

サーマルマイニングによる月面での水抽出

(第四報) 揮発性物質の分離方法の検討※

内田浩基・加茂雅裕

Thermal Mining for Lunar Water Part 4 – Studies on Separation of VOCs from Water Systems

Hiroki Uchida・Masahiro Kamo

月の氷レゴリスを加熱して取り出した水蒸気の捕獲方法と水蒸気以外の揮発性物質の分離方法について検討した。月の水氷には水以外に多量の揮発性物質が含まれており、月の水氷を水電解装置などに利用する際には、これらの揮発性物質を水から分離して水のみを抽出する必要がある。コールドトラップの形状の違いによる蒸気の冷却性能を調査した結果、これまで世の中で検討されている逆円錐台型のコールドトラップの場合、水と水以外の揮発性物質を十分に分離できず、Flow-through 法により水以外の揮発性物質を月面の宇宙空間に放出した場合、水の回収率が著しく低下する可能性が考えられる。そこで月面の水抽出を二段階に分けて、一段階目に、例えばコイル型コールドトラップなど微細な流路構造を用いた水（液相）トラップにより水抽出を行う。その後、二段階目に逆円錐台型コールドトラップを使用した氷（固相）トラップにより、抽出水中に溶け込んだ不純物を取り除く方法を考案した。このような二段階抽出方法により、月面において水の回収率を下げることなく、抽出水中の揮発性物質を大幅に低減し、後工程の純水化处理の負荷を低減することが可能と考えている。

1. 緒言

当社が開発した月面水電解装置を載せた ispace 社の月着陸船（ランダー）は 2025 年 6 月 6 日に月面着陸を試みた。しかし残念なことに、ランダーの不具合により月面着陸には至らず、世界初の月面での水電解装置を用いた水素と酸素の生成を実証することはできなかった。この結果を受けてもなお、当社は将来期待される月面エコシステムの一翼を担えるよう、引き続き環境クリエイター®として新たな環境への挑戦を続けていく²⁾。また今後、月面において水電解装置に使用する水資源の採掘と抽出に向けた技術実証を目指す³⁾。

月面において推薬である水素と酸素を生成する水電解技術は、ロケットの推薬生成プラント構想の後工程であり、この前段階として月面及び地下の氷の探査や採取、採取した氷のプラントへの輸送、水の純水化处理などの様々な工程が必要となる。これらの工程の内、当社では月面での水電解技術の開発に加えて、月に存在すると考えられている水資源の抽出方法を検討している（**図 1**）。本報では、月の氷を含むレゴリスを加熱して取り出した水蒸気の捕獲方法と水蒸気以外の揮発性物質の分離方法について検討した。

※ 本論文は、第 69 回宇宙科学技術連合講演会論文¹⁾を加筆修正したものである。

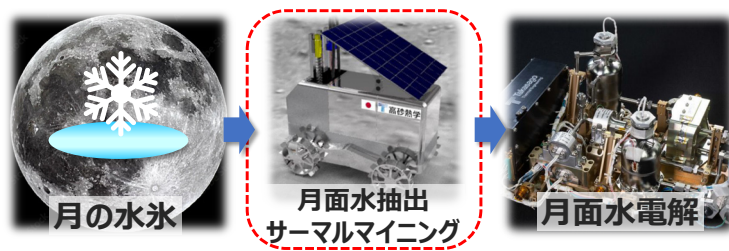


図1 月面水抽出サーマルマイニング技術の位置付け

2. 月面水抽出技術の動向

2.1 氷レゴリスの加熱方法

月の氷レゴリスを加熱してレゴリス粒子間に存在する氷を昇華させて水蒸気として取り出すサーマルマイニング（熱抽出）技術は Sowers によって提案された⁴⁾。Sowers の方法は、月面に太陽光を集光するドーム型の簡易テントを設営してテント内のレゴリス表層に集光した太陽光を照射し、この加熱によって発生した水蒸気を収集する方法である。しかし、月の極めて薄い大気（ $10^{-7} \sim 10^{-10}$ Pa）ではレゴリスの実効熱伝導率が非常に小さく数 cm 以上の深度にある氷を加熱できないことが問題である。そこで内田ら^{5, 6)}はより深い地下のレゴリス層の氷を加熱するため、ドリルで月面から 1m～数 m の深さの小孔を掘削し穴の先端を加熱することで加熱部を中心とした氷壁に囲まれた与圧空間を形成、この氷壁の内側にあるレゴリスを加熱して水蒸気を取り込む方法を提案した。一方、Hab⁷⁾および Kiewiet ら⁸⁾は、Sowers の簡易テント内でレゴリス表層を加熱する方法に対して、機械採掘により氷レゴリスを容器（るつぼ）に密閉して加熱する方法を提案し、水抽出の簡便さや装置寿命、水回収率（レゴリスに含まれる氷の元量に対する抽出できる水の割合）、エネルギー効率などの評価項目について詳細に比較した。この結果によれば、テント内でレゴリス表層を加熱する方法に比べて、機械採掘により容器内で加熱する方法の方が水回収率やエネルギー効率の点で約 10 倍優れるが、機械的な摩耗による装置寿命の短さや方法の煩雑さが難点である。このように、氷レゴリスを加熱する方法については、現時点ですべての評価項目を満足する方法がなく、当社提案のレゴリス深層に氷壁を形成し内部の氷レゴリスを加熱する方法も含めて、引き続き模索していく必要がある。

2.2 水蒸気の捕獲方法

サーマルマイニングにより氷レゴリスを加熱して昇華した水蒸気を、コールドトラップ（CT）の冷却面で液相の水または固相の氷の状態に捕獲する方法が検討されている^{9, 10)}。レゴリスに付着する氷の状態から CT を経て液相として抽出するまでの相変化における温度と圧力の関係と経路を図 2 に示す¹¹⁾。図 2 中の A は極低温・極低圧に保たれたレゴリスの氷の固相であり、この状態の氷をレゴリスごと加熱し B の気相（水蒸気）の状態にレゴリスから抽出する。抽出した水蒸気（B）は、2a の経路で一旦、氷（C）である 2b の経路で水（D）に相変化させるか、あるいは 3 の経路で直接、水（D）に戻すかの二通りが考えられる。

3 の経路で液相の水としてトラップする場合（以下、水トラップ）と 2a-2b の経路で固相の氷としてトラップする場合（以下、氷トラップ）の CT の形状案を図 3 に示す。水トラップの CT 形状は、CT 表面で流動性がある液相として水蒸気を捕獲するため、図 3(a) のようにコイル状の銅パイプ内壁で水蒸気を凝縮させるなど、蒸气流路と CT 面の形状を微細化することができる。一方、氷トラップの場合は、CT 表面に流動性がない氷が付着（凝華）するため、微細な流路は氷結によって閉塞する。更に、CT 表面から氷を剥離（例えば、シートヒーターなどの加熱により）して採取する場合、CT 周囲に氷塊を落下するための物理的空間が必要となる。このため、氷トラップの代表的な CT 形状は図 3(b) のような単一または複数の逆円錐台形状であり、Kalis¹⁰⁾や Heitkamp¹²⁾によって検討されている。

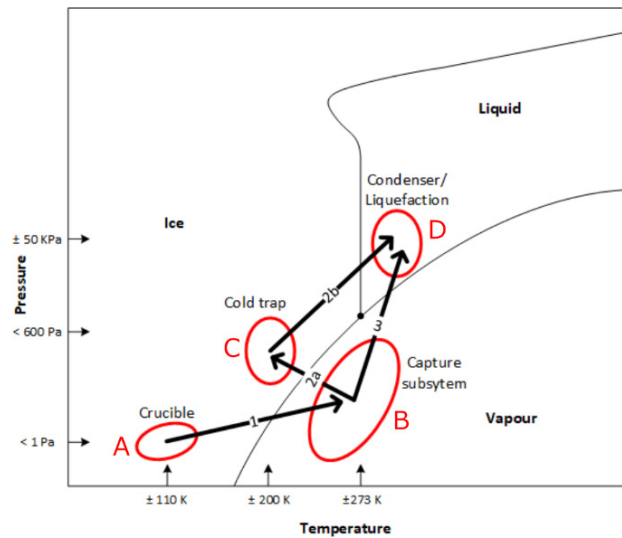


図2 月面水抽出における水の温度・圧力の相変化図¹¹⁾ (赤字のA~Dは著者が記入)

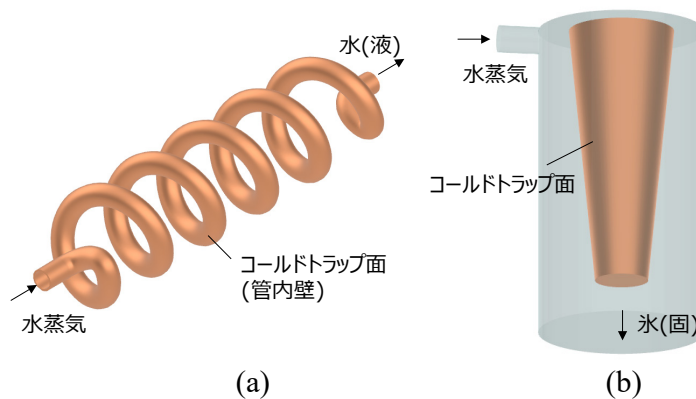


図3 水トラップと氷トラップの形状

3. 水蒸気捕獲と揮発性物質の分離方法の検討

月の氷には H_2O だけでなく水電解工程において装置の劣化や破損を引き起こす可能性がある有害な不純物 (H_2S , NH_3 , C_2H_4 等の揮発性物質) を 20~30 vol% 程度含む可能性が示唆されている¹³⁻¹⁵⁾。

図4に月の氷に含まれる揮発性物質の相図を示す¹⁴⁾。水以外の揮発性物質は水蒸気の凝縮・凝華が生ずる温度・圧力下において気体として存在する。このため、レゴリスの加熱により昇華する水以外の揮発性物質を含む蒸気をCTで捕獲する場合、水蒸気は凝縮・凝華し体積収縮するが、水蒸気以外の揮発性物質は凝縮・凝華しないNCG (Non-Condensable Gas) である。蒸発器と凝縮器からなる装置内において、水とNCGの昇華に対して、水のみ凝縮・凝華となるため、NCG分の気体モル量が増加し、装置内圧力が上昇する(ここでの現象は昇華と凝華であるが装置部品の呼称統一のため蒸発器、凝縮器とした)。この昇圧現象はNCGがCT表面で凝縮する圧力に達するまで継続するが、これにより蒸発器内において水が蒸発可能な圧力(飽和水蒸気圧)を超えるため、氷は昇華しにくくなると考えられる。

このような現象を避けるため、Holquistらは図5のFlow-through コールドトラップの概念を提案した¹⁴⁾。この概念では、凝縮器内にNCGが留まり装置内が昇圧した場合、凝縮部の下流において背圧弁を開放し月

面の真空中に NCG を放出することで、装置内圧を下げ、再び蒸発器内で氷を昇華しやすくすることができる。この概念においては、装置内の貴重な水蒸気が月面の真空中に NCG と一緒に放散されないよう、凝縮部の CT において確実に水蒸気を捕獲して、水蒸気と NCG を分離し、NCG のみ排出することが重要となる。

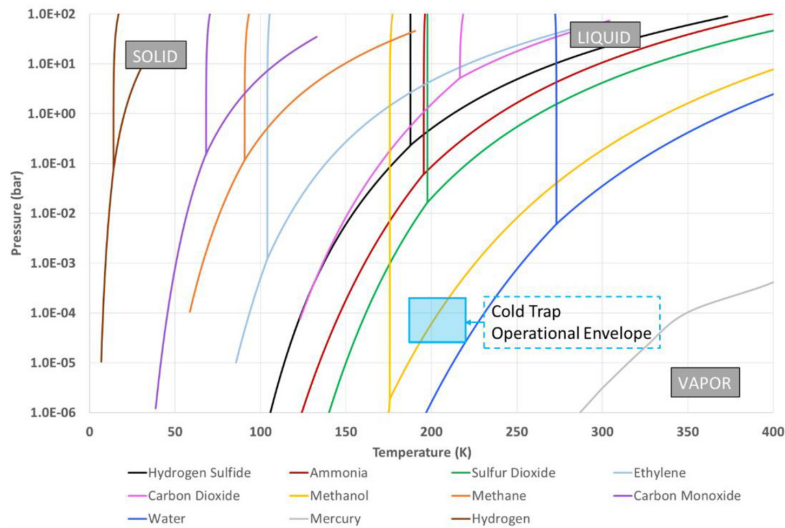


図 4 月の揮発性物質の相図と Holquist ら提案のコールドトラップ運用範囲¹³⁾

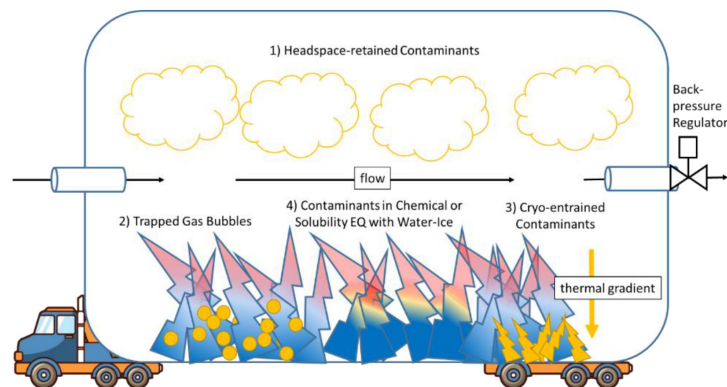


図 5 Holquist ら提案の Flow-through コールドトラップの概念図¹³⁾

図 3 の CT の形状の違いによる NCG を含む水蒸気の水の捕獲性能の違いを明らかにするため、図 6 の装置を用いた実験を行う。水以外の揮発性物質が含まれる蒸気の蒸発と凝縮の現象を定性的に理解するため、まずは月の氷の模擬物質として、安全で扱いやすく、水の凝縮・凝華点に比較的近いエタノールを選択した。凝縮器の CT 形状を図 3 のようにした場合の蒸発器と抽出液溜めのエタノール濃度を比較し水蒸気の回収効率について考察する予定である。

図 7 に、システム上流の蒸発器の温度から下流の凝縮器における温度変化とこれに対するアントワン式¹⁶⁾から求めた水とエタノールの飽和蒸気圧、および非理想系気液平衡計算¹⁶⁾による 20 vol%エタノール水溶液を蒸発させた際の凝縮器入口の水とエタノールの分圧を示す。この結果から、蒸発器から凝縮器に流れ込む蒸気は、凝縮器内において、水の場合は 2°C 以上、エタノールは 13°C 以上の冷却により凝縮すると考えられる。

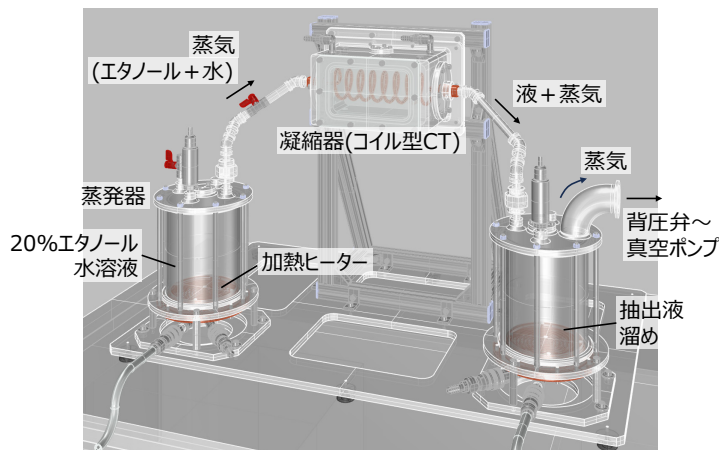


図6 揮発性物質を含む水蒸気の捕獲効率実験

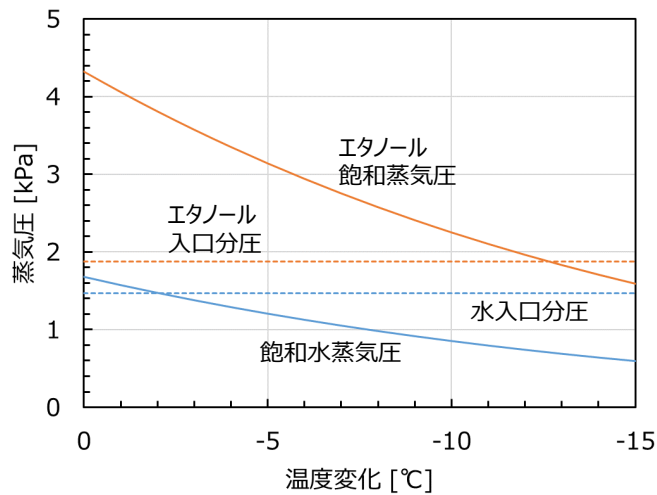


図7 水とエタノールの入口分圧と飽和蒸気圧

図8に、各CT形状の違い(図3)による蒸気の冷却性能の数値シミュレーション(相変化なし対流熱伝達のみ考慮)の結果を示す。ここでは、各解析モデルの入口と出口の境界条件(蒸気温度、圧力)、CT表面の温度や面積を等しくした。この結果から、図3(b)の逆円錐台型CTに比べて、図3(a)のコイル型CTは蒸気を効率よく冷却できることがわかった。コイル型CTは、出口付近の蒸気温度を入口温度から -9°C 程度冷却できるため、図7から水は凝縮するがエタノールは蒸気のまま凝縮器から排出されると予想できる。一方、図3(b)の逆円錐台型CTの場合は入口温度に対して、出口温度の降下は -2°C 未満であり、凝縮器からはエタノールだけでなくより多くの水が蒸気として排出される可能性が考えられる。今後、本シミュレーション結果について、図6の装置を用いて実験的に検証していく。

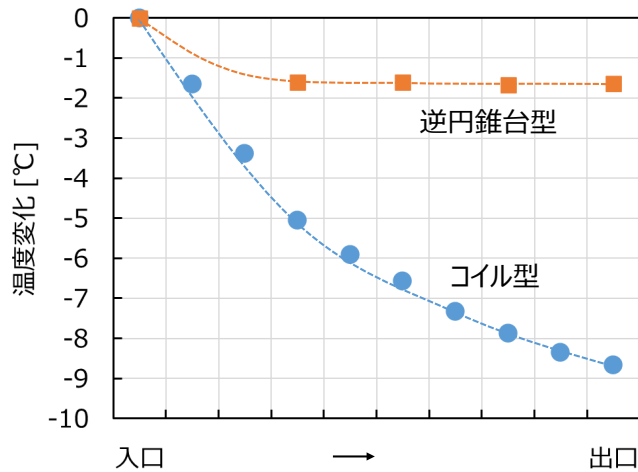


図8 各CT形状の蒸気冷却性能

4. 月の水を二段階で抽出する方法の提案

図3(b)の逆円錐台型（例えばKalis¹⁰⁾、Kiewiet¹¹⁾にて導入）のCTの場合、気相の水蒸気が液相の水よりも高い蒸気圧の揮発性物質を含む条件において、CT表面で水蒸気を捕獲できない可能性がある。このため、Flow-through法により月の真空中に蒸気を放出する際に、有害な揮発性物質と一緒に氷レゴリスから抽出した水蒸気も放出する可能性が考えられる。これにより、水の回収率の著しい低下が示唆される。そこで、我々は新たに図9に示すように月の氷レゴリスから二段階で水を効率的に抽出する方法を考案した。一段階目でコイル型などの微細な流路構造のCTを用いて水トラップを行い、蒸気に含まれる揮発性物質の大半を分離して、水以外の揮発性物質を月の真空中に放出する。その後、二段階目で氷トラップにより、更に抽出水に溶存する揮発性物質を取り除く。宮本ら¹⁵⁾によれば、高濃度の揮発性物質が混入する場合であっても氷トラップにより水蒸気を捕獲することで水に溶け込んだ揮発性物質量を大幅に低減できる。このように二段階の水抽出を行うことで、水の回収率を下げることなく、抽出水中の揮発性物質を大幅に低減し、後工程の純水化処理の負荷を低減することができると考えている。

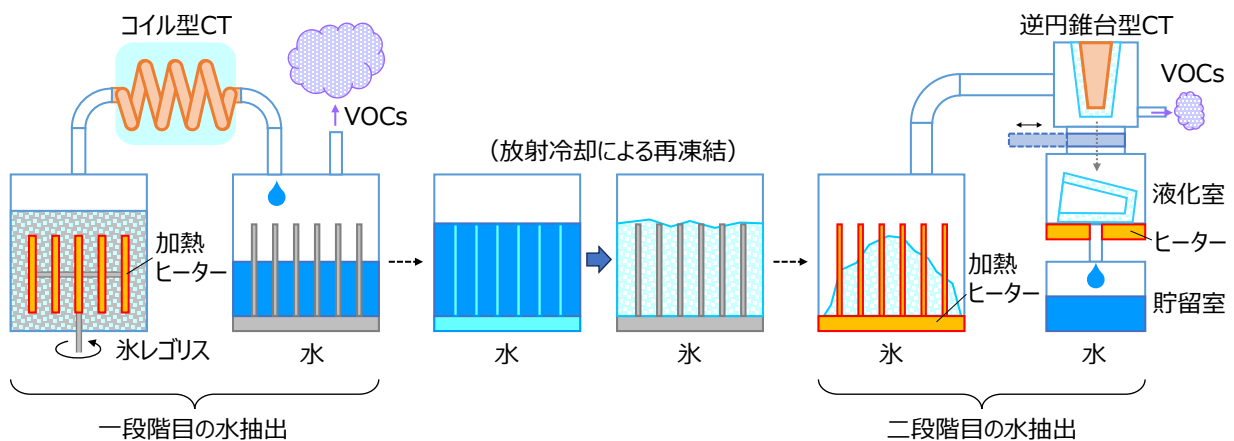


図9 月面における二段階式水抽出方法

5. 氷トラップによる月面水抽出技術

前節の二段階式水抽出法を実現するためには、①氷レゴリス加熱技術、②氷トラップによる水抽出技術、③氷トラップによる水抽出技術の要素技術が必要である。この内、②の技術については、3章の実験装置により実証実験を進める。①の氷レゴリス加熱については、月面水抽出装置への実装の容易さと実現性の観点から、まずは容器（るつぼ）内加熱を念頭に検討している。③の要素技術については、以下のようにエタノールを含む月の氷の各種揮発性物質とこれを含む氷レゴリスの模擬物質を製造し、①の氷レゴリスの加熱技術の検討と並行して氷トラップによる水抽出実験を行う。

5.1 氷レゴリス模擬物質の作成方法の検討

Wache¹⁷⁾により考案された霧状の水滴を含む空気流を LN2 液面に衝突させて、水を含む揮発性物質の水滴を急冷する方法により、月の氷を模擬した微細な氷粉末を作成する手法を試みる。氷粉末の作製装置の概略、および氷レゴリス模擬物質の作製手順を **図 10** に示す。氷粉末作製装置を用いて作製した氷粉末を含む LN2 懸濁液にレゴリス模擬物質（Exolith Lab 社 LHS-1 など）を添加し、極低温下の LN2 中で氷粉末とレゴリス模擬物質を攪拌して混合する。その後、LN2 を乾燥・除去することで、レゴリス模擬物質の粉末中に一様に氷粉末が分散した氷レゴリス模擬物質を作成する。

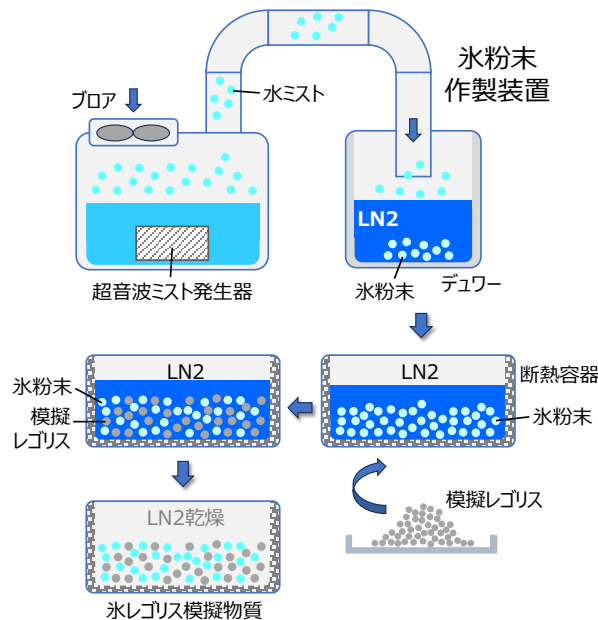


図 10 氷粉末の作製装置の概略、および氷レゴリスの模擬物質の作製手順

5.2 氷トラップによる水抽出装置の設計

現在、**図 3 (b)** の逆円錐台型の CT を用いて氷レゴリスの模擬物質から氷トラップにより水抽出する装置を設計している。本装置の概要図を **図 11** に示す。設計は DLR（ドイツ航空宇宙センター）で検討されている月面水抽出装置¹⁰⁻¹²⁾を参考にした。**図 11 (b)** の逆円錐台型 CT は、CT の内部に LN2 を流動させ CT 表面を氷点下以下に冷却する。蒸発器において氷レゴリスの模擬物質を加熱して発生した水蒸気は、凝縮器に流れ込み CT 表面で凝華して氷として捕獲される（現象は昇華・凝華であるが装置部品の呼称統一のため蒸発器、凝縮器とした）。CT 表面には捕獲した氷を剥離させるためのフィルムヒーターが設置されており、CT 表面で捕獲した氷が一定の厚さに成長した後、フィルムヒーターの加熱により、氷を CT 表面から剥離し、凝縮器の下方に設けた液化装置 (**図 11 (c)**) 内に氷塊を落とし込む。その後、**図 11 (c)** のゲート弁を閉じて、密閉した液化装置内を水の三重点以上に加圧・加熱し、氷塊を水に相変化した後、装置から水を取り出す仕組みである。

今後、本装置を作製し、前節の方法で作製した氷レゴリス模擬物質を用いて水抽出実証試験を行う予定である。

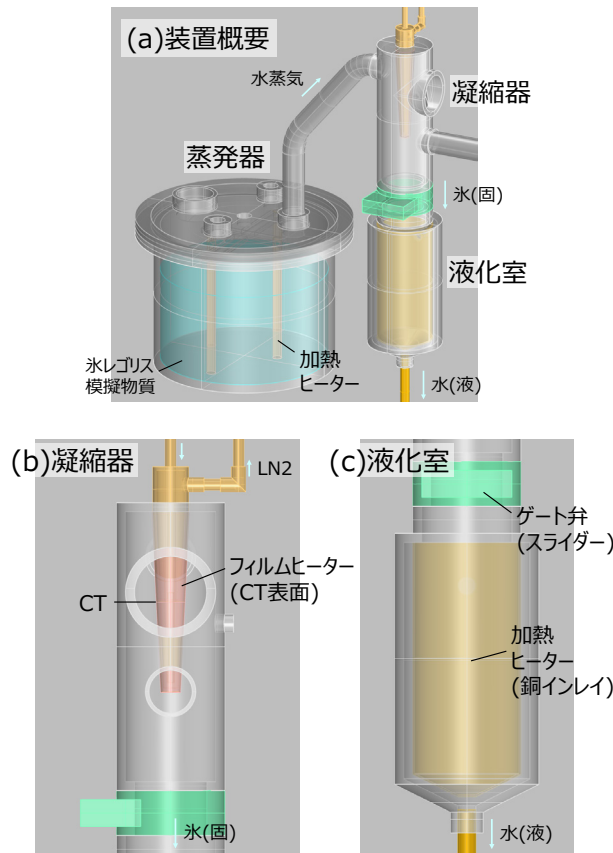


図 11 月面水抽出装置の概要図

6. まとめ

月の氷レゴリスを加熱して取り出した水蒸気の捕獲方法と水以外の揮発性物質の分離方法について検討した。月の氷には水以外に多量の揮発性物質が含まれており、採取した水氷を水電解装置などに利用する際には、これらの揮発性物質を水から分離して水のみを抽出する必要がある。CTの形状の違いによる蒸気の冷却性能について検討した結果、これまで先行研究で報告されている逆円錐台型のCTの場合、水と水以外の揮発性物質を十分に分離できず、Flow-through法により揮発性物質を月面直上の宇宙空間に放出した場合、水の回収率が著しく低下する可能性が考えられる。

そこで本研究では、月面の水抽出において一段階目に例えばコイル型CTなど微細な流路構造のCTを用いて水トラップにより水抽出し、二段階目に逆円錐台型CTなどを用いて抽出水中に溶存する不純物を取り除く氷トラップにより水抽出を行う、二段階式抽出方法を新たに考案した。本方法を用いることで、水の回収率を下げることなく、抽出水中の揮発性物質を大幅に低減し、後工程の純水処理の負荷を軽減することが可能と考えている。

今後、本報で提案した二段階式水抽出技術を実現するため、氷レゴリス加熱技術、水トラップによる水抽出技術、氷トラップによる水抽出技術の各要素技術について、実験的に検証を進めていく。

文 献

- 1) 内田浩基, 鹿山雅裕: 1N05 月面水抽出サーマルマイニング技術の開発 ～水蒸気の捕獲と揮発性物質の分離方法の検討～, 第 69 回宇宙科学技術連合講演会講演集 (2025).
- 2) 高砂熱学工業: 月面での水素・酸素生成への挑戦に関するご報告, 2025/6/9, https://www.ttenet.com/article_source/data/news/detail/2025/749.html
- 3) ispace: ispace、高砂熱学工業と月面におけるサーマルマイニング技術実証に向けた 計画検討に関する覚書を締結, 2025/5/9, <https://ispace-inc.com/jpn/news/?p=7359>
- 4) George Sowers: Thermal Mining of Ices on Cold Solar System Bodies, NIAC Phase I Final Report: Colorado School of Mines, 2020.
- 5) 内田浩基, 中田拓司, 川上理亮, et al.: サーマルマイニングによる月面水採取 (第二報) 再凝縮・凝固を考慮した氷レゴリスの伝熱解析, 高砂熱学イノベーションセンター報 vol. 37 (2023).
- 6) 内田浩基, 川上理亮, 河南治: 2L09 月面水採取サーマルマイニング技術の開発 ～氷水を含む月面レゴリスの熱解析～, 第 67 回宇宙科学技術連合講演会講演集 (2023).
- 7) Niklas Hab: Modeling, Simulation and Comparison of Lunar Thermal Water Extraction Methods for Space Resource Utilization, Technical University of Munich (2022).
- 8) L. Kiewiet, N.M. Hab, F.M. Marchese, et al.: Trade-off and optimization for thermal Lunar water extraction system, 73rd International Astronautical Congress (2022).
- 9) Nathaniel Ian Jurado: Rarified Water Vapor Deposition From Icy Lunar Regolith On An Engineered Cold Plate, University of Texas at El Paso (2021).
- 10) Christoph Kalis: Design of a Water Capturing System for Thermal Extraction of Water on the Moon In the context of In-Situ Resource Utilisation (ISRU), Delft University of Technology (2024).
- 11) Luca Kiewiet: An overview of the LUWEX project, German Aerospace Center (DRL), Oberseminar Geo und Astrophysik (2024).
- 12) Mart Heitkamp: Lunar Water Extraction: Design, Optimization, and Development for Future Space Exploration, University of Twente (2024).
- 13) 内田浩基, 鹿山雅裕: サーマルマイニングによる月面での水抽出(第三報) 水蒸気捕獲方法の検討, 高砂熱学イノベーションセンター報 vol. 38 (2025).
- 14) Jordan B. Holquist, Patrick Pasadilla, Chad Bower, et al.: Analysis of a Cold Trap as a Purification Step for Lunar Water Processing, International Conference on Environmental Systems (2020).
- 15) 宮本真吾, 松本千誉: 2L11 月面におけるレゴリス抽出水の純水化处理, 第 67 回宇宙科学技術連合講演会 (2023).
- 16) 化学工学協会: 化学工学便覧, 丸善 (1999).
- 17) Henning Wache: Thermal Conductivity Measurements of Dry and Icy Lunar Regolith Simulants, Technische Universität Braunschweig (2024).

ABSTRACT

Method for capturing water vapor extracted by thermal mining from lunar icy regolith and for separating water from VOCs were studied. Lunar water contains a large amount of VOCs; therefore, it is necessary to remove the VOCs and extract only the water for electrolysis. As a result of studying the cooling performance of the steam due to differences in the cold trap (CT) shape, in the case of inverted cone shape CT, which has been widely studied, it may not be possible to sufficiently separate water and VOCs. Also, it is possible that when VOCs are released into space on the lunar using the flow-through method, the water extraction rate may decrease significantly. We have proposed a two-stage method of capturing water vapor: in the first stage, a CT with a fine channel structure is used to capture the water vapor as water on the CT surface, and in the second stage, an inverted truncated cone CT or similar is used to capture the water vapor as ice on the CT surface. This method makes it possible to significantly reduce the amount of VOCs in the extracted water without reducing the water extraction rate.
