

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
独立行政法人エネルギー・金属鉱物資源機構

はじめに

2050 年カーボンニュートラル社会の実現に向けて、今後普及拡大が見込まれる再生可能エネルギー発電や電動車の製造に欠かせないレアメタル等の供給源として、我が国周辺海域に賦存する海洋鉱物資源への関心が高まっている。海洋鉱物資源は、金属鉱物資源のほぼ全てを海外からの輸入に頼っている我が国にとって、他国の資源政策等に左右されることのない資源の安定供給源となる可能性を秘めている。

一方、これまで世界的に海洋鉱物資源の開発事例はなく、技術的課題の解決のみならず、法制度や環境影響も含めて中長期的に取り組む必要があるとともに、それらの取組に対する評価が不可欠である。

こうした状況の中、閣議決定された「海洋基本計画」（第 1 期：平成 20 年 3 月、第 2 期：平成 25 年 4 月、第 3 期：平成 30 年 5 月、第 4 期：令和 5 年 4 月）及び経済産業省が定める「海洋エネルギー・鉱物資源開発計画」（第 1 期：平成 21 年 3 月、第 2 期：平成 25 年 12 月、平成 31 年 2 月）に基づき、海洋のエネルギー・鉱物資源の開発に向けた取組が推進されている。特に、鉱物資源では海底熱水鉱床を当面の探査・開発の主たる対象として、独立行政法人エネルギー・金属鉱物資源機構が委託事業主体となり、平成 20 年度より事業を推進してきた。

平成 20 年度から平成 24 年度までの第 1 期には、資源量評価、環境影響評価、採鉱・揚鉱技術、選鉱・製錬技術の各分野で詳細な検討を行った結果、それぞれ良好な成果が得られ、それらの成果と評価結果を平成 25 年 7 月に「海底熱水鉱床開発計画第 1 期最終評価報告書」としてとりまとめた。

平成 25 年度から平成 29 年度までの第 2 期には、既知鉱床の資源量の算定、新鉱床の発見、環境影響評価手法の確立、世界初となる採鉱・揚鉱パイロット試験の実施、選鉱プロセスの構築と国内製錬所の実操業炉を用いた亜鉛地金の試験製造などの成果を得た。また、総合評価として、それらの技術的な評価を行い、解決すべき課題を整理したうえで、平成 30 年 12 月に「海底熱水鉱床開発計画総合評価報告書」にとりまとめた。

平成 30 年度から令和 4 年度までの第 3 期には、第 2 期の総合評価を通じて抽出された課題の解決を目指し、各分野の取組を継続した。その結果、沖縄海域及び伊豆・小笠原海域での合計 5,180.5 万 t の概略資源量把握、沖縄海域での 7 つの新鉱床発見、複数の海域への環境影響評価手法の適用性確認、循環式スラリー揚鉱方式を軸とする採鉱・揚鉱システムや多様な鉱石に対する選鉱プロセスの構築などの技術的成果を得た。また、国内法制

度の整備や社会的受容性の醸成といった、将来の開発に必要なテーマについても検討を行った。

本報告書は、これらに対する評価に基づき成果・課題を整理するとともに、第3期に得られた技術的成果を踏まえたシナリオに基づく経済性評価を行ったうえで、今後の取組の展望を示すものである。

なお、本年4月28日に閣議決定された第4期海洋基本計画では、海底熱水鉱床について、引き続き「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」とされた。更に、令和5年度以降の取組について、「海洋エネルギー・鉱物資源開発計画」を改定して明らかにするとともに定められているところ、本報告書の内容を新たな開発計画に反映し、海底熱水鉱床の開発に向けて今後更なる取組を進めていくこととなる。

令和5年11月

経済産業省資源エネルギー庁
独立行政法人エネルギー・金属鉱物資源機構

目次

1. 概要	12
1-1. 資源量調査	12
1-2. 環境影響評価	12
1-3. 採鉱・揚鉱技術	13
1-4. 選鉱・製錬技術	13
1-5. 法制度のあり方の検討等	13
1-6. 経済性の評価	14
2. 海底熱水鉱床開発に向けた計画と体制	15
2-1. 海洋基本計画及び海洋エネルギー・鉱物資源開発計画	15
2-2. 実施体制	16
3. 海底熱水鉱床について	17
3-1. 海洋鉱物資源の分類	17
3-2. 海底熱水鉱床の概要	18
4. 個別技術分野における成果・課題	20
4-1. 資源量調査	20
4-1-1. 概要	20
4-1-2. 広域調査	22
4-1-3. 資源量評価	30
4-2. 環境影響評価	51
4-2-1. 概要	51
4-2-2. 環境調査	54
4-2-3. 環境影響予測	63
4-2-4. 環境保全策の検討	66
4-3. 採鉱・揚鉱技術	73
4-3-1. 概要	73
4-3-2. 採鉱方法	75
4-3-3. 鉱石細粒化	89
4-3-4. 揚鉱方法	95
4-3-5. 鉱石投入装置	102
4-3-6. 揚鉱水の処理	121
4-3-7. 洋上プラットフォーム	124
4-3-8. 採鉱・揚鉱システムの検討	132
4-4. 選鉱・製錬技術	138
4-4-1. 概要	138
4-4-2. 選鉱分野	140

4-4-3. 製錬分野	156
5. 法制度のあり方の検討等	158
5-1. 概要	158
5-2. 法制度	158
5-2-1. 国際法	159
5-2-2. 国内法	164
5-3. 社会的受容性	171
5-3-1. 国際動向と社会の関心	171
5-3-2. ステークホルダーに関する情報整理	172
5-3-3. 不確実性に関する検討	174
5-3-4. 不確実性の区分	175
5-3-5. 不確実性への対応策	177
5-4. 他産業の海域利用	178
5-4-1. 南西諸島海域	178
5-4-2. 伊豆・小笠原海域	179
5-5. 主要金属価格の推移	180
6. 経済性の評価	185
6-1. 経済性評価の方法	185
6-1-1. 評価対象	185
6-1-2. 経済性評価に必要なパラメータの設定方法	186
6-1-3. 経済性評価の方法	186
6-2. 経済性評価に用いる操業条件	187
6-2-1. 資源量調査	187
6-2-2. 環境影響評価	187
6-2-3. 採鉱・揚鉱	192
6-2-4. 選鉱・製錬	205
6-3. 経済性評価に必要なパラメータの設定	214
6-3-1. 精鉱生産量、品位と精鉱販売条件の設定及び販売収入の算出	214
6-3-2. 初期投資額とこれに伴う諸条件の設定	215
6-3-3. 維持投資とこれに伴う諸条件の設定	217
6-3-4. 操業費（OPEX）の設定	218
6-3-5. 税率の設定	218
6-4. 経済性評価結果	219
6-5. 感度分析結果	223
6-6. 経済性評価に影響する条件	225
6-6-1. 経済性評価の条件設定で将来的に考慮が必要な事項	225
6-6-2. 将来の開発の可能性や経済性評価結果に影響する仮定	225

6-7. 経済性評価に関するまとめと課題.....	226
7. 海底熱水鉱床開発において考慮すべき課題	227
7-1. 資源量調査	227
7-2. 環境影響評価	228
7-3. 採鉱・揚鉱技術	228
7-4. 選鉱・製錬技術	229
7-5. 法制度のあり方の検討等	230
8. 今後の展望	231
8-1. 資源量調査	231
8-2. 環境影響評価	231
8-3. 採鉱・揚鉱技術	231
8-4. 選鉱・製錬技術	232
8-5. 法制度のあり方の検討等	232
9. 略語リスト	233

図表目次

図 2-2-1	海底熱水鉱床開発事業の実施体制図	16
図 3-1-1	海洋鉱物資源の分布イメージ	17
図 3-1-2	我が国周辺の主な海洋鉱物資源の分布	18
図 3-2-1	海洋鉱物資源の賦存状況と探査権を有する国・組織	19
図 4-1-1	資源量の調査	21
図 4-1-2	JOGMEC が実施する資源量調査の流れ	22
図 4-1-3	海底熱水鉱床の分類	24
図 4-1-4	概略資源量の位置づけ	30
図 4-1-5	Hakurei サイトの地形陰影図	33
図 4-1-6	Hakurei サイトにおける鉱体の 3 次元モデルの鳥瞰図	34
図 4-1-7	ごんどうサイトの地形陰影図	35
図 4-1-8	ごんどうサイトにおける鉱体の 3 次元モデルの鳥瞰図	38
図 4-1-9	田名サイトの地形陰影図	39
図 4-1-10	田名サイトにおける鉱体の 3 次元モデルの鳥瞰図	40
図 4-1-11	野甫サイトの地形陰影図	41
図 4-1-12	野甫サイトにおける鉱体の 3 次元モデルの鳥瞰図	43
図 4-1-13	天美サイトの地形陰影図	44
図 4-1-14	天美サイトにおける鉱体の 3 次元モデルの鳥瞰図	45
図 4-1-15	銀水サイトの地形陰影図	46
図 4-1-16	銀水サイトにおける鉱体の 3 次元モデルの鳥瞰図	47
図 4-2-1	環境影響評価の実績	53
図 4-2-2	採鉱・揚鉱パイロット試験の調査地点	58
図 4-2-3	かく乱試験の調査地点	61
図 4-2-4	かく乱試験に伴う再堆積の計算結果とモニタリング結果との比較	63
図 4-2-5	底層域生態系モデルの概念図	64
図 4-2-6	かく乱試験に伴う底生生物の炭素現存量の変化（上）及び かく乱試験 と同規模の試験を実施した場合における底生生物の炭素現存量の変化（下） ..	65
図 4-2-7	環境保全策の検討のためのフローチャート	66
図 4-3-1	採鉱・揚鉱技術分野の実績	74
図 4-3-2	D 鉱床及び E 鉱床のマウンド地形図	76
図 4-3-3	D 鉱床主マウンドの地山モデル	78
図 4-3-4	各機器の使い分けの模式図	80
図 4-3-5	ハイブリッド型ビットのドラムカッター	81
図 4-3-6	立型採鉱試験機	82
図 4-3-7	陸上掘削試験の概念図	83

図 4-3-8	掘進速度と供試体の一軸圧縮強度の関係	87
図 4-3-9	陸上掘削試験の様子	87
図 4-3-10	HPGR 作動原理	89
図 4-3-11	試験装置	90
図 4-3-12	HPGR での破碎試験に供した実鉱石	90
図 4-3-13	破碎比と運転中平均ロール間隔の関係	91
図 4-3-14	処理体積と運転中平均ロール間隔の関係	91
図 4-3-15	水中試験装置	92
図 4-3-16	処理体積/（供給速度・ロール投影面積）と操業中平均ロール間隔/ロール径の関係について計算値と実測値の比較	94
図 4-3-17	遠心多段渦巻ポンプによるワンパス式スラリー方式概念図	95
図 4-3-18	複数台の単段渦巻ポンプによるワンパス式スラリー方式概念図	96
図 4-3-19	タンデム型でのポンプ配置案	97
図 4-3-20	水密のバッチタンクによる機械方式の概念図	98
図 4-3-21	バッチタンク概念図	99
図 4-3-22	循環式スラリー揚鉱方式の概念図	101
図 4-3-23	重力式の鉱石投入装置の構成	103
図 4-3-24	流路切替装置	104
図 4-3-25	流路切替試験装置概略図	104
図 4-3-26	製作したスラリー弁	105
図 4-3-27	払出試験装置概略図	106
図 4-3-28	払い出し装置	106
図 4-3-29	合流試験装置概略図	108
図 4-3-30	鉱石投入総合試験装置概略図	109
図 4-3-31	鉱石投入総合試験装置外観	110
図 4-3-32	鉱石投入総合試験の試験結果例	110
図 4-3-33	商用機の鉱石投入装置	112
図 4-3-34	ピストンポンプ式の鉱石投入装置の構成	113
図 4-3-35	ピストンポンプ作動原理	114
図 4-3-36	高圧下でのスイング弁切替試験設備	115
図 4-3-37	傾斜配置したピストンポンプの吸引吐出試験装置概略図	116
図 4-3-38	傾斜配置したピストンポンプの吸引吐出試験装置の外観	116
図 4-3-39	傾斜配置したピストンポンプの吸引吐出試験結果	117
図 4-3-40	循環式スラリー流送試験設備	118
図 4-3-41	循環式スラリー流送試験結果	118
図 4-3-42	実験装置構成	119
図 4-3-43	揚鉱水処理プロセス	123

図 4-3-44	試験に用いたセミサブの縮小モデル	125
図 4-3-45	係留設計に基づく配置概要	126
図 4-3-46	複合外力下における払い出し試験設備全景写真	129
図 4-3-47	複合外力下における払い出し試験設備概略図	129
図 4-3-48	採鉱・揚鉱システムの概念図	133
図 4-3-49	稼働性評価プログラム構成概略図	135
図 4-4-1	選鉱・製錬技術の実績	139
図 4-4-2	H 鉱の試料 1 に含まれる鉱物の Fe-Ba-Zn 三角ダイアグラム	141
図 4-4-3	H 鉱の試料 2 に含まれる鉱物の Ba-Si-Zn 三角ダイアグラム	141
図 4-4-4	F 鉱の処理フロー	142
図 4-4-5	揚鉱水処理のマスバランス	143
図 4-4-6	F 鉱の脱水ケーキ混合試験と結果	144
図 4-4-7	G 鉱の処理フロー	147
図 4-4-8	H 鉱の処理フロー	151
図 4-4-9	H 鉱由来の亜鉛精鉱から作製した亜鉛地金	156
図 4-4-10	H 鉱由来の鉛精鉱を用いた製錬試験で作製した亜鉛地金（上）と粗鉛 （下）	157
図 5-2-1	鉱業法に基づく手続きのフロー	164
図 5-2-2	環境影響評価のフロー	166
図 5-3-1	不確実性の種類とそれぞれの相互関係	176
図 5-5-1	ベースメタル（銅、亜鉛、鉛）の金属価格推移	181
図 5-5-2	貴金属（金、銀）の金属価格推移	182
図 6-1-1	採掘可能量のイメージ	185
図 6-2-1	底層域のモニタリング調査地点	189
図 6-2-2	水柱のモニタリング調査地点	190
図 6-2-3	経済性評価の対象とした鉱床の鉱体分布	193
図 6-2-4	静穏海象継続時間割合の考え方	193
図 6-2-5	極限閾値と退避離脱・再開期間のイメージ	194
図 6-2-6	移送管の構成	200
図 6-2-7	尾鉱堆積場の平面図	209
図 6-2-8	尾鉱堆積場の堤体の断面図	210
図 6-4-1	各年次の収入、支出	219
図 6-4-2	各年次の CF	220
図 6-4-3	累計 CF	220
図 6-4-4	プロジェクト期間の収入と支出の内訳	221
図 6-5-1	総収入、生産システムの CAPEX 及び OPEX と IRR の関係	224

表 4-1-1	発見された海底熱水鉱床の分類及び広域調査結果の一覧.....	24
表 4-1-2	各鉱床の概略資源量の算定に用いた情報	31
表 4-2-1	A 鉱床におけるベースライン調査の結果概要	55
表 4-2-2	B 海丘におけるベースライン調査の結果概要	56
表 4-2-3	モニタリング調査の項目	58
表 4-2-4	採鉱・揚鉱パイロット試験におけるモニタリング調査の結果の概要 ..	59
表 4-2-5	かく乱試験におけるモニタリング調査の結果概要.....	62
表 4-2-6	熱水性生物 13 種のサンプリング地点	67
表 4-2-7	熱水性生物の遺伝的多様性と遺伝的交流	68
表 4-2-8	非熱水性生物 7 種のサンプリング地点.....	69
表 4-2-9	非熱水性生物の遺伝的多様性と遺伝的交流.....	70
表 4-3-1	D 鉱床及び E 鉱床における鉱石の物性	77
表 4-3-2	採鉱・集鉱に用いる機器の概形と役割	79
表 4-3-3	立型採鉱試験機の仕様.....	81
表 4-3-4	陸上掘削試験の試験要素	83
表 4-3-5	陸上掘削試験の試験内容	84
表 4-3-6	陸上掘削試験結果	86
表 4-3-7	実操業時の HPGR 仕様	94
表 4-3-8	重力式の鉱石投入装置の作動手順	103
表 4-3-9	スラリー用弁の比較.....	105
表 4-3-10	合流部形状の比較	107
表 4-3-11	浮体特徴比較.....	124
表 4-3-12	沖縄海域の特定地点における気象海象条件.....	125
表 4-3-13	セミサブの仕様及び主要搭載設備	127
表 4-3-14	作業限界.....	129
表 4-3-15	稼働性の計算結果	130
表 4-3-16	採鉱母船仕様及び主要搭載設備	131
表 4-3-17	採鉱・揚鉱システムにおける高リスク作業.....	134
表 4-4-1	鉱物特性の解析に供した F 鉱の元素組成.....	140
表 4-4-2	鉱物特性の解析に供した H 鉱の元素組成	141
表 4-4-3	F 鉱の水・酸溶出試験結果.....	145
表 4-4-4	F 鉱の選鉱成績	146
表 4-4-5	試料の元素組成	149
表 4-4-6	G 鉱の水・酸溶出試験結果	149
表 4-4-7	G 鉱の選鉱成績.....	150
表 4-4-8	溶出試験に供した試料の品位.....	152
表 4-4-9	H 鉱の水・酸溶出試験結果	152

表 4-4-10	H 鉱の選鉱成績.....	154
表 4-4-11	亜鉛精鉱の分析結果.....	155
表 4-4-12	各浮鉱中の亜鉛及び珪素	155
表 4-4-13	製錬試験に供した H 鉱由来の鉛精鉱品位	156
表 5-2-1	鉱山保安法に基づき鉱業権者が取るべき手続きの要点	167
表 5-2-2	採鉱・揚鉱システムの主な構成要素、環境影響要因及び規制事項....	169
表 5-3-1	海底熱水鉱床開発に関係するステークホルダー	173
表 6-2-1	環境調査項目及び頻度の設定	188
表 6-2-2	鉱床ごとの水柱及び底層域調査地点数	191
表 6-2-3	環境影響評価の初期投資項目	191
表 6-2-4	環境影響評価の操業費項目	191
表 6-2-5	静穏海象継続時間割合解析時の採鉱母船と セミサブの作業限界閾値	194
表 6-2-6	作業限界閾値を考慮した採鉱母船とセミサブの 年間平均作業可能日数 (稼働率)	194
表 6-2-7	F 鉱床と G 鉱床における採鉱母船とセミサブの極限閾値の年間平均超 過回数	195
表 6-2-8	作業限界閾値と極限閾値、退避離脱期間及び再開期間を考慮した年間平 均作業可能日数 (稼働率)	195
表 6-2-9	採鉱機器の主な仕様.....	196
表 6-2-10	循環式スラリー揚鉱システムの仕様.....	197
表 6-2-11	船上高圧ポンプの仕様	197
表 6-2-12	揚鉱管・給水管の仕様.....	198
表 6-2-13	鉱石分離設備の機器構成	198
表 6-2-14	揚鉱水処理設備での薬品使用量	199
表 6-2-15	揚鉱水処理設備の機器構成	199
表 6-2-16	移送管の仕様.....	200
表 6-2-17	UMB ケーブルの仕様.....	201
表 6-2-18	その他船舶の用途	202
表 6-2-19	採鉱・揚鉱システムの初期投資項目	203
表 6-2-20	採鉱・揚鉱システムの維持投資項目	204
表 6-2-21	採鉱・揚鉱システムの操業費項目	204
表 6-2-22	選鉱設備の稼働スケジュール及び処理能力.....	205
表 6-2-23	破碎回路の仕様.....	206
表 6-2-24	F 鉱の磨鉱工程の仕様	206
表 6-2-25	F 鉱の浮選回路の設備	207
表 6-2-26	F 鉱の脱水設備	207

表 6-2-27	G 鉱の浮選回路の設備	208
表 6-2-28	G 鉱の脱水設備に関する仕様	208
表 6-2-29	尾鉱堆積場の構造	210
表 6-2-30	操業に関する設定条件	211
表 6-2-31	選鉱・製錬の初期投資に関する項目	212
表 6-2-32	選鉱・製錬システムの維持投資に関する項目	212
表 6-2-33	選鉱・製錬システムの操業費に関する項目	213
表 6-3-1	建設期間、操業期間、操業立ち上げ期間及びその稼働率の設定	214
表 6-3-2	販売する金属等の価格及び為替レート	215
表 6-3-3	初期投資額 (Initial CAPEX)	216
表 6-3-4	維持投資額 (Sustaining CAPEX)	217
表 6-3-5	操業費 (OPEX)	218
表 6-4-1	プロジェクト期間の収入と支出の内訳と給鉱量との関係	222
表 6-5-1	総収入、生産システムの CAPEX 及び OPEX と 投資回収期間の関係	223
表 6-5-2	総収入、生産システムの CAPEX 及び OPEX と IRR の関係	224

1. 概要

第3期海洋基本計画に則り定められた海洋エネルギー・鉱物資源開発計画（平成30年度改定）に従い、海底熱水鉱床の資源量調査、環境影響評価、生産技術の開発、法制度のあり方の検討等を行った。また、これらの結果をもとに、前回の総合評価より現実性の高い技術的条件を設定して経済性評価を行い、商業化に向けた具体的な課題を整理した。

これらの取組の概要は以下のとおりである。なお、本報告書において各期は海洋基本計画の期間を示し、第1期は平成20～24年度、第2期は平成25～29年度、第3期は平成30～令和4年度に当たる。

1-1. 資源量調査

沖縄海域の Hakurei サイト、ごんどうサイト、田名サイト、野甫サイト、天美サイト、銀水サイトの資源量評価を行い、第2期に把握した伊豆・小笠原海域の白嶺鉱床と合わせて、概略資源量合計 5,180.5 万 t を把握した。

また、資源量評価の対象となる新鉱床を発見するための広域調査では、新たに7つの有望な鉱床として東青ヶ島鉱床、天美（あまみ）サイト、豊見（とみ）サイト、梯梧（でいご）サイト、吾妻（あずま）サイト、令宝（れいほう）サイト、須美寿リフト中央鉱床を発見した。

1-2. 環境影響評価

これまでに開発した環境調査手法を用いて、地形や海流等の条件の異なる鉱床でベースライン調査を実施し、適用性を確認するとともに、調査を通じてベースラインデータを取得し、環境特性を把握した。また、第2期に実施した採鉱・揚鉱パイロット試験及びかく乱試験のモニタリング調査を継続し、試験後の環境影響の経時変化を明らかにした。

環境影響予測については、流況の観測データのない海域を想定し、一般公開データや詳細地形データから流動場を作成した。この流動場を粒子追跡モデルに反映し、濁りの拡散範囲及び再堆積厚さを計算・評価することで、観測データのない海域での本モデルの適用性を確認した。また、底層域生態系モデルの汎用性を確認するため、モデル開発時に対象とした鉱床とは異なる鉱床において、かく乱試験と同様の濁り発生条件を与え、底生生物の炭素現存量の再現計算を実施した結果、かく乱試験時と同様の増減パターンを示すことを確認した。

環境保全策の検討については、沖縄海域や伊豆・小笠原海域でサンプリングした生物を遺伝子解析し、種別の遺伝的多様性及び遺伝的交流関係を把握した。

1-3. 採鉱・揚鉱技術

第2期に実施した採鉱・揚鉱パイロット試験の結果から抽出された技術課題の解決に向けて、採鉱・揚鉱システムの試験機開発や要素試験等を通じた検討に取り組んだ。

採鉱分野では、主にチムニーやマウンド頂部を対象とする立型採鉱機を開発し、陸上で海底熱水鉱床の模擬岩盤を対象とした掘削試験を行い、掘削性能を確認した。

揚鉱分野では、循環式スラリー揚鉱方式を提案し、揚鉱水を循環利用することで揚鉱水処理量を低減し、船上での処理を可能にした。また、海水と混合したスラリー状の鉱石を循環系に連続的に投入する鉱石投入装置を開発し、陸上で鉱石供給から揚鉱管への鉱石投入までの一連の動作の総合試験を行い、移送性能を確認した。

これらの試験や検討等を通じて要素技術がそれぞれ技術的に成立し得ることを確認した後、操業安定性や環境影響を考慮して要素技術を組合せ、循環式スラリー揚鉱方式を軸とした採鉱・揚鉱システムを構築した。

1-4. 選鉱・製錬技術

多様な鉱床に適用可能な選鉱・製錬プロセスを確立するため、第2期に開発した亜鉛・鉛主体の鉱石の選鉱プロセスを改良し、銅主体の鉱石と金・銀に富む亜鉛・鉛主体の鉱石それぞれに適した選鉱プロセスを構築した。また、金・銀に富む亜鉛・鉛主体の鉱石については、構築した選鉱プロセスで処理して得られた精鉱を、亜鉛製錬の原料の一部として国内製錬所の実操業炉に投入し地金を作製するとともに、精鉱の品質に関する課題の抽出を行った。

1-5. 法制度のあり方の検討等

第2期に挙げられた課題に対応すべく、法制度と社会的受容性に関する検討を行ったほか、海底熱水鉱床賦存が知られる沖縄海域及び伊豆・小笠原海域の利用実態を調査した。

法制度については、EEZ 及び延伸大陸棚といった日本の国家管轄圏内での海底熱水鉱床開発を前提に、国際法上国家に課される義務について検討した上で、それに基づいて事業者の義務を規定する国内法を整備するために必要と考えられる情報を取りまとめた。

社会的受容性に関しては、海洋鉱物資源開発をめぐる国際動向に係る情報収集を行うとともに、海底熱水鉱床開発に関係し得るステークホルダーの抽出等を行った。また、社会的受容性を左右する要因の一つである不確実性について、科学・技術的不確実性と規則・制度的不確実性に分けて整理した。

海底熱水鉱床開発に際して考慮すべき他産業の海域利用として、沖縄海域及び伊豆・小笠原海域の漁業活動の実態を調査した。これらの海域では漁業活動が活発で、特に、沖縄域では地元の漁業者の他にも広範な関係者が存在することを確認した。

1-6. 経済性の評価

概略資源量を把握した 2 つの鉱床を対象に、これまでに海底熱水鉱床の商業化をイメージして検討・検証してきた生産技術に基づく予察的な経済性評価を行った。その結果、今回設定した条件では操業期間の累計 CF がマイナスとなり経済性を見出せないことが分かった。一方で、新鉱床の発見や金属価格の上昇等による収入増加や生産コストの削減を想定した感度分析において、収入が 40% 上昇し、生産システムのコストを 10% 低減した場合等で、経済性を見出し得る結果となった。

2. 海底熱水鉱床開発に向けた計画と体制

2-1. 海洋基本計画及び海洋エネルギー・鉱物資源開発計画

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、平成 20 年 3 月には同法に基づく第 1 期「海洋基本計画」が閣議決定された。この海洋基本計画を受けて、経済産業省では平成 21 年度から 10 年間の中長期計画として、「海洋エネルギー・鉱物資源開発計画」（以下、「開発計画」という。）が、総合資源エネルギー調査会の審議を経て、平成 21 年 3 月に策定された。その後、平成 25 年 4 月に第 2 期海洋基本計画、平成 30 年 5 月に第 3 期海洋基本計画が閣議決定され、それに伴い、開発計画も平成 25 年 12 月、平成 31 年 2 月に改定された。また、令和 5 年 4 月に第 4 期海洋基本計画が閣議決定され、現在は、これに伴う開発計画の見直しの議論が進められているところである。

海底熱水鉱床は、第 1 期より EEZ 等における当面の探査・開発対象の一つとして、必要な政策資源を集中的に投入する資源に位置付けられている。経済産業省は、JOGMEC を通じて、関係機関の協力の下、開発計画に基づき海底熱水鉱床の開発に向けて、資源量調査、環境影響評価、採鉱・揚鉱技術、選鉱・製錬技術の 4 つの分野について、並行して調査や技術的検討を進めてきた。これらの取組は多岐に亘るため、効率的かつ効果的に事業を推進する上では、各分野の進捗状況を見極めつつ全体を整合させながら進める必要がある。そのため、平成 25 年 12 月の開発計画改定にあたっては、第 1 期の目標や課題の明確化及び再設定、スケジュールの評価と見直しを行い、海底熱水鉱床開発計画第 1 期最終評価報告書を取りまとめた（平成 25 年 7 月公表）。第 2 期には、平成 29 年度に世界初となる実海域での採鉱・揚鉱パイロット試験を実施したことをはじめ、資源量評価や新鉱床の発見、環境影響評価の実施、選鉱プロセスや製錬技術の開発など、各分野の取組が進められた。また、第 1～2 期の 10 年にわたる取組に対する技術的な評価と課題の整理を行うとともに、これまでに検討・検証を行ってきたシステムや技術を前提とした経済性の検討を行い、「海底熱水鉱床開発計画総合評価報告書」（以下、「総合評価報告書」という。）を作成した（平成 30 年 12 月公表）。

第 3 期には、資源量調査の分野において概略資源量合計 5,000 万トンレベルの把握を目標とするなど、各分野において、より商業化をイメージした検討を行ってきた。最終年度の令和 4 年度には、今期に得られた資源量調査や生産技術開発の成果をもとに、第 2 期の総合評価報告書より現実的な条件を設定したうえで、経済性評価を行った。

このような着実な取組の一方、民間企業が参画する商業化を目指したプロジェクト開始のためには、依然として技術的、経済的、その他様々な課題が残されている。従って、海底熱水鉱床の商業化に向けては、市場経済動向や法制度の整備状況等の諸条件も踏まえ、引き続き中長期的な視点で課題の解決に取り組んでいく必要がある。

2-2. 実施体制

開発計画に基づく海底熱水鉱床開発の取組は、海洋基本計画の作成とその実施の推進を行う総合海洋政策本部との政策調整や、エネルギー・鉱物資源の安定供給の確保に関する重要事項を調査・審議する総合資源エネルギー調査会資源・燃料分科会への諮問等を通じて、政策の内容や方向性を確認しながら進めている。

具体的な取組は、経済産業省がJOGMECに委託して実施しており、更に、JOGMECは資源量調査、環境影響評価、採鉱・揚鉱、選鉱・製錬等に関する各事業を、民間企業や研究機関、大学の協力を得て進めている。

JOGMECは、海洋鉱物資源開発検討委員会を設置し、海底熱水鉱床開発における様々な分野の有識者の意見を聴取している。更に、当該委員会の下に探査、環境、採鉱・揚鉱、選鉱・製錬、経済性評価を含む総合評価に関するワーキンググループを設置し、各分野における事業の計画や進捗、調査結果等について専門的な見地から有識者の助言を得て、事業を実施している（図2-2-1）。

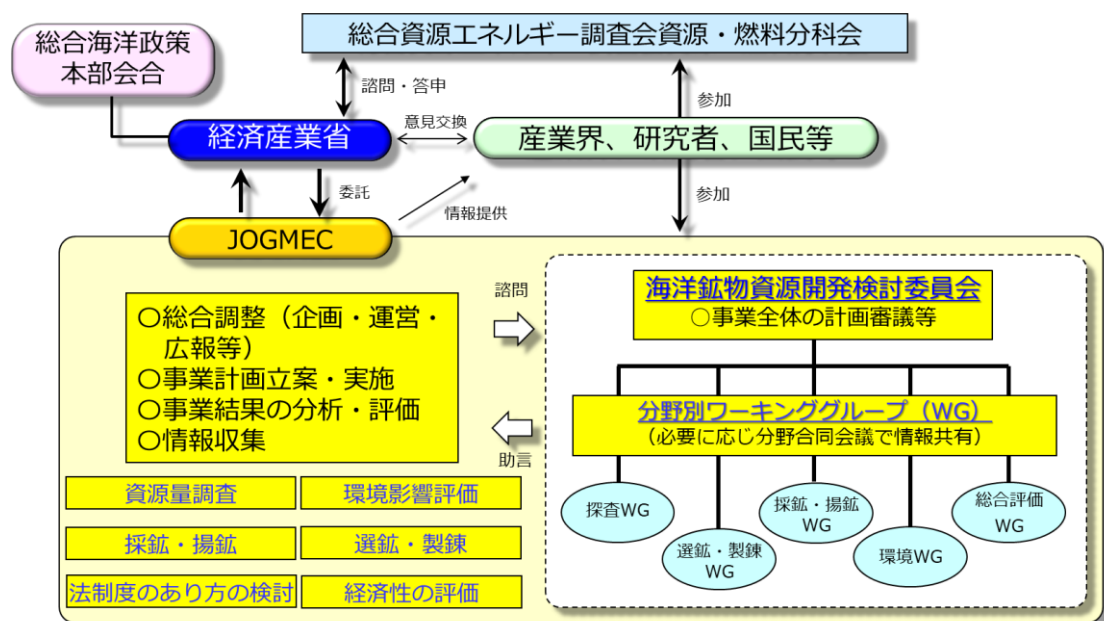


図 2-2-1 海底熱水鉱床開発事業の実施体制図

3. 海底熱水鉱床について

3-1. 海洋鉱物資源の分類

海洋基本計画には、それぞれ分布する海域、成因、産状、含まれる金属元素の異なる海底熱水鉱床、コバルトリッチクラスト、マンガン団塊及びレアアース泥の4つの海洋鉱物資源が明記されている（図3-1-1）。

これらの資源は、銅、鉛、亜鉛などのベースメタル、電気自動車用モーターや二次電池などに使用されているレアメタルといった金属元素を含むが、我が国からはるか遠い海域に分布しているものから、我が国周辺の海域に分布しているものまで様々存在する（図3-1-2）。

島嶼国であり世界第6位の排他的経済水域を有する我が国にとって、これら海洋鉱物資源は、金属鉱物資源の新たな供給源になる可能性を有している。

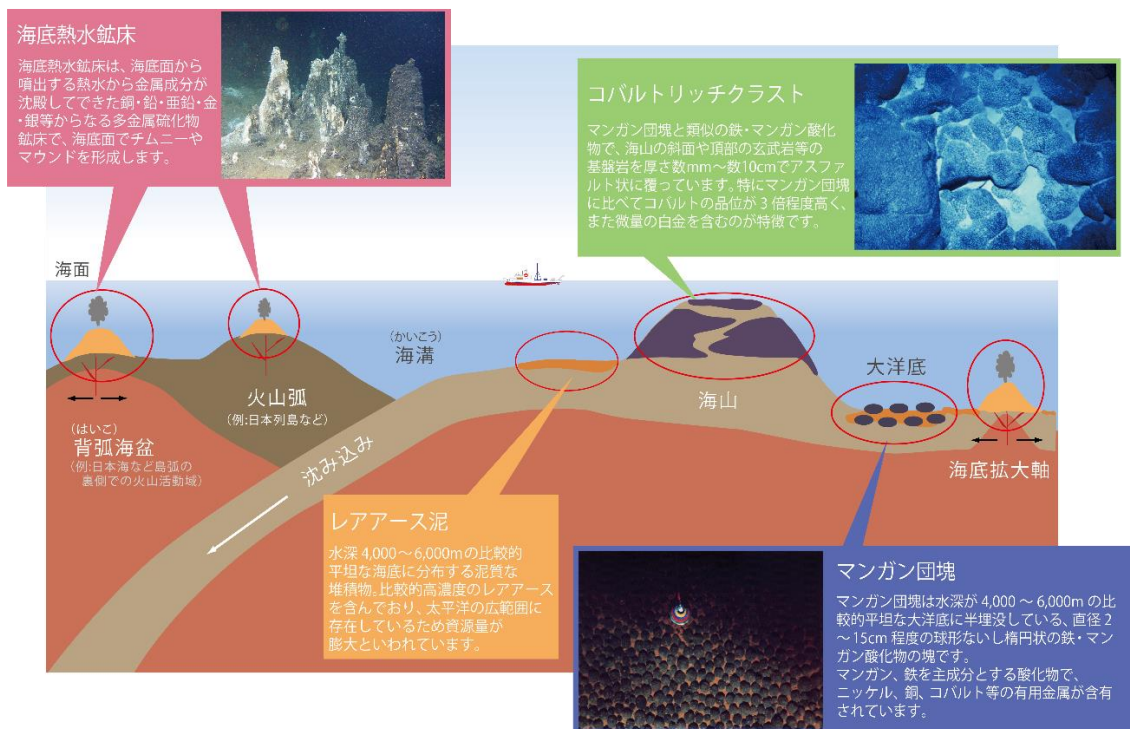


図3-1-1 海洋鉱物資源の分布イメージ

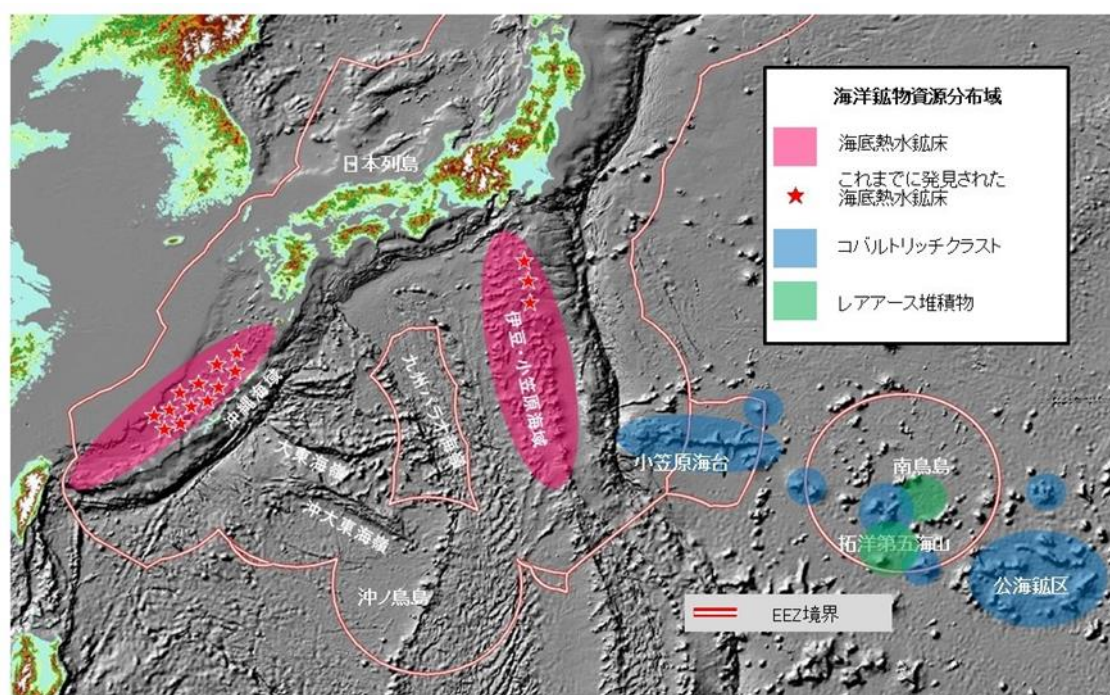


図 3-1-2 我が国周辺の主な海洋鉱物資源の分布

3-2. 海底熱水鉱床の概要

海底熱水鉱床は、地下深部に浸透した海水がマグマ等により熱せられ、周辺から有用元素を溶出した「熱水」が海底で噴出し、海水によって冷却される過程で、銅、鉛、亜鉛、金、銀等の各種金属が沈殿してできたものである。一般に、水深 700～2,000 m の中央海嶺等海底が拡大する場所や、ニュージーランド～フィジー、パプアニューギニア～マリアナ～日本に至る西太平洋の島弧－海溝系に分布し、世界で約 350 箇所程度の鉱徴地が見つかっている（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, 2018）。我が国の周辺海域では、島弧－海溝系に属する沖縄海域及び伊豆・小笠原海域（図 3-1-2）において、JOGMEC による資源調査のほか、AIST、JAMSTEC 及び海上保安庁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。

我が国以外の海底熱水鉱床開発の取組として、ロシア、フランス、中国、韓国、インド、ドイツ及びポーランドが、ISA との探査契約に基づき公海域に鉱区を保有している（図 3-2-1）ほか、韓国によるトンガやフィジーで取得した探査鉱区での掘削調査、カナダ企業の Nautilus Minerals 社（2019 年破産）によるパプアニューギニアの領海内での開発プロジェクト等、各国が探査や開発に向け取り組んできたものの、現時点ではまだ操業に至った事例はない。

また、海底熱水鉱床は、資源としての可能性を秘める一方で、貴重な熱水生態系を伴うものもあることから、開発に当たっては周辺環境や生物種への影響、それらの保全策等について十分な科学的調査・検証を行うほか、法制度の整備等も不可欠である。

Exploration for minerals in the Area



図 3-2-1 海洋鉱物資源の賦存状況と探査権を有する国・組織
(International Seabed Authority)

引用文献

International Seabed Authority, Exploration areas,

<https://www.isa.org.jm/minerals/exploration-areas> (2023 年 4 月 6 日閲覧)

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, 2018, 海底熱水鉱床開発計画総合評価報告書, 158p.

独立行政法人エネルギー・金属鉱物資源機構, 海洋鉱物資源の概要,

https://www.jogmec.go.jp/metal/metal_10_000003.html (2023 年 2 月 27 日閲覧)

4. 個別技術分野における成果・課題

4-1. 資源量調査

4-1-1. 概要

第1期には、沖縄海域の Hakurei サイトに、陸上の鉱床を対象とした鉱量計算において鉱業界で広く使われている計算法を適用した結果、マウンドと呼ばれる地形的な高まりの表層部の鉱物資源量を最大 340 万 t と算定した。また平成 24 年 2 月に運航を開始した海洋資源調査船「白嶺」による深部掘削により、海底面下 30 m より深部に新たな海底熱水鉱床の存在を確認した（経済産業省資源エネルギー庁ほか, 2013）。

第2期には、Hakurei サイトの深部に存在する鉱体の資源量を確認するボーリング調査を実施し、マウンド鉱体と下部鉱体を合わせた Hakurei サイトの資源量 740 万 t を算定した。また、伊豆・小笠原海域の白嶺鉱床についても、資源量を 10 万 t と算定した。更に、資源量評価の対象となる鉱床を発見するための広域調査の結果、沖縄海域で野甫サイト、ごんどうサイト、田名サイト、比嘉サイト、球美サイト、銀水サイトの 6 つの海底熱水鉱床を発見した（図 4-1-1）。このうち、ごんどうサイト及び球美サイトについては、海上保安庁との連携により発見に至った。また 6 つの海底熱水鉱床のうち、野甫サイト、ごんどうサイト、田名サイトではボーリング調査を開始した（経済産業省資源エネルギー庁ほか, 2018）。

第3期には、Hakurei サイト、ごんどうサイト、田名サイト、野甫サイト、天美サイト、銀水サイトのボーリング調査を実施し、第2期に算定した白嶺鉱床と合わせて、概略資源量 5,180.5 万 t を把握した。更に、広域調査では、沖縄海域で天美サイト、豊見サイト、梯梧サイト、吾妻サイト、令宝サイト、伊豆・小笠原海域にて東青ヶ島鉱床、須美寿リフト中央鉱床の 7 つの海底熱水鉱床を発見した。このうち、豊見サイト、梯梧サイト、吾妻サイト、東青ヶ島鉱床及び須美寿リフト中央鉱床については、他機関との連携や公表されている情報を参考にして調査を行った。なお、豊見サイトや梯梧サイトでもボーリング調査を実施し、上記の概略資源量には含んでいないものの、鉱化帯の一部を捕捉している。

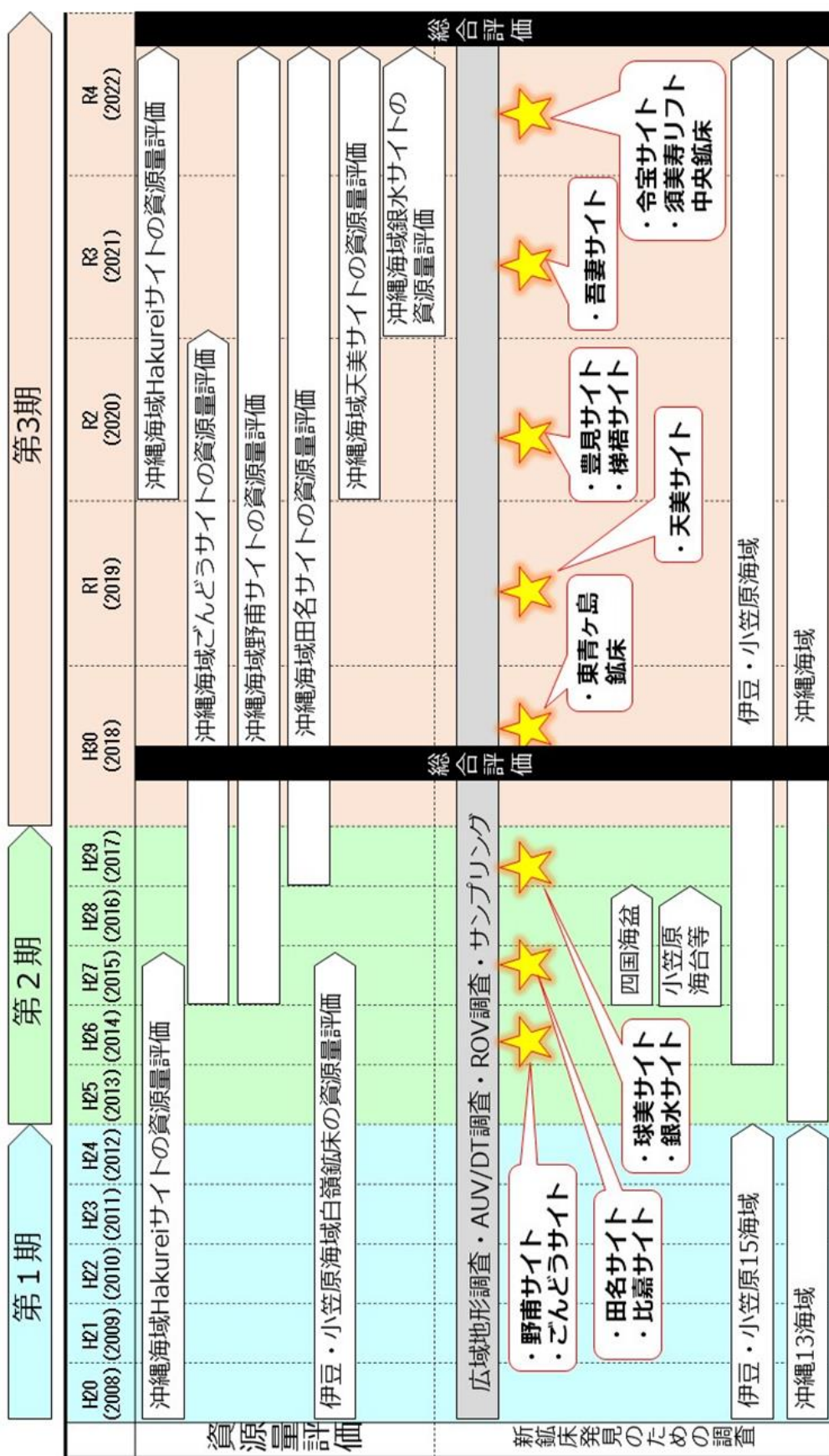


図 4-1-1-1 資源量の調査

4-1-2. 広域調査

日本の周辺海域において、海洋鉱物資源が賦存する可能性の高い有望海域を効率よく絞り込み探査候補地を特定することを目的として、平成 25 年度から資源探査タスクフォース（JOGMEC 及び AIST で構成）を設置し、資源ポテンシャル評価の総合的な解析を実施した。資源探査タスクフォースでは、双方が過年度までに蓄積した探査・研究手法や豊富なデータ（地質構造・海底地質・地形解析・地球物理・地球化学・海底観察・ボーリング調査結果等）を基に総合的な解析を行い、これまで体系的な探査が行われていなかった海域も含め、有望海域の絞り込みを行った。

4-1-2-1. 調査手法

広域調査から資源量評価までの調査フローを図 4-1-2 に示す。まず、船舶に搭載した MBES を用いた調査により広域の海底地形、後方散乱強度、水中音響異常のデータを取得し、その後 DT や AUV を用いて精密な海底地形、後方散乱強度、水中音響異常、化学センサーで得た海水の化学成分等のデータを取得し、有望エリアを絞り込む。海底熱水鉱床賦存の可能性が高いと判断されれば、ROV を用いて海底観察及び試料採取を行い、鉱化や変質の広がり、鉱石の品位を確認する。海底で採取した鉱石の 3 次元的分布を推定するため、ROV による電磁探査を実施し、得られたデータを解析して比抵抗分布を求める。

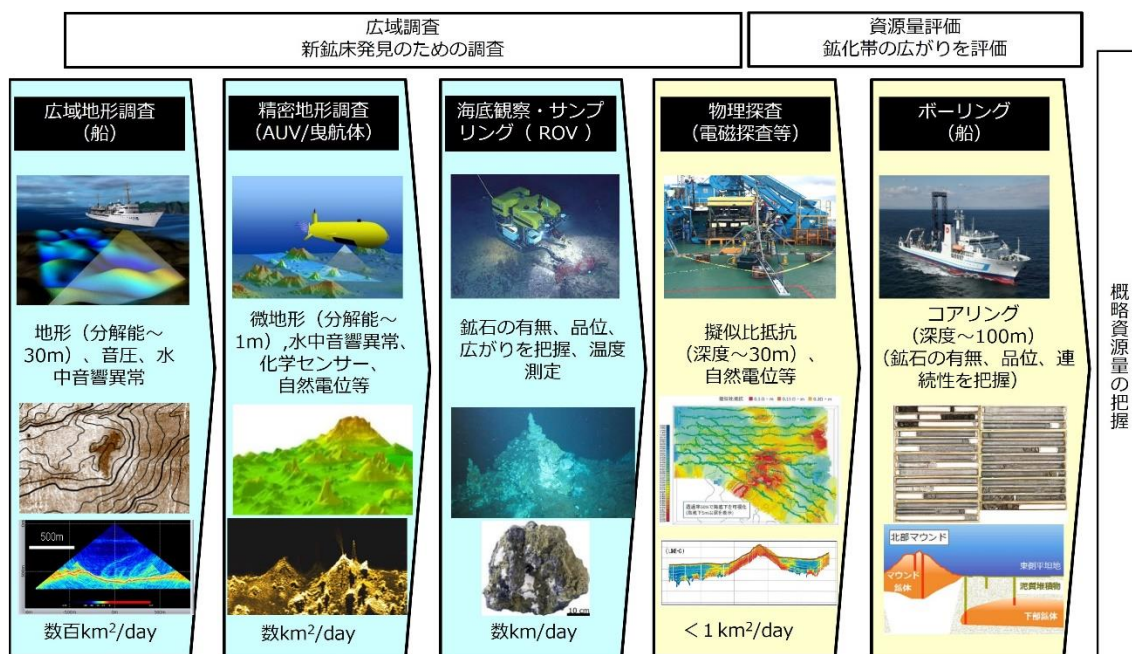


図 4-1-2 JOGMEC が実施する資源量調査の流れ

第 2 期に発見したごんどうサイトは、船舶の MBES で水中音響異常を測定することができなかったことから、資源探査タスクフォースにおいて、海底近傍を効率的に調査する手法として DT の有効性が検討された。また、第 2 期の提言を踏まえて、物理探査等を活用したより正確な鉱体の形状の把握・評価を目指すこととした。その際、候補となった物理探査手法は陸上の金属探査では以前より導入されていたものの、海域での探査では実績に乏しかったため、物理探査手法の改良及び解析技術の向上に取り組み、ROV を用いた物理探査を積極的に実施することが資源探査タスクフォースにおいて提案された。

第 3 期には、地形データの解析、赤色立体地図の作成、AI 技術を用いた解析、水中音響異常の詳細解析などの広域データ解析を行い、他機関との連携や公表されている情報も参考にして有望海域を抽出した。また、海底近傍を効率的に調査するために AUV と DT を組み合わせて調査を実施した。加えて、ROV を用いた物理探査を積極的に実施し、調査手法の改良及び解析技術の向上を行った。その結果、7 つの海底熱水鉱床を新たに発見した。そのうち、梯梧サイト、吾妻サイト、須美寿リフト中央鉱床は、船舶による MBES では水中音響異常が抽出されなかったサイトである。梯梧サイト、吾妻サイトは AUV で水中音響異常あるいは化学センサーの異常が抽出されたが、須美寿リフト中央鉱床は、海底面近傍での AUV を用いた調査によっても顕著な水中音響異常や化学センサー異常が測定されなかったため、他鉱床に比べて熱水活動が静的であることが考えられる。

探査において指標とする異常の観点から、海底熱水鉱床を Type-A~D の 4 種に分類した（図 4-1-3）。（Type-A）熱水噴出孔から熱水が激しく噴出しており、船舶に取り付けた MBES を用いて探査することができる。（Type-B）熱水の噴出が Type-A ほど激しくなく、海底近傍で測定する必要があるため、AUV や DT に音響調査機器と化学センサーを搭載して調査する。（Type-C）海底面に露出しているが、熱水噴出口から熱水が吹き上がっていない鉱床。（Type-D）海底面に露出していない鉱床。Type-C 及び Type-D については、水中音響異常や化学センサー異常が抽出される期待が低いいため、鉱床賦存有望地選定を目的とする物理探査においては、水中航走体（AUV や DT 等）による電気電磁探査や自然電位調査などの手法が有効である。各鉱床の分類結果と、根拠となる調査結果を表にまとめた（表 4-1-1）。

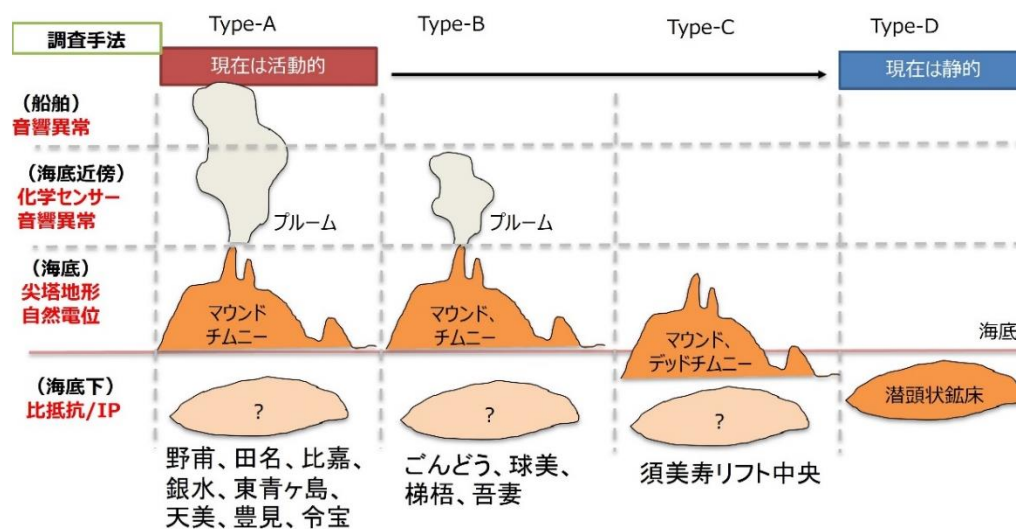


図 4-1-3 海底熱水鉱床の分類

表 4-1-1 発見された海底熱水鉱床の分類及び広域調査結果の一覧

海域名	Type	音響異常	化学センサー	採取方法
野甫サイト	A	船舶	検出	ROV
ごんどうサイト	B	AUV	検出	ROV
田名サイト	A	船舶	検出	ROV
比嘉サイト	A	船舶	検出	ROV
球美サイト	B	AUV	未実施	ROV
銀水サイト	A	船舶	検出	ROV
東青ヶ島鉱床	A	船舶	検出	ROV
天美サイト	A	船舶	検出	ROV
豊見サイト	A	船舶	検出	ROV
梯梧サイト	B	未検出	検出	ROV
吾妻サイト	B	AUV	未検出	ROV
令宝サイト	A	船舶	検出	ROV
須美寿リフト中央鉱床	C	未検出	未検出	ROV

4-1-2-2. 調査結果

以下、各サイトの発見の経緯、観察結果、物理探査の調査結果などを記述する。

第2期－（1）野甫サイト

平成24年10月から11月にかけて広域地形調査によって水中音響異常を抽出し、更に平成25年2月～3月及び平成26年2月～3月にAUVによる精密地形調査を実施して明瞭な水中音響異常、海底に複数の尖塔状地形、化学センサーの異常を検出した。

平成26年2月～7月にROVを用いた海底観察を実施し、南北1,000 m×東西600 m程度の範囲に、大小20個以上のマウンドを確認した。サイト中央には高さ約30 m、直径約100 mに及ぶ最大規模のマウンドがあり、頂上のチムニーやその倒壊物、裾野の沈殿物等から、亜鉛、鉛等を含む鉱石6試料を採取した。平成30年10月には、ROVを用いた物理探査を実施し、高導電率異常の分布などを確認した。

第2期－（2）ごんどうサイト

平成26年6月に海上保安庁がAUV「ごんどう」を用いて精密地形調査等を行い、海底に多数の尖塔状地形を発見するとともに、急激な水温の上昇も観測したことから、海底熱水鉱床の存在を推定し、平成26年9月に発表した。なお、これ以前の平成25年2月にJOGMECは当該海域において、船舶からMBESによる広域地形調査を行っていたが明瞭な水中音響異常は検出されておらず、その後も、ボーリング調査の機会に船舶からMBESを用いて幾度か測定を試みたが、明瞭な異常は検出されていない。JOGMECは平成26年10月に海上保安庁からの調査データの提供を受け、平成26年11月にROVを用いた海底観察を実施し、海底熱水鉱床の存在を確認した。平成27年2月にAUVによる精密地形調査を実施し、水中音響異常に加えて、化学センサーの異常を検出した。

ごんどうサイトでのROVを用いた海底観察の結果、南北1,500 m×東西300 m程度の範囲にチムニーやマウンドを確認した。チムニーの多くは黒色あるいは無色の熱水を激しく噴出している。高さ10 m級のチムニーが一般的であるが、中には20 mを超えるチムニーも見られた。マウンド裾野から緩傾斜域では活動を停止した10 m級のチムニーが林立しており、その周囲にはチムニーが崩れてできたマウンドが形成されている（独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構, 2015）。平成30年7月には、ROVを用いた物理探査を実施し、高導電率異常の分布などを確認した。

第2期－（3）田名サイト

平成26年12月に広域地形調査によって水中音響異常域を抽出した。平成27年2月にAUVによる精密地形調査を実施して海底に大小多数の凹凸の地形、水中音響異常、化学センサーの異常を検出した。

平成27年10月～11月にROVを用いた海底観察を実施し、南北800 m×東西600 m程度の範囲にチムニーやマウンドが群集して存在することを確認した。平成28年11月、

平成 29 年 2 月及び令和 2 年 10 月に、ROV を用いた物理探査を実施し、高導電率異常の分布などを確認した。

第 2 期－（４）比嘉サイト

平成 27 年 1 月に広域地形調査によって水中音響異常域を抽出し、平成 27 年 9 月に AUV による精密地形調査を実施し、水中音響異常、化学センサー異常を検出した。平成 27 年 11 月に ROV を用いた海底観察を実施し、直径 100 m 強のカルデラ地形の内壁に Pb・Zn 鉱物からなる緻密質な塊状鉱石が分布し、更に、カルデラ周縁部にも熱水が噴出していることを確認した。令和 3 年 10 月には、ROV を用いた物理探査を実施し、高導電率異常の分布などを確認した。

第 2 期－（５）球美サイト

球美サイトを含む火山性地形の高まりでは、海上保安庁が平成 28 年 5 月から 6 月にかけて AUV を用いた精密地形調査等を実施し、溶岩ドームや直径 30 m 程の複数の円錐状地形やブルームを確認した。JOGMEC は海上保安庁から調査データの提供を受け、平成 28 年 11 月、平成 29 年 2 月に ROV を用いた海底観察を実施し、海底熱水鉱床の存在を確認した。なお、JOGMEC は平成 27 年 10 月から 11 月にかけて広域地形調査を実施していたが、明瞭な水中音響異常は検出されていなかった。

球美サイトでは海底に熱水活動が 550 m×300 m 程度の範囲に分布しており、最高 350℃の熱水を噴出するチムニーやマウンドが確認された。平成 30 年 10 月には、ROV を用いた物理探査を実施し、高導電率異常の分布などを確認した。

第 2 期－（６）銀水サイト

平成 27 年 10 月から 11 月にかけて広域地形調査によって水中音響異常域を検出した。平成 28 年 11 月に AUV による精密地形調査を実施した結果、水中音響異常に加えて、チムニーと考えられる尖塔状の地形、化学センサーの異常を検出したため、平成 28 年 11 月及び平成 29 年 2 月に ROV を用いた海底観察を実施し、海底熱水鉱床の存在を確認した。

銀水サイトでは海底に熱水活動が 300 m×100 m 程度の範囲に分布しており、最高 220℃の熱水を噴出する高さ約 30 m のチムニーをはじめ、多数のチムニーを発見した。令和 2 年 10 月には、ROV を用いた物理探査を実施し、高導電率異常の分布などを確認した。

第3期－（1）東青ヶ島鉱床

平成 25 年より東京大学生産技術研究所が調査を実施し、海底熱水鉱床が確認されていた（東京大学生産技術研究所, 2015）。JOGMEC は平成 27 年 9 月から 10 月にかけて広域地形調査によって水中音響異常を抽出し、平成 29 年 9 月に実施した DT による精密地形調査の結果、従来報告されていなかった尖塔状の地形や熱水活動の兆候を多数検出し、化学センサーの異常も捉えた。また、平成 30 年 8 月から 9 月にかけて AUV を用いた精密地形調査も実施し、明瞭な水中音響異常、尖塔状地形に加えて化学センサーの反応を検出した。

平成 28 年 9 月、平成 29 年 12 月、平成 30 年 6 月～7 月に ROV を用いた海底観察を実施し、南北 8.4 km×東西 5 km 程度のカルデラ中央部において最大 25 m の高さのチムニー群を確認したほか、250℃を超える熱水活動を伴うマウンドを確認した。平成 30 年 9 月には、ROV を用いた物理探査を実施し、高導電率異常の分布などを確認した。

第3期－（2）天美サイト

平成 26 年 3 月に広域地形調査によって水中音響異常を抽出し、令和元年 8 月に AUV による精密地形調査を実施して海底に複数の尖塔状地形、明瞭な水中音響異常と化学センサーの反応を検出した。令和元年 10 月～11 月、令和 2 年 12 月、令和 3 年 2 月及び 8 月に ROV を用いた海底観察を実施し、南北 3 km×東西 4 km 程度の範囲にチムニーやマウンドで構成された鉱化帯を確認した。サイト中央には高さ約 30 m、直径約 100 m に及ぶ最大のマウンドがあり、マウンドの頂部では黒色を呈する熱水を噴出するチムニーを確認し、熱水の温度は最高で 250℃を計測した。また、このマウンドの周辺にも、無色の熱水を噴出するチムニー群や直径 20～50 m の硫化鉱マウンドを複数確認しており、サイト全域を通じた熱水温度は最高で約 320℃であった。令和 2 年 10 月には、ROV を用いた物理探査を実施し、高導電率異常の分布などを確認した。

第3期－（3）豊見サイト

平成 30 年度に SIP 事業として、AUV を用いて精密地形調査及び弾性波探査、ボーリング調査を実施し、ボーリング結果から、海底下 49 m 付近に堆積する泥岩層内で熱水性の黄鉄鉱や黄銅鉱を含む硫化鉱石が得られている（多良ほか, 2020）。JOGMEC は令和元年 9 月に AUV を用いた精密地形調査を実施し、チムニー状地形と海底からの熱水の噴き出しを示唆する水中音響異常と化学センサーの反応を検出した。令和 2 年 9 月と令和 3 年 8 月に ROV を用いた海底観察を実施し、南北 800 m×東西 1,000 m 程度の範囲にチムニーやマウンドで構成された鉱化帯を複数確認した。サイト内には最長で約 300 m にわたって熱水を噴出するチムニーと活動を停止したチムニーが断続的に分布することを確認し、熱水温度は最大で 325℃を計測した。また、このチムニー群の他にも、硫化鉱からなるチムニー群をサイト内の複数地点で確認している。令和 2 年 10 月には、ROV を用いた物理探査を実施し、高導電率異常の分布などを確認した。更に、令和 4 年 1 月のボーリング調査

中の地形調査では水中音響異常を検出した。

第3期－（4）梯梧サイト

平成26年度にAISTがROV「ハイパードルフィン」を用いた海底観察を実施し、硫化鉱を採取している（針金ほか,2017 ; Harigane et al, 2023）。JOGMECは平成27年12月に広域地形調査を実施したが、明瞭な水中音響異常は検出されなかった。平成30年10月にAUVによる精密地形調査を実施し、化学センサーの反応を検出した。また、火口底に複数のマウンド地形が存在することを確認した。令和2年9月、令和3年1月及び令和3年12月にROVを用いた海底観察を実施し、東西200 m×南北500 m程度の範囲にチムニーやマウンドが分布する鉱化帯を確認した。鉱化帯には直径約50 mに及ぶマウンドのほか、高さ15～20 mのチムニーが発達するチムニー群を確認している。一部で白色の沈殿物を伴う弱い熱水活動は確認されたが、チムニーの多くは活動を停止している。令和3年10月には、ROVを用いた物理探査を実施し、高導電率異常の分布などを確認した。

第3期－（5）吾妻サイト

平成30年度にSIP事業として、AUVを用いた精密地形調査や自然電位探査が実施され、自然電位探査の結果では、振幅が小さいものの負の異常域を形成している（笠谷ほか, 2020）。JOGMECは平成26年12月に広域地形調査を行ったが明瞭な水中音響異常は検出されなかった。令和元年9月にAUVを用いた精密地形調査を実施し、チムニー状地形と海底からの熱水の噴き出しを示唆する水中音響異常を検出した。令和3年2月、令和3年8月にROVを用いた海底観察を実施し、熱水を噴出するチムニーと活動の停止したチムニーが約250 mにわたって断続的に分布する鉱化帯を確認した。熱水温度を計測したところ、最大で315℃を計測した。鉱化帯の側方への連続性は十分に調査できていない。令和2年10月には、ROVを用いた物理探査を実施し、高導電率異常の分布などを確認した。

第3期－（6）令宝サイト

平成26年3月の広域地形調査によって水中音響異常を抽出し、令和3年9月及び令和4年8月にAUVによる精密地形調査を実施し、海底からの熱水の噴き出しを強く示唆する水中音響異常と化学センサーの反応を検出した。令和2年9月、令和3年10月、令和4年9月にROVを用いた海底観察を実施し、溶岩ドーム縁辺に硫化鉱からなるチムニー・マウンドと有用金属を含んだ堆積物を発見したほか、硫化鉱からなる熱水を噴出するチムニーを複数地点で確認し、熱水の最高温度は約200℃を計測した。

第3期－（7）須美寿リフト中央鉱床

昭和62年の日米共同科学調査において、米国の有人潜水探査機を用いた調査の結果、重晶石・シリカチムニー及びクリストバライトの集積が報告されていた（Urabe and Kusakabe, 1990）。JOGMECは平成25年9月、平成27年9月から10月、令和3年6

月に広域地形調査を実施したが、明瞭な水中音響異常の検出には至らなかった。平成 29 年 9 月に DT による精密地形調査を実施し、わずかな尖塔状地形を検出した。令和 4 年 9 月に AUV を用いた精密地形調査では顕著な水中音響異常や化学センサーの異常は検出されなかったが、自然電位の異常を検出した。平成 30 年 6 月と令和 4 年 6 月に ROV を用いた海底観察を実施し、尖塔状地形が活動を停止したチムニーであることを確認した。

4-1-2-3. 今後の課題

鉦床によっては、船舶搭載の MBES では水中音響異常を探知することができず、AUV 搭載の MBES による水中音響異常の把握や化学センサーによる異常の検出が鉦床発見の端緒となったことから、AUV や DT 等の水中航走体を用いた海底近傍の調査を行うことで、新鉦床発見の可能性が拡大すると考えられる。一方で、このような水中航走体を用いた調査手法は海底熱水鉦床の胚胎が期待される海域を網羅するには調査効率が低い。調査の項目や条件を最適化したうえで測線間隔を広げることや、自然電位の活用、急峻な海底地形に追従して高速で移動できる技術などが有用である。同時に、既知鉦床の衛星鉦体の探査や、有望海域の絞り込みのための更なるデータ解析（地形、水中音響異常、重磁力、AI 解析など）も行うべきであろう。

これまでの調査により、海底熱水鉱床のマウンドを構成する硫化物の品位分布に規則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。また、一般に海域でのボーリング調査は、遠隔での操作や船体動揺の影響等により陸上でのボーリング調査よりも難易度が高く、未固結な地質体の散逸などにより、コア回収率もよくないため、回収したコアから陸上と同程度の正確さで鉱石の賦存状況を把握するのは困難である。

第3期では、**Hakurei** サイト、野甫サイト、ごんどうサイト、田名サイト、銀水サイト、天美サイトの鉤体の鉤物資源量を確認するボーリング調査を実施し、各鉤床の資源量評価を行った。

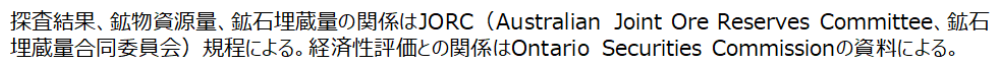


図 4-1-4 概略資源量の位置づけ

表 4-1-2 各鉱床の概略資源量の算定に用いた情報

	地質モデル作成、 岩相区分、分析値	詳細地形・ 海底観察結果	物理探査結 果（電磁探査 比抵抗）	ブロック モデルの 設定	品位・比重の 内挿・外挿
Hakurei サイト	○ (一部簡易分析)	○	○	○	○
野甫 サイト	○ (一部簡易分析)	○	○	—	○
ごんどう サイト	○	○	○	○	○
田名 サイト	○	—	—	—	○
銀水 サイト	○ (一部簡易分析)	○	○	—	○
天美 サイト	○	○	○	—	○

4-1-3-1. 沖縄海域 Hakurei サイト

(1) 地質・鉱床概要

Hakurei サイトは、南南東方向に伸びた長軸 6 km×短軸 3 km 程度の大きく陥没した凹地形に位置している。

Hakurei サイトには、幅数十 m から百数十 m、比高数 m から数十 m の大小様々な硫化鉱マウンド（以下、「マウンド鉱体」という。）と海底面下約 30 m に賦存する幅数十 m から数百 m、厚さ数 m から数十 m の堆積物混じりの硫化鉱体（以下、「下部鉱体」という。）が確認されている。

マウンド鉱体及び下部鉱体の硫化鉱は、緻密質なものから多孔質なものまで変化に富み、閃亜鉛鉱主体、閃亜鉛鉱及び黄鉄鉱主体、黄鉄鉱主体の鉱石が産出する。

海底面は軽石礫を含む暗灰色から淡灰色の未固結泥質堆積物に覆われており、下部鉱体の下盤には淡緑色から明灰色の凝灰岩・火山礫凝灰岩が分布する。この凝灰岩には、粘土化変質（イライト変質あるいは緑泥石変質）及び硬石膏の随伴が一般的にみられる。硬石膏は脈状あるいは鉱染状に産し、凝灰岩が黄鉄鉱及び磁硫鉄鉱により鉱染を受けた産状が、水平方向に連続的に確認される。

第 3 期には過年度までの調査及び分析結果を踏まえ、追加ボーリング調査及び化学分析結果の再検討を実施した。追加ボーリング調査の結果によりマウンド鉱体及び下部鉱体の更なる水平分布及び連続性が確認された範囲（以下、「連続鉱体」）について資源量を算定した。また、化学分析結果の再検討の結果、海底面直下から約 50 m までに存在する未固結堆積物には細粒の閃亜鉛鉱等を含むことから、十分な品位が確認された範囲（以下、「堆積鉱体」）についても資源量を算定した（図 4-1-5）。

なお、連続鉱体及び堆積鉱体については、調査精度がまだ十分でない等の理由により陸上の鉱床を対象とした鉱業界で広く使われている鉱量計算法を適用していないため、マウンド鉱体及び下部鉱体と同レベルの評価精度には達していない。

・連続鉱体モデル

既存のボーリングコアの位置・産状から、マウンド鉱体及び下部鉱体の連続性、又は鉱体の平面的広がり期待される地点にて追加ボーリング調査を実施した。特に中部～南部のマウンド鉱体及び下部鉱体が連続し、北部の下部鉱体についても平面的な広がりが確認されたことから、チムニーの成長、倒壊、再堆積のサイクルが大規模かつ長期間にわたって続いている可能性が示唆される。中部のマウンド鉱体付近のボーリング調査は磁硫鉄鉱が観察されたため、物理探査（AUV で取得された磁気探査）を参考にして鉱体をモデリングした。

※マウンド鉱体モデル及び下部鉱体モデル詳細については、第 2 期の総合評価報告書（経済産業省資源エネルギー庁ほか, 2013）にて記載している。

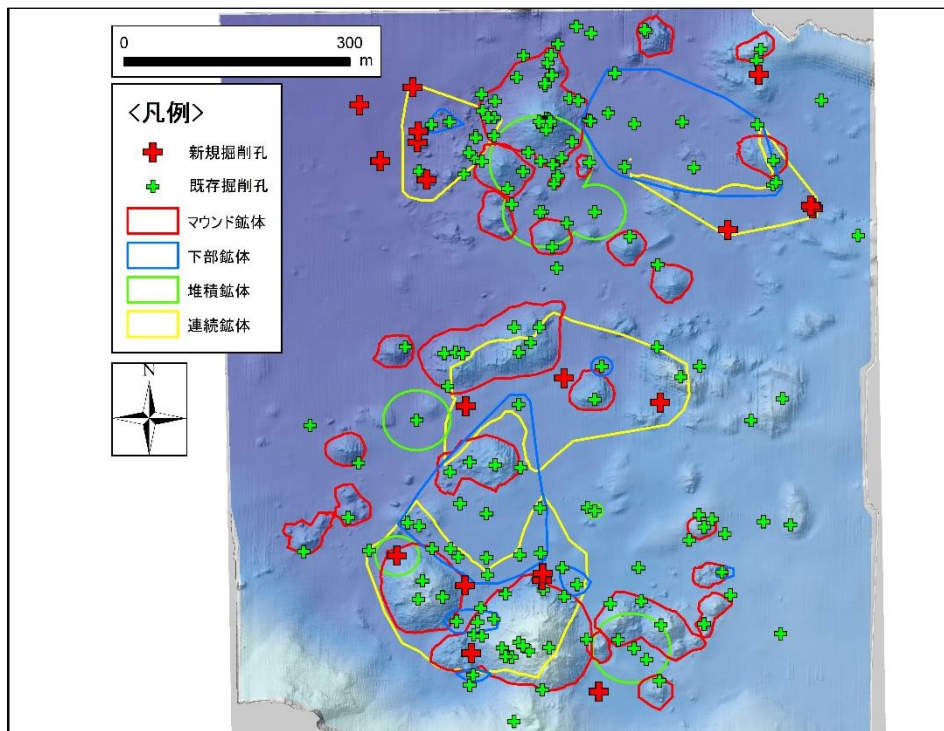


図 4-1-5 Hakurei サイトの地形陰影図

・堆積鉱体モデル

主に第 2 期までに取得された一部のボーリングコアの未固結堆積物を主とした岩相について、以前より亜鉛高品位部が確認されていた。電子顕微鏡にて産状を確認した結果、チムニー又はマウンド鉱体等の鉱体が形成したのち、既存の鉱体から閃亜鉛鉱等の鉱石片及び微細粒子が供給されながら堆積し、形成されたものと推察する。

鉱体のモデリングにあたっては、本サイトにおける鉱石類の分析値の基本統計量を勘案し、十分な品位が確認された部分が連続して確認できる部分を鉱体とした。

(2) 資源量評価

Hakurei サイトでは、平成 20 年度から深海鉱物資源探査船「第 2 白嶺丸」の海底着座型掘削装置（掘削能力 20 m）を用いてボーリング調査を実施し、資源量を算定した。

平成 24 年 2 月からは、海洋資源調査船「白嶺」の船上設置型掘削装置（掘削能力 400 m）でボーリング調査を集中的に実施した結果、海底表層部に存在するマウンドの深部方向への連続性を把握するとともに、マウンド周辺部の泥質の未固結堆積物の下にも層状の下部鉱体が存在していることを把握し、資源量を算定した。

平成 28 年 5 月の公表時（独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構，2016b）に含まれていなかった未評価孔に加え、その後、第 3 期の間に「白嶺」の船上設置型掘削装置（掘削能力 400m）及び民間船に搭載した海底着座型掘削装置（掘削能力 70 m）でボーリング調査を実施し、資源量を算定した。

Hakurei サイトにおける鉱体の 3 次元モデルの鳥瞰図を図 4-1-6 に示す。

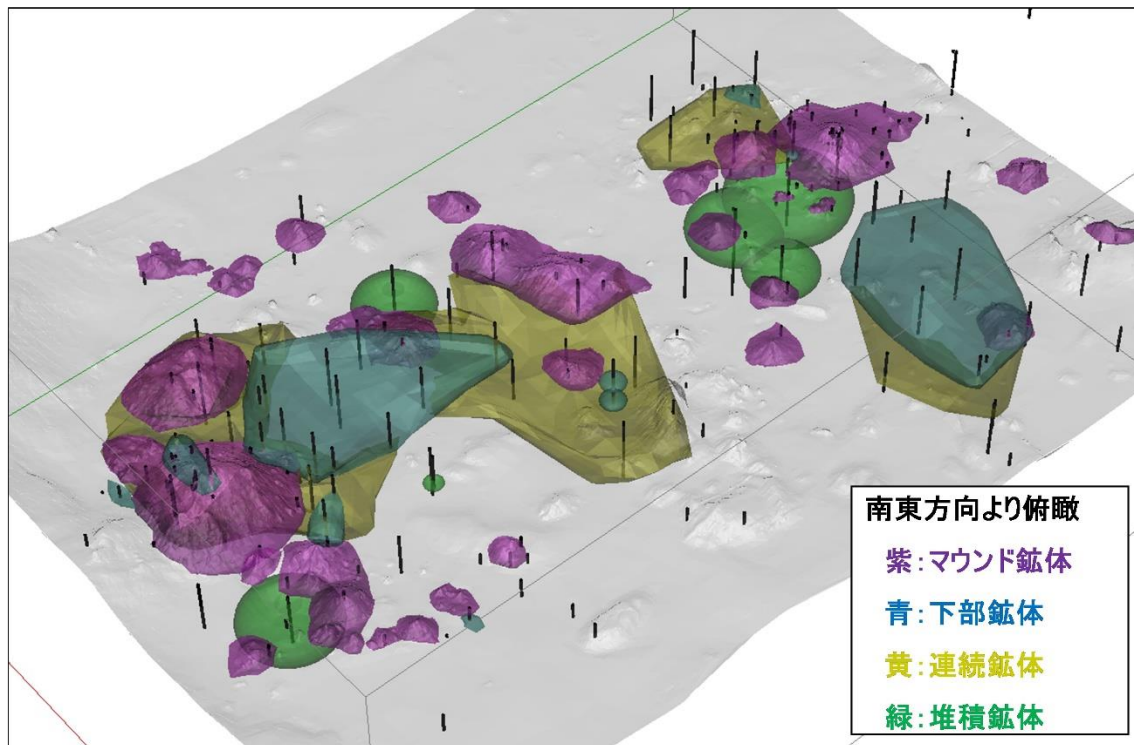


図 4-1-6 Hakurei サイトにおける鉱体の 3 次元モデルの鳥瞰図

4-1-3-2. 沖縄海域 ごんどうサイト

(1) 地質・鉱床概要

ごんどうサイトは、南北 1,500 m×東西 500 m 程度の凹地中に存在する。凹地は、南部から中央部にかけては南北方向、中央部～北部にかけては北北東-南南西方向に伸長し、最大幅 400 m、長さ 1,400 m で、約 0.55 km² の面積を持ち、西側に 10° 未満で傾斜する平らな海底からなる。表層では黒鉱質～半黒鉱質の塊状鉱が分布するが、表層以深では黄鉱質の塊状鉱～鉱染状鉱が主として分布する（図 4-1-7）。

鉱体は、マウンド複合鉱体、小マウンド鉱体、下部鉱体、鉱染状鉱体、補間鉱体からなる。

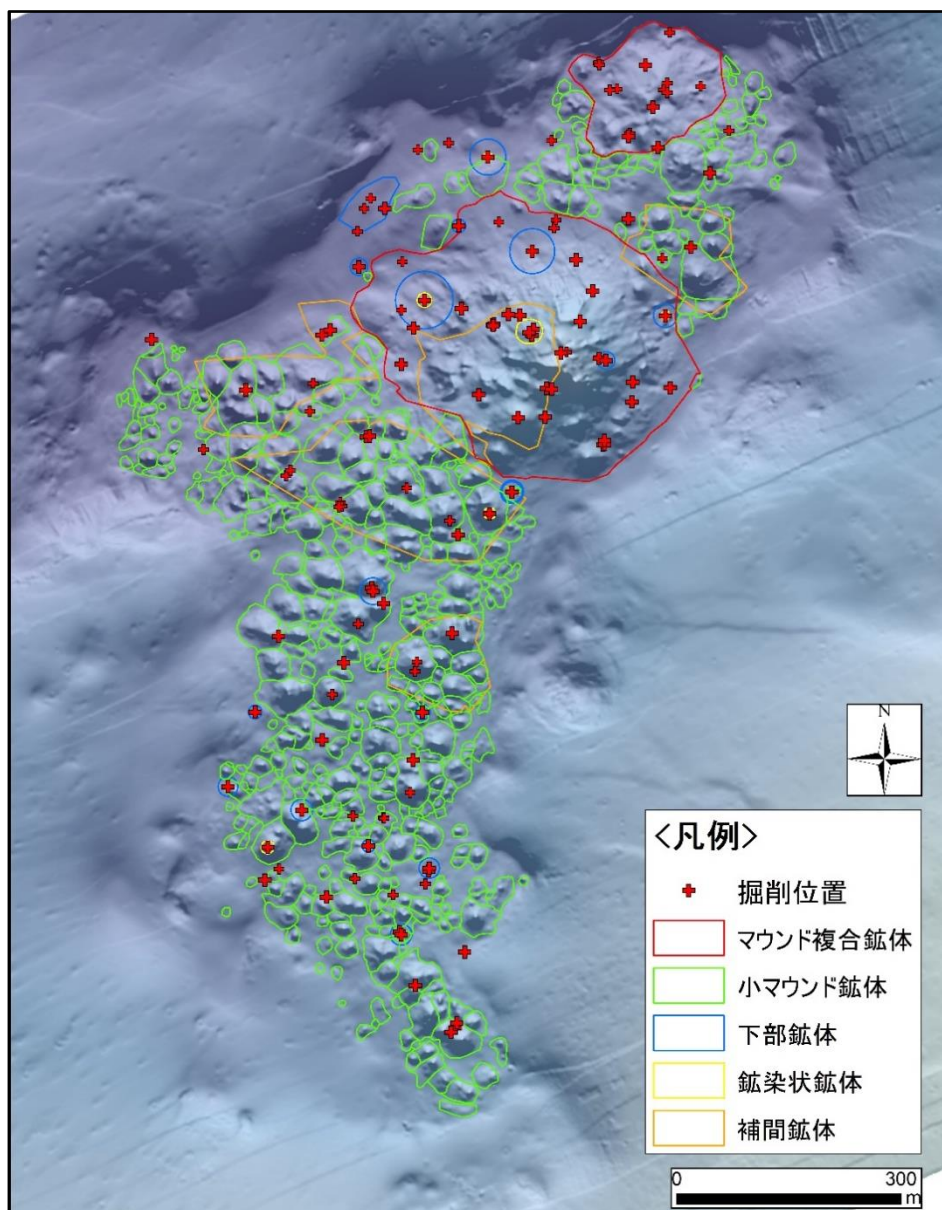


図 4-1-7 ごんどうサイトの地形陰影図

・マウンド複合鉱体モデル

ごんどうサイト中央部にある直径 300 m を超えるマウンドを中心に分布する南北 390 m×東西 470 m 程度の本サイトで最も大きな主マウンド複合鉱体と、北端に分布する南北 170 m×東西 200 m 程度の北部マウンド複合鉱体の 2 つを分類している。

主マウンド複合鉱体は、主に塊状硫化鉱、礫状硫化鉱、砂礫状硫化鉱よりなり、マウンドの山腹部には既存の硫化鉱が再堆積したと考えられる礫状硫化鉱及び砂礫状硫化鉱が多く分布する。鉱質は鉱体の上部では黒鉱質～半黒鉱質、鉱体の下部で黄鉱質が優勢となるが、鉱体の下端部まで黒鉱質が分布する箇所や海底面付近まで黄鉱質が分布する箇所が見られるなど、複合鉱体の複雑な形成プロセスを示唆する。空隙は全体的に上部から下部に向けて減少する傾向を示し、多孔質な鉱石から緻密な鉱石へ変化する。マウンド深部の凝灰岩類は粘土化変質（イライト変質あるいは緑泥石変質）及び珪化変質を被っている。部分的に黄鉄鉱や黄銅鉱を主体とする鉱染作用を被る箇所も存在し、まれに塊状硫化鉱を狭在する。

北部マウンド複合鉱体は、傾斜する斜面に張りつくように分布しており、主マウンド複合鉱体と比較してマウンドの形状は不明瞭である。鉱石は主に塊状硫化鉱、礫状硫化鉱及び砂礫状硫化鉱からなり、マウンドの頂部から山腹部にかけて礫状硫化鉱及び砂礫状硫化鉱が多く分布する。鉱体下端に主に黄鉄鉱、黄銅鉱が鉱染した鉱染状鉱石の分布が認められる。それ以深の凝灰岩類は粘土化変質を被っている。

なお、マウンド複合鉱体については、陸上の鉱床を対象とした鉱量計算において、鉱業界で広く使われている計算法を適用し金属品位の内挿計算を実施した。

・下部鉱体モデル

海底面より下に位置し、火山碎屑岩類及び堆積物に埋没するほか、マウンド鉱体下に火山碎屑岩類を挟んで胚胎する鉱体である。着鉱長の大きい下部鉱体は主に北西部及びその周辺に分布する。また南部には、数多くの着鉱長の小さい下部鉱体が分布する。下部鉱体の鉱石は主に塊状硫化鉱及び礫状硫化鉱からなる。鉱質は黒鉱質～半黒鉱質、黄鉱質又はその両方からなる鉱体が認められる。黒鉱質～半黒鉱質と黄鉱質の両方が認められる場合は、鉱体上部に黒鉱質～半黒鉱質、鉱体下部に黄鉱質が分布する傾向がある。鉱体下端には黄鉄鉱、黄銅鉱からなる鉱染状鉱石の分布が複数の鉱体で認められる。また、一部区間において閃亜鉛鉱の鉱染も見られる。鉱体下部には硬石膏化や粘土化を伴う凝灰岩類が分布する。以上のような鉱石、鉱質、空隙率及び変質の分布は、マウンド鉱体で認められる特徴と類似しており、下部鉱体がマウンド鉱体と同様に海底面で形成された鉱体であることを示唆する。

なお、黄鉱質が卓越する下部鉱体の成因としては、地下において火山碎屑岩類が黄鉄鉱、黄銅鉱の強い鉱染を受けて形成した可能性が考えられる。

・小マウンド鉱体モデル

ごんどうサイトには多数の小マウンドが広く分布している。特に南部鉱体地域において多く認められ、平坦～緩傾斜地に比高 10～15 m の小マウンド群として点在している。マウンドの数が非常に多いため、全てのマウンドを調査することは困難であるが、多くのマウンドにおいて ROV 海底観察・試料採取やボーリング調査により硫化鉱が確認されていること及び地形的な特徴から、小マウンドは基本的に硫化鉱により構成されているものと推測される。

主に塊状、礫状及び砂礫状鉱石からなり、海底面直下～上部は黒鉱質～半黒鉱質、下部では黄鉱質が優勢である。鉱石の空隙率は、マウンド複合鉱体と同様に下部に向かって減少する傾向を示す。部分的にいくつかの小マウンドが重複して形成された小規模な複合鉱体の可能性があるものも存在する。

鉱体下部には、硬石膏化や緑泥石変質を伴う凝灰岩類が分布する。また複数の鉱体で下端付近から黄鉄鉱や黄銅鉱が鉱染する鉱染状硫化鉱が下方へ連続して分布する。鉱体の下盤は、硬石膏変質や緑泥石変質を伴う火山碎屑岩類が主体である。

・鉱染状鉱体モデル

鉱染状鉱体はごんどうサイトのマウンド鉱体及び下部鉱体の下端から深部へ連続し、黄鉄鉱・黄銅鉱等の鉱染が顕著に認められる。一部の区間では閃亜鉛鉱の鉱染も認められる。鉱体を構成する主な岩相は鉱染状硫化鉱である。鉱体の連続性は一定せず、鉱体ごとに異なる。鉱染状鉱体は地下深所から上昇した熱水が母岩中に浸透したことにより形成したものと考えられる。

・補間鉱体モデル

本鉱体は、ボーリング結果を検討した上で前述の鉱体近傍の連続性を物理探査等から推察したものである。第 3 期では概略的な評価としたため、ボーリングの間隔が広いことや掘削深度が十分でないことから、前述した鉱体と同じ精度での検証ができていないものの、鉱石が分布する可能性が十分に高い範囲を補間したものである。

具体的には、周囲のボーリング間隔が広いが鉱石分布の特徴が物理探査結果と一致する範囲を連続させたもの、鉱体の下端まで掘削できていないものの、周囲の深部まで掘削しているボーリング調査結果から十分に鉱石の連続性が想定される範囲を含んでいる。

(2) 資源量評価

ごんどうサイトでは平成 27 年度から令和 2 年度までに船上設置型掘削装置（掘削能力 400 m）、海底着座型掘削装置（掘削能力 50 m）及び海底着座型掘削装置（掘削能力 70 m）を用いてボーリング調査を実施し、資源量を算定した。

ごんどうサイトにおける鉱体の 3 次元モデルの鳥瞰図を図 4-1-8 に示す。

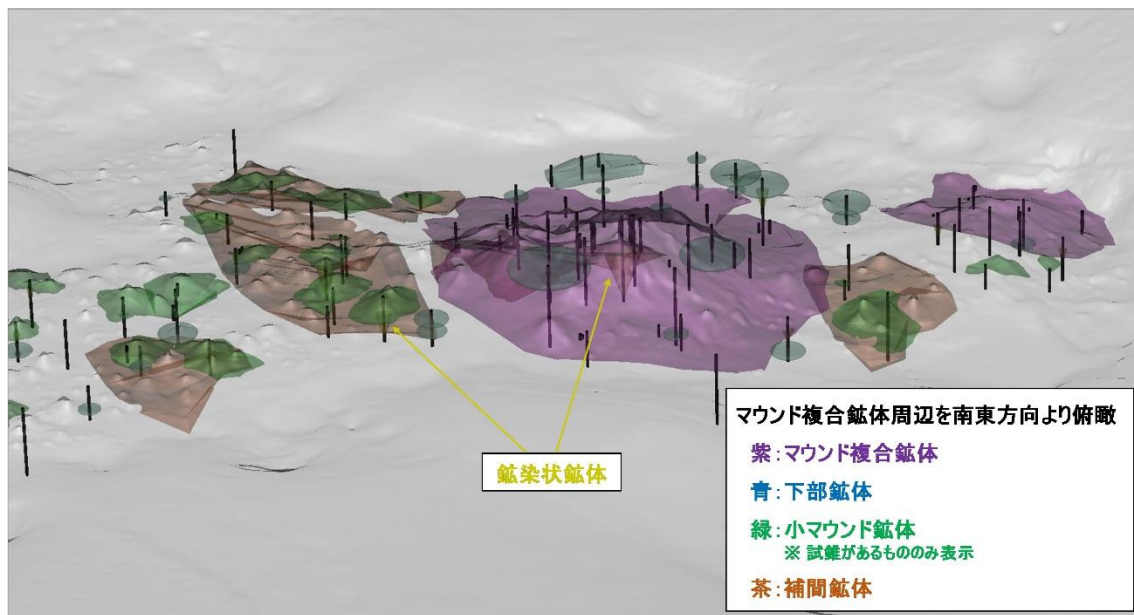


図 4-1-8 ごんどうサイトにおける鉱体の 3 次元モデルの鳥瞰図

4-1-3-3. 沖縄海域 田名サイト

(1) 地質・鉱床概要

田名サイトは、南北 300 m×東西 200 m 程度の範囲に最も規模の大きいマウンド地形から連続する大小多数のチムニーやマウンドが群集して分布している。更にその周囲にも 100～200 m×100～200 m 程度の範囲に小チムニーや小マウンドの群集を確認している。表層部では、閃亜鉛鉱、方鉛鉱、黄銅鉱及び黄鉄鉱主体の黒鉱質～半黒鉱質な未固結砂礫状硫化鉱や塊状又は礫状硫化鉱が産出し、その下位では黄銅鉱と黄鉄鉱主体の黄鉱質な鉱染を伴う凝灰岩からなる鉱染状硫化鉱が産出する。また、深部まで硬石膏化や粘土化が発達し、硬石膏脈の発達も認められ、黄銅鉱と黄鉄鉱鉱染を伴う。

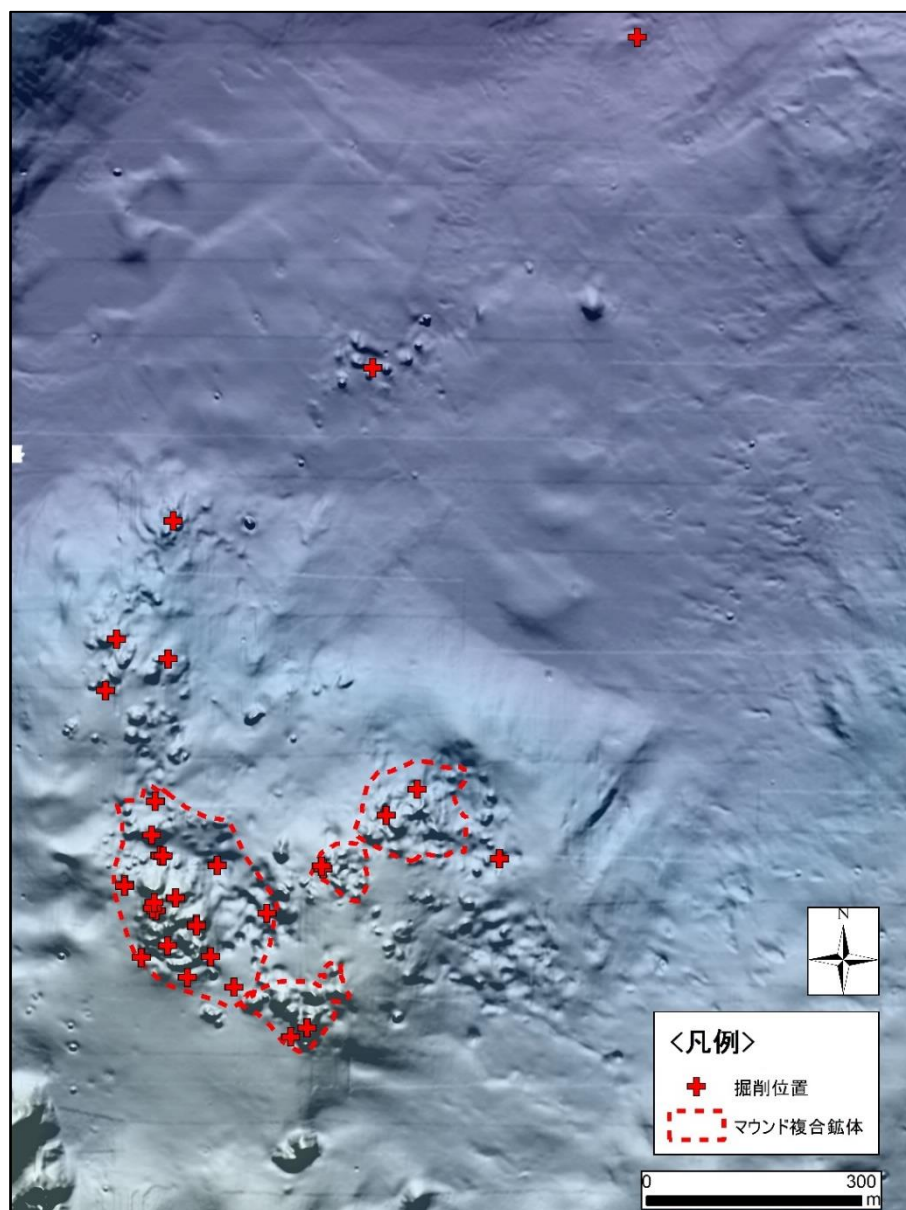


図 4-1-9 田名サイトの地形陰影図

- ・マウンド複合鉱体モデル

最大のもので、南北 300 m×東西 200 m 程度の平面的広がり、深部方向に最大 80 m 程度の層厚を持つ鉱染状鉱石主体の鉱体。ROV 海底観察の結果、平面的には鉱石は広く分布するが、ボーリング調査の結果から、東部や南部では 20 m 程度の鉱体厚である。上記特徴から、田名サイトでは更に周囲に海底表面付近に薄く広がる鉱体が点在する可能性がある。

(2) 資源量評価

田名サイトでは平成 29 年度以降、船上設置型掘削装置（掘削能力 400 m）、海底着座型掘削装置（掘削能力 50 m）及び海底着座型掘削装置（掘削能力 70 m）を用いてボーリング調査を実施し、資源量を算定した。

田名サイトにおける鉱体の 3 次元モデルの鳥瞰図を図 4-1-10 に示す。

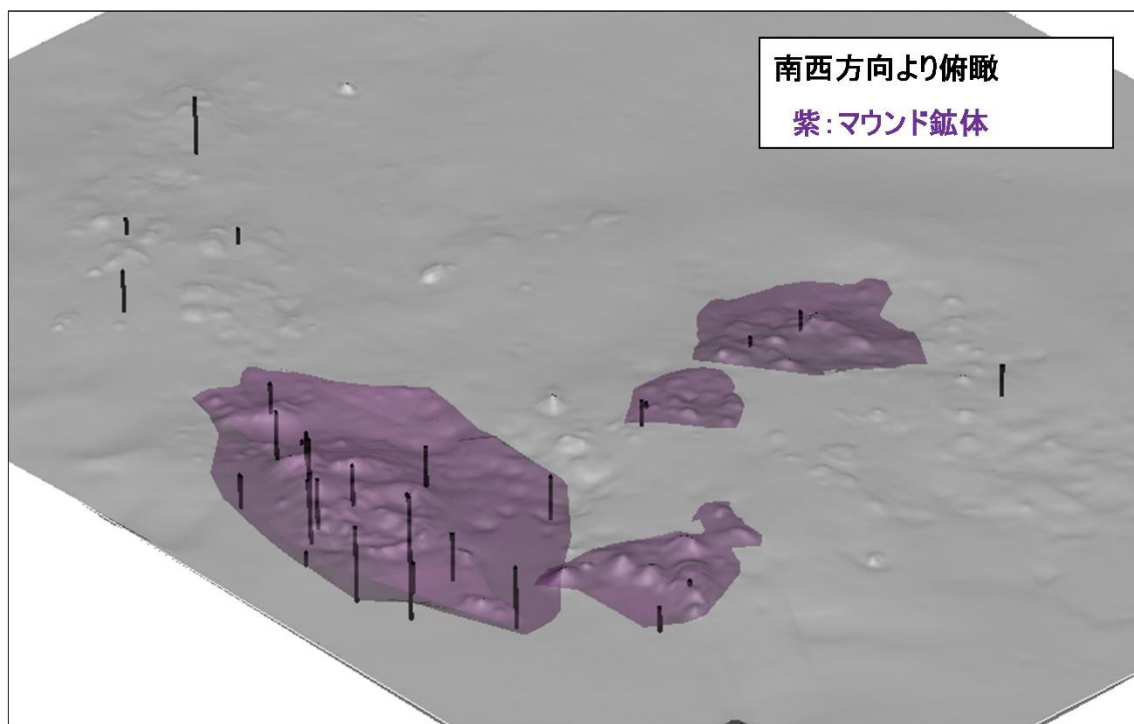


図 4-1-10 田名サイトにおける鉱体の 3 次元モデルの鳥瞰図

4-1-3-4. 沖縄海域 野甫サイト

(1) 地質・鉱床概要

野甫サイトでは、硫化鉱マウンドが南北 1,400 m×東西 600 m 程度に分布しており、硫化鉱石からなる小～大規模マウンドを 20 箇所以上で確認した。最大のマウンドは直径 200 m を超える。安山岩質～玄武岩質の火山岩を母岩とし、東北東系の裂罅に沿って閃亜鉛鉱や黄銅鉱の硫化鉱からなるマウンドが発達していることで、北東-南西方向に配列する 3 列のマウンド帯から構成される（図 4-1-11）。野甫サイトの熱水活動は非常に活発で、マウンド頂部に黒色を呈する熱水（300℃ 以上）を噴出するチムニーが数か所で確認されている。

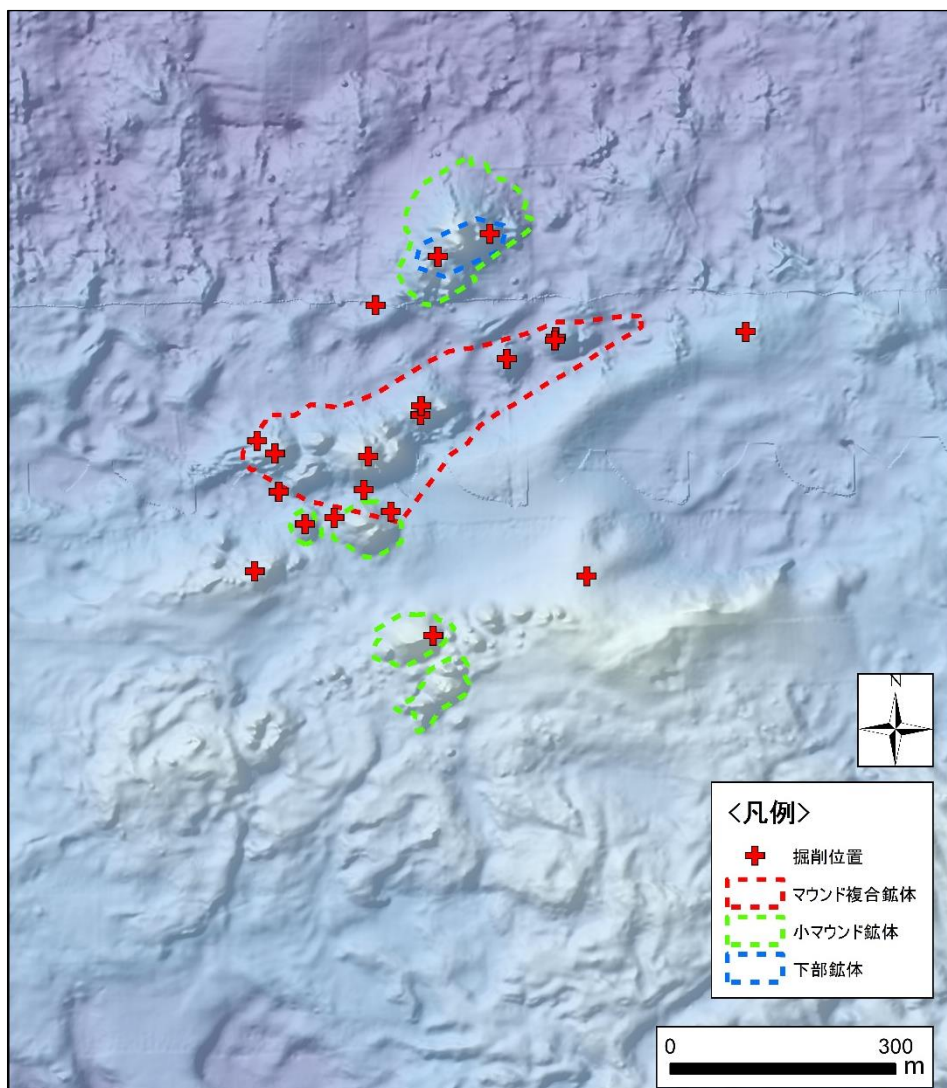


図 4-1-11 野甫サイトの地形陰影図

・マウンド複合鉱体モデル

砂礫状、礫状、塊状硫化鉱が採取されており、鉱質は黄鉄鉱、閃亜鉛鉱、方鉛鉱、磁硫鉄鉱を主体とする黒鉱質～半黒鉱質のものや黄鉄鉱や黄銅鉱を主体とする黄鉱質の鉱石が産出する。コア長 100 m を超えるボーリング 2 孔において、閃亜鉛鉱、黄銅鉱を含む塊状硫化鉱が確認されている。孔井地質は、上部 70～80 m が黒鉱質～半黒鉱質の塊状鉱石、その下部が黄鉱質の塊状鉱石、最下部が鉱染状硫化鉱石や黄鉄鉱鉱染の凝灰岩である。一部では表層から黄鉄鉱や黄銅鉱を主体とする黄鉱質の硫化鉱石が産出している。鉱質の分布から、当該ボーリング近傍を鉱体の形成時の最高温域として、北東-南西方向に鉱体を形成した可能性がある。また、鉱体の北東部でマウンド間が未固結堆積物で覆われている部分があるが、近傍のボーリング調査においてコア長 100 m 以上の硫化鉱の連続が確認されていることから、平面的な広がりも考慮すると堆積物の下位には硫化鉱石が分布していることが推測され、マウンド複合鉱体を連続させている。

・小マウンド鉱体モデル

表層から硫化鉱が産出し、黒鉱質～半黒鉱質、下部の硫化鉱は黄鉄鉱が主体で一部閃亜鉛鉱も伴う。下部には凝灰岩が産し、黄鉄鉱の鉱染を伴う場合がある。

最大で 150 m×100 m 程度のマウンドがあるが、基本的には直径 50 m 程度の小マウンドの鉱体である。各マウンドは北東-南西方向に配列する傾向が見られ、ROV 海底観察により、ボーリング調査未実施のマウンドにおいても硫化鉱が採取されていることから、近傍マウンドが連続するマウンド複合鉱体をなす可能性も考えられる。

・下部鉱体モデル

北部の小マウンド深部にて、マウンドの配列と同様の北東-南西の伸張方向に 70 m 程度、20～30 m 程度の層厚を持つ水平的な連続性を持つ。

なお、凝灰岩類の薄層も存在するが、ボーリングが鉱体の下端に達しておらず未確認のため、更に深部まで鉱体が続く可能性がある。

(2) 資源量評価

野甫サイトでは、平成 27 年度以降、船上設置型掘削装置（掘削能力 400 m）及び海底着座型掘削装置（掘削能力 70 m）を用いてボーリング調査を実施し、資源量を算定した。

野甫サイトにおける鉱体の 3 次元モデルの鳥瞰図を図 4-1-12 に示す。

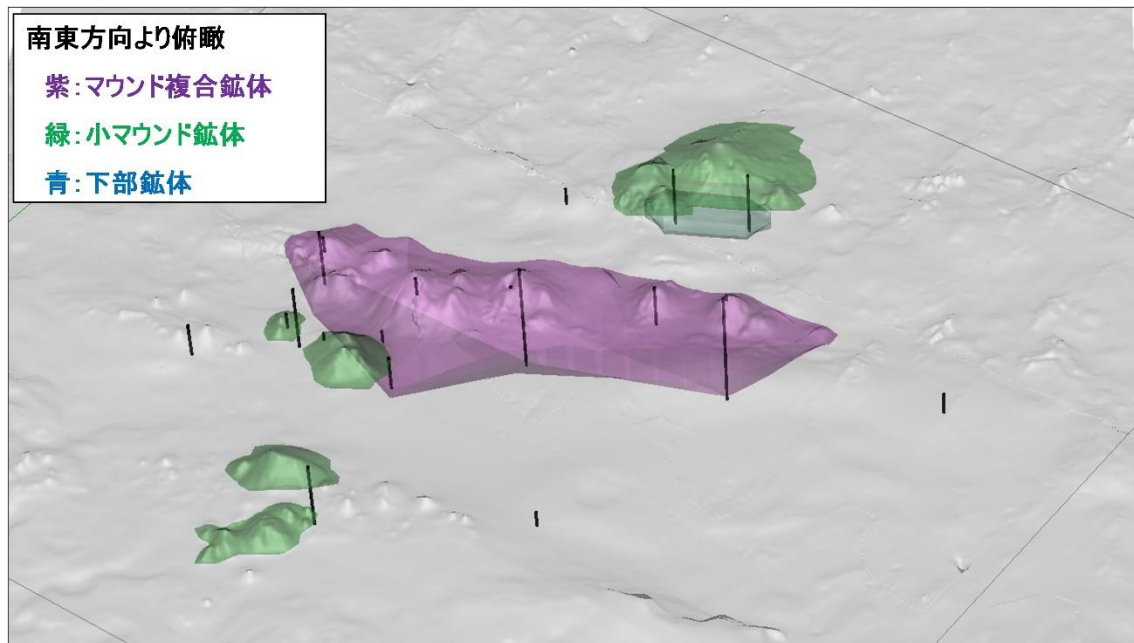


図 4-1-12 野甫サイトにおける鉱体の 3 次元モデルの鳥瞰図

4-1-3-5. 沖縄海域 天美サイト

(1) 地質・鉱床概要

天美サイトは、溶岩ドーム状の地形を呈する海丘の南方の南北 3 km×東西 4 km 程度の範囲の凹地に存在する。凹地は南にスプーンカット状の崖、北に断層崖のような急崖を有する。凹地の中央にマウンド状地形が複数認められ、直径 100 m 強、高さ 30 m のものが最大となる（図 4-1-13）。硫化鉱は北の急崖の海底面にも部分的に存在し、高さ 20 m 強のマウンドも確認されている。

天美サイトは、珪長質火山砕石物を主たる母岩とし、鉱質は黒鉱質である。硫化鉱石周辺部は珪化作用を伴う。

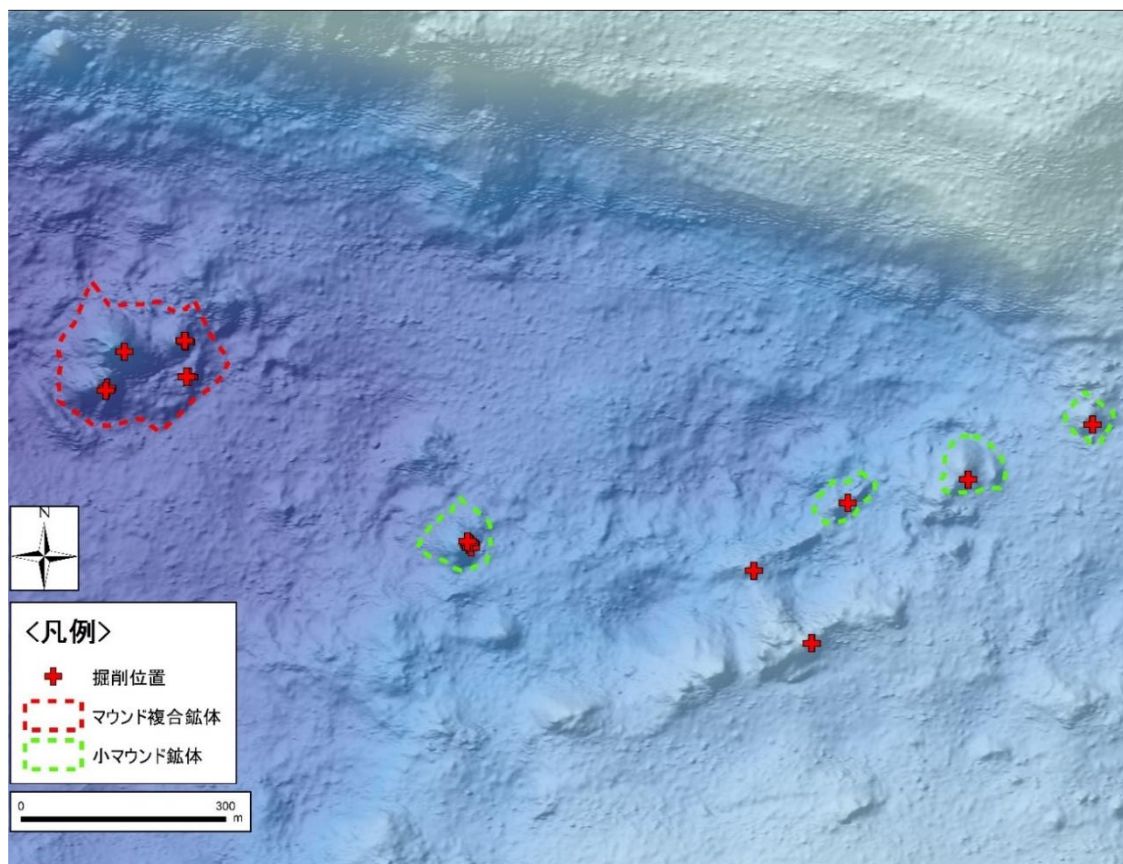


図 4-1-13 天美サイトの地形陰影図

・マウンド複合鉱体モデル

200 m×150 m 程度の平面分布を持つ連続したマウンド地形を複合したマウンド鉱体である。塊状鉱は一部のマウンド頂部から海底面下 20 m 程度まで連続的に確認できるが、主体は凝灰岩類を挟む鉱染状鉱石である。

・小マウンド鉤体モデル

概ね 50 m 以上のマウンド径を持つ独立した鉤体である。主に東部で確認される小マウンド地形でボーリング調査をした結果、それぞれの地点で海底面下 20 m 以上まで硫化鉤が確認される。また、ROV 海底観察により斜面部に鉤石が認められることに加え、着鉤した小マウンドは急斜面・崖状地形の縁に位置しているものが多いことから、急斜面・崖状地形に沿って連続した鉤体が形成されている可能性がある。

(2) 資源量評価

天美サイトでは令和 2 年度以降、船上設置型掘削装置（掘削能力 400 m）を用いてボーリング調査を実施し、資源量を算定した。

天美サイトにおける鉤体の 3 次元モデルの鳥瞰図を図 4-1-14 に示す。

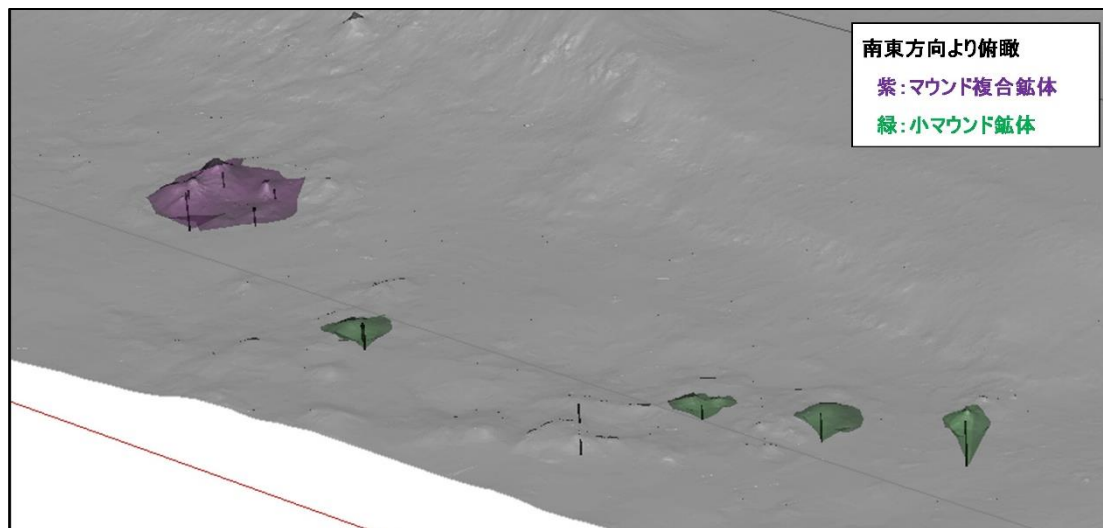


図 4-1-14 天美サイトにおける鉤体の 3 次元モデルの鳥瞰図

4-1-3-6. 沖縄海域 銀水サイト

(1) 地質・鉱床概要

銀水サイトは、熱水活動が南北 100 m×東西 300 m 程度の範囲に分布しており、丘状の地形が見られる（図 4-1-15）。

銀水サイトで実施されたボーリング調査によれば、塊状硫化鉱の着鉱長は海底面から約 10 m であり、深度 10 m～47.5 m までは、局所的に割れ目や弱面で脈状に硫化鉱物（閃亜鉛鉱、黄鉄鉱、方鉛鉱）の鉱染が認められる。

・マウンド鉱体モデル

150 m×50 m 程度の平面分布を持つ。ボーリング調査の結果から、マウンド頂部から深部まで塊状～鉱染状の硫化鉱であるマウンドと、マウンド表層部分のみ鉱染状硫化鉱であるマウンドが確認されている。一方で、ROV 海底観察では周辺のマウンド頂部から裾野にも連続して硫化鉱～熱水変質が認められることから、フィーダとなるマウンドの周囲は鉱体形成時に広く薄く鉱化・熱水変質を受けたものと推察される。

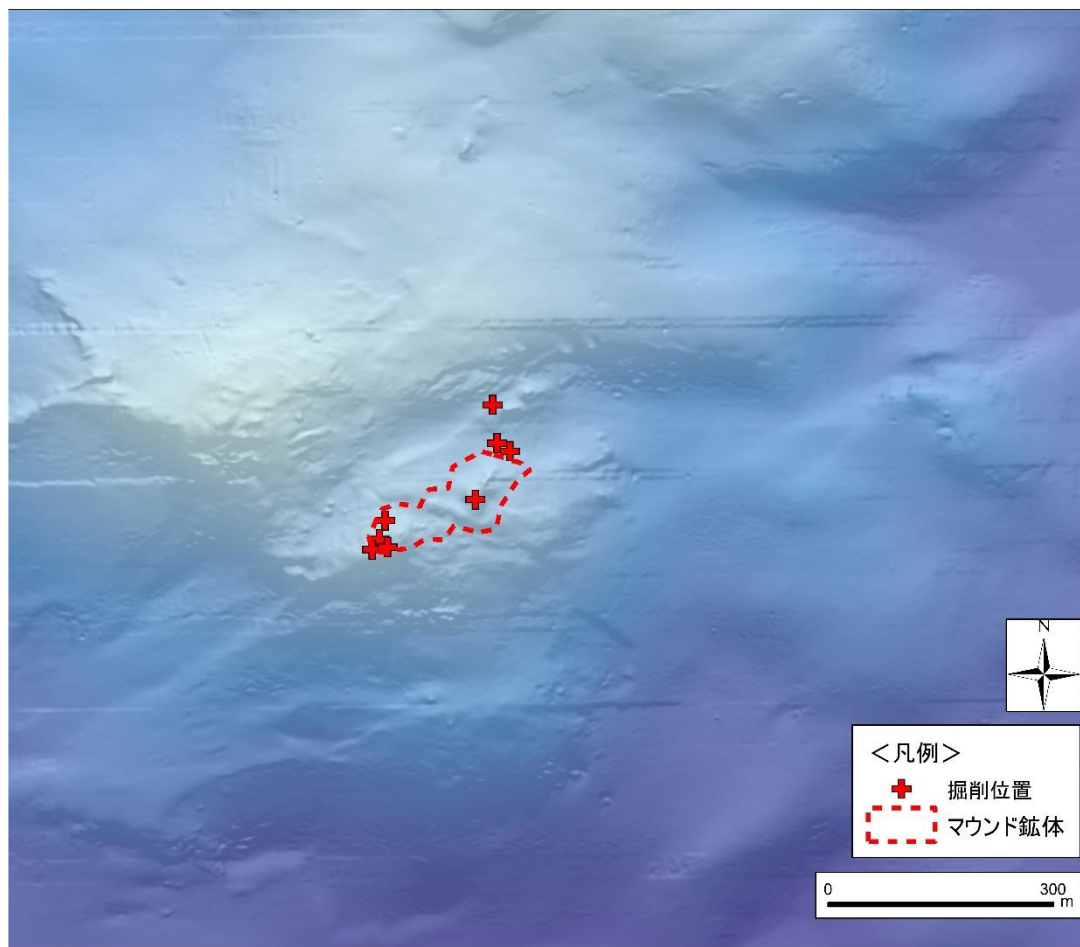


図 4-1-15 銀水サイトの地形陰影図

(2) 資源量評価

銀水サイトでは令和 3 年度以降、船上設置型掘削装置（掘削能力 400 m）、民間船に搭載した船上設置型掘削装置（掘削能力 100 m 以上）及び海底着座型掘削装置（掘削能力 70 m）を用いてボーリング調査を実施し、資源量を算定した。

銀水サイトにおける鉤体の 3 次元モデルの鳥瞰図を図 4-1-16 に示す。

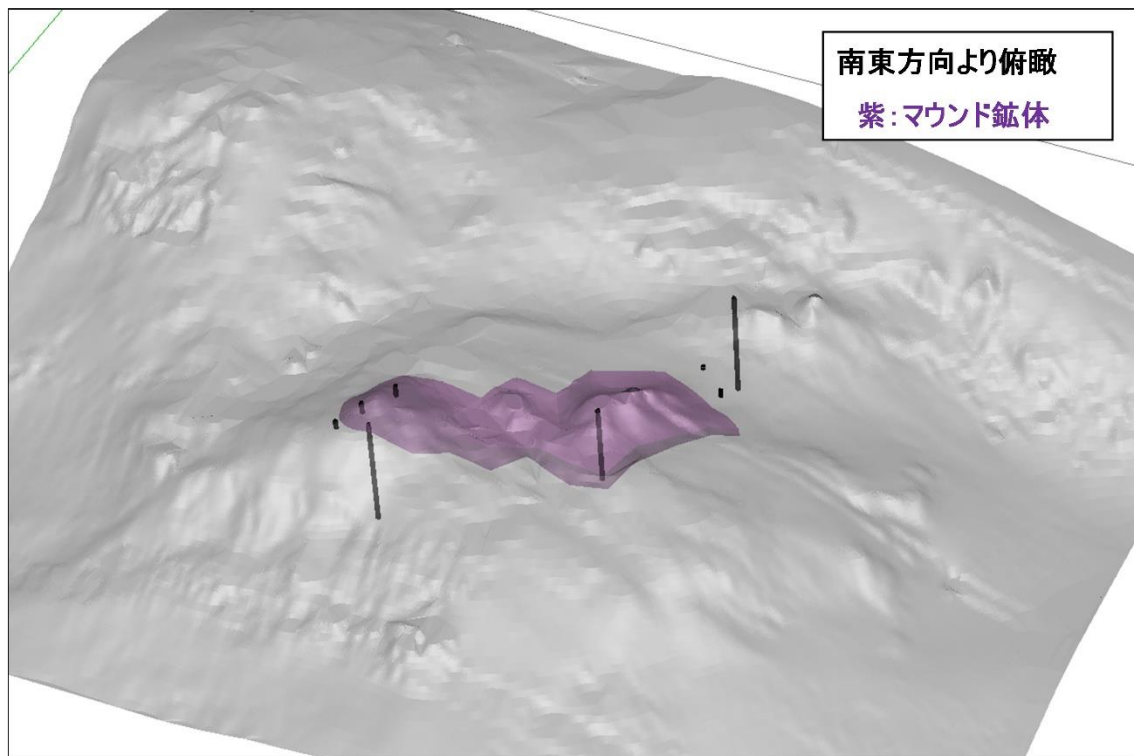


図 4-1-16 銀水サイトにおける鉤体の 3 次元モデルの鳥瞰図

4-1-3-7. その他鉱床

(1) 地質・鉱床概要

前述した鉱床のほか、資源量評価のために、沖縄海域では球美サイト、豊見サイト及び梯梧サイトにおいてもボーリング調査を実施した。

球美サイトは、ROV 海底観察により硫化鉱が確認されている。ボーリング調査では鉱体下盤の凝灰岩中に鉱染状鉱石を確認した。

豊見サイトは、南北 800 m×東西 1,000 m 程度の凹地にチムニーの林立が確認されている。ボーリング調査の結果、海底面表層に鉱石が分布していることを確認した。

梯梧サイトは、多数のチムニーやマウンドの分布が確認されている。ボーリング調査の結果、海底面下に塊状硫化鉱の分布が見られ、その着鉱長は 10～20 m 程度である。海底面付近における塊状硫化鉱部以深は凝灰岩類が分布し、黄鉄鉱の弱い鉱染が認められる。ROV 海底観察により、海底面には硫化鉱のチムニー群の分布が広く散点していることを確認した。

(2) 資源量評価

球美サイト、豊見サイト及び梯梧サイトについては、調査が不十分であり鉱体を想定することが困難なため今回の概略資源量には含めなかった。また、これら以外にも鉱石の分布を複数箇所では把握している。

4-1-3-8. 今後の課題

商業化あるいは開発投資判断にあたっての経済性評価には、概測資源量を把握する必要がある。海底熱水鉱床を対象としたボーリング調査における課題の一つとして、コアが十分に回収できないことがある。こうした課題は、堅硬な鉱石と未固結の岩相が混在する海底熱水鉱床固有の地質構成に起因するものである。低いコア回収率を補うために、これまで比抵抗分布から鉱石分布を推定して資源量の一部として算定することを試みた。今後は物理探査結果とボーリング調査結果を補うことを目的として岩石物性測定を実施する必要がある。具体的な岩石物性の測定手法として、物理検層、コアや海底面サンプルの物性測定が想定される。また、個々の海底熱水鉱床の形成過程を解明することで、数少ない試料から、資源量の把握に資する知見を得られる可能性があるため、既に発見されている鉱石価値の高い鉱床を対象とした成因研究等の取組も有効と考えられる。こうした取り組みを通じて、陸上の鉱床と同様に国際基準に準拠した手順で資源量評価を実施する必要がある。

引用文献

- AMC Consultants Pty Ltd, 2018, Preliminary Economic Assessment of the Solwara Project, Bismarck Sea, PNG, 274p.
https://www.miningnewsfeed.com/reports/Solwara_1_PEA_02272018.pdf
(2023 年 8 月 23 日閲覧)
- 針金由美子, 石塚治, 下田玄, 佐藤太一, 佐藤智之, 正樹佑香, 熊谷英憲, 2017, NT14 - 22 航海報告: 沖縄県久米島西方沖海域で発見された海底火山群の構造発達史解明にむけて, ブルーアース要旨集.
- Harigane Y, Ishizuka O, Shimoda G, Conway C E and Sato T, 2023, Morphology, petrology and geochemistry of submarine volcanoes around Kumejima Island: Implications for arc-related volcanism in the southern Central Ryukyu Arc, Marine Geology, vol. 458, 107014.
- 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, 2013, 海底熱水鉱床開発計画第 1 期最終評価報告書, 109p.
<https://www.jogmec.go.jp/content/300110684.pdf>. (2023 年 9 月 5 日閲覧)
- 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, 2018, 海底熱水鉱床開発計画総合評価報告書, 158p.
<https://www.jogmec.go.jp/content/300359550.pdf>. (2023 年 9 月 5 日閲覧)
- 独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構, 2014, 沖縄本島北西沖に新たな海底熱水鉱床の存在を確認,
https://www.jogmec.go.jp/news/release/news_10_000169.html. (2023 年 5 月 24 日閲覧)
- 独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構, 2015, 沖縄県久米島沖に有望な海底熱水鉱床の存在を確認,
https://www.jogmec.go.jp/news/release/news_10_000184.html. (2023 年 5 月 24 日閲覧)
- 独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構, 2016a, 沖縄海域で新たな 2 つの海底熱水鉱床の存在を確認,
https://www.jogmec.go.jp/news/release/news_06_000097.html. (2023 年 5 月 24 日閲覧)
- 独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構, 2016b, 沖縄伊是名海穴の海底熱水鉱床の資源量を 740 万トンと確認,
https://www.jogmec.go.jp/news/release/news_06_000130.html. (2023 年 5 月 31 日閲覧)
- 独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構, 2017, 久米島沖および沖永良部島沖に新たな海底熱水鉱床の存在を確認,
https://www.jogmec.go.jp/news/release/news_06_000284.html. (2023 年 5 月

24 日閲覧)

独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構, 2018, 伊豆・小笠原海域青ヶ島沖に新たな海底熱水鉱床を確認,

https://www.jogmec.go.jp/news/release/news_10_000295.html. (2023 年 5 月 24 日閲覧)

独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構, 2020, 奄美大島沖にて有望な海底熱水鉱床を新たに発見ー高品位の金・銀を含む亜鉛・鉛鉱床「天美 (あまみ) サイト」ー, https://www.jogmec.go.jp/news/release/news_01_000151.html. (2023 年 5 月 24 日閲覧)

東京大学生産技術研究所, 2015, 伊豆諸島青ヶ島の東に海底熱水鉱床を発見 ～短期間に海底熱水鉱床を発見可能な手法を開発～,

<https://www.iis.u-tokyo.ac.jp/ja/news/931/>. (2023 年 6 月 5 日閲覧)

Urabe T and Kusakabe M, 1990, Barite silica chimneys from the Sumisu Rift, Izu-Bonin Arc: possible analog to hematitic chert associated with Kuroko deposits, *Earth and Planetary Science Letters*, vol.100, 283-290.

多良賢二, 加藤政史, 浅川栄一, 芦寿一郎, 2020, 深海曳航型ハイドロフォンケーブルを用いた高分解能音波探査による海底熱水鉱床探査, *BUTSURI-TANSA*, vol.73, 14-22.

笠谷貴史, 金子純二, 岩本久則, 2020, 音響調査と自然電位法を用いた海底熱水鉱床調査技術プロトコルに基づく調査とその検証, *BUTSURI-TANSA*, vol.73, 42-52.

4-2. 環境影響評価

4-2-1. 概要

海底熱水鉱床の周辺には、化学合成生物群集等の熱水生態系が形成される。商業化に向けては、これらを含む周辺海洋環境が資源開発によって受ける影響を低減・回避するために、資源開発が及ぼし得る影響を定量データに基づいて科学的に評価するための技術開発が求められる。

UNCLOS に基づき設立された ISA は、深海底における海底熱水鉱床の探査を行う契約者に対して、2010 年 5 月に承認した探査規則（「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」）（ISBA/16/A/12）の中で、開発によって想定される環境影響の評価、モニタリング調査の実施（規則 34）を義務付けている。更に、ISA は 2013 年 7 月に法律・技術委員会が発行した環境ガイドライン（「深海底における海洋鉱物の探査に起因して起こり得る環境影響の評価に関する契約者向け指針に係る勧告」；ISBA/19/LTC/8）において、海底鉱物探査における環境調査の指針を示した。その後、2019 年 4 月の改定版（ISBA/25/LTC/6）には、水中音観測（附属書 I 42）や環境 DNA 分析（附属書 I 32.(e)）等の内容が盛り込まれた（International Seabed Authority, 2019）。なお、環境ガイドラインは、2022 年 7 月に改定されたもの（ISBA/25/LTC/6/Rev.2）が最新版となっており、環境影響評価書のレビューに利害関係者との協議内容に関する情報を記載することなどが追加されている。

環境影響評価分野の実績を図 4-2-1 に示す。

環境調査として、平成 20 年度から平成 23 年度まで、沖縄海域と伊豆・小笠原海域における環境特性を把握するためのベースライン調査、平成 24 年度から令和 2 年度まで、沖縄海域において平成 28 年度に実施した小規模なかく乱試験及び平成 29 年度に実施した採鉱・揚鉱パイロット試験に伴う環境影響を把握するための事前調査とモニタリング調査を行った。

第 3 期には、第 2 期までに開発した環境調査手法により、沖縄海域の鉱床（以下、「A 鉱床」という。）や伊豆・小笠原海域の海丘（以下、「B 海丘」という。）においてベースライン調査を実施し、環境特性を把握するとともに、開発した環境調査手法を地形や海流の異なる鉱床に適用できることを確認した。また、第 2 期に引き続き、かく乱試験及び採鉱・揚鉱パイロット試験のモニタリング調査を実施し、試験に伴う影響の経時変化を把握した。

環境影響予測のためのモデル（粒子追跡モデル、底層域生態系モデル）の開発では、第 1 期に概念設計及びモデル開発を行い、第 2 期にこれらモデルを用いてかく乱試験に伴う濁り（掘削くずや巻き上がった堆積物）の拡散範囲・再堆積厚さ及び底生生物の試験前後の炭素現存量の増減を予測、検証した。

第 3 期には、環境影響予測の対象とする鉱床の流況観測データが得られていないケースを想定し、一般公開されている流況データと詳細地形データから流動場を作成した。また、粒子追跡モデルにより、かく乱試験に伴う濁りの拡散範囲・再堆積厚さを計算した。計算結果をかく乱試験時の観測データと比較したところ、両者の傾向が一致したことで、観測

データのない鉱床での粒子追跡モデルの適用性を確認した。また、かく乱試験と同様の濁りの発生条件を与え、A 鉱床における底生生物の炭素現存量を底層域生態系モデルにより予測した。A 鉱床ではかく乱試験を実施していないため、かく乱後の炭素現存量の実測データを欠くが、予測された炭素現存量はかく乱試験時と同様の増減傾向を示したことから、濁りの発生に伴う底生生物の増減を再現可能と評価した。

環境保全策の検討では、第 1 期から遺伝子解析や保全策の検討を進めており、第 2 期からは、遺伝子解析結果に基づく遺伝的交流関係の検討も行ってきた。第 3 期には、沖縄海域や伊豆・小笠原海域でサンプリングした生物の遺伝子解析結果に基づき、種別の遺伝的多様性及び遺伝的交流関係を明らかにするとともに、沖縄海域の鉱床（以下、「C 鉱床」という。）の南部モデルマウンドを開発候補地と想定した場合の環境保全策のケーススタディを行った。

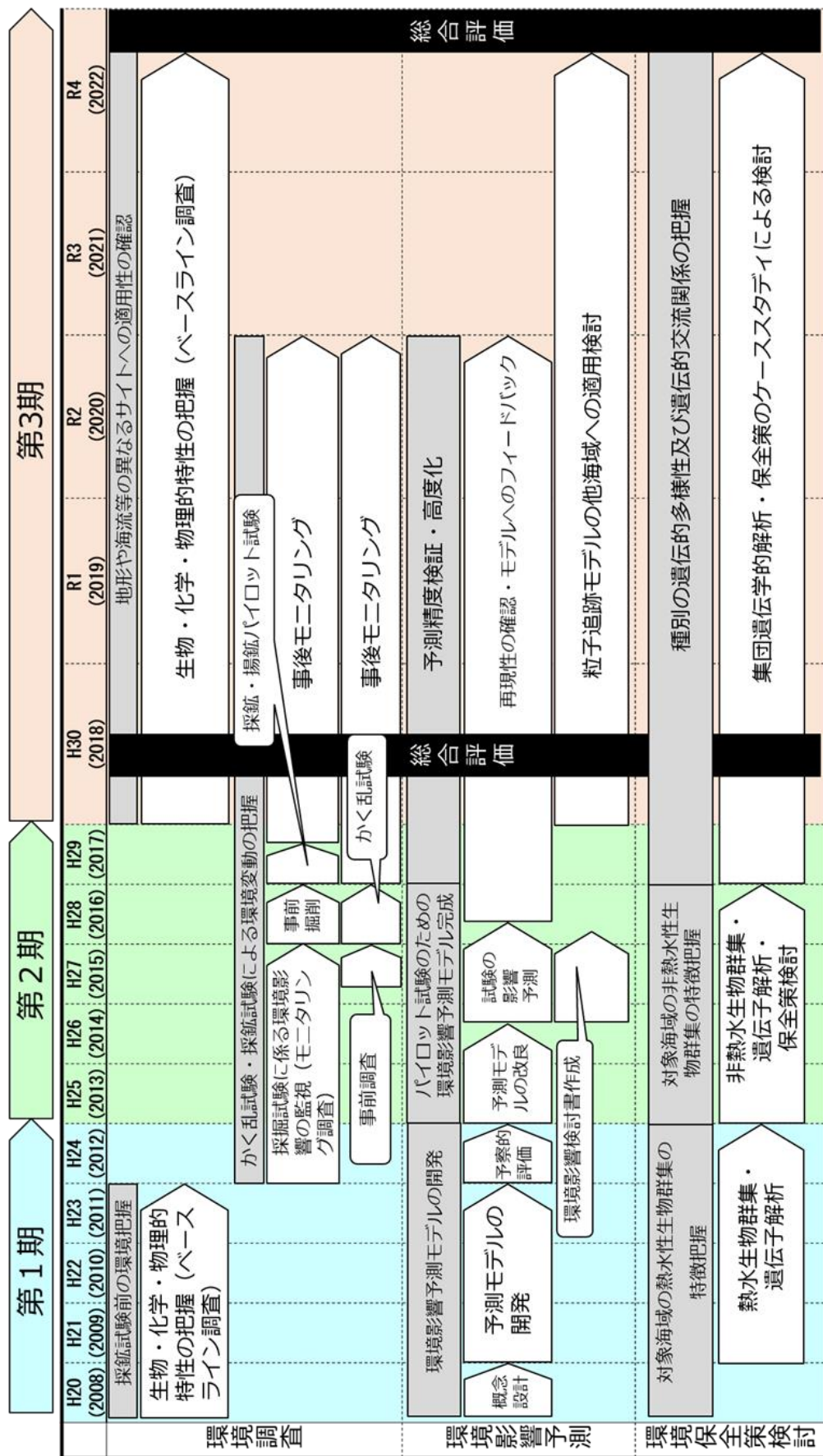


図 4-2-1 環境影響評価の実績

4-2-2. 環境調査

環境調査として、ベースライン調査と採鉱・揚鉱パイロット試験及びかく乱試験のモニタリング調査を実施した。以下に調査結果を示す。

4-2-2-1. ベースライン調査

第1期には、環境特性を把握することを目的として、沖縄海域と伊豆・小笠原海域に調査地点を設定し、ベースライン調査を実施した。第3期には、第2期までに開発した環境調査手法の他の鉱床への適用性を確認するため、A 鉱床（平成30年度から令和2年度の3年間）及びB 海丘（令和3年度から4年度の2年間）においてベースライン調査を実施した。

A 鉱床におけるベースライン調査の結果を表4-2-1に示す。

A 鉱床の北部はマウンド状の海底地形を呈し、ブルームが見られた。南部は、北部と同様にブルームが見られ、チムニーが多数確認された。一方、西部は、鉱体から800 mほど離れた平坦域であり、堆積物で覆われていた。

半日周潮の流況が卓越し、A 鉱床の西部では南から東南東の平均流が確認された。底質については、底質中の熱水由来の金属濃度の特徴から、A 鉱床西部（熱水由来の金属濃度が低い）、A 鉱床南部、A 鉱床北部の主マウンド付近（熱水由来の金属濃度が高く、有機物が多い）の3領域に区分された。

底生生物については、Epsilonbacteraeota（水素や硫黄化合物をエネルギー源とする化学合成独立栄養微生物の一種）を含む微生物やメイオセントス（底生生物のうち、32~500 µmのもの）の群集組成と底質中の金属濃度・組成に相関が認められた。また、これらの群集組成比は、西部と比較して北部や南部で高かった。

B 海丘におけるベースライン調査の結果を表4-2-2に示す。

伊豆・小笠原海域のB 海丘では、第3期に取得した2カ年のベースラインデータに過年度のデータを合わせて解析し、環境特性を把握した。なお、過年度に実施した底質分析のための試料分取方法や遺伝子解析方法は現在用いられる手法と異なっていることから、適切に長期保管していた残存試料を第3期と同じ手法で再分析し、その後の解析を行った。

流況についてみると、海丘内は半日周潮や日周潮が卓越しており、海丘内北部にあるカルデラ丘の外輪山崩壊部から南に向かう流れが確認された。海丘内の底質の金属濃度は海丘外より高いが、熱水活動に由来する銅、鉛、亜鉛等の金属が高濃度に認められるのは海丘の南東部に位置する鉱床周辺のみと、熱水活動の影響を大きく受けている範囲は限定的であった。沈降粒子についてみると、全粒子束に季節変動が見られた。水中音についてみると、令和4年度の調査においてザトウクジラと推測される鳴音が観測された。地中温度は、鉱床では深度方向の温度勾配が顕著であったが、鉱床から100 m離れた地点の温度勾配は小さかった。

第1期から第2期に開発した環境調査手法を用いて、地形や海流などの特徴の異なるA 鉱床及びB 海丘のベースライン調査を実施した結果、各調査地点の特徴を反映したデータ

を取得することができた。これにより、開発した環境調査手法が他の鉱床に適用可能であることを確認した。

表 4-2-1 A 鉱床におけるベースライン調査の結果概要

海洋物理学	流況	鉱床内では半日周潮が卓越しており、鉱床西部では南から東南東の平均流を確認した。
	水温・塩分・粒子分布	熱水活動が認められるマウンド上 10m では濁度が高く、水温上昇が認められた。
海洋化学	水質	熱水活動が認められるマウンド上 10m では熱水に由来する Pb、Fe、Cu 等の金属が含まれていた。
地質学的特性	底質	①鉱床西部（熱水由来の金属濃度が低い）、②鉱床南部、③鉱床北部の主マウンド付近（熱水由来の金属濃度が高い）の 3 領域に大別された。
生物群集	プランクトン	水深 100 m 以浅で細胞数が多かった。また、マイクロプランクトン（20～200 μm ）の細胞数はピコプランクトン（0.2～2 μm ）、ナノプランクトン（2～20 μm ）と比べて少なかったが、炭素量に換算するとマイクロプランクトンの占める割合は最大であった。
	底生生物	微生物やマイオベントスの群集組成と底質の金属濃度・組成に相関が認められた。
生物かく拌	堆積速度	過剰 ^{210}Pb の濃度から堆積速度と拡散速度係数を算出した結果、堆積速度が同程度の他海域と比較して、拡散速度係数は低く、生物によるかく拌は活発ではないことが明らかになった。
堆積作用	沈降粒子	植物プランクトン等の海洋で生成された光合成起源の粒子が多く、陸起源の有機物の割合は小さかった。
その他	水中音	船舶の航行音や降雨等海象に起因する音のデータを取得した。

表 4-2-2 B 海丘におけるベースライン調査の結果概要

海洋物理学	流況	海丘内では半日周潮及び日周期が卓越しており、海丘内北部のカルデラ丘の外輪山崩壊部周辺では南向きの平均流を確認した。
	水温・塩分・粒子分布	水温は時期によるが水深 100 m まで一定であり、その後深くなるにつれ低下した。塩分は水深 100～200 m で最大となり、水深 600～700 m まで低下し、それ以深では再び高くなった。濁度は表層を除くと鉛直方向に変化はみられなかった。
海洋化学	水質	表層は貧栄養であり、水深が深くなるにつれ栄養塩や全炭酸、アルカリ度が増加する一般的な外洋域の鉛直分布であった。
地質学的特性	底質	海丘内の有機物は海丘外に比べ少なかった。底質の特徴は海丘南東部、北部、南部に分けられ、熱水活動に由来する亜鉛やヒ素等の金属は鉱床の位置する南東部に限って分布が認められた。
生物群集	プランクトン	水深 0～200 m で蛍光色素の 2 層ピークを確認した。
	底生生物	海丘内の全菌数、ナノベントス、メイオベントスの生物量は海丘外より少なかった。メイオベントスの群集組成では、海丘内外で明確な違いは見られなかった。
生物かく拌	堆積速度	海丘内は海丘外に比べて堆積速度が遅く、生物かく拌も活発ではなかった。
堆積作用	沈降粒子	植物プランクトン等の海洋で生成された光合成起源の粒子が多く、全粒子束に季節変動が認められた。海底付近の全粒子束は海底面上 40 m の値よりも大きく、その比率は鉱物粒子が最も高かった。
その他	水中音	4 月に生物の鳴音（ザトウクジラと推測）を確認した。
	地中温度	鉱床では深度方向の温度勾配が大きく、鉱床から 100 m 離れた地点では温度勾配は小さかった。

4-2-2-2. 採鉱・揚鉱パイロット試験のモニタリング調査

C 鉱床の南部モデルマウンドにおいて、平成 28 年度に採鉱・揚鉱パイロット試験の事前掘削試験、平成 29 年度に集鉱・揚鉱試験を実施した。これらの試験による環境影響を把握するため、事前掘削試験の前から 1 年後までモニタリング調査を断続的に行った。第 3 期には、事前掘削試験の 2 年後及び 4 年後（採鉱・揚鉱パイロット試験の 1 年後及び 3 年後）のモニタリング調査を実施し、採鉱・揚鉱パイロット試験後のデータを更新するとともに、環境影響を時系列的に評価した。なお、事前掘削試験の 3 年後のモニタリング調査は、悪天候のため実施できなかった。

採鉱・揚鉱パイロット試験の調査地点を図 4-2-2、モニタリング調査の項目を表 4-2-3、モニタリング調査の結果を表 4-2-4 に示す。

流況についてみると、マウンド南東部では半日周潮が卓越し、1~3 cm/秒の東に向かう平均流が確認された。沈降粒子についてみると、試験期間中における全粒子束は、本鉱床で過年度に取得したベースラインデータの変動の範囲内であった。採鉱・揚鉱パイロット試験については、試験開始以前のベースラインデータを欠いているため、確認された環境の変化が試験の影響か、あるいは自然変動によるものかの判断が困難であった。

水質、底質、微生物群集についてみると、掘削後に海底面上 10 m の海水中の鉛濃度、底質中の鉛、ヒ素及び亜鉛濃度とともに、真正細菌の群集組成において熱水環境下で認められる微生物である *Epsilonbacteraeota* の組成比が上昇した。しかし、1 年後には、海水中の鉛濃度は定量下限値未満となり、底質中の鉛、ヒ素、亜鉛濃度、*Epsilonbacteraeota* の組成比ともに低下した。

底生生物についてみると、掘削後にメイオベントスの群集組成が変化した。底質中の金属濃度との相関関係は認められなかった。南部モデルマウンドでは、事前掘削試験の前に採鉱試験機による走行試験や掘削性能試験等が行われており、事前掘削試験時には既に底質がかく乱されていたことが、底質とメイオベントスの相関が認められなかった要因の一つであると推測される。

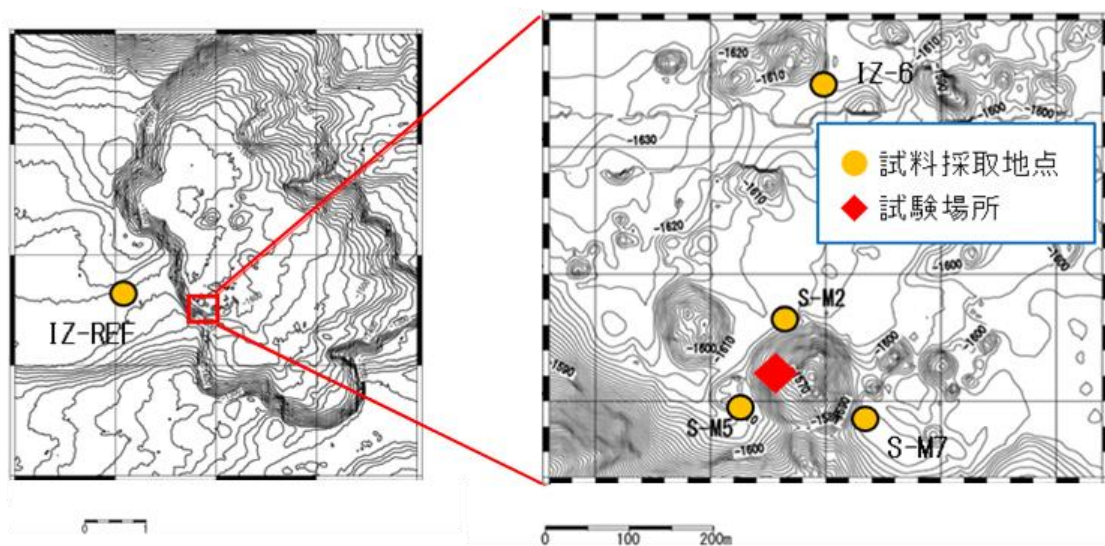


図 4-2-2 採鉱・揚鉱パイロット試験の調査地点

表 4-2-3 モニタリング調査の項目

項目	内容
流況	試験期間に近い時期における流向、流速
沈降粒子	試験期間を含む期間における沈降粒子の捕集
水質	全炭酸、アルカリ度、栄養塩類、金属類、DO、pH、TOC、DOC、SS、POC、PON、H ₂ S
底質	含水率、強熱減量、密度、粒度組成、金属類、TOC、TN、硫化物、安定同位体比（炭素、窒素、硫黄）、間隙水（DO、pH、H ₂ S、ORP）
微生物群集 （底質）	真正細菌、古細菌
底生生物	細菌群、ナノベントス（2～32 μm）、メイオベントス（32～500 μm）、マクロベントス（500 μm 以上）

表 4-2-4 採鉱・揚鉱パイロット試験におけるモニタリング調査の結果の概要

項目	結果
流況	・ 半日周潮が卓越しており、1～3 cm/秒の東に向かう平均流も確認した。
沈降粒子	・ 試験期間中における全粒子束は、過年度に取得したベースラインデータの変動の範囲内であった。
水質	・ 事前掘削後に掘削地点周辺の海底上 10 m において Pb の金属濃度が上昇した。試験 1 年後には定量下限値未満まで低下した。
底質	・ 事前掘削後に掘削地点周辺で Pb、As、Zn の金属濃度が上昇した。試験 1 年後にはこれらの濃度は低下した。 ・ 掘削地点周辺では事前掘削より前の調査と比較して As 等が高濃度であった。
微生物群集 (底質)	・ 調査期間を通じて掘削地点周辺の再堆積が認められる調査地点では、その他の調査地点と組成が異なっていた。 ・ 熱水由来の Hg、Pb、Cu の金属濃度との相関が認められた。 ・ 掘削地点周辺では事前掘削直後に熱水環境下にも認められる Epsilonbacteraeota の比率が上昇し、1 年後には減少した。
底生生物	・ 細菌群、ナノベントスともに調査期間において増減があるものの、ベースラインの変動の範囲内であった。 ・ メイオベントスは掘削地点周辺で事前掘削後に組成が変化したものの、4 年後には参照点に近い組成となった。 ・ メイオベントスの群集組成の変化は、熱水由来の金属との相関は認められなかった。

4-2-2-3. かく乱試験のモニタリング調査

第2期には、掘削による環境への影響を定量的に評価するため、沖縄海域の海穴の北部において、平成28年度に採鉱試験機を用いて海底面を小規模に掘削するかく乱試験を実施した。試験前にかく乱に伴い発生する懸濁粒子の再堆積の範囲を粒子追跡モデルでシミュレーションし、モニタリング調査地点を設定した。なお、かく乱試験前の自然状態の環境を把握するための事前調査、かく乱試験後の環境変化を確認するための試験直後、半年後及び1年後のモニタリング調査を実施した。

第3期には、試験の2年後、3年後のモニタリング調査を実施し、第2期の調査結果と合わせて、かく乱試験による環境影響を評価した。

かく乱試験の調査地点を図4-2-3、かく乱試験におけるモニタリング調査の結果を表4-2-5に示す。なお、かく乱試験のモニタリング調査項目は、採鉱・揚鉱パイロット試験と同様とした(表4-2-3)。

かく乱試験後の調査地点(N・M1~M11)のうち、厚さ5mmの再堆積を観測した調査地点(N・M7)において、試験直後に堆積物中の底質や生物群集の組成等に顕著な変化が見られ、試験から2年後、3年後のモニタリング調査では、次のような変化がみられた。

底質についてみると、試験直後に熱水活動に由来すると考えられる鉛や亜鉛の濃度が上昇したが、試験の3年後には、これらの濃度は低下した。しかし、金属の組成比は試験前の状態には戻っていなかった。微生物群集についてみると、Epsilonbacteraeotaの組成比は試験直後に上昇した後、半年後には低下し、3年後には試験実施前の組成比に近づいていた。ナノベントスの細胞数についてみると、試験直後から2年後まで大きな変化は認められなかったが、3年後は大きく減少した。メイオベントスについてみると、試験直後に節足動物の個体数が減少したが、1年後には試験直後と比較して増加していた。

以上より、かく乱によって巻き上がった堆積物がかく乱地点の周辺に拡散し、再堆積することから、底質や堆積物中の微生物群集については、再堆積が認められる地点ではかく乱地点と同様の特徴を示しているものと推測された。その後、新たな沈降粒子の堆積や生物かく拌等により、底質や微生物群集の組成は変化したものと推測される。メイオベントスのうち節足動物については、巻き上がった堆積物の再堆積を避けるため移動したことで、試験直後のみ一時的に減少したものと推測される。

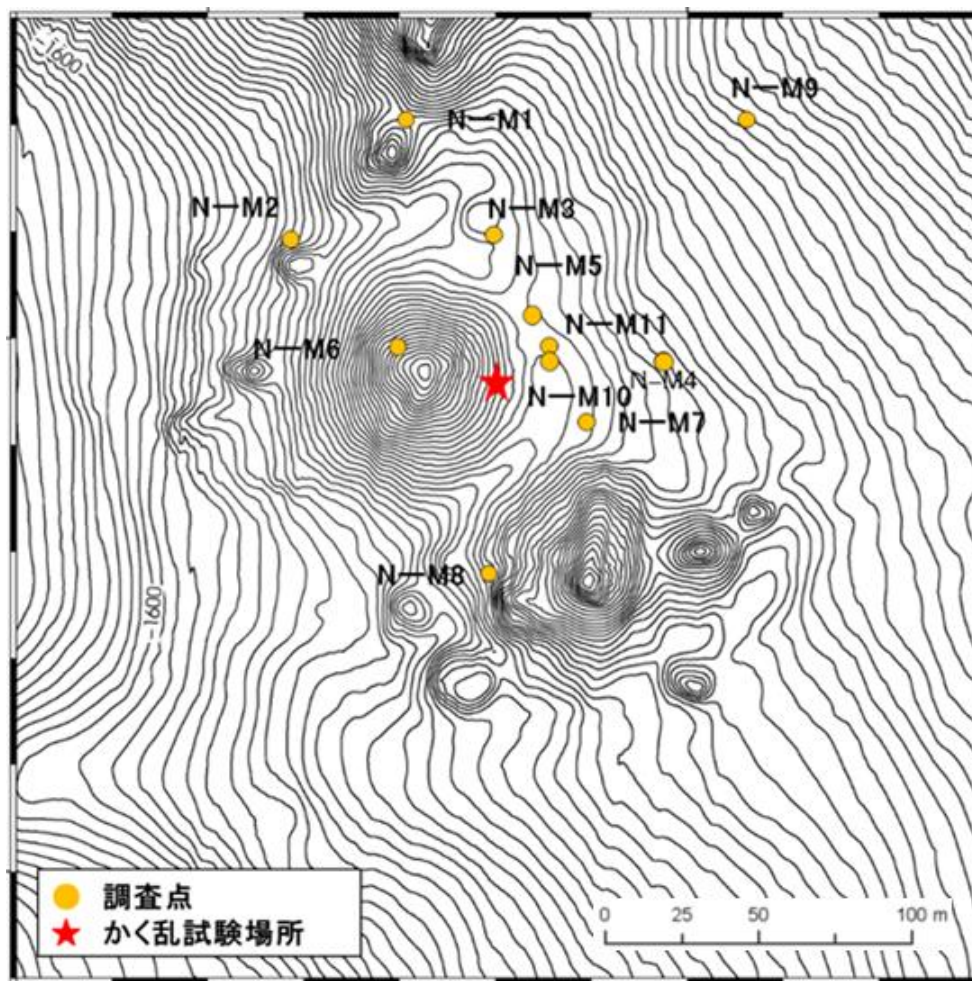


図 4-2-3 かく乱試験の調査地点

表 4-2-5 かく乱試験におけるモニタリング調査の結果概要

項目	結果
流況	・掘削開始から 2 時間ほどは南東方向への流れがあり、その後は東向きに、4 時間後には北から北西方向への流れが認められた。
沈降粒子	・試験期間中に全粒子束が最大となり、金属濃度が上昇した。
水質	・試験直後にアンモニアの濃度が上昇した。 ・試験 3 年後には、各測定項目とも試験前と同程度であった。
底質	・かく乱地点周辺や、再堆積の厚さが大きい N-M7 では、試験直後に Pb、Zn、Cu 等の金属濃度が上昇した。 ・N-M7 では、3 年後には金属濃度は低下したものの、試験前の金属組成と異なったままであった。
微生物群集	・かく乱地点周辺や N-M7 では、試験直後に Epsilonbacteraeota が増加した。また、熱水由来の Hg、Zn、Cu 等の金属濃度との相関が認められた。 ・N-M7 における Epsilonbacteraeota の組成比は、半年後には低下し、3 年後には試験実施前の組成比に近づいていた。
底生生物	・N-M7 における細菌群の細胞数は調査期間を通じて増減があるものの、ベースライン調査における変動の範囲内であった。 ・ナノベントスの細胞数は、試験直後から試験の 2 年後まで、N-M7 では大きな変化を示さなかったが、試験の 3 年後には大きく減少し、ベースライン調査の最小値より少ない値となった。 ・メイオベントスは、試験直後に N-M7 では節足動物の個体数が減少したが、試験の 1 年後には増加した。

4-2-2-4. 今後の課題

第 3 期には、第 2 期から継続して事前掘削試験を含む採鉱・揚鉱パイロット試験及びかく乱試験のモニタリング調査を実施し、環境影響が認められた範囲で流況や沈降粒子の経時変化を確認した。しかし、採鉱・揚鉱パイロット試験とかく乱試験はいずれも小規模であり、商業生産時とは環境影響の範囲や程度が異なるほか、影響が継続する年数も大きく異なると考えられる。海底熱水鉱床の商業化を見据え、実操業を想定したモニタリングのあり方を検討する必要がある。

4-2-3. 環境影響予測

環境影響予測として、観測データのない海域に対する環境予測モデル（粒子追跡モデル、底層域生態系モデル）の適用性を検討した。

4-2-3-1. 粒子追跡モデルによる影響予測の適用性検討

かく乱試験に係る再堆積計算結果とモニタリング結果との比較を図 4-2-4 に示す。左図はモデルを用いた再堆積計算結果（計算開始から 12 時間後）、右図はモニタリング結果である。また、図中の星印はかく乱地点（計算における濁りの発生源）、左図の桃色の実線は再堆積厚さの等値線を示す。

粒子追跡モデルにおける濁りの拡散範囲・再堆積厚さの予測には、対象海域の流動場が不可欠である。第 2 期には、かく乱試験時に取得した ADCP データを利用し、対象海域の時間的に変化する流動場を作成した。第 3 期には、流況観測データが得られていない海域における濁りの拡散範囲・再堆積厚さを予測する手法のひとつとして、一般公開されている広域的な流況データ及び詳細な海底地形データから流動場を作成した。作成した流動場を粒子追跡モデルに与えて、かく乱試験時の濁り発生条件を適用して濁りの拡散範囲・再堆積厚さを計算した結果、モニタリング結果と比較して過大評価となる地点もあるが、かく乱地点周辺及びかく乱地点の南東のマウンドに厚く堆積する傾向は一致した。このことから、流況観測データが得られていない海域においても、一般公開されている流況データを利用して流動場を作成すれば、粒子追跡モデルを用いて濁りの拡散範囲・再堆積厚さを予測可能であり、適用性があることを確認した。

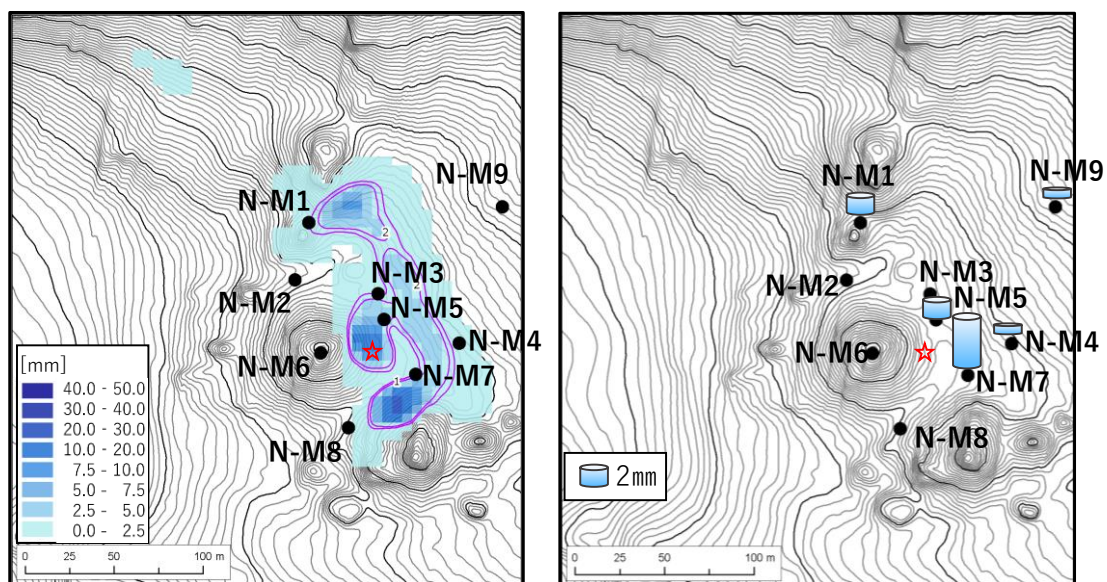


図 4-2-4 かく乱試験に伴う再堆積の計算結果とモニタリング結果との比較

4-2-3-2. 底層域生態系モデルによる影響予測の適用性検討

底層域生態系モデルの概念図を図 4-2-5 に示す。底層域生態系モデルは、掘削に伴う直接的及び間接的な影響による底生生物の増減を炭素現存量として表すことのできる物質循環モデルである。

第2期には、かく乱試験前及びかく乱試験の1年後までの底生生物の炭素現存量を計算した。その結果、濁りが生じるかく乱試験期間中、底生生物の炭素現存量が増減することを確認した(図4-2-6(上))。

第3期には、本モデルの汎用性を確認するため、かく乱試験地とは異なる鉱床で同様の試験を実施したと仮定して、底生生物の炭素現存量を計算した(図4-2-6(下))。その結果、濁りの発生とともにバクテリアでは炭素現存量が増加、メイオベントスでは表在性、埋在性ともに減少、ナノベントスでは変化がみられず、かく乱試験時の計算結果と同様の増減傾向を示した。

炭素現存量の増減の要因として、かく乱に伴う濁り中の生物が海底付近の流れによって別の地点に輸送されたこと、濁りの再堆積による退避や窒息によるへい死等が推測される。図 4-2-6 の結果は、生物量や海洋環境に関わらず、濁りに対する各分類群の増減パターンは同様であることを示す。このことから、海洋環境の異なる鉱床においても底生生物の炭素現存量を予測できる可能性が示された。

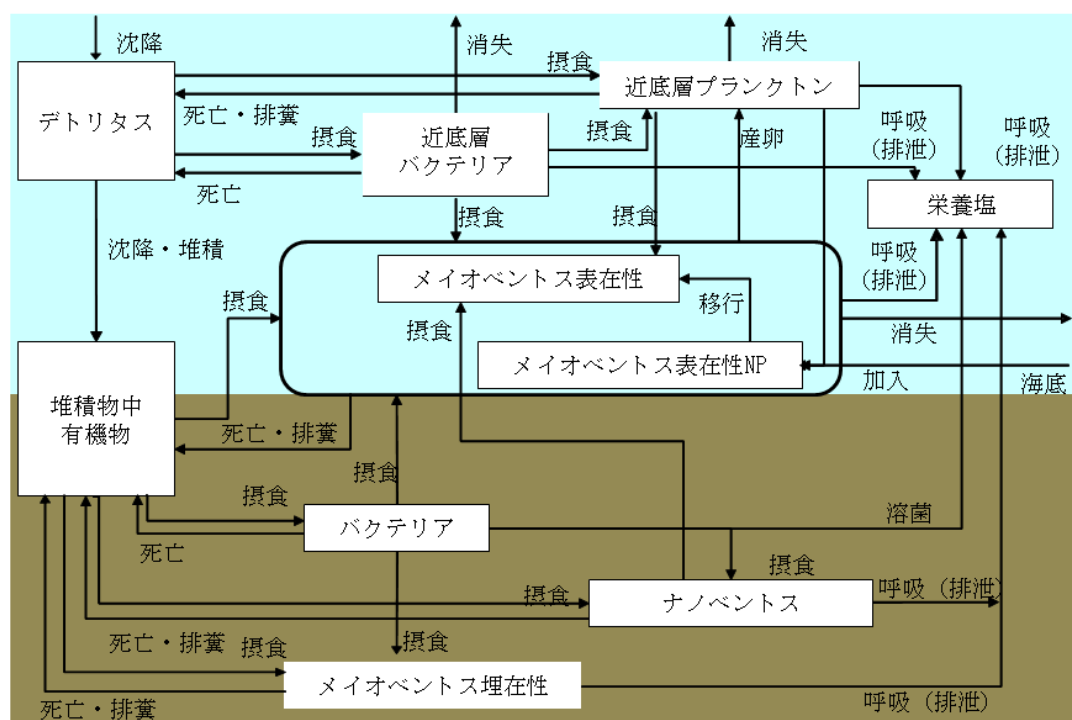


図 4-2-5 底層域生態系モデルの概念図
(NP: ノープリウス幼生)

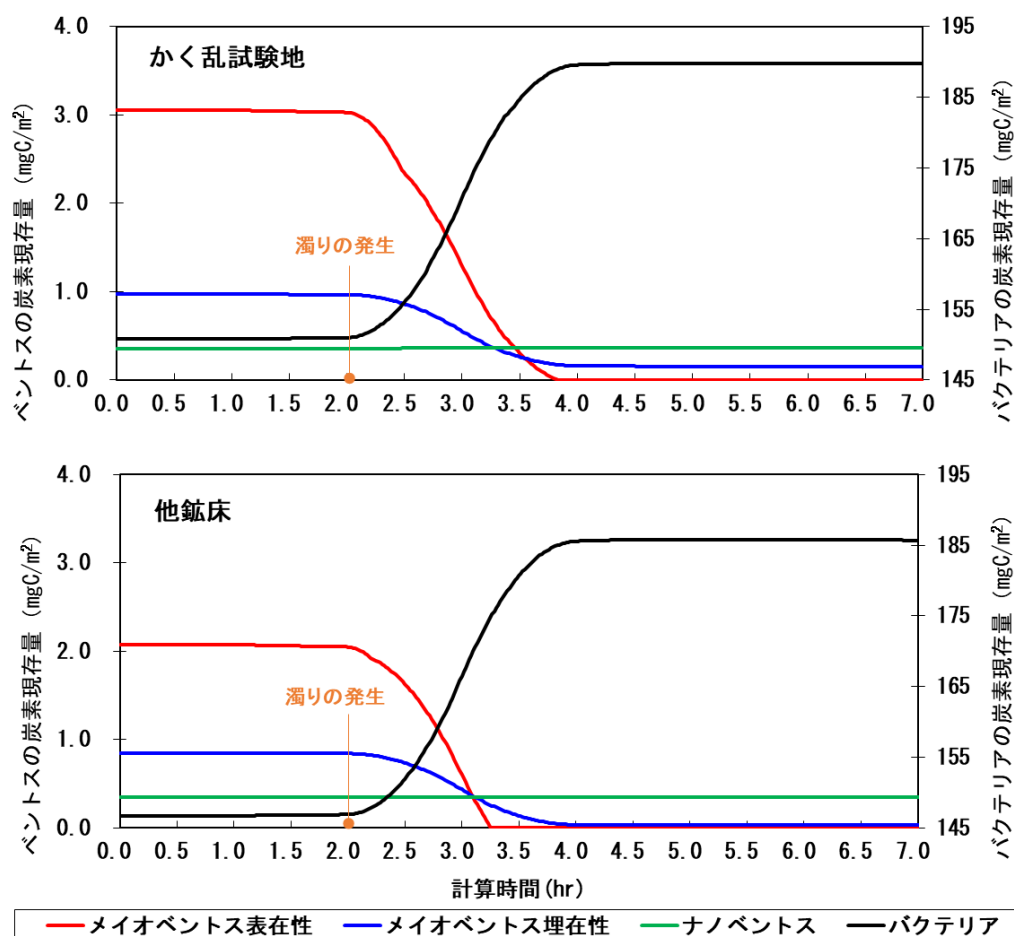


図 4-2-6 かく乱試験に伴う底生生物の炭素現存量の変化（上）及び
かく乱試験と同規模の試験を実施した場合における底生生物の炭素現存量の
変化（下）

4-2-3-3. 今後の課題

粒子追跡モデルについては、これまで短期間の試験に伴う濁りの拡散範囲・再堆積厚さの予測・検証のみ行っており、実操業を想定した予測を行っていない。商業生産時は、長期間にわたって濁りが発生すると考えられる。そこで、環境調査データや他の機関が作成した流況データ等を利用し、開発対象の候補となる鉱床の長期間の流況を反映した時空間的に変動する流動場を再現性高く、かつ効率的に作成し、粒子追跡モデルに適用していくことが今後の課題である。

底層域生態系モデルについては、計算結果と観測データの比較をかく乱試験に伴う再堆積が認められた数地点で行ったのみであり、予測精度の検証が不十分である。そこで、今後追加検証をする必要がある。

4-2-4. 環境保全策の検討

環境保全策の検討のためのフローチャートを図 4-2-7 に示す。

本事業では、開発候補地と周辺海域に生息する種の遺伝的交流関係に着目し、海底熱水鉱床の賦存する鉱床を中心に、第 1 期から第 2 期にかけて熱水性生物及び非熱水性生物をサンプリングし、形態同定及び遺伝子解析を実施した。なお、サンプリングにおいては、FDC、ROV 搭載カメラ及び国内で開発されたフリーフォール型深海探査機である江戸っ子 1 号による映像観察を併せて実施し、対象海域の優占生物種を把握した上で解析に供する対象種を選定し、サンプリングした。

第 3 期には、一部の生物種において遺伝子解析を実施するための試料量が不足していたため、第 1 期及び第 2 期に引き続きサンプリングや遺伝子解析を実施したほか、遺伝子解析結果からハプロタイプを推定し、種別の遺伝的多様性及び遺伝的交流関係を把握した。

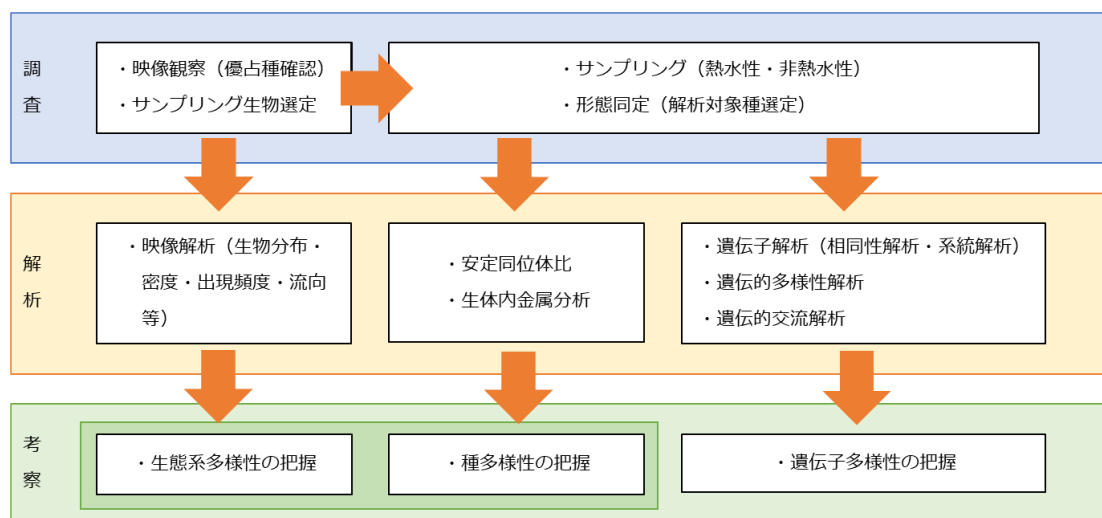


図 4-2-7 環境保全策の検討のためのフローチャート

4-2-4-1. 熱水性生物

熱水性生物 13 種のサンプリング地点を表 4-2-6 に示す。

熱水性生物については、12 地点から 13 種をサンプリングした。このうち、マリアナイトエラゴカイ近似種、ネッスイハナカゴは沖縄海域（(1)～(8)の 8 地点）、伊豆・小笠原海域（(9)～(12)の 4 地点）でサンプリングされており、広範囲に分布する種であった。サンプリングした 13 種については、生物集団の遺伝的な構成や決定要因となる遺伝子を明らかにするため、ハプロタイプの推定や遺伝的多様性の差異といった集団遺伝学的解析を実施した。

表 4-2-6 熱水性生物 13 種のサンプリング地点

N o.	生物種	沖縄海域								伊豆・小笠原海域			
		(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)
1	マリアナイトエラゴカイ 近似種	○	—	○	—	—	—	—	○	○	○	○	—
2	ネッスイハナカゴ	○	○	—	—	—	—	○	○	○	○	○	○
3	ゴエモンコシオリエビ	○	○	○	—	—	—	—	—	—	—	—	—
4	オハラエビ	○	○	○	—	—	—	—	—	—	—	—	—
5	エンセイオハラエビ	○		○	○	—	—	○	○	—	—	—	—
6	イバラモエビ族の一種	○	○	○	—	—	—	—	—	—	—	—	—
7	ヘイトウシンカイヒバリ ガイ	○	○	—	—	—	—	—	○	—	—	—	—
8	ツギノワタゾコガアミガ サガイモドキ	○	○	—	—	○	—	○	○	—	—	—	—
9	キノミフネカサガイ	○	○	—	—	○	○	○	○	—	—	—	—
10	サガミハイカブリニナ近 似種	○	○	—	—	—	—	○	—	—	—	—	—
11	ウロコムシ科の一種	○	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
12	セイタカハイカブリニナ 属の一種	—	—	—	—	—	—	—	—	○	○	○	—
13	ユノハナガニ	—	—	—	—	—	—	—	—	○	○	○	—

○：サンプリングを実施

熱水性生物の遺伝的多様性と遺伝的交流を表 4-2-7 に示す。

解析した結果、オハラエビは、遺伝的多様性が低いものの、分布する沖縄海域内においては遺伝的交流を有していた。また、ウロコムシ科の一種については、個体数が不十分であり、海域内における遺伝的交流関係については不明であった。オハラエビ及びウロコムシ科の一種を除いた種についてみると、概ね遺伝的多様性は中～高であり、分布する海域内において遺伝的交流を有していた。これより、多くの種で海域内の遺伝的交流による集団の供給が期待できることが明らかとなった。

表 4-2-7 熱水性生物の遺伝的多様性と遺伝的交流

No.	生物種	遺伝的多様性 ¹⁾		遺伝的交流（海域内）	
		沖縄 海域	伊豆・小笠原 海域	沖縄 海域	伊豆・小笠原 海域
1	マリアナイトエラゴカイ 近似種	高	高	有	有
2	ネッスイハナカゴ	中	中	有	有
3	ゴエモンコシオリエビ	高	—	有	—
4	オハラエビ	低	—	有	—
5	エンセイオハラエビ	高	—	有	—
6	イバラモエビ属の一種	中	—	有	—
7	ヘイトウシンカイヒバリガイ	中	—	有	—
8	ツギノワタゾコガアミガサガイ イモドキ	やや高	—	有	—
9	キノミフネカサガイ	やや高	—	有	—
10	サガミハイカブリニナ近似種	高	—	有	—
11	ウロコムシ科の一種	低～中	—	—	—
12	セイタカハイカブリニナ属の 一種	—	やや高	—	有
13	ユノハナガニ	—	中～高	—	有

1) 遺伝的多様性は、ハプロタイプ多様度にしたがって以下のとおり区分した。

0～0.2：低、0.2～0.4：やや低、0.4～0.6：中、0.6～0.8：やや高、0.8～1.0：高

4-2-4-2. 非熱水性生物

非熱水性生物 7 種のサンプリング地点を表 4-2-8 に示す。

非熱水性生物については、3 地点から 7 種をサンプリングした。沖縄海域では、腐肉食性のコンゴウアナゴ、肉食性のイラコアナゴといった魚類、ゴカクエゾイバラガニ、イトアシエビ属の一種といった甲殻類等が得られ、伊豆・小笠原海域では端脚類のみであった。なお、端脚類には複数種が含まれるが、深海性の端脚類に関する分類学的な知見が少ないことから、両海域で共通した種については不明であった。サンプリングした 7 種を対象に、熱水性生物と同様に集団遺伝学的解析を実施した。

表 4-2-8 非熱水性生物 7 種のサンプリング地点

No.	生物種	沖縄海域		伊豆・小笠原海域
		(1)*	(3)*	(9)*
1	コンゴウアナゴ	—	○	—
2	イラコアナゴ	—	○	—
3	ゴカクエゾイバラガニ	○	○	—
4	イトアシエビ属の一種	—	○	—
5	トカゲギス	—	○	—
6	ナナテイソメ科の一種	—	○	—
7	端脚類 ¹⁾	○	○	○

1) 複数種類を含む。

○：サンプリングを実施

*：表中の括弧内番号は表 4-2-6 のサンプリング地点と対応

非熱水性生物の遺伝的多様性と遺伝的交流を表 4-2-9 に示す。

非熱水性生物については、沖縄海域のコンゴウアナゴは遺伝的多様性がやや高く、同海域内において遺伝的交流を有していた。また、端脚類については、サンプリングされた複数種のうち、解析に必要な試料量を確保できた *Abyssororchomene* 属の沖縄海域内における遺伝的多様性は中程度であった。非熱水性生物については、コンゴウアナゴ、イラコアナゴ、イトアシエビ属の一種、端脚類の一種である *Abyssororchomene* 属の遺伝的交流を解析したが、コンゴウアナゴ以外の遺伝的交流関係は未解析である。この理由として、サンプリングした個体数が少なく、遺伝的多様性の解析に供する試料量として不十分であることが挙げられる。

表 4-2-9 非熱水性生物の遺伝的多様性と遺伝的交流

No.	生物種	遺伝的多様性 ¹⁾		遺伝的交流（海域内）	
		沖縄 海域	伊豆・小笠原 海域	沖縄 海域	伊豆・小笠原 海域
1	コンドウアナゴ	やや高	—	有	—
2	イラコアナゴ	高	—	—	—
3	ゴカクエゾイバラガニ	—	—	—	—
4	イトアシエビ属の一種	やや高	—	—	—
5	トカゲギス	—	—	—	—
6	ナナテイソメ科の一種	—	—	—	—
7	<i>Abyssorchomene</i> 属 ²⁾	中	—	—	—

1) 遺伝的多様性は、ハプロタイプ多様度にしたがって以下のとおり区分した。

0～0.2：低、0.2～0.4：やや低、0.4～0.6：中、0.6～0.8：やや高、0.8～1.0：高

2) サンプルングされた端脚類のうち、個体数が多い本属を代表として解析した。

4-2-4-3. 環境保全策の検討

第3期には、採鉱・揚鉱パイロット試験を実施した鉱床を対象に環境保全策のケーススタディを行った。

対象とした鉱床では、マウンド中心から半径約 150 m の範囲に熱水活動を伴う噴出孔が点在する。これらの噴出孔には、ゴエモンコシオリエビ、オハラエビ、マリアナイトエラゴカイ近似種、ネッスイハナカゴ、イバラモエビ属の一種、ツギノワタゾコシロアミガサガイモドキ、キノミフネカサガイ等、多くの熱水性生物が生息している。これら熱水性生物の多くは、鉱床を含む海域内において遺伝的差異はなく、遺伝的交流を有している。また、マウンド周辺の海底付近はコンゴウアナゴやホラアナゴ科等の底生性の魚類、ゴカクエゾイバラガニやイトアシエビ属の一種等の甲殻類といった非熱水性生物が生息している。非熱水性生物のうち、十分な試料数が得られ遺伝子解析されているコンゴウアナゴについては、熱水性生物と同様に海域内において遺伝的差異はなく、遺伝的交流を有している。

第2期に実施した採鉱・揚鉱パイロット試験の環境影響評価結果によれば、事前掘削に伴う濁りの拡散範囲は発生源から東西方向に約 150 m、南北方向に約 100 m である（経済産業省資源エネルギー庁ほか, 2018）。したがって、マウンドの中心部を採掘した場合、熱水活動を伴う噴出孔に再堆積し、噴出孔周辺に生息する生物に影響を及ぼすことが推測される。

鉱床に生息する主たる種の多くが沖縄海域内において遺伝的交流を有することから、開発の影響範囲外の沖縄海域内の他鉱床を遺伝子供給源として保護区に設定することで、鉱床が位置する海域の生物多様性が保たれると考えられる。

4-2-4-4. 今後の課題

海底熱水鉱床の開発に伴い環境影響を受けるエリアに生息する種について、周辺海域との遺伝的交流関係を調査し、遺伝子供給源となるエリアを保護することで開発対象海域全体の生物多様性を保全する考え方に基づき、熱水域及び非熱水域における主たる種をサンプリングし、遺伝子解析及び集団遺伝学的解析を進めてきた。その結果、鉱床や海域ごとに優占する種又は生態系は異なっており、種ごとに遺伝的な交流関係も異なっていることを把握した。これは、それぞれの鉱床、海域において、地形、流況、周辺海域との位置関係等の様々な要因が関係していることが考えられる。これらの調査結果を踏まえて、商業化のために保護すべき範囲を設定する必要がある。

非熱水性生物については、コンゴウアナゴを除いて、海域内における遺伝的交流が未解析である。生物採取に重点を置いた調査を実施し、サンプル数を増やすことが必要である。しかし、非熱水域は広範囲であり、かつ非熱水性生物の移動性が高いことから、ROV による直接採捕やベイトトラップによるサンプリングでは必要なサンプル数を確実に取得することは難しいと考えられる。そこで、サンプル数が増やせない場合に、公開されている DNA データベースを有効に活用すること、少ないサンプル数で解析可能な SNPs 法等の新しい手法を検討していくことが今後の課題である。

引用文献

International Seabed Authority, 2019, Recommendations for the guidance of contractors for the assessment of the possible environmental impacts arising from exploration for marine minerals in the Area (ISBA/25/LTC/6/Rev.1), 25/40. <https://www.isa.org.jm/wp-content/uploads/2022/06/25lrc-6-rev1-en.pdf>. (2023 年 8 月 18 日閲覧)

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, 2018, 海底熱水鉱床開発計画総合評価報告書, 158p. <https://www.jogmec.go.jp/content/300359550.pdf>. (2023 年 8 月 18 日閲覧)

4-3. 採鉱・揚鉱技術

4-3-1. 概要

第1期には、沖縄海域の海穴及び伊豆・小笠原海域の海丘を対象として、海底熱水鉱床の性状や気象海象条件を調査し、採鉱基礎条件を検討するとともに、採鉱・揚鉱システムに係る機器や手法の比較検討を行った。その一環として海底での採鉱・集鉱装置として2種類の小型試験機を開発し、平成24年度には世界で初めて水深約1,600 mでの掘削・走行試験に成功した。また、揚鉱方法や揚鉱管の比較検討を行い、水中ポンプ方式の概念設計を行った。

第2期には、海底熱水鉱床賦存海域においてこれらの小型試験機を用いた掘削試験を行い、掘削・集鉱効率、走行性能、操作技術、視認性向上等の要素技術を検証したほか、ジョークラッシャー（圧縮破砕機）を用いた水槽内での破砕試験により水中破砕性能を確認した。また、採鉱・揚鉱パイロット試験に向けて水中ポンプ設計仕様を決定するために、陸上でスラリー移送試験や摩耗試験を行い、揚鉱管内での大粒径スラリーの圧力損失の評価式の構築や採鉱・揚鉱パイロット試験相当の揚鉱管径での圧力損失と配管減肉量の推定を行った。それらを踏まえて平成27年度から3カ年の計画で採鉱・揚鉱パイロット試験事業を実施し、平成29年度には世界で初めてスラリー状にした海底熱水鉱床鉱石を連続的に船上まで揚鉱することに成功した。

第3期には、採鉱・揚鉱パイロット試験の結果から抽出された技術課題の解決に向けて、採鉱・揚鉱システムを6つの要素技術（①採鉱方法、②鉱石細粒化、③揚鉱方法、④鉱石投入装置、⑤揚鉱水の処理、⑥洋上プラットフォーム）に分けて、試験機開発や要素試験等を通じた検討に取り組んだ。

採鉱分野では、主にチムニーやマウンド頂部を対象とする立型採鉱機を開発し、陸上にて海底熱水鉱床の模擬岩盤を対象とした掘削試験を行い、掘削性能を確認した。また、HPGRを用いた鉱石細粒化を検討した。

揚鉱分野では、揚鉱水を循環利用することで揚鉱水処理量を低減し、船上での処理を可能にする循環式スラリー揚鉱方式を提案した。船上での揚鉱水処理のため、pH調整やキレート樹脂による処理プロセスを構築した。また、海水と混合したスラリー状の鉱石を循環系に連続的に投入する鉱石投入装置を開発し、陸上にて鉱石供給から払い出し、揚鉱管への鉱石投入までの一連の動作の総合試験を行い、移送性能を確認した。

洋上プラットフォームについては操業安定性や稼働性を考慮して、採鉱では船型を、揚鉱ではセミサブ型をそれぞれ採用した。

これらの試験や検討等を通じて要素技術がそれぞれ技術的に成立し得ることを確認した後、要素技術を組合せ、操業安定性や環境影響を考慮し、循環式スラリー揚鉱方式を軸とした採鉱・揚鉱システムを構築した。

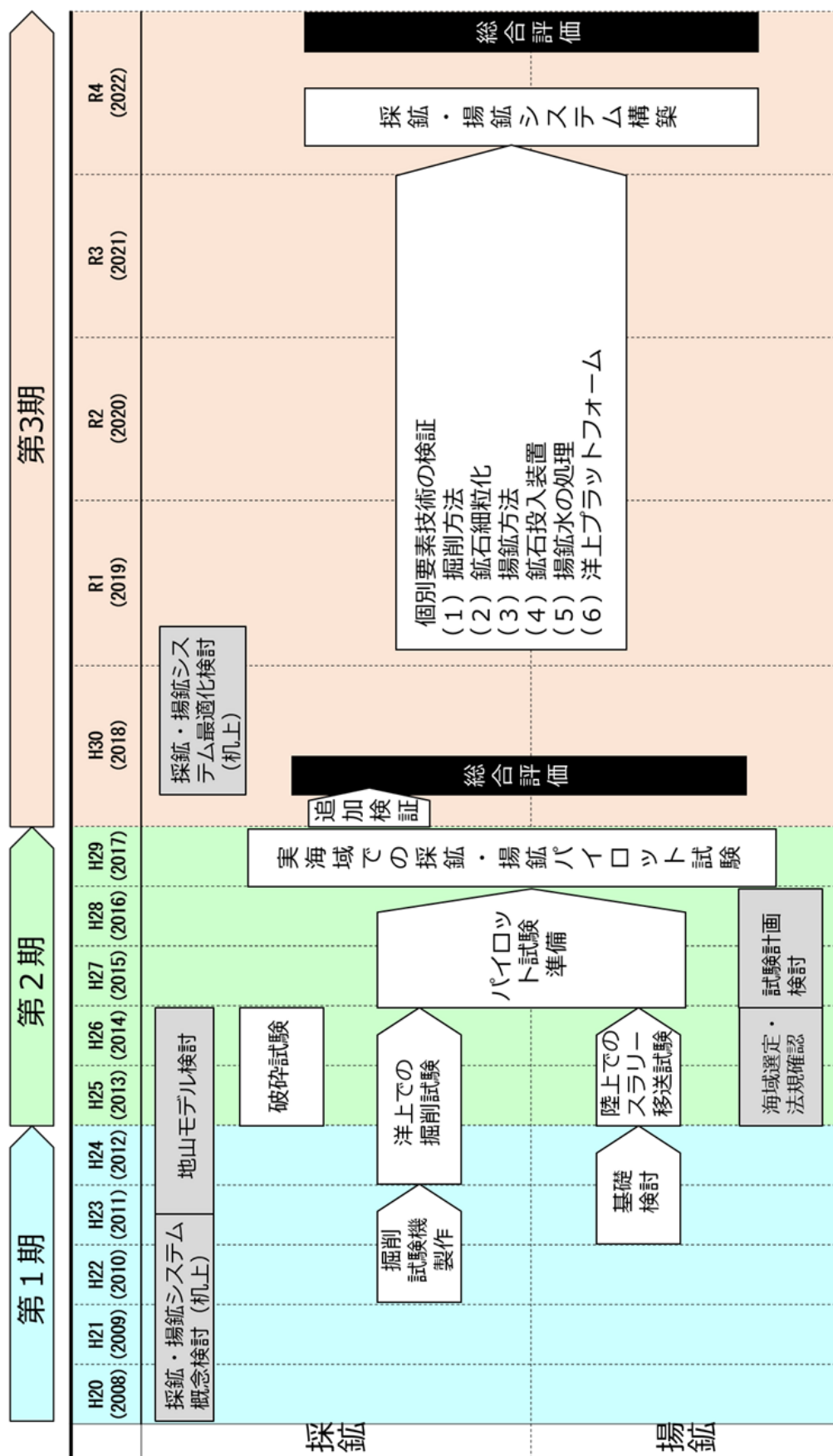


図4-3-1 採鉱・揚鉱技術分野の実績

4-3-2. 採鉱方法

採鉱方法を検討するために必要な地山モデルを、ボーリングのコアや掘削時のデータに基づき作成した。また、目標とする生産規模に達するよう海底熱水鉱床のマウンドを本格的に盤下げ掘削するためには、サーフェスマイナー等の自走式採鉱機を用いることが予想される。しかし、自走式採鉱機を導入するためには、海底に平地が造成されていなければならない。そこで、チムニーやマウンド頂部を掘削して平地を造成するための装置として立型採鉱機を設計・製作し、陸上での掘削試験により海底熱水鉱床の模擬岩盤に対する掘削性能を確認した。

4-3-2-1. 地山モデルの作成

各鉱床に適した採鉱方法を検討するとき、まずは採鉱対象となるマウンドの形状や物性を把握するとともに、鉱床の空間分布を示す地山モデルを作成する必要がある。そのため、第2期に沖縄海域の鉱床においてボーリングや地形調査を通じてデータを取得したが、調査量が十分ではなく、詳細な地山モデルの構築に至らなかった。そこで、第3期には沖縄海域の2つの鉱床（以下、「D 鉱床」、「E 鉱床」、という。）を対象としたより詳細な調査を実施し、そこで得られた3D地形図からマウンド地形を把握するとともに、ボーリングのコアや掘削時のデータから鉱石の物性を推定し、地山モデルを作成した。

(1) マウンド地形

FDC 及び ROV の画像から作成した3D地形図をもとに、D 鉱床及び E 鉱床のマウンド地形図を作成した。これらの鉱床では、1 km²程度のカルデラ地形の底部に大中小のマウンドが密集している（大型マウンド：径 100~200 m 級、中型マウンド：径 50 m 級、小型マウンド：径 20 m 級）。マウンドの斜面傾斜は最大 40° である。

マウンドの頂部や斜面にはチムニーが見られ、特に D 鉱床のマウンドではチムニーの発達が顕著である。チムニーを欠く場合は、チムニー崩壊により生じたと思われる径 1 m 前後の礫が分布する。そのような場所はガレ場様であり、表面を数 m 厚の砂泥が被覆することがある。

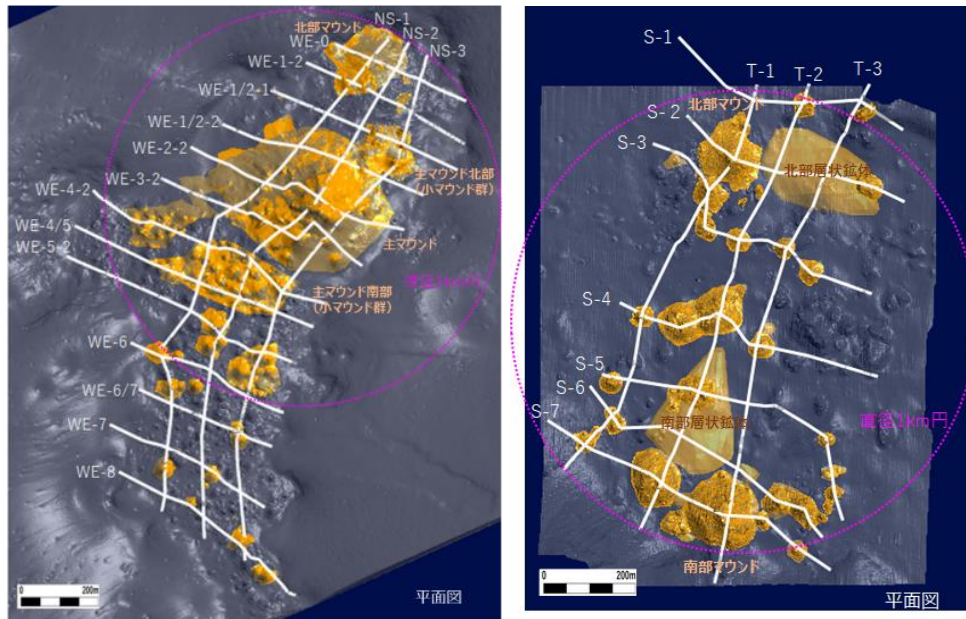


図 4-3-2 D 鉱床及び E 鉱床のマウンド地形図
(左 : D 鉱床、右 : E 鉱床) (橙色 : 鉱体、灰色 : 海底地形 (DEM))

(2) 鉱石の物性

D 鉱床及び E 鉱床における鉱石の物性を明らかにするため、両鉱床のボーリングコアの一部を用いて一軸圧縮強度及び有効間隙率（空隙率）を測定した。一軸圧縮強度測定の結果、ボーリング時の掘削断面積、掘進速度及びトルク等から算出した掘削体積エネルギー（SE 値）と一軸圧縮強度の間に相関がみられ、SE 値を 1/10 とした値（1/10SE 値）は一軸圧縮強度に相当することを確認した。

D 鉱床及び E 鉱床における鉱石の物性を表 4-3-1 に示す。ただし、これらは一部の地点で採取した鉱石から求めた値であるため、各鉱床の代表値とみなせるかどうか追加の検討が必要である。

表 4-3-1 D 鉱床及び E 鉱床における鉱石の物性

比較項目	D 鉱床	E 鉱床
試料数 (供試体数)	・ 26 試料(76 供試体) (同一箇所 2-3 供試体平均値≒推奨 値)	・ 47 試料(47 供試体) (同一箇所 1 試料=参考値)
試料採取深度 (海底面下 m)	・ 3m~82m	・ 0m~48m
強度平均値 qu	・ 38.55MN/m ²	・ 39.26 MN/m ² (0m 除外 42.17 MN/m ²)
強度の 深度変化	・ 0m : 不明 ・ ~80m : 低~高強度 (10-70MN, 部分的に 80MN 以上) ・ 深度依存でなく、鉱石産状に依存	・ 0m : 明らかに低強度(14MN 程度) ・ ~50m : 低~高強度 (10-70MN, 部分的に 90MN 以上) ・ 深度依存でなく、鉱石産状に依存
有効間隙率 (空隙率) ne	・ 2-20% (平均 10.1%)	・ 2-30% (平均 15.8%, 0m 除外 14.7%)
有効間隙率の 深度変化	・ 0m : 不明 ・ ~80m : 低~高間隙率 (2-20%) ・ 深度依存でなく、鉱石産状に依存	・ 0m : 明らかに高間隙率(26%程度) ・ ~50m : 低~高間隙率 (2-30%, max.45%) ・ 深度依存でなく、鉱石産状に依存
最表層試料 (0m 試料)	—	・ 低強度:4-24 MN/m ² (平均 13.57 MN/m ²) ・ ne:22-30%(平均 26.28%)
鉱石産状	・ 多様 ・ 礫状/塊状/珪化/鉱染状/硬石膏化	・ 単調 ・ 塊状/多孔質
産状と強度	・ 礫状+塊 状 : 20-60MN/m ² ・ 基盤+互層状 : 20-40MN/m ² ・ 珪化+鉱染状 : 40-80MN/m ²	・ 塊 状 : 10-65 MN/m ² ・ 多孔質 : 8-137MN/m ²
100MN 以上 の高強度鉱石	・ 主マウンド浅部 (7m,8m:塊状, ne:5%) ・ 主マウンド深部 (73m:鉱染・珪化, ne:1%)の 3 供試 体	・ 北部マウンド浅部に分布 (11m,23m:多孔質, ne:7%)
マウンド間 の強度比較	・ 主マウンド試料が、北部マウンド試 料より高強度	・ 北部マウンド試料が、南部マウンド 試料より高強度
基盤岩試料	・ 2 試料(凝灰角礫岩) (40 MN/m ² 前後で、ne:12.05%)	・ 1 試料(凝灰岩) (56.76 MN/m ² で、ne:16.6%)

(3) 地山モデルの作成

ボーリングのコア及び掘削時のデータに基づき、D 鉱床及び E 鉱床におけるマウンドの地山モデルを作成した。

D 鉱床では、複合マウンドやマウンド群が存在する。これらのうち、D 鉱床主マウンドのボーリング柱状図と 1/10SE 値プロファイルを重ねたものの例を図 4-3-3 に示す。コアが欠損している区間の岩相は、1/10SE 値より推定した。鉱体は 3 つの層（上部・中部・下部層）に大別され、各層で鉱石の産状・物性が異なる。上部層は礫状鉱石主体であり、一軸圧縮強度 20～60 MPa 程度、空隙率 10～30%程度とばらつきがみられた。中部層では礫状鉱石層と母岩（粘土化変質した凝灰岩～凝灰角礫岩）が互層状に産し、一軸圧縮強度 20～40 MPa 程度、空隙率 10～30%程度であった。下部層は珪化した緻密な鉱染状鉱石主体であり、一軸圧縮強度 40～80 MPa 程度、空隙率 10%程度であった。また、海底面下の鉱体（潜頭性鉱体）は小規模なもののみ確認されている。

E 鉱床のマウンドは独立したものが主体で、複合マウンドやマウンド群はほとんどみられない。一方で、D 鉱床より海底面下の鉱体（潜頭性鉱体）の規模が大きい。

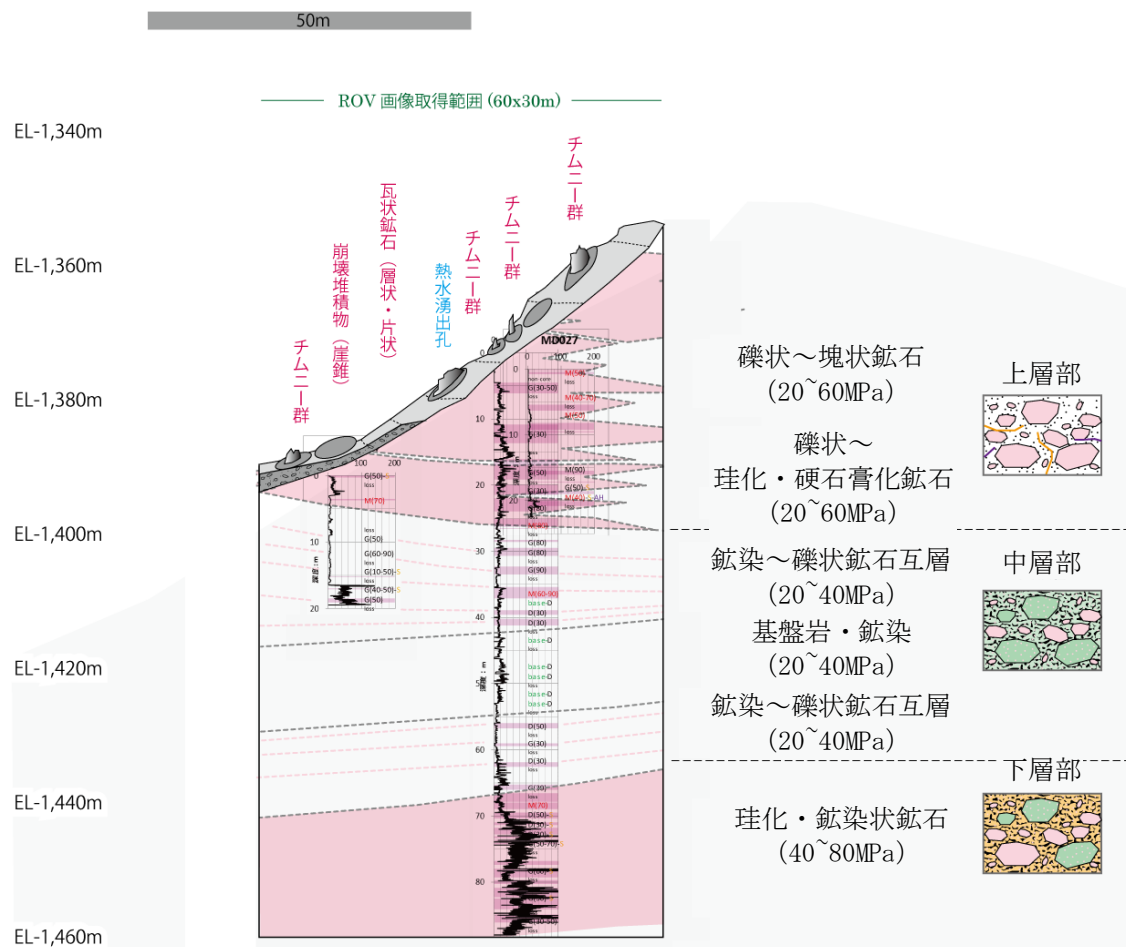


図 4-3-3 D 鉱床主マウンドの地山モデル
(ピンク色：鉱石、灰色：母岩)

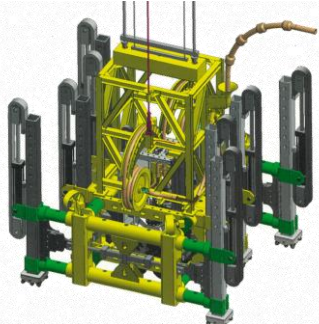
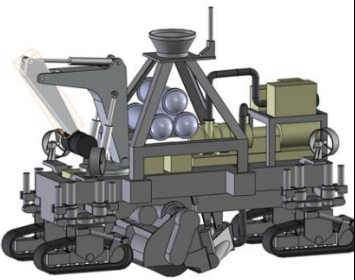
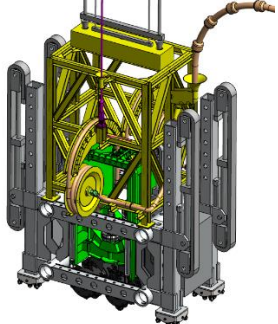
4-3-2-2. 採鉱方法の検討

第2期には、マウンドを本格的に掘削するための盤下げ採鉱機及びチムニーやマウンド頂部を掘削・平地造成する頂部採鉱機の必要性が指摘された。

従来の検討では、自走式採鉱機を使用することが提案されていた（経済産業省資源エネルギー庁ほか, 2018 ; AMC Consultants Pty Ltd, 2018）。しかし、急峻な地形や小型マウンドに自走式採鉱機を着底することは困難であるとして、懸架状態でも使用できる立型採鉱機を考案した。立型採鉱機により自走式採鉱機を導入できる広さまでマウンドを平地化した後は、自走式採鉱機で盤下げ掘削し、自走式採鉱機の運用が困難なマウンド底部に達すれば再び立型採鉱機を用いて掘削を行う。また、直径 50 m 以下の小型マウンドは、立型採鉱機だけで掘削する。なお、立型採鉱機は部分的な改修を加えることにより、揚鉱システムと接続し、鉱石投入装置に掘削された鉱石を移送する集鉱機として運用することも考えられる。

表 4-3-2 に採鉱・集鉱に用いる機器の概形と役割を、図 4-3-4 に各機器の使い分けの模式図をそれぞれ示す。

表 4-3-2 採鉱・集鉱に用いる機器の概形と役割

機器	立型採鉱機	自走式採鉱機	集鉱機
概形			
役割	・チムニー除去、マウンド頂部の掘削 ・自走式採鉱機の導入前の平地造成 ・マウンド底部の掘削 ・一時貯鉱	・盤下げ掘削（走行できる十分な平地造成後に導入） ・一時貯鉱	・一時貯鉱された鉱石を集鉱し移送管を通じて鉱石投入装置への輸送

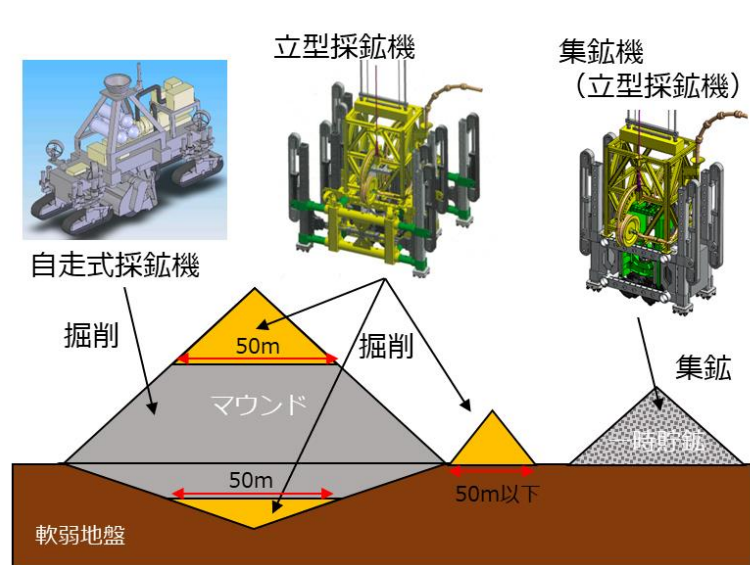


図 4-3-4 各機器の使い分けの模式図

(1) 立型採鉱機的设计・製作

1) 立型採鉱機の概念设计

市販の連壁掘削機をベースとして、アウトリガーやアンカー等を設けて傾斜地への安定性を確保し、急峻地形や小型マウンドでも掘削が可能な立型採鉱試験機を設計・製作した。また、後述の模擬岩盤を用いた陸上掘削試験で得られた結果をもとに、商用規模の立型採鉱機の概念設計を行った。

2) 立型採鉱試験機の基本設計

海底熱水鉱床においてチムニーやマウンド頂部の掘削に立型採鉱機を使用するとき、採鉱母船から立型採鉱機を吊り下げた懸架状態、又は掘削対象にアウトリガー等を接地させて立型採鉱機の姿勢を制御した状態で掘削することが考えられた。このような条件下での運用性や掘削性能を確認するため、立型採鉱機の試験機による掘削試験を行うこととし、試験機の基本設計を行った。

立型採鉱試験機は、油圧駆動により鏡映対称の回転方向に回転するドラムカッター2個を有し、掘削反力を支持できるように躯体四脚に油圧により伸縮可能なアウトリガーを取り付けることとした。

3) ビット形状の検討

市販の連壁掘削機には土壌や軟岩の掘削に適した平ビットが使用されているが、掘削対象である海底熱水鉱床鉱石は硬岩であることから、硬岩を掘削可能なドラムカッターが必要である。

そこで、3種類の掘削ビット（平ビット、丸ビット、平ビット・丸ビット混用ビット）の比較検討を行い、海底熱水鉱床の掘削に適したビットとして、平ビット・丸ビット混用

ビットにテーパビットやゲージビットを併用したハイブリッド型ビットを選定し、図 4-3-5 に示すドラムカッターを製作した。

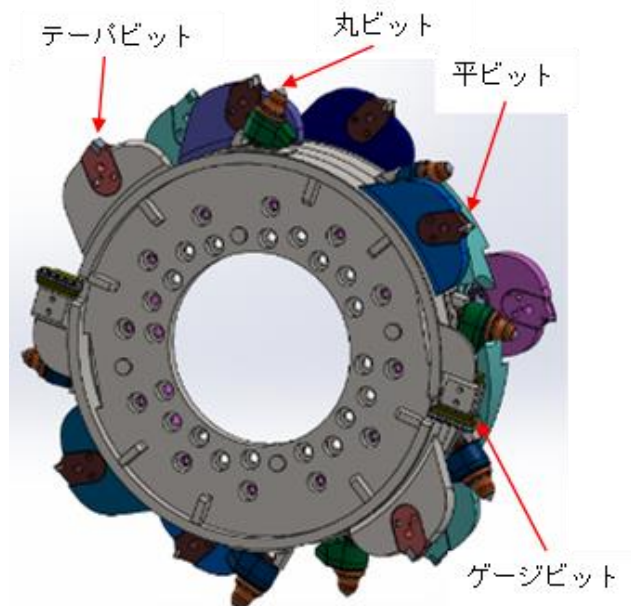


図 4-3-5 ハイブリッド型ビットのドラムカッター

4) 立型採鉱試験機の詳細設計・製作

2)基本設計及び3)掘削ビットの検討を踏まえ、掘削試験に用いる立型採鉱試験機の詳細設計・製作を行った。試験機にはハイブリッド型ビットのドラムカッターを搭載し、四脚に取り付けたアウトリガーは油圧モーターによる独立駆動を可能とした。アウトリガー先端はスパイク形状とした。表 4-3-3 に立型採鉱試験機の仕様を、図 4-3-6 に試験機の外観を示す。

表 4-3-3 立型採鉱試験機の仕様

機械寸法	全長: 3,300 mm、幅: 2,420 mm、高さ: 4,760~5,800 mm
掘削形状	2,400 mm × 850 mm
カッター回転数	0~17 rpm
ドラム軸最大トルク	低: 65.3 kN·m, 高: 32.6 kN·m (@油圧 27.4MPa)
駆動	オイルモーター
水中サンドポンプ	無し (外付けポンプによる)
重量 (空中)	20 t (カウンタウエイトを含む)



図 4-3-6 立型採鉱試験機

(2) 陸上掘削試験

海底熱水鉱床のマウンドを模擬した岩盤（平坦面、チムニー、不陸地形、ガレ場）を供試体とした陸上掘削試験を実施した（図 4-3-7）。本試験では、立型採鉱試験機を用いて安定した掘削が可能かどうかを検証するとともに、掘削効率、実収率等を求めた。

1) 試験手順

ピット（水槽）の底に供試体を設置して、立型採鉱試験機をクレーンで吊り、供試体上に接地して掘削を行った。掘削片を浚渫するため、供試体を設置したピットを水で満たした状態（水中）で掘削した。一部の条件では掘削状況の視認等を優先して、ピットに水を入れず、気中で供試体を掘削した。

水中で掘削したとき、掘削片は外置きのサクショポンプを用いてスラリーとして浚渫し、浚渫したスラリーは脱水機を用いて 0.6 mm 以上の掘削片と水に分離した。掘削片は鉱石タンクに貯留し、水は循環水タンクに流入後に配管を通じてピットに戻るようにして、ピットと循環水タンクの間を循環させた。スラリー流量は電磁流量計より計測し、スラリー密度はγ線密度計より計測した。また、試験後には、鉱石タンク及び循環水タンクの重量を計測し、浚渫した掘削片・スラリーの重量を算出した。また、掘削後の模擬岩盤の体積を 3 次元計測等により取得した。試験後には掘削片を回収して粒度分布を分析した。

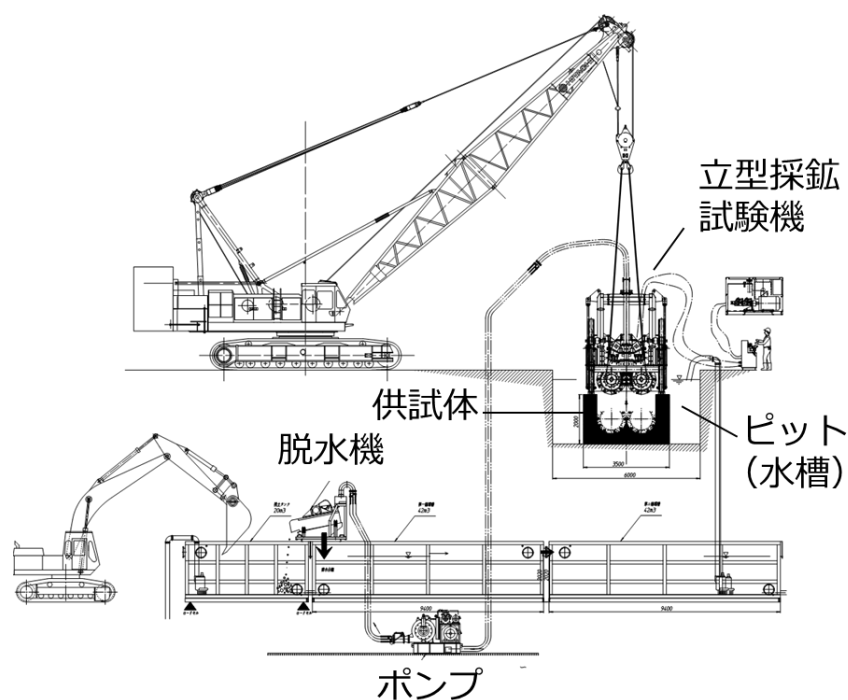


図 4-3-7 陸上掘削試験の概念図

2) 試験方法

陸上掘削試験の試験要素及び試験内容を表 4-3-4 及び表 4-3-5 に示す。模擬岩盤には主にモルタルを使用した。一部の条件 (Case 4) では高強度岩盤として安山岩を使用した。

表 4-3-4 陸上掘削試験の試験要素

試験番号	主な試験要素
Case1 平坦面の掘削	基本ケースとして、他ケースの評価基準とする。 マウンド浅部を模擬した岩盤 (平坦面)。 接地状態で掘削する。
Case2 チムニーの掘削	チムニーを模擬した岩盤。主に揺動状態で掘削する。 アウトリガーによる姿勢保持を検証する。
Case3 不陸地形の掘削	マウンド浅部を模擬した岩盤 (不陸地形)。連続的に掘削する。 アウトリガーによる姿勢保持を検証する。
Case4 高強度岩盤の掘削	マウンド深部を模擬した高強度岩盤 (安山岩) を掘削する。
Case5 ガレ場の掘削	ガレ場を模擬して、供試体上に礫 (粒径 1,000 mm 又は 500 mm) を配置したもの掘削する。 アウトリガーによる姿勢保持を検証する。

表 4-3-5 陸上掘削試験の試験内容

試験番号	試験セットアップ	掘削手順	供試体
Case1 平坦面の 掘削			
Case2 チムニー の掘削			
Case3 不陸地形 の掘削			
Case4 高強度 岩盤の 掘削			
Case5 ガレ場の 掘削			

3) 計測・評価方法

掘削効率は、次式で求める掘削レート R' (t/日)で評価した。

$$R = \left(\sum_{t=0}^{t=T} Q \times q \right) / T$$

R : 掘削レート(m^3/min)
 q : スラリー濃度(vol%)
 Q : スラリー流量(m^3/min)
 T : 掘削時間(min)

$$R' = 1.44 \times R \times \rho m$$

R' : 掘削レート(t/日)
 R : 掘削レート(m^3/min)
 ρm : 鉬石密度(設定値 : t/ m^3)

スラリー濃度 q は、 γ 線密度計の計測値から、以下の式で計算した。

$$q = \frac{\rho s - \rho w}{\rho m - \rho w}$$

ρs : スラリー密度(計測値 : t/ m^3)
 ρm : 鉬石密度(設定値 : t/ m^3)
 ρw : 循環水密度(計測値 : t/ m^3)

実収率は、次式のとおり管内スラリー通過量から求めた。

$$\text{実収率} = \frac{Vt}{Vm}$$

Vt : 管内スラリー中の鉬石通過体積(m^3)
 Vm : 掘削体積(m^3)

4) 試験結果

試験結果を表 4-3-6 に示す。Case2 及び 5 については、掘削状況の視認を優先してビットに注水しておらず、浚渫を実施していないため、掘削レート等のデータを取得していない。掘削レートは平成 29 年度の採鉱・揚鉱パイロット試験時に揚鉱した実鉱石の平均密度である 3.74 t/m^3 と単位時間あたりの掘削体積から算出した。また、各 Case は複数回実施しており、その都度掘削片を回収しているため、掘削片の粒度に幅がある。

供試体の一軸圧縮強度と掘進速度の相関を図 4-3-8 に示す。両者はほぼ反比例しており、理論上の関係と一致することを確認した。

Case1、2、3 及び 5 の試験の様子を図 4-3-9 に示す。

表 4-3-6 陸上掘削試験結果

試験 ケース	試験結果	掘削 レート (t/日)	スラリー濃度 平均 (vol%)	実収率 (%)	掘削片 粒度 (mm)
Case1 平坦面の 掘削	- 平坦面を安定して掘削した。 - アウトリガーによる姿勢制御が可能であることを確認した。	415	1.4	84	D50=1.3 最大粒径 53~75
Case2 チムニー の掘削	- 吊り下げられて上下動（ヒービング）している状態でもチムニーを掘削可能であった。 - 動揺最下端時にチムニーに喰い付き短時間での掘削を繰り返した。喰い付いたとき片刃接触となり、その反力による採鉱機の回転がみられた。	—	—	—	—
Case3 不陸地形 の掘削	- 不陸地形を連続的に掘削して、平地造成が可能であることが示唆された。 - 不陸地形に対してアウトリガーにより姿勢制御が可能であることを確認した。	425	2.1	72	D50=1.3 最大粒径 53~75
Case4 高強度 岩盤の 掘削	- 高強度岩盤を掘削可能であったが、ビットの欠損がみられた。 - 高強度岩盤（安山岩：120MPa）到達後は振動が激しくなりアウトリガーが浮くことがあった。高強度岩盤に対する反力（＝立型採鉱機重量）不足等により、アウトリガーが浮いたと考えられる。	118	0.52	84	D50=1.1 ~1.4 最大粒径 53
Case5 ガレ場の 掘削	(単一礫) - 単一の礫に対して安定して押さえ込み、掘削可能であった。 - 掘削物の粒度は最大 200 mm と大きかった。 (多数礫) - 礫が多数であっても安定して押さえ込み、掘削可能であった。 - ガレ場に対してアウトリガーにより姿勢制御が可能であることを確認した。	—	—	—	—

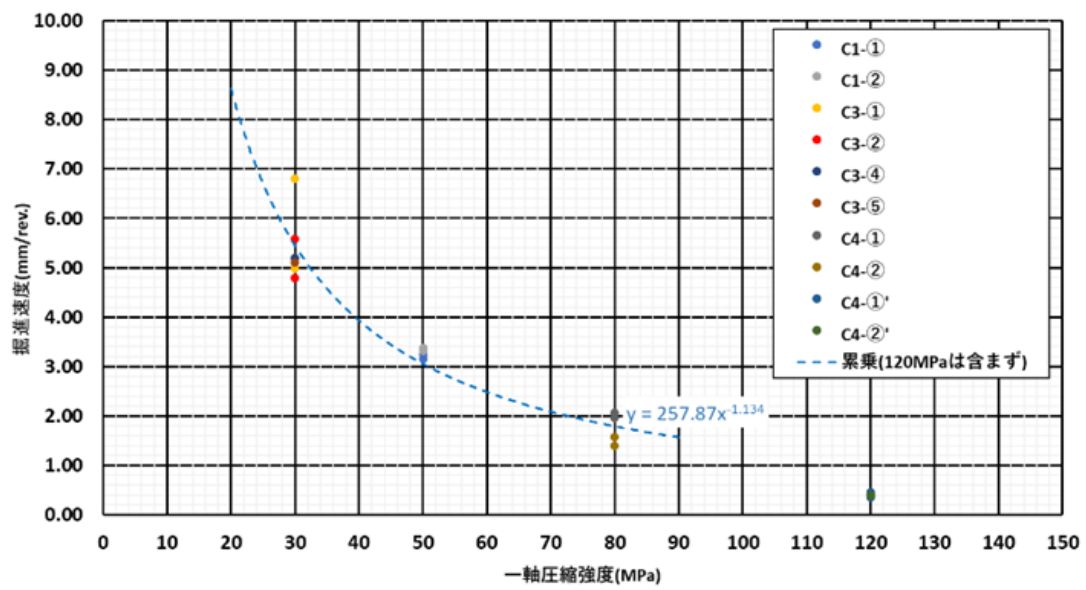


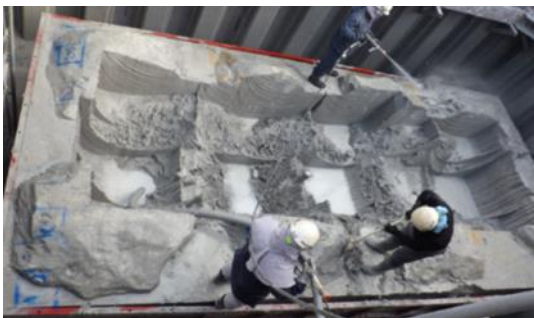
図 4-3-8 掘進速度と供試体の一軸圧縮強度の関係



Case1 平坦面掘削の様子



Case2 掘削後のチムニー模擬岩盤



Case3 掘削後の不陸地形模擬岩盤



Case5 掘削後のガレ場模擬岩盤
(多数角礫)

図 4-3-9 陸上掘削試験の様子

4-3-2-3. 今後の課題

海底熱水鉱床の採鉱方法を検討するために、対象とするマウンドの形状や物性を把握し、地山モデルを作成した。なお、本地山モデルは各鉱床のボーリングデータに基づくものであるため、採鉱計画の検討を行う際は、今後のボーリング調査の結果等から地山モデルの情報は更新される点を留意する必要がある。

マウンドの盤下げ掘削を担う自走式採鉱機を導入するための平地造成のため、立型採鉱機を提案し、立型採鉱試験機を設計・製作して陸上で行った掘削試験を通じて、海底熱水鉱床の模擬岩盤に対する掘削性能を確認した。今後は、実操業により近い条件での掘削試験等により、頂部掘削への適用性及び信頼性を向上させる必要がある。

4-3-3. 鉱石細粒化

揚鉱効率の向上や、ポンプや配管の摩耗・閉塞のリスク低減には、掘削された鉱石を海底で細粒化する必要がある。そこで、陸上で広く用いられる HPGR の適用性を検討した。

4-3-3-1. 鉱石細粒化システムの構築

図 4-3-10 に HPGR の作動原理を示す。HPGR は 2 つのローラーで構成されており、一方は固定され、他方は油圧シリンダーにより水平方向の移動が可能となっている。ロール間の原料層に対し、任意の圧力で移動式のローラーを押し付けることで原料を粉砕する。HPGR は鉱石やコンクリート用碎石の破碎などに広く用いられ、一般に他の手法より破碎効率やエネルギー効率で上回る (Schönert, 1991)。しかし、海底熱水鉱床鉱石の破碎や水中での使用実績はない。そこで、海底熱水鉱床鉱石を対象に HPGR を用いた破碎試験を実施し、その結果を基にシステムの構築を行った。

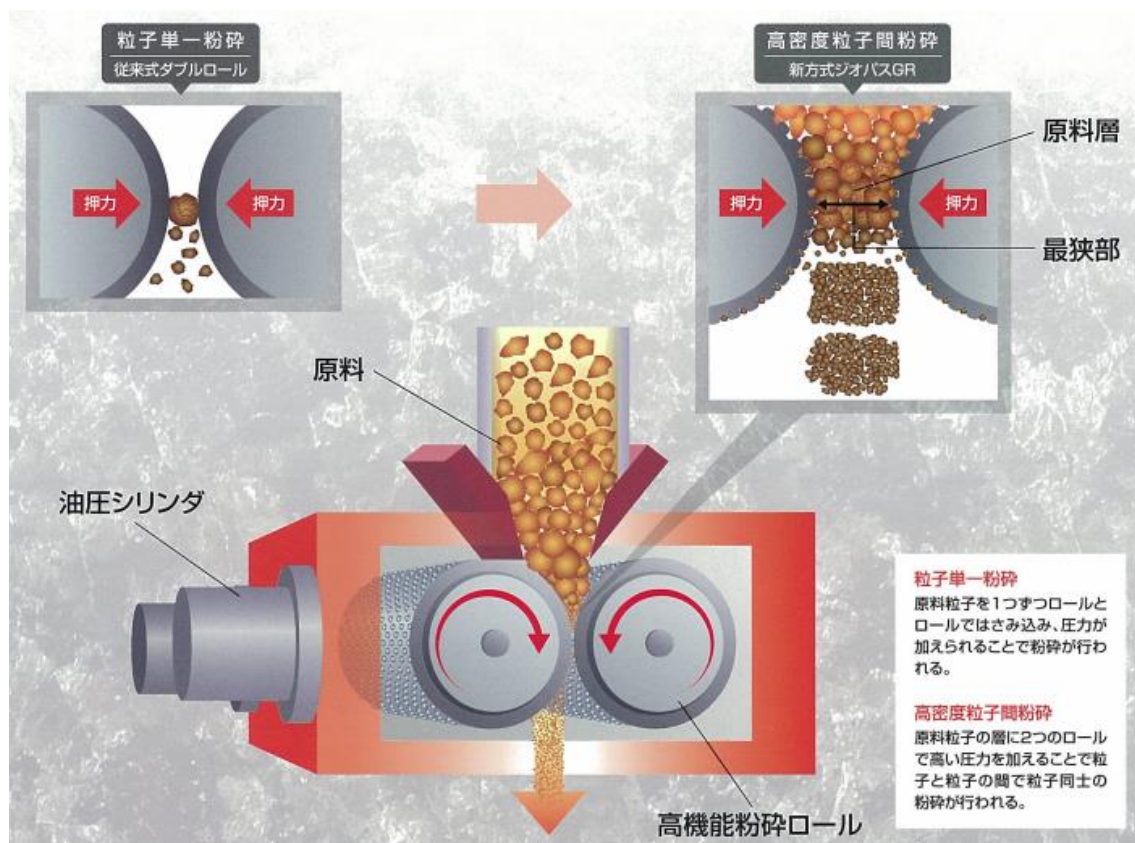


図 4-3-10 HPGR 作動原理
(古河産機システムズ株式会社)

(1) 実鉱石の破碎性能検討

図 4-3-11 に試験装置を示す。ロール径 $\phi=520$ mm、ロール幅 $L=220$ mm の既製品の HPGR (DHP-2009、古河産機システムズ株式会社製) を用いて気中で実鉱石及び模擬鉱石 (安山岩) の破碎試験を行い、結果を比較した。

図 4-3-12 に示すとおり、HPGR による実鉱石の破碎の状態を確認した。また、図 4-3-13 に模擬鉱石と実鉱石の破碎比 (投入原料の 80% 粒度に対する破碎後 80% 粒度の比) の比較を示す。気中での試験の比較の結果、実鉱石 ($\triangle$ 、 $\blacktriangle$) の破碎比は模擬鉱石 ($\circ$ 、 $\bullet$) より大きく、より細かく破碎されることが分かる。図 4-3-14 に模擬鉱石と実鉱石の単位時間当たりの処理体積を示す。実鉱石の処理体積は模擬鉱石と同等であった。



図 4-3-11 試験装置
(左 : HPGR 全体、右 : ロール)

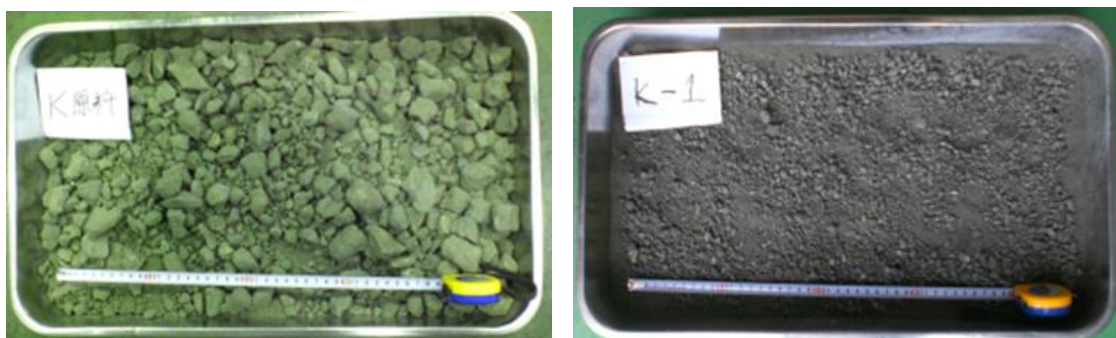


図 4-3-12 HPGR での破碎試験に供した実鉱石
(左 : 破碎前、右 : 破碎後)

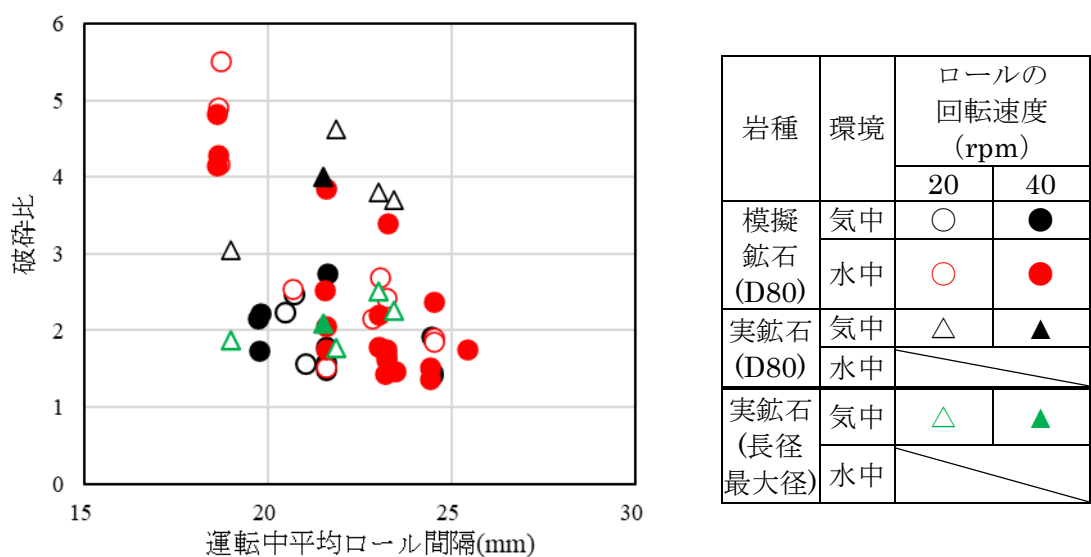


図 4-3-13 破碎比と運転中平均ロール間隔の関係
(HPGR ロール径 : 520 mm)

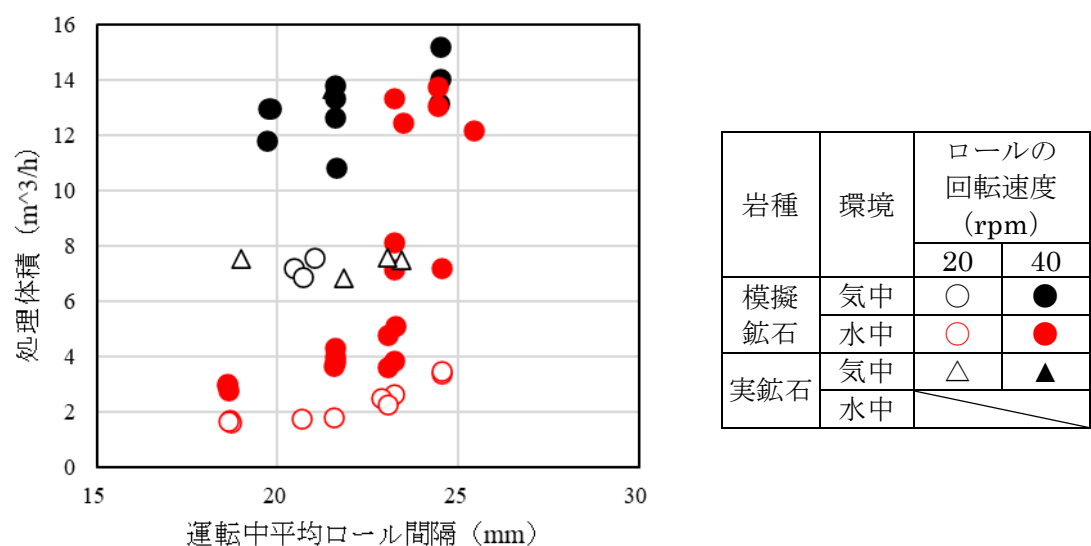


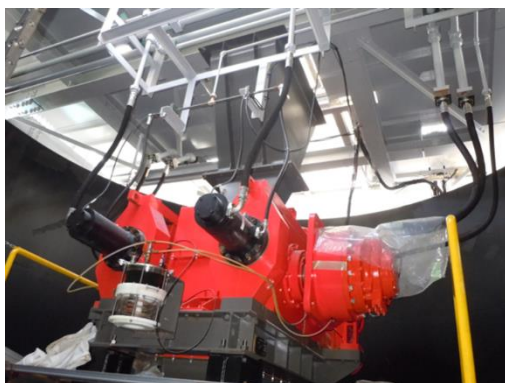
図 4-3-14 処理体積と運転中平均ロール間隔の関係
(HPGR ロール径 : 520 mm)

(2) 水中での破碎性能検討

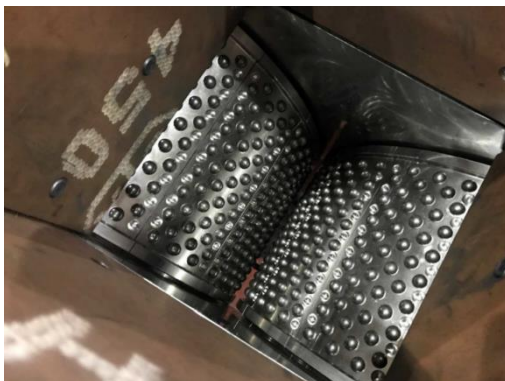
図 4-3-15 に水中試験用に開発された HPGR を示す。ロール寸法は (1) の気中試験と同じである。この装置を用い、気中試験と同じ運転条件（ロール回転速度、ロール間隔、押付圧等）での試験を実施し、処理性能への水の影響を検討した。なお、実鉱石の供給量不足及び試験後の水処理に係るコストの観点から、模擬鉱石のみを用いた。

図 4-3-13 に気中（○、●）と水中（○、●）の破碎比を示す。水中での破碎比は気中と同等又は大きく、より細かく破碎される可能性が示唆された。なお、ロール回転数による違いはほとんど認められない。

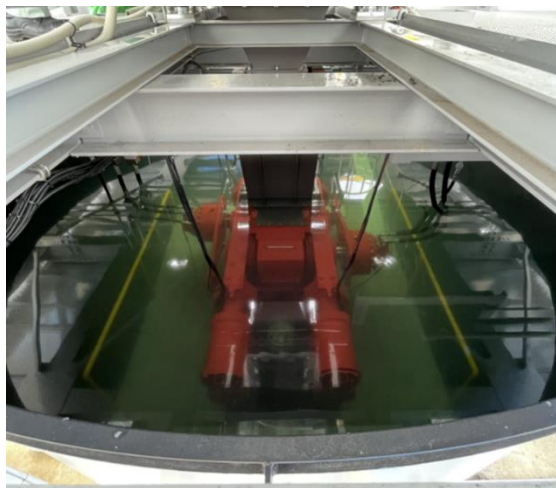
また、図 4-3-14 に気中（○、●）と水中（○、●）の処理体積の比較を示す。運転中平均ロール間隔が小さい（概ね 23 mm 未満）場合、処理量が気中の半分以下となった。原因として、間隙水圧の上昇に伴う有効応力の低下、水による粒子摩擦の低減、水流によるロール間への鉱石供給の阻害等が考えられるが、処理体積が減少するメカニズムは明らかになっていない。一方で、ロール間隔が広い（概ね 23 mm 以上）場合には気中と同等の処理体積を発揮したケースも確認された。しかし、処理量を向上できる具体的な運転条件は不明確である。



注水前の HPGR



HPGR のロール



水中での設置状況

図 4-3-15 水中試験装置

(3) 商用機の仕様・運転条件の推定の検討

初めに、破碎後の鉱石最大径を揚鉱管の閉塞リスクを低減し得る 50 mm 以下とするための条件を検討した。まず、気中でダブルロール式破碎機へ供給できる鉱石の最大径はロール径に応じて増加し、ロール径が $\phi 520$ mm であれば噛み込みが可能な鉱石の最大径は 189.4 mm と予想される（素木，1961）。次に、図 4-3-13 に示す気中での実鉱石の最大長径の破碎比（投入原料の最大長径／破碎後の最大長径）（△、▲）は、運転中ロール間隔が 18~24 mm の場合には、2.5~1.8 であった。模擬鉱石は水中では気中と同等以上の破碎比となるため、実鉱石でも同様の傾向があると仮定すると、投入原料の最大径が 125~80 mm であれば破碎後の模擬鉱石の最大径は 50 mm 以下になると予想される。この投入原料の最大径は、 $\phi 520$ mm のロールで噛み込みが可能な鉱石の最大径（189.4 mm）よりも小さいため、ロール径 $\phi 520$ mm 以上の HPGR への投入が可能である。

次に、商業生産時の揚鉱量の目標である 5,000 t/日の鉱石処理量を達成できる条件を検討した。Schönert（1991）は、ロール間での鉱石の滑りを無視した場合の気中における HPGR での処理体積を、鉱石の供給速度、ロール投影面積、ロール間隔とロール径の積で仮定している。そこで、図 4-3-16 に、処理体積／（供給速度・ロール投影面積）と操業中平均ロール間隔／ロール径の関係について、仮定から求めた値と計測値の比較を示す。なお、既製品の大型 HPGR（DHP-4027、古河産機システムズ株式会社製）を基に、商用機寸法をロール径 $\phi=1000$ mm、ロール幅 $L=685$ mm と仮定した。その結果、気中での実鉱石の処理体積／（供給速度×ロール投影面積）は商用規模予測値を上回った。（2）の水中試験の結果より、ロール間隔を調整すれば、水中でも気中と同等の処理体積となる可能性がある。しかし、水中での破碎に関して明らかになっていない点が多く、処理量を向上させる具体的な運用条件も得られていないので、単にロール径を大型化すれば目標量を達成できるかは不明確である。

現時点では、気中と水中で同等の性能を発揮し、破碎時のかさ密度がロール径 $\phi 520$ mm の実鉱石破碎時と同一値、かつロール面間隔がロール径に比例すると仮定し計算した。表 4-3-7 に商用機の仕様・操業条件の検討結果を示す。上記の処理量の検討より、ロール径 $\phi=1000$ mm、ロール幅 $L=685$ mm とし、それを基に外形寸法や重量を算出した。

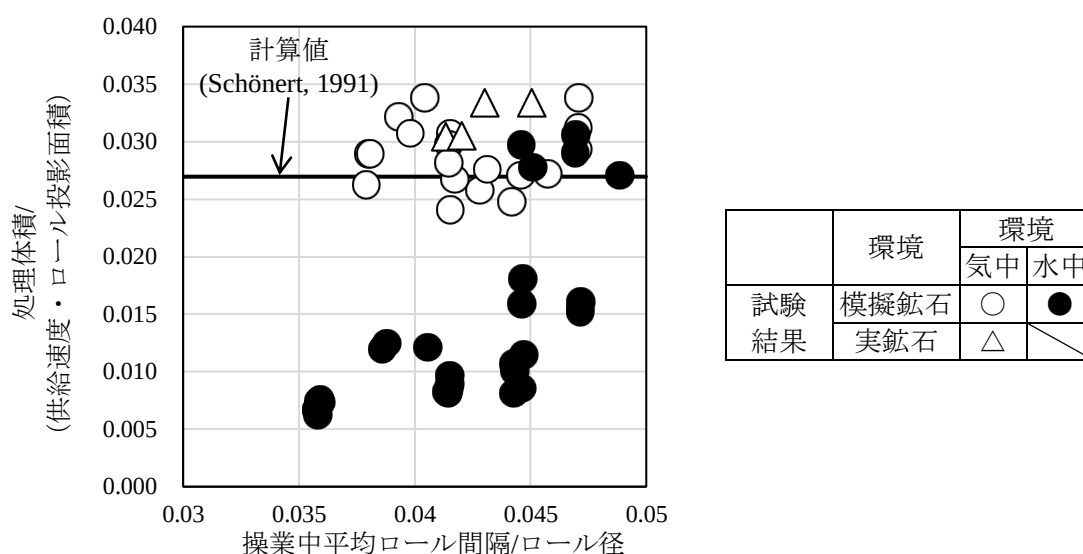


図 4-3-16 処理体積/（供給速度・ロール投影面積）と操業中平均ロール間隔/ロール径の関係について計算値と実測値の比較

表 4-3-7 実操業時の HPGR 仕様

運 転	実鉱石破碎処理量	t/日	5,000
		t/時間	208
条 件	実鉱石原料最大長径	mm	100
	実鉱石破碎産物最大長径	mm	50
H	ロール径	mm	1,000
P	ロール径幅	mm	685
G	ロール回転数	min ⁻¹	3~40
R 本 体 仕 様	横幅	mm	4,900
	縦幅	mm	6,100
	高さ	mm	5,100
	重量（油圧ユニット除く）	t	80
油圧ポンプ用電動機総合出力		kW	2,500

4-3-3-2. 今後の課題

HPGR を用いて実鉱石を破碎できることや、ロール間隔が広い場合には水中でも 5,000 t/日を達成する可能性があることを実験的に確認した。

一方で、水中で処理量の変動するメカニズムの把握は、HPGR 方式の適用に向けて残された課題であり、解決のためには引き続き検討が必要である。また、本システムは着底が前提であるので、頻繁に掘削場所を移動する採鉱計画に対応するためには、吊り下げ式のシステムの開発が必要となろう。

4-3-4. 揚鉍方法

海底熱水鉍床の商業的開発のためには、5,000 t/日の鉍石を海底から船上まで運搬（揚鉍）する必要がある。

既存の揚鉍法として、遠心多段渦巻ポンプによるワンパス式スラリー方式（以下、「多段式」という。）が挙げられる。図 4-3-17 にシステムの概略図を示す。本方式は、鉍石と海水の混合物（スラリー）を海底付近に設置した遠心多段渦巻ポンプで加圧し、揚鉍管を通じて揚鉍する方法である。揚鉍されたスラリーは鉍石分離槽で鉍石と揚鉍水に分離される。揚鉍水に含まれる懸濁物や溶存する金属イオンは生態系など海洋環境に影響を与えるため、水処理機構で揚鉍水全量进行处理し、有害物質を除去した後、深海へ圧送・放流する。

多段式では水中ポンプ内を鉍石が通過するため、ポンプの摩耗が顕著である。また、ポンプの整備のためには揚鉍管を全て揚収する必要があるため、メンテナンス性が低い。更に、膨大な量の揚鉍水进行处理する設備を海上に設けることが困難である。これらの課題を踏まえると、多段式による長時間運転は困難であり、商用化には適さないと考えられる。

そこで、第 3 期においては、これらの課題を解決でき、商用化に適したシステムを選定するため、複数の揚鉍法の有効性を比較した。

比較の対象は、複数台の単段渦巻ポンプによるワンパス式スラリー方式、水密のバッチタンクによる機械方式、循環式スラリー揚鉍方式の 3 つである。

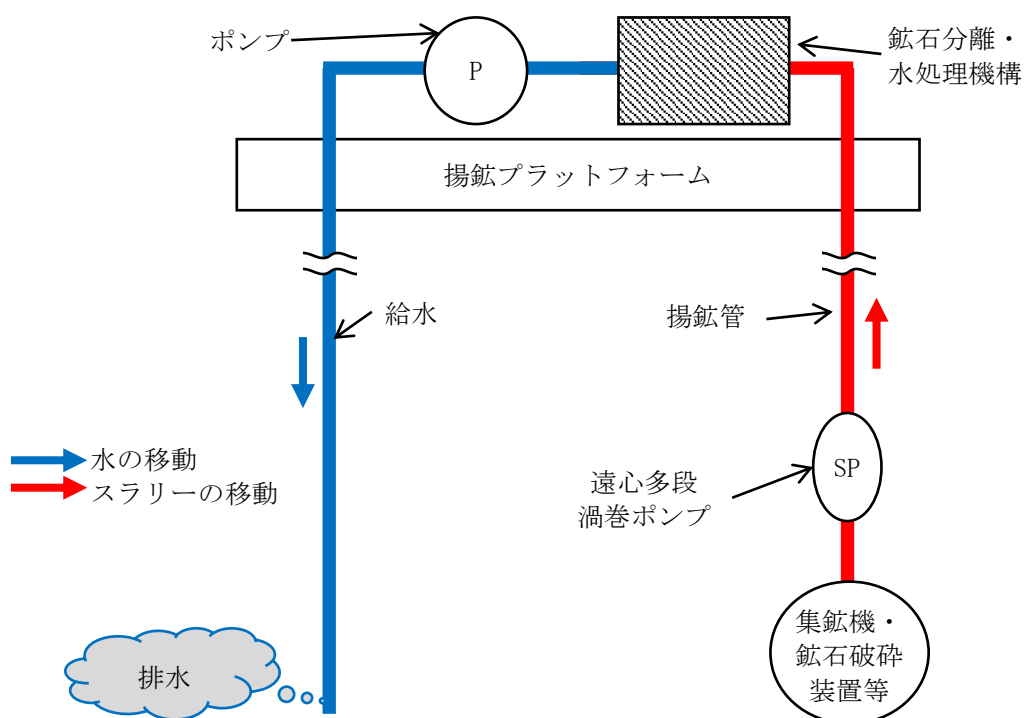


図 4-3-17 遠心多段渦巻ポンプによるワンパス式スラリー方式概念図

4-3-4-1. 複数台の単段渦巻ポンプによるワンパス式スラリー方式

図4-3-18に複数台の単段渦巻ポンプによるワンパス式スラリー方式(以下、「単段式」という。)の概念図を示す。これは、ライザー管下部～中部に複数の単段渦巻ポンプを設置し、ポンプ内部を通過したスラリーを揚鉦するものである。単段式の場合ポンプ単体の構造は、多段式に比べて簡素化されるが、ポンプや駆動機並びに配管等が増加するため、ポンプユニット(ポンプ、モーター、制御機構等を合わせたユニット)は複雑化する。そのため、図4-3-19のように1台のモーターで2台のポンプを動かすタンデム型を導入するなどして、単純化を行うことが必要である。

単段式では、水中に設置されたポンプ内を鉦石が通過するため、多段式の課題である耐摩耗性やメンテナンス性の低さは解決されていない。また、処理すべき鉦水の水の量も多段式と変わらないため、水処理機構設置の課題も残る。以上より、単段式の商用化は難しいと評価した。

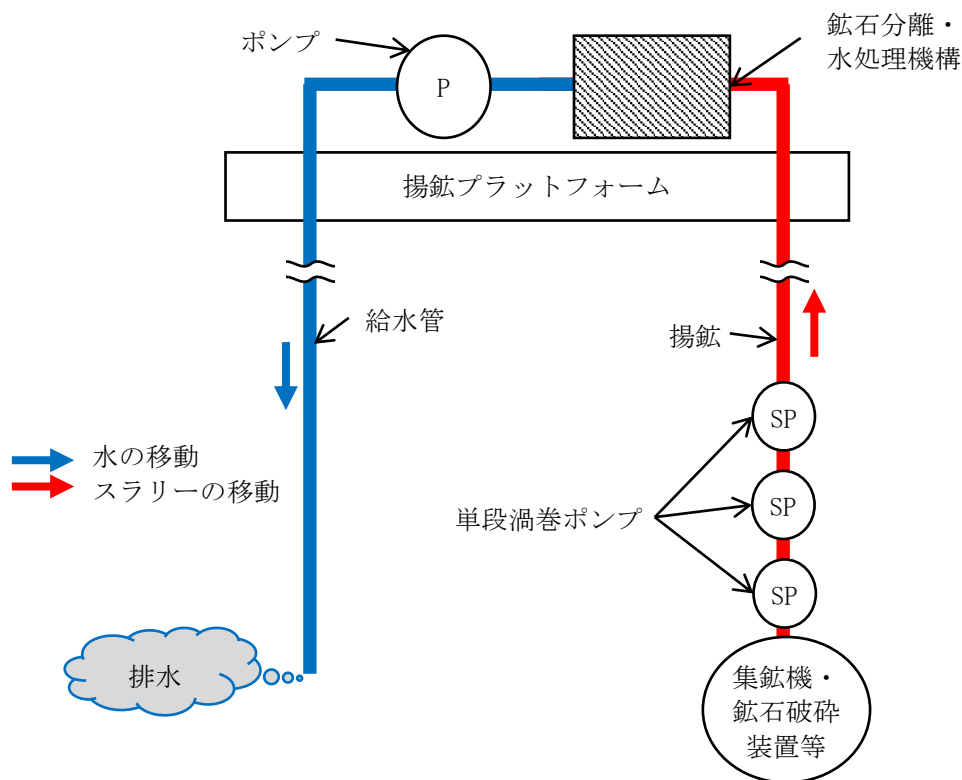


図 4-3-18 複数台の単段渦巻ポンプによるワンパス式スラリー方式概念図

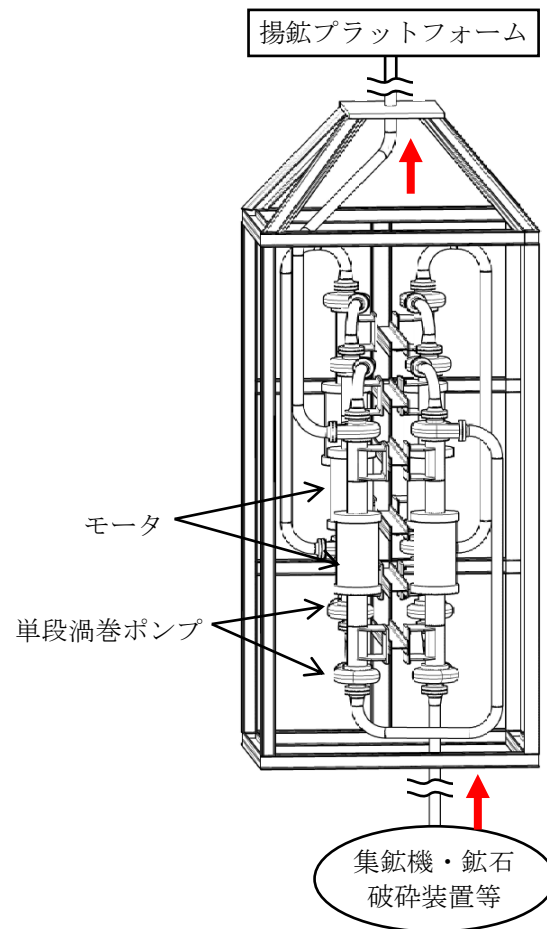


図 4-3-19 タンデム型でのポンプ配置案

4-3-4-2. 水密のバッチタンクによる機械方式

図 4-3-20 に水密のバッチタンクによる機械方式（以下、「機械方式」という。）の概念図を示す。機械方式ではスラリー輸送により揚鉱するのではなく、海底で図 4-3-21 に示すようなバッチタンクに鉱石を充填し、それを船上クレーンにより揚収する。また、タンクは水密とすることで、揚収中の粒子や揚鉱水の流出を防止する。

揚収の際に、鉱石がポンプのように可動部と接触しないため、摩耗の影響は極めて少ない。また、揚収するごとにバッチタンクや揚収用ケーブルを含む全ての揚鉱設備がプラットフォーム上に戻るため、メンテナンスが容易である。また、スラリー方式より揚鉱水が少なく、水処理機構の簡素化が可能である。

しかし、海底熱水鉱床には凹凸や斜面が多く、直径 8 m×高さ 7 m の水密タンクの耐圧設計・製作、調達の不確実性があるほか、これを安定的に着底させることは困難である。また、船上にて大重量のタンクを揚重するため、揚鉱管等が固定されているスラリー方式に比べて、海気象により稼働性が低下しやすい。従って、機械方式の商用化は難しいと評価した。

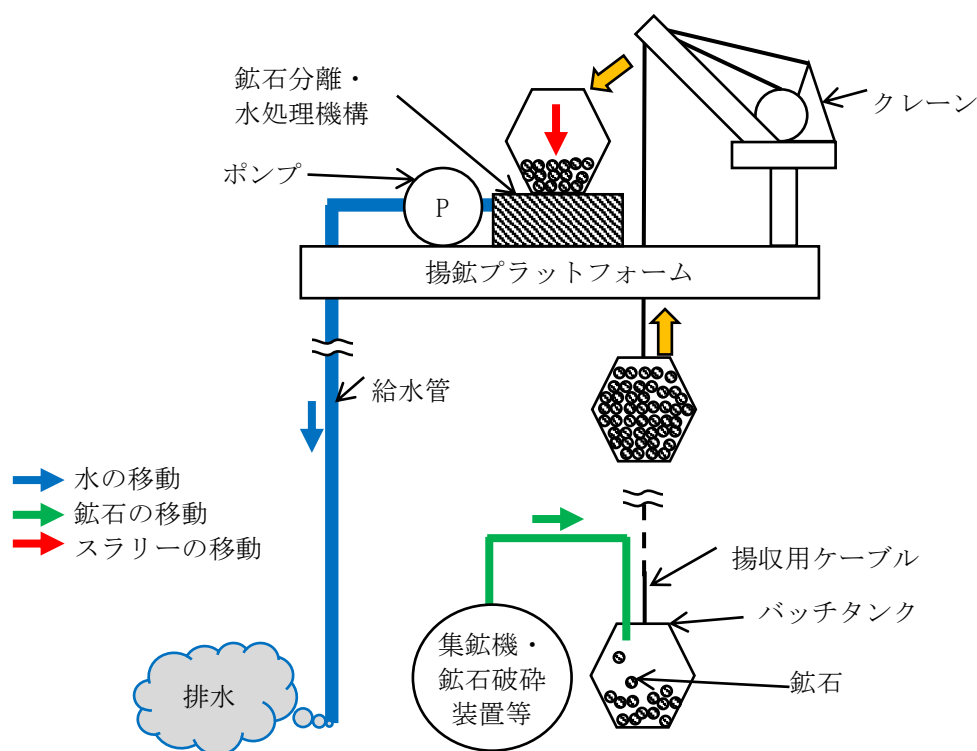


図 4-3-20 水密のバッチタンクによる機械方式の概念図

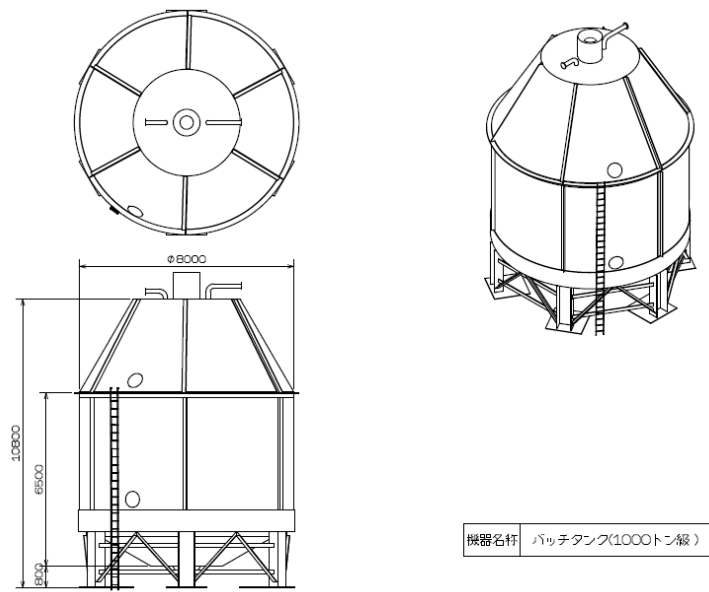


図 4-3-21 バッチタンク概念図

4-3-4-3. 循環式スラリー揚鉍方式

図 4-3-22 に循環式スラリー揚鉍方式（以下、「循環方式」という。）の概念図を示す。
揚鉍は以下の手順で行われる。

- ① 船上に配置された高圧ポンプにより、船上から海底面付近の揚鉍管先端の鉍石投入装置を経由して船上へ戻る配管内を循環する流れを形成する。
- ② 鉍石投入装置を経て鉍石を配管ループ内に投入する。
- ③ 鉍石投入装置で循環流へ投入された鉍石は、海水と混合されたスラリーとして船上まで移送される。
- ④ 鉍石は船上の鉍石分離装置で回収され、鉍石を分離した後の水は高圧ポンプで再び海底面付近へ圧送される。
- ⑤ ②～④を繰り返す

循環方式では給水管と揚鉍管が閉鎖管路を形成し、鉍石分離装置のすぐ下流にポンプを設置しているため、ポンプ内を鉍石が通過せず、摩耗を低減することが可能となる。また、ポンプは船上に設置しているため、ポンプをメンテナンスする度に揚鉍管を揚収する必要がない。そのため、メンテナンス性が向上し、メンテナンスコストの削減が期待される。

揚鉍水の大半が放流されずに循環・再利用されるため、ワンパス式に比べて揚鉍水処理量は著しく少ない。そのため、水処理機構が簡素化され、船上で処理できるので環境負荷が小さい。

以上のことから、生産性や環境親和性が向上するため、循環方式は他の揚鉍方式より商用化の可能性が高いと評価した。

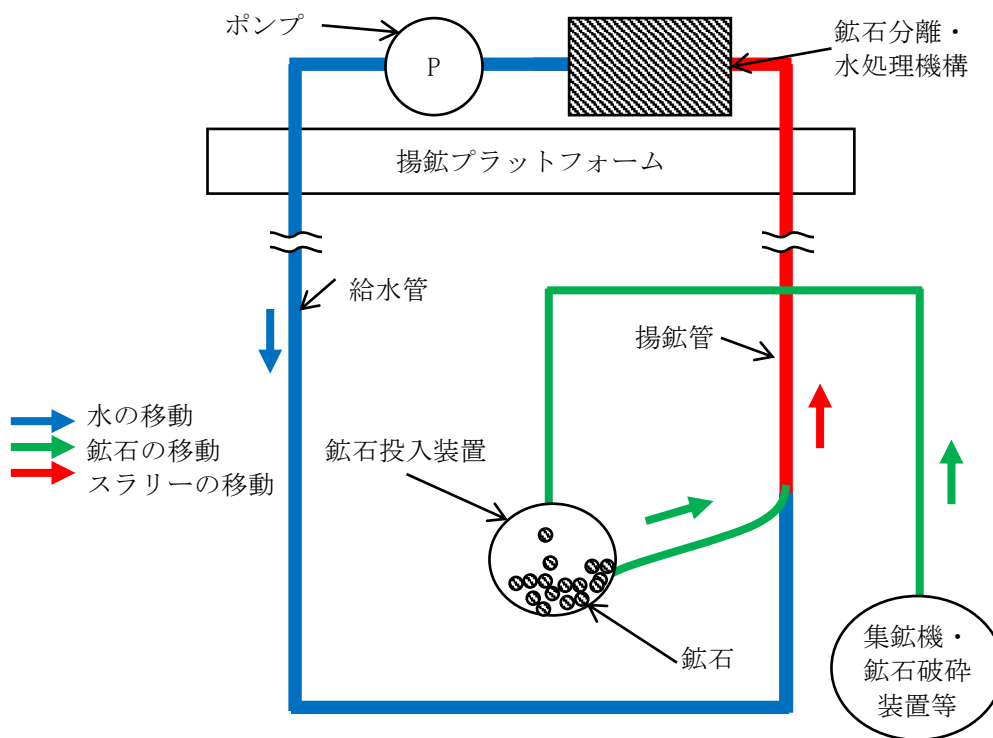


図 4-3-22 循環式スラリー揚鉬方式の概念図

4-3-4-4. 今後の課題

第 2 期に実施した採鉬・揚鉬パイロット試験で用いられた遠心多段渦巻ポンプによるワンプラス式スラリー方式は、ポンプの摩耗や揚鉬水処理など、商業化を妨げる課題があることが指摘された。そのため、これらの課題を解決し得る循環式スラリー揚鉬方式を提案した。

今後は、装置の高負荷及び長時間運転時の耐久性の検証等を通じて、適用性や信頼性の向上させる取組を継続する必要がある。また、本方式では循環水の pH の低下が装置に悪影響を与える可能性が指摘される。そこで、pH の低下対策を 4-3-6. の一部に述べる。

4-3-5. 鉍石投入装置

揚鉍量 5,000 t/日を達成するためには、揚鉍管内にスラリー濃度 10 vol%以上で鉍石を投入する必要があると見込まれる。また、揚鉍管の圧損は約 7 MPa（揚鉍管長：2,000 m、揚鉍管内径：204.8 mm、平均流速：5.27 m/s と仮定）と予測されるため、環境水压下の海底から揚鉍管内に鉍石を投入するためには、圧損以上の加圧力で鉍石を押し込む機構（鉍石投入装置）が必要となる。

これらの課題を解決するため、重力式とピストンポンプ式の 2 つの鉍石投入装置を検討した。検討の過程では、試験装置を製作し、試験を実施して性能を評価した。

4-3-5-1. 重力式

図 4-3-23 に重力式の鉍石投入装置の概略図を示す。本装置は流路切替装置、貯留タンク、合流部、給水管や揚鉍管をつなぐ配管・弁（充填、給水、排水、鉍石投入）で構成されている。集鉍機・浚渫装置から送られてきた鉍石は、流路切替装置を経由して貯留タンクに送られる。その後、表 4-3-8 に示す貯留タンクへの鉍石の供給及び払出の手順を経て、鉍石は揚鉍管に投入される。貯留タンク内の鉍石は、鉍石投入弁が開く時（手順 3）に給水と混合しながら鉍石払出装置により機械的に合流部へ送り出され、合流部内では水流と鉍石の自由落下により循環流へ投入され揚鉍管へ流送される。一連の手順を 3 つのタンクで間断無く行うことにより、揚鉍管内への連続的な鉍石投入を可能とする。

重力式は新規技術であるため、流路切替装置や合流部など各種要素技術を開発し、その後、全体を組み合わせた鉍石投入装置総合試験により重力式の有効性を検証した。また、得られた試験データや制御定数などを基に、商用機の概念設計を行った。

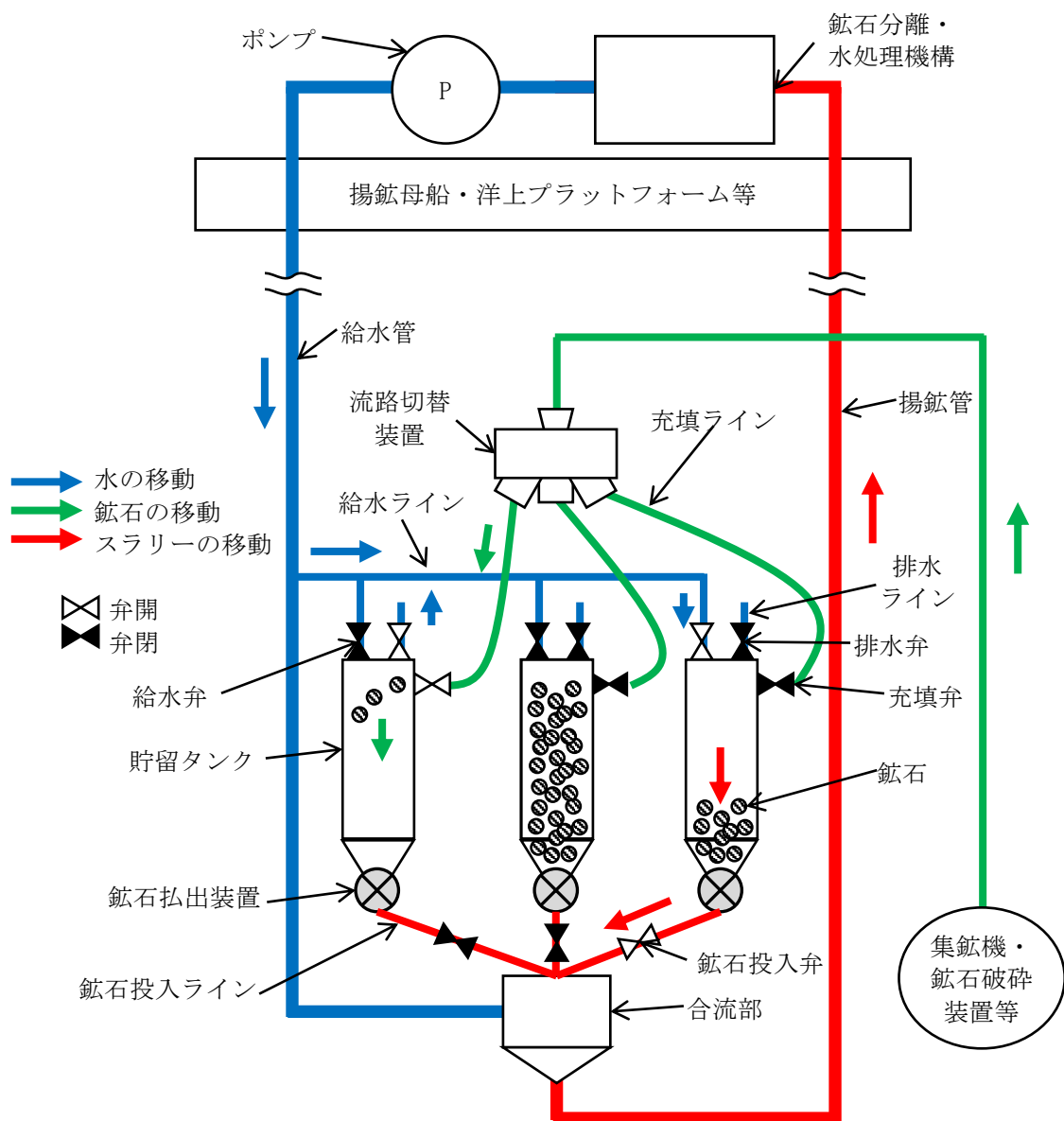


図 4-3-23 重力式の鉱石投入装置の構成

表 4-3-8 重力式の鉱石投入装置の作動手順

手 順 *	弁の開閉状態				貯留 タンク内 圧力	事象
	給水弁	排水弁	充填弁	鉱石 投入弁		
1	閉	開	開	閉	環境圧	・ 充填ラインから貯留タンクへ鉱石を供給 ・ 貯留タンク内の水（給水管由来）を排出
2	閉	閉	閉	閉	環境圧	・ 貯留タンク内は鉱石で充填
3	開	閉	閉	開	給水管 と同じ	・ 貯留タンク内の鉱石が自由落下により、払 出装置経由で合流部に到達 ・ 合流部で鉱石が給水管由来の循環水と合 流し、揚鉱開始

*3つの貯留タンクが順番に手順1・2・3を行うことで、連続的に揚鉱

(1) 要素技術検討

1) 流路切替装置

図 4-3-24 に開発した流路切替装置を示す。陸上の他分野で用いられる 3 方ボール弁のような流路切替装置は弁内の構造が複雑であり、ボール摺動部の噛み込み・摩耗によるスラリー流中の切替不可等の課題がある。そのため、より構造が単純で摺動部の噛み込み・摩耗のリスクが低いと予想される往復動型の切替装置とした。しかし、スラリー流中の流路切替可否は検証が必要なため、図 4-3-25 の試験設備を製作し、流路切替試験を実施した。スラリーを流しながら、30 秒ごとに流路を切り替え、圧力などを計測した結果、流量、スラリー濃度、圧力は概ね一定であったので、スラリー流中の流路切替は可能であり、鉱石投入装置総合試験へ適用できると判断した。

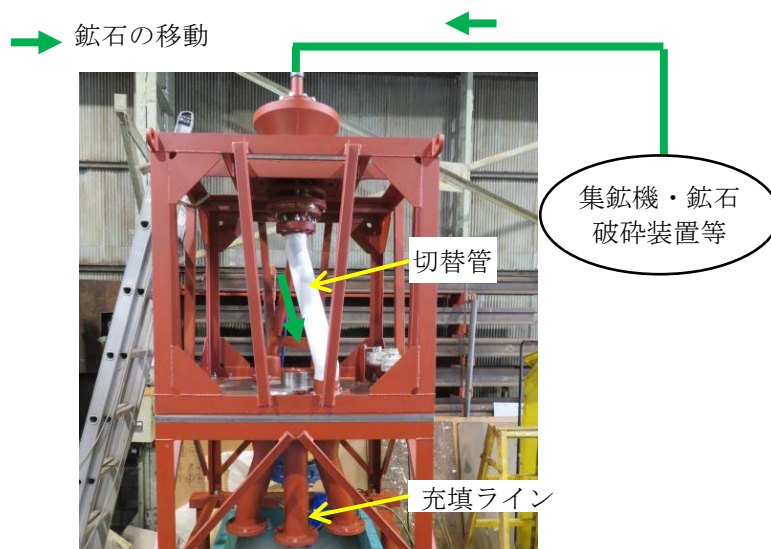


図 4-3-24 流路切替装置

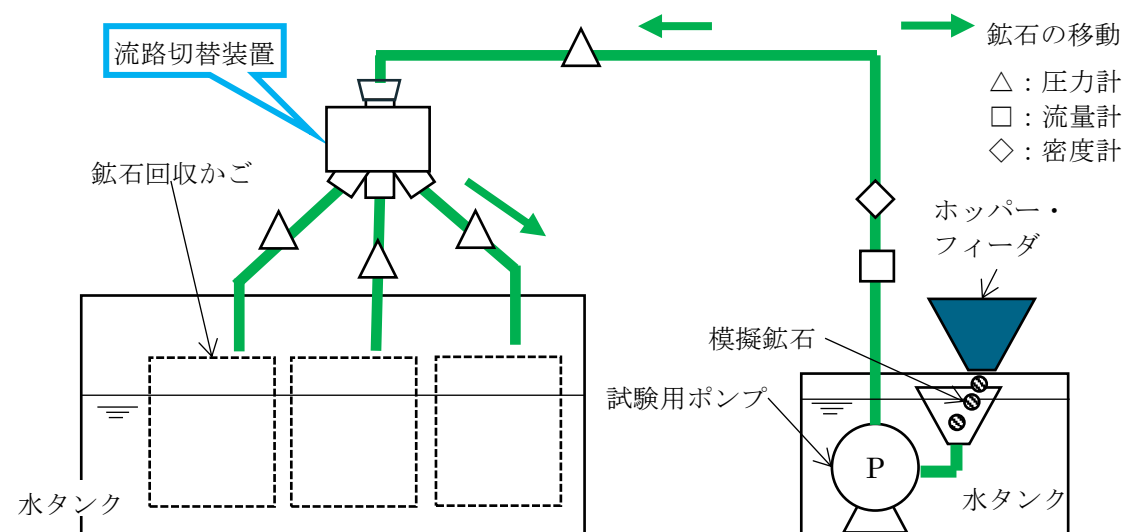


図 4-3-25 流路切替試験装置概略図

2) スラリー用弁

図 4-3-23 に示すとおり、貯留タンクごとに 4 つのスラリー用弁（給水弁、排水弁、充填弁、鉱石投入弁）が必要である。そこで、陸上においてスラリー用に広く用いられるナイフゲート弁、ピンチ弁、プレート弁の 3 つを机上で比較・検討した。表 4-3-9 に示す結果から、スラリー濃度や粒径が大きいスラリーに使用した場合に損傷のリスクが低いと考えられるプレート弁を選択した。

図 4-3-26 に製作したスラリー用弁を示す。本弁は、口径が 250A（商用機の 1/2 スケール）、設計圧力が 7.3MPa である。

表 4-3-9 スラリー用弁の比較

	ナイフゲート弁	ピンチ弁	プレート弁
概要	弁体がフラットで板厚の薄い仕切弁で流路を遮断する	ゴム製の流路を押しつぶすことで、流路を遮断する	弁体がフラットで板厚が厚い仕切り弁で流路を遮断する
メリット	- スラリーでの実績が豊富 - 弁体がフラットで、鉱石などの噛みこみリスクが低い	- 鉄鉱石製錬スラリーで実績がある - 弁体への鉱石の噛みこみリスクがない	- 石炭輸送での使用実績がある - 弁体がフラットで、鉱石などの噛みこみリスクが低い - 弁体が厚く、鉱石の衝突での損傷リスクが低い
デメリット	弁体が薄く、鉱石の衝突で損傷するリスクがある	流路がゴム製であり大水深では圧縮するため、深海での使用不可	重量・体格が比較的大きくなる
評価	不適	不適	好適



図 4-3-26 製作したスラリー弁

3) 鉬石払出装置

合流部や揚鉬管内でのスラリー濃度の変動は閉塞のリスクを高めるため、鉬石を一定量で払い出すように合流部上流に鉬石払出装置を設置する。そこで、類似用途での実績が豊富で、装置が比較的コンパクトなロータリーフィーダとスクリーフィーダの適用性を実験的に検討した。

図 4-3-27 に払出試験の概略図を、図 4-3-28 に試験に使用した払出装置をそれぞれ示す。貯留タンク下部に払出装置（ロータリーフィーダ又はスクリーフィーダ）を取り付け、閉鎖管路内へ鉬石を投入した。なお、装置は鉬石 5,000 万 t/日の揚鉬を想定した場合の商用機の 1/2 のスケールである。払出試験の結果、ロータリーフィーダ、スクリーフィーダとも概ね定量での払い出しが可能と判明したが、スクリーフィーダはロータリーフィーダに比べて消費電力や摩耗量が多かった。そのため、次項の鉬石投入装置総合試験では、鉬石払出装置としてロータリーフィーダを用いることとした。

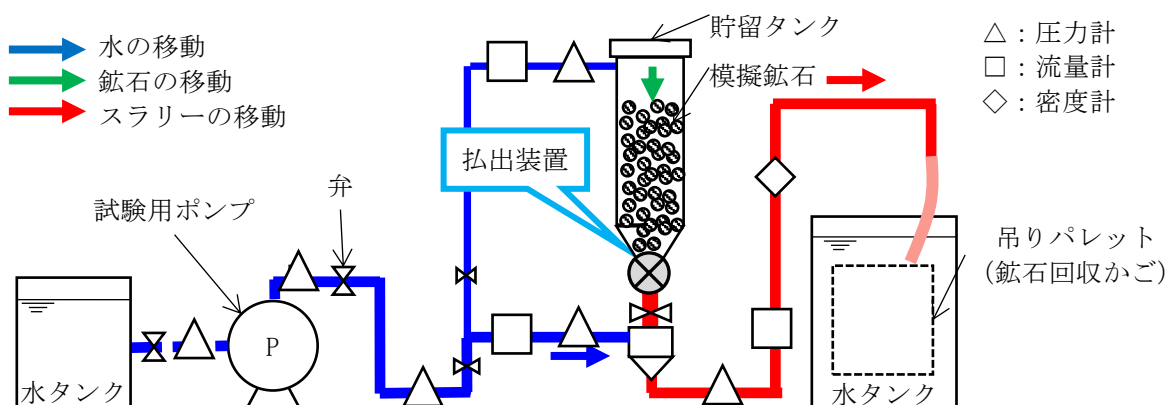


図 4-3-27 払出試験装置概略図

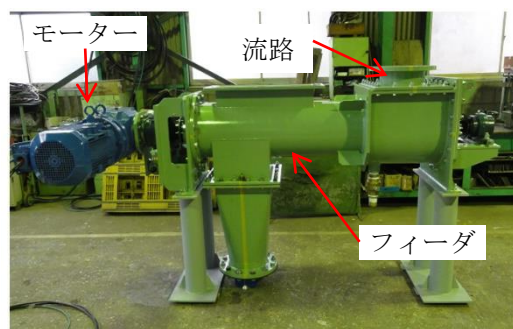
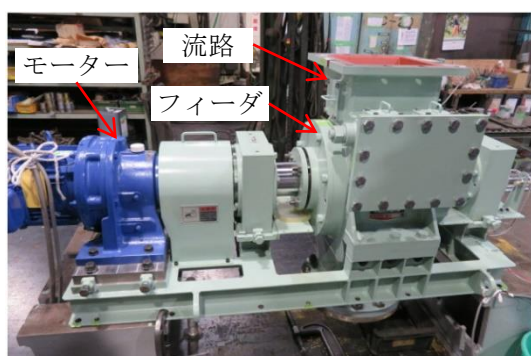


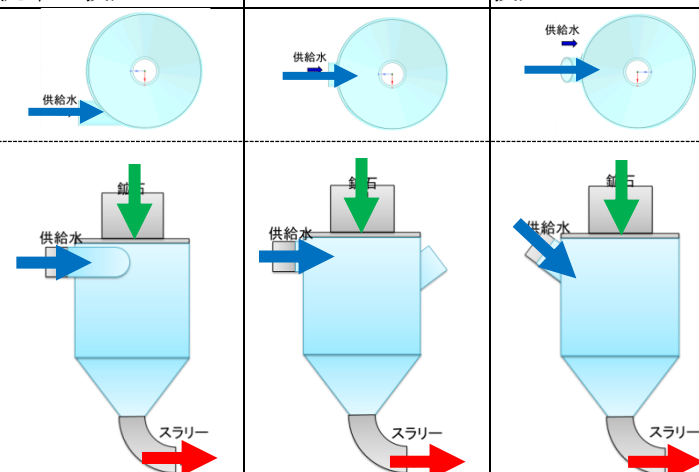
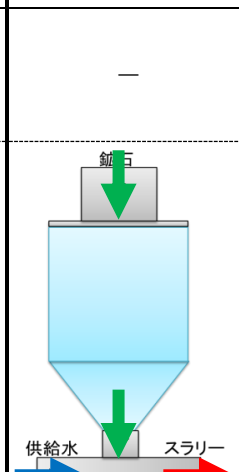
図 4-3-28 払い出し装置
(左：ロータリーフィーダ、右：スクリーフィーダ)

4) 合流部

揚鉬管と鉬石投入装置を単純な T 字管で接続すると、接続部の流路面積は揚鉬管側の配管径に依存するため、スラリー濃度が制限され、目標のスラリー濃度 10 vol% を達成できない懸念がある。そこで、貯留タンクから揚鉬管の間に、給水と鉬石をできる限り均一に混合し、一定濃度で払い出せる機能を有する合流部の設置を検討した。表 4-3-10 に合流部形状の比較を示す。

図 4-3-29 に合流部の検証試験（合流試験）装置を示す。貯留タンクから供給される模擬鉬石を合流部で給水と混合し、揚鉬管へ払い出す際のスラリー濃度を計測した。なお、装置は商用機の 1/2 スケールである。その結果、表 4-3-10 左の旋回型（合流部形状：エルボ型、給水管からの流れ方向：水平、旋回流：あり）が最もスラリー濃度を高めることができたため、次項の鉬石投入装置総合試験では、旋回型の合流部とした。

表 4-3-10 合流部形状の比較

合流部形状	エルボ型			T 字管型
給水管からの流れ方向	水平	水平	斜め下方	—
旋回流	あり	無し	無し	—
特徴	供給水による旋回流を形成し、流れに乗せた鉬石を循環流中に投入	供給水と鉬石を混合させ、これを循環流中に投入	下向きの流れを作り、流れに乗せた鉬石を循環流中に投入	自由落下で循環流中に鉬石投入
概略図 上：上面 下：側面				

青矢印：給水管からの供給水の流れ、緑矢印：鉬石の流れ、赤矢印：スラリーの流れ

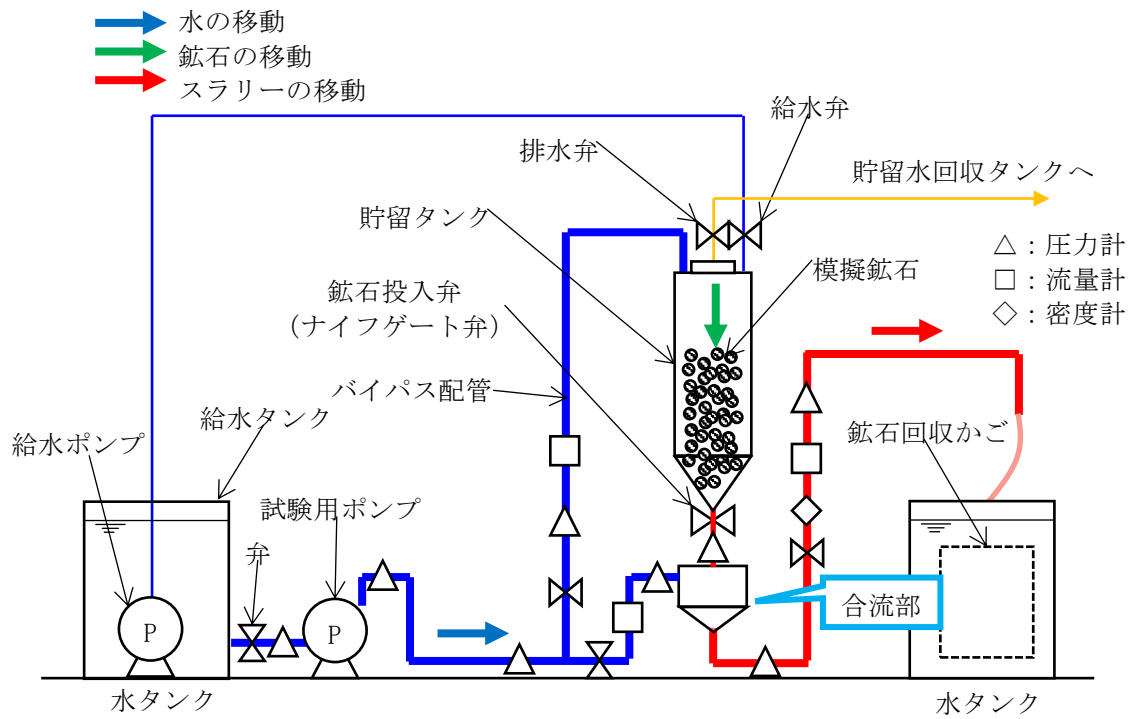


図 4-3-29 合流試験装置概略図

(2) 鉍石投入装置総合試験

(1) で検討した各要素技術を組み込んだ試験装置を製作し、貯留タンクへの鉍石供給から払い出し、揚鉍管への鉍石投入までの一連の動作を、組み込んだ制御プログラムで制御することにより、支障なく装置が作動し鉍石を連続的に払い出すことができるかどうかを確認する試験を実施した。

図 4-3-30 に試験装置の概略図を、図 4-3-31 に外観を示す。本試験における鉍石投入装置は商用機の約 1/2 スケールとし、貯留タンク、払出装置及びスラリー用弁は 1 系統分を対象とした。(払出装置の流路 A・B・C のうち、B のみが貯留タンクと接続)

図 4-3-32 に試験結果の例を示す。商用機での操作において想定される条件下で、スラリー濃度 10 vol%以上での安定的な鉍石投入が可能であることを確認した。

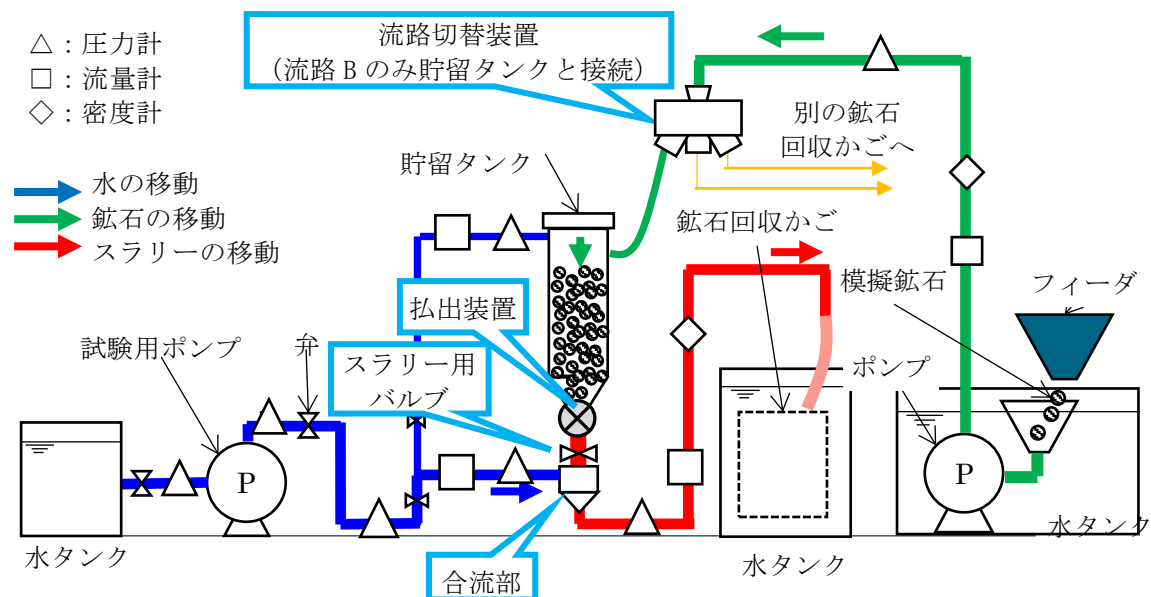


図 4-3-30 鉍石投入総合試験装置概略図

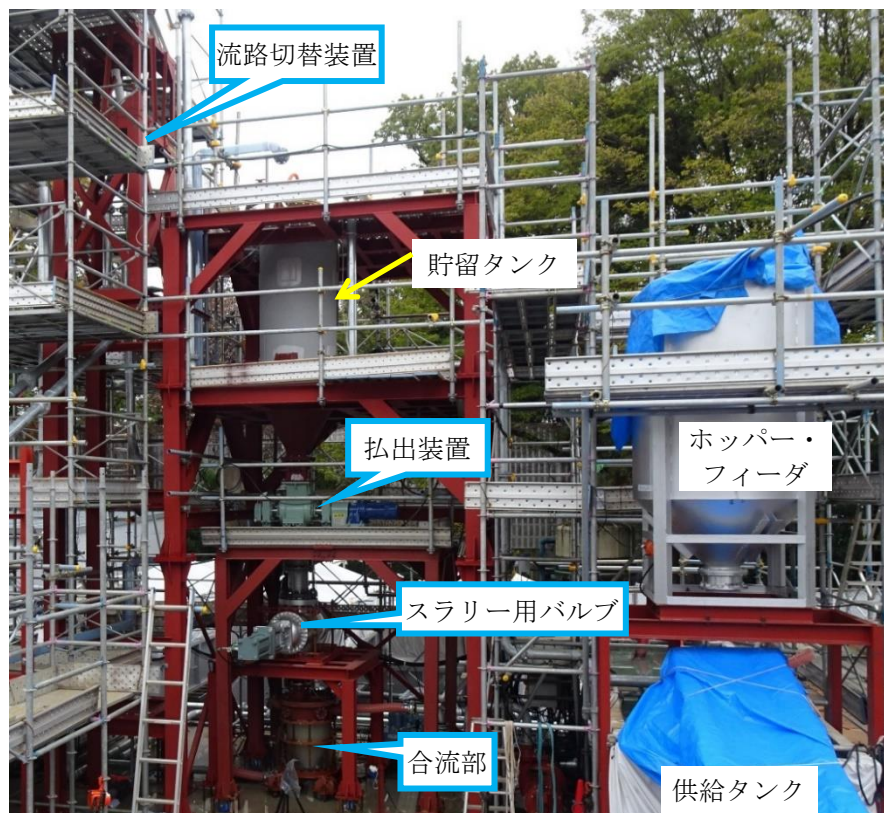


図 4-3-31 鉬石投入総合試験装置外観

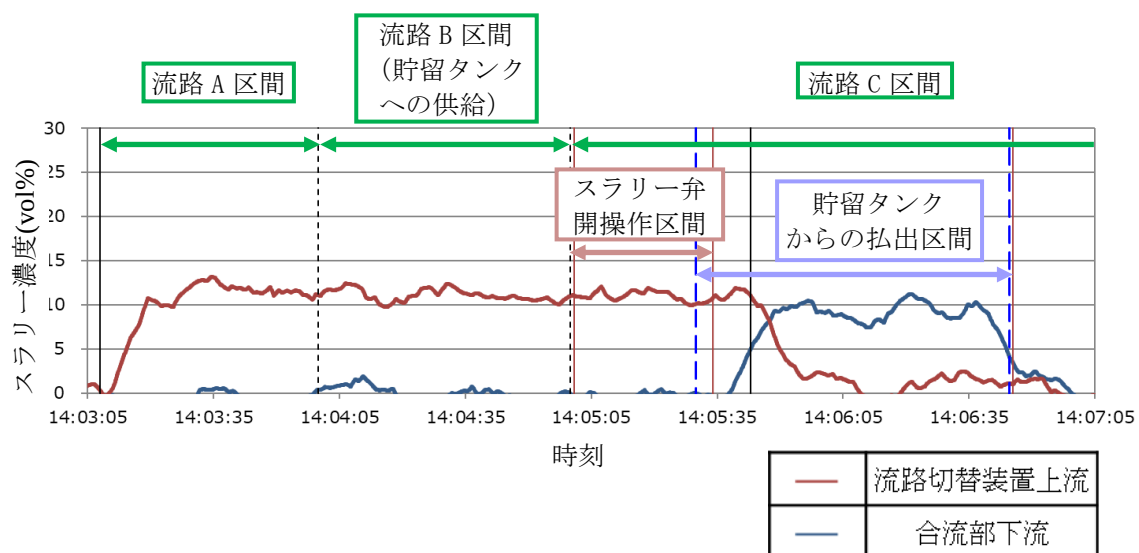


図 4-3-32 鉬石投入総合試験の試験結果例

(3) 制御システム検討

第2期では、採鉱・揚鉱パイロット試験及び実操業時の円滑な揚鉱システムの運転制御を達成するために、水中ポンプを用いたワンパス式スラリー揚鉱システムの商用機シミュレータを開発した。第3期には、船上ポンプを用いた循環式スラリー揚鉱システムの開発に着手したため、当該システムの試験用シミュレータを新たに開発した。更に、循環式スラリー揚鉱システムの構成機器として開発した鉱石投入装置を試験用シミュレータに組み込み、商用機シミュレータを開発した。この商用機シミュレータに鉱石投入総合試験などで得られた圧力損失特性等の試験結果を反映し、水深 1,600 m の条件における連続運転時及び異常発生時の運転制御を評価した。

商用機シミュレータを使用した検討により、商用条件において循環式スラリー揚鉱システムが成立し得ることを確認した。また、異常状態を模したシミュレーションにより、循環式スラリー揚鉱システムのリスクを抽出するとともに、リスクへの対応策を提案した。

商用機シミュレータを使用した制御検討の結果から得た対応策の一例として、鉱石投入装置の貯留タンクの弁切替について、当初は一定の時間ごとに開閉する定時弁切替制御としていたが、タンクオーバーの発生や貯鉱量不足が推定されたため、貯留タンク内の鉱石量検出信号による弁切替制御に変更したことが挙げられる。

(4) 商用機概念検討

検討した鉍石投入装置の商用機概念図を図 4-3-33 に示す。ここでは、想定される船上設備の制約から、商用機における鉍石投入装置の高さ寸法を 20 m 以内とするように検討を行った。この制約からスラリー用弁と合流部をつなぐ配管の角度は 60° となり、鉍石投入総合試験装置の 30° より鈍角になっている。この変更は、鉍石の流動性に対して不利になる可能性があるため、商用機の配置決定に向けては解析等を活用した詳細検討が必要である。

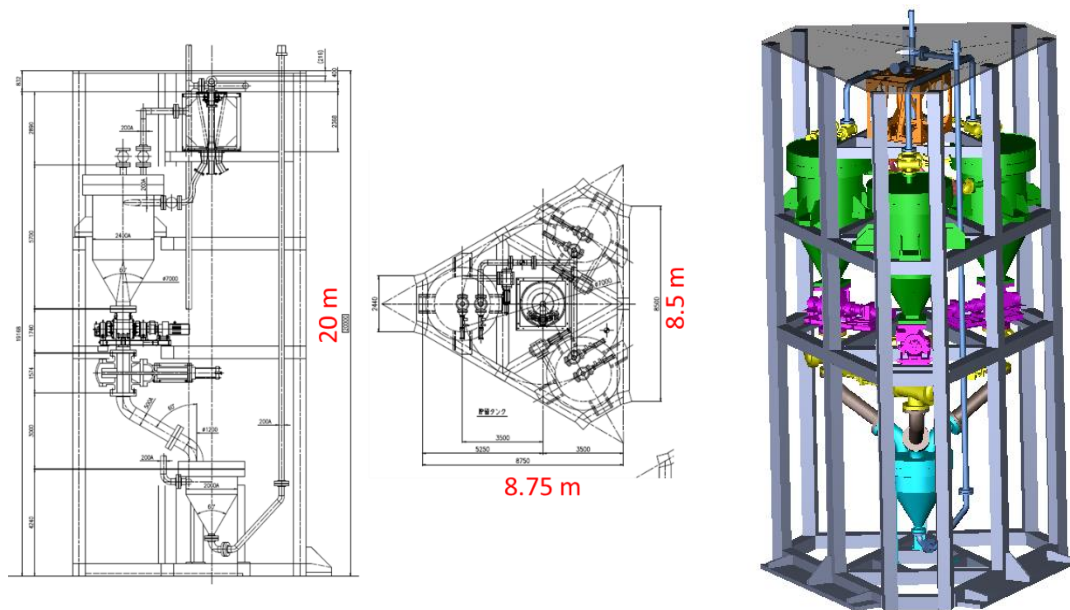


図 4-3-33 商用機の鉍石投入装置

4-3-5-2. ピストンポンプ式

ピストンポンプ式の鉱石投入装置の構成を図 4-3-34 に、作動原理を図 4-3-35 に示す。本装置は、2 本のピストンで交互にスラリーを押し出すことで、揚鉱管内の循環流中への連続的な吐出を可能とする。本方式は、陸上においてセメントや汚泥等のスラリー輸送に広く用いられるが、深海のような高圧下でのスイング弁切替や、汚泥等に比べて粒度の粗い海底熱水鉱床鉱石の吸引吐出、循環水中へのスラリーの吐出等には実績がなく、要素ごとの検討を要した。また、流動性の低いスラリーの吸引吐出性能を向上させるために、ピストンポンプの傾斜配置の導入が有効と予想した。

そこで、高圧下での切替及び逆流防止が可能な弁、ピストンポンプに適した傾斜角度を検討した。次に、検討結果を基に循環式スラリー流送試験設備を製作し、模擬鉱石や実鉱石を使用してピストンポンプの吸込性能及び循環流れ中へのスラリーの吐出性能を実験的に検討した。最後に、これらの検討結果を基に、商用機のプロトタイプ設計を行った。

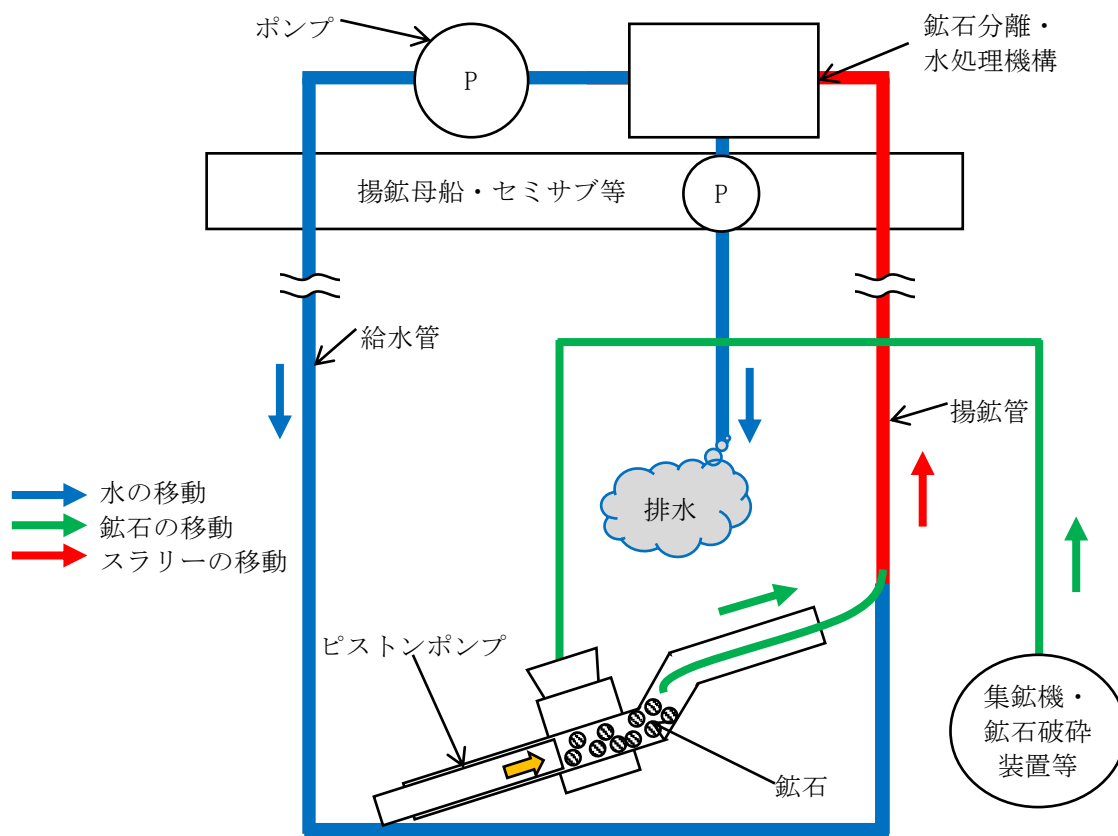


図 4-3-34 ピストンポンプ式の鉱石投入装置の構成



図 4-3-35 ピストンポンプ作動原理
(古河産機システムズ株式会社)

(1) 高圧下で切替可能・逆流防止可能な弁の検討

初めに、深海の高圧下でも 2 本のピストンで交互にスラリーを連続的に押し出せるように、逆流防止機能を備えたスイング弁を開発した。

図 4-3-36 に高圧下での弁切替性能を検証する試験設備を示す。スイング弁に対し、プランジャーポンプを用いて深海相当の圧力を載荷し、その際の切替性能を実験的に検討した。その結果、高圧下でもほぼ漏れを発生せずに弁の切替が可能であることが確認された。

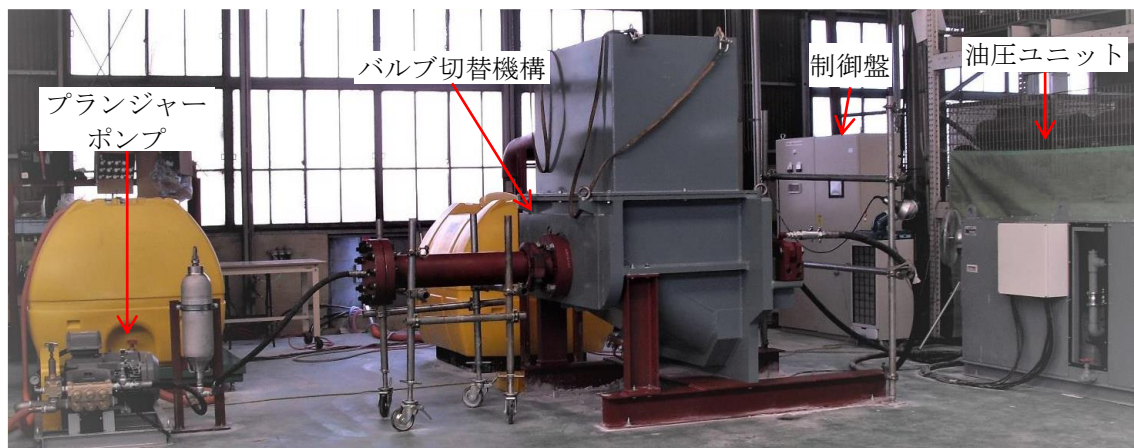


図 4-3-36 高圧下でのスイング弁切替試験設備

(2) 傾斜配置での鉱石の吸引吐出性能検討

図 4-3-37 に傾斜配置したピストンポンプの吸引吐出試験装置概略図を、図 4-3-38 に試験装置の外観をそれぞれ示す。傾斜は $0\sim 45^\circ$ とし、吸引したスラリーは気中へ吐出した。また、模擬鉱石として HPGR で破碎した石灰岩及び砂岩を使用した。

図 4-3-39 に試験結果を示す。砂岩を用いた結果（図中△、▲）から、ピストンポンプの傾斜が大きくなるほど吐出されるスラリー濃度が高く、吸引性能が向上したことを確認した。しかし、傾斜が大きくなると装置の重心が上がることで転倒のリスクが高まるため、両者のバランスを考慮して、最適傾斜を 30° とした。

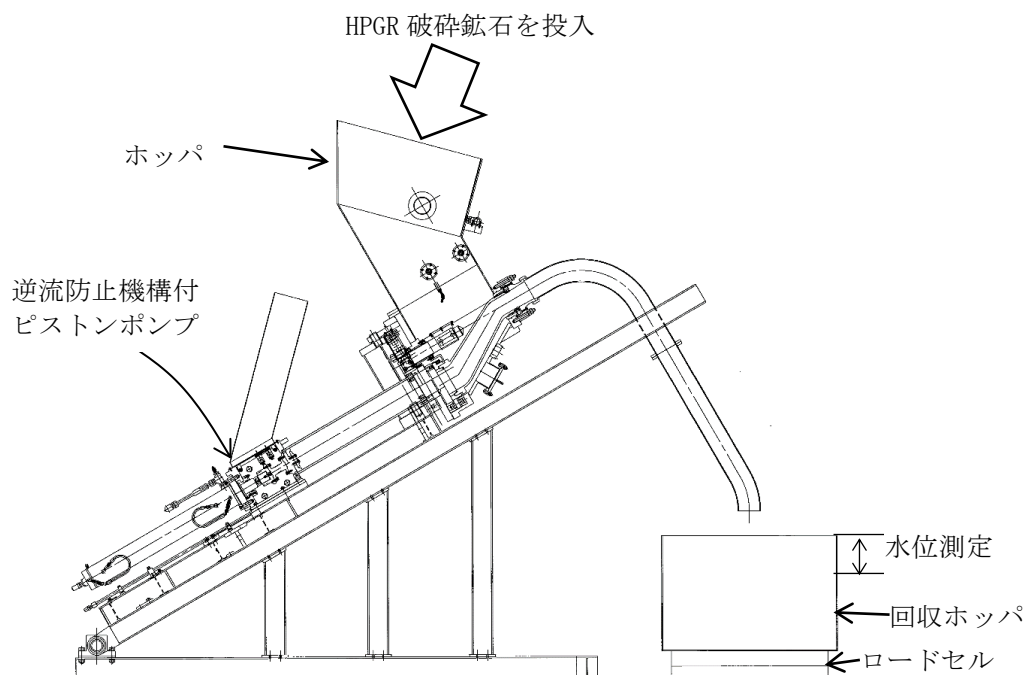


図 4-3-37 傾斜配置したピストンポンプの吸引吐出試験装置概略図



図 4-3-38 傾斜配置したピストンポンプの吸引吐出試験装置の外観
(左：ポンプ側、右：吐出口側)

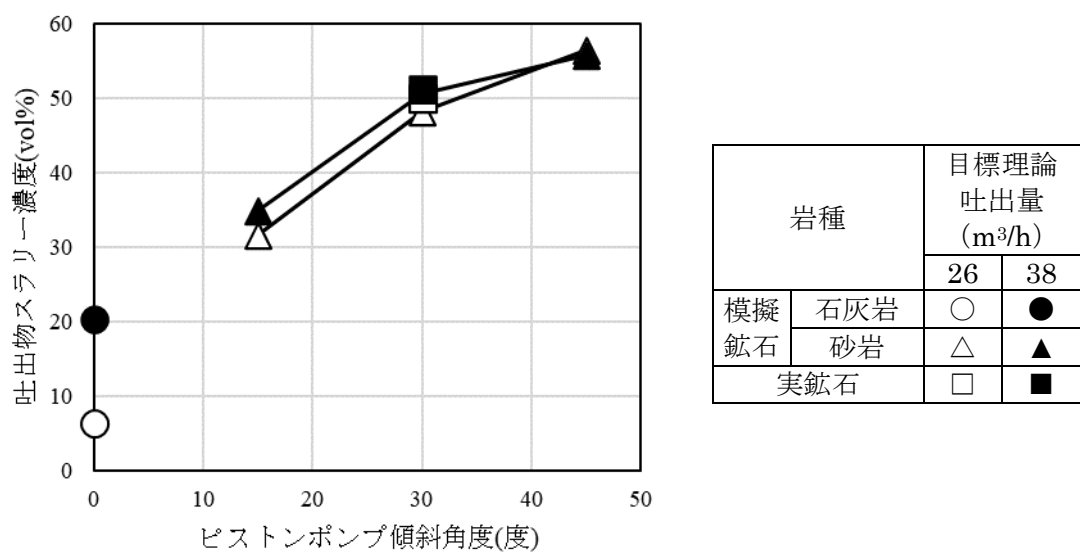


図 4-3-39 傾斜配置したピストンポンプの吸引吐出試験結果

(3) 循環流れ中への鉍石の吐出性能検討

図 4-3-40 に循環式スラリー流送試験設備を示す。これは、試験用ポンプにより循環流れを形成し、ピストンポンプを用いてその中に模擬鉍石を投入するものである。なお、配管径は商用機の揚鉍管の 1/2 スケールである。また、スラリーの閉塞防止策として、ピストンポンプから揚鉍管への接続管を下向きにし、ピストンポンプから循環配管までの流路断面積を一定とするため、異形レジューサで接続した。

図 4-3-41 に循環式スラリー流送試験の結果を示す。なお、スラリーの体積濃度は、水及び模擬鉍石の密度の仮定値（それぞれ 1.00 g/cm³ と 3.13 g/cm³）及び密度計でのスラリー密度の計測値から算出した。その結果、循環流れの中へ、スラリーの体積濃度が平均 10 vol % 以上となるようにスラリーを投入可能であることを実験的に確認した。なお、ピストンポンプを使用する場合、循環流の流速は、泥水シールド工法等のスラリー輸送の現場で水平管内の流速を求める際に使用される式で評価した方が安全であると提案された。

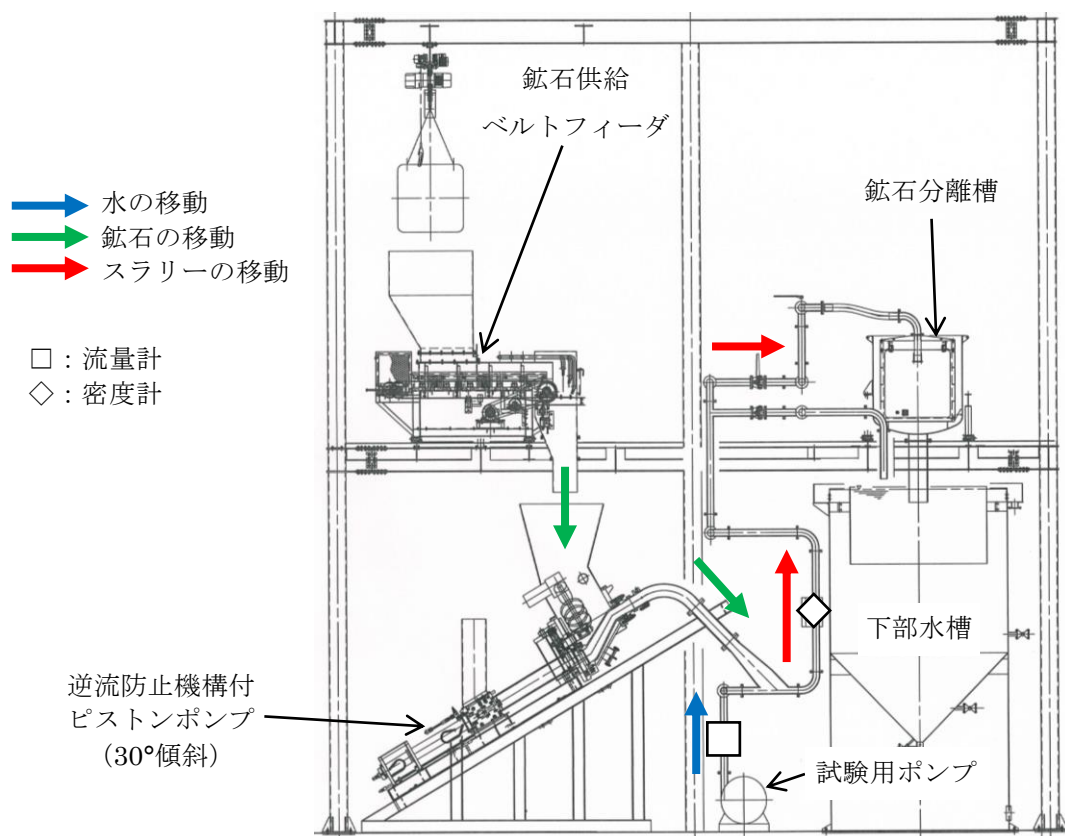


図 4-3-40 循環式スラリー流送試験設備

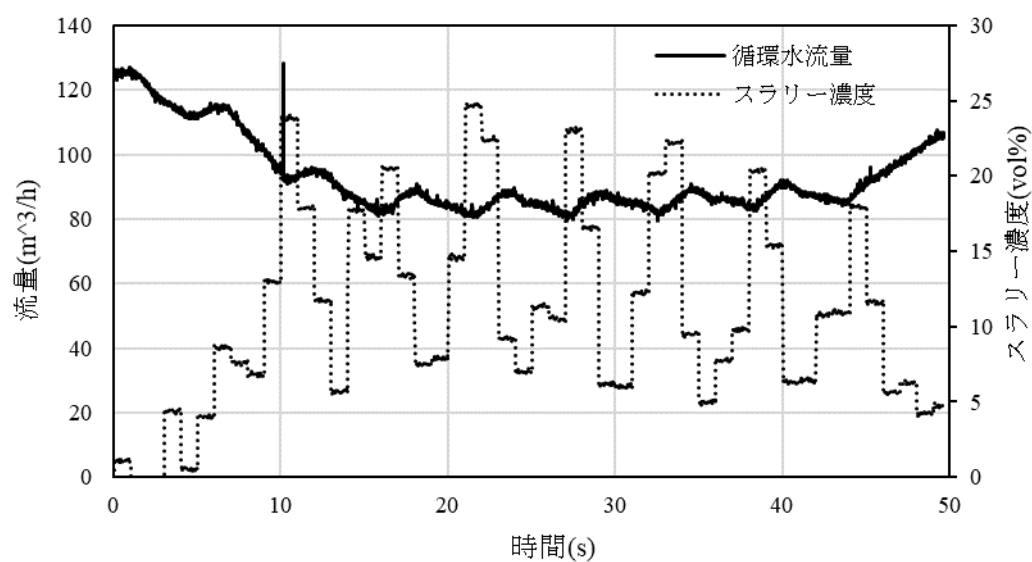


図 4-3-41 循環式スラリー流送試験結果

(4) 実鉬石の吸引吐出性能検討

(2) の試験設備（ピストンポンプの傾斜角：30°）を用いて、実鉬石の吸引吐出性能を検証した。

図 4-3-39 に試験結果を示す。実鉬石のスラリー濃度（図中□、■）は模擬鉬石（図中△、▲）と同等であることから、同等の吸引吐出性能を発揮し得ることを確認した。本試験結果及び (3) の試験結果より、ピストンポンプを用いて循環流中へ、スラリー中の実鉬石濃度 10 vol % 以上で鉬石を投入することが可能と見込まれた。

(5) 商用機概念検討

図 4-3-42 に商用機装置構成を示す。本構成では鉬石細粒化装置（HPGR）と鉬石投入装置（ピストンポンプ）が一体となっており、海底に着座した状態で運用する。

ピストンポンプは 5,000 t/日の鉬石を吐出できるようにシリンダー長及び内径を拡大した。また、ピストンポンプの閉塞防止のために①大径粒子の混入の防止と②細粒分と粗粒分の分級の防止を目的として、HPGR とピストンポンプの間に、大径粒子を排除するための投入排出切替装置・非常用脱出シュートと、粗粒分と細粒分を十分に混合するためのドラムミキサーを導入した。

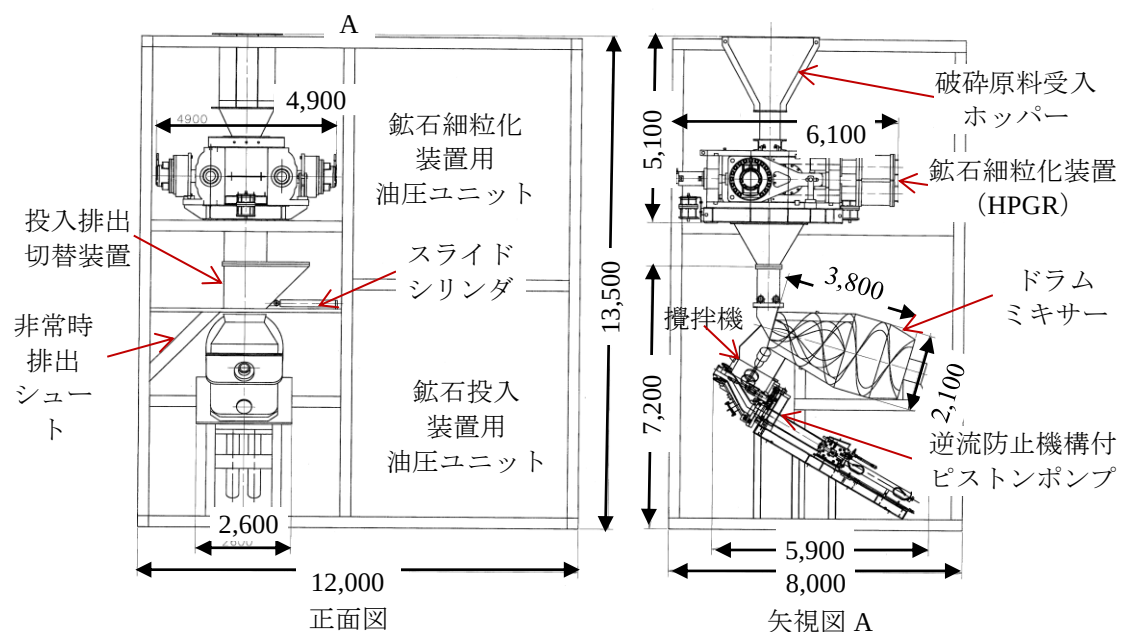


図 4-3-42 実験装置構成

4-3-5-3. 今後の課題

重力式とピストンポンプ式の 2 つの鉱石投入装置を提案し、それぞれの方式を構成する要素技術の机上及び実験的な検討、更に、揚鉱管への投入性能の実験的検討を実施した。

重力式では、スラリー濃度 10 vol %以上で鉱石を投入できることを実験的に確認する成果を得た。一方で、シミュレーションモデルでの検討の結果から、鉱石投入の効率を更に向上させるためには、流路切替装置や各弁の制御の精緻化が必要であることが示唆された。また、閉塞防止機構や、高負荷及び長時間運転時の耐久性等の不確実要素の低減に向けた検討も併せて必要となる。

ピストンポンプ式でも、スラリー濃度 10 vol %以上での鉱石の投入が可能であることを実験的に確認する成果を得た。一方で、本方式はピストンポンプ内で著しく濃度の高いスラリーを移送するために閉塞のリスクが高い点が課題である。そのため、閉塞回避の機構の実証が必要となる。また、本装置は海底に固定した状態での運用が前提となるが、掘削地点を頻繁に変える必要のある海底熱水鉱床開発に適用するためには、吊り下げ状態での運用を前提とした、概念検討を改めて行う必要もある。

4-3-6. 揚鉍水の処理

海底熱水鉍床の揚鉍の際には、運搬に用いた海水が揚鉍水として産出される。前述の循環式スラリー揚鉍方式の採用により揚鉍水の処理量を低減したが、循環水中の金属イオン濃度の上昇を防ぐため、揚鉍水の一部を循環させる前に処理することとし、海底熱水鉍床鉍石と人工海水より調製したスラリーを用いた要素試験と机上検討を実施して、揚鉍水の処理プロセスを構築した。

揚鉍水の処理は、鉍石分離及び固液分離・浄化処理に大別される。図 4-3-43 に処理プロセスを示す。

4-3-6-1. 鉍石分離

揚鉍されるスラリーは粒径 50 mm 以下の鉍石と海水（揚鉍水）から構成される。スラリー中の鉍石と揚鉍水の分離手順を以下に示す。

（鉍石分離手順）

- ① 揚鉍されるスラリーを土砂脱水篩の下段の網に投入し、粒径 2～50 mm の鉍石を回収する。下段の網を通過した粒径 2 mm 以下の鉍石を含む揚鉍水は循環槽に流入する。
- ② 粒径 2 mm 以下の鉍石を含む揚鉍水は湿式サイクロンによって分級され、粒径 0.074～2 mm の鉍石を含むアンダーフロー、粒径 0.074 mm 以下の鉍石を含むオーバーフローに分けられる。アンダーフローは土砂脱水篩の上段の網に投入され、粒径 0.074～2 mm の鉍石は回収される。
- ③ 土砂脱水篩で回収された粒径 0.074～50 mm の鉍石はベルトコンベアに排出され、鉍石貯留設備へ搬送される。粒径 0.074 mm 以下の鉍石を含む揚鉍水は、オーバーフロー受槽へ移送される。
- ④ 粒径 0.074 mm 以下の鉍石を含む揚鉍水は、pH 調整の上、温度調整槽で海水希釈された後に循環式スラリー揚鉍方式の循環水として再利用される。なお、一部の揚鉍水は後述の固液分離・浄化処理を施される。

4-3-6-2. 固液分離・浄化処理

海底熱水鉱床の鉱石と人工海水を混合させたスラリーを用いて、固液分離・浄化処理試験を行い、処理工程を検討した。

(1) 固液分離

粗砕した海底熱水鉱床鉱石に人工海水を加えてスラリーを調製した後、アルカリ添加により pH 調整して、スラリー中の金属イオンの沈殿を試みた。pH が高ければ水質汚濁防止法の一律排水基準をクリアすることを確認したが、pH 調整に用いる NaOH 等のアルカリ添加量が多いと操業費が高騰する。両者のバランスを考慮し、揚鉱水に含まれる金属イオンをほぼ沈殿させるために pH9.0 に調整した後、残留した金属イオンを別の手法で処理することとした。なお、pH 調整により凝集処理した凝集汚泥は、膜ろ過により固液分離することとした。

(2) 浄化処理

(1) と同様の手順で用意した膜ろ過水に含まれる残留金属イオンに対して、硫化物法、液体キレート剤法、キレート樹脂の 3 パターンでの処理を試みた。その結果、薬品使用量や汚泥発生量が少ないキレート樹脂にて浄化処理することとした。

(固液分離・浄化処理手順)

- ① 湿式サイクロン後のオーバーフロー受槽より、鉱石を概ね回収した揚鉱水の一部を固液分離・浄化処理システムの原水槽に受け入れる。原水槽に投入された揚鉱水は、固液分離・浄化設備の各プロセスから発生する凝集汚泥や洗浄排水等と合流（以下、「原水」という）し、水量調整及び水質均質化を図る。
- ② 原水の pH が酸性のときには、原水槽においてアルカリ（苛性ソーダ）を添加し、中和処理を行う。
- ③ 均質化された原水は懸濁物濃度が高いため、まず原水を直接フィルタープレス式脱水機により脱水処理する。脱水ろ液はろ液水槽に一時貯留し、脱水ケーキはコンベアで鉱石貯留設備へ移送する。
- ④ ほとんどの固形分が除去された脱水ろ液は、ろ液水槽からポンプにて反応槽へ送水し、反応槽において水酸化ソーダを添加、更に酸（硫酸）又は苛性ソーダにより pH9.0 に調整し、揚鉱水中の鉛やカドミウム等の金属イオンを不溶解性の硫化物フロックとして沈殿させる。
- ⑤ 反応槽から凝集汚泥槽に流入した硫化物フロックを含む排水は、膜ろ過処理で固液分離する。膜ろ過処理水はキレート原水槽に送水し、一時貯留する。固形分は凝集汚泥槽内に送られ、汚泥濃度 2%程度まで濃縮する。
- ⑥ 凝集汚泥槽内の汚泥濃度を一定濃度以下に保持するため、一定量の汚泥スラリーを抜き、原水槽に返送し原水と混合する。

- ⑦ 膜ろ過処理水中のヒ素やアンチモン等の金属イオンが排水基準値を満足しないときには、キレート吸着樹脂塔にてイオンを吸着除去する。
- ⑧ pH 調整槽にて中和した後は、循環水として再利用する。

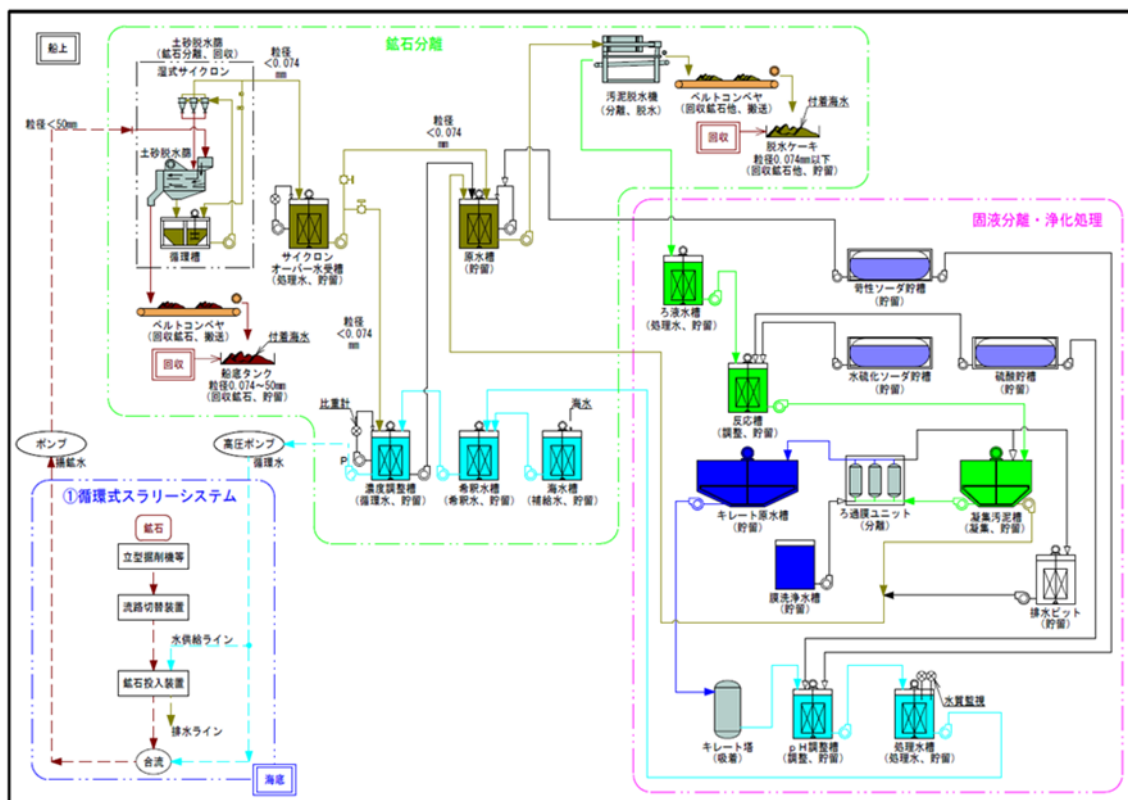


図 4-3-43 揚鉱水処理プロセス

4-3-6-3. 今後の課題

鉱石分離後の揚鉱水の処理について、海底熱水鉱床の鉱石と人工海水よりスラリーを調製して、固液分離及び浄化処理試験を行い、その結果を踏まえてアルカリ添加による pH 調整やキレート樹脂を用いたプロセスを構築した。

ただし、鉱石品位や鉱物組成の異なる海底熱水鉱床が新たに発見されるなどにより、揚鉱される鉱石の粒度分布や鉱石から揚鉱水に溶出する金属イオン量が想定と異なった場合には、鉱石から揚鉱水に溶出する金属イオンや懸濁物の処理及び使用薬剤について、開発対象に応じた最適化が求められる。

4-3-7. 洋上プラットフォーム

第2期までは、DPSを装備する船型のプラットフォームで採鉱・揚鉱の両方を実施する方式を検討していたが、稼働性や鉱石の払い出しの効率、船上設備の制約等が課題であった。また、一つのプラットフォームで採鉱と揚鉱の両方を実施することは、システムの安定性の観点から適切ではないと判断した。そこで、揚鉱と採鉱のプラットフォームを分離することとし、揚鉱プラットフォームは係留方式で位置保持を行い、更に船体動揺の低減から作業効率の向上を期する浮体構造物の採用を検討した。一方で、採鉱プラットフォームは、自走できない立型採鉱機を使用するために頻繁かつ精度の高い位置調整が必要となるため、船型を採用することとした。

4-3-7-1. 浮体構造物の揚鉱プラットフォームの検討

本プラットフォームは、揚鉱を担当する浮体構造物である。採鉱プラットフォームが先行して掘削した鉱石を海底から採集し、船上で揚鉱水と分離した後、一時貯留して運搬船に払い出す役割を担う。

(1) 適当な浮体の検討

海洋開発分野で広く用いられるセミサブ型、モノコラム型及びスパー型について、揚鉱プラットフォームとしての適用性を検討した。

表4-3-11にこれらを比較した結果を示す。揚鉱プラットフォームには集鉱機の吊り下げ設備、揚鉱システム、水処理システム等の多数の設備が必要である上に、鉱石払い出しなどの運用の自由度が重要である。そのため、艀装性と運用性に優れるセミサブ型を選定した。以降、揚鉱に用いるセミサブ型の洋上プラットフォームを「セミサブ」と呼称する。

表 4-3-11 浮体特徴比較

方式	セミサブ型	モノコラム型	スパー型
波浪中運動性能 (簡易評価)	船型より優れる	船型より優れる	他の浮体より優れる
物量 (≒コスト)	固定バラストが多く、高コスト	固定バラストが無く、低コスト	固定バラストが多く、高コスト
艀装性 (配置自由度)	甲板が直線状のため、シンプルな機器構成が可能で、配置に自由度が高い	甲板が円弧上であるため、機器配置が複雑化し、自由度が下がる	強度上、重量物は浮体直上にしか配置できない制限があり、自由度が低い
工事難易度 (≒コスト)	ドック内で完工まで可能なため、難易度が低い	下部浮体がドックに入らず部分的に海上工事が発生するため、難易度がやや高い	浮体立上げ、上部プラント据付け等が十分な水深の静穏な海上での施工が必要となり、大型化困難
運用性	直線形状のため、鉱石輸送船の横付け係船が比較的容易	甲板が円弧形状のため、鉱石輸送船の横付け係船時の索取りが難しい	鉱石輸送船の横付け係船/払い出しが困難

(2) 係留方法の検討

セミサブは合計 12 本のアンカー及び係留索によって海上で位置を保持する。実操業においては、セミサブの位置を海底の一時貯鉱場の直上に移動させる必要がある。しかし、セミサブは自走機能を持たない。そこで、セミサブを中心とした半径数 km の範囲にアンカーを配置し、それぞれの係留索の巻き出し長さを独自に調整することで、セミサブの位置を調整する方法を採用することとした。また、荒天下でもこの係留方法が有効かどうかを確認するため、試験と数値解析により評価した。

係留設計のためには、セミサブが暴風時条件下（表 4-3-12）で受ける環境外力（波や風から受ける力）を把握する必要がある。そこで、まずは図 4-3-44 に示す 1/100 スケールのモデルを用いた水槽・風洞試験を実施し、外力から算出される抗力係数を計測した。なお、モデルの形状は、その時点での後述（3）の検討状況を基に設定した。次に、セミサブへの環境外力の計測値を基に数値解析を実施し、係留索にかかる力を予測した。なお、解析には、初期位置（各係留索の巻き出し長さが等しい状態）と、初期位置から半径 500m 移動した状態の 2 つのパターンを用いた。その後、解析結果を基に、暴風時条件下でも破断しない図 4-3-45 の係留配置及び索の材質を選定した。

表 4-3-12 沖縄海域の特定地点における気象海象条件

	100 年再現暴風条件	10 年再現暴風条件	作業限界条件
風	風速： $U_{10}=42.1$ m/s 風向：全方位	風速： $U_{10}=34.4$ m/s 風向：全方位	風速： $U_{10}=15.0$ m/s 風向：全方位
波	有義波高： $H_{1/3}=16.7$ m 有義波周期： $T_{1/3}=15.0$ s 波方向：全方位	有義波高： $H_{1/3}=12.3$ m 有義波周期： $T_{1/3}=13.5$ s 波方向：全方位	有義波高： $H_{1/3}=4.0$ m 有義波周期： $T_{1/3}=10.0$ s 波方向：全方位
流れ	流速： $V=2.2$ knot 流向：全方位	流速： $V=1.7$ knot 流向：全方位	流速： $V=0.7$ knot 流向：全方位

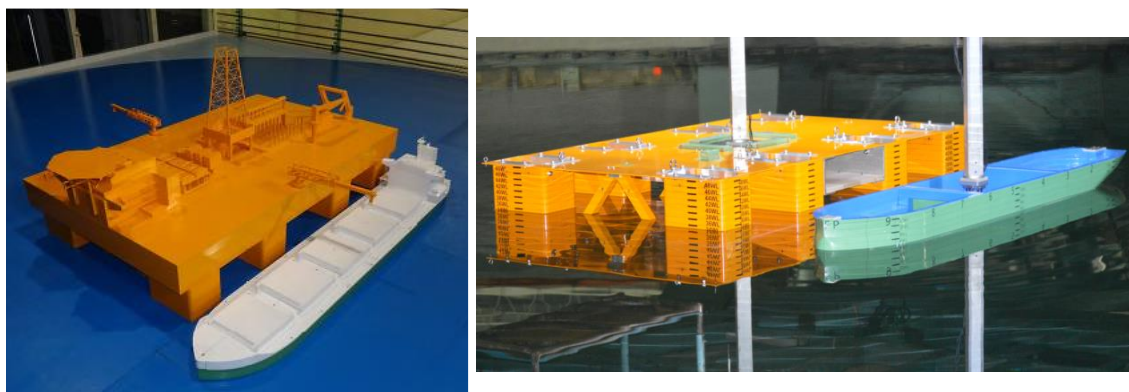
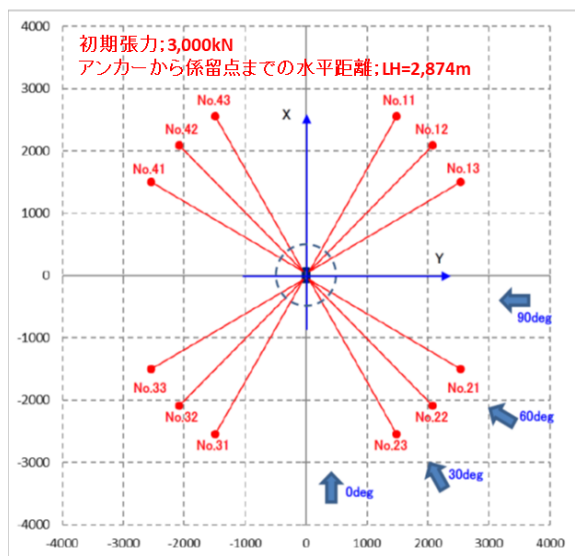


図 4-3-44 試験に用いたセミサブの縮小モデル
(左：風洞試験用、右：水槽試験用)



部位	係留索仕様
フェアリーダ側	φ138 mm ワイヤ ×500 m
海中部	繊維索 φ208 mm×1500 m
アンカー側	φ142 チェーン ×1500 m

図 4-3-45 係留設計に基づく配置概要

(3) 商用機仕様及び浮体上の設備の検討

表 4-3-13 に、セミサブの仕様や設備の検討結果を示す。初めに、集鉱機や揚鉱関連機器の懸架や操作等のセミサブの役割を検討し、それを基にセミサブ上に設置すべき機器を提示した。次に、操業のために各機器に求められる仕様を検討し、それを基に各機器の寸法・重量等を予測した。また、予備機の必要性等を検討し、各機器の搭載数を定めた。最後に、それらの機器を設置するためのセミサブの寸法や、機器レイアウトを検討した。

表 4-3-13 セミサブの仕様及び主要搭載設備

全長 (Loa)	126.0 m	型深さ (Dmld)	64.5 m
全幅 (Bmld)	98.0 m	喫水 (dmld)	34.5 m
鉱石ホールド	約 11,000 m ³ ×2 (鉱石 5,000t×10 日分)		
固定バラスト	約 39,000 t		
ムーンプール	10.0 mL×12.0 mB (鉱石投入装置、揚鉱管) 17.0 mL×22.0 mB (集鉱機)		
移動/位置保持方式	非自航 / 係留移動装置		
定員	139 名		
発電機	5,000 kW×4 基		
主要装備品	・ 集鉱機×2 基 (予備 1 基含む) ・ 循環揚鉱用高圧ポンプ×4 台 (内 2 台 Stand-by) ・ 鉱石投入装置×2 基 (予備 1 基含む) ・ 鉱石搬送装置 (コンベア、払出ブーム含む) ×一式 ・ 鉱石分離/固液分離・浄化处理装置(薬剤コンテナ含む) ×一式 ・ ROV×1 基 ・ ROV 昇降装置×1 基 ・ 鉱石投入装置及び揚鉱管昇降装置×一式 ・ 係留移動装置×一式 ・ ヘリコプターデッキ×一式 ・ 集鉱機昇降装置 ・ デッキクレーン×4 基 ・ 自動係船装置×2 基		

(4) 払い出し時の稼働性検討

1) 複合外力下の払い出し稼働性検討

一般的に石油・天然ガス分野での Side by Side 払出（船やセミサブが横並びの状態での払い出し）オペレーションの限界波高は 1.5 m である。しかし、開発想定海域の年平均波高が 1.8 m であることから、払い出し稼働率の低下が課題となっていた。払い出し装置の開発においては、係船作業の限界波高を 2.5 m とすることを目標に、水槽模型試験における計測を行って払い出し時の稼働率の改善を企図した。

図 4-3-47 に複合外力下における払い出し試験設備を示す。セミサブ模型は係留索を通じて周囲の係留模擬装置に係留され、風荷重模擬装置により風力に模擬した荷重が与えられる。これに加えて造波装置からの波力により環境外力を模擬する。セミサブ模型と鉦石輸送船模型は自動係船装置模型でつながれており、この係船装置模型に係る力が商用機換算で 1200 kN（装置耐力）以内であれば払い出しが可能であると判定する。

その結果、横波（波方向 90° 付近）以外であれば、波高 2.5 m・周期 7～10 秒でも装置耐力以下であり、鉦石払い出しが可能であることを確認した。なお、払出機構はセミサブの両側に設置予定のため、波方向に合わせて鉦石輸送船の接舷位置を変えることにより、波が高い状態での払出を可能にすることが示唆された。

2) 実海域の海気象条件に基づく稼働性検討

開発想定海域における海気象条件の推移を考慮した時間領域シミュレーションとその結果に基づくオペレーションウィンドウ解析により、実海域での払い出し稼働率を求めた。

初めに、各装置の仕様や安全基準を基に、表 4-3-14 の作業限界を設定した。次に気象庁の海気象推算データを基に 3 時間ごとの環境外力下でのセミサブ—鉦石輸送船の状態を数値解析により予測し、その結果と作業限界を比較した。その後、作業準備及び撤収に係る時間が合計 24 時間であることから、作業限界以下の条件が連続で 24 時間以上となる場合を稼働可能時間と定義し、その合計から総稼働時間を求めた。

結果の一例を表 4-3-15 に示す。海気象が比較的穏やかな 3 月の稼働率（1 ヶ月の期間内に稼働可能な総時間の割合）は 67.5%、台風が 2 回到来して海気象が厳しい 9 月は 32.5%と予測される。

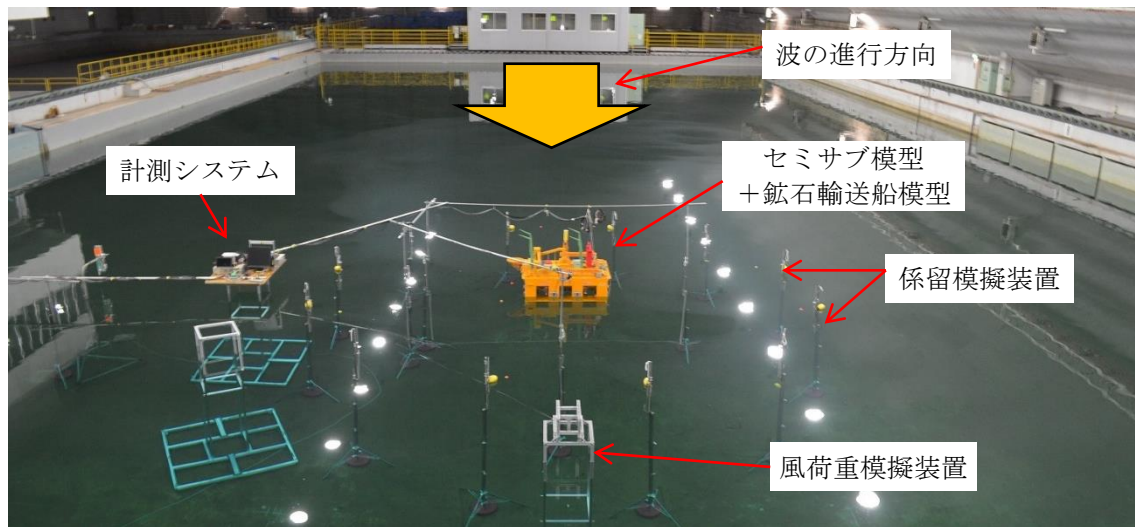


図 4-3-46 複合外力下における払い出し試験設備全景写真

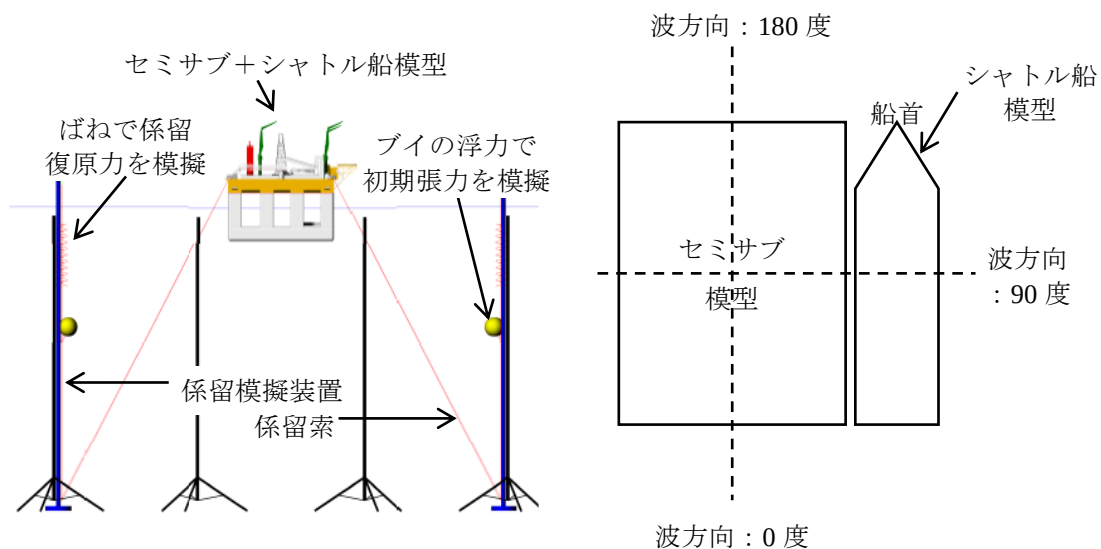
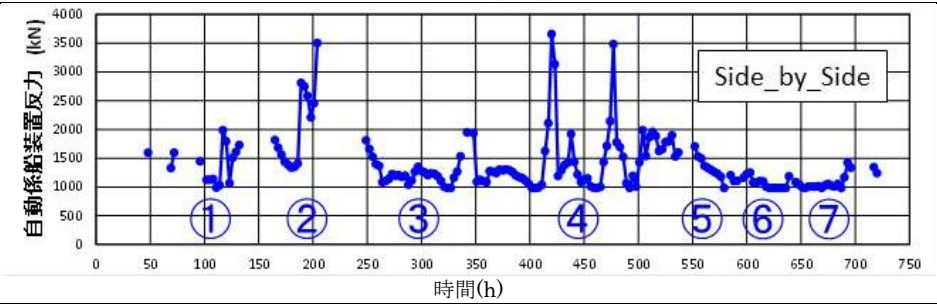
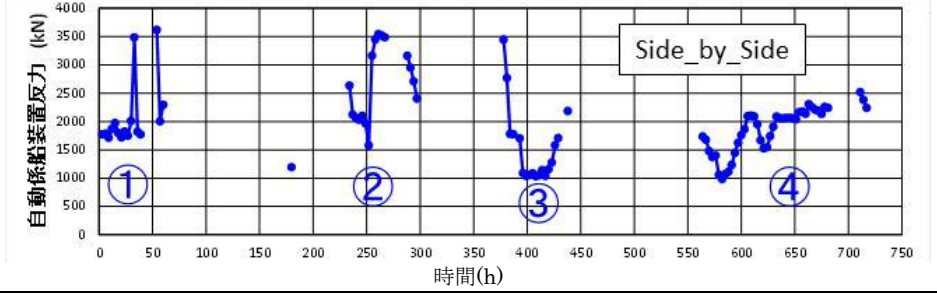


図 4-3-47 複合外力下における払い出し試験設備概略図
(左：浮体の係留方法、右：波方向の定義)

表 4-3-14 作業限界

評価項目	閾値	備考
平均風速	15 m/s	船上クレーンの使用限界条件を適用
自動係船装置反力の最大値	3,922 kN	自動係船装置の最大反力を適用
セル型フェンダー変位の最大値	0.4 m	セル型フェンダーの反力特性から比例限界近傍の変位を適用
最大ホーサー張力	885 kN	ISO 等の基準（最小破断荷重の 1/2 以下）に準拠
最大横揺れ角（片振幅）	5 °	作業性を考慮
最大上下加速度	0.5 G	安全性を考慮

表 4-3-15 稼働性の計算結果

	払出可能期間*	総稼働時間
3月		486
9月		234

*：自動係船装置反力<3922kN の場合、払出可能

4-3-7-2. 採鉱プラットフォームの検討

採鉱プラットフォームは、自走できない立型採鉱機を使用するために頻繁かつ精度の高い位置調整が必要となるため、船型を採用することとした。以降、採鉱に用いる船型の洋上プラットフォームを「採鉱母船」と呼称する。船団としての稼働率を上げるために採鉱機のみを搭載し、セミサブに先行して海底熱水鉱床を掘削して回る役割を担う。

表 4-3-16 に採鉱母船の仕様及び主要搭載機器を示す。重量が数百トンの採鉱機を 2 基搭載可能な仕様とした。

なお、採鉱母船については、セミサブほどには検討が進んでおらず、あくまで要求仕様に対する概略設計を行ったに過ぎない。

表 4-3-16 採鉱母船仕様及び主要搭載設備

全長 (Loa)	abt. 188 m
垂線間長 (Lpp)	abt. 170 m
全幅 (Bmld)	38.0 m
型深さ (Dmld)	19.2 m
喫水 (dmld)	6.2 m
ムーンプール	22.0 mL×17.0 mB (立型採鉱機 / 自走式採鉱機兼用)
移動/位置保持方式	自航 / Dynamic Positioning System
定員	66 名
発電機	5,000 kW×6 基
主要装備品	・ 立型採鉱機×1 基 ・ 自走式採鉱機×1 基 ・ ROV×1 基 ・ ROV 昇降装置×1 基 ・ 昇降式アジマススラスタ：船首×3 基、船尾×1 基 ・ 固定式アジマススラスタ：船尾×2 基 ・ バウスラスタ×1 基 ・ 採鉱機昇降装置 ・ デッキクレーン×2 基

4-3-7-3. 今後の課題

第 2 期までの 1 台の船型のプラットフォームが採鉱と揚鉱の両方を担うシステムと異なり、採鉱を採鉱母船で、揚鉱をセミサブで実施するシステムとした。

採鉱母船及びセミサブは、搭載する機器や運用条件が定まった後に、より詳細に検討する必要がある。

4-3-8. 採鉱・揚鉱システムの検討

前項までの結果をもとに、操業に必要な安定性や環境影響を考慮して、より現実性の高い採鉱・揚鉱システムの据付及び運用手順を構築した。また、洋上オペレーションのリスク分析を行い、構築した採鉱・揚鉱システムの稼働性を評価した。

4-3-8-1. 採鉱・揚鉱システムの据付及び運用手順

図 4-3-48 に採鉱・揚鉱システムの概念図を、以下の①～⑬に据付・運用手順の概要を示す。

- ① 採鉱母船を掘削地点まで移動する。
- ② 立型採鉱機をはじめとする採鉱システムを海中に投入する。
- ③ チムニーやマウンド頂部を立型採鉱機で掘削し、マウンド上に平地を造成する。
- ④ ③で造成した平地部を自走式採鉱機で掘削する。
- ⑤ マウンド底部や小型マウンドを立型採鉱機で掘削する。
- ⑥ 掘削した鉱石は海底に一時貯鉱する。
- ⑦ 採鉱母船を次の掘削地点に移動する。(採鉱については②～⑦を繰り返す)
- ⑧ セミサブを曳船により一時貯鉱地点に移動させ、アンカー船を用いて係留策で固定する。
- ⑨ 集鉱機、鉱石投入装置、揚鉱管等の揚鉱システムを海中に投入する。
- ⑩ 集鉱機で回収した鉱石を鉱石投入装置に送り、海水とともにスラリー状にして揚鉱管を通して船上に揚げる。
- ⑪ スラリー中の鉱石と揚鉱水を分離し、鉱石を回収する。揚鉱水は一部浄化処理した後に循環系に戻して再利用する。
- ⑫ セミサブの自動係船装置を用いて鉱石輸送船を接舷させ、鉱石を払い出す。
- ⑬ セミサブを次の一時貯鉱地点に移動する。(揚鉱については⑨～⑬を繰り返す)

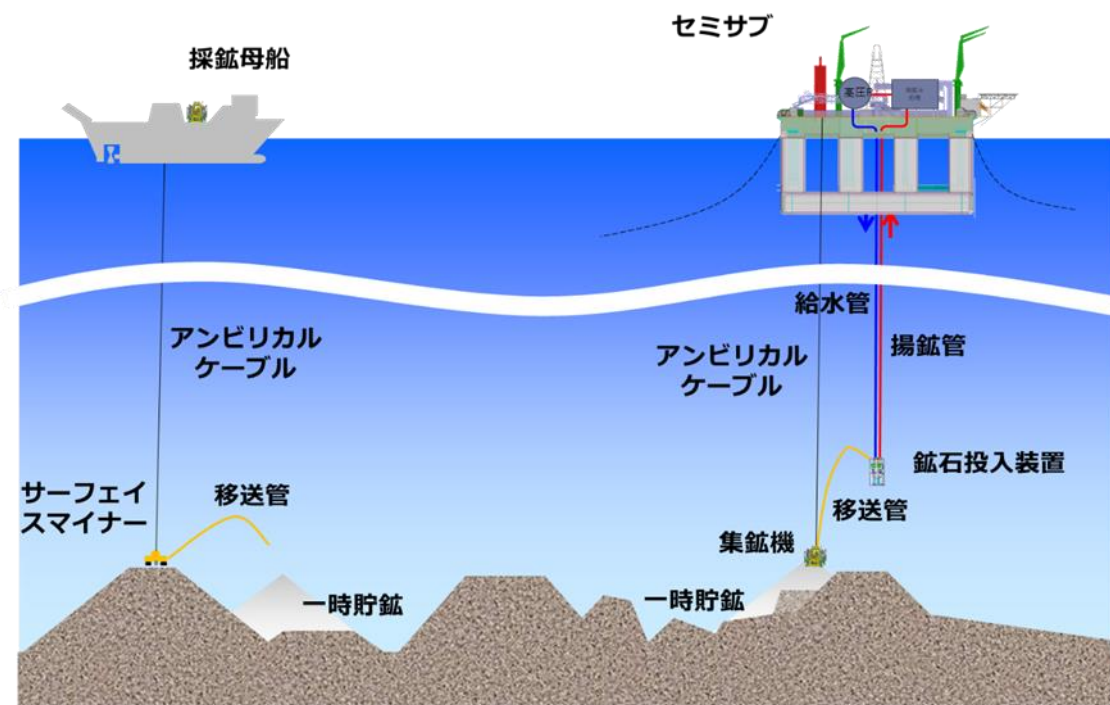


図 4-3-48 採鉱・揚鉱システムの概念図

4-3-8-2. 洋上オペレーションのリスク分析

日本近海の外洋に位置する海底熱水鉱床開発において、安全で効率的な洋上オペレーションを実現するために、採鉱から揚鉱までをセミサブのみで行うシステムを対象としてリスク分析を行った。海外の大水深石油・天然ガス開発等の知見を活用して、採鉱・揚鉱システムの据付け及び運用手順のリスクを抽出し評価した。

表 4-3-17 にリスクが高いと判定された作業を示す。これらに対しては、事前検討により課題を抽出した上で、適切な作業要領を作成し、それを遵守するなどの防止策を講じることによって、リスクの低減が可能と考えられた。

表 4-3-17 採鉱・揚鉱システムにおける高リスク作業

高リスク作業	発生事象	原因	結果	防止策
セミサブの輸送	輸送中のセミサブが制御不能になる	セミサブの曳船能力不足	セミサブの漂流、輸送に大幅な遅延、座礁による損傷	曳航に必要な牽引力（Bollard Pull）を適切に計算する
揚鉱システムの投入	揚鉱管の投入・揚収中に落下に伴い、管に共架していたアンビリカルケーブルが損傷する	揚鉱管接続中の不適切な管の固定方法	揚鉱管先端に懸架している鉱石投入装置の落下による損傷	適切な固定要領の立案及び遵守、安定性を持った固定方法の採用、堅牢な管継手方式の採用
立型採鉱機の投入	立型採鉱機を設置するときの沈下、転倒などの海底面の地盤条件に起因するトラブル	海底地盤の耐力の不足や海底面の不陸など地盤条件が明らかになっていない	立型採鉱機設置の遅延、立型採鉱機の損傷	事前の海底面調査、地盤条件の評価
鉱石輸送船への払い出し	鉱石輸送船がセミサブへ衝突する	誤った進入角度及び侵入速度	セミサブと鉱石輸送船の損傷、作業員や船員のケガ	鉱石輸送船の接舷要領の最適化、退避要領の立案と遵守、セミサブの両舷どちらでも接舷可能な構造とし、実際の海気象条件を基に接舷位置を選択する
鉱石輸送船による運搬	鉱石輸送船の積荷の液状化	固液分離が不十分で鉱石に水分が残留している、払い出し作業中や輸送中の雨などによりに積荷の水分が増加する	安定性の喪失による転覆、過積載	水分量の許容値を設定し、それを固液分離システムの管理値として運用する、払い出し前や払い出し中の積荷の水分量を測定する

4-3-8-3. 稼働性評価

採鉱・揚鉱システムを最適化し、効率的にオペレーションすることを目的として、採鉱・揚鉱、洋上での鉱石輸送用のシャトル船払出、陸上への荷役までを考慮したシステム全体の稼働性評価プログラムを構築し稼働性を評価した。

開発想定海域の気象海象の時系列データ等の既得情報を基にして稼働性評価プログラムを構築した。本プログラムでは、システム全体を4つのサブシステム（①採鉱、②揚鉱、③洋上プラットフォーム、④鉱石搬送船）に分類し、各サブシステム内のオペレーションをモデル化し統合することで、作業ごとの影響評価を可能としている（図4-3-49）。

本プログラムは、採鉱・揚鉱システムの稼働性を個々のサブシステムの稼働性を考慮しながら評価することができるため、ボトルネックになり得るオペレーション項目を抽出することが可能であり、各作業のパラメータの影響を定量的に解析し、最適な採鉱・揚鉱システムの運用を検討することができる。

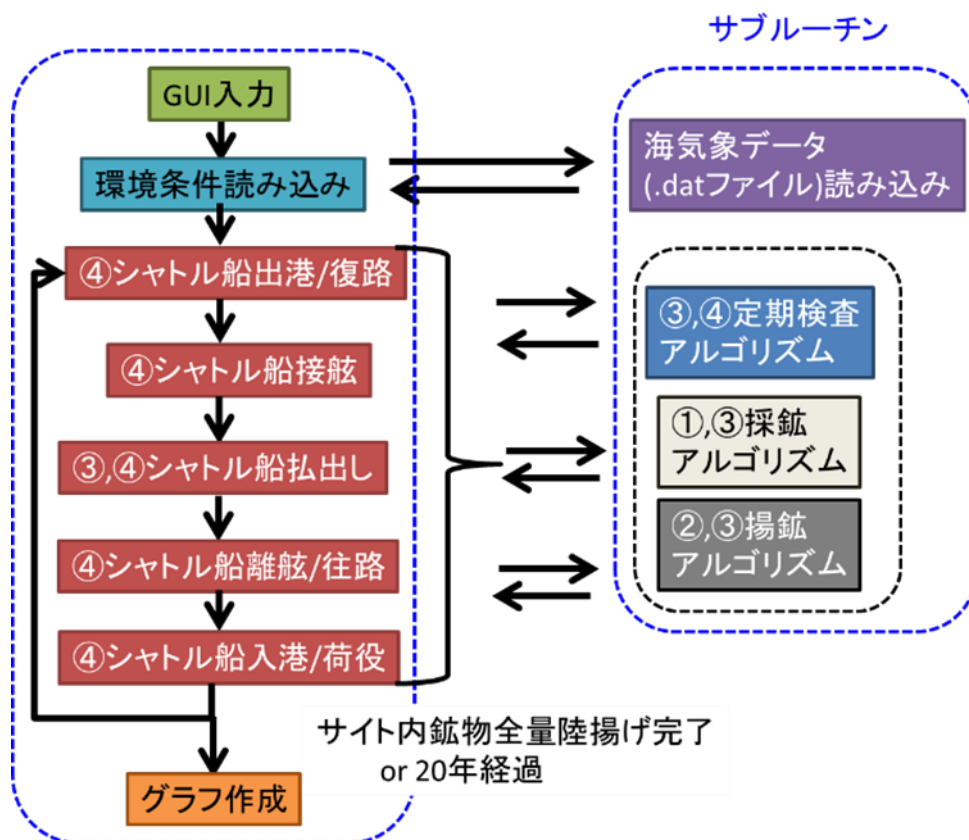


図 4-3-49 稼働性評価プログラム構成概略図

4-3-8-4. 今後の課題

採鉱・揚鉱システムを要素技術に分け、個別に技術検討を行った結果を踏まえ、操業に必要な操業安定性や環境影響を考慮して、より現実性の高い採鉱・揚鉱システムを構築した。今後は環境影響を考慮した上での経済性や作業効率等の向上が課題である。

また、採鉱・揚鉱システムの稼働性及び安定性を洋上オペレーションのリスク分析及び稼働性評価プログラムを通じて確認した。しかし、このリスク分析は、令和2年度時点で想定していた採鉱から揚鉱までをセミサブのみで行うシステムを対象にしたものであるため、現時点で想定している採鉱・揚鉱システムを対象に再度リスク分析を実施することが望ましい。

引用文献

AMC Consultants Pty Ltd, 2018, Preliminary Economic Assessment of the Solwara Project, Bismarck Sea, PNG, 274p.

古河産機システムズ株式会社, 高圧型グラインディングロール GEOPUS GR.

古河産機システムズ株式会社, 脱水ケーキ搬送用二連式ピストンポンプ PT series.

Hauton C, Brown A, Thatje S, Mestre NC, Bebianno MJ, Martins I, Bettencourt R, Canals M, Sanchez-Vidal A, Shillito B, Ravaux J, Zbinden M, Duperron S, Mevenkamp L, Vanreusel A, Gambi C, Dell'Anno A, Danovaro R, Gunn V and Weaver P, 2017, Identifying Toxic Impacts of Metals Potentially Released during Deep-Sea Mining—A Synthesis of the Challenges to Quantifying Risk. *Front. Mar. Sci.* 1-13.

林伸幸, 高野慧, 塩月浄志, 寺尾崇, 正信聡太郎, 川野 誠矢, 2015, 海底熱水鉱床開発用揚鉱管のスラリー移送に関する研究, 第 25 回海洋工学シンポジウム論文集, OES25-018.

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, 2018, 海底熱水鉱床開発総合評価報告書, 158p.

<https://www.jogmec.go.jp/content/300359550.pdf>. (2023 年 8 月 18 日閲覧)

素木洋一, 1961, セラミック外論 (12), 窯業協会誌, 69(5), C167-178.

Schönert, K, 1991, The Characteristics of Comminution with High Pressure Roller Mills, *KONA Powder and Particle J. Japan*. No.9, 149-158.

4-4. 選鉱・製錬技術

4-4-1. 概要

図 4-4-1 に第 1 期から第 3 期の選鉱・製錬分野の実績を示す。

第 1 期には、亜鉛・鉛主体の鉱石及び金・銀に富む亜鉛・鉛主体の鉱石を対象に、選鉱並びに製錬処理の研究開発を行った。

亜鉛・鉛主体の鉱石は黒鉱に組成に近い複雑硫化鉱であることから、黒鉱の選鉱処理を参考にした浮遊選鉱（以下、「浮選」という。）法を用いた処理フローを開発した。しかし、各鉱物の選択分離・回収は困難で、回収率の改善が課題として残った。金・銀に富む亜鉛・鉛主体の鉱石は、銅、鉛、亜鉛、金、銀が共存する亜鉛品位 50%以上の高品位鉱石と、ケイ酸塩や重晶石など脈石鉱物主体の鉱石に大別された。これらは、ジグ選別機を用いた比重選別により分離が可能であることを確認した。

製錬技術開発では、浮選により得られた精鉱を使用した還元溶錬試験を行い、鉛と亜鉛を揮発分離し、銅含有マットとスラグとした。この他、同精鉱に塩素ガスを吹き込みながら硝酸で浸出する方法を検討し、金を含むほぼ全ての元素の浸出を確認したが、多量の残渣処理が課題として残った。

第 2 期には、亜鉛・鉛主体の鉱石を対象に、目標を浮選プロセスの改善による精鉱品位と回収率の向上に取り組んだ。また、得られた精鉱を乾式製錬処理するための技術開発を行った。

同鉱石の浮選では、溶出イオンによる浮遊性低下を防ぐため、磨鉱産物のスラリーを脱水し、再び加水してリパルプすることで脱イオンしたスラリーを給鉱とした。その結果、亜鉛・鉛バルク精鉱は目標の亜鉛品位 40%、亜鉛回収率 70%を概ね達成した。浮選で得られた亜鉛・鉛バルク精鉱は、ISP 製錬所に原料の一部として投入し、亜鉛地金を得た。一方、硫黄などの不純物が一定水準以上含まれることから、投入量に制限があることが課題となった。硫化鉄精鉱（含金、銀）については、金・銀を回収するため、既存の製錬技術であるリサイクル炉を用いた塩化揮発法の適用可能性を検証した。その結果、金、銀がマットへ分配される割合が多く、処理が可能であることを示した。また、塩素の揮発率の制御などの課題があるが、金、銀が十分に揮発し回収可能であることを確認した。

第 3 期には、第 2 期までの研究で得られた知見を活かし、銅主体の鉱石（以下、「F 鉱」という。）、亜鉛・鉛主体の鉱石（以下、「G 鉱」という。）に係る浮選プロセスの構築を行い、そのコストを見積もった。また、金・銀に富む亜鉛・鉛主体の鉱石（以下、「H 鉱」という。）は、製錬所に原料の一部として投入し、地金を作製するとともに、精鉱に関する課題の抽出を行った。

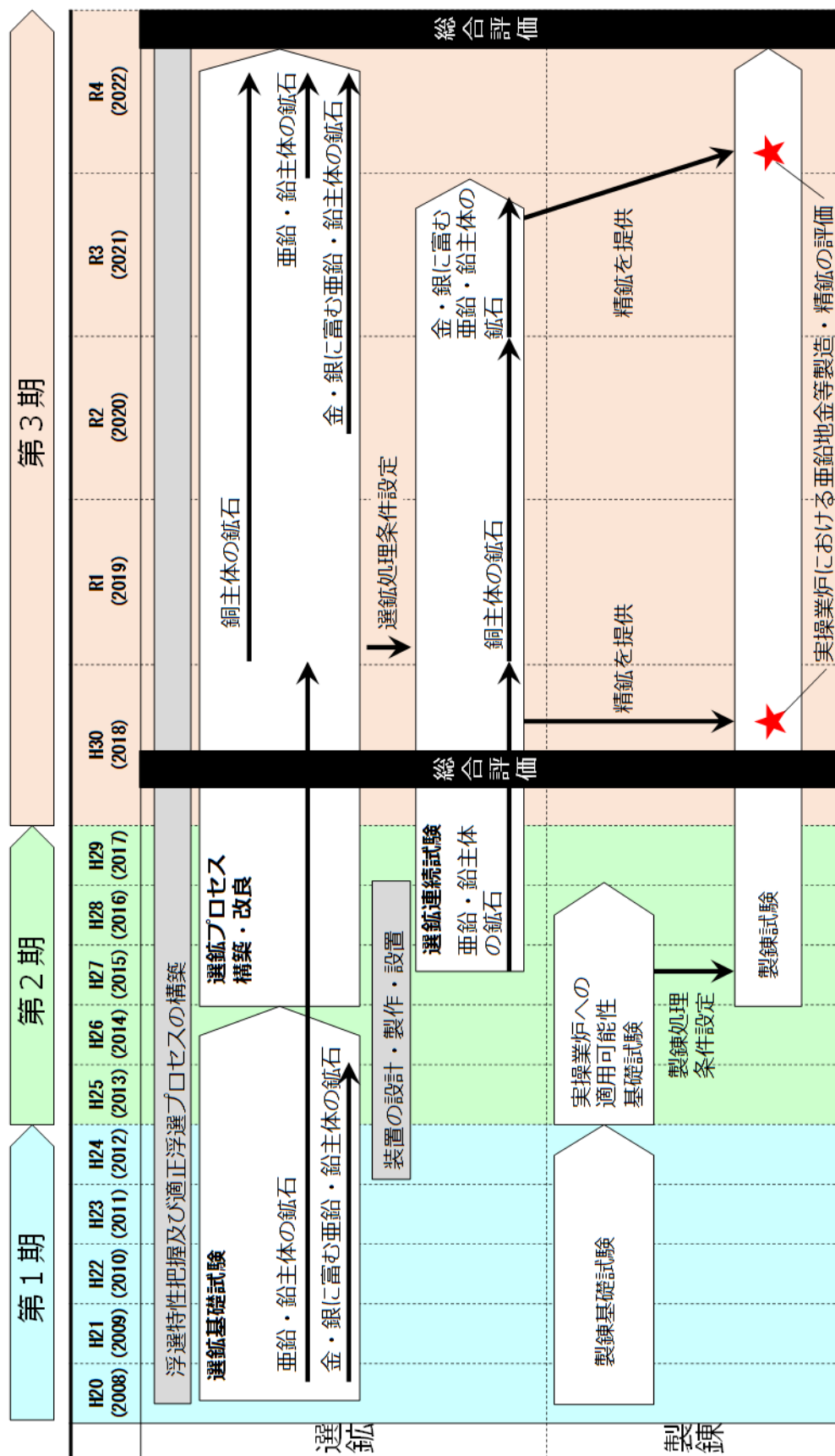


図 4-4-1 選鉱・製錬技術の実績

4-4-2. 選鉱分野

4-4-2-1. 鉱物特性

(1) F 鉱（銅主体の鉱石）

AIST 等が開発を進めている CAMP/DeMPES により、鉱石試料（元素組成は表 4-4-1 を参照）の鉱物種精密解析を実施し、黄銅鉱、閃亜鉛鉱、黄鉄鉱、硫酸鉛鉱のほか、それぞれ黄銅鉱 - 閃亜鉛鉱、黄銅鉱 - 黄鉄鉱の EDS スペクトルが混在した領域（以降、選鉱学的観点から「中間鉱物」と呼ぶこととする。）を確認した。

また、F 鉱は黒鉱に類似しており、黒鉱質（閃亜鉛鉱・方鉛鉱・四面銅鉱・黄銅鉱・重晶石）と黄鉄質（黄鉄鉱・黄銅鉱）の鉱石に大別される。このうち黒鉱質の鉱石中の銅は微細な鉱物が散在する病変として認められること、閃亜鉛鉱中の鉄の割合は G 鉱と比較して低く、ヒ素は黄鉄鉱または白鉄鉱中に固溶しているものが多いことを明らかにした。

表 4-4-1 鉱物特性の解析に供した F 鉱の元素組成

Au g/t	Ag g/t	Hg g/t	Cu %	Pb %	Zn %	Fe %	Ba %	Si %	S %	As %
2.0	229	55.3	7.39	7.13	13.6	24.5	1.52	3.45	35.7	0.24

(2) G 鉱（亜鉛・鉛主体の鉱石）

鉱物調査を実施した結果、鉱石中の鉄鉱物は黄鉄鉱又は磁硫鉄鉱が多く、大部分の亜鉛鉱物は鉄を固溶していた。その他の鉱物では、鉛鉱物として硫酸鉛、銅鉱物として微細な黄銅鉱が認められた。金と銀の鉱物は高解像度 SEM-EDS での測定により、ミクロンオーダーのエレクトラムとして存在していることを明らかにした。

(3) H 鉱（金・銀に富む亜鉛・鉛主体の鉱石）

表 4-4-2 に示す 2 試料を用いて CAMP により鉱物組成を観察した。

試料 1 は閃亜鉛鉱、重晶石を主体とした鉱石で、閃亜鉛鉱、重晶石、閃亜鉛鉱・重晶石中間鉱物が 94.6%を占める。また、三角ダイアグラムから閃亜鉛鉱、重晶石は中間鉱物として存在していた（図 4-4-2）。

試料 2 は閃亜鉛鉱、ケイ酸塩鉱物、重晶石を主体とした鉱石で、これらの鉱物（中間鉱物を含む）が 83.7%を占める。また、三角ダイアグラムから閃亜鉛鉱とケイ酸塩鉱物、ケイ酸塩鉱物と重晶石は中間鉱物として存在していた（図 4-4-3）。

また、両試料ともに銀鉱物はヒ雑銀鉱、雑銀鉱及びその中間鉱物として存在し、鉱物中の銀濃度は 0～50%で一定ではないことを確認した。

表 4-4-2 鉱物特性の解析に供した H 鉱の元素組成

試料	Au g/t	Ag g/t	Hg g/t	Cu %	Pb %	Zn %	Fe %	Ba %	Si %	S %	As %
1	11.3	844	68.4	0.79	3.46	27.1	0.85	24.3	1.75	16.4	0.21
2	10.1	271	41.0	3.31	0.75	13.4	7.13	1.05	17.8	16.6	0.12

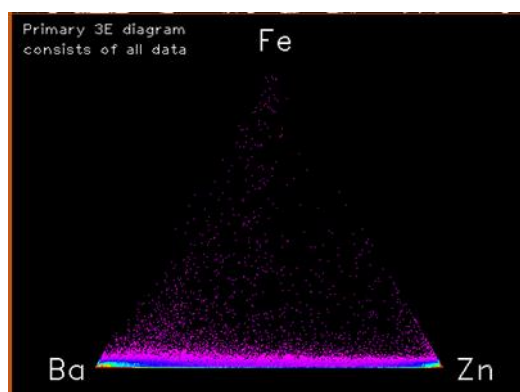


図 4-4-2 H 鉱の試料 1 に含まれる鉱物の Fe-Ba-Zn 三角ダイアグラム

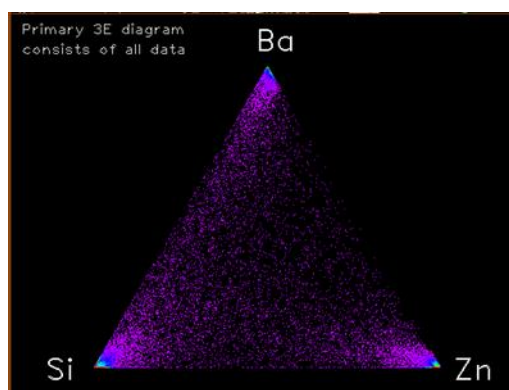


図 4-4-3 H 鉱の試料 2 に含まれる鉱物の Ba-Si-Zn 三角ダイアグラム

4-4-2-2. 選鉱成績の把握

(1) F 鉱の選鉱

1) 処理フロー

図 4-4-4 に処理フローを示す。給鉱は、F 鉱に後述する脱水ケーキを混合したものとした。これを亜鉛抑制剤とともにミルへ投入し、80%通過粒子径（ P_{80} ）で $39\ \mu\text{m}$ に磨鉱した。磨鉱産物に、捕収剤と起泡剤、pH 調整剤を添加後、銅粗選を行い、浮鉱は再磨鉱により $30\ \mu\text{m}$ にして銅精選の給鉱とし、沈鉱は亜鉛粗選の給鉱とした。銅精選浮鉱は脱亜鉛浸出工程を経て、銅精鉱となる。銅精選尾鉱は捕収剤、起泡剤、pH 調整剤を添加する清掃選で処理され、清掃選浮鉱は再磨鉱へ繰り返し、尾鉱は亜鉛粗選に供した。また、脱亜鉛浸出工程の浸出液からは、中和処理により石膏を回収し、鉄酸化・脱鉄工程を経て得た亜鉛溶液から亜鉛殿物を生産した。鉄酸化・脱鉄工程の鉄殿物は浸出尾鉱とした。一方、亜鉛粗選では活性剤、捕収剤を添加し、同様の薬剤を使用する亜鉛精選を経て亜鉛・鉛バルク精鉱を生産した。また、亜鉛粗選尾鉱と精選尾鉱は、混合した後、捕収剤、活性剤を添加する鉄粗選工程にて硫化鉄精鉱を回収し、沈鉱を浮選尾鉱とした。

銅精選浮鉱には亜鉛鉱物が多く混入しているため、前述の脱亜鉛浸出工程が必要である。この工程では、銅精選浮鉱に硫酸（ H_2SO_4 ）及び硫化物の酸化剤である酸素を添加したスラリーをオートクレーブで高温高压処理し、亜鉛を一部銅とともに浸出した。その後、還元的环境で高温高压処理し、浸出液中の銅を沈殿させた。スラリーはその後、銅精鉱シックナーに送られ、銅精鉱シックナーのアンダーフローを銅精鉱とした。銅精鉱シックナーのオーバーフローは中和回路に送り、pH 調整剤を加えて pH8 に調整し、亜鉛を沈殿させて亜鉛殿物を回収した。

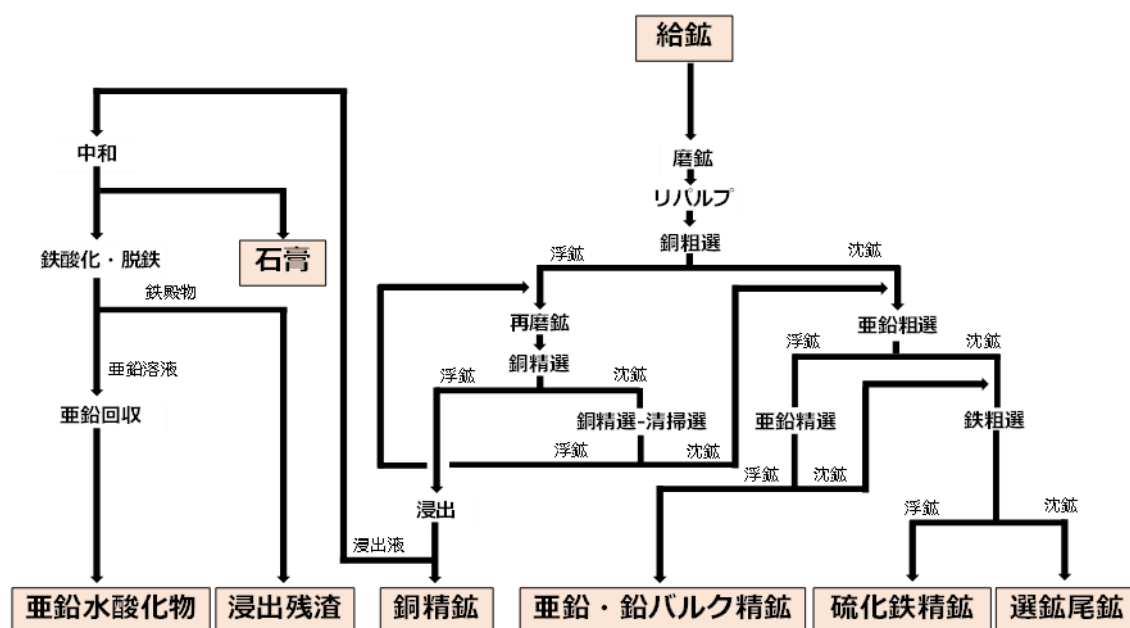


図 4-4-4 F 鉱の処理フロー

揚鉍水処理のプロセスを図 4-3-43 に、マスバランスを図 4-4-5 にそれぞれ示す。海底で採掘された鉍石は海水とともにセミサブに揚鉍され、鉍石分離工程において、ふるいとサイクロンで分級し、75 μm 以上を鉍石として回収する。75 μm 未満の鉍石はサイクロンのアンダーフローとして回収され、固液分離・浄化処理工程で水処理される。水処理で析出したケーキは脱水され、水分率 50wt%の脱水ケーキとして回収される。脱水ケーキはセミサブ上で鉍石と混合され、選鉍給鉍となる。マテリアルバランスに基づけば、鉍石と脱水ケーキの乾燥重量割合は 95 : 5 である。

固液分離・浄化処理

原水槽

汚泥脱水機

反応槽

凝集汚泥槽

膜ろ過ユニット

キレート

pH調整槽

循環槽へ

10%

80%

循環槽へ

10%

鉍石分離

サイクロン

ふるい

75 μ m~2mm 固形分

2mm以上 固形分

全体流量 (720m³/h) に対する流量比率

100%

給水管

高圧ポンプ

循環槽

10% IN (海水)

10% IN (処理水)

鉍石分離装置 浄化処理装置

20% OUT

80%

鉍石IN

鉍石充填ライン

排水弁

鉍石投入装置

鉍石分OUT

掘削機等

100% (鉍石濃度: 10 vol%)

揚鉍管

13%

87%

水供給ライン

合流部

- 143 -

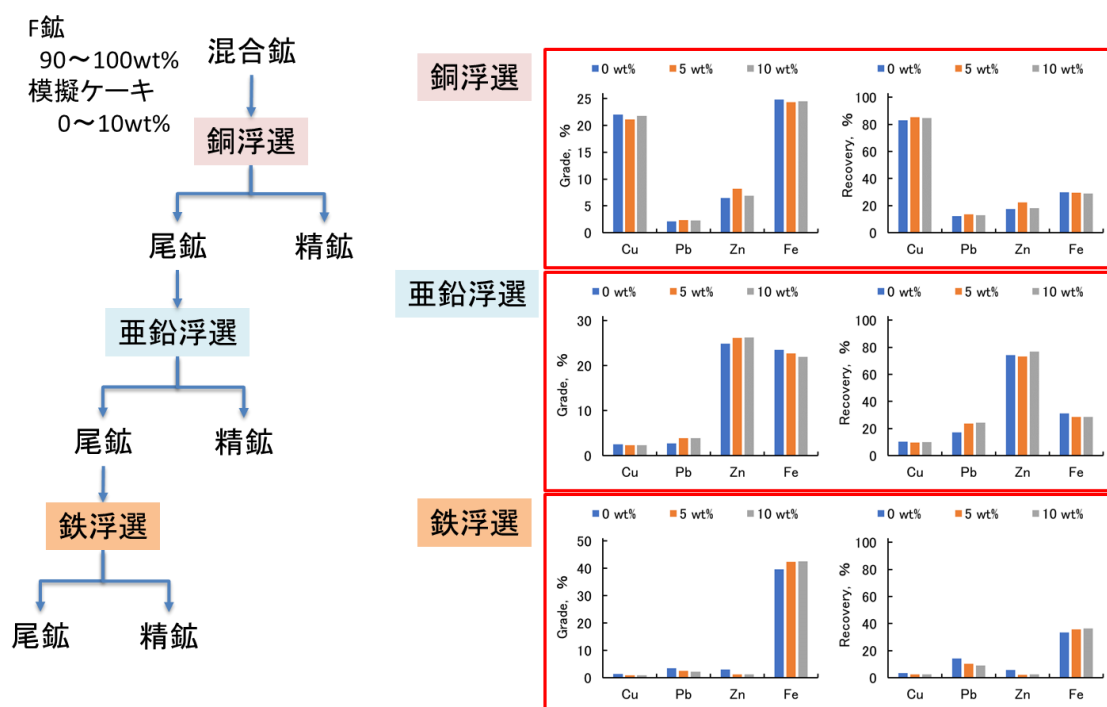


図 4-4-6 F 鉱の脱水ケーキ混合試験と結果

3) 溶存イオンの影響

F 鉱を対象とした銅浮選では、銅鉱物を浮遊させて、亜鉛鉱物を抑制する必要がある。ところが、その分離効率は低く、銅精鉱中の亜鉛品位が高いことが問題となっている。浮選は溶存する金属イオンの影響を受けやすいことから、鉱石の溶出試験を実施し、浮選に影響を与える金属イオンを確認した。

表 4-4-3 に溶媒が水及び EDTA+塩酸の混合液の場合の溶出試験結果を示す。銅は、水を溶媒としたときより、EDTA+塩酸の混合液を溶媒としたときの方が溶出量は大きくなった。これは、易溶性の硫酸銅 (CuSO_4) と 難溶性の酸化銅 (CuO) などの影響が考えられる。鉛は、更にその傾向が顕著に出た。これは、易溶性の塩化鉛 (PbCl_2) と 難溶性の硫酸鉛 (PbSO_4) の影響が考えられる。亜鉛は、EDTA+塩酸の混合液を溶媒としたときの溶出がわずかに多くなった。これは、易溶性の硫酸亜鉛 (ZnSO_4) と 難溶性の酸化亜鉛 (ZnO) の影響が考えられる。鉄は水では溶出せず、EDTA+塩酸の混合液でのみ溶出した。これは、①易溶性の硫酸鉄 (FeSO_4) を含んでいなかった可能性、②溶出後に沈殿した可能性、③難溶性鉄酸化物を含んでいた可能性、が考えられる。

表 4-4-3 F 鉱の水・酸溶出試験結果

試料名	Cu (ppm/mass%)		Pb (ppm/mass%)		Zn (ppm/mass%)		Fe (ppm/mass%)	
	水	EDTA +HCl	水	EDTA +HCl	水	EDTA +HCl	水	EDTA +HCl
Mix	0.41	0.78	0.7	42.4	9.0	10.1	—	0.30
01	0.05	2.08	0.9	211.9	32.0	44.0	—	0.13
02	2.18	4.91	0.5	3.8	2.9	3.0	—	0.21
03	—	0.26	0.4	84.2	6.3	9.8	—	0.51
04	0.83	1.86	0.6	48.6	7.9	8.9	—	0.07
05	0.64	1.01	1.0	48.2	7.6	7.4	—	—
06	0.15	2.30	0.5	107.7	11.9	17.5	—	0.65
07	0.41	5.32	0.5	93.4	7.4	9.0	—	0.38
08	1.20	4.20	0.6	22.0	9.0	9.9	—	0.13
09	1.06	4.69	0.5	33.6	5.3	5.9	—	0.25
10	1.01	4.23	0.1	7.8	11.0	11.3	—	1.34
11	1.07	2.64	1.1	25.7	4.4	4.6	—	0.13
12	0.42	2.19	0.3	37.2	8.0	8.2	—	0.47

4) 選鉱成績

各選鉱産物について、ICP 発光分光分析による元素分析を実施した（表 4-4-4）。また、各選鉱産物への元素の分布状況を把握するため、マテリアルバランスを作成した。特徴は次のとおりである。

- ・ 金は銅精鉱には濃縮しないが、亜鉛・鉛バルク精鉱、硫化鉄精鉱、尾鉱に分散する
- ・ 水銀及びヒ素は各選鉱産物に分散する傾向を示すが、ヒ素はわずかに硫化鉄精鉱に偏る
- ・ 鉛は大半が尾鉱に分配される

表 4-4-4 F 鉱の選鉱成績

産物	重量, wt%	品位						分配率					
		Au, g/t	Ag, g/t	Cu, %	Pb, %	Zn, %	Fe, %	Au, %	Ag, %	Cu, %	Pb, %	Zn, %	Fe, %
給鉱	100.0	1.2	164	4.94	3.5	6.9	16.2	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
銅精鉱	3.3	0.0	347	32.01	1.3	0.4	26.4	0.0	26.9	82.3	4.7	0.7	20.7
亜鉛・鉛バブル精鉱	69.7	2.4	325	3.30	2.4	32.4	18.7	31.7	31.5	10.6	10.7	74.2	18.3
硫化鉄精鉱	7.6	2.8	144	0.60	2.0	1.2	42.0	39.8	15.0	2.1	9.8	3.0	44.2
尾鉱	14.1	0.6	80	0.46	4.8	2.8	5.0	28.5	26.6	5.1	74.8	22.1	16.8

産物	重量, wt%	品位						分配率					
		Ba, %	Cd, g/t	Sr, g/t	As, %	Hg, g/t	-	Ba, %	Cd, %	Sr, %	As, %	Hg, %	-
給鉱	100.0	1.00	402	334	0.15	28	-	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	-
鉛精選浮鉱	3.3	0.09	0	0	0.09	20	-	1.2	0.0	0.0	7.2	8.9	-
亜鉛・鉛バブル精鉱	69.7	0.08	2,170	60	0.21	59	-	1.3	85.6	2.8	22.1	33.3	-
硫化鉄精鉱	7.6	0.41	70	150	0.32	47	-	7.0	3.0	7.7	36.4	28.4	-
尾鉱	14.1	1.67	85	549	0.09	15	-	90.6	11.5	89.5	34.2	29.3	-

(2) G 鉱の選鉱

1) 処理フロー

図 4-4-7 に処理フローを示す。給鉱はまず、磨鉱により産物粒度 21 μm (P_{80})とし、スラリー中に溶出するイオンの影響を極力小さくするために脱水してイオンを除去した。その後、亜鉛硫化鉱物の抑制剤を添加し、加水して混合した。その後起泡剤を添加し、スカルフ浮選により鉛鉱物を浮遊させ、亜鉛鉱物を沈鉱として回収した。浮遊した鉛鉱物は最終尾鉱と混合された。また、沈鉱として回収された亜鉛鉱物は、亜鉛活性剤、pH 調整剤及び起泡剤添加後に亜鉛粗選の工程へと送られた。亜鉛粗選で得られた浮鉱は亜鉛精選工程へ送られ、起泡剤、亜鉛活性剤及び捕収剤を添加して浮選され、亜鉛・鉛バルク精鉱とした。また、亜鉛粗選の沈鉱と亜鉛精選の沈鉱は混合し、亜鉛清掃選の給鉱とした。亜鉛清掃選の浮鉱は鉄粗選を経て硫化鉄精鉱として回収し、その沈鉱はスカルフ浮選沈鉱と混合して、最終尾鉱とした。

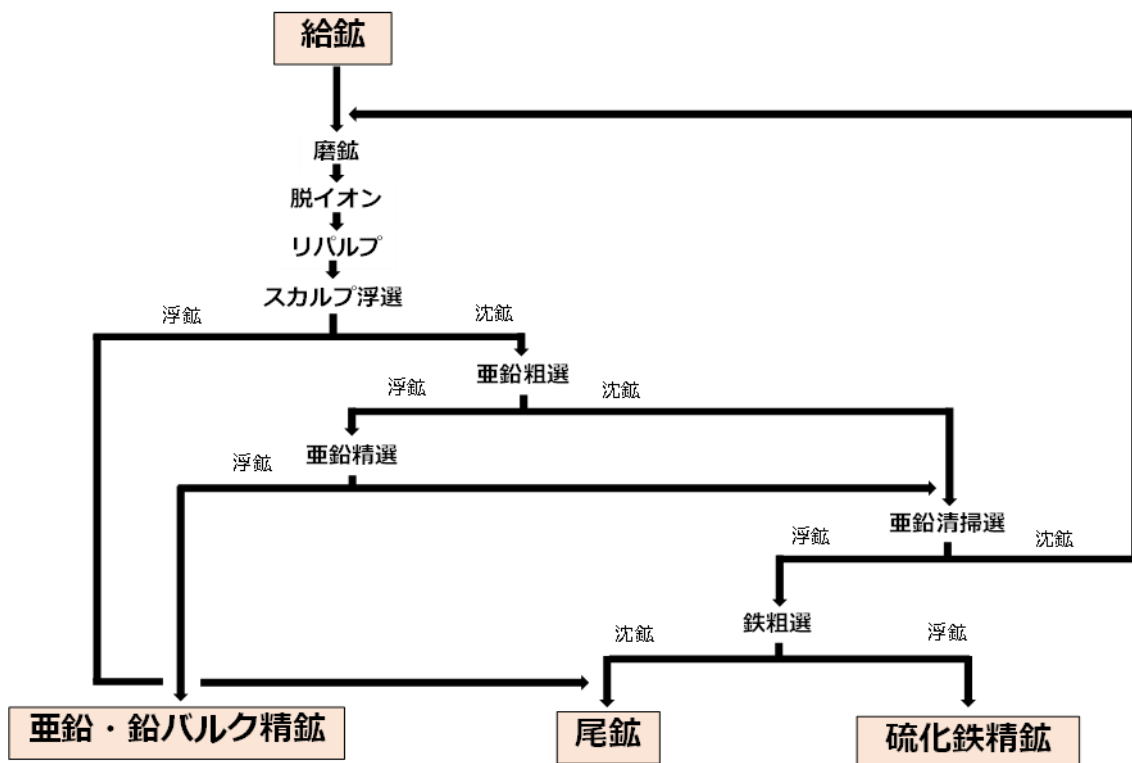


図 4-4-7 G 鉱の処理フロー

2) 溶出イオンの影響

G 鉱は F 鉱に比べて揚鉱後の酸化が進み易く、水に接触すると多量の金属イオンが溶出する特徴を有する。これにより、亜鉛鉱物が抑制され浮遊し難くなる。そこで、亜鉛・鉛・鉄成分の溶出特性を調査した。

試料として、表 4-4-5 に示す 6 種類の鉱石 (①～⑥) を使用し、溶出試験を実施した。溶出試験結果を表 4-4-6 に示す。

各溶媒を用いた時の溶出亜鉛濃度を比較する。例えば、①では、水又は EDTA+塩酸の混合液を溶媒とした場合の亜鉛濃度はそれぞれ 88.4 ppm、99.7 ppm と、酸を加えても顕著な差は認められなかった。すなわち、鉱石中の亜鉛成分は水に浸けるだけで容易に溶出しており、水難溶性かつ酸可溶性のものが少ないことが分かった。この傾向は、その他の試料でも同様に確認された。

溶出鉄濃度を亜鉛と同様に比較すると、②、③、⑥において、EDTA+塩酸の混合液を溶媒としたときに著しく鉄成分が溶出した。酸性下では 2 価鉄より 3 価鉄の方が EDTA と結合しやすいことから、鉱石に含まれる 3 価鉄が遊離して EDTA と結合した結果と考えられる。また、水で溶出した鉄は水可溶性の 2 価鉄である可能性があり、①には同成分が多く含まれることが推察される。

溶出鉛濃度は、EDTA+塩酸の混合液を溶媒とした場合に多く鉛が溶出する結果となった。これは、硫酸鉛は EDTA によって溶け出すため、この試験結果からも鉱石には硫酸鉛が多く含まれることがわかる。なお、水を溶媒とした場合、鉛は最大 7.82 ppm しか溶出しない。鉛イオンは鉱物粒子表面を活性化して浮遊を容易にする特性を有しており、多量に溶出すると、例えば亜鉛と鉄の選択分離性が低下するため、脱イオン工程の導入などにより十分除去しておくことが望ましい。

本試験を通じて、スカルプ浮選工程において、鉛鉱物からの鉛イオンの溶出が亜鉛の抑制を阻害していること確認したため、処理フローに脱イオン工程を追加することとした。

表 4-4-5 試料の元素組成

サンプル名	Au (g/t)	Ag (g/t)	Hg (g/t)	Cu (%)	Pb (%)	Zn (%)	Fe (%)	Ba (%)	Si (%)	S (%)	As (%)
①	2.0	321	14.6	0.30	4.83	4.24	30.6	5.93	0.92	40.3	0.69
②	6.0	286	6.2	0.51	2.57	12.10	32.6	2.79	0.27	41.5	1.00
③	10.0	715	2.2	0.42	14.10	20.30	21.0	1.09	2.35	22.6	0.37
④	<1.0	211	22.6	0.50	11.30	4.42	32.2	0.06	<0.05	43.6	0.39
⑤	3.0	160	7.30	0.43	1.74	4.40	39.6	0.68	0.07	48.0	0.45
⑥	4.0	345	20.6	0.46	5.74	7.50	30.4	4.66	0.74	38.6	0.54

表 4-4-6 G 鉱の水・酸溶出試験結果

試料名	Pb (ppm/mass%)		Zn (ppm/mass%)		Fe (ppm/mass%)	
	水	EDTA +HCl	水	EDTA +HCl	水	EDTA +HCl
①	0.50	253	88.4	99.7	50.2	60.8
②	5.29	394	118	140	9.39	35.2
③	7.82	279	25.7	40.0	11.2	58.0
④	7.60	1160	74.5	71.3	4.38	5.70
⑤	3.88	796	93.1	115	0.20	0.20
⑥	4.81	802	101	128	2.34	15.3

3) 選鉱成績

各選鉱産物について、ICP 発光分光分析による元素分析を実施した（表 4-4-7）。また各選鉱産物への元素の分布状況を把握するため、マテリアルバランスを作成した。特徴は次のとおりである。

- ・ 金は亜鉛・鉛バルク精鉱、硫化鉄精鉱、尾鉱にほぼ等分されたが、銀は半分以上が尾鉱に分配される
- ・ 水銀及びヒ素も分散傾向を示すが、ヒ素はわずかに硫化鉄精鉱に偏る
- ・ カドミウムは亜鉛・鉛バルク精鉱中に濃縮する

表 4-4-7 G 鉱の選鉱成績

産物	重量, wt%	品位						分配率					
		Au, g/t	Ag, g/t	Cu, %	Pb, %	Zn, %	Fe, %	Au, %	Ag, %	Cu, %	Pb, %	Zn, %	Fe, %
給鉱	100.0	4.2	468	0.35	5.7	7.0	16.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
亜鉛・鉛バブル精鉱	0.7	10.7	1,016	1.27	5.8	29.5	14.8	35.9	30.5	51.0	14.1	59.5	13.0
硫化鉄精鉱	7.6	6.3	403	0.46	7.2	1.8	30.4	33.3	19.1	29.1	28.0	5.8	42.3
尾鉱	14.1	2.0	370	0.11	5.2	3.8	11.2	30.9	50.4	19.9	57.8	34.7	44.7

産物	重量, wt%	品位						分配率					
		Ba, %	Cd, g/t	Sr, g/t	As, %	Hg, g/t	-	Ba, %	Cd, %	Sr, %	As, %	Hg, %	-
給鉱	100.0	4.15	252	624	0.36	20	-	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	-
亜鉛・鉛バブル精鉱	0.7	0.46	1,070	90	0.49	43	-	1.6	59.8	2.0	18.9	31.2	-
硫化鉄精鉱	7.6	3.02	50	500	0.60	22	-	16.1	4.4	17.8	36.6	25.1	-
尾鉱	14.1	5.36	142	785	0.25	13	-	82.3	35.8	80.2	44.6	43.7	-

(3) H 鉱の選鉱

1) 処理フロー

図 4-4-8 に処理フローを示す。給鉱は、磨鉱して鉛粗選給鉱とする。鉛粗選の浮鉱は鉛精選工程にて濃縮し、鉛精鉱として回収する。また、鉛粗選沈鉱は亜鉛粗選工程にて浮選され、浮鉱は精選工程にて濃縮を繰り返して亜鉛精鉱として回収し、亜鉛粗選の沈鉱は最終尾鉱とした。

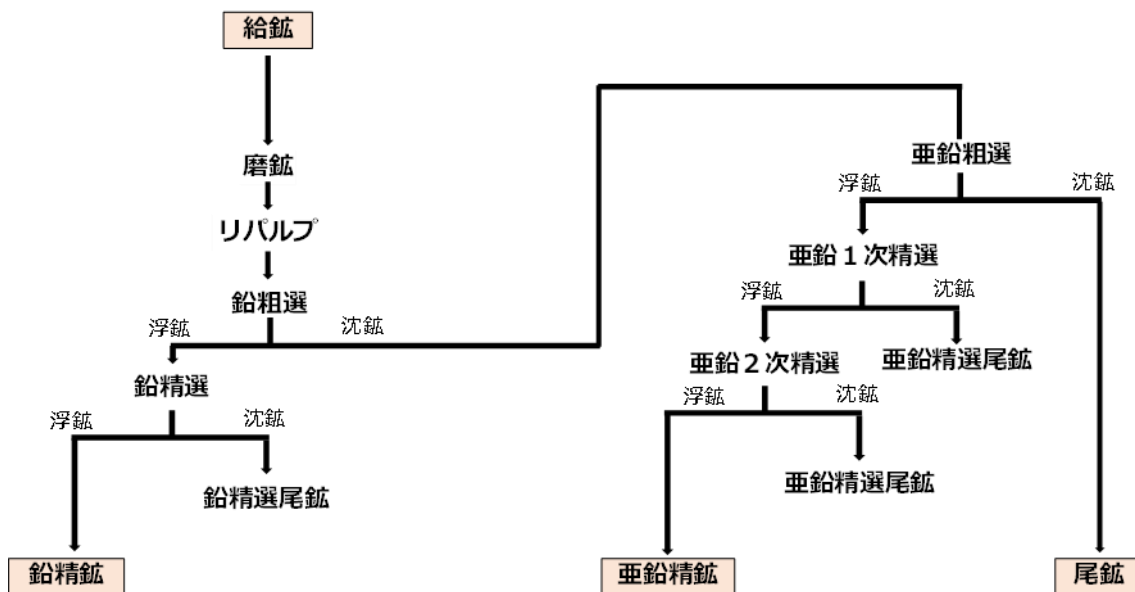


図 4-4-8 H 鉱の処理フロー

2) 溶出イオンの影響

F 鉱、G 鉱と同様に、H 鉱についても溶出試験を実施した。溶出試験に供した試料の品位を表 4-4-8 に、溶出試験結果を表 4-4-9 に示す。

鉄は水溶出では検出せず、EDTA+塩酸溶出では 0～3.1 ppm 検出された。溶媒が水の時、鉄は溶出しない、若しくは溶出したが沈殿したと考えられる。EDTA+塩酸は低 pH のため、水溶性及び難溶性の鉄鉱物が溶出したと考えられる。

銅は水溶出では 0～1.0 ppm、EDTA+塩酸溶出では 0～22.7 ppm 検出された。⑥のみ水で銅が溶出しており、この試料を浮選に供すると銅イオンによる閃亜鉛鉱の活性化が起こる可能性を示唆している。EDTA+塩酸では、水よりも溶出量が多い傾向があり、水溶性及び難溶性いずれの銅鉱物も溶出したことが考えられる。

亜鉛は水溶出では 2.1～23.0 ppm、EDTA+塩酸溶出では 5.3～59.4 ppm 検出された。水では水溶性の亜鉛鉱物が溶出した、若しくは溶出した銅・鉛イオンによって閃亜鉛鉱が活性化されて亜鉛イオンが溶出したと考えられる。EDTA+塩酸では、水より溶出量が多い傾向があり、水溶性及び難溶性いずれの亜鉛鉱物も溶出したことが考えられる。

鉛は水溶出では 2.7～15.1 ppm、EDTA+塩酸溶出では 74～297 ppm 検出された。鉛イ

オンは水に溶出するため、本試験結果から鉛イオンによる閃亜鉛鉱の活性化が起こる可能性が示唆される。EDTA＋塩酸で水より溶出量が多くなるのは、鉱石に含まれる硫酸鉛鉱が水より酸や EDTA に溶けやすいことが原因であると考えられる。

表 4-4-8 溶出試験に供した試料の品位

試料名	Fe(%)	Cu(%)	Zn(%)	Pb(%)
2①	1.60	1.46	44.50	5.10
2②	1.75	1.44	44.60	3.78
3①	3.70	1.14	28.60	4.17
3②	3.08	1.34	36.90	7.48
4	3.82	1.43	37.70	4.88
5	17.60	10.20	9.37	0.38
6	6.42	1.04	26.40	9.33
7①	4.17	1.86	31.80	4.58
7②	3.60	1.58	32.20	10.30
R3 連続試験試料	3.21	1.40	36.42	5.10

表 4-4-9 H 鉱の水・酸溶出試験結果

試料名	Fe (ppm)		Cu (ppm)		Zn (ppm)		Pb (ppm)	
	水	EDTA +HCl	水	EDTA +HCl	水	EDTA +HCl	水	EDTA +HCl
2①	—	—	—	—	3.4	9.3	4.3	101
2②	—	2.1	—	1.6	9.0	28.4	7.7	141
3①	—	—	—	—	4.7	14.8	3.5	74
3②	—	—	—	—	4.0	10.6	7.4	115
4	—	1.1	—	—	5.1	10.2	6.9	112
5	—	1.8	1.0	22.7	23.0	39.7	2.7	27.8
6	—	—	—	—	2.1	5.3	10.0	152
7①	—	—	—	—	4.0	38.6	15.1	177
7②	—	1.8	—	1.1	18.1	8.5	11.0	250
R3連続試験試料	—	3.1	—	1.6	14.7	59.4	12.0	297

3) 選鉱成績

各選鉱産物について、ICP 発光分光分析による元素分析を実施した（表 4-4-10）。また各選鉱産物への元素の分布を把握するため、マテリアルバランスを作成した。特徴は次のとおりである。

- ・ 金・銀は 8 割弱が亜鉛精鉱に分配され、尾鉱へのロスが少ない
- ・ 水銀、ヒ素、カドミウムも大部分が亜鉛精鉱に分配される
- ・ バリウムとストロンチウムは似た分配挙動を示す

表 4-4-10 H 鉱の選鉱成績

産物	重量, wt%	品位						分配率					
		Au, g/t	Ag, g/t	Cu, %	Pb, %	Zn, %	Fe, %	Au, %	Ag, %	Cu, %	Pb, %	Zn, %	Fe, %
給鉱	100.0	39	1,039	1.27	3.8	40.8	2.9	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
銅粗選浮鉱	0.7	33	1,350	16.20	20.2	14.9	14.2	0.6	0.9	8.5	3.6	0.2	3.3
鉛精鉱	4.6	54	2,560	7.14	30.0	28.8	5.9	6.5	11.4	25.9	36.6	3.3	9.5
鉛精選尾鉱	3.3	45	1,480	1.58	6.1	42.1	4.8	3.9	4.8	4.1	5.4	3.5	5.6
亜鉛精鉱	69.7	45	1,170	1.04	2.1	52.8	2.4	81.1	78.5	56.9	39.4	90.2	59.4
亜鉛精選尾鉱	7.6	24	423	0.49	3.5	11.3	5.6	4.7	3.1	2.9	6.9	2.1	14.8
尾鉱	14.1	9	104	0.15	2.2	2.0	1.5	3.3	1.4	1.7	8.2	0.7	7.4

産物	重量, wt%	品位						分配率					
		Ba, %	Cd, g/t	Sr, g/t	As, %	Hg, g/t	-	Ba, %	Cd, %	Sr, %	As, %	Hg, %	-
給鉱	100.0	3.52	1,863	1,625	0.28	78	-	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	-
銅粗選浮鉱	0.7	1.10	836	559	0.36	30	-	0.2	0.3	0.2	0.8	0.3	-
鉛精鉱	4.6	0.21	1,550	138	0.62	55	-	0.3	3.8	0.4	10.2	3.2	-
鉛精選尾鉱	3.3	1.75	2,060	802	0.39	103	-	1.7	3.7	1.7	4.6	4.4	-
亜鉛精鉱	69.7	1.01	2,400	458	0.29	98	-	20.0	89.8	19.6	72.5	87.3	-
亜鉛精選尾鉱	7.6	8.97	453	3,930	0.21	34	-	19.3	1.8	18.3	5.7	3.3	-
尾鉱	14.1	14.6	70	6,880	0.12	8	-	58.6	0.5	59.8	6.1	1.5	-

4) 亜鉛精鉱中の珪素低減試験

後述する製錬試験時に亜鉛製錬所にヒアリングをしたところ、国内亜鉛製錬所に供給するためには、亜鉛精鉱中の珪素品位（表 4-4-11）を 1/3 以下に低減する必要がある。

そこで、亜鉛精鉱の珪素品位を 1%程度にするための浮選条件を確立するため、鉛粗選沈鉱を用いて亜鉛粗選～1 次精選～2 次精選を実施した。本処理フローで得られた試験結果を表 4-4-12 に示す。亜鉛 1 次精選を pH 10.0、亜鉛 2 次精選を pH 11.0 で行うことにより、浮鉱側への珪素の分配が低減され、珪素品位が 1%台に低減された。

表 4-4-11 亜鉛精鉱の分析結果

Au, g/t	Ag, g/t	Hg, g/t	Cu, %	Pb, %	Zn, %	Fe, %	Ba, %	Si, %	S, %	As, %
45.0	1,170	98.2	1.04	2.14	52.8	2.44	1.01	4.63	24.6	0.29

表 4-4-12 各浮鉱中の亜鉛及び珪素

	亜鉛		珪素	
	品位 (%)	実収率 (%)	品位 (%)	実収率 (%)
亜鉛粗選浮鉱	55.2	78.9	3.33	22.1
亜鉛 1 次精選浮鉱	59.3	68.2	1.55	8.30
亜鉛 2 次精選浮鉱	60.4	62.7	1.07	5.10

4-4-2-3. 今後の課題

F 鉱、G 鉱、H 鉱の共通の課題は、粉砕コストの低減、試薬量の低減及び精鉱中の不純物元素の低減である。鉱物の単体分離度を高めるため、各浮選給鉱（磨鉱工程後の試料）の P_{80} を 50 μm 以下にして試験を実施したが、多くの粉砕エネルギーを要する方法である。そのため、浮選工程の給鉱粒度まで細粒化する前の段階でシリカ鉱物を分離する方法により、粉砕コストを低減させる試みが必要である。また、鉛浮選において、閃亜鉛鉱を抑制するために多量の試薬を使用しているが、薬剤コストの低減のため、代替試薬の使用又は薬剤使用量の低減が必要である。そのためには、閃亜鉛鉱の活性・抑制メカニズム等の解明、具体的には、金属イオンや薬剤と鉱物との反応の考察、鉱物表面観察といった基礎的な研究が有効である。精鉱中の不純物元素の低減に関しては、浮選の処理フローの更なる改良に加え、湿式処理等浮選以外の方法を組み合わせることも検討する余地がある。

F 鉱については、これまでの取組により銅精鉱をオートクレーブで高温高压処理することにより不純物である亜鉛の品位を低減できたが、鉛品位を低下させることはできていない。また、オートクレーブ処理は CAPEX、OPEX ともに高額になるため、経済性の向上にはより安価な処理プロセスの検討が必要である。

4-4-3. 製錬分野

4-4-3-1. H 鉱由来の亜鉛精鉱の製錬試験

国内の亜鉛製錬所にて、H 鉱由来の亜鉛精鉱（表 4-4-11）3.4 t を陸上鉱山由来の亜鉛精鉱 7,000 t と混合し、実操業炉に供する製錬試験を行い、亜鉛地金を作製した（図 4-4-9）。H 鉱由来の亜鉛精鉱の混合割合が小さかったこともあり、試験中、工程内で問題は発生しなかった。一方、精鉱中の不純物である珪素及び水銀濃度が高いことが懸念された。特に、珪素は電解液の粘性を高め、固液分離不良を誘発し得るため、製錬所により多くの量を供給するためには、精鉱中の珪素濃度を低減する必要がある。そのため、前述の珪素低減試験により、精鉱中の珪素濃度を低減するための処理フローを構築し、珪素の問題は解決した。

4-4-3-2. H 鉱由来の鉛精鉱の製錬試験

国内の亜鉛・鉛製錬所にて、H 鉱由来の鉛精鉱（表 4-4-13）350 kg を陸上鉱山由来の亜鉛精鉱 7.5 t と混合し、実操業炉に供する製錬試験を行い、亜鉛地金等を作製した（図 4-4-10）。H 鉱由来の鉛精鉱中には忌避元素が多く、特に水銀の品位を低く抑える必要があることが分かった。



図 4-4-9 H 鉱由来の亜鉛精鉱から作製した亜鉛地金

表 4-4-13 製錬試験に供した H 鉱由来の鉛精鉱品位

Zn	Pb	Cu	Cd	Fe	As	Au	Ag	Hg	SiO ₂
28.77	21.98	6.11	0.16	6.06	0.62	48	2197	99	4.79
F	Cl	Sn	Sb	Bi	T-S	SO ₄ -S	Na	K	CaO
<0.01	0.03	<0.01	0.41	<0.01	25.2	1.22	0.49	<0.01	<0.01
MgO	MnO	Al ₂ O ₃	Cr	Ni	Tl	Se	Te	T-C	M-Zn
<0.01	0.02	0.19	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	1.3	<0.5
Co	Mo	In	Br	水分					
<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	2.8		単位：Au、Ag、Hg は g/t、他は%			

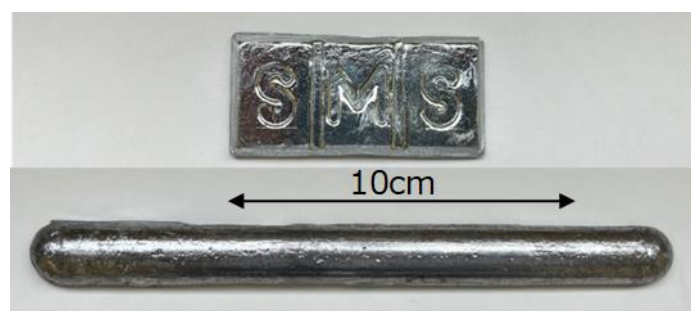


図 4-4-10 H 鉱由来の鉛精鉱を用いた製錬試験で作製した亜鉛地金（上）
と粗鉛（下）

4-4-3-3. 今後の課題

精鉱を国内製錬所に供して亜鉛地金を製造したものの、精鉱中の忌避元素、特にヒ素や水銀の品位が高い点が指摘された。製錬所によってヒ素や水銀の許容量は異なるが、現時点の品位では、いずれの製錬所においても精鉱の受け入れ可能量が限定される状況である。鉱石又は精鉱中のヒ素や水銀の存在形態は明らかではなく、ppm オーダーのため浮選による更なる除去は困難と思われるが、乾式製錬だけでなく、湿式製錬との組み合わせなど、多様なアプローチを検討する余地はある。

5. 法制度のあり方の検討等

5-1. 概要

第2期の総合評価報告書では、海底熱水鉱床開発において考慮すべき課題を技術的側面と社会的側面に分けて整理した上で、社会的側面に関しては、法制度の未整備、社会的受容性の醸成、他産業の海域利用に伴う操業日数の減少、金属価格の変動及び需要動向を課題として挙げている。

第3期は、これら社会的課題に対応すべく、法制度と社会的受容性について検討を開始した。ここでは、前者を国際法と国内法、後者を国際動向と社会の関心、ステークホルダー及び不確実性に分けて述べる。また、他産業の海域利用の実態として鉱床賦存が知られる南西諸島海域及び伊豆・小笠原海域における漁業活動を調査したほか、2017年以降の主要金属価格の推移をとりまとめた。

5-2. 法制度

法制度の整備に必要な情報整理のために、海底熱水鉱床事業に関係する現行法制度を特定した上で、これらの内容確認及び当該事業への適用可能性の検討を行った。その結果を踏まえて、現在国際社会で合意されている環境保全に関する規則を把握するため、UNCLOSやその他条約の整理を行った。

国際法は国家の義務、国内法は事業者の義務を規定するという構造を念頭に置き、国家管轄圏内での海洋鉱物資源開発において生じる義務について、国際法の観点から検討を行った。なお、国家管轄権内での海洋鉱物資源開発については、UNCLOS第208条第3項に「(国の管轄の下で行う海底における活動から生じる海洋環境の汚染を防止し、軽減し及び規制するための)(国内)法令及び措置は、少なくとも国際的な規則及び基準並びに勧告される方式及び手続と同様に効果的なものとする」と規定されているが、実際には国際的にはそのようなルールは未策定の状況である点には留意する必要がある。なお、同条第5項には「いずれの国も、特に、権限のある国際機関又は外交会議を通じ、(国の管轄の下で行う海底における活動から生じる)海洋環境の汚染を防止し、軽減し及び規制するため、世界的及び地域的な規則及び基準並びに勧告される方式及び手続を定める。」とあるが、この条文の記述に該当する国際的なルールは現時点では存在しない。

国内法についても、資源開発と環境保護の観点から、鉱業法、環境影響評価法、鉱山保安法を対象に、海底熱水鉱床開発に際して必要な手続を確認した上で、想定される事業フローに現行法制度を当てはめた場合の解釈や考え方を議論した。

5-2-1. 国際法

海洋に関する国際法について包括的に定めた条約が UNCLOS である。UNCLOS 第 136 条では、「深海底及びその資源は、人類の共同の財産である」と定め、深海底及びその資源に対する国の主権や主権的権利の主張又は行使を禁止する（第 137 条）とともに、深海底における活動を管理する（第 153 条）ための機関として、ISA の設置を定めている（第 156 条）。深海底（The Area）に関する国際的規則としては、UNCLOS 第 11 部に関する実施協定が定められており、ISA は当該協定に基づき 2000 年～2012 年にマンガン団塊・海底熱水鉱床・コバルトリッチクラストに関する探査規則を採択した。その後、2013 年にはマンガン団塊に関する探査規則を改正し、2019 年には深海底における海洋鉱物の探査に起因して起こり得る環境影響の評価に関する勧告をまとめた。開発規則については、2016 年以降、ISA において策定に向けた審議が続いている。開発規則は 2023 年 7 月にとりまとめられる予定であったが、2023 年 7 月の理事会で、2025 年 7 月の採択を視野に入れて審議を継続する方針が示されたところである。

第 3 期には、審議中の開発規則を除き、現行の国際法の規定を確認した。ここでは、UNCLOS を対象に、国際法の観点から国家管轄圏内の海洋環境保全について述べる。

5-2-1-1. UNCLOS における環境保全に関する義務について

UNCLOS は、第 11 部で「深海底」について、第 12 部で「海洋環境の保護及び保全」について定めている。第 11 部の第 145 条は、深海底における活動により生ずる有害な影響からの海洋環境の効果的な保護を確保するための必要な措置をとることについて述べている。他方で、第 12 部は「海洋環境の保護及び保全」と題して、深海底の活動に関わらず、海洋環境保護及び保全に関する一般的義務を定めていることから、国家管轄圏内の海底熱水鉱床開発において留意する事項も含んでいるとの認識に基づき、第 3 期は、主に第 12 部に定められている内容を中心に整理した。これは、国家管轄圏内の海域で主権的権利に基づく開発が行われる場合であっても、開発を行う者は、その海域を超えた部分に影響を拡大させないことに留意する必要があること、また第 12 部の規定は国家管轄圏内での開発に直接制限を及ぼすものではないが、締約国は条約に従って国内法を整備することから、海洋環境に関する一般的義務の内容も検討する必要があるとの認識に基づくものである。

(1) 海洋環境の保護及び保全

海洋環境に関する国の一般的な義務として、海洋環境の保護・保全が挙げられる。「海洋環境を保護し及び保全する義務」は、UNCLOS 第 12 部では第 192 条（一般的義務）、193 条（天然資源を開発する国の主権的権利）及び 235 条（責任）で次のように明記される。

- 第 192 条：いずれの国も、海洋環境を保護し及び保全する義務を有する。
- 第 193 条：いずれの国も、自国の環境政策に基づき、かつ、海洋環境を保護し及び保全する義務に従い、自国の天然資源を開発する主権的権利を有する。
- 第 235 条 1 項：いずれの国も、海洋環境の保護及び保全に関する自国の国際的義務を履行するものとし、国際法に基づいて責任を負う。

また、「保護及び保全」について、第 194 条（海洋環境の汚染を防止し、軽減し及び規制するための措置）でも次のとおり明記される。

- 第 194 条 5 項：この部の規定によりとる措置には、希少又はぜい弱な生態系及び減少しており、脅威にさらされており又は絶滅のおそれのある種その他の海洋生物の生息地を保護し及び保全するために必要な措置を含める。

UNCLOS が採択された 1982 年当時、第 192 条が規定する海洋環境保護・保全に関する一般的義務は勧告的な意味合い（hortatory）として捉えられていたが、2015 年の南シナ海事件を機に第 192 条に基づく一般的義務の考え方が変化した（Churchill, 2022）。国には実施主体による第 192 条違反を阻止するための「相当の注意義務（Due Diligence）」が求められる。「相当の注意義務」には、立法及び規則・措置を執行するための一定レベルの警戒が含まれる。

(2) 海洋環境汚染又は汚染の危険に対してとるべき措置

「海洋環境の汚染」については、UNCLOS 第 1 部第 1 条 1 項で、「人間による海洋環境（三角江を含む。）への物質又はエネルギーの直接的又は間接的な導入であって、生物資源及び海洋生物に対する害、人の健康に対する危険、海洋活動（漁獲及びその他の適法な海洋の利用を含む。）に対する障害、海水の水質を利用に適さなくすること並びに快適性の減殺のような有害な結果をもたらす又はもたらすおそれのあるものをいう。」と定義されている。

第 12 部では、海洋環境の汚染の防止・軽減・規制、及び汚染の危険又は影響を観察し、測定し、評価し及び分析するよう努力すること、汚染又は重大かつ有害な変化をもたらすことがある場合に、潜在的な影響を評価・公表することが規定されている。

1) 汚染の防止・低減・規制

海洋環境の汚染の防止・軽減・規制については、第 194 条（海洋環境の汚染を防止し、軽減し及び規制するための措置）、第 208 条（国の管轄の下で行う海底における活動から

の汚染）及び第 214 条（海底における活動からの汚染に関する執行）に規定される。

- 第 194 条 1 項：いずれの国も、あらゆる発生源からの海洋環境の汚染を防止し、軽減し及び規制するため、利用することができる実行可能な最善の手段を用い、かつ、自国の能力に応じ、単独で又は適当なときは共同して、この条約に適合するすべての必要な措置をとるものとし、また、この点に関して政策を調和させるよう努力する。
- 第 208 条 1 項：沿岸国は、自国の管轄の下で行う海底における活動から又はこれに関連して生ずる海洋環境の汚染（中略）を防止し、軽減し及び規制するため法令を制定する。
- 第 208 条 2 項：いずれの国も、1 項に規定する汚染を防止し、軽減し及び規制するために必要な他の措置をとる。
- 第 208 条 3 項：1 項及び 2 項に規定する法令及び措置は少なくとも国際的な規則及び基準並びに勧告される方式及び手続と同様に効果的なものとする。
- 第 214 条：いずれの国も、第 208 条の規定に従って制定する自国の法令を執行(enforce)するものとし、自国の管轄の下で行う海底における活動から又はこれに関連して生ずる海洋環境の汚染（中略）から生ずる海洋環境の汚染を防止し、軽減し及び規制するため、権限のある国際機関又は外交会議を通じて定められる適用のある国際的な規則及び基準を実施するために必要な法令を制定し及び他の措置をとる。

2) 環境影響評価

海洋環境の汚染リスクに対しては、第 204 条（汚染の危険又は影響の監視）に海洋環境のモニタリングについて、第 206 条（活動による潜在的な影響の評価）に環境影響評価の実施について規定される。

- 第 204 条 1 項：いずれの国も、（中略）海洋環境の汚染の危険又は影響を観察し、測定し、評価し及び分析するよう、実行可能な限り努力する。
- 第 204 条 2 項：いずれの国も、特に時刻が許可し又は従事する活動が海洋環境を汚染するおそれがあるか否かを決定するため、当該活動の影響を監視する。
- 第 206 条：いずれの国も、自国の管轄又は管理の下における計画中の活動が実質的な海洋環境の汚染又は海洋環境に対する重大かつ有害な変化をもたらすおそれがあると信ずるに足りる合理的な理由がある場合には、当該活動が海洋環境に及ぼす潜在的な影響を実行可能な限り評価するものとし、前条に規定する方法によりその評価の結果についての報告を公表し又は国際機関に提供する。

(3) 海洋環境汚染によって生じた損害に関する対応

海洋環境汚染によって生じた損害に関する対応は、第 235 条（責任）に規定される。

- 第 235 条 2 項：いずれの国も、自国の管轄の下にある自然人又は法人による海洋環境の汚染によって生ずる損害に関し、自国の法制度に従って迅速かつ適正な補償その他の救済のための手段が利用し得ることを確保する。
- 第 235 条 3 項：いずれの国も、海洋環境の汚染によって生ずるすべての損害に関し迅速かつ適正な賠償及び補償を確保するため、（中略）適当なときは、適正な賠償及び補償の支払に関する基準及び手続（例えば、強制保険又は補償基金）を作成するために協力する。

5-2-1-2. 国家管轄圏内において生じる義務についての検討

国家管轄圏内での海洋鉱物資源開発によって生じる義務について、UNCLOS 及び国際海洋法裁判所の勧告を参照して検討した。

(1) 海洋環境の保護及び保全についての一般的義務

UNCLOS 第 208 条には、国家管轄権内の海底での活動から生じる海洋環境の汚染を防止し、軽減し、及び規制するための、「少なくとも国際的な規則及び基準並びに勧告される方式及び手続と同様に効果的な」法令及び措置を定める旨が規定されているが、実際には国際的にそのようなルールは未策定の状況である点には留意する必要がある。

その状況を踏まえた上で、国家管轄圏内での海洋鉱物資源開発に関する国家の義務を考えるにあたっては、国は海洋環境の保護及び保全についての一般的義務を負っていることを考慮することが重要である。前述のとおり、海洋環境の保護及び保全に関しては、UNCLOS 第 192 条において、国は「海洋環境を保護し及び保全する義務を有する」一般的義務を負う旨が定められている。

また、同第 194 条 1 項では、あらゆる発生源からの海洋環境の汚染を防止し、軽減し、及び規制するための措置を規定しており、同条にて「海底及びその下の資源の探査又は開発に使用される施設及び機器からの汚染」(同条 3 項 (c)) を最小にするための措置をとること等が定められている。義務の位置付けや性格については、国際判例等においてどのような解釈が示されるかについても、引き続き留意しておく必要がある。

(2) 相当の注意義務

相当の注意義務とは、義務を遵守するという結果を達成するために、適当な手段を講じ、可能な限り最善の努力を尽くし、及び最高のことを行うという義務であり、一般的義務の遵守にあたっては、国家は「相当の注意義務 (Due Diligence)」を果たすことが求められる (佐古田, 2020)。2011 年 2 月 1 日に国際海洋法裁判所の海底紛争裁判部より出された勧告的意見によれば、「相当の注意義務」は可変的な概念で、ある時代には十分に注意を尽くしているとされていた措置が、新たな科学技術の知見に照らすとその注意が充分でなくなることもあるとの指摘がなされた。またこの概念は、活動に伴う危険との関連で変わることもあり、相当の注意義務の基準は、危険が大きい活動ほど厳しくなければならないとの見解が示された (Seabed Disputes Chamber of the International Tribunal for the Law of the Sea, Responsibilities and Obligations of States Sponsoring Persons and Entities with respect to Activities in the Area (Advisory Opinion), para. 117)。

相当の注意義務の具体的な内容の特定は、準拠できる明確な基準がない状況では特に難しく、現状として事前にどこまで対策を講じるべきかを特定することは困難である。

5-2-2. 国内法

5-2-2-1. 開発に際して必要な手続き

鉱業法が定める事業許可に必要な手続きと、環境影響評価法及び鉱山保安法が定める環境影響評価の手続きを以下に述べる。

(1) 事業許可に関して必要な手続き

鉱業法の目的は、「鉱物資源を合理的に開発することによって公共の福祉の増進に寄与するため、鉱業に関する基本的制度を定めること」（第1条）である。図5-2-1に鉱業法に基づく手続きのフローを示す。同法で規定する事業許可の手続きには、特定区域の指定（38条）、特定開発者の選定（第38条、第39条他）、申請の評価（第40条）等、行政が行う手続きのほか、試掘権者による採掘権の設定申請（第41条）、及び施業案の設定（第63条2項等）がある。

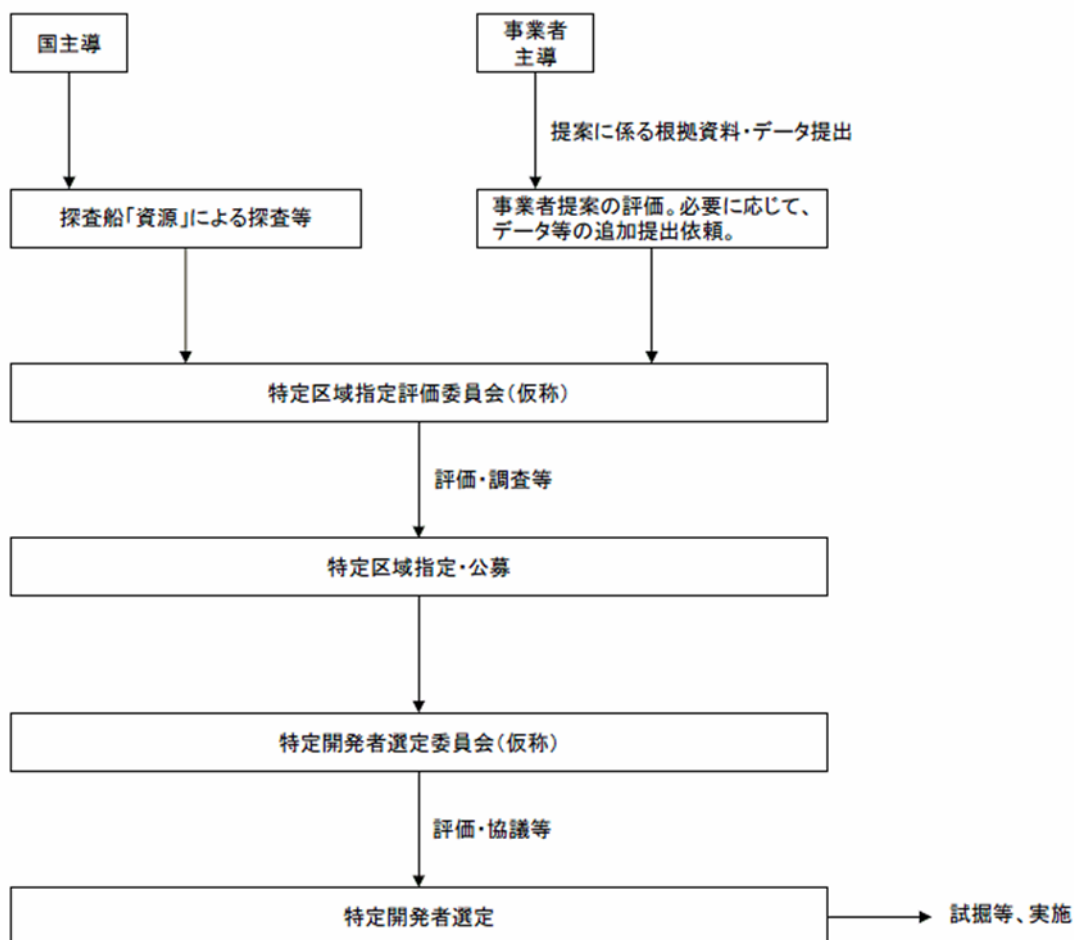


図5-2-1 鉱業法に基づく手続きのフロー
(経済産業省資源エネルギー庁)

(2) 環境影響評価に関して必要な手続き

環境影響評価に関して必要な手続きを定めた国内法として、環境影響評価法、鉱山保安法が挙げられる。それぞれの特徴を以下に述べる。

1) 環境影響評価法

環境影響評価法の目的は、「環境影響評価が適切かつ円滑に行われるための手続きその他所要の事項を定め、その事業に係る環境の保全について適正な配慮がなされることを確保し、もって現在及び将来の国民の健康で文化的な生活の確保に資することを目的とする」（第1条）と定められている。

環境影響評価法における評価対象は事業の目的に含まれる事業活動であり（第2条）、事故時の環境影響については同法で定める対象に含まれない。同法においては、①調査及び予測の結果を踏まえて、事業者の実行可能な範囲内での環境影響の回避・低減がされるかという観点から、また、②環境基準や環境保全上の規制基準等との整合性の観点から、評価が実施されることとなっている。

環境影響評価法で環境アセスメントの対象となる事業は、道路、ダム、鉄道、空港、発電所などの13種類である。このうち規模が大きく環境に大きな影響を及ぼすおそれがある事業は「第1種事業」として定められており、環境アセスメントの手続きを必ず行う必要がある。この「第1種事業」に準ずる規模の事業が「第2種事業」であり、手続きを行うかどうかを事業の許認可をする者が個別に判断する。また、地方公共団体の条例で対象となる事業は各地方公共団体により異なるので、個別の確認が必要である。つまり、「第1種事業」の全てと、「第2種事業」のうち手続きを行うべきと判断されたものが、環境影響評価法に基づく環境アセスメントの手続きを行うこととなる。

鉱物の採掘や土石の採取については、各都道府県で定める条例で環境アセスメントの対象とされているケースが多いが、環境影響評価法においては環境アセスメントの対象事業としては定められていない。

なお、仮に海底熱水鉱床開発にあたって新たに一定規模以上の港湾を整備する場合は、港湾計画に係る環境影響評価を行う必要がある。具体的には、港湾計画に係る環境影響評価については、「港湾管理者は、港湾計画の決定又は決定後の港湾計画の変更のうち、規模の大きい埋立てに係るものは港湾環境影響評価を行わなければならない。」（第48条第1項）と定められており、埋立て・掘り込みの面積が合計300ha以上の港湾計画の決定などはその対象となる（環境影響評価法施行令第20条）。港湾計画策定にあたっては、港湾法第3条の2の規定により、国土交通大臣が定める「港湾の開発、利用及び保全並びに開発保全航路の開発に関する基本方針」に基づき、港湾及びその周辺の環境に与える影響を計画の策定に際して評価することとされており、計画段階で環境影響評価を行うこととしてこれまで実施がなされている。

同法における環境影響評価の要点を、図5-2-2に示す。

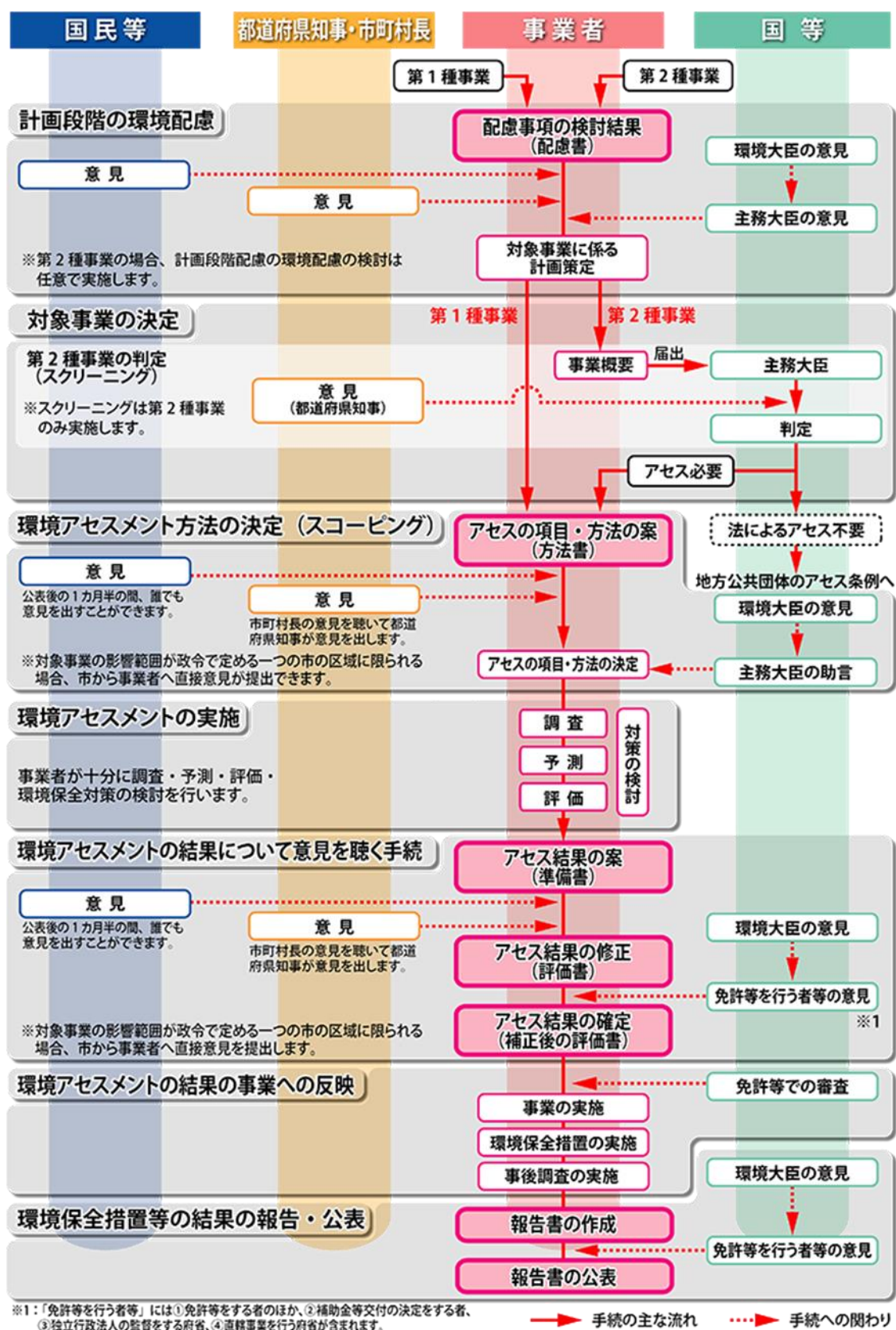


図 5-2-2 環境影響評価のフロー
(環境省)

2) 鉱山保安法

鉱山保安法の目的は「鉱山労働者に対する危害を防止するとともに鉱害を防止し、鉱物資源の合理的開発を図ること」(第1条)である。なお、保安上必要な措置について定める保安規程は、事業者が自主的に定めるものである。同法に基づき鉱業権者が取るべき手続きの要点を表5-2-1に示す。

鉱山保安法第13条において、「鉱業上使用する建設物、工作物その他の施設であって保安の確保上重要なものとして経済産業省令で定めるもの」については「特定施設」として定められており、鉱業権者は、これらの設置又は変更の工事をしようとする際にはその工事の計画を産業保安監督部長に届け出なければならない。具体的には、粉じん処理施設、坑廃水処理施設、騒音発生施設、振動発生施設、か焼場又は乾燥場、製錬場、捨石・鉱さい・沈殿物の集積場など35の施設が「特定施設」として定められている(鉱山保安法施行規則別表第二)。

表 5-2-1 鉱山保安法に基づき鉱業権者が取るべき手続きの要点

手続き		要点
1	工事計画の届出 (法第13条)	鉱業権者は、特定施設(規則別表第二の上欄)の設置又は変更工事をしようとするときは、その工事の計画の届出(規則様式第一)を実施。
2	保安規程の策定 (法第18条、19条)	鉱業権者は、鉱業を開始しようとするとき等に、現況調査を実施し、その結果に基づき、保安上必要な措置について保安規程を定め、経済産業大臣に届出。
3	特定施設の使用前検査 (法第14条)	鉱業権者は、特定施設の設置・変更の工事を完成したときは、使用の開始前に検査を行い、結果を記録・保存。
4	特定施設の使用開始の届出 (法第15条)	鉱業権者は、特定施設の使用を開始したとき又は廃止したときは、その旨を届出。
5	特定施設の定期検査 (法第16条、規則第34条)	鉱業権者は、特定施設のうち経済産業省令で定めるものについては、定期に検査を行い、その結果を記録、保存。

5-2-2-2. 事業フローに当てはめた検討

海底熱水鉱床開発に伴う環境影響を規制しようとする場合、想定される事業フローに現行法制度を当てはめることが可能かどうかを検討した。

(1) 採鉱・揚鉱システムの各法における位置付け

既存の法制度において、海底熱水鉱床開発で想定する採鉱・揚鉱システムがどのように定義されるかを検討した。その結果、鉱山保安法では「海洋施設」（鉱山保安法施行規則第1条第2項第25号）、海洋汚染防止法では「船舶」（海洋汚染防止法第3条、海洋汚染防止法施行令第1条7）と位置付けられる可能性が高いとの結論に至った。

(2) 建設期間の主な環境影響要因と適用されうる法規則

海底熱水鉱床開発事業において、建設（操業準備）の段階では海域での大規模な工事を行うことは想定しておらず、船のアンカリングが主な環境影響要因になると考えられる。

鉱山保安法の特定施設に該当する設備については技術基準への適合と工事計画の届出が必要となり、鉱山保安法施行規則別表第2にて特定施設が指定されている（鉱山保安法施行規則第31条）。

(3) 操業時の主な環境影響要因と適用されうる法規則

操業時は、海面から海底面にわたり、採鉱・揚鉱システムを構成する各設備・装置の稼働等による環境への影響が想定される。現時点では、採鉱・揚鉱システムの主な構成要素、機能、機能から想定される環境影響要因は表5-2-2のとおりである。

鉱山保安法では、鉱業権者は鉱業を開始するにあたり、鉱山の現況を調査し、その結果に基づき保安上必要な措置について保安規程を定め、経済産業大臣に届出を行う必要がある。保安規程で定める必要がある「鉱業権者が講ずべき措置」については、同法施行規則第3条～第29条（第23条、第27条、第28条を除く）に規定されており、「坑水又は廃水の処理等」（第19条）や「海洋施設における鉱業廃棄物等の処理」（第24条）等が挙げられている。鉱山保安法については、「鉱害の防止を1つの目的としており、（中略）そこに生態系保全の観念を読み取るのは難しいように思われる。」との見解がある（交告、2008年）。よって、鉱山保安法における規定が存在する場合においても、現在、ISAで策定中の開発規則等に照らして、海洋環境の保護及び保全の観点から、規定が十分な内容かどうかの検討を要する。

また、海洋汚染防止法では油、有害液体物質、廃棄物等の排出が規制される。鉱山保安法、海洋汚染防止法との適用関係についても検討を行い、適用される可能性のある規制事項とともにまとめたものを表5-2-2に示す。なお、それぞれの規制事項について、法規則上の用語の解釈、システムの構成要素の定義によって、適用の可否は変わる可能性がある。

この表から分かるとおり、現行法上で水中音、海底振動及び光に関する規制事項はない。

表 5-2-2 採鉱・揚鉱システムの主な構成要素、環境影響要因及び規制事項

構成要素	機能	環境影響要因	鉱山保安法施行規則（●）・海防法（○）上、適用される可能性がある規制事項
採鉱機	海底面を移動しながら鉱石を採掘	・ 供用時の設備の存在 ・ 海底面の攪乱（海底地形の変化、懸濁物質） ・ 水中音、海底振動 ・ 光	● 熱水の噴出・熱水中のバブル等を防止するための措置（第 4 条・5 条） ● 土地の掘削（鉱害防止措置等）（第 25 条）
移送管 1	掘削装置から一時貯鉱地点に鉱石を移送	・ 供用時の設備の存在 ・ 鉱石に接触した海水の移送管出口からの排出 ・ 貯鉱による懸濁物質排出 ・ 水中音	● 坑水又は廃水の処理等の措置（第 19 条）
集鉱機	一時貯鉱した鉱石を集める	・ 鉱石の攪乱による懸濁物質排出 ・ 水中音、海底振動 ・ 光	—
移送管 2	集鉱機から鉱石投入装置に鉱石を移送	・ 供用時の設備の存在 ・ 水中音	—
鉱石投入装置 揚鉱管	鉱石を揚鉱管に投入し、揚鉱	・ 供用時の設備の存在 ・ 海底面付近での循環水排出 ・ 水中音、海底振動 ・ 鉱石との接触による懸濁物、金属イオンの溶出	● 坑水又は廃水の処理等の措置（第 19 条）
固液分離・浄化 処理装置	揚鉱した鉱石を揚鉱水（海水）から分離し、その後海水を処理	・ 騒音（船上）	● 捨て石、沈殿物、鉱業廃棄物に該当する場合、その処理に関する措置（第 11 条、第 18 条、第 24 条）
給水管	循環水の移送	・ 供用時の設備の存在 ・ 水中音	—
洋上プラットフォーム（船又はセミサブ型プラットフォーム）、その他船舶（鉱石輸送船等）	上掲の各構成要素の積載、運航用船員及び作業員の収容、機器の海底への投入、採鉱・揚鉱作業の実施、鉱石の払い出し等	・ 供用時の設備の存在 ・ 居住区からの生活処理廃水 ・ 水中音 ・ 光 ・ NOx, SOx	○ 船舶の日常生活・通常の活動に由来する排水・廃棄物（第 10 条第 1 項第一号・二号・三号）（マルポール条約対象の船舶起因汚染に対応） ○ 環境大臣の許可を受けた廃棄物の排出（第 10 条の 6）（ロンドン条約 1996 年議定書対象の陸上起源の廃棄物の海洋投棄に対応）

(4) 閉山時の主な環境影響要因と適用されうる法規則

閉山時の主な環境影響として、海底地形の変化や金属成分の溶出等が想定される。鉱山保安法の鉱業権者が講ずべき措置としては、「土地の掘削（掘採跡の埋め戻し等、鉱物の掘採による崩壊・土砂流出・汚濁水流出等の鉱害防止措置、海洋施設からの土砂排出時の措置）」（第 25 条）がある。

なお、閉山時に残置物が発生した場合について、ロンドン条約 1996 年議定書では「海底鉱物資源の探査、開発及びこれらに関連する沖合における加工から直接に生じ、又はそれらと関連を有する廃棄物その他の物の処分及び貯蔵は、この議定書の適用を受けない」（第 1 条 4.3 項）と定めている。

以上のことから、現状、海洋鉱物資源開発における閉山後の残置物は規制の対象外であるが、ISA で審議中の開発規則等や、海洋への環境影響も踏まえて、閉山後の生産設備の残置に関する規制の可否やその内容について検討する必要がある。

5-3. 社会的受容性

社会的受容性は幅広い概念であるが、地域受容性、市場受容性、社会政治的受容性など、開発などを許容する社会ごとに区分されることがあり（Wüstenhagen, 2007）、事業展開を左右する重要な要素の一つである。また幅広い分野を横断し、様々な要素が絡み合って形成される概念でもある。それゆえ、資源開発のあり方を考える上で、それに関連する情報の整理及び分析は必須である。更に、社会心理などの要因により時々刻々と変化するものでもあるため、情報の収集と更新は継続的に行われるべきである。また、社会受容は一朝一夕に形成されるものではないので、実際の開発が行われる前段階から注視しておくことも大切である。これらを踏まえて、本項では、社会的受容性と連動する国際的動向、社会受容の形成主体となるステークホルダー及び社会的受容性を左右する要因の一つである不確実性について取り上げる。

5-3-1. 国際動向と社会の関心

近年、海洋鉱物資源開発に向けた動きが加速している。ISA は 2019 年 3 月に開発規則草案を公開した後、2020 年 10 月、2021 年 4 月に、開発規則及び附属書の基準案及びガイドライン案についてのパブリックコメントを実施し、開発規則策定に向けた議論を活発化させてきた。ISA と探査契約を締結するコントラクターの活動も活発化しており、2021 年 4 月にはベルギーの GSR が CCZ の実海域で水深 4,500m のマンガン団塊の集鉱に成功した。また、ナウル共和国をスポンサー国とする、CCZ のマンガン団塊探査に係るコントラクター（NORI）の親会社である The Metals Company は、開発に向けた準備の一環として、2021 年 9 月にはナスダックに上場し、翌月 10 月には NORI がマンガン団塊の採鉱試験に関する EIS を作成し、ISA に提出した。

一方で、海洋鉱物資源開発を行うことに慎重さを求める声も高まっている。欧州議会は、2018 年 2 月に欧州委員会に対して、環境への影響と深海生態系を阻害するリスクを認識するまで海底における鉱業の禁止を求める要請等を行った後、2021 年 4 月には、生物多様性の目標を法律で定めることを求める報告書を承認する中で、「海洋生物多様性の損失や海洋生態系の劣化がないように管理できるようになるまで、EU はモラトリアムを推奨すべきである」と述べた。その他のステークホルダーとしても、2021 年 3 月には、Google や BMW をはじめとするエンドユーザー側から、海洋鉱物資源を使わない旨の声明が発表された。また 2021 年 9 月には、IUCN が世界自然保護会議にて、深海底における海洋鉱物資源開発のモラトリアムに関する動議を採択するなど、NGO の動きも活発となっている。

なお、こうした一連の動きがある中で、2021 年 6 月、ナウルは自国民が開発に向けた業務計画の承認申請を行う意図を有するとして、NORI による開発がなされることを前提に、UNCLOS の第 11 部実施協定附属書第 1 節 15 に規定に基づき、ISA に対して開発規則及び手続きの作成について要請を行った。ISA は当該要請を受けて、「(ISA の) 理事会は、条約第 162 条 2(o)の規定に従い、当該要請があった時から 2 年以内に規則及び手続の採択

を完了する」という同条項(b)に基づき、2023 年 7 月の採択を目指して、開発規則の策定に向けた議論を進めてきた。こうした動きに対して、多くの環境 NGO や鉱物資源産出国、環境保護を重視する傾向の強い国々から、反対・反発する表明がなされている。

5-3-2. ステークホルダーに関する情報整理

海底熱水鉱床開発を進めるためには、開発により何らかの影響を受ける関係者、すなわちステークホルダーによる受容が欠かせない。しかし、一口にステークホルダーと言っても、事業者と直接的な関係を有する場合もあれば間接的な場合もある。例えば、海域利用に着目すれば、漁業関係者は直接的なステークホルダーになり、水産資源の消費者は間接的なステークホルダーに位置づけられよう。また、海域利用の許認可を与える国と事業者には法的な関係が、事業者と傭船契約を結ぶ海事会社には経済的な関係が存在するなど、それぞれの結びつき一律ではない。他にも、陸上施設を建設する段になれば、地域住民が主たるステークホルダーになることも考え得る。更に、開発に肯定的なステークホルダーもいれば、その逆も存在する。このように、ステークホルダーの構造は多様かつ複雑である。したがって、ステークホルダーの受容性を醸成するためには、それぞれに適したアプローチを考えなければならない。そこで本項では、海底熱水鉱床開発のステークホルダーに関する情報を整理するとともに、ステークホルダーの理解醸成のための対応策を述べる。

5-3-2-1. ステークホルダーの一覧

どのような関係者をステークホルダーとするかは公平な政策決定において重要であるが、前述のとおり、ステークホルダーは複雑な構造を有し、また開発フェーズごとに変化する。したがって、ステークホルダーの理解を得ようとする場合、プロジェクト毎の特性や開発フェーズに応じてステークホルダーになり得る主体を整理・区分する必要がある。

本節では以下表 5-3-1 のとおり、整理・区分の前段階の取組として、ステークホルダーの洗い出しを試みた。なお、ここに挙げたステークホルダーは一例にすぎない。

表 5-3-1 海底熱水鉱床開発に関係するステークホルダー

関係者区分	関係性・関心事項	その他
当事者		
海洋鉱物資源開発事業者	・ 事業実施者	
経済産業省	・ 許認可権者	
行政機関		
外務省	・ 国際条約関連事項 ・ 領土問題関連事項	鉱業権の設置に関する協議 （鉱業法第 40 条「特定開発者の選定等」：経済産業大臣は、前項の規定により鉱業権の設定の許可をしようとするときは、関係都道府県知事（国の所有する土地については、当該行政機関）に協議しなければならない。）
防衛省	・ 領土問題に関連する事項 ・ 軍事訓練水域に関連する事項	
環境省	・ 船舶・海洋施設からの廃棄物の排出に関する許可 ・ 環境影響評価に関連する事項 ・ 海洋保護区等に起案連する事項	
国土交通省 （海上保安庁）	・ 海洋汚染防止法の海域監視 ・ 関連船舶の出入港 ・ 事業の陸上施設関連事項	
農林水産省	・ 大臣許可漁業への影響	
都道府県	・ 知事許可漁業への影響	
民間企業等		
金融機関等	・ 赤道原則採択行 他	
機関投資家	・ ESG 投資	
採鉱システムメーカー等 サプライヤー	・ 資材の供給	
鉱物資源ユーザー （購入者）	・ 鉱物資源の確保 ・ 鉱物資源の ESG リスク	海洋鉱物資源開発のモラトリアムに賛同企業あり
漁業関係者・団体 （海域利用の重複）	・ 海域利用 ・ 漁獲高への影響	
漁業関係者 （漁業資源への影響）	・ 漁獲高への影響	
漁業関係者（その他）	・ 風評被害	
海運事業者	・ 海域利用（航路との重複など）	
海底通信事業者 （ケーブルの敷設等）	・ 海底面利用	
その他 対象海域の海水 面・資源の利用者	・ 海洋調査・コンサルタント会社 Bioprospecting レジャー利用者	
試験研究機関・専門家		
研究機関	・ 調査の実施と成果公表 ・ 調査手法・評価手法等への助言	
専門家	・ 専門分野に関する見解表明	
その他 団体等		
海洋鉱物資源開発に関連 する活動を行っている組織	・ 環境・社会影響等への関心	
環境 NGO	・ 環境影響への関心	
地元住民	・ 生活環境への影響 ・ 経済環境への影響など	
一般市民	・ 個人としての関心	

5-3-2-2. ステークホルダーへのアプローチ

ステークホルダーは多様な主体で構成されているため、理解醸成のためのアプローチも多様である。リスクコミュニケーション分野のアプローチの一つとしては、ステークホルダーを特定した上で、ステークホルダーごとに問題提起を行うといった手法が挙げられる。事業者とステークホルダーが双方向のコミュニケーションを効果的に行うためには、情報提供時には、様々な背景から生じるバイアスの存在を意識する必要がある（木下，2002）、お互いの認識にギャップがある可能性についても留意する。そうした準備が整った段階で理解の促進に努めることが可能となる。

ステークホルダーは社会受容に関する重要な要素と位置づけられるが、画一的な方法では対処できない。本項の内容を念頭に置きつつ、適切な関係を構築していくことが重要である。

5-3-3. 不確実性に関する検討

海洋鉱物資源は未だ商業開発の段階に達していないため、現時点で予見できない事項が多々ある。例えば、実際に商業開発が行われれば、陸上資源の補完として、あるいはカーボンニュートラル社会に不可欠な資源の供給元として社会全体が好意的に受け止める可能性もあるが、環境及び生態系の知見が不十分な深海域の活動に批判的な声が高まることも考える。また、商業化が始まらないために社会の反応が予見できない一方で、社会の受け止め方を予見できないことが商業化の妨げにもなるという逆の関係も成立する。同様に、法制度が整っていなければ開発に進めないが、商業化がもたらす利益や不利益が明確にならなければ法制度の整備に支障をきたす。また、因果関係は、双方向に限らず、更に複雑な要素が絡み合う場合もある。例えば、環境影響の許容範囲に関する基準やガイドラインが未整備であれば、採鉱・揚鉱技術開発を具体化し難い可能性もあるが、基準やガイドラインが未整備なのは、深海域のデータ収集には時間がかかることに加え、環境影響を正確に予見できない科学技術の現状にも一因がある。そして、環境影響を予見できなければ、前述のように、社会が好意的に受け止めるか、批判的に反応するかを予測できない。結果として精度の高い経済性評価が困難になり、開発の可否判断に不都合が生じる可能性がある。このように、社会受容については因果関係が複雑に絡み合っていることから、単に不確実として捉えられている事項でも、不確実の度合いに幅があるうえ、要因も多岐にわたっている。そこで本項では、開発判断を妨げる要因となりうる不確実性についての情報を整理するとともに、そのための対応策を紹介する。

5-3-4. 不確実性の区分

本項では、不確実性を科学・技術的不確実性と規則・基準の不確実性に分けて整理した。

科学・技術的不確実性は、更に 1) 生産技術、2) 海洋環境に及ぼす影響（物理・化学）、3) 海洋生態系が受ける影響、4) 影響把握方法、及び 5) 技術革新に区分される。このうちの 1) 生産技術は、経済性評価の結果を左右する項目である。例えば、既存技術で対処するか、開発段階の技術を導入するか、更に構想段階の技術に期待するかが確定しなければ、商業開発を目指すうえでの不確実要因となる。2) 海洋環境に及ぼす影響については、開発時に採用するシステムに応じて、影響の深刻度も増減する。3) 海洋生態系が受ける影響、特に生物に対する影響は、生物多様性の保全とも関係することから、社会一般として最も注目される項目である。しかし、その影響は生物群集の生態的特性に応じて差異があり、具体的には固着性底生生物、移動性底生生物、浮遊性生物、及び遊泳生物など生態的特性により影響の被り方が異なるため、対象海域の群集組成を把握していない限り不確実な影響予測にならざるを得ない。4) 影響の把握方法については、科学的知見が集積されれば、新たな懸念材料が追加される可能性があるということである。例えば、従来であれば海洋鉱物資源開発で最も懸念されてきた影響要因はプルームの発生と再堆積であったが、現在は、それに加えて水中音や毒性物質の拡散なども挙げられている（2001年に採択されたISAの環境ガイドライン（ISBA /7/LTC/1/Rev.1）には、影響要因としてプルームが掲載されていたが、2013年の改正版では、水中音、毒性物質などのモニタリングが追記されている）。5) 技術革新については、今後、科学の進捗により、更に懸念事項が増える可能性もある。

規則・基準の不確実性は、1) 社会的受容性、2) 経済性、3) 制度の運用に区分される。

1) 社会的受容性は、不測の出来事によって急転することもあるため、予見が困難な要素である。また、前述のとおり、世論形成の中核を成すステークホルダーには、直接及び間接的な当事者が存在することに加え、計画段階や事業着手の段階など、開発の進捗に応じて主たるステークホルダーの交代もありうる点で不確実要因である。例えば、開発の方針が公表されると関心の高い一般市民が開発の可否を問い、計画が具体化すると直接当事者である地元民の関心が高まるなど、主流となるステークホルダーが交代することも拡大することもある。2) 経済性については多くの説明を要さないが、金属価格の短期的変動も不確実要素である。3) 制度の運用に際しては、社会事情などの不確実な要素も考慮されることがある。

以上、開発に向けての不確実性を整理したが、実際にはその他に未知のリスクも発生する可能性があり、また前述のとおり、それぞれが関連している。それぞれの関係を図5-3-1に示す。

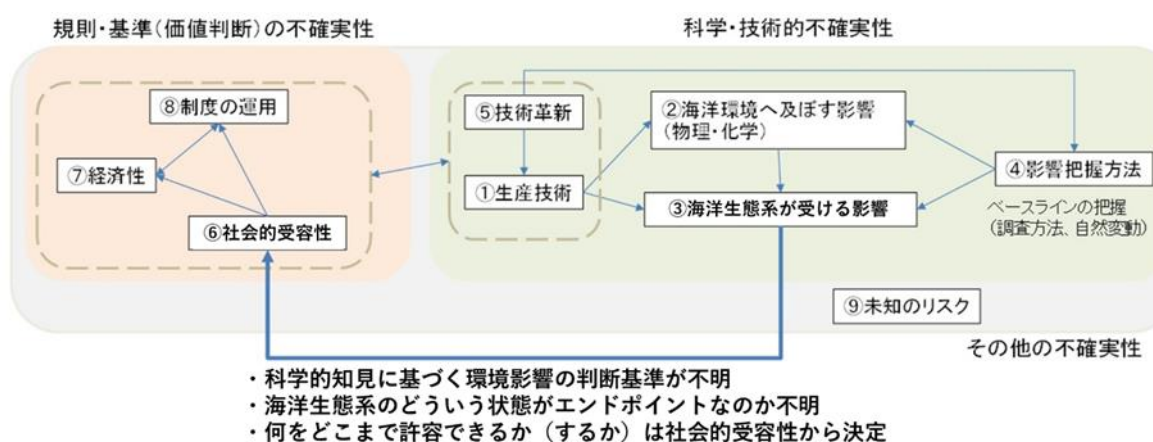


図 5-3-1 不確実性の種類とそれぞれの相互関係

5-3-5. 不確実性への対応策

ここでは多様な不確実性のなかの環境影響に焦点をあて、広く取り入れられている取組について整理する。

海洋鉱物資源については商業開発の実績がなく、また、深海環境に関する科学的知見も乏しい。そのため、環境への影響も十分に明らかになっていない。こうした不確実性があるにしても、国際的には、海洋環境の保護・保全は、国家の一般的義務とされている（UNCLOS 第 92 条）。また、わが国も SDGs やパリ協定などの国際的な潮流を踏まえつつ、持続可能性を支える技術の開発・普及を目指している（第 5 次環境基本計画）。すなわち、不確実性の有無にかかわらず、何らかの取組が求められていると言える。ここでは、取組の方針（理念）として、予防的アプローチと生態系アプローチ、それらを具現化するためのツールとして順応的管理を抽出した。

予防的アプローチは、環境への影響が科学的に証明されていなくとも、すなわち不確実性が高い状態であっても、それを、効果的な対応策を取ることを延期する理由にするべきではない、という方針である。リオ宣言第 15 原則には、「環境を保護するため、予防的アプローチは、各国により、その能力に応じて広く適用されなければならない。深刻な、あるいは不可逆的な被害のおそれがある場合には、完全な科学的確実性の欠如が、環境悪化を防止するための費用対効果の大きい対策を延期する理由として使われてはならない。」とある。生態系アプローチは、生態系の複雑で動的な本質に対応し、生態系の機能に関する完全な知識と理解の欠如に対応することを念頭に置いている（生物多様性条約第 5 回締約国会議）。そして、順応的管理は、環境基本計画において「政策判断を行った後においても、（中略）順応的取組を旨としているように、新たに集積した科学的知見に基づいて必要な施策の追加・変更等の見直しを継続して行うべきである。」と述べられているように、予防的アプローチのツールの 1 つでもある。また、生物多様性基本法第 3 条第 3 項において、「事業等の着手後においても、生物の多様性の状況を監視し、その監視の結果に科学的評価を加え、これを当該事業に反映させる順応的な取組により対応する。」と述べられているように、生態系アプローチのツールでもある。いずれも不確実性が解消されないことを前提として、問題が発生した時点で柔軟に方針転換を図ることを可能とするものである。

こうした前提を置く限り、不確実性を理由に開発のあり方やそれに対応する影響緩和策の検討を先送りすることにはならない。すなわち、その時々で最良の判断をすることに他ならない。その最良の判断の材料の中核となるのが、幅広い声を拾い上げ、透明性のあるプロセスで行われる環境影響評価である。

5-4. 他産業の海域利用

日本の EEZ 内で海底熱水鉱床の賦存が確認されているトカラ列島から沖縄本島にかけての南西諸島海域、伊豆諸島から小笠原諸島にかけての伊豆・小笠原海域においては、漁業をはじめとした経済活動が行われているほか、自衛隊及び在日アメリカ軍による各種訓練、研究機関等による各種調査・観測活動が行われている。今期は海底熱水鉱床の開発に際して考慮すべき、主に沖合域の漁業活動について、鉱床賦存が知られる南西諸島海域及び伊豆・小笠原海域の実態を調査した。

5-4-1. 南西諸島海域

沖縄本島海域は、島の西側沖合を黒潮が北上するため、熱帯性海域となっている。沿岸域は、熱帯性海域の特徴であるサンゴ礁が発達した広大な浅海域が形成され、種々のサンゴ礁性魚類や岩礁域で漁獲される魚類（瀬物類）を対象に、様々な漁業や養殖業が営まれる重要な漁場となっている。

沖合域では、カツオ・マグロ類及びソデイカなどの回遊性生物の漁場が形成されるほか、多数の岩礁域が散在しており、ハマダイ、アオダイ、オオヒメ等の瀬物類の重要な漁場が形成されている。

海底熱水鉱床が賦存する沖合域で行われているカツオ・マグロ類漁業は釣り・ひき縄及びはえ縄、瀬物類は釣り漁、ソデイカ漁は主に沖縄本島の東側（太平洋側）及び西側北部海域で旗流し漁にて行われている。

マグロ釣り漁業は、キハダ、メバチ、カツオなどを対象として、沖合域において、浮き魚礁（パヤオ）や集魚灯を利用した釣り及びひき縄漁業が通年行われている。これらは自由漁業として行われている。集魚灯漁業の操業は、浮き魚礁から 4 海里以上離れて行うこととなっている。また、夜間の調査・作業においては、浮き魚礁より 3～5 海里離れて作業をするよう漁業協同組合より要望されている。

また、2～4 月頃には、浮き魚礁においてカツオを対象とした沖縄県、鹿児島県、宮崎県の漁業者によるカツオ一本釣り漁業も行われている。

マグロはえ縄漁業は、メバチ、キハダ、ビンナガ、クロマグロなどを対象として、沖縄周辺海域及び日本の排他的経済水域外でも操業が行われている。これらは農林水産大臣許可漁業、又は漁船登録している都道府県の知事許可漁業として行われている。漁船の規模は 10～19 トン型が主体である。4～6 月頃は、沖縄周辺海域にクロマグロの漁場が形成されるため、沖縄県の他に宮崎県の漁業者を含め多くの操業が行われている。

瀬物類は、水深約 100～600 m で操業する一本釣りや底立てはえ縄により漁獲される。通年操業する一本釣り専業者が主体であるが、ソデイカ漁などと兼業する漁業者もいる。1 航海あたりの操業日数は、5 トン未満の小型船で 1～3 日、5 トン以上の船で 1 週間程度である。

その他に、日本の EEZ 内での外国漁船操業対策として外国漁船の投棄した漁具等の回収・処分や操業状況の監視が、沖縄県下の漁船により領海（12 海里）以遠で通年行われて

いる。

奄美海域は、周囲を珊瑚礁に囲まれた島嶼が南北に連なり、その西側沖合を黒潮が流れ、その影響で回遊性魚類も多く、近海に好漁場が形成されている。主な漁業として、カツオ・マグロ類やカマスサワラ等の回遊性魚類、ソデイカを対象とした釣り・ひき縄、アオダイ、ハマダイ、キンメダイ、ムツ、メダイ、カンパチ、ハタ類、スジアラやソデイカを対象とした釣り漁業が行われている。

一方、沿岸域では、イセエビ類、ブダイ類、ヤコウガイ等を対象とした素潜り漁業、スズメダイ類等を対象とした追込網漁業、さし網漁業等が行われている。

トカラ列島海域は、外海に面した多くの離島からなり、島嶼の周囲は岩礁域となっている。また、黒潮の影響で回遊性魚類も多いため、近海に好漁場が形成されている。主な漁業として、アオダイ、ウメイロ、ハマダイ、メダイ等の瀬物類やサバ類、アジ類、カツオ・マグロ類、カンパチ、タイ類、アオリイカ等を対象とした釣り・ひき縄漁業をはじめ、トビウオロープ曳浮敷網漁業やキビナゴ流網漁業、イセエビ・アサヒガニ等を対象とした網漁業のほか、地域特産種であるトコブシ漁業などが行われている。

5-4-2. 伊豆・小笠原海域

伊豆・小笠原海域は、複雑な海底地形と黒潮などの海流と相まって、多種多様な魚種が生息し、我が国有数の好漁場が形成されている。

イセエビ、テングサ、カツオ、タカベ、キンメダイ類等多様な魚種を対象とした採介藻漁業、一本釣り漁業、ひき縄漁業、立て縄漁業、建切網漁業、棒受網漁業等を組み合わせ、通年の操業が行われている。

また、三宅島及び八丈島では、カツオ・マグロ類を対象にひき縄漁業、小笠原島ではマグロ・カジキ類、ソデイカを対象とした立て縄漁業が行われている。

特に伊豆諸島海域は、黒潮の流路にあたることから多種の魚介類が生息し、東京都の漁業者のみならず他県の沿岸・沖合漁業者も多数操業する我が国有数の漁場を形成しており、これらの漁業者にとっては非常に重要な漁場となっている。

5-5. 主要金属価格の推移

金属価格の変動に関しては、需給動向とあわせて注視を続けてきた。2017年から2022年12月末までの主要金属価格の推移については図5-5-1と図5-5-2のとおりであり、この期間においては、価格は概ね上昇傾向であった。その主な要因としては、新型コロナウイルスの感染拡大、大規模鉱山の操業停止、LME在庫の減少などが考えられる。

ベースメタル（銅、亜鉛、鉛）については、2017年から2020年はじめにかけてはいずれの金属価格もほぼ横ばいで推移していたが、2020年初めに新型コロナウイルス感染拡大が始まって以降、変動幅が増大した。2020年から2022年にかけての各金属価格の推移について、以下に概説する。

銅：2020年1～3月にかけては、世界的に新型コロナウイルスの感染が拡大したことに伴い、需要低迷への懸念から下落傾向となった。しかし、その後は中国をはじめとして世界の経済活動が再開されたことで需要が回復。2021年に入ってから、世界的な脱炭素化の動きに伴い需要が増大するのではないかとの期待から上昇傾向が続き、また大規模鉱山が集中する南米地域でのストライキや地元コミュニティによる抗議デモ、LME在庫の減少、中国における電力不足などから、現物需給がタイト化した状況が続き、2022年3月には史上最高値となる10,730US\$/tを記録した。他方で、2022年下半年にかけては、中国での新型コロナウイルス感染再拡大に伴う都市封鎖措置による経済活動停滞、米国FRBによる利上げ観測に伴うドル高の動きなどに影響されて、価格は下落した。

亜鉛：亜鉛も2020年1～3月にかけては、世界的に新型コロナウイルスの感染が拡大したことに伴い、需要低迷への懸念から下落傾向となった。しかし、その後、中国の経済活動再開に伴う需要の回復に加え、同年11月に発生した南アフリカ共和国の鉱山での落盤事故による操業停止が価格を上昇させる要因となった。亜鉛は製錬に電解工程を含むことから、他の金属と比べてエネルギー・電力価格上昇の影響を受けやすい。2021年には、中国で発生した干ばつによる電力制限が続き、一部の亜鉛製錬所で生産制限が行われたほか、電力コストの高騰から欧州の製錬所3か所での生産量が最大50%削減されることなどが公表されたことにも影響を受け、価格は上昇傾向をたどった。また2022年にも電力価格高騰によるコスト高を受けて、他の製・精錬所でも生産停止が発生し、供給不足から高値で推移した。なお同年下半期は銅同様に、経済活動停滞への懸念やドル高の影響を受けたものとみられ、価格は下落した。

鉛：2021年には、世界的な異常気象による高温や水害などを背景に自動車バッテリーの交換需要が増加したことや、同年7月に欧州で発生した洪水によりドイツの製錬所が操業を停止して不可抗力宣言したことで、現物の需給のタイト化が加速し8月には約3年ぶりの高値圏での推移となった。2022年は世界経済低迷への懸念が価格の押し下げ要因となったものの、夏の猛暑により自動車交換用バッテリーの需要が増加したことで、供給タイト感が増し、下落幅は小さいままとなった。

金：安全資産としての投資先ともなる金は、対米ドル為替変動の影響を受けるだけでなく、世界経済の先行き懸念や、世界情勢の緊迫化等の地政学的リスクの高まりなど、将来

先行きへの不安感が高まると価格が上がる傾向にある。2020年3月にWHOが新型コロナウイルス感染拡大はパンデミックであると宣言した際には一時的に価格が下落したものの、その後世界的に経済状況が悪化し、その回復には時間を要したことを受けて、価格は上昇傾向をたどり、同年8月には史上最高値の2,058.15US\$/ozを記録した。また、2021年には次々に発生するコロナ変異株の流行に対する懸念、米国の利上げ開始時期をめぐる様々な推測、中東の政情不安等にも影響されて、1年を通じて高値圏で推移した。2022年には、ロシアによるウクライナ侵攻を受けた地政学的リスクの高まりの影響を受け、3月には一時的に2,000US\$/ozを超える高値も記録した。その後はドル高の影響も受けたものとみられ、上値の重い展開が続いた。

銀：銀は自動車の電気制御ユニットに使用されており、特にHEVやEVでの銀使用量が多いことから、EVの生産台数の伸びに伴い需要が高まるとみられている。このことから、多くの国でEV政策が盛んになった2020年頃から注目されるようになり、実需の高まり並びに投機筋によって価格が上昇したものと考えられ、その後も変動幅の大きい状況が続いている。

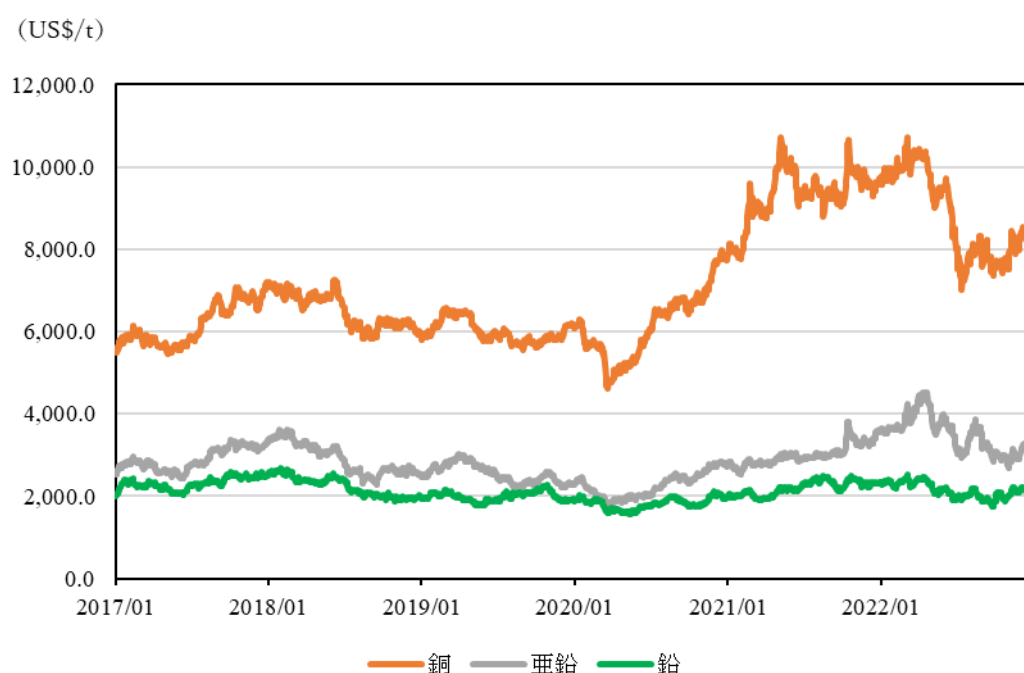


図 5-5-1 ベースメタル（銅、亜鉛、鉛）の金属価格推移
（出典：Bloomberg 提供の価格データ（2023年8月31日取得時点））

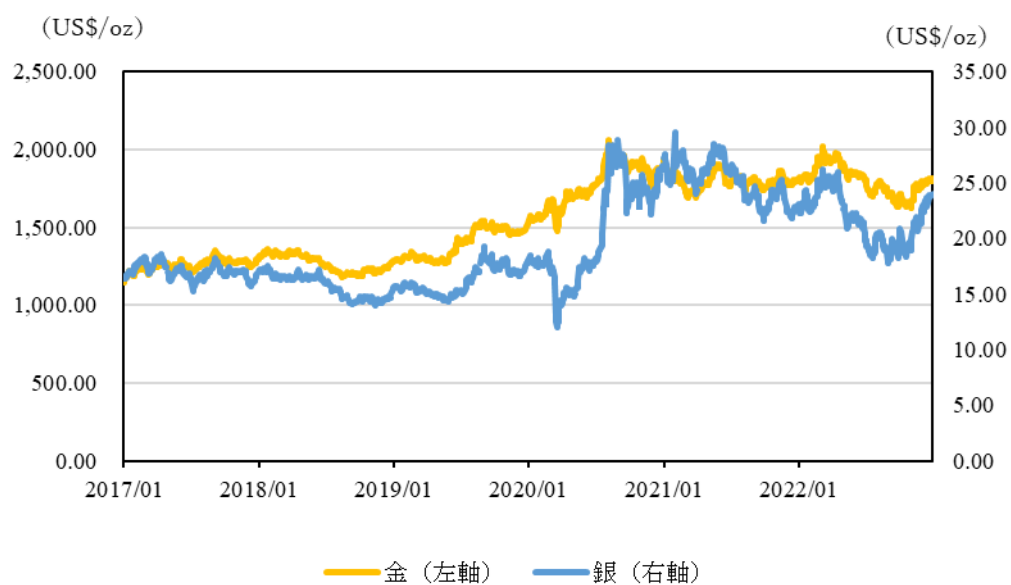


図 5-5-2 貴金属（金、銀）の金属価格推移
 （出典：Bloomberg 提供の価格データ（2023 年 8 月 31 日取得時点））

引用文献

- 独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構, 2021, カレント・トピックス No.21-01
「2020 年 金属鉱物資源をめぐる動向」,
<https://mric.jogmec.go.jp/reports/current/20210115/152444/> (2023 年 8 月 31 日
閲覧)
- 独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構, 2022, カレント・トピックス No.22-01
「2021 年 金属鉱物資源をめぐる動向」,
<https://mric.jogmec.go.jp/reports/current/20220112/164998/> (2023 年 8 月 31 日
閲覧)
- 独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構, 2023, カレント・トピックス No.23-01
「2022 年 金属鉱物資源をめぐる動向」,
<https://mric.jogmec.go.jp/reports/current/20230111/174784/> (2023 年 8 月 31 日
閲覧)
- 独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構 北京事務所 塚田裕之, 2021, ニュー
ス・フラッシュ (2021 年 1 月 28 日付)「中国：自動車産業での銀需要が高まる
見通し」,
https://mric.jogmec.go.jp/news_flash/20210128/152809/ (2023 年 8 月 31 日
閲覧)
- Churchill, R., Lowe, V., and Sander A, 2022, The law of the sea. *Manchester
University Press*.
- 環境省, 環境アセスメントガイド,
http://assess.env.go.jp/1_seido/1-1_guide/index.html. (2023 年 6 月 5 日閲覧)
- 国土交通省, 港湾分野の環境影響評価に関する計画段階環境配慮書作成等ガイドライン,
https://www.mlit.go.jp/kowan/kowan_fr6_000016.html. (2023 年 8 月 15 日
閲覧)
- 経済産業省資源エネルギー庁, 鉱業法に基づく制度等のご案内,
[https://www.enecho.meti.go.jp/category/resources_and_fuel/strategy/mining_a
ct/](https://www.enecho.meti.go.jp/category/resources_and_fuel/strategy/mining_act/). (2023 年 6 月 5 日閲覧)
- 佐古田彰, 2020, 深海底活動と環境保護：深海底活動責任事件、ケースブック国際環境
法、東信堂、pp.132-136
- 佐古田彰【資料】国際海洋法裁判所「深海底活動責任事件」2011 年 2 月 1 日勧告的意
見(一)及び(二)
- Seabed Disputes Chamber of the International Tribunal for the Law of the Sea,
Responsibilities and Obligations of States Sponsoring Persons and Entities
with respect to Activities in the Area (Advisory Opinion)
- 交告尚史, 2008, 海底資源問題に対する国内法の対応、ジュリスト No.1365、有斐閣、
pp.85-90

Rolf Wüstenhagen, Maarten Wolsink, Mary Jean Bürer, 2007, Social acceptance of renewable energy innovation: An introduction to the concept, Energy Policy
木下富雄, 2002, リスク認知の構造とその国際比較、安全工学、安全工学会、41-6, pp.356-363.

6. 経済性の評価

海底熱水鉱床の開発に向けた今後の取組の方向性を考える上では、技術的な評価のみならず、経済的な優位性や実現可能性の検討も重要である。そのため、ここでは、資源量評価によって概略資源量を把握した 2 つの鉱床を対象に、これまでに海底熱水鉱床の商業化をイメージして検討・検証してきた生産技術に基づく予察的な経済性評価を行った。

ただし、今回の経済性評価の条件設定では、将来の法制度の整備状況、環境影響への懸念や漁業等他産業との利用海域の重複などを背景とした社会的受容性、国内の尾鉱堆積場を伴う選鉱場の不在や精鉱の国内での受け入れ可否等の要素は考慮していない。したがって、それらの要素を考慮した操業条件等を設定することで、評価の結果は大きく変動し得ることに留意が必要である。

6-1. 経済性評価の方法

6-1-1. 評価対象

経済性評価の対象は、銅を主体とする F 鉱床及び亜鉛・鉛を主体とする G 鉱床とする。これらの鉱床の概略資源量のうち、これまでに検討した採鉱技術により採掘可能と考えられる鉱量（以下、「採掘可能量」という。）を算出し、評価に用いる。採掘可能量のイメージを図 6-1-1 に示す。鉱石の密度及び品位は、鉱床毎に採掘可能な鉱石の平均を用いる。より早期に初期投資を回収するために、鉱石に含まれる有価金属の価値がより高いと見込まれる F 鉱床から開発に着手し、同鉱床を終掘した後、G 鉱床の開発に移行するシナリオとする。

揚鉱した鉱石は、鉱床から 1,000 km 離れた国内の選鉱場に輸送する。選鉱プロセスは G 鉱床の開発に移行する前に変更する。F 鉱床の鉱石からは、銅精鉱、硫化鉄精鉱及び亜鉛水酸化物、G 鉱床鉱石からは亜鉛・鉛バルク精鉱と硫化鉄精鉱を生産し、これらを国内の製錬所に販売すると仮定する。なお、単一の事業体がこれら一連の事業を全て自己資金で実施するとし、セミサブと採鉱母船は同事業体が建造するものとする。

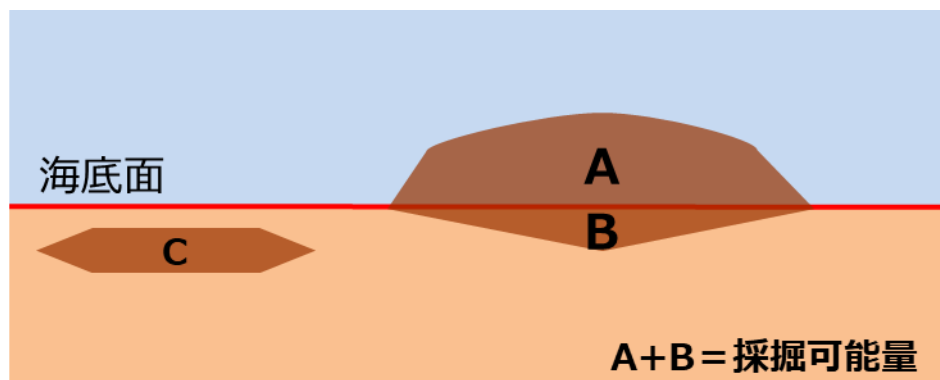


図 6-1-1 採掘可能量のイメージ

6-1-2. 経済性評価に必要なパラメータの設定方法

以下に従い、経済性評価に必要なパラメータを設定する。

F/S 期間、建設期間、操業期間及び操業立ち上げ時の操業度：プロジェクト立ち上げ時の環境調査や F/S に要する年数、生産設備の建設に要する年数、操業年数及び操業立ち上げ時（操業開始年）の操業度を設定。

選鉱プラントへの給鉱量（以下、「給鉱量」という。）：採鉱計画に基づく掘削量から、揚鉱時や運搬時にロスする量を差し引き、鉱石中の水分（5%）を除いたもの。

精鉱量と精鉱品位：給鉱量、鉱石の品位及び選鉱試験結果に基づく選鉱成績から、銅精鉱、亜鉛・鉛バルク精鉱及び硫化鉄精鉱の精鉱量と精鉱品位を算出。

精鉱販売条件と販売収入：ユニット引き、回収率（支払い率）、溶錬費（TC: Treatment Charge）、精錬費（RC: Refining Charge）、金属価格及び為替レートからなる精鉱販売条件を設定し、銅精鉱、亜鉛・鉛バルク精鉱及び硫化鉄精鉱の販売収入を算出。亜鉛水酸化物は販売価格のみを設定し、販売収入を算出。

初期投資額（Initial CAPEX）とこれに伴う諸条件：事前環境調査・環境影響評価、探鉱、操業前管理、採鉱・揚鉱設備、選鉱設備、尾鉱堆積場建設及び土地購入の各々について設定。

維持投資額（Sustaining CAPEX）とこれに伴う諸条件：採鉱・揚鉱設備、選鉱設備、尾鉱堆積場拡張及び土地の追加購入の各々について設定。

操業費（OPEX）：操業中の環境モニタリング調査、採鉱・揚鉱、選鉱及び尾鉱堆積場運用について設定。

6-1-3. 経済性評価の方法

以下に従い、経済性評価を行う。設定したパラメータを用いて各年度の CF を求めた上で、プロジェクト期間の累計 CF を算出する。

DCF 計算及び NPV と IRR の算出：出鉱開始後の各年度の CF が正の値、すなわち収入が支出を上回る場合、累計 CF は正の勾配を示す。その際には、各年度の CF にある一定の割引率を適用して DCF 計算を行い、NPV と IRR を算出する。負の値、すなわち収入が支出を下回る場合、累計 CF は負の勾配を示す。最終的に累計 CF がマイナスとなる場合には、DCF 計算を行わずに感度分析へ進む。

感度分析：本プロジェクトの経済性に大きな影響を与え得るパラメータを選定した上で、当該パラメータを段階的に変化させ、NPV や IRR がどのように変化するかを分析する。

6-2. 経済性評価に用いる操業条件

資源量調査、環境影響評価、採鉱・揚鉱、選鉱・製錬の各分野でプロジェクトの立ち上げから終掘後の閉山処理までの間に必要となる費用を算出する。

6-2-1. 資源量調査

操業前に開発対象の鉱量予測精度向上を目的とした資源量調査を行うこととする。資源量調査として、JOGMEC によるこれまでの探査で得られたボーリングコア及びデータを活用することを前提に、F 鉱床及び G 鉱床において開発対象とする複合マウンドに対する 25 m グリッドの In-fill ボーリングを行うこととし、当該ボーリング調査に係る費用のみ採鉱費に計上する。

6-2-2. 環境影響評価

ISA 環境ガイドラインを参照する環境ベースライン調査は、JOGMEC によるこれまでの事業で得られた調査データを活用することを前提に、調査データに基づく EIS の作成、開発地周辺のモニタリング調査の費用を計上する。なお、保護区設定の具体的な手順等については未確定であるため、保全策検討に係る費用は含めないこととする。

(1) EIS の作成

環境影響評価法（平成 9 年法律第 81 号）を適用して、取得済みのベースラインデータに基づき EIS を作成する。EIS の作成に要する期間は、各鉱床の操業開始前の 2 年間とする（実際には、EIS 作成後に生産設備の建設を開始すると考えられるが、今回の経済性評価では、DCF 計算上、生産設備の建設期間中に EIS を作成すると仮定する）。

また、EIS の作成段階で、環境影響予測モデルを用いて 2 つの鉱床に対する採鉱計画を踏まえて環境影響を予測し、計算結果に基づくモニタリング調査計画案を検討することとする。

(2) モニタリング調査

操業期間中に開発地周辺の環境への影響がある水準を超えた場合、生態系保全等の観点から、操業の中断、方法の見直し等を実施することが考えられる。そのような事態に備えて、事前の調査及び操業期間中のモニタリング調査を実施することとし、その費用を計上する。また、閉山後のモニタリング調査費用を計上する。

1) 事前の調査・操業中モニタリング

開発対象の周辺で操業期間中に想定される環境影響の程度、範囲等の状況を把握するため、操業期間中のモニタリング調査を実施する。モニタリング期間は操業期間と同じく、F 鉱床は 13 年間、G 鉱床は 5 年間とし、1 回／年の頻度でモニタリング調査航海を実施する。なお、モニタリング調査では各調査地点におけるプロジェクト期間中の環境変化を確

認する必要があることから、鉱床ごとに操業開始の前年に事前の調査を実施することとした。環境調査項目・頻度については表 6-2-1 に示す。

表 6-2-1 環境調査項目及び頻度の設定

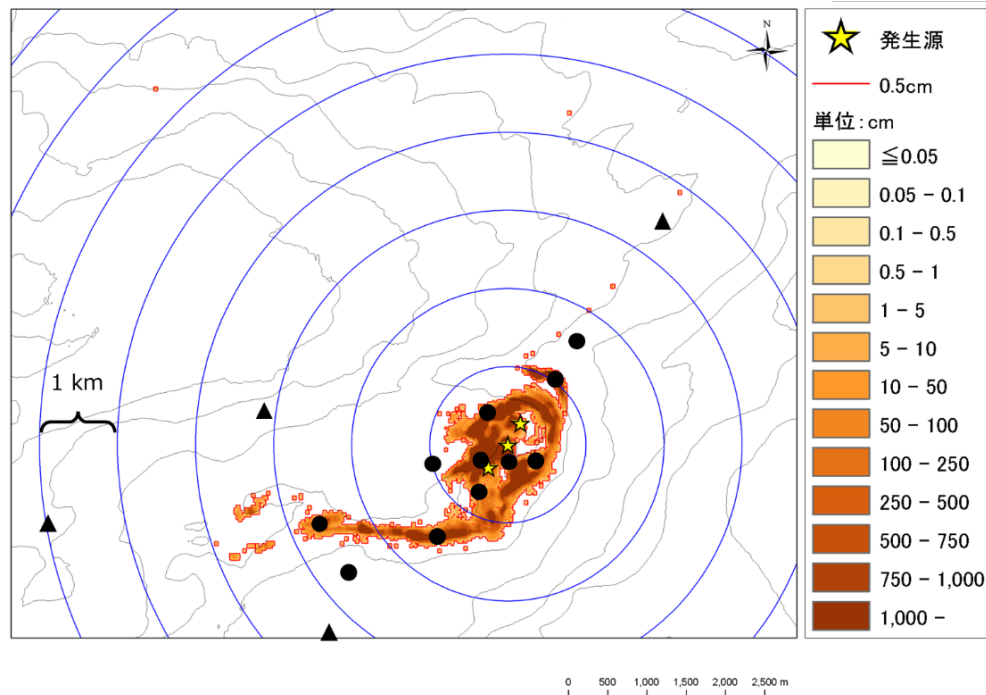
ISA 環境ガイドラインによる分類	項目	事前の調査	モニタリング調査	
			操業期間中	閉山後
海洋物理学	流向・流速	—	—	周年 1 回
	成層構造・粒子分布	1 回	初年度 1 回	初年度 1 回
海洋化学	水質	1 回	毎年 1 回	毎年 1 回
	底質	1 回	毎年 1 回	毎年 1 回
生物群集	植物プランクトン	1 回	毎年 1 回	毎年 1 回
	動物プランクトン・卵稚仔	1 回	毎年 1 回	毎年 1 回
	底生生物	1 回	毎年 1 回	毎年 1 回
	遊泳生物	1 回	毎年 1 回	毎年 1 回
	遺伝子解析	1 回	1 回／3～4 年	初年度 1 回
	金属・安定同位体	1 回	1 回／3～4 年	初年度 1 回
	海底映像	1 回	毎年 1 回	毎年 1 回
生物かく拌	生物かく拌	—	—	—
沈降粒子	沈降粒子	1 回	毎年 1 回	初年度 1 回
その他	水中音	1 回	毎年 1 回	—
	地中温度	1 回	毎年 1 回	毎年 1 回

開発した粒子追跡モデルを用いて、海面から海底面までの水中（水柱）での濁りの広がりや濃度、海底に再堆積した厚さと範囲を予測し、その結果に基づき調査地点数を検討する。

底層域のモニタリング調査地点については、調査実績から底生生物への影響が認められた再堆積厚さ 5 mm 以上となる範囲を踏まえて設定する。水柱のモニタリング調査地点については、水産用水基準（2018 年、公益社団法人日本水産資源保護協会）において水生生物の生息環境として維持することが望ましい基準として定められた濁り濃度 2 mg/L 以上となる範囲を踏まえて設定する。

底層域のモニタリング調査地点を図 6-2-1、水柱のモニタリング調査地点を図 6-2-2 に示す。図中の●は操業期間中に毎年モニタリング調査を実施する地点、図中の▲は予測された範囲を超えて影響が及んでいないか監視する地点を示す。なお、F 鉱床の PRZ については図の範囲外に 1 点設定する。

F 鉱床



G 鉱床

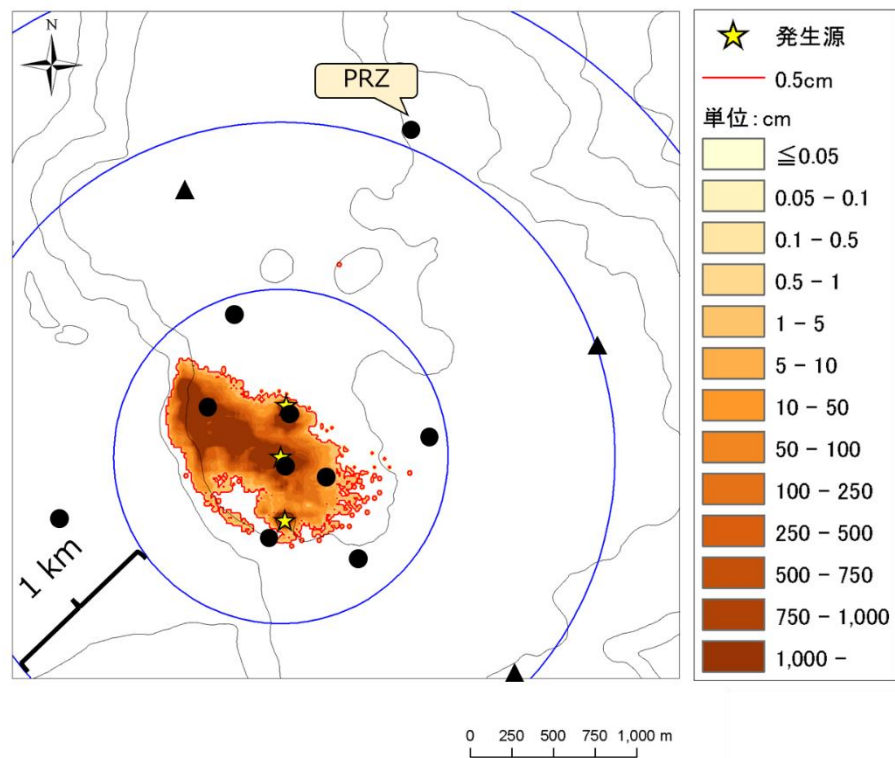


図 6-2-1 底層域のモニタリング調査地点

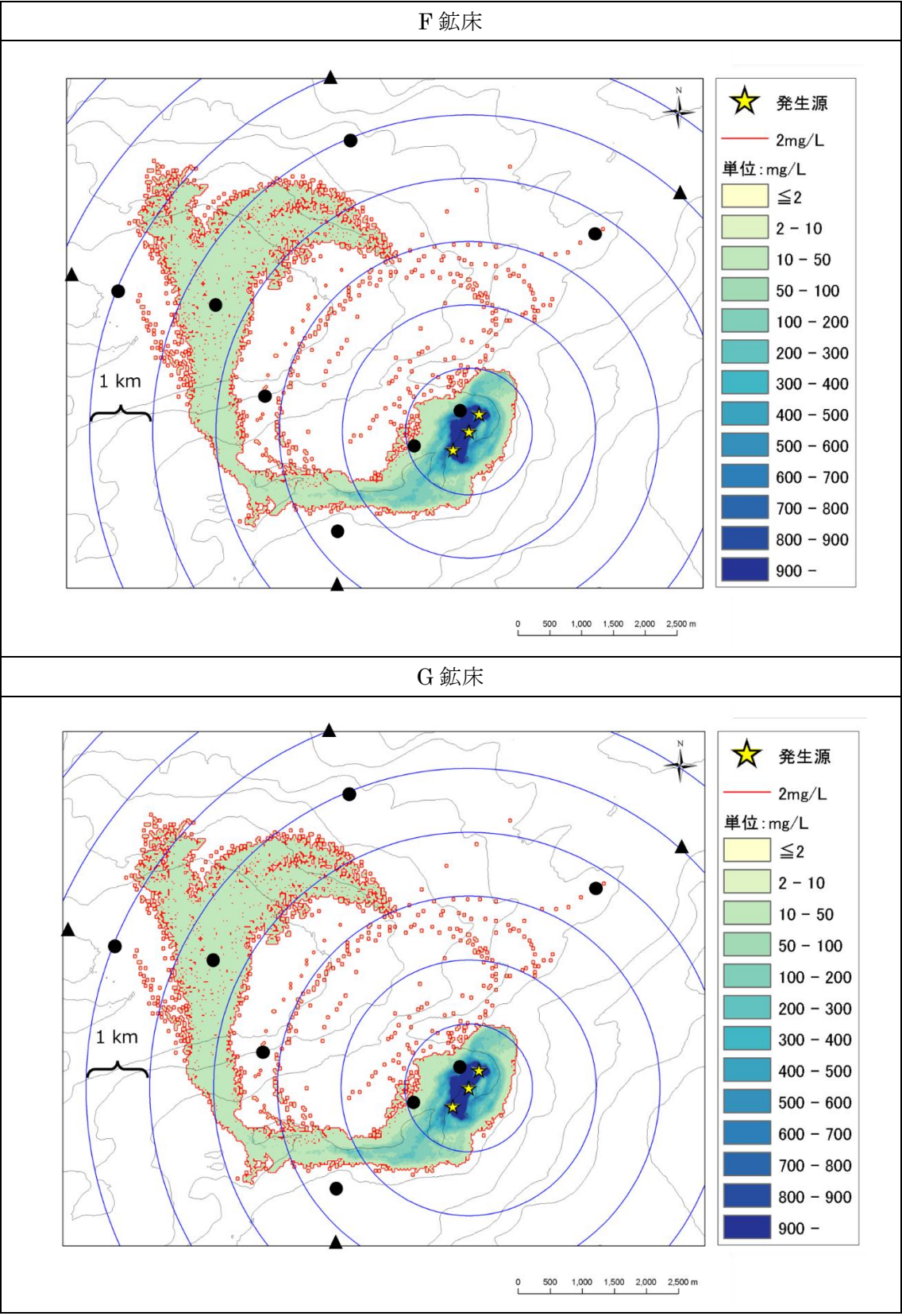


図 6-2-2 水柱のモニタリング調査地点

以上により、鉱床毎に設定した底層域及び水柱のモニタリング地点数を表 6-2-2 に示す。なお、図中の▲においては、底層域、水柱ともに、操業 1 年目のモニタリング調査で影響が及んでいないことを確認すると仮定し、2 年目以降のモニタリング調査は実施しないこととする。

表 6-2-2 鉱床ごとの水柱及び底層域調査地点数

鉱床	F 鉱床		G 鉱床	
	底層域	水柱	底層域	水柱
操業 1 年目の操業期間中モニタリング調査地点数	17 地点	12 地点	17 地点	12 地点
操業 2 年目以降の操業期間中及び閉山後のモニタリング調査地点数	13 地点	8 地点	13 地点	8 地点

2) 閉山後モニタリング

海洋鉱物資源開発における閉山後のモニタリング期間は ISA 環境ガイドラインでは定められていない。ここでは閉山後のモニタリング期間を 5 年と仮定し、1 回／年の頻度で実施することとする。閉山後のモニタリング項目と頻度を表 6-2-1、調査地点数を表 6-2-2 に示す。

(3) 費用構造

設計した条件に基づき、環境影響評価に係る費用項目を検討する。「初期投資」、「操業費」にかかる具体的な費用項目の内訳を表 6-2-3、表 6-2-4 にそれぞれ示す。

表 6-2-3 環境影響評価の初期投資項目

項目	内容
建設期間における事前調査費	水質・底質、植物・動物プランクトン、底生生物、遺伝子解析、沈降粒子、水中音等の調査費
EIS 作成費	EIS の作成

表 6-2-4 環境影響評価の操業費項目

項目	内容
操業期間中モニタリング調査費	水質・底質、植物・動物プランクトン、底生生物、遺伝子解析、沈降粒子、水中音等の調査費
閉山後モニタリング費（積立金）	流向・流速、水質・底質、植物・動物プランクトン、底生生物、遺伝子解析、沈降粒子等の調査費

6-2-3. 採鉱・揚鉱

4-3-8. に示す採鉱・揚鉱システムの運用手順及び概念図に基づき操業条件を設定し、費用を算出する。

(1) 採鉱計画

採鉱・揚鉱システム構成に基づき採鉱計画を検討し、採鉱母船やセミサブの配置の組み合わせや掘削量と揚鉱量のバランス等が理論的に成立することを確認した上で、選鉱設備への給鉱量を算出する。

両鉱床の採掘対象鉱石量(湿重量:Wmt)は、鉱床の3D地形図と鉱体モデルに基づき、海底面上から連続する鉱体のうちこれまでに検討した採鉱技術により採掘可能な鉱石の体積を集計し、鉱石の湿潤密度(各鉱床の海底面から連続する鉱体の平均密度に含水率5%を加味したもので、F鉱床は 3.52 g/cm^3 、G鉱床は 3.63 g/cm^3)を掛けて算出する。これにより、両鉱床を合わせた採掘可能量は19,263,956 wmtである。

図6-2-3に経済性評価の対象とした両鉱床の鉱体分布を示す。自走式採鉱機が効率的に稼働できる平地を直径50 m以上と仮定し、鉱体区画は、直径50 m以上の大型鉱体区画(G1~G7、H1~H7)と、それ以外の小型鉱体区画に2分して鉱量を集計する。次に、各鉱体区画内を掘削方法に応じて細分し、チムニー鉱体(立型採鉱機で破碎・整形)、マウンド鉱体(立型採鉱機で平坦化・整地)、層状鉱体(自走式採鉱機で平坦面を層状に盤下げ掘削:鉱体区画全体)、底部鉱体(立型採鉱機で掘込み:海底面下を含む)ごとに集計する。チムニー鉱体は鉱床の3D地形図や鉱体モデルに反映されておらず鉱量外であるが、海底地形データや海底面観察に基づくチムニー群記載を参照し、F鉱床にはチムニー鉱体の破碎・整形工程を設定する。G鉱床はチムニー群の情報がないため、同工程は設定しない。

採掘可能量の大部分は大型鉱体区画が占める。特に、F鉱床では採掘対象鉱石量の約6割が大型複合マウンド鉱体区画に偏在するため、採鉱母船とセミサブの干渉を考慮すると大型鉱体G1とG2-G7その他のマウンド鉱体で交互に採鉱・揚鉱する計画となる。セミサブの係留索可動範囲(1 km)の制約で、係留索の位置をG1中心の北半部・g4中心の南半部に分け、操業中に係留索の張替えを1回行う。一方で、G鉱床では鉱体が直径1 km以内の範囲に収まっており係留索の張替えは不要である。また、F鉱床の掘削が完了し、セミサブがF鉱床の鉱石を揚鉱している間に採鉱を先行できるため、採鉱母船とセミサブの干渉等の調整を要しない。

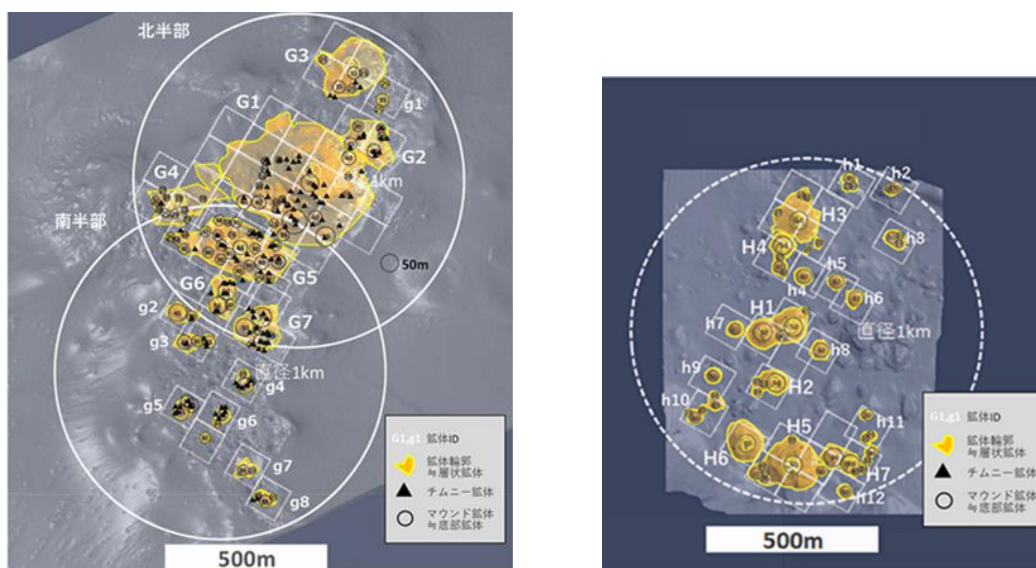


図 6-2-3 経済性評価の対象とした鉱床の鉱体分布

(2) 年間稼働率

図 6-2-4 に、静穏海象継続時間のウィンドウサイズを 1 日とした場合の考え方を示す。波浪推算データベースより年間の平均作業可能日数を算出する。

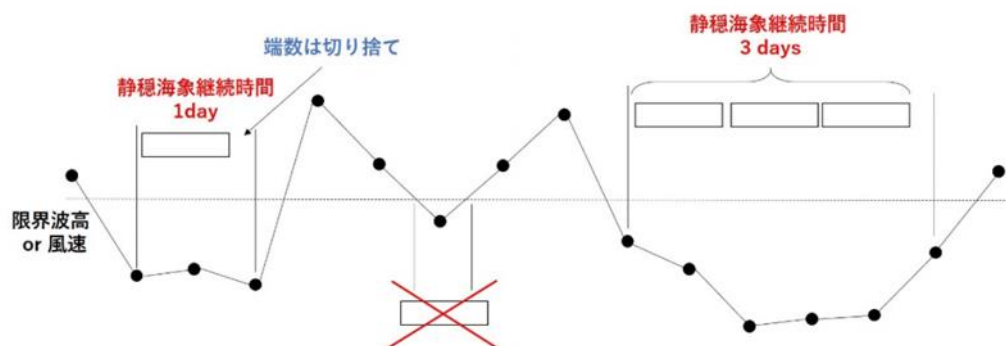


図 6-2-4 静穏海象継続時間割合の考え方
(出典：平成 30 年度総合評価報告書 4-3-30)

海中で使用する開発資機材を投入・揚収する際の海中での接続・取外し作業や、海底での採鉱・揚鉱作業の監視には ROV が必須である。したがって、採鉱母船とセミサブの稼働率を算出する際の作業限界閾値に関しては、精密機器である ROV の投入・揚収が可能な海気象が、作業限界閾値の制約条件になる。北海において、有義波高 4.0 m 程度の波浪条件でセミサブから ROV を投入・揚収した実績があり、船型においてもムーンプールやガイド装置の活用ができることから、有義波高 4.0 m 程度での投入・揚収が可能と仮定する。また、作業船における海上作業中止風速は 15 m/s に設定する。セミサブと採鉱母船の

作業限界閾値を有義波高 4.0 m 未満かつ平均風速 15 m/s 未満と設定する。ウインドウサイズに関しては、機器の投入・揚収に最低でも 24 時間程度が必要と考えられるので、1 日（24 時間）とする。作業限界閾値を用いて算出した F 鉱床と G 鉱床の年間平均作業可能日数と稼働率を表 6-2-5 及び表 6-2-6 に示す。

**表 6-2-5 静穏海象継続時間割合解析時の採鉱母船と
セミサブの作業限界閾値**

項目	値
有義波高 H_s	4.0 m
平均風速 V_w	15 m/s
ウインドウサイズ	1 日（24 時間）

**表 6-2-6 作業限界閾値を考慮した採鉱母船とセミサブの
年間平均作業可能日数（稼働率）**

鉱床	年間平均作業可能日数（稼働率）
F 鉱床	324 日（88.7%）
G 鉱床	328 日（89.8%）

セミサブの総員退避や採鉱母船の海域離脱が必要な極限的な海気象が生じた場合、その前後に総員退避、海域離脱を行う期間や作業再開するための期間が必要になる。そこで想定されるような海気象条件を「極限閾値」とし、極限閾値を超える期間の前に総員退避、海域離脱するために必要な「退避離脱期間」と極限閾値を超える期間の後に作業の再開準備を行う「再開期間」を設定する（図 6-2-5）。以上により、退避離脱期間及び再開期間を考慮した作業可能日数を算出する。

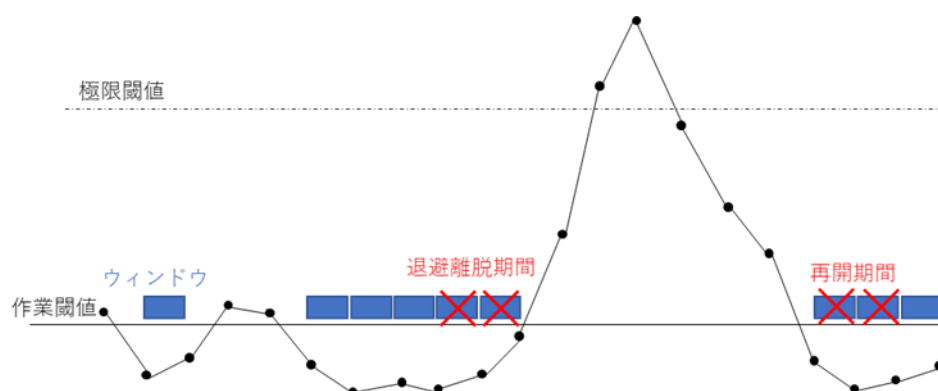


図 6-2-5 極限閾値と退避離脱・再開期間のイメージ

セミサブの極限閾値に関しては、他機関の聞き取りにより総員退避を要する条件を平均風速 44 m/s を超える場合とする。また、採鉱母船に関しては、JAMSTEC 所有の地球深部探査船「ちきゅう」の DPS の仕様を参考に、風速 30 m/s もしくは有義波高 5.5 m を超える場合、船位を保持できなくなる可能性があるため、荒天退避を行うと設定する。

退避離脱期間と再開期間に関しては、採鉱母船の場合、荒天退避と再開に必要な期間は、海中機器を揚収・投入し、海域を離脱・復帰するための 1 日間とする。一方、セミサブの場合、総員退避のために必要な期間は採鉱母船の荒天退避よりも長くなると予想されることから、総員退避と再開にそれぞれ 2 日間必要と仮定する。

極限閾値を超過した回数をカウントし、年平均に換算した結果を表 6-2-7 に示す。

表 6-2-7 F 鉱床と G 鉱床における採鉱母船とセミサブの極限閾値の年間平均超過回数

鉱床	年間平均超過回数	
	採鉱母船	セミサブ
F 鉱床	3.84 回	0 回
G 鉱床	3.70 回	0 回

表 6-2-8 の極限条件の年間平均超過回数に退避離脱期間及び再開期間の合計期間を掛け、表 6-2-6 の年間平均作業可能日数から差し引くと、作業限界閾値と極限閾値、退避離脱期間及び再開期間を考慮した年間平均作業可能日数（表 6-2-8）となる。

表 6-2-8 作業限界閾値と極限閾値、退避離脱期間及び再開期間を考慮した年間平均作業可能日数（稼働率）

鉱床	年間平均作業可能日数（稼働率）	
	採鉱母船	セミサブ
F 鉱床	316 日（86.5%）	324 日（88.7%）
G 鉱床	321 日（87.9%）	328 日（89.8%）

(3) 全体システムを構成する機器の仕様

1) 採鉱機器

4-3-2-2. のとおり、採鉱には立型採鉱機、自走式採鉱機、集鉱機の計 3 種類の機器を用いる。使用する機器の主な仕様を表 6-2-9 に示す。

表 6-2-9 採鉱機器の主な仕様

機器名		立型採鉱機	自走式採鉱機	集鉱機
寸法 (L×W×H)		16.6 m×17.0 m×15.3 m	15.5 m×4.5 m×5.8 m	12.6 m×11.7 m×15.3 m
質量		約 500 t	約 300 t	約 350 t
掘削装置	型式	多段ドラムカッター	ドラムカッター	多段ドラムカッター
	能力	110 m ³ /h	146 m ³ /h	110 m ³ /h
	出力	2650 kW	1,650 kW	1,650 kW
走行装置		フレームスライド式	4 クローラ式	アウトリガーのみ
浚渫装置	流量	1,100 m ³ /h	624 m ³ /h	720 m ³ /h
	揚程/出力	0.8 MPa×300 kW	0.8 MPa×450 kW	0.8 MPa/330 kW

2) 循環式スラリー揚鉱システム

① システム構成

循環式スラリー揚鉱システムは、セミサブ上に配置された高圧ポンプ、セミサブから鉱石投入装置までの送水管、鉱石投入装置、鉱石投入装置から船上までの揚鉱管、鉱石分離装置及び揚鉱水処理設備で構成される。なお、4-3-5. では、重力式とピストンポンプ式の 2 種類の鉱石投入装置を検討したが、経済性評価には重力式鉱石装置を導入した循環式スラリー揚鉱システム用いる。

循環式スラリー揚鉱システムの送水管及び給水管に必要な管内流速を確保し、最大鉱石生産量 5,000t/日を実現できる装置仕様とするため、揚鉱管径と管内流速からポンプ及び鉱石投入装置の仕様を定め、循環式スラリー揚鉱システムの仕様を設定する。なお、給水管数は 2 本、揚鉱管数は 1 本とする。表 6-2-10 に循環式スラリー揚鉱システムの仕様を示す。

表 6-2-10 循環式スラリー揚鉱システムの仕様

項目	値
流量	720 m ³ /h
船上高圧ポンプ	2 台直列(1 系統予備)
配管長さ	2,000 m
揚鉱管	配管内径：230.17 mm
	本数：1 本
送水管	配管内径：206.38 mm
	本数：2 本
揚鉱管鉱石濃度	大粒径：8.0 vol%
	微小粒径： 1.3 vol%
給水管鉱石濃度	微小粒径： 1.6 vol%

② 高圧ポンプ

揚鉱管、給水管、鉱石投入装置の圧力損失から船上の高圧ポンプの仕様を設定する。船上高圧ポンプは 2 台直列での運用とし、ポンプのメンテナンス時の運用を考慮して 2 系統搭載することとする。循環水には微小粒子（75 μm 以下）が含まれるため、摩耗を考慮し定格の回転数を 1,500 rpm とする。高圧ポンプの仕様を表 6-2-11 に示す。

表 6-2-11 船上高圧ポンプの仕様

項目	値
ポンプ形式	遠心ポンプ（5 段）
流量（定格）	720 m ³ /h
揚程（定格）	7.63 MPa（1 台当たり 3.82 MPa）
駆動方式	電動機（各 1500 kW）
回転数	1,500 rpm（1,800 rpm まで増速可とする）
設計圧力	10.1 MPa
鉱石濃度	1.6 vol%(75 μm 以下)
設置条件	船上

③ 揚鉦管

揚鉦管・給水管を選定するにあたり、荒天時における揚鉦管・給水管の投入・揚収時を対象とした強度解析及び稼働時を対象とした疲労強度解析を実施し、それらの解析結果を基に、揚鉦管・給水管の仕様を検討する。揚鉦管・給水管の仕様を表 6-2-12 に示す。

表 6-2-12 揚鉦管・給水管の仕様

項目	揚鉦管	給水管（2 本）
外径	273.05 mm (10-3/4")	219.08 mm (8-5/8")
初期板厚※	21.44 mm (0.844")	6.35 mm (0.25")
初期内径※	230.17mm	206.38 mm
線重量	132.88 kg/m	133.10 kg/m
鋼管グレード	X80	X80

④ 鉦石分離設備

循環式スラリー揚鉦システムを想定し、720 m³/h で循環する系から 75 μm 以上の固体粒子を回収するとして、1 日当たりの最大鉦石生産量である 5,000 t/日にて仕様を検討する。処理効率及び予備を考慮し、機器構成を検討する。表 6-2-13 に機器構成を示す。なお、鉦石分離設備は F 鉦床、G 鉦床で共通である。

表 6-2-13 鉦石分離設備の機器構成

機器名称	仕様	数量
土砂脱水篩	振動 2 段式、循環層 30 m ³ 、9"湿式サイクロン含む	3 台
サイクロンオーバー水受槽	容積 150 m ³ 、攪拌機 15 kW	1 槽
濃度調整槽	容積 150 m ³ 、攪拌機 15 kW	1 槽
希釈水槽	容積 150 m ³ 、攪拌機 15 kW	1 槽
海水槽	容積 100 m ³ 、攪拌機 11 kW	1 槽
ベルトコンベア No.1	テークアップ式 7.5kW	2 台
予備槽	容積 150 m ³ 、攪拌機 15 kW	1 槽
フィルタープレス	圧搾式 35.2 kW	4 台
ベルトコンベア No.2	テークアップ式 7.5 kW	2 台
サイクロンポンプ	耐摩耗スラリーポンプ、吐出量 3 m ³ /min×25 mH	7×3 台
オーバー水移送ポンプ	耐摩耗スラリーポンプ、吐出量 3 m ³ /min×10 mH	5 台

⑤ 揚鉍水処理設備

前述の鉍石分離工程の後、揚鉍水の約 1 割（68 m³/h）を一律排水基準値以下に処理できる仕様を検討する。なお、処理後の水は船上から海に排出はせず、循環系に戻すこととする。鉍床毎の薬品使用量を表 6-2-14 に示す。処理効率及び予備を考慮し、機器構成を検討した結果を表 6-2-15 に示す。

表 6-2-14 揚鉍水処理設備での薬品使用量

項目	F 鉍床			G 鉍床		
	注入率 (mg/L)	処理水量 (m ³)	薬品必要量 (kg/日)	注入率 (mg/L)	処理水量 (m ³)	薬品必要量 (kg/日)
水硫化ソーダ (濃度 100%)	100	1,476	149	4,000	1476	5,952
硫酸 (濃度 100%)	100	1,476	149	500	1476	744
苛性ソーダ (濃度 100%)	—	1,476	0	5,000	1476	8,160

表 6-2-15 揚鉍水処理設備の機器構成

機器名称	仕様	数量
原水槽	円筒形密閉式鋼板製水槽 70 m ³ (100 m ³)	1 槽
汚泥脱水機	フィルタープレス ろ過面積 555 m ² (598 m ²)	4 台
ろ布洗浄水槽	ポリエチレンタンク 6 m ³	1 槽
ろ液水槽	プラットフォーム内水槽	1 槽
反応槽	円筒形密閉式鋼板製水槽 20 m ³	1 槽
凝集汚泥槽	円筒形密閉式鋼板製水槽 20 m ³	1 槽
ろ過膜 ユニット	鋼製フレームユニット構造	4 台
膜洗浄槽	ポリエチレンタンク 4 m ³	1 槽
キレート原水槽	円筒形密閉式鋼板製水槽 70 m ³	1 槽
キレート塔	圧力式固定床非再生型	4 台
pH調整槽	円筒形密閉式鋼板製水槽 20 m ³	1 槽
放流槽	円筒形密閉式鋼板製水槽 20 m ³	1 槽
排水ピット	プラットフォーム内水槽	1 式
水硫化ソーダ貯槽	薬品運搬用 ISO コンテナ	1 槽
硫酸貯槽	薬品運搬用 ISO コンテナ	1 槽
苛性ソーダ貯槽	薬品運搬用 ISO コンテナ	1 槽

3) 移送管・UMB ケーブル

移送管：立型採鉱機及び自走式採鉱機から一時貯鉱まで、また集鉱機から鉱石投入装置までの移送管の圧力損失を計算し、移送管の仕様を設定する。移送管には図 6-2-6 に示すとおり浮力体を取り付け、カテナリー形状を維持するものとする。水平移送距離は、各機器が移送管から受ける張力の影響と各機器に搭載する浚渫ポンプ容量を考慮して 100 m 以内とし、移送管の長さを決定する。移送管の仕様を表 6-2-16 に示す。

UMB ケーブル：開発対象鉱床の水深に適用する 2,000 m 長ケーブルの仕様を検討する。立型採鉱機、自走式採鉱機、集鉱機及び鉱石投入装置の各々について、所要送電電力量に基づき定格電圧・電流及び導体仕様を設定し、ケーブルの仕様を設定する。UMB ケーブルの仕様を表 6-2-17 に示す。

表 6-2-16 移送管の仕様

項目	設定
集鉱時の鉱石移送レート	276 t/h (4.6 t/min)
管内径	285 φ
流量	1,100 m ³ /h
管内濃度	5.2 vol%
流速	4.8 m/s
長さ	250 m

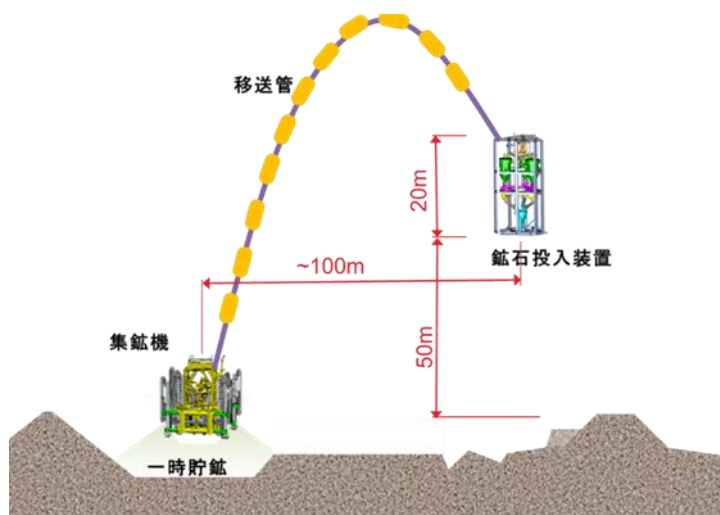


図 6-2-6 移送管の構成

表 6-2-17 UMB ケーブルの仕様

項目	仕様
立型採鉱機、自走式採鉱機	掘削機構用：AC6000 V、1500 kW、2 回路 浚渫機構用：AC6000 V、450 kW、1 回路 制御用：AC3000 V、3 A、1 回路 光ファイバー：SM 型、6 芯、1 回路
集鉱機	掘削機構用：AC6000 V、750 kW、2 回路 浚渫機構用：AC6000 V、450 kW、1 回路 制御用：AC3000 V、3 A、1 回路 光ファイバー：SM 型、6 芯、1 回路
鉱石投入装置	主機用：AC6000 V、200 kW、1 回路 制御用：AC3000 V、3 A、1 回路： 光ファイバー：SM 型、6 芯、1 回路

4) 採鉱母船及びセミサブ

本検討に用いる採鉱母船及びセミサブの仕様はそれぞれ表 4-3-16 及び表 4-3-13 のとおりである。

5) その他船舶

操業期間中に必要となる船舶費用をプロジェクトフェーズ毎に計上する。各船舶の用途と仕様を表 6-2-18 に示す。なお、その他船舶は全てチャーター船とし、チャーター費用を操業費として計上する。

表 6-2-18 その他船舶の用途

船舶	用途	仕様	プロジェクトフェーズ							
			輸送	セミサブ据付	機器投入	掘削	集鉱・揚鉱	機器揚収	セミサブ撤去	輸送
曳船	揚鉱セミサブの輸送	24,000PS級×2隻								
		7,200PS級×2隻								
警戒船	揚鉱セミサブ輸送時の前方及び側方警戒	3,600PS級								
アンカーハンドリング船	揚鉱セミサブのアンカー打設	35,000PS級×2隻								
オフショア支援船	資機材輸送／揚鉱セミサブのサポート／警戒船業務	4,000PS級×2隻								
	揚鉱水処理に使用する薬品類の輸送	7,500PS級								
鉱石輸送船	鉱石輸送	Handymax41,000dwt(載貨重量トン)								
燃料補給船	揚鉱セミサブへの燃料補給	Tanker10,000dwt(載貨重量トン)程度								

(4) オペレータ要員計画

採鉱母船及びセミサブ搭載する主要機材を整理し、各機材の操業に必要なオペレータ数及び操船要員数を検討した結果、採鉱母船とセミサブの総要員数は、それぞれ 66 名、139 名となった。勤務形態は 2 交代制とし、30 日で要員をローテーションさせる前提で、採鉱・揚鉱クルーと操船クルーを各 4 チームとする。採鉱母船のクルーは寄港・補給時に、セミサブはヘリコプター等でクルーチェンジすることとする。

(5) 給鉱量の設定

操業 1～13 年次には F 鉱床から、操業 14～18 年次には G 鉱床から給鉱される。プロジェクト期間の給鉱量の合計は 16.52 百万 dmt となる。

(6) 費用構造

設計したモデルケースに基づき、建設・操業に係る費用項目を検討する。「初期投資」、「維持投資」、「操業費」にかかる具体的な費用項目の内訳を表 6-2-19～表 6-2-21 に示す。

表 6-2-19 採鉱・揚鉱システムの初期投資項目

項目	内容
採鉱機	立型採鉱機、自走式採鉱機、集鉱機、予備各 1 台
移送管・ケーブル等	移送管 250 m、浮力体、アンビリカルケーブル等
循環式スラリー揚鉱装置	船上高圧ポンプ、鉱石投入装置、給電・制御設備等
揚鉱管	3 本管（各鉱床水深分の本数）、浮力体
鉱石分離設備	脱水篩、ベルトコンベア、ポンプ
水処理設備	ろ過膜ユニット、キレート塔、薬品コンテナ等
鉱石輸送設備	コンベア、払出ブーム等
セミサブ	セミサブ本体、自動係船装置、係留移動装置、集鉱機昇降装置等
採鉱母船	採鉱母船本体、掘削機昇降装置、スキッドシステム、クレーン等
その他船舶	
(予備費)	上記費用のうち、水中機器は 5%、船上機器は 10%を各項目に計上。

表 6-2-20 採鉱・揚鉱システムの維持投資項目

項目	内容
採鉱機	各機器の本体、歩行装置、浚渫装置掘削装置、油圧系統の本体・構成部品の交換
移送管・ケーブル等	移送管 250 m、浮力体、アンビリカルケーブルの本体の交換
循環式スラリー揚鉱装置	船上高圧ポンプ、鉱石投入装置、給電・制御設備の構成部品の交換
揚鉱管	3 本管（各鉱床水深分の本数）、浮力体の交換
鉱石分離設備	脱水篩、ベルトコンベア、ポンプの本体・構成部品交換
水処理設備	ろ過膜ユニット、キレート塔、薬品コンテナ等の本体・構成部品交換
鉱石輸送設備	コンベア、払出ブームの本体・構成部品交換
セミサブ	セミサブ本体、自動係船装置、係留移動装置、集鉱機昇降装置等の本体・構成部品交換
採鉱母船	採鉱母船本体、掘削機昇降装置、スキッドシステム、クレーン等の本体・構成部品交換

表 6-2-21 採鉱・揚鉱システムの操業費項目

項目	内容
揚鉱管	—
水処理設備	ろ過膜、キレート樹脂、薬品等
鉱石輸送装置	—
セミサブ	定期検査費、ROV 費、船舶経費、燃料費、保険料
採鉱母船	定期検査費、ROV 費、船舶経費、燃料費、保険料
その他船舶	鉱石輸送船、セミサブ係留時の曳船及び警戒船、薬品輸送船等
人件費	本社管理部門、セミサブ及び採鉱母船の操船クルー、採鉱・揚鉱部門クルー
動復員費	旅費経費、ヘリコプター費用

6-2-4. 選鉱・製錬

選鉱・製錬分野における経済性評価の範囲は、F 鉱と G 鉱を選鉱場で受け入れ、選鉱処理して生産した精鉱を製錬所等に販売するまでとする。また、尾鉱堆積場を伴う選鉱場を国内に建設する費用及び 18 年間の操業にかかる費用を計上する。費用の概算にあたっては、まず処理鉱石の条件設定を行い、次に、選鉱試験結果や陸上鉱山の開発事例等を踏まえて、尾鉱堆積場を含む選鉱設備のモデルを設計し、そのモデルに基づく操業形態及び人員体制を設定する。なお、立地は採掘現場から 1,000 km の日本国内で港湾設備が存在する場所とし、選鉱場は港湾部近傍、尾鉱堆積場は選鉱場から 1 km 離れた緩やかな傾斜を伴う平地に平ダムとして建設すると仮定する。

(1) 処理鉱石の条件設定

揚鉱された鉱石は、セミサブ上で脱水された後、鉱石運搬船によって選鉱設備まで運搬される。鉱石運搬船から陸揚げした鉱石を選鉱処理して精鉱を生産し、鉱石の陸揚げで利用したのと同じ港で精鉱を運搬船に船積みすると仮定する。前述のとおり、操業期間 18 年間のうち 1～13 年目には F 鉱、14～18 年目には G 鉱の選鉱を行うこととなる。稼働スケジュール及び処理量は、F 鉱と G 鉱で同じとする。選鉱設備の操業スケジュール及び処理能力を表 6-2-22 に示す。G 鉱を選鉱する期間には、F 鉱の処理は行わない。なお、操業開始後 12 年目は、F 鉱の選鉱終了後、3 ヶ月間をかけて選鉱対象鉱石を G 鉱に切り替えるための工事を行う。また、本事業で生産される精鉱の受入先は、国内の既存の製錬所と仮定する。

表 6-2-22 選鉱設備の稼働スケジュール及び処理能力

項目		値
稼働スケジュール	年間	336 日/年
	週間	7 日/週
	日間	24 時/日
稼働率	破碎	75%
	プラント（年間）	92%
	プラント（日）	100%
処理量	年間	1,080,940 Wmt/年
	日間	3,000 Wmt/年

(2) F 鉱の処理フロー

F 鉱の基本フローシートは、図 4-4-4 を想定する。各設備は前項の処理フローに基づき、F 鉱の物性及び選鉱試験結果に基づき設計する。

1) F 鉱の破碎・磨鉱設備

破碎回路はコーンクラッシャー、サイズ分けのための振動篩及び鉱石貯蔵ビンからなる。破碎回路の仕様を表 6-2-23 に示す。

表 6-2-23 破碎回路の仕様

項目	値
破碎段数	1 段
粒度（最大）	50 mm
稼働率	75%
給鉱量	204 dmt/時
給鉱サイズ (P ₈₀)	20 mm
生產品サイズ (P ₈₀)	10 mm

磨鉱回路は P₈₀ で 39 μm の粒径を達成する設計とする。1 次磨鉱は湿式オーバーフロー型ボールミルとサイクロン、2 次磨鉱はタワーミルとサイクロンで構成する。F 鉱の磨鉱工程の仕様を表 6-2-24 に示す。

表 6-2-24 F 鉱の磨鉱工程の仕様

項目		値
一次磨鉱	湿式オーバーフロー型ボールミル	—
	粉碎仕事指数 (BWi)	13 kWh/t
	一次磨鉱品サイズ (P ₈₀)	90 μm
二次磨鉱	タワーミル	—
	粉碎仕事指数 (BWi)	13 kWh/t
	粉碎仕事指数 (BWi) 13 kWh/t	39 μm

2) F 鉱の浮選設備

4-4-2-2. のとおり、F 鉱の浮選回路は、銅、亜鉛及び鉄の浮選からなる。銅精選精鉱は、加圧浸出及び脱銅回路に送られ、処理された後、最終的には銅精鉱が生産される。亜鉛浮選と鉄浮選では、亜鉛・鉛バルク精鉱と硫化鉄精鉱が生産される。鉄浮選の尾鉱は、中和処理が施された後、尾鉱堆積場に送られる。F 鉱の浮選回路の設備を表 6-2-25 に示す。なお、浮遊選鉱で銅精鉱を生産する場合、銅精選精鉱中の亜鉛品位が高いことが課題であった。そこで、F 鉱に対して、銅精選精鉱をフィードとする脱亜鉛プロセスを追加で導入し、亜鉛品位の低い銅精鉱を生産するものとする。

表 6-2-25 F 鉱の浮選回路の設備

項目	セル数	セルサイズ
銅粗選	4 個	50 m ³
銅精選/清掃選	2 個	40 m ³
亜鉛粗選/清掃選	6 個	40 m ³
亜鉛精選/清掃選	2 個	15 m ³
鉄粗選	5 個	30 m ³

3) F 鉱選鉱場の脱水設備

F 鉱の磨鉱及び浮選設備に用いられる脱水設備の仕様を表 6-2-26 に示す。

表 6-2-26 F 鉱の脱水設備

項目
磨鉱シックナー（高率）
亜鉛・鉛バルク精鉱シックナー（高率）
硫化鉄精鉱シックナー（高率）
加圧浸出後銅精鉱シックナー（高率）
中和シックナー（高率）
石膏・鉄シックナー（高率）
磨鉱フィルター（圧力タイプ）
亜鉛・鉛バルク精鉱フィルター（圧力タイプ）

(3) G 鉱の処理フロー

G 鉱の基本フローシートは、図 4-4-7 を想定する。

1) G 鉱の破碎・磨鉱設備

破碎回路は F 鉱と同じ仕様とする。破碎回路及び磨鉱工程の仕様は表 6-2-23 及び表 6-2-24 のとおりである。

2) G 鉱の浮選設備

亜鉛浮選と鉄浮選では、亜鉛・鉛バルク精鉱と硫化鉄精鉱が生産される。鉛浮選の浮鉱と鉄浮選の尾鉱は、中和処理が施された後、尾鉱堆積場に送られる。G 鉱の浮選回路の設備を表 6-2-27 に示す。

表 6-2-27 G 鉱の浮選回路の設備

項目	セル数	セルサイズ
鉛粗選	4 個	50 m ³
亜鉛粗選/清掃選	5 個	30 m ³
亜鉛精選	3 個	15 m ³
鉄粗選	7 個	30 m ³

3) G 鉱選鉱場の脱水設備

G 鉱の磨鉱及び浮選設備に用いられる脱水設備の仕様を表 6-2-28 に示す。

表 6-2-28 G 鉱の脱水設備に関する仕様

項目
磨鉱シックナー（高率）
亜鉛・鉛バルク精鉱シックナー（高率）
硫化鉄精鉱シックナー（高率）
中和シックナー（高率）
石膏・鉄シックナー（高率）
磨鉱フィルター（圧力タイプ）
亜鉛・鉛バルク精鉱フィルター（圧力タイプ）
硫化鉄精鉱フィルター（圧力タイプ）

(4) 尾鉱堆積場

尾鉱堆積場の検討にあたり、以下のガイドラインを参照して設計する。対象となる鉱床から 1,000 km 離れた複数の地点の 30 年間の平均降水量から、24 時間の可能最大降水量は 900 mm とする。

- ・ 国際大ダム会議 (International Commission on Large Dams, 2022)
- ・ 国際的な尾鉱管理基準 (Global Tailings Review, 2020)
- ・ カナダダム協会 (Canadian Dam Association, 2019)
- ・ 鉱業上使用する工作物等の技術基準を定める省令の技術指針 (内規) (20121115 商局第4号)

操業期間と鉱石処理量から尾鉱の総発生量を計算する。F 鉱の尾鉱は 18.69 百万トン、G 鉱の尾鉱は 10.42 百万トンであった (いずれも湿潤重量)。尾鉱堆積場は、3 つのセルに分けて設計する (図 6-2-7)。区画 1 と区画 2 は F 鉱の尾鉱を受け入れ、区画 3 は G 鉱の尾鉱を受け入れる。各区画は緊急時放水路とデカンタシステムで構成され、独立して運転することが可能である。設計上、各セルの建設を行うのは操業上必要なタイミングとし、都度維持投資費を計上する。同様に尾鉱堆積場の閉鎖も順次実施することとする。

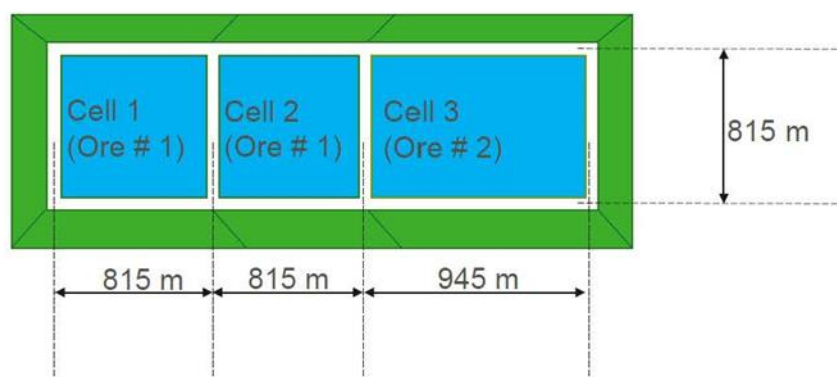


図 6-2-7 尾鉱堆積場の平面図

1) 尾鉱堆積場の堤体の構造

堤体は、ロックフィルまたは現地で調達可能な粒状の土砂を積み上げることにより建設する。尾鉱堆積場の堤体の断面を図 6-2-8 に示す。上流側の斜面及び底面部に、2 層の HDPE シートを敷設する。また、ロックフィルと HDPE シートの間には、砂の敷材及び粒状の移行材を導入する。尾鉱堆積場の下流側斜面は垂直 1 に対し水平 2、上流側・内部斜面は垂直 1 に対し水平 3 の角度となるよう設計する。

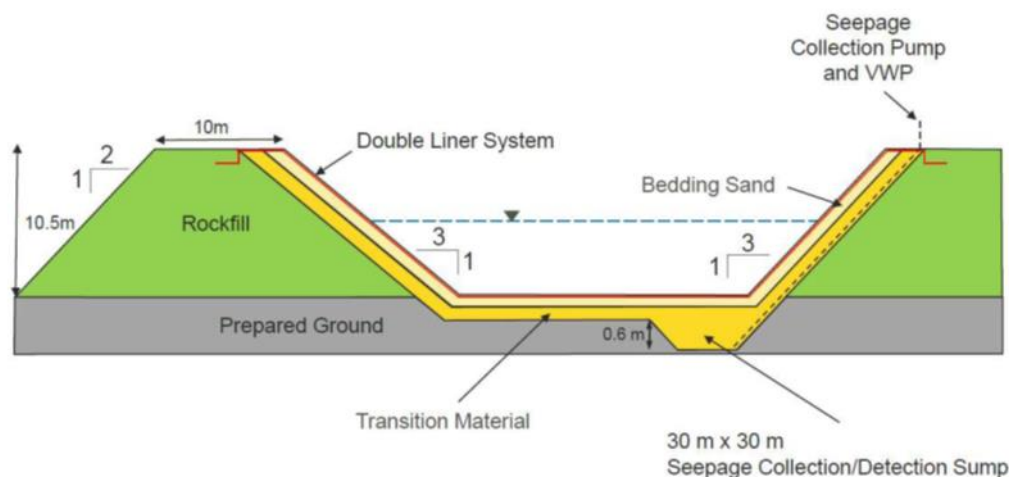


図 6-2-8 尾鉱堆積場の堤体の断面図

尾鉱堆積場のシートを通した浸出水は、各セルの角に設置される浸出水回収槽で回収する。各回収槽には振動ワイヤピエゾメーターを設置し、回収した浸出水の水量を計測し、これによりポンプアップが必要となるタイミングを確認する。以上の尾鉱堆積場の構造を、表 6-2-29 にまとめた。

表 6-2-29 尾鉱堆積場の構造

項目	値
堤頂幅	10 m (安全性と機材のアクセスの容易性を確保するため)
上流側及び内部の斜面	垂直 1 に対し、水平が 3 の角度
下流側の斜面	垂直 1 に対し、水平が 2 の角度
堤体	ロックフィル (本体)、粒の敷材と移行材 (本体とライナーの間の資材)
浸出水の対策方法	HDPE シートの敷設

(5) 操業形態・人員体制の条件設定

前項までの条件に従い設計した選鉱設備は、表 6-2-30 に示す条件で操業することとする。

表 6-2-30 操業に関する設定条件

項目	設定値
操業形態	
シフト（労働時間）	3 シフト/日（8 時間/シフト）
年間稼働日数	336 日/年（365 日×稼働率 92 %）
定期・突発修繕	25 日/年
人員体制	マネジメント 4 名、選鉱技術者 5 名、操業 46 名（破碎・磨鉱・浮選・貯鉱・堆積場管理）、分析 10 名、事務 8 名 計 73 名

(6) 費用構造

設定したモデルケースに基づき、建設・操業に係る費用項目を検討する。初期投資、維持投資、操業費にかかる具体的な費用項目の内訳を表 6-2-31～表 6-2-32 に示す。

表 6-2-31 選鉱・製錬の初期投資に関する項目

項目	内容
鉱石受入設備費用	積み下ろし・粗鉱ヤード用ベルトコンベア、ホイールローダー等
破碎篩分け設備費用	コーンクラッシャー、振動篩、ベルトコンベア、貯鉱ビン、ホッパー等
磨鉱設備費用	ボールミル、タワーミル、サイクロン、シックナー、フィルタープレス、ポンプ、タンク等
浮選設備費用	薬剤調整タンク、浮選機（銅粗選、銅精選、銅精選・清掃選、亜鉛粗選、亜鉛精選、鉄粗選）、ポンプ等
加圧浸出設備費用	薬剤調整タンク、オートクレーブ他
精鉱脱水・貯鉱・払出設備費用	薬剤調整タンク、シックナー、フィルタープレス、ポンプ、貯鉱ビン、ベルトコンベア等
尾鉱・水処理設備費用	中和処理タンク、シックナー、ポンプ等
その他付帯設備費用	選鉱用水・燃料・薬剤（粉末液体）貯蔵設備、送気機器、DCS、火災・防犯監視システム等
選鉱場建屋建築費用	各処理工程建屋、機械室、管理事務所、分析所、守衛室、救護室等
土木作業費用	敷地造成、粗鉱ヤード・精鉱貯鉱舎建設、建屋・屋外設備基礎工事、場内舗装・排水路整備等
電気工事費用	高～低圧線、変電設備、配電設備、無停電電源装置、非常用発電装置整備、照明工事等
配管工事費用	選鉱場及び堆積場に係る配管整備
堆積場建設費用	堆積場用敷地を4分割したうちの1区画（セル1）にスターターダムを建設
用地取得費用	選鉱場：40,000 m ² 、堆積場：800,000 m ² （セル1）を取得
間接費用	設計・調達・建設管理、資材輸送、重機レンタル、建設請負業者動員撤収等
予備費	上記費用の5%を計上

表 6-2-32 選鉱・製錬システムの維持投資に関する項目

項目	内容
定期点検以外の修理事業・改築	操業12、13年目に実施するG鉱へ対応するための設備改修
堆積場建設	堆積場の管理、敷地の取得及び建設、容量に達したセルの閉鎖

表 6-2-33 選鉱・製錬システムの操業費に関する項目

項目	内容
人件費	設定した人員体制の条件に基づく人件費
薬剤費	浮遊選鉱及び排水処理に用いる薬剤費（消石灰、硫酸、捕収剤、活性剤、起泡剤、抑制剤、凝集剤等）、車両燃料費
電力費	月基本料金及び電力量料金
水道費	管理事務所用水、選鉱用水、防火用水等
定期点検費	選鉱機器、配管、電気系統の点検・修繕用の部材・補修剤、突発修繕に係る補助人件費、機器借料等
その他費用	事務消耗品、ライセンス保守、保険料、各種許認可費用等

(7) 収入概算に係る条件設定

選鉱場で製造した銅精鉱は銅製錬所に販売することとし、銅及び銀を販売収入算出の対象とする。亜鉛・鉛バルク精鉱は ISP 製錬所に販売することとし、亜鉛、金及び銀を対象とする（精鉱中の鉛はユニット引きの条件以下の品位であるため評価対象外）。また、硫化鉄精鉱については、製錬手法を特定せずに金及び銀が回収されるものとして販売価格を求める。

6-3. 経済性評価に必要なパラメータの設定

プロジェクト立ち上げ時の採鉱・揚鉱と選鉱・製錬に係る生産設備の建設期間は3年以上とし、同期間内にF鉱床の資源量調査、F/S、操業前管理、環境モニタリングのための事前調査を行うものとする。前述のとおり、操業期間は計18年で、1～13年次はF鉱床、14～18年次はG鉱床で操業を行う。なお、11年次にはG鉱床の資源量調査を行う。操業立ち上げ期間は操業1年次の1年間とし、その間の採鉱・揚鉱システムの稼働率を70%とする。ここでの稼働率70%は機器及び設備の能力低下ではなく、操業の未成熟による選鉱設備への給鉱量の低下を想定したものである。建設期間、操業期間、操業立ち上げ期間及びその稼働率の設定を表6-3-1に示す。

表 6-3-1 建設期間、操業期間、操業立ち上げ期間及びその稼働率の設定

項目		値	単位	備考
建設期間		3	年	F/S、操業前管理等含む
操業期間	F 鉱床	13	年	操業開始 1～13 年目
	G 鉱床	5	年	操業 14～18 年目
操業立ち上げ期間		1	年	操業 1 年目
操業立ち上げ期間の稼働率		70	%	操業 1 年目

6-3-1. 精鉱生産量、品位と精鉱販売条件の設定及び販売収入の算出

操業1～13年次にはF鉱床の鉱石から銅精鉱、亜鉛・鉛バルク精鉱、硫化鉄精鉱及び亜鉛水酸化物を生産する。操業14～18年次にはG鉱床の鉱石から亜鉛・鉛バルク精鉱と硫化鉄精鉱を生産する。

精鉱生産量、精鉱品位、製錬会社ユニット引き、製錬会社支払い率、販売対象金属量、溶錬費（TC）、精錬費（RC）、金属価格及び為替レートを設定する。金属価格及び為替レートは2022年の年間平均を用いた。ただし、亜鉛水酸化物は市場価格が存在しないため、仮に2022年11月29日時点における酸化亜鉛の実勢価格（サンプル数13）の平均値を用いた。販売する金属等の価格及び為替レートの設定は表6-3-2のとおりである。精鉱品位からユニット引きを行い、支払い率を乗じて販売対象金属量算出する。精鉱販売収入は、この商業価値から溶錬費（TC）と精錬費（RC）を差し引いて、1兆960億円と算出された。

精鉱販売収入の中でF鉱床の鉱石から得られる販売収入は9,184億円、G鉱床の鉱石から得られる販売収入は1,776億円であった。F鉱床の操業年数は13年で、G鉱床は5年であるので、年平均販売収入はF鉱床で706億円/年、G鉱床で355億円/年と算出された。両鉱床間で年平均生産量に大きな違いがなく、採鉱や選鉱の年平均操業コストもほぼ同額であるため、開発の経済性はF鉱床の方が優れていることがわかる。

表 6-3-2 販売する金属等の価格及び為替レート

項目	価格	単位
Cu	8,815	US\$/t
Zn	3,485	US\$/t
Pb	2,153	US\$/t
Au	1,801.5	US\$/oz
Ag	21.8	US\$/oz
亜鉛水酸化物	1,680	US\$/t

6-3-2. 初期投資額とこれに伴う諸条件の設定

操業前管理、F 鉱床の資源量調査、F 鉱床の環境影響評価、採鉱・揚鉱（採鉱機、移送管 / UMB ケーブル、循環式スラリー揚鉱装置、揚鉱管、鉱石分離設備、水処理設備、鉱石輸送装置、セミサブ、採鉱母船、その他船舶）及び選鉱（選鉱設備、尾鉱堆積場、土地購入）に係る初期投資額を設定する。初期投資額を表 6-3-3 に示す。

有形固定資産の減価償却年数は、以下のとおり設定した。

- ・ 5 年：尾鉱堆積場
- ・ 6 年：水中採鉱設備、船上採鉱設備、鉱石輸送船のリリースフック
- ・ 7 年：選鉱設備
- ・ 15 年：セミサブ、採鉱母船

操業前管理のオーナー費と EPCM 費、F 鉱床の探鉱費、F 鉱床の環境影響評価及び事前調査費は無形固定資産とする。減価償却年数は以下のとおりとする。

- ・ 13 年：F 鉱床の探鉱費、F 鉱床の環境影響評価及び事前調査費
- ・ 18 年：操業前管理のオーナー費と EPCM 費

表 6-3-3 初期投資額 (Initial CAPEX)

項目		費用 (百万円)	割合
操業前 環境調査	環境ベースライン調査 (F 鉱床)	793	
	環境調査費の合計	793	0.3 %
操業前 採鉱費	年間採鉱費	4,293	
	採鉱費の合計	4,293	1.6 %
操業前 管理費	オーナー費用	750	0.3 %
	EPCM 費	250	0.1 %
	操業前管理費の合計	1,000	0.4 %
採鉱・揚鉱 設備費	採鉱機	64,831	23.7 %
	移送管・ケーブル等	1,638	0.6 %
	循環式スラリー揚鉱装置	14,544	5.3 %
	揚鉱管	4,350	1.6 %
	鉱石分離設備	7,155	2.6 %
	水処理設備	1,701	0.6 %
	鉱石輸送設備	14,307	5.2 %
	セミサブ、採鉱母船	117,501	42.9 %
	その他船舶	9	0.0 %
	採鉱設備の合計	226,036	82.6 %
選鉱設備費	選鉱設備	41,548	
	選鉱設備の合計	41,548	15.2 %
初期投資額合計		273,669	100.0 %

6-3-3. 維持投資とこれに伴う諸条件の設定

F 鉱床の操業中に実施する G 鉱床の資源量調査、G 鉱床の環境影響評価、F 鉱床及び G 鉱床の採鉱（採鉱機、移送管 / UMB ケーブル、循環式スラリー揚鉱装置、揚鉱管、鉱石分離設備、水処理設備、鉱石輸送装置、セミサブ、採鉱母船、その他船舶）、選鉱（選鉱設備、尾鉱堆積場、土地購入）に係る維持投資額を算出する。

有形固定資産の減価償却年数は、初期投資と同様に以下のとおりとする。

- ・ 5 年：尾鉱堆積場
- ・ 6 年：水中採鉱設備、船上採鉱設備
- ・ 7 年：選鉱設備
- ・ 15 年：セミサブ、採鉱母船

G 鉱床の採鉱費、G 鉱床の環境影響評価及び事前調査費は無形固定資産とし、減価償却年数は 5 年とする。

表 6-3-4 維持投資額 (Sustaining CAPEX)

項目		費用（百万円）	割合
環境調査	環境ベースライン調査（G 鉱床）	767	
	環境調査費の合計	767	0.2 %
採鉱費	操業中採鉱費	2,115	
	採鉱費の合計	2,115	0.6 %
採鉱設備 建設	採鉱機	116,871	35.1 %
	移送管・ケーブル等	1,847	0.6 %
	循環式スラリー揚鉱装置	26,977	8.1 %
	揚鉱管	29,801	8.9 %
	鉱石分離設備	14,178	4.3 %
	水処理設備	3,101	0.9 %
	鉱石輸送設備	9,014	2.7 %
	セミサブ、採鉱母船	99,876	30.0 %
	その他船舶	0	0.0 %
	採鉱設備の合計	301,665	90.6 %
選鉱設備 建設	選鉱設備	2,429	0.7 %
	尾鉱堆積場	24,959	7.5 %
	土地購入費（10 年目）	1,048	0.3 %
	選鉱設備の合計	28,437	8.5 %
維持投資額合計		332,984	100.0 %

6-3-4. 操業費（OPEX）の設定

環境調査（操業中モニタリング、閉山後モニタリング）、採鉱（揚鉱管、水処理設備、鉱石搬送装置、セミサブ、採鉱母船、その他船舶、人件費、動復員費）、選鉱（人件費、薬剤費、電気・水道代等操業費）に係る操業費を算出する。これら操業期間 18 年の操業費の総額を表 6-3-5 に示す。母船等の運航に用いる A 重油価格、電気代等のユーティリティ費用は 2022 年の年間平均価格を用いた。

なお、採鉱機や鉱石分離設備は船からの電力供給で稼働しており、電力に関する費用は「セミサブ、採鉱母船」の燃料費として計上される。また、採鉱機や鉱石分離設備等の整備に要する機器及びパーツの類は維持投資として計上した。閉山後の環境モニタリング費は閉山準備積立金として、必要額を操業年数で割った金額を毎年計上することとする。

表 6-3-5 操業費（OPEX）

項目		費用（百万円）	割合
環境調査 操業費	操業中モニタリング	8,532	1.4 %
	閉山準備積立金	4,253	0.7 %
	環境調査費の合計	12,785	2.1 %
採鉱設備 操業費	採鉱機	0	0.0 %
	移送管・ケーブル等	0	0.0 %
	循環式スラリー揚鉱装置	0	0.0 %
	揚鉱管	232	0.0 %
	鉱石分離設備	0	0.0 %
	水処理設備	14,827	2.4 %
	鉱石輸送設備	614	0.1 %
	セミサブ、採鉱母船	159,970	25.8 %
	その他船舶	159,760	25.8 %
	人件費	66,082	10.7 %
	動復員費	13,289	2.1 %
	採鉱設備の合計	414,774	67.0 %
選鉱設備 操業費	人件費	14,700	2.4 %
	薬剤費、電気・水道代等操業費	176,996	28.6 %
	選鉱操業費の合計	191,695	31.0 %
操業費合計		619,255	100.0 %

6-3-5. 税率の設定

商業生産時には固定資産税、法人税、消費税、鉱産税及び鉱区税の支払いが想定されるが、今回は税引き前の経済性を評価する。

6-4. 経済性評価結果

建設期間 3 年、F 鉱床の操業期間 13 年、G 鉱床の操業期間 5 年からなるプロジェクトの CF を計算した。

各年次の収入と支出の内訳及び CF を図 6-4-1 及び図 6-4-2 に、累計 CF を図 6-4-3 に、プロジェクト期間中の収入と支出の総額の内訳を図 6-4-4 と表 6-4-1 にそれぞれ示す。

累計 CF は建設期間 3 年間の初期投資によりマイナス 2,834 億円となるが、F 鉱床における 13 年間の黒字操業によりマイナス 9 億円まで回復する。その後の G 鉱床における 5 年間の赤字操業により累計 CF はマイナス 837 億円となる。

鉱石 1dt 当たりの操業コスト（操業期間中の OPEX と維持 CAPEX）は F 鉱床と G 鉱床で大きな違いはなく 53,937～55,856 円/dt を示す。なお、鉱石 1 dt 当たりの商業価値（鉱石 1 dt から得られる精鉱販売収入）は、F 鉱床が 77,067 円と生産コストを上回るのに対し、G 鉱床は約半額の 38,610 円と生産コストを下回ることが、G 鉱床の操業期間に累計 CF が悪化する原因である。

なお、本条件での検討では最終的な累計 CF がマイナスとなったことで IRR が算出できないため、DCF 及び NPV の計算は行わなかった。

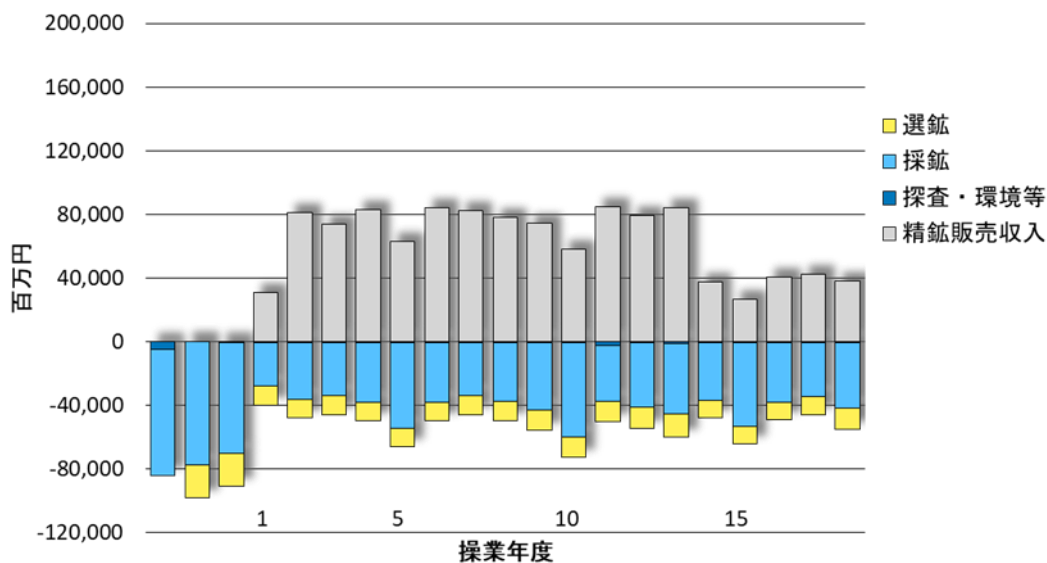


図 6-4-1 各年次の収入、支出

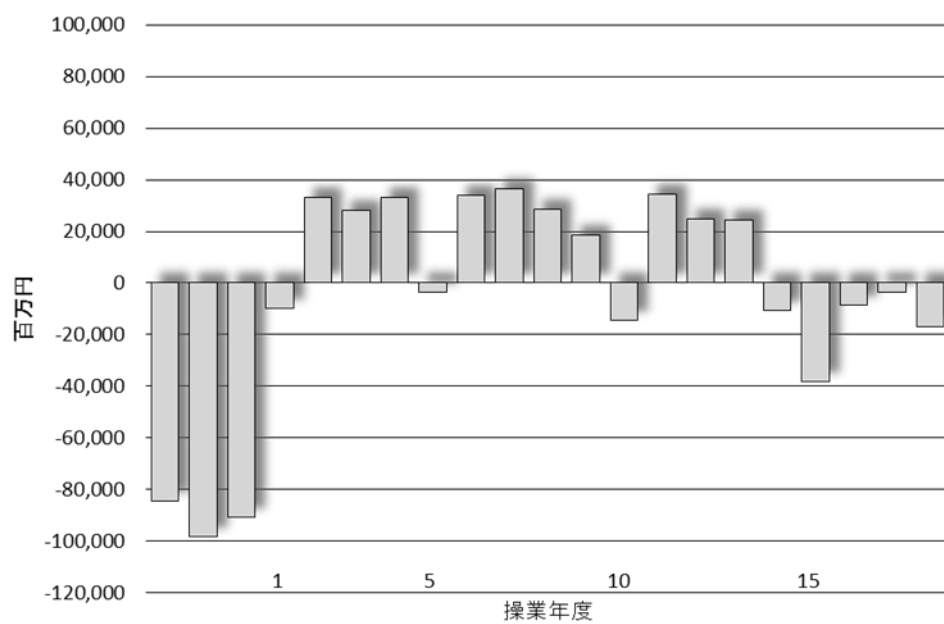


図 6-4-2 各年次の CF

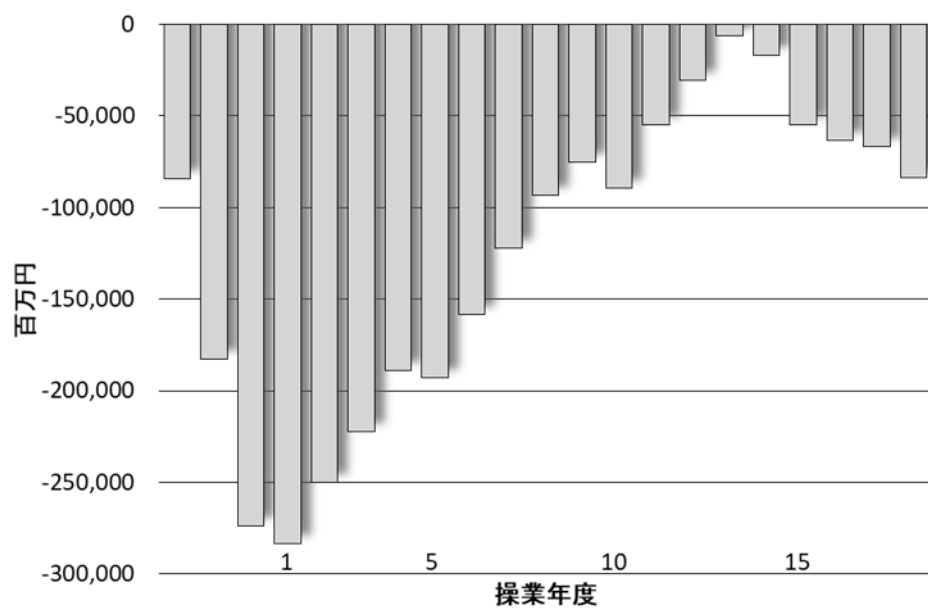


図 6-4-3 累計 CF

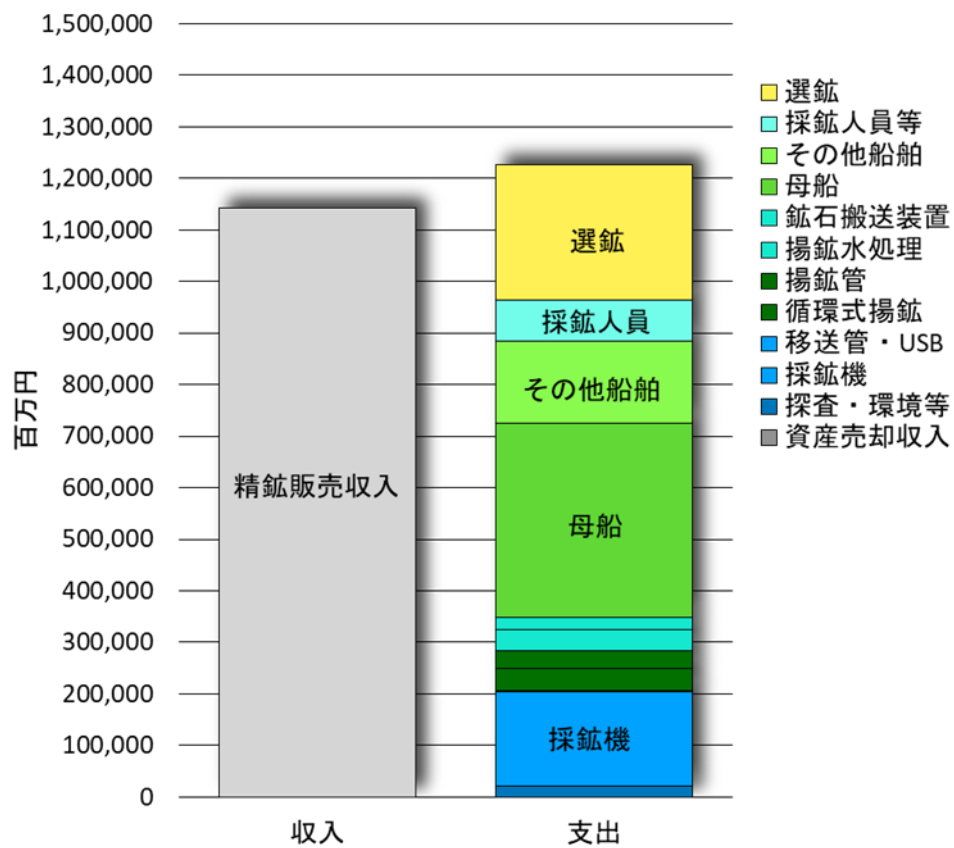


図 6-4-4 プロジェクト期間の収入と支出の内訳

表 6-4-1 プロジェクト期間の収入と支出の内訳と給鉱量との関係

	項目	単位	建設期間	F鉱床 操業期間	G鉱床 操業期間	合計
	給鉱量	k dt		12,419	4,793	17,212
収入	精鉱販売	百万円		957,075	185,063	1,142,137
	合計	百万円		957,075	185,063	1,142,137
支出	探査・環境等	百万円	6,086	8,350	7,318	21,753
	採鉱機	百万円	64,831	80,891	35,980	181,703
	移送管・UMB	百万円	1,638	1,442	405	3,485
	循環式揚鉱	百万円	14,544	21,286	5,690	41,521
	揚鉱管	百万円	4,350	20,042	9,990	34,383
	鉱石分離・水処理	百万円	8,856	24,936	7,170	40,962
	鉱石輸送装置	百万円	14,307	7,542	2,087	23,936
	セミサブ・母船	百万円	117,501	186,035	73,811	377,347
	その他船舶	百万円	9	116,491	43,269	159,769
	採鉱人員等	百万円		57,323	22,047	79,371
	選鉱	百万円	41,548	162,362	57,770	261,680
	税金	百万円	0	0	0	0
	合計	百万円	273,669	686,701	265,539	1,225,909
	収入-支出	百万円	-273,669	270,374	-80,476	-83,771
累計 キャッシュフロー		百万円	-273,669	-3,295	-83,771	

6-5. 感度分析結果

前項のとおり、閉山時の累計 CF はマイナスとなった。本項では感度分析として、プロジェクトの経済性に大きな影響を与えるパラメータを設定し、これらのパラメータを段階的に変化させた場合の IRR の変動を確認した。

プロジェクトの経済性に大きな影響を与えるパラメータは生産システムの CAPEX 及び OPEX と操業期間中の収入である。開発期間中の生産システムの CAPEX と OPEX を合わせた支出総額は 1 兆 2,041 億円に達する。本検討で想定した生産システムは、未だ開発段階であり技術的な不確実性があることから、今回見積もった支出よりも削減できる可能性があり、同様の理由から生産効率の向上による精鉱生産量増加の可能性もあると考えられる。また、精鉱販売収入そのものは、鉱石に含まれる有価金属の量や金属価格によって変動するため、鉱石品位や金属価格もプロジェクトの経済性に大きな影響を与える。有価金属の量、金属価格、生産効率の向上などに起因する収入を段階的に増加させるとともに、支出の削減を想定して生産システムの CAPEX 及び OPEX を段階的に変動させた場合の投資回収期間 (Payback Period) との関係を表 6-5-1 に、IRR との関係を表 6-5-2 及び図 6-5-1 にそれぞれ示す。

**表 6-5-1 総収入、生産システムの CAPEX 及び OPEX と
投資回収期間の関係**

投資回収期間 (年)		生産システムのCAPEX及びOPEX					
		100 %	90 %	80 %	70 %	60 %	50 %
総収入	150 %	5.35	4.26	3.56	3.08	2.59	2.15
	140 %	5.89	5.10	3.87	3.31	2.80	2.30
	130 %	6.55	5.63	4.59	3.60	3.04	2.49
	120 %	7.51	6.31	5.35	3.97	3.31	2.71
	110 %	10.43	7.25	6.04	5.04	3.66	2.99
	100 %	－	10.24	6.96	5.72	4.26	3.31

表 6-5-2 総収入、生産システムの CAPEX 及び OPEX と IRR の関係

IRR (%)		生産システムのCAPEX及びOPEX					
		100 %	90 %	80 %	70 %	60 %	50 %
総収入	150 %	14.38	17.89	21.73	26.06	31.15	37.39
	140 %	11.97	15.61	19.49	23.82	28.86	34.99
	130 %	9.25	13.07	17.05	21.42	26.43	32.48
	120 %	5.98	10.21	14.38	18.81	23.82	29.79
	110 %	1.60	6.77	11.34	15.94	20.99	26.92
	100 %	－	2.18	7.71	12.69	17.89	23.82

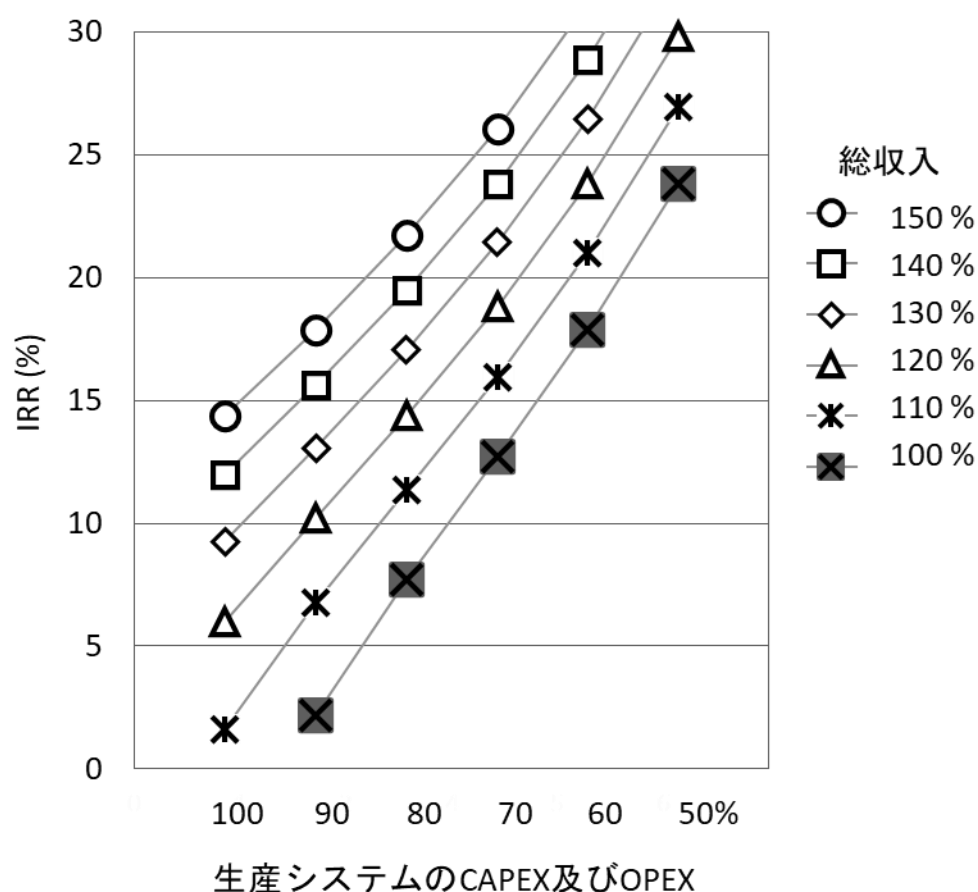


図 6-5-1 総収入、生産システムの CAPEX 及び OPEX と IRR の関係

感度分析の結果、総収入が 40% 上昇し、生産システムの CAPEX 及び OPEX が 10% 低減した場合、F 鉱床及び G 鉱床での操業 18 年間の累計 CF は 4,957 億円の黒字となり、IRR は 15% に達する結果となった。

6-6. 経済性評価に影響する条件

6-6-1. 経済性評価の条件設定で将来的に考慮が必要な事項

現時点では見込むことが困難であるが、商業開発を行う際に考慮する必要があると考えられる費用は、以下のとおりである。

- ・ 選鉱場、尾鉱堆積場等の用地選定・取得に係る調整や補償に係る費用
- ・ 漁業調整に係る費用
- ・ 許認可取得に係る費用
- ・ 保護区の設定や環境保全策の検討に係る費用
- ・ 資金調達コスト（支払利息、債務保証料、配当等）
- ・ 鉱産税、鉱区税
- ・ （新規に港湾を整備する場合）港湾設備の整備費用（本報告書では整備された港湾設備を活用すると仮定）
- ・ 港湾使用料

6-6-2. 将来の開発の可能性や経済性評価結果に影響する仮定

経済性評価を行う上で仮定した条件のうち、商業化に向けて実現性や費用への影響が大きいと考えられるものは、以下のとおり。

- ・ 鉱床の品位は一定であり、ズリ混入による希釈もないものとする（実際の品位分布を考慮せず、平均品位を一律に割り当て。ズリ混入率 0%と設定）
- ・ 通年で操業ができるとする（漁業等他産業との海域利用の調整を考慮していない）
- ・ 尾鉱堆積場を伴う選鉱場を国内に設置できるとする（現状、国内に同設備はない）
- ・ 生産する精鉱は全て国内の製錬所で受け入れできるとする（F 鉱床、G 鉱床とも亜鉛・鉛バルク精鉱の不純物（ヒ素、水銀）品位が高く、既存製錬所の受け入れ可能量が限定される可能性がある。また、硫化鉄精鉱処理時に脱硫設備が必要だが、現状、既存製錬所には脱硫設備がない。加えて、F 鉱では銅精鉱中の不純物（鉛、水銀）が高く、既存製錬所の受け入れ可能量が限定される可能性がある。）
- ・ 法や規則、ガイドラインは現時点で想定し得るものののみ採用するとする（現状想定されない法制度が整備された場合、生産方法や設備設計が変更になる可能性がある）

6-7. 経済性評価に関するまとめと課題

本経済性評価では、概略資源量が把握され、環境ベースライン調査や選鉱プロセスの検討が実施された F 鉱床及び G 鉱床を対象とした。また、採鉱・揚鉱システムは実際の鉱床の賦存状況、海象条件を考慮した上で、環境に配慮した循環式スラリー揚鉱方式を軸としたシステムを採用した。当該システムの構成と採鉱手順は、操業における生産量の安定や冗長性を考慮して構築したものである。経済性評価の結果、F 鉱床及び G 鉱床における操業 18 年間の累計 CF はマイナスとなった。一方、4-1. に記載のとおり、近年では新鉱床発見による概略資源量の増加だけでなく金品位の高い鉱床も発見されており、将来的に経済価値の高い鉱石が開発の対象となることも期待できる。また、実証試験などにより開発リスクや不確実性を低減させ、生産システムの技術革新等によりコスト削減に取り組むことで、経済性評価の精度向上と経済性の改善につながることを期待される。感度分析の結果から、収入が 40%増加し、生産システムの CAPEX 及び OPEX を 10%低減させることができれば、IRR が 15%に達するため、経済性を見出し得ると評価された。中長期的には金属価格の上昇が見込まれる中で、コストの削減と質・量ともに優れた鉱床の発見によって、将来における海底熱水鉱床の開発可能性は高まるものと考えられる。

本検討結果は、生産システムの構成と費用項目、生産の不安定性等の操業に関するリスクの考え方によって大きく変動するものであり、海底熱水鉱床開発の一例として参照されたい。今回の経済性評価では、実際には発生するであろうコストの一部が織り込まれていないこと、計算条件の中には開発可能性や経済性に大きな影響を及ぼし得る仮定も含まれることに留意する必要がある。

引用文献

International Commission on Large Dams, 2022, Tailing Dam Safety, Bulletin 194.

Canadian Dam Association, 2019, Technical Bulletin: Application of Dam Safety Guidelines to Mining Dams.

Global Tailings Review, 2020, Global Industry Standards on Tailings Management.

7. 海底熱水鉱床開発において考慮すべき課題

7-1. 資源量調査

海底熱水鉱床の開発に向けては、鉱物資源量をより高い確度で把握することが重要である。商業化あるいは開発投資判断にあたっての経済性評価には資源量カテゴリーの格上げ（概測資源量の把握）が必要であり、そのための手法を検討し、調査・解析を行う必要がある。また、陸上の鉱床では国際基準に準拠した資源量評価が定められているものの、海洋鉱物資源においては、国際基準に準拠した資源量評価の事例が少ないことから、海洋における鉱物資源量の評価手法を確立する必要がある。

海底熱水鉱床を対象としたボーリング調査における課題の一つとしてコアが十分に回収できないことがある。鉱石と未固結の岩相が混在して地質を構成することが大きな理由だが、これまでは比抵抗分布から鉱石分布を推定して資源量の一部として算定することを試みた。今後は物理探査結果とボーリング調査結果を補うことを目的として岩石物性測定を実施する必要がある。具体的な岩石物性の測定手法として、物理検層、コアや海底面サンプルの物性測定が想定される。また、海底熱水鉱床の形成過程を解明することで、数少ない試料から、資源量の把握に資する知見を得られる可能性があるため、既に発見されている鉱床を対象とした成因研究等、基礎研究の取組も有効と考えられる。

経済性評価の結果を考慮すると、商業化に向けてはさらなる資源量の積み増しが必要といえる。生産コストの圧縮に貢献するためには、鉱石価値の高い鉱床の発見が必要である。

鉱床によっては、船舶搭載の MBES で水中音響異常を探知することができず、AUV 搭載の MBES による水中音響異常の把握や化学センサーによる異常の検出が鉱床発見の端緒となったことから、AUV や DT 等の水中航走体を用いた海底近傍の調査を行うことで、新鉱床発見の可能性が拡大すると考えられる。一方で、このような水中航走体を用いた調査手法は海底熱水鉱床の胚胎が期待される海域を網羅するには調査効率が低い。調査の項目や条件を最適化したうえで測線間隔を広げることや、自然電位の活用、急峻な海底地形に追従して高速で移動できる技術などが有用である。同時に、既知鉱床の衛星鉱体の探査や、有望海域の絞り込みのためにさらなるデータの解析（地形、水中音響異常、重磁力、AI 解析など）も行うべきであろう。

7-2. 環境影響評価

環境影響評価分野では、環境調査手法や環境影響予測モデルを複数の海底熱水鉱床又は海域に適用すべく取り組んできた。商業化に向けては、これらをかく乱試験や掘削試験より長期間にわたって行われる実操業に利用するための検討が必要である。例えば、海底面の掘削などに起因する濁りは流れによって運搬されるため、長期間の流況を反映した流動場を作成し、粒子追跡モデルに適用して計算することで、濁りの拡散・再堆積をより精度良く予測することができると考えられる。また、かく乱試験の際には底層域生態系モデルによる計算結果と環境調査で得られた観測データを比較・検証したが、観測データはかく乱地点周辺の数地点から得られたのみであり、検証のためのサンプル数として十分とは言えない。今後、追加の観測データが取得された際などに、追加検証することが必要である、更に、操業中の環境影響を監視するため長期的に行われるモニタリングのあり方を検討する必要がある。

開発にあたっては周辺の生態系への影響が予測されることから、生物多様性を保全するために保護すべき範囲を設定すべきである。

7-3. 採鉱・揚鉱技術

採鉱・揚鉱分野では、環境影響を考慮した上で、採鉱・揚鉱システムの構成機器の技術的信頼性、生産効率、経済性の向上が求められる。

特に、技術的信頼性の向上は、商業化に向けて必要不可欠である。採鉱分野では、マウンド頂部を立型採鉱機で掘削して平地造成した後、自走式採鉱機により盤下げ掘削することを検討している。立型採鉱機については小型の試験機を製作し、陸上での掘削試験により海底熱水鉱床の形状や物性を大まかに再現した模擬岩盤に対する掘削性能を確認したが、実操業により近い条件での掘削試験等により、頂部掘削への適用性を検証し、信頼性を向上させる必要がある。また、陸上鉱山での運用実績のある自走式採鉱機を海底での盤下げ掘削に用いるための仕様を検討する必要がある。揚鉱分野では、環境影響を考慮して新たに構築した循環式スラリー揚鉱方式を安定的に運用するため、高負荷及び長時間運転時の耐久性等の不確実要素の低減に向けた検討や、陸上試験のみならず実操業により近い条件での検証を行い、システム全体の安定性及び信頼性を向上させる必要がある。

また、これまでに検討したシステム・構成機器は掘削対象の形状や物性に左右される。今後のボーリング調査の結果等から地山モデルの情報が更新された際に、必要に応じて効率的な採鉱計画や、採鉱母船及びセミサブの稼働率向上に向けた仕様・設備レイアウトの詳細検討が必要になる点に留意が必要である。

一方で、経済性評価で示されたとおり、生産コストの大半は採鉱・揚鉱に関するものである。採鉱・揚鉱に係る生産コストの低減を図りつつ、環境影響も考慮した採鉱・揚鉱システムに改良する必要がある。

7-4. 選鉱・製錬技術

選鉱分野では、各鉱石共通の課題として、粉砕コストや薬剤コストの低減及び精鉱中の不純物元素の低減が挙げられる。鉛浮選において、代替薬剤の使用又は薬剤使用量の低減が必要である。

F 鉱については、オートクレーブを用いて高温高压で湿式処理を行う脱亜鉛浸出工程により既存の製錬所に供給可能なレベルまで亜鉛品位を低下させることができるが、コストが高い工程であるため、可能な限り浮選等の物理選別により亜鉛等の不純物を除去することが望ましい。一方で、不純物を含む鉱物には、粒径が小さく単体分離していないものがある。これらは、物理選別が困難であるため、オートクレーブ以外の湿式処理等、他の技術との組み合わせも検討すべきである。

G 鉱、H 鉱については、製錬所に供給可能な品位の精鉱を製造できているが、ヒ素や水銀といった一部の忌避元素が陸上鉱山由来の鉱石に比して高いことから、これらの低減に取り組むべきである。

製錬分野では、海底熱水鉱床のような鉱物粒径が小さい鉱石の場合、選鉱による不純物除去には限界があり、選鉱分野だけでなく、製錬工程での不純物除去が必要となる。現在の国内製錬所は不純物の少ない原料の確保に努めているが、陸上鉱山でも不純物の多い精鉱が増えつつある中、そのような精鉱を低コストで処理する能力を有する製錬所の必要性が今後高まると考えられる。そのため、選鉱分野だけでなく、製錬分野でも高不純物精鉱への対応に関する研究が必要である。

その他の課題として、陸上施設の適地選定が挙げられる。陸上施設とは具体的には選鉱施設や尾鉱堆積場である。今回の経済性評価では、選鉱施設の敷地面積は港湾部含め 40,000 m²、尾鉱堆積場は 2,400,000 m²と見積もっているように、広大な敷地が必要となる。また、採掘現場が海域であることと、選鉱施設で生産した精鉱を別の場所に所在する製錬所等へ輸送することを考慮すれば、選鉱施設は港に隣接する場所に設置することが望ましく、かつ港は鉱石・精鉱を輸送する船舶が停泊可能な規模を有する必要がある。しかしながら、国土の狭い我が国においてそのような条件を満たす場所を確保することの不確実性が、海底熱水鉱床開発のリスクの一つとなっている。

また、選鉱施設は騒音や土壌汚染、尾鉱堆積場は土壌汚染やダム崩壊による事故の原因となる可能性がある。適切な対策を講じることにより、公害や事故の発生は抑制可能であるため、安全設計や操業中の環境モニタリングに加え、閉山後の尾鉱堆積場の管理、例えば安定化工事や覆土植栽、浸透水のモニタリングや処理も必要となる。

7-5. 法制度のあり方の検討等

環境影響に関する規制など、海底熱水鉱床開発のためのルールが未整備かつ不明確であることや、開発そのものが市場や地域社会等に受け入れられるかどうか分からない状況は、商業化を検討する上で大きな不確実要素である。

第3期には、UNCLOSを中心に国際法で定められている事項を確認し、国際社会で合意されている環境保全に関する規則、鉱業法等現行の国内法制度を海底熱水鉱床開発に適用した場合の手続きを整理した。加えて、社会的受容性に係る基礎的検討として、国際動向の把握、海底熱水鉱床開発におけるステークホルダーの洗い出しなどを行ったほか、南西諸島海域及び伊豆・小笠原海域における漁業を主とした利用実態を調査した。これらの取組により、開発を取り巻く法的・社会的な不確実性を低減し、商業化への円滑な移行のための準備を進めた。

一方で、例えば国際法上、国家は海洋環境の保護及び保全の観点から「相当の注意義務」を果たすことを求められるが、何によってその義務を果たしたとみなされるかといった基準が条約等に明示されていないなど、未だ不明確な点もある。国内法制度の整備に向けては、適用し得る生産技術を前提とした商業化のシナリオに基づき、国際的なルール及び諸外国の国内法制度を参照し、現行法制度の条文解釈や見直しを要する点について検討を継続する必要があるだろう。また、社会的受容性の醸成に向けて、海洋環境保全に関する国内外の動向や事業の進捗状況に応じたステークホルダーとの関わり、適切な情報発信を行うことが重要であることに加え、商業化に進む際には、開発対象海域の利用状況を精査し、他産業と共存すべく関係者と慎重に議論・調整していく必要がある。

8. 今後の展望

8-1. 資源量調査

- ・ 鉱石価値が高く規模の大きな鉱床について、資源量カテゴリーの格上げ（概測資源量の把握）のため、ボーリング調査を高い密度で実施すべきである。
- ・ ボーリングコアの回収率の改善を試みているが、海底熱水鉱床固有の地質性状に起因して掘削技術の向上や工夫のみでは限界があるため、岩石物性測定（検層やサンプルの物性測定）を行い、物理探査結果とボーリング調査結果を補完することで、より確度の高い地質モデルを構築すべきである。
- ・ ボーリング試料の地球化学的特性等から、海底熱水鉱床の資源量評価に資する適切な地質モデルを構築できる可能性があるため、鉱石価値の高い鉱床の成因等、基礎的な研究に取り組むべきである。
- ・ 新鉱床の発見による資源量の増加が経済性の向上に寄与すると考えられることから、船舶の MBES では水中音響異常が探知できない鉱床を効率よく探査すべきである。そのためには、AUV や DT 等による調査手法に関して、最新の技術を導入して調査を実施すべきであり、関連技術の情報収集にも取り組むべきである。また、既知鉱床の衛星鉱体の探査や、有望海域の絞り込みのためのさらなるデータの解析（地形、水中音響異常、重磁力、AI 解析など）を行うべきである。加えて、プルーフを伴わない鉱床に対しては、空中航走体（AUV や DT 等）による海底近傍の物理探査、特に電気電磁探査や自然電位探査が有効と考えられることから、調査手法や解析手法を改良すべきである。

8-2. 環境影響評価

- ・ 長期間にわたって行われる操業により継続的に発生する濁りの拡散・再堆積範囲を粒子追跡モデルで精度良く、かつ効率的に予測するための流動場作成方法を検討し、粒子追跡モデルに適用する。
- ・ 商業生産時の環境影響を監視するためのモニタリングのあり方を検討する。
- ・ 生物多様性の保全のために保護すべき範囲を設定する。

8-3. 採鉱・揚鉱技術

- ・ 海底熱水鉱床の開発事例は現在までに無いため、商業化に向けて採鉱・揚鉱システムの構成機器の技術信頼性を担保する取組を実施する。
- ・ 具体的には、採鉱技術については、マウンド頂部の掘削技術の確立に向けて、実操業により近い条件での掘削試験等により立型採鉱機の頂部掘削性能を検証する。揚鉱技術については、循環式スラリー揚鉱方式における装置の高負荷及び長時間運転時の耐久性を確認するとともに、実操業により近い条件下で、同方式への鉱石投入を含む総合試験を実施して適用性を検証する。
- ・ これらの取組も踏まえて、環境影響を考慮した上で、採鉱・揚鉱システムを改良し、

生産効率及び経済性の向上を図る。

8-4. 選鉱・製錬技術

- ・ 選鉱工程のコストの低減及び精鉱中の不純物低減に向けて、鉱物の浮選挙動の把握や湿式処理の検討を通じた選鉱工程の改良を行う。
- ・ 製錬工程における高不純物精鉱の処理を検討する。

8-5. 法制度のあり方の検討等

- ・ ISA で議論されている開発規則をはじめとする国際的なルール、諸外国の関連国内法、海洋環境保全に関する国際動向、国内外のステークホルダーに関する情報を収集し、国際ルールの策定に貢献するとともに、将来の国内法制度の整備、ステークホルダーへの適切な情報発信に寄与する。
- ・ ISA で議論されている開発規則等の国際ルールが策定された際には、それを踏まえて、実操業に適用し得る採鉱・揚鉱システムをはじめとする生産技術を前提とした商業化のシナリオと照らし合わせながら、現行国内法の条文を解釈するとともに、見直しを要する点を検討する。

9. 略語リスト

略語	英語表記	日本語
ADCP	Acoustic Doppler Current Profiler	超音波ドップラー流速計
AI	artificial intelligence	人工知能
AIST	National Institute of Advanced Industrial Science and Technology	国立研究開発法人 産業技術総合研究所
AUV	Autonomous Underwater Vehicle	自律型無人潜水機
AX	Amyl Xanthate	アミルザンセート
CAMP	Comprehensive Analyzer for Mineral Processing	選鉱性総合評価装置
CCZ	Clarion-Clipperton Zone	クラリオン・クリッパートン領域
CF	Cash Flow	キャッシュフロー
CTD	Conductivity, Temperature, Depth	電気伝導度、温度、水深
DCF	Discounted Cash Flow	割引キャッシュフロー
DCS	Distributed Control System	分散制御システム
DEM	Digital Elevation Model	数値標高モデル
DeMPES	Detail Mineral Phase Evaluation System	鉱物相精密評価システム
DNA	deoxyribonucleic acid	デオキシリボ核酸
DO	Dissolved Oxygen	溶存酸素量
DOC	Dissolved Organic Carbon	溶存性有機炭素
DPS	Dynamic Positioning System	自動船位保持装置
DT	Deep Tow	深海曳航体
EDS	Energy Dispersive X-ray Spectroscopy	エネルギー分散型 X 線分光法
EDTA	Ethylenediaminetetraacetic acid	エチレンジアミン四酢酸
EEZ	Exclusive Economic Zone	排他的経済水域
EIA	Environmental Impact Assessment	環境影響評価
EIS	Environmental Impact Statement	環境影響評価書
EPCM	Engineering, Procurement, Construction and Management	設計、調達、建設・試運転、管理
EU	European Union	欧州連合
EV	Electric Vehicle	電気自動車
F/S	Feasibility Study	フィージビリティスタディ
FDC	Finder-installed Deep-sea Camera	曳航式深海カメラ
FPG	Finder-mounted Power Grab	ファインダー付きパワーグラブ
FRB	Federal Reserve Board	連邦準備制度理事会
GSR	Global Sea Mineral Resources	グローバル・シー・ミネラル・リソース シーズ
HDPE	High Density Polyethylene	高密度ポリエチレン
HEV	Hybrid Electric Vehicle	ハイブリッド車
HPGR	High Pressure Grinding Rolls	高圧型グラインディングロール
ICP	Inductively Coupled Plasma	高周波誘導結合プラズマ
Initial CAPEX	Initial Capital expenditure	初期投資
IRR	Internal Rate of Return	内部収益率
IRZ	Impact Reference Zone	影響参照区域
ISA	International Seabed Authority	国際海底機構
ISO	International Organization for Standardization	国際標準化機構
ISP	Imperial Smelting Process	ISP (Imperial Smelting 社が開発した製 錬プロセス)

IUCN	International Union for Conservation of Nature and Natural Resources	国際自然保護連合
JAMSTEC	Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology	国立研究開発法人海洋研究開発機構
JOGMEC	Japan Organization for Metals and Energy Security (旧 Japan Oil, Gas and Metals National Corporation)	独立行政法人エネルギー・金属鉱物資源機構 (旧 独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構)
LME	London Metal Exchange	ロンドン金属取引所
MBES	Multi-Beam Echo Sounder	マルチビーム測深機
NGO	nongovernmental organization	非政府組織
NORI	Nauru Ocean Resources, Inc.	ナウル・オーシャン・リソーシーズ
NPV	Net Present Value	正味現在価値
OPEX	Operating Expenditure	操業費
ORP	Oxidation reduction potential	酸化還元電位
POC	Particulate Organic Carbon	懸濁有機炭素
PON	Particulate Organic Nitrogen	懸濁有機窒素
ROV	Remotely operated vehicle	遠隔操作無人探査機
SDGs	Sustainable Development Goals	持続可能な開発目標
SE	Specific Energy	掘削比体積エネルギー
SEM	Scanning Electron Microscope	走査型電子顕微鏡
SIP	Cross-ministerial Strategic Innovation Promotion Program	戦略的イノベーション創造プログラム
SNPs	Single Nucleotide Polymorphisms	一塩基多型
SS	Suspended Solids	浮遊物質
SSS	Side Scan Sonar	サイドスキャンソナー
Sustaining CAPEX	Sustaining Capital expenditure	維持投資
TN	Total Nitrogen	全窒素
TOC	Total Organic Carbon	全有機炭素
UMB	Umbilical	アンビリカル
UNCLOS	United Nations Convention on the Law of the Sea	国連海洋法条約
VMPS	Vertical Mutiple Plankton Sampler	鉛直多層式開閉ネット
WHO	World Health Organization	世界保健機関