Review

深海底鉱物資源開発の過去・現在・未来*

山崎 哲生¹

Past, Present, and Future of Deep-Sea Mining

by Tetsuo YAMAZAKI^a

a. Graduate School of Engineering, Department of Marine System Engineering, Osaka Prefecture University (Corresponding author, E-mail: yamazaki@marine.osakafu-u.ac.jp, FAX: 072-254-9914)

Deep-sea mineral resources, such as manganese nodules, seafloor massive sulfides, cobalt-rich manganese crusts, and rare-earth element-rich deep-sea mud have been interested in as potential resources for metals near future because of their higher metal contents and no overburden removals. The R&D histories and current activities are introduced. In case of manganese nodules, three pilot mining tests at actual sites were taken place in the end of 1970s and the early 1980s. The time some pioneer environmental works were conducted simultaneously. These results still have important meanings in deep-sea mining. In the first decade of 21st century, seafloor massive sulfide mining has been focused as an immediate target for commercial mining. Currently all the deep-sea mining is considered to have higher possibilities for commercial mining because of the increasing world metal demands. Not only many states but also many venture companies are coming into the R&D arena. For the realization of deep-sea mining, the durability of ore lift pipe has been the most critical technical and economic issue. On the basis of current technological progresses, the breakthrough is necessary. Japan's leadership is required for the sustainable mining good for the metal market and the environment.

KEY WORDS: Manganese Nodule, Seafloor Massive Sulfide, Cobalt-Rich Manganese Crust, Rare-Earth Element-Rich Deep-Sea Mud, Deep-Sea Mining

1. はじめに

マンガン団塊の鉱物資源としての可能性について、John Mero が紹介したことを端緒として、その開発に対する産業界の関心が高まり、1970年代に国際的規模での技術開発競争が展開された。この熱気は、1980年代から1990年代にかけて、いくつかの国家プロジェクトに引き継がれたが、経済的および技術的問題のため、産業界の関心は薄れた。

しかし、2000年代に入り、BRICSを初めとする、発展途上国から脱却し、経済成長を遂げる国々が出現したことにより、非在来型鉱物資源に対する関心が高まり、海底熱水鉱床開発実現の機運が生まれることとなった。また、これをきっかけとして、深海底鉱物資源開発全般に対する再認識が進み、マンガン団塊、海底熱水鉱床、コバルト・リッチ・クラストの開発鉱区取得の動きが展開されている。

ここでは、陸上鉱物資源と比較した深海底鉱物資源の利点を紹介し、その果たすべき役割を考える。また、深海底鉱物資源開発の過去・現在について概説する。さらに、深海底鉱物資源開発の課題と今後の展開についての予想を述べる。

2. 金属の存在量と市場動向

新たな需要量に相当する金属の生産量と、その金属の地殻内存在度とを比較したものがTable 1であるが、銅はその生産量の多さに反して、絶対的な存在量が少なく、開発対象となる鉱床の低品位化、さらには供給不足の可能性を否定できない。金、銀、亜鉛、鉛、スズにも同様の傾向があり、これらの次に不安要素のある金属として、ニッケル、マンガン、リチウム、インジウム、ガリウムが挙げられている¹⁾。

銅は種々の有用な特性を持っており、人類が最も古くから利用した金属である。特に、その電気抵抗は銀に次いで低く（銀1.47, 銅1.55, 金2.05, アルミ2.50, 鉄 $8.90 \times 10^{-8} \Omega \text{m}$, 0℃の場合）、電気の利用が進み、電化製品が普及するのに従って、銅の生産量は増加し、存在量が少ないため、採掘鉱石の銅含有率は年々低下することになる²⁾。さらに、近年においては、再生可能エネルギー利用の促進に伴っても、銅の需要は高まっている³⁾。金属の多くは、同様に他の元素等による代替が困難な特性を有しているため、発展途上国の経済成長に伴う需要増加が予測される状況下においては、これまで開発対象と考えられていなかった非在来型鉱物資源についても、その可能性を検討する必要が出てきている。

3. 深海底鉱物資源の利点

陸上の鉱物資源の開発においては、既存鉱山周辺ではない、新たな地域での開発を開始する前には、道路、港湾、鉄道、居住設

*2014年1月22日受付 2014年7月23日受理

1. 正会員 大阪府立大学大学院 工学研究科 海洋システム工学分野
[著者連絡先] FAX: 072-254-9914

E-mail: yamazaki@marine.osakafu-u.ac.jp

キーワード: マンガン団塊, 海底熱水鉱床, コバルト・リッチ・クラスト, レアアース泥, 深海底鉱物資源開発

Table 1 Production and abundance of metals.

Metal or product	World production in 2011 [metric ton] ⁴²⁾	Abundance in earth's crust [ppm in weight] ⁴³⁾
Platinum	484	0.01
Mercury	2,010	0.08
Gold	2,660	0.004
Silver	23,300	0.07
Cobalt	109,000	25
Tin	244,000	2
Molybdenum	264,000	1.5
Magnesium	771,000	23,300
Nickel	1,960,000	75
Lead	4,690,000	12.5
Zinc	12,800,000	70
Copper	16,100,000	55
Aluminium	44,400,000	82,300
Manganese ore	46,600,000	950
Steel	152,000,000	56,300

備等のインフラストラクチャーの整備が必要になる。このため、巨額の投資と長い準備期間が必要である。非在来型鉱物資源である深海底鉱物資源についても、採鉱、輸送、製錬等の設備を新設しなければならないため、投資額は大きくなるが、採鉱に必要な機器類は採鉱船にすべて搭載され、輸送も船舶によって行われるため、インフラストラクチャーの整備は不要である。また、日本に代表される鉱物資源輸入国では、製錬所が海岸に立地しているため、これらの製錬所に、深海底鉱物資源用の製錬設備等を作ることによって、既存港湾・荷役設備の利用が可能となり、投資額を抑制することができる。

深海底鉱物資源の資源としての可能性に興味が集まった大きな理由として、複数の有用金属を含有していることと、その含有率の高さが挙げられる。マンガン団塊とコバルト・リッチ・クラストの場合はマンガン、銅、ニッケル、コバルト⁴⁾、海底熱水鉱床の場合は、銅、亜鉛、鉛、金、銀⁴⁾が主な回収対象とされ、これらのほかに、白金、レアアース等の回収も検討されている⁵⁾。これらの回収対象金属の含有率が高いということは、残渣としての廃棄物処理量が少なくなることを意味している。また、深海底鉱物資源は、そのほとんどが海底に露出して存在しており、鉱床の上を覆う「被り」を除去せずに直接採掘することができる。これらは、環境影響をより小さくするという視点から、重要な特徴となる。また、水圏における循環の最終到達地点である深海底で開発を行う場合、水系を通じての下流の居住地域への環境汚染という、陸上鉱物資源開発の抱える大きな問題の発生が起これないということも、重要な特徴のひとつである。

深海底鉱物資源の魅力としては、太平洋のある海域に賦存するマンガン団塊中の銅の潜在的資源量が、世界需要の約35年分相当と試算されているように（詳細は後述）、その存在量も挙げられる。前述のように、多くの金属の供給に不安要素がある中で、この大きなポテンシャルは、今後の世界的な経済成長を支える基盤の一部を担う可能性を秘めているといえる。

4. 深海底鉱物資源開発の過去・現在

4・1 マンガン団塊の開発技術

マンガン団塊の鉱物資源としての可能性はMeroによって紹介され⁶⁾、これを端緒として、20世紀中、場合によっては1980年代末に商業生産が始まるかもしれないという予想のもとで、1970年代に4つの国際企業連合(KCON: ケネコットグループ(G)、OMA: US スチールG、OMI: インコG、OMCO: ロッキードG)による製錬技術を含む、マンガン団塊開発技術の研究が実施され、水深5,000mの実海域での採鉱実験が、1970年代末にKCONを除く3つのグループによって行われた⁷⁻⁹⁾。日本からはKCONに三菱G、OMAに日綿実業等(1976年撤退)、OMIに住友Gが参加した。内径6～8インチの鋼製揚鉱管を使用した水深4,000～5,000mの実海域での採鉱実験は、その後実施されておらず、この時の結果は技術的に重要なものである。

これらを参考に、1980年代から1990年代にかけては、日本、フランス、ソ連の国家プロジェクトを中心に、マンガン団塊の採鉱技術や製錬技術の開発が実施された。これらのうち、最も大規模な実験は、日本が1997年に水深2,200mの海山域で行った集鉱実験であるが、集鉱機単体の機能確認実験に留まった¹⁰⁾。国家プロジェクトのうち、現在も継続的に実施されているのは、インド、中国、韓国、InterOceanMetal (IOM: 東欧諸国等の国家連合)のものである。

インド、中国、韓国によるマンガン団塊開発技術の研究は、国際企業連合のプロジェクトからみると、周回遅れの感があったが、最近の状況下ではトップランナーになったといっても過言ではなく、特にインドと韓国のものは注目される。インドの採鉱システムの特徴は、海上プラットフォーム、揚鉱管、自走式採鉱機という直列系のシステムでありながら、1ユニットの生産量をかなり小さくし、多数のユニットを同時並行使用して、必要な生産量を確保するという点にある。ドイツから技術導入して、2000年に水深410mでのクローラー推進式採鉱機とフレキシブルチューブによる揚砂実験に成功した後、国産採鉱機によって、2007年に水深450mでの揚砂実験にも成功している¹¹⁾。サブシステムの故障によって、巨大直列系システム全体が停止するリスクを考えると、現実的な構成であるといえる。韓国では、6,000m仕様のクローラー自走式採鉱機を2012年に完成させ、2013年に水深1,370mにおける走行テストを成功させている¹²⁾。2016年以降に揚鉱システムと組み合わせたパイロット採鉱実験を水深2,200mで、その後引き続いて、採鉱機単独実験を実海域で計画している。インド、中国、韓国は、製錬技術開発にも力を入れている。特に、インドはUdaipurのHindustan Zinc Limited社内に0.5トン/日規模のマンガン団塊製錬パイロットプラントを建設し、2002年から亜硫酸アンモニウム浸出法など数種類の湿式製錬法の比較実験を実施した¹³⁾。この成果は、2008年に国際海底機構(ISA: International Seabed Authority)とインド政府の共催で開催されたISA Workshop on Polymetallic Nodule Mining Technology: Current Status and Challenges Aheadにおける、年間生産量150万トンで20年間操業するマンガン団塊開発モデルの概念構築、経済性試算にも反映された¹⁴⁾。ISAは国連海洋法条約に基づいて、1994年に設立された公海の海底鉱物資源の管理を行う国際機関であり、海底鉱物資源開発活動の管轄・管理権を有している。IOMは実験室レベルのマンガン団塊輸送実験や製錬基礎実験を実施している¹⁵⁾。

1975年から1980年にアメリカ商務省海洋大気庁(NOAA National Oceanic and Atmospheric Administration)がDOMES (Deep Ocean Mining Environmental Study) というプロジェクトを実施し、

Table 2 Estimated metal mass in manganese nodules at Clarion-Clipperton Fracture Zone area²⁷⁾.

	Nodules	Mn	Co	Ni	Cu
Average metal content (%)	—	28.2	0.22	1.23	1.09
Potentials of nodules (million tons)	62,000	17,500	134	761	669

マンガン団塊採鉱に伴う海洋環境への影響を評価する先駆的試みを行った。DOMES の特徴は、陸域から遠く離れた海域で、表層から深海底に至る物理・化学・生物的なベースライン調査を実施¹⁶⁾するとともに、対象海域で国際企業連合による大規模な採鉱実験が行われた際に、海洋環境への影響をモニタリング、評価した^{17, 18)}という点にある。特に、表層にまで影響を与えるような大規模な採鉱実験は、その後行われていないため、これらのレポートは、現在でも大きな価値を有している。NOAA はその後、深海底生態系影響実験 (BIE: Benthic Impact Experiment) を 1991 年から 1995 年にかけて実施し、模擬集鉱機から排出されるブリュームによって発生する再堆積による海底攪乱を、人為的に深海底生態系に与え、その影響を評価しようという試みを行った¹⁹⁾。この試みは後発の国、グループなどの類似研究の雛形となったが、連邦予算削減の影響を受けて 1995 年に中止されてしまった。

NOAA と同じ模擬集鉱機を使用して、日本、IOM、インドが海底生態系に人為的攪乱を与え、その影響をモニタリングする BIE (JET: Japan Deep-sea Impact Experiment, IOM-BIE, INDEX: Indian Deep-sea Environment Experiment) をそれぞれ 1994 年、1995 年、1997 年に実施した²⁰⁻²²⁾。一方、ドイツではハンブルク大学やアルフレッド・ウェーゲナー研究所を中心とするグループが、1988 年から深海底生態系攪乱・再生実験 (DISCOL: Disturbance and Recolonization Experiment in the Deep South Pacific Ocean) に取り組んだ²³⁾。BIE との違いは、鋤のような海底攪乱機を用いて海底を引っ掻き、集鉱機走行による海底の直接攪乱をターゲットとしている点にあった。この研究グループは、DISCOL の経験を基に、将来の深海底鉱物資源開発の際の環境アセスメント手法や環境保全策についての提言をまとめている²⁴⁾。

海底の直接攪乱については、日本も海山域で 1999 年から 2002 年に DIETS (Direct Impact Experiment on Seamount) というプロジェクトを実施して、攪乱 3 年後までモニタリングを行い、海底生態系の回復のシミュレーションモデルを構築した²⁵⁾。JET と DIETS という、日本の 2 つの研究成果はモニタリング結果の分析やシミュレーション解析において、高い評価を受けている。

4・2 マンガン団塊の鉱区取得

国連海洋法条約に基づき、ISA が管理する公海域 (The Area あるいは High sea と呼ばれる) に、2015 年までに計 17 の国あるいは組織のマンガン団塊鉱区 (排他的探査権を有する海域) が設定・認可されている (14 は探査権設定済み。3 は認可済み)²⁶⁾。このうち、日本のものも含む 16 鉱区が集中する、ハワイとメキシコの間のクラリオン・クリップトン断裂帯のマンガン団塊中の銅資源量は、Table 2 に示したように、669Mt (世界需要の約 35 年分相当) であり、マンガンは 17,500 Mt、ニッケルは 761 Mt、コバルトは 134 Mt と試算されている²⁷⁾。さらに、マンガン団塊にはチタン、ジルコン、プラチナ、モリブデン、テルル、タングステン、レアアース類も含有されており、人類に残された最後の巨大金属資源と考えられている。

マンガン団塊鉱区のうち最初の 7 つは、1994 年までに先行投資者として登録されたものを引き継ぎ、2001 年と 2002 年に探査契約を ISA と結ぶという形で設定されたが、2006 年にドイツが

探査契約を結んだのを端緒に、2011 年から 2015 年に 9 つの設定・認可が続くという状況になっている。このうち 5 つは、内陸国や発展途上国にもマンガン団塊開発の恩恵を及ぼすために設けられた Reserved Areas に、太平洋の島国等を前面に立ててベンチャービジネス会社が獲得したものであり、これらの会社は積極的な PR 活動によって、開発に必要な資金を投資家から集めようとしている。

4・3 海底熱水鉱床

1997 年にパプアニューギニア (PNG) の領海内で海底熱水鉱床の探査権を取得した Nautilus Minerals (NM) 社は、鉱業会社等から開発資金を集め、2007 年に採鉱システムを海洋石油・天然ガス生産機器等の製造実績のある企業に発注し、水深 1,800m の Solwara 1 鉱床の 2009 年からの開発開始をめざした。開発海域の鉱床の銅含有率が高いこと、内海の穏やかな気象条件、PNG 領海という好条件が、この動きを加速させた。世界経済危機のため、一旦、これらは 2008 年末にキャンセルされた。しかし、金属市況の回復と、2011 年に PNG 政府から開発許可とともに、30% の出資 (推定 US\$200M の資金提供) を受けることとなり、2013 年からの開発に向けて採鉱システム建造を再開した。その後、2012 年には中国の製錬会社と売鉱契約も締結し、順調に推移していたが、ヨーロッパ経済危機の影響による採鉱船建造の遅れと、PNG 政府との間で出資と収益配分を巡るトラブルが 2012 年 6 月に発生し、ついに、2012 年 11 月に全ての建造停止、PNG での活動凍結、人員整理に追い込まれた。2013 年になって、NM 社に有利なトラブルの調停結果が出たため、採鉱システム建造を再開し、現在は 2018 年の開発開始をめざしている²⁸⁾。

一方、韓国は 2008 年にトンガ EEZ 内に鉱区を確保して第一期の探査を完了し、採鉱実験を含む第二期へと移行することを 2011 年に表明した。また、フランスも 2010 年から太平洋の自国領であるワリス・フテyna 諸島 (Wallis & Futuna) EEZ 内の探査、開発検討を行っている。また、ISA が公海上の鉱区取得規則 (探査権取得のためのマイニングコード) を定めたことにより、2011 年から 2015 年に 5 つの鉱区設定 (中国、ロシア、韓国、フランス、ドイツ) がされている²⁶⁾。このように、NM 社の開発計画に紆余曲折はあったものの、海底熱水鉱床開発への世界各国の関心は衰えていない。

4・4 コバルト・リッチ・クラスト

コバルト・リッチ・クラストの探査は、日本が 1987 年から中央太平洋海域の公海上において継続的に実施し、その後、ロシア、中国、韓国も同じ海域に進出してきた。ISA が公海上の鉱区取得規則 (探査権取得のためのマイニングコード) を定めたことにより、2013 ~ 2015 年に中国、日本、ロシアが中央太平洋海域に鉱区設定を認められ、ブラジルが大西洋に申請を行った。

このように、まだ探査段階の活動が主ではあるものの、日本においては、採鉱技術や経済性評価の基礎研究も実施されている^{29, 30)}。採掘対象となるクラストが 5 ~ 10cm という薄層であり、微地形変化が大きいため、基盤岩をクラストと一緒に採掘してしまうことが技術面においても、経済面においても、大きな課題である。

4・5 レアアース泥

2010年に発生した中国のレアアース輸出規制問題を受けて、タヒチやハワイ周辺海域において、高いレアアース含有率の深海底堆積物が確認されたこと³¹⁾が注目を集めた。レアアース泥の資源的可能性については、海外においても関心が高まり、イギリスで開発のフィジビリティスタディ (FS) が実施された³²⁾。このFSでは、「レアアースの特性、価値、需給」、「レアアース泥の分布」、「探査における試料採取手法、分析手法」、「開発に伴う環境問題についての考察」、「開発における採掘手法、揚鉱手法、リーチング手法」について検討した。そして、含有率の低さから、揚鉱前の海底リーチングが必須であるとして、その技術的課題について詳細な検討を加えている。

その後、南鳥島の日本のEEZに、より高含有率で、海底面近くに存在するものが確認され³³⁾、国内の安定供給源としての可能性が検討されている。しかし、水深5,600～5,800mは、マンガン団塊より深く、堆積物の粘着性のために、同じ内径の揚鉱管でも生産量が小さくなる可能性もあるため、技術的にも経済的にも大きな課題がある³⁴⁾。また、高含有率といっても、最大でも0.5%程度しか有用物を回収できないため、残渣としての廃棄物処理量は多大となるという問題点も存在する。このため、当面はこれらの課題解決の方策を探ることが重要となる。

5. 深海底鉱物資源開発の課題と今後の展開

5・1 深海底鉱物資源開発の課題

マンガン団塊の商業生産が早ければ、10数年後にも開始されるのではないかという見通しを基に、1970年代に、当時の技術水準で、10年以内に実現可能性のある技術を基に、マンガン団塊採鉱システムの概念が構築された。しかし、この時には経済的可能性の追求が先行したため、一部の技術要素については、不十分な知識や見通しに基づいて技術開発が進められたことは否めない。

その代表的な例が鋼製揚鉱管である。内径10～12インチの鋼製揚鉱管を用いて、5,000mの揚鉱をエアリフトあるいはポンプリフトによって実施するという基本的概念が、まず構築された。そして、前述の3つの企業連合による実海域採鉱実験（内径6～8インチの鋼製揚鉱管使用）が1970年代末に実施された。その結果、鋼製揚鉱管の耐久性が、技術的、経済的なネックとなることが判明した。当時は、コンピュータの計算能力や、動的挙動のシミュレーション技術が不十分であり、ヒープ補償をすれば、1,000トンを超える重量の5,000mの鋼製揚鉱管の耐久性は十分あるとの見通しであった。しかし、鋼製であるため揚鉱管が自己伸縮すること、継手部分への応力集中が発生すること、海水雰囲気下での使用であること、繰り返し荷重による金属疲労が発生すること等々の、当時は十分に解明されていなかった問題が複合的に発生し、揚鉱管の切断等のトラブルが発生し、採鉱実験の実施時間は、いずれの採鉱実験においても、数時間から十数時間に留まった。

この鋼製揚鉱管の耐久性限界については、PNGやニュージーランド (NZ) の海底熱水鉱床採鉱システムの概念設計を担当したTechnip社も十分認識しており、波高が内海条件のNM社のものでは、マンガン団塊のものと同様の吊り下げ方式の鋼製揚鉱管を採用しているが、外洋域条件のNZのものでは可撓性自立フレキシブルライザーを採用している^{35,36)}。

5・2 深海底鉱物資源開発の今後の展開

海洋石油・天然ガス生産で使用される可撓性自立フレキシブルライザーについては、最近、Technip社が内径7および9イン

チのものが、3,000mまで実用化され、さらに伸ばすことができるという技術資料を公表している³⁷⁾。また、鋼管でありながら、ドラム巻き取りができる可撓性を有し、シームレスで、継手なしという海洋石油・天然ガス生産用のスチールカテナリーライザーも3,000mまでの施工が可能という資料が出ている³⁸⁾。今後、さらなる技術の進展も想定され、長さ5,000m、内径8～9インチのもので、150万トン/年のマンガン団塊揚鉱が、いずれ可能になると考えられるようになってきている。このため、前述のようなマンガン団塊鉱区取得ブームが起きている。しかし、経済的に十分な耐久性を有する、5,000mの揚鉱管はまだ登場していないため、不確実性は残っている。これが解決された時が、マンガン団塊が人類に残された最後の巨大金属資源となる日となる。

ここ数年、マンガン団塊等の鉱区取得が相次ぐ状況下で、新しい採鉱システム概念の提案も出てきている³⁹⁾。これは、複数集鉱機を同時並行稼働し、集めたマンガン団塊を1系統の揚鉱管で輸送するというシステム構成であり、これまで主流であった直列系大規模システムのうち、特に大型集鉱機の実現性に疑問を呈するものとなっていることが注目される。

NZのChatham Rock Phosphate社の海底リン鉱石開発が、2013年にNZ政府から開発許可を得た⁴⁰⁾。EEZ内の水深400mのChatham海台の表層に賦存する団塊状のリン酸塩岩石を採取しようという民間企業によるプロジェクトであり、既存の浚渫技術の適用で対応可能な水深であるため、技術的实现性は高い。開発資金がかなり集まってきている背景には、畜産国NZが牧草の肥料原料として、北アフリカから輸入しているリン鉱石に含有されている重金属、特に、カドミウムの問題がある。リン鉱石そのものは、価格が安いので、海底リン鉱石開発は経済的には有利とはいえないが、カドミウムが牧草や生産された食肉に濃集されることに対する不安という、食品安全性の点から、重金属を含まない海底リン鉱石開発は、多少高くてもビジネスとして成立する可能性が十分ある。NZ政府環境保護省が2015年2月に開発不同意を表明し、一端ストップがかかった。しかし、Chatham社は再挑戦を表明しているため、今後の動向が注目される。

前述の2016年以降に予定されている水深2,200mにおける韓国のパイロット採鉱実験の成否も注目される。1970年代末の3つの実験以来の大規模実験となり、過去30年以上にわたるハード及びソフトの両面からの技術進展の成果が試される場となるからである。その後引き続いて予定されている実海域における採鉱機単独実験も、過去に実施されたBIEと比較して、かなり大規模な海底攪乱を引き起こすという環境面からの注目度が高い。系統的な環境モニタリングができれば、商業生産時の環境影響を予測・評価するための貴重なデータを得る場になると期待される。

深海底鉱物資源開発の経済的可能性については、前述のマンガン団塊についてのISAによる経済性試算¹⁴⁾や、海底熱水鉱床に関するもの⁴¹⁾、レアアース泥に関するもの³⁴⁾などがあるが、これらの試算では、探査費用、環境保全関連費用、廃棄物処理費用については部分的な計上に留まり、十分な考慮がされていない。開発対象となる海域によって、これらの費用が異なることや、ISAが開発のためのマイニングコードをまだ定めていないことなどがその理由であるが、これらの費用を計上した場合、海底熱水鉱床に関するもので示されたように、利益が見込めないケースも出てくる。陸上鉱物資源と競争できるレベルの経済性が商業生産には求められるため、経済性見通しを明確にすることが求められる。

複数集鉱機を同時並行稼働させる採鉱システム構成にみられるように、1970年代に構築された概念を新たな視点、現在の技術

水準で見直し、経済的に魅力あるアイデアを提示して挑戦する試みが、今後ますます出てくることが予想される。

6. お わ り に

深海底鉱物資源開発は、複数金属を回収することになるため、生産規模によっては、ある金属の市場への供給が過剰となることも予想される。特に、複数の国あるいは企業が同時に同じものを対象に操業した場合は、その可能性が高くなる。このため、開発をめざす国あるいは企業等が話し合って、開発計画を調整しなければならないことが予想される。持続的な発展をめざすためには、陸上鉱物資源開発との協調も必要となる。日本は、深海底鉱物資源に恵まれており、技術レベルも高いため、これらの国際協調のリーダーシップを担うことが期待されている。たとえば、韓国がパイロット採鉱実験後に予定している実海域実験時に、系統的な環境モニタリングを実現するためには、国際的な協力体制を構築することが必要である。環境分野でのポテンシャルの高い日本がリードして、これを実現することができれば、以後の国際協調の端緒とすることが可能である。

ひとつ間違えば、「資源の奪い合い」となる可能性がある今後の時代を、日本が生き抜き、世界に貢献するために、先頭に立つて深海底鉱物資源の開発をめざすことが必要である。

References

- 1) K. Halada: *Materia Japan*, **46** (2007), 543-548.
- 2) P. Crowson: *Resources Policy*, **37** (2012), 59-72.
- 3) S. Takeshita: *Kinzokushigen Report*, **42** (2013), 641-658.
- 4) H. Hishida: *Kinzokushigen Report*, **35** (2006), 119-128.
- 5) JOGMEC: *JOGMEC News*, **28** (2013).
- 6) J. L. Mero: *The mineral resources of the sea*, Elsevier Oceanography Series, (1965), 311p.
- 7) C. G. Welling: *Proc. 13th Offshore Tech. Conf.*, (Houston, USA, 1981), Paper No. 4094.
- 8) R. Kaufman, J. P. Latimer and D. C. Tolefson: *Proc. 17th Offshore Tech. Conf.*, (Houston, USA, 1985), Paper No. 4901.
- 9) A. R. Bath: *Proc. 21st Offshore Tech. Conf.*, (Houston, USA, 1989), Paper No. 5998.
- 10) H. Yamada and T. Yamazaki (1998). Japan's ocean test of the nodule mining system. *Proc. 8th Int. Offshore and Polar Eng. Conf.*, (Montreal, Canada, 1998), pp. 13-19.
- 11) C. R. Deepak, S. Ramji, N. R. Ramesh, S. M. Babu, R. Abraham, M. A. Shajahan and M. A. Atmanand: *Proc. 7th ISOPE Ocean Mining Symp.*, (Lisbon, Portugal, 2007), pp. 166-170.
- 12) S. Hong: Oral presentation in 42nd Underwater Mining Institute, (Rio de Janeiro, Brazil, 2013).
- 13) P. K. Sen and S. K. Das: *Proc. ISA Workshop on Polymetallic Nodule Mining Technology - Current Status and Challenges Ahead*, (Chennai, India 2008), pp. 143-167.
- 14) <http://www.isa.org.jm/files/documents/EN/14Sess/LTC/ISBA-14LTC-3.pdf>
- 15) R. Kotlinski, V. Stoyanova, H. Hamrak, and A. Avramov: *Proc. ISA Workshop on Polymetallic Nodule Mining Technology - Current Status and Challenges Ahead*, (Chennai, India 2008), pp. 168-184.
- 16) E. Ozturgut, G. C. Anderson, R. E. Burns, J. W. Lavelle and S. A. Swift: *Deep ocean mining of manganese nodules in the North Pacific: Pre-mining environmental conditions and anticipated mining effects*, NOAA Technical Memorandum ERL MESA-33, (1978).
- 17) R. E. Burns, B. H. Erickson, J. W. Lavelle and E. Ozturgut: *Observation and measurements during the monitoring of deep ocean manganese nodule mining tests in the North Pacific, March-May 1978*, NOAA Technical Memorandum ERL MESA-47, (1980).
- 18) E. Ozturgut, J. W. Lavelle, O. Steffin and S. A. Swift: *Environmental investigation during manganese nodule mining tests in the North Equatorial Pacific, in November 1978*, NOAA Technical Memorandum ERL MESA-48, (1980).
- 19) D. D. Trueblood, E. Ozturgut, M. Pilipchuk and I. F. Gloumov: *Proc. 2nd ISOPE Ocean Mining Symp.*, (Seoul, Korea, 1997), pp. 139-145.
- 20) T. Yamazaki and Y. Kajitani: *Proc. 9th Int. Offshore and Polar Eng. Conf.*, (Brest, France, 1999), pp. 374-381.
- 21) C. G. Tkatchenko and T. Radziejewska: *Proc. 8th Int. Offshore and Polar Eng. Conf.*, (Montreal, Canada, 1998), pp. 282-286.
- 22) R. Sharma, B. Nagendernath, A. B. Valsangkar, G. Parthiban, K. M. Sivakolundu and G. Walker: *Marine Georesources & Geotechnology*, **18**(2000), 209-221.
- 23) G. Schriever, A. Ahnert, C. Borowski and H. Thiel: *Proc. Int. Symp. Environmental Studies for Deep-sea Mining*, (Tokyo, Japan, 1997), pp. 197-208.
- 24) H. Theil, M. V. Angel, E. J. Foel, A. L. Rice and G.: *Schriever, G.: Marine science and technology - Environmental risks from large-scale ecological research: a desk study*, MAS2-CT94-0086, Official Publications of European Communities, (1998), 210p.
- 25) S. Ohkubo and T. Yamazaki: *Proc. 5th ISOPE Ocean Mining Symp.*, (Tsukuba, Japan 2003), pp. 200-207.
- 26) <http://www.isa.org.jm/en/scientific/exploration/contractors>
- 27) ISA: *A Geological Model of Polymetallic Nodule Deposits in the Claiton-Clipperton Fracture Zone*, (2010), 213p.
- 28) <http://www.nautiluminerals.com>
- 29) T. Yamazaki, Y. Tomishima, K. Tsurusaki and K. Handa: *Journal of MMIJ*, **112** (1996), 1005-1014.
- 30) S.-H. Park, T. Yamazaki, S. Shimada, and T. Yamamoto: *Journal of MMIJ*, **118** (2002), 641-649.
- 31) Y. Kato, K. Fujinaga, K. Nakamura, Y. Takaya, K. Kitamura, J. Ohta, R. Toda, T. Nakashima and H. Iwamori: Deep-sea mud in the Pacific Ocean as a potential resource for rare-earth elements, *Nature Geoscience*, **4** (2011), 535-539.
- 32) M. B. Bashir, S. H. Kim, E. Kiosidou, H. Wolgamott and W. Zhang: *A Concept for Seabed Rare Earth Mining in the Eastern South Pacific*, LRET Collegium 2012 Series Vol. 1, Univ. Southampton, 121p.
- 33) http://www.jamstec.go.jp/e/about/press_release/20130321/#z1
- 34) T. Yamazaki, Y. Yamamoto, N. Nakatani and R. Arai: *Proc. 33rd Int. Conf. Ocean, Offshore and Arctic Eng.*, (San Francisco, USA, 2014), OMA2014-23141.
- 35) T. Parenteau: *Proc. 29th Int. Conf. Ocean, Offshore and Arctic Eng.*, (Shanghai, China, 2010), OMA2010-20185.
- 36) P. Stanton and A. Yu: *Proc. 29th Int. Conf. Ocean, Offshore and Arctic Eng.*, (Shanghai, China, 2010), OMA2010-20189.
- 37) http://www.technip.com/sites/default/files/technip/publications/attachments/Flexible_pipe_April_2013_Web.pdf
- 38) G. Rombado, B. Yue and C. Rueda: *Proc. 44th Offshore Tech. Conf.*, (Houston, USA, 2012), Paper No. 23704.
- 39) W. Flentje, S. E. Lee, A. Virnovskaia, S. Wang, S. Zabeen: *Polymetallic nodule mining: Innovative concepts for commercialisation*, LRET Collegium 2012 Series Vol. 5, Univ. Southampton, 132p.
- 40) <http://www.rockphosphate.co.nz/news/2013/12/9/nzx-announcement-mining-permit-granted>
- 41) T. Yamazaki, Y. Nakamoto, R. Arai and N. Nakatani: *Proc. 32nd Int. Conf. Ocean, Offshore and Arctic Eng.*, (Nantes, France, 2013), OMAE2013-10627.
- 42) http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/statistical_summary/myb1-2011-statistical_summary.pdf
- 43) Chigaku Dantai Kennkyukai: *Chigaku Jiten*, Heibonsha, (1996), 1443P.