

NASDA-TMR-950011

宇宙開発事業団技術報告

月エネルギー利用技術の研究

1995年8月

宇宙開発事業団

宇宙開発事業団技術報告

NASDA Technical Memorandum

月エネルギー利用技術の研究

Study on Utilization of Lunar Energy

長島 隆一 滝沢 悦貞 園山 実
Nagashima, Ryuichi Takizawa, Yoshisada Sonoyama, Minoru

技術研究本部システム技術研究部未来宇宙システム研究室
Future Space Systems Laboratory, Systems Engineering Department,
Office of Research and Development

宇宙開発事業団

National Space Development Agency of Japan

目 次

第1編 －ガラスの海分科会－

1. 序 論	3
2. ガラスの海構想の概要	4
2.1 ガラスの海コンセプトの概要	4
2.2 自己増殖性の確保	6
2.3 蓄熱の概要	8
2.4 ガラスの海の規模	11
2.5 地球へのエネルギー伝送	12
3. 100kW級発電システムの検討	14
3.1 システムトレードオフとフィージビリティスタディ	14
3.1.1 システム構成比較検討	14
3.1.2 システムの熱収支と熱損失	18
3.2 サブシステム検討	26
3.2.1 蓄熱部	26
3.2.2 伝熱部	29
3.2.3 発電部	30
3.2.4 放熱部	36
3.3 問題点と課題	39
4. 5 GW級発電システムの検討	42
4.1 システム構成の検討	42
4.2 問題点と課題	45
5. 結論及び今後の課題	48

第2編 －エネルギー伝送分科会－

1. 序 論	51
2. エネルギー伝送システムの概要	53
2.1 月面発電所からの無線送電における前提条件	53
2.2 無線送電の技術的可能性	55
2.3 送受電システムの基本構想	57

3. 送電系の検討	72
3.1 レトロディテクティブアレーの構成及び原理	72
3.2 ビーム幅	74
3.3 ビームステアリング	75
4. 給電系の検討	77
4.1 AC給電とDC給電の得失	77
4.2 DC給電回路	78
4.3 給電損失の検討	80
5. 受電系の検討	86
5.1 受電面積の検討	86
5.2 集電・配電システムの検討	89
6. システム配分の検討	92
6.1 損失項目の根拠	92
6.2 損失配分表	97
7. 信頼性とメンテナンスの検討	99
8. 部品点数削減の検討	118
8.1 マイクロ波モノリシックIC (MMIC) の構成、製造過程	118
8.2 マイクロ波回路の大きさ	120
8.3 SSPAの回路構成	124
8.4 MMIC適用性の検討	125
8.5 その他の方策	126
9. コストの検討	127
9.1 日本における電源別耐用年発電原価	127
9.2 原子力発電の発電原価試算	129
9.3 ガラスの海での試算	132
9.4 SPSの発電原価試算	134
10. 今後の課題と結論	136
10.1 マイクロ波無線送電の研究課題	136
10.2 宇宙での実証実験	138
10.3 結 論	139

第 1 編

ガラスの海分科会

1. 序論

月面活動において、夜間におけるエネルギーの確保は重要である。月の夜は約14日間も続き、月表面の温度は赤道上で約-170℃まで低下する。長期間ミッションを遂行する人間や機器にとって、この厳しい低温環境への対応も含めた定常的なエネルギー源の確保は、月開発利用構想における大きな課題となっている。

本論は、このような課題を解決するシステムとして、平成6年度に月面産の安定したエネルギー供給システムの新しい概念として検討した「ガラスの海システム」について論ずるものである。

2. ガラスの海構想の概要

2.1 ガラスの海コンセプトの概要

月の表土（レゴリス）の特徴の一つとして、熱伝導率が極めて低く、わずか表面下数十cmの温度は昼夜変わらず一定（赤道付近では -20°C ）であることが知られている。このことから、月面のレゴリスには一種の断熱の優れた魔法瓶としての機能が存在することがわかる。

この魔法瓶の中に、月面材料を用いた蓄熱材を生成して、14日間の昼間に太陽集熱装置を用いて温め、エネルギー溜め（湯たんぽ）として利用する。この熱は、熱そのものとして、もしくは熱電変換を経て電力として利用することが考えられる。この湯たんぽを「ガラスの海」と俗称的に呼ぶことにする。

「ガラスの海」と呼ぶ理由は、その蓄熱材の材質の発想にある。蓄熱材として有望なものとして、レゴリスを太陽集熱器により溶解（融点約 $1400\sim 1700\text{K}$ ）ガラス化し、塊状（ブロック状）にしたものが考えられる。また、化学（燃焼）反応を用いて形成したブロックやパウダー状のレゴリスにヘリウムや窒素などのガスを混合したものを利用するアイデアもある。

月の昼間に、このガラスの海を太陽集熱装置を用いて $800\sim 1000^{\circ}\text{C}$ 近傍まで加熱しておき、夜間はガラスの海と月面上（赤道約 -170°C ）との温度差を利用して発電等を行う。昼間にはガラスの海を太陽集熱装置により加熱すると同時に、太陽集熱部と月面上との温度差により発電も実施する。

図2.1-1にガラスの海システム構想の概要を示す。

ガラスの海の外観は、ガラス海を月面レゴリスの中に埋め込んだものとなり、月表面には太陽集熱システムや発電システム、放熱システムなどが設置される。また、月表面に構築したガラス海を後からレゴリスで被覆することも考えられる。ガラスの海の性能は熱伝導効率に大きく左右されるため、ヒートパイプや金属板などをガラスの海との十分な接触を伴う形で差し込んでおく必要がある。

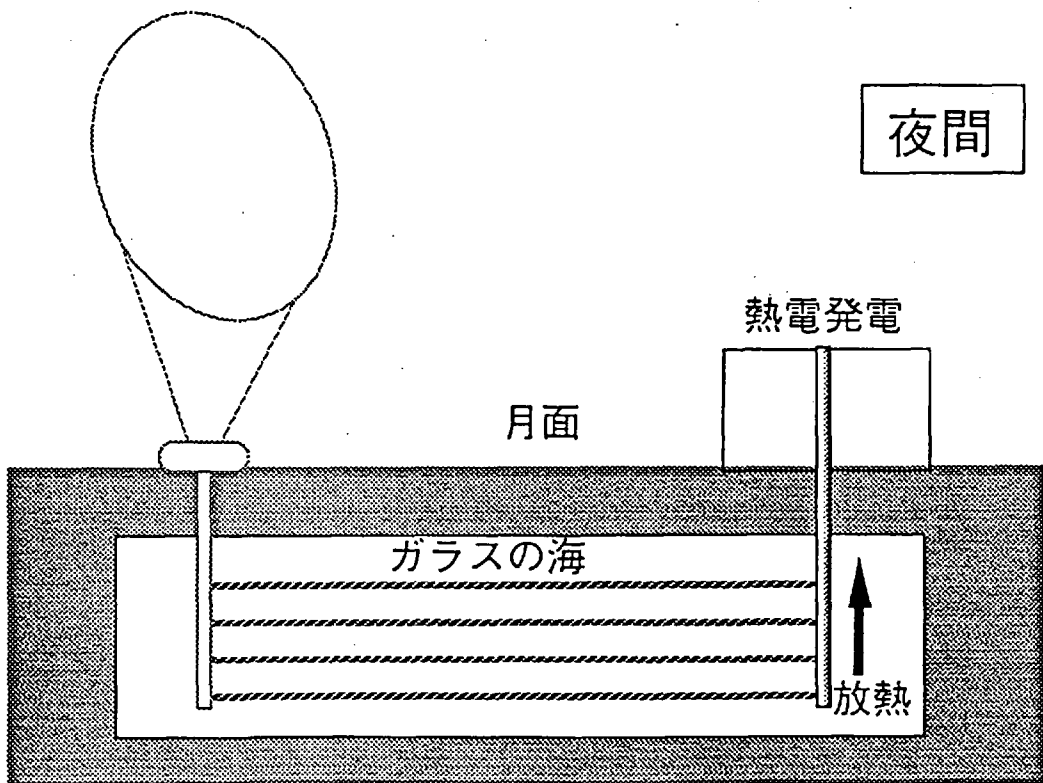
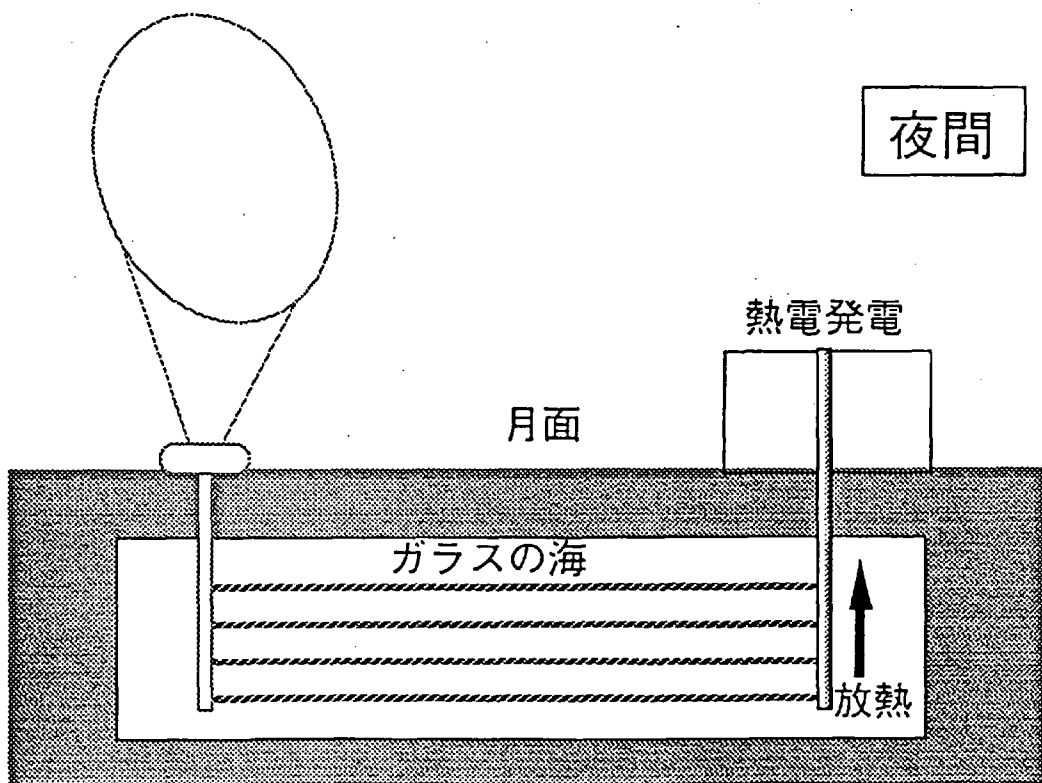
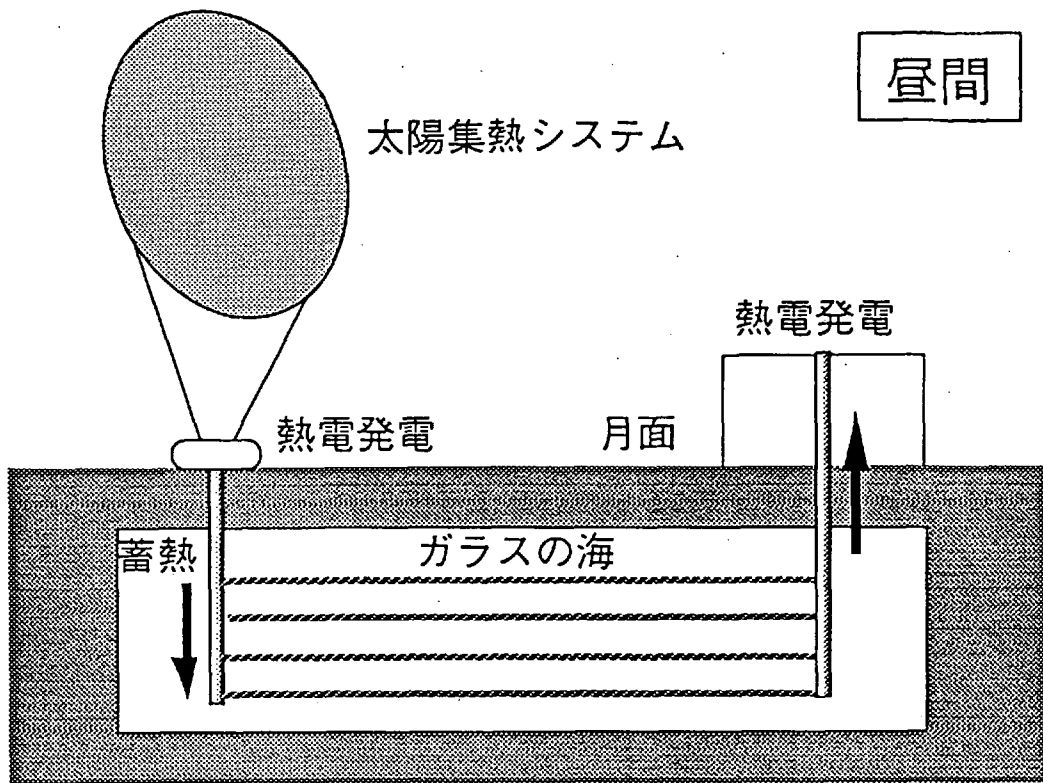
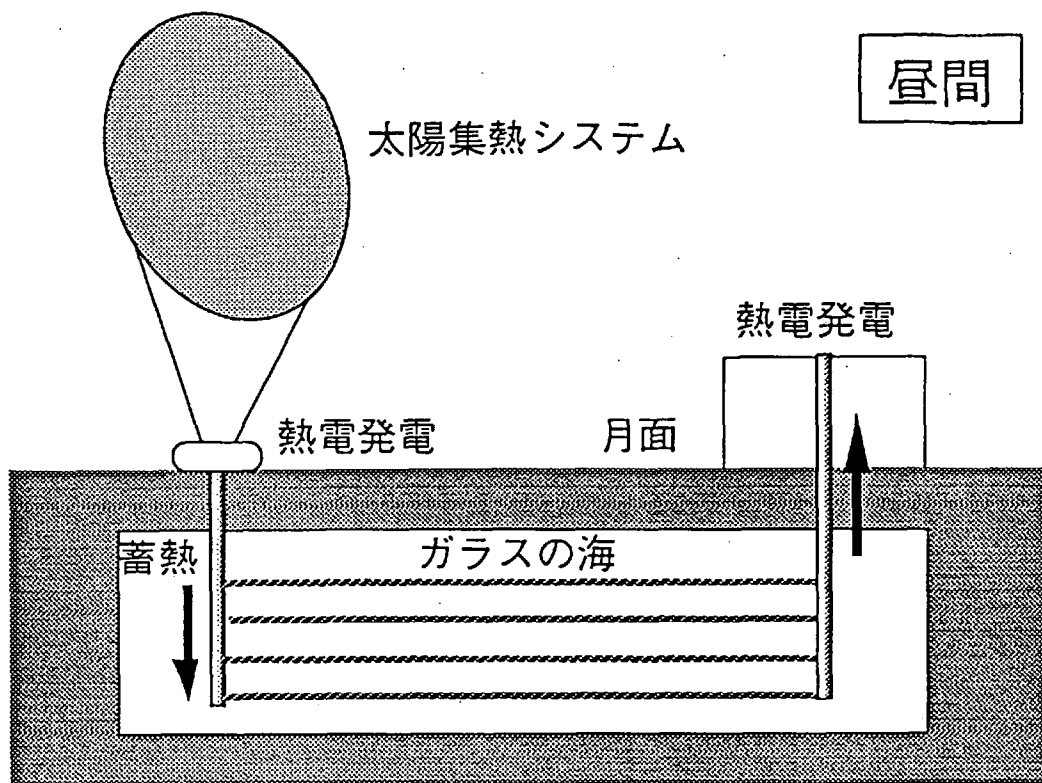


図2.1-1 ガラスの海構想の概念

2.2 自己増殖性の確保

月の開発利用シナリオを構築する上の大きな問題の一つとして、地球から月への膨大な輸送量が必要となる点が挙げられる。これまでに提案されてきた種々の月面基地構築シナリオにおいても、輸送のためのコストは全体コストの多大な部分を占めている。経済的な月開発利用を実現するには、輸送にかかるコストを極力小さくする必要がある。

このような問題点を考慮し、ガラスの海システムでは、月の資源の最大限の活用と、月面産エネルギーに基づく自己増殖性の実現を目指す。

図2.2-1にガラスの海における月資源の活用について示す。

レゴリスを構成する主な鉱物は、輝石、長石、カンラン石、チタン鉄鉱であり、これらの形態で種々の元素が存在する。月表土全体の平均では、酸素、珪素、鉄、アルミニウムの4つの元素が重量比で80%以上も占めている（うち、酸素が40%強）。

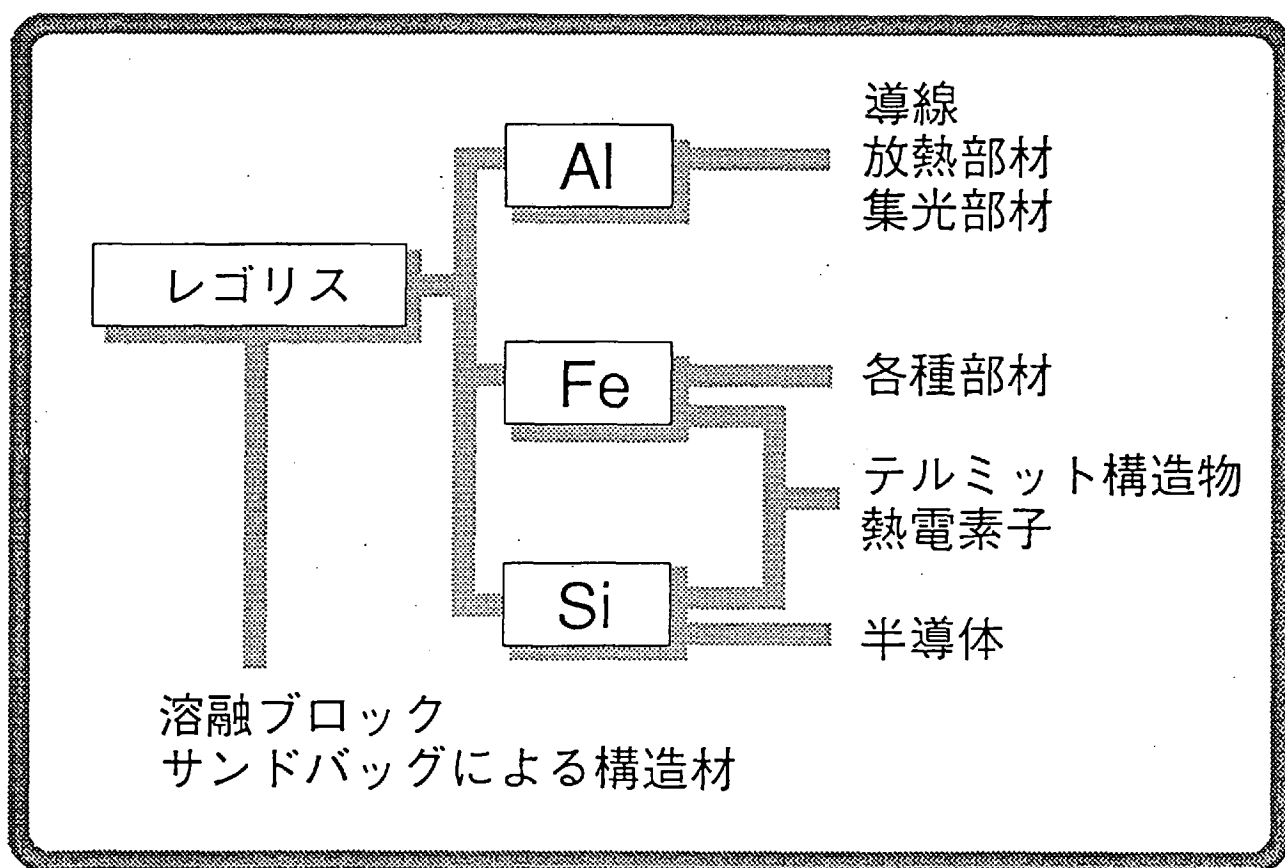


図2.2-1 ガラスの海における月資源の活用

前述の課題より、本格的な月利用を実現するためには、月面に豊富なこれらの元素を最大限に活用することが望まれる。ガラスの海システムの自己増殖性確保のために、以下のような月資源の活用を考えている。

■レゴリス

- ・太陽集光炉により加熱し、溶融ブロックを製造
- ・サンドバッグに詰めて構造材として利用

■鉄

- ・各種部材や機械部品の製造

■アルミニウム

- ・銅の代わりの導線を製造
- ・放熱部材の製造
- ・集光装置の表面部分の材料

■酸化鉄（チタン鉄鉱）＋珪素

- ・部材やブロックを形成するためのシリコンテル ミット反応の材料（酸化鉄（チタン鉄鉱）＋珪素→鉄（＋チタン）＋珪酸の燃焼合成）

■鉄＋珪素

- ・珪化鉄熱電素子の製造

■珪素

- ・半導体製造（パワーアンプなど）

ガラスの海により、ある程度の発電が月面で可能になれば、これらの物資を月のエネルギーを用いて製造することにより、自己増殖的にシステムを拡張していくことが可能になる。

2.3 蓄熱の概要

レゴリスの熱伝導率は、約 $0.01\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}^{(1)}$ であり、ガラスウールや毛布、羊毛、石綿、コルクなどの $0.04\sim 0.06\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}^{(2)}$ という熱伝導率と比較しても優れた断熱材であることがわかる。この原因はレゴリスがパウダー状になっていることに由来する。

ガラスの海の初期温度を 1000°C とし、輻射放熱による温度低下を、レゴリス表面の輻射率を $0.92^{(3)}$ として計算した。計算には、SINDA (Systems Improved Numerical Differencing Analyzer) を用いた。月面の夜 (14日間) におけるガラスの海の温度低下は、ガラスの海の上のレゴリスの厚さが 1.0m のとき約 23°C 、 0.3m のとき約 43°C となり、レゴリスの断熱材としての十分な能力が確認された (図2.3-1, 図2.3-2)。

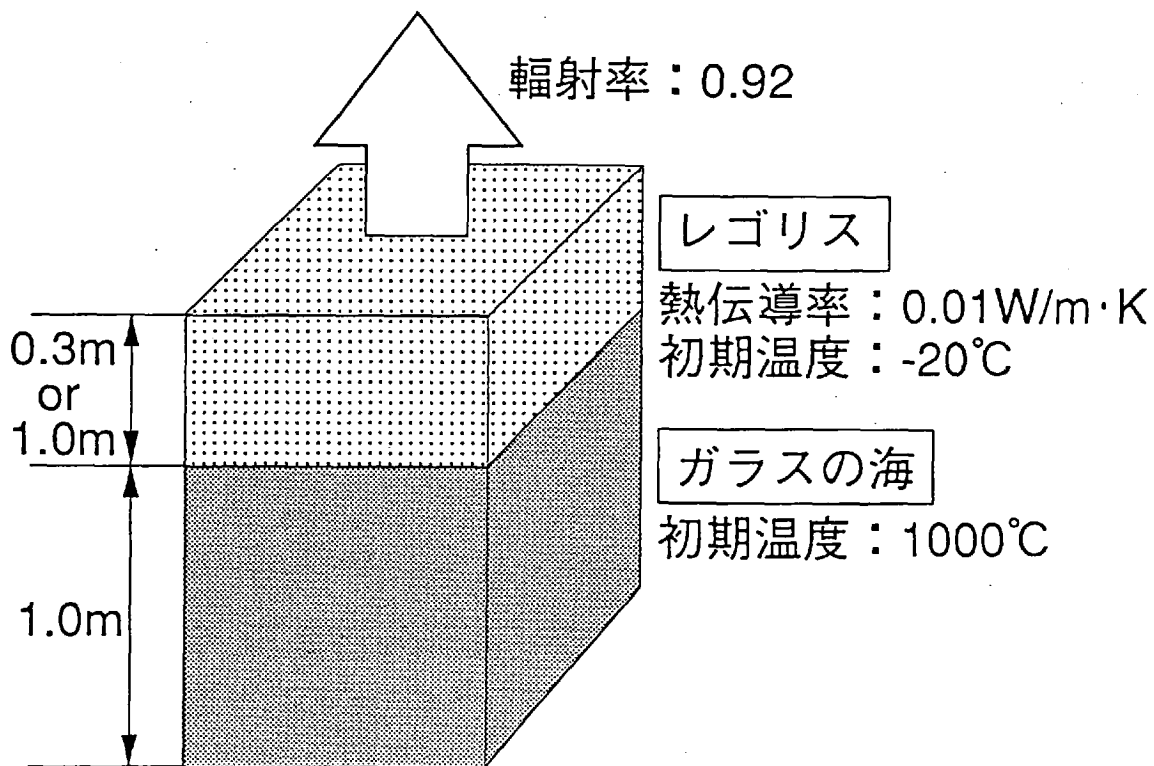


図2.3-1 解析モデル

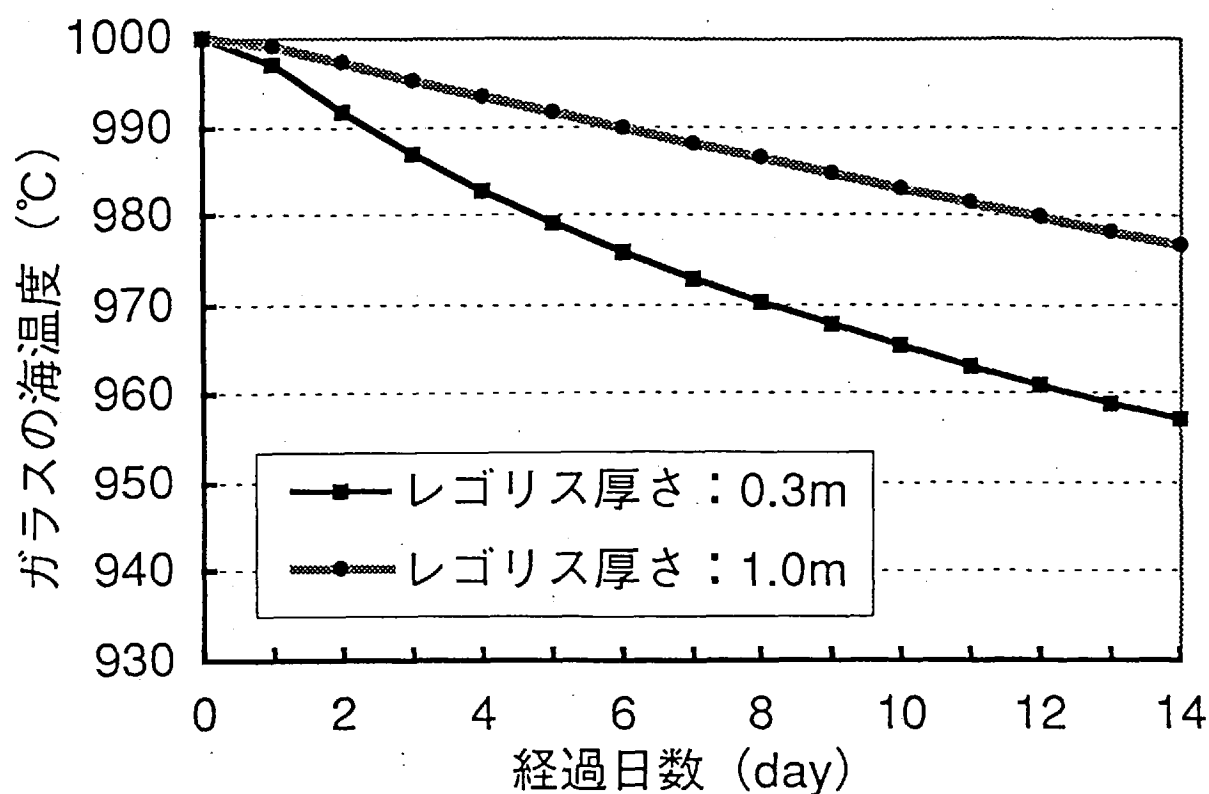


図2.3-2 ガラスの海の温度低下

次に、熱の蓄積について述べる。石英ガラスの熱伝導率は、 $2\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$ 程度⁽²⁾であり、月のレゴリスを溶かして固めたガラスの海の熱伝導率はこれに近い値になることが予測される。レゴリスとの熱伝導率の差を利用して熱エネルギーの流れをつくり、熱電素子などにより電気エネルギーに変換する。

表2.3-1にガラスの海システムに用いられる可能性のある種々の素材の熱伝導率を示す。これらのどの素材についても、レゴリスの熱伝導率の100倍程度の値であることが予想され、種々の方式による蓄熱の可能性が十分にあることがわかる。

表2.3-1 各素材の熱伝導率

素材	熱伝導率 (推定値) $\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$
レゴリス	0.01
鋳造ガラス	2~2.5
テルミット材 (SiO_2+Fe)	>1.6
Heガスを混入したレゴリス	0.84~1.76 ⁽⁴⁾

参考文献 (2.3)

(1)NASA SP-330, Apollo17 Preliminary Science Report,
1973

(2)国立天文台編, 理科年表、丸善

(3)JPL D-8160, Thermal Environment, 1991

(4)B.Tillotson, AIAA 91-3420, Regolith Thermal Energy Storage for Lunar Nighttime Power, 1991

2.4 ガラスの海の規模

ここでは、昼夜の0℃～1000℃の理想的な蓄熱及び放熱が行えることを仮定した場合に、月の夜間に100kWの電力（初期の月面拠点で必要とされるオーダー）を発生させるために必要なガラスの海の規模を計算する。ガラスの海の材質としては、鑄造ガラスを想定する。

$$We = \eta \cdot W_m \cdot (C_{ph} \cdot T_h - C_{pl} \cdot T_l)$$

ただし、

We ：14日間で必要な総電力量 $[1.21 \times 10^{11} \text{ (J) }]$

η ：発電システム効率 $[5 \text{ (\%) }]$

C_{ph} ：1000℃における比熱 $[1.11 \text{ (J/g} \cdot \text{K) }]$

C_{pl} ：0℃における比熱 $[0.70 \text{ (J/g} \cdot \text{K) }]$

T_h ：ガラスの海温度（高温時） $[1273 \text{ (K) }]$

T_l ：ガラスの海温度（低温時） $[273 \text{ (K) }]$

W_m ：ガラスの海の重量

より、 W_m を求めると約1980 (ton) となる。ガラスの海の密度を2.5 (g/cm³) とすると、体積は約792 (m³) となり、一辺が約9.25 (m) の立方体となる（図2.4-1）。ガラスの海の比熱については、0℃と500℃における石英ガラスのデータを用いた。固体の比熱は温度の上昇とともに増加する傾向にあるため、実際には1000℃の比熱は更に大きくなり、本モデル下における蓄熱能力は更に高くなるものと予想される。

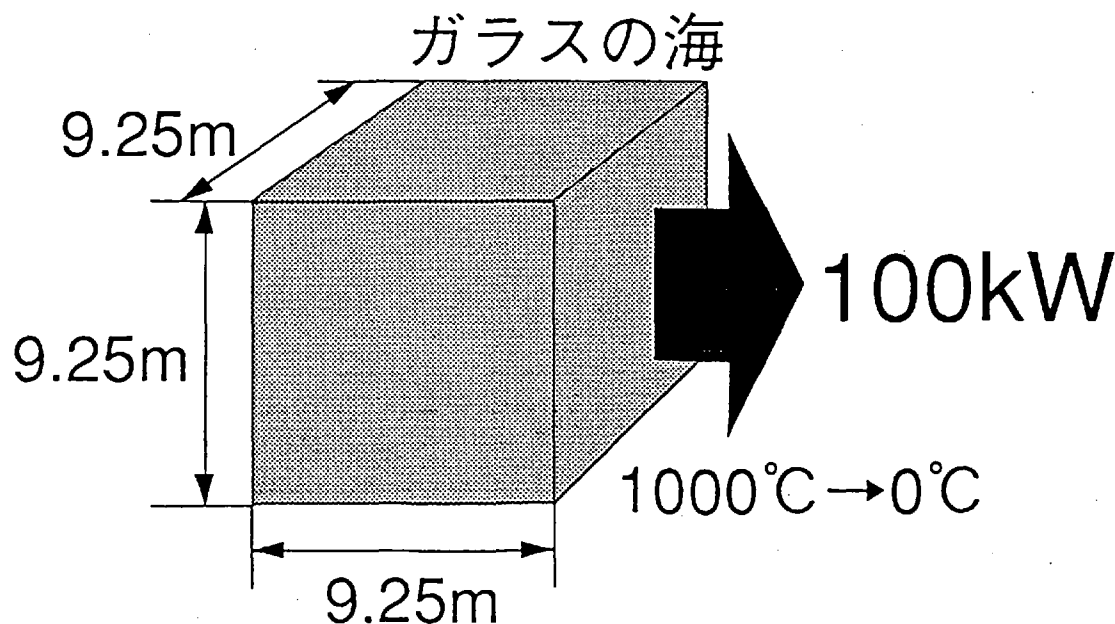


図2.4-1 ガラスの海の大きさの算定

2.5 地球へのエネルギー伝送

地球資源の枯渇問題は、21世紀に更に深刻化する世界規模の社会問題である。とりわけ、エネルギー資源については、世界人口の増加に伴い非常に困難な局面を迎えるものと考えられる。

図2.5-1に世界人口⁽¹⁾と電力需要の増加の予測を示す。

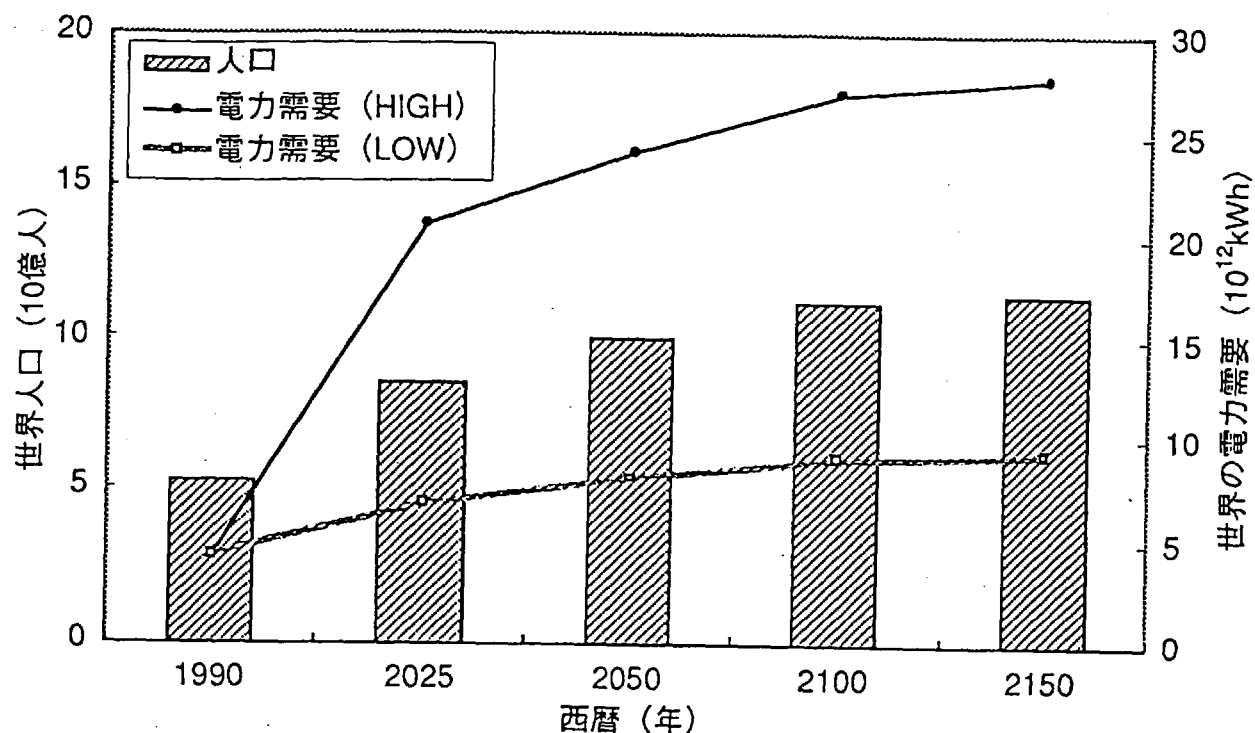


図2.5-1 世界人口と電力需要の予測

世界人口は約半世紀後には現在の2倍に達する。個人の電力消費量⁽²⁾が現在の世界平均レベルであるとする、電力需要も現在の約2倍 (LOWケース)、一人当たりの電力需要が日本のレベルに達する、現在の5倍以上の電力が必要となる (HIGHケース)。地球資源の有限性を越えて、このようなエネルギー需要の増加を支える手段の一つとして地球外資源があり、ガラスの海もその一要素となり得るものと考えている。

ガラスの海の最大の特徴は、自己増殖的な拡大が可能にある点にある。この特徴を生かせば、地球からの初期投資 (エネルギー) をはるかに上回るエネルギーのリターンを得ることが可能になる。また、ガラスの海システムは、稼働部分が少なく、地上の発電システムと比較して極めて耐用年数が高いものと考えられ、拡張という観点からも有利である。

ガラスの海システムで発生されるエネルギーと前述の月資源により、地球からの資源に極力頼らずに、新たなガラスの海システムを構築する。このようにして拡大されたガラスの海システムによる電力を地球に送電する。伝送方式は、SPSと同様にマイクロ波等による送電を考えている。

このような観点から、月から地球へのSGWの送電を実現するための発電+送電システ

ム、それらのインテグレーション、月資源によるシステム構築の可能性について検討を進めている。

図2.5-2に伝送システムの概要を示す。

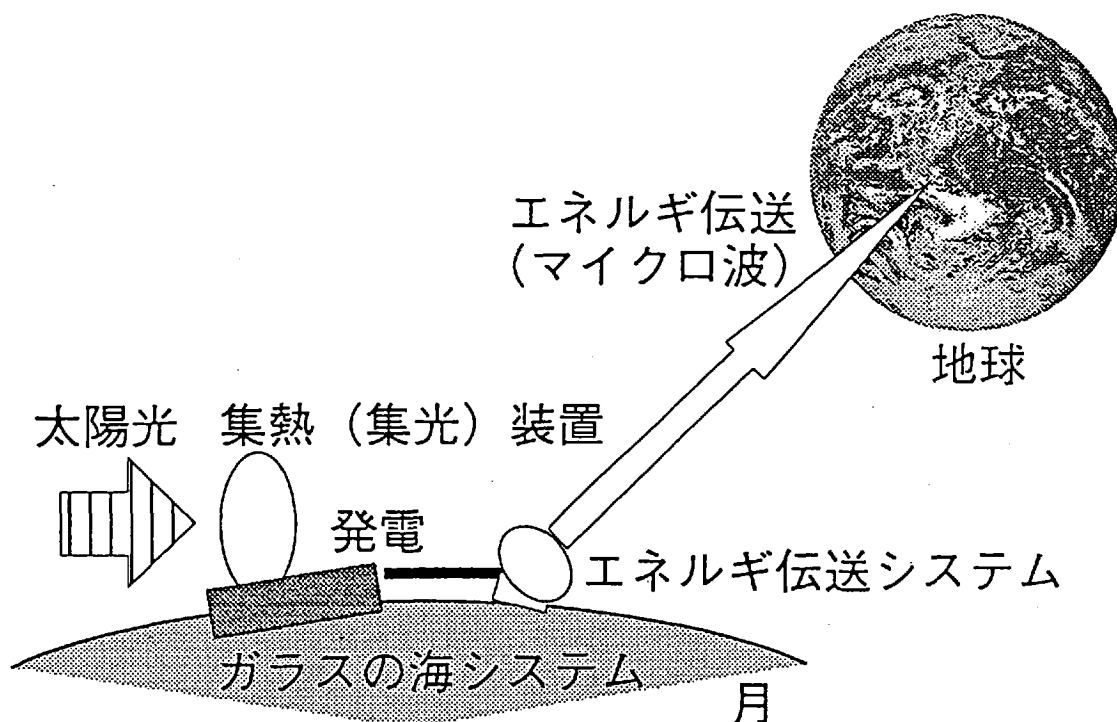


図2.5-2 月－地球エネルギー伝送システムのイメージ

参考文献 (2.5)

(1)World Resources, 1992-93

(2)資源エネルギー庁長官官房企画調査課，総合エネルギー統計，平成4年度版，通商産業研究社

3. 100kW級発電システムの検討

3.1 システムトレードオフとフィージビリティスタディ

3.1.1 システム構成比較検討

ガラスの海発電システムは大きく分けて以下の3つの部分から構成される。

- ・集熱部—太陽光を集めてその熱を蓄熱部に伝える。
- ・蓄熱部—集熱部で集められた熱を夜間の発電に利用できるように蓄える。
- ・発電部—昼間は集熱部で集めた熱を、夜間は蓄熱部に蓄えられた熱を利用し発電する。

また、上記の部分に共通に含まれるものとして、各部間で熱を伝えるための伝熱部がある。また、発電部には発電のために必要な温度差を発生させるための放熱部が含まれる。

(1) 集熱部

一般的に太陽光を集めて高温を得るにはパラボラ型の集熱装置が用いられている。この方法は実用化の研究も行われ、集熱効率は高い。ただし、集熱の中心をパラボラから離れた位置に設置することが必要となり、蓄熱部への伝熱経路が長くなる傾向がある。

集熱部を円錐型とし、太陽光を円錐の頂点の位置に集熱する方法も考えられる。この場合には円錐型頂点が集熱の中心となるため、蓄熱部への伝熱経路を比較的短くすることができ、また構造的にも簡単である。ただし、入射角度により集熱の中心に到達できなかったり、複数回の反射が必要あったりするため、集熱効率はパラボラ型に比べて低い。

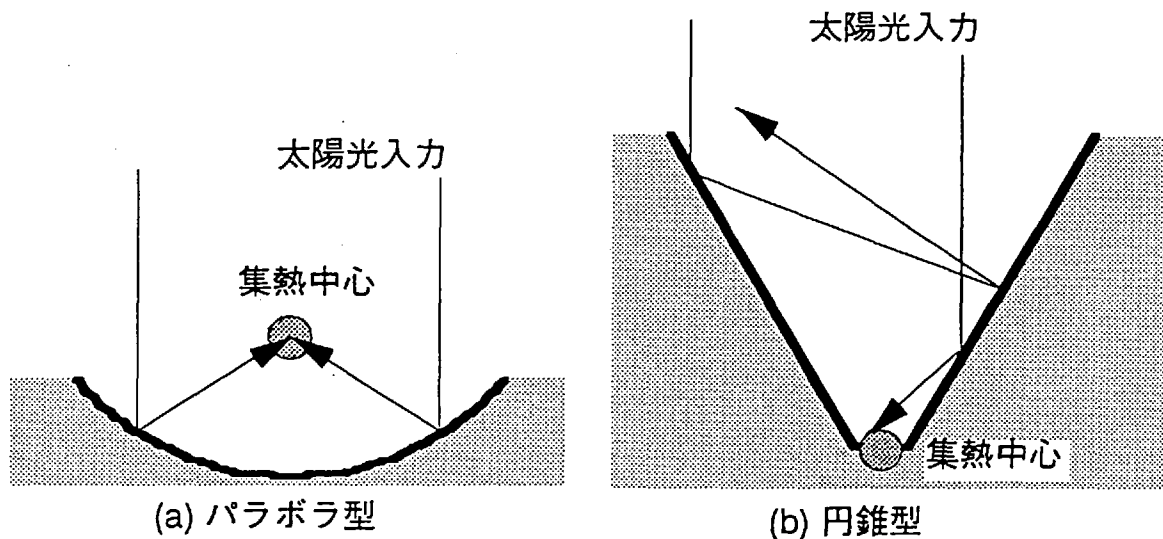


図 3.1-1 集熱部の形状

集熱部を太陽に対して正対するように移動させることで集熱効率を向上させることができるが、地球への電力伝送を前提に規模を大きくした場合、全体の規模は集熱装置が直径数10m～数100m程度の大きさとなるため、パラボラの向きを変化させるのは現実的には困

難であろう。

以上のことから、ガラスの海発電システムの集熱部としては、据え置きのパラボラ型が適当であると考ええる。

(2) 発電部

集熱した熱は何らかの方法により電気エネルギーに変換しなければならないが、熱を他のエネルギーに変換する方式は図 3.1-2 に示すように分類される(1)。

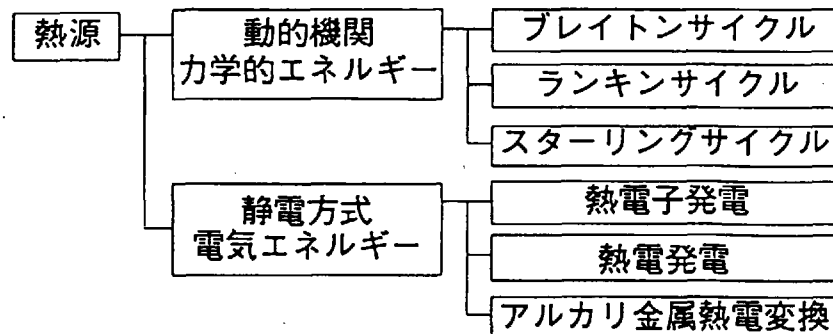


図 3.1-2 エネルギー変換方式の分類

動的機関を用いる方式は非常に効率が高いが、高度な機械構成要素が必要とされ、これらを月面上で製造することはまず不可能と考えられる。

ガラスの海発電システムで利用する技術としては、比較的構造が簡単で、回転部などが無く、メンテナンスに必要とされる手間が少なく済む、熱エネルギーから電気エネルギーへ直接変換する方式が適当であると考ええる。その中でも月面上で発電に必要な材料を比較的調達しやすいという点から、熱電発電が現時点では最も有望と言える。

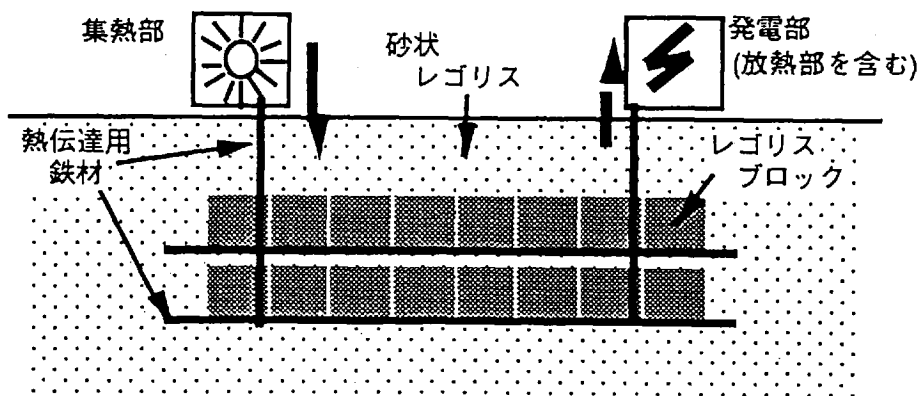
(3) 蓄熱部

蓄熱部に関してはその構成としていくつかの方式が考えられる。図 3.1-3、図 3.1-4、図 3.1-5 に方式の異なる 3 種類のシステムを示す。

どのシステムにおいても蓄熱部の周囲は砂状レゴリスで囲い、レゴリスの優れた断熱特性を利用して蓄熱部からの放熱を防ぐ構成としている。

システム 1 および 3 で蓄熱体として利用するレゴリスブロックはレゴリスを融解（融点約 1400～1700K）し、ブロック状に固めたものであり、ガラスと同程度の熱容量になると考えられる。

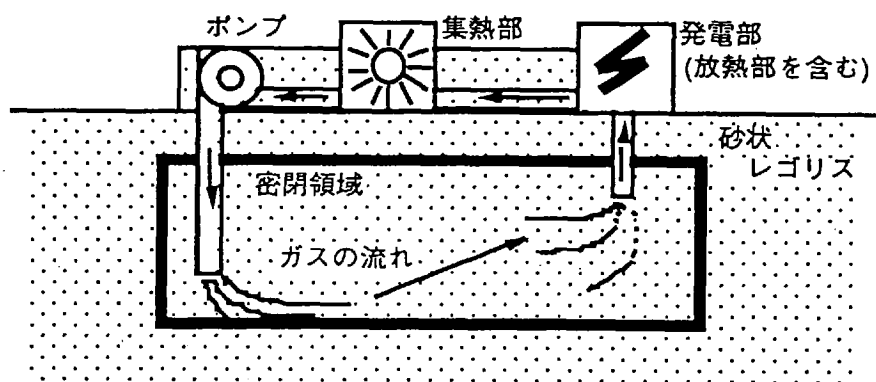
レゴリスに含まれる金属元素で大きな割合を占める元素は、珪素、鉄、アルミニウムである。それぞれの熱伝導率は表 3.1-1 に示すようにアルミニウムが最も優れている(2)。



蓄熱体 : レゴリスを融解して固めたレゴリスブロック

熱伝達媒体 : レゴリスから抽出した鉄により製造された平板状もしくは線状の鉄材

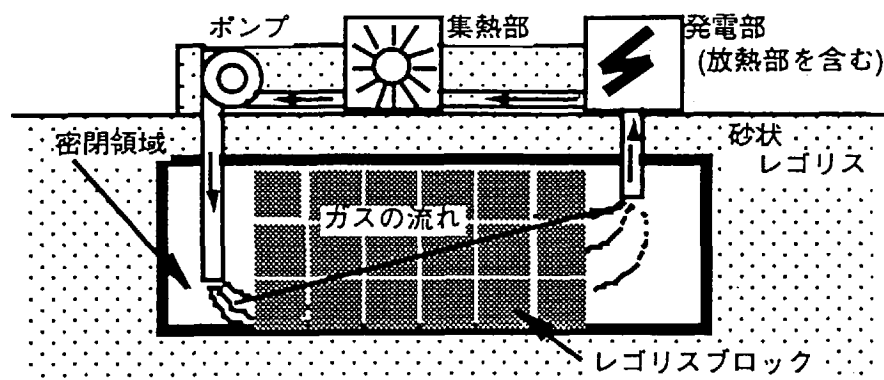
図 3.1-3 システム 1 概要図



蓄熱体 : 月面上に自然に存在する状態の砂状レゴリス

熱伝達媒体 : 窒素もしくはヘリウムガス

図 3.1-4 システム 2 概要図



蓄熱体 : レゴリスを融解して固めたレゴリスブロック

熱伝達媒体 : 窒素もしくはヘリウムガス

図 3.1-5 システム 3 概要図

表 3.1-1 Al, Fe, Si の熱伝導率 (2)

温度 K	熱伝導率 W/(m・K)		
	アルミニウム Al	鉄 Fe	けい素 Si
150	248	104	409
250	235	86.5	191
300	237	80.3	148
600	232	54.7	61.9
800	220	43.3	42.2
1000	-----	32.6	31.2
1200	-----	28.2	25.7

表 3.1-2 Al, Fe, Siの融点(2)

	アルミニウム Al	鉄 Fe	けい素 Si
融点 K	933.5	1810	1685

しかし、表 3.1-2 に示すようにアルミニウムは融点が低いため、1200K程度まで温度が上昇する蓄熱部に用いることはできない。

このためシステム 1 では熱伝達体として鉄材を利用することとしたが、これは熱の伝達効率の点からは非常に効率が悪いと言わざるを得ない。システム 1 の成立の可能性は、これによりかなり低下してしまう。

また、熱の伝達効率を上げるためレゴリスブロックと鉄材の接触面積をできるだけ大き

くするように、それぞれの表面を平滑に処理することが必要となるが、月面上でそのように精度を要求される処理を行うことは困難であろう。

システム2は自然の状態の砂状のレゴリスを蓄熱体に用いる方式である。熱の伝達には、月面上の表土に多く含まれているといわれる窒素ガスもしくはヘリウムガスを用いる。集熱部でガスを熱し、温度が上昇したガスを砂状レゴリスの中を循環させることでレゴリスに熱を伝達し蓄熱する。

ガスを循環するためにはポンプ等の機械部品が必要とされるが、これに関しては月面上で製造するのが困難であれば、地球から輸送することを考える。

ガスを用いる場合にはなんらかの方法で密閉空間を作り出さなければならないが、テルミット反応を利用して地中のレゴリスを壁状に固めることにより、レゴリスを掘り返すことなく密閉空間の構築は可能であろう。またこのシステムではレゴリスブロックを作成する必要もない。

これらの点から、システム2は構築方法としては今回検討するシステムの中では、最も簡単な方式であると言える。しかし、ガスが循環することにより砂状レゴリスが舞い上がり、ガスが循環するパイプの壁面およびポンプの内部に砂状レゴリスが付着し、それにより発電システムの機能に支障をきたすことが考えられる。

システム3ではシステム1と同様に蓄熱体にレゴリスブロックを使用し、伝熱媒体にはシステム2と同じく窒素ガスを利用する方式である。レゴリスブロックは月面地下に設けられた密閉された空間の中に、適当な隙間をおいて並べられる。集熱部で熱され温度が上昇した窒素ガスは、ポンプにより密閉空間の内部を循環し、並べられたレゴリスブロックに熱を伝達し蓄熱する。

この方式によればシステム1のように熱伝導率の低い鉄材を使用する必要もなく、またシステム2のようにガス循環経路に対しての砂状レゴリスの影響も心配する必要はなくなる。レゴリスブロックを大量に必要とすることと、蓄熱部を並べるための空間を月面上に作り、ガスが漏れないように処理しなければならないことといった構築上での問題はあるが、この方式が今回検討したシステムの中では、システムとしての成立の可能性が最も高い方式であると考えられる。

3.1.2 システムの熱収支と熱損失

太陽光熱入力エネルギーをもとにガラスの海発電システムにおいて、熱エネルギーが電気に変換されるまでのエネルギーの流れを図3.1-6に示す。

ここでは、以下のことを前提条件として検討した。

- ・昼夜とも同量の発電を行う。
- ・発電量は昼夜とも100kWとする。
- ・昼間は太陽光熱入力によるエネルギーの50%で発電を行い、残りの50%は蓄熱部に蓄える。
- ・夜間は蓄熱部に蓄えられた熱により発電を行う。
- ・蓄熱部および配管系の熱損失を、昼間は全体の10%
夜間は全体の0.1%とする。
- ・太陽光熱入力密度 : 1323W/m²
- ・集熱装置の効率 : 60%
- ・発電の効率 : 5%

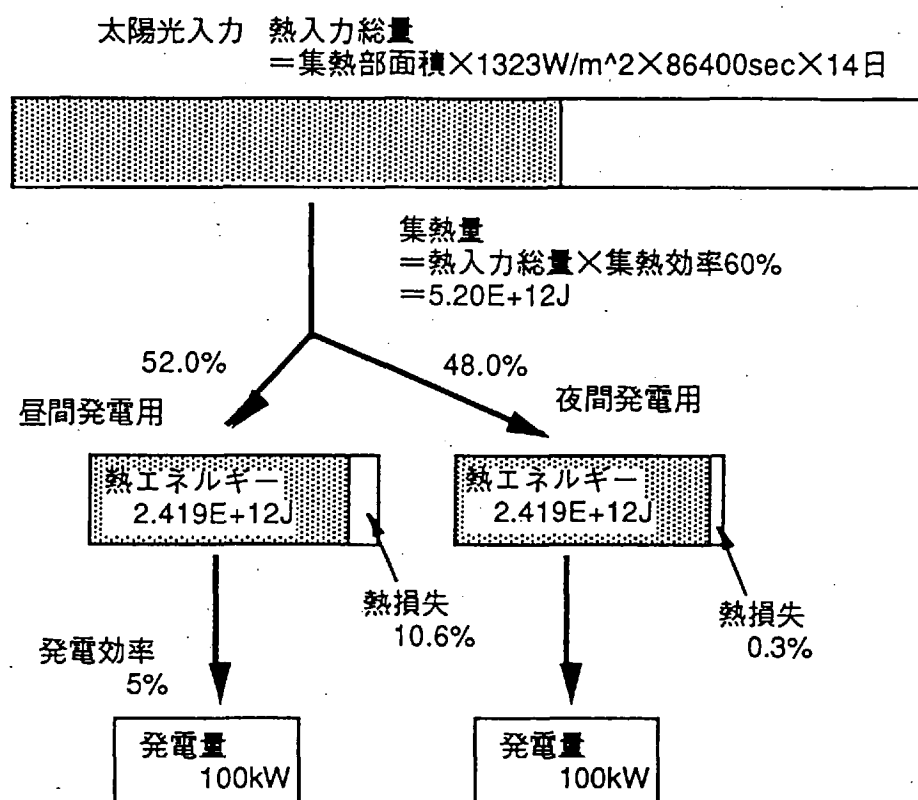


図 3.1-6 エネルギーの流れ

昼夜とも発電量 100kW をそれぞれ14日間にわたり発電するためには、総エネルギーとして以下の熱エネルギーが必要である。このエネルギーは夜間の発電に用いる分は蓄熱部に蓄えられ、昼間は順次発電に利用される。

$$\begin{aligned}
 & \text{14日間の100kW発電に必要な熱エネルギー} \\
 & = \text{発電量} \times 14\text{日} \times 24\text{時間} \times 3600\text{秒} / \text{発電効率} \\
 & = 100 \times 10^3\text{W} \times 14 \times 86400 / 0.05
 \end{aligned}$$

$$= 2.4192 \times 10^{12} \text{ J} \quad (3.1-1)$$

このために太陽光集熱装置で集熱しなければならない熱エネルギーは、以下のように計算できる。

太陽光集熱装置で集熱する熱エネルギー

$$\begin{aligned} &= 100\text{kW発電分の熱エネルギー} / (1 - \text{昼間の熱損失}) \\ &+ 100\text{kW発電分の熱エネルギー} / (1 - \text{夜間の熱損失}) \\ &= 2.4192 \times 10^{12} \text{ J} / (1 - 0.106) + 2.4192 \times 10^{12} \text{ J} / (1 - 0.03) \\ &= 5.20 \times 10^{12} \text{ J} \quad (3.1-2) \end{aligned}$$

この熱エネルギーのうち 52.0% は昼間の発電に用い、残りの48.0%は夜間の発電のための蓄熱に利用する。

太陽光集熱部で集熱する熱入力の総量は、集熱効率を 60% とすると以下のようになる。

熱入力総量

$$\begin{aligned} &= \text{太陽光集熱装置で集熱する熱エネルギー} / \text{集熱効率} \\ &= 5.20 \times 10^{12} \text{ J} / 0.6 = 8.67 \times 10^{12} \text{ J} \quad (3.1-3) \end{aligned}$$

この熱入力を集めるために必要な集熱部面積は、以下の式で求められる。

集熱部面積

$$\begin{aligned} &= \text{熱入力総量} / (\text{太陽光熱入力密度} \times 14\text{日} \times 86400\text{秒}) \\ &= 8.67 \times 10^{12} \text{ J} / (1323 \times 14 \times 86400) \\ &= 5.42 \times 10^3 \text{ m}^2 \quad (3.1-4) \end{aligned}$$

集熱部を円形のパラボラ型とすると、円の半径 r は、

集熱部半径

$$\begin{aligned} &= \text{SQRT} (\text{集熱部面積} / \pi) \\ &= \text{SQRT} (5.322 \times 10^3 \text{ m}^2 / \pi) \\ &= 42\text{m} \end{aligned}$$

次に以上の発電に必要なガラスの海の蓄熱部の体積を求める。

100kW級ガラスの海において、夜間の14日間に発電するために必要なエネルギー量 E は次式で求められる。

$$\begin{aligned} E &= 100\text{kW} / 0.05 \times 86400\text{sec} \times 14\text{日} \\ &= 2.419 \times 10^9 \text{ kJ} \quad (3.1-7) \end{aligned}$$

ここで 0.05 は発電の効率である。

蓄熱部として必要な体積 V は次式で求められる。

$$V = \frac{E}{\rho (C_H T_H - C_L T_L)} \quad (3.1-8)$$

ここでCはガラス相当としたレゴリスブロックの比熱C (kJ/kg/K)であり、温度T (K) の時に次式のように表せる(3)。添字 HとLはそれぞれ高温時と低温時を示す。

$$C = -1.8485 + 1.04741 \times \log(T) \quad (3.1-9)$$

$T_H = 700^\circ\text{C}$ 、 $T_L = 200^\circ\text{C}$ 、レゴリスブロックの密度を $\rho = 2000\text{kg/m}^3$ (ガラス相当)としてVを計算すると、

$$V = 1520\text{ m}^3$$

つまり、昼間に蓄熱した温度によりガラスの海が 700°C まで上昇し、14日間の夜間の発電によりそれが 200°C まで低下するとした場合に、100kW発電システムの蓄熱部に必要な体積Vは 1520m^3 となる。

システム3の方式をベースに、ガラスの海発電システムにおける熱損失について検討する。

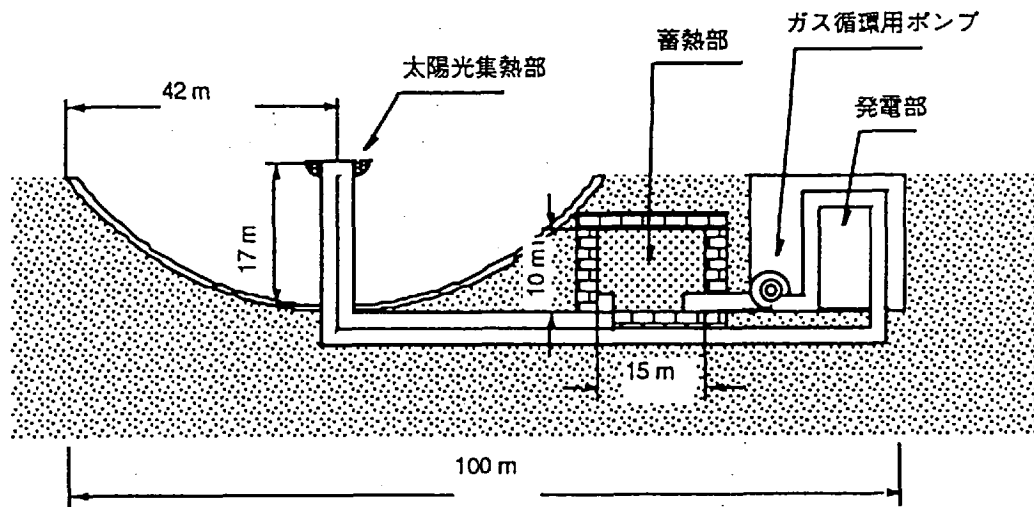


図 3.1-7 検討システムイメージ

図 3.1-7 にシステム3を基本にした100kW発電のシステムのイメージを示す。寸法は前述の検討に基づいている。

昼間の発電時におけるガスの循環経路と熱入力と熱損失の関係を図 3.1-8 に示す。以下の検討でガス循環用のパイプの半径は 5cmとする。

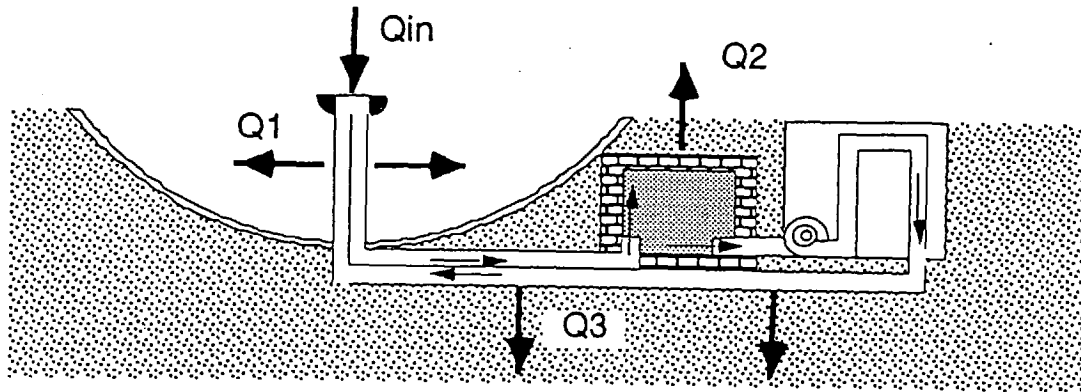


図 3.1-8 昼間の熱入力と熱損失

<昼間の熱損失>

- ・ 集熱部での熱入力 Q_{in}

14日間での1基あたりの熱入力は、

$$Q_{in} = 2.4 \times 10^{12} \text{J} \quad (3.1-10)$$

ここで窒素ガスは800℃程度までに加熱されるものとする。

- ・ パイプ露出部での放熱 Q_1

太陽光の直接あるいは反射入力は無視して宇宙($T_2 = 0\text{K}$)への放射のみとし、パイプ部の温度を $T_1 = 800^\circ\text{C}$ (1073K)とすると、 Q_1 は以下の式で示される。

$$Q_1 = A\sigma\epsilon(T_1^4 - T_2^4) = 2.0 \times 10^5 \text{W} \quad (3.1-11)$$

ここで、 A は露出部の表面積、

$$A = 2\pi \times 0.05\text{m} \times 17\text{m} = 5.3\text{m}^2$$

σ はステファンボルツマン定数、

ϵ は800℃の石英ガラス相当の赤外放射率(4)、

$$\epsilon = 0.5$$

14日間の合計では $2.4 \times 10^{11}\text{J}$ になり、これは熱入力 Q_{in} の10%である。

- ・ 蓄熱部での放熱 Q_2

蓄熱部は周囲を厚さ数10cmのレゴリスブロックで密閉され、その周囲は断熱性の高い砂状レゴリスが囲まれる。上部の砂状レゴリスの厚さを $d = 1\text{m}$ とし、密閉するブロックを700℃、地表の温度を100℃とすると熱伝導により蓄熱部から地表への放熱量は下式で表さ

れる。

$$Q_2 = \lambda \frac{\Delta T}{d} A = 900 \text{ W} \quad (3.1-12)$$

ここで λ は砂状レゴリスの熱伝導率、

$$\lambda = 0.01 \text{ W/mK}$$

A は蓄熱部上面の面積、

$$A = 10 \times 15 = 150 \text{ m}^2$$

また上部以外の地中では、密閉ブロック周囲1m近傍での温度を -30°C とすると、同様に $A = 650 \text{ m}^2$ から $Q = 4750 \text{ W}$ となる。これらの14日間の合計は、 $6.8 \times 10^9 \text{ J}$ となり、熱入力 Q_{in} の約0.3%程度である。

・ 埋設部での放熱 Q_3

パイプ直径の2倍付近で -30°C とすると、長さ $L = 100 \text{ m}$ の 500°C のパイプから周囲への熱伝導量は以下の式で表せる。

$$Q_4 = \frac{2\pi\lambda\Delta T}{\ln(r_2/r_1)} L = 1 \times 10^4 \text{ W} \quad (3.1-13)$$

14日間の合計は $6.0 \times 10^9 \text{ J}$ となり、熱入力 Q_{in} の約0.3%である。

以上より、昼間の発電時における熱損失の合計は、熱入力 Q_{in} の約10.6%と考えられる。

< 夜間の熱損失 >

次に夜間発電時の熱損失を検討する。夜間の発電時におけるガスの循環経路と熱入力と熱損失の関係を図 3.1-9 に示す。夜間においては、ガスの循環を蓄熱部と発熱部間だけで行い、集熱部にはガスを循環させない機構を用意するため、集熱部における熱損失は発生しない。

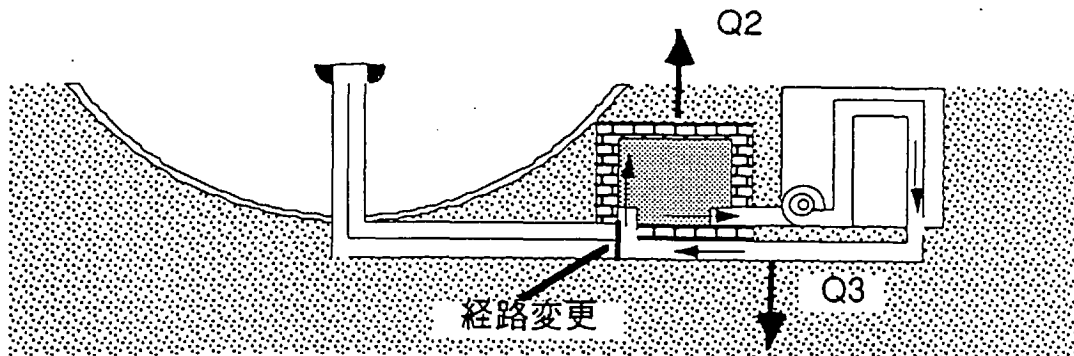


図 3.1-9 夜間の熱損失

・蓄熱部の放熱 Q_2

昼間の相違として地表が -150°C になり、ガスによる熱供給がないため蓄熱部のレゴリスブロックも14日間で 700°C から 200°C まで温度が低下するものとする。レゴリスブロックは平均温度として 450°C とすると、(3.1-12)式と同様の計算により、蓄熱部上部での放熱が 830W 、上部以外での放熱が 3100W になる。

これらの合計は14日間で $Q_2=4.75\times 10^9\text{J}$ であり、蓄熱量 Q_{in} の約0.2%である。

・埋設部での放熱 Q_3

パイプ長 $L=50\text{m}$ 、パイプの温度を 450°C とすると、(3.1-13)式より放熱量は 2200W となり、14日間の合計では $Q_4=2.7\times 10^9\text{J}$ となる。これは蓄熱量 Q_{in} の約0.1%である。

以上より、夜間時の熱損失は蓄熱量 Q_{in} の約0.3%程度となる。

システム2、システム3のように密閉空間を月面地下の構築するにあたって、利用できると思われる技術にテルミット反応がある。

テルミット反応とは、酸化物と金属粉末との混合物（テルミット組成混合物）に熱的刺激を与えることで瞬時に燃焼反応（酸化－還元反応）が伝播して大量の反応熱を放出する現象のことである。

表 3.1-3 に代表的テルミット反応の生成熱と最高到達温度を示す(5)。

表 3.1-3 代表的テルミット反応生成熱および生成部の最高到達温度

反応系	$-\Delta H$ (kJ/mol)	最高到達温度 (°C)
$\text{Fe}_2\text{O}_3 + 2\text{Al} \rightarrow \text{Al}_2\text{O}_3 + 2\text{Fe}$	832	~3,400
$2/3\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{Si} \rightarrow \text{SiO}_2 + 4/3\text{Fe}$	323	~2,800
$1/3\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{Mg} \rightarrow \text{MgO} + 2/3\text{Fe}$	311	~2,300

月面上には硅素とアルミニウムと鉄は酸化した状態で存在しており、硅素またはアルミニウムのテルミット組成混合物は月面上で生産できる可能性がある。

このテルミット反応を利用することができれば、反応によって得られる温度はレゴリスを融解するに十分である。テルミット組成混合物を連続的に反応するように棒状もしくは紐状に配置することで、隣接するレゴリスを融解し固めることができ、密閉空間の構築も比較的容易に可能であると考えられる。

参考文献

- (1) 廣田、宇宙用原子力発電、日本機械学会、「宇宙における発電システムと排熱技術に関する調査研究分科会」成果報告書
- (2) 日本機械学会編、「伝熱工学資料」(1986)
- (3) Roger A.Crane, "Evaluation of In-Situ Thermal Energy Storage for Lunar Based Solar Dynamic Systems", NASA-CR-189054 (1991)
- (4) 「伝熱計算法」、工学図書
- (5) 燃焼合成研究会編、「燃焼合成の化学」(1992)

3.2 サブシステム検討

3.2.1 蓄熱部

(1) レゴリス焼結体の製造

蓄熱材として用いるレゴリスブロックの製造法とし、焼結あるいは溶融によって作ることが考えられる。焼結は溶融よりも低温プロセスであるが、高密度のブロックを得るのは容易でない。そのため焼結体で蓄熱部を構成すると、単位体積当りの蓄熱量が小さくなる。一方溶融の場合は逆に、高密度のブロックが得られるものの、製造に高温の熱源を必要とする。ここでは、検討の第1段階として、焼結によってレゴリスブロックを作製し、その熱特性の測定結果について述べる。

原料はレゴリスに近い成分を有する混合物（図3.2-1参照）を用いた。なお、原料の各成分はふるいによって得られた粒径 $100\mu\text{m}$ 以下のもので、この混合物を、 $3\text{ton}/\text{cm}^2$ 、 1080°C で5時間加熱して焼結体を得た。次に、この焼結体の熱特性を測定するため、直径 10mm に加工して図3.2-2に示す円板状の焼結体を得た。

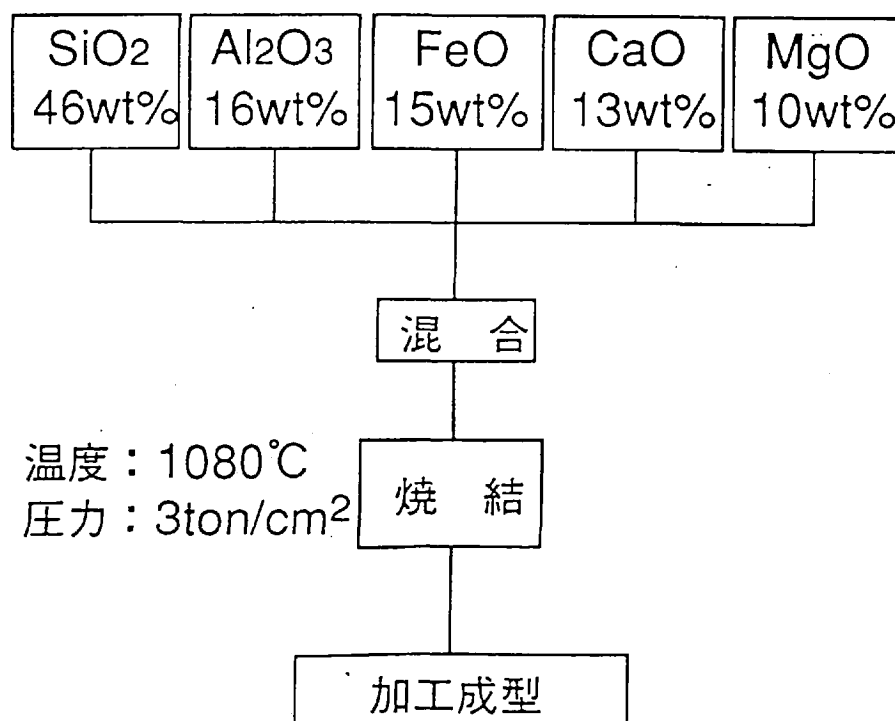


図3.2-1 レゴリス焼結体の製造方法



図3.2-2 試作レゴリス焼結体の外観

(2) 熱特性の測定

焼結体の熱伝導率、比熱をレーザーフラッシュ法により測定した。試作したレゴリス焼結体の比熱、熱伝導率の測定結果を表3.2-1に示す。熱伝導率は室温で 0.24W/mK で、熔融により作製したブロックの熱伝導率の推定値 ($2\text{W/m}\cdot\text{K}$) に比べ約1桁小さかった。これは、今回試作した焼結体の密度が約50%と低かったことによると考えられる。

蓄熱槽内部での熱伝導率が低いと、所定の時間の間に熱を取り出せない問題が生じることがある。この点を考慮すると、熔融法によって作製したブロックの方が優れていると思われる。今後は、熔融法によって作製したブロックとの熱的性能、製造法等について、詳細に検討する必要がある。ただし、焼結体の充填率が低いことを逆に利用し、熱媒体を内部に通過させることができれば、熱の伝わりが良くなることもあり、熔融ブロックの製造が極めて難しい場合には、焼結法も視野に入れた検討が必要になると思われる。

表3.2-1 レゴリス焼結体の熱特性

温 度 ℃	比 熱 $\text{J/g}\cdot\text{K}$	熱伝導率 $\text{W/m}\cdot\text{K}$
20	0.51	0.24
640	0.75	0.28

(3) レゴリスブロックの寸法

蓄熱部をブロックで構成した場合、ブロックが厚過ぎると、熱がブロック全体に伝わらない。そのため、ブロックを一定の寸法以下にする必要がある。現在は概略検討の段階であるので、ブロック内部の熱の流れを一次元と仮定し、ブロックの寸法を求めた。ブロックの最下部を 1000°C で14日間加熱した時に、最上部が 0°C から設定した温度になる厚さを求めた結果を図3.2-3に示す。なお、熱伝導率は $2\text{W/m}\cdot\text{K}$ （溶融レゴリスブロックの推定物性値）を用いた。解析からガラスの厚さを $0.3\sim 1.0\text{m}$ とすることによって、比較的容易に熱電変換が可能な $500^{\circ}\text{C}\sim 800^{\circ}\text{C}$ にガラスを加熱できることがわかった。

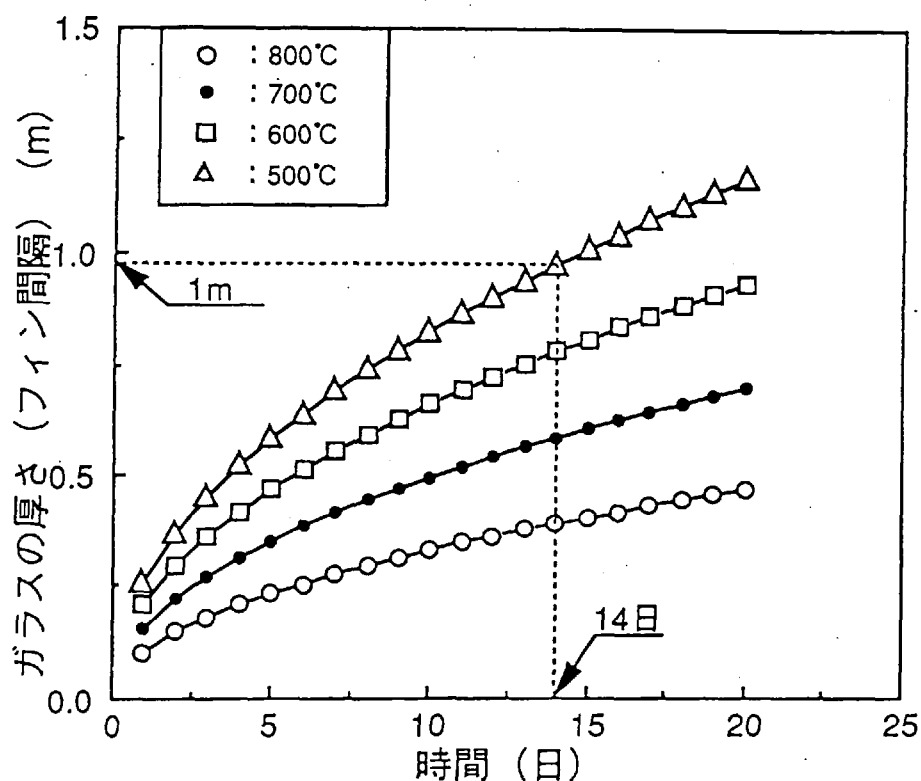


図3.2-3 ガラス厚さと加熱時間・温度の関係

3.2.2 伝熱部

月面エネルギーシステムの概略を図3.2-4に示す。集熱部からの熱エネルギーを蓄熱部へ運ぶ媒体としては、月面での入手の容易さ、配管腐食を考慮するとヘリウムガスあるいは窒素ガスが候補として考えられる。ただし、高密度の光によって高温に加熱された部分から、熱を十分に取り出せるかどうかという課題は今後詳細に検討する必要がある。すなわち、固体から気体への（凝縮・蒸発過程を含まない）熱輸送は一般に熱伝達率が低いため、一定の熱量を伝達するためには面積を必要とする。一方、集熱によって高温を得るためには、加熱部分をできるだけ小さくする必要がある。この矛盾する要請を共に満たせる設計点あるいは技術を見い出せるかどうか、今後重要なポイントになる。

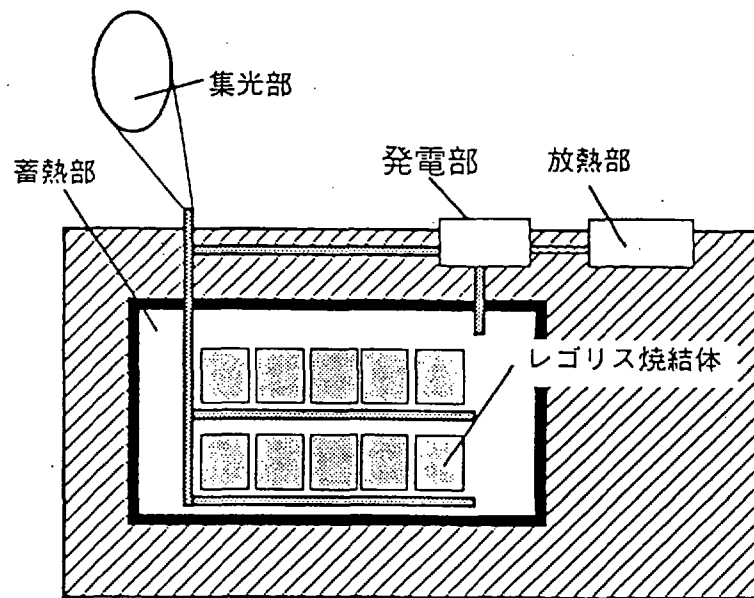


図3.2-4 月面エネルギーシステムの概略

発電部あるいは放熱部においても熱伝達率の問題は重要で、熱伝達率が小さいと、一定の熱を輸送するのに大きな伝熱面積を必要とする。あるいは、伝熱面積が限られた条件で所定の熱伝達を行う場合は、伝熱界面に大きな温度差が生じ、その結果、発電部に生じる温度差が小さくなり、発電効率が低下する。

発電部の低温側温度が室温～200℃であれば、液体の熱媒体（例えば水、液体ナトリウム）を使用できる。液体－固体間の熱伝達率は、気体－固体間の熱伝達率に比べて大きいので、気体を熱媒体にする場合に比べて小型化できる。

乱流による平均熱伝達率の算出式としては次式が知られている。

$$\alpha_m = 0.037 \times P r^{2/3} R e^{0.8} \lambda / l$$

α_m : 平均熱伝達率 (W/(m²K))

Pr : プラントル数 (—)

Re : レイノルズ数 ($= Ux / \mu$)

U : 流速 (m/s)

x : 平板戦端からの距離 (m)

μ : 動粘性係数 (m^2/s)

λ : 熱伝導率 ($W/m \cdot K$)

l : 平板長さ (m)

例えば、平板を 2 m として、流速 20 m/s で流れるヘリウムガスと板の間の熱伝達率を上式から求めると、室温において約 $47\text{ W/m}^2\text{K}$ である。一方、水の場合は $4 \times 10^4\text{ W/m}^2\text{K}$ で、ヘリウムの場合の約 850 倍である。発電部の寸法は、ほとんど熱伝達率で支配され、熱伝達率が小さいと伝熱部が大きくなる。ただし水の場合、水もしくは水素として地球から運搬する必要がある。現時点では地球からの運搬重量が不明のため、熱媒体の選定はできないが、今後、熱媒体、構造物等の重量を詳細に検討し、最適な熱媒体を選定する必要がある。

3.2.3 発電部

(1) 熱電素子発電

熱電素子は放射性同位元素 (RI) などと組み合わせて用いられた実績も多いが、効率が $0.05 \sim 0.1$ と低い。そのため、これまでは惑星探査衛星、軍事衛星などにその用途が限られていた。高効率化には、熱電素子の耐熱温度を高めることと、性能指数 Z を向上させることが必要である。現在、高温用熱電素子としては $Si-Ge$ 系熱電素子、中低温用の熱電素子としては、 $Fe-Si$ 系、 $Pb-Te$ 系、 $Mg-Ge$ 系熱電素子等が知られている。

(2) $Fe-Si$ 系熱電素子

熱電素子の性能は、一般に純度に鈍感であるため、製造に高度な純度管理システムを必要としない。また、焼結法によって製造できることから、単純工程で多量に製造できる。 $Fe-Si$ 系熱電素子の場合、主成分である Fe 、 Si がレゴリス中に多量に存在することから、月面で自己増殖的な発電システムを構築できる可能性がある。そこで、実現性を検証する第1段階として、図3.2-5に示す方法で素子を製造し、特性を調べた。原料としては、 Fe 、 Si 、およびドーパントである Al を用い、これらを溶融した後、粉碎・混合し、焼結して製造した。試作素子の外観を図3.2-6に示す。素子の使用温度域 (高温端温度) は $500 \sim 900^\circ\text{C}$ 程度で、高温端と低温端の間の温度差 500°C の場合、発電効率は約 3% であった。今回の実験では、アルミニウムの量を 0.3 原子%としたが、必ずしもこれが最適量とは言えず、今後の検討課題である。これまで行なった試験の結果では、アルミニウムを混入した珪化鉄の特性はコバルト、クロムを低濃度添加したものと似ており、コバルト、クロムの場合、効率が最大となる添加量は、さらに濃度の高い所にあることから、アルミニウムを現状よりも高濃度に添加することにより 5% 程度の効率は達成できると考える。

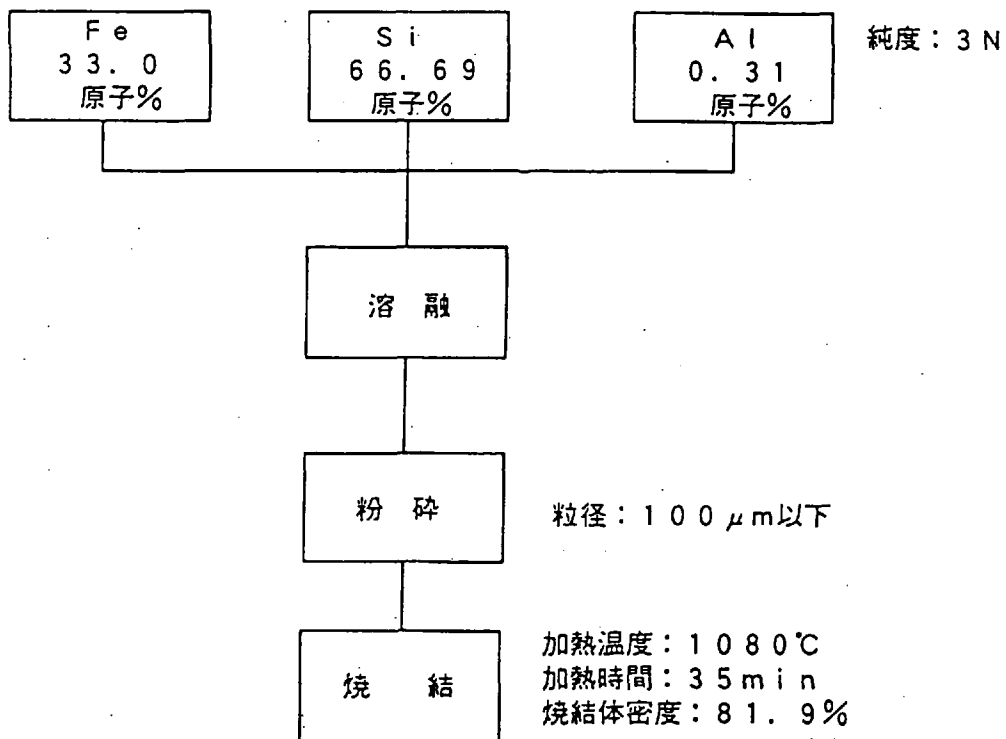


図3.2-5 Fe-Si系熱電素子の製造法

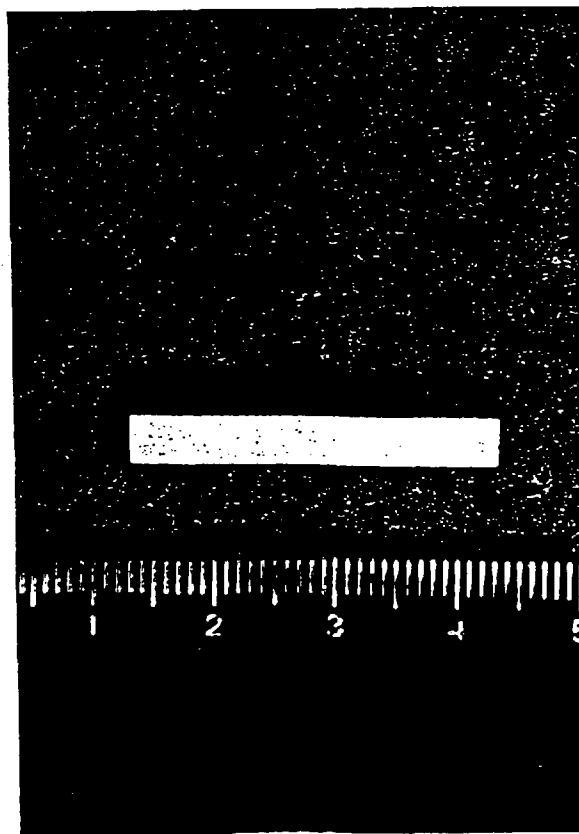


図3.2-6 試作素子の外観

(3) 発電部の構成

熱電素子を用いた発電部は、図3.2-7の様に、熱媒体の流れる配管の周囲に素子を配置し、素子の周りに放熱フィンを装着する構成、あるいは図3.2-8の様に蓄熱部の中に素子を直接挿入して、蓄熱部と輻射によって低温になる電極側との間の温度差により発電する構成が考えられる。

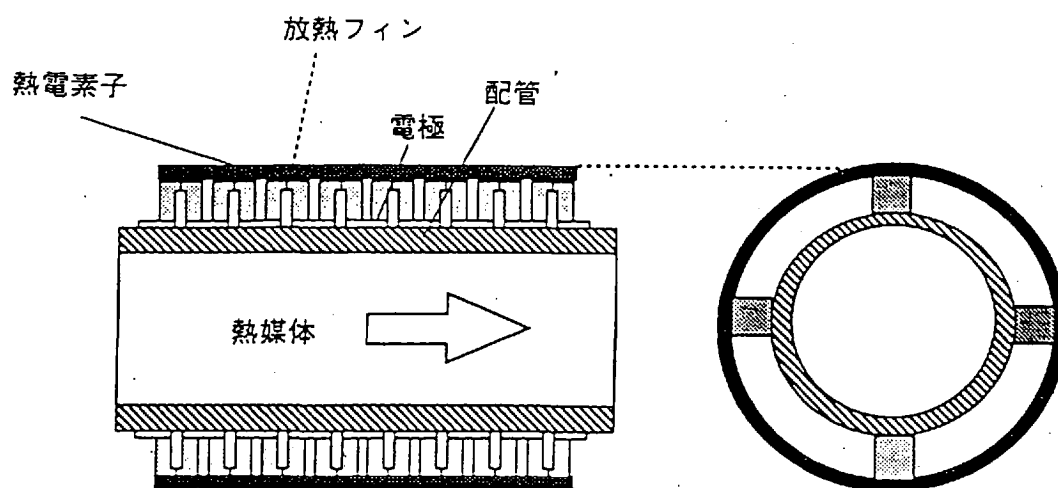


図3.2-7 発電部の構成

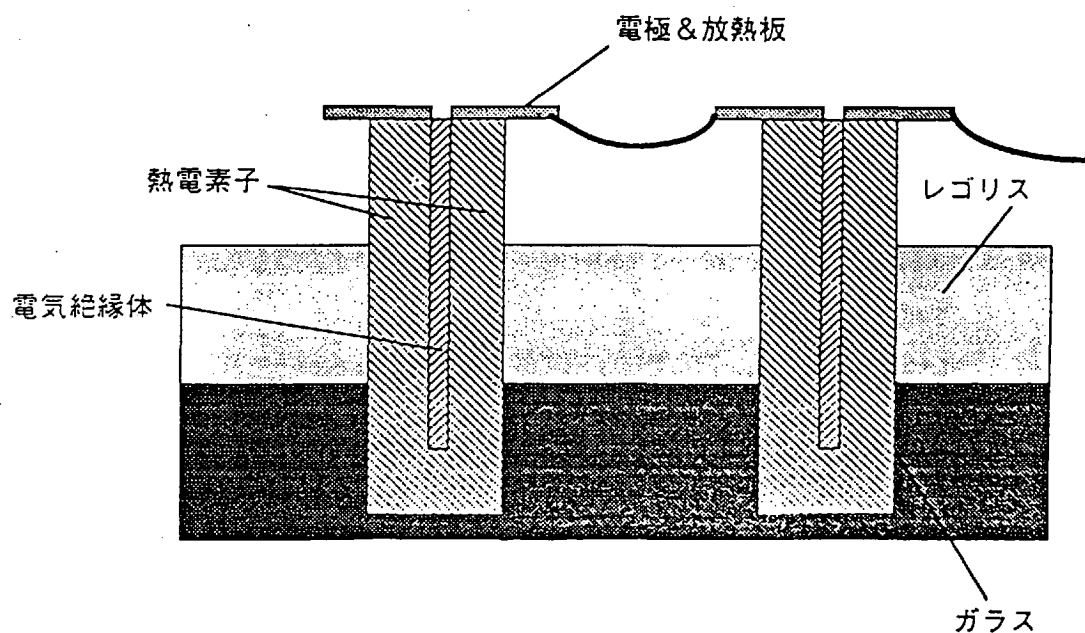


図3.2-8 発電部の構成

前者について、放熱板の長さを7cmとし、素子に2Wの入熱があった場合の放熱板の温度を解析した結果、放熱板の温度は約360℃で、熱電素子に生じる温度差は440℃となり、効率2%、出力密度0.09W/m²が得られることがわかった。後者の場合も同様に計算したが、素子が長いため入熱量が少なく、その結果、単位断面積当りの出力が0.01W/cm²と小さかった。そのため、発電器としての実現性は低いと考える。

ところで、熱電素子の出力は、容積とは直接関係しない。例えば、断面積と素子長さを一定に保ったまま素子を小さくしても、素子の出力は変化しない。この性質を利用すると、素子容積の少ない発電部を構成できる。例えば図3.2-9の用に吸熱板（あるいは放熱板）に対して素子の断面積を1/4とし、素子を高温熱媒体の流れる配管と低温熱媒体の流れる配管の間に挟むことにより（図3.2-10参照）発電が可能で、約0.36W/cm²の出力密度が得られる。

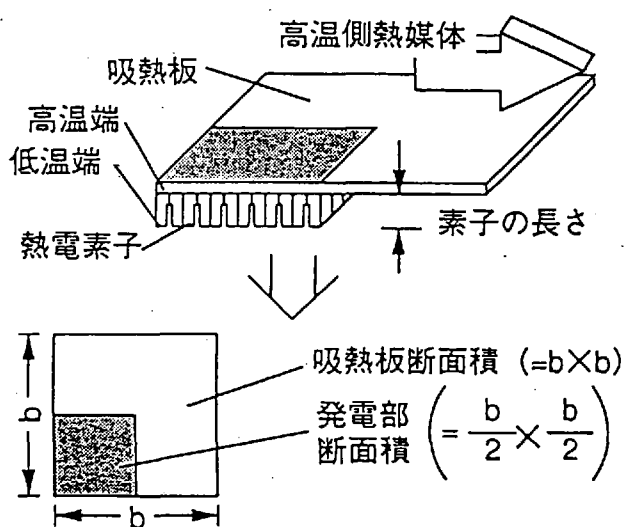


図3.2-9 熱電素子の構成

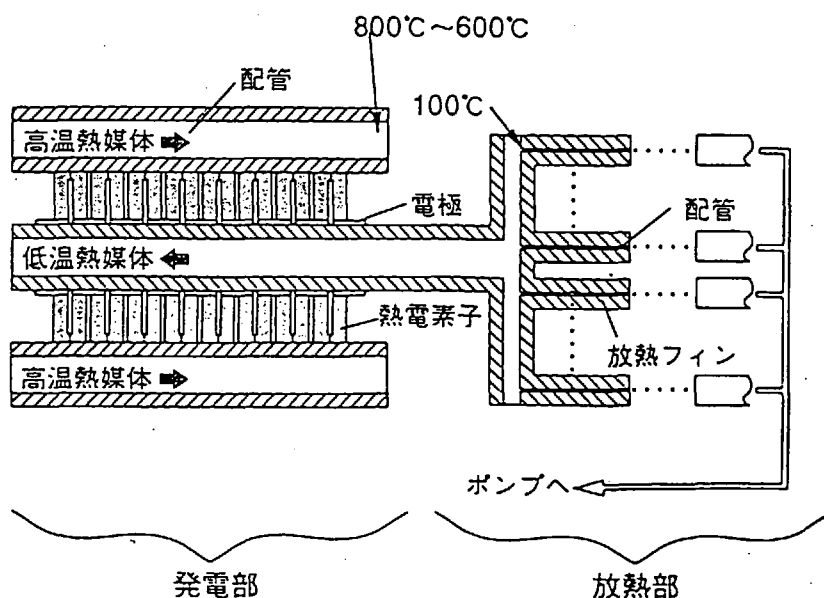


図3.2-10 発電部・放熱部の構成

(4) 熱電子発電およびアルカリ金属熱電発電 (AMTEC)

熱電子発電は高温面からの熱電子の放出による起電力の発生を発電原理とし、非常に高い温度 (1750~2000K) を必要とする。蓄熱部はそれ以上の温度を保持する必要があることから、熱電子発電は実現性は小さいと考えられる。

一方、アルカリ金属熱電発電 (AMTEC) の場合、熱電子発電より低い動作温度 (1000~1350K) で、熱電子発電と同程度以上の効率0.15~0.35が期待でき、太陽熱発電に適用できる可能性がある。AMTECの基本構成と発電原理を以下に述べる。

AMTECの発電部は、図3.2-11に示す様に、高温領域と低温領域が β'' アルミナを挟んだ構成で、高温領域には900~1300Kに加熱された液相のNaが、低温領域には β'' アルミナに接して多孔電極、さらに真空の層を介して400~800Kに冷却された凝縮壁が配置されている。 β'' アルミナはNaの陽イオンに対し導電性を持ち、電子に対しては絶縁体である。そのため、高温のNaは固体電解質の表面で電子を放出し、Na陽イオン高温領域と低温領域のNa蒸気圧差を駆動力として β'' アルミナを通過し、低温領域側の β'' アルミナの表面に達する。高温領域の液体Naから外部電気回路を通過してきた電子は、多孔電極と β'' アルミナの界面でNa陽イオンを中性化する。中性化されたNaは多孔電極内を拡散する間に蒸発熱を吸収する。蒸発したNaは真空の層を通過して低温の凝縮壁で凝縮する。凝縮した液相のNaは電磁ポンプにより高温領域へ戻される。

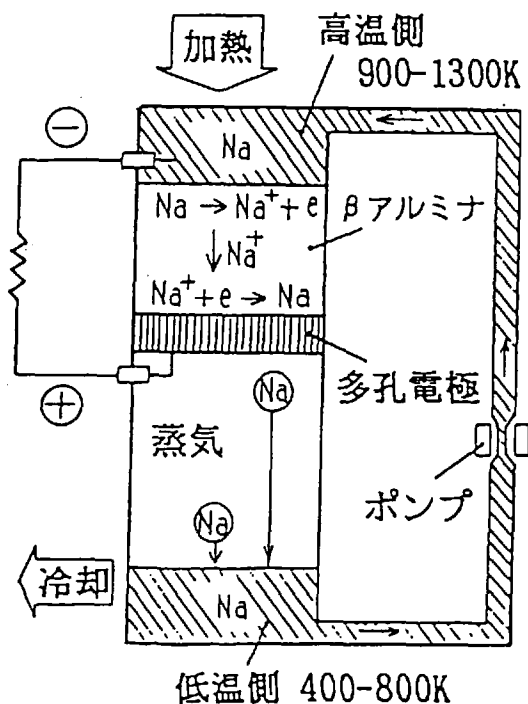


図3.2-11 AMTECの基本構成

AMTECは、次の特徴を有する。

- (1) 熱を電気に直接変換する直接発電方式である
- (2) 直接発電方式としては、高い発電効率（～35%）を期待できる
- (3) 排熱温度が比較的高い（400K～700K）

AMTECは上述したさまざまな利点を有するものの、実現するためには、いくつかの大きな技術課題が残されている。例えば、AMTECの効率は現状で10数%で、高効率化を図るためには、 β'' アルミナのイオン抵抗率を低減するか、薄肉で高強度の β'' アルミナを開発する必要がある。 β'' アルミナはこれまで主としてNa/S電池用の電解質として精力的に開発され、Na/S電池の作動温度である350℃（623K）付近の特性は解明されてきている。しかし、AMTECの作動温度である900～1300Kの温度領域については、強度及びNaとの共存性、カリウム、カルシウム等の不純物と β'' アルミナの破損および抵抗率増加の因果関係等、不明な点が多く、高性能化する上での解決課題となっている。

ところで、 β'' アルミナを通過してきたNaイオンは、多孔電極との界面で外部回路からの電子と結合し、中性化されたNaは多孔電極内を拡散する間に蒸発熱を得て蒸発する。したがって、多孔電極の特性としては、電気抵抗が小さく、かつ、蒸発したNa蒸気の通過抵抗が小さいことが望ましい。そこで、さまざまな構造を有する電極構造が提案されているが、決定的なものはなく、長期間の安定性についてはほとんど検証されていない。今後、耐久性、安定性に優れた、低抵抗の電極の開発が望まれる。

3.2.4 放熱部

放熱部の構成を図3.2-12に示す。例えば熱電素子を冷却した熱媒体は、放熱フィンを通して冷却された後、ポンプへ送られ、再び熱電素子を冷却する。ここで、フィンの長さを1mとし、フィンの入り口側の温度を300℃、出口温度を200℃とする。図3.2-13の放熱板を仮定すると、温度分布は次式で与えられる。

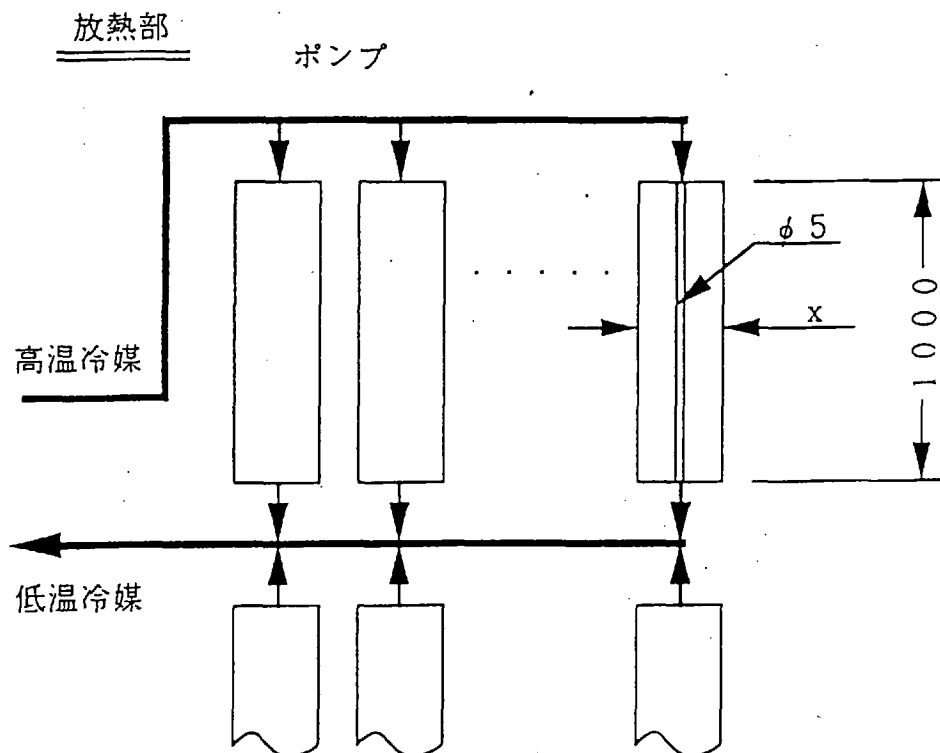


図3.2-12 放熱部の構成

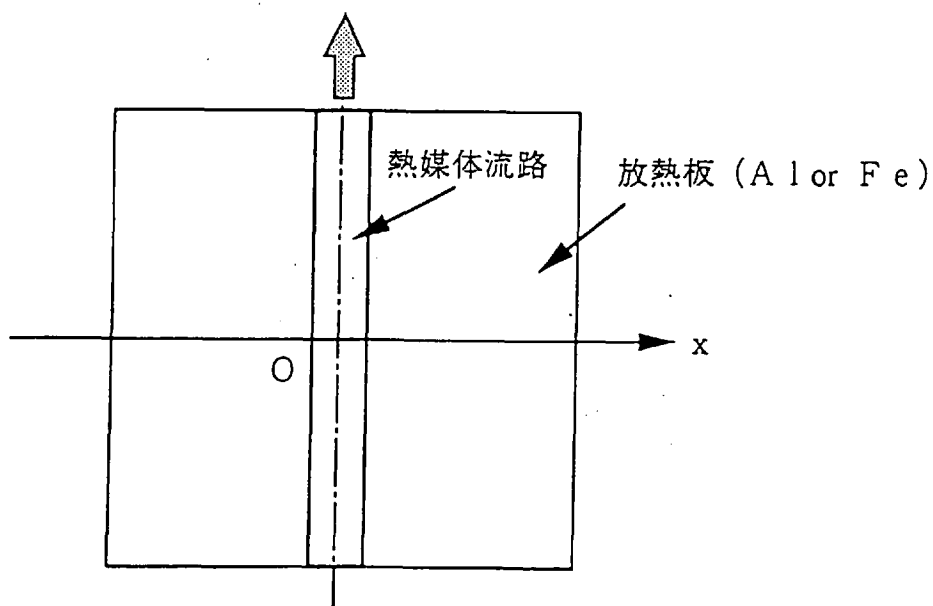


図3.2-13 解析体系

$$T/T_0 = (1 / (1 + 0.9487 \cdot X \cdot A \cdot (T_0 / 1000)^3))^{2/3}$$

$$A = (\sigma \cdot \epsilon \times 10^9 / \lambda_p / t_p)^{1/2}$$

σ : ステファーンボルツマン定数 ($5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2/\text{K}^4$)

ϵ : 輻射率 (—)

λ_p : パネルの熱伝導率 ($\text{W/m} \cdot \text{K}$)

t_p : パネルの板厚 (m)

T : x における温度 (K)

T_0 : $x = 0$ における温度 (K)

x : 流路直角方向の位置 (m)

放熱板をアルミニウム ($\lambda = 235 \text{ W/m} \cdot \text{K}$)、輻射率 $\epsilon = 0.8$ 、放熱板厚さを 1 mm とすると、放熱板の x 方向の温度分布は図3.2-14で与えられる。放熱量は、厳密には放熱板上の各点の放熱量を積分して求めるが、現在は、概略検討の段階であるので、放熱板の温度を x 線上の点で代表させて求めた。

例えば、幅 100 mm (片側 50 mm) の放熱板で放熱する場合、 T_{p1} (503 K) を代表温度とみると、 1 kW 当り 0.34 m^2 の面積が必要で、幅 200 mm (片側 100 mm) の放熱板の場合、 T_{p2} (485 K) を代表温度とみると 0.40 m^2 の面積が必要である。放熱板の表裏の2面からの放熱が可能であれば、前者の場合 1 kW の放熱に 1.7 枚の放熱板が必要で、後者の場合 1 枚の放熱板が必要である。

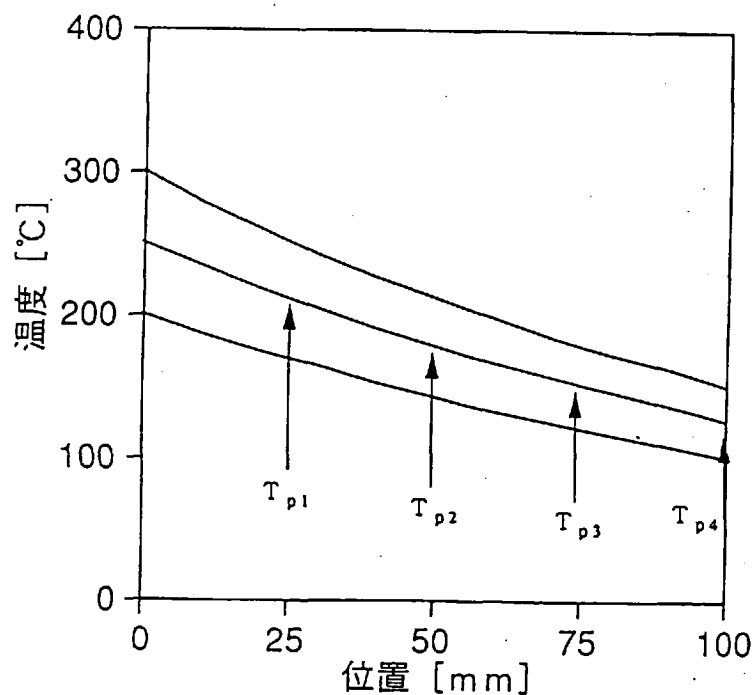


図3.2-14 放熱板の温度分布

一般的に、熱媒体流路が密に配置してあればあるほど、放熱板温度が均一になり、放熱効率の低下は少ないが、熱媒体流路（配管）及び放熱板の製造・接合工数が増える。月面で全て製造できる場合は問題にならないが、放熱システムの構築に、ある程度地球から材料を運ぶとすると、運搬コストを考慮した最適点（放熱板寸法、放熱温度等）の解析が重要な課題になると考える。

3.3 問題点と課題

ガラスの海100kW級発電システムにおける問題点及び課題を以下に示す。

(1) コンセプトについて

- ・ガラスの海システムでは、月資源の最大限の活用をコンセプトとしているが、特に初期の段階では地球からの輸送量が大きくトータルコストが高くなるという問題がある。耐用年数の長期化、自己増殖性の確保によるエネルギーペイバックタイムなどを検討し、システムの定量的評価を可能にする必要がある。
- ・システムの成立性の鍵となる、地球から輸送する重量の試算と軽量化及び構築コストの試算と評価を行う。また、システムの拡張性についても、ユニット化などを含めて検討する必要がある。
- ・昼夜の発電方式の切り替え時（熱流の切り替え時）に、能動的な操作が必要である。または可動部分が必要である。このとき、発電容量が落ち込むといった問題もあり種々の制御を検討する必要がある。

(2) 全体システムについて

- ・本年度の検討では全体としての効率の低さが大きな問題点として抽出された。種々のサブシステムの効率の向上が全体を通じての大きな課題であるといえる。
- ・暴露部の放射線被曝が懸念される。放射線のシステムに対する影響は本年度は検討しておらず、月面の環境を把握した上で、対策を講じる必要がある。
- ・ガラスの海システムで、システム性能の基本となるレゴリスの物性値について、十分なデータが存在しない。本年度は種々の仮定より得られた推定値を用いたが、これについてはレゴリスシミュラントなどによる実測値の測定を行い、信憑性の高いデータを得ることが急がれる。
- ・ガスを利用する際の圧力差に耐え得る構造の構築に手間と重量を要する。レゴリスを用いて作成した構造材などについて、強度データを得る必要がある。
- ・システムに生ずる温度差、昼夜の温度差が大きく、システムの熱ひずみなどが問題になることが考えられる。熱モデルによる評価とともに、電子機器などへの影響も十分に検討していくべきである。

(3) 発電部について

- ・現状のシステムは、太陽電池よりも効率が低い。熱電素子をはじめとする機器の高効率化は最大の課題である。また、月面での熱電素子の製造、熱電素子の長寿命化なども検討課題である。
- ・熱電素子間の接続方法（機械的接続方法・電気的接続方法）が複雑である。この接合は発電部の能力に大きく影響するため、簡易かつ確実な接続方法を検討する必要がある。

- ・発生電力を安定させるための設備、手法を検討する必要がある。

(4)集熱部

- ・集熱部の性能を最大限に評価した際に得られる2000℃という高温に耐え得る材料の獲得は困難である。媒体を熱する構造とともに、獲得温度などを明確にしていく必要がある。
- ・太陽集光ミラー表面の必要な精度の達成、特に月資源をもとにそれを達成が求められる。
- ・駆動系を伴わない集光装置では十分な集熱ができない。太陽追尾とすると、システムが複雑になりすぎる。最も簡易で効率が高い集熱方式及び部材の構築が課題である。

(5)伝熱部

- ・一般的に気体による熱伝達の評価は困難なため、本年度はごく簡易なモデルでしかそれを評価していない。伝達能力、配管への熱の洩れなど更に詳細なモデルをつくり解析していく必要がある。
- ・月には水が存在しないため、地上のような水を利用したごく簡単な高効率の熱伝達システムを構築することができない。資源調達性や性能などを考慮して、高効率の伝熱システムを構築する。
- ・流体を熱媒体として使用する場合、ポンプの輸送及び構築の問題が生ずる。ガラスの海システムに適したポンプの概念、諸元等を明確にしていく必要がある。
- ・夜間に集熱部から熱を漏らさないために、伝熱経路の切り替え機構が必要になる。簡易かつ確実な切り替え機構を検討する必要がある。

(6)蓄熱部

- ・ブロック型を選択した場合、溶融やブロックの固化（割れ目をつくらないための熱制御等含む）が困難である。シミュラントを用いた特性実験などにより、溶融ブロック生成のための技術を獲得していく必要がある。
- ・熱媒体にガスを用いた場合の密閉空間の構築に多大な資源とエネルギーを要する。テルミット反応工法などの省力化のアイデアの更なる具現化が要求される。

(7)放熱部

- ・現在の検討では、蓄積した熱を宇宙空間へ放射することにより熱流を獲得している。特に夜間の熱は重要な存在であるため、熱としての利用と結びつくシステム概念を検討すべきである。

(8)運用、保守、信頼性、メンテナンス

- ・ガラスの海システムは、レゴリスを断熱材として用いるため、蓄熱部をはじめとする種々のサブシステムが地下に配備されることになる。システムの保守、メンテナンスの容

易さの観点からは、埋没部の存在はマイナス要因である。埋没部を極力メンテナンスフリーのシステムで構築するとともに、必要とされるメンテナンスや交換が可能なシステムレイアウト等を検討しておく必要がある。

- ・伝熱系統にガスを用いた際、ガス漏れへの対処が困難。
- ・放射線、隕石、温度等の月面環境を考慮した各サブシステム、部品レベルの信頼度（故障）解析を行い、寿命や保守交換期間を明確にする必要がある。また、システム全体としての各故障モードを考慮したF T A，F M E Aなどのシステム信頼性解析などを行い、適切なモニタリングシステムや保守方針の確立を行う必要がある。

4. 5GW級発電システムの検討

4.1 システム構成の検討

3. で検討した100kW級発電システムを組み合わせて、地球へのエネルギー伝送を前提とした5GW級発電システムを構成した場合の、システムの規模について検討する。

ここで言う5GW級発電システムは、地球へのエネルギー伝送量が5GWであるシステムとする。エネルギー伝送の効率はエネルギー伝送分科会の成果報告書で詳細されるが、約50%程度であると考えられる。したがって、5GW級発電システムとしては、実際には10GWの電力を発電する必要がある。

10GWを発電するためには、100kW級発電システムは100,000基が必要とされる。100kW級発電システムに必要な集熱部の大きさは、3.1で示したように半径約42mの円になる。蓄熱部や発電部の大きさを考慮して、ここではひとつの100kW級発電システムが直径100mの円が内接する正六角形の中に設置できるものとして、5GW級発電システムの全体のレイアウトを検討する。

5GW級の伝送システムとしては、エネルギー伝送分科会の検討によると直径10kmに広がる伝送装置が必要とされる。発電システムはその周囲を取り囲むように配置するのが、効率的であると考えられる。

100kW級発電システムは直径100mの円が内接する正六角形の中に設置できるものとした。この場合の正六角形の一辺の長さは57.7mであるが、その六角形を直径10kmの伝送システムの回りの隙間無く敷き詰めて配置することとした。図 4.1-1 にそのように配置したガラスの海を一部拡大したイメージを示す。

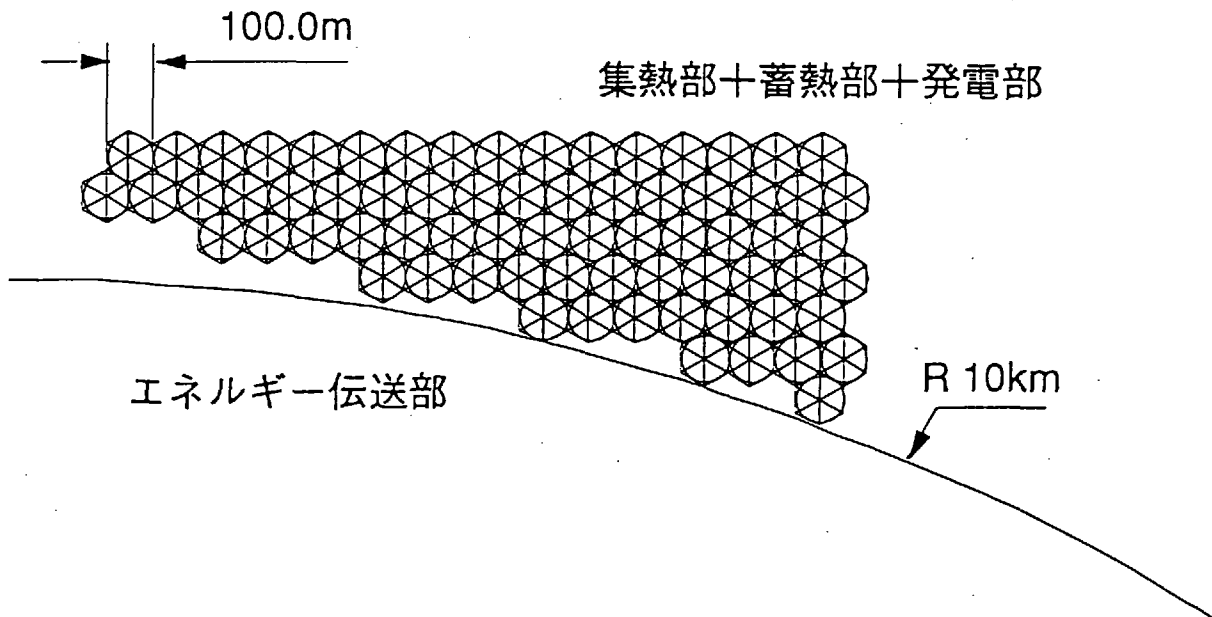


図 4.1-1 ガラスの海の配置

六角形ひとつの面積は、

$$(57.7 \times 100/2)/2 \times 6 = 8655 \text{ m}^2$$

ガラスの海システムは100,000基必要であり、同じ数の六角形を用意することが必要であるから、全体では以下の面積が必要である。

$$8655 \times 100000 = 8.655 \times 10^8 \text{ m}^2$$

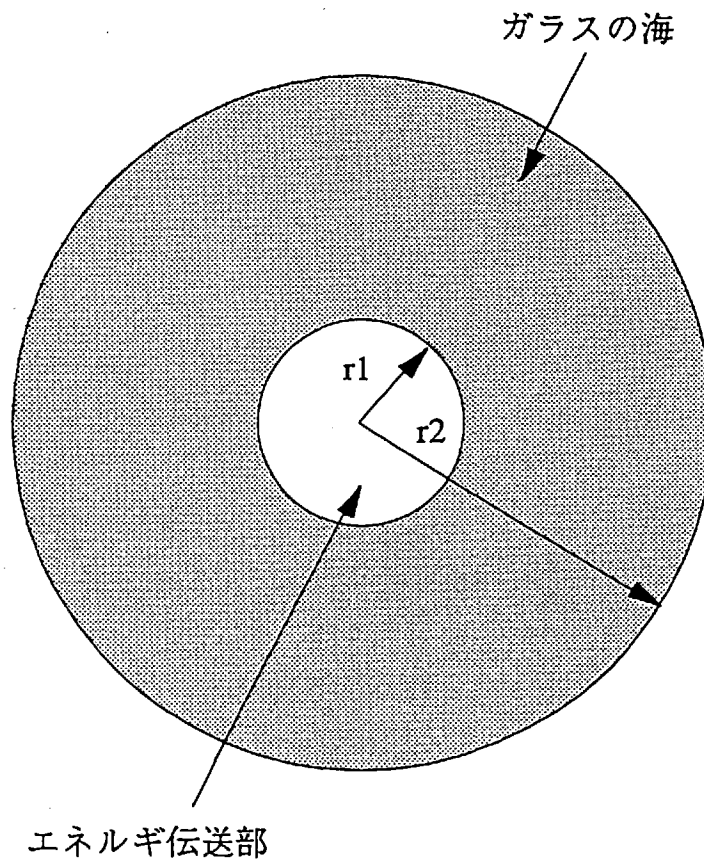


図 4.1-2 全体の大きさ

図 4.1-2 で示すようにエネルギー伝送部の周囲にガラスの海を配置すると、図のハッチング部の面積が上記の面積に相当する。

したがって、以下の式が成り立つ。

$$\pi r_1^2 - \pi r_2^2 = 8.655 \times 10^8$$

$r_1 = 5000\text{m}$ であるから、

$$r_2 = \sqrt{\frac{8.566 \times 10^4}{\pi} + 5000^2}$$

$$= 17253 \text{ m}$$

したがって、システム全体としては半径17km程度の大きさになると考えられる。

4.2 問題点と課題

地球へのエネルギー伝送を意図したガラスの海5GW級発電システムにおける問題点及び課題を以下に示す。

(1) コンセプト

- ・大規模化に伴い組立期間が長期化し、各設備、電子部品などの耐用年数、寿命などがエネルギーシステムの成立性に大きく影響する。また、トータルコストが高く、投資額を回収するのに多大な年月を要するものと考えられる。他のエネルギーシステムに対する優位性を保つためには、簡易かつ短期間の構築方式の確立とともに、設備の耐用年数、寿命、信頼度の定量的評価及び改善が必須である。
- ・組立に必要な人員が増大し、滞在等の設備を考えるとコストが増大する。単純工程化による無人建設などを検討する必要がある。
- ・地上からの輸送物資が大量で現状の輸送系では対応できない。地球から月への輸送量ができる限り小さくするとともに、低コスト輸送系の検討も重要である。また、輸送系に関して、現状の98%などという信頼性では、大規模システムの構築を考える場合、能率が悪すぎる。この点も十分に考慮に入れておく必要がある。
- ・大規模なシステムに拡張した場合は月そのものの環境、地形などを大幅に変えることになる。政治的理解を得るための方策が必須である。
- ・地球への送電を目的とした場合には、地上システムと比較した際の経済性の欠如が必至である。地球の資源枯渇問題、エネルギー問題などを十分に把握した上で、エネルギー収支を検討する必要がある。

(2) 全体システムに係わる製造

- ・レゴリスからの金属生成については、
 - ・金属精製プロセス（水素還元法、熔融塩電解法）の確立。
 - ・必要な純度を獲得する製造プロセスの確立。
 - ・金属精製工場の小規模化。
 - ・金属精製の課程で必要な触媒などの入手方法の獲得。
 - ・エネルギーコストが小さいアルミ製造方法の確立。

などの課題がある。

- ・レゴリスからのガス抽出・分離については、レゴリスに含まれるガスは非常に濃度が低く、レゴリスの処理量は莫大である。小規模、単純工程の、ガス抽出・分離工場のイメージ確立が求められる。
- ・金属成分からの、金属材料・部品製造については、部品を必要な精度に加工する性能が要求される。また、リソース（電力、冷却）、洗浄材、触媒等の確保について十分な検討を行う必要がある。

- ・システム構築のキー技術である月でのテルミット反応について、月環境下における反応性、未加工月表土での反応性などを検討する必要がある。
- ・月での製造物資や年間の製造量などを明確にした上で、実現可能な製造計画を策定する。また、部品のインテグレーションなどの方策の検討すべきである。

(3)全体システム

- ・現状の試算では、全体でのシステム効率が低すぎると言わざるを得ない。システム効率の鍵をにぎる各サブシステムの高性能化、効率向上が大きな課題である。

(4)発電部

- ・発電量の巨大化に伴い、熱電素子を中心とした発電ユニットの重量が非常に大きなものとなる。熱電素子の高効率化とともに月での製造方式の確立が求められる。

(5)集熱部

- ・現状の効率では、面積が多大であり、それに伴い構造物の製造が困難になる。この大きな原因は集光装置の中の熱伝達部の十分な性能が確保できない点にある。高効率の集熱方式の検討や熱伝達部の性能の向上が求められる。

(6)伝熱部

- ・耐熱、単純さ、コスト、高信頼性、月での資源調達性などを考慮した場合、理想的な媒体は存在しない。地上における理想的な熱媒体である水が月には存在しない。最適な媒体の選定とともに、最適な熱媒体の使用について検討する必要がある。

(7)放熱部

- ・宇宙空間への輻射のみで対処する場合、設備が多大になる。今年度の検討でも、放熱部に次ぐ多大な面積が必要となることがわかった。構造と材質の最適化検討とともに、熱利用を考慮した効率的な放熱を検討すべきである。

(8)エネルギー伝送への電力伝送系

- ・エネルギー伝送に際して、電圧、電流の安定化が必要となる。それを実現する簡易な安定化方式及び機器の小型化が求められる。

(9)地球へのエネルギー伝送系

- ・地球へのマイクロ波送電を考えた場合、地球温暖化の助長、高密度電力伝送のひきおこす通信障害、航空機等の危険が常に問題視される。本年度の検討では、エネルギー密度を小さくすることにより、種々の障害をほとんど皆無にできることがわかったが、マイクロ波

に対するパブリックアクセプタンスの検討、更に細かな障害の検討などを進めていく必要がある。

(10)運用、保守、信頼性、メンテナンス

・信頼度については、本年はパワーアンプを例にとり、偶発故障に対処するためのメンテナンス方針を検討した。方針の最適化により、1時間に18個の交換で十分であるという結論が得られたが、これについては管理エリアを多く設けたとしてもかなりの負担になることは明瞭である。今回設定した故障率1000FITをできる限り小さくする、また、メンテナンスフリーを実現して、パワーの低下を許す方策の検討など多くの課題が残されている。更に、パワーアンプ以外の制御機器、ケーブル等のメンテナンスも考慮する必要があり、それらを踏まえた、最適メンテナンス方針の確立、最適なメンテナンス方式の検討などなどを検討する必要がある。

5. 結論及び今後の課題

本論では、平成6年度当初に発案されたガラスの海という月の新しいエネルギーシステムの構想を明確にし、

(1)当面の月面ミッションを支える100kWクラスの発電システム

(2)地球へのエネルギーリターンを意図した5GWクラスの発電システム

という2つの形態のもとに、システムの実現可能性の検討、サブシステムの明確化とその複数のアイデアのトレードオフなどを行った。

本年度の検討からは、以下のことが明らかになった。

(1)100kW級発電システム

初期の月ミッションを支える100kW程度の発電が、ガラスの海システムではほぼ実現可能であることがわかった。同時にシステムの成立及び効率的なシステムの構築に不可欠な技術的課題、成立の鍵を握るポイントなどが抽出された。また、システムの高効率化などの観点から更に検討を進めるべきサブシステムなどについても明らかになった。

また、現状では未だ概念的であり詳細なイメージに到達していないサブシステムも多い。

今後検討を進める特に重要なポイントとしては、

- ・集光装置（集熱部）の構造
- ・熱伝達システムと媒体の選択
- ・ガラスの海の材質の選択と蓄熱能力の確証

などが抽出された。

また、今後は月面の他のエネルギーシステムとの比較検討を進めていく必要がある。

(2)5GW級発電システム

本年度検討した5GWシステムは、地球へのエネルギーのリターンを意図したものである。本年度の検討ではその初期的なサイジングなどを行ったが、ガラスの海の規模（特に集光部の規模）が莫大なものであることがわかった。また、部品点数についても億オーダーを越える莫大なものになることが予想される。このようなことから、自己増殖性を確保した構築方法、メンテナンスなどが今後の大きな課題となる。更に、送電システムとのインテグレーションについても今後十分に検討する必要がある。

第2編
エネルギー伝送分科会

1. 序論

現在の発電は化石燃料の石油や天然ガスと原子力発電に大きく依存している。しかし、石油や天然ガスの埋蔵量は限られ、価格も高騰している。原子力発電もチェルノブイリ原子力発電所で事故が起きたように、安全性の確保や立地条件の難しさがある。一方、急増する世界の人口や発展する経済活動を支えるためには、30年後には現在の約10倍程度のエネルギーが必要になると言われている。このエネルギー危機を乗り越えるためには環境にやさしい大型エネルギー源が必要である。環境にやさしいエネルギー源として、太陽光発電、燃料電池、風力発電、地熱発電など多くのエネルギー源が研究されているが、どれも火力発電や原子力発電に匹敵する基幹電力源には未だ成りえていない。例えば太陽電池による太陽光発電は、まったく二酸化炭素などを排出しないクリーンな電力源である。しかしながら、夜には発電できないことや天候に左右されるため、常時一定の電力を安定に供給しなければならない基幹電力源には不十分である。現在、太陽光発電は補助的で分散的な発電システムとして開発が進められている。そこで、火力発電や原子力発電に代わりうる基幹電力源の開発が望まれる。この将来の基幹電力源のひとつに宇宙太陽発電衛星や月面発電所のように宇宙で発電した電力の地球への送電が考えられる。

宇宙から地球へのエネルギー供給の実現の成否は、無線送電の技術開発にかかっていると言っても過言ではない。宇宙で発電した電力を水素に変換し、地球に輸送機で運んでは莫大な費用がかかり採算が合わない。マイクロ波以上の電磁波または光を用いて地上に送電するしか方法がない。ここでは、宇宙における発電システムのうち月面発電所からの無線送電の可能性について議論する。

宇宙からの電力供給を検討する上で、生体をはじめ地球の環境を守ることが大前提となることは当然である。一番の問題点は、送電用に用いられるマイクロ波の生体への影響である。解決策として、広大なレクテナ（受電アンテナ）を建設し、生体に影響を及ぼさないレベルにマイクロ波強度を弱めることが考えられる。さらに、レクテナを砂漠や遠く離れた海面で建設し、容易に生体がレクテナに近づけないようにすることである。第2の問題点として、地球の温暖化があげられる。温暖化に対して、マイクロ波による宇宙からの電力供給は、火力発電や原子力発電に比して有利と考える。なぜならば、マイクロ波で地球に送電する場合、90%近くのマイクロ波が電力に変換され、10%しか熱にならないからである。すなわち発電効率として90%ということになる。火力や原子力発電ではもっと多くの熱が発散しているものと考えられる。また、供給された電力が消費される際に発生する熱が問題になるならば、これは発電方法とは関係なく、地球全体の消費電力量を抑さえなくてはならない。

宇宙からのエネルギー供給は、本来地球にふりそそぐことのないエネルギーを地球に送電することにより、地球の熱バランスを崩すと危惧されることがある。しかし、太古から蓄積されたエネルギーである化石燃料を燃やす方が、はるかに地球の熱バランスにとって大きな問題と考える。長期間に蓄積されたエネルギーを短時間で消費して多くの熱を発生しているからである。本来地球には達しないエネルギーを地球で消費するマイクロ波送電は、熱への損失が少ない分だけ熱バランスへの影響が化石燃料より少ないと考えられる。しかしながら、化石燃料の場合は時間的に、マイクロ波送電の場合は空間的に集めたエネルギーを地球上で消費することから、熱バランスには少なからず影響がある。今後、熱を発散しない高効率発電の開発はもとより、熱バランスをくずさない電力使用量を検討しなければならないと考える。

2. エネルギー伝送システムの概要

2. 1 月面発電所からの無線送電における前提条件

テレビやラジオの放送や通常の無線通信が、非常に効率の悪い無線送電であることから分かるように、電波を用いた無線送電の原理は大変簡単で、単に無線の送受信をおこなうだけのことである。しかし、放送や通信の場合には、送信した電波のエネルギーの1億分の1でも受信できれば情報を伝達できるが、無線送電の場合は送信したエネルギーを100%近く受信しなければ送電として意味がない。この送電効率が、無線送電にとって放送や通信と最も異なる重要な点である。

本報告では、月面の発電所から地上の受電基地への送電システムを検討する。この検討における前提条件を以下に示す。

(1) 送電システムはすべて月の資源で作る。

送電システムを作る資材を地球から輸送していたのでは月面で発電所を作る意味がない。資材を地球から運ぶなら、静止軌道の宇宙太陽発電衛星の方が輸送費が安価となる。月面発電所の建設資材を月に求め、製造工場を月面に建設し、地上からはこの工場に必要な器材だけを輸送する。月ですべて資材をまかなうことができれば、製造工場を作るだけで、あとは月内で送電システムを大きく、増やしていくことができる。また運営やメンテナンスも地球からの支援なく行うことができる。

(2) 静止軌道などに無線中継点が無いこと。

今までに検討された月からの無線送電は必ず静止軌道に中継衛星を設け、常に一ヶ所の受電基地に送電するシステムが提案されている。月面から送電されたマイクロ波／レーザーを一旦レクテナ／太陽電池で受電し、再び地上への送電のためマイクロ波／レーザーに変換される。レーザーを用いる場合、中継衛星は今まで提案された宇宙太陽発電衛星と同じ衛星で、月面からのレーザーを受ける太陽電池と地上送電用のマイクロ波／レーザー送電システムから構成される。異なる点は太陽ではなく月を太陽電池が追尾する点と、レーザーのビームの大きさにより太陽電池の大きさが変わる点だけである。マイクロ波送電の場合は、太陽電池がレクテナに変わるだけである。この様に中継衛星はほぼ宇宙太陽発電衛星と大同小異のシステムとなる。さらに、マイクロ波／レーザーからDC、DCからマイクロ波／レーザーに2回変換することにより大幅に送電効率を落とす欠点がある。以上より中継衛星を建造するより、宇宙太陽発電衛星を建設した方が経済的と結論される。

逆に中継衛星を用いない場合の問題点は、地球の自転にともない受電基地が移動する点である。そのため、常にビームを走査し受電基地を追尾しなければならない。さらに受電基地が月から直視できない反対側に移動すれば、当然送電ができなくなる。そのため複数の受電基地が必要となり、ビームを切り替えて送電することとなる。中継衛星が無い半面、複数の受電基地が必要となる欠点がある。しかし受電基地は地上の設備であり、中継衛星を打ち上げるより、受電基地を複数製作するほうが容易と考える。また、月面発電所の次の段階で月からの資材による宇宙太陽発電衛星の建造が容易に予測され

る。月からの送電が無いときは宇宙太陽発電衛星からの受電に使用することもできる。また、大陸間の送電などにも応用できるものと考えられ、有効に受電基地を使うことができるものとする。

(3) 小規模なものから、相応の送電ができること。

大規模な送電システムができて初めて実用に供するようなシステムでは、送電アンテナ建設への投資がむずかしい。小規模な送電システムでそれなりの実用に供することができれば、段階的な開発が可能となり、実現性が高くなる。最初の段階はビームの試験および他の用途への転用（たとえばリモートセンシング用の合成開口レーダー）を考慮する。さらに規模を拡大し、月での送電に用いたり、他の用途としては天文観測のための超大型アンテナとしての応用も考えられる。

(4) 送電電力を宇宙太陽発電衛星と同一の5GWとする。

将来の化石燃料の枯渇、地球環境問題や経済性を鑑みるに、月面からのエネルギー供給量は地球で消費する電力の数十%を目標としなくてはならない。また、無線送電は建造に多くの費用が掛かるため、小規模の送電より大規模送電に適し、規模が大きいほど経済性も良くなる。しかしながら、今回の検討は初めての試みであり不確定要素が多いため、従来から多くの検討がなされている宇宙太陽発電衛星と同じ送電規模で検討する方が考えやすいため、送電規模を5GWとした。

2. 2 無線送電の技術的可能性

ここでは、2. 1で議論した前提条件をもとに無線送電における技術的可能性を議論する。

(1) 送電波の周波数の検討

無線送電でもっとも重要な検討項目は、送電用に用いる電磁波の周波数である。電磁波の周波数範囲は低周波から光の領域まで非常に広範囲であるが、月から地球上にビームを絞らなくてはならないことから、使用できる周波数帯は、マイクロ波からレーザー光までに限定される。マイクロ波、ミリ波およびレーザーでの比較表を表2.2-1にまとめた。なお、表中のCWCはCyclotron Wave Converterの略でMoscow大学で開発されたものである。周波数に関する検討を以下に示す。

①周波数が高ければ高いほどビームを収束しやすいことから、高い周波数（特に、レーザー）は送受電システムが小型になる長所をもつ。

②ビームが絞られるほど、エネルギー密度が高くなり、危険性が増大する。高出力のレーザー・ビームはSDIのような武器になり、ビームを横切るものに対して非常に危険である。

③今回の検討では静止軌道での中継衛星を用いないことから、月面の送電システムも地球大気の減衰や降雨減衰を考慮しなければならない。図2.2-1に各周波数における降雨減衰を示す。10GHz以上から降雨減衰が激しい。宇宙太陽発電衛星で考えられている2.45GHzではまったく大気による減衰は無いと考えられる。

レーザー・ビームの場合、大気による散乱光の危険性が危惧される。特に生体の眼に与える影響を十分に検討しなければならない。

④月の資源の利用の前提条件から、マイクロ波の増幅器にはGaAsでなくSiを用いる。Siトランジスタは効率の面でGaAsに劣り、せいぜい2.45GHzが現在の技術では限界である。それ以上の周波数では効率が非常に悪いものとなる。しかしながら、増幅器を月で製造することから輸送費がかからず、冷却さえ十分に行えるならば、増幅器の数で性能を補うことができる。

以上の検討結果から、Siトランジスタを用いた2.45GHzでの送電システムを今回の検討対象と決定した。実用時にはISMバンド（2.45GHz）以外の低い周波数も送電に認可される可能性も十分にあることを付け加える。

(2) エネルギー・ビームの検討

図2.2-2に理想的な送電アンテナの放射パターンと、送電電力に対する受電アンテナに到達する電力の比（効率）を示す。開口面分布はアンテナ端で1/10となるガウス分布である。この分布ではメイン・ビームは太くなるが、サイド・ローブが小さくなり、効率も横軸で2で送電効率が95%以上に達する。なお、横軸は送受電アンテナの面積ATとAR、波長 λ と送電距離Dで決まる値である。たとえば波長を12cm（2.45GHz）、送電距離を1kmとするならば、半径8.8mの送受信アンテナを用いれば95%以上の効率での送電が実現できることとなる。

地上でのマイクロ波の電力分布などの条件を、宇宙太陽発電衛星とまったく同一にすれば、DOEとNASAが検討した結果をそのまま用いることができる。すなわち、上記の計算から、送電アンテナの直径を9 kmにすれば、レクテナの大きさはレファレンス・システムと同じ10 kmの直径となる。この時、同じ効率で受電することができ、受電基地におけるマイクロ波電力分布も同一になる。マイクロ波の最大電力密度も電離層への影響除去のため 230 W/m^2 に抑ええることができる。以上の考察から送電アンテナとレクテナの大きさをそれぞれ直径9 kmと10 kmとした。将来、送電電力を増やす場合は電離層への影響や生体への影響など環境への影響を十分に調査する必要がある。大電力マイクロ波と電離層プラズマとの相互作用の実験を目的として、1983年にMINIXロケット実験が行われた。この実験で観測されたHF帯の波動スペクトラムを図2.2-3に示す。マイクロ波のONとOFFの差から、サイクロトロン周波数の1.5倍の周波数とプラズマ周波数帯のプラズマ波の励起が観測されている。さらに詳細な定量的実験をめざし、ビームを自由に制御できるアクティブ・フェイズド・アレイ・アンテナを用いて、1993年にISY-METSロケット実験を行った。その結果、レファレンス・システムで規定された 230 W/m^2 では、プラズマ波動の励起がないことが確認された。MINIXロケット実験で観測された波動は、ホーンアンテナ開口面付近の 150 kW/m^2 の非常に強いマイクロ波により励起されたものと結論された。

(3) レクテナ・サイトの検討

月から地球に直接送電するため、複数のレクテナを必要とする。レクテナの数が多いほどマイクロ波ビームの切り替え回数が増え、1基のレクテナが受け持つ受電時間が短くなる。マイクロ波はレクテナ面に垂直に近い仰角で入射することができるので、レクテナは円形に近い形となる。逆にレクテナの数が少ない場合は、それぞれのレクテナが広い仰角の範囲を受け持つこととなり、レクテナの形が楕円形となる。図2.2-4に示すように赤道付近にレクテナを設置した場合、4ヶ所にレクテナが設置できる可能性がある。また、まったく地上から離れ海上に設営する場合でも、太平洋上2ヶ所、インド洋と大西洋のそれぞれ一ヶ所づつが適当と考える。

4ヶ所にレクテナを設置した場合、月からの入射角は -45 度から 45 度の 90 度の範囲を追尾することとなり、レクテナの大きさは東西方向に14 km、南北方向に10 kmとなる。マイクロ波ビームを南北方向へ走査可能にすれば、赤道に限らず世界中どこにでも送電することが可能である。ただし、緯度により月の仰角が低くなるため、レクテナは南北方向に長いものとなる。

2. 3 送受電システムの基本構想

上記の検討をもとに、実際の送受電システムの基本構想を提案する。

(1) 送電アンテナ

送電アンテナは2. 2 (2) で検討したように、直径9 kmのアクティブ・フェイズド・アレイ・アンテナを用いる。図2.3-1に示す様に、アンテナ全体を月面から浮かし、平面を形成する。平面の精度は約1 cm ($\sim \lambda / 10$) 以内を目安とするが、平面からの誤差は送信位相の制御で補正することが可能である。

送電アンテナは数多くのサブ・アレイで構成される。サブアレイ単位で送信の位相が制御され、送電アンテナ全体がフェイズド・アレイ・アンテナとして機能する。サブアレイは図2.3-1に示すように円形に近い六角形で区分する。サブアレイは構造的に分けて製作する必要性はないが、サブアレイ内のアンテナはすべて同一位相で制御されるため、歪みが少ない一体構造が望ましい。

(2) サブアレイ

サブアレイはもっとも基本単位であるアンテナ素子（例えば、ダイポールアンテナ + 増幅器）の集合体で構成される。フェイズド・アレイ・アンテナの原理から、サブアレイが小さいほどサブアレイの放射パターン（半値幅）は広がり、広い範囲にマイクロ波ビームを走査することができる。また、グレーティング・ローブの間隔も広がり、レベルも小さくなる。最適なシステムは半波長ごとに位相制御すれば、グレーティング・ローブも出現しなくなる。しかしながら、全てのアンテナ素子で位相制御するのはシステムの的に過大である。そこで、サブアレイの大きさを決める条件として、

①地球全体の範囲にビームが走査できること。

地球の自転に伴いレクテナが移動する。レクテナを追尾するためにはビームを角度にして2度（地球直径12800 km / 地球-月間距離36万 km）の範囲を走査できなくてはならない。サブアレイの半値幅と比較検討する。半値幅は波長とアンテナ直径で決まり、2度の半値幅を持つアンテナの直径は3.4 mと計算される。この計算結果からサブアレイの大きさは少なくとも3.4 m以下でなくてはならない。また、大きなサブアレイでビームを振ると送電電力が減少することから、可能なかぎりサブアレイは小さいことが望まれる。

②グレーティング・ローブが受電基地以外に影響を与えないこと。

宇宙太陽発電衛星のレファレンス・システムでは、サブアレイの大きさが1.0 mで、400 kmおきにグレーティング・ローブが現われている。しかし①の検討から月面での送電アンテナのサブアレイの直径が3.4 mなら、サブアレイが小さいことと送電距離が長いことにより、メイン・ビームにもっとも近いグレーティング・ローブは地球中心から11800 kmの方向に現われる計算となる。これはビームを1度走査したとき、反対の1度方向にグレーティング・ローブが向く計算結果である。4ヶ所のレクテナサイトがある場合は、0.7度しか走査しないため、地球にグレーティング・ローブが向くことはない。ここでもサブアレイをより小さく区切れば、さらにグレーティング・ロー

ブは地球から離れ、安全になる。

(3) ビーム制御法

無線送電用のビーム制御方式としてレトロディレクティブ・アンテナ方式が提案されている。レトロディレクティブ・アンテナ方式とは、図2.3-2に示すようにレクテナ・サイトからパイロット信号を送信する。送信側でこのパイロット信号を受け、パイロット信号の共役位相を作り、この位相で送電アンテナからマイクロ波を送れば、パイロット信号を送信したレクテナ・サイトにビームが収束される。要は、パイロット信号を受けることによりレクテナ・サイト（パイロット信号送信アンテナ）とそれぞれの受信アンテナとの距離を算出していることを意味し、受電アンテナが位置を変えても、その変動はパイロット信号の位相により補正することができる。

もっとも単純なレトロディレクティブ・アンテナ方式は、パイロット信号の周波数と送電用マイクロ波の周波数が全く同じ場合である。原理的には正確にレクテナ・サイトに送電することができるが、パイロット信号と送電用マイクロ波の周波数が同じだと、送電アンテナ側のパイロット信号受信機で、パイロット信号と自ら送信しているマイクロ波と判別がつかないこととなる。また、パイロット信号の周波数を少しずらすとずらした分マイクロ波ビームの方向がレクテナ・サイトからずれることとなる。レファレンス・システムでは対称二周波（ $f + \Delta f$ と $f - \Delta f$ ）のパイロット信号を用いて、受信側で合成し、送電用マイクロ波の周波数での位相差を検出する方法（図2.3-3上図）を提案している。しかしこの方式には大きな欠陥がある。送電用マイクロ波の周波数での位相差を検出するため、まず $(f + \Delta f) + (f - \Delta f) = 2f$ の演算により2倍の周波数に変換し、 $f/2$ の演算により f を求める。しかし $f/2$ の演算には2つの解があり、 π だけずれたビームを打ち消し合う解もあり、不安定な制御となる。我々は非対称二周波（ $f + \Delta f$ と $f + 2\Delta f$ ）方式（図2.3-3中図）を提案し、実験的にも正常に動作することを確認した。結果を図2.3-4に示す。非対称二周波方式は $f + \Delta f$ を逡倍し、 $f + 2\Delta f$ と差をとるだけで、割り算することなく f における位相差を求めることができる。しかしながら、回路系が複雑で部品点数が多い。次にパイロット信号に送電用マイクロ波の半分の周波数を用いる方法（図2.3-3下図）を提案する。この場合、単に逡倍するだけで処理ができるため、回路系が非常に簡単となる。ただし、電離層での伝搬特性が異なる可能性があり、この電離層の影響を実際に確認する必要があると考える。

このレトロディレクティブ・アンテナ方式は、宇宙太陽発電衛星のように軽量化のために柔軟構造で送電アンテナを作らなくてはならない場合には不可欠な技術である。しかし、月面のように固定され、アンテナ面が常に一定ならばレトロディレクティブ・アンテナ方式までの機能は必要としない可能性がある。他のビーム制御法は、サブアレイごとの移相器を制御する方法である。パイロット信号を用いた干渉法や光学的な測量により、レクテナ・サイトの方向を正確に測定し、その方向にマイクロ波ビームが向くように制御する方法である。さらに、レクテナ・サイトに到達したマイクロ波ビーム分布を求め、ビーム制御に補正をかけることも可能である。この制御方法は計算機で各移相器の値を算出するため、ソフト的に融通性のあるシステムとなる。また、レトロディレ

クティブ・アンテナ方式には各サブアレイごとにパイロット受信機を必要とするが、他の制御法ではダイオードのみからなる簡単な移相器で実現できる。

ビーム制御はマイクロ波送電でのキー・テクノロジーであり、月面に最適なビーム制御方式を検討するためには、月面に簡単なレトロディレクティブ・アンテナ・システムや干渉計を設置し、実験することが不可欠と考える。

(4) アンテナ素子と増幅器

送電アンテナ全面に隙間なくアンテナ素子を配列しなければならない。有効開口面積の広い（ゲインの高い）アンテナ素子を用いれば、アンテナ素子の数を減らすことができる。ゲインの低いダイポール・アンテナを用いれば、素子数が非常に増大する。しかしながら、ダイポール・アンテナは線材だけで構成され、製作が容易である。特にダイポール・アンテナは帯域が広く、昼夜の温度差によるアンテナ等の膨張・収縮があっても感度に変化しない大きな長所がある。そこで今回の検討では、月でも製作が容易な点からダイポール・アンテナを選択した。

増幅器は前提条件で検討したようにSiトランジスタを用いる。増幅器の構成としては、効率がもっと高いF級増幅器を用いる。図2.3-5に回路図を示すようにF級増幅器は $\lambda/4$ 線路とタンク回路を用いて、奇数高調波にとって無限大のインピーダンス、偶数高調波にとってインピーダンスがゼロとなるフィルタを利用し、コレクタ電圧を矩形状にするものである。すなわちトランジスタに電流が流れている間、コレクタ電圧をゼロにし、トランジスタによる消費電力を極力減らし、効率をあげる増幅器である。F級はその原理から効率をあげるだけでなく、通信等への干渉となる高調波の除去にも当然有効である。

半導体増幅器は電子管と異なりゲインが低い（ $\sim 10\text{ dB}$ ）ため、カスケード結合により大電力増幅器を形成する。例えば10W出力の増幅器を用いる場合、基準発振器から10W出力まで増幅し、その出力を10分割する。10分割した出力をさらに10台の増幅器により100W出力する。このようにカスケードの増幅により最終段増幅器により7GWの送信出力を得ることになる。この方式では最終段が109個の増幅器群が必要な場合108以上の前段の増幅器群が必要となり、製造が複雑であり、それぞれの増幅器の調整が煩雑である。さらに、初段の増幅器が故障した場合、全システムが止まってしまう大きな問題がある。そこでアクティブ・アンテナの応用を提案する。アクティブ・アンテナとはアンテナと発振器を組み合わせたもので、各素子ごと発振器を持つアンテナである。それぞれの発振器はお互いに結合され周波数と位相が制御される。もしアクティブ・アンテナによりアクティブ・アレイ・アンテナを構成できるならば、増幅器の減少と信頼性の向上が望める。しかしながらアクティブ・アンテナの発振周波数や送信位相に関し、多くの研究課題がある。

アクティブ・アンテナでアンテナ素子を構成する場合、図2.3-6に示すように基板を用いずに、アンテナと発振器（F級増幅）を一体構造とする。この構造によりコンデンサ等のパッシブ素子はすべて立体回路で構成し、Siトランジスタだけが回路素子となる。これは部品点数の削減とアンテナ素子をモジュールとし、アンテナ素子の交換を非常に

容易とするものである。

S i トランジスタの信頼性はたいへん高く、アンテナ素子を故障で交換することはほとんど無いと考えられるが、故障発見のシステムも必要なことは言うまでもない。図 2.3-6 に示したように、分配器とダイオードのよる簡単な整流回路を付加することにより、容易に出力をモニタすることができる。これらを接続し全体の出力レベルを測定することもできるし、LED を接続すればアンテナ素子ごとの簡単な出力レベル表示も可能である。

(5) 受電システム

通信用アンテナは到達した電波を集め、その中から信号を取り出す。そのために位相合成などの手段や増幅器が必要となる。しかし、無線送電用の受電アンテナは通信用アンテナと異なり、アンテナに到達したマイクロ波を効率良く電力に変換するだけであるから、位相合成などは必要なく受信したマイクロ波を整流するだけで事足りる。レファレンス・システムでは、受電用素子として Bill Brown が発明したダイポール・アンテナとダイオードを組み合わせたレクテナ (RECTifying ANTenna) が提案されている。レクテナ素子は他の素子とは独立しているので、ダイポール・アンテナのアンテナ特性を持つことになる。そのため、H 面では等方的となり、すべての方向からくるマイクロ波を受電できる大きな長所を持つ。月面からの直接送電では、仰角 45 度から -45 度の広い範囲から受電アンテナにマイクロ波が入射されるため、このレクテナが受電アンテナとして適していると考ええる。パラボラ・アンテナとマイクロ波-DC 変換器 (例えば、Cyclotron Wave Converter (CWC)) を組み合わせた受電アンテナも考えられるが、受電するためには月を追尾する必要があると適していないと考える。

表2.2-1 マイクロ波／ミリ波送電とレーザー送電の比較

	マイクロ波	ミリ波送電	レーザー送電
システム	超大型	大型	小型 (100GHzの1／50)
受電	レクテナ／CWC (開発完了)	レクテナ／CWC (開発中)	太陽電池 (完成)
効率	80%	60%	60% (GaAs) 40% (Si)
ビーム制御	レトロディレクティブ・ アンテナ	レトロディレクティブ・ アンテナ	機械式
電力密度	大電力	大電力	太陽電池の温度特性 (温度上昇で効率低下)
発振管	FET	Gyrotorn Free Electron Laser	Free Electron Laser
危険性	シールドで保護	シールドで保護	SDI
工作精度	荒い	精密	鏡面
問題点	超大型	未開発／効率 発振管	ビーム制御 発振管

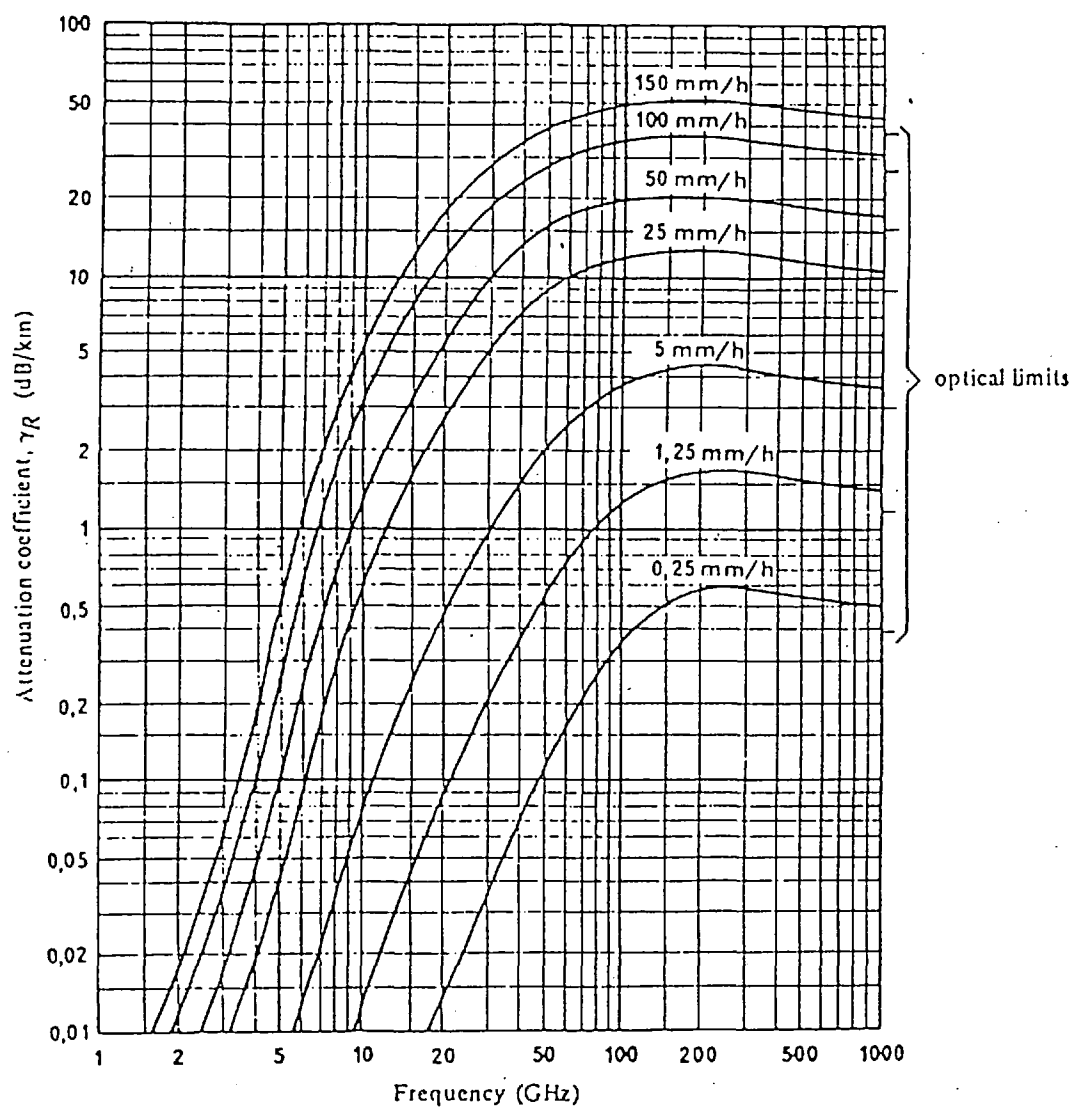


図 2.2 - 1 降雨減衰

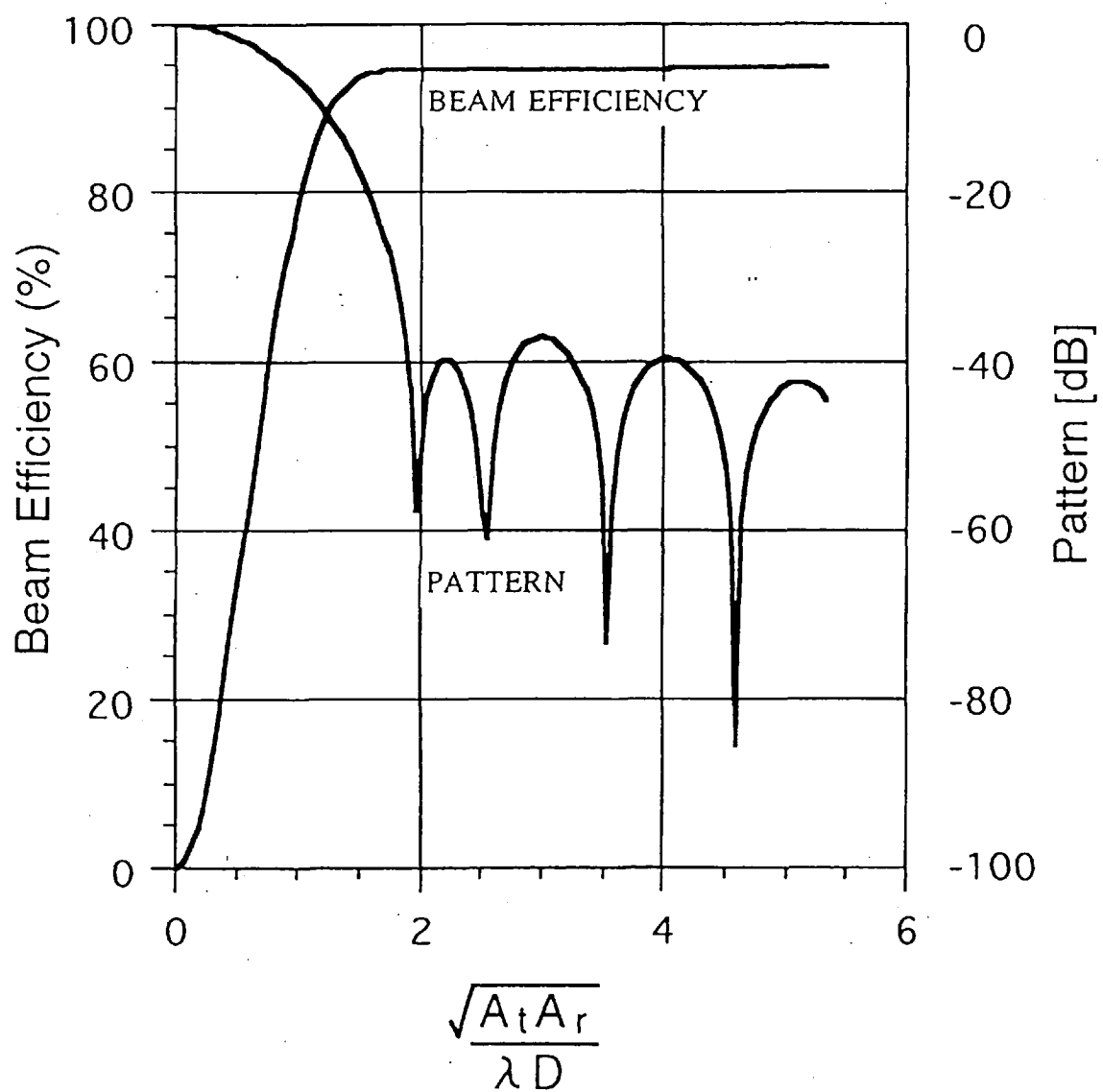


図 2.2 - 2 送電効率と放射パターン

SPECTRUM OF EXCITED PLASMA WAVES

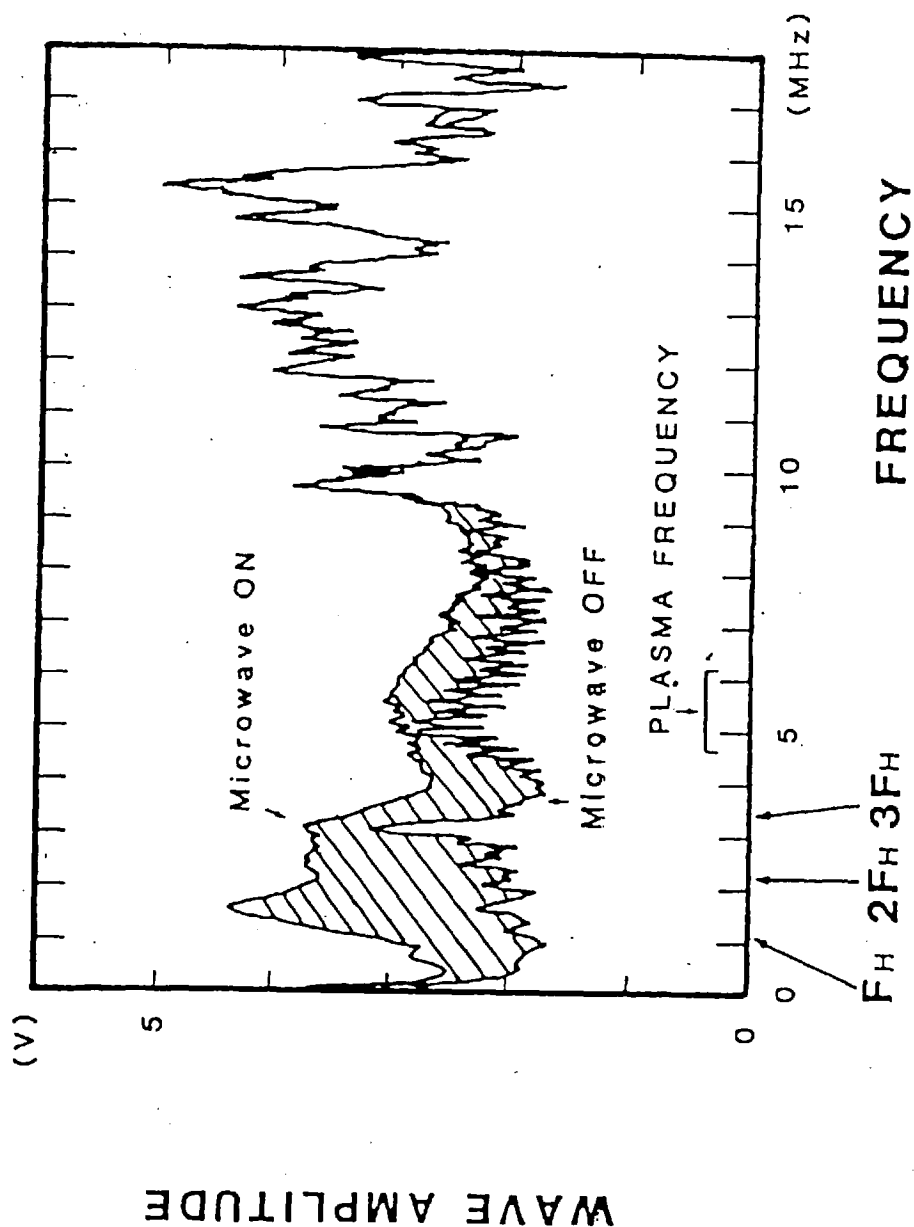


図 2.2-3 MINIX 実験で観測された
プラズマ波

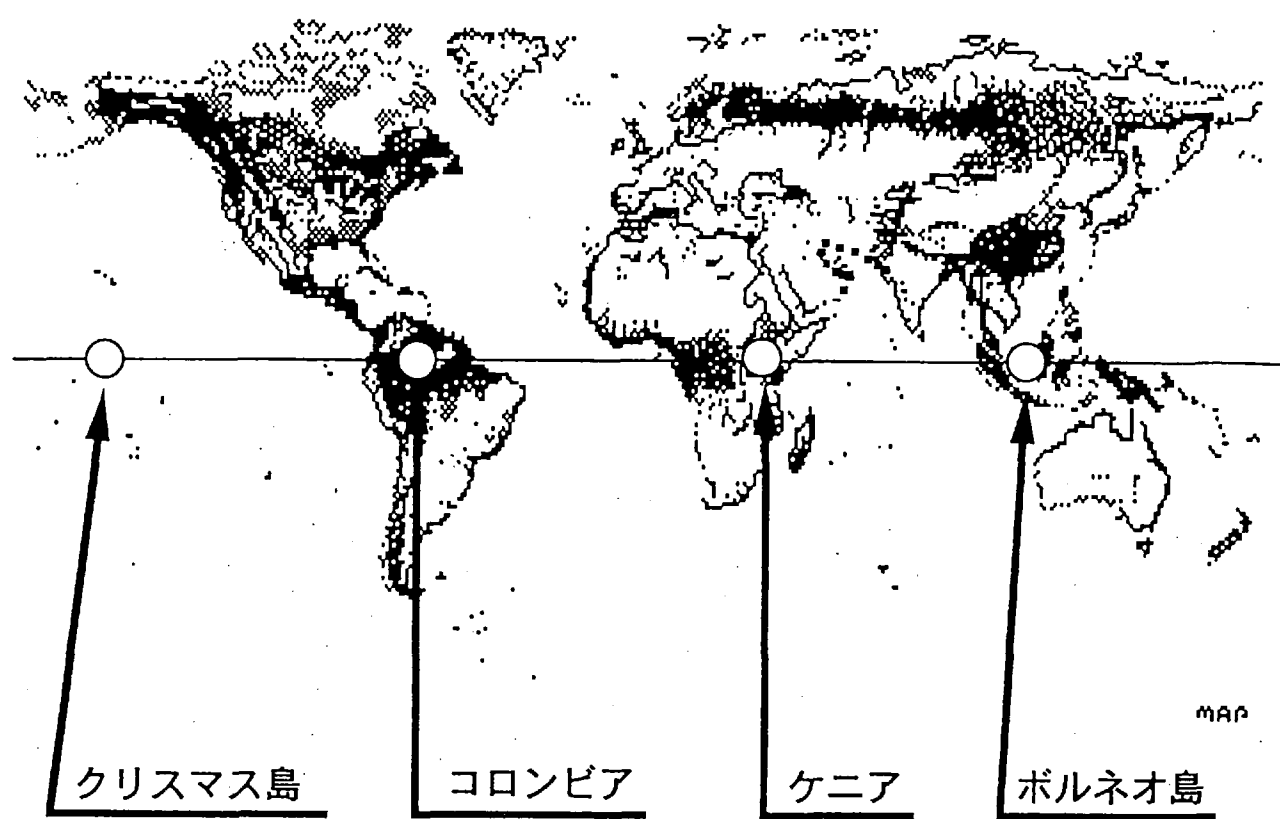


図 2.2 - 4 受電サイト

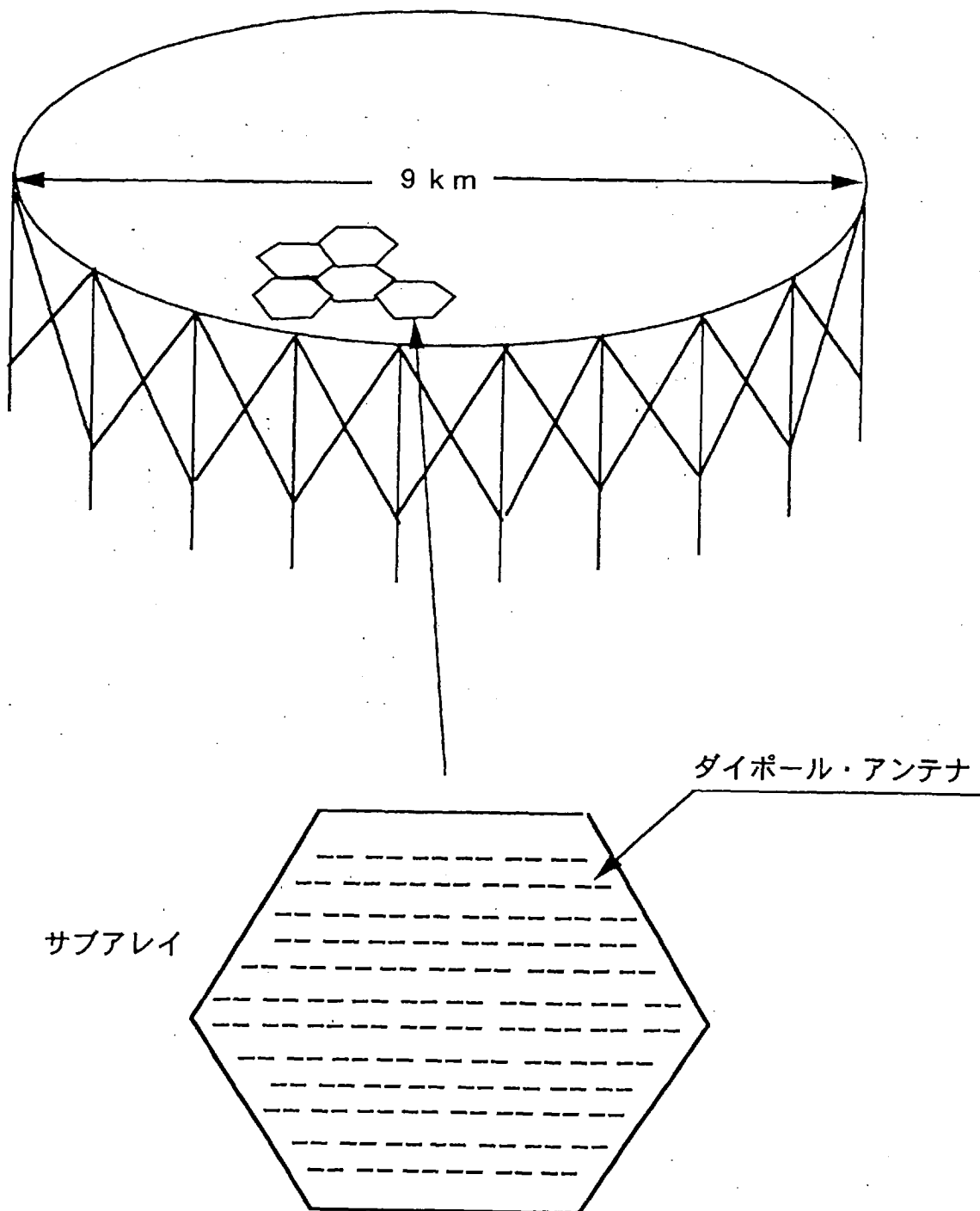


図 2.3 - 1 送電アンテナの外観図

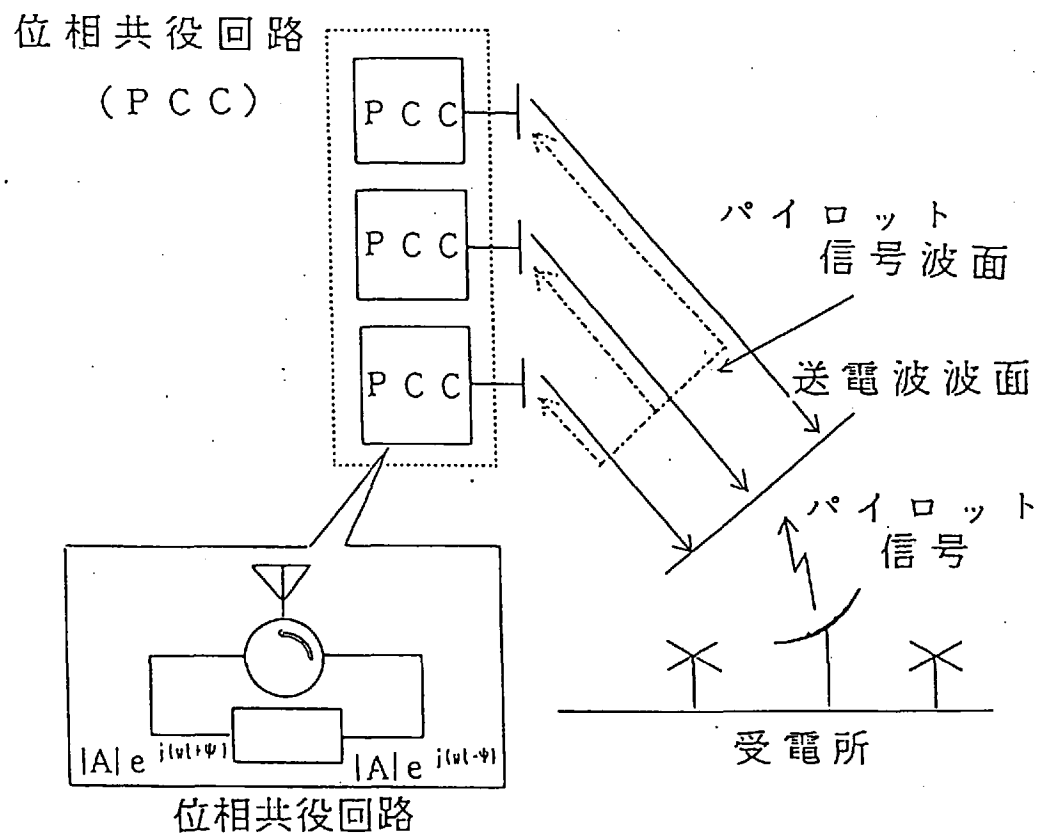
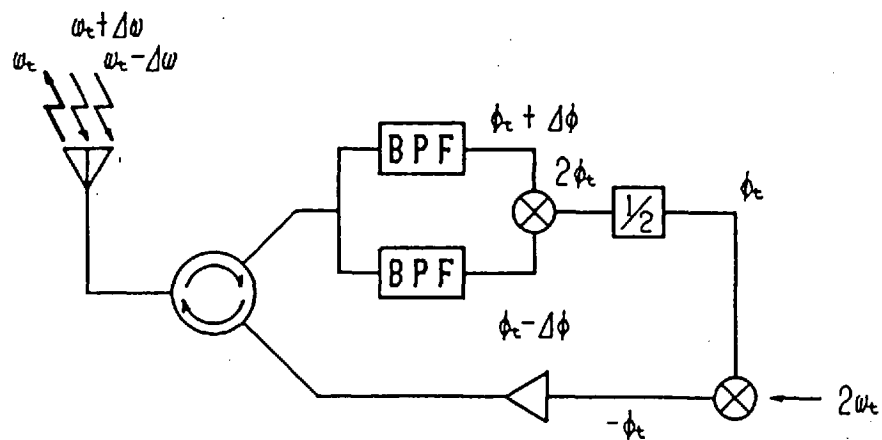
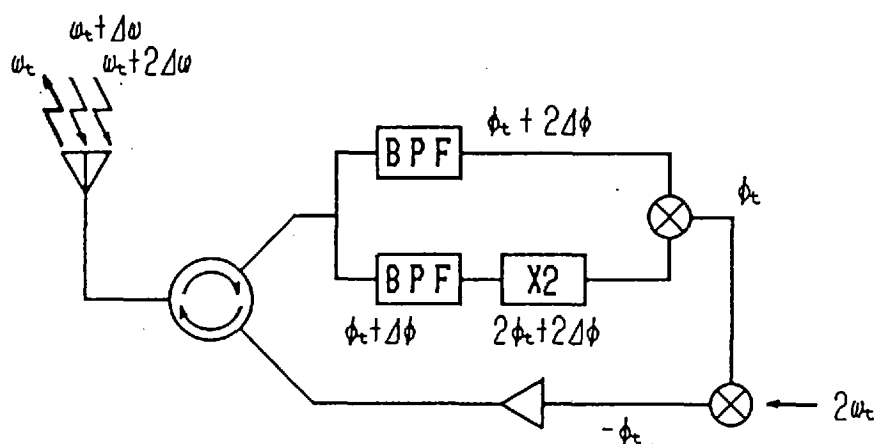


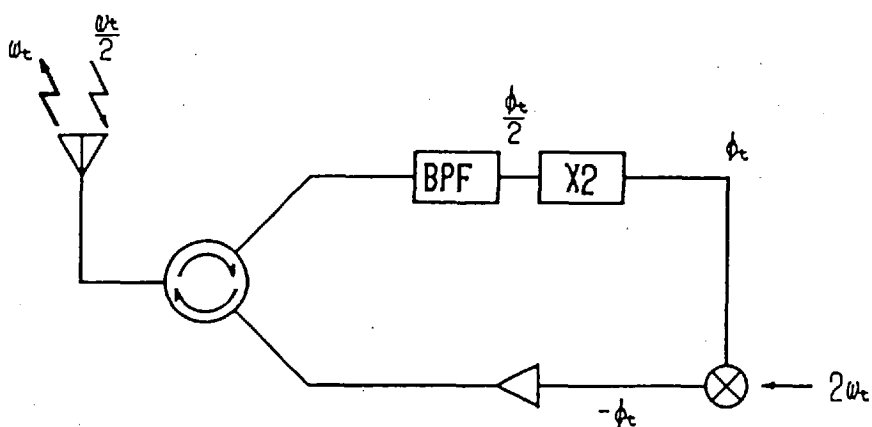
図 2.3 - 2 レトロディレクティブ・
アンテナ方式の原理図



Symmetrical two-tone



Asymmetrical two-tone



Half frequency

図 2.3 - 3 パイロット信号の処理回路

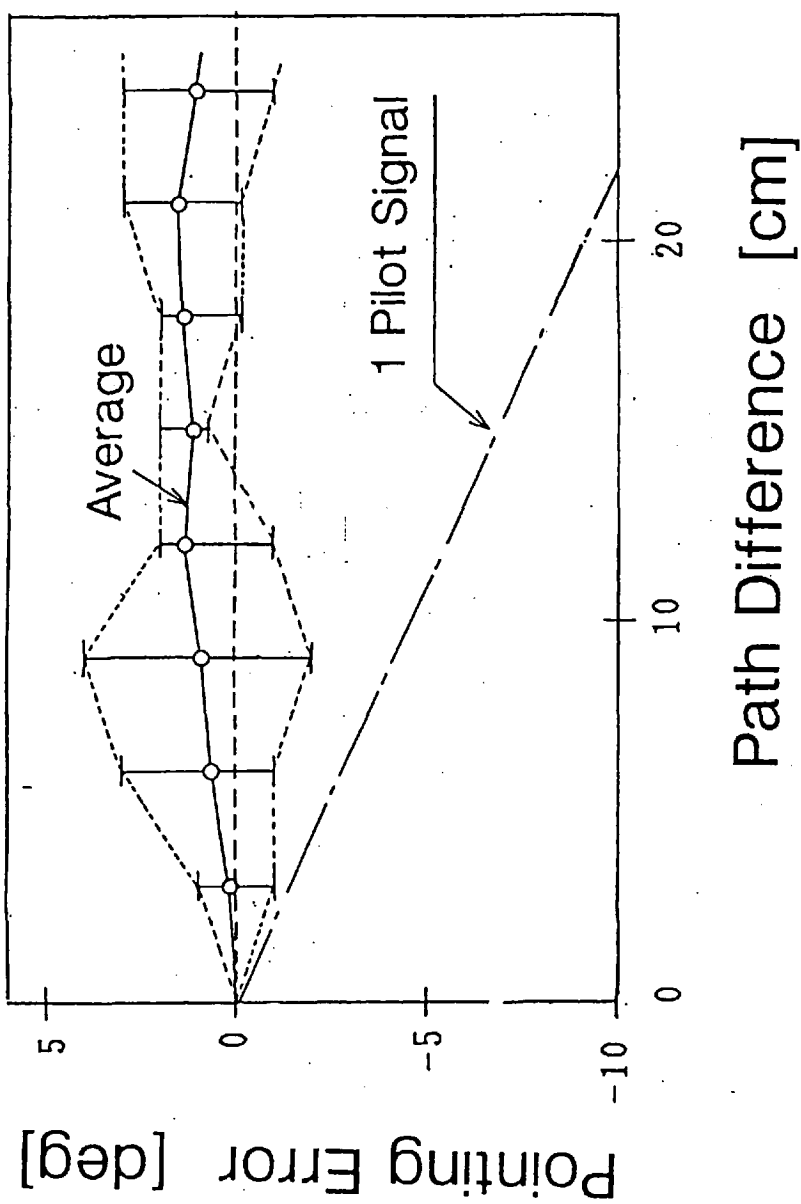


図 2.3-4 非対称二周波方式の実験結果

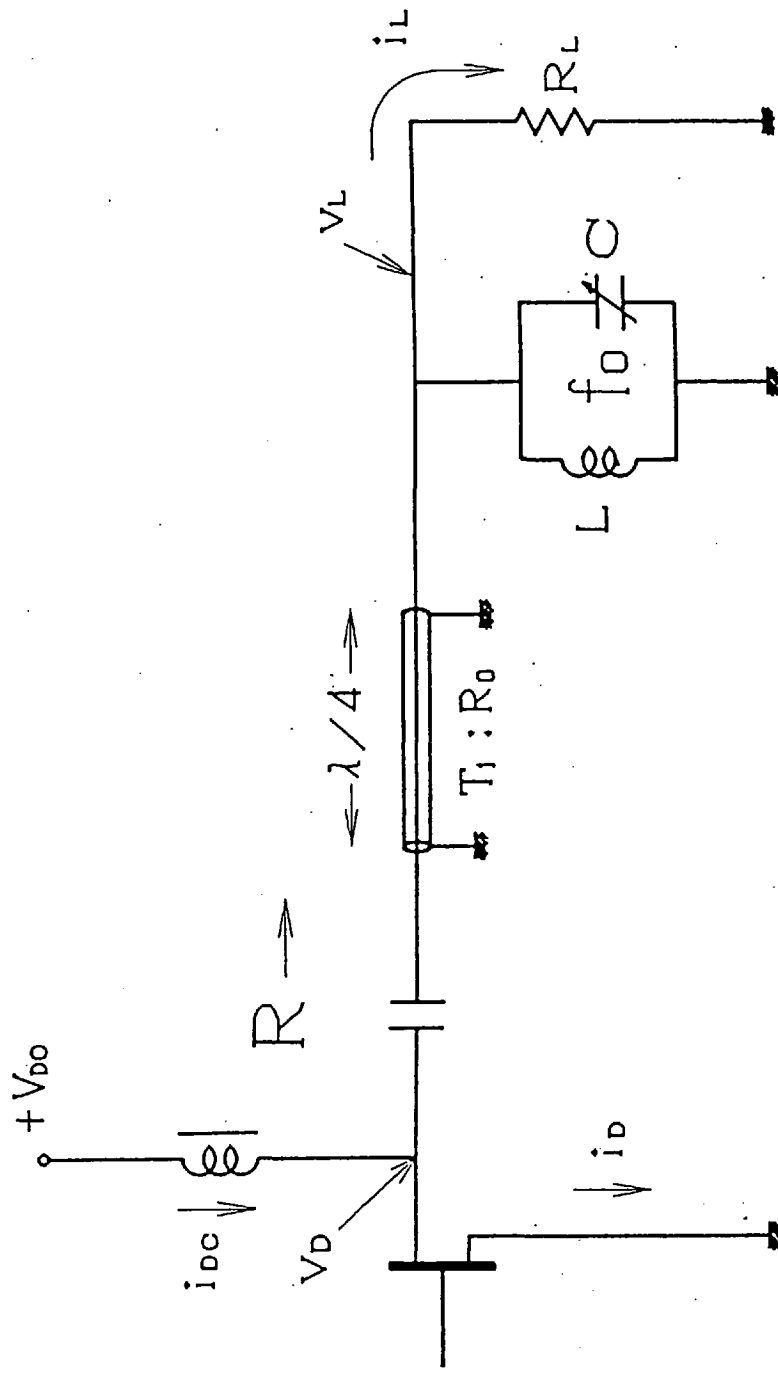


図 2.3-5 F 級増幅器の原理図

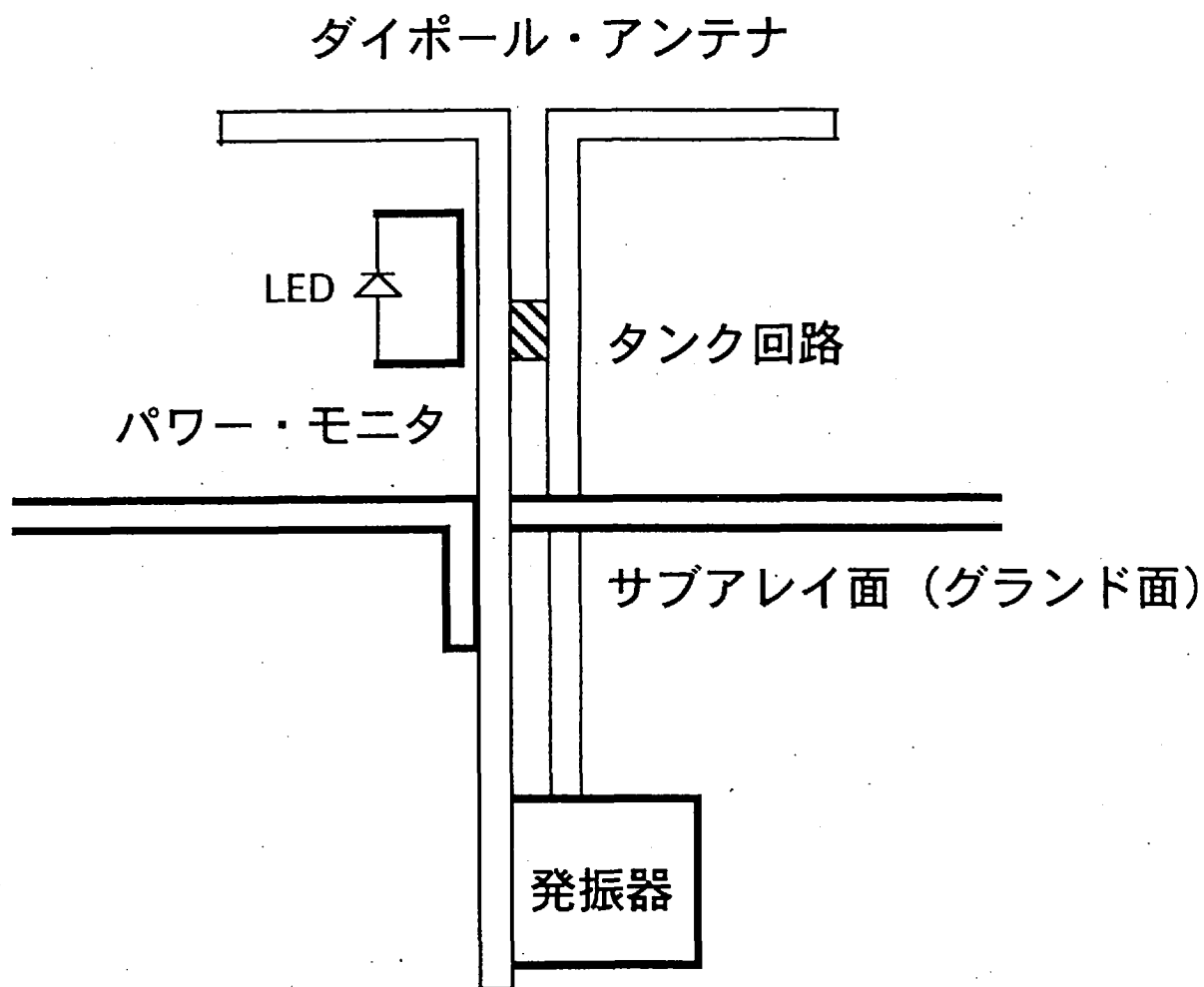


図 2.3 - 6 アクティブ・アンテナ素子

3. 送電系の検討

3.1 レトロディレクティブアレーの構成及び原理

図3.1-1 にレトロディレクティブアレーの構成図及び動作原理を示す。各サブアレーは75個の送電アンテナと、位相制御のためのパイロット受信系を有する。パイロット受信系ではパイロット信号から等波面からのサブアレーの中央における位相差 Φ を検出する。この位相差に基づき、送電サブアレー移相量 Φ' を計算し移相器を駆動する。この様にして受信パイロット信号の位相にあわせて送信位相を制御されたサブアレーの合成出力波面は受信パイロット信号の波面とそろうことになる。この様にして送電信号の指向性をパイロットの方向に常に制御することが可能となる。

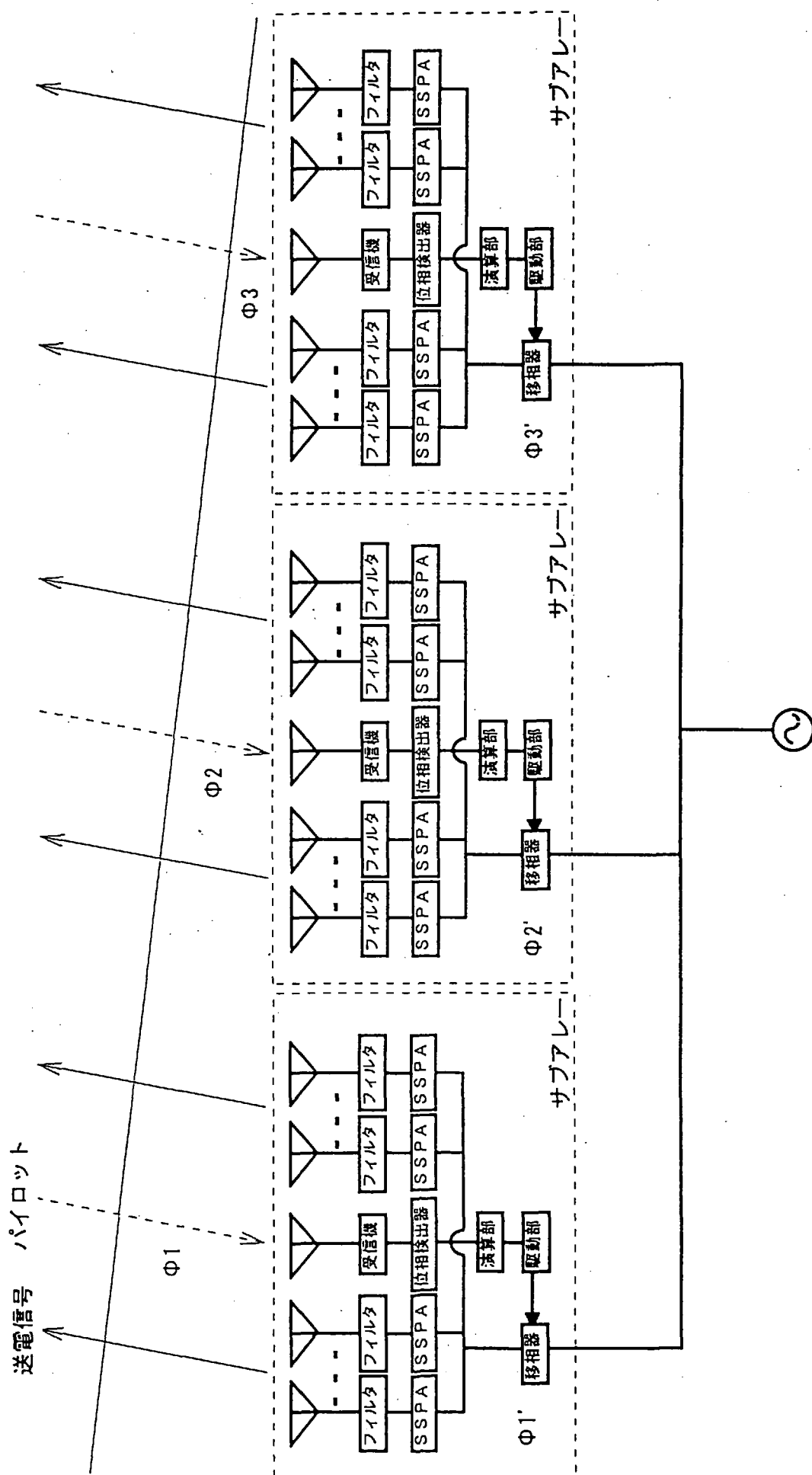


図3.1-1 レトロディレクティブアレーの構成及び動作原理

3.2 ビーム幅

アンテナのビーム半値幅（電力の半分が含まれる幅）は一般に(1)式で与えられる。

$$B = \frac{70\lambda}{D} \quad (1)$$

ここで、

B : ビーム半値幅 (deg)

D : アンテナ直径(m)

λ : 波長(m)

従って、ガラスの海の伝送系で想定している

アンテナ直径 $D = 10\text{km}$

周波数 $f = 2.45\text{GHz}$ ($\lambda = 0.122\text{m}$)

の場合には、ビーム半値幅 B は $8.57 \times 10^{-4}(\text{deg})$ となる。本ビーム幅は地球上で約 5.8km のスポット径に相当する。

3.3 ビームステアリング

3.3.1 要求

月は自転周期と公転周期が一致しているために、地球にいつも同じ面を向けている。しかし月の軌道が楕円で、しかも赤道面が軌道面に対し6.7度の傾きを持っているため、わずかながら首振り運動をする。この運動は秤動とよばれ、その運動は平均の月面中心に対して最大7度程度見かけの月面中心がずれる程度である。従って、ガラスの海の送電系においては、アンテナのビームは平均的な地球指向方向に対して±1度以内の範囲をビーム駆動出来ればよいことになる。

ビームのずれは受電効率の低下及び受電アンテナ周辺の電力束密度の上昇を招くためビームステアリングのステップはこれを考慮して決定する必要がある。ここでは、ビームの中心をビーム幅の $1/10^5$ 以内に制御することを前提に検討を行うが、詳細なビーム指向制御要求は別途受電効率等を考慮して検討する必要がある。

3.3.2 移相器ビット数

移相器のビット数が少ない場合、移相量の量子化誤差が大きくなり利得の低下、ビーム走査方向の誤差を招く原因となる。逆にビット数が多いと滑らかに走査はできるが移相器の挿入損失が増大し、アンテナ利得が低下する。このため、移相器のビット数はビーム走査特性が許容できる範囲で、出来るだけ小さくする必要がある。

利得の低下については、 i ビットの移相器を使用した場合、最小設定可能移相量 B は、 $B=2\pi/2^i$ であり、最大移相誤差は $\pm B/2$ となる。ここで量子化位相誤差が区間 $\pm B/2$ で一様に分布している場合、走査アンテナの利得 G は平均的に

$$G = \frac{2(1 - \cos B)}{B^2} G_0$$

ここで G_0 は量子化位相誤差を含まない場合の理想的な利得である。

ガラスの海の送電系では量子化により利得損失よりも指向方向の誤差が問題となると考えられる。

ビーム走査方向の誤差については、どの程度細かくビームを走査できるかという程度を表すグラニュラリティ (granularity) と呼ばれるものによって評価できる。素子数 N の直線アレーアンテナの平均グラニュラリティはビーム幅 θ_{HP} で規格化して次式で表せる。

$$\frac{\Delta\theta}{\theta_{HP}} = \frac{1}{2^{i-1} N}$$

ここで、ガラスの海の直径10km送電アンテナの場合、ビーム幅 8.57×10^{-4} 度である。ガラスの海の送電系の場合、サブアレー化を行っているため上式のNはサブアレーの数（550万个）が入ることになる。

比較的構成の容易な3ビットの位相器を用いた場合にはビーム幅の $1/(2.6 \times 10^6)$ 程度の指向誤差となり十分な指向精度と考えられる。

4. 給電系の検討

4.1 AC給電とDC給電の得失

AC給電とDC給電の一般的な得失を表4.1-1に示す。前回の検討を含めガラスの海ではDC給電方式を前提とする。

表4.1-1 AC給電とDC給電の比較

項目	A C 給 電	D C 給 電
開閉所／交直変換所	開閉所は交直変換所に比べて安価	交直変換装置が開閉所に比べて高価
長距離大電力送電	長距離送電の場合充電電流が問題となる ケーブルによる長距離大電力送電が困難	無効電力による損失や誘電体損失が無く 長距離大電力伝送が可能
E M I	対策が必要	制御が容易
放電	コロナ放電対策が必要	対策不要
高調波の発生	発生しない	交直変換器で高調波発生
導体数	導体数が多くなりケーブル線路が高価	導体数が少なくできケーブル線路が安価
無効電力	変成器による損失小	変換所において多くの無効電力を消費
電圧変成	容易（トランスによる）	複雑（DC/DC変換器による）

4.2 DC給電回路

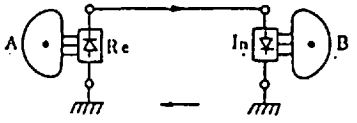
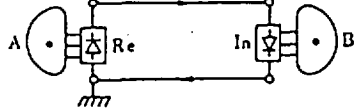
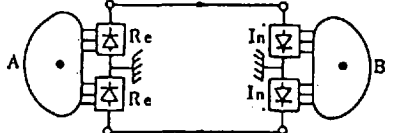
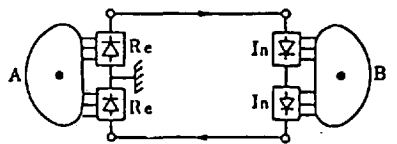
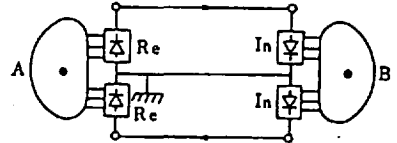
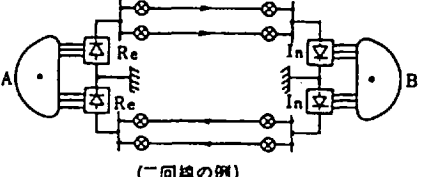
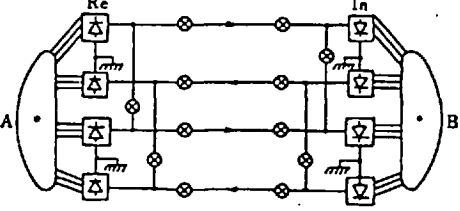
DC給電方式では、図4.2-1に示すような給電回路構成が考えられている（参考文献1）。これらは、地上のシステムとして、送電端と負荷の間の送電を考え、最終的には交流で給電するシステム構成である。ガラスの海では、バス形式とし複数の負荷に給電することを考えているが、負荷間の距離は比較的近いことから集中負荷と考えることが可能であり、考え方はそのまま適用可能である。



地上の給電システムでは、線路数を削減するために大地帰路や中性点接地が用いられる。月面では、大地接地抵抗などの特性が不明であるため、大地帰路をとることは不可能と考える。


また、発電系及び負荷のバランスが必要な中性点接地方式は給電回路が複雑で中性点の接地が必要であるため月面での適用は不向きであると考ええる。多回線伝送方式の場合も回路の複雑さから月面での適用には不向きであると考ええる。

以上よりガラスの海の給電系には、直流単極一回線送電の導体帰路方式を採用することが妥当と考える。

参考文献1：直流送電技術開設、電気学会（コロナ社）、1978

方 式	概 念 図
直流単極一回線送電	(1) 
	(2) 
直流双極一回線送電	(3) 
	(4) 
	(5) 
多回線送電方式	(a) 直流多回線送電方式  (二回線の例)
	(b) 変換器並列直流多回線送電方式  (2変換器並列, 二回線の例)

凡例  電源および負荷系統,  高速遮断器またはシャ断器

 順変換装置 (Re) および逆変換装置 (In)

(*) 多回線の場合にも当然一回線の場合と同様に単極の場合、双極の場合、種々の接地方式がある。ここでは双極両端接地の場合を代表としてあげている。

図4.2-1 直流二端子送電方式

4.3 給電損失の検討

4.3.1 銅線とアルミ線の特性

表4.3-1 に銅線の特性を、また表4.3-2にアルミ線の特性を示す（参考文献2）。銅とアルミでは導電率に1.5倍の差があるため、電気抵抗がアルミ線の方が大きくなる。しかしながら、月面資源の利用を考えた場合にはアルミ線の適用が必要となる。基本的には導体径を太くすることで銅線と同様に損失を低下させることは可能である。

4.3.2 導体損失の検討

ここでは、給電線による導体損失の検討を行う。給電線による損失は抵抗による損失であるため、給電線の抵抗に比例し、電流の二乗に比例する。給電線の抵抗は単位長さあたりの抵抗に距離をかけたものとなる。図4.3-1及び図4.3-2に給電線の太さを軟銅単線の最大直径と同じ直径12mmとした場合のアルミ線及び銅線の損失を示す。給電線の片道の最大長を10kmと仮定した場合、アルミ線では電流1Aで2.5W、10Aで250W、100Aで25kWの損失となる。従って導体帰路の給電回路を含めると、この2倍の損失が発生する。

ガラスの海の発電能力を100kWとすると、給電線に対して1%の損失を許容した場合、給電線の許容損失は往復で1kWになる。図4.3-3に直径12mmのアルミ電線で20kmの送電を行った場合の各電流における損失の計算結果を示す。図4.3-3より直径12mmのアルミ給電線を往復で20kmとした場合には、14Aの電流時に1kWの損失が発生することがわかる。

以上より、給電電流を14Aとすることとする。なお、給電損失と給電線の断面積は選択の範囲の広いパラメータであるため、今後その他の制約条件が発生した際に見直すこととする。

4.3.3 給電線の検討

地上の電線では一般に導体に絶縁被覆をかぶせケーブルとして使用することが多い。この絶縁被覆には紙またはポリエチレン、ビニール、テフロン等の樹脂が使用される。月面での給電線の製造を考慮した場合にはこれらの絶縁材料を入手することが困難と考えられるため、ガラスの海の給電線には絶縁被覆を施さない裸電線を使用することが妥当である。電車に対する給電は700～1500Vの直流が使用されており、また架線は裸電線であり裸電線による給電には技術的な問題はない。

表4.3-1 電気用軟銅線の特徴 (JIS C 3102)

径 (mm)	径の許容差 (mm)	断面積 (mm ²)	重量 (kg/km)	導電率 20℃ (%)	電気抵抗 (参考) 20℃ (Ω/km)	引張り荷重 (参考) (kg)	引張り強さ (kg/mm ²)	伸び 25℃mm (%)
0.10	0.008	0.007854	0.00382	98.0以上	2,240.0	—	—	15.0以上
0.12	—	0.01131	0.005	—	1,536.0	—	—	—
0.14	—	0.01539	0.0068	—	1,143.0	—	—	—
0.16	—	0.02011	0.009	—	874.9	—	—	—
0.18	—	0.02545	0.01263	—	691.3	—	—	—
0.20	—	0.03142	0.01593	—	559.9	—	—	—
0.21	0.008	0.04155	0.02094	—	423.4	—	—	—
0.26	0.01	0.05309	0.02720	—	331.4	—	—	—
0.29	—	0.06705	0.03572	98.0以上	266.4	—	—	15.0以上
0.32	—	0.08042	0.04149	99.3以上	215.9	—	—	20.0以上
0.35	—	0.09621	0.04853	—	180.5	—	—	—
0.40	—	0.1257	0.06117	—	138.1	—	—	—
0.45	—	0.1590	0.07414	99.3以上	109.2	—	—	—
0.50	0.01	0.1964	0.0906	100.0以上	87.79	5.50以下	28.0以下	—
0.55	0.02	0.2376	0.112	—	72.56	6.65	—	—
0.60	—	0.2827	0.133	—	60.99	7.92	—	—
0.65	—	0.3318	0.159	—	51.96	9.29	—	—
0.70	—	0.3848	0.182	—	44.81	10.8	—	—
0.80	—	0.5027	0.2469	—	34.30	14.1	—	20.0以上
0.90	0.02	0.6362	0.3166	—	27.10	17.8	—	25.0以上
1.0	0.03	0.7854	0.3982	—	21.95	22.0	—	—
1.2	—	1.131	0.605	—	15.24	31.7	28.0以下	—
1.4	—	1.539	0.868	—	11.20	41.6	27.0以下	—
1.6	—	2.011	1.188	—	8.573	54.3	—	—
1.8	—	2.545	1.63	—	6.774	68.7	—	25.0以上
2.0	—	3.142	2.03	—	5.487	84.8	—	30.0以上
2.3	—	4.155	2.94	—	4.149	112	—	—
2.6	—	5.309	3.720	—	3.248	143	27.0以下	—
2.9	0.03	6.605	4.872	—	2.610	172	26.0以下	—
3.2	0.04	8.042	6.145	—	2.144	209	—	—
3.5	—	9.621	7.053	—	1.792	250	—	—
4.0	—	12.57	11.7	—	1.372	327	—	—
4.5	—	15.90	14.1	—	1.084	413	—	—
5.0	—	19.64	17.4	—	0.8779	511	—	—
5.5	0.04	23.76	21.2	—	0.7256	618	—	—
6.0	0.06	28.27	25.3	—	0.6099	735	—	—
6.5	—	33.18	29.5	—	0.5196	863	—	—
7.0	—	38.48	34.2	—	0.4481	1,000	26.0以下	30.0以上
8.0	—	50.27	44.6	—	0.3430	1,260	25.0以下	35.0以上
9.0	—	63.62	56.6	—	0.2710	1,590	—	—
10.0	—	78.54	69.2	—	0.2195	1,960	—	—
12.0	0.06	113.1	1,005	100.0以上	0.1524	2,830	25.0以下	35.0以上

kg

(1) 1.4mm以下の径は、電気用銅線、引張り荷重、重量はJIS C 3102に準じて算出する。
2. 重量はJIS C 3102に準じて算出する。

表4.3-2 軟アルミ線、半硬アルミ線の特性

径 (mm)	許容応力 (mm)	断面積 (mm ²)	重量 (kg/km)	電気抵抗 20℃ (Ω/km)	軟アルミ線		(A-A)		半硬アルミ線 (HA-A)			
					引張り強さ (kg/mm ²)	最大 (kg)	引張り荷重 (kg)	伸び (%)	引張り強さ (kg/mm ²)	最大 (kg)	引張り荷重 (kg)	伸び (250mmに つき) (%)
5.0	±0.04	19.64	53.03	1.44	10.0	196	118	20	14.06	276	207	2.0
4.5	~	15.90	42.93	1.78	~	159	95.4	~	~	224	168	~
4.3	~	14.52	39.20	1.95	~	145	87.1	~	~	204	153	~
4.2	~	13.85	37.40	2.04	~	139	83.1	~	~	195	146	2.0
4.0	~	12.57	33.94	2.25	10.0	126	75.4	~	~	177	133	1.9
3.8	~	11.37	30.62	2.49	12.0	136	79.6	~	~	160	120	1.9
3.7	~	10.75	29.03	2.63	~	129	75.3	~	~	151	113	1.8
3.5	~	9.621	25.98	2.94	~	116	67.4	~	~	135	102	1.7
3.2	~	8.042	21.71	3.51	12.0	96.5	56.3	20	~	113	84.8	1.7
3.1	±0.04	7.548	20.38	3.75	12.5	94.4	52.8	18	~	106	79.6	1.6
2.9	±0.03	6.605	17.83	4.28	~	82.6	46.2	~	~	92.9	69.7	1.6
2.8	~	6.158	16.63	4.59	~	77.0	43.1	~	~	86.6	65.0	1.5
2.6	~	5.309	14.33	5.32	~	66.4	37.2	~	~	74.6	56.0	~
2.3	~	4.155	11.22	6.80	~	51.9	29.1	18	~	58.4	43.8	1.5
2.0	~	3.142	8.483	9.00	~	39.3	22.0	16	~	44.2	33.1	1.4
1.8	~	2.545	6.872	11.1	~	31.8	17.8	~	~	35.8	26.8	1.4
1.6	~	2.011	5.430	14.1	12.5	25.1	14.1	16	~	28.3	21.2	1.3
1.4	~	1.539	4.155	18.4	13.0	20.0	10.8	14	~	21.6	16.2	1.2
1.2	~	1.131	3.054	25.0	13.0	14.7	7.92	14	~	15.9	11.9	1.0
1.0	±0.03	0.7854	2.121	36.0	13.5	10.6	5.50	12	~	11.0	8.29	~
0.90	±0.02	0.6362	1.718	44.4	~	8.59	4.45	~	~	8.94	6.72	~
0.80	~	0.5027	1.357	56.2	13.5	6.79	3.52	12	14.06	7.07	5.31	1.0
0.70	~	0.3848	1.039	73.4	14.0	5.39	2.69	10	~	~	~	~
0.65	~	0.3318	0.8959	85.2	~	4.65	2.32	~	~	~	~	~
0.60	~	0.2827	0.7633	100	~	3.96	1.98	~	~	~	~	~
0.55	±0.02	0.2376	0.6415	119	~	3.32	1.66	~	~	~	~	~
0.50	±0.01	0.1964	0.5303	144	~	2.75	1.38	~	~	~	~	~
0.45	~	0.1590	0.4293	178	~	2.22	1.11	~	~	~	~	~
0.40	~	0.1257	0.3394	225	~	1.76	0.880	~	~	~	~	~
0.35	~	0.09621	0.2598	294	~	1.35	0.674	~	~	~	~	~
0.32	~	0.08042	0.2171	351	~	1.13	0.563	~	~	~	~	~
0.29	~	0.06605	0.1783	428	~	0.925	0.462	~	~	~	~	~
0.26	±0.01	0.05309	0.1433	532	14.0	0.743	0.372	10	~	~	~	~

(注) 1. アルミ線の密度は2.70g/cm³とする。

2. 本表の断面積、重量、電気抵抗、引張り強度は標準値に対するものである。

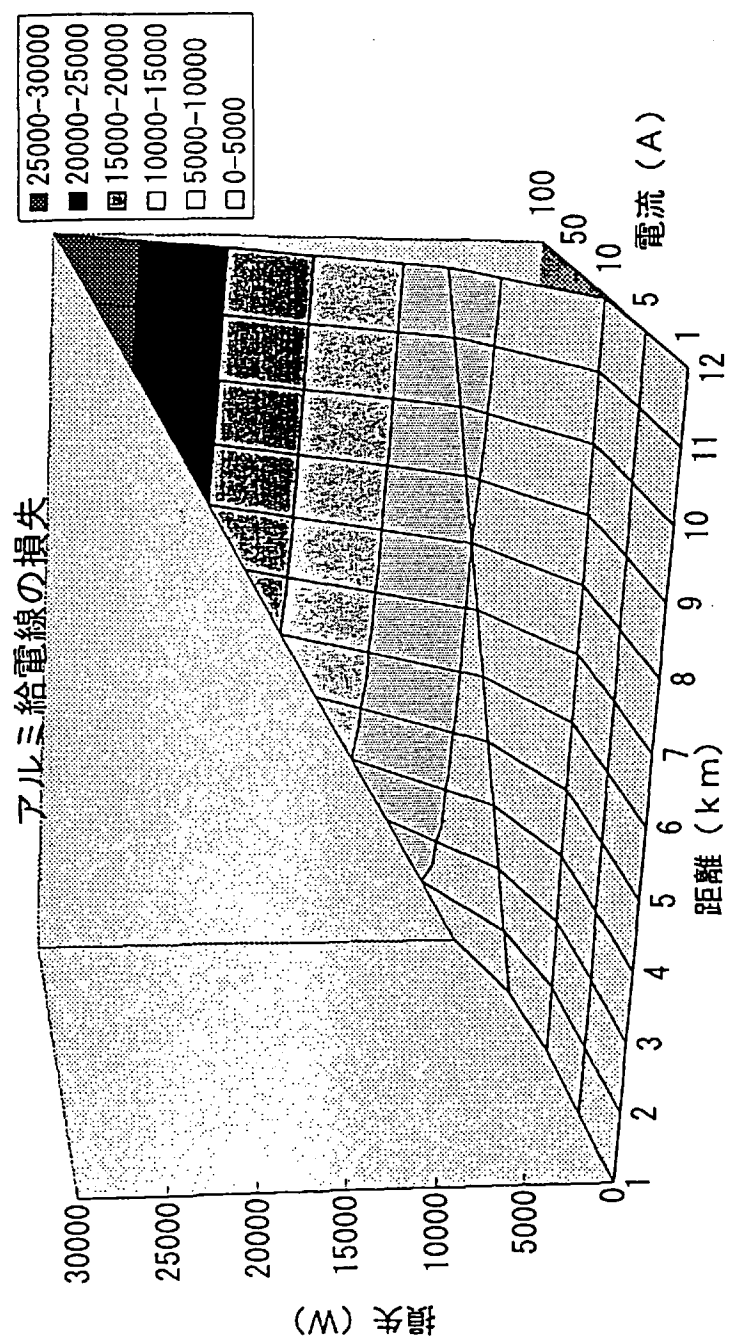


図4.3-1 アルミ給電線の損失 (直径12mm)

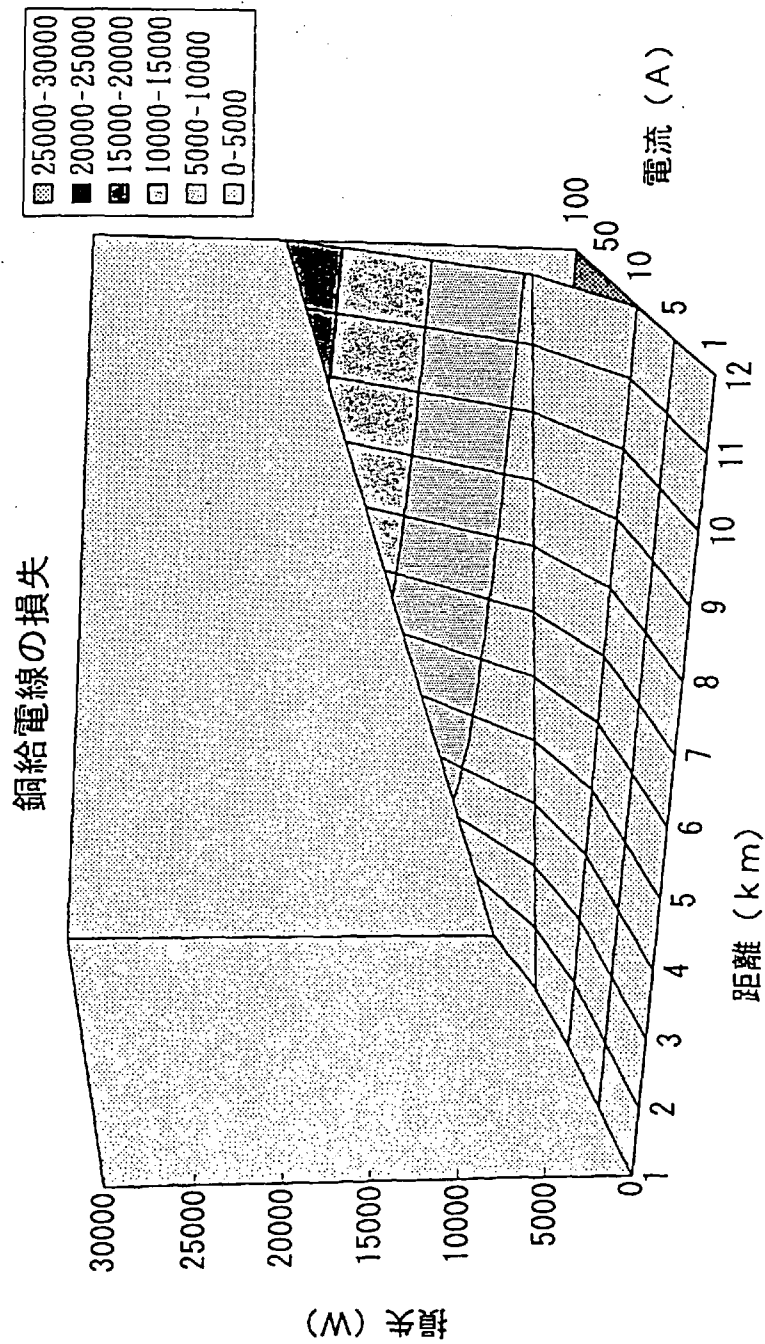


図4.3-2 銅給電線の損失 (直径12mm)

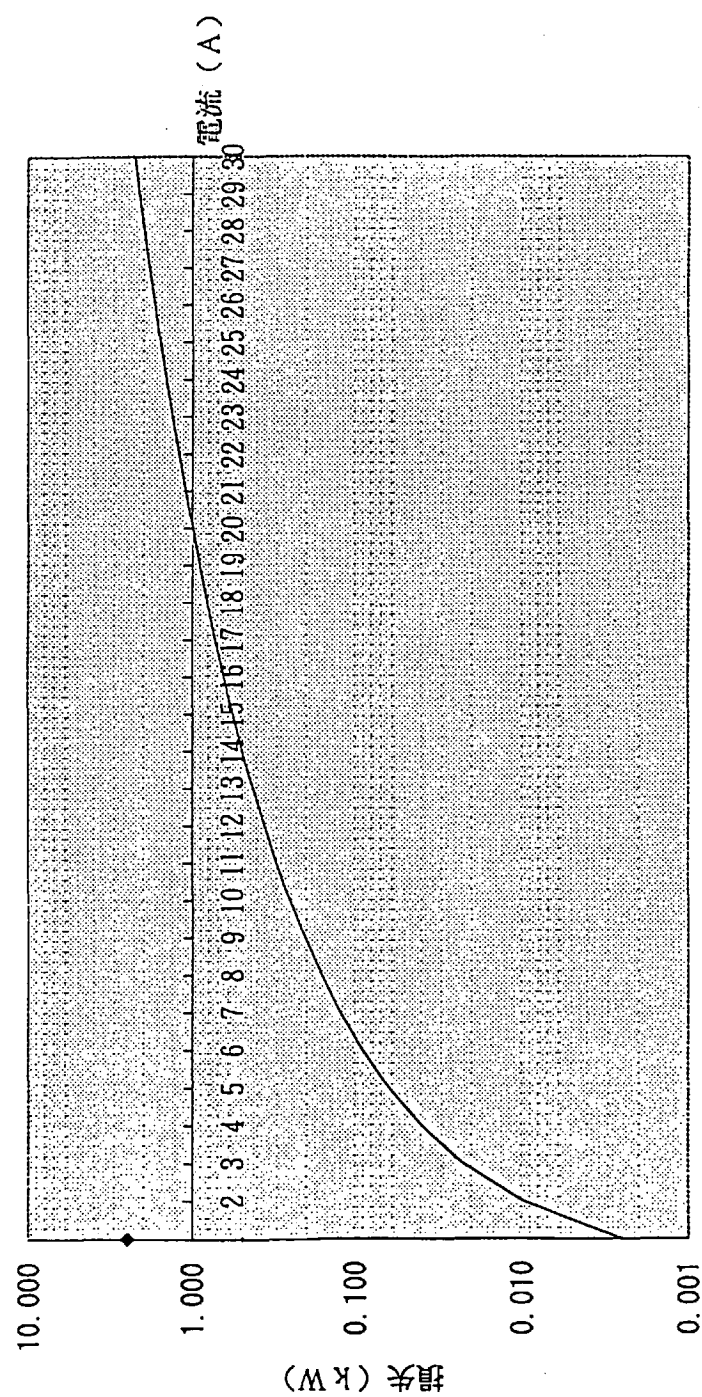


図4.3-3 給電電流対損失 (アルミ給電線直径12mm、距離20km)

5. 受電系の検討

5.1 受電面積の検討

宇宙送電システムの送受電アンテナ間の電力伝送効率 τ はCCIR-Rep679に示されており、アンテナが正対する場合には、図5.1-1（参考文献1）に示されるグラフから求めることができる。本グラフにおいて τ は次式によって求められる。

$$\tau = \frac{\sqrt{A_r A_t}}{\lambda D_s}$$

ここで、

A_r : 受電アンテナの面積

A_t : 送電アンテナの面積（直径 9km、円形）

λ : 波長（周波数2.45GHz）

D_s : 送受電アンテナ間の距離

図より τ が2.5以上ではほぼ100%の電力伝送が可能となることが解る。目標設計値となる電力伝送効率から受電面積が求められる。 $\tau = 0.5$ 、1.0、1.5、2.0、2.5に対応する受電面積を表5.1-1に示す。以下の検討においては $\tau = 1.5$ と設定して議論を進める。なお、この時、受電面積については以下のガラスの海のパラメータより求めることができ、

$$\tau = 1.5$$

$$A_t = (4.5 \times 10^3)^2 \pi = 63.6 \times 10^6 (\text{m}^2)$$

$$\lambda = 0.122 (\text{m})$$

$$D_s = 384,500 (\text{km})$$

$$A_r = 78.5 \times 10^6 (\text{m}^2) = (5 \times 10^3)^2 \pi$$

図5.1-1より $\tau = 1.5$ の時、空間伝送効率は89%となる。従って、送電アンテナと受電アンテナが正対するような位置関係においては半径5kmの受電設備を設けることによって空間伝搬損失11%を達成できる。

静止軌道上のSPSでは、上述の送受電アンテナ正対条件を満足するため受電面積は上記の計算と同一になる。しかしながらガラスの海の場合には、地球の自転により地上の受電アンテナから月を見る角度が時間とともに変化する。従って受電アンテナ自信に追尾機能がない場合には受電面積を増やす必要がある。いま、45度の入射角まで受電することを考慮した場合受電面積は2倍とする必要がある。

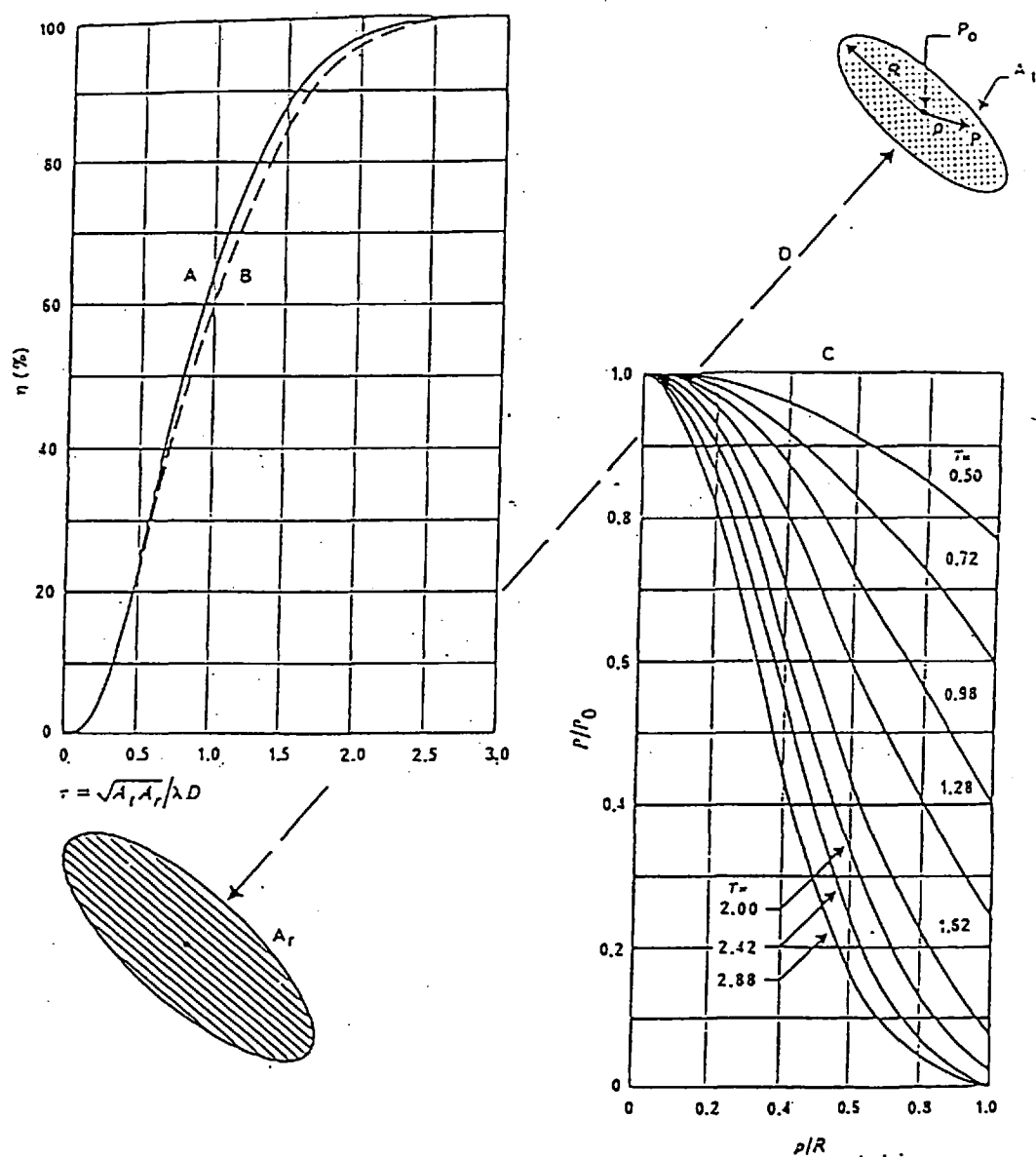


FIGURE 1 - RF power beam transmission efficiency

- A: circular aperture
- B: quadratic apertures
- C: optimum aperture taper
- P_0 : power flux-density at the centre of the aperture
- P : power flux-density at the edge of the aperture
- R : radius of the aperture
- ρ : radius to a point on the aperture
- η : efficiency

図5.1-1 マイクロ波電力送電の伝送効率 (CCIR-Rep. 679)

表5.1-1 受電面積

τ	0.5	1	1.5	2	2.5
λ (m)	0.1224	0.1224	0.1224	0.1224	0.1224
D(km)	384500	384500	384500	384500	384500
At(km ²)	63.617	63.617	63.617	63.617	63.617
Ar(km ²)	8.71	34.84	78.40	139.38	217.78
Rr(km)	1.67	3.33	5.00	6.66	8.33
η (%)	22	64	89	97	100

参考文献1: Characteristics and Effects of Radio Techniques for The Transmission of Energy from Space, Report 679-2, CCIR

5. 2 集電・配電システムの検討

レクテナの構成はほぼレファレンス・システムと同一なものとなる。ここでは、レクテナの集電用ネットワークについて若干検討した。図5.2-1のレクテナの集電システムはレファレンス・システムで提案されたものである。2パネルで14.8MW受電し集電する場合、一本のケーブルには約5MWが流れることとなる。レクテナ素子は直列接続により高圧を発生することができるので、出力が40kVになるよう接続されれば電流は125Aとなる。なるべく高圧にした方が電流が減り、送電ケーブルにおける損失も減らすことができる。しかし125Aの場合でも家庭用への送電線と同じ 1cm^2 の銅線を用いれば、5kmの長さで抵抗で 0.85Ω 、電圧降下で106Vと計算され2.6%の損失にとどまる。この時のケーブルの重量は4.45トンである。

レクテナは負荷変動により効率が変化する。この負荷変動は図5.2-2に示すようにインバータにより常に最適負荷状態に制御され、レクテナから最大電力を引き出すことができる。すなわち、負荷変動が生じてインバータが自動的に出力電圧を制御し、全電力を負荷に強制的に出力する。余剰電力が発生した場合は出力の調整が容易な火力発電で調整することとなる。これらのインバータ等の技術はすでに地上での太陽光発電システムで開発されており、そのまま流用することができる。

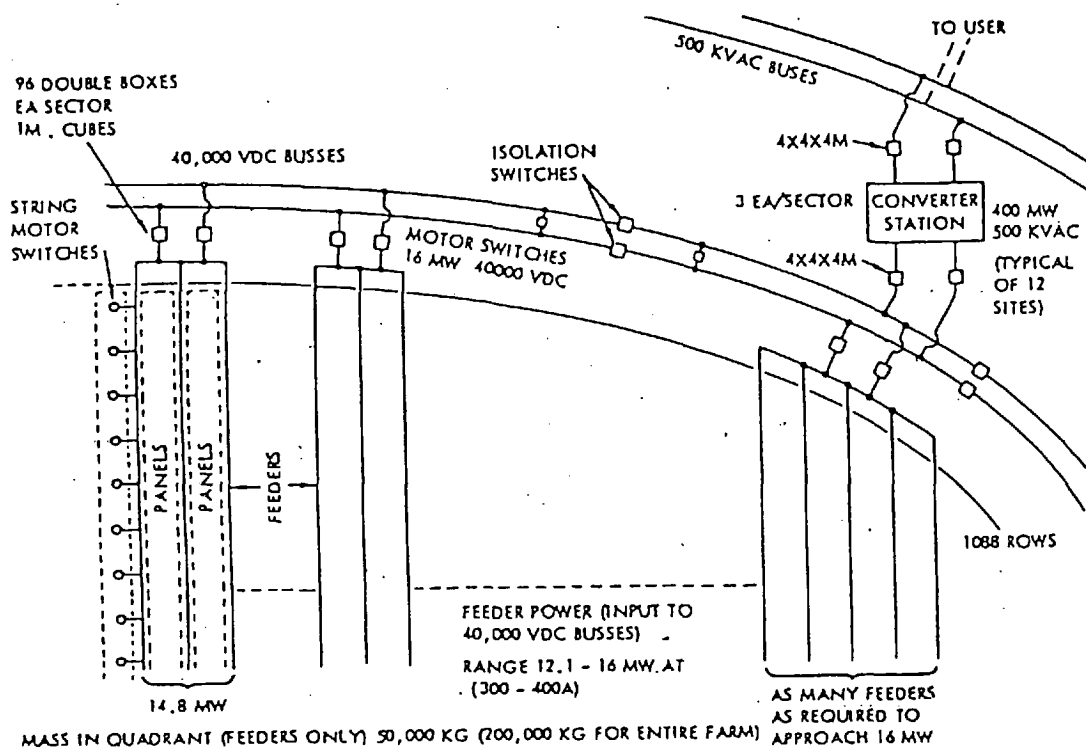


図 5. 2-1 レクテナの集電用ネットワーク

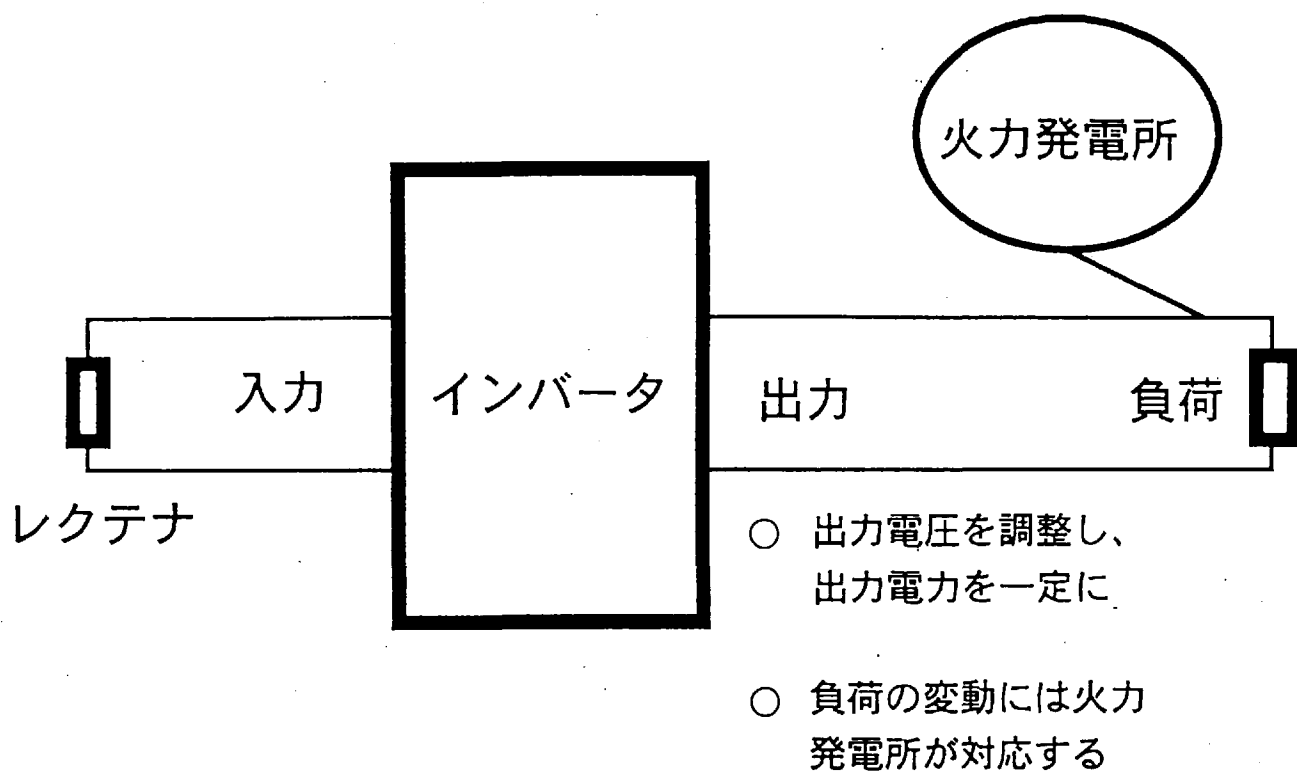


図 5. 2-2 レクテナへの負荷調整法

6. システム配分の検討

以上の検討結果をふまえガラスの海による発電、送受電全体システムを図6-1のように想定する。本想定システムにおいては、以下に示すような損失項目を考慮する必要がある。なお、この検討ではガラスの海の発電能力を基準と考えているため集熱効率などは別途見積もる必要がある。

6.1 損失項目の根拠

各損失項目の根拠を示す。

6.1.1 サブアレー制御系使用電力

本項目は、送電アンテナの位相制御に必要な受信機、位相検出器、計算機、移相器駆動回路で消費する電力である。送電アンテナの位相制御は各サブアレー毎に行われるため、サブアレー毎に本電力を計上する。ここでは、これらに50Wを配分するが内訳は、受信機15W、位相検出器5W、計算機20W、移相器駆動回路10Wと仮定する。

6.1.2 給電損失（直流）

本損失は、ガラスの海からサブアレーまでの給電線の電気抵抗によって消費される電力である。ここでは、地上の電力線で一般的に10～15%の損失を配分しているが、本システムでは送電距離も短く、効率を高くする必要から1%の損失を配分する。

6.1.3 電力変換効率（SSPA効率）

本効率は、直流電力の高周波電力への変換効率を示す。現在の2GHz帯のSSPAの変換効率は増幅器の動作によっても異なるが最大40%程度である。ここでは、将来の技術進歩による効率向上を見込み50%を配分する。

6.1.4 給電損失（RF）

本損失は、SSPAによって変換された高周波電力のアンテナ端までの給電線及びフィルタによって発生する損失を示す。一般に通信系では1～3dB（20～50%）の損失を見込む。また、フィルタ等を挿入した場合の損失は0.5～1dB（10～20%）程度である。

本配分では、SSPAがアンテナ直下に設けられることを考慮し、5%（0.2dB）の損失を配

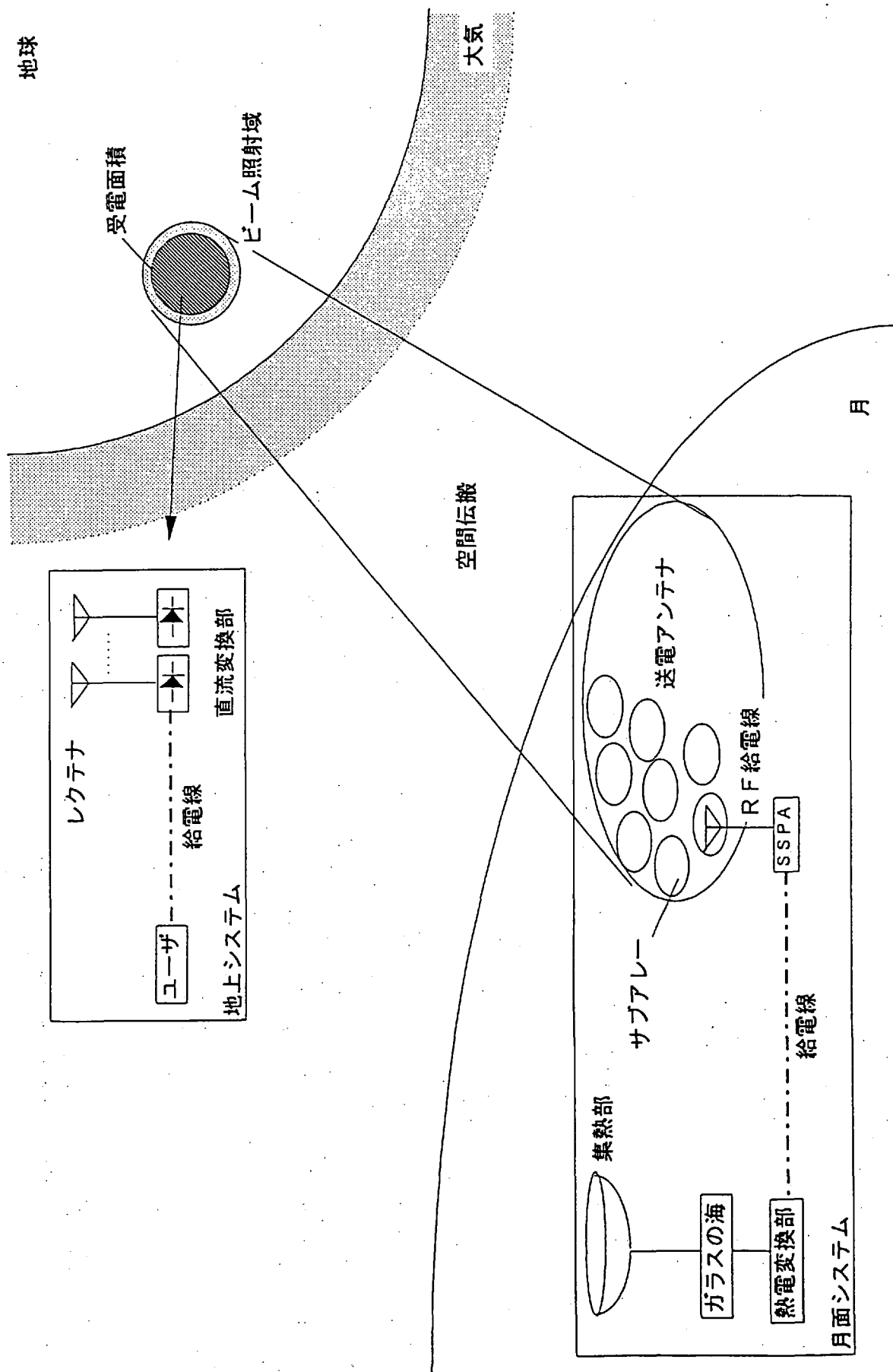


図6-1 ガラスの海全体システム構成

分する。

6.1.5 空間伝搬損失

本損失は、送電アンテナより放射された電波を受電アンテナがどの程度受電できるかを示す値である。本損失は送電アンテナと受電アンテナの各々の面積、両者間の距離及び波長によって決まってくる値である。ここでは、95%を配分する。本配分値を満たすための受電アンテナ規模については別途検討する。

6.1.6 大気吸収損失

本損失は、地球大気による電磁波の吸収による損失である。一般に大気吸収損失は周波数が高いほど大きくなる。図6.1-1（参考文献1）に周波数と減衰量の関係を示す。本図より本システムで検討している2.45GHzの減衰は1km（1気圧）あたり0.2dBである。宇宙からの到来波の場合大気内の伝搬長と気圧を考慮する必要があるが、ここでは伝搬路長全て1気圧と仮定し、また伝搬距離を1km（実際にはもう少し長い気圧も下がるため）と仮定し、損失を5%配分する。

6.1.7 レクテナのエネルギー収集効率

本効率は、受電アンテナであるレクテナのアンテナ素子が照射されているエネルギーのどの程度を収集できるかを示す値である。ここでは88%を配分する。この値はNASAのSPSリファレンスモデルの値である。

6.1.8 レクテナのエネルギー変換効率

本効率は、受電アンテナであるレクテナで収集されたエネルギーを整流素子によってどの程度電力に変換できるかを示す値である。ここでは89%を配分する。この値はNASAのSPSリファレンスモデルの値である。

6.1.9 送電網変換効率

本効率は、受電アンテナであるレクテナで収集され、整流素子でエネルギーに変換された電力を、どの程度の効率で送電網に伝送できるかを示す値である。ここでは、97%を配分する。この値はNASAのSPSリファレンスモデルの値である。

参考文献1 : CCIR-Rep. 719

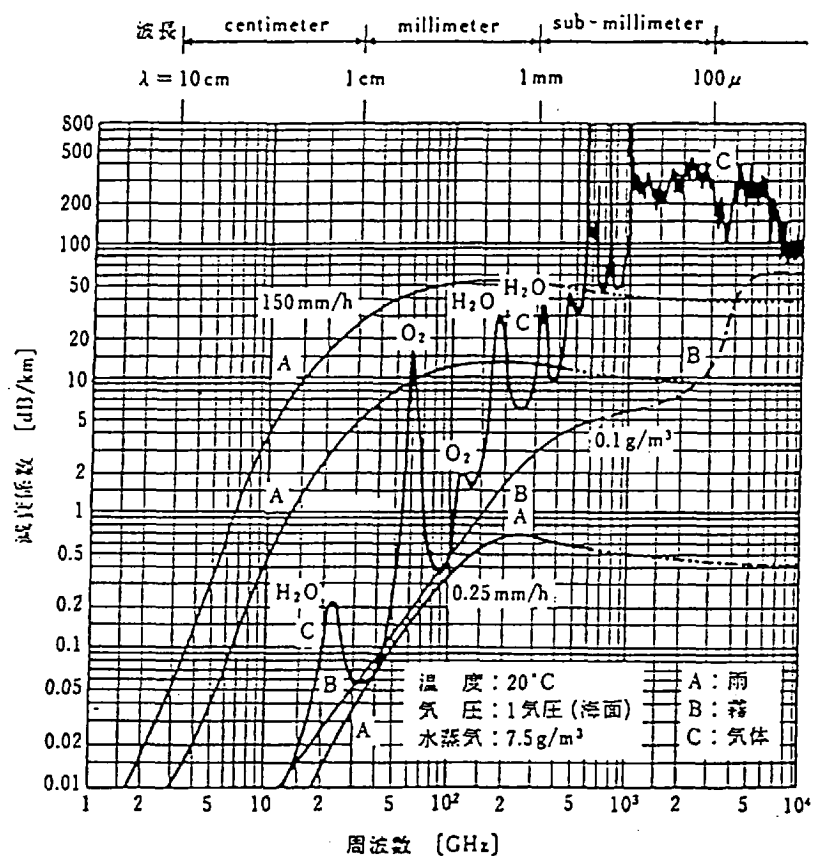


図6.1-1 電波の減衰特性 (CCIR-Rep. 719)

6.2 損失配分表

以上の結果に基づき損失配分を行った結果を表6.2-1に示す。この結果によれば、100kW
ガラスの海の場合には109,626個のガラスの海が必要となる。

表6.2-1 ガラスの海の損失配分表

項 目	単 位	ガラスの海の大きさ				
		100kW	300kW	500kW	800kW	1000kW
1つのガラスの海発生電力	kW	100	300	500	800	1000
ガラスの海個数	個	109626	36542	21925	13703	10963
総ガラスの海発生電力	GW	11.0	11.0	11.0	11.0	11.0
サブアレー制御系使用電力	W	50	50	50	50	50
サブアレー個数	個	6600000	6600000	6600000	6600000	6600000
総制御系使用電力	GW	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33
送電用電力	GW	10.6	10.6	10.6	10.6	10.6
給電損失(直流)	ND	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99
電力変換効率	ND	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
給電損失 (R F)	ND	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95
アンテナ端送信電力	GW	5	5	5	5	5
空間伝搬損失	ND	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98
大気吸収損失	ND	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95
レクテナのエネルギー収集効率	ND	0.88	0.88	0.88	0.88	0.88
レクテナのエネルギー変換効率	ND	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89
送電網変換効率	ND	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97
送電網供給電力	GW	3.7	3.7	3.7	3.7	3.7

7. 信頼性とメンテナンスの検討

ここでは、地球への送電を目的とした月エネルギーシステムの送電システムにおける巨大なサブアレイ群について、どれほどのメンテナンスが必要であるのかを算出する。

5GWの出力を実現するために、月面には10WのSSPA×76個で構成されたサブアレイ（ ϕ 3.5mに内接する正六角形）を660万個設置する。すなわち、本システムには合計で5億個以上のSSPAが存在することになる。仮に、各SSPA（各アンプ周辺のサブシステム）の故障率が1000FITであると仮定すると、単純な積算から1時間に500個以上のSSPAが故障を来すことがわかる。システム全体の大きさが直径10kmほどであることを考えると、そのメンテナンスは非常に困難であるといわざるを得ない。

ここでは、メンテナンスのし易さから、交換はサブアレイ単位とする方針をとる。各サブアレイの出力は常時モニタ可能なものとし、サブアレイ中の任意の数のSSPAの故障までは許容するとした場合に必要となるメンテナンスの程度（単位時間に交換を必要とする個数）を明らかにしていく。

以下では、各サブアレイにおいて、サブアレイ中の任意の個数以上のアンプが故障したらすぐに新しいサブアレイと交換するというメンテナンスの方針をとる場合について考えていく。なお、メンテナンス（交換）にかかる時間は0とし、ある時刻 t で故障の発生していたサブアレイは時刻 t において全て故障のない新しいサブアレイと置き換えられると仮定する。

(1)サブアレイの1つ以上の素子が故障したら交換（サブアレイごと）する場合

ここでは、各サブアレイにおいて、サブアレイ中の1個以上のアンプが故障したらすぐに新しいサブアレイと交換するというメンテナンスの方針をとる場合について考える。

λ ：各アンプの故障率（=1000(FIT)）

P_{00} ：76個の正常なアンプが単位時間後に全て正常のままである確率

P_{01} ：76個の正常なアンプのうち、単位時間後に1つ以上故障する確率

N_T ：トータルのサブアレイ数

N ：冗長系を保持しない場合のサブアレイ数（=6.6E6）

N_d ：単位時間（1時間）に必要なサブアレイ交換数

とすると、

$$P_{01} = 1 - P_{00}$$

$$P_{00} = \{\exp(-\lambda t)\}^{76} = 0.999924002$$

故障による出力の低下を許容するために必要なトータルのサブアレイ数は、

$$N_T = N \times \{76 / (76 - 1)\}$$

であるから、

$$N_d = N_T \times P_{01} = \underline{508.27} \quad \dots (7.1.1)$$

となる。

<参考>

トータルのサブアレイ数ではなく、サブアレイ中のアンプの数で冗長系を設ける方針をとる。

$$N_d = N \times [1 - \{\exp(-\lambda t)\}^{76}] = \underline{508.18} \quad \dots (7.1.2)$$

となり、(2.1)と(2.2)はあまり差がない。

(2)サブアレイの2つ以上の素子が故障したら交換する場合

(a)時刻 t における交換数の試算

t 時間後に1個のアンプの故障を許容したときに、 $t+1$ 時間後に2個以上のアンプの故障が発生するサブアレイ数を求める。このとき(時刻 t までに)、2個以上のアンプが故障したものについては、全て故障のないサブアレイにおきかわっているものと仮定する。

以下のようにパラメータを設定する。

λ : 各アンプの故障率 (=1000(FIT))

λ_t : 各アンプの時刻 t までの故障率

P_{t01} : 76個の正常なアンプのうちの1個が t 時間後に故障している確率

P_{02} : 76個の正常なアンプのうちの2個以上が単位時間後に故障する確率

P_{11} : 75個の正常なアンプのうちの1個以上が単位時間後に故障する確率

N_T : トータルのサブアレイ数

N : 冗長系を保持しない場合のサブアレイ数 (=6.6E6)

N_0 : t 時に全てのアンプが正常なサブアレイ数

N_1 : t 時にアンプの故障が1個のサブアレイ数

N_d : t 時から $t+1$ 時までの間に2個以上のアンプが故障するサブアレイの数
($t+1$ 時に必要なサブアレイ交換数)

故障による出力の低下を許容するために必要なトータルのサブアレイ数は、

$$N_T = N \times \{76 / (76 - 2)\}$$

である。

N_0 には、2個以上のアンプの故障が発生して、故障のないものに置き換えられたサブアレイ、及びもともと故障していないサブアレイが含まれているものとする。これより、

$$N_0 = N_T - N_1$$

である。

このとき、

$$N_1 = N_T \times P_{t01}$$

$$P_{t01} = 76 \times (1 - \lambda_t)^{75} \times \lambda_t$$

$$P_{02} = 1 - \{(1 - \lambda)^{76} + 76 \times (1 - \lambda)^{75} \times \lambda\}$$

であり、

$$N_d = N_0 P_{02} + N_1 P_{11}$$

より N_d を求めることができる。

(例) $t = 8760(h)$ のとき、

$$\lambda_t = 8.72E-3$$

$$N_1 = 2.33E6, N_0 = 4.45E6$$

$$N_d = 177.03 \rightarrow 1 \text{ 時間に } 177 \text{ 個のサブアレイの交換が必要である}$$

(b)漸化式による表現

ここでは、時刻 t の経過とともに、全体のサブアレイ数における故障 1 と故障 0 のサブアレイの割合がどのように変化していくのかを考える。

スタート時に全て正常なアンプにより構成されていたサブアレイは、単位時間後には、

- ・ 全て正常なサブアレイ
- ・ 1つ故障のサブアレイ
- ・ 2つ以上故障のサブアレイ

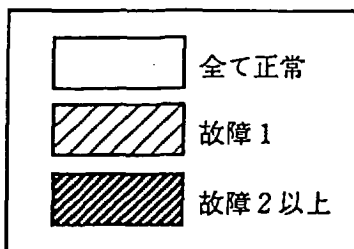
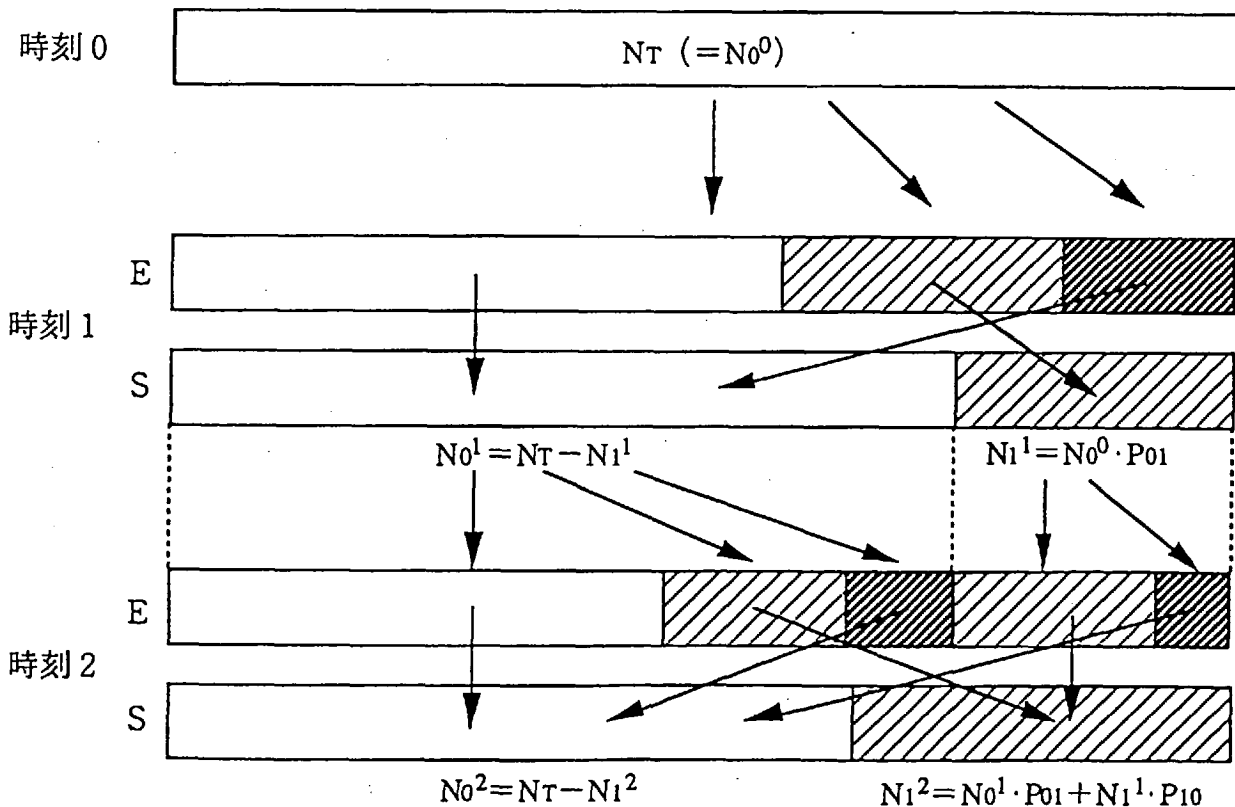
の3つに分かれる。ここでは、メンテナンスに要する時間は考えないこととし、2つ以上故障のサブアレイはすぐに新しいサブアレイに置き換えられるものとする。すなわち、任意の時刻 t では、

- ・ 全て正常
- ・ 故障 1

の2つのモードからのスタートとなる。更に、単位時間経過後には、

- ・ 全て正常 → ・ 全て正常
- ・ 故障 1 → ・ 故障 1
- ・ 故障 2 以上 → ・ 故障 2 以上

へと移行する。この様子を図示すると、以下のようになる。



ここで、時刻 n のスタート時（メンテナンス終了後）において、

N_T ：トータルのサブアレイ数

N_1^n ：1つ故障のサブアレイ数

N_0^n ：故障なしのサブアレイ数

とする。

各確率については以下のように設定する。

P_{00} ：故障なしのサブアレイが単位時間経過後に故障なしのままである確率

P_{01} ：〃 1個故障する確率

P_{02} ：〃 2個以上故障する確率

P_{10} ：故障1のサブアレイが単位時間経過後に故障1のままである確率

P_{11} ：〃 更に1個以上故障する確率

ここで、

$$P_{00} = {}^{76}C_0 \cdot (1 - \lambda)^{76}$$

$$P_{01} = {}^{76}C_1 \cdot (1 - \lambda)^{75} \cdot \lambda$$

$$P_{10} = {}^{75}C_0 \cdot (1 - \lambda)^{75}$$

$$P_{02} = 1 - P_{00} - P_{01}$$

$$P_{11} = 1 - P_{10}$$

である。

図中に示したように、

$$N_1^1 = N_0^0 \cdot P_{01} = N_T \cdot P_{01}$$

$$\begin{aligned} N_1^2 &= N_0^1 \cdot P_{01} + N_1^1 \cdot P_{10} \\ &= (N_T - N_T \cdot P_{01}) \cdot P_{01} + N_T \cdot P_{01} \cdot P_{10} \\ &= N_T \cdot P_{01} \cdot \{1 + (P_{10} - P_{01})\} \end{aligned}$$

更に、

$$\begin{aligned} N_1^3 &= N_0^2 \cdot P_{01} + N_1^2 \cdot P_{10} \\ &= N_T \cdot P_{01} + N_1^2 \cdot (P_{10} - P_{01}) \\ &= N_T \cdot P_{01} \cdot \{1 + (P_{10} - P_{01}) + (P_{10} - P_{01})^2\} \end{aligned}$$

同様にして、

$$N_1^n = N_T \cdot P_{01} \cdot \sum_{k=1}^n (P_{10} - P_{01})^{k-1} \dots\dots\dots (7.2.1)$$

が求まる。これにより、全体のサブアレイ数における故障1と故障0のサブアレイの割合も即座に求めることが可能である。

また、時刻 n において、単位時間の間に交換すべきサブアレイの数を N_d とすると、

$$\begin{aligned} N_d &= (N_T - N_1^n) \cdot P_{02} + N_1^n \cdot P_{11} \\ &= (N_T - N_1^n) \cdot (1 - P_{00} - P_{01}) + N_1^n \cdot (1 - P_{10}) \end{aligned}$$

となる。

ここでは、各サブアレイにおいて、サブアレイ中の2個のアンプの故障までは許容し、3個のアンプが故障したら新しいサブアレイと交換するというメンテナンスの方針をとる場合について考える。

P00: 故障なしのサブアレイが単位時間経過後に故障なしのままである確率

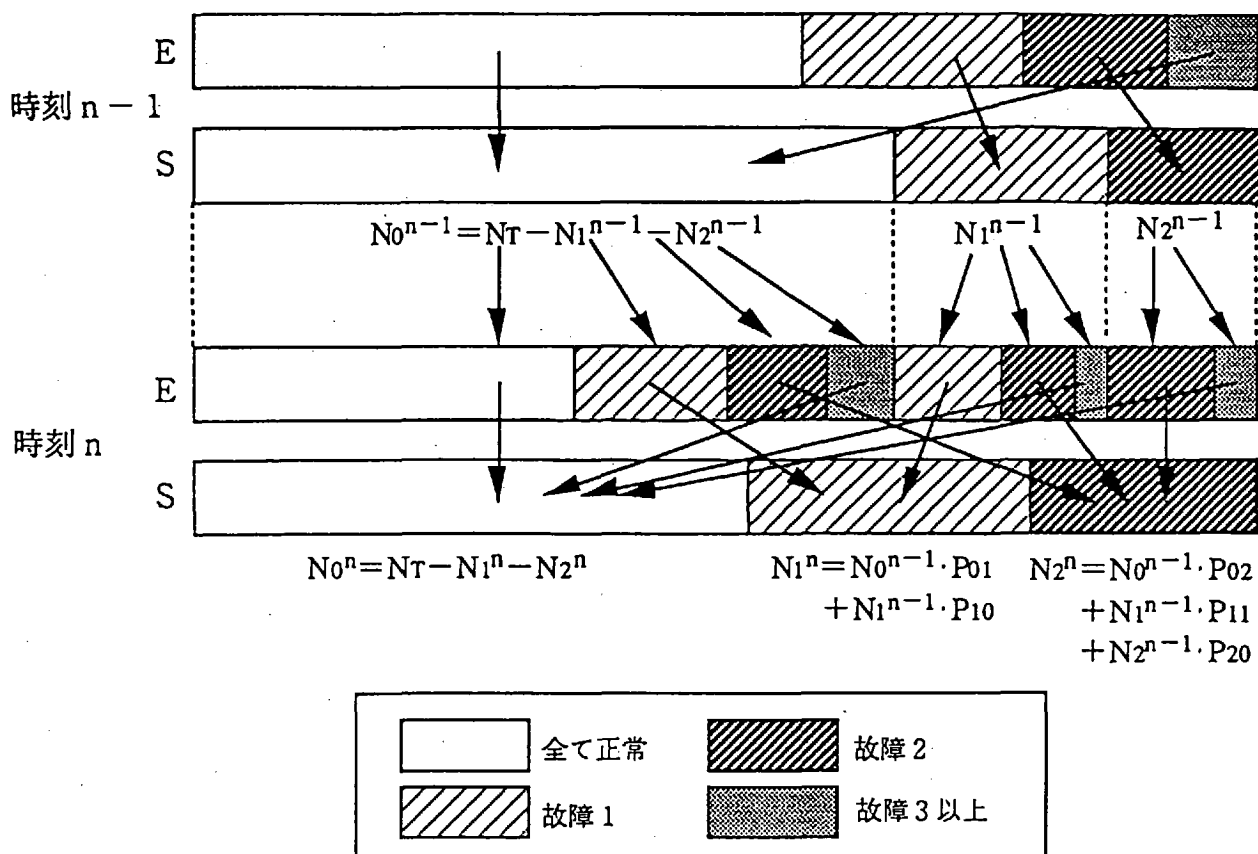
P21: 更に1個以上故障する確率

$$P_{21} = 1 - P_{20}$$

単位時間あたりのサブレイの交換数を N_d とすると、

$$N_d = N_0^{n-1} \cdot P_{03} + N_1^{n-1} \cdot P_{12} + N_2^{n-1} \cdot P_{21} \quad \dots\dots\dots(7.3.1)$$

となる。



(補足)

全く同様にして、各サブアレイにおいて、サブアレイ中の 3 個のアンプの故障までは許容し、4 個のアンプが故障したら新しいサブアレイと交換するというメンテナンスの方針をとる場合についても、単位時間あたりに必要なサブアレイの交換数 (N_d) が以下のよう求められる。

$P_{00} = 76C_0 \cdot (1 - \lambda)^{76}$: 故障なしのサブアレイが単位時間経過後に故障なしのままである確率
$P_{01} = 76C_1 \cdot (1 - \lambda)^{75} \cdot \lambda$: 1 個故障する確率
$P_{02} = 76C_2 \cdot (1 - \lambda)^{74} \cdot \lambda^2$: 2 個故障する確率
$P_{03} = 76C_3 \cdot (1 - \lambda)^{73} \cdot \lambda^3$: 3 個故障する確率
$P_{10} = 75C_0 \cdot (1 - \lambda)^{75}$: 故障 1 のサブアレイが単位時間経過後に故障 1 のままである確率
$P_{11} = 75C_1 \cdot (1 - \lambda)^{74} \cdot \lambda$: 更に 1 個故障する確率
$P_{12} = 75C_2 \cdot (1 - \lambda)^{73} \cdot \lambda^2$: 更に 2 個故障する確率
$P_{20} = 74C_0 \cdot (1 - \lambda)^{74}$: 故障 2 のサブアレイが単位時間経過後に故障 2 のままである確率
$P_{21} = 74C_1 \cdot (1 - \lambda)^{73} \cdot \lambda$: 更に 1 個故障する確率
$P_{30} = 73C_0 \cdot (1 - \lambda)^{73}$: 故障 3 のサブアレイが単位時間経過後に故障 3 のままである確率

$P_{04} = 1 - P_{00} - P_{01} - P_{02} - P_{03}$: 故障なしのサブアレイが単位時間経過後に4個以上故障する確率

$P_{13} = 1 - P_{10} - P_{11} - P_{12}$: 故障1のサブアレイが単位時間経過後に更に3個以上故障する確率

$P_{22} = 1 - P_{20} - P_{21}$: 故障2のサブアレイが単位時間経過後に更に2個以上故障する確率

$P_{31} = 1 - P_{30}$: 故障3のサブアレイが単位時間経過後に更に1個以上故障する確率

このとき、

$$N_0^n = N_T - N_1^n - N_2^n - N_3^n$$

$$N_1^n = N_0^{n-1} \cdot P_{01} + N_1^{n-1} \cdot P_{10}$$

$$N_2^n = N_0^{n-1} \cdot P_{02} + N_1^{n-1} \cdot P_{11} + N_2^{n-1} \cdot P_{20}$$

$$N_3^n = N_0^{n-1} \cdot P_{03} + N_1^{n-1} \cdot P_{12} + N_2^{n-1} \cdot P_{21} + N_3^{n-1} \cdot P_{30}$$

ただし、

$$N_T = N \times \{76 / (76 - 4)\}$$

N_k^n : 時刻 n のスタート時 (メンテナンス終了後) において
アンプの故障 k のサブアレイ数

である。

また、単位時間あたりのサブアレイの交換数を N_d とすると、

$$N_d = N_0^{n-1} \cdot P_{04} + N_1^{n-1} \cdot P_{13} + N_2^{n-1} \cdot P_{22} + N_3^{n-1} \cdot P_{31} \quad \dots\dots\dots(7.3.2)$$

なる漸化式が得られる。

(4)計算と考察

ここでは、(2)～(3)で導いた漸化式に基づき、各メンテナンスの方針において必要なサブアレイの交換数の時間的変化を計算する。

図7.1は、メンテナンス（サブアレイの交換）の方針を、

- ・ 1個以上故障したら交換（方針1）
- ・ 2個以上故障したら交換（方針2）
- ・ 3個以上故障したら交換（方針3）
- ・ 4個以上故障したら交換（方針4）

の4通りとしたとき、システムの維持のために必要となる1時間あたりのサブアレイの交換数を示したものである。横軸はシステムを設置してから時間を示すもので、1個以上故障で交換という方針以外では、時間の経過とともに許容される故障を内包するサブシステムが増加してくるため、必要となる交換数が増加してくる。16万時間経過後では、各方針における交換数はほぼ収束をみせている。これは、各システムにおいて、許容される故障を内包する各モードのサブアレイの数がバランスしてくるためである。すなわち、各モードにおいて、単位時間経過後の増加数と減少数が等しい状態となっている。

各方針において、16万時間経過後のサブアレイ交換数（ほぼ収束した数）は、

（方針1） $N_d(1)=508.27$ 個

（方針2） $N_d(2)=255.87$ 個

（方針3） $N_d(3)=171.76$ 個

（方針4） $N_d(4)=129.72$ 個

と算出された。

また、図7.2は、各方針における、全て正常なアンプで構成されるサブアレイ数の全体のサブアレイ数に対する比率の変化を示したものである。16万時間経過後の比率は、

（方針1）1.0000

（方針2）0.4967

（方針3）0.3289

（方針4）0.2450

と算出された。

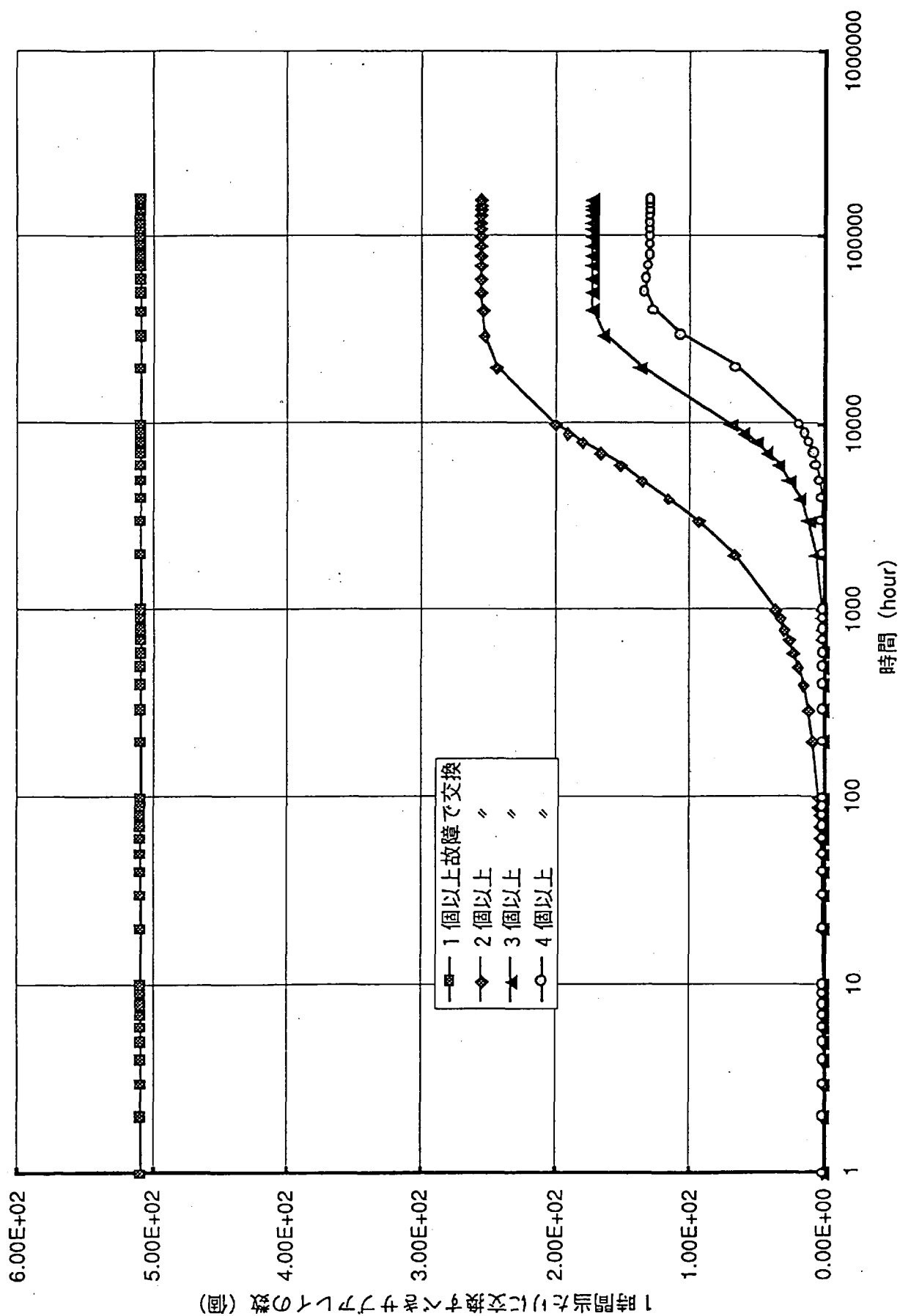


図7.1 交換すべきサブアレイの数 (1時間あたり)

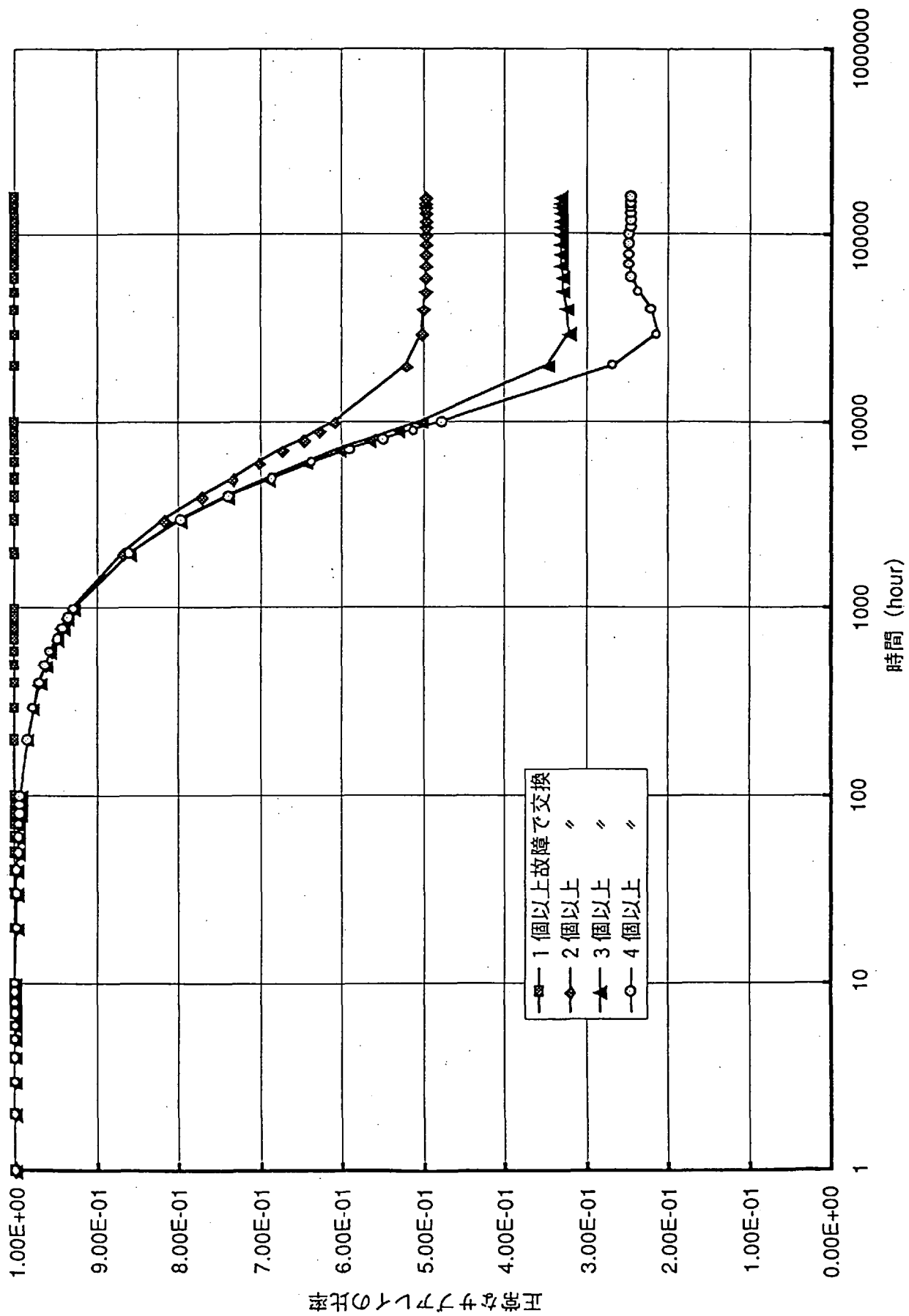


図7.2 全て正常な要素で構成されるサブアレイの比率

(5) サブアレイの i 個以上の素子が故障したら交換 (方針 i)

これまでの検討結果より、サブアレイ中の $i-1$ 個のアンプの故障までは許容し、 i 個のアンプが故障したら新しいサブアレイと交換するというメンテナンスの方針をとる場合については以下が導ける。

方針 i において出力の低下を避けるために必要なトータルのサブアレイ数を $NT(i)$ とすると、

$$NT(i) = N \times \{76 / (76 - i)\}$$

また、これまでと同様に、

N_k^n : 時刻 n のスタート時 (メンテナンス終了後) において
アンプの故障 k のサブアレイ数

とする。

各確率については、

P_{qr} : q 個故障のサブアレイが単位時間後に更に r 個故障する確率 ($q+r < i$)

: q 個故障のサブアレイが単位時間後に更に r 個以上故障する確率 ($q+r = i$)

とおく。

このとき、

$$N_0^n = NT(i) - N_1^n - N_2^n - \dots - N_{i-1}^n$$

$$= NT(i) - \sum_{k=1}^{i-1} N_k^n$$

$$N_1^n = N_0^{n-1} \cdot P_{01} + N_1^{n-1} \cdot P_{10}$$

$$N_2^n = N_0^{n-1} \cdot P_{02} + N_1^{n-1} \cdot P_{11} + N_2^{n-1} \cdot P_{20}$$

\vdots

$$N_{i-1}^n = N_0^{n-1} \cdot P_{0(i-1)} + N_1^{n-1} \cdot P_{1(i-2)} - \dots - N_{i-1}^{n-1} \cdot P_{(i-1)0}$$

$$= \sum_{k=0}^{i-1} N_k^{n-1} \cdot P_{k(i-j-1)}$$

.....(7.5.1)

ここで、

イ) $q+p < i$ のとき、

$$P_{qr} = 76 - q \cdot C_r (1 - \lambda) \cdot \lambda^r \quad \dots \dots (7.5.2)$$

ロ) $q+p = i$ のとき

$$P_{qr} = 1 - P_{q0} - P_{q1} - P_{q2} - \dots - P_{q(i-1)}$$

$$= 1 - \sum_{k=0}^{i-1} P_{qk}$$

.....(7.5.3)

より、各確率を求めることができる。

これらの漸化式を順次計算していくことにより、方針 i における時刻 n のサブアレイの交換数 $N_d(n)$ は、

$$\begin{aligned}
 N_d(i) &= N_0^{n-1} \cdot P_{0i} + N_1^{n-1} \cdot P_{1(i-1)} \cdots - N_{i-1}^{n-1} \cdot P_{(i-1)i} \\
 &= \sum_{k=0}^{i-1} N_k^{n-1} \cdot P_{k(i-k)} \cdots \cdots (7.5.4)
 \end{aligned}$$

となる。

図7.3に示すのは、16万時間後の各 i についての $N_d(i)$ を示したものである。この結果においては、 $i = 42$ のとき最小値を示している。しかしながら、16万時間で全ての i についての $N_d(i)$ が収束しているとは判断し難い。前述の計算結果が、 i が大きくなるにつれて収束値に近づく時間は長くなる傾向にあることを示していることから、収束には更に長時間を要するものと考えられる。

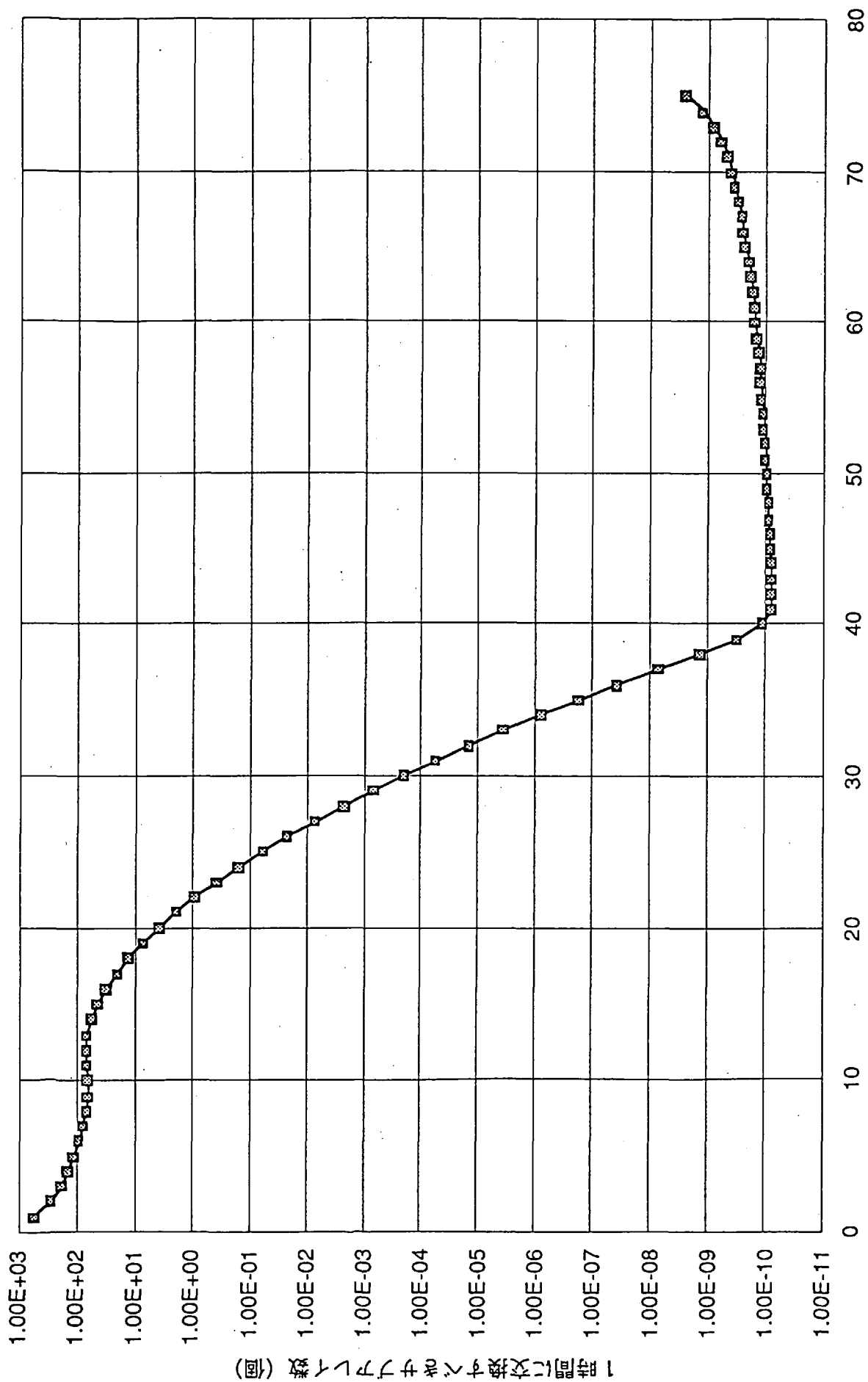


図7.3 16万時間後の各方針におけるサブアレイの交換数

(6) メンテナンスの方針

仮に、 $N_d(i)$ が収束している状態を仮定してみると、ここでは各故障モードのサブアレイ数が一定となっていると考えられる。すなわち、ある方針 i について、

$$N_1 = N_0 P_{01} + N_1 P_{10}$$

$$N_2 = N_0 P_{02} + N_1 P_{11} + N_2 P_{20}$$

$$N_3 = N_0 P_{03} + N_1 P_{12} + N_2 P_{21} + N_3 P_{30}$$

⋮
⋮

$$N_{i-1} = \sum_{k=0}^{i-1} N_k \cdot P_{k(i-1-k)} \quad \dots\dots\dots(7.5.5)$$

の合計 $i - 1$ 個の式が成立する。

また、

$$N_T(i) = N_0 + N_1 + \dots\dots\dots + N_{i-1} \quad \dots\dots\dots(7.5.6)$$

である。

ここで、

$$N_T(i) = N \times \{76 / (76 - i)\}$$

及び、

$$P_{qr} = 76 - q C_r (1 - \lambda)^{76-q} \lambda^r \quad \dots\dots\dots(7.5.2)$$

ただし、

$$N = 6.6 * E6$$

$$\lambda = 1000 \text{ (FIT)}$$

であるから、 N_0 から N_{i-1} 以外は全て定数となる。

すなわち、(7.5.5)と(7.5.6)を組み合わせれば、 N_0 から N_{i-1} までの i 個の未知数を持つ i 元 1 次の連立方程式が成立する。

この連立方程式により、 N_0 から N_{i-1} までを求めたら、

$$\begin{aligned} N_d &= N_0 P_{0i} + N_1 P_{1(i-1)} \dots\dots\dots + N_{i-1} P_{(i-1)1} \\ &= \sum_{k=0}^{i-1} N_k \cdot P_{k(i-k)} \end{aligned}$$

により、 N_d を求めることができる。

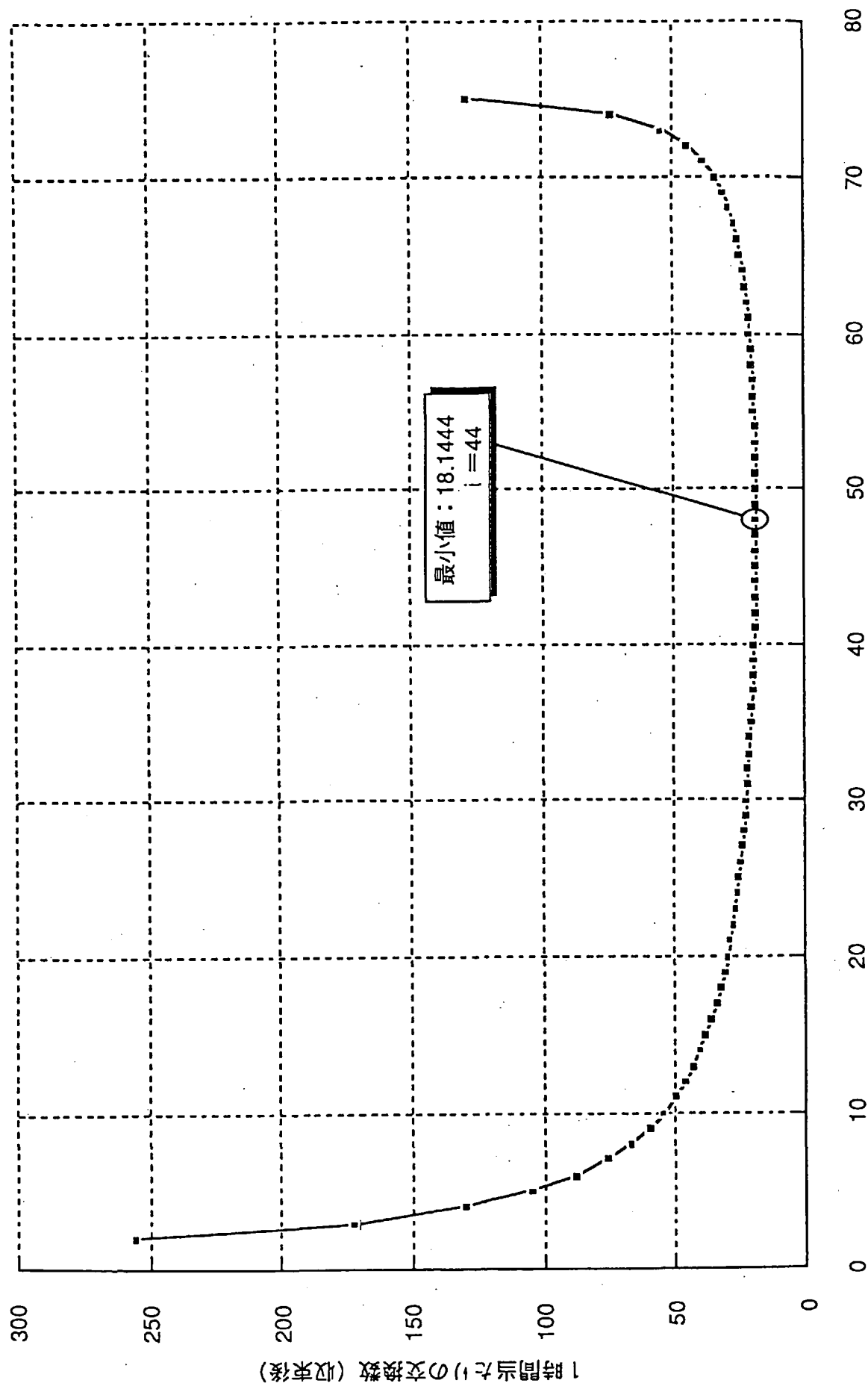
表7.1に示すのは、以上の方針に基づき計算した $i = 2 \sim 75$ における N_d の値である。

図7.4にはこれをグラフ化して示した。

N_d の収束値は、 $i = 48$ で最小値をとる曲線となっている。 i の増加とともに、冗長系の効果が現れ、交換を必要とするサブアレイ数は減少していく。しかしながら、 i がある値を越えると、故障時の出力を確保するための冗長系が大きくなるため、交換数は増加する。

表7.1 計算結果（1時間当たりの交換数）

i	Nd(i)	i	Nd(i)
2	255.8680	41	18.6676
3	171.7586	42	18.5272
4	129.7240	43	18.4087
5	104.5202	44	18.3210
6	87.7323	45	18.2369
7	75.7541	46	18.1837
8	66.7824	47	18.1527
9	59.8155	48	18.1444
10	54.2523	49	18.1596
11	49.7104	50	18.1992
12	45.9349	51	18.2645
13	42.7492	52	18.3572
14	40.0274	53	18.4790
15	37.6770	54	18.6326
16	35.6288	55	18.8208
17	33.8298	56	19.0472
18	32.2388	57	19.3162
19	30.8233	58	19.6333
20	29.5575	59	20.0052
21	28.4202	60	20.4404
22	27.3944	61	20.9494
23	26.4659	62	21.5460
24	25.6230	63	22.2478
25	24.8557	64	23.0783
26	24.1559	65	24.0690
27	23.5164	66	25.2637
28	22.9313	67	26.7248
29	22.3953	68	28.5447
30	21.9043	69	30.8661
31	21.4542	70	33.9231
32	21.0418	71	38.1293
33	20.6643	72	44.2947
34	20.3193	73	54.2678
35	20.0045	74	73.4552
36	19.7183	75	128.1459
37	19.4590		
38	19.2252		
39	19.0160		
40	18.8304		



サブアレイを交換するときの故障数 (i)

図7.4 1時間当たりの交換数 (収束後)

前述の計算結果より、1時間当たりのサブアレイの交換数を最も小さくするメンテナンスの方針は、

「サブアレイ中の素子76個のうちの48個以上が故障したら、そのサブアレイを交換する」方針であると結論できる。

また、その時の交換数は、定常時で1時間に18.1個である。

ここに定常時と書いたのは、メンテナンス数がほぼ最大になるときと考えられ、この定常時に達するまでにはかなりの時間を要するものと予想される（試算によると約100万時間（約114年））。

また、この方針における冗長数は、

$$6.6E6 \times \{[76 / (76 - 48)] - 1\} = 6.6E6 \times 1.714 \\ = 11.31E6$$

となる。すなわち、冗長系を設けない場合の約2.7倍のサブアレイが必要となる。従って、各素子に故障があまり発生していない初期においては、相当量の電力が得られることになる。

しかしながら、以上の最適値は、メンテナンスを最小化するという唯一の目的をとった場合に得られるものであり、本来ならば、冗長系の確保に伴うコストを考えた上で、かかるコストを最小化するのが望ましい。

仮に、

1つのサブアレイの交換にかかるコスト： C_i

サブアレイ1つ当たりのコスト（部品及び設置）： C_s

システムの耐用時間（hour）： T_i

とおくと、

交換にかかるコスト（ C_m ）： $C_i \cdot Nd(i) \cdot T_i$

初期コスト（ C_i ）： $C_s \cdot 6.6E6 \cdot \{76 / (76 - i)\}$

となり、 $C_m + C_i$ の和が最小となるよう i を求めるべきである。

現段階では、各コストが明確にされていないため、 C_m が最小となるように、 i を決定したことになる。以後、 $i = 48$ を最適方針として話を進めていくこととする。

この仮定のもとに、省力化を唯一の目的関数として決定されたメンテナンスの方針（定常時で1時間に18.1個）を運用上で実現するための方策を検討する。

本方針をとった場合、サブアレイ群は月面上に約16km直径の大きさとなる。

メンテナンスの容易さという観点から考えると、直径16kmという大きさは多大であり、これを幾つかのエリアに分けて管理するのが望ましい。

図7.1に示すのは、全体を等面積の36の管理エリアに分けた例である。この場合の各エリアの面積は、約 5.58×10^6 （ m^2 ）となり、これは正方形に直すと1辺が約2.36kmである。

この場合、一つの管理エリアで必要となる交換数は、平均的にみると、

$$18.1444 / 36 = 0.50 \text{ (個/時間)}$$

となり、およそ2時間に1つの交換ペースとなる。

更に1つの管理区域の負担を減らすには、同心円を更に1つ増やして64のエリアに分け、各管理エリアを $3.14 \times 10^6 \text{ m}^2$ （一辺1.77kmの正方形）としてもよい。この場合、一つの管理エリアで必要となる交換数は、

$$18.1444 / 64 = 0.28 \text{ (個/時間)}$$

となる。

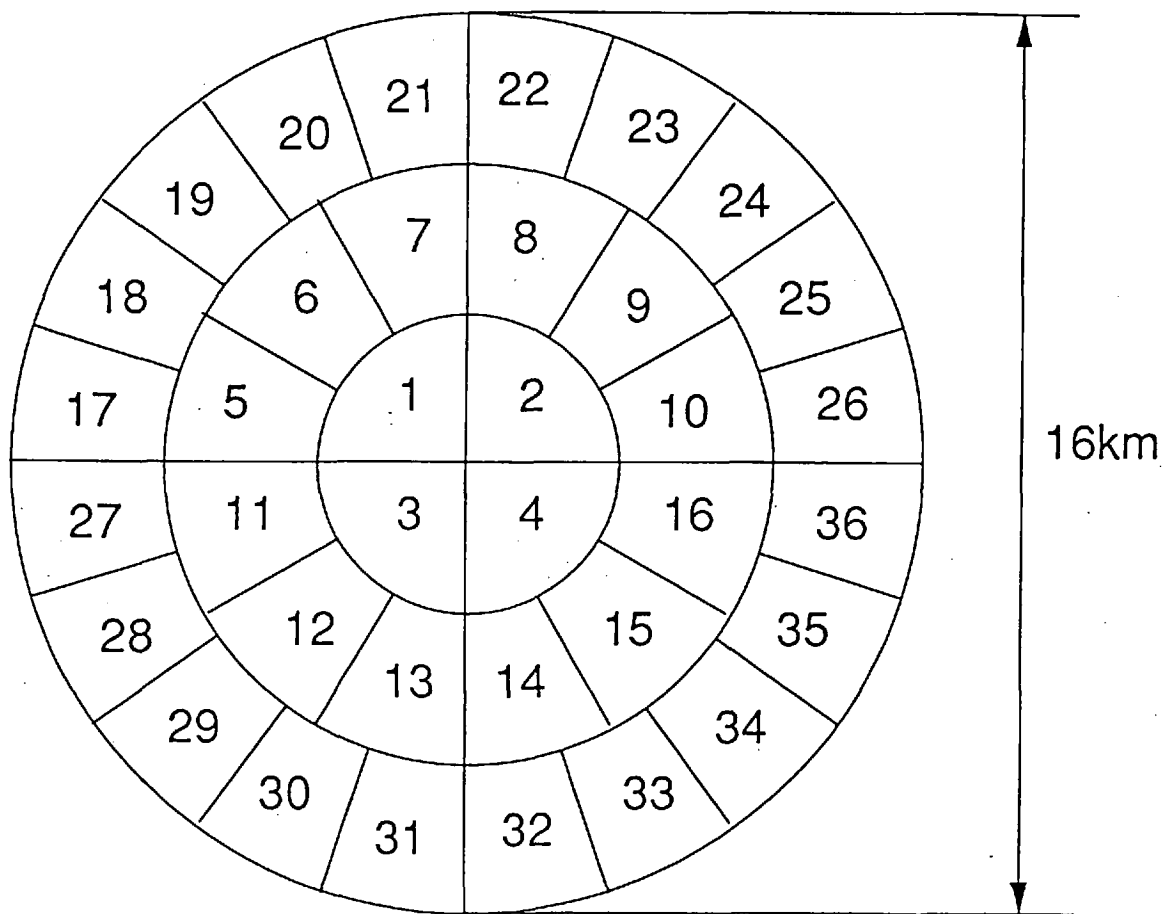


図7.1 36分割の管理エリア

8. 部品点数削減の検討

8.1 マイクロ波モノリシックIC (MMIC) の構成、製造過程

一般のICの製造工程を図8.1-1に示す(参考文献1)。また、各製造工程におけるMOSICの断面図を図8.1-2に示す(参考文献1)。ウェハ処理工程ではマスクのパターンを光学的に焼き付け、加工する場所としない場所を区別する。この焼き付けは、紫外線硬化樹脂のホトレジストを薄く均一に塗布し、マスクを通して紫外線で露光し、硬化しない部分を薬品で除去(エッチング)することによって行われる。その工程が終了した段階で不純物混入やアルミ電極のスパッタリング等が行われる。この様にしてウェハ全体に何らかの加工を施した後に別の薬品によって樹脂全体とともに不要部分が除去され次の工程に進む。組立工程ではICチップのパッケージング作業である。一般に地上用のICではエポキシ樹脂及びセラミックのパッケージが使われる。マイクロ波の場合には特性上金属ケースに入れる必要も発生する。

参考文献1: LSIプロセス工学(改定2版)、右高正俊編著、オーム社、1988

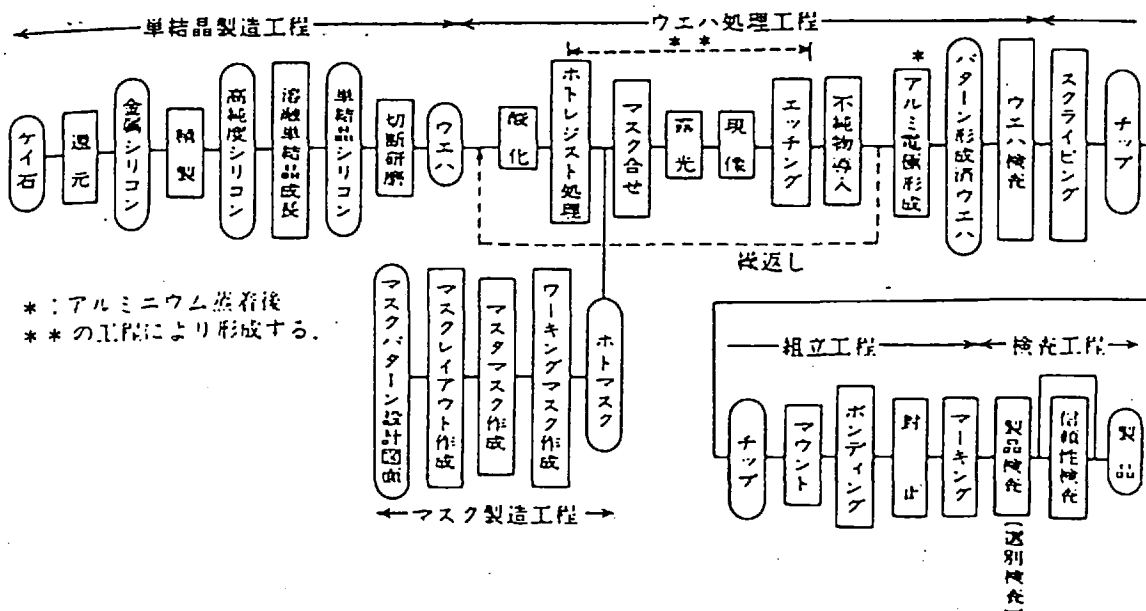


図8.1-1 ICの製造工程

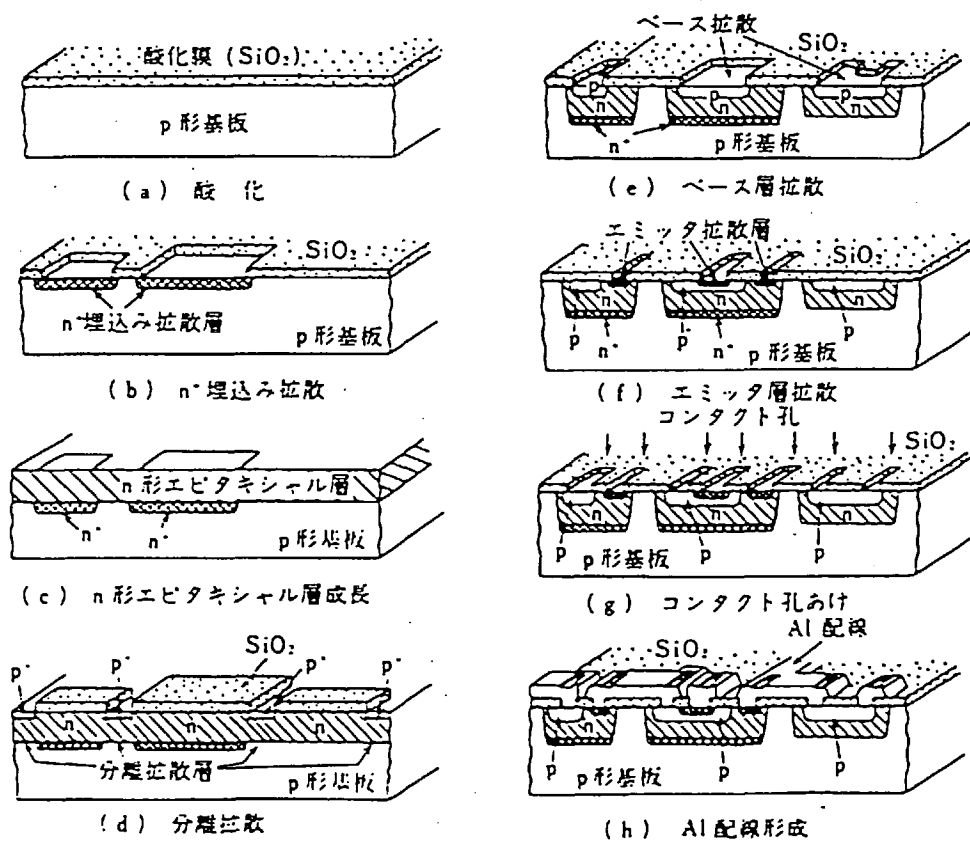


図8.1-2 簡単なMOSICの製造工程における断面模型図

8.2 マイクロ波回路の大きさ

8.2.1 マイクロ波回路

マイクロ波回路を平面回路として構成しようとする場合には、一般的にマイクロストリップラインが使用される。マイクロストリップラインでは周波数が低くなるほどその回路素子が大きくなる。

8.2.2 移相器

移相器にはアナログ型とデジタル型がある。アナログ型は、線路長を連続的に可変するものであり、可変長同軸ケーブルなどがこの部類に入る。デジタル型は複数の固定線路長の線路を切り替えて使用するものであり、現在の主流である。これらを宇宙空間で使用することを考えた場合、機械的部分の存在するアナログ型移相器は不向きと考えられる。以下はデジタル型移相器について述べる。

図8.2-1にマイクロストリップラインを用いたデジタル移相器の例を示す（参考文献2）。以下に代表的な移相器について述べる。

(1)線路切り替え型 SLPS

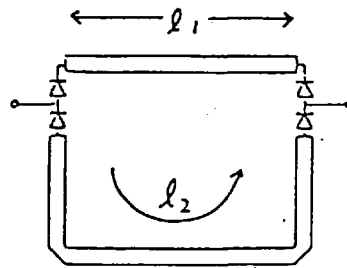
本移相器は、スイッチ素子によって切り替えられる2本のストリップラインの長さの差を必要とする移相量に相当する電気長が得られるように設定したものである。実際にはoffとなっている線路を通して漏れがあるため位相誤差、損失が発生するため、これを防ぐ工夫がなされている。一般に本方式は挿入損失が比較的小さく、構造も簡単であるが、高周波化に向かないことや、スイッチ素子の数が多い欠点があるが、設計が容易である。

(2)ローデッドライン型 LLPS

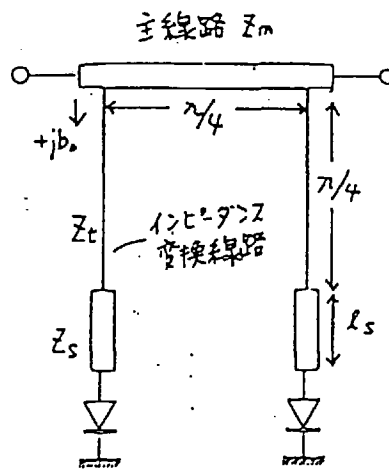
規格化インピーダンス Z_m 、長さ $\lambda/4$ の主線路に並列に接続されたサセプタンス b_0 の大きさが等しい装荷線路を符号が反転するように切り替えることにより移相量の変化を行うものである。この回路で所望の移相量 ϕ と主線路インピーダンス Z_m 、装荷サセプタンス b_0 には次式の関係とする必要がある。

$$\begin{aligned}Z_m &= \cos(\phi/2) \\ b_0 &= \tan(\phi/2)\end{aligned}$$

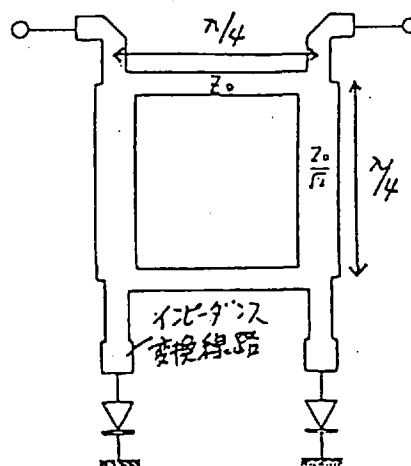
本方式は、挿入損失が小さく、帯域内の位相変化も比較的小さい（電力伝送は周波数固定のため影響無）が、180度近い位相量を実現することが出来ないため、大きな位相量を



(1)線路切り替え型 (SLPS)



(2)ローデッドライン型 (LLPS)



(3)ブランチライン型 (BLPS)

図8.2-1 デジタル移送器の種類

必要とする移相器には向かない、また設計も複雑である。スイッチ素子の数は少なくすることが出来る。

(3) ブランチライン型 BLPS

本方式は、スイッチ素子のon、offの切り替えによって生じる反射系 Γ の位相変化によって移相量を切り替える方式である。本方式は、スイッチ単体の移相量では所用の移相量が得られない場合にはインピーダンス変換回路を挿入して所用移相量を実現する。本方式では大きな移相量も容易に実現できるが、挿入損失がやや大きくなり、また設計も複雑である。スイッチ素子の数は少なくすることが出来る。

(4) 移相器の比較

必要とする移相量により若干の違いがあるものの、各移相器の特性の関連は概略以下の通りである。

挿入損失：	小SLPS	<	LLPS	<	BLPS大
寸法構造：	小SLPS	<	LLPS	<	BLPS大
周波数特性：	低周波SLPS, BLPS			<	LLPS高周波
移相量：	小移相SLPS, LLPS			<	BLPS
S W素子数：	大SLPS	>			LLPS=BLPS/小

(5) スwitch素子

スイッチ素子としてはPINダイオードを用いることが多いが、最近はFETを用いたものも多くなってきている。電子走査型アンテナのコストはスイッチ素子に依存するため、出来る限る使用個数を削減することが望ましい。また、能動部品の個数が少ないことが、月面での製造を考慮した場合にも望ましい。以下に両者の特徴などを示す。

(ア) PINダイオード

挿入損失は小さなON抵抗 (1Ω 以下) により、FETに比べ少ない、一方構成の面で見るとRFラインにバイアス電流を流す必要があるため、回路が複雑になることや、使用するダイオードの個数が多くなった場合消費電流が無視できない等の欠点がある。ダイオードの消費電流は1個あたり20mA程度であり、3ビット移相器を使用した19素子のアンテナでは4A以上の電流が必要となる。

(イ) FET

RFラインと独立したゲート電極の電圧でON、OFF出来るため、バイアス回路がPINダイオードの場合に比べ大変簡単になる。ON抵抗は 2Ω 程度あるため挿入損失は大きくなる。

また、MMIC化する場合にはFETを採用する必要がある。

参考文献2：移動体衛星通信システムにおける車載アンテナの設計・解析と今後の課題
テキスト、技研情報センター、1991年5月

8.3 SSPAの回路構成

2. 45GHzで10Wの出力を達成しようとする場合、複数段の増幅器を直列に接続する必要がある。直列アンプの総利得 G は各段の利得を G_n とすると下式で求められる。

$$G = G_1 G_2 G_3 \dots G_n$$

現状のSSPAの能力は一段の利得が10dB程度であるため、増幅器を3段程度直列に接続する必要がある。各段の利得を10dBと場合、総利得は30dBとなり、SSPAへの入力電力は0.01W必要である。

8.4 MMIC適用性の検討

8.4.1 移相器の大きさ

図8.1-1からも解るように、移相器の大きさは使用する周波数によって決定される。LLPS及びBLPSでは $\lambda/4$ が基準となるため、2.45GHzでは $\lambda \approx 12\text{cm}$ であるため、 $\lambda/4$ は3cmとなる。従ってBLPS型の場合一つの移相器が3cm*3cmの大きさとなる。

8.4.2 SSPAの大きさ

また、SSPA回路内で使用されるインダクタンスやキャパシタンスは周波数によって決定されるため、2.45GHzではかなり大きな寸法となることが想定される。

8.4.3 製造過程

前述のようにICの製造工程は非常に複雑で、多くの化学薬品や製造機器に頼っている。また、各プロセスは非常に高いクリーン度が要求されており現状のプロセスの月面での製造には疑問がある。

8.4.4 適用可否の検討

上記検討より、移相器をMMIC化した場合には、一段の移相器で3cm*3cmの大きさの中に複数のFETを作り込む必要がある。さらに複数段の移相器をMMIC化する場合にはより大きなものとなる。これは一般のLSIが1cm*1cm程度の大きさであるのに比べ非常に大きい。

SSPAの場合にも回路定数の関係から3段程度の増幅器をMMIC化した場合には回路寸法が大きくなることが考えられる。

一般にICの不良は面積が大きくなるほど増加する傾向にあり、このような回路をMMIC化した場合には歩留まりが低下することが懸念される。従って、地球上の製造ラインにおいて製造した場合においてもかなりの不良が発生すると考える。

また、月面での製造過程上の問題も含めて考慮した場合には、ガラスの海の送電系にMMICを適用することは困難と考える。

8.5 その他の方策

MMICを使用しない場合、これら回路の部品点数を削減する方策としては、ハイブリッドIC化があるが、この場合には基本的に個別の部品を組み合わせる必要があるため、部品点数が増加すること及び製造工程が複雑化するため月面での製造組立は困難であるとする。

9. コストの検討

9.1 日本における電源別耐用年発電原価

日本における各電源別の耐用年発電コストは、通産省資料によると表9.1-1に示す通りである。

表 9.1-1 電源別発電原価試算結果（平成元年度運転開始ベース）

	建設単価 (kW当たり)	耐用年発電原価(送電端) (kWh当たり)
原子力	31万円程度	9円程度
一般水力	64万円程度	13円程度
石油火力	19万円程度	11円程度
石炭火力	23万円程度	10円程度
L N G 火力	20万円程度	10円程度

（科学技術庁原子力局監修「原子力ポケットブック」1994年度版、日本原子力産業会議、P.13）

(参考) 元年度発電原価算定根拠表

電 源	一般水力	石油火力	石炭火力	LNG火力	原子力
出 力	1~4万kW級	60万kW級	60万kW級	60万kW級	110万kW級
耐 用 年 数	40年	15年	15年	15年	16年
燃 料 発 熱 量	-----	9,800kcal/l	6,200kcal/kg	13,000kcal/ kg	-----
熱 効 率	-----	39.7%	39.1%	40.5%	-----
所 内 率	0.4%	5%	8%	3%	4%
1基当たり従業員	3人	60人	70人	50人	100人
1人当たり人件費*	810万円	810万円	810万円	810万円	810万円
発電原価に占める 燃料費の割合	-----	6割程度	4割程度	5割程度	2割程度

* 退職金、厚生費等含む

** 濃縮ウラン購入費は1割程度

9.2 原子力発電の発電原価試算

9.1で示した原価試算表には、原価の算出方法までは示されていない。ガラスの海システムとの原価比較をするために、一般的な方法を利用して9.1で示した値に基づき、原子力の耐用年発電原価を試算する。

一年間あたりの発電原価は一般に次の式で求められる。

$$\text{年経費 (円)} / \text{年間供給電力量(kWh)} = \text{発電原価 (円/kWh)}$$

ここで年経費とは、建設した発電所の設備を運営・維持するために年間当たり必要な経費のことで、金利・減価償却費・諸税などの資本費と、人件費・修繕維持費・燃料費などの運転費とからなっている。年経費のうち、金利・減価償却費・燃料費が大半を占める。

年経費の算出には年経費率をあらかじめ定めておき、燃料費以外は次式で簡単に算出する方法が一般に用いられている。

$$\text{年経費 (円)} = \text{建設費 (円)} \times \text{年経費率}$$

年経費率には金利・減価償却費・修繕維持費など、燃料費を除いた資本費・運転費の各項目を含み、厳密には毎年異なった値となる。しかし、毎年異なった経費率をとると計算が繁雑になるので、ある期間内の現在価値額が問うかになるように平均化した年平均経費率が用いられている。表 9.1-2 に各設備の年平均経費率および耐用年数を示す。

表 9.1-2 各設備の年平均経費率および耐用年数

設 備 名	年平均経費率 (%)	耐用年数 (年)
水 力 発 電 所	12～14	約 35
火 力 発 電 所	15～19	約 15
原 子 力 発 電 所	18～20	約 16

(電気工学ハンドブック、電気学会、1988、P.930)

年平均経費率を用いて、原子力発電の発電原価を計算する。

計算には次の前提条件を用いる。

<前提条件>

発電規模	4.4×10 ⁶ kW (110万kW級 4基)
稼働率	70%
耐用年数	16年
発電原価に占める	20%
燃料費の割合	
建設単価	310,000 円/kW
年平均経費率	19%

建設費は、以下の式で計算できる。

$$\begin{aligned}\text{建設費 (円)} &= \text{建設単価 (円/kW)} \times \text{発電力 (kW)} \\ &= 310,000 \text{ (円/kW)} \times 4.4 \times 10^6 \text{ (kW)} \\ &= 1.364 \times 10^{12} \text{ (円)} = 13640 \text{ (億円)}\end{aligned}$$

年間の総発電量は以下の式で計算できる。

$$\begin{aligned}\text{総発電量} &= \text{発電力 (kW)} \times \text{時間 (h)} \times \text{稼働率} \\ &= 4.4 \times 10^6 \text{ (kW)} \times 8760 \text{ (h)} \times 0.7 \\ &= 2.7 \times 10^{10} \text{ (kWh)}\end{aligned}$$

年間の総経費は以下の式で計算できる。

$$\begin{aligned}\text{総経費} &= \text{年経費} + \text{燃料費} \\ &= \text{建設費} \times \text{年平均経費率} + \text{総経費} \times 0.2 \\ &= \text{建設費} \times 0.19 + \text{総経費} \times 0.2\end{aligned}$$

したがって

$$\begin{aligned}\text{総経費} &= (\text{建設費} \times 0.19) / 0.8 \\ &= \{1.364 \times 10^{12} \text{ (円)} \times 0.19\} / 0.8 \\ &= 3.24 \times 10^{11} \text{ (円)}\end{aligned}$$

発電原価は以下の式で計算できる。

$$\begin{aligned}\text{発電原価} &= \text{総経費} / \text{総発電量} \\ &= 3.24 \times 10^{11} \text{ (円)} / 2.7 \times 10^{10} \text{ (kWh)} \\ &= 12 \text{ (円/kWh)}\end{aligned}$$

9.3 ガラスの海での試算

1.2 の原子力発電の発電原価試算の考え方に基づき、ガラスの海において原子力発電と同等の発電原価を確保するとした場合の、ガラスの海の建設費を試算する。

ガラスの海の発電規模は 5GW とする。

多数のサブアレイから構成するシステムとすることで、稼働率をかなり高めることができると考えられるため、稼働率は 95% とする。

太陽エネルギーを利用するため燃料費は不要となる。

稼働部分が少ないシステムであること、また地球上と違い空気・水がないためそれらによる腐食等の影響が無いことなどから、耐用年数は地球上の設備よりかなり長くなると考えられる。表 9.1-2 に示したように、地球上の設備では水力発電所がもっとも耐用年数が長く、従って平均経費率も小さく (12~14%) になっているが、これを上回る平均経費率を達成できるものとする。

以上のことから、検討の前提条件を以下のように設定した。

<前提条件>

発電規模	5×10 ⁶ kW (110万kW級 4基)
稼働率	95%
発電原価に占める	0%
燃料費の割合	
年平均経費率	10%
発電原価	12円/kWh

年間の総発電量は以下の式で計算できる。

$$\begin{aligned}\text{総発電量} &= \text{発電力 (kW)} \times \text{時間 (h)} \times \text{稼働率} \\ &= 5 \times 10^6 \text{ (kW)} \times 8760 \text{ (h)} \times 0.95 \\ &= 4.16 \times 10^{10} \text{ (kWh)}\end{aligned}$$

総経費は以下の式で計算できる。

$$\begin{aligned}\text{総経費} &= \text{発電原価} \times \text{総発電量} \\ &= 12 \text{ (円/kWh)} \times 4.16 \times 10^{10} \text{ (kWh)} \\ &= 4.99 \times 10^{11} \text{ (円)}\end{aligned}$$

建設費は以下の式で計算できる。

$$\text{建設費} = (\text{総経費} - \text{燃料費}) / \text{年平均経費率}$$

$$\begin{aligned}
 &= 4.99 \times 10^{11} \text{ (円)} \quad / \quad 0.1 \\
 &= 4.99 \times 10^{12} \text{ (円)}
 \end{aligned}$$

建設費単価は、以下の式で計算できる。

$$\begin{aligned}
 \text{建設費単価 (円/kW)} &= \text{建設費 (円)} \quad / \quad \text{発電力 (kW)} \\
 &= 4.99 \times 10^{12} \text{ (円)} \quad / \quad 5 \times 10^6 \text{ (kW)} \\
 &= 998 \times 10^3 \text{ (円)} \\
 &= 998,000 \text{ (円)}
 \end{aligned}$$

原子力発電における建設費単価が310,000円であるから、ガラスの海発電システムが原子力発電とほぼ同様の発電原価を確保するためには、ガラスの海および地上系の設備建設費を、原子力発電のほぼ3倍程度とする必要がある。

9.4 SPSの発電原価試算

同様の方法でSPSの発電原価試算を行う。

計算には次の前提条件を用いる。年平均経費率はガラスの海相当とした。

<前提条件>

発電規模	5×10^6 kW
稼働率	98.4%
耐用年数	30年
発電原価に占める	0%
燃料費の割合	
年平均経費率	10%
輸送単価	12,500 \$/kg (1,250,000円/kg 1\$=100円として)

建設費は、以下の式で計算できる。

$$\begin{aligned}\text{建設費 (円)} &= \text{SPS建設費(除く輸送関係)} + \text{輸送単価} \times \text{SPS重量} \\ &= 2.67 \times 10^{12} \text{ (円)} + 1.25 \times 10^6 \text{ (円/kg)} \times 5.1 \times 10^7 \text{ (kg)} \\ &= 6.64 \times 10^{13} \text{ (円)}\end{aligned}$$

年間の総発電量は以下の式で計算できる。

$$\begin{aligned}\text{総発電量} &= \text{発電力 (kW)} \times \text{時間 (h)} \times \text{稼働率} \\ &= 5 \times 10^6 \text{ (kW)} \times 8760 \text{ (h)} \times 0.98 \\ &= 4.29 \times 10^{10} \text{ (kWh)}\end{aligned}$$

年間の総経費は以下の式で計算できる。

$$\begin{aligned}\text{総経費} &= \text{年経費} + \text{燃料費} \\ &= \text{建設費} \times \text{年平均経費率} + \text{総経費} \times 0.0 \\ &= \text{建設費} \times 0.10 + \text{総経費} \times 0.0 \\ &= 6.64 \times 10^{13} \text{ (円)} \times 0.10 \\ &= 6.64 \times 10^{12} \text{ (円)}\end{aligned}$$

以上のようにSPSの発電原価は原子力発電の13倍程度になると考えられる。

SPSでは建設費において輸送費がかなりの割合を占める。将来的に輸送費のコストを小さくすることができれば、発電の費用も低下させることが可能である。

ガラスの海においても月までの輸送費は必要であるが、月面上で資材調達を行うことが

できる点がSPSとは異なる。ガラスの海の構築のためには、いかに輸送分を減らすことができるか、そしていかに現地調達率を高めるかが、成立性における重要なポイントであると考ええる。

以上で用いたSPSに関する前提条件は、三菱総研が平成6年に「宇宙インフラストラクチャの波及効果に関する調査」としてNASDAに報告した内容から引用した。

10. 今後の課題と結論

10.1 マイクロ波無線送電の研究課題

今回の報告書は月からの無線送電に関し初歩的な提案にすぎず、実現のためには地上での技術開発や宇宙での実証実験など多くの研究課題がある。以下に箇条書きに研究課題をまとめた。なお、下線は宇宙実験が必要な項目である。

(1) 送電アンテナの要素技術の開発

1. 周波数の選択 2.45 GHz / 5.8 GHz / レーザー

降雨減衰、電離層通過特性

2. 送電アンテナ素子の開発 月面の条件や増幅器とマッチしたアンテナ素子の開発

3. ビーム走査の制御法

移相器制御 (移相器構成法、位相決定法、受電方向測定法—干渉計)

リトロディレクティブ・アンテナ方式

(パイロット信号周波数、受信アンテナ、回路構成、

電離層の影響)

受電電力分布からの制御

サブ・アレイの寸法

4. 開口面分布 (放射パターン) ガウス分布、テイラー分布

グレイティング・ローブ、サイド・ローブ

5. 超々大型アンテナの実現性 Active Phased Array Antennaとして機能

(3) マイクロ波回路の開発

1. シリコン半導体増幅器の高出力化

2. シリコン半導体増幅器の高効率化

3. 高調波の抑制対策

4. 温度制御 60度以下

5. 月面での製造の実現性 Micro-gravityのMerit

6. 大量生産への適応 MMIC、調整省略化 (ゲイン、位相)

(4) 受電アンテナの開発

1. マイクロ波—DC変換効率の向上 回路構成、受信アンテナ

2. 整流素子の開発 高耐圧ダイオード／電子管の開発

3. 受信方向制御 月と地球の相対位置関係

(5) 発電システムの開発

1. 増幅器との接続方法

電源の安定化、ON/OFF制御 (放射パターン)、一体化

(6) マイクロ波伝搬特性の評価

1. 電離層への影響評価 プラズマ加熱、プラズマ波の励起
2. 大気への影響評価

(7) 環境への影響評価

1. 電磁環境への影響評価 通信、電子機器
2. 生体への影響評価

10.2 宇宙での実証実験

上記の研究開発項目を以下の段階を踏まえた送電実験で性能評価することが実現のためには不可欠と考える。

(1) 地上送電実験

固定点間または飛翔体（飛行船、ヘリコプタ、飛行機）への送電実験により、開発したマイクロ波送受電システムの基本特性を測定し、性能を評価する。

(2) 低軌道衛星実験（群衛星、ロケット実験）

開発した技術の宇宙での評価実験であるとともに、宇宙環境でしか確認できない項目（下線部）の実験が目的である。

① 遠距離による位相制御の性能試験

（地上からのパイロット信号によるマイクロ波ビーム制御性能試験）

② マイクロ波の電離層通過特性の測定

③ マイクロ波の大気通過特性の測定

④ マイクロ波と電離層プラズマとの相互作用の実験

⑤ 通信への影響評価

(3) 月面実験

数個の送電アンテナを月面に設置し、位相制御、月面環境を試験し、マイクロ波送電に必要な技術の評価・実証をおこなう。

10.3 結論

マイクロ波無線送電が本格的に研究されてからまだ日も浅く、最長でも1 kmの送電実験(Goldstone)しか実施されていない。また、これから研究しなくてはならない課題も多々ある。しかしながら、マイクロ波無線送電は原理的に問題なく、多々ある研究課題も現在の技術レベルで十分に実現できるものである。月からの無線送電を実現するためには、一步ごとに開発・実証実験を繰り返し進むことが肝要と考える。また、マイクロ波無線送電は、大規模な宇宙送電のみならず、地上にあってもマイクロアクチュエータや管路ロボットへの送電、成層圏無線中継プラットフォーム、離島への送電など多くの応用がある。これらの応用を実現しながらマイクロ波無線送電の技術レベルを高めていくことが、月からの無線送電の実現へとつながる道と考える。

宇宙開発事業団技術報告 NASDA-TMR-950011

発行日 1995年8月31日

編集・発行 宇宙開発事業団

〒105-60

東京都港区浜松町2丁目4番1号

世界貿易センタービル22階

TEL 03-5470-4111 (代表)

©1995 NASDA

無断複写、転載を禁ずる

<本資料に関するお問い合わせ先>

宇宙開発事業団調査国際部技術情報課

TEL 03-5470-4276 ~ 4279

