

# 第30回衛星設計コンテスト

## ジュニア概要書

応募区分 ジュニアの部

### 1. 作品情報・応募者情報

作品名 月の自然エネルギーによる発電方法について
副題 月面の夜をバイナリー発電で乗り越える
学校名 長崎県立長崎西高等学校 物理部

### 2. ミッションの概要

月面開発において、2週間にわたる夜間の発電方法の確立は大きな課題である。そこで、月の地表温度 $-170^{\circ}\text{C}$ と地中温度 $-22^{\circ}\text{C}$ との間の150Kの温度差を利用し、バイナリー発電を行うことを提案する。発電用熱媒体に四フッ化炭素を使用し、タービン入口条件を圧力2.0MPa・温度 $-46^{\circ}\text{C}$ 、タービン出口条件を圧力0.05MPa・温度 $-138^{\circ}\text{C}$ 、熱媒体の流量を13.6t/hとすることで、定格100kWの発電ができる。

### 3. 目的と意義

(a) 目的 月面では昼と夜が2週間ごとに入れ替わる。夜間は太陽光による発電ができないため、太陽光以外のエネルギーを用いた発電方法が必要となる。本研究では、夜間の月面における発電方法の候補として「バイナリー発電」の利用を提案し、その実現可能性について考察する。
(b) 重要性・技術的意義等 月面の夜は2週間続き、地表温度は $-170^{\circ}\text{C}$ にもなるといわれる過酷な世界である。このような場所で得られる自然エネルギーは一見なさそうに思えるが、0.4m程度掘った地中は $-22^{\circ}\text{C}$ 前後の一定の温度に保たれているという報告がある <sup>[1]</sup> 。この150K近い温度差は、夜間の月面で得られる自然エネルギーとして大変魅力的である。 本研究は、地中熱との温度差で動作するバイナリー発電が、夜間の月面で稼働できるための適切な熱媒体を選定し、夜間の有効な発電方法を確立することが目標である。

### 4. アイデアの概要

■研究の背景 月は、地球に同じ面を向けたまま約28日の周期で公転する。ゆえに、月から見た太陽の運動も約28日周期となり、日光が当たる昼が約14日間（2週間）連続した後、日光の当たらない夜が同様に2週間続く。日光が当たらない2週間について、太陽光発電以外の方法でどのようにしてエネルギーを得るのかを考えることは、月面への移住を考えるにあたって避けられない問題である。そこで、本研究では、太陽光発電以外の自然エネルギーの活用について検討することを目的とし、夜間の持続可能な発電方法として「バイナリー発電」を提案する。
■バイナリー発電とは 地下の熱源を利用する従来の地熱発電は、地下から噴出する高温の水蒸気を直接利用してタービンを回す発電方法であるが、熱源が十分に高温ではないときは、それよりも沸点が低い熱媒体を別に準備し、加熱・蒸発して得られる蒸気でタービンを回し、再び冷却して液体へ戻すという循環を行う。このように、タービンを回す低沸点の熱媒体システムと、加熱源システムとの2つの熱サイクルを利用した発電方式をバ

イナリー発電という<sup>[2]</sup>。現在、国内で普及しているバイナリー発電は、温泉地や火山地帯での発電が主流であり、100℃～150℃の加熱源を用いて熱媒体を加熱・蒸発させ、発電後は外気温程度に冷却して液体へ戻している。一方、夜間の月面の地表温度は-170℃、地中温度は-22℃でほぼ一定であることが知られている。ともに氷点下ではあるが、大きな温度差が得られるため、適切な沸点の熱媒体を使用することで、発電ができると考えられる。

■月面における夜間の温度環境について

月面の地表温度および地中温度は、先行研究<sup>[1]</sup>によると図1、図2のように変化する。図1の横軸は月面での現地時間24時間を表し、地球時間の28日に相当する。図1によると、地表温度は、日の入り(18:00)直前に急激に下がるが、夜の2週間(18:00～6:00)は103K(-170℃)前後でほぼ一定となり、日の出(6:00)の直後から、また急激に上がる。そのため、今回問題としている夜の2週間については、地表温度を103K(-170℃)で一定であると仮定してよい。また、図2によると、地中温度は、地表から0.4m程度の深さでは、251K(-22℃)でほぼ一定であることも分かる。0.4m程度の深さであれば、月面での建設や設置も可能だと思われる。以上のことから、本研究では、地表温度を-170℃で一定、0.4m掘った地中温度を-22℃で一定とし、これらの温度差を用いたバイナリー発電について検討する。

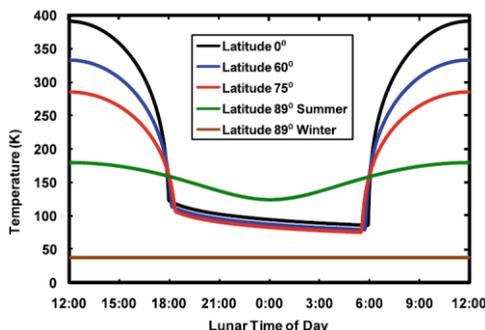


図1: 緯度ごとの、月面での現地時間(横軸の24時間が地球時間の28日に相当)と地表温度のモデル計算。緯度89度では、夏至と冬至の温度変化を示している。(D. A. Paige et al. 2010)

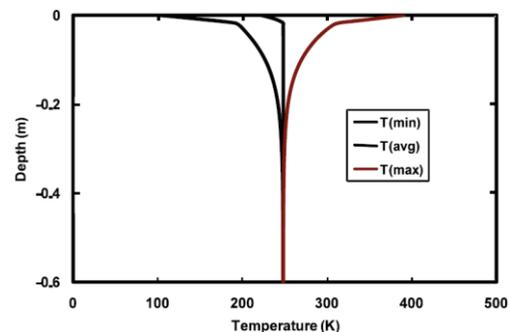


図2: 月の赤道における、地中の深さごとの日の最低温度、最高温度、平均温度のモデル計算。(D. A. Paige et al. 2010)

■熱媒体の選定について

発電用、加熱用、冷却用の3種類の熱媒体が必要で、使用する熱媒体の循環や熱交換の模式図が図3である。

発電用熱媒体は、地中温度-22℃と地表温度-170℃の間に沸点をもつことが条件であるため、沸点が-127℃の四フッ化炭素(CF<sub>4</sub>)を使用する。加熱用熱媒体には、-22℃から少し低い温度(-46℃を想定)

の間で常に液体である1-ブテン(C<sub>4</sub>H<sub>8</sub>)を使用し、昼の14日間に地下のタンクで-22℃に温めておいたものを夜間の発電で使用する。冷却用熱媒体には、-170℃から少し高い温度(-138℃を想定)の間で常に液体である四フッ化炭素を使用し、真空での放射を利用したラジエーターを使用することで、温度が上がった熱媒体の温度を地表温度と同程度の-170℃まで下げることができる。以上の理由により選定した熱媒体について、使用する温度の範囲、沸点や融点、熱媒体の状態をまとめたものが表1である。

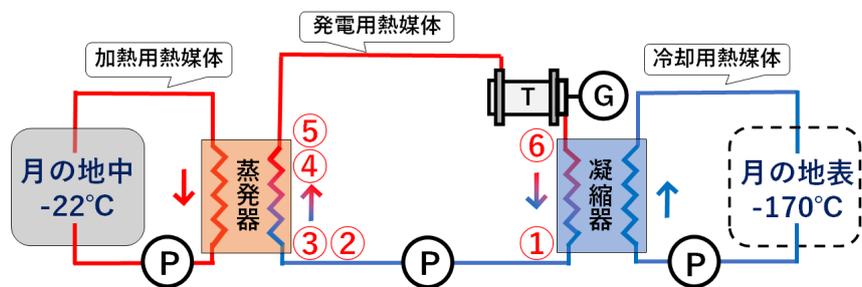


図3: 使用する熱媒体の循環や熱交換の模式図  
Tはタービン、Gは発電機、Pはポンプを表す  
数字①～⑥は図4(後述)の熱サイクルの各状態に対応する

表1: 熱媒体の使用温度と状態

熱媒体	物質名	使用温度 [°C]	沸点 [°C]	融点 [°C]	熱媒体の状態
加熱用	1-ブテン C <sub>4</sub> H <sub>8</sub>	-46 ~ -22	-6.5	-185	常に液体
発電用	四フッ化炭素 CF <sub>4</sub>	-138 ~ -46	-127	-183	液体・気体
冷却用	四フッ化炭素 CF <sub>4</sub>	-170 ~ -138	-127	-183	常に液体

## ■月面バイナリー発電の概要について

図4は、発電用熱媒体に用いる四フッ化炭素のT-S線図で、縦軸が温度T、横軸が比エントロピーSを表す。状態①で圧力2.0MPaの発電用熱媒体は、状態①→②でポンプを通過し、温度と圧力が上昇する。次に、状態②→③で蒸発器を通過することで熱媒体が気体になり始め、圧力が2.2MPaから2.0MPaまで下がり、同時に温度が上昇する。状態③→④で熱媒体が気体になり、さらに状態④→⑤で20Kの過加熱を行う。状態⑤→⑥で熱媒体の気体がタービンを回し、発電を行う。タービンを回した直後、断熱膨張(等エントロピー変化)により圧力が2.0MPaから0.05MPaまで急激に下がり、気体をタービンへと吸い込む力が発生する。最後に、状態⑥→①で凝縮器を用いて発電後の熱媒体を液体に戻し、比エンタルピが元の状態へと戻る。状態⑤→⑥ではタービン内の流体とノズルや翼との摩擦などの損失により、エントロピーが増大するため、破線のような等エントロピー変化は実現できない。一般的に示されている効率として、タービン軸効率0.95、タービン仕事効率0.90を用いるとき、熱媒体の流量が13.6t/hであれば、定格100kWが達成できる。

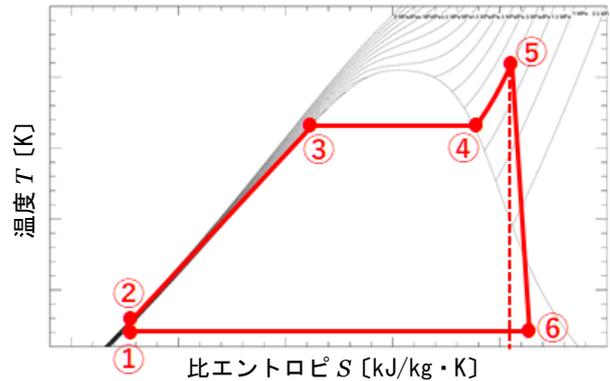


図4：四フッ化炭素のT-S線図およびバイナリー発電の熱サイクル図  
数字①～⑥は、図3と表2の各状態に対応

以上の熱サイクルにおける各状態の物理量をまとめたものが表2である。

表2：熱サイクルにおける各状態の物理量

状態	状態①	状態②	状態③	状態④	状態⑤	状態⑥
温度 [°C]	-138	-137	-66	-66	-46	-138
圧力 [MPa]	2.0	2.2	2.0	2.0	2.0	0.05
比エンタルピ [kJ/kg]	201	202	273	353	372	340

## ■重量・サイズ・建設方法について

発電施設一式の重量は10tで、その内訳は、バイナリー発電機3t(発電用熱媒体を含む)、加熱用熱媒体4t、冷却用熱媒体1t、ラジエーター1t、配管等1tである。月ロケットにはペイロードが50t級のものもあり、1度の打ち上げで運搬することができる。パッケージ化された発電機のサイズは、W1, 468×L3, 210×H2, 290mmで、月ロケットで運搬可能な大きさである。月への運搬後は、発電機と冷却用熱媒体は地表への設置で済むが、加熱用熱媒体のタンクを地下0.4mに埋める作業が必要になる。

## 5. 得られる成果

- ・ 四フッ化炭素(CF<sub>4</sub>)を熱媒体に用いることで、夜間の月面におけるバイナリー発電が可能になる。
- ・ 月面で定格100kWの発電が可能になり、人類が月へ進出する際の足がかりとなる。
- ・ 発電システム全体の重量が10tであるため、ロケット1回で月へ運ぶことができる。

## 6. 主張したい独創性または社会的な効果

- ・ 氷点下での温度差で動作するバイナリー発電の熱サイクルを決定できた。
- ・ 月の夜という過酷な環境で得られる自然エネルギーを用いた発電の実現可能性を示した。

## 7. 謝辞

概要書を執筆するにあたり、長崎総合科学大学工学部長である松井信正教授には、ミッション設定や熱サイクルについてのアドバイスをいただきました。長崎県雲仙市役所の佐々木様と森様には、小浜温泉バイナリー発電所の見学や研修でお世話になりました。

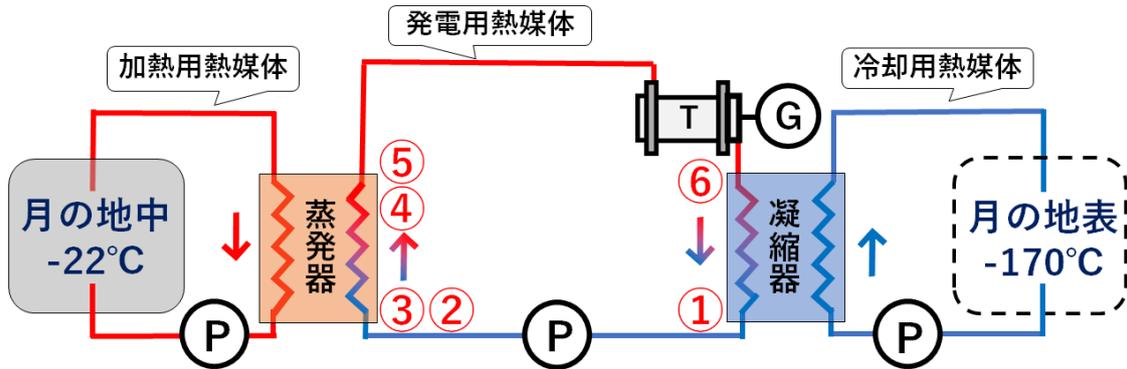
## 8. 参考文献

- [1] The Lunar Reconnaissance Orbiter Diviner Lunar Radiometer Experiment.  
D. A. Paige et al. Space Sci Rev (2010)
- [2] 九州電力「地熱バイナリー発電方式」の概要(2022年6月24日閲覧)  
[https://www.kyuden.co.jp/effort\\_renewable-energy\\_geothermal\\_business\\_binary.html](https://www.kyuden.co.jp/effort_renewable-energy_geothermal_business_binary.html)

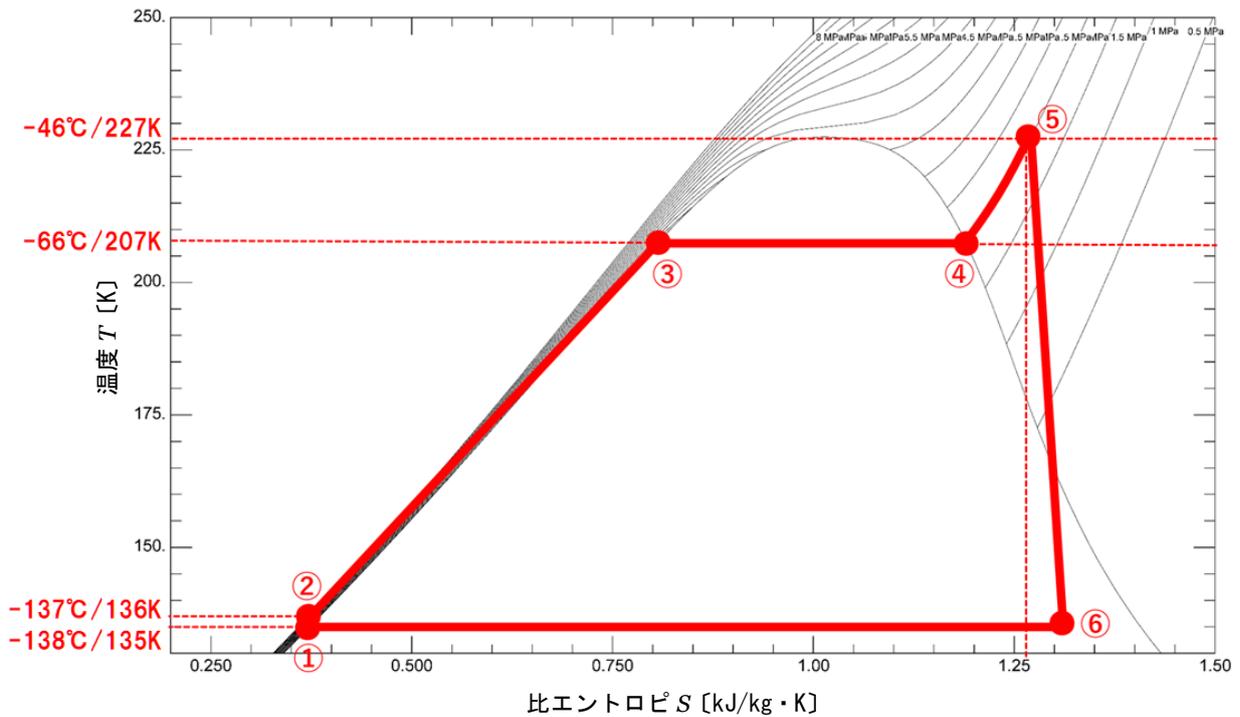
以上

補足説明資料（概要書の図3を拡大したもの、図4拡大して温度を表示したもの、および表2）

■使用する熱媒体の循環や熱交換の模式図



■発電用熱媒体に使用する四フッ化炭素の T-S 線図およびバイナリー発電の熱サイクル図



■熱サイクルにおける各状態の物理量

状態	状態①	状態②	状態③	状態④	状態⑤	状態⑥
温度 [°C]	-138	-137	-66	-66	-46	-138
圧力 [MPa]	2.0	2.2	2.0	2.0	2.0	0.05
比エンタルピー [kJ/kg]	201	202	273	353	372	340