

深海底鉱物資源 (6)

深海底鉱物資源開発技術の現状

産業技術総合研究所 地質情報研究部門 主任研究員
tetsuo-yamazaki@aist.go.jp

山崎 哲生

1. 世界の動き

1-1. マンガン団塊

(1) 概要

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年代に国際企業連合による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も実施された(図1、2)^{1)、2)、3)}。これを端緒として、1980年代から1990年代にかけては、日本とフランスの国家プロジ

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継続された(図3、4)^{6)、7)}。このうち、現在も大規模に実施されているのは、インド、中国、韓国のものである^{9)、10)、11)}。ポーランド、チェコ、スロバキア、ブルガリアという東ヨーロッパ諸国にロシアとキューバを加えた国家連合によって構成されているInterOceanMetal (IOM)も、規模は小さいものの研究を継続している^{12)、13)}。

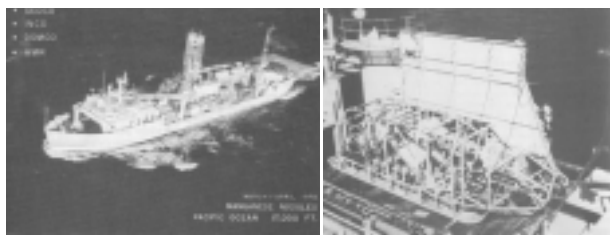


図1 インコ (OMI: Ocean Management Incorporated) の実海域採鉱実験船と曳航式集鉱機⁴⁾

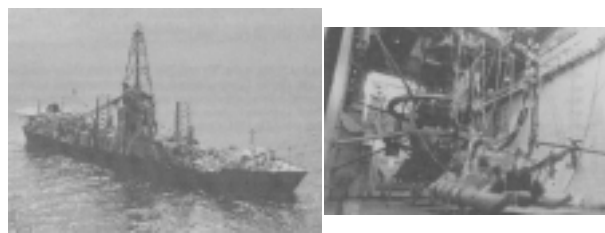


図2 ロッキード (OMC: Ocean Minerals Company) の実海域採鉱実験船と自走式採鉱機⁵⁾

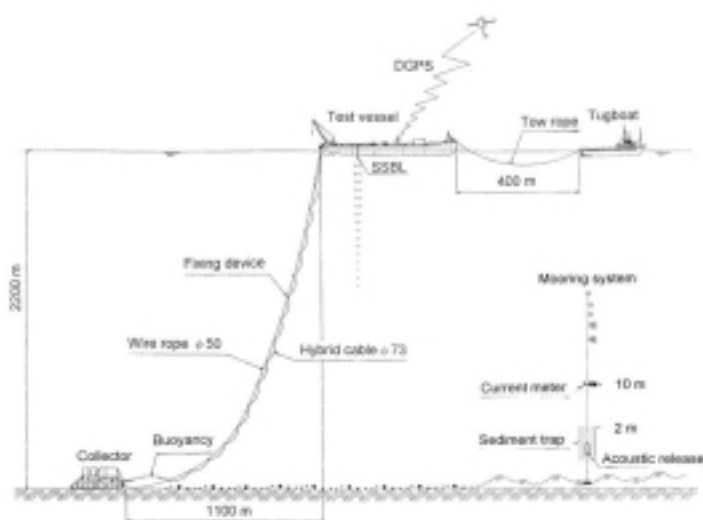


図3 日本の海山における集鉱実験概要、実験台船、曳航式集鉱機⁸⁾



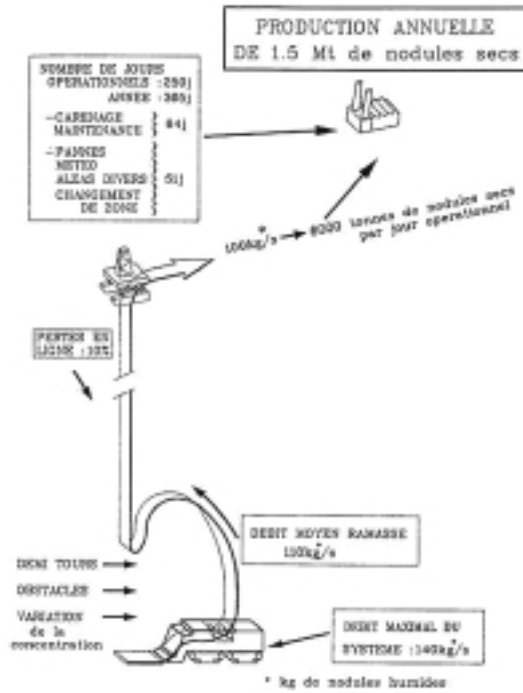


図4 フランス (IFREMER/GEMONOD) が経済性評価で使用した開発モデル⁷⁾

(2) 採鉍技術

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、最近の金属価格高騰という状況下ではトップランナーになったと言っても過言ではない。これら3か国は、いずれも自走式採鉍機を核とする採鉍システムを開発することを目標としており、インドは2000年に水深410mでのクローラー推進式採鉍機とフレキシブルチューブによる揚砂実験に成功している (図5)¹⁴⁾。インドの採鉍システムの特徴は、海上プラットフォーム、揚鉍管、採鉍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少なくし、多数のユニットを同時並行使用するという点にある (図6)¹⁵⁾。これに対して、中国と韓国では、国際企業連合、日本、フランスと同じような大規模直列系の採鉍システム (図7) を開発している。中国は2001年に、水深150mの湖で、模擬マンガン団塊を散布して、採鉍機とフレキシブルホースを組み合わせた実験を実施した¹⁶⁾。採鉍機は、機械・水力併用式団塊



図5 インドの浅海実験用自走式採鉍機とフレキシブルチューブ¹⁴⁾

取込機構を持ち、クローラー推進である (図8)。韓国では、2008年に浅海域で採鉍機、フレキシブルホース、バッファ、ポンプを組み合わせたテストを実施予定であり、その際に使用するフレキシブルホースとポンプが完成している (図9)。また、長さ30m、幅6m、深さ3mで、底に1mの厚さで堆積物を敷くことのできる土水槽 (Soil Basin) を完成させ、浅海域実験の前に、この土水槽で採鉍機のテストを行う体制を整えた (図10)。採鉍機は機械・水力併用式団塊取込機構を持つクローラー推進のものである。採鉍技術の研究を行ってなかったIOMも、基礎研究となるスラリー輸送実験を2000年から開始し、徐々に進展させている¹³⁾。

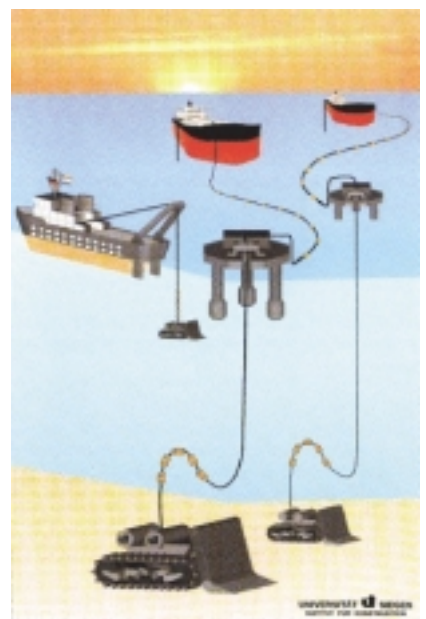
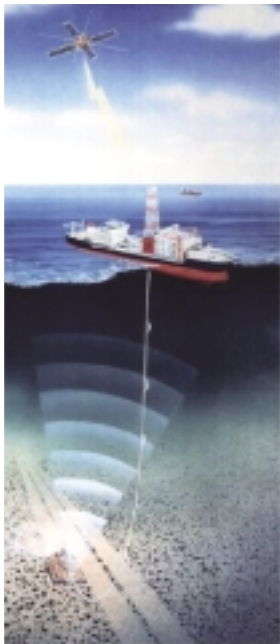
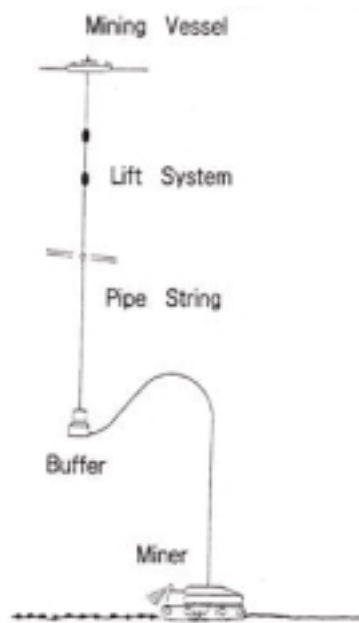


図6 インドの複数小規模採鉍システム概念¹⁵⁾



曳航式集鉬機（ケネコット、US
スチール、インコ、日本）



自走式採鉬機（ロッキード、フランス、
インド、中国、韓国）

図7 大規模直列系のマンガン団塊採鉬システム



図8 中国の湖採鉬実験用自走式採鉬機



[左] 図9 韓国の浅海実験用ポンプ
[右] 図10 韓国の土水槽

(3) 製錬技術

これらの国、グループの研究開発の特徴は、製錬技術開発にも力を入れていることである。インドはUdaipurのHindustan Zinc Limited社内に0.5t/日規模のマンガン団塊製錬パイロットプラントを建設¹⁷⁾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中である（図11）。



図11 インドの製錬パイロットプラント

実験に使用するマンガン団塊を100t以上集め、プラント脇に山積みしている。また、プラント設備の中には電解槽なども組み込まれており、実際に金属の状態での回収まで行っている。中国、韓国でも製錬技術開発が継続されている。このうち、中国では1t/日規模の製錬パイロットプラントを計画中である。韓国ではイ

ンドとの研究協力によって、湿式製錬法の研究開発を行っていた¹⁸⁾が、廃棄物処理の困難さから、日本で開発された熔錬硫化塩素浸出法とほぼ同じ製錬法を対象を転換し、0.2t/日規模の製錬パイロットプラントを建設し、実験を2006年に開始した。IOMも湿式製錬技術の研究を小規模ながら継続的に行っている¹²⁾。

(4) 環境影響予測・評価

1975年から1980年に商務省海洋大気庁（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、マンガン団塊採鉬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¹⁹⁾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鉬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^{20)、21)}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鉬実験は、その後行われていないため、これらのレポートや、その詳細な解析結果^{22)、23)}、また、1983年にスクリプス海洋研究所によって実施された採鉬実験跡の調査結果²⁴⁾などは、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、集鉬機から排出されるプルームによ

って発生する再堆積に相当する海底攪乱を、模擬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²⁵⁾。このプロジェクトは後発の国、グループなどの類似研究の雛形となったが、一部データの解析を行ったのみ²⁶⁾で、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。

中国と韓国は、マンガン団塊の採鉱に伴う環境影響予測・評価の分野では、自国鉱区のベースライン調査を実施している段階にとどまっているが、インドとIOMは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をそれぞれ1995年と1997年に開始した^{27)、28)}。いずれも、攪乱5年後のモニタリングまで終えている。ロシアについては、アメリカとBIEを共同で行ったこと²⁶⁾、日本、IOM、インドが攪乱機をロシア船で曳航したことが知られている。また、2000年にアメリカのBIEサイトを調査し、8年後のモニタリングを終えたと主張している。

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)に取り組んでいる²⁹⁾。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る。1996年には、既に攪乱7年後の生物・化学サンプリングを終えており、それらの結果^{30)、31)}やプリューム拡散シミュレーション^{32)、33)、34)}は日本の研究の目標となっている。

(5) 探査とフィージビリティスタディ

マンガン団塊の探査分野では技術的には目立った動きはないが、ドイツのBGR (Federal Institute of Geosciences and Natural Resources) がインコ (OMI) の鉱区を引き継いで、国際海底機構 (ISA: International Seabed Authority) に申請を行い、2006年にこれが認められた³⁵⁾。

ノルウェー政府の予算的支援を受けたノルウェーの企業グループが2000年から2001年にかけて、クック諸島(ニュージーランドの自治領)のEEZ(200海里排他的経済水域)内のマンガン団塊開発フィージビリティの検討を行った³⁶⁾。クック諸島のマンガン団塊は、ODA事業として金属鉱業事業団(現在の独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構(JOGMEC))が実施した調査によって、コバルト含有率、単位面積当たり賦存量とも、各国や国際企業連合の鉱区が集中するクラリオン・クリッパートン断裂帯海域を上回っている(コバルトに限れば、一部は4~5倍の単位面積当たり賦存量)ことが明らかにされたものである。図12に示したような自走式集鉱システムとワイヤーラインエレベータ揚鉱方式による採鉱システム、高温高压硫酸浸出法による製錬という構成で検討した結果は、経済的にはかなり悪いものとなった。コバルト含有率

が高く、生産規模をあまり大きくできないこと、その一方でニッケルや銅の含有率が低いことが影響したためである。

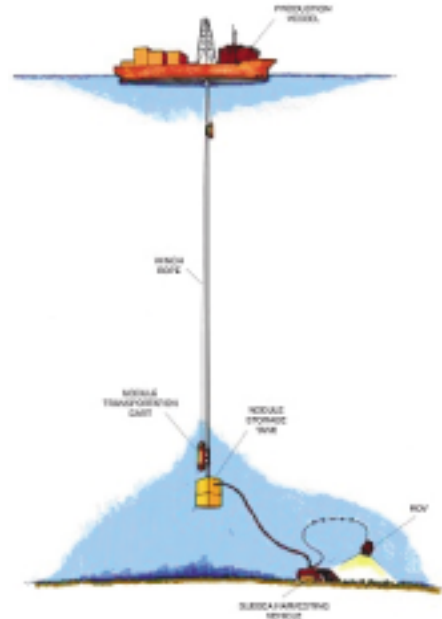


図12 ノルウェー企業Gの採鉱システム概念³⁶⁾

1-2. 海底熱水鉱床

海底熱水鉱床のうち、まず、紅海の重金属泥開発が検討され、1982年には水深2,200mの実海域での採鉱・選鉱実験が実施された^{37)、38)}。しかし、重金属泥は、金属硫化物の粒度 $2\mu\text{m}$ 以下が80%を占め、破碎による空隙露出・脱塩処理が困難で、新たな湿式製錬技術の開発とプラント建設のための巨額投資が必要だったこと、亜鉛が主対象だったことなどのために、実現には至らなかった。

これに対して、金、銀、銅の含有率が高い海洋性島弧や背弧海盆の黒鉱型海底熱水鉱床をターゲットとしたベンチャービジネスが急展開をみせている。カナダのバンクーバーに本社のあるNautilus Minerals社は1997年から活動を開始した³⁹⁾。同社のパプア・ニュー・ギニア(PNG)の活動では、2004年12月から2005年1月にかけて、海底近傍及び海底上でサイドスキャンソナー、サブボトムプロファイラ、磁力計、比抵抗測定センサなどの各種機器を搭載したフレームを曳航し、鉱体規模を測定する物理探査を実施した。また、これらデータの複合的解析を行い、2006年1月から2月にかけて、深海掘削船を備船して探査試錐を実施した。これらの結果を受けて、同社はPNGの8つの海底熱水鉱床鉱区のうちの一つに属するSolwara 1プロジェクト(金、銅、亜鉛含有率の高い黒鉱型塊状硫化物鉱床)向けの採鉱船の建造について、ベルギーのJan De Nul社と合意したと2006年10月4日にプレス発表した⁴⁰⁾(図13)。海底2万マイルの著者の名前にちなんでジュール・ヴェルヌ(Jules Verne)号と命

名されるこの採鉱船は、2009年に竣工する予定であり、竣工後速やかに商業生産に着手するとしている。また、Nautilus Minerals社は2006年11月3日のロシアのEpion Holding Ltd社 (US\$49.5million) とAnglo American PLC社 (US\$25million) に加えて、2006年12月7日にはカナダのTeck Cominco Ltd社 (US\$25million) を含むUS\$31.1millionの出資を受けることを発表した。これで2006年5月のCAN\$25millionと合わせて、Nautilus Minerals社が調達した資金は140億円を超えた。

一方、2005年にはイギリスのロンドンに本社を置くNeptune Minerals社が設立され、出資金UK£9.3millionを集めて、ニュージーランド、イタリア、バヌアツ、PNGに鉱区を確保し、探査活動を続けている。Neptune Minerals社が興味を示す海域は西太平洋が中心となっており、伊豆・小笠原海域なども含まれている。

Nautilus Minerals社の2006年10月4日のプレス発表およびホームページの記載では、採鉱船の建造はUS\$120millionかけてJan De Nul社が行い、Nautilus Minerals社がUS\$120millionかけて採鉱機と揚鉱サブシステムを開発・建造して、これらをJan De Nul社に

売却し、Jan De Nul社が6,000t/日規模の請負採鉱 (75 US\$/t) をすることになっている。

開発対象区域の水深が1,700m程度であること、PNGの領海内で島嶼に囲まれて海況が悪くないこと (図14)、黒鉱型塊状硫化物鉱床は機械採掘が可能で、重装備採鉱機を支える強度を十分に有していることなどを考え合わせると、生産規模に対応した採鉱システムを、上記の費用で建造できる可能性は十分にある。また、生産した原鉱石の選鉱と製錬は、既存技術で対応可能であり、製錬事業者への売鉱も容易である。このため、Nautilus Minerals社が、さらなる採鉱と環境アセスメントなどに必要となる費用なども含めて、今後US\$50~100millionを追加調達できれば、2009年の商業生産開始は十分可能性がある。

ただし、商業生産が実際に大きな利益をもたらすものになるかどうかは未知数である。これは、開発対象の塊状硫化物鉱床全体の平均品位と鉱量が把握されていないこと、開発に対する環境面での法制・規制等が未整備で環境保全コストが不明なことなどの影響があるためである。技術面では、採鉱システムが直列系の単一採鉱機と揚鉱サブシステムの組み合わせであることに、コンスタントな生産という点でやや不安がある。

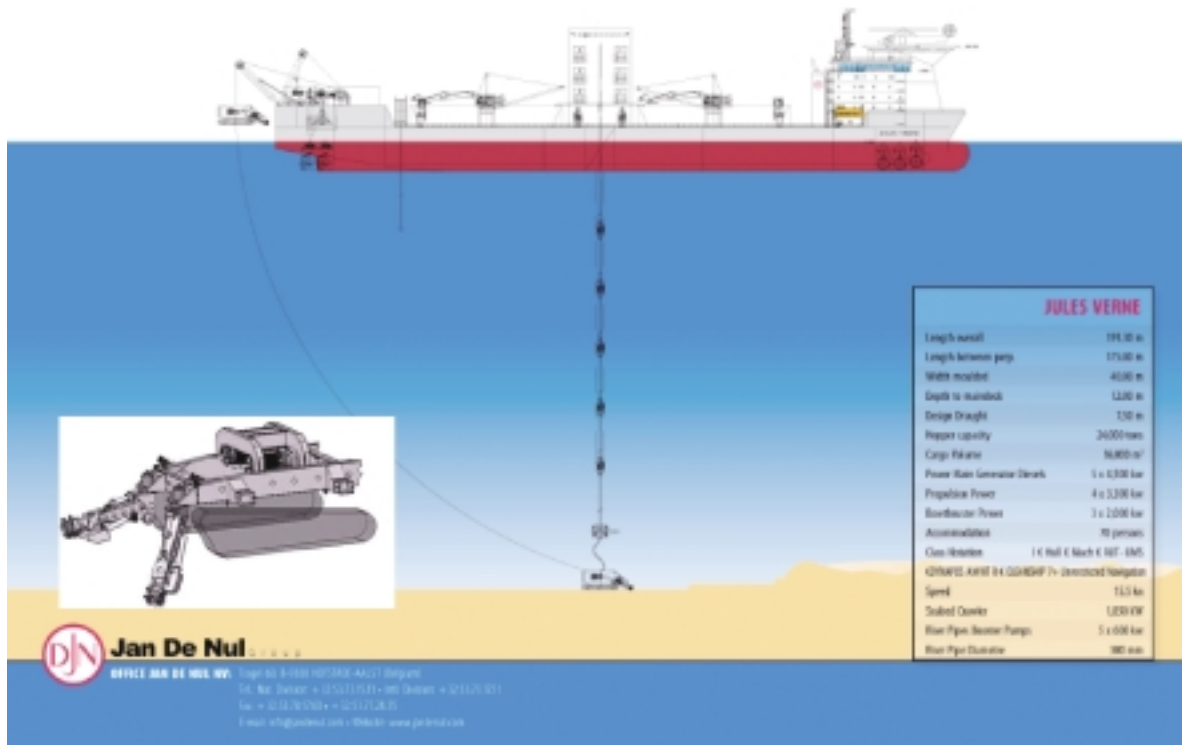


図13 Nautilus社のUS\$120Mの全長191mの採鉱船とUS\$120Mの海中サブシステム (6,000t/d)⁴⁰⁾

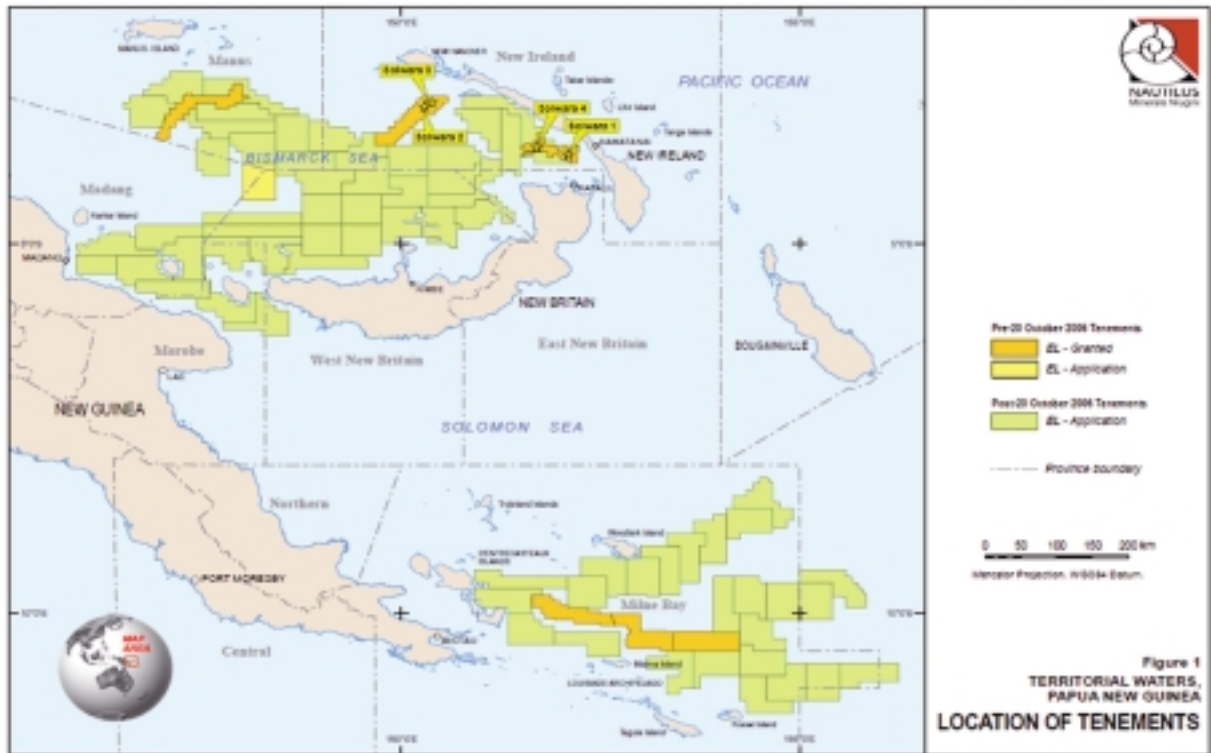


図14 PNGにおけるNautilus社既有鉍区と2006年11月および12月申請分⁴⁰⁾

1-3. コバルト・リッチ・クラスト

採鉍、製錬技術の分野では、中国において基礎的研究が実施されているのみである^{41)、42)}。特に、製錬技術については、マンガン団塊と同じ鉄マンガン酸化物であるため、マンガン団塊の製錬技術がそのまま適用できるとみなされている。

太平洋ではロシア、中国、韓国がコバルト・リッチ・クラスト調査を実施していることが知られており、特に、ロシアは経済情勢の好転により、調査活動を活発化させている。2004年から2005年にかけて、Magellan海山群でMBESによる地形調査、反射音圧強度解析、海底着座型コアリングマシン(GBU-6/4000。図15)によるコア採取、酸化物分析等を実施している。そのデータを用いて、地形図、斜面傾斜角分析図、クラスト・堆積物分布域図のほかに、クラスト厚さ図等も作成している。

インド洋においてもコバルト・リッチ・クラストの存在が確認され、Christmas Island⁴³⁾とAfanasiy-Nikitin Seamount⁴⁴⁾での調査結果が公表されている。

海底着座型コアリングマシンは、

コバルト・リッチ・クラストの厚さ調査のみならず、海底熱水鉍床の鉍体構造・鉍量調査に不可欠なものであり、ロシアSEVMORGEOのGBU-6/4000(掘削長6m、適用水深4,000m)、イギリスBGS(地質調査所)のRockdrill(掘削長5m、適用水深2,000m)が知られていたが、イギリスBGSの新型Rockdrill(掘削長15m、適用水深4,500m)が2006年に完成し、使用を開始した⁴⁵⁾。



State Unitarian Research and Production Company for Geological Sea Survey (SEVMORGEO), Saint Petersburg, Russia (<http://www.sevmorgeo.com/>)

Deep Sea Drilling Rig GBU - 6/4000

Size: 2.0 m wide, 2.5 m long, 8.5 m tall

Weight: 3.4 tons

Drilling depth: 6 m

Depth rating: 4000 m

Borer diameter: 59 mm

Rated drilling speed: 3 m/hr

Borer rotation speed: 300 rpm

Power requirements: 8 kW

Electrical feed: storage battery 24 V, 960 A hr

Thrust: controlled from 8 to 25 kN

図15 ロシアSEVMORGEOのGBU-6/4000

2. 日本における取り組み

2-1. 経過

鉱物資源のほとんどを輸入に依存しているわが国にとって、準国内資源とみなせる深海底鉱物資源は早くから注目され、1970年代に地質調査所、金属鉱業事業団などがマンガン団塊の分布状況の調査に着手した。また、マンガン団塊の採鉱技術と製錬技術についても、資源環境技術総合研究所などがほぼ同時期に研究開発を開始した。そして、20世紀中にもマンガン団塊の商業生産が開始されるのではないかという見通しを基に、1981年からは、工業技術院の大型プロジェクト「マンガン団塊採鉱システムの研究開発」が開始された。また、1989年には、マンガン団塊の採鉱が海洋環境に及ぼす影響の研究を、金属鉱業事業団が開始した。1994年に発効した国連海洋法条約において、これらの取り組みが評価され、日本は先行投資者 (Pioneer Investor) として、ハワイ東南東海域に優先的開発権を有する鉱区を保持することができた。一方、コバルト・リッチ・クラストと海底熱水鉱床については、1980年代半ばから、調査、採鉱技術、製錬技術の基礎的検討が地質調査所、金属鉱業事業団、資源環境技術総合研究所などで開始された。

しかし、その後、金属需要の伸びが世界的に鈍ったことを受けて、1994年に出された国連海洋法条約準備委員会のレポートで、マンガン団塊の商業生産が始まるのは2010年以降になるとの予測がなされるに至った。また、同年に採択された国連海洋法条約に基づく深海底鉱物資源開発関連実施協定で、先行投資者の負担を軽減するため、独自技術をエンタープライズ (先行投資者が供出した国際海底機構管理下の留保鉱区において、先行投資者とは別個にマン

ガン団塊採鉱を実施することになる事業者) に移転する義務が廃止された。

これらの経済、国際状況の変化を受けて、当面必要なデータの収集が終了した自国鉱区調査は1997年で中絶された。また、同年には工業技術院の大型プロジェクトも、当初計画より大幅にスケールダウンした海洋実験を実施して、研究開発を終了した。さらに、マンガン団塊の製錬技術、コバルト・リッチ・クラストの選鉱技術の研究もそれぞれ1995年と1997年に終了した。その後は、金属鉱業事業団によるコバルト・リッチ・クラストと海底熱水鉱床の調査、マンガン団塊の採鉱が海洋環境に及ぼす影響の研究、大陸棚延伸のための調査が実施され、現在に至っている。

これらのうち、環境影響予測・評価の分野では、堆積物を採取した堆積物をダクトから排出する模擬集鉱機を用いて、1994年から図16に示したような概念で、日本のBIE (JET: Japan Deep-sea Impact Experiment) の海底攪乱とプルーム拡散のモニタリングを実施した⁴⁶⁾。また、実験直後、1年後、2年後には、海底攪乱の影響を評価するための化学・生物サンプリング、再堆積域を観察するためのビデオ、写真撮影などを行った⁴⁷⁾、⁴⁸⁾。さらに、これらの結果を用いて、プルームの拡散、沈降シミュレーションプログラムの開発も行った。コバルト・リッチ・クラストが賦存する海山域では1999年から図17に示したようなDIETS (Direct Impact Experiment on Seamount) を実施し、海底生物相の3年後のモニタリング、ベースラインデータ等を取得している⁴⁹⁾。また、海底生態系モデルを構築し、環境アセスメントに利用できるツールの開発を試みた。海山域での類似研究はまったくない。

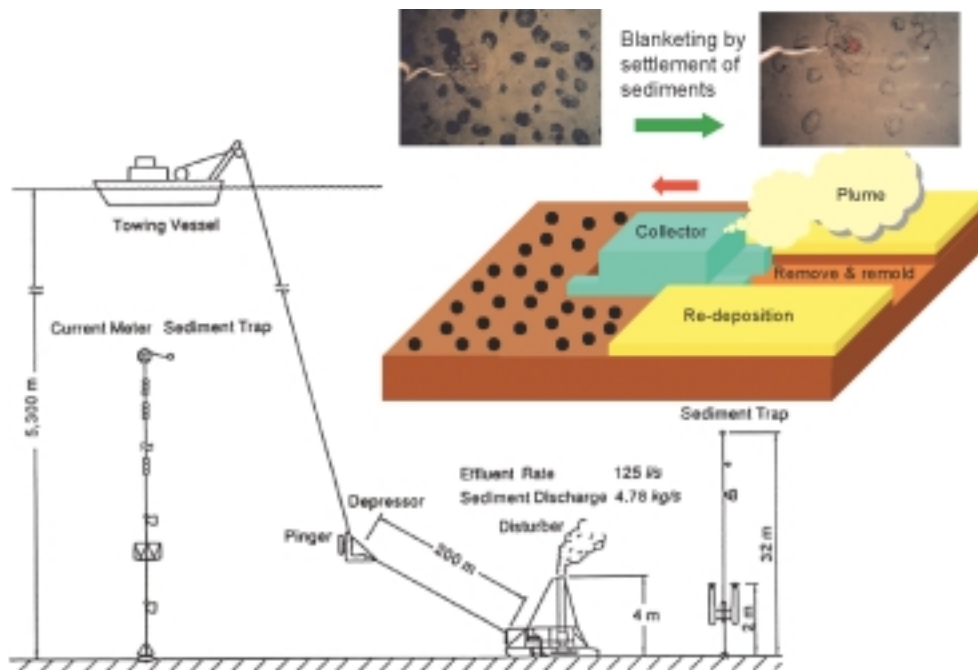
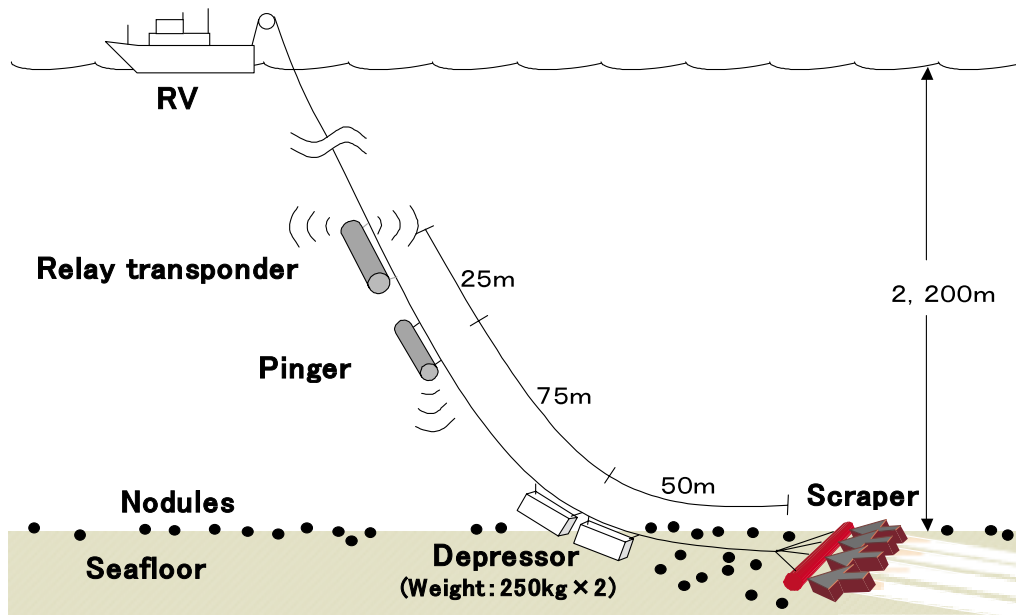


図16 JETの海底攪乱概念⁴⁸⁾

図17 DIETSの海底攪乱概念⁴⁹⁾

2-2. 日本の技術水準

海底着座型コアリングマシン（掘削長20m、適用水深6,000m）を保有し、マンガン団塊、コバルト・リッチ・クラスト、海底熱水鉍床探査を継続的に実施してきたことなど、技術、経験ともに日本を上回る国はなく、探査分野では世界のトップにいる。

集鉍機（採鉍機）、揚鉍システム、採鉍船という全体システムを稼働させた採鉍実験が、国際企業連合のプロジェクトでは行われた。これに対して、日本の場合はそれぞれのサブシステムの海洋実験にとどまった。このため、日本の海洋技術開発分野で一番の弱点とされるトータルシステムのオペレーションについての技術的蓄積を図ることはできなかった。このため、サブシステムについては世界のトップにいるものの、採鉍技術全体としては、日本は二番手に位置していると思われるべきであろう。日本より後から海域実験等を実施したインド、中国が、水深は浅くともトータルシステムの実験を指向したのは重要な視点である。

製錬技術開発において、コバルト・リッチ・クラストからの白金の回収、バイオリッチング等を試みているのは日本だけであり、要素技術という点では、世界のトップにいる。しかし、製錬技術開発における重要な要素のひとつが、スケールアップであることを考えると、この点ではインドや韓国に遅れをとっている。

環境影響予測・評価分野では、マンガン団塊賦存海域での攪乱実験後の長期モニタリング実績を除いて、

データの質、量、生態系モデルなど、日本が世界のトップにいることは間違いない。

3. 深海底鉍物資源開発の技術的可能性

深海底鉍物資源開発技術のベースとなる深海関連技術のうち、この20～30年間に大きな進展がみられたものとしては、①洋上測位技術（GPS等）、②船位保持・制御技術（ダイナミックポジショニング）、③海中測位技術（SSBL等）、④海中弾性波技術（三次元地震探査、サイドスキャンソナー、超音波センシング等）、⑤海中ケーブル技術（アンビカルケーブル等）、⑥海中ロボット技術（ROV、AUV等）などが挙げられる。そして、これらの技術進展の集大成が、水深約2,000mの海域からの石油生産、有人・無人深海潜水艇、地球深部探査船という形になって実現している。20～30年前には困難と考えられた深海域における活動が、次々と実現していく状況を考えると、深海底鉍物資源開発も技術的には実現性が高いと考えられる。

また、製錬技術においても、この20～30年間に酸化鉍の湿式製錬法の実用化が進展し、SX-EWによる銅生産や、高圧酸浸出法によるラテライトからのニッケル生産が実際に行われている。また、PCボードや携帯電話などからの金、銀のリサイクルのため、硫化鉍の乾式製錬工程における塩素処理技術の進展もみられる。これらの技術は深海底鉍物資源の製錬にも適用可能であり、深海底鉍物資源開発に大幅なコストダウンをも

たらず可能性がある。

4. 深海底鉬物資源開発の経済的可能性

金属鉬業事業団から産業技術総合研究所への受託研究（平成13年度及び14年度）と産業技術総合研究所の自主研究（平成16年度）において、深海底鉬物資源開発の予察的経済性検討を実施した。深海底鉬物資源のうち、コバルト・リッチ・クラストと黒鉬型海底熱水鉬床については、賦存状況や有望鉬床の場所、鉬量などの経済性検討に不可欠な探査情報の集積が、マンガング塊ほど進んでいない。また、廃棄物処理費用などの環境対策にどの程度の費用が必要かの検討はまったく行われていない。このため、これらの予察的経済性検討では、鉬区取得前の探査費用や環境保全コストを除外した分析を実施した。その結果、以下のことが明らかとなった^{50)、51)、52)}。

- ①鉬区取得前の探査費用と環境保全コストは含まないという前提付きではあるが、金属価格によっては深海底鉬物資源に経済的開発の可能性はある。
- ②マンガング塊とコバルト・リッチ・クラスト開発には巨額の投資が必要であるとともに、コバルトの市場規模が小さいため、リスクが大きい。
- ③明神海丘サンライズ鉬床などの黒鉬型海底熱水鉬床開発には、距離的有利さ、既存製錬所の利用など、少額の初期投資で済む利点がある。

5. 今後の技術的課題

海中ロボット技術の進展を考えると、深海底鉬物資源の採鉬には、自走式採鉬機、揚鉬管、海上プラットフォーム（採鉬船）を組み合わせたシステムを用いることになる予想される。マンガング塊の場合は、軟弱で攪乱を受けると大きな強度低下が起きる粘土質の深海底堆積層の上で、採鉬機が動かなければならないため、どのような推進機構を採用するかが技術課題である。また、コバルト・リッチ・クラストの場合は、斜面上の微地形変化が激しい基盤岩に薄層状態で付着しているマンガング酸化物を、基盤岩の混入を避けて掘削し、集めるといった大きな技術課題が存在する。黒鉬型海底熱水鉬床については、鉬体がある大きさを持った塊状のものである可能性が高く、チムニー等の塔状突起物が存在する海底表面での第一段階の掘削に困難さがあるものの、第二段階からは、採鉬機自身が作り出した鉬体上の平滑面で活動が行われるため、技術的問題点はほとんどない。揚鉬管システムには、海流に大きく流されることなく、海上プラットフォームのほぼ直下に、懸架状態で留まる剛性と、自重を支える強度が要求される。波高、水深などの海域特性や採鉬量に応じて、材質も含めた多角的検討が必要となるが、前記の大水深からの石油生産や地球深部探査船の稼働によって、技術と経験の蓄積が今後も進み、その応用が可能となると予想される。

マンガング塊とコバルト・リッチ・クラストについ

ては、マンガング酸化物から有用金属を抽出する製錬技術の開発が必要であるが、この分野では日本の取り組みが遅れているのが現状である。コバルト・リッチ・クラストについては、微量成分であるレアアース類等の回収の可能性の検討も実施すべきである。黒鉬型海底熱水鉬床については、著者らの研究によって、選鉬に必要な粒度にまで鉬石を破碎することと真水への浸水によって、既存の硫化鉬製錬所で受け入れ可能なレベルまで、塩分濃度を低下させることが可能であることが明らかにされている。

深海底鉬物資源が賦存する海域は、黒鉬型海底熱水鉬床を除いて、これまで生物に関する科学的調査があまり行われていないところである。このため、詳しいバックグラウンド調査をまず行い、生物相を把握する必要がある。一般に、水深が深いところは生物密度が低く、開発によってダメージを受けた場合、回復に長い時間が必要になると予想される。このため、次の段階として、開発によるダメージを模擬した実験、ダメージの定量的把握、回復過程のモニタリングなどを実施し、開発による環境影響を予測・評価するシミュレーションモデルを構築する必要がある。前述のように、日本はマンガング塊とコバルト・リッチ・クラストの賦存海域において、主として海底を対象にこのような調査、実験、モデル構築を行った実績を有している。黒鉬型海底熱水鉬床についても、同様の取り組みを行い、開発の可能性を検討する際に、環境影響まで含めた総合的検討ができるように、情報集積を図る必要がある。

これらの関連技術や専用技術などの実用化状況や開発への取り組み状況を総合すると、5年は無理としても、10年先には深海底鉬物資源開発が実現できる技術的基盤が整備されつつあると思われる。今後、最も重要な課題としては、採鉬技術においても製錬技術においても、パイロットスケールの総合実験を実施し、サブシステムを統合的に稼働させて運転実績を積み重ねることが挙げられる。また、その際には、環境影響を予測・評価するために必要なデータも併せて取得する必要がある。

(2007.1.19)

〈参考文献〉

- 1) Welling, C. G. (1981). "An Advanced Design Deep Sea Mining System," *Proc. 13th Offshore Tech. Conf.*, Paper No. 4.094.
- 2) Kaufman, R., Latimer, J. P., and Tolefson, D. C. (1985). "The Design and Operation of a Pacific Ocean Deep-Ocean Mining Test Ship: R/V Deepsea Miner II," *Proc. 17th Offshore Tech. Conf.*, Paper No. 4.901.
- 3) Bath, A. R. (1989). "Deep Sea Mining Technology: Recent Developments and Future Projects," *Proc. 21st Offshore Tech. Conf.*, Paper No. 5.998.

- 4) Shaw, J. L. (1993). "Nodule Mining - Three Miles Deep!" *Marine Georesources and Geotech.*, Vol. 11, pp. 181-197.
- 5) Chung, J. S. (2003). "Deep-ocean Mining Technology: Learning Curve I," *Proc. 5th ISOPE Ocean Mining Symp.*, pp. 1-7.
- 6) Yamada, H., and Yamazaki, T. (1998). "Japan's Ocean Test of the Nodule Mining System," *Proc. 8th Int. Offshore and Polar Eng. Conf.*, Montreal, pp. 13-19.
- 7) Herrouin, G., Lenoble, J., Charles, C., Mauviel, F., Bernard, J., and Taine, B. (1989). "A Manganese Nodule Industrial Venture Would Be Profitable - Summary of a 4-Year Study in France," *Proc. 21st Offshore Tech. Conf.*, Paper No. 5.997.
- 8) Yamazaki, T., Kuboki, E., and Yoshida, H. (1999). "Tracing Collector Passes and Preliminary Analysis of Collector Operation," *Proc. 3rd ISOPE Ocean Mining Symp.*, Goa, pp. 55-62.
- 9) Muthunayagam, A. E., and Das, S. K. (1999). "Indian Polymetallic Nodule Program," *Proc. 3rd ISOPE Ocean Mining Symp.*, Goa, pp. 1-5.
- 10) Liu, F., and Yang, N. (2001). "An Environmentally Friendly Deep Seabed Mining System," *Proc. Proposed Technologies for Deep Seabed Mining of Polymetallic Nodules*, Kingston, Jamaica, Int. Seabed Authority, pp. 187-211.
- 11) Hong, S., and Kim, K. H. (2001). "Research and Development of Deep Seabed Mining Technologies for Polymetallic Nodules in Korea," *Proc. Proposed Technologies for Deep Seabed Mining of Polymetallic Nodules*, Kingston, Jamaica, Int. Seabed Authority, pp. 261-283.
- 12) Vranka, F. (2003). "An Integration with Non-metallurgical Industries—New Challenge for Polymetallic Nodules Processing?" *Proc. 5th ISOPE Ocean Mining Symp.*, Tsukuba, pp. 223-230.
- 13) Sobota, J., Boczarski, S., Petryka, L., and Zych, M. (2005). "Measurement of Velocity and Concentration of Nodules in Vertical Hydrotransport," *Proc. 6th ISOPE Ocean Mining Symp.*, Changsha, pp. 251-256.
- 14) Deepak, C. R., Shajahan, M. A., Atmanand, M. A., Annamalai, K., Jeyamani, R., Ravindran, M., Schulte, E., Handschuh, R., Panthel, J., Grebe, H., and Schwarz, W. (2001). "Developmental Test on the Underwater Mining System Using Flexible Riser Concept," *Proc. 4th ISOPE Ocean Mining Symp.*, Szczecin, Poland, pp. 94-98.
- 15) Schwarz, W. (2001). "Advanced Nodule Mining System," *Proc. Proposed Technologies for Deep Seabed Mining of Polymetallic Nodules*, Kingston, Jamaica, Int. Seabed Authority, pp. 39-54.
- 16) Li, L., and Zhang, J. (2005). "Research of China's Pilot-miner in the Mining System of Poly-metallic Nodule," *Proc. 6th ISOPE Ocean Mining Symp.*, Changsha, pp. 124-130.
- 17) Das, R. P. (2001). "India's Demonstration Metallurgical Plant to Treat Ocean Nodule," *Proc. 4th ISOPE Ocean Mining Symp.*, Szczecin, Poland, pp. 163-166.
- 18) Si, S., Anand, S., Park, K.-H., Nam, C.-W., Das, R. P. (2003). "Dissolution Studies on Cu-Ni-Co-Fe Matte Obtained from Manganese Nodules," *Proc. 5th ISOPE Ocean Mining Symp.*, Tsukuba, pp. 231-237.
- 19) Ozturgut, E. et al. (1978). *Deep Ocean Mining of Manganese Nodules in the North Pacific: Pre-mining Environmental Conditions and Anticipated Mining Effects*, NOAA Tech. Memo. ERL MESA-33.
- 20) Burns, R.E. et al. (1980). *Observation and Measurements during the Monitoring of Deep Ocean Manganese Nodule Mining Tests in the North Pacific, March-May 1978*, NOAA Tech. Memo. ERL MESA-47.
- 21) Ozturgut, E. et al. (1980). *Environmental Investigation during Manganese Nodule Mining Tests in the North Equatorial Pacific, in November 1978*, NOAA Tech. Memo. ERL MESA-48.
- 22) Ozturgut, E. et al. (1981). "Estimated Discharge Characteristics of a Commercial Nodule Mining Operation," *Marine Mining*, Vol. 3, Nos. 1/2, pp. 1-17.
- 23) Lavelle, J. W., and Ozturgut, E. (1981). "Dispersion of Deep-Sea Mining Particulates and Their Effect on Light in Ocean Surface Layers," *Marine Mining*, Vol. 3, Nos. 1/2, pp. 185-212.
- 24) Spiess, F. N. et al. (1987). *Environmental Effects of Deep Sea Dredging*, Scripps Inst. Oceanography, SIO-Ref 87-5.
- 25) Ozturgut, E. et al. (1997). "An Overview of the United States' Benthic Impact Experiment", *Proc. Int. Symp. Environmental Studies for Deep-sea Mining*, Tokyo, Metal Mining Agency of Japan, pp. 23-31.
- 26) Trueblood, D. D. et al. (1997). "The Ecological Impacts of the Joint U.S.-Russian Benthic Impact Experiment," *Proc. 2nd ISOPE Ocean Mining Symp.*, Seoul, Korea, pp. 139-145.
- 27) Kotlinski, R., and Tkatchenko, G. (1997). "Preliminary Results of IOM Environmental

- Research,” *Proc. Int. Symp. Environmental Studies for Deep-sea Mining*, Tokyo, Metal Mining Agency of Japan, pp. 35-44.
- 28) Desa, E. (1997). “Initial Results of India’s Environmental Impact Assessment of Nodule Mining,” *Proc. Int. Symp. Environmental Studies for Deep-sea Mining*, Tokyo, Metal Mining Agency of Japan, pp. 49-63.
- 29) Thiel, H. (1995). “The German Environmental Impact Research for Manganese Nodule Mining in the SE Pacific Ocean,” *Proc. 1st ISOPE Ocean Mining Symp.*, Tsukuba, pp. 39-45.
- 30) Bluhm, H. et al. (1995). “Megabenthic Recolonization in an Experimentally Disturbed Abyssal Manganese Nodule Area,” *Marine Georesources and Geotechnology*, Vol. 13, No. 4, pp. 393-416.
- 31) Schriever, G. et al. (1997). “Results of the Large Scale Deep-sea Impact Study DISCOL during Eight Years of Investigation,” *Proc. Int. Symp. Environmental Studies for Deep-sea Mining*, Tokyo, Metal Mining Agency of Japan, pp. 197-208.
- 32) Zielke, W. et al. (1995). “Numerical Modeling of Sediment Transport Caused by Deep-sea Mining,” *Proc. 1st ISOPE Ocean Mining Symp.*, Tsukuba, pp. 157-162.
- 33) Jankowski, J. et al. (1996). “Numerical Modeling of Suspended Sediment due to Deep-sea Mining,” *J. Geophysical Research*, Vol. 101, No. C2, pp. 3,545-3,560.
- 34) Segschneider, J., and Sündermann, J. (1997). “Large Scale Transport of Particle Reactive Tracers—Numerical Simulations,” *Proc. 7th Int. Offshore and Polar Eng. Conf.*, Honolulu, Vol. 1, pp. 461-467.
- 35) Kudrass et al. (2006). “Polymetallic Nodules as a Future Deep Sea Mineral Resource,” *Abstracts Volume of 36th Underwater Mining Inst.*, Kiel, Int. Marine Minerals Soc., Kudrass 1-3.
- 36) Soreide, F., Lund, T., and Markussen, J. M. (2001). “Deep Ocean Mining Reconsidered a Study of the Manganese Nodule Deposits in Cook Island,” *Proc. 4th ISOPE Ocean Mining Symp.*, Szczecin, Poland, pp. 88-93.
- 37) Amann, H. (1985). “Development of Ocean Mining in the Red Sea,” *Marine Mining*, Vol. 5, pp.103-116.
- 38) Nawab, Z. (2001). “Atlantis II Deep: A Future Deep Sea Mining Site,” *Proc. Proposed Technologies for Mining Deep-Seabed Polymetallic Nodules*, Kingston, Jamaica, Int. Seabed Authority, pp. 301-313.
- 39) Malnic, J. (2001). “Terrestrial Mines in the Sea; Industry, Research and Government,” *Proc. Proposed Technologies for Mining Deep-Seabed Polymetallic Nodules*, Kingston, Jamaica, Int. Seabed Authority, pp. 315-331.
- 40) Nautilus Minerals HP, <http://www.nautilusminerals.com/s/Home.asp>
- 41) Xia, Y., Bu, Y., Zhao, F., and Qin, X. (2005). “The Study on Distribution Law of Crushing Graininess for Roller-mining Head Cutting Cobalt Crust,” *Proc. 6th ISOPE Ocean Mining Symp.*, Changsha, pp. 195-198.
- 42) Fan, Y., Jiang, X., Wang, S., and Jiang, K. (2005). “Studies on the Separation of Cobalt and Nickel in Solution from Hydrometallurgical Processing of Ocean Cobalt-rich Crust,” *Proc. 6th ISOPE Ocean Mining Symp.*, Changsha, pp. 226-229.
- 43) Exon, N. F., Raven, M. D., and De Carlo, E. H. (2002). “Ferromanganese Nodules and Crusts from the Christmas Island Region, Indian Ocean,” *Marine Georesources and Geotech.*, Vol. 20, pp. 275-297.
- 44) Banakar, V. K., Rajani, R. P., and Hein, J. R. (2005). “Compositional variation and genesis of ferromanganese crusts of the Afanasiy-Nikitin Seamount, Equatorial Indian Ocean,” *Abstracts Volume of 35th Underwater Mining Inst.*, Monterey, Int. Marine Minerals Soc. Banakar 1-8.
- 45) Skinner, A. C., and Smith, D. (2006). “High Resolution Coring—the Ground Truth,” *Abstracts Volume of 36th Underwater Mining Inst.*, Kiel, Int. Marine Minerals Soc., Skinner/Smith 1.
- 46) Fukushima, T. (1995). “Overview “Japan Deep-sea Impact Experiment = JET,”” *Proc. 1st ISOPE Ocean Mining Symp.*, Tsukuba, pp. 47-53.
- 47) Shirayama, Y. (1999). “Biological Results of JET Project: An Overview,” *Proc. 3rd ISOPE Ocean Mining Symp.*, Goa, pp 185-190.
- 48) Yamazaki, T, and Kajitani, Y (1999). “Deep-sea Environment and Impact Experiment to It,” *Proc. 9th Int Offshore and Polar Eng Conf*, Brest, Vol 1, pp. 374-381.
- 49) Ohkubo, S., and Yamazaki, T. (2003). “Summary of “Environmental Impact Research on Marine Ecosystem for Deep-sea Mining” Conducted by Metal Mining Agency of Japan,” *Proc. 5th ISOPE Ocean Mining Symp.*, Tsukuba, pp. 200-207.
- 50) Yamazaki, T., Park, S.-H., Shimada, S., and Yamamoto, T. (2002). “Development of Technical and Economical Examination Method for Cobalt-

rich Manganese Crusts,” *Proc. 12th Int. Offshore and Polar Eng. Conf.*, Kita-Kyushu, pp. 454-461.

- 51) Yamazaki, T., Park, S.-H., Shimada, S., Iizasa, K., and Siokawa, S. (2003). “A Case Study of Mining Seafloor Massive Sulfides in Japanese EEZ,” *Proc. 5th ISOPE Ocean Mining Symp.*, Tsukuba, pp. 63-70.
- 52) Yamazaki, T., and Park, S.-H. (2005). “Economic Validation Analyses of Japan's Nodule, Crust, and Kuroko-type SMS Mining in 2004,” *Proc. 6th ISOPE Ocean Mining Symp.*, Changsha, pp. 65-70.