

海底資源 揚収システム 改訂版

マッコウクジラに学ぶ技術障壁突破

技術士
Lakshmi 代表 小平高敏



海底資源揚収システム

改訂版

マッコウクジラに学ぶ技術障壁突破

小平高敏

Kodaira Takatoshi

Lakshmi

目次

はじめに

第1章 海底挑戦への発想転換

太平洋の日本近海海底は鉱物資源（貴金属・レアアース）の宝庫である。採算性が最も良く水深が浅い海底熱水鉱床でも実用化の用途は立っていない。海底資源は揚収が難しい。

現在の技術的障壁は新参の挑戦者には絶好のチャンスである。

海底資源の揚収技術にブレークスルーがある

高度な機械技術を用いないため、6〜7年以内に商業化が可能

公的資金投入を前提としない投資家が魅力を感じるビジネスモデル

第2章 海底挑戦への発想転換

1 挑戦の歴史

潜水艦・潜水艇

海底資源の揚収

揚収資源は流体（液体・気体）ではない。

揚収資源は固体で自噴しない。

海中・海底設置機構が必要。

2 困難さの原因

圧力差

深海は暗黒の世界で視界が悪い。

海中は電波が通らない。

水には抵抗があり移動が容易でない。

海中はエネルギーの獲得に苦勞する。

浮力があり上手に利用すると重力の束縛から解放される。

海中は意外と距離が近い。

3 新たな挑戦へ

ゼロベースで原理原則から考える。
生き物の真似をする。

内外圧を均衡させる。

浮力を利用する。

自律的に移動する。(自律航法)

思考実験

第3章 深海クレーンの全体像

1 深海クレーン

2 鉱物収集装置

3 海上司令船

4 運搬船

第4章 シェールガス・シェールオイルの教訓

1 シェールオイル・シェールガスの事業的特徴

2 海底鉱物資源事業化への指針

低コスト化

採鉱範囲の拡大

3 政府資金による開発状況

第5章 深海クレーンの構成

1 深海クレーン

構造および規模の評価

鉱石揚収運用

鉱物収集装置設置および回収運用

2 鉱物収集装置

3 海上司令船

4 運搬船

5 標識

第6章 実現するための技術

炭素繊維樹脂構造物

制御理論

水中光ファイバ通信

音響誘導

深海用機器

第7章 開発手順

設計および評価シミュレータ開発

貨物室仕切機構

加圧試験

資源回収装置訓練装置

浅水槽試験

位置標識

収支シミュレーション

はじめに

日本近海の太平洋海底表面には金・銀・白金を含んだ膨大な鉱物資源が眠っている。しかしこの資源を海底から揚収するのはサンプル程度の量が限度であって、経済的に意味のある量のコスト的に成り立つ形で揚収する手段は未だ実現されていない。この原因は従来の海底油田開発・浚渫技術の延長で技術開発を行っているためで今後も実現は容易ではないと筆者は考え、海面と深海を自由に往復するマッコウクジラの仕組みを利用し、現在利用可能な最先端技術を組み合わせ、資源揚収を商業的に実現する新技術を開発した（特願 2015-45368、特願 2015-197245、特願 2015-222542、国際出願 PCT/JP2016/083616、2017年4月公開）。本書の初版では、この特許の背景と概要を解説した。この技術は海底で発生する水素ガスの浮力で海底鉱物資源を揚収する。水素ガスの浮力は深海底においても大きいため揚収力が大きいという利点があるが、水素カスを利用することに起因して次の短所があった。

- ① 海底で水素ガスを発生する装置が必要である。
- ② 水素ガスを発生する電力を洋上で発生する必要がある。
- ③ 浮上中に余剰となった水素ガスをトルエンに吸収させて回収し水素ガス発生に要した電力を回収する必要がある。

そのため開発課題が広範になり実現に多額の開発費と初期投資を要し参入障壁が高くなった。日本総研による「みらい2018」コンテストで世に問うてみたところ、最終審査会まで進んだものの最優秀賞を取る事ができなかった。国家プロジェクトレベルの開発課題で大規模すぎるということが大方の評価であったが、水素ガス利用に対して障壁の高さを指摘する向きもあった。これらに対して再検討を加え、水素ガスに比べて浮力は劣るが比重が水より軽い液体とバラストと共に海底に降下させ海底で採集した省略に成功した。さらに浮力源である水より軽い液体とバラストと共に海底に降下させ海底で採集した鉱石と交換する簡単で効率的な機構を開発した。(特願2018-073519、2018-092628、2018-092631、2018-143015) ビジネス開発の手法としても、すでに商品市場で取引されている石油・天然ガスに対して新しい採掘方法で挑戦して成功を収めている米国におけるシェールガス・シェールオイルの考え方を参考に徹底的なコストダウンと参入障壁の除去を行った。シェールガス・シェールオイルで注目すべき点は政府主導の開発に依らないで草の根的な中小資本により商業化され、世界のパワーバランスを左右するまでに成長したことがある。その核心は「徹底した低コストでうまいものをつまみ食いから初めて蚕食の範囲を周囲に広げる」ということで、本書で提案する事業の基本精神とした。この基本精神はゴールドラッシュの金鉱掘りと変わらない。第三章でシステムの概要を解説し、第四章でシェールオイル・

シェールガス開発から事業姿勢として学ぶべき点をまとめ、第五章ではそれらを応用した採掘法の全容を示した。

第一章は海底資源の揚収が商業的に不可能である現状をのべているので、この点についてすでに理解のある読者は読み飛ばしてよい。

第二章は海底資源の揚収が商業的に不可能である現状で、従来技術の延長にとらわれずに発想を転換して革新技術で挑戦する意義を述べている。先を急ぐ読者は読み飛ばしてもよい。

第四章は本書のシステムを実現するために有益な技術を紹介している。

第1章 日本近海の海底資源

太平洋の日本近海海底は鉱物資源(貴金属・レアアース)の宝庫である。

海底鉱物資源は分布する場所、形成の仕方・形状・含まれる金属元素の違いから、マンガン団塊、海底熱水鉱床及びコバルトリッチクラストの3種類に分類でき、最近では、第4の資源としてレアアースを含む堆積物(レアアース泥)にも注目が集まっている。(図1.1(a) 海底鉱物資源の分布 図1.1(b) 海底鉱物資源の種類)

2016年8月29日付の日経テクノロジーの記事によると海洋研究開発機構(JAMSTEC)と東京大学、千葉工業大学などの研究グループは2016年8月26日、南鳥島周辺の排他的経済水域(南鳥島EEZ)の南部から東部にかけて、

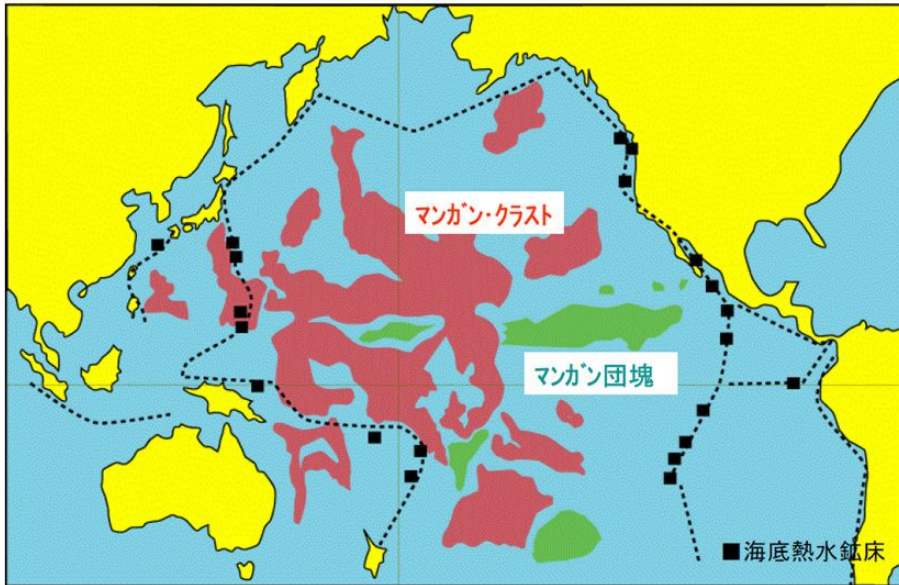


図1.1(a) 海底鉱物資源の分布

©JOGMEC

水深5500～5800mの深海底に広大なマンガンノジュール（マンガン団塊）の密集域を発見したと発表した。日本のEEZでは、これまで海山の緩斜面のコバルトリッチクラストに伴って存在する小規模なマンガンノジュールの分布は知られていたが、深海底に広大なマンガンノジュールの分布が見つかったのは初めてという。2016年8月29日付の日経テクノロジーの記事によると

海洋研究開発機構（JAMSTEC）と東京大学、千葉工業大学などの研究グループは2016年8月26日、南鳥島周辺の排他的経済水域（南鳥島EEZ）の南部から東部にかけて、水深5500～5800mの深海底に広大なマンガンノジュール（マンガン団塊）の密集域を発見したと発表した。日本のEEZでは、これまで海山の緩斜面のコバルトリッチクラストに伴って存在する小規模なマンガンノジュールの分布は知られていたが、深海底に広大なマンガンノジュールの分布が見つかったのは初めてという。

さらに2017年6月5日付の読売新聞の記事によると

海洋研究開発機構などは5日、房総半島から東南東350キロメートルの沖合に、希少金属を豊富に含む海底堆積層「コバルトリッチクラスト」が広がっているのを確認したと発表した。日本の排他的経済水域（EEZ）内にある。面積は約950平方キロメートルである。

このように近年、日本の資源に関する明るい話題が多いが、いくら資源があっても採算の取れる状態では海底から揚収できなければ絵に描いた餅である。実は現在はそういう状態なのである。

採算性が最も良く水深が浅い海底熱水鉱床でも実用化の用途はない。

海底熱水鉱床、コバルトリッチクラスト、およびマンガン団塊はいずれも海底表面に存在し、レアアース泥の場合でも海底表面より10mより浅い場所に存在する。海底資源の種類によって元素の含有率が異なるが、若干古い市場価格であるが試算すると表1・2 海底鉱物資源の経済的価値で示す通りとなる。1トン当たりの元素含有率より見た鉱石価値は沖縄

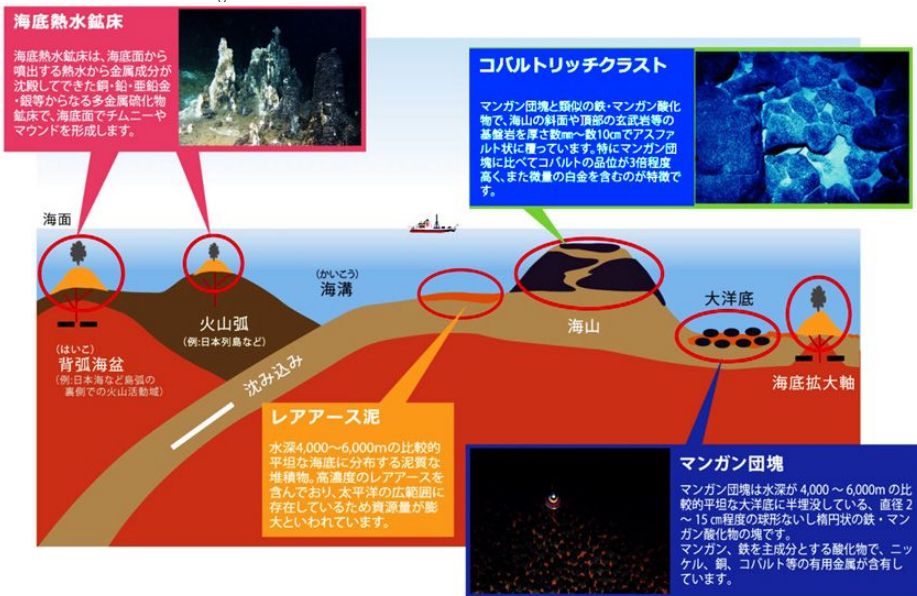




図 1.2 海底鉱物資源の種類 ©JOGMEC

表 1.2 海底鉱物資源の経済的価値

元素名	海底熱水鉱床		コバルトリッチクラスト		マンガン団塊		¥/g
	%	M#/1000t	%	M#/1000t	%	M#/1000t	
1 マンガン Mn		0	25	47.5	28.00	53.2	0.19
2 コバルト Co		0	0.9	59.4	0.30	19.8	6.6
3 ニッケル Ni		0	0.5	16	1.30	41.6	3.2
4 ガリウム Ga	0.019	26.6		0		0	140
5 セレン Se	0.0023	0.2024		0		0	8.8
6 テルル Te	0.0008	0.12		0		0	15
7 白金 Pt		0	0.00007	3.85		0	5500
8 金 Au	0.0012	30		0		0	2500
9 銀 Ag	0.14	70		0		0	50
10 銅 Cu	2.6	22.1		0	1.00	8.5	0.85
11 鉛 Pb	13.5	27		0		0	0.2
12 亜鉛 Zn	34.8	87		0		0	0.25
1000t価格(M#)		263		127		123	

元素単価 H21 経産省資料 2007 ものづくり白書

海域の海底熱水鉱床で2万7千円、青ヶ島近海で80万円と最も高く、コバルトリッチクラストとマンガン団塊が1万2千円と評価できる。

採算性が最も良く水深が浅い海底熱水鉱床でも実用化の目途はない。

海底熱水鉱床、コバルトリッチクラスト、およびマンガン団塊はいずれも海底表面に存在し、レアアース泥の場合でも海底表面より10mより浅い場所に存在する。海底資源の種類によって元素の含有率が異なるが、若干古い市場価格であるが試算すると表1.2 海底鉱物資源の経済的価値で示す通りとなる。1トン当たりの元素含有率より見た鉱石価値は沖縄海域の海底熱水鉱床で2万7千円、青ヶ島近海で80万円と最も高く、コバルトリッチクラストとマンガン団塊が1万2千円と評価できる。

海底熱水鉱床は他の海底資源に比べ深度が比較的低いこともあってJOGMECにより採掘の試行が行われている。2017年8月から9月にかけて沖縄海域の海底1600メートルにある海底熱水鉱床から鉱石を実証試験として鉱石を3cm程度に破碎して、幅10cm程度の管を通じて海水とともに断続的に16回合計16.4トン回収した。JOGMECは自ら、商業化に見合う生産コストの引き下げと長期

運転に向けた安定・信頼性向上が課題で、商業化を目指したプロジェクトの開始は平成30年後半以降としている。

海底資源は揚収が難しい。

海底資源が活用されない理由は経済的に成り立つ採掘方法と揚収方法がないことに尽きる。

技術開発が進み、熱水鉱床、コバルト・リッチ・クラスト、マンガン団塊より採鉱の可能性があるというレアアースについては2018年度の内閣府戦略的イノベーション創造プログラムの対象課題12件の一つに取り上げられ、資源調査技術の開発とレアアースの採泥・揚泥に関する基礎研究を行うこととしており、平成35年以降実海域試験を行うととしていて商業化は視野に入っていない。

要約すると、

- ① 日本南方の太平洋海底には、日本を資源大国にするような膨大な鉱物資源が眠っているが、海底からの揚収が困難である。とくに深度1600mでの海底熱水鉱床に対する実験機による試掘以外はできていない。これとても商業化に不可欠な耐久性、保守性、稼働率およびコストについては今後の課題である。

- ② レアアース泥は揚収に最も見込みがあるとの意見もあるが、開発には政府の継続的予算投入が不可欠である。経済的に成り立つのは最も好条件の場合でも、今から20年後以降ともいわれている。

この状況を観ると、現状の海底資源開発は公的資金頼みで技術開発がようやく継続可能という状態で、商業化できる段階にはない。筆者の見解では、現在の技術の延長上では直面している技術的困難さからみて、商業化に必須な耐久性、保守性、稼働率およびエネルギー効率を達成する可能性は少ないとみている。

現在の技術的障壁は新参の挑戦者には絶好のチャンスである。

本書で扱う海底資源開発の技術は一般にビッグサイエンスないしビッグテクノロジーといわれる分野で、通常、国家プロジェクトないし大企業が扱う分野である。いくら革新的な新技術であってもこれらの既存組織に受け入れてもらえない限り世に出ることが難しいのが実状である。しかし筆者は1996年から2006年の10年間、冷戦中は軍事ビッグテクノロジーであったスパイ衛星の商業化を目指した米国のベンチャー企業(現 DigitalGlobe 社)に立上げからニューヨーク株式市場上場まで取締役として参

画するという稀有の経験を得て、身をもって多くのノウハウを会得することができた。

『条件が揃えばベンチャー企業でもビッグテクノロジーと『思われている』ビジネスに挑戦して成功できる』というがその結論である。

以下、揃えるべき条件を明らかにしていく。

条件① ビッグテクノロジーと『思われている』ビジネスが対象で、ビッグテクノロジーを対象にベンチャー企業が単独で挑戦することは現在でも困難である。

スパイ衛星は冷戦期中はビッグテクノロジーであったが冷戦終結後はロケットをはじめ調達が可能になり、一部の部品に高度な技術を要するものがある点を除けば、実態はビッグテクノロジーではなくなっていたのでベンチャービジネスが参入できた。多くの人がそのことに気が付かなかっただけであった。本書で扱う海底資源の揚収も、現在進めている海底油田・ガス掘削、浚渫、サルベージ技術の延長で考ええると、高圧条件など乗り越えるべき機械的な技術障壁が大きく、確かにビッグビジネスしか対応できないであろう。しかし、深海の過酷な高圧条件を深海と海面を往復するマッコウクジラの生態メカニズ

ムと最先端の宇宙航空技術、軍事技術を用いて回避できることに筆者は気が付いた。海底資源の揚収はもはやビッグテクノロジーではなくビッグビジネスの専売でもない。このことに気が付いている人はほとんどいない。

条件② 高度な機械技術から高度なソフトウェア技術へ

システムを構築する方法として、複雑困難で限界的な事象を解決し実現する手段として、高度な機械技術をを用いる代わりに高度なソフトウェア技術を用いる。高度な機械技術の開発には設備を要し、長期間とコストがかかる一方、高度なソフトウェアは少数の先鋭的な頭脳があれば短期間に低コストでパソコン程度の設備で実現できる。ベンチャービジネスは少数の先鋭的な頭脳が中心となって起業するためこの条件を比較容易にクリアできる。(日本の大組織は実はこれが困難) 比較的小型のロケットエンジンと高度なソフトウェアで問題を解決するロケットベンチャーのスペースX社は実績を出しつつある。

条件③ 経済的に成り立つ採掘方法である。

鉱業として商業的に成り立つ根本条件を近年の米国におけるシェールオイル・シェールガス開発の例か

ら検討してみる。販売する原油・天然ガス自体は市況品であるので採掘コストだけが焦点となる。米国は制度的に土地所有者が資源開発しやすいので、コスト的に許せば中小資本による開発がなされる。第4章では市場原理のもとで事業化する要件を分析して海底鉱物資源開発に資する。

条件④ 投資家が魅力を感じるビジネスモデルを提示できる。

投資家は魅力のある投資案件でなければ投資を行わない。ハイリスクハイリターンかローリスクローリターンの違いはあるが、リスクに見合ったリターンを提示する必要がある。

本書で述べる技術をこの条件に合うものとして紹介していきたい。

海底資源の揚収技術にブレイクスルーがある

従来の海底油田・ガス掘削、浚渫、サルベージ技術に替って、マッコウクジラの生態メカニズムを基盤にした生物由来技術であり、機械的条件に厳しいところがない。さらに、宇宙航空技術、軍事技術を用いてシステムを実現し、従来の技術障壁を解消した。

高度な機械技術を用いないため、4〜5年以内に商業化が可能

本書の技術は機械的条件が厳しくない一方、計測制御系とソフトウェアについては最新技術を投入した。計測制御系とソフトウェアは初期段階でシミュレータにより開発検証し、少ない初期投資でリスク解消できる。さらに機械的条件が厳しくなく、方式的に大型化、深深度化への障壁がない。小型機で方式を実証後、早期の商業化が可能である。

公的資金投入を前提としない、投資家が魅力を感じるビジネスモデル

シミュレータ検証により初期投資を削減し、順次実機に切り替えることで資金需要を後ろ倒しにして投資リスクを減らせる。またシミュレータは見通しを展示しやすく投資家の理解を得やすい。さらに、

① 高圧部分がほとんどなく摩擦が少なく保守経費が低い。

② 浮力を利用しているのでエネルギー効率が良い

ことにより運用コストが低く損益分岐点が低く、投資家に魅力的な案件として提案できる。

とくに今回、水素ガスを浮力として用いないことによりj従来に對比して所要経費を10分の1以下に減じたことにより資金調達が明るくなったと言えよう。

第2章 海底挑戦への発想転換

前章で述べたように、海底鉱物資源開発の現状の見通しは極めて厳しい。困難さを直視し根源的に考えるべき段階と考える。従来行われてきた技術である、海底油田・ガス採掘、浚渫技術、水中機構・構造物、高圧圧送、鉱石破碎・スラリー化の延長以外の解決策を求め、理解するために、以下、本章では視野を広げて海底鉱物資源開発の問題点と取組み方を根源的に捉えていく。

1 挑戦の歴史

根源から考え直す一助とするために、まず、人間は今までどのように深海に挑戦してきたかを概略見してみよう。

潜水艦・潜水艇

人間が深海に挑戦する手段としては、潜水艦・潜水艇(図2・1潜水艦・潜水艇の構造)がある。装置を用いて地上環境を海中に持ち込み、維持する方法である。深海に行くとき水圧が高くなるので、人間の居住空間が高圧で破壊されないように超高張力鋼材による耐圧容器を内部に設け、深海であっても内部を1気圧に保つ。この容器の耐圧能力に制約されて潜航深度は最大でも500m〜1000m程度である。耐圧容器を小型の球形にして一万m級の深海に潜る潜航艇も実用化されているが、ただ潜って観察

とサンプル収集する以外には使えないのが実情である。この意味するところは、人間が生存できるように1気圧の空気を伴って深海に挑戦することの困難さと限界の存在である。

海底資源の揚収

古くから行われているのが海底油田・ガス田の掘削である。約3000mの海底まで商業化されているが、石油・ガスは土中圧力で自噴することと、流体(液体・気体)であるため固体に比べて取り扱いが容易であること、海中・海底設置機構がなくて海上で保守が可能であることが理由である。

海底鉱物資源では、海底油田・ガス田で存在したこれら利点が存在しなくなる。それにも拘わらず従来技術の延長で対応すると次の課題・問題が発生する。

揚収資源は流体(液体・気体)ではない。

パイプにより石油・ガスと同様に揚収しようとする液体化せざるを得ず、掘削・スラリー化等、海中での鉱物粉碎加工が新規に必要となる。レアアース泥の場合ほとんど泥なのでスラリー化は容易であるが、それでもスラリー輸送の配管の摩耗(曲線部)による寿命対策と保守対応は必要となる。

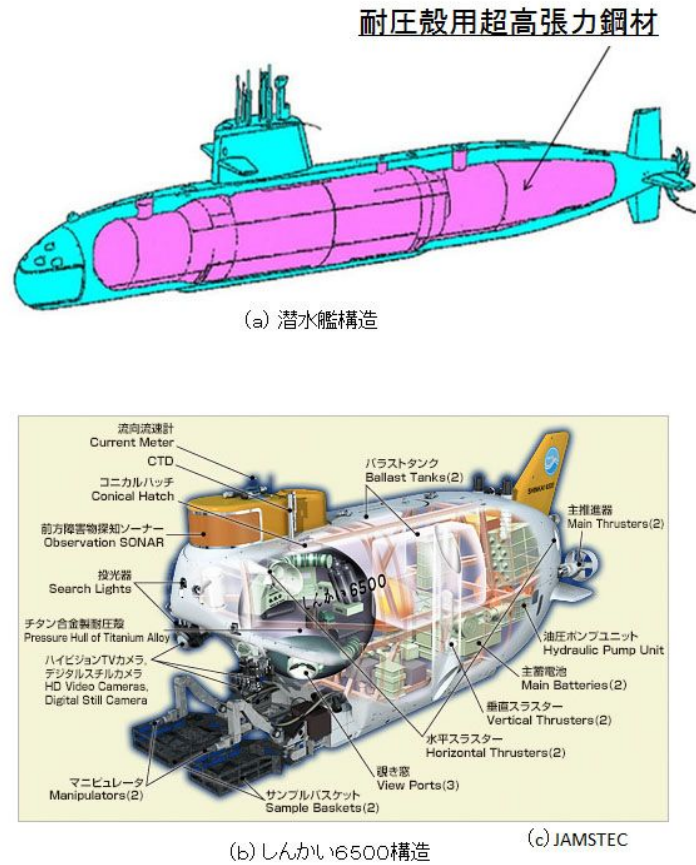


図2.1 潜水艦・潜水艇の構造

揚収資源は固体で自噴しない。

スラリー化しても、(実用的な濃度15%を想定)海底からの揚収に高圧ポンプ(30~50MPa)を海底に設置する必要があり、摩耗性のあるスラリー化液体を高圧ポンプで吐出することは機材の摩耗を考慮すると、想像を絶する技術である。洋上から高圧空気を吹き込む方法もあるが、耐圧配管とスラリー化液体を押し上げるためのさらなる高圧が必要となる。

海中・海底設置機構が必要。

揚収資源は流体でないため注水管、揚鉱管を海上から海底まで吊下するほか、掘削・スラリー化等、鉱物粉砕加工機器を海底に設置する必要がある。

固体で自噴しないため高圧ポンプを海底に設置するか、高圧配管を海底に吊下する必要がある。
 図2・2 熱鉱床揚収システム は JOGMEC による海底1600mの熱水鉱床開発実験機試験の構成である。実験機レベルであり、耐久性・保守性・経済性は今後の課題である



図2.2 熱鉱床揚収システム

©JOGMEC (黄色部分以外)

海底から管で揚収する方式で、物理的に一番厳しいのはスラリー化した鉱石の深海からの揚収である。先の記事中でレアアース泥揚収として、『レアアース泥は粒が小さく、海底まで下ろしたパイプに圧縮空気を送る方式で泥を引き上げられる。特定のサイズの泥粒だけ引き上げる「選鉱」技術によって、高濃度のレアアースを回収できるメドが立ってきた。』とあるが、レアアース泥の場合、スラリー化のプロセスが省略できる利点を生かし、海上から高圧搾空気（5000 m海底の場合、500気圧 \pm ）を注入して“レアアース泥（細粒固体）+海水+空気泡”のレアアース混合物を海底から押し上げる方式である。空気泡が海底から海面への上昇過程で5000 m海底の場合500倍に膨張し、物性が変化するので、膨張した空気を海中に途中で放出するか、海上まで揚鉱管を加圧しておく必要がある。この方法には下記技術課題があると想定される。

5000 mの海底に高圧搾空気を注入するための管の実現が難しく、出来ても極めて高価となる。

5000 mの海底に高圧搾空気を注入するためのエネルギーコストが大きい。

揚収するレアアース混合物の物性を制御するために記事中にもある海底での「選鉱」が行われる結果、海底に選鉱された鉱滓を海底に放出せざるを得ず、海底への環境汚染が広がる。

最初の2項目は、商業的に成り立ち難い要因であるが、最後の環境汚染の問題はレアアース泥揚収と

JOGMECの熱水鉱床揚収でも共通に発生する事態であり、国際的な資源争奪環境の中で対抗できるかという、技術を超えた問題を含んでいる。

これらの問題の根本的原因は、海底油田・ガス開発等、従来技術を出発点として「資源を液体（スラリー）で海底から管で揚収」することに固執することにあると考える。

2 困難さの原因

深海の物理的性質を考えてみよう。

人間は日常の生活空間と異なる環境で活動すると多大な困難に直面する。例としてすぐ思い浮かぶのは宇宙空間である。宇宙ステーションや宇宙服でようやく人間が生存可能となる地上と隔絶した異空間である。深海底の異空間のレベルは宇宙空間をはるかに超えている。これらの異空間に関与するためには人間は何らかの機械や装置に頼らざるを得ない。この機械・装置の実現の困難さは、人間の日常空間と対象とする異空間が物理的にどの程度隔絶しているかに左右される。深海底は宇宙に比べて未開発である。深海底が宇宙と比較して物理的にどのように異なるかを知ると、深海底への進出の困難さと方法が見えてくる。宇宙服はあっても深海服はないというのが、そのよい証左であろう。

深海の困難さを具体的に見てみよう。

圧力差

宇宙はほぼ真空であるので、1気圧の地上との圧力差は1気圧である。一方、水中では深度が10m増すごとに1気圧増えるので、5000mの海底では500気圧となり、地表との圧力差は実に500気圧となる。耐圧技術として桁違いの困難さがある。

深海は暗黒の世界で視界が悪い。

海中は海面近く以外は太陽光が届かず基本的に暗黒の世界である。また人工的に照明を行っても海中の不純物によって視界が遮られて数十m以上（場合によっては数m以上）の視界を得ることは一般に困難である。宇宙船が遠方の物体を視認できるのとは大きな違いである。

海中は電波が通らない。

さらに悪いことには、宇宙空間を含む空中と異なり海中では電波が減衰して通らない。電波が通らないということは、GPSによる位置測定ができないことであり、レーダーによる探知もできない。さらに電波による無線通信ができない。海中を伝搬可能なのは音波であり、海中では電波の代わりに使用されているが電波にない致命的弱点がある。第一に音波は海中で直進しない。海中は層状に温度分布が異

なり、音波の伝搬速度が水温により変化するため音波が屈折して目標位置に到達しないことが発生する。潜水艦はこの性質を利用して隠密行動をとっている。第二に、伝送可能な情報量は電波または音波の周波数に依存するが、電波に比べて音波は圧倒的に周波数が低いため、音波により動画映像を水中伝送することはできない。電波で使用する周波数はギガヘルツ（10億）オーダーであるが、音波で使用する周波数はキロヘルツ（1000）オーダーであるため伝送情報は百万分の一になってしまったためである。

水には抵抗があり移動が容易でない。

水には流体抵抗があり、移動する場合複雑さが増す。各種の移動する機材を設計する場合、検証すべきことが多くなる。真空中では実用上、毎秒数十kmで高速移動できるが、水中では最速といわれる魚雷でも毎秒30mが限界であり、抵抗により多くのエネルギーを消費する。

海中はエネルギーの獲得に苦労する。

水中には酸素がほとんどないので、内燃機関のような酸素を消費する動力を利用できない。原子力または蓄電池を利用するか、外部より電力を送電するほかない。宇宙では太陽電池で比較的容易に電力を獲得できるのに比べ難易度が高い。

水中はすべて都合が悪いことばかりかというところ、利用方法によっては次のような良い点もある。

浮力があり上手に利用すると重力の束縛から解放される。

宇宙空間と比べ有利となりうる点であるが、宇宙飛行士の訓練を水中で行っている映像がよく紹介されているが、水と同じ比重とすることにより無重力に近くなり重力の束縛から解放される。気球や飛行船がエネルギーをほとんど使用せずに上空に到達できるのもこの原理による。

海中は意外と距離が近い。

5000mの深海底といえども5kmの距離であり、距離的には近い。このことは浮力を活用して伝送ケーブルの比重を軽くすることにより有線による通信と送電が比較的容易にできることを意味する。潜水艦発射の魚雷では、魚雷が信号線を吐出しながら有線で潜水艦との通信を行いながら水中を航走する。

3 新たな挑戦へ

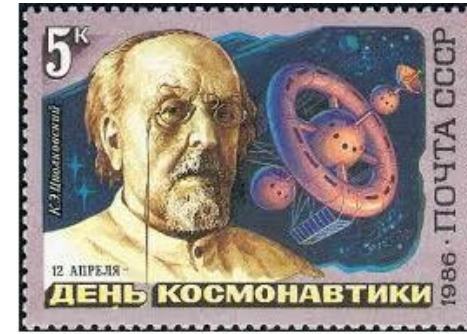
隔絶した世界（異空間）への挑戦を人間が過去どのようによってきたのか参考になるアプローチをみてみよう。

ゼロベースで原理原則から考える。

人間が未知の環境へ対応する方法には、いくつかのアプローチがある。

第一は基本原理に基づきゼロベースで考えるアプローチである。

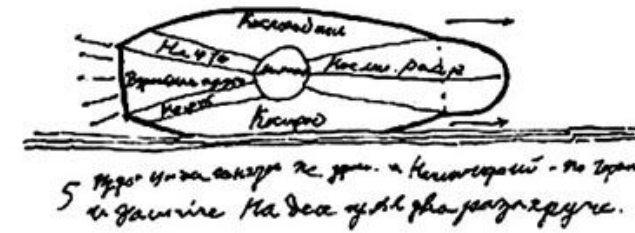
旧ソ連にツオルコフスキー（1857～1935）というロケット研究者がいた。彼は航空宇宙に全く経験がないにも関わらず、ニュートン力学を基礎に独学でロケットの方式研究を1920年代に行い、宇宙空間は水素ガスと酸素ガスを搭載したロケットで飛行しなくてはならないこと、速度を得るには多段階ロケットが必要なことを明らかにし、人工衛星、月飛行などの理論も示した（図2・3 ツオルコフスキーの構想）。ソ連は彼の没後の1950年代後半以降、彼の理論に従って宇宙開発を行った。未開の分野では未経験であっても、新参者であっても、原理原則に基づいて構想するのが有効である例である。



ツオルコフスキー



(a) 宇宙ロケットの概念



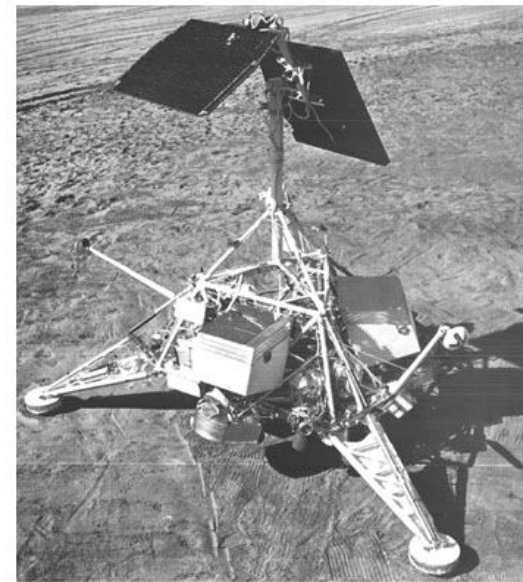
(b) 多段式ロケットの概念

図2.3 ツオルコフスキーの構想

原理原則に基づきゼロベースで考える場合にはアプローチは一つではないという特徴もある。第二次大戦後米国とソ連は互いに宇宙開発を機密にしながら独立に開発した歴史があるが、米国はソ連より基本原理に基づきゼロベースでアプローチした傾向がある(図2・4 月探査機の実現方法)。ソ連の宇宙探査機は圧力容器のような外見をしている(ルナ16号)。これは内部の冷却を気体の対流で行っていたためで冷却の設計が地上と近くなり容易となる反面、真空に対する耐圧設計を行うため重量が増加する。米国は内部の気圧を下げて耐圧設計を軽減して軽量化する反面、ヒートパイプや、熱解析ソフトなどの冷却技術の新技术開発を行った(サーベイヤー1号)。ソ連のように無人探査機に地上の環境を持ち込む必要は、ゼロベースで考えれば必要なく、耐圧容器による重量増加は避けられることである。新しいことに挑戦するアプローチは1つではなく、より根源的に考えたほうが良い結果となる例である。



(a) ルナ16号(ソ連) (C) NASA NSSDC Master Catalog Search



NASA Public Domain

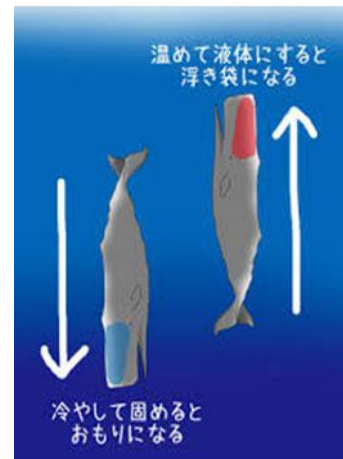
(b) サーベイヤー1号(米国)

図2.4 月探査機の実現方法

生き物の真似をする。

第二のアプローチとして生物の仕組みをまねるバイオメタリックスというのがある。生物の仕組みは数億年の進化の過程で環境に最適に適合しており、大いに参考にすべき点がある。天井にとまって落ちないハエの足を模擬した接着テープとか、トンボの羽の原理を活用した超小型飛行機や、高効率小型タービンなどの例がある。宇宙と地上を裸で往復できる高等生物はいないが、深海と海面を裸で往復できる哺乳類として、2000〜3000mの深海に潜り、海底でダイオウイカを捕食して海面に戻るマッコウジラの生態は大いに参考になる。

肺呼吸の大型哺乳類であるマッコウジラは潜水具もつけずに、どのように2000〜3000mの深海に潜りダイオウイカを捕食するのだろうか(図2・5 マッコウジラの潜水)。マッコウジラの筋肉中にはミオグロビンという血液に含まれるヘモグロビンの親戚のような物がとても多く、肺で取り入れた酸素を筋肉中に多量に液体として蓄えることが出来る。潜水するときに必要な酸素をこれで賄うため、肺の中の酸素は必要がなくなり、肺はしぼんだ風船状態となる。さらに、この酸素を使って海底で1時間活動することができる。つまり体内に気体はないので、高圧下でもつぶれることがなくなる。



マッコウクジラは生体で3000mの深海に潜ってダイオウイカを捕食できる

比重の制御により沈下・浮上(比重が1.0)体内圧と水圧が等しい

生体の優越点

- 耐圧部分が不要で深度障壁が低い
- 比重による昇降で高エネルギー効率
- 海底と海面を接続する構造がなく、構造的制約がなく、場所を選ばず、自由に獲物を捕獲

(参考) マッコウクジの能力の特徴

図2.5 マッコウクジラの潜水

また、マッコウクジラの頭から背中にかけては脳油というのがあって、海水により下降時には脳油を冷却して比重を重くし、上昇時には血流により加熱して比重を軽くして上昇する。

深海へのアクセスに関してマッコウクジラから学ぶべき生物模倣(バイオミメティクス)のポイントは次の3点である。

内外圧を均衡させる。

マッコウクジラの体内にあるのは固体と液体だけである。肺は萎んだ風船状態にしてあるので海中深く潜っても、これ以上はつぶれない。固体と液体は高圧下でもほとんどつぶれないので、体内から気体を排除すれば、海面と深海底の圧力差からの解放されるのである。この内外圧の均衡が実現できれば、深海用機材であっても耐圧設計を行わなくてもよくなる。

浮力を利用する。

浮力を利用して昇降するとは、下降時には水の比重より若干重くして、重力により降下し、上昇時には水の比重より若干軽くして浮力で上昇することである。この浮力の利用によりマッコウクジラは流体の

中での昇降で最もエネルギー効率の良い方法を実践している。大気中では気球があるが、大気の場合は上空に行くとも大気が希薄となり浮力が減るので、これに対抗して浮力を維持するためには気球を膨張させなくてはならないが、海中の場合、浮力はほぼ一定であるため体積は変えなくてよいという利点もある。

自律的に移動する(自律航法)。

マッコウクジラは生き物であるから誰の助けも受けず自分の意志で潜航し上昇する。すなわち、自律航法ができれば海中の構造物が不要になる。自律航法ができればシステムとしてコンパクトにすることができる。

マッコウクジラと潜水艦を比べてみると、なぜ潜水艦が深海に潜れないかが理解できる。潜水艦では船の内部に人間の居住空間用に耐圧容器がある。この部分は人間が生存するために1気圧に保つ必要があり、耐圧容器の耐圧能力が潜航限界ということになる。潜航深度を増やすには耐圧能力の高めるため容器の厚さを増す必要があり重量が大きくなる。積載能力が制限されるだけでなく、浮力不足で実現することすらおぼつかなくなる。ソ連が軽くて強度のある全チタン製潜水艦を作った理由がここにある。

第3章 深海クレーンの全体像

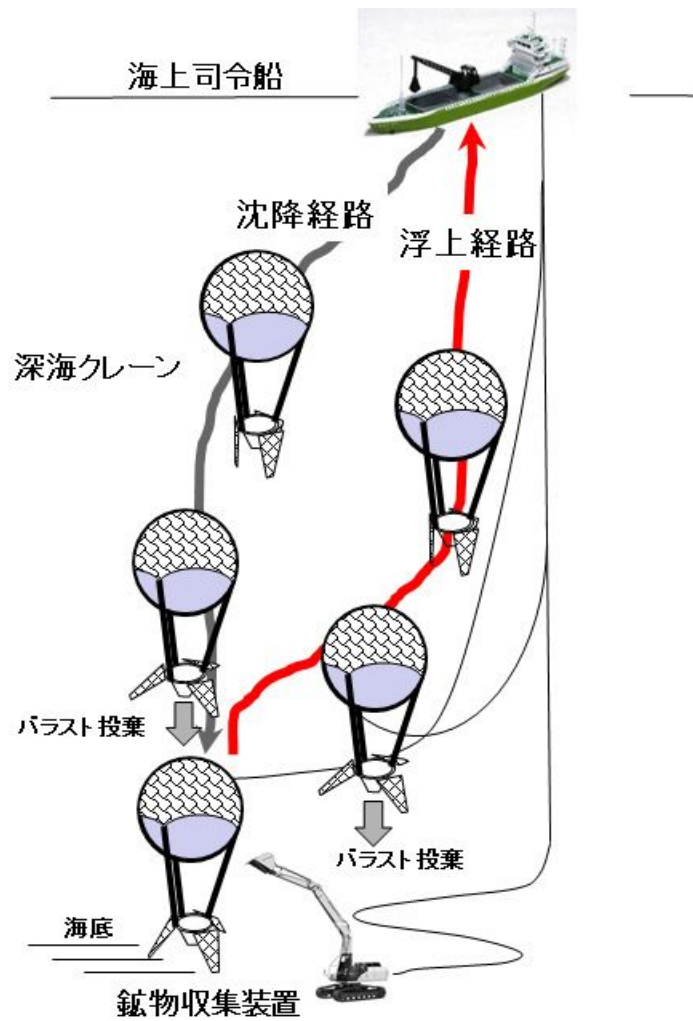


図3. 1 海底資源揚収システム全体図

- ① 内外圧を均衡させる
- ② 浮力を利用する
- ③ 自律的に移動する（自律航法）
- ④ 運搬船

さらに、物理法則はゼロベースできちんと考察して反映した。

海底資源揚収システムの実態は図3・1に示すように気球に似た無人潜航艇である。本章では全体像を述べ、第4章で実現のための根拠となる技術を説明する。第5章ではシステムの各部を詳説する。

海底資源揚収システム(図3・1)は次の構成部分より構成されている。

海底資源揚収システムは水中航走体である深海クレーンがバラストと積んで海面より海底に降下し、海底で鉱石と交換して、鉱石を貨物室に収容して自律航法で海底から海面に浮上する。この降下と浮上は浮力のみによる。本システムでは、従来、海底資源開発で使用されている技術はほとんど使用せずに、他分野で実用化されている技術と、計測制御技術、ソフトウェアに依存している。従来の海底資源開発のように物理的に限界となる要素がほとんど無いので、実現の障壁は低いといえるが、ソフトウェアへの依存は大きい。

1 深海クレーン

海面と海底を往復する球状の浮力タンクに貨物室と機械部と吊り下げた無人潜航体であり、鉱物運搬を行う。球形の浮力タンクを採用するのは製造が容易であること、表面積に対する容積が大きいこと、他の形状に比べて強度が得やすいこと、水中航走体としての特性が単純で、構造計算が簡単であることによる。浮力タンクはジュラルミンなどの軽量金属または軽量で強度の得られる炭素繊維樹脂で構成され、常温で液体で、水より比重の軽いnシクロペンタン（比重0.63）またはガソリン（比重0.70）

を密閉充填する。ガソリンは得られる浮力が劣るが価格が低い利点がある。

深海クレーンは気球と類似の構造を持ち、自律航法で海底と海面を往復するが、下降時は水より若干大きい比重に設定され、上昇時には水より若干小さい比重に設定される。海面からの下降時にはバラストを積載して沈下し、上昇時にはバラストの替わりに鉱物を積載して上昇する。上昇時の積載鉱物に見合う浮力は海底でバラストを投棄することによって得る。また貨物室に付随する機械部には開閉可能な着床脚が設置され、制御用と減速用の翼が設置される。翼は水抵抗が大きくなるようメッシュ状の構造となっている。深海クレーンの最大の特徴はバラストと採集鉱物を、重力を利用して軽量簡単な機構で置き換えることである。海底では着床用脚を用いて貨物室が着床し、浮力タンクは上方に浮いている。浮力タンクと貨物室の間には採集鉱物積み用の空隙があり、貨物室の上方より採集鉱物を投入することにより下方よりバラストを押し出してバラストを採集鉱物に置き換える。バラストの投棄量を調節して海底への着床維持と浮上を制御する。詳細については第5章で記す。

深海クレーンは自律水中航走体であるため誘導制御が不可欠で、水中音響、画像処理、慣性航法のほか、制御理論としてロケットやドローン制御で用いられている理論を適用する。海上司令船との制御・画像信号の通信のためには光ファイバケーブルを用いる。

2 鉱物収集装置

深海クレーンは重量の制約で海底鉱物の採集と積載の機能を持たすことができないことと、専ら海底で行う機能を毎回昇降させることは適切でないため、専用の鉱物収集装置を海底に持ち込み設置したままとする。鉱物収集装置は建機のパワーショベルに、必要に応じてブレーカなどのアタッチメントを変更して対応し、鉱物を細粒化またはスラリー化して水と圧送しないで原姿のまま採掘する。建機は油圧の差圧機構で動作するので電動であれば海底を含む水中でも稼働可能で、海中稼働の実績もある。

3 海上司令船

海上司令船は、深海クレーンなど海底資源揚収システムの全体を制御する。降下する深海クレーンへのバラストの積込み、浮上してきた深海クレーンからの揚収鉱物の回収を行ほか、鉱物収集装置、深海クレーンの揚収・保守および基地港からの輸送・展開・撤収を行う。

4 運搬船

揚収鉱物を海上司令船から基地港へ輸送し、基地港から海上司令船へ輸送する輸送船である。

第4章 シェールガス・シェールオイルの教訓

近年の米国におけるシェールオイル・シェールガス開発は採掘する対象と場所が海底鉱物資源と全く異なるが、鉱業として政府資金に頼らず自律的に市場原理に基づいて事業化に成功し、世界のパワーバランスにまで多大な影響を与えた成功例として、ビジネス的に学ぶべき点がないか検討する。分析していくと商業的に成り立たせるための根本条件とビジネスの進め方に対する示唆が得られる。シェールオイル・シェールガスは販売対象が原油・天然ガスで既存の市況品であり、ビジネス的にみると投資の在り方と採掘コストだけが焦点となる。この点は本書で扱う海底鉱物資源と全く同様である。本書はシェールオイル・シェールガスを論ずることが目的ではないので、ビジネスの進め方として海底鉱物資源開発に資する点に焦点を絞って記述する。

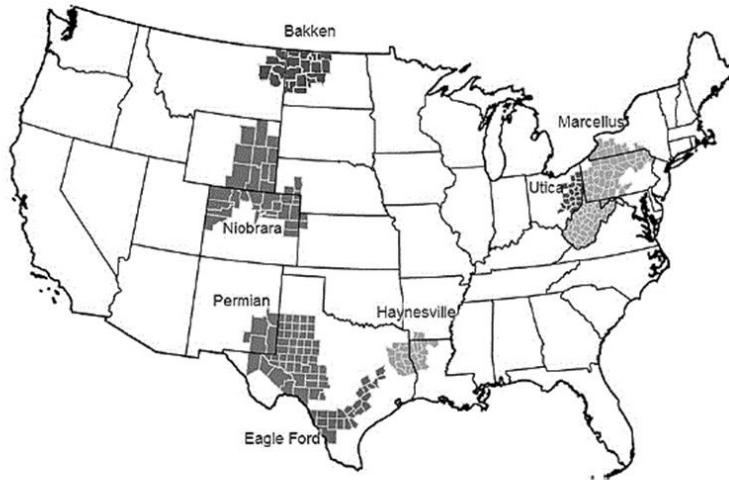
1. シェールオイル・シェールガスの事業的特徴

図4. 1は採掘地点の分布を示す。米国は制度的に土地所有者が資源開発をしやすく、以前より中小資本による石油・ガス開発がなされていてシェールオイル・シェールガスの開発はこの延長で行われている。地域的に広域に分散しており個別の資源分布特性に市場原理に基づき実施されている。採掘には大量の水が必要で北米大陸がこの条件を満たすという好条件もある。このような状況で採掘コストを下げ

る次の三つの技術進歩(図4. 2)により

価格競争が可能となった。

- ① 水平掘削技術
垂直に掘削していた掘削抗を油層・ガス層に沿うよう水平に曲げる。
- ② 水圧破碎とフラクチャー生成による石油・ガス流路の確保
水平抗に500から1000気圧の水を注入し地層を破碎して割れ目(フラクチャー)に石油・ガスを透過する物質を充填する。
- ③ マイクロサイズミックスによるフラクチャー生成の把握



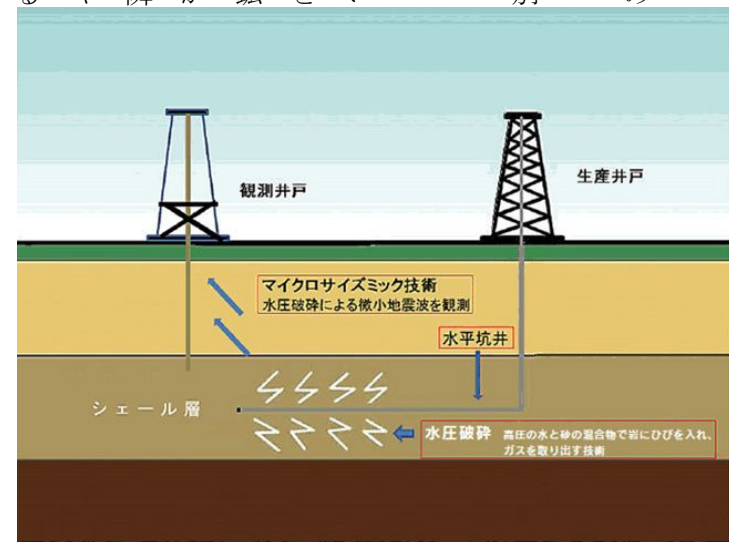
(出典) 米国エネルギー省情報局(EIA)「Drilling Productivity Report」2015年

図4. 1 シェールガス・シェールオイルの分布

地上及び掘削抗に分散設置された振動計で水圧破碎の振動を検出、分析（マイクロサイズミックス）して地中のフラクチャー生成状況を計算機で求める。

第一の特徴は、シェールオイル・シェールガスの個別の採掘点の中から低参入コストの場所を選んで選択的に市場原理に基づき開発されたことである。

さらに特徴的なことは、鉱脈は水平方向に広がっていて、通常の油田・ガス田と異なり地層を破碎しないと自噴しないので、単一の掘削井からいかに広範囲の鉱脈にアクセスするかということにすべての技術進歩が費やされている。鉱脈に沿って鉱脈を評価しながら隣接方向へ低コストで採掘領域を拡大することによりキヤッシュフローの確保と段階的投資を可能としている



(出典) 資源エネルギー庁 JOGMEC

図4.2 シェールガス・シェールオイルの技術革新

2. 海底鉱物資源事業化への指針

前項の特徴の項で述べたことの要点は「低コストでうまいものをつまみ食いから始めて蚕食の範囲を周囲に広げる」ということで、昔の金鉱掘りと同じ原則である。以下、この原則を海底鉱物資源の場合に適用して行く。その内容を項目別に記すと、

① 低コスト化

低コスト化には初期参入時点でのコスト削減、定常運用コストの削減、それらに共通する事項のコスト削減がある。

(ア) 共通的事項

● 洋上司令船

位置要求精度の緩和

海底への掘削を行う洋上船舶は掘削リグなどの水中構造物を海象によらず維持するため精密な位置制御が要求されるが、洋上司令船より海中への吊下物をなくす仕組みにすることにより要求精度を緩和できる。本書の方式は水中構造物が無く、水中航走体を用いるので

海中への吊下物はなく、精密位置制御は基本的に必要ない。

荷役の簡単化

クレーン等の小型低価格化を図る。想定している鉱石運搬船では、海洋資源調査船にあるような大型高性能クレーンは利用できない。引き上げるのは鉱石部分のみとし、浮力タンクは引き上げないようにするほか、単純な洋上作業で荷役ができるようにする。

船舶の小型低価格化

700トンクラスの鉱石運搬船は標準化されており、建造費も6億円程度と安い結果、備費が安く抑えられる。小型貨物船を利用するため海上司令船の監視制御システムはノー
トPCベースとして可搬可能な形とする。

● 深海クレーン

構造の単純・低コスト化を図る。

制御誘導機構への投入エネルギーを最小化する。

浮上・降下とも浮力に依るので揚収（浮上・降下）には本来動力は不要である。しかし経路変更と海底での軟着陸と精密位置制御には動力投入が必要であるが、この動力投入を最

小化ないしゼロとする。経路変更は制御翼の角度により行い、海底への軟着陸はバラスト投棄と制御翼による制動により行う。海底から鉱物収集装置を回収し揚収する場合には精密位置制御が必要で、スラストを用いざるを得ないため動力を要するが、微速であるので最小規模に抑えられる。海底に鉱物収集装置を設置した後、空荷で海面へ浮上する場合には海面への浮上時に速度が大きく浮力タンクに応力がかかり破壊の原因となるので浮上速度に制動をかけることが必要である。制動翼および浮力タンク上面の抵抗を増加させるほか無負荷浮上時には制動用パラシュートを開傘させて浮上速度を抑える。

(イ) 低参入コスト

- スケールアップ可能な構造とする。
同一構造でスケールアップできるような構造とする。
- 当初は人力操作から開始して、後日追加投資して、自動化・ロボット化する。
自動化投資は初期段階では抑制する。

(ウ) 低運用コスト

- エネルギー投入を下げる仕組み

揚収自体は浮力により海底でバラストと交換するためエネルギー投入を要しない。その他は制御誘導機構の低エネルギー化による。

- 輸送コストの削減

 - 選鉱屑のバラスト活用

本書の方式は海底で積載する鉱石と同量のバラストを投棄するのでバラストは重量を微調整するためには細粒である必要がある。揚収鉱石を破碎し選鉱した残余をバラストに使用することにより元の鉱床を復元し環境へのインパクトを最小化する。

 - 選鉱場所の近距離化

選鉱場所を揚鉱場所の近くに設定して輸送コストを削減する。

- ② 採鉱範囲の拡大

- 鉱脈方向への低コスト拡大

シェールガス・シェールオイルの場合、技術開発はこの部分に集中しており、この成功が事業化につながった。古くは米国西部のゴールドラッシュ、日本の金鉱掘りでも金鉱石地層に執着して掘り進んでいる。海底鉱物資源の場合、熱水鉱床、マンガン団塊、コバルトリッチクラスト、レアアース泥によって存在形態が異なる。熱水鉱床は塔状ないし小山状に岩石塊として海底に存在し、マンガン団塊はボール状に、コバルトリッチクラストは枕石状に海底表面に存在する。レアアース泥は海底数メートルから10メートルのところに層状に数メートルから10メートル分布している。鉱脈方向に低コストでアクセスを広げるかがシェールガス・シェールオイルの例から見ても、揚収と並んで重要課題である。電動建機による採掘は鉱脈の状況を採掘しながらノーコストで判断できるので、この目的に合致する。

3. 政府資金による開発状況

海底鉱物資源の開発は政府資金により行われている。政府の開発結果によっては本書による方法が競争力のない無意味なものとなる可能性がある。本書による方法が政府資金に与れなかった場合、そのことが致命的打撃になるか評価する必要がある。政府資金による開発で注目するべき動きは次の2件である。

- ① JOGMECによる沖縄近海1600Mの熱水鉱床の揚収（2017・8月～9月）

70億円（集鉱機20億円 準備費用、用船費、各種機器含む）の資金投入で

1・5ヶ月間16回の揚収で16・4トン 地金価格370万円の揚収に成功した。

② 戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）・革新的海洋資源調査技術

6000mの深海底より海底表面より2mから4mの間に層状に存在するレアアース泥採集の実海域試験を行う。

このうち、JOGMECの例についてはJOGMEC NEWS 2018年3月号で構成機器の詳細を述べていて商業生産を行う規模ではないにせよ投入資金70億円に見合ったかなり本格的なシステム構成である。揚収した16・4トンには比重が4程度と想定されるので全体の容積では一辺1・6mの立方体相当、16回で揚収しているので一回あたり平均容積では一辺60cmの立方体相当に過ぎない。この意味するところを分析してみよう。

① 投入した資金に対して得られた地金価値があまりに低い

どのぐらい低いかを超概算で検討してみよう。商業的運用では開発費は除外すべきであるから、投入資金70億円のうち、開発費を除く機材費が5億円として10年償却すると年額償却費は0・5億円と想定する。さらに機材の保守費を年額0・5億円とすると年額1・0億円となる。備船費は本書で想定している鉱石運搬船のガットクレーン船で月額1300万円、年額1・5億円である。

「はくれい」クラスの資源探査船クラスで開発費を除いた造船費用に対して10年償却とすると年額8億円、20人体制で運営して人件費年額1・5億円、発電電燃料および一般管理費20%として合計年額15億円の粗利が必要となる。揚収鉱石は輸送精錬費を控除して得られる価値を200万円とすると一年間稼働して8倍の1600万円となり、保守費0・5億円で10年間継続して、揚収能力を現状の機器レベルで100倍にする必要がある。この試算では、機材費、保守費を実態とかなり低めに見積もっており、広報写真に示されたかなり本格的な試験システムの能力としてあまりに低い。「試験が成功」というならば稼働性向上と性能向上の道筋を示し、次段階の開発に進むべきであろう。しかし現実には商業化に向けた性能定義と次段階の計画発表が無い。

② 公的資金で有効な技術が開発されている場合には、それに与れないアウトサイダーに参入の余地はないが、JOGMECの例は70億円の国費で海底石油開発の変形技術では採算の取れる事業化は不可能なことを立証したと言え、アウトサイダーとしては脅威にならないと判断してよいと思う。

戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）・革新的海洋資源調査技術の場合は構想の段階であるが商業化する場合に次に示すようにコスト的に弱点となる要素がいくつかある。（図4・3参照）

- ① 洋上船より海底に揚収管を下ろして、その中をスラリー化したレアアース泥を吸上げ回収する。この構造では高コスト体質の問題が生じる。すなわち収量を上げようとして揚収管の直径を大きくすると、要求されるデリック、洋上船に対する要求仕様が高くなる。揚収量を増やそうとすると大揚程大容量のポンプが必要でエネルギーコストが大きくなる。

- ② 海底下2から4メートルのレアアース泥層にジェット水流噴出管と貫入させて高圧水で解泥する。シエールガス・シエールオイルと一見似たやり方であるが、次の点が異なっている。

- (ア) 地層解泥用粉碎・ジェット流噴出管は泥吸上げ揚収管と別個に洋上より場所を変え貫入し解泥しなくてはならない。自噴もしないし、解泥は別途管を海底に下す必要がある。また、地層状況を推定するモデルはなく採掘可能な状況を予測するモデルもない。シエールガス・シエールオイルでは採掘管を鉤脈に沿って横方向に曲げ、地層を破碎してガス・オイルを自噴させながら、鉤脈の状況は採掘管より地層破壊の時の地震波より掘削可能状況を3次元で把握管理してさらに採掘を進める。特徴は地層にアクセスするのは採掘管の1か所のみで、鉤脈の状況を把握して採掘が有利な方向を見出していく。この点の効率が圧倒的にことなる。

- (イ) シエールガス・シエールオイルでは昔の「金鉤掘り」以来の経済合理性(金儲け精神)が旺盛である。

本書の立場は、海底鉤物資源開発と言えども、採掘対象物はすでに他の場所から得られているものに過ぎない。市場価値に合ったコストで得られなければならないという意味がない。そのために従来技術にとらわれずあらゆる知恵を動員して金儲けにつなげる手段を考え出すことである。第5章はこの考えに基づく方法である。幸いにして政府資金による方法は方式的にコスト競争力を持ちえず、競争相手として脅威を感じなくてよいと判断している。

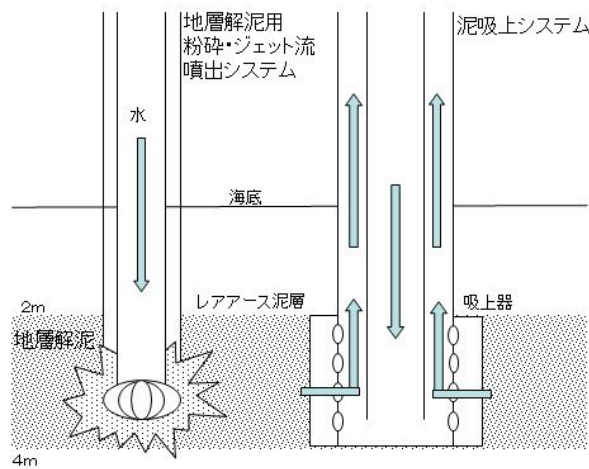


図4.3 レアアース泥回収システム

第5章 深海クレーンの構成

「第4章 2. 海底鉱物資源事業化への指針」に従い参入コストと運用コストを最小化すると同時に商業化が可能なコストと量的確保が可能な方式を提案する。すでに述べた「低コストでうまいもののみ食いから始めて蚕食の範囲を周囲に広げる」という戦略を実践する。

1. 深海クレーン

第3章 深海クレーンの全体像で概略を述べたのでここではより詳細に実現方法を述べる。

1. 1 構造および規模の評価

図5. 1に示すように深海クレーンは気球に似た構造をしており、浮力タンクに搭載物を搭載する貨物室が吊下されている。貨物室には制御翼兼着床用脚が設置されており開度制御と軸方向に対する回転角を制御して回転と進行方向を制御する。図5. 1は着床時の状態を示している。浮力タンクの浮力と深海クレーンの水中重量はほぼ拮抗しているので着床時に着床用脚にかかる荷重は極めて少ない。着床時には深海クレーンの水中重量が正（浮上しない）となるようにバランスを制御する。貨物室は浮力タンクより吊下するが網状のネットを浮力タンク上部にかぶせることにより行う。その理由は浮力タンクに局所的な応力集中が起こることを防ぐためと、表面を網

1.
2 鉍石揚収運用

深海クレーンは浮力タンクの浮力と貨物室に搭載したバラストの重量が水の比重より若干大きい状態で海底に近づく。貨物室の下部より投下するバラストの量を微調整することにより着床速度

状とすることによりに深海クレーンの浮上時に抵抗が増えて浮上速度の上昇を抑え、海面に浮上した時の浮力タンクにかかる応力を減ずる目的と、制御翼による制御時に吊下索の捻じれによる振動を防止するためである。浮力タンクの直径と得られる浮力の関係を示したのが表5. 1である。浮力タンクに充填する液体をガソリン（比重0. 70）とするかnシクロペンタン（比重0. 623）にするかにより揚収力が異なるが、価格的に安価で入手しやすいガソリンに対してコスト評価を行った。10トンの浮力を得るための浮力タンクは直径4. 0メートルの球である必要があり、充填に要するガソリンコストは330万円となる。燃料ではないので初期投資コストであり、貨物室等の構造物の水中重量を1トンとすると、海底よりの揚収能力は約9トン弱となる。参入コストはこの規模で評価するが、揚収重量が100トンとすると直径8. 6メートルの球が必要となる。

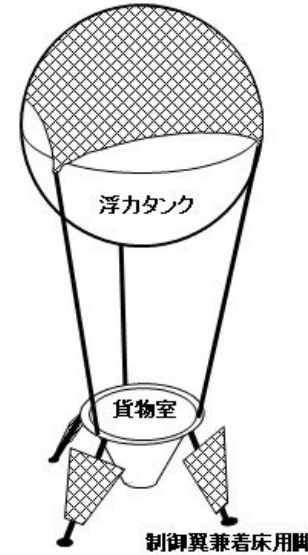


図5. 1 深海クレーン

表5. 1 浮力タンク体積と浮力諸元

半径 m	直径 m	体積 m ³	浮力(Ton)		価格 ガソリン 100万円
			ガソリン	nシクロ ペンタン	
1.20	2.40	7.24	2.17	2.73	0.72
1.30	2.60	9.20	2.76	3.47	0.92
1.40	2.80	11.49	3.45	4.33	1.15
1.50	3.00	14.14	4.24	5.33	1.41
1.60	3.20	17.16	5.15	6.47	1.72
1.70	3.40	20.58	6.17	7.76	2.06
1.80	3.60	24.43	7.33	9.21	2.44
1.90	3.80	28.73	8.62	10.83	2.87
2.00	4.00	33.51	10.05	12.63	3.35
2.10	4.20	38.79	11.64	14.62	3.88
2.20	4.40	44.60	13.38	16.82	4.46
2.30	4.60	50.97	15.29	19.21	5.10
2.40	4.80	57.91	17.37	21.83	5.79
2.50	5.00	65.45	19.63	24.67	6.54
2.60	5.20	73.62	22.09	27.76	7.36
2.70	5.40	82.45	24.73	31.08	8.24
2.80	5.60	91.95	27.59	34.67	9.20
2.90	5.80	102.16	30.65	38.51	10.22
3.00	6.00	113.10	33.93	42.64	11.31
3.10	6.20	124.79	37.44	47.05	12.48
3.20	6.40	137.26	41.18	51.75	13.73
3.30	6.60	150.53	45.16	56.75	15.05
3.40	6.80	164.64	49.39	62.07	16.46
3.50	7.00	179.59	53.88	67.71	17.96
3.60	7.20	195.43	58.63	73.68	19.54
3.70	7.40	212.17	63.65	79.99	21.22
3.80	7.60	229.85	68.95	86.65	22.98
3.90	7.80	248.47	74.54	93.68	24.85
4.00	8.00	268.08	80.42	101.07	26.81
4.10	8.20	288.70	86.61	108.84	28.87
4.20	8.40	310.34	93.10	117.00	31.03
4.30	8.60	333.04	99.91	125.56	33.30
4.40	8.80	356.82	107.05	134.52	35.68
4.50	9.00	381.70	114.51	143.90	38.17
			ガソリン単価	100.00	¥/リットル

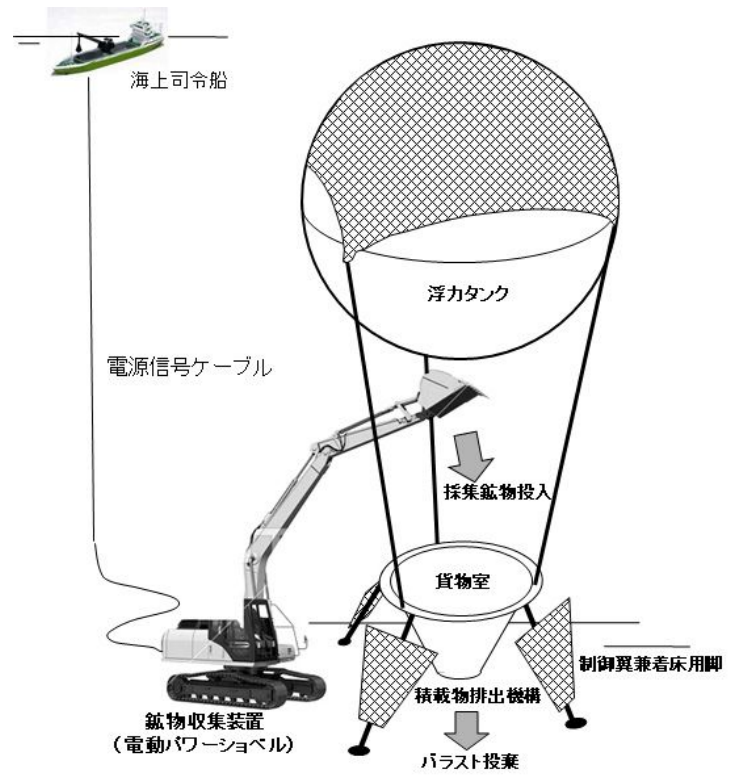


図5.2 深海クレーン鉱石積載

を調整できるが、ひとたび水の比重より軽くなると比重を増したり下方に推進する手段を持たせ

ていないので、着床速度は深海クレーンの機械的強度により定められる一定値、概ね毎秒0.7メートル程度に設定する。減速器兼着床用脚は海底の起伏に応じて開度を自動調整する。

図5.2は深海クレーンに対する採集鉱物積載の状況を示している。採集鉱物は電動パワーショベルにより貨物室の情報より投入されるが、着床用脚の根元にある重量計で投入量を監視し、投入量に見合った量のバラストを積載物排出機構より投棄する。全てのバラストを投棄しても深海クレーンの比重が海水より大きくなると浮上できなくなるので、制御翼兼着床翼の根もとにある重量計計測値の変化から残余バラスト量をアルゴリズムにより常時監視して採集鉱物投入を中止して浮上する。図5.3はバラストと投入したバラストと採集鉱物を交換するための機構を示しており、下側に絞る構造の円錐台の形をしている。(a)は着床時の貨物室がバラストで充填されていることを示す。バラストは細粒状の土砂で貨物室の下端に設けた排出物排出機構により投棄量の微調整が可能である。バラストの投棄は重力によって行われ、採集鉱物の選鉱滓、精錬滓を用いると輸送コストと環境負荷を削減できる。上部を仕切機構で覆い、上部より採集鉱物を投入し下端の積載物排出機構よりバラスト投棄を行っても両者の混合と採集鉱物が投棄されるのを防止する。(d)(e)は下方に延長可能な蛇腹構造の仕切機構の例を示しているが膜構造でもよい。

投入の途中過程で(c)は採集鉱物投入の終了時を示す。実際の運用では浮上時に深海クレーンの比重を海水より軽くする必要があるので投棄用のバラストを残しておく必要がある。

深海クレーンは海上司令船と海底の採掘点の間を昇降するが、降下経路及び浮上経路の制御は図5.4の制御翼兼着床脚の開脚度と回転角を制御して行う。制御翼兼着床脚には網目状の翼が設置されていて水流の制御と制動を行う。制御はエネルギーを投入する制御は行わず下降又は浮上時の位置エネルギーを制御翼により変換して制御力にする。図5.4(a)は各制御翼が軸回りに同一方向に傾いていて深海クレーンの回転を行う。回転方向は下降時と浮上時は逆となる。図5.4(b)は対向する制御翼二枚を水平座標面で同一方向に傾ける。残りの二枚は鉛直に向けて水平方向に制御力が発生しないようにする。(c)は開脚度を最小にして制動力を最小にする場合であり、(d)は開脚度を最大にして制動力を最大にする場合である。

1. 3 鉱物収集装置設置および回収運用

深海クレーンは海底より採集鉱物を揚収することに加え、鉱物揚収装置(電動パワーシヨベル)を洋上から海底に持ち込む操作と、海底から洋上に回収する操作を行う必要がある。

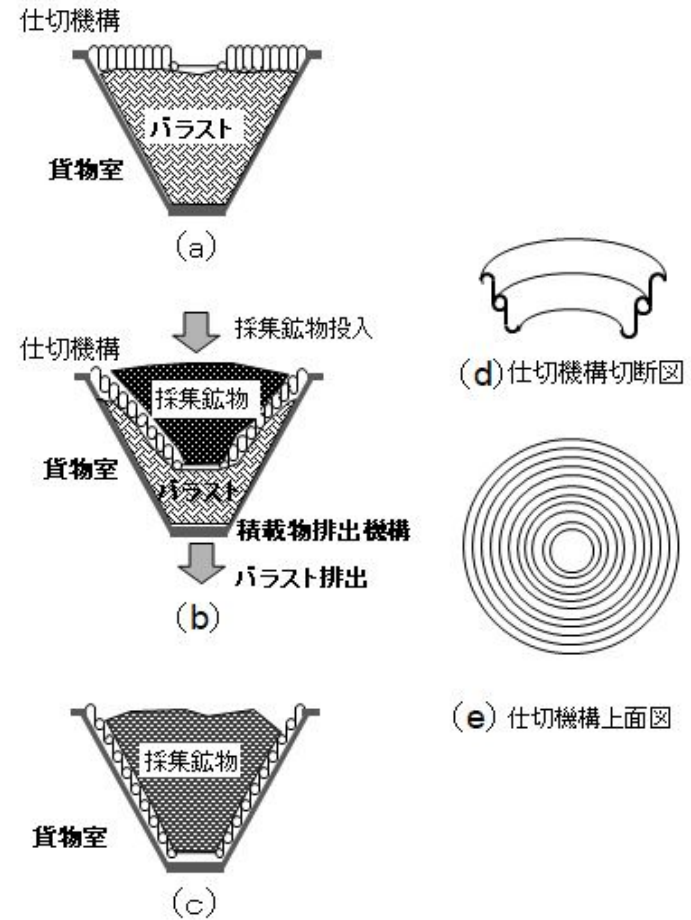


図5.3 深海クレーン鉱石積載

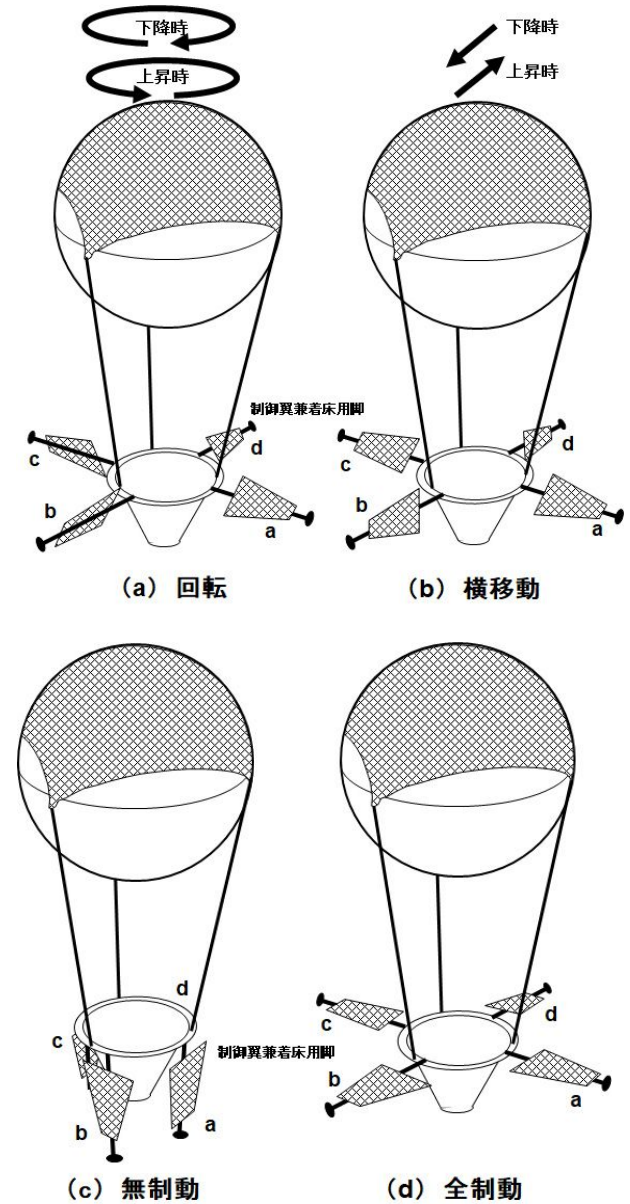


図5.4 深海クレーンの制御

この操作を行うためには海底より採集鉱物を揚収する場合に比べ次の点が異なる。

① 鉱物収集装置の海底への持ち込み

海底への降下時には貨物室に鉱物収集装置を吊下して降下する。位置精度および着床速度は採集鉱物揚収運用時と同様でよい。降下時は浮力タンクの浮力に対して上記条件を満足するように必要に応じて調整用のバラストを搭載し、着床直前に投棄して着床速度を調整する。鉱物収集装置を海底に設置した後は貨物室のバラストはなく、また負荷であった鉱物収集装置もないため浮力が過剰となり急速に上昇し貨物室の破損、洋上浮上時の応力による浮力タンク破損が予想される。この事態を防止するために上昇時に制動用パラシュートを開傘する。

② 鉱物収集装置の海底からの回収

海底に存在する鉱物収集装置を回収するためには、貨物室の下部に設置したフックに引っ掛ける必要がある、位置精度でミリメートルオーダー、相対速度で秒速数センチメートルオーダーの精密制御が求められる。鉱物収集装置をフックに引っ掛けたあとは貨物室のバラストを投棄して深海クレーンの比重を海水より軽くして浮上する。

鉱物収集装置の①および②の操作は採集鉱物の揚収と異なり精密な制御が必要とされるため、

貨物室の上部にバラストと採集鉬物を隔離する仕切機構の替わりに図5・5に示す精密制御用アタッチメントを設置する。図5・5に示すように電動の垂直スラスタ4基と水平スラスタ4基を設け電源として二次電池を付属させる。スラスタはフック上部に設けた撮像素子による映像で制御する。鉬物収集装置を海底に設置した後、浮上する場合は浮力過多となり貨物室及び海面浮上時に浮力タンクを応力過多で破損するのを防ぐ目的で減速用パラシュートを用意しておく傘させる。

図5・6は鉬物収集装置を海底に設置する場合の運用を示す図である。図5・7は鉬物収集装置を海底から回収する場合の運用を示す図である。海底からの回収は頻繁に行われる操作ではないので、精密制御用アタッチメントを貨物室の上部に設置して行う。精密制御用アタッチメントと鉬物収集装置の重量は深海クレーンの採集鉬物揚収能力より少ない必要がある。

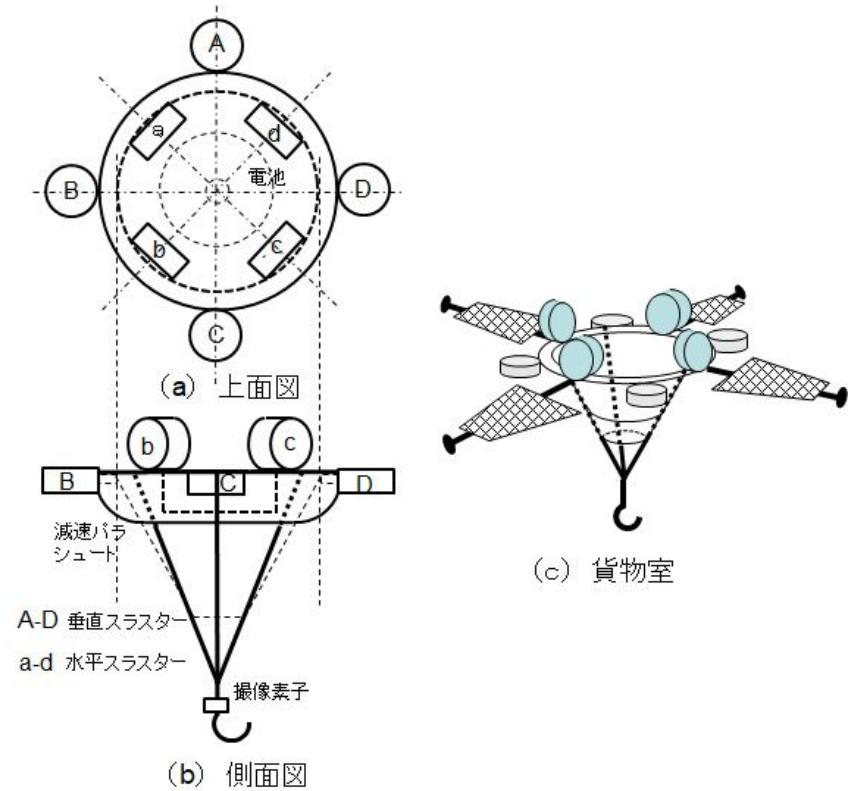


図5.5 精密制御用アタッチメント

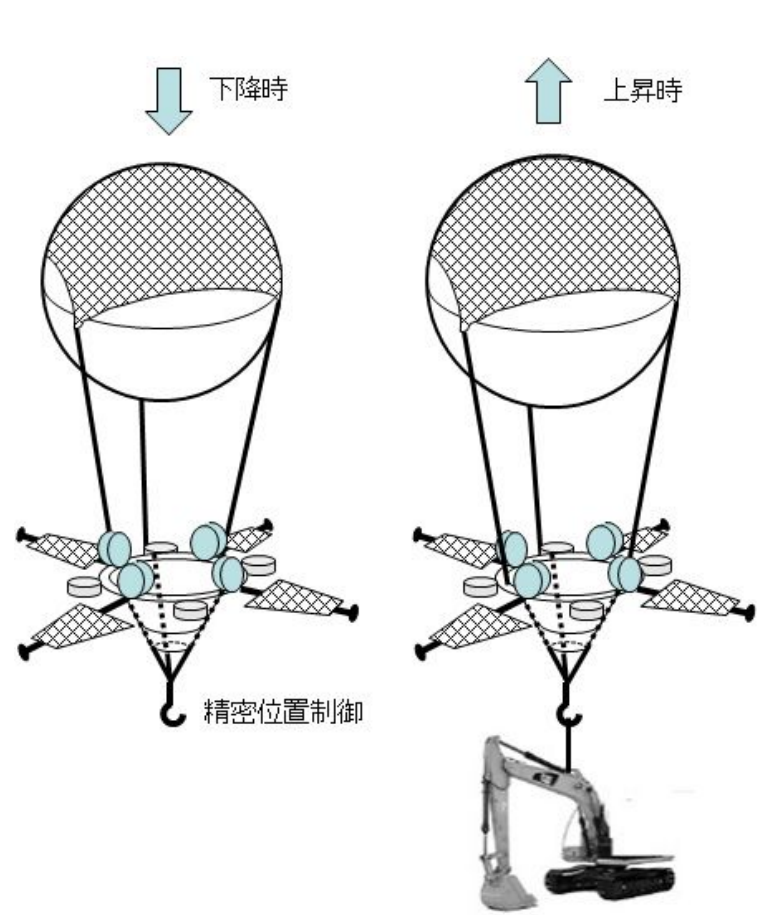


図5.7 鉍物収集装置の海底からの回収

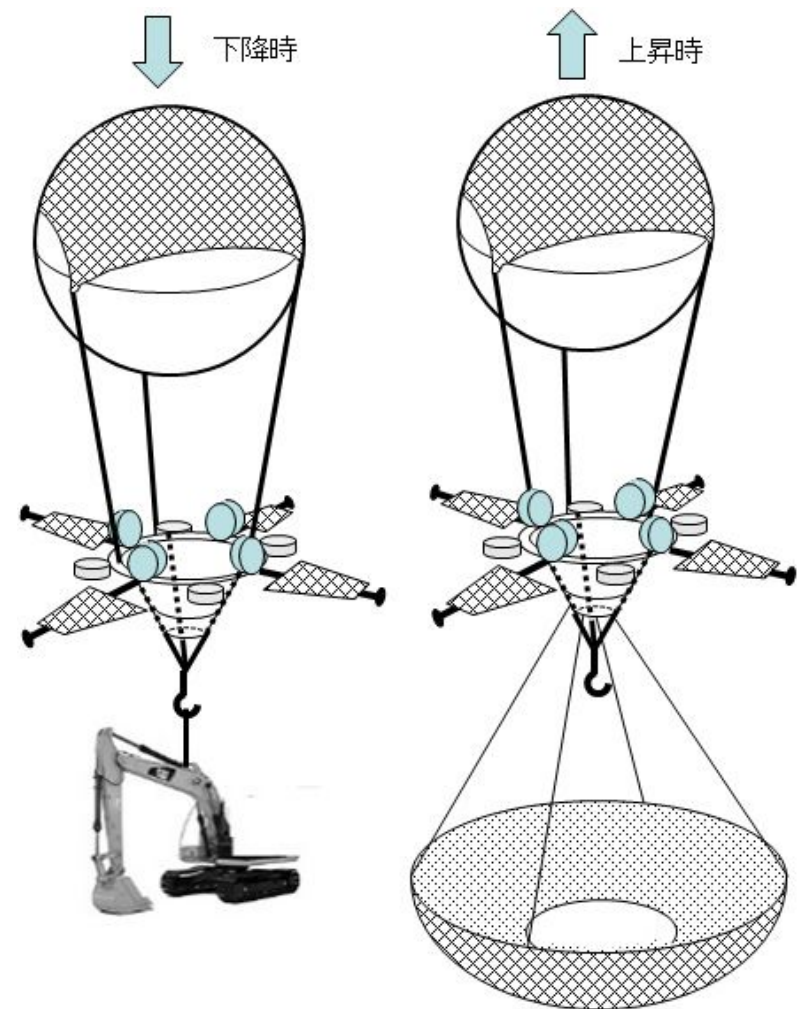


図5.6 鉍物収集装置の海底設置

1. 4 鉍物収集容器を用いた鉍物収集

これまで、深海クレーンの貨物室による鉍物揚収について述べてきたが、図5.7に示すような鉍物収集装置の海底からの揚収能力を利用すると、より柔軟に海底より鉍物を揚収できる。

図5.8は鉍物収集容器を導入して、この容器の中に鉍石を投入して鉍物収集装置と同様に深海クレーンに吊下して揚収することもできる。深海クレーンの貨物室による鉍物揚収に比べて貨物室に精密制御用アタッチメントを付加し、鉍物収集容器を追加する分、鉍石の揚収能力が少なくなり、さらに、深海クレーンと鉍物収集装置間の無線情報更新能力が必要になるなど欠点がある。一方、最大の利点は、浮力タンクによる揚収と鉍物収集装置による鉍物採掘を独立に非同期化して行える点で、海象の影響を受けやすい揚収作業を海象の良い期間に集中させて行い、海象の影響を受けない海底の掘削作業を定常的に継続実施することができる。

作業効率の向上方法には鉍物収集容器を用いる方法以外にも貨物室を付けた深海クレーンの数を増やして海底で待機させる方法、海底で収集した鉍物を短時間で搭載できるように集積しておく方法等が考えられ、実際の費用対効果を検討して選択すればよいことである。

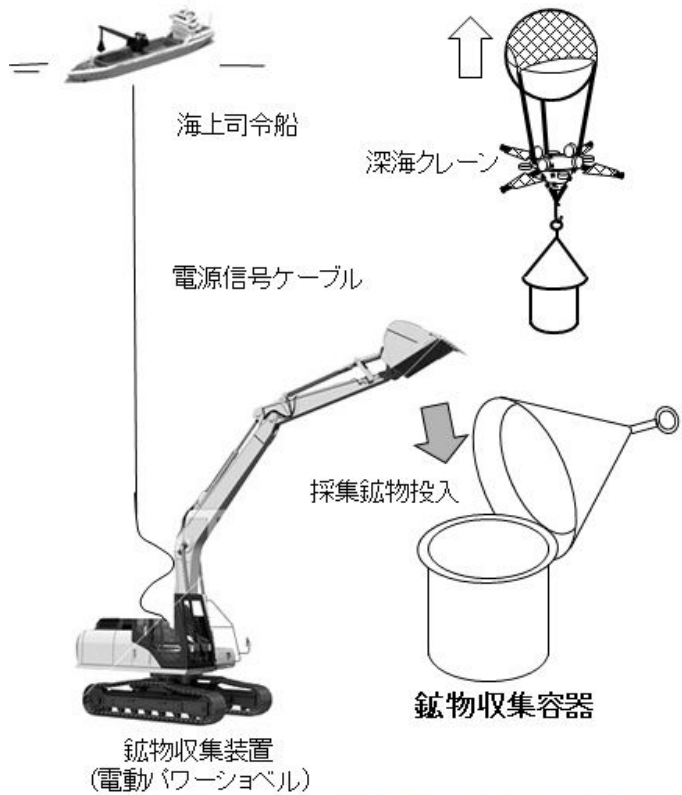


図5.8 鉍物収集容器への鉍石積載

2. 鉱物収集装置

深海クレーンでは揚鉱管による揚収を行わないため鉱石をスラリー化、細粒化する必要がなく、原姿に近い状態で揚収できる。そのため鉱物収集装置は地上での鉱物採掘の類推でそのノウハウを最大限適用できる。採掘自体は地上であれば鉱山採掘機器で行われ、各種の鉱脈状態に対応している。海底資源は次の種類があり採掘に際してそれぞれ異なった特徴がある。

- ① 海水熱水鉱床はマウンド状に岩塊として存在
- ② コバルトリッチクラストは海底に枕石状に存在
- ③ マンガン団塊は10数センチメートルの団塊として散乱
- ④ レアアース泥は海底泥の数メートルから10メートル下に数メートルから10メートルの層をなして存在する。

鉱山採掘機器はいずれも建機を大型化したものであり、建機、例えば図5・9に示すパワーショベルに各種アタッチメント（バケット、ブレーカー、回転破砕機、岩用首振りグラスパーなど）を付加すれば海底資源の異なった存在形態に対応できる。建機の駆動機構は油圧機構で動作していて駆動力は差圧であるので海底の高圧は差圧に関係ないので原理的には障害とならない。地上の建機は原動機で

油圧ポンプを動かしているので、これを電動機にすることにより水中での動作が可能である。すでにリモコンにより水中で動作する建機が実用化されている。図5・9はリモコン式水中建機の例であり洋上司令船より操作可能とするために電源信号ケーブルで接続し洋上司令船状の発電機から送電し、信号は光ケーブルで送る。海底は光が届かず泥を巻き上げて視界が保証されないので投光器と光学式撮像装置に加えて超音波式のビデオカメラ（例えば、<http://www.soundmetrics.com/>）を装備する。回収リングは深海クレーンにより海底より揚収回収する時に用いるものであり、円形のリングの周囲にLED発光体と音響トランスポンダを設け、深海クレーンを精密誘導して深海クレーンの引き上げフックが嵌合しやすいうように誘導する目的で用いる。

いにしえの金鉱掘りから最近のシェールガス・シェールオイルまで共通して言えることは、「低コストで連続した鉱脈を直接探りながら採掘範囲を拡大できる」ことが重要であり、シェールガス・シェールオイルの商業化にはこのことを実現するためにほとんどの技術開発が行われている。

リモコンの海中建機を用いた採掘は採掘状況を判断しながらノーコストで鉱脈方向に掘進めることができるため、シェールガス・シェールオイルからこれらの経済原則を学んだものといえよう。

3. 海上司令船

3. 1 船種の選定

洋上船舶としてどのような船種を必要とするかで参入コストと運用コストが大きく異なる。船種の選定は要求される機能で決定する。海底資源調査研究に用いる船には海底をマントルまで深く掘削調査する地球深部探査船「ちきゅう」(56752トン 600億円)、海底資源をボーリンウ調査する海洋資源調査船「はぐれい」(6283トン 137億円)が代表的である。これらは海底を採掘するための海洋掘削リグを搭載し、海象の変化の影響を避けるため船底のムーンプールと呼ばれる穴を通して採掘管を下ろす。海底の採掘点を一定位置に保つためにパウスタワー等の位置制御装置を装備する。さらに海底に各種機器を下ろすための大型クレーンを装備する。本書で述べる深海クレーンの運用では、海洋掘削リグ等の海中構造物を使用しないのでムーンプール及びパウスタワー等の一定位置制御機構を要しない。また、荷役方法を工夫して船上の小型クレーンで対応可能として699トンクラスガット鉱石運搬船(6億円)での運用を可能とする。

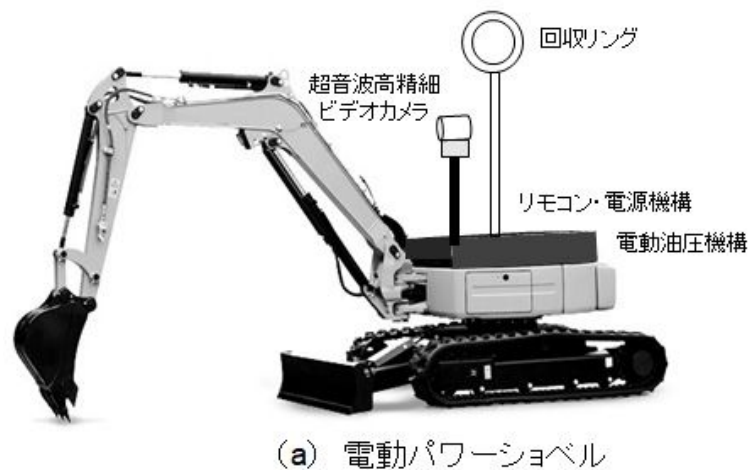


図5.9 鉱物収集装置

3. 2 荷役方法

ガットクレーン船は図5・10に示す砂利積載用の船倉が一区画ないし二区画設けられ船上に海底からの砂利引き上げ用に用いるクレーンを搭載した小型標準貨物船である。海底資源揚収を想定する運用想定海域は法律上「近海」に区分され、699トンクラス以上であることが必要である。積載量は1300トン程度まで可能である。洋上の採掘点までバラストを搭載して進出し、採集鉱石と交換して戻ってくる運用を考える。ガットクレーン船は備船費が月額1300万円程度と安い利点があるが、能力に合った荷役方法を含めた運用方法を設計する必要がある。

① 定点維持機能

バウスタターは装備していないので海流及び風によって流される方向に逆らってGPSで位置を測定して船舶位置を修正する。「みちびき」を利用することにより位置自体は高精度に把握できる。船舶の向きは自然任せであるが、海中構造物が無いので構わない。最終的にはGPSによる自動位置保持機能を装備することが人員への負荷削減のため必要である。

② 荷役

クレーン一つを用いて外洋で荷役を行うため風浪への対策が必要である。深海クレーンの浮力タンクは重量が30トン以上あるので、深海クレーン全体を揚収するのは避け、浮力タンクを海面に残し貨物室のみ揚収する。図5・10に荷役用機材を示す。浮力タンクより貨物室を分離して揚収するためには接続箇所が浮力タンクの中央の海面に来ることが望ましいので図5・10(a)のように浮力タンクを3分し中心に空隙ができるようにする(図5・11(f))。各浮力タンクには引き上げフック付きの(b)サブ浮力タンクを設け海面に浮上させるようにして、サブ浮力タンクについているフックにクレーンの先端を海面作業で引っ掛けて(図5・11(b))引き上げる。サブ浮力タンクにかかる荷重が大きくなると、主浮力タンクとの接続が自動的に外れ(図5・11(d))で図5・11(c)のように主浮力タンクが切り離されて海面に浮かぶ状態となる。さらに図5・11(d)のように海面より釣り上げて鉱石を回収する。バラストを積載した貨物室は同じく図5・11(d)のように海面に吊り下げ、図5・11(e)で示すように海面にある主浮力タンクのマーカー浮きと浮力タンク切り替えスイッチが海面で隣接するので海面作業で接続を行う。さらに貨物室を海面に対して降下させると、浮力源が主浮力タンクに切り替わって降下を開始する(図5・11(b)(a))。クレーンで釣り上げた貨物室は船上で荷役できる寸法重量となる。

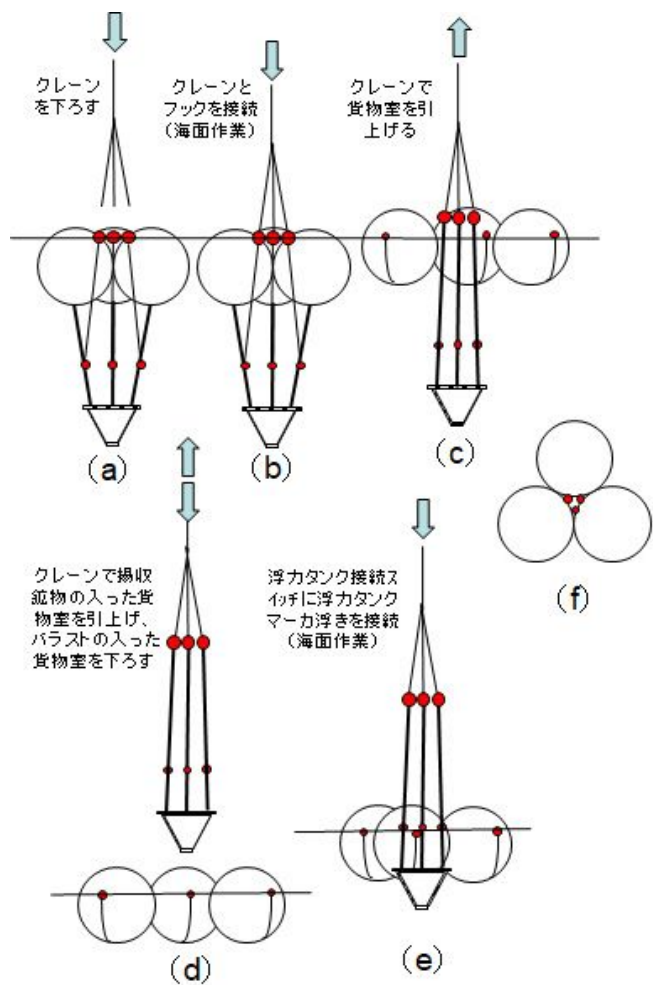


図5. 11 深海クレーンの荷役手順

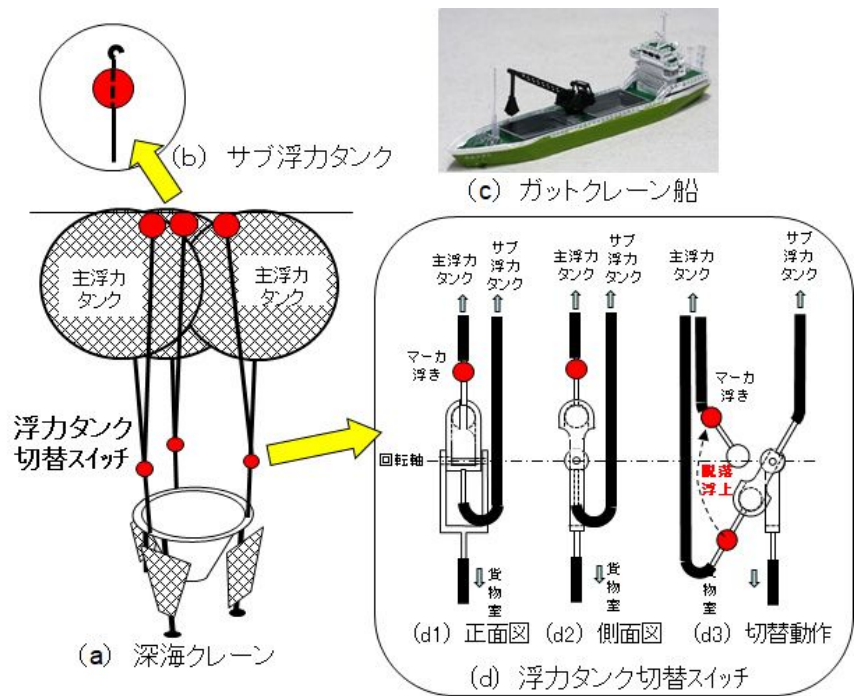


図5. 10 深海クレーンの荷役用機材

海面に浮上してきた深海クレーンの貨物室に対してクレーンの先端を引っ掛ける作業(図5・1 1(a)(b))と海底への降下に先駆けて貨物室を主浮力タンクに接続する作業(図5・11(e))は洋上で人手により行う必要がある。図5・10及び図5・11に示す工夫により、ガットクレーンによる荷役を可能とし、潜水作業も回避できたが、ガットクレーン船より小舟を下ろして行う作業であり、風浪の穏やかな時でないとは不可能である。荷役可能な日数は年間の50%と見積もっている。

海底では遠隔操作により電動建機を操作して採掘を行うが、貨物室に積み込むのに先立って、採掘、碎石、集積等の準備作業が必要である。海底での作業は海面での風浪の影響を受けないので、これら準備作業を風浪で海面での荷役作業ができないときの行い、海面での荷役ができるときに採集資源の揚収を集中的に行うようスケジュールする。

4. 運搬船

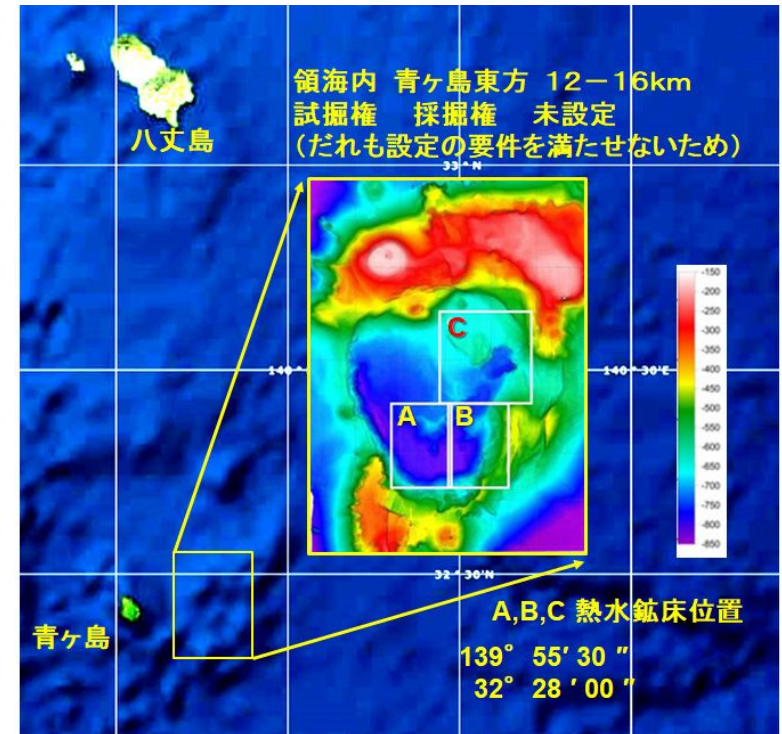
ガットクレーン船自体が碎石運搬船であるので、交代で採集海面上に遷移すれば運搬船として機能させることができる。

5. 標識

海面には位置目標が無く、海中ではGPSは使用できない。また暗黒の世界で視界も得られない。このような状況で鉱床位置を標定するのは極めて困難であるが、対象海域ではGPSが高精度で得られるのでGPSの鉛直線直下の海底に音響標識を設置して位置基準とする。図5・12は東青ヶ島カルデラ内の熱水鉱床の調査結果である。A区域の中央火口丘近辺に限定しても2km四方の領域がある。暗黒で視界が得られない状況で正確に採掘位置に深海クレーンを昇降させるのは極めて難しい。このため一定緯度経度ごとに音響標識を海底に設置する。測量学における基準点に相当するものであり、音響標識には正確な緯度経度を持たせる。正確な緯度経度は海上ではGPSを用いて数センチメートル誤差で得られるので、この測量点の直下に音響標識を慣性誘導で設置すれば高精度音響標識とすることができる。図5・13(c)音響標識設置法に示す。海上司令船に小型の位置標識船を積載しておき、正確な緯度経度を測定して、音響位置標識の慣性航法装置を初期化した後、水中を自由落下させて制御翼を制御して鉛直直下の位置に誘導着床させる。

音響標識には個別の認識番号を付与して着床後は個別の認識番号が一致した問合せの時のみ応答するトランスポンダとして機能させる。リッスンモードで動作する場合は消費電力を下げ長期間海底で電池で作動できるようにする。図5. 13 (a) は音響標識原の例であるが、一定距離ごとに緯度経度座標と認識番号を有するトランスポンダ（音響標識）群である。

この音響位置標識を用いて深海クレーンを海底の所定位置と海上司令船の間で往復させる。なお、慣性誘導による方法は、海底着床までの時間が長くなると精度が劣化するので、標識船を挟んで東西・南北の2方向に一定距離を隔てた音響発振船を配置して音響誘導により標識船の鉛直直下点に誘導する方法もある。



伊豆諸島青ヶ島の東に海底熱水鉱床を発見 浅田昭 東京大学 平成27年8月6日

図5. 12 東青ヶ島カルデラ内に熱水鉱床

第6章 実現するための技術

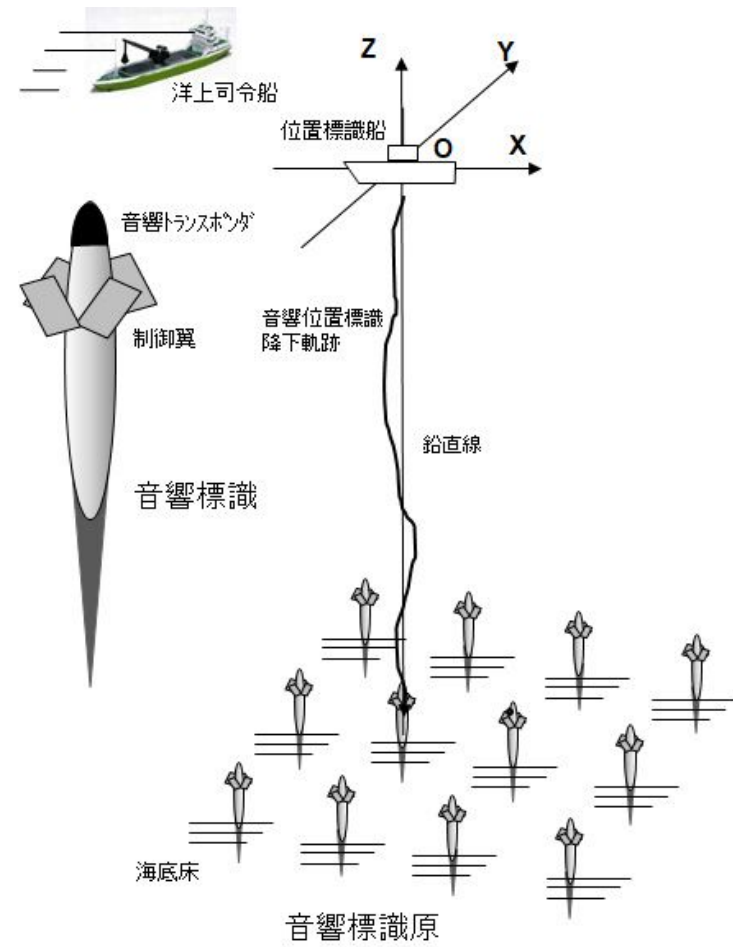


図5.13 海底標識の設置

第5章のシステムを実現するために、以下に紹介する他分野の実績ある最先端技術を利用できる。
炭素繊維樹脂構造物

深海クレーンは浮力を最大限に発生するために浮力タンクをはじめとする構造物を軽量化する必要がある。構造体として軽量強靱（比重1.8 鋼鉄強度の2倍）な炭素繊維樹脂を用いる。炭素繊維樹脂は高温で焼き固める工程がありオートクレーブという窯が必要であるが、ボーイング787胴体用のオートクレーブは直径9 m、長さ30 mの大きさで実用化されている。（図6・1 炭素繊維樹脂構造物の製造）

内外圧が等しく水中を移動する深海クレーンで最大応力が働くのは鉱石満載時に貨物室の周辺接続部であるが、炭素繊維樹脂の制限値に余裕をもって収められる。また、深海クレーンの諸元は上記オートクレーブの寸法に収まるので、深海クレーンの炭素繊維樹脂構造物の実現は既存技術と設備で対応できる。



川崎重工

(a) 航空機胴体の製造



川崎重工

(b) 最大級オートクレーブ装置

図6.1 炭素繊維構造物の製造

制御理論

深海クレーンは自律的に海上司令船と海底の間を往復しなくてはならない。気球状の形状を有し、上方に球状の浮力タンクがあり、下方に絞った円錐台状の貨物室を浮力タンクより索で吊下する。貨物室に制御兼制動翼があり、形状が変化する特殊な制御対象である。海底では鉤物収集装置にランデブーする必要があり相対速度が秒速数 cm 以下、位置精度 1cm 以下の精度を実現する必要がある。

制御系としては難易度が高いので、モデル化とシミュレーションにより開発を進めるが、

近年頻繁に実用化されているドローンに用いられている精密3次元位置制御と3次元姿勢制御のほか

(クオタニオン精密誘導) 最新の制御理論を深海クレーンに適用する。(図6.2 制御理論の応用) 水中の場合電波が通らないのでGPSは使えず、慣性航法装置と音響トランスポンダで位置と姿勢を求めなくてはならない。



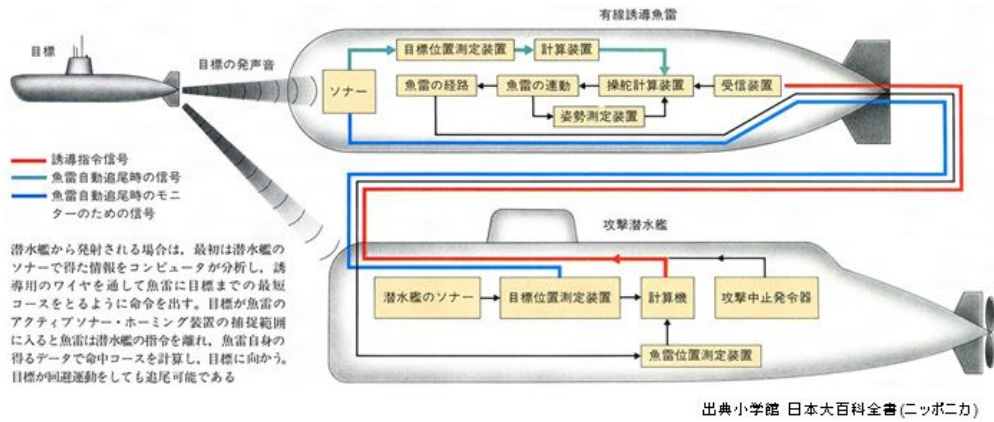
(a) ドローン

DHL

図6.2 制御理論の応用

水中光ファイバ通信

水中航走体を有線で制御する実例として潜水艦発射の魚雷がある。魚雷は深海クレーンよりはるかに遠距離の数十kmをはるかに高速の時速数十km/s(100m)で航走する。魚雷は信号線を吐出しながら目標に近づき、目標の音響情報を潜水艦にもたらし、潜水艦からは魚雷への制御信号を送る。光ファイバの例としては、陸上自衛隊の96式多目的誘導弾がある。光ファイバを吐出しながら飛翔し、ミサイルが捉えた赤外線画像をミサイルから指揮車に光ファイバで伝送して誘導する方式で、有効射程が10km以上である。このミサイルの場合、空中飛翔ではあるが、ミサイルは海底クレーンよりはるかに高速であること、さらに耐火炎能力が必要であるなど厳しい制約がある。深海クレーンに要求される光ファイバ通信は繰り返し使用することがあるが仕様のにははるかに条件が緩い(図6.3 光ファイバ有線誘導の実例)。



(a) 有線魚雷誘導システム

図6.3 光ファイバ有線誘導の実例

音響誘導

音響誘導は音の発生源の方向を探知して、音源の方向に向けて魚雷などの水中航走体を誘導する技術であり、航空機や水上艦が敵潜水艦に発射する魚雷に長年実用化されている(図6.5 音響誘導の実例)。深海クレーンでは海底基地と洋上司令船の間で往復させるためには深海クレーンから目標位置を知る必要がある。海中では光が届かないため、中々遠距離で目標方向を知るためには音波に依存する。海中は温度分布が層状に異なるため音波が屈折するので、水平方向には音波が届かないことがあり、探知に失敗することがある。図6.5(b)は魚雷の音響センサアレイの例であるが、格子状の音響センサ素子が魚雷の先頭部に設置されており、各センサ素子への音波の伝搬時間差により音源の方向を探知するものである。深海クレーンの音響誘導は音響魚雷に比べ次の点で有利である。

- ① 深海クレーンの移動が上下なので音波の屈折が少なく音響伝搬が確実である。
- ② 深海クレーンは魚雷より5〜10倍直径が大きく音波の入射方向による音波到着の時間差が大きく方向探知が容易となり、音響センサアレイを単純化できる。
- ③ 探知側より音波を送信し応答から距離を正確に計測できる(トランスポンダ)。



(a) 光ファイバ赤外線画像誘導96式多目的誘導弾

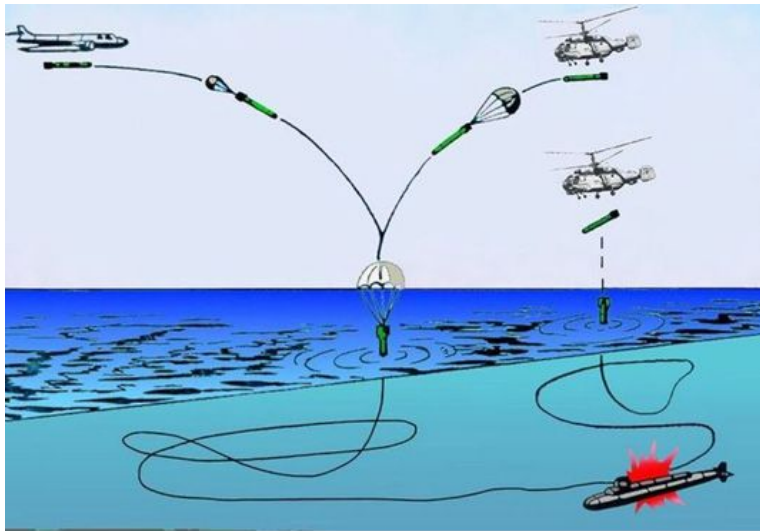
図6.4 光ファイバ有線誘導の実例

④ 十数 m より近傍では光学誘導に切り替えるため距離精度要求を緩和できる。

音響誘導は軍用の音響誘導より緩和した性能要求で実現できる。

光学誘導

海中の場合、光の透過距離が数 10 m を超えることは想定すべきではなく、海底で泥が舞い上がった場合は数 m も見通せないと想定しておくべきである。画像により目標を追尾(画像ホーミング)するミサイルはある。目標とセンサの相対速度は画像ホーミングのほうが深海クレーンよりはるかに大きい、要求される精度は深海クレーンの方がセンチメートルオーダーで高い。深海クレーンでは近接する目標が敵対的な存在ではないので、探知側より信号(音波・光)を送信してその応答を得ることができる。



(a) 音響誘導魚雷の音源追尾例



Головной отсек УГСТ, IMDS-2005, г.Санкт-Петербург

(b) 音響魚雷の音響センサー

図6.5 音響誘導の実例

深海用機器

高圧環境下でポンプ、モーター、弁、電子機器等を作動する必要がある。しんかい6500構造(図2・1)に示す耐圧殻内以外の部分は高水圧に晒されて機能している。機器を油浸、レジン固化等により耐圧構造にしたうえ、加圧水槽で試験することができる。

加圧装置は食品産業でたんぱく質分解等に100MPaレベルまでの装置が市販されているほか、燃料電池車向けの水素ガスタンク試験装置用試験装置の例がある

第7章 開発手順

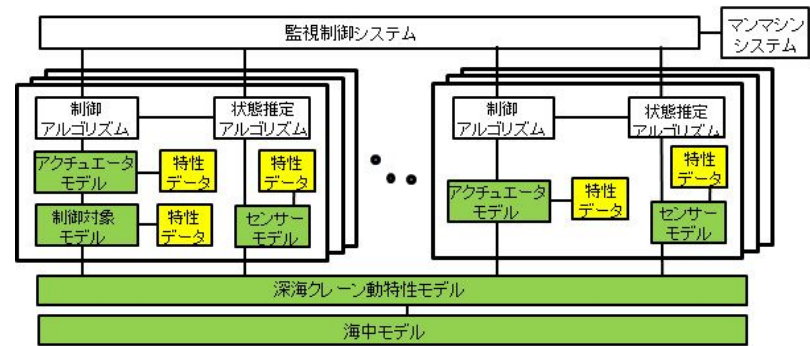
設計および評価シミュレータ開発

深海クレーンは海面と海底の特定位置の間を自由に航走するが、内外圧が等しく応力が少なく、低速であるので乱流などの問題を回避している。さらに形状と特性が単純であるため機械的・材料的制約が限られている。一方、浮力タンクが3ヶあり貨物室が吊下されている構造であるため制御状態によって形状が変化するので制御が難しくなる特徴があるが、低コスト化のため選択である。このようなシステムの場合、実際にシステムを構築するのに先立って計算機上で各構成部分の機能を数式モデルで模擬して動作を確認することが必須である。この段階は数学的・物理的にレベルの高い少数の技術者で行うことができ、コストの積み上がりは少ない利点がある。海底資源揚収システムを構成する各プログラムモジュールは図7・1(a)シミュレーションシステムの構成となるが実機完成に伴い、図7・1(b)実機システムに移行する。

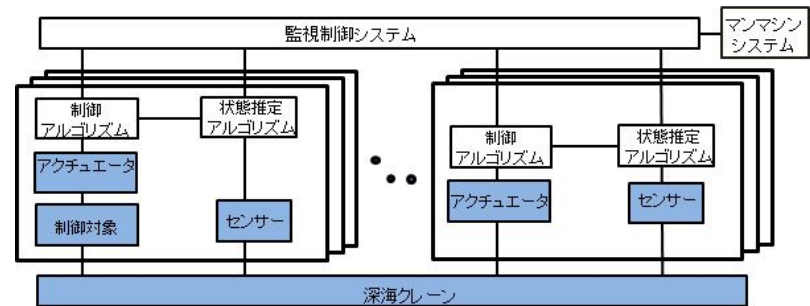
項目/年次	スケール	深度/方法 他	0	1	2	3
設計及び評価シミュレータ開発		PCソフト	■	■		
加圧試験		0-55MPa 加圧装置	■	■		
位置標識	1/1	500-1000m		■	■	
資源回収装置運転訓練装置		PCソフト			■	■
縮小サンプル収集器設計製作試験	1/4	500-1000m		■	■	
浅水槽試験	1/4	5m プール			■	
探査申請					■	
集中サンプル調査	1/4					■
試掘権申請						■
貨物室仕切機構		3Dプリンタ		■	■	
実機製作試験	1/1	500-1000m				■
開発フェーズ			①	①	②	

200M¥ 800M¥

図7.1 開発工程



(a) シミュレーションシステム



(a) 実機システム

図7.2 シミュレータによるシステム開発

監視制御システム

海底資源揚収システムの全体を統括し監視制御する機能を有し、ノートPC上に構築する。この部分は最終的な実システムと同一である。

マンマシンシステム

人間が海底資源揚収システムを監視制御するためのマンマシンインターフェイスをPC液晶画面上に実現する。この部分は最終的な実機システムと同一である。

制御アルゴリズム

海底資源揚収システムを構成する制御装置（バラスト制御装置、姿勢・航法制御装置、ドッキング制御措置など）の制御アルゴリズムをプログラム化したものである。開発の初期段階では、アクチュエータおよび制御対象をモデル化したプログラムに対して機能試験を行い。機能確認後、実機のアクチュエータ、制御対象に置き換える。

アクチュエータモデル

推進装置、駆動モータなど開発初期段階では数式モデルとし、実機試験による特性取得を行いモデル精度を向上させる。

制御対象モデル

初期段階では数式モデルとして試験し、制御対象の特性取得によりモデル精度を向上させ、最終的に実機に置き換える。

光学センサ・航法試験

光学マーカーを画像センサで取得して自己の位置と位置を知り深海クレーンを制御するので計算機上でシミュレータによりアルゴリズム開発が完了する。

音響センサ・航法試験

音響素子は深海クレーン、資源回収装置、音響標識に位置を離して設置される。音波の到着時間差で到来方向を知り、トランスポンダの応答時間で距離を知る。初期段階では数式モデルで機能確認する。

ドッキング航法試験

ランデブーは光学マーカーを画像センサで取得して自己の位置を知り深海クレーンを精密制御する。計算機上でシミュレータによりアルゴリズム開発が完了する。

状態推定アルゴリズム

取得したセンサデータ（画像センサ・音響センサ・慣性航法センサ）から深海クレーンの位置・速度・

姿勢推定などの状態値を推定するアルゴリズム。精度検証後最終的に実機で用いる。

深海クレーン動特性モデル

深海クレーンの水中動特性を数式で模擬する。

海中モデル

水中抵抗、音響伝搬、視程と画像センサ映像を数式模擬する。

加圧試験

耐圧水槽は信号線電源線の外部との貫通ができないので、テスト用プログラムを走らせるPCと電源（二次電池）を高圧水中で動作させる。この部分では以降、耐圧評価の共通のテストベッドとなる。

電子機器、をテストベッドに接続して高圧水中で耐久テストを行う。

位置標識

海底資源の概略位置は緯度経度で与えられている。海底には電波が届かないため海底ではGPSは使えない。正確な位置座標が判明している地点の直下に音響標識を誘導して着床させる。慣性誘導または音

響信号による誘導制御であり、設計データによりモデルを構築し評価シミュレーションを行ったうえで実機開発と検証試験を行う。

資源回収装置運転訓練装置

資源回収装置は電動パワーシヨベルであるので洋上司令船よりリモコンで操作し、採掘と深海クレーンへの搭載を行う。視界は投光器とビデオカメラが使用可能とは保証されず、精細度が劣る超音波ビデオカメラに頼らざるを得ない場合を想定しなくてはならない。深海クレーンは海底に着床しており、貨物室の上方に浮上用の浮力タンクがあり索で連接されている。貨物室の上方に鉱物を投入するに際しては適切な大きさに破碎しておく必要がある。破碎済みの鉱石を浮力タンクと連結索を破損しないように搭載しなくてはならない。以上の操作は事前に訓練習熟しておく必要がある、訓練用装置を準備する。

縮小サンプル収集器設計製作試験

具体的に地点を決めて採掘するためには経済産業大臣から試掘権、採掘権を取得する必要がある。採掘権に先立ち試掘権を取得することになるが、それに先立ち経済産業大臣の認める方法(今回の場合は集中サンプル)で探査を実施できなくてはならない。この探査を行うために、深海クレーンの1/4縮小モデルを設計製作試験して海底サンプル収集器として利用する。

浅水槽試験

利用しやすい高飛込みプールでスケールモデルを用いて縮小モデルの深海クレーンの水中特性評価を行う。深度変化による水圧変化は大きい、水の物理定数には顕著な変化はない。水中航走特性に関しては慣性誘導、音響誘導、光学誘導、航走試験は深海でなくとも、基本的に全アルゴリズムの検証が可能である。

貨物室仕切機構

重力を利用してバラストと採集鉱石を交換する機構であり、3Dプリンタを用いて縮小モデルによる動作検証を実施する。

収支シミュレーション

海底鉱物資源には海底熱水鉱床、コバルトリッチクラスト、マンガン団塊、レアアース泥があるが、本書の方式はそのすべてに共通的に適用可能であるが、第4章のシェールガス・シェールオイルの教訓で得られた「低コストでうまいものつまみ食いから始めて蚕食の範囲を周囲に広げる」という戦略を実践する。表7.1にコストシミュレーションを示す。青ヶ島の海底熱水鉱床がつまみ食いすべきうまいものに相当する。青ヶ島の熱水鉱床以外は全て参考用の試算である。深海クレーンには次の仕様設定をした。サイズは本書の記述の通りでガソリンを使用して揚収能力10トンとした。深海クレーンの沈降・浮上速度を毎秒1mとした。この速度であれば力学的にストレスを生じないとの前提によるもので、レアアース泥の場合は深海であるということでも毎秒2mとして試算した。深海クレーンのサイズは初期参入時に低コストで参入障壁とならないように設定したもので、レアアース泥では深海クレーンの揚収能力を1.5倍の15トンとして収益性を改善した。

表7.1 コストシミュレーション

鉱床区分	海底深度	揚収時間	揚収機数	揚収回数	揚収日量	揚収可能日数	鉱石単価	鉱石売上	備船費	人件費	経費	減価償却	コスト計	収支
	m	hr	機	回/日	ト/日	日/年	千円/ト	千円/年	千円/年	千円/年	千円/年	千円/年	千円/年	千円/年
海底熱水鉱床(沖繩)	1000	1.14	2	42.1	400.4	150	263.0	7,898	384	200	50	100	734	7,164
海底熱水鉱床(青ヶ島)	750	1.10	2	43.5	413.0	150	400.0	12,389	384	200	50	100	734	11,655
コバルトリッチクラスト	2000	1.28	2	37.6	356.9	150	127.0	3,399	384	200	50	100	734	2,665
マンガン団塊	5000	1.69	2	28.3	269.1	150	123.0	2,483	384	200	50	100	734	1,749
レアアース泥	6500	1.90	4	50.5	479.3	150	37.0	1,330	384	200	50	150	784	546
												数量		
海底熱水鉱床(沖繩)	263.0									50	千円	2	100	
海底熱水鉱床(青ヶ島)	400.0									10	千円	2	20	
コバルトリッチクラスト	127.0									20	千円	10	200	
マンガン団塊	123.0									30	千円	2	60	
レアアース泥(酸化物)	37.0									20	千円	2	40	
										20	千円	2	40	
備船費	16.0			千円/月								設備合計	460	
荷役時間(海面)	0.5			hr						500	千円		500	
海底積載	0.5			hr						200	千円		200	
深海クレーン速度	2.0			m/hr										
揚収可能日数	150.0													
人件費 10千円/年	200.0													
精錬経費率	50.0			%										

海底資源揚収システム(改訂版)

マッコウクジラに学ぶ技術障壁突破

発行日 平成30年8月5日

著者 小平高敏

発行者 小平高敏

発行所 Lakshmi

東京都武蔵野市境南町 3-14-23

TEL 0422-32-7632

tkodaira@deepseacrane.com