月間輸送技術（月への離着陸技術含む）の確立の後、月の科学探査ミッションを支援するローバー技術や観測技術が開発されるとともに、無人実験によりライフサイエンス実験や資源利用実験、サンプル回収等のための基礎的な技術が確認される。これらは、フェーズIIにおいて徐々に大規模化、長期化する実験/観測の基礎となる。実験/観測等のミッションに直接関係する技術の開発が行われる一方で、フェーズIIで構築される有人拠点システムを構成する様々なサブシステムに関する技術開発も行われる。また、システムインテグレーション技術や月面での建設技術、運用・管理のためのソフト技術等の開発も行われる。これらの技術は、各技術の性格や重要性、開発の優先度等を考慮すると、月面での実証実験が必要なもののほかに、地上試験で確立できるものやJEM等を利用した宇宙実験が必要なものに分けられる。各サブシステムの詳細な技術開発計画については、3節にて述べる。

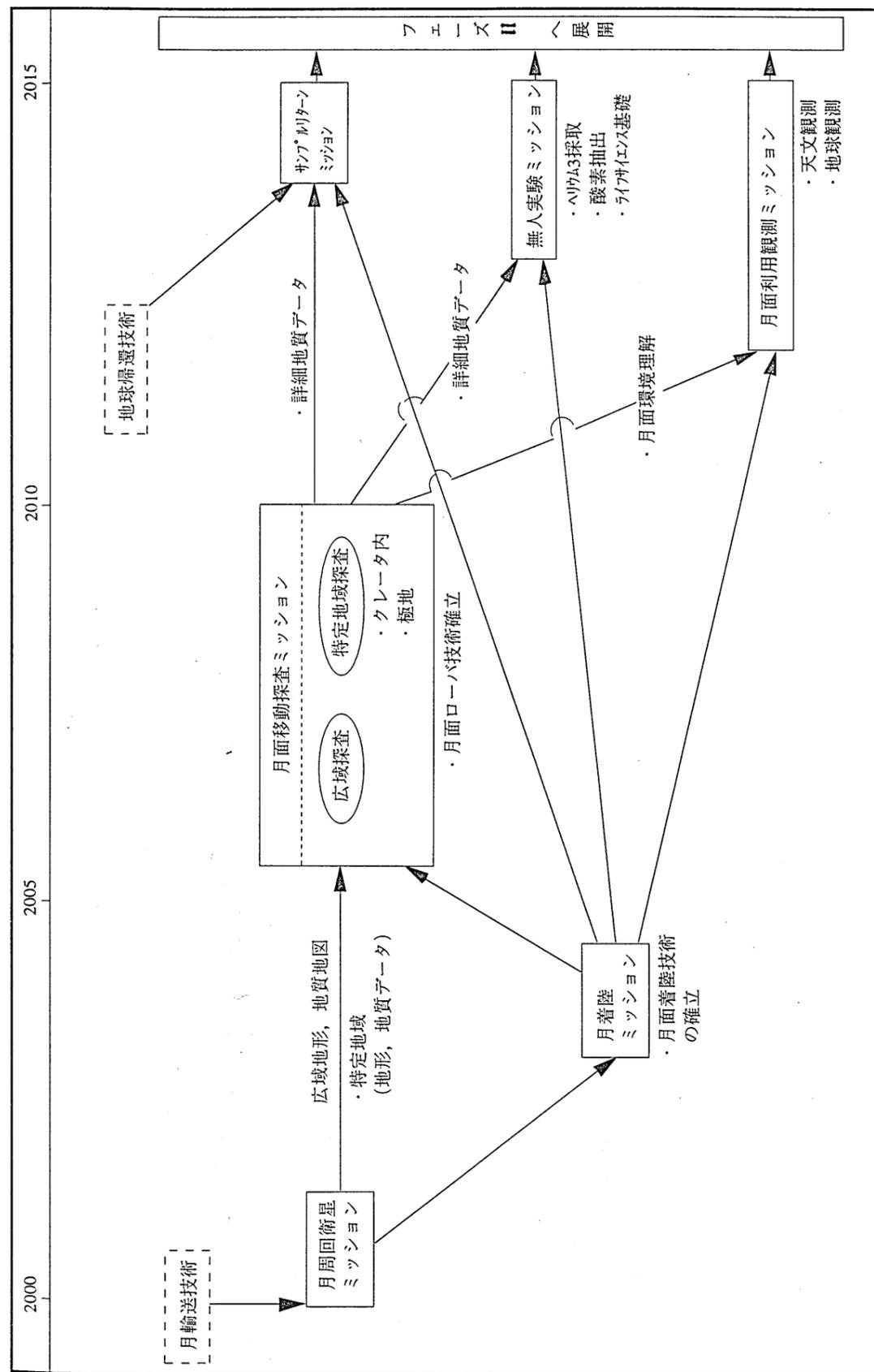


図 5.1.1 (1) 月面活動フェーズIのイメージ

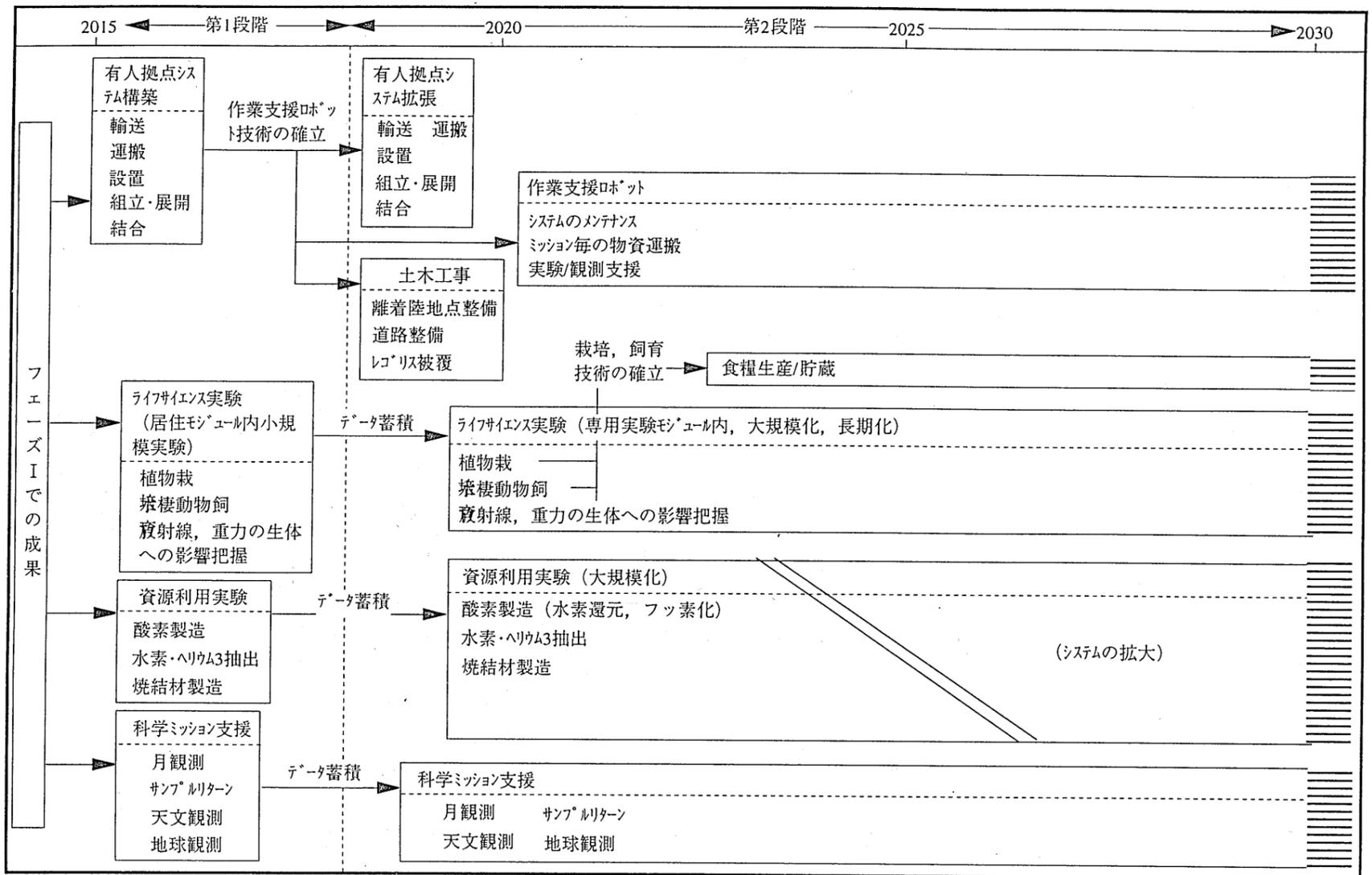
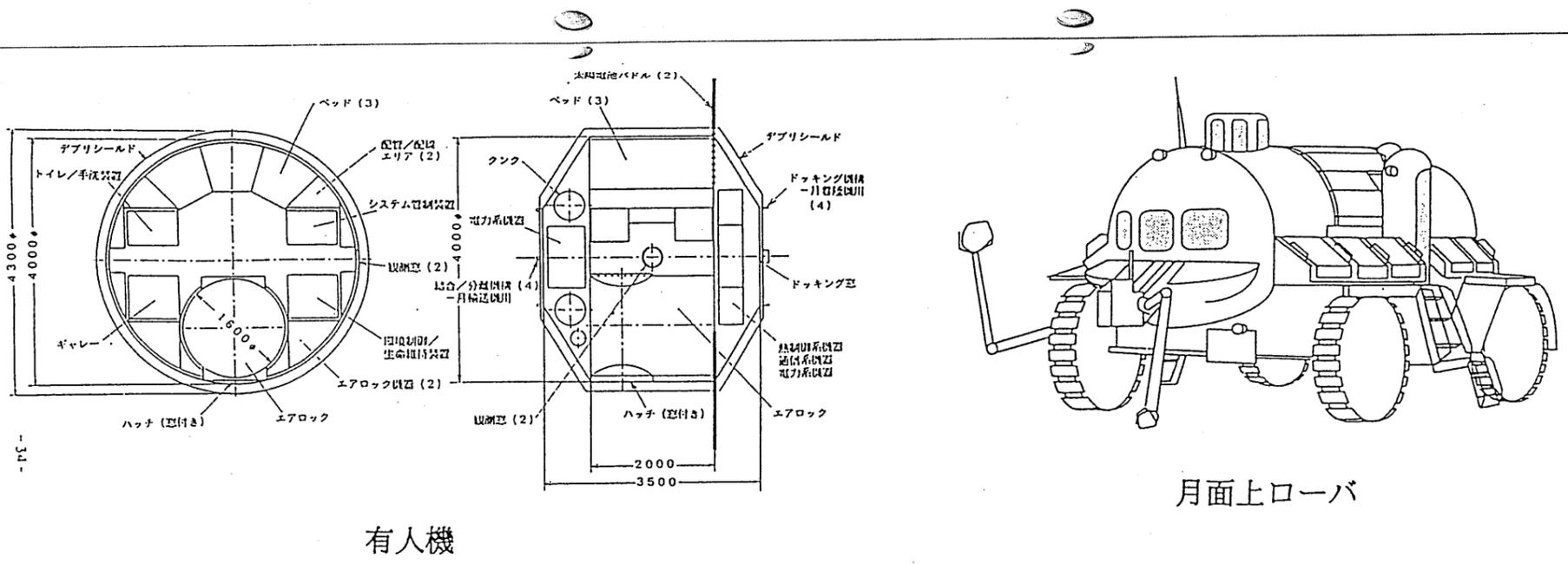


図 5.1.1 -(2) 月面活動フェーズIIのイメージ



有人機

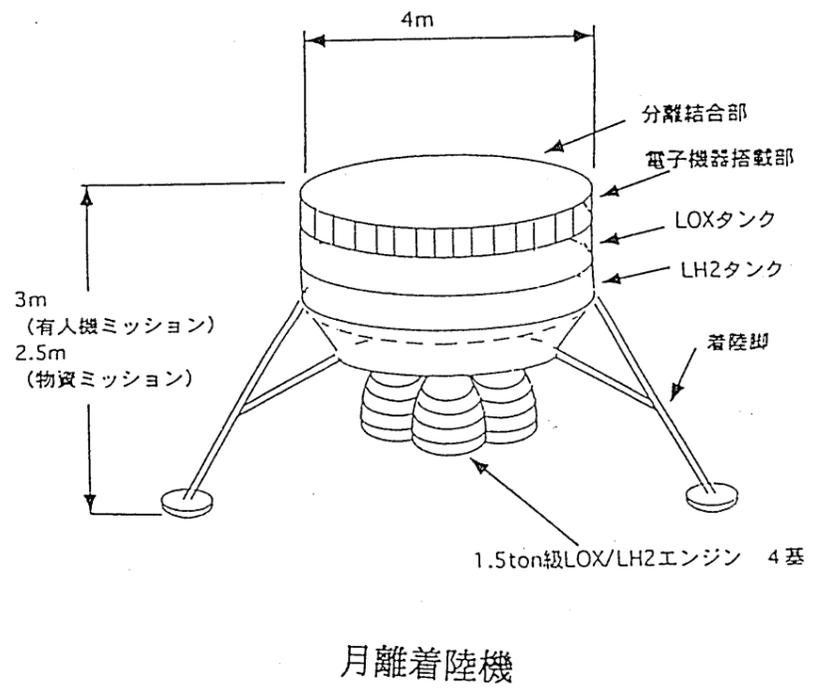
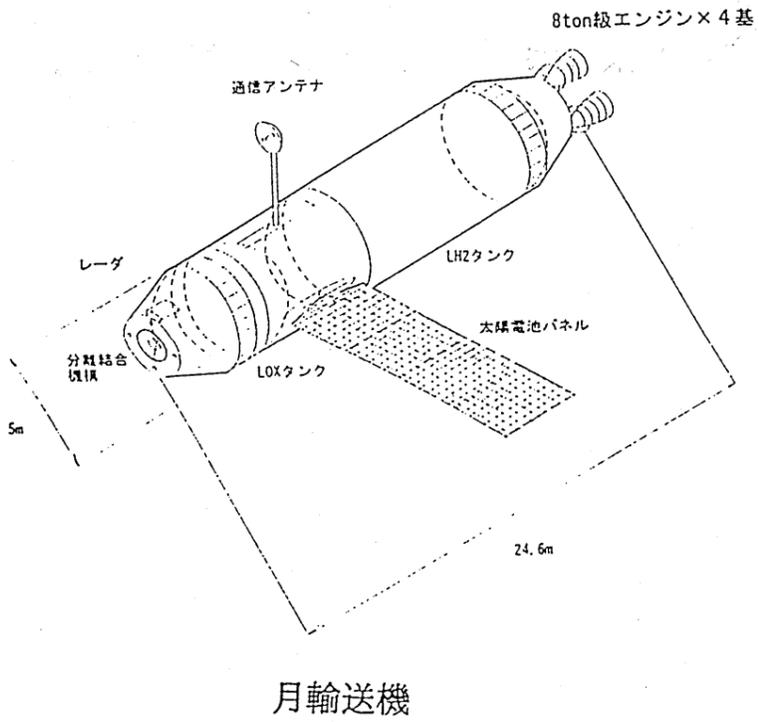
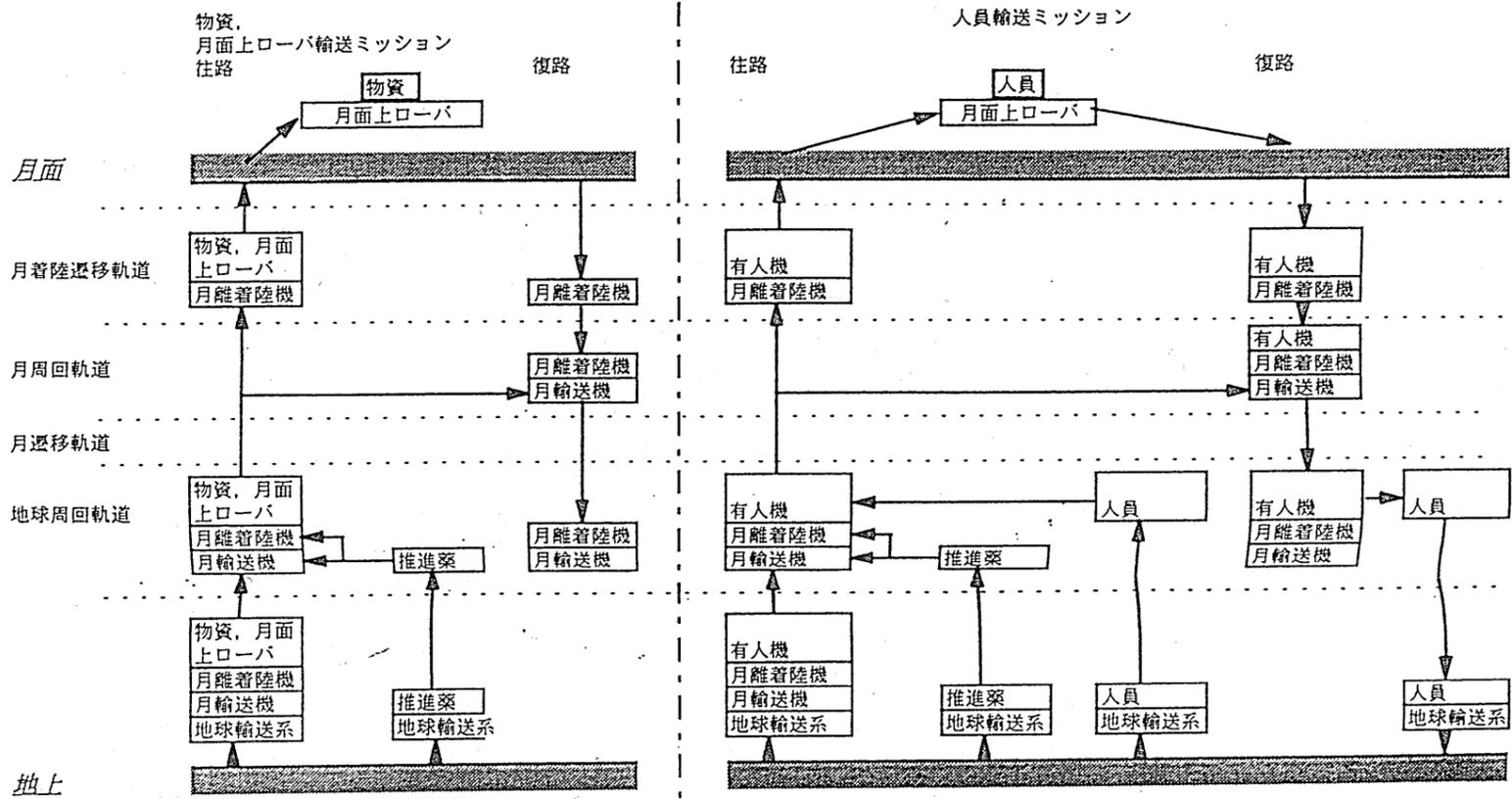


図 5.1.2 輸送システムの構成要素と輸送方式

## 2. 月面活動及び必要技術

### 2.1 無人月面活動（フェーズ I）

#### 2.1.1 フェーズ I (2000～2015 年)の月面活動

フェーズ I (2000～2015)においては、次の月面活動が実施される。

2000年初頭までに、H-IIロケットによる月輸送技術の確立が図られる。月の科学探査ミッションが先行し、月の起源と進化を理解する基礎データの収集が図られ、更に月からの科学としての天文観測のパイロットミッションが実施される。この間に地球帰還技術が確立され、フェーズ I の終わりにはより詳細な月地質データを得るため、サンプルリターンミッションが実施される。

- ・科学探査により月面の地形、地質データが得られるに従って、月の環境利用ミッションが始められる。まず天文観測のパイロットミッションが実施される。その後地球観測装置が設置され、グローバルな地球観測が始められる。これらのパイロットミッションにより、フェーズ II に実施される本格的な月面利用観測ミッションのための基礎データ収集が図られる。
- ・フェーズ II における有人活動に先行して、ライフサイエンスの基礎実験及び月面物資から、建築材料の製造酸素の抽出等が無人実験により実施され、データ収集が図られる。
- ・月の科学探査による理解が進むに従って、地球への資源供給を目的とした $^3\text{He}$ 等のパイロット実験が実施されるようになる。

上記の内容を実施するための代表的ミッションは、次のようなものが想定されている。

(フェーズ I の前期)

- ・月周回衛星ミッション
- ・月面着陸ミッション

(フェーズ I の中期)

- ・月面移動探査ミッション

(フェーズ I の後期)

- ・月面利用観測ミッション
- ・無人実験ミッション
- ・サンプルリターンミッション

### (1) 月周回衛星ミッション

フェーズ I において、まず最初に実施されるミッションは、月周回衛星からリモートセンシング手法による月表面のグローバルマッピングである。月周回衛星は、H-IIA ロケットで打ち上げられ、月周回軌道に投入された後、長期間リモートセンシングセンサを用いて月表面のデータを収集し、地球に伝送する。

- ・目的 : \*月の科学探査とし、月表面のグローバルマップを作成する。  
(重力、磁場、元素組成、地形等)  
\*以後に計画されている、月面活動の指標となるデータを得る。  
(元素組成、地形等)
- ・時期 : フェーズ I の初期
- ・期間 : 1 年程度 (1 ミッション)
- ・主構成 : 月周回衛星
- ・主要ミッション機器 : 月観測用リモートセンシングセンサ

### (2) 月面着陸ミッション

月周回衛星による月表面の観測結果に基づき、月面活動が実施される。月面着陸ミッションの初期においては、後続く本格的な月面活動のため、月面軟着陸技術の確立に多くの努力が払われることになる。ここでは、月面軟着陸技術の確立と局所的な初期の月表面の科学探査を月面着陸ミッションと呼ぶ。

- ・目的 : \*月面軟着陸技術の確立  
\*局所地点ではあるが、月面での直接的な科学探査による詳細データの収集 (月表面の元素組成、局所詳細地形、月内部構造解明データ収集)
- ・時期 : フェーズ I の前半
- ・期間 : 1 年
- ・主構成 : 月面着陸機
- ・主要ミッション機器 : 月面の観測機器 (地震計、熱流量計、相対 VLBI 用電波源)

### (3) 月面移動探査ミッション

月面着陸技術が確立されると、種々のミッション目的を持ったペイロードが月面に送り込まれるようになる。月面着陸機では“点”であった探査が、月面ローバによる探査により“面”に広がり、広い地域における詳細科学データが収集される。また、高地やクレーターの内部は、月の科学的データ、水の存在性、月面天文台等、重要な調査対象であり、ローバを用いた重要なミッションとなる。このため、ローバはミッション目的に合わせた

機能・性能が要求される。

- ・目的 : \*月の科学的探査
  - ①広域に渡り詳細データを収集
  - ②クレータ内部の詳細データを収集\*月利用のための調査
  - ①クレータ内の環境の調査  
(構造解明データ収集、天文望遠鏡設置場所の調査)
  - ②極地域のクレータ内部の水の存在調査
- ・時期 : フェーズ I の中間
- ・期間 : 1 年～2 年
- ・主構成 : 月輸送機  
月面着陸機  
月面ローバ
- ・主要ミッション機器 : 月面観測機器 (地形センサ、地震計、熱流量計、スペクトル分析計等)

### (4) サンプルリターンミッション

リモートセンシング及び月面活動における科学調査による、月に関する多くの理解、理論が確立される。これを裏付けるために、サンプルを地球に持ち帰り精密な調査が行われる。サンプルリターンミッションを実施するには、この時点までに地球帰還機の開発が完了していることが必要になる。さらに、最も有効なサンプルを選択し持ち帰ることが必要であるため、本ミッションに先だって、リモートセンシングとローバ探査により十分な調査が行われなければならない。

- ・目的 : \*月面から地球に帰還する技術の確立  
\*月面のサンプルを地球に持ち帰り詳細な分析を行いそれまでの調査から導かれた月に関する理解の裏付けを行う。
- ・時期 : フェーズ I の後半
- ・期間 : 月の昼 (15 日程度)
- ・主構成 : 月輸送機  
月面着陸機  
地球帰還機  
月面ローバ
- ・主要ミッション機器 : サンプル識別センサ  
サンプラー (ボーリングを含む)



## 2.1.2 フェーズ I (2000~2015 年、無人)の必要技術

フェーズ I における必要技術を各ミッションに従って検討する。

### (1) 各ミッションにおける技術開発分野

#### (a) 月周回衛星ミッション

- ・バス系 月周回衛星
- ・エネルギー系 月周回衛星用電源
- ・熱制御系 月周回衛星搭載機器に必要な温度環境制御
- ・通信系 月周回衛星と地球間の情報伝送
- ・観測系 リモートセンシング機器

#### (b) 月着陸ミッション

- ・バス系 月面着陸機
- ・エネルギー系 月面着陸機用電源
- ・熱制御系 月面着陸機搭載機器に必要な温度環境制御
- ・通信系 月面着陸機と地球間の情報伝送
- ・観測系 月面科学観測機器
- ・サポート系 観測機器の設置、サンプル採取

#### (c) 月面移動探査ミッション

- ・バス系 月面ローバ
- ・エネルギー系 月面ローバ用電源
- ・熱制御系 月面ローバ及び搭載機器に必要な温度環境制御
- ・通信系 月面ローバと地球間の情報伝送
- ・観測系 月面科学観測機器
- ・サポート系 サンプリング、観測機器の設置装置

#### (d) サンプルリターンミッション

- ・バス系 地球帰還機  
サンプリング月面ローバ
- ・エネルギー系 地球帰還機用電源  
月面ローバ用電源
- ・熱制御系 地球帰還機搭載機器に必要な温度環境制御  
月面ローバ及び搭載機器に必要な温度環境制御
- ・通信系 地球帰還機と地球間の情報伝送  
月面ローバと地球間の情報伝送

- ・観測系 サンプル観測機器
- ・サポート系 サンプラー、サンプル輸送装置

#### (e) 月面利用観測ミッション

- ・バス系 ランダー又は月面ローバ
- ・エネルギー系 バス用電源  
観測機器用電源
- ・熱制御系 バス系及び搭載機器に必要な温度環境制御  
観測機器に必要な温度環境制御
- ・通信系 バス系と地球間の情報伝送  
観測機器と地球間の情報伝送
- ・観測系 天文観測機器  
地球観測機器
- ・サポート系 観測機器の設置装置

#### (f) 無人実験ミッション

- ・バス系 月ロボット
- ・エネルギー系 月ロボット用電源  
無人実験装置用電源
- ・熱制御系 月ロボット及び搭載実験装置に必要な温度環境制御
- ・通信系 月ロボットと地球間の情報伝送
- ・観測系 実験装置
- ・サポート系 実験装置への資料採取、投入装置

### (2) 各ミッションにおける開発分析

表 5.2.1 に各ミッションにおける必要技術の分析結果を示す。

また表 5.2.2 に、各ミッションにおける主要な開発技術内容をまとめる。

表 5.2.1

## 月無人ミッションとインフラ技術

ミッション	取得データ、技術	月インフラ技術への反映
ペネトレータ	環境制御技術 月内部構造データ	月着陸機
ローバ	月面移動技術 遠隔操作技術 移動体熱制御技術 地形、地質、環境データ	月面車 月面作業ロボット 資源調査、利用
天文台	無人設置技術 遠隔操作技術 夜間電力供給技術	月面構造物 夜間大電力供給システム (本格的月天文台)
親子式ローバ	クレータ等の登坂技術 遠隔操作技術 試料採取、保管貯蔵技術	ローバとほぼ同じ
小惑星、宇宙環境 監視装置	天文台とほぼ同じ	天文台とほぼ同じ (スペースガードシステム、 宇宙天気予報システム)
サンプルリターン	試料採取、保管技術 地球帰還、再突入、回収技術	月輸送システム 月面作業ロボット 資源調査、利用

表 5.2.2 各ミッションにおける主要開発技術

代表的ミッション	主要開発技術	内容
月周回衛星ミッション	月軌道投入技術	・月周回衛星を実現させる誘導、制御技術
	月面リモセン技術	・高解像度カメラ ・マルチスペクトル分析装置
	データ処理解析技術	・地球上における大量のデータを解析処理するコンピュータシステム
月着陸ミッション	月軟着陸技術	・月面着陸装置 ・着陸誘導装置(月面センサを含む)
	月面観測センサ	・月面着陸機に搭載する月面観測装置(簡易移動センサを含む)
	熱制御技術	・月の昼夜の温度環境に耐えるための熱制御技術
月面移動探査ミッション	月面移動機構	・広域移動機構 ・局所ラフ地形走破機構(クレーター内部等)
	テレオペレーション技術	・通信ディレイのある遠隔操縦技術
	月面航法誘導技術	・ローバ位置評定 ・障害物回避(自律)
	月面観測センサ技術	・月面地形センサ、月面地質センサ、小型地震計、小型熱流量計
	熱制御技術	・月の昼夜の温度環境に耐えるための熱制御技術
	電力制御技術	・太陽電池による制限された電力の効率的な使用
	通信技術	・月面観測データの地球への送信 ・ローバコントロール用コミュニケーション通信(データ圧縮技術等を含む)
サンプルリターン ミッション	地球帰還技術	・地球帰還機 ・地球帰還、航法誘導装置
	サンプル収集技術	・サンプル識別センサ ・サンプル収集機構
月面利用観測ミッション	小型軽量望遠鏡技術	・月環境適合、小型軽量、光、赤外線望遠鏡
	電力供給技術	・クレーター内部設置の装置への電力供給システム
	熱制御技術	・クレーター内部の低環境に対する熱制御
	小型・軽量地球観測技術	・月環境適合、小型、軽量地球観測装置
無人実験ミッション	O <sub>2</sub> 製造実験技術	・月物質より、O <sub>2</sub> 製造実験を行う装置
	ライフサイエンス実験技術	・月環境適合ライフサイエンスの基礎実験装置
	<sup>3</sup> He採取実験技術	・月物質より <sup>3</sup> Heを採取する装置

## 2.2 有人月面活動（フェーズ-II）

フェーズIIは2015年から2030年であるが、第1段階と第2段階に分けられる。第1段階と第2段階の分岐点については、第1段階のシステム運用期間を約3年と想定した。すなわち、第1段階は2015年～2017年、第2段階は2018年～2030年とする。

### 2.2.1 第1段階（2015～2017年）

#### 2.2.1.1 有人月面拠点システムイメージ

##### (1)機能要求

第1段階における有人拠点システムは、以下のような機能を持つものとする。

- クルー人数は3人とする。
- 滞在期間は昼間の10日間のみとする。
- 使用年数は3年程度で、年間滞在回数は2回とする。従って、有人ミッションは合計6回となる。
- 地球からの遠隔操作によって主要機能を立ち上げることができ、モニタリングも可能とする。
- クルーによるシステムの立ち上げは1日で可能であるとする。
- 極力自動化を図る。
- 日陰中（無人）は必要最低限のハウスキーピング機能のみ作動させる。
- 水、酸素、食糧はすべて使い捨てとする。有人ミッションにおける廃棄物は貯蔵しておき、貯蔵用タンクを数回おきに持ち帰ることとする。
- 1回当たりの貨物輸送能力は最大8.5トン。月着陸機は、物資の簡易なハンドリング（荷降ろし／積み）性と再利用を考慮した構造とする。
- 最大電力量は20kWで、太陽電池パネル、燃料電池、及びバッテリーを利用する。
- イルメナイトからの酸素製造実験、及びレゴリスのフッ素化方法による酸素製造実験を行う。
- レゴリスから水素、及びHe-3の抽出実験を行う。
- 植物栽培、水棲動物飼育等のライフサイエンス実験を行う。
- 科学ミッション（天文台、宇宙モニタリング等）の支援を行う。
- 各システムの軽量化のため、可能なものについてはインフレーター構造等を考慮する。
- 初期の無人ミッションで輸送された物資がその後の有人ミッションでハンドリングされるまでの期間に温度変化等によって劣化しないようにするため、断熱機能を持たせる。
- 拡張性を考慮した設計とする。

##### (2)システムの構成

本段階におけるシステムは以下のような構成とする。

- 居住系：居住モジュール（環境制御機器、エアロック、スペーススーツ、マンシステム、屋内実験用ラック）

- 電力系：太陽電池パネル、電力モジュール（燃料電池、二次電池、電力分配器）燃料電池タンク
- 熱制御系：ラジエータ、ヒートパイプ、水ループ、2相ループ、ヒータ、多層断熱材（MLI等）
- 通信管制系：管制モニタ系、TT&C系、高速データ伝送系、月面通信系、ビーコン系
- 実験／観測系：実験装置（水／酸素製造実験プラント、水素／ヘリウム3抽出実験プラント）、観測装置、月震計、熱流量計、月サンプル回収／保管
- 運用系：断熱コンテナ、作業支援ロボット、補給品（水、酸素／窒素、食糧）、廃棄物貯蔵設備、工具
- 輸送系：月輸送機、月離着陸機、有人機、月面ローバー

##### (3)システムの重量・電力配分

第1段階における有人拠点システムの凡その重量及び電力配分は、下表の通りとする。

表5.2.3 有人拠点システム（第1段階）の重量配分、電力配分

項目	重量（トン）	電力（kW）
居住系	8.5	3.0
電力系	9.0	4.5
熱制御系	1.5	4.0
通信管制系	1.0	3.5
実験／観測系	7.5	4.0
運用系	6.5	1.0
合計	34.0	20.0

##### (4)システムの運用計画

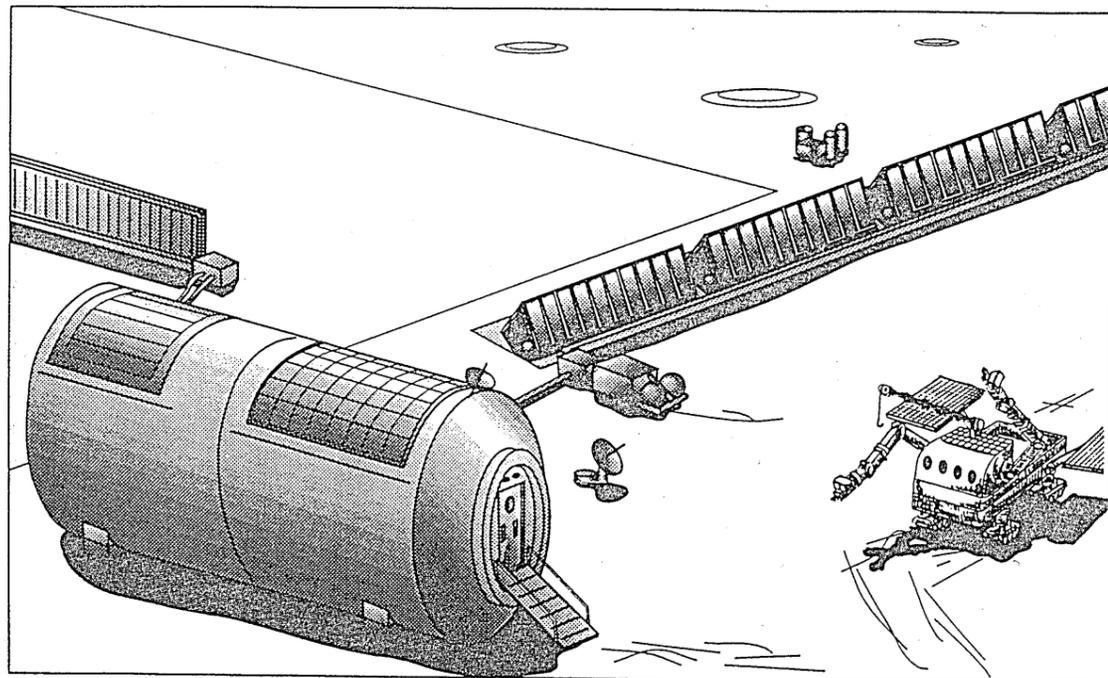
基本的な考え方としては、先ず4回の無人輸送によってシステム立ち上げのために必要な物資を輸送し、その後、6回の有人ミッションが実施されるものとする。無人ミッション（物資輸送）の1回当たりの最大輸送能力は8.5トン、有人ミッションの1回当たりの最大輸送能力は6トンと想定する。

4回の無人輸送ミッションでは、居住モジュール、太陽電池パネル、電力モジュール、燃料電池タンク、作業支援ロボット（クレーン、運搬、有人月面車、無人月面車）、通信管制系サブシステム、熱制御系サブシステム、観測装置、月サンプル回収装置、酸素製造実験プラント、水素／ヘリウム3抽出実験プラント、焼結ブロック体製造実験プラント等が輸送される。また、6回の有人ミッションでは、有人機によってクルー、補給品、交換部品等が輸送される。有人ミッションにおける主な活動は、システムの組立・整備・点検作業、ライフサイエンス実験、資源利用パイロット実験、サンプル回収、観測、科学ミッション支援等である。

(5) 有人拠点の構築手順

有人拠点システムの構築作業は、4回の無人ミッションと1回の有人ミッションにて行われるものとする。

無人ミッション1～4では、居住モジュール、電力系サブシステム（太陽電池パネル、電力モジュール、燃料電池タンク）、通信管制系サブシステム、熱制御系サブシステム、観測装置、月サンプル回収装置、水/酸素製造実験プラント、水素/ヘリウム3抽出実験プラント、焼結ブロック体製造実験プラント等が輸送され、有人ミッション1にて、これらを運搬・設置・組立・展開・稼働する。作業支援ロボット（クレーン作業用、運搬作業支援用、無人月面車、有人月面車）も無人ミッションにて輸送されており、各種作業を支援する。図5.2.1は、システム構築手順を表したものである。



有人月面拠点システムイメージ

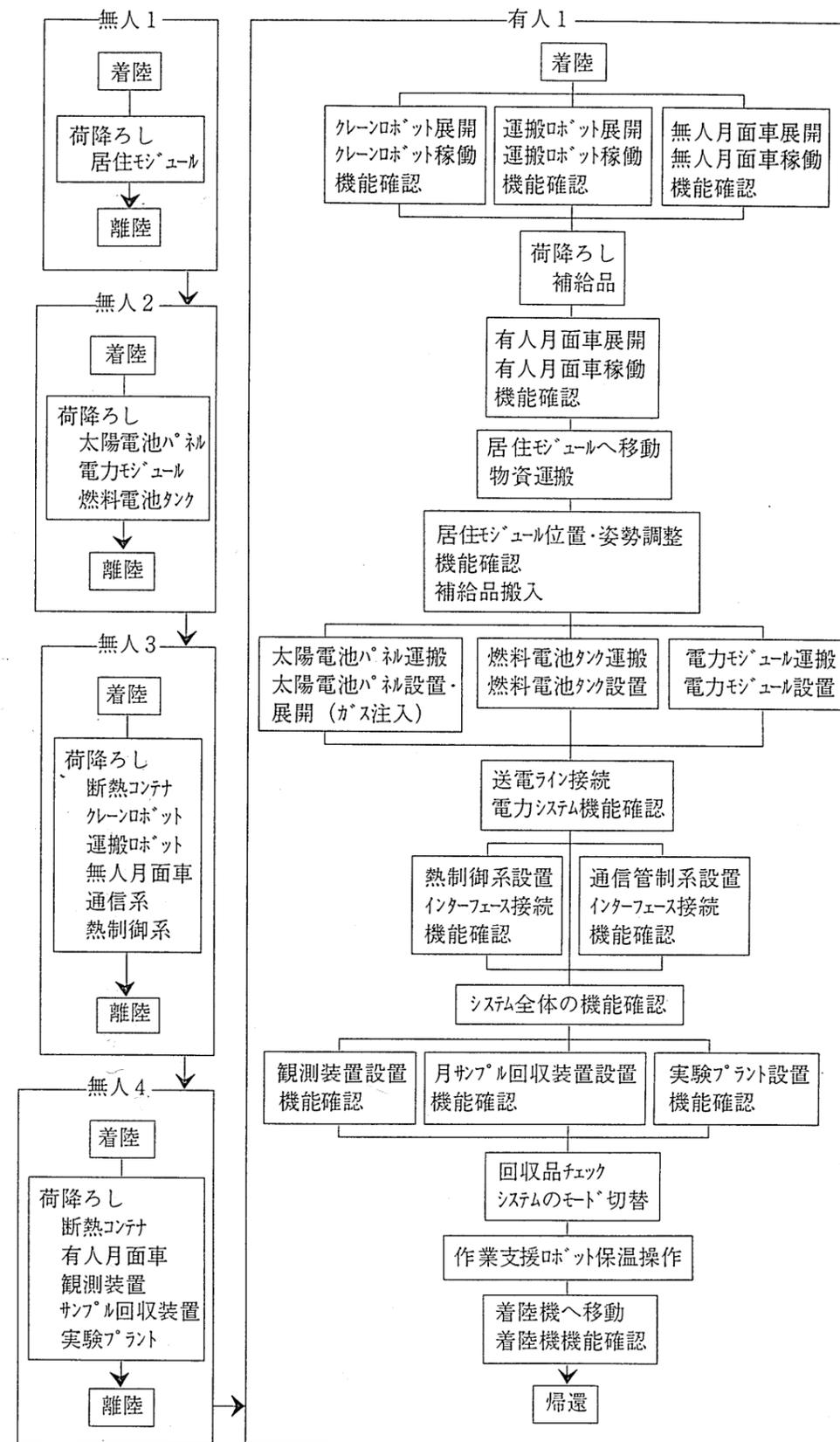


図 5.2.1

有人拠点システム構築作業フロー

## 2.2.1.2 要素技術

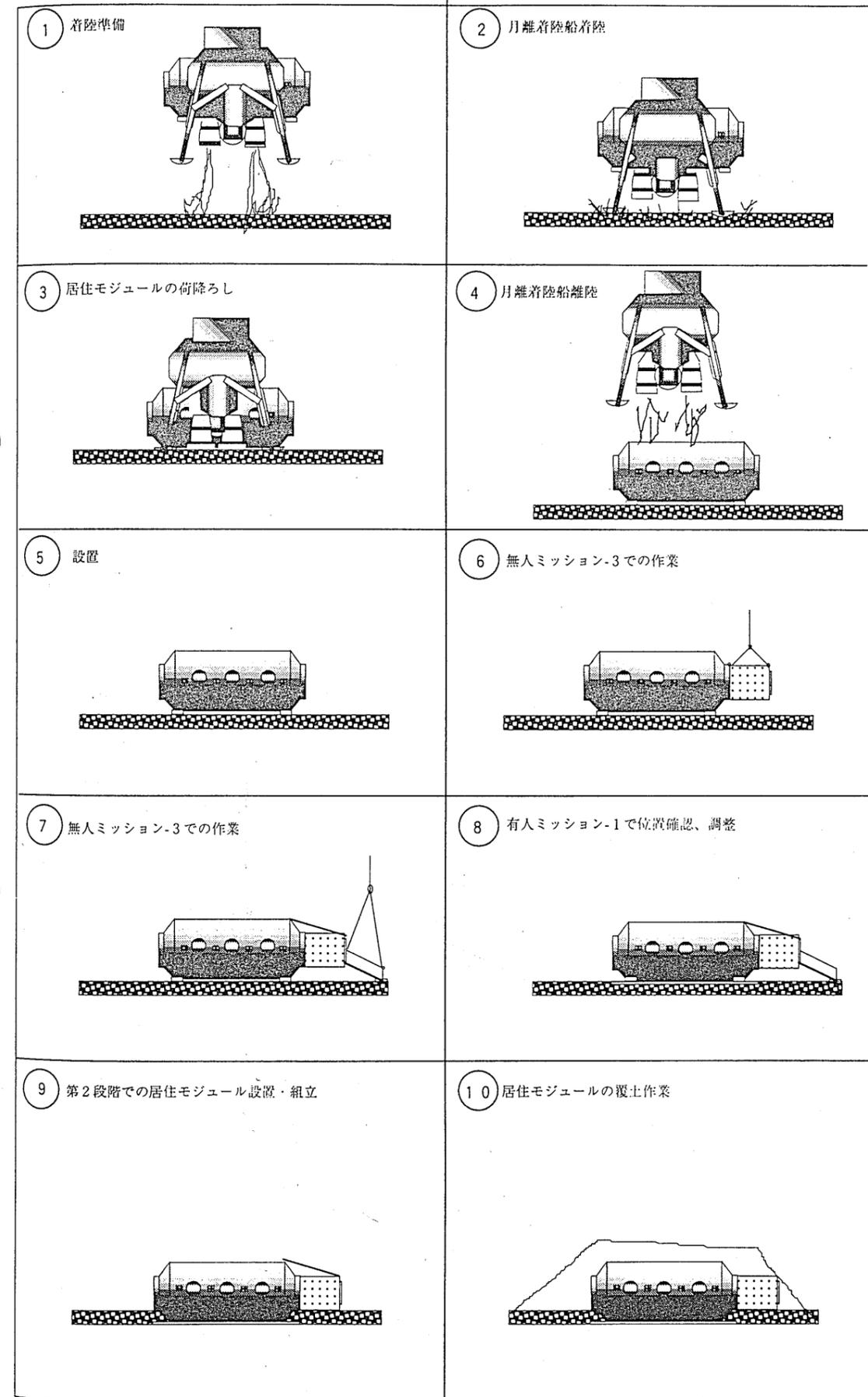
### 2.2.1.2.1 有人サポートシステム

月面拠点には居住モジュールとモジュール内を地球上と同じ与圧環境に保つ環境制御装置、クルーの生活を維持するためのマンシステム、有人月面活動を支援するエアロック、スペーススーツ等の有人サポートシステム及びこれらを支える電力系、熱制御系、通信管制系を保有する。

居住モジュールの構造は、主構造と内部構造及びエアロック等の副構造で構成され、急激な温度変化、宇宙放射線の照射、隕石等の月面環境から生活環境を守るために高い安全性が要求される。主構造は、1気圧に耐える構造・強度上有効な形状である円筒型の耐圧構造とする。居住モジュールは通常時3人、非常時6人が滞在可能なサイズとし、設置にあたっては月面の地形、着陸場からの距離等を考慮する必要がある。月面での居住モジュールの設置フローを図5.2.3に示す。

環境制御系は、居住モジュール内（図5.2.4）の圧力保持、温湿度制御を行うとともに炭酸ガス、有害ガス、微生物／微粒子を除去するものであり、供給する酸素、水は使い捨て方式がとられる。また、食料についても地上からの供給に依存し、クルーの生活で排出される廃棄物は月面外へ持ち出すが、一部は研究用として地上へ持ち帰る。

モジュール内での防火／消火については、構造材、断熱材、防音材、内装材、電線等に不燃材を使用することが不可欠であり、さらに火災検知器及び消火装置を設置する。エアロックシステムは、月面での有人活動のためにEMU（宇宙服）を装着して与圧部の退入室を行うもので、クルーロックは2人が宇宙服の脱着及び退入室作業を行える十分なスペースを確保するとともに加圧減圧、環境制御、O<sub>2</sub>マスク、冷却水供給、飲料水供給、環境モニタリング等の機能を支援装置ロックに設置する。月面活動後、クルーの与圧部退入室時に汚染された宇宙服を洗浄し、与圧部の汚染を防止する機能を設ける。EMUは、服内部の加圧保持による身体活動性の低下防止をはかるとともに生命維持のためのO<sub>2</sub>供給、CO<sub>2</sub>除去及び活動、代謝に対する温湿度制御機能を保有する。以上の有人サポートシステムの構成を図5.2.5に示す。



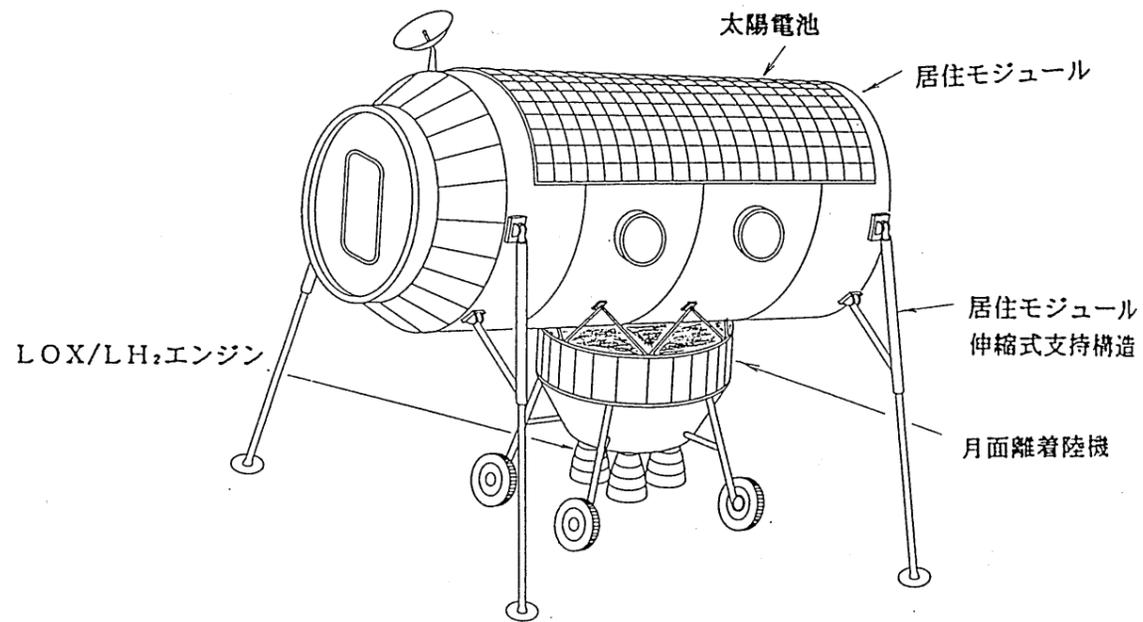


図 5.2.4 月面離着陸機 居住モジュール輸送形態

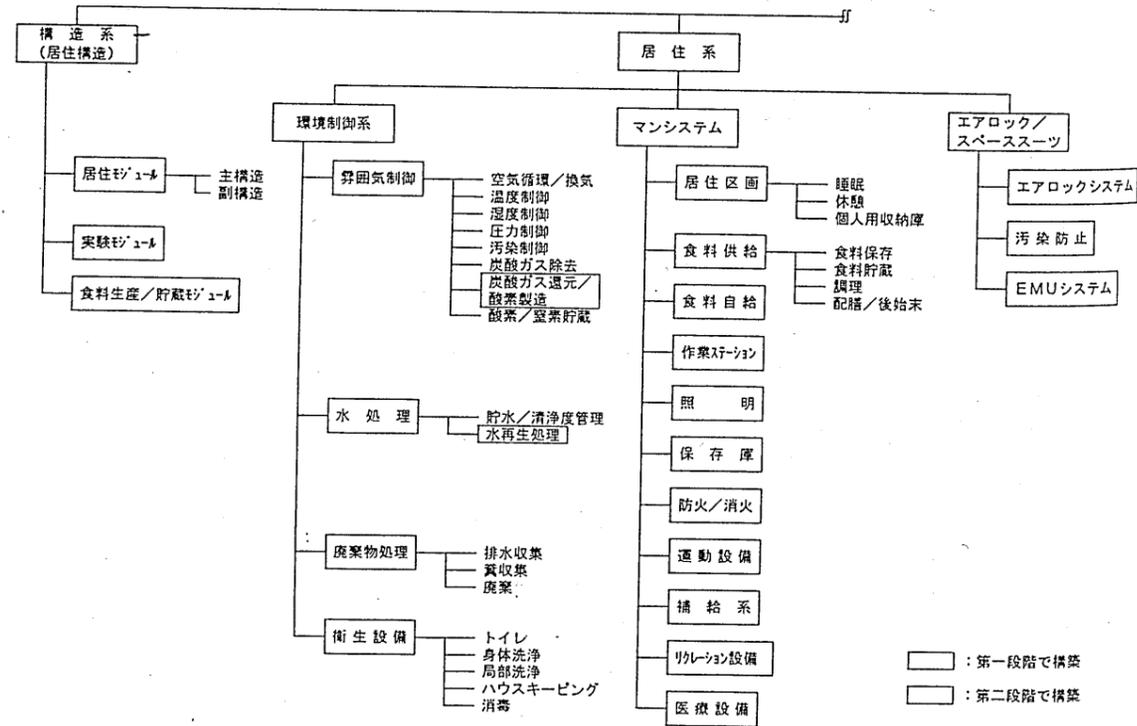


図 5.2.5 有人サポートシステム構成

### 2.2.1.2.2 エネルギー供給システム

#### (1) エネルギー供給システム概要

##### (a) 供給条件

要求される供給電力は、以下の通りとする。

	第一段階	第二段階
昼間 (ミッション運用モード)	20.0KW	20.0KW
昼間 (システム保存モード)	10.0KW	注 1.
夜間 (システム保存モード)	4.0KW	注 1.
夜間 (ミッション運用モード)		20.0KW
非常用 (2次電池, 2日間)	5.9KW	5.9KW

注 1. 第二段階では、連続して滞在するためシステム保存モードはないものと考えている。

##### (b) 運用プロファイル

エネルギー供給システムは電力モジュールとしてまとめ、無人 2 回目の輸送にて月面に降ろされる。月面到達後は、極力自立起動が可能となるよう考慮するが太陽電池パネルについては一部人間またはロボットの支援を受けるものとする。

##### (c) システム系統図

電力供給は昼間は太陽電池により、夜間は再生型燃料電池により行う。再生燃料電池用の G02, GH2 は昼間に太陽電池により得られる電力によって水を電気分解し貯蔵しておくものとする。ただし電解したガスは容積を小さくするため冷凍機により液化する。第一段階のシステム系統図を図 5.2.6 に、また電力制御系統図を図 5.2.7 に示す。

#### (2) 太陽電池による発電

太陽電池としては、出力劣化が少なく変換効率が比較的高かつ軽量でもあるシリコン太陽電池を用いる。

##### (a) 居住モジュール外部取付太陽電池

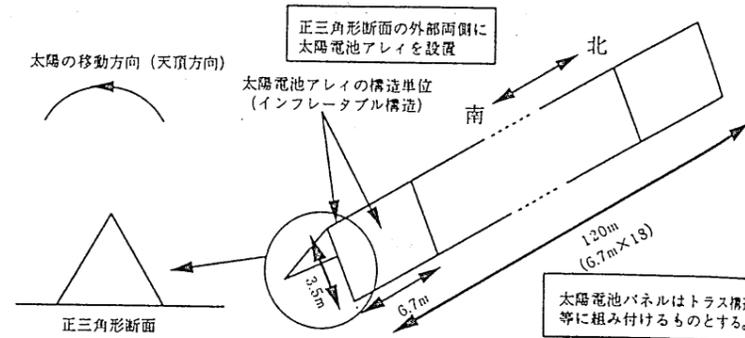
有人モジュールが月面に到達してから 2 日間程度は電力モジュールからのフル給電は期待できない。そのため居住モジュールの外部に居住モジュールで最低限必要な電力用太陽電池パネルを取り付ける。

(b) 太陽電池パネル面積, 電力, 重量

第一段階	
面積[m <sup>2</sup> ]	880
電力[KW]	40.6
重量[Kg]	3600

(c) 太陽電池パネルの配置

安定した電力を得るため正三角形断面のパネルを南北方向に上図のように展開する。第一段階では約 120m の長さとなる。



(3) 2次電池による発電

5.9KW, 2日間の能力をもつ非常用2次電池として、軽量および長寿命の点で優れているNiH<sub>2</sub>バッテリーを採用した。この2次電池の重さは約6000Kgであり、約8.5トンのなかに収めようとしている電力モジュールのなかに入りきらないため輸送は電力モジュールと別に考える必要がある。このように重い2次電池の代替案として燃料電池の冗長化等今後の検討課題と考える。

(4) 燃料電池による発電

(a) 機器の主要諸元

燃料電池	: 発生電力 20KW, 重量 390Kg
電解槽	: 電解能力 1Kg/h, 消費電力 60~90KW, 重量 650Kg
酸素液化装置	: 冷却能力 1.5W, 消費電力 200W, 重量 200Kg
水素液化装置	: 冷却能力 3.5W, 消費電力 900W, 重量 200Kg
液体酸素タンク	: 容量 2500 l, 貯蔵量 2800Kg
液体水素タンク	: 容量 5000 l, 貯蔵量 350Kg

(5) 総重量

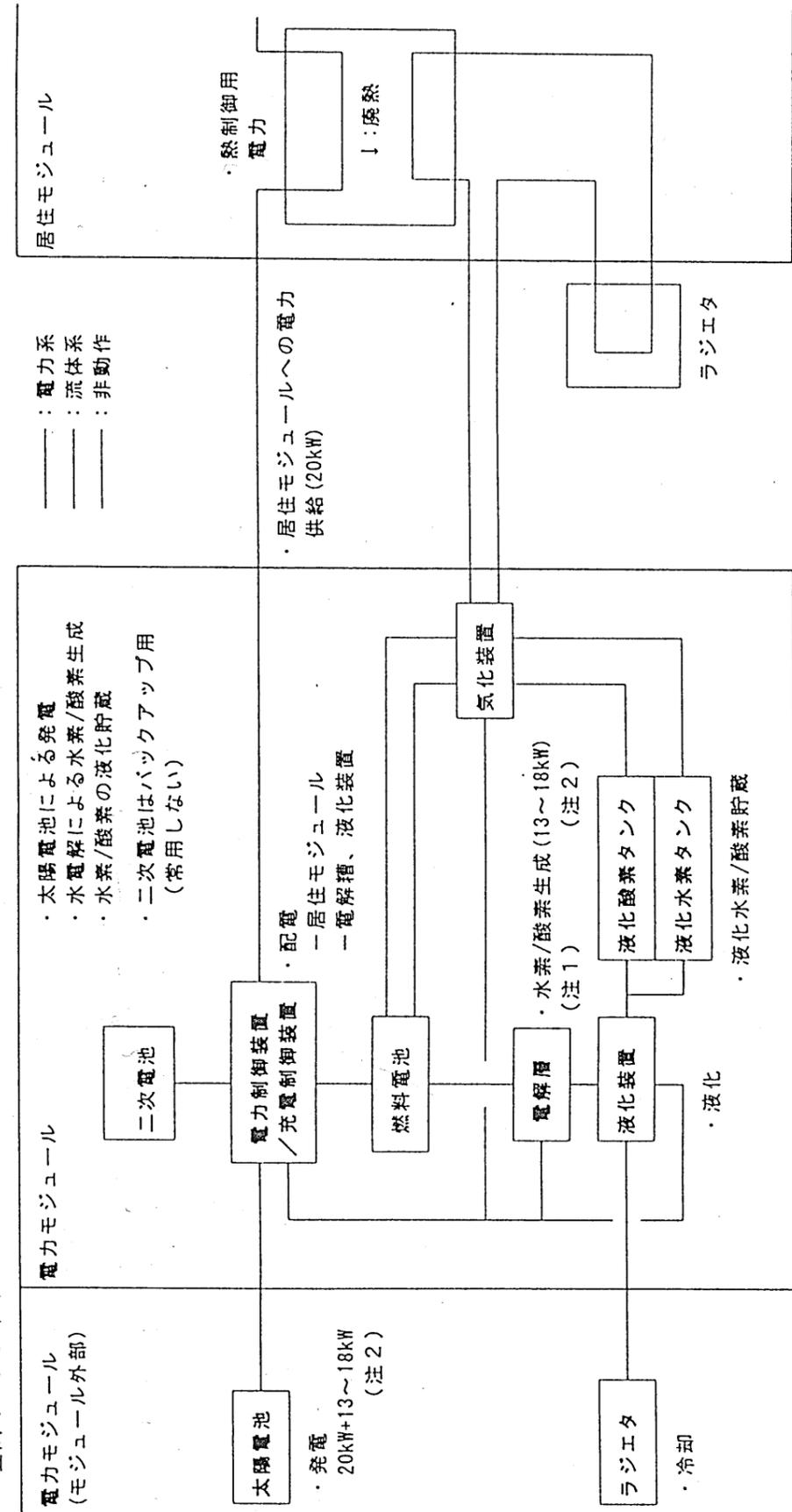
エネルギー供給システムの輸送総重量は以下の通りである。

太陽電池パネル	3600Kg
2次電池	6000Kg
電力制御機	200Kg
燃料電池	3000Kg
ラジエータ (熱制御系)	200Kg
モジュール	1500Kg

計 (2次電池を除く) 8500Kg

第一段階で輸送する量は、上記のように2次電池とその他のものに分けるものとする。

屋間のコンプレキシレーション



注1: 電解による廃熱除去 (9~12kW)が必要  
注2: 水の電気分解と液化用電力

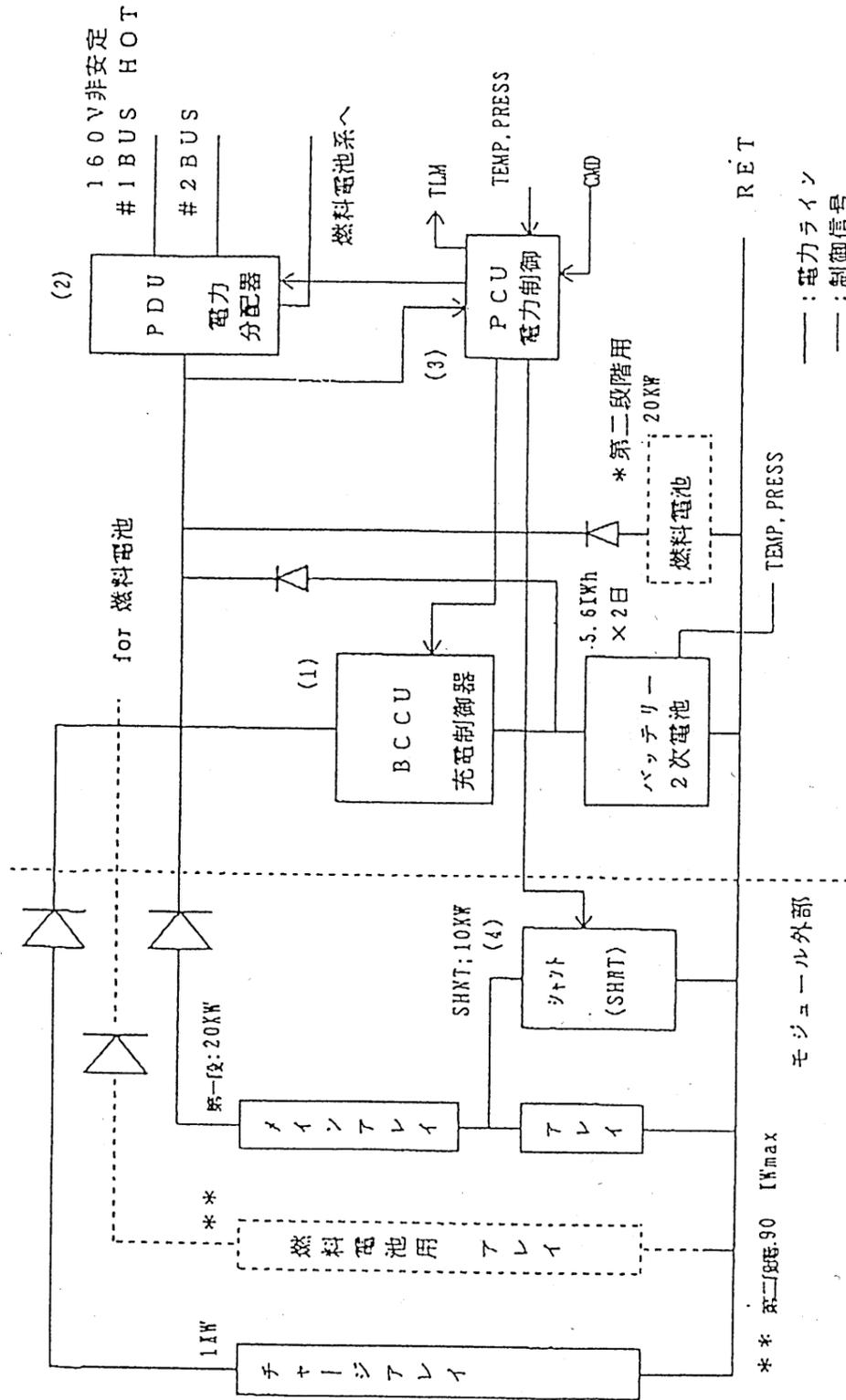


図 5.2.7 電力制御系統図

### 2.2.1.2.3 熱制御システム

月面では昼と夜は約2週間毎に繰り返す、月面温度は120~374Kという広い範囲で変動し、熱的に非常に厳しい環境条件下にある。熱制御系には、昼夜を問わずすべての運用モードにおいて、機器や環境を定められた温度範囲内に保つことが要求される。熱制御の観点から、運用モードは次の5つになる。

- |                |                       |
|----------------|-----------------------|
| (1) 通常運用モード    | : 昼間10日間、排熱量; 21.4kW  |
| (2) 緊急運用モードI   | : 昼間最大5日間、排熱量; 17.4kW |
| (3) " II       | : 夜間最大2日間、排熱量; 15.2kW |
| (4) システム保存モードI | : 昼間14日間、排熱量; 6.6kW   |
| (5) " II       | : 夜間14日間、排熱量; 1.7kW   |

これらのモードにおいては、機器は動作許容温度範囲内に保たれる。また、室内温度は20℃前後に維持する。(2)、(3)では実験系は作動させないので、これによる発熱はなくなる。(4)、(5)においては、テレメータ・データの取得及び送信に限定し、他の機器は非動作温度範囲内に保てればよいと考える。(4)では(5)で使う電力の充電を行う。

熱制御システムの構成を図1に示す。また、居住モジュールの熱制御系設計の基本的な考え方を表1に示す。与圧モジュール内の気温、機器の熱制御は流体ループを用いる能動制御で、内部で発生した熱は、ECLSS-HX、CP(ゴールドプレート)から水ループ、冷媒2相ループを経てラジエータから宇宙空間に放射される。与圧室外に設置される機器は、できるだけまとめてラジエータの近くに収納し、全体をMLIで覆い、太陽や月面からの熱入力を遮断する。機器からの発熱は高熱伝導率の取付板、ヒートパイプによりラジエータへ輸送される。ラジエータの配置については次を前提としている。即ち、

- (1) 居住モジュールは月面地球側東辺赤道付近に配置されている。
- (2) ラジエータは月の地表面に垂直で、かつ黄道面に並行に配置する。
- (3) 居住モジュールに装着したラジエータは開閉式とし、ミッション運用時は開、それ以外の時は閉とすることにより大幅な排熱量の変化に対応する。
- (4) 月面上に配置されるラジエータは、月面からの熱放射を避けるために月面上に熱シールドを設ける。
- (5) 月面上に配置されたラジエータは夜間の凍結防止等を考慮して、ミッション終了時には多層断熱材により断熱する。

月面有人拠点は、5回にわたる無人及び有人の月面着陸によって運用フェーズに入る計画となっている。居住モジュールは、第1回目の無人輸送により月面に着陸する。熱制御系の主要部分は、このモジュールに含まれている。着陸後、HKデータのテレメータ送信、地上からのコマンドの受信、機器の破損を防ぐための熱制御は最低限要求される。電力モジュールは、後から第2回目の輸送で届けられることになっているが、それまで生き延びるために必要なエネルギー源は、居住モジュールが持って行かなければならない。この間に必要な電力は、通信系0.5kW、熱制御系は夜間のモードにおいて1kWが必要である。よって、夜間の必要電力は1.5kW、昼間は通信系0.5kWと充電電力1.5kWの2kWが必要である。したがって、2kWを供給できる太陽電池パネルと発生電力1.5kWの再生型燃料電池とは、居住モジュールに搭載していくことが必要になる。第1回目のシステム保存モード(4)、(5)に準じた熱制御を行う。

無人ミッション2、3、4で月面に輸送される機器も、有人ミッション1までは、月面上に放置されるので、それぞれ通信系、電力系、熱制御系が必要になる。熱制御のため、機器は断熱コンテナに収納するか多層断熱材で覆い、断熱する。ヒータ及び上方に開閉型の放熱面を設け、機器を非動作温度範囲内に保つ。

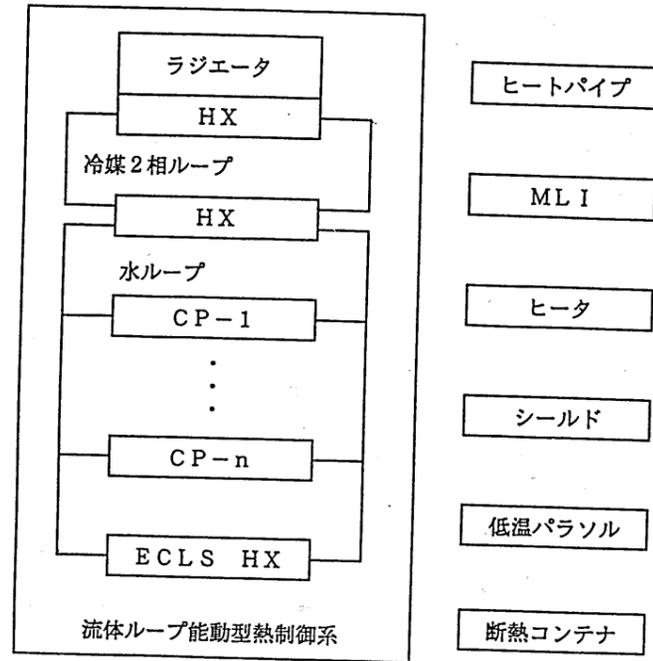
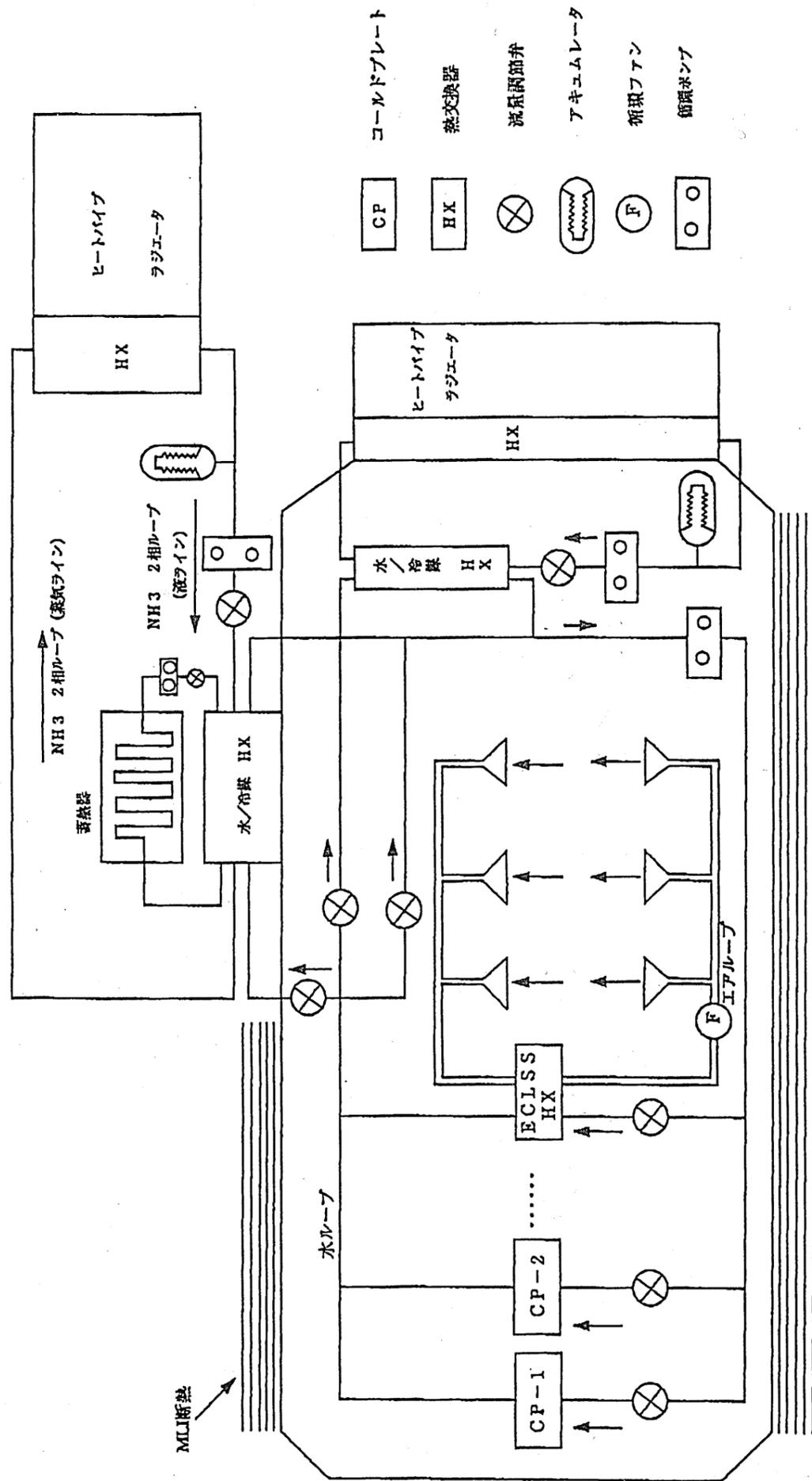


図1 熱制御システム構成要素

表1 居住モジュールの熱制御系システム

熱制御系	基本構成		排熱量(kW)	設計温度(C)	検討結果
単相流体ループ熱制御系	制御部	制御エレクトロニクス, 制御ソフトウェア	1. 通常運用モード 21.4	1. 室内環境 18.3~26.7 露点温度 4.0~15.6	<ul style="list-style-type: none"> <li>・単相ループは要求温度に応じ低温ループと中温ループから構成する。</li> <li>・運用モードによって排熱要求が大幅に変化する為、左記の1, 2, 3の運用モードと4, 5の運用モードでヒータを切り換える。</li> <li>運用モード1, 2, 3 面積 80m<sup>2</sup></li> <li>運用モード4, 5 面積 7m<sup>2</sup></li> <li>・飲料水を蓄熱材として用い、居住モジュールの温度変動を最少にする。</li> </ul>
	吸熱部	ユーティリティ, 熱交換器			
	熱輸送部	ポンプ, バルブ, 配管	3. 緊急運用モードII 15.2	2. 搭載機器 低温系 6~15 中温系 20~40	
	蓄熱部	蓄熱器	4. システム保存モードI 6.6		
	放熱部	熱交換器	5. システム保存モードII 1.7		
	計装部	温度センサ, 流量計, 圧力計			
	制御部	-			
	吸熱部	熱交換器			
熱輸送部	ポンプ, バルブ, フィューズ, 配管				
放熱部	ヒータ				
半受動型熱制御系	多層断熱材, OSR, スパース, 多層断熱材, ヒータ温度センサ				



### 2.2.1.2.4 通信システム

#### (1) 概要

約20年後に予定される有人月面探査に於ける通信システムは、50年以上前に科学論文誌上に発表された、英国人アーサー・シー・クラーク氏の”通信手段としての人工衛星利用”に始まる目覚ましい数々の蓄積技術、発展技術と深く関わると想像出来る。平成6年度に行われた”月探査に関する調査研究”(1)に於いて、有人月面探査の概要が示されている。更に、21世紀を宇宙情報通信ネットワーク全体のイメージで捉えれば、フェーズIIに於ける通信ネットワークは、その一部分と考えて良いであろう。図5.2.8は、21世紀を展望した宇宙情報通信ネットワークの構築シナリオを示している(2)。

平成6年度に行われた資料(1)を踏まえ、フェーズ-IIに於ける月面活動で利用可能な通信システムとして、月面の表面のシステムは個別に地球と直接通信、裏側のシステムは周回通信衛星を用いることを基本とする。前者は、月面上に地球向けの月面局を設置し、地球上に専用の通信局を置くことで、月面局-地球局間で直接の通信システムを構築するものである。後者は、月を周回する通信衛星を経由して地球上に設置された専用の地上局と月面上の設置通信局との通信システムを構築するものであり、例えば、3基の月周回衛星を用いれば月面内通信が確保されることが知られている。

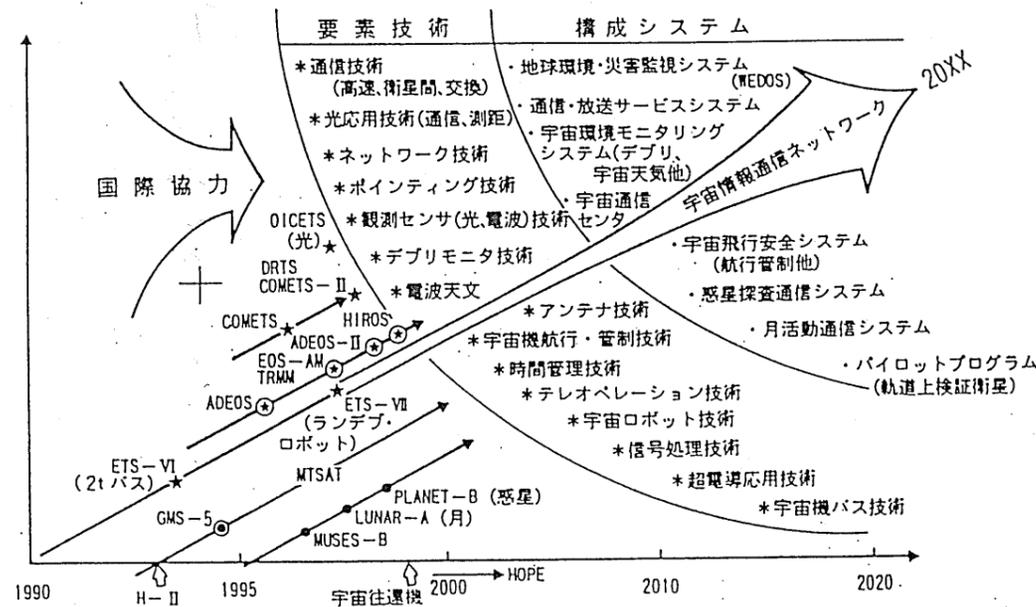


図5.2.8 宇宙情報通信ネットワークの構築シナリオ

(2) 通信ネットワークのイメージ

(a) 月・地球間直接通信：

より多い情報を、より早く、より正確に入手・伝達し、適切な対応・処理・利用を図ろうとする計画は宇宙探査や月面活動にも有効である。現在話題の世界情報ハイウェイ構想に関連して多方面で検討されている超高速通信システムはそれを実現するための有力候補で、音声、画像、データと云った情報を地球上にて双方向、高速で処理することが可能となる。資料(1)に於いてもその有効性が既に概略触れられている。また、種々のアプリケーションへと具体的な提言とした報告も行われている。図 5.2.9 に、高速衛星通信アプリケーションと必要と予測される伝送速度を示す(3)。本表より、数百Mbps～数Gbpsの伝送が可能となれば、かなりのアプリケーションの実現が可能となると云える。現在、米国航空宇宙局(NASA)のACTS衛星を用いての各種実験(4)(5)、私企業の提案であるが、“スペースウェイ(SPACEWAY)”構想(6)、低軌道・固定サービスを図る衛星構想等、衛星を介する超高速通信システム等が考えられており、数Mbps～数Gbpsの情報伝送を可能としている。これらは、地球・月の位置関係や距離(38万キロ)等に関わる条件を考慮に入れることで、“地球→月→地球”、或いは、“地球→衛星→月→衛星→地球”に於けるネットワークシステムの構築としてイメージ出来る。

アプリケーション名	10M	100M	1G	10G[bit/s]
マルチメディア新聞	(-数十M)			
高精細度デジタルマルチチャンネル放送	(45M-140M)	(140M-1.5G)		
マルチメディア電子ショッピング	(-数十M)			
電子図書館・電子博物館	(数十M)		(数百M-1G)	
ハイウェイテレビチャンネルサービス			(数百M-1G)	
企業内ネットワーク	(-数十M)	(数十M-数百M)		
テレファクトリー	(-数十M)	(数十M-数百M)		
高精細度SNG	(45M-140M)	(数百M-1.5G)		
遠隔ビデオテレプレゼンテーション		(45M-1.5G)	(1.5-10G)	
高速コンピュータ間通信			(数百M以上)	
遠隔医療		(数百M)		
遠隔教育	(数十M)	(数百M)		
研究情報ネットワーク	(数十M)		(数百M-1G)	
地球観測データネットワーク	(数十M-数十M)	(数百M-数百M)		
災害対策ネットワーク	(数十M-数十M)	(最大150M程度)		

太線：当面想定・必要とされるもの

細線：将来想定されるもの

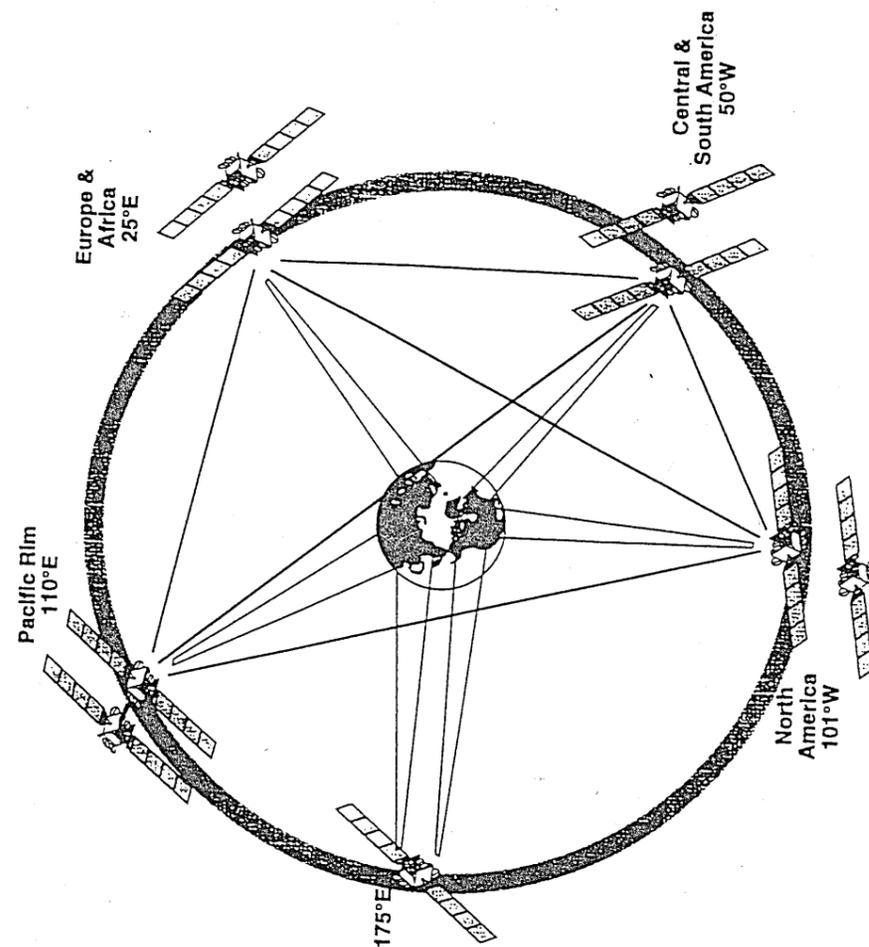
図 5.2.9 高速衛星通信アプリケーションに必要とされる伝送速度

(b) 月周回衛星システム：

地球から直接通信の出来ない月の裏側との通信システムの構築に月周回衛星システムが有効である。既に、月への無人探査ミッションとしての報告も行われており(7)、取得データ伝送を60Mbps程度で行うことが考えられている。フェーズIIでは、更に、高速・多量な情報伝達が求められると予想されるため、上記(a)と同様に、超高速の衛星通信ネットワークが必要となる。月の裏側からの地球への通信システムは、地球→衛星→月→衛星→地球で構成されるが、月面上では、前述の如く固定局の設置となるので、ネットワークの基本構成は、固定局(地球)→衛星局→固定局(地球)と考えて良く、上記スペースウェイのグローバルネットワークシステム(地球→衛星→地球)が想定出来る。資料(6)によれば、Ka帯、簡易地上局で、92Mbpsのデータ伝送の可能性が紹介されている。また、衛星間通信の形態(8)を取り入れることで、地球→静止衛星(データ中継)→周回衛星→月→周回衛星→静止衛星(データ中継)→地球の通信ネットワークも構成出来る。資料(8)によれば、米国航空宇宙局(NASA)での衛星間通信計画で、Ka帯、650Mbpsのデータ伝送が紹介されている。

(3) 想定される通信システム構成

資料(1)にシステムを構築した場合の衛星回線計算例が示されているが、これはシステム構成と要素技術との関わりを知る上で重要である。そこで、本表をベースに、近い将来での実現可能技術並びに技術課題に関わる部分を考慮し、30/20GHz帯の場合、並びに50/40GHz帯の場合について、それぞれ計算した。この結果では、マージンを12~13dBの確保を条件にすれば、30/20GHz帯では、1.2Gbpsの伝送が可能となるが、50/40GHz帯では、ほぼ600Mbps迄となる。なお、関連して周回衛星による間接通信の場合の衛星回線計算を、フォワード回線(地球局→衛星局→月面局)、並びに、リターン回線(月面局→衛星局→地球局)として実施した。これらの結果より、フォワード回線、リターン回線ともに、上記と同じマージンを考慮すれば、ほぼ600Mbps迄の伝送が可能である。なお、計算結果の諸表については専門的となるためここでは添付していない。更に伝送量を上げるためには、所要の帯域幅で、送信局のEIRP、受信局のアンテナ径の何れかを、若しくは両者を増大させる必要がある。尚、周回衛星を介したシステムの場合、更に、地球局、衛星局、月面局のそれぞれの物理的な位置関係で、各々の局に要求されるハードウェア構成が異なってくる場合があるが、システム計画全体の構成が決まれば、それに対応した通信システムの構築は可能である。従って、衛星を取りまく全体システム構成をどの様に作り上げるかが、今後の課題と云える。



システムネットワークのグローバル衛星

(4) 通信システム実現のための個別要素技術

(a) 通信技術:

衛星通信の実用化は1960年代初期の単純な衛星システムによる小容量通信から、現在活躍中の大型衛星/高度な通信システムによる大容量通信へと発展し、それらの技術もより高度なものとなって来ている。フェーズIIに於ける通信技術は、これら蓄積された技術の発展形態として捉えることが出来る。図5.2.10に衛星通信技術の進化を示す(12)。

直接通信では、伝送情報の性能は、対向して設けられる地球局技術にほとんど依存し、主として、地球局を構成するアンテナ系、RF送受信系、並びに変復調系等に使用される技術を高速通信実現の観点から考慮する必要がある。間接通信では、周回衛星を中心とした衛星間通信システムに於ける大容量伝送を如何に実現するかである。直接通信に於ける地球局技術要素の他に、衛星搭載アンテナ、衛星搭載中継器等の衛星搭載機器の性能から来る技術も重要な要素となる。

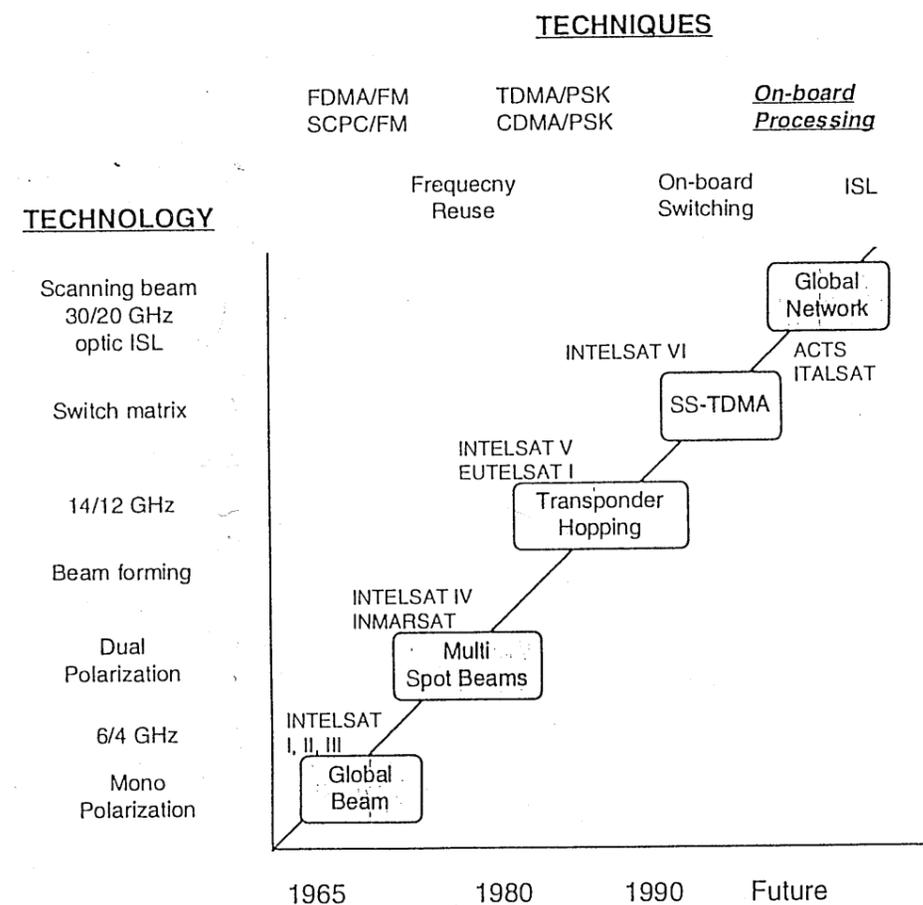


図 5.2.10 衛星通信技術の進化

#### (b) アンテナ系技術

一般に、ギガビット級の伝送速度を出来るだけ小規模の地球局で実現するためには、如何にしてアンテナの高利得を図り、必要な通信回線を確保するかである。月ミッションの場合では、地球/月間の伝搬損失を克服するために、同様に考えることが出来る。衛星通信は、今後多様化して行くと考えられ、このためには、地球局の性能の向上は勿論のこと、衛星の大型化、大出力化を図ることは、システムマージンの増大を得ると共に、月面局設備の負担をその分下げることに役立つ。このために、高利得を所定エリアにて実現するための大型搭載アンテナの実用化技術(10)、マルチビームの形成技術(11)等は重要な開発要素である。

#### (c) 捕捉・追尾技術

地球局・月面局間、或いは、地球局・周回衛星局・月面局間での通信回線を安定に保つためには、捕捉・追尾技術が重要である。地球と月の持つ天文・物理条件より、月面局からの地球局捕捉は、視野角の約2度に、地球局からの月面局捕捉は、地球の自転効果と通信可能仰角を考慮して、±85度の範囲で、15度/時間の速度で月面局の捕捉・追尾が必要となる。追尾方法には、プログラム追尾方式と自動追尾方式のアンテナ指向制御方法があるが、アンテナ径が大きくなると、アンテナビーム幅は狭くなり、アンテナ利得損失が生じ易くなるため、Ku帯以上の高い周波数帯では、後者が多く使用される。捕捉・追尾に使用されるハードウェアでは、RFセンサ捕捉追尾を行うための誤差信号検出技術が重要である。

月ミッションの場合、直接通信、或いは間接通信を問わず、上記の何れかを選択することとなるが、中でも閉ループによる自動追尾にて月/地球間の通信回線を維持するための技術の確立が必要である。

#### (d) 中継器技術

中継器技術は、周回衛星等への搭載用に関わるものである。一般に、中継器には、単純通過型中継器(スルーリピータ)と、再生型中継器とがあるが、後者は、高速の信号切り替えや信号の同期処理を衛星上で容易に可能とし、上り回線での干渉や雑音が下り回線に持ち込まれない利点がある。今後、高速処理を必要とする衛星システムに多く登場が期待されている。例えば、信号対雑音比( $E/N_0$ )とビット・エラー・レート(BER)で比較すると、概略、同一のBERに於いて、 $E/N_0$ は再生型中継器が2dB以上改善される(12)。再生型中継器によるデータ伝送実験は、前述のACTS衛星の他に、平成8年度冬期に打ち上げ予定の我が国のCOMETS衛星でも、Ka帯で150Mbpsのデータ中継が計画されている(13)。

#### (e) デバイス技術

伝送データ量の増加若しくは伝送速度の増大を図る上で、中継器のRF伝送系の超広帯域化が必要で、中継器を構成する各デバイスやコンポーネントに対する広帯域化が重要な技術となる。伝送帯域として1GHz以上を目的とする超広帯域中継器では、割り当て可能な周波数帯域から考慮すると、Ka帯若しくはこれ以上の周波数帯を使用することとなるので、周波数特性を劣化させないためのMMIC化技術を中継器コンポーネントの随所に取り入れる必要がある。また、非線形による劣化も防ぐ必要があり、送信信号の電力増幅器では、出力電力の増大では、直線性に優れた電力領域での使用も考慮しなければならない。受信系での低雑音化もシステムに影響する。更に、隣接及び同一周波数チャネルによる干渉、地球局の場合での高周波数帯に於ける降雨による減衰も品質劣化の要因となる。これらの観点に立って、中継器構成を始め、送受信系機器・デバイス等の技術を検討する必要がある。

## 2.2.1.2.5 資源加工パイロットプラント

### (1) 製造物質の絞り込み

以下の事項を考慮して製造物質の絞り込みを行った。

- ・月活動の比較的早期から製造される物質
- ・生命維持などの月面活動に不可欠な物質
- ・月での加工が地球からの輸送よりも経済性の高い物質
- ・地球では得られない、あるいは得にくい物質

絞り込みの結果、以下の物質を製造物質として選定した。

- ・酸素
- ・ヘリウム(3He, 4He)
- ・水素
- ・窒素
- ・ケイ素の抽出原料
- ・チタニウムの抽出原料

これらの物質のうち、酸素、水素及び窒素は、月面活動に不可欠な物質であり、そのために比較的早期から製造されると考えられる。ヘリウム（特にヘリウム3）は、地球では得にくい物質である。ブロック体には鋳物及び焼結体（セラミックス）が含まれ、構造材料あるいは蓄熱材料などとして利用される。ブロック体には比較的大きな質量が要求されるため、地球からの運搬物質としては適当ではないと考えられる。なお、ケイ素及びチタニウムなども、月では非常に有用であり、将来必ず必要となる物質である。しかしながら月開発の早期段階においてこれらの高純度な物質を得ることは現実的ではないため、酸素の製造過程から副産物的に生産されるケイ素あるいはチタニウム系の原料を、ここでは製造物質とした。

### (2) 加工プロセスの選定

#### (a) 太陽風由来ガス

回収ガスの分離法に関しては、簡便性と技術の信頼性を考慮して以下の方法を選定した。

- 触媒酸化／吸着法
- 深冷分離法

ヘリウム3とヘリウム4の分離に際しては、技術的には開発要素が多いが、将来的な大規模処理に優位な以下の方法を選定した。

- 極低温蒸留法

#### (b) 酸素

イルメナイトの水素還元法、苛性ソーダ熔融塩電気分解法、フッ素化法、メタン還元法、熔融マグマ電気分解法、プラズマ分離法、気相熱分解法等の種々の方法を比較検討した結果、資源加工の単純性、容易性、副産物の利用性等を考慮して以下の方法を選定した。

- イルメナイトの水素還元法
- フッ素化法

#### (c) ブロック体

工程が単純で設備が簡易なことより、以下の方法を選定した。

- 常圧形成焼結法

### (3) 各プロセスの要素技術

#### (a) 太陽風由来ガス回収プロセス

太陽風由来ガス回収プロセスの主な要素技術を以下に示す。

- ・レゴリス採取
- ・レゴリス分級
- ・ガス脱着工程
- ・ガス分離工程
- ・極低温蒸留

#### (b) イルメナイトの水素還元プロセス

イルメナイトの水素還元反応プロセスの主な要素技術を以下に示す。

- ・レゴリス採取
- ・レゴリス分級
- ・イルメナイト選鉱工程
- ・イルメナイトの水素還元（反応塔）
- ・水蒸気の電気分解（高温電解槽）
- ・酸素の貯蔵（ヘリウム冷凍機、酸素ガス貯蔵タンク）

(c)レゴリスのフッ素化プロセス

レゴリスのフッ素化反応プロセスの主な要素技術を以下に示す。

- ・採取工程
- ・分級工程
- ・レゴリスのフッ素化（反応塔）
- ・酸素とフッ化ケイ素の分離（フッ化ケイ素吸着塔）
- ・酸素の貯蔵（ヘリウム冷凍機、酸素貯蔵タンク）
- ・四フッ化ケイ素からシリコンの回収（四フッ化ケイ素分解槽）
- ・フッ化ナトリウムからフッ素の回収（フッ化ナトリウム電気分解セル）

(d)ブロック体製造（常圧焼結）

ブロック体製造プロセスの主な要素技術を以下に示す。

- ・レゴリス採取
- ・分級
- ・レゴリス及び添加物質混合
- ・混合物成形
- ・焼結
- ・ブロック体貯蔵

2.2.1.2.6 ロボット(フェーズII 第一段階)

1. フェーズIIのロボット作業分析

フェーズIIの第一段階では以下のような作業が想定される。

- (1) 有人基地インフラストラクチャの構築・整備  
(居住モジュール, 太陽電池パネル, ラジエータ, 通信系)
- (2) 月面天文台建設作業  
(地盤整備, 基礎および基礎構造の設置, 望遠鏡本体・サンシェードの設置)
- (3) 月面実験モジュール展開作業  
モジュールの搬出, 運搬, 据付, 結合, モジュール間の配管・配線  
太陽電池パネル, ラジエータの展開  
通信系の展開, 信号線敷設  
覆土作業  
点検・保守
- (4) 月面移動・輸送作業  
(道路整備, 輸送作業, 移動作業, 点検・保守)

2. ロボットの種類と構成

上述のロボット作業分析に基づき, 3種類のロボットについて構成と仕様を検討する。

2.1 クレーン作業ロボット

概念図を図 5.2.11aに示す。先端にクレーンと2本の補助アームを有し, 月面ランダーからの荷物の積み下ろし作業を行うほか, 4~6輪の走行系により自ら移動して近距離の運搬作業などを行う。また, 補助アームの先端には, 各種作業に応じてエンドイフェクタを装備し, 構造物の建設作業や覆土作業等を行う。概略諸元を以下に示す。夜間は, 図 5.2.11bに示すような熱シールドを展開して熱の輻射を抑えつつ, 充電した電力によりヒータを制御し自己保持を行う。

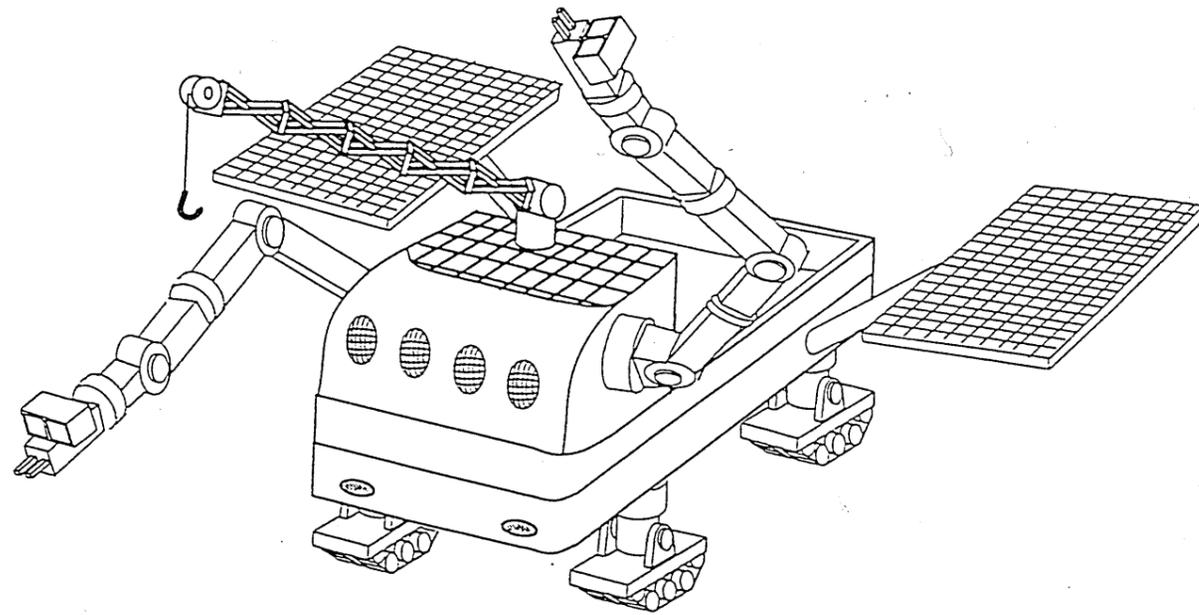


図5.2.11a クレーン作業ロボット

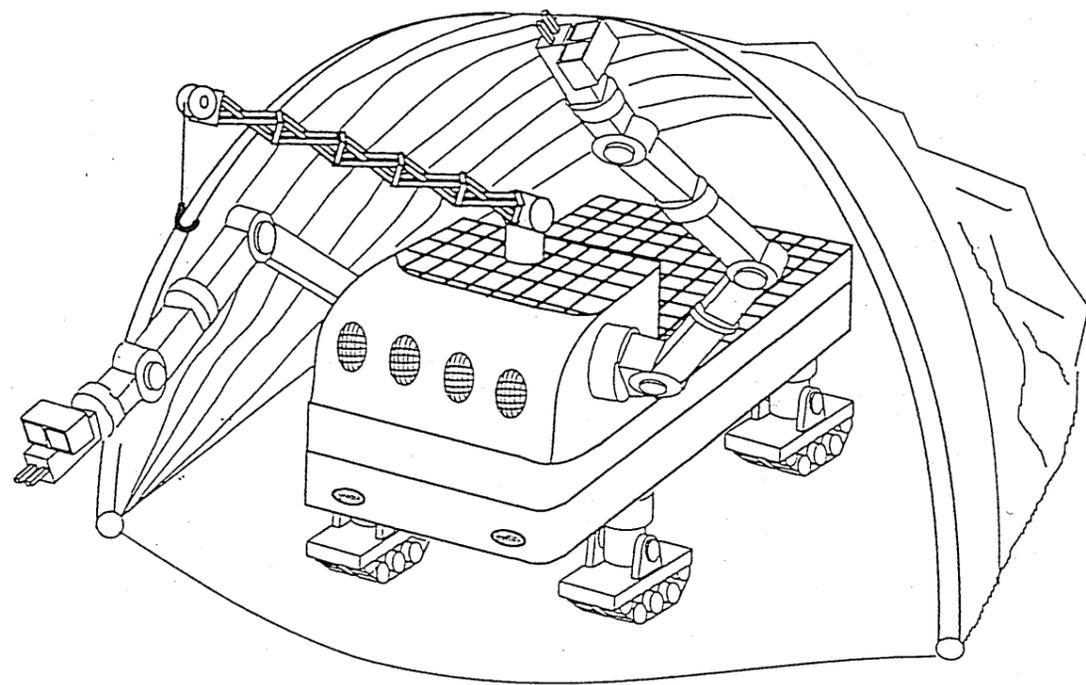


図5.2.11b 熱シールド

(a) マニピュレータ

ア. 主アーム(クレーン)

長さ 5 m  
 自由度数 3  
 可搬重量 400 kg

イ. 補助アーム(2本:以下の諸元は単体性能)

長さ 2 m  
 自由度数 7  
 可搬重量 100 kg

(b) 走行系

車輪数 4~6  
 走行速度 10 km/h

(c) 荷台

可搬重量 2 t  
 自由度 昇降・回転の2自由度

(d) 全体サイズ

重量 1400 kg (配分を次節に示す)  
 寸法 2×4×1.5 m (W×L×H)  
 消費電力 平均 1.5 kW, 最大 3 kW

(e) 電力供給

太陽電池+バッテリーによる自給方式  
 発電能力 最大 1.5 kW (発電効率: 10%)  
 バッテリー容量 30 kWh (300 kg)

(f) 連続稼働時間 10 h以上

2.2 運搬作業ロボット

運搬作業用ロボットの主要構成は、以下のように想定される。

- a. 車体 重量物に適したガントリー型の牽架構造を持つ。
- b. 脚 車輪, キャタピラまたはアーティキュレイテッドレッグ。後者は速度は制限されるが複雑な地形にアクセスする場合に, キャタピラは高傾斜地形にアクセスする場合に必要となる。

- c. アーム 3～4 m 程度の中型アームとし、自由度は8程度、センサとして手先カメラおよび力／トルクセンサは最低限装備するものとする。制御は有人拠点または地上からの遠隔操縦を主として、環境モデルおよびモデルマネージャを使用するものとする。更に、作業の詳細に合わせて付け替え可能なエンドエフェクタを数種類準備するものとする。
- d. 全体制御 走行に関しては全体制御用の計算機により経路選定、緊急停止等を行うものとする。また、ハウスキーピングも実施する。熱的に厳しい環境に放置されるので熱制御面の設計上の配慮が必要となる。
- e. リソース 重量： 1500 kg  
消費電力： 1500 W (4時間毎にシステムより充電)

### 2.3 月面車

月面車は大きく分類すると非与圧型と与圧型の2種類に分けられる。非与圧型は基地周辺の探査及びに軽量物の搬送、資源のサンプリングなどに使用されると考えられる(図 5.2.12)。また、与圧型の月面車は長距離の探査に使用される(図 5.2.12)。以下に非与圧型と与圧型それぞれの月面車の特性について述べる。

#### 1) 非与圧型月面車

- ・機能／目的： 基地周辺の探査やクルーの移動を目的とする。月面車の後部に搬送用のカーゴを取り付けて軽量ペイロードを輸送することが可能である。
- ・形式： 車輪型(4輪)
- ・寸法： 3 m (全長) x 2 m (全幅) x 1.5 m (高さ)
- ・重量： 150 kg
- ・最大速度： 20 km/h
- ・移動距離： 50 km
- ・構成： 走行：4輪型バギータイプ。  
エネルギー：バッテリー(5 kWh：基地にて40時間毎に充電)  
通信：基地と通信するアンテナ。

#### 2) 与圧型月面車

- ・機能／目的： 非与圧型月面車でカバーできない遠距離探査のための月面車。
- ・形式： 車輪型(4輪)
- ・寸法： 8 m (全長) x 4 m (全幅) x 4 m (高さ)
- ・重量： 3000 kg
- ・最大速度： 10 km/h
- ・移動距離： 300 km
- ・構成： 走行：与圧モジュールの下部に4輪もしくは6輪の走行系を有す。  
エネルギー：太陽電池とバッテリーの組み合わせ(自給式)。  
通信：基地との通信及び地球との通信用アンテナ。  
マニプレータ：サンプリング用6自由度双腕アーム。  
視覚：ステレオカメラを月面車の前後に設置。  
その他：エアロック。

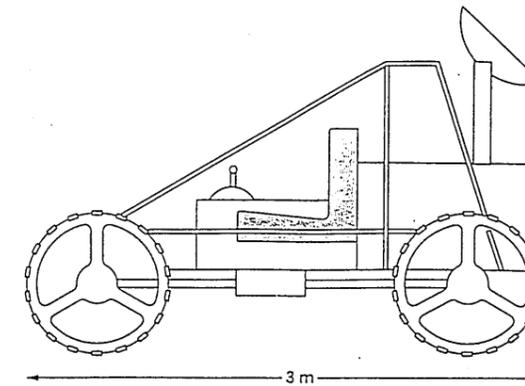


図 5.2.12 a 非与圧型月面車

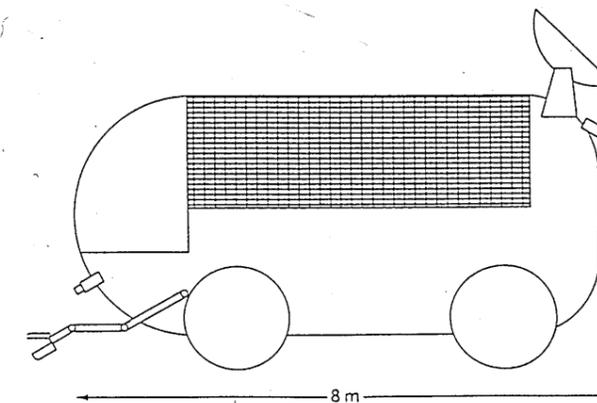


図 5.2.12 b 与圧型月面車

2.2.1.2.7 輸送システム

(1) 概要

輸送システムは、次の4つのモジュールから構成される。

- ・地球周回軌道と月周回軌道間の輸送を担う月輸送機
- ・月周回軌道と月面間の輸送を担う月離着陸機
- ・月面上で物資輸送、人員輸送と探査を担う月面上ローバ
- ・地球周回軌道と月面のミッション期間中に生命維持機能を担う有人機

輸送システムの運用のベースは、地球周回軌道である。地球周回軌道上の整備作業により・物資、月面上ローバ+月離着陸機+月輸送機もしくは・有人機+月離着陸機+月輸送機の形態となる。ミッションに必要な人員、物資および推進薬は、既存の地球近傍の輸送インフラストラクチャーを利用して、地上から地球周回軌道へと輸送される。地球周回軌道を離脱し、地球月遷移軌道を経て月周回軌道へ至る。月周回軌道上で・物資、月面上ローバ+月離着陸機もしくは・有人機+月離着陸機が、月輸送機から分離し月面着陸を実施する。輸送システムの最大規模は、ミッション開始時点で約120tonであり、最大輸送能力は、月面上へ物資8.5tonである。物資、月面上ローバ等を降ろした後、月離着陸機単独もしくは有人機+月離着陸機は、月面を離陸し、月周回軌道上で月輸送機と結合する。月周回軌道上で月輸送機と結合する。月周回軌道を離脱し地球月遷移軌道を経て地球周回軌道へ帰還する。帰還した輸送システムは、地球周回軌道上で、再び整備を受けた後、次の月輸送ミッションを実施する。

(2) 運用形態

輸送システムの運用形態を物資、月面ローバ輸送ミッションと人員輸送ミッションとについて、下図に示す。

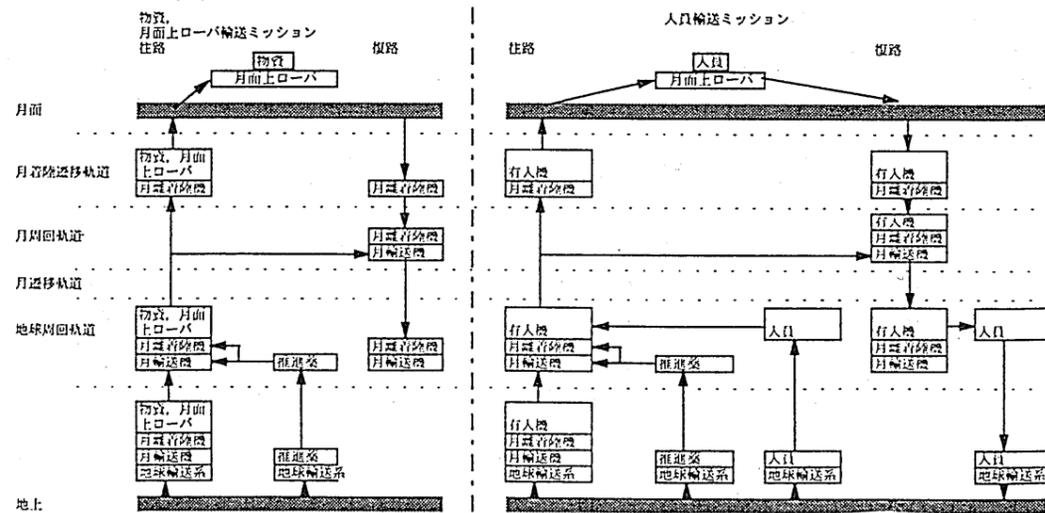


図 5.2.13 輸送システムの運用形態

(3) ミッション・シーケンス

往路

- ①地球輸送系による地上から地球周回軌道への打ち上げ
- ②周回軌道上での別便の地球輸送系からの人員搭乗および推進薬充填
- ③地球周回軌道から月遷移軌道移行
- ④ミッドコースト・マニューバ
- ⑤月周回軌道への移行
- ⑥月面着陸遷移軌道へ移行（復路ミッションが有る場合、月輸送機は軌道上待機）
- ⑦月面着陸実施

復路

- ①月面離陸
- ②月周回軌道投入
- ③有人機（月離着陸機）と月輸送機の結合
- ④月周回軌道から地球遷移軌道へ移行
- ⑤ミッドコースト・マニューバ
- ⑥地球周回軌道へ移行
- ⑦地球輸送系への人員移乗

(4) 輸送システム構成モジュール概要

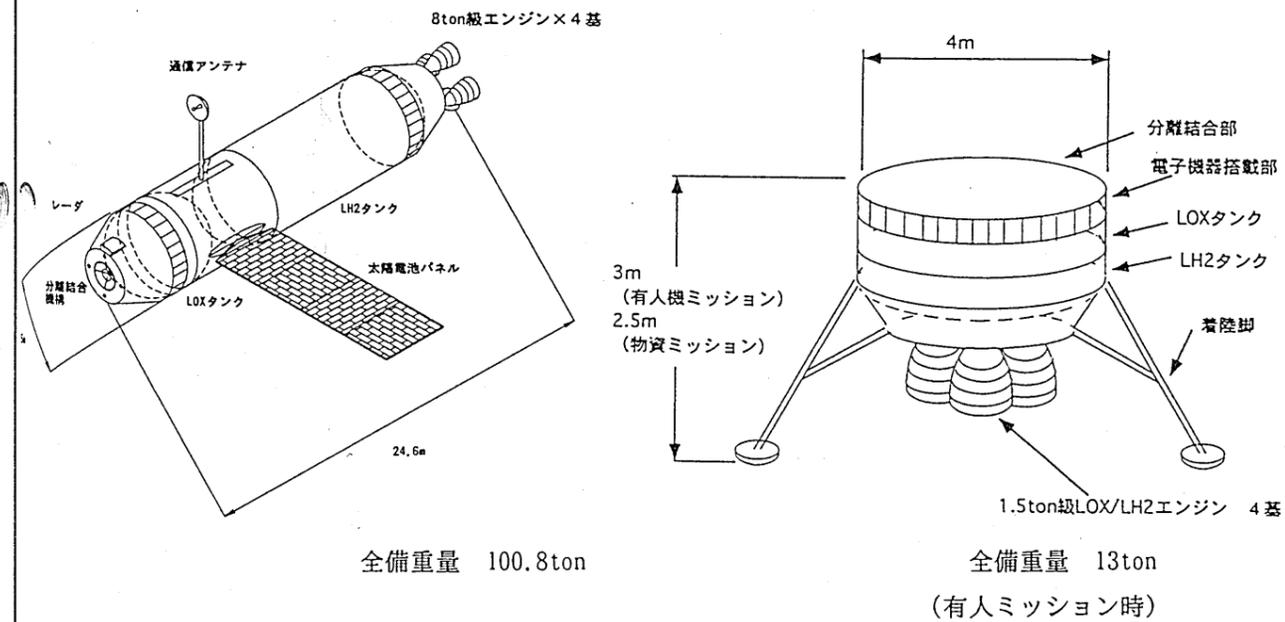


図 5.2.14 月周回軌道上で待機中の月輸送機概観

図 5.2.15 月離着陸機概観

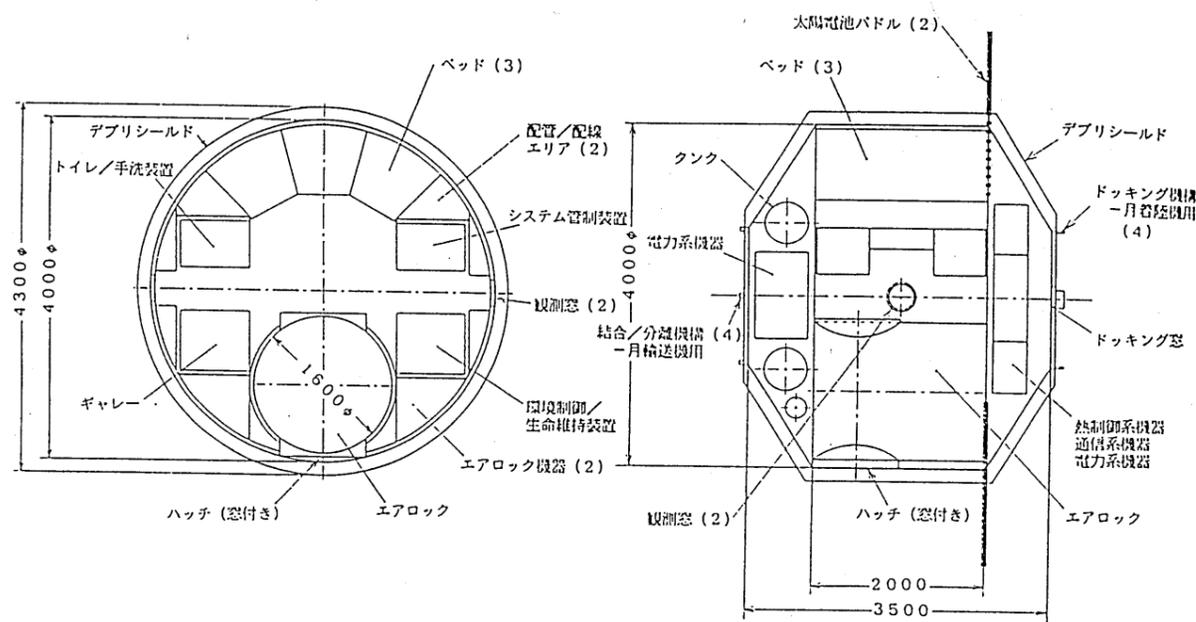
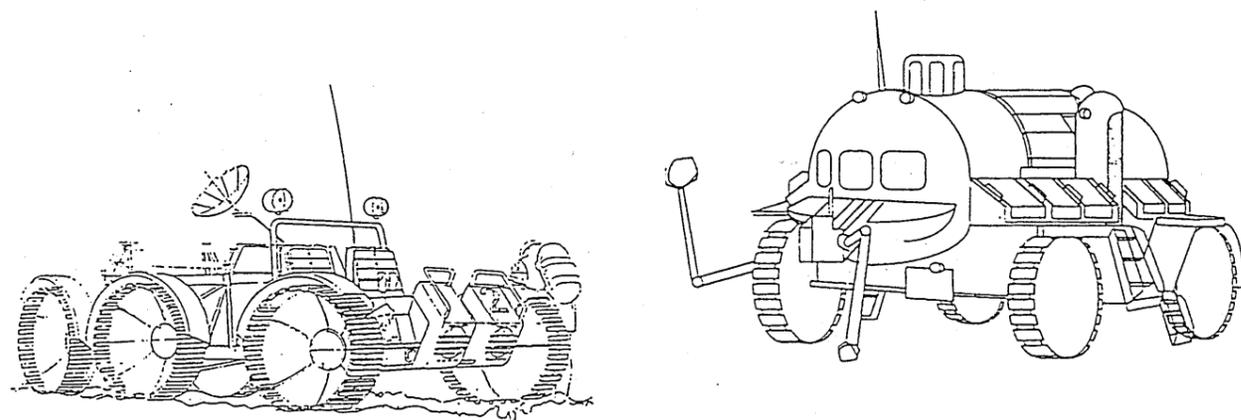


図 5.2.16 有人機概観



有人用月面ローバ（開放型）

有人用月面（与圧型）ローバ

図 5.2.17 月面上ローバ概観

### 2.2.1.2.8 ライフ・サイエンス実験システム

#### フェーズⅡ・第1段階でのライフ・サイエンス実験テーマ

有人月面拠点の長期的な目標は「人間の月面での滞在」である。これには月面環境の内「1/6Gの定重力環境」と「放射線」が大きな影響を及ぼすと考えられるが、これらの2つの環境条件が単独にあるいは複合してどのような影響を及ぼすかを事前に把握する必要がある。人間の月面での長期滞在を目指したフェーズⅡ・第1段階で実施すべき事前検証のライフ・サイエンス実験テーマを以下の3点に絞った。

#### (1) 「1/6Gの低重力環境」と「月面放射線」が及ぼす細胞レベルへの影響把握 実験テーマ

- ・生存率測定
- ・放射線量特性計測
- ・DNAの損傷の定量測定
- ・放射線誘発による突然変異頻度測定及び哺乳類細胞のガン化観察

#### (2) 「1/6Gの低重力環境」が及ぼす生体への影響把握

##### クルー対象実験テーマ

- ・滞在するクルーを対象にした生理学的データの取得
- ・1/6G下での閉鎖空間における空間認識調実験
- ・その他心理学のテスト実施

##### 哺乳動物対象—マウス、ラット—実験テーマ

- ・生理学的データ取得
- ・ビデオによる行動観察
- ・骨、筋肉、循環系への影響把握
- ・妊娠させた親動物を持ち込み出産後の子動物を観察

#### (3) 食糧生産基礎実験

##### 植物栽培実験テーマ

- ・短期実験…稲、大豆、シロイヌナズナ等の発芽及びその後の子葉鞘観察
- ・長期実験…長期自動栽培

##### 水棲動物飼育実験テーマ

- ・短期実験…魚類や両棲類の受精直後からの初期発生観察
- ・長期実験…魚類の継代飼育実験

#### 2. ライフ・サイエンス実験システム概念

フェーズⅡ・第1段階では実験用にダブルラックが2個用意される。従ってこのダブルラックの中に「微生物及び細胞実験装置」、「哺乳動物対象実験装置」、「植物

栽培実験装置（あるいは水棲動物飼育実験装置）」を搭載する他、PDBやDIUとしてストウェーjspスペースも確保する必要がある。但しクルー対象実験は居住区の空いたスペースを使用することになる。

## 2.2.2 第二段階

### 2.2.2.1 有人拠点システムイメージ

#### (1)機能要求

第2段階は、第1段階のシステムをベースとして規模の拡張を行うものとするが、実験機器などをはじめ一部は第1段階で使用したものを交換する必要があるものも考えられる。本段階における機能は、以下のように設定する。

- ・クルーは最大5人で、最大6カ月間連続滞在する。ただし、夜間は原則として屋外活動は行わないこととする。初期は、クルーは夜間に一旦軌道に戻ることも考えられる。システムの使用期間は13年間であるが、システム寿命の短いものは都度交換するものとする。
- ・第1段階の居住モジュールに実験モジュール、食糧生産/貯蔵モジュールを接続して使用する。食糧生産/貯蔵モジュールには、ECLSS機能も含まれる。
- ・ガス、水は再利用し、食糧は徐々に自給する（初期は地球からの供給に頼る）。
- ・電力は昼間、夜間とも20kWで、太陽電池パネル、燃料電池（夜間）、二次電池を使用する。
- ・長期間の滞在のため、モジュール群には放射線対策を施す（レゴリス覆土）。
- ・夜間においても実験モジュール内での実験は可能であり、長期間のライフサイエンス実験等を行う。
- ・レゴリスから酸素を製造するプラント、水素/ヘリウム3を抽出するプラント、金属材料製造プラント、焼結体製造プラント等の規模を拡大する。
- ・科学ミッション（天文台、宇宙モニタリング等）の支援を行う。
- ・第1段階同様、無人ミッションで輸送される機器類のうち断熱の必要があるものは断熱用コンテナに収納して輸送、月面上に仮置きする。コンテナはロボット群の保温に再利用することも考えられる。
- ・道路整備、発着陸地点整備等の土木工事を行う。

#### (2)システムの構成

本段階におけるシステムは以下のような構成とする。本段階では夜間も滞在するため電力は供給されるが、夜間に稼働させない機器類については第1段階と同様な温度変化対策を施すこととする。

- 居住系：第1段階での居住モジュールを使用する。また、ECLSSモジュール併用の食糧生産/貯蔵モジュールを追加する。放射線対策としてレゴリスによる被覆を施す。設置方法は、図5.2.18のように、月表面設置、半地下設置、地下設置が考えられる。

- ・居住モジュール（環境制御系、エアロック、スペーススーツ、マンシステム）
- ・食糧生産／貯蔵モジュール（ECLSS 併用）

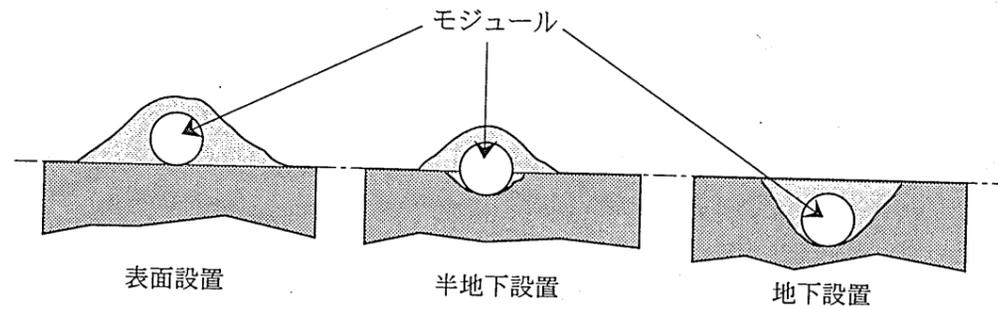


図 5.2.18 モジュールの設置形態例

- 電力系：太陽電池パネルを交換し、発電効率をアップする。また、夜間の活動も行われるため、燃料電池を 20kW に増強する。
  - ・太陽電池パネル
  - ・電力モジュール（燃料電池、二次電池、電力分配器）
  - ・燃料電池タンク
- 熱制御系：ベースは第 1 段階のシステムを拡張するものとするが、プラント等の大きな熱量を発生するものについては、独立して制御することとする。
  - ・ラジエータ
  - ・ヒートパイプ
  - ・水ループ
  - ・アンモニア 2 相ループ
  - ・ヒータ
  - ・多層断熱材 (MLI 等)

- 通信・管制系：基本的には第 1 段階と同様のシステムとする。

- ・管制モニタ系
- ・TT&C 系
- ・高速データ伝送系
- ・月面通信系
- ・ビーコン系

- 実験／観測系：屋内実験の増加に伴い、第 1 段階にて使用した居住モジュールとは別途専用の実験モジュールを設置する（居住モジュールに接続）。また、屋外実験／観測についても、第 1 段階に比べるとより本格的な資源利用プラントに交換され、規模の拡大が図られる。

- ・実験モジュール（居住モジュールに接続）
- ・酸素製造プラント
- ・水素、ヘリウム 3 抽出プラント
- ・焼結体製造プラント

- 運用系：水、ガスは再利用されるようになる。食糧は初期は地球からの供給に頼るが、徐々に自給可能とする。

- ・作業支援ロボット
- ・食糧貯蔵設備（初期のみ、食糧生産／貯蔵モジュール設置後は不要）
- ・補給品（初期の食糧等）
- ・廃棄物貯蔵設備
- ・工具

- 輸送系：各輸送機とも第 1 段階での輸送能力を維持。

- ・月輸送機
- ・月離着陸機
- ・有人機
- ・月面ローバー

### (3) システムの重量・電力配分

第 2 段階における有人システムの凡その重量配分及び電力配分は、表 5.2.6 の通り。居住系における食糧生産／貯蔵モジュール、電力系における新規太陽電池パネル、燃料電池、実験／観測系における実験モジュール、水／酸素製造プラント、ガス抽出プラント、金属材料製造プラント、レゴリスフッ素化プラント、焼結体製造プラント等の追加により増加

するが、その他は大部分が第1段階におけるシステムを転用する。補給系では、水、ガスの再利用及び食糧の自給により貯蔵機器が不要となるため重量は減っている（初期は一部自給のため、若干増えるものと考えられる）。電力については、資源加工プラントにおいて製造される酸素等の製造要求量によっては、大幅な増加、あるいは配分見直しが必要となる場合もある。

表 5.2.6 有人システムの重量配分、電力配分

項目	重量 (トン)	電力 (kW)
居住系	17.0	3.0
電力系	15.0	4.5
熱制御系	2.5	4.0
通信管制系	1.0	3.5
実験／観測系	10.0	4.0
補給系	1.0	1.0
合計	46.5	20.0

#### (4) システムの運用の考え方

本段階におけるシステムの運用は以下のように考える。

- ・輸送システムは第1段階と同様のものを用いる。
- ・本段階初期に追加するシステム（食糧生産／貯蔵モジュール、実験モジュール、太陽電池パネル、燃料電池、熱制御サブシステム等）の輸送は、初期の4回の無人ミッションで対応する。ただし、電力や熱制御系の追加分を先に組立／稼働させるため、4回の無人ミッションの間に2回の有人ミッションが行われる。
- ・モジュールの覆土作業や拠点外のエリアに必要な発着地点整備、道路整備等の土木作業は既存の作業支援ロボットで対応する。

以下に運用計画を以下に示す。

##### ① 無人ミッション

- ・地球からの輸送：太陽電池パネル (3.5)、燃料電池追加システム (4.0)、熱制御系追加システム (1.0) (8.5 トン)

- ・本段階では夜間も燃料電池により 20kW の電力を供給することから、昼間の発電量を増やす必要があり、効率を上げるためにも太陽追尾式の太陽電池パネルを建設する。

##### ② 有人ミッション1

- ・地球からの輸送：有人機（補給品、交換部品含む）(6.0 トン)
- ・月面での活動：新規の太陽電池パネル、燃料電池システム、熱制御系システムの設置・組立・整備・点検作業及び稼働、発着場及び道路の整備工事、既存実験システムを用いた資源利用及びライフサイエンス実験、科学ミッションの支援
- ・地球への持ち帰り：廃棄物、交換後の部品等

##### ③ 無人ミッション2

- ・地球からの輸送：実験モジュール (8.5 トン)
- ・屋内での実験のため実験専用のモジュールを設置する。

##### ④ 無人ミッション3

- ・地球からの輸送：食糧生産／貯蔵モジュール (8.5 トン)
- ・初期は地球からの食糧補給に頼るが、拠点内における食糧生産実験を経て徐々に自給していく。
- ・水とガスは再利用するため、ECLSS モジュール機能を食糧生産／貯蔵モジュールに含める。

##### ⑤ 有人ミッション2

- ・地球からの輸送：有人機（補給品、交換部品含む）(6.0 トン)
- ・月面での活動：実験モジュール、食糧生産／貯蔵モジュールの設置・組立・整備・点検作業及び稼働、モジュール群の覆土作業（第1段階での居住モジュールを活かすため、半地下或いは地下埋設はせず、月表面設置のままでの覆土ととする）、既存実験システムを用いた資源利用実験、実験モジュール内でのライフサイエンス実験、科学ミッションの支援
- ・地球への持ち帰り：廃棄物、交換後の部品等

##### ⑥ 無人ミッション4

- ・地球からの輸送：酸素製造プラント、水素／ヘリウム3抽出プラント、焼結体製造プラントを搭載した断熱コンテナ (8.5 トン)

##### ⑦ 有人ミッション3

- ・地球からの輸送：有人機（補給品、交換部品含む）(6.0 トン)
- ・月面での活動：
  - 酸素製造プラント、水素／ヘリウム3抽出プラント、焼結体製造プラントの設置・組立・整備・点検作業及び稼働、実験モジュール内でのライフサイエンス実験、食糧生産／貯蔵モジュール内での食糧生産実験、酸素製造、水素／ヘリウム3抽出、焼結体製造、科学ミッションの支援
  - 地球への持ち帰り：実験成果品、廃棄物、交換後の部品等

#### ⑧有人ミッション4

- ・地球からの輸送：有人機（補給品、交換部品含む）（6.0トン）、但し、補給品のうち食糧については食糧生産が軌道に乗った段階で補給は止める。
- ・月面での活動：酸素製造、水素／ヘリウム3抽出、焼結体製造、実験モジュール内でのライフサイエンス実験、食糧生産／貯蔵モジュール内での食糧生産実験、資源利用プラントを用いた材料製造実験、科学ミッションの支援
- ・地球への持ち帰り：実験成果品、廃棄物、交換後の部品等

#### ⑨有人ミッション5以降の有人ミッション（有人ミッション4と同様）

#### ⑩無人ミッションn：

- ・資源利用プラント等の大規模化が図られた場合、都度、無人ミッションにてプラント（8.5トン／基以下）を輸送し、その直後の有人ミッションで設置作業を行う。

#### (5)有人拠点の構築手順

有人拠点システムの構築手順について以下に示す。構築作業は、4回の無人ミッションと3回の有人ミッションにて行われるものとする。図5.2.18(1)～(3)は構築フローを示したものである。

#### ①無人ミッション1

- ・着陸
- ・荷降ろし（新規太陽電池パネル、追加燃料電池、追加熱制御系システム）
- ・離陸

#### ②有人ミッション1

- ・着陸
- ・荷降ろし（発着場設置機器、補給品、交換部品、工具）
- ・作業支援ロボット群の稼働、機能確認
- ・居住モジュールへの移動
- ・居住モジュールのモード切替、機能確認
- ・補給品搬入
- ・新規太陽電池パネル運搬、設置
- ・追加燃料電池運搬、設置
- ・追加熱制御系システム運搬、設置
- ・新規及び追加した各サブシステムの居住モジュールへの接続、機能確認
- ・新発着場－拠点間の道路整備（作業支援ロボットの活用）
- ・新発着場整備（整地、機器設置）
- ・居住モジュール、電力システム、熱制御システムのモード切替
- ・着陸機への移動、着陸機機能確認

- ・作業支援ロボットスリーブ（保温操作）
- ・帰還

#### ③無人ミッション2

- ・着陸
- ・荷降ろし（実験モジュール）
- ・離陸

#### ④無人ミッション3

- ・着陸
- ・荷降ろし（食糧生産／貯蔵モジュール）
- ・離陸

#### ⑤有人ミッション2

- ・着陸
- ・作業支援ロボット群の稼働、機能確認
- ・荷降ろし（補給品、交換部品、工具）
- ・居住モジュールへの移動
- ・居住モジュールのモード切替、機能確認
- ・補給品搬入
- ・電力システム、熱制御システムのモード切替
- ・実験モジュール運搬、設置
- ・食糧生産／貯蔵モジュールの運搬、設置
- ・居住モジュール、実験モジュール、食糧生産／貯蔵モジュールのインターフェース
- ・接続、機能確認
- ・モジュール群の覆土作業
- ・居住モジュール、電力システム、熱制御システムのモード切替
- ・着陸機への移動、着陸機機能確認
- ・作業支援ロボットスリーブ（保温操作）
- ・帰還

#### ⑥無人ミッション4

- ・着陸
- ・荷降ろし（酸素製造プラント、水素／ヘリウム3抽出プラント、焼結体製造プラントを搭載した断熱コンテナ）
- ・離陸

#### ⑦有人ミッション3

- ・着陸
- ・作業支援ロボット群の稼働、機能確認
- ・荷降ろし（補給品、交換部品、工具）

- ・居住モジュールへの移動
- ・居住モジュールのモード切替、機能確認
- ・補給品搬入
- ・電力システム、熱制御システムのモード切替
- ・断熱コンテナの展開
- ・酸素製造プラント、水素/ヘリウム3抽出プラント、焼結体製造プラントの運搬、設置、機能確認
- ・居住モジュール、電力システム、熱制御システムのモード切替
- ・機への移動、着陸機機能確認
- ・帰還
- ・作業支援ロボットスリープ（保温操作）

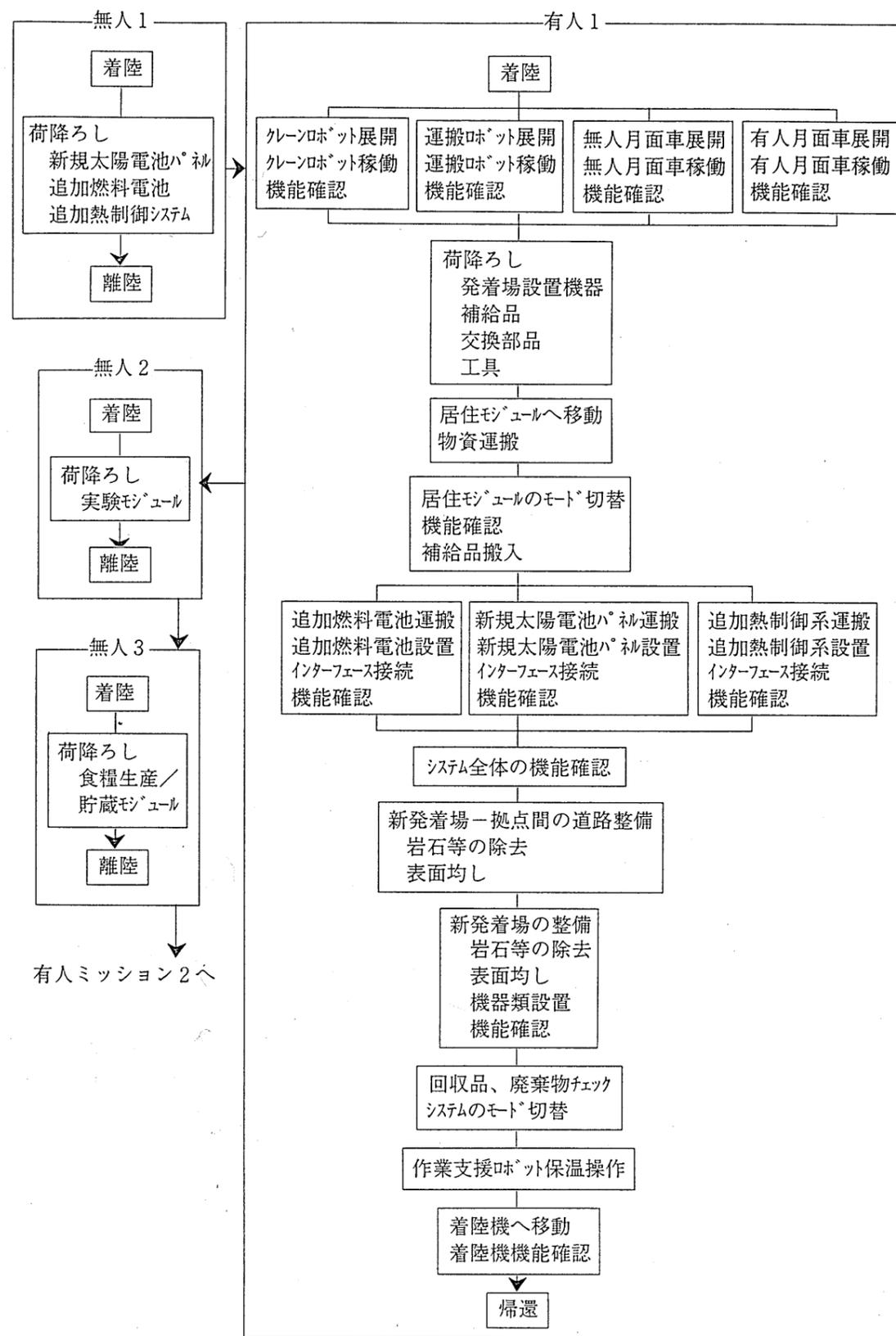


図 5.2.18(1) 第2段階有人拠点システム構築フロー（その1）

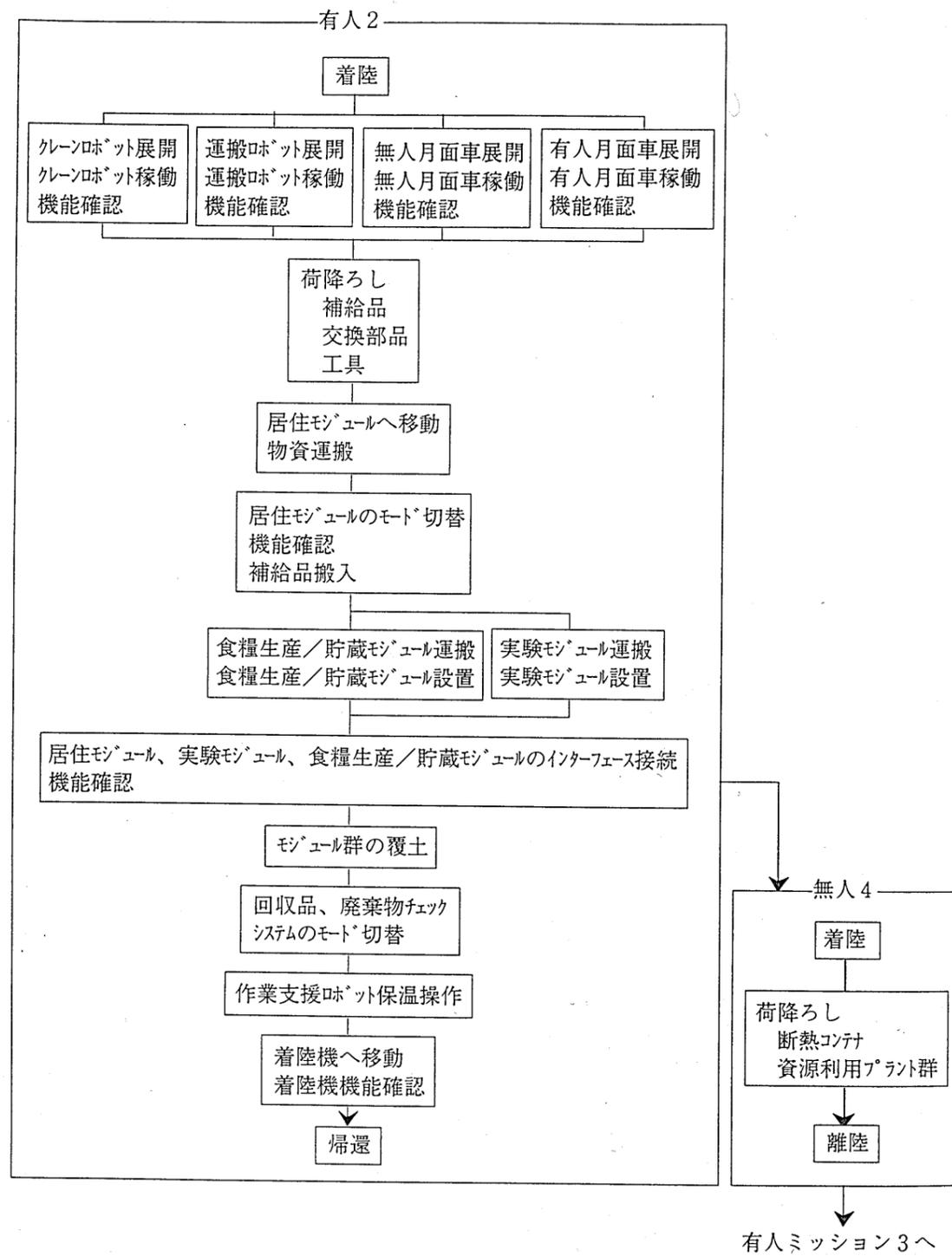


図 5.2.18(2) 第2段階有人拠点システム構築フロー (その2)

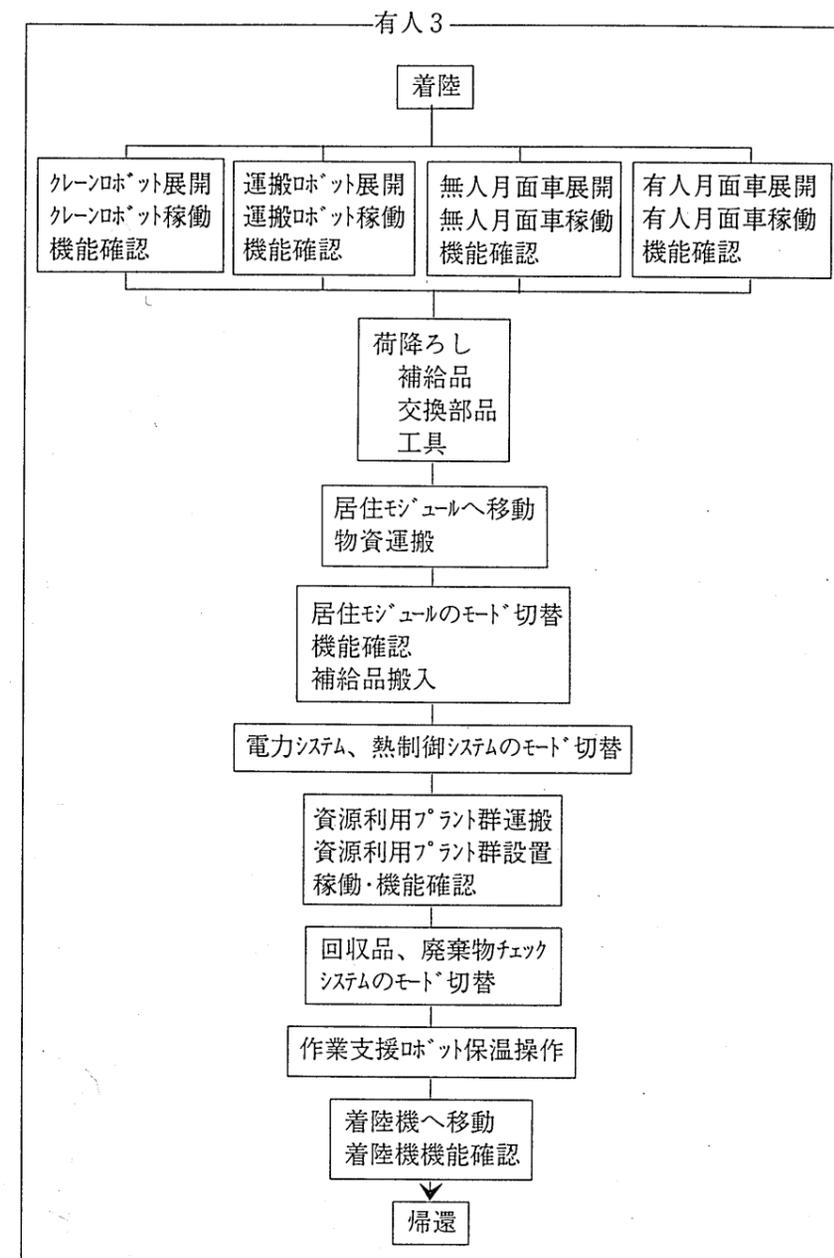


図 5.2.18 (3) 第2段階有人拠点システム構築フロー (その3)

## 2.2.2.2 要素技術

### 2.2.2.2.1 有人サポートシステム

第2段階での月面滞在人数は5人で、最大6ヶ月間連続滞在する。居住は第1段階で設置した居住モジュールを使用するが、これにECLSSモジュール併用の食料生産/貯蔵モジュールを追加接続する。また、実験モジュールも追加される。クルーの長期間滞在のためモジュール群には放射線遮蔽対策及び月の昼夜の温度対策としてレゴリスによる被覆を施す。なお、モジュール群の覆土は第1段階での居住モジュールを活かすため、半地下或いは地下埋設はせず、月表面設置のままの覆土とする。モジュール群の構築においては、第2段階の有人月面拠点では各種の実験/研究/探査/観測が行われるため、第1段階の有人月面拠点に比べ、物の運搬や人の移動距離を最小にする組み合わせ、良好な微小重力環境の確保等を満足させるような空間構成にする。このためモジュールは部材種類を少なくして標準化する。また、火災発生あるいは隕石などの衝突によるモジュールの減圧等の非常の場合を想定し、避難経路が2カ所以上設けておく必要がある。さらに、万一非常事態が発生した場合には、安全な場所に避難できることが必須である。これらの条件及び将来の拡張性を考慮するとモジュールは図5.2.19に示すように8の字型に前後、左右、上下に容易に接続できることが望ましい。環境制御系では、酸素の再利用システム構築のため、除去した炭酸ガスを還元し生成したH<sub>2</sub>Oから酸素を製造する。また、炭酸ガス還元で生成したCO、CH<sub>4</sub>等の不純物は有害ガス処理装置で分解処理する。有害ガス処理は吸着と触媒酸化により行う。大部分の有害ガスは活性炭などによる吸着により処理されるが、一酸化炭素、メタン、水素等は吸着が難しいため酸化分解により処理する。触媒酸化を行うにあたり触媒毒となるハロン、二硫化炭素等は前処理筒で、酸化によるNO<sub>x</sub>、SO<sub>x</sub>等の二次発生ガスは後処理筒で処理される。水再生利用のため、飲料水処理、貯蔵、供給及び衛生水処理、貯蔵、供給機能を保有する。処理した飲料水、衛生水はクルーの健康保持のため水質基準を満足することが必要で常時水質をモニターする。クルーの生活で排出される排泄物、廃棄物は、第2段階においては原則として月面にて処理するものとする。食料は初期は地球からの供給に依存するが徐々に自給していくこととし、効率の良い植物種を光合成により成長させ、可食部を食料として利用する。

月面での長期滞在では1/6重力、閉鎖環境、放射線、真空、温度等地上とは異なった物理環境に曝されるため、生理・精神的ストレスが人体に作用し、各種疾病の発生が予想される。疾病の診断・治療、疾病の予防、健康管理は不可欠であり、各種の医療・健康管理設備が必要である。

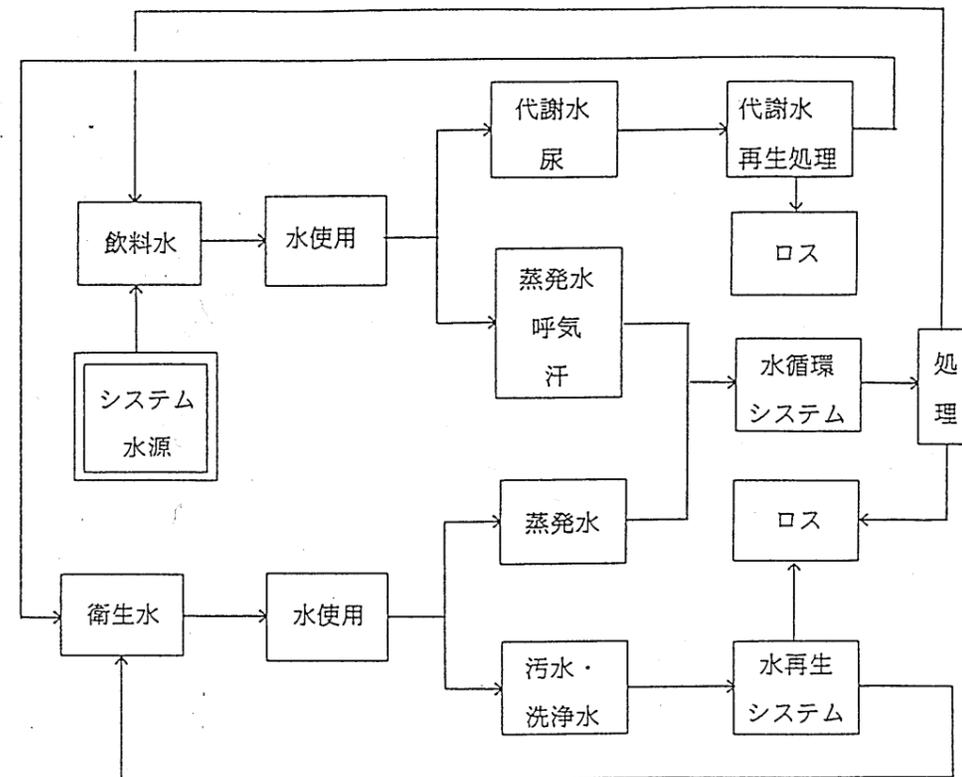
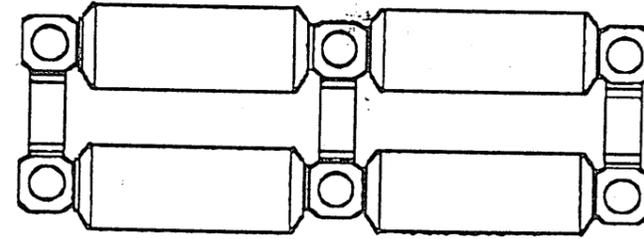


図 5.2.19 居住モジュールの配置と再利用システム

## 2.2.2.2 エネルギー供給システム

### エネルギー供給システム概要

#### (a) システム系統

システム系統は基本的に第一段階のものと変わらない。第一段階の夜間必要電力4KW に対し第二段階では 20KW に増加するため燃料電池用燃料の補充を行う。この夜間電力用に必要な燃料量は、酸素 2800Kg, 水素 350Kg である。これらの燃料を昼間水の電解で製造するための電力は約 90KW である。

#### (2) 太陽電池による発電

##### (a) 太陽電池パネルの設置

第二段階では第一段階に比べ格段に太陽電池パネル系の生成エネルギーは大きくなることから第一段階と同様の機構を採用した場合、長距離に亘る展開作業が要求され好ましくない。そこでここでは太陽電池パネルは南北方向に伸びた軸（一軸）回りに太陽光を追尾する方式を採用するものとする。

##### (b) 太陽電池パネルの面積、電力、重量

面積 [m <sup>2</sup> ]	590
電力 [KW]	120
重量 [Kg]	5500

#### (3) 2次電池による発電

2次電池による発電は第一段階にて運んだものをそのまま使用するものとする。

#### (4) 燃料電池による発電

燃料電池による発電装置については、第一段階において装置そのものは 20KW クラスのものを運びこんでいるため第二段階においては不足分の燃料を運びこめば十分である。

#### (5) 総重量

第二段階のエネルギー供給システムの輸送総重量は以下の通りである。

太陽電池パネル	3600Kg	(第一段階のものを一部流用する)
燃料	3000Kg	
熱制御系他	1900Kg	
計	8500Kg	

## 2.2.2.3 熱制御システム（第2段階）

第2段階においては、常時人が滞在し、夜間にも拠点（与圧モジュール）内で実験が行われるようになる。放射線対策及び断熱のため、与圧モジュールは 3m 程度のレゴリスで覆われるものとする。この段階でのシステムの詳細が不明なので、内部熱入力の具体的な評価は出来ないが、昼夜を問わず電力の使用が大幅に増えると予想され、それに伴い排熱要求も増加すると考えられる。また、夜間の電力消費を出来るだけ少なくするため、保温のための電力使用を可能な限り少なくすることが要求される。基本的には第1段階のものを増設し、能力増加に対処することになる。モジュールがレゴリスで覆われるため、ラジエータは月面に設置される形となるが、特性等は第1段階のものと大差ないと考えられる。運用モードに応じてラジエータ面積を変えること、月面からの赤外放射を防ぐため月面上に熱シールドを設置することも第1段階と同様である。この段階では、夜間の使用電力が大幅に増えるため電力使用を出来るだけ抑制することが要求される。したがって、夜間における保温のための電力使用を可能な限り減らすため、昼間に太陽熱を蓄熱し、この熱を夜間に使用する蓄熱制御系を採用する。

#### 2.2.2.4 通信システム

前節 2.1 に於いて、第1段階、即ち、月面活動として昼のみ行う場合での通信システムのネットワーク構成並びに通信技術に関わる課題等について記述した。人類が、夜間を含め、長期間、月面にて活動する場合に於いても、通信インフラの立場で見れば、特別な相違点は生じないと考えられる。従って、(a)月面の表面のシステムを個別に地球と直接通信、(b)裏側のシステムを周回通信衛星を用いる通信、の何れに於いても、必要となる要素技術は、前節で述べた課題と同一である。従って、それぞれの部分を参照することとし、ここでは割愛する。

#### 2.2.2.2.5 資源加工パイロットプラント

フェーズⅡ第2段階では、第1段階で実証した基本技術をベースにパイロット規模のプラントを建設し、フェーズⅢ段階に建設を計画している中規模プラントの設計データ取得を主目的として試験を実施する。

検討の前提条件として、酸素製造プロセス（イルメナイトの水素還元、レゴリスのフッ素化）については、フェーズⅡ第2段階における月面での有人活動を維持するために必要な酸素量（クルーの消費分と基地からの漏洩分に十分なマージンをみて 200kg/2週間と仮定した）を全てパイロットプラントで製造することとした。太陽風由来ガス回収プロセスについては、酸素製造プロセスの原料であるレゴリスの加熱過程で放出されるガスを全て処理することを前提として検討を実施した。また、ブロック体製造プロセスについては、コンクリートブロック相当の大きさのブロックを製造することを前提条件とした。

これらの、条件に基づき第2段階のプラントイメージを具体化するために、各プロセスに関してプラントサイジングの概略検討を実施した。その結果を以下に示す。

- (1) 太陽風由来ガス回収プロセス
  - プラント重量： 約 700kg
  - 必要電力： 約 15kw
- (2) イルメナイトの水素還元プロセス
  - プラント重量： 約 1,800kg
  - 必要電力： 約 20kw
- (3) レゴリスのフッ素化プロセス
  - プラント重量： 約 2,500kg
  - 必要電力： 約 20kw
- (4) ブロック体製造プロセス
  - プラント重量： 約 1,000kg
  - 必要電力： 約 10kw

#### 2.2.2.2.6 ロボット(フェーズII 第二段階)

第二段階では、基本的には、第一段階で月面に降ろした3種類のロボットをそのまま運用・稼働させる。

居住モジュール、エネルギー供給システムなど、すべてのシステムが大型化するが、多くは、第一段階における既存モジュールの追加拡張、増設といった手法で対応が可能であり、ロボットも第一段階のものが利用できる。

モジュール化技術を適用して、特定の作業目的のためのエンドイフェクタやツールを追加投入したり、ロボットアームを増設したりといったことも想定される。

また、地上でのロボット技術の進展に従って、第一段階のロボットシステムを、

- (1) 大型/高効率化
- (2) 高度自律化
- (3) 人間との協調

という方向で"自然に"発展させて行くことも考えられる。

#### 2.2.2.2.7 輸送システム

前節 2.1 に於いて、第1段階、即ち、月面活動として昼のみ行う場合での輸送システムの構成並びに技術に関わる課題等について記述した。第2段階、夜間を含め、長期間、月面にて活動する場合に於いても、輸送システムは第1段階と同様である。従って、必要となる要素技術は、前節で述べた課題と同一である。

#### 2.2.2.2.8 ライフ・サイエンス実験システム

フェーズⅡ・第1段階では実験用にダブルラックが2個用意され「微生物及び細胞実験装置」、「哺乳動物対象実験装置」、「植物栽培実験装置（あるいは水棲動物飼育実験装置）」を搭載する他、PDBやDIUそしてストウェーjspスペースが確保された。クルー対象実験は居住区の空いたスペースが使用された。

フェーズⅡ・第2段階に入っていけば、実験専用機の設置や大量栽培・大量飼育実験へ発展していくことが期待される。

### 3. 技術開発計画（フェーズⅠ）

#### 3.1 無人ミッション

##### 3.1.1 月面周回観測／着陸衛星

我が国が地球観測衛星や飛天／羽衣、LUNAR-A等の月探査機で培ってきた技術に基づき月周回衛星開発を行うが、月周回観測及び着陸点観測を実施するためには、H-IIロケットによる月周回軌道への投入、月面軟着陸、3軸衛星システムと追跡管制等新たな技術開発が求められる。この技術開発にあたっては、宇宙開発政策大綱が示すように、月周回衛星に引き続き、月面移動探査、サンプルリターン、月面天文台パイロットミッション等の月探査が継続的、系統的に展開されると想定されるため、単に月周回観測及び着陸点観測のための技術開発を行うのではなく、本計画以降の月探査活動の技術基盤の形成を目指すものとする。

具体的には以下のように技術開発を進める。

##### (1) H-IIロケットによる月周回軌道への投入能力の確認

我が国では、羽衣、LUNAR-Aが月周回軌道等に投入されたが、H-IIロケットで打上げられる衛星の月周回軌道への投入は初めてである。H-IIロケット打上げによる月周回軌道投入能力、精度、運用制約等を確認し、今後の月探査ための基礎データとする。

##### (2) 月面軟着陸

月周回衛星計画では月面上にミッション機器を配置する。また、月周回衛星以降の月探査活動では、移動探査機、パイロット的月面天文台等を月面上に輸送、設置するために月面軟着陸技術は必須であるが、我が国においては、月面軟着陸はこれまで行われていない。従って、月面軟着陸技術の確立を月周回衛星計画の重要な目標とする。

月面軟着陸を実現するためには、自立的障害物検知・回避を含む誘導制御、推力制御エンジン等の課題がある。このため、H-IIロケット相乗り機会を利用した月面軟着陸実験を月周回衛星開発の一ステップとして行うこととする。

##### (3) 3軸衛星システムと追跡管制

本計画では、多種、多様な月周回観測ミッションを約1年にわたって行う。また、ミッション達成のため、高精度な月面指向と軌道高度の制御が求められる。このため、地球観測衛星とLUNAR-Aで修得した技術を基盤として月面指向三軸衛星システムの開発と、月を周回する衛星の高精度な軌道決定と制御を行うための追跡管制技術の確立を行う。

本計画で修得される衛星技術は月周回衛星以降の月探査システム開発の基盤技術となる。

また、追跡管制システムは月探査のインフラストラクチャとなる。

#### (4) その他

(1) から(3) において述べた以外に過酷な月面上環境でミッションを行うための熱制御技術、大量かつ多岐にわたる観測データの処理システム等の技術開発テーマがあるが、これらについても、技術開発と高度化を段階的に進める。

### 3.1.2 月面移動探査

#### 3.1.2.1 ローバ

月面移動探査においては、月面着陸機の周辺を探査するマイクロローバから、数100 kmを移動しながら探査を行う長距離移動月面ローバ、さらにはクレータ内部の探査を行う、地形環境に特化した高い地形走破性を有する月面ローバ等が考えられる。月面環境に適合した月面ローバを開発するに当たっては、米国のアポロミッションにおいて2名搭乗可能な有人月面ローバ(アポロバギー)と、ロシアがソ連時代に2度実施した無人月面ローバ(ルノホート)の情報が利用できるが、十分なものとはいえない。このため、以下のように技術開発を進める。

##### (1) 走行系

探査ミッションにより異なる形状、性能が要求されるが、月面環境(1/6 g重力、真空、地形)に適した車輛の設計技術及び軽量化、エネルギー利用の効率化、長寿命化技術の確立を行う必要がある。

##### (2) 操縦系

操縦系の技術課題は、通信遅れのある系での安全な遠隔操縦手法の確立であり、遠隔操縦における遅れの補償及び自律による障害物発見、回避技術の開発が必要である。さらには、操縦用センサ及び搭載コンピュータ等の月環境適合化技術の開発が不可欠となる。

##### (3) 通信系

月面ローバの通信系は、月面ローバの遠隔操縦用データ及び操縦指令信号の送受信及びミッション実行に係わるデータ及び指示の送受信に使用される。通信系は、月面ローバ固有の技術として開発する要素は少なく、月面ミッション全体の中で開発していくのが妥当である。

##### (4) 熱制御系

月の昼夜周期が15日と長いため、昼の高温と夜の低温環境は非常に厳しい。このような環境下では、月面ローバの搭載電子機器を温度環境から保護するシステムが不可欠となる。このため月面ローバの重量、寸法、エネルギー供給能力を考慮して、昼間の放熱機構及び夜間の保温機構の確立を図らねばならない。

(5)電源系

電源系については、太陽電池と電池の併用が考えられる。太陽電池については、技術開発要素は少なく、電池に関しては、低温度性と容量、エネルギー密度、寿命等に基づき最適なものが必要となり、現在以上の性能を有する電池の開発が期待される。

(6)インターフェース

月面ローバは、月面着陸機及び搭載ミッション機器とにインターフェースを有する。これらは、各ミッションごとに開発されることになるが、技術課題としてインターフェース固有で開発すべき項目はないと考えられる。

(7)探査系

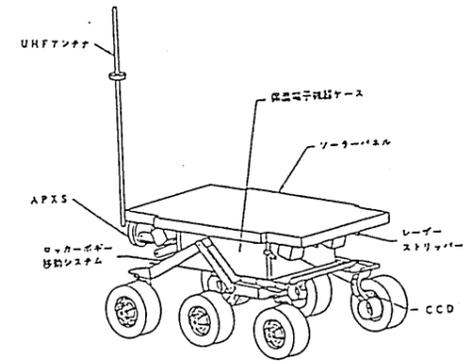
探査に使用される探査用機器類は、「月の科学及び利用可能性の調査のための月探査」ワーキンググループにおいて検討されているが、月面ローバの限られたペイロード能力、電力供給能力から、小型、軽量、省電力の探査機器の開発が不可欠となる。

表 5.3.1 に月面移動探査（フェーズ I）における月面ローバ技術開発計画を示す。

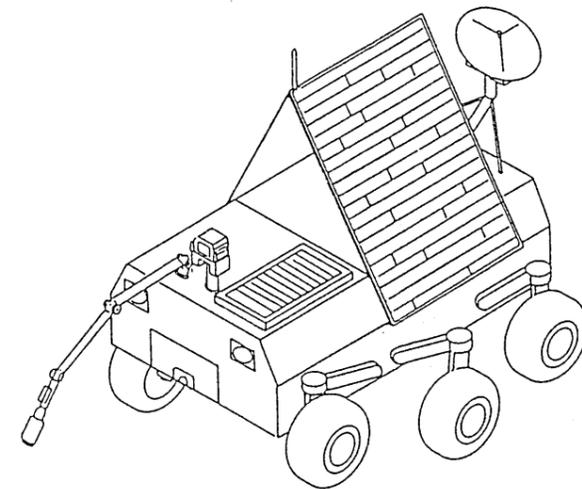
表 5.3.1 フェーズ I における月面ローバ技術開発計画

クリティカルな要素技術	2000 2005 2010 2015 2020					開発内容
	2000	2005	2010	2015	2020	
走行車輛		▲				1/6g重力下においてレジリス地形を走破する走行車輛の開発。 クレータ内部探査型高走破性能移動機構の開発。
操縦技術		▲				通信ディレイのある、遠隔操縦技術の確立。特に安全を確保する補償技術が不可欠。 オンボード障害物認識、障害物回避技術の確立。
熱制御技術		▲				昼の高温時の放熱及び夜間の低温時の保温による搭載電子機器等の保護技術の確立。
探査技術		#1 ▲		#2 ▲		小型、軽量、省電力、各種探査機器の開発。特に、穴掘り機構の開発は重要。

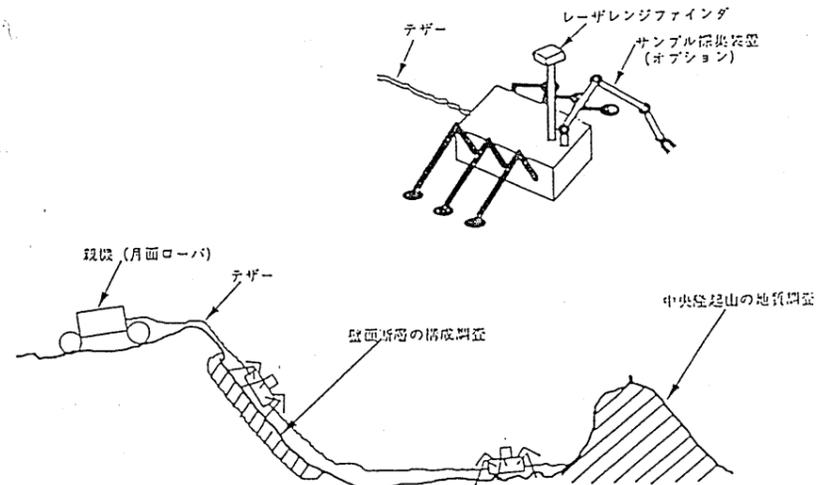
図 5.3.1



(a) 月面着陸機周辺活動用月面ローバ概念図



(b) 広域移動月面ローバ概念図



(c) クレータ内部探査用月面ローバ概念図

### 3.1.2.2 作業ロボット

フェーズ I の無人ミッションとして、2004年頃を目標に作業ロボットによる月面移動探査を行う。スケールモデルにより、月面移動作業機の要素技術である走行、操縦、熱制御、シール・潤滑などの技術確認を行う。

#### (1) ミッション

フェーズ I ミッションとしては、

- ・月面開発利用ミッションを想定した資源探査
- ・環境観測
- ・地形観測
- ・地盤調査
- ・月資源利用実験等
- ・広域/多点調査

等が挙げられる。

#### (2) 作業分析

フェーズ I では月面ローバ単体のミッションとみなせることから、作業としては、

##### ア) 移動作業

- ・地上からのテレオペレーションによる移動
- ・自律的/半自律的な位置同定、地形判断、経路計画、障害物回避

##### イ) 科学・工学ミッションの実施

- ・搭載ミッション機器による実験の実施
- ・地表面にセンサを接触あるいは近接させた実験の実施（マニピュレータアーム）

##### ウ) 充電作業

- ・太陽電池パネルを用いたエネルギーの蓄積
- ・夜間保温電力の確保

##### エ) 夜間保温

が考えられる。

#### (3) 作業ロボットの検討

上記の作業分析に基づき、作業ロボットの仕様を以下のように設定した。

- ・質量： 約 500 kg
- ・ミッション期間： 2 年
- ・走行距離： 1,000 km 程度
- ・操縦形式： 主-地上のオペレータによる遠隔操縦  
従-部分的にローバ自身の自律制御
- ・巡行速度： 1 km/h
- ・最高速度： 4 km/h
- ・最大登坂角度： 30 度（動安定）
- ・最大安定傾斜角： 35 度（静安定）
- ・最大乗越え段差： 30 cm

概念図は前節 図 5.3.1(a) に示されている。

#### (4) 開発課題

主な開発課題を以下に示す。これらの技術はフェーズ II ではさらに高度化して用いられるものであり、フェーズ I では基盤技術として開発がなされるべきものである。

- ・月面移動技術
  - ・移動機構（車輪、キャタピラ、クローラ、脚、それらの組み合わせ等）
  - ・移動機構へのレゴリス侵入防止対策
- ・月面航法誘導技術
  - ・自律的/半自律的な位置同定、地形判断、障害物回避、経路計画
  - ・カメラ画像、レンジファインダによる形状認識技術およびその自律化技術
  - ・センサフュージョン技術およびその自律化技術
  - ・地上からの位置決定技術
- ・センサ技術
  - ・航法用センサ（カメラ、レンジファインダ、障害物センサ）技術
  - ・センサデータ処理技術（データ処理、データ圧縮など）
  - ・光学センサへのレゴリス付着防止・除去技術
- ・熱制御技術
  - ・昼夜の外部熱環境の激変に対応可能な熱制御技術

- ・エネルギー技術
  - ・夜間のエネルギー供給技術
  
- ・小型化, 小消費電力化, 軽量化技術
  - ・マニピュレータアームの軽量化, 小消費電力化
  - ・電子機器の統合化, 軽量化, 小消費電力化
  - ・軽量, 高強度, 高剛性, 低熱伝導率構造材料の開発
  - ・ハードウェアのソフトウェア化
  
- ・テレオペレーション技術
  - ・通信時間遅れ(10秒程度)に対応した地上遠隔操作系技術
  
- ・マンマシンインタフェース技術
  - ・高操縦性の地上システム構築(プロトタイピングなど)

### 3.1.3 サンプルリターン

#### (1) 概要

月は、人類が初めてその地質を研究した星であり、その中で得られた研究結果は、我々が、太陽系の起源と進化の過程に関する知識を得るのに大いに役立っている。その地質/素材が、今後、どのような可能性を持ち、また、何かの問題を生ずる可能性を含んでいるか、早期に把握し、理解することは、月面インフラの整備にあたり重要な事である。過去の月面土壌の調査は、ロシアにおけるLuna 9が1966年2月の「嵐の海」への着陸に始まり、Luna 16、20、24におけるサンプルリターン、米国における1966年から1968年までの宇宙船サーベイヤーにおける月面調査、続くアポロ11号から17号までの有人活動によっても貴重なサンプルの取得が行われた。これら第一期の月面調査は1960年代から70年代にかけ、盛んに行われた。

このような貴重な調査結果をベースとして、今後計画される、月面インフラの整備のため、必要なサンプルリターン技術に関する調査検討の概要をまとめた。

報告は、サンプルリターンに関して、①サンプリングを必要とする要因/要求の分析、②サンプリング機構の検討、③サンプルリターン機の検討、④サンプルリターンを実現するための課題とその対策、⑤開発計画の検討について実施した。

#### (2) サンプリングを必要とする要因/要求の分析

サンプリングを必要とする要因/要求の分析をまとめた。

##### A サンプリング箇所による分類

- ① 定点サンプリング
- ② 多点サンプリング

##### B 科学的意義、月面基地を可能とするためのサンプリング

- ① 月面基地建設に必要な資源
- ② 月面サンプリングの学術的、インフラ整備上の要求

##### C サンプル量/質の検討

#### (3) サンプリング機構

サンプリング機構として採用の可能性のあるものについて、分類とその特徴をまとめた。

##### A サンプリング機構の分類と特徴

- ① 表層サンプリング
- ② 深層サンプリング
- ③ 移動サンプリング

##### B カプセル収納方式

#### (4) サンプルリターン実現のための課題

日本における打ち上げロケットの選択をはじめ、現在の技術の延長で、月サンプルリターンを成立させるための課題を整理した。このミッションを達成しようとしたとき、サンプルリターン機の重量上限を決定するロケットの打ち上げ能力の制約、より軽量なシステムで達成させるための宇宙機構成、着陸地点の不整地対応、月/地球の位置関係から生ずる最適打ち上げ時期とウィンドウ、軌道（位相）の調整、リソース制限と月面活動期間の制約、サンプルの移送方式、サンプリングのための自律化機能の範囲等の重要な課題が存在し、その課題の内容と施策について論じた。

- ・重量に対する課題
- ・不整地着陸/ランディングギア
- ・サンプルリターンの宇宙機方式と課題
- ・投入時期とウィンドウ、軌道の位相調整について
- ・月面活動期間
- ・サンプルのサンプル容器への封入方式/コンタミネーション対策
- ・自律化運用

#### (5) 開発計画案

上記開発課題を一つ一つ解決し、月のサンプルリターンを達成する為の開発計画案について考えた。この場合、技術的ハードルを越えるため以下に示すいくつかの開発フェーズを考慮した。そこで開発の各過程を着実に通過する必要がある事を明確にした。この各フェーズを遂行すると共に、本サンプルリターンを達成する前に、月周回観測ミッションや月着陸（観測）ミッションを段階的に完遂し、必要な技術の蓄積をすることが当然有るべき姿である。さらに、これら先駆のミッションが達成した月に関するインフラの遺産が有効に本サンプルリターンに適用できるよう、調整を取りつつ計画を進行させることが重要と判断した。

- フェーズ-0（地上要素研究）
- フェーズ-1（地球周回実験）
- フェーズ-2（試験機）
- フェーズ-3（実サンプリングフェーズ）

これら課題を一步ずつ、確実に消化して行くことによって、月面インフラ整備にあたって、必ず必要となる月サンプルリターンの技術的成果が得られるものと期待している。月サンプルリターンミッションの推進は、月面インフラの整備に不可欠であると共に、即刻結びつかない内容かもしれないが、月、地球、太陽の科学的解明に大いに役立つ情報が得られるものと判断する。

#### 3.1.5 月面天文台パイロットプラント

月面からの天文観測に、共通する技術課題として次の点があげられる。

第1は夜間観測に必要なエネルギーの供給の問題である。再生型燃料電池が重量的に有利であり、アイソトープによる発電は実現性に問題がある。また、マイクロ波送電による供給方法もトレードオフには加えていない。

第2は設置の安定性である。目標を追尾するため望遠鏡を振ることで月面を蹴るモーメントが発生するために、出来るだけ安定した方法で装置の足を月面に固定することが望まれる。ランダーに搭載した望遠鏡のシステムでは着陸時の姿勢に対する許容値が問題である。設置姿勢制御（少なくともその初期設定）の機能を望遠鏡が持つか、あるいはランダーの受け持ちか、どのような機構が適切か、今後の検討課題として残されている。

第3は熱制御である。月面天文台の実現可能性の検討に際しては、「夜間の保温」が最重要な問題の一つであると言われてきた。軌道上の赤外線天文衛星などで既に採用されている断熱技術を用いることによって、夜間の保温の問題はほぼ解決できる見通しであるが、技術的課題が少なくない。

第4は雑音の問題である。本質的には、月面のごく希薄ではあるがゼロではない「大気」による電磁波の吸収、放射、散乱をどう評価するか、および極地付近（緯度-85度程度）に望遠鏡を着陸させた場合の雑音環境、とりわけ月の表面温度とその局所的な分布や日照のフェーズによる変化をもたらす熱雑音がどの程度のものであるか、の2点が重要である。この問題は月表面の観測データの蓄積によって改善策を考える必要がある。

第5は前述の設置の安定性と似ているが、装置の振動防止機構の開発である。衛星における振動防止機構は月面の固定システムと相違があるので、小型コンパクトな振動防止機構の開発が必要である。

### 3.1.5 月からのモニタリング

小惑星や彗星が地球に衝突すれば、地球規模の大災害が生じる可能性が大きい。地球に接近する小惑星すべての軌道を決定することは、対策の第一歩となる。NASAのスペース・ガード計画では、CCD検出器を備えた2.4m専用望遠鏡を5～6台建設して、20年間の観測により直径1km以上の地球近傍小惑星を99%以上検出しようとしている。これ以下の大きさのものになると大気存在のため、地上からの検出は難しくなる。月面には大気がないため、月面に望遠鏡を設置すると地上の場合よりもはるかに良い精度で観測できる。月面望遠鏡の1号機は、フェーズIにおける無人ミッションとして実施される計画となっている。望遠鏡は、月着陸機に搭載され、月面に軟着陸後月着陸機に固定されたままの状態観測を行い、観測データを地球に送信する。

望遠鏡の概要；	口径	: 0.5m程度
	焦点形式	: 主焦点
	架台	: 赤道儀+極軸調整機構
	バッフル	: 鏡筒を長くすることとカバーで半分を隠すことを併用する案とする。カバーで半分を隠すと、光量は半分になるが、太陽の近く8°まで観測できる。
	重量	: 望遠鏡本体 350kg 望遠鏡電子機器 150kg
	消費電力	: 600W 300W(夜間カメラだけを動かす場合)
	データレート	: 5Mbps

月着陸機としてペイロード重量500kg、着陸時重量1000kg規模のものを想定すると、搭載できるバッテリーの重量は100kg程度になり、カメラの使用のみに限定しても低緯度地方での夜間の観測は困難になる。極地方に着陸させれば、ほぼ常時太陽電池から電力が得られ、熱制御上からも好ましく、上記規模の月着陸機を用いて常時観測が可能になる。従って、最初の小惑星観測用月面望遠鏡は極地方に設置し、夜間の観測のために大容量の蓄電装置を必要とする低緯度地方への設置は、より大型の月着陸機が利用や月面での有人作業が可能になる段階で増設していくのが現実的と考えられる。

## 3.2 有人拠点

### 3.2.1 有人拠点システム

月面有人拠点のシステム構築、及び運用のためには、予め月環境の把握とその影響評価を実施しておくことが重要であり、そのうえでシステムインテグレーション技術、基地建設技術、ソフト技術(施工計画、シミュレーション、管理手法等)の開発が必要となる。これらの技術の開発にあたっては、月面上での予測不能なトラブルによってクルーの生命が危険に曝される可能性を考慮すると、システム構築前に月面において構築技術の評価を行うための実験が必要と考えられる。

#### (1)月環境の把握とその影響評価

過去のアポロ計画や無人探査によって月環境のデータは得られているが、有人システムの構築を前提とした分析はあまり行われていない。フェーズII(有人フェーズ)に先だって実施されるフェーズI(無人フェーズ)において各種データを取得し、温度環境や放射線環境を正確に把握するとともに、有人システムに対する影響を評価し、講じるべき対策を検討する必要がある。

また、1/6Gの重力環境は、システム構築にあたっての物資のハンドリング、クルーの作業性等に影響を与え、長期間滞在となるフェーズIIの第2段階においては人体への影響も考えられる。フェーズIでは、機器類のハンドリング性についての実験が考えられる。さらに、システム構築時にはレゴリス・ダストの付着が問題となろう。特にサブシステム同士の接続時や仮置きした物資の移動・運搬時にダストを付着させない技術、或いは付着したダストを除去する技術等が求められる。

#### (2)システムインテグレーション技術

有人拠点システムは多様なサブシステムから構成されることになるため、高度なシステムインテグレーション技術が求められる。国際宇宙ステーション計画によって、軌道上におけるインテグレーション技術はある程度蓄積可能と思われるが、月面環境でのインテグレーションは経験が無く、フェーズI段階で無人による実験が必要と考えられる。

#### (3)基地建設技術

システムインテグレーション技術同様、月面での基地建設技術は未経験の分野であり、有人拠点システムの建設に向けて構造面や施工面で様々な研究・開発が求められる。構造技術においては、建設作業の軽減を図るため、第1段階の固定型太陽電池パネルにインフレタブル構造を用いることも考慮されるが、使用する材料(膜材等)の強度や耐環境性能等を明らかにする必要がある。また、第2段階では月表面にモジュールを複数設置し結

合することになるが、地盤の状況によっては不等沈下等の問題も考えられ、結合部に何らかの柔軟性を持たせる、或いは事前に基礎構造を構築する等の策を講じることが有効であろう。インフレーション構造の実証実験はフェーズ I の段階で実施可能であるが、第 2 段階に向けた実験については、フェーズ II 第 1 段階で実施することも考えられる。

また、施工技術はシステムインテグレーション技術、及び作業を行うロボット技術との関連性が強いが、モジュールやプラント類、観測機器、電力関係機器の設置方法、各々のインターフェース接合技術、テレオペレーション技術等、解決しておくべき課題は多い。施工性には 1/6G 環境が大きく影響するため、開発された技術の確認作業をフェーズ I の段階から月面実験によって行うことが求められる。

#### (4) ソフト技術

システムの構築（建設作業）、運用が開始される前に、システムの構築計画、及び運用計画に沿ったシミュレーションを行い、作業効率や安全性等を確認しておく必要がある。システムの構築、運用ともに、使用可能な電力量や機器類の性能、作業可能時間帯等によって制約される部分が大きく、これらの制約条件を考慮したシミュレーションを行うことによって、システム構築、運用を最適なものとすることが求められる。また、システムが構築された後のマネジメント手法も重要である。基本的な部分は JE M の運用段階において用いられるマネジメントの手法を応用可能と思われるが、環境やミッションが異なるため、改めて月面有人拠点システム用のものを開発することが求められる。

これらのソフト技術は、その他の技術の実証実験時にも用いられることから、早期に開発されることが望ましい。

### 3.2.2 要素技術

#### 3.2.2.1 有人サポートシステム

第一段階、第二段階実現までに必要な技術開発要素を以下に示す。

##### (1) 居住モジュール

###### (a) 地上での基礎研究

- ・ 模擬レゴリスによる実験
- ・ 模擬レゴリスの作成と真空環境下でのマクロな物性試験／微粒子挙動の試験／解析／超音波の効果試験等を行う。
- ・ 施工計画の検討
- ・ 第 1 段階の有人月面拠点
- ・ 拠点の地形、地質条件による居住モジュールの長期安定性（支持力／不等沈下量）の検討
- ・ 拠点の全体レイアウトの検討
- ・ 居住モジュールの施工法（整地、圧密／設置／組立、接合（無人施工法））の検討
- ・ 居住性、安全性の検討
- ・ 熱／放射線対策の検討
- ・ 第 2 段階の有人月面拠点
- ・ 全体レイアウト／拡張概念（分散型／集中型配置）の検討
- ・ モジュールの設置方式（地上／半地下／地下方式）の検討
- ・ 施工計画の検討
- ・ レゴリスの覆り量の推定、盛土安定角の推定、最適掘削深さの計算、掘削／運搬／設置／埋め戻し／盛土

###### (b) 月面での基礎研究

- ・ レゴリスの地耐力、摩擦抵抗、流動性、安定角、振動の影響、圧縮特性等の計測を月面ローバで行う。
- ・ ボーリング／コアサンプリング
- ・ ペネトレータ（打ち込み抵抗の計測）
- ・ ハンマーによる圧縮特性、地耐力試験
- ・ ショベルに掘り下げ、抵抗試験
- ・ 盛土試験（掘削土壌および再圧縮土壌の安定角の試験）

## (2)環境制御系

- ・ J E Mの開発成果を踏まえ、さらに有人月面活動のためには、解決すべき課題がある。
- ・ 汚染制御
- ・ 有害ガス許容濃度の設定
- ・ 多種類微量有害ガスの処理技術の確立
- ・ 空気再生システム技術
- ・ 再生式炭酸ガス除去、炭酸ガス還元、酸素製造の一連の空気再生システム技術の開発
- ・ 水処理
- ・ システム技術（システム制御、システム構成の最適化、運用コストの低減等）の開発
- ・ 要素技術（尿／衛生水の100%回収、揮発性ガスの除去等）の開発

## (3)食料供給

- ・ 光源、栄養素、高効率生産システム、炭酸ガス、水等に関する技術

## (4)エアロック

- ・ 高精度環境制御、加圧減圧制御技術、環境モニタリング技術

## (5)汚染防止

- ・ 宇宙服付着汚染物質の洗浄技術、廃棄物処理技術、汚染モニタリング技術

## (6) E M U

- ・ 月面での身体活動に最適な与圧服の開発
- ・ 構成品の軽量化、温熱制御・快適性の向上、着脱が容易な構造

## 3.2.2.2 エネルギー供給システム

以下第一段階、第二段階実現までに必要な技術開発要素について述べる。

### (1)太陽電池パネル展開

長大な太陽電池パネルの展開機構の開発およびパネル展開場所の整地・圧密が必要となる。

### (2)太陽電池パネル展開作業

第一段階においては太陽電池パネルがお互いに影を落とさないよう、南北方向に120mに亘ってパネルを展開する必要があり、ロボットの使用を含めその作業方法および作業量の検討をあらかじめ実施する。

### (3)燃料電池コンポネント開発およびシステム成立性確認

水の電解装置、ガス液化装置等宇宙環境適合性の確認されていないコンポネントの開発およびシステム制御性等のシュミレーション解析および実機による確認試験が必要と考える。

### 3.2.2.3 熱制御システム

月面基地の熱制御システムの構成は前述の様に開発フェーズに関わらず、技術的な課題は第1フェーズまでに解決されていなければならない。単相の流体ループはJEMの与圧部の熱制御ループとして開発が進められている。また、宇宙機の熱制御に単相流体ループを用いた例は多く、単相流体ループ用の機器も飛翔実績のあるものが多い。これに比べ二相流体ループを宇宙機に用いた例は世界にも無く、世界各国で実用化に向けた研究開発が続けられている。日本では宇宙開発事業団において、二相流体ループの開発が進められている。二相流体ループを実用化するためには次の様な技術課題が挙げられている。

#### (1) 蒸発器並列制御試験

複数の蒸発器からなる二相流体ループシステムを構成し、圧力、流量、放熱量の制御試験を行い、二相流体ループシステムの制御技術を確認する。これに並行して蒸発器、放熱器、ポンプ、マキユレータ、弁、圧力センサ、流量計及び制御エレクトロニクス、制御ソフトウェア等の主要な二相流体ループの要素が開発される。二相流体ループはJEMの暴露部の実験機器の候補として挙げられており、本蒸発器並列制御試験が提案されている。

#### (2) 二相流体ループシステム実証試験

JEM 暴露部で開発されたシステム技術及び要素を、実際の宇宙機のバス技術として軌道上実証することが二相流体ループの実用化のために不可欠である。二相流体ループは排熱性能を最大化するため、アンモニア等を作動流体としているので無人の宇宙機、あるいは有人の宇宙機の居住区域外の熱制御ループとして用いられる。JEMの搭載実験機器は暴露部に搭載されるとはいえ作動流体として水が用いられるので、アンモニアループは本実証試験で開発されなければならない主要な課題の1つである。もう1つの主要な課題は二相流体ループの軌道上組立・交換技術である。これらは将来の無人宇宙基地を構築するための技術として開発しなければならないものである。本実証試験を行う宇宙機は無人宇宙プラットフォームを想定しており、その延長線上に無人宇宙基地がある。

(3) 単相/二相流体ループハイブリッドシステム月面基地に用いられる流体ループは、居住区域内に単相ループを区域外に二相流体ループを用いたハイブリッドシステムである。単相、二相共にこれまでの開発の中でそれぞれ単独に技術課題は解決されている。ハイブリッドシステム特有の技術課題としては単相/二相の熱交換器、蓄熱材及び熱制御システムの安全性が挙げられる。

表5.3.3に現在の流体ループの開発の現状を踏まえ、流体ループの開発計画を示す。

表5.3.3 流体ループの開発の現状と開発計画

技術課題	96	97	98	99	00	01	02	03	04	05	06	15	30
マイルストーン		△ シフト				△ JEM					△ 有人	△ 月面基地	
(1) 単相流体ループシステム											△ 無人	△ 無人宇宙基地	
(2) 二相流体ループシステム 蒸発管基礎試験 蒸発器並列制御試験											P △ 無人		
(3) 二相流体ループシステム 実証試験											P △ 無人		
(4) 二相流体ループ組立・交換 実験													
(5) 単相/二相流体ループ ハイブリッドシステム													

### 3.2.2.4 通信システム

前節にて記述した如く、フェーズ I I に於ける月面との通信は、地球との直接通信、或いは、周回衛星を介した月面裏側との間接通信を前提とした、大容量の高速通信を必要とする。この通信技術の発展は、衛星通信システムを含め目覚ましく、フェーズ I I の時代を迎えるまでもなく、それらの多くは実現、若しくは実現に近い形で達成されているものと予測され、基本的には従来からの発展技術、応用技術で対応可能と考えられる。しかしながら、今後、月探査に関する全体システムの構築が具体化する段階に於いて、通信システムに対する新たなニーズの登場、若しくは従来と異なる通信システムへの期待も皆無とは云えない。それ故、これらの技術は必要により、フェーズ I に於いて宇宙実験を行うことは有効である。

### 3.2.2.5 資源加工パイロットプラント

太陽風由来ガス回収、酸素（イルメナイトの水素還元法、フッ素化法）及びブロック体製造プロセス、及び各プロセスに共通する要素技術について、フェーズ I 段階で技術開発を行う必要があると考えられる項目（技術開発テーマ）を抽出した。

技術開発テーマの選定に当たっては、以下の観点から優先順位を設定した。

- プロセスを成立させる上で研究開発が必須であるもの
- 添加物質の再利用を実施する上で研究開発が必須であるもの
- 要素技術は存在するが、稼働する上での条件が確立していないもの
- プロセス設計の上でデータ取得が必要なもの

#### (1) 太陽風由来ガス回収プロセス

回収ガスから水素及び窒素を分離する技術については、既存技術の応用が可能であるが、ヘリウム-3分離回収は、中核となるヘリウム同位体分離技術が地上でもまだ確立されてはいないことからプロセス自体の成立性について研究が必要である。ガス分離技術についても地上と月面の環境条件が相当に異なるためにプロセス設計のためのデータ取得を必要とする。

ガス分離及びヘリウム同位体分離過程を構成する要素技術について上記の観点から、優先して技術開発を行うべき順に技術開発テーマを抽出した。

- 極低温蒸留法で使用する希釈冷凍機の開発
- 極低温蒸留プロセスの成立性の確認
- 酸化反応塔性能の確認
- 吸着性能の確認及び回収条件確立
- レゴリス加熱器設計データの取得

#### (2) 酸素製造プロセス

現在提案されている月面酸素製造プロセスでは、地上環境と月面環境の相違及び原料とするレゴリスの物性に一部不明な点があることなどから何らかの研究開発又は設計用のデータ取得などが必要となる。イルメナイトの水素還元プロセスにおいては過去に研究例が多数あり月面酸素製造プロセスの中では最も検討が進んでいると考えられるが、プロセスの設計にあたってデータ取得が必要な要素技術などが幾つか存在する。一方レゴリスのフッ素化プロセスでは添加物質再利用のために必要な要素技術などが確立していない。

(a) イルメナイトの水素還元プロセス

イルメナイトの水素還元プロセスを構成する要素技術について技術開発テーマを抽出した。

- イルメナイト選鉱技術の開発
- 水蒸気電気分解槽の開発
- 流動層設計データの取得
- 硫化水素ガス除去技術の開発

(b) レゴリスのフッ素化プロセス

レゴリスのフッ素化プロセスを構成する要素技術について技術開発テーマを抽出した。

- レゴリス残さからのフッ素回収技術の開発
- 四フッ化ケイ素分解槽の開発
- 流動層設計データの取得
- 四フッ化ケイ素吸着技術の確立
- フッ化ナトリウム電解技術の確立
- 高温下でフッ素に耐性のある材料の開発

(3) ブロック体製造プロセス

ブロック体製造プロセスについては地上でほぼプロセスが確立されていることから、月面環境下でプロセスを稼働するため及び実プラント製造物の正確な評価を行う目的で原位置での、実際のレゴリスを使用したブロック体製造実験を実施することが必要である。

(4) 共通要素技術

共通要素技術については、月面環境の影響を最も強く受ける上にレゴリスを直接ハンドリングする技術であるために、研究開発及び設計用データの取得が必須となる。研究開発テーマの選定にあたっては以下の観点から優先順位を設定することとする。

- 各種製造プロセスを構成する上で必須となるもの
- 各種製造プロセスを稼働する際に必須となるもの
- 各種製造プロセスを運用する上で必要となるもの

これらの観点から抽出した研究開発テーマを優先順に以下に示す。

- 高真空-与圧部間物質輸送技術の開発
- レゴリス採取ロボット（他のサブシステムで検討）
- 加熱用太陽炉開発
- 高効率太陽電池の開発（他のサブシステムで検討）

3.2.2.6 ロボット(フェーズI)

1) フェーズIの開発課題

月面ロボット開発には多くの開発課題があり、これをクリアするための実証試験は、地上で行えるもの、地球周回軌道で行うべきもの、月面での実証が不可欠なもの等にクラス分けできる。

主な開発課題ごとに、その難易度/重要度、実証試験を行うべき環境を識別した結果を表5.3.4に示す。

表 5.3.4 開発課題と難易度/重要度及び実証試験実施環境

開発課題	難易度/重要度	実証試験実施環境		
		地上	軌道上	月面
(1) 小型軽量化/省エネ化	*	○		
(2) 機械要素				
a. 潤滑		△	○	
b. シール	*	△		○
c. 軸受		○		
(3) 耐環境技術				
a. 熱	*	△		○
b. 放射線		△	○	
c. 振動		○		
d. 静電気		○		
(4) 制御系		△		○
(5) モジュール化		○		
(6) エンドイフェクタ		○		
(7) 移動機構/マニピュレーション機構		○		
(8) 電力供給技術	*	○		

記号: \* 重要度大または月面ロボット特有の課題

○ 十分な実証試験が可能

△ 部分的な試験が可能

## 2) 技術検証ミッション

上記の\*で示したクリティカルな開発課題を検証するため、月面上での技術検証ミッションが不可欠と考える。2013年ごろと想定される第6回目の打ち上げを利用するのが適当である。具体的なロボットミッション候補とその意義づけは、

- (1) 居住モジュールの設置      --大型建造物のハンドリング
- (2) 天文観測機器の組立て・設置 --精密組立て作業, 物資の中長距離搬送
- (3) 覆土作業                      --月面上で必須の特有な作業
- (4) 太陽電池パドルの組立て    --エネルギー供給の基礎となる重要作業

である。これらの技術検証ミッションは、「拠点建設支援ロボット(スケールモデル)」を開発して実施する。

## 3.2.2.7 輸送システム

### 1. 輸送システムの技術開発計画の概要

2.2.1.2.7 で想定された輸送システムに関して、有人月面拠点活動開始以前に実施すべき事項に関し、輸送システムを構成するサブシステム毎(月輸送機, 月離着陸機, 有人機, 月面上ローバ)にまとめる。

今回は、技術的内容を中心にまとめてある。既存の宇宙活動計画の中に取り込んで実施する必要があるものもあり、他のプロジェクトの計画への反映自体も大きな課題と考えられる。

### 2. 月輸送機技術開発

月輸送機に関しては、基本的には既存のロケット, 衛星の技術により実現可能と考えられるが、再使用であること、運用期間が長期にわたること、またこれらに伴い補給, 整備, 維持の作業が発生することが想定されることより、次の技術開発を先行して実施することは、有効と思われる。

・無重量下推進薬移送技術 :JEM 等を利用した推進薬移送機構の実験

・軌道上整備作業                      : JEM 等を利用した機能品の整備作業実験

・地球~月間宇宙環境モニターおよび機器動作モニター

: ミッション終了後のH-IIロケットの2段を月遷移軌道に投入する。宇宙線モニタ機器や電子部品等を2段に搭載しておくことにより、地球~月間で遭遇する宇宙環境とその環境下での電子部品の劣化等のデータを長期にわたり得て、月輸送システムの設計データを得る。

・ランデブウ・ドッキング : ETS-VIIやHTVによる該当技術の習得

・月輸送システム用のフライト品をHTVに搭載した飛行実験 (HTV本来の搭載品とは、別搭載)

・月近傍の軌道決定・変更 : 月周回衛星を利用した軌道決定, 軌道変更技術の開発ならびに実証試験

・極低温推進薬長期保持 : JEM ないしミッション終了後のH-IIロケット2段を利用した極低温推進薬の長時間保管に関するデータの取得

・月輸送機を構成する機能品相当のハードウェアによるシステムモデルを製作し、故障時のシステム機能再構成に関するソフト・ハードウェアの技術取得

### 3. 月離着陸機の技術開発計画

月離着陸機の技術課題としては、以下の新規技術に関する課題が考えられる。

(1)月面への離着陸技術

(2)再使用技術

これらの新規技術に関する具体的な技術および開発計画を以下に示す。

#### (1)月面への離着陸技術

以下の新規技術を組み合わせた着陸実験モデルを製作し、着陸模擬試験にて月離着陸システムの確認を行う。

##### ・自律誘導制御技術

要素技術として障害物検知システムを開発し、自律誘導制御ロジックと組み合わせシミュレーションにより性能を確認する。

##### ・スロットリングエンジン

推力100～30%程度のスロットリングエンジンを開発し、高空燃焼試験(HAT)、地上燃焼試験(BFT、CFT)により性能を確認する必要がある。

##### ・着陸脚

再使用可能な軽量化された着陸脚の開発が必要となる。

#### (2)再使用技術

##### ・無重量下推進薬移送技術

再使用のため無重量下での推進薬移送技術を開発し、軌道上で実証試験を実施する。

### 4. 有人機の技術開発計画

有人機における技術課題は、ECLS でいくつか挙げられるが構造、機構、通信、電力などでは難しい開発課題はないものと考えられる。有人機は短期ミッションであり、乗員数も3人と少ないことから、ECLSは、基本的には、スペースシャトル、宇宙ステーションでの開発成果を流用することにするが、スペースシャトル、宇宙ステーションと異なる点での開発を以下の様に行う必要がある。

①空気調和装置

②有害ガス処理装置

③各装置共通

### 5. 月面ローバの技術開発計画

フェーズII(有人活動)における月面ローバの技術課題については、フェーズI(無人活動)における無人月面ローバの開発において、大半は解決されていると考えられる。フェーズIIにおける月面ローバの技術課題として残るのは、与圧型月面ローバにおける以下に示す乗員の生活環境を依存する技術である。これらの技術は、有人機開発の一環として開発されるものを流用することが可能であるが、月面ローバに適用するための開発が必要になると考えられる。

#### (1)空気調和装置

与圧型有人月面ローバのキャビン内における、空調を適正化するための検証が必要となる。

#### (2)有毒ガス処理装置

搭乗員が出す生活有毒ガスを除去し、適正な空気コンディションを維持する小型、軽量の装置の開発が必要である。

#### (3)エアロック装置

搭乗員が月面ローバを出入りする場合の気密保持及びレゴリス等付着物の除去を行う小型、軽量のエアロック装置の開発が必要である。

### 3.2.2.8 ライフ・サイエンス実験システム

フェーズⅠでは、フェーズⅡの実験を目指した実験計画立案と、フェーズⅡの実験装置開発に取り組む必要がある。

又、フェーズⅡに先立つフェーズⅠでの月面無人実験（技術開発）としては以下のテーマが対象としてあげられる。

- ・月面放射線モニタリング
- ・生物試料の輸送シミュレーション
- ・月面ライフ・サイエンス実験の単一要素無人実験
- ・月面汚染検証

### 3.3 フェーズⅠにおける技術開発計画のまとめ

第3節においてはフェーズⅠにおいて行われるべき技術開発の必要項目を抽出し、その開発計画の検討を行った。技術開発が行われるべき時期はミッションの投入時期によって左右される。フェーズⅠにおいては、

**無人ミッションの技術**としては、月周回観測／着陸衛星、月面ローバ、作業ロボット、サンプルリターン、月面天文台パイロットプラント、月からのモニタリングの技術開発が検討された。

これらの技術開発はミッション投入時期が2000年初頭であるので、優先的に実施せねばならない事項である。

**有人拠点構築の技術**はフェーズⅠ期間中に継続して行われる性格のものである。ここでは開発課題をあげたが、大半はまず地上で基本的な実験が行われるものである。システム関係としては有人拠点システム技術の技術開発が必要である。有人拠点を構築するための要素技術は、有人サポートシステム、エネルギー供給システム、熱制御システム、通信システム、資源加工パイロットプラント、ロボット、輸送システム、ライフ・サイエンス実験システムが検討された。

以上の技術開発課題と技術開発の考え方を表5.3.5にまとめた。

表 5.3.5 フェーズ I における重要技術開発課題

【無人ミッション】

システム	重要技術開発課題	技術開発計画における考え方
(1) 月面周回観測/着陸衛星	<p>月面周回軌道投入能力の確認 : H II-A ロケットによる月面周回軌道投入能力、精度、運用制約等の確認。</p> <p>軟着陸技術の確立 : 自立的障害検知・回避を含む誘導制御、推力制御エンジン等</p> <p>3 軸衛星システムと追跡管制 : 月面指向 3 軸衛星システム開発、高精度な追跡管制技術の確立</p> <p>その他 : 熱制御技術、観測データの処理システムの高度化</p>	<p>・月面周回衛星、月移動探査、サンプルリターン、月面天文台パイロットミッション等の月探査が継続的、系統的に展開されると想定されるため、単に月面周回観測及び着陸点観測のための技術開発ではなく、本計画以降の月探査活動の技術基盤の形成を目指す。</p>
(2) 月面移動探査 ① ローバ	<p>走行系 : 月面環境に適した車両設計技術、軽量化、エネルギー利用の効率化、長寿命化技術の確立</p> <p>操縦系 : 遠隔操縦における遅れ補償、自律による障害物発見、回避技術の開発。操縦用センサ及び搭載コンピュータ等の月環境適合化技術</p> <p>熱制御系 : 昼間の放熱機構、夜間の保温機構の確立</p> <p>電源系 : 高エネルギー密度化</p> <p>探査系 : 小型、軽量、省電力化</p>	<p>・月面着陸機の周辺を探査するマイクロローバから、数 10 km を移動しながら探査する長距離移動月面ローバ、さらにはクレータ内部の探査を行う、地形環境に特化した高い地形走破性を有する月面ローバを想定して技術開発を行う。</p>
② 作業ロボット	<p>月面移動技術 : 移動機構(車輪、キャタピラ、クローラ、脚、それらの組み合わせ等) 移動機構へのレゴリス侵入防止対策</p> <p>月面航法誘導技術 : 自律的/半自律的な位置同定、地形判断、障害物回避、経路計画 カメラ画像、レンジファインダによる形状認識技術及びその自律化技術 センサフュージョン技術及びその自律化技術 地上からの位置決定技術</p>	<p>・フェーズ I の無人ミッションとして、2007 年頃を目標にローバによる月面移動探査を行う。作業ロボットのスケールモデルにより、月面移動作業機の要素技術である走行操縦、熱制御、シール、潤滑などの技術確認を行う。</p> <p>・これらの技術はフェーズ II ではさらに高度化して用いられるものであり、フェーズ I では基盤技術として開発がなされるべき。</p>

<p>作業ロボット(続き)</p>	<p>センサ技術 : 航法用センサ(カメラ、レンジファインダ、障害物センサ)技術 センサデータ処理技術(データ処理、データ圧縮等) 光学センサへのレゴリス付着防止・除去技術</p> <p>熱制御技術 : 昼間の外部熱環境の激変に対応可能な熱制御技術</p> <p>エネルギー技術 : 夜間のエネルギー供給技術</p> <p>小型化、小消費電力化、軽量化技術: マニピュレータアームの軽量化、小消費電力化 電子機器の統合化、軽量化、小消費電力化 軽量、高強度化、高剛性、低熱伝導率構造材料の開発</p> <p>テレオペレーション技術 : 通信時間遅れ(10秒程度)に応じた地上遠隔操作系技術</p> <p>マンマシンインタフェース技術: 高操縦性の地上システム構築(プロトタイプ等)</p>	
<p>(3) サンプルリターン</p>	<p>重量に対する課題 不整地着陸/ランディングギア サンプルリターンの宇宙機方式 投入時期とウインドウ、軌道の位相調整について 月面活動期間 サンプルのサンプル容器への封入方式/コンタミネーション対策 自律化運用</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・技術的ハードルを越えるため以下の開発フェーズを考慮。 フェーズ0 : 地上要素研究 フェーズ1 : 地球周回実験 フェーズ2 : 試験機 フェーズ3 : 実サンプリングフェーズ</li> <li>・先駆ミッションのインフラ資産の有効利用を考慮すべき。</li> </ul>
<p>(4) 月面天文パイロットプラント</p>	<p>夜間のエネルギー供給技術 設置安定性 熱制御技術 夜間の保温技術 雑音 振動制御技術</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・夜間のエネルギー供給は再生型燃料電池が有力で、アイソトープは実現性に問題あり、マイクロ波送電は今後要検討。</li> <li>・安定した方法で装置の足を月面に固定。設置姿勢制御機能を望遠鏡が持つランダーの受け持ちか。</li> <li>・高断熱構造による電気回路類の保温。保温すべき電気回路およびバッテリーの発熱に見合うだけの熱伝達パスを持つような構造。</li> </ul>
<p>(5) 月からのモニタリング</p>	<p>軽量再生型燃料電池の開発 小型衛星用機器の使用によるバス機器の大幅な小型、軽量化</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・夜間の電力消費を抑えるため、夜間の観測データはメモリーに記憶し、昼間に地上に伝送する。また、軽量化の進み具合によっては、夜間観測が制約を受けるので、軽量の再生型燃料電池の開発は重要な技術課題。</li> </ul>

【有人拠点】

システム	重要技術開発課題	技術開発計画における考え方
<p>(1) 有人拠点システム</p>	<p>月環境の把握とその影響評価 : 温度環境、放射線環境の正確な把握及び有人システムに対する評価 移動・運搬時のダスト付着防止技術、除去技術</p> <p>a. システムインテグレーション技術 (フェーズI 無人による実験)</p> <p>b. 基地建設技術 構造技術: 使用する材料(膜材等)の強度、耐環境性能等の明確化(第Iフェーズ) 不等沈下等の対策(結合部の柔軟性など)(第IIフェーズ) 施工技術: モジュール、プラント類、観測機器、電力関係機器の設置方法、インターフェース結合技術、テレオペレーション技術等。技術の実証実験が重要。</p> <p>c. ソフト技術 シミュレーション: システムの構築計画、運用計画に沿ったシミュレーションによる作業効率、安全性等の確認 マネジメント手法: 月面有人拠点システム用のマネジメント手法の開発 早期開発が必要。</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・月面有人拠点のシステム構築、及び運用のためには、予め月環境の把握とその影響評価が重要。</li> <li>・これらの技術開発にあたっては、月面上での予測不能なトラブルによってクルーの生命が危険に曝される可能性を考慮すると、システム構築前に月面において構築技術を行うための実験が必要。</li> </ul>
<p>(2) 要素技術 ① 有人サポートシステム a. 居住モジュール</p>	<p>&lt;地上での基礎研究&gt; 拠点の地形、地質条件による居住モジュールの長期安定性、施工法、安全性、拡張概念の検討</p> <p>&lt;月面での基礎研究&gt; ・レゴリスの地耐力、摩擦抵抗、流動性、安定角、振動の影響、圧縮特性等</p>	

<p>b. 環境制御系</p> <p>c. 食料供給</p> <p>d. エアロック</p> <p>e. 汚染防止</p> <p>f. EMU</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・汚染制御技術の確立（有害ガス許容濃度の設定、処理技術）</li> <li>・空気再生システム技術の確立</li> <li>・水処理技術の確立 （システム制御、最適化、運用コスト低減、尿／衛生水の100%回収、揮発性ガスの除去等）</li> <li>・光源、栄養素、高効率生産システム、炭酸ガス、水等に関する技術</li> <li>・高精度環境制御、加圧減圧制御技術、環境モニタリング技術</li> <li>・宇宙服付着汚染物質の洗浄技術、廃棄物処理技術、汚染モニタリング技術</li> <li>月面での身体活動に最適な与圧服の開発 構成品の軽量化、温熱制御・快適性の向上、着脱容易な構造</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・JEMでのデータを活用する。</li> </ul>
<p>②エネルギー供給システム</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・太陽電池パネル展開 長大なパネル展開機構の開発、パネル展開場所の整地・圧密</li> <li>・太陽電池パネル展開作業 ロボットの使用を含めた作業方法、作業量の検討</li> <li>・液化機付燃料電池の開発</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・インフレータブル構造適用可能性の検討</li> </ul>
<p>③熱制御システム</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・蒸発器並列制御試験 二相流体ループシステムの制御技術の確立及び蒸発器、放熱器、制御エレクトロニクス等の要素技術の開発</li> <li>・二相流体ループシステム実証試験 JEM 暴露部で開発されたシステム技術及び要素の軌道上実証及び、二相流体ループの軌道上組立・交換技術の開発</li> <li>・単層／二相流体ループハイブリッドシステム 単層／二相の熱交換器、蓄熱材及び熱制御系システムの安全性</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・月面基地の熱制御システムの構成は開発フェーズに関わらず、技術的な課題は第1フェーズまでに解決されていなければならない。二相流体ループを宇宙機に用いた例は世界にも無く、実用化に向けた研究開発が続けられている状況である。</li> <li>・実証実験を行う宇宙機は、無人プラットフォームを想定しており、その延長線上に無人宇宙基地がある。</li> </ul>

<p>④通信システム</p>	<p>現在開発中の技術を基本とするが、今後要検討</p>	
<p>⑤資源加工パイロットプラント</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・太陽風由来ガス回収プロセス（ヘリウム3の分離回収） （要素技術） 極低温蒸留法で使用する希釈冷凍機の開発 極低温蒸留プロセスの成立性の確認 酸化反応塔性能の確認 吸着性能の確認及び回収条件の確立 レゴリス加熱器設計データの取得</li> <li>・酸素製造プロセス a. イルメナイトの水還元プロセス （要素技術） イルメナイト選鉱技術の開発 水蒸気電気分解槽の開発 流動層設計データの取得 硫化水素ガス除去技術の開発</li> <li>b. レゴリスのフッ素化プロセス （要素技術） レゴリス残さからのフッ素回収技術の開発 四フッ化ケイ素分解槽の開発 流動層設計データの取得 四フッ化ケイ素吸着技術の確立 フッ化ナトリウム電解技術の確立 高温下でフッ素に耐性のある材料の開発</li> <li>・ブロック体製造プロセス 実際のレゴリスを使用したブロック体製造実験の実施</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・技術開発のテーマ選定に当たっては、以下の観点から優先順位を設定。 <ul style="list-style-type: none"> <li>・プロセスを成立させる上で研究開発が必須であるもの</li> <li>・添加物質の再利用を実施する上で研究開発が必須であるもの</li> <li>・要素技術は存在するが、稼動する上での条件が確立していないもの</li> <li>・プロセス設計の上でデータ取得が必要なもの</li> </ul> </li> </ul>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>共通要素技術           <ul style="list-style-type: none"> <li>高真空—与圧部間物質輸送技術の開発</li> <li>レゴリス採取ロボット（他のサブシステムで検討）</li> <li>加熱用太陽炉開発</li> <li>高効率太陽電池の開発（他のサブシステムで検討）</li> </ul> </li> </ul>																					
⑥ロボット	<ul style="list-style-type: none"> <li>小型軽量化／省エネ化</li> <li>機械要素（潤滑、シール、軸受）</li> <li>耐環境技術（熱、放射線、振動、静電気）</li> <li>制御系</li> <li>モジュール化</li> <li>エンドイフェクタ</li> <li>移動機構／マニピュレーション機構</li> <li>電力供給技術</li> </ul> <p>下線は重要度大または月面ロボット特有の問題で、月面上での技術検証ミッションが不可欠。拠点建設支援ロボット（スケールモデル）を開発し実施する。</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>月面ロボット開発には多くの開発課題があり、これをクリアするための実証実験は、地上で行えるもの、地球周回軌道上で行うべきもの、月面での実証が不可欠なもの等に分類できる。</li> </ul> <table border="1"> <thead> <tr> <th>難易度／重要度の高いもの</th> <th>地上</th> <th>軌道上</th> <th>月面</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>小型軽量化／省エネ化</td> <td>○</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>シール</td> <td>△</td> <td></td> <td>○</td> </tr> <tr> <td>熱</td> <td>△</td> <td></td> <td>○</td> </tr> <tr> <td>電力供給技術</td> <td>○</td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table> <ul style="list-style-type: none"> <li>月面での技術実証ミッションは、2013年頃想定される第6回打ち上げを利用。</li> </ul>	難易度／重要度の高いもの	地上	軌道上	月面	小型軽量化／省エネ化	○			シール	△		○	熱	△		○	電力供給技術	○		
難易度／重要度の高いもの	地上	軌道上	月面																			
小型軽量化／省エネ化	○																					
シール	△		○																			
熱	△		○																			
電力供給技術	○																					
⑦輸送システム																						
a.月輸送機技術開発	<ul style="list-style-type: none"> <li>無重量下推進薬移送技術</li> <li>軌道上整備作業</li> <li>地球～月間宇宙空間モニター及び機器動作モニター</li> <li>ランデヴ・ドッキング</li> <li>月近傍の軌道決定・変更</li> <li>極低温推進薬長期保持</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>JEMを利用した推進薬移送機構の実験により検証</li> <li>JEMを利用した機能品の整備作業実験により検証</li> </ul>																				
b.月離着陸機	<ul style="list-style-type: none"> <li>月面への離着陸技術           <ul style="list-style-type: none"> <li>自律誘導制御技術</li> <li>スロットリングエンジン</li> <li>着陸脚</li> </ul> </li> <li>再使用技術           <ul style="list-style-type: none"> <li>無重量下推進薬移送技術</li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>月輸送に関しては、基本的には既存のロケット、衛星の技術により実現可能と考えられるが、再使用であることと運用期間が長期に亘ること、またこれらに伴い補給、整備、維持の作業が発生することが想定される。</li> </ul>																				

c.有人機	<ol style="list-style-type: none"> <li>空気調和装置</li> <li>有害ガス処理装置</li> <li>各装置共通（各装置全てにおいて小型、軽量、省電力化が必要）</li> </ol>	<ul style="list-style-type: none"> <li>有人機における技術課題はECLSでいくつか挙げられるが、構造、機構、通信電力などでは難しい開発課題はないと考えられる。基本的には、スペースシャトル、宇宙ステーションでの開発成果を流用。</li> </ul>
d.月面ローバ	<ul style="list-style-type: none"> <li>空気調和装置</li> <li>有害ガス処理装置</li> <li>エアロック装置</li> </ul>	
⑧ライフサイエンス実験	<ul style="list-style-type: none"> <li>月面放射線モニタリング</li> <li>生物試料の輸送シミュレーション</li> <li>月面ライフ・サイエンス実験の単一要素無人実験</li> <li>月面汚染検証</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>フェーズⅠでは、フェーズⅡの実験を目指した実験計画立案と、フェーズⅡの実験装置開発に取り組む必要がある。</li> </ul>

## 第6章 月探査活動の展開に関するシナリオ

## 第6章 月探査活動の展開に関するシナリオ

フェーズI（2000～2015年）における月面ミッションは次の通りである。

### 1. 月面活動イメージ

フェーズIにおいては、月の理解を目的とした科学探査ミッションが先行し、月の起源と進化を理解するための基礎データ収集が図られ、更に月からの科学としての天文観測のパイロットミッションが実施される。この間に地球帰還技術が確立され、フェーズIの中期以降にはより詳細な月地質データを得るため、サンプルリターンミッション等が実施される。具体的には、次のような活動イメージとなる。

- ・月周回衛星や月面ローバ、サンプルリターンによる科学探査から月面の地形・地質データが得られるにしたがって、月の環境利用ミッションが開始される。まず、天文観測のパイロットミッションが実施される。その後、小惑星監視や宇宙環境監視装置が設置され、地球近傍を含めたグローバルな宇宙監視が行われる。これらのパイロットミッションにより、フェーズIIに実施される本格的な月面利用観測ミッションのための基礎データ収集が図られる。
- ・フェーズIIにおける有人活動に先行して、月面物質から建築材料の製造、酸素の抽出等が無人実験により実施され、データ収集が行われる。また、JEM等で行われている有人活動が一層強化され、場合によっては月環境が人間に与える影響等を評価するために ライフサイエンス基礎実験が行われる。
- ・月の科学探査による理解が進むに従って、地球への資源供給を目的としたヘリウム3抽出等々のパイロット実験が実施されるようになる。

### 2. ミッション候補

フェーズIの期間に月において実施すべきミッション候補を以下に検討した。  
検討の前提条件として、

- ① 2000年代初頭、月周回衛星が実現し、月軌道上から月の観測が実施される。
- ② 同時に月面着陸機による月面軟着陸技術が習得される。
- ③ 輸送システムはH-IIAとし、月面着陸可能重量1.5t、内ランダーは約700Kg、ミッションペイロードの搭載可能重量は800Kg程度である。

## #1 ペネトレータミッション

月の起源と進化を探るためには、月の内部構造を詳細に解明することが必要である。このためには、科学観測ネットワークを月面に設置することが必要となる。これにより、月中心核の大きさや密度、月深部マントルの地震波構造、月の表側と裏側の違いを含む地殻構造、重力異常、熱流値等、月の起源と進化について鍵となる貴重なデータが得られると考えられる。このようなネットワークを構築するには、既に LUNAR-A で開発済みのペネトレータを利用することがもっとも技術的実現性が高く、さらに我が国の独自性という点からも適当と考えられる。

本ミッションは、7 台のペネトレータとランダー1 台により実施するものとした。月の裏側にペネトレータ 4 台、表側に 3 台設置し、このうち 5 台には地震計と熱流量計、2 台には地震計と VLBI 電波源を搭載する。ランダーには広帯域地震計、VLBI 電波源を搭載するため、2003 年打ち上げ予定の月面着陸実験機で習得した技術をさらに高度化(定点着陸、電力供給、月面環境下での長期間の作動等)する必要がある。ペネトレータは低温による電力制限のため低緯度地域に設置し、ランダーは高緯度地帯に軟着陸させる。

参考までに LUNAR-A で使用されるペネトレータを図 6.1 に示す。

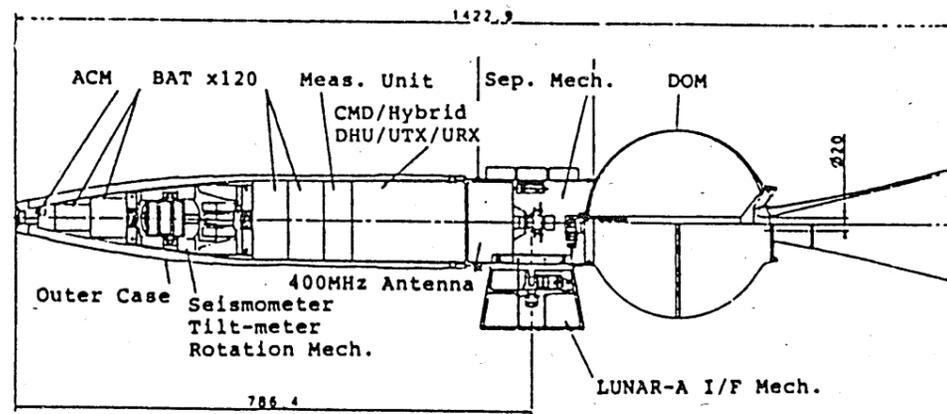


図 6.1 ペネトレータモジュール (LUNAR-A)

## #2 月面ローバミッション

月周回衛星による観測だけでなく、ローバを月におろし、より詳細な観測、探査を行うことは、科学面はもちろんのこと、将来の月資源利用に反映しうる基礎データを取得できる点からきわめて重要である。

さらに、ローバの探査により他の月着陸ミッションのための候補地等のより具体的なデータの取得が可能となる。

また、ローバを月面で運用すること自体が将来の月面車や有人活動支援ロボット等の開発につながる貴重な技術検証ミッションとなる。

ローバを月面各地に多数展開できればより短期間に広範囲の探査が可能となるが、数少ない打ち上げ機会からして 1~2 回が限度ではないかと考えられる。そのため走行能力や寿命は大きいことが望ましい。

実際の探査を行う前に技術検証用ローバを送り込むことが望まれるが、そのために貴重なフライト回数を減らすよりは、地上実験やシミュレーションを厳重に実施することにより対処すべきであろう。

ただし、他のミッションとの相乗りで小型、軽量のマイクロローバで技術検証実験を行う可能性はある。

図 6.2 はローバの一例であるが、全重量 500 Kg のうち観測機器等のミッション重量は約 60 Kg、走行距離は 100~1000 Km、平均走行速度 1 Km/h r、最大登坂角度 25°、発生電力 300 W、寿命 1 年を目標性能とし、分析等のミッションは原則として停止時に行うものとし、夜間は最小限の保温電力のみ使って冬眠状態とする。

このようなローバの技術課題は夜間の保温といかに安全に走らせるかというナビゲーションが重要である。

寿命や信頼性要求によりローバの開発の難易度は変化するが、上記のようなローバは 2005~2007 年頃までには実現できると考えられる。

上記ローバは平坦地を長距離走行するのにむいているが、急傾斜の崖やクレータを登ったり降りたりすることは困難である。傾斜面等を探査するにはそのような機能のみを有した小型ローバを使用することにより実現できる可能性がある。

崖を登りは降りることができる小型、単機能ローバを前述の親ローバに搭載し、親ローバが崖のふもとまで近づき、その後子ローバが親ローバの支援(電力、通信、監視、分析等)を得ながら崖をよじ登り、映像やサンプルを取得し、再び親ローバに戻るといった方式が採用できるかもしれない。

子ローバの重量は数 10 Kg 以内、移動距離も数 10~100 m 程度となろう。このような子ローバには歩行型のような新たな移動メカニズムが必要であり、重量だけでなく、親ローバとの組み合わせインタフェース上解決すべき技術課題が多いものの、開発は可能と考えられる。

ローバミッションは後述するサンプルリターンミッションと組み合わせることにより月探査の能力や精度を一層向上させうる可能性がある。

ローバに月面試料の採取、長期保管機能を持たせることにより、例えば1年間にわたりローバが移動する間、各地で興味ある試料を取得、保管しておき、後からフライトしてくれるサンプルリターン機に引き渡すことにより一回で、多くの場所のサンプルリターンミッションが可能となる。

このようなジョイントミッションを可能とするためには、ローバとサンプルリターン機の月面上におけるランデブー方式や試料の受け渡し機能等を明確にする必要がある。

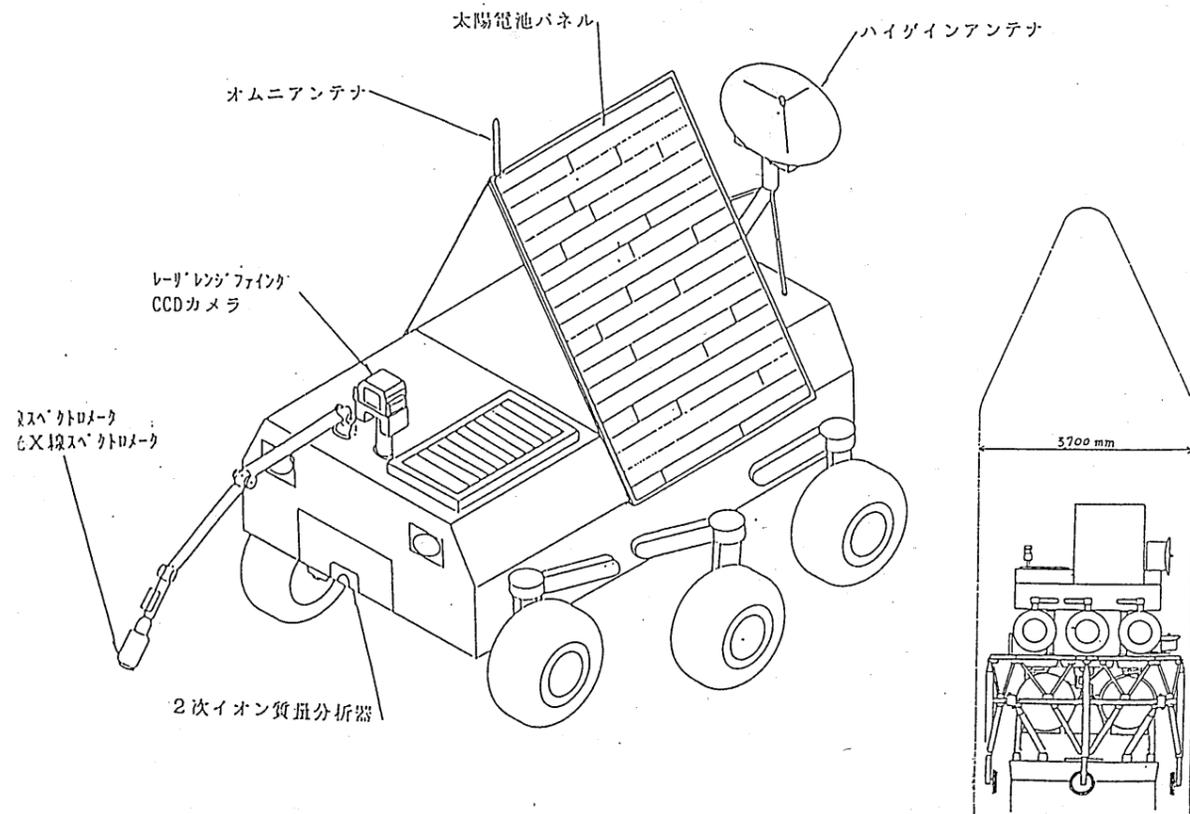


図6.2 月面ローバの構想(一例)

### #3 サンプルリターンミッション

サンプルリターンミッションを実施することによりリモートセンシングやローバでは困難な月面試料の詳細な分析、評価が可能となり、月探査上大きな意義がある。

サンプルリターンには新たに地球帰還技術が必要で、これは有人を含む将来の月面活動に不可欠な技術である。

サンプルリターン機は帰還用燃料まで月に到達させなければならず、重量的に厳しい状態である。従って、サンプルリターン機に月表面を移動できるような機能を持たせることは難しく、着陸地点のごく近い周辺から試料を採取することになる。多数の離れた地点から採取したい場合は、ローバミッションと組み合わせるか、サンプルリターン自体を多数回実施することになる。

月面到着時のサンプルリターン機の重量は帰還用推薬を含めて約1.5 t (着陸・帰還船700 Kg、サンプラー50 Kg)、このうちランダーの空になったタンク、一部電子機器、サンプリング機構、着陸脚等のランダ構体の一部は月に残し(500 Kg)、残りの約1 t (うち推薬700 Kg)が月面から離陸する。帰還船が地球軌道に到達すると試料2 Kgを納めたカプセル(50 Kg)が分離され、最終的にこのカプセルのみが再突入し回収される。

このようなサンプルリターン構想案の1つを図6.3に示す。

以上のようなサンプルリターンミッションは月面での試料採取、離陸、再突入カプセルの回収等の点で技術課題があるものの、ある程度の期間(8~10年程度)があれば十分開発可能と考えられる。

もし、エンジンをNTO(四酸化二窒素)/N<sub>2</sub>H<sub>4</sub>(ヒドラジン)からLOX/LH<sub>2</sub>に変更できれば、月面到着重量を約2 tまで向上させることができる。

月面からの帰還方式としても、ダイレクトリターンより月軌道上で地球帰還船が待機する方式の方がランデブー・ドッキングが必要になるものの、推薬上有利になる。

なお、サンプルリターンミッションは月試料を地球に持ち帰るということから、資料の受入、保管、分配、分析・試験等の地上側体制、施設の整備が必要になると考えられる。

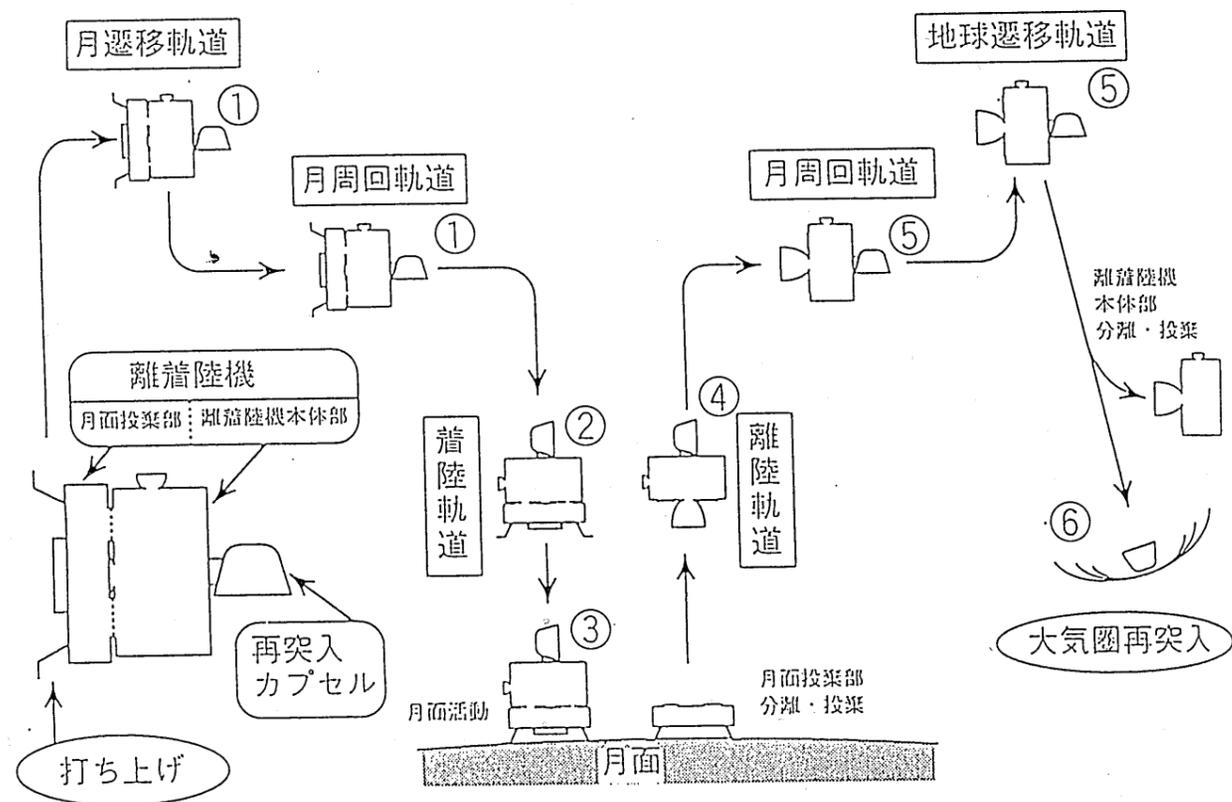
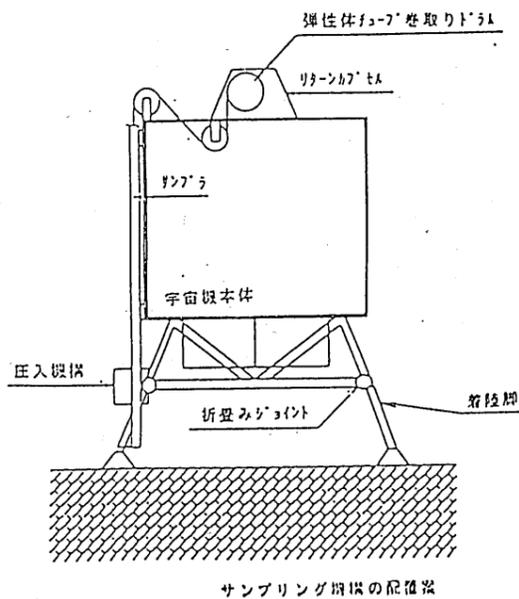


図6. 3 サンプルリターン構想 (一例)



#### #4 月面天文台パイロットミッション

月の低雑音、日陰状態における低音、大気がない、ゆっくりとした月周運動、地面が存在するといった月特有の環境を利用した天文観測は人類の宇宙理解に新たな可能性をひらくもので、例えば長基線干渉計等は月面のみで可能で、将来これらが実現すると現在の宇宙像が一掃される可能性さえある。

このような本格的な月天文台の設置に先立って、以下に述べるような小型、無人のパイロットミッションを打ち上げることは、それ自体科学的に意義があるだけでなく、将来の展開のための第一ステップとして、あるいは月面活動のための基礎技術開発として重要である。

##### (1) 宇宙背景放射観測装置

極地に近い高緯度地方(85°)に口径1.5m程度のミリ波受信用パラボラアンテナを設置し、宇宙の背景放射を高精度で測定することにより、宇宙がビッグバン(混沌)から銀河(秩序)へと進化した道筋を解明する。

観測装置は、アンテナ本体、放射シールド、受信機、データ処理・通信系からなり、ミリ波帯の3バンドを使用し、通信量は50~100Kbps、受信器検出部はスターリングクーラにより50K程度に冷却する必要がある。

アンテナは1軸制御で月の自転ごとに仰角を変えればよく(数ヵ月おき)、天体追尾は不要である。図6.4にこのミッションのイメージを示す。

重量的にはアンテナ100Kg、受信器50Kg、データ処理・通信系45Kg、シールド50Kgで、トータル250Kg程度となる見込みである。必要電力は100W以内(アンテナ5W、受信器45W、データ処理・通信系20W)である。

放射シールドは月に着陸後展開する方式を考える必要があるが、技術的には可能である。高精度のアンテナ追尾・駆動メカニズムは不要なので、この点も問題ない。ただし、着陸時のランダーの姿勢、方向をミッション側要求通りにできない場合が予想されるため、ランダー脚または観測装置自身に姿勢、方向可変メカニズムが必要となる。さらにランダーあるいは観測装置に機械的稼働部(常時)がある場合は、防振メカニズムを組み込む必要があるかもしれない。

最大の問題は夜間の電力供給である。14日間にわたる月の夜をバッテリー(NiH2)で対応すると、バッテリーシステムの重量だけで660Kgとなり、本観測装置をランダーに搭載することは難しい。これに対して、再生型燃料電池システムを搭載すると約320Kgとなり、ミッションはおよそ500Kgをわりあてることができ、重量的には本観測装置に加えてさらに250Kgのペイロードが搭載可能となる。もっとも、宇宙背景放射観測装置は寸法的にかなり大きいため、相乗りペイロードは小さな形状でないと難しそうである。

(2) 小型赤外線望遠鏡

40cm程度の小口径赤外線望遠鏡を月の高緯度地方に設置し、近傍銀河の近赤外線撮像観測を行って、地上に比べてはるかに暗い部分まで効率よく観測することにより銀河の研究に寄与する。

重量、必要電力、概略寸法、設置・追尾精度、通信容量等はTBD

#5 宇宙環境監視/地球衝突小惑星監視ミッション

太陽フレア等の太陽活動は、地球の高層大気や磁気圏に影響を及ぼし、通信の障害、途絶、遠距離送電線への地磁気誘導など地上の生活に悪影響を与えると同時に、宇宙空間においても衛星の寿命劣化や放電事故、放射線障害等の原因となり、さらに宇宙で活動する人体に対しても重大な悪影響を与えると予測される。このため太陽活動や地球近傍の宇宙環境を常時監視し、異常事態に警報を発する体制を整える。

月はその半面を常に地球に向けているため、地球及びその周辺を広い視野で、長期間連続して監視するにはきわめて適している。

また、口径0.5~1m程度の望遠鏡を月面に設置し、地球近傍小惑星を検出することにより、地球衝突小惑星の監視、回避が可能になると考えられる。ただし全ての小惑星を検出するには最終的に数十台の望遠鏡が必要となり、これは次のフェーズの、おそらくは国際共同ミッションになると考えられる。従って当面は、1台の望遠鏡で比較的大きな小惑星のみ監視しつつ、小惑星監視技術を確立する。

(1) 宇宙環境監視装置

放射線測定、地球磁気圏の紫外線撮像、太陽・惑星圏の電波監視(とくに低周波の観測)を実施する。将来的には大規模なアンテナシステム等を整備することとなるが、書記のミッションは将来から実績がある小型の観測機器をそのまま、または若干の改良を加えることにより比較的容易に実現可能(フライトモデル製作まで約5年間)と考えられる。具体的には以下のような観測機器を打ち上げることになるが、これらは監視という目的以外に科学的意義も大きい。とくに地球磁気圏の撮像観測は世界的にも初の試みとなる。

粒子測定装置

- 軽粒子 : シリコン半導体検出器を用いた互いに直角方向に視野を持つ2組の望遠鏡  
重量8Kg、消費電力10W
- 重粒子 : 2次元位置検出器とPIN型検出器を組み合わせた望遠鏡  
重量15Kg、消費電力20W

地球磁気圏観測装置

- 極端紫外線検出器を用いた口径、焦点距離ともに数10cmの反射望遠鏡  
重量10Kg、消費電力30W

これらの装置の概略を図6.5に示す。

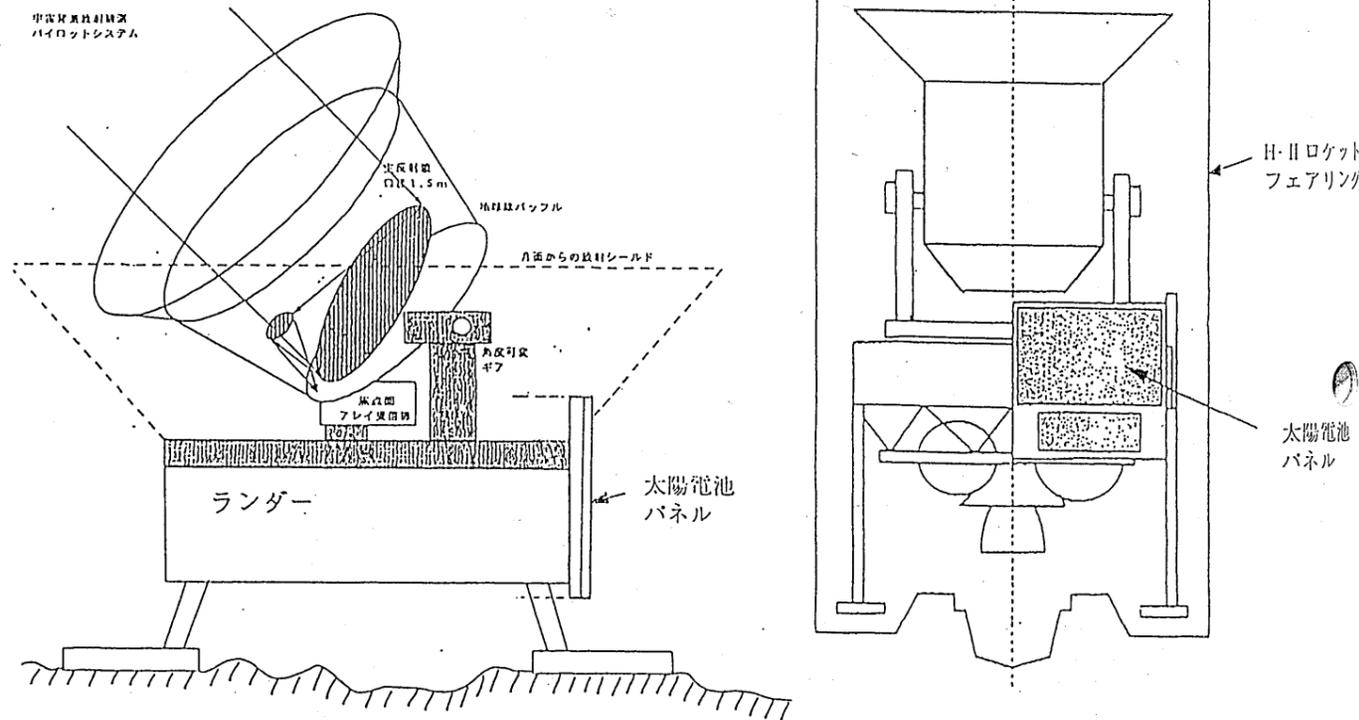
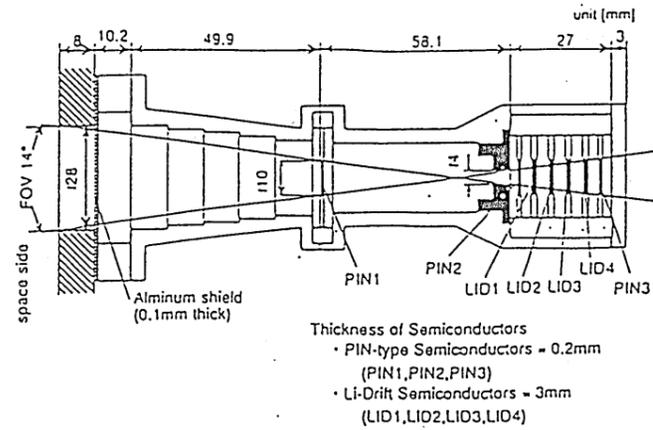
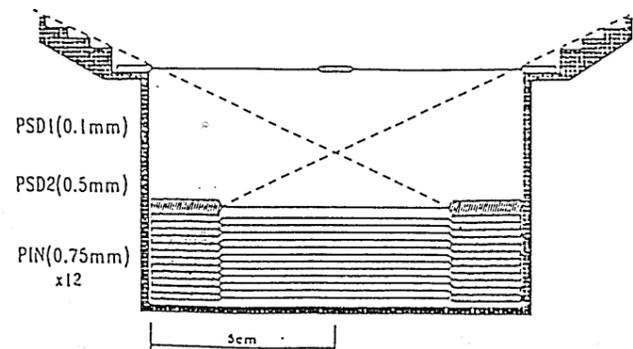


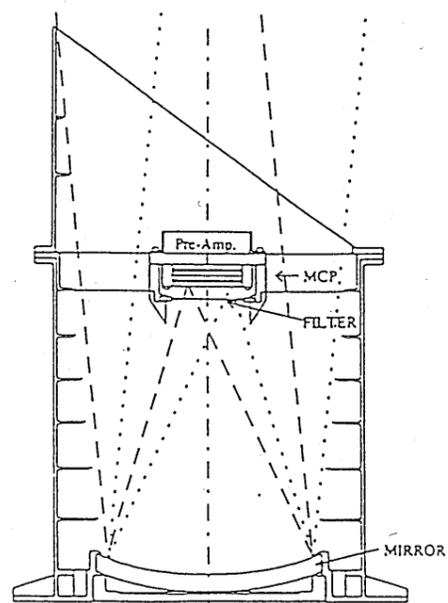
図6.4 天文台パイロットミッションの例



軽粒子観測望遠鏡



重粒子観測望遠鏡



地球磁気圏観測装置

図6.5 宇宙環境監視装置

(2) 地球衝突小惑星監視装置

駆動操作をできるだけ少なくし、かつ月の自転による星像移動により数時間で次々に同じ星野を観測するため、2°程度離れた方向に向けたCCD受光器付き望遠鏡(口径35cm)2台を月面に設置する。緯度方向のみ可動とする案もあるが、ランダーの着地方向や姿勢が厳密でないため、架台は経緯儀式にせざるをえない。

重量は望遠鏡100Kg、コントローラ100Kgの計200Kgであるが、必要電力はCCD100W、駆動系200Wで計300Wとなる。もし夜間常時300W消費する場合は本ミッションは重量的に成立しない。燃料電池重量だけでランダーのペイロード重量を占めてしまう。夜間は例えば望遠鏡の駆動を止めて観測するならば、消費電力は100Wとなり実現の可能性は高くなる。この場合さらに約300Kgの相乗りミッションが可能となる。ただし夜間の電力は100Wをシェアして利用するなどの運輸上の工夫が必要となる。このような場合の本装置の構想案を図6.6に示す。

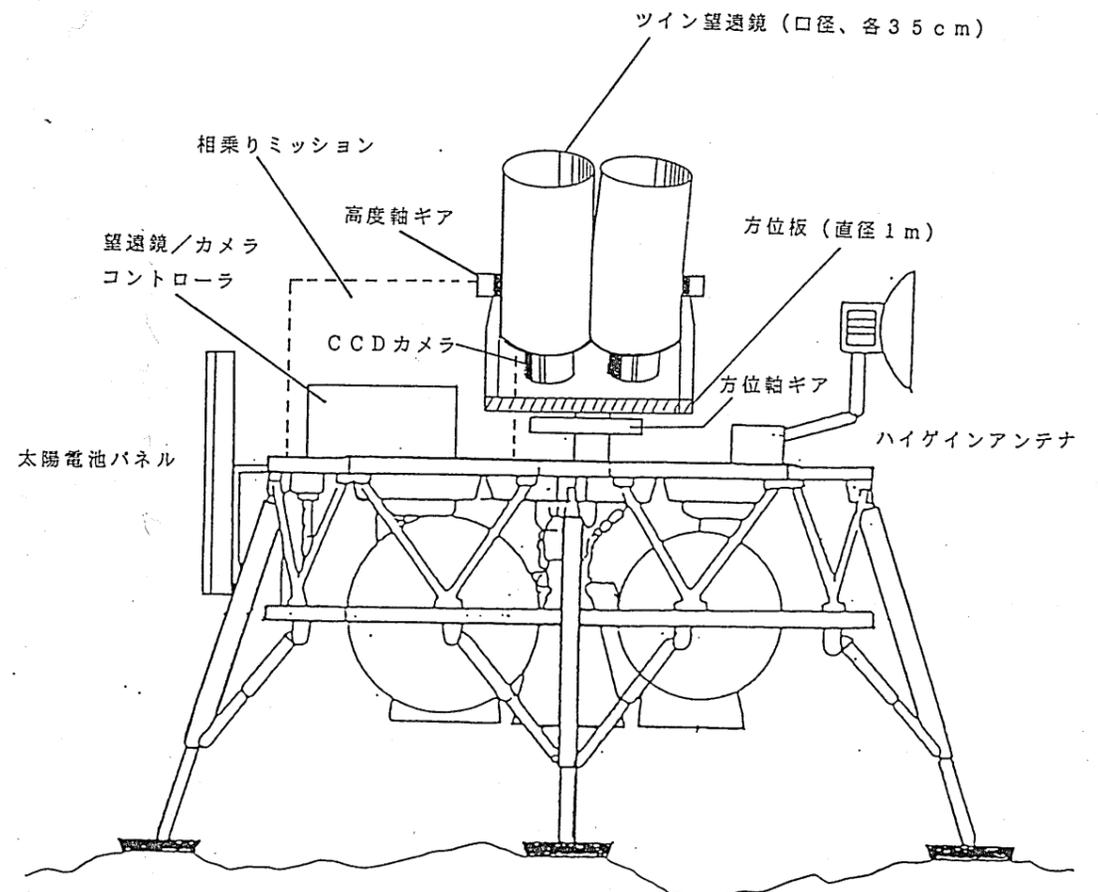


図6.6 地球衝突小惑星監視装置の構想

### 3. まとめ

2000～2015年の間にまず月の本格的な科学的探査を行い、加えて月面からの天文観測および宇宙環境モニタリングのための萌芽的・先行的研究を実施するものとして具体的なシナリオの作成を試みた。これを支えるためのインフラストラクチャーの開発は将来の大規模な月面活動への準備の側面をもち、期待される科学的成果とあわせて、このシナリオの価値を支えるものである。

シナリオの作成にあたっては、規模、予算、頻度等様々な与件を整理する必要があるが、ここでは、

「H-II Aを用いた6～7機のミッション」

という前提をアприオリに与えて、全てをこれに吸収させた。含意の一つは、国際協力は当然視野に入れることとして、我が国の主体的な実施ということである。

研究者層の育成を中心とする実施体制等解決すべき課題は多々あり、2015年までとしたことで先行して実施されたミッションからのフィードバックもかなり窮屈であるが、最大限の努力目標たりうるものとする。

#### (1) ミッションシナリオ

2003年頃、月面着陸実験機を相乗りさせた月探査周回衛星を打ち上げ、月軌道上から月の観測ならびに月面軟着陸実験を実施する計画が進行中である。このミッションを通して、2000年初頭に、月面軟着陸技術ならびに月の裏側からの通信を可能とするデータリレー衛星技術が修得されるものとする。

上記の探査周回衛星を1号機とよぶとき以下の月ミッションを順次実施する。ただし、これらの時期や順番、相乗りの組み合わせ等は、技術の開発状況やミッション目的の見直し等に伴い変更されうるものである。

ペネトレータミッション/小型望遠鏡

月面ローバミッション

宇宙背景放射観測装置/宇宙環境監視装置

月面ローバ(親子方式)

中型赤外線望遠鏡/地球衝突小惑星監視装置

サンプルリターンミッション

#### 2号機(2005年) ペネトレータ/ランダー/小型望遠鏡

地震計、熱流量計、VLBI電波源等を搭載したペネトレータ7台とランダー1台を組み合わせ、月面上に複数の観測点を設置し、月中心核、マントル、地殻等の月の内部構造を調査する。このようなネットワークを構築し、観測を行うことにより、月の進化と起源について鍵となる貴重なデータが得られる。ペネトレータは、既にLUNAR-Aで開発済みのもを使用することができる。ランダーは1号機で技術検証を行ったものをベースに、月面での電力供給、耐環境性等の点でより高機能化を図る。

本ミッションでは、ランダーを高緯度地方に着陸させる予定であるため、併せて非常に小型軽量の望遠鏡(口径30cm程度)をランダーに搭載し、天文観測の予備実験を行う。

#### 3号機(2007年) 月面ローバ

月の広域・直接探査のためにはローバが有効である。本ミッションを実施し、月の地形、地質、環境等の基礎データを取得することにより、これ以降に続くミッションをより確実に遂行することが可能になる。重量的に余裕がある場合は小型の天文観測ミッションまたは技術検証ミッションを相乗りさせる。

探査地点は、現時点では高地の多様性、マントルの不均一性を観測できることが期待されるSouth Pole Aitken盆地内または、月裏側の中緯度地域のクレータのいずれかの地域とし、CCDカメラ、蛍光X線分析装置等をローバに搭載し観測を実施する。

#### 4号機(2009年) 宇宙背景放射観測装置 / 宇宙環境監視装置

月天文台のパイロットミッションで、口径1.5m程度の高感度ミリ波アンテナを北極に近い高緯度地域(北緯80°)の月面に設置し、大気がなく安定して冷たい月環境を利用して、宇宙の背景放射のゆらぎを高精度で測定する。これにより宇宙がビッグバンから銀河を生みだし、恒星の宇宙へと進化した道筋を解明することができると期待される。重量に若干余裕がある場合は、小型宇宙環境監視装置を相乗りさせることも考えられる。なお、欧米での計画もあり、早期の実現が科学的意味からも重要である。

#### 5号機(2011年) 月面ローバ(親子方式)

2007年のローバ1号機をベースに、より高機能な親子方式のローバを開発し、大型ローバでは探査することが困難なクレータの壁などを含めた月面の調査を実施する。探査地域は、ローバ1号機で探索できなかったエリアが選択される。さらにローバに月面試料の長期保管機能を持たせ、後から到達するサンプルリターン機(2015年)に引き渡すことも検討する。

なお、月探査周回衛星によるリモートセンシングやローバ1号機の探査結果等から、より詳細な試料分析が必要となった場合、本ミッションはサンプルリターンミッションに変更される可能性もある。

6号機 (2013年~2015年) 中型赤外線望遠鏡 / 地球衝突小惑星監視装置

月天文台のパイロットミッション No.2で、中口径赤外線望遠鏡により近傍銀河の赤外線撮像観測を行う。地上に比べてはるかに暗い部分まで効率よく観測できると予想され、銀河の構造の研究、形態分類、質量の定量等の分野に極めて質の高いデータを提供できるものと期待される。状況によっては小型赤外線干渉計の可能性もある。同時に小惑星監視ミッションや磁気圏観測ミッションを組み合わせることで、100m以上の地球近傍小惑星を検出することや地球周辺の宇宙環境監視も可能となる。また重量的に余裕がある場合は、将来の月面拠点建設に必要なインフラ技術等の縮小モデルを用いた技術検証ミッションを相乗りさせる。

7号機 (2013年~2015年) サンプルリターン

リモートセンシングやローバ探査では実施することのできない、精密な同位体分析や極微量分析等は、サンプルリターンミッションによってのみ可能である。サンプルリターン候補地は、この時期までに周回衛星やローバ探査等で、より興味深い地点(現在は South Pole Aitken 盆地や月裏側の pyroclastic な堆積物があるところが候補地である。)を決定し、試料を採取し、地球に持ち帰る。サンプルリターンは、唯一の地球帰還ミッションであり、ここで修得された技術は有人を前提とした将来の地球帰還技術に反映しうるものである。なお、2011年に打ち上げたローバが採取し月面上の定位置に保管しておいた試料を受け取り、地球に帰還させることができれば、1回のサンプルリターンミッションで、より広範囲の地域の試料の分析を実施することが可能となる。

以上のようなミッションで取得、確立された技術やデータは、将来の有人を含めた月面活動に必要な技術の基礎をなすものである。ここでは科学の側面を強調したが、状況によっては月面活動へ向けての技術実証のためのパイロット実験ミッションを8号機として実施することとなる。

(2) 技術開発シナリオ

月無人ミッションに係わるインフラ技術を表 6.1 に、フェーズIIに向けた全体的な技術開発シナリオのまとめを表 6.2 に示す。

表 6.1 月無人ミッションとインフラ技術

ミッション	取得データ、技術	インフラ技術	反映の技術
ベネト	環境内月	技術データ	機
ローバ	月面移動、遠隔操作、制御、熱地、環境	技術データ	車作調、業査、ロボット
天文台	設置、電力、制御、給電	技術	構造大格、電力月、物的
親子式ローバ	レコ、探採、取、保管	技術	月面間本、給文、天
小惑星監視装置	天文台	技術	月面間本、給文、天
サンプルリターン	試料地球、再入、保管、回収	技術	月面間本、給文、天

表6.2 月インフラ技術開発計画

月面での実験を必要とする重要技術  
LEM等による宇宙実験が必要な技術  
地上試験で確立できる技術

主要ミッション	クリティカルな要素技術	技術開発フロー (▲ 打ち上げ: 同時期は相乗りを想定) 2000 2005 2010 2015 2030	備考
月周回/着陸衛星	月周回軌道投入技術 衛星システム/追跡管制技術 月面軟着陸技術	2000 → 2005 → 2010 → 2015 → 2030	1号機は月周回観測衛星、2号機は月ペネトレータミッションを想定 軟着陸、月面耐環境技術確立
月面ローバ	走行技術 探検、制御技術 移動体熱制御技術	2000 → 2005 → 2010 → 2015 → 2030	観測機器だけでなく分析装置も搭載する 半思地走行だけでなく、ガスをよじ登ったり、降りる機能 (孫ロボット使用等)が必要
月サンプリング	試料収集技術 地球帰還技術	2000 → 2005 → 2010 → 2015 → 2030	ローバが採取した試料を回収する可能性あり タイレクトリターンかLEOで回収
月面天文台 バイロケット	天文台無人設置技術 遠隔操作技術 夜間の電力供給技術	2000 → 2005 → 2010 → 2015 → 2030	小口径望遠鏡で予備実験 必要電力100W、昼間は機械式冷却機使用、防振対策要、背景 放射はミリ波帯観測
月からの モニタリング	天文台とはほぼ同じ	2000 → 2005 → 2010 → 2015 → 2030	小口径望遠鏡で予備実験、最終的に口径1mのツイン望遠鏡要 放射線、地球磁気圏及び電波の観測で、現状の技術で実現可能
システム	システム構築手順 月環境データの把握	2000 → 2005 → 2010 → 2015 → 2030	放射線、地球磁気圏及び電波の観測で、現状の技術で実現可能 月環境は無人ミッションで取得したデータが利用可能 最小限の機材の輸送と単純かつ短時間の有人作業によるシステ ムの構築
有人サポート	環境制御・生命維持技術 宇宙服	2000 → 2005 → 2010 → 2015 → 2030	宇宙服の汚染防止、塵除去方法
エネルギー	液化燃料燃料電池 太陽電池パネル設置技術	2000 → 2005 → 2010 → 2015 → 2030	月面における大型の太陽電池パネル設置方法 初期のエネルギー確保、非常用2次電池の重量大
熱制御	放熱面積可変型ラジエータ 二相流体ループ	2000 → 2005 → 2010 → 2015 → 2030	機材の月面到着から拠点建設開始までの設置期間の熱保護方法
通信	月の裏側との交信手段	2000 → 2005 → 2010 → 2015 → 2030	高速・大容量通信、月周回観測衛星の成果を反映
ロボット	電力供給技術 モジュール化技術 シールド、耐熱技術	2000 → 2005 → 2010 → 2015 → 2030	無人のローバミッションの成果を反映 クレーン/運搬/月面車のロボット機能が必要 ロボット自身にある程度の重量が必要 (レゴリスをカウンタウェイトとして利用)
資源加工実験	O <sub>2</sub> /He回収プロセス 加熱用太陽炉	2000 → 2005 → 2010 → 2015 → 2030	当面蒸発凝縮実験が主体となる
ライフS実験	放射線環境の把握 生物試料輸送技術	2000 → 2005 → 2010 → 2015 → 2030	低重力環境下における人間科学と宇宙放射線の生体への 影響がメインテーマ 月からのモニタリングの成果を活用
輸送	軌道上整備作業 ロケット再使用技術	2000 → 2005 → 2010 → 2015 → 2030	2015年以降、可能な限り早い時期に再使用型月輸送シス テムを開発、運用開始する

第7章 今後の課題

## 第7章 今後の課題

### 1. 研究人材の確保と養成について

これまでに本報告書で検討されてきた月探査に関する計画は、2000年初頭に具体的に計画されている月・周回ミッションを始めとし、ペネトレーター、ランダー、ローバ・サンプルリターンなどの各ミッション、天文学ミッション、宇宙モニタリングミッションなど多彩な内容をもっており、これを遂行するためには、今まで直接宇宙科学や宇宙開発に携わって来た研究者の何倍もの研究人材を必要とする。ちなみに日本惑星科学会は約500名の研究者を擁しており、地球惑星科学という観点に立てば更に十倍を超える研究者層が存在する。これらを顕在化させることが重要である。

一方、大型プロジェクトの遂行には必ずから研究室レベルでの活動と異なる側面がある。とくに中核となる研究者についてはプロジェクトの経験を通じて育成されるものであるにも拘わらず、プロジェクト実施の機会は極めて限られているという基本的な困難がある。長期的な視点から、広く主体的な参加を得つつ、ミッションの継続性を確保して重層的に育成を図る以外に特效薬はない。人材は適切な場所、適切な状況に置かれてはじめて能力を発揮する。例えば現状に見られるような大学院生、ポストドクター層による自発的な下支えには必ずから限度がある。

月探査を進めていくために宇宙開発機関、宇宙や天文に携わる国立研究所、大学、公的研究機関、企業などの緊密な協力体制が不可欠であるが、関係各機関や教育機関は組織の枠を超え、全体として研究人材を質量ともに確保する方策を実施する必要がある。

### 2. 国際協力について

世界が多極化した現在、多くの宇宙開発国と、このような月探査という人類的課題についての国際間の協調協力に基づくそれぞれの役割を果たすことが肝要である。このため月探査の推進にあたっては国際的な信頼醸成をはかり、月探査に係わる国際動向を注視していくことが求められる。

国際間の協調協力に基づくそれぞれの役割を果たすためには、我が国自身がしっかりした研究・技術ポテンシャルを持たねばならず、そのためには主体性のある月探査計画とその実現をめざすことが不可欠であり、その過程において国際的な協力可能性を求めていくべきである。

### 3. 国民的なコンセンサス形成に向けて

月探査・開発利用を進めていくためには、まず第1にこのように包括的な宇宙探査・開発利用についての国民の理解と支持をもとめていくことが必要である。このような開かれたコンセンサス形成の試みは始まったばかりである。加えるに宇宙開発政策大綱に示された方向を具体化するにあたっては、これにかかわる関係研究機関の開発体制整備が緊急の課題であり、同時に宇宙開発委員会を中心とする全体的な研究推進体制を整備していくことがなされねばならない。前述したように質量備わった研究人材の確保、安定的な研究資金の確保、国際協力の具体的検討などはとりわけ重要な課題として直ちに直面する問題である。また官民における技術蓄積も速やかに進めなければならない。とくに月探査を進めるにあたって、地上試験設備などの地上研究開発インフラの形成は速やかに着手していくことが求められている。

科学技術基本法が制定されてまだ日が浅い。月探査のような宇宙開発は科学・技術のみならず人文社会系の学問領域にも大きなインパクトを与え、次代の我が国の国民に大きな影響を及ぼすものである。このような広範な科学技術領域に影響を与える活動は科学技術基本法の制定趣旨に則った国民的な活動というべきものである。直面する課題の解決に対し、国民一般への透明度を高くしつつ、その支持を得ることが望まれる。

報告書の著作権は、科学技術庁にありますので、  
無断転載を禁止します。

月探査に関する調査研究（その2）報告書

平成8年3月

財団法人 未来工学研究所

〒135 東京都江東区深川 2-6-11 富岡橋ビル

TEL:03-5245-1012 FAX:03-5245-1061