

海底熱水鉱床 採鉱・揚鉱パイロット試験システムの開発

Development of the Pilot System for Test of Excavating and Ore-lifting in Seafloor Polymetallic Sulphides



石黒 慎二^{*1}
Shinji Ishiguro

益田 将寛^{*2}
Masahiro Masuda

小松 正夫^{*3}
Masao Komatsu

山路法宏^{*4}
Norihiro Yamaji

川野 誠矢^{*4}
Seiya Kawano

我が国周辺には多くの海底熱水鉱床が賦存し、資源小国の日本にとって有益な鉱物資源として期待されている。この海底熱水鉱床の開発に向けて(独)石油天然ガス・金属鉱物資源機構(JOGMEC)は沖縄近海で採鉱・揚鉱パイロット試験を実施し、世界で初めて海底から熱水鉱床鉱石の連続スラリー揚鉱に成功した。当社を代表とする共同企業体(三菱重工業(株)、三菱造船(株)、新日鉄住金エンジニアリング(株)、(国研)海上・港湾・航空技術研究所、清水建設(株)、住友金属鉱山(株)、深田サルベージ建設(株)、(株)三井三池製作所)は JOGMEC から委託を受け、試験システムを製作するとともに、パイロット試験においては試験システムの操作・計測を実施した。当社は試験システムの中核となる集鉱試験機と水中ポンプユニットを製作しており、その開発について述べるとともにパイロット試験の概要について報告する。

1. はじめに

パイロット試験の試験体勢図を図1に示す。採鉱母船から降ろされた集鉱試験機は鉱石の集積位置に移動する。その後、移送管の接続のためにアンビリカルケーブルを繰り出し、採鉱母船を移動させる。揚鉱母船は集鉱試験機の直上に移動し、移送管を集鉱試験機に接合し、水中ポンプユニットを下降させながら、集鉱試験機/採鉱母船から離れる様に移動し、移送管のカテナリアーを形成する。最終的に水中ポンプユニットは集鉱試験機との高度差約 50mまで下降させる。

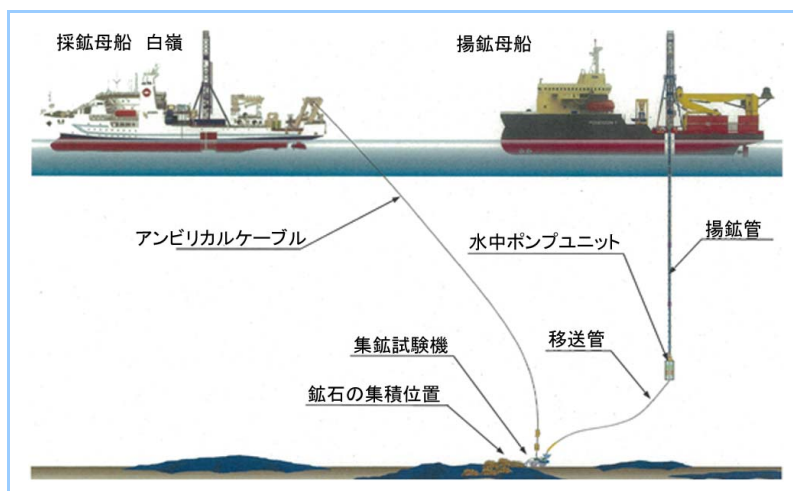


図1 パイロット試験 試験体勢図

採鉱・揚鉱試験は、採鉱母船、揚鉱母船の2隻同時運用によって行われた。

*1 三菱造船(株) マリンエンジニアリングセンター開発部 主席技師

*2 三菱重工業(株) パワードメイン 再生エネルギー事業部 水・エネルギー部 主席技師

*3 三菱造船(株) マリンエンジニアリングセンター開発部 主幹技師

*4 (独)石油天然ガス・金属鉱物資源機構

鉱石の集積は別途、(株)三井三池製作所製の掘削・破碎試験機によって前もって行われた。集鉱試験機によって浚渫された鉱石は移送管を経由し水中ポンプユニットに送られ、水中ポンプユニットから揚鉱母船上に揚鉱される。

本報では、この試験システムにおいて当社が担当した集鉱試験機と水中ポンプシステムの開発について述べるとともに採鉱・揚鉱パイロット試験の概要について報告する。

2. 集鉱試験機の開発

2.1 集鉱試験機改造計画

パイロット試験に先立ち、海底で採鉱を行う採鉱ユニットに関する技術的データを取得することを目的として採掘要素技術試験機の建造が行われた。採掘要素技術試験機は 2012 年に建造され、これまで洋上試験等を行い、技術的データ、実海域での運用データを取得している。パイロット試験に用いた集鉱試験機は採掘要素技術試験機を改造することで建造された。改造項目を図2に示す。

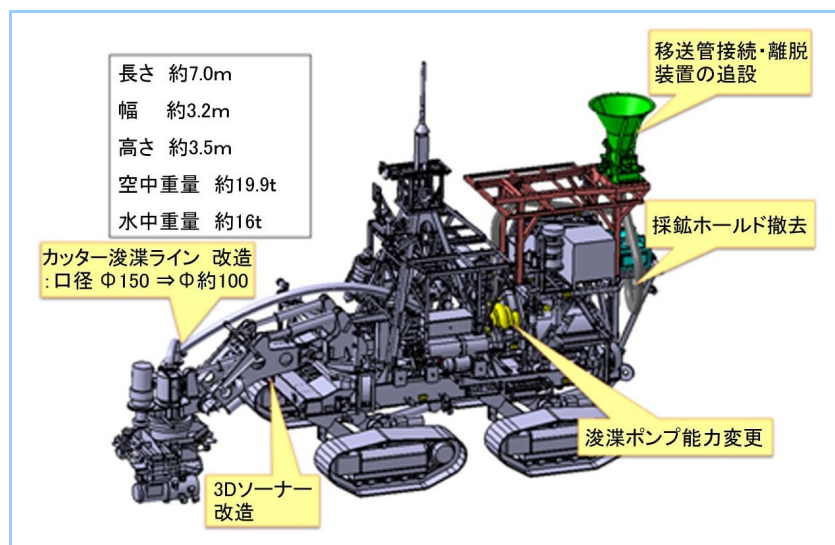


図2 集鉱試験機改造項目

採掘要素技術試験機から浚渫ポンプ、浚渫ラインを改造し、移送管を接続するための装置を追設。

(1) 掘削/浚渫ヘッド

集鉱試験機の掘削ヘッドは採掘要素技術試験機の掘削/浚渫ヘッドである2軸カッターヘッドをそのまま使用した。2軸カッターは相対する2つのカッタードラムが自転と公転を行うことによって、掘削ヘッド中央に掘削鉱石を集積し、中央の浚渫口で鉱石を吸込み、スラリー移送を行う。但し、浚渫ラインについては揚鉱管サイズ(内径約 100mm)に合わせ、集鉱試験機の中では口径をφ150からφ約100に変更している。

(2) 浚渫系統

採掘要素技術試験機では浚渫した鉱石は機体後部の採鉱ホルドに送られ、機体とともに船上に回収される。集鉱試験機の場合、移送管を通じて 50m上方にある水中ポンプユニットへスラリー輸送を行う。スラリー流速は、揚鉱に必要な流速を確保するものとし、集鉱試験機内の配管系変更に合わせて浚渫ポンプの流量及び揚程を変更した。

集鉱試験機内の浚渫ラインは口径φ約100とし、採鉱ホルドを撤去し、移送管接続・離脱装置につないでいる。移送管の接続は移送管の端末金物を移送管・接続離脱装置のコーンに上方から落とし込み、端末金物を油圧シリンダで固定することによって行う。移送管については内径φ約100の耐摩耗性ゴムホースを採用した。

2.2 ドック試験

改造後の集鉱試験機の浚渫スラリー移送性能を確認するため、ドック試験を実施した。ドック試験の概要を図3に示す。ドック底に置いた鉱石パレット内の碎石を集鉱試験機で浚渫し、移送管を介してドックサイドに設置した採鉱タンクにスラリー輸送する試験を行った。陸上の計測部には計測配管を設け、流量、圧力、スラリー濃度を計測した。

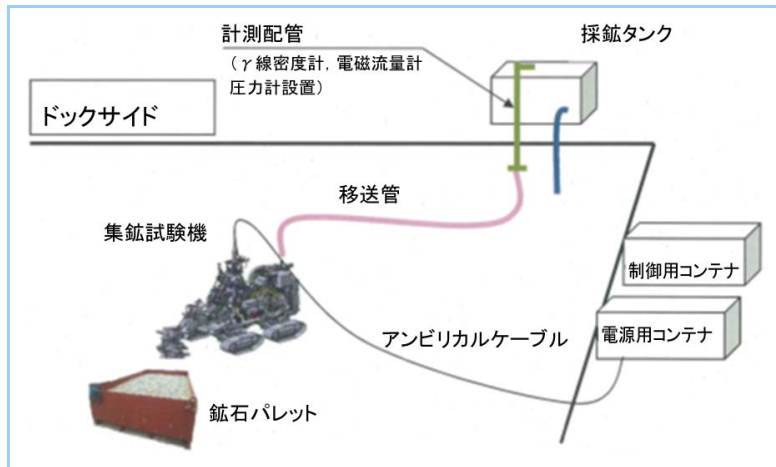


図3 ドック試験概要

ドック底に鉱石パレットを設置し、集鉱試験機で浚渫掘削を行い、ドックサイドの採鉱タンクへのスラリー輸送を行った。

ドック試験状況を図4に示す。試験の結果、以下の知見を得た。

- 1) 集鉱試験機/移送管を用いた掘削浚渫を行い、揚鉱が可能であることを確認した。
- 2) 濃度をコントロールするファクターは掘削深さとブームスイング速度であるが、掘削深さを調整することにより、濃度を調整できることを確認した。ブームスイング速度の影響は小さい。
- 3) 安定した濃度コントロールを行うためには掘削時に濃度を把握しておく必要があり、集鉱試験機へのγ線密度計装備が必要であることがわかった。（後日、γ線密度計搭載）

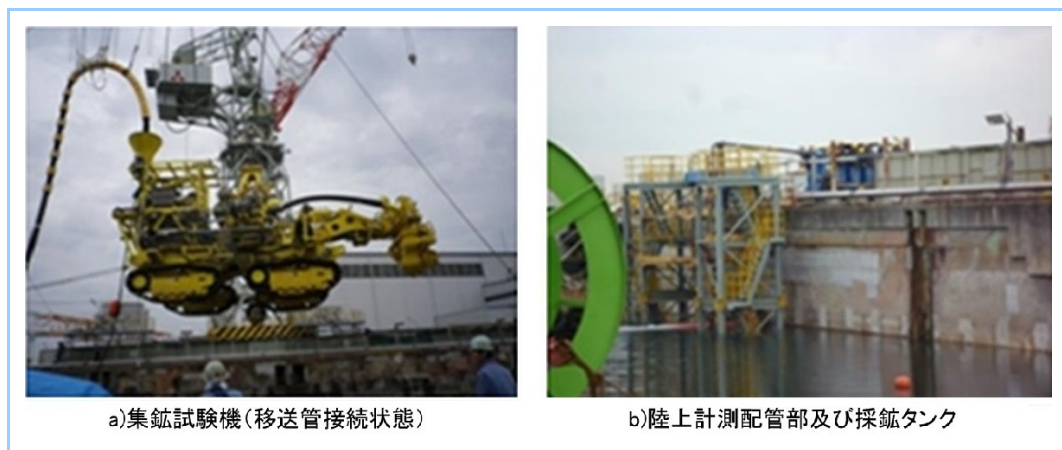


図4 ドック試験状況

- a) 移送管を移送管接続・離脱装置に接続した状態で空中を移動する集鉱試験機
- b) ドックサイドに設けられた陸上計測部と採鉱タンク、計測配管は水面から立ち上がった垂直配管部分に設けられており、採鉱タンクはドックサイドに設置されている。

3. 水中ポンプシステムの開発

3.1 水中ポンプ設計

基本検討条件を以下に示す。

- ① 鉱石 鉱石の粒子直径 最大 30mm 以下 採掘土砂の平均比重 3.2 とする(最大4)。
- ② 海域及び設置水深 最大深度は 1700m とする。

③ライザー管 リジッド管(鋼管)とする。パイプ内径 約 100mm

④スラリー体積濃度 10%程度を目安とする。

水中ポンプについては遠心式多段ポンプとする。1台のポンプとすると、ポンプの回転慣性によってライザー管に振じれ(トルク)がかかることから、2台のポンプで回転慣性を相殺させる組み合わせ構造とした。1台の水中ポンプは6段式とし、スラストバランスを取るため、羽根車は3段ずつの対向配列とした。水中ポンプの最小通路寸法は 50 mmとした。

3.2 水中ポンプシステム

水中ポンプユニット配置図を図5に示す。主寸法(L×W×H)は3×3×7mであり、空中重量は約 28 トンである。

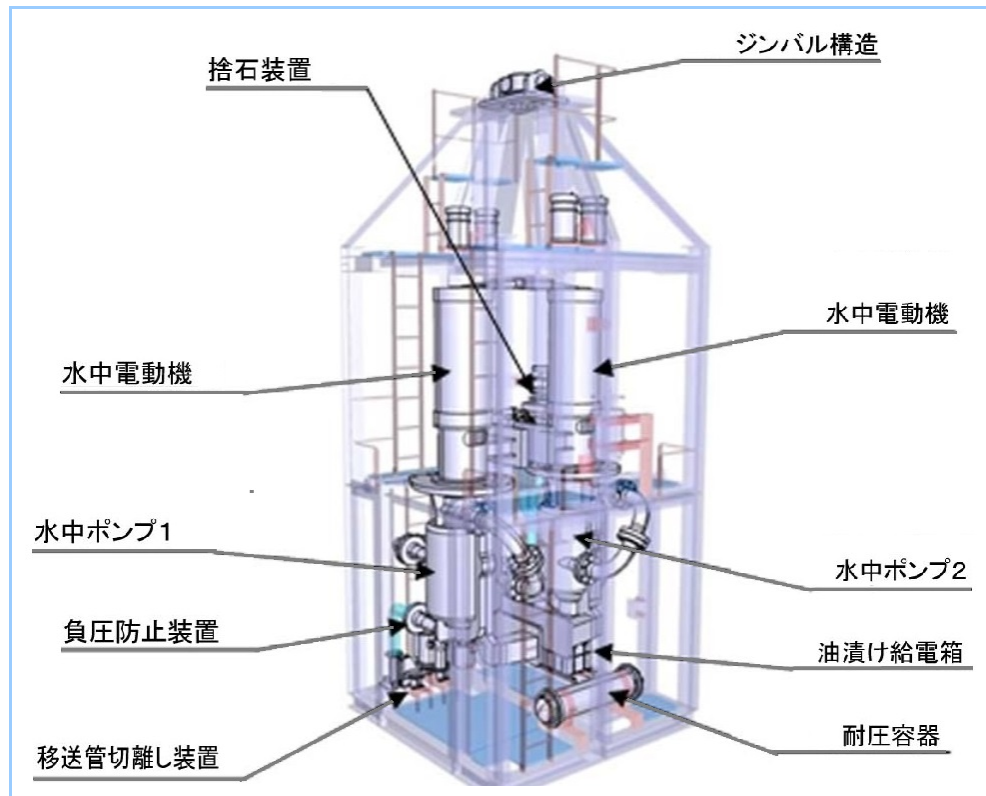


図5 水中ポンプユニット配置図

水中ポンプユニットは水中ポンプのほか、耐圧容器、捨石装置、負圧防止装置、移送管切離し装置などの装置から構成される。

水中ポンプについては2台のポンプを平行に配置し、片方の回転を CW(正転)、もう一方の回転を CCW(逆転)とし、トルクをキャンセルさせている。水中ポンプの頂部には揚鉱管との接続を行うライザーアダプターを設け、ジンバル構造で支持している。ポンプ停止時に揚鉱管内の鉱石を排出する捨石装置を設けている。水中ポンプの入口部には、移送管からの流れがさえぎられた時にバイパス弁を開け、負圧の発生を防止する負圧防止装置を設けている。移送管の接続は水中ポンプユニットの下部に設けている移送管切離し装置にて行う。移送管切離し装置では、集鉱試験機側での切り離しができなくなった場合、移送管を水中ポンプユニットから切り離すことができる。水中ポンプの回転数制御は船上部に設けたインバータで行われ、電圧、電流を監視している。水中ポンプの状態は船上部で流量、濃度、圧力を監視するとともに、水中ポンプユニットではポンプ前後の圧力を監視している。

水中ポンプユニットへの給電は1本のアンビリカルケーブルを用い、電動機用2系統と制御用1系統の3系統で行っている。電動機への給電は 6000V の高電圧に昇圧して行っている。

4. パイロット試験

2017 年8月中旬にパイロット試験は始まった。集鉱試験機は採鉱母船“白嶺”に搭載され、水中ポンプユニットは揚鉱母船に搭載され、それぞれ沖縄海域に向かい、試験海域でランデブーした。試験は集鉱試験機が試験地点(あらかじめ破碎した鉱石集積箇所)に着底し、水中ポンプユニットから降ろされた移送管を嵌合し、カテナリーを形成するところからスタートする。その後、水運転による確認を経て、スラリー揚鉱試験を実施した。

図6に水中ポンプユニットを示す。水中ポンプユニットは揚鉱母船のムーンプール上に搭載された状態であり、投入時はムーンプール上のカバーがスライドして開き、水中ポンプユニットはムーンプールから海中に投入される。移送管の嵌合作業の状況を図7に示す。移送管の嵌合はROV(無人探査機)で移送管の位置を確認しながら、揚鉱母船のDPS(Dynamic Positioning System)で位置を10cm単位で調整しながら、移送管先端を集鉱試験機の移送管接続・離脱装置のコーン直上に移動させて嵌合を行った。移送管には、集鉱試験機側から約10mフロートを取り付けており、機体との干渉防止を図っている。



図6 水中ポンプユニット

揚鉱母船のムーンプールカバー上に搭載されている水中ポンプユニット

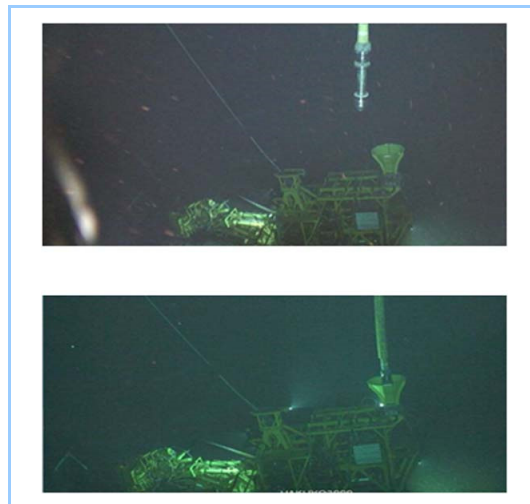


図7 集鉱試験機と嵌合前後の移送管

海底の集鉱試験機に嵌合のため、ROVで観察しながら移送管を接近させている状況(上)
海底の集鉱試験機に移送管が嵌合した直後の状況(下)

スラリー揚鉱試験はデータの取得のため、数分間のスラリー揚鉱を10数回行う形で実施した。スラリー揚鉱試験は低濃度から始め、徐々に高濃度のスラリー揚鉱を行う形で試験を行った。集鉱試験機の掘削浚渫濃度については主として掘削深さにてコントロールを行った。最も高い濃度は掘削深さ100mmの揚鉱試験であり、管内平均濃度として約6%の濃度が得られた。濃度コントロールは集鉱試験機の γ 線密度計を観測することによりある程度可能であり、突発的な高い濃度に対して、ブームの旋回、掘り下げを停止することにより、濃度の上昇を抑制することができる。濃度コントロールする上で集鉱試験機の γ 線密度計は有用であった。

図8にスラリー揚鉱試験の1例を示す。集鉱試験機で浚渫した鉱石は約7分遅れて船上に揚がってくる。その間、揚鉱管の管柱濃度は上昇し、揚鉱管の圧損は上昇する。水中ポンプ指令回転数は手動又は自動で設定するが、スラリー揚鉱中は手動では負荷変動に対応できないため、自動による回転数制御を使用する。図8には自動流量制御の状況を併せて示している。管内の濃度変化に伴う管内圧損の変化に対応して、自動流量制御は流量を目標値近傍に安定して制御ができることを確認した。流量目標値140m³/hに対し、揚鉱試験の間、目標値 ± 5 m³/h程度に流量を制御できている。

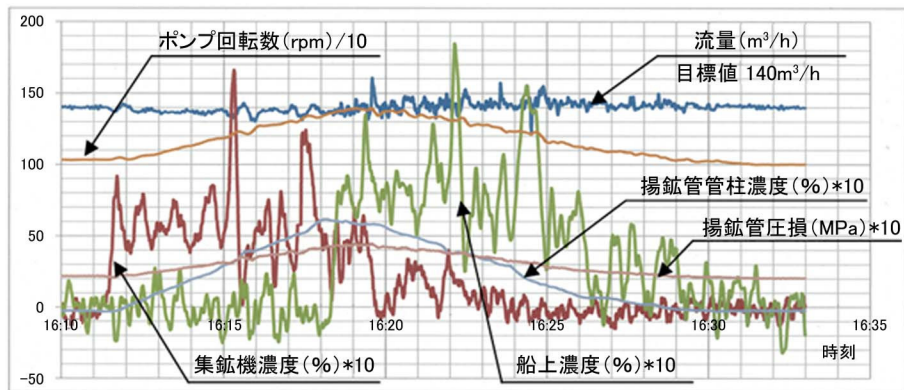


図8 スラリー揚鉱試験及び自動流量制御状況

スラリー濃度の変化により、ポンプ負荷が変動するが、負荷変動に追従し自動でポンプ回転数を変えることにより、流量を目標値近傍に安定して制御することができた。

5. まとめ

2017年8月中旬～9月下旬に実施したパイロット試験では、世界で初めて海底から熱水鉱床鉱石の連続スラリー揚鉱を達成した。鉱石、模擬鉱石合わせて約16tの鉱石を船上に揚鉱するとともに、水中ポンプ性能、揚鉱管圧損、自動流量制御等の商用時の採鉱システム検討に資する貴重な運用データを取得することができ、有益な知見を得ることができた。

パイロット試験は経済産業省の委託を受け、JOGMECが実施した。最後に経済産業省並びに本試験に携わった関係各位に感謝致します。

参考文献

- (1) 金属資源技術部深海底技術課, JOGMEC の海底熱水鉱床の開発に向けた取り組みの状況と国際状況, 金属資源レポート, (2011), p.293
- (2) 小松正夫ほか, 海底熱水鉱床採鉱システムの概念検討, 第22回海洋工学シンポジウム論文集, OES22-005, (2011), p.1
- (3) 石黒慎二ほか, 2軸及びドラムカッター方式による採掘要素技術試験機の概要, 資源・素材 2012(秋田)予稿集, (2012)
- (4) 石黒慎二ほか, 海底熱水鉱床 採掘要素技術試験機の開発, 三菱重工技報 Vol.50 No.2, (2013)
- (5) 石黒慎二ほか, 熱水鉱床採掘試験機の開発と洋上試験, 第25回海洋工学シンポジウム OES25-013, (2015)