

※本資料は、経済産業省の委託事業で得られた成果に基づき作成しています。



＜第9回海洋資源開発技術プラットフォーム会合＞

海底熱水鉱床の開発に向けた取り組みについて

2023年11月10日

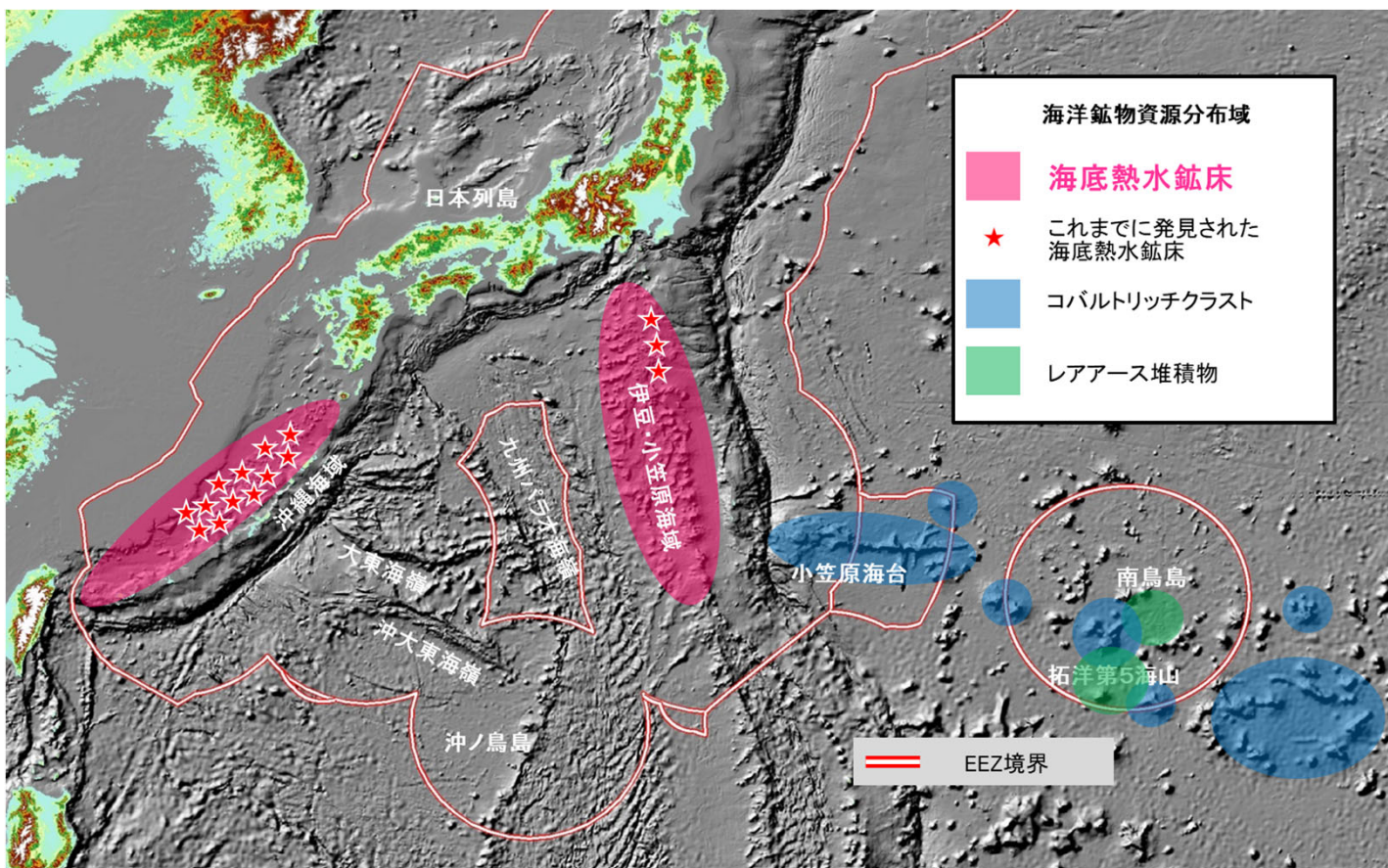
独立行政法人 エネルギー・金属鉱物資源機構

金属海洋資源部長 関本 真紀

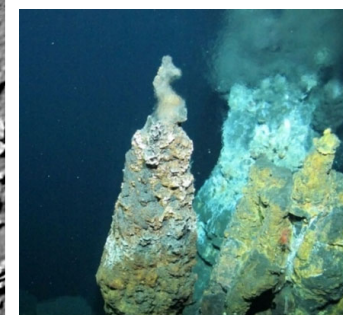
報告の内容

1. 海底熱水鉱床の特徴
2. 海洋エネルギー・鉱物資源開発計画と総合評価
3. 各技術分野における5カ年の取組と成果・課題
 - ① 資源量調査
 - ② 採鉱・揚鉱技術開発
 - ③ 選鉱・製錬技術開発
 - ④ 環境影響評価
4. 経済性の評価
5. まとめと今後の展望

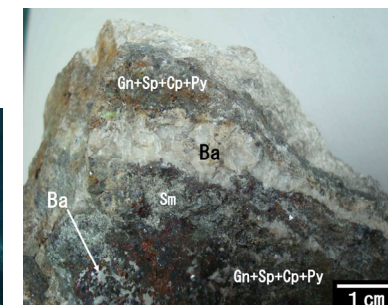
1. 海底熱水鉱床の特徴



- 日本近海では沖繩海域や伊豆・小笠原海域の水深500～2,000mに賦存
- 亜鉛、鉛、銅、金、銀などの金属を含む



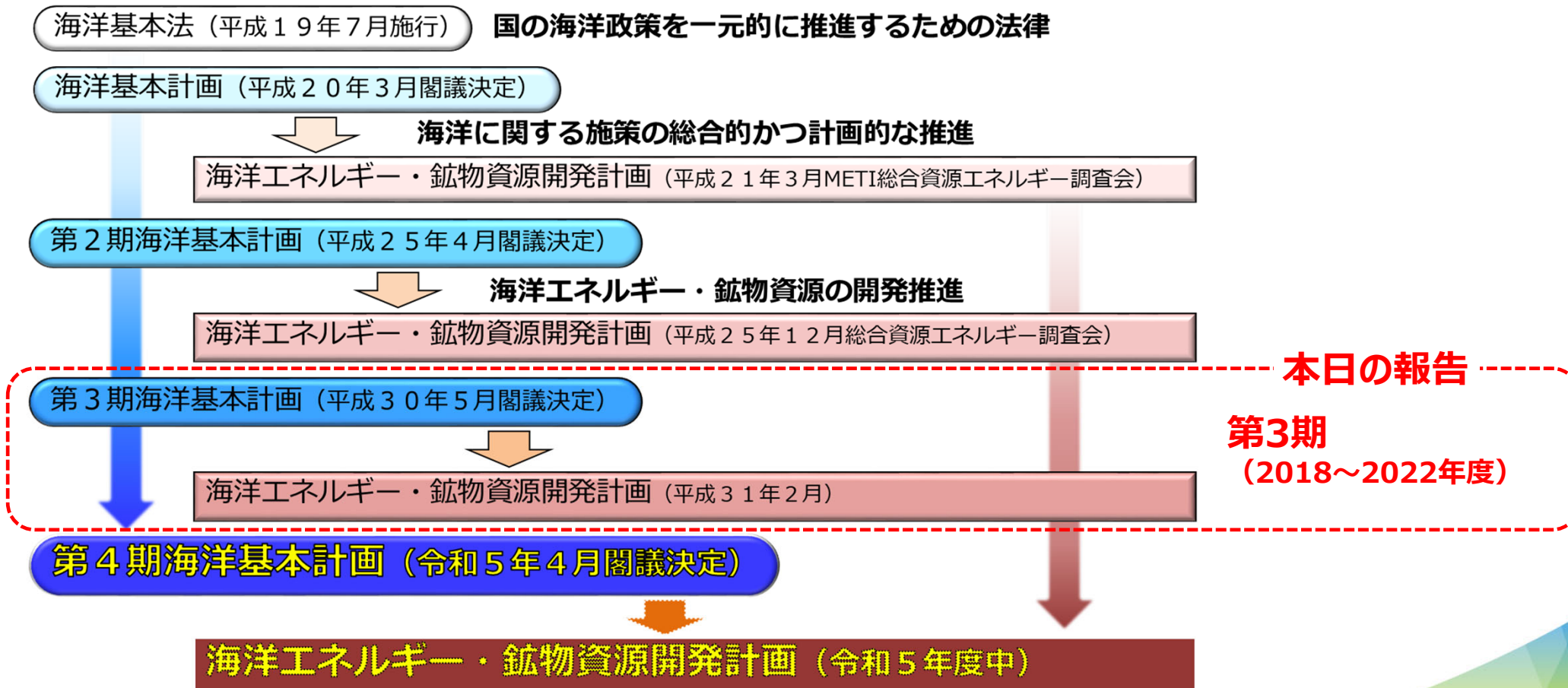
沖繩海域ごんどうサイトのチムニー（尖塔状地形）



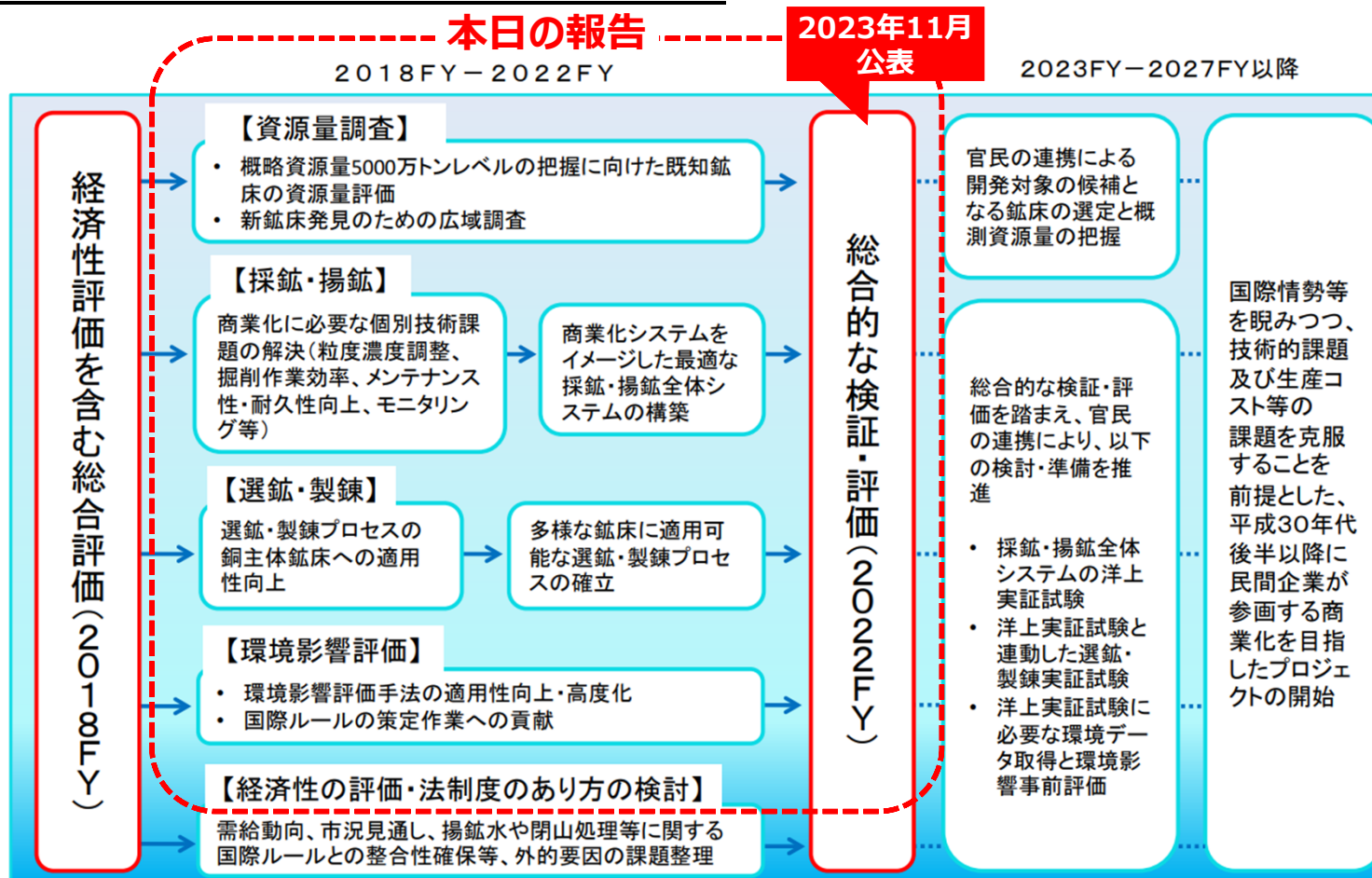
海底熱水鉱床鉱石を構成する金属鉱物

出典：海底熱水鉱床開発計画総合評価報告書（令和5年11月、経済産業省資源エネルギー庁・JOGMEC）を一部改変

2. 海洋エネルギー・鉱物資源開発計画と総合評価 開発計画の位置付け



2. 海洋エネルギー・鉱物資源開発計画と総合評価 海底熱水鉱床の開発に向けた工程表



2. 海洋エネルギー・鉱物資源開発計画と総合評価 総合評価報告書の目次



1. 概要

2. 海底熱水鉱床開発に向けた計画と体制

3. 海底熱水鉱床について

4. 個別技術分野における成果・課題

- 資源量調査
- 環境影響評価
- 採鉱・揚鉱技術
- 選鉱・製錬技術

5. 法制度のあり方の検討等

- 法制度
- 社会的受容性
- 他産業の海域利用
- 主要金属価格の推移

6. 経済性の評価

7. 海底熱水鉱床開発において考慮すべき課題

- 資源量調査
- 環境影響評価
- 採鉱・揚鉱技術
- 選鉱・製錬技術
- 法制度のあり方の検討等

8. 今後の展望

- 資源量調査
- 環境影響評価
- 採鉱・揚鉱技術
- 選鉱・製錬技術
- 法制度のあり方の検討等



第4期海洋基本計画に、今回の総合評価結果を踏まえて開発計画を改定することが明記されている

2. 海洋エネルギー・鉱物資源開発計画と総合評価 2018年（第2期末）の総合評価の振り返り



資源量調査

- 沖縄海域での**6つの海底熱水鉱床を発見**
- ボーリング調査の結果に基づき資源量評価を実施。**資源量750万tを把握**



採鉱・揚鉱技術開発

- 実海域での**採鉱・揚鉱パイロット試験**を実施
- 水深約1,600mの海底からスラリー状の鉱石を**連続的に揚鉱**（16.4t）することに成功

船上に揚鉱された鉱石



選鉱・製錬技術開発

- 採鉱・揚鉱パイロット試験サイトの**亜鉛・鉛に富む鉱石**特性を把握し、**選鉱フローを構築**
- 選鉱試験で得られた亜鉛・鉛バルク精鉱から**亜鉛地金を作製**



1cm

国内製錬所で製造された亜鉛地金



環境影響評価

- 採鉱・揚鉱パイロット試験の**環境影響評価**及びモニタリングを実施
- 同試験のための**環境影響予測モデルを開発**

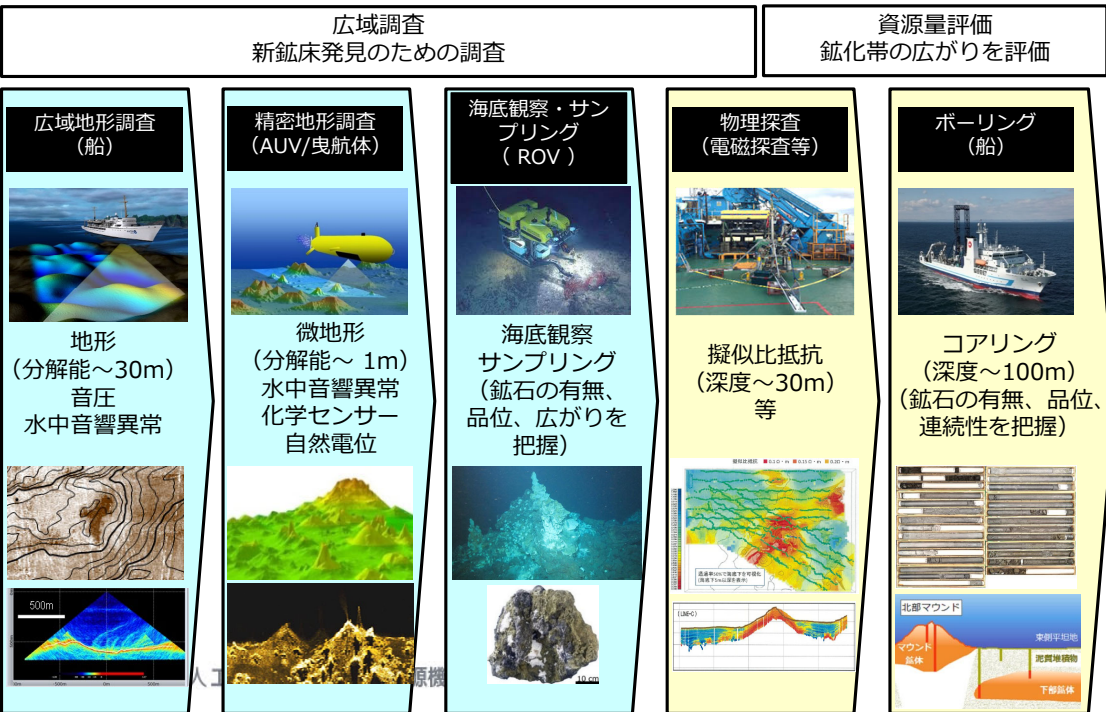
3. 各技術分野における5カ年の取組と成果・課題

① 資源量調査

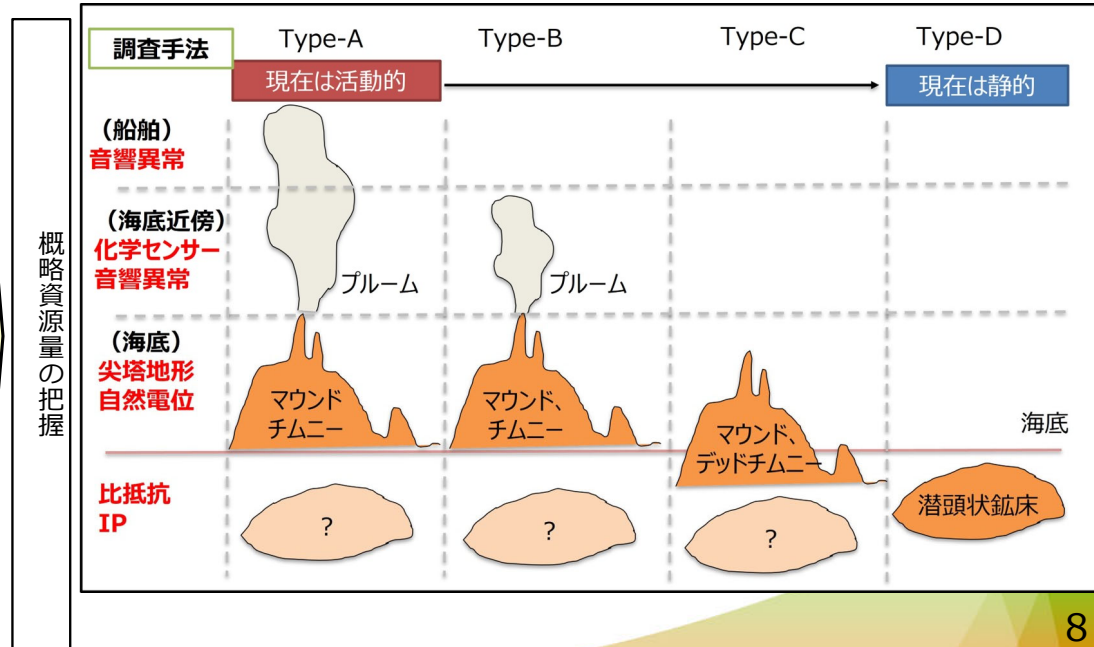
海底熱水鉱床の調査手法

- 広域調査： 新規鉱床発見や資源量評価対象となる鉱床の把握
- 資源量評価： 鉱床の規模や品位の把握

調査の流れ



探査手法の有効性を考慮したタイプ分類



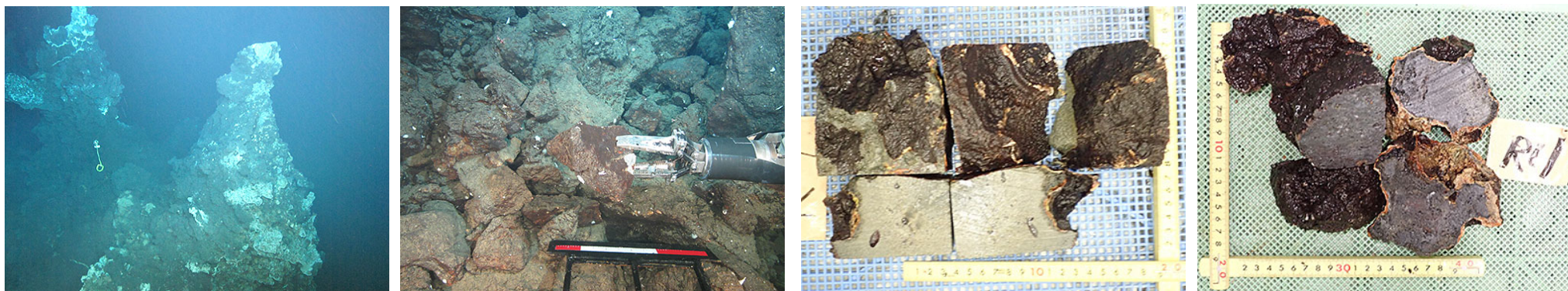
3. 各技術分野における5カ年の取組と成果・課題

① 資源量調査

広域調査

- **7つの新規鉱床**を発見（沖縄海域：天美サイト、豊見サイト、梯梧サイト、吾妻サイト、令宝サイト；伊豆・小笠原海域：東青ヶ島鉱床、須美寿リフト中央鉱床）

成果の事例（天美サイト）



出典：JOGMECニュースリリース（2020年3月）

- 2019年の調査の結果、鹿児島県奄美大島沖に新たな海底熱水鉱床を発見
- 沖縄海域の他の鉱床より浅い水深に賦存

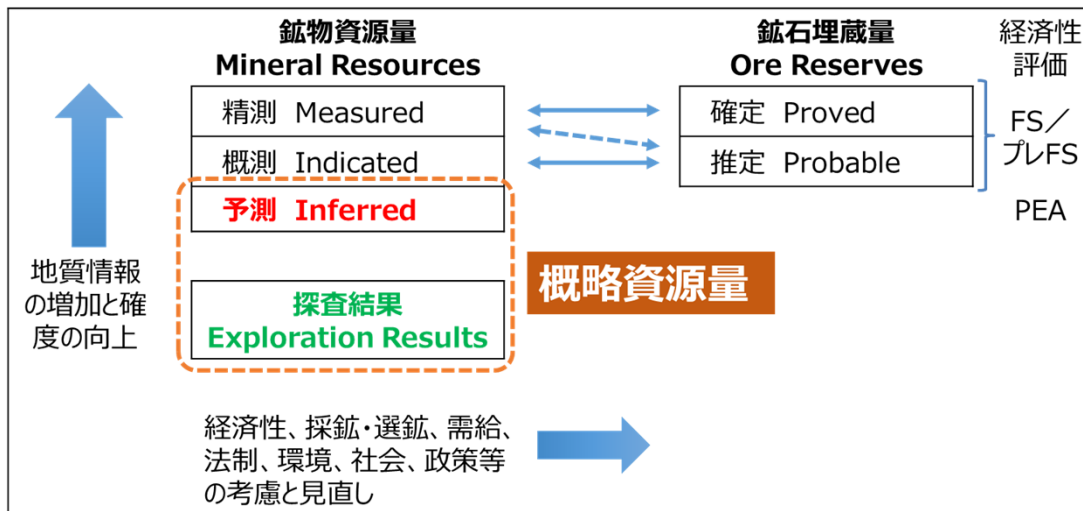
3. 各技術分野における5カ年の取組と成果・課題

① 資源量調査 資源量評価

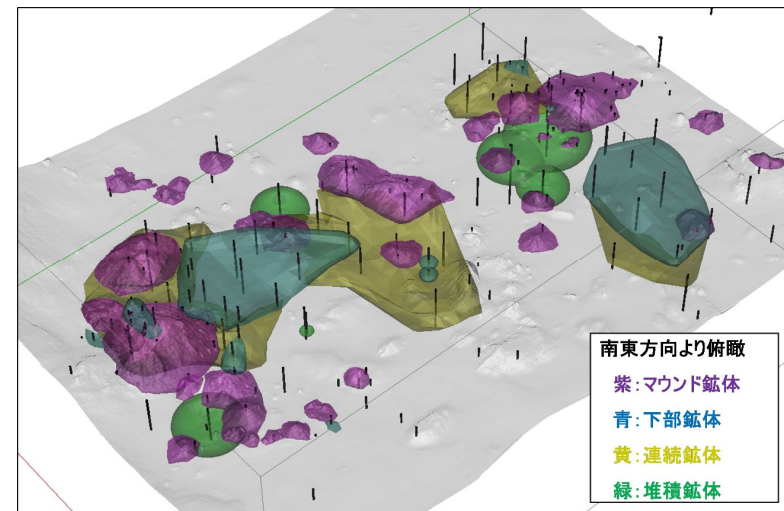
- 第2期の750万tから大幅に増加
- 一方、商業化に向けて資源量の精緻化が必要

- 沖縄海域の6つの鉱床を対象に資源量評価を実施
 - 第2期までに発見された既知鉱床： Hakureiサイト、ごんどうサイト、野甫サイト、田名サイト、銀水サイト（沖縄海域）
 - 第3期に発見された新規鉱床： 天美サイト（沖縄海域）
- 第2期に資源量評価を行った伊豆・小笠原海域の白嶺鉱床を含む7つの鉱床の概略資源量合計 **5,180.5万t**を把握

概略資源量の位置づけ



鉱体分布の事例 (Hakureiサイト)



Hakureiサイトにおける鉱体の3次元モデルの鳥瞰図

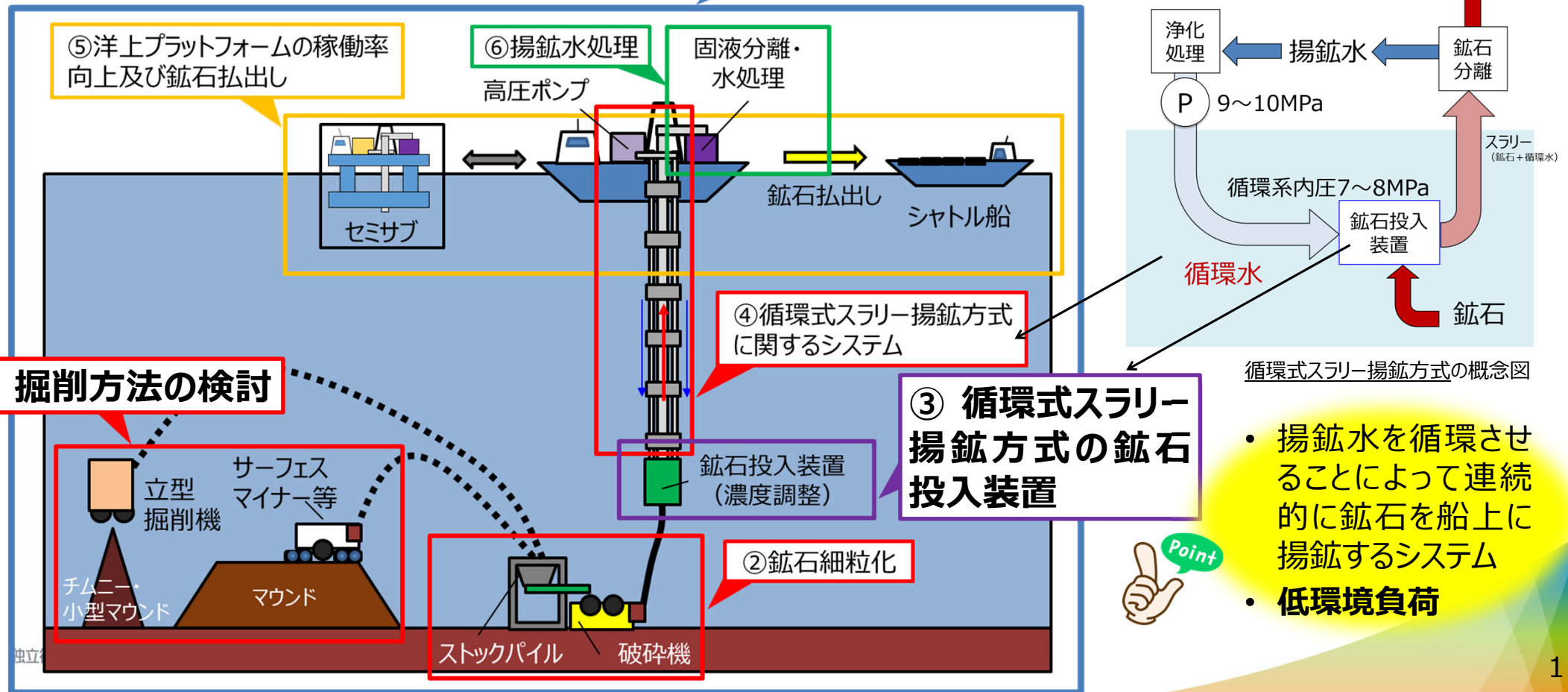
探查結果、鉱物資源量、鉱石埋蔵量の関係はJORC (Australian Joint Ore Reserves Committee、鉱石埋蔵量合同委員会) 規程による。経済性評価との関係はOntario Securities Commissionの資料による。

3. 各技術分野における5カ年の取組と成果・課題

② 採鉱・揚鉱技術開発

6つの要素技術と全体システム

⑦ 全体システムの最適化検討

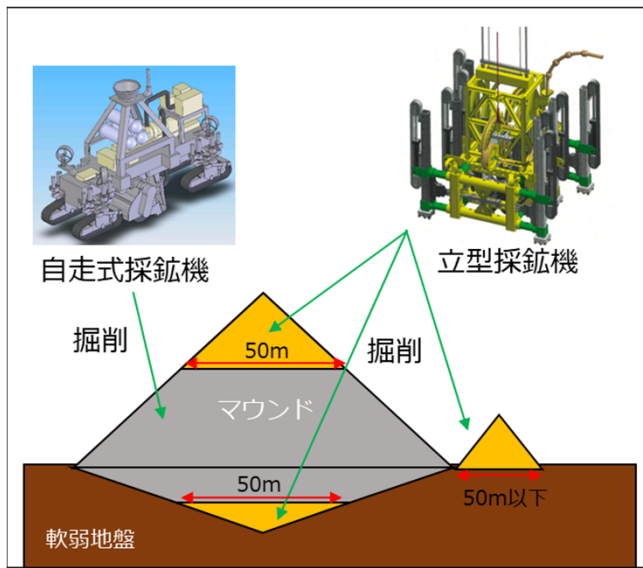


3. 各技術分野における5カ年の取組と成果・課題

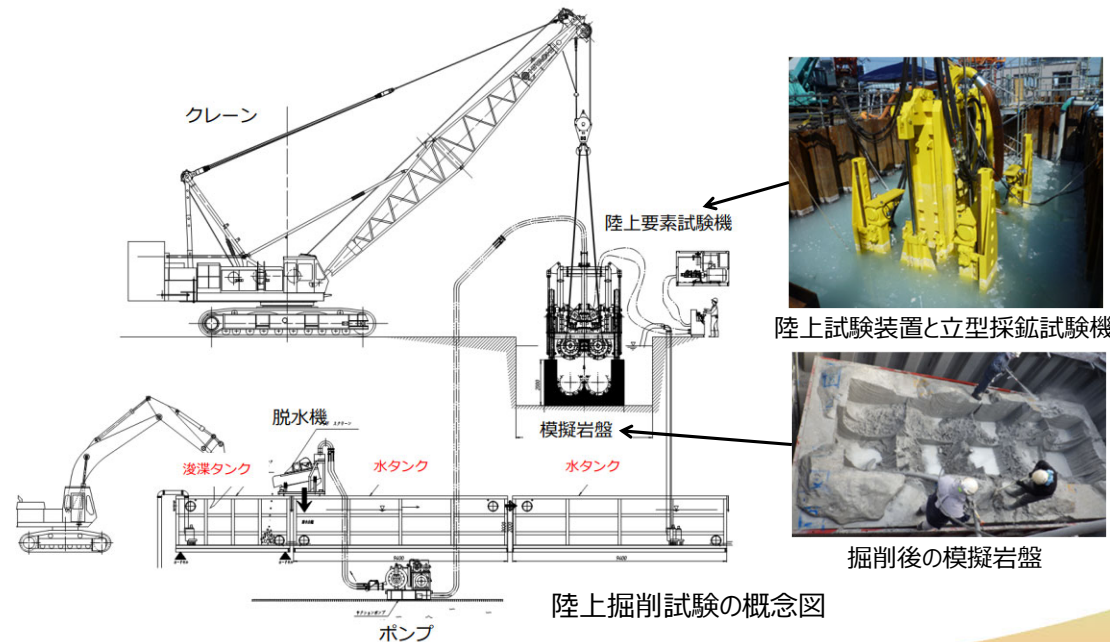
② 採鉱・揚鉱技術開発

頂部掘削方法の検討

- 目標とする生産規模（5,000t/日）の掘削を担う自走式採鉱機の導入には、径50m以上の平地が必要と想定
- チムニーやマウンド頂部を掘削し、平地造成するための**立型採鉱機を開発**
- **陸上試験**を通じて、様々な強度・形状の模擬岩盤に対する**掘削性能を確認**



掘削方法のイメージ



実海域により近い条件での試験を通じた更なる検証を要する

3. 各技術分野における5カ年の取組と成果・課題

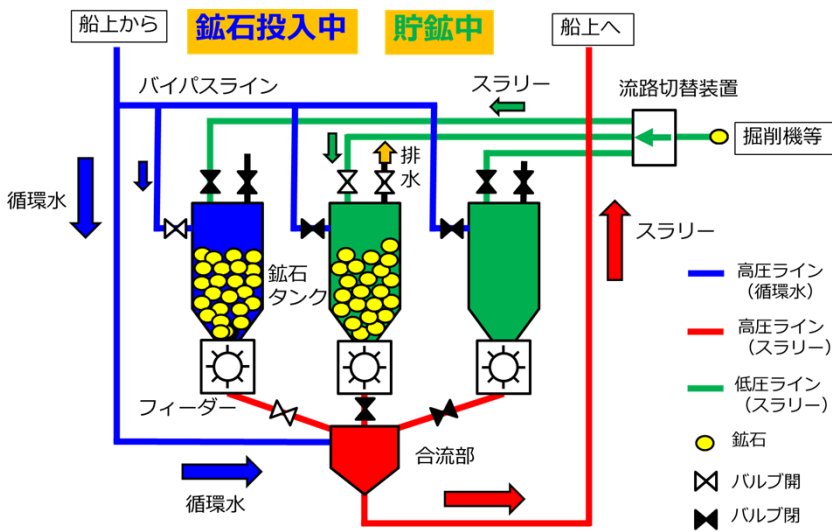
② 採鉱・揚鉱技術開発

鉱石投入装置の開発

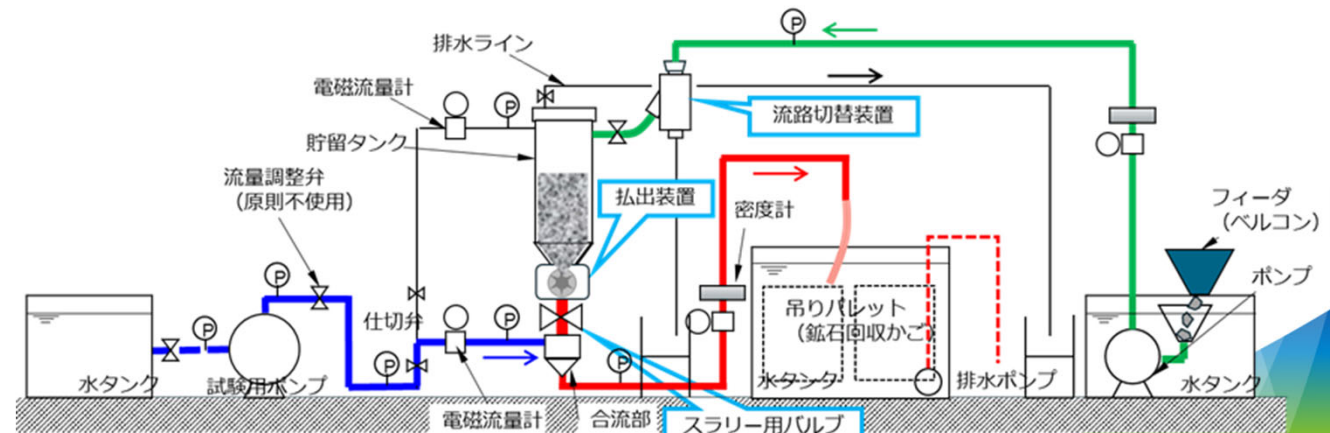
- 循環式スラリー揚鉱方式では、高圧（約7MPa）の揚鉱管内に一定量ずつ鉱石を投入する装置が必要。2つの方法を検討し、陸上でのスラリー移送試験にて技術的成立性や性能を確認

- ① 鉱石投入装置を循環系と同程度の圧力にして鉱石を投入する方法（重量式）
- ② 7MPaより大きな圧力で鉱石を押し込む方法（ピストン式）

- 異常運転を含む諸条件下での稼働性の確認
- 流路切替装置、バルブなどの耐久性の検証など、連続運転を維持するシステムの実証が必要



重力式鉱石投入装置の概念図
(特許出願中)



重力式鉱石投入装置によるスラリー移送試験装置の概要

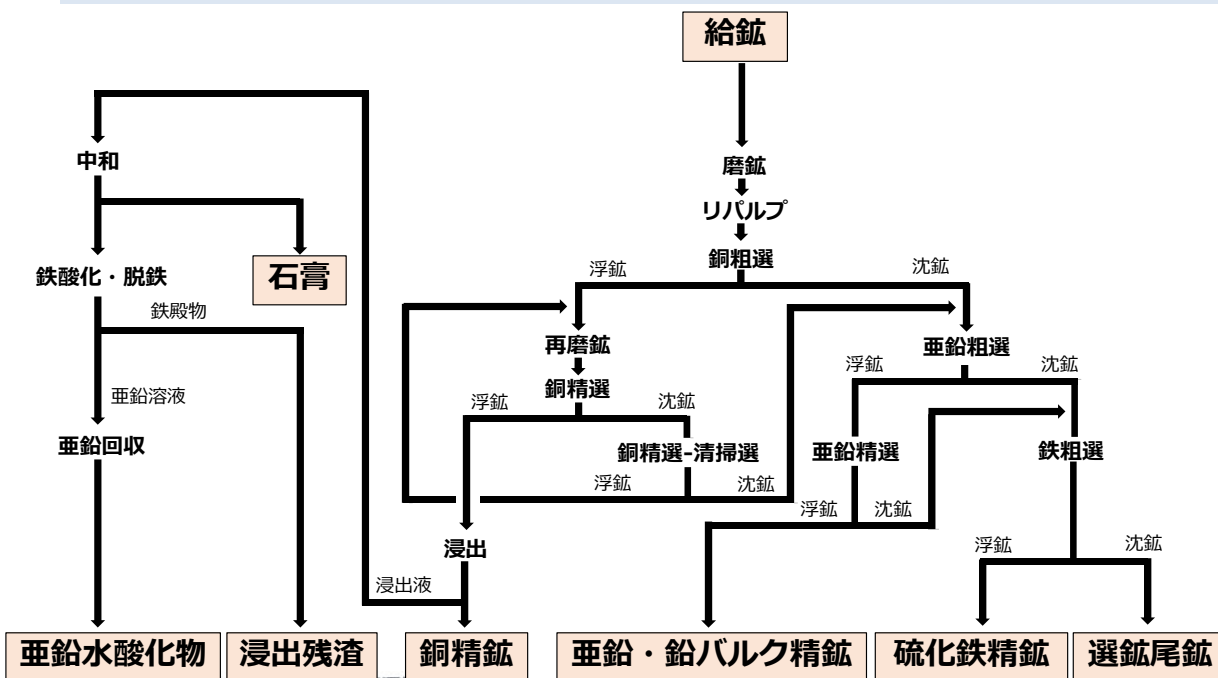
3. 各技術分野における5カ年の取組と成果・課題

③ 選鉱・製錬技術開発

対象試料と選鉱プロセスの検討

- 2018年度まで：**亜鉛・鉛主体**の鉱石
- 2019-2020年度：**銅主体**の鉱石
- 2021年度：**金・銀に富む**亜鉛・鉛主体の鉱石

- 亜鉛・鉛主体の鉱石の選鉱プロセスを改良し、**銅主体**の鉱石、**金・銀に富む**亜鉛・鉛主体の鉱石の選鉱プロセスを構築
- 不純物（銅精鉱中の鉛、亜鉛精鉱中の水銀、ヒ素など）の低減は引き続きの課題



独立行政法人 工ネルギー・金属鉱物資源機構

銅主体の鉱石の選鉱処理フロー

銅主体の鉱石の選鉱成績

	重量	Au (g/t)	Ag (g/t)	Cu (%)	Pb (%)	Zn (%)	Fe (%)
給鉱	100.0	1.2	164	4.94	3.5	6.9	16.2
銅精鉱	3.3	0.0	347	82.3	1.3	0.4	26.4
亜鉛・鉛バルク精鉱	69.7	31.7	31.5	10.6	10.7	74.2	18.3
硫化鉄精鉱	7.6	39.8	15.0	2.1	9.8	3.0	44.2
尾鉱	14.1	28.5	26.6	6.1	74.8	22.1	16.8

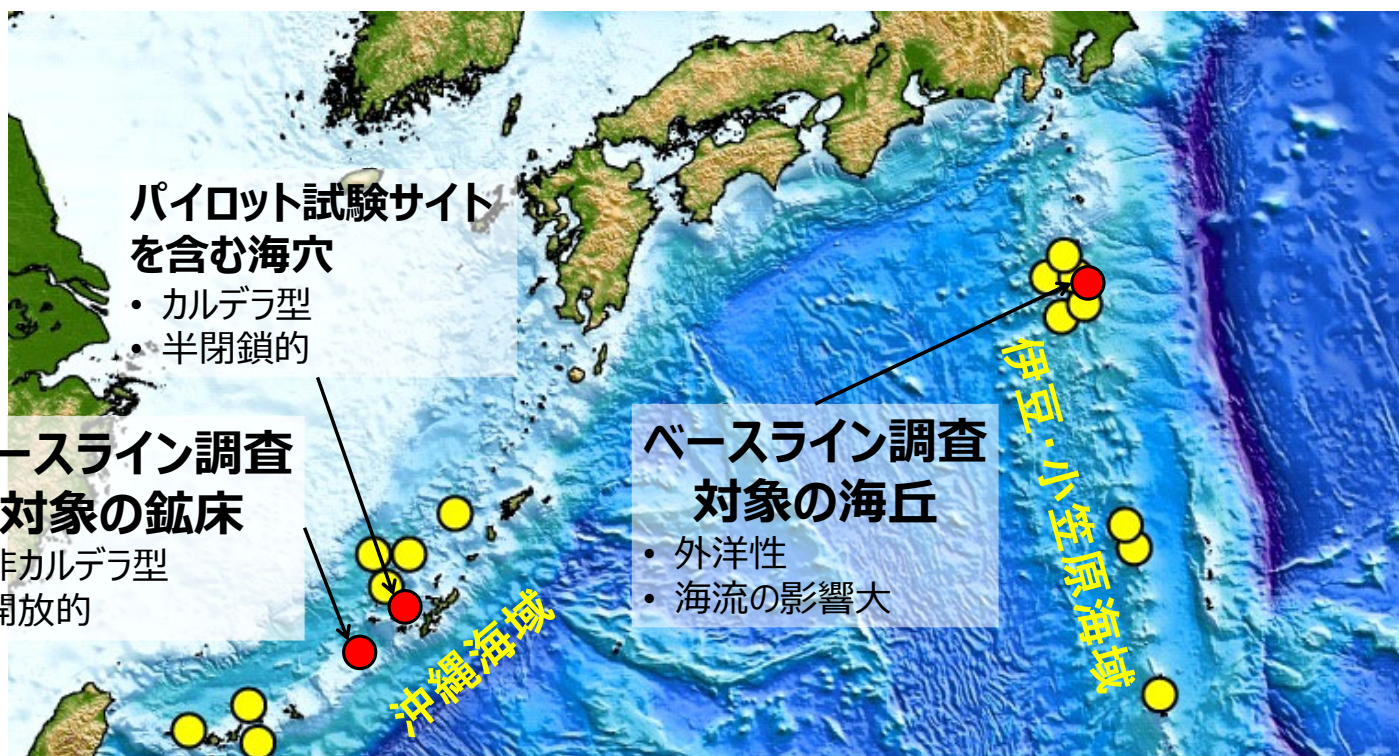
上段：重量 (kg) または品位
下段：実収率 (%)

3. 各技術分野における5カ年の取組と成果・課題

④ 環境影響評価

環境調査の実施地点と調査項目

- パイロット試験サイトを含む海穴：環境モニタリング →パイロット試験の影響把握
- 地形や海流の異なる鉱床：環境ベースライン調査 → ベースライン把握。**調査手法の適用性確認**



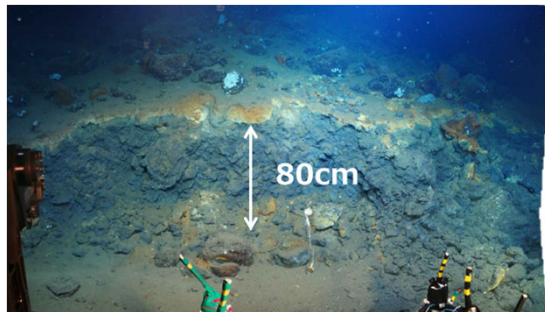
調査項目	
海洋物理	流向・流速 成層構造・粒子分布
海洋化学	水質
堆積物特性	底質、 地中温度
生物	プランクトン、底生生物 遊泳生物、大型生物 遺伝子解析 金属含有量 海底映像観察
生物擾乱	底質 (Pb210)
堆積作用	沈降粒子
その他	水中音

3. 各技術分野における5カ年の取組と成果・課題

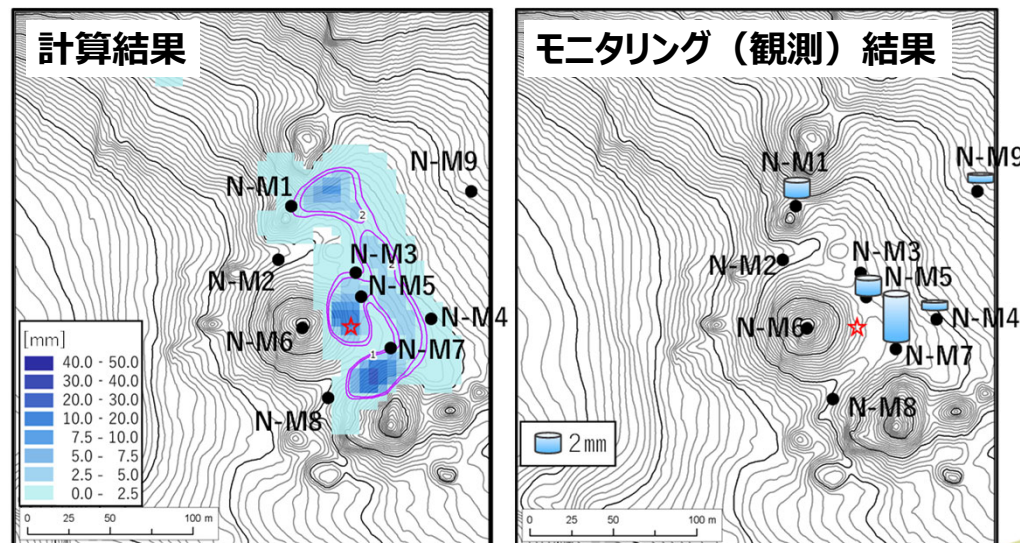
④ 環境影響評価

環境影響予測モデルの開発（粒子追跡モデルでの計算例）

- 海底熱水鉱床の掘削等に伴う濁りの拡散・再堆積を予測するためのモデルを開発。パイロット試験サイト及びかく乱試験サイトを含む海穴をはじめ、複数の鉱床を対象に計算を試みた
- 流況の観測データが得られない海域における濁りの拡散・再堆積を予測する手法として、海底地形データや公開されている流況データから作成した流動場を用いた計算も実施。かく乱地点周辺及び南東のマウンドに厚く堆積する傾向が一致することを確認



海穴内のかく乱試験サイトの様子



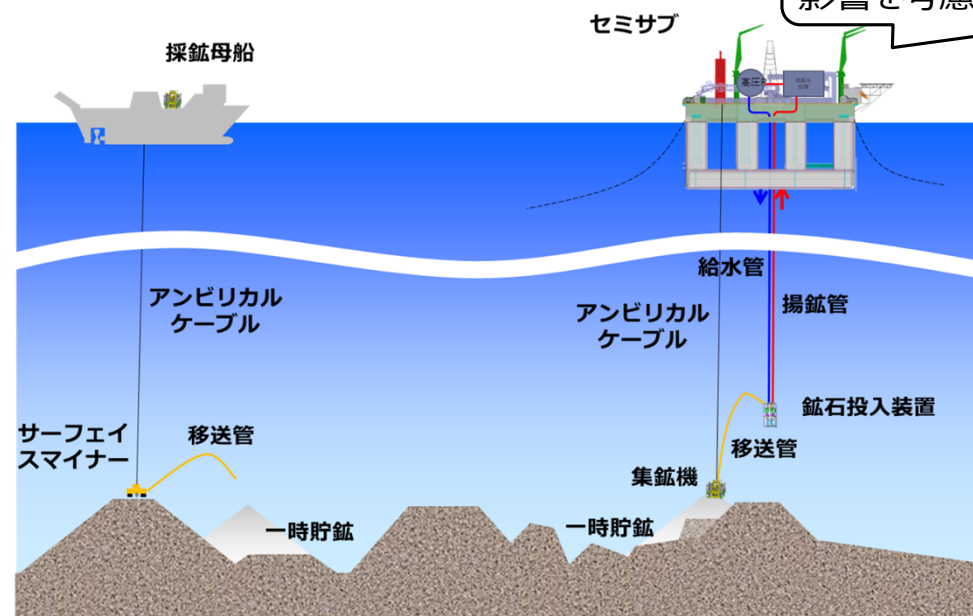
粒子追跡モデルによる濁りの再堆積の計算結果とモニタリング結果

4. 経済性の評価

経済性評価に用いた主な前提条件

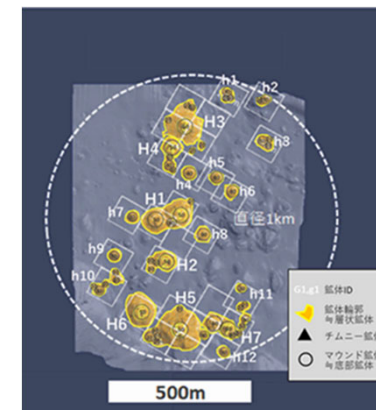
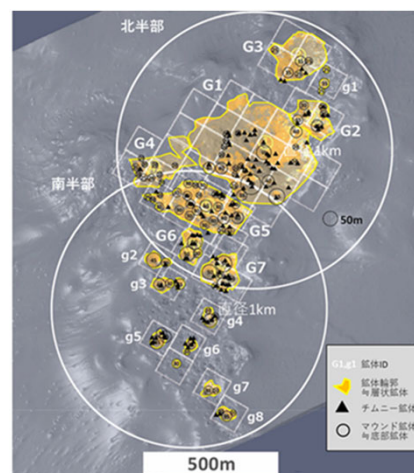
- 概略資源量を把握した2つの海底熱水鉱床を対象に採掘計画を策定。操業期間は18年間
- 生産規模（1日当たりの最大鉱石掘削量）は5,000wt/日。
- 採鉱・揚鉱システムや選鉱プロセス、環境モニタリング計画などは、第3期までの検討結果に基づく
- 精鉱全量を国内製錬所に販売すると仮定。金属価格や為替レートは、主に2022年の平均値を採用

採鉱・揚鉱システム



要素技術を組合せ、操業安定性や環境影響を考慮した採鉱・揚鉱システムを構築

鉱画の設定

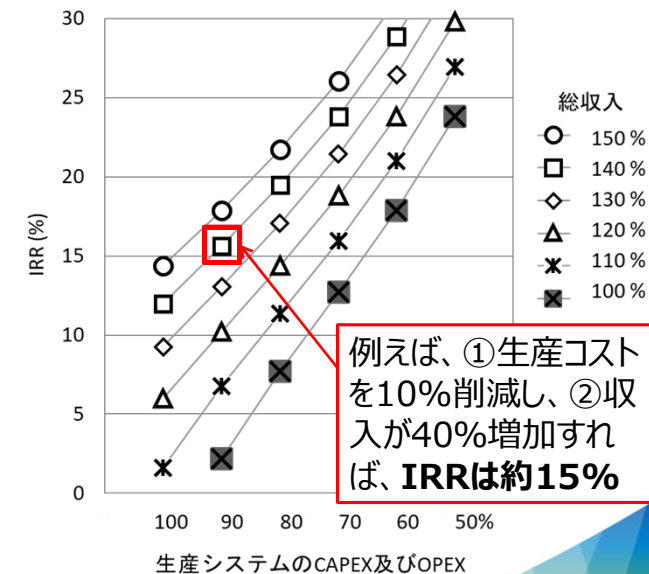
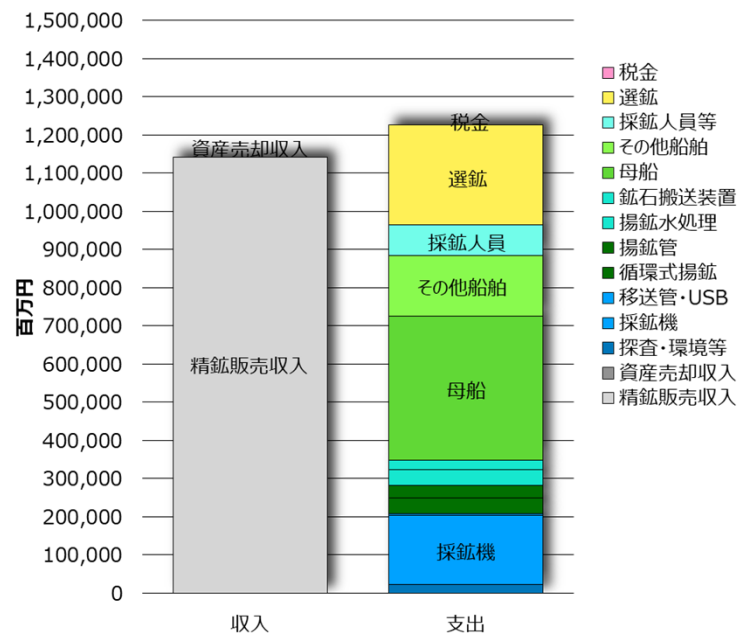
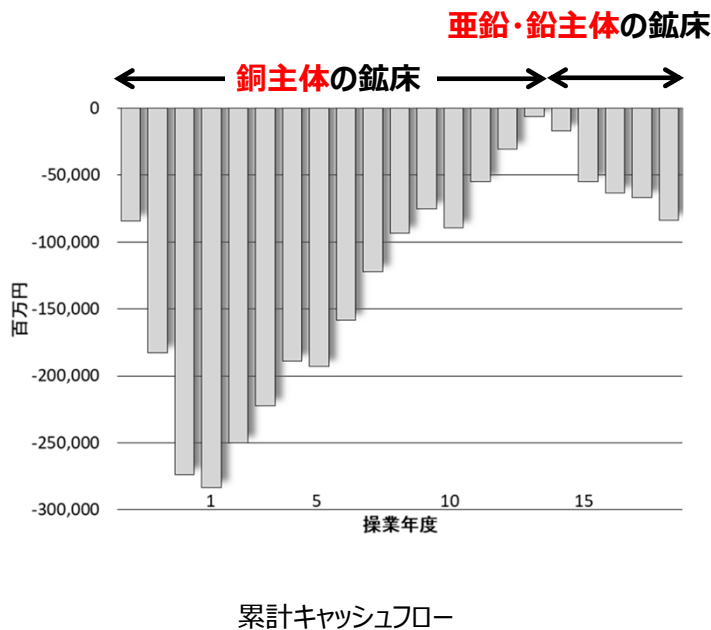


採鉱母船とセミサブの配置、掘削・揚鉱量のバランスなどを考慮して採鉱計画を策定

4. 経済性の評価

経済性評価の結果

- 支出1兆2,259億円に対して、収入は1兆1,421億円（収支は約840億円のマイナス）
- 生産システムの改良や操業の効率化により生産コストを削減し、新鉱床発見、生産効率の向上、金属価格の上昇により収入が増加すれば、十分なIRRが確保され、**経済性を見出しうると評価**



5. まとめと今後の展望

個別技術分野の主な成果・課題と第4期への展望

資源量調査

- 沖縄海域及び伊豆・小笠原海域で7つの新規鉱床を発見
 - 新規鉱床を含む7つの鉱床において、概略資源量合計5,180.5万tを把握
- 資源量の確度向上、最新技術を活用した探査手法検討

採鉱・揚鉱 技術開発

- 6つの要素技術について個別に検討し、それぞれ技術的に成立し得ることを確認
 - 循環式スラリー揚鉱方式を軸に、より実現性の高い全体システムを構築
- 実際の操業により近い条件での、掘削方法や揚鉱システムの検証

選鉱・製錬 技術開発

- 銅主体の鉱石及び金・銀に富む亜鉛・鉛主体の鉱石の選鉱プロセスを構築
- 精鉱中の不純物低減、製錬工程における高不純物精鉱の処理の検討

環境影響 評価

- 地形や海流などの特徴の異なる鉱床でベースラインデータを取得。多様な海域への環境調査手法の適用性を確認
- 商業化をイメージした環境保全策やモニタリング手法の検討 など

【参考】第4期海洋基本計画（2023年4月28日閣議決定）抜粋



■ 海底熱水鉱床

- 国際情勢を睨みつつ、**2020年代後半以降に民間企業が参画する商業化を目標としたプロジェクトの開始**を目指し、経済安全保障の観点からも、国として必要な時に確実に開発・生産できるようにするため、資源量の把握、環境面も含めた技術の確立、体制の整備等を行う。（経済産業省）
- 生産技術については、採鉱・揚鉱システムの構築に向け、これまでの取組において抽出された個別要素技術の課題解決に取り組み、循環式スラリー揚鉱システムを中心とした**採鉱・揚鉱に関する実証試験を実施**する。また、選鉱・製錬についても引き続き課題解決に向けた技術開発を行い、**多様な鉱床に適用可能なプロセスの確立**を目指す。（経済産業省）
- 環境保全に対する意識の高まりを受け、引き続き**環境影響評価を着実に実施**し、国際海底機構（ISA）へデータを提供するなど、**国際ルールの策定に主体的に貢献**していく。（内閣府、経済産業省）