

# 可搬型炉無線運転装置予備検討

1991年6月

動力炉・核燃料開発事業団  
大洗工学センター

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせください。

〒311-13 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002

動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター システム開発推進部・技術管理室

Enquires about copyright and reproduction should be addressed to: Technology Management Section O-arai Engineering Center, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation 4002 Narita-cho, O-arai-machi, Higashi-Ibaraki, Ibaraki-ken, 311-13, Japan

動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation)

1 9 9 1 年 6 月

可搬型炉無線運転装置予備検討

大坪 章\*, 羽賀一男\*

要 旨

フロンティア研究の一環として検討を実施している可搬型炉は地球上の避地、月面上  
或いは深海底への設置が想定されており、従ってその運転には無線通信が必要となる。

本報告書では、月面上及び深海底に設置された炉の無線運転方法について、現状技術  
に基づいて予備検討を行った。

月面上の炉の無線運転システムについては、現在の宇宙通信システムの延長線上にあ  
ると考えられ、技術的には特に大きな課題はないと予想される。

深海底の炉の無線運転システムについては、海中音響通信の分野にまだ少し課題が残  
っているが、技術的には解決出来ると予想される。

しかし、月面上の炉については、電波の月面との往復に3秒程度かかり、又深海底の  
炉についても音波の海上よりの到達に深さ6,500mの場合4秒程度必要となるため、い  
ずれの場合も炉の緊急制御を無線で行う事は不可能である。従って緊急の炉の制御は炉自  
身の制御システムで行う必要がある。

June, 1991

Preliminary Study on a Wireless  
Operation Installation of a Transportable  
Reactor

Akira Otsubo\*, Kazuo Haga\*

Abstract

A transportable reactor has been studied in one of activities of frontier research in PNC. Since the reactor is going to be used at an secluded place in the earth, on the surface of the moon or at the deep sea bottom, the operation of the reactor requires wireless communications.

Based on the present status of technology, a preliminary study has been performed in this report on a wireless operation method of the reactors on the moon and at the deep sea bottom. A wireless operation system of the reactor on the moon is supposed to exist technically on the extension of a present space communication system and a difficult problem does not seem to remain at the development stage of the wireless operation system.

Concerning the wireless operation system of the reactor at the deep sea bottom, a few problems remain to be solved in the field of acoustic communications in sea water. However they seem to be solved technically in future.

It takes about three seconds for an electric wave to go and come back between the reactor on the moon and the earth. It takes also about four seconds for an acoustic wave to reach the reactor at the deep sea bottom from the sea surface.

Therefore, urgent control of the reactor by wireless communications is impossible in both cases. The urgent control must be performed by the reactors themselves.

---

\* Frontier Technology Development Section, Technology Development Division,  
O-arai Engineering Center, PNC

## 目 次

1. はじめに .....	1
2. 可搬型炉システム .....	2
3. 無線運転装置システム概念 .....	3
3. 1 前提条件 .....	3
3. 2 地球と月との位置関係 .....	3
3. 3 回線確保 .....	3
4. システム解析 .....	5
4. 1 システム構成 .....	5
4. 2 月面モニタ、制御信号の形式 .....	5
4. 3 通信回線検討 .....	7
4. 4 無線装置運用検討 .....	8
4. 5 信頼性検討 .....	9
5. 深海底炉の無線運転装置 .....	14
5. 1 深海底炉無線運転システム .....	14
5. 2 海中音響通信システム .....	14
6. システム関連技術 .....	17
6. 1 宇宙運用データシステム .....	17
6. 2 シミュレーションモデルの検討 .....	18
7. おわりに .....	21
8. 謝辞 .....	21
参考文献 .....	21
付録（用語集） .....	43

## 図一覧表

図 1	クローズドブレイトンサイクル型炉システム .....	22
図 2	カリウムタービン型システム .....	23
図 3	原子炉発電システムの基本構成 .....	24
図 4	月の軌道 .....	25
図 5	地上局設置可能範囲 .....	26
図 6	回線確保法 .....	27
図 7	3 地上局からの可視領域 .....	28
図 8	地上局間インタフェース .....	29
図 9	月面上のインタフェース .....	29
図 10	月面可搬型炉無線運転システム概念図 .....	30
図 11	モニタ信号の伝送フォーマット .....	31
図 12	月面炉制御信号の伝送フォーマット .....	32
図 13	総合海底観測システム無人海底基地 .....	33
図 14	深海底炉無線運転システムの概念図 .....	34
図 15	シミュレーションモデルのシステム図 .....	35

## 表一覧表

表 1	ナトリウムクローズドブレイトンサイクルモニタ項目 .....	36
表 2	ナトリウムクローズドブレイトンサイクル制御項目 .....	37
表 3	カリウムタービンシステムモニタ項目 .....	38
表 4	カリウムタービンシステム制御項目 .....	39
表 5	更新周期別モニタ項目数一覧 .....	40
表 6	モニタ信号の回線計算例 .....	41
表 7	制御信号の回線計算例 .....	42

## 1. はじめに

フロンティア研究の一環として、地球上の避地や月面に設置することを想定した可搬型炉の研究を行っている。これらの可搬型炉即ち超小型高速炉の運転は、炉の近くに人間がいる場合には人間が運転することになるだろうが、設置される場所の特性上、地球上の運転センターより無線で運転可能な事も要求されることになると考えられる。

本報告書では、主に月面に設置された可搬型炉について検討を行った。炉は地球上の運転員より数十万km離れて設置されている。運転員は電波を用いた無線操作により、炉システムの起動、停止、炉出力調整及び炉の状態の監視等の簡単な操作を行うものとする。炉自体は或る程度の自律性を有するものとし、緊急対応が必要となるような事故時対応は炉自体で自律的に緊急停止等の操作が行われるものとする。

深海底に設置される可搬型炉については、月面上のものに比較し無線操作性能は余り十分とは言えないが、母船上の運転員による音響を用いた無線運転について検討を行った。

なお、専門的な用語についてはその解説を付録に記載した。



## 2. 可搬型炉システム

代表的な可搬型炉システムとして、クローズドブレイトンサイクル型システムとカリウムタービン型システムを選んで検討する事とした。前者を図1に、後者を図2に示す。

クローズドブレイトンサイクル型システムは最近は主にフランスに於て宇宙炉開発のERATO計画で研究されているものである<sup>1)</sup>。炉はリチウム冷却或いはナトリウム冷却の、20kWeの高速炉である。2次系にはHe-Xeガス冷却のクローズドブレイトンサイクルを2ループ或いは4ループ用いている。

カリウムタービン型システムはフロンティア技術開発室で研究を続けているもので<sup>2)</sup>、クローズドブレイトンサイクルに比較し、構造は少し複雑であるが、発電効率はより高い。

これらの原子炉発電システムの基本構成を図3に示す<sup>3)</sup>。

無線運転装置の検討にあたって、原子炉の動作状態モニタ及び運転制御に供する信号数をまず設定する。表1にナトリウム冷却炉の場合の、クローズドブレイトンサイクルシステムのモニタ項目を、表2に同システムの制御項目を、表3にはカリウムタービンシステムのモニタ項目を、表4には制御項目を示す。これらの表の作成に当っては、参考文献3の表4“Typical List of Instrumentation and Their Use”を参考にしつつ、項目数を増す方向で選定した。

表1に示すナトリウム冷却炉クローズドブレイトンサイクルシステムのモニタ数は195項目である。一方、表3に示すカリウムタービンシステムのモニタ数は163項目であり、表4の制御項目数は37項目である。従って無線運転装置の検討にあたっては、モニタ及び制御項目数の多いナトリウム冷却炉ブレイトンサイクルシステムを検討対象とすることにした。

### 3. 無線運転装置システム概念

#### 3.1 前提条件

無線運転装置システムは次のような条件に基づいて概念を構築するものとする。

- a) 炉は月面上の地球対向面に設置されているものとする。
- b) 炉のモニタ及び制御は、連続的に常時行えるものとする。
- c) 無線運転装置によるデータ伝送は、アンテナの向き方向が水平方向より+5°以上の角度（アンテナエレベーション角）で行うものとする。

上記条件のように無線運転装置システムの回線を連続的に確保するためには、月と地球の軌道から回線上のブラックアウトを考慮し、システムの形態を考える必要がある。以下に月面に設置された可搬型炉の無線装置と地球上のコントロール局間の回線確保のためのコンフィギュレーション検討を行う。

#### 3.2 地球と月との位置関係

月の軌道、姿勢及び月～地球間距離を図4に示す。この図のように、月の軌道は黄道（地球公転軌道）に対し約5°の傾斜を持って公転しており、この公転軌道（白道）面に対し約1°の赤道傾斜角を有する。また、白道面は約8.9年で一回転する。

月の対地球自転周期は丁度一恒星月に等しく、従って月は常にその半面を地球に向け、他の半面を地球に向ける事がない。

月面上の可搬型炉と直接インターフェース可能な地上局設置範囲は、先に述べたエレベーション角度+5°以上という条件より図5に示すようになる。図5中の $\alpha$ 及び $\theta$ は次式で計算される。

$$\frac{\sin \theta}{r} = \frac{\sin(90+5)^\circ}{L}$$

$$\sin \theta = \frac{6378 \text{ km}}{384400 \text{ km} - 1738 \text{ km}} \cdot \sin 95^\circ$$

$$\alpha = 180^\circ - (95^\circ + \theta) = 84.05^\circ$$

この $\alpha$ の範囲以外はブラックアウトとなり、回線確保不可能域となる。

#### 3.3 回線確保

前節のブラックアウト域における回線確保の方法につき検討をする。回線確保の方法としては、次のケース1, 2, 3が考えられる。

- ケース1 複数の地上局を中継し、月面設置された可搬型炉とインターフェースする。この場合、地上局間のインターフェースに地上回線ルートを使用するものと、衛星回線ルートを使用するものと2通りがある。
- ケース2 静止衛星を中継し、月面に設置された可搬型炉とインターフェースする。

ケース3 周回衛星を中継し、月面に設置された可搬型炉とインタフェースする。

上記各ケースを図6に示す。この3ケースのうち、ケース2と3は各中継衛星に、地上局とのインタフェース用及び月とのインタフェース用の2系統の補捉追尾アンテナが必要となる。現在日本では月補捉追尾アンテナを有する衛星はなく、今後開発する必要がある。こういう事情を考慮して、本報告書では、ケース1について検討を行うこととする。

ケース1について、地上の運転員と月面上の可搬型炉間の回線確保の為に必要となる、中継局の設置数を検討する。図7に示す通り常時回線を確保する為には、最低3局の地上局が必要となる。

月面上の可搬型炉と地上局の間のインタフェース方法としては、前述のように地上局間を衛星回線で結ぶ方法と地上回線で結ぶ方法がある。この様子を図8に示す。地上回線ルートまたは衛星回線ルートで伝送された信号は、可視局の月軌道を補捉追尾している通信アンテナから、月面に設置されている無線装置側のアンテナへ伝送され、無線運転装置へインタフェースされる。

次に、月面上のインタフェースにつき検討する。月面上には、月面基地及び地上局とのインタフェースを行う為の無線装置が存在する。本無線装置は、月面に置かれる可搬型炉近傍に置かれ、可搬型炉のモニタ及び制御に用いられる。このモニタ及び制御装置を月面基地に設置し、可搬型炉と有線で結ぶ場合も存在する。この様子を図9に示す。

## 4. システム解析

### 4.1 システム構成

月面可搬型炉無線運転システムの構成を図10に示す。月面上の可搬型炉を地上より運転する場合、信号の往復時間に約3秒ほど必要となる。従って、炉システムの確実な運転のために3秒以下の応答時間が求められる制御については、月面上で行われる必要がある。図10の可搬型炉のブロック内の自動制御計算機は、この目的のためのものである。

月面側無線運転装置は「ベースバンド信号処理部」及び「RF(Radio Frequency)部」より成る。

表1の月面炉モニタ項目のうち、アナログ信号についてはベースバンド信号処理部のA/D変換回路において所定のフォーマット(後述)に編集される。このうち、モニタ信号はRF回路部にて搬送波を変調する。搬送波は送信部に於て所要電力まで増幅されたのち、空中線部より地球局へ送出される。この為のアンテナの大きさは直径約1m、重量は100kgと考えられる。

地上局より送信された月面炉制御信号はRF部において受信、復調されたのち、ベースバンド信号処理部へ供給される。得られた制御信号については、伝送路の雑音の影響等によりデータ誤りが生じる可能性があるため、復号・検証回路部においてデータ誤りの検出・訂正が行われ、その結果は地上へ通知される。

これらの処理を経たのち、正常な制御信号のみが月面上の可搬型炉の制御部へ配分出力される。

地球側については、可視局に於て受信された月面炉のモニタ信号は中継局を経て炉運転局へ転送される。

モニタ信号は炉運転局のデータ処理用計算機にて工学値変換などを行った後、モニタ盤に表示される。このモニタ盤に表示される月面炉の運転状態に応じて、炉の制御が必要であるのが確認された場合、運転員は所定の制御コマンドを入力する。この制御コマンドは、予め定められた誤り訂正符号などが付加されたのち、中継局を経て可視局より月面に送信される。

### 4.2 月面炉モニタ、制御信号の形式

無線による月面炉のモニタ、制御システムに類似なものとして、軌道上にある人工衛星を地上より運用するために用いられるテレメトリ(遠隔測定)およびコマンド(遠隔制御)システムを挙げることができる。図10に示される月面側無線装置のベースバンド信号処理部の構成についても人工衛星に搭載されるテレメトリ、コマンドシステムの構成に倣っているが、次に示すモニタ信号および制御信号の形式に関する検討もテレメトリ、コマンドシステムを基本としている。

#### (1) 月面炉モニタ信号の形式

検討の対象とされるナトリウムブレイトンサイクル発電炉のモニタおよび項目数については2章で説明した。表1に示される各モニタ項目をそのデータ更新周期別にグループ化した結果を表5に示す。

次に表5に示されるモニタ項目数を満足するデータ伝送フォーマット(案)を図11に示している。図11において、1メジャーフレームは16マイナフレームより構成され、1マイナフレームは96ワード(8ビット/ワード)より構成されている。また、データ伝送速度は1マイナフレーム/2秒、1メジャーフレーム/32秒としている。

表5に示されるモニタ項目数のうち、データ更新周期が1秒以内のデータをA系、5秒以内のデータをB系、10秒以内のデータをC系、60秒以内のデータをD系と区分しているが、これらの各データの伝送フォーマットへの割付け数(案)は図11に示す通りである。

A系データ伝送用ワードは1マイナフレーム中に1秒周期で7ワードずつ合計14ワード配分されている。つまり、7ワード分のデータを1秒周期で伝送可能としている(2倍のスーパーコミュニケーションと呼称される)。

B系データ伝送用ワード数は49ワード/マイナフレームである。従って、表5に示される98ワード分のデータを伝送するためには2マイナフレーム必要とされる(奇数番号のマイナフレームと偶数番号のマイナフレームでB系データを半分ずつ伝送する)。この結果、各B系データの伝送周期は4秒となる。

C系データ伝送用ワード数は11ワード/マイナフレームであり、表5に示される42ワード分を賄うためには11マイナフレーム必要とされるが、図11では16マイナフレーム割り当てておりスペアが生じている。D系の各データの伝送周期は32秒となる。

以上に示したように、図11に示されるデータフォーマットは予備系センサによるデータを含めて、求められるデータ更新周期を満たして伝送が可能であることを示している。また、図11には月面炉のセンサデータ伝送のための予備ワード以外にも予備のワードを有しているが、それらのワードは図10に示された月面に設置される可搬型炉の自動制御計算機の動作状態あるいは月面側無線運転装置自身の動作状態をモニタするためのデータ伝送用として用いられるものである。図11に示されたデータフォーマットに基づき算出されるモニタ信号の伝送速度は次の通りである。

$$(8\text{ビット/ワード}) \times (96\text{ワード/マイナフレーム}) \times (1\text{マイナフレーム}/2\text{second}) = 384 \text{ bps (bps: bit per second)}$$

以降に示す通信回路検討などにおけるモニタ信号の伝送速度として、この384 bpsを基準とする。

## (2) 月面炉制御信号の形式

月面炉制御信号の形式は人工衛星の運用に用いられるコマンド信号のフォーマットに準ずることが適当と考えられる。図12にそのフォーマットを示す。図12に示されるフォーマットは96ビットの基本単位で構成されるが、その中でユーザが任意にその内容を規定できるのは、衛星アドレスより以降の41ビットである。衛星アドレスに相当する部分については、他の宇宙セグメントの運用に干渉を与えないように関係機関と調整の上、決定される必要がある。また、フォーマットの最後尾に付加されるポリミナルチェックコードはデータ伝送中に発生する可能性のあるデータ誤り検証用として用いられる。表2に示された各制御項目に対応するデータは上記の各データエリアを除く32ビット分のエリアを用いて伝送される。

### 4.3 通信回線検討

月面に設置される可搬型炉を地上より無線運転するために月面および地上に設置される無線装置の規模を見積ることを目的として、月面-地上間の通信回線検討を以下に行う。つまり、送信側の情報が受信側に対して一定の確からしさを伝えられるために必要とされる無線局の規模を見積るものである。無線回線の性能は、無線局（すなわち送信機、受信機およびアンテナ）の特性、電波の伝搬特性及び干渉特性から決定されるが、特に干渉特性のうち対隣接宇宙セグメントについては現時点では考慮しないものとする。通信回線検討に先立ち、基本となる回線パラメータならびに回線計算式を以下に示す。

受信側での受信機入力電力  $P_r$  を求めるためには次の計算式が用いられる。

$$P_r = (P_t \cdot G_t) G_r \left\{ \frac{\lambda}{4 \pi d} \right\}^2 \quad \text{----- (1)}$$

ここで、 $P_t$  : 送信機出力電力                       $\lambda$  : 信号電波の波長  
 $G_t$  : 送信アンテナ利得                       $d$  : 伝搬距離  
 $G_r$  : 受信アンテナ利得                       $\pi$  : 円周率

(1)式に示される  $(P_t \cdot G_t)$  は実効放射電力(Equivalent Isotropically Radiated Power : EIRP)と呼ばれ、最終的に送信アンテナより出力される電力である。また、 $\left\{ \frac{\lambda}{4 \pi d} \right\}^2$ の逆数は自由空間伝搬損失と呼ばれる。

受信側無線局の特性は(1)式に示される受信アンテナ利得 ( $G_r$ ) と雑音性能によって定まる。受信システムの雑音性能は次のように与えられている。

$$N = k T_s B \quad \text{----- (2)}$$

ここで、 $k$  : ボルツマン定数 ( $1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ )  
 $B$  : 雑音帯域幅  
 $T_s$  : 受信システム雑音温度 ----- 天空や地表あるいは太陽などのエネルギーのアンテナへの入射量、受信機の雑音指数及び信号線路の損失などに起因する雑音の総和

(1)式と(2)式の比は搬送波電力対雑音電力比 ( $C/N$ ) と呼ばれる。この  $(C/N)$  を帯域幅に無関係に(3)式のように表したものを、搬送波電波対雑音電力密度比 ( $N/N_o$ ) といい、無線回線の総合性能を表している。

$$(C/N_o) = [(P_t \cdot G_t) G_r \left\{ \frac{\lambda}{4 \pi d} \right\}^2] / (k \cdot T_s) \quad \text{----- (3)}$$

月面に設置される可搬型炉を無線運転するため一定以上の通信品質でモニタし、制御信号を伝送するためには所定の  $C/N_o$  が確保されなければならない。この所要  $C/N_o$  は信号の伝送速度、変調方式、許容されるデータ誤りの度合い (確率) 及び装置の出

来ばえ（理論値との差異）などによって定まる。

上記の回線計算式および基本パラメータにより、通信回線検討を次に行う。通信回線計算においては、単位としてデシベル（dB）が用いられる。デシベルと物理単位の関係は次の通りである。

$$dB = 10 \log [\text{物理量}] \quad (\text{例: } 5 \text{ watt は } 7.0 \text{ dBW と表す})$$

単位としてデシベルを用いることにより、通信回線計算は加減算に置き換えられる。モニタ信号および制御信号に関する回線計算をそれぞれ表6および表7に示す。

表6では、月面可搬型炉の運転状態モニタ信号を4章2節で検討した伝送速度（384 BIT PER SECOND）で地球局へ送信する場合の通信回線の例を示している。月面側無線局の規模としては送信機出力電力が10W、アンテナ直径が1m程度の小規模局とし、地球側無線局はアンテナ直径が3m程度の中規模局としている。

また、モニタ信号伝送用搬送波の周波数としては、人工衛星のテレメトリシステムにおいて一般的に用いられている2.3GHzを適用している。地球局で得られる受信電力対雑音電力密度比（C/N<sub>0</sub>）41.6dB・Hzに対して13.2dBのマージンを得ることができる。

一方、制御信号についての通信回線計算例は表7に示す通りである。地球局の送信機出力電力は100Wとし、搬送波周波数は人工衛星のコマンドシステムにおいて用いられている2.1GHzを選択している。人工衛星のコマンドシステムでは、データ伝送速度として250bpsあるいは500bps程度が選択されているが、ここでは1kbpsとしている。制御信号のデータ誤り率を $10^{-6}$ （100万分の1）以下とした場合、14.8dB程度の回線マージンを見積ることができる。これらのことより、月面可搬型炉無線運転局のサイズは比較的中・小規模なものを見積ることができる。

#### 4.4 無線装置運用検討

無線運転装置の運用上、特に考慮すべき運用について整理する。

##### (1) 冗長系への切り替え

無線運転装置のモニタ系及び制御系の冗長系への切り替えは、定期検査時或いは無線運転装置の不具合でない限り、行わない。その理由を以下に示す。

- ・主系、冗長系の切り替えに用いられる機械的なスイッチは、電気的なものに比べ信頼度が低い為、切り替え回数を極力少なくしたほうがよい。
- ・万が一、冗長系が故障していた場合、再び主系に戻す間のデータが途絶える可能性がある。

##### (2) モニタデータ異常時の対応

モニタ中のデータに異常値が発見された場合の解析手順を以下に示す。

###### ① データの信ぴょう性を確認する。

- ・全く関連性のないデータ項目において、複数の異常データが発生している場合は、可搬型炉が異常であることよりも、回線上のエラーまたは、デー

タ処理系の不具合が考えられる。

②データ伝送系の問題だとした場合、可搬型炉側か無線運転装置側か確認する。

- ・地上局側の無線運転装置モニタ系を切り替えて確認する。
- ・月面に置かれている可搬型炉側の無線運転装置モニタ系を切り替えて確認する。

以上の運用は、従来衛星の運用において実施されていることであり、特に新しいことではない。

次に、可搬型炉の事故時の対応についての運用案を考える。原子炉系の異常に対し、安全確保の為に以下のセーフティ運用を行う。

- ・第1段階：可搬型炉出力を1/3にダウン（最低必要電力の確保）
- ・第2段階：炉出力停止（最低必要電力の確保）

セーフティ時の対応について、この様な運用を考えている。この運用に関しては、今後更に検討を必要とする。

#### 4.5 信頼性検討

##### (1) 信頼性要求

従来の静止衛星に対する信頼性要求の概要は、次の通りである。

- ・ミッション期間（7～10年）内に摩耗又は、劣化による故障が発生しないこと。
- ・残存確率は、0.80以上であること。
- ・必要な部分は冗長系とし、冗長系の一方の故障が他の機能を失うような故障モードを持たない設計とする。
- ・単一部品の故障によってシステムの破局的故障を少なくするような設計とする。
- ・一つのコンポーネントの故障が他のコンポーネントの故障を誘発したり機能障害となることをすくなくするような設計とする。
- ・各コンポーネントの故障が、電源に対し短絡モードとならないような設計とする。

本無線運転装置においても、月面上に設置される無線運転装置に関しては従来の静止衛星と同等以上の信頼性確保が必要であると考えられる。

##### (2) 問題点及び制約

本無線運転装置の検討にあたり、考えられる問題点及び制約等を以下に示す。

- ・無線運転装置の耐環境性
- ・回線系の雑音に対する対策
- ・太陽雑音による回線上の不具合
- ・伝送距離上の運用制約

##### a. 無線運転装置の耐環境性

静止衛星の放射線環境は、軌道上で予測される放射線に対して環境の不確定性を考慮して、遷移軌道の放射線に対して10倍、静止軌道上の電子に対して1.5倍、太陽フレア陽子については信頼水準99%でのAL(Anomalously Large Event)8回として検討を行っている。これは、主に各機器に使用している半導体に対し実施されている。



衛星内に使用する部品については、衛星本体、他の搭載機器及び各機器解析を行い衛星本体等による遮蔽効果を考慮し、放射線環境に各部品が耐えるように設計している。

一例として、静止衛星の放射線耐量は  $1 \times 10^5 \sim 1 \times 10^6$  radとして設計している。宇宙環境で受ける放射線等を以下に示す。尚、詳細説明は用語集に示す。

① 太陽放射

太陽からのエネルギー放射をいう。太陽放射は通常太陽常数と太陽分光照射量によって表現される。

② 地球放射

地球から宇宙空間に放出されるエネルギー放射をいう。地球放射には、地球自身からの放射である赤外放射と太陽放射の地球からの反射分であるアルベドがある。

静止軌道上における赤外放射及びアルベドは、以下の通りである。

平均放射強度：約  $0.238 \text{ kWm}^{-2}$  (但し、緯度  $30^\circ$  以下)

アルベド : 太陽放射(約  $1.4 \text{ kWm}^{-2}$ )の約30%

月面上においては、静止軌道上より遙かに遠方にあり小さくなる。

③ 荷電粒子

荷電粒子は、地球地場に補捉され放射線帯と呼ばれる空間に定常的に存在するものと太陽や宇宙のかなたから飛来するものとに分けられる。

前者は、補捉電子線と補捉陽子線に分類される。後者は、太陽フレアに伴って放出される太陽宇宙線と宇宙から飛来する銀河宇宙線である。これら荷電粒子は、宇宙用機器に入射し、その部品・材料に損傷を与える。尚、補捉電子線は高度50000km以下、補捉陽子線は高度20000km以下に存在するため、月面に置かれる本無線運転装置への影響はない。又月面及び静止軌道上の太陽宇宙線と銀河宇宙線を下表に示す。

	陽子エネルギー	月面上	静止軌道上
太陽宇宙線	1 ~ 100 MeV	100/cm <sup>2</sup> /sec	10 ~ 200/cm <sup>2</sup> /sec
銀河宇宙線	100 ~ 10000 MeV	1 /cm <sup>2</sup> /sec	1/cm <sup>2</sup> /sec(200MeV)

④ 太陽風

太陽のコロナから定常的に放出される荷電粒子で、プラズマとして地球付近まで飛来する。陽子と電子があり、さらに微弱ではあるが磁場も存在する。月面における太陽風を示す。

	陽子エネルギー	月面上
太陽風	0.001 MeV	$10^8 / \text{cm}^2 / \text{sec}$

## ⑤ 太陽放射圧

太陽からの放射により受ける圧力で、対象物の反射率により変化する。

## ⑥ 宇宙塵

宇宙空間に浮遊する個体と呼び、寸法で数ミクロンから数km、質量で $10^{12} \text{g}$ から $10^{-12} \text{g}$ の個体物質を包含している。

## ⑦ 温度環境

月面における温度変動範囲は、次の通りである。

$$102 \text{ K} \sim 384 \text{ K} \quad (\text{約} -171 \text{ }^\circ\text{C} \sim 111 \text{ }^\circ\text{C})$$

## ⑧ 真空度

月面における真空度は、 $1 \times 10^{-10} \text{ Torr}$ である。これは、静止衛星静止軌道上の条件と同一値である。

## ⑨ その他

月磁場はない為、宇宙用機器への影響はない。

次に、宇宙環境の中で、真空・荷電粒子等からハードウェアを守るための処置例を示す。

## ① 熱真空対策

受動的熱制御：多層断熱ブランケット、サーマル・コーティング、断熱スペーサ等

能動的熱制御：ヒータ、サーモスタット、ヒートパイプ、サーマルルーバ等

## ② 放射線対策

全線量効果：集積回路の耐放射線性向上、シールド等

単一現象：集積回路の選択、誤り訂正符号の採用、冗長系と多数決、ウォッチドッグタイマ等

## ③ 帯電対策：等電位化

## b. 回線系の雑音に帯する対策

通信回線には装置自身の発生する熱雑音ならびに、天空あるいは地球の放射エネルギーなどによる外来雑音が存在する。通信回線の品質を維持・向上するためには、それらの雑音レベルに対して十分な大きさの信号強度を得るためアンテナ径や送信機出力電力が選択される他に、熱雑音の発生量の抑制や、データ誤り訂正方式が採用されている。

月面に設置される可搬型炉の無線運転システムについては、装置の大規模化を避けながら、通信回線の品質を高め、安全・確実な運転のためデータの誤りの訂正を行うような技術が必要とされる。

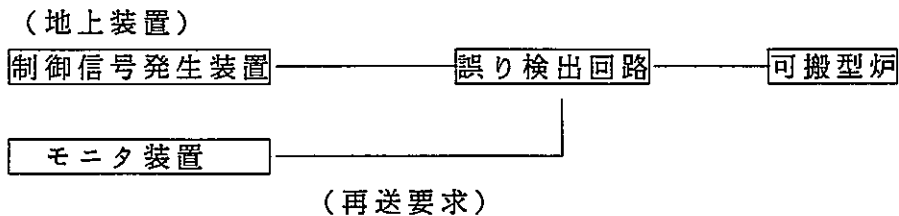
4章3節の通信回線検討において、モニタ信号及び制御信号のデータ誤り率はそれぞれ $1 \times 10^{-6}$ 及び $1 \times 10^{-9}$ 以下としている。

モニタ信号は一定の周期で繰り返し送信されるため、複数の同一信号を受信側で比較することにより、信号の確からしさは実用上の問題のないレベルにまで高められる。

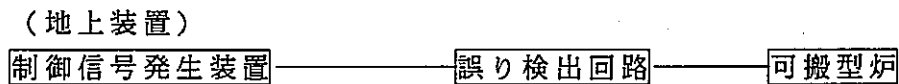
一方、制御信号については回線計算上の許容データ誤り率をモニタ信号に比べて1桁厳しく設定しているが、次に示す方法を併用することにより更にシステムの確実性が図られる。

制御信号の伝送手順の代表例として次に示す通り、再送手順と誤り訂正手順がある。

①再送手順



②誤り訂正手順



再送手順方式は送信した信号が正常に受信されたか否かを送信側が確認するものであり、受信された信号をそのまま送信側へ送り返す方法と、受信側で誤りの有無を検出してその結果（誤り無し／有り）を返送する方法がある。図12に示されるポリミナルチェックコードは、このデータ誤りの有無を受信側で行うために用いられるデータである。

受信されたデータに誤りが生じていることが確認された場合、送信側は再び該当データの送信を行う。

受信側での誤りの訂正方法としては誤り訂正符号方式と多数決方式がある。前者は情報データの他に誤り訂正符号データを同時に伝送し、受信側で信号処理を行い定められた範囲内の誤りを訂正するものである。後者の多数決方式は同一データを複数回連続的に伝送し、受信側でそれらのデータの一致／不一致を検出し、多数決で最終的に受信データを検出する方式である。多数決方式は誤り訂正符号方式に比べて回路構成が簡単であるという特徴がある。

誤り訂正手順は送信すべきデータ量が再生手順方式に比べて増大するが、随時受信結果の確認を必要としないため、制御信号の伝送所要時間は低減される。

宇宙ロボットなどの制御においては、誤り訂正手順が採用される計画にある。このような誤り検出、訂正手順を月面に設置される無線運転装置に採用することによってシステムの安全・確実な運転が実現できる。

この他、運用システムの安全性を高めるためには、暗号化などのセキュリティを採用して対妨害性能を高めることが月面に設置される無線運転システムには重要である。

c. 太陽雑音による回線上の不具合

地球局のアンテナビーム指向方向に太陽が入ると、地球局受信機の見かけの雑音温度が急激に増大し、回線断を発生させる。同様に、月面に設置されるアンテナビーム指向方向に太陽が入った場合も回線断を発生されることになる。但し、このような現象が起こるための条件として月・太陽・地球がほぼ直線的に並ぶ必要があり、十分予測が可能である。また、地球及び月に設置されたアンテナからのビーム指向幅が地球及び月に対しある程度絞られていれば、直接太陽がビーム指向幅内に入ることはなく、雑音レベルもそれほど上がらないと考えられる。よって、回線上のマージンをある程度確保することにより、回線断を回避することができると考えられる。

d. 伝送距離上の運用制約

地球局と月面局間の距離的な伝送遅れは約1.3秒であり、アンサーバックを考慮すると約2.6秒かかることになる。さらに、無線装置の回路内伝達に要する時間を考慮すると約3秒と考えられる。

以上のことから、ある事象をモニタ後アクションを起こした場合、最低でも約3秒は遅れることとなる。

## 5. 深海底炉の無線運転装置

海底資源調査あるいは海底環境調査活動が国内外において進められている。それらの活動における動力源として、海底に設置される可搬型炉（以下「深海底炉」という）を地上施設より制御・監視するための無線運転装置について以下に示す。

ここで対象とする深海底炉は深度2,500mあるいは6,500mの海底に設置される構想である。

### 5.1 深海底炉無線運転システム

深海底炉を用いた総合海底観測システム無人海底基地を図13に示す。この基地では、地殻の挙動に関する観測、深海の生物に関する観測が行われる。図中の新動力源群として深海底炉が用いられる。深海底炉無線運転システムの概念図を図14に示す。図において資源調査、学術調査あるいは地震予知のための各種計測・観測装置が海底に設置され、それらの装置により得られるデータの収集装置ならびに各装置の動力源とされる海底炉が併せて設置される構想を示している。深海底炉を含む各装置の設置、回収あるいは補修は潜水船およびROV(Remotely Operated Vehicle)によって行われる。各計測・観測装置により得られるデータの回収については定期的には母船、潜水船あるいはROVによってもなされるが、リアルタイムには人工衛星などを利用して直接、地上施設に送信されることが望ましい。炉の運転は、現在故障した箇所を切捨てて、残った部分で運転を継続するという方法を検討している。

深海底炉無線運転システムは図14に示されるように地上施設と、洋上ブイ或いは観測船との間を接続する通信系と、洋上ブイ或いは観測船と海底に設置される装置の間を接続する水中通信系より構成される。前者の通信系については陸上と洋上ブイ或いは観測船を直接接続するケースにおいては電波の海面反射による回線品質の劣化が大きくなるため、これを防ぐために人工衛星を介したシステムが適当と考えられる。洋上ブイを用いる場合には、その海面上での設置方法が問題となる。深度2,500m或いは6,500mにもおよぶ海上に浮遊させるブイはワイヤなどにより所定の洋上に固定される方式とするか、自身でその位置を検出して所定の洋上にその位置を保つことが可能な装置、機関を備えた能動航行方式とするか、あるいはブイの位置を知ることが可能な他からの無線操縦によりその洋上位置を保つことが可能な装置、機関を備えた受動航行方式とするかの検討が必要とされると考えられる。

図14に示されるGPS(Global Positioning System)衛星は洋上ブイ自身はその位置を検出する必要がある場合の航法情報源として利用されるものである。洋上ブイは衛星通信用機器、水中通信用機器およびそれらの電源装置を最低限備えることが求められ、通常目にする航行用のブイに比べてかなり大きな規模となるものと考えられる。

### 5.2 海中音響通信システム

海中音響通信システムに関する研究開発の現状を次に概説する。海洋科学技術センターは潜水調査船「しんかい2000」に続いて、「しんかい6500」の開発を完了し、1989年8月に金華山沖の日本海溝で水深6,527mの潜水記録を樹立した。この潜水調査船「しん

かい6500」の潜水支援音響システムとして母船「よこすか」から潜水船を測位・追尾するための音響航法装置、潜水船が自身の位置を知るための音響測位装置、そして前方の障害物や目標を探知、映像化するソナーなどの各機器が開発され、上記潜水実験に用いられた。

また、近年海底石油掘削あるいは海底資源調査等の海中作業の増加に伴いROVおよびこれを発展させたAROV(Autonomous ROV)や海洋ロボットの開発が進められている。これらの水中Vehicleの多くは目に相当するTVカメラと手に相当するマニピュレータを有し、支援船上のオペレータの遠隔操作または監視のもとで自律的に海中作業を行う構想である。水中Vehicleと支援船の間で画像伝送する場合は情報の大容量化が必要となるが海中音波による画像伝送は1980年頃から種々試みられており、次に示す事例が紹介されている。

- ・フランスのThomson-SINTRA(前Thomson-CSF)社では伝送距離1.2kmで、伝送速度20kbpsのTV画像伝送装置を開発し、欧米の各種ROVに搭載されている。
- ・海洋科学技術センターでは6,500m潜水調査船システムの水中通話機の性能に関する検討及び伝送距離約2kmで1フレーム/26秒のTV画像(アナログ方式)の伝送実験を行っている。
- ・通産省工業技術院の大学プロジェクト「極限作業ロボット」の研究開発の一環として伝送距離60m、情報速度500kbpsの海中音響通信システムの基礎技術の検討が進められているが、ハードウェアの規模などについては今後の課題とされている。

音響以外の水中通信システムとしては軍事用として研究開発が進められているブルーグリーンレーザを代表例として挙げることができる。米国国防省において1980年頃より研究開発が進められている潜水艦レーザ通信システムは地上施設と衛星(レーザ衛星)間はRF、レーザ衛星から潜水艦へはレーザを用いて通信回線を構成するもので、レーザ衛星に搭載されるレーザはラマンレーザ(波長=0.491 $\mu$ m)、伝送情報速度は100bps程度で海面下200~300mの潜水艦に対して $1 \times 10^{-6}$ 程度のデータ誤り率を目標としているといわれ、1990年代後半に実用化が期待されている。ただし、海水中でのレーザビームの広がりが大きいため、(潜航中の)潜水艦から衛星へ通信するためには非常に大きなエネルギーを必要とされるため、実現が難しく、この潜水艦レーザ通信システムは一方向(衛星→潜水艦)通信システムである。

上述の海洋科学技術センターによる音響通信システムの2000m潜水調査船システムを用いた実験の報告では、音声通信に関しては、現状の技術に送受波器の指向性利得および入力電力を改善することにより、最大通信距離として9,200mが可能であるとの見通しが得られている<sup>9)</sup>。また、TV画像伝送実験においては伝送距離1,800mで信号対雑音比が約15~20dB得られると報告されている<sup>9)</sup>。これを伝送距離6,500mに適用した場合、海中での伝搬損失が約40dB程増加する(ただし、周波数を25kHzとした場合)ため、長距離伝送には一層の改善が必要であると考えられる。

海面及び海底からの反射信号、あるいは付近を航行する船舶による音響雑音に対して十分な耐性を有し、更に長距離海中通信を可能とする高感度、高出力の音響通信機、通信方法の開発が一層進められることが必要と考えられる。更に、深度6,500mの海底と海面との艦の音響信号の伝搬時間が約4秒強（片道）必要とされることが深海炉無線運転システムに与える影響を考慮する必要がある。即ち深海底炉の緊急制御を無線で行うのは不可能と考えられる。

## 6. システム関連技術

### 6.1 宇宙運用・データシステム (Space Operation and Data System : 「SODS」)

これまでの静止衛星及び中高度地球周回衛星の追跡管制設備の開発・整備及び運用を通じて修得した技術蓄積をベースに、日・米・欧・加によるH-Iロケット、国際宇宙ステーション等が運用される。1990年代後半から日本の宇宙開発プログラムに表れる各種の軌道上宇宙機／搭乗員の宇宙活動を、我が国自らの手で最も効率的に実施することができる統合宇宙運用基盤を総合的に開発・整備し、体系的に管理運用することを目的として宇宙運用データシステムの開発が始まっている。

宇宙運用・データシステムの通信ネットワークシステムは、軌道上の宇宙機と地上の運用管制システム等の各種施設・設備を結ぶ通信機能を有するシステムである。この通信ネットワークシステムをブレイクダウンすると、以下のシステムに分けられる。

- ・ 軌道上の宇宙機と地上との間を強力な無線通信機能で直接に結ぶ追跡管制用地球局群
- ・ 関連の設備、外部機関等との通信に使用する通信回線網
- ・ 地球周回衛星と地上との間をデータ中継・追跡衛星(DRTS)を介して、連続的で大容量のデータ伝送路で結ぶために整備するデータ中継・追跡衛星システム(DRTSS)

宇宙運用データシステムについての海外動向は次のようである。

#### (1) NASAの動向

現在10局以上ある地球局網は追跡・データ中継衛星システム(TDRSS)が確立した後は、3局の深宇宙局と2局の打ち上げ支援局に整理される。深宇宙局には26mφ、64mφアンテナ系が残る。26mφ系は深宇宙支援の他に、シャトル運用のバックアップ系、非TDRSS使用衛星の支援と密に使用される予定である。更に複数の民間ロケット打ち上げ会社が設立され、これらの支援にNASA地球局は使われるので、NASA地球局によるNASDA衛星の支援は極めて難しくなる。

地上局、各管制センター等を結ぶ通信網は宇宙ステーションとTDRSSの時代を迎え、全米を通信衛星や光通信システム等で覆う高度な広帯域網で置き換える計画である。

ネットワークの一大ユーザである宇宙基地側は、同計画の主要成果物の一つは宇宙活動で得る「情報」であると考えている。特に、国際的宇宙基地計画には、多くの宇宙機と地上センター、研究機関が含まれることから、情報システムがうまく機能するかどうかは計画の成否の大きな要素となる。

宇宙機の管制を行う管制センターについては、NASAはゴダード宇宙飛行センター(GSFC)やジョンソン宇宙センター(JSC)等にその機能を分担させている。

#### (2) ヨーロッパの動向

ESA、フランス、西ドイツ等の運用・情報システムが存在しヨーロッパ、アフリカ、南米等に地球局網を有しておりナショナルプログラムやESAのプログラム毎に役割分担



を行っている。ESAは、1980年代末には10ヵ国程に地球局を持つ計画である。海外局は主に打ち上げ及び初期段階の運用に使っている。計画によればアリアンロケットは年10回以上打ち上げられる予定であり、これからの地球局はアリアンロケットのユーザ衛星支援に専念することになると思われる。

通信ネットワークは、先進的通信方式の世界標準の一つであるパケット通信網を世界の諸宇宙機関に先駆けて既に運用している。運用ネットワークのみならず、関連情報についても各所のコンピュータを結び遠隔地からのソフトウェア利用や業務情報化が現在進行中である。

情報システムにおいては、50Gバイト以上の蓄積容量を持つデータベースが現存し、2500万項目のデータが5400人以上のユーザによって使用されている。

管制システムについては、大型のホストコンピュータとワークステーションを組合せ、衛星固有のデータファイル等を追加するだけで複数衛星を同時に支援できるシステムを運用している。

また、追跡管制の将来システムに関する国際調整状況は次のようである。

#### (1) 宇宙ネットワーク相互運用パネル(SNIP)

NASA、ESA、NASDAは、データ中継衛星を用いた“宇宙ネットワーク”を1990年中期頃に確立する計画を有している。宇宙ネットワークは、従来の地球局ネットワークに比べ、低高度の衛星と常時かつ大容量のデータ伝送を飛躍的に可能とするものである。

現在、NASDAとESAのデータ中継衛星システム間で相互運用を可能とし、NASAの次世代TDRSSも加わるように働きかけつつ、調整を進めている段階である。

#### (2) 宇宙データシステム諮問委員会(CCSDS)

電力やバンド幅等に地上の通信路とは異なる独特の制約等がある宇宙データシステムに対して、情報の発生源から情報の各種利用者に致るデータ処理システムを標準化し、処理の自動化、国際協力の推進、信頼性の向上等を図るガイドラインを「勧告」として規定することを目的に、1982年10月設立された。

以上のように宇宙ネットワークについては、NASA、NASDA、ESAによる世界規模の宇宙ネットワーク作り計画が、国際協力の下に進んでいる。

### 6.2 シミュレーションモデルの検討

ここでは月面上に設置される可搬型炉の無線運転システムのシミュレーションモデルの検討結果について示す。深海底炉無線運転システムについては、海中音響通信の分野にまだ技術的課題を抱えていると考えることができるが、月面炉無線運転システムについては現在の宇宙通信システムの技術延長線上にあると考えられる。月面炉無線運転のための通信システムについては4章3節に示された通信緒元で十分実現が可能であると考えることができる。

従来の惑星探査システムと月面炉無線運転システムの大きな相異は後者のシステムはモニタ信号と制御信号が相互に密接な関係があり、運転員の判断・操作を含めてそれら

の信号はクローズループを構成している点にあるといえる。また、地上における原子力発電プラントの制御システムと月面炉無線運転システムの相異としては、前者に比べて後者のシステムは運転員が利用できる情報（信号の種類ならびに量）が限られること、ならびに往復で約3秒あるいはそれ以上の信号伝搬遅延時間を生じることなどが挙げられる。

以上の点を考慮して、ここで検討するシミュレーションモデルの製作目的は装置自身の開発ではなく、遠距離通信による伝搬遅延時間などが可搬型炉の運転に及ぼす影響、制約の度合いを模擬し、それらの環境下で安全・確実に小型高速炉を運転するための運用技術を開発するためのツールを準備するものと位置づけることとする。

シミュレーションモデルのシステム図（案）を図15に示す。図15に示されるシステム図は月面部分と地上部分を適度に離れた位置に設置し、その間を無線回線で接続するシステムを示している。その距離を100m程度とすると、表6及び表7に示した自由空間伝搬損失量は約80dB程度と見積ることができ、月面と地上との通信時に比べてその損失量は約130dBも少ない値となる。（ $10^{13}$ 分の1の損失量）

このように条件が大きく異なるもつで4章3節に示した規模の無線局をシミュレーションモデルに適用することの是非については更に検討を要するが、ここではシミュレーションモデルの製作目的を運用技術の開発を主題とし、それに見合った通信諸元を適用することとする。前述の通り、自由空間伝搬損失量が約80dB程度であるため、月面側および地上通信アンテナ無指向性の低利得型で十分であり、送信機出力電力についても10m以下の小電力で十分な回線マージンを得ることができる。

次に図15に示されるシミュレーションモデルの内容について以下に示す。提案するシミュレーションモデルの主要な機能は次の通りである。

- 1) 信号電力対雑音電力比の調節
- 2) 伝搬遅延時間のシミュレーション
- 3) 高速炉の動作シミュレーション
- 4) 運転員とのマンマシンインタフェース
- 5) 上記の各機能を実現する部分間の信号接続・切替えおよび信号処理

図15に示される「雑音発生器」は実際の通信回線において、装置自身の発生する雑音あるいは宇宙空間などにより入射する外来雑音を模擬するために用意されるもので、その雑音信号は「混合器」において「変調器」出力信号に加算される。月面相当部分に用意される「雑音発生器」はモニタ信号に重畳される雑音を、地上相当部分に用意される「雑音発生器」は制御信号に重畳される雑音を模擬するために使用される。「混合器」と「送信機」の間に挿入される「減衰器」は送信機出力電力レベルの調整に用いられるものである。月面相当部分および地上相当部分の「ベースバンド信号処理部」にはそれぞれ「遅延回路」が用意される。遅延時間量は実験者が「計測・制御用コンピュータ」のKeyboardより任意に設定できるものとする。以上に示した部分は主として、通信回線をシミュレーションするものである。

「模擬高速炉」については、そのタービン出力電流／電圧、冷却材温度あるいは制御ドラム位置などのモニタ信号を「計測・制御コンピュータ」を用いてソフトウェアによりシミュレーションする。模擬モニタ信号は月面相当部分の「ベースバンド信号処理部」において図11に示される伝送フォーマットに編集されたのち、設定された遅延時間後に通信回線系に出力される。地球相当部分の装置で受信された模擬モニタ信号は「ベースバンド信号処理部」において、図11の伝送フォーマットのWD1～WD3に示されるフレーム同期パターンを検出することにより送信されたデータを順に取り出し、ソフトウェア処理を行ったのち「計測・制御用コンピュータ」のCRTへ表示する。

模擬制御信号は実験者が「計測・制御用コンピュータ」のKeyboardより入力する。制御信号はデータ誤り検出／訂正符号などが付加されたのち、設定された遅延時間後に通信回線系に出力される。

月面相当部分で受信された制御信号はデータ誤り検出／訂正処理が行われたのち前記、「計測・制御用コンピュータ」を用いてソフトウェアによりシミュレーションされる「模擬高速炉」へ出力され、プログラム化されたその動作状態を変えるために用いられる。

「模擬高速炉」はヒータ、リレーおよび電子回路などを用いてハードウェア的に用意することも可能であるが、実験中に「模擬高速炉」の動作パラメータを変更する必要がある場合などに自由度が制限されることを懸念し、ここではソフトウェア化することとしている。

図15においてSWはスイッチを示している。シミュレーションモデルの月面相当部分と地上相当部分を同一フロアに設置する実験システムの場合は月面相当部分あるいは地上相当部分の「混合器」の出力をそれぞれ、地上相当部分あるいは月面相当部分の「復調器」に接続することで実験が可能である。

また伝搬遅延時間による影響を主体とした実験を行う場合は、月面相当部分および地上相当部分の「ベースバンド信号処理部」同士を接続することで確認が可能である。月面相当部分と地上相当部分を同一フロアに設置する実験システムの場合は、「計測制御用コンピュータ」は月面相当部分と地上相当部分との共用も可能であると考えられる。

シミュレーションモデルの製作目的を運用技術の開発に特定した場合は、月面相当部分および地上相当部分の「ベースバンド信号処理部」同士を接続するコンフィギュレーションが、装置規模の点で効率的と考えられる。

## 7. おわりに

可搬型炉の無線運転装置について予備検討を行った。その結果、月面上の炉の無線運転システムについては、現在の宇宙通信システムの延長線上にあると考えられ、開発は比較的容易である事がわかった。又、深海底炉の無線運転システムの開発課題についても、技術的には解決されるものである事が、わかった。

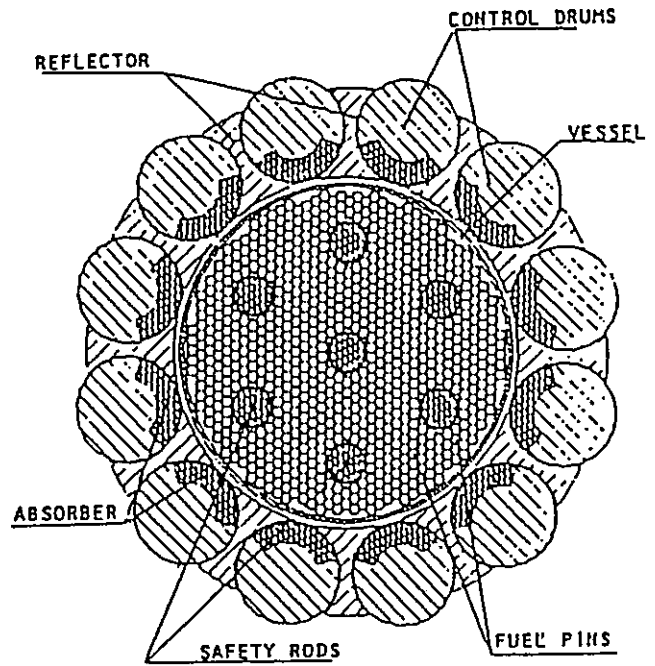
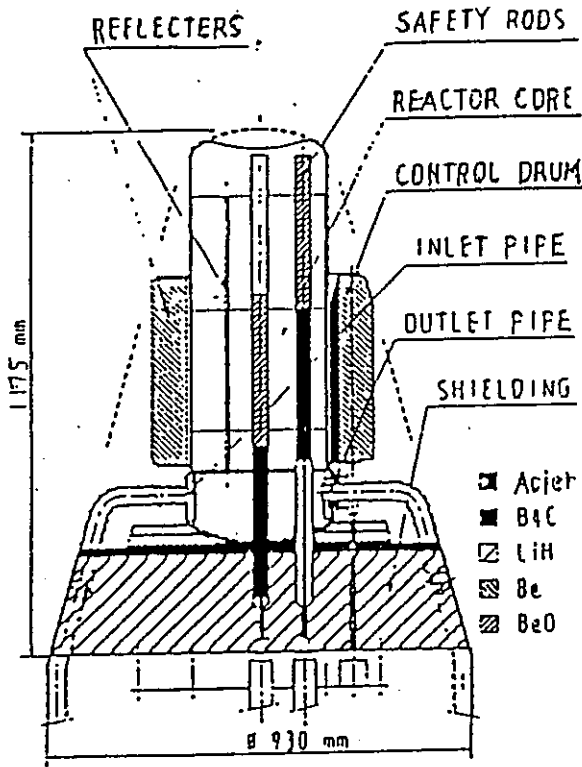
無線運転装置のシミュレーションモデルについても検討したが、このような開発研究が出来るだけ早く行われる事が望まれる。

## 8. 謝辞

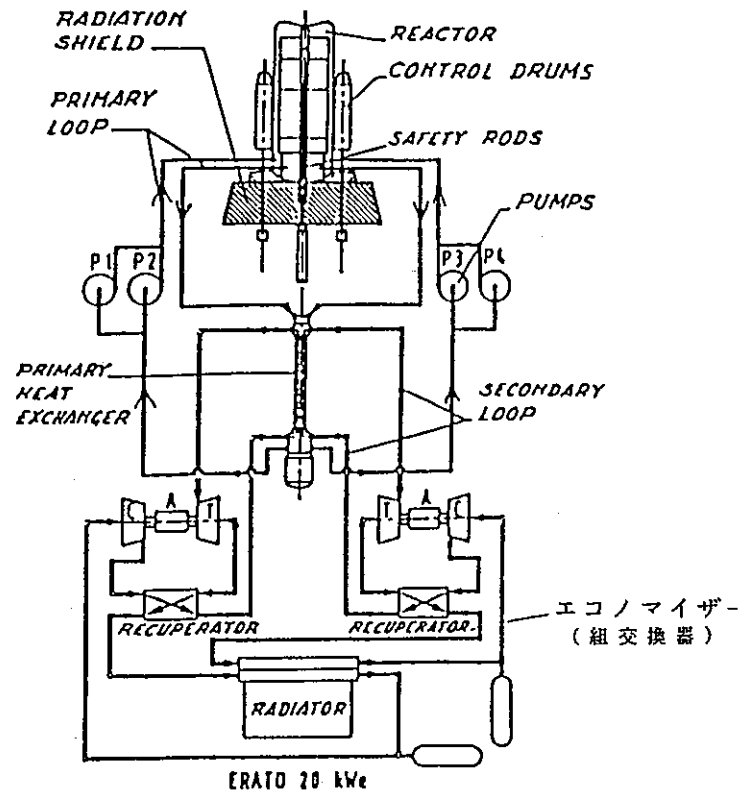
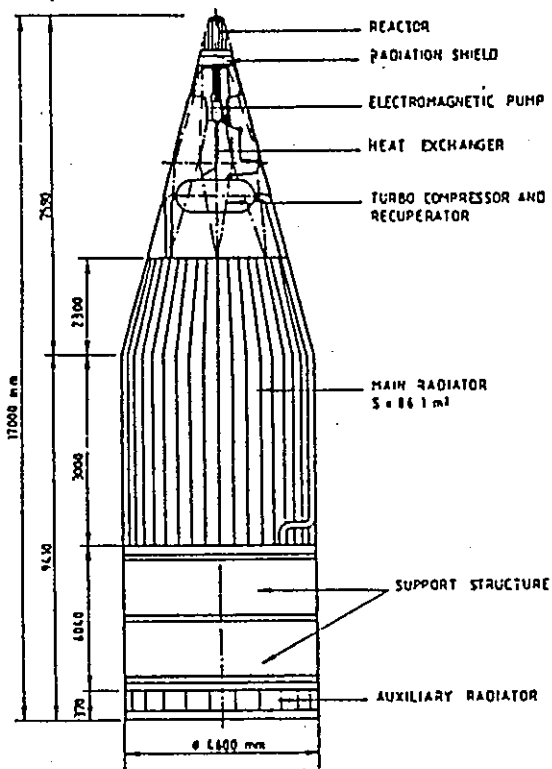
三菱電機（株）の方々には、システム解析及びシステム関連技術等について御協力いただいたので、ここで謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 動燃報告書 PNC 19430 90-002 「高温高速炉—ブレイトンサイクルシステムの宇宙炉に関する調査検討」、大坪 章 他、1990年8月
- 2) “カリウムタービン発電の予備検討” 片岡 一, 羽賀一男 他、将来の宇宙活動ワークショップ90/月面基地ワークショップ、3A7、つくば市、平成2年6月12日～14日
- 3) “Autonomous Control Design Considerations for Space Nuclear Power Systems,” M.S.Imamura et al., Space Nuclear Power Systems 1984, Orbit Book Company, Malabar, FL. 1985
- 4) 衛星通信ガイドブック、富永英義 他、オーム社
- 5) “6500メートル潜水調査船システムの水中通話機の性能に関する検討” 網谷泰孝 他、海洋科学技術センター試験研究報告 JAMSTECTR 17(1986)
- 6) “音響による画像信号伝送の基礎研究” 土屋利雄 他、海洋科学技術センター試験研究報告 JAMSTECTR 17(1986)

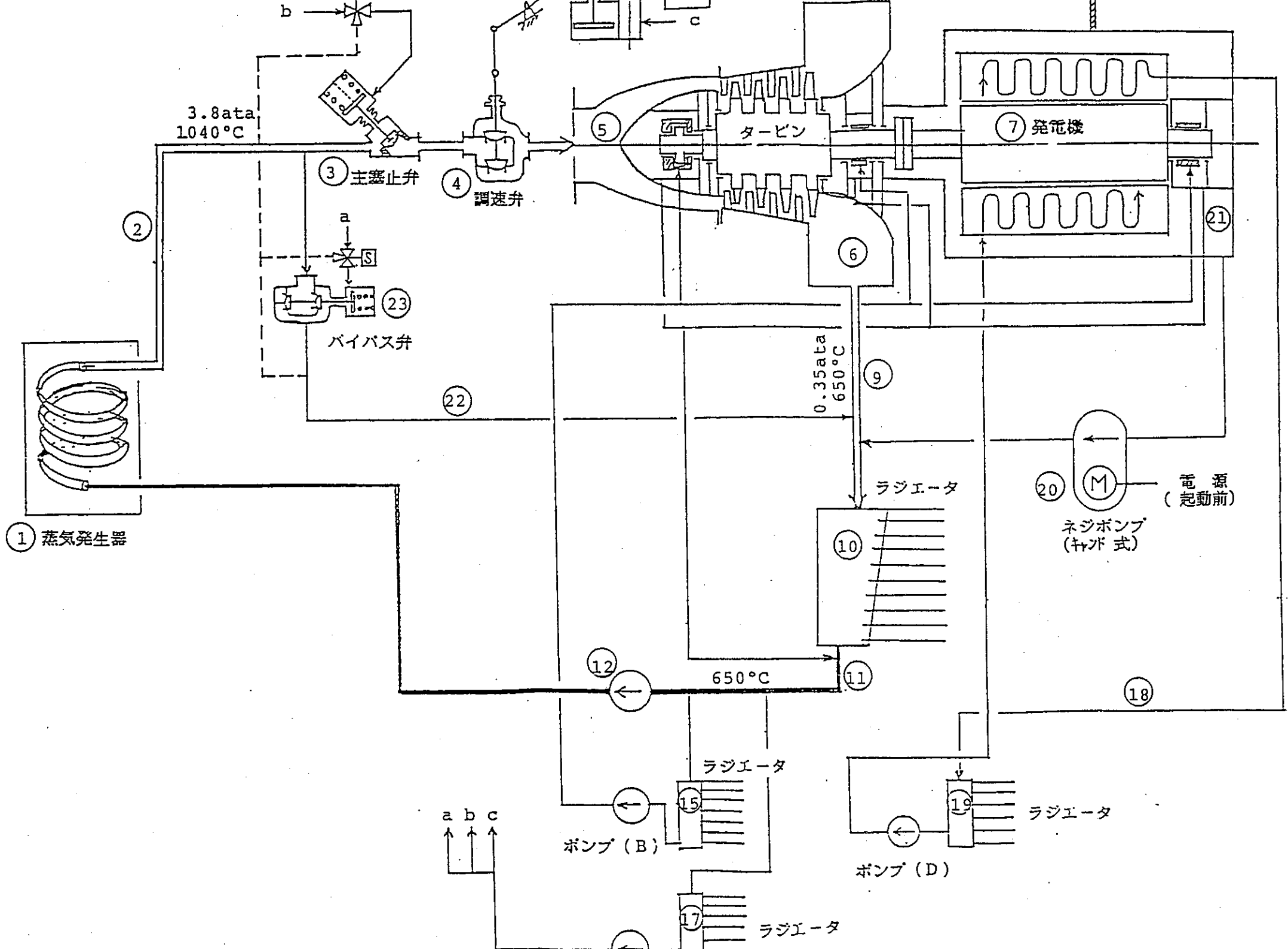


( a ) Vertical and Horizontal Cross Section of the Considered Liquid Metal Cooled Reactor.



( b ) General Layout and Schematic Diagram of the LMFBF Derivative 20-kWe Brayton System.

図 1 クローズドブレイトンサイクル型炉システム



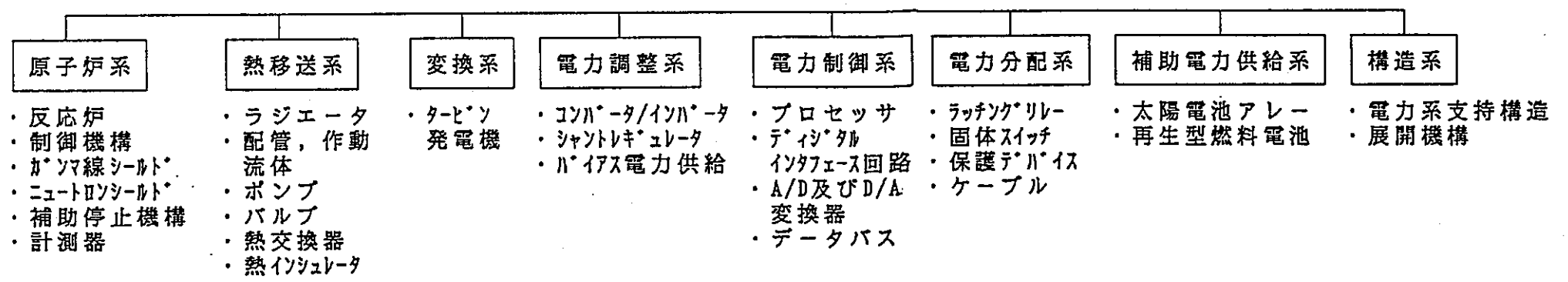
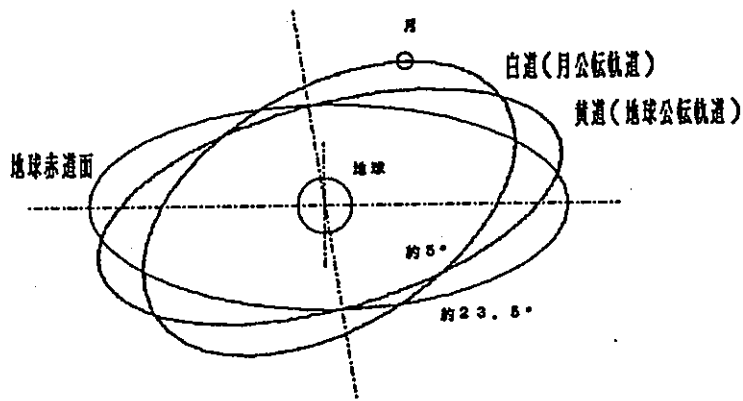
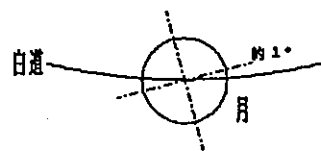


図3 原子炉発電システムの基本構成



月の軌道



月の姿勢

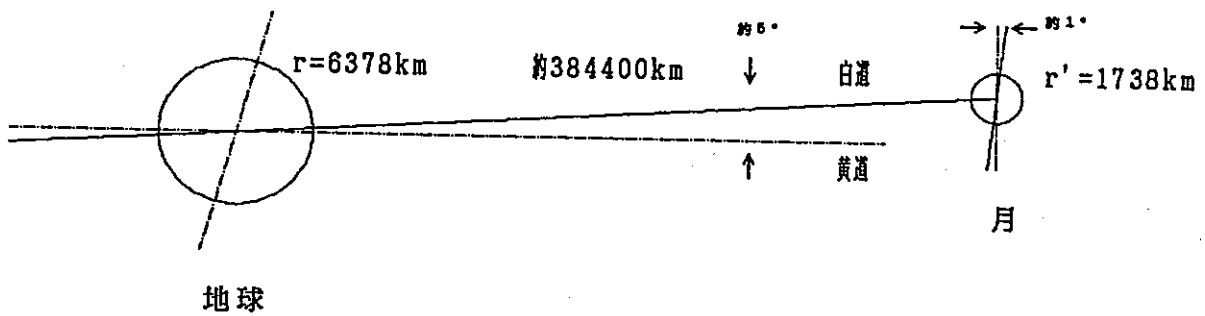


図4 月の軌道



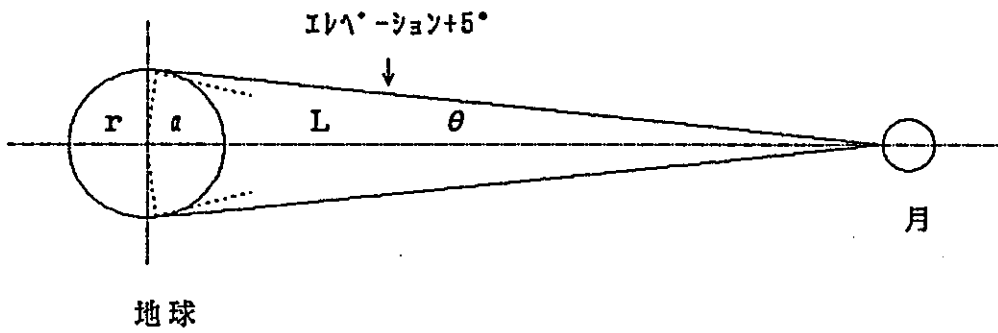


図5 地上局放置可能範囲

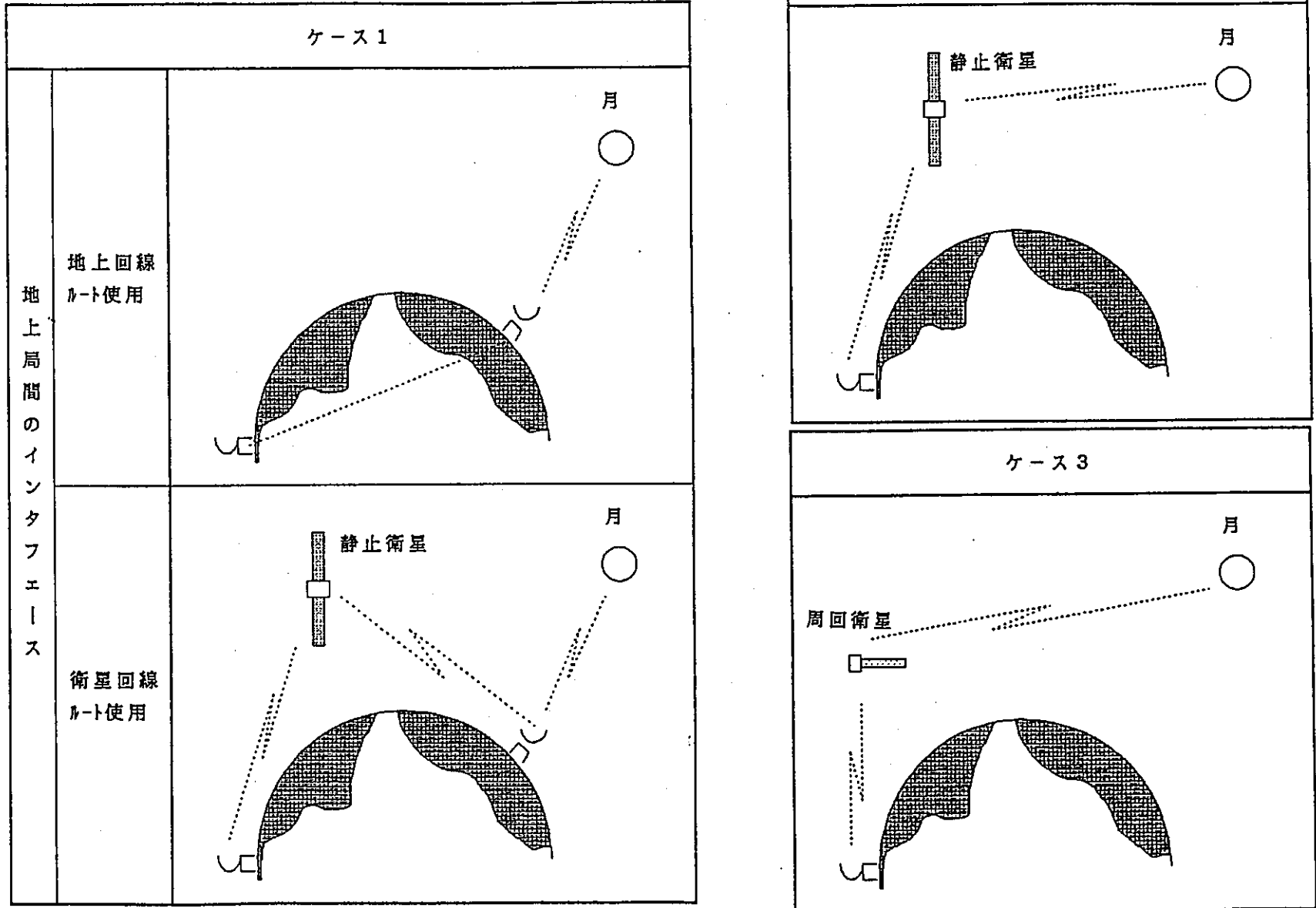


図 6 回線確保法

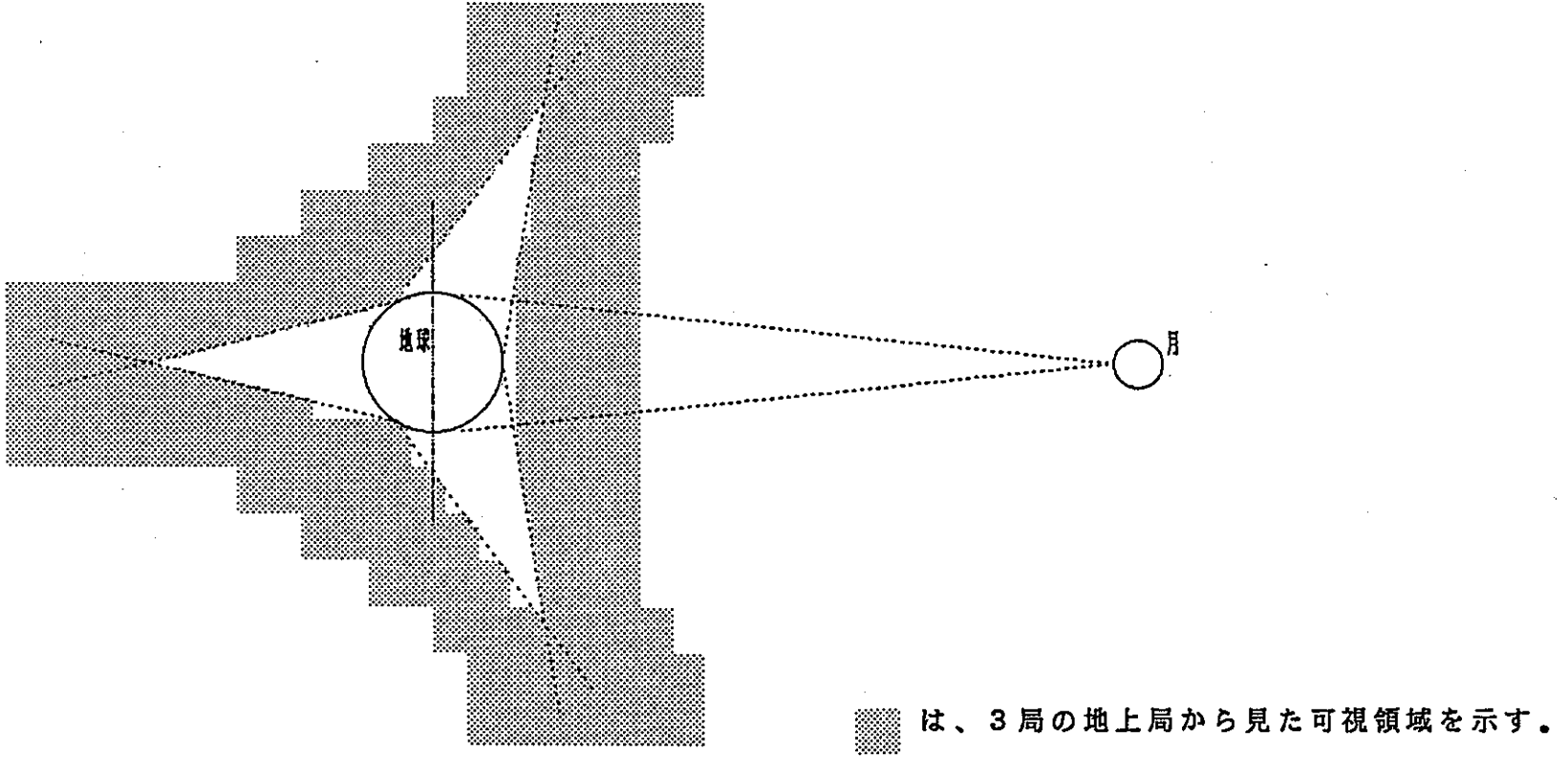


図7 3地上局からの可視領域

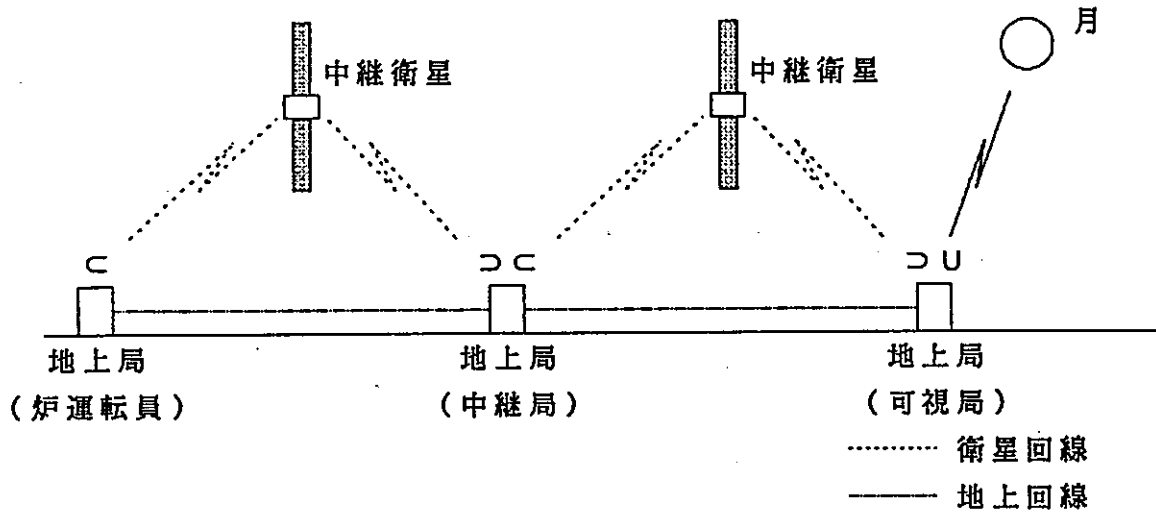


図8 地上局間インタフェース

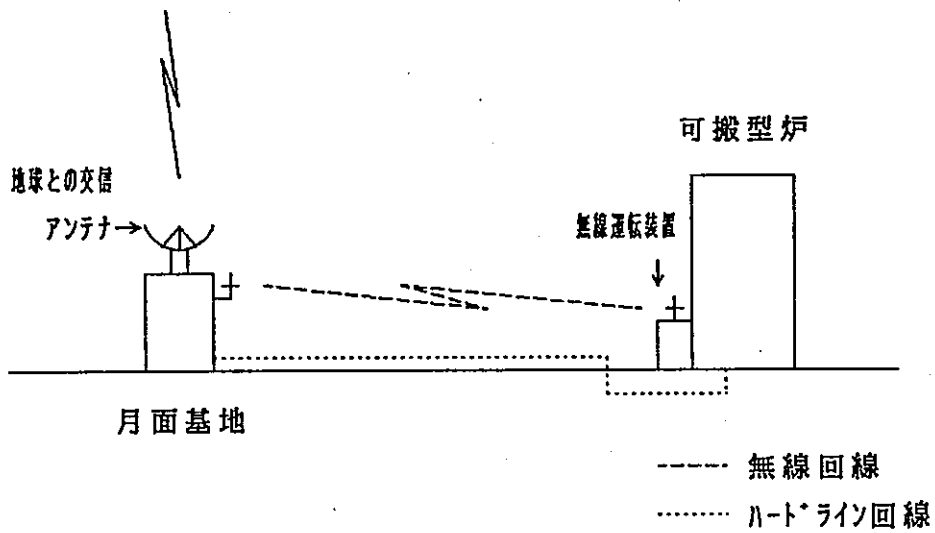


図9 月面上のインタフェース

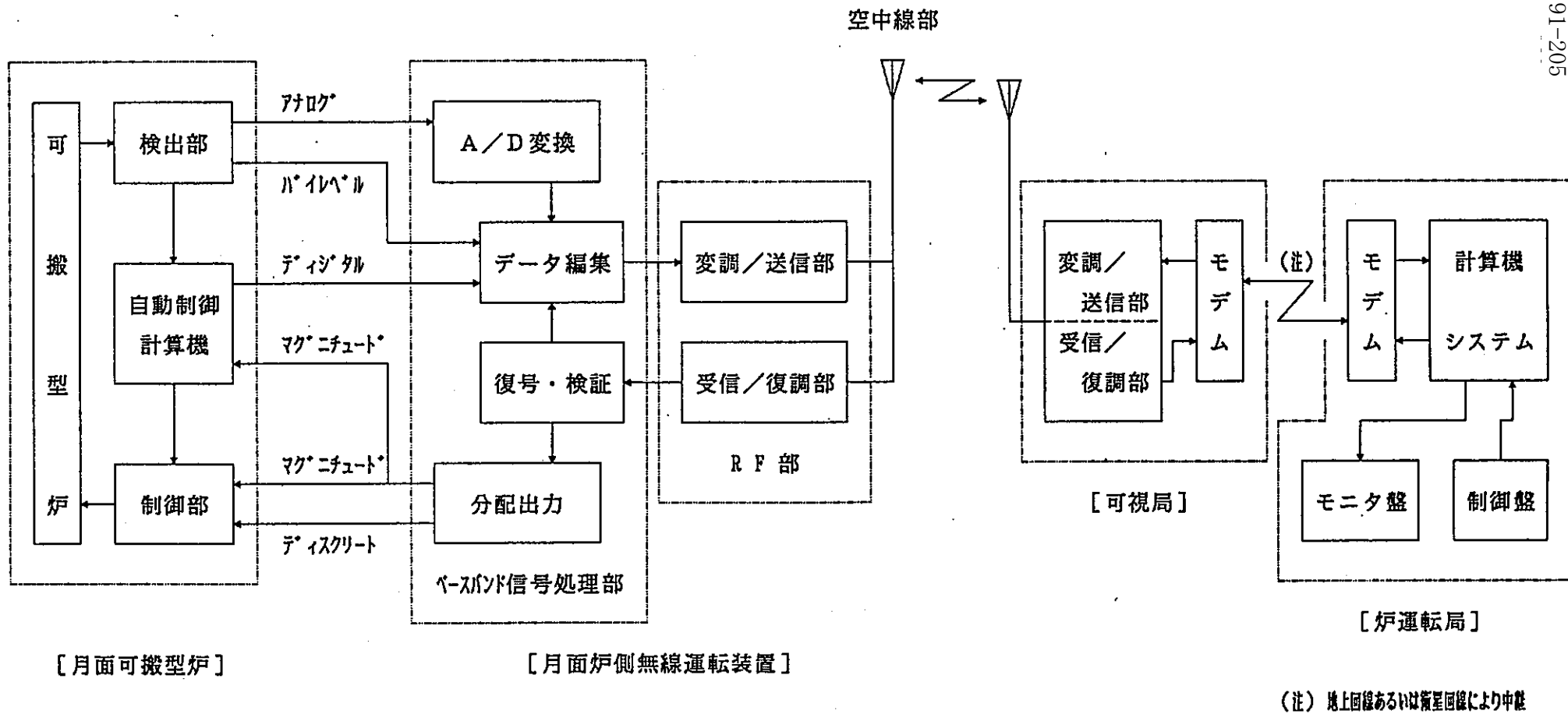


図 1 0 月面可搬型炉無線運転システム概念図

		WD1 フレーム同期パターン	フレーム No.16	A 1	A 2	A 3	A 4	A 5	A 6	A 7	A λ <sup>7</sup>	λ <sup>7</sup>	λ <sup>7</sup>	λ <sup>7</sup>	λ <sup>7</sup>		
(T=0sec)	WD1 フレーム同期パターン	フレーム No.2	A 1	A 2	A 3	A 4	A 5	A 6	A 7	A λ <sup>7</sup>	λ <sup>7</sup>	λ <sup>7</sup>	λ <sup>7</sup>	λ <sup>7</sup>		B 26	
	WD1 フレーム同期パターン	フレーム No.1	A 1	A 2	A 3	A 4	A 5	A 6	A 7	A λ <sup>7</sup>	λ <sup>7</sup>	λ <sup>7</sup>	λ <sup>7</sup>	λ <sup>7</sup>		B 26	
	C 1	C 5	C 9	B 1	B 3	B 5	B 7	B 9	B 11	B 13	B 15	B 17	B 19	B 21	B 23	B 25	B 52
	C 13	C 17	C 21	B 27	B 29	B 31	B 33	B 35	B 37	B 39	B 41	B 43	B 45	B 47	B 49	B 51	λ <sup>7</sup>
	C 25	C 29	C 33	B 53	A 1	A 2	A 3	A 4	A 5	A 6	A 7	A λ <sup>7</sup>	λ <sup>7</sup>	λ <sup>7</sup>	λ <sup>7</sup>		B 80
	C 37	C 41	C λ <sup>7</sup>	B 55	B 57	B 59	B 61	B 63	B 65	B 67	B 69	B 71	B 73	B 75	B 77	B 79	B
	D 1	D 17	D λ <sup>7</sup>	B 81	B 83	B 85	B 87	B 89	B 91	B 93	B 95	B 97	B λ <sup>7</sup>	B λ <sup>7</sup>	B λ <sup>7</sup>	B λ <sup>7</sup>	λ <sup>7</sup> (T=4sec)
																	λ <sup>7</sup> (T=2sec)

- A系データ** : 2 X (7 データ + 1 λ<sup>7</sup>データ) / マイフレーム
- B系データ** : (49 データ + 4 λ<sup>7</sup>データ) / マイフレーム
- C系データ** : (11 データ + 1 λ<sup>7</sup>データ) / マイフレーム
- D系データ** : (2 データ + 1 λ<sup>7</sup>データ) / マイフレーム

図 1 1 モニタ信号の伝送フォーマット

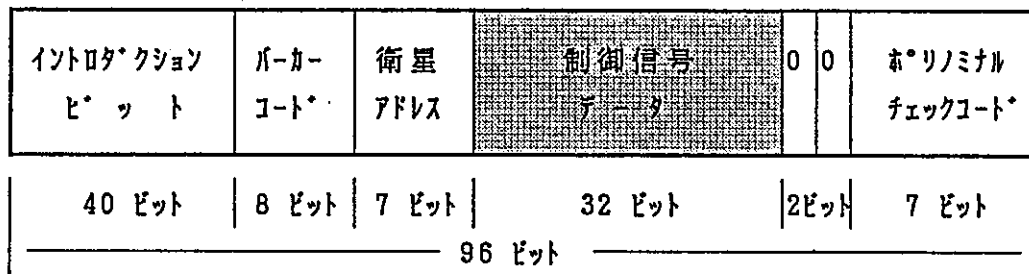


図 1 2 月面炉制御信号の伝送フォーマット

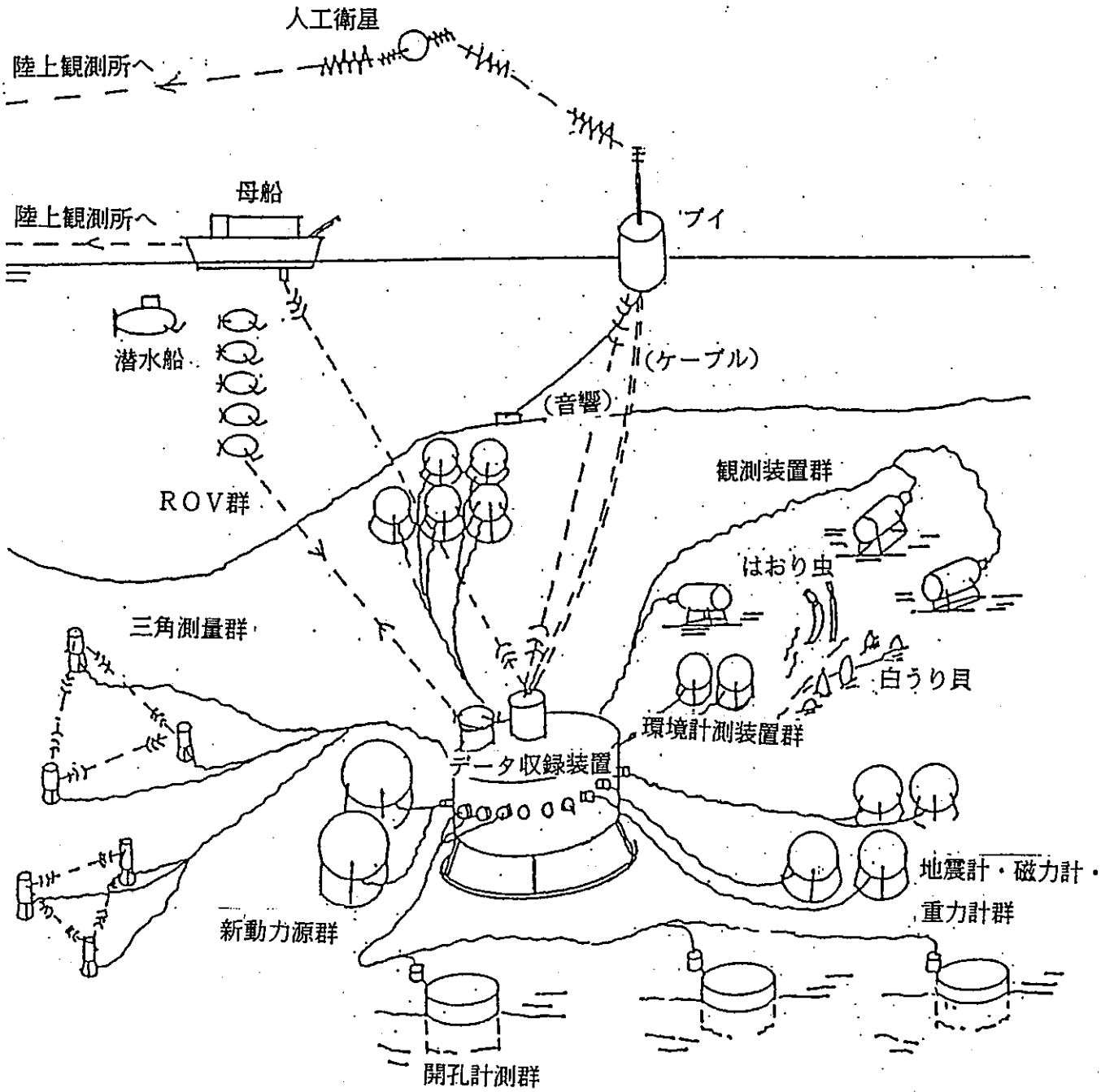


図 1 3 総合海底観測システム無人海底基地



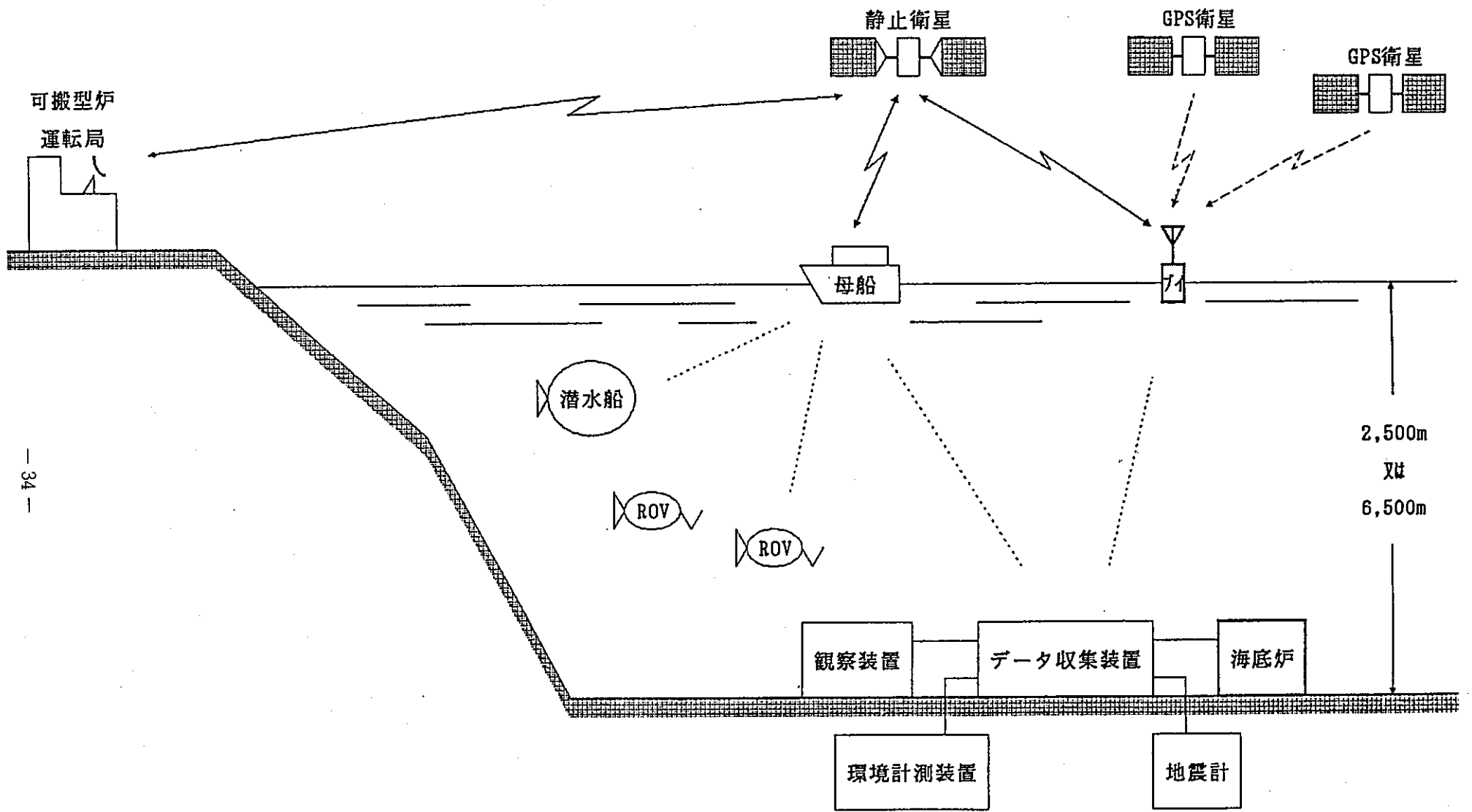


図 1 4 深海底炉無線運転システムの概念図

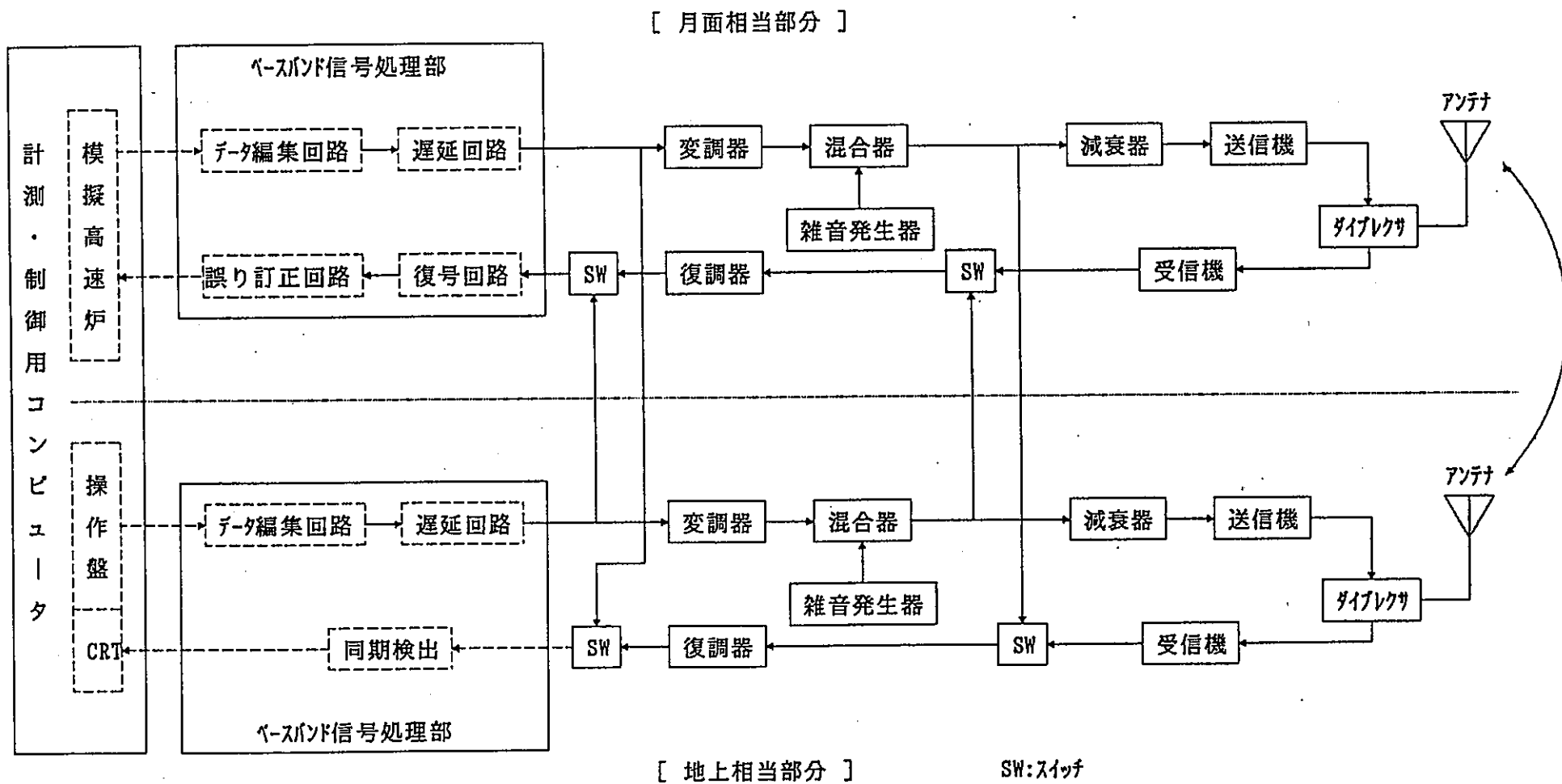


図 1 5 シミュレーションモデルのシステム図

表1 ナトリウム冷却プレイトンサイクル発電月面炉 モニタ項目

項目名	項目数	測定範囲	精度	更新周期	信号種類
タービン出力電流	主4,予備4	0 ~ 300 A	フルレンジの ±1%	10 sec	アナログ
タービン出力電圧	主4,予備4	0 ~ 1000 V	//	10 sec	アナログ
一次電源バス電圧	主1,予備1	0 ~ 200 V	//	10 sec	アナログ
冷却材流量 A	主2,予備2	0 ~ 3.5kg/S	//	5 sec	アナログ
冷却材流量 B	主4,予備4	0 ~ 3 kg/S	//	5 sec	アナログ
補助電源バス電圧	主1,予備1	0 ~ 200 V	//	10 sec	アナログ
ラジエータ温度	主8,予備8	0 ~ 300 ℃	//	60 sec	アナログ
原子炉冷却材温度(1次系)	主2,予備2	0 ~ 800 ℃	フルレンジの ±0.5%	5 sec	アナログ
中性子束計	3	0 ~ $10^{16}$ n/cm <sup>2</sup> S	フルレンジの ±1%	1 sec	アナログ
制御ドラム位置	主12,予備12	0 ~ 180°	//	5 sec	アナログ
制御ドラム位置	主12,予備12	0 ~ 360°	//	5 sec	アナログ
シャント電流	主1,予備1	0 ~ 100 A	//	60 sec	アナログ
バッテリー電圧	主1,予備1	0 ~ 100 V	//	60 sec	アナログ
バッテリー電流	主1,予備1	0 ~ 100 A	//	60 sec	アナログ
冷却液圧力 1次系	主3,予備3	0 ~ 5 気圧	//	10 sec	アナログ
冷却液圧力 2次系	主4,予備4	0 ~ 15 気圧	//	10 sec	アナログ
冷却液2次系温度	主12,予備12	0 ~ 800 ℃	//	5 sec	アナログ
ポンプ電源供給出力電圧	主4,予備4	0 ~ 20 A	//	5 sec	アナログ
安全棒挿入 ON/OFF	主7,予備7	——	——	1 sec	バイレベル
電磁弁 ON/OFF	主8,予備8	——	——	5 sec	バイレベル
調速弁開度	主4,予備4	0 ~ 100 %	フルレンジの ±1%	10 sec	アナログ
原子炉圧力	主1,予備1	0 ~ 5 気圧	//	1 sec	アナログ

アナログ : アクティブな電圧信号または、パッシブな抵抗値等で出力される信号

バイレベル : アクティブな電圧信号または、オープン/ショート等で出力されるステイタス信号。あるいは、ステイタス信号をデジタルデータに編集して出力される信号。

表2 ナトリウム冷却プレイトンサイクル発電月面炉 制御項目

項目名	項目数	制御精度	信号種類
制御ドラム位置	12	10ビット	シリアルデジタル コマンド
安全棒 挿入	7	—————	ディスクリート コマンド
安全棒 引抜き	7	—————	ディスクリート コマンド
原子炉主冷却ライン弁 開	2	—————	ディスクリート コマンド
原子炉主冷却ライン弁 閉	2	—————	ディスクリート コマンド
ナトリウム ポンプ動作	2	10ビット	シリアルデジタル コマンド
プレイトンサイクルポンプ動作	4	10ビット	シリアルデジタル コマンド
主塞止弁 開	2	—————	ディスクリート コマンド
主塞止弁 閉	2	—————	ディスクリート コマンド
バイパス弁 開	4	—————	ディスクリート コマンド
バイパス弁 閉	4	—————	ディスクリート コマンド
調速弁 開度	4	10ビット	シリアルデジタル コマンド

ディスクリート コマンド : 主に機器のオン/オフまたは、選択を指令する信号。リレー等を単一のパルス信号によって動作させるものである。

シリアルデジタル コマンド : 主にアナログ制御量の指定を指令する信号。16ビットの情報として伝送されるものである。

表3 カリウムタービン発電月面炉 モニタ項目

項目名	項目数	測定範囲	精度	更新周期	信号種類
タービン出力電流	主1,予備1	0 ~ 300 A	フルレンジの ±1%	10 sec	アナログ
タービン出力電圧	主1,予備1	0 ~ 1000 V	〃	10 sec	アナログ
一次電源バス電圧	主1,予備1	0 ~ 200 V	〃	10 sec	アナログ
冷却材流量 一次	主1,予備1	0 ~ 10 kg/S	〃	5 sec	アナログ
冷却材流量 二次	主1,予備1	0 ~ 10 kg/S	〃	5 sec	アナログ
補助電源電圧	主1,予備1	0 ~ 200 V	〃	10 sec	アナログ
ラジエータ温度	主8,予備8	0 ~ 1000 ℃	〃	60 sec	アナログ
原子炉冷却液出入口温度	主4,予備4	0 ~ 1500 ℃	フルレンジの ±0.2%	5 sec	アナログ
中性子束計	3	0 ~ 10 <sup>16</sup> n/cm <sup>2</sup> S	フルレンジの ±1%	1 sec	アナログ
制御ドラム位置	主12,予備12	0 ~ 180°	〃	5 sec	アナログ
制御ドラム位置	主12,予備12	0 ~ 360°	〃	5 sec	アナログ
バッテリー電圧	主1,予備1	0 ~ 200 V	〃	60 sec	アナログ
バッテリー電流	主1,予備1	0 ~ 20 A	〃	60 sec	アナログ
冷却液圧力	主3,予備3	0 ~ 5 気圧	〃	10 sec	アナログ
冷却液2次系温度	主5,予備5	0 ~ 1300 ℃	〃	5 sec	アナログ
ポンプ電源供給出力電流	主4,予備4	0 ~ 20 A	〃	5 sec	アナログ
ポンプ温度	主2,予備2	0 ~ 1200 ℃	〃	10 sec	アナログ
安全棒挿入 ON/OFF	主7,予備7	——	——	1 sec	バイレベル
電磁弁 ON/OFF	主6,予備6	——	——	5 sec	バイレベル
調速弁開度	主1,予備1	0 ~ 100 %	フルレンジの ±2%	10 sec	アナログ
ヒートパイプ加熱器温度	主1,予備1	0 ~ 1500 ℃	フルレンジの ±1%	60 sec	アナログ
発電機外衣内圧力	主1,予備1	0 ~ 0.5 気圧	フルレンジの ±2%	60 sec	アナログ
2次系補機ライン温度	主5,予備5	0 ~ 1000 ℃	〃	60 sec	アナログ
原子炉圧力	主1,予備1	0 ~ 5 気圧	フルレンジの ±1%	1 sec	アナログ

アナログ : アクティブな電圧信号または、パッシブな抵抗値等で出力される信号

バイレベル : アクティブな電圧信号または、オープン/ショート等で出力されるステータス信号。あるいは、ステータス信号をデジタルデータに編集して出力される信号。

表 4 カリウムタービン発電月面炉 制御項目

項目名	項目数	制御精度	信号種類
制御ドラム位置	12	10ビット	シリアルデジタル コマンド
安全棒 挿入	7	————	ディスクリート コマンド
安全棒 引抜き	7	————	ディスクリート コマンド
原子炉主冷却ライン弁 開	1	————	ディスクリート コマンド
原子炉主冷却ライン弁 閉	1	————	ディスクリート コマンド
原子炉補助主冷却ライン弁 開	1	————	ディスクリート コマンド
原子炉補助主冷却ライン弁 閉	1	————	ディスクリート コマンド
リチウム ポンプ動作	1	10ビット	シリアルデジタル コマンド
カリウム ポンプ動作	1	10ビット	シリアルデジタル コマンド
主塞止弁 開	1	————	ディスクリート コマンド
主塞止弁 閉	1	————	ディスクリート コマンド
バイパス弁 開	1	————	ディスクリート コマンド
バイパス弁 閉	1	————	ディスクリート コマンド
調速弁 開度	1	10ビット	シリアルデジタル コマンド

ディスクリート コマンド : 主に機器のオン/オフまたは、選択を指令する信号。リレー等を単一のパルス信号によって動作させるものである。

シリアルデジタル コマンド : 主にアナログ制御量の指定を指令する信号。16ビットの情報として伝送されるものである。

表5 更新周期別モニタ項目数一覧

データ更新 周期	項目数	予備系センサを 含めた項目数	所要ワード数 (*4)	ワード配置記号 (*5)
1 秒以内	11(*1)	19(*3)	7	A1,A2 -- An
5 秒以内	56(*2)	112	98	B1,B2 -- Bn
10 秒以内	21	42	42	C1,C2 -- Cn
60 秒以内	11	22	22	D1,D2 -- Dn
合 計	99	195	169	

(\*1) ・中性子束計のモニタ項目（三項目）を含んでいる。

・中性子束計以外の項目のうち7項目（安全棒挿入ON/OFF）はバイレベルデータである。

(\*2) 56項目のうち8項目（電磁弁モニタ）はバイレベルデータである。

(\*3) (\*1) に示される中性子束計モニタは予備系センサを持たない。

(\*4) 所要ワード数は予備センサ系によるデータを含めて伝送するケースについて見積もっている。

(\*5) ワード配置記号は図11に示されるデータフォーマットとの対応を示している。

表6 モニタ信号の回線計算例

通信パラメータ	計算値	備考
月面局送信機送信電力	10.0 dBW	Pt=10 W
送信系給電損失	-4.0 dB	
送信アンテナ利得	24.6 dBi	アンテナ直径=1 m
送信 E I R P	30.6 dBW	
-----		
自由空間伝搬損失	-211.3 dB	周波数=2.3 GHz d=38,000 km
偏波・大気吸収損失	-0.5 dB	
-----		
地球局受信アンテナ利得	34.2 dBi	アンテナ直径=3 m
受信系給電損失	-2.0 dB	
受信電力	-149.0 dBW	
受信雑音電力密度	-203.8 dB/Hz	Ts=24.8 dB·K(300 k) ホッルツマン定数=-228.6dBW
地球局受信電力対雑音電力密度比	54.8 dB·Hz	
-----		
信号伝送速度	25.8 dB·Hz	384 bps
変調損失	4.2 dB	変調度=1.0 ラジアン
所要Eb/No	9.6 dB	データ誤り率=1×10 <sup>-5</sup>
固定劣化分	2.0 dB	
-----		
地球局の所要受信電力対 雑音電力密度比	41.6 dB·Hz	
通信回線マージン	13.2 dB	



表 7 制御信号の回線計算例

通信パラメータ	計算値	備考
地球局送信機送信電力	20.0 dBW	Pt=100 W
送信系給電損失	-3.5 dB	
送信アンテナ利得	33.4 dBi	アンテナ直径=3 m
送信 E I R P	49.9 dBW	
-----		
自由空間伝搬損失	-210.5 dB	周波数=2.1 GHz d=38,000 km
偏波・大気吸収損失	-0.5 dB	
-----		
月面局受信アンテナ利得	23.8 dBi	アンテナ直径=1 m
受信系給電損失	-3.0 dB	
受信電力	-140.3 dBW	
受信雑音電力密度	-201.8 dB/Hz	Ts=26.8 dB·k(480 k) ボルツマン定数=-228.6dBW
月面局受信電力対雑音電力密度比	61.5 dB·Hz	
-----		
信号伝送速度	30.0 dB·Hz	1 kbpss
変調損失	4.2 dB	変調度=1.0 ラジアン
所要Eb/No	10.5 dB	データ誤り率=1x10 <sup>-6</sup>
固定劣化分	2.0 dB	
-----		
地球局の所要受信電力対 雑音電力密度比	46.7 dB·Hz	
通信回線マージン	14.8 dB	

## 用語集

用語	解説
アンテナエレベーション角	アンテナ指向水平方向からの上下角度(上+,下-) ・仰角。
アナログ(モニタ)	アクティブな電圧信号または、パッシブな抵抗値等で出力される信号。
ハイレベル(モニタ)	アクティブな電圧信号または、オープン/ショート等で出力されるステータス信号。あるいは、ステータス信号をデジタルデータに編集して出力される信号。
ディスクリット(コマンド)	主に機器のオン/オフまたは、選択を指令する信号。リレー等を単一のパルス信号によって動作させるものである。
シリアルマグニチュード (コマンド)	主にアナログ制御量の指定を指令する信号。 16ビットの情報として伝送されるものである。
ブラックアウト	通信回線が途絶えること。
白道	月の公転軌道
黄道	地球の公転軌道
可視域	通信回線の確立が可能な範囲
静止衛星	地球赤道面上において地球を回る公転周期が地球の自転周期と等しくなるような軌道半径を有す円軌道衛星
R F	Radio Frequency 無線周波数

用語	解説
ポリノミナル チェック コード	<p>多項式を用いた符号誤り検出方式において用いられる検出用のコード。</p> <p>情報<math>M(x)</math>を予め定めた多項式<math>G(x)</math>で割ったときの余りを<math>H(x)</math>とし、送信側は<math>M(x)</math>に<math>H(x)</math>を付加してデータを出力する。受信側はそのデータを<math>G(x)</math>で割り、商が0の場合は正しくデータが受信されたと判断する。</p> <p>上式多項式<math>H(x)</math>をポリノミナル チェックコードと呼ぶ。</p>
遷移軌道	<p>希望する最終の高度と同じ高度に遠地点をもつ楕円軌道</p>
太陽常数	<p>大気のない条件で、太陽-地球間の平均距離上に太陽光に垂直に置かれた単位面積が単位時間に太陽から受ける放射エネルギーの合計</p>
太陽分光照射量	<p>波長を独立変動とする太陽放射エネルギーの分布。この分布を全波長域について積分すれば太陽常数が得られる。</p>
赤外放射	<p>地球への全入射太陽エネルギーのうち、大気中に熱として吸収され、逆に大気より<math>4\mu</math>以上の波長の熱放射として、再度宇宙空間へ放出されるエネルギー</p>
アルベド	<p>地球への全入射太陽エネルギーのうち、大気中の散乱、雲及び地球表面からの放射の結果、宇宙空間へ再放出されるものの割合</p>
捕捉電子線	<p>地球磁場に捕捉された10MeV以下のエネルギーの電子で高度50000kmまでに存在する。</p>

用語	解説
捕捉陽子線	地球磁場に捕捉された陽子で、数100MeV以上の高エネルギー陽子は高度10000km以下に存在し、10MeV程度の陽子は高度20000km以下に存在する。
太陽宇宙線	太陽フレアと呼ばれる局所的な爆発により放出される高エネルギー荷電粒子群で、その粒子組成は陽子すなわち太陽陽子線が最も多く宇宙用機器に及ぼす影響は極めて大きい。
銀河宇宙線	太陽系以外から飛来する荷電粒子の総称であり、電子陽子、He原子核からFp原子核まで観測されている。 荷電粒子はエネルギーが高く透過力が強いことと、物質中での阻止能が大きいことから半導体素子のシングルイベント現象を引き起こす。 シングルイベント現象：荷電粒子の進入により半導体を構成する物質が変化し、半導体素子としての機能を失う現象
誤り訂正符号	送信側で誤り訂正符号ビットを付加し、受信側で誤りを訂正することにより総合の誤り率を改善する
ウォッチドックタイマ	データの処理時間を管理し、1つの処理に対し予定された時間を超えた場合、その後の処理を中止する
雑音温度	内部雑音が無く、実際と同じ利得を持つ受信システムを想定し、その出力端で観測される雑音出力を生じるような、等価的な入力端での温度

用語	解説
S O D S	Space Operation and Data System 宇宙運用・データシステム
D R T S	Data Relay Tracking Satellite データ中継・追跡衛星
D R T S S	Data Relay Tracking Satellite System データ中継・追跡衛星システム
N A S A	National Aerospace and Space Administration 米国航空宇宙局
T D R S S	Tracking and Data Relay Satellite System データ中継衛星システム（アメリカ）
N A S D A	National Space Development Agency of japan 宇宙開発事業団
G S F C	Goddard Space Flight Center ゴダード宇宙飛行センター
J S C	Johnson Space Center ジョンソン宇宙センター
E S A	European Space Agency 欧州宇宙機関
パケット通信	コンピュータインタフェースにより、データフォーマットに制限を受けない自由度の高い伝送方式

用 語	解 説
S N I P	Space Network Interoperability Panel 宇宙ネットワーク相互運用パネル
C C S D S	Consultative Committee for Space Data System 宇宙データシステム諮問委員会