

# 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23年3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. はじめに	1
2. 「海洋エネルギー・鉱物資源開発計画」のうち「海底熱水鉱床開発計画」について	2
3. 実施体制	3
4. 開発計画における第1期前半3年の目標・内容	4
5. 第1期中間評価期間における実績・成果	5
(1) 資源量評価	5
(2) 環境影響評価	16
(3) 資源開発技術（採鉱技術）	22
(4) 製錬技術（選鉱・製錬技術）	30
6. 実証試験候補海域の選定	35
7. まとめ	36
8. 今後の計画	37
参考1 海底熱水鉱床開発委員会委員名簿	39
参考2 ワーキンググループ委員名簿	40
参考3 用語集	44

## 1. はじめに

我が国周辺海域に賦存が期待される海底熱水鉱床は、他国の資源政策に影響しない資源であり、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。

このため、平成20年3月に策定された「海洋基本計画」において、「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実現する」ことが目標として定められた。

これを受け、平成21年3月、経済産業省は、開発までの道筋（ロードマップ）として、「海洋エネルギー・鉱物資源開発計画」を策定した。

同計画においては、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。

経済産業省は、開発計画に基づき、平成20年度から我が国周辺の海底熱水鉱床の開発に向けた取り組みに着手し、その実施を独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構（JOGMEC）に委託している。

今年度は、開発計画の第1期前半における中間評価時期にあたり、有識者からなる「海底熱水鉱床開発委員会（委員長：海洋研究開発機構理事平朝彦、副委員長：浦辺徹郎東京大学教授）（事務局：JOGMEC）」において中間評価を実施した。なお中間評価の実施にあたり、委員会の下に設置された資源量評価、環境影響評価、採鉱技術及び選鉱・製錬技術の4つのワーキンググループにおいて、それぞれの分野毎に詳細な検討を行った。

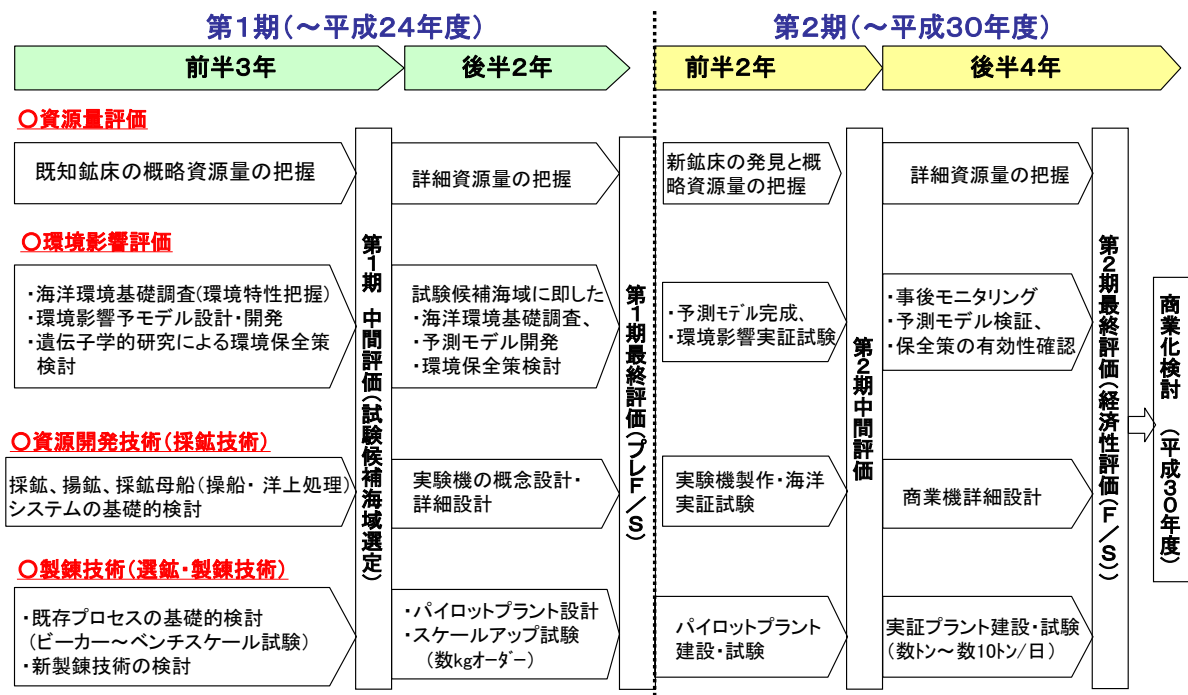
本中間評価報告書は、ワーキンググループでの検討結果をとりまとめたものである。

## 2. 「海洋エネルギー・鉱物資源開発計画」のうち「海底熱水鉱床開発計画」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1のとおりである。

表1 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」)

### 3. 実施体制

海底熱水鉱床の開発に向けての取り組みは、経済産業省（METI）からの委託を受け、独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構（JOGMEC）が中心となり、独立行政法人産業技術総合研究所（AIST）、独立行政法人海洋研究開発機構（JAMSTEC）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、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：平朝彦JAMSTEC理事、副委員長：浦辺徹郎東京大学教授）（事務局：JOGMEC）」を設置した（参考1）。また、海底熱水鉱床の開発には、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、それぞれ技術分野毎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2）。

海底熱水鉱床開発にかかる実施体制については図1に示す。

取り組みにあたっては、JAMSTEC等の他機関が保有する船舶や調査機器の活用を図るとともに、AIST、大学、民間企業との共同研究や委託を通じて、積極的な連携を図りつつ、効率かつ効果的な開発計画の推進を図った。

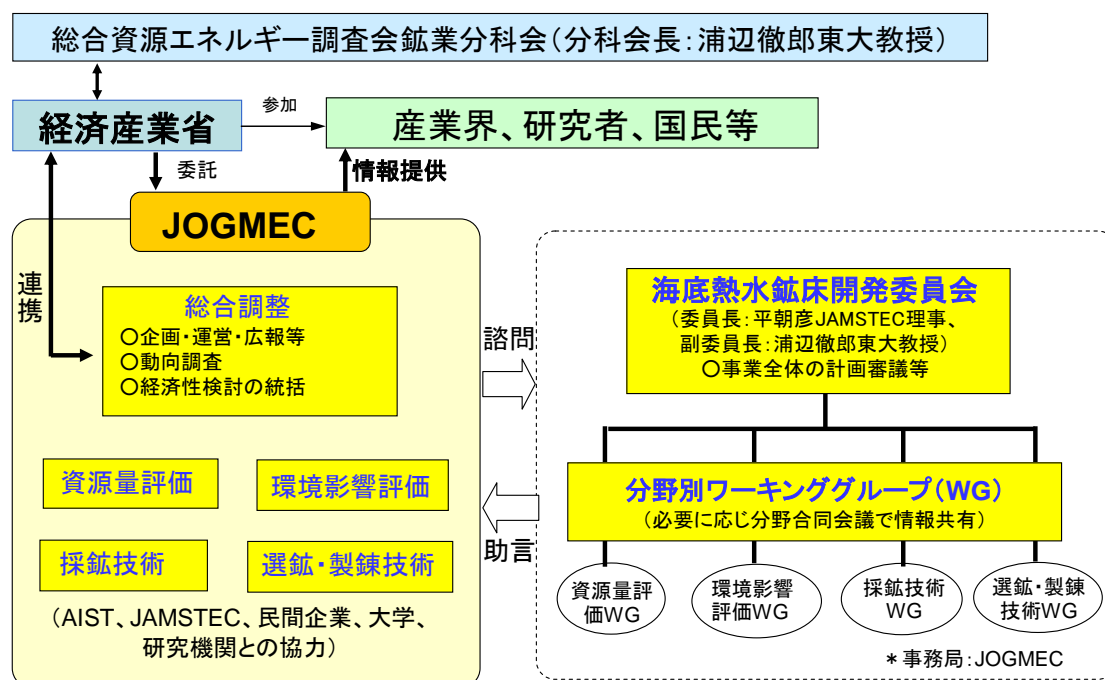


図1 海底熱水鉱床開発にかかる実施体制

#### 4. 開発計画における第1期前半3年の目標・内容

開発計画において、平成22年度までの第1期前半3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（徴候）が確認されている区域を中心に、ボーリング調査、物理探査等を実施し、徴の垂直方向の連続性や品位等の資源情報を取得し、概略資源量を把握する。さらに、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

沖縄海域及び伊豆・小笠原海域で確認されている海底熱水鉱床周辺域において、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、海洋環境実証試験海域を選定する。

##### (3) 資源開発技術（採鉱技術）

広範囲に海底熱水鉱床の徴候が確認されている海域での採鉱を想定した採鉱システムの検討を実施する。特に、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。

##### (4) 製錬技術（選鉱・製錬技術）

製錬法の既存プロセスである浮遊選鉱－乾式製錬法及び、新技術の湿式製錬法の、海底熱水鉱床への適用性について検討を行う。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、ビーカースケール等での基礎的検討を行う。

## 5. 第1期中間評価期間における実績・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（徴候）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（写真1）」（JOGMEC所有）等を活用し、ボーリング調査、物理探査等を実施し、鉱床の垂直方向の連続性や品位等の資源情報を取得し、概略資源量の把握に努めた。

また、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ため、上記区域に加え、その周辺海域において、音響調査、曳航式深海テレビカメラ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た。



写真1 深海底鉱物資源探査専用船「第2白嶺丸」

概略資源量を把握するための調査では、沖縄海域においては沖縄本島北西約110kmに位置する伊是名海穴を対象として調査を実施した。伊是名（いぜな）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、窪地の中に海底熱水鉱床が確認されている。

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で重点的に調査を実施した。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800mであり、カルデラ内壁の南東斜面に海底熱水鉱床が確認されている。

調査は、自律型無人探査機（Autonomous Underwater Vehicle: AUV）や有索無人潜水機（Remote Operated Vehicle: ROV）を用いた精密海底地形調査や曳航式深海テレビカメラ（Finder-installed Deep-sea TV



Camera: FDC) 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拡がりを確認した後、海底下20mまで掘削可能な深海用ボーリングマシン (Benthic Multi-coring System: BMS) によるコア試料採取や大型グラブ (Finder-mounted hydraulic Power Grab: FPG) によるサンプリングを実施した (写真2)。

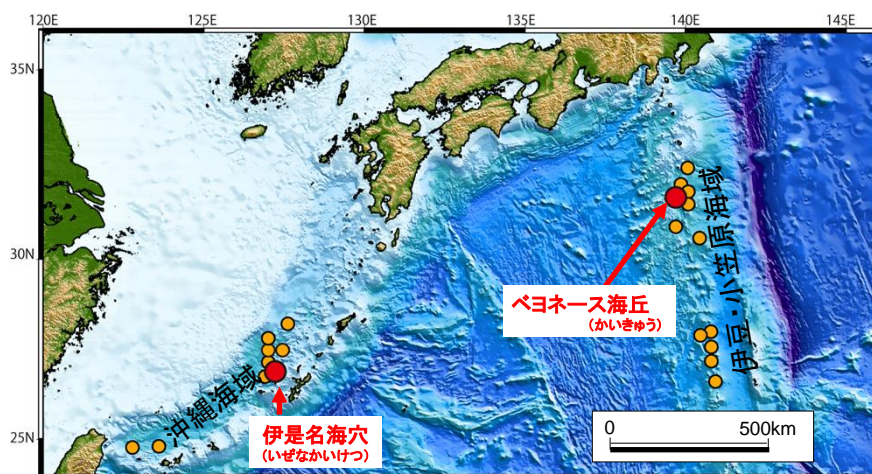


図2 我が国周辺の主な海底熱水鉱床分布域  
(オレンジ色は確認されている海底熱水鉱床の徴候)

一方、広域調査では、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近傍の未探査海域において、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を実施した。

第1期前半3年間に実施した主な調査の実績は、表2のとおりである。

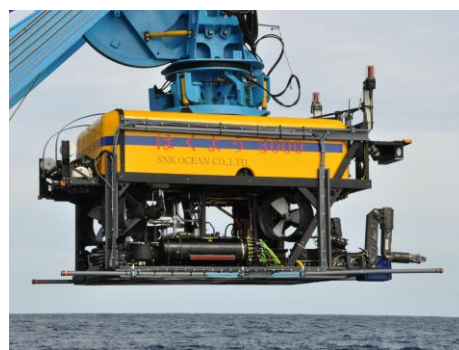
表2 各海域の主な調査実績

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)	82	26	108
	掘進長(m)	796	189	985
	コア長(m)	349	51	400
	コア回収率(%)	44	27	40.6
FPG	採取点(点)	52	6	58
	重量(t)	45	2.7	47.7
FDC	測線数(本)	13	6	19
	測線距離(km)	18.5	11.1	29.6

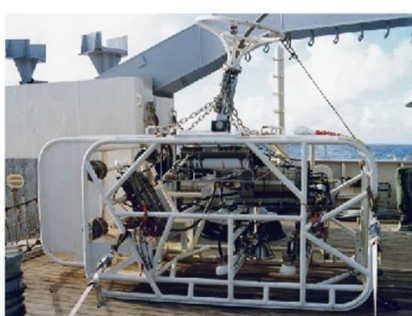




自律型無人探査機(AUV)



有索無人潜水機(ROV)



曳航式深海テレビカメラ(FDC)



深海用ボーリングマシン(BMS)



パワーグラブ(FPG)

写真2 資源量評価に活用した主な調査機器

## ②概略資源量把握のための調査の成果

### a) 沖縄海域

海底熱水活動が広範囲に認められる伊是名海穴において、解像度 1m の精密な海底地形図を作成した。この結果、従来は確認することができなかった多くの地形的な高まり（マウンド地形）の存在を確認した（図 3）。

また、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、地形的な高まりの表面は、海底熱水鉱床の礫やチムニーからなり、マウンドを離れると砂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（写真 3）。

上記調査により伊是名海穴の北部と南部には、直径 100m 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、このマウンドをモデルマウンドに設定し、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 本、総掘進長 796m）を実施し、マウンドの内部構造の把握に努めた（図 4）。

82 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 3 に示す。

表 3 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）

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
亜鉛	8.44%	テルル	0.34ppm
金	2.96g/t	ヒ素	5565ppm
銀	236g/t	水銀	21.1ppm



図3 精密海底地形図

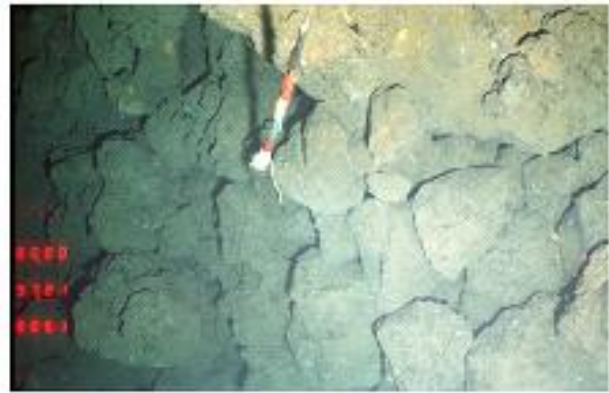


写真3 曳航式海底テレビカメラで観察されたマウンド

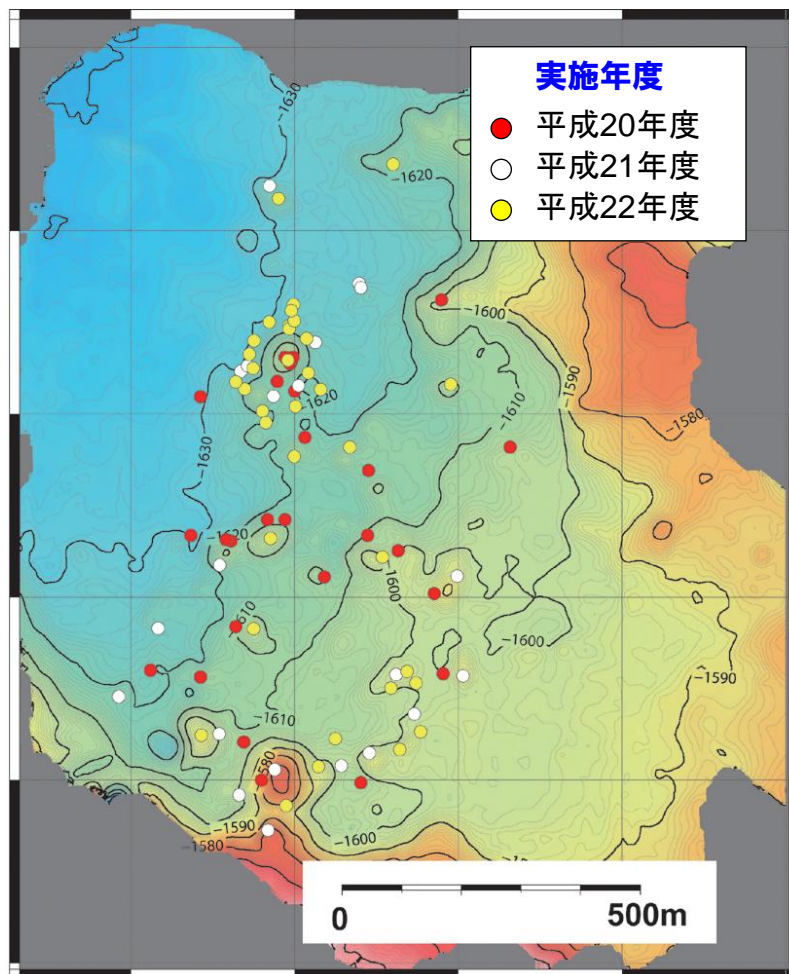


図4 ボーリング位置図（伊是名海穴）

モデルマウンドにおける集中的な調査の結果、①マウンド頂部付近から実施したボーリングでは全て金属硫化物が採取されたこと、②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ることを確認した。このことから、周囲の海底面から地形的に高まった部分（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。ただし、現有深海用ボーリングマシン（BMS）の掘削限界（20m）によりマウンド最下部を確認することはできていない。

また、マウンド裾野から実施したボーリングでは、マウンドの周辺の海底面下にも金属硫化物の存在が確認できたが、現有 BMS の性能からさらに下位への連続性を把握することはできていない。（図 5）。

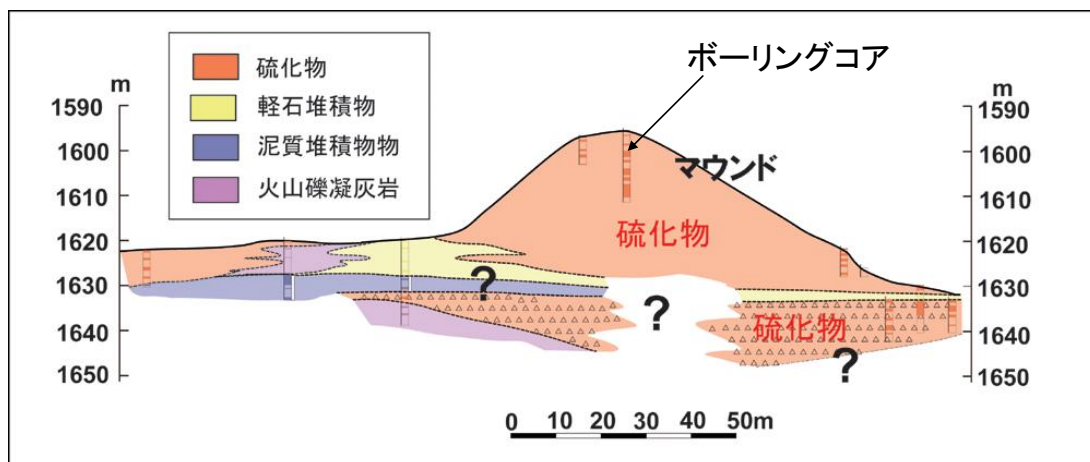


図 5 モデルマウンド断面図（ピンク色は海底熱水鉱床（金属硫化物））

#### b) 伊豆・小笠原海域

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において、沖縄海域と同様に、解像度 1m での精密な海底地形図を作成した結果、凹凸が激しいことが判明した。

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域の存在を確認した。

この範囲を中心に、ボーリング調査（26 本、総掘進長 189m）を実施し、海底熱水鉱床の水平・垂直方向の広がり の把握に努めた（図 6）。

26 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 4 に示す。



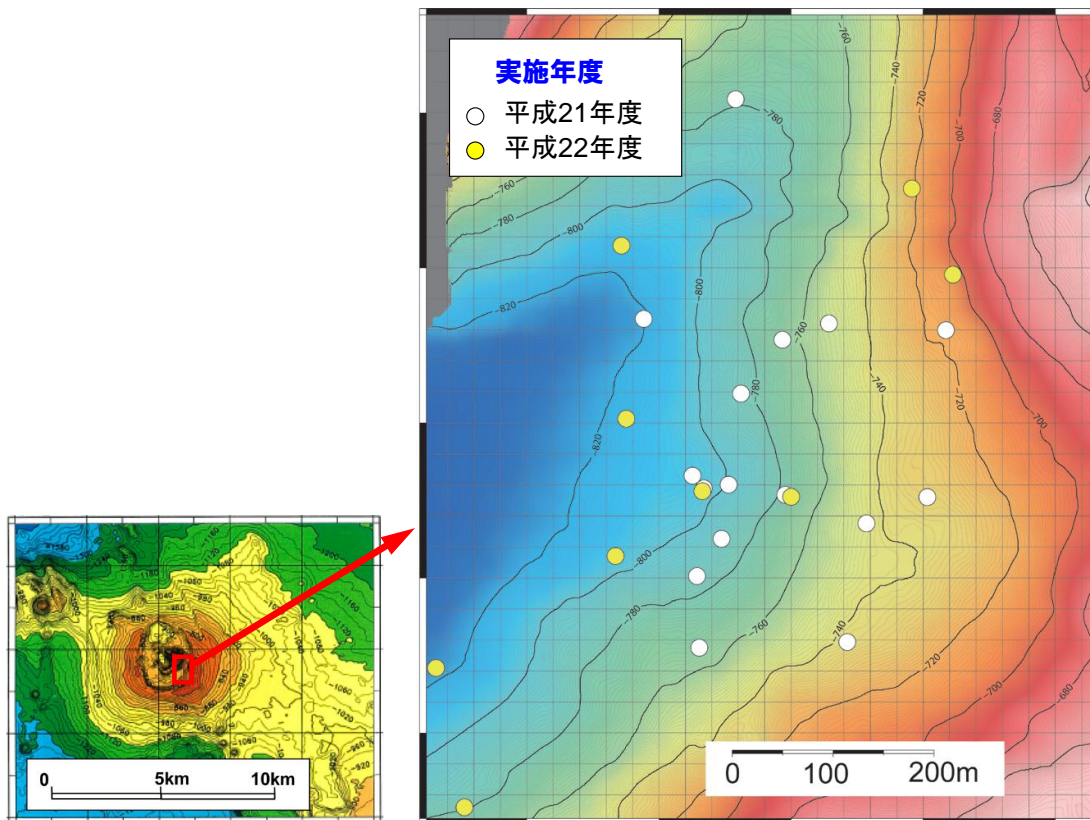


図 6 ボーリング位置図（ベヨネース海丘）

表 4 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%	ガリウム	29.1ppm
鉛	1.67%	セレン	26.6ppm
亜鉛	30.6%	テルル	0.09ppm
金	11.5g/t	ヒ素	2340ppm
銀	290g/t	水銀	19.7ppm

この結果、海底熱水鉱床（金属硫化物）の水平的な広がりには 100m × 150m 程度で、垂直方向の広がりには平均 2m 程度と沖縄海域に比べて薄いものの、その化学組成は亜鉛 30% を超えるものであった（図 7）。

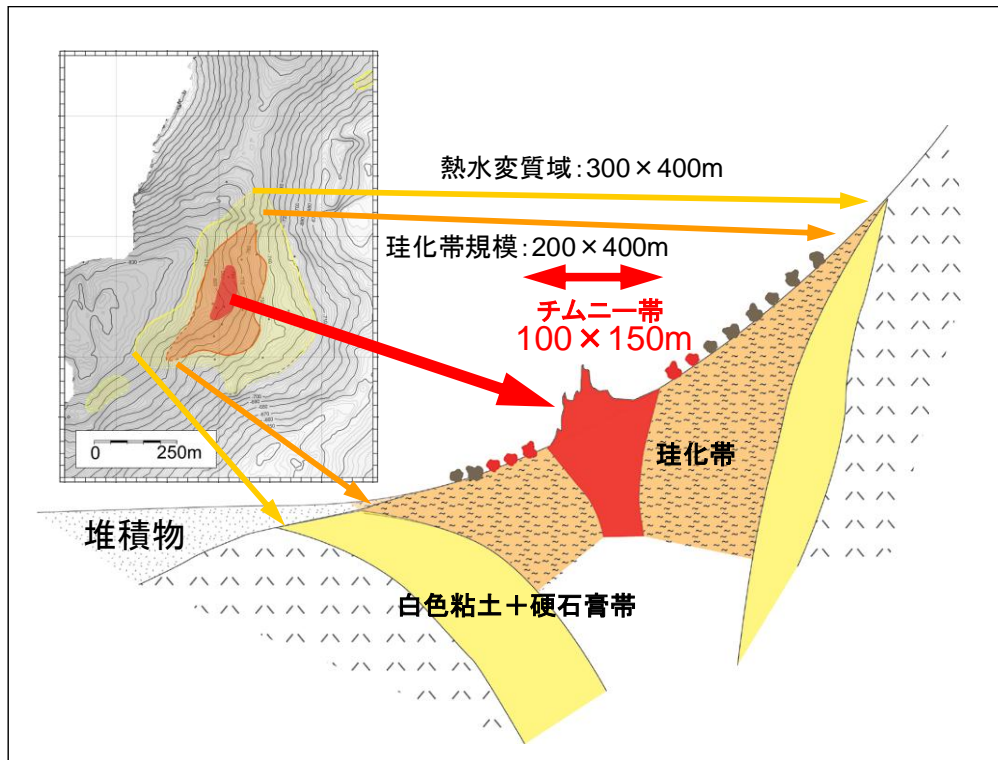


図7 ベヨネース海丘鉱床断面イメージ図

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2m、密度3.0、水平的な広がりを100m×150mとした場合概略資源量は、9万トン、厚さを最大厚さ8mで見積もった場合36万トンと推定される。ただし、当該海域は、気象条件が厳しく、現在の調査船では定点維持能力の限界により長時間ボーリング調査ができないため、深部掘削ができない点が課題として残った。

### ③広域調査

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、伊是名海穴周辺で、海底熱水鉱床の徴候が確認されている4海域で、海底地形調査及び曳航式深海テレビカメラによる海底観察を実施した。その結果、1海域で、新たに海底熱水鉱床の存在を示唆する熱水変質帯、海水の濁度地帯を抽出した。

また、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5海域で海底地形調査及び深海TVカメラによる海底観察を実施した。その結果、1海域において、熱水鉱床の存在を示唆する熱水変質帯、海水の濁度を確認した。

#### ④新調査船の建造

現在、調査で活用している鉱物資源探査専用船「第2白嶺丸」は就航以来30年が経過し、老朽化が目立ってきた。

また、現有の深海用ボーリングマシンでは海底下最大20mまでしか掘削できないことや定点保持能力の限界があるため垂直方向の鉱床の連続性を把握できない。

このため新たに2種類の掘削装置（海底下50m及び400m掘削を可能）を装備する新調査船「白嶺（はくれい）」の建造に着手している（図8）。

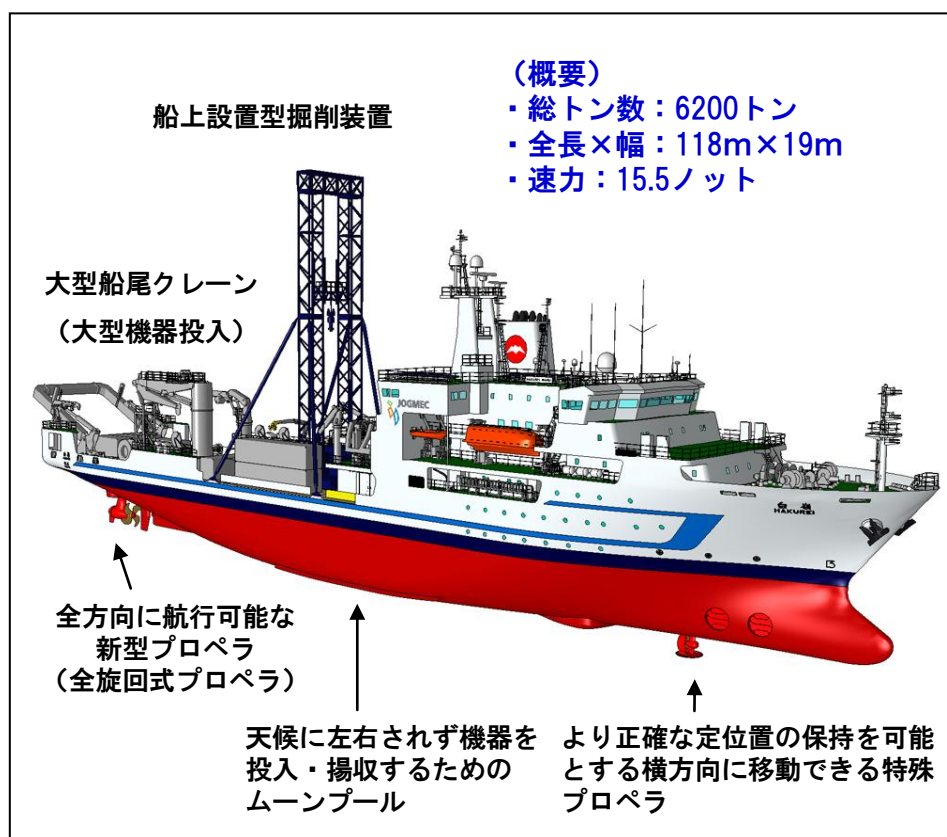


図8 海洋資源調査船「白嶺」のイメージ

#### ⑤概略資源量の評価

沖縄海域伊是名海穴に設定したモデルマウンドの詳細な調査と解析により、周囲の海底面から高まったマウンド部は全て海底熱水鉱床（金属硫化物）の可能性が高い。

伊是名海穴の調査対象海域には、約40個のマウンドが存在し、その体積は精密海底地形図から約72万 $m^3$ であり、密度を乗じて算定すると、少なくとも伊是名海穴に分布するマウンドの合計概略資源量は250万トンと推定される。



またマウンドの裾野で実施したボーリング調査等の結果から、さらに深部や周辺部分にも同規模程度の鉱床が予測される(深部への鉱床の拡がりは今後新調査船により調査を要する)ことから、伊是名海穴においては、この2倍の約500万トン(\*)の概略資源量が期待される。

なお、伊豆・小笠原海域ベヨネース海丘の概略資源量は、鉱体の範囲は150m×100m、深さ最大8mとして計算した場合、36万トンであるが、深部のデータが不足しているため、現時点では概略資源量を推定することは困難である。

第1期前半3年の目標は既知鉱床の概略資源量の把握であったが、沖縄海域の1つの鉱床についてはほぼその目的を達成することができた。ただし、マウンド部では用いた深海用ボーリングマシン(BMS)の掘削限界を越えて金属硫化物が存在する可能性があること、及び海底面下にマウンドの形態を呈さない金属硫化物が確認されたものの、その把握が十分ではないこと等の理由から、陸上の鉱山で鉱量計算に用いられている国際基準を用いた計算法は適用できなかった。

しかし、第1期前半3年間の調査ではまだ精度は高くないが、得られたデータから日本周辺海域に存在する他の海底熱水鉱床の概略資源量の把握を行った。

日本周辺海域には科学的調査等により伊是名海穴やベヨネース海丘を含め20数カ所程度の海域で海底熱水鉱床の鉱徴が確認されており、また今後の調査によってさらに新たな鉱徴が発見される可能性もある。これらの海域に存在する好適な地質的特徴を勘案すると、その半数に当たる10ヶ所で伊是名海穴と同規模の鉱床の存在を期待することは過大な期待とは言えない。このことから、伊是名海穴の概略資源量をベースとして、現時点では日本周辺海域の総概略資源量を、5,000万トン程度と推定した。

今後適切な方法で日本周辺全体の詳細な資源量の推定を行うことが求められているが、それは更なる探査を進めなければ正確な予測が難しい。

なお、現段階では、前述したように本資源量の計算方法は、国際基準に達していないが、今後、国際基準に準じた方法で計算すべくデータの蓄積を図ることが必要である。

(\*) 参考：海底熱水鉱床と同様の過程で生成し、かつて商業的に採掘された秋田県北部の「黒鉱鉱床」の平均的規模は、単位鉱体として数 10～100 万トン、ひとまとまりの鉱体群として合計 500 万トン～1000 万トン（鉱石重量）程度であった。秋田県北部には 10 あまりの鉱床群が知られており、その総鉱石重量は 5,000 万トンであった。

## (2) 環境影響評価

### ①概要

沖縄海域及び伊豆・小笠原海域の資源量評価調査が実施されている伊是名海穴及びベヨネース海丘を含む周辺海域において、第2白嶺丸及びJAMSTECの所有する研究船を用いて、海流、水質、生息生物の状況等を把握するため、環境ベースライン調査を実施した。

また、採掘に伴う環境影響を予測するためのモデル開発に着手した。

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ータを蓄積した。

3年間の環境ベースライン調査の実績は、表5に示す。

表5 環境ベースライン調査の実績表

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「かしよう」
	171日		

### ②環境ベースライン調査

沖縄海域の伊是名海穴、伊豆・小笠原海域のベヨネース海丘の周辺域に調査地点を設定し、それぞれ環境ベースライン調査を実施した。

調査では、有索無人潜水機（ROV）を用いて、熱水域及び非熱水域の生物試料の採取、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4）。また、マルチプルコアラー（Multiple Corer: MC）、ボックスコアラーにより底質・底生生物の特性を、CTD（電気伝導度 Conductivity、水温 Temperature、水深 Depth）センサー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4）。

洋上調査と併行して、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（ADCP）及び沈降粒子捕捉装置（セディメントトラップ））（写真 4）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を把握した。また、ADCP、セジメントトラップともに、季節変動及び経年変動を把握するために、1 年間にわたり継続的に観測を実施中である。

調査海域及び調査地点は図 9 に示す。

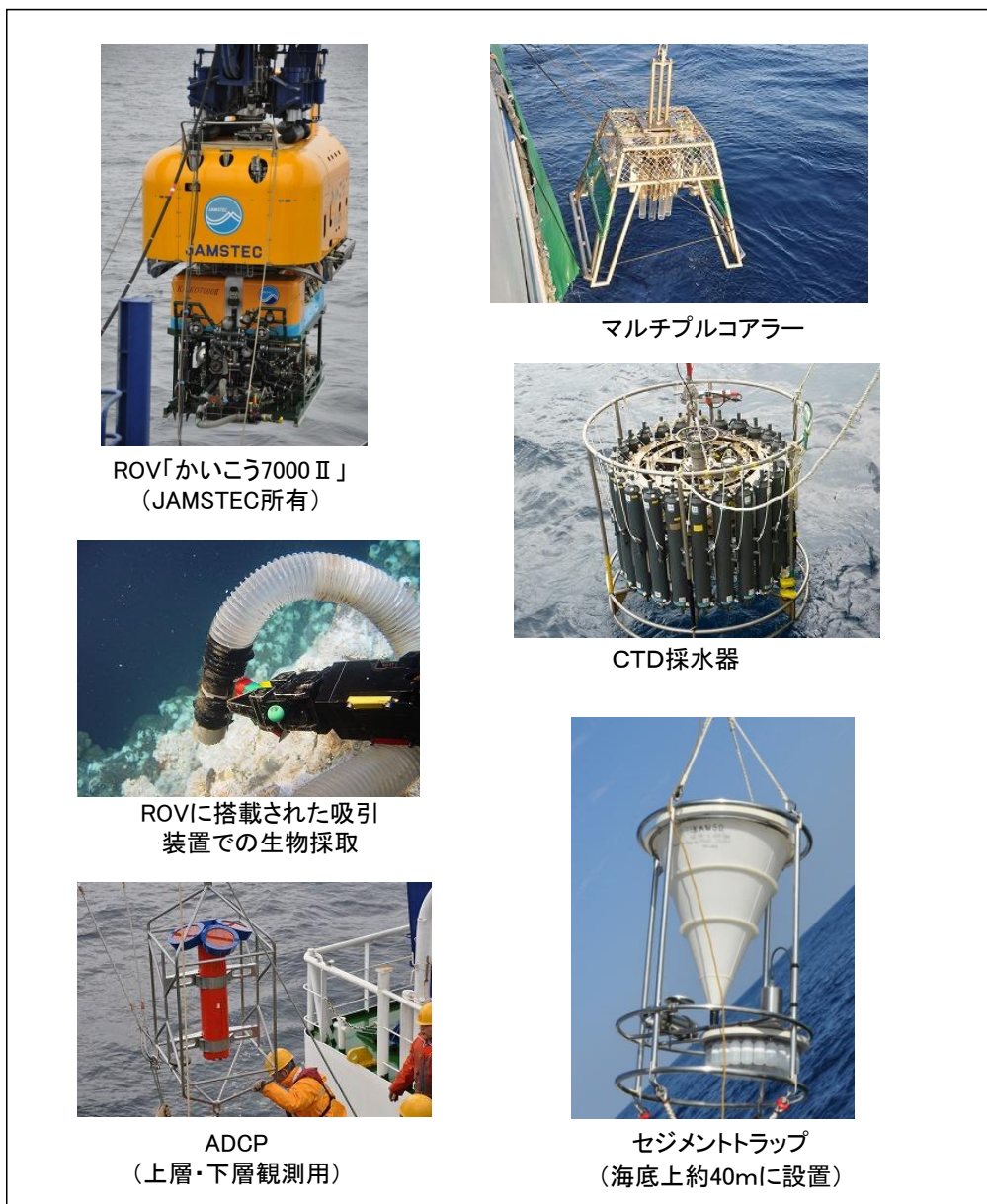


写真 4 環境ベースライン調査で使った主な調査機器

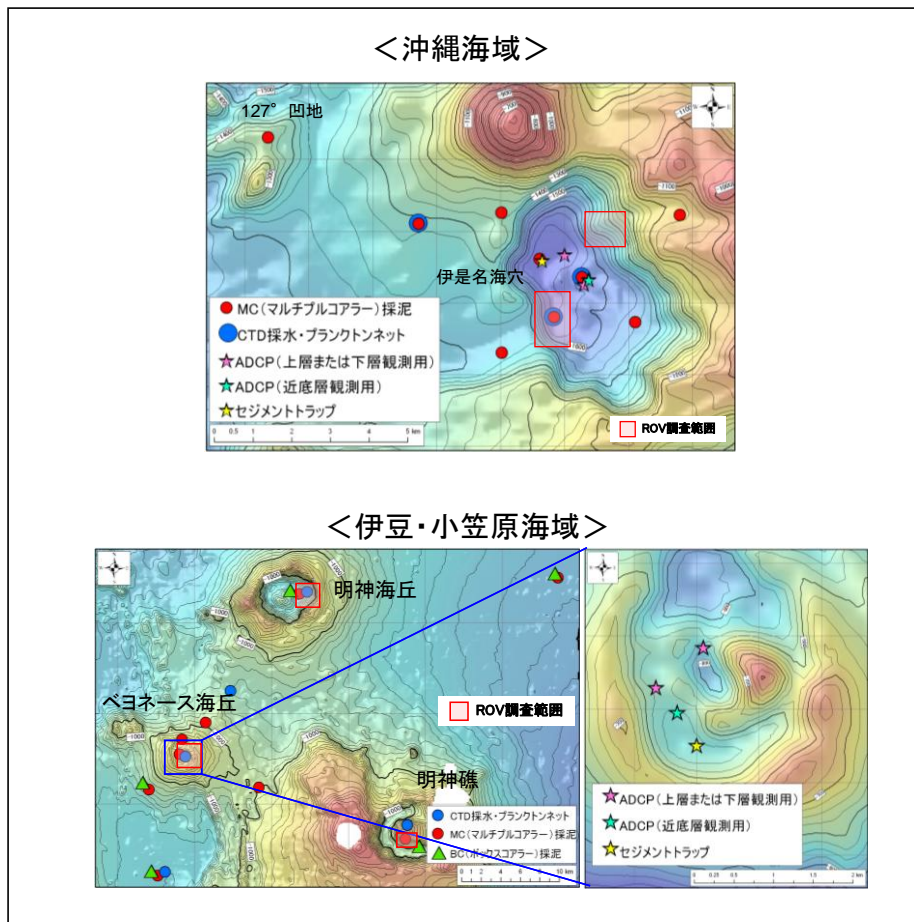


図9 調査海域図（水質、底質、生物調査）

調査結果の概要を表6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において、生物の生息状況や物理化学的環境の特性について調査した。その結果、伊是名海穴では熱水性生物が多い傾向にあり、また、濁度や重金属濃度が高く、沈降粒子の中に熱水起源粒子が多く含まれたことから、熱水の影響が比較的広範囲に及んでいると考えられた。一方、ベヨネース海丘では、伊是名海穴に比べて熱水活動が不活発であり、表層プランクトンを起源とする沈降粒子が多いなどの特徴が見られた。

表 6 環境ベースライン調査結果の概要

調査項目	沖縄：伊是名海穴	伊豆・小笠原：ベヨネース海丘
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大型生物の生息状況を確認した。	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。
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。	表層域（0～200m）で蛍光色素の 2 層のピークを確認した。
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。	水温・塩分、海水成分とともに外洋域に一般的な鉛直変化が観測された。
底質	海穴内では熱水域、非熱水域ともに水銀や砒素などの有害物質の濃度が高い傾向が見られた。	熱水域では水銀や砒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。
流動	最下層の流れは主に南向きで、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。	最下層の流れは主に北向きで、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。
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。	沈降粒子は、光合成起源が大半であり、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

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、環境ベースライン調査のデータを利

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。

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

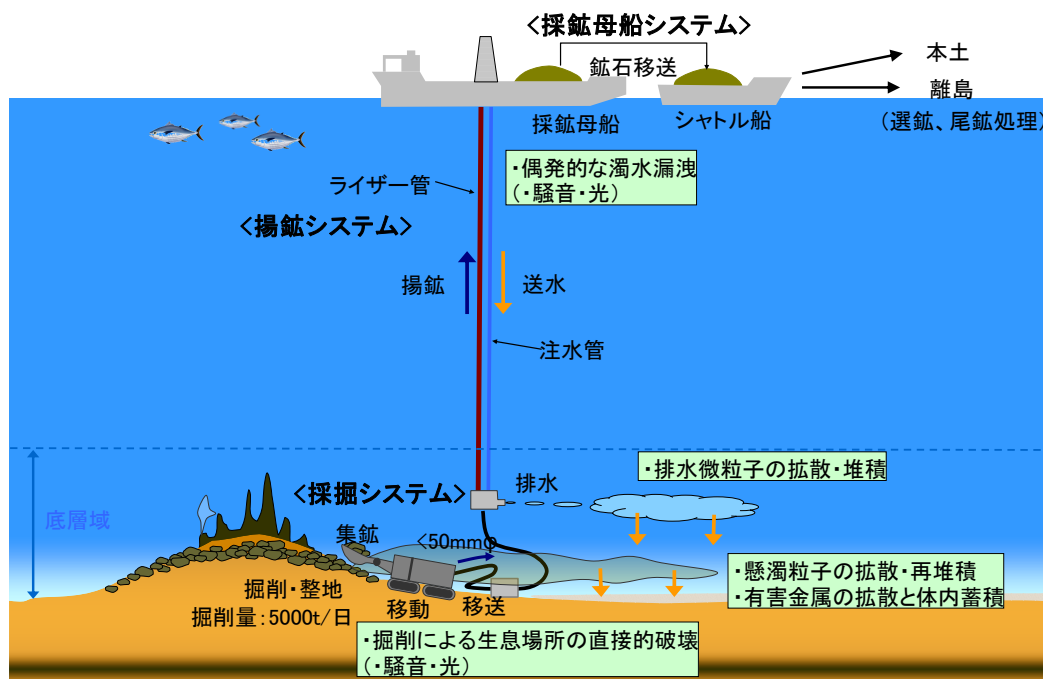


図 10 海底熱水鉱床の採掘において懸念される環境影響の概念

懸濁粒子の拡散・再堆積モデルを用い、現在想定される商業的規模の採掘条件（採掘量 1 日 5,000 トン）に即した予察的なシミュレーションを実施した（図 11）。

伊是名海穴でのシミュレーションの結果、10 日間の採掘で堆積厚さは最大 30cm 程度となったが、拡散は限定的でかつ、海穴外には広がらないことを確認した。

また、ベヨネース海丘でのシミュレーションの結果、10 日間の採掘で堆積厚さが最大 27cm 程度となったが、拡散・再堆積の影響が海丘の外には広がらないことを確認した。

このことから、現時点においては、伊是名海穴、ベヨネース海丘ともに開発規模の条件においても、採掘に伴う懸濁粒子の拡散・堆積範囲はカルデラを超えて大きくは広がらなかった。



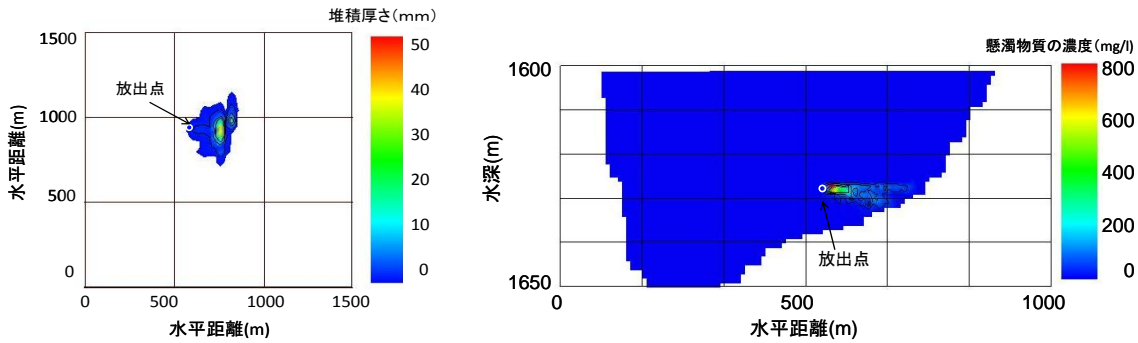


図 11 懸濁粒子濃度の拡散シミュレーションの結果の例（伊是名海穴）

#### ④環境保全策の検討

伊是名海穴、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。沖縄海域ではオハラエビ、ゴエモンコシオリエビ、ヘイトウシンカイヒバリガイ他 4 種、伊豆・小笠原海域では、ユノハナガイ、ネッスイハナカゴ、マリアナイトエラゴカイ他 2 種を解析対象とした。

その結果、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が確認された。また、各種について遺伝子の移動を調べた結果、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考えられた。

図 12 に代表種における遺伝子交流の検討結果の例を示す。

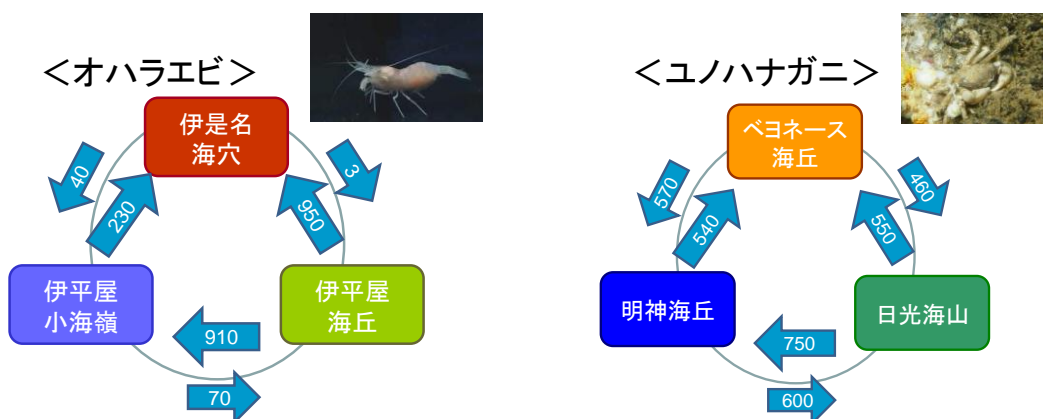


図 12 沖縄海域及び伊豆・小笠原海域における代表種の遺伝的交流

※数値は海域間を移動する遺伝子の相対値。

※伊平屋海丘及び日光海山の既存データを使用

### (3) 資源開発技術（採鉱技術）

#### ①概要

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、海外動向を把握した上で、商業的規模での採鉱対象条件（海象、採掘条件、採掘オペレーション等）を決定した上で、システムを構成する3つのサブシステム（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の製作を実施中であり、これまでに製作条件を決定するための掘削部分の陸上試験等を実施した。今後、採掘要素技術試験機が完成次第、浅海域、実海域での試験を予定している。

以下に、採鉱対象条件、各サブシステムの検討結果を示す。

#### ②設計条件の検討結果

##### a) 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7)。

表7 設計波高(暴風時)

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

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

##### b) 採鉱基礎条件

採鉱作業、運用を考慮して日採掘量、年操業日数、日作業時間、操業日サイクル、年採掘量等の採鉱基礎条件について検討を行い、表8のとおり採鉱基礎条件(目標)を定めた。

また、予備的経済性評価を行い日採鉱量は、5,000t/日程度で検

討するのが妥当であるとの結論を得た。

表 8 採鉱基礎条件

日採掘量	5,000wt/日
有効日採掘量	4,792wt/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

c) 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(1,650m)及び伊豆・小笠原海域ベヨネース海丘(水深800m)を対象に、以下の採鉱オペレーションの基本条件を決定した。

i) 使用水深 最大2,000m

ii) 熱水鉱床の物性

- ・ 1軸圧縮強度 平均20MPa程度(最大50MPa)
- ・ 密度 3~4

d) 掘削対象の地山モデルの構築

海底熱水鉱床に関するこれまでの知見に基づいてマウンドの地山モデルを設定した。その結果、採掘対象マウンドは直径約100m、比高約20mとし、表面は直径数10cm~1m程度の礫が被覆し、頂部にはチムニーが存在することを想定した(図13)。

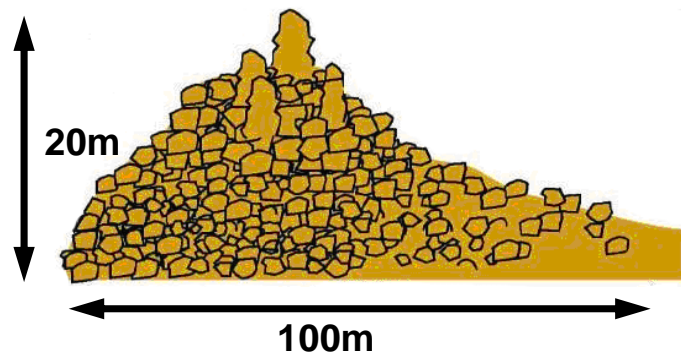


図 13 採掘対象の地山モデル

### ③採鉱システムの検討結果

#### a) 全体システムについて

採鉱システムは、大きく3つのサブシステムから構成され、①海底で鉱石を採掘する採掘システム、②採掘された鉱石を海面まで揚げる揚鉱システム、③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システムに区分される（図14）。

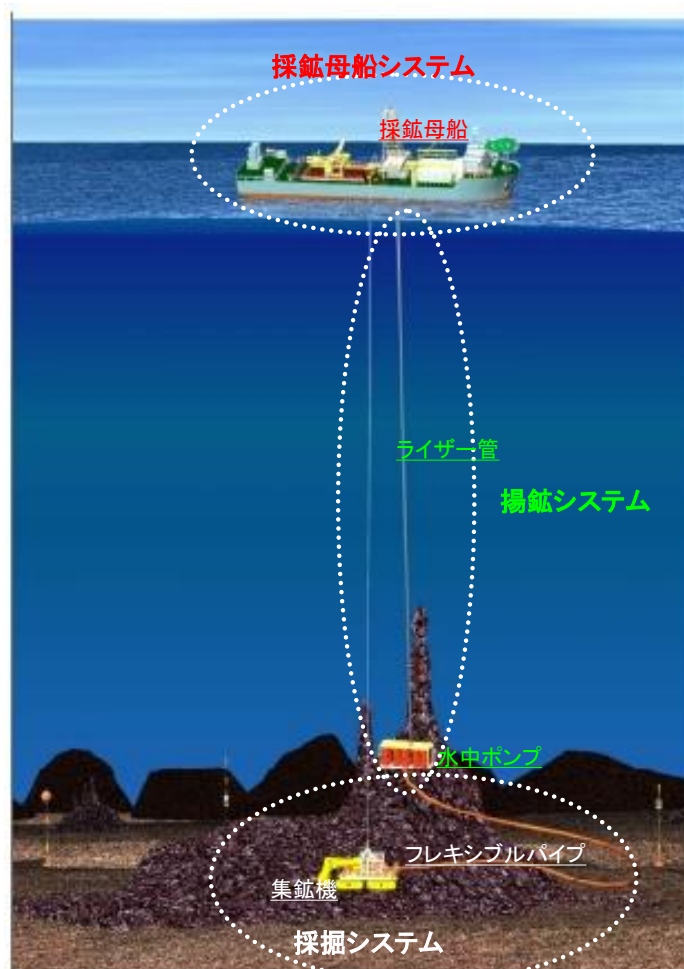


図14 商業生産時の採鉱システム概念図

各サブシステムの検討結果は以下のとおり。

#### b) 採掘システム

採掘システムは、採鉱機、採鉱機から揚鉱ユニットまで鉱石スラリーを輸送するフレキシブルパイプ等から構成される。特に、採鉱機及びフレキシブルホースの最適条件を以下のとおり決定した。

○採鉱機イメージ（主要目を表 9 に示す。）

- ・マウンドを移動しつつ、鉱石をφ50mm以下の岩片に破碎
- ・掘削ヘッドはドラム式、移動方法はクローラー式
- ・5,000トン/日の採掘量を考慮して、採鉱機の仕様及びそのイメージを検討した（図 15）

○フレキシブルホース

- ・採掘された鉱石片を揚鉱システムのポンプに送るために必要
- ・採鉱機とポンプを繋ぎながら、採鉱機の移動を阻害しない柔軟性を持たせることが必要である

表 9 採鉱機イメージの主要目（本採鉱機）

項目	要 目
主寸法	約 10.5mL × 5.4mW × 4.5mH
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 <sup>3</sup> /h（5,000 t/日） 掘削ブーム 旋回・俯仰機能
浚渫装置	浚渫ポンプ 660m <sup>3</sup> /h × 130m 水頭
移動装置	油圧駆動 4クローラー 登坂能力 35° 以上 スラスタ（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、レスポнда（音響測位用）、計装・状態監視用センサ

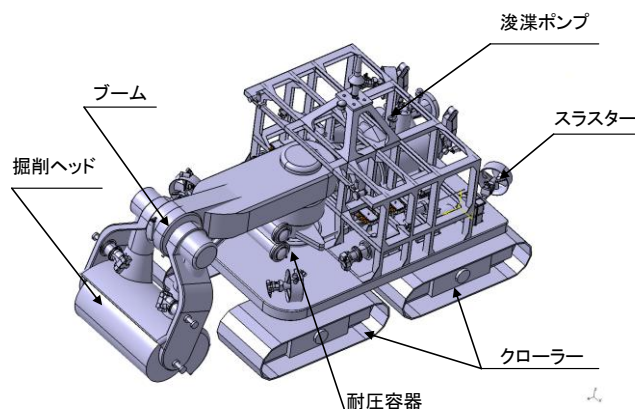


図 15 採鉱機のイメージ図

### c) 揚鉦システム

ポンプ方式、エアリフト方式、バケット方式による揚鉦方式を検討した結果、制御が容易で石油開発等で実績を有するポンプ方式が最適であると決定した。

またリジットライザー及びフレキシブルホースの適用性を検討した結果、沖縄及び伊豆小笠原海域の気象条件を踏まえると、リジットライザーが適切であることが判明した。

以上の検討からリジットライザーの下部に水中ポンプを吊り下げて、スラリー方式により鉦石片を含んだ海水をライザー管を通して揚鉦する方式が最有力であると判断された（図 16）。ただし、直列にポンプを配置するポンプリフト方式も経済性の観点から検討する必要があることが確認された。

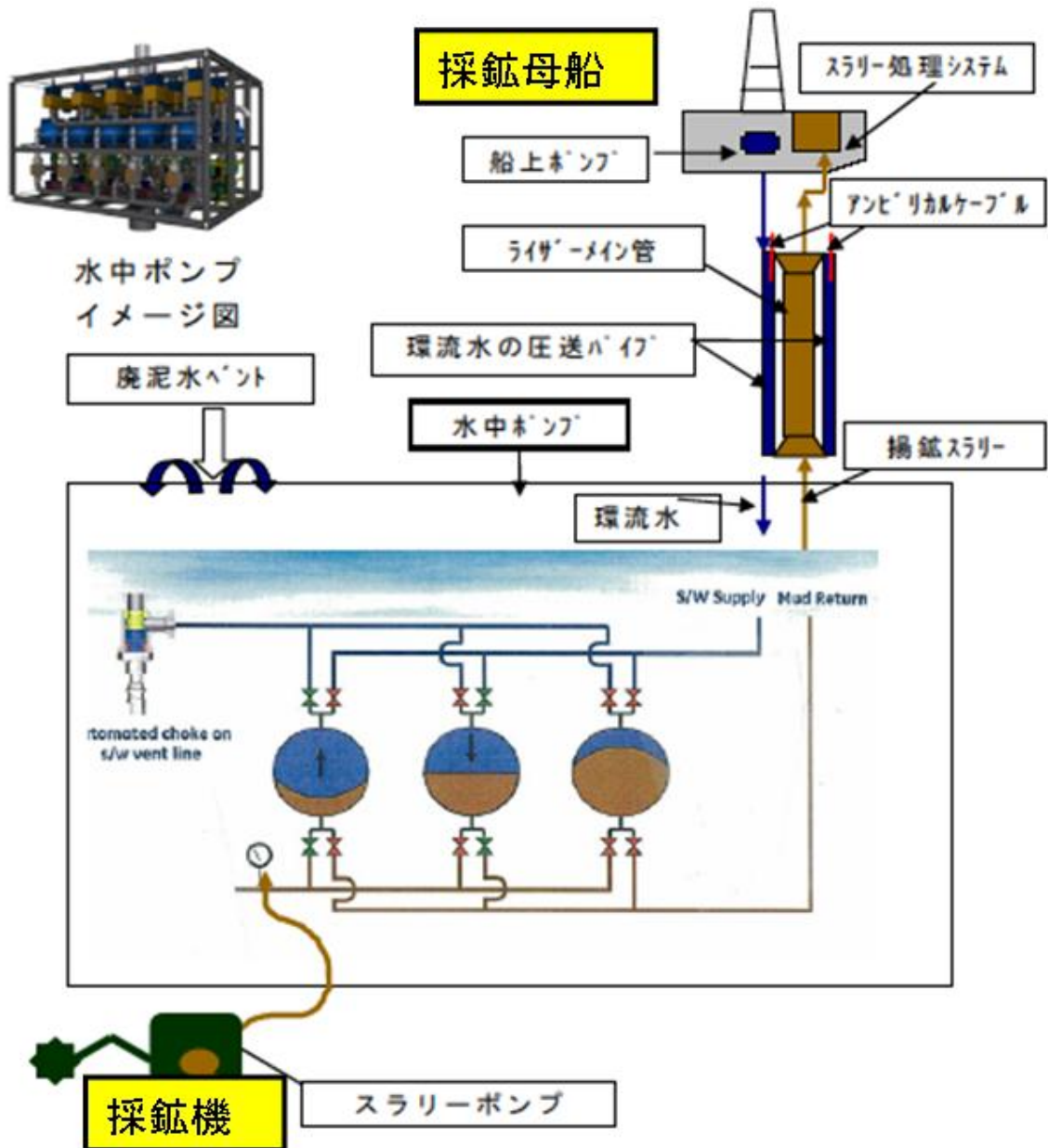


図 16 揚鉱システムの構成図（水中ポンプ方式）

#### d) 採鉱母船システム

採鉱機、ライザー管の投入・揚収・運転の点から比較検討を行った結果、現時点では、中央開口部（ムーンプール）を備えダイナミックポジショニング方式（DPS 式）による定点保持を行う舟形の採鉱母船が最適であることを確認した（図 17）。

また、定点保持方法・能力、鉱石を陸地に運搬するシャトル船の仕様、鉱石積載方法等についても水槽試験（写真 5）等を通じて技術的な検討を行い、その妥当性を検証した。



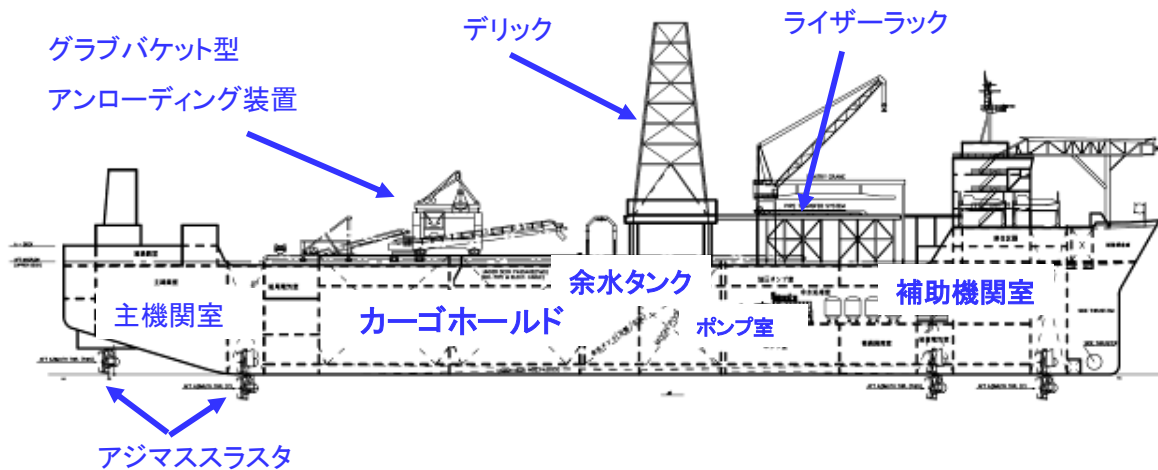


図 17 採鉱母船の概念図



写真 5 採鉱母船とシャトル船との水槽実験

### ③採掘要素技術試験機の製作

海底熱水鉱床の採鉱システムについては、世界的に開発事例がなく、特に、3つのサブシステムのうち、採掘システムが最も技術開発要素が高い。このため、今後の検討課題となっている実証試験機的设计にあたっては、まず①移動、②掘削・整地、③集鉱・移送技術といった個別の要素技術について基礎的検討が不可欠である。このため、これらの要素技術データの取得を目的に採掘要素技術試験機の製作に着手した。

当該試験機の製作は、現在、3つの企業グループで併行して実施中であり、これまでに陸上での掘削試験を実施し、試験機の製作に求められる基礎的掘削データの取得を行っている（写真 6）。試験機の完成後、実海域等において採掘要素技術試験を実施する計画である。



写真 6 掘削方法に関する陸上試験

#### (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。

試験に用いた試料は写真7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

写真7 選鉱・製錬試験に用いた試料

##### ②既存プロセスの検討結果

###### a) 伊豆・小笠原海域の試料の選鉱処理プロセスの検討結果

ベヨネース海丘の3カ所から採取された試料を用いて検討を実施した。試料には、それぞれ比重差があるため、まず比重選別法の1つであるジグ選別で、それぞれ

○高亜鉛品位産物

○銅、鉛、亜鉛、金、銀などを含む産物

○海底基盤岩を主体とした低品位産物

に分離し、その後、高亜鉛品位産物は直接製錬、各種金属を含む産物は浮遊選鉱、低品位産物は湿式製錬法で処理するプロセスを提案した（図18）。

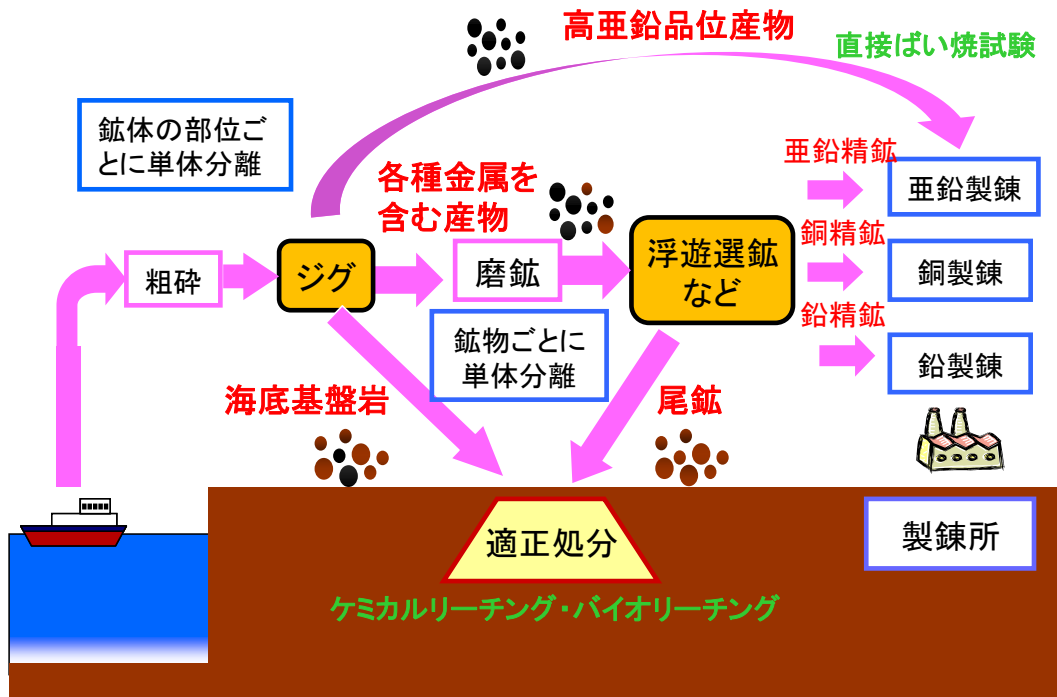


図 18 伊豆・小笠原海域ベヨネース海丘試料の選鉱・製錬処理フローのイメージ

特に、各種金属を含む産物（図 19 は試料中の銅や鉛などの存在状態を示す）のさらなる選鉱処理試験を検討した結果、多段の浮遊選鉱などで、亜鉛精鉱、銅精鉱及び鉛精鉱としてそれぞれ濃縮できる可能性を見出した。

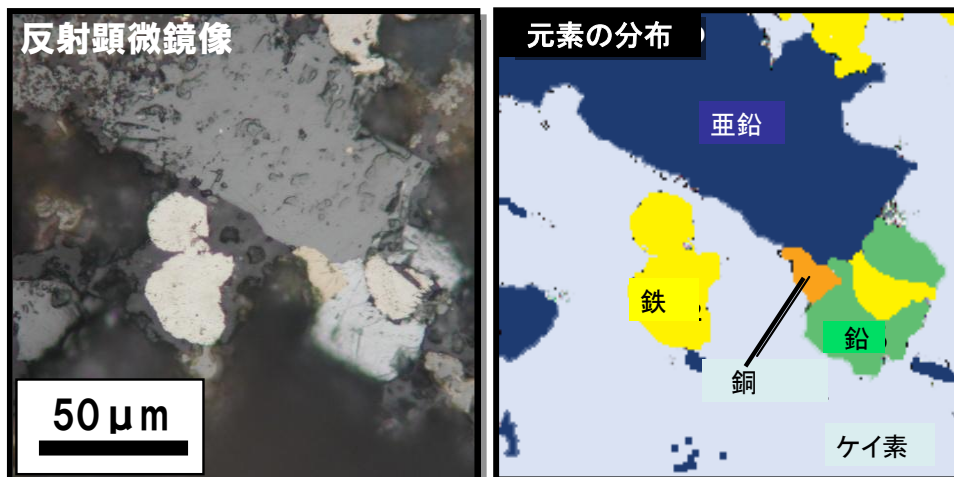


図19 伊豆・小笠原海域の各種金属を含む試料の顕微鏡写真と各種金属の分布

## b) 沖縄海域の試料の選鉱処理プロセスの検討結果

沖縄海域の試料は、伊豆・小笠原海域試料に比べ、銅、鉛、亜鉛、金、銀の品位が低い一方、鉄品位が高く、また全体的に硫化物の粒度が微粒であるのが特徴である。

このため、伊豆・小笠原海域とは異なる処理プロセスが必要である。浮遊選鉱法により、銅、鉛、亜鉛を含む産物を回収し、鉄の硫化物と分離できる可能性を見出した（図 20）。

ただし、金属硫化物が微粒であるため、通常のプロセスに比べて、その処理には多くの解決すべき課題があることが判明した。

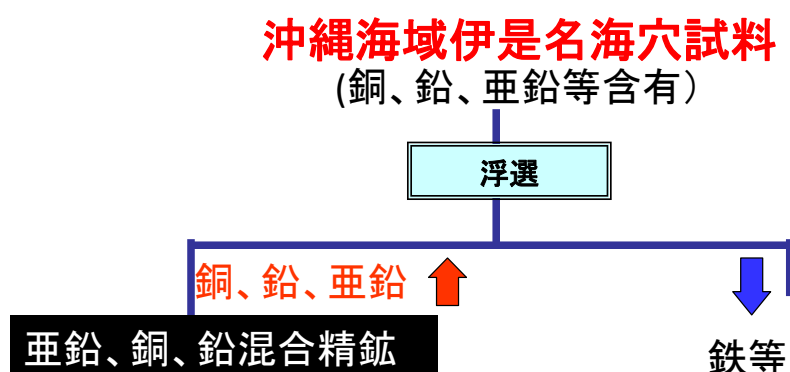


図 20 沖縄海域伊是名海穴試料の浮遊選鉱処理フローのイメージ

## c) 製錬技術の検討

ベヨネース海丘の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。

また、伊是名海穴の試料では、銅、鉛、亜鉛を含む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 21）。

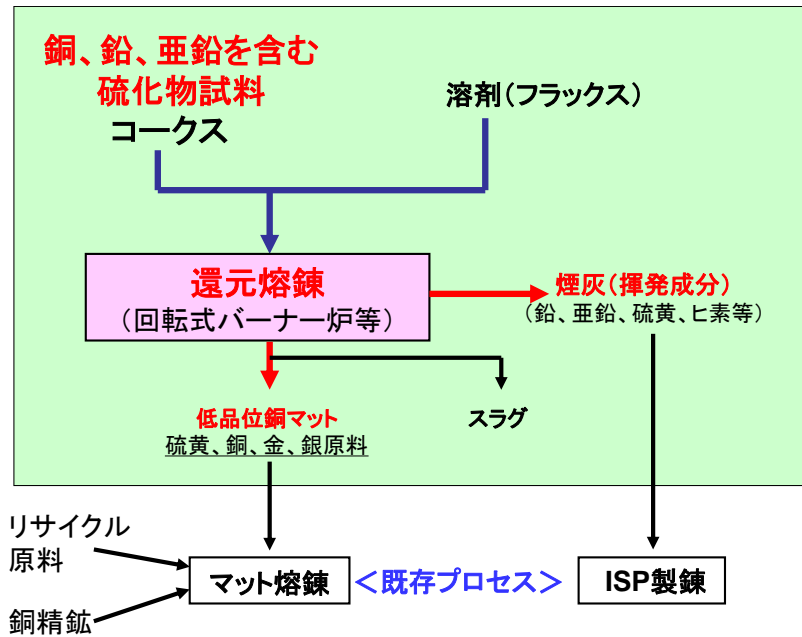


図 21 直接製錬フローのイメージ

### ③新技術の検討結果

#### a) 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、金及び銀に対して高い浸出率が得られた（図 22）。

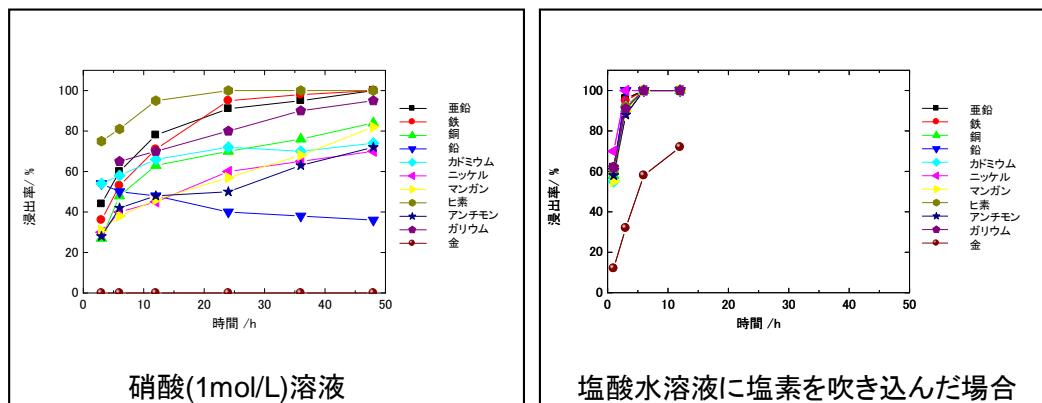


図 22 ケミカルリーチングにおける各元素の経時変化



## b) バイオリーチングの検討

中温性鉄酸化細菌 (*At. Ferrooxidans*) 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 23)。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。

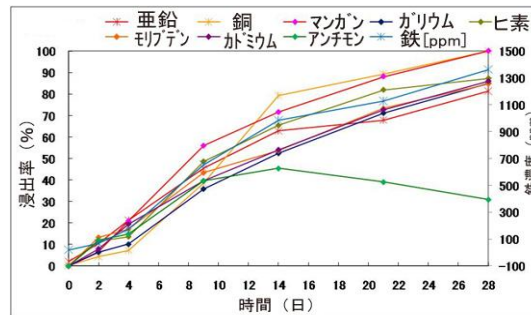


図 23 中温性鉄酸化細菌によるバイオリーチングにおけるベースメタルの経時変化

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。



## 6. 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大規模である可能性が判明し、現時点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、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。

## 7. まとめ

### (1) 資源量評価

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、集中的なボーリング調査等を実施し、鉱化帯の水平・垂直方向の連続性を確認した。その結果、一つの鉱化帯の概略資源量が500万トン程度期待できる可能性が判明し、我が国排他的経済水域内で10個程度期待できることから、その概略資源量は5,000万トンと推定した。

### (2) 環境影響評価

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、環境ベースライン調査を実施し、環境データを取得し、当該海域の環境特性を把握した。特に、生息生物の遺伝子解析の結果、現時点では伊是名海穴及びベヨネース海丘固有の種は確認されなかった。

### (3) 資源開発技術（採鉱技術）

予備的経済性検討の結果、商業的採掘規模は1日5,000トンが必要と算定した。これを踏まえて、採鉱システム（採掘・揚鉱・採鉱母船）の基礎的検討を実施・完了した。

併行して採掘要素技術試験機を製作し、一部陸上試験に着手しデータを蓄積した。

### (4) 製錬技術（選鉱・製錬技術）

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、既存プロセス（浮遊選鉱－乾式製錬法）及び新技術（ケミカルリーチング及びバイオリーチング）について検討した結果、現時点で想定できる選鉱処理プロセスフローを提案した。

### (5) 実証試験候補海域

上記結果から、沖縄海域伊是名海穴を1位、伊豆・小笠原海域ベヨネース海丘を2位とすることが適当である。

## 8. 今後の計画

### (1) 資源量評価

#### ① 詳細資源量の把握

第1期前半で沖縄海域及び伊豆・小笠原海域の概略資源量を把握したが、現有の深海用ボーリングマシン(BMS)では掘削能力(20m)に限界があることも判明した。

また、ボーリング調査の結果、掘削長に対するコア回収率が平均40%程度であり、陸上鉱床の探査の場合と比較して低いことから、正確な資源量評価が困難である(陸上鉱床の探査で用いるボーリング調査のコア回収率は一般に80%~90%)。

このため、今後は、こうした課題の解決に努めつつ、当面は、引き続き、現有BMSを用いて、ボーリング調査を実施し、水平・垂直方向の資源情報の取得に努めるが、深部掘削については新調査船の就航に期待する。

#### ② 広域調査

引き続き、海底地形調査等を実施しつつ、文部科学省の基盤ツール開発やJAMSTECの探査機開発プロジェクトの開発動向と連携して推進していく。

### (2) 環境影響評価

第1期前半で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周辺の環境ベースライン調査によって、当該海域の環境特性を把握したが、候補海域での詳細な検討は行っていないため、今後は、以下の試験候補海域における環境影響評価及び保全策の検討が必要である。

- ① 候補海域における環境影響評価項目の抽出と評価に必要な生物、水質、底質、流向・流速に関する詳細な環境データの取得
- ② 候補海域の環境特性に即した環境影響予測モデルの改良及び予測シミュレーション
- ③ 遺伝子解析等による、候補海域における生物多様性の保全策の検討と国際的に認知を促すための成果普及。

### (3) 資源開発技術（採鉱技術）

経済的に採掘可能な規模、採掘対象条件を検討し、最適な採鉱システムの概念を構築した。また、今後の実証試験機の設計に必要な情報取得のため採掘要素技術試験機を製作中である。

ただし、現時点の調査結果からは、採掘対象のマウンドの内部構造が正確に解っていないため、今後の深部調査に基づき資源量評価分野において鉱床モデルの見直しを行った場合には、これに対応し採鉱システムを再検討する可能性がある。

当面は、現時点での情報を踏まえ、各サブシステムの検討結果から抽出された課題について技術的検討を継続しつつ、採掘要素技術試験機による海域試験を実施し、その成果を踏まえて実証試験機の設計に反映する。

また、資源量評価、選鉱・製錬技術分野等と連携し、商業化へ向けた採算性を検証するため予備的フィジビリティ・スタディ（プレフ／S）を実施する。

### (4) 製錬技術（選鉱・製錬技術）

沖縄及び伊豆・小笠原海域の試料では鉱物粒子、組成が異なるため、実験室レベルでの基礎試験を通じて、現時点においてそれぞれの海域に適した選鉱・製錬プロセスを提案した。

ただし、海底熱水鉱床（金属硫化物）は、陸上鉱床（黒鉱鉱床）よりヒ素等の不純物が多く含まれることや鉱物粒子が細かいこと等からその処理は容易ではない。さらに、日本国内には、現在、鉱石を一次処理するための選鉱施設も存在しない。

このため、今後、選鉱パイロットプラントの建設を目的とした設計が必要であるが、残された課題の解決を含め浮遊選鉱法を含めた物理選別法や乾式製錬法等、より最適な条件の探索も必要であることから引き続き基礎試験を併行して実施する。また、海上での処理を効率的に進めるため海底物理選別の実現可能性、選鉱残渣処理法、選鉱実施場所等の検討も引き続き実施する必要がある。

【参考1 海底熱水鉱床開発委員会委員名簿】

平成23年3月現在

委員長	平	朝彦	独立行政法人海洋研究開発機構 理事
副委員長	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	阿部	一郎	住友金属鉱山株式会社取締役 専務執行役員
	岸本	清行	独立行政法人産業技術総合研究所地質情報研 究部門地球変動史研究グループ主任研究員
	白山	義久	国立大学法人京都大学フィールド科学教育研 究センター瀬戸臨海実験所長 教授
	徳山	英一	国立大学法人東京大学大気海洋研究所 海洋底科学部門海洋底地質学分野 教授
	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2 ワーキンググループ委員名簿】

平成23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	国立大学法人東京大学大気海洋研究所海洋底科学部門海洋底地質学分野 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
	玉木 賢策	国立大学法人東京大学大学院工学系研究科エネルギー・資源フロンティアセンター長 教授

計7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  | 国立大学法人京都大学フィールド科学教育研究センター瀬戸臨海実験所長 教授            |
| 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気海洋研究所海洋生態系動態部門底生生物分野 教授             |
|     | 中田 喜三郎 | 東海大学大学院海洋学研究科海洋工学専攻 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                        |
|     | 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                     |
|     | 山本 啓之  | 独立行政法人海洋研究開発機構極限環境生物圏研究センター海洋生態・環境研究プログラム技術研究主幹 |
|     | 山崎 哲生  | 大阪府立大学大学院工学研究科海洋システム工学分野 教授                     |

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部技術部  
担当部長

坂本 隆 新日鉄エンジニアリング株式会社海洋事業部商  
品・プロジェクト企画部長

皿田 滋 独立行政法人産業技術総合研究所知能システム  
研究部門 主任研究員

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 准教授

矢野 州芳 三菱重工業株式会社船舶技術部 主席技師

計6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

小笠原 滋 DOWAメタルマイン株式会社 企画室  
技術担当部長

吉田 卓司 三井金属鉱業株式会社 竹原製錬所長

計6名（敬称略：委員は50音順）

### 【参考3 用語集】

#### ＜資源量評価＞

【概略資源量】 海底熱水鉱床の水平的な拡がり及び垂直方向の連続性を予察的に調査し、鉱床のおおよそ資源量を算定すること。国際基準に準拠するものではない。

【詳細資源量】 概略資源量調査で有望と判断された区域について、グリッドボーリングを展開し、国際準拠の鉱量計算基準（後述）で資源量の算定を行うこと。

【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。

【深海用ボーリングマシン】 海底着座型のボーリングマシン。海洋でボーリングを行う場合、調査船にボーリング檣を有する「大水深掘

削船」やプラットフォームに檣を有する「大水深セミサブ」を用いることが一般的であった。1990年代に日本、英国が海底の状況を観察しながら掘削地点を選定すること、コア回収率を高める工夫が必要であったことなどから海底面に動力源を有する「深海用ボーリングマシン」の開発が行われた。日本では、1996年に金属鉱業事業団（現・JOGMEC）が第2白嶺丸に搭載するため、日本で初めて海底着座型ボーリングマシンを導入した。

【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きている。調査で用いた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1m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】海底熱水鉱床（鉱石）は、主に「硫化物」という金属元素と硫黄の化合物からなる。硫化物から金属成分を濃集する工程を「選鉱」という。濃集したものを「精鉱」という。精鉱から地金を生成する工程を「製錬」という。

【品位】 サンプルングした鉱石・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。

【資源量計算の国際基準】 資源量の分類、規定は豪州において制定された“JORC 規定”が基本となっている。日本にも JIS 規格というものがあ、JORC との関係では、「JIS：埋蔵鉱量 $\div$ JORC：鉱物資源量」、「JIS：可採鉱量 $\div$ JORC：鉱石埋蔵量」となっている。また、米国、カナダ、南アフリカも国際基準を有しているが、それらの間で規格統一がなされているわけではない。これらの国の資源量計算基準を用いれば、国際的に信頼の高い資源量として認知される。我が国が海底熱水鉱床で行った現状の調査レベルでは、調査密度、調査量の観点から国際基準で資源量を計算できない。

【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。

【有索無人潜水機（ROV；Remotely Operated Vehicle）】 遠隔操作による水中探査機。水中カメラ、ソナー、マニピュレータを備えた物がある。

## <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。

【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。

【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。

【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。

【有索無人潜水機 (ROV ; Remotely Operated Vehicle)】遠隔操作による水中探査機。水中カメラ、ソナー、マニピュレータを備えた物がある。

#### <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 $1\text{mm}^2$ 当たりの圧力に換算したもの。

【資源量】発見・未発見及び経済的価値の有無、技術的に回収可能・不可能を問わず、海底に自然に存在している (海底熱水鉱床の) 資源の集積量を指す。

【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。

【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

困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方式（DPS 式）】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ウ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を高度差 1000m 以上を揚げなければならぬため、強力なポンプ等を用いたシステムが検討されている。

【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の確認・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。

#### ＜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。

【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。

【湿式処理（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。

【溶剤】 乾式製錬において、不純物をスラグにするための物質

【熔錬】 鉱石を溶鉱炉その他の炉で熔融・還元して粗合金を得る操作。

【マット製錬】 乾式製錬法の一つ。銅製錬の場合、硫化鉱を熔融し、硫化鉄分と硫化銅分が主体の鉱（マット）を作り、酸化して鉄分主体の鏝（スラグ）と酸化銅分主体の白鉱（マット）とを反射炉で分離する。酸化銅主体の白鉱（マット）は還元され、転炉で粗銅となる。

【ISP 製錬】 乾式鉛・亜鉛製錬法の一つ。イギリスのインペリアル・スメルティング社が考案した手法で亜鉛・鉛混合精鉱をコークスとともに炉に装入し、鉛と亜鉛を同時に製錬する手法。

【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。

【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。

