

6 新たな海洋資源開発へ向けて

6.1 メタンハイドレート

メタンと水からなるメタンハイドレート (MH: Methane Hydrate) が、大水深域の海底下や永久凍土地域の地層内に存在することが、近年の研究でわかってきた。非在来型の天然ガス資源の一つである MH は、日本周辺海域にも相当量の賦存が見込まれており、MH からのガス生産技術が確立され、商業化が実現すれば、日本のエネルギー安定供給に貢献する新たな国産エネルギー資源になるものとして期待されている。

6.1.1 メタンハイドレート結晶の構造と物性

(1) 水・メタンの混合物の相変化と MH

メタンなどの分子径の小さいガスと水の混合物は、大気温度・大気圧力下では気液 2 相の平衡状態 (ガスの一部が水に溶解して、ガスと水に分離した状態) で存在するが、メタンと水を容器に仕込んだ後に混合物を加圧・冷却していくとガスの包接化合物 (clathrate compound、ハイドレートと呼ばれる固体結晶) ができる。図 6.1.1 は、水リッチの場合 (水量がメタン量より十分に多い場合) に、メタンと水の混合物がどのような相状態で存在するのかを説明する状態図 (P-T 図) である。圧力温度条件の変化に対応して、I (氷: 固相)、H (ハイドレート: 固相)、Lw (水相)、V (気相) の四つの相が現れる。図の Q_1 で示された点が 4 重点で、圧力約 2.6MPa、温度は 273.1K (0.1°C) である。

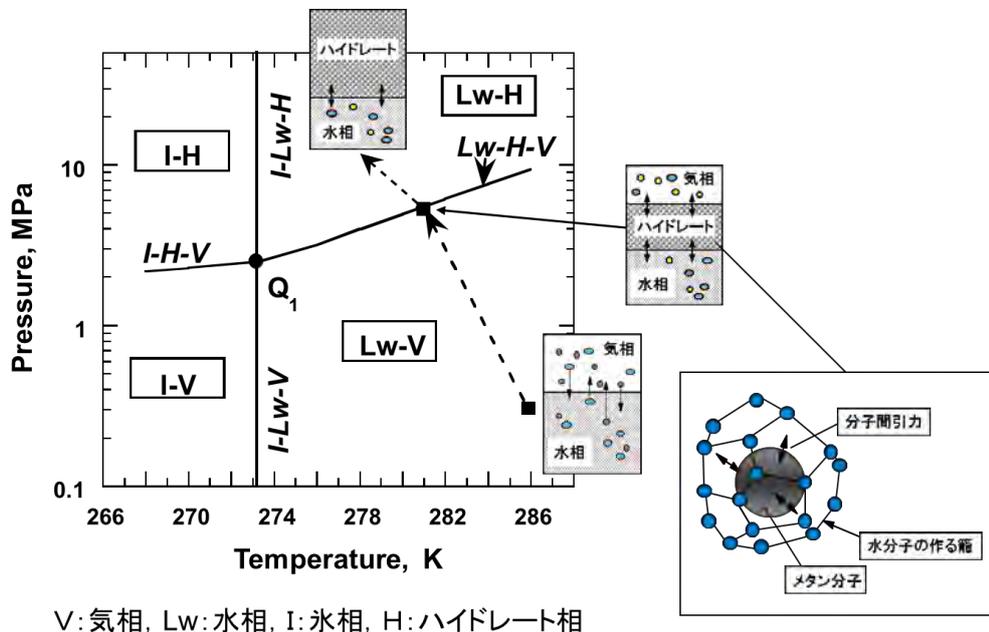


図 6.1.1 メタンと水混合物の相変化 (水リッチの場合)

図中の破線で示すように、気液 2 相の平衡状態 (Lw-V) にある混合物を加圧冷却していくと、相境界線の圧力・温度条件に達すると MH が生成し、Lw-H-V の 3 相平衡状態になる。さらに加圧冷却を続けていくと、メタンが全て MH の生成に消費されるので、残った

水と MH の 2 相状態 (図の Lw-H で示された領域) になる。このように、MH は決して特殊な物質ではなく、単純な水とメタンの混合物に他ならない。メタンと水が存在している高圧及び一定の温度条件下では、必ず MH が存在している。

(2) MH の外観と特徴

天然に存在する水は、 H_2O という一つの分子の状態では自然界に存在していることは非常にまれであり、水素結合によって何個かの水分子が結合した状態 (クラスター構造) で存在している (図 6.1.2)。水を冷やしていくと、この水素結合が強くなりクラスター構造は籠状構造へと成長する。このとき、水の中にメタンが溶解していなければ、単なる氷の結晶になる。しかし、メタンが飽和状態で水に溶解していると、図 6.1.3 に示したように、水分子の作る籠状構造の空孔 (隙間) にメタン分子が分子間力で捕獲され、熱力学的に最も安定した状態の MH 結晶ができる。

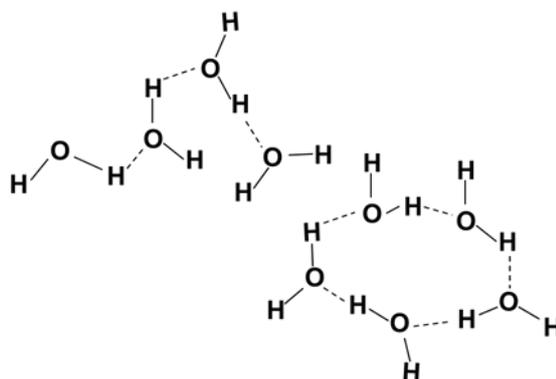


図 6.1.2 クラスター構造で存在する天然の水

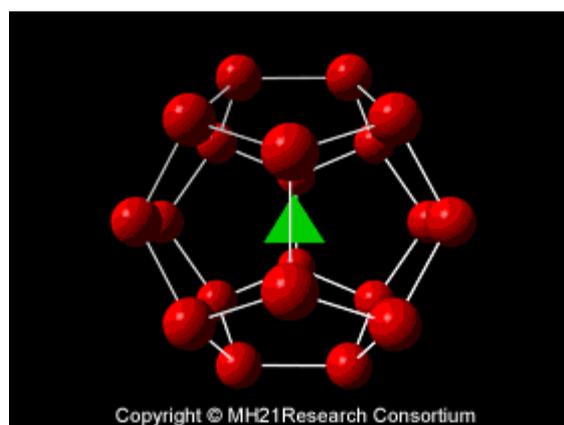


図 6.1.3 MH の構造模型図

(出典 : MH21 研究コンソーシアムウェブサイト)

第 6 章 新たな海洋資源開発へ向けて

MH は低温高圧の環境で安定に存在し、外観は氷に似ている。低温高圧下では安定であるが、圧力を下げるか、温度を上げると、水とメタンに分解する。図 6.1.4 に示すように、実験室の高圧セルで作った MH を大気圧下に取り出して着火すると勢いよく燃える。これは、大気圧下（常温下）に置かれた状態は、MH が安定して存在できない条件下であるため分解し、ハイドレートの結晶構造が崩れて放出されたメタンが燃焼する現象である。氷が燃えているような印象から、MH は「燃える氷」と呼ばれることもある。



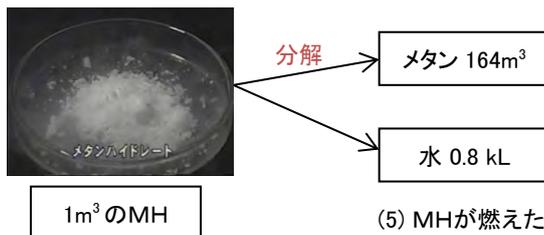
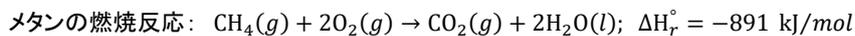
(1) 実験室で水とメタンから作った人工のMH粉末をシャーレに注ぐと、MHは分解し始める

(2) 火を近づける

(3) MH分解により発生したメタンガスに着火し、燃え始める



(4) MHから分解するメタンの燃焼反応が継続し、徐々にMH粉末は消失していく



(5) MHが燃えた後には純水だけが残る

図 6.1.4 実験室で作成した MH とその分解による燃焼

(出典：サイエンスチャンネル)

6.1.2 自然界に賦存するメタンハイドレートの資源ポテンシャル

(1) 自然界に賦存する MH の安定領域と賦存形態

自然界に低温高圧の状態ではメタンと水が存在する場所では、MH は熱力学的に安定に賦存する。このような場所として代表的なのは、海底下の地層中である。例えば、水深が約 950m の海域における温度圧力条件（海表面からの温度と深度との関係）を図 6.1.5 に示す。

第 6 章 新たな海洋資源開発へ向けて

図中の青色の破線は海水中および海底下地層の温度を示すが、海水の温度は海底面近くでは $2\sim 5^{\circ}\text{C}$ ($275\sim 278\text{ K}$) と低くなる。その後、海底面下の地層中では、地球内部からの伝熱の影響を受けて温度は上昇していく。一方、海中および海底下地層の圧力は、深度が深くなるにつれて高くなる。水中圧、すなわち水頭分だけ圧力が高くなるから、例えば深度 $1,200\text{ m}$ ではおよそ 12 MPa の圧力になる。図中の赤線は、図 6.1.1 の圧力-温度図における MH の平衡圧力曲線 ($L_w\text{-H-V}$ 線) を深度に換算した $L_w\text{-H-V}$ の相境界線であり、相境界線より低温側の領域で MH は安定に存在できる。つまり、相境界線と温度曲線が交差する深度範囲に MH が熱力学的に安定に存在できる領域があり、この領域をハイドレート安定領域 (hydrate stability zone) と呼ぶ。海底面下の水深 $1,000\text{m}$ 程度の海域では、海底面下 300m までの間 (斜線ハッチングで示した深度範囲) の地層内に MH の安定領域がある。安定領域の下限深度は BGHS (Base of Gas Hydrate Stability : ハイドレートの安定領域基底) と呼ばれており、BGHS より深い地層中では、圧力が高くてもハイドレートは存在せずに、ガスと水の状態になる。水深が深くなるほど BGHS は深くなり、MH の安定領域の幅は厚くなる。

MH は一般に「砂層型」、「表層型」の二種類の呼び名で紹介されることが多いが、図 6.1.6 に示すように、自然界に存在する MH は、海底面近傍 MH (海底面上およびその近傍の地層中に存在する MH)、泥層内 MH (泥層に貫入する形で存在する MH)、砂質層孔隙充填型 MH (在来型の石油や天然ガスと同様に、砂の粒子の間の孔隙を埋めるような形で存在している MH) 等の賦存形態として確認されている。

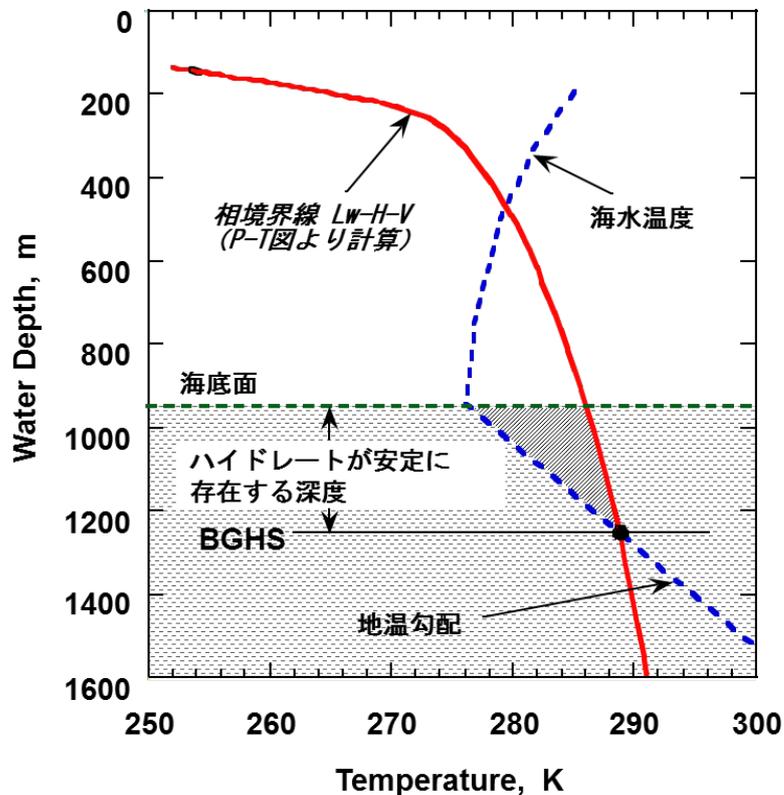


図 6.1.5 海域における MH の安定領域

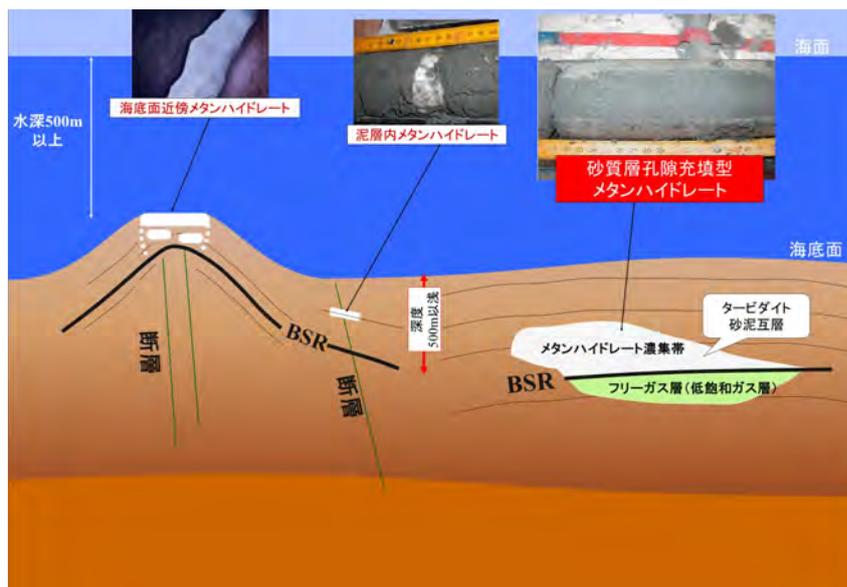


図 6.1.6 海域における MH の賦存形態

(出典：MH21 研究コンソーシアムウェブサイト)

(2) MH の資源としてのポテンシャルと位置付け

MH の賦存が確認あるいは推定されている場所を図 6.1.7 に示す。日本近海も含め、世界中にその存在が報告されている。その量については、ボーリング調査などによってある程度分かってきた。例えば、Milkov らは世界の海底下にメタン量 1,000～5,000 兆 m^3 を含む MH があると推定している。もし、この数値の 10% が採取可能になれば、100～500 兆 m^3 のメタン供給量となり、IEA が報告している 2013 年末の在来型天然ガスの究極可採資源量 (ultimate recoverable resources) 465 兆 m^3 に匹敵する資源量になる。2016 年現在の世界の天然ガス消費量は約 3 兆 m^3 であるから、MH は資源として大きなポテンシャルを有している。



図 6.1.7 MH の賦存が確認あるいは推定されている場所

(出典：MH21 研究コンソーシアムウェブサイト)

第 6 章 新たな海洋資源開発へ向けて

このように MH の資源ポテンシャルは膨大と推定されているが、まだ商業的な生産技術が確立されていないため、他の天然ガス資源とは異なり可採資源量には含まれない。在来型天然ガスは、井戸を仕上げるだけでガスは自噴してくるので、低コストでの開発ができる。コールベッドメタン、タイトサンドガス、シェールガスなどの非在来型天然ガス資源の開発には水圧破碎法などの技術を要するが、地下からそれらを回収する技術は既に存在する。実際に米国の国内天然ガス生産量の約半分は、これらの非在来型天然ガスが供給している。

一方、海域に存在する MH に対しては、その生産手法自体が確立していない。現在開発研究の主たる対象になっているのは砂質層孔隙充填型 MH であるが、地層の孔隙を埋める形で MH は固体として存在しているので、MH 賦存層（以下、MH 層）からメタンを生産するためには何らかのエネルギーを加えて地層内の MH を分解させ、その分解ガスを井戸から回収するというプロセス（MH 分解採取法）が必要になる。開発コストも割高になる。MH は、シェールガスなどと同じ非在来型資源に分類されるが、可採資源量には含まれず、想定資源（prospective resource）と位置付けられる。

6.1.3 メタンハイドレートの探査と資源量評価技術

MH 資源量の推定には、容積法が用いられる。資源量評価の流れを図 6.1.8 に示すように、まずは、広域物理探査を実施して、海底下の地質構造を推定する。その後に MH の賦存が期待される海域で 3 次元物理探査と掘削調査を行うことで、MH 濃集帯（methane hydrate-concentrated zone）が検知され、掘削地点での検層・コア分析結果から地層の孔隙率や MH 飽和率等の詳細な地下情報が把握される。その情報を 3 次元物理探査から得られる広域情報に組み込むことによって、確率的に資源量が推定される。

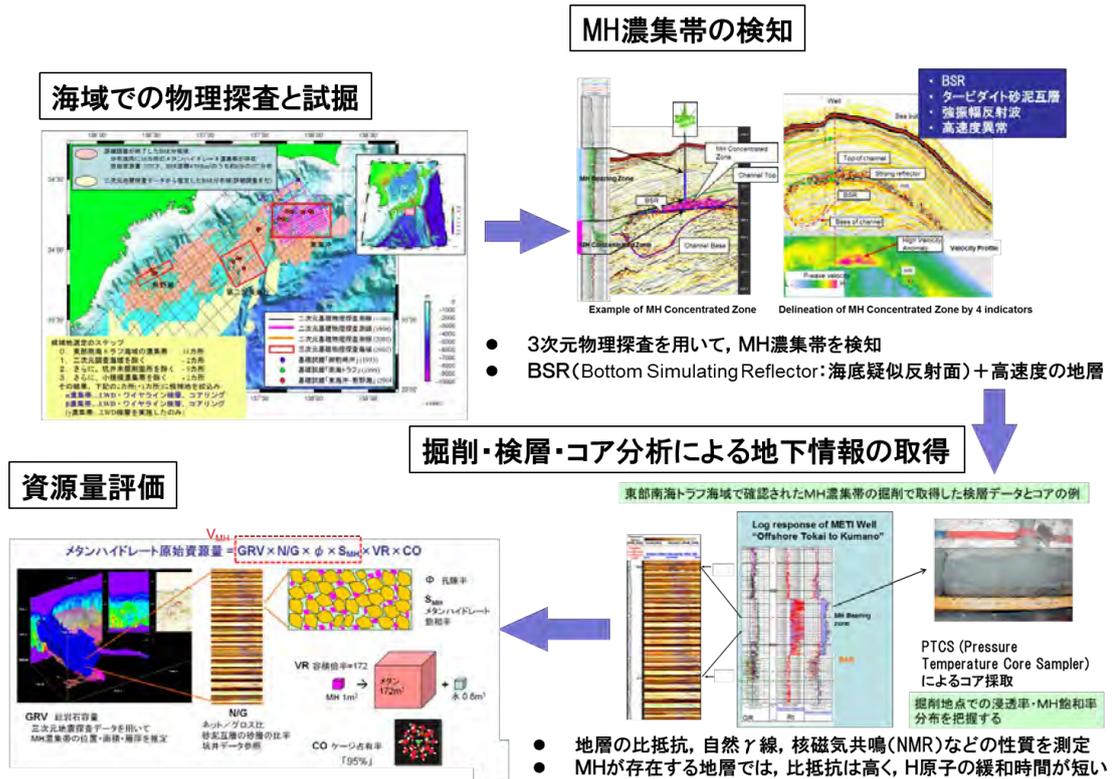


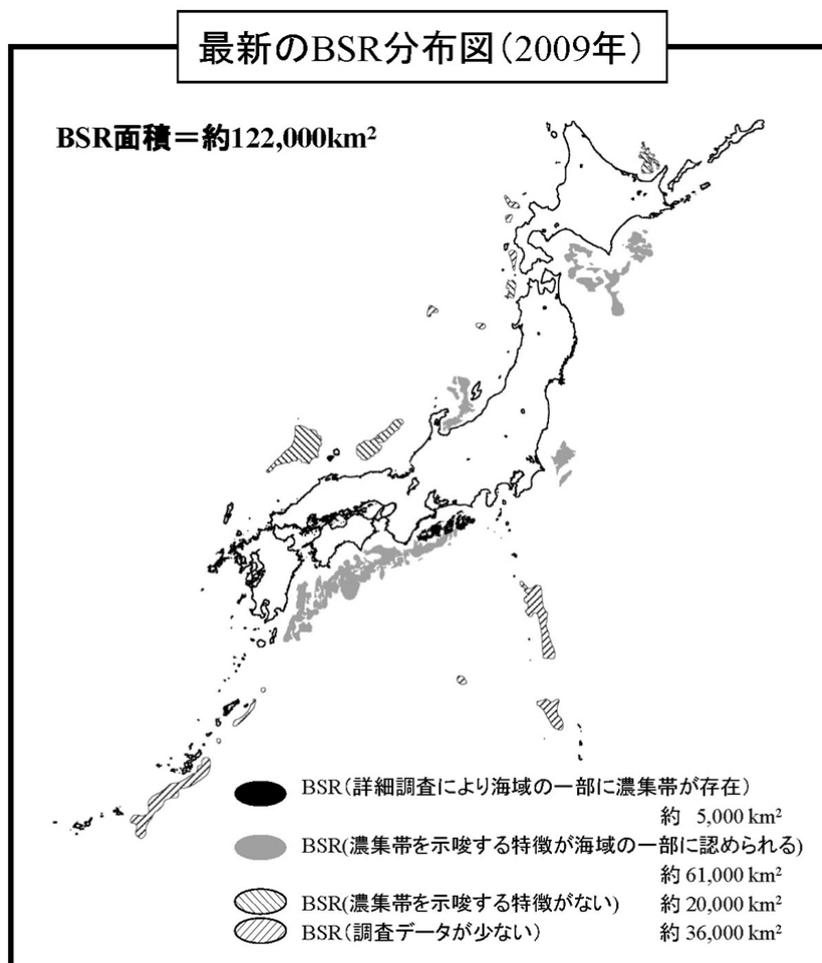
図 6.1.8 MH 資源量評価の流れ (各図の出典：MH21 研究コンソーシアム)

物理探査では、海底下地層中に弾性波を発震して、地層境界で反射して戻ってくる波を受振する反射法地震探査と呼ばれる方法が用いられる。MH の安定存在領域の下限では、MH を含む地層の境界面で音響特性が急激に変化するので、反射地震記録断面上では、層理面とは関係なくほぼ海底面に平行して現れる強振幅の反射面が現れる。この強振幅の反射面は海底擬似反射面 (BSR : Bottom Simulating Reflector) と呼ばれ、MH の存在を示唆する指標として利用されている。しかし、BSR の情報だけでは、① MH 層の上部境界を把握できない、② BSR が必ずしも平面的に分布していないケースがあるなどの制約があり、適切な資源量評価はできない。3次元物理探査と掘削調査を行うことで、① BSR、② タービダイト砂層、③ 強振幅の反射波、④ 弾性波の高速度異常、の四つの指標を用いて、MH 濃集帯の三次元的な分布を直接推定することができる。

MH に含まれるメタン原始資源量は、図中に示した式で計算できる。GRV (Gross Rock Volume) は、濃集帯の総岩石容量すなわち全体の嵩体積であり、これは物理探査での探査断面を解釈していくことで求められる。N/Gは Net Gross Ratio、すなわち MH が存在する砂層の割合である。 ϕ は砂層の孔隙率、 S_{MH} は孔隙内の MH 飽和率であり、検層とコア分析の情報から求められる。地下に存在する MH の体積は $GRV \times N/G \times \phi \times S_{MH}$ と推定できる。地下にあるメタンハイドレート 1 m^3 が分解したときには約 164 m^3 のメタンガスが発生するので、MH の体積を 164 倍した数値がメタン原始資源量となる。

日本では、既存の地震探査記録が再解析され、MH の存在を示唆する BSR 分布の見直しが行われている。図 6.1.9 は公表されている最新の BSR 分布図を示すが、日本周辺海域に

は、MH 濃集帯を示唆する特徴が認められる BSR の総面積が 61,000km² と推定されている。



Copyright © MH21 Research Consortium

図 6.1.9 日本周辺海域の B S R 分布図

(出典：MH21 研究コンソーシアムウェブサイト)

また、東部南海トラフ海域では 16 箇所の MH 濃集帯があることが把握されている。本海域に存在する MH 中のメタン原始資源量を確率的に評価した結果では、平均値として、MH 濃集帯の部分に 5,739 億 m³、濃集帯以外の部分に 5,676 億 m³、合計で 1 兆 1,415 億 m³ のメタン原始資源量が存在すると報告されている。2015 年の日本の年間天然ガス消費量は約 1,130 億 m³ であるから、東部南海トラフ海域の MH 濃集帯にあるメタン原始資源量は国内消費量の約 5 年分に相当する。

6.1.4 メタンハイドレートからのガス生産技術

海底地層中に MH が賦存していても、それらからメタンを経済性に採り出す技術を確認しなくては、MH の資源としての経済価値はゼロである。図 6.1.10 に地下資源から経済価値が生まれるまでの概念を示すように、地下に存在する資源の総量は原始資源量 (in-place resources) と呼ばれ、そのうちで既生産量などを含めて地球全体で採取可能と推定される量が究極可採資源量である。さらに、現状の技術と石油・ガス価格で開発可能と判断され、開発プロジェクトによる生産が確実に見込める資源量は確認埋蔵量 (proved reserves) と呼ばれる。日本周辺海域の砂層型 MH は大きな原始資源量を有しているが、MH からガスを生産・開発するシステムは確立していないので、可採資源量には含まれない。ガス生産技術に関する研究では、MH を可採資源に格上げするための技術基盤の構築が行われている。

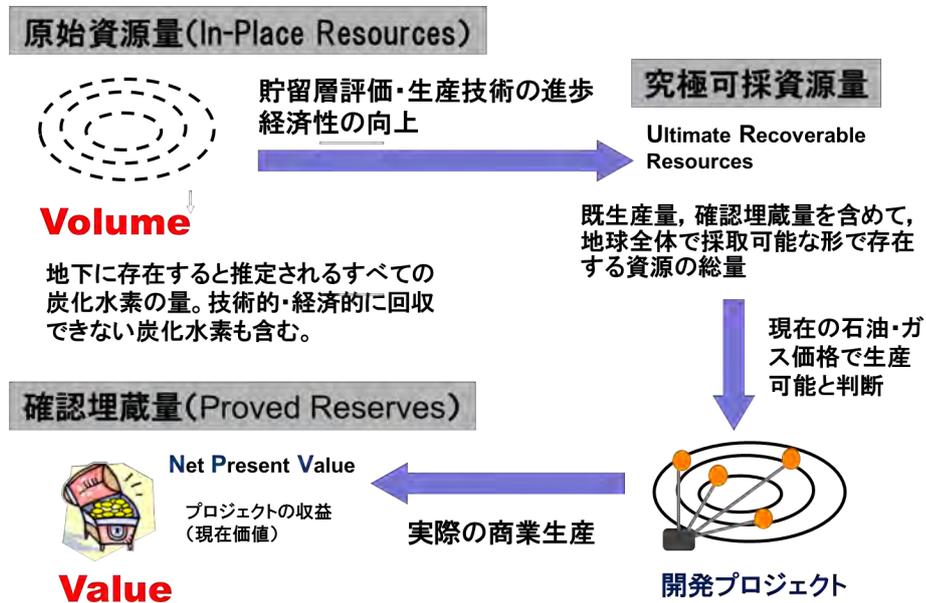


図 6.1.10 原始資源量と埋蔵量の関係

まず、地層内に固体として存在する MH からどのようにしてメタンを取り出すのかの方法について述べる。MH は低温・高圧条件下で熱力学的に安定であり、水深 1,000m 程度の海域では、海底面下約 300~400m の地層内の孔隙を埋める形で固体として存在する。海底下から MH を掘り出すことは経済性と環境保全の両面から不可能であるため、地層内で MH を分解させてその際に発生するメタンを生産する方法 (MH 分解採取法) が適用される。

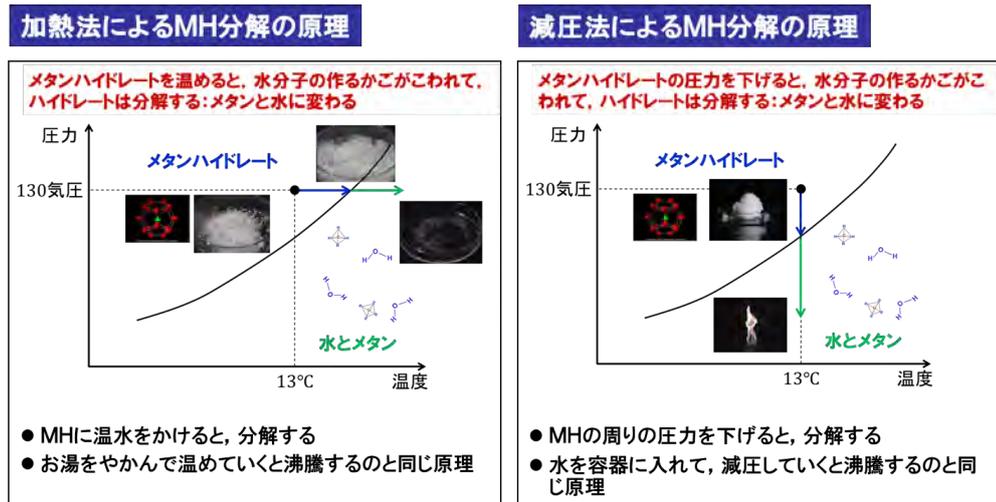


図 6.1.11 減圧法と加熱法の違い (概念)

代表的な MH 分解採取法としては、「減圧法 (depressurization method)」と「加熱法 (heating method)」がある。その概念を図 6.1.11 に示すように、水を温めて沸騰させるのと同様の原理で MH を加熱して分解させる方法が加熱法であり、水を減圧して沸騰させるのと同じ原理で MH の周りの圧力を下げて分解させる方法を減圧法と呼ぶ。MH の開発研究が始まった初期段階では、MH を分解するためには地層を温めるしかないと考えられていたが、MH 堆積物コアを用いた分解実験、MH 層からのガス生産実験などの経験を通じて、MH 層は浸透性を有しており、MH の分解に減圧法が有効に機能することがわかってきた。地層内での MH 分解とガス生産挙動を予測する貯留層シミュレータ (hydrate reservoir simulator) が開発され、MH 層に減圧法を適用した場合のガス生産挙動を数値計算によって予測する技術も構築されている。

なお、減圧法という名称から、この方法はビール瓶の栓を開けたときのように急激に減圧してガスを出す方法と誤解されやすいが、そうではなく、井戸で圧力を下げてその圧力低下を地層内に伝播させて MH の分解を促し、その後は地熱を利用して MH を分解させる方法である。図 6.1.12 に減圧法によるガス生産の概念を示すように、減圧法では、生産井を MH 層に掘り、坑井内に設置したポンプで水を汲み上げて地層圧力を低下させる。海底地層中の MH は低温・高圧の条件下で安定に存在しているが、圧力が下がると分解し始める。1 モルの MH をメタンと水に分解するためには約 52kJ の熱を必要とするが、この熱エネルギーは地熱から供給され、MH の分解とガス・水の生産が継続する。減圧法では、MH の分解エネルギー (dissociation energy) が地層から自然に供給されるので、エネルギー効率の良いガス生産が可能になる。

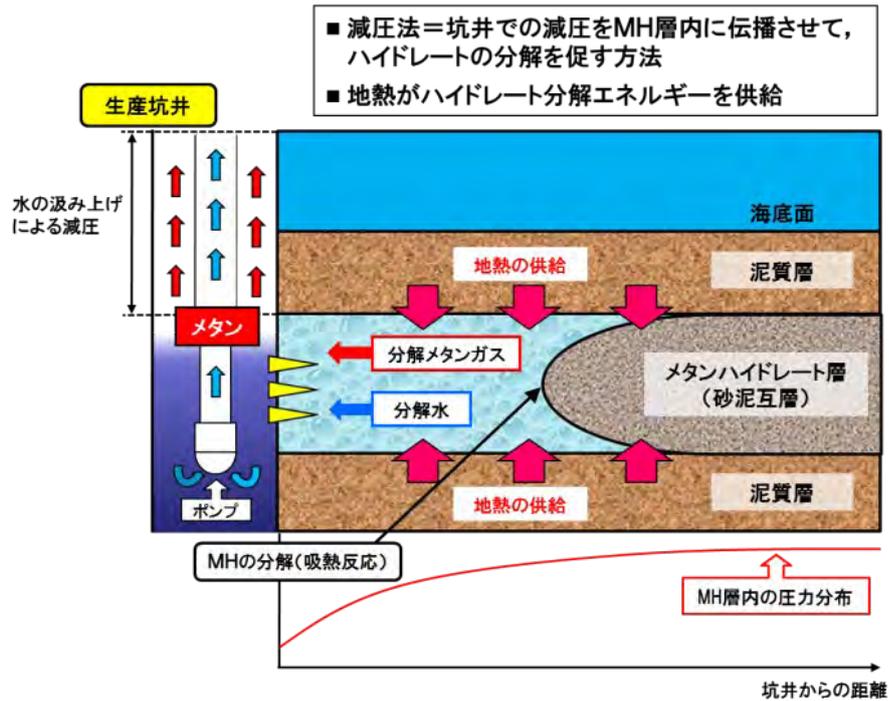


図 6.1.12 減圧法による MH ガス生産の概念

MH 層からのガス生産に対する減圧法の有効性は、陸域に存在する MH 層を対象に実証されてきた。2008 年 3 月に日本とカナダの国際共同研究で実施された第 2 回陸上生産試験では、カナダ・マッケンジーデルタ永久凍土下の MH 層から減圧法を用いて約 5.5 日間の連続ガス生産（累計ガス生産量約 13,000 m³）に成功している。

日本の場合は、開発対象の MH 層は陸域ではなく海底下浅部に存在する。減圧法が海底下の MH 層に対して有効に機能するのを確認するために、渥美半島～志摩半島沖の MH 濃集帯を対象にした第 1 回海洋産出試験が実施され、2013 年 3 月にガス生産実験が行われた。現場では、地球深部掘削船「ちきゅう」を使用して、生産井一つと二つの観測坑井が仕上げられ、ライザーパイプで海底下に仕上げた生産井と船をつなげた後で、生産井の中に電動ポンプを組み込んだテスト編成用のパイプが挿入された。また、MH が分解したときに地層から砂が生産井内に流入しないように、生産井の仕上げ区間にはスクリーンパイプが設置され、スクリーンパイプと坑井の環状部にはグラベルが充填された（図 6.1.13）。この状態で、電動ポンプを駆動させることによって生産井内の水を汲み上げ、図 6.1.12 で説明した減圧法の原理によって地層内の MH を分解させている。その結果、約 5 MPa の安定した坑底圧力が維持され、日量約 20,000m³で 6 日間のガスの連続生産に成功している（累計ガス生産量は約 12 万 m³）。これは世界で初めての海底下の砂層型 MH からのガス生産実験であり、MH 層の挙動を把握するための多数のデータ（ガス・水の生産挙動、観測坑井での地層の温度変化など）が蓄積することができたが、一方で、坑井内に砂が流入する出砂が生じ、気象条件の悪化の影響もあり、6 日間で海洋産出試験は終了した。

第 6 章 新たな海洋資源開発へ向けて

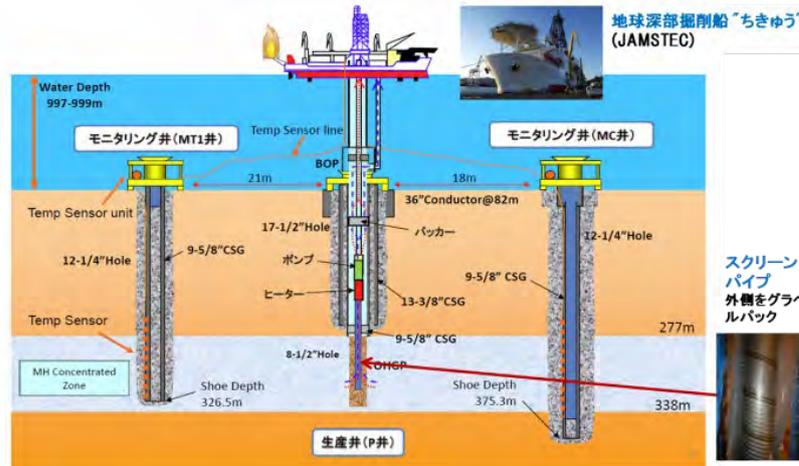


図 6.1.13 第 1 回海洋産出実験での生産井と観測井

(出典：MH21 研究コンソーシアム)

その後の第 2 回海洋産出試験においては、第 1 回海洋産出試験と同じ MH 濃集帯を対象にして、2017 年 4 月～7 月にガス生産実験が実施されている。この海洋産出試験は、① 第 1 回海洋産出試験で生じた出砂トラブル等の解決を図ること、および、② 3～4 週間のガス生産において生産レートの増加を確認することを目的として実施された。その結果、異なる出砂対策を施した 2 本の生産井のうち 1 本目は出砂トラブルによりガス生産試験を中断する結果となったが、2 本目の生産井では出砂トラブルは発生せず、約 20 日間のガス連続生産が達成されている。減圧法による MH 層からのガスの累計生産量は、1 本目の生産井では約 12 日間で生産量約 40,850 m³、2 本目の生産井では約 24 日間で生産量約 222,600 m³と報告されている。実験結果については、現在も詳細な解析が行われており、生産井・観測井の仕上げ状況、各生産井でのガス・水の生産挙動などの概要は、メタンハイドレート資源開発研究コンソーシアムのホームページにて公開されている。

中国においても、2018 年に南シナ海北部の神狐 (Shenfu) 海域において、海底下の MH から約 60 日間のガス生産 (累計ガス生産量：約 309,000 m³) を実施したことが報道されている。

6.1.5 メタンハイドレート開発への展望

現在までの海洋産出試験では減圧法によるガス生産に成功しているが、単にガスを出しただけでは商業生産には至らない。探査から始まって掘削、貯留層評価、生産、開発までの各技術が整備され、経済性と環境適合性の条件が満たされて MH 商業生産が可能になる。図 6.1.14 に示すように、MH 開発技術の整備に向けての課題は、海底下の技術の実証と海底下から地上までを結ぶ開発システムも含めた総合的検証の 2 つのステップに大別される。第 1 ステップは、出砂防止対策を含めた坑井仕上げ技術の確立と MH 層の挙動把握である。地層内の MH 分解を制御できるのか、予測できるのかを確認できなければ、研究は先に進めない。第 2 ステップは、長期のガス生産挙動シミュレーションと海底機器を含めた開発

第6章 新たな海洋資源開発へ向けて

システムの検討である。坑井を何本仕上げるのか、どのように生産ガスを地上まで輸送するのかなどの開発コンセプトができれば、開発プロジェクトの経済性やエネルギー収支比（EROI：Energy Return On Investment）とは、開発によって得られるエネルギー量を開発行為に投入したエネルギー量で割った値で、エネルギー資源の質を表す指標）などの総合的検証が可能になる。

砂質層孔隙充填型 MH の開発に対しては、ガス生産試験を実施する段階まで技術レベルは到達し、MH の商業開発に向けて海底下の技術の実証研究が進められている。日本周辺海域には砂層型以外にも海底面近傍 MH の存在も確認されており、この賦存形態の MH についてのガス生産手法も検討が始められている。

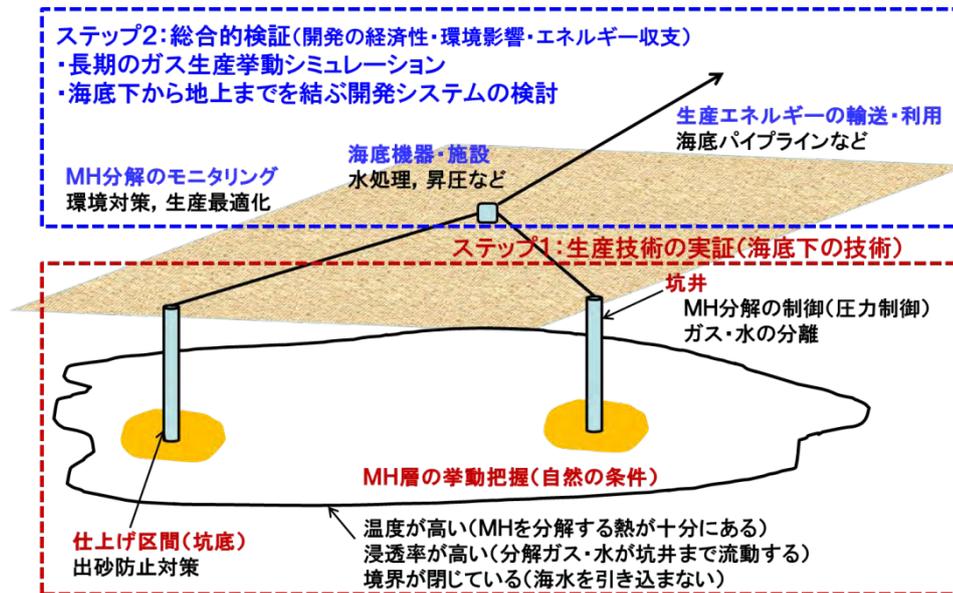


図 6.1.14 MH 開発技術の整備に向けての課題

6.2 海底鉱物資源

鉱物資源は、エネルギー資源と共に人類の文明社会を支えるための重要な役割を果たしている資源である。人類は古くから陸上の様々な鉱物資源を開発・利用することで、文明を発展させてきた。その中でも、特に金属資源が文明の発展に果たしてきた役割は大きく、古くは青銅器や鉄器をはじめとするベースメタル（base metals）の利用に始まり、現在ではレアメタル（critical metals）を含む殆ど全ての金属元素を利用するまでになっている（図 6.2.1）。

第 6 章 新たな海洋資源開発へ向けて

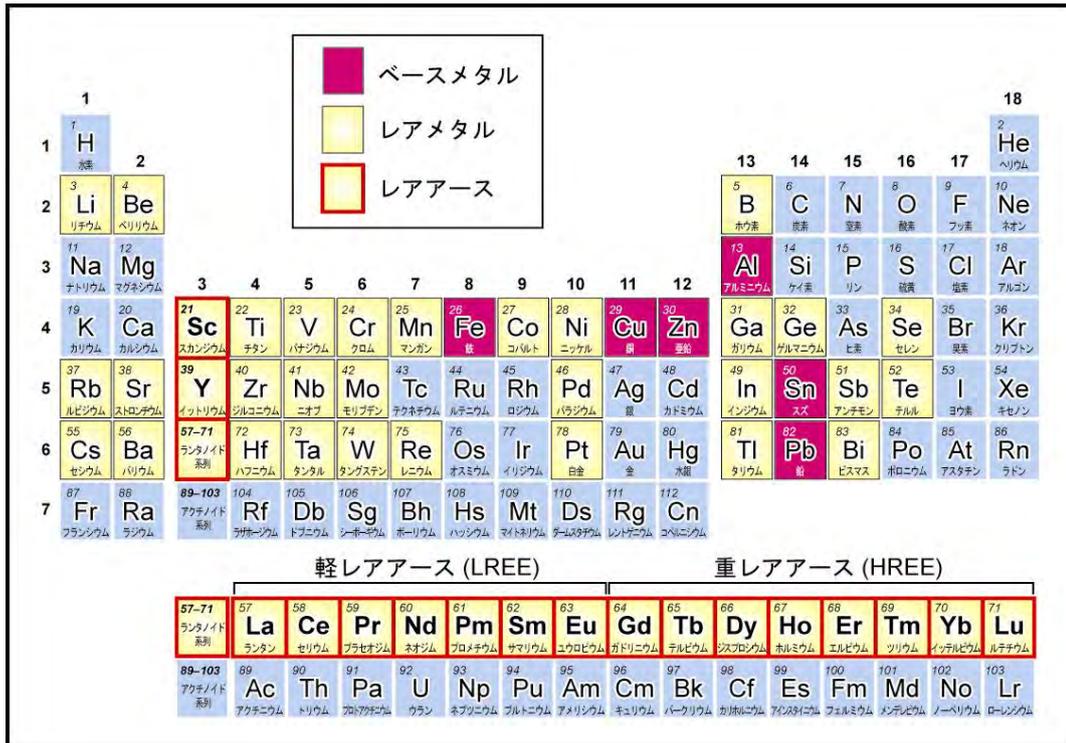
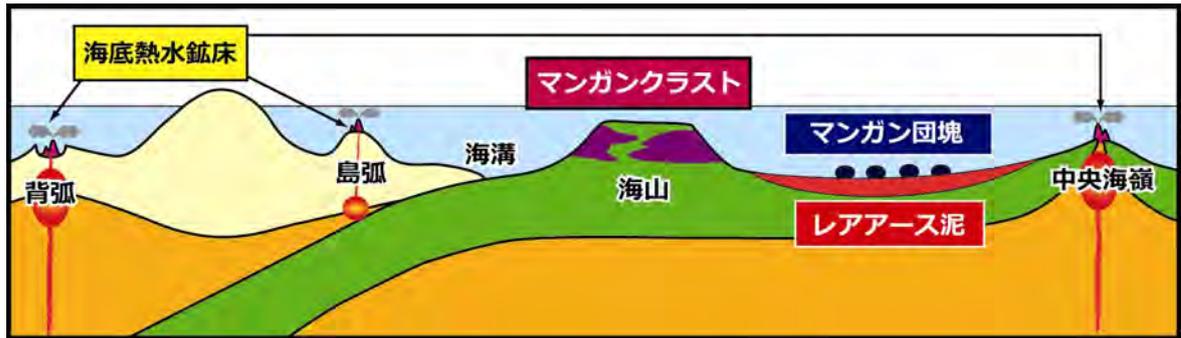


図 6.2.1 人類が利用する様々な金属（レアメタルは経済産業省の定めた 47 元素を引用）

今後とも、人口の増加と文明のさらなる発展を支えるために、鉱物資源の消費が増えることは確実であると予想される。しかし一方で、陸上で高品位かつ大規模な鉱床を発見することは次第に難しくなっており、より低品位で、コストがかかり、環境へのインパクトが大きい資源を開発せざるを得なくなりつつあることが指摘されている。そんな中、注目されているのが海底鉱物資源である。

科学技術の長足の進歩に伴って、人類は地球の表面積の 7 割を占める海底からも資源の産出が可能になりつつある。実は、エネルギー資源である石油や天然ガスについては、すでに 1970 年代より海洋からの生産が本格的に始まっており、現在では全体の実に約 4 割が海洋から生産されている。一方、鉱物資源については、現在まで海底からの商業生産は行われておらず、海底鉱物資源の本格的な開発には未だ至っていない。しかし、鉱物資源を海底から生産しようという動きは 1960 年代から存在しており、開発に必要な技術も着実に進歩を続けている。そのため、将来的には石油や天然ガスなどのエネルギー資源に続き、鉱物資源の開発も海へと進出する可能性は高いと考えられる。

現在の海底において存在が確認されている鉱物資源は、「海底熱水鉱床 (seafloor massive sulfides)」「マンガン団塊 (manganese nodules)」「マンガンクラスト (ferromanganese crusts)」「レアアース泥 (REY-rich mud)」の四つである (図 6.2.2)。本章では、これらの海底鉱物資源について、6.2.1 海底鉱物資源の概要と、6.2.2 海底鉱物資源の分布と資源ポテンシャル、そして 6.2.3 海底鉱物資源開発への展望について解説する。



	海底熱水鉱床	マンガンクラスト	マンガン団塊	レアアース泥
産状	熱水から沈殿した金属から成るチムニーとマウンド	基盤岩を皮殻状に覆う厚さ数cm～10数cmのマンガン酸化物	海底堆積物の表面に分布する直径数cm～10数cmの球状の団塊	深海盆に広く分布する遠洋性の堆積物
水深	主として1,000～4,000m	主として800～2,500m	4,000～6,500m	4,000～6,000m
含まれる有用金属	銅、鉛、亜鉛、金、銀、ゲルマニウム、ガリウム、等のレアメタル	マンガン、銅、ニッケル、コバルト、白金、テルル、モリブデン等	マンガン、銅、ニッケル、コバルト、リチウム、モリブデン等	レアアース、特に中希土類元素～重希土類元素に富む

図 6.2.2 現在までに存在が確認されている四つの海底鉱物資源とその特徴

(出典：Nakamura et al., 2015 を改変)

6.2.1 海底鉱物資源の概要

(1) 海底熱水鉱床

海底熱水鉱床は、海底下にしみこんだ海水がマグマによって熱せられ、周囲の岩石から有用金属元素を溶かし込むことで熱水となり、それが上昇して海底から噴出する際に、熱水噴出孔の周囲に溶けていた有用金属元素を沈殿・集積したものである（図 6.2.3）。

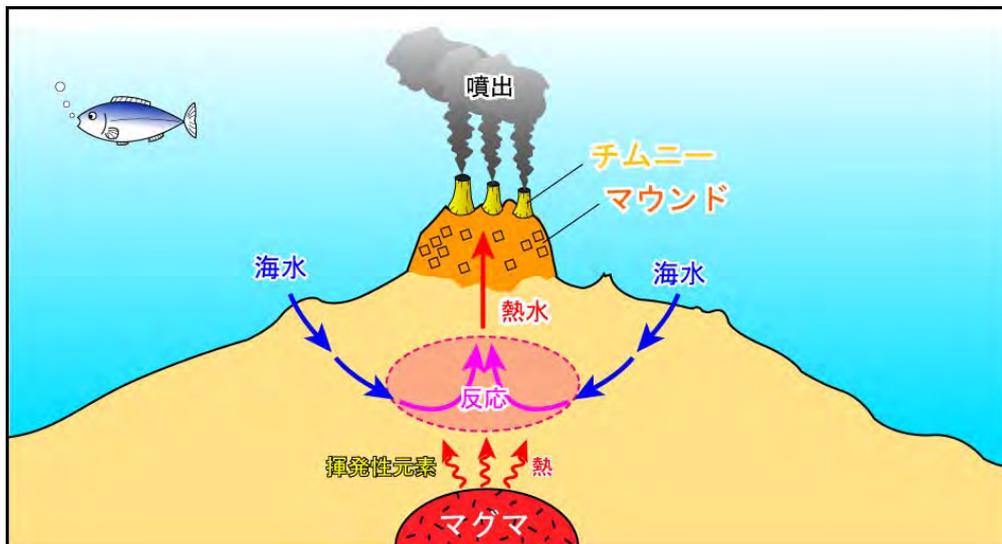


図 6.2.3 海底熱水鉱床の形成概念図

第 6 章 新たな海洋資源開発へ向けて

水深 1,000m を超えるような深海底には、このような「海底熱水噴出孔」が多数存在していることが知られている。海底熱水鉱床は、一般的に水深 1,000~4,000 m に存在していることが多いが、1,000 m 未満および 5,000 m 以深にも存在することが確認されている。

世界で初めてこの海底熱水噴出孔が発見されたのは、意外にも最近の 1977 年のことである。その最初の「海底熱水噴出孔」が見つかった場所は、東太平洋のガラパゴス諸島沖の深海底で、アメリカの有人潜水調査船「アルビン」によるものであった。この最初の熱水噴出孔は、実は重金属に富む高温の熱水噴出孔（ブラックスモーカーと呼ばれる）ではなかったが、2年後の 1979 年には、同じく「アルビン」によって東太平洋海膨に初めてのブラックスモーカーが見つかっている。これらの発見以来、現在までの約 40 年間に、「海底熱水噴出孔」は世界中で 300 か所以上見つかっている。

海底熱水鉱床を構成する鉱物は、鉄、銅、鉛、亜鉛などの重金属と硫黄が結合した黄鉄鉱 (FeS_2)、黄銅鉱 (CuFeS_2)、方鉛鉱 (PbS)、閃亜鉛鉱 (ZnS) などの硫化鉱物と、カルシウムやバリウムなどのアルカリ土類金属と硫酸イオンが結合した硬石膏 (CaSO_4) や重晶石 (BaSO_4) などの硫酸塩鉱物である。海底熱水鉱床の開発では、これらの主成分鉱物（特に硫化鉱物）に含まれる銅、鉛、亜鉛などの元素が、主要なターゲットとなっている。そのため、海底熱水鉱床は「海底熱水“硫化物”鉱床」とも呼ばれる。海底熱水鉱床はまた、しばしば金、銀などの貴金属にも富んでいることがある。例えば、パプアニューギニアの海底熱水鉱床では、最大で 20 g/t の金と 642 g/t という銀の含有量が報告されている。これは、一般的な陸上の金銀鉱床の品位の数倍に達する濃度である。海底熱水鉱床には、この他にも微量金属としてビスマス、カドミウム、ガリウム、ゲルマニウム、アンチモン、テルル、タリウム、インジウムなどが含まれていることがわかっている。これらの元素は、後述する島弧の火山活動に伴う海底熱水鉱床に特に含有量の高いものが見つかっており、海底熱水鉱床はこれらのレアメタルの資源としても注目されつつある。

海底熱水は、その多くが 300°C を超える超高温の水（亜臨界水・超臨界水）であり、中には 400°C を超える熱水も見つかっている。圧力が 1 気圧の地上では、水は温度が 100°C を超えると沸騰してしまうために、それ以上の温度の水にお目に掛かることは無い。一方、海底熱水鉱床のある深海底は、100 気圧以上の圧力がかかる高圧環境にあり、そこでは水は 300°C を超えても沸騰しないため、地上では考えられないような高温の水が存在することができる（図 6.2.4）。

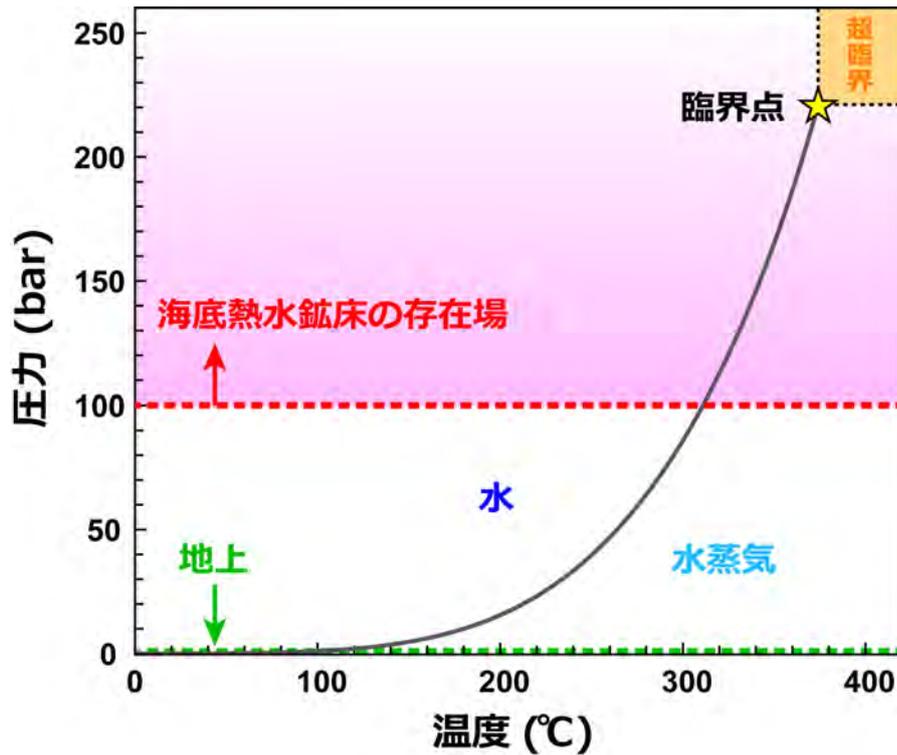


図 6.2.4 水の相図と海底熱水鉱床存在場の圧力条件

上述のように、海底熱水鉱床に含まれている重金属元素は、元々岩石中に含まれていたものが高温の水-岩石反応によって熱水中に溶解し、さらにそれが熱水噴出孔において沈殿・集積したものである（図 6.2.3）。海底熱水が多量の重金属を溶かし込める理由は、(1) 高い温度と、(2) 海水に含まれる塩化物イオン、そして (3) マグマから供給される火山ガスにある。上述のように、海底熱水は高い圧力のために 300°C 以上という、地上では考えられないような高温になる。この高温こそが、金属の溶解度を上げる第一の要因となる。温度以外の重要な要素の一つとして、塩化物イオンの存在がある。海底熱水は、海水を起源とするために、多量の塩化物イオンを含んでいる。熱水に溶けている金属は、単体のイオンとしてよりも、この塩化物イオンと結合して塩化物錯体を形成した方が、桁違いに多くの量が溶けることができる。そのため、海底熱水に含まれる塩化物イオンは、熱水に重金属を溶かし込む上で非常に重要な役割を演じている。熱水の重金属濃度を決める三つ目の要素として、マグマから噴出してくる火山ガスが挙げられる。マグマからは、水蒸気と二酸化炭素、そして亜硫酸ガスを主体とする火山ガスが放出されることが知られている。このうち、亜硫酸ガスが海底下を循環する熱水に混入すると、硫酸を形成して熱水の pH を下げる。酸には重金属を含む様々な物質を溶かし出す力があるため、この亜硫酸ガスの混入による pH の低下は、熱水への重金属の溶解を著しく促進する。

熱水は、海底に噴出した際の海水との混合による温度の低下と pH の上昇によって、重金属元素の溶解度が劇的に低下する。これにより、熱水中に溶けていた多量の重金属元素は速やかに硫化鉱物として沈殿する。熱水噴出孔において沈殿した硫化鉱物は、チムニーと呼ばれる煙突状の構造物を形成する（図 6.2.3）。チムニーは継続的に供給される熱水に

第 6 章 新たな海洋資源開発へ向けて

よって徐々に成長していくが、ある程度の高さになると崩壊し、その後には再び新しいチムニーが形成・成長するというサイクルを繰り返す。このとき、崩壊したチムニーの破片は、熱水噴出孔の周囲に次第に集積し、マウンドと呼ばれる硫化鉱物の山を作っていく（図 6.2.3）。マウンドは、大きなものでは直径数百 m、鉱量数百万トンに達することが確認されており、これが銅、鉛、亜鉛などの金属資源として採掘の対象となっている。

(2) マンガン団塊

マンガン団塊とは、マンガンと鉄の水酸化物を主成分とした直径数 cm～十数 cm の球状～楕円状の塊である。これらは、主に水深 4,000～6,500 m の深海底の、特に堆積速度が 1,000 年間に 2 cm 以下と遅い堆積物の上に存在することが知られている。

マンガン団塊の研究の歴史は古く、1800 年代後半に行われたイギリスの海洋探検船チャレンジャー号による世界一周航海において、すでに大西洋の海底からその発見が報告されている。それ以降、太平洋、インド洋を含む世界中の深海底で次々にその存在が確認され、マンガン団塊が海洋底の広範囲に分布していることが明らかとなっている。

マンガン団塊は、主にブーゼライトとバーナダイトという 2 種類の鉄マンガン酸化物により構成されている。ブーゼライトはマンガンを主成分とする含水マンガン酸化鉱物で、理想的には鉄を含まないとされる。構造分類としては、層状マンガン酸塩鉱物というグループに分類され、 10\AA の層間に交換性金属陽イオン (Cu^{2+} 、 Ni^{2+} 、 Zn^{2+} 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+}) を一定量（マンガンに対する原子比で最大 1/6 まで）含む。特に、銅とニッケルは、ブーゼライトの層間イオンとして強い選択性を持つことが知られている。一方のバーナダイトは、マンガンと共に同程度の鉄を含有する非常に結晶度の低い酸化鉱物とされ、構造的には細粒かつ低結晶質な平面結晶をなしている。層間イオンを取り込むブーゼライトと比較して銅、ニッケル、亜鉛の濃度は 1 桁低い一方、コバルトの含有量は逆に数倍程度高いという特徴をもっている。

マンガン団塊において、資源として主要なターゲットと考えられている元素はマンガン、コバルト、ニッケル、銅である。マンガン団塊にはこれらの元素のほかに、リチウム、モリブデン、カドミウム、希土類元素なども濃集しており、近年これらの元素もターゲットと成り得ると考えられている。

バーナダイトはマンガン団塊と海水との境界において、海水から直接沈殿する微細なマンガンと鉄の粒子（ナノパーティクルもしくはコロイド）によって形成されると考えられている。主としてこのバーナダイトから成るマンガン団塊は、海水起源団塊（hydrogenetic nodules）と呼ばれる。一方、ブーゼライトは団塊と堆積物の境界において、堆積物の続成作用により組成の変化した間隙水から沈殿して形成されると考えられている。このようなマンガン団塊は、続成起源団塊（diagenetic nodules）と呼ばれる。この続成起源団塊の生成には、有機物の分解によって還元的になった間隙水中に堆積物中のマンガンが溶出してくるというプロセスが、特に重要であると考えられている（図 6.2.5）。

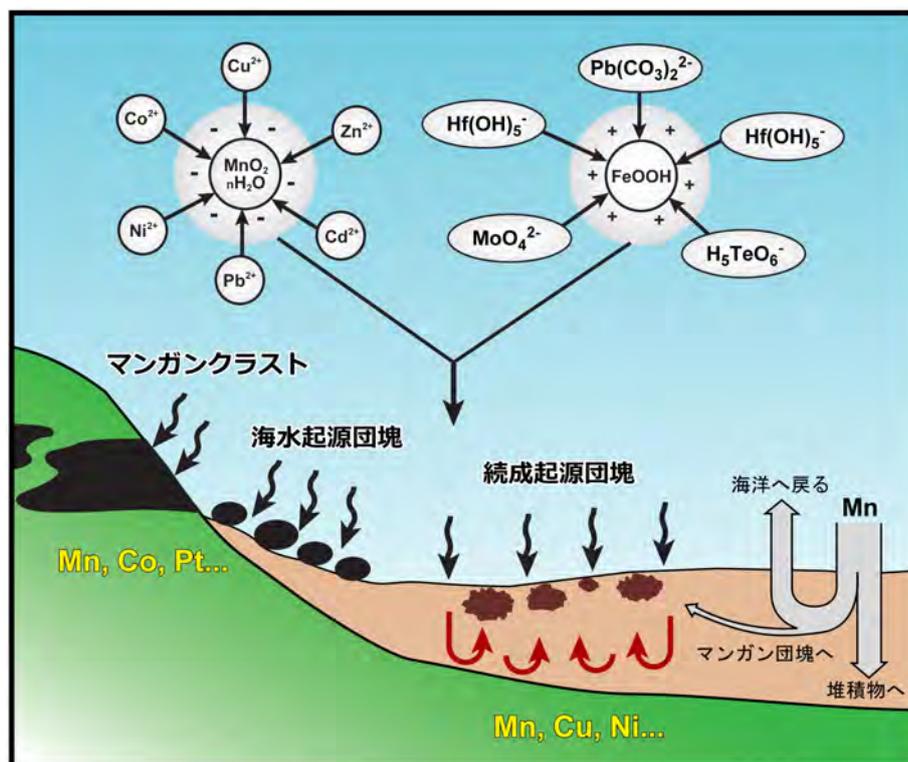


図 6.2.5 海水起源/続成起源マンガン団塊とマンガンクラストの形成プロセス

(出典 : Hein et al., 2013 を改変)

マンガン団塊の表面の形状は、バーナダイトが優勢な部分は平滑であり、ブーゼライトが優勢な部分はゴツゴツと粗いという明瞭な違いがある。海水起源団塊の成長速度は、100 万年間で 1-10 mm と極めて遅い。一方、続成起源団塊のそれは 100 万年間で数百 mm と海水起源団塊に比べると 2 桁程度速い速度で成長すると見積もられている。ただし、この続成起源団塊の堆積速度も、周囲の堆積物のそれ（1,000 年間に 2 cm 以下）と比べると桁で遅く、いずれのマンガン団塊もその成長は極めてゆっくりと進むものであることがわかる。なお、多くのマンガン団塊は海水起源の成長と続成起源の成長の両方を示すとされ、全体の成長速度も 100 万年間で数十 mm という両者の中間的な値を示すことが多い。また、化学組成もそれに応じて海水起源と続成起源の中間的な組成を示す。

マンガン団塊は、ほぼ例外無く核を持っており、鉄とマンガン酸化物はこの核の周囲に順次沈着することで層を成長させていく。そのため、マンガン団塊の形はこの核の形を反映していることが多い。核となっているものは、様々な大きさの岩石片、固結した泥、サメの歯、プランクトンの殻、あるいは古いマンガン団塊の破片など多種多様である。マンガン団塊が高密度で存在する海域において、いつ、どのようにしてこれらの核が供給されたのかは、今も完全には明らかになっておらず、マンガン団塊の成因を考える上で興味深い問題として残されている。

(3) マンガンクラスト

マンガンクラストは、上述のマンガン団塊と同様にマンガンと鉄の水酸化物を主成分とした資源であり、海山および海台の斜面や頂上などの岩盤を数 cm から最大 26 cm の厚さで覆って出現する（図 6.2.5）。化学組成についてもマンガン団塊と基本的には類似しているが、マンガン、銅、ニッケルの含有量はやや低く、一方でコバルトに富む（最大で 1% 以上）という系統的な違いが認められる。このため、しばしば「コバルトリッチクラスト」と呼ばれることもある。マンガンクラストの存在は、水深 400 m から 7,000 m に至る広い範囲で確認されている。ただし、高い品位と十分な厚さをもつマンガンクラストの出現は、一般的に 800 m～2,500 m の範囲に集中しているとされている。

マンガンクラストは、上記のイギリスの海洋探検船チャレンジャー号による世界一周航海において、すでにマンガン団塊とともに記載がなされている。ただし、潜水船や深海カメラによる産状の観察が不可能であったこの当時は、両者は厳密には区別されていなかったと考えられる。それから約 100 年後の 1970 年代後半に起こったシャバ紛争によるコバルト価格の急騰をうけて、1980 年代初頭よりコバルトに富むマンガンクラストへの注目は急激に高まった。そして、中央太平洋を皮切りに世界中で調査が行われ、マンガンクラストが世界中の海山においてかなり普遍的に見られることがわかってきた。

マンガンクラストの構成鉱物は、主に海水起源のマンガン団塊と同じバーナダイトである。続成起源のマンガン団塊を構成するブーゼライトはほとんど見られない。そのため、マンガンクラストは全て海水からの鉄マンガン酸化物の直接沈殿によって形成されたと考えられている。マンガンクラストの化学組成は、上述のようにマンガン団塊と比べてマンガン、銅、ニッケルの含有量が低く、コバルトに富むという特徴がある。マンガンクラストの化学組成に見られるこのような特徴は、主にバーネサイトから成りブーゼライトをほとんど含まないという鉱物組成をよく反映している。すなわち、マンガンクラストの鉱物組成および化学組成は、先述の続成起源マンガン団塊とは系統的に異なっているものの、海水起源マンガン団塊とは基本的に共通していると言える。

コバルトリッチクラストという別名からもわかるとおり、マンガンクラストについて、資源として主要なターゲットと考えられている元素はコバルトである。しかし、マンガンクラストはその他にもテルル、マンガン、モリブデン、ビスマス、白金、タリウム、希土類元素などにも富んでおり、近年はこれらの元素（特にレアメタル）の資源としても注目が高まっている。これら一連の濃集元素は、海水からマンガンおよび鉄が沈殿する際に、吸着されることで濃集したものと解釈されている（図 6.2.6）。

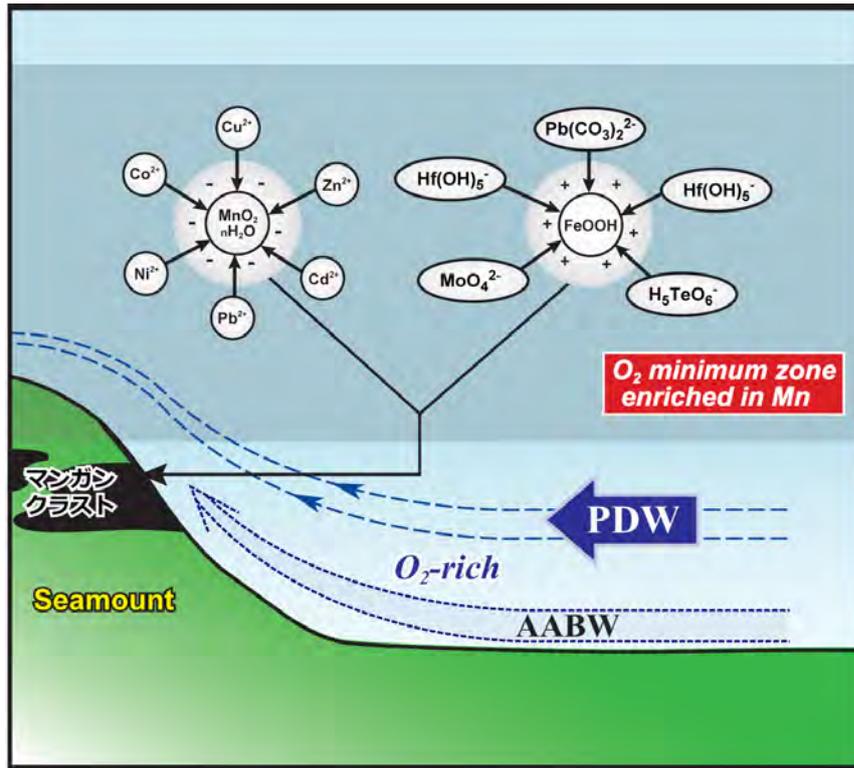


図 6.2.6 マンガンクラストの形成概念図 (出典 : Hein et al., 2013 を改変)

マンガンクラストの成長速度は、百万年で数 mm 程度と見積もられており、これも上述の海水起源マンガン団塊の成長速度と良く一致している。このように、マンガンクラストは構成鉱物、化学組成、成長速度などの点で海水起源のマンガン団塊と共通しており、成因的にもほぼ同一のものと考えられる。一方で、マンガンクラストの成因には海洋の酸素極小層 (OMZ : Oxygen Minimum Zone) が関連していると指摘されることがある。すなわち、マンガンクラストの Mn の供給源が OMZ に溶存している 2 価の Mn であり、これが下層からの酸素に富んだ水塊と混合することによって再び酸化物となり沈殿することでマンガンクラストができるというのである (図 6.2.6)。しかしながら、本質的に同じものであるはずの海水起源マンガン団塊が、OMZ とは無関係の深海 4,000~6,000 m に普遍的に存在していることを考えると、マンガンクラストの成因のみを OMZ と結びつけるのは整合的ではない。マンガンクラストの成長と OMZ の関係には、未だ未解明な点が残されていると言える。いずれにしても、世界中の海山においてマンガンクラストが普遍的に見られることから、マンガンクラストは決して特殊な環境下においてのみ生じるわけではなく、堆積物によって覆われにくくかつ酸素に富んだ底層水が巻き上げられやすい起伏のある地形であればどこでも生成され得ると考えられる。

一方で、海山ではない平坦な深海盆には、マンガンクラストは存在していない。そのため、海盆スケール (数百~数千 km²) でのマンガンクラストの分布密度は、海山の分布密度と密接に関係していると言える。また、100 万年で数 mm という遅い成長速度から、厚さ 10 cm 以上のマンガンクラストに成長するためには、すくなくとも数千万年オーダーの時間が必要であることがわかる。したがって、海山は古いほど厚いマンガンクラストに覆

われる。このような海山の密度と年代という二つの条件が理想的に揃っているのが、西太平洋である。西太平洋には白亜紀中期（約1億年前）の大規模な火成活動によって数多くの海山・海台が高密度に形成されていることが知られており、マンガンクラストの生成に絶好の条件が整っている。

(4) レアアース泥

レアアース泥は、2011年に太平洋で初めてその存在が報告された、その名の通りレアアース（rare-earth elements）を豊富に含んだ深海堆積物（泥）である。レアアースは、最先端の電子技術および環境技術に欠かすことの出来ない資源であるが、2010年に尖閣諸島を巡る日中間の緊張の高まり（特に、中国漁船による海上保安庁巡視船への体当たり事件）をきっかけとして起こった中国によるレアアース禁輸措置に伴って価格が暴騰した（レアアースショック）。レアアース泥の発見は、まさにこのレアアースショックとタイミングが一致していたことから、世界中で大きな注目を集めた。

レアアース泥は、主として微細な粘土鉱物から構成される深海底堆積物である。従来、遠洋性粘土あるいは赤色（褐色）粘土などと呼ばれているものの一部に相当し、中国のイオン吸着型鉱床より高いレアアース含有量（400 ppm以上）を持つことと定義されている。北太平洋やインド洋から報告されているレアアース泥は、ほとんどが総レアアース濃度（ランタノイド15元素とイットリウム合計）で数百 ppm程度であるのに対して、南東太平洋のレアアース泥は1,000～2,000 ppmと高い総レアアース濃度を示す。さらに、南鳥島（Minamitorishima Island）周辺の日本のEEZの中で見つかったレアアース泥の中には、8,000 ppmに達する超高濃度のものが見つかっている。

レアアース泥において、レアアースの濃集に関与している成分は三つあるとされている。一つは、海底熱水から放出された鉄水酸化物で、これが海水中のレアアースを吸着しながら堆積することでレアアースを濃集していると考えられている。二つめは、海水から沈殿するマンガン酸化物で、これらも熱水からの鉄水酸化物と同様に海水中のレアアースを吸着しながら堆積物中に沈積することで、レアアースを濃集していると考えられる。そして三つめは、生物の歯・骨片など（生物源リン酸カルシウム）であり、これが海水中のレアアースを取り込みながら沈積し、レアアースを濃集する。南鳥島EEZで見つかった超高濃度レアアース泥を含む、総レアアース濃度2,000 ppm以上のレアアース泥では、レアアース濃集に関わる上記三つの成分のうち、生物源リン酸カルシウムの寄与が最も顕著に認められる。さらに、生物源リン酸カルシウムはレアアース泥におけるレアアースの主要なホスト相ともなっている。

これら三つのレアアース濃集成分の寄与とは別に、レアアース泥中へのレアアースの濃集には、これらの成分によってもたらされたレアアースが、レアアースを濃集しない他の成分（例えば、生物源炭酸カルシウムや陸源屑砕物など）による希釈をなるべく受けないことも重要な要因となっていると考えられている。レアアースの濃集に関与していると考えられている熱水起源の鉄水酸化物、海水起源のマンガン酸化物、生物源リン酸カルシウムの三つはいずれも沈積のフラックスが非常に遅いため、レアアースを濃集していない他の

第6章 新たな海洋資源開発へ向けて

堆積成分が多く供給される条件では希釈されてしまう。そのため、レアアース泥の形成には、このような希釈成分がなるべく供給されない、堆積速度の遅い環境が必要であると考えられる。

6.2.2 海底鉱物資源の分布と資源ポテンシャル

(1) 海底熱水鉱床

海底熱水鉱床は、海底火山に伴って出来るものである。したがって、その存在場は海底火山の存在する場と同一と考えてよい。火山は、主として「プレート境界」と呼ばれる場所に存在することが知られており、活発な火山活動が起こるこのプレート境界には、「中央海嶺 (mid-oceanic ridge)」と「沈み込み帯 (subduction zone)」の2種類が存在している。

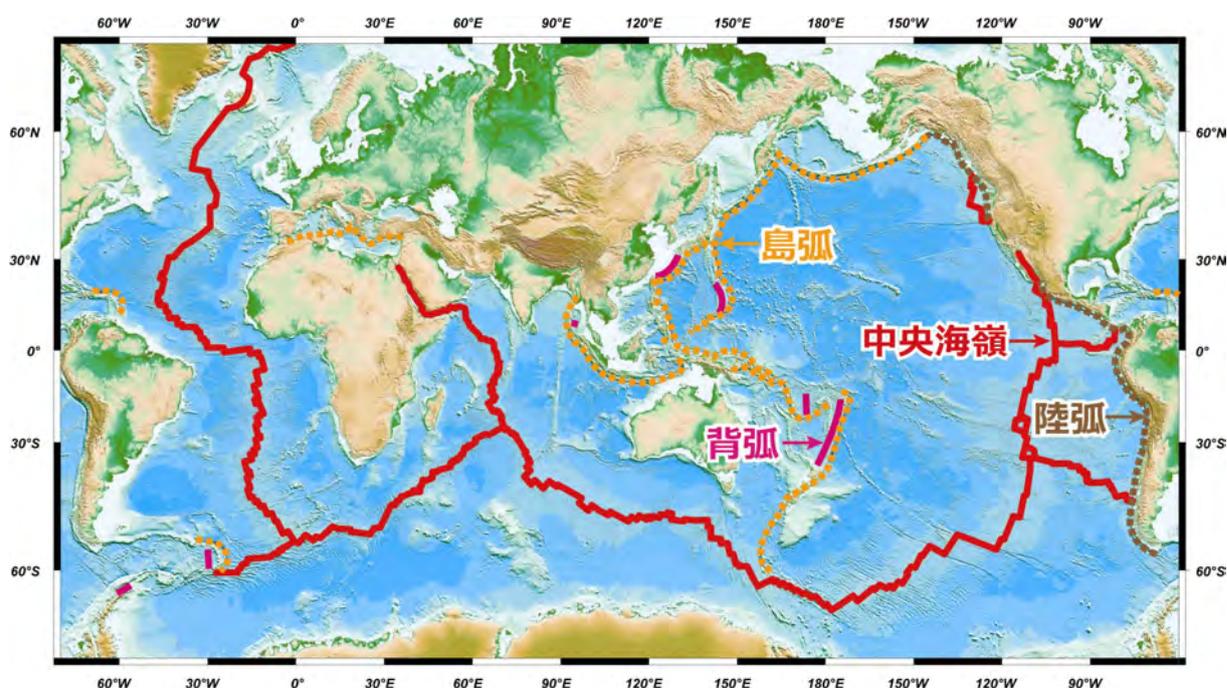


図 6.2.7 中央海嶺と沈み込み帯の分布

中央海嶺は、太平洋、インド洋、大西洋などの大洋の真ん中を 60,000 km 以上にわたって連なる海底火山の大山脈で (図 6.2.7)、プレートが新しく作られる場所としても知られている。この中央海嶺は、地球上で最も激しく火山活動が起こっている場であり、これまでに多数の海底熱水鉱床が発見されている。ただし、我が国の周辺には中央海嶺は存在していない (図 6.2.7)。一方、沈み込み帯は中央海嶺で作られたプレートが、海溝から文字通り地球内部に沈み込む場であり、ここでも活発な火山活動が起こることが知られている。沈み込み帯は、以下に述べるように「陸弧 (continental arc)」、「島弧 (island arc)」、「背弧 (back arc)」からなっており、地球をぐるりと取り巻くように存在する。それらは中央海嶺とは異なり、その多くが太平洋の周縁部に存在している (図 6.2.7)。世界有数

第6章 新たな海洋資源開発へ向けて

の火山国である我が国も、この沈み込み帯に位置している（図 6.2.7）。そのため、EEZ内に存在する海底熱水鉱床は、すべてこの沈み込み帯の火山活動に伴うものである。

太平洋の東側にある沈み込み帯は、南北アメリカ大陸の西海岸に存在している（図 6.2.7）。そのため、これらの沈み込み帯に伴う火山活動はすべて大陸内の陸上で起こっている。このような沈み込み帯は「陸弧」とも呼ばれる。一方、太平洋の西側にある沈み込み帯は大陸から離れた海洋中に存在し、火山島を形成している。このことから、この様な沈み込み帯は「島弧」とも呼ばれる。海底熱水鉱床の生成場としては、ほとんどが陸上火山からなる陸弧は適当ではなく、海底火山を主体とする島弧が重要である。また、島弧の背面（海溝と反対側）にはしばしば海洋底拡大を伴う海底火山活動場が伴われる場合がある。これを「背弧」といい、海底熱水鉱床の主要な存在場の一つと考えられている（図 6.2.7）。地球上で火山活動が起こる場としては、上記のプレート境界のほかに、ハワイのようにプレートの中に存在するものも少数だが存在し、これらは「プレート内火山」と呼ばれている。ハワイのような海洋のプレート内火山においても、熱水活動が起こっていることが知られている。しかし、その数は中央海嶺や沈み込み帯に比べると非常に少なく、なおかつこれまでに大規模な海底熱水鉱床を伴うような高温で活発な熱水活動は一つも見つかっていない。

これまでに発見されている海底熱水鉱床のうち、58%は中央海嶺から、26%は背弧から、16%が島弧から報告されており、プレート内火山からの報告は 1%未満である。中央海嶺の海底熱水鉱床は、水深 2,000~3,000 m に存在するものが多いのに対して、背弧のそれは 1,500~2,000 m、島弧のそれは 1,000 m 未満に存在するものが多く、中央海嶺に比べて明らかに浅いという傾向がある（図 6.2.8）。

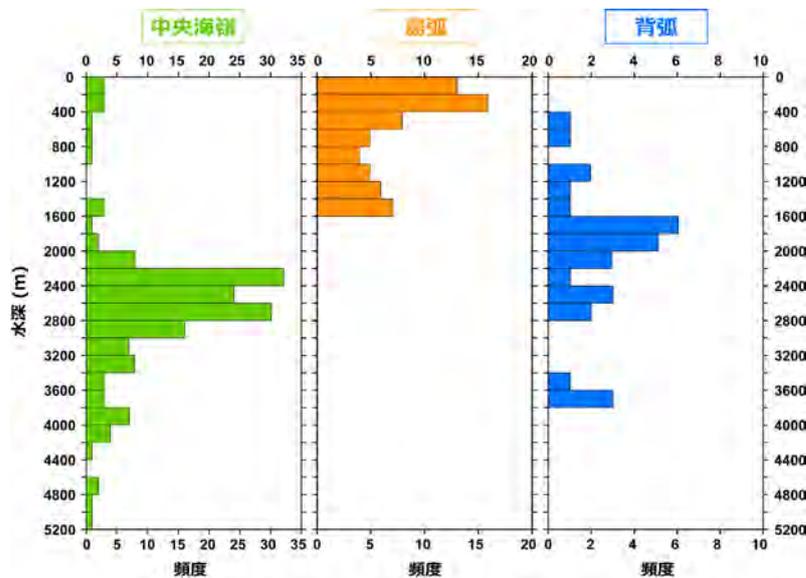


図 6.2.8 海底熱水鉱床の存在場と深度分布

(出典：データは Lehmköster, J., 2014 より)

水深は熱水活動場の圧力をあらわしており、さらにこの圧力は熱水の最高温度を規定す

第6章 新たな海洋資源開発へ向けて

ることになる（図 6.2.4）。そのため、水深の大きい中央海嶺の熱水に比べて、水深の小さな島弧の熱水の最高温度は低くなる。熱水の温度は、金属の溶解度を定める重要な要因であるため、高温条件（ $> 350^{\circ}\text{C}$ ）で出来る中央海嶺の海底熱水鉱床では銅が多く含まれるのに対し、比較的低温（ $< 350^{\circ}\text{C}$ ）で出来る島弧・背弧の海底熱水鉱床では、 350°C 以下では溶解度の低い銅の含有量が少なく、相対的に鉛、亜鉛など銅以外の重金属元素含有量が多くなるという系統的な違いが認められる。

日本は沈み込み帯の島弧と呼ばれる場に存在している。そのため、沈み込み帯の海底火山活動に関連した海底熱水鉱床が多数存在している。一方、中央海嶺とは遠く離れているために、日本の周辺に中央海嶺の火山活動に伴われる海底熱水鉱床は存在しない（図 6.2.7）。これまでに我が国周辺において見つかった海底熱水鉱床は、主として沖縄トラフ（Okinawa Trough）と伊豆・小笠原島弧（Izu-Bonin Arc）に集中している（図 6.2.9）。これは、北海道・本州・四国・九州の4島は非常に大きいため火山が全て陸上に存在するのに対して、沖縄トラフと伊豆・小笠原島弧は大きな島が少なく、多くの火山が海底に存在するためである。

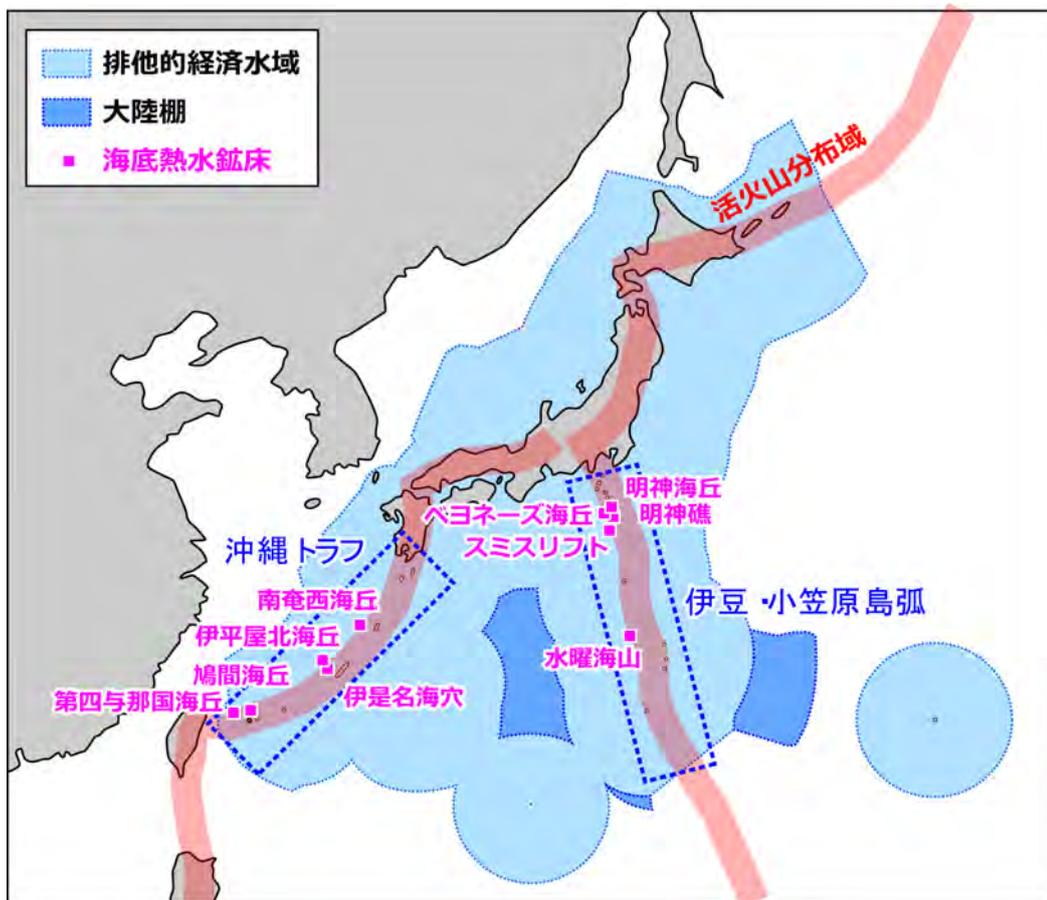


図 6.2.9 日本列島周辺の海底熱水鉱床（出典：中村, 2014 を改変）

沖縄トラフは、フィリピン海プレートがユーラシアプレートの下に沈み込んでいる「沈み込み帯」で、その海底では活発な火山活動が起こっていることが知られている。現在までに、中部の伊平屋北海丘、伊平屋小海嶺、伊是名海穴、および南部の鳩間海丘、伊良部

第6章 新たな海洋資源開発へ向けて

海丘、第四与那国海丘群などで大規模な熱水鉱床が見つまっている（図 6.2.9）。伊豆・小笠原島弧は、フィリピン海プレートの下に太平洋プレートが沈み込んでいる沈み込み帯である。これにともなって、やはり陸上および海底に活発な火山活動が起きており、現在までに北部の明神海丘カルデラ、ベヨネーズ海丘カルデラ、南部の水曜海山などに海底熱水鉱床の存在が確認されている（図 6.2.9）。これら二つの海域には、まだ見付かっていない鉱床が多数存在している可能性も高く、現在も調査が進められている。

海底熱水鉱床は、場所ごとに組成が大きくことなることと、鉱量を計算するのに必要な深さ方向の情報がほとんど得られていないことなどから、現段階で海底熱水鉱床全体の資源量はおろか、個々の海底熱水鉱床の鉱量を見積もることすら難しいというのが現状である。深さ方向の分布をきちんと把握するためには、ボーリング調査が必須である。しかし、海底でボーリングを実施するには専用のドリルシップもしくは、海底設置型のボーリングマシンが必要であり、時間やコストの制約から簡単には実施できない。そのため、現在までにボーリングによって深さ方向の情報が得られた上で、鉱量が推定されている海底熱水鉱床はわずか 10 か所程度に過ぎない（表 6.2.1）。

表 6.2.1 海底熱水鉱床の規模

鉱床名	場所	鉱床サイズ (Mt)	見積方法
アトランティスII	紅海	90	掘削船
ミドルバレー	ファンデフカ海嶺	10-15	掘削船 (ODP)
伊是名	沖縄トラフ	7.4	海底着座型掘削マシン
TAG	中央大西洋海嶺	4	掘削船 (ODP)
ソロワラ1	ビスマルク海	2.5	ROV
ソロワラ12	ビスマルク海	0.2	ROV
白嶺	伊豆-小笠原弧	0.1	海底着座型掘削マシン
ピカ	マリアナトラフ	<0.1	海底着座型掘削マシン
伊平屋北	沖縄トラフ	<0.1	掘削船 (ODP)
ロガチェフ	中央大西洋海嶺	<0.1	海底着座型掘削マシン
バックマヌス	ビスマルク海	<0.1	海底着座型掘削マシン
水曜海山	伊豆-小笠原弧	<0.1	海底着座型掘削マシン

(出典：Petersen et al., 2016 を改変)

このうち、1千万トンを超える鉱量を持つと見積もられているのは、紅海のアトランティスII凹地と東太平洋ファンデフカ海嶺のミドルバレーの海底熱水鉱床だけである。前者は、堆積物中に侵入した熱水から重金属硫化物が沈殿しているもので、塊状の硫化物鉱床ではなく、堆積物と混ざった「硫化物泥」と呼ばれる形で資源が存在している。一方、ミドルバレーでは鉱石は塊状の硫化物マウンドの形で存在するが、これらは大半が堆積物に埋まっている。このように、これまでに鉱量が推定されている海底熱水鉱床の中で特に大きな二つは、いずれも堆積物が大量に供給される場において生成したものであるという共通点がある。次に、百万トンオーダーの鉱量が推定されている海底熱水鉱床は、沖縄トラフ

第6章 新たな海洋資源開発へ向けて

の伊是名と大西洋中央海嶺の TAG、そしてパプアニューギニアのビスマルク海にあるソロワラ 1 の三つである。この三つのうち、伊是名だけは上述のミドルバレーと良く似た、堆積物が大量に供給される場において生成した塊状硫化物鉱床であるが、他の二つは堆積物の関与のない典型的な海底熱水鉱床である。これら五つ以外のサイトは、すべて百万トンを超えて下回る鉱量しかない極小規模な海底熱水鉱床であると見積もられている。

わずか 10 例のみから確定的なことを言うのは難しいが、これらのデータから以下の二つの可能性を指摘することができる。まずは、1 千万トンクラスの鉱床が形成されるためには、堆積物の関与が必要であるということである。この理由として考えられるのは、(a) 上昇してきた熱水が堆積物中で硫化物鉱物を沈殿させるため、本来は海水中に放出されてしまっている熱水噴出孔には沈殿しない硫化物（このような硫化物がほとんど全てだと考えられている）までがすべて沈殿・集積するために規模が大きくなること、そして (b) 堆積物によって酸化的な海水から遮断されるために、硫化物の風化による消失を防ぐことができることである。もう一つ指摘できる可能性は、堆積物の関与が無くとも百万トンクラスの海底熱水鉱床は生成し得るということである。ただし、既存のデータ（表 6.2.1）のみを見ても、ここまで大きくなるものは全体として見ると極少数であると考えられる。このことから、大半の海底熱水鉱床は百万トンよりも遥かに小さい規模にしかならない可能性が高い。

(2) マンガン団塊

マンガン団塊は、太平洋、大西洋、インド洋など世界の海洋の深海底に広く分布している。ただし、堆積速度が 1000 年間に 2 cm 以下と遅い場所に限られるために、生物源の炭酸塩堆積物が堆積する水深 4,000 m 以浅の海域（中央海嶺や海山の頂部・翼部）や、陸源の碎屑物、もしくは風成塵が大量に供給されるような海域では、大規模な分布は認められないと考えられる。

これまでで最も広域かつ高密度なマンガン団塊が見つかった海域は、太平洋東部のクラリオン断裂帯とクリッパートン断裂帯に挟まれた海域（CCZ : Clarion-Clipperton Zone）である。このマンガン団塊分布域は、メキシコ沖からハワイ沖にまで及ぶ少なくとも 12,100,000 km² にわたって続いている（図 6.2.10）。マンガン団塊の分布密度は、高いところで 75 kg/m² に及び、海域全体の平均でも 15 kg/m² に達する。太平洋における CCZ 以外の分布域としては、東太平洋のペルー海盆（Peru Basin）および南太平洋のペンリン海盆（Penrhyn Basin）に、CCZ に次ぐ規模のマンガン団塊の分布が確認されている（図 6.2.10）。ペルー海盆は、ペルーの沖合約 3,000 km に位置する海盆で、CCZ の約半分の広さの海域に平均でも 10kg/m² の密度のマンガン団塊の分布が確認されている。一方のペンリン海盆は、オーストラリアの東岸から数千キロに位置するクック諸島近傍の海盆で、750,000 km² の海域に 25 kg/m² を越える高密度のマンガン団塊が分布している。太平洋以外にも、インド洋や大西洋の深海底においてもマンガン団塊の存在は確認されている。このうち、中央インド洋海盆（Central Indian Ocean Basin）においては、これまでにペンリン海盆に匹敵する広さのマンガン団塊分布域が報告されている（図 6.2.10）。この海域におけるマンガン団塊の分布密度は、約 5 kg/m² とやや低い。

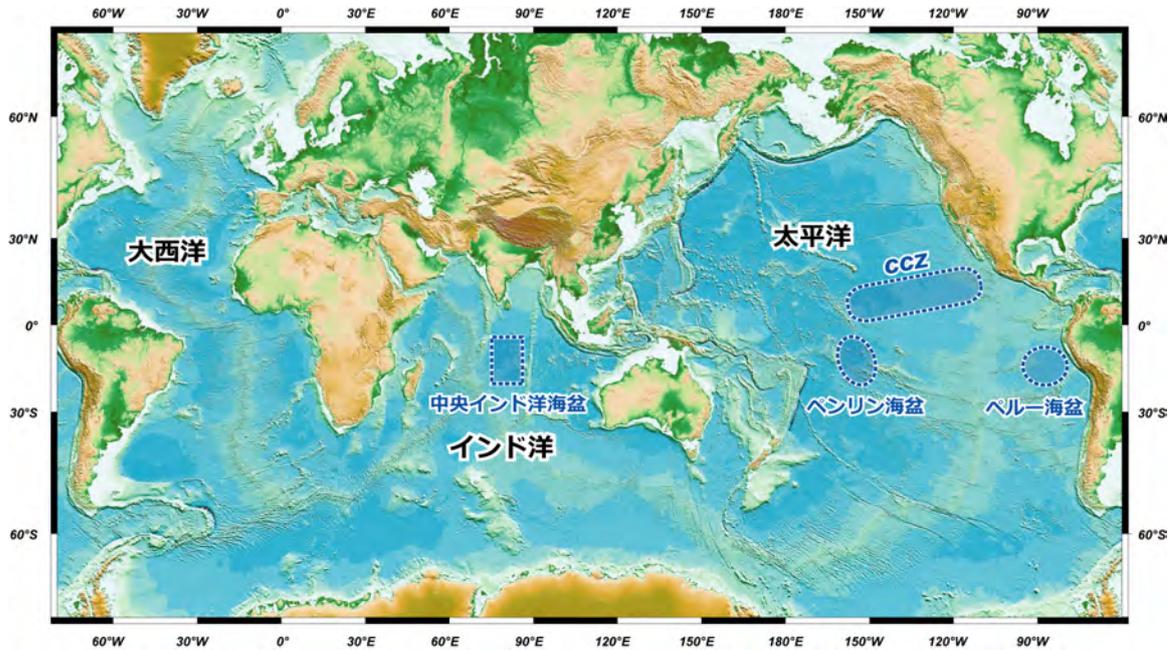


図 6.2.10 太平洋とインド洋でこれまでに知られている大規模マンガン団塊分布域

日本の EEZ 内においても、マンガン団塊が存在することは古くから知られていた。ただし、それらは主にマンガンクラストの発達する海山の緩斜面部にスポット的に発達するもので、上記の太平洋の深海盆に発達する広大なマンガン団塊分布域と比較するようなものではなかった。そのため、EEZ 内のマンガン団塊が資源として注目されることはなかった。しかし、2016 年に南鳥島沖 EEZ の水深 5,500~5,800 m の深海盆に大規模なマンガン団塊分布域が存在していることが明らかとなった。この南鳥島 EEZ のマンガン団塊分布域の広さは、約 44,000 km² におよぶと推定されている。これは、上述の CCZ やペンリン海盆のマンガン団塊分布域に比べると小さいが、日本が CCZ に持つマンガン団塊探査鉱区 (75,000 km²) の 60% 近い広さであり、資源として十分に検討に値するものであると考えられる。

マンガン団塊の主要な構成金属元素はマンガンと鉄であるが、経済的な興味を持たれているのはむしろ副成分である銅、ニッケル、コバルトである。さらに最近では、微量成分であるモリブデン、リチウム、希土類元素などにも注目が集まりつつある。現在まで、マンガン団塊の詳細な分布と資源量がある程度把握されている海域は、太平洋の CCZ とペンリン海盆を含むクック諸島の EEZ のみである。その他の場所は、資源量はおろか分布の詳細さえもほとんどわかっていないのが現状である。

12,100,000 km² にわたって続く CCZ のうち、ISA が管轄する有望海域 5,480,000 km² に存在するマンガン団塊の総量は、乾燥重量で 211 億トンと見積もられている。この膨大なマンガン団塊に含まれるマンガンは、陸上のマンガン資源量を凌駕しており、同じくニッケルとコバルトは、陸上資源のそれぞれ 2 倍と 3 倍に相当すると見積もられる。また、希土類元素の一種であるイットリウムは陸上資源の 4 倍、レアメタルの一種であるタリウムは実に 6,000 倍も存在すると見積もられている。一方、CCZ のマンガン団塊に含まれる銅

第6章 新たな海洋資源開発へ向けて

の総量は、陸上の銅資源量の20%程度と見積もられている。ペンリン海盆を含むクック諸島のEEZは1,830,000 km²あり、このうちマンガン団塊の分布が確認されるのは750,000 km²である。EEZ内のマンガン団塊総量は、乾燥重量で51.3億トンと見積もられている。このうち、主要なターゲットとなる金属であるコバルトの資源量は、陸上資源の約2倍程度と見積もられる。一方、ニッケルと銅に関しては、それぞれ陸上資源の約30%および約2%程度が存在すると見積もられている。

(3) マンガンクラスト

マンガンクラストは、太平洋、大西洋、インド洋において広く分布が認められているほか、北極海においても存在が報告されている。そのため、世界の海に普遍的に存在していると考えられる。一方、マンガンクラストの分布を考える際には、(1)出現が海山や海台の斜面および頂部に限られることと、(2)100万年で数mmという極めてゆっくりした速度で長い時間をかけて成長すること、という2点を踏まえる必要がある。すなわち、マンガンクラストの分布密度は海山・海台の出現頻度と、それらの年代に大きく依存すると考えられる。世界の海山の分布は、その57%が太平洋に集中していることが知られており、インド洋や大西洋における海山の分布密度は太平洋に比べてずっと低い(図6.2.11)。

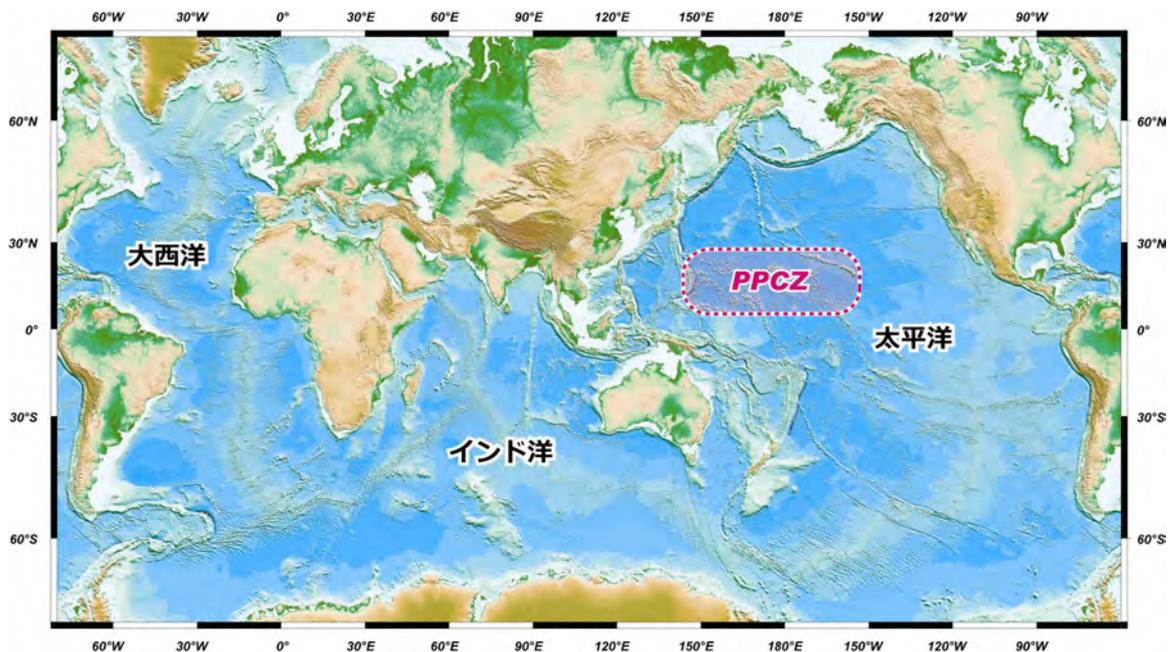


図 6.2.11 世界の海底地形と海山の分布。PPCZ: Pacific Prime Crust Zone

このことは、マンガンクラストの分布密度が太平洋において高いことを意味している。その中でも、特に注目されるのが西太平洋である。この海域には世界でも最も古く(1億年～1億5千万年前)、しかもサイズの大きな海山が高密度に分布していることが知られている。そのため、この海域はPacific Prime Crust Zone (PPCZ)と呼ばれ、マンガンクラストの最も有望な海域として、上述したマンガン団塊のCCZと共に、大いに注目されている(図6.2.11)。

第6章 新たな海洋資源開発へ向けて

南鳥島 EEZ を含む伊豆・小笠原海溝の東側海域の太平洋プレート上は、上記の西太平洋 PPCZ の一部に相当し、1 億年よりも古い年代を示す海山が多数存在している(図 6.2.12)。そして、この海域の海山には 10cm を超えるような厚いマンガンクラストの分布が確認されている。一方、伊豆・小笠原海溝西側のフィリピン海プレート上にも、多数の海山が存在しており(図 6.2.12)、これらの海山においてもマンガンクラストが普遍的に発達していることが確認されている。ただし、これらの海山の年代は数千万年から数百万年と、太平洋プレート上の海山に比べるとずっと若い。そのため、マンガンクラストの厚さも薄いことがわかっている。

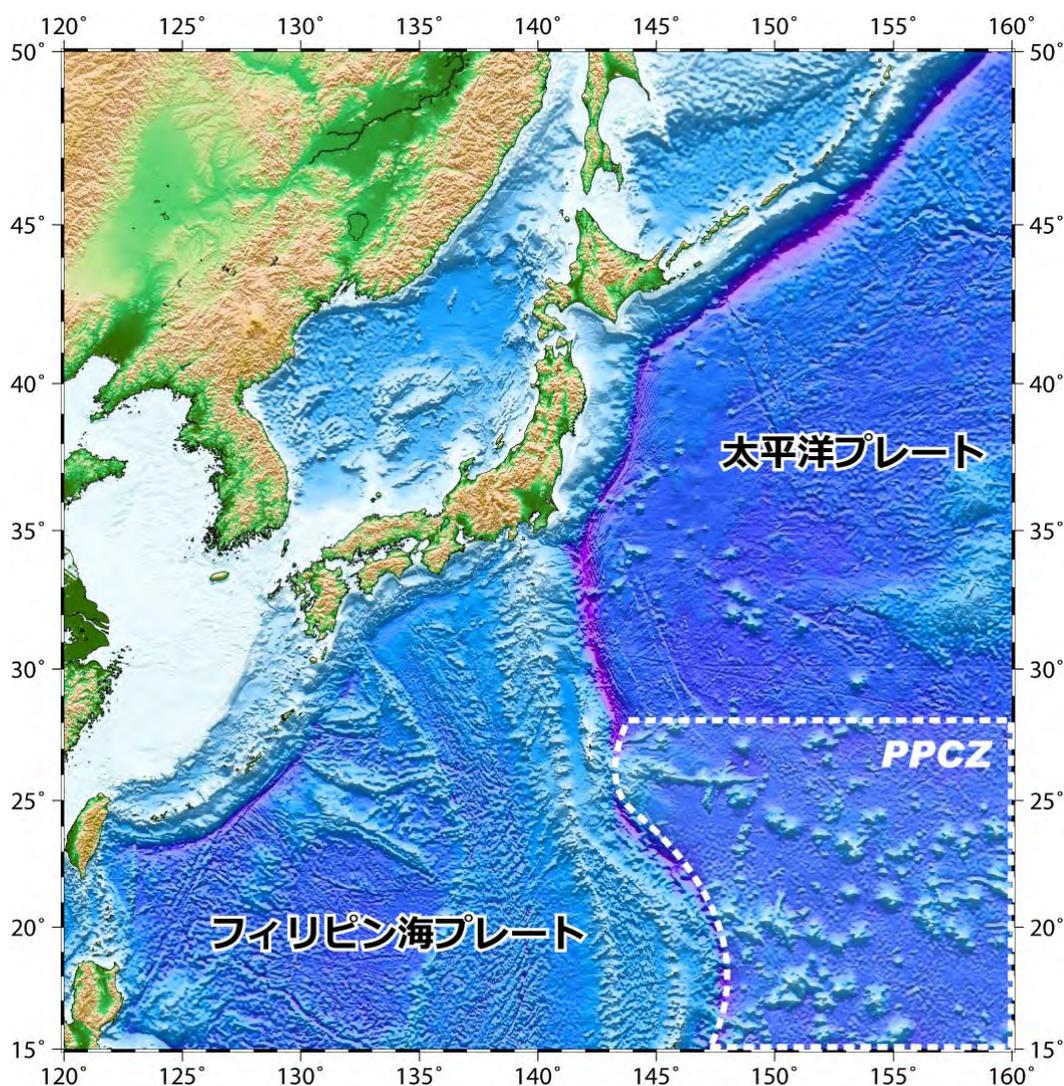


図 6.2.12 日本周辺海域における海山の分布. PPCZ: Pacific Prime Crust Zone

マンガンクラストについて、資源ポテンシャルの見積りが試みられているのは、現在のところ西太平洋の PPCZ だけである。それによると、PPCZ に分布するマンガンクラストの総量は、乾燥重量で 75.3 億トンと見積もられている。このうち、最も主要なターゲットであるコバルトの資源量は、陸上資源の約 4 倍、またその他の金属としてイットリウムは

陸上資源の約3倍、テルルは約9倍、そしてタリウムが約1,700倍存在すると見積もられている。

(4) レアアース泥

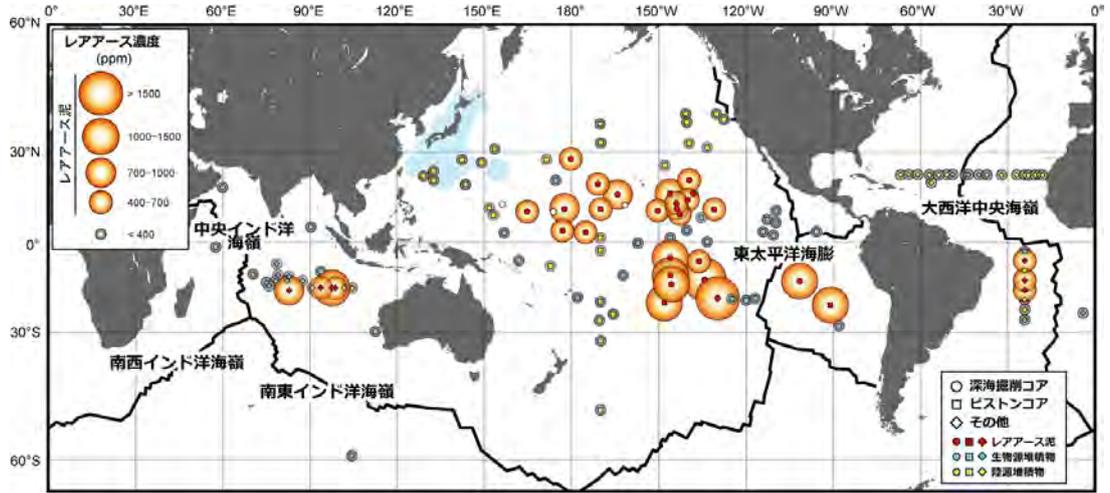


図 6.2.13 太平洋，インド洋，大西洋の海底表層におけるレアアース泥の分布

(出典：Nakamura et al., 2015 を改変)

現在までに、レアアース泥は特に太平洋に広く認められているほか、大西洋とインド洋の一部でも確認されている（図 6.2.13）。その成因としては、海底熱水から放出された鉄水酸化物や海水から沈殿するマンガン酸化物、生物の歯・骨片などが堆積速度の遅い海底にゆっくりと沈積し、海水中のレアアースを取り込むことでレアアースが濃集すると考えられている。また、レアアース泥の形成には、上記レアアース濃集成分以外の成分により希釈されないことも重要であると考えられている。そのための条件として、(a) 水深が炭酸塩補償深度（CCD：Carbonate Compensation Depth）より深いこと、(b) 生物活動が活発な赤道域から離れていること、(c) 陸源物質の供給源である大陸から離れていることの三つが挙げられる。一般に海洋では、表層に生息する生物の炭酸カルシウム殻が海底へ向かって沈降しており、それらが海底に大量に降り積もると、堆積物中のレアアースが希釈される。しかしながら、水深が CCD（現在の太平洋では約 4,000 m 以上）よりも深くなると、主に圧力の効果により炭酸塩の溶解度が大きくなり、海底に炭酸塩が堆積しなくなる。また、生物活動が活発な赤道域では、上記の炭酸カルシウム殻以外に、表層に生息する生物のシリカ殻が大量に降り積もることが知られている。そのため、このような海域では炭酸カルシウム殻の堆積しない水深においても、このシリカ殻によって堆積物中のレアアースが希釈されてしまう。さらに、大陸からは風によって細かな砂や塵などの碎屑性粒子が運ばれてくる。大陸に近づくほどこれらの粒子の供給量は増大するため、それらが大量に降り積もる大陸近傍では、やはり堆積物中のレアアースが希釈されてしまうことになる。実際に、このような生成条件を反映して、これまでに知られているレアアース泥の分布は、赤道および大陸から離れた深海域に存在している（図 6.2.13）。

第 6 章 新たな海洋資源開発へ向けて

2011 年の発見当初、レアアース泥は日本の EEZ 内には確認されていなかった。しかし、最初の発見から約一年後に、日本の EEZ である南鳥島周辺海域にもレアアース泥が存在することが明らかとなっている。南鳥島は本州から約 1,800 km 離れた我が国の最東端の島であり、また日本で唯一太平洋プレート上に存在する島でもある。この島は、今から 1 億年以上前に南太平洋で誕生し、太平洋プレートの運動に伴って現在の位置まで移動してきたことがわかっている。その間に、北太平洋のレアアース泥が堆積する海域を通過しており、そこで形成されたレアアース泥が現在南鳥島に存在していると考えられる (図 6.2.14)。

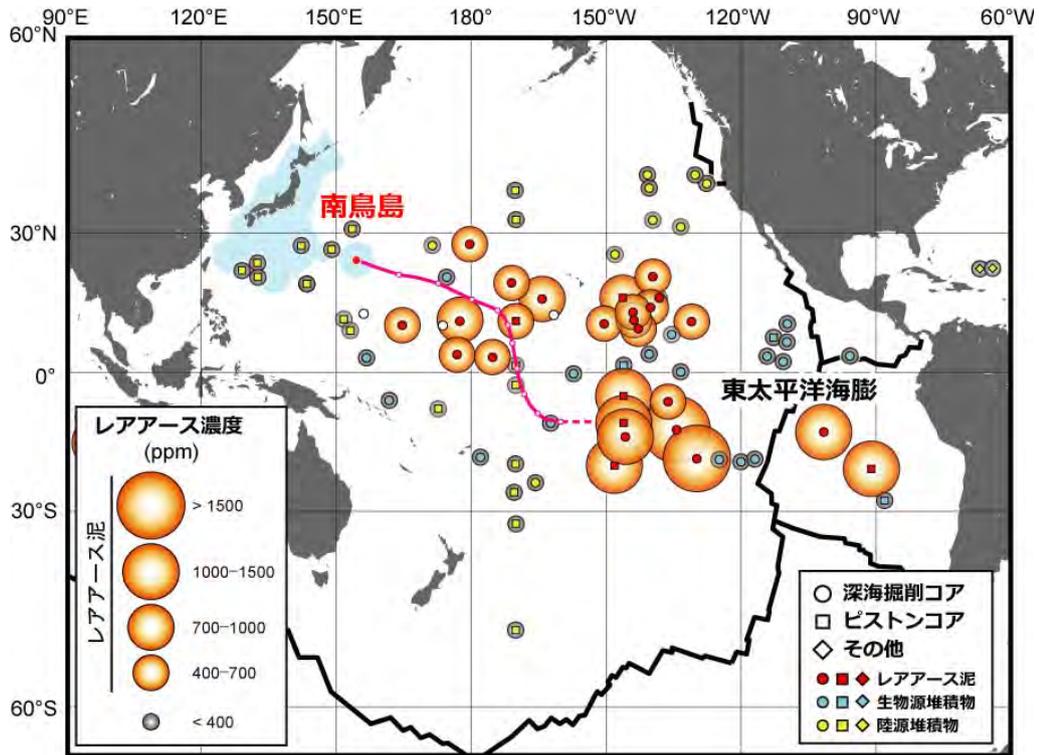


図 6.2.14 太平洋プレート上における過去 1 億年の南鳥島の軌跡

(出典 : Kato et al., 2011 を改変)

また、近年の調査の進展によって、南鳥島 EEZ ではこれまで太平洋で見つかったレアアース泥の実に 3 倍以上に達する、7,000 ppm を超える「超高濃度レアアース泥」が、海底下 2~4 m 程度の比較的浅い深度に存在していることも発見されている。このような超高濃度のレアアース泥は、これまで世界中で南鳥島 EEZ 以外では見つかっておらず、このような泥がいつどのようにして形成されたのかが大いに注目される。

南鳥島 EEZ におけるレアアース泥の探査は、超高濃度レアアース泥発見後も精力的に続けられており、音響探査によるレアアース泥の分布状況の解明や、海底から採取されたコアサンプルの鉱物学的・化学的解析にもとづくレアアースホスト相の解明などが現在も進められている。

レアアース泥が持つレアアース資源量は、広大な分布が確認されている太平洋において

第6章 新たな海洋資源開発へ向けて

見積もりが行われている。それによると、タヒチ沖の南東太平洋のレアアース泥分布エリアの面積は 2,360,000 km² であり、そのレアアース資源ポテンシャルは、酸化物換算で 120 億トンと見積もられている。さらに、ハワイ沖の中央太平洋のレアアース泥分布エリアの面積は 8,800,000 km² であり、そのレアアース資源ポテンシャルは、酸化物換算で 760 億トンと見積もられている。この二つを合わせた太平洋全体のレアアース資源ポテンシャルは 880 億トンとなり、これは現在確認されている陸上資源の 800 倍というとてつもない量である。

6.2.3 海底鉱物資源開発への展望

海底鉱物資源の開発が、これまでの陸上資源の開発と最も大きく違う点は、(1) 人間が直接行くことのできない高圧（数百気圧）の深海底において、リモートコントロールされた機械等を使いながら鉱石を採取する「採鉱（mining）」と、(2) 採取された鉱石を数千 m 上の海面まで水中を揚げる「揚鉱（lifting）」の 2 点である。そしてこれらは、メンテナンス等が容易でない深海底において長期にわたって操業を続けられるだけの信頼性と耐久性を兼ね備えたものでなくてはならず、大きなチャレンジとなっている。

(1) 海底鉱物資源採鉱・揚鉱システム開発の実例：マンガン団塊

深海底の鉱物資源を採掘して引き上げるという挑戦を人類が最初に行ったのは 1970 年代であり、ターゲットはマンガン団塊であった。それ以前から、マンガン団塊にはマンガンの他に銅やニッケルなどの有価金属が高濃度で含まれているため、海底鉱物資源としての注目が集まっていたが、1960 年代に入ると開発を目的とした調査・研究が本格的に始められた。その結果を受けて、1970 年代にアメリカ、カナダ、イギリス、西ドイツ、ベルギー、オランダ、イタリア、フランスなどの企業が参加する複数の国際コンソーシアムによって、採鉱・揚鉱システムの設計・製造と実海域での試験が集中的に行われた。この際に、マンガン団塊の採鉱・揚鉱システムの基本的なデザインコンセプトとして、(1) 採鉱機によって採集された鉱石をスラリー状にして、パイプによって海面まで送るタイプ（流体ドレッジ法（hydraulic dredging））、(2) ケーブルに等間隔に取り付けられたバケットによって、採鉱と揚鉱を行うタイプ（連続バケット法（continuous line bucket mining））、(3) 独立した採鉱シャトルがマンガン団塊を採集後、自前の浮力で海面まで浮上してくるタイプ（シャトルマイナー法（shuttle mining））の三つが提案され、採鉱・揚鉱の試験が行われている（図 6.2.15）。また、(1) のタイプはスラリーを揚げるための動力としてポンプを使う方式（ポンプリフト（pump lift））と空気を使う方式（エアリフト（air lift））が存在する（図 6.2.16）。

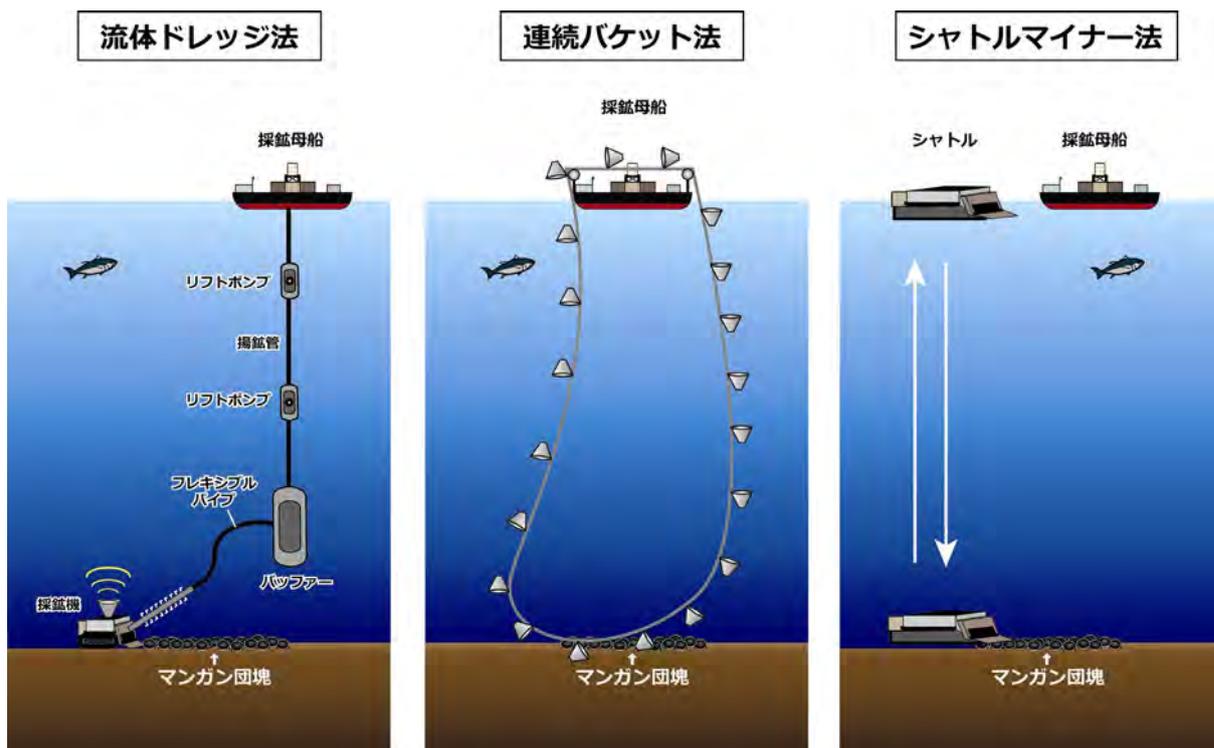


図 6.2.15 現在までに提案されている三つのマンガン団塊採鉱・揚鉱システム

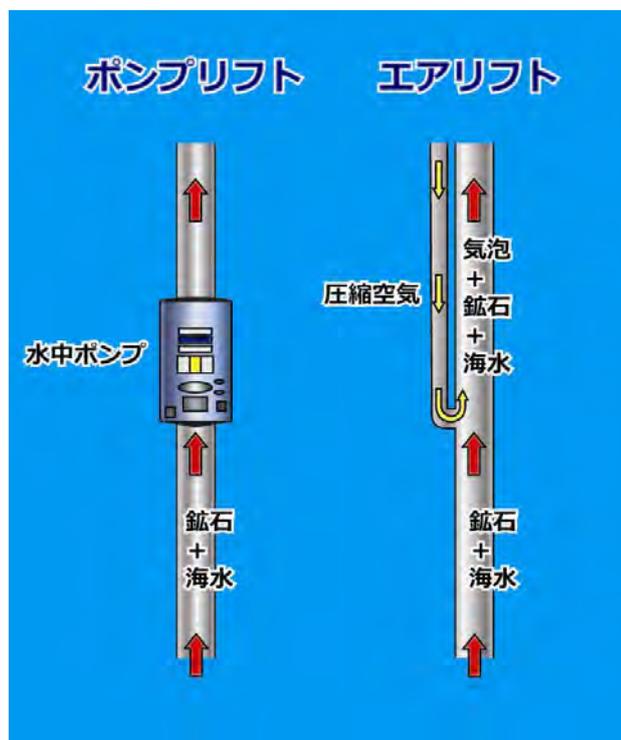


図 6.2.16 マンガン団塊揚鉱のための二つのリフトシステム

(出典：Nakamura et al., 2015 を改変)

マンガン団塊採鉱・揚鉱システムの実海域試験を世界で最初に行ったのは、アメリカの Deep Sea Ventures 社であり、1970 年のことである。この時の試験海域はフロリダ沖の大

第6章 新たな海洋資源開発へ向けて

西洋にあるブレイク海台で、水深は実際のマンガン団塊分布域よりも浅い1,000 mであった。用いたシステムは、採鉱機とエアリフトシステム（あらかじめ250 mの採鉱管でテスト済み）からなる流体ドレージ法によるもので、これを高さ25 mのデリックと6×9 mのムーンプールを備えた6,750トンの母船から運用することで、マンガン団塊の採鉱・揚鉱に成功している。

同じく1970年に、延縄漁法から着想を得た益田善雄氏によって考案された日本独自方式である連続バケット法の試験が、タヒチ沖の水深3,760 mの海域で行われ、マンガン団塊の採集に成功している。さらに、1972年には30社からなる企業連合がこの連続バケット方式による実海域試験を、CCZの水深4,900 mの海域で実施している。この時に使用されたシステムは、長さ8 kmのケーブルに等間隔にバケットが付けられたものを船首より海底に降ろし、船尾より回収するというものであった。この試験では、10日以上にわたり総量にして8トンのマンガン団塊を採集することに成功した。しかし、長く伸びたケーブルが絡み付いてしまうというトラブルも試験期間中に3回発生し、連続バケット方式の問題点も浮き彫りとなった。この経験をふまえ、約1 km離れた2隻の船を使って、2船の間でバケットを循環させる新たなシステムが提案され、1975年にその試験を行うことが計画されたが、この新たな試験は、資金を工面できなかったために、実行されることなくキャンセルされている。

1970年代後半には、アメリカ企業を中心とし、アメリカ、ヨーロッパ、日本の企業からなる三つの国際コンソーシアムが流体ドレージシステムの実海域試験を実施している。このうち、Ocean Management Incorporated (OMI) は、1978年の初めにSEDCO 445という掘削船を利用して、ポンプリフトとエアリフトを用いた流体ドレージシステムの試験を行った。ポンプリフトは、揚鉱管の水深1,000 mのところに取り付けたポンプによって揚鉱するもので、エアリフトは、同じく揚鉱管の水深1,500 mと2,500 mのところの空気の吹き込み口を設置したシステムである。実海域試験は、ハワイの南方1,250 km地点のCCZにおいて3回行われ、合計600トンのマンガン団塊を採鉱・揚鉱することに成功している。

Ocean Mining Association (OMA) は、1976年に20,000トンの母船から運用するエアリフトを用いた流体ドレージシステムを作製し、1977年よりサンディエゴの南西1,900 kmのCCZにおいて採鉱・揚鉱実験を開始した。この最初の試験は揚鉱管の機器トラブルによって中止となったが、1978年初頭から再びCCZにおけるエアリフトを用いた流体ドレージシステムによる3回の浅海試験（水深1,000 m）と1回の深海試験（水深4,000 m）、そして4回の実海域試験（水深5,000 m）を行った。これらの試験においても、技術的課題や天候の悪化によって度々の中断を余儀なくされたものの、1978年10月に行われた最後の試験において18時間の連続運転に成功し、550トンのマンガン団塊を採鉱・揚鉱することに成功している。ただし、この最終試験も機器トラブルにより中断されている。

Ocean Minerals Company (OMCO) は、1978年に33,000トンの船をアメリカ海軍より借り受け、これを母船とする採鉱・揚鉱システムの試験を開始した。OMCOのシステムは、自走式の採鉱機を特徴としている。これらは、カリフォルニア沖の水深1,800 mの海

第6章 新たな海洋資源開発へ向けて

域において何度か浅海試験を実施した後に、1978年末にハワイ沖での実海域試験を行った。しかし、この最初の試験はムーンプールのハッチが開かなくなるというトラブルのために中止となった。明けて1979年2月に実海域試験は中断となり、マンガン団塊の採鉱・揚鉱は行われなかった。

1979年には、前述の二つの方式とは全く異なる方式の採鉱・揚鉱システムが、フランスの技術者達によって提案された。シャトルマイナー法と呼ばれるこのシステムは、潜水調査船のオペレーションに良く似ている。まず、独立したビークルが自ら海底に潜り、海底に着くと積んでいるバッテリーを動力源として、キャタピラーで動き回りながらマンガン団塊を採取する。そしてマンガン団塊を250トン採取した後、バラストを捨てて海面まで浮上し、これを母船へと回収することで揚鉱を行うというものである。このシステムはしかし、フィーシビリティースタディーにおいて、極めて高コストであることが明らかとなってしまった。なぜなら、250トンのマンガン団塊を採取するために、実に1,200トンの巨大なシャトルが必要になってしまうためである。この問題は、4,000~5,000mという深海で使用可能な高性能な浮力材が存在しないことと、採鉱作業を支えるためのバッテリー(当時は鉛蓄電池が想定されていた)のサイズと重量が大きくなるものになってしまうことに起因している。

1970年代に行われたこれら一連の採鉱・揚鉱試験によって、流体ドレッジ法が深海からマンガン団塊を採鉱・揚鉱する上で最も効率的で信頼性の高いシステムであると考えられるようになった。そのため、1980年代以降に日本、フランス、インド、韓国等においてその後新たに計画されたマンガン団塊の採鉱・揚鉱システムは、すべて流体ドレッジ法を採用している。ただし、1980年代以降に実際にマンガン団塊の採鉱・揚鉱システムの実海域試験まで行われた例は無い。日本においても、独自の採鉱・揚鉱システムの開発を目指した取組みが1981年からスタートしている。揚鉱システムについては、ポンプリフトとエアリフトが平行して開発され、それぞれ200mの縦型水槽を用いた陸上試験まで完了している。そして1990年代後半には、南鳥島沖の平頂海山山頂(水深2,000m)において採鉱・揚鉱システムの海域試験が行われ、採鉱機の試験に成功している。しかし、その後の実海域(水深5,000m)での開発は終了となっている。

いずれにしても、上述のように1970年代にはすでに水深5,000m以上という深海から鉱物資源を採鉱・揚鉱することに成功しており、海底鉱物資源の開発に技術的な壁は無いと言える。

(2) 海底鉱物資源開発への新たな挑戦：海底熱水鉱床

海底熱水噴出孔の周辺にマウンドという形で集積した硫化鉱物を採鉱・揚鉱した例は、世界中でこれまでに一例も無い。ただし、重金属泥(metalliferous muds)と呼ばれる熱水から沈殿した硫化鉱物を多量に含む泥を海底から採鉱・揚鉱した例は、一例だけ存在する。マンガン団塊の採鉱・揚鉱試験が盛んに行われていた1979年、ドイツの鉱山会社であるPreussag AGは、紅海の水深約2,000mの海域で採鉱・揚鉱システムのプレパイロット試験を実施し、ポンプリフトを用いたシステム(図6.2.17)で15,000m²(260万トン)

第6章 新たな海洋資源開発へ向けて

の重金属泥を採取することに成功している。

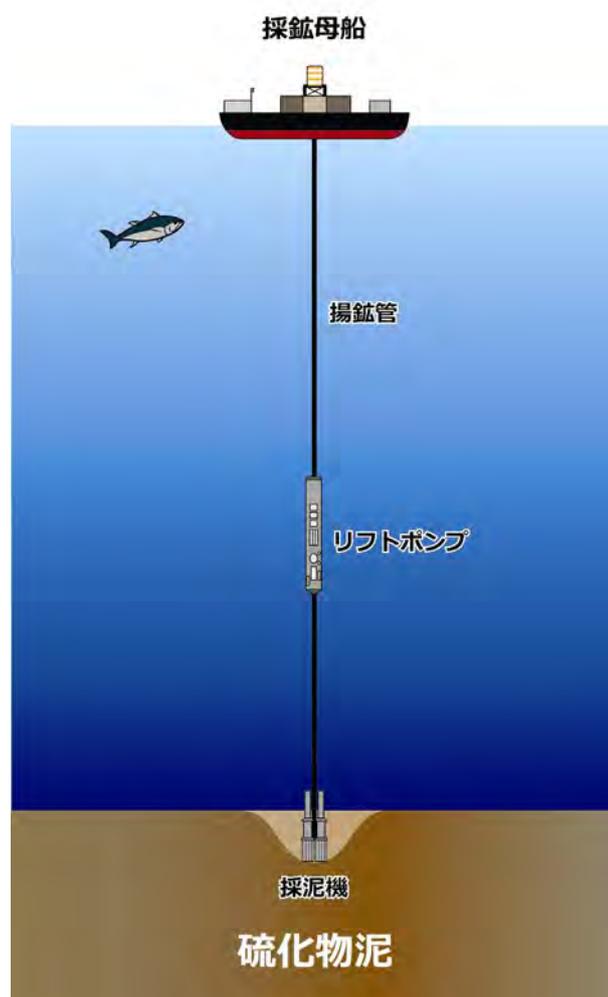


図 6.2.17 紅海の硫化物泥採取のためのポンプリフトシステム

(出典：Nakamura et al., 2015 を改変)

一方近年、カナダの Nautilus Minerals 社はパプアニューギニアの EEZ 内に存在する海底熱水鉱床の商業開発を目指して、探査と採鉱・揚鉱システムの構築を進めている。Nautilus Minerals 社の計画しているシステムも、採鉱機とポンプリフトを用いた流体ドレッジ法を採用している (図 6.2.18)。

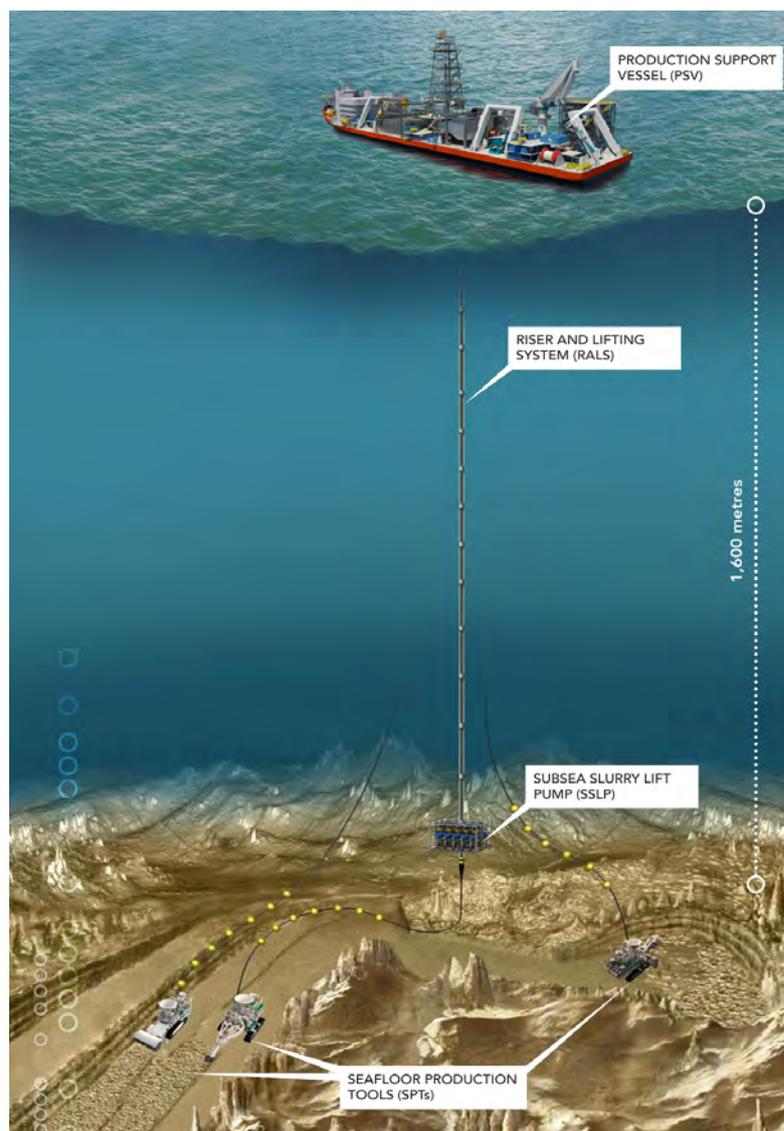


図 6.2.18 Nautilus Minerals 社が構築中の海底熱水鉱床開発システム

(出典：Nautilus Minerals 社ウェブサイト)

現在までに、3 種類の採鉱機を完成させ、陸上試験を行っていると報じられている。また、ポンプリフトを用いた揚鉱システムも完成品の陸上テスト段階にあるという。一方、これらの採鉱・揚鉱システムを運用するための母船は、2016 年現在まだ建造中である。

日本では、2008 年より JOGMEC が中心となって、EEZ 内の海底熱水鉱床開発を目指した探査、採鉱・揚鉱技術の開発が進められている。2015 年までには 2 種類の採鉱機の製作と試験を行い、ポンプリフトの陸上試験も実施されている。そして、現在の計画では 2017 年に沖縄本島北西沖の水深 1,600 m の海域において、実海域試験を実施する予定である。これに成功すると、前述の Nautilus Minerals 社を追い抜いて、世界初の海底熱水鉱床の実海域試験成功例となる可能性がある。

(3) レアアース泥およびマンガングラスト開発への展望

レアアース泥は、現在のところ採鉱・揚鉱システムの構想段階にあり、実地での試験の段階にはまだない。しかし、レアアース泥には以下の二つの有利な点がある。一つは、存在する場所が水深 4,000 m 以上の深海底で、1970 年代に採鉱・揚鉱試験が成功しているマンガング塊とほぼ同じあること。そしてもうひとつは、これまた 1970 年代に既に採鉱・揚鉱試験が行われている紅海の熱水性硫化物泥と同じ泥であるということである。すなわち、レアアース泥の採鉱・揚鉱システム開発に際して、まったくのゼロから挑戦しなくてはいけない課題はなく、既存の技術のみを用いて開発可能であると考えられる。

実際、レアアース泥の開発においては、上記のマンガング塊および硫化物泥の開発システムをもとに、さらに現在運用中の海底石油開発技術を応用した開発システムが提案されている (図 6.2.19)。このレアアース泥開発システムでは、まず水中バックホウなどの採泥機を用いた採鉱システムにより、海底のレアアース泥を採鉱し、これをエアリフト方式による揚泥リフトシステムで深海底から母船上まで揚泥することが想定されている。

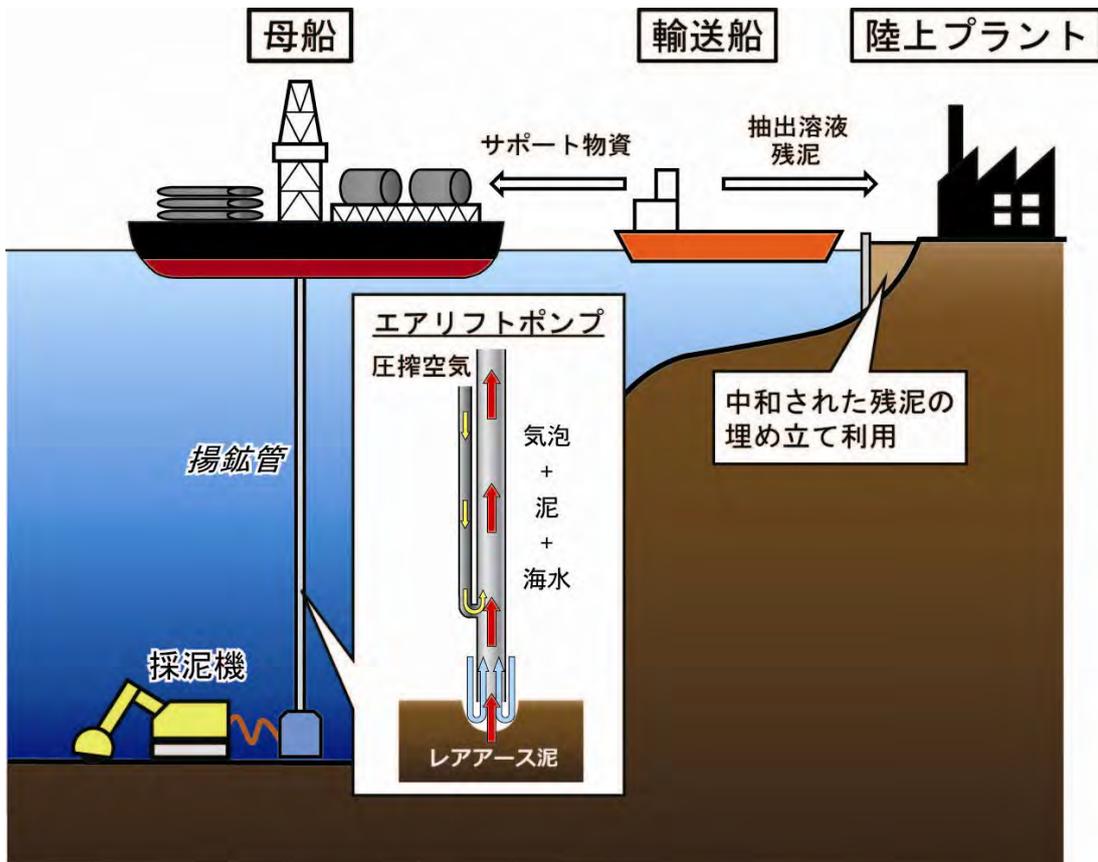


図 6.2.19 提案されているレアアース泥開発システム

(出典 : Nakamura et al., 2015 を改変)

一方、現在までマンガングラストの具体的な開発システムは構想段階にも至っていない。もちろん、実地でテストされた実績も無い。この大きな原因のひとつは、急峻な海山の斜

第6章 新たな海洋資源開発へ向けて

面の露岩表面に成長する厚さ数 cm から数十 cm のマンガン酸化物層を広大な面積にわたって引き剥がすという採鉱方法が、他の海底鉱物資源のそれと比べて技術的に複雑で難しいものだからと言える。急傾斜で起伏の激しい斜面に、不均質な厚さで張り付くマンガンクラストを剥がすことのできる採鉱機のデザインは、未だ示されてはいない。採鉱の困難さの一方で、マンガンクラスト揚鉱のためのシステムは、他の海底鉱物資源で検討されているものと共通している。例えば、揚げる鉱石そのものはマンガン団塊とほぼ同じものと考えて良い。また、想定される採鉱深度は 800 m から 2,500 m とマンガン団塊よりも遥かに浅く、海底熱水鉱床に近い。そのため、マンガン団塊や海底熱水鉱床で想定されているフレキシブルライザーを用いたエアリフトまたはポンプリフトによる揚鉱システムをそのまま用いることができると考えられる。

<参考資料>

6.1 メタンハイドレート

- MH21-S 研究開発コンソーシアム. “MH21 の 18 年間の成果”. MH21-S 研究開発コンソーシアム.
<https://www.mh21japan.gr.jp/results.html>, (参照 2021-02-26).
- サイエンスチャンネル. “未来を創る科学者達(53) 燃える氷メタンハイドレートを探れ！増田昌敬”. 科学技術振興機構. 2003.
<https://scienceportal.jst.go.jp/gateway/sciencechannel/i036904053/>, (参照 2021-02-26).
- JOGMEC. メタンハイドレートは燃えない！？～研究が進むメタンハイドレート開発の現在～. JOGMEC NEWS. 2016. vol.46.
- Milkov, A.V.; Sassen, R. Economic geology of offshore gas hydrate accumulations and provinces. *Marine and Petroleum Geology*. 2002, vol. 19, p. 1-11.
- Milkov, A.V. Global estimates of hydrate-bound gas in marine sediments: how much is really out there? *Earth-Science Reviews*. 2004, vol. 66, p. 183-197.
- International Energy Agency (IEA). *World Energy Outlook 2014*, p. 146.
- メタンハイドレート資源開発研究コンソーシアム. “フェーズ1 総括報告書(平成 20 年 8 月)”. メタンハイドレート資源開発研究コンソーシアム.
https://www.mh21japan.gr.jp/pdf/seika/phase1_20110622.pdf, (参照 2021-02-26).
- メタンハイドレート資源開発研究コンソーシアム. “日本周辺海域におけるメタンハイドレート起源 B S R 分布図”. 2009-7-31. https://www.mh21japan.gr.jp/pdf/BSR_2009.pdf, (参照 2017-02-28).
- 山本晃司, 佐伯龍男. メタンハイドレート資源量評価と陸上産出試験. *石油技術協会誌*. vol. 74, no. 4, p. 270-279.
- Yamamoto, K.; Terao, Y.; Fujii, T.; Ikawa, T.; Seki, M.; Maki, M.; Kanno, T. Operational overview of the first offshore production test of methane hydrates in the Eastern Nankai Trough. *Offshore Technology Conference*. 2014, OTC-25243-MS.
<https://onepetro.org/OTCONF/proceedings-abstract/14OTC/3-14OTC/D031S034R004/172106>, (cited 2021-02-26).
- メタンハイドレート資源開発研究コンソーシアム. “第 26 回メタンハイドレート開発実施検討会 資料 5 : 第 1 回海洋産出試験の結果報告について”. 経済産業省. 2013-12-16.
https://www.meti.go.jp/committee/summary/0004108/pdf/026_05_00.pdf, (参照 2021-02-26).
- Masuda, Y.; Saeki, T.; Narita, H. Gas hydrates as a future energy resource - A new challenge from the world's first offshore production test toward commercial development. 21th World Petroleum Congress, Moscow, Russia, June 15-19, 2014.
- Fujii, T.; Suzuki, K.; Takayama, T.; Tamaki, M.; Komatsu, Y.; Konno, Y.; Yoneda, J.; Yamamoto, K.; Nagao, J. Geological setting and characterization of a methane hydrate reservoir distributed at the first offshore production test site on the Daini-Atsumi Knoll in

第6章 新たな海洋資源開発へ向けて

the eastern Nankai Trough, Japan. *Marine and Petroleum Geology*. 2015, vol. 66, p. 310-322.

- Kurihara M.; Sato A.; Ouchi H.; Narita H.; Masuda Y.; Saeki T.; Fujii T. Prediction of Gas Productivity From Eastern Nankai Trough Methane-Hydrate Reservoirs. *SPE Reservoir Evaluation & Engineering*. 2009, vol. 12, no.3, p. 477-499.
- Konno, Y.; Oyama, H.; Nagao, J.; Masuda, Y.; Kurihara, M. Numerical Analysis of the Dissociation Experiment of Naturally Occurring Gas Hydrate in Sediment Cores Obtained at the Eastern Nankai Trough, Japan. 2010, *Energy & Fuels*, vol. 24, no. 12, p. 6353-6358.
- メタンハイドレート資源開発研究コンソーシアム. “第28回メタンハイドレート開発実施検討会 資料7: 第1回海洋産出試験: 成果のまとめ”. 経済産業省. 2015-02-19.
https://www.meti.go.jp/committee/summary/0004108/pdf/028_07_00.pdf,
(参照 2021-02-26).
- Konno, Y.; Fujii, T.; Sato, A.; Akamine, K.; Naiki, M.; Masuda, Y.; Yamamoto, K.; Nagao, J.; Key Findings of the World's First Offshore Methane Hydrate Production Test off the Coast of Japan: Toward Future Commercial Production. *Energy & Fuels*. 2017, vol. 31, no. 3, p. 2607-2616.

6.2 海底鉱物資源

- Petersen, S.; Krättschell, A.; Augustin, N.; Jamieson, J.; Hein, J.R.; Hannington, M.D. News from the seabed – Geological characteristics and resource potential of deep-sea mineral resources. *Marine Policy*. 2016, vol.70, p.175-187.
- 白井 朗, 高橋嘉夫, 伊藤 孝, 丸山明彦, 鈴木勝彦. 海底マンガンを床の地球科学. 東京大学出版会, 2015, 264p.
- Hein, J. R. and Koschinsky, A. Deep-ocean ferromanganese crusts and nodules. In *Treatise on Geochemistry* (edited by Holland, H. D. and Turekian, K. K.), second ed. Elsevier, Oxford, 2014, p. 273–291.
- Hein, J. R.; Mizell, K.; Koschinsky, A.; Conrad, T. A. Deep-ocean mineral deposits as a source of critical metals for high- and green-technology applications: Comparison with land-based deposits. *Ore Geology Reviews*. 2013, vol. 51, p.1-14.
- SPC. Deep Sea Minerals: Sea-Floor Massive Sulphides, a physical, biological, environmental, and technical review. Baker, E. and Beaudoin, Y. (Eds.) 2013, Vol. 1A, Secretariat of the Pacific Community (SPC).
- SPC. Deep Sea Minerals: Manganese Nodules, a physical, biological, environmental, and technical review. Baker, E. and Beaudoin, Y. (Eds.) 2013, Vol. 1B, Secretariat of the Pacific Community (SPC).
- SPC. Deep Sea Minerals: Cobalt-rich Ferromanganese Crusts, a physical, biological, environmental, and technical review. Baker, E. and Beaudoin, Y. (Eds.) 2013, Vol. 1C,

Secretariat of the Pacific Community (SPC).

- SPC. Deep Sea Minerals: Deep Sea Minerals and the Green Economy. Baker, E. and Beaudoin, Y. (Eds.) 2013, Vol. 2, Secretariat of the Pacific Community (SPC).
- Nakamura, K.; Fujinaga, K.; Yasukawa, K.; Takaya, Y.; Ohta, J.; Machida, S.; Haraguchi, S.; Kato, Y. REY-rich mud: A deep-sea mineral resource for rare earths and yttrium. Handbook on the Physics and Chemistry of Rare Earths. 2015, vol. 46, p.79–127.
- Usui, A. and Someya, M. “Distribution and composition of marine hydrogenetic and hydrothermal manganese deposits in the northwest Pacific.” Manganese Mineralization: Geochemistry and Mineralogy of Terrestrial and Marine Deposits. Nicholson, K.; Hein, J. R.; Biihn, B.; Dasgupta, S. ed., Geological Society Special Publication, 1997, vol. 119, p. 177-198.
- International Seabed Authority. A Geological Model of Polymetallic Nodule Deposits in the Clarion–Clipperton Fracture Zone. ISA Technical Study. 2010, No. 6. Kingston, Jamaica: International Seabed Authority.
- Kim, S. –S. and Wessel, P. New global seamount census from altimetry-derived gravity data. Geophysical Journal International. 2011, vol. 186, p.615–631.
- Yesson, C.; Clark, M. R.; Taylor, M. L.; Rogers, A. D. The global distribution of seamounts based on 30 arc seconds bathymetry data. Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers. 2011, vol. 58, p.442–453.
- Hein, J. R.; Conrad, T. A.; Dunham, R. E. Seamount characteristics and mine-site model applied to exploration- and mining-lease-block selection for cobalt-rich ferromanganese crusts. Marine Georesources and Geotechnology. 2009, vol. 27, p.160-176.
- Lehmköster, J. World Ocean Review 3: Marine Resources—Opportunities and Risks. Hamburg, Germany: maribus GmbH, 2014, 165 p.
- 加藤泰浩. 太平洋のレアアース泥が日本を救う. PHP 研究所, 2012, 253p.
- ISA. Workplan for the formulation of regulations for the exploitation of polymetallic nodules in the Area Report of the Secretary-General. International Seabed Authority, Kingston, Jamaica, 2012.
https://www.isa.org.jm/sites/default/files/files/documents/isba-18c-4_0.pdf, (cited 2017-03-06)
- Amann, H. Development of ocean mining in the Red Sea. Marine Mining. 1985, vol. 5, p.103–116.
- ISA. Polymetallic Nodules. ISA Technology Brochure, 2012,
<https://www.isa.org.jm/files/documents/EN/Brochures/ENG7.pdf>, (cited 2021-02-26)
- 中村謙太郎. 海底熱水鉱床: その実態と探査の最前線. 化学と工業. 2014, Vol. 67-5, p.406-408.
- Nautilus Minerals. “Technology Overview”. Nautilus Minerals.
<http://www.nautilusminerals.com/irm/content/technology-overview.aspx?RID=329>, (cited 2017-03-06)

7.1. 探査・掘削に用いられる船舶

	探査に用いられる船舶等 (5.2.1.参照)																						
	<table border="1"> <tr><td>基本情報</td><td></td></tr> <tr><td>種類</td><td>三次元物理探査船</td></tr> <tr><td>船名</td><td>資源</td></tr> <tr><td>所有者</td><td>経済産業省</td></tr> <tr><td>オペレータ</td><td>独立行政法人石油天然ガス・金属資源機構 (JOGMEC)</td></tr> <tr><td>長さ、幅、型深</td><td>86.2 m x 39.6 m x 8.5 m</td></tr> <tr><td>総トン数</td><td>10,395 t</td></tr> <tr><td>建造年</td><td>1999年 (2007年に改造工を実施)</td></tr> <tr><td>造船会社</td><td>LangstenS&B (ノルウェー)</td></tr> <tr><td>主要能力</td><td>弾性波探査 (地震探査) 用ストリーマー・ケーブルの曳航長 4,800 m エアガン・アレイ 両舷に3対ずつ (片舷ずつ交互に発震し、1発震につき約50 Lの高圧圧縮空気 (2,000 PSI) を放出する。各エアガンの発震は0.1 ミリ秒の精度で制御可能) 定員 65人 最大速力 13.5 ノット 航続期間 106日 主推進機関 電気推進機関 (アジマススラスタ) 4基 発電機 ディーゼル発電機 3,200 kW x 4基</td></tr> <tr><td>Webサイト/参考資料</td><td>JOGMEC物理探査船グループ 三次元物理探査船「資源」による調査活動についての報告 https://oilgas-info.jogmec.go.jp/pdf/5/5348/201409_069a.pdf</td></tr> </table>		基本情報		種類	三次元物理探査船	船名	資源	所有者	経済産業省	オペレータ	独立行政法人石油天然ガス・金属資源機構 (JOGMEC)	長さ、幅、型深	86.2 m x 39.6 m x 8.5 m	総トン数	10,395 t	建造年	1999年 (2007年に改造工を実施)	造船会社	LangstenS&B (ノルウェー)	主要能力	弾性波探査 (地震探査) 用ストリーマー・ケーブルの曳航長 4,800 m エアガン・アレイ 両舷に3対ずつ (片舷ずつ交互に発震し、1発震につき約50 Lの高圧圧縮空気 (2,000 PSI) を放出する。各エアガンの発震は0.1 ミリ秒の精度で制御可能) 定員 65人 最大速力 13.5 ノット 航続期間 106日 主推進機関 電気推進機関 (アジマススラスタ) 4基 発電機 ディーゼル発電機 3,200 kW x 4基	Webサイト/参考資料
基本情報																							
種類	三次元物理探査船																						
船名	資源																						
所有者	経済産業省																						
オペレータ	独立行政法人石油天然ガス・金属資源機構 (JOGMEC)																						
長さ、幅、型深	86.2 m x 39.6 m x 8.5 m																						
総トン数	10,395 t																						
建造年	1999年 (2007年に改造工を実施)																						
造船会社	LangstenS&B (ノルウェー)																						
主要能力	弾性波探査 (地震探査) 用ストリーマー・ケーブルの曳航長 4,800 m エアガン・アレイ 両舷に3対ずつ (片舷ずつ交互に発震し、1発震につき約50 Lの高圧圧縮空気 (2,000 PSI) を放出する。各エアガンの発震は0.1 ミリ秒の精度で制御可能) 定員 65人 最大速力 13.5 ノット 航続期間 106日 主推進機関 電気推進機関 (アジマススラスタ) 4基 発電機 ディーゼル発電機 3,200 kW x 4基																						
Webサイト/参考資料	JOGMEC物理探査船グループ 三次元物理探査船「資源」による調査活動についての報告 https://oilgas-info.jogmec.go.jp/pdf/5/5348/201409_069a.pdf																						

	探査に用いられる船舶等 (5.2.2.参照)																						
	<table border="1"> <tr><td>基本情報</td><td></td></tr> <tr><td>種類</td><td>海底広域研究船</td></tr> <tr><td>船名</td><td>かいめい</td></tr> <tr><td>所有者</td><td>国立研究開発法人 海洋研究開発機構 (JAMSTEC)</td></tr> <tr><td>オペレータ</td><td>日本海洋事業株式会社</td></tr> <tr><td>長さ、幅、型深さ</td><td>100.5 m x 20.5 m x 9.0 m</td></tr> <tr><td>総トン数</td><td>5,747 t</td></tr> <tr><td>建造年</td><td>2016年</td></tr> <tr><td>造船会社</td><td>三菱重工株式会社 下関造船所</td></tr> <tr><td>主要能力</td><td>3次元海底探査用ストリーマーケーブル: 3,000 m x 4本 3次元高解像度探査用ストリーマーケーブル: 300 m x 20本 2次元海底探査用ストリーマーケーブル: 12,000 m x 1本 海底設置型掘削装置: 使用深度 ~3,000 m, コアリング長 30 m パワーグラブ: 使用深度 6,000 m, 採取容量 1m³, シェル型と6本爪型の2種 40 m ビストンコアラ-: パイプ長40 m, コア径110 mmφ (大口径コアラ-) 3,000 m級無人探査機 (ROV) 定員: 65名 航海速力: 12ノット 航続距離: 約9,000海里 主推進機関: 推進電動機 (2,400 kW x 2基)</td></tr> <tr><td>Webサイト/参考資料</td><td>http://www.jamstec.go.jp/j/about/equipment/ships/kaimei.html http://www.nmeweb.jp/duties_investship_kaimei.html</td></tr> </table>		基本情報		種類	海底広域研究船	船名	かいめい	所有者	国立研究開発法人 海洋研究開発機構 (JAMSTEC)	オペレータ	日本海洋事業株式会社	長さ、幅、型深さ	100.5 m x 20.5 m x 9.0 m	総トン数	5,747 t	建造年	2016年	造船会社	三菱重工株式会社 下関造船所	主要能力	3次元海底探査用ストリーマーケーブル: 3,000 m x 4本 3次元高解像度探査用ストリーマーケーブル: 300 m x 20本 2次元海底探査用ストリーマーケーブル: 12,000 m x 1本 海底設置型掘削装置: 使用深度 ~3,000 m, コアリング長 30 m パワーグラブ: 使用深度 6,000 m, 採取容量 1m ³ , シェル型と6本爪型の2種 40 m ビストンコアラ-: パイプ長40 m, コア径110 mmφ (大口径コアラ-) 3,000 m級無人探査機 (ROV) 定員: 65名 航海速力: 12ノット 航続距離: 約9,000海里 主推進機関: 推進電動機 (2,400 kW x 2基)	Webサイト/参考資料
基本情報																							
種類	海底広域研究船																						
船名	かいめい																						
所有者	国立研究開発法人 海洋研究開発機構 (JAMSTEC)																						
オペレータ	日本海洋事業株式会社																						
長さ、幅、型深さ	100.5 m x 20.5 m x 9.0 m																						
総トン数	5,747 t																						
建造年	2016年																						
造船会社	三菱重工株式会社 下関造船所																						
主要能力	3次元海底探査用ストリーマーケーブル: 3,000 m x 4本 3次元高解像度探査用ストリーマーケーブル: 300 m x 20本 2次元海底探査用ストリーマーケーブル: 12,000 m x 1本 海底設置型掘削装置: 使用深度 ~3,000 m, コアリング長 30 m パワーグラブ: 使用深度 6,000 m, 採取容量 1m ³ , シェル型と6本爪型の2種 40 m ビストンコアラ-: パイプ長40 m, コア径110 mmφ (大口径コアラ-) 3,000 m級無人探査機 (ROV) 定員: 65名 航海速力: 12ノット 航続距離: 約9,000海里 主推進機関: 推進電動機 (2,400 kW x 2基)																						
Webサイト/参考資料	http://www.jamstec.go.jp/j/about/equipment/ships/kaimei.html http://www.nmeweb.jp/duties_investship_kaimei.html																						

	探査・掘削に用いられる船舶等 (5.2.5.参照)																						
	<table border="1"> <tr><td>基本情報</td><td></td></tr> <tr><td>種類</td><td>海洋資源調査船</td></tr> <tr><td>船名</td><td>白嶺</td></tr> <tr><td>所有者</td><td>独立行政法人石油天然ガス・金属資源機構 (JOGMEC)</td></tr> <tr><td>オペレータ</td><td>海洋技術開発株式会社</td></tr> <tr><td>長さ、幅、型深</td><td>101 m x 19 m x 9.2 m</td></tr> <tr><td>総トン数</td><td>6,283 t</td></tr> <tr><td>建造年</td><td>2012年</td></tr> <tr><td>造船会社</td><td>三菱重工株式会社 下関造船所</td></tr> <tr><td>主要能力</td><td>船上設置型掘削装置: 最大水深2,000 m, 掘削能力400 m 海底着座型掘削装置: 最大水深3,000 m, 掘削能力50 m 有索式無人潜水艇 (ROV): 稼働水深3,000 m ファインダー付パワーグラブ: 6本爪型 (約1 m³) 最大水深6,000 m; シェル型 (約2 m³) 最大水深3,000 m 定員 70人 最大速力 16.46ノット (試運転時最大速力), 航海速力15.5ノット 航続距離 9,000海里</td></tr> <tr><td>Webサイト/参考資料</td><td>http://www.oed.co.jp/product/ship01.html http://www.oed.co.jp/product/ship02.html http://www.iojgmc.go.jp/metal/metal_10_000005.html</td></tr> </table>		基本情報		種類	海洋資源調査船	船名	白嶺	所有者	独立行政法人石油天然ガス・金属資源機構 (JOGMEC)	オペレータ	海洋技術開発株式会社	長さ、幅、型深	101 m x 19 m x 9.2 m	総トン数	6,283 t	建造年	2012年	造船会社	三菱重工株式会社 下関造船所	主要能力	船上設置型掘削装置: 最大水深2,000 m, 掘削能力400 m 海底着座型掘削装置: 最大水深3,000 m, 掘削能力50 m 有索式無人潜水艇 (ROV): 稼働水深3,000 m ファインダー付パワーグラブ: 6本爪型 (約1 m ³) 最大水深6,000 m; シェル型 (約2 m ³) 最大水深3,000 m 定員 70人 最大速力 16.46ノット (試運転時最大速力), 航海速力15.5ノット 航続距離 9,000海里	Webサイト/参考資料
基本情報																							
種類	海洋資源調査船																						
船名	白嶺																						
所有者	独立行政法人石油天然ガス・金属資源機構 (JOGMEC)																						
オペレータ	海洋技術開発株式会社																						
長さ、幅、型深	101 m x 19 m x 9.2 m																						
総トン数	6,283 t																						
建造年	2012年																						
造船会社	三菱重工株式会社 下関造船所																						
主要能力	船上設置型掘削装置: 最大水深2,000 m, 掘削能力400 m 海底着座型掘削装置: 最大水深3,000 m, 掘削能力50 m 有索式無人潜水艇 (ROV): 稼働水深3,000 m ファインダー付パワーグラブ: 6本爪型 (約1 m ³) 最大水深6,000 m; シェル型 (約2 m ³) 最大水深3,000 m 定員 70人 最大速力 16.46ノット (試運転時最大速力), 航海速力15.5ノット 航続距離 9,000海里																						
Webサイト/参考資料	http://www.oed.co.jp/product/ship01.html http://www.oed.co.jp/product/ship02.html http://www.iojgmc.go.jp/metal/metal_10_000005.html																						

	掘削に用いられる船舶等 (5.3.1.参照)	
	基本情報	
	種類	地球深部探査船
	船名	ちきゅう
	所有者	国立研究開発法人 海洋研究開発機構 (JAMSTEC)
	オペレータ	日本マントル・クエスト株式会社
	長さ、幅、型深さ	210 m x 38.0 m x 16.2 m
	総トン数	56,752 t
	建造年	2005年
	造船会社	三菱重工株式会社 長崎造船所
主要能力	<p>掘削方式：ライザー掘削方式 デリック(掘削やぐら)：高さ70.1 m, 幅18.3 m, 長さ21.9 m ドローワークス：最大吊上荷重 1,250 t, 5,000馬力 (3,728 kW) ドリルストリング長：10,000 m 最大掘削推進：2,500 m (ライザー掘削時) ライザーパイプ：長さ27 m (1本), 直径約50 cm 噴出防止装置 (BOP)：15,000 psi (103 MPa) Crown mounted compensators: リグとドリルストリングの相対運動を吸収する装置。大水深化に伴い、長大で大重量のストリングに対処するため開発された。 マッドポンプ：2,200 hp x 7,500 psi x 3台 DPS：NK DPS-B方式</p> <p>定員：200名 航海速度：12ノット 航続距離：約14,800海里 主推進機関：ディーゼル電気推進 (ディーゼル発電機5,000 kW x 6基, 2,500 kW x 2), アジマススラスタ 4,200 kW x 6基, サイドスラスタ 2,550 kW x 1基</p>	
Webサイト/参考資料	http://www.jamtec.go.jp/chikyuu/j/ http://www.jamtec.go.jp/j/about/equipment/ships/chikyuu.html http://www.mqj.co.jp/chikyuu/spec.html	

7.2. 据付・操業に用いられる船舶等



据付・操業に用いられる船舶等 (5.6.1.参照)	
基本情報	
種類	Offshore Construction and Support Vessels (Deepwater Construction Vessel)
船名	AEGIR
所有者	Heerema Marine Contractors
オペレータ	Heerema Marine Contractors
長さ、幅、深さ	210m x 46.2m x 11m
総トン数	50,228
建造年	2013年
造船会社	大宇造船海洋
主要能力	載貨重量 : 41,105 Mt Heavy Lift : 4,000mt (17m-40m) 1,500mt @ 78m Pipelay : J-lay (2,000mt x 32"OD), R-lay (2 x 2,000mt, 16"OD)
Webサイト/参考資料	https://hmc.heerema.com/fleet/aegir/ http://worldmaritimeneews.com/archives/78788/heeremas-new-vessel-aegir-to-arrive-in-rotterdam-for-final-outfitting/ http://www.marinetraffic.com/en/ais/details/ships/shipid:414824/mmsi:354590000/vessel:AEGIR



据付・操業に用いられる船舶等 (5.6.1.参照)	
基本情報	
種類	Pipelay Crane Vessel (S-Lay)
船名	くろしお
所有者	日鉄住金オフショアコンストラクション
オペレータ	新日鉄住金エンジニアリング
長さ、幅	142m x 40m
総トン数	13,287 t
建造年	1972年
造船会社	函館どつく(株)
主要能力	クレーンの最大吊り能力 2,500 t 要員収容能力 323人
Webサイト/参考資料	https://www.nsoc.eng.nssmc.com/business



据付・操業に用いられる船舶等 (5.6.1.参照)	
基本情報	
種類	Heavy Lifting Crane Vessel (クレーン船)
船名	Thialf
所有者	Heerema Marine Contractors
オペレータ	Heerema Marine Contractors
長さ、幅、深さ	201.6m x 88.4m x 49.5m
総トン数	136,709
建造年	1985年
造船会社	三井造船
主要能力	載貨重量 : 129,221 Mt Tandem lift : 14,200 t at 31.2m radius (subject to stability calculations) Main hoist lifting height : 95m above work deck for each crane. Lowering depth of auxiliary hoists 460m below work deck at minimum radius. Dynamic position system : DP3 スラスタ : 5,500 kW x 6基- 360 degrees azimuth (total thrust 400t) 居住区 : 736 persons
Webサイト/参考資料	https://hmc.heerema.com/fleet/thialf/ http://www.marinetraffic.com/jp/ais/details/ships/shipid:413401/mmsi:353979000/imo:8757740/vessel:THIALF http://www.4coffshore.com/windfarms/vessel-thialf-vid45.html

	据付・操業に用いられる船舶等 (5.6.2.参照)	
	基本情報	
	種類	Tug Boat (タグボート)
	船名	魁
	所有者	日本郵船株式会社
	オペレータ	株式会社ウィングマリタイムサービス
	長さ、幅、深さ	37.2m x 10.2m x 4.4m
	総トン数	272
	建造年	2015年
	造船会社	京浜ドック株式会社
主要能力	日本初のLNG燃料船 主機関：ガス燃料/ディーゼル燃料切り替え可能なデュアル フューエル機関 (ニイガタ 6L28AHX-DF) 2基 推進装置は全旋回型推進器 (ニイガタ ZP-31) 2基 曳航力：前進55トン/後進50トン 船速：14.0ノット(最大)	
Webサイト/参考資料	http://www.keihindock.co.jp/file/HP_sakigake.pdf http://www.nyk.com/release/3560/004044.html	

	据付・操業に用いられる船舶等 (5.6.3.参照)	
	基本情報	
	種類	Heavy Transportation Vessel (重量物運搬船)
	船名	DOCKWISE VANGUARD
	所有者	Boskalis
	オペレータ	Dockwise
	長さ、幅、深さ	275m x 70.0m x 15.5m
	総トン数	91,784
	建造年	2013年
	造船会社	現代重工
主要能力	載貨重量：116,173 Mt デッキ広さ：275m x 70m Draft submerged at FPP/APP：31.50m/31.50m Water-depth above main deck at FPP/APP：16m 推進装置：主推進器 12MW CPP x 2, アジマススラスト 3MW リトラクタブルCPP x 2基 船速：14.5ノット(expected) Dockwise Type-0 vessel SSHTV (Semi-Submersible Heavy Transport Vessel)	
Webサイト/参考資料	http://boskalis.com/about-us/fleet-and-equipment/offshore-vessels/heavy-transport-vessels.html http://www.offshorekinematics.com/vanguard/page/vessel-specs.html http://www.marinetraffic.com/jp/ais/details/ships/shipid:367076/mmsi:306039000/imo:9618783/vessel:DOCKWISE_VANGUARD	

	据付・操業に用いられる船舶等 (5.6.3.参照)	
	基本情報	
	種類	Flotel (フローテル)
	船名	Safe Boreas
	所有者	Prosafe
	オペレータ	Prosafe
	長さ、幅、深さ	104.2m x 91.25m
	総トン数	34,076
	建造年	2015年
	造船会社	センブコープ マリーナ/ジュロン造船所
主要能力	載貨重量：12,400 Mt 居室：450 (all single cabine) デッキ面積：approx. 1,000 m ² Gangway：Telescopic hydraulic 38.0m +/- 7.5m Dynamic positioning system：DP-3 スラスタ：4.0 MW x 6基 係留装置：12点 (90mm wire)	
Webサイト/参考資料	http://www.prosafe.com/safe-boreas/category986.html http://www.marinetraffic.com/jp/ais/details/ships/shipid:847937/mmsi:565905000/imo:9649823/vessel:SAFE_BOREAS https://www.orcadian.co.uk/regalia-to-be-joined-by-similar-vessel-in-scapa-flow/	

	据付・操業に用いられる船舶等 (5.6.4.参照)	
	基本情報	
	種類	Anchor Handling Tug Supply Vessel/AHTS (アンカーハンドリング船)
	船名	BOURBON ORCA
	所有者	Bourbon Offshore Norway
	オペレータ	Bourbon Offshore Norway
	長さ、幅、深さ	86m x 18.5m x 8.5m
	総トン数	4,311
	建造年	2006年
	造船会社	ULSTEIN VERFT AS
主要能力	載貨重量 : 3,179 Mt 設計: Ulstein X-bow ボラードブル能力 : 181 Mt 主ウインチ : 3ドラム付電動油圧式 x 1基 デッキ面積 : 548 m ² Dynamic positioning system : DP2 船速 : 17.1ノット(最大) 発電機関 : 主 2,880kW x 4基, 補 1,665kW x 2基 推進装置 : タンデム電気推進式、モーター 3,000kW (可変速) (0-3,000kW) x 2基 + 2,000kW (定速) x 2基 定員 : 34 persons	
Webサイト/参考資料	http://www.bourbonoffshore.com/en/services-and-fleet/our-fleet/ahts-powerful-and-versatile-vessels https://ulstein.com/references/bourbon-orca http://www.marinetraffic.com/jp/ais/details/ships/shipid:312025/mmsi:258511000/imo:9352377/vessel:BOURBON_ORCA	

	据付・操業に用いられる船舶等 (5.6.4.参照)	
	基本情報	
	種類	Production Support Vessel (プラットフォームサブライ船)
	船名	KL BARENTSFJORD
	所有者	K Line Offshore
	オペレータ	K Line Offshore
	長さ、幅、深さ	94.9m x 84.9m x 20.0m
	総トン数	4,518
	建造年	2011年
	造船会社	STX Norway Brevik
主要能力	載貨重量 : 5,100 Mt デッキスペース : 1,100m ² (66.8m x 16.5m) Max deck cargo weight : 3,210 t Dynamic positioning system : DP2 船速 : 15.3ノット 居住区 : 25名収容可	
Webサイト/参考資料	http://www.klineoffshore.no/files/KL-Brisfjord_220612.pdf http://www.marinetraffic.com/jp/ais/details/ships/shipid:121840/mmsi:209272000/imo:9482366/vessel:KL_BARENTSFJORD http://myship.com/imo/9482366/KL-BARENTSEJORD	

	据付・操業に用いられる船舶等 (5.6.5.参照)	
	基本情報	
	種類	Pipelay Vessel (S-Lay, J-lay)
	船名	Castorone
	所有者	Saipem
	オペレータ	Saipem
	長さ、幅、型深さ	330m x 39m x 23.8m
	総トン数	103,032 t
	建造年	2011年
	造船会社	Keppel Shipyard
主要能力	載貨/パイプ重量 : 20,000 t S-lay; 最大水深 2,000m、最大径 60" (条件により変動)、Max tensor 220 t J-lay; 最大水深 3,000m 要員収容能力 702人	
Webサイト/参考資料	http://www.saipem.com/sites/SAIPEM_en_IT/scheda/Vessels/Castorone.page	



据付・操業に用いられる船舶等 (5.6.5.参照)	
基本情報	
種類	Reel Pipelay Vessel
船名	Lay Vessel North Ocean 105
所有者	SANTANDER BANCO
オペレータ	McDERMOTT
長さ、幅、型深さ	135m x 29.8m x 9.7m
総トン数	11,500 t
建造年	2012年
造船会社	Metalship & Docks
主要能力	Reel Capacity; 2,900 t Reel-lay; 4~16" (2~24" in OD product) Traction Winch; 3.1 t 3352m x 4.75" in wire rope 要員収容能力 129人
Webサイト/参考資料	https://www.mcdermott.com/portfolio/lay-vessel-north-ocean-



据付・操業に用いられる船舶等 (5.6.6.参照)	
基本情報	
種類	ROV
船名	はくよう3000
所有者	深田サルベージ建設株式会社
オペレータ	深田サルベージ建設株式会社
長さ、幅、高さ	3.02mx1.8mx1.9m
重量	4575kg
製造年	2010年
製造会社	International Submarine Engineering Ltd
主要能力	ペイロード 200kg 最大使用深度 3000m 電動油圧 150HP(75HP×2) マニピュレータ マルチプル7ファンクションコントロール×2(最大可搬重量250kg)
Webサイト/参考資料	http://www.fukusal.co.jp/ship/ship04/hakuyou3000.html http://subseaworldnews.com/2012/07/11/ise-to-build-another-hysub-rov-for-japanese-snk-ocean/

7.3. 生産に用いられる船舶・浮体式設備

	生産に用いられる船舶・浮体式設備 (4.3.参照)	
	基本情報	
	種類	FPSO(改造)
	船名	NINGALOO VISION
	所有者	Prosafe
	オペレータ	Quadrant Energy
	全長、型幅、型深さ	244m x 41.6m x 23.5m
	総トン数	63,876
	建造年	建造：1981年 改造：2009年
	造船会社	建造：ジャパンマリンユナイテッド(旧IHI呉造船所、旧船名：MT Kudam) 改造：Keppel
主要能力	載貨重量：101,832 Mt タンク容量：620,000 bbl 処理能力：63,000 bbl of oil/d オペレータ数：24名 西オーストラリア沖にて操業中	
Webサイト/参考資料	http://quadrantenergy.com.au/wp-content/uploads/2016/05/Ningaloo-Vision-Factsheet-October-2015.pdf http://www.inpex.co.jp/business/australia.html	

	生産に用いられる船舶・浮体式設備 (4.3.参照)	
	基本情報	
	種類	FPSO(新造)
	船名	Sanha LPG FPSO
	所有者	SBM Offshore, Sonangol
	オペレータ	SBM Offshore, Sonangol
	全長、型幅、型深さ	262.7m x 49.0m x 29.3m
	総トン数	111,246
	建造年	2004年
	造船会社	IHI
主要能力	載貨重量：94,000 Mt タンク容量:135,000m ³ 処理能力：37,370 bbls LPG/d タンク方式：IHI-SPB方式 タンク数：6 居住区：60名 アンゴラ共和国沖 サンハ鉱区にて操業中	
Webサイト/参考資料	http://www.sbmoffshore.com/wp-content/uploads/2013/07/SANHA_LPG_FPSO_Chevron_Angola.pdf	

	生産に用いられる船舶・浮体式設備 (4.3.参照)	
	基本情報	
	種類	Cylindrical FPSO (円筒型浮体設備)
	船名	Sevan 1000
	所有者	Eni Norge, Statoil
	オペレータ	Eni Norge
	全長、水線面半径	112m x 90m
	総トン数	N/A
	建造年	2015年
	造船会社	現代重工業
主要能力	処理能力：100,000 bbl/d タンク容量：1,000,000 bbl 排水量：210,000 Mt 居住区：120名 ノルウェー沖バレンツ海Goliatフィールドで操業中	
Webサイト/参考資料	http://www.eninorge.com/en/Field-development/Goliat/Development-solution/The-platform---FPSO/ http://www.sevanmarine.com/index.php/component/content/article/41/582-sevan-1000-fps-for-goliat	

	生産に用いられる船舶・浮体式設備 (4.3.参照)	
	基本情報	
	種類	FSO
	船名	ERAWAN 2
	所有者	CHEVRON
	オペレータ	CHEVRON
	全長、型幅、型深さ	322m x 46.0m x 23.9m
	総トン数	83,985
	建造年	2012年
	造船会社	IHI
主要能力	載貨重量：151,962 Mt 生産能力：40,000 - 50,000 bbl/d 貯油能力：1,080,000 bbl タンク容量：1,726,000 m ³ タンク数：14 居住区：80名(最大) タイ沖で操業中	
Webサイト/参考資料	https://www.ihico.jp/var/ezwebin_site/storage/original/application/80267f029ba27979b4c564b41c88016f.pdf http://crudemarketing.chevron.com/crude/far_eastern/erawan.aspx	



生産に用いられる船舶・浮体式設備 (4.3.参照)	
基本情報	
種類	FLNG
船名	Prelude
所有者	Shell, INPEX, CPC, KOGAS
オペレータ	Shell
全長、型幅、型深さ	488m x 74m x 43.4m
総トン数	300,000
建造年	建造中
造船会社	Technip Samsung Consortium
主要能力	載貨重量：約 600,000 Mt 生産能力：LNG 3.6 MTPA, コンデンセート 1.3 MTPA, LPG 0.4 MTPA タンク容量：220,000 m ³ タンク数：6 オペレーター：110 - 120人 西オーストラリア沖Browse Basinで操業予定
Webサイト/参考資料	http://www.shell.com/about-us/major-projects/prelude-flng/prelude-flng-an-overview.html



生産に用いられる船舶・浮体式設備 (4.3.参照)	
基本情報	
種類	FSRU
船名	GOLAR SPIRIT
所有者	Golar LNG
オペレータ	Petrobras
全長、型幅、型深さ	289.01m x 44.61m x 12.52m
総トン数	106,577
建造年	建造：1981年 改造：2008年
造船会社	建造：川崎重工業 改造：Keppel
主要能力	再ガス化能力：2,5bcm/year タンク容量：129,000 m ³ 国内初建造のLNG船 ブラジル沖で操業中
Webサイト/参考資料	http://www.golarlng.com/index.php?name=Our_Business%2FFloating_Storage_.html http://www.marinetraffic.com/es/ais/details/ships/shipid:711749/mmsi:538002199/imo:7373327/vessel:GOLAR_SPIRIT



生産に用いられる船舶・浮体式設備 (4.3.参照)	
基本情報	
種類	Truss SPAR
船名	Lucius
所有者	Anadarko, Freeport, EM, Petrobrass, INPEX, Eni
オペレータ	Anadarko
直径、長さ	33.5m x 164m
総トン数	N/A
排水量	23,000t
建造年	2013年
造船会社	Technip
主要能力	処理能力：石油 80,000 bbl/d、天然ガス 450 mmcsf/d 水深：2,172m (7,100ft) メキシコ湾で操業中
Webサイト/参考資料	http://www.anadarko.com/Operations/Upstream/Gulf-of-Mexico/Production/



生産に用いられる船舶・浮体式設備 (4.3.参照)	
基本情報	
種類	Semi-Submersible Facility
船名	未定 (Ichthys CPF)
所有者	INPEX, TOTAL, Osaka Gas
オペレータ	INPEX
全長、型幅	150m x 110m
総トン数	N/A
建造年	建造中
造船会社	三星重工業
主要能力	処理能力：1,657 mmcsf/d (peak gas export rate) 排水量：140,000 t Topside重量：約70,000 t 居住区：200人 西オーストラリア沖で操業予定
Webサイト/参考資料	http://www.inpex.co.jp/english/ichthys/concept.html http://www.inpex.com.au/our-projects/ichthys-Ing-project/ichthys-in-detail/project-facilities/central-processing-facility/



生産に用いられる船舶・浮体式設備 (4.3.参照)	
基本情報	
種類	TLP (Tension Leg Platform)
船名	Shenzi TLP
所有者	BHP Billiton
オペレータ	BHP Billiton
全長、型幅	59m x 19.2m (Topside)
総トン数	N/A
建造年	2007年 (据付 2008年, 生産開始 2009年)
造船会社	三星重工業
主要能力	生産能力 : 原油 100,000 bbl/d、ガス 50 mmscfd 最大可載重量: 約 14,000 t 排水量 : 約40,000 t 水深 : 1,333m 三井海洋開発がプロジェクトマネジメント、設計、資材調達、建造工事、プレ・コミッションングの契約メキシコ湾Shenziフィールドで操業中
Webサイト/参考資料	http://www.modec.com/jp/project/tp/shenzi.html

7.4. 輸送に用いられる船舶

	輸送に用いられる船舶等 (5.4.1.参照)	
	基本情報	
	種類	VLCC (30万トン型原油運搬船)
	船名	GEM NO.1 (ジーイーエム ナンバーワン)
	所有者	環能海運股份有限公司 (グローバル・エナジー・マリタイム)
	オペレータ	GEM NO.1 MARITIME CORPORATION
	全長、型幅、型深さ	330m x 60.0m x 29.35m
	総トン数	156,501
	建造年	2016年
	造船会社	ジャパン マリンユナイテッド
主要能力	載貨重量 302,652Mt 主機関：MAN B&W 7G80ME-C9.2 省エネデバイス 新型Super Stream Duct、SURF-BULB、A-LV Finおよび船首形状Ax-Bow採用 航海速力：15.8ノット	
Webサイト/参考資料	https://www.jmuc.co.jp/press/2016/gem-no1.html	

	輸送に用いられる船舶等 (5.4.1.参照)	
	基本情報	
	種類	アフラマックス型タンカー
	船名	KAIMON MARU (かいもん丸)
	所有者	JXオーシャン (旧JX日鉱日石タンカー)
	オペレータ	JXオーシャン
	全長、型幅、型深さ	246.8m x 44.4m x 22.0m
	総トン数	66,200
	建造年	2013年
	造船会社	ジャパン マリンユナイテッド
主要能力	載貨重量 120,015Mt 主機関：DU-WÄRTSILÄ 6RTA58-D 省エネデバイス ATフィンおよびLVフィンを装備 航海速力：14.5ノット	
Webサイト/参考資料	http://www.jmuc.co.jp/press/2013/post-29.html http://www.on-jx-group.co.jp/information/tanker/pdf/20130111.pdf	

	輸送に用いられる船舶等 (5.4.3.参照)	
	基本情報	
	種類	LNG Carrier (MOSS型タンク)
	船名	GRACE DAHLIA (グレースダリア)
	所有者	日本郵船、東京ガス
	オペレータ	日本郵船
	全長、型幅、型深さ	286.5m x 52.0m x 28.0m
	総トン数	141,671
	建造年	2013年
	造船会社	川崎重工業株式会社
主要能力	載貨重量： 86,512Mt タンク容量 (カーゴ積載量)： 177,427m ³ ボイルオフ率： 0.10%/日 推進装置：再熱式蒸気タービン機関 航海速力： 19.5ノット	
Webサイト/参考資料	https://www.khi.co.jp/news/detail/20130930_2.html	

	輸送に用いられる船舶等 (5.4.3.参照)	
	基本情報	
	種類	LNG Carrier (MOSS型球形ストレッチタンク方式 (連続タンクカバー付) "SAYAENDO")
	船名	LNG VENUS
	所有者	商船三井、大阪ガス
	オペレータ	商船三井
	全長、型幅、型深さ	288m x 48.94m x 26.0m
	総トン数	136,710
	建造年	2014年
	造船会社	三菱重工株式会社
主要能力	載貨重量： 75,000Mt タンク容量 (カーゴ積載量)： 153,000m ³ ボイルオフ率： 0.10%/日 推進装置：再熱式蒸気タービン 航海速力： 19.5ノット	
Webサイト/参考資料	http://www.mol.co.jp/pr/2014/14059.html http://www.mhi.co.jp/technology/review/pdf/521/521054.pdf http://www.osakagas.co.jp/company/press/pr_2014/1216635_10902.html	

	輸送に用いられる船舶等 (5.4.3.参照)	
	基本情報	
	種類	LNG Carrier (メムレン型 (GTTマークⅢ方式))
	船名	TANGGUH FOJA
	所有者	川崎汽船、ムトラス社
	オペレータ	川崎汽船 (ケイライン・シッフマネジメント社)
	全長、型幅、型深さ	285.1m x 43.4m x 26.0m
	総トン数	97,897
	建造年	2008年
	造船会社	三星重工業
主要能力	載貨重量: 82,338Mt タンク容量 (カーゴ積載量): 154,800m ³ 推進装置: 二元燃料ディーゼル機関電気推進方式 航海速力: 19.5ノット	
Webサイト/参考資料	https://www.kline.co.jp/news/detail/1187136_1454.html	

	輸送に用いられる船舶等 (5.4.3.参照)	
	基本情報	
	種類	LNG Carrier (自立角形タンク方式 (SPB方式))
	船名	未定
	所有者	東京エルエヌジータンカー、商船三井、日本郵船
	オペレータ	商船三井、日本郵船
	全長、型幅	299.9m x 48.9m
	総トン数	
	建造年	2017年
	造船会社	ジャパンマリンユナイテッド
主要能力	載貨重量: 75,000Mt タンク容量 (カーゴ積載量): 165,000m ³ ボイルオフ率: 0.08%/日 推進装置: 三元燃料ディーゼル機関電気推進方式 航海速力: 19.5ノット	
Webサイト/参考資料	http://www.jmuc.co.jp/press/2014/spb-lng.html http://www.tokyo-gas.co.jp/Press/20140228-01.html	

	輸送に用いられる船舶等 (5.4.3.参照)	
	基本情報	
	種類	大型LPG運搬船 (液化石油ガス運搬船) (VLGC)
	船名	SUMIRE GAS
	所有者	アストモスエネルギー
	オペレータ	飯野海運
	全長、型幅、型深さ	229.9m x 37.2m x 21.0m
	総トン数	46,796
	建造年	2016年
	造船会社	川崎重工業
主要能力	載貨重量: 54,243Mt タンク容量 (貨物艙容積): 82,416m ³ 主機関: MAN B&W 7S60ME-C8.2 航海速力: 17.0ノット	
Webサイト/参考資料	https://www.khi.co.jp/pressrelease/detail/20160330_1.html http://www.astomos.jp/zwp/wp-content/uploads/2016/03/news20160323.pdf	

(付録) 海洋資源開発 参考動画集

(付録) 海洋資源開発 参考動画集

- Offshore Learning Center
<http://www.offshore-mag.com/learning-center.html>
- 日本海洋掘削株式会社 会社紹介ビデオ
<https://www.youtube.com/watch?v=l-N8WDyodj4>
- 深海科学掘削技術～地球深部探査船「ちきゅう」～
<https://www.youtube.com/watch?v=1n-wLHvcKi0&t=154s>
- 海底広域研究船「かいめい」機能紹介
<https://www.youtube.com/watch?v=iQKYwey4d3c&t=70s>
- 海洋資源調査船「白嶺」紹介映像
<https://www.youtube.com/watch?v=idawAZZmVpE>
- 物理探査船「資源」紹介映像
<https://www.youtube.com/watch?v=IHTQfSSuiAk>
- 三井海洋開発株式会社 事業紹介映像
<https://www.youtube.com/watch?v=CfGSyP4ivT8>
- イクシスプロジェクト 関連動画
<http://www.inpex.co.jp/ichthys/movie.html>