

極限環境閉鎖系における
コージェネレーションシステムの検討

1991年8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)

極限環境閉鎖系における コージェネレーションシステムの検討

野村紀男*，羽賀一男**，大坪 章**

要 旨

高温可搬型液体金属冷却炉システムは、通常の地上環境とは異なる極限環境下での閉鎖系へのエネルギー供給源（300kWe用 SPECTRA-L，2MWe用 LUBAR）としても期待される。月面等の極限環境閉鎖系のエネルギーの供給形態としては、これまでは専ら電力だけの利用を想定してきたが、発生したエネルギーの有効利用の面から見ると、用途によっては熱そのものを併用する方が有利な場合も考えられる。そこで、原子炉を熱源とする月面基地におけるエネルギーシステムについて、発生した熱の直接利用を組み込んだ場合の利害の得失を検討した。

この検討において、①全電化方式でエネルギーシステムを作りあげた場合と、②熱利用が可能な項目については積極的に原子炉の排熱利用を行ったコージェネレーションシステムの場合、の2つに分けて、熱・電気のエネルギーフローを示すエネルギーシステム図を作成した。コージェネレーションシステムでは、熱移送媒体として化学反応を利用（メタンガスと水蒸気の混合ガスを核燃により分解し、水素と一酸化炭素を生成する。それをパイプで輸送して、消費地でその逆反応により熱を取り出す。）した、極限環境に相応しいものを提案した。

検討の結果、システムの重量を評価軸とした場合、基地の拡大によってエネルギー需要が1MWe程度になると、排熱利用を積極的に行ったコージェネレーションシステムの方が、エネルギー供給を全て電気で賄う全電化と同等あるいはそれ以上に有効となる可能性があることがわかった。

最後に、コージェネレーションシステムによってエネルギーの有効利用とシステムの軽量化の両方を達成するために必要な今後の技術的課題を明らかにした。

* : 大洗工学センター 安全管理部 放射線管理課

** : 大洗工学センター 技術開発部 フロンティア技術開発室

Study of Co-Generation System in Sever Environment

Norio NOMURA* Kazuo HAGA** Akira OTSUBO**

ABSTRACT

High-temperature transportable liquid-metal-cooled fast reactors are also expected as an energy source in sever environments such as lunar base. Only electricity has been considered as the energy supply system to the lunar base, however, both use of electricity and heat power(co-generation system) may offer better effective use of energy than only the electrification system is considered. In this report, the advantage of co-generation system based on a transportable reactor examined to a usage in a lunar base.

Two energy system diagrams on heat and electricity flows have been compared from the view point of total weight. One is the case of all electrification. The other (co-generation system) is the case in which the exhaust heat from the nuclear reactor is actively utilized to reduce the demand of electricity. A heat transport technique using a chemical process as the heat media is adapted for the latter. In the chemical system, hydrogen and carbon monoxide are formed from methane and steam by adding nuclear heat. Then the gases are transported through a pipe and changes to the original materials generating heat at the consuming spot.

As the result of present study, it is clarified that the co-generation system has a possibility to have an advantage over the case of all electrification in total weight of system when the energy demand increase to MWe level.

Finally, future R&D items were mentioned to reduce the weight of this co-generation system and to increase the effectively.

* : Radiation Control Section, Health and Safety Division,
Oarai Engineering Center, PNC

** : Frontier Technology Development Section,
Technology Development Division,
Oarai Engineering Center, PNC

目 次

第1章	はじめに	1
第2章	既存研究の調査	2
2.1	極限環境条件の整理	2
2.2	極限環境下での使用エネルギー源	4
2.3	提案されている基地の規模	7
2.4	地上におけるコジェネレーションシステム	11
2.5	熱移送技術の検討	23
第3章	極限環境におけるエネルギー需要の検討	28
3.1	極限環境におけるエネルギー消費項目	28
3.2	エネルギー需要量の設定	29
第4章	極限環境におけるエネルギーシステムの設定	31
4.1	コジェネレーションシステムのエネルギー収支	31
4.2	需要量に基づくシステムの設定	37
4.3	システムの評価	43
第5章	今後の技術的課題	47
5.1	エネルギーシステム全般の課題	47
5.2	コジェネレーションシステムの課題	48
第6章	おわりに	49
	謝 辞	49
	参考文献	50
APPENDIX		
1.	ガスタービンの熱効率	53
2.	ディーゼルエンジンの熱効率	56
3.	排熱回収システムの回収機器例	58
4.	月面における資源利用	63

目 次

表2.1	宇宙用エネルギー供給技術の概要と比較	6
表2.2	月面基地の各フェーズの活動内容	10
表2.3	コージェネレーションシステムの主要構成機器	16
表2.4	排熱回収方法	22
表2.5	熱移送媒体の特性比較	24
表3.1	全電化の場合のエネルギー需要量	30
表3.2	フェーズⅢにおける酸素製造工程	30
表4.1	コージェネ方式を利用した場合のエネルギー需要量	34
表4.2	コージェネ型と全電化型の総重量の比較（フェーズⅡ）	45
表4.3	コージェネ型と全電化型の総重量の比較（フェーズⅢ）	46

目 次

図2.1	初期月面基地の全体概念	9
図2.2	従来システムとコジェネレーションシステムのエネルギーフロー	13
図2.3	蒸気タービンシステム例	17
図2.4	ガスタービンシステム例	18
図2.5	ディーゼルエンジンシステム例	20
図2.6	NH ₃ -H ₂ O混合物による地域熱輸送の系統図	27
図2.7	メタン合成ガスによる地域熱輸送の系統図	27
図4.1	全電化式のエネルギー収支	32
図4.2	コジェネレーション方式のエネルギー収支	32
図4.3	フェーズIIにおけるエネルギーの流れ	35
図4.4	フェーズIIIにおけるエネルギーの流れ	36
図4.5(a)	全電化方式によるエネルギー供給システム(フェーズII)	39
図4.5(b)	全電化方式によるエネルギー供給システム(フェーズIII)	40
図4.6(a)	コジェネ利用エネルギー供給システム(フェーズII)	41
図4.6(b)	コジェネ利用エネルギー供給システム(フェーズIII)	42

第1章 はじめに

フロンティア研究の中で提案されている高温可搬型液体金属冷却炉システムは、通常の地上環境とは異なる極限環境下での閉鎖系へのエネルギー供給源（300kWe用 SPECTRA-L、2MWe用 LUBAR）としても期待される。月面等の極限環境閉鎖系のエネルギーの供給形態としては、これまでは専ら電力としての利用だけを検討してきたが、発生したエネルギーの有効利用の点からは、電力以外に熱そのものを用いる場合が有利となる場合も想定される。これは、原子炉で発生した熱を電力に変換する場合にはある効率があり、最終的に熱として利用するような用途には、初めから熱を供給した方が得策であるためである。そこで、原子炉を熱源とする月面基地におけるエネルギーシステムを体系的に捉え、一部熱の形で利用することの利害の得失を検討した。

検討では、まず極限環境閉鎖系における最適なエネルギーシステムを設定するため、極限環境（月面）の特徴を整理し、その中で使用されるエネルギーの概要を既存の研究から把握するとともに、特に電気エネルギーと熱エネルギーに着目してその併用技術を調査した。その結果をもとに、各種エネルギーの効果的な利用方法と、それらを併用した場合の最適なシステムを考案した。ここで言う最適とは、現状では月面基地資材のコストの大半が輸送費であることから、全システムの重量が軽量であることとした。

最後に、このシステムの実現に要求される技術的な課題の抽出を行った。

第2章 既存研究の調査

極限環境として挙げられるものには、地球上では砂漠、海中、極地などがあるが、最も厳しい環境は、①無大気、②長期間太陽光無し、が条件として加わる。このような環境は、宇宙空間あるいは月などの天体が当てはまる。従って、本調査では最も苛酷な環境条件の1つと考えられる月に焦点を絞って、その環境を整理し、そこで使用されるであろうエネルギーについて、国内外の研究論文・文献を中心に調査した。

2.1 極限環境条件の整理

想定する月面環境¹⁾については先に実施した調査を基に環境条件をまとめた。なお、月と地球を比較すると、以下の違いがある。

	月	地球	月：地球
半径 (km)	1738	6378 (赤道半径)	1 : 4
質量 (g)	7.348×10^{25}	5.974×10^{27}	1 : 80

(1) 月の地形²⁾

月の表面は、海・高地・山脈の3つに大別できる。海は比較的平坦で、一般には月の平均水準面よりも低く、主に月の北半球および表側（地球に向かっている側）に多い。高地は海よりも高い位置にあり、クレーターが多く存在している。山脈はその周辺地形に比べて急激に高くなったところで、海の周辺に多い。

(2) 月の地層^{3), 4)}

月は表層（厚さ：数m～数十m）、地殻（60～65km）、マントル（約1000km）、核（直径1200～1800km）からなっている。

(3) 月の表層地質^{4), 5), 6), 7)}

月表面は「レゴリス」と呼ばれる砂状の土砂で覆われており、アルミニウム、カルシウム、珪素などが酸化物の形で多く含まれている。レゴリスの平均粒径は0.04～0.13mmで、土を構成する粒子の大きさが小さいものから大きいものまで万遍なく含まれている。平均密度は1.4～1.9g/cm³で、乱した状態での内部摩擦角（土の剪断強さ

を示す要素の1つである摩擦抵抗を決定する角度)は 27° である。また、真空下の非常に乾燥した状態に置かれているため、熱伝導率は極めて低く、地球上の平均的な地質(未凍結の乾燥状態)の10分の1以下の $9\sim 13\text{mW/m}\cdot\text{K}$ である。

(4) 月震^{3), 8)}

年間に約3000回発生するが、マグニチュード2~3の小規模のものがほとんどであるため、建造物の構造力学上の問題は生じない。ただし、震動の継続時間が長く、初期震動から震動の増幅、沈静化まで十数分間続く。

(5) 温度^{3), 9), 10), 11)}

真空であるために太陽光が直接表面に達し、月の表面温度は夜間の -170°C から昼間の $+120^\circ\text{C}$ まで変化する。しかし、レゴリスの熱伝導率が小さいために、地下1m以深ではこのような表面の温度変化の影響は受けない。アポロ17号の測定結果では、深さ1.2~2.4mの地下温度は $-18\sim -16^\circ\text{C}$ 間で深さに比例して上昇しているが、この上昇は月の内部熱によるものである。

(6) 大気¹²⁾

月には僅かながら大気が存在するが、実質的には真空と呼んでも差支えないほど極めて稀薄で、夜間は 10^{-12}torr 、日中は表面の物質が熱せられてガス化するため 10^{-9}torr となる。

(7) 重力^{3), 10), 13)}

月の重力には、地域によって若干の変動はみられるが、一般には地球の約6分の1で、重力加速度は 162cm/s^2 である。

(8) 放射線^{14), 15), 16)}

月の表面には、太陽のプラズマの大規模な爆発によって発生する「太陽風(太陽フレア)」と、銀河系の中心部から放出される「宇宙線」などの放射線が到達する。その中でも太陽風の放射線量は大きく、月面上での線量当量が4日間で 10Sv (1000rem)という観測結果の報告もある。また、アポロ計画における宇宙飛行士の被曝線量をみると、月面に着陸した11号~17号(着陸しなかった13号は除く)の平均で 5.4mGy (540mrad)であった。なお、アポロ11号~17号の平均宇宙飛行日数は11日間である。

(9) 磁場³⁾

月にも磁場はアポロ計画によって観測されているが、その強さはまちまちであり、15号では 6×10^{-5} ガウス、16号では最大 3.13×10^{-3} ガウスが観測されている。また、月磁気は統一的な磁気分布を持たず、地球のように一定の方向に向いているということもない。

(10) 隕石^{17), 18)}

大気が無いため隕石は飛来速度 (20~40km/s) で衝突する。隕石の規模と飛来角度をみると大きなものほど飛来頻度は少なく、アポロ計画で月から持ち帰られた岩石に見られる微小な孔の数から次のように推定されている¹⁷⁾。

隕石による開孔の直径	1年間に1 m ² に落下する頻度
0.1 (μm)以上	30,000 (個/m ² ・年)
1 "	1,200 "
10 "	300 "
100 "	0.6 "
1,000 "	0.001 "

(11) 地球からの距離¹⁹⁾

月は、地球から約38万km離れている。地球と月の間の輸送を考えた場合、地上から月まで直接到達するロケットは非効率的であり、地上-地球周回低軌道-月周回軌道-月面というように輸送手段を分けて考えるのが一般的である。

2.2 極限環境下での使用エネルギー源

(財)未来工学研究所の主宰する「月面基地と月資源開発研究会」の「月面基地と月資源開発の調査研究中間報告書」⁶⁾に、月面において使用可能なエネルギー源がまとめられている。ここでは、原子力、太陽エネルギー及び燃料電池についてその要約を述べる。

(1) 原子力

原子力は、無酸素状態、少量の燃料で長時間かつ高出力での発電・熱供給に対応できる利点がある。放射性同位元素の崩壊熱を利用した、いわゆるラジオアイソトープ電池も原子力エネルギーの利用の一つといえる。

(2) 太陽エネルギー

太陽エネルギーの利用には、太陽光から光・電気変換素子を用いて直接電力を得る太陽光発電と、太陽熱を利用する太陽熱発電の2方式がある。太陽熱発電はさらに2

つに分類でき、作動流体を加熱してタービンを回転させて発電する方式と、熱・電気変換素子を使う方法がある。このような太陽光発電方式は動的機械の部品が少ないので、長寿命で信頼性も高くすることができる。このため長期の高信頼性を要求されるミッションに適している。一方、太陽熱発電は太陽光発電に比べて高い電気変換効率を有するが、その利点を活かすには大電力システムにならざるを得ず、システムが非常に大きくなるため様々な制約を受けることになる。また、太陽エネルギー利用一般に言えることであるが、太陽光の照射が不可欠であるので、長期間夜が続く月面では主たるエネルギー源とはなりにくい。

(3) 燃料電池

燃料電池には基本的に燃料の補給が必要で、長期間ミッションの一次電源としては不適である。宇宙分野では、電気化学反応を利用した燃料電池、特に燃料補給の問題からアルカリマトリックス型水素-酸素燃料電池が使われている。

(4) 極限環境において適するエネルギー源

表2.1に宇宙用エネルギー供給技術の概要と比較を示す。月のように長期間太陽光のない夜が続く極限環境下では、出力/重量の比から原子炉を熱・電気の一次エネルギー源とすることが最適で、これを主とし、太陽光・太陽熱発電システムを従とする方式が、最も良いと考えられる。

表2.1 宇宙用エネルギー供給技術の概要と比較

方式	原子力発電		太陽熱発電	太陽光発電	
	原子炉	ラジオアイソトープ電源		高剛性パネル方式	フレキシブルパネル方式
特徴	<ul style="list-style-type: none"> 大電力がコンパクトな形で得られるため、一体で運搬できるものも可能であり、建設が比較的簡単 いかなる環境下でも運転可能 	<ul style="list-style-type: none"> 小型で小電力の電源として有効 熱電素子効率が低く、大電力には向かない 米国の惑星探査機などでの使用実績は多い 	<ul style="list-style-type: none"> 太陽電池に比べて変換効率が高い エネルギー蓄積に蓄熱器が使用でき、バッテリーより軽量化できる 頻繁な保守、点検が必要 	<ul style="list-style-type: none"> 受動型で信頼度が高い 人工衛星などで最も使用実績が多い 太陽電池セルの改善によって更に高効率が可能 建設が比較的簡単 日陰時のバッテリー運用がクリティカル 大電力供給では原子力に劣る 	<ul style="list-style-type: none"> 建設が非常に容易 移動可能で、日照時はどこでも発電できる 太陽電池セルの変換効率が低く、大面積が必要 受動型で信頼度が高い 長期暴露での放射線劣化が大きい
技術状況及び実績	<ul style="list-style-type: none"> 米国ではSP-100システムを開発中 ソ連はROMASKA, TOPAZを開発し実用に供している 仏はBRATOの設計研究材料試験を実施中 	<ul style="list-style-type: none"> 米国では、トランジットパイオニアバイキングボイジャーガリレオ(290We)用のものを開発した 	<ul style="list-style-type: none"> 地上用の反射炉は実現している 宇宙ステーション用の発電システムとして米国で開発中 我が国ではNAL等が研究・開発を進めている 	<ul style="list-style-type: none"> 基本的には既存技術で対応できる 現在までに打ち上げられた3500機の人工衛星の中の9割以上で実績を持っている 	<ul style="list-style-type: none"> 地上用のものとしては製造されている アモルファス太陽電池の高効率化が進められている 宇宙用としての開発検討が進行中 ロールアップ型太陽電池パドルとしてはNASA宇宙望遠鏡、フラットパック型としてはCTS以来多数の実績
技術開発課題	<ul style="list-style-type: none"> 液体金属冷却型原子炉 第1次、第2次冷却ループ技術 凝縮器、ラジエータ(ヒートパイプ) 		<ul style="list-style-type: none"> 太陽熱発電システムの開発目標設定及び検討 各構成ハードウェア技術の開発 	<ul style="list-style-type: none"> 薄型高効率GaAsセル H₂-O₂再生型燃料電池 	<ul style="list-style-type: none"> 太陽電池の高効率化と耐環境性アップ NiH₂バッテリーの高容量化

2.3 提案されている基地の規模

「月面基地と月資源開発研究会」の中間報告書⁶⁾によると、以下のような基地の規模を各発展段階（フェーズ）毎に考えている。なお、各フェーズの活動内容を表2.2にまとめるとめる。

(1) フェーズ1：無人事前探査期

有人月面基地建設に先立って必要なデータを得るための事前調査が主体となるとともに、サンプルリターン及び現地での無人実験などで予測された月資源の分析確認などを行う。月面上でのエネルギーとしては、供給電力20kW程度で太陽光、太陽熱発電システムが考えられる。

(2) フェーズ2：有人非常駐期

要員8人とし、前半では昼のみ滞在するものとするが、後半では夜間も滞在することを想定する有人非常駐の基地であり、地球に面した赤道近傍に位置する。ここでは基地建設に重点が置かれる。建設資材は全て地球から輸送され、生命維持システムを持つ6m×15m程度の居住棟と実験棟、補給カートリッジ、植物棟を持つ基地が構築される。このための供給電力は当初太陽光発電（燃料電池を含む）35kW程度から、最後は300kWの小型原子炉により賄われる。この段階での基地の概略図を図2.1に示す。

(3) フェーズ3：有人常駐初期

フェーズ2を拡張し、要員8人から32人までが昼夜の3ヶ月程度滞在する有人常駐基地である。基地は月面上2～3カ所へ拡張される。各種の科学観測のほか、酸素製造のプラントも稼働する。これらのための電力は原子力発電の追加により10MW程度が供給され、マイクロ波などによる電力輸送システムも使用される。また、月面移動車への電力提供も考えられている。

(4) フェーズ4：有人常駐拡大期

要員64～125人が長期滞在するもので、居住施設は快適化され、大規模工場によって酸素の自給が図られている。また、対隕石の点から地上のみならず地下居住システムも検討される。居住基地はセンターが2～3カ所設けられ、基地形状や規模は多様化する。月面活動が拡大し、本格的に月資源利用が図られ、核融合燃料³He抽出システムの小規模な実験も行われる。電力は、原子力発電によって100MW級の電力が供給

される。

(5) フェーズ5：自給コロニー化

基本的に自給自足であり，閉鎖生態系生命維持システム（CELSS=Closed Ecological Life Support System）は確立されている。月面インフラストラクチャーの整備が図られ，大部分の資材は月面での生産となる。地球並みの³He核融合が原子力発電と併用され，供給電力は100MW以上となる。化学工場や機械工場などが整備され，大型の天文台や簡易な交通システムも成立する。

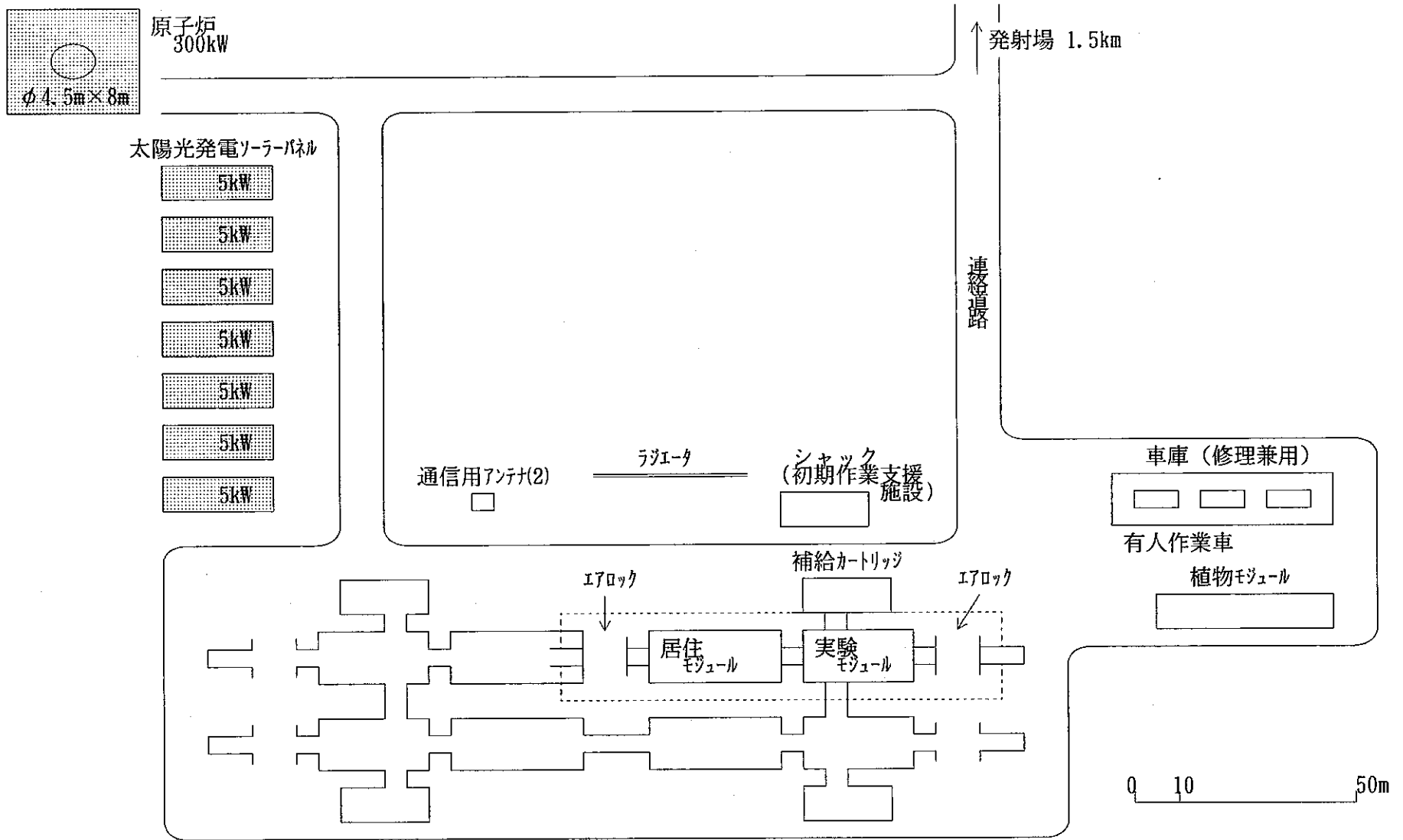


図2.1 初期月面基地の全体概念

表2.2 月面基地の各フェーズの活動内容

	フェーズⅠ (無人事前探査)	フェーズⅡ (有人非常駐)	フェーズⅢ (有人常駐初期)	フェーズⅣ (有人常駐拡大)	フェーズⅤ (自給コロニー)
エネルギー	<ul style="list-style-type: none"> 供給電力 20kW以下 太陽光発電 	<ul style="list-style-type: none"> 供給電力 200kW 以下 RTG, 燃料電池追加 原子力発電 (後半) 	<ul style="list-style-type: none"> 供給電力 10MWまで 原子力発電追加 電力輸送システム 	<ul style="list-style-type: none"> 供給電力 100MW 程度 原子力発電 月資源による電池製造 	<ul style="list-style-type: none"> 供給電力 100MW 以上 原子力発電 ^3He 核融合発電用実験プラント
基地建設	<ul style="list-style-type: none"> 建設のための事前調査 	<ul style="list-style-type: none"> 候補地選定 (1カ所) 地球から建設資材輸送 小型宇宙船の事前投入 (前哨基地) 	<ul style="list-style-type: none"> 2~3カ所 地球から建設資材輸送 フルモジュール 月面組立 インフラ建設 	<ul style="list-style-type: none"> センターが2~3カ所 月面生産資材が寄与 基地形状, 規模多様化 プラント, 工場建設 	<ul style="list-style-type: none"> 月面インフラ整備 大部分の資材は月面生産
生活維持	<ul style="list-style-type: none"> 月面環境, 居住のための事前調査 	<ul style="list-style-type: none"> 宇宙ステーション並みの生命維持システム (地球から補給) 	<ul style="list-style-type: none"> マイクロド 生命維持システム 居住棟 $\sim 30\text{m}^3$/人 	<ul style="list-style-type: none"> 酸素自給 大規模農場 地下居住システム 	<ul style="list-style-type: none"> 自給自足 CELS S 確立
		<ul style="list-style-type: none"> 昼 (前半) 昼夜 (後半) 要員 8人 	<ul style="list-style-type: none"> 夜間も滞在 要員 8~32人 	<ul style="list-style-type: none"> 長期滞在 要員 64~125人 	
資源利用	<ul style="list-style-type: none"> ボリスの分析 (現場分析, サンプル) 資源分布地図の作成 	<ul style="list-style-type: none"> 資源採集地選定(1カ所) 資源パイロットプラント 要素試験 	<ul style="list-style-type: none"> 資源プラント稼働 酸素製造 前期/後期 金属精練実験 	<ul style="list-style-type: none"> 金属精練, 冶金 ^3He 抽出, 精製実験 土壌の高品位利用 	<ul style="list-style-type: none"> ^3He 製造 大量生産, 大量処理 化学工場, 機械工場
科学観測	<ul style="list-style-type: none"> 観測のための月面事前調査 地磁気圏, 赤外線収支観測その他 	<ul style="list-style-type: none"> VLBI ・宇宙天気予報 小型赤外線可視光望遠鏡 赤外線全天サーベイ他 	<ul style="list-style-type: none"> 中型赤外線可視光望遠鏡 ニュートリノ 干渉計 ・サマリウム波 ガンマ線マッピング 他 	<ul style="list-style-type: none"> 大型パラボラ望遠鏡 大型重力波アンテナ 大口径望遠鏡 大型ニュートリノ 	<ul style="list-style-type: none"> 地球並みの大型天文台
		<ul style="list-style-type: none"> 地盤探査 (地震探査) ソル 物理 熱流量 + γ 線調査 水 	<ul style="list-style-type: none"> 地殻構造探査 (地震, 電磁気, 重力) 広域地質調査 熱流量 + γ 線 (拡大) 	<ul style="list-style-type: none"> 地殻構造探査 (ネットワーク 拡大) ・隕石探査 クレーター 内部周辺構造 ボリング 調査 	

2.4 地上におけるコージェネレーションシステム

(1) コージェネレーションシステムの定義

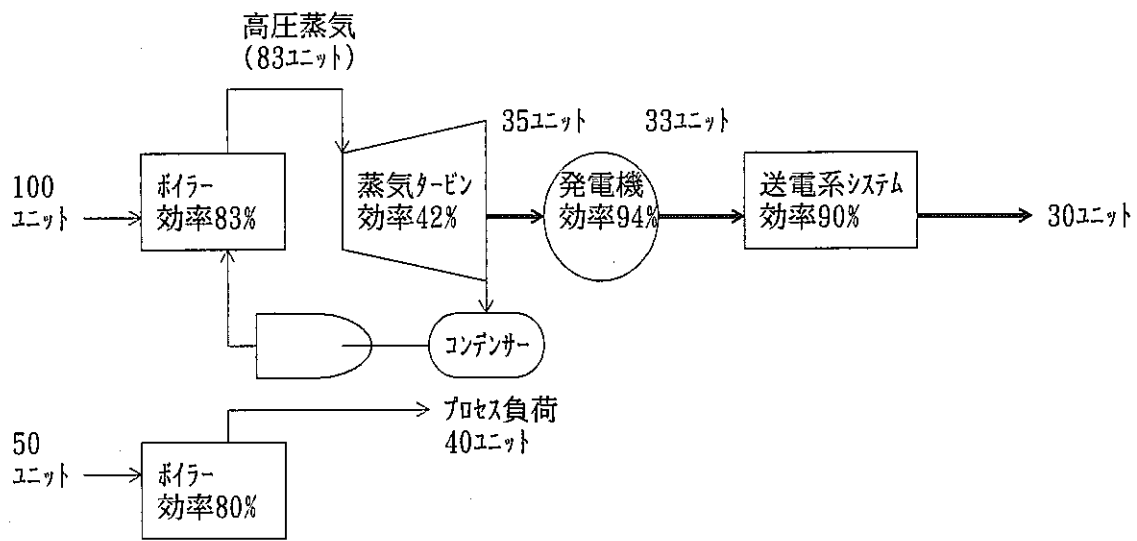
コージェネレーションシステムとは、「原動機としてのディーゼルエンジン、ガソリンエンジン、ガスタービンなどを用いて自家発電し、その排熱によって暖房・給湯、工業用プロセス利用、あるいは吸収式冷凍機を介して冷房を行い、入力エネルギーを効率良く多段的に利用することを目的としたシステム」²⁰⁾と定義できる。

図2.2に代表的なコージェネレーションと従来システムのエネルギーフローを示す²⁰⁾。従来システムでは、発電系と熱利用系の双方に独自のエネルギーを投入している。従って、発電系100、熱利用系50の合計150の入力に対して利用可能なエネルギーは電力（発電系）30、熱（熱利用系）40であった。これに対して、コージェネレーションシステムの場合は、発電系で発生する廃熱を有効利用するため、投入エネルギー100に対して電力が30、熱が40利用できる。従って、総合効率を考えると従来システムではこの場合 $(30+40)/(100+50) = 47\%$ であるのに対して、コージェネレーションシステムでは、 $(30+40)/100 = 70\%$ となる。このような差が生じるのは、従来システムの場合は大規模発電所を想定しており、ここで発生する廃熱を利用しないとの考え方に立っているが、一方のコージェネレーションシステムでは、排熱が有効利用できるということが挙げられる。

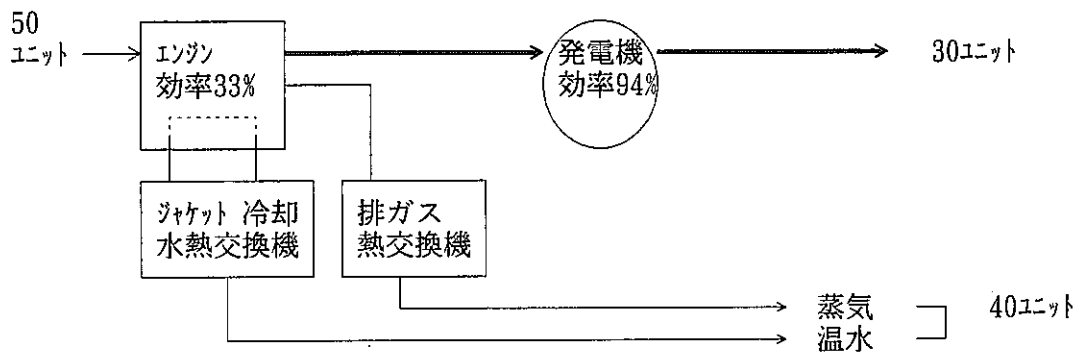
このようなコージェネレーションシステムの特徴をまとめると次のように言うことができる²⁰⁾。

- a. 発電機の排熱（冷却水、排ガス）を利用することによる省エネルギー効果に基づき、省資源に貢献できる。
- b. 省エネルギー効果により、環境汚染総量（熱汚染、浮遊微粒子、SO₂など）の減少が期待できる。
- c. 電力需要ピーク時にも制限されることなく利用でき、また逆に低負荷時には売電を考慮できるので、電力ネットワークに対し安定供給への貢献が可能である。
- d. 契約電力の小量化および省エネルギー効果によってエネルギーコスト低減につながる。

- e. 受変電設備を小規模にし、従来死蔵していた非常用発電機を活用する意味で、設備費の低減ができる。



i) 従来システム例



ii) コージェネレーションシステム

図2.2 従来システムとコージェネレーションシステムのエネルギーフロー

* ボイラー効率は規模の大小によって効率が異なることを考慮した

(2) コージェネレーションシステムの変遷²⁰⁾

敷地内で自家発電を行う方式は前世紀から今世紀初頭にかけて、オンサイトパワーシステムとして米国では一般的であった²¹⁾。この方式は、蒸気駆動レシプロエンジン発電機で直流電力を発生させるもので、交流機器の発達していない当時としては、配電ロス、送電ロスの面から、局所運転には最も効果的な方式であった。その後、交流機器の発達とともに中央発電所が整備され、交流電力が高圧で送電されるようになるとこの方式は稼働費節約などの理由からすたれていった。1920年代から1930年代にかけてのことである。

1960年代に熱回収技術の発達に伴い、再びこの方式が注目され、オンサイトパワーシステムに熱回収を取り入れたオンサイトエネルギーシステムとして普及し始めるようになった。ここで述べるコージェネレーションシステムもこのオンサイトエネルギーシステムと同義であり、システム構成も何ら異なるものではなく、以下、オンサイトエネルギーシステムをコージェネレーションシステムと呼ぶ。また、同様の言葉として、TOTAL ENERGY SYSTEMがあげられるが、これもコージェネレーションシステムとシステム構成は同一である。ただし、コージェネレーションシステムは、発電に熱回収を取り入れた方式であるのに対し、TOTAL ENERGY SYSTEMは、むしろ熱回収に発電を添付させた方式であり、その基本姿勢は異なる。また、日本では、トータルエネルギーシステムという用語は、発電の有無にかかわらず、熱の多段的利用を目的とした方式すべてを指している。

一方、欧州では、19世紀後半からすでに地域規模で熱併給発電が行われており、1980年に建設された西ドイツのポストシュラッセ発電所から1893年に市庁舎に蒸気を供給したのが世界最初とされている。欧州の熱併給発電は一般に蒸気タービン（抽気もしくは抽気復水）を原動機とし、発電規模も 10^4 kWオーダーで、熱供給も都市単位というのに比べ、米国では、ディーゼルエンジン、ガスエンジン、ガスタービンを原動機とし、発電規模は 10^3 kWオーダー、熱供給も自己建物かもしくは団地単位くらいなもので、全体的に小規模である。米国では、現在コージェネレーションシステムをさらに拡大したものとして、MIUSシステム²²⁾の研究開発が進められている。これはModular Integrated Utility Systemの略称で、直訳すれば、単元集約型ユーティ

リティシステムとなる。内容的には、ガスエンジン、またはディーゼルエンジンによる自家発電と、その排熱およびごみ焼却の排熱による冷暖房・給湯システム、さらにはごみの輸送・処理システム、排水の再生利用システムといったものを組み合わせたもので、2,000～3,000戸程度の団地を対象にエネルギーの有効利用による省資源、ならびに各種廃棄物のミニマイズによって環境保全を図ろうというものであり、エネルギーについての自己完結型方式、あるいはクローズドサイクル形態に近いものといえる。

近年、我が国においてもエネルギーの有効利用の観点から、コージェネレーションシステムの普及が顕著である。日本コージェネレーション研究会の調べによれば、1990年3月末日現在における国内民生用のシステム設置箇所は420を超え、発電容量も約180,000kWに達している。産業用に関しても設置箇所は約350、発電容量1,400,000kWとなっている。

現在、コージェネレーション関連技術で開発が活発化しているものとしては、燃料電池が挙げられる。燃料電池は次世代のコージェネレーションの中核機器として注目を集めており、その特徴である①発電効率が高い、②排ガスがクリーンである、③騒音・振動が小さいことによって商品化が望まれている。

(3) コージェネレーションシステムの分類

コージェネレーションシステムの構成機器は、その役割から大きく4つに分けることができる。すなわち、駆動システム、発電システム、熱回収システム、補助熱源システムである。表2.3に各システムの主な構成機器を示す。

表2.3 コージェネレーションシステムの主要構成機器²⁾¹⁾

分 類	構 成 機 器	エ ネ ル ギ ー 形 態
駆動システム	蒸気タービン ガスタービン ディーゼルエンジン ガスエンジン	高圧蒸気 — 動力 ガス・石油類 — 動力 石油類 — 動力 ガス — 動力
発電システム	発 電 機	動 力 — 電力
熱 回 収 シ ス テ ム	熱 交 換 器 " " " 排温水吸収式冷凍機 排ガス吸収式冷凍機	温 水 — 温水 温 水 — 低圧蒸気 排 ガ ス — 温水 排 ガ ス — 低圧蒸気 温 水 — 冷水, 温水 排 ガ ス — 冷水, 温水
補 助 熱 源 シ ス テ ム	電動冷凍機 吸収式冷凍機 直だき吸収式冷凍機 ボ イ ラ ヒートポンプ	電 力 — 冷水 蒸 気 — 冷水 ガス・石油類 — 冷水, 温水 ガス・石油類 — 温水, 蒸気 電 力 — 温水, 冷水

コージェネレーションシステムは、これら各機器を適宜組み合わせることにより、さまざまな形式のシステムが考えられるが、基本的には、駆動システムから次の4つに分類される。

- a. 蒸気タービンシステム
- b. ガスタービンシステム
- c. ディーゼルエンジンシステム
- d. ガスエンジンシステム

以下の(4)~(7)では、これら各システムについて述べる。

(4) 蒸気タービンシステム²⁰⁾

蒸気タービンシステムは、図2.3²³⁾に示すように、ボイラで高圧蒸気を発生させ、排気を冷房・暖房・給湯用の熱源として利用、または、抽気復水タービンの抽気を同様に利用するもので、すでに欧州では熱併給発電プラントとして広く利用され、わが国でも、産業用としてプロセス蒸気に利用する方式として普及している。しかし、民生用建築に導入する場合には、以下の点で不適とされる。

- a. 小規模では発電効率が低く、適さない。
- b. 出力当たりの建設費が高い。
- c. 発停に時間がかかり、自動化が容易でない。
- d. 広いスペースが必要である。
- e. 蒸気発生量が発電電力量に比べて多く、蒸気が余る。

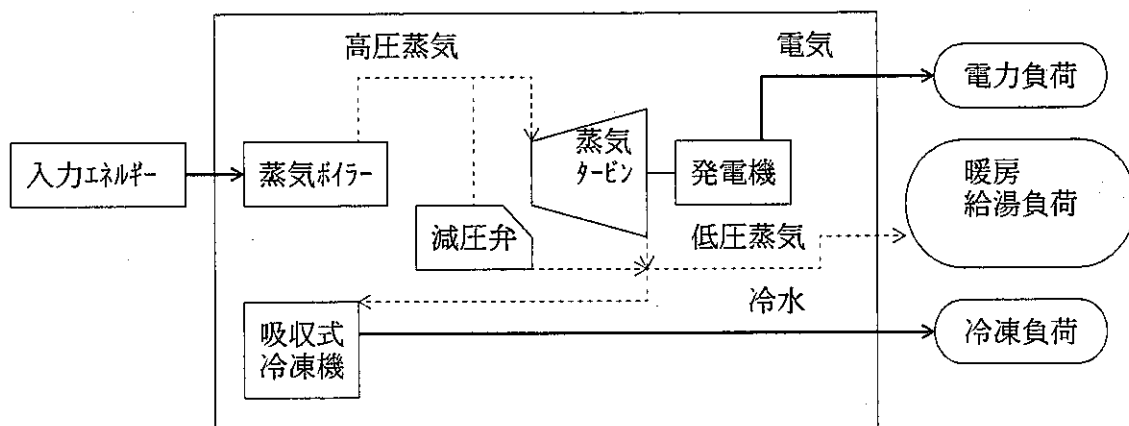


図2.3 蒸気タービンシステム例²³⁾

(5) ガスタービンシステム

ガスタービンシステムは、図2.4²³⁾に示すように、ガス・石油類などの燃料でガスタービンを駆動して発電し、排気を排ガスボイラに導いて、低圧蒸気あるいは温水として回収し、冷房・暖房・給湯需要をまかなうものである。ガスタービン発電の歴史は戦後に始まり、わが国でも近年、非常用発電機として普及が著しい。コージェネレーションシステムにガスタービンを用いる例は、米国では産業分野で多くみられ、蒸気を工場空調、プロセス蒸気に、あるいは排気を直接製品の乾燥に用いるなどの例がある。しかし、このガスタービンは発電効率が低く、排熱量に比べ電気出力が小さく熱電比*の小さい民生用の建物にはあまり適さない（APPENDIX 1 参照）。

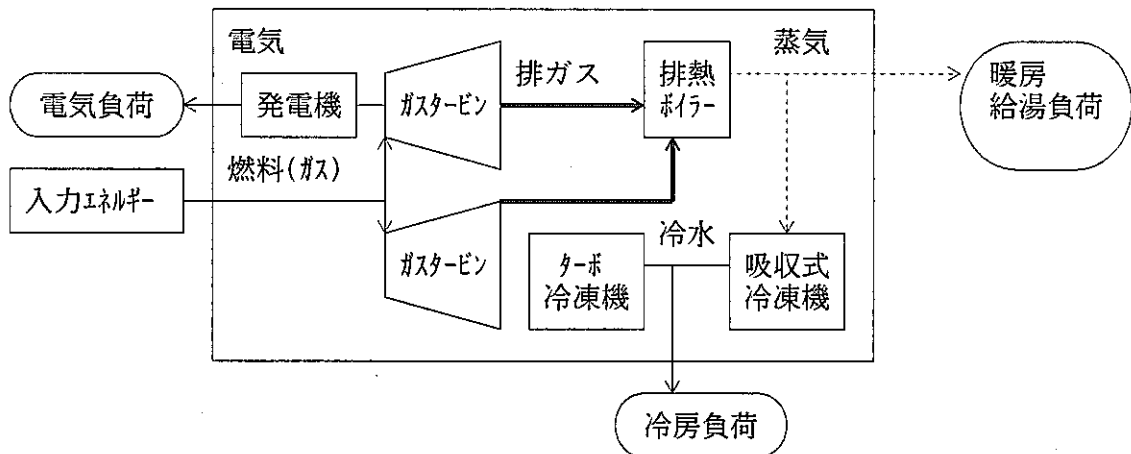


図2.4 ガスタービンシステム例²³⁾

$$*熱電比 = \frac{\text{建物の熱需要}}{\text{建物の電力需要}}$$

(6) ディーゼルエンジンシステム

図2.5にディーゼルエンジンシステムの構成例を示す。エンジンからの排ガスは排ガスボイラ、又は排ガス熱交換器を介して蒸気あるいは温水として、またジャケットの冷却は熱交換器を介して温水として回収され、冷房・暖房・給湯に利用される。

ディーゼル発電機の定格負荷時における熱収支は、入力エネルギーに対して、発電電力量約30～40%、冷却水、潤滑油への放熱約20～30%、排ガスへの放熱約30～40%、残りが発電機ロス、輻射熱等となっており、タービン発電機に比べて発電効率が高くコージェネレーションシステムの発電システムとして適している（APPENDIX 2 参照）。

排ガス温度は全負荷時で400～500℃と高く、熱回収装置で容易に回収可能であるが、排ガス中の亜硫酸ガスによる腐食を避けるため、実際には200℃程度までしか回収できず、排熱量の約半分程度の回収にとどまっている。ただし、特殊な排ガス熱交換器を用いればこの限りではない。排ガス中のSO₂は脱硫装置で比較的容易に除去されるが、400～1,000ppm 含まれるNO₂は処理困難で、メーカー側でも触媒として白金バナジウムを用いる方式、EGR*方式などNO₂低減の技術開発が進められている。ジャケット冷却水への放熱量は、入力エネルギー量の約3割であるが、ほとんどが回収可能である。温度レベルは80～90℃程度であり、暖房・給湯および冷房に充分利用できる温度でもある。冷却水を1～3 kg/cm²・G程度の低圧蒸気として回収する方式もあり、この場合、単効用蒸気吸収式冷凍機等へも使える事から用途も広がるが、日本での実施例はあまり多くはない。

* EGR= Exhaust Gas Recirculation : 排ガス再循環方式

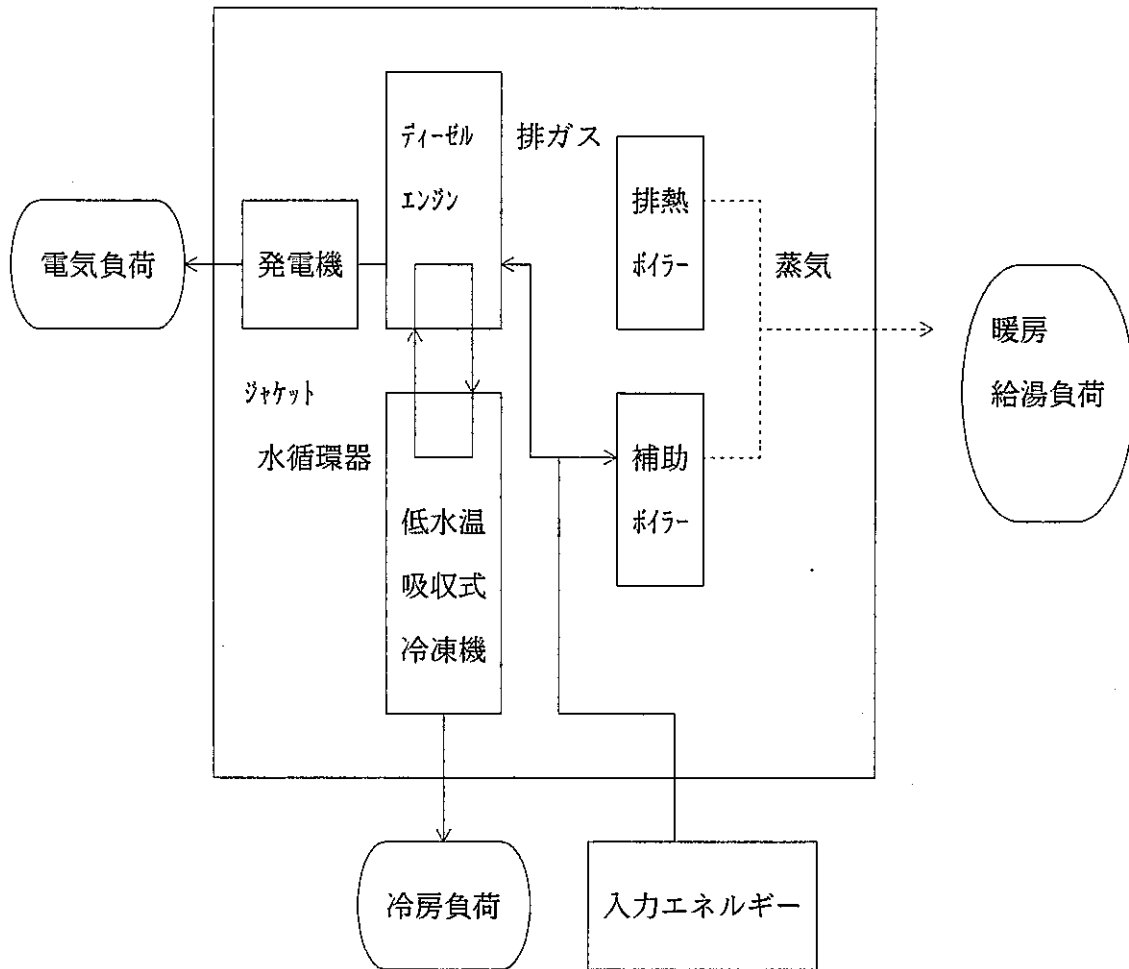


図2.5 ディーゼルエンジンシステム例²⁰⁾

(7) ガスエンジンシステム²⁰⁾

ガスエンジンからの熱回収は、冷却水、排ガスから行われるため、システム構成もディーゼルエンジンシステムとほぼ同様である。ただ、ディーゼルエンジンの排ガスはすすを多く含むため排ガス吸収式冷凍機の運転に利用しづらいのに対し、ガスエンジンの排ガスは比較的クリーンであるため、直接利用できる点で異なっている。

発電効率は30%程度で、ヒートバランスはディーゼルエンジンと異なり、冷却水への放熱が多い。排ガス量はディーゼルエンジンより少ないが、温度レベルが高く600℃前後であり、160℃内外まで回収できるため、利用可能熱量はディーゼルエンジンとほぼ同様である。

燃料には通常、都市ガス13A（低位発熱量 9,929kcal/Nm²）が用いられるが、近年、6B、6Cの都市ガス、あるいは消化ガス（下水、畜産廃棄物消化ガスなど）も利用できるようになってきている。

(8) 排熱回収システム²⁰⁾

排熱は、ガス、蒸気、温水の3つの形態をとり、その質によって表2.4に示す回収方法が考えられる。回収には、熱交換器、排熱利用の吸収式冷温水機、ヒートポンプなどが用いられ、蒸気、温水、冷水に交換される（APPENDIX 3にこれら回収機器の例を示す）。

近年、太陽熱の冷暖房への利用が注目され、排熱利用の吸収式冷温水機の開発が進み、排熱の有効利用率も向上してきている。ここでは、排熱の利用を目的とした吸収式冷温水機について述べる。


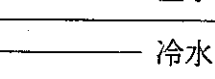
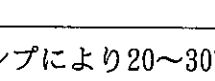
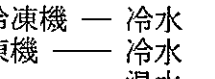
a. 低温水吸収式冷温水機

冷媒に水を、吸収剤にLiBr水溶液を利用し、95～85℃程度の低温水を熱源として、冷水、温水を得ることができる単効用式の吸収式の冷凍機である。標準仕様では、冷水温度（入口13℃→出口8℃）、冷却水温度（入口30℃→出口38℃）、温水温度（入口85℃→出口80℃）である。

b. 排ガス吸収式冷温水機

冷水、温水の取り出し原理は低温水吸収式冷温水機と同様であり、再生器の加熱に排ガスを用いている。排ガスは低温水に比べて高品位なため、排ガス条件によっては二重効用式とすることが可能である。設計条件も低温水式に比べてゆるく、標準仕様で、冷水温度（12℃→7℃）、温水温度（55℃→60℃）、冷却水温度（32℃→37.5℃）である。

表 2. 4 排熱回収方法^{2,4)}

利用方法	廃熱の種類	回 収 方 法
直接利用	高温廃ガス (400 °C以上)	二重効用吸収冷温水機  冷水 温水
	低温廃ガス (300 °C以上)	単効用吸収冷温水機  冷水 温水
	中圧廃蒸気 (4 kg/cm ² G以上)	二重効用吸収冷凍機  冷水 熱交換機  温水
	低圧廃蒸気 (0.5 kg/cm ² G以上)	単効用吸収冷凍機  冷水 熱 交 換 機  温水
	低 温 水 (85°C)	単効用吸収冷凍機  冷水
	低 温 水 (60°C)	吸収式第一種ヒートポンプにより20~30°C 温水を昇温
間接利用	廃 ガ ス	廃熱  二重効用吸収冷凍機  冷水 単効用吸収冷凍機  冷水 ボイラ 熱交換機  温水
	廃 ガ ス	廃熱温水ボイラ  単効用吸収冷凍機  冷水 (注) 温水温度は最低85°C

2.5 熱移送技術の検討

熱移送媒体に関する調査結果を表2.5に示す。(1)原子炉冷却に一般的に用いられる加圧水等の物質の顕潜熱の利用，(2)物質の吸収熱と蒸発熱をサイクル的に利用するアンモニア-水吸収サイクル，(3)物質の化学変化時の反応熱の利用，(4)物質の昇華熱の利用，に分けて以下に特徴を述べる。

(1) 物質の顕潜熱の利用

原子炉冷却に一般的に用いられる加圧水と液体金属（液体ナトリウム・液体リチウム・液体カリウム）について，下降限界温度（凝固温度）と上昇限界温度（沸点あるいは臨界温度）および比熱から，顕熱での単位重量当りの熱移送量と，さらに，液体の蒸発潜熱をも利用する場合の熱移送量を算出した。ここで，物質の顕潜熱を利用して熱輸送を考える場合，比熱，利用温度範囲の広い液体が望ましい。液体リチウムの顕熱時移送能力は，顕熱利用時に1,148kcal/kg，潜熱併用時に1,610kcal/kgと他媒体の潜熱併用時に比べても高い。従って，現在顕潜熱の利用が可能な物質の中では，液体リチウムの顕熱利用が最も効果的である。また，液体金属は高温域での蒸気圧が低く，20MPaもの加圧が必要な水に比べ，所要動力および設備的な面で優位である。ただし，液体金属が化学的に活性が高い点に注意を要する。

(2) 吸収サイクルの利用

アンモニア： NH_3 （冷媒）-水： H_2O （吸収液）混合物を用いた吸収サイクルシステムを図2.6に示す^{25)・26)}。 NH_3 - H_2O 混合物を原子炉の熱で分解して，アンモニアと水とに分離する（分離温度は約115°C）。アンモニアは流体の状態を利用先に搬送される。水も同様に利用先に搬送され，吸収器の中で再度混合され吸収反応を起こす。この反応熱を加熱源として利用し，混合液を原子炉側に返送する。ここで，長距離移送を前提にしているためか，アンモニアを圧縮-凝縮した液体をポンプ搬送している。さらに，原子炉出口の蒸気条件に戻すため，蒸発-圧縮操作を行う。蒸発器において，アンモニアの蒸発に応じて冷却出力も得られる。前述(1)および後述(3)が加熱側での利用で，冷熱源を得るためには別途冷凍機器を必要とすることに対し，このシステムの特徴は同一サイクル内で冷熱源と加熱源が利用できることである。ただし，熱分離に

表2.5 熱移送媒体の特性比較

比較項目 熱移送媒体		上昇限界 温度** (°C) ①	圧 力 (kPa)	下降限界 温度 (°C) ②	比 熱 反応熱 ③	顕熱利用時 の熱移送量 (kcal/kg) ④	蒸発潜熱 (kcal/kg) ⑤	潜熱利用時 の熱移送量 (kcal/kg) ⑥	算 出 根 拠
物質の顕潜 熱利用	加圧水	370	20x10 ³	0	1.27 * ¹	470	133	603	$\left. \begin{aligned} \textcircled{4} &= (\textcircled{1} - \textcircled{2}) \times \textcircled{3} \\ \textcircled{6} &= \textcircled{4} + \textcircled{5} \end{aligned} \right\}$
	液体ナトリウム	880	60	98	0.305 * ¹	238	922	1160	
	液体リチウム	1327	43	179	1.00 * ¹	1148	462	1610	
	液体カリウム	757	73	63	0.192 * ¹	133	517	650	
吸収サイクル	NH ₃ -H ₂ O混合物	132	—	—	—	—	不明	61	文献25, 26による。
	LiBr-H ₂ O混合物	—	—	—	—	—	—	—	
化学変化	CH ₄ +H ₂ O 3H ₂ +CO	—	—	—	206 * ²	—	—	1422	文献27による実証実験値
	C ₂ H ₆ +2H ₂ O 5H ₂ +2CO	—	—	—	—	—	—	—	
	C ₃ H ₈ +3H ₂ O 7H ₂ +3CO	—	—	—	—	—	—	—	
昇華熱 (固体冷媒)	アンモニア(NH ₃)	-77.6	0.01	-123	437.5 * ³	—	—	437.5x10 ³	文献30による。 ヒートパイプ利用(構想段階)
	メタン(CH ₄)	-182.3	0.01	-213	141.9 * ³	—	—	141.9x10 ³	
	アルゴン(Ar)	-189.1	0.01	-225	49 * ³	—	—	49 x10 ³	
	一酸化炭素(CO)	-204.9	0.01	-227	70.6 * ³	—	—	70.6x10 ³	
	炭酸ガス(CO ₂)	-55.5	0.01	-148	135.3 * ³	—	—	135.3x10 ³	

注) 媒体の物性値は文献1)~4), 7), 8)による。

*1: kcal/kg°C, 水は0~370°Cでの平均, 他は上昇温度限界近傍

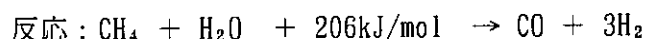
*2: KJ/mol

*3: cal/mg

よる配管腐食の問題が予想される。なお、文献には詳細なデータが記載されていないため、熱移送能力については不明である。システムの基本原理は、空調冷凍分野で古くから使われているアンモニア-水利用吸収式冷凍機サイクルと同一で、サイクルとしての信頼性は高い。ただし、現在ではアンモニアの毒性から、水を冷媒、リチウムブロマイドを吸収液とした吸収冷凍機に切替えられている。

(3) 化学変化の利用

メタン分解およびメタン化の化学変化時のエネルギーを利用するシステムを図2.7に示す^{25), 27), 28), 29)}。



の内、原子炉熱により、熱交換器において、水蒸気中のメタンは450~825°Cの温度範囲で一酸化炭素と水素とに分解される。文献では原子炉はヘリウムを使った高温ガス炉を想定している。一酸化炭素と水素は利用先であるメタン化設備において、熱を放出しつつ逆反応でメタンと水蒸気にもどされる。水蒸気はキャリアガスとしての役割を果たす。文献によれば、4,500時間の実証実験が終了した。この方式によれば、液体リチウムを蒸発潜熱まで利用する場合には及ばないが、液体リチウムの顕熱分のみ利用する場合とほぼ同等の1,422kcal/kgの熱移送能力があるとしている(表2.5)。

このシステムの特徴として、

- ①原料であるメタンが生活廃棄物の発酵により容易に入手可能である、
- ②サイクルの一部を開放システムとすれば、生成ガスが移動用車両の燃料、あるいは後述する余熱放出用固体冷媒材料となる、
- ③余剰分を液体ガスとして貯蔵できる、

等が挙げられる。

(4) 昇華熱の利用

原子炉出力と消費側負荷のアンバランスによる余剰熱は最終的には天空放射により放熱せざるを得ない。ここでは放熱時の冷却源として固体冷媒について検討した。

固体の昇華熱を利用する固体冷媒は、人工衛星に搭載される赤外線観測装置の冷却熱源として1982年夏に我が国のK-10ロケットで使用された。固体冷媒の冷却能力は、表2.5に示すごとく、炭酸ガスの場合で135Mcal/kgと大きく³⁰⁾、放熱側だけの熱移送

能力と考えれば液体金属の 10^3 倍大きい。また、固体冷媒自体の温度が -55.5°C （二酸化炭素の場合）と低く、高温排熱処理には最適である。また、再凝固させるためには -148°C （二酸化炭素の場合）の極低温状態にする必要があるが、月面では天空放熱させれば可能である。

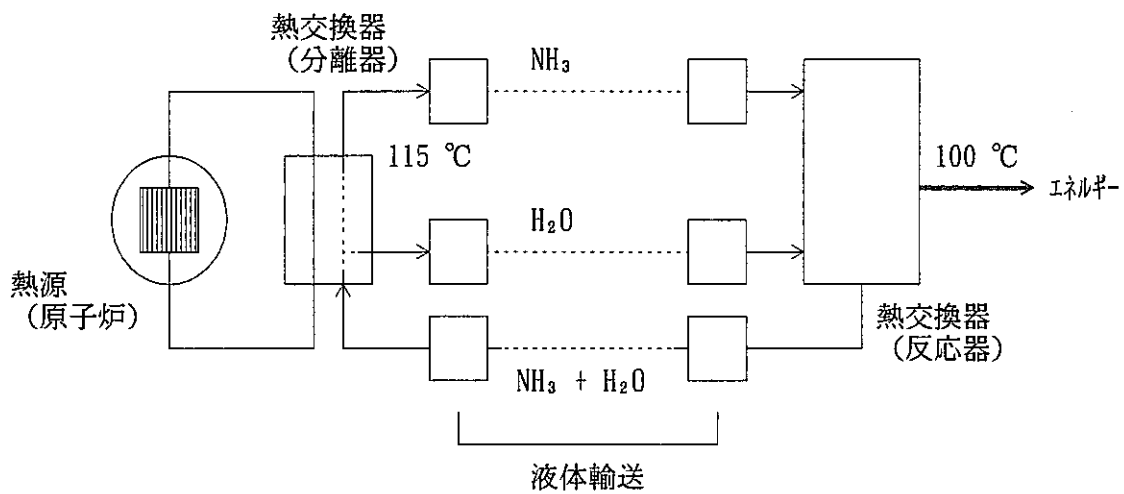


図2.6 NH₃-H₂O混合物による地域熱輸送の系統図

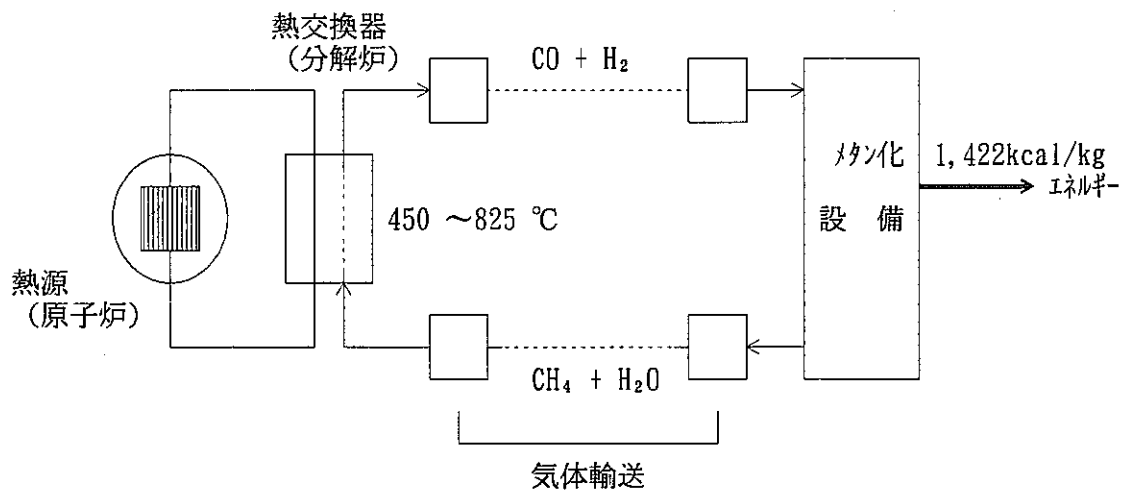


図2.7 メタン合成ガスによる地域熱輸送の系統図

第 3 章 極限環境におけるエネルギー需要の検討

本節では、「月面基地と月資源開発研究会」による月面開発のフェーズⅡ及びフェーズⅢにおいて月面に設置される施設構成とそこでのエネルギー消費項目をまとめるとともに、消費量も概略値を推定した。その際、電気エネルギーを必要とするもの及び熱エネルギーを必要とするものは何かを中心に検討し、その中でも特に熱エネルギーを使う施設・設備に重点を置いた。

3.1 極限環境におけるエネルギー消費項目

ここでは、月面活動の各発展段階（フェーズ）のうち「月面基地と月資源開発の調査研究中間報告書」で区分されているフェーズⅡ，フェーズⅢについて報告書を参照し、エネルギー消費項目を挙げた。これを以下に示す。

- | | |
|-------|---|
| フェーズⅡ | <ul style="list-style-type: none"> i) 居住モジュール用エネルギー ii) 搬送用エネルギー iii) 移動車用エネルギー iv) 科学観測（VLBI* 等） v) 資源パイロットプラント用エネルギー |
| フェーズⅢ | <ul style="list-style-type: none"> i) 酸素製造プラント用エネルギー ii) 前哨基地用エネルギー iii) 居住モジュール用エネルギー iv) 科学観測用エネルギー v) 冶金パイロットプラント用エネルギー vi) セラミックパイロットプラント用エネルギー vii) 植物工場パイロットプラント用エネルギー |

* VLBI (Very Long Baseline Interferometry): 超長基線干渉法

電波放射源を観測する方法の 1 つで、遠く離れた 2 地点において電波源を観測し、2 地点間の位相差から正確な電波源の方位を知る方法。

フェーズⅢでは、冶金、セラミック、植物工場等の次期の大量生産を目指したパイロットプラント群がエネルギー需要として考慮される事がフェーズⅡとの大きな違いである。

3.2 エネルギー需要量の設定

前節で挙げられたエネルギー消費項目について文献調査によってエネルギー需要量を以下の通りに定めた。

基本的には、「月面基地と月資源開発の調査研究中間報告書」を参考とした。例えば、フェーズⅡの居住モジュールでのエネルギー需要は、報告書中の後期活動での原単位である10kW/人を採用した。また、フェーズⅢの居住モジュールのエネルギー需要は、報告書中の473kWをそのまま採用した。その他の項目（搬送用エネルギー、移動車、前哨基地、酸素製造プラント）に関しても同報告書を参照した。

但し、フェーズⅡの科学観測（VLBI等）および資源パイロットプラントに関して、さらにフェーズⅢの各種パイロットプラントに関しては、生産量又は観測施設の規模等によって大きく変動するために、各々で特定する事は困難であったので、それぞれ一括しておおよその数値を定めた。ここで、APPENDIX 4に月面基地と月資源開発の調査研究の中で検討された月の資源利用を示す。フェーズⅡ、フェーズⅢ共に局所的に大きな熱需要がある部分はあまり考えられず、プラントに関してもパイロット施設のため生産量は小さい事が予想されるためエネルギー利用の利便性を考慮してエネルギー需要は全て電気エネルギーとして算出した（表3.1）。なお、フェーズⅢにおける酸素製造プロセスを表3.2に示す。

表3.1 全電化の場合のエネルギー需要量

フェーズⅡ	居住モジュール	10 kW/人×8 人	80 kWe
	搬送用エネルギー		10 kWe
	移動車		4 kWe
	その他 (科学観測 (VLBI等), 資源パイロットプラント)		100 kWe
	合計		≒ 200 kWe
フェーズⅢ (後期)	酸素製造プラント (200t _o /年)		80 kWe
	前哨基地		60 kWe
	移動車		55 kWe
	居住モジュール		473 kWe
	その他 (科学観測 (ニュートリノ等), 植物工場パイロットプラント, 冶金パイロットプラント, セラミックパイロットプラント)		300 kWe
	合計		≒ 1 MWe

表3.2 フェーズⅢにおける酸素製造工程⁷⁾

工 程	内 容	原料他	製品他	使用電力	重量	運転温度	備 考
1. 採掘・選鉱	原料の採掘・選鉱・分級	—	ガス イリチウム	—	—	—	—
2. 還元工程 原料充填 炉過熱 炉冷却	原料・H ₂ 充填 還元炉 H ₂ O 回収 冷却 スラッジ回収	ガス H ₂ H ₂ H ₂	H ₂ O スラッジ	33.9kW	2.5t	850 °C	熱源: 太陽熱、 原子力 プラント
3. 電気分解 工程	固体高分子電解質 水分解	H ₂ O	O ₂ H ₂	9.5kW	1.0t	50 ~100 °C	H ₂ 貯蔵: 吸蔵合金
4. 酸素製造 工程 タンク予冷 精製・液化 ・貯蔵 供給・保冷	ヘリウム冷凍機 ヘリウム冷凍機 ヘリウム冷凍機	O ₂	液化 酸素	12.0kW 12.0kW 12.0kW	3.0t	-193°C	冷却水 触媒 乾燥剤

第4章 極限環境におけるエネルギーシステムの設定

本章では、3.2節での検討をもとに、より効果的なエネルギー供給のあり方を提案する。まず、電気エネルギー及び熱エネルギーの極限環境下でのエネルギーフローを明らかにし、その供給システムを図示することとする。

4.1 コージェネレーションシステムのエネルギー収支

3.2節では全て電力需要としてエネルギー需要を算出したが、本検討でのエネルギー源は、高速炉を使用しているので高温排熱が得られる事が特徴として挙げられ、この熱を有効利用するという観点に立って、再度エネルギー需要の見直しを行い、熱利用が可能な部分には可能な限り熱エネルギーを利用する事を前提として算定を行う事とした。すなわち可能な限りコージェネレーションシステムを採用するとの前提でエネルギー収支の検討を行った。算定の前提条件（仮定）は次の通りとした。

- ①表3.1で示された電気エネルギーはほぼ全量最終的には熱に変換される。
- ②熱に変換されたものは全量、電気式ヒートポンプにて昇温され放熱板にて放出される（但し、酸素製造プラントのプロセス加熱用エネルギーは、高温で使用されるのでこの排熱は直接放熱板で捨てられる）。
- ③上記の電気式ヒートポンプの成績係数（入力電気エネルギーに対する冷却能力の割合）を3.0と仮定する。
- ④排熱を利用した冷却方式は吸収式冷凍サイクルを採用する事とし、この成績係数は1.0と仮定する。
- ⑤電気式の冷却方式（電気式ヒートポンプ）から排熱利用の冷却方式（吸収式冷凍機）への変更は、移動車等の移動可能なもの及び前哨基地など熱輸送距離が長くなるものは除外する。

従って、全電気式でのエネルギー使用量を仮に100とする（図4.1）と、熱利用併用方式（コージェネレーション方式）を採用する項目の場合には、図4.2のようになる。

なお、原子炉の熱効率は15%とし、2次系低温部温度を630℃とする。

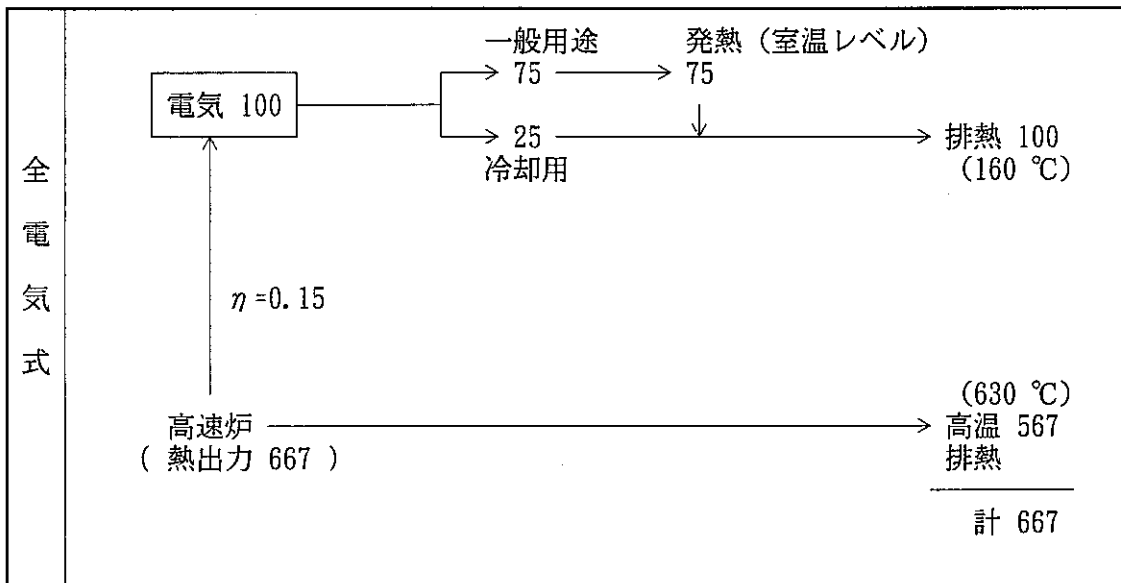


図4.1 全電化式のエネルギー収支

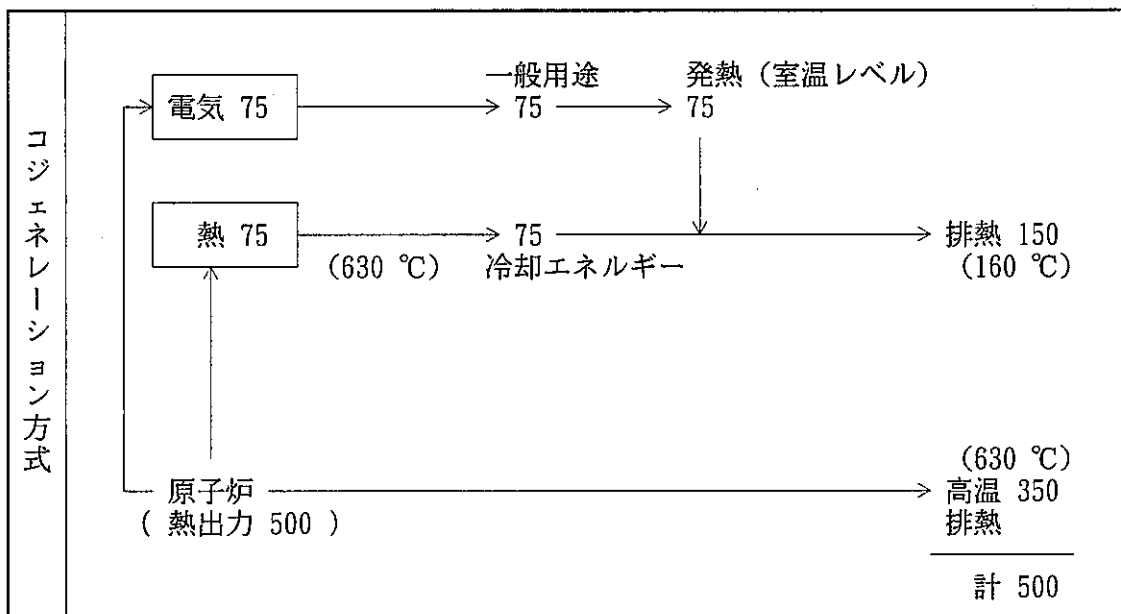


図4.2 コジェネレーション方式のエネルギー収支

以上の前提条件を基に、あらためてコジェネレーション方式のエネルギー需要を算定し直すと表4.1のようになる。

具体的には、フェーズⅡにおいては、居住モジュール、その他（科学観測(VLBI等)、資源パイロットプラント）の項目をコジェネ方式採用対象とした。フェーズⅢにおい

ては、酸素製造プラントの一部及び居住モジュール、その他（科学観測・冶金・セラミック・植物工場パイロットプラント）の項目である。

酸素製造プラントに関しては、動力エネルギー（40kWe）には室温レベルでの排熱があるものとして、これには吸収冷凍サイクルの冷却方式を適用する事とし、加熱用エネルギー（40kWt）は、この排熱が高温で出される事を想定して直接放熱板で捨てることとした。

移動車、搬送動力として供給された電気エネルギーは、最終的には排熱となってしまいが、それぞれ局所的に処理されるものとした。このためコジェネ方式、全電気方式においても差異が生じないため、後節で検討する重量算出等には含めない事とする。

表4.1の表をもとにエネルギーフローの概要を図4.3及び図4.4に示す。

表4.1 コージェネ方式を利用した場合のエネルギー需要量

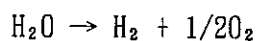
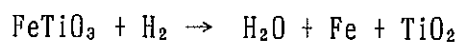
フェーズI	◎居住モジュール 10 kW/人×8人	60 kWe 60 kWt	冷却用エネルギー
	搬送動力等	10 kWe	
	移動車	4 kWe	
	◎その他：科学観測（VLBI等） 資源パイロットプラント	75 kWe 75 kWt	
合計		≒ 150 kWe 135 kWt	
フェーズII (後期)	○酸素製造プラント* (200 トン/年) 動力 加熱	40 kWe 40 kWt	プロセス加熱用
	前哨基地	60 kWe	
	移動車	55 kWe	
	◎居住モジュール	355 kWe 355 kWt	冷却用エネルギー
	◎その他：科学観測（ニュートリノ等） 冶金パイロットプラント セラミックパイロットプラント 植物工場パイロットプラント	225 kWe 225 kWt	
合計		≒ 735 kWe 620 kWt	

◎：コージェネレーション方式採用対象項目

○：一部にコージェネレーション方式採用の項目

*酸素製造プラント：

現在、月で考えられている酸素製造方式のうち有力視されているのは水素還元法であり、これを用いたプラントを想定した。なお、水素還元法は以下のプロセスによる。



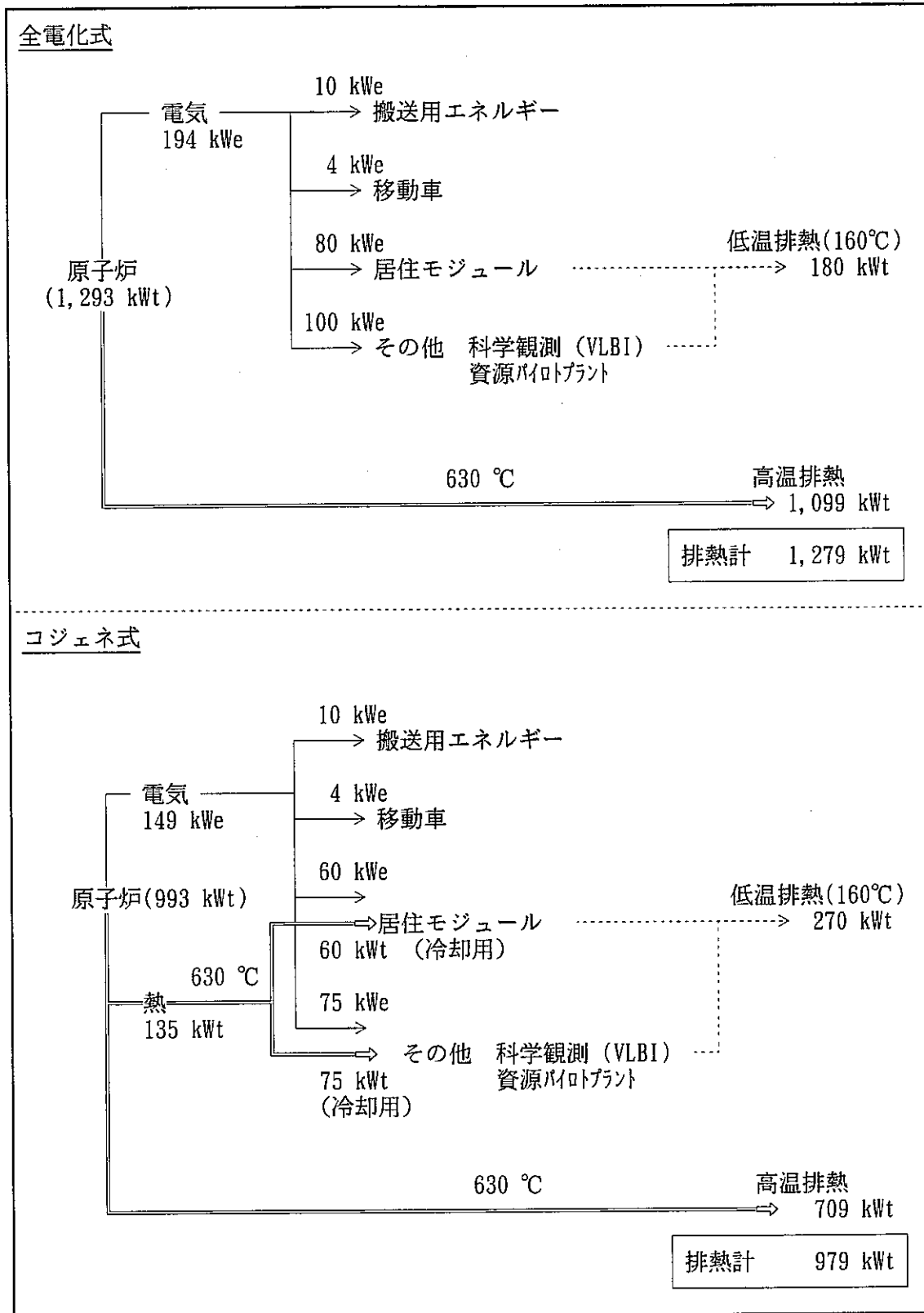


図4.3 フェーズIIにおけるエネルギーの流れ

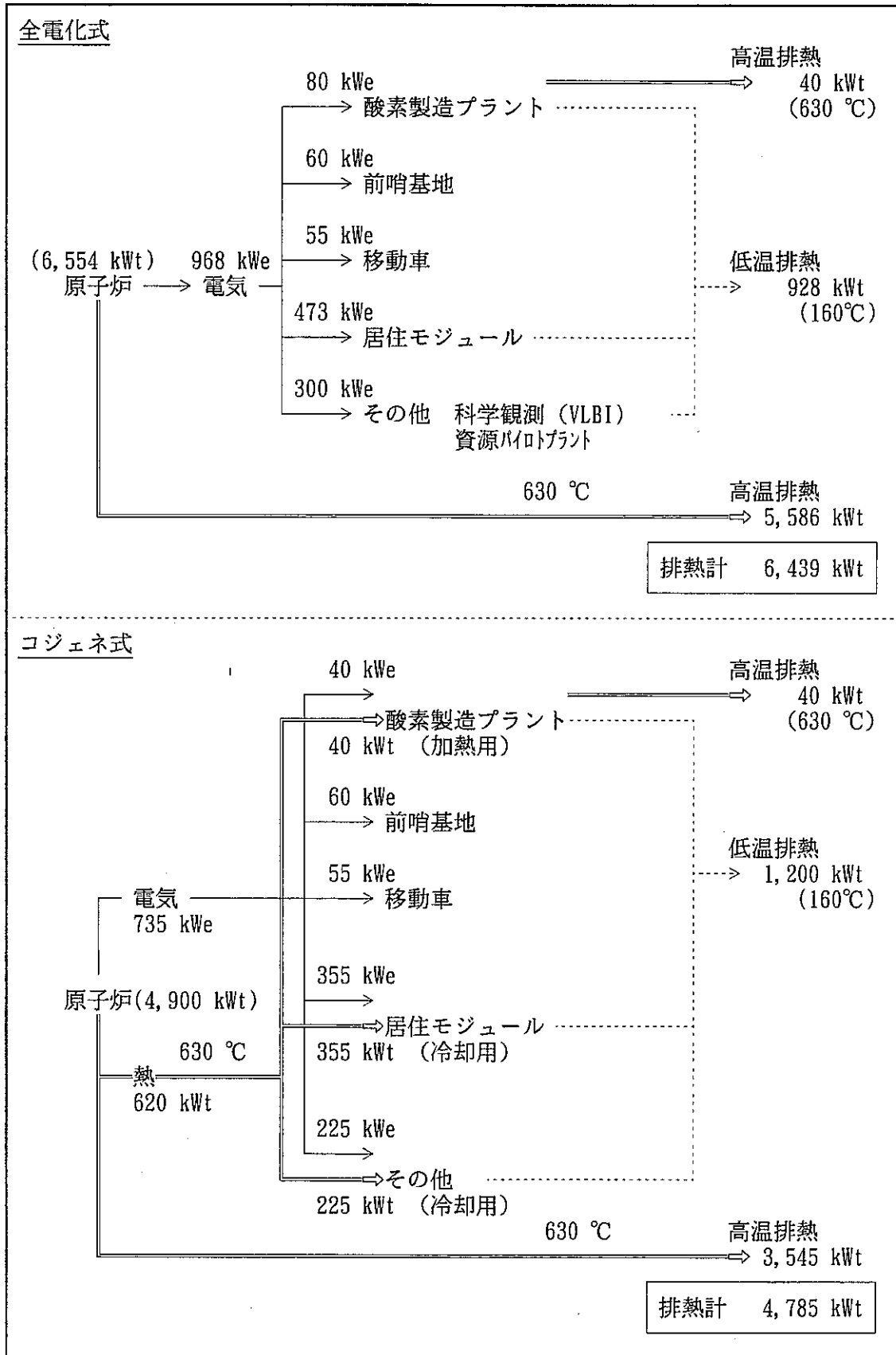


図4.4 フェーズⅢにおけるエネルギーの流れ

4.2 需要量に基づくシステムの設定

(1) 全電化方式によるシステム設定

前節（図4.3及び図4.4）に示したエネルギー需要に全電化方式で対応した場合のシステムを、図4.5の(a)〔フェーズⅡの場合〕及び(b)〔フェーズⅢの場合〕に示す。酸素製造プラント・居住モジュール・実験施設（植物育成、鉱物、その他）へのエネルギー供給を電気で行うが、供給された電気が最終的には熱に変換されるため、各施設に冷却設備を設け、電動ヒートポンプにより冷房し、室内排熱を低温排熱パネルから排出する。また、原子炉の発電排熱は高温排熱パネルにより放射される。なお、前哨基地については、遠隔地となるため電気のみを供給し、独立した冷却システムを設ける。

(2) コージェネ方式によるシステム設定

図4.3及び図4.4に示したエネルギー需要のうち、熱利用が可能な部分には熱を優先的に利用するシステムを図4.6の(a)〔フェーズⅡの場合〕及び(b)〔フェーズⅢの場合〕に示す。電気システムについては全電化方式と同様であり、排熱利用のため付加された原子炉冷却システム・熱回収システム・加熱システム・冷却システムについて以下で述べる。

a. 原子炉冷却システム

原子炉冷却用熱移送媒体を外部に取り出し、排熱の1部を2次側（酸素製造プラント等）に利用、その他を高温排熱システム（SPACTRA-LではナトリウムヒートパイプLUBARではナトリウムループとヒートパイプ）を通しパネルから排出する。熱移送媒体としては、1次系はリチウムであるが、2次系にはカリウムランキンサイクルを想定しているため、カリウムを用いる。

b. 熱回収システム

原子炉排熱を回収し、基地施設熱源として利用する熱回収システムでは、原子炉本体と各施設との距離が約300mと長く、液体カリウム等で温度差を直接利用しようとするれば、原子炉排熱により媒体温度が高温となるため、熱損失が増加すると共に、媒体の比重が大きい（約0.7g/cm³）ことによって配管内の摩擦損失が大となり媒体搬送動力が増大する。また、摩擦損失を抑制するため媒体の配管内流速を低下しようとするれば、配管径が大きくなり配管材重量が増加すると共に、外表面面積が増加するため熱損失も増加する。

2.5節に示した化学変化を利用する方式によれば、二酸化炭素-水素分解炉で発生する気体の温度が40℃前後と低く配管をレゴリス中に埋設すれば熱損失が減少し、さらに、比重も小さいため搬送動力が抑えられる。一方、化学変化を利用する方式ではシステムが複雑化する欠点があるが、液体金属方式に比べ熱損失・搬送動力・重量の面で有利である他に、原材料であるメタンと水が居住プラントからの廃棄物系統により現地生産できること、水素・メタン・二酸化炭素が単独に製造可能で、液体燃料・植物プラント等への転用が図れるという面で優れている。なお、ここでは主材料としてメタンを設定したが、反応熱利用を高効率化するためにはエタン・プロパン等の利用も考えられる。

c. 冷却系統

各施設に供給されたエネルギーは最終的に温度レベルの低い排熱に交換される。排熱を除去し、室内環境を一定の温度レベルに維持するには、排熱の温度レベルより低い温度の媒体で採熱し、室外に放出させる必要がある。室温条件を地上と同一レベルと考えるならば、7℃前後の冷水を室内に循環しファンコイルユニット等で冷房することが最も簡易なシステム構成となる。また、冷水を製造する冷凍機として、吸収冷凍サイクルを用いる。

d. 加熱系統

一酸化炭素と水素からメタンを生成する際の反応熱を吸収冷凍サイクルの加熱源として用いる（液体金属を移送媒体とする）。吸収冷凍サイクル内では、発生器の冷媒・吸収液混合物を加熱することにより冷媒を蒸発分離している。

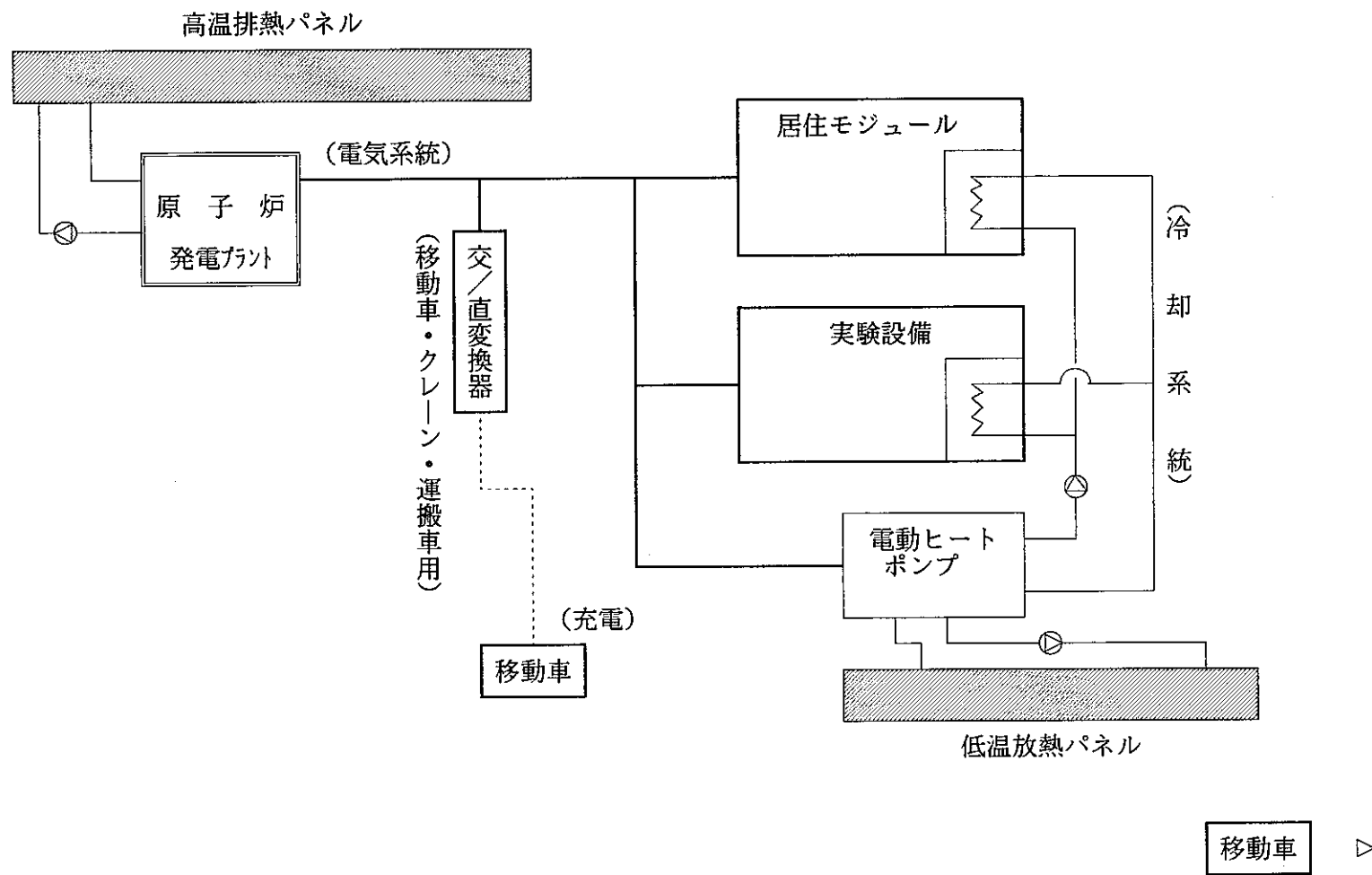


図4.5(a) 全電化方式によるエネルギー供給システム (フェーズII)

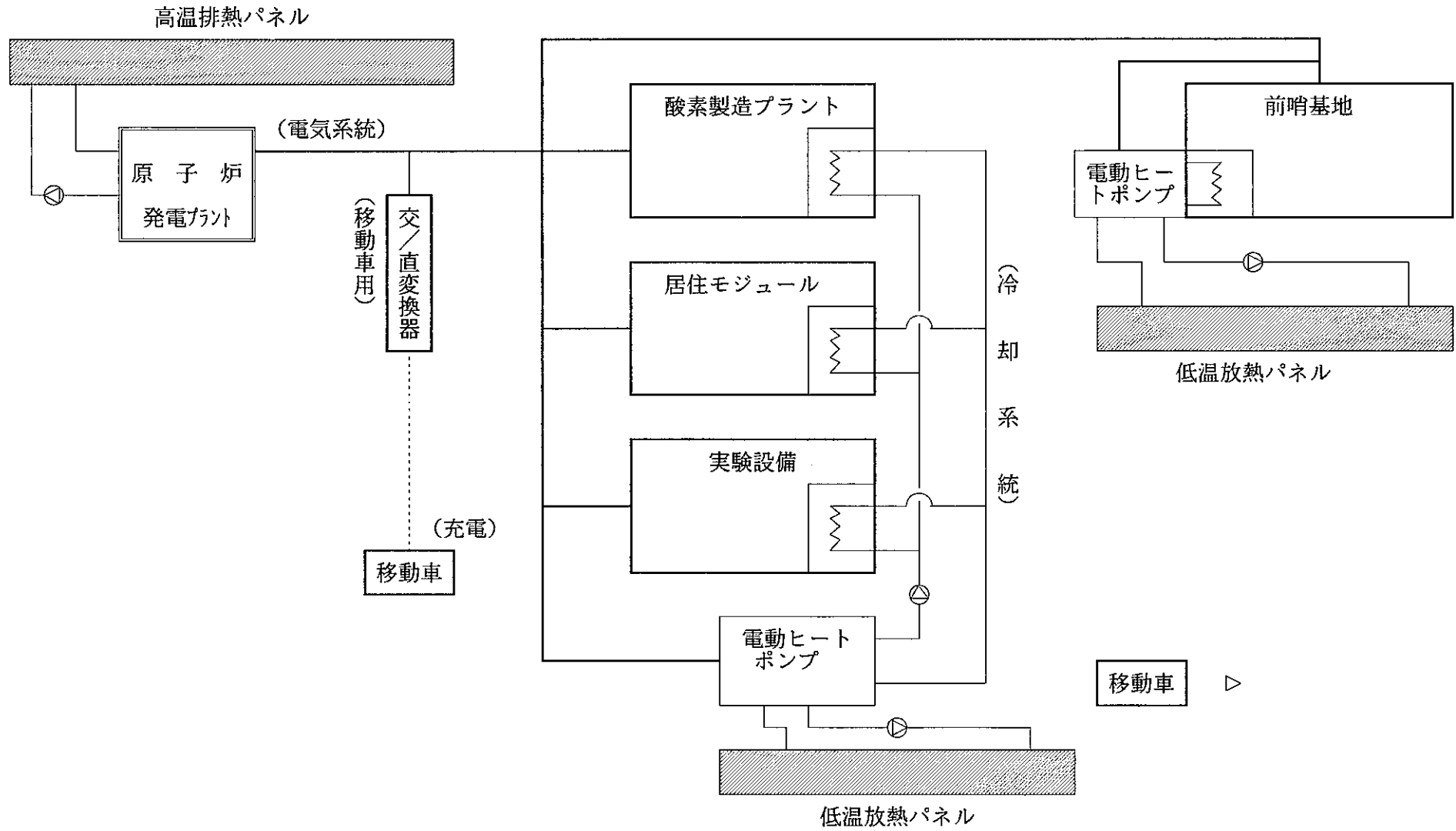


図4.5(b) 全電化方式によるエネルギー供給システム (フェーズⅢ)

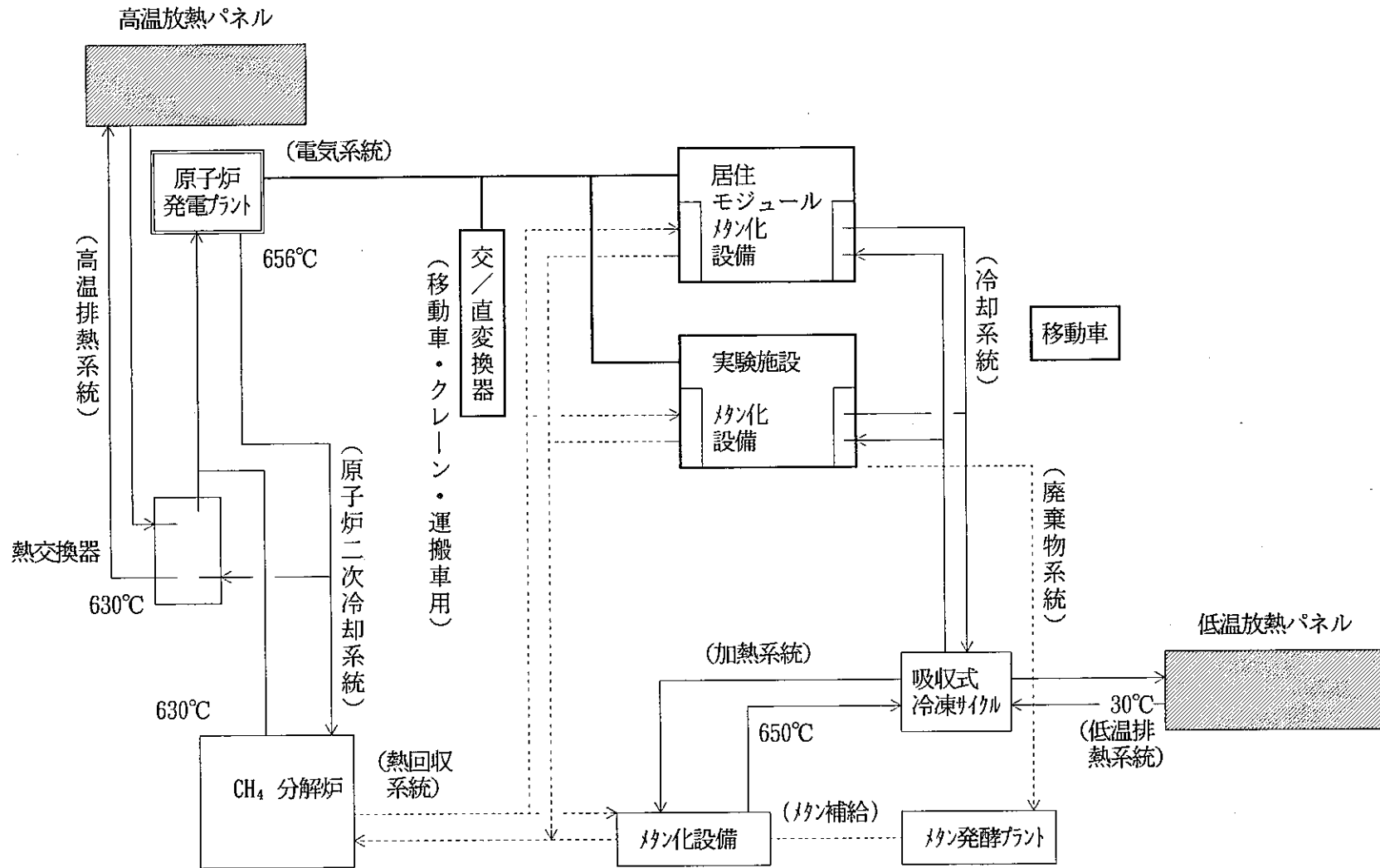


図4.6(a) コジェネ利用エネルギー供給システム (フェーズII)

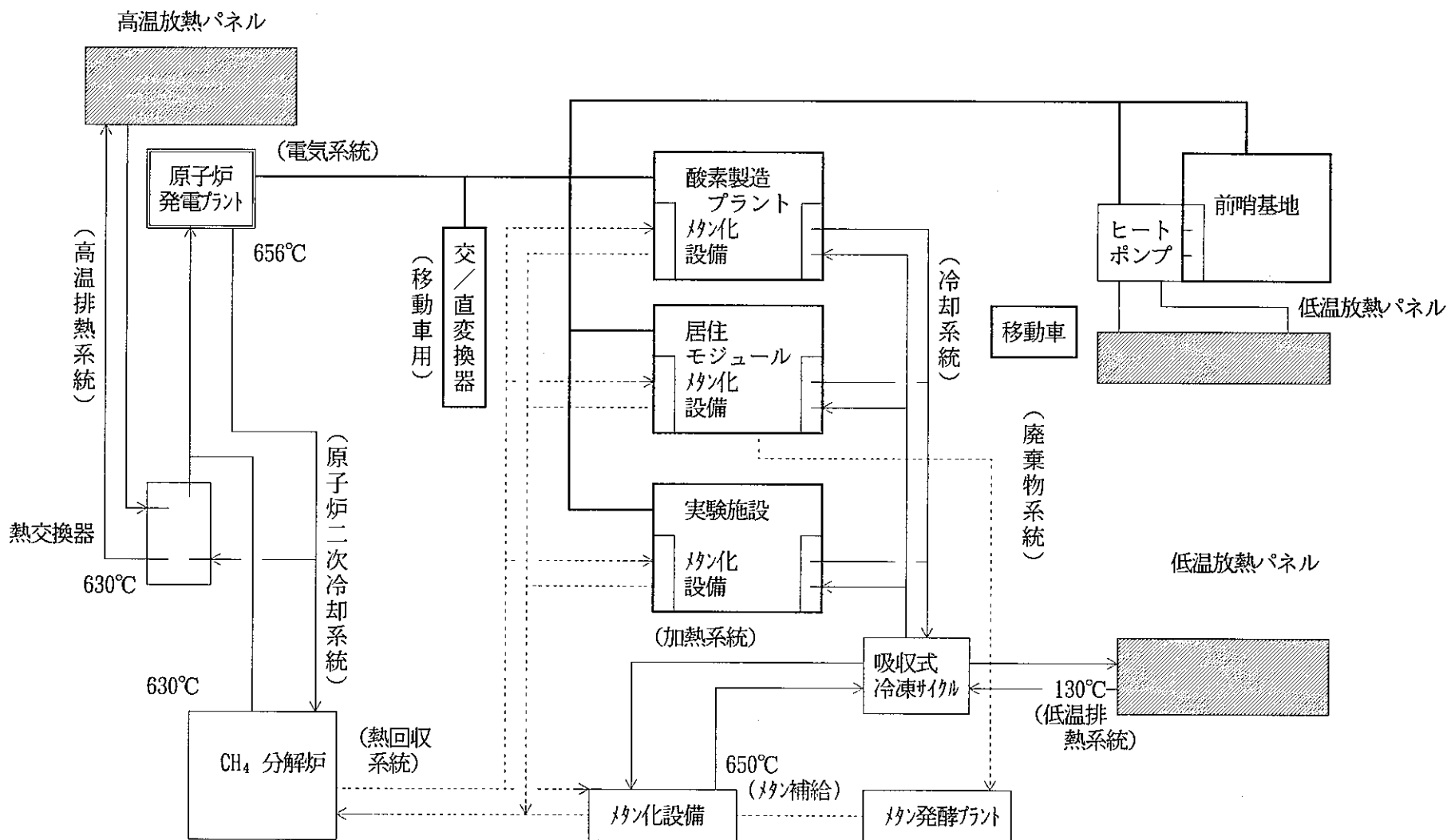


図4.6(b) コージェネ利用エネルギー供給システム (フェーズⅢ)

4.3 システムの評価

前節で設定されたエネルギーシステムをもとに各システムの重量を算出した結果をフェーズⅡに対して表4.2に、フェーズⅢに対して表4.3に示す。

(1) 算定条件

算定に用いた条件は以下の通りである。

- 重量はシステム毎に異なるもののみ算出し、共通部分（空調2次等）は除いた。
- 放熱パネルの面積は、

$$A = \frac{Q\omega}{(T_w^4 - T_s^4)} \times \frac{1}{\varepsilon\eta\sigma \times 2} \quad (\text{両面を利用する})$$

で求めた。ここで、

A : 放熱板面積 (m²)

Q ω : 放熱量 (W)

T_w : 高温排熱 903K (630°C) , 低温排熱 433K (160°C)

T_s : 宇宙及び月面等による反射の平均温度 322K

ε : 放熱パネルの放射率 ≈ 0.8

η : 放熱パネルの効率 ≈ 0.9

σ : ステファンボルツマン定数 = 5.67×10^{-8} W/m² · K⁴

- パネル重量は高温 (630°C) 排熱用パネルはSPECTRA-Lの設計実績から17kg/m²、又低温 (160°C) 排熱用パネルは5 kg/m²¹⁾とする。
- ヒートポンプ (冷凍機) の重量は、地上型のものを用いた。それには、ポンプ等の附属機器の重量も含む。
- 熱媒用配管は、高温に耐えかつ軽量のものとして炭素繊維製のものを考える。また、熱媒はCH₄を使い、その分解炉等の処理装置は吸収式冷凍機の重量と等しいものと仮定し算出した。
- 原子炉の基数は、電力需要に見合った数とし、又冗長性の観点から、複数台設置を基本とした。ただし、フェーズⅢの後期用としては、大型月面原子炉 (LUBAR) × 1基も参考までに比較した。

(2) システムの評価

- フェーズⅡでは、原子炉がこの規模としては大きく、電力需要の減少を原子炉基数の減少に結びつけられなかったため、熱利用を積極的に行うコジェネシステムでは重量を評価軸とすると全電化型の9.5 tに比べ14.8 tになり、不利になる。
- フェーズⅢ（後期）では、酸素製造や生命維持装置用にかかなりの熱需要があるため、配管や、処理装置等の熱移送系及び吸収式冷凍機による重量増はあるものの、エネルギーの効率的利用による原子炉の基数減により、システム重量は全電化型の35.3 tに比べ36.4 tになりほぼ同等である。このため今後の熱移送系あるいは吸収式冷凍機の技術的発展による軽量化により、コジェネシステムが有利になる可能性が大いにある。

表 4.2 コジェネ型と全電化型の総重量の比較 (フェーズII)

方式 機器	①コジェネ型(SPECTRA-L×1基)	②電化型(SPECTRA-L×1基)
原子炉用 放熱パネル	排熱～709 kWt 放熱温度～630 °C パネル面積～14m ² (@17kg/m ²) 0.3 ton	1,099 kWt 630 °C 21 m ² 0.4 ton
一般排熱用 放熱パネル	排熱～270 kWt 放熱温度～160 °C パネル面積～136 m ² (@5kg/m ²) 0.7 ton	180 kWt 160 °C 91 m ² 0.5 ton
ヒートポンプ (冷凍機)	吸収式 (地上型の重量) 3.1 ton	電気式 (地上型の重量) 1.6 ton
熱媒用配管 及び CH ₄ 処理装置	全長 300m ×2 (往復) カーボンファイバー管 0.6 ton (2次側は無視) CH ₄ 処理装置 3.1 ton ----- 3.7 ton	なし (2次側は無視) 0 ton
原子炉本体	電力需要 149 kWe < 300 ×1 = 300 kWe SPECTRA-L ×1 基 (7 t/基×1) 熱出力 2,000 kWt 26.8 kg/kW 電気出力 300 kWe 寿命10年 7.0 ton	電力需要 194 kWe < 300 ×1 = 300 kWe SPECTRA-L ×1 基 (7 t/基×1) 7.0 ton
合 計	14.8 ton	9.5 ton

表 4.3 コージェネ型と全電化型の総重量の比較 (フェーズⅢ)

方式 機 器	①コージェネ型(SPECTRA-L×3基)	②電化型(SPECTRA-L×4基)	③全電化型(LUBAR×1基)
原子炉用 放熱パネル	排熱～3,551 kWt 放熱温度～630℃ パネル面積～66㎡ (@17kg/㎡) 1.1 ton	5,425 kWt 630℃ 102㎡ 1.7 ton	5,425 kWt 630℃ 102㎡ 1.7 ton
一般排熱用 放熱パネル	排熱～1,194 kWt 放熱温度～160℃ パネル面積～600㎡ (@5kg/㎡) 3.0 ton	837 kWt 160℃ 420㎡ 1.4 ton	同左 1.4 ton
ヒートポンプ (冷凍機)	吸収式 (地上型の重量) 5.3 ton	電気式 (地上型の重量) 4.2 ton	同左 4.2 ton
熱媒用配管及び CH ₄ 処理装置	全長 300m×2 (往復) カーボンファイバー管 -- 0.7 ton (2次側は無視) CH ₄ 処理装置 ----- 5.3 ton 6.0 ton	なし (2次側は無視) 0 ton	同左 0 ton
原子炉本体	電力需要 729 kWe < 300×3 = 900 kWe SPECTRA-L×3基 (7 t/基×3) 熱出力 2,000 kWt 26.8 kg/kW 電気出力 300 kWe 寿命10年 21.0 ton	電力需要 952 kWe < 300×4 = 1,200 kWe SPECTRA-L×4基 (7 t/基×4) 28.0 ton	電力需要 952 kWe < 3,000 kWe LUBAR×1基 熱出力 20,000 kWt 23.3 kg/kW 電気出力 3,000 kWe 寿命10年 60.0 ton
合 計	36.4 ton	35.3 ton	67.3 ton

第 5 章 今後の技術的課題

第 2 章での調査をもとに、第 3 章及び第 4 章では極限環境におけるエネルギーシステム、特にコジェネレーションシステムの利用について検討を行ったが、本章では、その中で明らかになった技術的な研究・開発課題をまとめた。

5.1 エネルギーシステム全般の課題

月面におけるエネルギーシステムのこれからの技術的課題は大きく分けて 3 つあると考えられる。

(1) 軽量化

初期の月面活動においては、かなりの建設資材を地球から運搬する必要があり、このための輸送コストは莫大なものになる。従って、システム評価の上で重量の占めるウェイトは非常に高くなる。

最近、材料工学の進歩により強度が強く耐熱性に富む軽い各種の材料が開発されている。例えば、複合材料の 1 つである炭素繊維は上記の条件に見合うものの 1 つであるが、これらをエネルギーシステムの中に多く使うことにより、トータルの建設費を低減できるものと考えられる。

将来、月面での各種金属精錬が可能となり、地球資源に頼らなくてすむようになった時には、システムの評価は重量ではなく、効率やコスト等といった、地球上に近い評価軸で行われると思われる。

(2) 高効率化

同じシステムでも、よりエネルギー効率が高ければ設備が小さくてすみ、結果的に軽かつ安いシステムとなる。地球用の技術においては、エネルギーの有効利用という観点からの高効率化が進んでいるので、この技術をもとに宇宙用に適した技術を考えることができると考えられる。

(3) 宇宙環境への適合

1 G で大気がある環境下での技術は地球上においてかなりの進歩をみたが、地球上と同じ機器が少ない重力、真空下の月面あるいは宇宙において適切に機能するかは明

らかではない。また、屋外に設置する機械は真空の上に放射線や隕石に曝されるので材質が問題になる。システムの基本的な原理や材料が宇宙での使用に適しているかどうか、十分に検討し試験する必要がある。

5.2 コジェネレーションシステムの課題

コジェネレーションシステムがより魅力的になるための技術的課題としては、以下のようなものが挙げられる。

(1) 軽量化

まず、吸収式冷凍機の軽量化が必要である。地球用のものが電気式に比べ重いのは、吸収式冷凍機の原理上、内部を真空に近い状態に保つ必要があるためで、月面上においては、これは逆に有利に働く要素であるので軽量化は期待できる。その他の軽量化が可能なものとしてメタン化設備、配管材料、放熱装置等が挙げられる。

(2) 高効率化

次に、吸収式冷凍機の高効率化が必要である。地球用でも2重効用型等が開発されており、宇宙用としても、さらに放熱温度の上昇等を含めた高効率化技術の開発が必要である。またメタン化設備や放熱パネルの高効率化が重要な要素と考えられる。

(3) 宇宙環境への適合

吸収式冷凍機内での少ない重力下での熱交換や月面上の環境に適した放熱システム、また装置や配管の宇宙環境からの保護は重要な課題と考えられる。

(4) 高性能熱移送システムの実用化

宇宙環境で用いる熱移送システムとしては、重量、熱損失、搬送動力の面で有利なメタン化学変化利用のシステムが有望であり、今後、地球上での実証実験に加え、少ない重力や真空などといった月面環境下での実証実験も必要である。

第6章 おわりに

コージェネレーションシステムは原子炉排熱の有効利用が図られるという点から、閉鎖系のエネルギー供給設備の総重量を低減させる可能性を有する。ここでは、極限環境閉鎖系である月面基地におけるエネルギー供給を取り上げ、全電化方式とコージェネレーションシステムについて、現時点での技術レベルを基にシステム全重量を評価軸とした検討を行った。その結果、基地のエネルギー需要が1 MWe程度になれば、排熱利用を積極的に行ったコージェネレーションシステムが、全電化方式と同等あるいはより有利となる可能性があることがわかった。さらに、コージェネレーションシステムをより有利にするための今後の技術的課題を明らかにした。

今回の検討は、結果の具体的な数値よりもこの評価法を開発したことに意義がある。コージェネレーションシステムの得失をさらに論じるには、放熱パネル重量など各機器の重量評価を今後進められるであろう技術開発の成果にリンクさせて、より現実的に把握してから行う必要がある。

今回は極限環境を月面として検討したが、得られた評価手法は地球上であっても最終的な放熱系の変更だけで適用することが可能である。しかし、地上では重量があまり問題にならないと考えられ、製造、組立て、運用、コストなど他の評価軸が採用されるであろう。

謝 辞

本検討を実施するに当たり、清水建設(株)の齋藤鉄夫氏、鈴木道哉氏、川井昌裕氏、高木健治氏らの協力を得た。ここに謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 小畑益彦 他, 「極限環境における可搬型炉設計条件の検討」, PNC SJ 9060 90-001
1990年3月.
- 2) 小森長生, 「月の地質学」, 築地書館, 1974年.
- 3) 古在由秀, 「月と小惑星」, 恒星社, 1979年.
- 4) 「世界の宇宙開発 SPACE TECHNOLOGY」, pp.128-137, pp.152-167, 旺文社, 1982年.
- 5) 「第8回建設ロボットに関する技術講演会」テキスト, 1989年2月.
- 6) 「将来の宇宙活動ワークショップ 89」講演集, 1989年6月.
- 7) 未来工学研究所, 月面基地と月資源研究会, 「月面基地と月資源開発の調査研究中間報告書」, p.37, 1989年12月.
- 8) 久城育夫, 武田弘, 水谷仁, 「月の科学」, 岩波書店, 1984年.
- 9) Johnson, F. S., Carrol, J. M., Evans, D. E., "Proceedings of the Third Lunar Science Conference," pp.2231-2242, Cambridge MA, 1972.
- 10) Cadogan, P. H., "The Moon - Our Sister Planet," Cambridge University Press, 1981.
- 11) Langseth, M. G., Keim, S. J., Peters, K., "Proceedings of the Seventh Lunar Science Conference," pp.3143-3171, New York, 1976.
- 12) Podoniaks, E. R., "Environmental Considerations for Lunar Base Engineering," Space '88, p.55, American Society of Civil Engineers, Albuquerque, Aug. 1988.
- 13) Smith, C. G., Powis, R. L., Litvak, S., Senzee, A. W., Baugher, J. F., "The Book of the Moon," Prentice-Hall Inc., 1986.
- 14) 下平勝幸, 「宇宙半導体とその放射性対策」, Radioisotopes, Vol.36, No.2, pp.35-44, 1987.
- 15) Silberberg, R., Tsao, C., Adams, J. H. Jr., Letaw, J., "Radiation Hazards in Space," Aerospace America, pp.38-41, Oct.1987.

- 16) 加藤和明, 「宇宙航空士の放射線被曝管理基準 新種の職業人放射線被曝」, 日本原子力学会誌, Vol. 31, No. 4, pp. 422-427, 1989.
- 17) Adams, P., "Moon, Mars and Meteorites", Her Majesty's Stationery Office for the British Geological Survey, Cambridge University Press, 1984.
- 18) Taylor, G. J., "The Lunar Environment," Proceedings of the First Lunar Development Symposium, Atlantic City NJ, 1986.
- 19) NASA, "Report of the 90-Day Study on Human Exploration of the Moon and Mars," Nov. 1989.
- 20) 早川一也, 「コジェネレーションシステム」, (株)シーエムシー, 1985年.
- 21) Tourin, R. H., "District Heating with Combined Heat and Electric Power Generation," ADVANCES IN ENERGY SYSTEMS AND TECHNOLOGY, Vol. 1.
- 22) キャタピラー三菱(株) エンジン部, 「ガスエンジンセミナー」, 1983年.
- 23) Hilsen, N. B. et al., "An Assessment of Central Station Cogeneration Systems for Industrial Complexer" EPA (United States Environmental Protection Agency), 1982.
- 24) 長谷川茂, 「省エネルギー型吸収式冷凍機冷温水機の性能と実施例, 空気調和と冷凍」, Vol. 21, No. 1, 1981年.
- 25) 井上宇市監訳, 「地域暖房」, 丸善株式会社, 1988年.
- 26) Bachl, H., "Fernwarttransport uber grobe Entfernungen," Brennstaff-Warn Kraft, Vol. 28, pp. 282-289, 1976.
- 27) Harth, R. et al, "A Thermochemical Pipeline System for Distributing Nuclear Generated Heat," Proc. of Nuclear Heat Application, Ween, IAEA-TC-483/14, 1984.
- 28) Singh, J., Niessen, H. F., Harth, R. et al, "The Nuclear Heated Steam Reformer -Design and Semitechnical," Nuc. Eng. Design, No. 78, pp. 179-194, 1984.
- 29) Harth, R., Jnsing, W., Teubner, H., "Experience Gained from the EVA II and KVK Operation," Nuc. Eng. Design, No. 121, pp. 173-182, 1990.

- 30) 村上 他, 「固体窒素を用いた冷却系」, 第27回宇宙科学技術連合講演会
1983年.
- 31) Tilliette, Z. P., Carré, F. O., "French Investigation on an Alternative, Longer
Term, 20-kWe, Direct Cycle, Gas-Cooled Reactor, Space System," 7th Sym.
on Space Nuclear Power Systems, Albuquerque, pp.508-518, Jan. 1990.

APPENDIX 1. ガスタービンの熱効率

参考資料

ガスタービンの熱効率

(機械工学便覧(社団法人 日本機械学会)より抜粋)

2・5・7 単純ガスタービンサイクル

a. 理論単純ガスタービンサイクル 第91図に示すようなガスタービンの基本形であり、空気圧縮機、燃焼器、タービンの組合せよりなる。これは第91図(b), (c)のようなサイクル12341であり、断熱圧縮1→2, 等圧加熱2→3, 断熱膨張3→4, 等圧放熱4→1からなっている。

この断熱圧縮, 断熱膨張が, 理論的な等エントロピ変化(isentropic change)で, 動作ガスが理想気体で, 各部の圧力損失, 漏れ損失がない理論サイクルについて, 空気流量1 kgf/s について考える。

$$\text{受熱量 } Q_1 = h_3 - h_2 = c_p(T_3 - T_2)$$

$$\text{放熱量 } Q_2 = h_4 - h_1 = c_p(T_4 - T_1)$$

とすれば, 理論熱効率 η_{th} は,

$$\eta_{th} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1 - \varphi^{-m} \quad (286)$$

ここに $\varphi = p_2/p_1$ 圧力比

$$m = (\kappa - 1)/\kappa$$

したがって, 熱効率 η_{th} は圧力比 φ のみの関数となり, 第92図に示すように変化する。

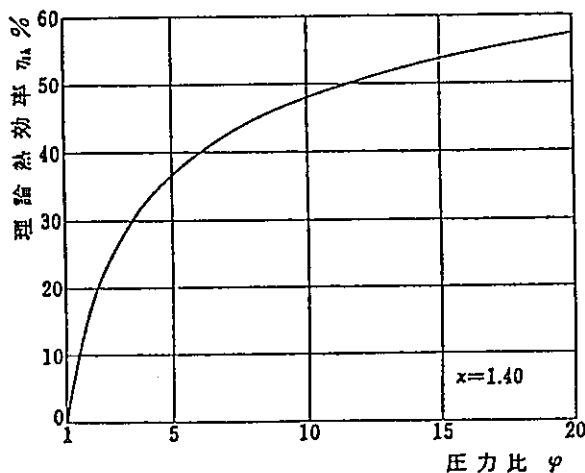
次に単位流量1 kgf/s 当たりの出力である比出力を求める。この比出力が大きいほど, 必要出力に要する空気量が少なくてよいことになる。

圧縮機入力

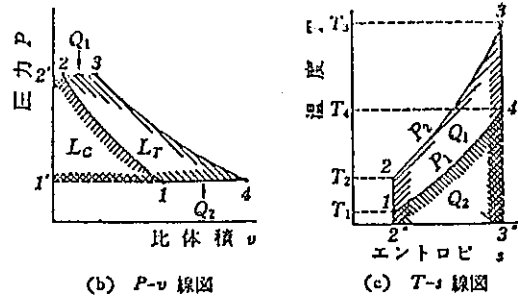
$$AL_c = A \int_1^2 v dp = c_p T_1 (\varphi^m - 1) \quad (287)$$

タービン出力

$$AL_T = A \int_3^4 v dp = c_p T_3 (1 - \varphi^{-m}) \quad (288)$$



第92図 単純サイクルの理論熱効率



第91図 単純サイクル

b. 実際単純ガスタービンサイクル 実際の単純ガスタービンでは, 前項の理論サイクルに比して, 次の諸点で異なっている。

(1) 圧縮, 膨張とも等エントロピ変化でなく, 圧縮機の断熱効率 η_c , タービンの断熱効率 η_T を考慮しなければならない。

(2) 燃焼器で, 燃料の持つ発熱量のうち, 実際に発生した熱量の割合を燃焼効率 η_B とし, これは1より小である。

(3) 燃焼器やダクト内で圧力損失が生じる。

(4) 動作ガスの流量は燃料の量だけ増し, 単位空気流量にたいし燃空比 f (燃料流量/空気流量) だけ増加する。一方, 冷却用など空気の漏れ損失もある。

(5) 動作ガスの比熱 c_p , 比熱比 κ は, ガス温度, 組成などにより変化する。

これらの中で, (1) の影響がとくに大きいので, この項だけに注目して単純ガスタービンサイクルの特質を考えてみることにする。

$$\text{圧縮機入力 } AL_c = c_p T_1 (\varphi^m - 1) / \eta_c \quad (290)$$

$$\text{タービン出力 } AL_T = \eta_T c_p T_3 (1 - \varphi^{-m}) \quad (291)$$

熱効率

$$\eta_a = \frac{\eta_T \tau (1 - \varphi^{-m}) - (\varphi^m - 1) / \eta_c}{\tau - \{1 + (\varphi^m - 1) / \eta_c\}} \quad (292)$$

比出力

$$AL = c_p T_1 \{ \eta_T \tau (1 - \varphi^{-m}) - (\varphi^m - 1) / \eta_c \} \quad (293)$$

これらの式から, 熱効率 η_a , 比出力 AL は, 圧力比 φ によるばかりでなく, 温度比 τ によっても影響され, また η_c , η_T の影響をも受けることがわかる。これらを図示したのが第93図および第94図である。これらの図から η_a および AL をそれぞれ最大にする最適圧力比があるこ

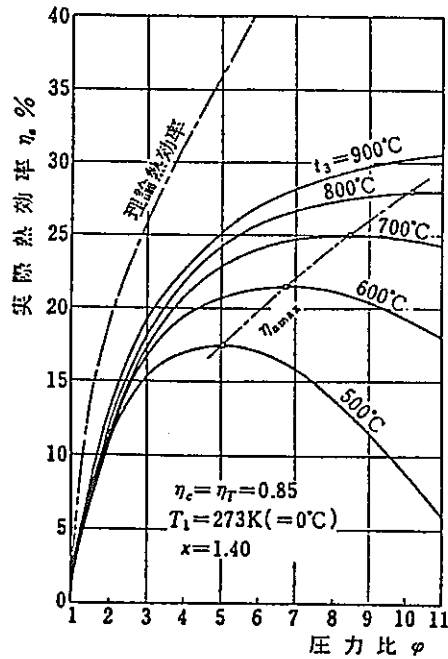
とがわかる。これらの最適圧力比はそれぞれ次式のようになる。

$$\varphi_{opt}^m = \frac{-a + \sqrt{a^2 + ab(b-a-1)}}{b-a-1} \quad (294)$$

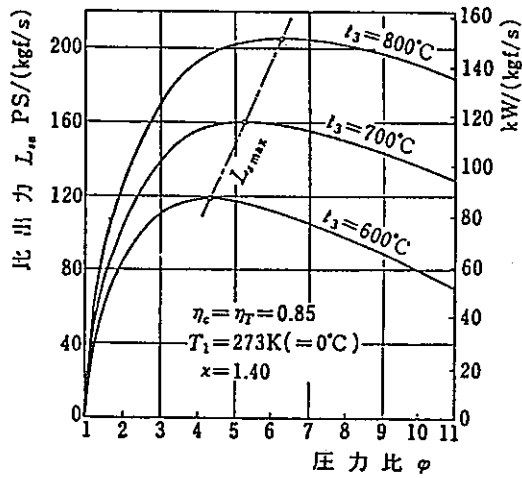
$$\varphi'_{opt}^m = a^{1/2} \quad (295)$$

ここに $a = \eta_c \eta_T \tau$, $b = \eta_c(\tau - 1) + 1$

温度比 τ , すなわちタービン入口温度 T_3 が高い程, 熱効率も比出力も増加し, それらの最大値を示す最適圧力比 φ_{opt} , φ'_{opt} も高いほうに移る。したがって, 高ガス温度, 最適圧力比によりガスタービンの性能向上が達せられる。



第 93 図 タービン入口温度 T_3 を変化した場合の単純サイクルの実際熱効率と圧力比との関係



第 94 図 単純サイクルの比出力と圧力比との関係

APPENDIX 2. ディーゼルエンジンの 熱効率

参考資料

ディーゼルエンジンの熱効率

(機械工学便覧(社団法人 日本機械学会)より抜粋)

2・5・4 内燃機関の理論サイクルとその熱効率 現在の内燃機関の基本サイクルとして、定容サイクル、定圧サイクル、複合サイクルの3種がある。これらの基本サイクルにおいては、動作ガスは比熱一定の理想気体とし、ガスは出入りせず密閉可逆サイクルとして扱う。これを理論サイクルと呼び、動作ガスを空気のみとした場合、空気標準サイクルという。内燃機関のサイクルでは、その熱効率と共に、単位重量の動作ガスの行う仕事量が重要で、これを平均有効圧 (mean effective pressure) で表す。平均有効圧は、1サイクルの仕事量 (P-v 線図の囲む面積) を動作ガスの有効容積 (行程容積、第84図の横軸の長さ v_0) で割った値で、サイクル中の圧力の平均値を示す。

c. 複合サイクル(サバテサイクル, Sabathé cycle)

第86図に示すように、加熱の一部を等容、残りを等圧の下で行うサイクルで、定容サイクルと定圧サイクルの組合せであるところから複合サイクルまたは合成サイクルと呼ばれ、ディーゼル機関の基本サイクルである。

受熱量 $Q_1 = Q_v + Q_p = c_v(T_3 - T_2) + c_p(T_3 - T_2)$

放熱量 $Q_2 = c_p(T_4 - T_1)$

有効仕事 $AL = Q_1 - Q_2 = c_v(T_3 - T_2) + c_p(T_3 - T_2) - c_p(T_4 - T_1)$

熱効率

$$\eta_{th} = 1 - \frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2 + \kappa(T_3 - T_2)}$$

$$= 1 - \left(\frac{1}{\epsilon}\right)^{\kappa-1} \left[\frac{\varphi \xi^{\kappa} - 1}{\varphi - 1 + \kappa\varphi(\xi - 1)} \right] \quad (281)$$

平均有効圧

$$P_m = \frac{P_1}{(\kappa - 1)(\epsilon - 1)} \left\{ \epsilon^{\kappa} [\varphi - 1 + \kappa\varphi(\xi - 1)] - \epsilon(\varphi \xi^{\kappa} - 1) \right\} \quad (282)$$

$$= \frac{P_1 Q_1}{ART_1} \frac{\epsilon}{\epsilon - 1} \left\{ 1 - \left(\frac{1}{\epsilon}\right)^{\kappa-1} \left[\frac{\varphi \xi^{\kappa} - 1}{\varphi - 1 + \kappa\varphi(\xi - 1)} \right] \right\} \quad (283)$$

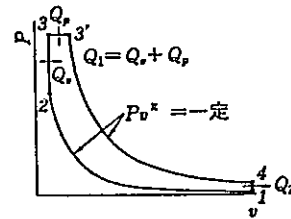
圧力、温度の関係

$$\left. \begin{aligned} P_2 &= P_1 \epsilon^{\kappa}, P_3 = P_2 \varphi = P_1 \epsilon^{\kappa} \varphi, P_3' = P_3 = P_1 \epsilon^{\kappa} \varphi \\ P_4 &= P_3 (\xi / \epsilon)^{\kappa} = P_1 \varphi \xi^{\kappa} \end{aligned} \right\} \quad (284)$$

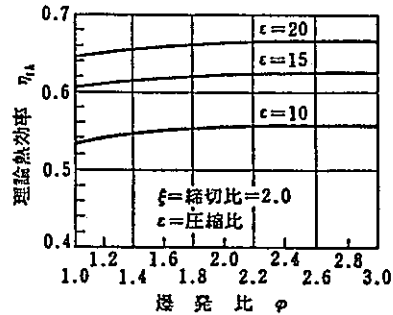
$$\left. \begin{aligned} T_2 &= T_1 \epsilon^{\kappa-1}, T_3 = T_2 \varphi = T_1 \varphi \epsilon^{\kappa-1} \\ T_3' &= T_3 \xi = T_1 \varphi \xi \epsilon^{\kappa-1}, \\ T_4 &= T_3' (\xi / \epsilon)^{\kappa-1} = T_1 \varphi \xi^{\kappa} \end{aligned} \right\} \quad (285)$$

ここに、 $\varphi = P_3/P_2$ (圧力上昇比)、 $\xi = v_3'/v_3 = T_3'/T_3$ (締切比)、 $\epsilon = v_1/v_2$ (圧縮比) である。

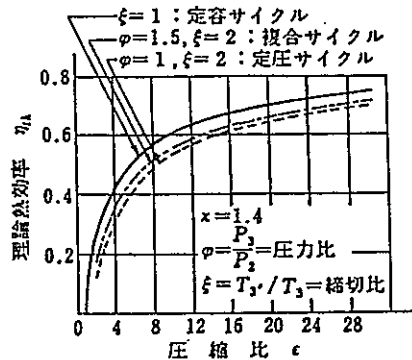
複合サイクルの熱効率は $(\epsilon, \kappa, \varphi, \xi)$ の関数で、 $\epsilon, \kappa, \varphi$ は大きいほど熱効率がよくなるが、 ξ が大きくなると逆に悪くなる(第88図)。また平均有効圧は、 φ, ξ を大きくすると高くなり、仕事量は増大する。



第86図 複合サイクル



第88図 複合サイクルの理論熱効率と爆発比の関係

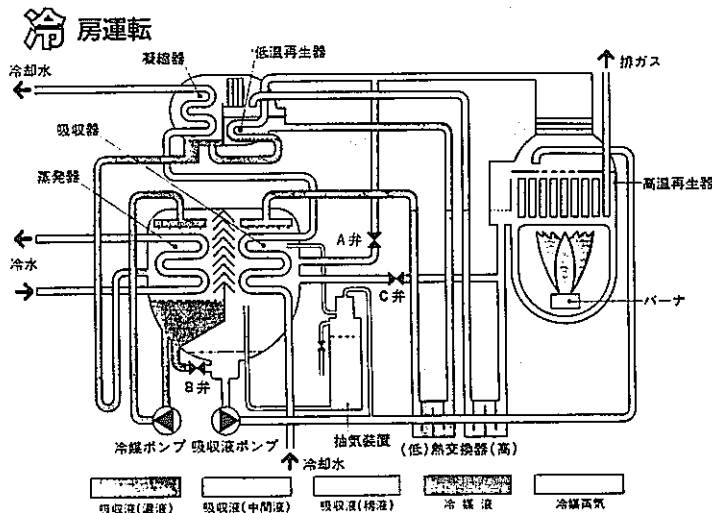


第89図 理論熱効率と圧縮比の関係

APPENDIX 3. 排熱回収システムの 回収機器例

(三洋電機株式会社パンフレットより)

吸収冷温水機 (二重効用吸収式冷凍機+暖房機能)

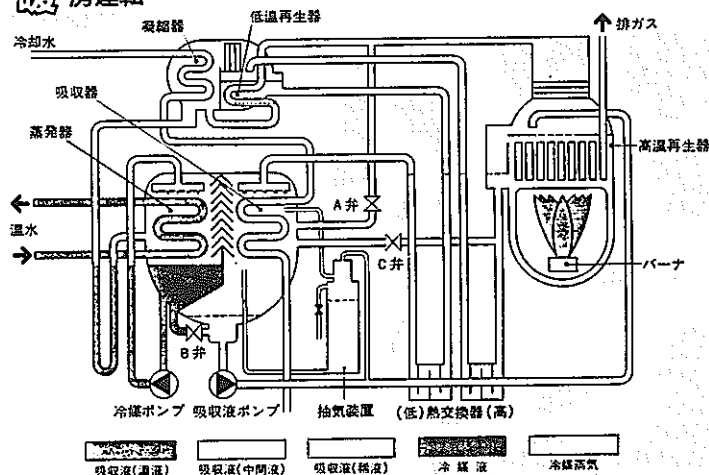


●冷房サイクル

本機は、蒸発器・吸収器・凝縮器・低温再生器および高温再生器の三つの缶胴と熱交換器、ポンプなどから構成されています。蒸発器内で冷水を冷却し、蒸発した冷媒(水)は、吸収器内の濃い吸収液(LiBr)に吸収され溶液は薄くなります。この稀吸収液は、溶液ポンプにより低温熱交換器、高温熱交換器を経て温度上昇し、高温再生器に導かれ、加熱されて中間濃度まで濃縮されます。中間濃縮液は、高温熱交換器を経て低温再生

器に入り、高温再生器で発生した冷媒蒸気により、最終濃度に濃縮され、低温熱交換器により温度を下げて吸収器へ戻ります。一方、高温再生器で発生した蒸気は、低温再生器で中間濃縮液を加熱し、ドレンとなりますこの冷媒(水)は、凝縮器に入り、外部から冷却水で液化された冷媒とともに減圧機構を経て蒸発器へ戻ります。このようにして戻ってきた吸収液および冷媒はそれぞれ吸収・蒸発が容易に行なえるよう、個々の管束上に散布される構造となっています。

●暖房運転



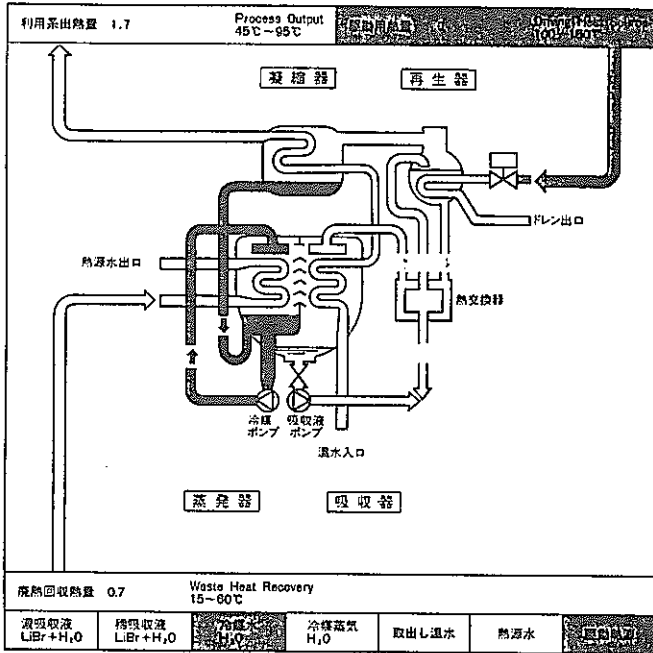
●暖房サイクル

稀吸収液は、高温再生器で加熱濃縮され冷媒蒸気を発生します。発生した冷媒蒸気は、蒸発器と吸収器に送られます。そこで蒸発器で熱交換し、温水を取り出します。一方濃縮さ

れた中間液は、吸収器に送られ、冷媒と混合し稀液となり低温熱交換器を通り、高温再生器に送られます。

温水吸収ヒートポンプ

機内フロー図 第1種ヒートポンプ



温水吸収ヒートポンプは、工場排水等の低温度レベルの排熱から熱を回収し、高温の温水 (MAX. 95°C) を製造します。

駆動エネルギーとして蒸気、A重油、ガス等が利用できますが電力は補機用として少量を必要とするのみです。

温水吸収ヒートポンプは、加熱用エネルギーの約40%を排温水から得るため、その40%分が省エネルギーとなります。

昇温特性の一例を右下図に示します。

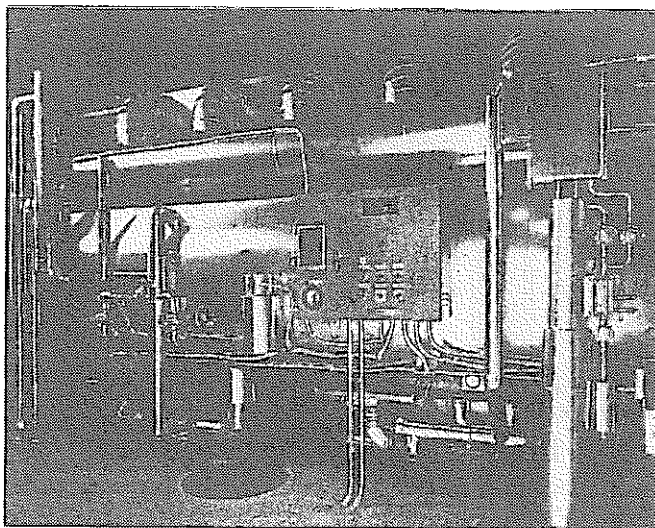
温水出口温度は、熱源水出口温度と温水入口温度によって決まります。一例として

熱源水(排温水)出口温度——20°C

利用温水入口温度——30°C

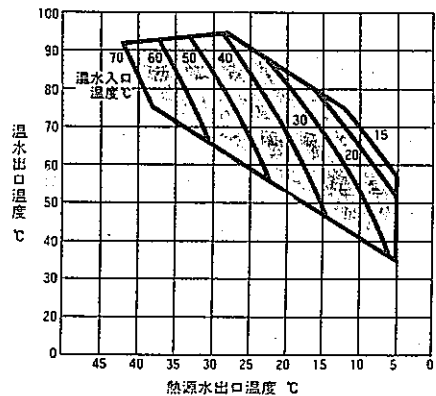
とすると取り出し温水出口温度は約80°Cとなります。

この昇温特性は、標準条件における昇温温度とその限界域を示すものです。



昇温特性図

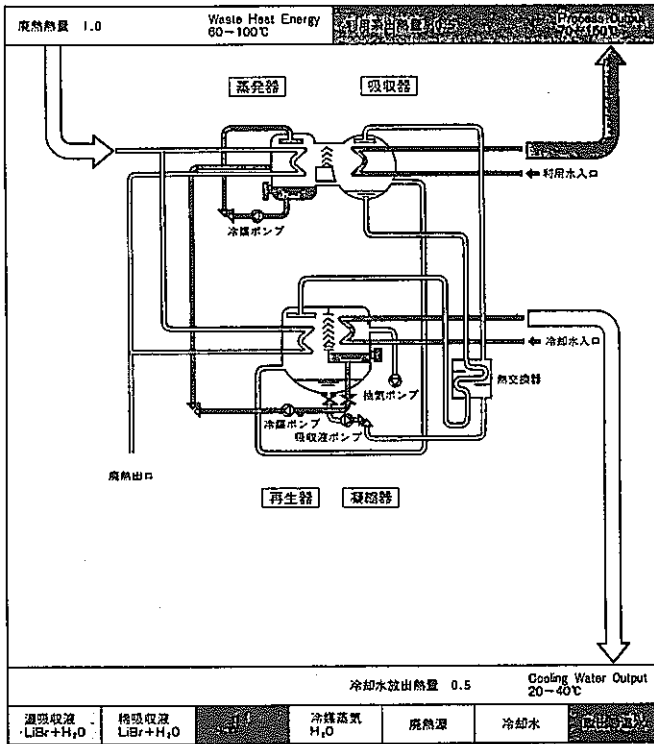
熱源水出入口温度差 $\Delta T = 10 \text{ deg } ^\circ\text{C}$



蒸気発生吸収ヒートポンプ

機内フロー図

第2種ヒートポンプ



蒸気発生吸収ヒートポンプは、廃蒸気や廃温水を駆動エネルギーとして利用し、100°C以上の高温水、もしくはフラッシュ蒸気を製造する最新の省エネルギー機器です。

左図に示されるように、廃熱量1.0を機器に導入すると約0.5の比率で有効エネルギーが取り出せます。成績係数COPは、つねに1.0より小さくなりますが、入熱としての廃熱の利用ができますので、生産プロセスへ導入した場合大きなメリットがあると考えます。

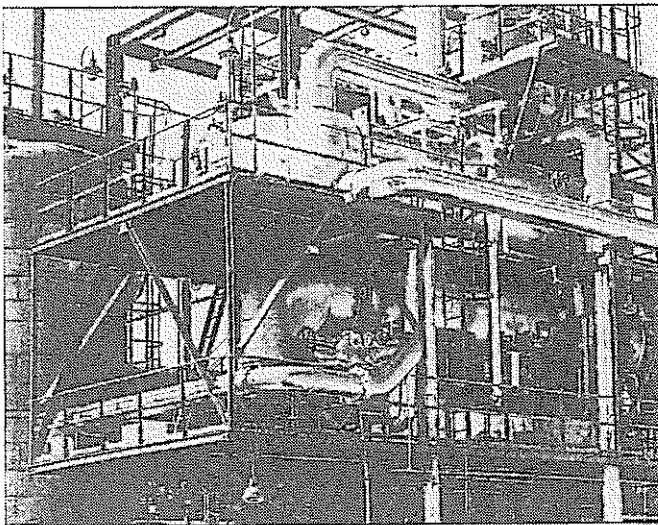
昇温特性を右下図に示します。

今、廃蒸気飽和温度 80°C

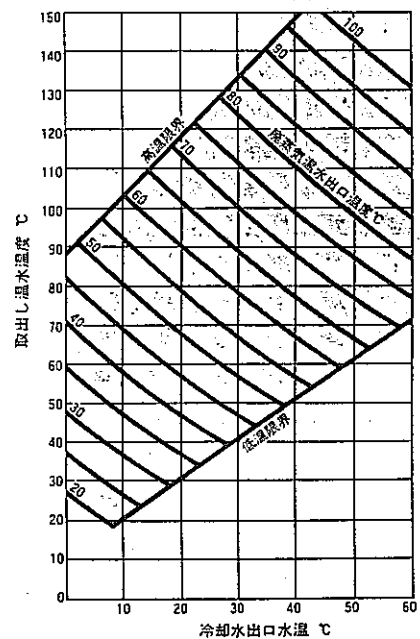
冷却水出口温度 33°C (冷却塔)

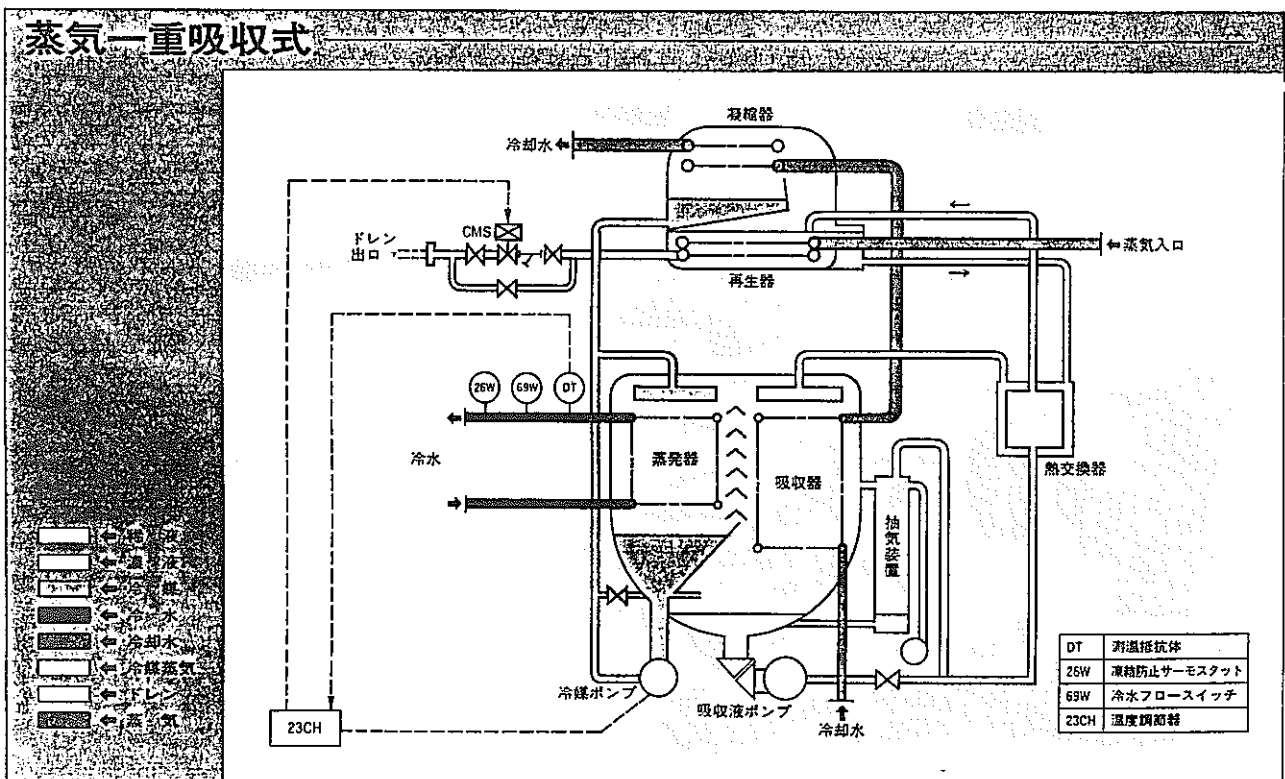
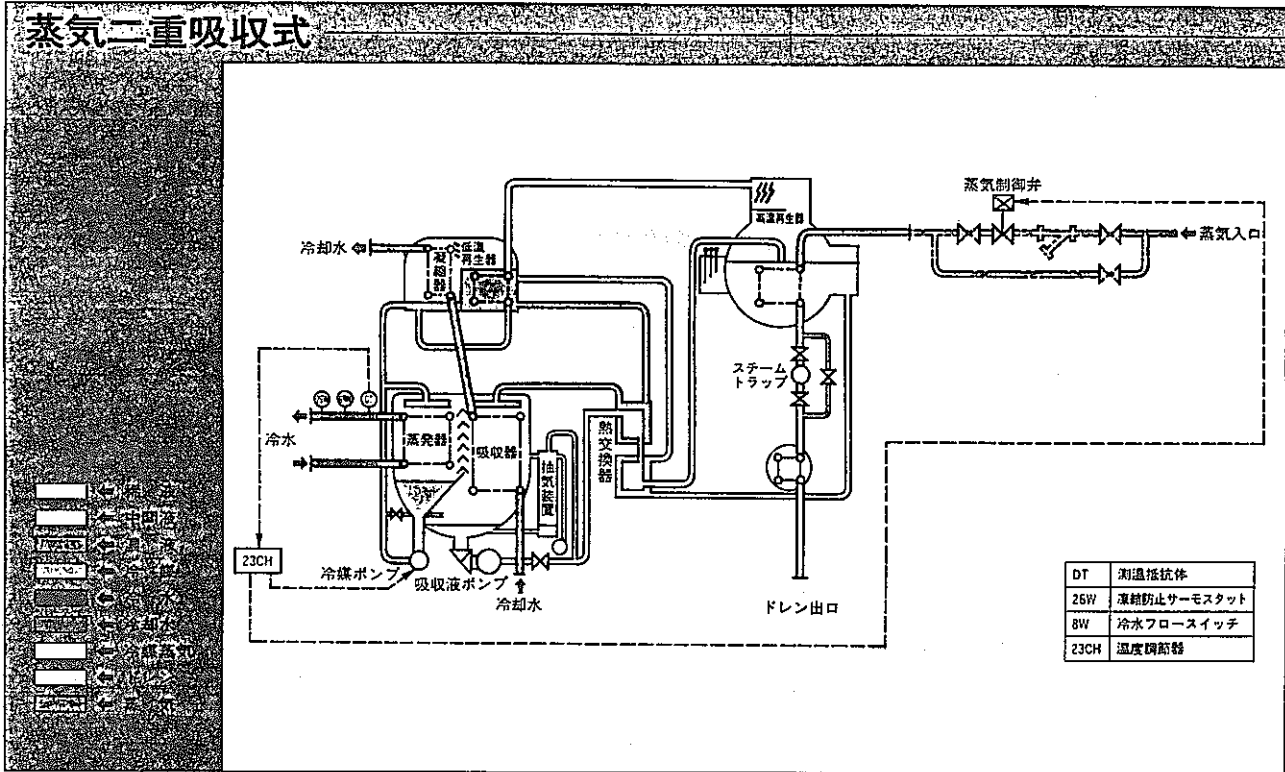
と仮定した場合、120°Cの高温水の製造が可能となります。

さらにフラッシュ機構により低压蒸気を発生する場合、取出高温水温度-5°C程度の蒸気が製造できます。



昇温特性図

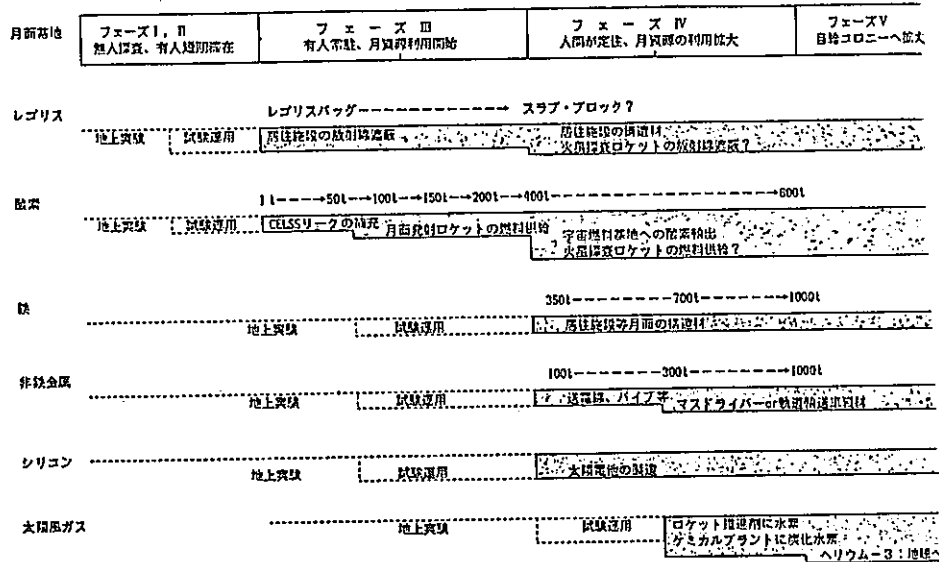




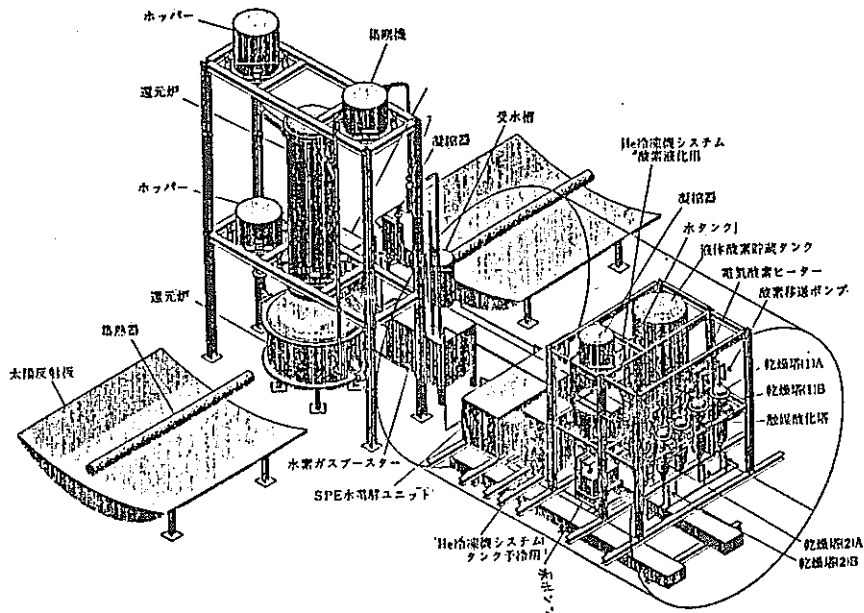
APPENDIX 4. 月面における資源利用

(月基地と月資源開発研究会報告書概要版より)

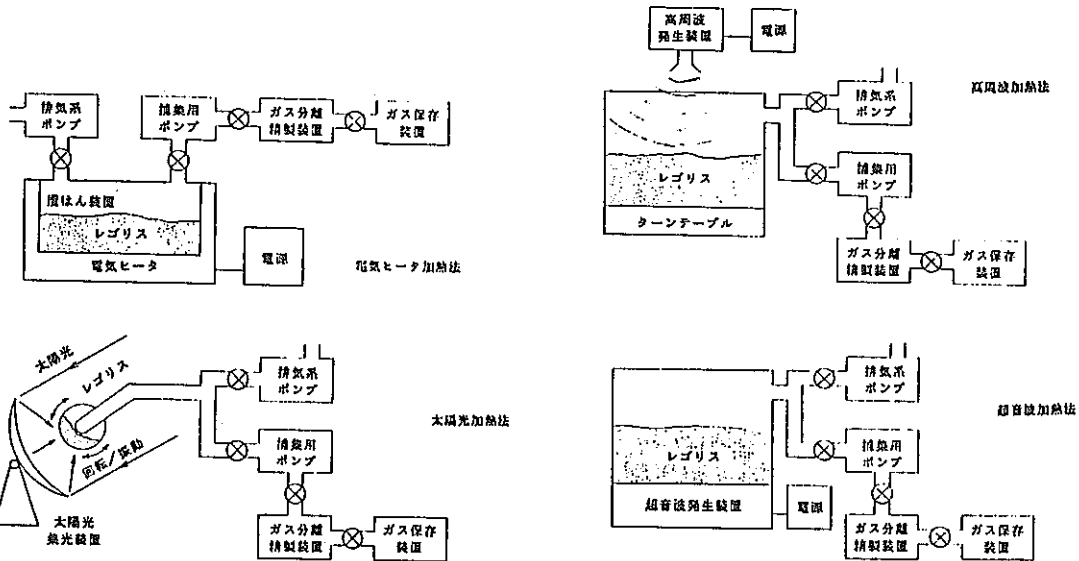
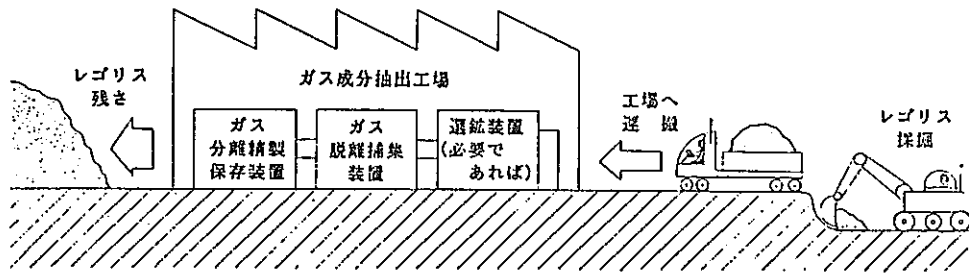
月の資源利用



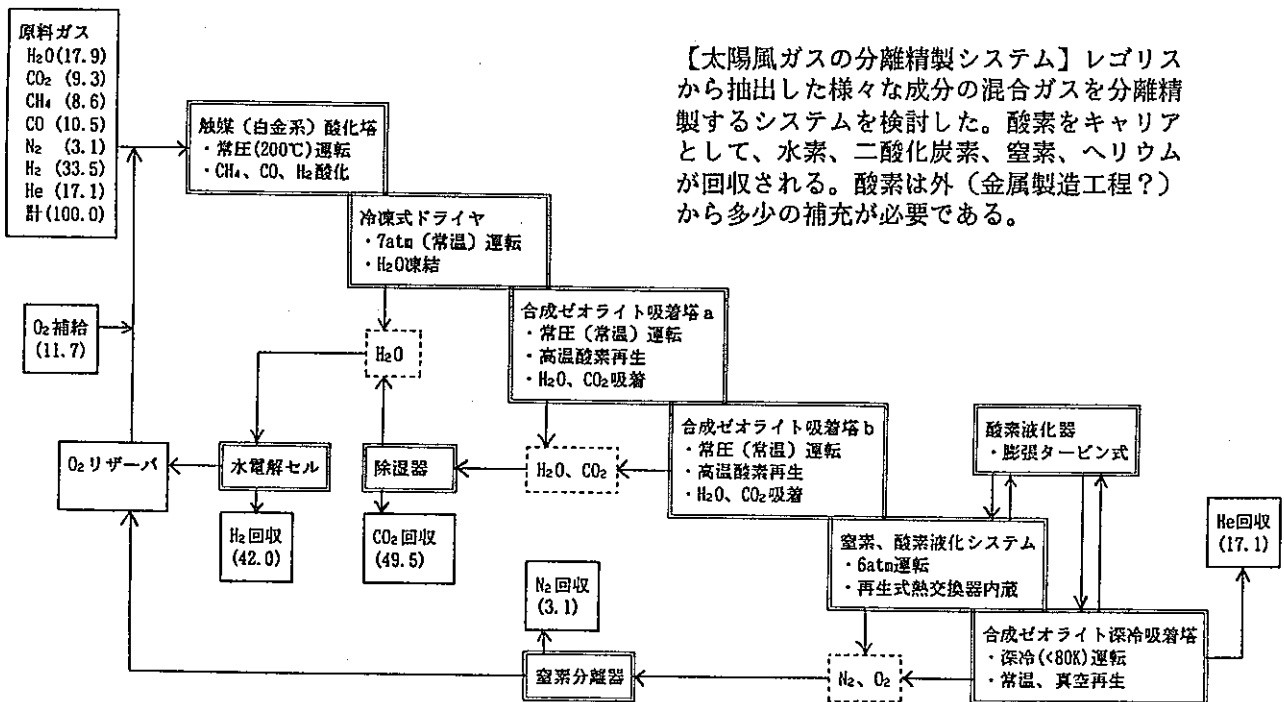
【資源利用の見地からみた月面基地と工場システムの発展シナリオ】フェーズⅢより酸素の小規模生産とレゴリス低加工品生産を開始し、フェーズⅣ前期では金属やセラミックスの生産、後期より太陽風ガスの抽出を始める。ヘリウム3の大規模抽出はフェーズⅤである。



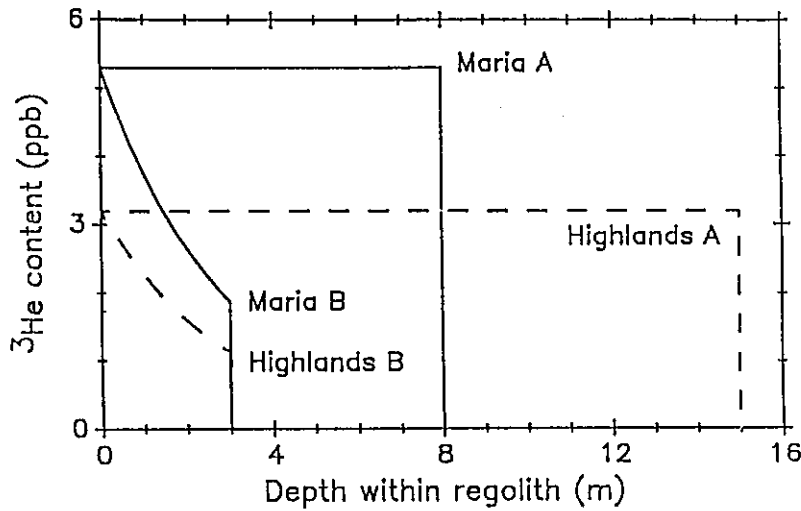
【初期酸素製造システム】フェーズⅢの初期において年1トンの酸素を製造するシステム。レゴリスより濃縮したイルメナイトを原料とし、流動床型還元炉で水素による直接還元を行う。また、水の電気分解ユニットと酸素精製・液化貯蔵ユニットを含む。



【初期の太陽風ガス抽出工場】レゴリスからの水素抽出を主目的とする工場システムを検討した。水素は比較的大量(数10~100ppm)にレゴリス中に含まれるので、レゴリスを採掘・運搬して工場で集中処理するという、地上型のシステムを想定した。レゴリスからのガス脱離方法には様々なオプションが考えられる。



【太陽風ガスの分離精製システム】レゴリスから抽出した様々な成分の混合ガスを分離精製するシステムを検討した。酸素をキャリアとして、水素、二酸化炭素、窒素、ヘリウムが回収される。酸素は外(金属製造工程?)から多少の補充が必要である。

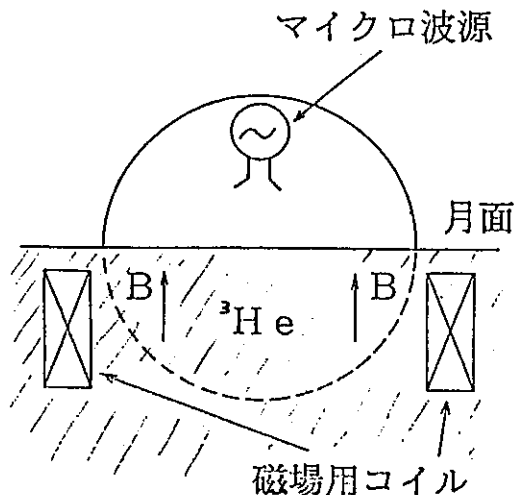


- A: ヘリウム-3含有量は深さと共に変化せず、レゴリスの厚さは海で8m、高地で15mである(最も楽観的な仮定)
- B: ヘリウム-3含有量は深さと共に自然対数的に減少する(最も悲観的な仮定) この場合3mより深い部分に含有されるヘリウム-3は無視する

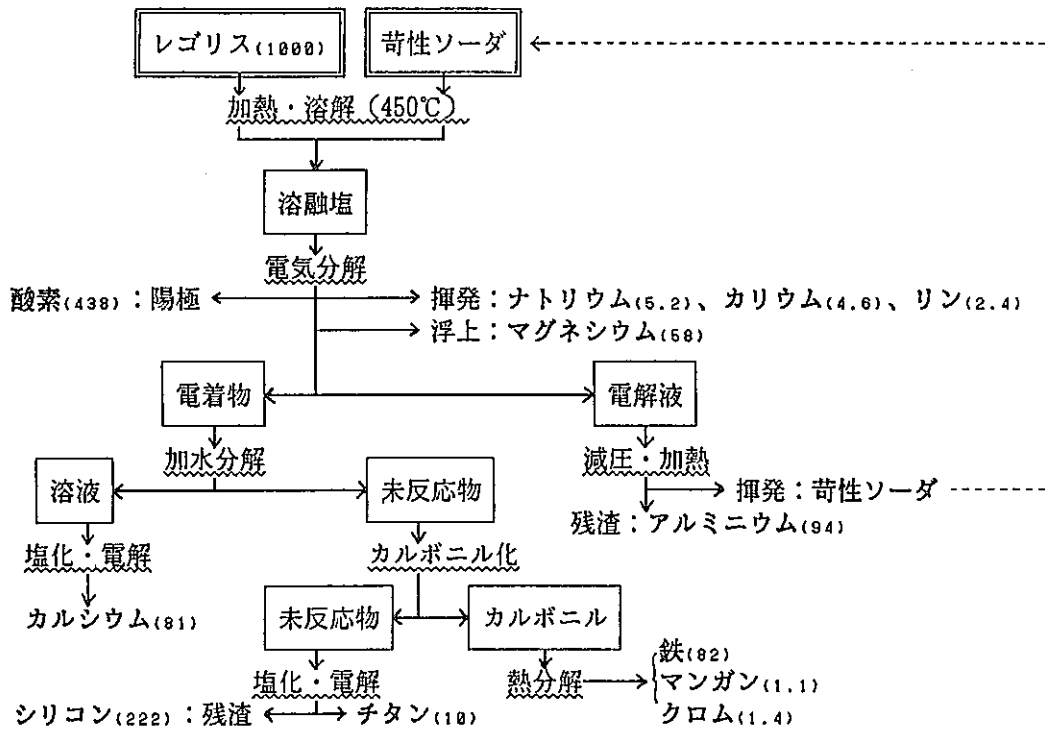
【月面におけるヘリウム3分布モデル】アポロ及びビルナのサンプルを分析した結果、海と高地の表面のヘリウム3平均含有量は各々5.3ppbおよび3.2ppbと推定される。これに対し、地下に向けてのヘリウム3分布はほとんど未知であり、上記の様な垂直分布モデルが考え得る。

ヘリウム3垂直分布	熟成度の偏り	ヘリウム3の量(単位千トン)		
		海	高地	全体
B(指数的減少)	なし	100	350	450
B(指数的減少)	あり	100	520	620
A(変化無し)	なし	435	2,782	3,217
A(変化無し)	あり	435	4,173	4,608

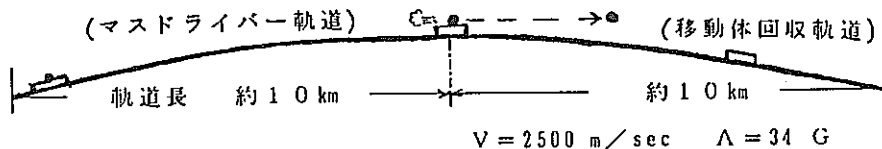
【月のヘリウム3の総量】垂直分布に関する不確定要素と、さらに月レゴリス全体の平均熟成度の不確定要素を考慮すると、最も控え目な予想で45万トン、最も楽観的な予想では460万トンのヘリウム3が月に存在することになる。



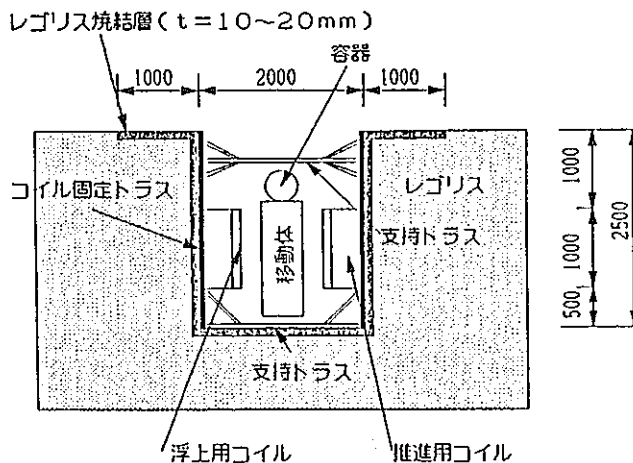
【月面におけるヘリウム3回収装置の概念】ヘリウム3の大規模回収は非常に大量のレゴリス処理を必要とするため、採掘・運搬を伴わない方法の開発が望まれる。この装置は月面上を移動可能なドームとマイクロ波照射装置、磁場発生用コイルからなり、核磁気共鳴の原理によってヘリウム3のみを選択的に加熱しようというものである。



【苛性ソーダ熔融塩電気分解法による金属製造プロセス】電気分解とそれに続く一連の処理により、酸素と各種金属をまとめて製造することができる。添字は原料レゴリス1000kgに対し得られる量（得られる量が1kg以下の元素は省いた）を示す。溶媒や還元剤は閉ループを形成する。



【マストライバー軌道全体の概略】金属やセラミックスなど大量の資源を必要とする月面構造物の例として、貨物をラグランジュポイントまで打ち上げる、磁気浮上式リニアモーターマストライバーの概略を検討した。軌道総延長は約20kmで、月の赤道上に建設される。



【マストライバー軌道断面図】数タイプ検討したマストライバー軌道構造の一例。軌道支持材には、誘導電流の発生による損失を避けるため極力金属は用いない。なお、金属資材としてはアルミ770トン、チタン80トン（月面自給可）の他、ニオブとニッケルが合わせて300トン程度必要である。