

海底鉱物資源の揚鉱システムとして提案する キャリア循環方式の全体構成と技術的な課題

谷 和夫^{1*}・梅田 洋彰²・鈴木 亮彦²・矢部 浩史²

¹東京海洋大学 学術研究院 海洋資源エネルギー学部門 (〒108-8477 東京都港区港南4-5-7)

²(株) 不動テトラ 地盤事業本部 (〒103-0016 東京都中央区日本橋小網町7-2)

*E-mail: ktani00@kaiyodai.ac.jp

Key Words : lifting, deep sea mining, carrier material, mineral resources

1. はじめに

(1) 海底鉱物資源の揚鉱技術の現状

深海底に賦存する鉱物資源（海底熱水鉱床、マンガンクラスト、マンガン団塊など）を海上に移送する多様な揚鉱システム（エアリフト・スラリー汲み上げ方式や重液体循環方式など）が提案され研究開発されているが、商用化に至った実用技術はない。例えば、2017年に（独）石油天然ガス・金属鉱物資源機構（JOGMEC）が沖縄海域（Hakureiサイト）の熱水鉱床（鉱石の密度 3.2～4.1 Mg/m³）で行った採鉱・揚鉱パイロット試験では、最大粒径が30 mmで密度が3.2 Mg/m³以下の石分を水深1600 mから海上に汲み上げることに成功した¹⁾。しかし、密度（品位）が高い鉱石の回収は困難で、汲み上げ流速（4.8 m/s）が高いためにエネルギー効率が低く、鉱床の破碎、不要鉱物（鉱滓）の処分、揚鉱水の処理などに要するコストも大きいと推測される。よって、商業的な開発のためには、環境負荷を抑えつつ粗粒かつ高密度の鉱石を効率良く揚鉱する方法が望まれていた。

(2) キャリア物質循環方式による揚鉱システムに係る従来の提案

著者らは、環境負荷を抑えるために揚鉱水を極力減らした揚鉱システムとして図-1に示すキャリア物質循環方式を考案した²⁾。粗粒物の輸送に好適な搬送媒体（以後、キャリア物質（carrier material）と称す）として粒状体を含む粘性流動体を提案し、環状管路内を低い流速（0.1 m/s 未満）で循環させて粗粒かつ高密度の鉱石を移送する。そのため、既存のエアリフト・スラリー汲み上げ方式などによる揚鉱技術に比べて、エネルギー効率が高く、かつ環境リスクが低く抑えられることが特

長である。このアイデアは、フレッシュコンクリートの高所への打設技術や液状化対策の1つである流動化させた砂の地盤注入技術において、砂（細骨材）や礫（粗骨材）をポンプで数百メートルを超えて圧送できることに注目して着想した。そして、鉱石保持性能とポンプ圧送性に優れたキャリア物質として砂とベントナイト泥水の配合が好適であり、低い流速（6～36 mm/s）でも粗粒かつ高密度の鉱石（25 mm, 5.6 Mg/m³）も揚鉱できることを示した^{3,4)}。

しかし、海底での鉱石の管内への搬入、鉱石の粒度や輸送密度、海上での鉱石のキャリア物質からの分離、ポンプが点検・事故などにより停止した際の対処や閉塞の防止、不要鉱物（鉱滓）の処分、キャリア物質の配合調整などの考え方については未検討だった。そこで、従来

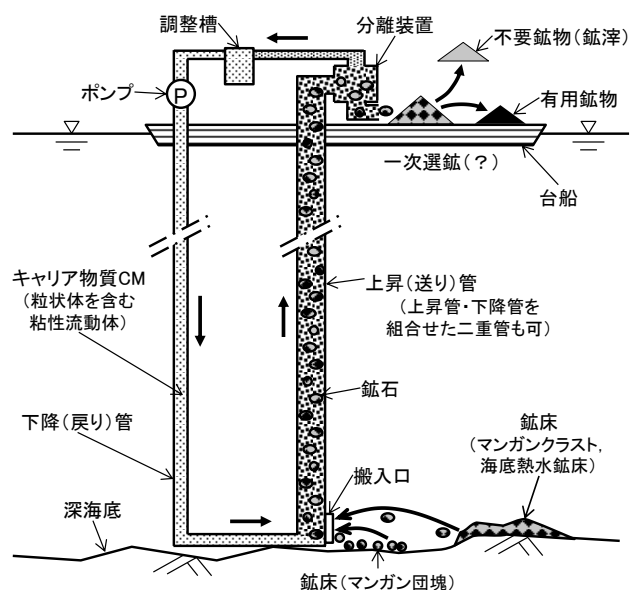


図-1 キャリア物質循環方式による従来の揚鉱システムの概要

の提案に係る課題を抽出し、海底から海上までにわたる揚鉦システムの全体構成を見直し、それぞれの構成部分において求められる性能や機能を整理した。

2. 改良した揚鉦システムの概要

(1) 従来の提案に係る課題

解決すべき主な課題として抽出された事項を、図-1に示す各構成要素毎に整理して以下に示す。

- a) 鉦石・キャリア物質： 海底での掘削や小割作業を軽減すると共に有害物質の溶出・流出を抑制するためには、高密度の鉦石を可能な限り大きな寸法（例えばマンガン団塊を想定して200 mm）でも揚鉦できることが望ましい。しかし、キャリア物質の輸送性能の限界として、現状では20～30 mm以下に細粒化する必要がある³⁾⁴⁾。
- b) 搬入口： キャリア物質に配合するベントナイトの膨潤性能は塩分により劣化し易いので、海底で鉦石を管内に搬入する際に海水が侵入することを防ぐ必要がある。また、輸送効率が高くなるように、鉦石の粒度・密度に応じて搬入率を適切に制御する必要がある。
- c) 揚鉦管： 鉦石の混入率が過大になると管の詰まりが、ポンプの停止時には管底や曲管部に沈殿・堆積が懸念される。こうした閉塞のリスクを下げるためには、鉦石が管内に様に分布し相対位置が変わらずに層流で移送される状態（キャリア物質と鉦石が相対速度なく管軸に平行に上昇する状態）が理想である。しかし、鉦石の沈降速度は粒径・密度・形状に依存するので実現は不可能である。また、鉦石による管壁の摩耗も懸念される。
- d) 分離装置： 鉦石を回収した後にキャリア物質を再利用するために、海上でキャリア物質から鉦石を分離する必要がある。しかし、鉦石の細粒分とキャリア物質に配合する粒状体（砂）を分別することは困難である。さらに、タック（粘着性）により鉦石の表面に付着したキャリア物質を取り除くことも容易ではない。
- e) 調整槽： 搬入口での海水の混入や分離装置での鉦石の細粒分の残留によって、キャリア物質の劣化は避けられない。そのため、キャリア物質の配合を劣化状況に応じて調整する必要がある。
- f) ポンプ： 管内に取り込んだ鉦石の粒度・密度・混入率に応じて適切な運転をする必要がある。しかし、長距離の管路に亘って鉦石の分布状況を把握することは困難である。また、揚鉦管内（キャリア物質+鉦石）と戻り管内（キャリア物質）の密度差が大きいと運転負荷が大きくなる。
- g) 不要鉦物（鉦滓）： 揚鉦されたすべての鉦石を陸域

に輸送すると、輸送や不要鉦物（鉦滓）の処分のためのコストが膨大になるので、一次選鉦を海上で行い有用な鉦物のみを回収すると効率良い。ただし、不要鉦物（鉦滓）をそのまま海水中に放出すると有害物質による環境破壊が問題となり、無害化しても濁りによる海洋汚染は免れない。

(2) カプセル輸送の導入による解決

前節(1)に記す各課題を解決するために改良した揚鉦システムを図-2に示す。輸送物を容器に格納して管路輸送をするカプセル輸送（capsule transportation）の概念を導入した点が特徴である。

カプセル輸送では、搬送流体として入手や廃棄が容易な空気ないし水を利用して、循環させずに下流端で開放するのが一般的である。一方、重量物を上方に移送する必要がある揚鉦ではキャリア物質（砂を含むベントナイト泥水）を搬送流体として利用し、海底～海上間で環状の管路を循環させる。さらに、鉦石を海底から海上に輸送（揚鉦）するだけでなく、不要鉦物（鉦滓）を海上から海底に輸送して海底で処分する。そのため、海底と海上の揚鉦管と戻り管を繋ぐ部分（主に水平管路）には鉦石ないし不要鉦物（鉦滓）を輸送容器に搬入・搬出する装置を設け、海上に輸送（揚鉦）された鉦石は台船上で有用鉦物と不要鉦物（鉦滓）に分離する。

図-2（上）は輸送容器を管外に取り出さない方式であり、エレベーターと同様に、搬入口と搬出口では輸送容器の扉（内扉）と管の扉（外扉）の位置を揃えて開閉する。一方、図-2（下）は輸送容器を管外に取り出す方式であり、ピストルの回転式弾倉と同様に、回転式シリンダー（リボルバー）構造の搬入・搬出装置を想定する。

改良した揚鉦システムによる前節(1)に記す各課題の解決を以下に示す。

- a) 鉦石・キャリア物質： 鉦石も含めた輸送容器全体の重量を輸送効率の観点から最適な範囲となるように搭載する鉦石の総重量を調整することにより、粗粒かつ高密度の鉦石も揚鉦が可能になる。
- b) 搬入口と搬出口： 図-2（上）の方式では液密構造の二重扉（海底の管路に外扉、輸送容器に内扉）を設けることにより、図-2（下）の方式では回転式シリンダーを液密構造とすることにより、海底で鉦石を揚鉦管に搬入する際に海水が管内に混入することを防ぐことができる。また、個々の容器で輸送する鉦石の重量と容器の間隔に応じてポンプを効率良く制御することが可能になる。
- c) 揚鉦管： 狭窄部を設けず（管の内径を一定とし）曲管半径を大きくし、円管の内径よりやや小さい外径の円筒形状の容器を利用すれば閉塞のリスクはなくなる。鉦石も含めた各容器の総重量をポンプの停止時の沈降

を極力抑えられる範囲内に制御すれば、容器間の距離をほぼ一定に保つことができる。また、鉱石が管壁に触れないので、管壁の摩耗が少ない（輸送容器との接触はある）。

- d) 分離装置： 鉱石がキャリア物質に混入しないので、装置自体が不要になる。その代わりにキャリア物質の搬入・搬出設備が必要になる。
- e) 調整槽： 鉱石の細粒分や海水の混入によるキャリア物質の配合の変化がないので、性能の低下は抑制される。
- f) ポンプ： 輸送容器の形状・寸法は同一で、鉱石も含めた総重量を一定の範囲内とすることができるので、ポンプの制御が容易になる。揚鉱管内と戻り管内にお

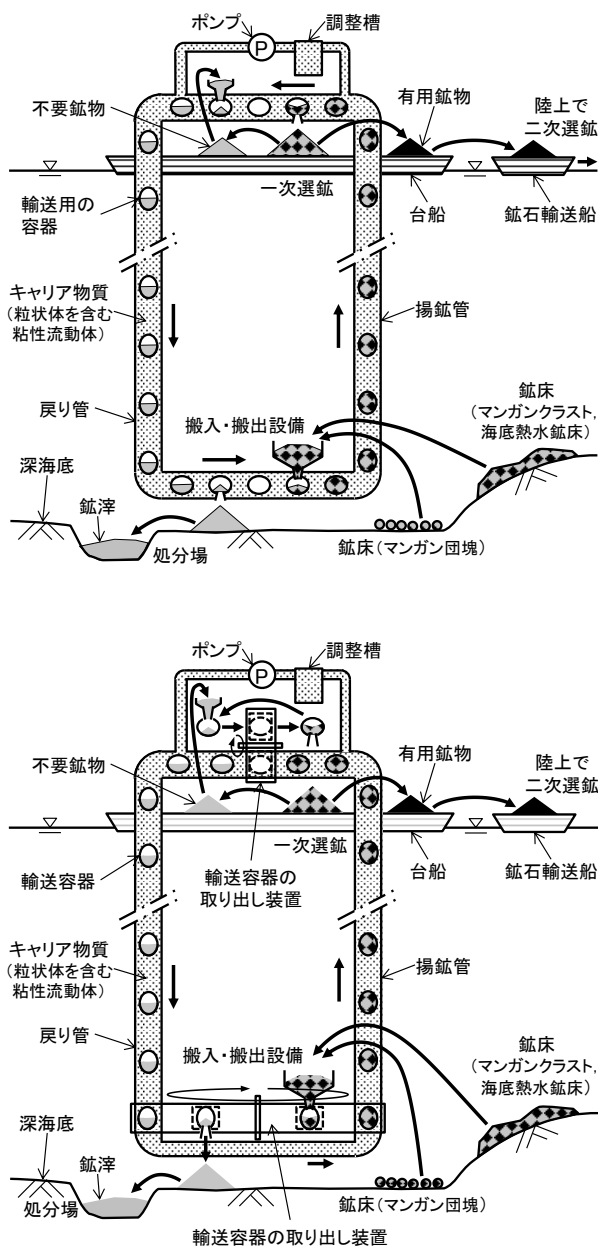


図-2 カプセル輸送を導入した揚鉱システムの概要
(上) 容器を管外に取り出さない方式
(下) 容器を管外に取り出す方式

ける平均的な密度の差を小さくできるので、ポンプの運転負荷が小さくなる。

- g) 不要鉱物（鉱滓）： 不要鉱物（鉱滓）を海底で環境に配慮して適切に処分することができれば、陸上に輸送して処分する必要はない。

3. 各構成構成部分において求められる性能や機能

(1) 輸送容器

搬入する鉱石の大きさとして、マンガン団塊の直径やマンガンクラストの層厚が最大0.2 m程度であり、熱水鉱床も同程度の大きさまで小割りすることを想定する。不定形な鉱石も余裕を持って収めるためには開閉部の口径が最大径の2倍は必要と考え、容器の径は0.4 m以上を想定する。

容器の形状としては、円形の管路に合わせて円柱が好適であろう。搬入・搬出設備で向きと位置を合わせるために、側面に溝状・羽状のガイドを設置する。扉の位置は、輸送容器を管外に取り出さない方式（図-2（上））では側面に、輸送容器を管外に取り出す方式（図-2（下））では前後になる。

容器内の圧力を管内圧力と同じに保つと、容器の耐圧性能を過度に高くする必要はなく、また容器からの海水の漏洩や容器へのキャリア物質の侵入を防ぐことができる。そのためには、容器の体積変化をある程度許容できる構造とする必要がある。なお、図-2（上）の方式では、海底で容器の扉を開けた状態でキャリア物質と海水の密度差に起因して作用する内外圧差を想定した耐圧性能は必要である。

(2) 揚鉱管と戻り管

海底油田・ガス田の採掘に利用する円形断面のライザー管を想定する。曲管部では、輸送容器の移動を阻害しないように適切な内径と曲率にする。

(3) 海底の搬入・搬出設備

輸送容器を管外に取り出さない方式（図-2（上））では、二重扉の液密性が重要なので、輸送容器の向きと位置を管路の扉に合わせる仕組みが重要である。

一方、輸送容器を管外に取り出す方式（図-2（下））では、液密構造の回転式シリンダーが複雑なので、故障対応や維持管理が問題となる。

(4) ポンプ

維持管理の容易性から海上に設置する。容器に搭載する鉱石の重量と容器の間隔に応じて適切な運転制御

を行う。

の観点で改善した。

4. まとめ

海底鉱物資源（海底熱水鉱床、マンガングラスト、マンガン団塊など）の開発において粗粒かつ高密度の鉱石を海上まで効率的に輸送する揚鉱方式として、搬送流体であるキャリア物質（粒状体を含む粘性流動体）を環状の管路内に循環させるスラリー輸送システムに、鉱石を容器に搭載するカプセル輸送の概念を導入した。高密度の鉱石を海底で小割せずに揚鉱できるだけでなく、鉱石がキャリア物質に混入しないためにキャリア物質の劣化も防止できる。さらに、海上から海底に返送される容器に海上で分離した不要鉱物（鉱滓）を搭載して、海底で適切に処分することも特長である。環境親和性と経済性

参考文献

- 1) 経済産業省資源エネルギー庁, JOGMEC : 海底熱水鉱床開発計画総合評価報告書, 158p, 2018.
- 2) 谷 和夫, 鈴木亮彦, 大林 淳, 田中肇一 : 海底有価物質の揚鉱方法及び揚鉱装置, 特許第 6878721 号, 2017.
- 3) 折田清隆, 谷 和夫, 古庄哲士, 鈴木亮彦 : ベントナイト懸濁液と珪砂の混合物による海底鉱物資源の揚鉱効率の検討, 第 46 回海洋開発シンポジウム, 土木学会, 6p, 2021.
- 4) Orita, K., Tani, K., Suzuki, A. and Kosho, T.: Experimental study of ore lifting efficiency with mixture of bentonite suspension and sand as a carrier material for deep sea mining, *Proc. European Regional Conf. on Rock Mech. and Rock Eng., EUROCK-2021*, 8p, 2021.