

平成27年度  
交通運輸技術開発推進制度  
研究成果報告書  
(ダイジェスト版)

(テーマ4) 交通運輸分野の国際競争力強化・新市場の創出

海洋鉱物資源開発における  
交通運輸分野の技術開発に関する研究

平成28年3月

国立研究開発法人 港湾空港技術研究所  
国立研究開発法人 海上技術安全研究所  
一般財団法人 沿岸技術研究センター

## 研究成果報告要約

作成年月	平成28年3月
研究テーマ名	交通運輸分野の国際競争力強化・新市場の創出
研究課題名	海洋鉱物資源開発における交通運輸分野の技術開発に関する研究
研究代表者名	(独) 港湾空港技術研究所 特別研究官 下迫健一郎
研究期間	平成27年6月5日～平成28年3月22日
研究の目的	海洋鉱物資源開発の現況及び技術開発課題を整理し、港湾・船舶関連技術の海洋鉱物資源開発への適用・応用のあり方や技術開発課題を明確化し、事業化を図る上での交通運輸分野のボトルネックの解消を図り、我が国の国際競争力強化・新市場の創出に資することを目的とする。平成27年度は、各要素技術の適用可能性について一定の結論を得るとともに、交通運輸技術を活用した海洋鉱物資源開発の全体システムの提案とその評価及び今後の課題についてとりまとめを行う。
研究成果の要旨	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 4種の海洋鉱物資源に関し条件設定を行い、チャート式揚収・輸送モデル及び揚収・輸送コスト最小化モデルを用いて、輸送パターン及び輸送コストの検討を行った。輸送船型を大型化することによって輸送コストを減ずることが可能であるが、揚収場所や鉱物資源の特徴によって大きくコストが異なることを示した。</li> <li>2. 海底資源開発における資源採掘は、大規模な施工を完全無人化で実施する必要がある。またその特殊な条件から、センシング技術や移動体経路についても制限が多い。本章では提案した採鉱機について、その製作コスト、運用コスト、実用のために必要となる課題点についてとりまとめを行った。さらに既存水中施工機械の知見を基に採鉱能力について検討した。 また水中遠隔操作のためには外界計測センサが重要であり、既存の超音波イメージセンサに関する課題点や呈示方法について検討を行った。</li> <li>3. 海洋鉱物資源揚収システムとして、水深5,000mクラスの超大水深域に対応した揚鉱管（ライザー）技術に着目し、実用的なライザーの安全性評価技術を確立するために、浮体動揺を考慮した水槽試験を行って挙動解析ツールの検証を行った。また、超大水深に適用可能なライザーの概念検討を行うとともに、当該解析ツールを用いてライザーパイプ挙動を解析し、強度・疲労評価を行った。</li> <li>4. 遠隔離島を基地として、揚収した鉱物を選鉱・精錬した際に発生する残渣を埋立て処分することを想定し、処分場建設や埋立てによる土地造成の実現性について検討した。技術的には工事可能であるが、護岸建設に非常に長い工期を必要とする一方、処分場として使用できる期間が短いこと、直接工事費は規模に応じた金額であっても間接工事費がその2.5倍近くに達するなど、遠隔離島における建設工事の難しさが反映される結果となった。</li> <li>5. 3つの経済性評価指標を用いて、設定したケースについて、経済性評価の試算及び感度分析を行った。掘削・集鉱機械の機材操業費の削減、品位の高い鉱物資源の採取が重要であること等を明らかにし、遠洋での海洋鉱物資源採集においては、輸送・ロジスティクス費用の占める割合が高く、その効率化が課題であることを示した。感度分析においては、海洋鉱物資源の品位・価格が大きな影響を与えることが明らかとなった。さらに、脱水・排水や環境面での課題の解決の重要性を指摘した。</li> </ol>
知的財産権取得状況	なし。
研究成果発表実績	なし。

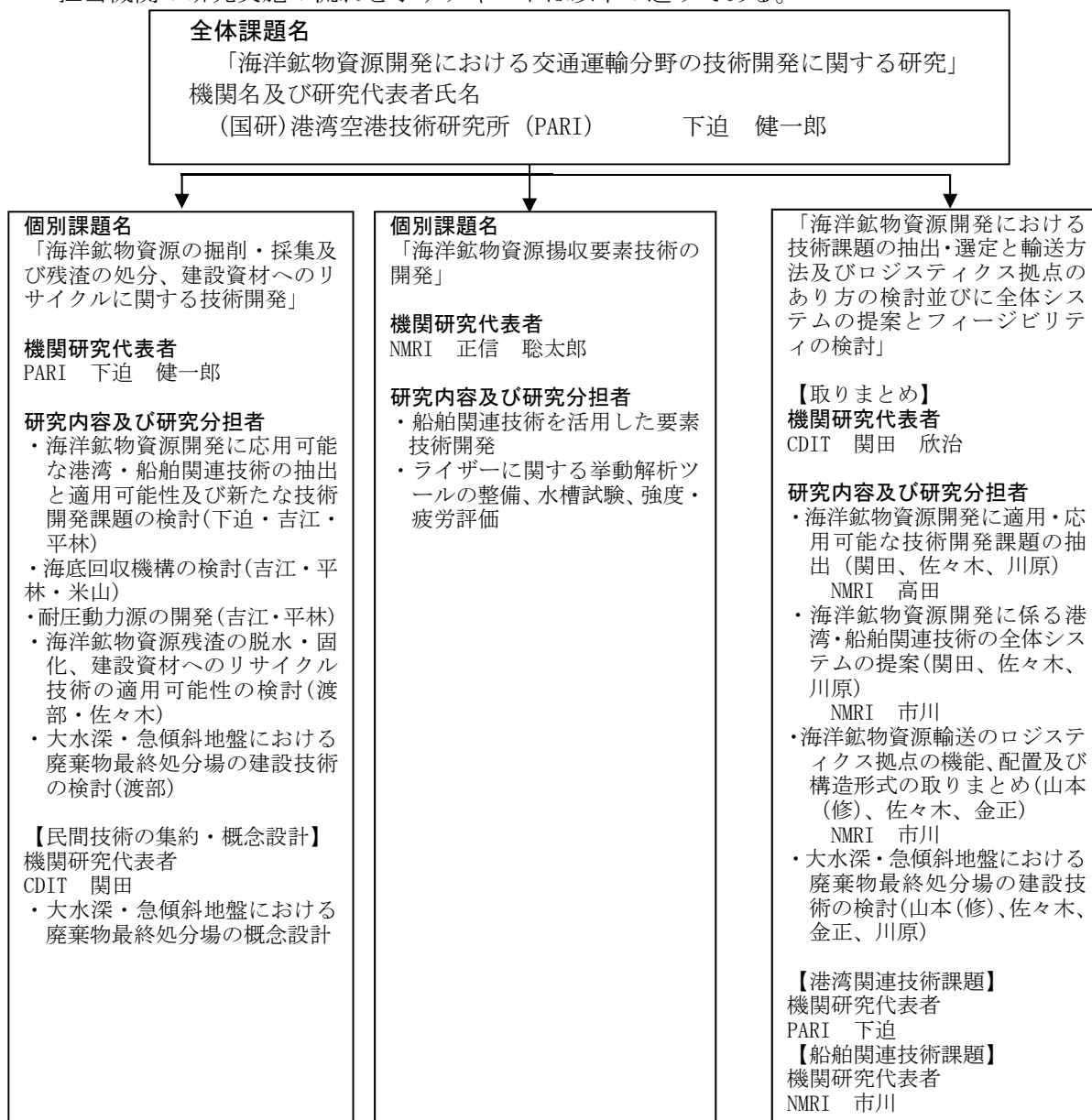
## 研究開発の目的と実施体制

### 研究開発の目的

交通運輸分野においては、港湾及び船舶に関する様々な技術的蓄積がなされており、それらの技術の適用・応用及び新たな技術開発を行うことにより、海洋鉱物資源開発を進めるに当たって解決しなければならない種々の技術課題を克服することが可能となると考えられる。本研究では、海洋鉱物資源開発の推進を支援し、交通運輸分野における我が国の国際競争力強化・新市場の創出に努めることを目的とする。

### 研究実施体制

本研究は、(国研)港湾空港技術研究所(PARI)を総括研究機関とし、(国研)海上技術安全研究所(NMRI)、(一財)沿岸技術研究センター(CDIT)と共同して実施した。担当機関の研究実施の流れを示すチャートは以下の通りである。



海洋鉱物資源開発における交通運輸分野の技術開発に関する研究  
研究者構成

【国立研究開発法人 港湾空港技術研究所】

下迫 健一郎 特別研究官  
渡部 要一 地盤研究領域長  
吉江 宗生 新技術研究開発領域長  
佐々 真志 地盤研究領域 動土質研究チームリーダー  
米山 治男 海洋研究領域 海洋利用研究チームリーダー  
平林 丈嗣 新技術研究開発領域 主任研究官

【国立研究開発法人 海上技術安全研究所】

高田 篤志 企画部 産官学連携副主管（平成27年9月30日まで担当）  
市川 吉郎 企画部 産官学連携主管（平成27年10月1日から担当）  
正信 聡太郎 海洋開発係 深海技術研究グループ長

【一般財団法人 沿岸技術研究センター】

関田 欣治 顧問  
山本 修司 業務執行理事  
佐々木 宏 研究主幹（平成28年1月28日まで担当）  
金正 富雄 調査役  
川原 修 主任研究員

海洋鉱物資源開発における交通運輸分野の技術開発に関する検討会  
検討会構成

【座長】

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

【委員】 (五十音順)

飯笹 幸吉 東京大学 生産技術研究所機械・生体系部門 特任教授  
谷口 正次 資源・環境ジャーナリスト  
宮本 卓次郎 横浜国立大学 統合的海洋教育・研究センター 特任教員(教授)  
村井 基彦 横浜国立大学 大学院 環境情報研究院 人工環境と情報部門  
調和システム学分野 准教授  
山野 澄雄 株式会社フグロジャパン 代表取締役社長

【オブザーバー】

吉田 正彦 国土交通省 総合政策局技術政策課長  
河合 崇 国土交通省 海事局海洋・環境政策課 海洋開発戦略室 課長補佐  
小谷野 喜二 国土交通省 港湾局海洋・環境課長  
岩淵 洋 海上保安庁 海洋情報部海洋調査課長

## 研究開発の成果

### 1 序論

平成25年度は、3年計画の初年度として、海洋鉱物資源開発に係る現状と課題の整理、交通運輸分野における技術開発課題の明確化、海洋鉱物資源開発に係る交通運輸技術の全体システムの提案、そのフィージビリティの概略的検討として、経済性評価の手順と手法及びその前提条件について検討を行った。また、個別要素技術について基礎的な研究・検討を行い、海洋鉱物資源の掘削・採集機構等の提案、揚収システムとしてのライザーの挙動解析手順の整理及び解析ツールの整備、残渣の脱水・固化、建設資材へのリサイクル技術を検討するためのレアアース堆積物の土質試験等を実施した。平成26年度は、全体システムの提案とそのフィージビリティの検討については、海洋鉱物資源開発ロジスティクス拠点と輸送のあり方について検討を行い、海洋鉱物資源開発における前提条件の設定、チャート式揚集・輸送モデルとそれに基づく揚集・輸送コスト最小化モデルの提案を行い、海洋鉱物資源開発におけるロジスティクスのあり方を検討するためのツールの整備を行った。併せて、海底熱水鉱床とコバルトリッチクラスト開発に対応したPSV（生産支援母船）の概念設計を行った。また、個別要素技術については、海洋鉱物資源の掘削・採集に活用可能な深海施工技術の適用可能性の検討、海洋鉱物資源揚収システムの要素技術等の開発、海洋鉱物資源残渣の処分に関する要素技術の適用可能性の検討に関し、模型実験や水槽実験等を行い、データの収集・解析を実施した。平成27年度は、本研究の最終年度として、各要素技術の適用可能性について一定の結論を得るとともに、交通運輸技術を活用した海洋鉱物資源開発の全体システムの提案とその評価及び今後の課題についてとりまとめを行う。

## 2 海洋鉱物資源開発の全体システムの提案とフィージビリティの検討

### 2.1 海洋鉱物資源開発のロジスティクスの検討

海洋鉱物資源開発におけるロジスティクスのあり方を具体的に検討するため、平成26年度の研究において、海洋鉱物資源の揚収と輸送に係るチャートを作成し、ロジスティクスのモデル化を行う、「チャート式揚収・輸送モデル」及びチャート式揚収・輸送モデルを用いて設定した輸送パターンとPSV概念設計の結果を基に、コスト関数の最小化を図る「揚収・輸送コスト最小化モデル」を提案した。

海洋鉱物資源開発におけるロジスティクスは、海洋鉱物資源の日揚収量、採鉱場所と輸送先である貯鉱場との距離、生産支援船（Production Support Vessel：PSV）のホールスペース、輸送船の船型等の諸条件により、様々な輸送パターンが設定される。チャート式揚収・輸送モデルは、PSVにおける海洋鉱物資源の積載量と輸送船への荷役、輸送船の運航スケジュールを1枚の表に時系列に表記することにより、PSVのホールスペースと輸送船の船型との関係を明らかにし、最適なロジスティクスのあり方を検討す

るものである。また、揚収・輸送コスト最小化モデルは、海洋鉱物資源の揚収及び輸送に要する費用を算出することが可能となり、PSV と輸送船の船型の組み合わせによる、最適な輸送形態の検討を行うことが出来る。また、全体プロジェクトの経済性評価の指標の一つである、正味現在価値 (NPV) から総ロジスティクス費用の現在価値を除ることにより、海洋鉱物資源開発におけるロジスティクス以外の作業過程にかけることが可能な費用の目安を把握することが可能となる。

今年度は、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種の海洋鉱物資源に関し、それぞれの海洋鉱物資源開発における生産プロセスとロジスティクスの設定を行い、チャート式揚収・輸送モデルを用いて輸送パターンの検討を行うとともに、揚収・輸送コスト最小化モデルによって表 2-1に示すパターンについて、ロジスティクスに要する費用の算出を行った。

表 2-1 海洋鉱物資源開発に係るロジスティクス費用の概算結果

鉱物資源の種類	海底熱水鉱床			コバルトリッチクラスト			マンガン団塊	レアアース泥	
	5,000t/day			1,000t/day			3,000t/day	10,000t/day	3,333t/day
日揚鉱量	5,000t/day			1,000t/day			3,000t/day	10,000t/day	3,333t/day
輸送パターン	I	II	I-2	I	II	III	-	I	II
PSV船型	SHIP-A	SHIP-A	SHIP-A	SHIP-A	SHIP-B	SHIP-B'	SHIP-C	SHIP-D	SHIP-D
PSVホールド容積	13,500m <sup>3</sup>	13,500m <sup>3</sup>	13,500m <sup>3</sup>	13,500m <sup>3</sup>	7,000m <sup>3</sup>	3,500m <sup>3</sup>	43,000m <sup>3</sup>	22,000m <sup>3</sup>	22,000m <sup>3</sup>
PSV建造費用(百万円)	14,000	14,000	14,000	14,000	12,000	10,000	17,000	14,500	14,500
PSV運用費用(百万円/年)	1,000	1,000	1,000	1,000	900	800	1,100	1,000	1,000
輸送船積載量	20000t	10000t	20,000t	20,000t	10000t	5,000t	30,000t	10,000t	10,000t
輸送船隻数	1隻	2隻	1隻	1隻	2隻	1隻	3隻	4隻	2隻
輸送船チャーター費用(百万円/年)	900	1,440	900	900	1,440	600	3,000	2,880	1,440
総累積費用(百万円)	52,000	62,800	52,000	52,000	58,800	38,000	99,000	92,100	63,300
総累積費用現在価値(百万円)	39,822	47,160	39,822	39,822	43,801	29,000	72,720	67,230	47,660

注)コバルトリッチクラストの輸送パターンⅢは、南鳥島へ輸送するパターンであり、経済性評価の試算に当たっては、南鳥島から日本本土への輸送コストを別途計上する。

各海洋鉱物資源の輸送パターン設定の考え方及びチャート式揚収・輸送モデル及び揚収・輸送コスト最小化モデルから得られる知見は以下のとおりである。

#### (1) 海底熱水鉱床

海底熱水鉱床の輸送パターンとしては、輸送船積載量が2万トンのケース (I) 及び1万トンを2隻用いるケース (II) に加え、ケース I のバリエーションとして、輸送船への鉱石の積込みを行っている間は、揚収を行わないケース I-2を設定した。I に対してIIのケースは、総累積費用が100億円も割高となり、大型船を用いて隻数を少なくする方が有利となる。これは、海上輸送の常識およびヒアリング結果とも合致する。ケース I-2については、ロジスティクス費用に影響は出ないが、結果的に年間揚鉱量が減少するため、経済性評価において収益が下がることとなる。(第6章に記述)

#### (2) コバルトリッチクラスト

コバルトリッチクラストの輸送パターンについては、小名浜に輸送するケースとして、輸送船積載量が2万トンのケース (I) 及び1万トンを2隻用いるケース (II) を設定し、また、南鳥島に輸送するケース (III) を設定した。南鳥島に輸送するケースについては、南鳥島で脱水を行った後に本土に輸送する必要があるが、その輸送費は経済性評価において加算することとしたため、本項においては I 及びIIのケースと比

較して総累積費用が低くなっている。大型船を用いる方が有利なことは海底熱水鉱床と同様である。本検討においては、極めて単純化した輸送パターンの設定を行っているため、海底熱水鉱床ⅠとコバルトリッチクラストⅠの総累積費用が同額となっているが、海底熱水鉱床の日揚鉱量はコバルトリッチクラストの5倍であるため、コバルトリッチクラストの輸送コストは海底熱水鉱床の5倍かかることとなり、本土からはるかに離れた海域での海洋鉱物資源の開発には膨大な輸送コストがかかることが示されている。

### (3) マンガン団塊

マンガン団塊は、その賦存位置からカナダへ輸送する設定とした。海底熱水鉱床及びコバルトリッチクラストと比べて、輸送距離が長大となり、PSVの規模及び輸送船の船型が非常に大きくなるため、上記の2種の事例と比較して、輸送コストが約2倍になっている。

### (4) レアアース泥

レアアース泥は、南鳥島で脱水を行う設定としており、南鳥島までの輸送のみ考慮している。有用鉱物の濃度（粗鉱の品位）が低いため、1日当たりの揚鉱量を10,000tとしており、ケースⅠにおいては、輸送船の積載量を10,000tとしても毎日輸送船への積み替えを行う必要が生じ、現実的な設定とならない。本ケースにおいては、PSV及び輸送船の船型が非常に大きくなり、マンガン団塊と同様に、揚収・輸送コストが極めて大きくなる。また、最近、南鳥島周辺で超高濃度のレアアース泥が発見されており、また、海中にて分級を行うことにより、より高濃度のレアアース泥のみを揚収する方法が検討されているため、3倍の濃度のレアアース泥を揚収できる場合を考慮し、1日当たりの揚鉱量をⅠの1/3としたケースをⅡとして設定した。この場合、総累積費用を大きく減ずることが可能となり、レアアース泥開発においては、極めて重要な課題と考えられる。

## 3 海洋鉱物資源の掘削・採集に活用可能な深海施工技術の適用可能性の検討

海洋国家である日本において水中土木施工の技術開発の歴史は古く、水中ブルドーザや水中バックホウ等世界的に類を見ない施工機械が開発されており、河川や港湾における施工で実際に活用されている。また噴火や地震など自然災害に対し、その迅速な復旧を目的とした実施工を伴った技術開発は、無人化施工技術の急速な発展につながった。また、平成25年の海洋基本計画<sup>1)</sup>の見直しでは、メタンハイドレード・熱水鉱床において民間主導の商業化を目指すと明言されるなど、海底資源開発についても注力されつつある。

しかし商業化のためには採掘コストが重要視され、海底における大規模な採掘技術<sup>2)</sup>が必要である。今までは採掘機の開発が注視されてきた感があるが、実際には大規模かつ広範囲における完全無人化施工が必要とされ、また深海という特殊な条件から、センシング技術や移動体経路についても制限が多い。



そのため海底資源採掘に係る現実的な施工法について検討する必要があり、過年度の報告書において、陸上無人化施工技術および水中建設機械技術の知見から、海底資源採掘の施工手順を想定し、必要となる掘削移動体について提案した。

本年度は、提案した機構について製作に必要なコスト、及び、運用時のコストについてとりまとめを行い、その機構サイズから想定される施工効率（日採鉱能力）についても検討を行った。採鉱機単機での採鉱能力は低く、作業の高効率化や複数台での運用を検討する必要がある。

また、これら三種類の機構については、鉱物資源の存在する地形情報に既存の水中施工機械や遠隔操作技術を適応する方針で考案したものであり、実際の運用には技術的課題も存在する。

例えば採鉱ヘッド等は対象となる鉱物の物性に合わせた設計開発が必要であり、また不陸が大きな地形や急傾斜地などでは安定した設置のための機構が必要である。

さらに水中遠隔操作における作業効率の向上のためには、地形や作業状況を認識する外界計測が重要となる。作業中に発生する濁りにより光学映像の利用が制限されるため、超音波を用いた形状計測の技術開発が重要である。

#### 4 海洋鉱物資源揚収システムの要素技術等の開発

浮体システムの構成要素の一つである揚収システムは、スラリー方式やバケット方式が考えられるが、生産性等の観点からスラリー方式が有望であると考えられている。海底熱水鉱床、マンガン団塊、レアアース泥など、賦存する水深が異なっても、スラリー方式の場合、揚収システムは共通しており、揚鉱管（ライザー）、リフティングシステム、その他付帯設備で構成されている。このうち、本業務では、船舶関連技術の一つである揚鉱管（ライザー）技術に着目した。揚鉱管と類似の構造物である石油・天然ガス開発用（掘削・生産）ライザーでは、水深3,000m程度まで実績があり、この程度の水深までなら、既存の石油・天然ガス用ライザー技術の活用により対応可能と考えられるが、水深5,000mクラスの超大水深域は未知の領域であり、浮体動揺に伴うパイプの軸方向振動やVIV等を合理的に評価する必要がある。そこで、実用的なライザーの安全性評価技術を確立するために、既存の基準をベースにした挙動解析手順の整理及び解析ツールの整備を行って、水槽試験結果と比較・検証するとともに、概念設計されたライザーを対象にした強度・疲労評価を実施することとし、最終年度は、ライザーパイプ縮尺部分模型を用いた水槽試験を実施して、挙動解析結果と比較・検証するとともに、超大水深に適用可能なライザーシステムの概念検討を行って、当該ライザーの強度・疲労評価を実施した。

水槽試験では、浮体動揺及び流れの影響を考慮した計測を行って、供試模型の挙動を評価した。さらに、水槽試験に対応した挙動解析を行って試験結果と比較し、挙動解析結果は試験結果と良い一致を示すことが確認でき、本挙動解析ツールが超大水深ライザーの挙動解析に有効であることが示唆された。

また、超大水深ライザーに適用可能なライザーシステムとして、CFRP（Carbon Fiber

Reinforced Plastics) と鋼管のコンポジットライザーを提案し、強度・疲労評価を行った。強度・疲労評価の結果、接合部の強度、管内の摩耗特性等に課題が残るものの、全体システムとして成立する可能性があることが示唆された。

## 5 海洋鉱物資源残渣の処分に関する要素技術の適用可能性の検討

遠隔離島を基地として、揚収した鉱物を選鉱・精錬した際に発生する残渣を埋立て処分することを想定し、処分場建設や埋立てによる土地造成の実現性について検討した。海底地盤が急傾斜であり、かつ波浪条件が厳しい遠隔離島では、護岸建設に時間がかかる。具体的な条件を設定して試設計を行った結果に基づき、以下の点に留意すべきことが示唆された。

資材調達や波浪条件の厳しさから、護岸構造として実現可能と考えられるのは、陸上施工を前提とした鋼枠コンクリート構造くらいであり、実際、遠隔離島における護岸建設においてこの形式が採用されている例がある。陸上からのクレーンによる鋼枠の設置や、陸上からのコンクリート打設を前提としており、気象・海象条件の制約を受けにくい。1日の作業で1函の鋼枠設置とコンクリート打設を完了させることができる一方で、資材の搬入や鋼枠の組み立て作業などの準備を加えると、10日で1函設置する程度の作業効率となってしまう。水深20mのところに護岸を構築するには、幅10m、奥行き25m、高さ3mの鋼枠を使うと仮定し、法線直角方向に2函並べ、鉛直方向に7函程度積み重ねると、護岸を10m延伸するのに約140日もかかる計算になる。海上施工となるケーソン工法などは1函あたりの長さがあるために作業効率は高いが、設置には静穏な日を連続して確保する必要があり、気象・海象条件の制約から事実上実現不可能である。海底勾配や水深などの制約から、受入れ土量容量約150万 $\text{m}^3$ の処分場を建設する場合、護岸建設に約36年、遮水工の整備に約7年の計43年もかかる一方で、残渣による埋立てを始めると、わずか14年ほどで処分場は満杯になってしまう。工事期間と使用期間のバランスがきわめて悪く、遠隔離島における建設工事の難しさを物語っている。遮水工は、残渣をセメント固化するなどして構築することが想定される。埋め立て処分する残渣についても、将来の土地利用を考慮した上で、所定の強度が発現されるようにセメント固化処理などを施す必要がある。様々な仮定に基づいた試算結果ではあるが、処分場建設の直接経費は約400億円、間接経費は約910億円となり、間接工事費の割合が非常に高くなる。この点についても、遠隔離島における建設工事の難しさが表れている。

## 6 各要素技術の検討結果を踏まえた、全体システムの評価及び今後の課題の整理

### 6.1 経済性評価の試算結果

平成25年度報告書において記載した経済性評価手法により、回収期間、内部収益率、正味現在価値の3つの指標を用いて設定した海洋鉱物資源開発のケースについて、経済性評価の試算及び感度分析を行った。試算及び感度分析のケースを表 6-1に示す。

表 6-1 経済性評価の試算及び感度分析実施ケース

海洋資源の種類	検討パターン	
海底熱水鉱床	I-①	標準ケース(輸送パターン I)
	II-①	標準ケース(輸送パターン II)
	I-2-①	輸送船積込み時揚収せず(輸送パターン I-2)
	I-①-a	感度分析(資源価格:H25)
	I-①-b	感度分析(資源価格:H25、支払利息・割引率8%)
コバルトリッチクラスト	I-①	標準ケース(輸送パターン I)
	I-②	掘削・集鉱機械の機材操業費(作業母船減)(輸送パターン I)
	II-②	掘削・集鉱機械の機材操業費(作業母船減)(輸送パターン II)
	III-②	掘削・集鉱機械の機材操業費(作業母船減)(輸送パターン III)
	I-①-a	感度分析(資源価格:H25)
	I-①-b	感度分析(資源価格:H19)
	I-②-c	感度分析(リン鉱石20%)
マンガン団塊	②	掘削・集鉱機械・文献データ(機材操業費を初期費用の1/2)
レアアース泥	I-②	掘削・集鉱機械の機材操業費(作業母船減)(輸送パターン I)
	I-②-a	感度分析(資源価格1/2)
	II-②-b	感度分析(揚鉱量1/3、分級濃度2倍(7,000ppm)、価格1/4)

### 6.2 経済性評価の試算及び感度分析の結果から得られた知見

今回の試算においては、海底熱水鉱床以外の海洋鉱物資源では、掘削・集鉱機械1台に対して1隻の母船を配置する標準ケースでは機材操業費が割高となり採算性が確保されなかったため、1隻の作業母船で複数の掘削・集鉱機械を配置するケースにて検討を行った。掘削・集鉱機械の機材操業費を初期費用の一定の範囲に抑えることが採算性を向上させるために重要であると考えられる。

操業費用(OPEX)における輸送・ロジスティクスの費用の割合は、今回の試算では、資材・人員の補給等を明示的に考慮していないにもかかわらず、輸送距離の短い海底熱水鉱床では3%程度であるが、コバルトリッチクラスト、マンガン団塊では、13~17%程度に上り、本土から遠く離れたサイトでの海洋鉱物資源採集においては、輸送・ロジスティクスの効率化が重要な課題となるものと考えられる。

また、感度分析においては、海洋鉱物資源の品位・価格は経済性評価に極めて大きな影響を与えることが明らかとなり、品位の高い鉱物資源の確保、採集が重要な鍵となると考

えられる。特にレアアース泥については、品位の高い高濃度のレアアース泥の採取、分級等による濃度向上と採泥量の削減を行うための技術開発が、採算性を向上させるとともに処分を行う残渣を減ずる意味でも極めて重要であると考えられる。

今回の試算においては、スラリー状にして揚収した鉱物資源の脱水、脱水後の排水が可能であると想定した。脱水後の排水の処理の問題については各資源共通の課題であり、技術面と併せ、法的課題の解決が必要と考えられる。特にレアアース泥は、粒子が細かく含水比が高いものと考えられるため、脱水を行う方法について十分な検討が必要と考えられる。

コバルトリッチクラストについては、基盤岩に含まれている可能性のあるリン鉱石を合わせて採取することが可能となれば、経済性が一定程度改善できるものと考えられる。

## 7 結論

平成 27 年度においては、平成 26 年度に引き続き、海洋鉱物資源開発に係る全体システムの提案及び経済性評価手法とその前提条件に関する検討の一環として、チャート式揚収・輸送モデル及び揚収・輸送コスト最小化モデルを用いてロジスティクスのあり方について検討を行った。また、個別要素技術として、海洋鉱物資源の掘削・採集に活用可能な深海施工技術、海洋鉱物資源揚収システムの要素技術等について引き続き実験・試験等を実施し、更なる検討を行った。海洋鉱物資源残渣の脱水・固化、建設資材へのリサイクル技術については、試設計により、大水深・急傾斜地盤における廃棄物最終処分場の建設技術の検討を行った。これらを踏まえ、全体システムにおける経済性評価の試算及び感度分析を行い、今後の課題の整理を行った。平成 27 年度は本研究の最終年度であり、本研究全体の研究成果を要約すると以下のとおりである。

- (1) 海洋鉱物資源開発の全体システムについては、従来、脱水、輸送・ロジスティクス、残渣の処分などの過程について、これまであまり重視されておらず、それらを含めた全体システムとして十分な検討がなされてこなかった。また、海洋鉱物資源揚集の際の脱水及び排水の取り扱いが極めて重要な問題であり、技術的、法的課題の解決が必要と考えられる。さらに、海洋鉱物資源開発においては、環境面で大きな課題が存在している。環境のモニタリングや環境への影響を最小限にするための技術開発等が必要である。
- (2) 輸送・ロジスティクスの側面から海洋鉱物資源開発をとらえ、その効率化を図ることは極めて重要な課題である。本研究では、PSV のホールスペースと輸送船の船型との関係を明らかにする「チャート式揚収・輸送モデル」を提案し、4種の海洋鉱物資源に関し生産プロセスの設定とロジスティクスの検討を行い、海洋鉱物資源開発の諸条件によって、輸送パターンが大きく異なることを示した。また、設定した輸送パターンを基に、「揚収・輸送コスト最小化モデル」を用いて、最適な輸送形態の検討を行う手法を提案し、その試算を行った。海洋鉱物資源開発の事業化に当た

っては、実際に即した輸送計画を立案し、その効率化を図る必要がある。特に本土からはるかに離れた海域での海洋鉱物資源開発にはその輸送・ロジスティクスに大きなコスト負担が必要となり、その重要性はより大きいものと考えられる。

- (3) 提案した採鉱機について、その製作コスト、運用コスト、既存水中施工機械の知見を基とした採鉱能力について検討した。

さらに実用のために必要となる課題点についてとりまとめを行った。

その結果として、採鉱機単体での施工効率（採鉱能力）は、目標となる日採掘量に達しておらず、複数台の運用が必要である。

また、水中遠隔操作のためには外界計測センサが重要であるが、既存の超音波イメージセンサでは分解能が低いため、機体に搭載した音響カメラにより取得する作業対象形状と、作業アームの関節角度等の情報、目標形状などの補助情報を重畳表示するなどの呈示に関する検討が必要となる。

- (4) 海洋鉱物資源揚収システムとして、揚鉱管（ライザー）技術に着目し、海洋鉱物資源が賦存する水深5,000mクラスの超大水深域に対応可能な実用的なライザーの安全性評価技術を確立するために、既存の基準をベースにして挙動解析手順を整理するとともに、水槽試験結果との比較・検証を通じて、解析ツールの整備を行った。さらに、超大水深に適用可能なライザーシステムの概念検討を行うとともに、本業務で整備した解析ツールを用いて当該ライザーの強度・疲労評価を実施した。

- (5) レアアース資源泥や(模擬試料として)海底粘土試料およびカオリン粘土を用いて、セメント固化処理の実現性について検討した。精錬後の残渣処理を想定し、セメント固化処理における pH の影響についても調べた。セメント固化処理土は、pH が大きくなると強度が大きくなる傾向にあったが、母材がカオリン粘土の場合には pH の変化に対する強度変化は非常に小さかった。固化処理技術（遮水性を高めるために必要に応じてベントナイトを混練）を用いれば、管理型廃棄物処分場の遮水層を構築できることを示した。一方で、遠隔離島における処分場の試設計を行った結果、建設工事は技術的に可能であるが、非常に長い工期と高い建設費が課題になることが明らかになった。

- (6) 3つの経済性評価指標を用いて、設定したケースについて、経済性評価の試算及び感度分析を行った。掘削・集鉱機械の機材操業費の削減、品位の高い鉱物資源の採取が重要であること等を明らかにし、遠洋での海洋鉱物資源採集においては、輸送・ロジスティクス費用の占める割合が高く、その効率化が課題であることを示した。感度分析においては、海洋鉱物資源の品位・価格が大きな影響を与えることが明らかとなった。さらに、脱水・排水や環境面での課題の解決の重要性を指摘した。

## 8 知的財産権取得状況

なし。

## 9 研究成果発表実績

- 1) 論文発表 なし。
- 2) 口頭発表 なし。
- 3) その他（研究内容報告書、機関誌発表、プレス発表等） なし。

## 10 参考文献

- 1) SRK Consulting : Offshore Production System Definition and Cost Study、SL01-NSG-XSR-RPT-7105-001、2010
- 2) <http://www.mugendai-web.jp/archives/287>
- 3) <http://www.kantei.go.jp/jp/singi/kaiyou/kihonkeikaku/130426kihonkeikaku.pdf>
- 4) 経済産業省資源エネルギー庁, ” 海底熱水鉱床開発計画第1期最終評価報告書”  
<http://www.meti.go.jp/press/2013/07/20130705003/20130705003-2.pdf>
- 5) T. Yamazaki : Development of Technical and Economical Examination Method for Cobalt-Rich Manganese Crusts, 2002
- 6) 加藤泰浩 : 太平洋のレアアース堆積物が日本を救う、PHP 新書 812、2012. 8. 1
- 7) 沖野, 藤岡、「紀南海底崖の地形と地質」、JAMSTEC 深海研究第 10 号
- 8) Natsushima cruise report (NT13-13, 24th June, 2013, #5 Takuyo Seamount)
- 9) 山崎, 鶴崎, 半田, 富島、「コバルト・リッチ・マンガン鉱床のグラビティコアリング」,
- 10) SRK Consulting : Offshore Production System Definition and Cost Study, SL01-NSG-XSR-RPT-7105-001, 2010
- 11) <http://www.mugendai-web.jp/archives/287>