

# 太陽炉を用いた火星での製鉄

群馬工業高等専門学校 専攻科 生産システム工学専攻

新井浩平, 天野俊一, 岩崎真也, 上杉廣大

## 1 緒言

現在, 火星は人類の移住先として注目されており, 有人探査に関する研究が広く行われている。火星に人類が居住するときには, 地球での我々の生活と同様に多種多量の物資が必要になると考えられる。これらの物資の輸送に既存のロケットを用いると, 高額な費用と片道6か月以上の長い輸送時間が伴うため, 物資の全てを地球からの供給に頼るのは困難であると考えられる。

一方, 火星の地表に存在する砂には比較的高い割合の酸化鉄が含まれている。この酸化鉄を還元して純度の高い鉄を生成することにより, 人々の日常生活や研究活動等に多用されている鉄製品を現地で生産することが可能になると考えた。また, 鉄の生成に必要な熱エネルギーを太陽炉を用いて調達することにより, 大規模な発電設備や他天体からの燃料供給への依存性を高めずに製鉄を行うことができる考えた。

本稿では, 火星での製鉄設備の構築を実現するため, 火星の砂を原料とし, 太陽炉から熱エネルギーを得る製鉄設備について提案する。

## 2 ミッション概要

### 2.1 ミッションの目的

鉄鋼材料は我々の生活に密着した材料であり, その用途は広範囲にわたり, 使用量もほかの材料を圧倒する。そのため火星に移住する可能性を検討した場合, 火星で製鉄を行うことは非常に有益である。火星で作成した製鉄は地球上の鉄系材料の使用用途に準じることが想定される。文献によると製鉄の用途のほとんどは製鋼の原料となるが, 一部分は鋳物用原料としても使われる。具体的には道路のガードレールや建築物の骨組等インフラ整備に利用されるであろう。

表1に火星の砂と構成する主な成分と, その重量割合を示す。

表1によると火星の砂の割合では酸化ケイ素が最も多い。このことから火星で生産する材料はセラミック系がよいと思われるが, 鉄とセラミックの機械的特性を比較した場合, セラミックは脆性材料であるので加工が容易でない。さらに脆性材料であるために引張強度は鉄に劣る。したがって汎用性の高い鉄を生産した方が優位である。

地球から火星へと物資を送る場合の費用の概算値を表2に示す。表2より, 有人で物資を送る場合, 膨大な輸送コストが生じてしまい, 衛星を何度も送るのは不可能である。したがって火星での製鉄作業は必然である。

また, 火星での生産は地球外惑星からの資源の有効利用への展望を示すためにも非常に有益である。

表1 火星における砂の組成(上から割合順)

成分	重量割合 [wt%]
SiO <sub>2</sub>	44.4
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	20.3
SO <sub>3</sub>	9.5
MgO	8.5
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.6
CaO	5.5
other oxides	6.2

表2 火星への鉄系材料の調達コスト

手法	価格 [億円/t]
ロケット(無人)	100
衛星(無人)	200
衛星(有人)	10000
現地生産 <sup>†</sup>	6800[円/t]

<sup>†</sup> 設備輸送費用は含まない

以上より, 本ミッションの目的は, 火星環境を考慮した独自の製鉄手法を火星で実施し, 製鉄を行うことである。

### 2.2 ミッションの内容

ミッションの目的を達成するために, ミッション内容を以下の5項目に分割した。

- (1) 酸化鉄の還元
- (2) 必要な資源量の算出
- (3) 太陽炉の設計
- (4) 製鉄設備全体の設計
- (5) 輸送性の考察

(1)では, 地球での既存の製鉄手法について火星環境下での実現性を評価し, 火星環境下で火星の砂を原料として鉄を生成する手法を化学的観点から取り扱う。(2)では, (1)で考案した製鉄手法に要する資源の量の試算の実施と調達方法の検討を行う。(3)では, 火星での太陽炉の有効性について検討し, 火星地表面での加熱性能を試算する。(4)では, 太陽炉を含む製鉄設備全体の設計と運用について検討する。(5)では, 使用する太陽炉を地球から輸送することを想定し, その輸送手段について考察する。

本稿では, (1), (2)を第3章で, (3)を第4章で, (4), (5)を第5章でそれぞれ取り扱う。

表3 火星の大気組成

成分	モル分率 [%]
CO <sub>2</sub>	95.32
N <sub>2</sub>	2.7
Ar	1.6
O <sub>2</sub>	0.13
CO	0.08
H <sub>2</sub> O	0.021

### 3 製鉄工程

#### 3.1 地球における製鉄方法

地球上で行われている製鉄の流れを図1に示す。

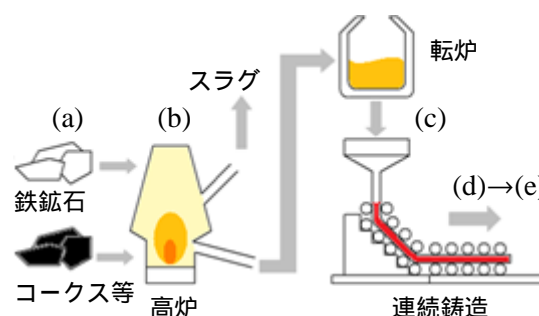


図1 製鉄方法概略図

図1において(a)~(e)の各工程について説明する。

- 粗鋼の投入 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>を主成分とする鉄鉱石とコークス(炭素を主成分とした燃料及び還元剤)、石灰石等を交互に高炉に投入する。
- 製鉄 高炉内に熱風を送りこむことでコークスを燃やし、炉内温度を2000℃近くに上昇させ、鉄鉱石を溶かして銑鉄をつくる。
- 製鋼 高炉から取りだされた製銑を転炉に移し、炉内に純酸素を送り込むことで炭素と不純物を酸化燃焼させる。また、内部に残存するガスを取り除くために脱酸を行う。
- 圧延(連続鋳造) 熱的ロスを減らす観点から、製鋼炉から直接圧延工程に移る連続鋳造(連続鋳)が主流となっている。連続鋳では任意厚さ成形、連続的な鋼板の製造が可能となっている。
- 処理加工 連続鋳まで行った鋼板は表面にメッキを施して耐食性を向上させる。

#### 3.2 火星における製鉄の問題点

以上の説明から火星における製鉄の問題点を3点挙げる。

- 火星には炭素が微小であることからコークスが存在しないため代わりとなる還元剤が必要である。
- 不純物を除去するための還元剤及び溶剤は地球に存在しているものがほとんどないため、不純物除去の代替技術が必要である。
- 現在火星には精錬まで行えるほどの設備は存在せず、精錬過程までの再現が難しい。

以上の項目について代替案を次の節に示す。

#### 3.3 火星における製鉄技術の構築

##### 3.3.1 火星の砂の特徴

SiO<sub>2</sub>の割合が大部分を占めており、鉄鋼の主原料となるFe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>は次いで20%、その他すべて10%以下となっていることがわかる。鉄鉱石と比較すると組成は比較的類似しているが、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>の占める割合が低くなっている。これは、火星での製鉄の難易度を高める要因の一つとなると予想さ

#### 2.3 火星環境の概要

ミッション内容を具体的に検討するために、火星環境について調査及び仮定を行った。

火星の大気は地球のものより稀薄で、大気圧<sup>1)</sup>は約0.636 kPaである。また、地表での平均気温<sup>1)</sup>は約210 Kである。大気の組成<sup>1)</sup>のうち、上位6種類の気体とその割合を表3に示す。

以上をまとめると、地球と比較して以下の特長が考えられる。

- 低い酸素濃度と小さな大気圧のため、外気への依存性が高い燃焼等の化学反応は不適
- 低い気温のため、液体を用いる場合には凍結に注意
- 低い大気圧のため、圧縮機等の回転翼の効率が低下する可能性あり

また、火星での製鉄手法の検討にあたって、以下の条件を仮定した。

- 製鉄作業は屋外で実施
- 火星の表土を不足なく採取可能
- 水素は火星で調達

(a)は、作業場所に関する仮定である。製鉄作業は大きな発熱を伴うことが予想されるため、安全性確保を目的として作業は屋外で行うべきであると考えた。従って、化学反応について火星の気温、大気圧等を考慮する必要がある反面、発熱量の上限値や装置の規模の制限は無視する。

(b)は、表土の採取に関する仮定である。火星の地表を大規模に採掘した探査機はまだ存在しないため、火星の表土の採掘性は不明である。しかし、居住施設が存在すれば、建設などを目的とした、地表を掘削するための有効な技術が存在していると考えた。

(c)は、使用可能な物資に関する仮定である。火星の極地域の凍土には水が固体の状態で存在するとされる。これを融解し、太陽光発電等によって得られた電力を用いて電気分解を行い、H<sub>2</sub>を調達する。

以上の自然環境及び設備に関する条件を考慮し、火星に特化した新たな製鉄手法について検討する。

表 4 砂の成分物性

成分	密度 [g/cm <sup>3</sup> ]	融点 [°C]	沸点 [°C]	判定 <sup>‡</sup>
SiO <sub>2</sub>	3.00	1650	2230	浮遊
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7.85/6.98 <sup>†</sup>	1550	—	—
SO <sub>3</sub>	1.92	16.9	45	気化
MgO	3.58	2852	3600	浮遊
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.97	2072	2977	浮遊
CaO	3.34	2572	2850	浮遊

<sup>†</sup> 個体/液体それぞれの融点を表わす

<sup>‡</sup> 遊離または気化についての判定

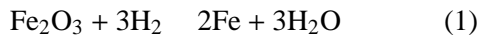
れる。

### 3.3.2 火星での製鉄の定義

地球で定義される製鉄とは、銑鉄を精製する“製銑”および純度、機械的性質を向上させる“精錬”の2工程の総称であるが、本テーマである“火星における製鉄”の製鉄は前者の製銑のみを指し、精錬工程を省くものとする。主な理由は、精錬を行うほど精巧な設備を導入することが困難なこと、通常の製錬であれば低減させられるべき炭素が水素還元を用いれば全く生成されなくなるなどである。今回、筆者らは火星で実現できる“製鉄”行程の限界は、地球における“製銑”行程までと見積もり、本テーマではこれをもって製鉄と呼ぶ。

### 3.3.3 還元剤の代替

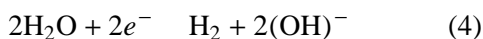
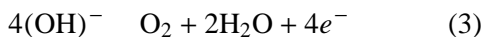
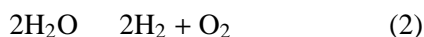
前述のとおり、還元剤となるコークスが火星において存在しないことが問題点である。このことは火星での製鉄において高い障壁となる。地球からコークスを輸送するという解決法が考えられるが、その場合、鉄の生産量が限定されてしまい非効率的である。よって、火星にもとより存在する物質を還元剤とする方法が得策であると判断した。これらを踏まえ、筆者らは、“水素による還元”を提案する。



式(1)は鉄と水素の還元反応式で、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>にH<sub>2</sub>をふきつけることによりFeが還元されることを示す。これを利用すれば、コークスなしでの製鉄が可能となる。

### 3.3.4 水素の生成方法

製鉄時に必要な水素の調達について述べる。火星には地下に比較的高純度の氷が存在する。筆者らはその氷を電気分解することにより、製鉄に必要な水素を調達することとした。以下に水の電気分解における化学反応式を示す。式(2)が全反応式、式(3)が陽極における反応式、式(4)が陰極における反応式である。



水1Lあたりの物質量が55.56 molであるため、式(2)より水1Lあたり生成できる水素の量は1671.48 Lとなる。また、式(1)式より製鉄1回で還元剤として使用する水素の量は4069.83 Lとなる。よって、製鉄1回あたりに要する氷の量は2.43 kgとなる。

続いて、製鉄1回あたりに要する電力量を求める。まず水素1 molを生成するための電力量は式(5)で示される。(F = 27.0 Ah/mol はファラデー定数、E は端子電圧、n は水素に対する電荷の数)

$$W = F \times E \times n \quad (5)$$

今回、端子電圧2Vとし、式(4)より電荷の数は2個となる。これらより、電力量Wは、108 Wh/molとなる。また式(1)より製鉄1回あたりに必要な水素量は135.38 molであることがわかるので、製鉄1回あたりに必要な水素を生成するための電力量は14.62 kWhとなる。

最後に、水素生成に必要な電力量より火星に用意するソーラーパネルの規格を決定した。まず、火星での日照時間も考慮し、1日の発電時間を5時間とした。よってソーラーパネルは最大出力153 W、面積1165 mm × 990 mmのものを20枚、計約3 kWのものを用意した。これにより1日15 kWhの発電が可能となり、製鉄1回に必要な水素を生成するための電力量が確保できる。

以上をまとめると、鉄5 kgを生成するためには準備として、3 kWのソーラーパネルで5時間の発電を行い、2.43 kgの氷を電力量14.62 kWhにて電気分解し、1回の製鉄で使用する水素4069.83 Lを生成する必要がある。

### 3.3.5 新たな不純物除去法の構築

筆者らは火星の砂の各成分の物理的特性を利用した全く新たな不純物除去法を考案した。以下にその手順と原理を示す。なお各成分の物理的特性は表4に従う。

Phase1 SO<sub>3</sub>の遊離

Phase2 MgO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO, SiO<sub>2</sub>の遊離

Phase3 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>の還元

Phase1 炉へ砂を投入し加熱を開始する。炉内温度が45°Cに到達するとSO<sub>3</sub>が気化し砂内から消滅する。このとき、Feの硫化が懸念されるが、FeはFeSよりFe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>で安定となるため、硫化することはない。

Phase2 炉内温度をさらに1600°C付近まで上昇させる。すると、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>が融点を超え、液状化する。MgO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO, SiO<sub>2</sub>の融点はいずれもFe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>の融点を上回るうえ、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>より比重が小さいので、これら4成分は浮遊する。浮遊したところをすくい上げ、除去する。なおSiO<sub>2</sub>の融点はFe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>の融点に比較的近いため温度制御を精密に行うよう、注意する必要がある。

Phase3 1600°Cの炉内雰囲気において、溶湯に対して水素を炉内下部から供給し攪拌する。還元が終了したら、生成されたFeを冷却し、炉内から取り出す。

### 3.4 加熱対象

加熱対象について，必要熱量試算に関わる諸元を示す．加熱対象は (i) 火星の砂と (ii) 炉に大別される．以下でそれぞれについて述べる．

- (i) 火星の砂 火星の砂の成分割合・密度は，表 1, 4 のとおりである．また，表 5 に各成分のモル質量を示す
- (ii) 炉 炉は高さ 44 cm，直径 28 cm の円筒状で Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 製とする．内部に攪拌棒が装着してあるが，試算では無視する．また，炉の輻射による熱損失は無いものと仮定した．炉の素材の全体積は 6918 cm<sup>3</sup>，質量は 27.5 kg である．

### 3.5 必要熱量試算

ここでは，Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> に含まれる Fe 原子をすべて抽出可能であると仮定して，Fe 5 kg (純度 100% の鉄インゴット) の製鉄に必要な熱量を試算する．(i) 火星の砂の必要熱量と (ii) 炉の必要熱量を求め，合計し，(iii) 総熱量とする．なお，Fe の生成熱は小さいため無視する．

- (i) 火星の砂の必要熱量 式 (1) と，表 5 中の Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> のモル質量と Fe のモル質量 (55.845 g/mol) より，Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 159.7 g から Fe 111.69 g が生成されることがわかる．この関係から，Fe 5 kg を得るために Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> が 7.15 kg 必要であることが計算できる．そして，表 1, 4 を用いて Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> を 7.15 kg を含む火星の砂の各成分の質量と体積が計算できる．表 6 にその計算結果を示す．表 5, 6 から，Fe 5 kg を得るために必要な火星の砂の各成分の物質質量が計算できる．表 5 にその計算結果を示す．熱量は式 (6) から求める．

$$Q = n \int_{T_1=230}^{T_2=1873} C(T) dT \quad (6)$$

火星の平均気温は  $T_1 = 230$  K で，製鉄時の最高到達温度は  $T_2 = 1873$  K であるから，積分区間を 230 から 1873 とした． $n$ [mol] は物質質量， $T$ [K] は温度である．また，文献<sup>3)</sup>に記載されている各温度における無機化合物の熱容量の表から図 2 のグラフを作成し，形状から近似式を定め，1 mol あたりの熱容量  $C(T)$  とした．表 7 に各成分の  $C(T)$  と，表 8 に式 (6) か

表 5 各成分のモル質量

成分	モル質量 [g/mol]
SiO <sub>2</sub>	60.080
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	159.690
MgO	40.304
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	101.960
CaO	56.080
SO <sub>3</sub>	80.066

表 6 質量と体積の算出結果

成分	質量 [kg]	体積 [cm <sup>3</sup> ]
SiO <sub>2</sub>	15.638	6255.369
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7.150	1375
MgO	2.994	836.269
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.972	496.830
CaO	1.937	579.998
SO <sub>3</sub>	3.346	1045.643

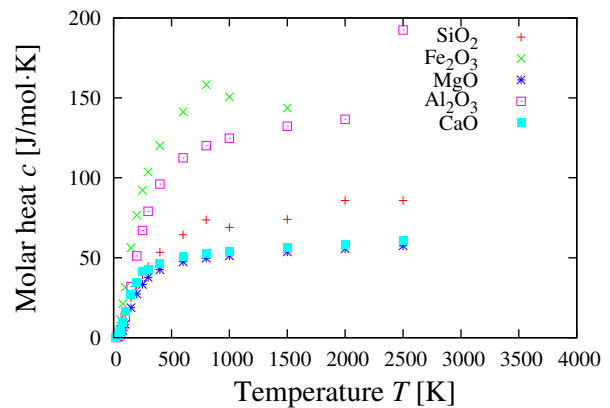


図 2 各物質の温度  $T$  とモル比熱  $c$  の関係

ら計算した熱量を示す．Fe 5 kg の製鉄時に必要な火星の砂の必要熱量は，表 8 の熱量を合計し  $7011 \times 10^4$  J となる．

- (ii) 炉の必要熱量 炉の質量と，表 5 の Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> のモル質量を用いて，炉の物質質量  $n = 269.4$  mol を得る．これを  $C(T)$  の式に代入し式 (6) を利用すると， $9692 \times 10^4$  J となる．

表 7 比熱の近似式一覧

成分	式
SiO <sub>2</sub>	$C_s(T) = 20.486 \ln T - 72.284$
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	$C_f(T) = -8 \times 10^{-11} T^4 + 4 \times 10^{-7} T^3 - 0.0007 T^2 + 0.5825 T - 17.101$
MgO	$C_m(T) = 14.691 \ln T - 52.017$
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	$C_a(T) = 2 \times 10^{-14} T^5 - 1.0 \times 10^{-10} T^4 + 4.0 \times 10^{-7} T^3 - 6.0 \times 10^{-4} T^2 + 0.4575 T - 19.59$
CaO	$C_c = -1.910 \times 10^{-17} T^6 + 1.594 \times 10^{-13} T^5 - 5.255 \times 10^{-10} T^4 + 8.718 \times 10^{-7} T^3 - 7.652 \times 10^{-4} T^2 + 3.426 \times 10^{-1} T - 1.058 \times 10^1$



表 8 砂の熱量試算結果一覧

成分	熱量 [kJ]
SiO <sub>2</sub>	28880
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13860
MgO	5895
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6960
Cao	14510

(iii) 総熱量 火星の砂の必要熱量と炉の必要熱量を合計し総熱量  $1670 \times 10^5 \text{ J}$  が求まる。

## 4 太陽炉

### 4.1 火星での有効性

太陽炉は放物面鏡を用いて太陽光を集光し、得られた輻射によって物体を加熱する装置である。太陽炉は加熱に要するエネルギーを太陽光から得るため、Joule 熱やアーク放電といった電力から熱源を得る加熱方法と比較して使用電力が少なく、電力供給設備への依存性が低い。

太陽からの輻射は、惑星の大気圏を通過して地表に達する。地球上では濃密な大気や雲等により、天候の影響を受けやすく安定性に劣る。一方、2.3 節での記述より、火星では大気圧が地球より小さく、大気による減衰は減少する。また、地球と比較して大気中の水蒸気量が小さく、太陽光を遮蔽し得る雲が形成されないため、安定性も向上する。以上より、太陽炉は火星環境に適した加熱装置であると考えられる。

以下、本章では火星環境下における太陽炉の実現性の検証を行う。なお、本ミッションで用いる太陽炉を含む製鉄設備全体の設計手法については 5.1 節で扱う。

### 4.2 加熱性能

太陽炉の規模と加熱性能との関係を得るため、最高到達温度と伝熱量の 2 つを設定し、それぞれ試算を行う。対象とする太陽炉は、放物面鏡 1 枚のみを備えた最も単純な構造をもつ、直達型太陽炉とする。

最高到達温度  $T_m$  の算出には、理論式<sup>4)</sup>において式中の直達日射を放物面鏡に流入する熱流束  $q$  で置換した式 (7) を用いる。

$$T_m = \left[ \frac{4q}{\sigma\alpha^2} \left\{ 1 - \left( \frac{16-n^2}{16+n^2} \right)^3 \right\} \right]^{\frac{1}{4}} \quad (7)$$

ただし、 $\alpha$  は太陽の視直径、 $n$  は口径比、 $\sigma = 5.670 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$  は Stefan-Boltzmann 定数である。また、加熱対象物からの伝導伝熱と対流伝達を無視し、輻射伝熱が Lambert の法則に従うとの仮定のもとに成立している。

火星での太陽炉の実現性を検証するため、式 (7) を用いて最高到達温度の試算を行う。放物面鏡

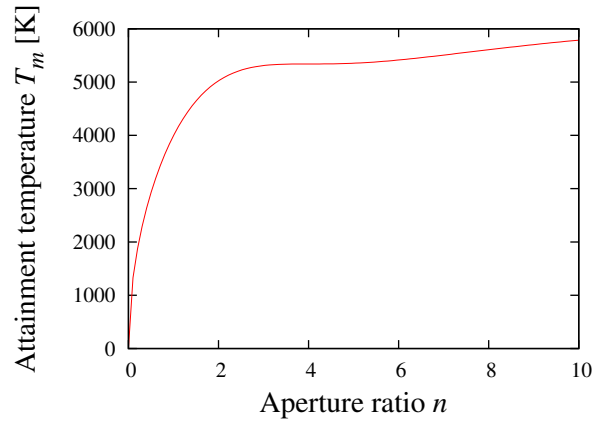


図 3 直達型太陽炉の到達温度  $T_m$  と口径比  $n$  の関係

に入射する熱流束  $q$  は、火星軌道での太陽定数 ( $589.9 \text{ W/m}^2$ ) に自身の反射率  $\rho = 0.9$  をかけ、 $q = 530.9 \text{ W/m}^2$  を得る。

火星での太陽の視直径  $\alpha$  は、太陽の直径を  $d$ 、太陽と火星の距離を  $l$  として次式により定義される。

$$\alpha = \frac{d}{l} \quad (8)$$

上式より、 $d = 139.2 \times 10^7 \text{ m}$ 、 $l = 227.9 \times 10^9 \text{ m}$  を代入し、 $\alpha = 6.108 \times 10^{-3} \text{ rad}$  を得る。

口径比  $n$  は、放物面鏡の直径  $D$  と焦点距離  $f$  の比であり、次式により定義される。

$$n = \frac{D}{f} \quad (9)$$

以上より、得られた  $q, \alpha$  をもとに口径比  $n$  と最高到達温度  $T_m$  との関係を図 2 に示す。

口径比の選定にあたって、到達温度及び光路に関する幾何学的考察から口径比の許容範囲について検討を行う。下限値は、図 3 より要求される到達温度から設定する。例えば、本ミッションでの製鉄が要する最大温度は  $1873.15 \text{ K}$  であるため、 $n > 1.6$  が求められる。

一方、上限値は口径比と光の照射方向の関係から決定する。放物線の焦点は、口径比が増加するにつれて放物面鏡の鏡面に近付き、 $n = 4$  で放物面鏡の縁と焦点の高さが一致する。すなわち、 $n > 4$  では加熱対象物は側面からも熱せられる。本ミッションでは溶鉱炉内の加熱対象物に光を直接当てて加熱するため、照射対象面は平面となる。よって、口径比は  $n < 4$  でなければならない。以上より、口径比の上限値が得られた。

図 3 の曲線より、 $n = 3$  のときに  $5310.45 \text{ K}$  となり、それ以降  $\partial T_m / \partial n$  は小さくなっている。よって、上下限値内の値である  $n = 3$  を用いて試算を行う。また、このときの光路の概観を図 4 に示す。

次に、伝熱量について検討する。直達型太陽炉では放物面鏡に入射する伝熱量  $\dot{Q}$  は、口径  $D$  を用いて式 (10) によって表される。

$$\dot{Q} = q \frac{\pi D^2}{4} \quad (10)$$

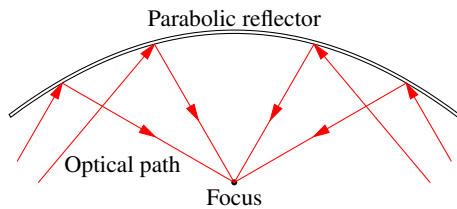


図4 放物面鏡の断面と集光光路 ( $n = 3.0$ )

表9 口径と入射エネルギー量の関係

口径 $D$ [m]	伝熱量 $\dot{Q}$ [kW]
0.50	0.1042
1.0	0.4170
2.0	1.668
5.0	10.42
10.0	41.70
20.0	166.8

上式より、伝熱量は口径に依存する。口径は、要求される伝熱量に応じて決定する。式(10)を用いて、 $0.50 \leq D \leq 20.0$  の範囲にて、6通りの口径について伝熱量を試算した。なお、熱流束は図2の場合と同様に  $q = 530.9 \text{ W/m}^2$  を用いた。その試算結果を表9に示す。

表9より、口径  $D = 2 \text{ m}$  では伝熱量が  $1.6 \text{ kW}$  を超え、市販の  $1 \text{ kW}$  級の小型電気炉に匹敵する。また、 $D = 10 \text{ m}$  では、市販の大型電気炉に匹敵する出力が得られる。

以上より、太陽炉によって製鉄に必要な到達温度  $T_m = 1873.15 \text{ K}$  を実現可能であることが示された。また、口径比の許容範囲を決定したり、口径と伝熱量との関係が得られたりした。すなわち、太陽炉が火星環境下で製鉄に必要な加熱性能を満足し得ることが示された。

## 5 運用構想

### 5.1 設備設計

4.2節では、対象の太陽炉を最も基本的な形態である直達型太陽炉と仮定して試算した。しかし、直達型太陽炉は本ミッションには適さない。

直達型太陽炉は鏡面を上に向けると加熱面は下を向くため、液体の加熱には不適である。本ミッションでは溶鉱炉内で加熱対象物を熔融させるため、溶鉱炉の液面を鉛直上向きに保ちつつ上面から加熱を行う必要がある。また、伝熱量を増加させるためには口径を増加させる必要があり、鏡面の大型化による輸送性の悪化や設置難易度の増加を伴う。

すなわち、本ミッションで用いる太陽炉には、熔湯の落下を防ぐために開口部を常に上に向けておくことと、口径を小さくしつつ必要な伝熱量を得ることが求められる。そこで、図5に示す配置を

採用する。

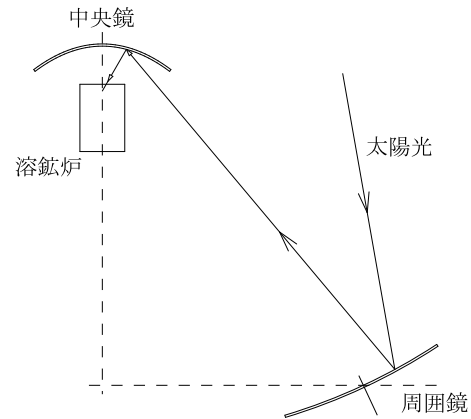


図5 各鏡の配置と光路の概要

本ミッションで用いる製鉄設備は、複数の装置から構成される。設備の中央に配置された加熱用放物面鏡（以下、中央鏡）の下に溶鉱炉を配置し、受光面積を確保しつつ各装置を小型化するため、その周囲に集光用放物面鏡（以下、周囲鏡）を複数配置する。中央鏡は固定式とし、真下に上下に移動可能な溶鉱炉を設置する。周囲鏡には仰角、方位角、高さを調整できる機構を装備する。中央鏡と周囲鏡の概観をそれぞれ図6, 7に示す。

溶鉱炉は、内部に攪拌装置<sup>7)</sup>を備える。これは、中央鏡からの伝熱によって熔湯の光照射面近傍のみが熱せられ、熔湯全体の温度均一性の低下を防ぐためである。

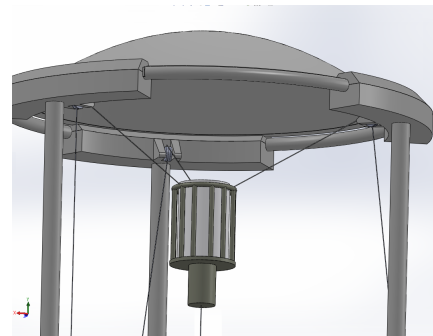


図6 中央鏡の概観

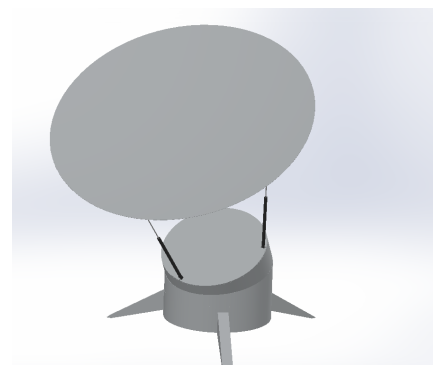


図7 周囲鏡の概観

天球上での太陽位置は天体運動により時々刻々と変化する。そこで、時間の経過に対する加熱の安定性を確保するため、周囲鏡を適切に駆動する。太陽軌道を正確に予測するには、製鉄設備の自己位置が既知である必要があるが、現在の火星にはGPS等の容易に高精度な測位が可能な環境は構築されていない。そのため、周囲鏡の正確な制御を目的として、太陽をカメラで捕捉してフィードバックとして用いるとともに、太陽軌道の算出<sup>5)</sup>を行う。さらに、周囲鏡と溶鉱炉の駆動に用いる電力を削減したり、中央鏡への伝熱むらを低減するため、これらを最小化項目として、オンラインでの最適制御<sup>6)</sup>を行うことも実用上有効であると考えられる。

以上を踏まえ、設計例として表10の設計条件での製鉄装置全体の概観を図8に示す。

火星の砂は人間が直接シャベル等で採取し、直接炉へ投入するものとする。本ミッションで提案する製鉄は小規模なものであり、煩雑な装置を使用し自動化するメリットが乏しいと判断した。表10の設計条件の規模であれば、人間が直接採取した方が自由度も高く経済的であると考えられる。

## 5.2 宇宙機への搭載

製鉄設備を地球から火星に輸送するにあたり、宇宙機への搭載について検討した。現在、地球と火星を往復して運搬を行う宇宙機が存在しないため、大気圏への突入に耐えうる輸送用宇宙機としてSpace Shuttleを仮定し、主要部品が搭載可能であるか検討を行う。

本ミッションで用いる製鉄設備では、周囲鏡の

表10 設計条件の設定例

項目 [単位]	値
最大伝熱量 [kW]	37
中央鏡口径 [m]	2.0
周囲鏡口径 [m]	2.5
中央鏡高さ [m]	3.0
緯度 [deg]	0.0
周囲鏡の列数	2



図8 製鉄設備全体の概観

口径と個数はトレードオフの関係となっており、宇宙機に搭載可能な口径を選択しても個数で補うことが可能である。実際に、表10の設計条件では、Space Shuttleのペイロードベイ<sup>8)</sup>(直径4.6m×長さ18.3m)に搭載可能な寸法値である、中央鏡の口径を2m、反射鏡の口径を2.5mに設定し、37kWの最大伝熱量の条件を満たす設計例を提示した。以上より、本ミッションで用いる製鉄設備は宇宙機への搭載に際し、寸法値の設定に柔軟性があるため、火星へ輸送可能であると考えられる。

## 6 結言

本稿では、電力や燃料が限られた火星環境でも実施可能な製鉄手法を提案した。ミッションの実現性について検証し、設計例を示した。本稿で行ったミッションの解析内容を以下にまとめる。

- (1) 地球上の製鉄技術の適用性についての検討
- (2) 独自の製鉄技術の提案
- (3) 火星の自然環境・設備を考慮した加熱装置の選定
- (4) 太陽炉の形式の決定
- (5) 太陽炉の加熱性能についての検討
- (6) 設計例の提示

本ミッションが火星開拓及び今後の人類の繁栄に貢献できることを願っている。

## 参考文献

- 1) National Aeronautics and Space Administration, “Mars Fact Sheet”, (参照日 2013年10月31日), [http://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/factsheet/marsfact.html].
- 2) “地球の正体(その3):火星の組成”, (参照日 2013年7月1日), [http://kissyarita.blog.fc2.com/blog-entry-186.html].
- 3) 社団法人日本化学会, “化学便覧 基礎編 改定5版”, (2004), 丸善株式会社.
- 4) 桜井武磨, “太陽炉”, *Journal of the Japan Society of Precision Engineering*, Vol. 29, No. 338 (1963), pp. 197–208.
- 5) 瀧澤隆宏, 須田健太郎, 平社信人, 長谷川翔, “揺動を伴う移動体からの太陽光捕捉による火星測位システムの試作研究”, *Proc. 22th Workshop on JAXA/ISAS Astrodynamics and Flight Mechanics*, A-9 (2012).
- 6) Hirakoso, N., Takizawa, T., Ishihara, M., Aoki, K., “Online Tracking Control of Autonomous Mobile Robot Utilizing Optimal Formulation”, *Journal of System Design and Dynamics*, Vol. 6, No. 3 (2012), pp. 310–321.
- 7) 東京窯業株式会社, “攪拌装置”, 特開 2012-167868号. 2012-09-06.
- 8) 宇宙航空研究開発機構, “スペースシャトルの概要”, (参照日 2013年11月1日), [http://iss.jaxa.jp/iss\_faq/inf/shuttle.html].