

深海底鉱物資源のポテンシャル

産業技術総合研究所 山崎哲生

(財)日本深海底技術開発協会会報39号 シリーズ「深海からの恵み」(第2回)を改編

1. はじめに

深海底鉱物資源は21世紀の人類に残された最後の鉱物資源といわれ、技術上未解決の困難な課題を抱えながらも1960年代から広い関心が寄せられ続けている。深海底鉱物資源のうち、マンガン団塊とコバルト・リッチ・クラスト(CRC:Cobalt-rich crust)には、共にコバルト、ニッケル、銅、マンガンが酸化物として含有されている。さらに、CRCについては、白金の濃集も報告されており、これらの金属が開発の検討対象である。海底熱水鉱床については、中央海嶺系の重金属泥や塊状鉱床がまず注目され、その後、西太平洋海域で金、銀の含有割合が高い背弧海盆、海洋性島弧系の黒鉱タイプの海底熱水鉱床(SMS:Seafloor massive sulfide)が次々に発見された。金、銀に銅、鉛、亜鉛も加えた硫化鉱が開発の検討対象である。

これらの深海底鉱物資源のうち、マンガン団塊を対象としたアメリカ系資本を中心とする国際企業グループによる開発技術の研究が先行し、1990年代初頭の商業的開発の可能性も予想された。しかし、1970年代末からの世界経済の停滞とともに、開発は将来のこととされ、現在に至っている。

本稿では、現在の経済、技術的状况に基づいて、2001~2003年に著者が中心となって実施したこれらの深海底鉱物資源の技術・経済的可能性評価(フイージビリティスタディ:FS)の結果^{1), 2), 3), 4)}を要約して紹介する。経済性の検討に用いたモデル、

パラメータの設定、仮定や条件などの詳細については、これらの文献を参照いただきたい。また、紙面の制約上、上記の文献に収録されている引用文献については、本稿では記載を省略する。

2. 深海底鉱物資源概要

深海底鉱物資源として注目されているものには、図1に示すように、水深5,000mの大洋底に分布するマンガン団塊、水深800~2,500mの海山を被覆するCRC、海洋底の拡大軸や背弧海盆に出現する海底熱水鉱床などの深海底鉱物資源がある。

マンガン団塊とCRCは、海水中に溶けているマンガン、鉄などの金属が、ある一定の物理化学的環境の下で、核や基盤となる岩石などに沈殿、付着してできたものと考えられており、1cmの厚さのものができるのに、1,000万年ぐらいかかったと推定されている。海底熱水鉱床は、海底が拡大してできた裂け目における海底火山活動のようなもので、海水が熱源である岩石の中から、金属分を溶かし出して、濃縮、凝固してできると考えられている。

鉄マンガン酸化物を主成分とするマンガン団塊には、多い場合は銅とニッケルが1%程度ずつ含まれているほか、コバルトも0.2%程度存在する。また、CRCも鉄マンガン酸化物を主成分としているが、こちらには、コバルトを1%以上含むものが見つかっている。海底熱水鉱床は銅、鉛、亜鉛のほか、金や銀を相当量含むものが見つかっている。



マンガン団塊

コバルト・リッチ・クラスト

黒鉄タイプ海底熱水鉱床

図1 深海底鉱物資源概観(金属鉱業事業団パンフレットより抜粋)

3. 過去のFS

マンガン団塊を対象に実施されたFSとして、テキサスA&M大学、アメリカ鉱山局、IFREMERのものが知られている。また、CRCを対象としたものとしては、ハワイ州政府のものがある。これらのFSでは、製錬工程に投入する鉱石の乾燥重量を年間150万tあるいは300万tと設定している。

海底熱水鉱床に対しては、サウジアラビアとスーダンが共同で実施した紅海のAtlantis II Deepに半固結状態で堆積している重金属泥のFSが知られている。このFSでは開発規模として年間300万tが想定され、年間6万tの亜鉛、1万tの銅、100tの銀、1tの金を20年間にわたって生産する開発モデルのDiscount Cash Flowが17%になると示された。

4. 過去の技術開発の概要

4.1 採鉱技術

マンガン団塊の採鉱技術については、1960年代から、日本を含む先進各国によって研究開発が進められてきた。いろいろな採鉱方法が検討されたが、もっとも有望とされているのは、図2に示したような流体ドレージ方式と呼ばれるものである。この方式では、海底で曳航式あるいは自走式の採掘装置がマンガン団塊を集め、これをパイプラインの中に発生させた水流によって海面まで輸送する。



図2 マンガン団塊の採鉱システム

CRCについては、海底の基盤岩に固着しているマンガン酸化物を剥がしたり、掘削したりする機能を付加する必要があるが、その後のシステム構成は、マンガン団塊と同様のものが考えられている。著者らによるCRC採鉱システムイメージを図3に示す。

海底熱水鉱床については、重金属泥とSMSとで、採鉱システムは大きく異なる。重金属泥の場合は、前記のFSでその構成が示されており、SMSの場合は、著者らによって実施された最近の研究⁵⁾によって、CRCと同様のものの適用が示唆されている。

4.2 製錬技術

基盤の岩石が混じることが避けられないCRCと、有用金属の濃淡が鉱石中に存在する海底熱水鉱床の場合は、陸上の鉱物資源の場合と同様の選鉱、製錬という工程をたどると予想されているが、マンガン団塊の場合は核の岩石などが小さく、有用金属がほぼ均質に含まれているため、選鉱工程を省略して直接製錬工程に入ると考えられている。

マンガン団塊とCRCは酸化物であること、空隙率が高く、その中に含まれる塩分の物理的除去が困難であることから、製錬技術については、数多くの新規技術の提案・開発が実施されている。その中でも還元焙焼-アンモニア浸出法、キュプリオン-アンモニア浸出法、塩化焙焼-水浸出法、高温高压硫酸浸出法、熔錬硫化-硫酸浸出法などが代表的な処理法として知られている。しかし、多くの実験、基本的検討が1990年代初めまでに終了しており、経済

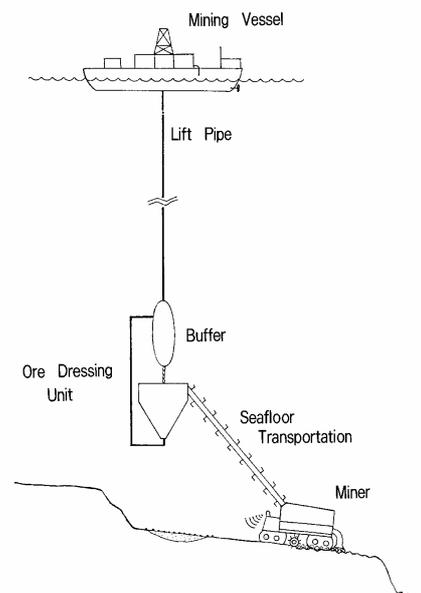


図3 CRCの採鉱システム

性が高く、環境への影響が少ない方法の開発、選定という意味では、現在の経済、技術的状况を考慮したレビューと再評価が必要と考えられる。この点で、現在もパイロットスケールの研究が進行中のインドの動向が注目される。

紅海の重金属泥のFSでは、 $2\mu\text{m}$ 以下が80%という微粒子で構成されるという重金属泥の特性のため、微細孔隙に含まれる海水を除去することが困難であり、金属塩化物を使用する湿式浸出法がテストされた。しかし、SMSの場合、原鉱石の構成粒子サイズが大きいため、原鉱石の破碎によって孔隙が開き、真水に浸潤するだけで十分に海水を除去できることが最近の著者らの研究⁴⁾によって明らかにされた。このため、脱塩後、既存硫化物製錬所で製錬することが可能である。

4. 3 選鉱技術

CRCは、基盤の岩石である玄武岩、石灰岩などが付着した状態で掘り出されると予想され、輸送途中のできるだけ早い段階（海底の原位置あるいは海面の採鉱船など）で選鉱を行うことが望ましいと考えられている。有用金属を含む鉄マンガン酸化物と基盤岩には、比重差、強度差、磁性差などがあり、既存技術の組み合わせによって選別できると予想されており、基礎実験も行われている。

SMSは成因、組成が黒鉱に酷似しているため、黒鉱の選鉱技術がほぼそのまま適用できると考えられている。黒鉱の選鉱では、数段階の粉碎、特に摩鉱と呼ぶ微粉碎過程を経て、回収する金属ごとに工程を変えながら、浮遊選鉱を行う。

4. 4 環境影響予測・評価

深海底鉱物資源を開発することによる環境影響予測・評価手法を開発するため、マンガン団塊賦存海域を対象に、実海域でのパイロットスケール採鉱実験のモニタリング実施、海底の人為的攪乱実験による生態系への影響とその回復のモニタリング実施などの研究を、日本を含む世界各国が行ってきた^{6), 7), 8), 9), 10), 11), 12)}。また、CRCの賦存する海山では、日本のみが、生態系の基礎調査と海底の人為的攪乱実験を実施している¹³⁾。

5. 新たな経済、技術的状况

5. 1 主開発対象金属の変化

経済的な状況としては、開発対象とされる金属の価格、需要動向が挙げられる。マンガン団塊とCRCに共通して含まれるニッケル、銅、コバルトを例にとると、長期的な傾向として、ニッケルと銅よりも、コバルトの価格上昇割合がかなり高くなっている。マンガン団塊の場合、金属含有率の違い（たとえば、国連海洋法に基づく日本鉱区があるクラリオン・クリッパートン断裂帯(CCFZ)内のある区域ではNi:1.44%、Cu:1.12%、Co:0.20%）を考慮しても、3つの金属の中でコバルトが最も経済性を期待されるものとなってきている。

海底熱水鉱床についても、当初はベースメタルである亜鉛、銅が開発対象として想定されていたが、価格、需要動向からこれらに対する関心は薄れており、金、銀の含有率に関心が移行している。

5. 2 製錬関連技術の進歩と新展開

黒鉱処理技術がリサイクル事業に応用され、小坂製錬(株)では、約30万tの輸入硫化鉱製錬工程に、重量割合で10~20%の電子基板や携帯電話などの破碎物を投入し、これらの中に高濃度で含まれている金、銀、銅などの回収を行っている。この工程では塩素を発生させる塩化ビニル類のある程度の混入は避けられず、これを系内で無害化処理することが実際に行われている。

これは、深海底鉱物資源に対して必要とされる特殊な製錬処理技術の一部が、既に実用化されたことを意味する。

6. 開発モデル概要

6. 1 マンガン団塊

マンガン団塊の開発では直接製錬を行うため、有用成分の損失はない。一方、採鉱した全量を輸送して製錬工程に搬入するため、大規模な輸送設備と製錬設備が必要であり、輸送費と製錬費増加による経済性への影響が予想される。マンガン団塊とCRCについては、金属価格への影響を考慮して、世界消費量の10%にあたる年間2,500tのコバルトの生産量を基準と設定し、各種技術パラメータに基づいて、これから逆算して評価モデルの製錬規模や採鉱規模を計画した。

対象海域はCCFZの日本鉱区(Latitude N10°、Longitude W147°付近)とした。日本鉱区のうち、平均賦存密度が10 kg/m²以上の地域がまず採鉱対象となるものと仮定し、前出のCo:0.2%、Ni:1.44%、

Cu:1.12%という有用金属含有率を品位として用いた。その他のパラメータについては、平均水深 5,000m、団塊の湿比重 2.0、含水率 35%とした。

採鉱システムは、採鉱機を揚鉱管とフレキシブルホースによって構成されるパイプストリングによって曳航する流体ドレッジ方式とし、水中ポンプによる揚鉱を採用した。

製錬方式としては、他の浸出法との比較結果から優位性が確認された熔錬硫化塩素浸出法を選んだ。

6.2 CRC

CRCは水深、コバルト含有率の点で、マンガン団塊より有利である。しかし、基盤岩にクラスト下部が密着しているため、クラスト部分だけを選択的に採掘することは困難で、採掘された鉱石への基盤岩混入は避けられない。この基盤岩混入をできるだけ少なくすること、また、混入した基盤岩を除去する選鉱工程を導入することが求められる。これらに必要なコストによっては、CRCの有利さが失われてしまう可能性があり、この点に関する検討を十分行う必要がある。

対象海域は南鳥島の東南約 360 海里付近の公海上の海山と仮定し、Latitude N17°、Longitude E157°を位置データと設定した。この付近のある海山の水深 1,000~2,500mのクラスト鉱床賦存帯から得られたサンプルの有用金属含有率である Co:0.64%、Ni:0.5%、Cu:0.13%という値を品位として用いた。中型の海山を想定し、表面積約 1,500 km²の 20%にCRCが平均厚さ 30mm で分布し、そのうち、面積にして 20%に相当する平均厚さ 50mm の山頂縁辺部と斜面上部の地域が採掘対象となると仮定する。この場合、分布密度は 100 kg/m²、埋蔵鉱量は 600 万 t と計算できる。当該海山での採掘終了後は、近傍の他の海山へ移動して採掘を継続するものとする。そのほか、平均水深 2,000m、クラスト部分の湿比重 2.0、含水率 35%、基盤岩部分の湿比重 2.5、含水率 10%、基盤岩混入率は約 20%等を基準条件として仮定する。

採鉱機としては、クラストおよび礫状の両方に対応できる自走式採鉱機を採用した。ピック埋込タイプ自由回転式圧砕ローラを掘削装置、ジェットノズルを取込装置として有し、そのほかに本体フレーム、走行装置、供給装置、制御装置で構成する。走行装置は地形の変化、障害物に対応可能な 4 履帯式である。

採鉱船上に浮遊選鉱設備を設置し、クラストと基盤

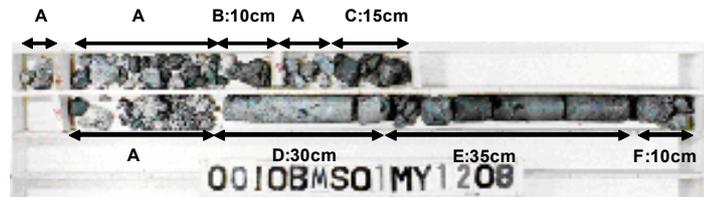
岩を分離し、製錬方式としては、マンガン団塊と同じ熔錬硫化塩素浸出法を採用する。

6.3 SMS

沖縄トラフ伊是名海穴での発見を初めとして、ラウ海盆、北フィジー海盆、マヌス海盆、伊豆一笠原弧の明神海丘や水曜海山など、西太平洋海域で金、銀を多く含む黒鉱タイプの背弧海盆、海洋性島弧系のSMSが次々に発見されている。採取されたサンプルには、高い金（数~数 10ppm）、銀（数 100~1,000ppm）含有率を示すものがあり、経済的開発の可能性が高いと考えられている。実際、オーストラリアのノーチラス社が、パプア・ニュー・ギニアのEEZ内であるマヌス海盆のSMSを対象に、探査鉱区を取得し、1997年から探査を継続している。しかし、鉱体規模の把握が不十分で、推定鉱量としては、明神海丘のサンライズ鉱床についての 900 万 t という数字が示されているのみであり、現時点では開発規模を大きく考えることはできない。

推定鉱量が算出されていること、日本のEEZ内にあること、製錬立地想定場所との距離などの観点から、明神海丘カルデラのサンライズ鉱床を対象に選定した。東京から南へ約 256 カイリ (Latitude N32° 06、Longitude E139° 52) で、水深は約 1,400m である。物性試験結果⁵⁾から、湿比重は 3.5、含水率は 12.8%とした。

サンライズ鉱床は潜水艇による調査によって発見され、サンプルからは高い金、銀、銅の含有率が得られている。しかし、これらはチムニー、マウンドを中心に肉眼観察によって選ばれ、採取されたものであり、その過程で選別を受けたものである。また、硫化鉄をあまり含んでいないものについては、金属含有率の分析が行われないため、サンプルのデータを平均することには意味がない。このため、海底着座式コア採取機 (BMS: Benthic Multi-Coring System) によって、サンライズ鉱床で採取されたコアのうち、図4に示した 0010BMS01MY の分析値を用いることを検討した。このコアはサンライズ鉱床北西縁辺部の小規模マウンドの斜面で採取されたものであるが、表層堆積物の下部に、有用金属含有率の高い富鉄部が存在する可能性を示唆するものといえる。このコアについては、採取コア長 146 cmのうち、A の計 46cm 分は約 2m 単位でコアバレルを交換して掘削をする際に、海底面近傍の堆積物が掘削孔に落



Sample name	Drilled length: 757cm Recovered core length: 146cm	Cu (%)	Pb (%)	Zn (%)	Au (g/t)	Ag (g/t)
A	about 46cm in 0-757cm	0	0	0	0	0
B	about 10 cm in 163-351cm	1.44	0.91	45.40	18.60	656.00
C	about 15cm in 351-553cm	28.90	0.01	0.40	1.40	28.20
D	about 30 cm in 553-757cm	0.21	0.18	5.76	3.30	44.90
E	about 35cm in 553-757cm	2.59	1.86	20.60	8.20	945.00
F	about 10 cm in 553-757cm	0.22	0.92	2.59	0.38	285.00
Average of 146 cm		5.56	0.65	12.46	5.31	326.52
Average of 100 cm		6.67	0.78	14.95	6.38	391.82

図4 0010BMS01MYの写真および分析値

下して、回収コア中に混入したものと解釈される。このため、残りのB、C、D、Eの部分について個別に有用金属含有率を測定し、それぞれの長さ分の重みをつけて、100cmのコア長全体の平均有用金属含有率を求めた。その結果、Cu:6.67%、Pb:0.78%、Zn:14.95%、Au:0.38ppm、Ag:391.82ppmが得られた。図4にはこのコアの品位分析値もまとめて示した。

この表に示した分析値は掘進長757cmのうち回収された部分のみ、さらにそのうちの落下物ではないと解釈された部分100cmの平均値であり、鉱床全体の平均値として用いることには疑念がある。このため、この100cmの平均値については富鉱部の有用金属含有率の例として扱うことにし、鉱床全体の平均値としては、黒鉱浮選データとして公表されている原鉱品位Cu:1.66%、Pb:2.45%、Zn:10.5%、Au:1.4ppm、Ag:113ppmを用いることにした。

開発規模は、海底での破碎効率、集鉱効率などの明確な研究データがないため、揚鉱量を基準に取ることにし、年間30万t(Wet)を基準と設定した。これは、サンライズ鉱床の埋蔵鉱量のうち、採掘の際にロスする分(約3分の1)を除いた600万tが、20年間の採掘対象となると仮定したためである。

SMSの物性試験結果⁵⁾から、採鉱機はCRCと同じタイプの掘削装置、取込装置、本体フレーム、走行装置、供給装置、制御装置で構成する。ただし、起伏変化の激しいマウンド上での作業を考慮して、上部構造の外周には、採鉱機の転倒時に各装置を保護するためのロールオーバー構造を装備し、後部には転倒、埋没等のトラブルから脱出するためのアウトリガーの装

備を設置する。掘削、取込、走行に必要な反力は、SMSの水中比重が大きいことを利用した貯鉱方式によって得る。これは、採鉱機の中に貯鉱スペースを設け、その中の鉱石を増減することにより、自重を制御するものである。ある場所での採掘が終了すると、採鉱機は離底し、採鉱船の力を借りて次の点へ移動する。

採鉱船上に浮遊選鉱設備を設置し、陸上で脱塩後、精鉱は既存製錬所に全て売却することにする。

7. 金属価格

金属価格は、Roskill's Metals Databook 2000を基に、Ni:US\$3.3/1b、Cu:US\$1/1b、Pb:US\$0.45/1b、Zn:US\$0.55/1b、Au:US\$336.4/oz、Ag:US\$5.2/ozという過去5年間の平均値を設定した。しかし、コバルト価格は変動が大きいため、US\$15/1b、US\$20/1b、US\$25/1b、US\$30/1bの場合に分けて評価した。

SMSの場合、売鉱価格は鉛、亜鉛の製錬生産売上収益の75%あるいは70%として計上した。これらに含まれている金・銀についても、同様に計上した。

8. 経済性評価結果

表2～4にマンガン団塊、CRC、SMSの経済性を評価した結果を示した。コバルト価格がUS\$15/1b、US\$20/1bでは、マンガン団塊がCRCより有利であり、US\$25/1bになるとCRCの優位性が現れることがわかった。マンガン団塊もCRCも、コバルト価格がUS\$20/1bでは、利益が生まれず、このレベルでは、借入金の利子補給、税制面での優遇措置など、政府の保護措置が必要となる。US\$25/1bになって、資本回収期

間11.7年、純現在価値US\$77 million、内部収益率9.8%と、資本回収期間11.1年、純現在価値US\$62 million、内部収益率10.6%となり、この程度になると利益が見込めることがわかった。これに対して、SMSの場合は、売鉱価格を70%としても、資本回収期間10.5年、純現在価値US\$13 million、内部収益率11.1%となり、売鉱することによって、製錬所新設の初期投資が不要になるため、経済性がかなり見込める結果になった。

表2 マンガン団塊の基本経済性評価

Sensitivity factor	Manganese nodule under 2,500t/y Co production rate		
	Payback period	NPV(\$)	IRR(%)
US\$ 15/lb	16.9	-156M	3.9
US\$ 20/lb	13.9	-38M	7.0
US\$ 25/lb	11.7	77M	9.8
US\$ 30/lb	10.2	188M	12.3

表3 CRCの基本経済性評価

Sensitivity factor	Cobalt-rich crust with 15% bedrock, by froth flotation		
	Payback period	NPV(\$)	IRR(%)
US\$ 15/lb	-	-181M	-
US\$ 20/lb	15.2	-52M	5.5
US\$ 25/lb	11.1	62M	10.6
US\$ 30/lb	8.6	172M	14.6

表4 SMSの基本経済性評価

Sensitivity factor	Seafloor massive sulfides under 300,000t/y and having no processing plant		
	Payback periods	NPV(\$)	IRR(%)
Purchased price			
Metal sales in 75%	9.4	23M	13.2
Metal sales in 70%	10.5	13M	11.1

表5 生産規模の拡大の影響 (マンガン団塊)

Sensitivity factor	Manganese nodule under 25,000t/y Co production rate		
	Payback period	NPV(\$)	IRR(%)
US\$ 15/lb	14.7	-377M	6.8
US\$ 20/lb	12.0	771M	10.3
US\$ 25/lb	10.2	1888M	13.3
US\$ 30/lb	8.8	2989M	15.9

表6 基盤岩混入率の増加の影響 (CRC)

Sensitivity factor	Cobalt-rich crust with 41% bedrock, by froth flotation		
	Payback period	NPV(\$)	IRR(%)
US\$ 15/lb	-	-	-
US\$ 20/lb	-	-199M	-
US\$ 25/lb	15.7	-74M	5.0
US\$ 30/lb	11.9	42M	9.6

表7 富鉱部のみ採鉱 (SMS)

Sensitivity factor	Seafloor massive sulfides under 50,000t/y and having no processing plant		
	Payback periods	NPV(\$)	IRR(%)
Purchased price			
Metal sales in 75%	7.3	17M	20.4
Metal sales in 70%	8.0	14M	18.1

9. パラメータを変化させた感度分析

9.1 生産規模の拡大 (マンガン団塊)

2,500t というコバルト生産量の制約を外し、規模拡大によるコストダウン効果を見るため、究極的な場合として、世界消費量の100%にあたる年間25,000tを生産規模とする設定で、マンガン団塊開発の経済性評価を行ってみた。その結果を、表5に示す。US\$20/lbでも、資本回収期間12.0年、純現在価値US\$771 million、内部収益率10.3%となり、収益が見込めることになる。

実際の計算では、年間5,000tのコバルト生産規模のユニットを5つ作るようになった。このため、本社は能等の一元化による若干のコスト削減効果を見逃すれば、表5の数値は年間5,000tのコバルト生産規模の場合の経済性評価結果とみられることもできる。当たり前のことであるが、陸上資源が枯渇し、ある程度大規模生産が可能になれば、開発の可能性が高まることになる。

9.2 基盤岩混入率の増加 (CRC)

基盤岩混入率の異なる2つのサンプルに、同じ浮遊選鉱試験を実施した結果を利用して、基盤岩混入率の増加が経済性評価に与える影響を計算してみた。その結果を表6に示す。基盤岩混入率が増加すると、選鉱によって分離できずに、精鉱中に混入する基盤岩の量が増加し、これが海上輸送、製錬に負担となり、経済性が悪化することがはっきりわかる。

9.3 富鉱部のみ採鉱 (SMS)

サンライズ鉱床の鉱体の中に、図4に示したような富鉱部が、このコア回収率に相当する割合で含まれると仮定し、富鉱部のみを小規模に採掘するという開発モデルを考えてみた。この場合、20年の採鉱期間を想定すると、揚鉱量基準で年間5万t (Wet) の開発となる。この規模の採鉱システムとしては、400mの水深での実験を成功させたインドのマンガン団塊採鉱システムが存在する。このシステムは、ドイツのSiegen大学が考案したもので、自走式採鉱機とドラム巻き取り可能なフレキシブルチューブから構成される。揚鉱は、採鉱機に搭載したポンプによってチューブ内に発生させた水流によって行う。

この採鉱機をベースに、掘削装置の付加、本体フレームや走行装置の強化、保護構造の装備などを行って、SMSの小規模採鉱システムを構築し、経済性の検討を実施した。

その結果、表7に示すように、開発規模の縮小と、鉱石の品位向上によって、商業的開発が可能なレベルまで経済性が向上することがわかった。

10. おわりに

年間 2,500t というコバルト生産量という規模設定の下で、マンガン団塊とCRC開発の経済性を評価し、コバルト価格が US\$ 15/lb、US\$ 20/lb では、マンガン団塊がCRCより有利であるものの、この価格では、民間企業独力での開発は困難であることがわかった。しかし、コバルト価格と需要の動向によっては、開発のチャンスがあることも明らかとなった。SMSについては、開発規模を小さく設定し、既存製錬所に精鉱を売却するという方法によって、民間企業ベースでの開発の可能性があるとわかった。CRCについては、採掘時の基盤岩混入を抑えなければならないことも明らかになった。

このように、FSでは経済的可能性の評価と同時に、システム構成、技術面で達成すべき性能など、技術的な評価も行うことができる。今回の検討では、新たな技術的状況をシステム構成に反映させることを試みたが、今後、深海底鉱物資源開発に適用可能な技術、手法などをさらに詳細に調査し、開発の可能性をより高める生産規模、システム構成について検討を深めたいと考えている。

資源開発が成立するために重要なことは、有用物が高い密度で濃集している場所を発見し、その状況を把握することである。この意味で、深海底鉱物資源の開発の可能性の検討を深めるためには、有望な海域について、より詳しい調査も必要とされている。

参考文献

- 1) Yamazaki, T., Park, S.-H. et al. (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.
- 2) 朴洗憲, 山崎哲生ほか (2002). "コバルト・リッチ・クラストのポテンシャル比較手法の開発," 資源と素材, Vol. 118, pp. 641-649.
- 3) 山崎哲生, 朴洗憲ほか (2003). "深海底鉱物資源開発の技術・経済的可能性評価," 第17回海洋工学シンポジウム論文集, pp. 423-430.
- 4) Yamazaki, T., Park, S.-H. et al. (2003). "A Case Study of Mining Seafloor Massive Sulfides in Japanese EEZ," *Proc. 5th ISOPE Ocean Mining Symp.*,

Tsukuba, pp. 63-70.

- 5) Yamazaki, T., and Park, S.-H. (2003). "Relationship between Geotechnical Engineering Properties and Assay of Seafloor Massive Sulfides," *Proc. 13th Int. Offshore and Polar Eng. Conf.*, Honolulu, pp. 310-316.
- 6) Burns, R.E., Erickson, B.H. 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.
- 7) Ozturgut, E., Lavelle, J.W. et al. (1980). *Environmental Investigation during Manganese Nodule Mining Tests in the North Equatorial Pacific, in November 1978*, NOAA Tech. Memo. ERL MESA-48.
- 8) Schriever, G., Ahnert, A., 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, MMAJ, pp. 197-208, 1997.
- 9) Trueblood, D.D., Ozturgut, E. et al. (1997). "The Ecological Impacts of the Joint U.S.-Russian Benthic Impact Experiment," *Proc. Int. Symp. Environmental Studies for Deep-sea Mining*, Tokyo, Metal Mining Agency of Japan, pp. 237-243.
- 10) Yamazaki, T., and Kaijitani, Y. (1999). "Deep-sea Environment and Impact Experiment to It," *Proc. 9th Int. Offshore and Polar Eng. Conf.*, Brest, Vol. 1, pp. 374-381.
- 11) Radziejewska, T., Rokicka-Praxmajer, J. et al. (2001). "IOM BIE Revisited: Meiobenthos at the IOM BIE Site 5 Years after the Experimental Disturbance," *Proc. 4th ISOPE Ocean Mining Symp.*, Szczecin, pp. 63-68.
- 12) Sharma, R. Nath, B.H. et al. (2003). "Monitoring the Effects of Simulated Disturbance on Benthic Conditions and Its Implications to Deep Seabed Mining," *Proc. 5th ISOPE Ocean Mining Symp.*, Tsukuba, pp. 208-215.
- 13) 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.