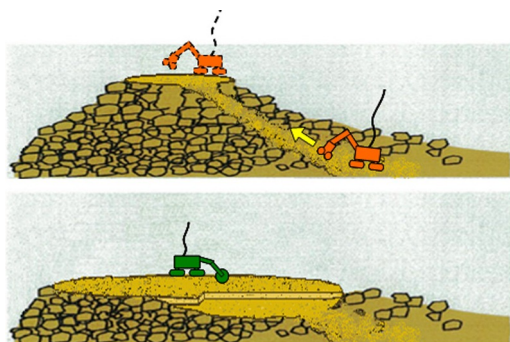


海底熱水鉱床 採掘要素技術試験機の開発

Development of Mining Element Engineering Test Machine for Operating in Seafloor Hydrothermal Deposits



石黒 慎二*¹
Shinji Ishiguro

山内 由章*²
Yoshiaki Yamauchi

小高 宏幸*³
Hiroyuki Odaka

秋山 清悟*⁴
Seigo Akiyama

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。この熱水鉱床採掘システム実現のための技術的データの取得を目的とし、当社を代表とする共同企業体(三菱重工業(株)、カヤバシステムマシナリー(株)、住友金属鉱山(株))は、(独)石油天然ガス・金属鉱物資源機構から採掘要素技術試験機の建造を受注し、平成24年3月に完工した。そして、平成24年11月には沖縄海域の海底熱水鉱床において洋上試験を実施し、海底での掘削、サンプル採取等の成果を上げた。

1. はじめに

我が国の排他的経済水域には多くの海底熱水鉱床があり、1000m程度の比較的浅い経済的に有用と思われる幾つかの鉱床が存在すると推定されている。これらの熱水鉱床は銅、鉛、亜鉛、金、銀に富み、さらにレアメタルを含有しており、レアメタル資源としても期待される。資源小国の日本としてはこの海底資源の開発が急務とされている。商業化の実現のためには実証試験を行うパイロットプラントの建造が必要と考えられているが、このパイロットプラントに先立ち、海底で採掘を行う採掘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の建造に先立っては、掘削装置、浚渫装置及び走行装置に対する要素試験を実施し、その成果を織り込んで採掘要素技術試験機は建造された。その後、採掘要素技術試験機を海洋資源調査船「白嶺」に搭載し、実際の海底熱水鉱床での洋上試験を実施した。

本報では、採掘要素技術試験機の建造と、それに先立ち行われた採掘要素技術試験(掘削装置要素試験、浚渫装置要素試験、走行装置要素試験)の概要、及び洋上試験について報告する。

2. 要素技術試験

2.1 採鉱オペレーション及び掘削ヘッド

(1) 採鉱システムの概要

熱水鉱床は同じ海底資源である石油ガス等の流動体とは異なって、深海底に賦存した重比重の鉱石を掘削、採取、海上への揚鉱、そして選鉱製錬所まで運搬することではじめて商業利用できる。しかしながら、深海という過酷な環境下に阻まれて、試験的なコアサンプリングを除いてこれまでこの種の採鉱システムによる大規模商業採取はいまだ実施されたことがない。

想定する採鉱システムは図1に示すように採鉱母船、採鉱機、水中ポンプユニット、揚鉱管等で構成される。採鉱機は母船上の船上制御装置とアンビリカルケーブルで結んで遠隔制御される。採

*1 船舶・海洋事業本部船海営業部 首席技師
*3 カヤバシステムマシナリー(株)

*2 船舶・海洋事業本部船海営業部 工博
*4 住友金属鉱山(株) 担当部長 技術士

鉱機と水中ポンプユニットはフレキシブルパイプでつながって、採鉱機で掘削・浚渫した鉱石を水中ポンプユニットが揚鉱管を通して船上部へ移送する。採鉱母船の採鉱ホールドに鉱石が貯蔵され、シャトル船で選鉱製錬所へ運搬される。

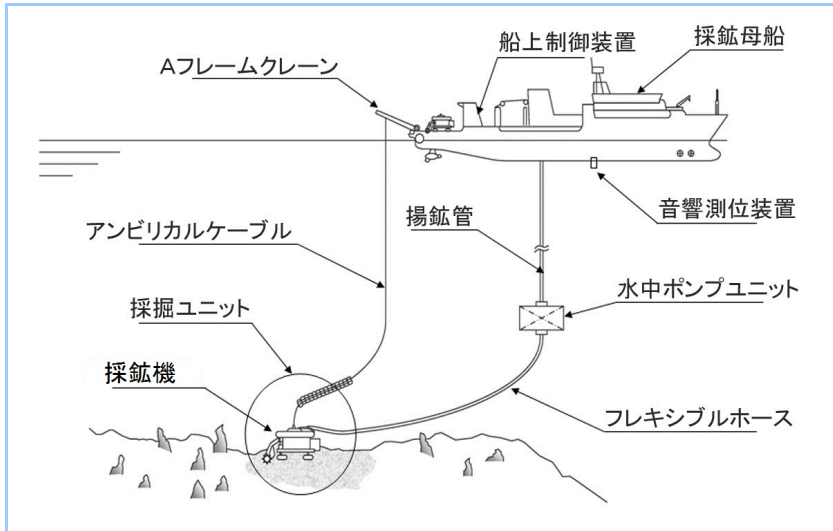


図1 想定する採鉱システム

採鉱システムは、採鉱母船、揚鉱管、採鉱機にて構成される。

(2) 採鉱オペレーション及び掘削ヘッド

海底熱水鉱床の表面には角礫が集積しており、チムニーが林立するような場所も存在する。このような場所では効率的な掘削ができないので、あらかじめ角礫やチムニーの除去を行う補助掘削を行い、その後、高効率のベンチカットによる本掘削を行う方式が考えられる。この場合、異なる掘削ヘッドを使用することとなるため、採鉱機も本掘削用の本採鉱機と補助掘削用の補助採鉱機の2台の採鉱機を用意する必要がある。また、海底での採鉱オペレーションを考えると、陸上のように掘削と集鉱を別々に行うことは作業時間や支援母船設備の付帯コストから非効率といえ、掘削と浚渫を同時に行うことが回収率の高い、効率の良い採鉱を実現できる手段と考えられる。両者とも掘削ヘッドは掘削と浚渫を兼ねた掘削/浚渫ヘッドとする。

本採鉱機用の掘削ヘッドはロードカッターなどの鉱山機械、建設機械で使用されているドラムカッターとする(図2(a))。また、補助採鉱機用の掘削ヘッドとしては角礫やチムニーの掘削を行う自由度を持ちながら、掘削と浚渫を効率的に行える掘削ヘッドとして多軸(4軸)カッターを考案した。図2(b)に4軸カッターの概念図を示す。

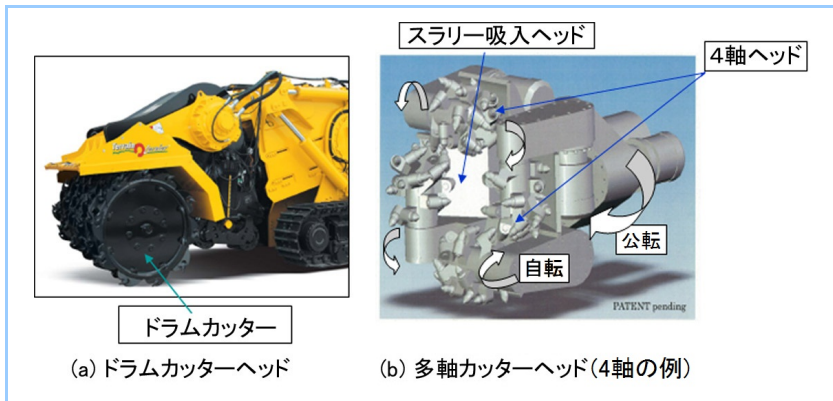


図2 掘削ヘッド

掘削ヘッドは本掘削用のドラムカッターヘッドと補助掘削用の多軸カッターヘッドの2種類を使い分ける。いずれも1台の機械で掘削と浚渫を同時に行い、回収率の高い採掘を実施する。4軸ヘッドは周囲の掘削ヘッドで中央に集鉱、中央に設けた吸入ヘッドでスラリー移送される。

4軸カッターは対となった掘削カッターがヘッド中央に集鉱するよう、自転しながら公転し、ドーナツ状の掘削を行う。カッターの掘削に伴い、掘削された岩石はヘッド中央に集められ、中央に位置する吸入ヘッドで浚渫され、海底面から試験機側へスラリー移送される。4軸カッターは、2軸とすることも可能である。

2.2 掘削装置要素試験

2.1 で述べた考え方にに基づき、採掘要素技術試験機に使用する掘削ヘッドとしてドラムカッターと4軸カッターの2つを採用した。採掘要素技術試験機の建造に先立ち、ドラムカッター掘削装置要素試験と4軸カッター掘削装置要素試験を実施した。

ドラムカッター掘削装置要素試験では陸上の土木機械のドラムカッターを用いて、20MPa コンクリート、50MPa コンクリート、海底熱水鉱床鉱石サンプル、蛇紋岩の4種の供試体に対して試験を行った。試験により掘削トルク、掘削反力、掘削土量などの基本掘削性能を確認した。試験の結果、採掘要素技術試験機のドラムカッター掘削装置についてはほぼ計画通りの仕様で所定の性能が得られる見込みを得た。掘削岩盤の粒度分布は安定しており、運転条件を調整することより、粒度をコントロールできることが分かった。

4軸カッター掘削装置要素試験は採掘要素技術試験機への搭載を想定した仕様で試作し、掘削装置要素試験を実施した。図3に4軸カッター掘削装置要素試験の状況を示す。

試験の結果、掘削土量が $0.1\sim 0.3\text{m}^3/\text{h}$ 程度であり、掘削能力が不足していることが判明した。この原因は限られた油圧パワーを4つに分割したため、各ドラムの掘削能力が不足したことによるものである。この対策として4ドラムを2ドラムとした2軸カッターとし、各ドラムの径を増加させ、掘削時の周速を大きくするものとした。



図3 4軸カッター掘削装置要素試験

対となった掘削カッターが自転しながら公転し、ドーナツ状の掘削を行う。実機ではカッターの掘削に伴い、掘削された岩石はヘッド中央に集鉱し、中央の吸入ヘッドで浚渫され、海底面からスラリー移送される。

この対策に基づき試作試験装置を改造し、改めて2軸カッター掘削装置要素試験を実施した。試験の結果、海底熱水鉱床岩石サンプルで $1.2\text{m}^3/\text{h}$ の掘削能力を確認した。また、4軸カッターでは歯がたたなかった蛇紋岩(1軸圧縮強度 $70\sim 170\text{MPa}$)も掘削できることを確認した。掘削能力は大きく向上し、対策の有効性を確認でき、採掘要素技術試験機への搭載のめどを得ることができた。中央への集鉱能力については4軸カッターと同様に得られており、掘削粒度も安定していることを確認した。

2.3 浚渫装置要素試験

本掘削装置は掘削機能と浚渫機能を同時に行う。このため、ドラムカッター、4軸カッターそれぞれの掘削ヘッドに浚渫ヘッドを組み合わせて浚渫装置要素試験を実施した。試験はそれぞれの掘削・浚渫ヘッドを試作し、試験水槽で実際に水中掘削と浚渫を行い確認した。ただし、水槽に設置した試験体は碎石及び粘土とし、掘削ヘッドには掘削機能は持たせず集鉱の機能のみ模擬した。

想定した浚渫ヘッドにおける掘削土の流れを図4に示す。試験の結果、それぞれの浚渫ヘッドで碎石の取りこぼしもなくスラリー移送可能であること、スラリーポンプの能力相当まで集鉱し、移送可能であることを確認した。

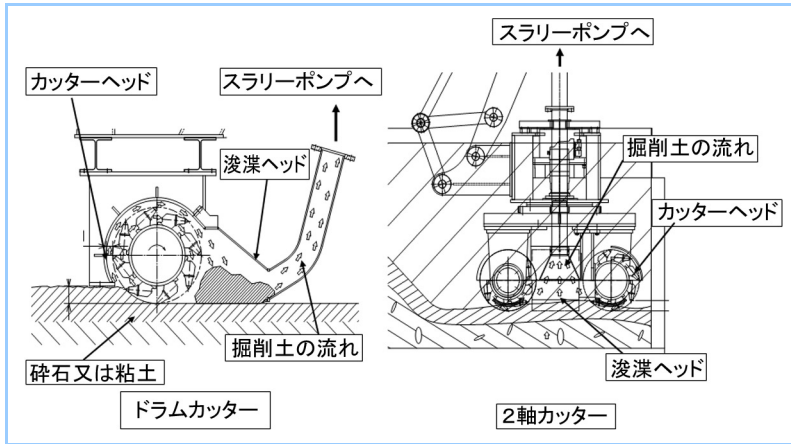


図4 浚渫装置要素試験(浚渫ヘッドにおける掘削土の流れ(想定))

想定した浚渫ヘッドにおける掘削土の流れは、ヘッドの回転力と浚渫ポンプの吸引によってスラリー移送される。

2.4 走行装置要素試験

海底の熱水鉱床は角礫が集積した不整地が多く、走行が困難な環境である。このため、不整地走行性能の向上を図るため、4つのクローラを独立に支持し、それぞれの脚の高さ・角度を調整可能な4クローラ独立懸架式走行装置を走行装置に採用した。

採掘要素技術試験機の建造に先立ち、4クローラ走行装置テストベッドを試作し、砕石により構成した不整地を走行する走行装置要素試験を実施した。基本走行性能及び不整地での走行性能を確認した。図5に走行装置要素試験の状況を示す。



図5 走行装置要素試験

4クローラ走行装置テストベッドを試作し、砕石により構成した不整地を走行する走行装置要素試験の試験風景を示す。

3. 採掘要素試験機

採掘要素技術試験機は機体前部に左右旋回、上下伏仰に可動するブームを持ち、ブームの先端にカッターを搭載している。カッターにはドラムカッターと2軸カッターの2つがあり、ドラムカッターは平面的掘削を、2軸カッターは採掘機正面や凹凸した起伏面の荒掘削を行うものとして使い分ける。それぞれの掘削ヘッドには浚渫ヘッドが設けられており、掘削機能と浚渫機能を同時に行うのが本機の特徴の1つである。また、海底面での走行は独立懸架式の4つのクローラで行い、この4クローラにより傾斜35度の坂を登り、35cmの段差を乗り越える。図6に採掘要素技術試験機の概要を示す。

本格的な商用システムでの採掘機は重量120t、1000kW級の水中機器システムと予想されるが、今回製作した採掘要素技術試験機は重量20t、184kWの規模となり、試験機としながらも通常の水中作業用ROVに比べると倍以上の大きさと重作業能力を持つ。

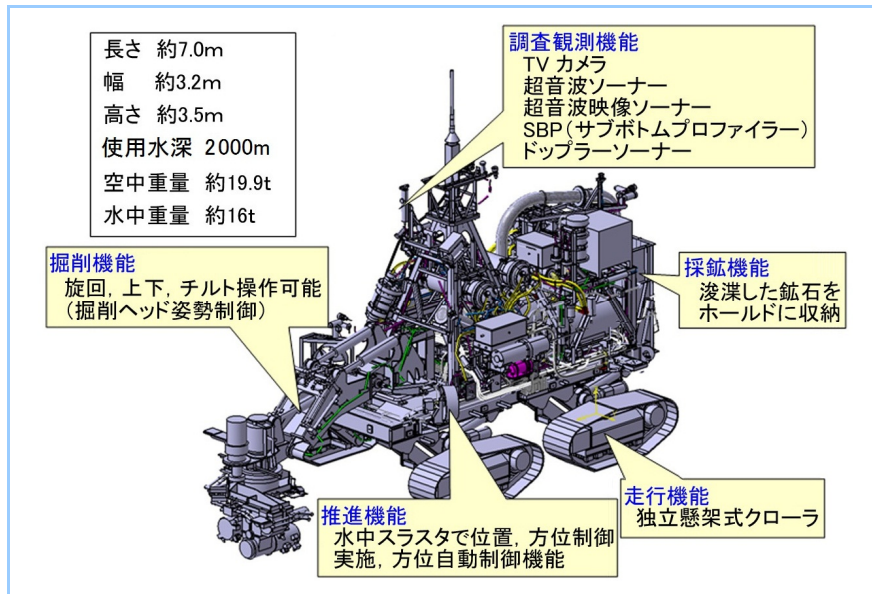


図6 掘削試験機

2軸カッターヘッド装備状態の採掘要素試験機の概要を示す。

4. 洋上実証試験

本試験機は平成 24 年 11 月に海洋資源調査船「白嶺」に搭載され、沖縄海域で海域実験を行った。凹凸を避けて着底した地点には 2~5m クラスのチムニーが周囲に認められ、比較的地形の傾斜は緩いものの、高さ 1m 程度の小さなチムニーやそれらが崩壊したと考えられる凹凸があつて着底可能な場所は限られた。

海底で2軸カッターヘッドを用いて実施したチムニー掘削状況を図7に示す。この2軸カッターでのチムニー掘削により採鉱ホルドに約 25kg の硫化鉱を回収することができた。今回採取した岩石の粒度分布をみると 50mm を超える粒径はなく安定した粒度での掘削機能を確認した。掘削採取した掘削岩石及び粒度分布を図8に示す。

洋上試験で得られた成果と今後の課題を下記に示す。

(1) 海底熱水鉱床サンプル回収

大水深での実際の海底熱水鉱床マウンドで採掘要素技術試験機を運転し、その作動、機能を確認することができた。海底熱水鉱床マウンドで海底面、チムニーを掘削して、海底から硫化鉱を含む鉱床サンプルを回収することができた。

(2) 運用データの取得

熱水鉱床マウンドで採掘要素技術試験機を運用し、将来の実証機建造のための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。

(3) 海底状況把握の重要性

試験海域は堆積層に覆われており、着底するだけでも土煙で濁り、透明度が低く、海底の視認性が悪い。また海底にはあちこちに大きな礫や小チムニーが存在し、危険である。安全にオペレーションを行うためには海底の状況を把握することが重要であり、複数の TV カメラ、ソナーを持ち、海底及び周囲の状況を監視しながらオペレーションを行うことが必要である。

(4) ヘビーデューティ

採鉱機は海底で掘削作業を行う土木機械であり、掘削対象や岩との接触に耐えうるヘビーデューティ性が必要である。また掘削対象や岩との接触に耐えうる設計、保護が必要である。

(5) 掘削ヘッド、掘削対象の監視

掘削ヘッドの周囲の状況及び掘削対象を良く認識することが効率の良い掘削を行うために必要と考えられる。このためには掘削ヘッドの状況を監視するセンサを数多く持つことが望ましい。

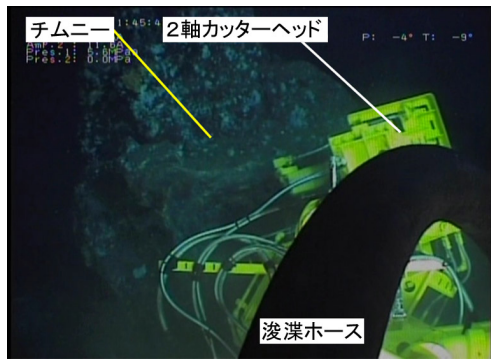


図7 掘削を行ったチムニー
2軸カッターヘッドにより深海底のチムニーを掘削する様子を示す。

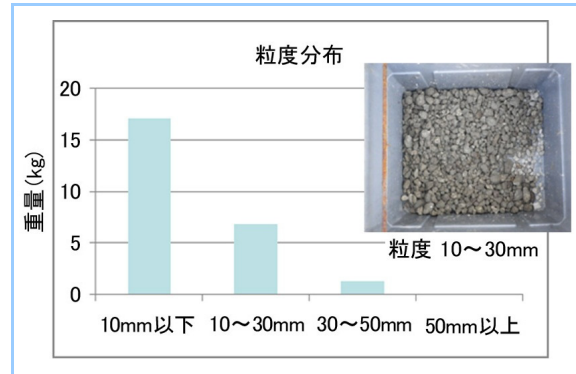


図8 採取された熱水鉱床岩石の粒度分布
採取した掘削岩石には 50mmを超える粒径のものはなく、安定した粒度分布を示している。

5. まとめ

掘削要素試験、浚渫要素試験、走行装置要素試験の成果を織り込み、採掘要素技術試験機は建造された。平成24年11月に実施した洋上試験では実際に大水深での海底熱水鉱床マウンドで採掘要素技術試験機を運転し、海底から硫化鉱を含むサンプルを回収することができた。熱水鉱床マウンドで採掘要素技術試験機を運用し、将来の実証機建造のための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。

最後に本試験機の建造に際して(独)石油天然ガス・金属鉱物資源機構より多大なるご指導を戴いたことに感謝致します。

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, 海底熱水鉱床採掘システム概念検討, 第22回海洋工学シンポジウム論文集, OES22-005, (2011), p.1
- (3) 石黒ほか, 2軸及び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)