Review

日本周辺海域に分布する海底熱水鉱床の 開発プロジェクトの概要*

上 田 哲 士¹ 岡 本 信 行²

The Overview of Project for Developing Seafloor Massive Sulfides in the EEZ of Japan

by Satoshi UEDA^{a*} and Nobuyuki OKAMOTO^a

a. Japan Oil, Gas and Metals National Corporation, 10-1 Toranomon 2-chome, Minato-ku, Tokyo,
105-0001 (*Corresponding author, E-mail: ueda-satoshi@jogmec.go.jp)

For the future development of seafloor massive sulfides (SMS) in the EEZ of Japan, efforts to exploration and technological development have been enhanced.

Ministry of Economy, Trade and Industry (METI) formulated "Plan for the development of ocean energy and mineral resources" in 2009, and it was amended in December 2013. In this plan, four technological fields of SMS have been carried out in parallel, respectively, Resource evaluation, Environmental impact assessment, Mining system techniques and Processing techniques.

Toward the development and commercialization of SMS, We need many technical and social challenges. In order to achieve these challenges, we have to have a strategic vision.

We must challenge to develop SMS through collaboration between industry, educational institutions and the administration of Japan.

In this paper, current circumstances and issues of the development of SMS are presented.

KEY WORDS: Seafloor Massive Sulfide, Plan for the Development of Ocean Energy and Mineral Resources, Resource Evaluation, Environmental Impact Assessment, Mining System Techniques, Processing Techniques

1. は じ め に

近年、他国の資源ナショナリズム等の資源政策に影響を受けにくい資源として、我が国周辺の排他的経済水域 (EEZ) に賦存する金属鉱物資源への関心が高まっている。海底の金属開発が可能になれば、海外に供給の多くを依存している我が国の金属資源の新たな供給源として期待できる。しかし、海底の金属資源開発については、いまだ世界に実例のない未踏分野であり、長期的かつ積極的な取り組みが必要であると同時に、冷静かつ慎重な評価と検討を合わせて行わなければならない。

このため、平成 20 年 3 月に閣議決定された海洋基本計画においては、「エネルギー・鉱物資源の開発は、民間企業にとりリスクが高く、技術的な困難も伴うため、基礎調査や技術開発等について、国が先導的な役割を担う」とされた。これを受け、経済産業省 (METI) は、平成 21 年 3 月に策定した「海洋エネルギー・鉱物資源開発計画」の中で、特に海底熱水鉱床の開発に向けた 10 年計画を定め、独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機

構 (JOGMEC) が委託事業主体となり、事業を推進してきた。

2013 年 4 月には、新たな海洋基本計画が閣議決定され、海底熱水鉱床については、「平成 30 年代後半以降に民間企業が参画する商業化を目指したプロジェクトが開始されるよう、既知鉱床の資源量評価、新鉱床の発見と概略資源量の把握、実海域実験を含めた採鉱・揚鉱に係る機器の技術開発、環境影響評価手法の開発等を推進するとともに、その成果が着実に民間企業による商業化に資するよう、官民連携の下、推進する」と位置づけられた。また、新たな海洋基本計画の策定に伴い海洋エネルギー・鉱物資源開発計画についても 2013 年 12 月に改正された^{1,2)}。

現在、海底熱水鉱床の開発に向けた工程表に基づき、資源量評価、採鉱・揚鉱技術、選鉱・製錬技術、開発に伴う環境影響評価の分野について、それぞれ併行して検討が行われている^{3,4)}。

海底熱水鉱床の開発にあたっては、世界的にもこれまで開発事例はなく、様々な技術的課題が多く存在する。このため、本稿では海底熱水鉱床を開発に対する現状認識の共有を図る観点から、現在の取り組み状況や課題について、その概要を紹介したい。

2. 海底熱水鉱床の特徴

海底熱水鉱床は、地下深部に浸透した海水がマグマ等の熱により熱せられ、地殻に含まれている有用元素を抽出しながら海底に噴出し、それが冷却される過程で、熱水中の銅、鉛、亜鉛、金、銀等の重金属が沈殿してできた多金属硫化物である。一般に、

*2014 年 12 月 22 日受付 2015 年 10 月 23 日受理

1. (独)石油天然ガス・金属鉱物資源機構 金属資源技術部 海洋資源調査課
2. 正会員 (独)石油天然ガス・金属鉱物資源機構 金属資源技術部 海洋資源技術課長

[著者連絡先] FAX: 03-6758-8060 (JOGMEC・上田)

E-mail: ueda-satoshi@jogmec.go.jp

キーワード: 海底熱水鉱床, 海洋エネルギー・鉱物資源開発計画, 資源量評価, 環境影響評価, 採鉱・揚鉱技術, 選鉱・精錬技術

Fig.1 Location of Seafloor massive sulfide around Japan.

Fig.2 Marine Resources Research Vessel "HAKUREI".

水深 1,000 – 3,000 m の中央海嶺の海底拡大軸や西太平洋の島弧-海溝系の背弧海盆に分布していることが知られている⁵⁾。(Tivey, 2007)

我が国周辺海域では、島弧-海溝系に属する沖縄トラフや伊豆・小笠原海域において、(国研)海洋研究開発機構(JAMSTEC)や(国研)産業技術総合研究所(AIST)等の科学的調査やJOGMECによる海洋資源調査によって、海底熱水鉱床の徴候が発見されている。

これらのうち特に沖縄トラフの伊是名海穴と伊豆・小笠原海域のペヨネース海丘においては、JOGMECによる有索無人潜水機(Remotely Operated Vehicle: ROV)等を用いた海底観察やサンプリングによって広範囲に熱水活動域が確認されている(Fig. 1)。

深海底の鉱物資源には海底熱水鉱床の他、マンガン団塊やコバルトリッチクラストが知られているが、海底熱水鉱床の分布水深は他の2鉱種に比べ浅いという特徴がある。さらに日本のEEZ内で確認された海底熱水鉱床の分布水深は700–1,600mと世界的にも浅く、技術的・経済的にも開発に有利であると期待されている。

一方で、海底熱水鉱床周辺の生態系は熱水噴出孔などから供給されるメタンや硫化水素等を利用して有機物をエネルギー源とした生態系であり⁶⁾、開発に当たっては生物種の保全等について最大の配慮を払いつつ実施することが求められる。

3. 海底熱水鉱床の開発に向けた取組の現状

海底熱水鉱床の開発に向けての取り組みは、METIからの委託を受けたJOGMECが中心となり、AIST, JAMSTEC, (国研)海上技術安全研究所(NMRI)等の研究機関、大学、民間企業の協力の下、資源量評価、採鉱・揚鉱技術、選鉱・製錬技術、環境影響評価についての検討をそれぞれ併行して実施している。

また、開発計画を効率かつ効果的に推進するため、有識者からなる「海底熱水鉱床開発委員会(委員長: 浦辺徹郎 東京大学名誉教授)(事務局: JOGMEC)」を設置している。また、海底熱水鉱床の開発には、多岐にわたる分野の検討が必要であることから、委員会の下、それぞれ技術分野ごとにワーキンググループ(WG)を設置し、詳細な技術検討を行うとともに、必要に応じ合同会議を行い、分野間での情報共有を図っている。

3・1 資源量評価

沖縄海域及び伊豆・小笠原海域において、海底熱水鉱床(徴候)が確認されている区域を中心に、ボーリング調査、物理探査等を実施し、鉱床の垂直方向の連続性や品位等の資源情報を取得し、資源量の把握に努めている。

調査海域は、沖縄海域と伊豆・小笠原海域とし、沖縄海域においては沖縄本島北西に位置する伊是名海穴を調査対象とした。伊

是名海穴は、南南東方向に伸びた、長軸 6km、短軸 3km の窪地地形からなっており、窪地の中に Jade サイトや Hakurei サイトと呼ばれる海底熱水鉱床サイトが確認されている⁷⁾。

また、伊豆・小笠原海域においては、八丈島南方に位置するペヨネース海丘を調査対象とした。ペヨネース海丘は、中央火口丘を伴うカルデラ地形を呈し、カルデラ内壁の南東斜面に「白嶺鉱床」と呼ばれる海底熱水鉱床サイトが確認されている^{3, 4)}。

調査方法としては、調査船による地形調査、自律型無人探査機(Autonomous Underwater Vehicle: AUV)やROVを用いて1mから数10cmの解像度を有する精密海底地形調査、電磁探査および海底観察等によって、熱水活動に由来する徴候の水平的な広がりを確認し、ボーリングシステムを用いてコア試料を採取することにより鉱床の鉛直方向の連続性の確認を行っている。

JOGMECは、船上設置型ボーリングシステム(2000mの水深で海底下400mまで掘削可能)と海底着座型ボーリングシステム(3000mの水深で海底下50mまで掘削可能)の2種類を装備可能な海洋資源調査船「白嶺(はくれい)」を就航させた(Fig. 2)。「白嶺」は、我が国周辺海域の海洋資源の探査・開発を推進するために建造された海洋資源調査船であり、2012年1月末に完成した。総トン数6,283トン、全長118.3m、幅19.0mの調査船で、前述の大型ボーリングシステムの他、ROV等の各種最新調査機器を搭載している(Fig. 3)。「白嶺」は2012年2月から海底鉱物資源の賦存量調査等に実施している。

平成24年度末に沖縄海域伊是名海穴内Hakureiサイトを対象に硫化鉱物の資源量評価を実施した。国際基準に従い計算した結果、Hakureiサイトの資源量は、予測鉱物資源量(Inferred Mineral Resources)に相当するカテゴリーで最大340万トンと推定した。算定にあたっては、「第2白嶺丸」で採取した121孔のボーリングコア試料の分析値を使って計算した。鉱量計算では地質モデルの作成、岩相区分、分析値の検証、ブロックモデルの設定、品位・比重推定等に基づいて鉱量の集計を行った。

これまでの調査により、多くの地形的な高まり(マウンド)内部はすべて硫化鉱物で構成されていると推定されるものの、空間的な硫化鉱物の品位分布に系統的な変化は見られず、熱水活動の強弱、熱水通路の変化等により複雑な構造を持つと推定される。また、ボーリングコアの回収率が100%ではないことやボーリング間隔が海底地形に規制されることによって一様でないことから資源量分類は予測鉱物資源量に相当するものとされた。

2013年1月には白嶺の船上設置型ボーリングシステムにより、Hakureiサイト北部モデルマウンド裾野において、海底面下30m付近の堆積岩類の下部に新たな硫化鉱物帯の存在を確認した。これらの硫化鉱物帯は深部や水平方向にさらに連続する可能性があり、Hakureiサイトにおける今後の資源量の増大が期待される(Fig. 4)。

自律型無人探査機(AUV)

曳航式深海テレビカメラ(FDC)

有索式無人潜水機(ROV)

船上設置型ボーリングシステム

海底着座型ボーリングシステム

Fig.3 Typical equipment for Exploration of SMS.

Fig.4 Cross-section of SMS mound in Izena hole.

日本周辺海域には伊是名海穴やベヨネース海丘を含め20数カ所程度の海域で海底熱水鉱床の鉱徴が確認されており、今後の調査によってさらに新たな鉱徴が発見される可能性もある。JOGMECではAISTとともに、「資源探査タスクフォース」を組織し、深海底鉱物資源の存在が期待される海域の抽出を行っている。これらの海域においてより精密な調査を行うことにより、日本周辺海域全体での資源ポテンシャルの増大を図ることとしている。

3・2 環境影響評価

海底熱水鉱床の開発に当たっては熱水鉱床周辺環境への配慮が必須である。

資源量評価調査が実施されている海域を中心に、海流、水質、生息生物の状況等を把握するため、環境ベースライン調査を実施しており、その結果、伊是名海穴では熱水性生物が多い傾向にあり、また濁度や重金属濃度が高く、沈降粒子の中に熱水起源粒子が多く含まれたことから、熱水の影響が比較的広範囲に及んでいると考えられる。一方、ベヨネース海丘では、伊是名海穴に比べて熱水活動が不活発であり、表層プランクトンを起源とする沈降粒子が多いなどの特徴が見られた。採掘に伴う環境影響を予測するため、環境ベースライン調査のデータを利用しながら、環境影響予測モデル開発を行うことで、採掘に伴う懸濁粒子の拡散・再堆積は狭い範囲に限られること、揚鉱排水の拡散の影響は拡散され低濃度になることが予測でき、生態系へ影響についてはその回復に要する時間を確認した^{3,4)}。

また、採掘要素技術試験（後述）の予察的な環境影響予測・評価、環境影響モニタリング調査では、水質、底質、生物等の予察を行い、実際の試験からは周辺環境に対する深刻な影響は認められなかった。

さらに、環境保全策の検討として、周辺海域との遺伝子的交流等の調査を行うことで、伊是名海穴あるいはベヨネース海丘に固有の種はいないことを確認した。

3・3 採鉱・揚鉱技術

深海底鉱物資源の商業的採掘は世界的にも事例がなく、環境影響に配慮しつつ、経済的に採掘できる技術の開発が求められている。このため、JOGMECでは海底熱水鉱床の徴候が確認されている沖縄海域を対象に採鉱システムの技術検討を行っている。

暫定的な経済性検討に基づき商業採掘規模を1日5,000トンとして、海底熱水鉱床の採鉱システムを構成する3つのサブシステム（採掘、揚鉱、採鉱浮体）の最適方式を検討した^{3,4)}。

特に採掘システムについては、沖縄海域伊是名海穴内の海底熱水鉱床で、2種類の採掘試験機を用いて、世界初の走行・掘削試験に成功した。また、試験の結果、想定すべき採掘対象が泥、砂を含み大きさ・硬さの異なる複雑な形態であること、懸濁下での可視化技術の開発、揚鉱技術の本格開発など、新たに解決すべき技術課題も抽出されており、有意義なデータを取得している。

3・4 選鉱・製錬技術

沖縄海域及び伊豆・小笠原海域で採取された試料を用いて、それぞれ両海域の鉱石の選鉱学的特徴の把握を行った上で、実験室規模での選鉱試験や製錬試験を行っている。これまでのところ、両海域から採取された試料の鉱物特性が異なることから、それぞれの海域に適用した選鉱プロセスを提案した^{3,4)}。一例として、沖縄海域伊是名海穴で採取された試料については、浮遊選鉱基礎試験により、銅、鉛、亜鉛を含む産物を回収し、鉄の硫化物と分離できる可能性を見出したが、金属硫化物が微粒であるため、通常のプロセスに比べて、その処理には多くの解決すべき課題があることも判明している。また、製錬試験においては、鉱石から直接製錬が可能となるフローシステムも提案している。一方、新たな製錬法の取組としてケミカルリーチング及びバイオリーチング法の適用性を検討した結果、銅、鉛、亜鉛等の基礎的浸出データ

等が得られたものの、まずは発生する大量の残渣に対する処理の問題を解決することが重要であることが指摘されている^{3,4)}。

4. お わ り に

深海底鉱物資源の商業化において、技術の確立を図る以上に、まずは事業化の判断に資するレベルの正確な資源量の算定が最重要課題である。しかし、掘削長に対するコア回収率が平均 40% 程度であり、80－90% 程度を求める陸上鉱床の探査の場合と比較して低いことから、正確な資源量評価が困難である。また、世界的な商業化事例のない深海底鉱物資源を開発・生産していくためには、採掘技術の開発はもとより、開発に伴う環境影響評価を最小限にする必要がある。また、実際に海底から揚げってきた鉱石をどこで処理するのかといった問題も大きな課題の一つである。かつては我が国にも鉱石を処理する選鉱施設が多数存在したが、現在では海外から中間処理鉱石（精鉱）として輸入されており、鉱石選鉱場は存在しないため、新たな選鉱場の建設が必要である。また選鉱過程において、膨大な選鉱尾鉱が発生するため、その堆

積場の確保や鉱害対策も必要であろう。さらにこれまでの調査により明らかになりつつあるが、鉱石中の不純物である高濃度の砒素含有の問題がある。現状では一定以上の砒素を含有する鉱石については日本の製錬所は受け入れが困難である。

このように海底熱水鉱床の開発・商業化に向け、さまざまな技術的・社会的な課題があり、これらを克服するためには、中・長期的視点に立ち、我が国の産業界、大学、研究機関、その他関係者の協力・連携・理解による地道な取組が不可欠である。

References

- 1) 経済産業省：海洋エネルギー・鉱物資源開発計画，2009。
- 2) 経済産業省：海洋エネルギー・鉱物資源開発計画，2013。
- 3) 資源エネルギー庁他：海底熱水鉱床開発計画にかかる第 1 期中間評価報告書，2011。
- 4) 資源エネルギー庁他：海底熱水鉱床開発計画第 1 期最終評価報告書，2013。
- 5) Tivey, M.K.: Generation of Seafloor Hydrothermal Vent Fluids and Associated Mineral Deposits, *Oceanography*, **20**, No. 1 (2007), 50-65.
- 6) 豊原哲彦ほか：海底熱水高所の環境影響評価の検討状況と環境保全策のコンセプト，第 22 回海洋工学シンポジウム，2010。
- 7) Halbach et al.: Probable modern analogue of Kuroko-type massive sulphide deposits in the Okinawa Trough back-arc basin, *Nature*, **338** (1989), 496-499.