

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令和3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、本成果は JOGMEC、双日株式会社及び大平洋金属株式会社に帰属する。

尚、本報告書の著作権は JOGMEC に帰属する。

令和3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

成果報告書  
(公開版)

令和4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



## 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 と双日株式会社及び大平洋金属株式会社が共同にて実施した令和 3 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る。

本報告書が、関係各位の参考になれば幸甚である。

令和 4 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.....	3
1-2-1 共同スタディ方法.....	3
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.....	5
2-1 試料概要.....	5
2-2 分析前処理.....	5
2-3 元素分析.....	7
2-3-1 分析目的.....	7
2-3-2 分析方法.....	7
2-3-3 分析結果.....	8
2-4 MLAによる分析.....	13
2-4-1 MLA概要.....	13
2-4-2 分析目的.....	13
2-4-3 前処理.....	13
2-4-4 分析方法.....	14
2-4-5 分析結果.....	15
2-4-5-1 A 鉱石.....	15
(1) 鉱物種.....	15
(2) 鉱物重量割合.....	18
(3) 含ニッケル鉱物のニッケル分布率.....	19
2-4-5-2 B 鉱石.....	20
(1) 鉱物種.....	20
(2) 鉱物重量割合.....	22
(3) 含ニッケル鉱物のニッケル分布率.....	22
2-4-5-3 C 鉱石.....	23
(1) 鉱物種.....	23
(2) 鉱物重量割合.....	26
(3) 含ニッケル鉱物のニッケル分布率.....	26
2-4-5-4 D 塊鉱石.....	28
(1) 鉱物種.....	28
(2) 鉱物重量割合.....	30
(3) 含ニッケル鉱物のニッケル分布率.....	30
2-4-6 選鉱シミュレーション (D 塊鉱石).....	31

2-4-7	比重選別の適用可能性検討.....	34
(1)	A 鉱石 .....	34
(2)	B 鉱石 .....	36
(3)	C 鉱石 .....	37
(4)	D 塊鉱石.....	39
3	基礎選別試験 .....	40
3-1	基礎選別試験対象鉱石 .....	40
3-2	選別手法 .....	41
3-3	ポットミル.....	42
3-3-1	目的.....	42
3-3-2	試験方法 .....	42
3-3-3	試験結果 .....	44
3-4	ポットミル（繰り返し粉碎） .....	50
3-4-1	目的.....	50
3-4-2	試験方法 .....	50
3-4-3	試験結果 .....	51
3-5	インテンシブミキサー .....	55
3-5-1	目的.....	55
3-5-2	試験方法 .....	55
3-5-3	試験結果 .....	57
3-6	重液選別試験 .....	67
3-6-1	目的.....	67
3-6-2	試験方法 .....	67
3-6-3	試験結果 .....	69
3-6-4	MLA 分析結果（インテンシブミキサー粉碎後 D 塊鉱石） .....	72
3-7	アトライタ .....	73
3-7-1	目的.....	73
3-7-2	試験方法 .....	73
3-7-3	試験結果 .....	75
3-8	HPGR 模擬ピストン試験.....	78
3-8-1	目的.....	78
3-8-2	試験方法 .....	78
3-8-3	試験結果 .....	80
3-9	手選別（色彩選別）試験 .....	90
3-9-1	目的.....	90
3-9-2	試験方法 .....	90
3-9-3	試験結果 .....	92
3-10	硫酸浸出試験.....	98
3-10-1	目的.....	98
3-10-2	試験方法 .....	98
3-10-3	試験結果 .....	99

3-11	基礎選別試験まとめ .....	100
4	結言 .....	103
5	スタディ結果に対する評価、提言 .....	104
6	謝辞 .....	105

## 目次

図 2-1	試料の前処理方法	6
図 2-2	粒度分布（篩下積算分布）	6
図 2-3	粒度分布（篩下積算分布）細粒部拡大	7
図 2-4	上：反射電子像、下：鉱物マッピング像（A 鉱石-1.18mm+0.60 mm 試料）	17
図 2-5	A 鉱石各粒群の鉱物重量割合（グループ化したもの）	18
図 2-6	各粒群におけるニッケル分布率（A 鉱石）	19
図 2-7	上：反射電子像、下：鉱物マッピング像（B 鉱石-1.18mm+0.60 mm 試料）	21
図 2-8	B 鉱石各粒群の鉱物重量割合（グループ化したもの）	22
図 2-9	各粒群におけるニッケル分布率（B 鉱石）	22
図 2-10	上：反射電子像、下：鉱物マッピング像（C 鉱石-1.18mm+0.60 mm 試料）	25
図 2-11	C 鉱石各粒群の鉱物重量割合（グループ化したもの）	26
図 2-12	各粒群におけるニッケル分布率（C 鉱石）	27
図 2-13	上：反射電子像、下：鉱物マッピング像（D 塊鉱石-1.18mm+0.60 mm 試料）	29
図 2-14	D 塊鉱石各粒群の鉱物重量割合（グループ化したもの）	30
図 2-15	各粒群におけるニッケル分布率（D 塊鉱石(Fine)）	30
図 2-16	選鉱シミュレーション結果（D 塊鉱石）	33
図 2-17	比重選別検討用 MLA データ（A 鉱石）	34
図 2-18	比重選別検討用 MLA データ（B 鉱石）	36
図 2-19	比重選別検討用 MLA データ（C 鉱石）	37
図 2-20	比重選別検討用 MLA データ（D 塊鉱石）	39
図 3-1	C 鉱石試料調整フロー	40
図 3-2	ポットミルの外観	43
図 3-3	ポットミルの試験フロー	43
図 3-4	ポットミル粉砕におけるパルプ濃度の影響（C 鉱石）（篩下産物結果）	45
図 3-5	ポットミル粉砕におけるパルプ濃度の影響（D 塊鉱石(Fine)）（篩下産物結果）	45
図 3-6	ポットミル粉砕におけるボール充填率の影響（C 鉱石）（篩下産物結果）	46
図 3-7	ポットミル粉砕におけるボール充填率の影響（D 塊鉱石(Fine)）（篩下産物結果）	46
図 3-8	ポットミル粉砕産物に 13.2mm 以下を組み合わせた場合の品位及び回収率（C 鉱石）（篩下産物結果）	47
図 3-9	ポットミル繰り返し粉砕試験フロー	51
図 3-10	篩下積算重量分布	52
図 3-11	ポットミル繰り返し粉砕結果（A 鉱石）（篩下産物結果）	52
図 3-12	ポットミル繰り返し粉砕結果（B 鉱石）（篩下産物結果）	53
図 3-13	ポットミル繰り返し粉砕結果（C 鉱石）（篩下産物結果）	53
図 3-14	ポットミル繰り返し粉砕結果（D 塊鉱石(Fine)）（篩下産物結果）	54
図 3-15	インテンシブミキサー外観	56
図 3-16	インテンシブミキサーによる選択粉砕試験フロー	56
図 3-17	インテンシブミキサーによる選択粉砕試験フロー2（繰り返し粉砕）	57

図 3-18	インテンシブミキサー粉砕における回転数の影響 (C 鉱石) (篩下産物結果)	58
図 3-19	試験後のパン内の試料の様子 (C 鉱石) (篩下産物結果)	58
図 3-20	インテンシブミキサー粉砕における回転数の影響 (D 塊鉱石(Fine)) (篩下産物結果)	59
図 3-21	試験後のパン内の試料の様子 (D 塊鉱石(Fine)) (篩下産物結果)	59
図 3-22	インテンシブミキサー粉砕におけるパルプ濃度の影響 (C 鉱石) (篩下産物結果)	60
図 3-23	試験後のパン内の試料の様子 (C 鉱石) (篩下産物結果)	60
図 3-24	インテンシブミキサー粉砕におけるパルプ濃度の影響 (D 塊鉱石(Fine)) (篩下産物結果)	61
図 3-25	インテンシブミキサー粉砕による繰り返し粉砕 (C 鉱石) (篩下産物結果)	62
図 3-26	インテンシブミキサー粉砕による繰り返し粉砕 (D 塊鉱石(Fine)) (篩下産物結果)	62
図 3-27	ポットミル粉砕産物に 13.2mm 以下を組み合わせた場合の品位及び回収率 (C 鉱石) (篩下産物結果)	63
図 3-28	重液選別の試験フロー	68
図 3-29	重液選別結果	69
図 3-30	アトライタの外観	73
図 3-31	アトライタ粉砕の試験フロー	74
図 3-32	C 鉱石でのアトライタ粉砕試験結果	75
図 3-33	D 塊鉱石(Fine)でのアトライタ粉砕試験結果 (篩下産物結果)	76
図 3-34	圧縮試験機の外観	図 3-35 試験用治具の外観
図 3-35	試験用治具の外観	
図 3-36	HPGR 模擬ピストン試験の試験フロー	79
図 3-37	C 鉱石でのピストン試験結果 (篩下産物結果)	81
図 3-38	C 鉱石でのピストン繰り返し試験結果 (篩下産物結果)	81
図 3-39	ピストン試験篩下産物に 13.2mm 以下を組み合わせた場合の品位及び回収率 (C 鉱石)	82
図 3-40	D 塊鉱石(Coarse)でのピストン試験結果 (篩下産物結果)	83
図 3-41	D 塊鉱石(Coarse)でのピストン繰り返し試験結果 (篩下産物結果)	83
図 3-42	C 鉱石でのピストン試験による単体分離性の変化	86
図 3-43	C 鉱石の BSE 像及びマッピング像 (ピストン試験)	87
図 3-44	D 塊鉱石(Coarse)でのピストン試験による単体分離性の変化	88
図 3-45	D 塊鉱石(Coarse)の BSE 像及びマッピング像 (ピストン試験)	89
図 3-46	手選別 (色彩選別) の試験フロー	90
図 3-47	C 鉱石 色彩分類	91
図 3-48	D 塊鉱石(Fine) 色彩分類	91
図 3-49	C 鉱石の色彩ごとの Ni 品位及び分布率	92
図 3-50	D 塊鉱石(Fine)の色彩ごとの Ni 品位及び分布率	94
図 3-51	C 鉱石の色彩ごとの XRD 分析結果	96
図 3-52	D 塊鉱石(Fine)の色彩ごとの XRD 分析結果	97
図 3-53	硫酸浸出試験フロー	99

図 3-54	硫酸浸出試験結果 .....	99
図 3-55	品位回収率曲線（試験結果プロット） .....	102

## 表目次

表 2-1	ICP 分析結果 (A 鉱石) .....	8
表 2-4	ICP 分析結果 (D 塊鉱石(Coarse)) .....	11
表 2-5	ICP 分析結果 (D 塊鉱石(Fine)) .....	12
表 2-6	MLA で確認された鉱物 (A 鉱石) .....	16
表 2-7	MLA で確認された鉱物 (B 鉱石) .....	20
表 2-8	MLA で確認された鉱物 (C 鉱石) .....	24
表 2-9	MLA で確認された鉱物 (D 塊鉱石) .....	28
表 2-10	シミュレーションで用いた数値 (MLA Mineral Reference) .....	32
表 2-11	単体分離度 (A 鉱石) .....	35
表 2-12	単体分離度 (C 鉱石) .....	38
表 3-1	ポットミルの試験条件 .....	42
表 3-2	C 鉱石の試験結果まとめ .....	48
表 3-3	C 鉱石 -13.2mm 以下の粒群と合算した場合の品位及び回収率 .....	48
表 3-4	D 塊鉱石(Fine)の試験結果まとめ .....	49
表 3-5	ポットミル繰り返し粉碎試験条件 .....	50
表 3-6	インテンシブミキサーによる選択粉碎試験条件 .....	55
表 3-7	C 鉱石の試験結果まとめ (インテンシブミキサー) .....	64
表 3-8	C 鉱石の試験結果まとめ (インテンシブミキサー繰り返し粉碎) .....	64
表 3-9	C 鉱石 -13.2mm 以下の粒群と合算した場合の品位及び回収率 (インテンシブミキサー) .....	65
表 3-10	C 鉱石 -13.2mm 以下の粒群と合算した場合の品位及び回収率 (インテンシブミキサー繰り返し粉碎) .....	65
表 3-11	D 塊鉱石(Fine)の試験結果まとめ (インテンシブミキサー) .....	66
表 3-12	D 塊鉱石(Fine)の試験結果まとめ (インテンシブミキサー繰り返し粉碎) .....	66
表 3-13	重液選別の試験条件 .....	68
表 3-14	重液選別結果まとめ .....	70
表 3-15	C 鉱石 -13.2mm 以下の粒群と合算した場合の品位及び回収率 (インテンシブミキサー繰り返し粉碎+重液選別) .....	71
表 3-16	インテンシブミキサー粉碎後 D 塊鉱石(Fine) MLA 分析結果 .....	72
表 3-17	インテンシブミキサー粉碎後 D 塊鉱石(Fine) 単体分離度 .....	72
表 3-18	繰り返し粉碎の試験条件 .....	74
表 3-19	C 鉱石のアトライタ粉碎試験結果まとめ .....	77
表 3-20	C 鉱石 -13.2mm 以下の粒群と合算した場合の品位及び回収率 (アトライタ粉碎) .....	77
表 3-21	D 塊鉱石(Fine)のアトライタ粉碎試験結果まとめ .....	77
表 3-22	HPGR 模擬ピストン試験の試験条件 .....	79
表 3-23	C 鉱石のピストン試験結果まとめ .....	84
表 3-24	C 鉱石 -13.2mm 以下の粒群と合算した場合の品位及び回収率 (ピストン試験) .....	84

表 3-25	D 塊鉍石(Coarse)のピストン試験結果まとめ .....	85
表 3-26	手選別 (色彩選別) の試験条件 .....	90
表 3-27	C 鉍石 手選別 (色彩選別) の結果 .....	93
表 3-28	色彩ごとの組み合わせの結果 (C 鉍石) .....	93
表 3-29	13.2mm 以下との組み合わせの結果 (C 鉍石) .....	94
表 3-30	D 塊鉍石(Fine) 手選別 (色彩選別) の結果 .....	95
表 3-31	硫酸浸出試験条件 .....	98
表 3-32	選別手法の比較 .....	101



## 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、低品位ニッケル鉱石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。

4 鉱山のニッケル鉱石の性状把握として粒度分布測定及び元素分析を行ったところ、B 鉱石、C 鉱石については 13.2mm 以上の粒群がその他の粒群に比べて著しく品位が低いことが分かり、13.2mm 以上の粒群の Ni 品位を高めることで全体の Ni 品位向上の可能性が示唆された。令和元年度にスタディ対象とした D 鉱石も同様の傾向がみられるため、13.2mm 以上の粒群を選鉱の対象とすることで、より良い結果が得られる可能性がある。

選別による Ni 品位向上効果が見込まれる、あるいは品位向上によるメリットが大きいと判断した 2 鉱山の鉱石について基礎選別試験を実施し、以下の結果を得た。

C 鉱石は、13.2mm 以上のサイズの鉱石のみを対象とし、様々な粉砕機を用いた表面粉砕によって品位向上効果を確認したところ、13.2mm 以下を対象とした過年度の結果と同様、表面粉砕による品位向上が確認された。中でも、インテンシブミキサー粉砕を行ったものは目標の品位・回収率曲線上に位置する良好な結果が得られた。最適条件で繰り返し粉砕を実施していないため、追加で試験を行うことで曲線の上側に来る成績が得られる可能性がある。

D 塊鉱石は、大太平洋金属株式会社にて粗破砕を行った状態の鉱石に対して、C 鉱石と同様、粉砕機を用いた表面粉砕を試した。Ni 品位が 1%を超えることはなかったものの、それに近い品位まで向上出来ており、今後の Ni 価格次第では、取引対象となり得る可能性があると言える。

どちらの鉱石に対しても最も有効であったインテンシブミキサー粉砕については今後も検討していくことで将来に備えることが出来ると考える。

## 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

低品位ニッケル鉱石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 D 鉱山の鉱石を対象とし、スタディを実施したが、D 鉱石は蛇紋岩 (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、物理選別による付加価値化が困難であった。また、令和 2 年度には、同国 E 鉱山の鉱石を対象とし、同様の分析及び実験を行ったところ、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 は粉碎されやすく、Serpentine-Fe-oxide に大部分の Ni が存在する E 鉱石は繰り返し粉碎の効果が得られやすい鉱石であるためと考えられる。これらの結果を踏まえ、令和 3 年度は同国内の 4 種の鉱石 A~D 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。

- ・ 化学組成分析
- ・ 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、4種の鉱石の中から選別に適した鉱石を選定するとともに適切な選別方法を検討する。

#### (2) 基礎選別試験

令和2年度に良好な成績が得られたポットミルを使用した繰り返し粉碎を試し、表面粉碎に対する鉱石毎の適用性の違いについて確認する。

その後、キャラクタリゼーション及び触覚試験の結果を踏まえ、比重選別や表面粉碎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。

### 1-2-2 共同スタディ実施期間

令和3年8月10日～令和4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

宮武 修一 (資源開発部長)  
橋本 晃一 (資源開発部 技術課長)  
古谷 尚稔 (資源開発部 技術課 担当調査役)  
榊原 泰佑 (資源開発部 技術課)  
神谷 太郎 (金属資源技術研究所 所長)  
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)  
Magwaneng Refilwe (金属資源技術研究所 研究員)  
小田 真夕 (金属資源技術研究所 研究員)

双日株式会社

塗師尾 努 (非鉄・鉱産部 部長)  
若田 浩司 (非鉄・鉱産部 課長)  
藤田 和也 (非鉄・鉱産部)  
荒木 佑介 (非鉄・鉱産部)

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)

大河原 卓 (資源・技術開発プロジェクト部 課長補佐)

戸田 成太郎 (資源・技術開発プロジェクト部 主任)

## 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。）を用いて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

本スタディでは太平洋金属株式会社八戸製造所で原料として使用しているフィリピン共和国 4 鉱山の低品位ニッケル鉱石を試験対象とした。

なお、D 塊鉱石は、一般的に Ni 品位が非常に低く、Ni 鉱山において製錬に供することができずに廃石となっている鉱石である。Ni 品位を向上させることができれば、資源量の拡大に繋がり、鉱山開発における競争力強化に資することから、試験対象とした。D 塊鉱石は八戸製造所でジョークラッシャーにより粗破碎したものを試料としているが、30mm 以下に破碎した粒度の粗いものを D 塊鉱石(Coarse)、10mm 以下に再度破碎した細かいものを D 塊鉱石(Fine)とした。

### 2-2 分析前処理

分析の前処理として図 2-1 のとおり粉碎・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させる。
- (2) ふるい上部産物は、約 1kg に縮分し、それを分析用に縮分後、振動ミル（フリッチュ社／P-9）で微粉碎し、ICP 分析及び 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碎せずに MLA 分析を行う。2.36 mm 以上の 3 粒群については微粉碎後に MLA 分析を行う。また、各粒群とも ICP 用試料については微粉碎を行う。試料の粒度分布を図 2-2 及び図 2-3 に示す。

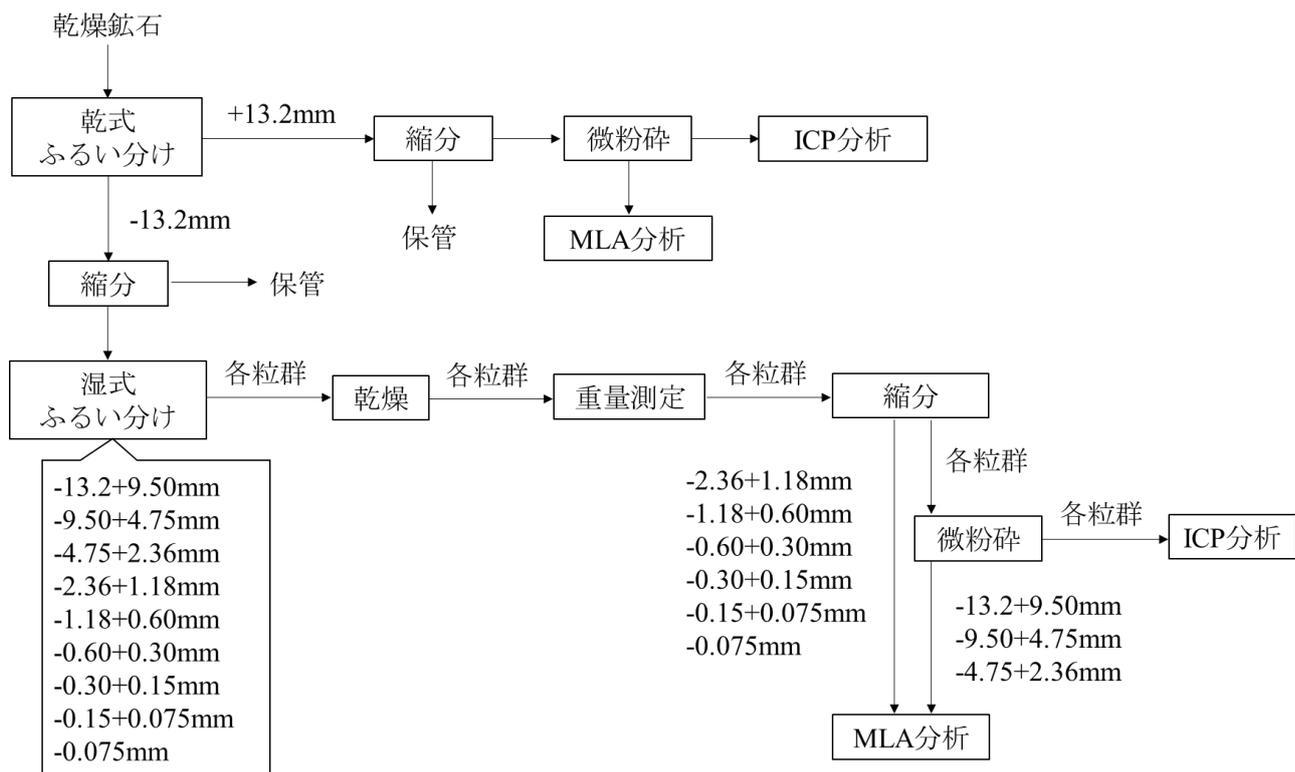


図 2-1 試料の前処理方法

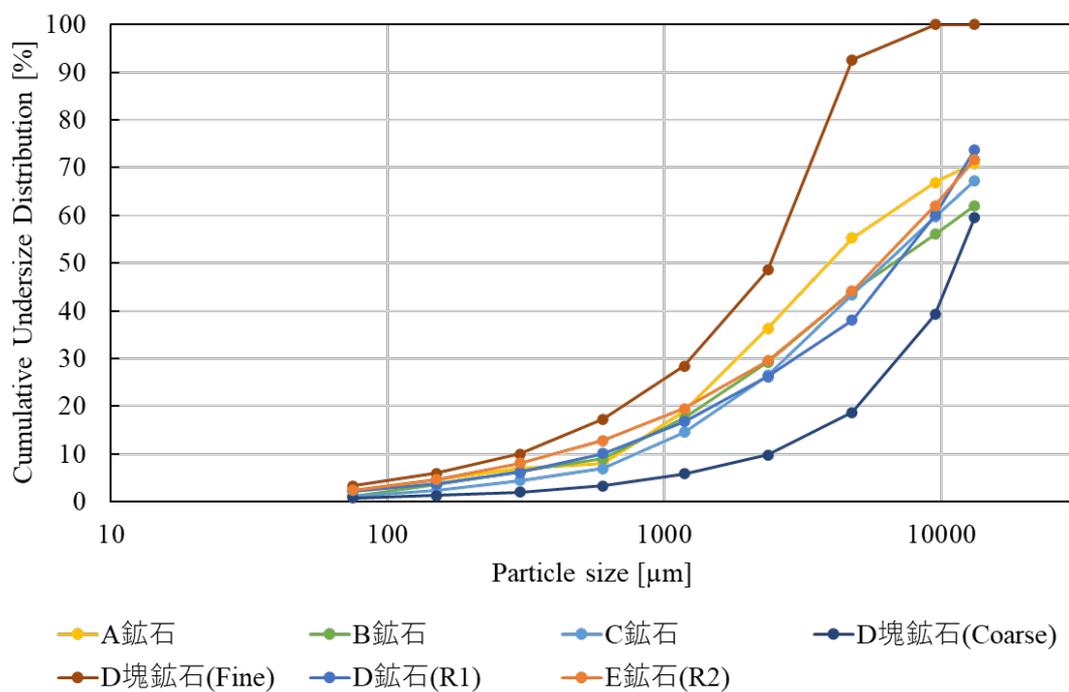


図 2-2 粒度分布 (篩下積算分布)

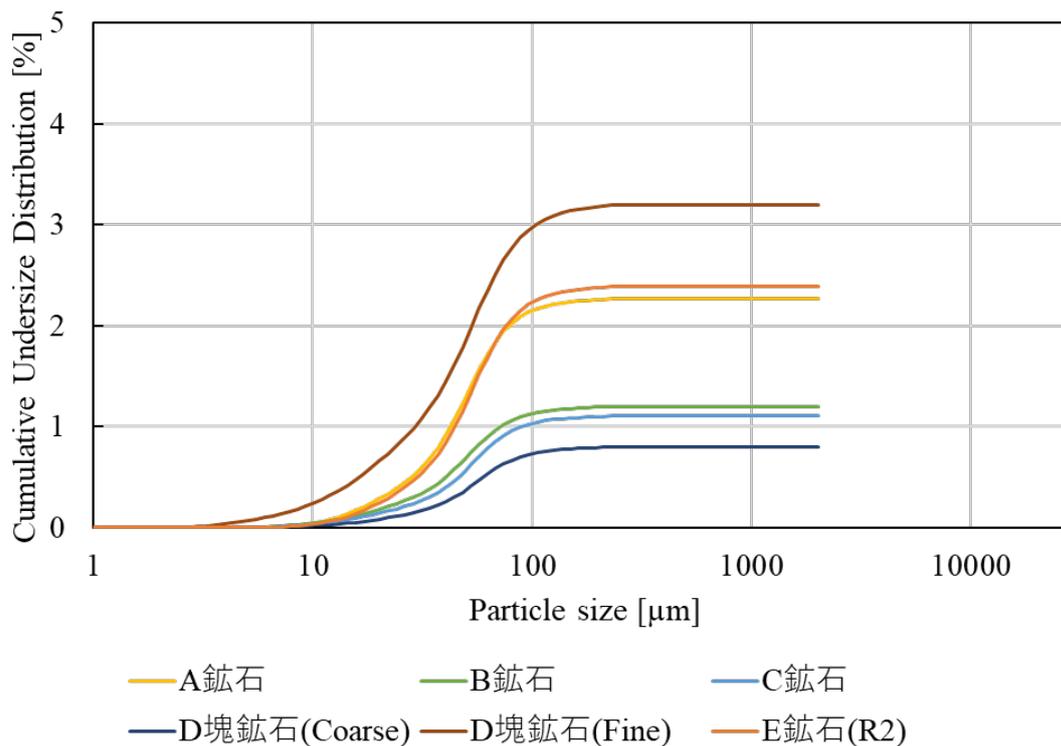


図 2-3 粒度分布（篩下積算分布）細粒部拡大

## 2-3 元素分析

### 2-3-1 分析目的

ニッケル磁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、振動ミル微粉砕産物を用いた。

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. 微粉砕試料から 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、高温高压下で試料を溶解する（20 分間で 220℃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、容器を超純水で洗い流したのもを加える。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 μm 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 から表 2-3 に示す。

ICP 分析結果から、これまでのスタディ結果と同様に細粒部のニッケル品位が高いことが確認された。B 鉱石及び C 鉱石は 13.2mm 以上の粒群がその他の粒群に比べて著しく品位が低いことから、13.2mm 以上の粒群の品位を向上させることで全体の品位が大きく向上する可能性が示唆された。他方、A 鉱石については 13.2mm 以上の粒群に加え、13.2mm 以下においても品位の低い粒群が散見しており、また D 塊鉱石については全体の品位が低いため、同様の方法は適さないと考えられる。

表 2-1 ICP 分析結果 (A 鉱石)

粒度	重量	重量割合	品位 %		元素分布率 %		Fe/Ni	平均品位との比較	
	g	%	Fe	Ni	Fe	Ni		Fe	Ni
+13.2mm	413.56	29.1	6.64	1.03	12.86	21.34	6.47	0.44	0.73
-13.2+9.50mm	58.21	4.1	11.03	1.31	3.01	3.84	8.41	0.74	0.94
-9.50+4.75mm	164.90	11.6	13.66	1.33	10.55	11.01	10.29	0.91	0.95
-4.75+2.36mm	269.47	18.9	18.26	1.57	23.06	21.28	11.64	1.22	1.12
-2.36+1.18mm	248.62	17.5	20.45	1.63	23.82	20.43	12.52	1.36	1.17
-1.18+0.60mm	153.81	10.8	21.51	1.68	15.50	12.99	12.81	1.43	1.20
-0.60+0.30mm	14.36	1.0	15.83	1.48	1.07	1.07	10.72	1.06	1.06
-0.30+0.15mm	34.67	2.4	20.12	1.61	3.27	2.81	12.47	1.34	1.15
-0.15+0.075mm	33.14	2.3	21.07	1.60	3.27	2.67	13.19	1.41	1.14
-0.075mm	32.27	2.3	23.67	1.57	3.58	2.55	15.05	1.58	1.13
Head(calc.)	1423.01	100	15.00	1.40	100.00	100.00	10.74	1.00	1.00

Product	Assays (ICP), %							
	Al	Ca	Co	Cr	Fe	Mg	Ni	SiO2
+13.2mm	0.15	0.11	0.01	0.09	6.64	17.19	1.03	16.86
-13.2+9.50mm	0.25	0.03	0.01	0.18	11.03	12.77	1.31	45.23
-9.50+4.75mm	0.34	0.03	0.02	0.22	13.66	12.37	1.33	43.48
-4.75+2.36mm	0.48	0.04	0.03	0.29	18.26	9.85	1.57	39.96
-2.36+1.18mm	0.55	0.05	0.04	0.33	20.45	8.66	1.63	40.15
-1.18+0.60mm	0.57	0.04	0.04	0.35	21.51	8.30	1.68	39.18
-0.60+0.30mm	0.46	0.06	0.06	0.25	15.83	9.47	1.48	41.18
-0.30+0.15mm	0.52	0.08	0.05	0.30	20.12	7.53	1.61	37.34
-0.15+0.075mm	0.52	0.12	0.05	0.32	21.07	7.01	1.60	38.44
-0.075mm	0.60	0.14	0.04	0.34	23.67	6.79	1.57	36.10
Head(calc.)	0.39	0.06	0.03	0.23	15.00	11.82	1.40	33.98

表 2-2 ICP 分析結果 (B 鉱石)

粒度	重量	重量割合	品位 %		元素分布率 %		Fe/Ni	平均品位との比較	
	g	%	Fe	Ni	Fe	Ni		Fe	Ni
+13.2mm	625.85	38.0	6.10	1.14	21.67	30.01	5.37	0.57	0.79
-13.2+9.50mm	98.46	6.0	8.76	1.53	4.89	6.37	5.70	0.82	1.07
-9.50+4.75mm	198.74	12.1	10.73	1.58	12.10	13.28	6.77	1.00	1.10
-4.75+2.36mm	243.00	14.8	12.91	1.61	17.80	16.51	8.01	1.21	1.12
-2.36+1.18mm	193.38	11.7	14.73	1.63	16.16	13.28	9.04	1.38	1.13
-1.18+0.60mm	139.96	8.5	16.13	1.66	12.81	9.81	9.70	1.51	1.16
-0.60+0.30mm	43.76	2.7	16.22	1.71	4.03	3.16	9.47	1.52	1.19
-0.30+0.15mm	46.50	2.8	17.16	1.73	4.53	3.40	9.89	1.60	1.21
-0.15+0.075mm	38.15	2.3	17.83	1.73	3.86	2.79	10.29	1.67	1.20
-0.075mm	19.53	1.2	19.55	1.67	2.17	1.38	11.68	1.83	1.16
Head(calc.)	1647.31	100	10.70	1.44	100.00	100.00	7.43	1.00	1.00

Product	Assays (ICP), %							
	Al	Ca	Co	Cr	Fe	Mg	Ni	SiO2
+13.2mm	0.28	0.03	0.01	0.10	6.10	17.85	1.14	44.77
-13.2+9.50mm	0.48	0.04	0.01	0.15	8.76	15.04	1.53	44.58
-9.50+4.75mm	0.68	0.11	0.01	0.20	10.73	13.49	1.58	42.86
-4.75+2.36mm	0.75	0.07	0.02	0.28	12.91	12.50	1.61	41.78
-2.36+1.18mm	0.80	0.06	0.02	0.23	14.73	11.25	1.63	40.84
-1.18+0.60mm	0.83	0.05	0.02	0.26	16.13	10.40	1.66	39.77
-0.60+0.30mm	0.82	0.04	0.03	0.21	16.22	10.55	1.71	38.60
-0.30+0.15mm	0.85	0.07	0.03	0.23	17.16	9.57	1.73	39.24
-0.15+0.075mm	0.89	0.13	0.03	0.35	17.83	9.15	1.73	39.01
-0.075mm	0.93	0.16	0.03	0.24	19.55	8.81	1.67	38.12
Head(calc.)	0.57	0.06	0.01	0.18	10.70	14.22	1.44	42.67

表 2-3 ICP 分析結果 (C 鉱石)

粒度	重量	重量割合	品位 %		元素分布率 %		Fe/Ni	平均品位との比較	
	g	%	Fe	Ni	Fe	Ni		Fe	Ni
+13.2mm	493.58	32.7	8.99	1.15	18.65	24.84	7.80	0.57	0.76
-13.2+9.50mm	114.90	7.6	16.09	1.65	7.77	8.28	9.75	1.02	1.09
-9.50+4.75mm	246.80	16.3	16.60	1.67	17.22	17.96	9.96	1.05	1.10
-4.75+2.36mm	254.76	16.9	18.41	1.69	19.72	18.78	10.91	1.17	1.11
-2.36+1.18mm	180.26	11.9	21.20	1.73	16.06	13.60	12.27	1.35	1.14
-1.18+0.60mm	115.71	7.7	22.09	1.72	10.74	8.71	12.81	1.40	1.14
-0.60+0.30mm	38.21	2.5	21.82	1.70	3.50	2.84	12.84	1.39	1.12
-0.30+0.15mm	31.49	2.1	21.89	1.72	2.90	2.36	12.76	1.39	1.13
-0.15+0.075mm	17.62	1.2	22.77	1.73	1.69	1.33	13.17	1.45	1.14
-0.075mm	16.70	1.1	24.91	1.77	1.75	1.29	14.04	1.58	1.17
Head(calc.)	1510.02	100	15.75	1.52	100.00	100.00	10.39	1.00	1.00

Product	Assays (ICP), %							
	Al	Ca	Co	Cr	Fe	Mg	Ni	SiO2
+13.2mm	1.49	0.13	0.01	0.15	8.99	15.81	1.15	41.41
-13.2+9.50mm	1.51	0.12	0.01	0.18	10.33	15.03	1.25	40.48
-9.50+4.75mm	1.53	0.12	0.01	0.23	12.14	13.89	1.37	39.14
-4.75+2.36mm	1.56	0.12	0.02	0.27	13.58	13.10	1.44	38.12
-2.36+1.18mm	1.59	0.12	0.02	0.29	14.64	12.59	1.48	37.28
-1.18+0.60mm	1.60	0.11	0.02	0.29	15.26	12.26	1.50	36.79
-0.60+0.30mm	1.61	0.11	0.02	0.30	15.43	12.15	1.51	36.65
-0.30+0.15mm	1.61	0.11	0.02	0.30	15.57	12.05	1.51	36.54
-0.15+0.075mm	1.61	0.11	0.02	0.30	15.65	12.00	1.51	36.48
-0.075mm	1.70	0.14	0.03	0.39	24.91	7.11	1.77	29.61
Head(calc.)	1.61	0.11	0.02	0.30	15.75	11.94	1.52	36.40

表 2-2 ICP 分析結果 (D 塊鉱石(Coarse))

粒度	重量	重量割合	品位 %		元素分布率 %		Fe/Ni	平均品位との比較	
	g	%	Fe	Ni	Fe	Ni		Fe	Ni
+13.2mm	684.90	40.4	5.22	0.55	38.06	38.05	9.43	0.94	0.94
-13.2+9.50mm	344.24	20.3	5.45	0.55	19.95	19.01	9.89	0.98	0.94
-9.50+4.75mm	348.01	20.5	5.53	0.55	20.47	19.23	10.03	1.00	0.94
-4.75+2.36mm	150.49	8.9	5.79	0.66	9.27	9.99	8.75	1.04	1.12
-2.36+1.18mm	67.75	4.0	6.67	0.92	4.81	6.27	7.23	1.20	1.57
-1.18+0.60mm	42.13	2.5	6.45	0.70	2.89	2.96	9.20	1.16	1.19
-0.60+0.30mm	21.78	1.3	5.36	0.67	1.24	1.46	8.00	0.96	1.14
-0.30+0.15mm	12.69	0.7	6.13	0.76	0.83	0.97	8.09	1.10	1.29
-0.15+0.075mm	8.54	0.5	7.80	0.76	0.71	0.65	10.23	1.41	1.30
-0.075mm	13.00	0.8	12.86	1.08	1.78	1.40	11.96	2.32	1.83
Head(calc.)	1693.52	100	5.55	0.59	100.00	100.00	9.43	1.00	1.00

Product	Assays (ICP), %						
	Al	Ca	Co	Cr	Fe	Mg	Ni
+13.2mm	0.16	0.06	0.01	0.07	5.22	20.52	0.55
-13.2+9.50mm	0.11	0.02	0.01	0.06	5.45	20.31	0.55
-9.50+4.75mm	0.10	0.02	0.01	0.05	5.53	20.43	0.55
-4.75+2.36mm	0.12	0.02	0.01	0.06	5.79	19.94	0.66
-2.36+1.18mm	0.12	0.01	0.01	0.06	6.67	18.87	0.92
-1.18+0.60mm	0.12	0.01	0.01	0.06	6.45	19.32	0.70
-0.60+0.30mm	0.12	0.02	0.01	0.06	5.36	20.04	0.67
-0.30+0.15mm	0.13	0.03	0.01	0.07	6.13	19.38	0.76
-0.15+0.075mm	0.17	0.05	0.02	0.11	7.80	18.40	0.76
-0.075mm	0.29	0.07	0.03	0.14	12.86	15.82	1.08
Head(calc.)	0.13	0.03	0.01	0.06	5.55	20.25	0.59

表 2-3 ICP 分析結果 (D 塊鉱石(Fine))

粒度	重量	重量割合	品位 %		元素分布率 %		Fe/Ni	平均品位との比較	
	g	%	Fe	Ni	Fe	Ni		Fe	Ni
+13.2mm	0.00	0.0							
-13.2+9.50mm	0.00	0.0							
-9.50+4.75mm	73.48	7.4	5.17	0.39	7.03	5.16	13.28	0.95	0.70
-4.75+2.36mm	438.44	44.1	5.20	0.51	42.21	40.40	10.18	0.96	0.92
-2.36+1.18mm	199.83	20.1	5.05	0.46	18.68	16.48	11.05	0.93	0.82
-1.18+0.60mm	111.35	11.2	5.65	0.71	11.64	14.33	7.91	1.04	1.28
-0.60+0.30mm	72.72	7.3	5.87	0.73	7.89	9.62	7.99	1.08	1.32
-0.30+0.15mm	39.95	4.0	6.16	0.73	4.55	5.23	8.48	1.13	1.30
-0.15+0.075mm	26.44	2.7	6.64	0.84	3.25	3.99	7.93	1.22	1.50
-0.075mm	32.32	3.2	7.95	0.82	4.75	4.79	9.68	1.46	1.47
Head(calc.)	994.53	100	5.44	0.56	100.00	100.00	9.74	1.00	1.00

Product	Assays (ICP), %							
	Al	Ca	Co	Cr	Fe	Mg	Ni	SiO2
+13.2mm								
-13.2+9.50mm								
-9.50+4.75mm	0.11	0.02	0.01	0.08	5.17	21.08	0.39	44.48
-4.75+2.36mm	0.10	0.02	0.01	0.07	5.20	20.86	0.51	43.83
-2.36+1.18mm	0.11	0.02	0.01	0.05	5.05	20.48	0.46	45.46
-1.18+0.60mm	0.11	0.02	0.01	0.05	5.65	20.32	0.71	44.34
-0.60+0.30mm	0.13	0.02	0.01	0.08	5.87	19.96	0.73	43.21
-0.30+0.15mm	0.13	0.03	0.01	0.08	6.16	19.46	0.73	42.99
-0.15+0.075mm	0.15	0.05	0.01	0.08	6.64	19.57	0.84	42.46
-0.075mm	0.17	0.06	0.02	0.09	7.95	18.97	0.82	41.50
Head(calc.)	0.11	0.02	0.01	0.07	5.44	20.52	0.56	44.07

## 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及び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。以下の（1）で示した粒群は比較的粗いため、そのまま研磨して観察を行った。その他の試料については2.36mm以上のものはそのままの大きさではサンプリングによる結果の偏りが大きいため、ジョークラッシャー、ディスクミル及び振動ミルを用いて数百 $\mu\text{m}$ 以下程度の細粒にし、0.3mmのものはそのままの状態樹脂包埋を行った。その際、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（2）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#600、#800、#1000、#1200の耐水研磨紙を順に用いて行い、その後、3 $\mu\text{m}$ のダイヤモンドスラリーと羊毛、1 $\mu\text{m}$ 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（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 # 600、# 800、# 1000、# 1200 の耐水研磨紙を順に用いて行い、その後、3  $\mu\text{m}$  のダイヤモンドスラリーと羊毛、1  $\mu\text{m}$  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 の分析は、加速電圧：25 kV、エミッション電流値：40  $\mu\text{A}$ 、WD（Working distance、作動距離）：13 mm の条件で行い、測定モードは GXMAP 法（1  $\mu\text{m}$  物粒を一定間隔で EDS により分析）」を適用した。倍率は -2.36+1.18 mm、-1.18+0.60 mm、-0.60+0.30 mm 試料では 300 倍、その他の粒群では 1000 倍とし、各試料 100 フレーム以上（倍率 300 倍で 1 フレームは約 1.4 mm 四方、倍率 1000 倍で 1 フレームは約 0.4 mm 四方）を観察した。

## 2-4-5 分析結果

### 2-4-5-1 A 鉱石

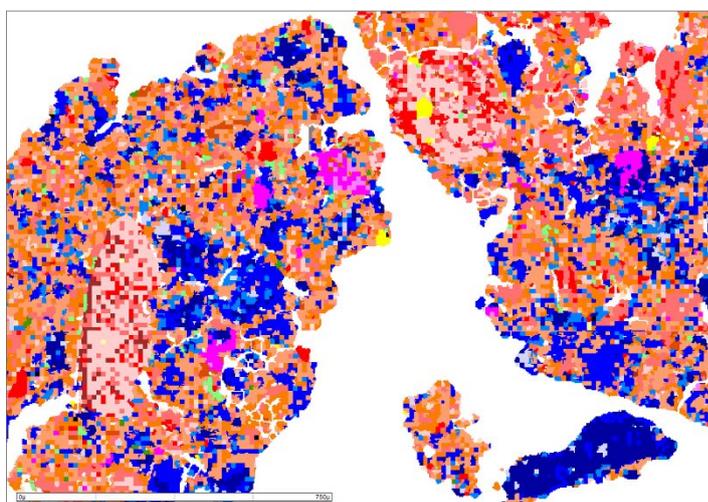
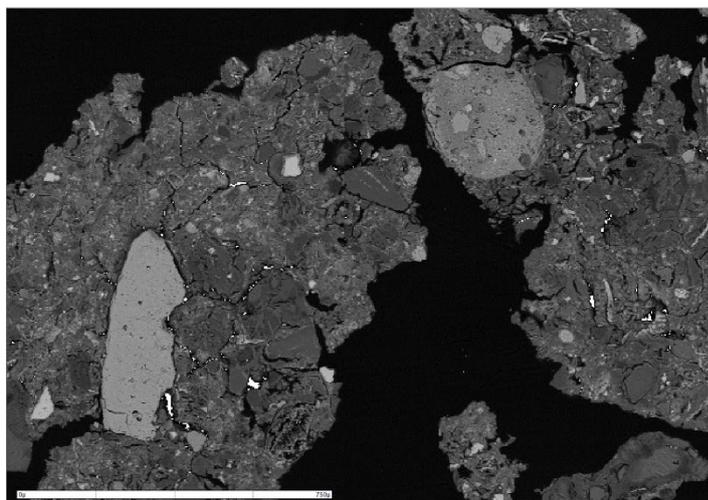
#### (1) 鉱物種

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 24 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)、蛇紋石と鉄酸化物が複雑に入り混じった相 (Serpentine&Fe-oxide\_Ni)、酸化鉄 (Fe-oxide\_Ni) の 3 種があることが判明した。本分析において、含ニッケル鉱物で近しいスペクトルを持つものはニッケル品位を記載して区別している。これは鉱物中のニッケル品位が粒子によりばらつきが大きいためであるが、表 2-4 で区分された Ni 品位が代表的だと考えられる。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 2-4) に示すように、微細な Fe-oxide が Serpentine に広がっており、MLA 分析では Serpentine と Fe-oxide の区別が困難だからである。

表 2-4 MLA で確認された鉱物 (A 鉱石)

鉱物リスト	Ni (%) ※	グループ化後の名称
Serpentine_Ni2.8	2.84	Serpentine_Ni
Serpentine_Ni1.3	1.35	
Serpentine_Ni0.9	0.94	
Serpentine	0	Serpentine
Serpentine&Fe-oxide_Ni1.25	1.25	Serpentine&Fe-oxide_Ni
Serpentine&Fe-oxide_Ni2.1	2.09	
Serpentine&Fe-oxide_Ni1.6	1.58	
Serpentine&Fe-oxide_Ni8.9_Co	8.94	
Serpentine&Fe-oxide	0	Serpentine&Fe-oxide
Fe-oxide_Ni3.2	3.18	Fe-oxide_Ni
Fe-oxide_Ni2.5	2.53	
Mn-Fe oxide_NiCo	19.02	
Mn-Fe oxide_Ni	11.10	
Fe-oxide	0	Fe-oxide
Fe-oxide_CrNi	0	
Magnetite high Cr	0	
Spinel-chromite	0	Spinel-chromite
Spinel-chromite_Fe_high	0	
Quartz	0	Si mineral
Quartz_Fe	0	
Augite (Pyroxene)	0	
Mg oxide	0	Others
SnZnClNaFeO	0	
SCaMgFeNaO	0	

※Ni 品位は代表値 (平均値でなく、代表粒子の値)



- Background
- Serpentine\_Ni2.8
- Serpentine\_Ni1.3
- Serpentine\_Ni0.9
- Serpentine
- Serpentine&Fe-oxide\_Ni1.25
- Serpentine&Fe-oxide\_Ni2.1
- Serpentine&Fe-oxide\_Ni1.6
- Serpentine&Fe-oxide\_Ni8.9\_Co
- Serpentine&Fe-oxide
- Fe-oxide\_Ni3.2
- Fe-oxide\_Ni2.5
- Fe-oxide
- Mn-Fe oxide\_NiCo
- Mn-Fe oxide\_Ni
- Fe-oxide\_CrNi
- Magnetite high Cr
- Spinel-chromite
- Spinel-chromite\_Fehigh
- Quartz
- Quartz\_Fe
- Augite (Pyroxene)
- Mg oxide
- SnZnClNaFeO
- SCaMgFeNaO
- Unknown
- Low\_Counts
- No\_XRay

図 2-4 上：反射電子像、下：鉱物マッピング像 (A 鉍石-1.18mm+0.60 mm 試料)

(2) 鉱物重量割合

図 2-5 に A 鉱石の各粒群の鉱物重量割合を示す。

非ニッケル鉱物の割合は 2.36mm 以下の粒群には少ないが、粗粒部、特に+13.2mm に Ni を含まない Serpentine が多く存在していた。

Ni を含む Serpentine や Serpentine&Fe-oxide はいずれの粒群でも全体のおおよそ 7 割を占め、細粒になるにつれて Serpentine&Fe-oxide の割合が増加することがわかった。

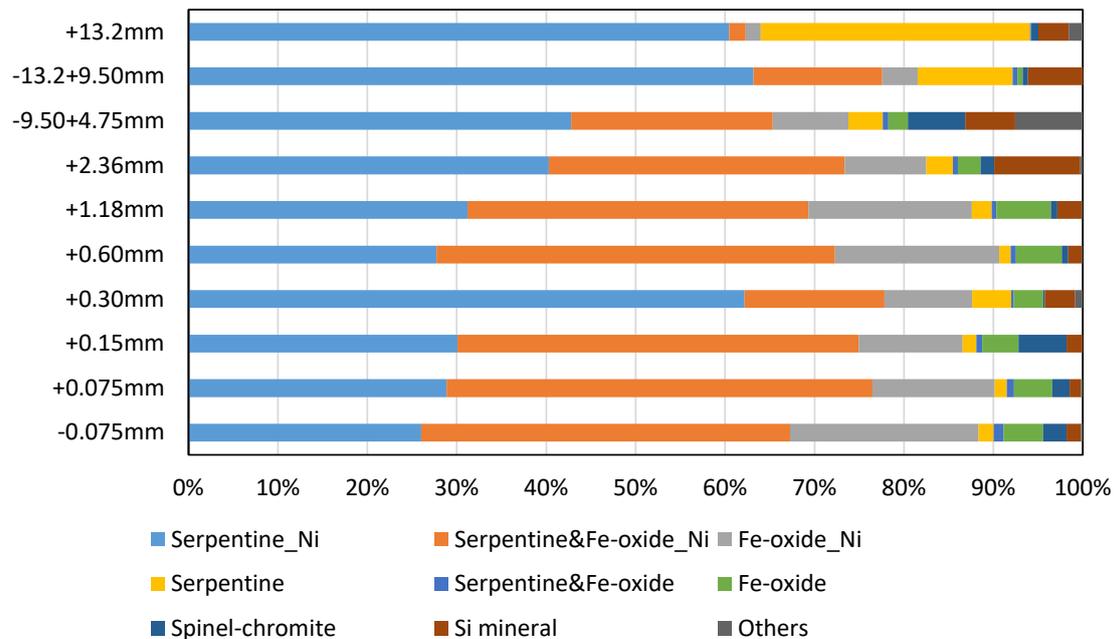


図 2-5 A 鉱石各粒群の鉱物重量割合 (グループ化したもの)

### (3) 含ニッケル鉱物のニッケル分布率

図 2-6 に A 鉱石の各粒群におけるニッケル分布率を示す。

Ni は主に Serpentine と Serpentine&Fe-oxide に存在していた。昨年度の E 鉱石より Fe-oxide への偏りが少なく、比較的硬い Serpentine や Serpentine&Fe-oxide に Ni が多く存在しているため、強い力で表面粉砕するなどして Ni を回収することが必要であると考えられる。また、細粒であるほど Serpentine&Fe-oxide や Fe-oxide への分布率が高いことがわかった。

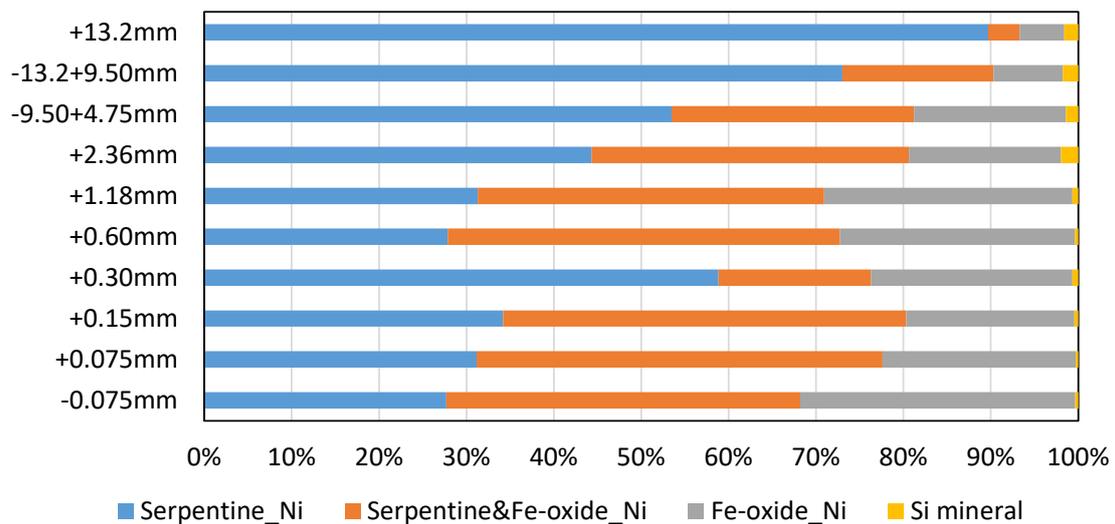


図 2-6 各粒群におけるニッケル分布率 (A 鉱石)

2-4-5-2 B 鉱石

(1) 鉱物種

表 2-5 に MLA で確認された鉱物種を示す。MLA 分析の過程で全 20 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、5 種にまとめた。含ニッケル鉱物としては、蛇紋石 (Serpentine)、蛇紋石と鉄酸化物が複雑に入り混じった相 (Serpentine&Fe-oxide\_Ni)、酸化鉄 (Fe-oxide\_Ni) の 3 種があることが判明した。

表 2-5 MLA で確認された鉱物 (B 鉱石)

鉱物リスト	Ni (%) ※	グループ化後の名称
Serpentine_Ni2.0	2.02	Serpentine
Serpentine_Ni1.3	1.32	
Serpentine_Ni0.6	0.57	
Serpentine_Ni0.7	0.66	
Serpentine&Fe oxide_Ni7.3	7.30	Serpentine&Fe-oxide
Serpentine&Fe-oxide_Ni2.3	2.36	
Serpentine&Fe oxide_Ni2.1	2.12	
Serpentine&Fe-oxide_Ni1.7	1.71	
Serpentine&Mn-Fe oxide	16.28	
Fe-oxide_Ni5.2	5.27	Fe-oxide_Ni
Fe-oxide_Ni2.5	2.50	
Fe-oxide_Ni2.2	2.17	
Fe-oxide_Ni0.8	0.80	
Quartz	0	Si mineral
Fe-oxide	0	
Kaolinite	0	
Albite	0	
Si-oxide	0	
Spinel-chromite	0	Others
Spinel-chromite_Si	0	

※Ni 品位は代表値 (平均値でなく、代表粒子の値)

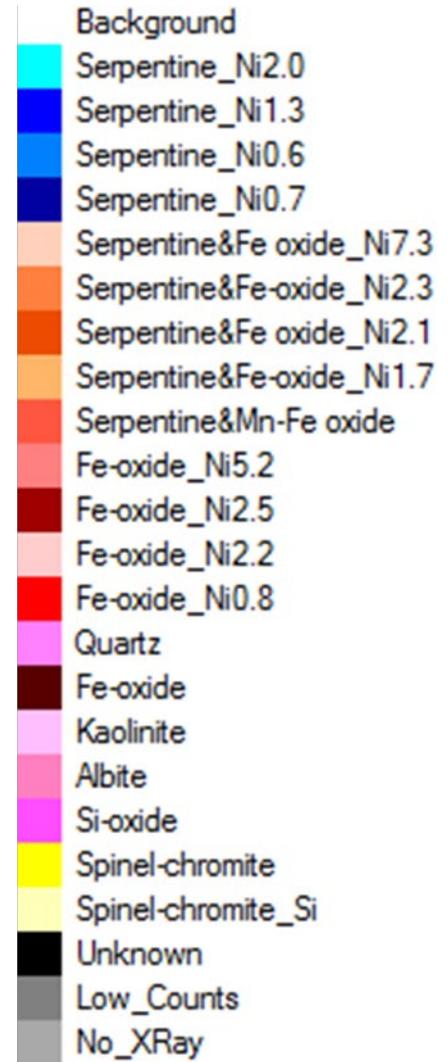
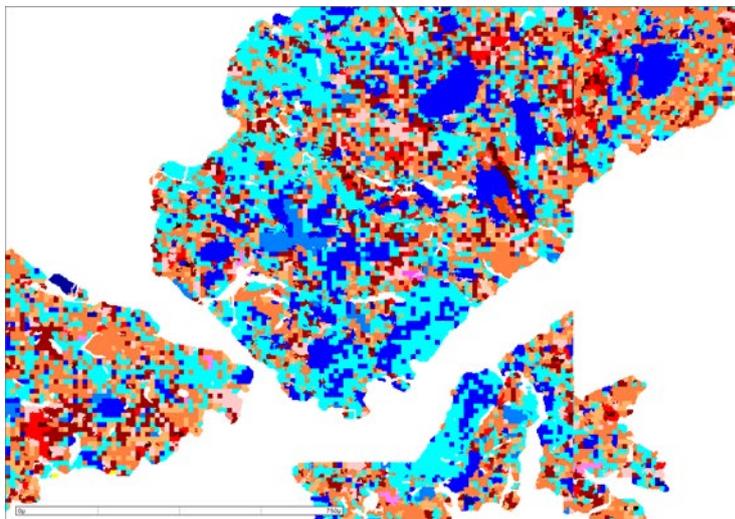
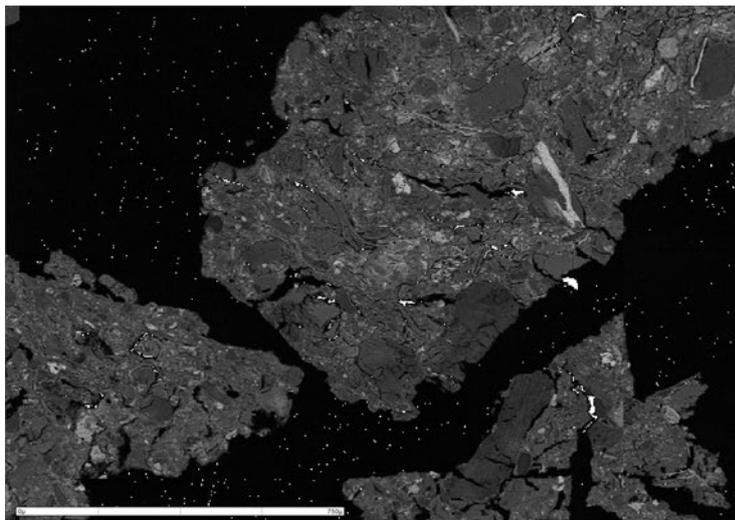


図 2-7 上：反射電子像、下：鉱物マッピング像 (B 鉍石-1.18mm+0.60 mm 試料)

(2) 鉱物重量割合

図 2-8 に B 鉱石の各粒群の鉱物重量割合を示す。大部分の粒子に Ni が含まれており、Serpentine と Serpentine&Fe oxide が特に多く存在することがわかった。

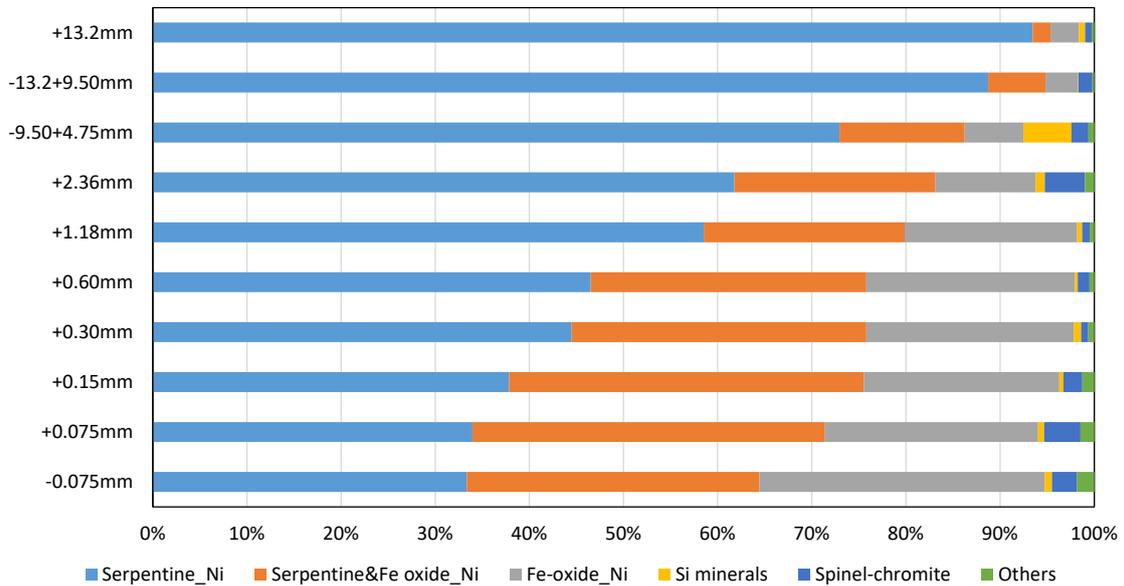


図 2-8 B 鉱石各粒群の鉱物重量割合 (グループ化したもの)

(3) 含ニッケル鉱物のニッケル分布率

図 2-9 に B 鉱石の各粒群におけるニッケル分布率を示す。

Ni は主に Serpentine と Serpentine&Fe-oxide に存在していた。粗粒ほど Serpentine の割合が高く、特に 9.5mm 以上は大部分の Ni が Serpentine に含まれることが判明した。

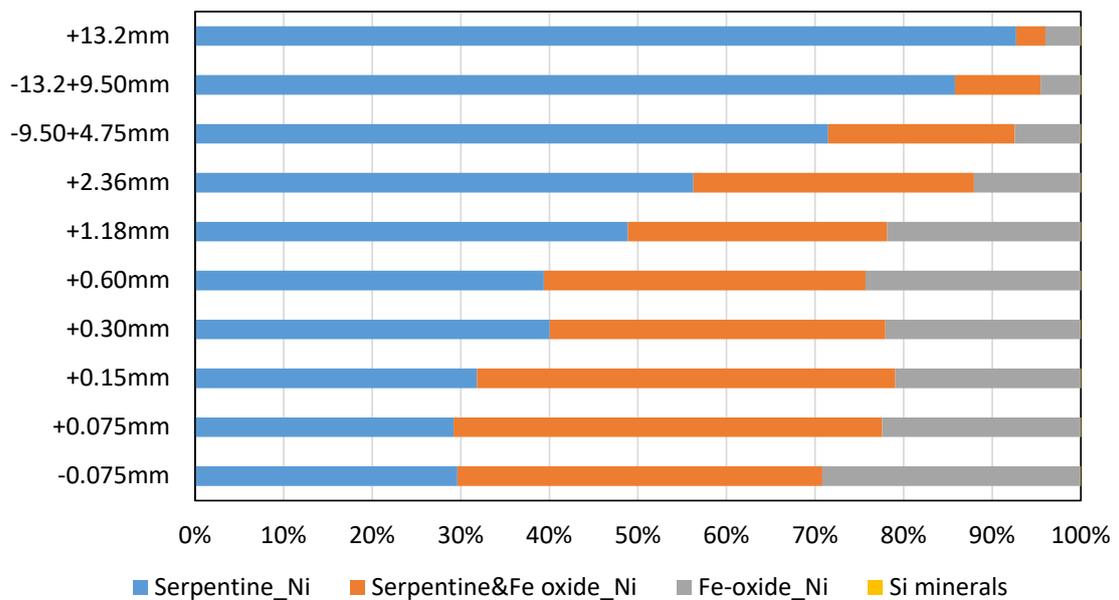


図 2-9 各粒群におけるニッケル分布率 (B 鉱石)

### 2-4-5-3 C 鉱石

#### (1) 鉱物種

表 2-6 に MLA で確認された鉱物種を示す。MLA 分析の過程で全 36 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)、蛇紋石と鉄酸化物が複雑に入り混じった相 (Serpentine&Fe-oxide\_Ni)、酸化鉄 (Fe-oxide\_Ni)、カオリナイト (Kaolinite)、鉄アルミニウム酸化物 (Fe-Al-oxide)、チタン酸化物 (Ti-oxide) の 6 種があることが判明した。本分析においては、表 2-6 で区分された Ni 品位が代表的だと考えられる。

表 2-6 MLA で確認された鉱物 (C 鉱石)

鉱物リスト	Ni (%) ※	グループ化後の名称
Serpentine_Ni14	14.50	Serpentine_Ni
Serpentine_Ni4.5	4.53	
Serpentine_Ni3.1	3.12	
Serpentine_Ni2.0	2.01	
Serpentine_Ni1.6	1.58	
Serpentine_Ni1.4	1.42	
Serpentine&Fe-oxide_Ni11_MnCo	9.71	Serpentine&Fe-oxide_Ni
Serpentine&Fe-oxide_Ni3.5	3.54	
Serpentine&Fe-oxide_Ni3.2	3.17	
Serpentine&Fe-oxide_Ni2.9	2.91	
Serpentine&Fe-oxide_Ni1.0	1.08	
Serpentine&Mn-Fe-oxide_Ni17	17.25	
Serpentine&Magnesiochromite_Ni4.5	4.57	Serpentine
Serpentine&Magnesiochromite	0	
Serpentine_Ti	0	
Serpentine_Cr	0	
Serpentine	0	Fe-oxide_Ni
Fe-oxide_Ni6.0	6.01	
Fe-oxide_Ni2.0	2.04	
Fe-oxide_Ni1.9	1.90	
Mn-Fe-oxide_Ni5.7	5.76	Fe-oxide
Fe-oxide_CrMg	0	
Fe-oxide	0	Si-minerals
Quartz	0	
Olivine (Fayalite)	0	
Augite (Pyroxene)	0	
Clinochlore (Chlorite)	0	
Hornblende (Amphibole)	0	
Kaolinite	1.01	
Spinel-chromite	0	Spinel-chromite
Chromite	0	
Fe-Al-oxide	1.09	Others
Ti-oxide	0.80	
Ilmenite	0	
Al-oxide	0	
AlFeSiClO	0	

※Ni 品位は代表値 (平均値でなく、代表粒子の値)

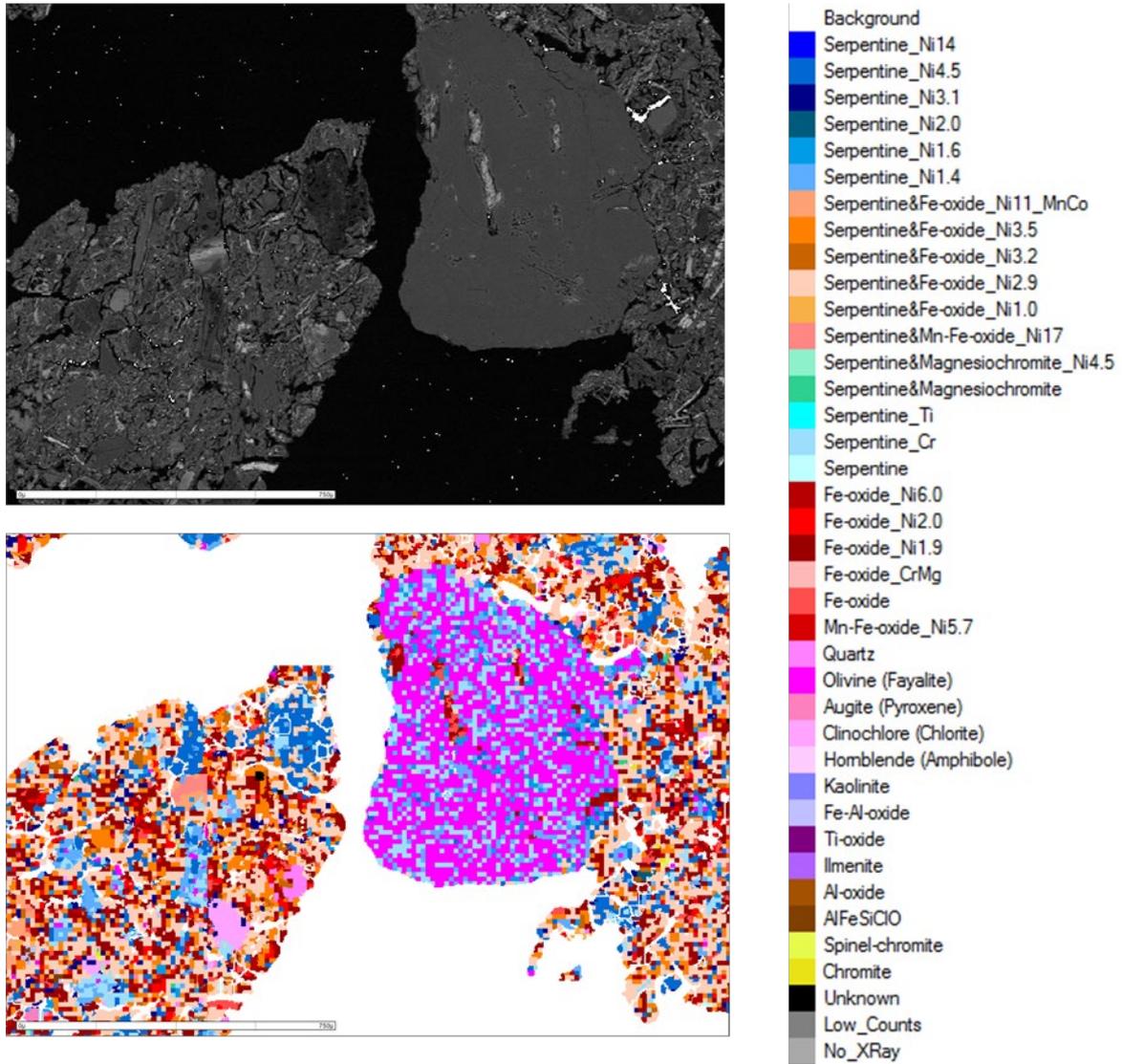


図 2-10 上：反射電子像、下：鉱物マッピング像 (C 鉍石-1.18mm+0.60 mm 試料)

(2) 鉱物重量割合

図 2-11 に C 鉱石の各粒群の鉱物重量割合を示す。細粒部(0.60mm 以下)の Ni 含有鉱物の割合は大きく変わらないが、粗粒部は粒子が荒いほど Ni 含有鉱物の割合が低いことがわかった。特に 13.2mm 以上は Si minerals(主に Olivine)の割合が高い。

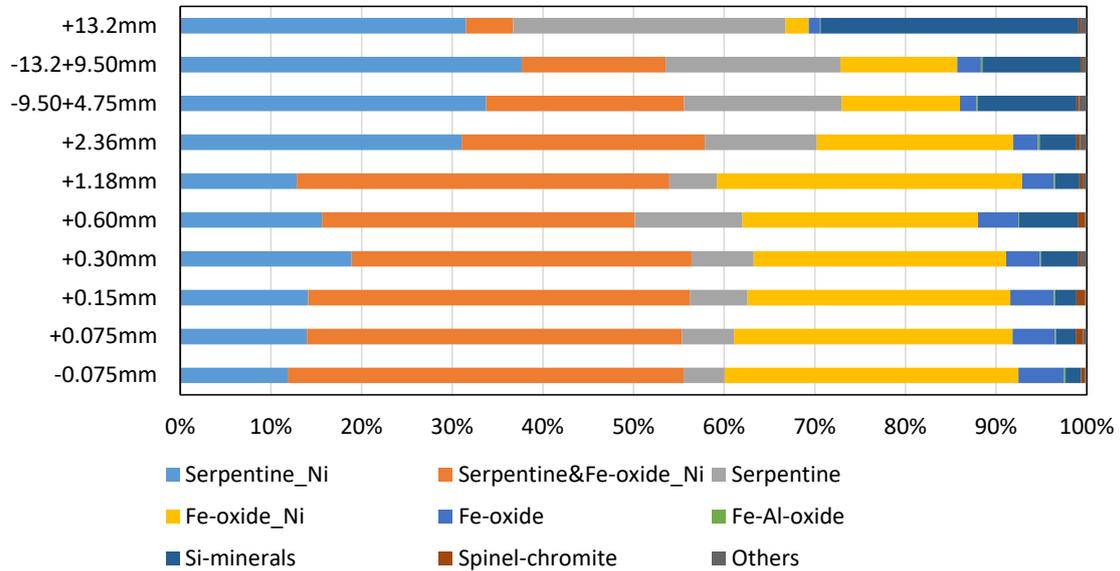


図 2-11 C 鉱石各粒群の鉱物重量割合 (グループ化したもの)

(3) 含ニッケル鉱物のニッケル分布率

図 2-12 に C 鉱石の各粒群におけるニッケル分布率を示す。

Ni は主に Serpentine、Serpentine&Fe-oxide 及び Fe-oxide に存在していた。細粒になるにつれ、Serpentine&Fe-oxide や Fe-oxide に多く Ni が分布しており、1.18mm 以下では約 8 割が Serpentine&Fe-oxide 及び Fe-oxide に存在していることがわかった。

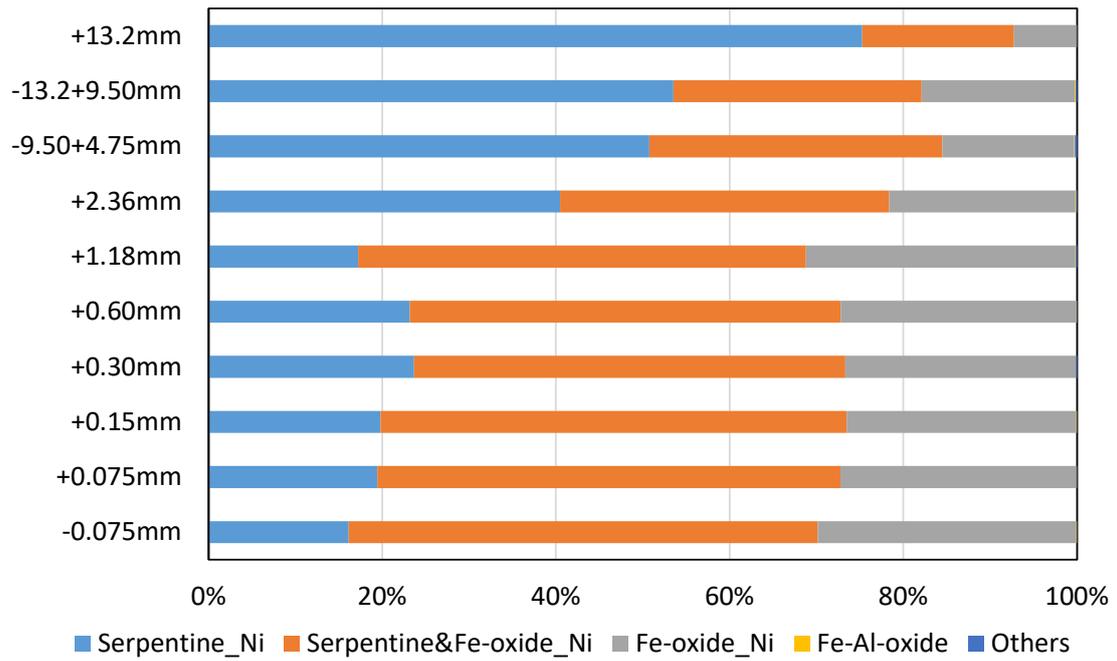


図 2-12 各粒群におけるニッケル分布率 (C 鉱石)

2-4-5-4 D 塊鉱石

(1) 鉱物種

表 2-7 に MLA で確認された鉱物種を示す。MLA 分析の過程で全 20 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)、蛇紋石と鉄酸化物が複雑に入り混じった相 (Serpentine&Fe-oxide\_Ni)、酸化鉄 (Fe-oxide\_Ni) の 3 種があることが判明した。本分析においては、表 2-7 で区分された Ni 品位が代表的だと考えられる。

表 2-7 MLA で確認された鉱物 (D 塊鉱石)

鉱物リスト	Ni (%) ※	グループ化後の名称
Serpentine_Ni2.1	2.12	Serpentine_Ni
Serpentine_Ni0.9	0.91	
Serpentine_Ni0.5	0.49	
Serpentine_Ni3.1_MnCo	3.08	
Serpentine_Ni1.7	1.74	
Serpentine&Fe-oxide_High	3.08	Serpentine&Fe-oxide_Ni
Serpentine&Fe-oxide_Middle	2.04	
Serpentine&Fe-oxide_Low	2.13	
Fe-oxide_NiCr	0.76	Fe-oxide_Ni
Serpentine	0	Serpentine
Quartz	0	Si mineral
Augite_Al	0	
Augite (Pyroxene)	0	
Albite	0	
Fe-oxide_MgSi	0	Fe-oxide
Fe-oxide	0	
Spinel-chromite	0	Spinel-chromite
Chromite	0	
FeSiAl	0	Others
PSiCaNaO	0	

※Ni 品位は代表値 (平均値でなく、代表粒子の値)

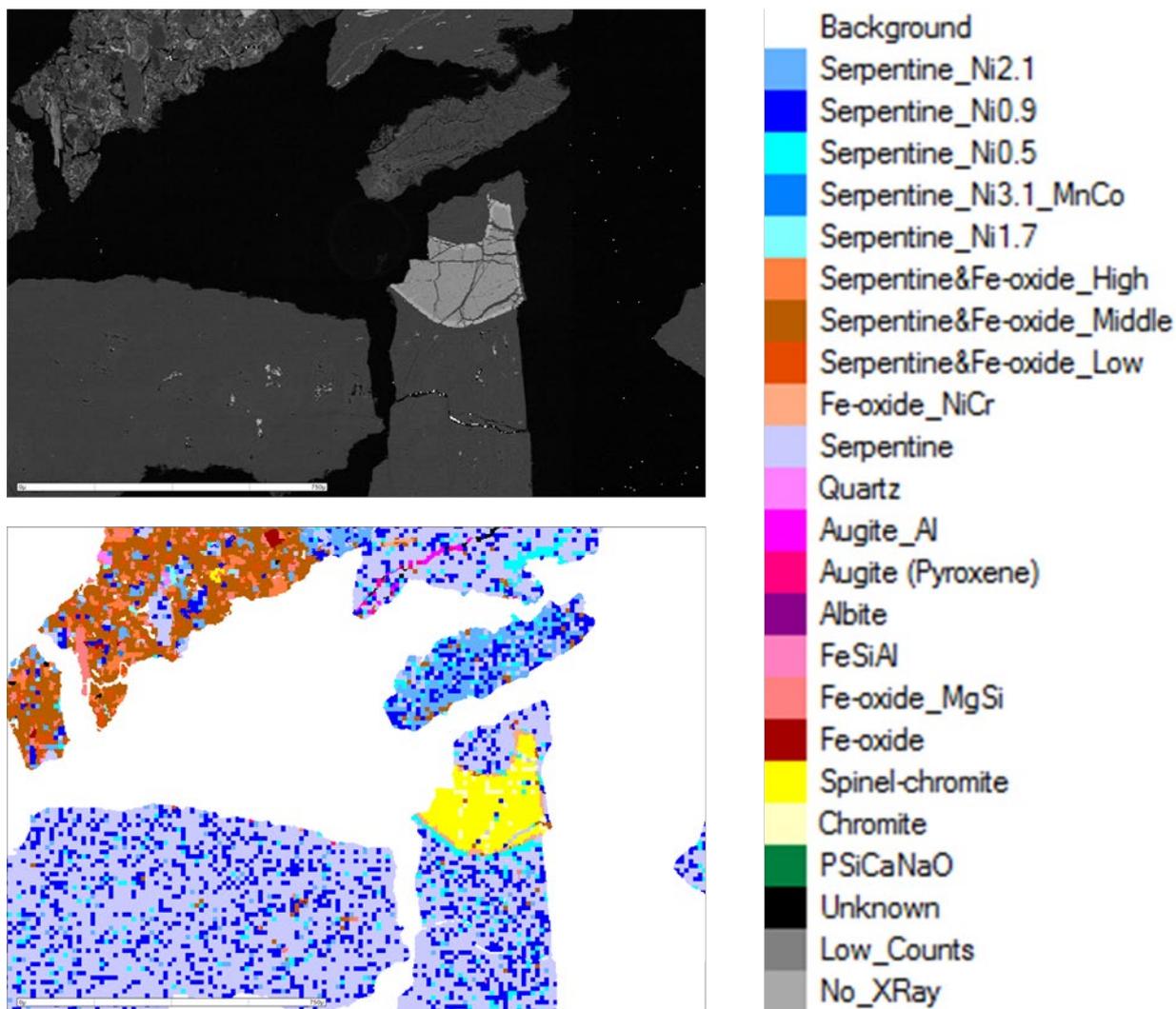


図 2-13 上：反射電子像、下：鉱物マッピング像 (D 塊鉍石-1.18mm+0.60 mm 試料)

(2) 鉱物重量割合

図 2-14 に D 塊鉱石の各粒群の鉱物重量割合を示す。全体的に Serpentine の割合が高く、その中でも Ni を含まないものが多いことがわかった。よって、理論的には Ni を含まない Serpentine を除去することで Ni 品位向上の可能性がある。特に 2.36mm 以上の粒群では 6 割が Ni を含まない Serpentine であり、細粒になるにつれその割合が減少する。

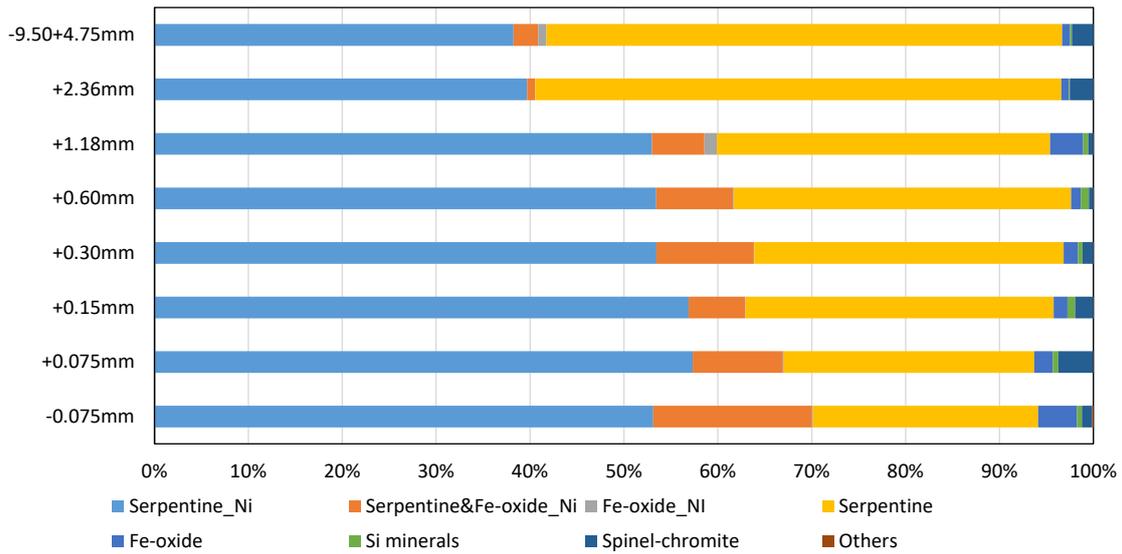


図 2-14 D 塊鉱石各粒群の鉱物重量割合 (グループ化したもの)

(3) 含ニッケル鉱物のニッケル分布率

図 2-15 に D 塊鉱石の各粒群におけるニッケル分布率を示す。

Ni は Serpentine と Serpentine&Fe-oxide に多く存在していた。そのなかでも大部分の Ni が Serpentine に分布しており、細粒になるにつれ、その分布率が増加する傾向にある。

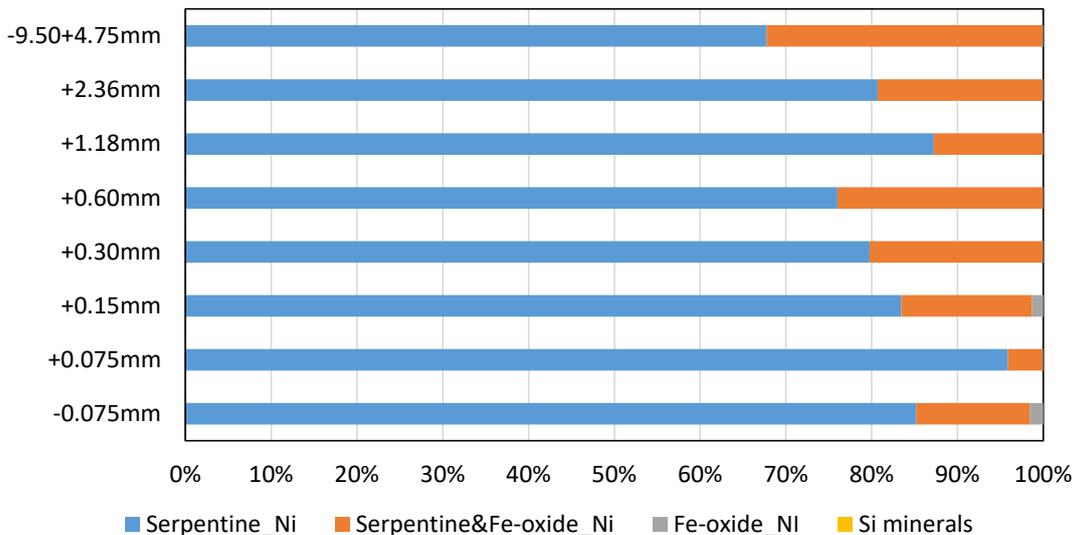


図 2-15 各粒群におけるニッケル分布率 (D 塊鉱石(Fine))

#### 2-4-6 選鉱シミュレーション (D 塊鉱石)

MLA 分析結果 (表 2-8) より、Ni 含有率順に Ni 含有鉱物のみ回収すると回収率 100%で Ni 品位 1.38wt%となる。ただし、これはすべての鉱物が単体分離しているものとしての計算となる。しかしながら、Ni を含む鉱物のみ回収するという選別は不可能なため、鉱物ごとの選別について計算した結果を以下に示す。また、それら結果を図 2-16 に示す。

- a) Serpentine のみ回収                      回収率 85.31%   Ni 品位 0.62wt%
- b) Fe-oxide を含むもののみ回収   回収率 14.69%   Ni 品位 1.53wt%

b)の場合、回収率は低いもののニッケル品位が高いため、実現できれば良いが、図 2-13 からも分かるように、鉱物同士が入り混じって存在しており、また比重もばらつきがあるため、物理選別による分離は極めて難しいと言える。また、過年度のスタディ結果から、磁力選別の適用も難しいと考えられ、本シミュレーションのような成績を得るのは難しいと言える。

表 2-8 シミュレーションで用いた数値 (MLA Mineral Reference)

回収 STEP	鉱物名	鉱物重量割合 [wt%]	Ni 分布率 [%]	比重	組成式	鉱物組成 (含有率)												
						Al (%)	Ca (%)	Co (%)	Cr (%)	Fe (%)	Mg (%)	Mn (%)	Na (%)	Ni (%)	O (%)	P (%)	Si (%)	
1	Serpentine_Ni3.1_MnCo	0.02	0.08	3.31	O58 Si28 Mn5.0 Fe3.9 Ni1.2 Mg2.5 Co1.0	0.00	0.00	2.52	0.00	9.08	2.54	11.50	0.00	3.08	38.71	0.00	32.57	
2	Serpentine&Fe-oxide_High	0.45	2.09	4.97	Fe03 O56 Si8.1 Ni1.5 Mg7.6 Cr0.4	0.00	0.00	0.00	0.85	50.64	6.46	0.00	0.00	3.07	31.12	0.00	7.86	
3	Serpentine&Fe-oxide_Low	0.40	1.28	3.80	Fe15 O46 Mg54 Si15 Ni0.9 Al1.3	1.33	0.00	0.00	0.00	32.23	19.75	0.00	0.00	2.13	28.55	0.00	16.01	
4	Serpentine_Ni2.1	14.50	46.24	2.34	O47 Mg30 Si18 Fe3.8 Ni0.6	0.00	0.00	0.00	0.00	9.15	28.42	0.00	0.00	2.12	38.82	0.00	21.49	
5	Serpentine&Fe-oxide_Middle	3.55	10.90	4.32	Fe19 O48 Mg17 Si11 Ni0.9 Al1.6 Cr0.3	1.56	0.00	0.00	0.69	40.53	15.14	0.00	0.00	2.04	28.20	0.00	11.84	
6	Serpentine_Ni1.7	0.08	0.21	3.59	O55 Fe13 Si23 Mg7.6 Ni0.7 Ca0.5	0.00	0.78	0.00	0.00	29.18	7.35	0.00	0.00	1.74	34.79	0.00	26.16	
7	Serpentine_Ni0.9	24.28	33.24	2.06	O56 Mg25 Si15 Fe3.6 Ni0.6	0.00	0.00	0.00	0.00	6.59	31.34	0.00	0.00	0.91	42.62	0.00	18.54	
8	Fe-oxide_NiCr	0.36	0.42	6.02	Fe37 O53 Cr8.1 Si1.0 Ni0.4 Mg0.8	0.00	0.00	0.00	12.39	60.34	0.58	0.00	0.00	0.76	25.07	0.00	0.86	
9	Serpentine_Ni0.5	7.52	5.54	1.98	O57 Mg23 Si12 Al6.2 Fe1.8 Ni0.2	8.06	0.00	0.00	0.00	4.92	26.40	0.00	0.00	0.49	43.66	0.00	16.47	
10	Serpentine	45.13	0.00	1.88	O58 Mg25 Si13 Fe1.8	0.00	0.00	0.00	0.00	5.06	30.36	0.00	0.00	0.00	45.78	0.00	18.80	
	Quartz	0.21	0.00	1.79	SiO2	1.30	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	45.09	0.00	53.61	
	Augite_Al	0.02	0.00	1.95	O52 Si16 Mg13 Ca6.5 Na6.5 Na3.1 Fe1.3 Cr0.7	7.83	11.73	0.00	1.65	3.22	14.35	0.00	3.26	0.00	37.40	0.00	20.56	
	Augite (Pyroxene)	0.13	0.00	1.80	O55 Si20 Mg17 Ca6.0 Fe1.1	0.00	11.11	0.00	0.00	2.80	19.50	0.00	0.00	0.00	40.34	0.00	26.25	
	Albite	0.00	0.00	1.76	NaAlSi3O8	14.73	0.61	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	10.21	0.00	39.92	0.00	34.53	
	FeSiAl	0.01	0.00	5.04	Fe32 Si61 Al3.1	4.48	0.00	0.00	0.00	48.70	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	46.82	
	Fe-oxide_MgSi	0.90	0.00	5.59	Fe39 O52 Mg5.3 Si2.9	0.00	0.00	0.00	0.00	67.64	3.99	0.00	0.00	0.00	25.85	0.00	2.52	
	Fe-oxide	0.71	0.00	6.22	Fe47 O50 Mg1.4 Si0.7	0.00	0.00	0.00	0.00	75.32	0.98	0.00	0.00	0.00	23.09	0.00	0.61	
	Spinel-chromite	1.69	0.00	5.15	(Fe2+,Mg)Cr2O4	7.73	0.00	0.00	37.94	23.41	3.96	0.00	0.00	0.00	26.96	0.00	0.00	
	Chromite	0.05	0.00	5.63	Cr28 Fe17 Mg18 O26 Al10	7.70	0.00	0.00	41.49	26.60	12.31	0.00	0.00	0.00	11.90	0.00	0.00	
	PSiCaNaO	0.00	0.00	1.59	O63 P25 Si8.6 Ca0.6 Na0.9 Fe0.3 Al0.5	0.68	1.14	0.00	0.00	0.86	0.00	0.00	1.04	0.00	47.78	37.11	11.39	

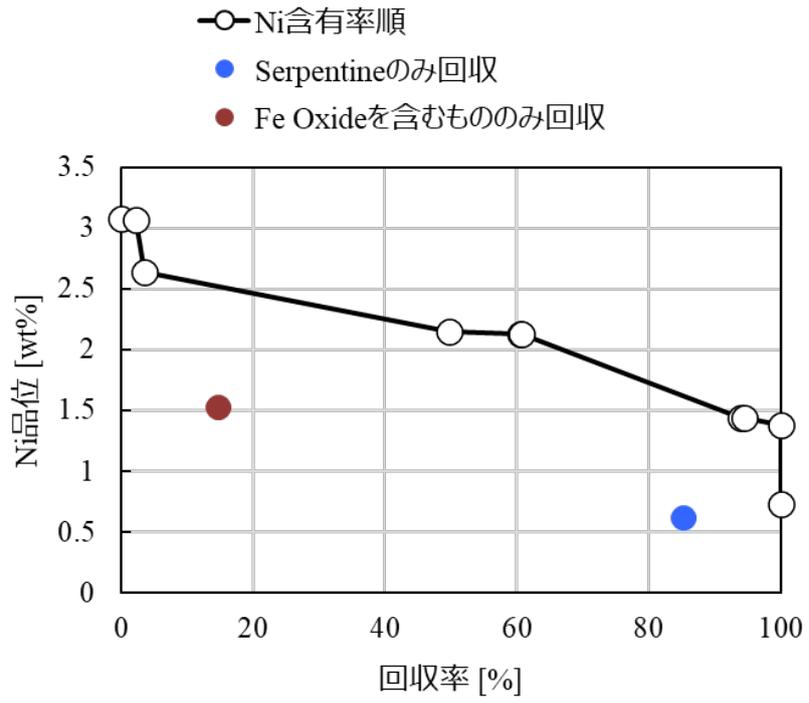


図 2-16 選鉱シミュレーション結果 (D 塊鉱石)

## 2-4-7 比重選別の適用可能性検討

MLA 分析結果より、各鉱物の比重選別の可能性について検討を行った。

### (1) A 鉱石

比重の重い鉱物から順に並べ、それらの Ni 品位、重量割合及び Ni 積算重量割合を示したものが図 2-17 である。比重の境界値を  $2.4\text{g/cm}^3$  以下の適当な値 (2.0 など) に設定した場合、1% の Ni を失うが、34%の重量を削減できるため、50% (Ni99%/重量 66%) のアップグレードを達成できる可能性がある。しかしながら、これは各鉱物が完全に単体分離していると仮定し、比重選別を実施した場合の理論値である。

表 2-9 に示す通り、細粒部であっても単体分離度が非常に低いため、比重選別の適用可能性は低いと言える。

Mineral	Density	Ni (%)	重量割合 (%)	Ni 積算重量割合 %
Fe-oxide_CrNi	6.99	1.28	0.03	100.00
Fe-oxide_Ni3.2	6.41	3.18	0.93	99.96
Magnetite high Cr	6.23	0.00	0.00	96.98
Mn-Fe oxide_NiCo	6.10	19.02	0.00	96.98
Spinel-chromite_Fehigh	5.70	0.00	0.01	96.98
Serpentine&Fe-oxide_Ni8.9_Co	5.68	8.94	0.03	96.98
Fe-oxide_Ni2.5	5.62	2.53	0.72	96.69
Fe-oxide	5.45	0.00	0.03	94.83
Mn-Fe oxide_Ni	5.30	11.10	0.02	94.83
SnZnClNaFeO	5.29	0.00	0.00	94.61
Serpentine&Fe-oxide_Ni1.6	4.97	1.58	0.32	94.61
Serpentine&Fe-oxide_Ni2.1	4.93	2.09	1.11	94.11
Spinel-chromite	4.76	0.00	0.76	91.77
Serpentine&Fe-oxide	4.04	0.00	0.13	91.77
Serpentine&Fe-oxide_Ni1.25	3.63	1.25	0.37	91.77
Augite (Pyroxene)	3.40	0.71	0.53	91.30
Serpentine_Ni2.8	3.05	2.84	8.84	90.92
Serpentine_Ni0.9	2.82	0.94	15.34	65.48
Serpentine_Ni1.3	2.48	1.35	36.29	50.87
Quartz_Fe	2.19	0.63	1.91	1.22
Serpentine	1.96	0.00	30.10	0.00
Quartz	1.79	0.00	0.96	0.00
SCaMgFeNaO	1.76	0.00	0.01	0.00
Mg oxide	1.41	0.00	1.56	0.00

比重選別の境界値

図 2-17 比重選別検討用 MLA データ (A 鉱石)

表 2-9 単体分離度 (A 鉱石)

	単体分離度※1		
	-0.30+0.15mm	-0.15+0.075mm	-0.075mm
Serpentine_Ni2.8	2.34※2	1.33	8.22
Serpentine_Ni0.9	0.19	0.06	2.77
Serpentine_Ni1.3	0.32	0.47	2.89
Serpentine	0.03	0.03	0.97

※1 単体分離度は MLA で算出される面積単体分離度の値のうち、95-100%に該当するもの（該当鉱物を含む粒子のうち、面積比率で 95～100%を該当の鉱物が占める割合）を使用

※2 表の見方の説明

0.15～0.30 の粒群中の Serpentine\_Ni2.8 と分類した鉱物のうち 2.34%は単体で存在している可能性が高く、残り約 98%は他の鉱物と片刃を成している。

(2) B 鉱石

比重の境界値として図 2-18 の①、②が考えられるが、どちらの場合も比重の差が小さすぎて、比重選別は不可能と言える。②以上の比重を設定すると、ニッケルのロスが大きすぎるため、比重選別の意味がなくなる。

Mineral	Density	Ni (%)	重量割合 (%)	Ni積算重量割合 %
Fe-oxide	6.29	0.00	0.27	100
Serpentine&Mn-Fe oxide	5.63	16.28	0.04	100
Fe-oxide_Ni0.8	5.52	0.80	0.99	99.6
Fe-oxide_Ni2.2	5.47	2.17	0.85	99.1
Fe-oxide_Ni5.2	5.24	5.27	0.12	97.9
Spinel-chromite_Si	4.80	0.00	0.19	97.4
Spinel-chromite	4.74	0.00	0.52	97.4
Serpentine&Fe oxide_Ni7.3	4.60	7.30	0.05	97.4
Fe-oxide_Ni2.5	4.54	2.50	1.08	97.2
Serpentine&Fe oxide_Ni2.1	3.92	2.12	0.01	95.4
Serpentine&Fe-oxide_Ni1.7	3.57	1.71	0.43	95.4
Serpentine&Fe-oxide_Ni2.3	3.38	2.36	1.37	94.9
Serpentine_Ni2.0	2.42	2.02	23.97	92.7
Si-oxide	2.31	0.00	0.02	60.4
Serpentine_Ni1.3	2.28	1.32	67.60	60.4
Serpentine_Ni0.7	2.12	0.66	0.25	0.7
Serpentine_Ni0.6	2.11	0.57	1.63	0.6
Kaolinite	2.09	1.91	0.00	0
Quartz	1.89	0.00	0.61	0
Albite	1.78	0.00	0.00	0

②

①

図 2-18 比重選別検討用 MLA データ (B 鉱石)

### (3) C 鉱石

比重の境界値として図 2-19 の①、②が考えられるが、比重選別の境界値①の場合は比重差が小さすぎるため、比重選別は難しい。②の場合は、境界値を 2.9g/cm<sup>3</sup> 以下の適当な値に設定した場合、8%の Ni を失うこととなるが、41%の重量を削減できるため、50% (Ni92%/重量 59%) 以上のアップグレードを達成できる可能性がある。しかしながら、これは各鉱物が完全に単体分離していると仮定し、比重選別を実施した場合の理論値である。

表 2-10 に示す通り、細粒部であっても単体分離度が非常に低いため、比重選別の適用可能性は低いと言える。

Mineral	Density	Ni (%)	重量割合	Ni積算重量割合 %
Fe-oxide	6.22	0.00	2.18	100
Fe-oxide_Ni2.0	6.16	2.04	3.78	100
Fe-oxide_CrMg	5.55	0.00	0.24	96.0
Serpentine&Mn-Fe-oxide_Ni17	5.47	17.25	0.30	96.0
Chromite	5.22	0.00	0.09	93.3
Serpentine&Fe-oxide_Ni11_MnCo	5.09	9.71	0.39	93.3
Fe-oxide_Ni6.0	5.05	6.01	1.99	91.4
Fe-oxide_Ni1.9	4.95	1.90	9.77	85.2
Spinel-chromite	4.95	0.00	0.26	75.6
Mn-Fe-oxide_Ni5.7	4.85	5.76	0.10	75.6
Ilmenite	4.71	0.00	0.06	75.3
Serpentine&Fe-oxide_Ni3.5	4.56	3.54	5.46	75.3
Serpentine&Fe-oxide_Ni1.0	4.55	1.08	0.51	65.3
Serpentine&Fe-oxide_Ni3.2	3.91	3.17	2.25	65.1
Serpentine&Magnesiochromite	3.80	0.00	0.62	61.4
Serpentine&Fe-oxide_Ni2.9	3.64	2.91	12.33	61.4
Serpentine&Magnesiochromite_Ni4.5	3.55	4.57	0.12	42.9
Ti-oxide	3.55	0.80	0.01	42.6
Serpentine_Ti	3.50	0.00	0.05	42.6
Fe-Al-oxide	3.35	1.09	0.12	42.6
Serpentine_Ni3.1	3.04	3.12	1.65	42.5
Serpentine_Ni4.5	3.03	4.53	12.38	39.8
Serpentine_Ni14	2.93	14.50	0.07	10.9
Serpentine_Ni1.6	2.91	1.58	2.85	10.3
Hornblende (Amphibole)	2.70	0.00	0.36	8.0
Serpentine	2.66	0.00	0.38	8.0
Serpentine_Ni1.4	2.34	1.42	10.73	8.0
Serpentine_Ni2.0	2.20	2.01	0.04	0.2
Olivine (Fayalite)	2.17	0.00	9.90	0.1
Kaolinite	2.15	1.01	0.22	0.1
Serpentine_Cr	2.13	0.00	17.12	0
Al-oxide	2.05	0.00	0.25	0
Augite (Pyroxene)	2.01	0.00	0.49	0
Clinocllore (Chlorite)	1.97	0.00	1.84	0
AlFeSiClO	1.92	0.00	0.07	0
Quartz	1.75	0.00	1.01	0

図 2-19 比重選別検討用 MLA データ (C 鉱石)

表 2-10 单体分離度 (C 鉍石)

	单体分離度 (%)		
	-0.30+0.15mm	-0.15+0.075mm	-0.075mm
Serpentine_Ni1.4	0.14	0.38	1.85
Olivine (Fayalite)	0.33	0.68	0.63
Serpentine_Cr	1.81	2.79	7.52

(4) D 塊鉱石

比重の境界値として図 2-20 の①、②、③が考えられるが、どちらの場合も比重差が小さいため、比重選別は困難と言える。

Mineral	Density	Ni (%)	重量割合 (%)	Ni積算重量割合 %
Fe-oxide	6.22	0.00	0.71	100
Fe-oxide_NiCr	6.02	0.76	0.36	100
Chromite	5.63	0.00	0.05	99.6
Fe-oxide_MgSi	5.59	0.00	0.90	99.6
Spinel-chromite	5.15	0.00	1.69	99.6
FeSiAl	5.04	0.00	0.01	99.6
Serpentine&Fe-oxide_High	4.97	3.07	0.45	99.6
Serpentine&Fe-oxide_Middle	4.32	2.04	3.55	97.5
Serpentine&Fe-oxide_Low	3.80	2.13	0.40	86.6
Serpentine_Ni1.7	3.59	1.74	0.08	85.3
Serpentine_Ni3.1_MnCo	3.31	3.08	0.02	85.1
Serpentine_Ni2.1	2.34	2.12	14.50	85.0
Serpentine_Ni0.9	2.06	0.91	24.28	38.8
Serpentine_Ni0.5	1.98	0.49	7.52	5.5
Augite_Al	1.95	0.00	0.02	0
Serpentine	1.88	0.00	45.12	0
Augite (Pyroxene)	1.80	0.00	0.13	0
Quartz	1.79	0.00	0.21	0

比重選別  
境界値

③  
②  
①

図 2-20 比重選別検討用 MLA データ (D 塊鉱石)

### 3 基礎選別試験

#### 3-1 基礎選別試験対象鉱石

前章でのキャラクターゼーションの結果から、以下の理由で2種類の鉱石を基礎選別試験対象とした。

**C 鉱石** : 13.2mm 以上の粒群がその他の粒群に比べて著しく品位が低いことから、13.2mm 以上の粒群のニッケル品位を向上させることで、全体の品位が大きく向上すると考えられ、期待される選別試験の効果の高さから試験対象とした。B 鉱石も同様の傾向を持つが、本スタディではC 鉱石を対象とした。なお、試験対象である 13.2mm 以上の試料はサンプリング誤差を少なくする目的で、ジョークラッシャーを用いて 13.2mm 以下に破砕して試験に用いた。

**D 塊鉱石** : 前述の通り、Ni 鉱山において製錬に供することができずに廃石となっている鉱石であるが、Ni 品位を向上させることができれば、資源量の拡大に繋がり、鉱山開発における競争力強化に資することから、試験対象とした。なお、ピストン試験以外の試験では、D 塊鉱石の Fine を試験に使用した。ピストン試験では大きい粒子径の試料も粉砕の効果を得られると考えたため、Coarse を試験に用いた。

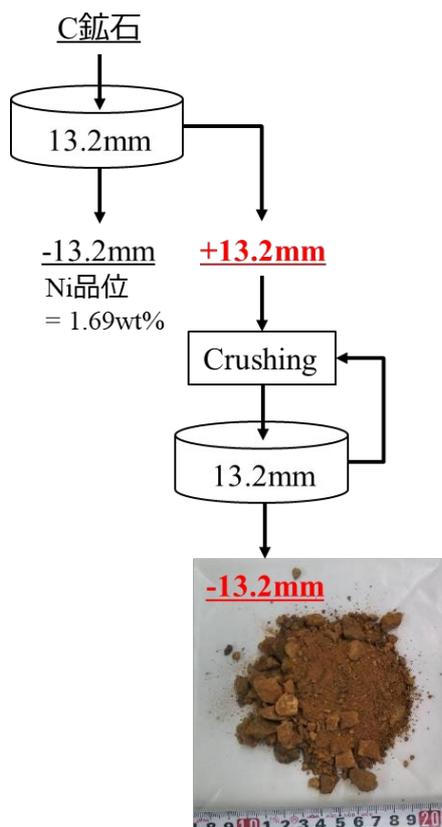


図 3-1 C 鉱石試料調整フロー

### 3-2 選別手法

比重選別による品位向上は難しいと考えられたため、これまでのスタディで良好な成績の得られた選択粉碎<sup>1</sup>について様々な粉碎機を試し、Ni 鉱石を高品位化する手法の検討を行った。さらにC 鉱石については、比重選別による品位向上の可能性がわずかながらあったため、選択粉碎後の試料に対し重液選別を実施した。

なお、選別試験の評価は、Ni 回収率及び次式で定義される Upgrade 率で行うこととした。

$$\text{Upgrade 率 [-]} = \frac{(\text{得られた産物の Ni 品位}) [\text{wt}\%]}{(\text{得られた産物から逆算して求めた給鉱の Ni 品位}) [\text{wt}\%]}$$

---

<sup>1</sup> 粒子径の違いや物性の違いによって特定物質または特定部位（表面のみ）を優先的に粉碎する方法。ニッケルが鉱物表面に多く分布する傾向にあることから選択粉碎が効果的であると考えられ、粉碎に適した粉碎機を選定するための試験を行った。

### 3-3 ポットミル

#### 3-3-1 目的

小型の卓上ボールミルであるポットミルを用いて、ボールミルによる選択粉砕の効果を確認する。

#### 3-3-2 試験方法

試験条件を表 3-1、試験フローを図 3-3 に示す。試験は以下に示す手順で行った。

- I. ミルの容器に試料 50g と所定のパルプ濃度になるよう水道水を添加
- II. ミルの容器に所定の粉砕媒体充填率になるようボールを追加（なお、ボール充填率は鉱石の固さを考慮して、D 塊鉱石の方が高い値としている）
- III. 91rpm で 10 分間粉砕
- IV. 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
- V. 回収した各産物を ICP-OES により定量分析

表 3-1 ポットミルの試験条件

条件	C 鉱石	D 塊鉱石
給鉱	C 鉱石+13.2mm -13.2mm ジョークラッシャー 一破砕	D 塊鉱石 (Fine)
給鉱重量	50g	50g
粉砕機	ポットミル	ポットミル
回転数	91rpm	91rpm
磨鉱時間	10min	10min
粉砕媒体充填率	6% 20%	6% 35%
パルプ濃度	66% (試料 50g+水 25mL) 33% (試料 50g+水 100mL) 17% (試料 50g+水 250mL)	66% (試料 50g+水 25mL) 33% (試料 50g+水 100mL) 17% (試料 50g+水 250mL)

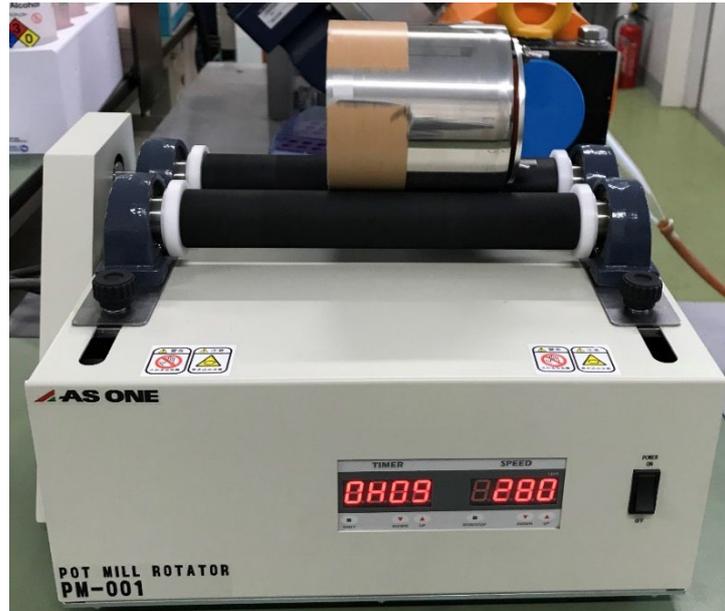


図 3-2 ポットミルの外観

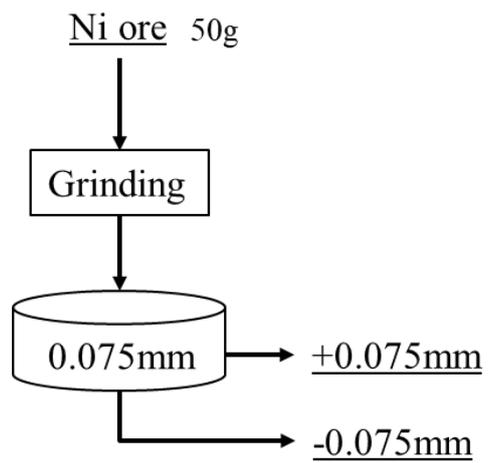


図 3-3 ポットミルの試験フロー

### 3-3-3 試験結果

本項以降、各試験における結果は、粉碎後のふるい分け篩下産物を回収対象として算出した Ni 回収率、Ni Upgrade 率、Ni 品位を記載している。図 3-4 及び図 3-5 にパルプ濃度を変更した際の結果、図 3-6 及び図 3-7 に粉碎媒体（ボール）充填率を変更した際の結果を示す。また、図 3-8 には C 鉱石の 13.2mm 以下の試料と試験産物を合算した際の結果を示す。なお、合算時には試験結果の Upgrade 率をキャラクターリゼーション時に得られた 13.2mm 以上のニッケル品位 Ni 1.15%に乘じることで試験産物のニッケル品位を求め、それを用いて合算後の品位を計算している。それらグラフ化したデータ以外の情報も含めた試験結果を表 3-2、表 3-3、表 3-4 に示す。

C 鉱石では、パルプ濃度が濃いほど回収率、品位向上効果が上昇した。パルプ濃度 66%の 때가最も良い結果であった。本スタディで実施した各試験では、+13.2mm の試料を砕いて縮分して使用しているものの、給鉱品位のばらつきが生じており、その結果 Ni Upgrade と Ni Grade が連動していない結果となっている（選鉱試験では、ある程度の給鉱品位のばらつきは避けられないため、各選鉱方法の品位向上効果を比較・評価する際は一般的に Upgrade 率を用いる）。一方で、D 塊鉱石の場合は、パルプ濃度の影響は小さい結果となった。

ボール充填率の影響については、C 鉱石では充填率を上げると、回収率、Upgrade 率が増加する結果であった。D 塊鉱石の場合、回収率は向上するが、品位向上効果が低下する結果であった。

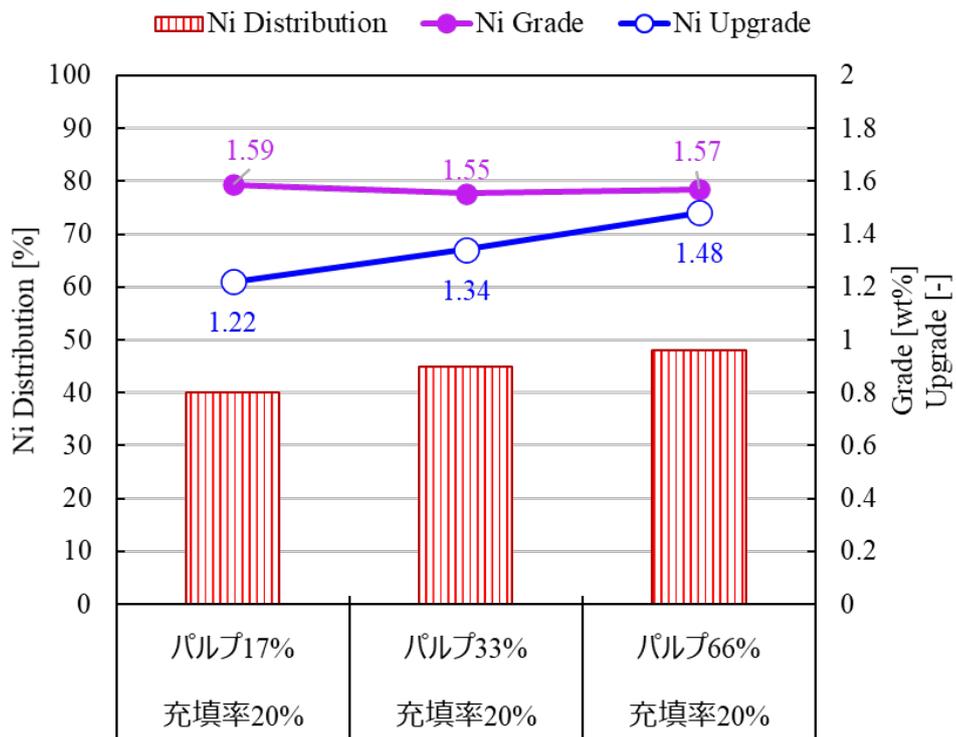


図 3-4 ポットミル粉砕におけるパルプ濃度の影響 (C 鉱石) (篩下産物結果)

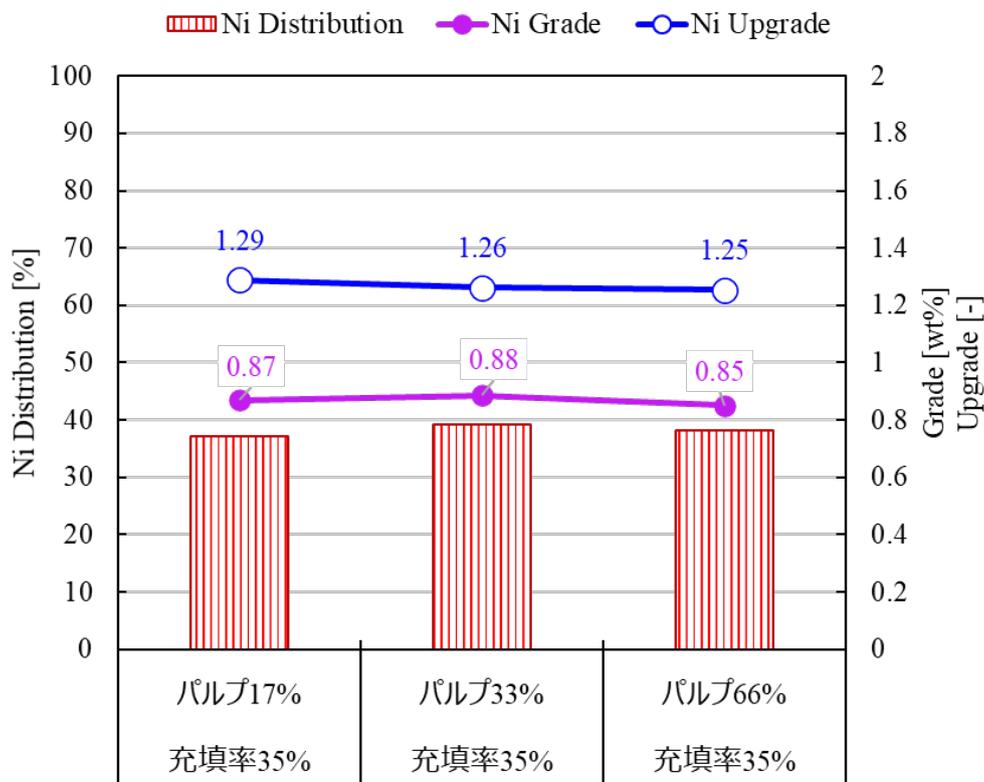


図 3-5 ポットミル粉砕におけるパルプ濃度の影響 (D 塊鉱石(Fine)) (篩下産物結果)

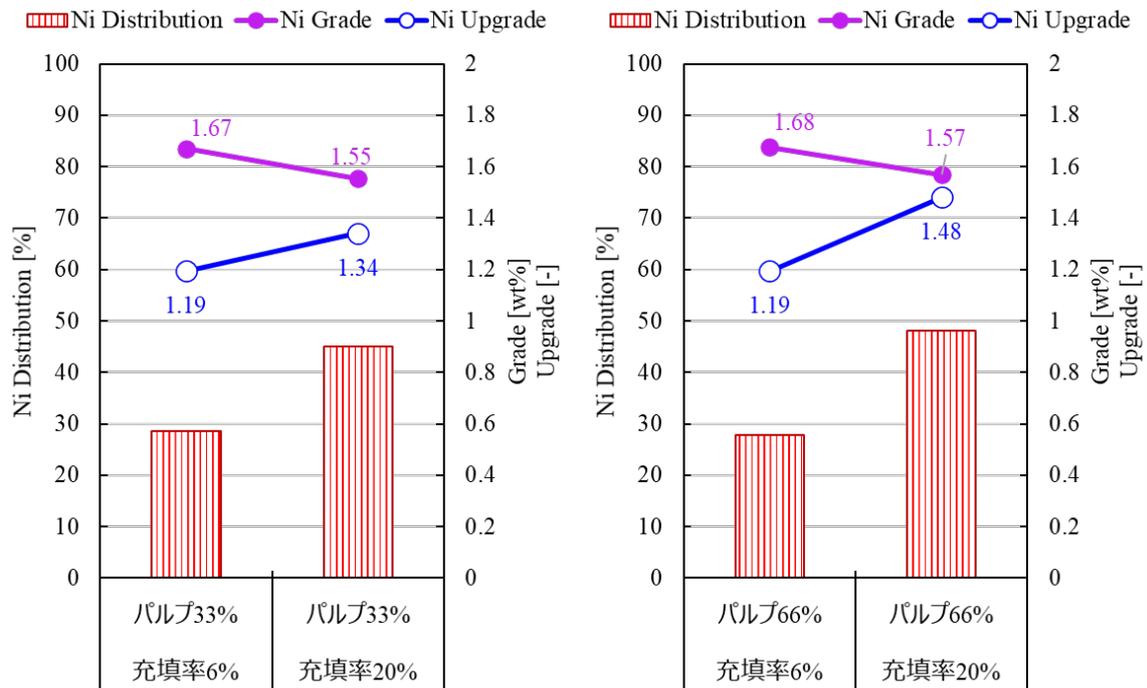


図 3-6 ポットミル粉砕におけるボール充填率の影響 (C 鉱石) (篩下産物結果)

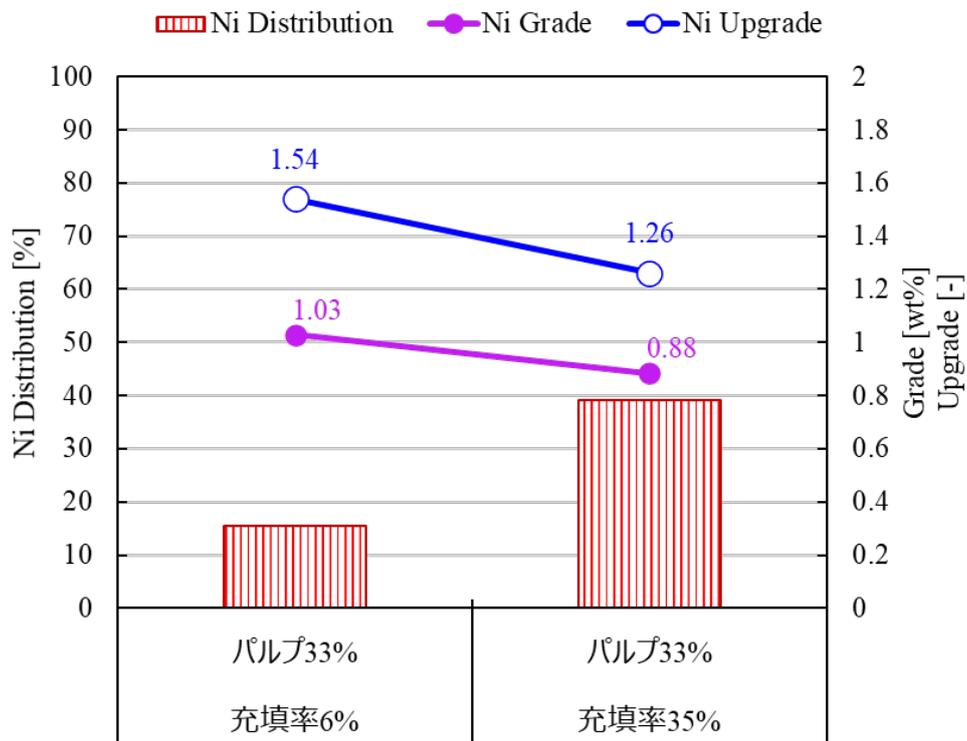


図 3-7 ポットミル粉砕におけるボール充填率の影響 (D 塊鉱石(Fine)) (篩下産物結果)

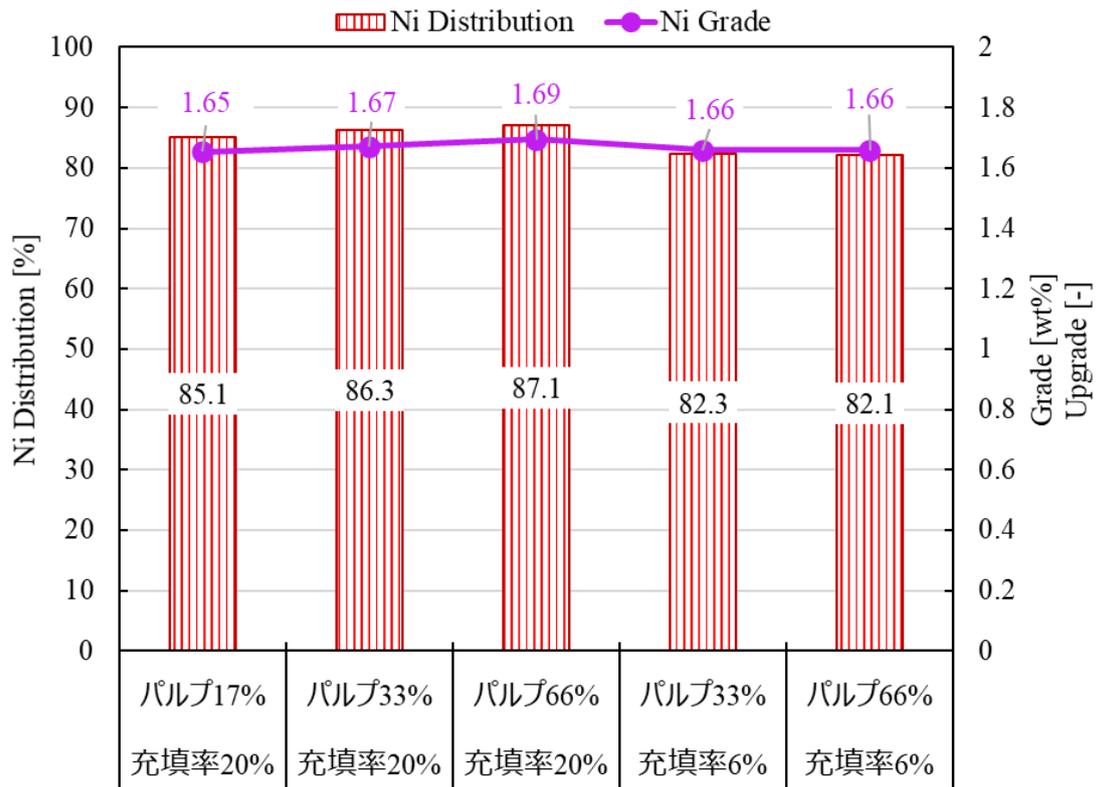


図 3-8 ポットミル粉碎産物に 13.2mm 以下を組み合わせた場合の品位及び回収率 (C 鉱石)  
(篩下産物結果)

表 3-2 C 鉱石の試験結果まとめ

ボール充填率	パルプ濃度	Feed			+75 $\mu$ m							-75 $\mu$ m						
		Grade [wt%]			Distribution [%]		Grade [wt%]		Upgrade [-]		Fe/Ni	Distribution [%]		Grade [wt%]		Upgrade [-]		Fe/Ni
		Ni	Fe	Fe/Ni	Ni	Fe	Ni	Fe	Ni	Fe		Ni	Fe	Ni	Fe	Ni	Fe	
充填率 20%	パルプ 17%	1.30	8.63	6.63	59.9	49.0	1.16	6.30	0.89	0.73	5.42	40.1	51.0	1.59	13.39	1.22	1.55	8.43
充填率 20%	パルプ 33%	1.16	8.39	7.24	55.0	47.5	0.96	6.01	0.83	0.72	6.26	45.0	52.5	1.55	13.12	1.34	1.56	8.44
充填率 20%	パルプ 66%	1.06	8.77	8.28	51.9	52.3	0.81	6.80	0.77	0.77	8.35	48.1	47.7	1.57	12.88	1.48	1.47	8.21
充填率 6%	パルプ 33%	1.40	9.29	6.64	71.5	57.5	1.31	7.02	0.94	0.76	5.34	28.5	42.5	1.67	16.52	1.19	1.78	9.89
充填率 6%	パルプ 66%	1.40	8.45	6.02	72.1	58.5	1.32	6.45	0.94	0.76	4.89	27.9	41.5	1.68	15.00	1.19	1.78	8.95

表 3-3 C 鉱石 -13.2mm 以下の粒群と合算した場合の品位及び回収率

ボール充填率	パルプ濃度	-13.2mm				PotMill-75 $\mu$ m						-13.2mm&Pot Mill-75 $\mu$ m						
		Distribution [%]		Grade [wt%]		Distribution [%]		Upgrade [-]		Grade [wt%] Upgrade から算出		Distribution [%]		Grade [wt%]		Upgrade [-]		Fe/Ni
		Ni	Fe	Ni	Fe	Ni	Fe	Ni	Fe	Ni	Fe	Ni	Fe	Ni	Fe	Ni	Fe	
充填率 20%	パルプ 17%	75.2	81.4	1.69	19.04	10.0	9.5	1.22	1.55	1.40	13.95	85.1	83.1	1.65	18.34	1.09	1.16	11.09
充填率 20%	パルプ 33%	75.2	81.4	1.69	19.04	11.2	9.8	1.34	1.56	1.54	14.05	86.3	83.2	1.67	18.34	1.10	1.16	10.97
充填率 20%	パルプ 66%	75.2	81.4	1.69	19.04	11.9	8.9	1.48	1.47	1.70	13.20	87.1	83.0	1.69	18.24	1.12	1.16	10.77
充填率 6%	パルプ 33%	75.2	81.4	1.69	19.04	7.1	7.9	1.19	1.78	1.37	15.99	82.3	82.8	1.66	18.72	1.09	1.19	11.28
充填率 6%	パルプ 66%	75.2	81.4	1.69	19.04	6.9	7.7	1.19	1.78	1.37	15.96	82.1	82.8	1.66	18.73	1.10	1.19	11.28

表 3-4 D 塊鉱石(Fine)の試験結果まとめ

ボール充填率	パルプ濃度	Feed			+75 $\mu$ m							-75 $\mu$ m						
		Grade [wt%]			Distribution [%]		Grade [wt%]		Upgrade [-]			Distribution [%]		Grade [wt%]		Upgrade [-]		
		Ni	Fe	Fe/Ni	Ni	Fe	Ni	Fe	Ni	Fe		Fe/Ni	Ni	Fe	Ni	Fe	Ni	
充填率 35%	パルプ 17%	0.67	5.82	8.62	62.9	66.3	0.60	5.41	0.88	0.93	9.09	37.1	33.7	0.87	6.81	1.29	1.17	7.83
充填率 35%	パルプ 33%	0.70	5.85	8.34	60.8	63.7	0.62	5.41	0.88	0.92	8.74	39.2	36.3	0.88	6.83	1.26	1.17	7.72
充填率 35%	パルプ 66%	0.68	5.84	8.59	61.9	65.2	0.60	5.47	0.89	0.94	9.04	38.1	34.8	0.85	6.68	1.25	1.15	7.85
充填率 6%	パルプ 33%	0.67	5.74	8.58	84.5	84.6	0.63	5.40	0.94	0.94	8.59	15.5	15.4	1.03	8.77	1.54	1.53	8.52

### 3-4 ポットミル（繰り返し粉砕）

#### 3-4-1 目的

小型の卓上ボールミルであるポットミルを用いて、ボールミルによる選択粉砕の効果を確認する。なお、本試験はキャラクタリゼーションの一環として実施したため、全4種の鉱石に対して実施している。

#### 3-4-2 試験方法

試験条件を表 3-5、試験フローを図 3-9 に示す。試験は以下に示す手順で行った。

- I. ミルの容器に試料 50g と所定のパルプ濃度になるよう水道水を添加
- II. 1 回目の粉砕時には水道水 25mL を加え、パルプ濃度 66% に調整。
- III. 91rpm で 10 分間粉砕
- IV. 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
- V. 網上を容器に入れ、25mL の水道水を添加し、再度 III の条件で粉砕。そのため、2 回目以降の粉砕では湿式ふるい分け時に鉱石に付着した水分が加わるため、66% よりもパルプ濃度が高い状態での試験となる。
- VI. IV、V を繰り返し、合計 3 回粉砕を行う。その後、IV を実施。
- VII. 回収した各産物を ICP-OES により定量分析

表 3-5 ポットミル繰り返し粉砕試験条件

条件	設定値
給鉱	A 鉱石 -13.2mm
	B 鉱石 -13.2mm
	C 鉱石 -13.2mm
	D 塊鉱石 (Fine) -13.2mm (-9.50mm)
	D 鉱石(R1) -13.2mm
E 鉱石(R2) -13.2mm	
給鉱重量	50g
粉砕機	ポットミル(1L)
回転数	91rpm
粉砕時間	10min
初期パルプ濃度	66% (給鉱 50g & 水道水 25mL)
条件	設定値

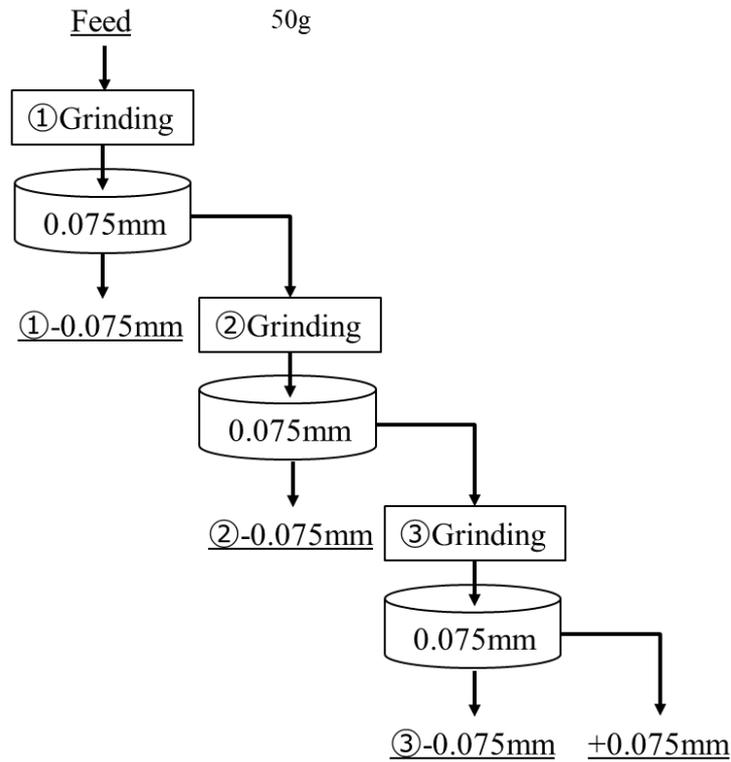


図 3-9 ポットミル繰り返し粉砕試験フロー

### 3-4-3 試験結果

図 3-10 に各鉱石の篩下重量積算分布、即ち各 Grinding 後の 75 $\mu$ m 以下の試料の重量割合を示す。また、図 3-11 から図 3-14 に各鉱石の繰り返し粉砕時のニッケル回収率、品位、Upgrade 率、Fe/Ni 比を示す。

図 3-10 が示す通り、D 塊鉱石は他の鉱石と比較して篩下積算分布が低く推移していることから、硬くて粉砕されにくい鉱石であると分かる。

どの鉱石においても、繰り返し粉砕を行うことで Ni 回収率は向上するが、Upgrade 率は下がる結果となった。A 鉱石、C 鉱石については、B 鉱石に比べ回収率が高く、粉砕されやすい鉱物にニッケルが多く含まれていることが示唆される。一方、D 塊鉱石は回収率が低く、硬い鉱物にニッケルが含まれる、または鉱物内部にニッケルが含まれることが推察される。

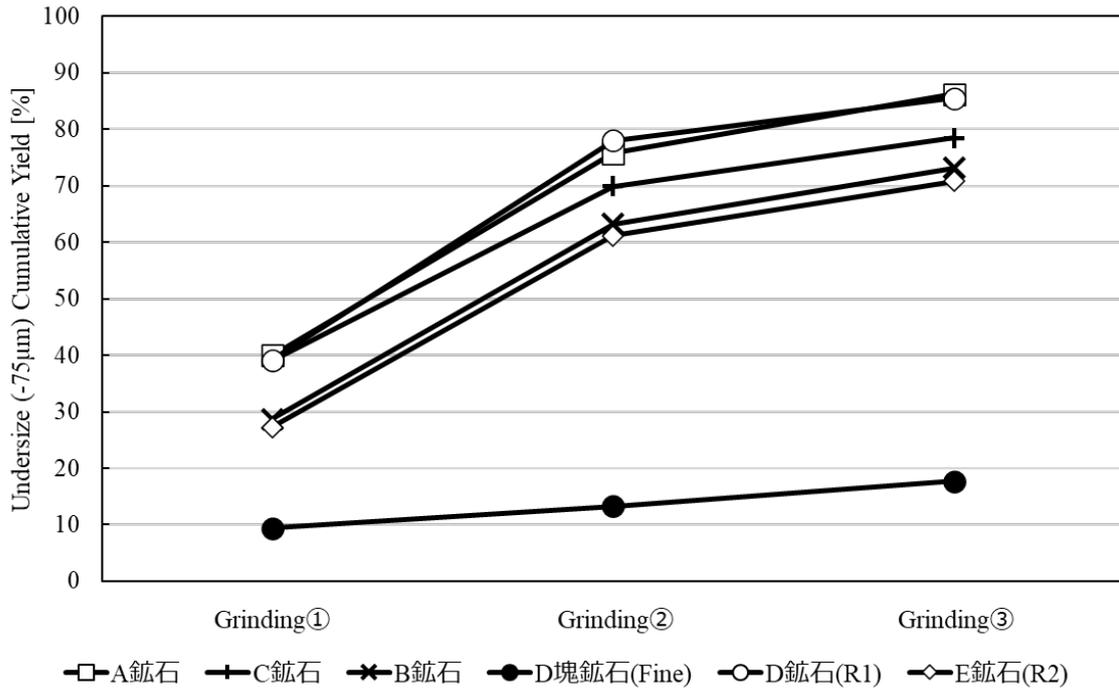


図 3-10 篩下積算重量分布

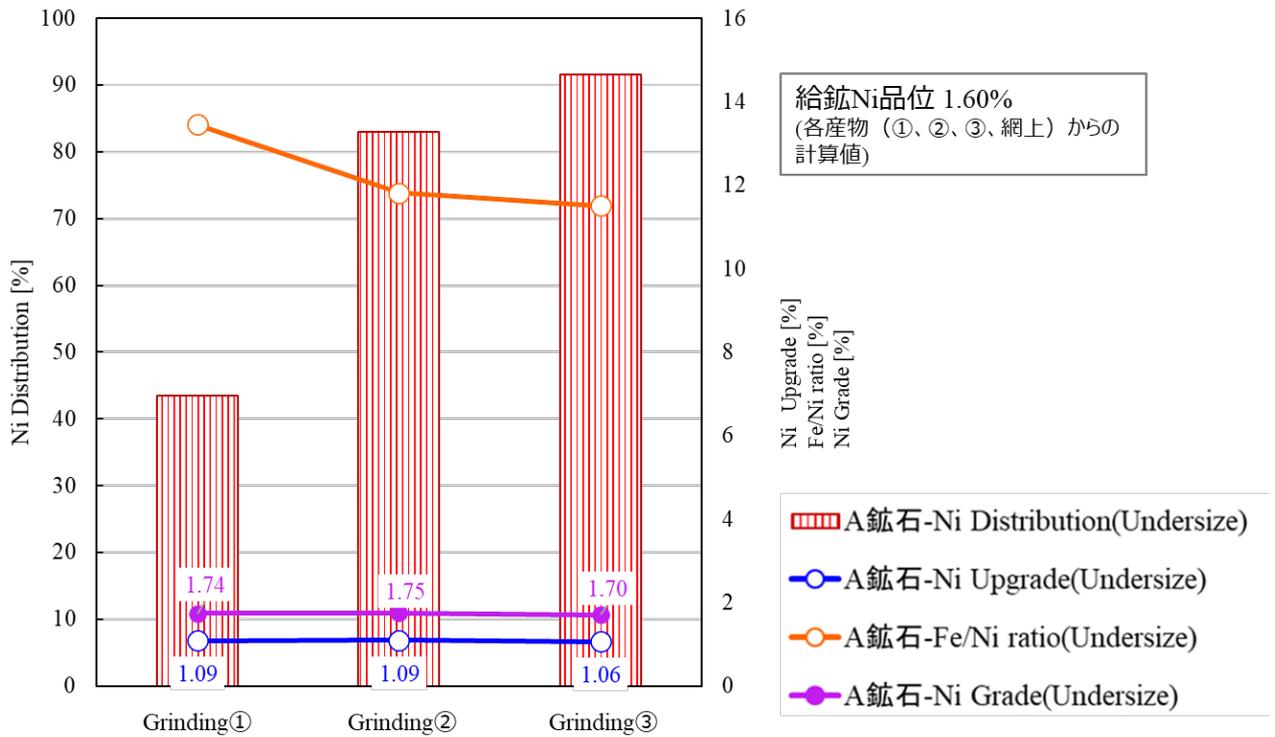


図 3-11 ポットミル繰り返し粉碎結果 (A 磁石) (篩下産物結果)

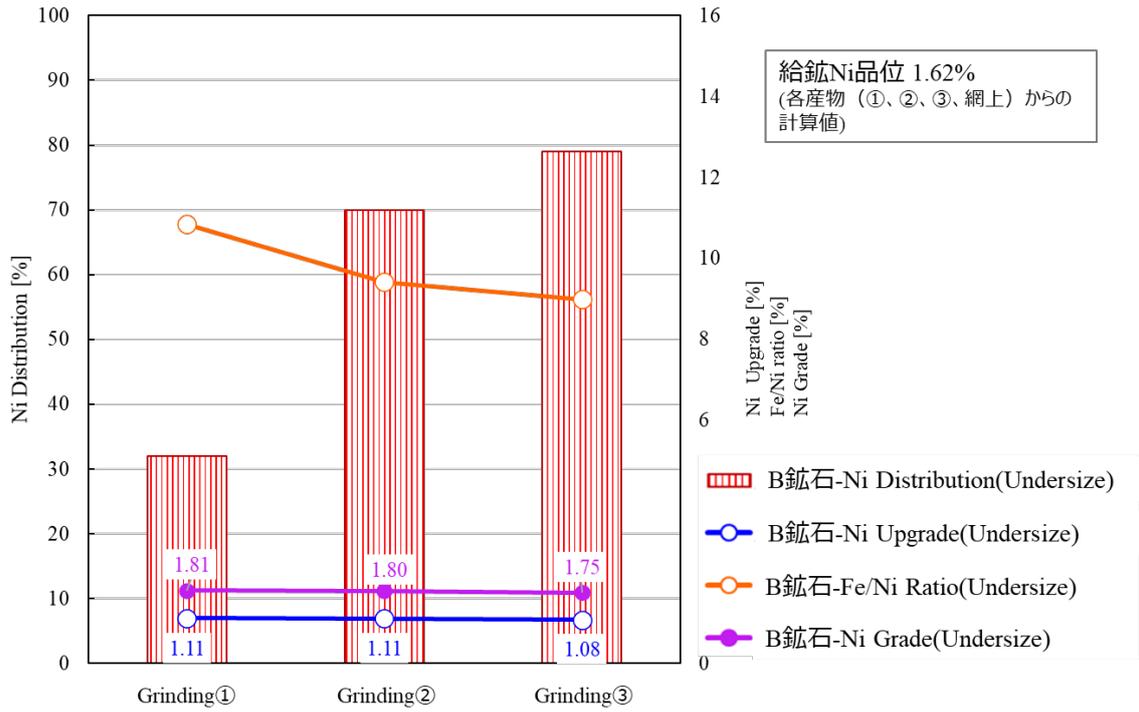


図 3-12 ポットミル繰り返し粉碎結果 (B 鉱石) (篩下産物結果)

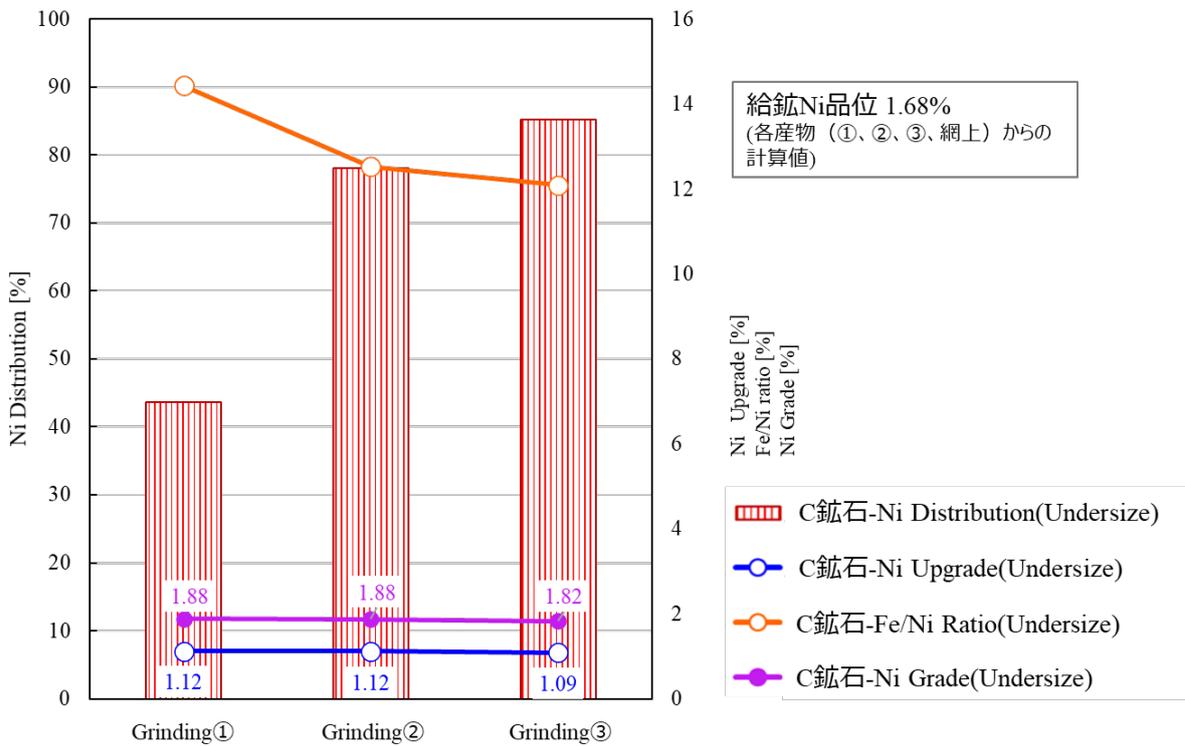


図 3-13 ポットミル繰り返し粉碎結果 (C 鉱石) (篩下産物結果)

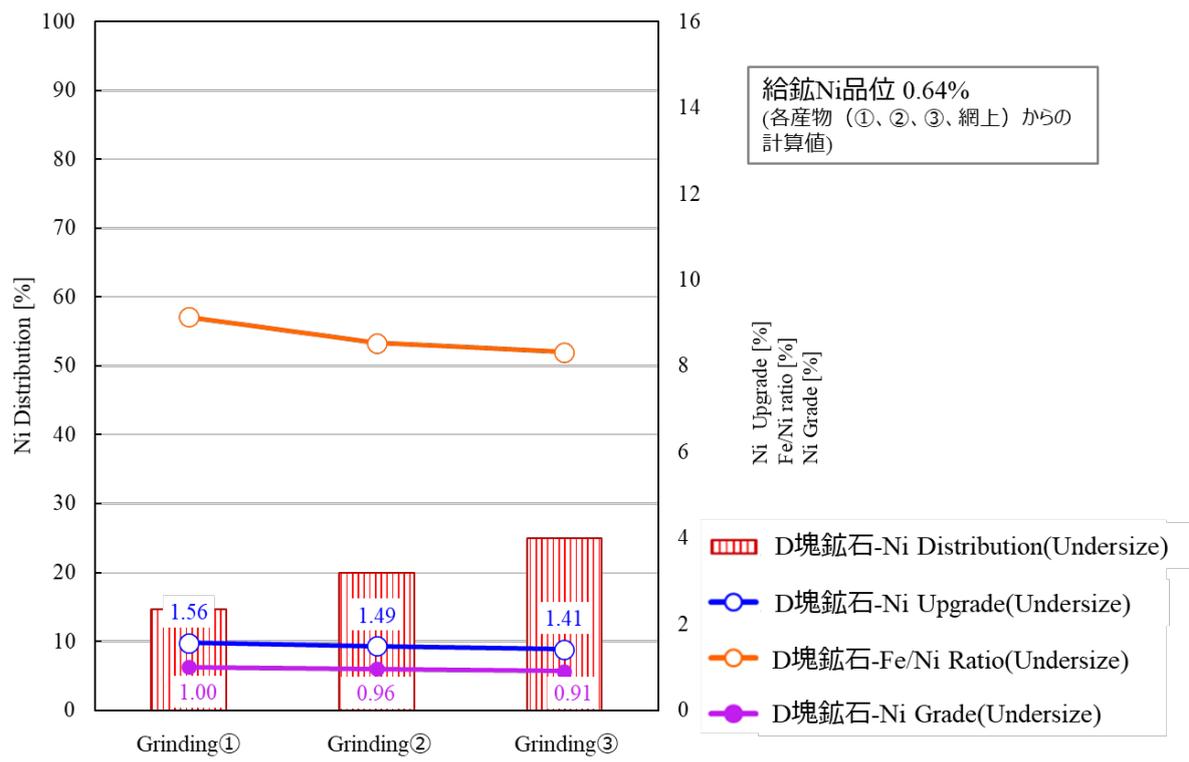


図 3-14 ポットミル繰り返し粉碎結果 (D 塊鉄石(Fine)) (篩下産物結果)

### 3-5 インテンシブミキサー

#### 3-5-1 目的

選択粉砕に適した粉砕機と考えられるインテンシブミキサーによる鉍石の選択粉砕の効果を確認する。

#### 3-5-2 試験方法

早稲田大学が所有するインテンシブミキサー（アイリッヒ製 EL1、図 3-15）を用いた。試験条件を表 3-6、試験フローを図 3-16 及び図 3-17 に示す。試験手順は以下の手順で行った。

- I. 混合パン（容器、1L）を取り外す。
- II. 混合パンに試料 350g 及び所定のパルプ濃度にするために必要な水（水道水）を添加。
- III. パン傾斜 30 度、パン回転速度 170rpm（逆回転）、粉砕時間 10 分に設定。
- IV. ローター回転数を所定の値に設定。
- V. 10 分間試験実施。
- VI. 回収した各産物については ICP-OES による定量分析を実施。

表 3-6 インテンシブミキサーによる選択粉砕試験条件

条件	C 鉍石	D 塊鉍石
給鉍	C 鉍石+13.2mm -13.2mm ジョークラッシャー破砕	D 塊鉍石（Fine）
給鉍重量	350g	350g
粉砕機	インテンシブミキサー	インテンシブミキサー
回転数	500, 1500, 3000rpm	1500, 3000, 6000, 7000rpm
磨鉍時間	10min	10min
パルプ濃度	100%（試料 350g） 80%（試料 350g+水 75mL） 66%（試料 350g+水 455mL）	100%（試料 350g） 80%（試料 350g+水 75mL） 66%（試料 350g+水 455mL）
繰り返し粉砕	回転 1500rpm パルプ濃度 80%	回転 6000rpm パルプ濃度 80%



図 3-15 インテンシブミキサー外観

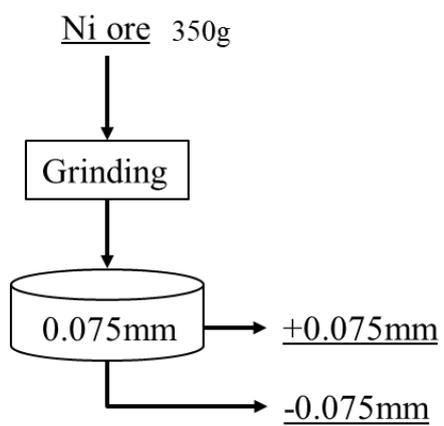


図 3-16 インテンシブミキサーによる選択粉碎試験フロー

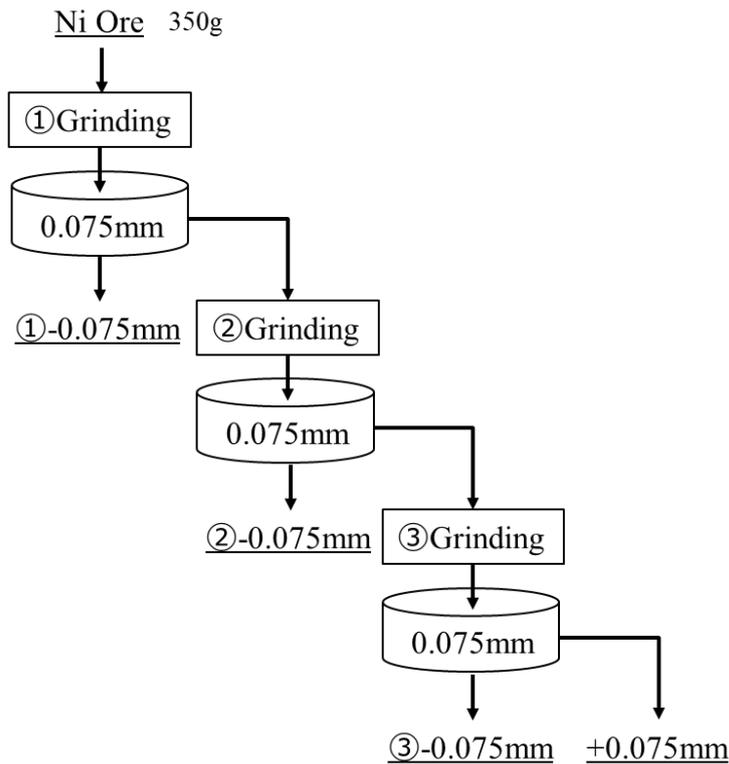


図 3-17 インテンシブミキサーによる選択粉砕試験フロー2（繰り返し粉砕）

### 3-5-3 試験結果

図 3-18 及び図 3-20 に回転数を変更させた試験結果を、図 3-22 及び図 3-24 にパルプ濃度を変更した試験結果を示す。また、それら試験後の容器内の試料の様子を図 3-19、図 3-21 及び図 3-23 に示す。加えて、繰り返し粉砕を行った結果を図 3-25 及び図 3-26 に示す。また、図 3-27 に C 鉱石の 13.2mm 以下の試料と試験産物を合算した際の結果を示す。それら試験データを表 3-7 から表 3-12 に示す。

回転数を上げることで回収率、品位向上効果が向上することが分かった。それぞれ、C 鉱石では 3000rpm、D 塊鉱石では 6000rpm が適した回転数であると言える。また、パルプ濃度を変化させた場合、C 鉱石では回収率は大きく変化しないが、パルプ濃度 100% (Dry) のとき品位向上効果が最大であった。D 塊鉱石では、Upgrade 率・回収率の結果からパルプ濃度 80% が最適と言える。

C 鉱石の繰り返し粉砕は試験時間の都合上、分析結果が出る前に連続で試験を実施せざるを得ず、必ずしも最適な条件となっていない。試験産物の粉砕され具合などの見た目から、回転数 1500rpm、パルプ濃度 80% が良いと判断し、その条件で繰り返し粉砕を行った。一方、D 塊鉱石については繰り返し粉砕を後日実施したため、分析結果から最適と判断した条件である、6000rpm、パルプ濃度 80% を用いて繰り返し粉砕を行った。適用した条件において、どちらの鉱石も繰り返し粉砕によって、回収率が向上するが、Upgrade 率は下がる結果となった。

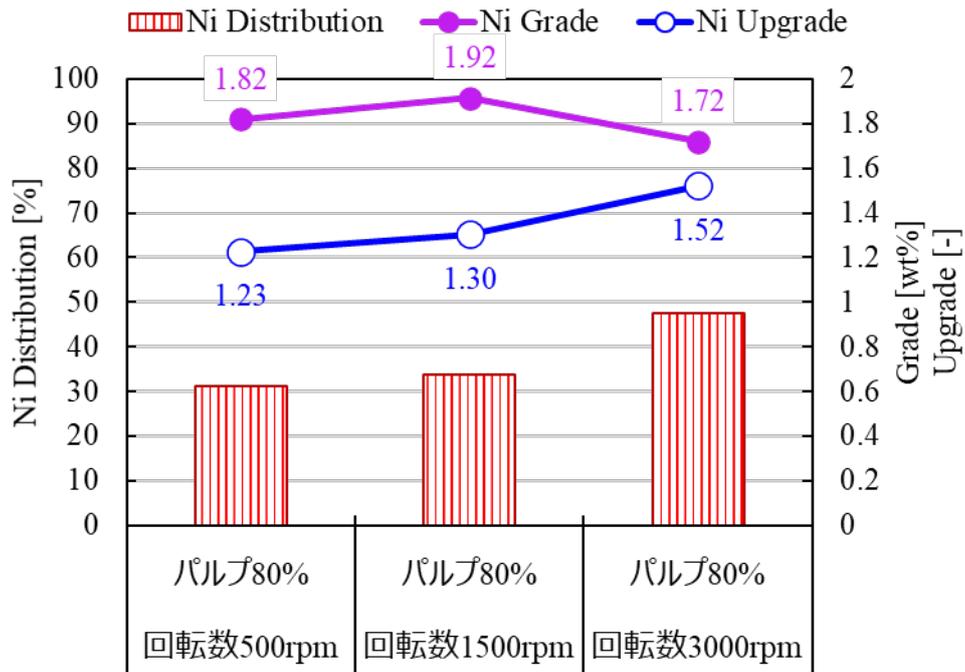


図 3-18 インテンシブミキサー粉砕における回転数の影響 (C 鉱石) (篩下産物結果)



図 3-19 試験後のパン内の試料の様子 (C 鉱石) (篩下産物結果)  
左 : 500rpm、中央 : 1500rpm、右 : 3000rpm

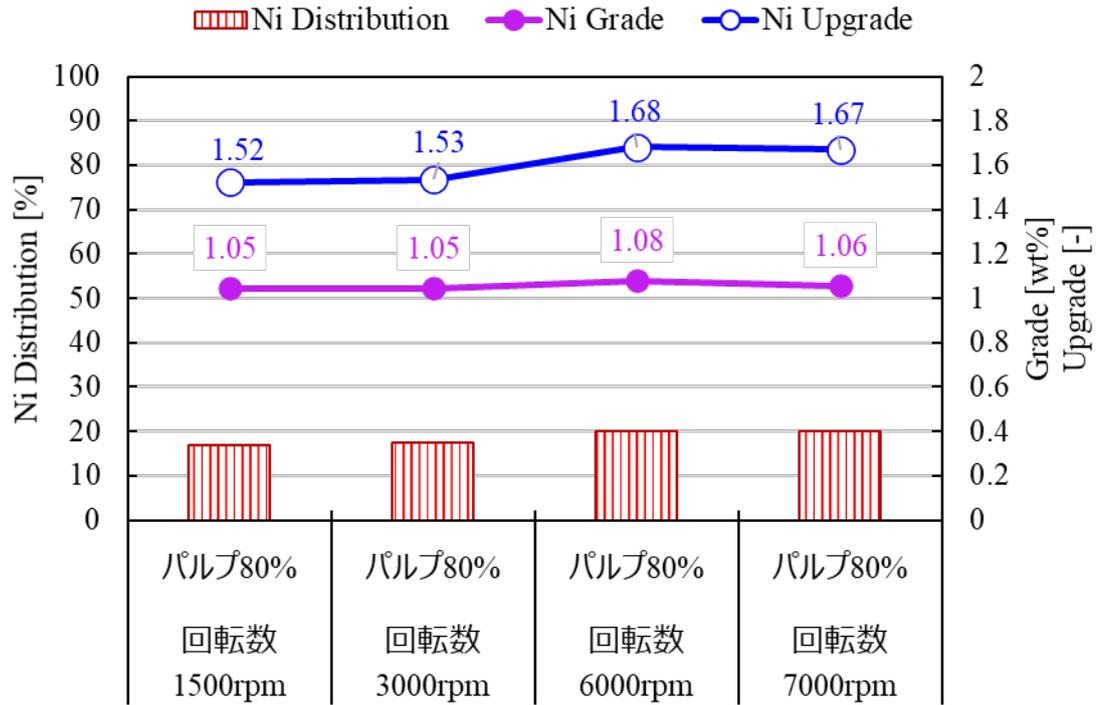


図 3-20 インテンシブミキサー粉砕における回転数の影響 (D 塊鉱石(Fine)) (篩下産物結果)

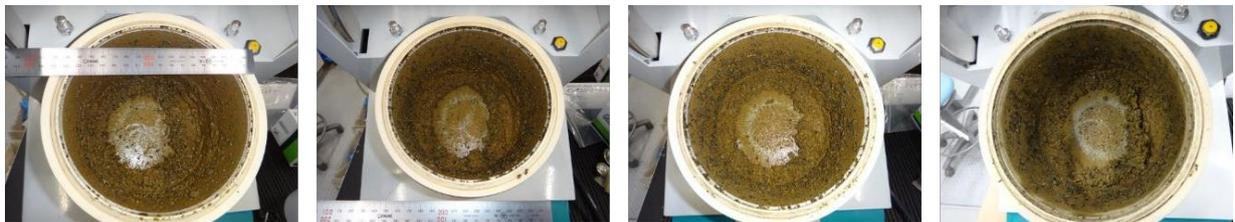


図 3-21 試験後のパン内の試料の様子 (D 塊鉱石(Fine)) (篩下産物結果)  
左から : 1500rpm、3000rpm、6000rpm、7000rpm

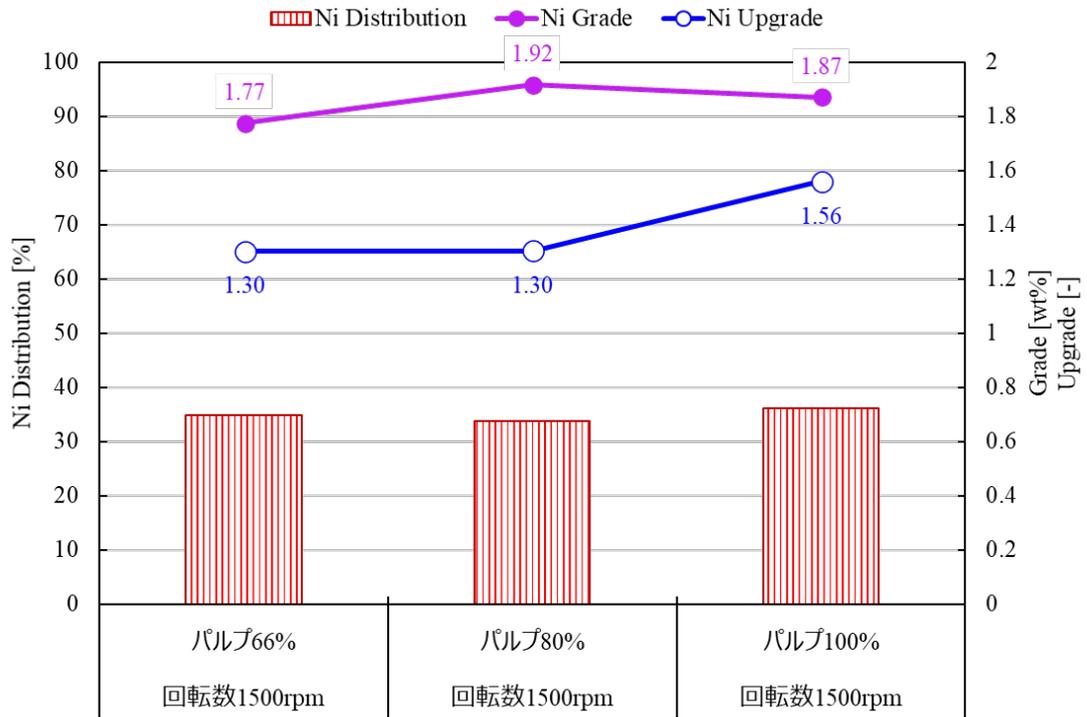


図 3-22 インテンシブミキサー粉砕におけるパルプ濃度の影響 (C 鉱石) (篩下産物結果)



図 3-23 試験後のパン内の試料の様子 (C 鉱石) (篩下産物結果)  
 左 : パルプ濃度 66%、中央 : 80%、右 : 100%

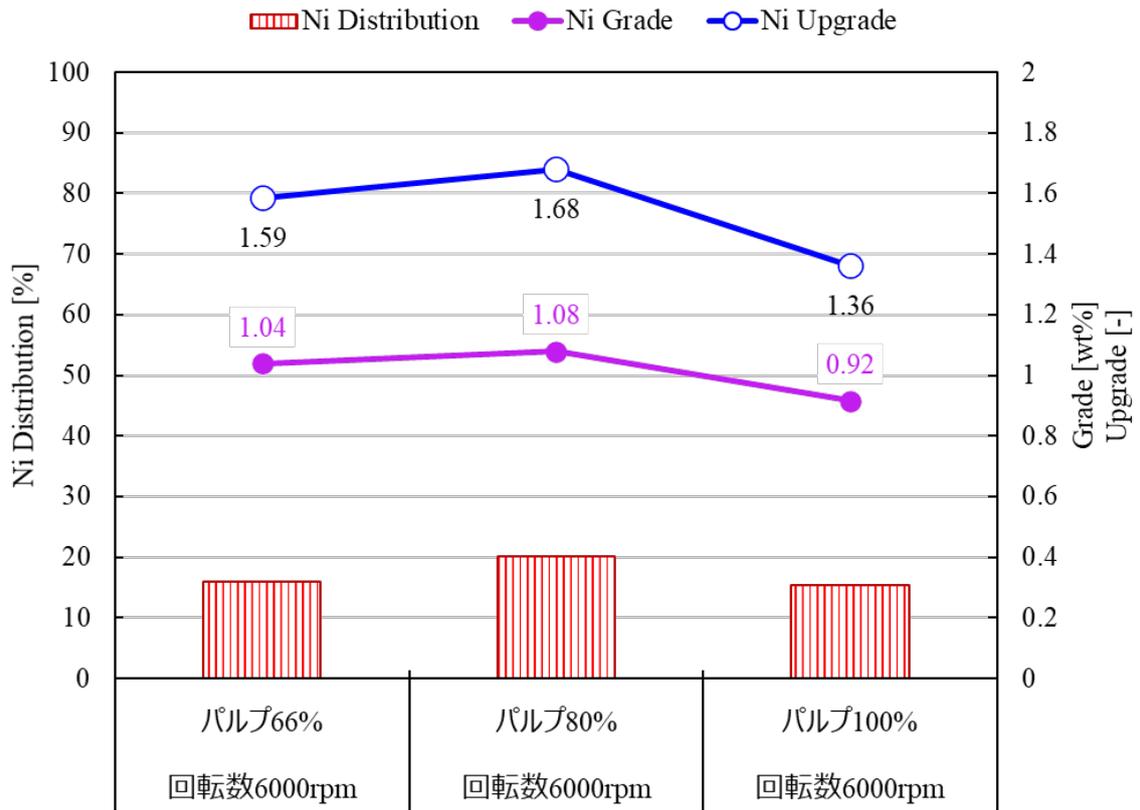


図 3-24 インテンシブミキサー粉砕におけるパルプ濃度の影響 (D 塊鉱石(Fine)) (篩下産物結果)

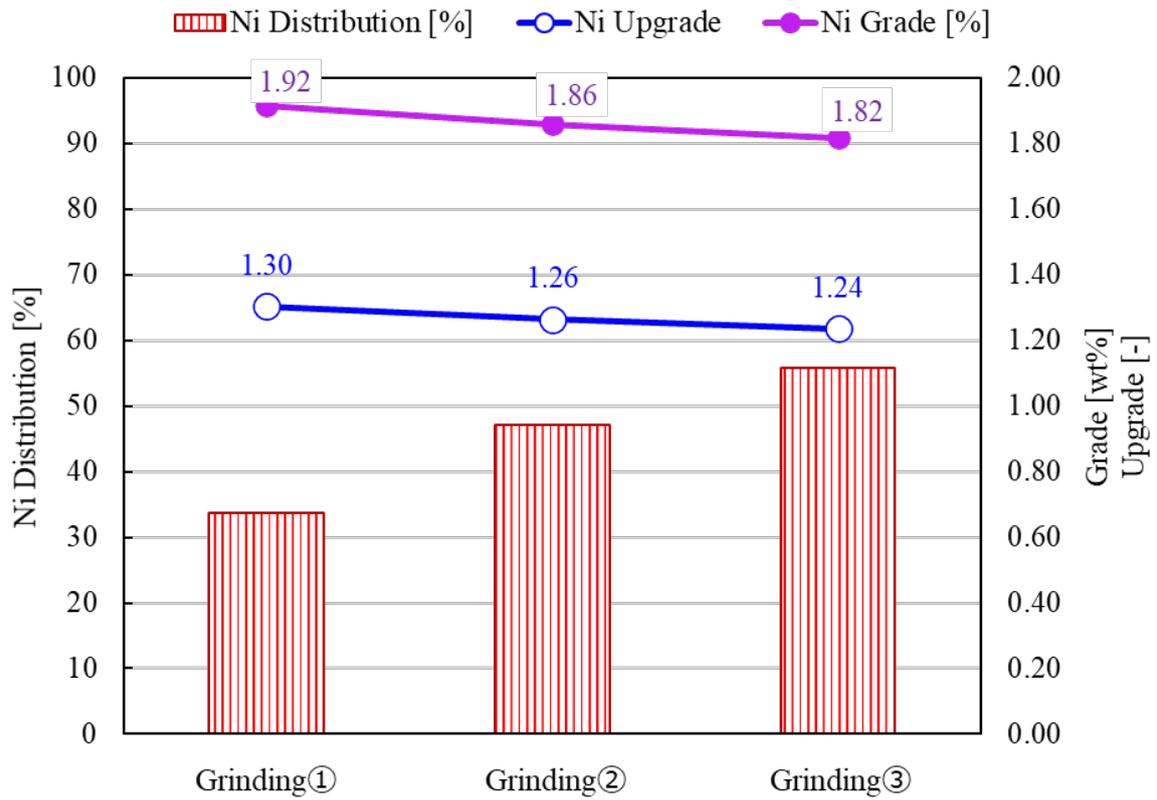


図 3-25 インテンシブミキサー粉砕による繰り返し粉砕 (C 鉱石) (篩下産物結果)

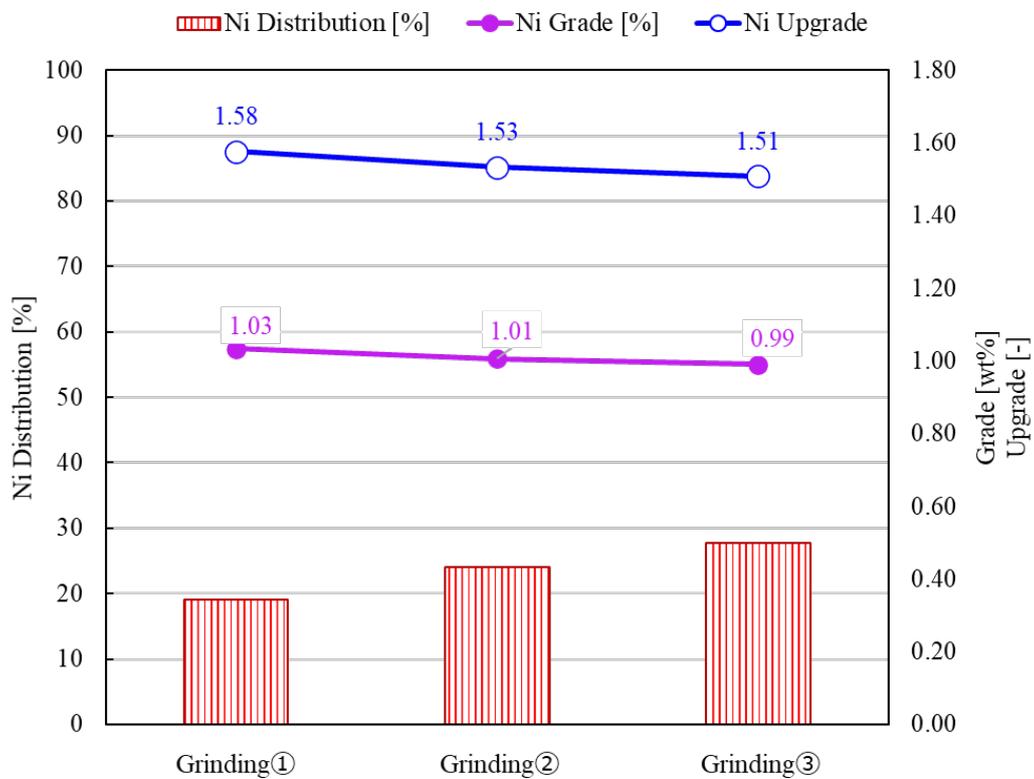


図 3-26 インテンシブミキサー粉砕による繰り返し粉砕 (D 塊鉱石(Fine)) (篩下産物結果)

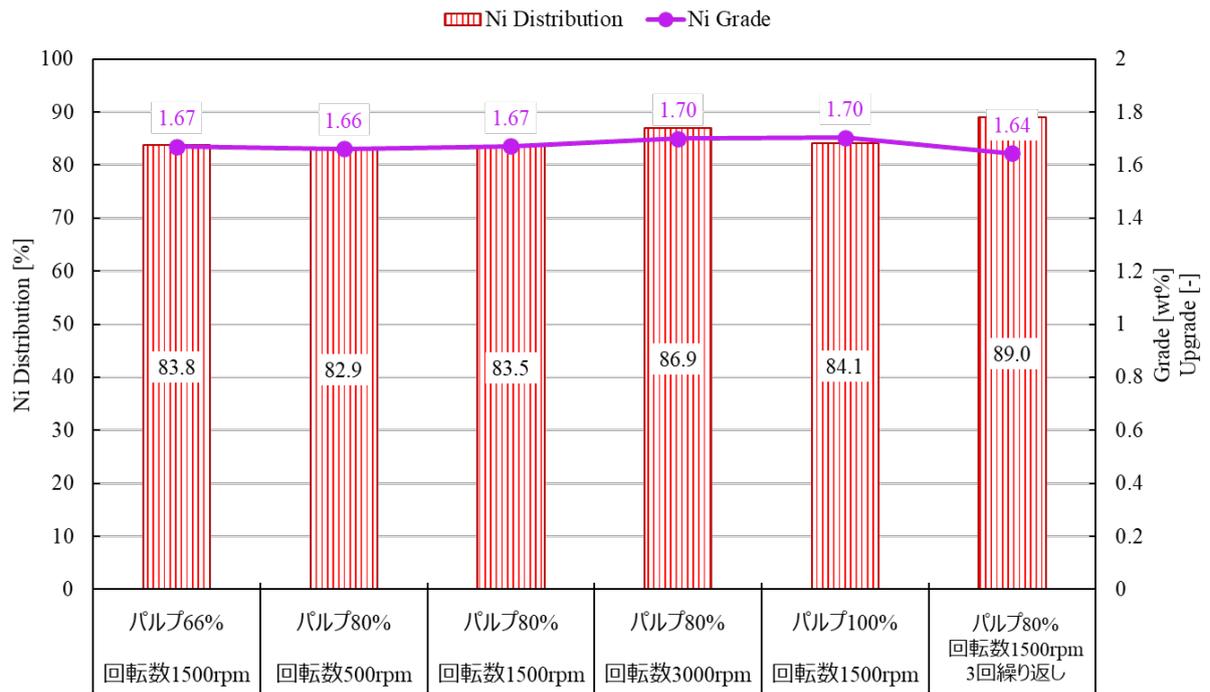


図 3-27 ポットミル粉砕産物に 13.2mm 以下を組み合わせた場合の品位及び回収率 (C 鉱石) (篩下産物結果)

表 3-7 C 鉱石の試験結果まとめ (インテンシブミキサー)

回転数	パルプ濃度	Feed			+75 $\mu$ m							-75 $\mu$ m						
		Grade [wt%]		Fe/Ni	Distribution [%]		Grade [wt%]		Upgrade [-]			Distribution [%]		Grade [wt%]		Upgrade [-]		Fe/Ni
		Ni	Fe		Ni	Fe	Ni	Fe	Ni	Fe	Fe/Ni	Ni	Fe	Ni	Fe	Ni	Fe	
回転数 1500rpm	パルプ 66%	1.36	9.06	6.65	65.2	55.3	1.21	6.83	0.89	0.75	5.63	34.8	44.7	1.77	15.17	1.30	1.68	8.55
回転数 500rpm	パルプ 80%	1.48	9.67	6.52	68.9	55.5	1.37	7.19	0.92	0.74	5.26	31.1	44.5	1.82	16.96	1.23	1.75	9.32
回転数 1500rpm	パルプ 80%	1.47	9.18	6.24	66.3	54.7	1.31	6.77	0.89	0.74	5.15	33.7	45.3	1.92	16.06	1.30	1.75	8.38
回転数 3000rpm	パルプ 80%	1.13	9.05	8.01	52.6	47.9	0.86	6.30	0.76	0.70	7.30	47.4	52.1	1.72	15.15	1.52	1.67	8.80
回転数 1500rpm	パルプ 100%	1.20	8.80	7.34	63.8	59.0	1.00	6.75	0.83	0.77	6.78	36.2	41.0	1.87	15.56	1.56	1.77	8.32

表 3-8 C 鉱石の試験結果まとめ (インテンシブミキサー繰り返し粉碎)

Feed		-75 $\mu$ m①							-75 $\mu$ m①②							-75 $\mu$ m①②③						
Grade [wt%]		Yield [%]	Distribution [%]		Grade [wt%]		Upgrade [-]		Yield [%]	Distribution [%]		Grade [wt%]		Upgrade [-]		Yield [%]	Distribution [%]		Grade [wt%]		Upgrade [-]	
Ni	Fe		Ni	Fe	Ni	Fe	Ni	Fe		Ni	Fe	Ni	Fe	Ni	Fe		Ni	Fe	Ni	Fe	Ni	Fe
1.47	9.18	25.87	33.72	45.28	1.92	16.06	1.30	1.75	37.26	47.13	56.70	1.86	13.96	1.26	1.52	45.09	55.71	63.49	1.82	12.92	1.24	1.41

表 3-9 C 鉱石 -13.2mm 以下の粒群と合算した場合の品位及び回収率 (インテンシブミキサー)

回転数	パルプ濃度	-13.2mm				インテンシブミキサー-75 $\mu$ m						-13.2mm&インテンシブミキサー-75 $\mu$ m						
		Distribution [%]		Grade [wt%]		Distribution [%]		Upgrade [-]		Grade [wt%] Upgrade から算出		Distribution [%]		Grade [wt%]		Upgrade [-]		
		Ni	Fe	Ni	Fe	Ni	Fe	Ni	Fe	Ni	Fe	Ni	Fe	Ni	Fe	Ni	Fe	Fe/Ni
回転数 1500rpm	パルプ 66%	75.2	81.4	1.69	19.04	8.6	8.3	1.30	1.68	1.50	15.17	83.8	89.7	1.67	18.6	1.10	1.18	11.13
回転数 500rpm	パルプ 80%	75.2	81.4	1.69	19.04	7.7	8.3	1.23	1.75	1.41	16.96	82.9	89.6	1.66	18.8	1.10	1.19	11.32
回転数 1500rpm	パルプ 80%	75.2	81.4	1.69	19.04	8.4	8.4	1.30	1.75	1.50	16.06	83.5	89.8	1.67	18.7	1.10	1.19	11.19
回転数 3000rpm	パルプ 80%	75.2	81.4	1.69	19.04	11.8	9.7	1.52	1.67	1.75	15.15	86.9	91.1	1.70	18.5	1.12	1.18	10.90
回転数 1500rpm	パルプ 100%	75.2	81.4	1.69	19.04	9.0	7.7	1.56	1.77	1.79	15.56	84.1	89.0	1.70	18.7	1.12	1.19	10.97

表 3-10 C 鉱石 -13.2mm 以下の粒群と合算した場合の品位及び回収率 (インテンシブミキサー繰り返し粉砕)

-13.2mm&-75 $\mu$ m①								-13.2mm&-75 $\mu$ m①②								-13.2mm&-75 $\mu$ m①②③							
Yield [%]	Distribution [%]		Grade [wt%] Upgrade から算出		Upgrade [-]			Yield [%]	Distribution [%]		Grade [wt%] Upgrade から算出		Upgrade [-]			Yield [%]	Distribution [%]		Grade [wt%] Upgrade から算出		Upgrade [-]		
	Ni	Fe	Ni	Fe					Ni	Fe	Fe/Ni	Ni					Fe	Ni	Fe	Ni			Fe
75.77	83.54	89.79	1.7	18.7	1.10	1.19	11.19	79.49	86.87	91.9	1.7	18.26	1.09	1.16	11.02	82.05	88.999	93.192	1.6441	17.94	1.0844	1.1388	10.912

表 3-11 D 塊鉱石(Fine)の試験結果まとめ (インテンシブミキサー)

回転数	パルプ濃度	Feed			+75 $\mu$ m							-75 $\mu$ m						
		Grade [wt%]		Fe/Ni	Distribution [%]		Grade [wt%]		Upgrade [-]			Distribution [%]		Grade [wt%]		Upgrade [-]		
		Ni	Fe		Ni	Fe	Ni	Fe	Ni	Fe	Fe/Ni	Ni	Fe	Ni	Fe	Ni	Fe	Fe/Ni
回転数 6000rpm	パルプ 66%	0.65	5.60	5.60	84.0	84.1	0.61	5.24	0.93	0.94	8.56	16.0	15.9	1.04	8.85	1.59	1.58	8.52
回転数 1500rpm	パルプ 80%	0.69	5.88	5.88	83.1	83.2	0.64	5.50	0.93	0.94	8.57	16.9	16.8	1.05	8.90	1.52	1.51	8.51
回転数 3000rpm	パルプ 80%	0.68	5.96	5.96	82.6	83.0	0.63	5.57	0.93	0.94	8.78	17.4	17.0	1.05	8.96	1.53	1.50	8.58
回転数 6000rpm	パルプ 80%	0.64	5.90	5.90	79.9	80.9	0.58	5.43	0.91	0.92	9.31	20.1	19.1	1.08	9.44	1.68	1.60	8.75
回転数 7000rpm	パルプ 80%	0.63	5.90	5.90	79.9	81.4	0.57	5.46	0.91	0.93	9.52	20.1	18.6	1.06	9.14	1.67	1.55	8.66
回転数 6000rpm	パルプ 100%	0.67	5.75	5.75	84.6	84.9	0.64	5.50	0.95	0.96	8.57	15.4	15.1	0.92	7.68	1.36	1.34	8.39

表 3-12 D 塊鉱石(Fine)の試験結果まとめ (インテンシブミキサー繰り返し粉砕)

Feed		-75 $\mu$ m①							-75 $\mu$ m①②							-75 $\mu$ m①②③						
Grade [wt%]		Yield [%]	Distribution [%]		Grade [wt%]		Upgrade [-]		Yield [%]	Distribution [%]		Grade [wt%]		Upgrade [-]		Yield [%]	Distribution [%]		Grade [wt%]		Upgrade [-]	
Ni	Fe		Ni	Fe	Ni	Fe	Ni	Fe		Ni	Fe	Ni	Fe	Ni	Fe		Ni	Fe	Ni	Fe	Ni	Fe
0.66	5.66	12.11	19.09	18.91	1.03	8.84	1.58	1.56	15.69	24.05	22.62	1.01	8.17	1.53	1.44	18.40	27.76	25.34	0.99	7.80	1.51	1.38

### 3-6 重液選別試験

#### 3-6-1 目的

インテンシブミキサーによる粉碎後の網上産物（75 $\mu\text{m}$ 以上）に対し、重液選別を行うことで更にNi鉱物を選択的に回収可能か検討する。なお、試験対象は2-4-7(3),(4)に記載した、比重選別の適用可能性を踏まえ、C鉱石のみとした。なお、参考までに、実際にD塊鉱石のインテンシブミキサーによる繰り返し粉碎を行った際の網上（75 $\mu\text{m}$ 以上）産物のMLA結果を3-6-4に示す。

#### 3-6-2 試験方法

重液選別の試験条件を表3-13、試験フローを図3-28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 2.5 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（浮鉱）を回収し、水洗した後にろ過及び乾燥した。
- IV. ビーカーの底に滞留した産物（沈鉱）についても回収し、水洗した後にろ過及び乾燥した。
- V. 乾燥後の浮鉱と比重 2.4 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鉱と沈鉱を回収した。
- VI. V で回収した浮鉱に対して比重 2.3 に調製した SPT 水溶液を用いて I～IV の操作を行い、浮鉱と沈鉱を回収した。

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 3-13 重液選別の試験条件

条件	設定値
給鉱	C 鉱石インテンシブミキサー三回繰り返し+0.075mm
給鉱重量	25g
重液	ポリタングステン酸ナトリウム (SPT)
重液比重	2.3, 2.4, 2.5
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

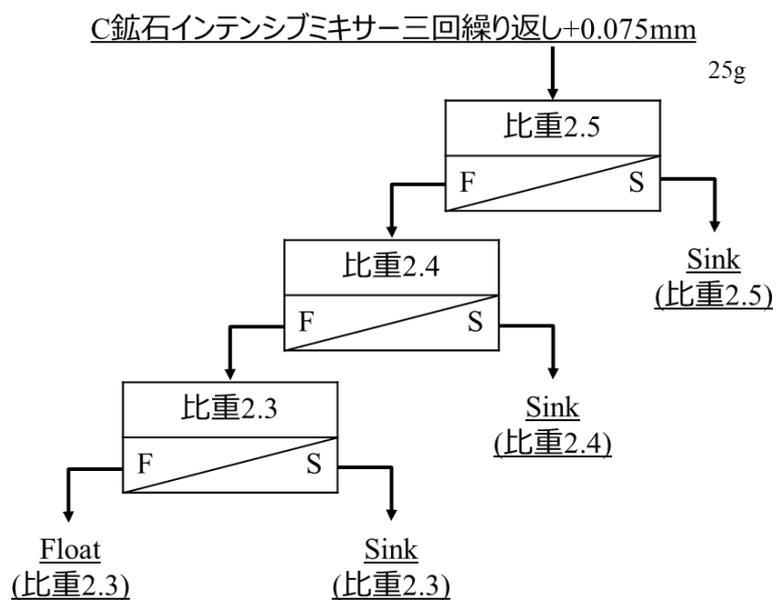


図 3-28 重液選別の試験フロー

### 3-6-3 試験結果

図 3-29 に試験結果を示す。また、試験データを表 3-14 に、C 鉱石の 13.2mm 以下の試料と試験産物を合算した際の結果を表 3-15 に示す。

比重  $2.3\text{g/cm}^3$  の重液を用いることで、浮鉱（比重 $<2.3$ ）に Ni を濃縮させることが可能と分かり、インテンシブミキサー粉砕において未回収のニッケルをさらに回収できる可能性が示唆された。ただし、回収率は低いため、費用対効果の検証が必要である。

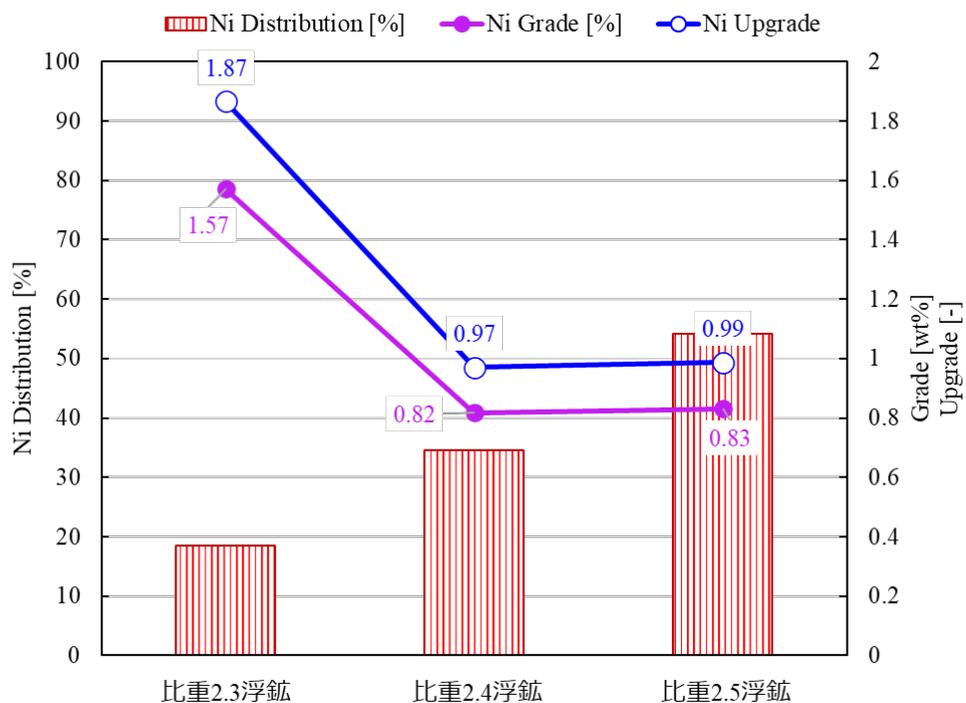


図 3-29 重液選別結果

表 3-14 重液選別結果まとめ

Product	Weight		Assays (ICP), %		Element Distribution, %		Fe/Ni	Upgrade	
	g	%	Ni	Fe	Ni	Fe		Ni	Fe
SG2.3F	2.7	9.9	1.57	5.88	18.5	10.3	3.74	1.87	1.04
SG2.3S	7.1	25.7	0.53	5.25	16.1	23.8	9.96	0.63	0.93
SG2.4S	5.3	19.2	0.86	5.83	19.6	19.8	6.79	1.02	1.03
SG2.5S	12.5	45.2	0.86	5.75	45.9	46.0	6.72	1.02	1.02
Head(Calc.)	27.6	100.0	0.84	5.65	100.0	100.0	6.70		

Combine Product	Weight		Assays (ICP), %		Element Distribution, %		Fe/Ni	Upgrade	
	g	%	Ni	Fe	Ni	Fe		Ni	Fe
重液比重 2.3									
浮鋇 (< 比重 2.3)	2.7	9.9	1.57	5.88	18.5	10.3	3.74	1.87	1.04
沈降 (> 比重 2.3)	24.9	90.1	0.53	5.25	81.5	89.7	9.96	0.63	0.93
Head(Calc.)	27.6	100	0.84	5.65	100.0	100.0	6.70		

Combine Product	Weight		Assays (ICP), %		Element Distribution, %		Fe/Ni	Upgrade	
	g	%	Ni	Fe	Ni	Fe		Ni	Fe
重液比重 2.4									
浮鋇 (< 比重 2.4)	9.8	35.6	0.82	5.42	34.5	34.2	6.63	0.97	0.96
沈降 (> 比重 2.4)	17.8	64.4	0.86	5.77	65.5	65.8	6.74	1.02	1.02
Head(Calc.)	27.6	100	0.84	5.65	100.0	100.0	6.70		

Combine Product	Weight		Assays (ICP), %		Element Distribution, %		Fe/Ni	Upgrade	
	g	%	Ni	Fe	Ni	Fe		Ni	Fe
重液比重 2.5									
浮鋇 (< 比重 2.5)	15.1	54.8	0.83	5.57	54.1	54.0	6.69	0.99	0.99
沈降 (> 比重 2.5)	12.5	45.2	0.86	5.75	45.9	46.0	6.72	1.02	1.02
Head(Calc.)	27.6	100	0.84	5.65	100.0	100.0	6.70		

表 3-15 C 鉱石 -13.2mm 以下の粒群と合算した場合の品位及び回収率（インテンシブミキサー繰り返し粉碎＋重液選別）

-13.2mm&-75μm①②③&2.3F							
Yield [%]	Distribution [%]		Grade [wt%] Upgrade から算出		Upgrade [-]		
	Ni	Fe	Ni	Fe	Ni	Fe	Fe/Ni
83.83	91.03	93.89	1.6	17.7	1.08	1.12	10.81

### 3-6-4 MLA 分析結果（インテンシブミキサー粉砕後 D 塊鉱石）

D 塊鉱石のインテンシブミキサーによる繰り返し粉砕を行った際の網上（75 $\mu$ m 以上）産物の MLA 結果を表 3-16 及び表 3-17 に示す。存在割合の多い Serpentine\_Ni2.1、Serpentine\_Ni0.9、Serpentine\_Ni0.5 及び Serpentine の比重が非常に近く、Ni を含まない Serpentine のみを比重選別により分離することは難しいといえる。さらに、それら鉱物の単体分離度が低いため、比重選別による Ni 品位向上は非常に困難と考えられる。

表 3-16 インテンシブミキサー粉砕後 D 塊鉱石(Fine) MLA 分析結果

Mineral	Density	Ni (%)	重量割合 (%)	Ni 積算重量割合 %
Fe-oxide	6.22	0.00	0.45	100.00
Fe-oxide_NiCr	6.02	0.76	0.12	100.00
Chromite	5.63	0.00	0.08	99.88
Fe-oxide_MgSi	5.59	0.00	1.02	99.88
Spinel-chromite	5.15	0.00	1.01	99.88
FeSiAl	5.04	0.00	0.00	99.88
Serpentine&Fe-oxide_High	4.97	3.07	0.50	99.88
Serpentine&Fe-oxide_Middle	4.32	2.04	5.75	97.85
Serpentine&Fe-oxide_Low	3.80	2.13	0.49	82.31
Serpentine_Ni1.7	3.59	1.74	0.36	80.92
Serpentine_Ni3.1_MnCo	3.31	3.08	0.05	80.10
Serpentine_Ni2.1	2.34	2.12	14.30	79.91
Serpentine_Ni0.9	2.06	0.91	26.82	39.72
Serpentine_Ni0.5	1.98	0.49	11.35	7.37
Augite_Al	1.95	0.00	0.00	0.00
Serpentine	1.88	0.00	37.29	0.00
Augite (Pyroxene)	1.80	0.00	0.34	0.00
Quartz	1.79	0.00	0.07	0.00
Albite	1.76	0.00	0.00	0.00
PSiCaNaO	1.59	0.00	0.00	0.00

表 3-17 インテンシブミキサー粉砕後 D 塊鉱石(Fine) 単体分離度

	単体分離度
Serpentine_Ni2.1	0%
Serpentine_Ni0.9	0%
Serpentine_Ni0.5	0%
Serpentine	0%

単体分離度は MLA で算出される面積単体分離度の値のうち、95-100%に該当するもの（該当鉱物を含む粒子のうち、面積比率で 95~100%を該当の鉱物が占める割合）を使用

### 3-7 アトライタ

#### 3-7-1 目的

選択粉碎に適した粉碎機と考えられるアトライタ（ビーズミル、媒体攪拌型粉碎機）による鉱石の選択粉碎の効果を確認する。

#### 3-7-2 試験方法

粉碎装置として、秋田大学が所有するアトライタ（三井鉱山株式会社（現、日本コークス）製 図 3-30）を用いた。他の試験と同様に 0.075mm 以下の試料をニッケル濃縮産物とした。

試験条件を表 3-18、試験フローを図 3-31 に示す。

- I. 所定の充填率になるよう媒体（3mm のステンレス製ビーズ）を容器に入れる。
- II. 試料 100g と所定のパルプ濃度になるように調整した水道水を容器に加え、10 分間攪拌。
- III. 2.36mm のふるいを用いて媒体と試料を選別。網上のビーズ中に混ざっている試料はピンセットを使って手で選別。
- IV. 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 3-30 アトライタの外観

表 3-18 繰り返し粉砕の試験条件

条件	C 鉱石	D 塊鉱石
給鉱	C 鉱石+13.2mm -13.2mm ジョークラッシャー 破碎	D 塊鉱石 (Fine)
給鉱重量	100g	100g
回転数	350rpm	350rpm
磨鉱時間	10min	10min
ボール (ビーズ) 粒径	3mm	3mm
ボール充填率	60%	60%, 85%
パルプ濃度	100% (試料 100g) 66% (試料 100g+水 50mL)	100% (試料 100g) 66% (試料 100g+水 50mL)

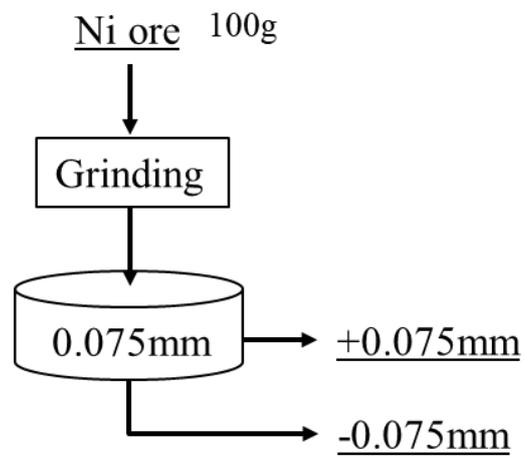


図 3-31 アトライタ粉砕の試験フロー

### 3-7-3 試験結果

図 3-32 及び図 3-33 D 塊鉱石(Fine)でのアトライタ粉砕試験結果に試験結果を示す。また、試験データを表 3-19 及び表 3-21 に、C 鉱石の 13.2mm 以下の試料と試験産物を合算した際の結果を表 3-20 に示す。

C 鉱石では乾式（パルプ濃度 100%）の方が Upgrade 率は高いが、回収率は湿式（パルプ濃度 66%）の方が高い結果となった。D 塊鉱石ではパルプ濃度の違いによる影響はほとんどなかったが、粉砕媒体充填率が高いほど Upgrade 率は上がるが、回収率が低い結果となった。

粉砕力については、湿式で充填率が低い方が高いことが分かったが、C 鉱石で回収率が低いことから鉱石の固さに寄らず、選択粉砕の効率はそれほど高くない可能性があるが、粉砕時間など試験条件を変えることでそれら結果が変わる可能性はある。

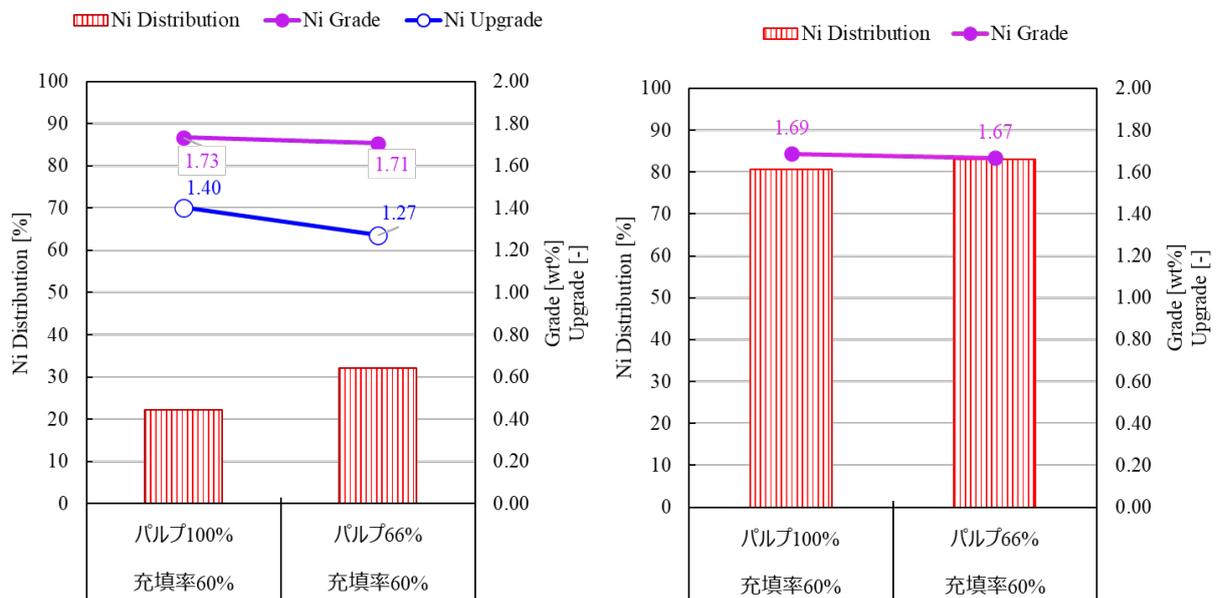


図 3-32 C 鉱石でのアトライタ粉砕試験結果

(左図：アトライタ粉砕後の 75µm 以下産物、右図：-13.2mm 以下との合算値)

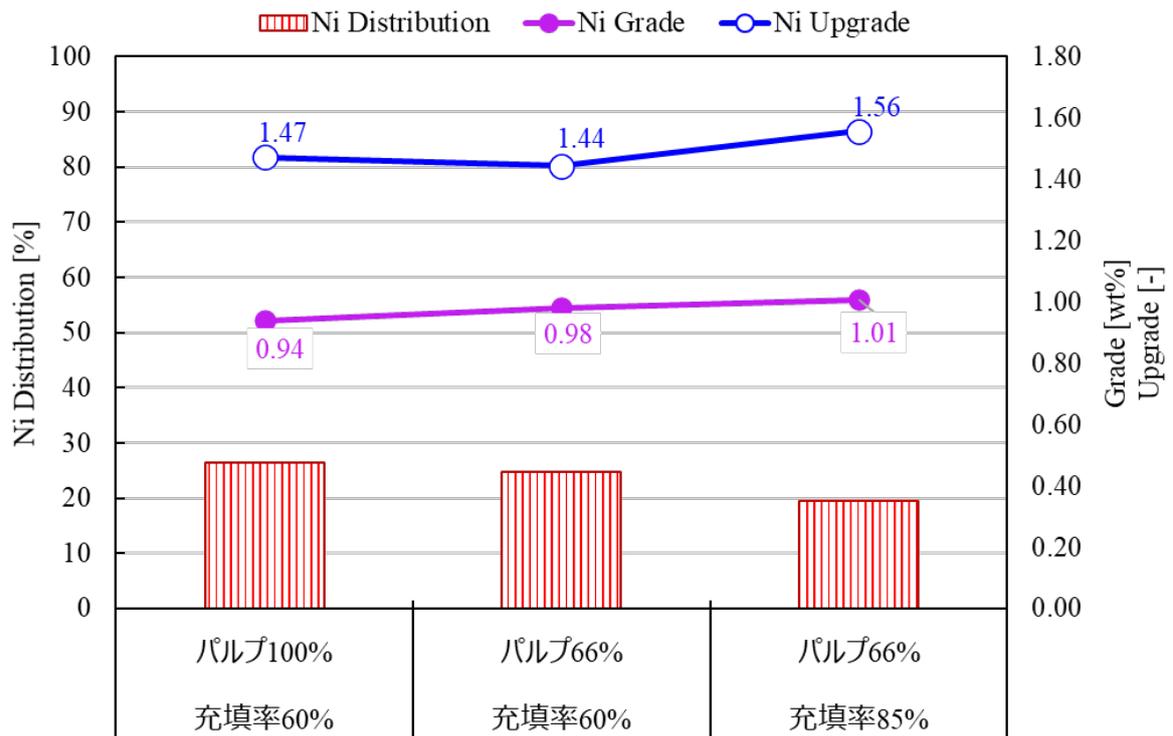


図 3-33 D 塊鉱石(Fine)でのアトライタ粉碎試験結果 (篩下産物結果)

表 3-19 C 鉱石のアトライタ粉砕試験結果まとめ

充填率 パルプ濃 度	Feed			+75 $\mu$ m						-75 $\mu$ m							
	Grade [wt%]			Distribution [%]		Grade [wt%]		Upgrade [-]		Distribution [%]			Grade [wt%]		Upgrade [-]		
	Ni	Fe	Fe/Ni	Ni	Fe	Ni	Fe	Ni	Fe	Fe/Ni	Ni	Fe	Ni	Fe	Ni	Fe	Fe/Ni
B60_P100	1.24	8.72	7.05	77.8	71.1	1.14	7.36	0.92	0.84	6.44	22.2	28.9	1.73	15.94	1.40	1.83	9.19
B60_P66	1.34	8.95	6.66	67.9	56.9	1.22	6.81	0.91	0.76	5.58	32.1	43.1	1.71	15.26	1.27	1.71	8.94

表 3-20 C 鉱石 -13.2mm 以下の粒群と合算した場合の品位及び回収率 (アトライタ粉砕)

充填率 パルプ濃 度	-13.2mm				アトライタ試験-75 $\mu$ m				-13.2mm&アトライタ試験-75 $\mu$ m							
	Distribution [%]		Grade [wt%]		Distribution [%]		Grade [wt%] Upgrade から算出		Yield [%]	Distribution [%]		Grade [wt%]		Upgrade [-]		
	Ni	Fe	Ni	Fe	Ni	Fe	Ni	Fe		Ni	Fe	Ni	Fe	Ni	Fe	
B60_P100	75.2	81.4	1.69	19.04	5.5	5.4	1.61	16.45	72.5	80.7	82.4	1.69	18.85	1.11	1.20	
B60_P66	75.2	81.4	1.69	19.04	8.0	8.0	1.46	15.34	75.6	83.1	82.8	1.67	18.63	1.10	1.18	

表 3-21 D 塊鉱石(Fine)のアトライタ粉砕試験結果まとめ

充填率 パルプ濃 度	Feed			+75 $\mu$ m						-75 $\mu$ m							
	Grade [wt%]			Distribution [%]		Grade [wt%]		Upgrade [-]		Distribution [%]			Grade [wt%]		Upgrade [-]		
	Ni	Fe	Fe/Ni	Ni	Fe	Ni	Fe	Ni	Fe	Fe/Ni	Ni	Fe	Ni	Fe	Ni	Fe	Fe/Ni
B60_P100	0.64	5.50	8.62	73.5	77.2	0.57	5.18	0.90	0.94	9.05	26.5	22.8	0.94	6.98	1.47	1.27	7.43
B60_P66	0.68	5.50	8.10	75.2	76.3	0.62	5.06	0.91	0.92	8.22	24.8	23.7	0.98	7.59	1.44	1.38	7.74
B85_P66	0.65	5.41	8.35	80.5	82.0	0.60	5.07	0.92	0.94	8.51	19.5	18.0	1.01	7.78	1.56	1.44	7.72

### 3-8 HPGR 模擬ピストン試験

#### 3-8-1 目的

圧縮することで、鉱物同士の境界部を破壊する、又は破壊されやすくなるよう微細な罫（クラック）を入れ、鉱物の単体分離性を向上させることを期待し、High Pressure Grinding Rolls (HPGR)を模擬したピストン試験（一軸圧縮試験機を用いた試験）を行う。

#### 3-8-2 試験方法

秋田県産業技術センターが所有する万能材料試験機（Instron 製、モデル 5985 図 3-34）を用いた。微細な粒子を含んだ状態では圧縮する力が分散され、効率が悪くなるため、1.18mm 以下の粒子をふるい分けで除去したものを試料とした。

試験条件を表 3-22 に、試験フローを図 3-36 に示す。

- I. 試験用に作成した治具（内径 82mm の円筒、直径 80mm の円柱、板、全てステンレス製 図 3-345）の中に鉱石 50g を入れる。
- II. 所定の荷重まで加圧する。（所定の荷重に到達したところで終了。保持はしない。）
- III. 1.18mm のふるいを用いて試料を選別。
- IV. 特定の荷重についてはIIIの網上を再度治具に入れ、同じ荷重で加圧し、その後ふるい分けを実施。
- V. 回収した各産物については ICP-OES による定量分析及び MLA 分析を行った。



図 3-34 圧縮試験機の外観



図 3-35 試験用治具の外観

表 3-22 HPGR 模擬ピストン試験の試験条件

条件	C 鉱石	D 塊鉱石
給鉱	C 鉱石+13.2mm ジョークラッシュャー破碎 -13.2mm+1.18mm	D 塊鉱石 (Coarse) -13.2mm+1.18mm
給鉱重量	50g	50g
粉碎機	圧縮試験機	圧縮試験機
荷重	50-200kN 10-40MPa	100-240kN 20-48MPa
ピストン移動速度	3.4mm/sec	3.4mm/sec

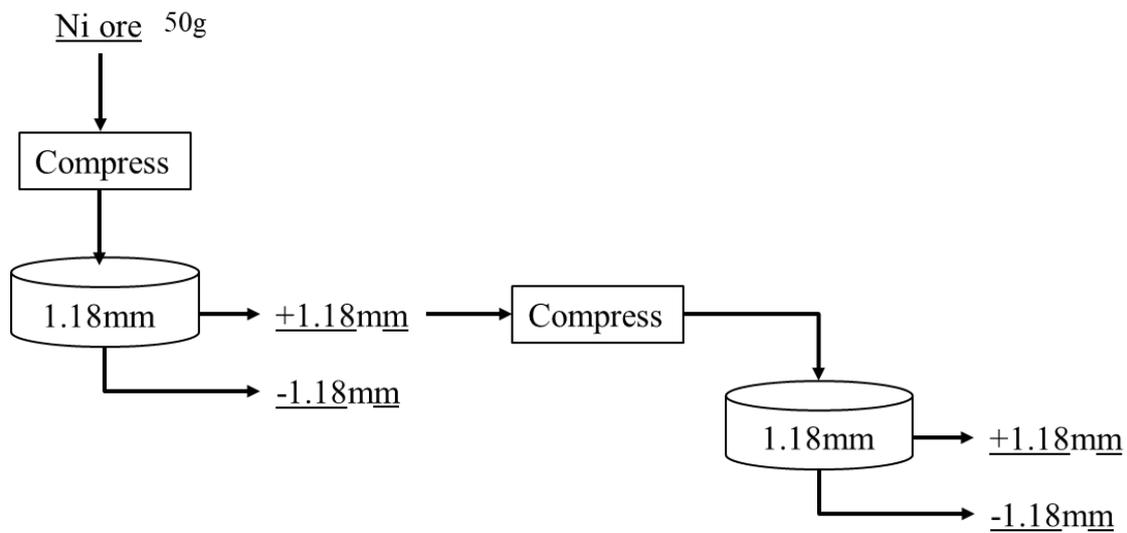


図 3-36 HPGR 模擬ピストン試験の試験フロー

### 3-8-3 試験結果

図 3-37 及び図 3-40 に荷重を変化させた試験結果を、図 3-38 及び図 3-41 に繰り返し粉碎を行った結果を示す。また、図 3-39 に C 鉱石の 13.2mm 以下の試料と試験産物を合算した際の結果を示す。それら試験データを表 3-23 から表 3-25 に示す。

C 鉱石では高い荷重の方が回収率が高いが、Upgrade 率がやや下がる結果となった。D 塊鉱石では 200kN のときに回収率が最大となった。また、どちらの鉱石も繰り返しにより回収率が大きく向上した。しかしながら、どの条件においても Upgrade 率は低いものとなった。

図 3-42 及び図 3-44 にピストン試験による単体分離性の変化について示す。Ni を含む鉱物及び含まない鉱物のうち、存在割合の高いもの 2 種類をそれぞれ選び、MLA 分析により算出された面積単体分離度の分布について示したものである。単体分離度が高いほど、粒子断面が単一の鉱物で占められていることを表す。なお、Feed の Grade(wt%)については、2 章のキャラクターゼーション時のふるい分け試料のうち、1.18mm 以下の 5 粒群の MLA 分析結果を加重平均したものである。これらの結果から、C 鉱石については、ピストン試験による単体分離性の向上が期待される結果となったが、D 塊鉱石についてはそれが見られない結果であった。C 鉱石については、選択粉碎（インテンシブミキサー）や比重選別と組み合わせることでそれらの効果が増すと考えられる。今後、粒度を 75 $\mu$ m 以下に限定して分析を行うことで、より明確な効果が確認できる可能性がある。

併せて、図 3-43 及び図 3-45 に給鉱及びピストン試験後の試料の SEM 画像（二次電子像、BSE 像）並びに MLA による鉱物マッピング像を示す。この画像からは鉱物境界面の破壊やひび割れが促進されているかどうか判断は出来ない。

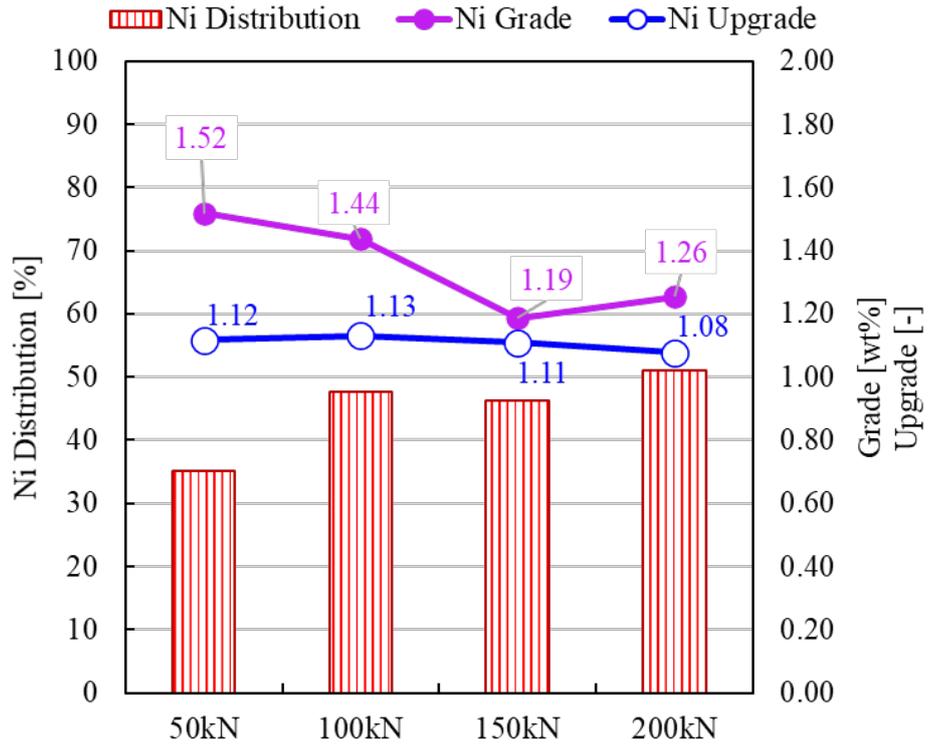


図 3-37 C 鉱石でのピストン試験結果（篩下産物結果）

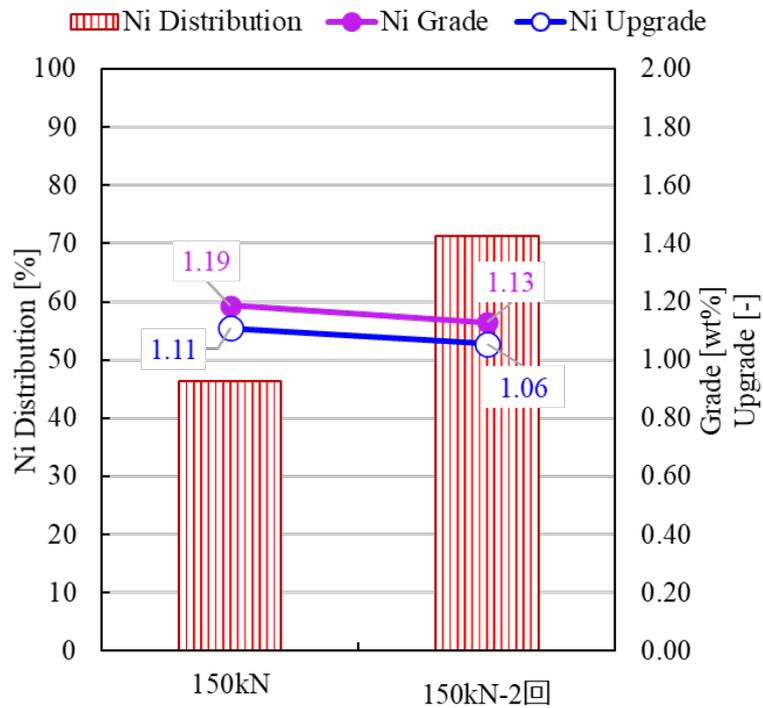


図 3-38 C 鉱石でのピストン繰り返し試験結果（篩下産物結果）

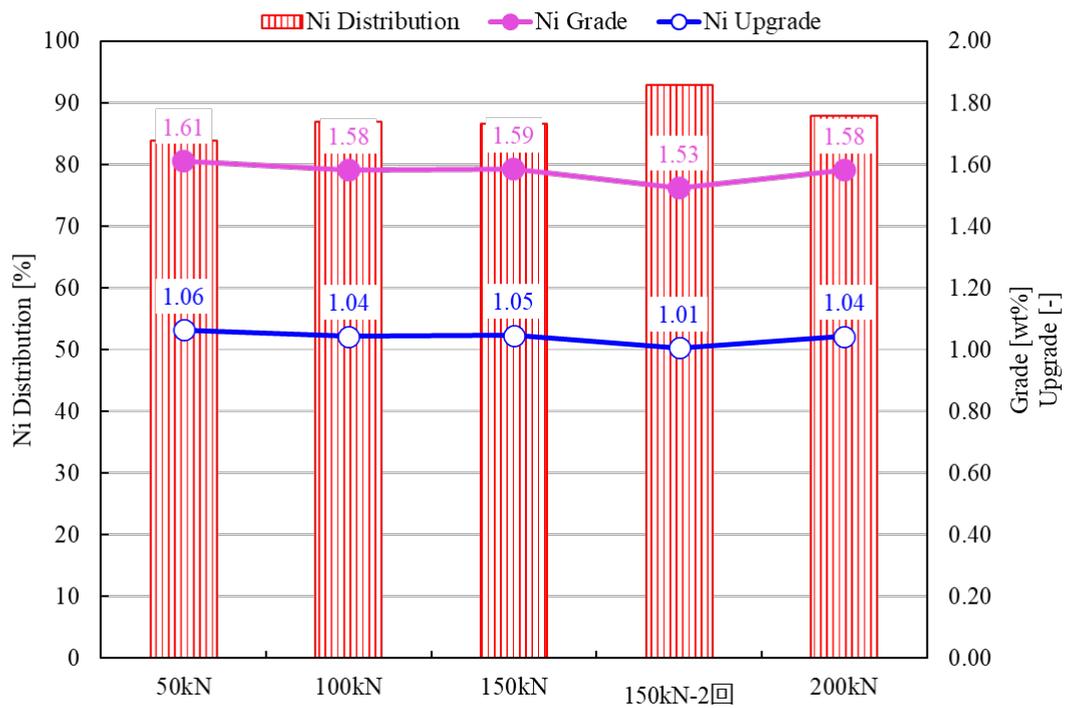


図 3-39 ピストン試験篩下産物に 13.2mm 以下を組み合わせた場合の品位及び回収率 (C 鉱石)

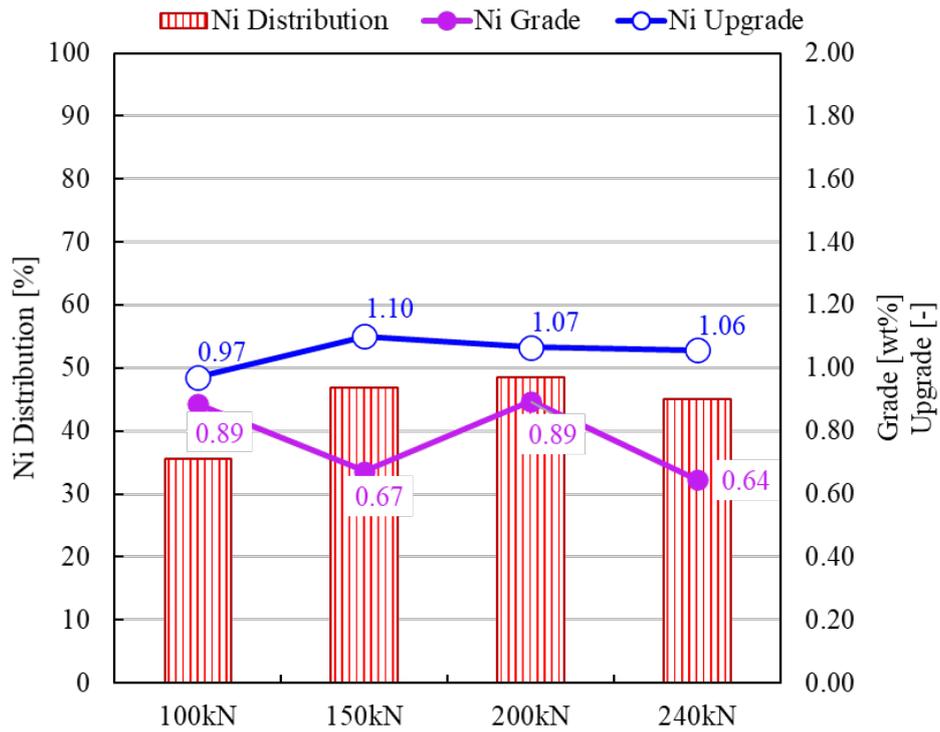


図 3-40 D 塊鉱石(Coarse)でのピストン試験結果 (篩下産物結果)

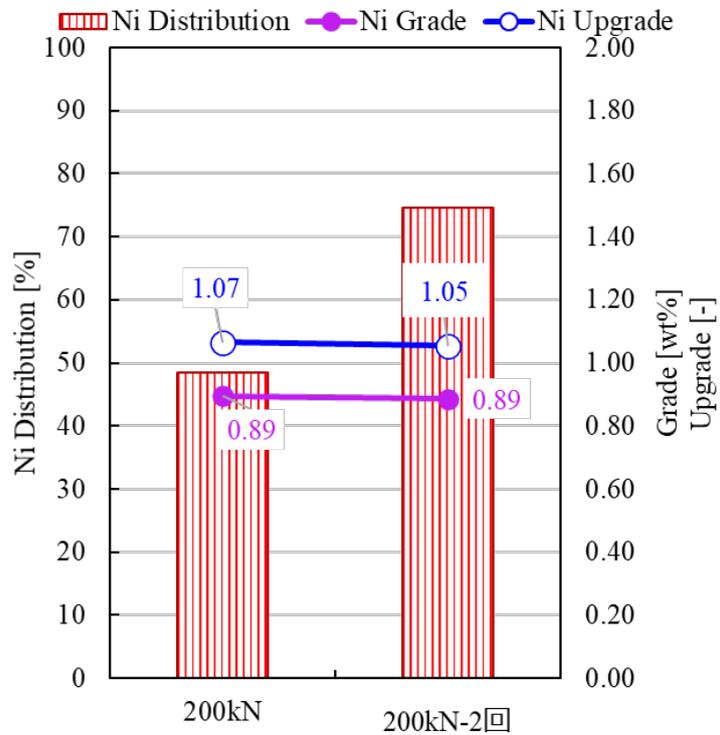


図 3-41 D 塊鉱石(Coarse)でのピストン繰り返し試験結果 (篩下産物結果)

表 3-23 C 鉱石のピストン試験結果まとめ

荷重	Feed			+1.18mm					-1.18mm						
	Grade [wt%]		Fe/Ni	Distribution [%]		Grade [wt%]			Distribution [%]	Grade [wt%]		Upgrade [-]		Fe/Ni	
	Ni	Fe		Ni	Fe	Ni	Fe	Fe/Ni		Ni	Fe	Ni	Fe		
50kN	1.36	7.80	5.73	64.9	60.0	1.29	6.83	5.30	35.1	40.0	1.52	9.91	1.12	1.27	6.52
100kN	1.27	8.21	6.46	52.4	49.1	1.15	6.95	6.05	47.6	50.9	1.44	9.95	1.13	1.21	6.92
150kN	1.07	7.32	6.84	53.7	53.7	0.99	6.76	6.85	46.3	46.3	1.19	8.11	1.11	1.11	6.83
150kN-2 回	1.07	7.32	6.84	28.6	29.3	0.95	6.63	7.00	71.4	70.7	1.13	7.65	1.06	1.05	6.78
200kN	1.16	7.34	6.30	48.9	47.8	1.08	6.67	6.17	51.1	52.2	1.26	8.07	1.08	1.10	6.43

表 3-24 C 鉱石 -13.2mm 以下の粒群と合算した場合の品位及び回収率（ピストン試験）

荷重	-13.2mm				ピストン試験-1.18mm						-13.2mm&ピストン試験-1.18mm							
	Distribution [%]		Grade [wt%]		Distribution [%]		Upgrade [-]		Grade [wt%] Upgrade から算出		Yield [%]	Distribution [%]		Grade [wt%]		Upgrade [-]		Fe/Ni
	Ni	Fe	Ni	Fe	Ni	Fe	Ni	Fe	Ni	Fe		Ni	Fe	Ni	Fe	Ni	Fe	
50kN	75.2	81.4	1.69	19.04	8.7	7.5	0.95	0.88	1.09	7.87	77.6	83.9	82.7	1.61	17.56	1.06	1.11	10.89
100kN	75.2	81.4	1.69	19.04	11.8	9.5	0.90	0.85	1.04	7.61	81.1	87.0	83.1	1.58	17.10	1.04	1.09	10.81
150kN	75.2	81.4	1.69	19.04	11.5	8.6	0.92	0.92	1.06	8.30	81.0	86.7	83.0	1.59	17.23	1.05	1.09	10.86
150kN-2 回	75.2	81.4	1.69	19.04	17.7	13.2	0.88	0.91	1.02	8.14	89.4	92.9	83.8	1.53	16.34	1.01	1.04	10.71
200kN	75.2	81.4	1.69	19.04	12.7	9.7	0.95	0.94	1.09	8.43	82.5	87.9	83.2	1.58	17.09	1.04	1.08	10.79

表 3-25 D 塊鉱石(Coarse)のピストン試験結果まとめ

荷重	Feed			+75 $\mu$ m				-75 $\mu$ m						
	Grade [wt%]			Distribution [%]		Grade [wt%]		Distribution [%]		Grade [wt%]		Upgrade [-]		
	Ni	Fe	Fe/Ni	Ni	Fe	Ni	Fe	Ni	Fe	Ni	Fe	Ni	Fe	Fe/Ni
100kN	0.91	5.79	6.34	64.4	63.1	0.93	5.77	35.6	36.9	0.89	5.83	0.97	1.01	6.58
150kN	0.61	5.66	9.27	53.0	56.0	0.56	5.53	47.0	44.0	0.67	5.84	1.10	1.03	8.69
200kN	0.84	5.55	6.61	51.5	55.2	0.79	5.63	48.5	44.8	0.89	5.46	1.07	0.98	6.10
200kN-2 回	0.84	5.55	6.61	25.3	30.5	0.73	5.79	74.7	69.5	0.89	5.45	1.05	0.98	6.16
240kN	0.61	5.73	9.40	55.0	56.9	0.58	5.68	45.0	43.1	0.64	5.80	1.06	1.01	9.01

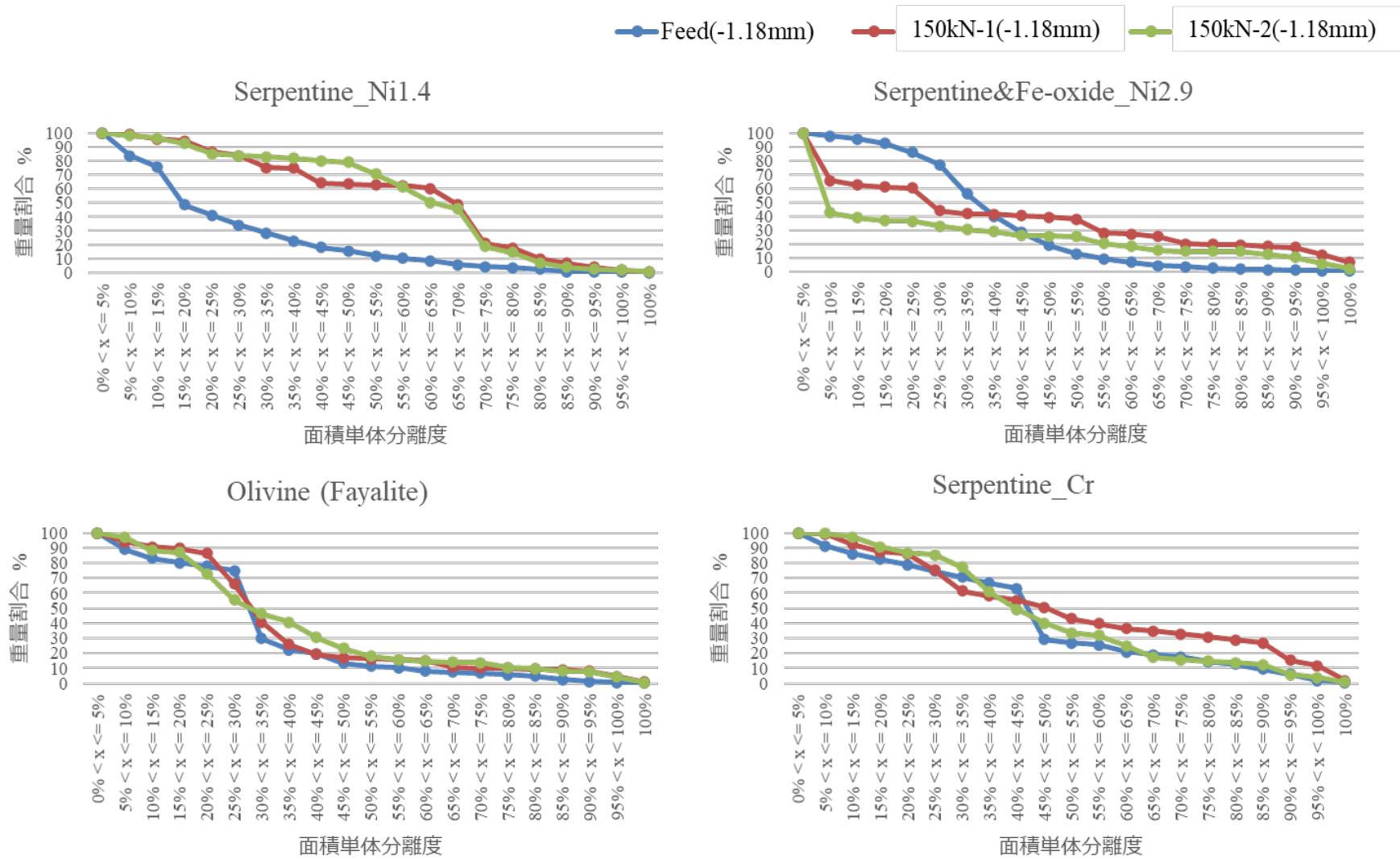
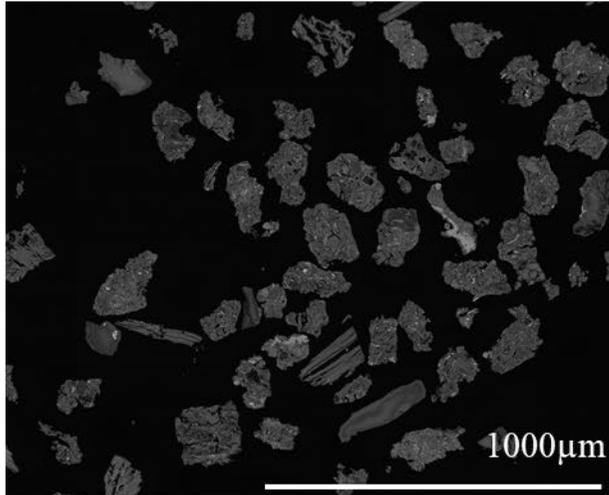
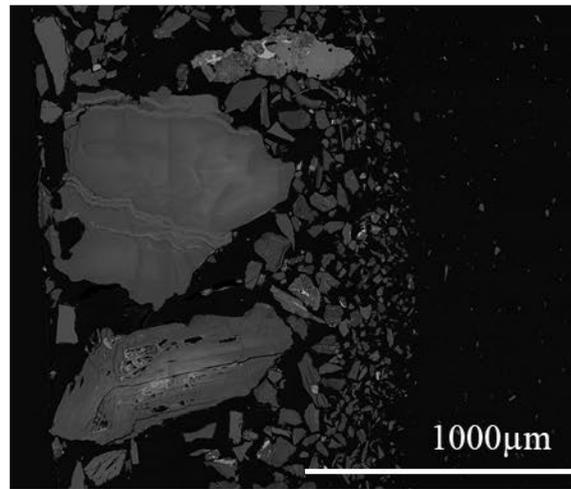


図 3-42 C 鉱石でのピストン試験による単体分離性の変化

粉碎前試料



粉碎後 (150kN-1回目)



粉碎後 (150kN-2回目)

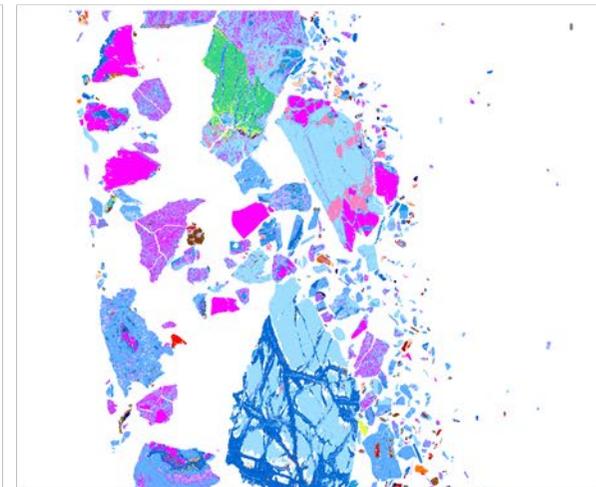
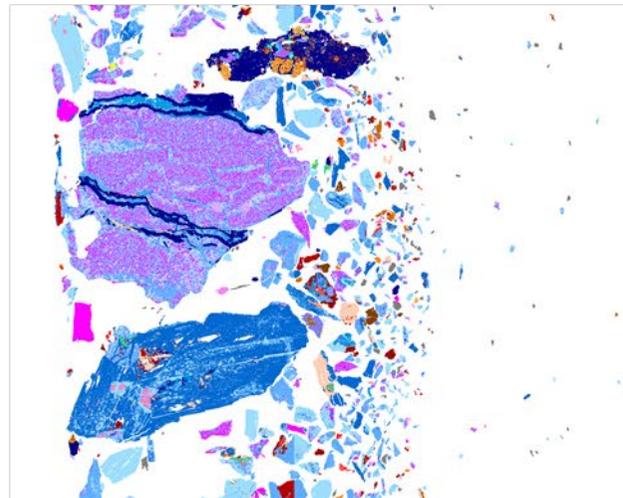
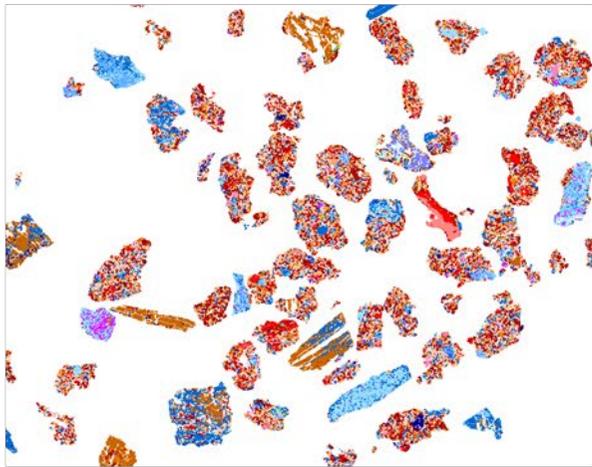
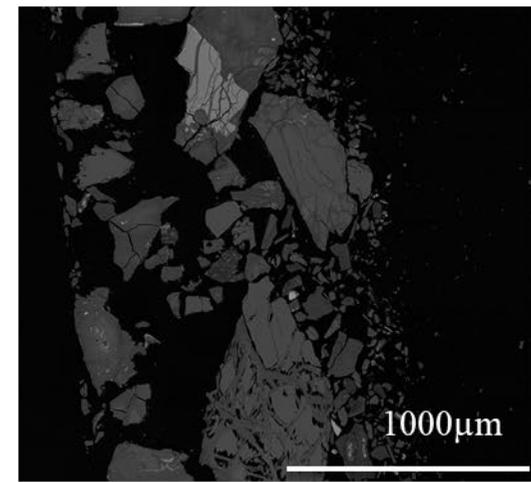


図 3-43 C 鉍石の BSE 像及びマッピング像 (ピストン試験)

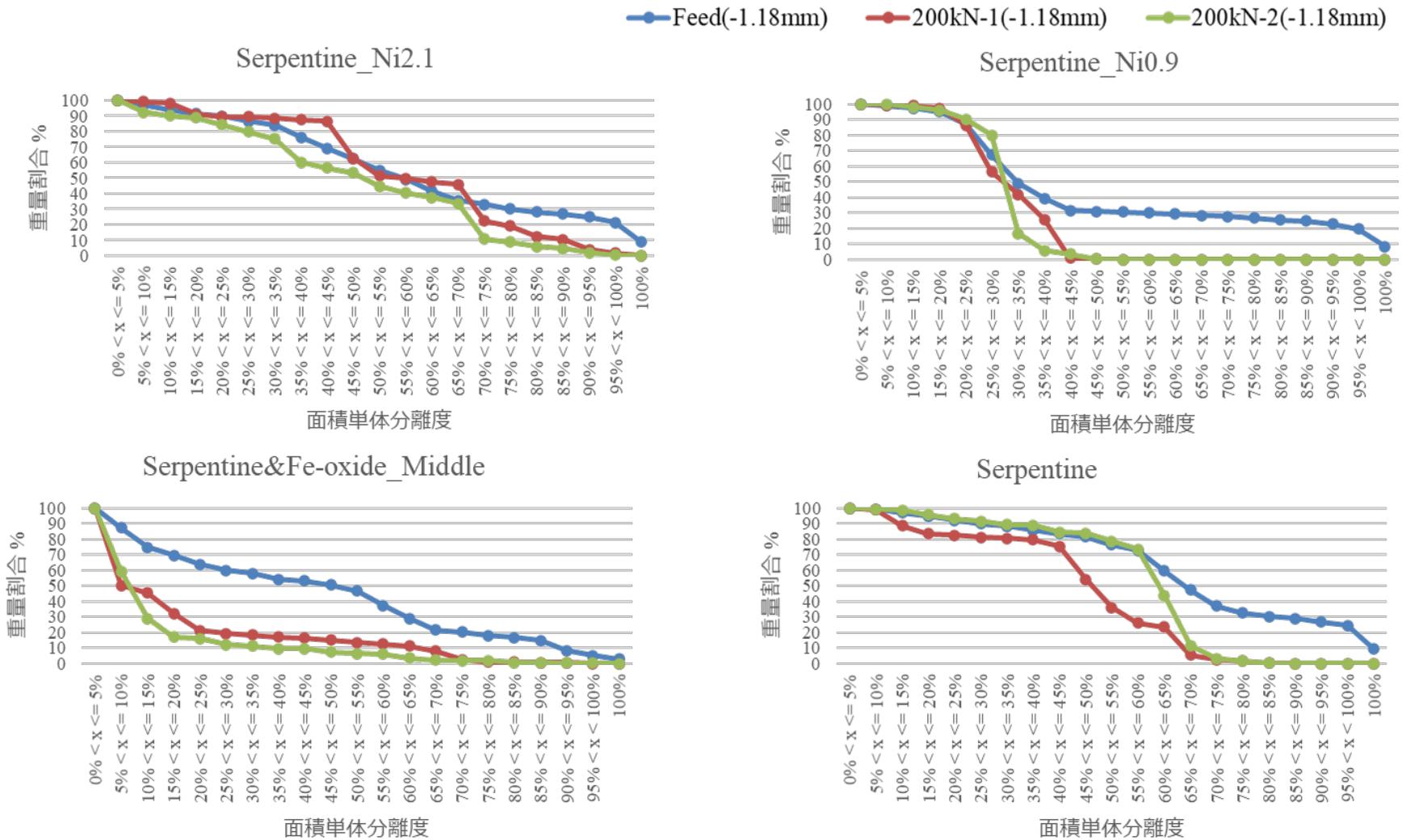
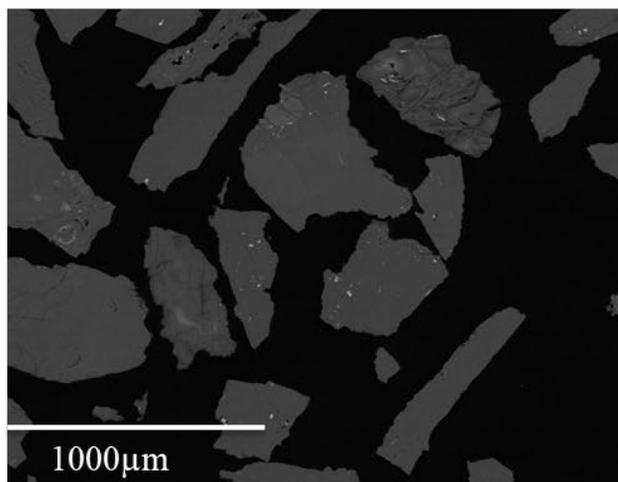
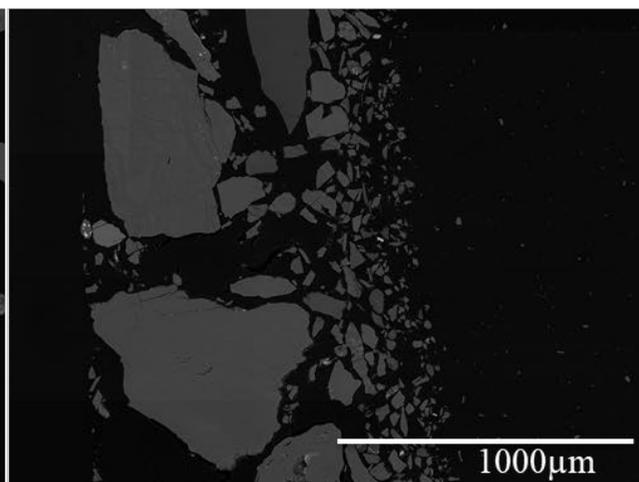


図 3-44 D 塊鉱石(Coarse)でのピストン試験による単体分離性の変化

粉碎前試料



粉碎後 (200kN-1回目)



粉碎後 (200kN-2回目)

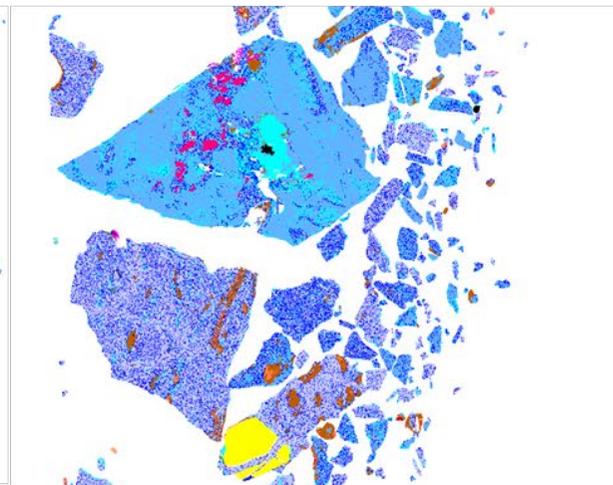
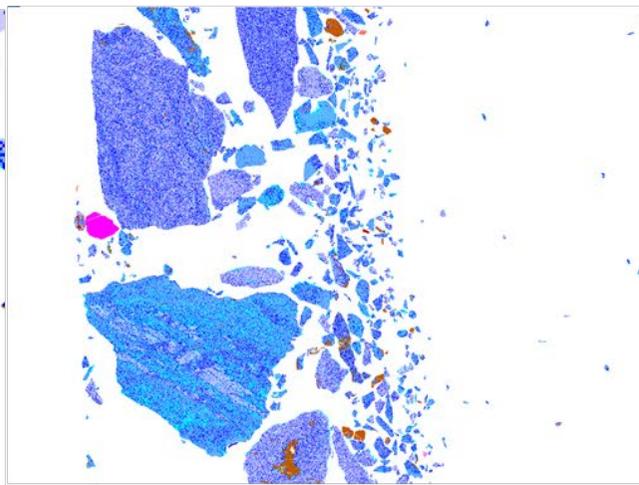
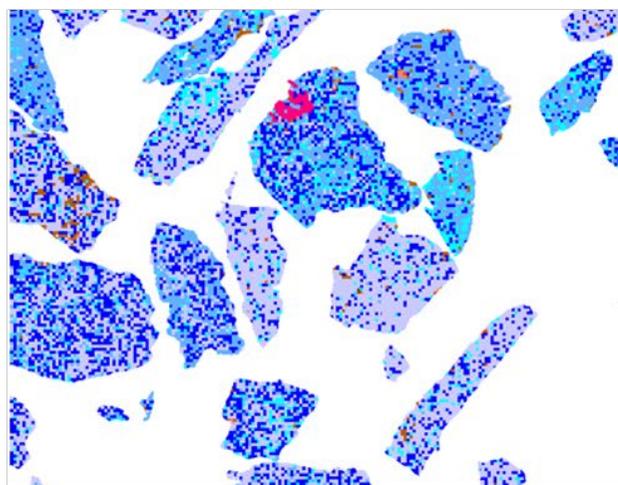
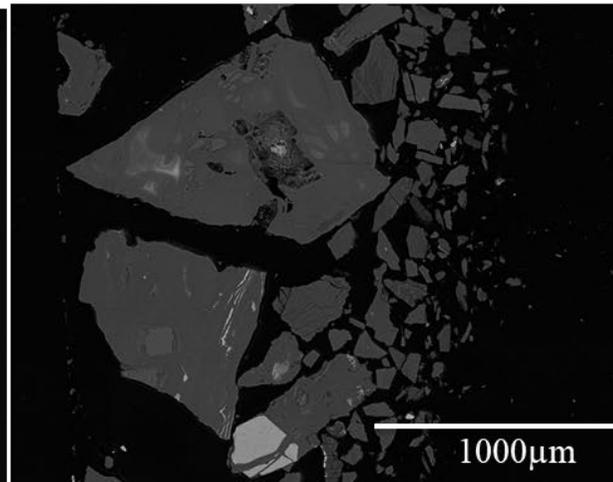


図 3-45 D 塊鉱石(Coarse)の BSE 像及びマッピング像 (ピストン試験)

### 3-9 手選別（色彩選別）試験

#### 3-9-1 目的

色彩選別機（カラーソーター）の適用可能性について検討するため、人の目で色を区別し、色彩別に手で選別を行う。

#### 3-9-2 試験方法

1.18mm 以下の細粒部を除いた試料に対し、以下表及び写真に示す条件で手選別を行った。

表 3-26 手選別（色彩選別）の試験条件

条件	C 鉱石	D 塊鉱石
給鉱	C 鉱石+13.2mm -13.2mm ジョークラッシャー破碎	D 塊鉱石 (Fine)
給鉱重量	50g	50g
分類数	色彩 6 分類+形状 1 分類	色彩 4 分類

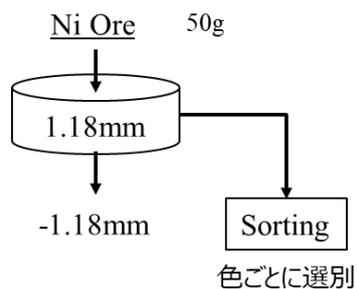


図 3-46 手選別（色彩選別）の試験フロー

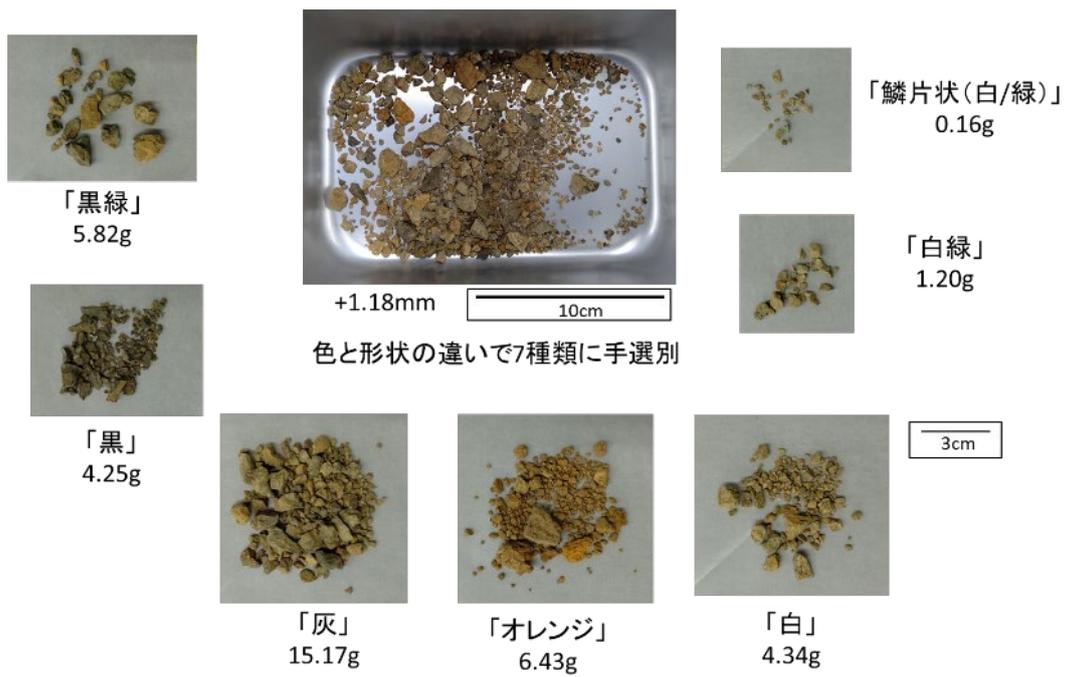


図 3-47 C 鉍石 色彩分類

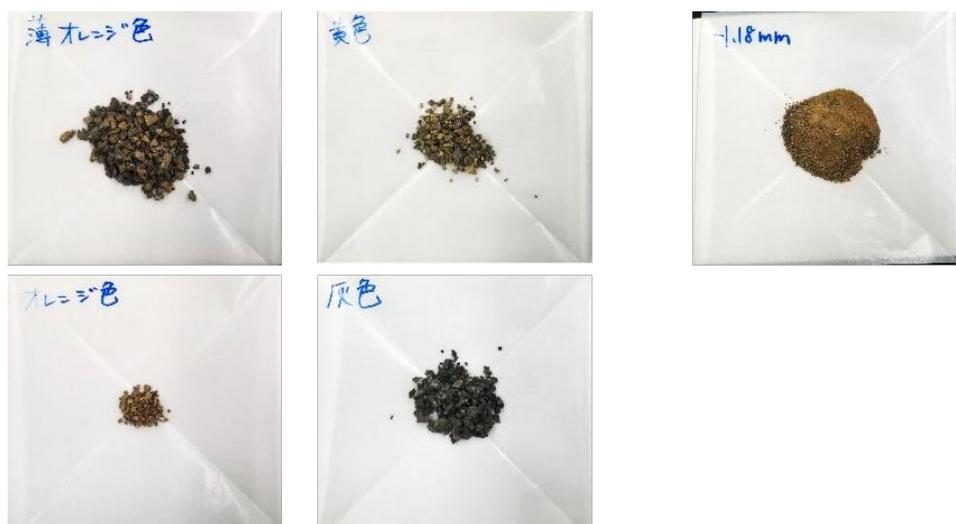


図 3-48 D 塊鉍石(Fine) 色彩分類  
(右上の-1.18mm は選別対象外)

### 3-9-3 試験結果

C 鉱石の選別結果を図 3-49、表 3-27、に示す。白・白緑・灰色の鉱石の Ni 品位が高い傾向にあり、反対に黒・黒緑という暗い色の鉱石は Ni 品位が 1.2wt%以下と低かった。色彩の違いを利用することで Ni 品位の向上効果が見込める可能性が示唆されたため、Ni 品位の高い色彩グループから順番に回収していった場合の品位及び回収率を計算したものを

表 3-28 に示す。また表 3-29 に 13.2mm 以下の試料と試験産物を合算した際の結果を示す。高品位の Ni を含む鉱物の重量割合はそれほど高くないため、色彩選別のみで品位及び回収率とも高い成績を得るのは難しいと言える。また、図 3-51 に XRD パターンを示す。「白」では高品位のニッケルを含む鉱物である珪ニッケル鉱 (Garnierite) のピークが確認された。

D 塊鉱石の選別結果を図 3-50 及び表 3-30 に示す。黄色の鉱石の Ni 品位が 1.1% (Upgrade 率で算出した品位は 0.96%) と高いが、図 3-52 の XRD パターンを見ると Serpentine であり、薄オレンジとの差がないため、色彩以外の情報で分類するのが難しいと言える。色彩だけで黄色を選択的に分類できれば 1%に近い鉱石を得ることが出来る可能性がある。

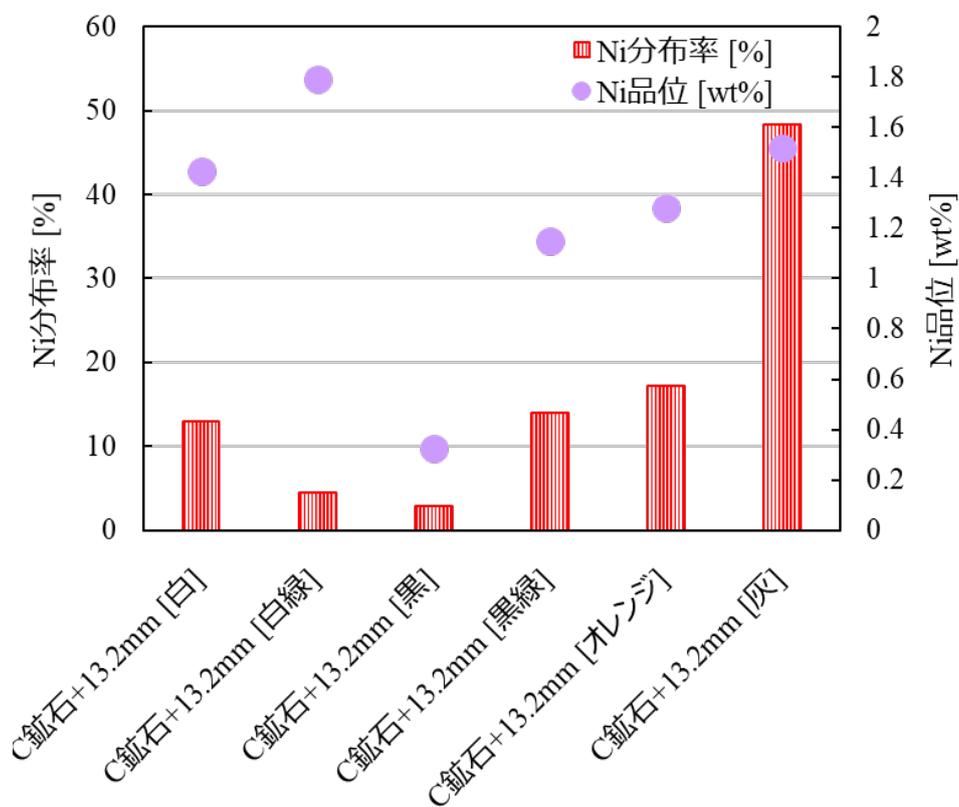


図 3-49 C 鉱石の色彩ごとの Ni 品位及び分布率

表 3-27 C 鉱石 手選別（色彩選別）の結果

分類	重量割合	Grade %		分布率 %	
	%	Ni	Fe	Ni	Fe
C 鉱石+13.2mm [白]	9.3	1.43	7.85	10.2	8.2
C 鉱石+13.2mm [白緑]	2.6	1.79	5.61	3.5	1.6
C 鉱石+13.2mm [黒]	9.2	0.32	5.28	2.3	5.4
C 鉱石+13.2mm [黒緑]	12.5	1.15	5.95	11.0	8.3
C 鉱石+13.2mm [オレンジ]	13.8	1.28	15.70	13.5	24.2
C 鉱石+13.2mm [灰]	32.7	1.52	7.25	37.9	26.3
C 鉱石+13.2mm [-1.18mm]	19.9	1.43	11.83	21.6	26.1

表 3-28 色彩ごとの組み合わせの結果（C 鉱石）

組み合わせ	重量割合 %	Ni 品位 %	Ni 分布率 %	Ni Upgrade
C 鉱石+13.2mm [白緑]	2.6	1.79	3.5	1.37
C 鉱石+13.2mm [白緑]+[灰]	35.3	1.54	41.4	1.17
C 鉱石+13.2mm [白緑]+[灰]+[白]	44.6	1.51	51.6	1.16
C 鉱石+13.2mm [白緑]+[灰]+[白]+[-1.18]	64.5	1.49	73.2	1.14
C 鉱石+13.2mm [白緑]+[灰]+[白]+[-1.18]+[オレンジ]	78.3	1.33	79.7	1.02
C 鉱石+13.2mm [白緑]+[灰]+[白]+[-1.18]+[オレンジ]+[黒緑]	90.8	1.31	90.6	1.00

表 3-29 13.2mm 以下との組み合わせの結果 (C 鉱石)

組み合わせ	重量割合 %	Ni 品位 % (Upgrade 率から算出)	Ni 分布率 %
C 鉱石-13.2mm	67.3	1.69	75.2
C 鉱石-13.2&+13.2mm [白緑]	68.2	1.69	76.0
C 鉱石-13.2&+13.2mm [白緑]+[灰]	78.8	1.64	85.4
C 鉱石-13.2&+13.2mm [白緑]+[灰] +[白]	81.9	1.63	88.0
C 鉱石-13.2&+13.2mm [白緑]+[灰] +[白]+[-1.18]	88.4	1.60	93.3
C 鉱石-13.2&+13.2mm [白緑]+[灰] +[白]+[-1.18]+[オレンジ]	92.9	1.55	94.9
C 鉱石-13.2&+13.2mm [白緑]+[灰] +[白]+[-1.18]+[オレンジ]+[黒緑]	97.0	1.52	97.7

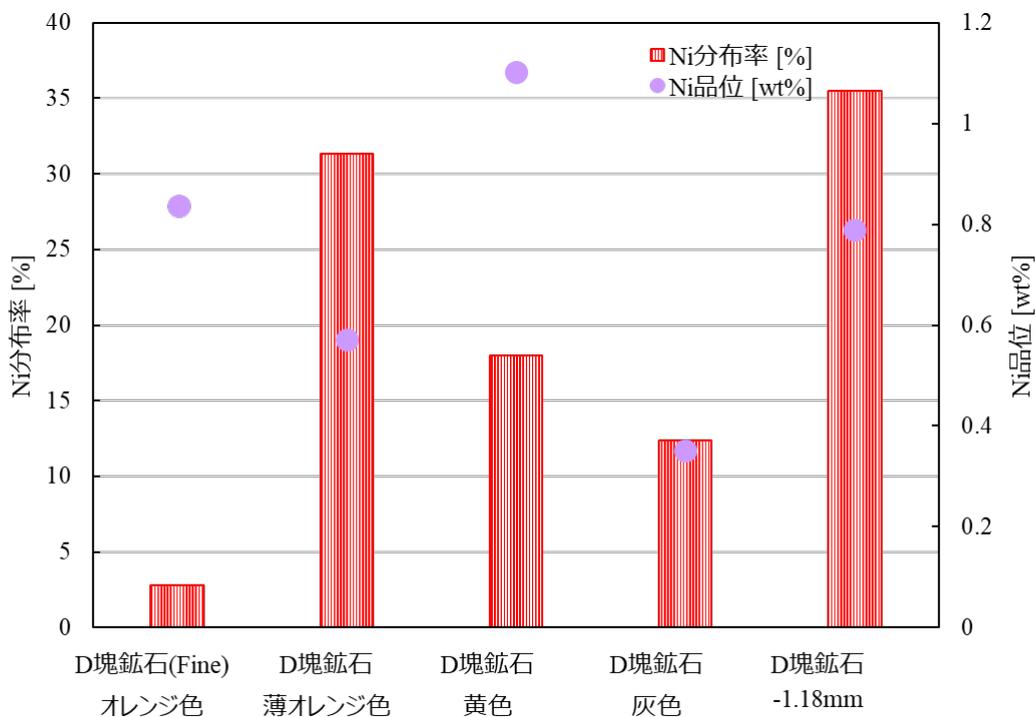


図 3-50 D 塊鉱石(Fine)の色彩ごとの Ni 品位及び分布率

表 3-30 D 塊鉱石(Fine) 手選別（色彩選別）の結果

分類	重量割合	Grade %		分布率 %		Ni Upgrade
	%	Ni	Fe	Ni	Fe	
D 塊鉱石(Fine) オレンジ色	2.2	0.84	7.27	2.8	2.8	1.29
D 塊鉱石(Fine) 薄オレンジ色	35.4	0.57	5.37	31.3	33.8	0.88
D 塊鉱石(Fine) 黄色	10.6	1.10	5.61	18.0	10.5	1.71
D 塊鉱石(Fine) 灰色	22.8	0.35	5.14	12.4	20.9	0.54
D 塊鉱石(Fine) -1.18mm	29.1	0.79	6.18	35.5	32.0	1.22

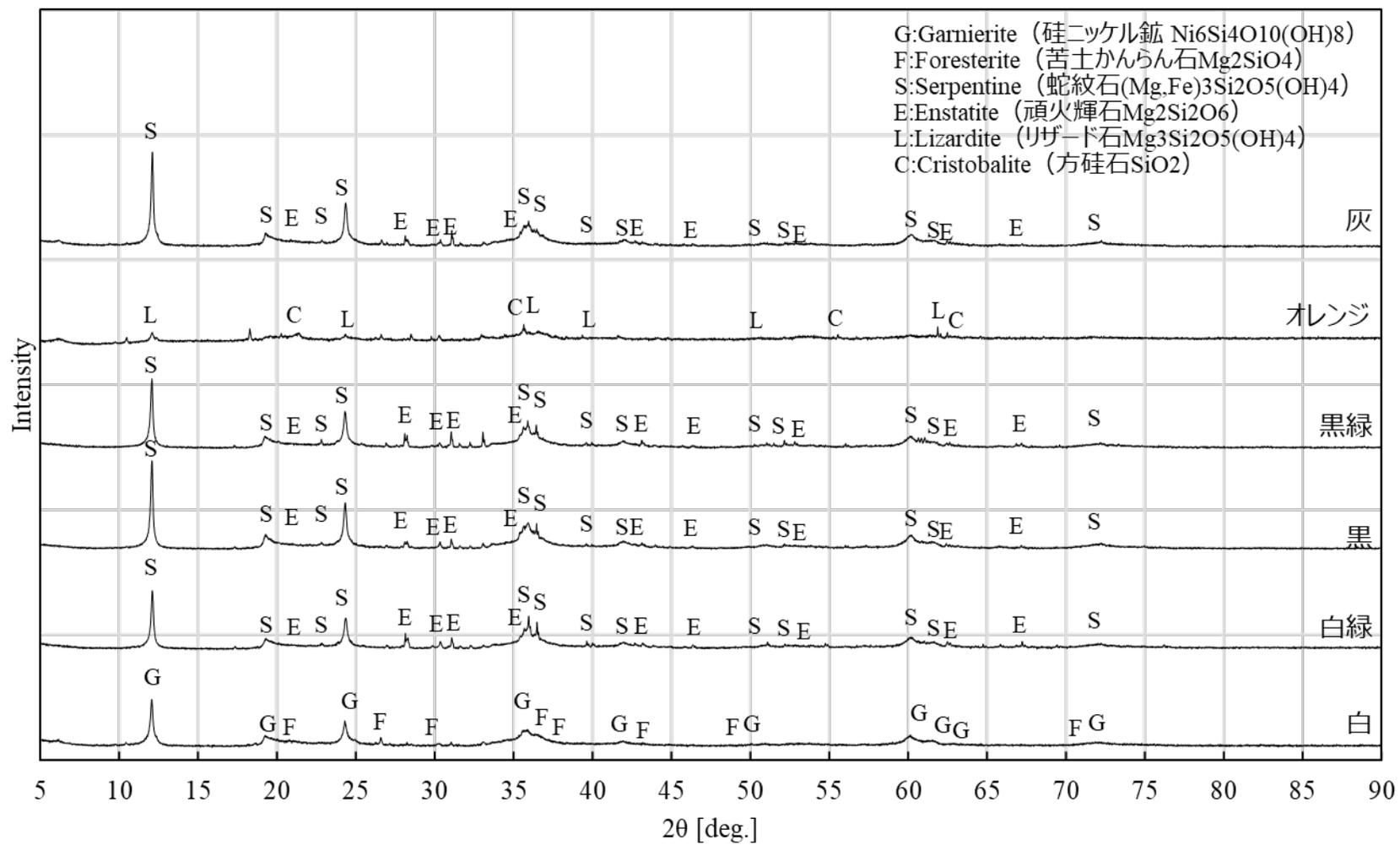


図 3-51 C 鉱石の色彩ごとの XRD 分析結果

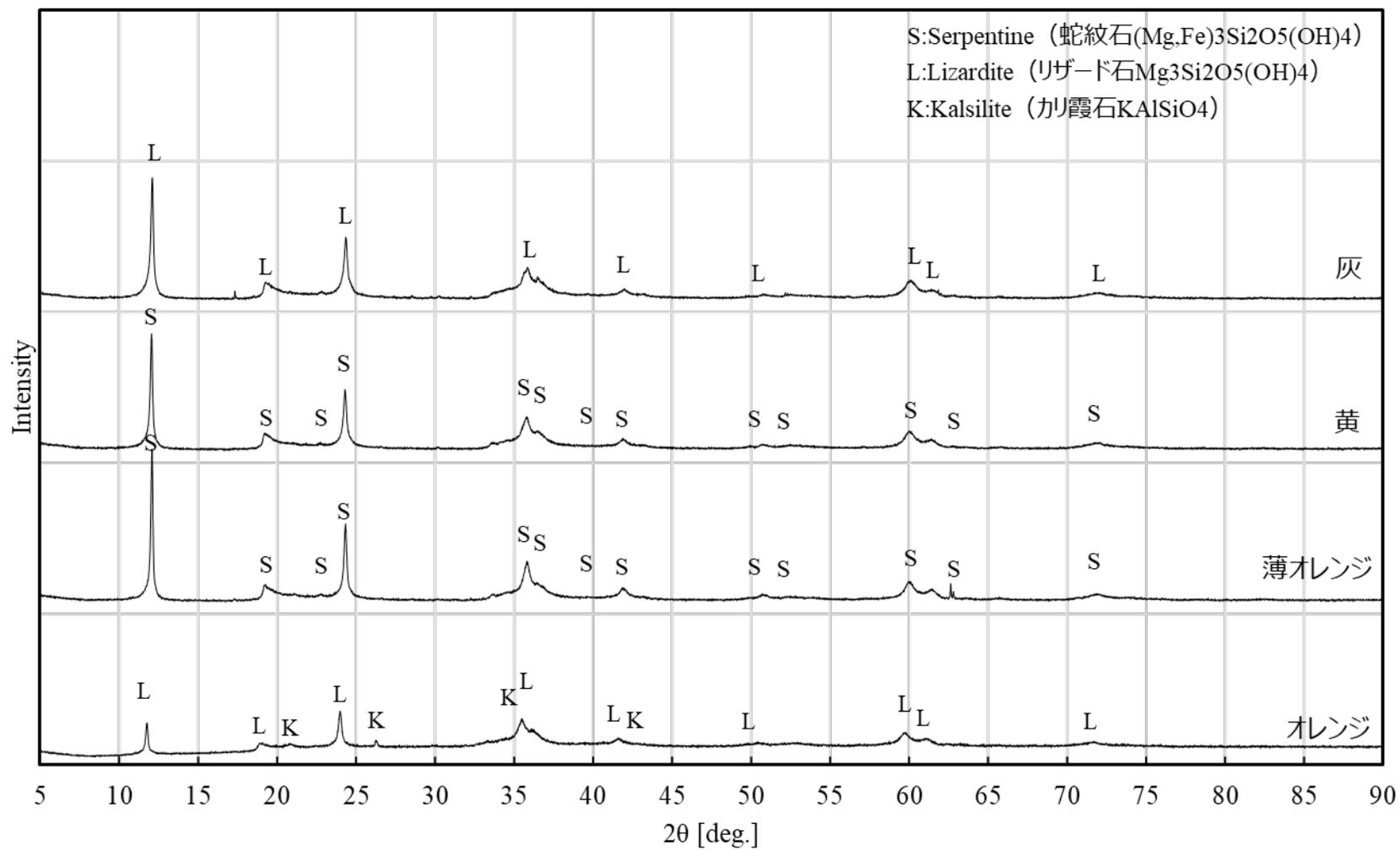


図 3-52 D 塊鉱石(Fine)の色彩ごとの XRD 分析結果

### 3-10 硫酸浸出試験

#### 3-10-1 目的

鉱石中の Ni 品位が低い D 塊鉱石については物理選別による品位向上とは別に酸浸出による鉱石からの Ni 回収可能性について検討する。また、粉砕と硫酸浸出を同時に行うことによる Ni 浸出高効率化の可能性について検討する。

#### 3-10-2 試験方法

酸浸出による鉱石からの Ni 回収可能性の検討については、酸浸出前に JOGMEC 金属資源技術研究所が所有する振動ミル（フリッチュ社/P-9）を用いて微粉砕を行った。粉砕と硫酸浸出を同時に行うことによる高効率な Ni 浸出の検討については、JOGMEC 金属資源技術研究所が所有するポットミル内で粉砕及び酸浸出を行った。

試験条件を表 3-31、試験フローを図 3-53 に示す。

##### 【微粉砕後の硫酸浸出】

- I. 振動ミルで数十  $\mu\text{m}$  以下程度まで微粉砕した試料 12g を 200mL ビーカーに入れる。
- II. 60mL の硫酸を加える。硫酸濃度は 1、3、6mol/L の三種類でそれぞれ試験を実施。
- III. 30 度、120rpm の条件で恒温振とう機内で 24 時間浸出させる。
- IV. 5C のろ紙によりろ過して浸出液及び残渣の ICP 分析を行う。

##### 【ポットミルを用いた粉砕中の硫酸浸出】

- V. ポットミルに D 塊鉱石（Fine）50g を入れ、3mol/L 硫酸 250mL を加える。
- VI. 91rpm、10 分間、ボール充填率 35% で粉砕
- VII. 5C のろ紙によりろ過して浸出液及び残渣の ICP 分析を行う。

表 3-31 硫酸浸出試験条件

条件	微粉砕浸出	ポットミル浸出
給鉱	D 塊鉱石（Fine）	D 塊鉱石（Fine）
給鉱重量	12g	50g
粉砕	振動ミル（微粉砕）	ポットミル
回転数	120rpm（恒温振盪機）	91rpm（ポットミル）
浸出・磨鉱時間	24h	10min
粉砕媒体充填率	-	35%

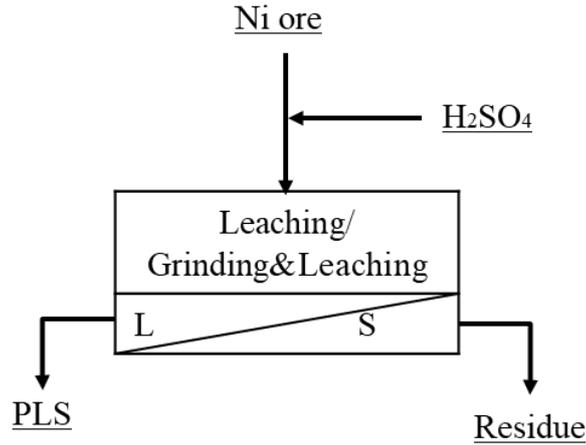


図 3-53 硫酸浸出試験フロー

3-10-3 試験結果

図 3-54 に D 塊鉱石の硫酸浸出試験結果を示す。微粉砕した場合、硫酸濃度 3mol/L 以上で高い浸出率が得られたが、ポットミルでは同じ硫酸濃度でも浸出率が低かった。ポットミルでは、反応時間の不足や粒径が大きく Ni 鉱物が十分に硫酸と接触できなかったため低浸出率となったと考えられ、粉砕時間を延ばすことで高い浸出率が得られる可能性がある。

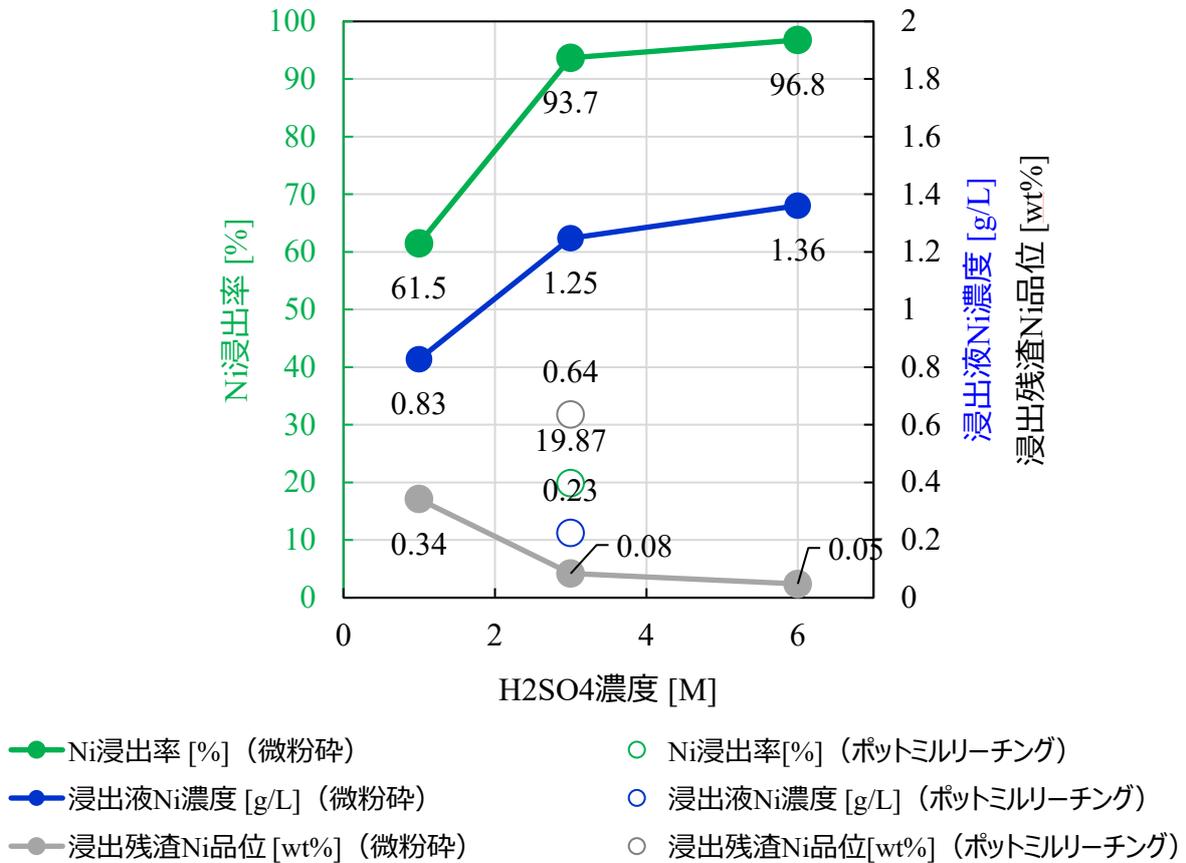


図 3-54 硫酸浸出試験結果

### 3-11 基礎選別試験まとめ

基礎選別試験としてポットミル粉砕、インテンシブミキサーによる粉砕（繰り返し含む）、インテンシブミキサーと重液選別の組み合わせ、アトライタ粉砕、HPGR を模擬したピストン試験、手選別（色彩選別）、硫酸浸出を実施した。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表 3-32 にまとめる。

また、図 3-55 に品位・回収率曲線上に試験結果をプロットしたものを示す。品位・回収率曲線は、目標とする Ni 品位と回収率を結んだ曲線であり、プロットが右上にあるほど良い成績であることを示す。D 塊鉱石については、製錬工程に入れる原料として Ni 品位 1.2%以上の品位を確保する必要があるため、1.2%を基準として作成されている。品位・回収率曲線を見ると、C 鉱石についてはインテンシブミキサーの一部の結果が曲線上部に位置しており、今回検討した選鉱方法の中でも最も期待できる手法と見られる。選鉱費用を考慮していないため、それを考慮すると利益には繋がらない結果といえるが、インテンシブミキサー試験では最適条件で実施できていないため、より良い成績が得られる可能性がある。一方、D 塊鉱石は、いずれの選鉱方法においても、Ni 品位 1.2%に届いておらず、現状では実用化に値しないものと言えるが、今後の Ni 価格次第では、実用化検討の可能性があると考えられる。以上の結果から、Ni の高品位化に最も効果があったのは、インテンシブミキサーによる粉砕であった。本スタディで検討した、ニッケル品位向上に対する各選別（粉砕）方法の適用可能性について以下に纏める。

ポットミル	粉砕力が高く、細粒部の重量が増えるため、Ni の回収率は他の粉砕機（インテンシブミキサー、アトライタ）に比べて高いが、Ni Upgrade 率がインテンシブミキサーに比べて低いため、選択粉砕性が低い。
インテンシブミキサー	今回試したのものの中では Ni Upgrade 率が最も高く、選択（表面）粉砕に最も適した粉砕機と考えられる。
重液選別	粉砕後の試料に対し比重選別を実施した場合、軽比重産物側の Ni 品位が高くなることが確認されたが、粒子同士の比重が非常に似通っており、設定する比重の値が少しでも変わると、品位が大きく変わるため、操業に適用する場合は経済性を考慮した上で、回収率を落としながら、高品位の Ni を回収するのが良いと考えられる。
アトライタ	Ni Upgrade も回収率も他に比べて低く、サプロライト鉱の選択粉砕には適さない粉砕機であると考えられる。
HPGR（模擬）	僅かではあるが、単体分離度の向上が確認された。SEM 画像では確認できなかったが、鉱物境界面にひび割れが発生していれば、選択粉砕と組み合わせることで選択粉砕効果が増す可能性がある。
手選別（色彩選別）	D 塊鉱石については手選別により、最も高品位の産物を得ることが出来たが、実操業への適用可能性については実際にカラーソータを用いた試験が必要である。

表 3-32 選別手法の比較

		C 鉱石 (+13.2mm)		C 鉱石合算 (+13.2mm Upgrade &-13.2mm)		D 塊鉱石		
		Ni Upgrade	回収率 (%)	Ni (%) +13.2mm は Upgrade 率から 算出	回収率 (%)	Ni Upgrade	Ni (%) Upgrade 率か ら算出	回収率 (%)
ポットミル	C 鉱石 : 充填率 20%, パルプ濃度 66% D 塊鉱石(Fine) : 充填率 35%, パルプ濃度 33%	1.48	48.1	1.65	85.1	1.26	0.71	39.2
インテンシブミキサー	C 鉱石 : 回転数 3000rpm, パルプ濃度 80% D 塊鉱石(Fine) : 回転数 6000rpm, パルプ濃度 80%	1.52	47.4	1.70	86.9	1.68	0.94	20.1
インテンシブミキサー繰り返し	C 鉱石 : 回転数 1500rpm, パルプ濃度 80% D 塊鉱石(Fine) : 回転数 6000rpm, パルプ濃度 80%	1.24	55.7	1.64	89.0	1.38	0.77	27.8
インテンシブミキサー繰り返し+重液選別	C 鉱石 : 比重 2.3 浮鉱			1.64	91.0			
アトライタ	C 鉱石 : 充填率 60%, パルプ濃度 66% D 塊鉱石(Fine) : 充填率 85%, パルプ濃度 66%	1.27	32.1	1.67	83.1	1.56	0.87	19.5
ピストン試験 (HPGR 模擬)	C 鉱石 : 150kN-2 回繰り返し D 塊鉱石(Coarse) : 200kN-2 回繰り返し	1.06	70.7	1.53	92.9	1.05	0.59	74.7
手選別	C 鉱石 : [白緑]+[灰]+[白]+[-1.18] D 塊鉱石(Fine) : [黄色]	1.16	78.3	1.6	93.3	1.71	0.96	18

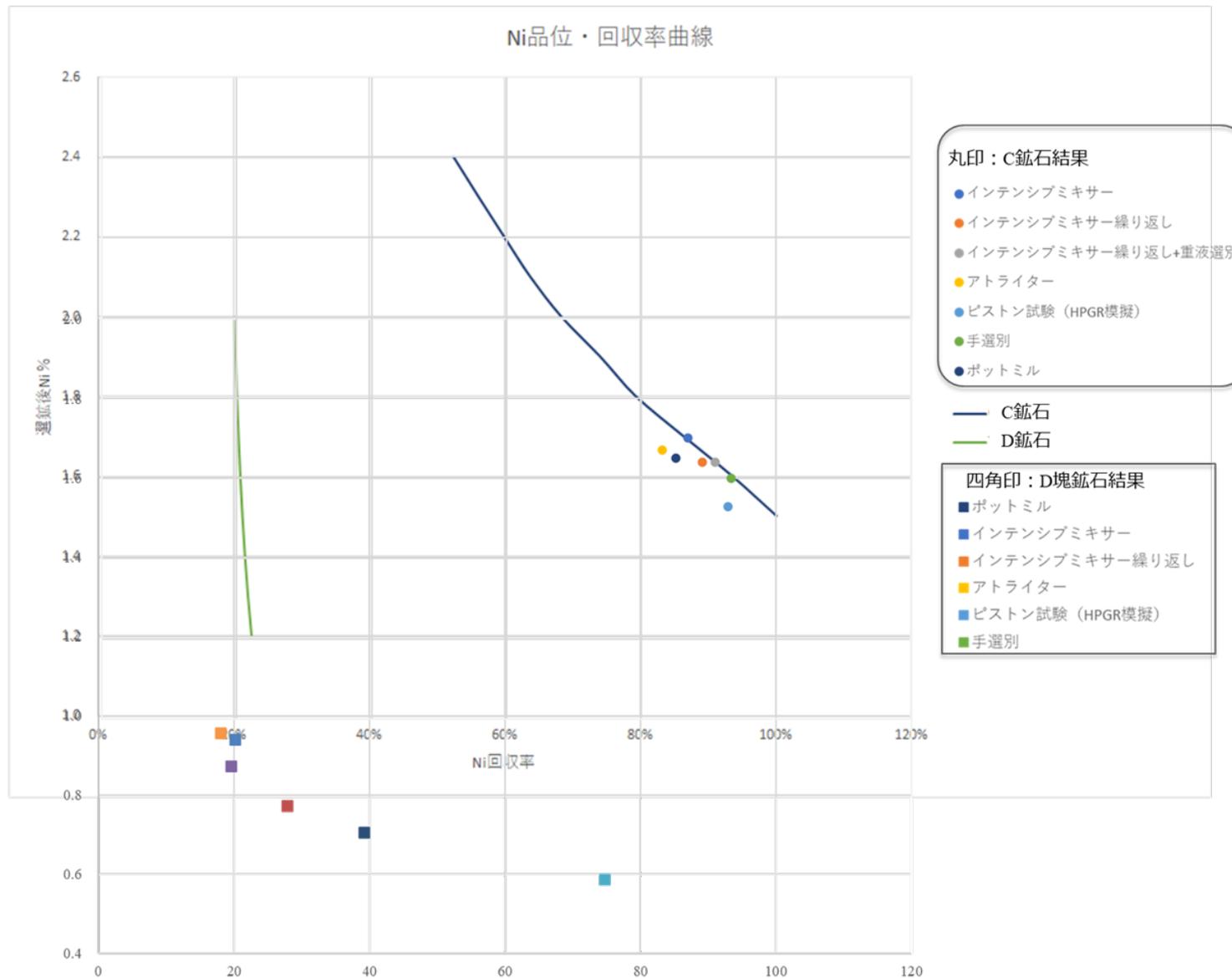


図 3-55 品位回収率曲線 (試験結果プロット)

#### 4 結言

スタディを通して、以下のことが明らかになった。

##### (1) 13.2mm での選別の効果

B 鉱石、C 鉱石については 13.2mm 以上の粒群がその他の粒群に比べて著しく品位が低いことから、13.2mm 以上の部分の Ni 品位を高めることで全体の Ni 品位が向上する可能性が高いことが示唆された。令和元年度に対象とした D 鉱石も同様の傾向がみられるため、13.2mm 以上の鉱石を対象とすることで、より良い結果が得られる可能性がある。

##### (2) C 鉱石

13.2mm 以上のサイズの鉱石のみを対象とし、様々な粉砕機を用いた表面粉砕によって品位向上効果を確認したところ、13.2mm 以下を対象とした過年度の結果と同様、表面粉砕による品位向上が確認された。中でも、インテンシブミキサー粉砕を行ったものは品位・回収率曲線上に位置する良好な結果が得られた。最適条件で繰り返し粉砕を実施していないため、追加で試験を行うことで曲線の上側に来る成績を得られる可能性がある。

##### (3) D 塊鉱石

大平洋金属株式会社にて粗破砕を行った状態の鉱石に対して、C 鉱石と同様、粉砕機を用いた表面粉砕を実施した。Ni 品位が 1%を超えることはなかったものの、それに近い品位まで向上出来ており、今後の Ni 価格次第では、取引対象となり得る可能性があると言える。

##### (4) 選択粉砕に適した粉砕機

どちらの鉱石に対しても最も有効であったインテンシブミキサー粉砕については今後も検討していくことで将来に備えることが出来ると考える。

## 5 スタディ結果に対する評価、提言

本スタディでは、これまでに比国の主要な5つの鉱山に産する6種類の低品位ニッケル鉱石を対象として、キャラクターゼーション及び基礎選別試験を実施してきた。その結果、産地によって各粒群の鉱物組成やニッケルの分布率に違いがあることが明らかになり、その違いが物理選鉱による富鉱化率に影響を及ぼすことが判明した。

令和3年度はこれまで試験対象としていなかった13.2mm以上の鉱石に着目し、特に13.2mm以下の鉱石とのNi品位差が大きく、富鉱化の可能性が高いC鉱石を対象に試験を実施し、目標とするNi品位、Ni回収率を達成することができた。また、現状では廃石となっているD塊鉱石についても同様に試験を実施し、目標品位の達成には至らなかったが、1%近くまでNi品位を向上させることができた。これらの結果から、Ni鉱山において製錬に供することができずに廃石となっている極低品位Ni鉱石の富鉱化の可能性について、一定の成果が得られたものとする。今後さらなる富鉱化、選鉱条件の最適化が期待される。

## 6 謝辞

インテンシブミキサー試験は早稲田大学理工学術院所研究室のインテンシブミキサーを、アトライタ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アトライタを、HPGR 模擬ピストン試験は秋田県産業技術センター所有の万能試験機を使用しました。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。ここに各組織及びご協力いただいた方への感謝の意を表します。