

本報告書は、JOGMEC と双日株式会社及び大平洋金属株式会社が共同にて実施した平成31年度現場ニーズ等に対する技術支援事業「低品位ニッケル鉱石の性状解明及びニッケル品位改善に向けた基礎試験の実施」の研究結果をまとめたものであり、本成果及び本報告書著作権は、JOGMEC、双日株式会社及び大平洋金属株式会社に帰属する。

平成31年度現場ニーズ等に対する技術支援事業

低品位ニッケル鉱石の性状解明および
ニッケル品位改善に向けた基礎試験の実施

成果報告書

(公開版)

令和2年2月

独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構

双日株式会社

大太平洋金属株式会社

はしがき

近年、世界的な鉱物資源の需要拡大による原料確保のための権益獲得競争の動きが一層活発化する中で、環境保全対策や循環型社会の構築に向けた積極的な対応が求められるなど、我が国の金属産業・製鉄業が置かれている状況は大きく変化している。一方で資源開発事業の進展により、採掘対象の低品位化、探査ターゲットの奥地化や潜頭化など、より技術的リスクの高い鉱床の開発へと移行しており、より効率的な選鉱・製錬等の生産技術が求められている。これらに対応する技術が企業の競争力を左右しているのが現状である。

このような背景のもとに、独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構（JOGMEC）では、我が国の金属資源産業が抱える技術課題等を把握し、我が国企業が関与する操業現場や鉱山開発等の案件を対象とし、生産技術や鉱山開発・FS 評価に対する技術支援を行うために、平成 17 年度から現場ニーズ等に対する技術支援事業を開始した。

本報告書は、JOGMEC と双日株式会社および大太平洋金属株式会社が共同にて実施した平成 31 年度現場ニーズ等に対する技術支援事業「低品位ニッケル鉱石の性状解明およびニッケル品位改善に向けた基礎試験の実施」の研究結果をまとめたものである。

本報告書が、関係各位の参考になれば幸甚である。

令和 2 年 2 月

独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構
双日株式会社
大太平洋金属株式会社

目次

要約.....	1
1 共同スタディ概要.....	2
1-1 目的.....	2
1-1-1 背景.....	2
1-1-2 共同スタディの目的.....	2
1-2 共同スタディ内容.....	2
1-2-1 共同スタディ方法.....	2
1-2-2 共同スタディ実施期間.....	2
1-2-3 共同スタディ従事者.....	2
2 試料のキャラクタリゼーション.....	4
2-1 試料概要.....	4
2-2 分析前処理.....	4
2-3 元素分析.....	5
2-3-1 分析目的.....	5
2-3-2 分析方法.....	5
2-3-3 分析結果.....	5
2-4 MLAによる分析.....	9
2-4-1 MLA概要.....	9
2-4-2 分析目的.....	9
2-4-3 前処理.....	9
2-4-4 分析方法.....	10
2-4-5 分析結果.....	10
2-4-5-1 鉍物種.....	10
2-4-5-2 鉍物重量割合.....	12
2-4-5-3 含ニッケル鉍物のニッケル分布率.....	13
2-4-5-4 鉍物粒径.....	15
2-4-5-5 単体分離度.....	15
2-4-6 選鉍シミュレーション.....	16
3 基礎選別試験.....	18
3-1 概要.....	18
3-2 試験方法.....	19
3-3 試験結果.....	19
4 まとめ.....	21
5 提言.....	22
6 引用文献.....	23

図目次

図 2-1	試料の前処理方法	4
図 2-2	粒度分布	5
図 2-3	ニッケル品位と鉄品位の相関	7
図 2-4	ニッケル品位とマグネシウム品位の相関	8
図 2-5	各粒度のニッケル分布率	8
図 2-6	粒度とニッケル品位の関係	9
図 2-7	反射電子像 (-0.60+0.30mm 試料)	12
図 2-8	各粒群の鉱物重量割合 (グループ化したもの)	12
図 2-9	鉱物重量割合 (Serpentine 内訳)	13
図 2-10	各粒群における含ニッケル鉱物のニッケル分布率	14
図 2-11	試料全体に対する各鉱物のニッケル分布率	14
図 2-12	鉱物粒径分布	15
図 2-13	主な鉱物の単体分離度	16
図 3-1	Ravensthorpe ニッケル鉱山における選鉱フローシート	18
図 3-2	ボールミル	19
図 3-3	選択粉碎試験におけるニッケルの品位・実収率曲線	20

表目次

表 2-1	ICP 分析結果	6
表 2-2	XRF 分析結果	6
表 2-3	分析値の差 (XRF 分析値から見た ICP 分析値との差の割合)	7
表 2-4	MLA で確認された鉍物	11
表 2-5	シミュレーション (1) で用いた数値および算出結果	16
表 2-6	シミュレーション (2) で用いた数値および算出結果	17

要約

近年優良な鉱床の枯渇等により現在操業している、あるいは今後開発されるニッケル鉱山のニッケル品位は低下することが予測されており、低品位ニッケル鉱の品位を向上する技術の確立が求められている。そこで本スタディにおいて、低品位ニッケル鉱石の鉱物学的な性状把握及び基礎的な選鉱試験を実施した。

ニッケル鉱石の性状把握として粒度分布測定および元素分析を行ったところ、粗粒が比較的多い粒度分布を持つが、細粒側のニッケル品位が高いことが判明した。鉱物単体分離解析装置による分析の結果、主な含ニッケル鉱物は **Serpentine** であり、**Serpentine** と **Fe-oxide** が複雑に混在した相も多く観察された。また、**Serpentine** のニッケル品位は **0～15%**程度と不均一であった。この結果から選鉱シミュレーションを行ったところ、ニッケル回収率を低下させないよう全ての **Serpentine** を回収した場合、ニッケル品位は **0.23%**の上昇だが、ニッケル品位の低い **Serpentine** も除去した場合、ニッケル品位は **0.46%**の上昇となった。

また、基礎選鉱試験では選択粉碎を行い、給鉱のニッケル品位が **1.61%**に対し、最大 **2.00%**まで品位を上昇させることができた。

1 共同スタディ概要

1-1 目的

1-1-1 背景

ニッケルの酸化鉱石であるサブロライト鉱は東南アジア等で採掘された後、本邦においてフェロニッケルやニッケル地金等に製錬されているが、近年優良な鉱床の枯渇等により現在操業している、あるいは今後開発されるニッケル鉱山のニッケル品位は低下することが予測されている。

1-1-2 共同スタディの目的

低品位ニッケル鉱の品位を向上する技術の確立は本邦企業の鉱山権益獲得における競争力強化に資することから、低品位ニッケル鉱石の鉱物学的な性状把握及び基礎的な選鉱試験を実施する。

1-2 共同スタディ内容

1-2-1 共同スタディ方法

本共同スタディは、次の業務を行う。

(1) 試料のキャラクタリゼーション

分析前処理として、対象とする低品位ニッケル鉱石（以下、試料という。）を湿式にてふるい分けして複数の粒群に分割し、以下の分析を実施する。

- ・ 含有金属の測定
- ・ 鉱物単体分離解析装置によるニッケルを含む鉱物の同定及び、それら鉱物のグレインサイズ、単体分離度測定

これらの分析により、ニッケル成分について粒度偏析の有無、単体分離性を確認し、適切な選別方法を検討する。

また、鉄分が高過ぎる鉱石は、フェロニッケル製品の品質維持を難しくすることから、試料中の鉄の存在形態も同時に把握する。

(2) 基礎選別試験

ニッケルが特定の鉱物として存在している場合、脈石との物理的性質の違いを利用した選別（比重選別、磁選等）を検討する。

ニッケルが複数の鉱物に固溶して鉱石中に薄く分布している場合、ボールミル等の装置によりニッケルが濃縮しているとされる鉱石表面を剥離する粉碎試験を行い、細粒へのニッケル濃縮の可能性を検討する。

1-2-2 共同スタディ実施期間

令和元年11月27日～令和2年2月28日

1-2-3 共同スタディ従事者

独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構

鈴木 哲夫（金属資源技術部長）

神谷 太郎 (金属資源技術部 生産技術課長)
今野 広祐 (金属資源技術部 生産技術課長代理)
高橋 達 (金属資源技術研究所 主任研究員)
工藤 賢太郎 (金属資源技術研究所 研究員)
Magwaneng Refilwe (金属資源技術研究所 研究員)

双日株式会社

沖村 充則 (合金鉄・非鉄金属部 部長)
五野 隆由 (合金鉄・非鉄金属部 担当部長)
越智 政人 (合金鉄・非鉄金属部 課長補佐)

大平洋金属株式会社

一柳 広明 (資源・技術開発プロジェクト部 部長)
戸田 成太郎 (資源・技術開発プロジェクト部)

2 試料のキャラクタリゼーション

ニッケル鉱石の性状把握のため、元素分析と鉱物単体分離解析装置（以下「MLA」という。）を用いた含有鉱物の分析を実施し、ニッケル鉱石中の含ニッケル鉱物の確認や鉱物重量割合、鉱物粒径等の把握を試みた。

2-1 試料概要

本スタディではニッケル 1.5% の比国産低品位ニッケル鉱石を試験に供した。

2-2 分析前処理

試料は分析を実施するため図 2-1 のとおり粉砕・縮分を行った。以下に手法を記す。

- (1) 試料を 13.2mm のふるいを用いて乾式でふるい分けをする。塊状の試料についてはなるべく手で解砕してふるいを通過させる。
- (2) ふるい上部産物は、約 0.5kg に縮分し、振動ミル（フリッチュ社/P-9）で微粉砕後、ICP 分析および MLA 分析に供する。
- (3) ふるい下部産物は約 1kg に縮分した後、9.50 mm、4.75 mm、2.36 mm、1.18 mm、0.60 mm、0.30 mm、0.15 mm、0.075mm のふるいを使用し、9 粒群に湿式でふるい分けを行う。
- (4) (3) の試料を 110℃、60 時間乾燥させ、重量を測定する。
- (5) 2.36mm 以下の 6 粒群については微粉砕せずに MLA 分析を行う。2.36mm 以上の 3 粒群については微粉砕後に MLA 分析を行う。また、各粒群とも ICP 用試料については微粉砕を行う。
- (6) 0.075mm 以下の試料については粒度分布測定装置（マイクロトラック・ベル株式会社/MT3000 II）により粒度分布を測定する。

試料の粒度分布を図 2-2 に示す。粗粒の割合が比較的高いことが分かった。

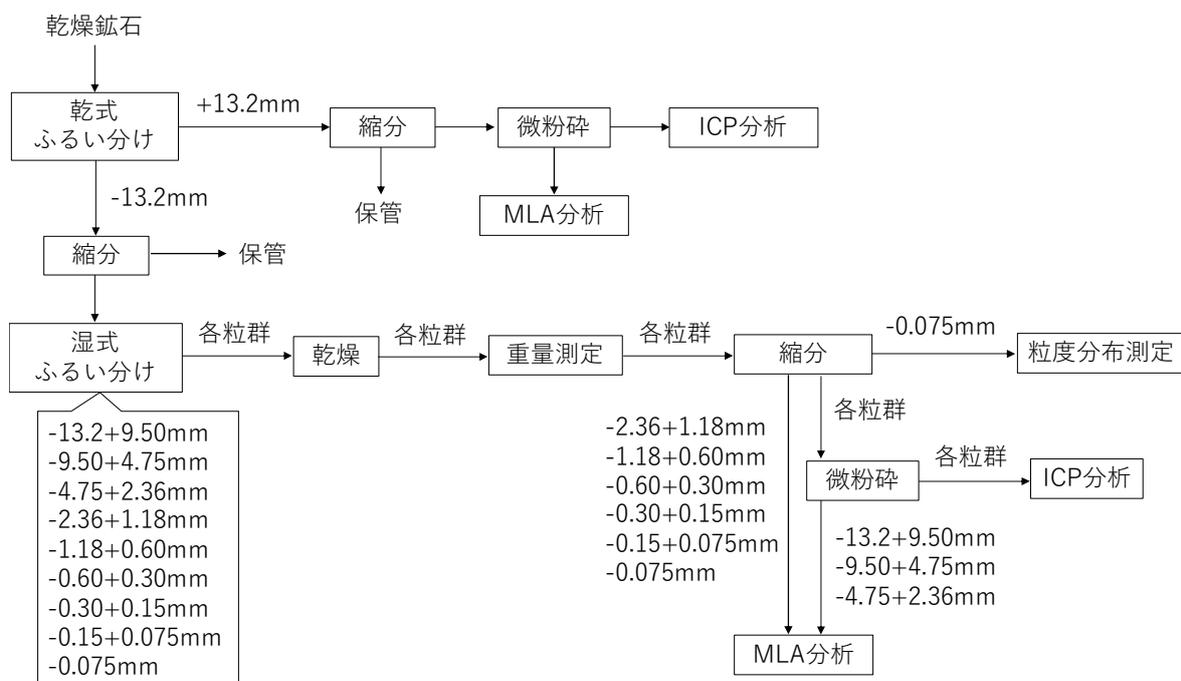


図 2-1 試料の前処理方法

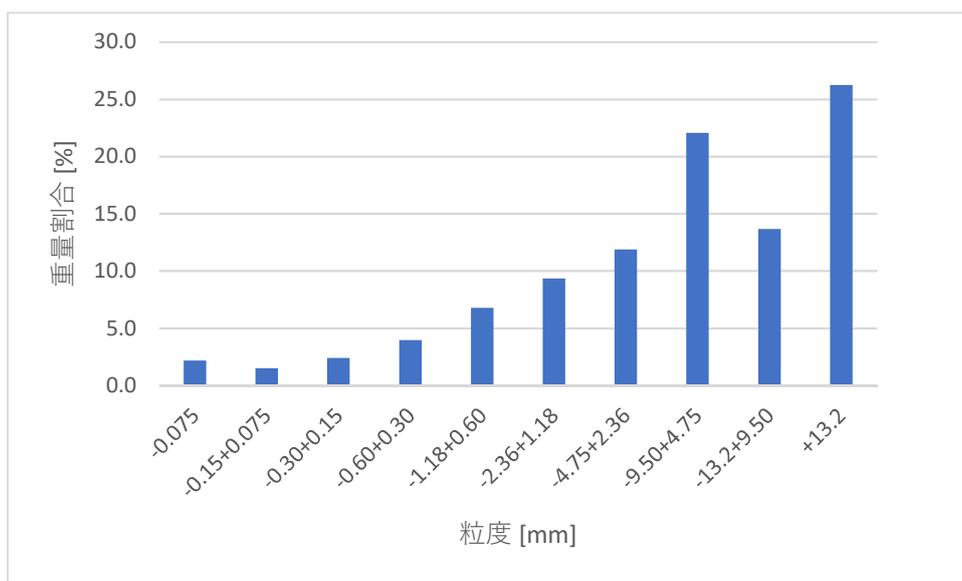


図 2-2 粒度分布

2-3 元素分析

2-3-1 分析目的

ニッケル鉱石の性状を把握するため、元素の定性・定量分析を行った。

2-3-2 分析方法

JOGMEC 金属資源技術研究所の ICP 発光分光分析装置（アジレント・テクノロジー株式会社／Agilent 5110 ICP-OES、以下「ICP」という。）および大平洋金属株式会社所有の蛍光エックス線分析装置（株式会社リガク／SMX-12 型、以下「XRF」という。）により分析を行った。分析試料は、振動ミル微粉碎産物を用いた。XRF では主に 1%以上含有する元素の分析を目的とし、ICP では主に 1%以下の元素の分析を目的とした。

ICP 分析の前処理として、以下の手順で試料を酸溶解した。

- a. 微粉碎試料から 0.20g を秤量する。
- b. 試料 0.20 g と 35.0-37.0w%塩酸及び 60-61 w%硝酸（富士フィルム和光純薬株式会社）各 4 mL をテフロン製耐圧容器に投入する。
- c. b.の容器をマイクロウェーブ試料分解装置（マイルストーンゼネラル株式会社／ETHOS EASY）に入れて酸を温め、高温高压下で試料を溶解する（20 分間で 220°C まで上昇させ、20 分間保温）。
- d. c.の溶液を 100 mL のメスフラスコに移し、b.の容器を超純水で洗い流したものも加える。その後標線まで超純水でメスアップする。
- e. d.のうち約 12mL をシリンジに入れ、目開 0.2 μ m のシリンジフィルタに通し、濾液を ICP 分析に供する。

2-3-3 分析結果

ICP 分析結果および XRF 分析結果を表 2-1 および表 2-2 に示す。また、表 2-3 に XRF 分析値から見た ICP 分析値との差の割合を示す。

ICP 分析結果から、+13.2mm の試料中のニッケル品位は 1%程度である一方、-13.2mm の試料は 1.6~2.0%であった。また、細粒ほどニッケル品位が高くなる傾向がみられた。XRF 分析結果も同様の傾向が伺えた。ICP 分析、XRF 分析ともに、ニッケル品位は鉄品位と正の相関があり、マグネシウム品位とは負の相関があることが示唆された（図 2-3、図 2-）。

ICP 分析結果と XRF 分析結果を比較したところ、鉄、マグネシウムは大きな差はなかった。ニッケルは 13.2mm 以下の試料については差がほとんどなかったものの、+13.2mm 試料については ICP 分析値が XRF 分析値よりも割合として 13%低かった。また、アルミニウム、カルシウム、コバルト、クロムは全粒度において ICP 分析値の方が低くなり、特にクロムは割合で 70~80%の差が見られた。これはクロムなどの元素が難溶性鉱物中に多く存在していたためと推察される。

粒度分布と ICP 分析結果から、各粒度のニッケル分布率を図 2-、粒度とニッケル品位の関係を示すカスケードチャートを図 2-に示す。最も多くニッケルが分布する粒群は-9.50+4.75mm であった。また、ニッケル品位が低い+13.2mm のニッケル分布率は 17.7%であり、単純なふるい分けで粗粒を除去するとニッケルのロスが大きいことが示唆された。

表 2-1 ICP 分析結果

試料識別	Al	Ca	Co	Cr	Fe	Mg	Ni
+13.2mm	0.29	0.02	0.04	0.12	8.89	18.79	1.03
+9.50mm	0.63	0.08	0.05	0.26	18.46	13.58	1.74
+4.75mm	0.52	0.03	0.05	0.22	17.65	13.24	1.65
+2.36mm	0.51	0.03	0.05	0.25	18.47	13.27	1.68
+1.18mm	0.55	0.02	0.06	0.29	20.22	12.46	1.71
+0.600mm	0.57	0.03	0.06	0.26	20.65	12.15	1.76
+0.300mm	0.60	0.04	0.06	0.32	20.70	11.88	1.77
+0.150mm	0.61	0.04	0.07	0.41	20.60	11.60	1.78
+0.075mm	0.62	0.06	0.07	0.27	22.42	11.64	1.94
-0.075mm	0.68	0.07	0.06	0.32	24.41	10.36	1.96

表 2-2 XRF 分析結果

試料識別	Al	Ca	Co	Cr	Fe	Mg	Ni
+13.2mm	0.36	0.03	0.05	0.39	8.90	19.63	1.18
+9.50mm	0.80	0.10	0.07	1.08	18.14	13.89	1.73
+4.75mm	0.69	0.06	0.07	1.06	17.65	13.91	1.66
+2.36mm	0.68	0.05	0.07	1.09	18.38	13.84	1.70
+1.18mm	0.74	0.04	0.08	1.23	20.04	12.87	1.72
+0.600mm	0.76	0.06	0.08	1.17	20.47	12.64	1.76
+0.300mm	0.85	0.06	0.09	1.51	20.52	12.35	1.76
+0.150mm	0.94	0.04	0.10	1.94	20.50	12.04	1.77
+0.075mm	0.84	0.09	0.10	1.41	21.47	11.77	1.87
-0.075mm	0.79	0.13	0.08	0.74	23.51	11.28	2.01

表 2-3 分析値の差 (XRF 分析値から見た ICP 分析値との差の割合)

試料識別	Al	Ca	Co	Cr	Fe	Mg	Ni
+13.2mm	-20%	-35%	-26%	-70%	0%	-4%	-13%
+9.50mm	-22%	-16%	-31%	-76%	2%	-2%	1%
+4.75mm	-26%	-48%	-23%	-80%	0%	-5%	-1%
+2.36mm	-26%	-49%	-29%	-77%	1%	-4%	-1%
+1.18mm	-25%	-43%	-27%	-77%	1%	-3%	-1%
+0.600mm	-25%	-47%	-29%	-78%	1%	-4%	0%
+0.300mm	-30%	-38%	-32%	-79%	1%	-4%	0%
+0.150mm	-36%	24%	-33%	-79%	0%	-4%	1%
+0.075mm	-26%	-34%	-29%	-81%	4%	-1%	4%
-0.075mm	-14%	-49%	-31%	-57%	4%	-8%	-3%

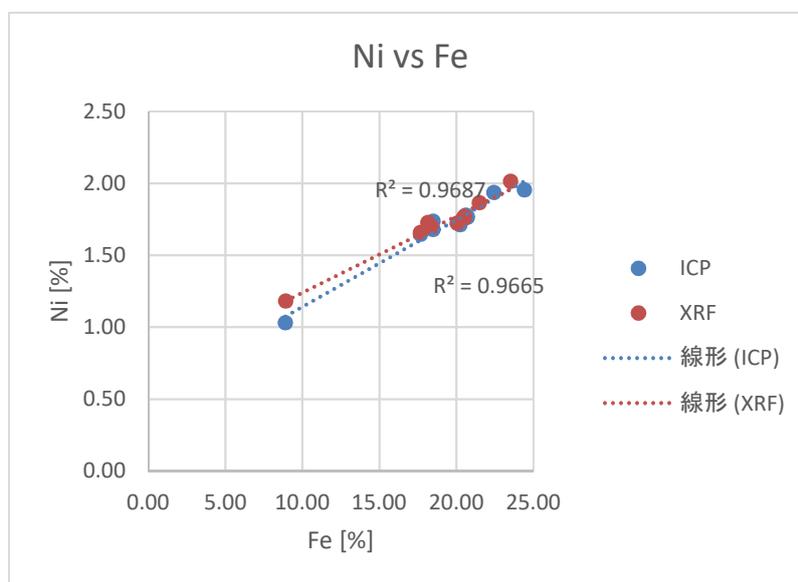


図 2-3 ニッケル品位と鉄品位の相関

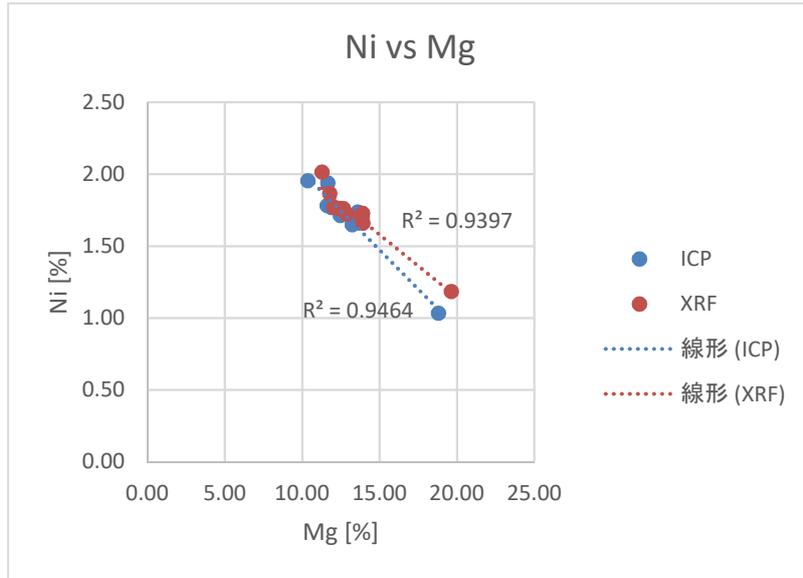


図 2-4 ニッケル品位とマグネシウム品位の相関

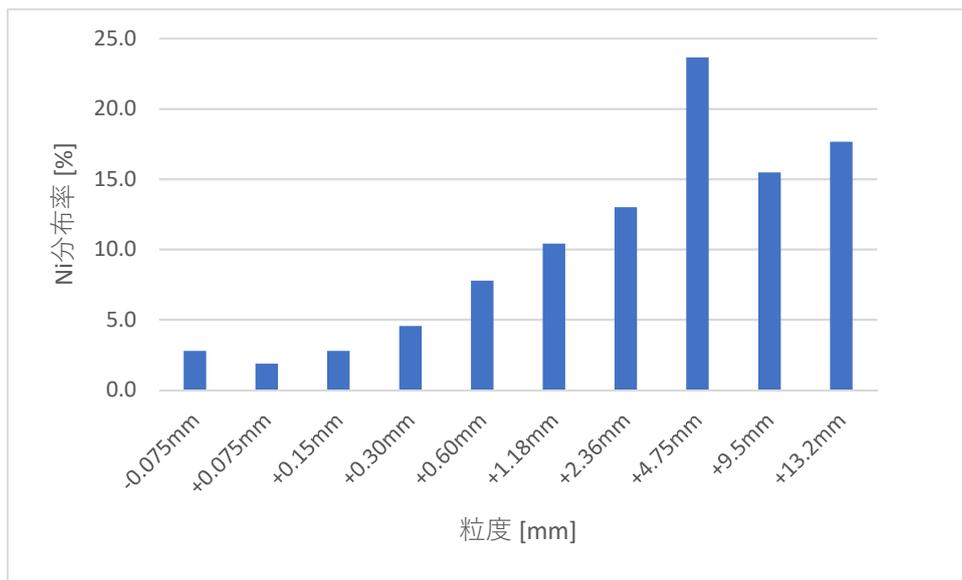


図 2-5 各粒度のニッケル分布率

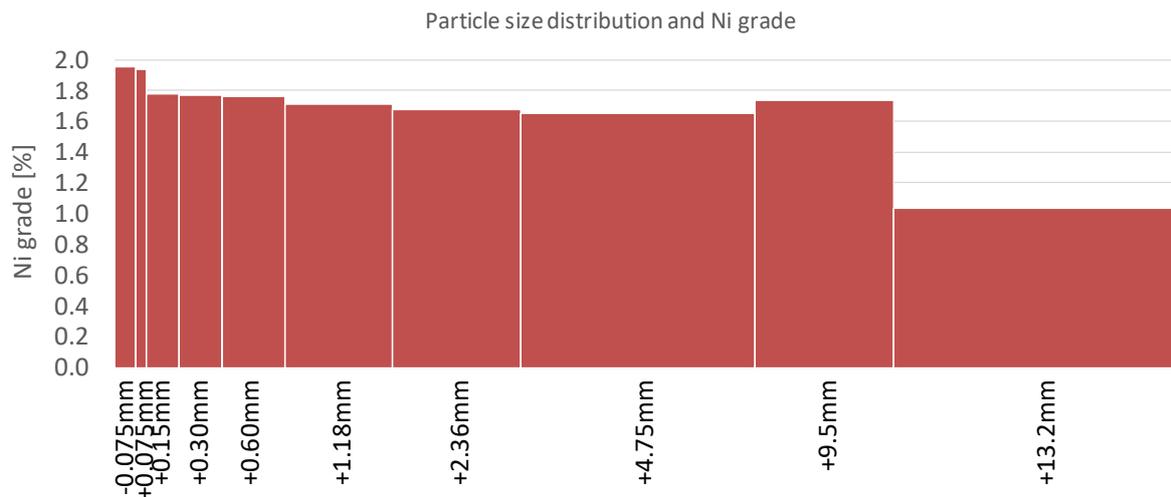


図 2-6 粒度とニッケル品位の関係

2-4 MLA による分析

2-4-1 MLA 概要

MLA は、走査型電子顕微鏡 (Scanning Electron Microscope、以下、SEM と略す。) -エネルギー分散型 X 線分光器 (Energy Dispersive X-ray Spectrometer、以下、EDS と略す。) に搭載された処理ソフトウェアの名称である。この装置は、SEM の反射電子像から得られる粒子や粒子中の輝度の違いによる粒界の情報および EDS による元素組成情報を組み合わせることにより、粒子中の鉱物の組成割合や単体分離度を取得することができる。

2-4-2 分析目的

ニッケル鉱石中の鉱物の重量割合、鉱物粒径、単体分離度について把握することを目的とする。

2-4-3 前処理

MLA による解析の前処理として下記の操作を行った。(1) の粒群は比較的粗いため、そのまま研磨して観察が可能であるが、(2) は細粒であるため、樹脂包埋時に粒度偏析が生じやすいことから、その影響が出ないように (1) と異なる前処理法を適用した。また、(1) は 1 粒子の面積が大きく、帯電しやすいことから、帯電防止として蒸着にはカーボンより導電性が優れるオスミウムを用いた。

(1) -2.36+1.18mm、-1.18+0.60mm、-0.60+0.30mm、-0.30+0.15mm、-0.15+0.075mm 試料

- a. 直径 30mm の樹脂硬化容器の底面に一様に広がるよう試料を入れ、樹脂 (ストルアス社/エポフィックス) を約 15mL 注ぐ。
- b. a. を真空デシケーター内に入れ、アスピレーターで -0.09MPa まで減圧させて脱泡する。これを 1 ~ 2 回繰り返す。
- c. 40°C の乾燥機に入れ、8 時間掛けて硬化させる。
- d. 容器から硬化した樹脂包埋試料を取り出し、自動研磨装置 (metkon 社・DIGIPREP301) にて試料を研磨する。研磨は # 600、# 800、# 1000、# 1200 の耐水

研磨紙を順に用いて行い、その後、3 μ m のダイヤモンドスラリーと羊毛、1 μ m のダイヤモンドスラリーとスウェードで琢磨する。

- e. 研磨された樹脂の観察面に、オスミウムコーター（メイワフォーシス株式会社／Neoc-Pro）でオスミウムを蒸着する。

（2）その他の粒群の試料

- f. 10mL ポリ容器に試料を約 0.5g 入れ、これに試料の体積の 1/3 程度の炭素粉と約 1mL のエタノールを添加し、よく混合する。
- g. 樹脂（同上）を f. に約 7mL 注ぎよく混合させた後、ポリ容器から直径 25mm の樹脂硬化容器に試料を移す。
- h. g. を真空デシケーター内に入れ、アスピレーターで-0.09MPa まで減圧させて脱泡する。これを 1～2 回繰り返す。
- i. 40℃の乾燥機に入れ、8 時間掛けて硬化させる。
- j. 容器から硬化した樹脂包埋試料を取り出し、岩石カッター（スキャンディア社／MINICUT-40）で鉛直方向に半分に切断する。
- k. 直径 30mm の樹脂硬化容器に、切断面が底面になるよう j. を置き、試料が完全に隠れるまで樹脂（同上）を注ぎ、脱泡し、40℃の乾燥機で硬化させる。
- l. 自動研磨装置（metkon 社・DIGIPREP301）にて試料を研磨する。研磨は # 6 0 0、# 8 0 0、# 1 0 0 0、# 1 2 0 0 の耐水研磨紙を順に用いて行い、その後、3 μ m のダイヤモンドスラリーと羊毛、1 μ m のダイヤモンドスラリーとスウェードで琢磨する。
- m. 研磨された樹脂の観察面に、カーボンコーター（株式会社真空デバイス／VC-100S）で炭素を蒸着する。

2-4-4 分析方法

MLA の分析モードは XBSE（1 鉱物粒につき 1 点 EDS により分析）を適用した。倍率は 276 倍とし、各試料 96 フレーム以上（1 フレームは 1500 μ m 四方）を観察した。

2-4-5 分析結果

2-4-5-1 鉱物種

表 2-4 に MLA で確認された鉱物種を示す。MLA 分析の過程で全 3 0 種に分類したが、似た性質の鉱物についてはグループ化を行い、8 種にまとめた。含ニッケル鉱物としては、蛇紋石（Serpentine）、酸化鉄（Fe-oxide_Ni）、マンガン鉄酸化物（MnFe oxide_NiCo）、カオリナイト（Kaolinite_Ni）の 4 種があることが判明した。本分析において、Serpentine_Ni○と記述した鉱物はニッケル品位が○%である Serpentine を示している。これは Serpentine 中のニッケル品位は粒子によりばらつきが大きいためであり、数字の区分としては 0%、1%、2%、6%、15%の 5 つに分類した。その中間の値のニッケル品位の Serpentine も存在するが、今回の解析では、この 5 つのうち最も近い値に分類するようにした。また、Serpentine-Fe-oxide は Serpentine と Fe-oxide が複雑に入り混じった状態の相を示している。これは反射電子像（図 2-7）に示すように、微細な Fe-oxide が Serpentine に広がっており、今回の MLA の分析条件では Serpentine と Fe-oxide を区別することができなかったためである。

表 2-4 MLA で確認された鉱物

鉱物リスト	Ni (%)	グループ化後の名称
Serpentine_Ni15	14.29	Serpentine
Serpentine_Ni6	5.85	
Serpentine_Ni2	1.46	
Serpentine_Ni1	1.02	
AlSerpentine_Ni1	0.50	
Serpentine	0.00	
FeSerpentine_Ni2	2.39	
Serpentine-Fe-oxide_Ni2	2.23	
Serpentine-Fe-oxide_Ni1	1.04	
Fe-oxide_NiCr(HD)	2.38	
Fe-oxide_CrNi(HD)	0.61	
Fe-oxide_NiCr(LD)	1.25	
Fe-oxide_Ni-Quartz	1.38	
MnFe oxide_NiCo	9.22	MnFe oxide_NiCo
Kaolinite_Ni	2.12	Kaolinite_Ni
Fe-oxide(Magnetite)	0.00	Fe-oxide
Fe-oxide_Mn	0.00	
Fe-oxide_Cr	0.00	
Chromite	0.00	Chromite
Chromite(High_Cr)	0.00	
Albite	0.00	Si minerals
Augite	0.00	
K-feldspar	0.00	
MgSiAlFeCrO	0.00	
Quartz	0.00	
SiMgCaAlFeNaO	0.00	
Zoisite	0.00	
Calcite	0.00	Others
Dolomite	0.00	
Gibbsite	0.00	

※鉱物名が不明な鉱物については、構成元素を羅列して表記している。

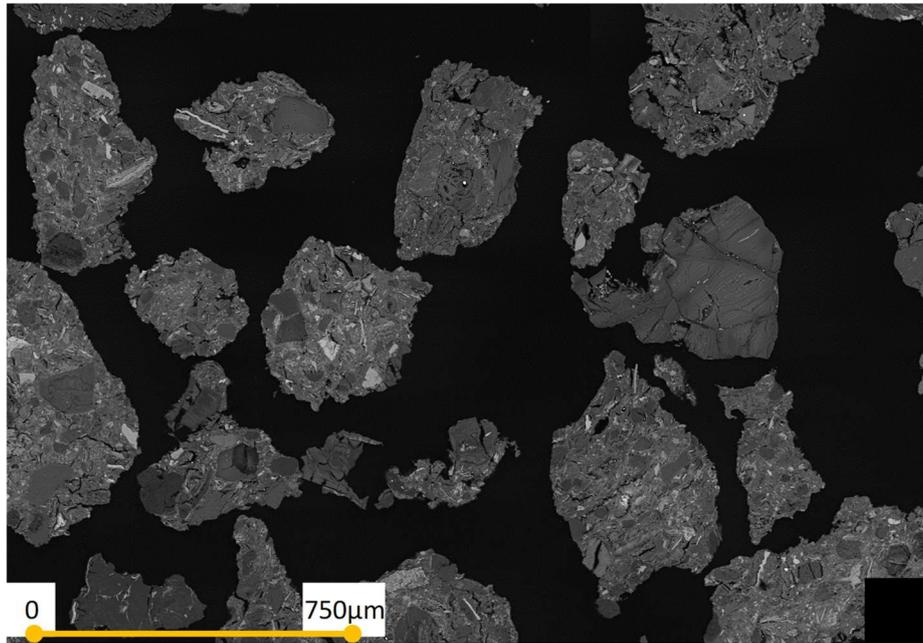


図 2-7 反射電子像 (-0.60+0.30mm 試料)

2-4-5-2 鉱物重量割合

図 2-8、図 2-9 に各粒群の鉱物重量割合を示す。+13.2mm の試料は 89%が Serpentine である一方、13.2mm 以下の試料については Serpentine が 30~50%で、Serpentine-Fe-oxide が 28~48%占めている。+13.2mm の試料はニッケル品位が 1%の Serpentine が他の粒群に比して多く占めており、これが元素分析においてニッケル品位が低い理由であると推察される。

主な非ニッケル鉱物は、ケイ酸塩鉱物 (Si minerals; 2.8~7.3%)、クロマイト (Chromite; 0.6~4.8%) であり、ケイ酸塩鉱物としては石英 (Quartz; 0.8~3.0%)、普通輝石 (Augite; 0.4~1.1%) が比較的多く存在している。

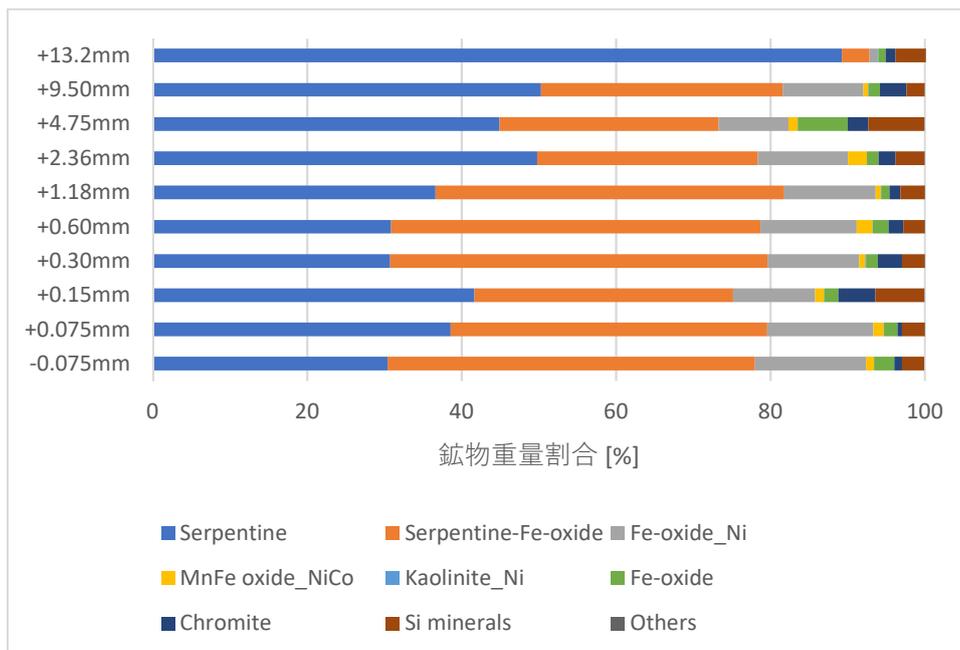


図 2-8 各粒群の鉱物重量割合 (グループ化したもの)

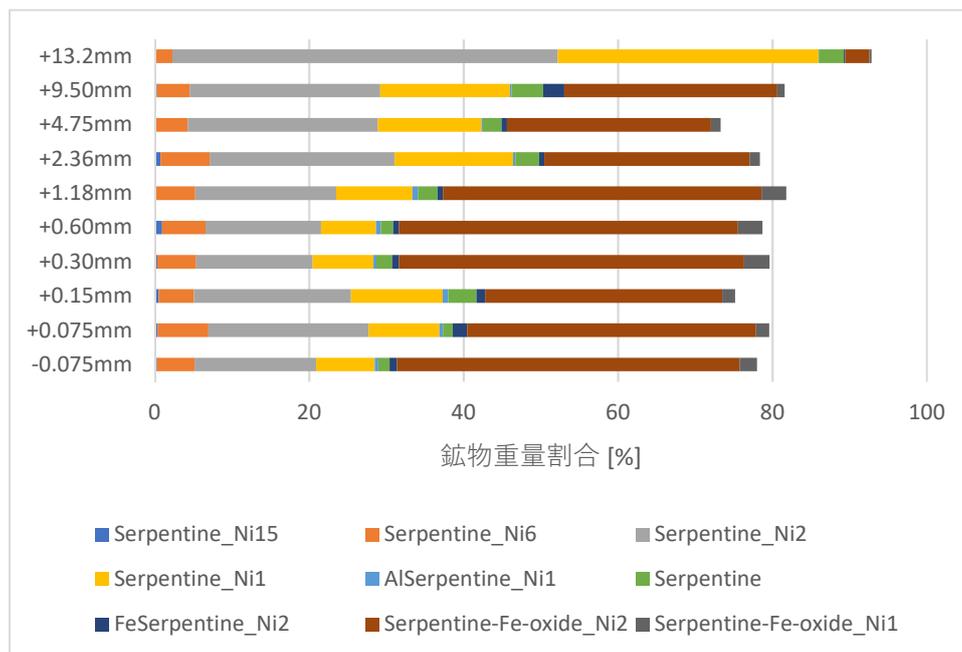


図 2-9 鉱物重量割合 (Serpentine 内訳)

2-4-5-3 含ニッケル鉱物のニッケル分布率

図 2-に各粒群における含ニッケル鉱物へのニッケル分布率を、図 2-1 に試料全体に対する各鉱物のニッケル分布率を示す。Fe-oxide_Niについてはグループ化して示している。

Serpentine_Ni2 と Serpentine-Fe-oxide_Ni2 は鉱物重量割合が高く、ニッケルの分布率としても高い割合になっている。また、Serpentine_Ni6 は鉱物重量割合が低いものの、ニッケル品位が高いことから、ニッケルが多く存在する鉱物の1つとなっている。

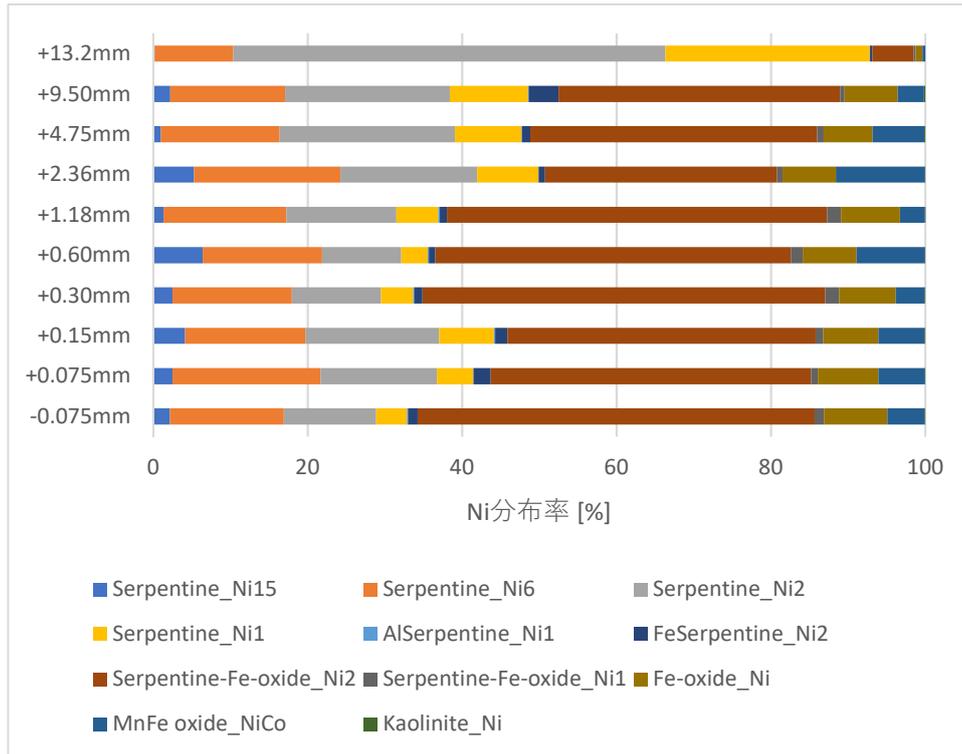


図 2-10 各粒群における含ニッケル鉱物のニッケル分布率

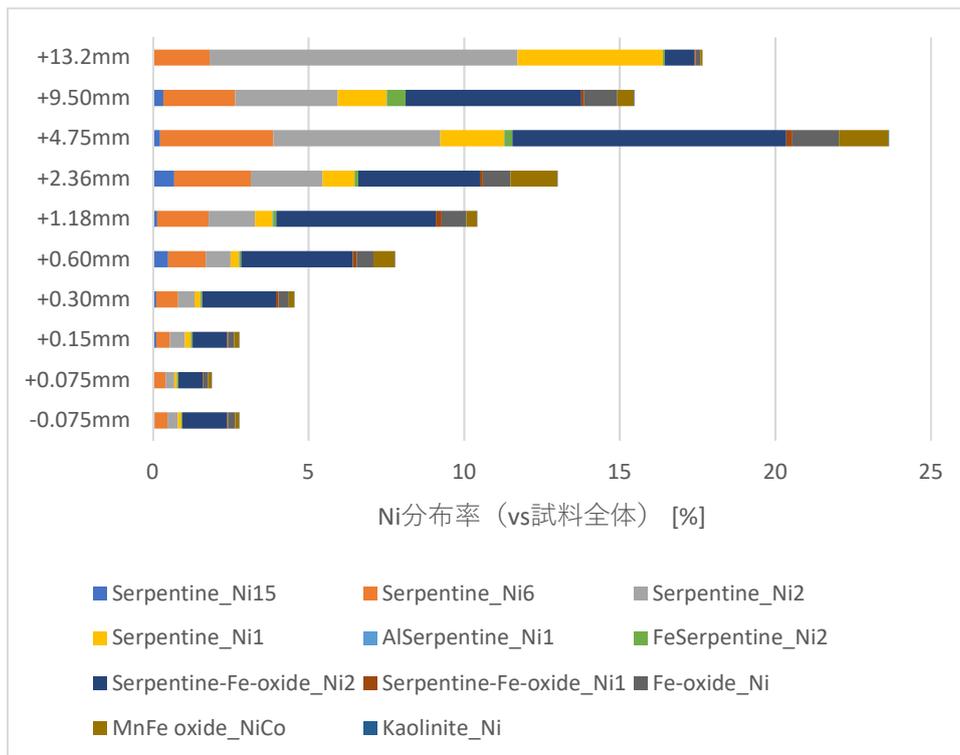


図 2-11 試料全体に対する各鉱物のニッケル分布率

2-4-5-4 鉱物粒径

図 2-12 に主たる含ニッケル鉱物の Serpentine_Ni2、Serpentine-Fe-oxide_Ni2 および主たる非ニッケル鉱物の Augite、Chromite、Quartz の鉱物粒径分布を示す。微粉碎した試料については、鉱物自体が粉碎されてしまい、本来の鉱物の大きさよりも小さくなっているため、ここで示しているデータは MLA 分析において粉碎していない試料のうち、最も大きい 2.36+1.18mm の粒群の鉱物粒径である。

Serpentine_Ni2、Serpentine-Fe-oxide_Ni2 は鉱物粒径が大きく、篩下積算重量割合が 80% となるのは 700~850 μm 程度である。一方、非ニッケル鉱物は Serpentine よりも小さく、この中で最大の Chromite は篩下積算重量割合が 80% で約 350 μm 、最小の Augite は 80 μm である。

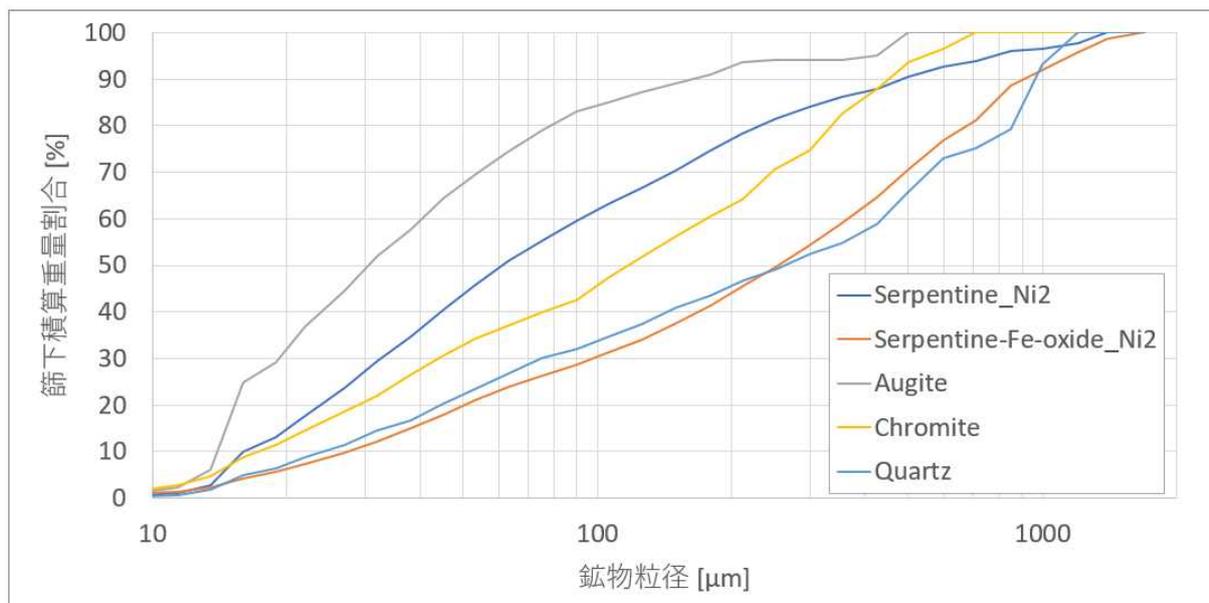


図 2-12 鉱物粒径分布

2-4-5-5 単体分離度

図 2-13 に主な鉱物の単体分離度を示す。ここでは、粒子に占める目的鉱物の割合が 95% 以上のとき単体と定義し、その単体の割合を単体分離度としている。Serpentine_Ni2 は 30% 台、Serpentine-Fe-oxide_Ni2 は 0.075 μm のときで 30% 台であり、Chromite や Augite に比べると単体分離度は低い。このことから、含ニッケル鉱物と非ニッケル鉱物を分離する場合、ある程度の粉碎が必要であると考えられる。

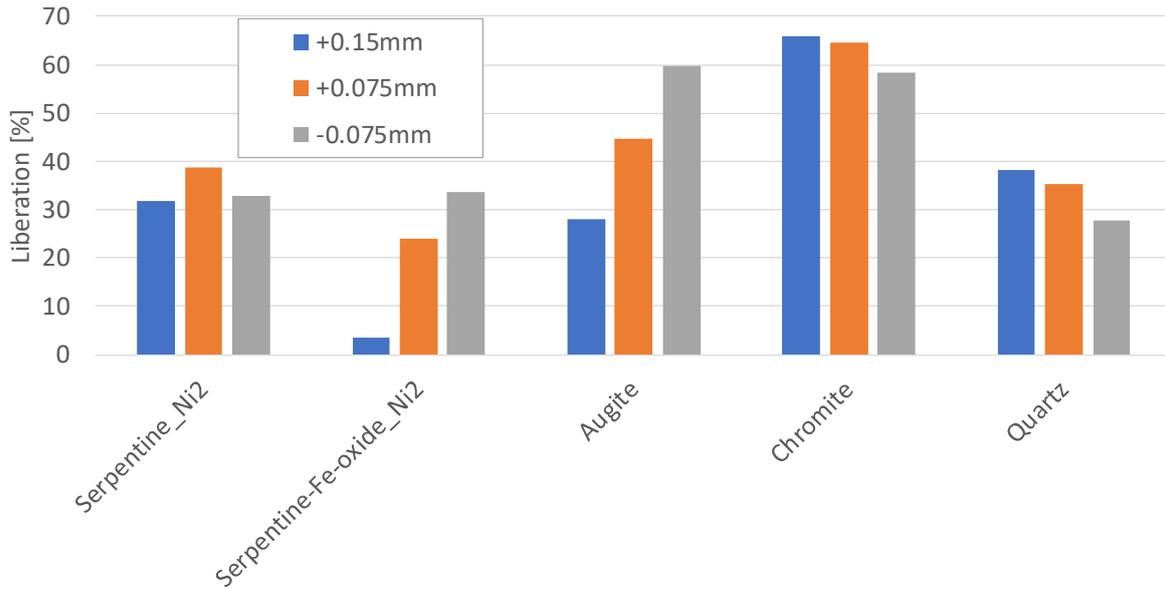


図 2-13 主な鉱物の単体分離度

2-4-6 選鉱シミュレーション

MLA 分析結果より、以下の 2 条件の選鉱を行った時の精鉱のニッケル回収率およびニッケル品位を算出した。

- (1) 理想的な粉碎・選鉱により非ニッケル鉱物が完全に除去された時の精鉱のニッケル品位
- (2) 理想的な粉碎・選鉱により Ni 品位 1%の Serpentine 及び非 Ni 鉱物が完全に除去された時の精鉱の Ni 品位

(1) のとき、ニッケルの回収率 100%となる。粗鉱中の含ニッケル鉱物の重量割合および粗鉱のニッケル品位から、精鉱のニッケル品位は以下の式で算出可能である。

$$(\text{精鉱のニッケル品位}[\%]) = \frac{(\text{粗鉱のニッケル品位}[\%])}{(\text{粗鉱中の含ニッケル鉱物の重量割合}[\%])} \times 100$$

計算結果は 1.89%となり、粗鉱に比べ 0.23%の品位上昇である (表 2-5)。

表 2-5 シミュレーション (1) で用いた数値および算出結果

鉱物重量割合[%]*		ニッケル品位[%]	
含ニッケル鉱物	88.2	粗鉱	1.66*
非ニッケル鉱物	11.8	精鉱	1.89

※MLA 分析値

(2) のとき、Ni 品位 1%の Serpentine を除去するため、その分ニッケル回収率は低下し

88.7%となる。これを考慮し、以下の式により精鉱のニッケル品位は算出した。

$$(\text{精鉱のニッケル品位}[\%]) = \frac{(\text{粗鉱のニッケル品位}[\%]) \times (\text{ニッケル回収率}[\%])}{(\text{粗鉱中の含ニッケル鉱物の重量割合}[\%])}$$

計算結果は 2.12%となり、粗鉱に比べ 0.46%の品位上昇である。(表 2-6)

表 2-6 シミュレーション (2) で用いた数値および算出結果

	鉱物重量割合[%]※	ニッケル分布率[%]※		ニッケル品位[%]
回収対象鉱物	69.7	88.7	粗鉱	1.66※
除去対象鉱物	30.3	11.3	精鉱	2.12

※MLA 分析値

3 基礎選別試験

3-1 概要

ラテライト鉱石の選鉱方法として選択粉碎がある。これは、ラテライト化した含ニッケル鉱物は非ニッケル鉱物（石英、かんらん石類など）に比べて軟らかいという性質を利用したものであり、自生粉碎などにより選択的に含ニッケル鉱物の粒径を小さくして、粒径差により含ニッケル鉱物と非ニッケル鉱物を選別する方法である。図 3-1 は西オーストラリア州に位置する Ravensthorpe ニッケル鉱山における選鉱フローシート⁽¹⁾である。鉱石を粗砕後、ドラムスクラバーによりスラリー化し、ふるい分けやサイクロンなどにより細粒側に区分されたものを富鉱化鉱石として回収する。このプロセスではニッケル品位を 1% から 2% に富鉱化している。

本スタディでは基礎選別試験として、予察的に選択粉碎試験を実施し、本試料のニッケル濃縮の可能性について確認した。

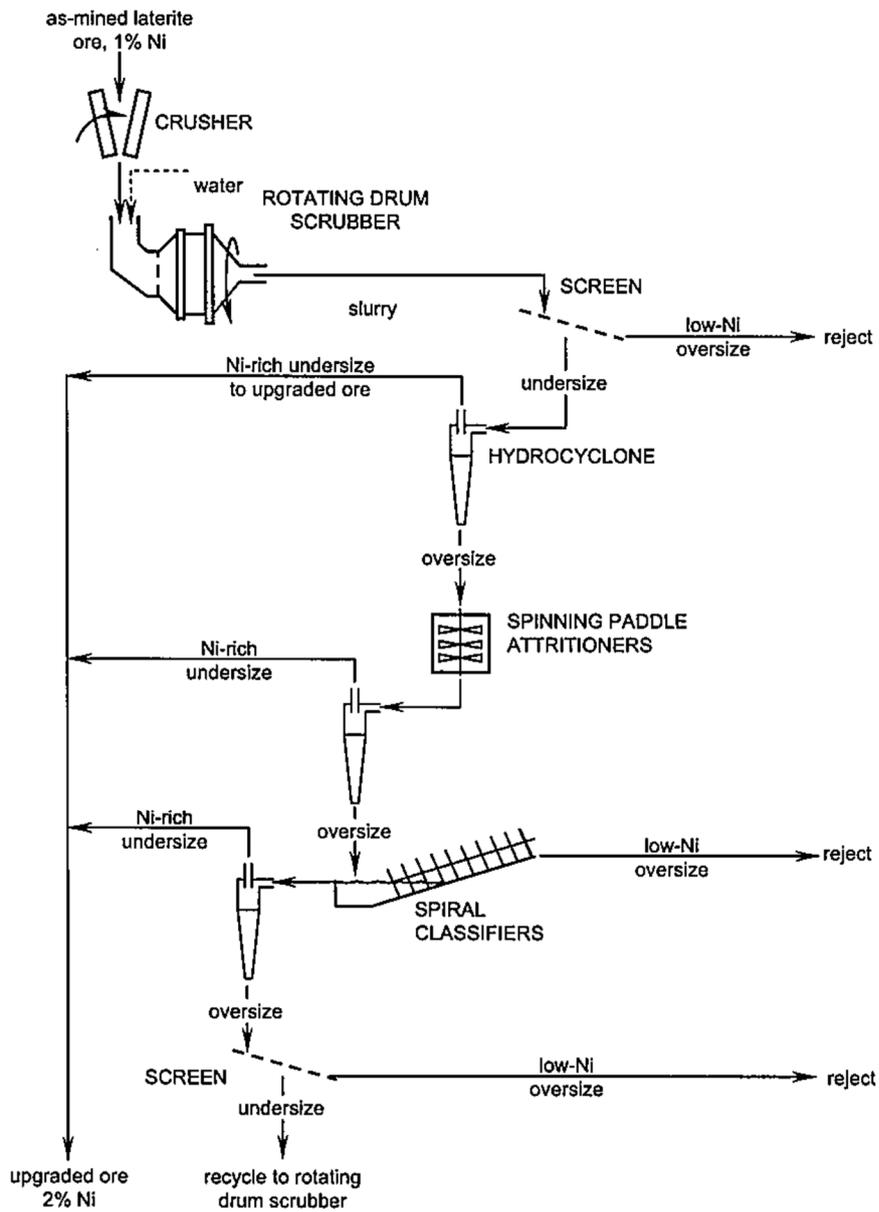


図 3-1 Ravensthorpe ニッケル鉱山における選鉱フローシート

3-2 試験方法

選択粉砕装置として、JOGMEC 金属資源技術研究所が所有するボールミル（株式会社吉田製作所、図 3-2）を用いた。粉砕の選択性を高めるため、ボールを使用せず、自生粉砕とした。粒径の境界を $75\mu\text{m}$ とし、 $75\mu\text{m}$ 以下の試料をニッケル濃縮産物とした。試験の手順は以下のとおりである。

- a. ミルの容器に未乾燥試料 1kg と 500mL の水道水を入れる。
- b. 60rpm で 10 分間自生粉砕をする。
- c. 容器から試料を取り出し、 $75\mu\text{m}$ のふるいで湿式ふるい分けを行う。
- d. ふるい上試料はミルの容器に戻し、500mL の水道水を添加する。ふるい下試料はろ過後、乾燥させ、ICP 分析を行う。
- e. b.～d.を 2 回繰り返す。
- f. ふるい上試料について、乾燥させ、ICP 分析を行う。



図 3-2 ボールミル
(図中のボールは不使用)

3-3 試験結果

図 3-3 にニッケルの品位・実収率曲線を示す。粉砕 10 分後に $75\mu\text{m}$ 以下の鉱石のニッケル品位は 2.00% となり、給鉱の品位よりも 0.39% 上昇した。このときのニッケル回収率は 20% であったが、粉砕時間を 30 分にすることでニッケル回収率は 42% まで上昇した。粉砕時間が 10 分のときは、ニッケル品位が高い Serpentine が先に粉砕されたことで、前章のシミュレーション（2）により算出したニッケル品位に近くなり、粉砕時間が長くなるにつれニッケル品位の低い Serpentine も $75\mu\text{m}$ 以下に粉砕され、ニッケル品位が低下したと思われる。

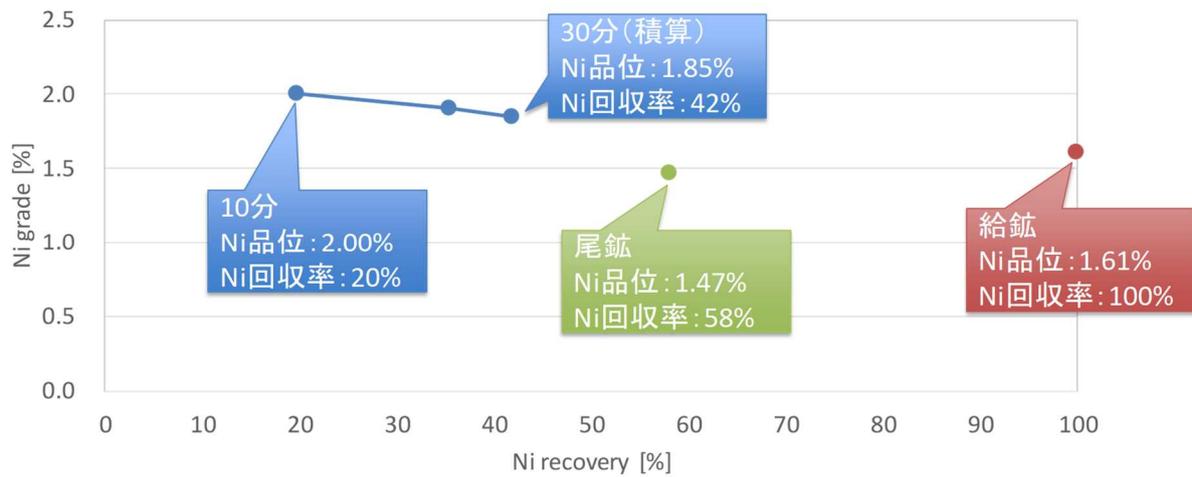


図 3-3 選択粉碎試験におけるニッケルの品位・実収率曲線

4 まとめ

本スタディの対象試料はキャラクタリゼーションの結果、以下のことが明らかとなった。

- ・ 粗粒が比較的多い粒度分布を持つ
- ・ 細粒側のニッケル品位が高い
- ・ 主な含ニッケル鉱物は Serpentine であり、Serpentine と Fe-oxide が複雑に混在した相も多く観察された
- ・ Serpentine のニッケル品位は 0~15%程度と不均一である
- ・ MLA 分析結果から選鉱シミュレーションを行ったところ、ニッケル品位は最大で 2.1%まで向上できる

また、基礎選鉱試験では、選択粉碎によりニッケル品位が向上することを確認した。

5 提言

今回試料として使用した低品位ニッケル鉱石は含ニッケル **Serpentine** と **Fe-oxide** の混在相を最大 48%含むことから、ニッケル回収率を優先して選鉱するとニッケル品位向上に伴い、鉄品位も上昇してしまうことが懸念される。また、この混在相の分離には鉱石の微粉碎と更なる選鉱工程が必要となりコスト面から現実的な手段とは言い難い。フェロニッケル製錬に用いるニッケル鉱石はある程度鉄品位を抑える必要があることから、今回使用した試料以外の鉱石を複数調査し、**Serpentine** と **Fe-oxide** の混在相の少ない鉱石銘柄に絞り込んで選鉱技術開発の検討を継続したい。またニッケル鉱石中のニッケルは **Serpentine** や **Fe-oxide**、**MnFe oxide**、**Kaolinite** 中に含有されていることが分かったが、各鉱物中のニッケルの存在形態は明らかになっていない。ニッケルの多種多様な存在形態の把握は最適な選鉱方法を決めるうえで重要になるため、今後の研究項目の一つとしたい。

6 引用文献

- (1) Frank Crundwell, Michael Moats, Venkoba Ramachandran, Timothy Robinson, W. G. Davenport. (2011). *Extractive Metallurgy of Nickel, Cobalt and Platinum-Group Metals*. Elsevier Ltd., p44.