—第 93 回渡辺賞受賞—

海底熱水鉱床採鉱・揚鉱パイロット試験の功績* ～世界で初めて海底熱水鉱床の連続揚鉱に成功～

山 路 法 宏¹ 岡 本 信 行² 塩 川 智³
川 野 誠 矢⁴ 櫻 井 宏 信⁵

Achievement for Pilot Test of Excavating and Ore Lifting Conducted for Seafloor Polymetallic Sulphides – World's First Success in Continuous Ore Lifting Test for Seafloor Polymetallic Sulphides –

by Norihiro YAMAJI^a, Nobuyuki OKAMOTO^b, Satoshi SHIOKAWA^b,
Seiya KAWANO^c and Hironobu SAKURAI^c

- a. Project Director, Metals Mining Technology Department, JOGMEC (Corresponding author,
E-mail: yamaji-norihiro@jogmec.go.jp)
b. Deputy Director General, Metals Mining Technology Department, JOGMEC
c. Metals Mining Technology Department, JOGMEC

Seafloor Polymetallic Sulphides (PMS) is deep sea mineral that is confirmed to exist within Japanese exclusive economic zones and expected to develop as a new supply source for Japan. However, deep sea minerals including PMS have not been commercially developed so far, although various countries are eagerly working it. Japan Oil, Gas and Metals National Corporation (JOGMEC) has been commissioned by Ministry of Economy, Trade and Industry (METI) to conduct practical study on PMS for commercialization. As part of the efforts, JOGMEC implemented “Excavating and Ore-lifting Pilot Test” from the middle of August to end of September 2017. In the test, JOGMEC succeeded in consecutive lifting of ore and sea water in a state of solid-liquid flow from a depth of approximately 1,600m for the first time in the world. Through the test, it became clear that there are still many technical challenges left to be resolved for development of PMS such as improvement in durability of equipment, system optimization, adjustability of ore grain size and slurry concentration and so on. JOGMEC will continue efforts aimed at commercialization of PMS from a long-term perspective.

KEY WORDS: Seafloor Polymetallic Sulphides, Okinawa Trough, Excavation Test, Lifting Test, Mining Test

1. は じ め に

我が国の排他的経済水域内（沖縄海域や伊豆・小笠原海域）には海底熱水鉱床が多数存在することが明らかになっている。これらの海底熱水鉱床は、陸上鉱山の鉱石と比較して銅、鉛、亜鉛、金、銀等の有用金属を多く含む鉱床も発見されており、金属資源需要のほぼ全量を海外からの輸入に頼っている我が国にとって、新たな資源の供給源として期待されている。これらの海底熱水鉱床は、賦存している水深が海洋鉱物資源の中でも比較的浅いこと等から、開発に有利な資源であると期待されているが、海底に固着・堆積している鉱石を採鉱・揚鉱する技術が確立されていない。

独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構（JOGMEC）は、経済産業省からの委託を受け、研究機関、大学、民間企業協力の下、国の海洋エネルギー・鉱物資源開発計画（以下、「開発計画」）に基づいた海底熱水鉱床の開発に関わる取り組みを行ってきた。開発計画に基づき、平成 30 年代後半以降に民間企業が参画するプロジェクトが開始されるよう、資源量評価、採鉱・揚鉱技術、選鉱・製錬技術、環境影響評価の 4 つの分野に分けてそれぞれ検討・開発を進めてきた。特に採鉱・揚鉱技術分野では、第 2 期開発計画の中で 2017 年度に計画された「採鉱・揚鉱システムを一体とした実海域でのパイロット試験」の実施に向けて、機器やシステムの開発等の取り組みを進めてきた¹⁾。

海洋鉱物資源の開発は、我が国のみならず海外でも注目を集めており、直近ではパプアニューギニア（PNG）の領海内で海底熱水鉱床の開発を進めているカナダ企業の Nautilus Minerals 社が、3 種類の商業機を完成させている。大水深域の試験としては、韓国海洋科学技術研究院（KOIST: Korea Institute of Ocean Science and Technology）がマンガン団塊採鉱のために製作した集鉱装置を用いた水深 1,370m の海域での模擬マンガン団塊の集鉱試験や、水中ポンプ等を用いた水深 1,200m での揚鉱試験を個別に実施した実績はあるが、マンガン団塊が賦存する実海域（水深 5,000 ～

*2019 年 4 月 10 日受付 2019 年 6 月 7 日受理 2019 年 3 月 28 日 資源・素材学会 第 143 次定時社員総会にて発表

1. 正会員（独）石油天然ガス・金属鉱物資源機構 金属資源技術部 海洋資源技術課 担当調査役
2. 正会員（独）石油天然ガス・金属鉱物資源機構 金属資源技術部 担当審議役
3. （独）石油天然ガス・金属鉱物資源機構 金属資源技術部 担当審議役
4. （独）石油天然ガス・金属鉱物資源機構 金属資源技術部 海洋資源技術課
5. （独）石油天然ガス・金属鉱物資源機構 金属資源技術部 海洋資源技術課
〔著者連絡先〕FAX: 03-6758-8058
E-mail: yamaji-norihiro@jogmec.go.jp

キーワード：海底熱水鉱床、沖縄トラフ、掘削試験、揚鉱試験、採鉱試験

Fig.1 Diagram of ore lifting test.

6,000m)における一連のシステムの試験には至っていない。また、海底に半埋没している直径2～15cmの球状ないし楕円状のマンガング塊と、海底面にチムニーやマウンドを形成している海底熱水鉱床では、採鉱手法も異なる。更に、我が国の排他的経済水域 (EEZ: Exclusive Economic Zone) 内では、沖縄海域や伊豆・小笠原海域で海底熱水鉱床のポテンシャルが確認されているが、外海であることから PNG の領海とは異なり海気象の影響を受けやすく、船舶の動揺を考慮した機器の仕様やオペレーション、稼働率を検討する必要もある。

本稿では、2017年に実施した世界初となる採鉱・揚鉱パイロット試験（以下、「パイロット試験」という）の概要を中心に、2008年度からの採鉱・揚鉱における個別要素技術や全体システムの開発の取り組みとその成果について報告する (Fig. 1)。

2. 世界の採鉱・揚鉱技術の歴史と動向

海洋鉱物資源開発の歴史は長く、1970年代に入ると、北東太平洋のクラリオン・クリッパートン断裂帯に囲まれた海域 (CCZ: Clarion-Clipperton Zone) において、水深約5,000mの海底の堆積物中に半埋没する形で分布するマンガング塊を対象に、欧米諸国からなる国際コンソーシアムによる採鉱・揚鉱試験が行われた。特に、ロッキード、ロイヤルダッチ・シェル社等からなる国際コンソーシアムの一つである Ocean Minerals Company (OMCO) 社は、1976年と1979年に、アルキメデス式のスクリーブローバ採鉱機 (Miner) (Fig. 2) を20m×70mのムーンプール付きの採鉱母船から降下させ、水深5,000mの海底で採鉱実験を行い、商業化に向けた様々なデータ取得を行った²⁾。

一方、日本では通商産業省工業技術院地質調査所が中心となり、1974年から海洋鉱物資源、特にマンガング塊の分布・成因を把握するための科学調査が開始され、翌年の1975年から金属鉱業事業団がハワイ沖のCCZを対象とした賦存状況調査に着手した。

国際舞台では、世界的なマンガング塊の開発機運の高まりにより、1973年から第三次国連海洋法会議がニューヨークで開始され、マンガング塊の探査・開発ルールを含めた海洋法規 (条約) の策定を目指すことになったが、その権益確保には採鉱・揚鉱技術といった技術要件が求められた。こうした国連での動向を踏まえ、1986年に経済産業省工業技術院による大型工業技術研究開発制度 (略称: 大プロ、後に産業科学技術研究開発制度: 産技制度に名称変更) による日本独自の「マンガング塊採鉱技術システム研究開発プロジェクト」が開始された。しかし、1990年代に

Fig.2 OMCO's remotely controlled miner (RCM) inside Hughes Glomar Explorer.

Fig.3 Ore lifting pump and buffer system.

入ると、銅をはじめとした非鉄金属の価格の低位低迷期が長期にわたって続き、マンガング塊の開発機運が低下したことにより、国連での技術要件が解消された。こうした状況は本プロジェクトにも影響を与え、プロジェクトは2008年までの17年間長期にわたって継続されたものの、実海域での集鉱機から揚鉱ポンプ、揚鉱管による一連の採鉱システムの確立までには至らなかった³⁾。

その後、中国、韓国及びインドではクローラによる自走式集鉱機の開発が行われ、浅海域での自走試験等が実施された⁴⁻⁷⁾。また、KOISTでは、スラリー濃度調整を行うバッファシステムの開発をキーテクノロジーと考え、独自技術による開発を実施し、2016年にはドイツ製の揚鉱ポンプと繋いで韓国沖の水深500mの浅海域での揚鉱試験に成功した (KIOST, 2016) (Fig. 3)。

最近では、国際海底機構 (ISA: International Seabed Authority) のマンガング塊の国際鉱区を取得したベルギーのコントラクターである GSR (Global Sea Mineral Resources NV) が集鉱機 (PAANIA-I 及び II) (Fig. 4) を製作し、2019年4月に、水深約5,000mのベルギー及びドイツ鉱区 (いずれも北東太平洋のCCZ) で集鉱試験とプレミウムモニタリングを実施する計画である⁸⁻⁹⁾。

Nautilus Mineral 社は、前述のとおり PNG の領海内で海底熱水鉱床プロジェクト Solwara 1 を進めており、Seafloor Production Tools (SPTs) として3種類の商業機 (Fig. 5) のほか、揚鉱システムとして揚鉱管やポンプの製造を完了させている。SPTs は、2017年4月に PNG に輸送され、2018年に没水試験を実施している¹⁰⁾。これらの機器は、ナミビア沖の海底からのダイヤモンド

Fig.4 Sea-trial using the PATANIA-I (GSR, 2018).

Fig.5 Seafloor Production Tools (SPTs).

浚渫に使用している自走式浚渫クローラを発展させたものであるが、大水深域での海洋鉱物資源開発の実績がなく、Nautilus 社も海底での掘削試験等を実施したとの発表は行っていない。

3. 採鉱・揚鉱システムの検討

3・1 採鉱・揚鉱条件の設定

採鉱システムを検討するにあたっては、開発対象のモデルや採鉱方法等を想定する必要があった。そのため、当初は海底熱水鉱床の全体像が十分把握できていなかったが、海底熱水鉱床に対するそれまでの知見に基づき、掘削対象とする鉱床の形状や物性のほか、採掘方式や商業化時の生産規模等の主な条件を以下のように設定した。

- ・採鉱対象：海底から盛り上がったマウンドとし、その規模は直径約 100m、比高約 20m
- ・マウンド表面：直径数 10cm ～ 1m 程の礫によって被覆
- ・マウンド内部：比較的均質・硬質な硫化岩によって構成
- ・マウンド頂部：チムニーが存在
- ・鉱石の一軸圧縮強度：平均 20MPa 程度（最大 50MPa）
- ・鉱石の有効間隙率：10-40%
- ・鉱石の比重：3-4
- ・採掘方式：頂部から下方へ機械掘削によるベンチカット
- ・掘削産物の最大粒径：50mm 以下
- ・一日当たりの粗鉱生産量：湿潤重量で 5,000t

しかしながら、その後、2012 年に建造した JOGMEC が所有する海洋資源調査船『白嶺』を用いたボーリング調査や各種サンプリング等の結果、近年では、マウンドはより急峻であり、内部は強度的に均質でもなく、硫化鉱の各ブロック間の充填物と構成される硫化鉱物によって強度が異なる等、当初想定と異なるマウンドの地盤特性が徐々に明らかとなっている。

3・2 採鉱・揚鉱システムの構成

前述の海底熱水鉱床のモデルマウンドに対する最適な採鉱・揚鉱方法として検討してきた採鉱・揚鉱システムを Fig. 6 に示す。このシステムは、海底で鉱石を掘削・集鉱する採鉱ユニット、採掘された鉱石を海水とともにポンプで海面まで揚げる揚鉱ユニット、海面に揚がった鉱石と海水を分離して鉱石をシャトル船へ払い出す採鉱母船ユニットに分かれる。

採鉱ユニットでは、自走式の採鉱機・集鉱機によりマウンドを掘削して鉱石を集鉱し、フレキシブルパイプを通じて揚鉱ユニットのポンプまで送る。ポンプと揚鉱管（ライザー管）から構成される揚鉱ユニットでは、採鉱ユニットから送られてきた鉱石を海上（船上）まで揚げる。そして、採鉱母船ユニットにおいて、揚がってきた鉱石と海水のスラリーが固液分離され、鉱石は陸上に輸送

Fig.6 Commercial mining system concept design.

するシャトル船に払い出されるシステムとなっている。これらの各ユニットにおいて、前述の採鉱条件の下での仕様を検討し、試験機を設計・製造した上で、各要素技術について実証を行った。

3・3 採鉱ユニット

採鉱ユニットでは、採鉱機及び集鉱機に係るマウンド上での走行、掘削、集鉱等の要素技術に関する技術的評価を行うことを目的として、2種類の小型の採掘要素技術試験機（以下、「試験機」という）を製造し、陸上や水槽内での試験のほか、実海域の1,600mの海底でも試験を実施した。

(1) 試験機 A (Fig. 7) マウンドを整地する2軸型と整地された面を下向きに効率的に掘削するドラム型の2種類の Cutterヘッドを備え、いずれの掘削ヘッドにもある中央の集鉱ノズルから集鉱し、試験機後部に排出することが可能である。走行方式は4クローラによる自走式で、各クローラを個別にシリンダー制御することで、海底面の状況に応じて前後・左右の高さや傾きを調整することが可能となっている。

(2) 試験機 B (Fig. 8) 掘削と集鉱を別々の機械によって行う

Fig.7 Mining testing tool with 4 crawler system and multi-axis cutter head.

Fig.8 Mining testing tool with 2 crawler system and road header.

場合を想定し、採鉱機の掘削ヘッドは、炭鉱等の岩盤坑道掘削等で使用されているロードヘッダー型のものを採用している。また、掘削ヘッドを集鉱ヘッドに交換することで、集鉱機とすることが可能であり、走行方式は2クローラとした。

掘削・集鉱状況や走行状況、操作技術、視認性向上等の要素技術の確認やデータ取得のため、白嶺にこれら2つの試験機を搭載し、2012～2014年度に海底熱水鉱床賦存地域の水深約1,600mの海底で採鉱試験を実施した。この試験では、各カッターヘッドタイプによる硫化鉱の掘削効率や掘削後の鉱石粒度のほか、掘削ビットの磨耗状況、走行性能、3Dソナー等を用いた視界不良時の視認性、船上での試験機の投入から揚収までの一連のオペレーション、海底重機の遠隔操作等について確認し、掘削ユニット開発のための豊富なデータを取得した。更に、試験機Bを用いた採鉱試験では、24時間連続掘削を達成するとともに、マウンド中腹の斜面に平坦地（ベンチ面）を造成することにも成功した。

なお、この採鉱試験では、事前、事中、事後で濁りや水中騒音に関する環境モニタリング測定を行い、掘削等による周辺環境への影響の把握・評価も行っている。

3・4 揚鉱ユニット

海底で採掘した鉱石の揚鉱方法として、ポンプ式、エアリフト式及びバケット式の3方式について、それぞれの利点や欠点について評価を行った。エアリフト方式は気体・液体・固体の3相流で制御が難しく生産性もばらつきがあり、バケット式は安価でメンテナンス性が良いものの生産性が低いため、メンテナンス性は劣ものの、生産性が高く操作性が良いと考えられたポンプ方式を選択した。

そこで、ライザーシステムとしてリジッドライザーとフレキシブルライザー、水中ポンプシステムとしてダイアフラム型水中ポンプとターボ型水中ポンプ、その他、船体からの吊り上げ方式と自立式を含めて、複数の組み合わせに応じた仕様を検討し、比較評価を行った。大きな曲げ加重をかけることができないフレキシブルライザーは、巨大なハンドリング装置が必要となり、システム重量や価格面でもリジッドライザー同等以上となったことに加えて、水中ポンプ用のアンピリカルケーブルの固縛が困難等設置・回収作業にも課題があった。水中ポンプについては、ターボ型が重量、所要電力、信頼性、価格等の面でダイアフラム型よりも優位性が高いと考えられたため、最終的にリジッドライザー／ターボ型ポンプ方式を採用することとした。

パイロット試験に向けて、揚鉱ユニットの設計に資する圧力損

Fig.9 Image of slurry loop test facility.

失の推定式の作成や、揚鉱管の磨耗量把握等を目的としたスラリー循環式移送試験を実施した (Fig. 9)。

このスラリー試験により、流体の慣性力と重力の比を表す無次元量であるフルード数との関係式を求め、海底熱水鉱床の鉱石密度を 3.5g/cm^3 、鉱石とともに揚げられる海水（以下、「揚鉱水」という）の密度を 1.037g/cm^3 、内径を 0.11m と 0.20m 、スラリー流速を $3.5 \sim 7.5\text{m/s}$ とし、管内スラリー濃度を 5% 、 10% 、 15% で想定した場合の揚鉱管長 $2,000\text{m}$ の圧力損失を推定した。

3・5 採鉱母船ユニット

採鉱母船を採鉱地点にとどめる方式としては、自動船位保持装置 (DPS: Dynamic Positioning System) による方式と、係留索を用いた方式があるが、商業化時には複数の鉱床が採鉱対象となると想定され、頻繁な場所移動が必要になることから、位置保持に係る事前準備作業が不要で場所移動も容易である DPS 方式に優位性があると評価された。ただし、DPS の場合には、常時大型のスラスタを運転する必要があるため燃料消費量が大きくコスト高となることに加えて、機能不全による暴走・漂流に対処するためのシステムを検討する必要がある。

3・6 採鉱・揚鉱システムの概念設計

上述の各ユニットでの検討結果を踏まえ、採鉱ユニット、揚鉱ユニット、採鉱母船ユニットそれぞれの仕様を検討し、以下のように主要目を設定した上で、これらを組み合わせた採鉱・揚鉱システム全体での概念設計を行った。

Fig.10 Pilot test of excavating and ore lifting diagram.

4. パイロット試験の目的

パイロット試験は、将来の海底熱水鉱床開発の事業化に際して必要となる採鉱・揚鉱に係る要素技術を網羅的に確立するとともに、商業化を目指したプロジェクトの開始に向けて、経済性の検討に資する技術やコスト等の課題を抽出することを目的として計画された。2014年度までに開発・検証を積み重ねてきた試験機・技術・システムをベースにして、2015年度から2017年度までの3年間で計画・準備した上で、掘削から揚鉱までの一連のシステムを検証するための実海域試験を実施した。

実海域試験は、事前に海底熱水鉱床のマウンドを掘削する「事前掘削試験」、掘削片を一定の粒度以下に破碎して集積する「事前破碎試験」、集積した破碎片を浚渫して水中ポンプで船上まで揚げる「揚鉱試験」の3ステージに分けて行った (Fig. 10)。

特にパイロット試験の最終ステージである揚鉱試験は、連続的な揚鉱の技術的検証に加え、集鉱から揚鉱までの一連のシステムの各種測定データの取得、個別要素技術に関する課題の抽出及び把握等を目的とした。下記の試験基礎条件を設定するとともに、鉱石を海水とともに連続的に揚鉱する技術に係る実海域での検証及びデータ取得を確実にを行うため、実鉱石の事前破碎や集鉱時の手動によるスラリー濃度調整等の水中ポンプの閉塞防止策を講じた。

【揚鉱試験基礎条件】

試験海域：	沖縄近海
試験期間：	2017年8月22日-9月23日
試験水深：	約1,600m
スラリー流速：	3.8m/s
スラリー濃度目標：	3-5vol.% (MAX10vol.%)
鉱石粒子最大粒径：	30mm (長径)
揚鉱管直径：	約100mm
実鉱石密度：	3.2g/cm ³
揚鉱方式：	ポンプリフト (揚鉱管懸下)
ポンプ型式：	多段遠心ポンプ
揚鉱管：	リジッド

3年間の技術開発中に大粒径の鉱石がポンプ内流路閉塞を引き起こした経験から、ポンプ内の流路を鉱石が閉塞することなく通過させるために鉱石の最大長径を30mm以下とし、鉱石と海水によるスラリーの体積濃度を15%以下にコントロールする条件設定を行った。

また、水中ポンプの必要吐き出し流量の低下に対する回転数制

御の追従の可否や、1,600mの鉛直揚鉱管内の鉱石流動状態の把握、全機器を組み合わせたトータルシステムの運転状態と総合運用等、陸上試験では確認できないことを揚鉱試験で検証した。

5. パイロット試験の実施体制

パイロット試験は、JOGMECと8企業・研究機関からなる「採鉱・揚鉱パイロット試験受託コンソーシアム」(構成員：三菱造船株式会社 (代表)、新日鉄住金エンジニアリング株式会社 (副代表、現日鉄エンジニアリング株式会社)、国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所、清水建設株式会社、住友金属鉱山株式会社、深田サルベージ建設株式会社、株式会社三井三池製作所、三菱重工業株式会社)が中心となり、大学等の有識者から構成される海底熱水鉱床開発委員会や、同委員会の下に設置した採鉱技術ワーキンググループでの指導、助言を踏まえつつ、産学官の連携体制で実施した。

6. パイロット試験における揚鉱試験までの取り組み

パイロット試験の実施に当たっては、3ヵ年計画を作成し、必要に応じて検証・試験項目を見直した。Fig. 11に、パイロット試験事業の3ヵ年にわたる取り組み内容の概要を示す。

揚鉱試験の実施に向けて、「掘削→運搬→破碎→集鉱・揚鉱」の一連の試験に要求される鉱石量を求め、各々の手法や手順を含めた採鉱計画を検討した。パイロット試験においては、掘削、運搬及び破碎作業には試験機Bを用い、掘削ヘッドを装着した状態を「掘削試験機」として、掘削ヘッドを破碎機 (小型ジョークラッシャー付きのバケット) に換装した状態を「破碎試験機」として、それぞれ事前掘削試験及び事前破碎試験を行った。また、配管径や浚渫ポンプ性能を揚鉱試験用に改造した試験機Aを「集鉱試験機」として、揚鉱試験時の集鉱作業を行った。

6・1 事前掘削試験・事前破碎試験

揚鉱試験で揚鉱する鉱石を確保するため、2014年度に試験機Bで開削したベンチ面において、2016年度に掘削試験機による事前掘削試験を実施した。

その後、破碎試験機を用いて、2016年度中に深海で稼働試験を行った上で、2017年度の揚鉱試験前に事前破碎試験を実施し、長径で30mm以下に破碎した実鉱石を必要量確保することに成功した。破碎した実鉱石は、ベンチ上に設置したスクリーン付きのパレット内に貯鉱することで、大粒径の鉱石との混合を防止し、集鉱時の閉塞リスクを低減する措置を講じた (Fig. 12)。

6・2 水中ポンプシステム開発

Fig.11 Actions in pilot test for three years.

Fig.12 Excavating test machine carrying and crushing ore on the seafloor.

揚鉱母船から懸下される水中ポンプユニット (Fig. 13) は、幅 3m、奥行 3m、高さ 7m、重量約 30t の多段遠心ポンプである。また、ポンプ下部には採鉱ユニットの集鉱試験機と接続するためのフレキシブルホースが接続されている。水深約 1,600m の配管の圧力損失を考慮した上で、ポンプの仕様吐出流量を $137\text{m}^3/\text{h}$ と設定し、2 台直列につないだ。また、各々を正逆回転の並列配置とすることで、ポンプユニットに作用する回転トルクを相殺する構造とした。

水性能試験や鉱石通過性試験、スラリー性能試験、ポンプ性能試験、材料磨耗試験、軸受・シール摩擦試験、システム総合試験 (ドック) 等を行い、2016 年度に水中ポンプユニットを完成させた。鉱石通過性試験では、ポンプ内部で鉱石が滞留することが判明し、インペラ入口側に旋回防止板を設置することで、鉱石の滞留時間を大幅に短縮させた。

揚鉱試験に先立ち、水深約 500m の浅海域において作動確認を行い、工場試験のデータと比較しながら、水圧条件下でも運転状態や性能に異常がないことを確認した。

【水中ポンプユニット主要目】

吐出流量:	$137\text{m}^3/\text{h}$
スラリー体積濃度:	最大約 10%
鉱石密度:	平均 3.2, 最大 4.0
鉱石粒子径:	長径 30mm 以下
揚液:	鉱石含む海水
最小流路寸法:	50mm
主寸法 (L × W × H):	約 $3.0 \times 3.0 \times 7.0\text{m}$
空中/水中重量:	約 28t / 約 24t

Fig.13 Submersible pump unit.

駆動方式: インバータ制御/約 250kW モータ

6・3 揚鉱管システム開発

揚鉱管は、海水中での鉱石スラリー移送という腐食磨耗環境で使用されることから、各種磨耗試験等を実施し、揚鉱管材料として耐腐食磨耗性の高い 2 相ステンレス鋼を選定した。しかしながら、揚鉱試験では短時間での運用であり、腐食や磨耗の影響が小さいことから、経済性を考慮し、炭素鋼管の中で優れた耐摩耗性を有する油井管 (SM-125S) を採用した。

揚鉱管の設計にあたり、概略設計された揚鉱システムの緒言や海気象条件等に基づく揚鉱管の全体解析により、必要とされる揚鉱管の強度や作業限界値を算出した。また、揚鉱管内の固液二相流の現象を推定するのに有効なスラリー移送解析法を構築するとともに、揚鉱管の挙動を計測する小型挙動計測装置や揚鉱管内のスラリー移送状態等を監視・記録するモニタリングシステムを開発・製作した。

6・4 稼働性評価・安全性評価

揚鉱試験の実施において海気象が大きく影響するため、模型を用いて試験時における連続作業可能日数等の稼働性評価解析を実施した。また、揚鉱管強度解析で求められた許容限界波高等を関

Fig.14 Ore-collecting test machine launched from the deck of vessel.

Fig.15 Vessel operation work during the lifting test.

Fig.16 Ore-collecting test machine connected to the flexible hose.

値としたオペレーションウィンドウ解析により連続作業が可能な日数を算定し、揚鉱試験の基本計画やオペレーション条件の検討を行った。

揚鉱試験のオペレーションにおいて安全面に十分配慮するため、パイロット試験計画初期段階に安全性評価作業 (HAZID: Hazard-Identification) を実施し、想定されるハザードとオペレーション手順との因果関係の整理、機能停止及び人名損傷等の全体プロセスへの影響評価を行った。2016年度には HAZID で抽出した全プロセスに対して HAZOP (Hazard and Operability Study) 会議を実施し、事故を発生させると考えられる設計意図からの逸脱 (ずれ) を 353 件特定した。

6・5 事前海域試験・浅海域試験

実海域での連続作業可能日数が限られることから、揚鉱試験では、安全かつ効率的なオペレーションが求められた。そのため、2016年度に、オペレーション要領の確認、オペレーション所要時間の把握、オペレーションの習熟等による稼働率向上、揚鉱試験計画に資する各種データ取得や課題抽出等を目的とした事前海域試験を実施した。また、水中ポンプユニットや鉱石分離設備等実機による総合的な機能確認やオペレーションの更なる習熟訓練を目的として、揚鉱試験の1ヶ月前に、水深約500m程度の海域で浅海域試験を実施した。これらの事前の試験により、オペレーションの所要時間を大幅に短縮するとともに、揚鉱試験時の安全かつ効率的な作業要領を確立した。

7. 揚鉱試験の実施

揚鉱試験は、沖縄近海にて2017年8月22日から9月23日までの海象条件が良い時に、複数回に分けて実施した。試験サイトについては、地形や熱水活動の有無、環境の特性等を事前に調査した上で選定した。以下にその概要及び結果について説明する。

7・1 揚鉱試験の概要

掘削試験機や集鉱試験機のオペレーションを行う採鉱母船 (白嶺)

Fig.17 Ore collecting operation.

嶺) (Fig. 14), 水中ポンプユニットの投入・揚収, 揚鉱管接続作業や鉱石分離の役割を有する揚鉱母船 (POSEIDON-1) のほか, 遠隔操作無人探査機 (ROV: Remotely Operated Vehicle) を用いて海中での作業支援を行う ROV 母船 (新世丸), スラリーから鉱石分を除去した海水 (揚鉱水) を陸上まで移送する揚鉱水移送船 (新潮丸) の4船を同時に運用した (Fig. 15)。

試験実施に際し、集鉱試験機、水中ポンプ及び揚鉱管を同時並行で海底に降ろし、集鉱試験機を着底させた状態で、水深約1,600mにて、集鉱試験機、ROVからリアルタイムで送られてくる映像をもとに、揚鉱母船 DPS のオペレーションにより水中ポンプ下のフレキシブルホースを接続した (Fig. 16)。なお、ROVの映像や揚鉱管内の濃度変動等の主要データを全船に配信・共有するため、各船の作業状況が確認できる情報共有システムを構築・運用し、試験を実施した。

集鉱試験機と水中ポンプを接続した後、採鉱母船 (白嶺) の船上から集鉱試験機の集鉱ヘッドを遠隔操作し、集鉱ヘッドのスイング数やヘッドの高さ (掘削深さ) を変化させながら (Fig. 17)、設置したバレット中に貯鉱されている鉱石を海水とともに集鉱し、揚鉱母船 (POSEIDON-1) の船上から制御する水中ポンプを用いて海底から船上までスラリー状で連続的に揚鉱した。

揚鉱試験では、大粒径の鉱石による閉塞への懸念から、事前掘削試験及び事前破碎試験において海底で掘削・破碎してバレットに貯鉱した実鉱石に加えて、事前に陸上で長径30mm以下に整粒した模擬鉱石 (パムコクラストン: 鉱石密度2.92g/cm³) を入れたバレットも用意し、事前に海底に設置した。揚鉱試験は、まずは確実に整粒されている模擬鉱石を対象として、少ないスイング数や浅い掘削深さでの試験を行った後、徐々にスイング数や掘削

Fig.18 Lifted ore.

深さを大きくした試験を実施した。その過程で、スイング速度や掘削深さとスラリー濃度の関係や水中ポンプの回転数制御状態、揚鉱管内のスラリー移送状態等について把握し、次の試験計画に反映させることで、円滑な試験実施と確実かつ適切なデータの取得を可能とした。模擬鉱石による複数の試験の結果と成果を踏まえ、実鉱石を対象とした揚鉱や高濃度かつ長時間の揚鉱にチャレンジした。

揚鉱した鉱石は、揚鉱母船の船上に設置した鉱石分離装置によって海水と分離した後、船上タンクに貯鉱した (Fig. 18)。鉱石とともに揚げた海水 (揚鉱水) は、揚鉱水運搬船に移送し、揚鉱試験終了後に陸上の処理施設にて全量処理を行った。

7・2 揚鉱試験の結果

試験中のスラリー濃度、流量や圧力等については、集鉱試験機や水中ポンプ、揚鉱管や船上配管等に搭載した計器によりモニタリングし、試験の状況を常時監視した (Fig. 19, Table 1)。この試験により、開発した掘削・破碎試験機や集鉱試験機、水中ポンプが深海底で長時間稼動できたほか、集鉱試験機～水中ポンプ～鉱石分離装置までの一連のシステムの技術的検証や各種個別データ等下記の非常に貴重な情報の取得にも成功した。

- 採鉱ユニット：集鉱試験機の性能
- 揚鉱ユニット：水中ポンプの性能や制御、スラリー移送状態の解析、水中ポンプ、揚鉱管や船上配管の内面磨耗量
- 採鉱母船ユニット：揚鉱作業の作業性、スラリー性状、鉱石分離プロセス性能、操業条件、情報共有システムの通信性
- その他：海底での作業音 等

揚鉱試験ではポンプ内閉塞は発生せず、合計 16 回 (模擬鉱石：10 回、実鉱石：6 回) の試験実施に成功し、揚鉱した鉱石量は模擬鉱石約 12.3t、実鉱石約 4.1t の合計約 16.4t となった。16 回の試験の累計揚鉱時間は約 1 時間 37 分である。

試験では、流量を一定に保持するために水中ポンプのインバータにより回転数を制御しているが、濃度変動に対して制御が追従できるかを慎重に確認するとともに、集鉱試験機のブーム操作 (掘削深さやスイング数の変化) とスラリー濃度の関係の把握にも努めた (Fig. 20, Fig. 21, Fig. 22)。結果として、16 回の揚鉱試験を実施し、1 回の揚鉱試験の平均濃度は最大で 3.8%、スラリー柱濃度 (揚鉱鉱石が船上に達し、水中ポンプの出口から船上まで揚鉱管路内にスラリーが満たされている状態での管内平均濃度) で最大 5.6% となった。

8. 課題

パイロット試験を実施した結果、採鉱計画見直しによる採鉱・揚鉱システム全体の再構築等安定的な操業を実現するためのいくつかの課題が明らかとなった。

例えば、スラリー濃度の変動を抑え、水中ポンプへ供給するた

Fig.19 Measurement and monitoring system.

Table 1 Measurement and monitoring items.

No.	システム	主な計測内容
1	揚鉱母船	船底タンク水位、船位、船体動揺量、海気象
2	ROV	映像
3	ケーブルリール	ケーブルの張力、巻出し長さ
4	集鉱試験機	動力用電源の電流・電圧、油圧系の圧力、測位、方位・ピッチ・ロール、深度、高度、アームの姿勢、浸没深度、差圧、アーム角度、海水温度
5	水中ポンプ	測位、深度、差圧、捨石装置センサー、耐圧容器温度、電動機温度、制御用・動力用電源の電流・電圧
6	小型挙動計測装置	揚鉱管の加速度、角速度
7	摩耗計測管	a. 揚鉱管：内面摩耗量、外面腐食量 b. 船上配管：内面摩耗量
8	水中モニタリングアセンブリ	スラリー濃度、管内圧力、差圧、挙動・姿勢、深度、測位情報、映像
9	船上モニタリングアセンブリ	スラリー濃度、流速、管内圧力
10	鉱石分離設備	泥水流量、泥水密度、泥水の質、タンク水位、硫化水素濃度、総揚鉱量
11	計測タンク	水温、吐出量 (泥水・鉱石)

めのバッファシステムや、掘削した大粒径の鉱石を海底で細粒化させる粉碎技術等の粒度・濃度調整機能の開発である (Fig. 23)。その他、連続的に操業するための機器・部材の耐久性やメンテナンス性の向上、モニタリング技術やシミュレーション技術の向上、システム全体の高効率化や最適化等解決すべき技術的課題が多数残されている。

また、今回の揚鉱試験では、集鉱から揚鉱にかけて一連の要素

Fig.20 Relationship of slurry concentration with depth of excavation and number of swing.

Fig.21 Lifting test results (average slurry concentration from each test).

Fig.22 Lifting test results (maximum average slurry concentration in the lifting pipe filled with slurry).

技術やシステムの検証を行ったが、商業化を検討する上では、海底熱水鉱床のマウンドに対する最適な採鉱（掘削・破碎・運搬・集鉱）の手法や機器が確立されていない。鉱床やマウンドによって、そのサイズや形状、物性が様々であり、それぞれの地山モデルを構築するとともに、それぞれに対する最適な採鉱方法を検討する必要がある。

更に、開発に向けては、環境面での取り組みも課題が残されている。現状、海洋鉱物資源の開発ルールは国際的にも議論の途上にあるため、本試験の実施にあたっては、ISA 環境ガイドラインに準拠した環境ベースライン調査の実施や、本試験のために開発したモデルによるごり拡散の数値シミュレーション予測 (Fig. 24) 等によって、事前に深刻な影響が生じないことを慎重に確認するとともに、試験中にも環境モニタリング測定を行い、試験後も継続して環境への影響を評価している。

JOGMEC では、今後も継続して環境への影響を評価していくとともに、これまでに得られた環境データや評価結果を用いて、科学的なデータに基づく持続可能な海洋鉱物資源開発に向けた国際ルール作り積極的に貢献していく計画である。

9. おわりに

本試験の成功は、海洋鉱物資源開発に必要な技術の確立に向け、大きな一歩となった。2018 年 12 月には、本試験で検証した採鉱・揚鉱技術のみならず、資源量評価、選鉱・製錬技術、環境影響評価の各分野におけるこれまでの取り組みを技術的に評価するとともに、現時点での経済性の検討まで行った海底熱水鉱床開発計画総合評価報告書¹⁾を公表したことで、10 年にわたる取

Fig.23 Challenges to be solved for commercialization.

Fig.24 Simulation result example of distribution of re-sedimentation thickness of suspended particles by predictive simulation model.

り組みにおいて一定の区切りとなった。

一方で、これまで述べたように、開発に向けてはまだ多くの課題が残されており、今回の成果をもって商業化への目途が立ったわけではない。本試験によって得られたデータを十分に分析・評価し、様々な課題を正しく認識した上で、長期的かつ総合的な視点から海底熱水鉱床の商業化に向けた取り組みを継続していくことが必要である。

2018 年 5 月 15 日には第 3 期海洋基本計画が閣議決定され、2019 年 2 月 15 日には開発計画が改定された。その中では、海底熱水鉱床をはじめとする海洋鉱物資源の開発に向けて、これまでの取り組みを踏まえた次期 5 カ年の計画が示されており、JOGMEC では引き続き、それら国の政策に基づき取り組みを続けていく所存である。

謝辞 本試験は経済産業省の委託業務で実施されたものであり、経済産業省並びに本業務に携わった全ての関係各位に感謝の意を表します。

References

- 1) 経済産業省資源エネルギー庁／独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構：海底熱水鉱床開発計画総合評価報告書(2018), pp.45-72, 116-117. [Agency for Natural Resources and Energy, Ministry of Economy, Trade and Industry (METI) / Japan Oil, Gas and Metals National Corporation (JOGMEC) : Summary Report of Comprehensive Assessment concerning Development of Seafloor Polymetallic Sulphides (2018), pp.45-72, 116-117.]
- 2) Yamada, H, and Yamazaki, T (1998). "Japan's Ocean Test of the Nodule Mining System," *The Eighth International Offshore and Polar Engineering Conference*, 24-29 May, Montreal, Canada.
- 3) Chung, J-S (2010). "Full-Scale, Coupled Ship and Pipe Motions Measured in North Pacific Ocean," *Int J Offshore and Polar Eng*, ISOPE, **20** (1), 1-6.
- 4) Hong, S, Kim, H-W, Choi, J, Yeu, T-K, Park, S-J, Lee, C-H, and Yoon, S-M (2010). "A Self-Propelled Deep-Seabed Miner and Lessons From Shallow Water Tests," *Proceedings of the ASME 2010 29th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering OMAE 2010-2013*, 75-86.
- 5) Hong, S (2016). "The Status of Deep Sea Mining Technologies and the Commercialization Strategy of Korea," *Presentation of International Conference on Deep Sea Mining, Berlin, 13 December, 2016*.
- 6) Liu, S, Yang, N, and Han, Q (2010). "Research and Development of Deep Sea Mining Technology in China," *Proceedings of the ASME 2010 29th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering OMAE 2010-20527*, 163-169.
- 7) Janarthanan, C, Chandran, V, Sundaramoorthi, V, Viswanath, B.O, Dinesh Kumar, D, Muthuvel, P, Rajesh, S, Gnanaraj, A.A, Venkatesan, K, Muthukrishna Babu, S, Gopkumar, K, Ramesh, N.R and Ramadass, G.A (2018). "Development and Testing of Locomotion Trials on Soft Sea Bed Soil and System Performance Checks of Experimental Undercarriage System," *Proceedings of the Twenty-eighth (2018) International Ocean and Polar Engineering Conference Sapporo, Japan, June 10-15, 2018*, 152-159.
- 8) Federal Institute for Geosciences and Natural Resources (BGR) (2018). "Environmental Impact Assessment for the testing of a pre-prototype manganese nodule collector vehicle in the Eastern German license area (Clarion-Clipperton Zone) in the framework of the European JPI-O MiningImpact 2 research project," *Stilleweg 2, D-30655 Hannover, Germany*.
- 9) Global Sea Mineral Resources NV (GSR) (2018). "Environmental Impact Statement-Small-scale testing of nodule collector components on the seafloor of the Clarion-Clipperton Fracture Zone and its environmental impact," *DEME group*, April, 2018.
- 10) Nautilus Minerals Inc. (2019). "Status of the Equipment," *web-site of the Nautilus Minerals Inc.*