

【特集】

海底鉱物資源開発の現状と海技研の取り組み

我が国の排他的経済水域内には、海底熱水鉱床、コバルトリッチクラスト等の海底鉱物資源の存在が期待されています。特に、海底熱水鉱床に関しては、平成20年3月に「海洋基本計画」、平成21年3月に「海洋エネルギー・鉱物資源開発計画」がそれぞれ策定され、開発計画において、資源量評価、環境影響評価、採鉱技術及び選鉱・製錬技術の検討をそれぞれ併行して実施することによって10年後を目処に商業化に移行することが目標として掲げられています。本稿では、海底鉱物資源開発の現状、海底熱水鉱床の概略資源量並びに海底熱水鉱床の開発に向けた海技研の取り組みについて報告する。 (海洋開発系)

1. 海底鉱物資源開発の現状

海底鉱物資源には、主に「海底熱水鉱床」「コバルトリッチクラスト」「マンガン団塊」の3タイプがあり、それぞれに含有元素や分布場所は異なるが、共通しているのは、以前からその存在は認識されながらも、未だに商業生産まで至った例がないということである。まさに人類にとって手つかずのまま残されてきた資源です。

しかし近年、カナダのバンクーバーに本社を置くベンチャー企業の Nautilus Minerals 社が、パプアニューギニア領海内における海底熱水鉱床（同国政府から環境許可及び鉱業権を取得済）について、2013年後半の生産開始の計画を発表するなど、海底鉱物資源を取り巻く環境は大きく前進している。

一方、国連海洋法条約では、公海域の深海底鉱物資源は人類共同の財産であると規定されており、ジャマイカ共和国に本部が設置されている「国際海底機構（ISA：International Seabed Authority）」と呼ばれる国際機関により一元的に管理されている。

ISAでは、2000年にマンガン団塊の探査規則が策定され、その後2004年第10回総会から海底熱水鉱床及びコバルトリッチクラストの探査規則の策定に向けた検討が開始された。これらの探査規則は、2006年第12回総会において、海底熱水鉱床とコバルトリッチクラストを分離して検討することを決定し、2010年第16回総会理事会で、海底熱水鉱床の探査規則案が採択された。残るはコバルトリッチクラストの探査規則案

のみとなっている。

このように近年、海底鉱物資源を取り巻く環境は大きく前進しています。以下に最近の公表資料を踏まえ、海底鉱物資源の動向を調べてみます。

1-1. マンガン団塊

マンガン団塊については、日本は昭和50年度からハワイ南東方沖での探査に着手し、その後、順次、採鉱システム技術開発、環境影響調査、製錬技術開発を実施し、その結果、2001年にはISAから15年間の排他的探査権が付与され、現在同海域の鉱区開発に向けた各種の検討が行われています。2011年現在、排他的探査権が付与されているのは、日本含め、フランス、中国、インド、韓国、ロシア、旧共産圏諸国連合及びドイツの計8の国。中国、韓国などでは、小型の採鉱試験機を実際に製作し各種データを取得しているとともに、ドイツは、2006年にISAからハワイ沖に探査権が付与され、マンガン団塊サンプリングを実施している。

1-2. 海底熱水鉱床

海底熱水鉱床に関しては、1997年に Nautilus Minerals 社がパプアニューギニア領海のビスマルク海に探査鉱区を取得し、2007年以降、AUV、ROVなどを用いた探査を活発に行っている。2008年後半のリーマンショックの影響で当初予定の生産開始時期が遅れたが、2013年後半の生産開始を目指し、海洋石油のライザー技術を応用し、本格的なエンジニアリングの検

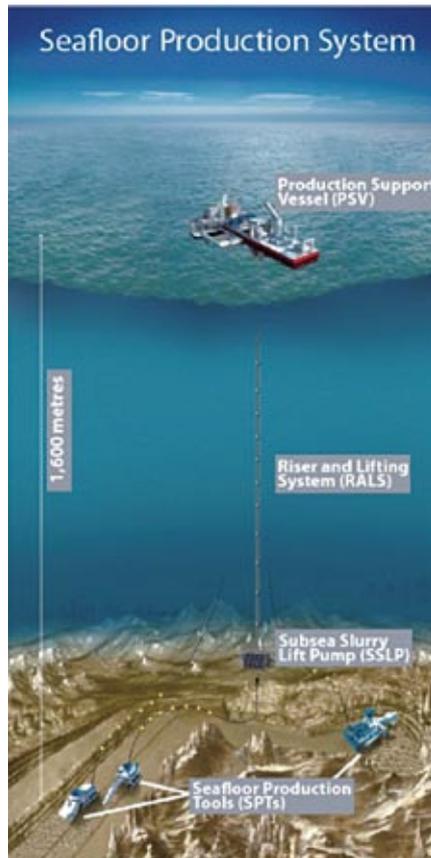


図1.Nautilus Minerals社が提案する生産システム

討を行っている(図1)

韓国では、2008年3月にトンガ政府から同国EEZ内の海底熱水鉱床探査鉱区が付与され、試験採掘のために、4クローラを有する採鉱実験機概念設計を完了させている模様である。

1-3. コバルトリッチクラスト

コバルトリッチクラストは北西太平洋の公海域に分布が確認されており、ロシア、韓国、中国などが調査を行っている模様であるが、詳しい情報は公表されていない。これは、国際ルールが検討中であるため、有望

な海域の公表を控えているものと考えられている。

2. 海底熱水鉱床の概略資源量

独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構(以後JOGMECと称する)は、沖縄海域及び伊豆・小笠原海域(図2)等海底熱水鉱床の徴候が広範囲に確認されている区域を中心に、概略資源量調査を実施している。

2-1. 沖縄海域

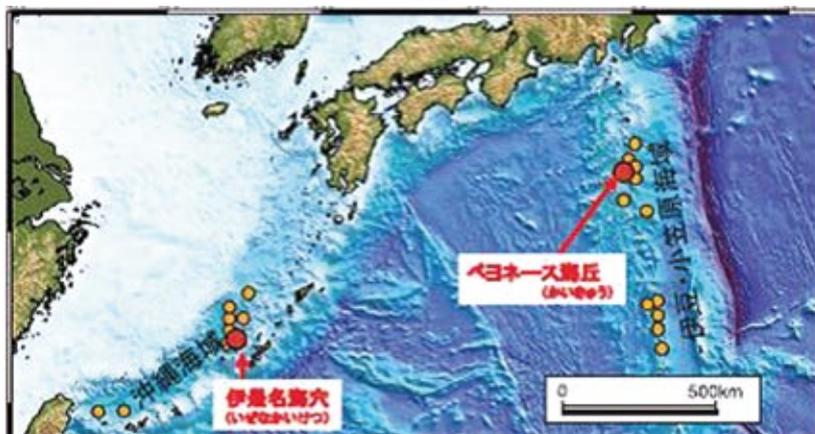


図2. 我国周辺の主な海底熱水鉱床分布域(オレンジ色は確認されている海底熱水鉱床の徴候)
(出典:海底熱水鉱床開発計画にかかる第1期中間評価報告書、平成22年、経済産業省資源エネルギー庁ほか)

沖縄海域で特に海底熱水活動が広範囲に認められる伊是名海穴の調査により、直径 100 m 前後の円錐型の大きなマウンドが存在することが明らかとなり、このマウンドに対し精密な海底観察、グラブサンプリングやボーリング調査 (82 孔、総掘進長 796 m) を実施することで、マウンドの内部構造の把握を行っている。このボーリング調査で取得した海底熱水鉱床 (金属硫化物) コアサンプルの平均品位例を表 1 に示す。

含有金属	品位	含有金属	品位
銅	0.43 %	ガリウム	9.36ppm
鉛	3.20 %	セレン	55.7ppm
金	2.96 g/t	テルル	5,565ppm
銀	236 g/t	ヒ素	21.1ppm

表 1. 金属硫化物のボーリングコアの平均品位 (沖縄海域伊是名海穴の 285 個の試料平均)

(出典：海底熱水鉱床開発計画にかかる第 1 期中間評価報告書、平成 22 年、経済産業省資源エネルギー庁ほか)

マウンドにおけるグラブサンプリングの結果からマウンド表面は金属硫化物の礫で構成されていることが確認され、マウンドは、全て金属硫化物で構成されているものと推定される。ただし、現有の深海用ボーリングマシン (BMS) の掘削限界が 20 m であるためにマウンド最下部を確認することはできていない。そのため沖縄海域における推定資源量は算定されていない。

2-2. 伊豆・小笠原海域

伊豆・小笠原海域では過去の調査により海底熱水活動が広範囲に認められたベヨネース海丘において、海底熱水活動に起因するチムニー帯を中心に、ボーリング調査 (26 本、総掘進長 189 m) を実施し、海底熱

水鉱床の水平・垂直方向の広がり把握している。本ボーリング調査で取得した海底熱水鉱床 (金属硫化物) のコアサンプルの平均品位例を表 2 に示す。

含有金属	品位	含有金属	品位
銅	1.43 %	ガリウム	29.1ppm
鉛	1.67 %	セレン	26.6ppm
亜鉛	30.6 %	テルル	0.09ppm
金	11.5 g/t	ヒ素	2,340ppm
銀	290 g/t	水銀	19.7ppm

表 2. 金属硫化物のボーリングコアの平均品位

(伊豆・小笠原海域ベヨネース海丘の 22 個の試料平均)

(出典：海底熱水鉱床開発計画にかかる第 1 期中間評価報告書、平成 22 年、経済産業省資源エネルギー庁他)

ベヨネース海丘の概略資源量は、ボーリング調査で確認した平均の厚さを 2 m、密度 3.0 g/cm³、水平的な広がりを 100 m × 150 m とした場合、9 万トン、厚さを 8 m で見積もった場合 36 万トンと推定されている。ベヨネース海丘の概略資源量は、ボーリング調査で確認した平均の厚さを 2 m、密度 3.0 g/cm³、水平的な広がりを 100 m × 150 m とした場合、9 万トン、厚さを 8 m で見積もった場合 36 万トンと推定されている。

3. 海底熱水鉱床の採鉱技術

— 採掘要素技術 試験機の開発動向 —

海底熱水鉱床の採鉱システムは、3つのユニットから構成される (図3)。海底で鉱石を掘削する採掘ユニット、掘削された鉱石を船上まで揚げる揚鉱ユニット、そして揚鉱された鉱石を一次貯留し、選鉱設備等に輸送する役割を果たす採鉱母船ユニットである。これら各ユ

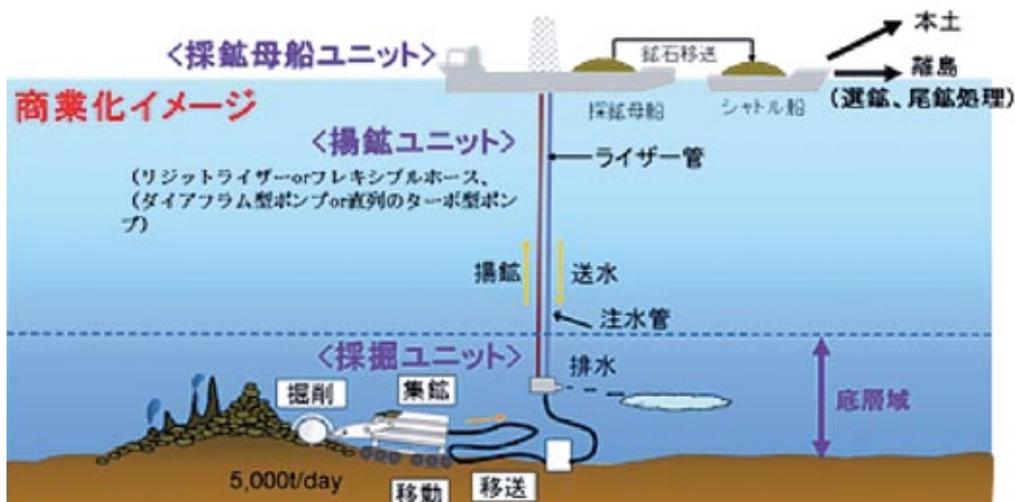


図 3. 海底熱水鉱床の採鉱システムのイメージ (出典：平成 23 年度 (第 3 回) 金属資源関連成果発表会資料より抜粋)

ユニットに関し、JOGMECでは平成20年度より海底熱水鉱床採鉱システムに係る検討に取り組んでいる。

3-1. 採鉱システム事業の概要

JOGMECでは、平成20～22年度の3年間にわたり予備的経済性評価、対象海域の海気象条件設定等の検討を実施され、経済的に成立させるためには5,000t/日の掘削量が必要との設計条件を設定するとともに、各ユニットに係る既存技術について動向調査・机上検討を実施している。

採掘ユニットに関し、水深約1,700mという大水深において海底熱水鉱床が賦存する海域において、5,000t/日の掘削量を達成するような掘削・集鉱・移動等を効率的に行う採鉱機は世界的に開発例がなく、各種要素技術の技術的実現可能性の評価は、なされていない。Nautilus Minerals社が、パプアニューギニア沖での海底熱水鉱床開発(図1)を目指し、英国のSoil Machine Dynamics社に採鉱機を発注し、製造中であるが、技術的課題をどのようにクリアしたのか、あるいは今後、商業時生産までにどのようにクリアしていくのかということは不明である。

そのため、段階的に技術的実現可能性を調査するために、平成22年度より各種要素技術について陸上・水槽・実海域での試験を目的とした採掘要素技術試験機調達事業を実施している。

実証試験機は、採鉱システムは、採鉱母船ユニット、揚鉱ユニット、採掘ユニットを組み合わせた全体システムの技術的実現可能性を評価するためのものであり、採掘要素技術試験機のネクストステップの検討事項で

ある。海洋エネルギー・鉱物資源開発計画では平成23年、24年度に実証試験機概念設計・詳細設計を実施し、第2期以降に実証試験機の製作・海洋実証試験が計画されている。平成23年度は、採掘要素技術試験機事業を進め、陸上・水槽等で採掘ユニットに係る要素試験データを取得しつつ、そうしたデータを適宜反映させながら全体システムとしての実証試験機概念設計を実施する2つの検討を同時並行的に進めている(図4)。

3-2. 試験機事業の概要

採掘要素技術試験機事業は、平成22年度提案公募型の企画競争を実施し、事業実施者を主要2JVに選定し、事業が進められている。公募を実施するに当たっては、以下の条件が付加されている。

- ①採掘ユニットは水深700m～2,000mでの掘削を想定。
- ②採掘ユニットは鉱石(あるいは岩石等)を掘削・破碎し、揚鉱ユニットまで輸送するまでのシステムを想定。採掘ユニットから出る鉱石のサイズは直径50mm以下。
- ③採掘ユニットでは鉱石部分のみの選択的な採掘を想定。
- ④鉱石部分の採鉱実収率は90%以上を想定。
- ⑤揚鉱ユニットは50mm以下の鉱石を採鉱母船ユニットに揚鉱することを想定。
- ⑥商業生産の際の採鉱量は5,000t/日を想定。また、採掘ユニットの作業環境として、沖縄海域伊是名

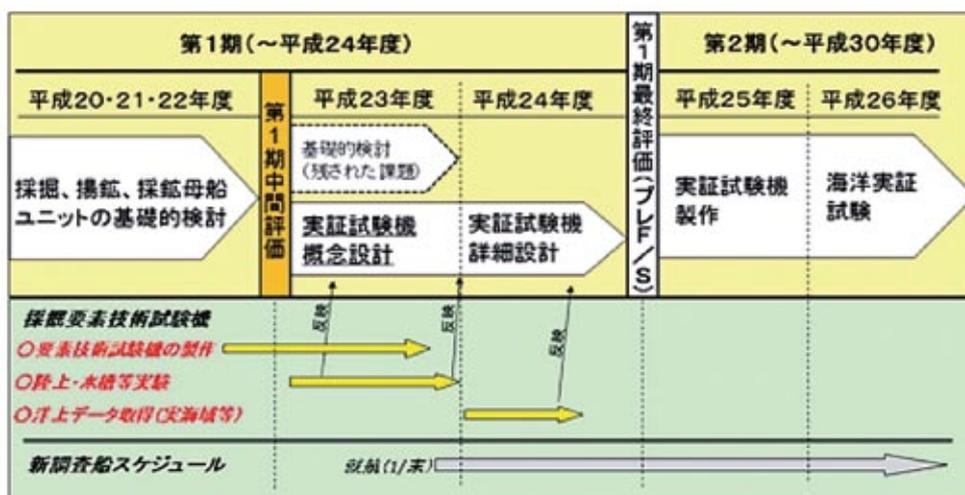


図4. 採鉱分野の事業計画(出典:平成23年度(第3回)金属資源関連成果発表会資料より抜粋)

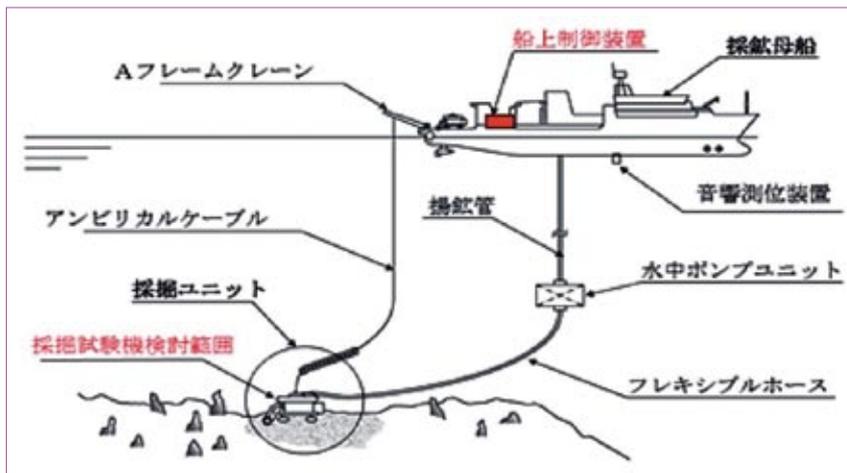


図5. 三菱重工等 JV の想定する採鉱システムのイメージ (出典:平成23年度(第3回)金属資源関連成果発表会資料より抜粋)

海穴の北部モデルマウンド採掘を想定し、掘削対象の鉱床の形態としては、1) チムニー林立環境、2) 礫堆積環境、3) 砂泥堆積環境、4) 塊状硫化鉱体を想定。

上記の前提条件のもと、本事業では採掘ユニットに期待される、①移動、②掘削・整地、③集鉱・移送技術の要素技術に関して、各グループで試験・検討が進められている。各グループの試験機事業の概要は以下の通り。

三菱重工業株式会社を代表とし、住友金属鉱山株式会社、カヤバシステムマシナリー株式会社を構成員とする共同企業体(以下「三菱重工等 JV」)の提案する採鉱システムのイメージを図5に示す。採掘ユニットのコンセプトとして、掘削と同時に集鉱する All in One

型の4クローラ方式採鉱機を想定している。採鉱機はフレキシブルホースで揚鉱ユニットと繋がれており、集鉱された鉱石はそのまま揚鉱ユニットを介して船上に揚げられることになる。商業機は、重量比で本試験機の10倍程度を想定している。

株式会社三井三池製作所を代表とし、当所海技研を構成員とする企業連合(以下、三井三池等 JV とする)の提案する採鉱システムのイメージを図6に示す。三菱重工等 JV の試験機と異なる点は、採掘と集鉱はそれぞれ別の機械で実施するシステムを想定しているところである。掘削のみ実施する採鉱機は陸上用採鉱機として実績のあるロードヘッダをベースとし、掘削ドラムは傘型円錐形で周囲にビットを配置したものである。移動機能は、海底の不整地面を安定に走行するために低姿勢形状で2クローラ方式を想定している。本試験機事業における集鉱機は、水槽試験でノズル形状の

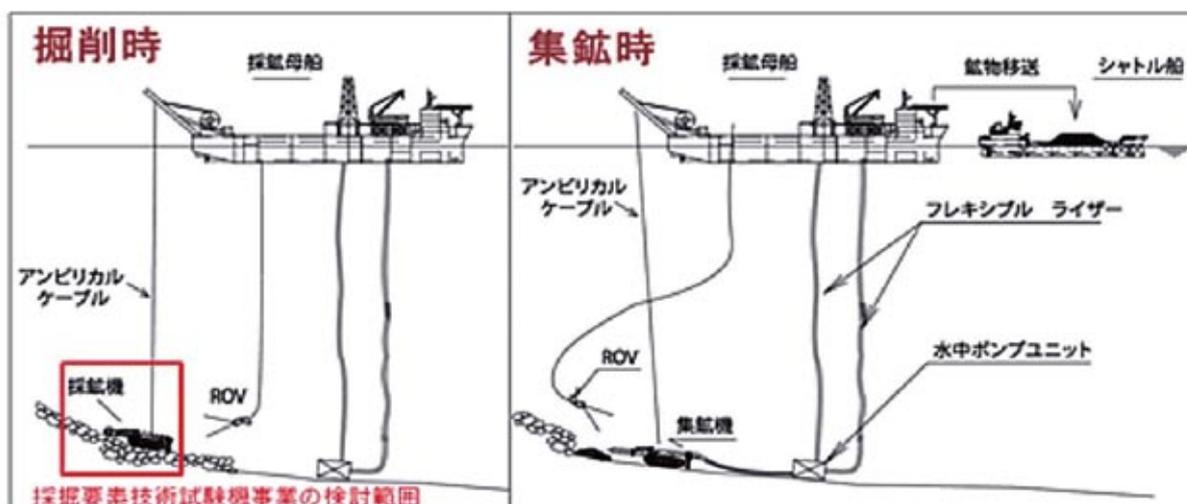


図6. 三井三池等 JV の想定する採鉱システムのイメージ (出典:平成23年度(第3回)金属資源関連成果発表会資料より抜粋)

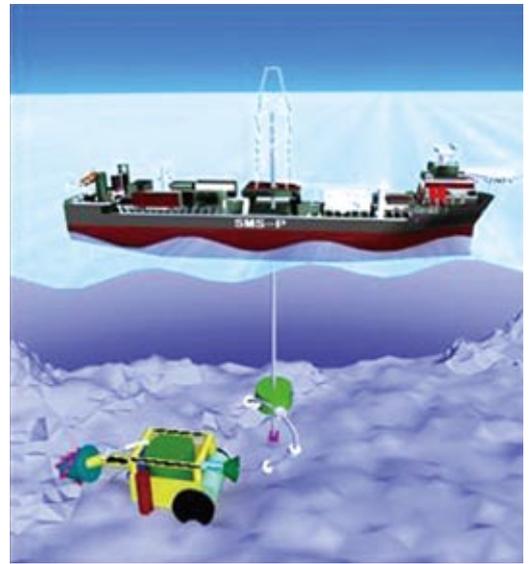


図7. 海底熱水鉱床開発用プラットフォームのイメージ

水槽試験との比較検討のみ実施しており、中心は掘削専用の採鉱機の掘削及び走行に係る要素技術である。なお、商業機は、重量比で本試験機の10倍程度を想定している。

これらの試験機は、平成24年度以降、新調査船「白嶺」に搭載され、実海域における洋上試験に供されることが予定されている。

3-3. 当所の取り組み

海技研では、国土交通省からの受託研究「外洋上プラットフォームの研究開発」（平成19～22年度）の中で、海底熱水鉱床開発用プラットフォームの基本計画を行うとともに、調和設計法（多様な海洋利活用目的に応じて、安全性・経済性などのバランスのとれた最適な外洋上プラットフォームの設計を支援するツール。H19年からH22年の4か年計画で国土交通省

の受託研究で実施された「外洋上プラットフォームの研究開発」の一環で開発)の検証のために同プラットフォームの試設計を行った(図7)。さらに、平成23年度からの第3期中期計画において、海底鉱物資源開発用サブシステム(採鉱、揚鉱)に関する技術開発及び安全性評価等を実施している。

4-2節で述べた試験機事業(平成22～23年度)において、海技研は(株)三井三池製作所と共同で採掘要素技術試験機を設計・製作した(図8)。試験機の開発にあたっては、現有機器(陸上用ロードヘッダ)による走行試験及び掘削試験、主要機器耐圧試験、調査観測装置(ソナー)水中試験等の要素試験を行って設計のための基礎データを取得した。主要機器耐圧試験は海技研の高圧タンクで実施し、試験機を構成する主要機器の高圧水中での耐圧性能及び動作性能を確認した。主要機器耐圧試験の様子を図



図8. (株)三井三池製作所と共同で開発した採掘要素技術試験機

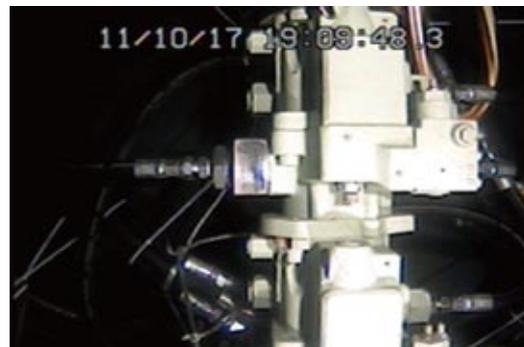
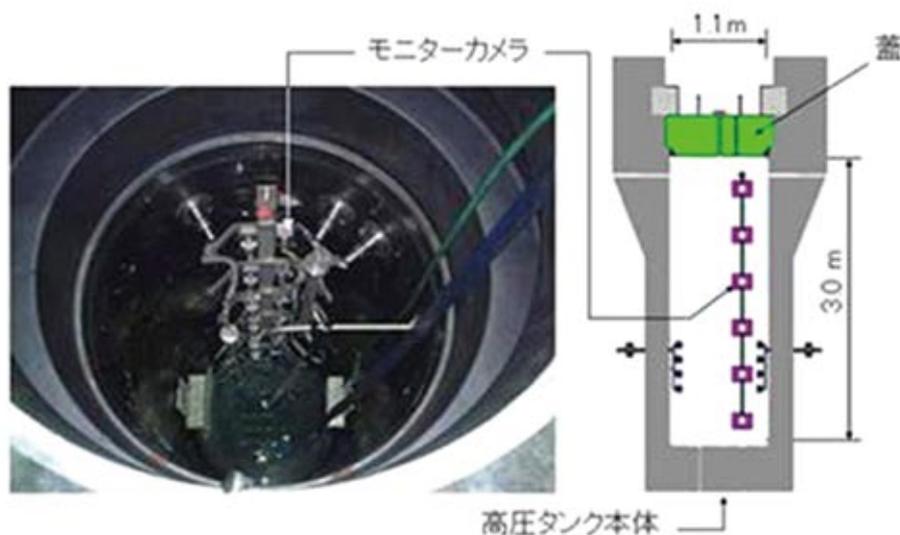


図 9. 主要機器耐圧試験の様子 (左：供試体取出時の様子、右：試験中の水中カメラ映像)

9に、高圧タンクの概要を図10に示す。またソナー水中試験は、海技研の救命器具落下試験設備(落水水槽(当所屋外水槽：長さ25m×幅15m×水深3m))で実施し、濁度環境下、振動条件下におけるソナーの観測性能を確認した。なお濁度条件は、別途実施した掘削時の濁度に関する簡易解析結果に基づき設定した。最終的に製作した試験機を用いて陸上及び水中での性能試験を行い、試験機の性能確認に必要な各種データを取得するとともに、様々な機器が水中で正常に作動することを確認した。なお、陸上性能試験及び水

中性能試験は、それぞれ三井三池製作所九州事業所、海技研の落水水槽で実施した。性能試験の様子を図11に示す。

その他、揚鉱システムや海底選鉱システムに関する研究を行っている。海底選鉱システムとは、海底で採取した鉱石をその場で粉砕し、有用鉱物のみを分離するシステムである。海底選鉱システムのイメージを図12に示す。海技研は東京大学と共同で、要素技術である鉱石の粉砕技術や有用鉱物を分離する浮選技術等の研究を行っている。浮選技術の研究では、海技研の高



寸法 (m)	重量 (ton)	最大使用圧力 (MPa)	付帯設備
φ 1.1 (内径) × 3.0 (内部深さ)	60 (蓋を除く)	60	加圧装置 温度調節装置 pH 調節装置 回流装置 監視制御コンソール 等

図 10. 高圧タンクの概要



図 11. 採掘要素技術試験機の性能試験の様子
(左：陸上掘削試験（於：三井三池製作所 九州事業所）、右：水中掘削試験（於：落下水槽））

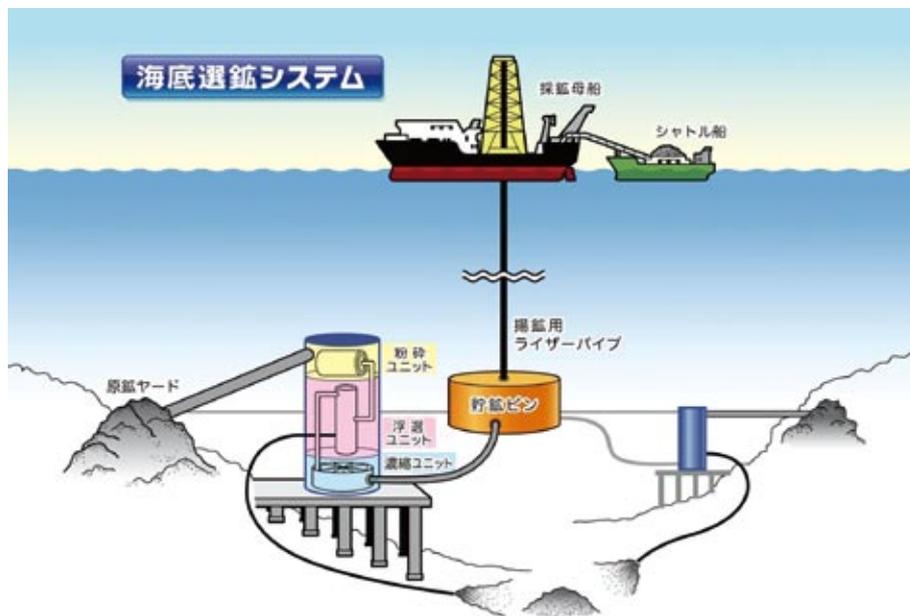


図 12. 海底選鉱システムのイメージ

圧タンクにおいて模擬的な浮選試験を実施して、高水圧条件においても浮選による有用鉱物の分離が成立する可能性があることを確認した。また研究成果をもとに、特許の出願（特願 2010-201166）も行っている。今後は、システム全体の概念設計や経済性評価の検討も行っていく予定である。

おわりに

平成20年の「海洋基本計画」の閣議決定と平成21年の「海洋エネルギー・鉱物資源開発計画」の策定により、我が国の海洋鉱物資源開発の方向性が固まり、海底熱水鉱床については10年後を目途に商業化に移行するロードマップが作成されている。また国際的にも多く

の国々が、資源ナショナリズムに基づき海洋鉱物資源開発を活発化させ、開発競争は今後さらに激しくなることが予想される。そうした中、我が国において、資源セキュリティの観点からALL JAPANによる海洋鉱物資源の探査・開発を進めていくことは重要である。また、平成23年度には最新鋭の探査機器を搭載した海洋資源調査船「白嶺」が就航しており、こうした強力なツールを活用することで海底鉱物資源開発を環境に配慮しつつ促進させ、我が国の海洋資源国としての未来を切り開けるよう、当所も微力ながら貢献していきたい。

参考文献

1. 金属資源レポート 2011
2. 独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構，平成 23 年度（第 3 回）金属資源関連成果発表会資料