

■ 特 集 ■ 採鉱技術からみた資源開発

マンガンノジュールの開発の概要

Trend and Preliminary Knowledge of Detachment of Manganese Nodule

伊 藤 福 夫^{*}

Fukuo Itoh

1. はじめに

深海底のマンガンノジュールは、技術的、経済的にみても、もはや潜在的資源 (potential resources) でなく、世界の Ni, Co, Cu および Mn の主要な資源の一つになってきたように思われる。中でも、Ni 品位の高いノジュールの資源的価値は最も高いといえよう。一方、アメリカ、西ドイツでは、マンガンノジュール開発に関する国内法を成立させており、フランス、イギリスでもその準備が進められている。このような情勢もあって、1973 年以来、難航を続けてきた国際海洋法条約も年内調印の見通しがたち、国連機構内にオーソリティーの設置・発足を契機に¹⁾、工業先進国の間では、商業規模でのマンガンノジュール開発の機運が高まっている。わが国でも、昭和 56 年度から工業技術院の大型プロジェクトとして「マンガン団塊採鉱システム」の開発研究がスタートする²⁾。

マンガンノジュールの開発に直接関与している人口は、鉱物資源開発人口の中でもほんの一握りにしかならない。しかし、この新たな資源開発は直接の関係者だけでなく、幅広い分野の多勢の人々の理解と支えがあってこそ、はじめて成功するものと考えている。そこで、専門を異にする幅広い本誌読者のために、マンガンノジュール開発について、私見を折りこみながら、2 回にわたって解説することにした。

2. 予備知識 (1) —— 情勢・動向

2.1 国際海洋法の動き

1973 年以来、難航してきた第 3 次海洋法会議の深海底開発問題は、再開第 9 会期 (1980・7・27～同年 8・29) において、以下にまとめたように、大筋では

ば妥協に近い合意が得られ、暫定投資保護の問題を第 10 会期の大きな問題として残すのみとなった¹⁾。

i) オーソリティー (国際海底機構、構成国 36 ヶ国) が資源管理に当たり、その下部機関のエンタープライズ (国際開発公社) がこれを開発する。これと併行して、私企業 (または国) が一定の条件の下で開発する。
ii) オーソリティー理事会の表決方式——問題を重要性に応じて 3 段階に分け、規約の制定や陸上資源国の救済措置など最重要事項については全会一致で、次いで $\frac{3}{4}$ 、 $\frac{2}{3}$ の多数決制をとる。iii) 最終条項——批准国が 60 ヶ国に達してから 1 年後に条約が発効する。
iv) 生産制限——一定期間、深海底からの鉱物生産量は、一定時期以降のニッケルの消費量の伸びの一定割合に制限される。現在の妥協案では、将来のニッケル消費量の伸びを最低 3% として深海底鉱物生産量を算出することとなっている。v) 技術移転——私企業等は、深海底開発にあたり、使用する技術を一定期間「国際開発公社」や発展途上国に移転しなければならない。vi) 財務条件——私企業等は、深海底開発活動による収益等の一部を「国際海底機構」に納付しなければならない。なお、これにより集められた収益は陸上産出国への補償や発展途上国への配分に当てられる。
vii) 再検討会議——生産開始後 15 年目に、深海底開発制度全般を見直すための会議を設ける。会議開始の 5 年以内に新開発制度について合意が得られないときには、条約締結国の $\frac{2}{3}$ の決定および批准により、新開発方式がすべての締結国に適用される。viii) 「国際開発公社」の資金調達——同公社に深海底開発を行なわせるため、1 プロジェクトに必要な資金の半分を各国が直接拠出し、残り半分を各国が債務保証しなければならない。

今後の予定は、i) 起草委員会 (1981 年 1 月 12 日～2 月 27 日、於ニューヨーク)、ii) 第 10 会期 (1981 年

* 工業技術院公害資源研究所資源第 4 部第 1 課長

〒305 茨城県筑波郡谷田部町小野川 16-3

3月9日～4月17日、於ニューヨークまたはジュネーブ、iii) 条約署名(1981年9月または10月、於カラス)となっている。

2.2 内外の動向

マンガンノジュールの開発は未踏の分野への挑戦であり、投資額が膨大でしかもリスクが大きいことから、大手といえども単独で取組んでいる私企業はなく、幾つかが集まって Joint Venture を組んだり、国際コンソーシアムを組織したりして開発研究を実施しているのが特徴である^{3) 4)}。表1に示したように、現在、5つの国際コンソーシアムが活動しており⁵⁾、工業先進国の強力な海洋開発企業はこれらコンソーシアムのいずれかに参加して活動している。その代表的な各国の企業またはグループを挙げると、アメリカでは、US Steel 社、Kennecott Copper 社、Lockheed Missiles & Space 社、西ドイツでは、AMR (Metallgesellschaft, Preussag, Salzgitter の3社の J.V.)、カ

ナダでは Inco 社、フランスでは、AFERNOD (CN-EXO, SLN 社、CEA, CFD, BRGM の官民合同の J.V.) などがある^{6) 7)}。わが国では、住友グループの日本深海鉱業⁸⁾や関心の高い34社が集まって組織している研究組合の深海底鉱物資源開発協会 (DOMA) などがあげられる。政府機関では、公害資源研究所が採鉱および製錬の基礎研究を行なっている。

3. 予備知識 (2) — 科学・技術

3.1 マンガンノジュールの性状

形状と大きさ^{10)~12)} — 瘤・塊状 (nodule), 板状 (slub), 被覆状 (crust) などがある一定していないが、図-1および図-2に一例⁹⁾を示したように、ほぼ玉ねぎのような塊状と考えてよい。大きさも数mmのものから20cmのものまであり、通常2~6cm程度のものが多い。

内部構造と組織^{13)~24)} — トドロキ石、バーネス石、

表1 マンガン・ノジュール開発を目指す国際コンソーシアムの概要

1. U.S. Steel Group	OMA	50Mil. \$		
Essex Minerals	(U.S.A.)	(33 1/3%)		
Union Seas	(Belgium)	(33 1/3%)		
Sun Ocean Ventures	(U.S.A.)	(33 1/3%)		
2. INCO Group	OM I	40Mil. \$		
Inco	(Canada)	(25%)		
Metallgesellschaft	AMR	(Germany)		(25%)
Preussag				
Salzgitter				
Sedco	(U.S.A.)	(25%)		
Domco	(Japan)	(25%)		
3. KENNECOTT Group		50Mil. \$		
Kennecott Copper	(U.S.A.)	(50%)		
Rio-Tinto Zinc	(U.K.)	(10%)		
Consolidated Goldfields	(U.K.)	(10%)		
Norand Mines	(Canada)	(10%)		
B.P.	(U.K.)	(10%)		
Mitsubishi	(Japan)	(10%)		
4. LOCKHEED Group		50Mil. \$		
Lockheed Missiles & Space	(U.S.A.)	(40%)		
Amoco Minerals	(U.S.A.)	(25%)		
Billiton International Metals	(U.K. Netherland)	(25%)		
B.K.W. Ocean Minerals B.V.	(Netherland. U.K.)	(10%)		
5. 2-SHIP CLB SYNDICATE				

米, 仏, 加, 西独, 日, 豪より16社で構成

(注) は設立された法人, は作業実施主体

S-MnO₂などが検出されるが、一般に、構成物質のほとんどが非結晶であり、走査型電子顕微鏡を用いて検鏡した微細構造の一例を図-3に示したが、これらの写真に見られるように、非常によく整った成層部分があったり、ぶどうの房のように発達している部分があったり、不規則に発達している部分があったり、放射状に貫入している部分があったりで、層の発達は単純でない。これらの各積層の厚さは0.25μ~10μ、平均2~5μであることが観察されている。そして、積層の各層の接合面付近に、多種類の微量な成分が存在している。

化学成分^{4), 25)}—Mn, Feの水酸化物が卓越しているが、0~3%の範囲で含まれているNi, Co, Cuが資源価値を決定する。参考までに、これら主要成分の平均的含有率を表2に紹介した。

物理的性質⁴⁾—見掛け比重は通常1.8~3.0、真比重は2.0~3.7程度、多孔質で、含水率は20~40%。色は概して金属光沢のない黒色であるが、含有成分によって茶褐色がかかったものや青味がかかったものもある。硬さはモースの1~4程度、乾燥すると硬くなり、ま

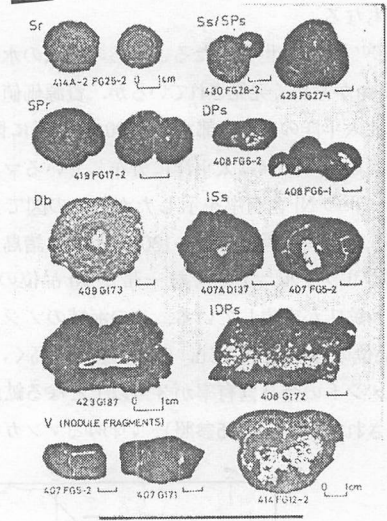


図-1 マンガンノジュール（北太平洋）の断面

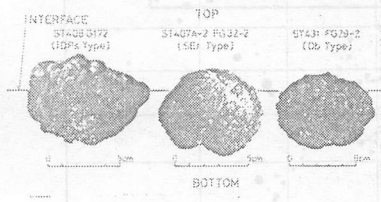


図-2 マンガンノジュール（北太平洋）の外観

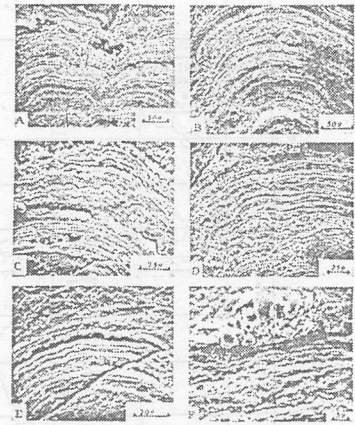


図-3 マンガンノジュールの微細構造のSEM写真の例

表2 各海洋産マンガン団塊の代表的化学成分

地域別 化学成分	太平洋											インド洋			大西洋	浅海産	南極海	北極海
	中央太平洋海山域	バハカリフォルニア海山域	バハカリフォルニア大陸縁地域	南東部	南部	南西部	中央	北東部	北部	北西部	西部	東部						
Mn	13.96	15.85	33.98	19.81	16.61	16.87	15.71	22.33	16.98	13.26	13.56	15.83	16.3	6.6	11.06	6.6		
Fe	13.10	12.22	1.62	10.20	13.92	13.30	9.06	9.44	10.95	13.43	15.75	11.31	17.5	26.4	15.52	26.6		
Ni	0.393	0.348	0.096	0.961	0.433	0.564	0.956	1.080	0.463	0.330	0.322	0.512	0.42	0.022	0.31	0.02		
Co	1.127	0.514	0.0075	0.164	0.595	0.395	0.213	0.192	0.195	0.303	0.358	0.153	0.31	0.009	0.20	0.01		
Cu	0.061	0.077	0.065	0.311	0.185	0.393	0.711	0.627	0.348	0.193	0.102	0.330	0.20	0.004	0.17	0.01		
Pb	0.174	0.085	0.006	0.030	0.073	0.034	0.049	0.028	0.106	0.113	0.061	0.034	0.10	0.003	0.05	0.00		
Ba	0.274	0.306	0.138	0.145	0.230	0.152	0.155	0.381	0.410	0.373	0.146	0.155	0.17	0.14	0.11	0.14		
Mo	0.042	0.040	0.069	0.037	0.035	0.037	0.041	0.047	0.029	0.026	0.029	0.031	0.035	0.006	—	—		
V	0.054	0.065	0.030	0.031	0.050	0.044	0.036	0.041	n.d.	n.d.	0.051	0.010	0.07	0.012	—	—		
Cr	0.0011	0.0051	0.0019	0.0005	0.0007	0.0007	0.0012	0.0007	n.d.	n.d.	0.0020	0.0009	0.002	0.002	—	—		
Ti	0.773	0.489	0.061	0.467	1.007	0.810	0.561	0.425	0.475	0.460	0.820	0.582	0.8	0.20	0.57	0.20		
lg. loss	30.87	24.78	21.96	27.21	28.73	25.50	22.12	24.75	14.73	18.56	25.89	27.18	23.8	17.1	—	—		
水深 (m)	1,757	1,146	3,003	4,324	3,539	5,001	5,049	4,537	5,048	4,623	3,793	5,046	n.d.	—	n.d.	n.d.		

た脆くもなる。

分布^{26)・27)}——世界いたるところの海域の水深1～数1000 mから広く発見されているが、資源価値の高いものは北太平洋のごく一部水深3500 m以深に限られるようである。図-4に太平洋に分布しているマンガンノジュールのNi含有率を示したが、この図で太線で囲んだ5°～25°、西経110°～180°のハワイ諸島、タヒチ、南カリフォルニアを含む一帯がNi品位の高いノジュール鉱床が密集している。この海域のノジュールはNi品位のみならず、Cu、Co含有率も高く、これらエレメントの合計含有率が3%以上となる鉱床が多く発見されている(図-5参照)。いわゆるマンガン銀座

と呼ばれている海域である。

垂直方向の分布は、中には堆積層中に埋没しているものも発見されるが、大部分は下半分が堆積層中に埋まり、上半分が海底面上に出ている状態で賦存している。

濃集度は、分布面積密度で0～50%以上、あるいは0～25 kg/m²以上と広い範囲で変化しているが、稼行濃集度(商業的に採算のとれる濃集度)は10 kg/m²以上といわれている。

3.2 堆積層の物理的・工学的性質

北太平洋の深海底堆積物は、大雑端にみて、赤粘土、珪質軟泥および石灰質軟泥の3種類に大別されるが、

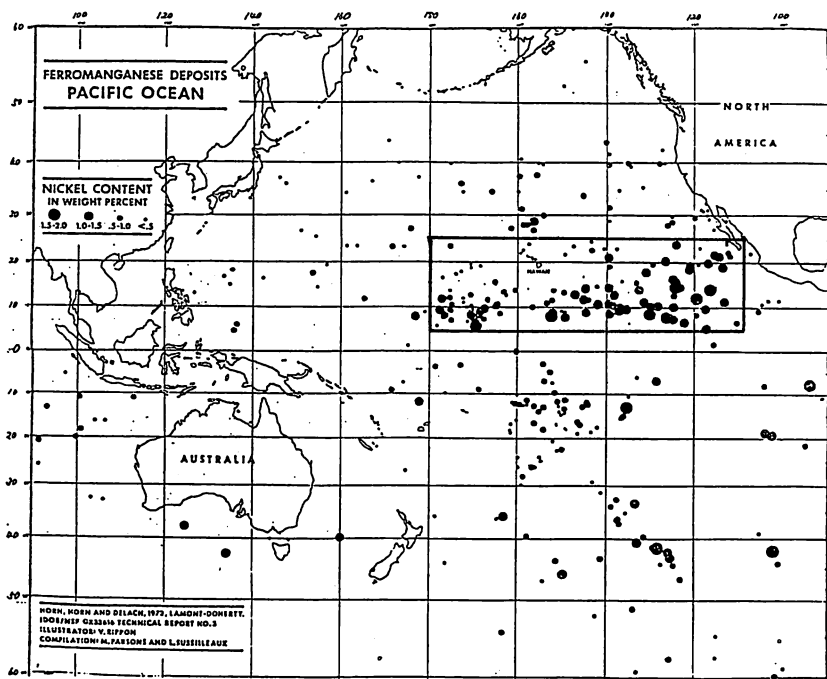


図-4 太平洋のマンガンノジュールのニッケル含有量

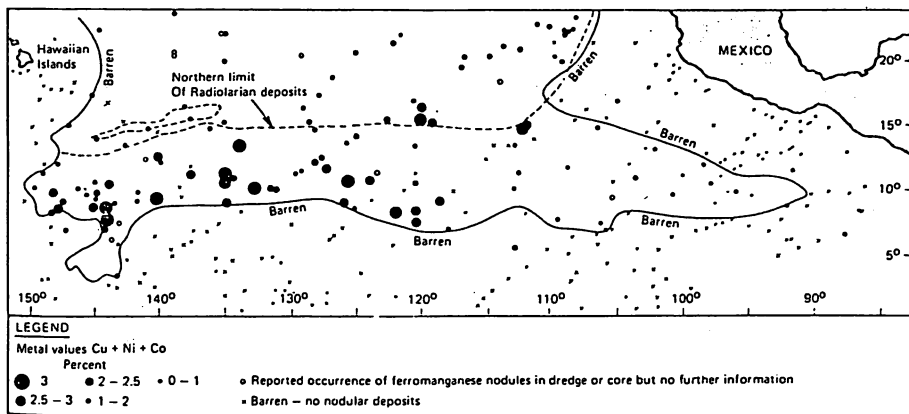


図-5 北太平洋東南海域のマンガン・ノジュール中の主要成分の濃度

マンガンノジュールは、一般に、前2者上に胚胎するが後者にはほとんど賦存していない。これらの堆積層の物理的、工学的性質は、種類により、場所によって著しく異なるが、とくに前2者と後者との差異は著しい。ちなみに、筆者らが測定した結果の一例を表3および図-6に示し²⁸⁾、参考に供したい。また、前2者には、砂の性質、粘土の性質、粘性流体の性質などが潜在しており、力のかけ方によって、いずれかの性質が強く現われるなど複雑な挙動をする。取扱い方によって強度に著しい差異を生ずるいわゆる力学的に鋭敏な性質を有している。ノジュールとの付着強度は5 g/cm²程度である。

4. 開発の概要

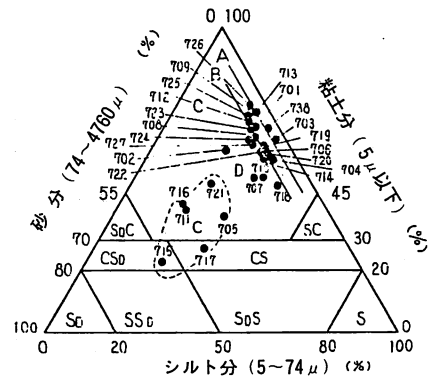
これまでの調査結果をまとめると、深海底のマンガンノジュールの鉱床は長径2~6 cmの大きさの“豆炭”形の鉱塊が下半分が軟かい堆積土の中に埋まり、上半分が海底面上に顔を出した状態で露出し、斑点状に単層で分布していると考えてよい。このようなマンガンノジュールを生産、利用するためには、探査一採鉱一輸送一処理の過程を踏まなければならない。

探査には、広域にわたって、高速度、高精度で走査し、マンガンノジュールの分布密度を測定する間接探査法と所要所において、ボックスコアラにより底質ともども不攪乱試料を採取する直接探査法が、また必要に応じて、ノジュールのみを採取するフリーフォールグラブサンプラ、同カメラ、大型バケットなどが用いられている。わが国においては、NNSS 船位測定装置、サブボトムプロファイラ、ナロービームサウンド、多周波超音波探査システム、深海用高速度テレビシステムなど最新装置を搭載した探査専用船“第2白嶺丸”の完成²⁴⁾とこれを年間250日就航させる探査体制の確立、過去10年間にわたる地質調査所を公害資源研究所による調査実績などにより、探査技術はほぼ確立したとみてよい。

採鉱は主として、海底面上のマンガンノジュールを集める作業(集鉱)、集めたノジュールを海底から洋上の採掘船まで移動させる作業(揚鉱)、洋上で簡単な処理と一時的に貯鉱する作業および採鉱現場から陸上の処理プラントまでノジュールを運搬する作業(輸送)の順に実施される。洋上に処理プラントを設置してほとんどの処理を洋上で行なう方法が考えられるが、大容量のエネルギーの供給など多くの問題があり、いまのところ、処理は陸上でという考え方が一般的である。

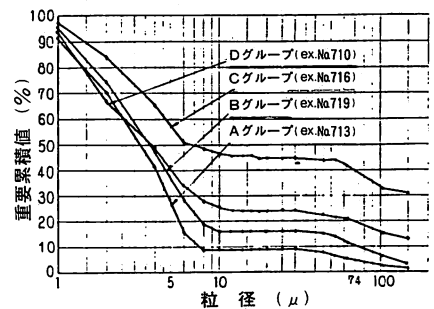
表3 深海底堆積土の物理的、工学的性質

	深海粘土			珪質軟泥			石灰質軟泥		
	最大	最小	平均	最大	最小	平均	最大	最小	平均
真比重	2.92	2.78	2.85	2.65	2.51	2.57	2.86	2.70	2.76
バルク密度(g/cm ³)	1.36	1.12	1.26	1.26	1.13	1.17	1.51	1.28	1.39
自然含水比(%)	393	145	229.5	503	261	378.4	213	96	141.0
液性限界(%)	195	110	145.0	248	130	181.8	139	57	89.8
塑性限界(%)	102	33	59.0	114	63	92	54	31	45.0
ペーンせん断強度(g/cm ²)	55.5	8.3	30.0	58.7	6.0	29.8	62.0	21.2	37.2
コーン貫入抵抗(g/cm ²)	459	81	279.7	558	72	310.5	918	211	422



C: 粘土 SC: シルト質粘土 S_pC: 砂質粘土
CS: 粘土質シルト CS_p: 粘土質砂 S: シルト
S_pS: 砂質シルト SS_p: シルト砂質 S_p: 砂

(a) 三角座標による粒度分布図



(b) 粒径加積曲線のパターン

図-6 深海底堆積土の粒度分布

採鉱が経済的に成り立つためには、i) マンガンノジュールの品位が稼行品位以上であること、ii) マンガンノジュールの分布密度が高く、一定量を定常的に供給できること、そして iii) 採鉱技術が優れていることが要求される。採鉱システムには前述したように集鉱システム、揚鉱システム、海上作業システム、海中機器ハンドリングシステム、計測システムなどのサ

ブシステムが含まれており、これらのサブシステムが総合されて1つのトータルシステムが構成されるが、海底採掘ベンチャーの成功はそれぞれのサブシステムの成功にかかっており、どの1つも欠かせない。中でも、第1、第2の集鉱システムと揚鉱システムは採鉱の成否を決定する重要な鍵となるため、各企業における研究は主としてこの2点に集中されており、種々の発明、特許、ノウハウが生まれている^{30)~37)}。集鉱に用いられる基本的な先端機器類 (mining heads) として、バケット (bucket)、ローラー (roller)、スパイラル (spiral)、スイープアーム (sweep arm)、ギャザリングアーム (gathering arm) などが考えられ、揚鉱には、CLB (continuous line bucket)、エアリフトポンプ (air lift pump)、水中ポンプ (under water pump)、浮揚ホッパー (buoyant ore hopper)、潜水艇 (submersible vehicle) などが考えられる。洋上では、採掘船の他鉱石運搬船が用意され、年間を通じて切れ目のない採鉱作業ができるようにしなければならない。

これまでに提案されている採掘方法やそれに用いられる機器の種類は相当数にのぼっており、すでにその多くが紹介されている^{38)~46)}。しかし、経済的な観点からみると、今のところ、実現性のある方法は僅かに水力方式とCLB方式の2通りに限定されるようである。本誌では紙数の制限から、これまでに発表されている

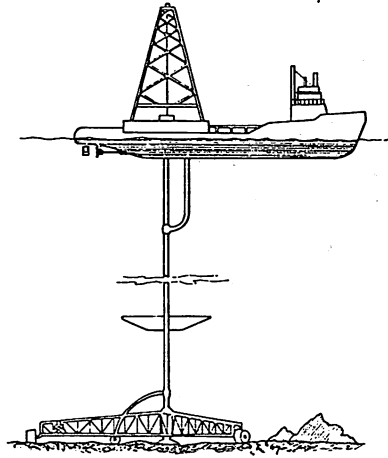


図-8 Kootらのマンガン・ノジュール採掘システム

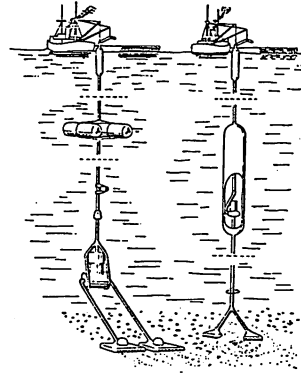


図-9 Meroの流体ドレッジ

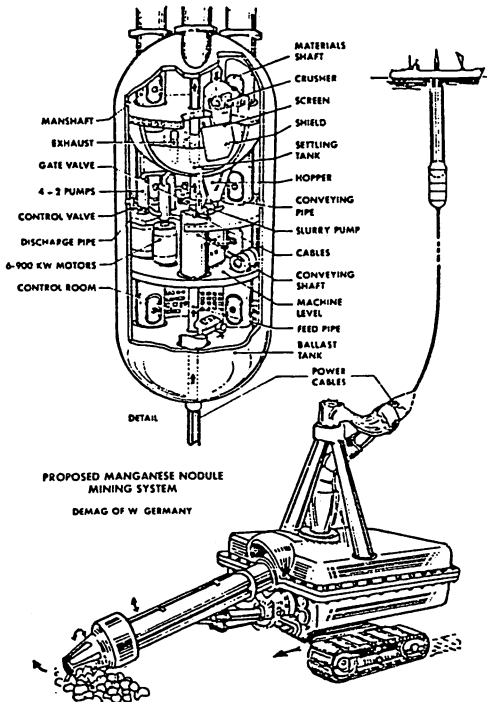


図-7 Demagのマンガン・ノジュール採掘システム

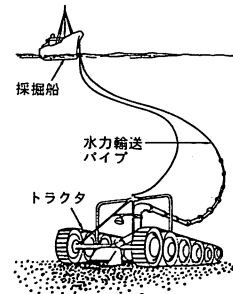


図-10 深海底採掘トラクター

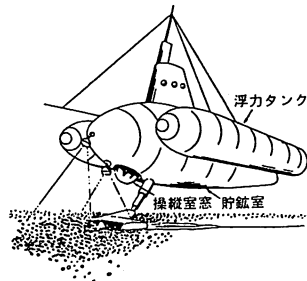


図-11 潜水式採掘ビークル

表5 ノジュール開発の操業コスト 10⁶st/年規模 (S/st)

発表者	Sorensen & Mead	Dorste-Witz	Mero (CLB)	Mero (水力式)	Drechsler	Drechsler	Clauss	Deepsea Ventures	Monterieff Smale-Adams	Dubs
発表年	1968	1971	1972	1972	1972	1972	1972	1973	1974	1974
採 鉱		10.5			4.25	4.25	8.6			5~10
水力式	9.20			10				20.5~25		
C L B			2							
輸 送	5.80	9.0	4	4	3	3	6.2			4~7
処 理	25.0	50.5	10	20	15	30		34.5~50		10~15
雑		2.4	2.3	5.3	7	7				
合 計	40	72.4	18.3	39.3	29.25	44.25	14.8	55 ~75	31.82	19~32

果は非常に異なり、判断するのが至難である。ちなみに、資本金および操業コストを表4および表5に示した。紙数の制約があったとはいえ、書き終えてみて、概要のまた概要になるような綴り方になってしまった。とくに、肝腎の採鉱の具体的なデータの欠除はいかにも物足りない。しかし、わが国でも、来年度から通産省の大型プロジェクトが開始される見通しが濃くなるなど、ようやくマンガン・ノジュールの開発に本腰を入れて取り組む機運が高まってきたことは真に喜ばしいことである。

8. おわりに

一読しておわりのように、深海底のマンガンノジュールはもはや潜在資源ではなく、立派な鉱物資源であること、そして現在の技術で、ともかくも5000 mの深海底からマンガンノジュールを揚げるができることを知っていただけたと思う。今後は技術を向上させ、経済的に採算がとれるためにはどうすればよいのか、どんなことがわかり、どんなことがわからないのかをよく見極めた上で技術改革と取り組む必要がある。これを支えるために、より一層の研究者の層を厚くすることが必要であろう。多くの方々の参加を呼びかけたい。

参考文献

- 1) 伊藤福夫, "第3次国連海洋法会議再開第9会期の成果", 日本鉱業会誌, Vol.96, No1113, p.26, 1980.
- 2) 伊藤福夫, "マンガン・ノジュールの大プロジェクト", 日本鉱業会誌, Vol.96, No1109, p.28, 1980
- 3) 伊藤福夫, "深海底のマンガンノジュールの国際企業グループ", 日本鉱業会誌, Vol.93, No1073, p.513, 1977
- 4) 堀田敦史, "第12回金属の電解製錬に関する談話会—マンガンノジュールの開発と処理", 予稿集p.3, 昭和55年8月
- 5) 深海底鉱物資源開発協会, "海底鉱物資源の開発—国際コンソーシアムの活動現況", DOMA ニュース, No20, p.5~

- 15, 1981
- 6) 伊藤福夫, "フランスのマンガンノジュール開発の現状(その1)", 日本鉱業会誌, Vol.96, No1110, p.40, 1980
- 7) 伊藤福夫, "フランスのマンガンノジュール開発の現状(その2)", 日本鉱業会誌, Vol.96, No1111, p.60, 1980
- 8) 伊藤福夫, "深海底マンガンノジュール開発のわが国の企業グループ(1)—DOMCO", 日本鉱業会誌, Vol.93, No1077, p.910, 1977
- 9) GSJ, "Deep Sea Mineral Resources Investigation in the Central—Eastern Part of Central Pacific Basin", GH76—1 Cruise Report, p.142~143, 1977
- 10) J. L. Mero, "Deep—sea floor", The Mineral Resources of the Sea, Elsevier Publishing Co., 1965, pp.103~241
- 11) Geoffrey P. Glasby, "Manganese deposits in the southeast Pacific", Inter University Program of Research on Ferromanganese Deposits of the Ocean Floor, Phase 1 Rep., Apr. 1973, pp.137~170
- 12) H. W. Menard, "Marine geology of the Pacific", McGraw Hill, 1964
- 13) Ronald K. Soren, "Mineralogical, chemical, and optical procedures and standards for study of growth features and economic potential of manganese nodules", Inter—University Program of Research on Ferromanganese Deposits of the Ocean Floor, Phase 1 Rep., Apr., 1973, pp.23~38
- 14) Carr G. L., "Marine manganese nodules, identification and occurrence of minerals", M. S. Thesis, Washington State Univ., Pullman, Wash., 1970, p.101
- 15) Foster A. R., "Marine manganese nodules, nature and origin of internal features" M. S. Thesis, Washington State Univ., Pullman, Wash., 1970, p.131
- 16) Friedrich G., B. Rosner and S. Demirsoy, "Erzmikroskopische und mikroanalytische Untersuchungen an Manganerz Koncretionen aus den pazifischen Ozean", Mineral. Deposita, Ht. 4, 1969, pp.298~307
- 17) Glasby G. P., "The mineralogy of manganese from a range of marine environments", Marine Geol., Vol.13, 1972, pp.57~72
- 18) Heady H. H., "Collection and analysis of marine manganese nodules", U. S. Bureau of Mines, Open File Rep-

- ort, 1967, p. 30
- 19) Burns, R. G. and D. W. Fuerstenau, "Electron probe determination of inter element relationships in manganese nodules," *Amer. Mineral.*, Vol. 51, 1966, pp. 895~902
 - 20) Cronan D. S. and J. S. Tooms, "Amicroscopic and electron probe investigation of manganese nodules from the northwest Indian Ocean", *Deep—Sea Res.*, Vol. 15, 1968, pp. 215~223
 - 21) Gager H. M., "Mössbauer spectra of deep—sea iron—manganese nodules", *Nature*, No. 220, 1968, pp. 1021~1023
 - 22) Johnson C. E. and G. P. Glasby, "Mössbauer effect determination of particle size in microcrystalline iron—manganese nodules", *Nature*, No. 222, 1969, pp. 376~377
 - 23) Andrushchenko P. F. and N. S. Skornyakova, "The textures and mineral composition of iron—manganese concretions from the southern part of the Pacific Ocean", *Oceanology: USSR*, Vol. 9, No. 2, 1969, pp. 229~242
 - 24) Stanley V. Margolis and Geoffrey P. Glasby, "Microlaminations in marine manganese nodules as revealed by scanning electron microscopy", *Inter—Univ. Program of Research on Ferromanganese Deposits of the Ocean Floor, Phase 1 Rep.*, 1973, pp. 77~83
 - 25) J. L. Mero, "Chemical Composition of Manganese nodules," *The Mineral Resources of the Sea*, p. 178~241, 1965
 - 26) Horn, D. R., Horn, B. M. and Delach, M. N. (1973): *Metal Content of Ferromanganese Deposits of the Oceans: NSF/IDOE Technical Report No 3, GX—33616*
 - 27) Horn, D. R., Horn, B. M. and Delach, M. N. (1973): *Copper and Nickel Content of Ocean Ferromanganese Deposits and their Relation to Properties of the Substrate; Papers on the Origin and Distribution of Manganese Nodules in the Pacific and Prospects for Exploration*, p. 77~84
 - 28) 伊藤福夫, 鶴崎克也, "深海底堆積土の諸性質とそれらの相関性に関する 2, 3 の考察", *採鉱と保安*, Vol. 25, No. 1, 昭和 54 年 1 月, p. 10~16
 - 29) 伊藤福夫, "深海底鉱物資源探査専用船「第 2 白嶺丸」竣工す", *日本鉱業会誌*, Vol. 96, No. 1108, p. 40, 1980
 - 30) Gardner P. S., Patent, May 1966
 - 31) J. Ball, U. S. Patent 3310894, Mar. 1967
 - 32) N. Koot et. al., U. S. Patent 3433531, Mar. 1969
 - 33) J. R. Graham et. al., U. U. Patent 3456371, Jul. 1969
 - 34) G. W. Sheary et. al., U. S. Patent 3480326, Nov. 1969
 - 35) A. J. Nelson, U. S. Patent 349062,
 - 36) T. E. Steel et. al., U. S. Patent 3504943, 1970
 - 37) B. J. Thorn et. al., U. S. Patent 3588174, Jun. 1971
 - 38) J. L. Mero, "Minerals on the ocean floor", *Scientific American*, Vol. 203, No. 6, 1960, pp. 64~72
 - 39) Lockwood G. S., "Engineering as acts of mineral recovery from the ocean floor", *Mining Eng.*, Vol. 16, No. 8, 1964, pp. 45~49
 - 40) Wojciechowski B. W., "The technology and economics of mining marine manganese nodules", *Oceanology International* 72, 1972
 - 41) Cruickshank M. J., "Mining, Undersea," *Encyclopedia of Science and Technology*, Mc Graw—Hill, 1971
 - 42) Masuda Y. et. al., "Continuous bucketline dredging at 12000 feet", *Preprint, OTC 1410*, 1971
 - 43) J. L. Mero, "Ocean mining is alive and well and living at Sea", *Preprint, OTC 1362*, 1971
 - 44) Kaufman R. et. al., "Recent development in deep ocean mining", *6 th Annual Preprints, Marine Technology Society*, 1970
 - 45) Niblock R. W., "Offshore mining system unveiled at OTC meeting", *Undersea Technology*, June, 1969
 - 46) Lecour E. J. et. al., "Deep ocean mining—new application for oil field and marine equipment", *Preprint, OTC 1412*, 1971
 - 47) 伊藤福夫, "マンガンノジュールの採掘—海上輸送は大きな問題", *日本鉱業会誌*, Vol. 94, No. 1086, p. 548, 1978
 - 48) 伊藤福夫, "マンガンノジュールの採鉱", *第 12 回金属の電解製錬に関する談話会予稿集*, p. 2—11, 1980
 - 49) Sorokin Y. I., "Population, activity and production of bacteria in bottom sediments of the Central Pacific", *Oceanograph*, No. 6, 1970, pp. 853~863
 - 50) Mero J. L., "The Mineral Resources of the Sea", *Elsevier Pub. Co.*, 1964, pp. 127, 225~230, 262~267
 - 51) Sorenson P. E. & Mead. W. J., "A Cost Benefit Analysis of Ocean Mineral Resources Development: The Cost of Manganese Nodules", *Amer. J. of Agricultural Economics*, Dec. 1968
 - 52) Swan D. A., "The potential of manganese nodules as a future mineral resources", *SNAME, Marine Technology*, 1974, pp. 9~18
 - 53) Drechsler H. D. "Exploration of the sea: A preliminary cost—benefit analysis of nodule mining and processing", *Mart. Stud.*, Vol. 1, 1973, pp. 53~66
 - 54) Kaufman R. & Rothstein A., *Mining Eng.*, 1974
 - 55) Francois J. L. and Leslie F. M., "Computer model predicts acceptable risk for commercial nodule mining projects", *E/MJ*, Jul., 1974, pp. 53~59

