

本報告書は、JOGMEC と 双日株式会社 及び 大太平洋金属株式会社が共同にて実施した令和 2 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太平洋金属株式会社に帰属する。

令和2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3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平洋金属株式会社が共同にて実施した令和 2 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 3 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 .....	3
1-2-3 共同スタディ従事者 .....	3
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 .....	6
2-3-1 分析目的 .....	6
2-3-2 分析方法 .....	6
2-3-3 分析結果 .....	6
2-4 MLAによる分析 .....	8
2-4-1 MLA概要 .....	8
2-4-2 分析目的 .....	8
2-4-3 前処理 .....	8
2-4-4 分析方法 .....	9
2-4-5 分析結果 .....	9
2-4-5-1 鉍物種 .....	9
2-4-5-2 鉍物重量割合 .....	11
2-4-5-3 含ニッケル鉍物のニッケル分布率 .....	12
2-4-5-4 鉍物粒径 .....	13
2-4-5-5 単体分離度 .....	14
2-4-6 選鉍シミュレーション .....	15
3 基礎選別試験 .....	16
3-1 基礎選別試験 .....	16
3-2 試験試料 .....	16
3-3 磁力選別試験 .....	18
3-3-1 目的 .....	18
3-3-2 試験方法 .....	18
3-3-3 試験結果 .....	20
3-4 重液選別試験 .....	21
3-4-1 目的 .....	21
3-4-2 試験方法 .....	21
3-4-3 試験結果 .....	23

3-5	ネルソンコンセンレーター比重選別試験.....	24
3-5-1	目的.....	24
3-5-2	試験方法.....	24
3-5-3	試験結果.....	26
3-6	テーブル選別試験.....	28
3-6-1	目的.....	28
3-6-2	試験方法.....	28
3-6-3	試験結果.....	29
3-7	繰り返し粉碎.....	33
3-7-1	目的.....	33
3-7-2	試験方法.....	33
3-7-3	試験結果.....	35
3-7-4	B 鉱との比較.....	38
3-8	基礎選別試験まとめ.....	40
4	繰り返し粉碎と物理選別の組み合わせ試験.....	41
4-1	繰り返し粉碎と物理選別の組み合わせ試験.....	41
4-2	繰り返し粉碎試験.....	41
4-2-1	目的.....	41
4-2-2	試験方法.....	41
4-2-3	試験結果.....	43
4-3	+1.18mm 手選別.....	45
4-3-1	目的.....	45
4-3-2	試験方法.....	45
4-3-3	試験結果.....	45
4-4	-1.18+0.075mm 重液選別.....	48
4-4-1	目的.....	48
4-4-2	試験方法.....	48
4-4-3	試験結果.....	48
4-5	-1.18+0.075mm ネルソンコンセンレーター比重選別.....	51
4-5-1	目的.....	51
4-5-2	試験方法.....	51
4-5-3	試験結果.....	51
4-6	-1.18+0.075mm テーブル選別試験.....	53
4-6-1	目的.....	53
4-6-2	試験方法.....	53
4-6-3	試験結果.....	54
4-7	繰り返し粉碎と物理選別の組み合わせまとめ.....	56
5	結言.....	62
6	提言.....	63
7	引用文献.....	64
8	謝辞.....	65

## 目次

図 2-1	試料の前処理方法	5
図 2-2	粒度分布（網下積算分布）	5
図 2-3	粒度とニッケル品位の関係（A 鉱）	8
図 2-4	粒度とニッケル品位の関係（B 鉱）	8
図 2-5	反射電子像（-0.60+0.30mm 試料）	11
図 2-6	A 鉱 各粒群の鉱物重量割合（グループ化したもの）	11
図 2-7	B 鉱 各粒群の鉱物重量割合（グループ化したもの）	12
図 2-8	各粒群におけるニッケル分布率（A 鉱）	12
図 2-9	各粒群におけるニッケル分布率（B 鉱）	13
図 2-10	鉱物粒径分布（A 鉱）	13
図 2-11	主な鉱物の単体分離度（A 鉱）	14
図 2-12	主な鉱物の単体分離度（B 鉱）	14
図 3-1	デーヴィスチューブテスターの外観	19
図 3-2	磁力選別の試験フロー	19
図 3-3	磁力選別試験の回収率・富鉱比	20
図 3-4	重液選別の試験フロー	22
図 3-5	重液選別の回収率・富鉱比	23
図 3-6	ネルソンコンセントレーター外観	25
図 3-7	ネルソンコンセントレーター比重選別の試験フロー	25
図 3-8	ネルソンコンセントレーター比重選別の回収率・富鉱比	26
図 3-9	テーブル選別機外観	28
図 3-10	テーブル選別機の回収口	29
図 3-11	テーブル選別の回収率・富鉱比	30
図 3-12	ポットミルの外観	33
図 3-13	繰り返し粉碎の試験フロー	34
図 3-14	繰り返し粉碎の回収率・富鉱比	36
図 3-15	繰り返し粉碎の網下への鉱物回収率	37
図 3-16	鉱種別の繰り返し粉碎の回収率・富鉱比	38
図 4-1	ボールミルの外観	42
図 4-2	2 回繰り返し粉碎のフロー	43
図 4-3	2 回繰り返し粉碎のマテリアルバランス	44
図 4-4	+1.18mm 手選別で得られた鉱石	45
図 4-5	+1.18mm 手選別の分布率・富鉱比	46
図 4-6	+1.18mm 手選別産物の XRD パターン	47
図 4-7	-1.18+0.075mm 重液選別の回収率・分布率	49
図 4-8	-1.18+0.075mm 多段重液選別の分布率・富鉱比	50
図 4-9	-1.18mm+0.075mm ネルソンコンセントレーター比重選別の分布率・富鉱比	51
図 4-10	-1.18+0.075mm テーブル選別試験での回収口	53
図 4-11	-1.18+0.075mm テーブル選別の回収率・富鉱比	54

図 4-12	繰り返し粉碎と色彩選別を活用したプロセスのマテリアルバランス .....	57
図 4-13	繰り返し粉碎と色彩選別、多段重液選別を活用したプロセスのマテリアルバ ランス .....	58
図 4-14	繰り返し粉碎と色彩選別、ネルソンコンセントレーター比重選別を活用したプロ セスのマテリアルバランス .....	59
図 4-15	繰り返し粉碎と色彩選別、テーブル選別を活用したプロセスのマテリアルバ ランス .....	60
図 4-16	Ni 回収率を重視して繰り返し粉碎と色彩選別、多段重液選別を活用したプロセ スのマテリアルバランス .....	61

## 表目次

表 2-1	ICP 分析結果 (A 鉱)	7
表 2-2	ICP 分析結果 (B 鉱)	7
表 2-3	MLA で確認された鉱物	10
表 2-4	シミュレーション (1) で用いた数値および算出結果	15
表 2-5	シミュレーション (2) で用いた数値および算出結果	15
表 3-1	各選別試験で用いた給鉱の粒群	16
表 3-2	各粒群の元素品位	16
表 3-3	各粒群の鉱物重量割合	17
表 3-4	磁力選別の試験条件	18
表 3-5	磁力選別の産物の品位	20
表 3-6	重液選別の試験条件	22
表 3-7	重液選別の産物品位	23
表 3-8	ネルソンコンセントレーター比重選別の試験条件	24
表 3-9	ネルソンコンセントレーター比重選別の産物品位	27
表 3-10	テーブル選別の試験条件	29
表 3-11	テーブル選別の産物品位	31
表 3-12	繰り返し粉碎の試験条件	34
表 3-13	繰り返し粉碎の産物品位	36
表 3-14	繰り返し粉碎で得られた各産物個別のデータ	37
表 3-15	鉱種別の繰り返し粉碎の試験結果	39
表 3-16	選別手法の比較	40
表 4-1	繰り返し粉碎の試験条件	42
表 4-2	+1.18mm 手選別の産物品位	46
表 4-3	-1.18+0.075mm 重液選別の産物品位	49
表 4-4	-1.18+0.075mm 多段重液選別の産物品位	50
表 4-5	-1.18+0.075mm ネルソンコンセントレーターの産物品位	52
表 4-6	-1.18+0.075mm テーブル選別の試験条件	53
表 4-7	-1.18+0.075mm テーブル選別の試験結果	55

## 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** と **Fe-oxide** の混合物であった。また、**Serpentine** のニッケル品位は 0~15%程度と不均一であったが、大部分は 1%以下程度のものであった。

基礎選鉱試験では選択粉碎と色彩選別、多段重液選別を組み合わせることで、Ni 回収率が 93.0%で給鉱の Ni 品位 1.50 wt%に対し、最大 1.62 wt%まで品位を向上させることができた。これは、**Serpentine** と比較し、**Serpentine-Fe-oxide** は粉碎されやすいため、**Serpentine-Fe-oxide** に大部分の Ni が存在する A 鉱は繰り返し粉碎の効果が得られやすい鉱石であるためであり、**Serpentine** 中に存在する Ni の割合が高かった B 鉱では効果が低かったと考えられる。今後の課題として、Fe 品位が挙げられる。Ni の多くは **Serpentine** と **Fe Oxide** の混合物で存在し、これらは繰り返し粉碎により回収物 (75 $\mu$ m 以下) に多く分布することになり、その結果、Ni と同時に Fe も濃縮されることとなり、精鉱の Fe 濃度が高すぎることとなる。そのため、繰り返し粉碎後の網上産物 (75 $\mu$ m 以下) 中の Fe 品位が低く Ni 品位の高い鉱物 (**Serpentine** 等) を選択的に回収することが重要である。

## 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。令和元年度にはフィリピン共和国 B 鉱山の鉱石を対象とし、スタディを実施したが、B 鉱は蛇紋石 (Serpentine) と酸化鉄 (Fe-oxide) が複雑に混在した低 Ni% の鉱物粒子が全体鉱量の多くを占めており、物理選別による富鉱化が困難であった。今年度は比国内の他の鉱山 (A) の鉱石を対象とし、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、Fe品位が高過ぎる鉱石は、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。

さらに、昨年度対象としたB鉱との性状の違いについて比較を行い、後述する基礎選別試験の結果と併せて、鉱物特性の違いによる選鉱の難易について検証する。

##### (2) 基礎選別試験

まず、比重選別や磁選等の適用可能性および感度を確認するための触覚試験を実施する。触覚試験は、数種類の重液媒体を用いた重液選別の比較やデーヴィスチューブによる磁場への感度の確認などが挙げられる。なお触覚試験の方法は、キャラクタリゼーションの結果を踏まえて選定する。

キャラクタリゼーションおよび触覚試験の結果を踏まえ、脈石との物理的性質の違いを利用した比重選別や磁選などの物理選別方法の中から適切な手法を選定し検討する。

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2年8月25日～令和3年2月26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

宮武 修一 (資源開発部長)  
神谷 太郎 (資源開発部 技術課長)  
榎原 泰佑 (資源開発部 技術課)  
森山 最岳 (資源開発部 技術課)  
砂田 和也 (金属資源技術研究所 副所長)  
小野 竜大 (金属資源技術研究所 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・非鉄貴金属部 部長)  
松岡 洋平 (合金鉄・非鉄貴金属部 課長代理)

大太平洋金属株式会社

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

本スタディではフィリピン共和国 A 鉱山に産する低品位ニッケル鉱石を試験対象とした。

### 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 13.2 mm 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、0.075 mm 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°C、60 時間乾燥させ、重量を測定する。
- (5) 2.36 mm 以下の 6 粒群については微粉砕せずに MLA 分析を行う。2.36 mm 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。

試料の粒度分布を図 2-2 に示す。粒子径について B 鉱と A 鉱を比較すると後者が前者よりも小さく、その割合も高いことが分かった。

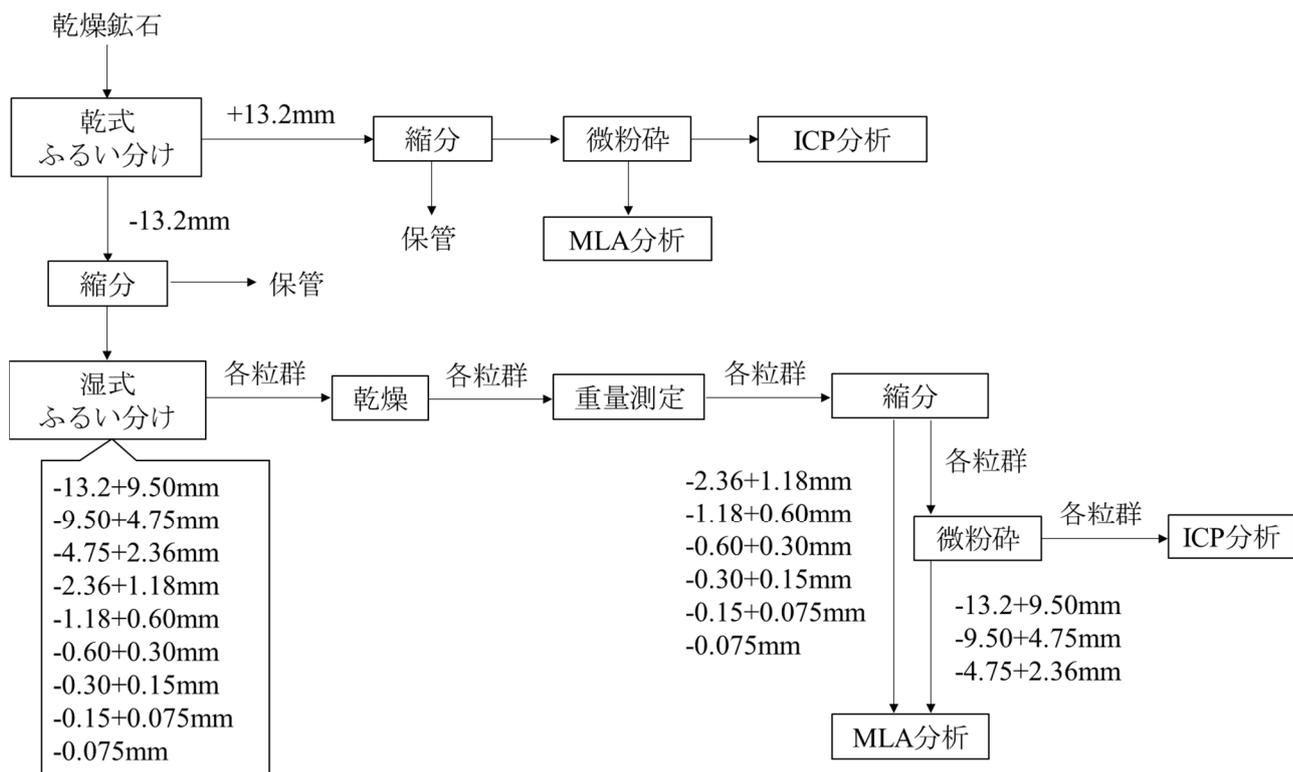


図 2-1 試料の前処理方法

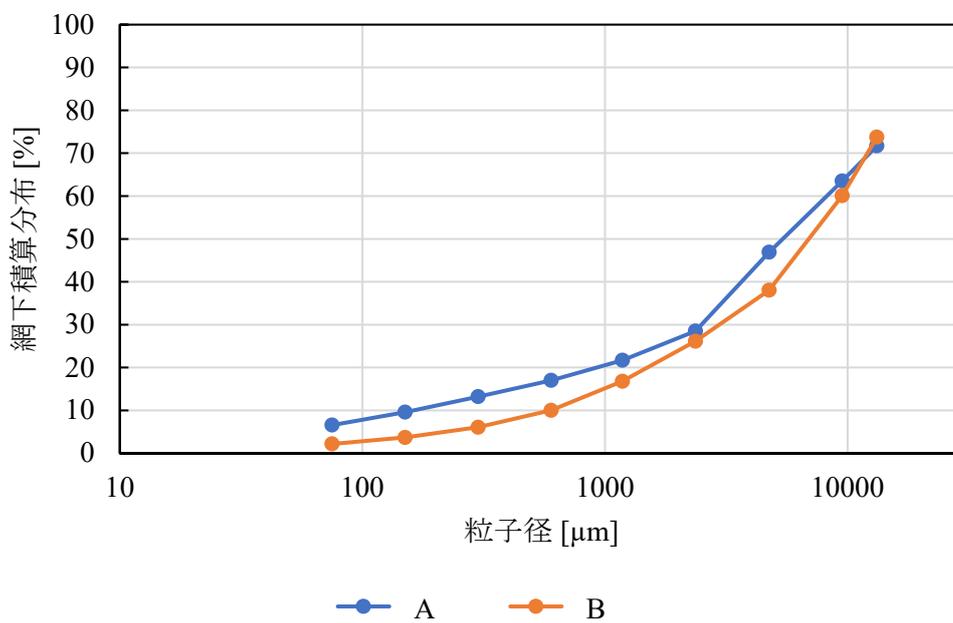


図 2-2 粒度分布 (網下積算分布)

## 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。）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。

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 0.20 g を秤量する。
- b. 試料 0.20 g と 35.0-37.0 w%塩酸及び 60-61 w%硝酸（富士フイ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のもも加える。その後標線まで超純水でメスアップする。
- e. d.のうち約 12 mL をシリンジに入れ、目開 0.2  $\mu\text{m}$  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 分析結果を表 2-1 に示す。また、比較のため B 鉱の結果を表 2-2 に示す。

ICP 分析結果から、粒群ごとにニッケル品位の大きな差は見られないが、75  $\mu\text{m}$  以下の細粒部は比較的品位が高いことを確認した。特に、B 鉱は 150  $\mu\text{m}$  以下で顕著に品位が高くなる傾向が得られた。

粒度分布と ICP 分析結果から得られた粒度とニッケル品位の関係を示すカスケードチャートについて、A 鉱のものを図 2-3 に、B 鉱のものを図 2-4 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 (A 鈹)

	Weight [%]	Al [%]	Ca [%]	Co [%]	Cr [%]	Fe [%]	Mg [%]	Ni [%]	Fe/Ni
+13.2mm	28.3	0.35	0.07	0.02	0.14	9.63	15.26	1.31	7.35
+9.5mm	8.2	0.46	0.03	0.03	0.17	13.48	15.11	1.54	8.75
+4.75mm	16.6	0.66	0.04	0.04	0.25	16.98	12.69	1.63	10.42
+2.36mm	18.4	0.77	0.05	0.05	0.23	17.10	11.63	1.37	12.48
+1.18mm	6.8	0.80	0.04	0.05	0.29	19.21	11.23	1.49	12.89
+0.60mm	4.7	0.76	0.13	0.05	0.25	17.69	11.41	1.39	12.73
+0.30mm	3.8	0.79	0.07	0.05	0.23	17.61	11.11	1.40	12.58
+0.15mm	3.6	0.79	0.09	0.05	0.26	17.42	10.73	1.45	12.01
+0.075mm	3.0	0.80	0.13	0.05	0.26	18.05	10.30	1.52	11.88
-0.075mm	6.6	0.89	0.16	0.05	0.27	21.48	9.55	1.64	13.10
Average		0.62	0.07	0.04	0.21	15.19	12.85	1.44	10.55

表 2-2 ICP 分析結果 (B 鈹)

	Weight [%]	Al [%]	Ca [%]	Co [%]	Cr [%]	Fe [%]	Mg [%]	Ni [%]	Fe/Ni
+13.2mm	26.2	0.29	0.02	0.04	0.12	8.89	18.79	1.03	8.63
+9.5mm	13.7	0.63	0.08	0.05	0.26	18.46	13.58	1.74	10.61
+4.75mm	22.1	0.52	0.03	0.05	0.22	17.65	13.24	1.65	10.70
+2.36mm	11.9	0.51	0.03	0.05	0.25	18.47	13.27	1.68	10.99
+1.18mm	9.3	0.55	0.02	0.06	0.29	20.22	12.46	1.71	11.82
+0.60mm	6.8	0.57	0.03	0.06	0.26	20.65	12.15	1.76	11.73
+0.30mm	4.0	0.60	0.04	0.06	0.32	20.70	11.88	1.77	11.69
+0.15mm	2.4	0.61	0.04	0.07	0.41	20.60	11.60	1.78	11.57
+0.075mm	1.5	0.62	0.06	0.07	0.27	22.42	11.64	1.94	11.56
-0.075mm	2.2	0.68	0.07	0.06	0.32	24.41	10.36	1.96	12.45
Average	-	0.49	0.04	0.05	0.22	16.41	14.42	1.54	10.66

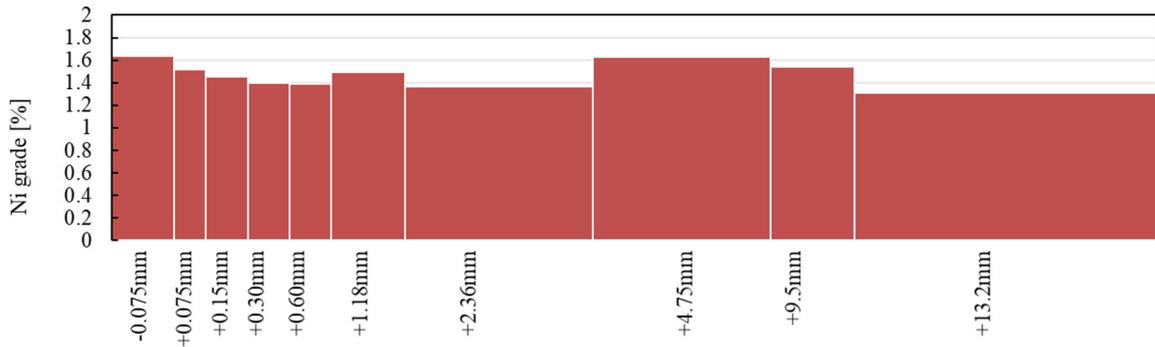


図 2-3 粒度とニッケル品位の関係 (A 鉱)

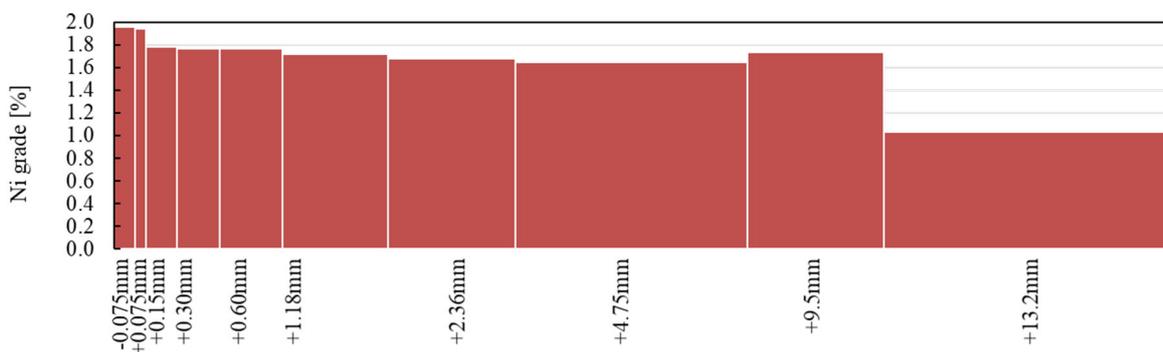


図 2-4 粒度とニッケル品位の関係 (B 鉱)

## 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。

- (1) -2.36+1.18 mm、-1.18+0.60 mm、-0.60+0.30 mm 試料
- a. 直径 30 mm 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 15 mL 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-0.09 MPa まで減圧させて脱泡する。これを 1～2 回繰り返す。
  - c. 25°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 # 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 μm のダイヤモンドスラリーと羊毛、1 μm 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（電流値 5 mA/10 秒。真空度 10 Pa）。
- (2) その他の粒群の試料
- f. 10 mL ポリ容器に試料を約 0.5 g 入れ、これに試料の体積の 1/2 程度の炭素粉と約 1 mL 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 7 mL 注ぎよく混合させた後、ポリ容器から直径 25 mm 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-0.09 MPa まで減圧させて脱泡する。これを 1～2 回繰り返す。
  - i. 25°C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 30 mm 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、25°C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 μm のダイヤモンドスラリーと羊毛、1 μm 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 の分析は、加速電圧：25 kV、エミッション電流値：40 μA、WD (Working distance)：13 mm の条件で行い、測定モードは「XBSE 法（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 150 フレーム以上（1 フレームは約 1.5 mm 四方）を観察した。

#### 2-4-5 分析結果

##### 2-4-5-1 鉱物種

表 2-3 に MLA で確認された鉱物種を示す。MLA 分析の過程で全 18 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、9 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 (Mn-Fe oxide\_Ni)、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-low, middle, high と記述した鉱物の内、Ni-low はニッケル品位が1%程度、Ni-middle は5%程度、Ni-high は10%程度の 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るが、表 2-3 に示される Ni 品位に近いものが多いと考えられる。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 2-5) 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つたためである。

表 2-3 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_Ni-high	12.68	Serpentine
Serpentine_Ni-middle	6.06	
Serpentine_Ni-low	0.57	
Fe oxide (Hematite)_Ni	0.49	Fe-Oxide_Ni
Fe oxide (Goethite)_Ni	1.56	
Mn-Fe oxide_Ni	2.56	Mn-Fe oxide_Ni
Serpentine & Fe oxide (Type1)_Ni	3.52	Se-Fe-oxide
Serpentine & Fe oxide (Type2)_Ni	2.9	
Serpentine & Mn-Fe oxide_Ni	19.41	
Kaolinite_Ni	1.6	Kaolinite_Ni
Fe oxide (Magnetite)	0	Fe-oxide
Spinel-chromite	0	Spinel-chromite
Quartz	0	Si minerals
Plagioclase	0	
Chlorite	0	
Hornblende (Amphibole)	0	
Dolomite (Carbonate)	0	Others
Ca sulfate	0	

※Ni 品位は代表値 (平均値でなく、代表粒子の値)

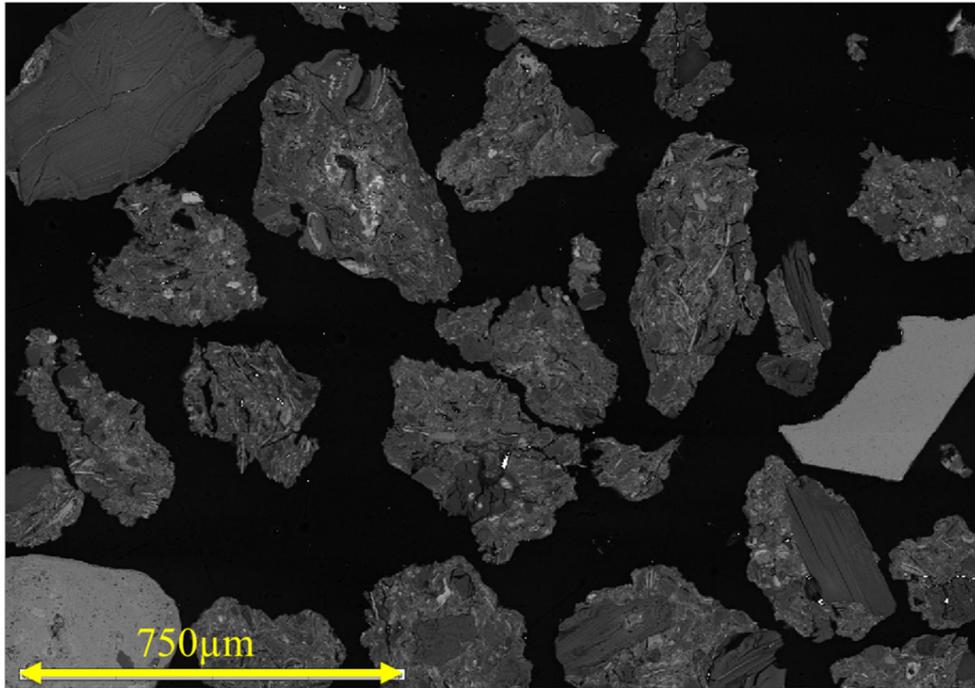


図 2-5 反射電子像 (-0.60+0.30 mm 試料)

#### 2-4-5-2 鉱物重量割合

図 2-6 に A 鉱の各粒群の鉱物重量割合を、図 2-7 に B 鉱のそれを示す。A 鉱は B 鉱と比べ、Serpentine-Fe-oxide の割合が非常に高くなっていることが分かる。特に、-13.2 mm 以下の粒群では、55~70%程度を Serpentine-Fe-oxide が占める。

非ニッケル鉱物の割合はどの粒群でも 3~8%と高くない。また、その大部分はケイ酸塩鉱物 (Si minerals) である。

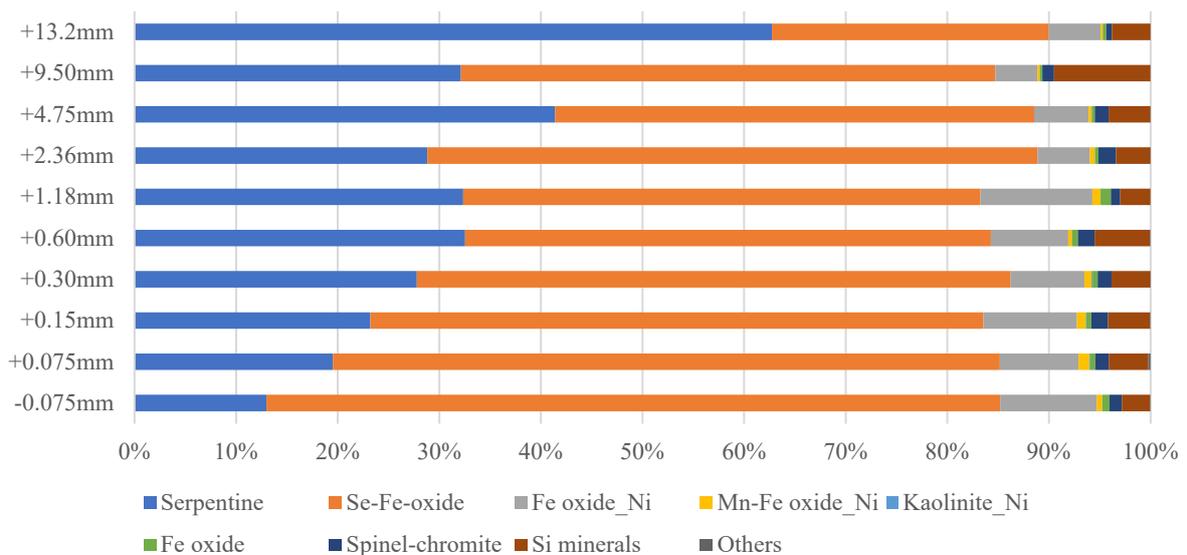


図 2-6 A 鉱 各粒群の鉱物重量割合 (グループ化したもの)

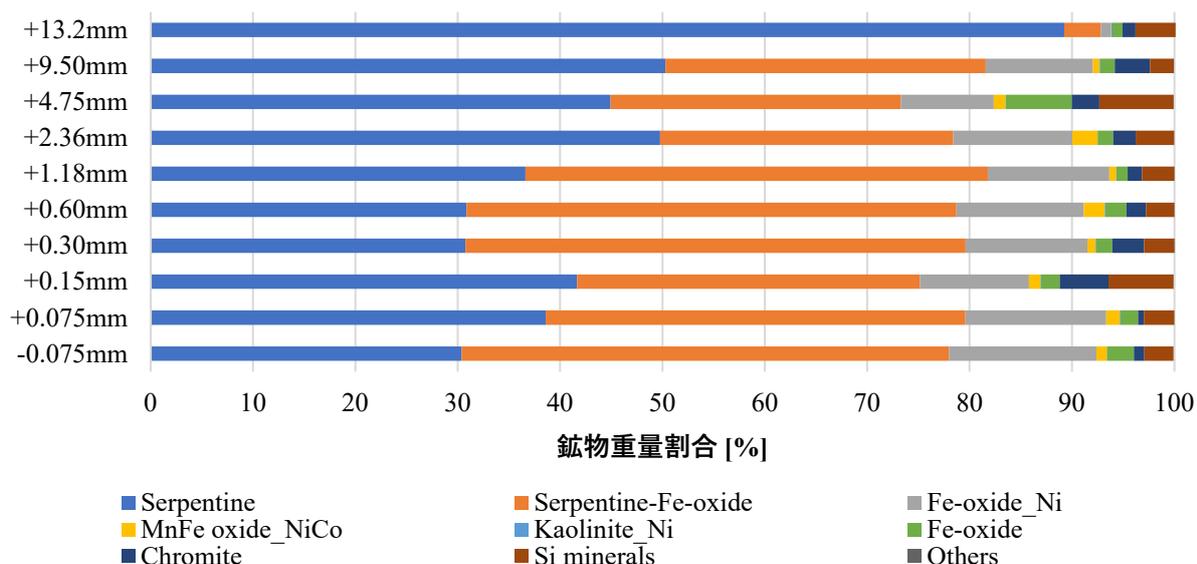


図 2-7 B 鉱 各粒群の鉱物重量割合 (グループ化したもの)

### 2-4-5-3 含ニッケル鉱物のニッケル分布率

図 2-8 に A 鉱の各粒群におけるニッケル分布率を、図 2-9 に B 鉱のそれを示す。

B 鉱と比較し、A 鉱は Serpentine-Fe-oxide に大部分の Ni が存在している。後述 (3-7 等) の通り、Serpentine と比較し、Serpentine-Fe-oxide は粉砕されやすいため、Serpentine-Fe-oxide に大部分の Ni が存在する A 鉱は繰り返し粉砕の効果を得られやすい鉱石であると言える。それら Serpentine-Fe-oxide を選択的に回収することで Ni 品位の向上が望めるが、Serpentine と Fe-oxide が複雑に入り混じった粒子であり、均一な性質を持たないため、それらの幅に対応できる選別方法の検討が必要である。また、Fe-oxide を含むため、Ni と同時に Fe も濃縮されることが考えられる。

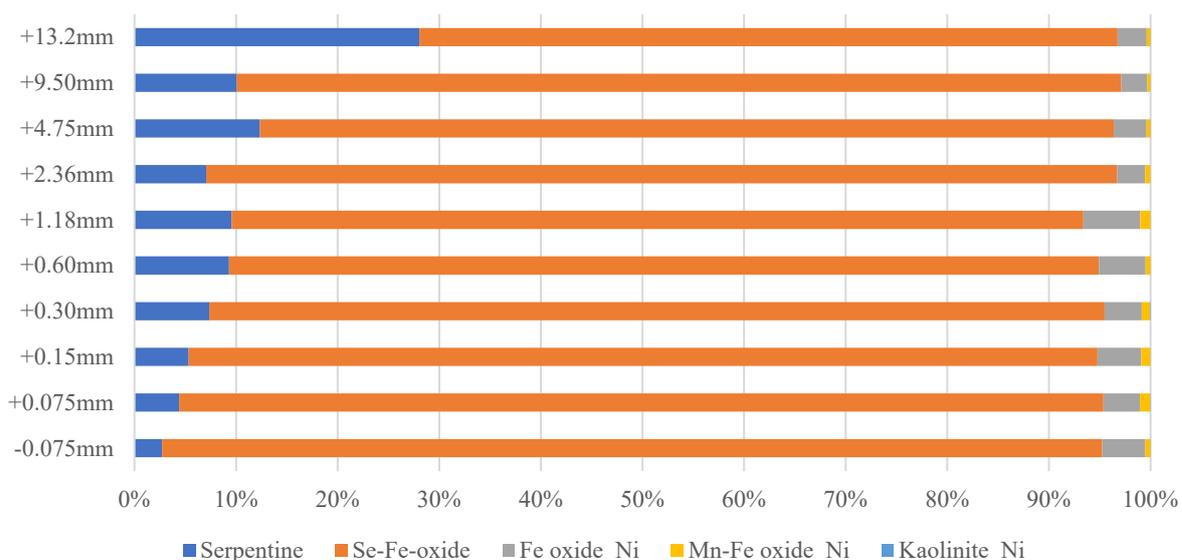


図 2-8 各粒群におけるニッケル分布率 (A 鉱)

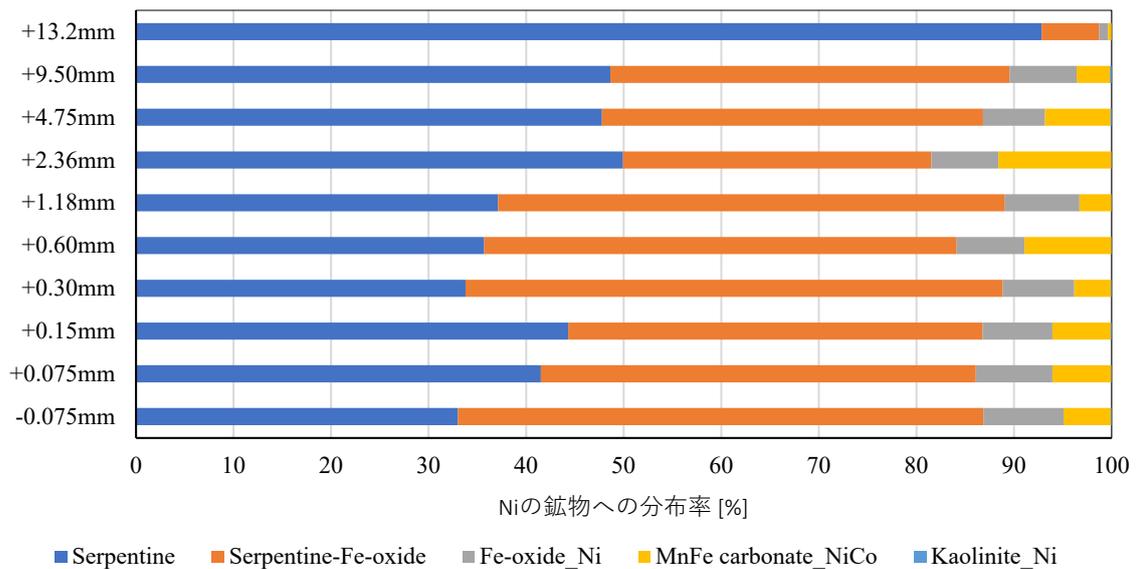


図 2-9 各粒径におけるニッケル分布率 (B 鉱)

#### 2-4-5-4 鉱物粒径

図 2-10 に A 鉱の主たる含ニッケル鉱物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+1.18 mm の粒径の鉱物粒径である。

Serpentine\_Ni-low、Hornblende、Quartz は鉱物粒径が大きく、Spinel-chromite、Serpentine-Fe oxide は比較的粒径が小さいことが分かる。Ni 含有鉱物、非含有鉱物に粒子径の差のみで選別するのは難しい。

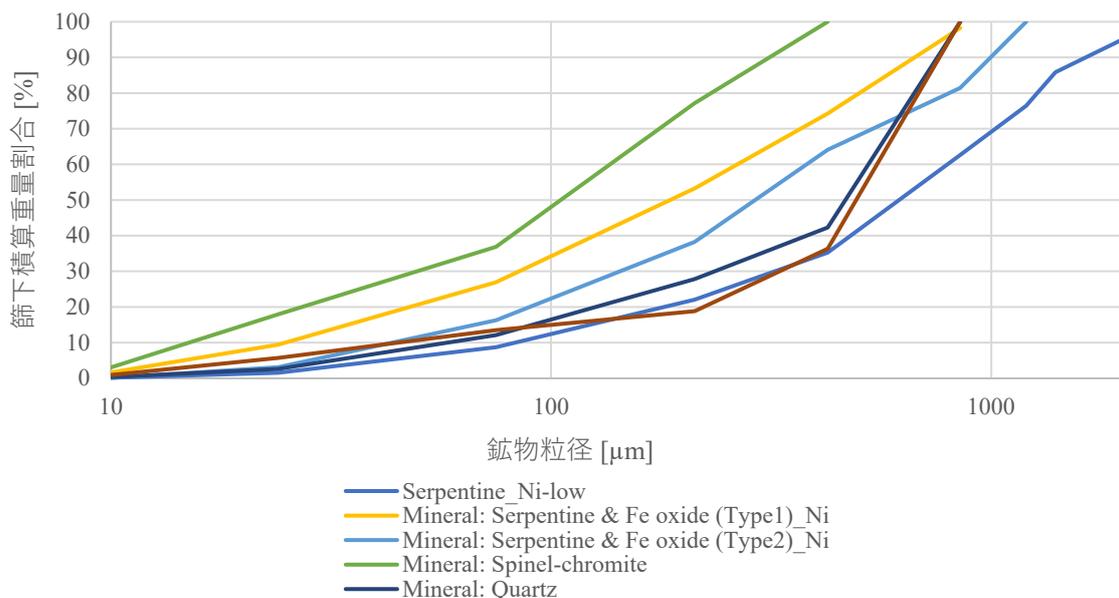


図 2-10 鉱物粒径分布 (A 鉱)

### 2-4-5-5 単体分離度

図 2-11 に A 鉱の主な鉱物の単体分離度を、図 2-12 に B 鉱のそれを示す。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。B 鉱と比べると、A 鉱はどの鉱物も単体分離度が高いため、破碎して 0.3mm 以下程度の粒径にすれば、鉱物毎の特性の差を利用して、目的鉱物を選択的に回収できる可能性がある。

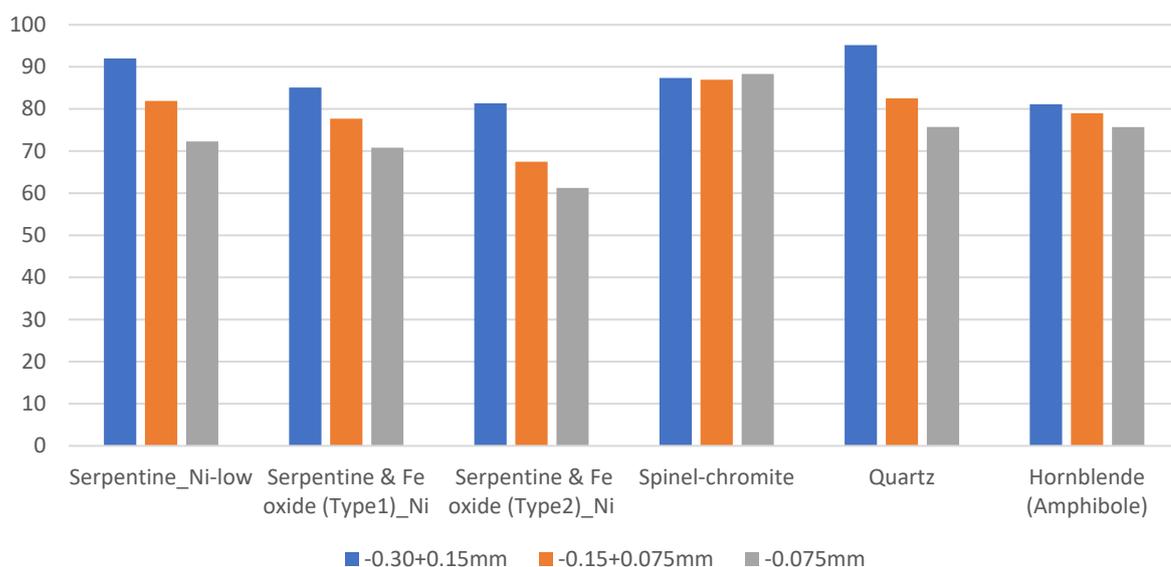


図 2-11 主な鉱物の単体分離度 (A 鉱)

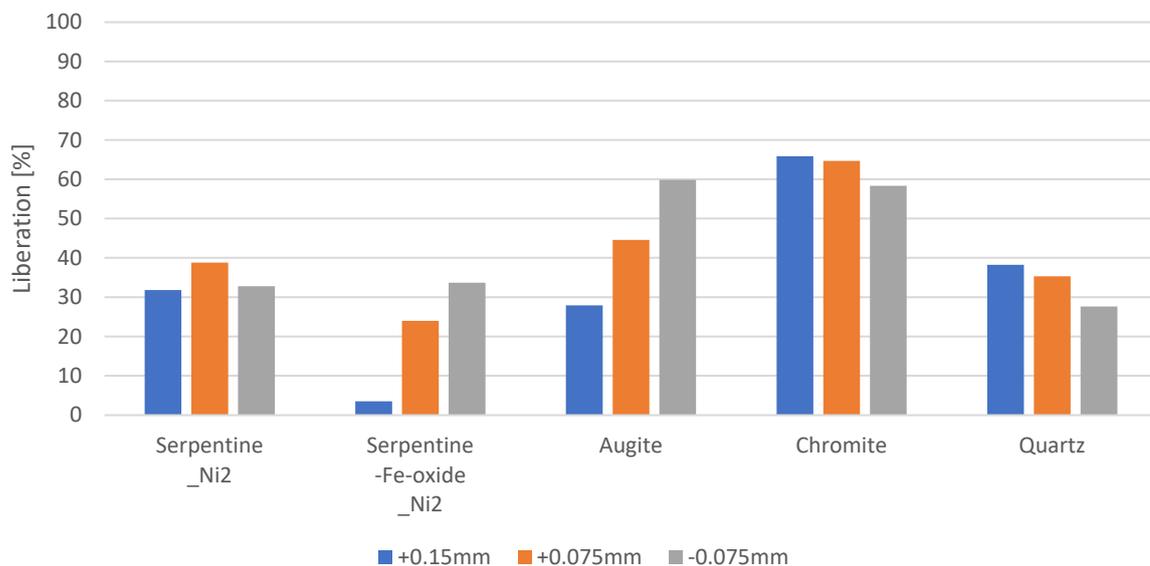


図 2-12 主な鉱物の単体分離度 (B 鉱)

#### 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 Serpentine\_Ni-low (Ni 品位 1%程度と考えられる 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 Ni 1.52%となり、粗鉱に比べ 0.08%の品位上昇である (表 2-4)。

表 2-4 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	94.2	粗鉱	1.44*
非ニッケル鉱物	5.8	精鉱	1.52

※ICP 分析値

(2) のとき、Ni 品位の低い Serpentine を除去するため、その分ニッケル回収率は低下し 87.0%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を算出した。

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

計算結果は Ni 2.29%となり、粗鉱に比べ 0.85%の品位上昇である。(表 2-5)

表 2-5 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	54.8	87.0	粗鉱	1.44*
除去対象鉱物	45.2	13.0	精鉱	2.29

※ICP 分析値

### 3 基礎選別試験

#### 3-1 基礎選別試験

本スタディではラテライト鉱石の選鉱方法として実施例のある選択粉碎<sup>(1)</sup> および一般的な物理選別の手法である磁力選別、重液選別、ネルソンコンцентレーター比重選別、テーブル選鉱試験を実施し、高いNi回収率でNi鉱石を高品位化する手法の検討を行った。

選別試験の評価は、得られた産物のNi品位、Fe品位、Fe/Niと、次式で定義される富鉱比で行うこととした。

$$\text{富鉱比} [-] = \frac{\text{(得られた産物の成分 A の品位) [wt\%]}}{\text{(得られた産物から逆算して求めた給鉱の成分 A の品位) [wt\%]}}$$

#### 3-2 試験試料

各種選別は表 3-1 に示す粒群に対して試験を行った。また各粒群の元素品位を表 3-2、鉱物重量割合を表 3-3 に示す。

表 3-1 各選別試験で用いた給鉱の粒群

選別	給鉱
磁力選別	A 鉱 -0.30+0.15 mm
重液選別	A 鉱 -1.18+0.60 mm
ネルソンコンцентレーター比重選別	A 鉱 -1.18+0.60 mm
テーブル選別	A 鉱 -1.18+0.60 mm
粉碎試験	A 鉱 -13.2 mm

表 3-2 各粒群の元素品位

	Ni 品位 [wt%]	Fe 品位 [wt%]	Fe/Ni	Al 品位 [wt%]	Ca 品位 [wt%]	Mg 品位 [wt%]
-13.2 mm	1.50	17.38	11.6	0.73	0.07	11.90
-1.18+0.60 mm	1.42	17.30	12.2	0.80	0.04	11.41
-0.30+0.15 mm	1.45	17.42	12.0	0.79	0.09	10.73

表 3-3 各粒群の鉍物重量割合

鉍物			-13.2 mm		-1.18+0.60 mm		-0.30+0.15 mm	
鉍物名	比重	Ni 含有率 [wt%]	鉍物重量割合 [wt%]	Ni 分布率 [%]	鉍物重量割合 [wt%]	Ni 分布率 [%]	鉍物重量割合 [wt%]	Ni 分布率 [%]
Serpentine_Ni-high	2.63	12.68	0.05	0.30	0	0.02	0.01	0.03
Serpentine_Ni-middle	2.95	6.06	0.03	0.09	0.01	0.16	0.03	0.07
Serpentine_Ni-low	2.02	0.57	33.08	8.90	45.89	13.33	23.17	5.24
Fe oxide (Hematite)_Ni	6.22	0.49	2.33	0.54	5.93	1.17	3.24	0.63
Fe oxide (Goethite)_Ni	5.37	1.56	4.08	3.00	4.60	3.12	5.96	3.69
Mn-Fe oxide_Ni	6.19	2.56	0.44	0.53	0.44	1.90	0.86	0.88
Serpentine & Fe oxide (Type1)_Ni	4.35	3.52	36.10	59.99	18.58	40.43	43.78	61.11
Serpentine & Fe oxide (Type2)_Ni	4.48	2.90	16.71	22.88	21.52	37.56	15.14	17.41
Serpentine & Mn-Fe oxide_Ni	5.61	19.41	0.41	3.76	0.10	2.29	1.42	10.92
Kaolinite_Ni	2.16	1.60	0.02	0.02	0	0.01	0.04	0.03
Fe oxide (Magnetite)	6.25	0	0.44	0	0.03	0	0.51	0
Spinel-chromite	5.34	0	1.36	0	1.47	0	1.65	0
Dolomite (Carbonate)	1.35	0	0.01	0	0	0	0.01	0
Ca sulfate	1.53	0	0	0	0.01	0	0.04	0
Quartz	1.74	0	3.10	0	1.02	0	1.21	0
Plagioclase	1.79	0	0.07	0	0	0	0.14	0
Chlorite	2.51	0	1.26	0	0.36	0	2.29	0
Hornblende (Amphibole)	1.94	0	0.50	0	0.02	0	0.49	0
Native Aluminum	2.7	0	0	0	0	0	0.00	0

### 3-3 磁力選別試験

#### 3-3-1 目的

鉍物の磁性の違いを利用して、Ni 鉍物を選択的に回収可能か検討する。また併せて Ni 鉍物を選択的に回収可能な磁束密度を調査する。

#### 3-3-2 試験方法

磁力選別装置として JOGMEC 金属資源技術研究所が所有するデーヴィスチューブテスター (ERIEZ 製モデル EDT、図 3-1) を用いた。磁力選別の試験条件を表 3-4、試験フローを図 3-2 に示す。試験は以下に示す手順で行った。

- I. 試料 30g に水道水 500mL を加えスラリー化した。
- II. 400mL/min の流量の水で満たしたデーヴィスチューブテスターに電圧を印加し 4000G の磁束密度を発生させた。
- III. 印加されたデーヴィスチューブテスターにI.で作成したスラリーを投入し、5 分間磁選を行った。この時、4000G 非磁着物は装置下部から排出された。
- IV. 磁束密度を 3000G に下げさらに 5 分間磁選を行い、装置下部から 3000G 非磁着物を回収した。
- V. 磁束密度を 1250G に下げさらに 5 分間磁選を行い、装置下部から 1250G 非磁着物を回収した。
- VI. デーヴィスチューブテスターへの印加を終了し、内部を洗浄して 1250G 磁着物を回収した。
- VII. 回収した各産物については ICP-OES による定量分析を行った。

表 3-4 磁力選別の試験条件

条件	設定値
給鉍	A 鉍 -0.30+0.15mm
給鉍重量	30g
磁選機	デーヴィスチューブテスター
磁選時間	5 min
磁力	4000, 3000, 1250 Gauss
ストローク	54 回/min
流量	0.4 L/min



図 3-1 デーヴィスチューブテスターの外観

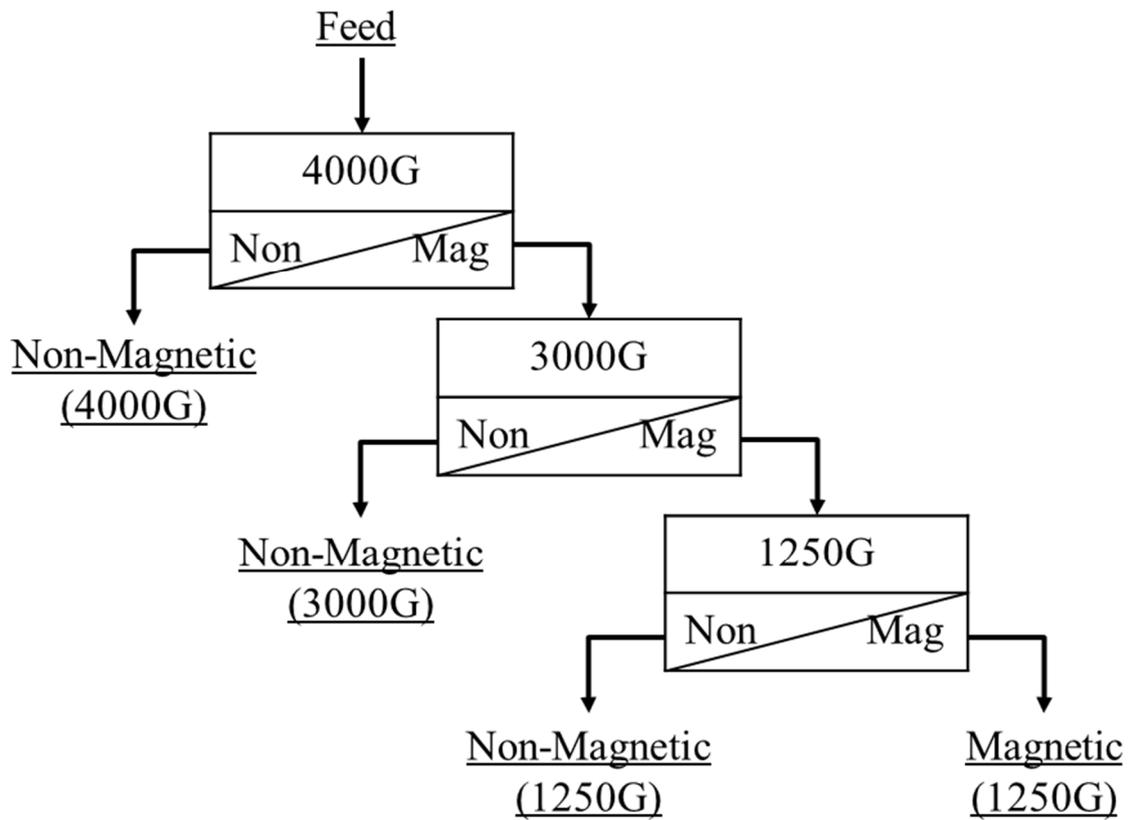


図 3-2 磁力選別の試験フロー

### 3-3-3 試験結果

図 3-3 に磁着物および非磁着物の Ni 回収率と Ni、Fe 富鉄比、表 3-5 に各条件で得られた産物の元素品位と Fe/Ni を示す。なお、試験は、チューブ内に磁着物を残したまま、磁力を下げながら連続して実施したが、結果はそれぞれの磁力で実施した場合に得られる結果を計算により求めたものを示している。(例えば、1250G の非磁着物は 1250G,3000G,4000G の Non-magnetic の合算値。)

図 3-3 より 3000G と 4000G では磁着物で Ni の富鉄比が向上した。しかしながら Ni の回収率は 30%未満であり、磁力選別では高回収率で Ni を濃縮することは困難であることが確認された。

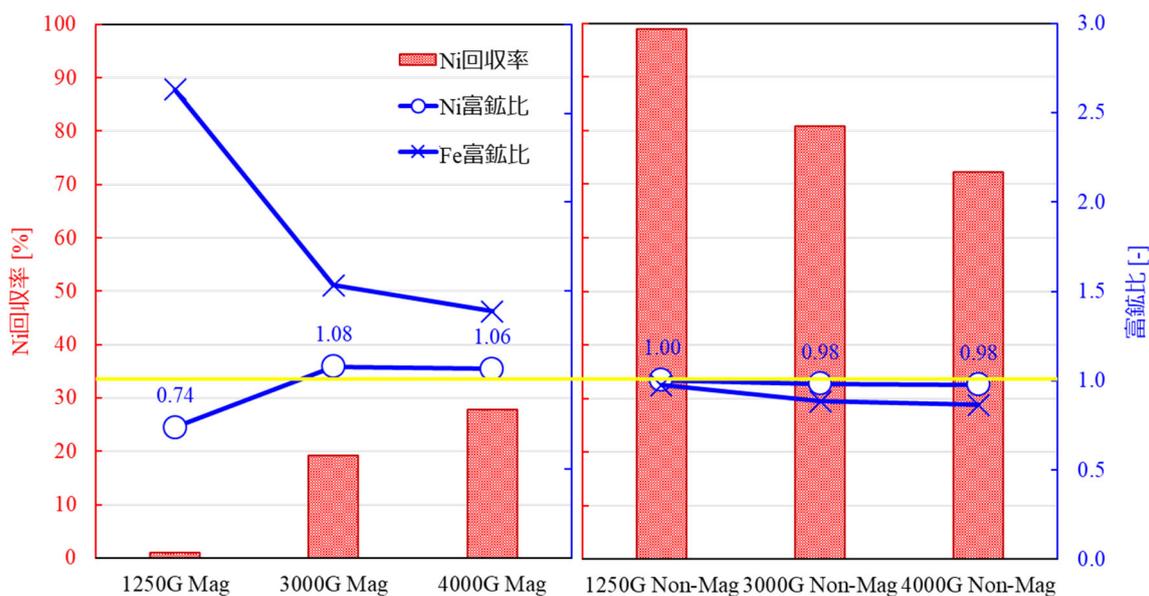


図 3-3 磁力選別試験の回収率・富鉄比

表 3-5 磁力選別の産物の品位

	Ni 品位 [wt%]	Fe 品位 [wt%]	Fe/Ni	Al 品位 [wt%]	Ca 品位 [wt%]	Mg 品位 [wt%]	
給鉄	1.45	17.42	12.01	0.79	0.09	10.73	
1250G	磁着物	1.00	40.91	40.74	0.33	0.09	3.47
	非磁着物	1.42	17.45	12.31	0.81	0.13	9.35
3000G	磁着物	1.25	31.75	25.32	0.61	0.10	5.92
	非磁着物	1.37	15.01	10.94	0.76	0.15	9.81
4000G	磁着物	1.31	26.64	20.41	0.66	0.12	7.03
	非磁着物	1.34	13.42	10.04	0.76	0.13	10.43

### 3-4 重液選別試験

#### 3-4-1 目的

鉍物の比重の違いを利用して、Ni 鉍物を選択的に回収可能か検討する。また併せて Ni 鉍物を選択的に回収可能な重液の比重を調査する。

#### 3-4-2 試験方法

重液選別の試験条件を表 3-6、試験フローを図 3-4 に示す。試験は以下に示す手順で行った。

- I. 300mL ビーカーに試料 25g と比重 2.0 に調製したポリタングステン酸ナトリウム (SPT) 水溶液 200mL を加え、1 分間攪拌した。
- II. 試料と SPT 溶液を混合したビーカーを 30°C の恒温装置内で 24 時間静置した。
- III. 24 時間静置後、SPT 水溶液の液面に浮上した産物 (浮鉍) を回収し、水洗した後にろ過および乾燥した。
- IV. ビーカーの底に滞留した産物 (沈鉍) についても回収し、水洗した後にろ過及び乾燥した。
- V. 乾燥後の沈鉍と比重 2.5 に調製した SPT 水溶液を 300mL ビーカーで 1 分間攪拌し、II ~IV と同様の操作を行い浮鉍と沈鉍を回収した。
- VI. V で回収した沈鉍に対して比重 3.0 に調製した SPT 水溶液を用いて I ~IV の操作を行い、浮鉍と沈鉍を回収した。
- VII. 回収した各産物については ICP-OES による定量分析を行った。

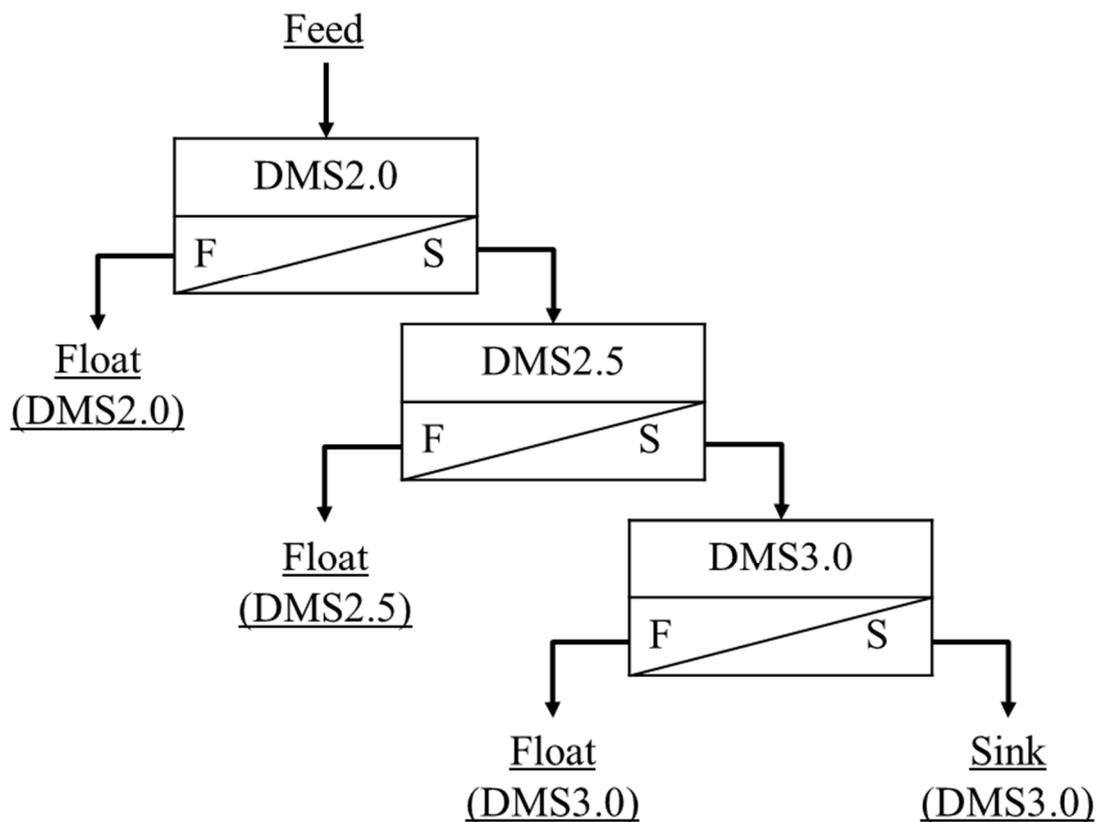


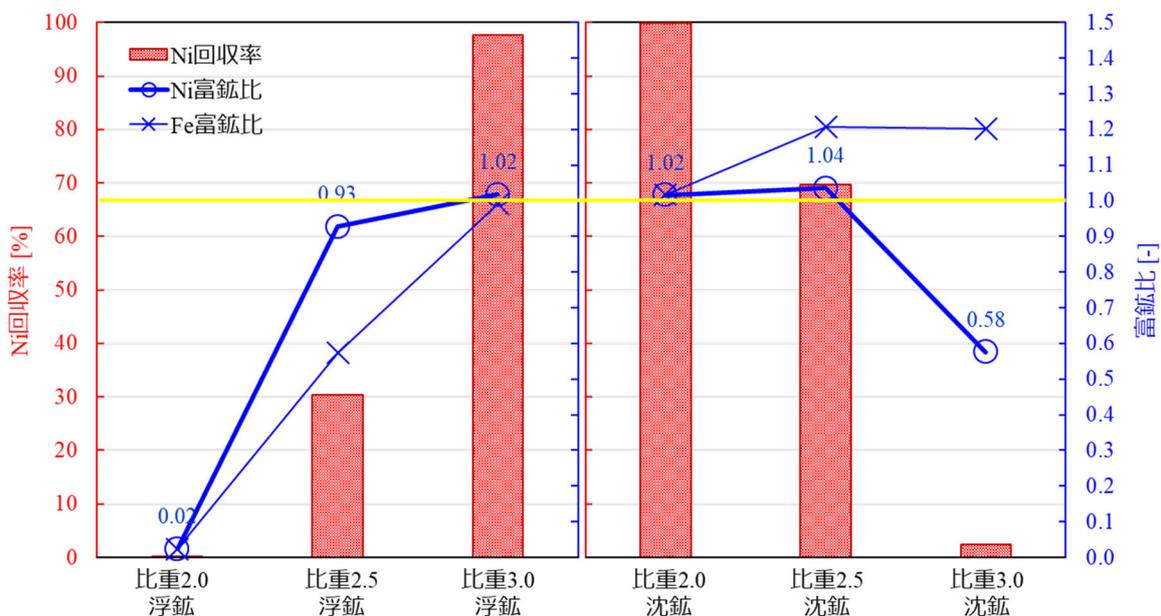
図 3-4 重液選別の試験フロー

表 3-6 重液選別の試験条件

条件	設定値
給鉦	A 鉦 -1.18+0.60mm
給鉦重量	25g
重液	ポリタングステン酸ナトリウム (SPT)
重液比重	2.0, 2.5, 3.0
重液容積	200mL
パルプ濃度	125g/L
静置時温度	30°C (恒温装置内で保持)
静置時間	1 日

### 3-4-3 試験結果

図 3-5 に浮鉱および沈鉱の Ni 回収率と Ni、Fe 富鉱比、表 3-7 に各条件で得られた産物の元素品位と Fe/Ni を示す。図 3-5 から明らかなように比重 2.0 と比重 2.5 では沈鉱、比重 3.0 では浮鉱に Ni が濃縮する傾向が見られた。この結果より Ni 鉱物を含有する粒子は比重 2.5~3.0 の間に多く存在していることが推測される。



(左図：浮鉱、右図：沈鉱)

図 3-5 重液選別の回収率・富鉱比

表 3-7 重液選別の産物品位

	Ni 品位 [wt%]	Fe 品位 [wt%]	Fe/Ni	Al 品位 [wt%]	Ca 品位 [wt%]	Mg 品位 [wt%]
給鉱	1.42	17.30	12.20	0.80	0.04	11.41
比重 2.0 浮鉱	0.04	0.44	12.14	1.39	0.02	0.18
沈鉱	1.50	18.48	12.31	1.53	0.05	11.08
比重 2.5 浮鉱	1.37	10.44	7.63	1.19	0.04	13.20
沈鉱	1.53	21.96	14.35	1.69	0.06	9.79
比重 3.0 浮鉱	1.50	18.03	11.99	1.51	0.04	11.15
沈鉱	0.85	21.87	25.70	1.80	0.03	4.96

### 3-5 ネルソンコンセンレーター比重選別試験

#### 3-5-1 目的

鉱物の比重の違いを利用して、ネルソンコンセンレーターで Ni 鉱物を選択的に回収可能か検討する。また併せて Ni 鉱物を選択的に回収可能なネルソンコンセンレーターの各種条件（回転度・流量）を調査する。

#### 3-5-2 試験方法

JOGMEC 金属資源技術研究所が所有するネルソンコンセンレーター（FLSmith Ltd 製 KC-MD3、図 3-6）を用いた。

ネルソンコンセンレーター比重選別の試験条件を表 3-8、試験フローを図 3-7 に示す。試験手順は以下の手順で行った。

- I. 遠心力を所定の回転度に調整した。
- II. 流量を 3L/min に設定した。
- III. 試料を 500mL の水道水と混合し、よく攪拌しながら約 1 分間かけて装置に投入した。
- IV. 試料投入後 2 分間選別を行い、オーバーフロー産物を回収した。
- V. 流量を 5L/min に設定し、さらに 2 分間選別を行い、オーバーフロー産物を回収した。
- VI. 流量を 7L/min に設定し、さらに 2 分間選別を行い、オーバーフロー産物を回収した。
- VII. 最後にネルソンコンセンレーター内に留まったアンダーフロー産物を回収した。
- VIII. 回収した各産物については ICP-OES による定量分析を行った。

表 3-8 ネルソンコンセンレーター比重選別の試験条件

条件	設定値
給鉱	A 鉱 -1.18+0.60mm
給鉱重量	25g
比重選別機	ネルソンコンセンレーター
給鉱濃度	25g-ore/500mL-water
給鉱時間	1min
選別時間	2min
流量	3, 5, 7 L/min
回転度	20, 30%



図 3-6 ネルソンコンセンレーター外観

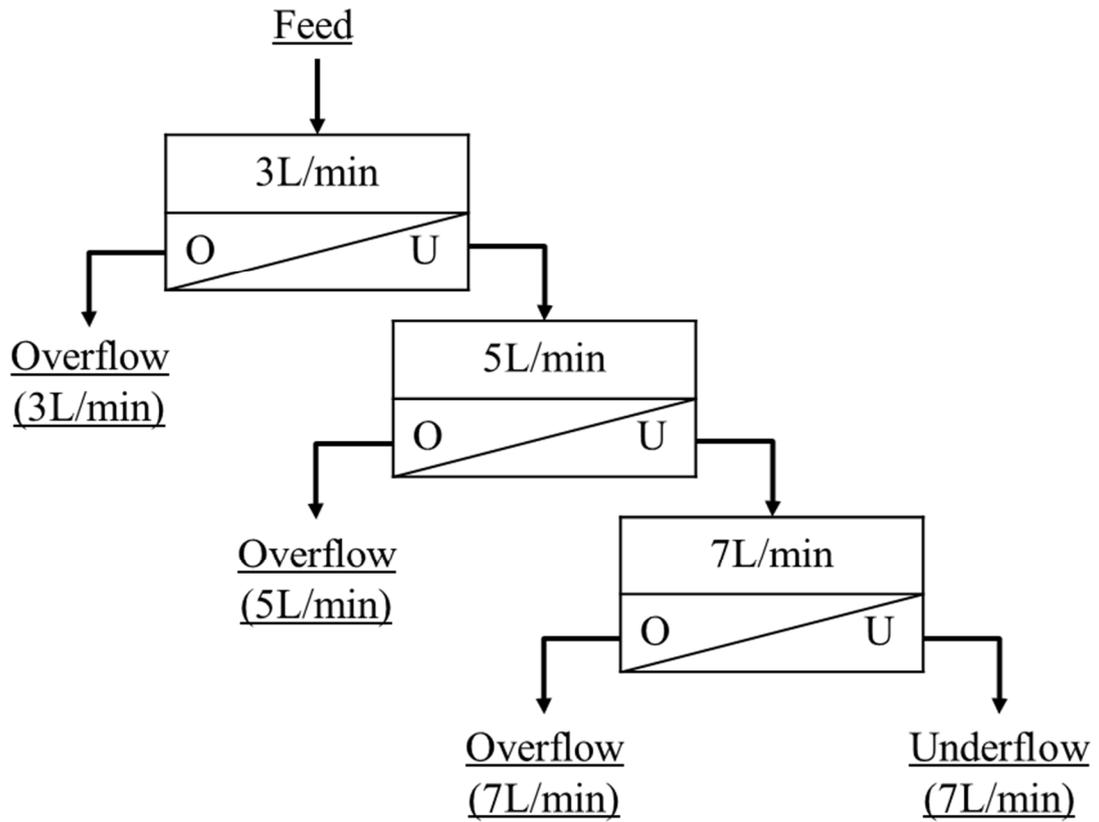
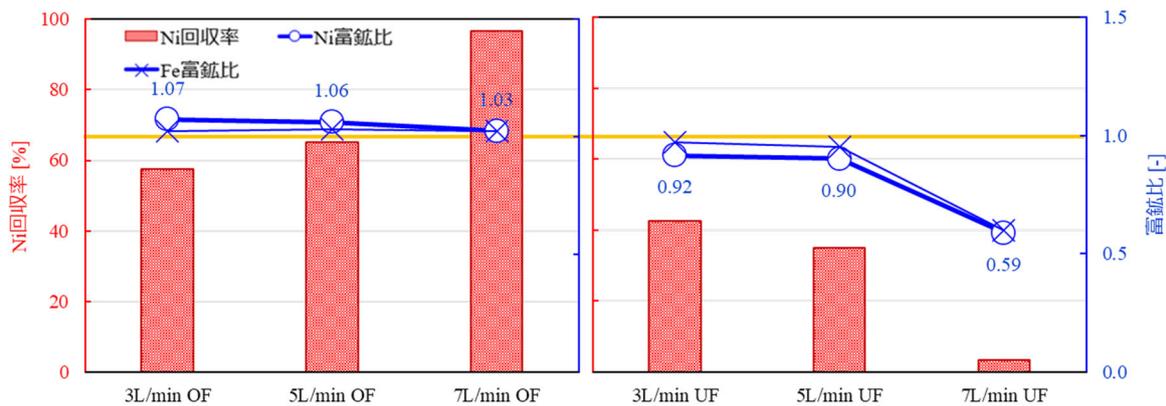


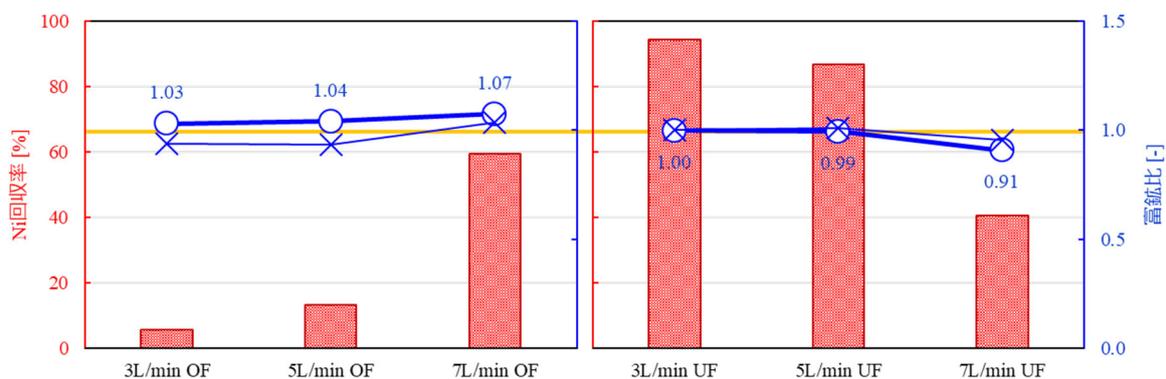
図 3-7 ネルソンコンセンレーター比重選別の試験フロー

### 3-5-3 試験結果

図 3-8 にオーバーフローおよびアンダーフローの Ni 回収率と Ni、Fe 富鉄比、表 3-9 に各条件で得られた産物の元素品位と Fe/Ni を示す。図 3-8 から明らかなように回転度 20%、回転度 30%の双方においてオーバーフロー側で Ni 富鉄比が高くなる傾向を確認した。しかしながら、回転度 30%では、Ni 富鉄比が向上したオーバーフローへの Ni 回収率が最大でも 60%にとどまった。このことより-1.18+0.60mm に対してネルソンコンセンレーター比重選別を適用する場合は、回転度を 20%に設定して行うと高 Ni 回収率での Ni 富鉄比向上が可能であることが分かった。



回転度 20% (左図：オーバーフロー、右図：アンダーフロー)



回転度 30% (左図：オーバーフロー、右図：アンダーフロー)

図 3-8 ネルソンコンセンレーター比重選別の回収率・富鉄比

表 3-9 ネルソンコンセンレーター比重選別の産物品位

			Ni 品位 [wt%]	Fe 品位 [wt%]	Fe/Ni	Al 品位 [wt%]	Ca 品位 [wt%]	Mg 品位 [wt%]
給鉱			1.42	17.30	12.20	0.80	0.04	11.41
回転度 20%	3L/min	OF	1.61	18.15	11.29	1.57	0.23	9.82
		UF	1.37	17.18	12.53	1.40	0.18	11.64
	5L/min	OF	1.59	18.24	11.46	1.55	0.22	9.92
		UF	1.35	16.86	12.50	1.39	0.19	11.85
	7L/min	OF	1.54	18.15	11.81	1.51	0.19	10.47
		UF	0.88	10.59	12.02	1.25	0.53	13.91
回転度 30%	3L/min	OF	1.45	16.20	11.15	1.58	0.51	8.15
		UF	1.41	17.30	12.28	1.51	0.21	10.54
	5L/min	OF	1.47	16.13	10.98	1.57	0.36	8.71
		UF	1.40	17.40	12.41	1.50	0.21	10.66
	7L/min	OF	1.40	17.87	11.79	1.57	0.24	9.70
		UF	1.28	16.45	12.84	1.44	0.22	11.29

OF:オーバーフロー、UF:アンダーフロー

### 3-6 テーブル選別試験

#### 3-6-1 目的

鉱物の比重の違いを利用して、テーブル選別機で Ni 鉱物を選択的に回収可能か検討する。また併せて Ni 鉱物を選択的に回収可能なテーブル選別機の各種条件（デッキ角度・流量・カットポイント）を調査する。

#### 3-6-2 試験方法

テーブル選別試験では、国立大学法人秋田大学が所有するウィルフレータブル選別機（Clyde Mining & Engineering 製 Wilfley #13 Laboratory Size Table、図 3-9）を用いた。

テーブル選別の試験条件を表 3-10 に示す。テーブル選別においては、図 3-10 に示すように試料を 5 か所の回収口より回収した。得られた 5 種の産物（H1, H2, M, L1, L2）は乾燥後、ICP-OES による定量分析を行った。



図 3-9 テーブル選別機外観

表 3-10 テーブル選別の試験条件

条件	設定値
給鉱	-1.18+0.60mm
給鉱重量	50g
選別機	ウィルフレーテーブル
流量	6L/min, 8L/min (10°のみ)
デッキ角度	3, 7, 10°
給鉱時間	1min
選別時間	2min
パルプ濃度	10% (給鉱 50g+水 450mL)

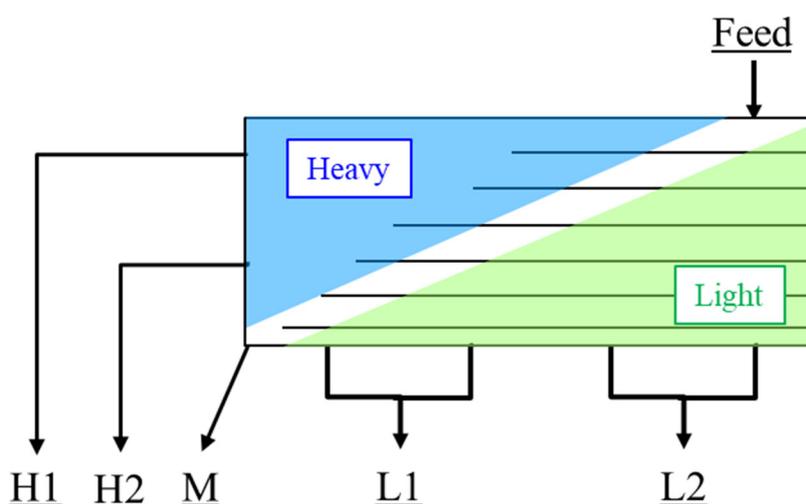
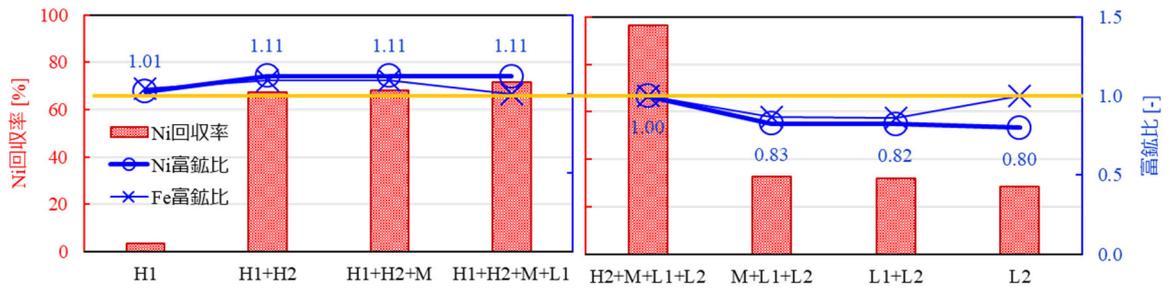


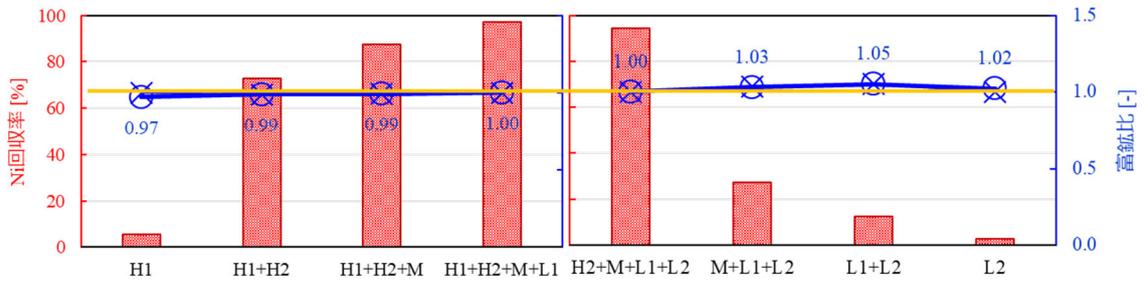
図 3-10 テーブル選別機の回収口

### 3-6-3 試験結果

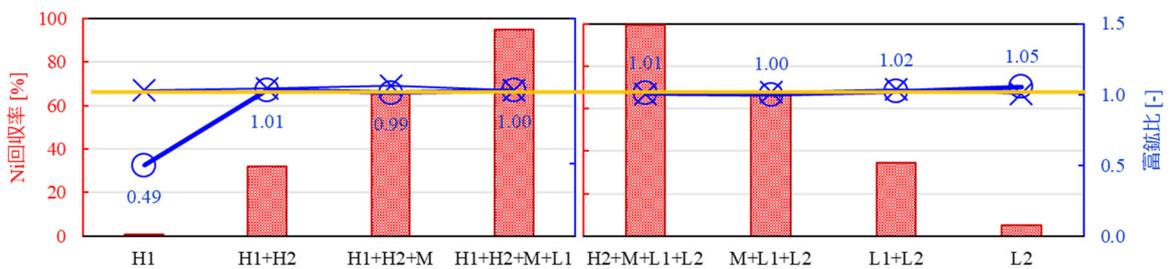
図 3-11 に重産物および軽産物の Ni 回収率と Ni、Fe 富鉱比、表 3-11 に各条件で得られた産物の元素品位と Fe/Ni を示す。図 3-11 よりデッキ傾斜角が 3° のときは重産物、7° および 10° では軽産物で Ni 富鉱比が高くなる傾向を確認した。デッキ傾斜角が 7° および 10° では、Ni 富鉱比が向上するものの Ni 回収率は 50%未満と低くなった。対してデッキ傾斜角 3° で Ni 富鉱比が向上した軽産物では、Ni 回収率が 70%近くとなった。このことより、-1.18+0.60mm に対してテーブル選別を適用する場合は、デッキ傾斜角を 3° に設定して行くと高 Ni 回収率での Ni 富鉱比向上が可能であることが分かった。



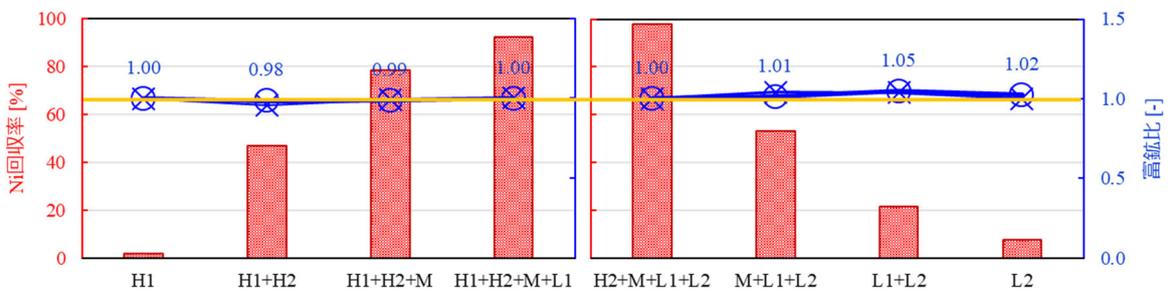
デッキ傾斜角 3° , 流量 6L/min (右図 : 重産物、左図 : 軽産物)



デッキ傾斜角 7° , 流量 6L/min (右図 : 重産物、左図 : 軽産物)



デッキ傾斜角 10° , 流量 6L/min (右図 : 重産物、左図 : 軽産物)



デッキ傾斜角 10° , 流量 8L/min (右図 : 重産物、左図 : 軽産物)

図 3-11 テーブル選別の回収率・富鉄比

表 3-11 テーブル選別の産物品位

			Ni 品位 [wt%]	Fe 品位 [wt%]	Fe/Ni	Al 品位 [wt%]	Ca 品位 [wt%]	Mg 品位 [wt%]	
給鉱			1.42	17.30	12.20	0.80	0.04	11.41	
3° 6L/min	重産物	H1	1.42	17.10	12.06	1.48	0.18	11.42	
		H1+H2	1.56	17.93	11.53	1.53	0.23	10.45	
		H1+H2+M	1.56	17.94	11.53	1.53	0.23	10.45	
		H1+H2+M+L1	1.55	17.81	11.48	1.54	0.25	10.32	
	軽産物	H2+M+L1+L2	1.40	16.49	11.80	1.86	0.88	8.72	
		M+L1+L2	1.16	14.32	12.38	2.33	1.82	6.29	
		L1+L2	1.15	14.25	12.39	2.34	1.84	6.23	
		L2	1.12	14.10	12.60	2.42	1.97	5.88	
	7° 6L/min	重産物	H1	1.48	1.53	12.12	1.63	0.64	10.99
			H1+H2	1.51	1.57	11.75	1.50	0.20	11.14
			H1+H2+M	1.51	1.60	11.78	1.51	0.20	11.03
			H1+H2+M+L1	1.53	1.56	11.75	1.51	0.19	10.93
軽産物		H2+M+L1+L2	1.53	17.95	11.76	1.51	0.20	10.89	
		M+L1+L2	1.57	18.63	11.86	1.57	0.29	10.22	
		L1+L2	1.60	18.86	11.76	1.59	0.39	9.87	
		L2	1.56	18.79	12.05	1.64	0.45	9.63	
10° 6L/min		重産物	H1	0.73	8.76	12.01	0.74	0.17	5.51
			H1+H2	1.50	16.86	11.21	1.51	0.20	10.09
			H1+H2+M	1.48	17.19	11.62	1.54	0.27	10.84
			H1+H2+M+L1	1.50	17.64	11.73	1.61	0.27	10.92
	軽産物	H2+M+L1+L2	1.51	17.67	11.72	1.62	0.60	10.83	
		M+L1+L2	1.49	17.86	11.96	1.65	0.34	11.06	
		L1+L2	1.53	18.23	11.91	1.73	0.34	10.59	
		L2	1.58	18.06	11.45	1.79	0.75	8.97	

10° 8L/min	重産物	H1	1.49	17.83	11.93	1.60	0.12	11.24
		H1+H2	1.47	17.05	11.57	1.55	0.17	10.52
		H1+H2+M	1.48	17.68	11.97	1.51	0.24	10.73
		H1+H2+M+L1	1.49	17.88	11.97	1.53	0.24	10.66
	軽産物	H2+M+L1+L2	1.50	17.86	11.94	1.53	0.27	10.56
		M+L1+L2	1.52	18.60	12.26	1.52	0.35	10.62
		L1+L2	1.57	18.54	11.81	1.62	0.38	9.96
		L2	1.53	17.57	11.46	1.64	0.61	9.28

### 3-7 繰り返し粉砕

#### 3-7-1 目的

鉱物の粉砕性の違いを利用して、繰り返し粉砕で Ni 鉱物を選択的に粉砕・ふるい分け回収可能か検討する。また併せて Ni 鉱物を選択的に粉砕・ふるい分け回収可能な粉砕回数を調査する。

#### 3-7-2 試験方法

粉砕装置として、JOGMEC 金属資源技術研究所が所有するポットミル（図 3-12）を用いた。粉砕の選択性を高めるため、通常ポットミルとして使用する場合と比較して低い粉砕媒体充填率で粉砕した。粒径の境界を 0.075mm とし、0.075mm 以下の試料をニッケル濃縮産物とした。

繰り返し粉砕の試験条件を表 3-12、試験フローを図 3-13 に示す。繰り返し粉砕試験は、以下の手順で行った。

- I. ミルの容器に試料 50g と 25mL の水道水を加えた。
- II. 91rpm で 10 分間粉砕をした。
- III. 容器から試料を取り出し、0.075mm のふるいで湿式ふるい分けを行った。
- IV. 網上産物はミルの容器に戻し、25mL の水道水を添加した。網下産物はろ過後、乾燥させた。
- V. II.~IV.を 2 回繰り返し、最後に網上産物を回収し、ろ過後乾燥させた。
- VI. 回収した各産物については ICP-OES による定量分析および MLA による観察を行った。

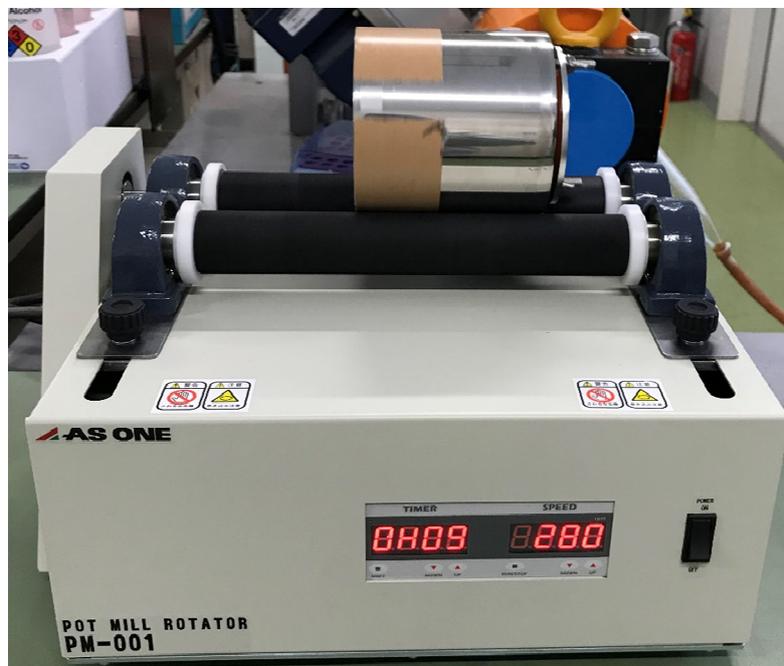


図 3-12 ポットミルの外観

表 3-12 繰り返し粉砕の試験条件

条件	設定値
給鉱	A 鉱 -13.2mm
給鉱重量	50g (初期条件)
粉砕機	1L ポットミル
粉砕媒体充填率	6%
回転数	91rpm
磨鉱時間	10min
パルプ濃度	66% (試料 50g+水 25mL)

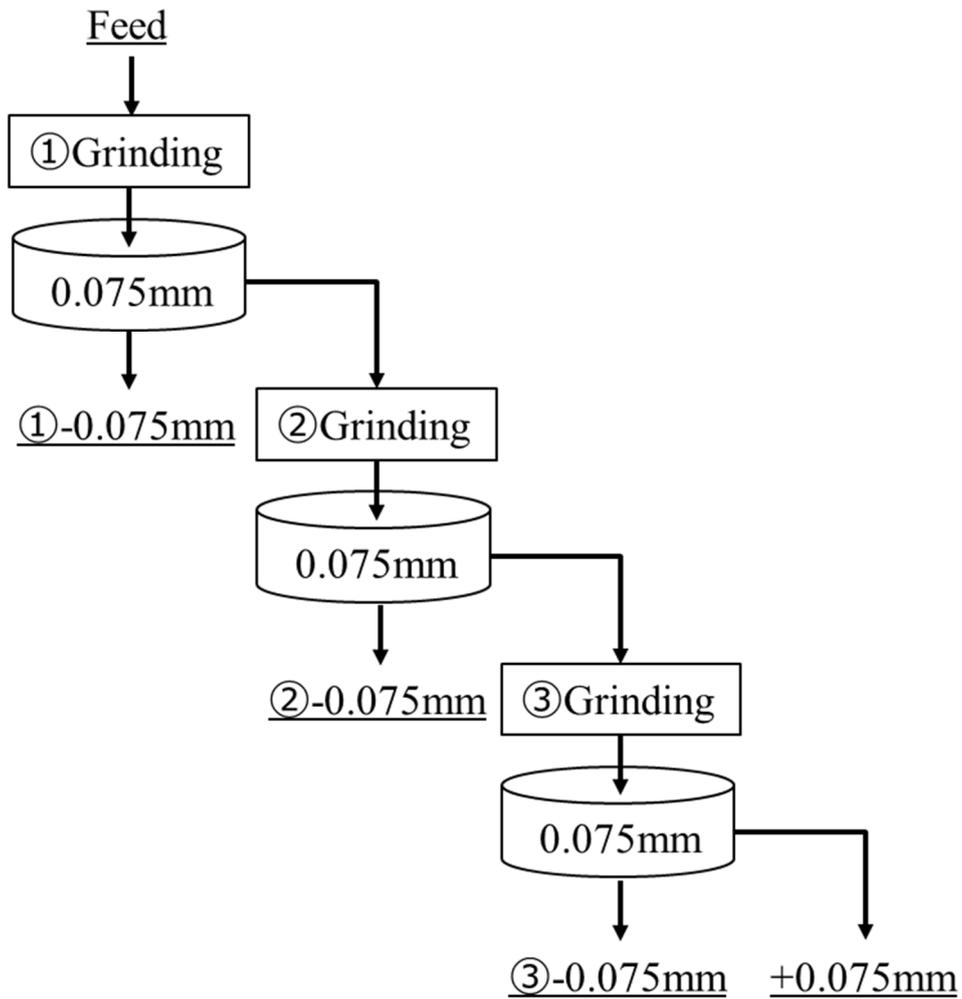
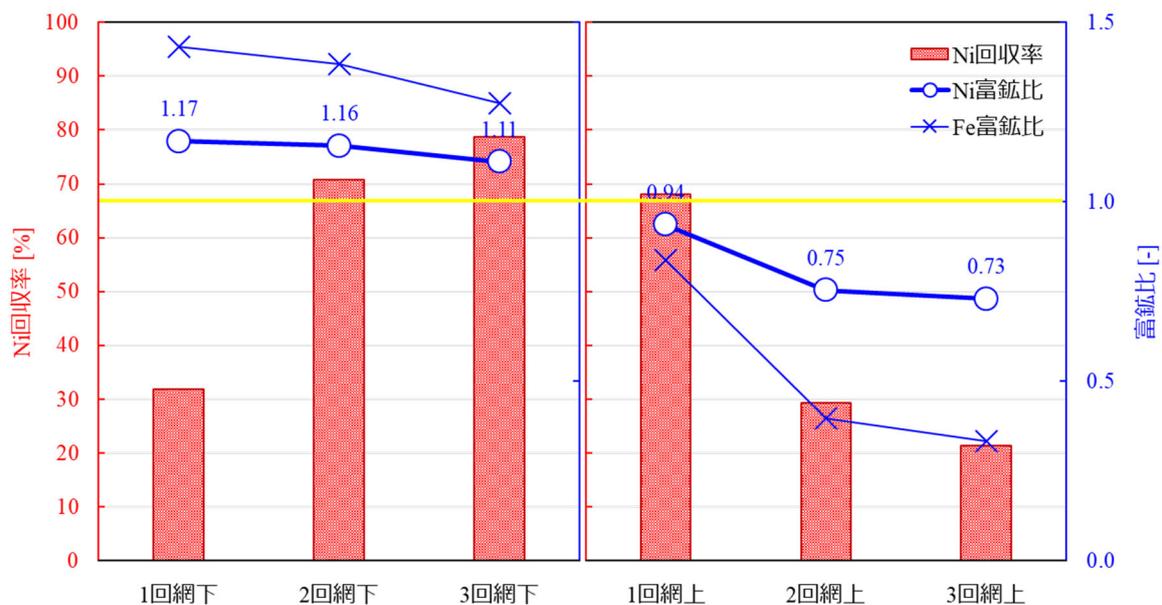


図 3-13 繰り返し粉砕の試験フロー

### 3-7-3 試験結果

図 3-14 に 1 回から 3 回目までそれぞれの網上及び網下の Ni 回収率と Ni、Fe 富鉄比、表 3-13 に各条件で得られた産物の元素品位と Fe/Ni を示す。図 3-14 より網下で Ni 富鉄比が向上する傾向および Ni 富鉄比と連動して Fe 富鉄比が変化する傾向を確認した。さらに図 3-15 に MLA より求めた Ni 含有鉄物別の網下への回収率を示す。図 3-15 から分かるように繰り返し粉碎では Fe を多く含有する鉄物の Serpentine と Fe Oxide の混合物や Fe Oxide が粉碎されやすく、網下にこれらの高 Fe 含有 Ni 鉄物が濃縮されたことによるものと考えられる。

表 3-14 に繰り返し粉碎で得られた各産物の個別のデータを示す。表 3-14 より Ni 富鉄比が 1 を超える産物は、1 回目の粉碎及び 2 回目の粉碎で得られた網下産物までであることがわかる。このことより、繰り返し粉碎で Ni を網下産物へ濃縮するには、繰り返し粉碎の回数が 2 回までが効果的であることが分かった。



(左図：網下、右図：網上)

図 3-14 繰り返し粉砕の回収率・富鉄比

表 3-13 繰り返し粉砕の産物品位

粉砕回数		Ni 品位 [wt%]	Fe 品位 [wt%]	Fe/Ni	Al 品位 [wt%]	Ca 品位 [wt%]	Mg 品位 [wt%]
給鉄		1.50	17.38	11.60	0.73	0.07	11.90
1 回	網上	1.42	13.55	9.51	1.11	0.17	14.74
	網下	1.78	23.16	13.03	1.81	0.18	10.26
2 回	網上	1.15	6.40	0.40	0.64	0.16	17.63
	網下	1.76	22.37	12.72	1.73	0.19	10.90
3 回	網上	1.11	5.37	0.33	0.52	0.11	18.41
	網下	1.69	20.62	12.20	1.63	0.20	11.50

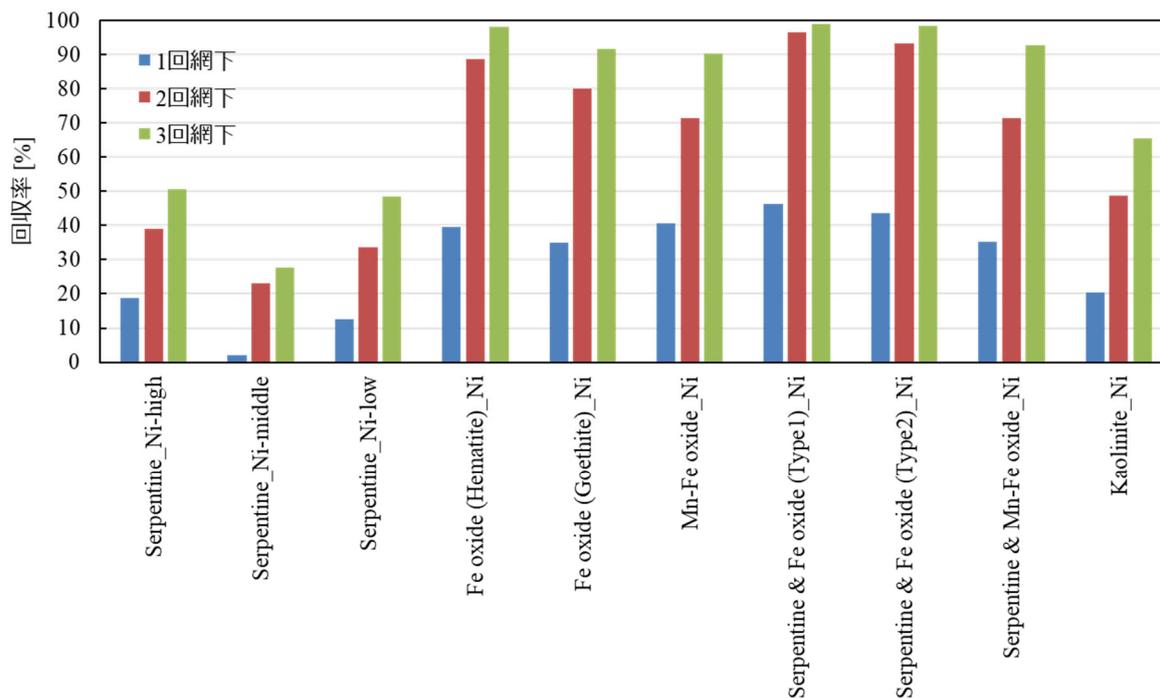


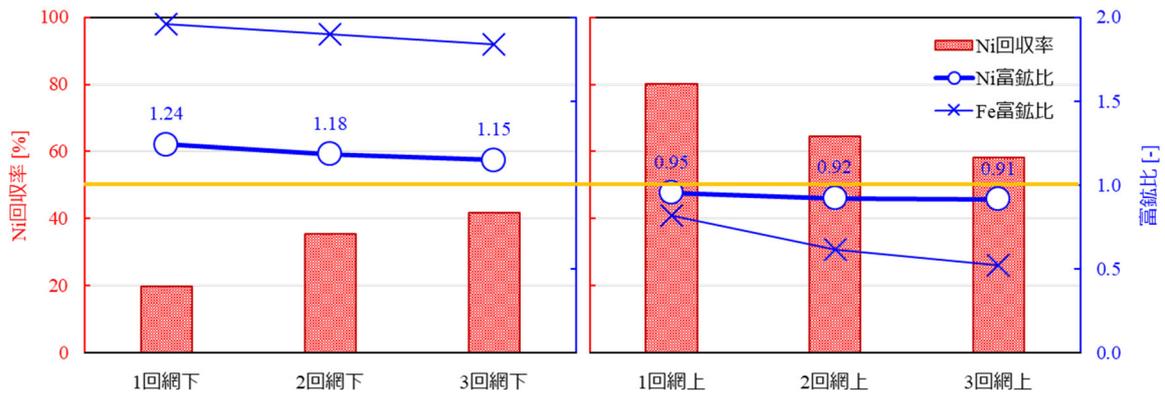
図 3-15 繰り返し粉砕の網下への鉱物回収率

表 3-14 繰り返し粉砕で得られた各産物個別のデータ

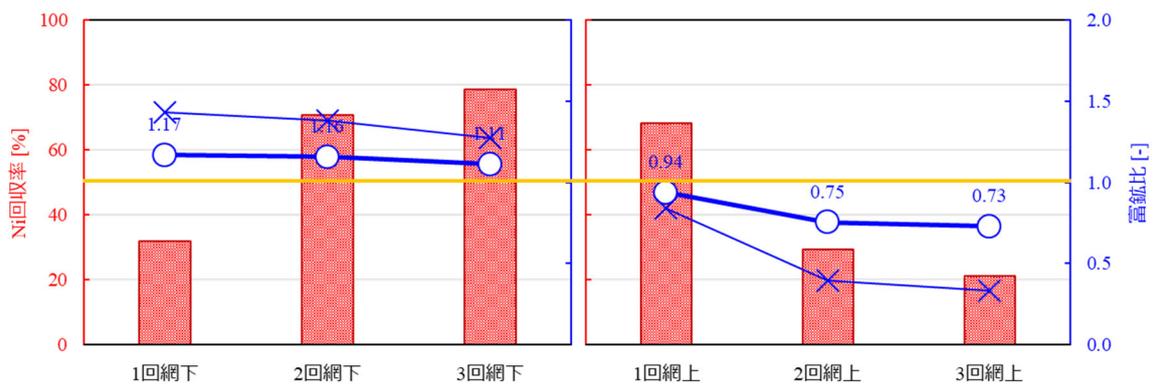
	Ni 分布率 [%]	Ni 品位 [wt%]	Ni 富鉱比 [-]
①-0.075mm	31.9	1.78	1.17
②-0.075mm	38.9	1.74	1.15
③-0.075mm	7.9	1.26	0.83
+0.075mm	21.3	1.11	0.73

### 3-7-4 B 鉱との比較

図 3-16 に B 鉱と A 鉱の繰り返し粉砕での Ni 回収率と Ni、Fe 富鉱比、表 3-15 に得られた産物の元素品位と Fe/Ni を示す。図 3-16 から明らかなように B 鉱と A 鉱はともに網下で Ni 富鉱比が向上する傾向を確認した。また網下での Ni 回収率は、B 鉱と比較して A 鉱の方が高くなることが分かった。これは Ni 存在形態が、B 鉱では Serpentine 及び Serpentine と Fe Oxide の混合物、両方であるのに対し、A 鉱では粉砕されやすい Serpentine と Fe Oxide の混合物が支配的であることに由来すると考えられる。



B 鉱 (左図：網下、右図：網上)



A 鉱 (左図：網下、右図：網上)

図 3-16 鉱種別の繰り返し粉砕の回収率・富鉱比

表 3-15 鉍種別の繰り返し粉碎の試験結果

鉍種	粉碎回数		Ni 品位 [wt%]	Fe 品位 [wt%]	Fe/Ni	Al 品位 [wt%]	Ca 品位 [wt%]	Mg 品位 [wt%]
B 鉍	給鉍		1.54	16.41	10.66	0.49	0.04	14.42
	1 回	網上	1.53	12.00	7.82	0.31	0.03	16.26
		網下	2.00	28.72	14.35	0.70	0.05	10.25
	2 回	網上	1.48	9.02	6.09	0.24	0.02	17.58
		網下	1.91	27.84	14.61	0.70	0.04	9.99
	3 回	網上	1.47	7.63	5.19	0.22	0.02	18.25
		網下	1.85	26.92	14.56	0.66	0.05	10.18
	A 鉍	給鉍		1.50	17.38	11.60	0.73	0.07
1 回		網上	1.42	13.55	9.51	1.11	0.17	14.74
		網下	1.78	23.16	13.03	1.81	0.18	10.26
2 回		網上	1.15	6.40	0.40	0.64	0.16	17.63
		網下	1.76	22.37	12.72	1.73	0.19	10.90
3 回		網上	1.11	5.37	0.33	0.52	0.11	18.41
		網下	1.69	20.62	12.20	1.63	0.20	11.50

### 3-8 基礎選別試験まとめ

基礎選別試験として磁力選別、重液選別、ネルソンコンセントレーター比重選別、テーブル選別、繰り返し粉砕を実施した。表 3-16 に各選別の Ni 濃縮が確認された条件のうち最も効果のあった条件の結果をまとめる。表 3-16 より Ni の高品位化に最も効果があったのは、繰り返し粉砕であることがわかる。しかしながら繰り返し粉砕では、Ni 回収率が 70%と 30%近く Ni をロスしてしまっている。対して、重液選別やネルソンコンセントレーターでは Ni の回収率が 100%近くと非常に高いが、Ni の高品位化は限定的であった。このようにそれぞれの選別で Ni の高品位化と Ni 回収率に得意不得意があることが確認された。

表 3-16 選別手法の比較

	対象鉱石	条件	Ni 回収率	高 Ni 産物 Ni 富鉱比	低 Ni 産物 Ni 富鉱比
磁力選別	-0.30+0.15	3000G	磁着物 20%	1.08	0.98
重液選別	-1.18+0.60	比重 3.0	浮鉱 100%	1.02	0.58
ネルソン コンセントレーター 比重選別	-1.18+0.60	回転度 20%	OF 95%	1.03	0.59
テーブル選別	-1.18+0.60	デッキ傾斜角 3° 流量 6L/min	重産物 70%	1.11	0.83
繰り返し粉砕	-13.2	2 回粉砕	網下 70%	1.16	0.75

※OF:オーバーフロー

## 4 繰り返し粉砕と物理選別の組み合わせ試験

### 4-1 繰り返し粉砕と物理選別の組み合わせ試験

3-7より繰り返し粉砕でNiを網下へ濃縮回収可能であることが分かった。しかしながら網上には幾らかNiが残存している。本試験では、繰り返し粉砕で網上に残存したNiを各種物理選別で回収可能か調査する。

### 4-2 繰り返し粉砕試験

#### 4-2-1 目的

繰り返し粉砕を行い、Niを濃縮した網下産物とNiが低減された網上産物を得る。また繰り返し粉砕時のNiのマテリアルバランスを作成する。

#### 4-2-2 試験方法

3-7の試験より大量の試料が必要となることから、3-7で使用したポットミルをスケールアップした粉砕装置として、JOGMEC 金属資源技術研究所が所有するボールミル（吉田製作所製、図 4-1）を用いた。粉砕の選択性を高めるため、通常ボールミルとして使用する場合と比較して低い粉砕媒体充填率で粉砕した。粒径の境界を0.075mmとし、0.075mm以下の試料をニッケル濃縮産物とした。

2回繰り返し粉砕の試験条件を表 4-1、試験フローを図 4-2 に示す。2回繰り返し粉砕試験は、以下の手順で行った。

- I. ミルの容器に試料 500g と 250mL の水道水を加えた。
- II. 60rpm で 10 分間粉砕をした。
- III. 容器から試料を取り出し、0.075mm のふるいで湿式ふるい分けを行った。
- IV. 網下産物はミルの容器に戻し、250mL の水道水を添加し、II の条件で再度粉砕した。網下産物はろ過後、乾燥させた。
- V. IV. で得られた粉砕産物に対して、1.18mm および 0.075mm のふるいで湿式ふるい分けをし、+1.18mm, -1.18+0.075mm, -0.075mm の粒群の試料を回収し、ろ過後乾燥させた。
- VI. 回収した各産物については ICP-OES による定量分析、MLA による観察および物理選別試験に供するため所定の重量になるまで縮分を行った。

表 4-1 繰り返し粉碎の試験条件

条件	設定値
給鉱	A 鉱 -13.2mm
給鉱重量	500g (初期条件)
粉碎機	8L ボールミル
粉碎媒体充填率	6%
回転数	60rpm
磨鉱時間	10min
パルプ濃度	66% (試料 500g+水 250mL)



図 4-1 ボールミルの外観

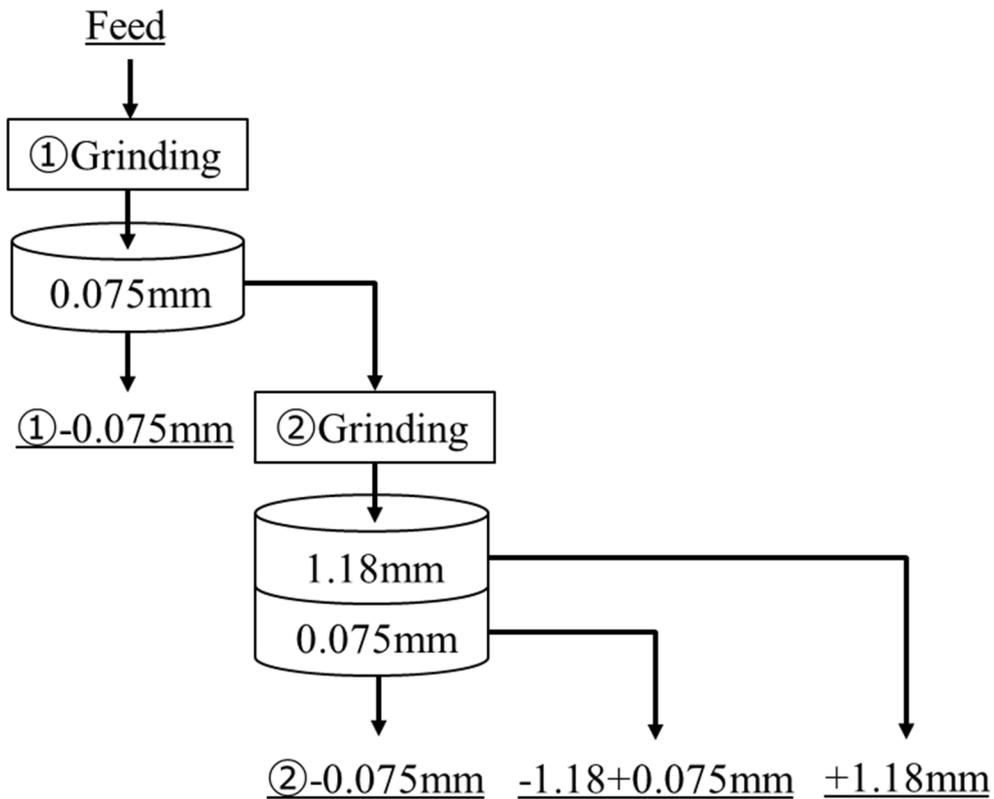
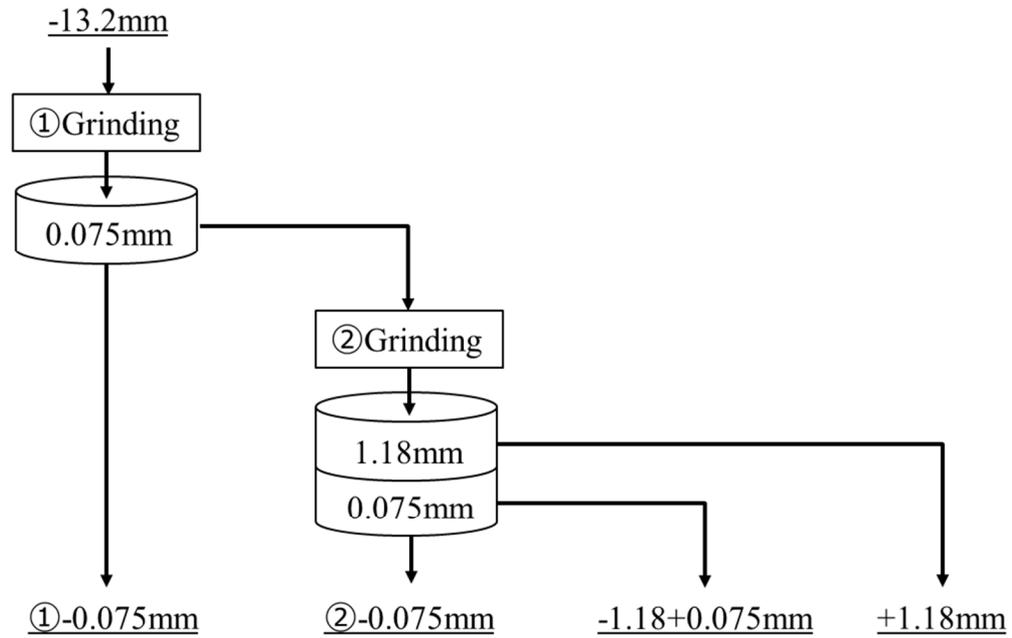


図 4-2 2回繰り返し粉砕のフロー

#### 4-2-3 試験結果

図 4-3 に 2 回繰り返し粉砕のマテリアルバランスを示す。図 4-3 より Ni は網下に濃縮され、粉砕回数が 1 回、2 回の両網下産物とも高 Ni 産物が得られた。網上産物については -1.18+0.075mm の方が、+1.18mm と比較して Ni 品位が高かった。



	①-0.075mm	②-0.075mm	-1.18+0.075mm	+1.18mm
歩留 [%]	27.3	33.9	19.4	19.4
Ni分布率 [%]	32.1	39.2	14.6	14.1
Ni品位 [wt%]	1.78	1.74	1.14	1.10
Fe品位 [wt%]	23.16	23.71	7.90	5.49
Fe/Ni	13.03	12.47	6.93	4.99
Al品位 [wt%]	1.81	1.66	0.98	0.50
Ca品位 [wt%]	0.18	0.19	0.20	0.21
Mg品位 [wt%]	10.26	11.42	14.74	16.85

図 4-3 2 回繰り返し粉砕のマテリアルバランス

#### 4-3 +1.18mm 手選別

##### 4-3-1 目的

2回繰り返し粉砕で得られた+1.18mm に対しては、テーブル選別やネルソンコンセントレーター比重選別の適用外粒径（1.0mm 以下が対象）であり、実施する場合には追加の磨鉱工程が必要になる。また、重液選別を実施したところ、比重 2.0 から 3.0 の範囲では Ni を濃縮させることが出来なかった。これら理由から、鉱石の特徴（色彩・形状）で高 Ni 含有鉱物を選択的に回収可能か検討する。

##### 4-3-2 試験方法

2回繰り返し粉砕で得られた+1.18mm の鉱石を色彩や形状の違いでオレンジ色、白色、緑色、灰色、黒色の 5 タイプに手選別した。また晶癖の違いからオレンジ色を更に板状、それ以外を小片状の 2 タイプに分けた。手選別した各鉱石はそれぞれ ICP-OES で定量分析、XRD で鉱物同定を行った。

##### 4-3-3 試験結果

図 4-4 に手選別で得られた鉱石の写真、図 4-5 にタイプ別の各鉱石の Ni 分布率と Ni、Fe 富鉱比、表 4-2 に各条件で得られた産物の元素品位と Fe/Ni を示す。図 4-5 より Ni は白色と緑色の鉱石に多く分布していることがわかる。さらに表 4-2 から白色の鉱石には Ni が 1.55 wt% と高品位で含有していることが見て取れる。図 4-6 にタイプ別の各鉱石の XRD パターンを示す。図 4-6 から Ni を高く含有していた白色の鉱石は Serpentine であることが確認された。

本試験の結果より+1.18mm の鉱石に対して色彩による選別で Ni 濃縮の可能性が示唆された。



図 4-4 +1.18mm 手選別で得られた鉱石

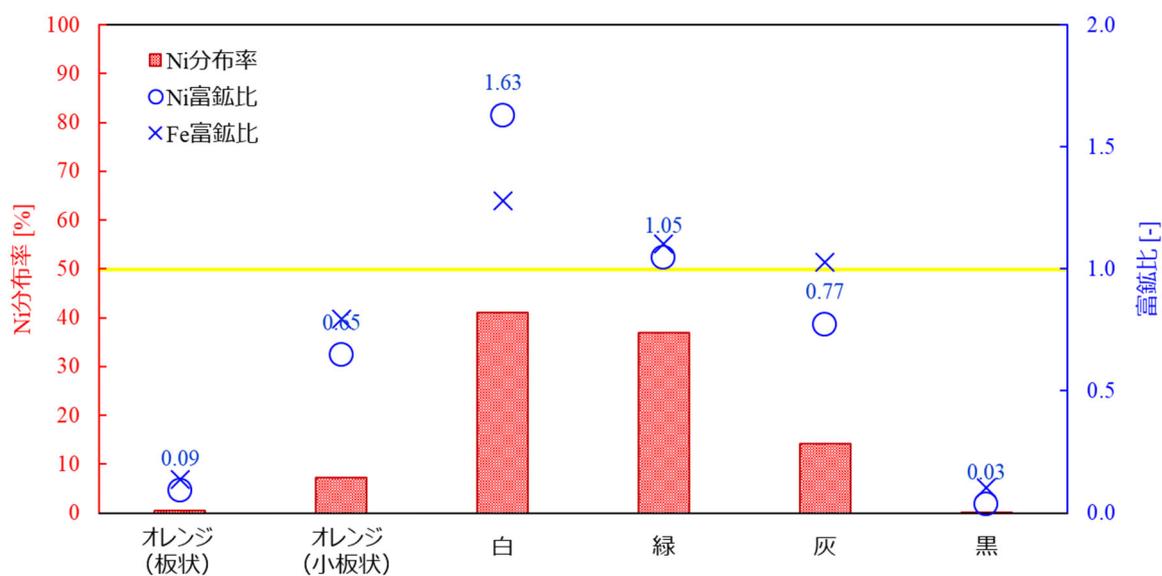


図 4-5 +1.18mm 手選別の分布率・富鉱比

表 4-2 +1.18mm 手選別の産物品位

	Ni 品位 [wt%]	Fe 品位 [wt%]	Fe/Ni	Al 品位 [wt%]	Ca 品位 [wt%]	Mg 品位 [wt%]
給鉱	1.10	5.49	5.01	0.50	0.21	16.85
オレンジ (板状)	0.09	0.72	8.37	0.03	0.01	0.98
オレンジ (小片状)	0.62	4.17	6.76	0.42	0.02	4.33
白	1.55	6.72	4.32	0.70	0.02	4.33
緑	1.00	5.78	5.80	0.72	0.17	17.93
灰	0.74	5.39	7.31	1.19	0.42	19.29
黒	0.03	0.54	16.36	4.62	0.03	1.98

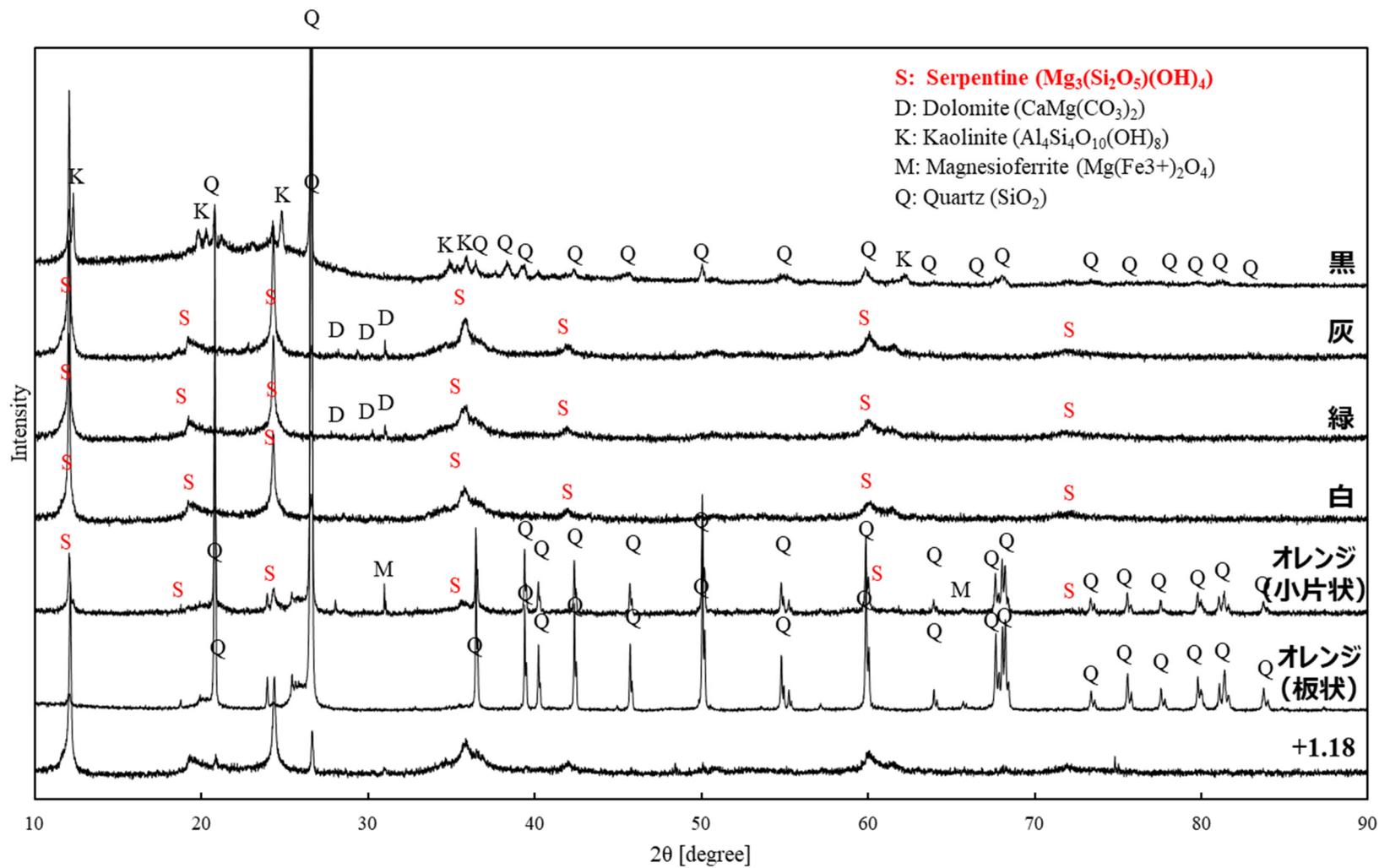


図 4-6 +1.18mm 手選別産物の XRD パターン

#### 4-4 -1.18+0.075mm 重液選別

##### 4-4-1 目的

2回繰り返し粉碎で得られた-1.18+0.075mm に対して重液選別で高 Ni 含有鉱物を選択的に回収可能か検討する。また併せて高 Ni 含有鉱物を選択的に回収可能な重液比重を調査する。

##### 4-4-2 試験方法

2回繰り返し粉碎で得られた-1.18+0.075mm に対して 3-4-2 と同様の試験方法で重液選別を行った。

##### 4-4-3 試験結果

図 4-7 に浮鉱および沈鉱の Ni 回収率と Ni、Fe 富鉱比、表 4-3 に各条件で得られた産物の元素品位と Fe/Ni を示す。図 4-7 から明らかなように比重 2.0 では沈鉱、比重 2.5、3.0 では浮鉱に Ni が濃縮する傾向が見られた。この結果より Ni 鉱物を含む粒子は比重 2.0~3.0 の間に多く存在していることが推測される。表 4-3 から Ni 品位が最も高くなったのは比重 2.5 で重液選別を行った時の浮鉱であることが分かった。

比重の異なる重液を多段で組み合わせた多段重液選別の検討を行った。多段重液選別の各比重範囲での Ni 分布率、富鉱比を図 4-8、各比重範囲での元素品位と Fe/Ni を表 4-4 に示す。図 4-8 より Ni の 70%近くが比重 2.0~2.5 の範囲に分布していることがわかる。また表 4-4 より Ni 品位が 1 wt%を超えたのは、比重 2.0~2.5 の範囲のみであることがわかる。このことより 2回繰り返し粉碎した-1.18+0.075mm では比重が 2.0~2.5 の範囲に高 Ni 含有粒子が多く含まれていることを確認した。

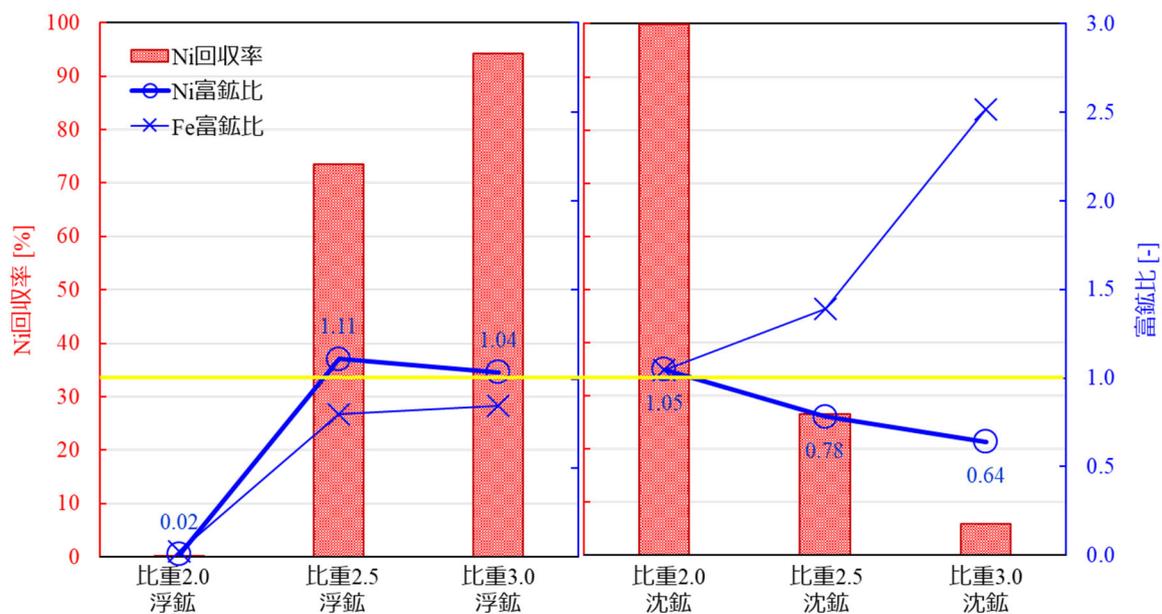


図 4-7 -1.18+0.075mm 重液選別の回収率・分布率

表 4-3 -1.18+0.075mm 重液選別の産物品位

	Ni 品位 [wt%]	Fe 品位 [wt%]	Fe/Ni	Al 品位 [wt%]	Ca 品位 [wt%]	Mg 品位 [wt%]	
給鉱	1.14	7.90	6.93	0.98	0.20	14.74	
比重 2.0	浮鉱	0.02	0.24	13.97	1.34	0.03	0.09
	沈鉱	1.12	7.31	6.51	0.90	0.08	15.80
比重 2.5	浮鉱	1.19	5.60	4.70	0.83	0.03	17.22
	沈鉱	0.84	9.70	11.57	1.09	0.17	10.91
比重 3.0	浮鉱	1.11	5.92	5.33	0.91	0.07	16.11
	沈鉱	0.69	17.59	25.67	1.05	0.20	4.82

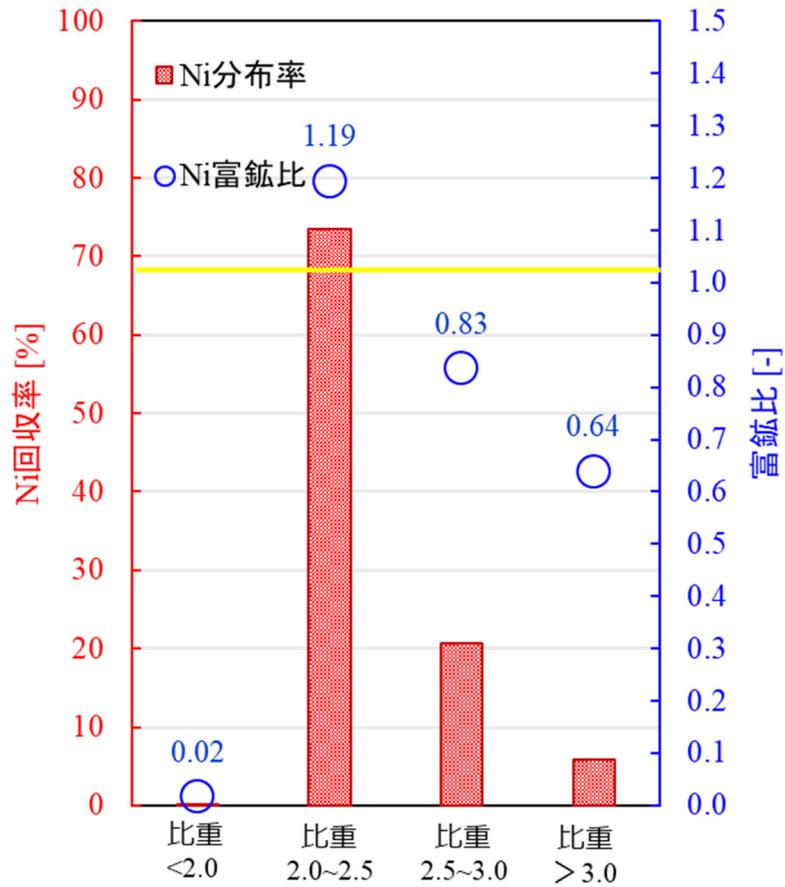


図 4-8 -1.18+0.075mm 多段重液選別の分布率・富鋇比

表 4-4 -1.18+0.075mm 多段重液選別の産物品位

	Ni 品位 [wt%]	Fe 品位 [wt%]	Fe/Ni	Al 品位 [wt%]	Ca 品位 [wt%]	Mg 品位 [wt%]
給鋇	1.14	7.90	6.93	0.98	0.20	14.74
比重<2.0	0.02	0.24	13.97	1.34	0.03	0.09
比重 2.0~2.5	1.28	6.00	4.69	0.80	0.03	18.49
比重 2.5~3.0	0.90	6.79	7.58	1.11	0.16	13.16
比重>3.0	0.69	17.59	25.67	1.05	0.20	4.82

#### 4-5 -1.18+0.075mm ネルソンコンセントレーター比重選別

##### 4-5-1 目的

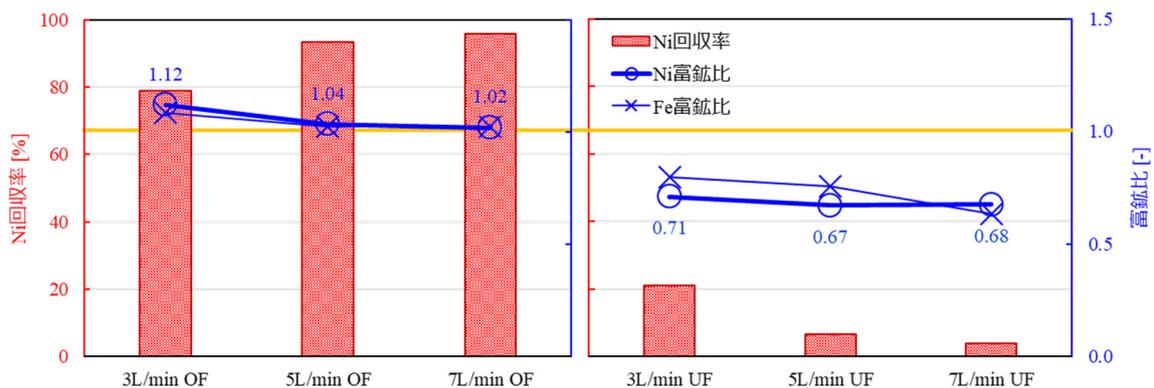
2 回繰り返し粉碎で得られた-1.18+0.075mm に対してネルソンコンセントレーターで高 Ni 含有鉱物を選択的に回収可能か検討する。また併せて高 Ni 含有鉱物を選択的に回収可能なネルソンコンセントレーターの運転条件（回転度・流量）を調査する。

##### 4-5-2 試験方法

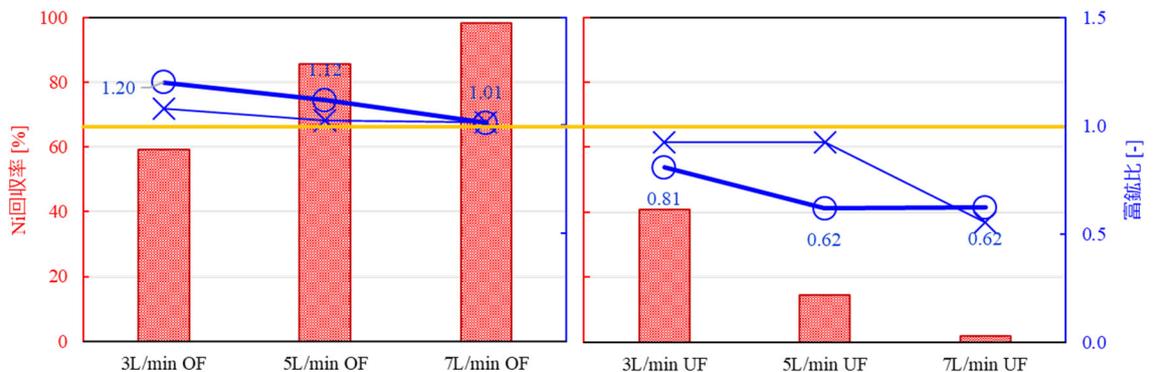
2 回繰り返し粉碎で得られた-1.18+0.075mm に対して 3-5-2 と同様の試験方法でネルソンコンセントレーター比重選別試験を行った。

##### 4-5-3 試験結果

図 4-9 にオーバーフローおよびアンダーフローの Ni 回収率と Ni、Fe 富鉱比、表 4-5 に各条件で得られた産物の元素品位と Fe/Ni を示す。図 4-9 から明らかなように回転度 20%、30%両方でオーバーフローに Ni が濃縮した。表 4-5 で Ni が濃縮したオーバーフローの Ni 品位に着目すると回転度 30%の方が、回転度 20%と比較して高い Ni 品位の産物が得られた。このことより、2 回繰り返し粉碎で得られた-1.18+0.075mm に対してネルソンコンセントレーター比重選別を適用する場合には、回転度 30%で行うとより高い Ni 品位の上昇が見込まれることが分かった。



回転度 20% (左図：オーバーフロー、右図：アンダーフロー)



回転度 30% (左図：オーバーフロー、右図：アンダーフロー)

図 4-9 -1.18mm+0.075mm ネルソンコンセントレーター比重選別の分布率・富鉱比

表 4-5 -1.18+0.075mm ネルソンコンセンレーターの産物品位

			Ni 品位 [wt%]	Fe 品位 [wt%]	Fe/Ni	Al 品位 [wt%]	Ca 品位 [wt%]	Mg 品位 [wt%]
給鉱			1.14	7.90	6.93	0.98	0.20	14.74
回転度 20%	3L/min	OF	1.16	8.11	6.99	1.04	0.32	14.68
		UF	0.73	5.95	8.10	0.75	0.41	12.52
	5L/min	OF	1.07	7.67	7.16	0.98	0.32	14.22
		UF	0.70	5.64	8.12	0.70	0.52	12.38
	7L/min	OF	1.06	7.65	7.24	0.97	0.32	14.12
		UF	0.70	4.74	6.77	0.65	0.66	12.74
回転度 30%	3L/min	OF	1.22	8.06	6.61	0.99	0.32	13.77
		UF	0.82	6.93	8.46	0.85	0.34	13.12
	5L/min	OF	1.14	7.66	6.75	0.97	0.32	14.08
		UF	0.63	6.91	11.04	0.76	0.37	11.35
	7L/min	OF	1.03	7.59	7.39	0.93	0.32	13.44
		UF	0.63	4.13	6.54	0.69	0.58	13.32

※OF:オーバーフロー、UF:アンダーフロー

#### 4-6 -1.18+0.075mm テーブル選別試験

##### 4-6-1 目的

2回繰り返し粉碎で得られた-1.18+0.075mm に対してテーブル選別機で高 Ni 含有鉱物を選択的に回収可能か検討する。また併せて高 Ni 含有鉱物を選択的に回収可能なテーブル選別機の運転条件（デッキ傾斜角・流量・カットポイント）を調査する。

##### 4-6-2 試験方法

2回繰り返し粉碎で得られた-1.18+0.075mm に対して表 4-6 に示す条件でテーブル選別試験を行った。なお本試験では、重産物 H1 の回収量が少ないため、図 4-10 に示すように重産物 H1+H2 を合わせて回収した。

表 4-6 -1.18+0.075mm テーブル選別の試験条件

条件	設定値
給鉱	2回粉碎-1.18+0.075mm
給鉱重量	50g
選別機	ウィルフレータブル
流量	6L/min, 8L/min (10°のみ)
デッキ角度	7, 10°
給鉱時間	1min
選別時間	2min
パルプ濃度	10% (給鉱 50g+水 450mL)

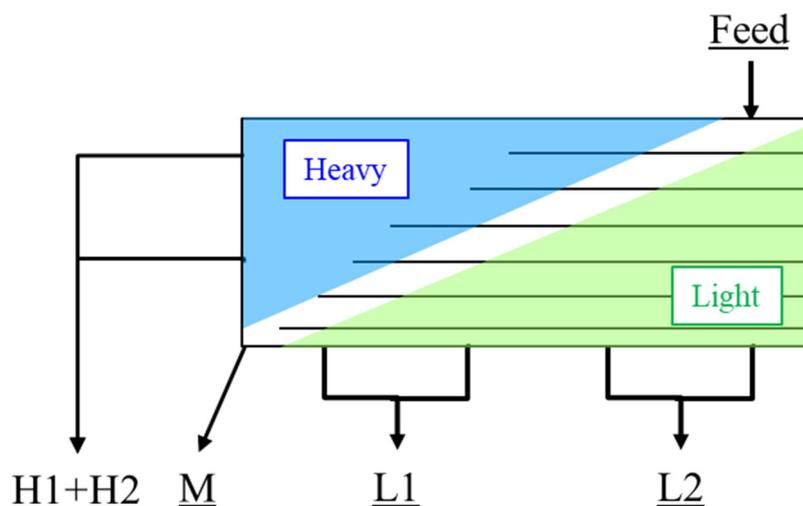
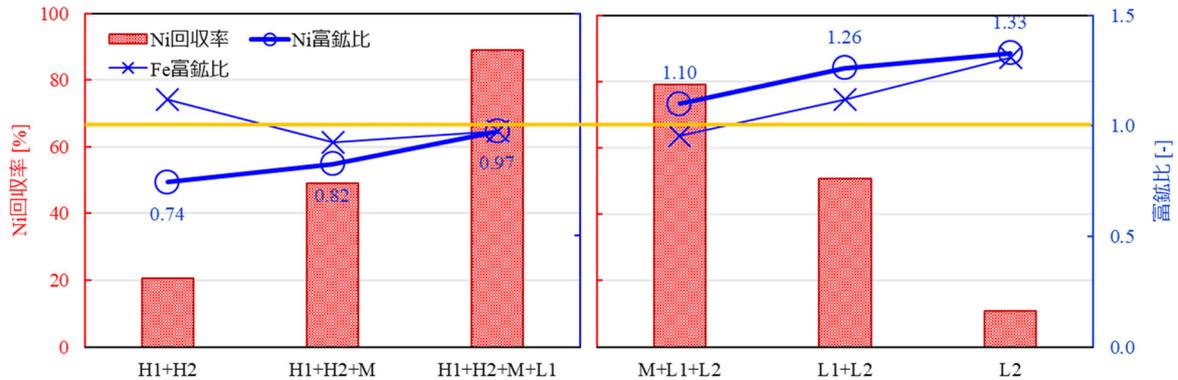


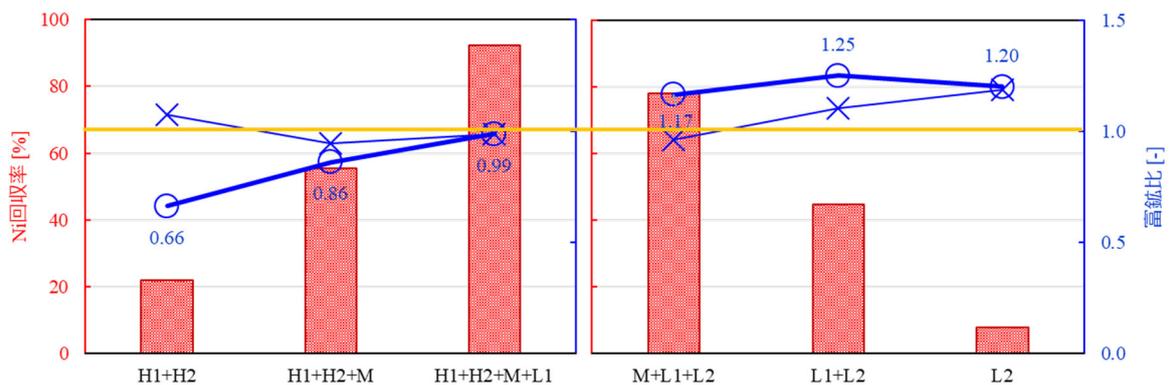
図 4-10 -1.18+0.075mm テーブル選別試験での回収口

### 4-6-3 試験結果

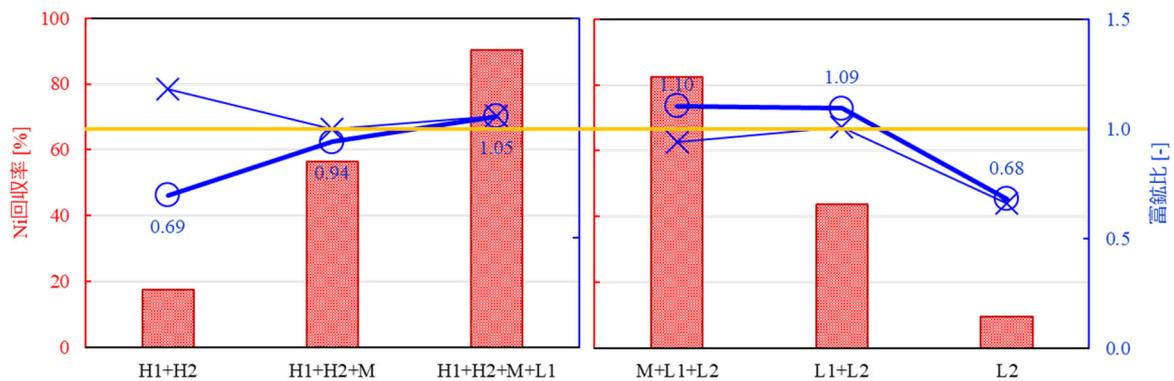
図 4-11 に重産物および軽産物の Ni 回収率と Ni、Fe 富鉄比、表 4-7 に各条件で得られた産物の元素品位と Fe/Ni を示す。図 4-11 より全体として軽産物で Ni 富鉄比が高くなる傾向を確認した。



デッキ傾斜角 7°, 流量 6L/min (左図：重産物、右図：軽産物)



デッキ傾斜角 10°, 流量 6L/min (左図：重産物、右図：軽産物)



デッキ傾斜角 10°, 流量 8L/min (左図：重産物、右図：軽産物)

図 4-11 -1.18+0.075mm テーブル選別の回収率・富鉄比

表 4-7 -1.18+0.075mm テーブル選別の試験結果

			Ni 品位 [wt%]	Fe 品位 [wt%]	Fe/Ni	Al 品位 [wt%]	Ca 品位 [wt%]	Mg 品位 [wt%]
給鉱			1.14	7.90	6.93	0.98	0.20	14.74
7° 6L/min	重産物	H1+H2	0.77	7.68	10.04	0.95	0.29	12.50
		H1+H2+M	0.85	6.34	7.47	0.88	0.28	13.33
		H1+H2+M+L1	1.00	6.70	6.69	0.89	0.27	13.80
	軽産物	M+L1+L2	1.14	6.59	5.80	0.88	0.28	14.25
		L1+L2	1.30	7.71	5.93	0.94	0.28	14.39
		L2	1.37	9.03	6.59	1.00	0.37	13.31
10° 6L/min	重産物	H1+H2	0.70	8.02	11.39	0.96	0.32	12.17
		H1+H2+M	0.92	7.05	7.71	0.89	0.25	14.10
		H1+H2+M+L1	1.05	7.39	7.04	0.93	0.26	14.27
	軽産物	M+L1+L2	1.24	7.23	5.82	0.92	0.25	15.12
		L1+L2	1.33	8.27	6.20	1.02	0.31	14.24
		L2	1.28	8.91	6.96	1.05	0.39	12.36
10° 8L/min	重産物	H1+H2	0.68	8.11	11.92	0.99	0.35	12.18
		H1+H2+M	0.92	6.85	7.45	0.90	0.29	14.51
		H1+H2+M+L1	1.03	7.28	7.05	0.93	0.29	14.57
	軽産物	M+L1+L2	1.08	6.49	6.00	0.84	0.25	13.94
		L1+L2	1.07	6.97	6.49	0.84	0.26	11.97
		L2	0.67	4.57	6.86	0.55	0.19	6.96

#### 4-7 繰り返し粉碎と物理選別の組み合わせまとめ

図 4-12～図 4-16 に繰り返し粉碎と各種物理選別を組み合わせた Ni 高品位化プロセスフローを示す。図 4-12 の繰り返し粉碎と色彩選別のみプロセスフローでは Ni 回収率が 80%未満であったが、 $-1.18+0.075\text{mm}$  に対して各種物理選別（多段重液選別、ネルソンコンセントレーター比重選別、テーブル選別）を行うことで Ni 回収率を 80%台まで向上させることができた。さらに色彩選別で回収する鉱石に緑色を追加することで Ni 回収率は 90%を超えることが可能となった。また Fe/Ni に着目すると図 4-12～図 4-15 のプロセスフローでは給鉱と比較して高い値となっていたが、図 4-16 のプロセスフローでは Fe/Ni を給鉱より下げることができた。これは、色彩選別で低 Fe 含有 Ni 鉱物をより多く回収できたことによると考えられる。

図 4-13～図 4-16 のプロセスフローより高 Ni 回収率で Ni 品位の向上が達成可能であることが示唆された。

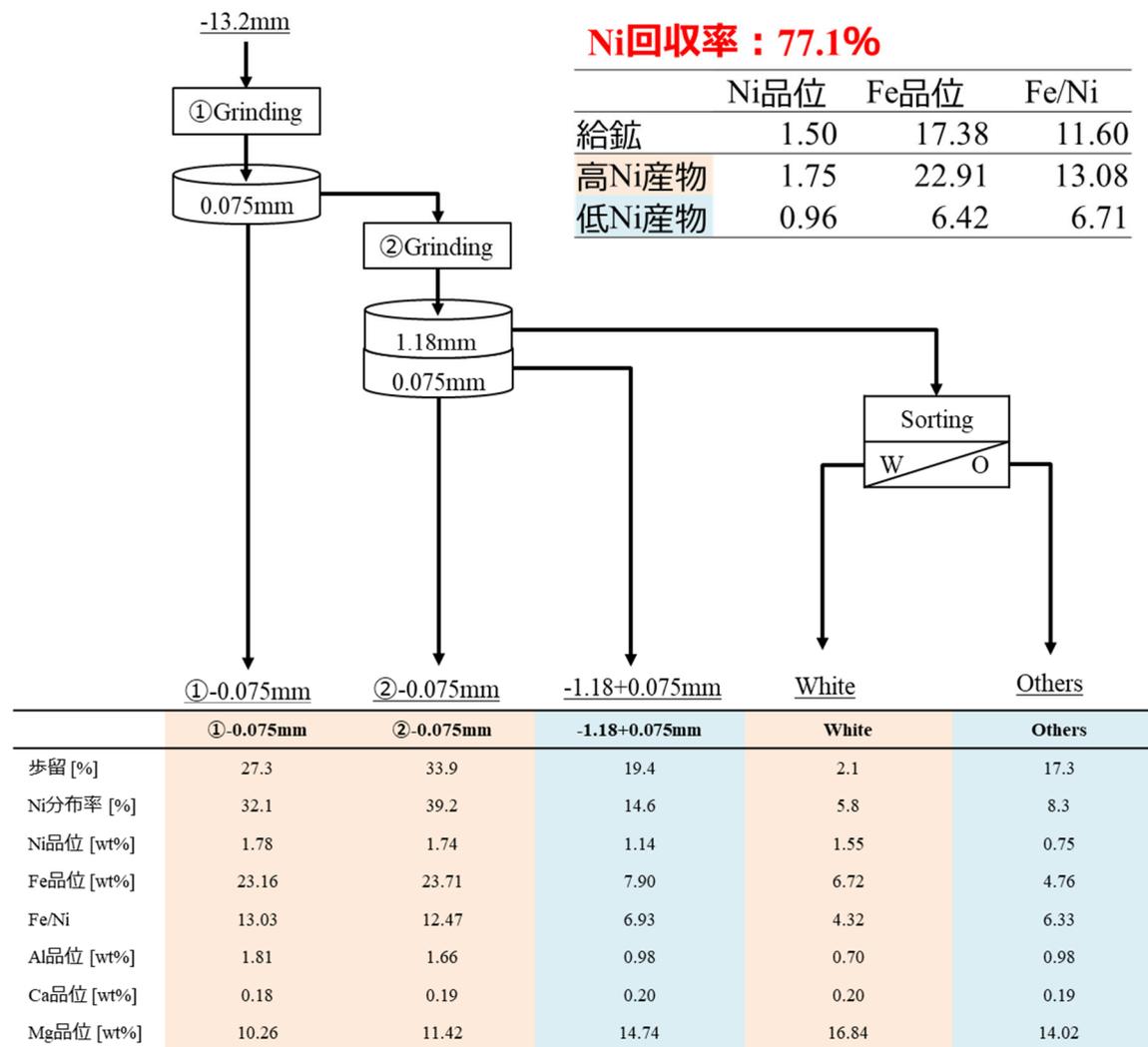


図 4-12 繰り返し粉砕と色彩選別を活用したプロセスの材料バランス

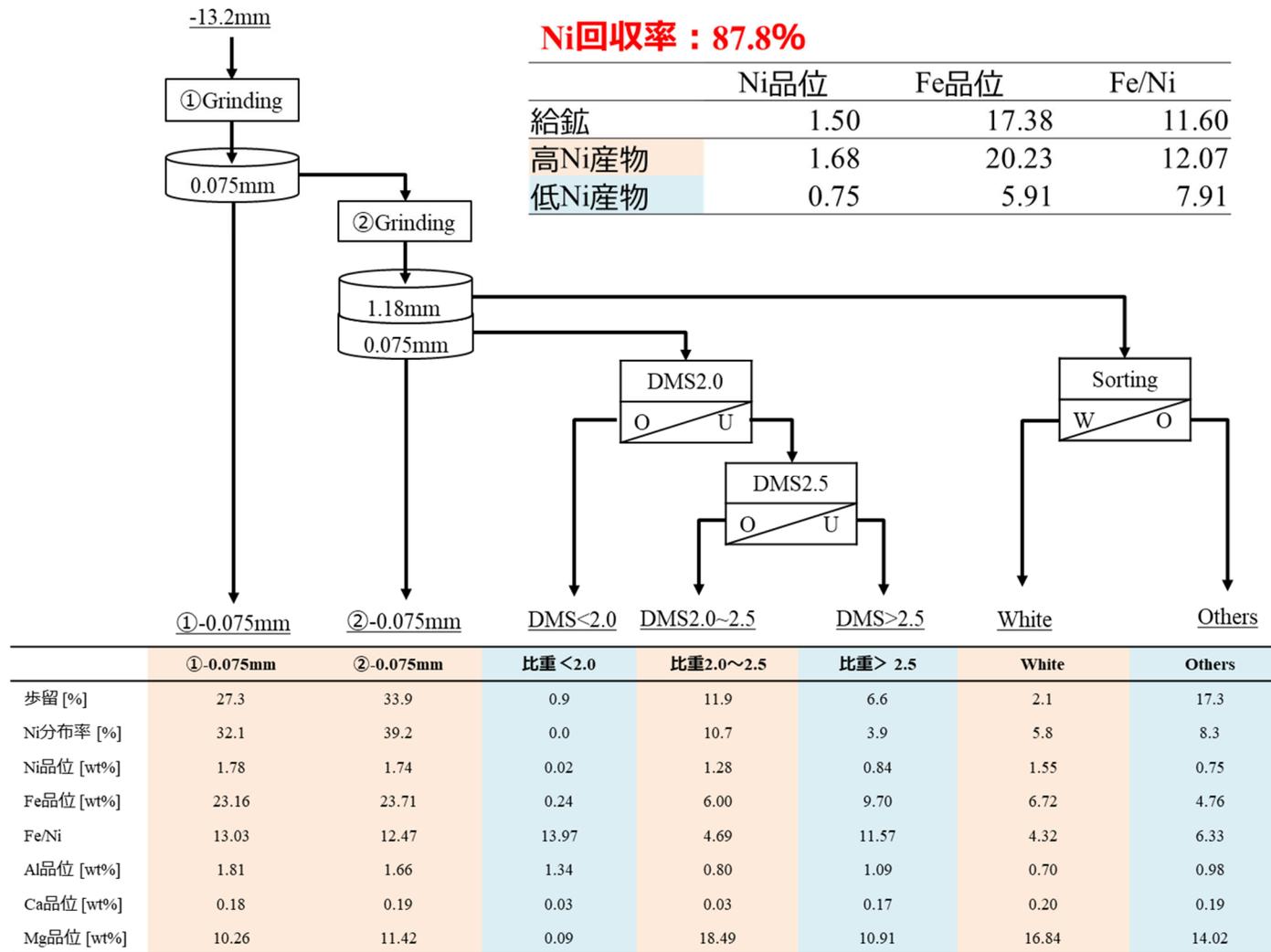


図 4-13 繰り返し粉砕と色彩選別、多段重液選別を活用したプロセスの材料バランス

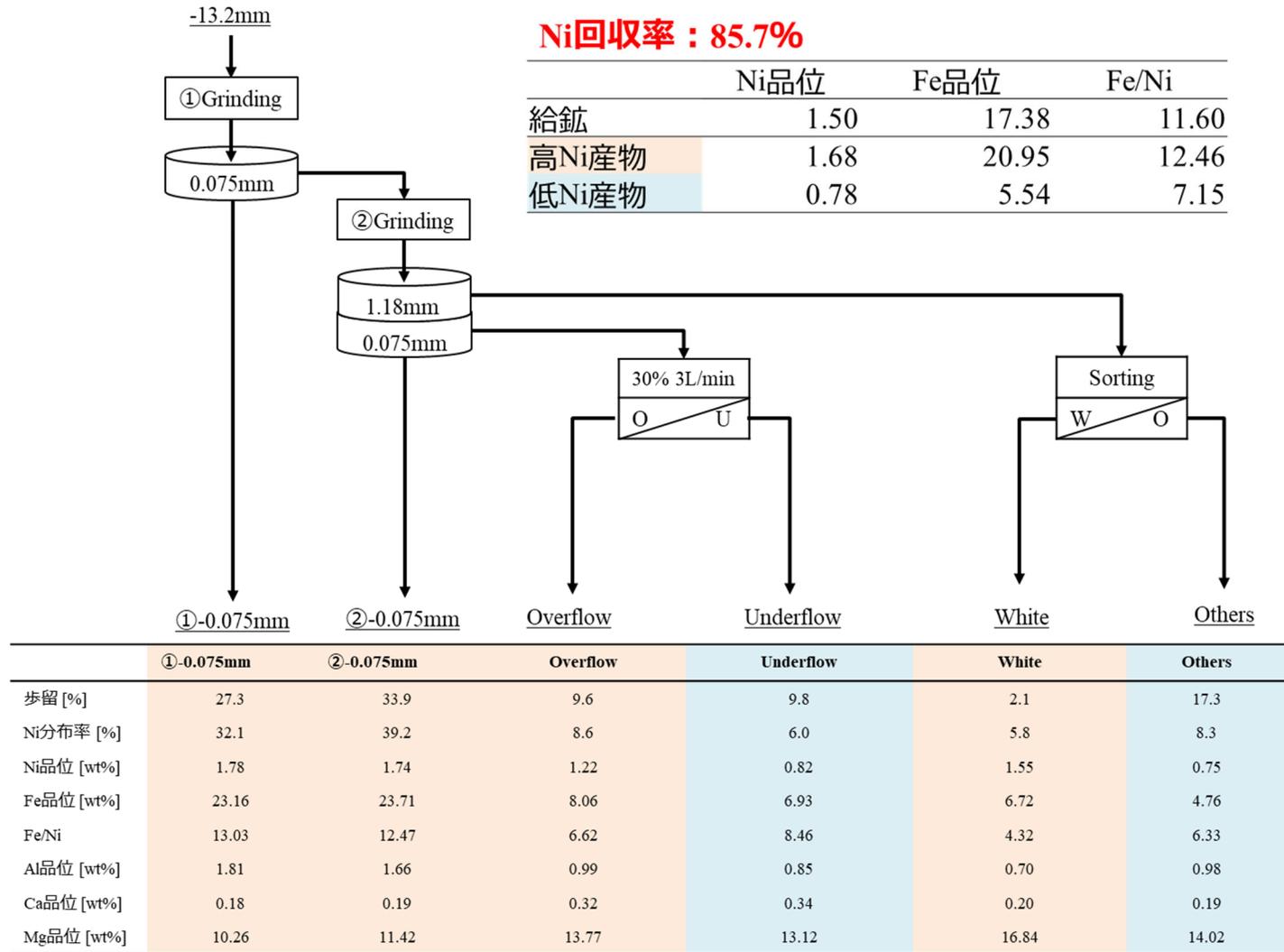


図 4-14 繰り返し粉砕と色彩選別、ネルソンコンセントレーター比重選別を活用したプロセスの材料バランス

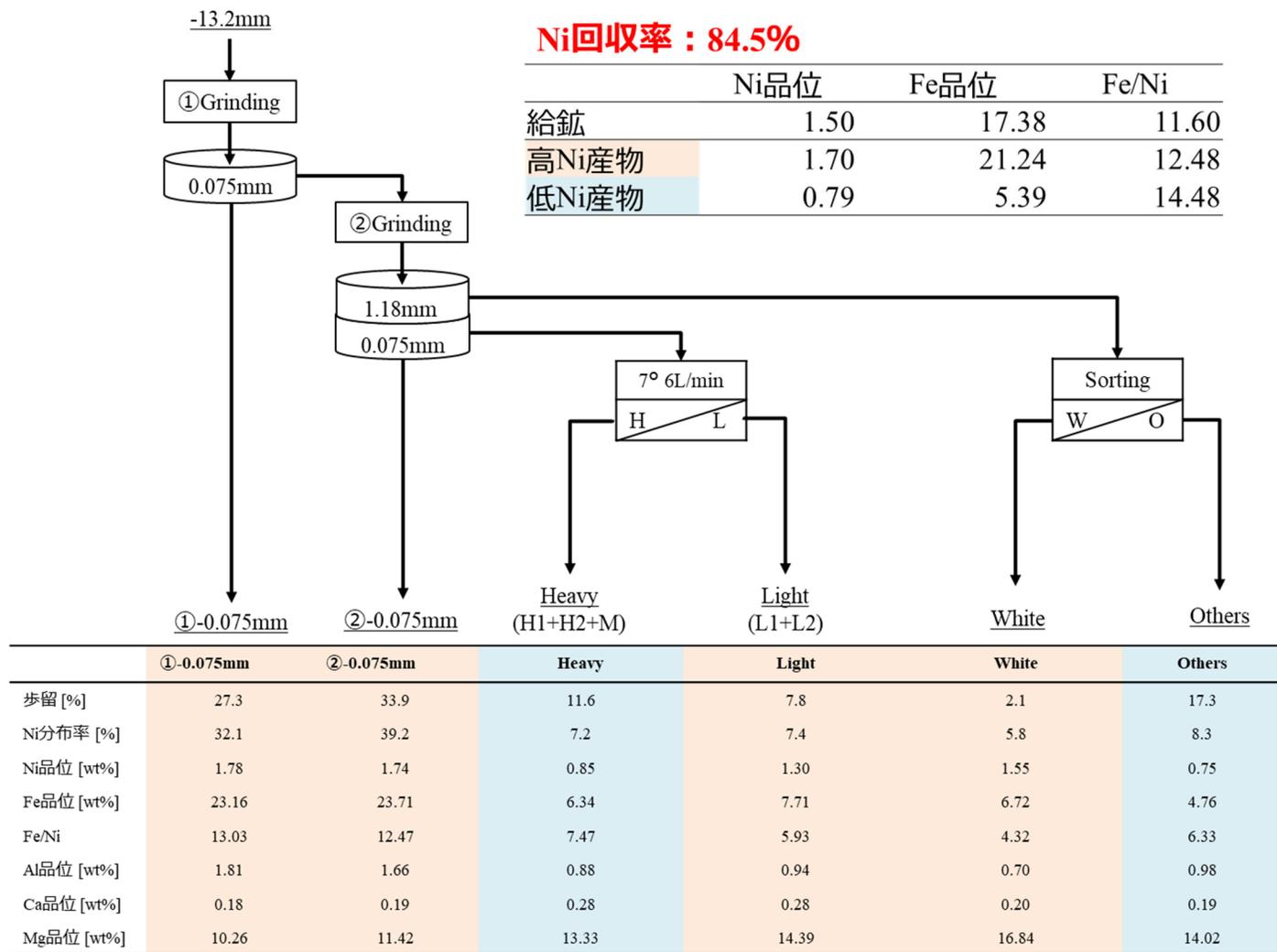


図 4-15 繰り返し粉砕と色彩選別、テーブル選別を活用したプロセスの材料バランス

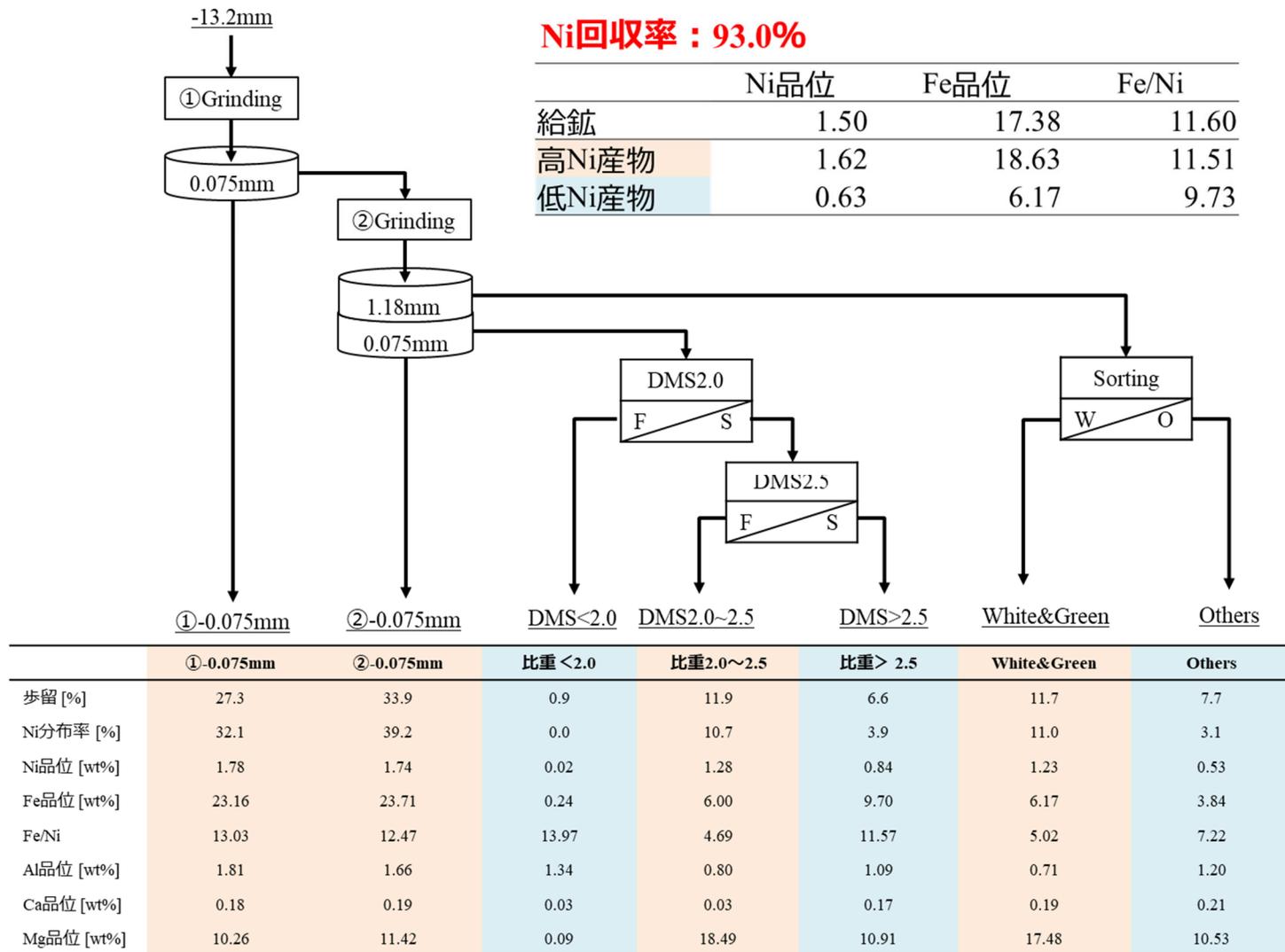


図 4-16 Ni 回収率を重視して繰り返し粉砕と色彩選別、多段重液選別を活用したプロセスの材料バランス

## 5 結言

本スタディを通して、以下のことが明らかとなった。

- ・ B 鉱と比較して A 鉱は細かい径の粒子の割合が多い。
- ・ 粒群による Ni 品位にはばらつきがある。
- ・ Ni の存在形態は、Serpentine と Fe Oxide の混合物が支配的。
- ・ 繰り返し粉砕を行うと Serpentine と Fe Oxide の混合物が優先的に粉砕され、細粒で Ni が濃縮する。
- ・ Serpentine 中への Ni 存在割合が高い B 鉱は A 鉱よりも繰り返し粉砕の効果が得られにくかったと考えられる。
- ・ A 鉱の Ni は Serpentine と Fe Oxide の混合物中に含まれることから、繰り返し粉砕により Ni とともに Fe も濃縮される。そのため、繰り返し粉砕後の網上産物（75 $\mu$ m 以下）中の Fe 品位が低く Ni 品位の高い鉱物（Serpentine 等）を選択的に回収することが重要。
- ・ 繰り返し粉砕で得られた+1.18mm は白色の鉱石に Ni を多く含有する。

繰り返し粉砕で得られた-1.18+0.075mm は各種物理選別で Ni の富鉱化が可能。以上のことより Serpentine と Fe Oxide の混合物が主体である Ni 鉱石に対しては、繰り返し粉砕と色彩選別、物理選別を組み合わせることで、高い Ni 回収率で Ni 品位向上を達成できることが確認された。

## 6 提言

A 鉱は B 鉱と比較して Serpentine と Fe Oxide 混合物の比率が高く、またその Ni 含有割合も高いことから、湿式での繰り返し粉碎試験ならびに各種物理選別により、高い Ni 回収率、高 Ni 富鉱化を達成できた。

今回の結果を受けて Ni 鉱石は産地ごとに鉱物学的な多様性を有することが確認できたほか、その多様性は物理選鉱における富鉱化の可能性を左右することが判明した。今後の検討課題としては、複数の Ni 鉱石銘柄を MLA に供し、それらの鉱物重量割合および各鉱物の Ni 分布率から選鉱の可能性を評価したい。また選鉱により最も富鉱化が見込まれる鉱石については、選鉱における最適条件の検討を実施する。

また本スタディで選鉱試験に供していないが A 鉱の +13.2 mm は ICP 分析において、低 Fe で Ni も高くないものの、B 鉱の同粒群と比較すれば Serpentine と Fe Oxide の混合物の量が多く、また Ni 含有割合も比較的高いことから、同粒群における選鉱の可能性も検討したい。Ni 鉱山において乾式製錬や湿式製錬に供することのできない低 Ni、低 Fe 岩石の殆どが廃石になるため、それを富鉱化できれば低品位 Ni 鉱石の利用が可能となり、鉱山の延命も期待できる。

7 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.

## 8 謝辞

テーブル選別試験は秋田大学大学院国際資源学研究科 資源処理工学研究室所有のウィルフレーターブル選別機を使用し、実施しました。また、XRD 分析は秋田県資源技術開発機構の装置を利用し実施しました。両者に対し、ここに感謝の意を表します。