論文 コバルトリッチマンガン鉱床開発システムの経済性評価*

朴 洗 憲¹ 岡 屋 克 則² 島 田 莊 平³

Economic Evaluation of the Development System of Cobalt-Rich Manganese Deposit

by Sehun PARK^a, Katsunori OKAYA^b and Sohei SHIMADA^c

- a. Graduate Student (Dr. Course), Department of Geosystem Engineering, Graduate School of Engineering, The University of Tokyo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8656, Japan
- b. Research Associate, Department of Geosystem Engineering, Graduate School of Engineering, The University of Tokyo
- c. Associate Prof., Dr., Institute of Environmental Studies, Graduate School of Frontier Sciences, The University of Tokyo

Cobalt-rich manganese deposit (CRMD) have a significant advantage of developing projects, when they can be separated the metal-bearing crust from the accompanying rocks by introducing the mineral processing. Using the mineral processing experimental data given by the Deep Ocean Minerals Association (DOMA), the authors evaluated the cost of the total system for CRMD development.

We tried to elaborate an economic improvement in considering influences upon the system combination and the apatite / basalt ratio contained in basement rocks. Comparing further the respective economic evaluation, we could obtain the profit and loss curve for a promising CRMD condition.

As a result, an optimized development method was proposed as follows: it was to use robotic miner for mining, gravity concentration for mineral processing and smelting and chlorine leaching process for metallurgical process in the Co : 0.41 %, Ni : 0.35 %, Mn : 14 %, Cu : 0.07 % overgrade basaltic sites.

KEY WORDS : Cobalt-rich Manganese Deposit, Development System, Economic Evaluation, Profit and Loss Curve, Mineral Processing

1. は じ め に

コバルトリッチマンガン鉱床 (Cobalt-Rich Manganese Deposit, 以下 CRMD) は、選鉱処理により Mn 相を主体とするクラスト部と採鉱時に混入する海底玄武岩を主体とする母岩部との分離が可能である。採鉱の対象はあくまでクラスト部分であるが、コバルトリッチクラスト (Cobalt-Rich Crust, 以下 CRC) は海山斜面の基盤岩上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鉱することは現在技術上極めて困難で、揚鉱された CRC に基盤岩を伴うことは避けられない。マンガン団塊にはない CRC 特有の事項として、このような基盤岩を伴う CRC から脈石部を除去する前処理によってクラスト部分のみを選別・回収し、次段の製錬工程に向けることの有効性を検討する必要がある。

本研究では、平成 8, 9 年度に深海底鉱物資源開発協会が実施したコバルトリッチマンガン鉱床の選鉱技術に関する試験データ¹⁾²⁾を利用して、CRMD 開発システムの経済性を選鉱処理システムの違いに主眼をおいて評価した。現状では経済性を評価するための基本的な情報も十分ではないため、コストの絶対額よりシステム

間の相対的な比較を通じ、最も有効な開発システムを検討した。採鉱・選鉱・製錬のシステム全体を、いくつかのサブシステムの組み合わせを変え、経済性を比較・検討し、基盤岩を伴うという CRMD 開発システムに特有な影響について検討、考察し、有望鉱床の必要条件、採鉱方式に要求される性能などを論じることとした。

本論文では、脈石混入率の多少による差異、開発システム構成の変更、多段処理、両脈石の含有割合による経済性の影響を考慮し、有望鉱床の最適条件を構築し、将来的な CRMD 開発システム設計の判断基準として役立てることを研究目的とした。

2. CRMD 開発システムのコスト

今回のコスト計算を行うに当たっては、為替レートは過去 5 年間の平均値を計算し、1\$ = 110 円とした。なお、経済評価の基準は、1995 年とし、参考とした資料がこれより古い場合には、一律 2.4 % / 年のインフレ率によって各単価を補正して用いた。ただし、開発直前の調査費用や設備費算定におけるインフラに関する費用は含まれていない。また、ディスカウントレートは、考慮していない。

2・1 原価要素の設定

原価要素の設定方法は文献³⁾より引用し、計算した。

1) **変動費** 計画した設備が必要とする各運転コストとして操業資材、エネルギー費等を考慮した。

2) **減価償却費** 開発システムの有形減価償却は、定額法によるものとし、採鉱船・選鉱船はプラントコスト計算により、耐

* 2000 年 5 月 11 日受付 12 月 25 日受理 資源・素材学会平成 12 年度春季大会において一部発表

1. 学生会員 東京大学大学院生(博士後期課程) 工学系研究科地球システム工学専攻

2. 正会員 東京大学大学院助手 工学系研究科地球システム工学専攻

3. 正会員 工博 東京大学大学院助教授 新領域創成科学研究科環境学専攻

[著者連絡先] FAX 03-3818-7492 (東大・工・地球システム)

E-mail : park@join.t.u-tokyo.ac.jp

キーワード : コバルトリッチマンガン鉱床, 開発システム, 経済性評価, 採算曲線, 選鉱処理

表 1 コバルトリッチマンガン鉱床開発システムの方法と操作条件

方法	採鉱システム		船上選鉱プロセス		製錬システム	
	流体ドレッジ方式 連続ライバケット方式		選択破砕、比重選別 磁力選別、浮遊選別		焙焼硫化塩素浸出法 亜硫酸ナトリウム浸出法	
操業条件	掘削量 120 万 t/年 (5,000 t/日)		選鉱量 90 万 t/年 (3,700 t/日)		製錬量 70 万 t/年 (2,400 t/日)	
	操業日数 240 日/年		操業日数 240 日/年		操業日数 305 日/年	

表 2 コバルトリッチマンガン鉱床開発システムのコスト

項目	採鉱システム	選鉱プロセス	輸送システム	製錬システム
キャピタルコスト (億円)	234.3	150.9	106.7	565.2
運転コスト (円/t)	12,473	3,916	720	36,370

用年数 16 年，定額法年率 0.062 とし，付帯設備は海上作業による塩分の影響を考え，耐用年数 15 年，定額法年率 0.066 とし計算した。製錬システムは「銅，鉛または亜鉛製錬設備」に相当するものとし耐用年数 9 年，定額法年率 0.111 とし計算を行った。

3) 損害保険料 概略の計画設計によく使われるように製造設備，付帯設備合計額の 0.6% とした。

4) 修繕費 通常の石油化学プラントの計画設計で 사용되는ように製造設備投資額の 3% とした。

5) 人件費 採鉱・選鉱システムに関する労務コストは操業条件に合わせ，文献中の US\$ 表示に現在の為替レートを乗じて計算した。また，製錬システムに関しては文献中からプロセスの運転に必要な労務種別を推定し，現在の時給や為替レートを乗じて得たものを計算した。

6) 運転用消耗品費等の雑費 プラントコストの計画設計によく使われるように製造設備投資額の 1% とした。

2・2 開発システムのコストと評価基準

今回の開発システムの基準システムとしては，流体ドレッジ方式，船上選鉱処理，焙焼硫化塩素浸出法を想定し，これと異なる採鉱方式，製錬法との間ではシステム間の相対的な比較を通じ，経済性を検討した。また，選鉱については，マンガン団塊の処理方法である原鉱直接処理との経済性を比較するとともに，陸上選鉱，海底選鉱という選鉱実施場所のほか，各種選鉱方法単独あるいは組み合わせについても比較，検討した。開発システムの方法と操業条件を表 1 のようにまとめた。

基準システムのキャピタルコストについては，後述するように採鉱システム（採鉱船と採鉱装置）が 234 億円かかり，全体の開発システムの 25% を占めた。また，選鉱システム（選鉱船と複合選鉱装置）が 151 億円で 16% であり，製錬システムは 565 億円で 59% を占める結果になった。

運転コストは，原価要素について操業資材，エネルギー費，減価償却費，損害保険料，修繕費，人件費，運転用消耗品費等の雑費を経済性評価に算入し，下記に示したように採鉱コストが 1 t 当たり 12,470 円で全体の 23% であり，選鉱コストが 3,900 円で 7.6% である。また，輸送コストが 1 t 当たり 720 円で 1.4% であり，製錬コストは 36,400 円で全体の 68% の割合となった。以上の結果を表 2 と図 1，2 に示した。

経済性評価基準は，利益 (N) で，次のように表せる⁴⁾。

$$N = v[\alpha(P - \pi)(c - \beta) / 100 - K - F \pm Z] - D - M$$

α : 製錬所の販売価格と仕入れ価格の割合

π : 金属取り引き価格により発生するコストの控除分

β : 製錬する際の金属損失による控除分 (パーセント)

P : 単位重量当たりの金属価格

v : 歩留まり

c : 精鉱金属品位 (パーセント)

F : 製錬場までの輸送費

図 1 CRMD 開発システムのコストの割合

図 2 CRMD 採鉱・製錬システムの運転コストの内訳

Z: 基準品位からの品位変動に対するプレミアムおよびペナルティ

M: 採鉱費 D: 選鉱費 K: 製錬費

2・3 採鉱システム

採鉱システムでは，一般的には流体ドレッジ方式は大規模採鉱，連続ラインバケット方式 (CLB と略記) は小規模採鉱に適すると考えられている。このため，全体的な開発システムの検討を行う本研究では，大規模採鉱に適し，詳細な検討データも公表されている流体ドレッジ方式を基準システムとし，経済性を評価することにした。また，研究が進んでいる CLB 方式についてもコストを計算し，比較することにした。

採鉱方式による採取効率，分離効率，脈石混入率などが経済性評価に重要な要因になるが，今回の経済性評価のベースとなる，採鉱システムの操業条件は掘削量 120 万 t/年 (水分率 49%，脈石混入率 20～40%)，操業日数 240 日の 1 日 5,000 t 規模を計画し，海底の採取効率を 80%，集鉱された鉱物の分離供給装置による供給効率を 95%，Dewatering 効率を 98% と仮定した⁵⁾。

CRMD 採鉱システムの経済性の検討は，ほとんど行われていないが，採鉱システムのコスト内訳は，1987 年に Department of the Interior Minerals Management Service と State of Hawaii Department of Planning and Economic Development が，年間製錬処理量 70 万 t

表3 採鉱システムのコスト内訳 (流体ドレッジ方式)

項目	価格 (億円/年)
キャピタルコスト	234.3
採鉱船	106.7
装備	127.6
運転コスト	61.07
燃料	6.08
償却費	15.00
保険料	3.47
修繕	25.45
人件費	9.32
雑費	1.75

とし、流体ドレッジ方式 (Halkyard 方式) による採鉱コストを概算した内容を、採鉱システムの調査研究報告書⁶⁾⁷⁾より減価償却費を加え、表3のようにまとめた。

流体ドレッジ方式の運転コストは減価償却費を含めて61.1億円/年と概算できる (一般管理費は含まず)。これらの概算は、1 t 当たり 1 万 2,470 円となる。

一方、連続ラインバケット方式については CRMD 開発に関するキャピタルコストの情報がなく、今回の経済性評価においてキャピタルコストの変動による影響が大きくないため、同操業条件の流体ドレッジ方式と変わらないと仮定し、減価償却費を計算した。また、運転コストは Masuda, Y. と Cruickshank, M. J. が 1993 年に発表した文献⁸⁾によるとマーシャル諸島で年間 88,000 t 生産量として、採鉱部門の運転コスト 11.9 億円/年との概算があり、これに減価償却費をいれ、1 t 当たり 1 万 4,600 円となる。

2・4 選鉱プロセス

選鉱プロセスの有効性は、基盤岩を伴う CRC から脈石部を除去する前処理によってクラスト部分のみを選別・回収し、次段の製錬工程に向けることである。選鉱実施場所においては陸上、船上、海底 (後述) を想定することができるが、例えば、船上で選鉱処理しようとする、尾鉱を海洋にダンプングすることで、輸送費節減と濃縮による製錬費節減が見込まれるが、同時に選鉱コストの付加や有価金属の損失などが発生する。そのため、選択破碎、比重選別、磁力選別、浮遊選別およびその組み合わせによる選鉱歩留まりや精鉱品位の比較・検討から経済性において最適な選鉱処理方法を選択することにした。最適な選鉱処理方法を選出するに当たり、次のような CRMD の分離特性を考慮した。

1) 有用金属成分に着目すると、Co, Ni が Mn とほぼ同じ挙動を示し、産地にかかわらず Co, Ni が一定の割合で Mn 相中に含まれ、Co, Ni, Cu 等の有用金属の品位は Mn, Fe の品位と相関が認められる¹⁾。

2) 採鉱された CRMD の黒色部以外の部分 (灰色部、乳白色部) にはほとんど有用成分を含有していない。したがって、CRMD の有用金属含有量の差は脈石の混入が原因である²⁾。

選鉱プロセスに及ぼす影響は、種々の要因が存在するが、今回の研究では、脈石混入の多少による有用金属含有量の差やリン灰石と玄武岩の含有割合による選鉱処理結果を中心に、CRMD からの有価金属回収の経済性に及ぼす影響について検討した。

経済性評価のベースとなる選鉱プロセスの操業条件は、年 90 万 t (=120 万 t × 0.8 × 0.95 × 0.98)、操業日数 240 日の 1 日 3,750 t 規模の選鉱量を設定した。

1) キャピタルコスト プラント建設費の積算法には、個別積算法、単価法、比率法および指数法などがあり、それぞれの方法には長所短所があるが、選鉱プロセスについて建設費の見積もりは、船上処理を想定しているため、容量に算術比例して変わることを見込み、コスト比率法を用いて、主要機器コストの合計値から Lang の係数をかけて計算した³⁾。選鉱処理に必要な主要機器コストは、コバルトリッチクラスト鉱床の選鉱技術に関する調

表4 選鉱プラントの建設費

(億円)	浮遊選鉱	磁力選鉱	比重選鉱	複合プラント*
主要機器コスト	8.28	8.02	5.29	9.82
建設費	37.29	36.09	23.82	44.21

(*複合プラントは比重選別、磁力選別、浮遊選別を備えたプラントである。)

表5 選鉱プロセスの運転コストの内訳

	磁力選別	浮遊選別	比重選別	複合プラント
運転費	消費電力 520 円/t	消費電力 500 円/t	消費電力 460 円/t	消費電力 930 円/t
	浮遊剤 120 円/t	浮遊剤 120 円/t	浮遊剤 120 円/t	浮遊剤 120 円/t
	償却費 1,000 円/t	償却費 1,008 円/t	償却費 910 円/t	償却費 1,059 円/t
	修繕費 476 円/t	修繕費 480 円/t	修繕費 435 円/t	修繕費 503 円/t
	保険料 95 円/t	保険料 96 円/t	保険料 87 円/t	保険料 100 円/t
	人件費 1,120 円/t	人件費 1,120 円/t	人件費 1,120 円/t	人件費 1,120 円/t
	その他 80 円/t	その他 80 円/t	その他 73 円/t	その他 84 円/t
	Total 3,291 円/t	Total 3,404 円/t	Total 3,084 円/t	Total 3,916 円/t

査研究報告書から引用し²⁾、表4のようになった。

プラント建設費 = 主要機器コストの合計値 × 係数 (L)

ただし、L は Lang の係数で、選鉱プラントの場合、4.2 ~ 4.7 程度の値となるが、ここでは一般に用いられる 4.5 とした³⁾。

2) 運転コスト 運転コストは、以下の諸設備を使用しているプラントの稼働データをもとに計算し、表5のようになった。運転コストの内訳中、消費電力についてのみ考えると、磁力選別の場合、設備電力は受入供給設備 (330 kWh)、一次破碎機 (ジョークラッシャ、574.1 kWh)、振動ふるい (133.4 kWh)、二次破碎機 (ロッドミル、786.3 kWh)、回転ふるい (6 mesh、319.7 kWh)、三次摩砕機 (ボールミル、1,391.5 kWh)、サイクロン (199.0 kWh)、高勾配磁気分離機 (175.5 kWh) である。その他の設備は、プラントの大きさが関係してくるものであり、156 t/h (=90 万 t/240/24 h) のプラントにおける1時間当たりの消費電力量として表す。エアーコンプレッサが 87 kWh、脱臭設備が 473 kWh、照明等が 1,050 kWh である。以上の消費電力量をすべて合計すると、このプラントにおける1時間当たりの消費電力量は約 5,520 kWh である。船上で発電機を動かして得る電力であることを考慮し、1 kWh 当たり 15 円として計算し、1 日の消費電力は 199 万円で 1 t 当たり 520 円となる。

2・5 海上輸送費

海上輸送はハワイ島およびマーシャル諸島の排他的経済水域 (EEZ) 内のものを対象とし、日本まで運搬することを想定した。20 万 t 規模の鉄鉱石をブラジルから運搬する場合、1 t 当たり 10 ~ 12 \$ かかる。ハワイ島およびマーシャル諸島の EEZ 内から日本まで約 1,200 海里程度であることを考慮し、1 t 当たりの輸送コストを 6 \$ と仮定し、保険料などを含め、1 t 当たり 720 円と概算できる。

2・6 製錬システム

CRMD 製錬プロセスの経済性の検討は、ほとんど行われていないので、マンガン団塊の処理プラントのコスト内訳を参考にし、CRMD の商業的な製錬システムに適用することにした。

実際の製錬システムの選定においては、他の浸出法との試験結果の比較から優位性が確認されている熔錬硫化塩素浸出法⁹⁾を選び、経済性評価を行った。熔錬硫化塩素浸出法は、熔錬硫化硫酸浸出法の改良法として、有価金属の浸出率が高く、浸出液からの金属の分離が容易であるが、塩素ガスを使用するので耐食性の材料を使用しなければならない問題点がある。有価金属の浸出率は Co : 92 %, Ni : 98 %, Mn : 95 %, Cu : 98 % と仮定した¹⁰⁾。また、開発システムにおいては製錬システムの影響が大きいため、キュプリオンアンモニア浸出法の改良法である亜硫酸アンモニア浸出法を選び、有価金属、特にコバルトの浸出率が高い同法の採用による影響を検討した。小島和浩¹⁰⁾による熔錬硫化塩素浸出法と亜硫酸アンモニウム浸出法の収益性の比較から、有価金属の浸出率は Co : 94 %, Ni : 98 %, Mn : 95 %, Cu : 98 % と仮定した。また、操業資材、エネルギー費に関しては熔錬硫化塩素浸出法が 240 百

万円/日、亜硫酸アンモニウム浸出法が354百万円/日であるため、1日6,000t規模の熔錬硫化塩素浸出法のコスト内訳を参考にし、亜硫酸アンモニウム浸出法のコストに換算して適用した。

製錬システムの製錬量は、比重選別(歩留まり75%)、磁力選別(歩留まり72%)、浮遊選別(歩留まり70%)などの各選別プロセスごとに差はあるが、平均70万t/年、操業日数305日の1日約2,400t規模の操業条件を想定した。

1) **キャピタルコスト** 熔錬硫化塩素浸出法の建設費の積算方法は、一般にプロセスプラントの機器の数量がかわらない場合、プラントおよび単一機器のコストはその容量に算術比例して変わるのではなく、指数比例によって変動するという特性を有するため、ここでは指数法を採用した¹¹⁾。

$$P_1 = P_2 \left(\frac{L_1}{L_2} \right)^n$$

ここに、 P_1 : 求めるプラントまたは機器のコスト、 P_2 : 既知のプラントまたは機器のコスト、 L_1 : 求めるプラントまたは機器の容量大きさ、 L_2 : 既知のプラントまたは機器の容量大きさ、 n : 定数(0.6~0.8)である。

深海底鉱物資源の有用金属の回収技術開発調査報告書⁹⁾によると、マンガン団塊の20t/日処理のパイロットプラントの建設費は47億円と報告されているが、今回の製錬システムにおいては、国内に多数設置されている浸出処理施設を改良して建設することを想定した。そこで、土地、発電や用水関係設備に関する費用は除外し、乾式・湿式処理設備、環境保護設備などの建設費用のみ求めることにし、全建設費を30億3,600万円と想定した。2,400t/日プラント建設費は537億円と見積もることができる。また、亜硫酸アンモニウム浸出法の建設費は、熔錬硫化塩素浸出法と同じものとして算定した。

$$2,400 \text{ t/日の建設費} = 30.36 \text{ 億円} \times \left(\frac{2400}{20} \right)^{0.6} = 536.80 \text{ 億円}$$

2) **運転コスト** 製錬システムの運転コストは、平成7年深海底鉱物資源の有用金属の回収技術開発調査報告書⁹⁾により1日6,000t規模の熔錬硫化塩素浸出法のコスト内訳に基づき計算し、表6のようになった。具体的な算出内容は次のように表せる。

(1) **減価償却費**: この商業プラントの有形減価償却は、簡便のため「銅、鉛または亜鉛製錬設備」に相当するものとし耐用年数9年、定額法年率0.111として計算を行った。すると、年間の減価償却費は5,958百万円である。操業日数305日で割ると、1日当たり1,953万円の減価償却となる。

(2) **操業資材費**: 深海底鉱物資源の有用金属の回収技術開発調査報告書⁹⁾によりコスト内訳を参考にした。生石灰、塩素、各種

表6 熔錬硫化塩素浸出法コスト概算(6,000t/日)

項 目	物 量	単 位	費 用
操業資材			
生石灰	521 t/日	15 円/kg	7,830 千円/日
けい砂	651 t/日	7 円/kg	4,560 千円/日
硫黄	55.5 t/日	30 円/kg	1,665 千円/日
NaOH	135 t/日	50 円/kg	6,750 千円/日
ソーダ灰	73.2 t/日	40 円/kg	2,930 千円/日
鉄分	555 t/日	12 円/kg	6,660 千円/日
塩素	72.9 t/日	35 円/kg	2,550 千円/日
酸素	103 t/日	32 円/Nm ³	3,300 千円/日
溶媒抽出剤			
TRP	0.93 m ³ /日	1,400 円/kg	1,300 千円/日
Kelex100	0.66 m ³ /日	25,000 円/kg	16,500 千円/日
TNOA	0.63 m ³ /日	3,500 円/kg	2,210 千円/日
ノニアルコール	0.33 m ³ /日	210 円/kg	69 千円/日
希釈剤	4.3 m ³ /日	50 円/kg	215 千円/日
活性炭	0.6 t/日	450 円/kg	270 千円/日
用水	120,000 m ³ /日	10 円/m ³	1,200 千円/日
合計			56,510 千円/日
エネルギー			
電力	5,748 Mwh/日	10 円/kwh	57,480 千円/日
重油	450 m ³ /日	15 円/l	6,750 千円/日
石灰	2,500 t/日	15 円/kg	37,500 千円/日
合計			101,730 千円/日

表7 主な金属の過去5年間の平均値

金属物	金属価格	為替(1\$=110円)
Co	65 \$/kg	7,150,000 円/t
Ni	8 \$/kg	880,000 円/t
Cu	\$/kg	319,000 円/t
Mn	\$/t	57,750 円/t

抽出剤や硫黄などの操業資材は、1日6,000t規模の処理に対して5,650万円という概算をそのまま用いると、1t当たりのコストは9,420円となる。

(3) **エネルギー費**: 同様にコスト内訳を参考にしたが、電力単価に関しては東京電力の工場用単価をベースにし、10円/kWhとして計算した。1日6,000t規模の処理に対して1億173万円というコスト概算値が得られ、1t当たりのコストは1万6,800円となる。

(4) **廃さい処理費**: コバルトリッチクラストの製錬に関して、米国のMMS(Minerals Management Service)と、ハワイ州のDPED(Department of Planning and Economic Development)が合同で報告している内容を深海底鉱物資源の有用金属の回収技術開発調査報告書⁹⁾より引用し、計算した。

年間70万tの処理精鉱に対して193万\$のコストがかかる。1\$=110円の為替を考えると、1t当たり300円と概算される。

(5) **労務費**: プラントに従事する労働力については、Charle River Associates Incorporatedの報告書¹²⁾より、その要点を抜粋した。操業労務、間接労務(安全)、管理監督、事務共通などで評価している方法に準じ、必要な労務量に現在の給料、為替レートを乗じ、CRMDの製錬規模で換算して適用した。合計3,024百万円/年、9,915千円/日となる。

(6) **金属価格**: 1t当たりの金属価格は、金属鉱業事業団の「ばなんざ」¹³⁾より過去5年間の平均値を計算し、経済性評価を行うことにした(表7)。

3. 経済性評価結果

3・1 脈石混入率

選鉱処理なしで揚鉱の全量を海上輸送し浸出製錬すれば、基盤岩の随伴量に応じて操業資材、エネルギー費などの処理コストが

図3 選鉱プロセスの違いによる経済性評価(脈石混入率28%のリン灰石主体)

図4 選鉱プロセスの違いによる経済性評価(脈石混入率40%の玄武岩主体)

増大する。そのため、売鉱価格は 38,011 円/t、処理コストは 50,770 円/t であり、全体的な利益は -12,759 円/t (損失) であった。しかし、揚鉱後、船上における選鉱処理を行えば、濃縮による輸送費節減と製錬費節減の効果が予想される。

まず、流体ドレージ方式と熔錬硫化塩素浸出法を用い、脈石混入率による経済性を評価すると、脈石混入率 28% (水分率 49%) のリン灰石主体の鉱物資源は Co : 0.39%, Ni : 0.37%, Mn : 15.8%, Cu : 0.074% の品位に対して、浮遊選別、磁力選別、比重選別の順に経済性が期待されるという結果になった (図 3)。ただし、現状より金属価格が 30% 上昇すれば、原鉱処理の方は処理コスト負担より有価金属の損失分がないため、売鉱価格が増大し、選択破碎による選鉱処理の方より経済性が改善された。また、処理コストが 30% 減少すれば、処理コスト負担からの節減効果が得られるため、経済性の順序が変わり、揚鉱の全量を浸出製錬する原鉱処理にも可能性があることがわかった。

一方、脈石混入率 40% (水分率 49%) の Co : 0.2%, Ni : 0.12%, Mn : 6.99%, Cu : 0.042% の品位に対し、玄武岩主体の鉱物資源による経済性を評価してみると、比重選別はクラスト部と玄武岩の比重の差による高い分離性が、そのまま経済性の面にも表れ、選鉱歩留まり (33%) はそれほど大きくないものの、処理コストが少ないため、他の選別より経済性が良いという結果が出た (図 4)。しかし、脈石混入率が多いため、種々の条件の変更によっても採算がとれないことがわかった。

3・2 開発システムの構成

品位を上げることにより輸送費と製錬費の節減効果が予想されるため、選鉱プロセスの多段処理の可能性を考えてみた。しかしながら今回の結果によると、同時に選鉱コスト増や有価金属損失が生ずるため、全体的な経済性は低くなることがわかった (図 5)。

また、開発システム組み合わせにより経済性が改善される可能性も検討した。採鉱システムは流体ドレージ式と CLB 式の場合を、

図 5 開発システム構成による経済性評価

図 6 海底・船上・陸上処理による経済性評価

図 7 両脈石の含有割合による経済性評価(収益限界)

製錬システムは熔錬硫化塩素浸出法と亜硫酸アンモニウム浸出法においてシステム変化による経済性を比較すると、採鉱システムは流体ドレージ式、製錬システムはエネルギー費が少ない熔錬硫化塩素浸出法の方が、CRMD 開発システムにおいて最も経済性が良いことがわかった。また、二段および三段の選鉱プロセスが、必ずしも経済的に有利であるとはいえず、現状より金属価格が 30% 上昇する場合には利益が見込まれることがわかった (図 5)。

さらに、選鉱実施場所の変化による経済性を検討するため、海底に選択破碎装置 (破碎機、サイクロン) を入れ、船上で選鉱処理を行う場合 (海底処理)、船上で選択破碎と選鉱処理を行う場合 (船上処理)、陸上で行う場合 (陸上処理) による経済性の違いをみた (図 6)。一日 5,000 t 規模の船上選鉱処理を基準とする場合、海底処理による開発システムでは揚鉱量の減少によりエネルギー費と人件費の節減効果があり、選鉱船をなくし、選鉱施設を採鉱船上に設置することができるため、キャピタルコストの節減効果が得られる。また、船上処理に比べ、陸上処理では選鉱船が不必要であるため、キャピタルコストが低く、エネルギー単価が安いものの、輸送費、廃さい処理費などの操業費が増加する。その結果、海底処理、船上処理、陸上処理の順で経済性が改善することになった。また、規模縮小の場合、操業費が大きな陸上処理の方が経済性の改善幅が大きくなることがわかった。

3・3 脈石の含有割合

最後に、選鉱分離性の重要な要素として脈石の主要部分であるリン灰石と玄武岩の両脈石の含有割合 (リン灰石/(リン灰石+玄武岩)) による開発システムの採算範囲を考えた (図 7)。

脈石がリン灰石である場合は浮遊選別が有効であり、脈石が玄武岩である場合には、クラスト部と玄武岩の比重の差による高い分離性が得られる比重選別が経済性の面でも良いという結果が出た。また、両脈石が混在している場合には磁力選別により良好な経済性を得られることが明らかとなり、両脈石の存在割合により最適な選鉱方法が存在することがわかった。これに基づき、最適な CRMD 賦存条件を考えてみると、鉱物品位 Co : 0.41%, Ni : 0.35%, Mn : 14%, Cu : 0.07% 以上の玄武岩の海域で、比重選別により選鉱処理する方法が有利であると思われる。

4. ま と め

以上のように、全海域に存在する CRMD に適用可能な選鉱プロセスを選択するのは非常に難しいが、両脈石の含有割合により最適な選鉱方法があることがわかった。

主な結果をまとめると以下の通りである。

(1) 脈石がリン灰石主体である場合は浮遊選別が有効であり、両脈石含有割合が同等である場合は磁力選別が有効と考えられる。一方、脈石が玄武岩である場合には、比重選別により良好な

経済性を得られる。

(2) 開発システムにおいては製錬システムの影響が大きく、脈石混入率により経済性の幅が大きく変わることがあるため、脈石混入率が低い採鉱方式の開発が必要である。

(3) 金属価格の上昇や処理コストの増減により経済性の順序が変わり、二段および三段の選鉱プロセスが、必ずしも経済的に有利であるとはいえない。

今回は、品位も高く、厚みもある CRC がどのような基盤岩を伴って賦存するのか、どのような採鉱方式の脈石混入率が低いのかという基本的な情報も十分ではなく、金利などのディスカウントレートも考慮していないので、絶対値として十分正確な経済性計算が行われなかった点は否めない。しかし、脈石混入の多少による有用金属含有量の差やリン灰石と玄武岩の含有割合により、経済性の幅が大きく変わることがわかった。また、CRMD 開発システムにおいて適切な選鉱プロセスの選択の必要性が明らかになったことは大きな意義があると思われる。

今後の CRMD 開発プロジェクトの商業化を目指すためには、CRC 層厚、基盤岩などの鉱床賦存条件の調査により適切な開発シ

ステムを選択していく必要があると思われる。

謝辞 本研究を遂行するに当たり、大変貴重なご意見を頂いた東京大学大学院工学系研究科地球システム工学専攻、岡野靖彦名誉教授に深く感謝を申し上げる。

引用文献

- 1) 深海底鉱物資源開発協会：コバルトリッチクラスト鉱床の選鉱技術に関する調査研究報告書，(1997)
- 2) 深海底鉱物資源開発協会：コバルトリッチクラスト鉱床の選鉱技術に関する調査研究報告書，(1998)
- 3) 化学工学協会編：経済評価とプラントコスト，プロセス設計シリーズ 6，(株) 丸善
- 4) Tarjan, G.: Mineral Processing, Fundamentals Comminution Sizing and Classification Volume 1, Akademiai Kiado Budapest, (1981)
- 5) 山崎・富島・鶴崎・半田：資源と素材，Vol. 112, p. 1005-1014, (1996)
- 6) 日本機械工業連合会：コバルトリッチクラスト鉱床の採鉱システムの調査研究報告書，(1994)
- 7) 日本機械工業連合会：コバルトリッチクラスト鉱床の採鉱システムの調査研究報告書，(1995)
- 8) Masuda, Y. and Cruickshank, M.J.: MTS 93, p. 144-153, (1993)
- 9) 深海底鉱物資源開発協会：平成 7 年度深海底鉱物資源の有用金属の回収技術開発調査報告書，(1996)
- 10) 小島和浩：資源と素材，Vol. 112, p. 968-973, (1996)
- 11) 島田莊平：日本エネルギー学会誌，第 73 巻，第 9 号，p. 802-809, (1994)
- 12) Charle River Associates Incorporated.: CRA Report No. 383, (1981)
- 13) 金属鉱業事業団：ぼなんざ，ISSN 0385-0501, (1997)