

水素還元による月土壤からの水製造

渡辺隆行(東京工業大学), 金森洋史(NASDA), 青木 滋(清水建設), 吉田哲二(清水建設), 内藤 均(NAL), 荻原巖千男(NAL), 中村嘉宏(法政大学)

1. 緒言

将来の月面における有人活動を考えると、特に水と酸素の供給は重要な課題である。酸素は水の電気分解より容易に得られることや、生成した水そのものも様々な用途が考えられる点から、水製造には大きなメリットがある。水製造は、水素を還元剤として使用する場合がもっとも簡単で、輸送コストのかからないプロセスとなる。

月土壤の特徴として、 Fe_2O_3 を全く含まない一方、 FeO を 15 %程度含んでいることが挙げられる。なお、地球の土壤においては、 FeO は 5 6 %である。月土壤成分の水素還元による自由エネルギー変化を Fig. 1 に示す。 Fe_2O_3 および FeO の還元反応が容易に進行することを確認した。

本研究では水素還元による月土壤からの水製造を行い、水製造の可能性、最適条件および反応機構の検討を目的とした。

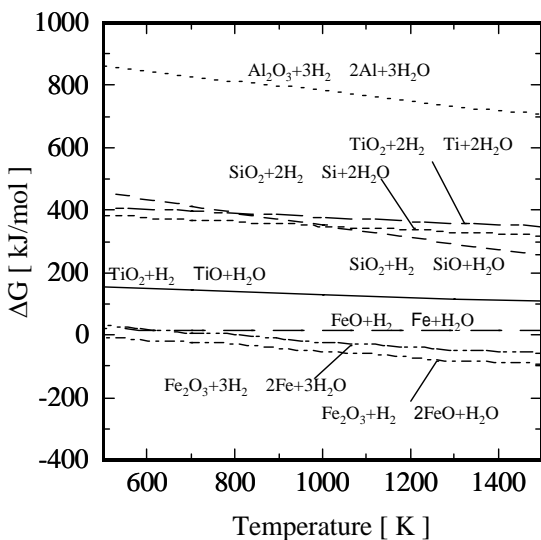


Fig. 1 Free energy change of hydrogen reduction with metal oxides.

2. 実験装置および方法

本研究で用いた実験装置図を Fig. 2 に示す。還元反応器の部分は月面実験を想定し設計した。実験装置は、主に反応炉部、ガス供給・制御部、そして計測部で構成されている。温度は黒丸で示した位置において、圧力は反応器の入口および出口において計測した。反応器を出た水素中に含まれる水分量は、管路に設置した相対湿度計にて測定した。

反応器は試料の装着のため、二重構造になっており、外管と内管で構成される。材質はいずれも Inconel600 であり、気密性は保たれている。反応器図を Fig. 3 に示す。水素は外管の入口より反応器内に流入し、外管と内管の隙間をらせん状に上昇する。その間に所定温度に加熱され、上部より内管に流入し、内管に設置された試料と還元反応を起こす。

試料は、月土壤と同等の成分を含む月土壤シミュラントと呼ばれる模擬試料を用い、粒径(75 μm を境に分級した二種類、および試料そのもの)による違いを比較した。また本研究では、水素流量は 4 l/min 一定とし、試料量、反応温度、試料粒径、圧

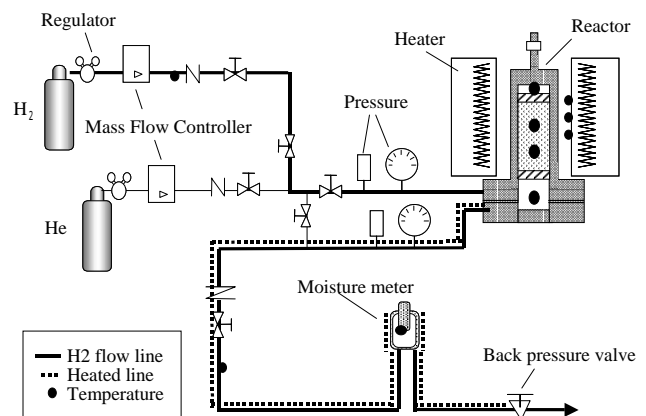


Fig. 2 Schematic diagram of experimental apparatus.

力の水生成速度に対する影響を調べた。実験条件を Table 1 に示す。

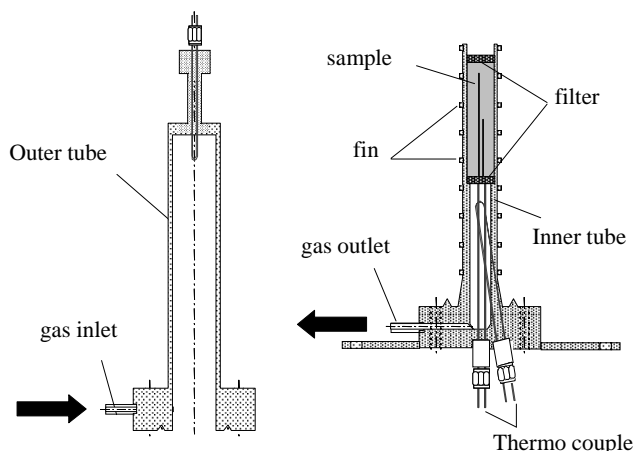


Fig. 3 Schematic diagram of the cross section of the reactor.

Table 1 Experimental Conditions.

Hydrogen Flow Rate	[l/min]	4
Sample Weight	[g]	20, 40, 60
Reaction Temperature	[K]	1173, 1223, 1273, 1323
Particle Size	[μm]	Entire, Under75 μm , Over75 μm
Inlet Pressure	[kPa]	303, 404, 505

3. 実験結果

水生成速度に対する温度の影響を Fig. 4 に示す。1273 K 以下では温度上昇によりピークが高くなり、水分発生量は増加する。それ以上の温度では逆に低くなり水分発生量は減少する。これは、試料粒子のアルカリ成分の溶融によって反応表面積が減少し、還元反応を妨げていることが原因である。

水生成速度に対する試料粒径の影響を Fig. 5 に示す。粒径の小さい試料が水生成速度は速く、累積水分量も多い。これは粒子の表面積の影響を受けているからである。また、粒径の大きい試料は完

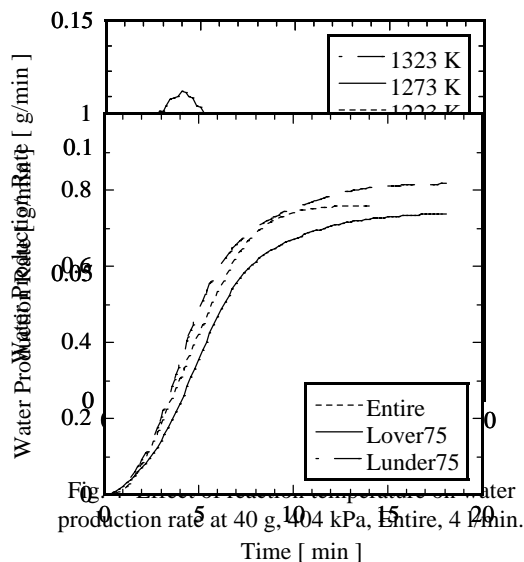


Fig. 5 Effect of particle size on water production rate at 40 g, 404 kPa, Entire, 4 l/min.

全に還元されず、還元成分が内部に残存している可能性が考えられる。

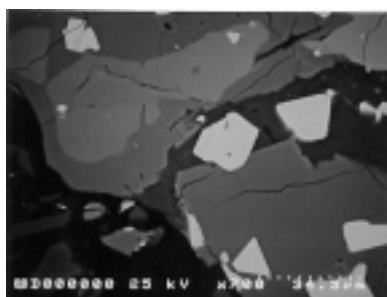
4. 月土壌シミュラントの分析結果

月土壌シミュラントの還元前と還元後の化学組成分析結果を Table 2 に示す。FeO および Fe₂O₃ に大きな変動が見られ、他の成分には特に目立つ変化はなかった。これにより、水製造に関わる成分は FeO および Fe₂O₃ のみであることがわかる。

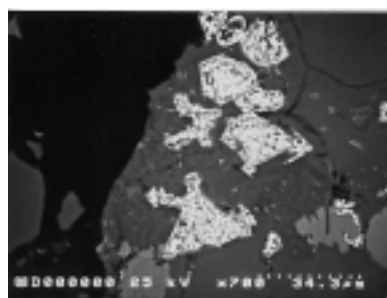
還元前と還元後の粒子の断面観察を走査型電子顕微鏡(SEM)を用いて行った。結果を Fig. 6 に示す。白色部分は Fe および Ti を多く含む部分、灰色部分は Si, Ca, Na, Al 等の多種の酸化物を含む部分、そして濃い灰色部分は Si を多く含む部分である。

Table 2 Chemical composition of lunar soil simulant before and after reduction.

Concentration [wt%]		
Lunar Soil Simulant		
Oxide	Before	After
SiO ₂	50.3	50.9
TiO ₂	2.0	2.0
Al ₂ O ₃	16.3	16.4
Cr ₂ O ₃	-	-
FeO	8.7	12.3
Fe ₂ O ₃	4.4	0.4
MnO	0.2	0.2
MgO	4.4	4.4
CaO	9.4	9.5
Na ₂ O	2.4	2.3
K ₂ O	1.1	1.1
P ₂ O ₅	0.4	0.4
S	-	-
H ₂ O	0.5	0.1
Total	100.0	100.0



(a)



(b)

Fig. 6 SEM photographs of the cross section of the particle.

(a) Before Reduction

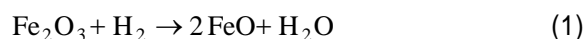
(b) After Reduction at 1273 K

Table 3 Results of classification by nature.

	Total Fe	Fe	FeO	Fe ₂ O ₃
Before	9.61	0.11	8.47	4.25
2 min	9.72	1.56	9.53	1.07
6 min	9.70	3.47	7.95	0.07
8 min	9.77	3.57	7.65	0.36
After	10.34	3.86	8.15	0.07

還元後の写真の白色部分に多数の細孔が生成していることが分かる。これは、白色部分を構成する酸化鉄中の酸素分が水素還元により抽出され、構造に変化が生じたことを示している。

含有される鉄成分の態別分析の結果を Table 3 に示す。月土壌シミュラントの水素還元は、2段階の反応機構をもつことがわかる。第一段階で、Eq.(1)で示す Fe₂O₃ の FeO への還元が即座に進行する。第二段階で、Eq.(2)で示す FeO の Fe への還元が緩やかに進行することがわかった。



5. 結言

実験結果および数値解析より月面における固定床水素還元による月土壌からの水製造は可能であることが示された。

実験より明らかになったことを以下に示す。

- 試料量に比例して、累積生成水量は増大する。
- 1273 K 以上ではアルカリ成分の溶融により細孔が塞がれるため、水生成が妨げられる。
- 粒径が小さい試料の場合には、反応表面積の増大により、累積生成水量が増大する。
- 水製造の最適反応条件として、反応温度 1273 K、粒径は小さいもの、圧力は低圧、還元時間 10 15 min という条件下で最適な水製造ができた。
- 水素還元の反応機構の検討の結果、粒子内部の生成物層拡散過程が律速段階であることが分かった。