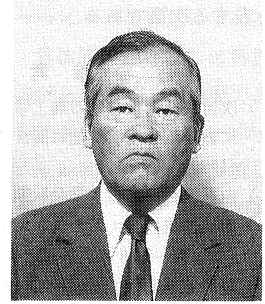


■ 展望・解説 ■

深海底鉱物資源の開発展望

A View of Deep Seabed Mineral Resources

馬 場 利 一*
Riichi Baba



1. はじめに

深海底鉱物資源の歴史は、1873年～76年におけるイギリスの海洋調査船チャレンジャー号の壮大な探検航海で約4,500mの深海底から陥円形の黒色固形物を引き揚げ、大洋の深海底に存在する鉱物として報告したことに始まる。その後1884年、その鉱物は、マンガンおよび鉄を主成分とし、他にも有用金属が含まれていることが明らかにされたが、当時は、金属資源としては余り注目されなかった。その後1960年代に入ると、急激なレアメタルの需要増と価格の高騰などともなってコバルト、ニッケル、銅等の資源に注目が集まったが、たまたまメロー博士の著書等が契機となって、マンガン団塊の存在が広く知られるようになり、深海底の調査が急速に進展した。

1966年には紅海の海底に熱水起源の重金属泥が発見され、また1970年代に入るとプレートテクトニクス理論に基づく海底調査によって東太平洋海膨や背弧海盆等、次々と熱水を吐くスモーカーが発見された。いずれも銅、鉛、亜鉛、銀、金などを含有する塊状硫化物鉱床である。

一方、Manheim, Cronan等によるMIDPAC'81航海でハワイ諸島等赤道付近の海山の平頂部や斜面などには、コバルトに富むマンガン酸化物および白金やレアアース等も含有するコバルト・リッチ・クラストが発見され、その後の調査の進展につれてコバルト・リッチ・クラストは太平洋全域に広く賦存することが判明してきた。

太平洋地域の海底鉱物資源の分布と有望海域を示す模式図を図-1にしめす¹⁾。

現在まで、各国において、それら海底鉱物資源の有効利用をめざして、より詳細な探査、開発技術の研究が続けられており、それらの成因などに関する多くの

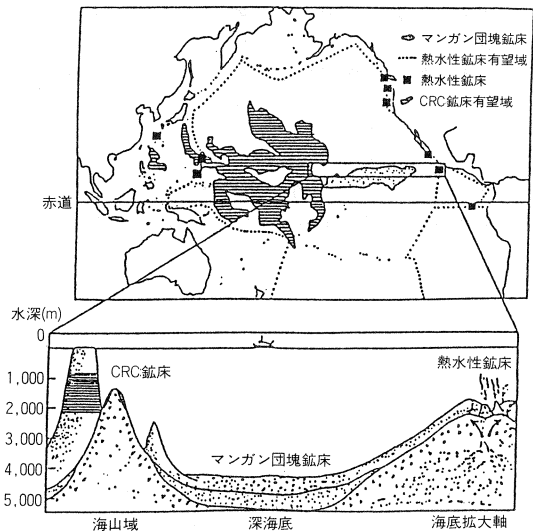


図-1 深海底鉱物資源分布模式図¹⁾

学術的研究報告がある²⁾。

我が国は、国土が狭小で資源小国であるが、国の周囲が海洋にかこまれ、排他的経済水域が広く、さらに広大な太平洋をひかえており、これらの深海底鉱物資源の有効な活用が熱望されている。

2. 深海底鉱物資源の特色とその探査

2.1 マンガン団塊

マンガン団塊が金属鉱物資源として注目されたのは1965年メロー博士(カリフォルニア大学)が「The Mineral Resources of the Sea」を出版し、ニッケル、コバルト、銅、マンガンの鉱石として、その埋蔵量の豊富さを紹介して以来である。米国は、1960年頃から本格的な調査を始めていたが、ソ連、西独、フランス等も次第に積極的な探査活動に入っている。

その後米国企業を中心として、4つの国際コンソーシアムが発足し、探査及び開発研究が盛に行われた³⁾。

我が国においても、レアメタルの確保の必要性から

* (財)深海底鉱物資源開発協会・嘱託

〒101 東京都千代田区内神田1-5-4

1974年、日本海域の地質調査を目的とした調査船「白嶺丸」(金属鉱業事業団の所有)により調査が開始された。同年には、(社)深海底鉱物資源開発協会の発足をみ、1975年から金属鉱業事業団の委託により、クラリオン・クリップトン断裂帯海域(C-CZone)即ちハワイ南東からメキシコ沖にかけての調査を開始している。(図-2参照)さらに1980年には、マンガン団塊探査専用船として、「第2白嶺丸」を建造し、本格的な調査に就航させた^{4, 5)}。1982年には、官民の共同出資により「深海資源開発株式会社」が設立され、以来本格的なマンガン団塊の探査が続けられて来ている^{5, 9)}。

その頃、国連海洋法が採択された。一方、探査を実施してきた日、佛、ソ連及び米国のコンソーシアムとの間の鉱区に関する交渉が結着して、1987年12月に国連海洋法条約付帯決議に基づき、マンガン団塊鉱区登録^{4, 5)}が、深海資源株式会社にも認められ、7.5万km²の鉱区が確保された。国連に登録された鉱区の位置を図-2に示した⁶⁾。

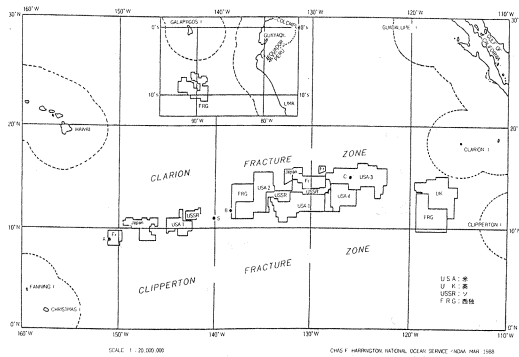


図-2 太平洋における各国のマンガン団塊鉱区⁶⁾

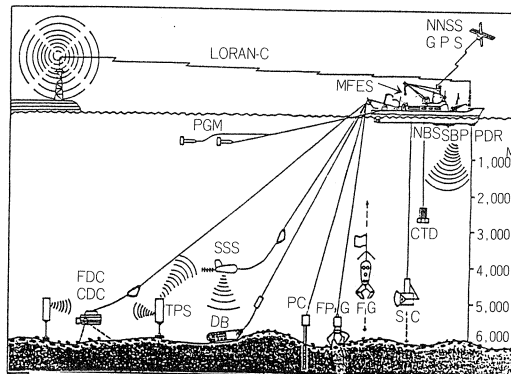


図-3 第2白嶺丸の探査方法概念図⁵⁾

表1 マンガン団塊とコバルト・リッチ・クラストの有用金属の品位⁷⁾

Metal	Nodules ^a	Crusts ^b
Cobalt (%)	0.27	0.90
Copper (%)	0.54	0.06
Manganese (%)	20.00	25.00
Nickel (%)	0.76	0.50
Platinum (gm/tonne)	—	0.40 ^c

^aMckelvey et al., 1983

^bClark et al., 1984

^cHalbach et al., 1984,

マンガン団塊は、砂利大から拳大以上にも及ぶ球体随円体などをした黒褐色の塊状であり、その断面には玉ネギ状組織がみられ、一般に二酸化マンガンの多い層にニッケル、銅が、また鉄酸化物の多い部分にコバルトが濃縮していることが知られている。その金属組成について多くの調査があるが、代表的な分析例として、後述のコバルト・リッチ・クラストとの比較分析表を表1⁷⁾に示した。

それらの資源の開発には、詳細な海底地形、資源の賦存状態、品位などを知ることが必須であり、そのための調査船及び探査機器の確保が重要である。我が国で実施されている第2白嶺丸の探査方法の概念図を図-3に、探査機器の概要を表2に示した^{4, 5)}。これらの機器を搭載した第2白嶺丸はマンガン団塊のみならず1985年からは、海底熱水鉱床、更に1987年からは、コバルト・リッチ・クラスト鉱床の探査にも活躍している⁹⁾。(表2使用対象参照)

2.2 海底熱水鉱床

1966年に紅海の約2000mの海底に熱水層に覆われた銅、鉛、亜鉛、銀などの硫化物を含む泥が発見されたことに端を発している⁹⁾。1978-79年には、EPR21°Nやガラバゴス海嶺において、またファンデフーカ海嶺、ゴルダ海嶺、グワイマス海盆などに多金属塊状硫化物の熱水鉱床が次々と発見された。我が国でも、1985年から第2白嶺丸により東太平洋海膨メキシコ沖の探査活動を開始している⁹⁾。また1985年には地質調査所により伊豆・小笠原周辺にも熱水噴出や微細な硫化物、1987年には潜水調査船「しんかい2000」(海洋科学技術センター所属)により、沖縄の北西部に伊是名海穴の熱水噴出が発見され、また1988年には西独クラウスタール工科大学との共同調査によって伊是名海穴で金品位の高い試料が採取され、有望視されている。また、フィジーベースンにおける日佛共同探査、マリアナト

表2 搭載主要探査機器一覧表

4, 5) より作成

調査項目	機器名称	英 文 名	使用対象鉱床		
			マンガン団塊	海底熱水鉱床	Coクラスト
測 位	NNSS	Navy Navigation Satellite System	○	○	○
	GPS	Grobal Positioning System	○	○	○
	Loran C	Loran C	○	○	○
	TPD	Transponder	○	○	○
測 深 海 底 地 形	NBS	Narrow Beam Sounder	○	○	○
	PDR	Precision Death Recorder	○	○	○
海 底 面 探 査	MFES	Multi-frequency Exploration System	○		○
	SSS	Side Scan Sonar	○	○	○
	SBP	Sub-bottom Profiler	○	○	○
	AG	Air Gun	○	○	○
	PGM	Proton Gradio Meter	○	○	○
サンプリング	FG	Free Fall Grab	○		○
	DB	Dredge Bucket	○	○	○
	FG	Finder installed Power Grab		○	○
海 底 観 察	CDC	Continious Deep sea Camera	○		
	FDC	Finder mounted Deep sea Camera	○	○	○
海 水 調 査	CTD	Conductivity. Temperature, Depth System	○	○	○

ラフでの日米共同調査などが報告されており、多くのチムニーが発見されてきている。以上のような背弧海盆型の鉱床規模や品位などについては今後の調査に大きな期待がもたれている¹⁰⁾。

2.3 コバルト・リッチ・クラスト

1980年代に中央太平洋、ハワイ付近の海山に発見されて以来、広く知られてきた。これらは、海山を形成している玄武岩、変質岩（ハイアロクラスタイト）或は石灰岩などの基盤岩の表面に普通数cmの厚さで被

覆している。また海山頂部、下斜面などに存在する礫状岩の表面を堅く被覆しているものも多い。これらは比較的浅い800~2,400mに賦存していて、0.5~2%のコバルトを含有しているのが特徴である。その他、ニッケル、銅を含むマンガン、鉄等の酸化物からなっている。レアアースや白金等を含有するものも見出されている¹¹⁾。図-1のように、有望海域も広大で、排他的専管水域中にも賦存している可能性が大きい。現在の先端科学工業に欠くべからざるレアメタルや貴




COMMON SEABED MINERAL DEPOSITS			
DEPOSIT TYPE :	SUBSTRATE CHARACTER	MINING REQUIREMENT	METALS OF ECONOMIC IMPORTANCE
MANGANESE NODULES	 FREE STANDING	MINOR DISLODGE- MENT AND LIFTING / SUCTION	COBALT NICKEL MANGANESE IRON
MANGANESE CRUSTS	 AFFIXED	SCARIFY, FRAGMENT AND SUCTION	PLATINUM NICKEL MANGANESE
POLYMETALLIC SULFIDES	CHIMNEY-LIKE STRUCTURES (SMOKERS) STOCKWORX (ROOT SYSTEM) 	SCARIFY / CUT CHIMNEY (SMOKERS) EXCAVATE (ROOT SYSTEM) FRAGMENT & SUCTION	GOLD SILVER COPPER ZINC

図-4 深海底鉱物資源の模式図¹¹⁾

金属類も含有するとあって、おおきな注目を集め、米国では、その探査採鉱技術の開発に力を入れている。我が国でも、東海大学が独自で南鳥島南方の調査を行うとともに1987年から中部太平洋海域で第2白嶺丸による調査を実施してきた。一方我が国は1985年より資源開発協力基礎調査事業の一環であるSOPAC (South Pacific Applied Geoscience Commission) に協力し、クック諸島キリバス共和国ツバルにおいて、マンガン団塊の調査に、その後コバルト・リッチ・クラストの探査を実施してきている。いずれも今後の本格的調査の進展に大きな期待がよせられている⁹⁾。

3. 深海底鉱物資源の開発技術

以上3種の深海底鉱物資源のうち、最も具体的に開発が検討研究されているのは、マンガン団塊の採鉱システムであるが、その他についてもそれぞれその構想や基礎的検討がなされている。3種の鉱床についての採鉱システムを検討するための基礎となる鉱床賦存状況の模式図を図-4に示した¹¹⁾。

3.1 マンガン団塊の採鉱

1970年代中期から1980年にかけて、米国の企業を主体とする国際コンソーシアムが結成され、またフランス等でもさまざまな採鉱方法が提案研究されている。

その一例としてフランスのIFREMERにおけるマンガン団塊採鉱(集鉱と揚鉱)開発構想の概念図を図-5に掲げた¹²⁾。それは自走式採鉱(集鉱)方式で拾い、揚鉱には、図のように3つの方式が提案されている。

我が国では、1982年通商産業省工業技術院の大型ブ

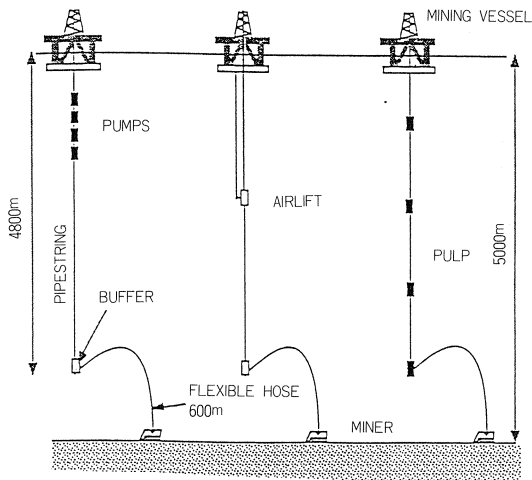


図-5 マンガン団塊の採鉱・揚鉱の概念図¹²⁾

ジェクトの制度の下に、技術研究組合「マンガン団塊採鉱システム研究所」が設置され、技術開発を本格的に進めてきた。その集鉱システムは、揚鉱管とフレキシブルホースを介して軟弱な海底堆積層上を採鉱船に曳航されながら、流体ドレッジ方式でマンガン団塊を採鉱するのでも、電気掃除機と同様の原理である^{1, 4)}。集鉱機内では、混入してきた泥状海底堆積物を分離排除し、また過大粒径のマンガン団塊については適当な粒径に粉碎して揚鉱システムに供給することとしている^{1, 4)}。

揚鉱システムは、ポンプリフト装置とエアリフト装置が研究対象となっている。

ポンプリフト装置は揚鉱管の水深1000m及び2000m点に設置された多段スラリーポンプ方式が計画されている。その垂直、或は傾斜管における固液二相流特性、マンガン団塊の破碎性など多くの基礎試験が行われている^{1, 4)}。

エアリフト装置では、吹き込む空気量や吹き込み位置と気・液・固三相流の関係についての研究が実施されている。

これらの研究は公害資源研究所内に設置された深さ200mの立型水槽で実験が進められてきたが、同所では各種の基礎研究が実施され、たとえばマンガン団塊の破碎特性¹³⁾、固液二相流特性¹⁴⁾、気液固三相流の

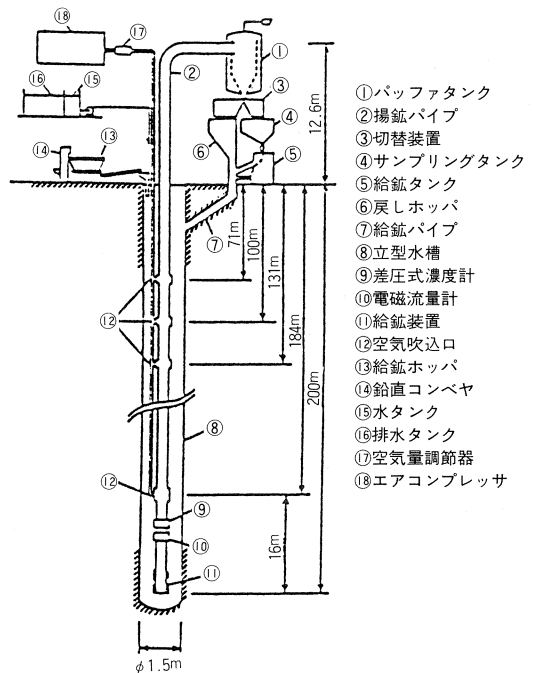


図-6 マンガン団塊揚鉱実験装置¹⁵⁾

表3 海底熱水鉱床の工学的特性¹⁾

	伊是名海穴試料						ゴルダ海嶺 試料	黒鉱試料
	A	B	C	D	E	F		
見掛け密度(g/cm ³)	2.94	3.87	2.73	2.32	2.82	1.88	3.14	4.13-4.75
密度(g/cm ³)	4.63	4.55	4.49	4.25	4.71	3.64	4.68	4.18-4.89
空隙率(%)	37	15	39	45	40	48	33	0-3
P波速度(km/sec)	3.4	3.5	3.1	1.9	2.3	1.8	3.7	3.4-4.7
圧縮強さ(MPa)	24.0	38.2	21.0	3.45	6.37	3.13	9.06	84-144
引張り強さ(MPa)	2.23	4.09	3.04	0.61	0.80	0.14	0.09	2.0-13.4
シヨア硬さ	10.2	18.3	14.6	1.6	9.4	5.2	×	32.5-38.9

輸送特性等についての研究報告がある。これらの実験装置の概略を図-6に示す¹⁵⁾。

3.2 海底熱水鉱床の採鉱

最初に発見された海底熱水鉱床は前述のように紅海海底の凹地(ディープ)に沈澱した重金属泥で、銅、鉛、亜鉛、銀などを多量に含有しており、この鉱床の開発のために、サウジアラビアとスーダンの両国政府が「サウジ・スーダン紅海委員会」を設立し、1979年に紅海の実海域で振動サクシオン方式による採鉱予備実験した¹⁶⁾。

その後大洋中央拡大軸や背弧海盆等に次々と熱水鉱床が発見された。これらはいずれもチムニーやマウンドによって構成される塊状硫化鉱床であり、採掘には破碎あるいは切削が必要である。

鉱石の物性値として伊是名海穴から採取した試料と黒鉱鉱床の試料に基づく工学的特性の比較研究の例を表3に示す¹⁾。このほかにA. M. Crawford et alによるEPR 21° N鉱床の物性値の報告例もある⁸⁾。

我が国の深海底鉱物資源開発協会ではこれらの資料を基を、掘削・集鉱・揚鉱の各機能を一台の採鉱機に組み込んだ自己完結型の採鉱システムを検討するとともに、散在している中〜小規模鉱床を対象に、各機能を分離した小規模複数の採鉱機に分散させた分離分散型採鉱システムをも検討している¹⁷⁾。

3.3 コバルト・リッチ・クラストの採鉱

コバルト・リッチ・クラスト鉱床は平頂海山斜面の基盤岩を被覆しているペープメント状のものと、平頂海山頂部の有孔虫軟泥や砂礫上に分布する礫状のものに大別される¹⁷⁾。マンガング塊や海底熱水鉱床に比べて800〜2400mと深度は比較的浅いが、微地形は非常に複雑で、ペープメント状のクラストの厚みは0.1〜20cm、平均2cm程度あり、その中から比較的厚い(2cm以上)部分を採掘対象として選択する必要がある。そのため、海底地形の詳細な探査とクラストの厚みや固さを測定することが必要である¹⁷⁾。

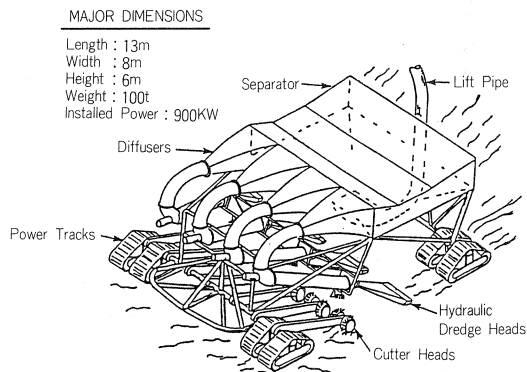
コバルト・リッチ・クラスト鉱床の対比を表4¹⁸⁾に、

表4 コバルト・リッチ・クラスト鉱床の対比¹⁸⁾

	ハワイ諸島	中部太平洋海山群及び ライン諸島	フランス領ポリネシア	中部太平洋赤道帯海域	南鳥島東南方海域
大地形及び水深	水深 4,000mまでの海山斜面	水深 1,000~1,500mの 海山斜面	水深 1,000~1,500mの 海山斜面	水深 500~3,500mの 海山頂部及び斜面	水深 560~2,000mの 海山頂部及び斜面
下盤岩石	水深 900~1,500mの 段階状テラス ハイアロクラスタイト、火山 性砕屑岩、リン酸化石灰石	水深 2,000~3,000mの 段階状テラス ハイアロクラスタイト、CR C砕屑物、リン灰土と古いC RC固結物	リン酸塩化石灰岩 石灰質角礫岩、リン灰土	玄武岩、ハイアロクラスタイト 石灰岩	玄武岩、石灰岩、リン灰石 玄武岩質溶岩
CRC鉱床厚さ 賦存形態	2~5cm 斜面では被覆型 一部で団塊型混在	1~8cm(平均2.5cm) 斜面では被覆型 テラスでは団塊型	平均2.5cm 斜面では被覆型 一部で団塊ポケット	0.1~8cm(平均2cm) 斜面では被覆型 被覆率 10~100%	0.1~5cm(平均3cm) 斜面では被覆型 山頂では被覆型・団塊型
金属成分含有率	Co: 0.4~1.6% Mn: 15~30% Fe: 7~22% Ni: 0.8% Cu: 0.6%	Co: ~2% Mn: 15~31% Fe: 7~18% Ni: 0.7~0.8% Cu: 0.05%	Co: 1.07~1.33% Mn: 25~35% Fe: 14~15.5% Ni: 0.6~0.7% Cu: 0.1%	Co: 0.5~1.4% Mn: 17.2~31% Fe: 9.4~19.0% Ni: 0.4~1.1% Cu: 0.1%	Co: 0.73% Mn: 24.7% Fe: 15.6% Ni: 0.57% Cu: 0.1%
	Glasby (1977) Craig (1982) Hein (1985)	Halbach (1982) Halbach (1984)	Mero (1965) Ranchin (1972) Pichocki (1984)		

表5 コバルト・リッチ・クラスト鉱床の工学的特性¹⁾

	クラスト	基盤岩
見掛け密度 (g/cm ³)	1.65-2.17	1.44-2.92
空隙率 (%)	43-74	7-69
P波速度 (m/sec)	2090-3390	1760-5860
圧縮強さ (MPa)	0.5-16.8	0.1-68.2
引張り強さ (MPa)	0.1-2.3	0.0-18.9

図-7 クラスト採鉱機概念図^{1,9)}

南鳥島付近海底において採取された試料の工学的特性を測定した例を表5¹⁾に示す。

ペーパメント状コバルトクラストの採鉱は、複雑な地形にごく薄く張り付いている鉱床をいかに効率よく採取するかがポイントである。地形の変化によく追従してしかも基盤岩をできるだけ混入させずに採鉱するための技術は未だ確立していないが、米国におけるコンセプトの例を図-7⁹⁾に示した。これはロータリーカッターで切削し水力吸引集鉱し、揚鉱する方式のクローラ型自走式採機である。我が国でも(社)深海底鉱物資源開発協会でクローラ式走行装置と可動型アームに取りつけられた回転ドラム掘削法などが検討されている¹⁷⁾。

4. 処理技術

深海底鉱物資源の開発には、最終的に処理技術が不可欠の課題である。マンガン団塊の製錬については1970年～1980年代にかけて、米国政府や企業を中心とするコンソーシアムが結成され、研究を実施している。我が国においても大学や研究所等における研究が報告されているが、何れも経済性を加味した検討までには到っていない⁴⁾。

現時点で最も有力な製錬方法と目されている方法を以下に略記した^{20,21)}。

(1) 還元焙焼—アンモニア浸出法

乾燥粉碎→還元焙焼→浸出→溶媒抽出→電解採取
(COガス) (NH₃, CO₂吸込)

○浸出では、Ni, Co, Cuはアンミン醋塩となり溶解する。MnはMuCO₃, Feは、Fe(OH)₃として沈澱する。

○溶媒抽出では、Ni→Cu→Coの順に抽出分離される。

(2) キュブリオン—アンモニア浸出法

粉碎→還元浸出→溶媒抽出→電解採取

○浸出は1価のCuイオンの存在下でCOを吹き込みアンモニア浸出する。生成物は(1)に同じ。

(3) 塩化焙焼—水浸出法

乾燥粉碎→塩化焙焼→水浸出→溶媒抽出→電解採取
(HClガス)

○Ni, Cu, Co, Mn等は塩化物として溶解する。Feは水和によりFe₂O₃として、大部分が除去される。

○溶媒抽出はCu, Co, Niの順に抽出分離される。

(4) 高温高压硫酸浸出法

粉碎→加圧浸出→中和→溶媒抽出→電解採取

○浸出は、オートクレーブにて浸出。

Ni, Co, Cuは選択的に浸出される。

○溶媒抽出はCu, Ni, Coの順に抽出分離される。

(5) 熔錬硫化—硫酸浸出法

乾燥→還元溶解→(粗合金)→硫化→(マット)→加圧浸出→溶媒抽出→電解採取

○還元溶解でMnはスラグとして除去、Ni, Co, Cu, Feは粗合金となる。粗合金はSを添加硫化し、Ni, Co, Cuはマットを作る。Feは酸化スラグとして除去。

その他、亜硫酸浸出法、塩酸浸出法、亜硫酸アンモニウム—炭酸アンモニウム浸出法、セグレゲーション法など多くの研究報告がある^{22, 23, 24, 25)}。

現在は、金属鉱業事業団の依頼により深海底鉱物資源開発協会が、経済的な製錬法の確立を目指して、研究を開始している⁴⁾。

熱水鉱床鉱物は対象が硫化鉱であり、処理上の課題は少ないと考えられている。コバルト・リッチ・クラストについては、マンガン団塊とほぼ同じように考えられているが、混入してくる基盤岩を分離選別することが必要となろう^{26,27)}。また、レアアース、白金へ

の対応或は含有磷への対策などは今後の課題であろう。

5. おわりに

以上深海底鉱物資源開発の現状について概要を述べてきたが、企業化は21世紀に入ってからと考える識者が多い。その頃になれば科学技術の進歩と相まって開発のための要素技術の進展は目覚ましいものとなるであろう。1989年12月にハワイで「深海底鉱物資源開発に関するシンポジウム」が開催され、数多くの国から工学、科学、法律経済等の専門家が多数参加したが、彼らに対するアンケート調査によると、その商業的開発時期は10~20年後であろうし、また最初に開発を実施する国は日本であろうという推定が最も多かったという²⁸⁾。

深海に対しての最近の関心事はそのアプローチの方法をどうするかということのようである。遙かな宇宙についての知識獲得の手掛かりは結構あって、宇宙科学は正に日進月歩の観を呈している。しかし僅か10 kmにも満たない深海については解明されていないことが余りにも多い。有人、無人の各種観測方法の研究が多方面で進められているが、シンポジウム「深海ステーション」第1回(平成2年9月)が開催されたように、最終的には深海有人基地を設けて直接観察すべしとの議論がなされている。また、マンガン団塊の処理も海底でとの提案も聞かれる²⁹⁾。

地球に残されている最後の秘境であり、また人類共有の最後の遺産ともいべき鉱物資源の宝庫でもある深海底の開発利用について、地球環境を破壊することなく実行されることへの期待は誠に大きい。

参 考 文 献

- 1) 鶴崎克也; 深海底資源開発研究の現状と将来 資源と素材 106 (1990) 10, 555-562
- 2) 中尾征三; 地質ニュース 393 (1990) 42-53
- 3) 鉱業便覧 昭和59年度版
- 4) Fujimori, M.; Evaluation of Deep Seabed Mining Technology. 24th Annual Conference of the Law of the Sea Institute. Session V Deep Seabed Mining, July 26, 1990
- 5) 松本勝時; 海洋開発ニュース Vol. 18, No. 6 (1990年11月)
- 6) Padan, J. W.; Commercial Recovery of Deep Seabed Manganese Nodules. Marine Mining 9 (1990) 1 87-103
- 7) Hein, J. R. et al; Cobalt and Platinum Rich Crusts and Associated Substrate Rocks from the Marshall Islands. Marine Geology, Vol. 98 (1988) 255-283
- 8) Crauford, A. M. et al; Geotechnical Engineering Properties of Deep-Ocean Polymetallic Sulfides from 21°N East Pacific Rise. Marine Mining 4 (1984) 4 337-354
- 9) 2000年の資源ビジョン(平成2年6月)通産省資源エネルギー庁編
- 10) 青木正博他; 海洋科学技術センター試験所報告(1982)
- 11) Werjefelt, B. R. L. et al; Preliminary Disclosure of a Fluid Dynamic Deep-Sea Mining System with No Moving Parts. Metals and Society 14 (1990) 3/4, 369-379
- 12) Herouin, G. et al; A Manganese Nodule Industrial Venture would be Profitable. OTC 5997 (1987) 321-332
- 13) 山崎哲生他; ポンプリフトによるマンガン団塊の破碎性に関する研究. 採鉱と保安 31 (1985) 11, 1-7
- 14) 斉藤隆之他; 動揺管路内における固液二相流動特性. 資源素材学会1990年春季大会講演要旨集135-136
- 15) Saito, T. et al; Lifting Characteristics of Manganese Nodules by Air-Lift-Pump on 200m Vertical Test Plant, OCEANS' 90 Vol. 1 48-53
- 16) Amann, H.; The Red Sea Pilot Project, Marine Mining 8 (1989) 1, 1-22
- 17) 菊地 豊; 海底熱水鉱床及びコバルト・リッチ・クラスト鉱床の採鉱法について, 月刊海洋23 (1990) 7, 440-445
- 18) 鶴崎克也他; コバルト・リッチ・クラスト採掘装置のフィージビリティスタディ, 日本鉱業会1988年春季大会予稿集
- 19) Halkyard, J. E.; Technology for Mining Cobalt Rich Manganese Crusts Sea-mounts. OCEANS' 85, 352-373
- 20) Jordan, C. E.; Processing Technologies for Extracting Cobalt from Domestic Resources, IC 9176 (1988) Bureau of Mines
- 21) Haynes, B. W. et al; Laboratory Processing and Characterization of Waste Materials from Manganese Nodules. RI 8938 (1985) Bureau of Mines
- 22) 藤井雄二郎; マンガン・ノジュールの処理技術, 日本鉱業会誌 102 (1986) 1186, 827-841
- 23) 一条美智夫; マンガン・ノジュールの湿式処理における2,3の試み. 日本鉱業会関東支部談和会資料(1980)
- 24) Djohari, A. et al; セグレグーション法によるマンガン・ノジュールからのCu, NiおよびCoの回収. 日本鉱業会誌 104 (1988) 1207, 615-620
- 25) 六川暢了; 炭酸アンモニウムと亜硫酸アンモニウム混合溶液によるマンガン団塊からのニッケル, コバルトおよび銅の抽出. 資源と素材 105 (1990) 4, 205-209
- 26) Haynes, B. W. et al; Extractive Metallurgy of Ferromanganese Crust of the Necker Ridge Area, Hawaiian Exclusive Economic Zone. Marine Mining 6 (1987) 1, 23-36
- 27) 藤井雄二郎他; マンガン・ノジュール及びコバルト・クラストの製錬. 資源処理技術 35 (1988) 2, 61-71
- 28) 山崎哲生; 「21世紀の深海底鉱物資源開発に関する国際会議」報告, 資源 2 (1990) 7, 18-22
- 29) Branovsky, A. B.; Hydrometallurgical Processing Method of Deep-Sea Solid Mineral Resources at the Point of Extraction. Sea Bed Mineral Resources Conference, Dec. 1989, East-West Center, Hawaii