

海底熱水鉱床開発計画

第1期 最終評価報告書

平成25年7月5日

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
海底熱水鉱床開発委員会

はじめに

近年、他国の政策に影響を受けにくい資源として、我が国周辺海域に賦存する金属鉱物資源への関心が高まっている。開発が可能になれば、海外に供給の太宗を依存している我が国の資源の新たな供給源として期待できる。

しかし、海底の資源開発については、石油・天然ガス分野を除いて、いまだ世界に実例のない未踏分野であり、長期的かつ積極的な取り組みが必要であると同時に、冷静かつ慎重な評価と検討を合わせて行わなければならない。

このため、平成 20 年 3 月に閣議決定された海洋基本計画においては、「エネルギー・鉱物資源の開発は、民間企業にとりリスクが高く、技術的な困難も伴うため、基礎調査や技術開発等について、国が先導的な役割を担う」とされた。

これを受け、経済産業省は、平成 21 年 3 月に策定した「海洋エネルギー・鉱物資源開発計画」の中で、特に海底熱水鉱床の開発に向けた 10 年計画を定め、独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構が委託事業主体となり、事業を推進してきた。

平成 24 年度末で第 1 期を終える 5 年間については、資源量評価、環境影響評価、資源開発技術（採鉱技術）及び選鉱・製錬技術の分野で、詳細な検討を行い、それぞれ良好な成果を得た。

本報告書は、5 年間の取組を踏まえ、その成果と評価結果について取りまとめたものである。

なお、本年 4 月 26 日には、新たな海洋基本計画が閣議決定され、海底熱水鉱床については、「平成 30 年代後半以降に民間企業が参画する商業化を目指したプロジェクトが開始されるよう、既知鉱床の資源量評価、新鉱床の発見と概略資源量の把握、実海域実験を含めた採鉱・揚鉱に係る機器の技術開発、環境影響評価手法の開発等を推進するとともに、その成果が着実に民間企業による商業化に資するよう、官民連携の下、推進する」と位置づけられた。さらに、「海洋エネルギー・鉱物資源開発計

画」の改定についても必要に応じ、所要の措置を講ずると定められており、本報告書に取りまとめたこれまでの成果と今後の課題については、新たな開発計画に反映して取り組んで行くこととなる。

平成 25 年 7 月

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
海底熱水鉱床開発委員会

目 次

1. 第1期の成果概要	1
2. 第1期最終評価に当たっての基本的考え方.....	2
2. 1 海洋基本計画と海底熱水鉱床にかかる開発計画.....	2
2. 2 国際的枠組との協調.....	3
2. 3 開発における潜在リスクについて.....	4
3. 海底熱水鉱床について.....	6
4. 海底熱水鉱床開発計画の内容.....	8
4. 1 開発計画について.....	8
4. 2 開発計画における第1期5カ年の目標・内容.....	9
4. 3 実施体制.....	10
5. 第1期評価期間における実績・成果.....	11
5. 1 各分野の実績・成果.....	11
5. 2 実証試験候補海域の選定.....	68
6. 第1期評価期間における個別技術分野の評価.....	69
6. 1 資源量評価.....	69
6. 2 環境影響評価.....	71
6. 3 資源開発技術（採鉱技術）.....	73
6. 4 製錬技術（選鉱・製錬技術）.....	75
6. 5 総合評価.....	77
7. 課題と今後の提言.....	80
7. 1 資源量評価.....	80
7. 2 環境影響評価.....	81
7. 3 資源開発技術（採鉱技術）.....	82
7. 4 製錬技術（選鉱・製錬技術）.....	82
7. 5 第2期開発計画の実施体制.....	83
7. 6 未探査地域への取り組み.....	84

参考 1	Numis Securities Ltd. (2008)が掲げた Nautilus Minerals Inc.への投資のリスクファクター.....	85
参考 2	海底熱水鉱床開発委員会委員名簿.....	89
参考 3	ワーキンググループ委員名簿.....	90
参考 4	用語集.....	94

1. 第1期の成果概要

1. 沖縄海域伊是名海穴内で資源量を推定

沖縄海域伊是名海穴及び伊豆・小笠原海域ベヨネース海丘を中心に、海洋資源調査船「第2白嶺丸」、「白嶺」等を用いて、高解像度の地形調査、海底電磁探査、ボーリング調査等を実施した。特に、沖縄海域伊是名海穴内での121本のボーリング調査等から、マウンド（地形的な高まり）表層部の資源量を340万トンと推定した。さらに「白嶺」での深部ボーリングで海底面下に新たな新鉱体を発見した。

世界最先端の海洋資源調査船「白嶺（はくれい）」が就航

従来の調査船では海底下20mの掘削が限界であったが、平成24年2月、2種類の掘削装置（海底下50m及び400m掘削可能）を装備する世界最先端の海洋資源調査船「白嶺」が就航した。

2. 採掘要素技術試験の成功と採鉱システムの提案

採掘・揚鉱・採鉱母船で構成される採鉱システムの概念設計を実施した。将来の実証試験機設計に反映させるため、2種類の採掘試験機を製作し、沖縄海域伊是名海穴内で走行・掘削テストに成功した。また、実機開発に向けた海底での可視化技術等の技術的課題も明らかになった。

3. 採掘要素技術試験に先立ち環境影響調査を実施

採掘要素技術試験に先立ち、沖縄海域伊是名海穴、伊豆・小笠原海域ベヨネース海丘及びその周辺海域において、20航海の環境調査を実施し、当該海域の環境特性を把握した。この環境影響調査により、周辺環境への深刻な影響が生じないことが予測できた。また、試験中及び事後に再度環境モニタリングを行い、試験による影響を評価・検証した。さらに試験海域では、主要な大型底生生物の遺伝子学的検討を行い、固有の生物が存在しないことを確認した。

4. 多様な鉱石に対応する選鉱・製錬プロセスを提案

沖縄海域伊是名海穴及び伊豆・小笠原海域ベヨネース海丘より採取された31種類の試料を用いて、ラボスケールでの選鉱・製錬基礎試験を実施し、多様な鉱物からなる鉱石の選鉱特性を把握するとともに、ラボ～ベンチスケールでの有用金属の分離試験等を実施した。さらに選鉱パイロットプラント、実選鉱場の概念設計を実施した。また、有害鉱物の処理、貴金属回収等の技術課題も明らかになった。

2. 第1期最終評価に当たっての基本的考え方

2. 1 海洋基本計画と海底熱水鉱床にかかる開発計画

平成19年7月に海洋に関する基本理念を定めた「海洋基本法」が施行され、同法に基づき「海洋基本計画」が平成20年3月に閣議決定された。「海洋基本計画」では、「いまだ商業化されていない海底熱水鉱床については、今後10年程度を目途に商業化を検討する」ことが目標として定められた。

これを受け、総合資源エネルギー調査会鉱業分科会（分科会長：浦辺徹郎東京大学教授（当時））は、平成21年3月、「海洋エネルギー・鉱物資源開発計画」を決定し、総合海洋政策本部会合で了承された。この10年計画により海底熱水鉱床の開発に向け、探査・開発の道筋と必要な技術開発等を具体的に定めた。この時点では、より早期に民間企業による開発に移行すべきとの意見もあったが、海底鉱物資源の開発は未踏課題であることから、国が各種リスクの低減に先導的な役割を担い、民間企業的意思決定に必要な基礎的な情報を提供する必要があるとの立場が取られた。

このため、経済産業省は、独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構（以下「JOGMEC」という）を通じて、関係機関の協力の下、海底熱水鉱床にかかる開発計画として（1）鉱床の資源量評価、（2）環境影響評価、（3）資源開発技術（採鉱技術）、及び（4）選鉱・製錬技術の4つの側面から調査や技術的検討を同時並行的に実施してきた。

開発に当たって取組が必要な分野は多岐に亘ることから、効率的かつ効果的に開発を推進するため、各分野の進捗状況を見極めつつ全体を整合して進め、計画的に各段階で評価を行いつつ開発を推進していくこととし、開発の進捗状況に応じて、目標（課題）の明確化・再設定、内容及びスケジュールの評価と見直しを行った。

海底熱水鉱床の開発には、ここに挙げた技術的要素のみならず、金属価格、陸上資源の生産コスト、環境規制等、市場経済動向や各国制度を反映する変動要素が多く、こうした海底熱水鉱床の開発を取り巻く諸条件を踏まえて、開発を進めていく必要がある。ただし、それらの検討については、より商業化の時期が近づいてから実施することがより効果的と考えられる。

2. 2 国際的枠組との協調

海底鉱物資源の開発に関する国際枠組みの一つとして、1982年の国連海洋法条約及び国連海洋法条約第11部の実施に関する1994年協定に基づき設立された国際海底機構（International Seabed Authority: 以下「ISA」という）が挙げられる。ISAは、大陸棚限界線外の「深海底」において、資源管理をすることを目的として設立された機関である。その主要な役割は、深海底における活動の実施に係る規則及び手続きの採択、深海底における海洋科学研究の促進と奨励、深海底における天然資源の保護保全、及び海洋の生態系保全である。

ISAは、2001年のマンガン団塊に引き続き、海底熱水鉱床の概要調査及び探査に関する規則（以下「探査規則」という）を2011年に採択した。海底熱水鉱床に関する探査規則は、全44条の規定及び契約書様式を含む4つの付属文書からなっている。

同規則の中で、特に環境保全に関しては、契約者（探査権を保有する者）に対し、探査活動の中で、公害を防止し、軽減し、コントロールすべき必要な手段を講じなければならないこと、環境ベースラインのデータ及び情報を取得し、環境モニタリング・プログラムを開発し、定期的な報告書をISAに提出することを義務付けている。ただし、これらの規則では実施すべき項目については定めているものの、契約者がその結果をどのように適用するかについては具体的に定められておらず、今後の課題となっている。言い換えるならば、海底熱水鉱床に関する探査規則は、環境保全についての原則を定めたものであり、実際の保全案については現在検討がなされている「環境ガイドライン」の制定にゆだねることになっている。

しかし、実際に海底において資源開発が行われた実績は無く、これまで本格的な環境影響評価が実施されたことはない。その意味で、今回本計画で実施された環境影響調査（評価）は、最先端の科学的知識をもとに世界で初めてなされた試みであり、その成果はISAにおける国際的な検討にも活かされるべきものである。我が国としても、今回得られた知見をもとに、ISAにおける環境ガイドラインの制定及びその実行に積極的に関与・貢献していくことが重要である。

2. 3 開発における潜在リスクについて

本開発計画では、上記のような国内的、国際的な背景の下、探査段階であっても環境負荷及び生物多様性保護を考慮し、技術的にも経済的にも実現可能な方法で、海底熱水鉱床の開発が可能であるかを検討した。

第1期の終了に当たり、本報告書では、このような視点がいかに実現されたかについて検討を加え、第2期への移行について総合的な視点から評価を行う必要があると認識した。また、本年4月に閣議決定された新たな海洋基本計画では、第2期終了後の平成30年代後半以降に、民間企業が参画する海底熱水鉱床の商業化を目指したプロジェクトが開始されるよう、調査・開発等が行われる計画であるが、それに向けて必要な措置についても検討を加える。

海底熱水鉱床の開発にはさまざまなリスクが存在する。パプアニューギニアのマヌス海盆において先駆的な海底熱水鉱床の開発を試みた Nautilus Minerals Inc.は、ロンドン証券取引所のベンチャー向け株式市場（AIM）へ上場を行った際の新規公開株式目論見書（Numis Securities Ltd., 2008年）において、同社への投資判断の一つとしてのリスク要因を掲示している。Nautilus Minerals Inc.のベンチャー事業と、今回の開発計画における取組とでは実施形態や周辺環境が異なるため、その総てが当てはまるものではないが、海底熱水鉱床開発に共通するリスク要因と考えられる29項目を参考1に示した。

なお、これらのリスクは、民間企業が海底熱水鉱床の開発を検討する上で考慮すべきリスクを包含してはいるが、本開発計画における第1期の5年間では、国自らがこれらすべてのリスクに対応したり、それらを軽減したりすることができないことは言うまでもない。

そこで、今回の計画では、独自に代表的なリスク項目を取上げ、それらの中で最も優先性が高い、又は国として取り組むべき要素の高いもの5つを選定し（表1）、その軽減に努めた。

表 1 わが国における主要な海底熱水鉱床開発リスクについて

リスク項目	リスクの内容
1.資源量リスク	既知鉱床に対するボーリングの数、深度、密度、及びコア回収率が限られており、鉱床の産状、品位分布と真の埋蔵鉱量が明らかでない。また、開発可能な鉱床の数が少ない。さらに熱水活動を停止した鉱床（潜頭性鉱床）の探査などが不可欠であるが、海底下に埋没した鉱物資源に適用され得る探査手法が確立されていない。
2.環境影響評価リスク	海底熱水鉱床の開発事例はなく、どのような環境基礎調査が最適であるのか、またどのような環境パラメータを測定しなければならないのか明らかにする必要がある。これらを通じて採鉱活動の環境に対する影響を明らかにし、企業による参入を容易にする必要がある。
3.採鉱リスク	海底熱水鉱床は、これまで採鉱されたことがなく、多様な鉱床の形態、物性に対応する採掘・揚鉱技術が確立されていない。それらの機器が作られていないだけでなく、採鉱浮体・洋上処理も含めた生産システム全体の検討がなされていない。
4.選鉱・製錬リスク	海底熱水鉱床は、地層中で続成・変成作用等によって熟成されていないため、粒度が細かく鉱石の組織が複雑なため、特別な選鉱・精鉱処理を必要とすることや、回収率が大きく変わることがある。有害元素や放射性元素の存在によっては、経済性を持たないケースもあり得る。
5. 経済性リスク	上記のリスクの総体として、また将来にわたる陸上の鉱業の動向や金属価格の変動、エネルギー価格等のコスト増要因など、社会情勢の変化から来るリスク。

表 1 の 5 つのリスクのうち、(1) 資源量評価、(2) 環境影響評価、(3) 資源開発技術（採鉱技術）、及び(4) 選鉱・製錬技術の 4 つについてそれぞれ検討を行った。

こうしたリスクが平成 20 年度からの継続的な取組によって、どのように変化してきたかについて、以下に、事業概要・実施体制等を含め、実績・成果及び評価結果をとりまとめた。

3. 海底熱水鉱床について

海底熱水鉱床は、水深 700-3,000 m の太平洋中央海嶺の海底拡大軸や西太平洋の島弧-海溝系の背弧海盆等に 350 箇所程度発見されている海底熱水活動に伴って生成したものである。

これらは地下深部に浸透した海水がマグマ等の熱により熱せられ、地殻に含まれている有用元素を抽出しながら海底に噴出し、それが冷却される過程で、熱水中の銅、鉛、亜鉛、金、銀等の重金属が沈殿したものである（写真 1）。

これらの大半は規模が小さく経済的に資源と呼べるほどのものではないが、準経済的な資源量を持つものも知られていることから、本報告書ではこれを海底熱水鉱床と呼ぶ。

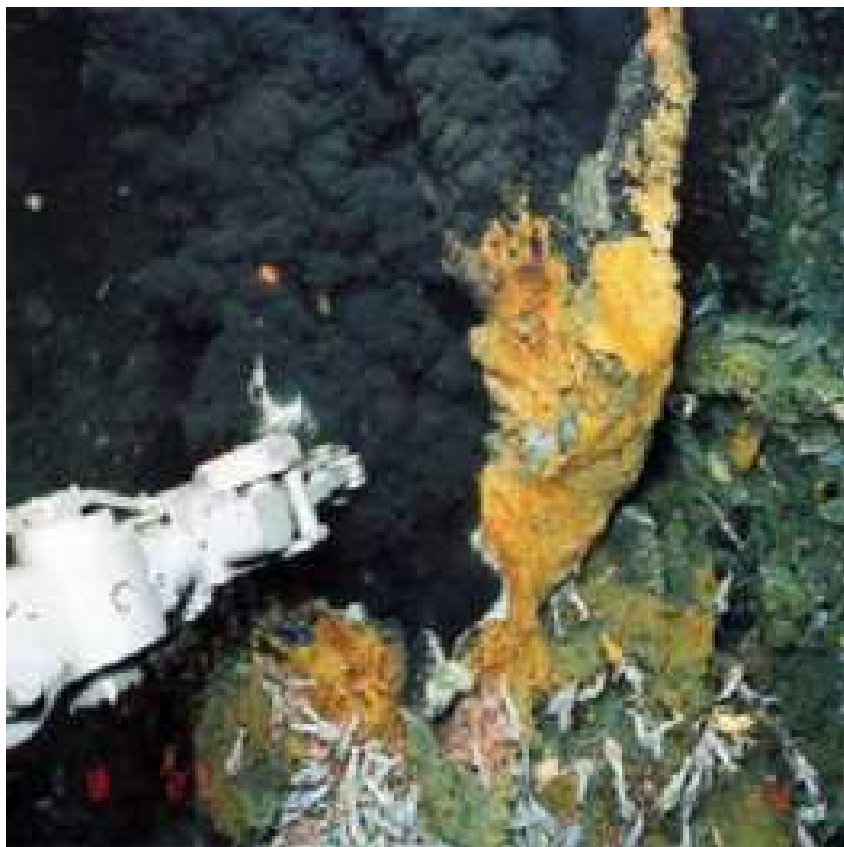


写真 1 海底熱水噴出口

我が国周辺海域では、島弧-海溝系に属する沖縄トラフ及び伊豆・小笠原海域（図 1）において、JOGMEC による海洋資源調査や独立行政法人産業技術総合研究所（以下「AIST」という）や独立行政法人海洋研究開発機構（以下「JAMSTEC」という）等の科学的調査によって、多くの海底熱水鉱床が発見されている。

また、分布水深が 700-1,600m と比較的浅く、中央海嶺に分布するものより金、銀の品位も高いことから、技術的・経済的にも開発に有利であると期待されている。

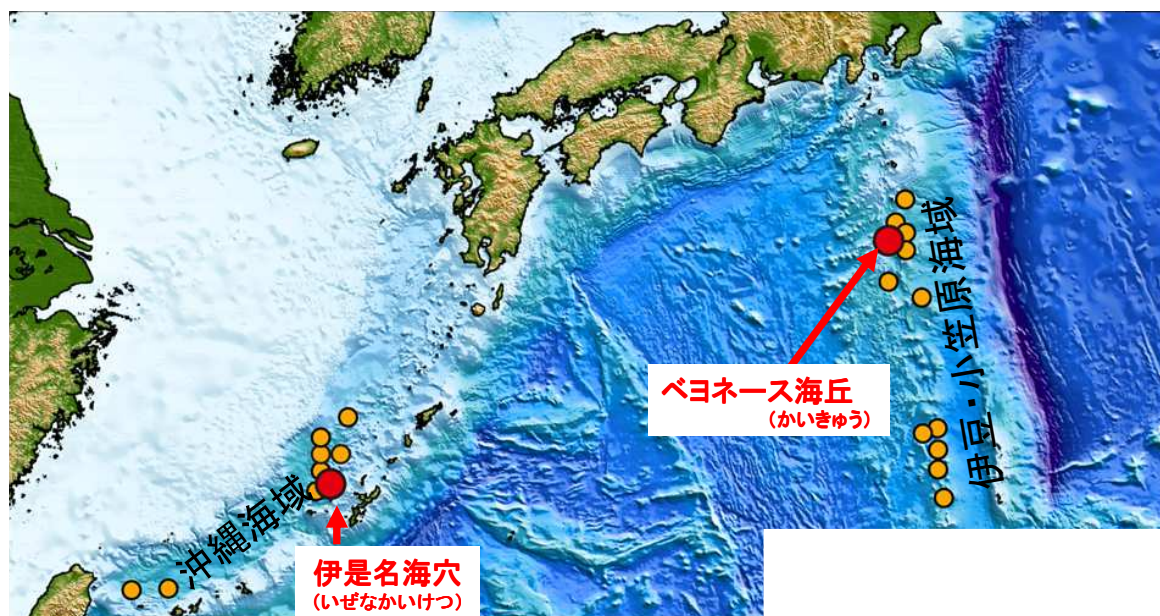


図 1 我が国周辺の主な海底熱水鉱床分布域
(オレンジ色は確認されている海底熱水鉱床の徴候)

一方で、貴重な熱水系生態圏を伴うものもあることから、開発に当たっては生物種の保全等について最大の配慮を払いつつ実施することが求められる。

海底熱水鉱床が分布する熱水噴出口周辺には、化学合成に依存する生物群集（熱水活動域生物群集）が生息しており、これらの寿命は熱水が噴出する期間に限定しているという特徴を持つ。これらの生物群集は特異な海洋生態系として貴重であるばかりでなく、遺伝子資源のソースとして医薬品、化学産業からも注目されている。

こうした我が国周辺海域に分布する海底熱水鉱床は、我が国固有の資源であり、開発が可能になれば、太宗を海外に依存している金属鉱物資源の新たな供給源として期待できる。

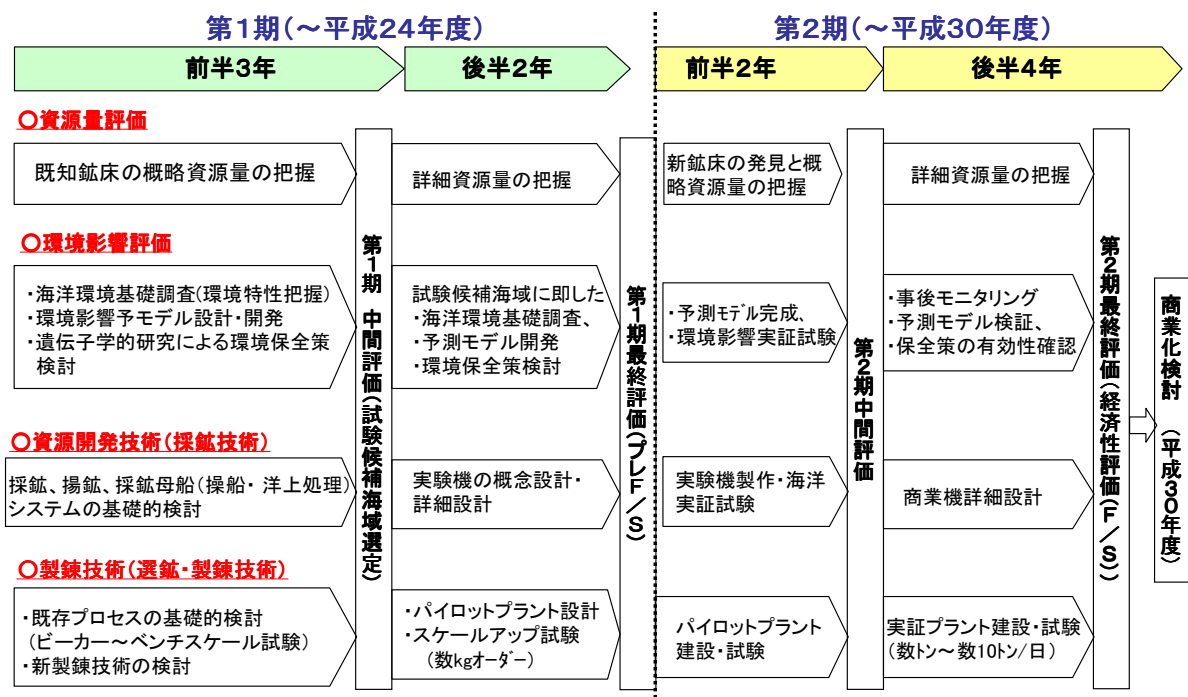
4. 海底熱水鉱床開発計画の内容

4. 1 開発計画について

平成 21 年 3 月に策定された「海洋エネルギー・鉱物資源開発計画」のうち「海底熱水鉱床にかかる開発計画」では、平成 24 年度までを第 1 期、平成 25 年度から平成 30 年度までを第 2 期として資源量評価、環境影響評価、資源開発技術及び製錬技術について、各期を前半・後半に区分し、中間及び最終評価を実施し、効率的かつ効果的に計画を推進することとしている。

具体的な開発計画の内容は、表 2 のとおりである。

表 2 海底熱水鉱床にかかる開発計画



(出典：平成 21 年 3 月経済産業省「海洋エネルギー・鉱物資源開発計画」)

4. 2 開発計画における第1期5カ年の目標・内容

「海底熱水鉱床にかかる開発計画」について、平成24年度までの第1期5カ年の目標と内容は、それぞれ以下のとおりである。

(1) 資源量評価

沖縄海域及び伊豆・小笠原海域において、海底熱水鉱床が確認されている区域を中心に、ボーリング調査、物理探査等により、鉱徴の垂直方向の連続性や品位等の資源情報を把握し、第1期前半では概略資源量、後半では詳細資源量を把握する。

さらに、この既知鉱物資源量の把握と同時に潜在鉱物資源量を明らかにすることは今後の開発を進めるために重要である。このため、音響調査、サンプリング等による広域調査を実施し、未探査海域での新たな海底熱水鉱床の発見に努める。

(2) 環境影響評価

第1期前半では、沖縄海域及び伊豆・小笠原海域で確認された海底熱水鉱床周辺の環境特性を把握するため、海洋環境基礎調査を実施し、当該海域全体の環境特性を把握する。また、海洋環境基礎調査の結果等を踏まえ、環境影響予測モデルの開発に着手するとともに、生物遺伝子構造の研究による環境保全策の検討を行い、海洋環境実証試験候補海域を選定する。

後半では、選定した実証海域において、詳細な海洋環境基礎調査を実施し、当該海域の詳細な環境特性の把握に努めるとともに、実証試験海域に即した環境影響予測モデルの開発と環境保全策の検討を行う。

(3) 資源開発技術（採鉱技術）

第1期前半では、広範囲に海底熱水鉱床の徴候が確認されている海域を対象に、採掘方式（移動方法、採掘方法等）・揚鉱方式・採鉱船（位置保持システム等）の基礎的検討を行う。後半では、基礎的検討を踏まえ、実験海域に即した、最適な海洋実験機器の設計を行う。

(4) 製錬技術（選鉱・製錬技術）

既存プロセス（浮遊選鉱-乾式製錬法）及び湿式製錬法の適用について、鉱物粒子が細粒であること、含有レアメタルの回収、ヒ素等の不純物除去などの課題の解決のため、前半ではラボスケール等での基礎的検討を行い、

後半ではベンチスケールでの試験、パイロットプラントの設計等を行う。

4. 3 実施体制

海底熱水鉱床の開発に向けての取組みは、経済産業省からの委託を受け、JOGMECが中心となり、AIST、JAMSTEC、独立行政法人海上技術安全研究所（以下「NMRI」という）等の研究機関、大学、民間企業の協力の下、資源量評価、環境影響評価、資源開発技術及び製錬技術についての検討を併行して実施している。

また、開発計画を効率かつ効果的に推進するため、有識者からなる「海底熱水鉱床開発委員会（委員長：浦辺徹郎東京大学教授（当時）、事務局：JOGMEC）」を設置した（参考2）。海底熱水鉱床の開発には、環境保全も含めて多岐にわたる分野の検討が必要であることから、委員会の下、それぞれの分野にワーキンググループ（WG）を設置し、詳細な技術検討を行うとともに、必要に応じ合同会議を行い、情報共有を図った（参考3）。

第1期の海底熱水鉱床開発計画にかかる実施体制については図2に示す。取り組みにあたっては、JAMSTECや民間企業が保有する船舶や調査機器を積極的に活用するとともに、AIST、NMRI、大学、民間企業等との共同研究や委託を通じて、積極的な連携を図りつつ、生態系保全に深く配慮し、効率かつ効果的な開発計画の推進を図った。

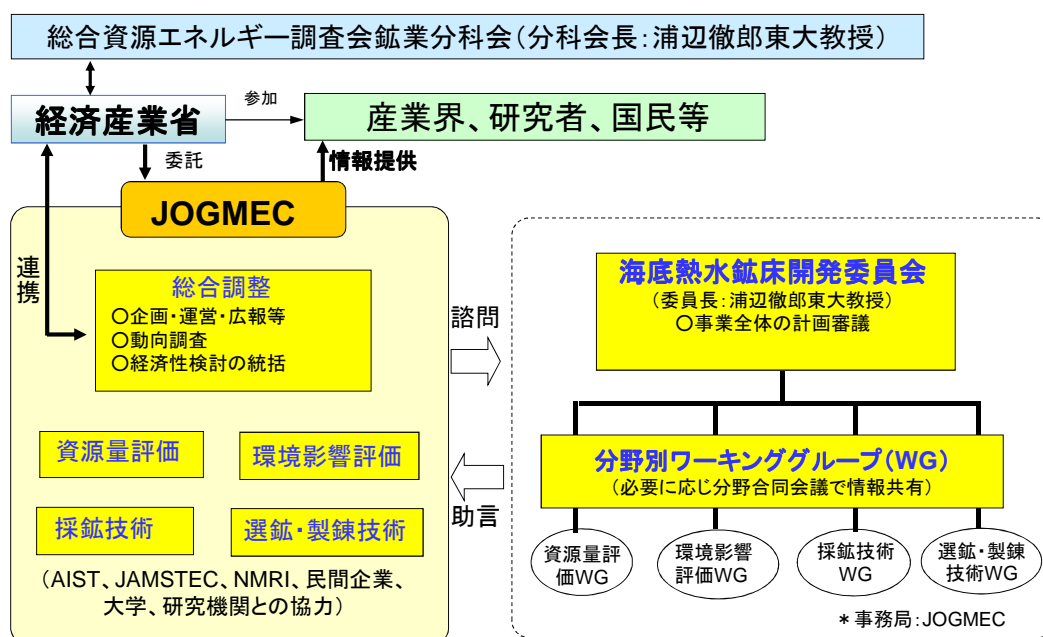


図2 海底熱水鉱床開発にかかる実施体制（平成25年3月現在）

5. 第1期評価期間における実績・成果

5. 1 各分野の実績・成果

(1) 資源量評価

1) 概要

沖縄海域及び伊豆・小笠原海域において、海底熱水鉱床が確認されている区域を中心に、鉱物資源探査専用船「第2白嶺丸」、平成24年2月以降は海洋資源調査船「白嶺」（いずれも JOGMEC 所有）、さらには民間チャーター船を活用し、地形調査、物理探査、ボーリング調査等を実施し、鉱床の垂直方向の連続性や品位等の資源情報を取得し、資源量の把握に努めた。調査は、自律型無人探査機（Autonomous Underwater Vehicle: 以下「AUV」という）や有索式無人潜水機（Remotely Operated Vehicle: 以下「ROV」という）を用いた精密海底地形調査や曳航式深海テレビカメラによる海底観察によって、熱水活動に由来する徴候の水平的な広がりを確認した後、海底設置型ボーリングマシン（海底下20m掘削可能）、「白嶺」就航後（写真2）は、より深部まで掘削可能な海底着座型及び船上設置型ボーリングマシン（海底下50m及び400m掘削可能）を活用し、コア試料採取等により、垂直方向の広がりを確認するとともに、国際基準に従ったモデル鉱床の詳細資源量の把握に努めた。

調査海域は、沖縄海域と伊豆・小笠原海域とし、沖縄海域においては沖縄本島北西約110km、水深1,600mに位置する伊是名（いぜな）海穴を調査対象とした（図1）。伊是名海穴は、南南東方向に伸びた、長軸6km、短軸3kmの窪地地形からなっており、窪地の中にJade siteやHakurei siteと呼ばれる海底熱水鉱床サイトが確認されている。

また、伊豆・小笠原海域においては、八丈島南方約100kmに位置するベヨネース海丘を調査対象とした。ベヨネース海丘は、中央火口丘を伴うカルデラ地形を呈し、カルデラ底で水深700mであり、カルデラ内壁の南東斜面に「白嶺鉱床」と呼ばれる海底熱水鉱床サイトが確認されている。

第1期に実施した主な調査の実績は、表3のとおりである。

さらに、既知鉱床の資源量評価と同時に潜在鉱物資源量を明らかにするため、上記区域に加え、その周辺海域において、マルチビーム測深機、曳航式深海テレビカメラ、AUV、ROVによる広域調査を実施し、新たな海

底熱水鉱床の発見に努めた。

表 3 各海域のボーリング調査実績

調査機器	項目	伊是名海 穴	ベヨネース 海丘	合計
		小計	小計	
BMS	掘削孔（孔）	121	26	147
	掘進長（m）	1,073	189	1,262
	コア長（m）	465	51	516
	コア回収率（%）	43.3	27.0	40.8
BML	掘削孔（孔）	3	4	7
	掘進長（m）	48	52	100
	コア長（m）	17	11	28
	コア回収率（%）	35.4	21.1	28.0
R140	掘削孔（孔）	9	-	9
	掘進長（m）	391	-	391
	コア長（m）	179	-	179
	コア回収率（%）	45.8	-	45.7
合計	掘削孔（孔）	133	30	163
	掘進長（m）	1,512	241	1,753
	コア長（m）	661	62	723
	コア回収率（%）	43.7	25.7	41.2

- * : BMS : 「第 2 白嶺丸」搭載の海底設置型ボーリングシステム。20m 掘削仕様。
- * : BML : 「白嶺」搭載の海底設置型ボーリングシステム。50m 掘削仕様。
- * : R140: 「白嶺」搭載の船上設置型ボーリングシステム。400m 掘削仕様。
- * : コア回収率は、掘進長を、採取した岩石・鉱石の長さ（コア長）で割り、百分率で示した。

<コラム>

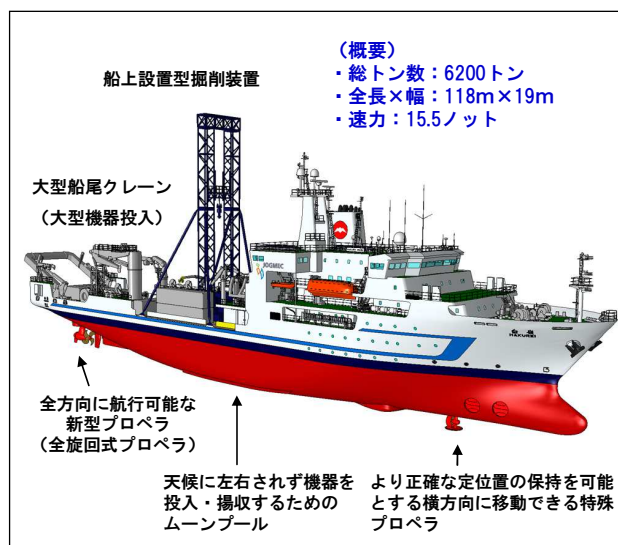
世界最先端の海洋資源調査船の建造

海洋鉱物資源調査の一端を担ってきた、鉱物資源探査専用船「第2白嶺丸」は建造以来、30年以上が経過し老朽化が目立ってきた。このため、2種類の掘削装置（海底下50m及び400m掘削を可能）や有索式無人潜水機（ROV）等の世界最先端の装備を誇る海洋資源調査船「白嶺（はくれい）」の建造に着手し、平成24年2月に就航した。

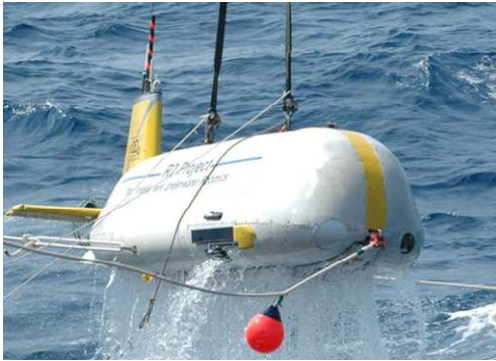


海洋資源調査船「白嶺」

「白嶺」は、日本周辺の黒潮等の潮流下でも安全に、掘削作業を進めるため、船体中央部にムーンプールと呼ばれる開口部を設け、ボーリングロッドの上げ下げや大型調査機器の投入・揚収を可能にしている。また、採掘要素技術試験機などの大型試験も可能なケーブルや大型クレーンなどを装備している。さらに、これらの調査を行うため、全回転式プロペラを複数装備し、強力な定点保持機能を有しており、飛躍的な調査能力の向上を図った。



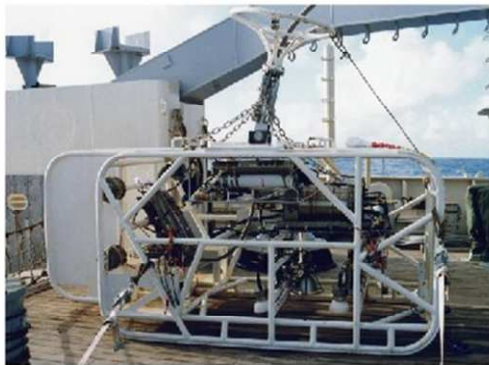
「白嶺」の主要装備のイメージ



自律型無人探査機(AUV)



有索式無人潜水機(ROV)



曳航式深海テレビカメラ(FDC)



船上設置型ボーリングシステム



海底着座型ボーリングシステム

写真2 資源量評価に活用した主な調査機器

2) 既知鉱床の資源量評価

資源量評価は、沖縄海域伊是名海穴内 Hakurei site を対象に実施した。

国際基準に従い計算した結果、Hakurei site において、予測鉱物資源量(Inferred Mineral Resources)に相当するカテゴリーで最大 340 万トンと推定した。

今回の算定にあたっては、これまでに「第 2 白嶺丸」で採取した 121 孔のボーリングコア試料の分析値を使って計算したものである。鉱量計算では地質モデルの作成、岩相区分、分析値の検証、ブロックモデルの設定、品位・比重推定等から鉱量の集計を行った。

これまでの調査により、多くの地形的な高まり（マウンド）内部は全て硫化物で構成されていると推定されるものの、硫化物の品位分布に系統的な変化は見られず、熱水活動の強弱、熱水通路の変化等により複雑な構造を持つと推定される。ボーリングコアの回収率が 100%ではないことやボーリング間隔から、資源量分類は予測鉱物資源量に相当する。

パプアニューギニア領海のビスマルク海で Nautilus Minerals Inc.が海底調査を行っている Solowara 1 プロジェクトでは、予測鉱物資源量と概測鉱物資源量が公表されている（表 4）。今回算定した 340 万トンという数字は、Solowara 1 の予測鉱物資源量と概測鉱物資源量を合計した値に近い。また、熱水鉱床と成因が類似するとされている、かつて秋田県で操業していた中規模黒鉱鉱床である「深沢鉱床」と同規模となる。

表 4 代表的な鉱床の鉱物資源量と品位の一覧表

鉱床	鉱物資源量 (kt)	金 (g/t)	銀 (g/t)	銅 (%)	鉛 (%)	亜鉛 (%)
伊是名海穴 (予測鉱物資源量)	3,378	2.6	216	0.33	2.52	7.25
Solowara1 (予測鉱物資源量)	1,540	6.4	34	8.1		0.9
(概測鉱物資源量)	1,030	5	23	7.2		0.4
深沢鉱床	3,000	0.6	93	1.13	3.3	15.4
松峯鉱床	20,000	0.62	63.5	2.02	0.29	0.98

(注) 伊是名海穴の品位は、資源量の集計に基づく鉱体全体の平均品位

(注) Solowara 1 は、Nautilus Minerals 社ホームページ、深沢鉱床、松峯鉱床は、佐藤 1983 から引用

一方で、ベヨネース海丘の資源量については、国際基準による算定を試みたものの、ボーリング本数が少なく十分に鉱体の形を描くことができていない為、予測鉱物資源量を算定できるレベルに達していない。

3) 資源量把握のための調査の成果

(A) 沖縄海域

①探査データの取得・解析

海底熱水活動が広範囲に認められる伊是名海穴内 Hakurei site を中心に、マルチビーム測探機を用いて垂直分解能 1m 及び 20cm (AUV 及び ROV 搭載) の精密な海底地形図を作成した。海底地形から Hakurei site には、北部と南部に直径 100m 前後の円錐型の 2 つの大きなマウンドと従来確認できなかった大小様々な複数のマウンドが存在することが明らかとなった (図 3)。また、曳航式深海テレビカメラや ROV によって当該海底を観察した結果、マウンドの表面は、海底熱水鉱床の礫やチムニーからなり (写真 3)、マウンド裾野にはシルト質から泥質の軟弱な堆積物が分布していることを確認した。



図 3 精密海底地形図



写真 3 曳航式海底テレビカメラで観察されたマウンド表面

②ボーリング調査

Hakurei site の 2 つのマウンド（北部及び南部モデルマウンド）で精密な海底観察、パワーグラブ及びボーリング調査（133 本、総掘進長 1,512m）で試料を採取、品位データから資源量の把握に努めた。

パワーグラブとボーリング調査で採取した試料写真を写真 4 に示す。また、133 本のうちの 124 本のボーリング調査で取得した硫化物の平均品位を表 5 に示す。



伊豆・小笠原海域ベヨ
ネース海丘の試料



沖縄海域伊是名海穴の試料

（パワーグラブで採取された試料写真）



（ボーリング試料写真）

写真 4 資源量調査で採取された試料

表 5 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モデル鉱床の 392 個の試料平均)

含有金属	品位	含有金属	品位
銅	0.51 %	銀	250 g/t
鉛	3.49 %	鉄	30.68 %
亜鉛	9.69 %	ヒ素	5,649 ppm
金	3.2 g/t	水銀	26 ppm

北部及び南部モデルマウンドにおけるパワーグラブ及びボーリング調査の結果、i) マウンド頂部の内部は全て金属硫化物が採取されたこと(最大深さ 25m)、ii) マウンド表面は金属硫化物の礫で構成されることから、マウンド内は、全て金属硫化物で構成されるものと推定される。

③「白嶺」船上設置型ボーリングマシンによる新たな硫化鉱物帯の発見

Hakurei site 北部マウンド裾野において、海底面下 30m 付近の堆積岩類の下部に新たな硫化鉱物帯の存在を確認した。これらの硫化鉱物帯はさらに深部に連続する可能性がある。

北部モデルマウンド頂上を基点とした東西断面図を図 4 に示す。

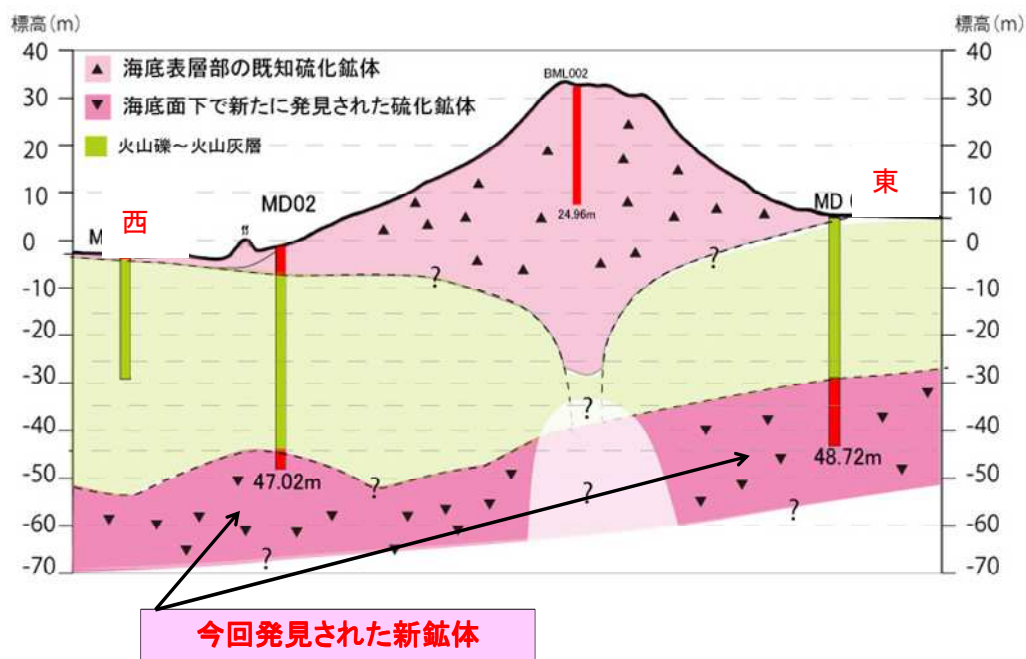


図 4 北部モデルマウンドを中心とする地質概略断面図 (東西方向)

マウンド頂上を基点とした南北断面図を図5に示す。南部モデルマウンドの頂部の海面下14m深部まで硫化物が存在することを確認した。また南部モデルマウンドの北側には、広範に堆積物が分布し、その下部にも硫化鉱物帯が存在していることを確認した。

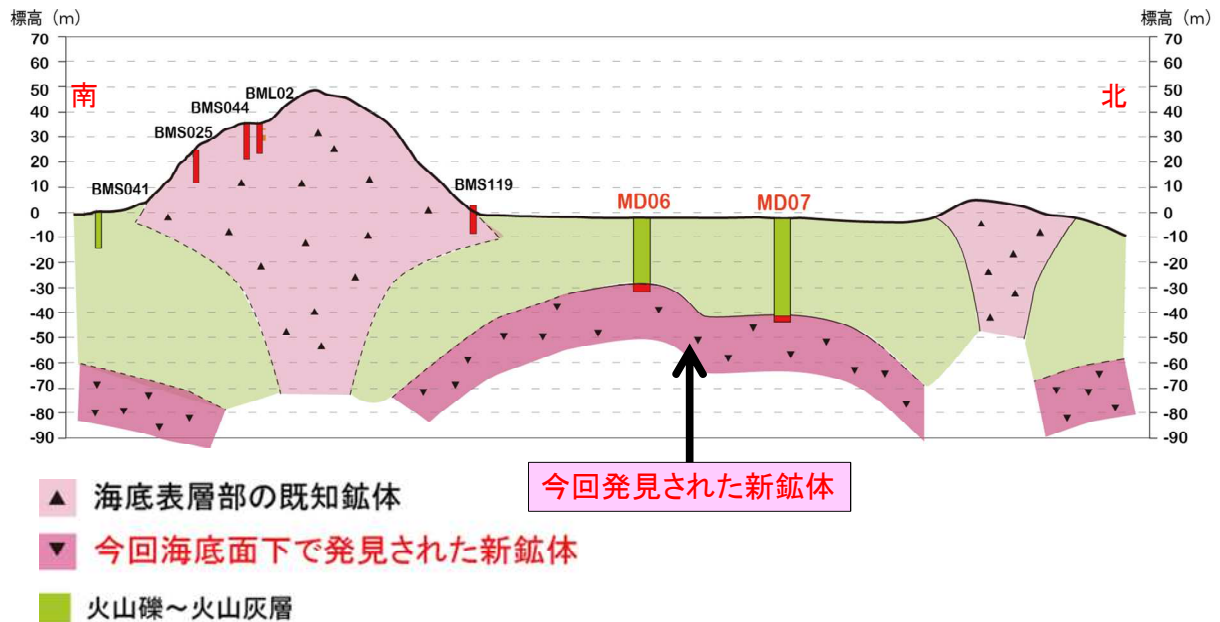


図5 南部モデルマウンドを中心とする地質概略断面図

(B) 伊豆・小笠原海域

①探査データの取得・解析

過去の調査によって海底熱水活動が広範囲に認められたベヨネース海丘内のモデル鉱床（白嶺鉱床）において、沖縄海域と同様に、垂直分解能 1m 及び 20cm の精密な海底地形図を作成した（図 6）。その後、曳航式深海テレビカメラによって当該域の海底を観察した結果、海底熱水活動に起因するチムニー帯や熱水による変色異常域の存在を確認した。

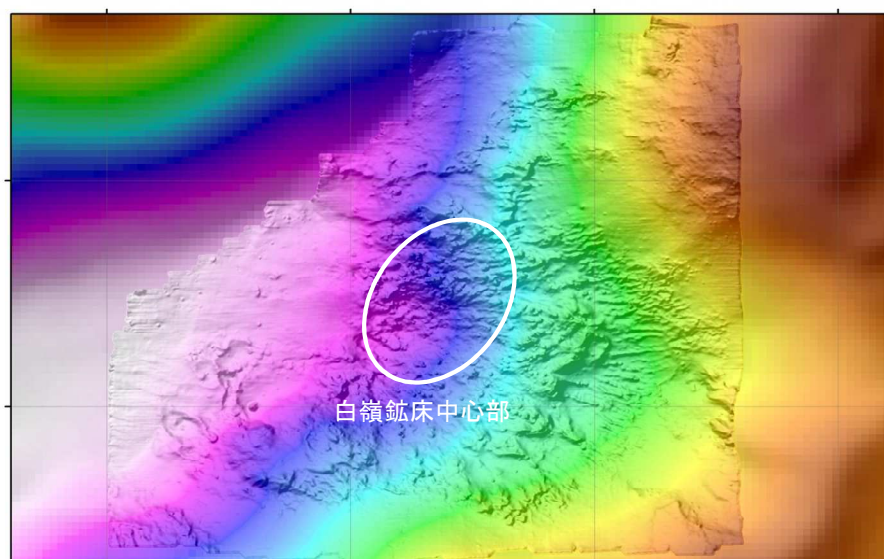


図 6 白嶺鉱床精密地形図

②ボーリング調査

上記異常域を中心に、ボーリング調査（30 本、総掘進長 241m）を実施し、海底熱水鉱床の水平・垂直方向の広がりを把握した。

30 本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を表 6 に示す。

表 6 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)

含有金属	品位	含有金属	品位
銅	1.43 %	銀	290 g/t
鉛	1.67 %	鉄	5.61 %
亜鉛	30.6 %	ヒ素	2,340 ppm
金	11.5 g/t	水銀	19 ppm

ボーリング調査からは、海底熱水鉱床（金属硫化物）の水平的な広がり
 は 100m×150m 程度と推定される（図 7）。

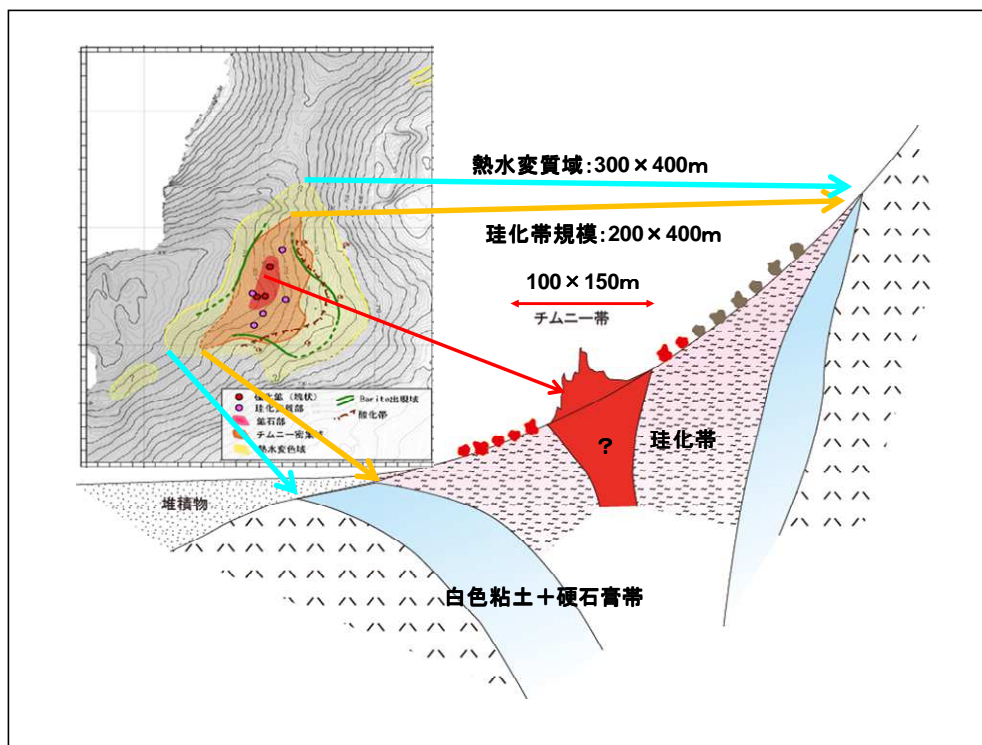


図 7 ベヨネース海丘鉱床断面イメージ図

4) 広域調査

(A) 沖縄海域

新たな海底熱水鉱床を発見するため、沖縄海域においては、海底熱水鉱床の徴候が確認されている 13 海域で海底地形調査、曳航式深海テレビカメラ、ROV 及び AUV による精密海底地形調査及び海底観察を実施した。その結果、3 箇所で、新たに海底熱水鉱床の存在を示唆する熱水変質帯、海水の濁度異常地帯、チムニー状地形を確認した（図 8）。

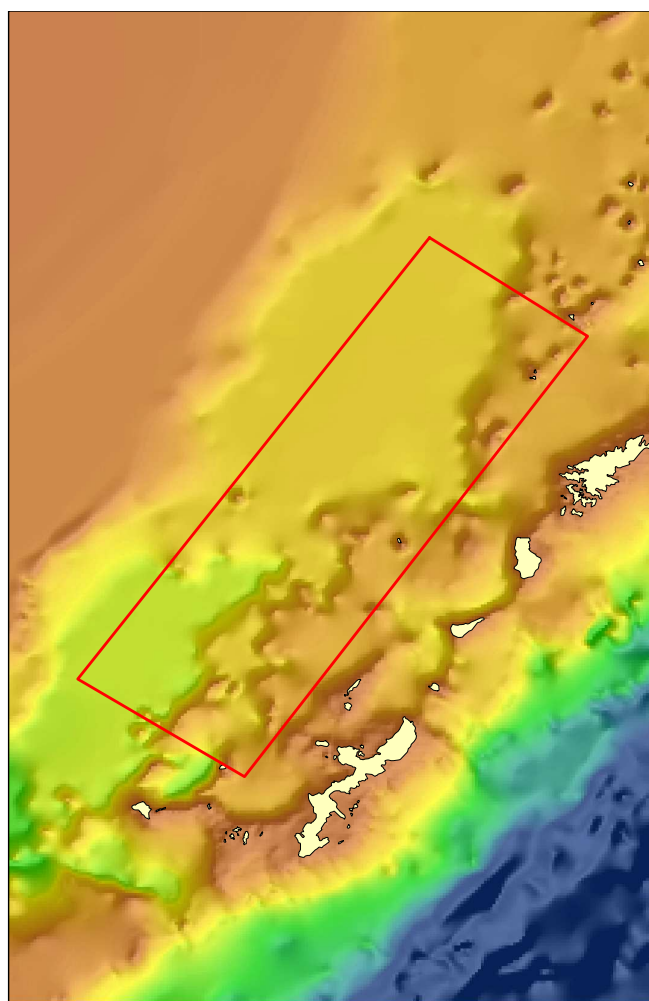


図 8 沖縄海域での広域調査位置図

(B) 伊豆・小笠原海域

伊豆・小笠原海域においては、海底熱水鉱床の徴候が確認されている15 海域で沖縄海域と同様の広域調査を実施した。その結果、4 箇所で、熱水鉱床の存在を示唆するチムニー状地形、熱水変質帯、海水の濁度異常を確認した（図9）。

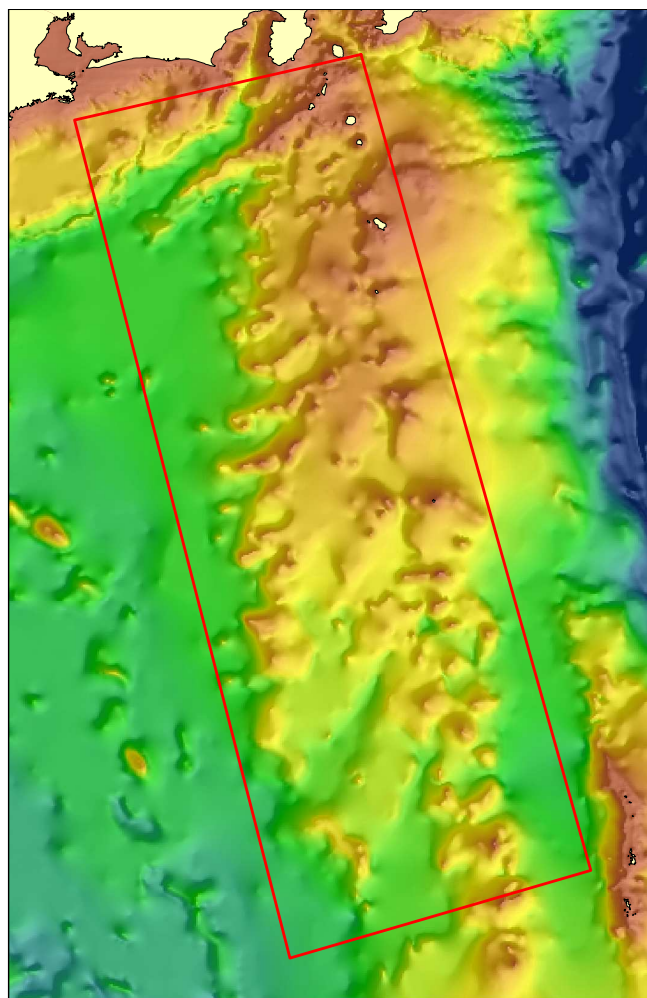


図9 伊豆・小笠原海域での広域調査位置図

(2) 環境影響評価

1) 概要

海底においても、資源開発に先駆けて環境影響評価を行うことが不可欠である。例えば、ISAの「深海底における多金属硫化物の概要調査及び探査に関する規則」(マイニングコード)では、規則33に「海洋環境の保護及び保全」を定めている。同条では、海洋環境や海洋生態系を保護するため、「リオ宣言の第15原則に定められた予防的アプローチ及び最善の環境慣行を適用する」ことを述べている。また同規則34では、「環境ベースライン」の決定と監視を求めている。

環境基礎調査は、海洋生物学の専門家及び環境影響評価モデリング専門家で実施した。沖縄海域伊是名海穴及び伊豆・小笠原海域ベヨネース海丘の周辺域に調査地点を設定し、20航海の環境基礎調査を実施した。

表7 環境影響予測・評価の調査内容環境基礎調査の調査項目

評価項目		調査内容
水質	濁り	濁度・懸濁態有機物・浮遊物質の状況 流向・流速の状況 掘削及び走行による濁度の状況
	有害金属	水質の有害金属の状況 流向・流速の状況
底質	有機物	底質の有機物の状況 流向・流速の状況
	有害金属	底質の有害金属の状況 流向・流速の状況
水中騒音		水温・塩分の状況 底生魚類の状況
地形・地質		地形の状況 地質の状況
動物	動物プランクトン	動物プランクトンの状況
	底生魚類	遊泳動物の状況
	底生生物	底生生物の状況
熱水生態系		熱水生態系の状況

また、海底熱水鉱床の採掘において懸念される環境への影響について、事前に予測するためのモデルを開発した。

さらに、生物の遺伝子学的研究により、環境保全策の検討のためのデ

一タを蓄積した。

5年間の環境基礎調査の実績を表8に示す。

表8 環境基礎調査の実績表

調査年度	実調査日数	調査項目	使用船舶
平成20年度	43日	海底地形、流動、沈降粒子、底生生物	JAMSTEC「よこすか」 JAMSTEC「かいいい」
平成21年度	64日	水質、底質、プランクトン、底生生物、沈降粒子、流動	「第2白嶺丸」 JAMSTEC「よこすか」 JAMSTEC「かいいい」
平成22年度	64日	流動、沈降粒子、プランクトン、底生生物、水質、底質	「第2白嶺丸」 JAMSTEC「かいいい」 JAMSTEC「かいよう」
平成23年度	74日	流動、沈降粒子、プランクトン、底生生物、水質、底質	「第2白嶺丸」 JAMSTEC「かいいい」 JAMSTEC「かいよう」
平成24年度	99日	ADCP（*）、セジメントトラップ係留系、水質、音響、底質、底生生物、濁度	深田カバネ「新世丸」 JOGMEC「白嶺」 JAMSTEC「かいいい」 JOGMEC「白嶺」 JAMSTEC「かいよう」
計	344日		

（*）ADCP: 超音波ドップラー流速計

2) 環境基礎調査

沖縄海域伊是名海穴、伊豆・小笠原海域ベヨネース海丘の周辺域に調査地点を設定し、それぞれ環境基礎調査を実施した。

調査では、ROVを用いて、熱水域及び非熱水域の生物試料の比較・採取、深海テレビカメラ観察による熱水域から非熱水域に至る生物群集の出現状況を把握した（写真5）。また、マルチプルコアラー及びボックスコアラーにより底質・底生生物の分布及び種構成の特性を把握した。さらに、電気伝導度・水温・水深センサー（Conductivity Temperature Depth sensor：以下「CTDセンサー」という）及び採水器により水温・

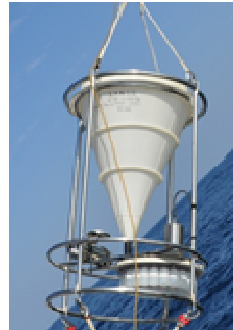
塩分・水質の鉛直分布特性を把握した（写真5）。

洋上及び海底調査と併行して、調査対象海域の年間を通じた海流、流速などの情報を収集することを目的に、伊是名海穴及びベヨネース海丘で2種類の係留系（超音波ドップラー流速計：Acoustic Doppler Current Profiler：以下「ADCP」という）及び沈降粒子捕捉装置（セジメントトラップ）を設置し、それぞれ海底近傍から上層域までの鉛直的な流向・流速及び沈降粒子量や粒子起源等の海中調査を実施した。

これらの調査は海洋環境や海洋生態系への影響を調べる上で現在考え得る最善の方法であり、ISAの規則33、34の要求をすべて満たすものとする。



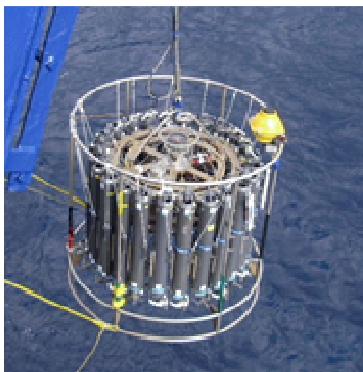
マルチプルコアラー



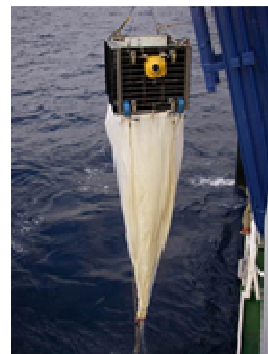
沈降粒子捕捉装置
(セジメントトラップ)



超音波ドップラー流速計(ACDP)



CTDセンサー及び採水器



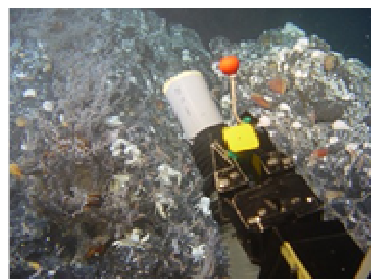
鉛直多段プランクトン
ネット



ソリネット



ROV「かいこう 7000 II」
(JAMSTEC 所有)



ROVに搭載された吸引装置
による生物採取

写真5 環境基礎調査で使用した主な調査機器

沖縄海域及び伊豆・小笠原海域の環境基礎調査結果（環境特性）の概要を表 9(a), 表 9(b)に示す。

表 9(a) 環境基礎調査結果の概要（沖縄：伊是名海穴）

a)底生生物	ゴエモンコシオリエビやオハラエビ類などの熱水性生物を含む全大型生物を確認するための調査を実施し、それらの生息状況を確認した。
b)プランクトン	バクテリアと動物プランクトンが中層域（水深 200-1000m）よりも底層域（水深 1000m-海底付近）で多く、底層域のプランクトンの生産が高いことが示唆された。
c)熱水	JADE site では 200-300°C以上の Pb、Cu、Ba、Al、Li を多く含む熱水、HAKUREI site では Pb、Cu、Ba、Al を多く含む熱水が確認された。
d)水温・塩分・水質	海底付近での温度異常や、海底から底上約 200m までの間に顕著な高濁度層が存在するなどの特徴が見られた。これが底質に高い金属濃度をもたらしている。
e)底質	海穴内では熱水域、非熱水域ともに水銀やヒ素などの有害物質の濃度が高い傾向が見られた。これらは海穴内にすべて拡散している。
f)流況	最下層の流れは主に北西向きで、中層域から底層域まで通常 5-10cm/秒の緩やかな流れが観測された。
g)沈降粒子	沈降粒子は、光合成起源、熱水起源、大陸起源の粒子を含み、全粒子束が時期を問わず多い傾向が見られた。

表 9(b) 環境基礎調査結果の概要（伊豆・小笠原：ベヨネース海丘）

a)底生生物	セイタカハイカブリニナ属腹足類などの熱水性生物を含む大型生物の生息状況を確認した。
b)プランクトン	表層域（0-200m）で蛍光色素の 2 層のピークを確認した。
c)熱水	白嶺鉱床周辺域では、100-150°Cで Cu、Ba、Al を多く含む熱水の噴出が確認された。
d)水温・塩分・水質	水温・塩分、海水成分ともに外洋域に一般的な鉛直変化が観測された。
e)底質	熱水域では水銀やヒ素の濃度が高い傾向にあるが、非熱水域では特に高い傾向は認められなかった。
f)流況	最下層の流れは主に南東向きで、通常 5-10cm/秒の緩やかな流れが観測された。表・中層域では時期的に黒潮の影響を受け、60cm/秒以上の流れが観測された。
g)沈降粒子	沈降粒子は光合成起源が大半で、全粒子束に季節変動が認められた。

3) 環境影響予測モデル開発

沖縄海域伊是名海穴内には熱水プルームにより重金属やヒ素が広汎に広がっており、そこでの生態系は、そのような特殊な環境下で形成されたものと考えられる。しかし、採掘による懸濁粒子の拡散・再堆積の影響についてはあらかじめ見積もる必要があると同時に、海穴内外への影響、海水コラム中への影響については注意して監視する必要がある。

海底熱水鉱床の採掘において懸念される環境影響として考えられるものは、①採掘による懸濁粒子の拡散・再堆積の影響、②揚鉱排水の拡散の影響、③熱水域及び非熱水域を含む生態系への影響である（図 10）。

この環境影響の概念に基づき、環境基礎調査のデータを利用しながら、以下のモデルの開発を行った。また各種モデルは採掘条件等の入力により懸濁粒子のシミュレーションが可能となった。

- ① 懸濁粒子の拡散・再堆積モデル
- ② 揚鉱排水の拡散モデル
- ③ 底層域・表中層域生態系影響・回復予測モデル

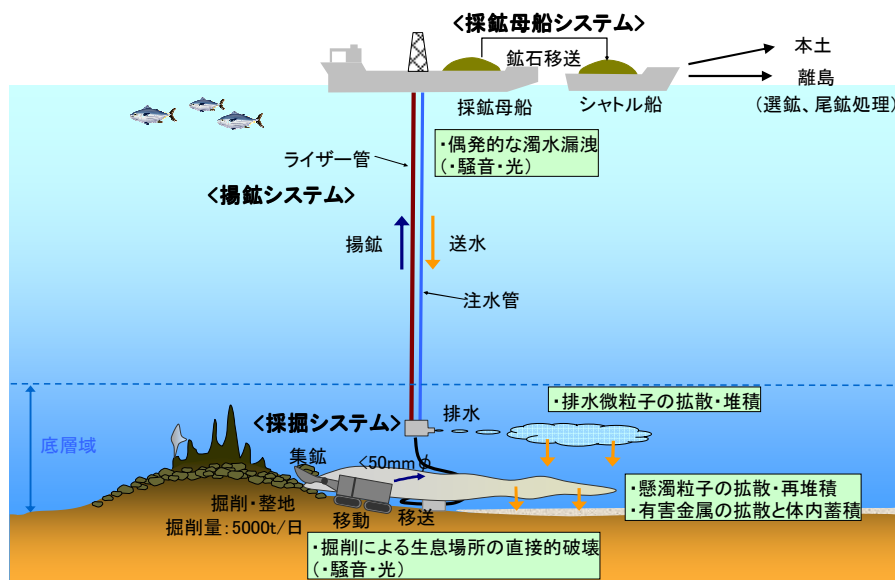


図 10 海底熱水鉱床の採掘において懸念される環境影響の概念

①懸濁粒子の拡散・再堆積モデル

後述する資源開発技術（採鉱技術）分野で検討された日粗鉱生産量 5,000 トン/日を前提として、懸濁粒子の放出条件を表 10 のように設定し、計算開始から 10 日後の懸濁物質の濃度分布を図 11 に示す。

沖縄海域伊是名海穴及び伊豆・小笠原海域ベヨネース海丘ではいずれも放出点から速やかに懸濁粒子が希釈され、伊是名海穴では水平方向に250m、ベヨネース海丘でも220m程度の比較的狭い範囲に懸濁粒子が広がっている。再堆積の厚さが0.1mm以上生じる領域は、伊是名海穴で放出点から流下方向に300m程度、ベヨネース海丘では400m程度である。最大の堆積厚さは、伊是名海穴では30cm、ベヨネース海丘では27cmであった。

表 10 採掘に伴う懸濁粒子の放出条件

項目	採鉱基礎条件
日粗鉱生産量[wt/日]	5,000
吸引率[%]	90
放出量[t/日]	500
計算時間[時間]	24
放出水深[m]	1,586m (海底上 10m)
比重	2.5
空隙率	0.7

	細砂分以上	シルト分	粘土分
組成比[%]	3	59	38
粒径[μm]	250	75	5
沈降速度[cm/s]	3	0.3	0.002

伊是名海穴

ベヨネース海丘

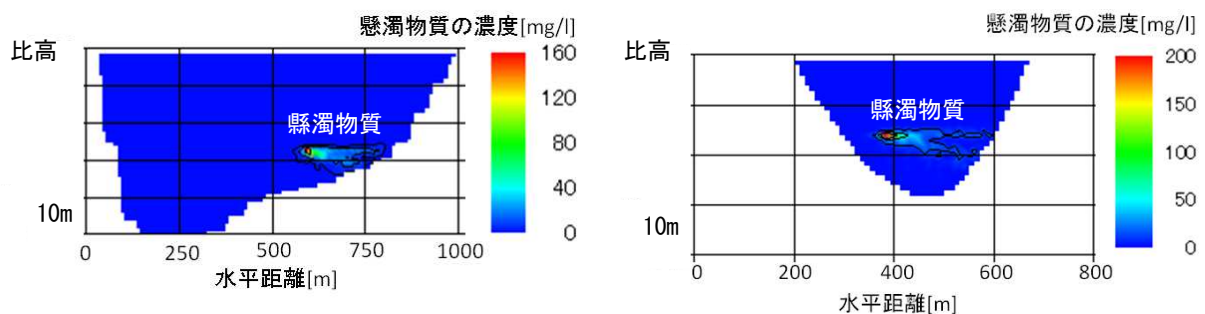


図 11 懸濁粒子の拡散・再堆積シミュレーションの結果
(懸濁物質の濃度分布)

②揚鉱排水の拡散モデル

採鉱技術分野の検討条件より計算条件を設定し、表 11 の条件で揚鉱排水に含まれる浮遊物質の濃度分布を計算した。

排出から 2 時間後の放出水深表層(水深 5m)、水深 500m、水深 1,550m における計算結果を図 12 に示す。表層、水深 500m では浮遊物質濃度の高い範囲は拡散されながら、再現された流れ場の方向であるほぼ北東向きに移流している。排出点付近では、1.5mg/L 以上の濃度となっているが、排出点から 30m より下流側では、0.5mg/L 以下である。水深 1,550m では、表層や水深 500m とは異なり、周囲の流れが小さく拡散による効果が大きいため、浮遊物質濃度の高い範囲は広く拡散されながら、再現された流れ場の方向であるほぼ北西向きに移流している。濃度の高い懸濁粒子は、拡散されながら、流れ場の下流方向に移流し、低濃度となると予測された。

表 11 揚鉱排水の放出条件

項目	値		
排水流量[m ³ /分]	13.8		
排水中の浮遊物質の濃度[mg/L]	20		
計算時間[時間]	12		
	底層	中層	表層
放出水深[m]	1,550	500	5
揚鉱排水の水温[°C]	3.9	11.3	22.9
揚鉱排水の塩分[psu]	35.6	35.6	35.2

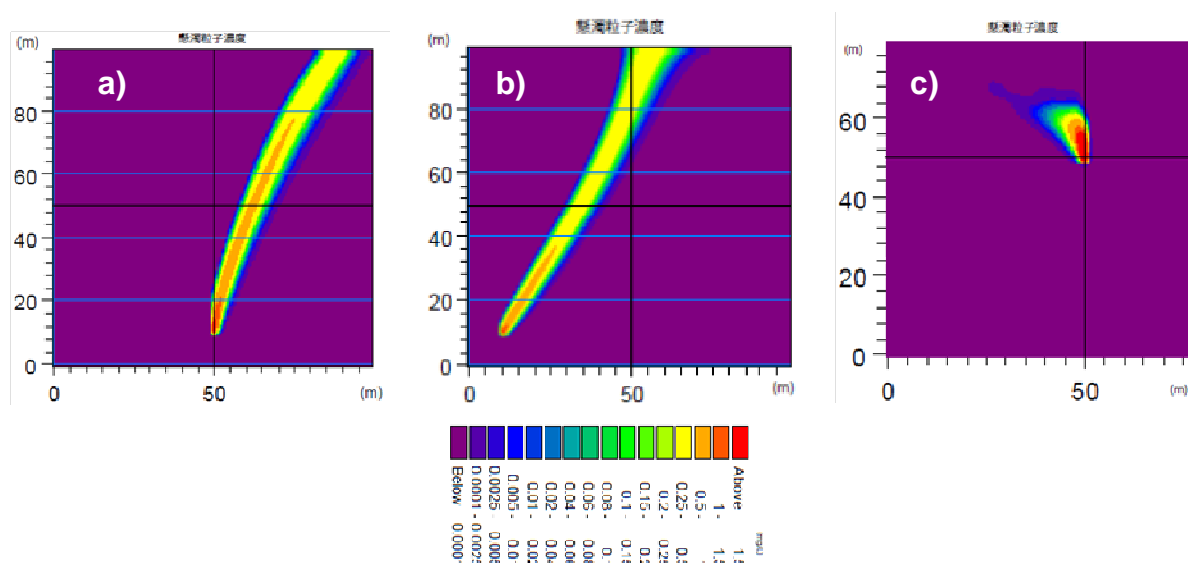


図 12 a)表層 (5m)、b)水深 500m、c)水深 1,550m から排出した場合の計算開始から 2 時間後の懸濁粒子濃度の水平分布 (単位 : mg/L)

③底層域・表中層域生態系影響・回復予測モデル

採掘機の掘削・走行に伴う底生生物への影響を予測するため、底層域生態系モデル（図 13）で底生生物の現存量分布を再現し、①で得られた結果を入力条件としてシミュレーションを実施し、採掘機の掘削・走行に伴う底生生物現存量の増減、試験後の底生生物の現存量の回復期間を予測した。底生生物群集の影響・回復の計算条件は表 12 に示したとおりである。

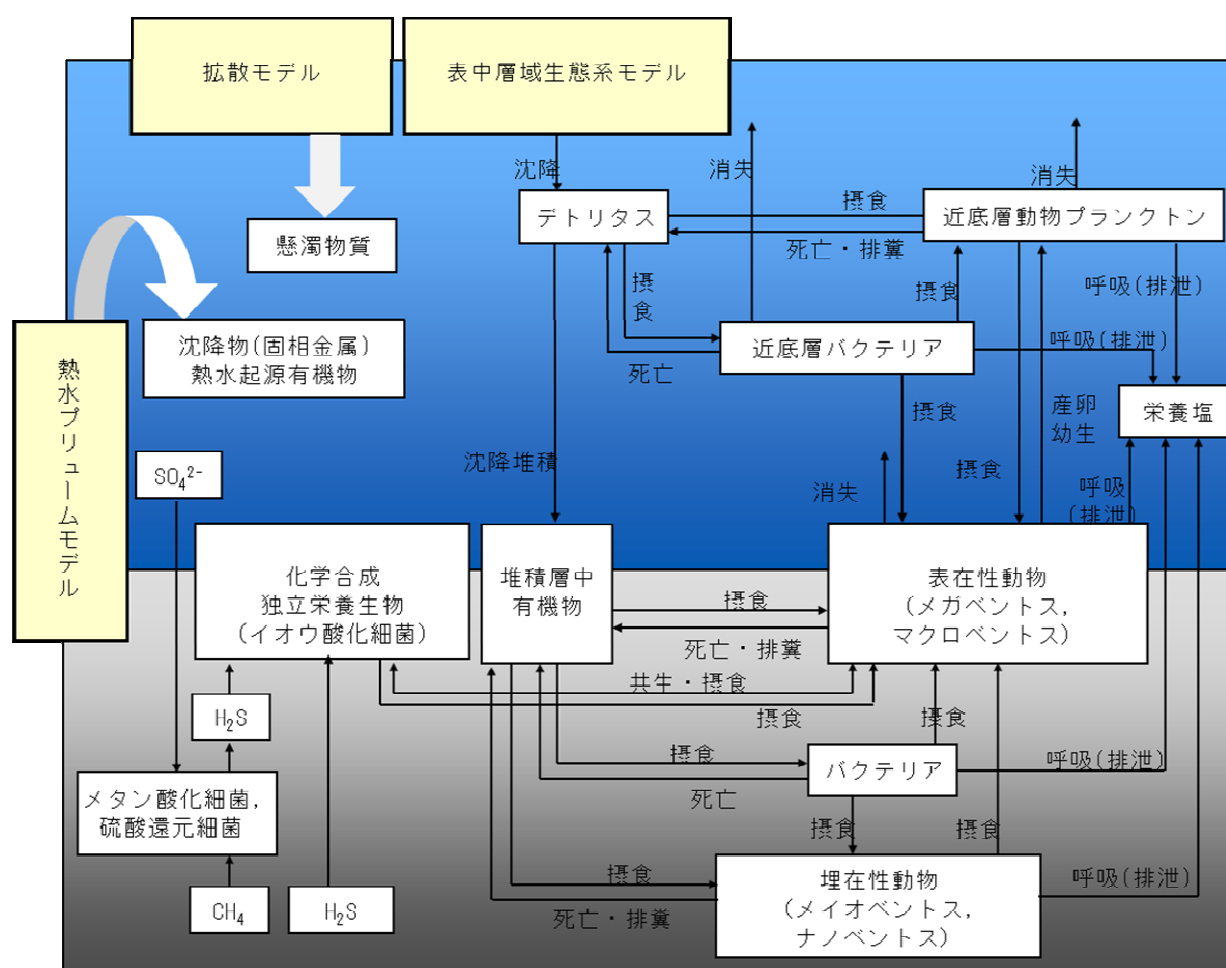


図 13 底層域生態系モデルの概念図

表 12 底生生物群集の影響・回復の計算条件

パラメータ		備考
項目	細目	
堆積速度に対する生物応答の定数	堆積物中のバクテリア	Mn 団塊調査結果の引用
	埋在性動物（メイオベントス）	
	近底層バクテリア	
	堆積物中の有機炭素現存量	
	上記以外	仮定値
硫黄酸化細菌	成長阻害係数（硫化水素）	仮定値
	成長阻害係数（酸素）	
	成長阻害係数（硝酸）	
	生物炭素量	
	セルクオータの摂取速度等	仮定値または文献値
化学合成生態系（熱水域）	Fe、Mn、栄養塩、有機物等（平面分布）	熱水環境基礎調査の結果
	CH ₄ 、H ₂ S、水温、塩分、DO（一定値）	
	底生生物	文献値

沖縄海域伊是名海穴を対象とし底生生物への影響・回復の予測及び評価手法について検討した結果、伊是名海穴においても化学合成生態系の基礎生産者である硫黄酸化細菌及び熱水域・非熱水域の表在性動物の現存量が表現可能であることが確認できた。また、伊是名海穴においても海底攪乱及び再堆積による現存量の増減が表現可能であり、この時の底生生物の現存量及び回復予測時間を定量的に評価可能なモデルであることが確認できた。

4) 採掘要素技術試験のための予察的環境影響予測・評価

平成 24 年度に実施した採掘要素技術試験に先立ち、沖縄海域伊是名海穴を対象に、予察的な環境影響予測・評価を行った。

検討に当たっては、現時点では我が国の環境影響評価法に規制されていないが、まず同法を参考にするとともに、水産用水基準の対象項目、ISA の「Recommendation for the guidance of the contractors for the assessment of the possible environmental impacts arising from exploration for polymetallic nodules in the Area（公海域における多金属団塊の探査に起因する環境影響評価に係る事業者への指導に関する提言）」に記載されるベースライン要求項目を踏まえ、環境影響評価方法書（環境影響評価項目：表 13）を決定した。次にこれまでに開発した懸濁粒子の拡散・再堆積モデルを用いて、採掘要素技術試験の仕様、試験内容、試験時間、発生見込みの懸濁粒子等のデータをモデルに組み込み、採掘要素技術試験による周辺への影響予測シミュレーションを実施した。

表 13 環境影響評価項目及び選定理由

環境要素の区分			影響要因の区分				環境影響評価項目として選定する理由	
			走行 状況の 確認試験	掘削 状況の 確認試験	集鉱 状況の 確認試験	耐久 試験		
水環境	水質	濁り	○	○	○	○	試験機の走行、掘削、集鉱により、濁りが発生する可能性があることから選定する。	
		有害金属	○	○	○	○	試験機の走行、掘削、集鉱により、鉱石あるいは堆積物中に含まれる有害金属が拡散する可能性があることから選択する。	
	底質	有機物・栄養塩	○	○	○	○	試験機の走行、掘削、集鉱に伴う濁りの拡散、再堆積による堆積物の成層変化が、底質中の有機物量、栄養塩量が増加する可能性があることから選定する。	
		有害金属	○	○	○	○	試験機の走行、掘削、集鉱に伴う有害金属を含有する濁りの拡散、再堆積により、有害金属の分布範囲が拡大する可能性があることから選定する。	
その他	騒音	水中騒音	○	○	○	○	試験機の走行、掘削、集鉱に伴い発生する水中騒音により、遊泳生物などの行動が変化することから選定する。	
境土環境	その他	地形・地質	—	○	—	○	試験機の掘削に伴い地質が変化することから選定する。	
動物	動物プランクトン	現存量	○	○	○	○	○	試験機の走行、掘削、集鉱に伴う濁りの発生により、近底層の動物プランクトンの現存量が変化することから選定する。
		遊泳生物	現存量	○	○	○	○	○
	底生生物	現存量	○	○	○	○	○	試験機の走行、掘削、集鉱に伴い底生生物が直接的（埋没・死亡）、底質の変化による間接的（餌料環境の変化）な影響を受ける可能性があることから選定する。
系生態	熱水生態系	○	○	○	○	○	○	試験海域に特殊な生態系（熱水生態系）が存在し、試験機の走行、掘削、集鉱に伴い熱水生態系が影響を受ける可能性があることから選定する。

注：○は影響を受ける可能性のある項目、—は対象外を示す。

上記の環境影響評価からは、以下に示すように、採掘要素技術試験による周辺環境への深刻な影響は生じないことを予測・評価した。

- ・濁りや有害金属の高濃度拡散範囲は、海穴内のごく限られた範囲である。
- ・濁りと同様に有機物や有害金属の相対的に高い再堆積濃度は、伊是名海穴内の限られた範囲である。
- ・文献等による類似事例より、水中騒音の影響が及ぶ範囲は限られると考えられる。
- ・動物（動物プランクトン、底生生物・魚類）への影響は、環境（水質・底質）の変化が比較的大きな伊是名海穴内の限られた範囲においては、可能性が考えられる。
- ・試験時の濁りは高いものの、終了後には速やかに減少し、試験後3時間程度で試験前あるいはベースラインの値に戻った。このことから、試験によって発生した懸濁物質は、その場からは速やかに沈降すると考えられる。
- ・一部の箇所を除き、多くの箇所では採掘試験後でも堆積物中の重金属濃度は採掘前と変化しなかった。堆積物の化学組成や水質についてもほぼ同様の結果であった。
- ・予測の基となる流れ場の再現には、海底地形は、500mメッシュデータを使用しており、南部モデルマウンドのように急峻な崖地やチムニ一群のような複雑な地形状況を考慮していない。その結果、予測の流向と実測の流向が逆になった。

5) 環境影響モニタリング調査

採掘要素技術試験に先立ち、試験海域周辺から 150-200m 離れた地点にモニタリング用係留系（流向流速計 2 基、堆積量測定用 4 基）を設置した。

また、採掘要素技術試験機（後述）に CTD センサー、機器本体の騒音を記録するハイドロフォン、ADCP（一部）を装備し、試験中の環境特性を測定した。さらに、試験直後（作業終了 2.5 時間後）に、試験場所の直上、50m、100m で、CTD センサー及び海水の濁度観測を実施し、試験の影響をモニタリングした（図 14）。さらに、採掘試験航海終了後にチャーター船により、試験箇所近傍や周辺海域において水質、底質、生物等の環境影響項目のサンプリングを実施した。

海水の濁度異常は、試験終了 4 時間後には環境ベースラインの値の範囲内となり、試験時の濁質は速やかに沈降すると考えられた。また、その他の調査項目についても環境ベースラインの値の範囲内であることが確認された。

ただし、今年度を実施した採掘要素技術試験では、試験機の実稼働時間が想定より短く、影響が観測できなかった可能性もあることを考慮する必要がある。

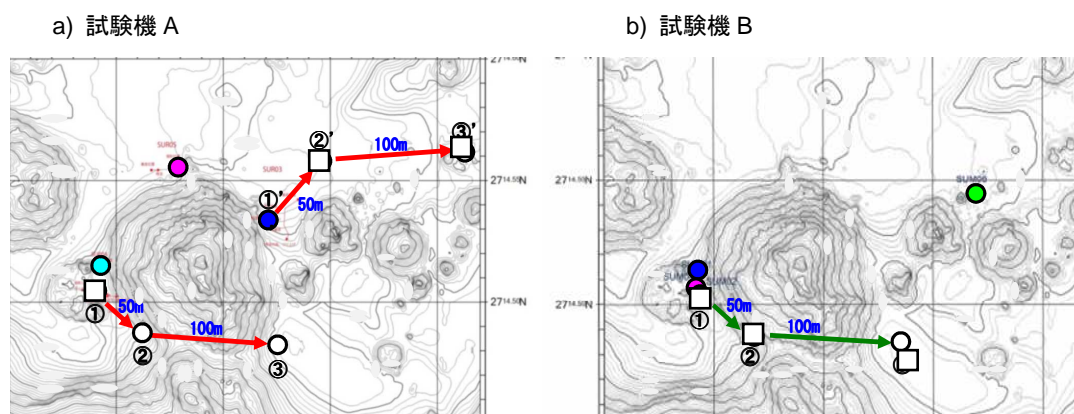


図 14 試験直後のモニタリング位置図
(● : 試験機位置、□ : 採水モニタリング箇所)

6) 環境保全策の検討

海底熱水鉱床周辺域の生物多様性を保全するために、遺伝学的研究による環境保全策を検討した。海底熱水鉱床の生物多様性保全の考え方は、海域の遺伝的多様性の維持、採掘区内の個体群の回復の検討のため、海域間の遺伝的交流の確認、個体群の供給源の調査を行った。

海底鉱物資源として開発、利用が期待されている海底熱水鉱床の周辺には、化学合成微生物の有機物生産に依存した熱水性の化学合成生物群集がしばしば形成される。こうした群集を構成する生物種の多くは、熱水域あるいは類似の還元環境（湧水域や鯨遺骸など）に固有であることが知られている。国内外の生物多様性保全に関する条約や法律には、種多様性だけでなく、それぞれの種の持つ遺伝的多様性の保全が謳われており、開発を想定した場所で遺伝的に固有な生物種が確認された場合には、それに対する開発の影響を可能な限り低減、回避する手法を見出すことが必要となる。

保全策の戦略としては、開発を想定した場所と遺伝子交流があり、遺伝的多様性の維持と開発後の幼生供給が期待される場所を保護区に選定する方法として、カルデラ単位でゾーニングを行う方法などの検討を行った（図 15）。

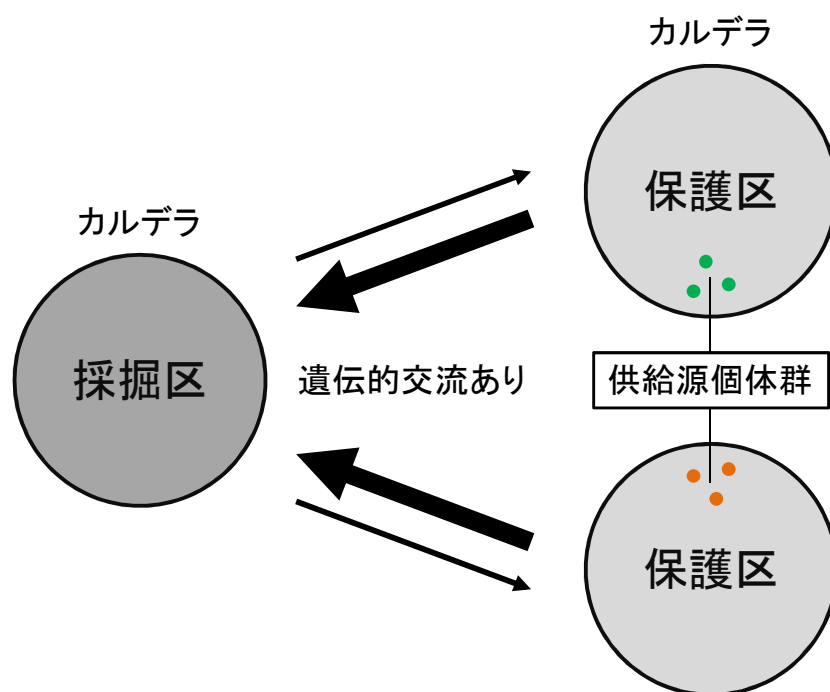


図 15 海底熱水鉱床の生物多様性保全の概念図

沖縄海域伊是名海穴、伊豆・小笠原海域ベヨネース海丘及びその周辺海域において、熱水性生物の遺伝学的研究を実施した。沖縄海域ではゴエモンコシオリエビ、ヘイトウシンカイヒバリガイ他 12 種、伊豆・小笠原海域では、ユノハナガイ、マリアナイトエラゴカイ他 5 種を解析対象とし、両海域では、共通種を含めて合計で 15 種類の解析を実施した（表 14）。

表 14 熱水性生物の遺伝子解析結果の概要

種名	分類群	主要分布域	特徴
ゴエモンコシオリエビ	甲殻類	沖縄	伊平屋北から移出が卓越
イバラモエビ	甲殻類	沖縄	移出入に偏りなし
オハラエビ	甲殻類	沖縄、 伊豆・小笠原	移出入に偏りなし
エンセイオハラエビ	甲殻類	沖縄	—（分析個体数 20 個体以下）
ネッスイハナカゴ	甲殻類	沖縄、 伊豆・小笠原	移出入に偏りなし
ユノハナガニ	甲殻類	伊豆・小笠原	移出入に偏りなし
サガミハイカブリニナ属	腹足類	沖縄	伊平屋小海嶺への移入が卓越
セイタカハイカブリニナ属	腹足類	沖縄	移出入に偏りなし
ツギノワタゾコアミガサガイモドキ	腹足類	沖縄	移出入に偏りなし
ヘイトウシンカイヒバリガイ	二枚貝類	沖縄、相模湾	移出入に偏りなし
シマイシロウリガイ	二枚貝類	沖縄、相模湾	移出入に偏りなし
アケビガイ	二枚貝類	沖縄	—（分析個体数 20 個体以下）
ウロコムシ科の一種	多毛類	沖縄	—（分析個体数 20 個体以下）
アレイズハオリムシ	多毛類	沖縄	移出入に偏りなし
サガミハオリムシ	多毛類	沖縄、相模湾	移出入に偏りなし

その結果、これらの種はいずれも伊是名海穴及びベヨネース海丘が遺伝子の供給源とはなっていないと考えられた。

(3) 資源開発技術（採鉱技術）

1) 概要

我が国周辺海域における海底熱水鉱床の開発は、重要非鉄金属資源の安定した準国内資源供給源の確保につながるとともに、日本の自給率の向上に貢献する。

いまだ世界に実用化例のない海底熱水鉱床採鉱システムの開発には、水深約 2,000m の海底から海上に至る過酷な自然条件を克服するための高度な技術が種々必要とされる。これらの技術の確立は、海洋開発産業の育成、強化につながり、ひいては日本の産業構造高度化の促進に寄与することが期待されている。

本分野では、海底熱水鉱床の徴候が確認されている沖縄海域を対象に採鉱システムについて検討を行った。

具体的には、商業的規模での採鉱基礎条件（海象・採掘条件・採掘オペレーション等）を設定した上で、システムを構成する3つのユニット（採掘・揚鉱・採鉱母船）の概念検討を行い、現時点の資源情報を踏まえた採鉱システムの概念を構築した。また、実証試験機の設計に反映させるため、小型の採掘要素技術試験機を用いて実海域での試験を行い、走行、掘削等の機能確認を行うとともに、走行・掘削・集鉱・操作性等に関する各種データを取得した。

以下に、採鉱システム検討のための前提条件となる採鉱基礎条件等の想定、及び採鉱システムを構成する各ユニットの検討結果を示す。

2) 採掘基礎条件の検討

① 海底熱水鉱床の工学的性質

一般に、採鉱方法や採鉱機の仕様を検討するには、鉱床の賦存状況を解析して鉱床モデルを構築し、さらに、代表的な地質区分毎に地山の物性を割付けた地山モデルを作成する必要がある。鉱床モデルと地山モデルは、3次元ブロックモデルとしてデータを集約し、その主要なデータには、岩石・硫化物タイプ、密度、品位、一軸圧縮強度などがある。これらのデータに基づき、採掘コストなどの諸条件を与えて、収益を最大とする最終ピット形状を設計、そのピット内部の採掘計画を作成して経済性評価に供する。

海底熱水鉱床の採鉱システムの検討では、海底熱水鉱床の硫化物の基本物性を明らかにし、鉱床モデル、地山モデルを構築するため、採鉱システム設計の検討と並行して資源の実態把握を実施している（図 16）。

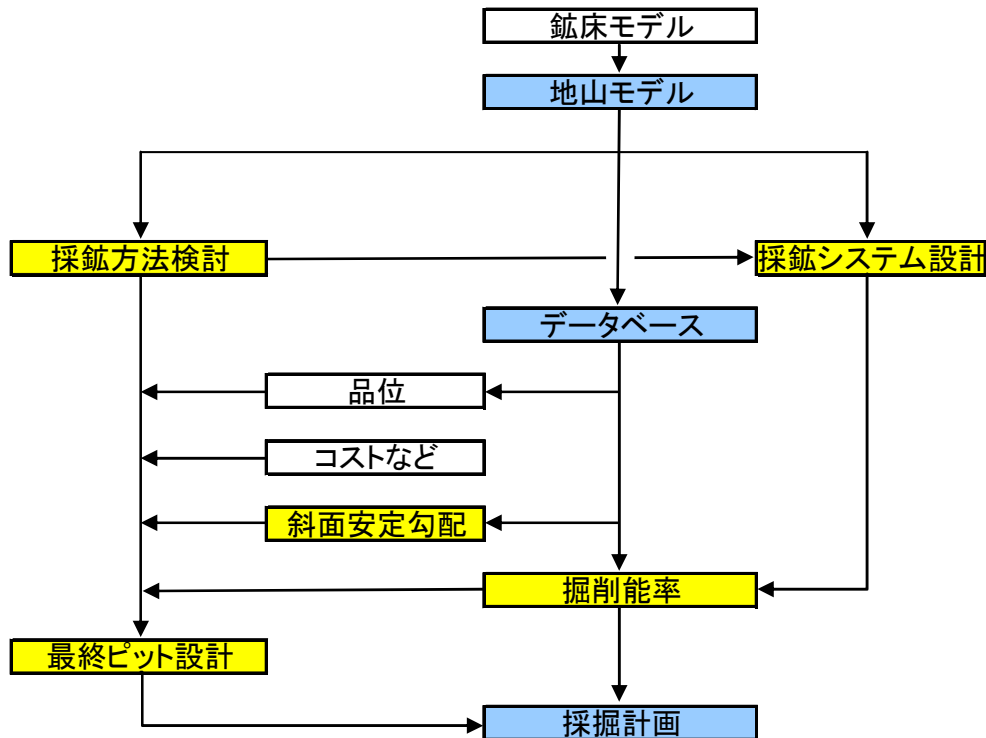


図 16 採掘計画作成までの流れ

<マウンドの地盤特性>

伊是名海穴内 Hakurei Site のマウンドにおいて地盤特性の把握を目的として、ROV にバケットを取り付けてマウンド斜面部の地盤切削調査を実施した。調査対象としたマウンドは、比高約 25m で、頂部に高さ約 5m のチムニーが産し、マウンド斜面から中腹にかけて尾根構造を有する。尾根部では小チムニーが確認されている。マウンド山麓部では黒色泥に埋没した塊状硫化鉱の礫が産し、硫化鉱の礫は、大きさは様々である。マウンド裾野にはシルト質から泥質の軟弱な堆積物が分布している。

マウンド斜面の小丘及びその基部をバケットで切削し、掘削前、掘削中及び掘削後の状況をハイビジョンカメラで観察した。小丘はバケットの刃がたたず、切り崩すことなく表面を削るのみであった。このことから小丘部分は比較的硬い岩石、地質的には固結した硫化物からなると判断した。小丘基部のバケットでの切削では、黒色泥が舞い上がり、バケットの中には硫化物の礫が確認された。最終的に、垂直方向に約 2.2m 掘削したが、その間の地盤状況は変わらないことから、表層から少なく

とも 2m 程度に渡って黒色泥と硫化鋳礫からなることが確認された。

②海象気象条件

対象海域での公開気象データを下に、設計波高(暴風時)及び発現頻度分布について検討し、設計波高(暴風時)を設定した(表 15)。

表 15 設計波高(暴風時)

項目	ベヨネース海丘	伊是名海穴
有義波高 ⁽¹⁾	16~18m	
有義波周期 ⁽¹⁾	16~18 秒	
海流速度(表層) ⁽²⁾	2m/秒	2.3m/秒
平均風速 ⁽³⁾	57m/秒	

注)使用した公開海気象データ

(1)Global Wave Statistics、(2)日本海洋データセンター、(3)建築物荷重指針・同解説

③採鋳基礎条件

採鋳システムを検討する上で、前提条件となる生産規模を設定するため、種々の仮定を置き、日粗鋳生産量 5,000wt/日(湿潤重量)と 2,000wt/日(湿潤重量)の2つの生産規模で経済性を比較した。その結果、当面、検討して行くべき生産規模を 5,000wt/日とした。

検討条件は、15年の操業が可能な資源量を有するものと仮定し、粗鋳品位はボーリングコアの分析結果の銅換算品位 5%以上の平均値とし、操業期間中は一定品位とした。また、伊是名海穴 Hakurei Site での採鋳、離島での浮遊選鋳、本土での乾式製錬を想定した。その結果、5,000wt/日の生産規模とした場合において経済性を有する可能性があることがわかり、下記のとおり採鋳基礎条件(目標)を定めた(表 16)。

表 16 採鋳基礎条件

日粗鋳生産量	5,000 wt/日
有効日採掘量	4,792 wt/日
年操業日数	268 日(月間点検、定年検含む平均値)
年採掘量	1,284 千 wt/年
操業年数	15 年
日作業時間	24 時間連続操業、12 時間勤務 2 交代制
操業日サイクル	25 日連続操業後、5 日間点検休止

④採鉱オペレーション条件の検討

採鉱対象サイトとしては、沖縄海域伊是名海穴及び伊豆・小笠原海域ベヨネース海丘を対象とした。以下に採鉱オペレーションの基本条件を示す。

<一般条件>

採鉱システム検討の前提としては下記条件を想定した。

- 使用水深：最大 2,000m
- 採鉱対象は伊是名海穴内 Hakurei site に賦存する熱水鉱床マウンドのうち北部モデルマウンドを想定し、モデルマウンドを設定
- 海底での鉱石の切削サイズは 50mm 以下を想定

<想定したモデルマウンド>

掘削対象となる鉱床の全体像は明らかとはなっていないが、採鉱システム検討にあたり、熱水鉱床に関するこれまでの知見に基づいてモデルマウンドを設定した。モデルマウンドは全体が採掘対象となる鉱石からなり、大きさは、直径約 100m、比高約 20m とし、表面は、直径数 10cm ~ 1m ほどの礫が被覆し内部は比較的均質・硬質、頂部にはチムニーが存在することを想定した。モデルマウンドの地山モデルの概念図を図 17 に示す。

鉱石の物性については、硫化物のサンプル数が少ないが有効間隙率が 10-40% と非常に高いのが特徴で、一軸圧縮強度は平均 20MPa 程度、最大 50MPa、比重 3-4 と仮定した。

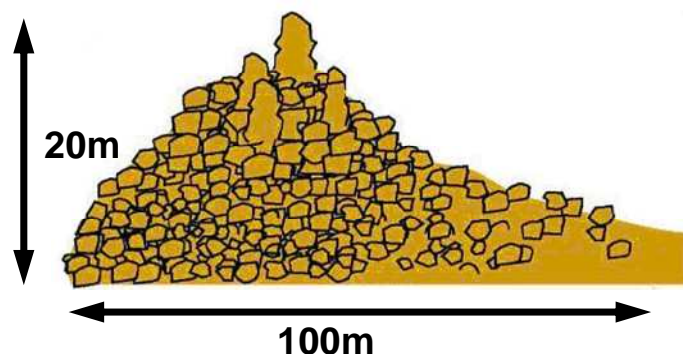


図 17 採掘対象の地山モデル

3) 採鉱システムの要素技術検討

採鉱システム全体は、図 18 に示すようなシステムが最適と考えられ、そのシステムは、海底で鉱石を採掘する採掘ユニット、採掘された鉱石を海面まで揚げる揚鉱ユニット、海面に揚がった鉱石を処理し陸上に運ぶための採鉱母船ユニットに分かれる。それぞれのユニットに関する検討内容については以下に示す。



図 18 海底熱水鉱床の採鉱システム

①採掘ユニット

採掘ユニットは、マウンドを整地・造成するための補助掘削機（パワーショベル、パワーグラブ、クラッシャー等）、鉱石を本格的に掘削するための採鉱機、掘削された鉱石片を集めるための集鉱機、及び集鉱機から揚鉱ユニットまで鉱石を輸送するためのフレキシブルホース等か

らなる。これまでの検討では、技術的に検討すべき要素の多い採鉱機及び集鉱機について実施してきた（図 19）。



図 19 採掘ユニット図

<掘削装置>

採掘ユニットを構成する採鉱機の掘削装置としては、下記の要件を満たすことが必要である。

- 対象鉱石の圧縮強度は最大 50MP で、鉱体は固結した塊状硫化物からなる比較的均質な岩盤と想定
- 目標掘削量は湿潤重量で 5,000wt/日、平均比重 3 で約 70m³/時
- 掘削ヘッドはブームに搭載可能で、前方及び下方を掘削できること
- 掘削ヘッドは安定した粒度が得られること

掘削ヘッドについては、陸上で用いられている型式について検討を行った結果、採鉱機の掘削装置としての要件を考慮すると、採鉱機の掘削ヘッドとしてドラムカッターが最も適しており、ロードヘッダー、カッターヘッドがそれに次ぐと考えられる。

この結果、本採鉱機用の掘削ヘッドとしては、ドラムカッターを、補助採鉱機用の掘削ヘッドとしてはロードヘッダー、カッターヘッド型のヘッドを選定した。

<移動装置>

海底での移動方式として歩行式及びクローラ方式（2 クローラ、4 クローラ）がこれまで用いられている。

凹凸地、軟弱地盤、傾斜地での移動性を評価した結果、角礫が集積した凹凸地形の多い熱水鉱床での移動装置としては4クローラ方式、または低重心の2クローラ方式が適していると考えられる。

<集鉱装置>

掘削された鉱石片の水中ポンプユニット（揚鉱ユニット）までの輸送については、集鉱装置を用いてフレキシブルホースを介してスラリーで輸送される。集鉱装置を計画する上での検討条件を以下に示す。

- 掘削により鉱石は50mm以下の大きさに碎かれるものとする
- 鉱石の比重は平均3とするが、最大4の鉱石も考慮する
- 水中ポンプユニットの海底からの高さ最大100mとする
（オペレーション時の標準の海底からの高さは50mとする）
- フレキシブルホース長 150m
- スラリー体積濃度 15%以下を目安とする
- フレキシブルホース内径 200Aを標準とする

<採鉱機の概要>

本格的に掘削するための採鉱機について概念検討を行った。検討結果を主要目表として表17に示す。採鉱機のイメージ図の1案を図20に示す。ここでは、1台の機械で掘削と同時に浚渫を行うAll-in-One型の採鉱機（集鉱機）とした。

表17 採鉱機主要目(本採鉱機)

項目	要目
主寸法	約10.5m(長さ)×5.4m(幅)×4.5m(高さ)
重量	空中約120t、水中約100t
総馬力	1,150kW 浚渫ポンプ 450kW 油圧ポンプ 350kW×2
掘削装置	油圧駆動式ドラムカッター 掘削量 70m ³ /時 (5,000t/日) 掘削ブーム 旋回・俯仰機能

浚渫装置	浚渫ポンプ 660m ³ /時×130m 水頭
移動装置	油圧駆動 4クローラ 登坂能力 35° 以上 スラスト (水中移動用)
調査観測装置	TV カメラ、ライト、超音波ソナー、航海センサー、レスポнда (音響測位用)、計装・状態監視用センサー

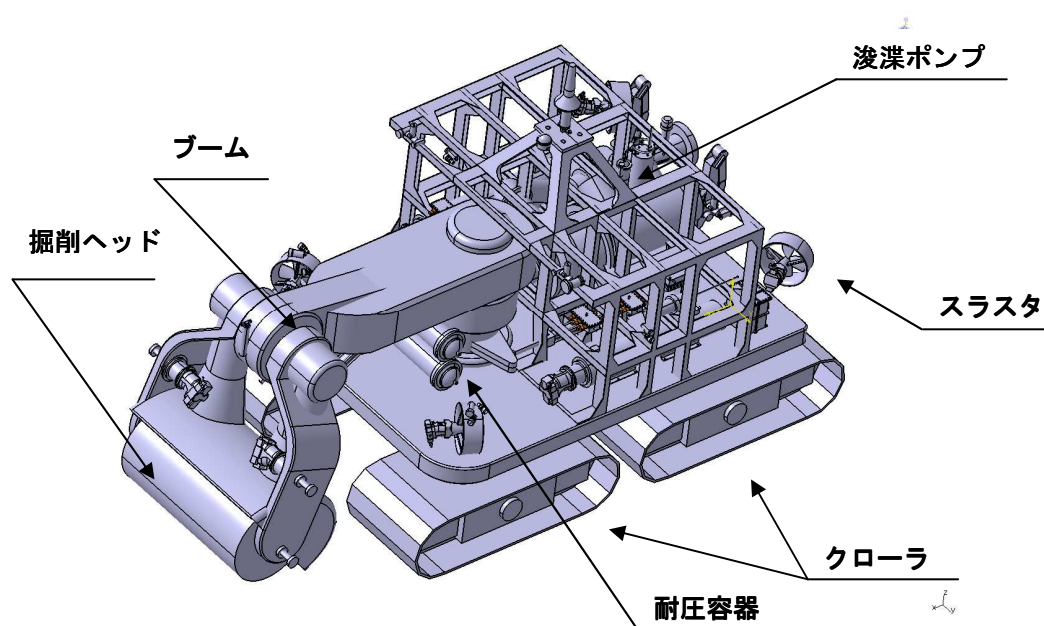


図 20 採鉱機イメージ図

②揚鉱ユニット

<揚鉱方法の比較評価>

海底で採掘した鉱石の揚鉱方法としてはポンプ式、エアリフト式及びバケット式の3方式が考えられる。

○ポンプ式：ライザーの下端に水中ポンプユニットを配置し、採鉱機で採掘した鉱石をポンプで船上に押し上げる。

○エアリフト式：採鉱機で採掘した鉱石を、ライザー下部にエアーを挿入し、船上に吸い上げる。

○バケット式：採鉱機で掘削した鉱石をバケットで船上に掬い上げる。

この3方式について、その利点、欠点について評価した結果を表18に示す。ポンプ式とエアリフト式は鉱石をスラリーにして輸送を行う方式である。ポンプ式は生産性が高く、流量の調整等の操作性も良いが、水中ポンプユニットがライザー下端にあり、メンテナンス性は良くない。エアリフト式は気体・液体・固体の3相流であり、制御が難しく、生産性もばらつきがあるが、主要装置が船上にあり、ポンプ式に比べてメンテナンス性は良い。バケット式の利点は安価でメンテナンス性が良いという点であるが、生産性は低く、操作（バケット位置のコントロール）も難しい。

表18 揚鉱方法の比較評価

項目	スラリー式		機械式
	ポンプ式	エアリフト式	バケット式
生産性	○	○	△
操作性	○	△	△
メンテナンス性	△	○	○
電力	大	大	小
コスト	高価	高価	安価

＜ライザー管・ポンプ方式の比較評価＞

揚鉱方法としては生産性、操作性を重視して、石油開発等で実績のあるライザー管を用いたポンプ方式を選択し、さらなる検討を実施した。ライザー管、ポンプ方式には以下に示す2つの選択肢がある。

- ライザータイプ：リジッドライザー／フレキシブルライザー
- 水中ポンプ：ダイヤフラム型／ターボ型

これらの組合せを考慮した6ケースについて検討を実施した(表19)。

表19 ライザー管とポンプ方式の組み合わせ

ケース	ライザー／水中ポンプ
ケース1	リジッドライザー／ダイヤフラム型
ケース2	リジッドライザー／ターボ型
ケース3	フレキシブルライザー／ダイヤフラム型
ケース4	フレキシブルライザー／ターボ型
ケース5	フレキシブルライザー自立型／ダイヤフラム型
ケース6	フレキシブルライザー自立型／ターボ型

ケース 3 ではシステムが複雑で運用面が困難、ケース 5、ケース 6 ではポンプユニットの海底設置は系統的にメリットがないことから、中間評価段階で除外し、ケース 1, 2, 4 に絞り検討を実施した。

水中ポンプも含めた揚鉬ユニット全体で比較評価した結果を表 20 に示す。

表 20 揚鉬ユニット比較評価

ケース	1	2	4
システム総重量	約 1,850t	約 1,680t	約 1,496t
採鉬時電力	約 5,835kW	約 2,770kW	約 2,770kW
実績	ライザー／ポンプともに石油掘削分野であり	ライザー／ポンプともに石油掘削分野であり	ポンプ吊り下げ方式としてはなし
海流に対する感受性	○	○	○
V I V 対策	○	○	◎
設置・回収作業	○	○	×
非常切離／再接合	○	○	○

③採鉬母船ユニット

<母船の鉬石保管庫容積>

母船の鉬石貯蔵ホールド(ホールド)の容積については、1日あたりの採鉬量を 5,000wt とし、鉬石の比重を 3.0、固結鉬石を破碎した場合の体積の変化率を 2 とした。また、シャトル船による採鉬母船からの鉬石運搬サイクルを原則 5 日とし、荒天等によるスタンバイ期間を 2 日間考慮して、母船の貯蔵量を最大 7 日間とした。この前提条件から、採鉬母船のホールドの容積を、24,000m³ とした。

<採鉬母船船型>

採鉬母船を採鉬地点にとどめる方式としては、ダイナミックポジショニングシステム（以下「DPS」という）による位置保持方式と、係留索を用いた係留方式がある（図 21）。DPS により位置保持を行う場合、採鉬場所での事前準備作業は不要であり、また、採鉬場所間移動も自由に行うことが可能であるが、常時大型のスラストを運転する必要があり、燃料消費量が多い。係留方式の場合、採鉬場所において事前に係留索、

フレキシブルライザー等を設置しておく必要があり、採鉱場所の頻繁な移動は困難である。また、採鉱機のケーブルと係留索の絡みを防止するために、回頭角度を制御できる海気象条件内での稼動となる。

採鉱母船としては、その船の寿命間に数箇所の鉱床で採鉱作業を行うことが考えられ、鉱床の場所を変えるために、大掛かりな準備作業が必要となる係留方式に比べ、簡単に海域を変えることができる DPS のほうが有利であると考えられる。ただし、DPS の場合には、機能不全による暴走・漂流に対処するためのシステムにしなければならないという問題もある。

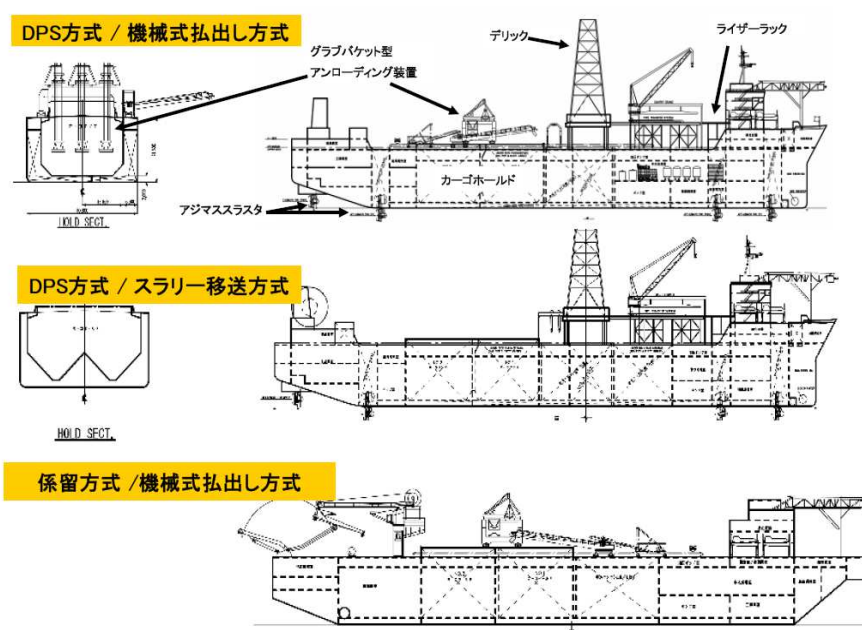


図 21 採鉱母船船型イメージ

4) 採鉱システム概念設計

採鉱システムの概念設計では、2つのケースを例にとり、採掘・揚鉱・採鉱母船ユニットの仕様検討を行い、概念設計を行った(図 22)。

- ケース 1: リジッドライザー／ダイアフラム水中ポンプ
- ケース 2: フレキシブルライザー；ターボ型水中ポンプユニット

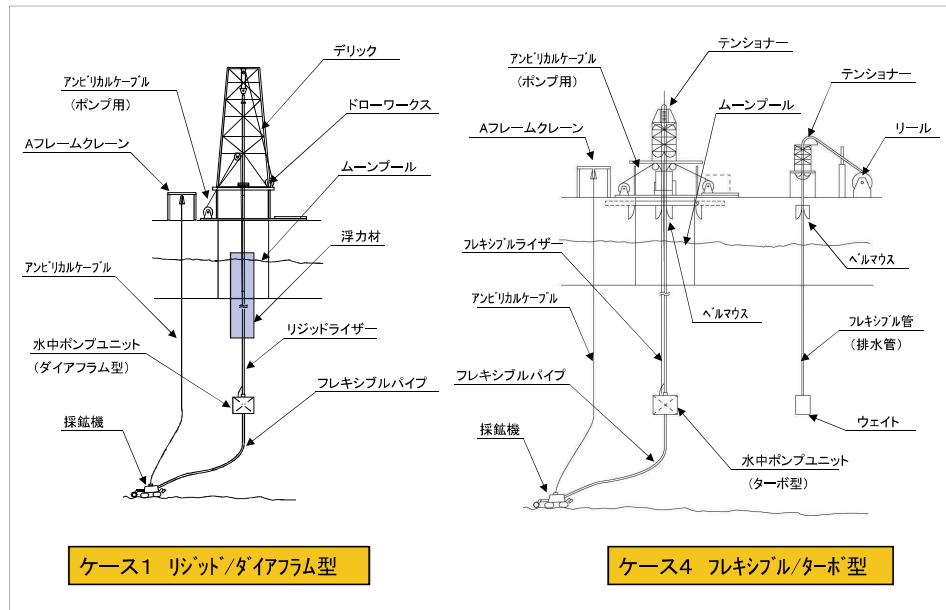


図 22 採鉱システムの概略仕様

<採掘ユニット>

採掘ユニットについては、要素検討で検討した掘削作業の使用率検討結果に基づき、掘削作業効率を 0.78 として掘削量を $90\text{m}^3/\text{時}$ とした。スラリー流量は $624\text{m}^3/\text{時}$ としている。また、段差乗越え能力 1m として採鉱機の仕様を検討した結果を以下に示す。

採鉱機主要目 () はケース 2 の場合

○主寸法 長さ×幅×高さ：13.5×5.4×6.5m

○空中重量／水中重量：120／100t

○総馬力：1,150kW (1,000kW)

浚渫ポンプ 450kW (300kW) $624\text{m}^3/\text{h} \times 1.3\text{MPa} (0.8\text{MPa})$

油圧ポンプ 350kW×2

○掘削装置：油圧駆動式ドラムカッター $90\text{m}^3/\text{時}$ (at20MPa)

○移動装置：4 クローラ、登坂能力 35° 以上、段差乗越え能力 1m、
スラスト 水中移動用

○フレキシブルホース嵌合離脱装置：1 式

<揚鉱ユニット>

リジッドライザー、フレキシブルライザーの両者とも下端に水中ポンプユニットを吊下げることとなるため、両者ともその荷重を受け持つ強度が必要であり、所要強度に基づき、寸法・構造を決定した。

また、ダイアフラム水中ポンプユニット及びターボ型水中ポンプユニットについてもそれぞれ専門メーカーと協力し、基本設計を行った。両者の大きな違いは、ダイアフラム型は主動力を船上部に持つ船上注水ポンプによっているのに対し、ターボ型ポンプは水中部に電動機を持ち、大電力の送電が必要な点である。また、ポンプの特質としてダイアフラム型は並列システムであるのに対し、ターボ型は直列システムである点が異なる。また、採鉱機がブラックアウトする事態に備え、両者ともフレキシブルホース離脱装置を設けるものとしている。

<採鉱母船ユニット>

採鉱母船の主寸法は、ケース 1、ケース 2 の両者とも過年度までの検討した寸法で問題ないことを配置検討の結果確認した。

以下に主要目を示す。

○全長×全幅×型深さ	: 216m×40.8m×21.5m
○喫水	: 11.0m
○軽荷重量	: 28,700t
○戴貨重量	: 42,800t
○ホールド容積	: 24,000m ³
○発電機	: 6,000kW×6 台
○アジマススラスト	: 4,200kW×6 台

5) 採掘要素技術試験の結果

①採掘要素技術試験機の概要

採鉱機・集鉱機に係る各種の要素技術（走行・集鉱・掘削技術等）に関する技術的評価を行うことを目的として、3機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・水槽・実海域で試験を実施した。以下に各試験機の概要を記述する。

<試験機 A>

試験機 A は、整地等を実施する補助掘削機用の 2 軸カッターヘッドと、整地された面を下向きに本格的に掘削することを目的としたドラムカッターヘッドの 2 種類の掘削ヘッドを持ち、船上にてヘッドの交換が可能

である。

各掘削ヘッドの中央には集鉱ノズルがついており、掘削しながら集鉱することができる。集鉱された鉱石は、試験機後部に取り付けられた採鉱ホルドに集められる。

走行機能は4クローラによる自走式で、各クローラはシリンダー制御により高さ、角度の調整が可能である。本試験機を用いて陸上試験、水槽試験、実海域試験を実施し掘削・集鉱・走行に係る要素技術試験データを取得した。

<試験機 B>

試験機 B は、石炭鉱山等の実績があるロードヘッダーを掘削ヘッドに持ち、採鉱方法の概念として、掘削と集鉱は別々の機械による作業を想定している。試験機は掘削ヘッドを集鉱ヘッドに交換することで集鉱機となる。

走行機能は2クローラ方式で、機体形状は重心が低く、シンプルな構造とした。試験機後部にはアウトリガーがあり、掘削反力が取れないときは地面に突き刺し突っ張り棒とすることができる。

本試験機を用いて陸上試験、水槽試験、実海域試験を実施し掘削・走行に係る要素技術試験データを取得した。

<試験機 C>

試験機 C は、海底の凹凸地において、機体を安定した姿勢で走行するための走行装置の開発を目指して陸上実験用の試験機として製造した。走行は4つのクローラで、各クローラは油圧シリンダーで昇降する昇降脚に取り付けられている。昇降脚は、機体に取り付けられた傾斜センサーによるロール・ピッチ角の水平からの偏差に応じて昇降する。試験機では、左側2脚のみに昇降機能を持たせ、移動性能、姿勢制御機能を確認し、実機開発に向け、陸上試験用として開発し、走行要素データを取得した。

② 採掘要素技術試験機の実海域試験

平成24年8月22日～9月10日と10月21日～11月9日の2期間において、「白嶺」に上述の試験機 A 及び B を搭載して沖縄海域伊是名海穴に産する海底熱水鉱床地帯で採掘試験を実施した。試験機については

下記の項目についての確認試験を行った。

- 投入・揚収状況の確認試験
- 走行状況の確認試験
- 掘削状況の確認試験
- 集鉱状況の確認試験
- 耐久試験（ピック耐久、機械耐久）
- 総合試験

また、併せて採掘による環境への影響を把握するため濁りと水中騒音に関するデータを取得した。また、海底での試験機の動作状況は同時に投入した ROV にて観察した(図 23)。

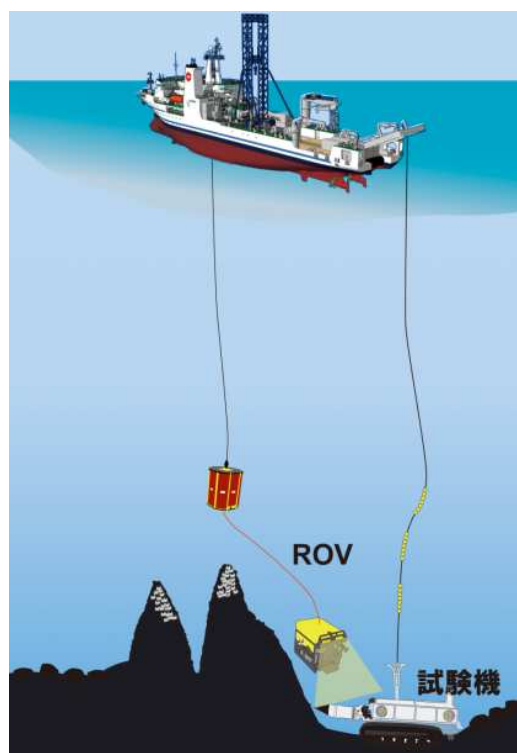


図 23 実海域での採掘試験イメージ

<試験機 A の試験結果>

2 軸カッターヘッド及びドラムカッターヘッドの 2 種類の掘削ヘッドで、水深 1,600m の海底熱水鉱床サイトで実際に走行・掘削・集鉱できることを実証した。また、採掘試験機で初めて掘削と同時に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（写真 6）。

しかし、掘削・走行中は、懸濁粒子により海底状況把握が困難である

ことが判明した。周囲の状況把握のため、ソナー・カメラ等の高度化、取り付け位置等の工夫が今後の課題である。

洋上試験で得られたデータを分析し、今後の採掘ユニット開発のための基礎的データを取得した。



写真6 海底での試験機A (2軸カッターヘッド)

<試験機Bの実海域試験>

水深1,600mの海底熱水鉱床サイトで実際に走行・掘削できることを実証した(写真7)。掘削終了後のROVの観察により硫化鉱の表面にピックで削った跡が残されているのを確認した(写真8)。

走行試験では硫化鉱マウンドの斜面部を登坂し、試験機のピッチが最大27度となる条件下で走行することを確認した。



写真7 海底での試験機B



写真8 掘削跡

掘削時は、掘削片の舞い上がりによりカメラでの視界確保が困難であるがソナーを用いると懸濁中でもある程度は周囲状況等の把握が可能であることが確認された(図24)。

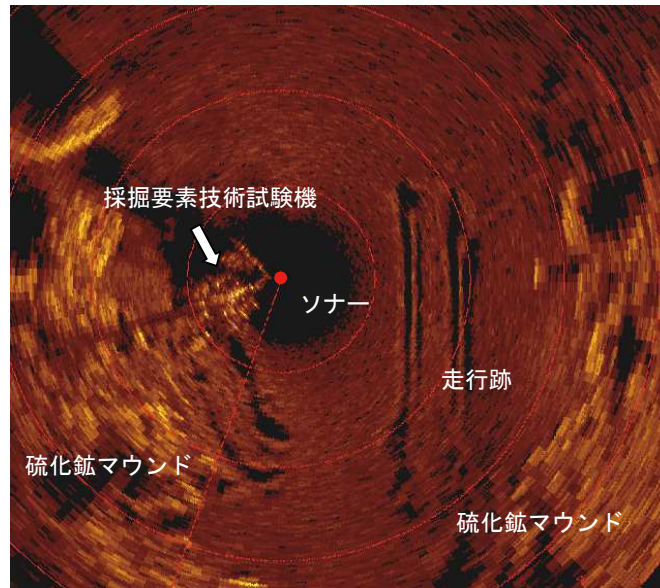
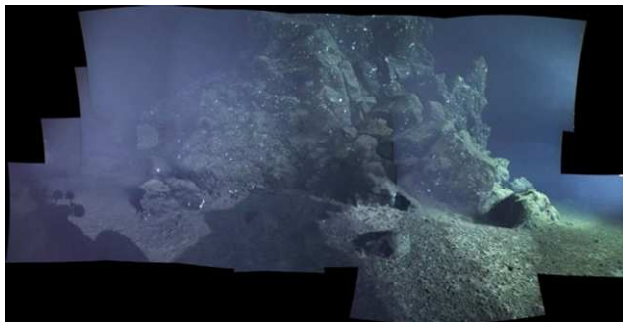


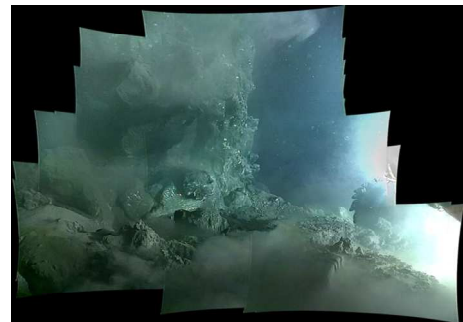
図 24 海底での全方位ソナー映像

掘削試験は 4 回実施し、4 回分の総掘削時間は約 120 分、カメラ画像から 3 次元解析にて想定掘削量を分析した（写真 9）。

今後の課題としては、掘削中の視認性確保の向上及び軟弱地盤での走行性能の向上が課題である。



<試験前>



<試験後>

写真 9 試験前後の合成画像

(4) 製錬技術 (選鉱・製錬技術)

1) 概要

沖縄海域伊是名海穴及び伊豆・小笠原海域ベヨネース海丘で採取された試料を用いて、両海域の鉱石の選鉱学的特徴の把握を行った上で、既存プロセスの検討として浮遊選鉱―乾式製錬法による実験室規模での基礎試験を、新技術の検討として湿式製錬法（バイオリーチング及びケミカルリーチング）の適用試験を実施した。また、浮遊選鉱試験については、試験結果を踏まえ、スケールアップ試験を実施し、パイロットプラントの設計に反映するためのデータを取得した。さらに、実操業を想定した選鉱場の概念検討を行った。試験に供する試料は、資源量調査で採取されたものを供した。

2) 既存プロセスの検討結果

既存プロセスの検討には、海底着座型ボーリングマシンにより採取したコア試料とパワーグラブにより採取した塊状試料を破碎、整粒、縮分したものを用いた。第1期に検討・使用した縮分試料は33種に及び、各種で品位や性質のばらつきが非常に大きなものであった。

沖縄海域伊是名海穴及び伊豆・小笠原海域ベヨネース海丘の試料は、鉱物粒子が細かい、ヒ素含有率が高いなどの共通点がある一方、品位や鉱物構成などに相違があることを確認した。その特徴から大きく6種類の試料に区分し、これらの特徴を考慮し、それぞれの海域に最適な選鉱・製錬プロセスの検討を行った。

①選鉱基礎試験

(A) 沖縄海域伊是名海穴の試料を用いた試験結果

沖縄海域伊是名海穴 Hakurei site で採取した試料を用いてラボスケールでの基礎検討を実施した。試料の粉碎性や有価鉱物の存在形態、選鉱によるヒ素除去の可能性など、選鉱学的な特性評価を実施した。本検討で入手したパワーグラブ及び海底着座型ボーリングマシンで採取されたコア試料（BMS 試料）は、伊豆・小笠原海域の試料に比べ、鉛は同程度であるものの、相対的に銅、鉛、亜鉛、金、銀の品位は低いものであった。また、多くの試料で、鉄や重晶石の含有量が高く、選鉱による有価

鉱物の高濃縮が必要であること、また、ヒ素濃度が伊豆・小笠原海域試料に比べて高く選鉱工程による除去が必要であることが予測された。

このため、基礎試験では、選鉱特性や選鉱効率の向上を目指し、微粒子鉄鉱物の除去を想定した微粒子磁選やマイクロバブルカラム浮遊選鉱試験も併せて実施した。

選鉱学的特性評価として、鉄鉱物は、主として磁硫鉄鉱と黄鉄鉱の2種があり、特に磁硫鉄鉱が多いことが特徴である。また、主要構成鉱物のサイズ分布を画像分析により測定した結果、特に黄銅鉱のサイズが小さく、10 μm 程度まで粉砕したとしても、これらを高精度に相互分離することは極めて困難であることが予測された。図25は鉱物粒子解析装置による鉱物粒子像の一部であり、銅、鉛、亜鉛鉱物が鉄鉱物中に微細に存在しており、分離は容易でないことを確認した。特に磁化選別では8割近くの鉄を回収できる条件を見出したものの、依然として分離効率は低迷する結果となった。また、マイクロバブルカラム浮遊選鉱試験ではアルカリ湿式粉砕試料を用いることにより、銅、亜鉛の回収率が改善することが確認された。

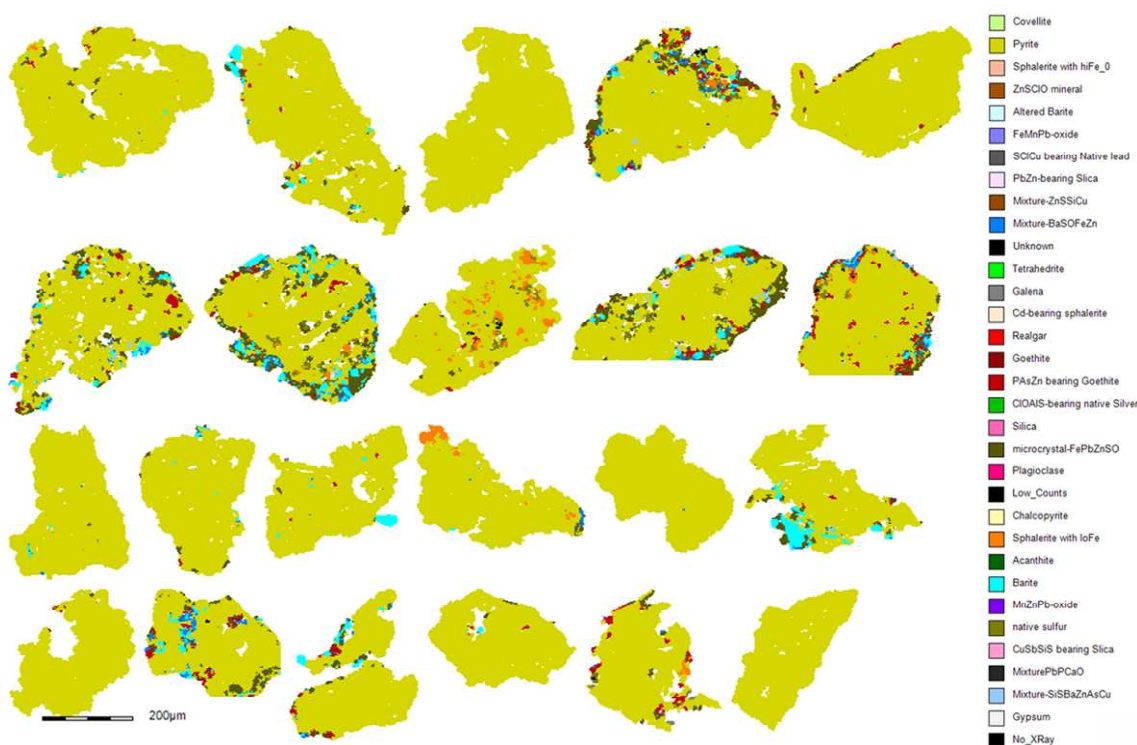


図 25 沖縄海域試料の鉱物粒子像

(B) 伊豆・小笠原海域の試料を用いた選鉱基礎試験

伊豆・小笠原海域ベヨネース海丘で採取した複数の試料に対して調査を実施した。最初に、粉碎性や有価元素の存在形態、選鉱によるヒ素除去の可能性など、選鉱学的な特性評価を実施した。試験に用いた試料は採取した部位ごとに組成が異なるが、実際の採鉱時には、これらが一緒に揚鉱されることも想定されるため、まずは、各部位に選別するための選鉱法を検討した。その結果、比重選別法の一つであるジグによって選別が可能であり、各部位が混合された試料を、各種金属を含む中品位試料、高品位試料及び低品位試料の 3 種に選別できることが明らかとなった。高品位試料の亜鉛品位は亜鉛精鉱に近いものであり、直接、酸化焙焼して湿式亜鉛製錬に投入できる可能性を検討した。また、銅、鉛、亜鉛等が共存しているため、製錬に供する前に浮遊選鉱等により銅、鉛、亜鉛精鉱に選別することが可能であるかを検討した。低品位産物は、品位は低い但有価金属又は不純物が含有しており、その回収や除去をケミカルリーチング及びバイオリーチングを利用して実施することを検討した。

5 年間で分析した 6 種の伊豆・小笠原海域パワーグラブ試料（他にチムニー試料 1 種）は、銅、鉛、亜鉛、金、銀が共存する亜鉛品位が 50% 以上の高品位試料、珪酸塩や重晶石などが主体となった試料に分類される。顕微鏡観察により、多くの試料が数 mm の塊が凝集したような形態を有することも確認された。これらの試料は、混合しても、粗粒段階で比重選別（ジグ）により比較的容易に選別可能であった。図 26 は、鉱物粒子解析装置による鉄、シリカ系の鉱物を対象とした、主として 200 μ m 以上の粒子に対する鉱物粒子像の一部である。黄鉄鉱等の硫化鉄鉱物はこの粒度でも単体分離に近い状態の粒子も観察された。硫化鉄鉱やシリカの一部は、粉碎により粗粒段階で単体分離されて選鉱による選別の可能性が高いことが示唆された。

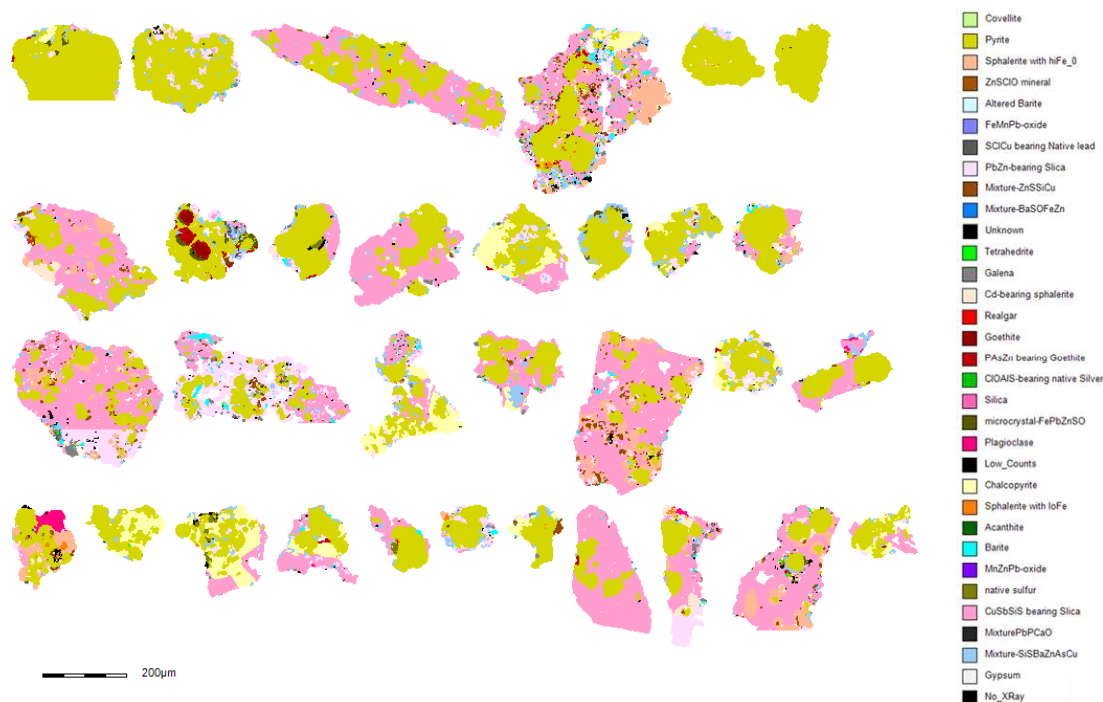


図 26 伊豆・小笠原海域試料の鉱物の鉱物粒子像

②選鉱スケールアップ試験

選鉱基礎試験の結果等を踏まえ、沖縄海域伊是名海穴で採取されたボーリング及びパワーグラブ試料を用いて、スケールアップ試験を実施した。

ボーリング試料を用いた試験では、鉱物学的特性を調査した後、破碎試験、銅・鉛・亜鉛を一括して回収するバルク精鉱回収試験、分離試験を実施した。試験に当たっては、粉碎粒度、浮選試薬（抑制剤、捕収剤）、浮選時間による影響、金の挙動等を調査した。その結果、銅・鉛・亜鉛のバルク浮選では、浮選時間 10 分以上でそれぞれ 80%以上の採取率を得るなどの結果が得られた。

また、沖縄海域でのマウンド表面 13 地点から採取したパワーグラブ試料を混合し、鉱物同定、浮遊選鉱試験を実施した。選鉱試験に用いた試料の主要成分の品位は、銅：0.4 %、鉛：3.7 %、亜鉛：7.1 %、金：5.0 g/t、銀：301 g/t、ヒ素：6,700 g/t であった。黒鉱処理で実績の有する手法などを含め、粉碎粒度、pH、試薬等の条件を変えて、計 58 回の浮選試験を行った（写真 10）。これらの浮選結果を踏まえ、銅・鉛セミバルク浮選でまず銅・鉛鉱物を浮遊させ、次に亜鉛浮選で亜鉛を回収し、

硫化鉄浮選で鉄を回収する連続する連続選鉱フローを提案することができたが、回収率の向上が課題である（図 27）。



写真 10 選鉱試験（浮遊選鉱）

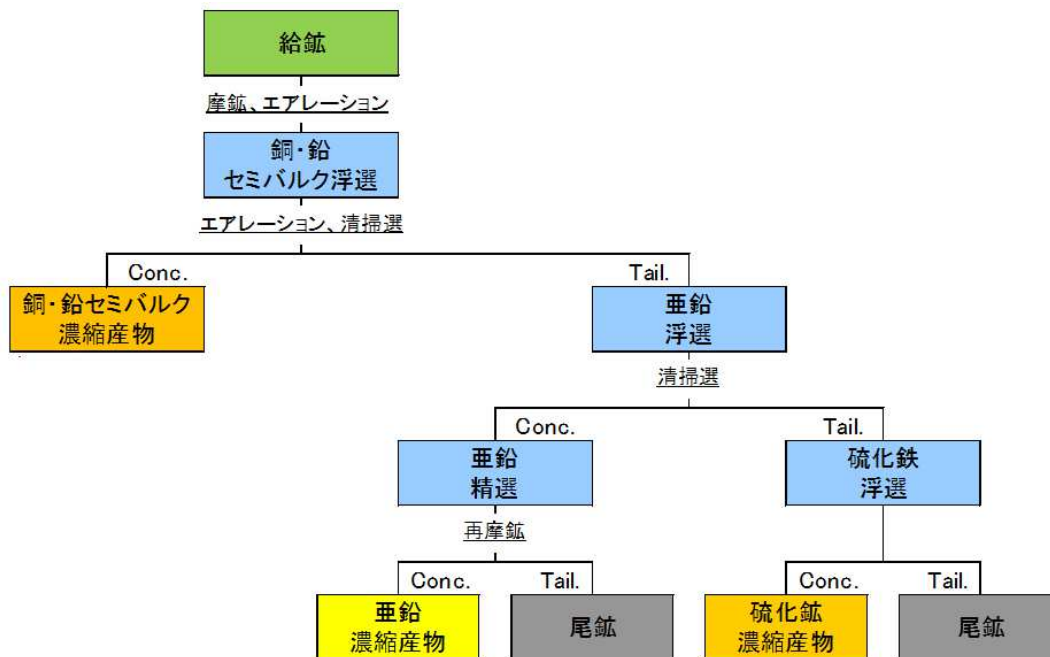


図 27 沖縄海域混合試料の選鉱フローシート

③製錬基礎試験

沖縄海域伊是名海穴の試料は、微細組織による単体分離性等の問題で、生産段階では選鉱により精鉱の回収が困難な場合が想定される。このため、乾式製錬により、直接的に未選鉱鉱石から銅、鉛、亜鉛やその他の有価金属を分離回収し、同時にヒ素を濃縮回収する技術について検討するため、還元溶錬試験を行った。この結果、鉛と亜鉛を揮発分離し、銅含有マットとスラグに分配できることを確認し、金属硫化物を原料として直接製錬が可能となるフローシステムを提案した（図 28、図 29、写真 11）。

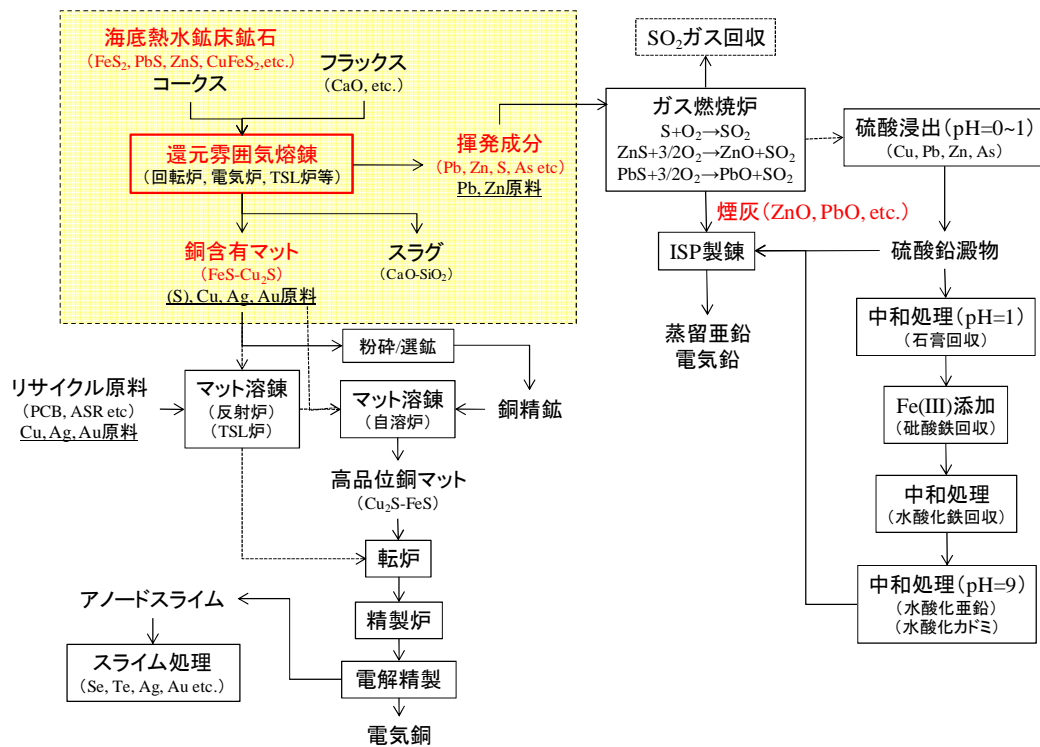


図 28 直接製錬の全体フロー

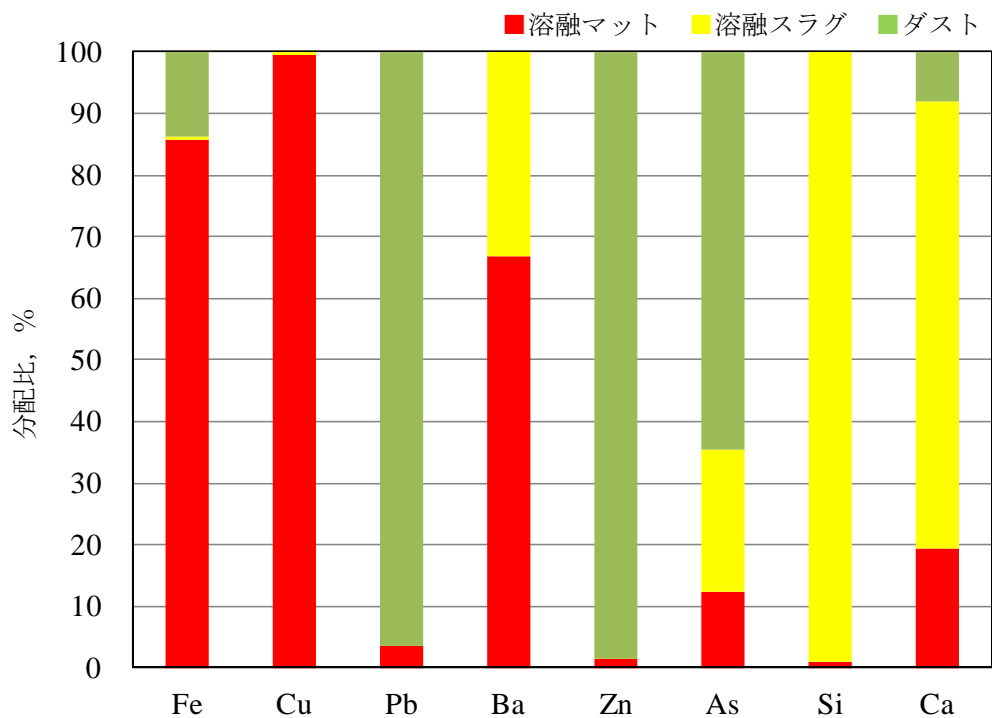


図 29 各元素のマツトースラグーダスト間分配比
(1,500°C、120 min、0.5 L/min)



写真 11 実験後スラグと実験後マツト

伊豆・小笠原海域ベヨネース海丘で採取された高品位亜鉛試料について、直接製錬を行うことを想定し、ばい焼試験を実施した結果、亜鉛原料として利用可能であることが判明した。

④その他

海底で鉱石と非鉱石の物理選別の可能性を検討するため、模擬鉱石や実鉱石を用いて予察的試験を実施した結果、選別できる可能性を見出した。

3) 新技術の検討結果

①ケミカルリーチングの検討

伊豆・小笠原海域及び沖縄海域の両試料とも、硝酸を浸出液に用いた場合、亜鉛、銅、鉄、鉛、ヒ素の浸出率が最も高くなることを確認した。また、ヒ素の浸出率も亜鉛と同程度と高い傾向にある。なお、浸出に塩素を添加した場合、浸出速度及び浸出率の向上が見られた他、金及び銀に対しても高い浸出率が得られた（図 30）。

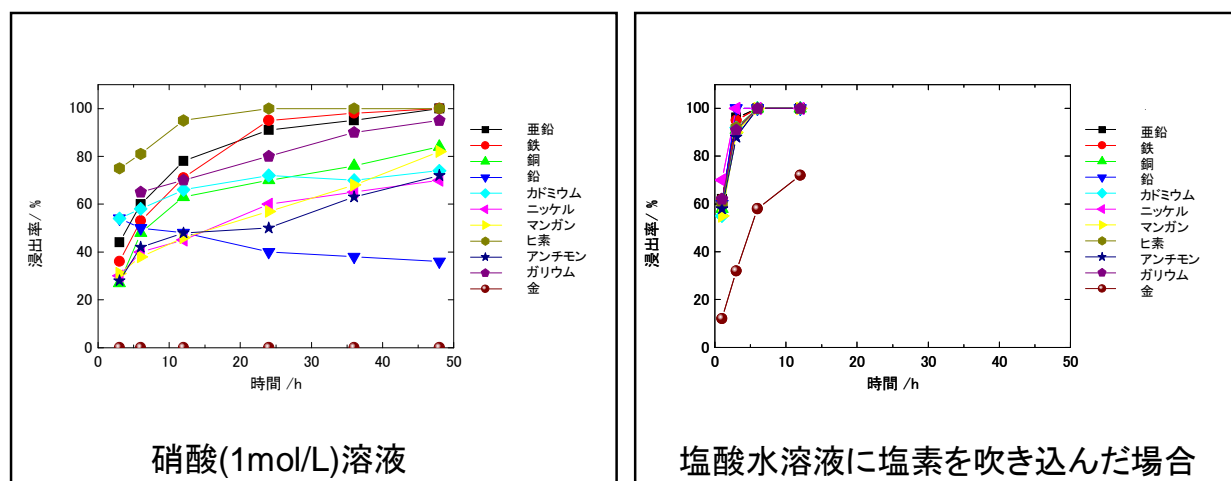


図 30 ケミカルリーチングにおける各元素の経時変化

②バイオリーチングの検討

中温性鉄酸化細菌(*At. Ferroxidans*)を適用することで、含有している有価金属をほぼ溶出させることが可能であることを確認した（図 31）。ただし、尾鉱に含まれている鉛、金及び銀は溶出しないため、バイオリーチングのみでそれらの元素を回収することは不可能である。

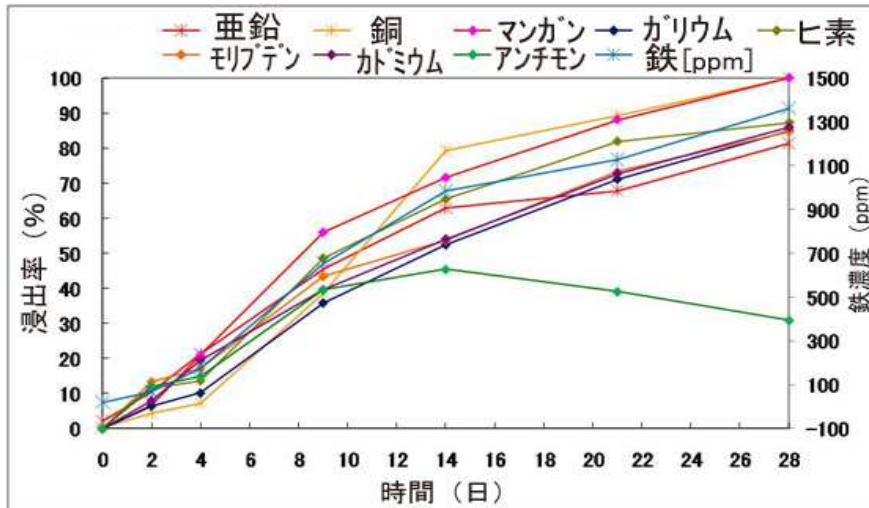


図 31 中温性鉄酸化細菌によるバイオリーチングにおけるベースメタルの経時変化

ケミカルリーチング及びバイオリーチング手法では、個別の金属の分離抽出、回収率向上について今後検討が必要であるが、まずは大量の残渣処理の問題解決が重要であることから、中間評価をもって検討は終了した。

4) 選鉱パイロットプラントの概念設計

国内に 500 kg/時規模のパイロットプラント設備を建設することを想定して概念設計を行った (図 32)。

処理系統は、鉱石の受入、水洗、破碎設備及び摩鉱、浮選、精鉱処理設備から成り、選鉱廃さいはフィルターでろ過後廃棄処分とした。

操業形態は、受入、水洗、破碎設備は 1 方/日操業とし、摩鉱工程以降は 24 時間/日操業とするとした。

その他の設計条件は次の通りとした。

- 受入設備： 受入鉱舎容量 150t
- 水洗・破碎工程:処理量 2,000 kg/時 (7 時間/日操業)
- 摩鉱、浮選、精鉱処理工程： 処理量 500 kg/時 (24 時間/日操業)
- 浮選・精鉱処理工程： 浮選工程は 2 系統からなり、各々摩鉱産物及びスライム鉱を処理する。

ただし、現時点で選鉱試験による最適パラメータが得られていないこと、必要とする試料の量の確保などの課題解決を優先させる必要がある。

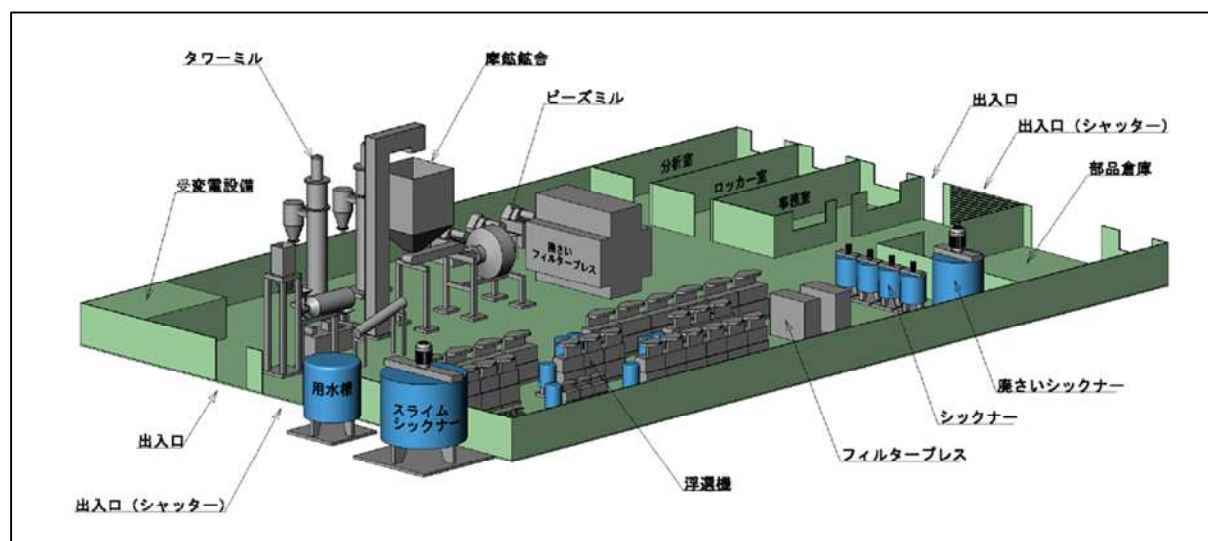


図 32 パイロットプラント設備配置鳥瞰図

5) 実操業規模の選鉱設備の概念設計

選鉱処理設備は、受鉱、破碎、摩鉱、浮選、精鉱処理、廃さい処理設備からなり、また、付帯設備は受電設備、用水・飲料水設備、試薬受入・溶解設備、分析室、試験室、事務所などからなることを想定し、過去の陸上鉱山での知見を踏まえつつ検討を行った。

選鉱場の設置場所は、国内、離島などが想定されるが、比較的採掘海域に近い離島内での建設を想定して、操業主要基準を以下のとおり設定して検討を行った。また、堆積場は陸地に外盛式アースダム(石塊及び粗粒廃さいで堤体を形成)を建設することを想定した。

<採掘鉱量>

- ・ 1,284 千 wt/年 (採掘日数 268 日、採掘量 4,792 wt/日)
- ・ 採掘年数 15 年

<受入鉱量>

- ・ 年間受入鉱量 1,130 千 dt/年 (含水率 12%とする)
- ・ 内塊鉱 3,374 dt (3,552 wt)
- ・ 細粒鉱 843 dt (パルプ濃度 8.0%)

<選鉱処理方法>

- ・ 操業形態:24 時間連続操業（12 時間勤務 2 交代制）
- ・ 23 日連続操業（7 日点検休止）
- ・ 選鉱処理量:4,200 t/日（175 t/時、SAG ミル給鉱量 140 t/時）

<選鉱場立地場所>

- ・ 選鉱場立地地点：採掘場所から 200km 程度以内の買電、河川水使用可能な地域を想定。
- ・ 選鉱場の建設場所：港湾設備に接近した地域。廃さい堆積場は選鉱場周辺の山間地に建設を想定。

本設計による選鉱実処理設備の設備配置鳥瞰図を図 33 に示す。

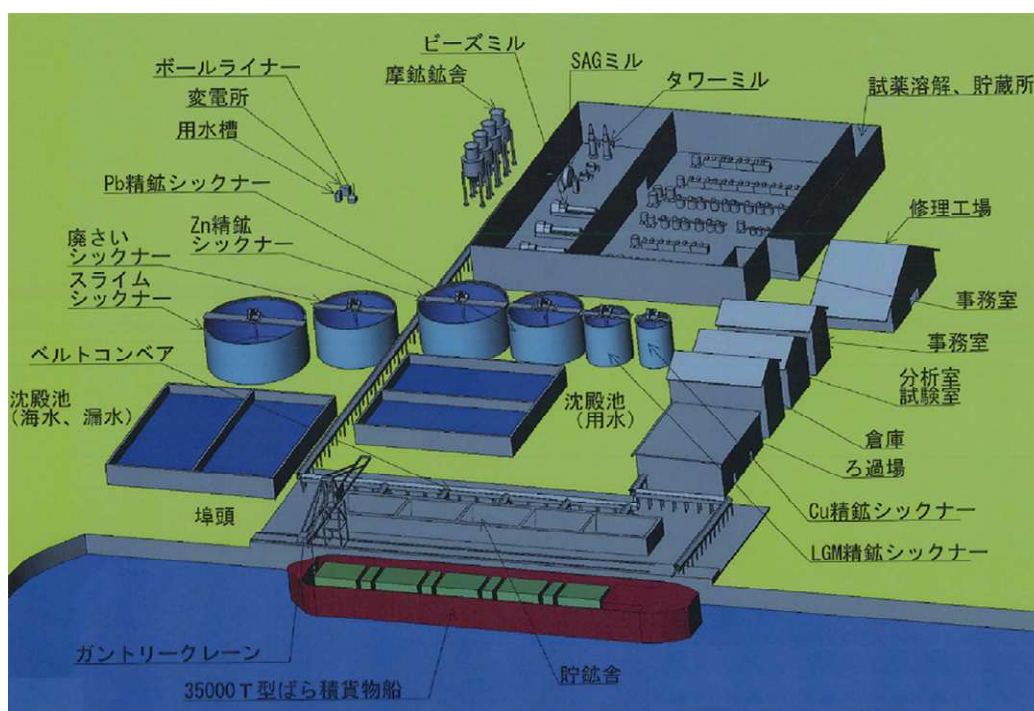


図 33 選鉱実処理設備の設備配置鳥瞰図
(廃さい堆積場は省略)

6) 選鉱実操業設備の設置に伴う法的規制について

選鉱操業設備は、貯鉱場、乾燥場、選鉱場、精鉱場、捨石・廃さい堆積場、沈殿濃集設備、排水処理設備、化学分析設備等で構成される。

また、選鉱場は、破碎設備、磨鉱設備、分級設備、選鉱設備、脱水設備などで構成され、これら設備は環境規制の対象となる。

環境関連法には、上位法から、環境基本法、鉱業法、鉱山保安法及び一般法（大気汚染防止法、水質汚濁防止法、改正土壌汚染対策法、騒音規制法、振動防止法、悪臭防止法、廃棄物処理法等）がある。

鉱業法は、国際的な資源競争の激化及び、資源を巡る国際緊張関係の増加に対応するため改正され、改正鉱業法として平成24年1月21日から施行され、海底熱水鉱床のように資源確保上極めて重要な鉱物は、改正鉱業法の趣旨と整合的に、海底採掘場から離れた選鉱操業施設でも（山元でない選鉱操業施設でも）、改正鉱業法下で規制されている。

現行では、鉱山採掘場（山元）を有する鉱山は、鉱山保安法の対象となっているが、鉱山採掘場を有しない、買鉱による製錬所は、鉱山保安法の対象外となっている。ただし、採掘も製錬も実施していない、休廃止鉱山の坑廃水処理施設は鉱山保安法の対象となっている。

選鉱操業設備は、従来の陸上資源では、鉱山採掘場の密接に関連して設置されているものであったが、海底熱水鉱床等の海底鉱物資源の場合、選鉱操業設備が、採掘場所（海底）の近い場所に建設するのは、廃水量、廃さい量及び周辺環境影響の観点から極めて難しい。

一方、国内の鉱山廃水処理施設、又はその技術を有する場所で実施する場合は、環境規制への適合技術が整備され、迅速に対応できる可能性が高い。海底鉱物資源（海底熱水鉱床）が海底から採掘され、国内で選鉱される場合は、採掘場とは離れた場所に、選鉱操業設備を設置することが予想される。

現行の鉱山保安法では、このような採掘現場から離れた場所に選鉱操業設備を設置することを想定していない。海外から選鉱済みの鉱石（精鉱）を購入して製錬を行っている現状のシステムの処理と異なり、採掘現場以外の場所で、多くの鉱山設備を設置する必要があり、実態に即した法整備が必要である。

5. 2 実証試験候補海域の選定

資源量評価では、主に沖縄海域伊是名海穴及び伊豆・小笠原海域ベヨネース海丘において調査を実施し、海底熱水鉱床の資源情報の蓄積を図ってきた。特に、伊是名海穴に設定したモデルマウンドにおける集中的な調査の結果から、伊是名海穴はベヨネース海丘に比べ品位は高くないが資源量としては規模が大きいことから、資源量評価では伊是名海穴が優位であると判断される。

環境影響評価では、同海域及び周辺において、生物を対象とした遺伝子解析を行った結果、それぞれの海域に固有の種は確認されなかった。また、予察的に影響予測シミュレーションを行った結果では採掘による懸濁粒子はカルデラの外に拡散しないことを確認した。

採鉱技術においては、当該モデルマウンドを中心に、マウンドの詳細な岩盤状況を把握し、マウンド表面はチムニーの崩壊で形成された巨礫（最大で1m程度）に覆われていることが判明し、これらの結果から地山モデルを構築し、それを踏まえた採掘要素技術試験機の製作等が進められている。

選鉱・製錬技術では、両海域から取得した試料を用いて、基礎的な実験を行った結果、それぞれの海域の鉱物特性に合わせた別の処理プロセスが必要と判断された。

各分野の検討の結果、資源量が見込まれ、生物多様性の維持が可能であり、岩盤特性、選鉱・製錬特性が比較的把握できている点を考慮すると、将来の実証試験を実施する候補海域を、沖縄海域伊是名海穴を優先順位1位とし、伊豆・小笠原海域ベヨネース海丘を2位とすることが妥当であることが中間評価の段階で選定された。

6. 第1期評価期間における個別技術分野の評価

6. 1 資源量評価

1) 資源量評価

資源量評価は、沖縄海域伊是名海穴内 Hakurei site を対象に実施した。

国際基準に従い計算した結果、伊是名海穴において、予測鉱物資源量に相当するカテゴリーで最大 340 万トンと推定した。

今回の算定にあたっては、これまでに「第2白嶺丸」で採取した 121 孔のボーリングコア試料の分析値を使って計算したものである。鉱量計算では地質モデルの作成、岩相区分、分析値の検証、ブロックモデルの設定、品位・比重推定等から鉱量の集計を行った。

国際的な鉱量計算に基づき、これまで蓄積されたボーリングデータを網羅して、第一義的な資源量評価のデータを得ることができたとみなせる。

一方、これまでの調査によりマウンド内部は全て硫化物で構成されていると推定されるものの、熱水活動の強弱及び熱水通路の変化でかなり複雑になっていると推定する。ボーリングコアの回収率は 100% ではないこと、ボーリング間隔から探査段階は予測鉱物資源量に相当する。ボーリングコア回収率は、硫化物の性状以外にも掘削条件やボーリングサイトでの姿勢などの要因を明らかにしない限り、より確度の高い資源量評価に達するものではなく、十分とはいえない。

また、伊豆・小笠原海域では AUV 及び ROV で取得した海底精密地形、海底観察、電磁調査、BMS による掘削 26 孔等を実施し、鉱床調査に必要なデータを取得した。

伊豆・小笠原海域では、国際基準に準じた資源量の算定を実施したが、ボーリング本数が少なく十分に鉱体の形を描くことができていない為、資源量を算定できるレベルには達しなかった。

2) 資源量把握のための調査

沖縄海域では、海底熱水活動が広範囲に認められる伊是名海穴内のモデル鉱床を中心に、マルチビーム測深機を用いて垂直分解能 1m 及び 20cm の精密な海底地形図を作成した。海底地形から Hakurei site には、北部と南部に直径 100m 前後の円錐型の 2 つの大きなマウンドと、従来確認できなかった大小様々なマウンドが存在することが明らかとなった。

また、曳航式深海テレビカメラや ROV によって当該海底を観察した結果、マウンドの表面は、海底熱水鉱床の礫やチムニーからなり、マウンド裾野にはシルト質から泥質の軟弱な堆積物が分布していることを確認した。

北部及び南部モデルマウンドにおけるパワーグラブ及びボーリング調査の結果、i) マウンド頂部の内部は全て金属硫化物（最大深さ 25m）が採取されたこと、ii) マウンド表面は金属硫化物の礫で構成されることから、マウンド内は、全て金属硫化物で構成されるものと推定される。

Hakurei site 北部マウンド裾野において、海底面下 30m 付近の堆積岩類の下部に新たな硫化鉱物帯の存在を確認した。これらの硫化鉱物帯はさらに深部に連続する可能性がある。

資源量調査により、既知鉱床以外に潜在する新たな鉱床の発見に至ったことなど、世界をリードする成果を得ており、達成度は高いと評価できる。

3) 広域調査

沖縄海域では、新たな海底熱水鉱床を発見するため、海底熱水鉱床の徴候が確認されている 13 海域で海底地形調査、曳航式深海テレビカメラ、ROV 及び AUV による海底観察を実施した。その結果、3 箇所、新たに海底熱水鉱床の存在を示唆する熱水変質帯、海水の濁度異常地帯、チムニー状地形を確認した。

伊豆・小笠原海域においては、海底熱水鉱床の徴候が確認されている 15 海域で沖縄海域と同様の広域調査を実施した。その結果、4 箇所、熱水鉱床の存在を示唆するチムニー状地形、熱水変質帯、海水の濁度異常を確認した。

広域調査ではデータ収集と全体的な解析が課題として残されている。さらに音響調査、サンプリング等による探査指標の構築等についても、今後積極的に取り組む必要がある。

6. 2 環境影響評価

1) 環境基礎調査

環境基礎調査は、海洋生物学の専門家及び環境影響評価モデリング専門家で実施し、適切な実施体制で行われたと評価できる。

沖縄海域伊是名海穴及び伊豆・小笠原海域ベヨネース海丘の周辺域で環境基礎調査を実施し、熱水域及び非熱水域の生物試料の採取、生物群集の出現状況の把握、水温・塩分・水質の鉛直分布特性等の把握を行い、適切に調査方法が行われたとみなされる。

さらに、伊是名海穴及びベヨネース海丘で年間を通じて鉛直的な流向・流速及び沈降粒子量や粒子起源等の把握を行い、適切な方法・期間で行われたとみなされる。

2) 環境影響予測モデル開発

海穴内には熱水プルームにより重金属やヒ素が広汎に広がっており、生態系は特殊な環境下にある。しかし、採掘による懸濁粒子の拡散・再堆積の影響についてはあらかじめ見積もる必要があり、海穴内外への影響、海水コラム中への影響についても注意して監視する必要がある。

採掘による懸濁粒子の拡散・再堆積の影響では、懸濁粒子の再堆積の厚さの水平分布と垂直分布は狭い範囲に限られていると予測した。また、揚鉦排水の拡散の影響では、濃度の高い懸濁粒子は拡散されながら、流れ場の下流方向に移流し、低濃度となると予測した。さらに、熱水域及び非熱水域を含む生態系への影響では、熱水特有表在性動物、非熱水特有表在性動物、硫黄酸化細菌、埋在性動物、堆積物中バクテリア、近底層バクテリアが初期現存量まで回復に要する時間を確認した。このような環境影響予測モデルの手法は、採掘による影響の見積もりと監視について適切に行われたと評価できる。

底生生物への影響・回復の予測及び評価手法の検討では、伊是名海穴における化学合成生態系の基礎生産者である硫黄酸化細菌及び熱水域、非熱水域の表在性動物の現存量、海底攪乱及び再堆積による増減、回復予測時間等を定量化し、適切な環境影響評価モデルの検討を行ったと評価できる。

3) 採掘要素技術試験のための予察的環境影響予測・評価

採掘要素技術試験の予察的な環境影響予測・評価を行い、海外で先行

する事例と比べても多項目な環境影響評価方法の設定を行い、十分な検討を行ったと評価できる。

懸濁粒子の拡散・再堆積モデルの開発では、採掘要素技術試験のデータをモデルに組み込み、濁りや有害金属の高濃度拡散範囲、有機物や有害金属の再堆積濃度、水中騒音の影響は、伊是名海穴内の限られた範囲であることを予測した。また、採掘試験時の濁度は速やかに試験前の値に戻ることで、堆積物中の重金属濃度、化学組成や水質は試験前と変化しないことから、周辺環境に深刻な影響を生じさせないことを予測・評価し、適切な予察的環境影響予測及び評価を行ったといえる。一方、流れ場の再現は予測と実測の流向が異なり、より微地形を考慮した再現が必要である。

4) 環境影響モニタリング調査

採掘要素技術試験に先立ち、試験海域周辺や鉛直方向、採掘要素技術試験機にモニタリング機器を装備し、環境特性を測定した。また、採掘試験後に試験箇所近傍で水質、底質、生物等の環境影響項目のサンプリングを実施した。海水の濁度異常は、試験終了後すぐに環境ベースライン調査の値の範囲内となり、その他の調査項目についても環境ベースラインの値の範囲内であることが確認し、実際の試験からは周辺環境に対する深刻な影響は認められなかった。これらの環境影響モニタリング調査は、適切な調査項目で行われたと評価できる。

ただし、今年度実施した採掘要素技術試験では、試験機の実稼働時間が想定より短く、さらなるデータ収集と全体的な解析が必要である。

5) 環境保全策の検討

海域の遺伝的多様性の維持、採掘区内の個体群の回復を検討するため、海域間の遺伝的交流の確認、個体群の供給源の調査を行った。沖縄海域ではゴエモンコシオリエビ等 14 種、伊豆・小笠原海域では、ユノハナガイ等 7 種を解析対象とした。これらの種はいずれも海域間で遺伝的な交流があり、現時点では、伊是名海穴あるいはベヨネース海丘に固有の種はいないことを確認した。また、伊是名海穴及びベヨネース海丘は遺伝子の供給源ではないとした。このような海域間の遺伝的交流の確認等は、適切な環境保全策の検討を行ったと評価できる。

今後は、より適切な保全策を講じるために、熱水性生物だけでなく、非熱水性生物についても遺伝子解析を実施する必要がある。

6. 3 資源開発技術（採鉱技術）

1) 採掘基礎条件の検討

海底熱水鉱床採掘システムの開発には水深約 2,000m の海底から海上に至る過酷な自然条件を克服するための高度な技術が種々必要とされる。

本事業では、海底熱水鉱床の徴候が確認されている沖縄海域を対象に採鉱システムについて検討を行った。

ボーリングデータからマウンドの物性の比較を行い、硬度の弱い表層に対して中層の硬質部で銅含有量が高いとしたが、さらに密度、品位、一軸圧縮強度などからのマウンド内の物性の検討が必要である。

対象海域での公開海気象データを基に、設計波高(暴風時)及び発現頻度分布について検討し、オペレーション条件を想定した。

生産規模の想定では、粗鉱品位を採取済み鉱石コアの銅換算品位 5% として日粗鉱生産量（湿潤重量）5,000wt/日、操業年数 15 年を目標とすべき採鉱基礎条件とした。

2) 採鉱システムの要素技術検討

①採掘ユニットの検討

採掘ユニットは、マウンドを整地・造成するための補助掘削機と本格的に採鉱を行う採鉱機・集鉱機及びフレキシブルホースで構成されると想定した。採鉱機はクローラ方式とし、実証試験機のプロトタイプ設計・詳細設計に資するデータを取得することを目的とした2種類の採掘要素技術試験機を開発し、沖縄海域で採掘・走行試験に成功し、要素技術（掘削・集鉱・走行）に係る試験データを蓄積した。

最適な採掘ユニットの検討については、基礎的な知見、設計データを得た。しかし、採掘対象が泥、砂を含み大きさ・硬さの異なる複雑な鉱石形態であることや、海底での可視化技術等、実機開発に向けた技術的課題も抽出され、残された課題は多い。

採鉱方法については、さまざまな賦存状況に対応できるように採鉱メニューを整備し、採鉱機械の多様化を検討するとともに、資源量評価分野の掘削対象の地盤特性等の詳細把握の進捗に応じて適宜見直し再評価を実施していく必要がある。

②揚鉬ユニットの検討

揚鉬方法、ライザータイプの比較検討により、揚鉬ユニットの構成としてリジッドライザーによるターボ型水中ポンプ方式を選定し概念設計を実施し、基礎的な知見、設計データを得た。

揚鉬ユニットは、揚鉬管やポンプ等の材料等の詳細仕様について鉬石のスラリー移送による磨耗や腐食の影響を考慮した検討が必要である。

③採鉬母船ユニットの検討

最も作業が困難な海象条件を想定した場合でも、年間払い出し量124.5万wtが達成可能であることを前提に中央開口部を備え、DPSで定点保持を行う船型を選定し、概念設計を終了した。

採鉬母船ユニットの更なる詳細検討は採掘・揚鉬ユニットの仕様を定めた後に検討する必要がある。

3) 採鉬システム概念設計

採鉬システムの概念設計では、2つのケースを例にとり、採掘・揚鉬・採鉬母船ユニットの仕様検討を行い、概念設計を行い、基礎的な知見、設計データを得た。

6. 4 製錬技術（選鉱・製錬技術）

1) 既存プロセスの検討結果

沖縄海域伊是名海穴及び伊豆・小笠原海域ベヨネース海丘で採取された鉱石の特性が異なり、さらに同じ海域内でも品位にかなりの違いがあることが判明した。

このため、それぞれの特徴を踏まえて選鉱フローを検討し、それぞれの鉱石の試料特性とその特性に応じた選鉱フローを提案した。

沖縄海域から採取された試料は、いずれも硫化鉱物の単体粒子径が小さいことに加え、鉱物特性が黒鉱型鉱床と異なること、鉱物種が複数であること、鉄分が多いことなどにより、従来の黒鉱での選鉱法をそのまま適用することはできず、それぞれの鉱石に沿った適正なプロセス開発のための課題を抽出した。

製錬技術については、沖縄海域伊是名海穴で採取した試料について、選鉱せず直接熔錬炉に投入する可能性を検討した結果、鉛、亜鉛の大部分は還元溶錬により揮発回収できることが判明した。一方、伊豆・小笠原海域ベヨネース海丘で採取された亜鉛を高品位に含有する試料について、酸化焙焼試験を実施した結果、現行の流動焙焼炉に亜鉛原料として利用できることを確認した。

最適な選鉱・製錬技術の既存プロセスの検討については、高品位鉱の鉛、亜鉛の回収が可能となり、所要の選鉱・製錬に必要な技術の一部は用意されたといえる。

2) 新技術の検討結果

バイオリーチング、ケミカルリーチングともに亜鉛や銅、その他微量金属の浸出が認められ、選鉱後の尾鉱から対象金属が溶解することが判明した。ただし、反応速度の問題等のため第1期前半にて検討を終了した。

3) 選鉱パイロットプラントの概念設計

国内に 500 kg/時規模のパイロットプラント設備を建設することを想定して概念設計を行った。処理系統は、鉱石の受入、水洗、破碎設備及び摩鉱、浮選、精鉱処理設備から成り、選鉱廃さいはフィルターでろ過後廃棄処分するとした。操業形態は、受入、水洗、破碎設備は1方/日操業とし、摩鉱工程以降は24時間/日操業とするとした。ほか設定条件と

しては、以下の条件で摩鉱産物及びスライム鉱を処理することとした。

- ・ 水洗・破碎工程：処理量 2,000 kg/時（7 時間/日操業）
- ・ 摩鉱・浮選・精鉱処理工程：処理量 500kg/時（24 時間/日操業）
- ・ 受入設備： 受入鉱舎容量 150t

4) 実操業規模の選鉱設備の概念設計

選鉱処理設備は、受鉱、破碎、摩鉱、浮選、精鉱処理、廃さい処理設備からなり、また付帯設備は受電設備、用水・飲料水設備、試薬受入・溶解設備、分析室、試験室、事務所などからなることを想定し、過去の陸上鉱山での知見を踏まえつつ検討を行った。

選鉱場の設置場所は、国内、離島などが想定し操業主要基準を設定して検討を行った。また、堆積場は陸地に建設することを想定した。

6. 5 総合評価

本報告書における評価は、冒頭の「第1期最終評価に当たっての基本的考え方」で述べたとおり、民間企業による海底熱水鉱床の開発を促すため、以下の各種リスクの低減に取り組んできた成果の総合評価である。

(1) 資源量評価分野

沖縄海域伊是名海穴内の海底熱水鉱床において、国際基準に準拠した資源量計算の結果、中間評価の段階で250万トンとした予測鉱物資源量は、鉱床のマウンド表層部で最大340万トンとなることが判明した。これに加えて、平成24年2月から新たに運航を開始した海洋資源調査船「白嶺」による深部掘削調査の結果、海底面下30mより深い深度に、海底熱水鉱床の新鉱体が存在することを確認したが、その連続性を捕捉するまでには至らなかった。

深部の新鉱体に対する資源量計算は、今後、深部掘削調査を継続し、新鉱体の形態を明らかにした後、試算する必要があるが、表層部と深部を合わせた伊是名海穴内の全資源量は、前回の中間評価で算定した500万トンを上回る可能性がでてきたことは大きな成果と言える。

中間評価の段階で得られた、我が国経済水域に伊是名海穴と同規模の海底熱水鉱床が10箇所程度分布し、全体で概略資源量5,000万トンという算定は、上記発見を踏まえると、超える可能性が出てきており、第1期の目標は十分達成できたと考え、第2期に移行しても問題ないと判断される。

(2) 環境影響評価分野

海洋においても、資源開発に先駆けて環境影響評価を行うことが不可欠である。海洋基本計画の18条では「科学的知見を踏まえつつ、海洋環境に対する悪影響を未然に防止する」ことも求めている。また、ISAの「深海底における多金属硫化物の概要調査及び探査に関する規則」(マインニングコード)では、規則33に「海洋環境の保護及び保全」、規則34に「環境ベースライン及び監視」を定めている。

沖縄海域伊是名海穴、伊豆・小笠原海域ベヨネース海丘周辺域での環境基礎調査では、熱水域及び非熱水域の生物試料の採取、生物群集の出

現状の把握、水温・塩分・水質の鉛直分布特性の把握を行い、適切な調査方法で行われたと評価できる。

環境影響予測モデル開発では、採掘に伴う懸濁粒子の拡散・再堆積は狭い範囲に限られること、揚鉱排水の拡散の影響は拡散され低濃度になることを予測し、生態系の影響では回復に要する時間を確認した。このような環境影響予測モデルの手法は、採掘による影響の見積もりと監視について適切に行われたと評価できる。

採掘要素技術試験の予察的な環境影響予測・評価、環境影響モニタリング調査は、水質、底質、生物等の予察を行い、実際の試験からは周辺環境に対する深刻な影響は認められなかった。海外で先行する事例と比べても多項目な環境影響評価方法の設定を行っており、十分な検討を行ったと評価できる。

環境保全策の検討では、伊是名海穴あるいはベヨネース海丘に固有の種はいないこと、遺伝子の供給源ではないことが確認された。海域間の遺伝的交流等の検討は、適切な環境保全策の検討を行ったと評価できる。

また、これらの環境影響評価方法の設定は、国際的な環境ガイドライン構築の取り組みを開始したと言え、環境影響モデル設計・開発を念頭とした第1期の目標は十分達成できたと考えられる。

(3) 資源開発技術（採鉱技術）分野

中間評価時の予備的経済性検討により商業採掘規模を1日5,000トンとして、海底熱水鉱床の採鉱システムを構成する3つのサブシステム（採掘、揚鉱、採鉱浮体）の最適方式を検討した。

特に採掘システムについては、沖縄海域伊是名海穴内の海底熱水鉱床で、2種類の採掘試験機を用いて、世界初の走行・掘削試験に成功し、これにより、将来の実機開発に向けて有意義なデータを取得した。一方試験の結果、採掘対象が泥、砂を含み大きさ・硬さの異なる複雑な形態であることや、懸濁下での可視化技術の開発、揚鉱技術の本格開発など、新たに解決すべき技術課題も抽出されたものの、第1期の目標はほぼ達成できたものと考え、第2期に移行しても問題ないと判断される。

(4) 製錬技術（選鉱・製錬技術）分野

鉱床表層部の異なる特性の鉱石を用いてその特性に応じた選鉱・製錬

フローを提案することができた一方、有害物質の処理、貴金属回収等、より重点的に取り組むべき技術課題も抽出された。また、選鉱パイロットプラントの基本的な設計を完了し、国内での建設を想定した選鉱場の概念検討を行うことができた。さらに既存製錬所での処理フローを想定した製錬プロセスを提案できた。鉱石の性状が複雑であり、選鉱実収率のさらなる向上は大きな課題であるものの、第1期の目標はほぼ達成できたものと考え、第2期に移行しても問題ないと判断される。

以上、これらの結果を総合すれば、第1期は想定以上の大きな成果が得られたものと判断され、第2期に移行することが妥当であると判断される。

7. 課題と今後の提言

本年4月に閣議決定された新たな海洋基本計画では、「国際情勢をにらみつつ、平成30年代後半以降に民間企業が参画する商業化を目指したプロジェクトが開始されるよう、既知鉱床の資源量評価、新鉱床の発見と概略資源量の把握、実海域実験を含めた採鉱・揚鉱に係る機器の技術開発、環境影響評価手法の開発等を推進するとともに、その成果が着実に民間企業による商業化に資するよう、官民連携の下、推進する」としている。それに向けて必要な第1期の課題と第2期への提言について以下に示す。

7. 1 資源量評価

- 沖縄海域伊是名海穴の北部マウンド裾野でのボーリング調査により、海底面下30m付近から、堆積岩類の下部に潜頭する新たな硫化鉱物帯の存在を確認した。硫化物はボーリングの孔底まで連続し、これらの潜頭性鉱床は更に深部に連続する可能性があるが、海象の影響等により深部を確認することが出来なかった。一方、表層部では予測鉱物資源量を340万トンと算出することができた。今後は、マウンド周辺の更に深部に対する掘削を行い、電磁探査法等新たに得られたデータと連動して鉱床の全体像を捉え、当該鉱床の詳細資源量を確立する必要がある。
- 伊豆・小笠原海域ベヨネース海丘では、ボーリング密度がまだ低く、国際的な基準に基づく資源量の算定には至らなかった。今後は沖縄海域同様、鉱床の全体像を捉え、当該鉱床の詳細資源量を把握する必要がある。
- 沖縄海域及び伊豆・小笠原海域で実施した計28海域の広域調査のうち、7海域で熱水鉱床の存在を示唆する熱水変質帯、海水の濁度異常地帯、チムニー状地形等を確認した。今後は、さらに音響探査、サンプリング等を実施し、得られたデータから鉱床賦存の指標を解析する必要がある。

○熱水活動を停止して海底下に埋没しているような鉱化帯については、ほとんど探査されていない。海底下に埋没している鉱物資源を探査することは技術的にも難しく、高精度で効率良く鉱体を把握するための探査機器、探査システムの開発が求められている。今後は大学等において研究開発が進められている金属探査センサーも組み入れながら未探査地域の探査を行う必要がある。

7. 2 環境影響評価

○環境基礎調査においては、海底面付近で、生物群集の出現状況、底質・底生生物の特性、水温・塩分・水質の特性を把握した。しかし、中層部・表層部の特性については調査がなされていない。今後は、海底面付近のみならず、表層部・中層部の生物・水質等ベースラインの把握、採掘試験時のモニタリングシステム、環境影響予測モデルなどを評価し、環境基礎調査の調査項目や環境影響評価方法等の妥当性の検証や、改良に取り組む必要がある。

○採掘要素技術試験による環境影響予測からは、濁りや有害金属の高濃度拡散範囲、再堆積濃度範囲、水中騒音の程度、懸濁物質の沈降速度等について、いずれも周辺環境への深刻な影響は生じないと判断された。ただし、環境影響モニタリング調査では試験機の実稼働時間が想定より短かったため、十分な観測値が得られなかった。今後は、採掘要素技術試験を長時間行い、影響を評価する必要がある。また、今回のモデル計算に用いた地形データは測点間隔が500mと粗く、海穴内の微地形の変化を反映していない。今後は、これまでに得られた微地形データを用いて、より精度の高い環境影響予測モデルの改良等を行う必要がある。

○海底熱水鉱床周辺域で生物多様性の保全の検討のため、遺伝学的研究として海域間の遺伝的交流、個体群の供給源を調査した。伊是名海穴及びベヨネース海丘では、周辺海域との間で熱水性生物の遺伝的な交流があり、かつ固有種はいなかった。しかし、非熱水性生物の影響については、調査が不十分である。今後は、非熱水性生物への影響についても遺伝子解析等を含めた検討を行う必要がある。

7. 3 資源開発技術（採鉱技術）

- 硫化物マウンドを対象とした採掘方法や採鉱機の仕様を検討するため、同マウンドの物性等を解析して地山モデルを検討したが、物性データが表層部に限られ、マウンドの全体像は未だ明らかとなっていない。今後は、深部ボーリング等により鉱床全体の地山モデルを構築する必要がある。また、海底面下に新たに発見された鉱化帯の形態を解明し、その採掘方法を検討するとともに、必要に応じて採鉱基礎条件を見直す必要がある。
- 採掘要素技術試験機では、懸濁物質が巻き上げられ、想定よりも視界不良となることが明らかになった。今後は、全く視界がきかない状況下でも、採鉱機械等の遠隔操作技術の確立、機体周囲の状況把握のためのセンサーやカメラ、ソナー等の高度化等を検討する必要がある。
- 揚鉱方法として、今期は、ポンプ式、エアリフト式、バケット式について、生産性、操作性、メンテナンス性、電力、コストの面から比較し、現時点では、総合的にポンプ式によるスラリー移送が優れているとした。今後は、鉱石のスラリー移送による磨耗や腐食に耐え得るシステムを構築するために、揚鉱管やポンプ等の材質等の仕様について検討する必要がある。さらに、実験装置による陸上での揚鉱試験の後、実際の海域での採掘・揚鉱・パイロット試験を実施する必要がある。また、破碎工程の必要性についても併せて検討する必要がある。
- 採鉱母船の仕様については、概念検討を行ったが、採掘・揚鉱の仕様が決まった後、詳細検討を実施すべきである。

7. 4 製錬技術（選鉱・製錬技術）

- 沖縄海域から採取された鉱石を用いた選鉱基礎研究を実施し、それらの鉱石の選鉱フローを提案したが、硫化物の単体粒径が微細という特徴のため、浮遊選鉱において選鉱実収率及び分離性が低かった。今後

は鉱物特性、カラム浮選・マイクロバブルカラム浮選の併用を含む浮選方式、微粒子比重分離・磁選等の検討により新プロセスを開発し、選鉱成績を高めることが必要である。また、今回発見した海底面下の硫化物の鉱石に適応する新たな選鉱フローを構築することが必要である

○採取した鉱石には、比較的高い濃度のヒ素・水銀等の有害元素、貴金属元素（金・銀）が含まれている。今後は、選鉱による有害元素の低減・除去方法を検討することが必要である。貴金属元素については、その存在形態を把握し、貴金属元素を含む鉱物の濃縮方法を検討することが必要である。

○沖縄海域の鉱石については、直接溶解炉に投入する還元溶解試験により、鉛、亜鉛の大部分が揮発回収できた。また、伊豆・小笠原海域の鉱石では、酸化焙焼試験により、現行の流動焙焼炉において亜鉛原料として利用できた。しかし、最適な選鉱・製錬技術の既存プロセスの検討については、部分的には用意されたが、各要素の連動性は乏しかった。今後は、選鉱・製錬技術の連動試験を実施する必要がある。さらに、その結果を踏まえて、環境基準を順守しつつ選鉱パイロットプラント、廃さい堆積場を建設し、試験することが必要である。

7. 5 第2期開発計画の実施体制

海底熱水鉱床開発計画の推進にあたっては、経済産業省から委託を受けた JOGMEC が実施してきた。JOGMEC では、事業の推進にあたり、産学分野の有識者から構成される委員会を設置し、助言・指導の下、着実な成果を挙げている。

第2期開発計画においては、海底熱水鉱床開発の事業化・産業化に向け、資源開発に対するリスクを自らも取れる企業の参画を促す必要がある。また、新規鉱床の発見と資源量評価の一層の加速化とともに、世界的に開発事例のない採鉱・揚鉱技術などの生産技術等を確立し、世界的に関心が高まりつつある熱水生態系の保全など、取り組むべき課題の多様化や高度化のため、各分野間の一層の連携を図る必要がある。

このため、今後は、委員会による審議に加え、多様化・高度化する課

題の解決に対応できる実施体制の構築も検討していく必要がある。

7. 6 未探査地域への取り組み

我が国の排他的経済水域（EEZ）等において、資源量拡大による海洋鉱物資源開発促進のため、他機関と連動して、有望海域の抽出、新鉱徴地の発見、資源量評価対象の鉱床の抽出を図る必要がある。

【参考 1】 Numis Securities Ltd. (2008)が掲げた Nautilus Minerals Inc. への投資のリスクファクター(1)

リスク項目	リスクの内容
Exploration risk (探査法に関するリスク)	海底熱水鉱床の鉱量が明らかにされた例がない。商業的な探査手法がなく、探査技術が海底に適用されておらず、マーケットが無い。
Mining and recovery risk (採掘、揚鉱リスク)	熱水鉱床はこれまで採掘されたことがなく、採鉱技術が確立していない。活動的な場所にあるので地震・噴火等の自然災害が起こる可能性がある。
Estimates of grades from samples (品位推定に関するリスク)	品位の推定が試料からなされている。科学研究による分析値は鉱床の品位を代表しない。
No production history (生産の歴史がない)	(Nautilus Minerals Inc.は)生産の経験を有しない。
Inability to find a suitable site for the concentrator (選鉱場の最適サイトがない)	必要な時期までに陸上に選鉱場を建設する見通しが無い。
Dependence on a small number of projects (経験値が少ないプロジェクトに依存)	現場の数が少なく、それらの一つに問題が生じたときに負の効果がおよぶ事がある。
Reliance on strategic relationships (戦略的パートナーとの信頼性)	損得勘定で結びついたパートナーとの関係を継続、構築してビジネスを実施しているが、さもないと信頼関係の理由が無く、それが今後も続く保証がない。

* 今回のケースに該当しない項目については省略してある。リスクの内容については簡略化してある。

【参考 1】 Numis Securities Ltd. (2008)が掲げた Nautilus Mineral Inc. への投資のリスクファクター(2)

リスク項目	リスクの内容
Grade, tonnage and resources (品位、資源量)	ボーリング、マッピング、品位分析を通して決定すべき、鉱床の産状、品位と鉱量が明らかでない。過去の開発事例もない。ボーリングのコア回収率が低く、品位分布が明らかでない。このため、得られた埋蔵鉱量が真のそれであるかどうか保証できないので、鉱区の価格に影響を与える可能性がある。
Metallurgy and treatment (選鉱・製錬リスク)	海底熱水鉱床から金属が回収された事がないため、鉱石の組織によっては、特別な選鉱・精鉱処理を必要とし、回収率が大きく変わることがある。有害元素や鉱物の存在によっては、経済性を持たないケースもあり得る。
Operational costs (操業コスト)	採鉱法が確定していないため、効率や信頼性が不明で、仮にそれが開発されたとしても、経済的かどうか不明である。
Safety at sea (海洋での安全性)	海洋における鉱業の安全性と従業員の健康、など。
Equipment risk (機器リスク)	採鉱機器の設計不備、性能不足、納期の遅れ等による計画の遅延、機器の故障による操業中断、気象条件、など。
Renewal of tenements and tenement application (鉱区更新リスク)	鉱区の更新や申請手続き。
Tenements risk (鉱区リスク)	現在探査の初期段階にあり、今後とも探鉱結果を出し続けられるか。
Dependence on the directors and key personnel (特定人材依存)	人員が限られており、キーになる個人を失うと、負の要素。

* 今回のケースに該当しない項目については省略してある。リスクの内容については簡略化してある。

【参考 1】 Numis Securities Ltd. (2008)が掲げた Nautilus Minerals Inc.
への投資のリスクファクター(3)

リスク項目	リスクの内容
Litigation (訴訟リスク)	訴訟が起こされる可能性
Financial resources (投資環境リスク)	開発資金が調達出来るか、また推定された起業資金額より多くかかるリスク。
Future funding requirements and risk (将来の資金需要リスク)	操業中の鉱山がないため、キャッシュフローを負債ないしエクイティーファイナンスから得る必要がある。それができなくなると操業停止の可能性。
Ability to exploit successful discoveries (発見能力)	今後とも探査に成功するか、鉱区の獲得が出来るか、それによる資金獲得が可能か。
Insurance risk (保険リスク)	損害保険によりすべての予測される損失がカバーされていない。鉱山災害、環境破壊、操業の遅延、資金不足、訴訟リスク、保証免除項目など。
Market risk (市場リスク)	金属価格の変動、税金やロイヤリティーの変化、環境保護問題など、予測できないリスク。
Commodity prices	金属価格、石油価格、エネルギー価格の変動。
Economic operations (経済的操業)	現有の内、限られた鉱区のみが生産に移行する。
Competition (競争リスク)	鉱業界は競争が激しく、低コストの鉱山が開発される可能性。
Vessel and equipment availability (船舶、機器確保)	世界的な探査活動の高まりにより、船舶、機器の確保が困難となっている。

* 今回のケースに該当しない項目については省略してある。リスクの内容については簡略化してある。

【参考 1】 Numis Securities Ltd. (2008)が掲げた Nautilus Minerals Inc. への投資のリスクファクター(4)

リスク項目	リスクの内容
Weather and sea conditions (気象・海象リスク)	悪天候による操業中止、事故、海水による機器の腐食。
Government regulation (カントリーリスク)	鉱業法の問題など。ノーチラス社の場合、PNG 鉱業法 1992 により政府は株式の 30%を取得する権利を有している。
Environmental risk and hazards (環境リスク)	海底熱水鉱床は開発されたことがないので、監督当局の要求を満たすためにどのような環境パラメータを測定しなければならないのか明らかでない。環境ベースライン調査はまだ終了しておらず、採鉱の環境に対する影響も不明。環境関連の法規はより厳密な基準と執行へ転換しつつあり、コンプライアンスの欠如に対する罰金と罰則の強化、より厳格な環境アセス、と経営陣への高い責任を負わせる方向に進んでいる。
Disruption from non-governmental organizations (NGO リスク)	他の鉱山と同様、非政府組織の圧力やロビー活動にさらされる可能性。

* 今回のケースに該当しない項目については省略してある。リスクの内容については簡略化してある。

【参考2】 海底熱水鉱床開発委員会委員名簿

平成25年3月現在

委員長	浦辺 徹郎	国立大学法人東京大学大学院理学系研究科 地球惑星科学専攻 教授
委員	後根 則文	住友金属鉱山株式会社 執行役員
	岸本 清行	産業技術総合研究所地質情報研究部門 資源テクトニクス研究グループ 主任研究員
	木川 栄一	独立行政法人海洋研究開発機構 海洋資源研究プロジェクト プロジェクトリーダー
	白山 義久	独立行政法人海洋研究開発機構 理事
	徳山 英一	国立大学法人高知大学 海洋コア総合研究センター長
	中村 崇	国立大学法人東北大学多元物質科学研究所 教授
	中村 年孝	パンパシフィック・カッパー株式会社 取締役 常務執行役員
	山富 二郎	国立大学法人東京大学大学院工学系研究科 システム創成学専攻 教授

計9名（敬称略：委員は50音順）

【参考3】 ワーキンググループ委員名簿

平成25年3月現在

<資源量評価ワーキンググループ>

- | | | |
|-----|--------|-------------------------------------|
| 部会長 | 徳山 英一 | 国立大学法人高知大学
海洋コア総合研究センター長 特任教授 |
| 委員 | 秋山 義夫 | 三菱マテリアルテクノ株式会社
顧問 |
| | 飯笹 幸吉 | 国立大学法人東京大学大学院新領域創成科学研究科海洋技術環境学専攻 教授 |
| | 石橋 純一郎 | 国立大学法人九州大学大学院理学研究院
地球惑星科学部門准教授 |
| | 浦辺 徹郎 | 国立大学法人東京大学大学院理学系研究科
地球惑星科学専攻 教授 |
| | 須山 俊明 | DOWAメタルマイン株式会社
資源・原料部長 |

計6名（敬称略：委員は50音順）

<環境影響評価ワーキンググループ>

- | | | |
|-----|--------|---|
| 部会長 | 白山 義久 | 独立行政法人海洋研究開発機構
理事 |
| 委員 | 秋山 義夫 | 三菱マテリアルテクノ株式会社
顧問 |
| | 小島 茂明 | 国立大学法人東京大学大学院新領域創成科学
研究科 教授 |
| | 中田 喜三郎 | 名城大学大学院総合学術研究科
特任教授 |
| | 橋本 惇 | 国立大学法人長崎大学水産学部海洋資源動態
科学講座教授 |
| | 福島 朋彦 | 国立大学法人東京大学海洋アライアンス
特任准教授 |
| | 山崎 哲生 | 大阪府立大学大学院工学研究科
海洋工学システム分野 教授 |
| | 山本 啓之 | 独立行政法人海洋研究開発機構海洋生物多様
性研究プログラム 技術研究主幹 |

計 8 名（敬称略：委員は 50 音順）

<採鉱技術ワーキンググループ>

部会長 山富 二郎 国立大学法人東京大学大学院 工学系研究科
システム創成学専攻 教授

委員 秋山 清悟 住友金属鉱山株式会社資源事業本部技術部
担当部長

加藤 俊司 独立行政法人海上技術安全研究所
海洋開発系長

坂本 隆 新日鉄住金エンジニアリング株式会社戦略
企画センター海底資源開発事業推進部長

皿田 滋 国立大学法人筑波大学システム情報系
研究員

福井 勝則 国立大学法人東京大学 大学院工学系研究科
システム創成学専攻 教授

矢野 州芳 三菱重工業 株式会社 船舶技術部
主席技師

計 7 名（敬称略：委員は 50 音順）

<選鉱・製錬技術ワーキンググループ>

部会長 中村 崇 国立大学法人東北大学多元物質科学研究所
教授

委員 伊藤 真由美 国立大学法人北海道大学大学院工学研究科
准教授

今井 哲男 社団法人日本技術士会 資源工学部
会長

大木 達也 独立行政法人産業技術総合研究所環境管理技
術研究部門リサイクル基盤技術研究グループ
長

佐藤 重樹 DOWA メタルマイン株式会社
製錬部部長

吉田 卓司 彦島製錬株式会社
代表取締役社長

計 6 名（敬称略：委員は 50 音順）

【参考 4】 用語集

＜資源量評価＞

【資源量計算の国際基準】資源量とは、地中に存在する特定の鉱物や金属のある一定の品位以上の質量を示し、それが経済的に採掘されるかどうかは全く関係ない。資源量は、その存在の確からしさに応じて数段階に分類されることが多く、その分類基準は各国により様々に定義されている。オーストラリアでは Joint Ore Reserves Committee (JORC) により定められた報告書のガイドライン JORC code、カナダでは証券取引法が定めた様式 National Instruments 43-101 (NI43-101)、米国では証券取引委員会 (United States Securities and Exchange Commission, SEC) の Industry Guide 7 などがあり、これらが国際的な基準とされる。本事業では JORC code に基づき資源量を計算した。

【予測鉱物資源量】鉱量分類は、確度の低い順に予測鉱物資源量(Inferred Mineral Resource)、概測鉱物資源量(Indicated Mineral Resource)、精測鉱物資源量(Measured Mineral Resource)に分類される。予測鉱物資源量は、その質量や品位が推定できる鉱物資源量であるが、精度は低いものであり、地質情報などから推定できるもののその確認はなされていないものとされている。

【経済的・準経済的な資源量】海底熱水鉱床の経済性評価については、品位、埋蔵量、生産量、採鉱・選鉱・製錬処理の工程・コスト、将来の需要予測などから試算される。海底熱水鉱床の経済性評価の基準は、陸上資源と比べてまだ明確ではない。

【水中音響調査】海洋の海底面、海底下の調査は音波を利用することが一般的であり、音波を利用した調査を総称して「音響調査」と呼ぶ。音響調査の中には、マルチビームエコーサウンダー (MBES : Multi Beam Echo Sounder System)、SBP (Sub Bottom Profiler) などがある。MBES は海底の地形調査に、SBP は海底下の地質状況を把握する目的で使用する。

【ボーリング】トンネルや井戸など主に地中に円筒状の穴を掘削する作業を「ボーリング」という。日本語で試錐（しすい）もしくは鑿井（さくせい）とも表現され、地質調査、農業、水文学、土木工学、鉱物資源、地熱、石油、天然ガスなど産業、学術のさまざまな分野において用いられている。岩石鉱石を採取するための「コアボーリング」と温泉ボーリングのように岩石等採集を行わない「ノンコアボーリング」がある。

【物理探査】地表下の地質状況等を把握するために、人為的に発生させた物理現象（電気、磁気、電磁、地震波）の反応を測定し、これを解析することによって、推定する手法を「物理探査」という。物理探査は、地震探査、電気探査、電磁探査、磁気探査等がある。海洋では、石油分野で反射法地震探査が普及していたが、近年では、電気探査、電磁探査も普及しつつある。

【海底設置型ボーリングマシン】掘削装置自体を海底に着座させ、ボーリングマシン。日本では1996年金属鉱業事業団（現JOGMEC）が第2白嶺丸に搭載するため、日本で初めて搭載した。現在運用している海底設置型ボーリングマシンは耐水深3000m、最大掘進長50mである。

【船上設置型ボーリングマシン】船上部に掘削機本体を設置し、ムーンプールから掘削ロッドを海底に降ろして海底下を掘削する装置。掘削対象の土質条件に併せて、掘削ツールが変更可能である。圧力保持掘削ツールを搭載することで海底下に賦存するメタンハイドレート試料の採取も可能となる。

【深海テレビカメラ】深海ではカメラを利用し地質状況の把握、生物観察を実施している。陸上で使用しているハンディカメラあるいはテレビ取材用カメラを耐圧容器に納め曳航体やサンプリング機器に搭載して使用しており、これを「深海テレビカメラ」と呼ぶ。深海テレビカメラと母船は、光ケーブルで連結されていることが多く、リアルタイムで映像を観察しながら調査を行っている。また、近年、陸上でもハイビジョンカメラが急速に普及したが深海テレビカメラにもハイビジョンカメラが使用されることが多く

なっている。調査で用いる曳航式深海テレビカメラを Finder-installed Deep-sea TV Camera、略称 FDC と呼んでいる。

【チムニー】海底熱水鉱床の活動により生成される柱状の構造物を「チムニー」と呼んでいる。熱水が海底面に吹き上げることで煙突を形成したものである。

【マウンド】海底熱水鉱床は、主にチムニーとマウンドからなる。チムニーは成長、活動を停止・転倒を繰り返すことで結果的に、丘のような地形を形成する。これを「マウンド地形」と呼ぶ。その大きさは、水曜海山で見られるような 1 m 程度のものから大西洋中央海嶺の TAG サイトで見られるよう直径 100m に達するものまで様々である。

【硫化物】硫黄 (S) と結合している鉱物。黄鉄鉱 (FeS)、閃亜鉛鉱 (ZnS)、方鉛鉱 (PbS)、黄銅鉱 (CuFeS₂) などが代表的。

【品位】サンプリングした鉱石・岩石に含有する金属元素、非金属元素の割合を「品位」という。化学組成と呼ぶこともある。

【熱水変質帯 (域)】熱水活動がある地域では、熱水と岩石が反応して「熱水変質帯 (域)」を形成する。例えば陸上の温泉地帯で白色粘土化や褐色化している現象が見られるが、全て熱水変質の産物である。

【珪化帯】熱水と岩石の反応の結果、シリカが増加する熱水変質作用の一つである。酸性条件が強い場所で起こるため、上述の白色粘土化帯よりもより鉱床の近い場所に形成されることが多い。

【自律型無人探査機 (AUV ; Autonomous Underwater Vehicle)】自律型の深海探査ロボット。機体に内蔵したコンピュータにあらかじめ設定されたデータに従い、自分の位置を計算しながら航走することができる。

【有索式無人潜水機 (ROV ; Remotely Operated Vehicle)】遠隔操作に

よる水中潜水機。水中カメラ、ソナー、マニピュレータを備えた物がある。

【パワーグラブサンプリング】パワーグラブによる海底熱水鉱床のサンプリング。1度に多くのサンプルを得ることができるが、そのサンプルは海底表層の物に限られる。

【海底地形図】マルチビーム測探機（Multi Beam Echo Sounder: MBES）により取得される海底地形データより作成される海底の地形図。一般的に船舶に搭載したMBESから作られたものをさすが、ROVやAUVに搭載し、海底に近づきデータを取得することで、より詳細な海底地形図を作ることができる。

【垂直分解能】地形の高さ方向を測定または識別できる能力。一般的に水平分解能に比べて劣る。

【ブロックモデル】資源量計算の精度の高い手法の一つ。計算対象の領域を直方体形状のブロックに分割し、このブロックに特定の品位、密度を割り付け、そのブロックを積み上げることで鉱量を計算する方法がブロックモデル法である。

【海底の濁度異常地帯】濁度が著しく高い領域。濁度計などのセンサーで検知できるほか、目視でも確認できる場合が多い。活発な熱水活動が確認されている海域は濁度が高いことが多い。

【密度】単位体積あたりの質量。鉱量を推定する際に重要なパラメータとなる。

【可採鉱量】地下に存在する地下資源の埋蔵量のうち、「現在の市価で」技術的・経済的に掘り出すことができる埋蔵総量から、既生産分を引いた量。

<環境影響評価>

【拡散モデル】発生源から排出された物質が海水中や大気中に広がるとき、どのように拡散するかを予測するためのモデル。

【係留系】流速計や沈降粒子等を測定するセジメントトラップ等の機器を取り付け、通常下部は海底にアンカー等で固定し、上部には浮きを装備して海底よりロープ等で垂直に立ち上がるようにしたもの。

【光合成】植物が光エネルギーを使って二酸化炭素から有機物を合成すること。その有機物に依存した生物群集から成る生態系を光合成生態系と呼ぶ。

【重金属】比重が4～5以上の金属元素のことで、水銀、鉛、カドミウム、クロム、マンガン、コバルト、ニッケル、銅、亜鉛、ビスマス、鉄などが挙げられる。一般に体内に蓄積されやすく、有害なものが多い。

【生物多様性】生物の間に見られる変異性を総合的に指す言葉。生物多様性には様々な定義があるが、生物多様性条約では生態系、種、遺伝子の3つのレベルにより捉えている。

【超音波ドップラー流速計（ADCP）】超音波を水中に発射し、水流とともに移動する微粒子からの反射波を検出し、鉛直各層毎の流速を測定する装置。

【マルチプルコアラー（Multiple Corer）】海底堆積物を採取する装置のひとつ。内径50～100mmの採泥用コアが複数装備され、海底に到達するとこれらのコアが堆積物に貫入し、引き上げる時に閉栓されることで、不かく乱状態で筒状に海底の泥を採取することができる。

【ボックスコアラー】海底堆積物を採取する装置のひとつ。マルチプル

コアラーよりも一度に多くの採泥ができるが、表層はややかく乱されやすい。マルチプルコアラーで採集されるよりも大型の底生生物を効率良く、より多く採集するには向いている。

【底質】 海底等を構成する粘土、シルト、砂、礫などの堆積物や岩のこと。底生生物の生活の場。

【底生生物（ベントス）】 底質に固着または匍匐を行って生活する生物群。二枚貝、フジツボ、ナマコ等を含む。

【プランクトン】 浮遊生物の総称で、植物プランクトンと動物プランクトンに大別される。植物プランクトンは光合成を行い、1次生産者として水域の膨大な生物量を支えている。また、動物プランクトンは一次消費者として植物プランクトンを餌とし、魚類などの餌となる。

【沈降粒子捕捉装置（セジメントトラップ）】 水柱の沈降粒子を捕捉するための漏斗状の装置。海底に一定期間設置し、沈降する粒子の量や化学成分を調べて、海洋における物質循環のダイナミクスを明らかにするものである。沈降物質は装置下部の回転盤にセットされた固定液入り採集瓶に收容される。回転盤には複数の採集瓶をセットすることができ、試料の採取間隔も任意に設定することができる。

【電気導電度・水温・水深】 電気導電度は水の電気の伝わりやすさの割合を示すもので、海水中の塩分の指標となる。水温は水の温度（摂氏℃）。水深は海表面から海底面までの距離（m）である。

【水質】 水の性質を決定づける化学構成成分の総称。有機物量や濁りの割合を示す濁度及び重金属量等が挙げられる。

【沈降粒子・沈降起源】 海表面から海底に向かって沈降する粒子状物質の総称。プランクトンの死骸や、微小な砂塵等、起源は様々である。

【懸濁粒子】いわゆる「濁り」。海底の堆積物が巻き上がり、水柱に浮遊しているものの総称。

【国際海底機構（International Seabed Authority : ISA）】国際海洋法条約に基づき公海域の海底鉱物資源を一元的に管理するために設立された国際機関（本部ジャマイカ）。国際海底機構が管理するのは、沿岸国の管轄権の及ぶ排他的経済水域(EEZ)・大陸棚の外側の海底及びその下部。

<資源開発技術（採鉱技術）>

【一軸圧縮強度】コンクリートや岩石などの強度の基準。円筒状の供試体を上下から試験機で圧縮し、供試体が破壊する際の圧力を断面 1mm^2 当たりの圧力に換算したもの。

【商業生産規模】企業が商業生産として活動を行い、投資(資金の投入)に対して、その社会で妥当と見なされる以上の利益が期待できるだけの規模を言う。一般的には、規模が大きいほど「一定の投資額」に対する利益は多くなるとされているため、商業生産のためにはある程度の大きさの生産規模が前提となる。ただし、この生産規模は、生産物(金属)の価格、社会的制約(環境保護等)、社会的要求(金属供給の必要性)、要求される利益(経済状況)等によって上下する。

【地山モデル】採掘の対象となる鉱床の岩石・鉱石の堅さ、空隙の入り方、内部の断層・空洞といった物は採掘の際の大きな支障となり、場合によってはそれに対応できるように採掘のための機械を設計しなければならない。このような鉱床の岩石・鉱石の堅さ等々を測定して、モデル化したものを地山モデルという。

【地盤切削調査】掘削機器を用いて対象となる地盤を掘削し、地盤の性状を調査することをいう。地盤が硬質か軟質かで、最適な掘削方法は変わってくるため、事前に地盤の性状を調査することは重要である。

【基本物性試験】一軸圧縮強度、空隙率、P波速度、ショア硬度など、対象物の基本的な物性を測定する試験。物性試験のうち、一般化されている試験手法のもの。

【異方性】物体の物理的性質が方向によって異なること。結晶は一般に異方性を示す。また外力でゆがんだ物体、不均一に熱せられた物体、電場・磁場内に置かれた物体など、ある方向に特別な条件のある物体も異方性をもつ。熱水鉱床鉱石は不均質な場合が多く、異方性を持つ場合が多い。

【寸法効果】部材や構造について、寸法上は相似関係にあっても強度や性能上での比例関係とは一致しないことをいう。

【空隙率】岩石や土壌などの単位体積あたりで、すきまの割合を百分率で表したものの。多孔度、間隙率ともいう。海底熱水鉱石は空隙率の高いものがよく見られる。

【P波速度】弾性波のうち進行方向に平行に振動する波の速度。一般に、軟質になるほど速度は低く、硬質になるほど高い。

【ショア硬度】ショア硬度計で測定した物質の硬さの程度をいう。ショア硬度計は、球場のダイヤモンドを先端につけた落下錘を有するもので、この約4gの落下錘を約25cmの高さから試料表面に落とし、それが反発されて跳ね上がる高さで硬度数を規定する。

【縞状構造による力学異方性】構成鉱物種やその量比、あるいは鉱物のサイズが異なる部分が互層をなしている構造をもち、それにより一軸圧縮強度やP波速度に異方性が生じることをいう。

【湿潤密度】粒子の間隙を充填する水分などの重量を含んだ堆積物の単位体積重量をいう。

【クローラ】無限軌道と呼ばれているもので、起動輪、転輪、誘導輪を囲むように一帯に接続された履板（りばん）の環であり、起動輪でそれを動かす事によって不整地での車両の移動を可能にするもの。「キャタピラー（商標）」。

【アンビリカルケーブル】船から海中に吊り下げた採掘や観測用の機器には作動のための電力を送り、映像などのデータを船に送り返すための電線（ケーブル）が必要となる。これをアンビリカルケーブルという。

通常は、破損を防止し、船から吊り下げた機器の重量を支え、機器を船に回収するためのワイヤーロープの機能も持たせるため、表面は鉄線で覆われている。

【BMS : Benthic Multi-coring System】 深海用のボーリングマシンのシステムの略。海底面から棒状の岩石を採取する装置。

【採鉱母船】 採鉱システムのうち、海上にあって作業の基地となり、各システムを制御する母船。採鉱の機材を海域まで運搬することや、海底から揚げてきた鉱石を保持・運搬する役割も負う。

【シャトル船】 採鉱母船から鉱石片を受け取り、陸上の精錬所に運ぶための貨物船をいう。

【ダイナミックポジショニングシステム（DPS）】 船舶が洋上の1地点に調査や作業のため留まる時、錨やその他の固定用の施設を用いずに、自らの位置をスクリュー等の力によって補正して留まる方式。深海域での調査では錨などが使えないため、外洋で活動する調査船・作業船はこのような機能を持っている。

【ムーンプール】 特殊作業用の船舶で、船体中央部の甲板から船底まで開いた矩形あるいは円形の穴を言う。この穴から各種の調査機器を降ろすことで船の揺れによる悪影響を最小限にすることができる。掘削船（「ちきゅう」や「ジョイデスレゾリューション」など）によく見られる構造。

【揚鉱】 海底で採掘した鉱石片を洋上の採鉱母船まで運び上げる事を言う。海底から海面までの水中で高度差 1000m 以上にわたり揚げなければならないため、強力なポンプ等を用いたシステムが検討されている。

【揚鉱排水】 採鉱母船まで運び上げた鉱石片と海水を分離するプロセスを経て発生する排水。船上で鉱石を回収するための固液分離プロセスにおいて大気と接触するため、通常の下層海水と比較して溶存酸素濃度や水温が高くなる。海水が海底から鉱石とともに揚鉱され、船上の処理プロセスを経て、再び下層へと輸送されると想定されている。

【ライザーパイプ】揚鉱管。海底にある採鉱機で採掘された鉱石を海上の採鉱母船まで揚げるための管。長さが数千 m に達し、自らの重量と先端部に取り付けられた採鉱機材の重量を支えるだけの強度と、海流や採鉱母船の揺れに対応できるだけの柔軟性を持っている事や、作業のための取り扱いの容易さ、経済性などが要求される。

【リジッドライザー】海底から海上の採鉱母船まで鉱石を揚げるための管(ライザー管)のうち、鋼管などからなり、外力に対して曲がりにくい構造となっているもの。

【フレキシブルライザー】海底から海上の採鉱母船まで鉱石を揚げるための管(ライザー管)のうち、ある程度の柔軟性を持ち、外力に対応して曲がることのできる管をいう。

【エアリフト】鉱石片の揚鉱方法のひとつ。ライザー管の各所から圧搾空気を吹き込み、空気の泡の上昇力によって鉱石片を海上まで揚げる方法。

【スラリー】一般には、微細な固形物が混ざった液体の事を言う。採鉱システムでは、海底で採掘し破碎した鉱石片が混ざった海水のことを言う。

【環流水】鉱石を含んだスラリーが採鉱母船に届くと、母船の中で鉱石片と海水とを分離して鉱石片を船倉に保管する。

この際に分離した海水は、深海域の低い温度の海水のため、そのまま放流すると海面近くで悪影響を及ぼすことが懸念されている。このため、ライザー管に付いている圧送パイプで海底近くまで戻してそこで放流することとなる。この海水を海底に戻すことから環流水としている。

【浚渫ポンプ】海底にある岩片や泥を海水と共に吸い上げるためのポンプのことをいう。ポンプ内部は吸い込んだ岩石片などがぶつかって摩耗が激しく、高度な耐久性が要求される。

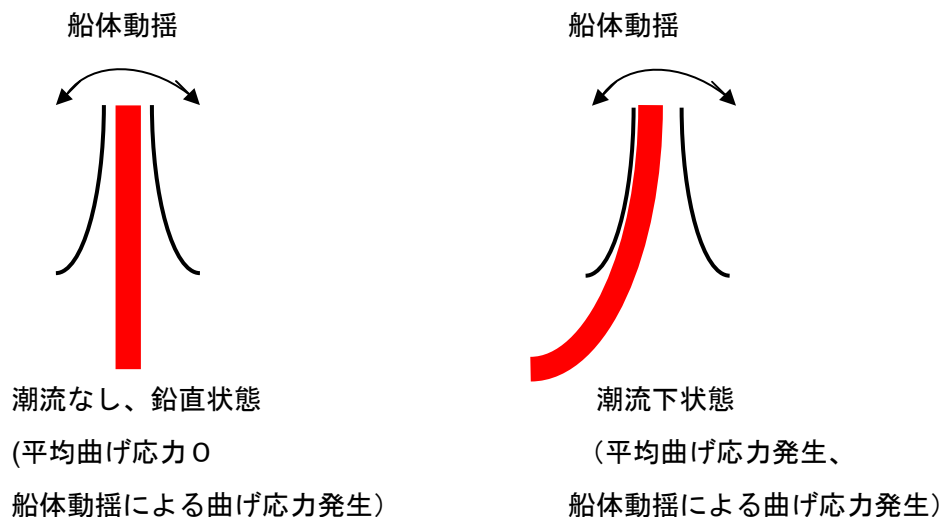
【有義波高】有義波高・有義波周期とは、ある地点で連続して波を観測したとき、波高の高いほうから順に全体の 1/3 の個数の波（例えば 20 分間で 100 個の波が観測されれば、大きい方の 33 個の波）を選び、これらの波高および周期を平均したものを言う。

1000 の波を観察すると、そのうち 1 波はこの有義波高の 2 倍近い高さの波となる。

【実証試験機】この採掘システムのような新技術の開発においては、陸上で検討して設計した物がうまく作動するかを確認・試験を行うため、完成品の数分の 1 の小型のモデルを製造し、実地で実際に作動させて検証を行い、設計の検証と問題点の抽出を行う。このときに作られる小型のモデルのことを実証試験機という。

【VIV : Vortex Induced Vibration】流れの中でパイプの後方に渦が発生し、これにより流れと直角方向にパイプが振動する現象。長期間続くとパイプの疲労問題が発生する。

【ベルマウス】ケーブルを損傷しないように内面を平滑、引き入れ口をラッパ状に加工した鋼管。フレキシブルライザーの上端は船体にて支持されるが、曲げ応力の抑制のために、ベルマウスにより支持する必要がある。



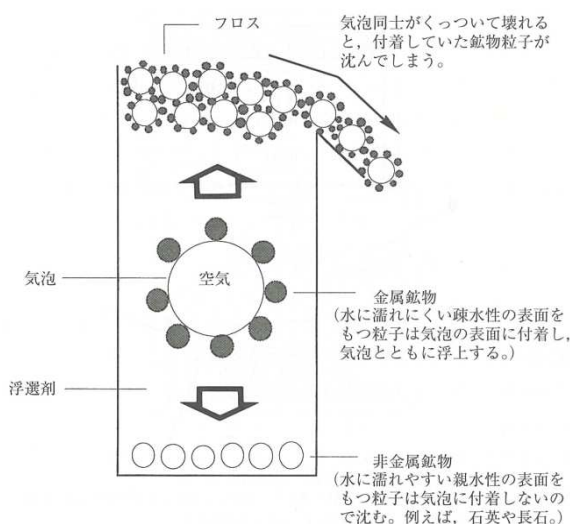
<選鉱・製錬技術>

【選鉱・製錬】：鉱山で採掘される鉱石は、通常、有用鉱物と非有用鉱物から構成される。このような鉱石から金属を抽出するためには、通常、次の2段階の工程が必要であり、第1段階を選鉱、第2段階を製錬という。

第1段階：鉱石から有用鉱物だけを選別する。

第2段階：選別した有用鉱物から金属だけを抽出する。

【浮遊選鉱】選鉱法には磁力選鉱、比重選鉱、浮遊選鉱、静電選鉱など様々な方法がある。硫化鉱物の選鉱処理では、浮遊選鉱を用いることが多い。水に対する物質表面の濡れやすさは物質ごとに異なり、物質表面の処理によっても変化する。細かく砕いた鉱石を水に懸濁させ、これに捕収剤を添加して鉱物粒子の表面を処理した後、気泡を導入すると、水に濡れにくい疎水性の表面をもつ鉱物粒子は気泡に付着し、気泡の浮力で気泡とともに浮上する。一方、水に濡れやすい親水性の表面のままの鉱物粒子は気泡に付着せず沈下する。このように、水に対する物質表面の濡れやすさの違いを利用して、ある種の鉱物を気泡とともに浮上させ、別の鉱物を沈下させることによって鉱物分離を行う方法を浮遊選鉱という。



【浮選試薬】浮選のために添加される薬品。物質表面の処理に用いるものとしては捕収剤（鉱物表面を選択的に疎水化）、活性剤（鉱物

表面の疎水化を助ける)、抑制剤(鉱物表面の疎水化を妨害する)があり、その他に起泡剤(泡を起こさせ、フロスを安定させる)がある。

【バルク浮選】複数の金属が混合した精鉱(バルク精鉱)を浮遊物として回収する浮選方法。特に本報告書では主要金属(銅・鉛・亜鉛)の3種が混合している濃縮産物を浮鉱として回収する場合をバルク浮選、3種のうち2種が混合している浮鉱を回収する場合をセミバルク浮選と定義している。

【乾式製錬法】高温で鉱石あるいは精鉱を処理して金属の濃縮または還元を行う製錬法。硫化鉱を溶融して金属をマットにして濃縮する(銅溶鉱炉、フラッシュ炉)、精鉱(焼結鉱)を溶融還元して粗金属を得る(ISP溶鉱炉、鉛溶鉱炉)、マットを処理して粗金属とする(銅転炉)などに分けられる。

【熔錬】鉱石を溶鉱炉その他の炉で溶融・還元して粗合金を得る操作。

【湿式製錬法】水溶液を利用し、金属を回収する製錬手法。原鉱石あるいは選鉱された精鉱から回収対象の金属をイオンの形で水溶液に溶かし出す浸出工程と、溶液から金属あるいは化合物を精製分離する工程からなる。SX-EW、ケミカルリーチング、バイオリーチングは、すべて湿式処理(法)に分類される。乾式製錬に比して工程の床面積が大きく、反応速度が遅いなどの欠点はあるが、各工程が厳密に制御できるので純度の高い金属が得られ、レアメタル等の有価物も回収しやすいという利点がある。

【ケミカルリーチング】湿式法(製錬法)の一法で、特に薬品等を用いて金属浸出を行うもの。硫酸加圧浸出法、塩化物浸出法、アンモニア浸出法に大別されるが、対象鉱種等で多岐にわたる手法が確立されている。

【バイオリーチング】微生物を利用して硫化鉱鉱石中の有用成分を溶出させて回収する精錬法。他の精錬技術と比べてコストが非常に低く、現在では銅鉱石を対象としたバイオリーチングがチリやアメ

リカなどで大規模に行われており、バイオリーチングを含め湿式処理法による銅の生産量は世界の銅生産量の20%にもものぼる。微生物の種類により還元細菌、鉄酸化細菌、硫黄酸化細菌に分けられる。また、近年、高温で生息する微生物を利用し金属を回収する技術も検討されている。

【廃さい】 鉱山、選鉱場、製錬所などで、鉱石から有用鉱物を分離回収したのちに残る不用物。選鉱では尾鉱、製錬ではスラグ(鉱さい)とも呼ぶ。

【マイクロバブルカラム浮選】 カラム浮選機は、細長い円筒状のカラムにスラリーを供給しながら、カラム下端から空気を細かい気泡状態にして吹き込み、鉱物と気泡とをカラム内で接触させることにより、目的とする鉱物を気泡に付着させて上昇させ、フロスとして回収する装置である。通常のカラム浮選では気泡のサイズは数百マイクロンであるのに対し、マイクロバブルカラム浮選では数十マイクロンの気泡を用いることにより、より微細な鉱物の付着が可能となる。

【アルカリ湿式粉砕】 大気中で粉砕する乾式粉砕に対し、粉砕容器に液体を入れて粉砕することを湿式粉砕といい、特にアルカリ溶液を入れた場合をアルカリ湿式粉砕という。

【比重選別法（ジグ）】 鉱物粒子の比重の差によって選別する方法。ジグ選別はその一つで、水中において水を上下方向に脈動させ、その運動を利用して比重差により選別する方法である。

【鉱物粒子解析装置】 電子顕微鏡を利用し、指定した範囲の鉱石粒子の粒度、構成元素等を自動的に分析・同定し、その分布状態や割合を測定する装置。

【酸化焙焼】 金属製錬の予備処理工程の一つで、硫化物鉱石を融点以下の温度で加熱し、化学反応によって酸化物の形に変化させることをいう。

【パイロットプラント】実験室で得た結果を基にして、新しく計画される生産プラントを建設するのに先立ち、適切な設計と生産規模拡大の影響を調べるためにつくる中規模な実験プラントのこと。