



特集記事・2

鉄鋼業を取り巻く独創的な発想に基づく
研究・技術開発

人類の居住領域拡大を目した 宇宙・月面製鉄への試み

A Trial of Cosmic or Lunar Surface Ironmaking toward Habitable Zone Expansion of Human Race

小林能直

Yoshinao Kobayashi

東京工業大学
科学技術創成研究院
教授

1 人類の宇宙計画・探査の歴史

20世紀半ばに大戦終結後、冷戦に入った東西世界構造の中で、戦略的に優位に立つべくソ連、米国が領空のはるか上、宇宙空間での覇権を競い合う時代が訪れた。先の大戦は洋上戦から航空戦へと高度展開し、さらにエレクトロニクスの力と核エネルギーを味方につけた側に有利に展開した事実に基づき、大陸間弾道ミサイルを視野に、もとより宇宙開発はこれら延長線上にあったものである。一連の競争の中で災禍に犠牲になった多くの方々の鎮魂への思いを馳せ、祈りを捧げるこの2021年8月に、上記の夢の先のようなお題で執筆をする機会をいただいている。

上記宇宙開発競争の緒戦を制したのはソ連であり、大陸間弾道ミサイル（1957年、R-7）、人工衛星（1957年、スプートニク1号）、宇宙への動物（1957年、スプートニク2号、ライカ）、有人宇宙飛行（1961年、ユーリイ・ガガーリン）、人工惑星（1959年、ルナ1号）、月面衝突（1959年、ルナ2号）、月面着陸（1966年、ルナ9号）、宇宙ステーション（1971年、サリユート1号）、火星着陸（1973年、マルス3号）など、国家体制の確立も背景に赫赫たる成果を上げた¹⁾。

一方の米国は「スプートニクショック」に対応すべく陸海軍の協力体制に難儀しつつも数度の失敗を経て、翌1958年によく 익스プローラー-1号の打ち上げに成功した。開発の遅れを憂慮した当局は同年にアメリカ航空宇宙局（NASA）を立ち上げ、有人宇宙飛行を目指したマーキュリー計画を立案し、1959年にはテストパイロットを決定していたが、同年すでに月に着目し月面衝突・人工惑星を実現していたソ連に対し、ロケット爆発や月への途上での失速・墜落など技術的な劣勢を覆せず、ついに有人宇宙飛行でも先を越されることになる。事態を重く見たジョン・F・ケネディ大統領は「1960年

代に月にアメリカ人を送り込む」ことを宣言し、これがアポロ計画につながった。段階的な技術革新により号数を追うごとに成果を上げた同計画でついにアポロ11号が月面着陸・探査を行うことに成功し、その後17号まで計画は遂行された²⁾。

その後米国はスカイラブ計画による宇宙ステーションからバイキング計画に始まる惑星探査へと展開し、1977年8月、9月にボイジャー計画³⁾により2号機、1号機が次々と打ち上げられ、木星、土星、天王星、海王星の観測に成功し、土星の輪の正体が氷状物質であるなど太陽系空間における貴重な情報の数々を残し、現在は星間空間航行に入っている。一方ソ連は開発体制の一元化やロケットタイプの選択で困難を生じ、その後の国家体制の変革により事実上終焉を迎え、その後その技術遺産はロシア連邦宇宙局などに引き継がれることとなった。

日本における宇宙開発は、戦後の事実上航空技術開発が不可能な時期を経て、1951年のサンフランシスコ平和条約締結による再開後、東京大学生産技術研究所・航空班（後の宇宙航空研究所（1964年）、宇宙航空科学研究所（ISAS、1981年））にてペンシルロケットからカップ／ラムダロケットへと展開した小型ロケット開発の末に、1970年に我が国初の人工衛星「おおすみ」の打ち上げに成功した⁴⁾。その間、科学技術庁では1963年に航空宇宙技術研究所（NAL）、1964年に宇宙開発推進本部（後の宇宙開発事業団（NASDA、1969年））を設置し、科学技術研究が主体の東大・宇宙研に対し、NASDAは種子島をロケット発射基地として、米国からの技術供与も受け、商用衛星の開発に力を入れ、1975年にN-Iロケット打ち上げに成功した⁵⁾。

その後、文部省および科学技術庁管轄の3機関は、それぞれに開発を進めた。宇宙研・ISASは「おおすみ」打ち上げの技術をもとにミューロケットに展開、大気観測衛星、X線

天文衛星の打ち上げ・運用に成功し、1985年の地球の重力圏脱出に必要な第二宇宙速度を超える出力を持つM-3SIIロケットの開発につなげた。一方NASDAは米国からの技術移転により1977年に静止気象衛星「ひまわり」を打ち上げた後、徐々に技術の国産化率を高め、N-Iの大型化後継モデルN-IIロケット（1981年）、そして500kgを衛星軌道に投入できるH-Iロケット（1986年）、後継完全国産モデルH-IIロケット（1994年）の開発に成功した。その後しばらく商用衛星の海外主流化や大型ロケット打ち上げ失敗が続くなどで躓き、政府主導の宇宙機関の統合の動きにより、2003年にISAS、NAL、NASDAが統合され、文部科学省・宇宙航空研究開発機構（JAXA）⁶⁾が発足した。

この年代の間にも、米国NASAでは順調に開発が進められ、1981年にはスペースシャトルの初号機コロンビア号が打ち上げられ、1986年のチャレンジャー号の事故などもあったが、ハッブル宇宙望遠鏡の実現、そして国際宇宙ステーション（ISS）計画に、再使用型宇宙往還機として貢献した⁷⁾。なお米、露、日、加、欧州によるISS建設計画は、1995年のロシアとのシャトル・ミールドッキングプログラムによる協力関係も経て、現在も継続中である。

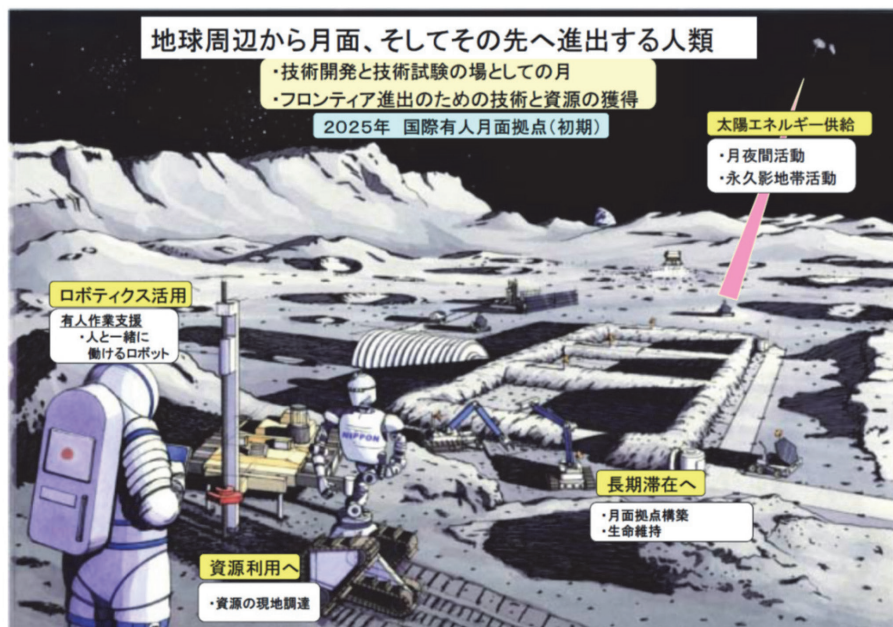
2000年前後より、米国は惑星を中心に太陽系探査を行うことを本格的に志向し、ディスカバリー計画によりマーズ・パスファインダーが火星に着陸、探査車による火星表面の貴重な観測データが得られた。その流れの中で、2004年に探査機スピリットが火星に着陸した直後、G・W・ブッシュ大統領（当時）は「宇宙開発の展望」と題する新宇宙政策「コンステレーション計画」⁸⁾を発表、2008年のリーマン・ショックからの世界同時不況などを背景にバラク・オバマ大統領により中止されたが、有人火星探査計画として展開は続き、再度の月面への有人着陸を目指すアルテミス計画が2019年に公表されている。

JAXAは発足2年後の2005年には、約20年後までの宇宙航空分野の望ましい姿を長期ビジョンとして発表し⁹⁾、「宇宙と物質・空間の起源」と「宇宙における生命の可能性」への挑戦とともに（図1）、月面でのその場資源利用（In-Situ Resource Utilization）と月面拠点の構築についてもビジョンが掲げられた（図2）。2007年の月周回衛星「かぐや」による月環境の実測精査¹⁰⁾、2009年の国際宇宙ステーション（ISS）への物資の補給およびISSで最大の実験棟となる「きぼう」の運用の成功、ISAS時代の2003年打ち上げの「はやぶさ」による小惑星イトカワからのサンプルリターン成功に続く、2014年打ち上げの「はやぶさ2」による小惑星リュウグウからのサンプルリターンなど、上記ビジョンに合致した特筆すべき成果が挙げられた。

このように、20世紀中盤の宇宙開発の幕開け以来、人類はその探索領域を常に拡大し、いまや知の境界線の拡大のみならず、惑星・衛星表面を含む宇宙空間の活用実現に向けた研究開発が加速されている。本稿、「人類の居住領域拡大を目した」などと壮大な枕詞を冠してしまっただが、まずは「資源のその場利用」の考えに基づく鉄鋼製造・鉄づくりのロケーションとして、地球から最至近の天体である月、月面に着目した製鉄プロセス展開可能範囲拡大への試みに向けた展望を描けたら、と考えている。



図1 JAXAの掲げる宇宙開発⁹⁾

図2 JAXAの月面開発計画⁹⁾

2 宇宙・月面製鉄の試みへの着目

人類の宇宙空間への進出を考える際に重要なのは生命体が生存可能なインフラの確保である。宇宙には、無重力空間、真空雰囲気、太陽由来のものをはじめとする各種粒子線、超高温、極低温など、およそ地球上で育まれてきた、人類をはじめとする生命体には受け入れがたい環境が広がっている。生命体には本来環境適応性が備わっており、地球上でも氷河期と温暖期の交互到来、南北方向の磁場交代や磁場変化、太陽フレアからの高エネルギー線の到達、約6500年前の小惑星衝突に代表される大小さまざまな数々の天体の飛来など、多種多様な絶滅の危機に追い込まれつつも生命体、生態系は全体としては生き残ってきた。そして最終的に動物種の中では哺乳類の進化を促す環境となり、人類の出現につながるといふ偶然あるいは必然の結果となっている。しかしこれは天文学的時間スケールでなされた遺伝子の進化の結果であり、地球上とはおよそ異なる環境に向かおうとする際に、我が生命体系の環境適応能力に期待するのはほとんど不可能に近い。

そこで、地球に至近で、夜空に輝く天体の中で異様に大きく、惑星と衛星の大きさの組み合わせとしては極めて近い位置にあり、潮の干満などにも強く作用し、古来より人類の心を惹きつけてやまず、惑星科学としても非常に興味深い天体である月に着目し、表面地質としての物質状況や、重力作用などの物理的状況にも近い要素を期待し、宇宙への人類の居住領域拡大を目した試みの第一歩として、月面拠点の構築が考案された⁹⁾。そこで問題となるのはその構築に必要な物資、原材料の調達であり、なかでも地球上での人類の近代

的文明発展に不可欠であった「鉄鋼」は、必然、宇宙における拠点インフラ構築においても最重要物質として目されている。しかしこの製造に必要なすべての原材料を地球から運搬することは、「月への物資の輸送費は1kgあたり1億円」とも言われているように、およそ現実的ではない。そこで、まずは月土壌における鉄資源となり得る物質の存否が焦点となる。

本来鉄は、宇宙でも最も安定な元素であり、原子番号26番のこの元素は宇宙創成期のビッグバン以降、軽元素同士の核融合による原子量の大きい元素への変遷を経て生成され、自発的に生成する元素としての終着点ともなっている。これより大きい元素は、例えば超新星爆発などの莫大なエネルギー源などからの助けを得ないと融合生成されないため、鉄はその安定性から、周期表を踏まえた宇宙における元素の存在割合において特異的に高い値を示している。これは、古代の地球に鉄とニッケルが金属状態で存在している隕鉄が降り注いでいたことにも傍証づけられ、鉄富化 α 相とニッケル富化 γ 相の層状結晶が、1℃冷却するのに100万年を費やさないと形成されない特殊な金属組織として発見されており、これは悠久の時間を旅してきたことの証左でもある。さらに言えば、この組織中に鉄相とニッケル相の界面に、強磁性体からなる磁性多層膜である「鉄プラチナ」に匹敵する高い機能性(磁気異方性)を示す相が生成していたことが現代になって物性の観点から明らかにされ、鉄の「機能性材料」としてのプレゼンスは古代よりあったとも認識できるが、構造材料として考えた場合、いわば「降鉄量」の絶対量が少なすぎ、人類の文明をリードする材料となるには、地球環境雰囲気や安定である「酸化鉄」すなわち鉄鉱石を、地上にふんだんにある

還元剤としての炭素源である石炭と高炉内で反応させ大量に生産する、現代の製鉄法の発明を待たねばならなかった。

したがって、月面に隕鉄状で膨大な量の「金属鉄」が存在すれば問題はないのだが、月の創成プロセスで検討されているように、地球に匹敵するようなサイズの別惑星の衝突から引きちぎれるようにして生じた天体であるとする¹¹⁾、鉄は地球上と同じく酸化状態で存在することが予想される。またアポロ計画における一連の探査により、月の表面は、レゴリスと呼ばれる細かい砂と岩石で覆われていることがわかっており、これが「月土壌」を形成している。月のレゴリスの大部分は隕石の衝突により岩石が破碎されて生じたもので、数m～数十mの深さにわたって粒径8～125 μm の細かな粒子が堆積している。表1に示すように、アポロ14号が持ち帰ったサンプルにより、やはり残念ながら金属状態の鉄は存在しないものの、同時に、月土壌には酸化鉄を10mass%前後含む土壌が存在することが月面調査の結果としてわかり、これを鉄資源として活用することができれば、月面製鉄および月資源

をその場利用した建造物建設へ向け、大きな第一歩を踏み出すことができる。

3 月面製鉄研究¹³⁾

月面製鉄が、地球環境の中での従来の製鉄に比べてプロセス的に有利かどうかは、原料の調達、天体間の距離の問題とは別に、実現可能性を評価する上で欠かせぬ検討事項である。表2に月面環境と地球環境における主な物理的条件の違いを示す。なかでも考慮すべきものに、重力と大気が挙げられる。月の重力(重力加速度 1.62 m/s^2)は地球の重力(重力加速度 9.81 m/s^2)の約 $1/6$ であり、月面拠点に用いる建築資材、構造物などすべての物が地球上より軽くなるため、構造部材の必要量が下げられる利点がまず挙げられる。また、この重力差に起因して、月には大気がほとんど存在せず($\sim 10^4\text{--}2\times 10^5\text{ molecule/cm}^3$)、月面は地球の大気($2.5\times 10^{19}\text{ molecule/cm}^3$)に比べて $4\times 10^{-16}\text{--}8\times 10^{-15}$ 倍の圧力の高真空

表1 月土壌の化学組成¹²⁾

Components	Apollo 11	Apollo 12	Apollo 14	Apollo 15	Apollo 17	Lunar 16	Lunar 20
SiO ₂	42.2	46.3	48.1	46.8	43.2	41.7	45.1
TiO ₂	7.8	3	1.7	1.4	4.2	3.4	0.55
Al ₂ O ₃	13.6	12.9	17.4	14.6	17.1	15.3	22.3
Cr ₂ O ₃	0.3	0.34	0.23	0.36	0.33	0.28	0
FeO	15.3	15.1	10.4	14.3	12.2	16.7	7
Fe ₂ O ₃	0	0	0	0	0	0	0
MnO	0.2	0.22	0.14	0.19	0.17	0.23	0.13
MgO	7.8	9.3	9.4	11.5	10.4	8.8	9.8
CaO	11.9	10.7	10.7	10.8	11.8	12.5	15.1
Na ₂ O	0.47	0.54	0.7	0.39	0.4	0.34	0.5
K ₂ O	0.16	0.31	0.55	0.21	0.13	0.1	0.1
P ₂ O ₅	0.05	0.4	0.51	0.18	0.12	0.12	0.16
S	0.12	—	—	0.06	0.09	0.09	0.08
Sum	99.9	99.11	99.83	100.79	100.14	99.68	100.82

表2 月と地球の物理的条件の違い¹⁴⁾

Property	Moon	Earth
Mass (kg)	7.353×10^{22}	5.976×10^{24}
Radius (km)	1738	6371
Surface area (km ²)	37.9×10^6	510.1×10^6
Mean density (g/cm ³)	3.34	5.517
Gravity at equator (m/s ²)	1.62	9.81
Escape velocity at equator (km/s)	2.38	11.2
Mean surface temperature (°C)	107 (day), -153 (night)	22
Atmosphere (molecule/cm ³)	$\sim 10^4$ (day), 2×10^5 (night)	2.5×10^{19}

の状態に保たれているため、還元や熱分解などの製鉄反応が進みやすいと考えられる。後者に関しては、月表面の昼間の太陽光放射は大気がほぼないこともあって地球に比べ地表で熱エネルギーとしてとらえられやすく、これを反応の熱源として活用し、月面の高真空と太陽エネルギーによる熱分解により、月土壌中の酸化鉄から鉄を生成できる可能性があるが、蒸気圧差を考慮した捕集システム考案の必要性もあり、反応速度も考えると還元剤を作用させるほうが実現性が高い。しかし月面には還元剤は存在しないため地球から運搬しなくてはならず、安全面・経済性など観点から炭素（黒鉛）が候補として挙げられる。そこで本稿では月面製鉄の第一段階として黒鉛溶融還元による月土壌からの製鉄の可能性を検討した基礎研究を以下に紹介する¹³⁾。

人類が発明した中で最高効率の向流型還元反応金属生産装置ともいわれる高炉を用いた製鉄法は、酸素を炭材と反応させ生成したCOガスにより、鉄鉱石を主に還元する過程であり、大規模なプロセスとして完成されている。熱・物質の向流により反応効率を最大化するため、縦型にして重力による酸化鉄から鉄に変遷する凝縮層の下方への物質移動を促し、一方還元剤であるCOガスは下部からの熱風吹込みにより上方へ向流させる。そのため、ガスの通気性を確保する観点から、酸化鉄すなわち鉄鉱石と炭材すなわち石炭は、積み重なった層の中で適度な空隙を保たせねばならず、必然粉状原料は使えず、鉄鉱石は適切なサイズに焼き固めた焼結鉱を、石炭は乾留して強度を持たせたコークスを使用している。それぞれの層が圧縮崩壊して目詰まりを起こさないよう、強度確保のための原料前処理が必須で、これに好適な高品質の原料確保が大きな制限となっている。このような劣質化する鉄資源の問題、そして一度火入れをすると定修などの大規模中断を行うまではほぼ定量出銑となるため生産量調整が難しいなどの問題を解決するため、溶融還元法の開発が1980年代から進められてきた。我が国では1988年から8年間の国家プロジェクトとしてDIOS (Direct Iron Ore Smelting Reduction Process)¹⁵⁾の開発が行われた。この方法は、鉄浴型溶融還元法と呼ばれるもので、1,500℃程度の溶銑ないし溶融スラグに鉄鉱石を添加することで、鉄鉱石を溶融状態で溶銑中の溶解炭素によって瞬時に還元し、溶銑を製造するプロセスである。鉄鉱石の銘柄を問わず使用ができ、上述の高炉法で必要なコークス炉や焼結機といった原料の塊成化工程が不要であるという特徴があるが、スラグの高酸化鉄濃度および熱供給のための燃焼による高温に起因する炉壁耐火物損傷の問題などもあり、また開発当時、国内では既存の設備が生産余力を持って弾力的な対応可能な需要動向であったため、操業はほとんど行われて来なかった経緯がある。しかし、月面製鉄では、月土壌の酸

化鉄濃度が低い、「溶融酸化鉄の還元」というプロセスが必須であり、この実施可能性、特に速度論的な考察は重要になると考えられる。

溶融酸化鉄還元速度論としては、これまで黒鉛を還元剤とした溶融還元プロセスにおける反応機構や反応速度の検討も多く行われている。須賀田ら¹⁶⁾は1623–1723 KでFeO, SiO₂, Al₂O₃およびCaOなどを含む試料に黒鉛棒を浸漬、回転させて還元を行い、化学反応律速であること、反応速度定数は酸化鉄の活量の1次に比例するとしたとき最もよく整理できることを示し、化学反応速度定数として $1.7 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$ (1873K)を報告している。また佐々木ら¹⁷⁾はCOガス吹き付けによる溶融酸化鉄の還元COによる溶融酸化鉄還元の化学反応速度定数として1350 cm/s (1873K)を報告、月橋ら¹⁸⁾はCOガス輸送層による溶融酸化鉄の還元反応の化学反応速度定数として9.3 cm/s (1723K)を報告している。しかし報告値同士は互いに大きく異なり、また高酸化鉄濃度・高塩基度のスラグの測定値が大半で、月土壌のような低酸化鉄濃度・低塩基度の系に対してはほとんど行われていない。そこで、我々は月土壌を模擬した系での溶融スラグの還元実験を行った。

もちろん、実際の月土壌はほぼ入手不可能であるため、その組成と粒度分布を模した模擬砂（シミュラント）（図3）、組成 (mass %) : 49.1SiO₂-16.2Al₂O₃-9.13CaO-4.77Fe₂O₃-8.30FeO-12.4その他)を用いることとし、黒鉛坩堝に装入しての溶融還元実験を行った。実験炉としては縦型管状電気抵抗炉を用い、黒鉛坩堝中に40gのシミュラントを装入し、直径を変えた黒鉛棒を挿入したケースも合わせ、場合によってはこれを回転させるなど、温度レベルも含めて様々な条件により実験を行った。これにより、模擬砂中酸化鉄が黒鉛により還元され、金属鉄粒が生成することを確認した（図4）。ま

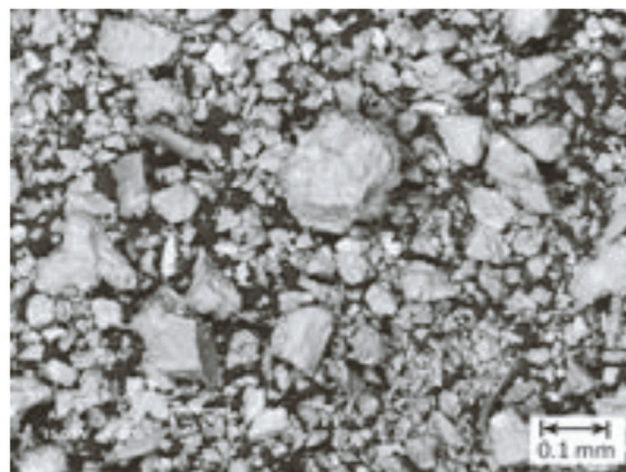


図3 月模擬砂（シミュラント）

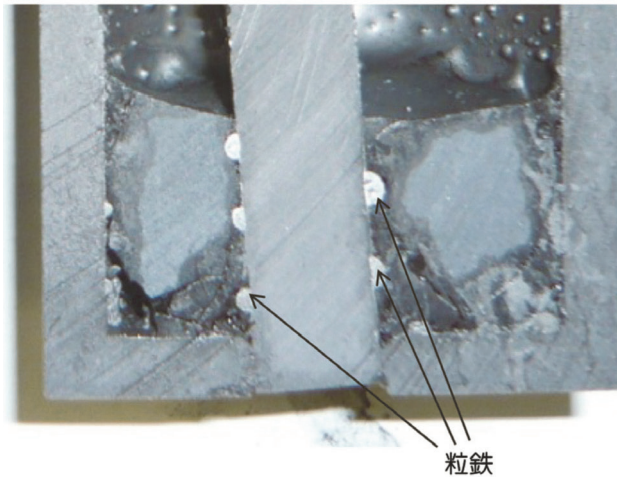


図4 黒鉛還元による溶融模擬砂からの粒鉄の生成

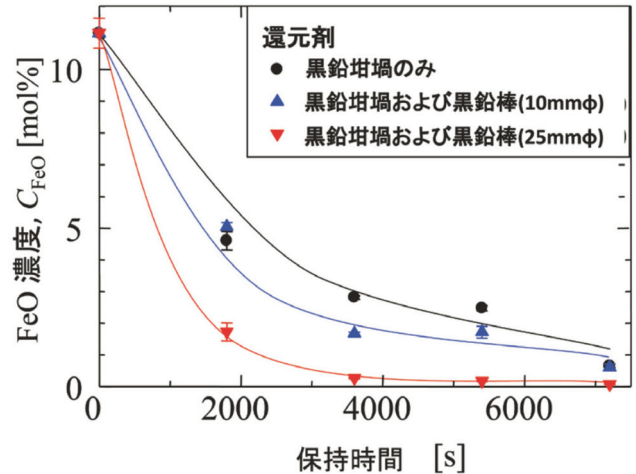


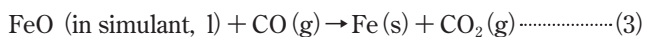
図5 黒鉛還元による溶融模擬砂中酸化鉄濃度の経時変化

た溶融シミュラント中酸化鉄濃度は大きく低減し、黒鉛坩堝中に黒鉛棒を装入して反応界面積を増やすことにより反応は速く進むこと(図5)、1706~1803 Kと温度を変えた実験により高温の方が反応は早く進むことがわかった。さらに、黒鉛棒を用いて浴を攪拌することにより反応は促進され、その効果は500rpmまで見られ、それ以上では反応速度は変化しないことがわかった。上記の結果から、月土壤模擬砂の黒鉛溶融還元における総括反応速度定数を式(1)の一次反応速度式により整理した。

$$v = -\frac{V}{A} \frac{dC_{\text{FeO}}}{dt} = k_t C_{\text{FeO}} \quad (1)$$

(v : 還元反応速度 ($\text{mol} \cdot \text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$), V : 溶融模擬砂の体積 (cm^3), A : 反応界面積 (cm^2), C_{FeO} : FeO 濃度 ($\text{mol} \%$), k_t : 総括反応速度定数)

なお、この式は本系で考えられる式(2)および式(3)の化学反応あるいは反応界面のシミュラント側境膜内 FeO の物質移動のいずれが律速した場合においても数式上成立する。



式(1)に基づき実験結果について C_{FeO} の対数と t の関係をプロットし、その関係の直線性から得られる傾きから、 k_t として $2.0 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$ を得た。これは須加田ら¹⁷⁾による1723 Kでの $2\text{FeO} \cdot \text{SiO}_2$ 組成近傍での値と近い値となった。また温度上昇により $0.5 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$ (1706 K) から $2.0 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$ (1803 K) まで反応速度は増大した。この結果から反応速度定数の温度関数であるArrheniusの関係式(式(4))に基づいて、みかけの活性化エネルギー(E_a)を試算したところ、約360

kJ/mol を得た。

$$k = k_0 \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (4)$$

(k : 反応速度定数, k_0 : 頻度因子, E_a : みかけの活性化エネルギー, R : 気体定数, T : 温度)

また1803 Kで静止状態で $2.0 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$ であった反応速度定数が、攪拌により500rpmで $9.0 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$ に達した。

静止した黒鉛を用いたときのみかけの活性化エネルギーは約360 kJ/mol と大きく、化学反応律速である可能性があること、黒鉛棒の回転速度が速くなるにしたがい反応速度が増大することから以下のように反応機構を考察した。静止状態では、溶融模擬砂と黒鉛の間には $\text{CO}-\text{CO}_2$ のガス境膜が存在し、模擬砂中酸化鉄はまずこの境膜内の CO で還元されて鉄となり、その結果生成した CO_2 は黒鉛で再度還元されて CO に戻るといった間接還元の反応経路を通る。その後黒鉛棒による攪拌が進むにつれガス境膜は剥離し、溶融模擬砂と黒鉛棒が直接触れる割合が増大して模擬砂中酸化鉄が直接黒鉛に還元される直接還元の経路で反応が進むことにより反応速度が増大し、ついにはガス境膜が完全に消失して反応速度が最大化する。すなわち、攪拌によるガスフィルム剥離により反応の律速段階が CO ガスによる酸化鉄の間接還元から、黒鉛による直接還元に移行する、という反応機構が考えられる(図6)。

このような実験結果と速度論考察から、黒鉛の周囲のガス境膜の除去が反応速度の増大につながるという観点からの知見が得られ、これにより月面における黒鉛還元製鉄の優位性を考察した。液体中の気泡の上昇速度は以下のStokesの式で示される。

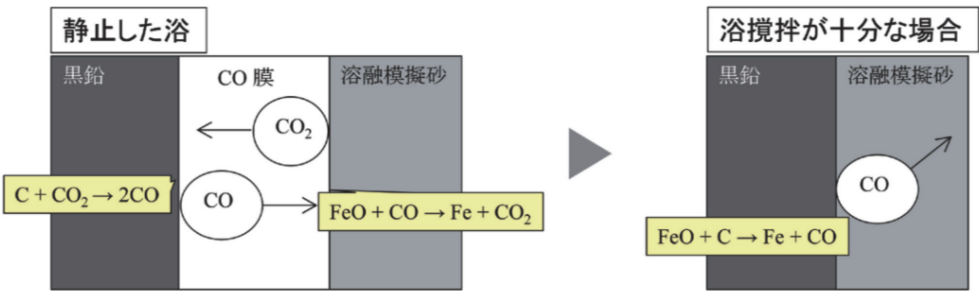


図6 熔融模擬砂中酸化鉄の黒鉛還元機構

$$\frac{4}{3}\pi R^3(\rho_s - \rho)g = 6\pi\eta Rv \dots\dots\dots (5)$$

(*R*:気泡半径, *ρ_s*:液体の密度, *ρ*:気体の密度, *g*:重力加速度, *η*:液体の粘度, *v*:気泡の上昇速度)

したがって、気泡の上昇速度は体積の2/3乗、重力加速度の1乗に比例して増大することになる。月面の大気圧は地球上の約10⁻¹⁵倍であること、重力加速度は約1/6であることを考慮すれば、単純な圧力平衡のみを考えると月面での気泡上昇速度は地球上の約10⁹倍となる。さらに熔融月土壌による静水圧（静スラグ圧）は地球上の約1/6であることも考慮すれば、月面ではCOガスが容易に離脱するため、反応速度増大に非常に有利な環境であることがわかった。

このように、地球以外の天体で熔融酸化鉄含有融体の炭素還元による製鉄を行うことは、プロセス条件上の利点がある場合があることを高温物理化学の観点から考察することができた。抽出金属相、酸化物層、生成ガスの分離性の観点から重力の存在は必要ではあるが小さい方がよく、また圧力平衡の観点から真空度が高い方がよい、ということが示され、月面はその条件を整えることができるよい候補天体であることがわかった。また、月土壌が、鉄源である酸化鉄を低濃度ながら含むということで、資源のその場利用（Insitu Resource Utilization, ISRU）が可能な点も前提として大変重要である。これらの条件を満たしそうな次の天体の候補としては宇宙開発戦略上も注目されている火星が考えられる。マーズパスファインダーなどの探査結果が示すように、地表土壌の赤色が鉄の存在を示すとすれば、ISRUが可能であり、重力が地球の3分の1程度、気圧は地球の大気圧の0.75%と、プロセス条件的にも有利であると考えられる。もちろんパラメトリックに考えなければならない要素に関する検討は今後さらに総合的に進める必要はあるが、人類の居住領域拡大を目した宇宙への展開の第一歩として、月面製鉄への試みが橋頭保になり、次なる天体への展開が展望できれば、と考える次第である。

4 人類の歩みとしての宇宙製鉄

上述したように、鉄は空から降るのを待って、金（gold）より価値が高いとされ「天空の金属」と言われた時代から、炭火を燃やした焼け跡に、偶然、酸化鉄が還元されて生成したのであろう金属鉄の発見を経て、人類が自らの意思で鉄を製造することが可能になり、まずは武具や建築補強材などとしての役割を担い、そして高炉という人類史上最大効率の向流型反応容器の発明によって、産業革命を経て、人類文明の欠くべからざる必須インフラである構造材料として、そして磁石などの機能性材料としても発展してきた。そして中央集中型の生産スタイルから、現代の多様性対応のための言わば地産地消型の生産を目指す展開の中で、高炉に比して小規模である直接還元法、熔融還元法や連铸～成形過程においてもミニミルといった生産プロセスが考案されてきた。そしてさらなる展望を望む宇宙製鉄は、extraterrestrialな天体の上にその生産サイトを考えるという、上記の歩みのパフォーマンスの最大化の概念とも言えるものである。

人類の三大災禍と言われる、自然災害、戦争、感染症。そして現代はそれに加えて、人工物の安全処理（福島第一原子力発電所などの事故炉の収束）および地球温暖化の二大問題に人類は直面している。わが国では、2011年の福島事故の収束・廃炉、2020年からのコロナ禍対応、同年の菅首相の「カーボンニュートラル（CN）」宣言への産業界の対応などが喫緊の課題となっている。前者は安心安全な廃止措置のための燃料デブリ取り出し方法の提案に資する材料工学という観点から、そしてカーボンニュートラルについてはCN社会構築を目指した、ゼロカーボンでのエネルギー・材料創製という観点からの貢献を、本年6月に発足した東京工業大学・ゼロカーボンエネルギー研究所において目指している。その中で、ゼロカーボン（ZC）製鉄の基礎研究にも取り組み始めているが、鉄鉱石原料の鉄の創製が酸化鉄の還元工程が不可避である以上、ZCを目指すにはこの化学反応を化石燃料由来以外の電力・エネルギーで賄うしかなく、炭素循環型にするにしても、

いったんは不可避免的に発生するCO₂をCOに戻すエネルギーはゼロカーボンプロセスによるものである必要がある。このような取り組みを丁寧に進める一方で、地球から宇宙へと境界条件そのものを変えることで、global warmingすなわち「地球温暖化」を地球外プロセス展開により原理的に避け、すなわち地球環境視点で論ぜば「究極のゼロカーボン製鉄」となるが、人類の居住空間そのものも制限から解放されて展開できる可能性のあるテクノロジーへと人類はその歩みを進めようとしている。

鉄鋼産業は、我が国が誇る、世界に冠たる科学技術を擁する国力の源泉である。その持続可能な発展のためには畢竟「人材」が重要であり、「人材育成」を丁寧に行っていくと同時に、このような100年先を見通すことにもつながる「夢のある科学技術」で、学生の皆さんを惹きつけることも肝要かと感じている。そのような展望を描くとき、「宇宙製鉄・月面製鉄」は、我々が中長期的に直面する問題への解決法になり得ると同時に、営々と発展する地球製鉄技術に加えて、aviation, biology, terraformingなどの異分野とも融合する非常に魅力的なテーマになりうるのではないかと所感する次第である。

参考文献

- 1) <http://en.roscosmos.ru/>, (2021年8月).
- 2) United States. Congress. House. Committee on Science and Astronautics, (1973), 1974 NASA authorization: hearings, Ninety-third Congress, first session, on H.R. 4567. Page 1271. Washington: U.S. Govt. Print. Off.
- 3) <https://voyager.jpl.nasa.gov/>, (2021年8月).
- 4) <https://www.isas.jaxa.jp/missions/spacecraft/past/ohsumi.html>, (2021年8月).
- 5) 日下実男：日本の人工衛星, ダイアモンド社, (1971), 259.
- 6) https://www.jaxa.jp/about/history/index_j.html, (2021年8月).
- 7) https://www.nasa.gov/mission_pages/shuttle/flyout/index.html, (2021年8月).
- 8) W.H. Gerstenmaier : Transitioning to a Next Generation Human Space Flight System (English), United States Senate Committee on Commerce, Science and Transportation.
- 9) JAXA長期ビジョン概要, 宇宙航空研究開発機構, 平成17年4月6日.
- 10) 滝澤悦貞, 佐々木進, 加藤学：日本航空宇宙学会誌, 56 (2008) 656, 223.
- 11) P.D.Dpudis, 水谷仁訳：月の科学, シュプリンガー・フェアラーク, 東京, (2000).
- 12) 松本信二：月へ, ふたたび, オーム社, (1999), 11.
- 13) Y.Kobayashi, H.Sonezaki, R.Endo and M.Susa : ISIJ Int., 50 (2010) 1, 35.
- 14) Lunar source book, Cambridge University Press, ed. by G.H.Heiken et al., (1991), 28.
- 15) 北川融：鉄と鋼, 88 (2002) 8, 430.
- 16) 須賀田正泰, 杉山喬, 近藤真一：鉄と鋼, 58 (1972) 10, 1363.
- 17) 佐々木康, 相馬胤和：鉄と鋼, 64 (1978) 6, 376.
- 18) 月橋文孝, 加藤公雄, 大塚研一, 相馬胤和：鉄と鋼, 68 (1982) 7, 750.

(2021年10月4日受付)