## 平成 31 年度

# 休廃止鉱山における 坑廃水処理の高度化調査研究事業

### 報告書

## 令和2年3月

独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構

## 目次

1.	業務概要	토	1-1		
1.1.	件名	۲	1-1		
1.2.	背景	背景及び目的1			
1.3.	事業	事業実施期間1			
1.4.	実旅	実施体制1-1			
1.5.	実旅	面内容	1-3		
1	.5.1.	地下水制御技術の調査研究	1-3		
	1.5.1.1.	鉱山関連データ等の収集	1-3		
	1.5.1.2.	休廃止鉱山の広域における水量シミュレーションモデルの精緻化	1-3		
	1.5.1.3.	休廃止鉱山の局所的範囲における水量シミュレーションモデルの精緻化	1-3		
	1.5.1.4.	休廃止鉱山における坑廃水発生に係る水質シミュレーションモデルの作成]	1-3		
	1.5.1.5.	休廃止鉱山における水量・水質シミュレーションモデルの作成	1-3		
	1.5.1.6.	1.5.1.2~1.5.1.5 章のシミュレーションモデルを用いた現況再現解析	1-4		
	1.5.1.7.	休廃止鉱山における水量シミュレーション及び水量・水質シミュレーション	Ó		
	効果予測	則解析結果に基づく鉱害防止対策の検討	1-4		
1	.5.2.	自然回帰型坑廃水浄化システム(以下「パッシブトリートメント」という。)	導		
フ	へに向けた	と調査研究1	1-4		
	1.5.2.1.	鉱山関連データ等の収集	1-4		
	1.5.2.2.	パッシブトリートメントの整備に向けた取組み	1-4		
	1.5.2.3.	パッシブトリートメントによる坑廃水処理の水質予測解析	1-4		
	1.5.2.4.	パッシブトリートメント導入ガイドライン作成に向けた検討	1-4		
1	.5.3.	委員会の設置、報告書の作成等	1-5		
2.	地下水制	削御技術の調査研究2.1	1-1		
2.1.	水理	里地質構造調査ボーリングによるデータ収集	1-1		
2	.1.1.	業務概要2.1	1-1		
	2.1.1.1.	概要2.1	1-1		
	2.1.1.2.	調査数量2.1	1-2		
	2.1.1.3.	工程表2.1	1-5		
	2.1.1.4.	地形地質概要2.1	1-7		
2	.1.2.	調查実施方針2.1	1-9		
2	.1.3.	調查手順2.1	1-9		
2	.1.4.	調查方法2.1-	-10		
	2.1.4.1.	調査ボーリング(ワイヤーライン工法)2.1-	-10		
	2.1.4.2.	ボーリングコア判定基準2.1-	-11		
	2.1.4.3.	透水試験(注水による岩盤の透水試験)2.1-	-14		
	(1)	試験の概要2.1-	-14		

(2)	試験用具	2.1-14
(3)	試験方法	2.1-15
2.1.4.4.	孔壁映像撮影	2.1-16
(1)	観察装置	2.1-16
(2)	画像解析	2.1-17
2.1.4.5.	孔内微流速測定	2.1-18
(1)	試験方法	2.1-18
2.1.4.6.	地下水採取	2.1-19
2.1.5.	調査結果	2.1-20
2.1.5.1.	資材搬入	2.1-20
2.1.5.2.	準備・設営作業	2.1-21
2.1.5.3.	ボーリング調査結果	2.1-22
(1)	0~4.1 m 表土	2.1-25
(2)	4.1~16.1 m 輝石安山岩	2.1-25
(3)	16.1~32.6 m 火山礫凝灰岩	2.1-26
(4)	32.6~42.50 m 凝灰岩	2.1-27
(5)	42.50~53.40 m 火山礫凝灰岩	2.1-28
(6)	53.40~74.60 m 凝灰岩	2.1-29
(7)	74.60~80.70 m 砂岩	2.1-32
(8)	80.70~110.00 m 輝石安山岩	2.1-33
2.1.5.4.	孔内水位観測結果	2.1-36
(1)	孔内水位	2.1-36
(2)	ポテンシャル水位(平衡水位)	2.1-37
2.1.5.5.	孔壁画像撮影結果	2.1-38
2.1.5.6.	透水試験結果(注水による岩盤の透水試験)	2.1-45
2.1.5.7.	孔内微流速測定結果	2.1-47
2.1.5.8.	孔曲がり測定結果	2.1-49
2.1.5.9.	地下水観測孔仕上げ	2.1-50
2.1.5.10.	自動観測・記録装置の設置	2.1-51
2.1.5.11.	固体分析結果	2.1-53
(1)	研磨薄片観察	2.1-53
(2)	粉末 X 線解析(XRD 分析)	2.1-65
(3)	蛍光 X 線解析(XRF 分析)	2.1-71
2.1.5.12.	水質分析結果	2.1-76
2.1.6.	総合解析	2.1-83
2.1.6.1.	地質層序	2.1-83
2.1.6.2.	掘削関連情報の対比	2.1-86
2.1.6.3.	断裂分布(不連続面解析)	2.1-88

(1)	ヘアークラック	2.1-88
(2)	開口亀裂	2.1-90
(3)	鉱物脈	2.1-92
(4)	鉱染脈	2.1-94
2.2. 地下	「水制御に資する地下水・地表水統合解析モデルの構築・改良及び	バそれを用いた坑
廃水量削減に	-資する対策工の効果予測解析	2.2-1
2.2.1.	資料収集整理及び現地調査	2.2-1
2.2.1.1.	不足するデータの抽出と追加収集・整理	2.2-1
(1)	気象情報	2.2-1
(2)	地質情報	2.2-14
(3)	鉱山関連情報	2.2-16
2.2.1.2.	現地調査	2.2-18
(1)	河川流量一斉観測	
(2)	河川流量連続観測	2.2-29
(3)	河川水質一斉観測	2.2-33
(4)	地質調査	2.2-35
2.2.1.3.	水質分析	
(1)	試料採取箇所	
(2)	実施結果	
2.2.2.	広域の地下水・地表水流動シミュレーションモデルの修正	
2.2.2.1.	水理地質構造の修正	
(1)	地下地質構造のモデル化	
(2)	三次元数値シミュレーションモデルの構築	
2.2.2.2.	現況再現解析	2.2-78
(1)	検証の考え方	2.2-78
(2)	解析コード	2.2-78
(3)	解析条件	2.2-78
(4)	マッチング経緯	
2.2.2.3.	坑廃水量及び河川流量観測結果を検証したシミュレーションモ	デルの評価2.2-
90		
(1)	河川流量	
(2)	坑内排水量	
(3)	湧水量分布	
(4)	積雪深	2.2-99
(5)	年代トレーサ濃度	
(6)	流動経路	
2.2.3.	坑道範囲周辺(局所)の地下水・地表水流動シミュレーションモ	テルの構築 .2.2-
104		

iii

2.2.3.1.	局所モデルの構築	2.2-104
(1)	対象領域の設定	2.2-104
(2)	陸面過程のモデル化	2.2-105
(3)	三次元数値シミュレーションモデルの構築	2.2-106
2.2.3.2.	現況再現解析	2.2-107
(1)	検証の考え方	2.2-107
(2)	解析条件	2.2-107
2.2.3.3.	坑内排水量、河川流量観測結果を検証対象としたシミュレーショ	ョンモデルの評
価	2.2-110	
(1)	河川流量	2.2-110
(2)	坑内排水量	2.2-111
2.2.4.	水量・水質シミュレーションモデルの構築	2.2-112
2.2.4.1.	連成解析ツールの概要	2.2-112
(1)	連成解析ツール要件	2.2-112
(2)	解析手順	2.2-112
2.2.4.2.	検証の考え方	2.2-113
2.2.4.3.	概略モデルを用いた感度解析	2.2-114
(1)	解析条件	2.2-114
2.2.4.4.	現況再現解析	2.2-122
(1)	解析条件	2.2-122
(2)	解析結果	2.2-123
2.2.5.	鉱害防止対策工の検討及び効果予測解析	2.2-126
2.2.5.1.	鉱害防止対策工の基本検討及び効果解析検討ケースの抽出	2.2-126
2.2.5.2.	鉱害防止対策工の効果予測解析	2.2-127
(1)	鉱害防止対策工のモデル化	2.2-127
(2)	解析結果	2.2-130
2.2.5.3.	鉱害防止対策工の水質変化予測解析	2.2-132
2.2.6.	参考文献	2.2-134
2.2.6.1.	文献一覧	2.2-134
2.3. 坑虜	<b>逐水発生の水質予測モデルの構築</b>	2.3-1
2.3.1.	昨年度の検討内容及び課題	2.3-1
2.3.1.1.	旧松尾鉱山における酸性坑廃水生成シミュレーション及び将来予	予測モデルの検
討	2.3-1	
(1)	黄鉄鉱の溶解モデルの検討	2.3-1
(2)	旧松尾鉱山における酸性坑廃水の水質将来予測	2.3-1
2.3.2.	旧松尾鉱山における坑廃水発生モデル及び将来予測モデルの構築	2.3-3
2.3.2.1.	溶出試験に基づく各種硫化鉱物の溶出速度の評価	2.3-3
(1)	硫化鉱物の前処理方法ならびに溶出実験の最適条件の検討	2.3-3

(2)	模擬地下水に対する各種硫化鉱物溶出速度モデルの構築	2.3-5
(3)	溶出試験結果のまとめ	2.3-7
2.3.2.2.	ボーリングコア観察に基づく旧松尾鉱山坑廃水生成プロセスの検討	2.3-9
(1)	全岩化学組成分析結果	2.3-9
(2)	コア研磨片観察結果	2.3-10
2.3.2.3.	水量日変動を考慮した旧松尾鉱山の酸性坑廃水発生予測モデルの検討…	2.3-14
(1)	使用したタンクモデル概要	2.3-14
(2)	旧松尾鉱山周辺の降水量の補正計算	2.3-15
(3)	旧松尾鉱山水量の水量予測結果	2.3-17
(4)	気候変動を考慮した坑廃水の水量変動予測	2.3-18
(5)	気候変動及び坑廃水量の変動を考慮した坑廃水の水質変動予測	2.3-19
2.3.2.4.	まとめ	2.3-21
(1)	旧松尾鉱山における坑廃水発生予測及び将来予測モデルの構築	2.3-21
(2)	水量日変動を考慮した旧松尾鉱山の酸性坑廃水発生予測モデルの検討	2.3-21
2.3.3.	参考文献	2.3-22
2.4. 地下	「水制御ガイドライン	2.4-1
2.4.1.	ガイドラインの作成目的・方針	2.4-1
2.4.1.1.	目的	2.4-1
2.4.1.2.	作成方針	2.4-1
2.4.2.	ガイドライン目次(案)	2.4-2
2.4.3.	各章の作成方針	2.4-3
2.4.3.1.	「1 章 はじめに」の作成方針	2.4-3
(1)	1.1 章 ガイドラインの目的	2.4-3
(2)	1.2 章 ガイドラインの適用範囲	2.4-3
(3)	1.3 章 全体の構成	2.4-3
2.4.3.2.	「2章 鉱害防止事業について」の作成方針	2.4-3
2.4.3.3.	「3章 坑廃水量削減に向けた情報整理」の作成方針	2.4-3
(1)	3.1 章 必要な情報	2.4-3
(2)	3.2 章 情報の整理・収集方法	2.4-3
2.4.3.4.	「4章 坑廃水量削減のための解析手法」の作成方針	2.4-3
(1)	4.1 章 坑廃水量削減のための解析手法の概要	2.4-3
(2)	4.2章 数値シミュレーション手法(水量)	2.4-4
(3)	4.3章 数値シミュレーション手法(水質)	2.4-4
(4)	4.4 章 統計解析手法	2.4-4
2.4.3.5.	「5 章 鉱山地域における水量シミュレーションモデルの構築」の作	□成方針
	2.4-4	
(1)	5.1章 鉱山地域における水量シミュレーションモデル構築の手順	2.4-4
(2)	5.2章 鉱山地域における水量シミュレーションモデル構築に必要なデータ	92.4-4

(3)	5.3 章 鉱山地域における水量シミュレーションモデルの構築	2.4-4
(4)	5.4 章 水量シミュレーションモデルの検証	2.4-4
2.4.3.6.	「6 章 鉱山地域における水量・水質シミュレーションモデルの構築」	の作成
方針	2.4-4	
2.4.3.7.	「7 章 統計解析」の作成方針	2.4-5
2.4.3.8.	「8章 地下水制御に係る発生源対策」の作成方針	2.4-5
(1)	8.1 章 発生源対策	2.4-5
(2)	8.2章 予測解析	2.4-5
(3)	8.3 章 評価方法	2.4-5
2.4.3.9.	「(別冊)旧松尾鉱山での事例」の作成方針	2.4-5
(1)	<ol> <li>旧松尾鉱山について</li> </ol>	2.4-5
(2)	2. 旧松尾鉱山におけるシミュレーションモデルの構築	2.4-5
(3)	3. 旧松尾鉱山におけるシミュレーションモデルを用いた現況解析	2.4-5
(4)	4. 旧松尾鉱山におけるシミュレーションモデルを用いた予測解析	2.4-5
3. 自然回帰	帚型坑廃水浄化システム導入に向けた調査研究	3.1-1
3.1. 人口	二湿地型	3.1-1
3.1.1.	業務概要	3.1-1
3.1.1.1.	目的	3.1-1
3.1.1.2.	実施内容	3.1-1
3.1.2.	坑廃水のデータの収集及び解析	3.1-2
3.1.2.1.	方法	3.1-2
(1)	流量及びサンプルリング	3.1-2
(2)	水質分析	3.1-2
3.1.2.2.	結果	3.1-3
(1)	水圧	3.1-3
(2)	流量・水質	3.1-5
3.1.2.3.	既往の研究情報	3.1-7
(1)	人工湿地のコンセプト	3.1-7
(2)	文献調查	3.1-8
3.1.3.	現地連続処理試験	3.1-10
3.1.3.1.	連続処理試験	3.1-10
(1)	目的	3.1-10
(2)	試験方法	3.1-10
(3)	試験結果	3.1-15
(4)	現地試験まとめ	3.1-24
3.1.3.2.	室内試験	3.1-25
(1)	石灰石の成分分析	3.1-25
(2)	石灰石による中和実験	3.1-27

(3)	炭酸カルシウムの溶解実験	3.1-28
(4)	室内試験まとめ	3.1-34
3.1.3.3.	PHREEQC による思考実験	3.1-35
(1)	シミュレーション①	3.1-35
(2)	シミュレーション②	3.1-39
(3)	シミュレーション③	3.1-40
(4)	全炭酸低濃度でのバッチ試験	3.1-44
(5)	思考実験まとめ	3.1-47
3.1.3.4.	試験結果まとめ	3.1-47
3.1.4.	実規模相当実証試験の準備	
3.1.4.1.	処理プロセスの検討	
3.1.4.2.	試験設備の設計	
3.1.5.	自然回帰型坑廃水浄化システムの導入による効果の検討	
3.1.5.1.	導入コスト試算	
3.1.5.2.	コスト削減について	3.1-51
3.1.6.	自然回帰型坑廃水浄化システムの導入ガイドライン作成に資する情	報の整理.3.1-
54		
3.1.7.	中和水路型処理の中和剤等の追加検討	3.1-55
3.1.7.1.	石灰石を用いた中和水路型処理の課題	
3.1.7.2.	バッチ試験による検討	3.1-56
(1)	検討した中和剤の種類及び性状	3.1-56
(2)	バッチ試験の実施方法及び条件	3.1-57
(3)	バッチ試験の結果及び考察	3.1-59
3.1.7.3.	まとめ	3.1-69
3.1.8.	参考文献	3.1-72
3.2. 微生	生物活用型	
3.2.1.	目的	
3.2.2.	調査の内容	
3.2.2.1.	コスト削減/省エネ化のための現状把握(平成 30 年度)	
3.2.2.2.	処理プロセスの特性把握と最適化(平成 30 年度)	
(1)	坑廃水に係るデータの収集及び解析	
(2)	坑廃水データの解析結果に基づく処理プロセスの設計	
3.2.2.3.	実処理規模の設備設置検討(平成 30 年度)	
(1)	測量・地盤調査業務	
(2)	設計及び設置費用見積の作成	
3.2.2.4.	実処理規模実証試験設備の設計・施工	
(1)	坑廃水データの収集及び解析業務(継続)	
(2)	小型試験装置による連続処理試験業務(現地実証及び評価実施)…	

(3)	実規模相当実証試験の準備(設計・施工、年内完工)	3.2-3
(4)	自然回帰型坑廃水浄化システムの導入による効果の検討	3.2-3
3.2.3.	坑廃水データの収集及び解析業務(継続)	3.2-4
3.2.3.1.	B 鉱山概要	3.2-4
3.2.3.2.	現行の坑廃水処理システム	3.2-4
3.2.3.3.	坑廃水発生量調査	3.2-7
3.2.4.	小型試験装置による連続処理試験業務	3.2-10
3.2.4.1.	SRB 処理プロセスの検討	3.2-10
3.2.4.2.	試験の目的	3.2-10
3.2.4.3.	試験系について	3.2-10
3.2.4.4.	石灰水路 中和試験(a) 基礎試験(ビーカー試験)の結果	3.2-11
3.2.4.5.	石灰水路 中和試験(b) 現地試験(小型水路試験)の結果	3.2-15
3.2.4.6.	管理方法	3.2-17
3.2.4.7.	重金属処理用バイオプロセスの検討	3.2-18
3.2.5.	実規模相当実証試験の準備	3.2-23
3.2.5.1.	SRB 処理法の概要	3.2-23
3.2.5.2.	最終規模における設計概念	3.2-24
3.2.5.3.	SRB 処理法の実規模設備設置	3.2-25
3.2.6.	自然回帰型坑廃水浄化システムの導入による効果の検討	3.2-28
3.2.6.1.	ランニングコスト削減効果	3.2-28
3.2.6.2.	バイオプロセス導入で期待されるランニングコスト低減以外の効果	3.2-29
3.3. 人	工湿地・微生物/植物併用型もしくはその他の型について	3.3-1
3.3.1.	目的	3.3-1
3.3.2.	対象鉱山の概要	3.3-1
3.3.2.1.	対象鉱山の概要	3.3-1
3.3.2.2.	対象鉱山の鉱害対策状況	3.3-1
3.3.2.3.	実証処理試験の実施場所	3.3-1
3.3.2.4.	実証処理試験の処理原水	3.3-3
3.3.3.	小型試験装置処理試験	3.3-5
3.3.3.1.	腐葉土の測定	3.3-5
(1)	目的	3.3-5
(2)	腐葉土の測定項目	3.3-6
3.3.3.2.	処理原水の前処理試験	3.3-8
(1)	目的	3.3-8
(2)	前処理試験方法	3.3-8
(3)	前処理試験結果	3.3-10
(4)	前処理試験結果のまとめ	3.3-14
3.3.3.3.	小型試験装置による処理試験	3.3-15

(1)	目的	
(2)	小型試験装置の設計条件	
(3)	測定項目及び分析項目	
(4)	小型試験装置の設置	
(5)	小型試験装置の処理結果	
(6)	硫酸還元反応確認試験	
(7)	前処理設備の処理効果	
(8)	通水終了時の資材の成分分析	
(9)	過年度試験との比較	
(10)	小型試験装置のまとめと実証処理装置への適用	
(11)	実証処理試験へ供する原水の前処理について	
(12)	実証処理試験における通水速度の設定について	
(13)	実証処理試験における設計条件のまとめ	
3.3.4.	実証処理装置における試運転	
3.3.4.1.	試験の目的	
3.3.4.2.	実証処理装置の設計製作	
(1)	設計条件	
(2)	処理フローシート	
(3)	配置計画	
(4)	水槽計画図	
(5)	坑内の配置状況	
(6)	測定項目と分析項目	
(7)	試運転条件の変更及び資材調整	
(8)	試運転結果	
3.3.4.3.	試運転の追試	
(1)	試験の目的	
(2)	測定項目と分析項目	
(3)	追試の条件	
(4)	資材調整状況	
(5)	試運転の追試の結果	
3.3.4.4.	令和元年度の試験結果のまとめと次年度の改善検討	
(1)	令和元年度の試験結果と課題	
(2)	令和2年度の改善・改造案	
3.4. 水貿	〔予測モデルを用いたパッシブトリートメント導入の事前検討	
3.4.1.	昨年度の検討内容及び課題	
3.4.1.1.	人工湿地によるパッシブトリートメントの水質シミュレーション	/モデルの検討
	3.4-1	
3.4.2.	水質予測モデルを用いたパッシブトリートメント導入の事前検討	

3.4.2.1.	パッシブトリートメント適用フローシートの作成	3.4-2
(1)	坑廃水の負荷量の計算	3.4-3
(2)	鉄処理の必要性の検討及び処理方法の選択	3.4-3
(3)	嫌気処理方法の選択	3.4-4
3.4.2.2.	パッシブトリートメント適用フローシートによる 13 鉱山への適用検討.	3.4-6
(1)	13 鉱山坑廃水の負荷量の計算結果	3.4-7
(2)	Fe 処理の検討	3.4-8
(3)	本庫型浸透流型湿地導入の可能性についての検討	3.4-11
3.4.2.3.	まとめ及び今後の課題	3.4-23
3.4.3.	参考文献	3.4-24
3.5. パッ	,シブトリートメント導入に向けたガイドライン	3.5-1
3.5.1.	ガイドラインの目的・作成方針	3.5-1
3.5.1.1.	目的	3.5-1
3.5.1.2.	作成方針	3.5-1
3.5.2.	ガイドライン目次(案)	3.5-1
3.5.3.	各章の作成方針	3.5-3
3.5.3.1.	「1 章 はじめに」の作成方針	3.5-3
(1)	1.1 章 ガイドラインの目的	3.5-3
(2)	1.2 章 ガイドラインの適用範囲	3.5-3
(3)	1.3 章 全体の構成	3.5-3
(4)	1.4 章 坑廃水処理の課題	3.5-3
3.5.3.2.	「2章 パッシブトリートメントの概要」の作成方針	3.5-3
(1)	2.1 章 パッシブトリートメントの概要	3.5-3
(2)	2.2章 各プロセスの特徴	3.5-3
(3)	2.3 章 パッシブトリートメント各プロセスのまとめ	3.5-3
3.5.3.3.	「3章 パッシブトリートメント適用可能性の検討方法」の作成方針	3.5-4
(1)	3.1 章 水量の把握	3.5-4
(2)	3.2 章 水質の把握	3.5-4
(3)	3.3章 菌叢の把握	3.5-4
(4)	3.4 章 地形(立地)条件の把握	3.5-4
(5)	3.5章 気象条件の把握	3.5-5
(6)	3.6 章 水質シミュレーションを用いた解析	3.5-5
(7)	3.7 章 パッシブトリートメント適用可能性の検討	3.5-5
(8)	3.8 章 パッシブトリートメントの型の決定	3.5-5
3.5.3.4.	「4章 パッシブトリートメント事前調査方法」の作成方針	3.5-5
(1)	4.1 章 基礎試験	3.5-5
(2)	4.2章 連続試験	3.5-6
(3)	4.3章 コスト比較	3.5-6

	(4)	4.4 章	リスク評価	
	3.5.3.5.	۲ <b>5</b> ±	章 パッシブトリートメント導入方法」の作成方針	
	(1)	5.1章	設計・施工	
	(2)	5.2 章	システムの立ち上げ・運転	
	(3)	5.3 章	維持管理	
	3.5.3.6.	6章.	以降の作成方針	
4. <i>i</i>	総論			4-1
4.1	. 地下7	水制御技	術の調査研究	4-1
4.2	. 自然回	回帰型坑	廃水浄化システム導入に向けた調査研究	4-3

### 図目次

义	1-1	実施体制	
义	1-2	旧松尾鉱山の位置	1-3
汊	2.1-1	調査位置図(広域図) 国土地理院 地理院地図	2.1-7
义	2.1-2	調查位置図 国土地理院 地理院地図	2.1-7
义	2.1-3	調査地周辺の地質図	2.1-8
义	2.1-4	地質層序	2.1-8
义	2.1-5	ボーリング作業手順	2.1-9
义	2.1-6	コアバーレル	2.1-10
义	2.1-7	オーバーショット(回収冶具)	2.1-10
义	2.1-8	コア採取の状況と RQD 表示との関係	2.1-12
义	2.1-9	透水試験概要図	2.1-14
义	2.1-1	0 BIP システムの構成図(現場システム)	2.1-16
义	2.1-1	1 ボアホールと亀裂の関係	2.1-17
义	2.1-12	2 孔内微流速測定(スピナー式)測定状況概要図	2.1-18
义	2.1-1	3 ベーラーサンプラー	2.1-19
义	2.1-14	4 調査位置図	2.1-20
义	2.1-1	5 県道からの進入路入り口の状況	2.1-20
义	2.1-1	6 作業ヤードの伐採整地状況	2.1-21
义	2.1-1	7 ボーリングマシン仮設状況写真	2.1-21
义	2.1-1	8 深度 6.6 m 付近の安山岩溶岩	2.1-25
义	2.1-1	9 深度 10.4 m 付近の安山岩溶岩	2.1-25
义	2.1-2	0 深度 23.7 m 付近の火山礫凝灰岩	2.1-26
叉	2.1-2	1 深度 17.6 m 付近の火山礫凝灰岩	2.1-26
义	2.1-22	2 深度 36.5 m 付近の凝灰岩	2.1-27
义	2.1-2	3 深度 44.8 m 付近の火山礫凝灰岩	2.1-28

図 2.1-24	深度 52.6 m 付近の火山礫凝灰岩	2.1-28
図 2.1-25	深度 54.10 m 付近の凝灰岩	2.1-29
図 2.1-26	深度 55.80 m 付近の凝灰岩	2.1-29
図 2.1-27	深度 56.00 m 付近の凝灰岩	2.1-30
図 2.1-28	深度 60.80 m 付近の凝灰岩	2.1-30
図 2.1-29	深度 73.40 m 付近の凝灰岩	2.1-31
図 2.1-30	深度 78.80 m 付近の砂岩	2.1-32
図 2.1-31	深度 107.10 m 付近の安山岩	2.1-33
図 2.1-32	深度 109.20 m 付近の安山岩	2.1-33
図 2.1-33	ボーリングコア写真(4.10~110 m)	2.1-35
図 2.1-34	孔内水位測定結果	2.1-36
図 2.1-35	ポテンシャル水位測定結果	2.1-37
図 2.1-36	深度 15.7~16.00 m 間の孔壁展開画像	2.1-38
図 2.1-37	深度 29.50~29.80 m 間の孔壁展開画像	2.1-38
図 2.1-38	深度 35.40~35.70 m 間の孔壁展開画像	2.1-39
図 2.1-39	深度 45.60~45.90 m 間の孔壁展開画像	2.1-39
図 2.1-40	深度 49.00~51.00m 間の孔壁展開画像	2.1-40
図 2.1-41	深度 72.00~72.30 m 間の孔壁展開画像	2.1-41
図 2.1-42	深度 75.00~75.30 m 間の孔壁展開画像	2.1-41
図 2.1-43	深度 78.00~78.30 m 間の孔壁展開画像	2.1-42
図 2.1-44	深度 83.20~83.50 m 間の孔壁展開画像	2.1-42
図 2.1-45	深度 86.40~86.70 m 間の孔壁展開画像	2.1-43
図 2.1-46	深度 104.40~104.70 m 間の孔壁展開画像	2.1-43
図 2.1-47	深度 107.30~107.70 m 間の孔壁展開画像	2.1-44
図 2.1-48	透水試験結果(Stage1~Stage10)	2.1-46
図 2.1-49	孔内微流速測定結果	2.1-47
図 2.1-50	孔跡断面図(A-2)	2.1-49
図 2.1-51	孔跡平面図(A-2)	2.1-49
図 2.1-52	孔曲計測結果写真(A-2 110 m)	2.1-49
図 2.1-53	有孔管のストレーナ仕様	2.1-50
図 2.1-54	観測井戸構造図	2.1-50
図 2.1-55	自動観測・記録装置概念図	2.1-51
図 2.1-56	自記記録による孔内水位観測結果	2.1-52
図 2.1-57	A-2 No.1 39.20-39.40 m	2.1-55
図 2.1-58	A-2 No.1 39.20-39.40 m	2.1-56
図 2.1-59	A-2 No.2 57.50-57.60 m	2.1-57
図 2.1-60	A-2 No.2 57.50-57.60 m	2.1-58
図 2.1-61	A-2 No.3 72.60-72.80 m	2.1-59

図 2.1-62	A-2 No.3 72.60-72.80 m	2.1-60
図 2.1-63	A-2 No.4 78.35-78.50 m	2.1-61
図 2.1-64	A-2 No.4 78.35-78.50 m	2.1-62
図 2.1-65	A-2 No.5 101.60-101.70 m	2.1-63
図 2.1-66	A-2 No.5 101.60-101.70 m	2.1-64
図 2.1-67	試料名:A-2 No.1 39.20-39.40 m	2.1-66
図 2.1-68	試料名:A-2 No.1 39.20-39.40 m	2.1-66
図 2.1-69	試料名:A-2 No.2 57.50-57.60 m	2.1-67
図 2.1-70	試料名:A-2 No.2 57.50-57.60 m	2.1-67
図 2.1-71	試料名:A-2 No.3 72.60-72.80 m	2.1-68
図 2.1-72	試料名:A-2 No.3 72.60-72.80 m	2.1-68
図 2.1-73	試料名:A-2 No.4 78.35-78.50 m	2.1-69
図 2.1-74	試料名:A-2 No.4 78.35-78.50 m	2.1-69
図 2.1-75	試料名:A-2 No.5 101.60-101.70 m	2.1-70
図 2.1-76	試料名:A-2 No.5 101.60-101.70 m	2.1-70
図 2.1-77	元素構成比	2.1-73
図 2.1-78	$SiO_2 vs Na_2O + K_2O \boxtimes$	2.1-74
図 2.1-79	ハーカー図	2.1-75
図 2.1-80	ベーラーサンプラー	2.1-76
図 2.1-81	各分析項目の分析値	2.1-78
図 2.1-82	各分析項目の構成比	2.1-78
図 2.1-83	ヘキサダイアグラム	2.1-81
図 2.1-84	トリリニアダイアグラム	2.1-81
図 2.1-85	ヘキサダイアグラムとトリリニアダイアグラムによる水質の表示例	2.1-82
図 2.1-86	表層地質図 (旧建設資料,1955)	2.1-83
図 2.1-87	旧松尾鉱山付近の地質柱状図	2.1-84
図 2.1-88	見かけ傾斜図(ヘアークラック)	2.1-88
図 2.1-89	π・カウントダイアグラム(ヘアークラック)	2.1-89
図 2.1-90	見かけ傾斜図(開口亀裂)	2.1-90
図 2.1-91	π・カウントダイアグラム(開口亀裂)	2.1-91
図 2.1-92	見かけ傾斜図(鉱物脈)	2.1-92
図 2.1-93	π・カウントダイアグラム(鉱物脈)	2.1-93
図 2.1-94	見かけ傾斜図(鉱染脈)	2.1-94
図 2.1-95	π・カウントダイアグラム(鉱染脈)	2.1-95
図 2.2-1	旧松尾鉱山周辺の気象観測地点位置図	2.2-2
図 2.2-2	年間降水量の経年変化	2.2-3
図 2.2-3	降水量分布(気象庁『解析雨量』を加工し、2017年の総雨量を図化)	2.2-3
図 2.2-4	降水量分布(気象庁『解析雨量』を加工し、2018年の総雨量を図化)	2.2-4

図 2.2-5	積雪深の経年変化	2.2-6
図 2.2-6	日平均気温の経年変化	2.2-8
図 2.2-7	日平均風速の経年変化	2.2-10
図 2.2-8	日照時間の経年変化	2.2-12
図 2.2-9	日平均相対湿度の経年変化	2.2-13
図 2.2-10	本事業におけるボーリング実施地点	2.2-14
図 2.2-11	本事業において実施したボーリングの結果概要	2.2-15
図 2.2-12	坑内排水量の経年変化	2.2-17
図 2.2-13	流量一斉観測地点位置図	2.2-19
図 2.2-14	比流量分布図	2.2-28
図 2.2-15	流量連続観測地点位置図	2.2-29
図 2.2-16	流量連続観測結果(時系列水位変化)	2.2-30
図 2.2-17	各地点の H-Q 相関図	2.2-31
図 2.2-18	流量連続観測結果(時系列流量変化)	2.2-32
図 2.2-19	現地水質(pH)分布図	2.2-34
図 2.2-20	現地踏査ルートマップ	2.2-36
図 2.2-21	現地踏査ルートマップ(北ノ又川周辺)	2.2-37
図 2.2-22	現地踏査ルートマップ(赤川中流域)	2.2-38
図 2.2-23	赤川中流左岸の溶岩の露頭スケッチ	2.2-39
図 2.2-24	現地踏査ルートマップ(赤川上流域)	2.2-40
図 2.2-25	赤川上流右岸の八幡平(鉱床胚胎層)中の溶岩のスケッチ	2.2-41
図 2.2-26	赤川上流右岸の八幡平層(鉱床胚胎層)の大きな露頭のスケッチ	2.2-41
図 2.2-27	地熱発電所生産井背後の八幡平層(鉱床胚胎層)の大きな露頭のスケッチ	2.2-42
図 2.2-28	アスピーテライン南側の八幡平層(鉱床胚胎層)の大きな露頭のスケッチ	2.2-43
図 2.2-29	高橋(1962)に示された 100m 坑坑内地質図(モノクロの原図に着色)	2.2-47
図 2.2-30	鉱化作用と変質作用の模式理想図(転記・清書された図に着色)	2.2-47
図 2.2-31	八幡平火山の形成史	2.2-49
図 2.2-32	採水地点位置図	2.2-58
図 2.2-33	坑道内への流入水経路の断面イメージ	2.2-67
図 2.2-34	解析領域	2.2-68
図 2.2-35	坑道付近の地質断面概念図	2.2-70
図 2.2-36	表層地質図(モデルバージョン 2)	2.2-71
図 2.2-37	低地の上部溶岩(UL1)の分布域及び基底面標高	2.2-71
図 2.2-38	大長根上部溶岩(UL4)の分布域及び基底面標高	2.2-72
図 2.2-39	大長根低部溶岩(UL5)の分布域及び基底面標高	2.2-73
図 2.2-40	大長根深部溶岩(UL6)の分布域及び基底面標高	2.2-73
図 2.2-41	鉱床胚胎層(OC)の分布域及び基底面標高	2.2-74
図 2.2-42	下部溶岩(LL)の分布域及び基底面標高	2.2-74

図 2.2-43	3次元数値シミュレーションモデル鳥瞰図(モデルバージョン2)	2.2-76
図 2.2-44	3次元数値シミュレーションモデル鉛直断面位置図	2.2-76
図 2.2-45	3次元数値シミュレーションモデル鉛直断面図	2.2-77
図 2.2-46	CFC-12の大気中濃度	2.2-80
図 2.2-47	地表面における熱収支の取扱い(単層熱収支法)の概念	2.2-81
図 2.2-48	降水遮断の模式的概念図	2.2-83
図 2.2-49	土壤蒸発効率(近藤, 1994)	2.2-85
図 2.2-50	検証期間における日単位の河川流量(赤川)に関する観測流量と計算流量の話	平価2.2-
91		
図 2.2-51	各河川の流況の観測流量と解析結果の比較	2.2-92
図 2.2-52	各河川の連続流量の観測流量と解析結果の比較	2.2-93
図 2.2-53	各河川の連続流量の観測流量と解析結果の比較(参考:降雪量1.5倍ケース)	2.2-94
図 2.2-54	検証期間における日単位の坑内排水量に関する観測流量と計算流量の評価	2.2-95
図 2.2-55	坑内排水量の観測水量と解析結果の比較	2.2-96
図 2.2-56	降雪量を1.5倍にした場合の坑内排水量の観測水量と解析結果の比較(参考)	2.2-97
図 2.2-57	湧出量分布と現地湧水地点との比較	2.2-98
図 2.2-58	新中和処理施設における積雪深の観測量と解析結果の比較	2.2-99
図 2.2-59	CFC-12 観測点位置図	2.2-100
図 2.2-60	各地点における CFC-12の観測濃度と計算結果の比較	2.2-101
図 2.2-61	地表面直下に配置した粒子の流動経路	2.2-103
図 2.2-62	坑道に到達した水の地表水における浸透確率	2.2-103
図 2.2-63	局所モデルの領域範囲	2.2-104
図 2.2-64	旧松尾鉱山周辺の土地被覆分布	2.2-105
図 2.2-65	3次元数値シミュレーションモデル鳥瞰図(モデルバージョン 2-1)	2.2-106
図 2.2-66	広域モデルと局所モデルにおける河川流量の観測流量と計算流量の評価	2.2-110
図 2.2-67	赤川河川流量の再現状況	2.2-110
図 2.2-68	広域モデルと局所モデルにおける坑内排水量の観測流量と計算流量の評価	2.2-111
図 2.2-69	坑内排水量の再現状況	2.2-111
図 2.2-70	連成解析ツールの解析手順	2.2-113
図 2.2-71	水量・水質シミュレーションの検討フロー	2.2-114
図 2.2-72	概略モデルにおける地質断面図	2.2-118
図 2.2-73	ベースケースによる水質場の状況	2.2-119
図 2.2-74	反応鉱物係数 1/100 による水質場の状況	2.2-119
図 2.2-75	反応鉱物係数 1/1,000 による水質場の状況	2.2-120
図 2.2-76	pyrite と marcasite が共存した水質場の状況	2.2-120
図 2.2-77	鉱物分布の変更による水質場の状況	2.2-121
図 2.2-78	流動場(地下水面)の変更による水質場の状況	2.2-121
図 2.2-79	局所モデルにおける地質断面図	2.2-123

図 2.2-80	対策前の水質場の状況	2.2-124
図 2.2-81	対策後の水質場の状況	2.2-125
図 2.2-82	排水トンネル設置箇所	2.2-127
図 2.2-83	赤川保全水路工の追加設置箇所	2.2-128
図 2.2-84	赤川支川の保全水路工の追加設置箇所	2.2-129
図 2.2-85	対策工案と浸透確率分布の対比	2.2-131
図 2.2-86	上流側の排水トンネル設置による水質場の状況	2.2-133
図 2.3-1	前処理の有無による超純水への黄鉄鉱溶解試験結果の比較	2.3-5
図 2.3-2	模擬地下水を用いた黄鉄鉱の浸出試験結果	2.3-6
図 2.3-3	模擬地下水を用いた白鉄鉱の浸出試験結果	2.3-6
図 2.3-4	磁硫鉄鉱を用いた浸出試験結果	2.3-7
図 2.3-5	ボーリング調査地点	2.3-9
図 2.3-6	(a)黄鉄鉱(b)白鉄鉱の標準試料、(c)~(n)ボーリングコア研磨片の反射顕微	鏡像2.3-11
図 2.3-7	52.5 m 地点試料の(a)SEM 画像及び(b)分析ポイント	2.3-12
図 2.3-8	67.0 m 地点試料の(a)SEM 画像及び(b)分析ポイント	2.3-12
図 2.3-9	72.0 m 地点の試料の(a)SEM 画像及び(b)分析ポイント	2.3-13
図 2.3-10	84.7 m 地点の試料の(a)SEM 画像及び(b)分析ポイント	2.3-13
図 2.3-11	本研究で使用したタンクモデルの概要図	2.3-14
図 2.3-12	降水量の補正フローチャート	2.3-16
図 2.3-13	水量予測結果と観測値の比較	2.3-17
図 2.3-14	表面タンク・表層タンク・地下水層タンクにおける水量の割合の推移	2.3-18
図 2.3-15	将来の坑廃水量予測結果	2.3-19
図 2.3-16	坑廃水の水質変動予測結果	2.3-20
図 2.4-1	ガイドライン使用イメージ	2.4-1
図 3.1-1	流量測定実施場所(左:総合原水合流地点、右:本坑坑内水)	
図 3.1-2	坑口と本坑坑内水排出バルブ	3.1-3
図 3.1-3	坑口前及び集水マスの流量経時変化	
図 3.1-4	流量と pH の経時変化	
図 3.1-5	流量と Fe 濃度の経時変化	
図 3.1-6	流量と Zn 濃度の経時変化	
図 3.1-7	流量と Cd 濃度の経時変化	
図 3.1-8	旧本庫鉱山坑廃水処理のための人工湿地	3.1-7
図 3.1-9	プロセスフロー	
図 3.1-10	粗石系列	
図 3.1-11	細石系列	
図 3.1-12	その他系列	
図 3.1-13	連続処理試験反応槽設置状況(1)	
図 3.1-14	連続処理試験反応槽設置状況(2)	

図 3.1-15	集水槽のサンプリング位置	3.1-12
図 3.1-16	A~E 槽のサンプリング位置	3.1-12
図 3.1-17	その他系列のサンプリング位置	3.1-12
図 3.1-18	坑内水原水	3.1-13
図 3.1-19	各槽の構造	3.1-13
図 3.1-20	水位・詰まりの確認窓	3.1-14
図 3.1-21	詰まり・水位の確認	3.1-14
図 3.1-22	流量と pH	3.1-16
図 3.1-23	金属濃度(Fe、Zn、Cd)の変化	3.1-16
図 3.1-24	原水の連続試験時流量と尾花沢市の降水量	3.1-16
図 3.1-25	流量推移(8/1~8/31)	3.1-17
図 3.1-26	流量推移(8/30~11/18)	3.1-17
図 3.1-27	通水状況(下方からの通水)	3.1-18
図 3.1-28	通水状況(上方からの通水)	3.1-18
図 3.1-29	受け槽の設置(A~C 槽)	3.1-18
図 3.1-30	受け槽の設置(D~E 槽)	3.1-18
図 3.1-31	粗石系列(左)と細石系列(右)の滞留時間による pH 及び重金属濃度の変化	3.1-20
図 3.1-32	サンプルごとの Fe 濃度	3.1-21
図 3.1-33	サンプルごとの Cu 濃度	3.1-21
図 3.1-34	サンプルごとの Pb 濃度	3.1-22
図 3.1-35	サンプルごとの Cd 濃度	3.1-22
図 3.1-36	サンプルごとの Zn 濃度	3.1-22
図 3.1-37	サンプルごとの SS 濃度	3.1-23
図 3.1-38	粗石系列の水位の経時変化	3.1-23
図 3.1-39	細石系列の水位の経時変化	3.1-24
図 3.1-40	旧本庫鉱山の石灰石の XRD チャート	3.1-26
図 3.1-41	A 鉱山の石灰石の XRD チャート	3.1-26
図 3.1-42	カラム試験の実施状況	3.1-28
図 3.1-43	カラム試験結果	3.1-28
図 3.1-44	石灰石に付着している殿物	3.1-29
図 3.1-45	反応器のイメージ及びサンプリング用チューブの状況	3.1-29
図 3.1-46	石灰石充填後	3.1-29
図 3.1-47	pH の経時変化	3.1-30
図 3.1-48	pHと重金属の関係	3.1-31
図 3.1-49	<b>Ca<sup>2+</sup>濃度の経時変化</b>	3.1-32
図 3.1-50	SO4 <sup>2-</sup> 濃度の経時変化	3.1-32
図 3.1-51	補正した Ca <sup>2+</sup> 濃度の経時変化	3.1-33
図 3.1-52	CaSO <sub>4</sub> の溶解度(梅津 1991) <sup>※⑬</sup>	3.1-33

図 3.1-53	CaCO3の溶解速度	
図 3.1-54	CaCO3の溶解速度と pH の関係	
図 3.1-55	Plummer の CaCO3 溶解速度の研究例(Plummer et al. 1978) <sup>※®</sup>	
図 3.1-56	水溶液①への CaCO3 の添加	
図 3.1-57	水溶液②への CaCO3 の添加	
図 3.1-58	水溶液③への CaCO3 の添加	
図 3.1-59	水溶液④への CaCO3 の添加	
図 3.1-60	本坑坑内水のシミュレーション結果とバッチ試験の実測値の比較	
図 3.1-61	初期の DIC 濃度が与える影響(25°C)	
図 3.1-62	DIC が保存されていた場合の旧本庫鉱山と A 鉱山の pH 比較	
図 3.1-63	大気平衡であった場合の旧本庫鉱山と A 鉱山の pH 比較	
図 3.1-64	A 鉱山坑廃水の pH 上昇に対する各金属の影響	
図 3.1-65	旧本庫鉱山坑廃水の pH 上昇に対する各金属の影響	
図 3.1-66	エアレーション状況	
図 3.1-67	pHと重金属の関係	
図 3.1-68	バッチ試験のシミュレーション結果	
図 3.1-69	pH と DIC の関係	
図 3.1-70	【案】人工湿地設計図	
図 3.1-71	A 鉱山の坑廃水処理費用(3 年平均)	
図 3.1-72	人工湿地適用時の材料費の推移	
図 3.1-73	材料費コスト余剰分の推移	
図 3.1-74	現地試験の pH 挙動概要	
図 3.1-75	現地試験実施後(2019/10/30)の石灰石の様子	
図 3.1-76	中和剤の写真	
図 3.1-77	バッチ試験の様子	
図 3.1-78	バッチ試験の凡例	
図 3.1-79	バッチ試験の pH 経時変化	
図 3.1-80	バッチ試験の pH 経時変化(拡大版)	
図 3.1-81	バッチ試験の pH・各元素の経時変化	
図 3.1-82	バッチ試験の各元素濃度と pH との相関	
図 3.1-83	バッチ試験の各元素濃度と[H2CO3]との相関	
図 3.1-84	抜粋した試験条件	
図 3.2-1	処理設備系統図	
図 3.2-2	坑廃水処理施設全体図(配置図)	
図 3.2-3	凝集槽、沈降槽、汚泥槽	
図 3.2-4	薬注室内部	
図 3.2-5	第一調整槽(左)、第二調整槽(右)	
図 3.2-6	水量の現状把握~測定方法~	

図 3.2-7	水位計設置位置及び設置状況	
図 3.2-8	総合原水水量測定結果(2018年4月下旬から2019年10月下旬まで)	
図 3.2-9	浸透水①水量測定結果(2018年4月下旬から2019年10月下旬まで)	
図 3.2-10	SRB 処理法の実証試験イメージ	
図 3.2-11	Ca 濃度と pH 値の関係	
図 3.2-12	基礎試験(ビーカー試験)のデータ例(S/V=85/1000、20℃、攪拌周	速 13cm/sec) 3.2-
13		
図 3.2-13	石灰水路試験(ラボ試験)の結果	
図 3.2-14	石灰水路での試験状況	
図 3.2-15	pH の経時変化	
図 3.2-16	溶解速度定数kの経時変化	
図 3.2-17	石灰水路の目標 pH 値達成に向けた管理方法について	
図 3.2-18	重金属処理用バイオプロセスの検討	
図 3.2-19	バイオプロセス試験装置イメージ	
図 3.2-20	バイオプロセス試験装置	
図 3.2-21	バイオプロセス試験装置でのサンプリング位置等	
図 3.2-22	バイオプロセス試験状況	
図 3.2-23	バイオプロセス 微生物活性化状況の把握(評価開始後1ヶ月)	
図 3.2-24	SRB 処理法の実処理フロー(案)	
図 3.2-25	SRB 処理法の最終規模設計概念(案)	
図 3.2-26	SRB 処理法の実規模実証処理フローイメージ	
図 3.2-27	SRB 処理法の実規模処理(石灰水路)	
図 3.2-28	実証処理設備(水槽)の設置イメージ	
図 3.2-29	実証処理設備(水槽)の設置状況	
図 3.2-30	実証処理設備(水槽)の設置状況	
図 3.2-31	コスト削減効果の見積	
図 3.2-32	現在の処理プロセス	
図 3.3-1	実証処理試験の実施予定場所	
図 3.3-2	原水流量の経時変化	
図 3.3-3	pH と EC の経時変化	
図 3.3-4	重金属濃度の経時変化	
図 3.3-5	S-Feの酸化試験のフローチャート	
図 3.3-6	酸化した鉄の固液分離試験のフローチャート	3.3-9
図 3.3-7	酸化試験の結果(1)	
図 3.3-8	酸化試験の結果(2)	
図 3.3-9	固液分離試験の結果	
図 3.3-10	中和試験の結果	
図 3.3-11	小型試験装置の処理フロー	

図 3.3-12	小型試験装置(接触酸化槽)の構造図	
図 3.3-13	小型試験装置(中和槽)の構造図	
図 3.3-14	小型試験装置(天然材充填槽)の構造図	
図 3.3-15	小型試験装置の設置計画図	
図 3.3-16	Zn の変化	
図 3.3-17	pHの変化	
図 3.3-18	T-Fe の変化	
図 3.3-19	S-Fe の変化	
図 3.3-20	DO の変化	
図 3.3-21	ORP の変化	
図 3.3-22	Eh (RUN1)の変化	
図 3.3-23	Eh (RUN2)の変化	
図 3.3-24	水頭の変化	
図 3.3-25	水温の変化	
図 3.3-26	SO4 <sup>2-</sup> の変化	
図 3.3-27	過年度実施したカラム試験装置図	
図 3.3-28	過年度実施したカラム試験との比較(1)	
図 3.3-29	過年度実施したカラム試験との比較(2)	
図 3.3-30	過年度実施したカラム試験との比較(3)	
図 3.3-31	過年度実施したカラム試験との比較(4)	
図 3.3-32	過年度実施したカラム試験との比較(5)	
図 3.3-33	過年度実施したカラム試験との比較(6)	
図 3.3-34	小型試験で得られた原水水質の変化(1)	
図 3.3-35	小型試験で得られた原水水質の変化(2)	
図 3.3-36	小型試験で得られた原水水質の変化(3)	
図 3.3-37	実証処理試験における処理フローシート	
図 3.3-38	実証処理装置の配置計画	
図 3.3-39	接触酸化槽の構造図	
図 3.3-40	天然材充填槽の構造図	
図 3.3-41	試運転における Zn の変化	
図 3.3-42	試運転における pH の変化	
図 3.3-43	原水計量槽と接触酸化槽4に設置した pH の推移	
図 3.3-44	試運転における T-Feの変化	
図 3.3-45	試運転における S-Feの変化	
図 3.3-46	試運転における Fe <sup>2+</sup> の変化	
図 3.3-47	試運転における DO の変化	
図 3.3-48	試運転における ORP の変化	
図 3.3-49	試運転における Eh の変化	

図 3.3-50	試運転における水頭の変化	3.3-65
図 3.3-51	試運転における水温の変化	
図 3.3-52	試運転における SO4 <sup>2-</sup> の変化	
図 3.3-53	試運転の追試における Zn の変化	3.3-74
図 3.3-54	試運転の追試における pH の変化	3.3-74
図 3.3-55	試運転の追試における T-Fe の変化	3.3-75
図 3.3-56	試運転の追試における S-Fe の変化	3.3-75
図 3.3-57	試運転の追試における DO の変化	3.3-76
図 3.3-58	試運転の追試における ORP の変化	3.3-76
図 3.3-59	試運転の追試における Eh の変化	3.3-77
図 3.3-60	試運転の追試における水頭の変化	3.3-77
図 3.3-61	試運転の追試における水温の変化	3.3-78
図 3.3-62	試運転の追試における SO4 <sup>2-</sup> の変化	3.3-78
図 3.4-1	海外の石炭鉱山におけるパッシブトリートメント適用フローシート	3.4-2
図 3.4-2	パッシブトリートメントにおける鉄の処理方法の例	3.4-4
図 3.4-3	パッシブトリートメントにおける嫌気処理方法の例	
図 3.4-4	パッシブトリートメント適用フローシート	
図 3.4-5	A 鉱山の坑廃水へのモデル適用結果:(a)pH、(b)Cu、(c)Zn、(d)Cd、(e)Pb	
図 3.4-6	D 鉱山の坑廃水へのモデル適用結果:(a)pH、(b)Zn、(c)Cd	
図 3.4-7	E 鉱山の坑廃水へのモデル適用結果:(a)pH、(b)Cd、(c)Pb、(d)As	3.4-13
図 3.4-8	F 鉱山の坑廃水へのモデル適用結果:(a)pH、(b)As、(c)Zn	3.4-14
図 3.4-9	G 鉱山の坑廃水へのモデル適用結果:(a)pH、(b)Mn、(c)Cd、(d)Zn、(e)Pb	
図 3.4-10	H 鉱山の坑廃水へのモデル適用結果:(a)pH、(b)Zn、(c)Cu	3.4-16
図 3.4-11	I 鉱山の坑廃水へのモデル適用結果:(a)pH、(b)Zn、(c)Cu	3.4-17
図 3.4-12	J 鉱山の坑廃水へのモデル適用結果:(a)pH、(b)Zn、(c)Cd、(d)Pb	
図 3.4-13	L 鉱山の坑廃水へのモデル適用結果:(a)pH、(b)Zn、(c)Cd	
図 3.4-14	M 鉱山の坑廃水へのモデル適用結果:(a)pH、(b)Cu、(c)Zn、(d)Cd	
図 3.4-15	N 鉱山の坑廃水へのモデル適用結果:(a)pH、(b)Zn	3.4-21
図 3.4-16	O 鉱山の坑廃水へのモデル適用結果:(a)pH、(b)Zn	
図 3.5-1	パッシブトリートメント適用可能性の検討の流れ	3.5-4
図 3.5-2	パッシブトリートメント事前調査方法の流れ	3.5-5
図 3.5-3	パッシブトリートメント導入の流れ	3.5-6

### 表目次

表	1-1	関係事業者リスト	1-2
表	1-2	委員会等	1-5
表	1-3	本委員会 委員リスト	1-6
表	1-4	地下水制御技術の調査研究ワーキンググループ委員会 委員リスト	1-6
表	1-5	パッシブトリートメント導入に向けた調査研究ワーキンググループ委員会	委員リスト
			1-7
表	2.1-1	調査地点	2.1-1
表	2.1-2	調査数量	2.1-2
表	2.1-3	主要機器設備一覧(掘削ツール)	2.1-3
表	2.1-4	主要機器設備一覧(測定ツール)	2.1-4
表	2.1-5	工程表	2.1-5
表	2.1-6	コア硬軟区分判定表	2.1-11
表	2.1-7	コア形状区分判定表	2.1-11
表	2.1-8	コア割れ目状態判定表	2.1-11
表	2.1-9	風化区分	2.1-12
表	2.1-10	) 変質区分	2.1-12
表	2.1-1	ボーリングコア判定についての岩盤等級区分基準	2.1-13
表	2.1-12	2 計画注水圧力パターン	2.1-15
表	2.1-1	3 採水時測定項目	2.1-19
表	2.1-14	4 ボーリング柱状図(1)	2.1-23
表	2.1-1	5 ボーリング柱状図(2)	2.1-24
表	2.1-1	6 地層区分	2.1-34
表	2.1-1	7 透水試験結果一覧	2.1-45
表	2.1-18	8 孔内微流速測定結果より算定した透水係数	2.1-48
表	2.1-19	Э 孔曲がり計測結果	2.1-49
表	2.1-20	) 自動観測・記録装置諸元	2.1-51
表	2.1-2	1 研磨片観察結果	2.1-53
表	2.1-22	2 X線粉末回折結果一覧	2.1-65
表	2.1-23	3 項目と検出限界値	2.1-72
表	2.1-24	4 分析結果	2.1-72
表	2.1-2	5 室内水質分析項目	2.1-76
表	2.1-20	5 採水時測定項目	2.1-76
表	2.1-2	7 水質分析結果一覧	2.1-79
表	2.1-28	3 主要イオンのイオン当量	2.1-80
表	2.1-29	9 八幡平層の概要	2.1-85
表	2.1-30	) ボーリングデータ対比図(Bor.A-2)	2.1-87

表 2.2-1	追加収集した気象関連資料	2.2-1
表 2.2-2	積雪深データの入手状況	2.2-5
表 2.2-3	気温データの入手状況	2.2-7
表 2.2-4	風速データの入手状況	2.2-9
表 2.2-5	日照時間データの入手状況	2.2-11
表 2.2-6	相対湿度データの入手状況	2.2-13
表 2.2-7	追加入手した地質関連資料	2.2-14
表 2.2-8	追加入手した鉱山関連資料	2.2-16
表 2.2-9	現地調查項目	2.2-18
表 2.2-10	流量一斉観測結果(6月-1)	2.2-20
表 2.2-11	流量一斉観測結果(6月-2)	2.2-21
表 2.2-12	流量一斉観測結果(6月-3)	2.2-22
表 2.2-13	流量一斉観測結果(6月-4)	2.2-23
表 2.2-14	流量一斉観測結果(10月-1)	2.2-24
表 2.2-15	流量一斉観測結果(10月-2)	2.2-25
表 2.2-16	流量一斉観測結果(10月-3)	2.2-26
表 2.2-17	流量一斉観測結果(10月-4)	2.2-27
表 2.2-18	流量連続観測地点一覧表	2.2-29
表 2.2-19	旧松尾鉱山周辺地質に関する既存資料	2.2-35
表 2.2-20	既存地質図類の着眼点及び評価	2.2-44
表 2.2-21	解析モデルと各文献の層序対比表	2.2-56
表 2.2-22	水質分析結果(6月)	2.2-60
表 2.2-23	水質分析結果(10月)	2.2-61
表 2.2-24	トレーサ分析結果(6月)	2.2-63
表 2.2-25	トレーサ分析結果(10月)	2.2-63
表 2.2-26	トレーサによる年代推定	2.2-64
表 2.2-27	2019 年 5 月から 12 月における坑廃水(原水)の水質分析結果	2.2-66
表 2.2-28	考慮する水理地質区分(モデルバージョン 2)	2.2-69
表 2.2-29	検証データー覧	2.2-78
表 2.2-30	熱収支式の取扱い	2.2-81
表 2.2-31	樹冠・林床パラメータ	2.2-83
表 2.2-32	土地利用区分毎の等価粗度係数(モデルバージョン 2)	2.2-84
表 2.2-33	土地利用区分毎に設定したバルク輸送係数及びアルベド	2.2-84
表 2.2-34	水理地質区分毎の水理物性の設定値(モデルバージョン2)	2.2-86
表 2.2-35	平衡流動場の解析に用いる初期条件	2.2-87
表 2.2-36	再現解析におけるマッチングの経緯	2.2-89
表 2.2-37	土地被覆区分毎の等価粗度係数(モデルバージョン 2-1)	2.2-107
表 2.2-38	水理地質区分毎の水理物性の設定値(モデルバージョン 2-1)	2.2-109

表 2.2-39	降水条件に適用した溶液組成	2.2-114
表 2.2-40	初期溶液組成及び鉱物組成	2.2-116
表 2.2-41	感度解析における検討ケース一覧	
表 2.2-42	鉱害防止対策工ケースによる坑内排水量の比較	2.2-131
表 2.3-1	FeS2溶出モデルに考慮した元素とそのイオン種	2.3-3
表 2.3-2	FeS2溶出モデルに考慮した沈殿種	2.3-3
表 2.3-3	本研究で作成した模擬地下水の組成	2.3-5
表 2.3-4	ボーリング試料の XRF 分析結果に基づく鉱物組成計算結果	2.3-10
表 2.3-5	各種硫化鉄鉱物の特徴	2.3-10
表 2.3-6	SEM-EDS の各ポイントの分析結果	2.3-13
表 2.3-7	本研究で得られたタンクモデルの各パラメータ値	2.3-18
表 2.3-8	一律排水基準値以下となる年月	2.3-20
表 2.4-1	地下水制御ガイドライン目次(案)と構成内容	2.4-2
表 3.1-1	実施内容の概略	
表 3.1-2	分析項目	
表 3.1-3	本坑坑内水排出バルブの水圧データ(水圧[MPa]水量[L/min]水頭[m])	
表 3.1-4	流量及び水質(2018/9/14~2019/7/1)	
表 3.1-5	本庫方式の人工湿地における各構成要素で期待される効果	
表 3.1-6	A 鉱山及び旧本庫鉱山坑廃水の平均濃度比較	
表 3.1-7	文献調査まとめ(1)	
表 3.1-8	文献調査まとめ(2)	
表 3.1-9	石灰石成分表	
表 3.1-10	現地試験(2019/8/8~2019/11/18)の流量及び水質	
表 3.1-11	現地試験前(2018/9/14~2019/7/1)の流量及び水質(一部再掲)	
表 3.1-12	尾花沢及び山形の降水量と天気概況	
表 3.1-13	流量不安定時の結果(8月7日)	
表 3.1-14	A 槽 in、out 及び D 槽 in、out での平均水位(cm)	
表 3.1-15	XRF成分分析結果	
表 3.1-16	XRD 成分分析結果	
表 3.1-17	TG-DTA 測定結果	
表 3.1-18	飽和実験結果(1)	
表 3.1-19	飽和実験結果(2)	
表 3.1-20	洗浄した石灰石での分析結果	
表 3.1-21	A 槽の石灰石で分析結果	
表 3.1-22	B 槽の石灰石での分析結果	
表 3.1-23	C 槽の石灰石での分析結果	
表 3.1-24	本坑坑内水の化学物質濃度のパラメーター(単位:mmol/L:pHを除く)	3.1-36
表 3.1-25	A 鉱山及び旧本庫鉱山の坑廃水の化学物質濃度のパラメーター	

表 3.1-26	全炭酸濃度	
表 3.1-27	通気有の重金属濃度	
表 3.1-28	通気無の重金属濃度	
表 3.1-29	人工湿地の面積及び体積	
表 3.1-30	A 鉱山に人工湿地を導入した場合のコスト	
表 3.1-31	アクティブトリートメントコスト項目	
表 3.1-32	A 鉱山坑廃水の各系統割合	
表 3.1-33	ガイドライン作成に資する情報の整理	
表 3.1-34	中和剤の種類及び性状の概要	
表 3.1-35	バッチ試験の試験対象水の水質	
表 3.1-36	バッチ試験条件一覧表	
表 3.1-37	抜粋した試験条件の詳細データ	
表 3.1-38	中和剤特徴まとめ	
表 3.2-1	平成 28 年度水質実績	
表 3.2-2	水量、薬品原単位等	
表 3.2-3	中和試験 基礎試験(ビーカー試験)の結果	
表 3.2-4	温度・周速条件ごとのデータフィッティング結果	
表 3.2-5	石灰水路 観測データ	
表 3.2-6	石灰水路 計算結果	
表 3.2-7	バイオプロセス試験開始後1ヶ月での測定結果	
表 3.2-8	S成分の測定法比較	
表 3.3-1	処理原水(通洞坑水)の主要成分	
表 3.3-2	対象腐葉土の仕様	
表 3.3-3	腐葉土の測定項目	
表 3.3-4	腐葉土の測定結果	
表 3.3-5	前処理試験によって得られた知見	
表 3.3-6	測定項目	
表 3.3-7	分析項目	
表 3.3-8	累積通水量約17m <sup>3</sup> 時点の処理過程における水質	
表 3.3-9	引抜殿物濃度の測定結果	
表 3.3-10	資材の成分分析結果	
表 3.3-11	充填資材量の比較	
表 3.3-12	小型試験の結果及び実証処理試験への適用	
表 3.3-13	原水水質のまとめ	
表 3.3-14	室内カラム試験と小型試験における通水速度のまとめ	
表 3.3-15	小型試験装置と実証処理装置の設計条件について	
表 3.3-16	実証処理装置の設計条件について	
表 3.3-17	測定項目	

表 3.3-18	分析項目
表 3.3-19	試運転条件の変更
表 3.3-20	試運転結果と追試の内容3.3-67
表 3.3-21	測定項目
表 3.3-22	分析項目
表 3.3-23	追試における天然材充填槽の資材調整の内容3.3-69
表 3.3-24	試運転結果と次年度の課題と対策
表 3.3-25	現状の課題と次年度に向けた検討
表 3.3-26	次年度の改善・改造内容
表 3.4-1	13 鉱山の坑廃水組成と水量データ
表 3.4-2	13 鉱山における Net Acidity の計算値
表 3.4-3	考慮した沈殿生成反応及び化学種
表 3.4-4	水酸化第二鉄への表面錯体を考慮した平衡反応及び平衡定数
表 3.4-5	水酸化アルミニウムへの表面錯体を考慮した平衡反応及び平衡定数(Karamalidis and
Dzon	nbak, 2010)
表 3.4-6	δ-MnO <sub>2</sub> への表面錯体を考慮した平衡反応及び平衡定数(Yao and Millero, 1996)3.4-10
表 3.4-7	13 鉱山の基準値超過項目、滞留時間、容積、処理不可項目
表 3.5-1	パッシブトリートメント導入に向けたガイドライン目次(案)と構成内容

### 写真目次

写真 3.3-1	実証処理試験の実施予定場所	
写真 3.3-2	酸化試験の試験状況	
写真 3.3-3	中和試験の試験状況	
写真 3.3-4	小型試験装置の設置状況	
写真 3.3-5	エアポンプの凍結状況	
写真 3.3-6	天然材充填槽の運転状況(1)	
写真 3.3-7	天然材充填槽の運転状況(2)	
写真 3.3-8	小型試験装置の保温状況	
写真 3.3-9	硫酸還元反応確認試験の状況(1)	
写真 3.3-10	硫酸還元反応確認試験の状況(2)	
写真 3.3-11	接触酸化槽の運転状況	
写真 3.3-12	殿物引抜後の接触酸化槽の状況	
写真 3.3-13	4 時間静置後の殿物の状況	
写真 3.3-14	ダイヤフラムポンプによる殿物の連続引抜状況	
写真 3.3-15	通水終了時の天然材充填槽の状況	
写真 3.3-16	通水終了時の天然材充填槽1の内部の状況	
写真 3.3-17	通水終了時の天然材充填槽2の内部の状況	
写真 3.3-18	カラム試験の試験状況	
写真 3.3-19	実証処理装置の設置状況	
写真 3.3-20	実証処理装置の水槽内部の状況	
写真 3.3-21	試運転開始の状況	
写真 3.3-22	天然材充填槽4の資材調整状況	
写真 3.3-23	天然材充填槽1の資材調整状況	
写真 3.3-24	天然材充填槽2の資材調整状況	
写真 3.3-25	天然材充填槽3の資材調整状況	
写真 3.3-26	天然材充填槽4の資材調整状況	
写真 3.3-27	次年度の改造内容	

【事業目標】

金属鉱業等の休廃止鉱山は、事業活動終了後も、坑口や集積場等からヒ素、カドミウム、鉛等 の重金属を含む坑廃水が流出し続ける状況にある。このような坑廃水を放置し河川等に流出した 場合、健康被害、農作物被害、漁業被害等が発生し、深刻な社会問題を引き起こすことがあるた め、そのような休廃止鉱山を管理する地方公共団体等は、大量の電力を消費し、坑廃水処理を昼 夜問わず継続して行っていることから、当該処理の省エネ化の対策が求められている。

このため、省エネ化の対策として期待できる、実態が把握されていない休廃止鉱山における地 下水の水量・水質を予測し、地下水の挙動のシミュレーションを用いた坑廃水量の削減手法を確 立させるための検討、当該手法を踏まえた地下水制御に係る対策工事や管理対策の検討を行うと ともに、重金属除去作用を有する植物や微生物を利用した自然回帰型坑廃水浄化に関して、坑廃 水の状況や立地条件等を勘案した最適な浄化システムの導入検討及び本浄化システムで水質改善 がどのようなメカニズムで行われているかの効果検証を実施する。

【要旨】

#### 地下水制御技術の調査研究

本調査研究事業の内、地下水制御技術の調査研究では引き続き旧松尾鉱山をモデル鉱山とした。 水理地質構造ボーリング調査では、旧松尾鉱山の第四鉱体に着鉱したため、鉱体部(主に硫化鉱、 GL-40~-80 m 辺り)の透水係数(注水による透水試験)や亀裂の状態(孔壁映像・微流速測定)、 また、鉱体周辺部への遷移状況等を確認することができた。また、過年度事業の成果に加え、今 年度事業で得られた追加データや現況再現解析の結果、また各パラメータへの応答パターン等を 総合的に考慮してモデルの精緻化を行い、坑内排水量の絶対値、季節的な変動ともに、概ね再現 する計算結果が得られた。ただ、融雪期の坑内排水量等については多少の改善の余地が見られた。 GETFLOWS と PHREEQC を用いた水量・水質シミュレーションモデルについては、黄鉄鉱や自 鉄鉱などの Fe の溶出ポテンシャルを有する鉱物種を考慮して、鉱物存在範囲の前提条件を立て た上で検討を行った。発生源対策工事の検討については、3 種類のケースについて効果予測解析 を実施し、その結果を基に、次年度は数種類の発生源対策工事をシミュレーションモデル上で模 して効果予測解析を行い、評価まとめを行う。

なお、本事業では、上記のような多量の地質学的データを収集して構築する3次元水量・水質 シミュレーションモデルの他に、坑内排水量の日変動データを考慮して統計学的に水質の変動を 予測できるモデルの構築も行い、設定条件により、気象観測データから旧松尾鉱山付近の気象条 件を補正し1年分のデータを解析することで融雪期や多雨期の流量変動を予測することができた。

次年度事業における最終目標であるガイドライン作成に向けて、今年度はその検討作業を行った。ガイドラインの全体構成については概ね固めることができたと考えられる。次年度の効果予 測解析などの結果を事例集としてまとめ、ガイドラインの中で記載する方針とした。

・自然回帰型坑廃水浄化システム導入に向けた調査研究

本調査研究事業の内、自然回帰型坑廃水浄化システム(以下「パッシブトリートメント」という。)導入に向けた調査研究は、「人工湿地型」、「微生物活用型」及び「人工湿地・微生物/

xxviii

植物併用型もしくはその他の型」のパッシブトリートメント技術について、過年度事業でモデル 鉱山として選定したA鉱山、B鉱山及びC鉱山において、連続試験を実施することで各技術の効 果検証を実施した。特にB鉱山及びC鉱山においては、平時の坑廃水処理水量の数分の一程度の 規模となる実規模相当実証試験設備を設置し試運転まで実施した。これにより、小規模試験では 確認されなかった槽の凍結や短絡による処理性の低下などの課題を見いだすことができた。また、 A鉱山では石灰石のみによる中和では pH が 7 程度までしか上昇せず、金属の処理も不十分とな ることが確認でき、コンクリート廃材等の石灰石以外の中和材についての検討も実施した。次年 度は各鉱山において実規模相当実証試験を実施することで、これまでに見いだされた課題への対 処策について検討し、パッシブトリートメント導入の効果を精緻に検証することが必要であると 考えられる。

また、将来パッシブトリートメント導入の可能性のある複数の鉱山について、過年度に構築し たシミュレーションモデルを活用し、実際の水量・水質に対し、人工湿地を適用する場合にどの 程度の湿地面積が必要となるか等の机上検討を行った。その結果、複数の鉱山ではさほど広大な 湿地を造成せずとも金属を除去できる可能性が示唆されるなど、パッシブトリートメント導入に ついて適用可能性を机上検討することが可能になったと考えられる。

さらに、パッシブトリートメントの導入による効果の予測、導入ガイドライン作成に向けた検 討を実施し、ガイドラインについては全体の構成について概ね構築することができた。

【委員会の設置】

・本委員会

6名の委員を選任し、2回の委員会を設置・運営した。

- ・地下水制御技術の調査研究ワーキンググループ委員会 10名の委員を選任し、2回の委員会を設置・運営した。
- ・自然回帰型坑廃水浄化システムの導入に向けた調査研究ワーキンググループ委員会 7名の委員を選任し、2回の委員会を設置・運営した。

#### 1. 業務概要

#### 1.1. 件名

平成 31 年度休廃止鉱山における坑廃水処理の高度化調査研究事業

#### 1.2. 背景及び目的

金属鉱業等の休廃止鉱山は、事業活動終了後も、坑口や集積場等からヒ素、カドミウム、鉛等 の重金属を含む坑廃水が流出し続ける状況にある。このような坑廃水を放置し河川等に流出した 場合、健康被害、農作物被害、漁業被害等が発生し、深刻な社会問題を引き起こすことがあるた め、そのような休廃止鉱山を管理する地方公共団体等は、大量の電力を消費し、坑廃水処理を昼 夜問わず継続して行っていることから、当該処理の省エネ化の対策が求められている。

このため、省エネ化の対策として期待できる、実態が把握されていない休廃止鉱山における地 下水の水量・水質を予測し、地下水の挙動のシミュレーションを用いた坑廃水量の削減手法を確 立させるための検討、当該手法を踏まえた地下水制御に係る対策工事や管理対策の検討を行うと ともに、重金属除去作用を有する植物や微生物を利用した自然回帰型坑廃水浄化に関して、坑廃 水の状況や立地条件等を勘案した最適な浄化システムの導入検討及び本浄化システムで水質改善 がどのようなメカニズムで行われているかの効果検証を実施する。

#### 1.3. 事業実施期間

平成 31 年 4 月 1 日 ~ 令和 2 年 3 月 31 日

#### 1.4. 実施体制

本事業の関係事業者リスト及び実施体制についてそれぞれ表 1-1 及び図 1-1 に示す。委員会の 設置・運営等の事務局業務は、独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構(以下「JOGMEC」 という。)が担当した。

シミュレーション等を用いた地下水制御技術の調査研究については、株式会社地圏環境テクノ ロジー、学校法人早稲田大学に委託した。

水理地質構造調査ボーリングについては、日鉄鉱コンサルタント株式会社に外注した。

自然回帰型坑廃水浄化システム導入に向けた調査研究業務は三菱マテリアルテクノ株式会社、 DOWA エコシステム株式会社、株式会社環境総合テクノス、学校法人早稲田大学に委託した。

事業者名	住所
JOGMEC	東京都港区虎ノ門二丁目10番地1号
株式会社地圏環境テクノロジー	東京都千代田区神田淡路町二丁目1番地
日鉄鉱コンサルタント株式会社	東京都千代田区丸の内二丁目3番2号
株式会社環境総合テクノス	大阪府大阪市中央区安土町一丁目3番5号
DOWA エコシステム株式会社	東京都千代田区外神田四丁目 14番1号
三菱マテリアルテクノ株式会社	東京都台東区台東一丁目 30番7号
学校法人早稲田大学	東京都新宿区大久保三丁目4番1号

表 1-1 関係事業者リスト



図 1-1 実施体制

1.5. 実施内容

#### 1.5.1. 地下水制御技術の調査研究

休廃止鉱山における水量シミュレーション及び水量・水質シミュレーションを用いて鉱害防止 対策の検討等を行うため、昨年度までの成果を踏まえ以下の調査等を実施した。

なお、下記 1.5.1.2 章、1.5.1.3 章及び 1.5.1.5 章で作成したシミュレーションモデルの解析においては、より多くの解析を行えるように、並列化計算により計算効率を向上した解析手法を用いることを前提とした。

#### 1.5.1.1. 鉱山関連データ等の収集

旧松尾鉱山について、シミュレーションモデル精緻化等に必要な水量、水質、雨量、地質図、 坑道図等既存の鉱山関連データ等の収集・整理を行った。さらに、ボーリング調査や現地地質踏 査、水文調査等を行い、地質の分布等を明らかにするために必要なデータを収集するとともに、 必要に応じて現地での水量測定、水質分析等によりデータ収集を行った。



図 1-2 旧松尾鉱山の位置

#### 1.5.1.2. 休廃止鉱山の広域における水量シミュレーションモデルの精緻化

旧松尾鉱山について、現地地質踏査やボーリング調査等の結果に基づき、地表水と地下水の交換挙動を3次元的に解析可能な広域シミュレーションモデルを精緻化した。

#### 1.5.1.3. 休廃止鉱山の局所的範囲における水量シミュレーションモデルの精緻化

旧松尾鉱山について、現地地質踏査やボーリング調査等の結果に基づき、坑道掘削範囲周辺に おいて、坑廃水量に大きな影響を及ぼす人工構造物を詳細に再現した地下水流動解析が可能なシ ミュレーションモデルを精緻化した。

#### 1.5.1.4. 休廃止鉱山における坑廃水発生に係る水質シミュレーションモデルの作成

旧松尾鉱山について、地下水の鉱体への接触による坑廃水の発生挙動が予測可能な水質シミュ レーションモデルを作成した。

1.5.1.5. 休廃止鉱山における水量・水質シミュレーションモデルの作成 旧松尾鉱山について、水量と水質を同時に予測解析可能な移流分散を考慮した水量・水質シミ ュレーションモデルを作成した。

1.5.1.6. 1.5.1.2~1.5.1.5 章のシミュレーションモデルを用いた現況再現解析

既存データや1.5.1.1 章で得られたデータを用いて、現況再現解析を行った。データと解析結果 に差異が認められる場合は、シミュレーションモデルに組み込まれていないフィールドの実態を 推定し、その仮説を検証した。

# 1.5.1.7. 休廃止鉱山における水量シミュレーション及び水量・水質シミュレーションの効果予測解析結果に基づく鉱害防止対策の検討

休廃止鉱山における水量シミュレーション及び水量・水質シミュレーションの効果予測解析結 果に基づく地下水制御に係る発生源対策工事の検討を行うとともに、休廃止鉱山における地下水 制御による発生源対策のためのガイドラインの作成に向けた検討を行った。

#### 1.5.2. 自然回帰型坑廃水浄化システム(以下「パッシブトリートメント」という。) 導入に 向けた調査研究

昨年度事業において選定したモデル鉱山(以下「モデル鉱山」という。)において、パッシブ トリートメントが導入された場合における水質変化や将来予測等に関するパッシブトリートメン トの効果検証ツールの検討等を行った。

#### 1.5.2.1. 鉱山関連データ等の収集

モデル鉱山について、水量、水質、雨量、設備図面等既存の鉱山関連データ等の収集・整理を 行った。また、現地での水量測定、水質分析等によりデータ収集を行った。さらに、必要に応じ て、将来パッシブトリートメントの導入の可能性のある鉱山について、既存の鉱山関連データ等 の収集・整理を行うとともに、現地での水量測定、水質分析及び導入検討に向けた現地調査等に よりデータ収集を行った。

#### 1.5.2.2. パッシブトリートメントの整備に向けた取組み

モデル鉱山におけるパッシブトリートメントの導入検討を行った。具体的には、進捗状況によって、現地の測量・土質調査や実坑廃水による連続試験データといった設計に必要となるデータの取得、さらに実規模相当の実証試験設備の基本設計・詳細設計・工事・試運転等を行うとともに、パッシブトリートメントの導入による効果(一例としては電力削減量に基づく省エネ効果、 維持管理費やそれに付随する工事費の低減)を検討した。

#### 1.5.2.3. パッシブトリートメントによる坑廃水処理の水質予測解析

旧本庫鉱山の水質調査等のデータを基に構築した水質予測モデルを用いて、他鉱山におけるパッシブトリートメント導入に向けた事前検討調査を行った。

#### 1.5.2.4. パッシブトリートメント導入ガイドライン作成に向けた検討

鉱害防止事業実施者がパッシブトリートメントの導入を検討するに当たり、各鉱山の水量や水
質、敷地面積等を踏まえた最適なパッシブトリートメントの提案ができるガイドラインの作成に 向けた検討を行った。

### 1.5.3. 委員会の設置、報告書の作成等

地下水制御技術及びパッシブトリートメントの専門家等を交えた本調査研究事業全体の委員会 (6名)を設置するとともに、地下水制御技術の調査研究(10名)及びパッシブトリートメント 導入に向けた調査研究(7名)それぞれにワーキンググループを設置し、調査結果等を基にモデ ル鉱山における地下水制御技術の検討やパッシブトリートメントの効果検証の検討等を実施した。 構成員は、坑廃水処理等に関連のある分野の研究者及び技術者等により構成した。

調査の実施に当たり、委員会及びワーキンググループ参加者の選定、開催時期、進め方、報告 書の作成等については、あらかじめ産業保安グループ鉱山・火薬類監理官付担当者に十分に連 絡・相談を行い、進捗を報告した。

日程	委員会・現地調査等	実施場所
令和元年5月22日	第1回パッシブトリートメント導入に向 けた調査研究ワーキンググループ委員会	JOGMEC 虎ノ門本部
令和元年 5 月 23 日	第1回地下水制御技術の調査研究ワーキ ンググループ委員会	JOGMEC 虎ノ門本部
令和元年5月28日	第1回本委員会	JOGMEC 虎ノ門本部
令和元年8月19~20日	現地委員会	A鉱山/尾花沢市役所
令和元年 10 月 2~3 日	現地委員会	松尾鉱山/いこいの村岩手
令和元年 12 月 12 日	A鉱山検討会	JOGMEC 虎ノ門本部
令和2年1月21日	第2回パッシブトリートメント導入に向 けた調査研究ワーキンググループ委員会	JOGMEC 虎ノ門本部
令和2年1月22日	第2回地下水制御技術の調査研究ワーキ ンググループ委員会	JOGMEC 虎ノ門本部
令和2年1月31日	第2回本委員会	経済産業省

表 1-2 委員会等

公Ⅰ→ 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一	表 1-3	本委員会	委員リス
---	-------	------	------

所属・役職	委員氏名(敬称略)
国立大学法人東京大学 名誉教授	山富 二郎(委員長)
国立大学法人岡山大学 名誉教授 兼 国立大学法人岡山大学大学院環境生命科学研究科 特任教授	西垣 誠
国立大学法人東京大学 名誉教授 兼 株式会社地圏環境テクノロジー 代表取締役会長	登坂 博行
国立大学法人東北大学大学院環境科学研究科 教授	井上 千弘
学校法人早稲田大学理工学術院 教授	所 千晴
国立大学法人岩手大学理工学部 システム創成工学科社会基盤・環境コース 准教授	大河原 正文

表 1-4 地下水制御技術の調査研究ワーキンググループ委員会 委員リスト

所属・役職	委員氏名(敬称略)
国立大学法人岩手大学理工学部	大河原 正文
システム創成工学科社会基盤・環境コース 准教授	(委員長)
国立大学法人岡山大学 名誉教授	西石 誂
兼 国立大学法人岡山大学大学院環境生命科学研究科 特任教授	
国立大学法人東京大学 名誉教授	<b>惑振 捕</b> 行
兼 株式会社地圏環境テクノロジー 代表取締役会長	· ①· 贝 · · · · · · · · · · · · · · · · ·
国立大学法人秋田大学大学院 国際資源学研究科資源地球科学専攻 教授	大場 司
学校法人早稲田大学理工学術院 教授	所 千晴
国立大学法人島根大学 学術研究院 環境システム科学系 准教授	増本 清
国立研究開発法人日本原子力研究開発機構	小百 姜之
核燃料・バックエンド研究開発部門人形峠環境技術センター計画管理室長	小师我之
日本鉱業協会 環境保安部 兼 技術部 次長	片岡 卓
国立研究開発法人産業技術総合研究所 地質調査総合センター地圏資源環	<b>正</b> 約
境研究部門 地圏環境リスク研究グループ 研究グループ長	
国立大学法人北海道大学大学院工学研究院 環境循環システム部門	宮山 眉吾
客員教授	

所属・役職	委員氏名(敬称略)
国立大学法人東北大学大学院 環境科学研究科 教授	井上 千弘(委員長)
学校法人早稲田大学理工学術院 教授	所 千晴
学校法人立命館理工学部環境都市工学科 教授	惣田 訓
国立大学法人筑波大学生命環境系 教授	山路 恵子
公立大学法人秋田県立大学生物資源科学部生物環境科学科 教授	宮田 直幸
日本鉱業協会 環境保安部 兼 技術部 次長	片岡 卓
地方独立行政法人北海道立総合研究機構 環境・地質研究本部 地質研究所 地域地質部地質情報グループ 研究主幹	荻野 激

表 1-5 パッシブトリートメント導入に向けた調査研究ワーキンググループ委員会 委員リスト

- 2. 地下水制御技術の調査研究
- 2.1. 水理地質構造調査ボーリングによるデータ収集
- 2.1.1. 業務概要
- 2.1.1.1. 概要

本業務は、鉱床採掘地域の地下水流上流側における、地質構造(鉛直構造)と各地質の水理特 性を明らかにすることにより、広域水循環解析に用いる水理地質構造モデルの組立の基礎資料を 得ることを目的とした。併せて、地下水位や水質に関する情報を得ることで、今後の解析・検討 の検証・参考資料を得るものである。

ボーリング孔 No. (位置座標)	種別	規格	調査数量
A-2 孔	土質ノンコアボーリング	上部溶岩	(標高 1037mL
(X=39.945045、	孔径 116mm(GL±0 m~GL-4.1m)	火砕岩	~927.0mL)
Y=140.921910	岩盤オールコアボーリング		(GL±0m~GL-110m)
周辺)	孔径 HQ(GL-4.1m~GL-110m)		
	拡孔ボーリング		
	孔径 HQ→116mm(GL-4.1m~GL-40m)		
	ケーシング区間		
	GL±0m~GL-40m(孔径 116mm)		

表 2.1-1 調査地点

# 2.1.1.2. 調査数量

表 2.1-2 調査数量

	項目	単位	数量	備考	
	準備作業	式	1	_	
	設営・解体	箇所	1	-	
	ノンコアボーリング (ワイヤーライン工法)(清水掘り)	m	4.1	GL±0∼GL-4.1m, 116mm	
掘削作業 (鉛直)	オールコアボーリング (ワイヤーライン工法)(清水掘り)	m	105.9	GL-4.1~GL-110m HQ_WL 掘削終了後孔曲がり測知	È
	拡孔ボーリング (ワイヤーライン工法)(清水掘り)	m	35.9	GL-4.1~GL-40m, 116mm	
透水試験	注水による岩盤の透水試験	回	10	GL-10~GL-110m間で10m 延べ10回	毎
孔壁映像撮影	孔壁展開型 (ボアホールスキャナ)	m	92.1	GL-15.7~GL-108m間 開口性割れ目解析含む	
孔内微流速 測定	孔内微流速 自然水位/注水時水位の2段階を m 32 GL-76(合成水位)~GL-108m間 測定 測定		08m間		
地下水採取	ベーラーによる	回	5	GL-20m,GL-80m,GL-90m, GL-100m,GL-105m (深度は発注者指示によ	3)
地下水観測孔 仕上げ VP50		式	1	地下水位以下孔底まで ストレーナ加工(開孔率0.1%程度)	
自動観測装置 設置及び観測	絶対圧水位計+バロメーター	式	1	-	
水質分析	【採水時測定項目】 水温,pH,EC,ORP,DO,CO2ガス 【室内定量分析】 [Na],[Mg],[K],[Ca], [Total Fe],[溶解性Fe], [Fe2+],[Mn],[Si],[As], [P],[A1],[C1],[SO42-], [HCO3-],[Total CO2], TC,SS,8.4Ax,4.0Ax, As価数分析	試料	5	GL-20m GL-80m GL-90m GL-100m GL-105m (発注者の指定した深度 孔内水による)	Ф
	コアの反射型顕微鏡観察	試料	5	GI-39 20∼39 40m	硫化物等
盆栖回宫	粉末法X線回折	試料	5	$GL-57.50 \sim 57.60m$ $GL-72.60 \sim 72.80m$	バルク、Cuターゲット
動物門化	定方位法X線回折	試料	5	GL-78.35~78.50m GL-101.60~101.70m (変計学の地二にトス)	水簸試料、エチレン グリコール処理含む
	蛍光X線分析	試料	5	(光社有の指示による)	
	データ整理・解析	式	1	-	
	報告書作成	式	1	-	

名	称		型式		仕		様	数量	備	考
			エヌ・エル・シー	4	法	(mm)	$2,235 \times 1,160 \times 1,590$			
試	錐	機	L-38 メガロ	重量	(原動桐	幾除)	1,560kg	1台		
				巻 ( シ	上 能	a 力 ル)	4.8t			
同	上	用		出		力	19kw	1/2		
原	動	機	>19KW	回	転	数	1,750	1日		
			鉱研	4	法	(mm)	$1,700 \times 620 \times 1,000$			
主試錐ボ	ペンプ		MG-15	重		量	430kg	1台		
			4筒複動ポンプ	吐出	量×最大	大圧力	130L/min  imes 7.0Mpa			
同	F	用	モーター	出		力	11kw	1.4		
原	動	機	11kW	電		圧	200V	177		
ワイヤー	ーライン		利根	4	法	(mm)	2,000×1,180×950	1.4		
ホイスト			WHE-2500D	重		量	1.3t	1日		
同	上	用	モーター	出		力	11kV	1.4		
原	動	機	1 1 kW	電		圧	200V	177		
掘	削	櫓	四脚	4	法	(mm)	3,000×2,000×9,000	1基		
マシ	ン基	礎	H鋼	4	法	(mm)	H300×4,000	4本	94kg/m	
発	電	機	デンヨー製	形		式	DCA-60LSIE	1台		
Lm	bkr.	+444		アセ	チレン	ガス	15k	友 1 士		
90	的	惤		酸	素 た	バス	14k	台1平		
卢士 . 4	いってんがい	a.	エヌ・エル・シー			径	25mm	1式		
94-9	-~1~~	V	N L — 5	吊	荷	重	5.0t	1式		
4° 11	/ H H J L		HQ-WL	単	管	臣	3,00m/本	36本		
- y - y - y	7749F		HQ-WL	単	管	長	1,00m/本	1本		
コアノ	バーレ	N	HQ-WL	単	管	長	4.14m/本	1式		
インナー	・チューブ		HQ-WL	単	管	油	3,00m/本	1式		
ケー	シン	グ	φ 116mm	単	管	長	3.00m/本	14本		
Pt -	b V	н		4	法	(mm)				
虹 小	7 /	9	簡易プール約2m <sup>2</sup>	寸	法	(mm)	2,600×1,600×650	2基		
水中	ポン	プ	ツルミ製		2时		100V×0.4kw	1台		
ツ ー	- <i>I</i> V	ス			工具他		スイベル・ホルダー類	1式		
運 搬	トラッ	ク	いすゞ自動車		4t車		ユニック付	1台		

表 2.1-3 主要機器設備一覧(掘削ツール)

	名		称	:	型	式	仕		様	数量	備	考
透	水	試	験	器	東陽雨	海事製	孔内静水压透	彭水試験装置	US-30-Ⅱ	1台		
パ	ッ		力	ĺ	エヌ・エ	ル・シー	φ	58mm ×3.00m	l	1本		
注		水		管	AQ¤	コッド		3.00m/本		33本		
送	水	ポ	ン	プ	ツル	ミ製	吐出 最大吐 ※脈動が	容量 150L/m 出圧力1.5MPa 没定圧力の±1	in 以上 20%以内	1台		

表 2.1-4 主要機器設備一覧(測定ツール)

# 2.1.1.3. 工程表

(現 場 作 業)

表

程

Н

ŧ. 令和元年11月 道路通行止め 当初予定 実績 ...... 令和元年10月 T 業務名 :平成31年度休廃止鉱山における抗廃水処理の高度化調査研究事業に係る八幡平地域における水理地資構造に係るボーリング調査 ..... ..... 令和元年9月 ----令和元年8月 現場工期:令和元年8月13日~令和元年10月31日(実績) 契約工期:令和元年7月23日~令和2年 1月17日 現地搬入(資材搬入、設営) Ψ 注水による岩盤の透水試験 自動観測・記録装置設置 驖 地下水位データ回収 地下水観測孔仕上げ Ħ 水質分析(探水時) **ボー こ ソ グ** 孔内徽流速测定 孔壁映像撮影 멅 地下水探取 種別 被员 华



2.1-5



麦

程

Н



2.1-6

## 2.1.1.4. 地形地質概要

調査地点は、岩手県八幡平市の西方に広がる奥羽山地東端の、八幡平・茶臼岳南東方に伸びる 標高1300m前後の稜線より東側に広がる凹地に位置する。

調査地を含む凹地は、西側の稜線直下を滑落崖とする地すべり地帯であり、その北端を、赤川 の最上流部である恵比寿沢が東方へ流下している。調査地点は、地すべり地の北端付近の恵比寿 沢右岸に位置する。

調査地周辺は、通商産業省工業技術院地質調査所日本地質図大系東北地方によれば、茶臼岳-前森山火山岩類に属する、恵比寿森・屋ノ棟岳溶岩と、砂・礫で構成される地すべり堆積物の境 界付近に位置する。



図 2.1-1 調查位置図(広域図) 国土地理院 地理院地図



#### 図 2.1-2 調查位置図 国土地理院 地理院地図







図 2.1-4 地質層序

通商産業省工業技術院地質調査所 日本地質図大系編集委員会 1992

# 2.1.2. 調査実施方針

本業務は八幡平地域の鉱床採掘地域の地下水流上流側における地質構造(鉛直構造)と各地質 の水理特性を明らかにすることにより、広域水循環解析に用いる水理地質構造モデルの組立の基 礎資料を得るため、ボーリング調査及び透水試験を実施した。

併せて、今後の解析・検討の検証・参考資料を得るため、水質分析及び鉱物同定を行った。 なお、ボーリング掘削完了後は、地下水観測孔及び自動観測装置を設置した。

2.1.3. 調査手順

ボーリングの掘削深度は地表下 110 m までとした。また、透水試験は土砂風化部分を除き、地 表下 10~110 m 区間の間で、10 m 毎に 10 回実施した。

地下水採取は、20m、80m、90m、100m、105mにおいて5試料採取した。 ボーリング調査の手順を図 2.1-5に示す。



図 2.1-5 ボーリング作業手順

# 2.1.4. 調査方法

# 2.1.4.1. 調査ボーリング (ワイヤーライン工法)

ボーリングは、ワイヤーライン工法によって実施した。

ワイヤーライン工法はロータリーボーリングの一種で、ワイヤーラインロッドの先端に取り付けたコアバーレルを回転させることにより掘進する。掘進後、ロッドを昇降することなく、コアを納めたコアバーレル(図 2.1-6)からオーバーショット(図 2.1-7)を用いて、インナーチューブのみをワイヤーロープを使って地上に回収するコア採取器具を使用した工法である。ロッド昇降の手間と時間を必要とせず、深い箇所のコア採取に適する。



掘削中は作業前に孔内水を確認し、掘進速度、湧水、逸水量、スライムの情報等に注意 し、変化の状況を作業日報として記録した。

• 掘削深度は、JOGMEC 職員と協議し、110 m までとした。

## 2.1.4.2. ボーリングコア判定基準

ボーリングコアの観察に際しては、表 2.1-6~表 2.1-10 に示すコアの判定区分表、表 2.1-11 に示 す岩盤区分基準、図 2.1-8 に示す RQD を参考に、柱状図の作成を行った。

なお、本業務におけるボーリングについては、"岩盤柱状図"を用いて柱状図を作成した。

記 号	硬 軟 区 分
А	極硬、ハンマーで容易に割れない。
В	硬, ハンマーで金属音。
С	中硬、ハンマーで容易に割れる。
D	軟, ハンマーでボロボロに砕ける。
E	極軟、マサ状、粘土状。

表 2.1-6 コア硬軟区分判定表

(財)日本建設情報総合センター1999:ボーリング柱状図作成要領 p.10

表 2.1-7 コア形状区分判定表

記号	模式図	コ ア 形 状
I	K	長さ 50 cm以上の棒状コア。
П		長さが 50~15 cmの棒状コア。
Ш	PERCE	長さが15~5 cmの棒状~片状コア。
IV	72.45.26.26.27.77.28.2	長さが5cm以下の棒状~片状コアでかつコアの外周の一部が認められるもの。
V	99999999999999999999999	主として角礫状のもの。
VI	an an that the state of the sta	主として砂状のもの。
VII	The state	主として粘土状のもの。
VIII	1	コアの採取ができないもの。スライムも含む。(記事欄に理由を書く)

(財)日本建設情報総合センター1999:ボーリング柱状図作成要領 p.11

表 2.1-8 コア割れ目状態判定表

記号	割れ目状態区分
а	密着している、あるいは分離しているが割れ目沿いの風化・変質は認められない。
b	割れ目沿いの風化・変質は認められるが、岩片はほとんど風化・変質していない。
с	割れ目沿いの岩片に風化・変質が認められ軟質となっている。
d	割れ目として認識できない角礫状、砂状、粘土状コア。

(財)日本建設情報総合センター1999:ボーリング柱状図作成要領 p.12

a	非常に新鮮である。
β	新鮮である。層理面、片理面にそって僅かに変色があり割れやすい。
γ	弱風化している。層理面、片理面にそって風化している。
δ	風化している。岩芯まで風化している。ハンマーで簡単に崩せる。
8	強風化している。黄褐色化し、指先で簡単に壊すことができる。

表 2.1-9 風化区分

(財)日本建設情報総合センター1999:ボーリング柱状図作成要領 p.13

表 2.1-10 変質区分

記号	変質区分	変質 状 況
1	非変質	肉眼的に変質鉱物の存在が認められないもの。
2	弱変質	原岩組織を完全に残し、変質程度(脱色)が低いもの。あるいは非変質部の割合が高いもの(肉眼で50%以上)。
3	中変質	肉眼で変質が進んでいると判定できるが,原岩組織を明らかに残し,原岩判定が容易 なもの。または非変質部を残すものおよび網状変質部。
4	強変質	構成鉱物,岩片等が変質鉱物で完全置換され,原岩組織を全く〜殆ど残さないもの。

(財)日本建設情報総合センター1999:ボーリング柱状図作成要領 p.15



# 図 2.1-8 コア採取の状況と RQD 表示との関係

(財)日本建設情報総合センター1999:ボーリング柱状図作成要領 p.17

岩盤	対象岩盤の一般的目安としては,新鮮な岩石のテストピースの自然乾燥一軸圧縮強度が800km f / cm <sup>2</sup> 以上のもの。									
等級	新鮮岩の露頭部における岩石のハンマー打撃によっ	って、一般に金属音が発生する。								
	岩盤の一般的性状	ボーリングコアの状態								
А	岩質はきわめて新鮮で、火成岩の造岩鉱物あるい は堆積岩の構成粒子は全く風化変質しておらず、 また節理はほとんど分布していない。岩盤として はきわめて堅牢、固密である。	コアは100cm以上の棒状をなし岩質極めて新鮮 で、コアの表面は非常になめらかであり、節理は 認められない。(すなわち、コア箱1mにおいて は、割れ目の認められないintact rockである) コアの採取率は極めてよい。								
В	岩質は新鮮で,火成岩の造岩鉱物あるいは堆積岩 の構成粒子はほとんど風化変質していない。また 節理の分布はまばらであり,密着している。岩盤 としては堅牢,固密である。	コアは40~50cm前後の長柱状が主体をなし、岩質 は新鮮で、コアの表面はなめらかである。節理の 分布は少なく、密着している。節理面は稀れに汚 染されていることもある。コアの採取率は極めて よい。								
C <sub>H</sub>	岩質はおおむね新鮮, 堅硬であるが, 火成岩では 造岩鉱物中, 長石類および雲母, 角閃石などの有 色鉱物がわずかに風化変質している場合もあり, また堆積岩類では構成粒子として二次的に存在す る長石類および有色鉱物がわずかに風化変質して いる場合もある。節理はかなり分布しており, ま た節理面は風化変質をうけて変色汚染されている 場合が多く, ときには風化物質がうすく付着して いることもあるが, 一般にはおおむね密着してい る。岩盤としては堅固である。	コアは10~30cm前後の柱状が主体をなし, 岩質は おおむね新鮮で, コアの表面はおおむねなめらか である。 節理はやや発達し, 節理面はしばしば淡褐色に風 化変質しているが, 風化変質は内部まで進んでい ない。時に節理面には薄く風化物質が付着するこ ともある。 コアの採取率はよい。								
См	岩質は一般にやや風化変質している。このうち火 成岩では石英を除き,長石類および有色鉱物は風 化を受け,しばしば褐色あるいは赤褐色を呈して いる。また堆積岩類では構成粒子として二次的に 存在する長石類および有色鉱物が風化変質し,火 成岩の場合と同様,しばしば褐色あるいは赤褐色 を呈している。節理は開口し,しばしば粘土ある いは風化物質を挟在している。このクラスの岩石 中には細かな毛髪状割れ目が多量に胚胎している ことが多い。 その他,岩質は新鮮であっても,開口節理の分布 が著しく,クラッキーな状態を示すものもこのク ラスに含まれている。	コアは10cm前後の短柱状が主体をなし、岩片状を なす場合でも組合せると円柱状になる。岩質はや や風化変質しておりコアの表面はおおむね粗面を 呈する。節理面は風化汚染され、内部まで風化が 進んでいる。コアバレルからコアを抜いた時新た な割目が生じる。コアの採取率はおおむね80%以 上。岩質が新鮮でも、開口節理が発達し、コア長 の短いものはこの岩級に含まれる。								
CL	火成岩の造岩鉱物あるいは堆積岩の構成粒子は著 しく風化を受けているために、岩石全体としても 一般に褐色あるいは赤褐色を呈する。節理は開口 し、粘土および風化物質の挟在が著しい。このク ラスの岩石では細かな毛髪状の割れ目の分布が著 しく、さらにこの割れ目に沿って風化も進んでい る。その他、岩質は新鮮であっても、開口節理の 分布が著しく、石積状の産状を示すのもこのクラ スに含まれる。	コアはおおむね岩片状が主体をなし、組合せても 円柱状にすることは難しい。岩質は風化している 為、コアの表面はザラザラし、一般に褐~茶褐色 を呈する。風化変質は節理付近のみならず全体に 進んでいる。コアバレルからコアを抜いた時崩壊 し易い。採取率はおおむね80%以下。 短柱状コアと砂~粘土状コアが繰り返す場合もこ の岩級に含まれる。								
D	火成岩の造岩鉱物あるいは堆積岩の構成粒子は著 しく変化を受けしばしば砂状および粘土状を呈す る部分が見られる。このクラスの岩盤では節理の 分布はむしろ不明瞭である。	コアはおおむね砂~粘土状を呈し、一見岩盤被覆 層との区別は難しいが、相対的に締り度よい。 通常の清水掘りでは、ダブルコアチューブを用い てもコア採取率は著しく悪い。								

表 2.1-11 ボーリングコア判定についての岩盤等級区分基準

(財)日本建設情報総合センター1999:ボーリング柱状図作成要領 p.20

#### 2.1.4.3. 透水試験(注水による岩盤の透水試験)

本試験は、岩盤の透水係数を求めることを目的とした。

(1) 試験の概要

ボーリング孔内をパッカーにより任意の試験区間に区切り、試験区間内の有効注水圧力を段階 的に上昇させながら注水し、その定常時の注水流量から透水係数を求める定常法による透水試験 である。



図 2.1-9 透水試験概要図 (社)地盤工学会:地盤調査の方法と解説、P591,614

(2) 試験用具

透水試験に用いる機器は、下記の形式又は能力のもの若しくは同等品以上とした。

- ポンプ:最大圧力が計画する注水圧力を満足するもので、吐出圧力及び吐出量の脈動が 小さい形式のものとする。場合によっては吐出口付近にアキュムレーターを取 り付け、脈動を小さくする。
- 水圧計 : 目盛りの最小単位が0.001 MPa (≒0.01 kgf/cm<sup>2</sup>) 以上のものとする。
- 流量計 : 目盛りの最小単位が0.1 L/min以上の流量計とする。
- パッカー: 上部からのパッカーリークを防止するために、1m程度あるいはそれ以上の長さ で、比較的軟らかいパッカーの使用を原則とする。
- 加圧装置: 高圧ガスボンベ(窒素ガス)とする。

(3) 試験方法

- 試験方法は原則としてステージ工法によるものとする。また、地盤の変形、破壊が生じないように、有効注水圧力を低圧とする。
- ② 試験深度は、ボーリングコア観察により、所定深度周辺で亀裂の少ない位置を選定する。
- ③ 試験孔は崩壊のない安定した孔壁に仕上げる。ただし、パッカーの遮水効果が良好でないと予想される場合は、事前にセメントなどによって孔壁を保護する。
- ④ 加圧装置によりパッカーを膨らませ、孔壁に密着させる。注水開始後、パッカー上部への水漏れが発見又は推定されたときは、パッカー位置を上下に移動し再試験するものとする。
- ⑤ 水圧計を用いて、試験区間内の平衡水位を測定する。これと合わせ、水圧計と試験区間 中央の高さの差(h1)、平衡水位と試験区間中央の高さの差(h2)を求める。
- ⑥ 最大注入圧力は 0.20 MPa (≒2.0 kgf/cm<sup>2</sup>)を基本とし、増加過程の圧力段階は最大注入圧力を含めて 5 段階程度、減少過程は 4 段階程度を目安として各注入圧力における流量を観測する。

表 2.1-12 計画注水圧力パターン

 $0 \rightarrow 0.04 \rightarrow 0.08 \rightarrow 0.12 \rightarrow 0.16 \rightarrow 0.20 \rightarrow 0.16 \rightarrow 0.12 \rightarrow 0.08 \rightarrow 0.04 \rightarrow 0 \text{ (MPa)} \\ [0 \rightarrow 0.40 \rightarrow 0.80 \rightarrow 1.20 \rightarrow 1.60 \rightarrow 2.00 \rightarrow 1.60 \rightarrow 1.20 \rightarrow 0.80 \rightarrow 0.40 \rightarrow 0 \text{ (kgf/cm}^2) ]$ 

- ⑦ 注水流量を流量計で1分ごとに測定し、注水流量がほぼ一定になったときの値を注水圧力 p1 (Pa) における測定注水流量Q1 (m<sup>3</sup>/s) とする。
- ⑧ 透水係数の算出は、以下に示す式により行う。

$$k = \frac{1}{2\pi La} \ln \left( \frac{2L}{D} \right) \begin{array}{l} D : 試験区間(孔)の直径 (cm) \\ L : 試験区間の長さ (cm) \\ a : 直線部分の傾き (s/m2) \end{array}$$

#### 2.1.4.4. 孔壁映像撮影

本業務の地質調査で得られたコアと孔壁の対比及び層相の観察を目的として孔内観測(ボアホ ールスキャナ観察)を行った。条件は下記のとおりである。

- 孔内観測は、孔内洗浄後に実施する。
- ② 使用する機器等については、事前に JOGMEC 職員に承諾を得るものとする。
- ③ 孔壁画像取得直後に画像を確認し、画像が鮮明でない場合は再度撮影するなど、所定の 品質を確保する。

なお、地山状態により鮮明な孔壁画像の取得が困難な場合は、JOGMEC 職員と協議する。

- ④ 孔壁展開画像はボーリングコアに併せて深度補正する。
- ⑤ ボーリング孔壁の全開を展開した状態で、定方位に連続した画像を観測記録し、亀裂の 走向・傾斜・開口幅等の観測を行う。

なお、今回観察に使用した機器は以下のとおりである。

#### (1) 観察装置

ボアホールスキャナ観察、及び解析には、BIP システム(Borehole Image Processing System:孔 壁展開画像作成装置)を使用する。図 2.1-10 に BIP システムの構成図を示す。

		孔壁展開画像観察記録装置	深度測定ブーリー
		220mケブラーケーブル及びウインチ	$\checkmark$
フローブ	<ul> <li>• \$\$\phi\$ 50 mm × 2.20 m</li> <li>• 計測ボーリング孔径に合わせてアクリル窓を交換</li> </ul>		
	することで大口径にも適 応可能。 ・重量10 kg		
ケーブル	・5芯ケーブル	制御 基盤 セオー	
ウインチ	・220 mケブラー ・昇降速度0~11 m/s ・リモートコントロール	ア クリル 家 ア クリ リル 家 ア クリ ノ ル 家 ク ワ クリ ノ ル 家 ク ワ ク ワ ク ス ク ワ ク ス ク ク の ク の ク の の の の の の の の の の の の	<u></u>
孔壁展開画像	・液晶ディスプレイ	方位計位	R
観察記録装置	・光磁気ディスク	h <sup>*</sup> 779-	₽
	・フルガラー表示 ・計測速度0~54 m/h		

図 2.1-10 BIP システムの構成図(現場システム)

#### (2) 画像解析

本業務で得られた観測データについては、不連続面解析等の解析を行うものとする。不連続面 の走向傾斜の測定は、現場で観察記録した光磁気ディスクを読み出して室内解析システムのディ スプレイ上に表示させる。

図 2.1-11 に示すように孔壁との切合線として示される一連の地層面、亀裂面にマウスによりサインカーブ上の接点を移動させてフィットさせることによって行う。

計算された該当面の走向傾斜はディスプレイに表示され、ファイルに記録される。また、同様 に開口幅もポイントした2点間の実距離として示される。



節理・亀裂面等の不連続面



- ボーリング孔内の岩盤状況及び不連続面解析にあたり、以下のものを作成した。
- ① 孔壁展開画像カラープリント
- ② 不連続面一覧表
- 不連続面の解析結果図

### 2.1.4.5. 孔内微流速測定

孔内における深さごとの水頭差の違いによって上下方向に流れる地下水の孔内流速を測定し、 地盤の透水性や地下水の流動を把握することを目的とした。

- 測定は、水位を自然水位と注水時水位の2段階に変化させて行い、両者の比較から測定対 象区間の水頭及び透水係数の深度分布を算出する。
- ② 測定は原則として 1.0 m ピッチで行うが、透水試験の結果を考慮し、高透水部で 0.5 m ピ ッチとする場合は、事前に JOGMEC 職員と協議を行う。
- ③ 地質境界部を貫通した場合、帯水層相互の地下水の交換によって地下水の流れが変化することがあるため、地質状況を確認しながら測定を行う。

#### (1) 試験方法

孔内微流速測定の測定方法はスピナー式と呼ばれるもので、孔内の上下方向の流速をプロペラの回転数により検出するものである。図 2.1-12 に測定器の概要を示す。



図 2.1-12 孔内微流速測定(スピナー式)測定状況概要図

## 2.1.4.6. 地下水採取

採水深度は、地質状況及び透水状況を判断し、深度 20 m、80 m、90 m、100 m、105 mの5 地 点とし、採水はベーラーサンプラーを使用した。なお、掘削水の影響を除くために、掘削後 8 時 間以上経過後の地下水を採取した。

ベーラーサンプラーは $\phi$ 45 mm、長さ 1000 mm、採水容量 1000 mLのステンレス製のものを使用した。

使用するベーラーサンプラーは下部にボール弁があり、水中に下げて持ち上げる時に弁が閉ま り筒の中に採水ができる。「取水具」をベーラーサンプラーの下部に挿入するとボール弁が押し 上げられて、採水した水をビーカー等へ容易に取り出すことができる。

なお、採水時には、以下の項目について現場で測定した。

採水時測定項目



表 2.1-13 採水時測定項目

目視観察、水温、pH、EC、ORP、DO、CO<sub>2</sub>ガス

図 2.1-13 ベーラーサンプラー

# 2.1.5. 調査結果

# 2.1.5.1. 資材搬入

作業実施箇所は十和田八幡平国立公園内の県道 23 号(アスピーテライン)沿いに位置する国 有林であり、機材搬入搬出に際しては、交通法規を遵守し、不用意に道路を占有しないよう配慮 し、JOGMEC が取得した許認可に基づき資材搬入のために必要な作業ヤードの整備を行った。



# 図 2.1-14 調査位置図



図 2.1-15 県道からの進入路入り口の状況

# 2.1.5.2. 準備·設営作業

- ① 試錐座は JOGMEC 職員より指定された場所に設置した。
- ② 試錐座の作業面積は、約5m×19mを作業範囲とした。
- ③ 試錐機設置個所はH鋼等で安全に作業が出来るよう、強固な作業場を製作した。
- ④ 運搬路、資材置き場は指定された区域内とし、区域以外は使用しないこととした。
- ⑤ 資材搬入・試錐機の設置は4tトラックのユニッククレーンを使用して行った。
- ⑥ 燃料・掘削水について
   軽油:発電機の燃料(軽油)は掘削孔付近まで運搬した。運搬頻度:2日毎】
   掘削水:掘削水はボーリング地点近傍の赤川より揚水ポンプにて取水し、掘削孔近傍に
   設置したタンクに貯水し、使用した。



図 2.1-16 作業ヤードの伐採整地状況



図 2.1-17 ボーリングマシン仮設状況写真

# 2.1.5.3. ボーリング調査結果

本業務で実施したボーリングの柱状図は表 2.1-14~

表 2.1-15 に示すとおりである。

ボーリングコアの観察結果、掘削区間には2層の安山岩と、それらの地層に挟まれて、火山礫 凝灰岩及び凝灰岩よりなる火砕岩と、砂岩が出現することが判明した。

表 2.1-16 にボーリングで出現した地層区分と、その特徴を示し、図 2.1-33 に全掘削区間のボー リングコア写真を示す。 ボーリング柱状図

平成31年度休廃止鉱山における坑廃水処理の高度化調査研究事業に係 る八幡平地域における木理地質構造に係るボーリング調査 柘 査 麕

	a la
—リングNo.	

		42.16"	18.87″			治 (1) (1) (1) (1) (1) (1) (1) (1) (1) (1)	( ( ( ( ( ( ( ( ( ( ( ( ( (		— 御火/8 hundimetrational metricularity	92: 081 	s 満水/的 13		80 11 11 25 55 55 55 55 55 55 55 55 55 55 55 55	88 81 almatuuluuluuluuluuluuluuluuluuluu		。 23 路水/8 33	<u>8</u> 8 	anahanahanhannahan	熊主	86 1.5 × / 8 × / × / 8 × / × /	25 後天/20 100 100 100 100 100 100 100 100 100 1	
		9°56'	0°55'			福山田 三十二十二十二十二十二十二十二十二十二十十十二十十十二十十十十十十十十十十十	「小壁保護」	0 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3	33 50 31 	5 270 220 220	440	333	1 57 70	137	88	30	129	267	131		2004 1200 H	: C
	- HNo.	å 39	経 14	۲ لی تا ۲ لی تا		原位置試驗 (室内試驗 (	)	~ (p)		4		19.00 米爾公本	20.00			1		39.20 39.40	-			
ボーリング	بن ا	뷰	17日東	- 1 - 3 8 /		~ 減 驟	-40 						020			2027 2027		50 0	2			UcO
关		Ш I – I	2年1月	・ - キレダイ - トダイ	÷	<ul> <li>「標準費人 値~深度」図</li> <li>オン値</li> <li>オン値</li> <li>アンゴン値</li> <li>エカ</li> <li>エカ</li> </ul>	₩ 01- 線 粉 02-			8 10 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1	L 265 1193 1146 1513 1513 1513 1641		633 046		22 25 25 25 25 25 25 25 25 25 25 25 25 2	2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2	0108 0059 111 111 111 111 111 111 111 111 111 1	1010 1010 1010 1010 1010 1010 1010 101	686 0026 1026 118 138 178	001 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000	205 205 2014 108 108 501 503 503 503 503 503 503 503 503 503 503	1004
<b>15</b> 供名事来(		木字赤川	☐ 23 ⊟ ~		מה הכי	、	0110		¢⊈ ₩		14	(46.66) (0.20) (0.20)		2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2	(0.2.0) (0.2.0) (0.2.0)		Id	(143) (14)) (143)			3.70	E CORRE
5度化調查 グ調査		松尾寄	1年7月	業場	光电波	<b>札内水位3 /</b> ● ( z	/測定月日		5 	9/14 9/14										56/56	199 199 199	49.96
正熟山における功策不必理め高 3ける木理地質構造に係るボーリン、		4 市大字	間令和	一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一		楽 (1) (1) (1) (1) (1) (1) (1) (1) (1) (1)	2 D 区 [ % ] 公		(100) (100) (100) (100) (100) (100) (100) (100)	(100) (100) (100) (47) (100) CM	(100)* D		D	10000000000000000000000000000000000000		(00) (00) (00)	(60) D	(00) (06) (06)	(100)	[46] <sup>(100)</sup> (90) (90) (100)	v(00) (00) (00) (00) (00)	\$(00)
		見 小 幡 平	調査期	武 m a	)   	□ ズ ↓ K ↓	а с – .	>		18 13 13 13 13 13 13					49 J.	00 <b>4</b>	<u>9</u> 89898	<u>*************************************</u>	10 [5]	<	€T 21 00	
		市 市	資源機構		<u>0</u> 00 00 種				料:棒状〜短柱 る程度の硬さ。 みられる。	5向の割れ目が をび暗赤色の後	割れ目が多く 状コアとなる。 化している。	と含む凝灰岩を *となる。 )、原岩絶織お	孔壁は軟質。	と他む議厌帯を 「採頭される。	)、原地絶儀なく勝張し、ボロ	たしている。	尾取できない。 そとなる。	■織は不明瞭で 2際が多く発達 く館と思われ、 うである。	B線は不明瞭で いやガラス質で ざらしている。	国線を含む 縦反 たる線を含む 院岩組織不明。 国際が発達し、	粒状の黄白色 むようになる。 国鞭を含む源沃 市る礫を含む 同当は不明。	関が発達し、
4以31年度休廃 5八幡平地域に3	_	調査位置	・金属鉱物	0 ● ● ● ● ● ● ● ● ● ● ● ● ● ● ● ● ● ● ●	。 「南」 「百」 「	弫	<del>₩</del>	土。ノンコア区間	石坊山造 風代し活 風代したおり、全体 国代アとなる。 アイーの強力で登け 赤色の義音な戦歩が	風化で、水平~縦J 達する。 花面沿いに赤褐色J 鉱物がみられる。	~強風化しており、 達し、短柱状~角礫 アの方面は黒~褐色	2~3cm程度の角礫が 体にする。 体に体える。 体に株式。 体に粘土化しており の構成物は不明。	ア流出、採取不能。 土化し、軟質。	2~3cm結束の角繰ら 2~3cm結束の角繰ら 存存者がコアとし	霰に粘土化しており び構成物は不明。 や舎むとコアは吸力 ロに崩力る。	္ 樂~土砂状。粘土/	ア流出区間。 館と思われ、コア ライムは砂~粘土は	3個「しくおり、原治条 4名にも数量備用の2 7名でも数量構成の2 7名でも少くガン もおもした思えかい	質しており、原治* る。 認が多く発達し、* る。コア表面はどら	2~3cm備展以下の) 右、按口帯と思わ 、変質しており、 時に食数目以下の2	- フ.メ。 康42.7mt行まり、 <u> まする自然硫黄を含</u> 2~3cm罹度以下の 3、 安山岩と思た 、 漆醋しており、	年にも教言以下の言
			ミ然ガス	力 <sup>270</sup> 。 出	百 180	風慾	七覧		→ (2) (2) (3) (4) (4) (5) (5) (5) (5) (5) (5) (5) (5		日第日 で	。 4 中王全王令	u 粘	·e州(州	o ~ ⊾ ④~~ ⊾	便	三軟ス	する金を全方	変も空も	~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~		<u>م</u>
者	中 王	5	人石油ラ	,06 ,06	°0 *	画 て て 日 七 日 日	水 形 状 の状態		。 日~日	م ا	N	o II	IV d	α I	~ 0 ~ H	p VI	N	σ <u> </u>	a IZ ~ Z	م ~ م ۲ ~ ۳		
	事業	– A –	政法、	色 81 18	受	包	麗	-	暗厌~厌	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	<sup>指 志</sup>		<b>淡</b> 厌	厌 ~	· 欲厌	R		灰~暗灰			灰~終灰	
			独立行	1037m	IIIOO.ULI	牡 光	》	** **	#	日 <del>加</del> 		त्वतः व द वद वद वद वद वद दरवद वद वद वद वद वद वद दरवद वद वद वद वद वद वद दरवद वद वद वद वद वद दरवद वद वद वद वद वद वद दरवद वद वद वद वद वद वद	1755555 1755555 1755555 1755555 1755555 1755555 1755555 17555555 1755555555	※ 日 業 薬 医 非	C 4 C 4 C 4 C 4 C 4 C 4 C C 4	बद बद बद बद बद बद देवेद बद बद बद बद देवेद बद बद बद बद देवेद बद बद बद बद बद बद बद बद बद बद दुवेद बद बद बद बद बद		<u>《《《《《《《《《《《《《《《《《《《《《《《《《《《《《《《《《《《《</u>		(	また。 	
		ング名	機関	標業	Щ Ц	景 皆	(III)	0 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 0		3.50 11.50	27201.91 06:0	1.30 19.70 19.70	16.20 20.80 5.30 21.70	<u>a &lt; a &lt;</u>	<u>K 1&lt; 1&lt; 1&lt; 1&lt; 12 k2 k2</u>	<u>16.40 31.6088 88</u> <u>14.40 32.6088</u> <u>14.40 32.6088</u>			4.50		्वर वर वर वर वर वर वर वर 	40
		リード	発	子 (1) (1) (1) (1) (1) (1) (1) (1) (1) (1)	諸	標長	(II)	3 2 1	4 0 0 0 0 0 0 0 0	10 12 12 13 102	14 15 16 102	17 17 18 19 10	$\begin{array}{c} 20 \\ 21 \\ 101 \\ 101 \end{array}$	22 24 25 26	27 28 29	30 31 10( 32 10( 32 10(	34 35 36	37 Iv 37 33 39 39 33 39 30 50 50 50 50 50 50 50 50 50 50 50 50 50	40 -	43 44 45	46 47 48 49	: بر ساب

表 2.1-14 ボーリング柱状図(1)



表 2.1-15 ボーリング柱状図(2)



(1) 0~4.1 m 表土

最大径 10 cm 程度の安山岩礫を含む礫混じり粘土状を呈する。

# (2) 4.1~16.1 m 輝石安山岩

全般に暗灰色~暗褐色を呈し、緻密・硬質である。斑状組織で、輝石類と思われる有色鉱物が 散見される。長石は酸化や風化が進んでいる部分では白濁している(図 2.1-18~図 2.1-19)。

4.1~11.50 m 間は強風化しており、全体に棒状~短柱状コアとなる。ハンマーの強打で砕ける 程度の硬さで、暗赤色の微細な鉱物がみられる。

11.50~12.9 m間は弱風化で、水平~縦方向の割れ目が発達する。割れ目沿いに赤褐色及び暗赤 色の微細鉱物がみられる。

12.90~16.10 m 間は中~強風化しており、短柱状~角礫状コアとなる。コアの方面は黒~褐色化している。



図 2.1-18 深度 6.6 m 付近の安山岩溶岩



# 図 2.1-19 深度 10.4 m 付近の安山岩溶岩

(3) 16.1~32.6 m 火山礫凝灰岩

全体に灰色を呈し、 φ2~3 cm 程度の角礫を含む凝灰岩を主体とする。

棒状~柱状コアとなるが、全体に粘土化が著しく、軟質で、原岩組織及び構成物は不明瞭である。

水を含むとコアは吸水膨張し、ボロボロに崩れる(図 2.1-20~図 2.1-21)。



図 2.1-20 深度 23.7 m 付近の火山礫凝灰岩



図 2.1-21 深度 17.6 m 付近の火山礫凝灰岩 水を含むと膨張し崩壊しやすい。

# (4) 32.6~42.50 m 凝灰岩

全般に灰色~暗灰色を呈し、礫分をあまり含まない凝灰岩よりなる。 部分的に珪化変質しており、原岩組織は不明瞭である。ややガラス質で、全体に φ 数 mm 程度 の空隙が多く発達し、コア表面はガサガサした肌ざわりである(図 2.1-22)。



図 2.1-22 深度 36.5 m 付近の凝灰岩 ややガラス質で、ガサガサしている。

# (5) 42.50~53.40 m 火山礫凝灰岩

全般に灰色~暗灰色を呈し、  $\phi 2 \sim 3 \text{ cm}$  程度以下の角礫を含む凝灰岩を主体とする。 軽石、安山岩と思われる礫を含むが、変質しており、原岩組織は不明瞭である。 全体に  $\phi$  数 mm 以下の空隙が発達し、ポーラスである

深度 42.7 m 付近より、粒状の黄白色を呈する自然硫黄を含むようになり、深度 52.50 m 付近よ り 微細な黄鉄鉱鉱物が点在する (図 2.1-23、図 2.1-24)。



図 2.1-23 深度 44.8 m 付近の火山礫凝灰岩 ややポーラスで、自然硫黄を含む。



図 2.1-24 深度 52.6 m 付近の火山礫凝灰岩 黄鉄鉱を鉱染状に含む。

## (6) 53.40~74.60 m 凝灰岩

全般に暗灰色を呈し、鉱化変質が著しい。原岩組織は不明瞭である。

53.40~54.70m間はややポーラスでガラス質となる(図 2.1-25)。

54.70~56.00m間は黄白色硫黄鉱物と赤褐色鉱物がまだらに分布する(図2.1-26)。

56.00~59.70 m 間は棒状コアとなり、非常に硬質で、微細な黄鉄鉱の集合体をまだらに含む (図 2.1-27)。

59.70~62.20 m 間は自然硫黄と微細な黄鉄鉱の集合体をまだらに含む。棒状コアで非常に硬質である(図 2.1-28)。

62.20~74.60 m は全体に棒状コアとなり、非常に硬質でハンマーの打撃で金属音を発する。原 岩組織はほとんど不明瞭で、全体に微細な黄鉄鉱の集合体がまだらに含まれ、金属光沢を発する。 また部分的に割れ目沿いに自然硫黄が付着する(図 2.1-29)。



図 2.1-25 深度 54.10 m 付近の凝灰岩 ややポーラスで黄鉄鉱を鉱染状に含む。



図 2.1-26 深度 55.80 m 付近の凝灰岩

白色自然硫黄と赤褐色鉱物を含む。



図 2.1-27 深度 56.00 m 付近の凝灰岩 微細な黄鉄鉱を鉱染状に含む。



図 2.1-28 深度 60.80 m 付近の凝灰岩 自然硫黄と微細な黄鉄鉱の集合体をまだらに含む。


図 2.1-29 深度 73.40 m 付近の凝灰岩 割れ目沿いに自然硫黄を含む。

(7) 74.60~80.70 m 砂岩

灰色~暗灰色を呈し、石英粒を多く含む砂岩と思われる。

灰色~暗灰色を呈し、黄白色を呈する自然硫黄が帯状~縞状に含まれる。全体に棒状で硬質である(図 2.1-30)。



図 2.1-30 深度 78.80 m 付近の砂岩

# (8) 80.70~110.00 m 輝石安山岩

全般に暗灰色~暗褐色を呈する輝石安山岩。

全体に中風化~弱風化で、棒状~柱状コアとなるが、部分的に風化が著しい軟質部を挟む。全体に顕著な鉱化変質は見られず、微量の硫黄鉱物と黄鉄鉱が点在する程度である。

80.70~84.30m間及び107.45~110m間はやや脱色、珪化しており、自破砕状と思われ、軟質となる(図 2.1-31)。

107.45 m 以深は空隙が発達しややポーラス。硫黄鉱物と微細な黄鉄鉱集合体をまだらに含む。 (図 2.1-32)。



図 2.1-31 深度 107.10 m 付近の安山岩 珪化、脱色し、白色化している。



図 2.1-32 深度 109.20 m 付近の安山岩 硫黄鉱物と微細な黄鉄鉱集合体をまだらに含む。

表 2.1-16 地層区分

分布深度	地層	岩相および割れ目状態	釖	达体	代表的なコア写真
0~4.10m	表土	-			
4. 10∼16. 10m	安山岩	暗灰色~暗褐色を呈する輝石安山岩。 4.1~11.50m間は強風化しており、全体に棒 水~短柱状っアとなる。 ハンマーの強打で砕ける程度の硬さ。暗赤 色の微細な鉱物がみられる。 11.15~12.9m間は弱風化で、水平~縦方 向の割れ目が発達する。 割れ目沿いに赤褐色及び暗赤色の微細鉱物 がみられる。 12.90~16.10m間は中~強風化しており、 短柱状~角爆状コアとなる。 コアの方面は黒~褐色化している。			
16. 10∼32. 60 m	火山礫凝灰岩	全体に			Contraction of the second
32.60~42.50m	凝灰岩	確分をあまり含まない疑灰岩。 全体に る数m程度の空隙が多く発達する。 ややガラス質で、コア表面はガサガサした 肌ざわりである。 変質しており、原岩組織は不明瞭である。 る。			
42.50∼53.40m	大山礫凝灰岩				
53.40~74.60m	凝厌岩	全体に鉱化変質が著しく暗灰色を呈し、 原岩組織は不明瞭である。 53.40~54.70m間はややボーラスでガラス 賃となる。 54.70~56.00m間は黄白色硫黄鉱物と赤褐 色鉱物がまだらに分布する。 56.00~59.70m間は棒状コアとなり、非常 に硬質で、微細な黄鉄鉱の集合体をまだら 含む。 59.70~62.20m間は自然硫黄と微細な黄鉄 鉱の集合体をまだらに含む。 棒状コアで非常に硬質である。 62.20~74.60ml注全体に棒状コアとなり、 非常に硬質でハンマーの打撃で金属音を発 する。原岩組織はほとんど不明瞭で、全体 に微細な黄鉄鉱の集合体がまだらに含まれ、 金属音を発わる。また部分的に割れ 目沿いに自然硫黄が付着する。		鉱	
74.60~80.70m	砂岩	灰色~暗灰色を呈し、石英粒を多く含む 砂岩と思われる。灰色~暗灰色を呈し、黄 白色を呈する自然硫黄が帯状~縞状に含ま れる。全体に棒状、硬質。		/	
80.70~110.00m	安山岩	暗灰色~暗褐色を呈する輝石安山岩。 全体に中風化~弱風化で、棒状~柱状コア となるが、部分的に風化が著しい軟質部を 挟む。全体に顕著な鉱化変質は見られず、 微量の硫黄鉱物と黄鉄鉱が点在する程度で ある。 80.70~84.30m間および107.45~110m間は やや脱色、韭化しており、自破砕状と思わ れ、軟質となる。 107.45m以深は空隙が発達しややポーラ ス。硫黄鉱物と微細な黄鉄鉱集合体をまだ らに含む。			



図 2.1-33 ボーリングコア写真(4.10~110 m)

# 砂岩

# 2.1.5.4. 孔内水位観測結果

# (1) 孔内水位

ボーリング掘削期間中に、手計り式水位計にて孔内水位を観測した。観測は原則として翌作業 日の掘削作業開始前とした。観測の結果を図 2.1-34 に示す。

観測の結果、深度 40 m まで掘削した翌日朝の孔内水位は深度 10.8~12.45 m で推移していたが、 その後深度 50 m 掘削まで孔内水位は確認されなかった。

深度 50~90 m間では孔内水位は掘削の進行に伴って深度 46.25~84.22 mと降下し、安定しなかったが、深度 90~100 m 掘削間は深度 77.4~77.6 m で落ち着き、さらに深度 110 m 掘削時点で孔内水位は上昇し、深度 71.19~71.85 m で安定した。



# 図 2.1-34 孔内水位測定結果

(2) ポテンシャル水位(平衡水位)

注入による岩盤の透水試験実施時に、試験区間の区間平衡水位を測定した。測定結果を図 2.1-35 に示す。

観測の結果、深度 10~80 m 区間では、ポテンシャル水位はほぼパッカー区間に位置し、地下 水はほとんど胚胎しないことが判明した。一方、深度 80~100 m 区間においては、ポテンシャル 水位は深度 75.00~76.85 m 付近にあり、さらに深度 110 m では深度 71.65 m 付近に確認された。 深度 75.00 m 付近より下位の層準に地下水が胚胎するものと推察される。



図 2.1-35 ポテンシャル水位測定結果

2.1-39

# 2.1.5.5. 孔壁画像撮影結果

孔壁映像撮影は、ケーシングパイプの下端深度以下の、GL-15.7~108.0 m 間について実施した。 代表的な層相について、以下に撮影結果を示す。

図 2.1-36 に、上部の安山岩区間の孔壁画像を示す。地下水位より上位に位置することから、カ メラの光源が反射し、流入したと思われる粘土類が付着しており、鮮明な画像とはなっていない。 ケーシングパイプの磁気の影響でカメラが回転するため、補正が正しく効かず、ねじれた画像と なっているが、節理等の割れ目は確認されない。



図 2.1-36 深度 15.7~16.00 m 間の孔壁展開画像

図 2.1-37 に火山礫凝灰岩の深度 29.50~29.80 m間を示す。孔壁には密集する礫が確認されるが、 節理等の割れ目や不連続面は見られない。

なお、鉛直方向の白色を呈する筋は、落下する水滴が映り込んだもので、カメラが方位を自動 するため、歪んで映っている。



図 2.1-37 深度 29.50~29.80 m 間の孔壁展開画像

図 2.1-38 に凝灰岩の深度 35.40~35.70 m 間を示す。孔壁には少量の礫が確認されるが、節理等の割れ目や不連続面は見られない。



図 2.1-38 深度 35.40~35.70 m 間の孔壁展開画像

図 2.1-39 に火山礫凝灰岩の深度 45.60~45.90 m 間を示す。孔壁には少量の礫が確認されるが、 節理等の割れ目や不連続面は見られない。



図 2.1-40 に火山礫凝灰岩の深度 49.00~51.00 m 間を示す。深度 49.80~50.95 m 間に、縦方向の 空洞がみられる。



図 2.1-40 深度 49.00~51.00m 間の孔壁展開画像

図 2.1-41 に凝灰岩の深度 72.00~72.30 m間を示す。黄色を呈する自然硫黄が割れ目を充填している。割れ目沿いに空隙は見られない。



図 2.1-41 深度 72.00~72.30 m 間の孔壁展開画像

図 2.1-42 に砂岩の深度 75.00~75.30 m 間を示す。割れ目沿いに黄色を呈する自然硫黄が見られ、 空隙には粘土分が付着している。



図 2.1-43 に砂岩の深度 78.00~78.30 m 間を示す。白色を呈する硫黄鉱物の縞状構造が観察される。



図 2.1-44 に下部安山岩の深度 83.20~83.50 m間を示す。縦方向の空洞が見られる。



図 2.1-44 深度 83.20~83.50 m 間の孔壁展開画像

図 2.1-45 に下部安山岩の深度 86.40~86.70 m間を示す。水平方向に近い、緩い傾斜の不連続面 が見られるが、開口はしていないように見える。



図 2.1-45 深度 86.40~86.70 m 間の孔壁展開画像

図 2.1-46 に下部安山岩の深度 104.40~104.70 m 間を示す。不連続面に沿って風化が進行し軟質 となり、掘削水によって孔壁が拡大している。



図 2.1-46 深度 104.40~104.70 m 間の孔壁展開画像

図 2.1-47 に下部安山岩の深度 107.30~107.70 m間を示す。安山岩の軟質部に縦方向の空洞が見られる。孔内微流速測定によって湧水も確認されており、みず路を形成しているものと思われる。



図 2.1-47 深度 107.30~107.70 m 間の孔壁展開画像

## 2.1.5.6. 透水試験結果(注水による岩盤の透水試験)

透水試験(注水による岩盤の透水試験)の結果を表 2.1-17 に示す。また、過年度に実施した A-1 ボーリングの結果と併せて今後の検討資料とするため、透水試験結果を基に、換算ルジオン値 を算出し、グラフとして整理した(図 2.1-48)。

試験の結果、深度10~50m間、60~70m間、及び80~100m間では透水係数は6.59×10<sup>-6</sup> m/sec ~5.77×10<sup>-8</sup> m/sec の低い値を示し、50~60m、70~80m及び100~110m間では6.28×10<sup>-4</sup> m/sec ~4.54×10<sup>-5</sup> m/sec の高い値を示すことが判明した。

ボーリング区間の地層及び孔壁画像撮影結果と対比すると、地層は全体に塊状を呈し、節理等の割れ目も少ない。ただし、深度49.8~51.00m付近、深度75.10~75.20m付近及び深度107.35~107.70m付近にはみず路と思われる空洞が観察され、これらの箇所を含む区間における透水係数が高い結果となった。

St.No.	船	弌験実	施深度		透水係数 (m/S)	ルジオン値 Lu	換算 ルジオン値 Lu'	最大注入圧力 (Mpa)	限界圧力 (Mpa)
1	10.00	m ~	20.00	m	6.59E-06	-	46.7	0.198	_
2	20.00	m ~	30.00	m	1.31E-07	-	0.9	0.199	_
3	30.00	m ~	40.00	m	6.20E-07	-	4.4	0.197	_
4	40.00	m ~	50.00	m	5.22E-07	_	3.7	0.204	_
5	50.00	m ~	60.00	m	1.73E-04	-	1224.1	0.010	-
6	60.00	m ~	70.00	m	5.77E-08	-	0.4	0.240	_
7	70.00	m ~	80.00	m	6.28E-04	-	4445.6	0.003	_
8	80.00	m ~	90.00	m	3.29E-06	-	23.3	0.205	_
9	90.00	m ~	100.00	m	1.72E-07	_	1.2	0.294	_
10	100.00	m ~	110.00	m	4.54E-05	_	321.0	0.039	_

表 2.1-17 透水試験結果一覧



図 2.1-48 透水試験結果 (Stage1~Stage10)

# 2.1.5.7. 孔内微流速測定結果

孔内微流速測定結果を図 2.1-49 に示す。

測定は孔内水位が存在する深度 75 m 以深について実施し、さらに、孔壁の崩壊の危険性が懸 念されたため、深度 75~84 m 間と、深度 85~108 m 間の2回に分けて実施した。また、試験は透 水性を把握するため、自然状態と注水状態の2 状態において実施した。

測定の結果、深度 75.0~75.5 m間において、下降流を示す流速変化がみとめられた。この区間 については、孔壁映像撮影によって、深度 75.10~75.20 m付近に空洞が確認されており、これが みず路を形成し、逸水しているものと考えられる。

深度 107.0~108.0 m間においては、上昇流を示す流速変化が認められた。この区間についても 孔壁映像撮影によって、深度 107.35~107.70 m付近に空洞が確認されており、これがみず路を形 成し、湧水しているものと考えられる。

深度 83.0~84.0 m間については、緩やかな流速の変化がみられる。この区間は、孔壁映像撮影 の結果では空洞等は見られないが、ボーリングによるコア採取ができなかった区間であることか ら、地層が柔らかく、掘削によって孔壁が拡大しており、そのために流速の変化が生じているも のと推察される。



2.1-49

# 図 2.1-49 孔内微流速測定結果

流速の変化が見られた、深度 75.00~75.50 m 区間と、深度 107.00~108.00 m 区間について、流 速の変化量等から、透水係数を算出した。

透水係数は、孔内微流速測定において、自然水位状態と注水あるいは揚水状態での水位差と、 この時の流量差から、以下の式によって推定できる(※)。

$$\kappa = \frac{Qi}{2\pi\Delta p} \ln \frac{R}{\gamma}$$

ここに、 Qi :流量変化量(cc/sec/cm)

**k** : 透水係数(cm/sec)

 $\Delta p$ :水頭変化量(cm)

R :影響半径(cm)

**γ** : 孔の有効半径(cm)

ここで、R は対数項に入っている関係上、k に対する影響は少ないので、今回の計算では、便 宜的に R = 100 m (10,000 cm) とした。

計算結果を表 2.1-18 に示す。

計算の結果、深度 75.00~75.50 m 間では透水係数 k =  $4.71 \times 10^{-0}$  cm/sec、深度 107.00~108.00 m 間では透水係数 k =  $1.46 \times 10^{-2}$  cm/sec となった。

表 2.1-18 孔内微流速測定結果より算定した透水係数

計算区間	区間長 流量変化長 (cm) (cc/sec/cm)		水頭変化量 (cm)	孔の有効半径 (cm)	影響圈半径 (cm)	透水係数 (cm/sec)
75.00~75.50m	50.00	53.99	14.00	4.65	10000	4.71E+00
107.00~108.00m	100.00	7.07	592.00	4.65	10000	1.46E-02

※上野将司:地すべり地の地下水調査における微流速計の適用,地すべり第36巻第号,P32-39

# 2.1.5.8. 孔曲がり測定結果

孔曲がり計測は110m掘削終了後、孔底にて実施した。

結果を表 2.1-19、図 2.1-50、図 2.1-51 及び図 2.1-52 に示す。

計測の結果、ボーリング孔は深度110mにおいて、西へ0.54m、南へ0.79m 偏芯していることが判明した。

測 定		測 定	結 果		垂直	深度	水	平	距	離
計算地点	区間長	磁古位	百业专位	佰 剑	区 間	坑 準	$N \rightarrow S$	5方向	$E \rightarrow W$	Ⅴ方向
(m)	(m)	104 75 11	吴礼力位	THE ANT	(m)	(-m L)	区間(m)	累計(m)	区間(m)	累計(m)
110	110.00	223.00	214.17	-89. 50	110.00	110.00	-0.79	-0.79	-0.54	-0.54

表 2.1-19 孔曲がり計測結果





図 2.1-51 孔跡平面図(A-2)



図 2.1-52 孔曲計測結果写真(A-2 110 m)

# 2.1.5.9. 地下水観測孔仕上げ

掘削完了後、孔内全長に VP50 の塩ビパイプを挿入する。ストレーナ加工は 100 mm 毎に直径 5 mm 孔を 2 つ千鳥配置とした(図 2.1-53)。(開口率 0.1 %)

孔口周辺には 50 cm×50 cm×20 cm のセメント打設を行い、観測井戸の保護を行った(図 2.1-54)。

一般入林者の安全確保のため、観測孔周辺に囲い等を設置し、立入禁止表示板を設置した。



図 2.1-53 有孔管のストレーナ仕様





# 2.1.5.10. 自動観測・記録装置の設置

地下水位観測を実施するにあたり、観測孔に地下水位自動観測・記録装置を設置した。 水位計は、(株)応用地質製の絶対圧水位計S&DLmini及びバロメーター(気圧補正用セン サ)を使用し、計測は1時間間隔とした。

観測は令和2年度まで継続される予定であり、道路が降雪で閉鎖されるまでの間に動作確認を 兼ねたデータ回収を行いその間の地下水位観測データを整理した。

表 2.1-20 に水位計の諸元を示し、図 2.1-55 に水位計の設置概念図を示す。

	水位計部	温度	(計部)	その他				
測定範囲	99m	測定範囲	-20∼50℃	電池寿命	6~8年(10分間隔測定時)			
測定精度	±0.1%F.S. W/1年(正弦波/波長)	測定精度	±0.37°C	メモリ容 <b>量</b>	水位、温度各30,000測定			
分解能	0.5cm	分解能	0. 1℃					
長期ドリフト	±0.1%F.S. ₩/1年(正弦波/波長)			測定間隔	1時間に設定			
校正方法	工場出荷時校正							
精度保証範囲	0~40℃(但し、凍結なきこと)			寸法/重量	$\phi 22 \times L58 \text{mm}/177 \text{g}$			
動作温 <mark>度範</mark> 囲	-20∼50°C			本体材質	SUS(窒化チタンアルミPVD コーティング)			

表 2.1-20 自動観測・記録装置諸元



図 2.1-55 自動観測·記録装置概念図

地下水位自動観測結果を図 2.1-56 に示す。

観測は、自記水位計を設置した10月31日から、アスピーテラインが通行止めとなる11月4日 までの間のデータを回収した。

観測の結果、孔内水位は当初深度71.8m付近で推移していたが、11月4日未明より、深度71.25 m付近に上昇し、データ回収時点では深度71.3m付近へ低下傾向にある。

データ回収の半日程度前に数 mm 程度の降雨があったことを現地で確認しており、山側で浸透 した雨水が、地下水胚胎層に流入したことで、孔内水位が上昇したものと推察される。



図 2.1-56 自記記録による孔内水位観測結果

2.1.5.11. 固体分析結果

(1) 研磨薄片観察

① 観察機材

顕微鏡観察には、ニコン製 ECLIPSE E600 POL を使用した。

# 2 観察結果

観察結果は以下の通りである。

	斑晶					石基				変質,その他							
サンプルNo.	Qz	P1	Срх	0px	Mgt	P1	Срх	Glass	Mgt	Qz	0p1	Ру	Mrc	Lm	S	Brt	Smc
A−2 39.20~39.40m	+									0	+	0					
A−2 57.50∼57.60m	+									0		0		-	$\bigtriangleup$		
A−2 72.60~72.80m	+									0		0	$\bigtriangleup$		$\bigtriangleup$	-	
A−2 78.35~78.50m	Δ									0	-	$\triangle$		-	0		
A−2 101.60~101.70m		0	$\bigtriangleup$	+	+	0	+	+	$\bigtriangleup$	$\bigtriangleup$							$\triangle$
凡例																	

表 2.1-21 研磨片観察結果

◎:極多量 ○:多量 △:中量 +:少量 -:微量

Qz:石英	P1:斜長石	Cpx:単斜輝石	0px:斜方輝石
Mgt:磁鉄鉱	Py:黄鉄鉱	Mrc:白鉄鉱	Lm:褐鉄鉱
S:自然硫黄	Brt:重晶石	Smc:スメクター	イト

# A. A-2 No.1 39.20~39.40 m (図 2.1-57~図 2.1-58)

·岩石名:硫化鉄鉱体(原岩不明)

微晶・隠微晶質な石英、黄鉄鉱を主体とし、少量のオパールを伴う。径が最大で数 100 μ m 程度の微晶石英の集合体を含有する。殆どが石英及び黄鉄鉱に交代されているため原岩は 不明である。

黄鉄鉱は最大 300μm 程度の自形~半自形を呈するものの他、石英の粒間を充填するもの があり、一部で細粒石英及び黄鉄鉱が累層状に認められる。

# B. A-2 No. 2 57. 50~57. 60 m (図 2. 1-59~図 2. 1-60)

·岩石名:硫化鉄鉱体(原岩不明)

微晶・隠微晶質な石英、黄鉄鉱を主体とし、少量の自然硫黄、微量の褐鉄鉱からなる。不 明瞭ではあるが、全体的に層状に配列し、径が最大で数 100 µ m 程度の石英の鉱物片を少量 含有する。鉱物片は、断片化し不規則形状を呈する。殆どが石英、黄鉄鉱及び自然硫黄に交 代されているため原岩は不明である。

黄鉄鉱は半自形を呈し、最大でも 50 μ m 程度で、縞状に配列する。部分的に 1 mm 程度の 集合体を形成する。自然硫黄は石英及び黄鉄鉱の粒間を充填する。 C. A-2 No. 3 72. 60~72. 80 m (図 2. 1-61~図 2. 1-62)

·岩石名:硫化鉄鉱体(原岩不明)

微晶な自形~半自形の石英、黄鉄鉱及び白鉄鉱を主体とし、少量の重晶石を伴う。粒間は 不明鉱物(melnikovite?)及び自然硫黄に充填される。部分的に石英に富み、脈状の黄鉄鉱 に切られる。

黄鉄鉱の多くはコロフォーム状を呈し、径は最大で 500μm 程度ある。白鉄鉱は不定形あるいは板状を呈し、黄鉄鉱粒子とモザイク状にかみ合っている。また、周縁には melnikovite?が認められる。

- D. A-2 No. 4 78. 35~78. 50 m (図 2. 1-63~図 2. 1-64)
  - · 岩石名: 珪化岩

主に石英及び自然硫黄と少量の黄鉄鉱、微量の褐鉄鉱からなる。

石英は不定形粒状を呈し、径は最大で 500 µ m 程度である。部分的に破砕され、片状となる。黄鉄鉱は、一部の石英粒周囲や石英中に認められ、褐鉄鉱を交代するものもある。粒間は自然硫黄に充填される。

- E. A-2 No.5 101.60~101.70 m (図 2.1-65~図 2.1-66)
  - ·岩石名: 複輝石安山岩

斑状組織を示す複輝石安山岩である。斑晶は斜長石、単斜輝石、斜方輝石及び磁鉄鉱を主体とし、集斑状組織を示すことが多い。石基は斜長石と単斜輝石、その粒間を充填する微晶・隠微晶質の磁鉄鉱やガラス等よりなる。

斜長石は、多くのものが自形を呈し、径は最大で 2 mm 程度である。アルバイト双晶を示 し、塁帯構造をもつものもある。また内部に単斜輝石をポイキリティックに含むこともある。 単斜輝石は自形~半自形を呈し、径は最大で 1.5 mm 程度であり、周囲及び裂罅をスメクタ イトに交代される。斜方輝石は自形~半自形を呈し、径は最大で 1.0 mm 程度であり、多く はスメクタイトに交代される。磁鉄鉱は他形~半自形を呈し、径は最大で 0.2 mm 程度であ る。

偏光顕微鏡写真 (図 2.1-57~図 2.1-66)

凡例

Qz: 石英 Pl: 斜長石 Cpx: 単斜輝石 Mgt: 磁鉄鉱 Py: 黄鉄鉱 S: 自然硫黄







図 2.1-58 A-2 No.1 39.20-39.40 m 反射光



図 2.1-59 A-2 No.2 57.50-57.60 m 上:オープンニコル; 下:クロスニコル





図 2.1-60 A-2 No.2 57.50-57.60 m 反射光





図 2.1-61 A-2 No.3 72.60-72.80 m 上:オープンニコル; 下:クロスニコル





図 2.1-62 A-2 No.3 72.60-72.80 m 反射光





図 2.1-63 A-2 No.4 78.35-78.50 m 上:オープンニコル; 下:クロスニコル



図 2.1-64 A-2 No.4 78.35-78.50 m 反射光





図 2.1-65 A-2 No.5 101.60-101.70 m 上:オープンニコル; 下:クロスニコル



図 2.1-66 A-2 No.5 101.60-101.70 m 反射光

- (2) 粉末 X 線解析(XRD 分析)
- ① 分析機器

分析には、リガク社製 Ultima IV を用いた。

## 分析試料作成及び測定方法

供与された試料は縮分により凡そ5g程度まで減らした後、鉄乳鉢で粉砕し、さらにアルミナ 製乳鉢で粉末にして不定方位分析用試料とした。粒度の判定は乳鉢中で十分細粒化が認められ、 指で触れたときに粒状感を感じなくなること、及び粉末に粘りが生じることを目安とした。

#### **③** 測定条件

X線発生装置の電圧は50kV、電流値は40mAに調整した。

不定方位分析は、拡散スリット、散乱スリットをそれぞれ 2/3°、受光スリットを 0.3 mm に設定した。スキャン範囲は 2°~90°、サンプリング幅は 0.02°、スキャン速度は 2.0°/分である。

また、定方位分析は、拡散スリット、散乱スリットをそれぞれ 2/3°、受光スリットを 0.3 mm に 設定した。スキャン範囲は 2°~30°、サンプリング幅は 0.02°、スキャン速度は 0.5°/分である。

## ④ 鉱物の同定

X線分析結果一覧表及び各測定プロファイルを次項に記す。分析の結果、主に石英、黄鉄鉱、 自然硫黄、斜長石及び単斜輝石のピークが検出され、定方位では若干のスメクタイトのピークを 確認することができた。

サンプルNo.	Qz	Trd	P1	Cpx	Smc	Mgt	Ру	Mrc	S
A−2 39.20~39.40m	0						0		
A−2 57.50∼57.60m	0						0		
A−2 72.60~72.80m	O						0		
A-2 78.35∼78.50m	O							$\bigtriangleup$	0
A−2 101.60~101.70m	0	0	0	$\bigtriangleup$	-	+			

表 2.1-22 X 線粉末回折結果一覧

凡例

◎:極多量
 ○:多量
 △:中量
 +:少量
 -:微量
 Qz:石英
 Trd:トリディマイト
 P1:斜長石
 Cpx:単斜輝石
 Smc:スメクタイト
 Py:黄鉄鉱
 Mrc:白鉄鉱
 S:自然硫黄



定方位測定プロファイル (青:水簸;赤:エチレングリコール処理)




不定方位測定プロファイル



図 2.1-70 試料名: A-2 No.2 57.50-57.60 m 定方位測定プロファイル (青:水簸;赤:エチレングリコール処理)





不定方位測定プロファイル



図 2.1-72 試料名: A-2 No.3 72.60-72.80 m 定方位測定プロファイル (青:水簸;赤:エチレングリコール処理)







図 2.1-74 試料名: A-2 No.4 78.35-78.50 m 定方位測定プロファイル(青:水簸;赤:エチレングリコール処理)





不定方位測定プロファイル



図 2.1-76 試料名: A-2 No.5 101.60-101.70 m 定方位測定プロファイル(青:水簸;赤:エチレングリコール処理)

#### (3) 蛍光 X 線解析(XRF 分析)

化学分析は以下の表 2.1-23 に示す 15 元素及び LOI (強熱減量) に関して、Actlabs 社で実施した。分析結果を表 2.1-24 に、元素構成比を図 2.1-77 に示す。

各分析試料の内、A-2 No.5 の 101.60~101.70 m 地点は図 2.1-78 上でデイサイトにプロットされる。ハーカー図(図 2.1-79)上では、大場・梅田(1999)で報告された八幡平火山群の分析値と 同傾向を示す。

その他の4試料については、LOIがA-239.20~39.40 m及びA-257.50~57.60 mで10%程度、A-272.60~72.80 m及びA-278.35~78.50 mで30-40%程度と高い。これらは、大部分がSの影響と考えられる。

参考文献

大場 司,梅田 浩司(1999),八幡平火山群の地質とマグマ組成の時間-空間変化,岩鉱,94, 187-202

分析項目	Co <sub>3</sub> 0 <sub>4</sub>	Cu0	NiO	SiO <sub>2</sub>	Si <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> 0 <sub>3</sub> (T)	MnO	MgO
検出限界値	0.005%	0.005%	0.003%	0.01%	0.01%	0.01%	0.001%	0.01%
分析項目	Ca0	Na <sub>2</sub> 0	K20	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	$Cr_2O_3$	$V_{2}O_{5}$	
検出限界値	0.01%	0.01%	0.01%	0.01%	0.01%	0.01%	0.003%	

表 2.1-23 項目と検出限界値

表 2.1-24 分析結果

		A−2 39. 20∼39. 40m	A-2 57. 50∼57. 60m	A−2 72.60~72.80m	A−2 78.35~78.50m	A−2 101.60~101.70m
SiO <sub>2</sub>	%	65.08	64.3	33.05	54. 41	63
TiO <sub>2</sub>	%	0.89	0.76	0.51	1.37	0.63
A1203	%	0.16	0.06	0.02	0.12	14.84
$Fe_2O_3(T)$	%	20.85	21.55	35. 21	2.67	6. 93
$Cr_2O_3$	%	0.01	0.03	0.04	< 0.01	< 0.01
MnO	%	0.003	0.001	< 0.001	< 0.001	0. 135
MgO	%	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	3.68
Ca0	%	< 0.01	0.01	< 0.01	< 0.01	5.82
Na <sub>2</sub> 0	%	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	2. 59
K20	%	0.02	0.01	< 0.01	0.05	1.42
$P_{2}O_{5}$	%	0.01	0.01	0.01	0.01	0.09
$V_{2}O_{5}$	%	0.017	< 0.003	< 0.003	0. 026	0.021
Co <sub>3</sub> 0 <sub>4</sub>	%	0.008	< 0.005	0.011	< 0.005	< 0.005
Cu0	%	< 0.005	< 0.005	0. 481	< 0.005	< 0.005
NiO	%	< 0.003	0.009	0.024	0.003	< 0.003
LOI	%	11.57	12.57	30. 18	40.85	1.46
Total	%	98.62	99.3	99. 56	99. 51	100. 6





 $\boxtimes$  2.1-78 SiO<sub>2</sub> vs Na<sub>2</sub>O + K<sub>2</sub>O  $\boxtimes$ 



図 2.1-79 ハーカー図

### 2.1.5.12.水質分析結果

採水した孔内水について、表 2.1-25 に示す項目の室内水質分析を行った。

対象試料	分析条件	分析項目
深度 20 m、80 m、	安内字县八	[Na]、[Mg]、[K]、[Ca]、[Total Fe]、[溶解性Fe]、[Fe <sup>2+</sup> ]、
90 m、100 m、	主的企重力	[Mn], [Si], [As], [P], [Al], [Cl], [SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ], [HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ],
105mの5試料	101	[Total CO2]、TC、SS、8.4Ax、4.0Ax、As 価数分析

表 2.1-25 室内水質分析項目

採水深度は、地質状況及び透水状況を判断し、深度 20 m、80 m、90 m、100 m、105 m の 5 地 点とした。

採水はベーラーサンプラーを使用し、掘削水の影響を除くために、掘削後 8 時間以上経過後の 地下水を採取した。

ベーラーサンプラーは $\phi$ 45 mm、長さ 1,000 mm、採水容量 1,000 mLのステンレス製のものを使用した。



表 2.1-26 採水時測定項目

図 2.1-80 ベーラーサンプラー

表 2.1-27 に、水質分析結果を示す。また、図 2.1-81 に、分析項目毎の値をグラフ化したものを 示し、図 2.1-82 に採取地点毎の分析項目の構成比を示す。なお、各分析項目は計量単位が異なる ものがあるため、グラフの縦軸は無単位として表示した。

分析の結果、各採水地点で分析項目の溶存傾向は異なる傾向が見られた。

分析項目のうち、水温は各深度で 12.9°~14.8°となっており、一般的な地下水としてはほぼ 妥当な値となっている。

水素イオン濃度は、深度 20 m、80 m、及び 90 m 地点では pH = 4.5~5.9 であるが、100 m 及び 105 m 地点では pH = 3.1~2.8 と強酸性を示す。

電気伝導率は、深度 20 m、80 m、及び 90 m 地点では 31~44 mS/m を示すが、100 m 地点では 65 mS/m、105 m 地点では 130 mS/m と高くなる傾向が見られる。

酸化還元電位は、深度 20 m 地点で 80 mV、80 m 及び 90 m 地点で 300~340 mV を示すが、100 m 及び 105 m 地点では 130~170 mV となる。

溶存酸素は、各深度において 2.6~5.1 mg/L を示す。

溶存炭酸ガスは、深度 20 m 及び 90 m 地点で 1.2~2.4 mg/L を示すが、80 m、100 m 及び 105 m 地点では 9.4~10.3 mg/L とやや高い値を示す。

Naは、深度 20 m 及び 90 m 地点で 6.1~6.6 mg/L を示すが、80 m、100 m 及び 105 m 地点では 2.3~3.7 mg/L とやや低い値を示す。

Mgは、深度20m及び80m地点では19~20mg/Lを示すが、90m、100m及び105m地点では2.2~8.7mg/Lとやや低い値を示す。

Kは、深度 20m地点では 4.6 mg/Lを示すが、80m、90m、100m及び 105m地点では 0.62~1.8 mg/L と低い値を示す。

Caは、深度 20 m、80 m、90 m 及び 105 m 地点では 19~35 mg/L を示すが、100 m 地点では 8.4 mg/L とやや低い値を示す。

T-Feは、深度20m、90m、100m、及び105m地点では31~77mg/Lを示すが、80m地点では120mg/Lとやや高い値を示す。

溶解性 Fe は、深度 20 m、80 m、100 m、及び 105 m 地点で 16~69 mg/L を示すが、90 m 地点で は 9.1 mg/L とやや低い値を示す。

2価鉄イオンは、深度 20 m、 90 m、 100 m 地点では 1.1~14 mg/L を示すが、 80 m 及び 105 m 地 点では 40~55 mg/L とやや高い値を示す。

Mnは、各深度において 0.27~1.7 mg/L を示す。

Si は、深度 20 m、80 m、90 m、及び 105 m 地点で 12~33 mg/L を示すが、100 m 地点では 5.1 mg/L とやや低い値を示す。

As は、深度 20 m、90 m 及び 100 m 地点で 0.01~0.060 mg/L を示すが、80 m 及び 105 m 地点で は 0.29~0.46 mg/L とやや高い値を示す。

Pは、各深度において 0.025~0.099 mg/Lの値を示す。

Al は、深度 20 m、80 m、90 m 地点では 19~75 mg/L を示すが、100 m 及び 105 m 地点では 1.3 ~5.8 mg/L と低い値を示す。

Clは、各深度において 2.5~4.2 mg/L を示す。

硫酸イオンは、深度 20 m、80 m、90 m、及び 105 m 地点で 200~380 mg/L を示すが、100 m 地 点では 80 mg/L とやや低い値を示す。

重炭酸イオンは、深度 100 m 地点で測定限界以下、105 m 地点で 0.01 mg/L、20 m 地点で 0.32 mg/L を示すが、80 m 及び 90 m 地点で 4.4~13 mg/L と高い値を示す。

T-CO<sub>2</sub>は、深度 20 m、80 m、90 m、及び 105 m 地点で 12~35 mg/L を示すが、100 m 地点では 4.1 mg/L とやや低い値を示す。

TCは、各深度で 3.4~10 mg/L を示す。

浮遊物質量は、深度 100 m 及び 105 m 地点で 48~54 mg/L を示すが、20 m 地点では 220 mg/L、 90 m 地点で 400 mg/L となり、80 m 地点では 1,100 mg/L と極端に高い値を示す。

8.4Axは、深度20m、80m、90m、100m地点で35~110mg/Lを示し、105m地点では320mg/L

と高い値を示す。

4.0Ax は、深度 20 m 地点で 5 mg/L 未満、80 m、90 m、及び 100 m 地点で 10 mg/L を示すが、 105 m 地点では 155 mg/L と高い値を示す。

As 価数(3+)は、深度 20 m 地点で 0.002 mg/L 未満の測定限界以下となるが、80 m、90 m、100 m 地点で 0.2 mg/L、105 m 地点では 0.11 mg/L を示す。

As 価数(5+)は、深度 20 m 地点で 0.009 mg/L、90 m 地点で 0.056 mg/L、100 m 地点で 0.051 mg/L を示すが、80 m 及び 105 m 地点では 0.18~0.45 mg/L とやや高い値を示す。



図 2.1-81 各分析項目の分析値



図 2.1-82 各分析項目の構成比

No	計量の対象	1回目	2回目	3回目	4回目	5回目	単位
		9月10日	10月14日	10月17日	10月21日	10月22日	
	採水深度	GL-20m	GL-80m	GL-90m	GL-100m	GL-105m	-
1	目視観察	白茶色、濁り	茶色濁りあり	茶色濁りあり	茶色	無色濁り有り	-
2	*水温	13	12.9	13.2	14.8	14.4	°C
3	水素イオン濃度	4.5/13.0℃	5.9/12.9°C	5.9∕7.9℃	3. 1∕14. 8℃	2.8/14.4°C	-
4	*電気伝導率	43	44	31	65	130	mS/m
5	*酸化還元電位	80	300	340	170	130	mV
6	溶存酸素量	4.2	3.7	5.1	2.6	2.9	mg/L
7	溶存炭酸ガス	1.2	10.2	2.4	10.3	9.4	mg/L
8	Na	6.6	3.3	6.1	2.3	3.7	mg/L
9	Mg	19	20	8.7	2.2	3.7	mg/L
10	К	4.6	1.8	1.5	0.62	1.1	mg/L
11	Ca	35	27	19	8.4	27	mg/L
12	T-Fe	31	120	36	41	77	mg/L
13	溶解性Fe	16	41	9.1	17	69	mg/L
14	2価鉄イオン	1.1	40	4.4	14	55	mg/L
15	Mn	1.1	1.7	0.66	0.44	0.27	mg/L
16	Si	20	33	12	5.1	13	mg/L
17	As	0.01	0.46	0.06	0.057	0.29	mg/L
18	Р	0.033	0.041	0.099	0.032	0.025	mg/L
19	Al	20	75	19	1.3	5.8	mg/L
20	Cl	4.2	2.7	2.8	2.5	2.5	mg/L
21	硫酸イオン	200	230	220	80	380	mg/L
22	重炭酸イオン	0.32	13	4.4	0.01未満	0.01	mg/L
23	T-CO2	17	35	12	4.1	30	mg/L
24	ТС	5.4	10	6.3	3.4	9.2	mg/L
25	浮遊物質量	220	1100	400	54	48	mg/L
26	8 4 A v	1.3	2.2	0.7	1.1	6.4	mmo1/L
20	0.174	65.1	110.1	35.0	55.0	320.3	mg/L
27	4 0 A x	0.1未満	0.2	0.2	0.2	3.1	mmo1/L
21	1.071	5.0未満	10.0	10.0	10.0	155.1	mg/L
28	As価数分析(As3+)	0.002 未満	0.01	0.004	0.006	0.11	mg/L
29	As価数分析(As5+)	0.009	0.45	0.056	0.051	0.18	mg/L
	一以下余白一						
/#*	注) 4.0Ax:pHが4.0以上の	)検体はアルカ	リ度で分析				
1厘							
老							
,							

表 2.1-27 水質分析結果一覧

また、主要イオンの溶存バランスによる水質の傾向を見るため、Naイオン、Kイオン、Caイオン、Mgイオンの主要陽イオンと、硫酸イオン、塩化物イオン、重炭酸イオンの溶存量をイオン当量に換算し(表 2.1-28)、主要イオンのヘキサダイアグラム及びトリリニアダイアグラムを作成した。(図 2.1-83 及び図 2.1-84)

なお、一般的には陽イオンと陰イオンの当量はほぼ同じ値となるが、当該地点では、主要イオン以外に多くの溶存イオンが含まれることから、主要イオンの当量がほぼ同じ値となっていない。 従って、概略的な傾向を見るための参考値とした。

ヘキサダイアグラムでは、各深度とも Ca イオンと硫酸酸イオン多く含む、ほぼ同様の傾向を 示すが、100 m 地点では各イオンの溶存比が多地点より少ない特徴がみられる。また、トリリニ アダイアグラムでは、すべての地点において、一般にアルカリ土類非炭酸塩型(Ⅲ型)と呼ばれ る範疇に分類される。(図 2.1-85 参照)。

一般的には、アルカリ土類非炭酸塩型(Ⅲ型)は、硫化物を含む岩石・土壌から SO4<sup>2</sup>が溶出 するとともに酸性化が進行して形成され、当該地域の地質的背景を反映していると考えられる。

	採水深度		A-2-1 20m	A-2-2 80m	A-2-3 90m	A-2-4 100m	A-2-5 105m
		mg/L	6.60	3.30	6.10	2.30	3.70
	ナトリウム イオン	me/L	0.29	0.14	0.27	0.10	0.16
		me %	10.94	6.83	18.24	16.67	8.79
		mg/L	4.60	1.80	1.50	0.62	1.10
	カリウム イオン	me/L	0.12	0.05	0.04	0.02	0.03
陽		me %	4.53	2.44	2.70	3.33	1.65
イ	カリウムエナトリウム	me/L	0.41	0.19	0.31	0.12	0.19
オ	ЛУУАТ Л РУУА	me %	15.47	9.27	20.95	20.00	10.44
ſ	. L. J. S L. J.	mg/L	35.0	27.0	19.0	8.4	27.0
	カルシワム イオン	me/L	1.75	1.35	0.95	0.42	1.35
		me %	66.04	65.85	64.19	70.00	74.18
	マグネシウム イオン	mg/L	19.00	20.00	8.70	2.20	11.00
		me/L	0.49	0.51	0.22	0.06	0.28
		me %	18.49	24.88	14.86	10.00	15.38
	でな 悪分	mg/L	200. 0	230.0	220.0	80.0	380.0
	航 酸 イオン	me/L	4.16	4.79	4.58	1.67	7.91
	•	me %	87.95	67.28	88.25	97.66	98.02
陰	the last the	mg/L	20.0	75.0	19.0	1.3	5.8
1 オ	塩 化 物 イオン	me/L	0.56	2.12	0.54	0.04	0.16
ン	• · · ·	me %	11.84	29.78	10.40	2.34	1.98
	<b>壬</b> 円 酚	mg/L	0.3	13.0	4.4	0.0	0.0
	単 灰 酸 イオン	me/L	0.01	0.21	0.07	0.00	0.00
	•	me %	0.21	2.95	1.35	0.00	0.00
	当量合計 (陽イオン)	me/L	2.65	2.05	1.48	0.60	1.82
Ì	当量合計 (陰イオン)	me/L	4.73	7.12	5.19	1.71	8.07
当	i量比(陽イオン/陰イオン)	0.56	0.29	0.29	0.35	0.23	

表 2.1-28 主要イオンのイオン当量



図 2.1-84 トリリニアダイアグラム



図 2.1-85 ヘキサダイアグラムとトリリニアダイアグラムによる水質の表示例 共立出版 2009 水文科学 p201 筑波大学水文科学研究室

2.1.6. 総合解析

### 2.1.6.1. 地質層序

ボーリングコア観察の結果、掘削区間には2層の安山岩と、それらの地層に挟まれて火山礫凝 灰岩、凝灰岩及び砂岩が出現することが判明した。

また、これらの地層のうち、上部安山岩以深の、深度 32.5 m 付近から深度 80.70 m 区間の火山 礫凝灰岩、凝灰岩及び砂岩に、硫黄鉱物及び黄鉄鉱の鉱化作用が見られ、特に深度 52.5 m~80.7 m間では黄鉄鉱を主体とする鉱体を形成している。

これらの岩相と、鉱体の状態を勘案すると、ボーリング地点では、図 2.1-86、図 2.1-87 及び表 2.1-29 に示す地質層序のうち、八幡平層の最上部安山岩から上部安山岩にかけての部分が出現す るものと考えられる。



図 2.1-86 表層地質図 (旧建設資料,1955)

出典:「平成 30 度休廃止鉱山における坑廃水処理の高度化調査研究事業に係る水量・水質シミ ュレーションモデルの構築及びそれを用いた解析業務-平成 29 年度事業成果の報告-」より



図 2.1-87 旧松尾鉱山付近の地質柱状図

出典:高橋雄一郎,南部松夫2003,新岩手県鉱山誌,東北大学出版会

					and setting the set of	
岩層名	一般走向	序さ	梯 界	鉱体・坑内との関係	構 成 岩 石	変 質 状 況
最上部	N20 W、東へ10 内外領斜	27 m (160 ML)	この上部は大長根座で観 察され、層厚 64 m	160 ML 東部のみ 大長根端天崖に連続分布	集婉岩、熔岩、凝灰質頁岩	鉱化は大幅に弱まり、変質岩化する のみ
最上部 安山岩	N 20°W、東へ約 10°傾斜	10 m (160 ML)		160 ML @&	複輝石安山岩	鉱石化の勢を減じ、変質岩での存在 が多い
上部 堆積層	N 10° ~ 15°W、東 へ 10°内外傾斜	部分的に異なる 86 m(160 M L 15 号)		100 MLと 160 MLの東部	常岩、集塊質角礫凝灰岩、 角礫凝灰岩、砂質角礫凝灰 岩、凝灰質防治、角隙凝灰 岩と凝灰質頂岩との互脳、 凝灰質頂岩と同一層準でも 変化に富む	変質岩または鉱石化しているが、鉱 体母体としては重要性が薄い
上部 安山岩	N 16°~20°W、東 へ10°内外傾斜	114 m (160 M L 中央部)		100 ML と 160 ML のみ 100 ML 以上ではやや大切な鉱床母岩	ガラス質複輝石安山岩質熔 岩	100 M L 以上ではすべて変質作用と鉱 石化を受けている
中部 堆積層	N 10°E、東へ 10° 内外傾斜	各坑準で異なる		8 ML~184 MLの各抗準にあり 100 MLより上部は、重要な鉱石の供給母岩	各抗準で多少異なるが、全 般的に角礫凝反岩・集塊岩 が主、熔岩・凝灰質頁岩・ 砂質凝灰岩も伴う	100 MLより上部は変質作用と鉱化作 用共に激しい 下部は単なる変質岩に留る
中部 安山岩	N 10 * E、東へ 10 * 内外傾斜	部分により異なる 16 m (160 ML 中 央部)		3 ML~184 MLの各教挙にあり 上部抗準では重要母岩	複輝石安山岩質爆岩	種々の変質を受けている、上部では 比較的よく鉱化され、下部では鉱化 が弱まり、下緑が若干鉱化されるに 過ぎない
下部 地積層	平均的には、N 10° E、東へ10°内外個 斜	鉱体中央で厚く北 端と南端で薄い、 160 MLの23 mが 最大	下部安山岩の上面の凹凸 により平行して小さく褶 曲するが、上部ではその 影響が薄れる	3 ML~184 MLの各抗準に最も広く分布す る、確實化・硫化鉄鉱化したものの量は信岩 層に比べ最も多く、鉱床母岩としては最重要	角礫質器灰岩が主、安山岩 質角礫凝灰岩、同砂質角礫 凝灰岩、集塊質角礫凝灰岩、 凝灰質頁岩等	常に粘土化、洼化、銃黄化、硫化鉄 鉱化など1つまたはそれ以上の変質 を受け、新鮮なものは見受けられな い
下部 安山岩	N 10°~20°E、東 へ10°~29°僅斜 鉱体中央部で西へ大き く亜出した孤状を呈す る	20 m以上	上位の下部地積層とは優 独面のため回凸に富む	184 ML以下の各抗準で鉱体下盤到にある、 鉱体は上面に幾分噴込んで胚胎するが深部ま での鉱化はない	復輝石安山岩質薄岩 ;	ごく軽微の変質作用を受けたものか ら完全に鉱石化したものまで種々あ る
最下部	黒沢、白沢に分布		2		複輝石安山岩質熔岩、集塊 岩が主体	

# 表 2.1-29 八幡平層の概要

出典:旧松尾鉱山新中和処理事業10周年誌編集事務局1993,

よみがえる北上川-旧松尾鉱山坑廃水処理 10 年-

#### 2.1.6.2. 掘削関連情報の対比

掘削時のドリリングパラメータ(掘進速度、回転数、送水量、排水量)及び、ボーリングコア の状況(岩種、岩相、硬軟、鉱化変質区分、帯磁率、孔内微流速、透水係数、水質、個体分析結 果、RQD、最大コア長、コア採取率)を整理し、ボーリング結果対比図として整理した。(表 2.1-30)

ボーリングコアの帯磁率を測定した結果では、帯磁率は-1.93~20×10<sup>-3</sup> SI Unit を示し、深度 5 ~15 m 付近及び 80~110 m 付近の安山岩溶岩では-0.58~20×10<sup>-3</sup> SI Unit 程度の幅でピークが見られるが、それ以外の火山礫凝灰岩、凝灰岩及び砂岩では平均的には-7.2×10<sup>-5</sup> SI Unit で推移する。 安山岩溶岩では高く、凝灰岩では低い傾向が見られる。

注水による岩盤の透水試験結果では、深度 10~50 m 間、60~70 m 間、及び 80~100 m 間では 透水係数は 6.59×10-<sup>6</sup> m/sec~5.77×10<sup>-8</sup> m/sec の低い値を示し、50~60 m、70~80 m 及び 100~ 110 m 間では 6.28×10<sup>-4</sup> m/sec~4.54×10<sup>-5</sup> m/sec の高い値を示すことが判明した。

ボーリング区間の地層及び孔壁画像撮影結果と対比すると、地層は全体に塊状を呈し、節理等の割れ目も少ない。ただし、深 49.8~51.00 m 付近、深度 75.10~75.20 m 付近及び深度 107.35~107.70 m 付近にはみず路と思われる空洞が観察され、これらの箇所を含む区間における透水係数が高い結果となった。

水質分析結果では、各採水地点で分析項目の溶存傾向は若干異なる傾向が見られるが、ヘキサ ダイアグラムでは、各深度とも Ca イオンと硫酸酸イオン多く含み、ほぼ同様の傾向を示す。た だし、100 m 地点では各イオンの溶存比が多地点より少ない特徴がみられる。また、トリリニア ダイアグラムでは、すべての地点において、一般にアルカリ土類非炭酸塩型(Ⅲ型)と呼ばれる 範疇に分類され、旧松尾鉱山の特徴である硫化鉱物を背景とすることがうかがえる。

個体分析の結果では、深度 39.20~39.40 m、57.50~57.60 m、72.60~72.80 m のコアは、原岩は 不明であるが、硫化鉱体であることが判明した。また、深度 78.35~78.50 m のコアは、珪化岩、 深度 101.60~101.70 m のコアは、複輝石安山岩であることが判明した。

孔内水位観測の結果では、孔内水位は最終的に深度 71.85 m 付近で推移するが、降雨の影響と 思われる変動があるものと推察される。



#### 表 2.1-30 ボーリングデータ対比図 (Bor.A-2)

#### 2.1.6.3. 断裂分布(不連続面解析)

孔壁画像撮影結果を基に、ヘアークラック、開口亀裂、鉱物脈及び鉱染脈の4種について、不 連続面解析を行った。以下に、それぞれの特徴について述べる。

# (1) ヘアークラック

ヘアークラックは、深度 30 ~110 m間において、137 本確認された。そのうち、深度 30~80 m 付近までは、7 本程度であるが、深度 80~110 m間の安山岩区間に 130 本程度が発達することが 判明した(図 2.1-88)。

解析の結果、これらのクラックは傾斜方位にばらつきはあるものの、大局的には南東方向へ 0 ~30°程度傾斜するものが多い(図 2.1-89)。



図 2.1-88 見かけ傾斜図(ヘアークラック)



図 2.1-89 π・カウントダイアグラム (ヘアークラック)

(2) 開口亀裂

開口亀裂は、深度 50~110 m間において、13 本確認された(図 2.1-90)。開口幅は最小で 1 mm、 最大で 44 mm で、平均的には 9 mm 程度となっている。

解析の結果、これらの亀裂は傾斜方位にばらつきはあるものの、大局的には東〜南方へ 0~60°程度傾斜するものと、鉛直に近いものが存在する(図 2.1-91)。



2.1-92



(3) 鉱物脈

鉱物脈は、深度 60~110 m間において 36 本確認され、深度 60~73 m間、深度 80~93 m間及び 深度 103~110 m間に集中している(図 2.1-92)。

解析の結果、これらの鉱物脈は傾斜方位にばらつきがあるものの、大局的には東〜南方へ 0~45°程度傾斜するものが多い。(図 2.1-93)。



図 2.1-92 見かけ傾斜図(鉱物脈)



E

Е

図 2.1-93 π・カウントダイアグラム(鉱物脈)

(4) 鉱染脈

鉱染脈は、深度 70~110 m間において 29 本確認され、深度 74~80 m間、及び深度 104~110 m間に集中している(図 2.1-94)。

解析の結果、これらの鉱物脈は傾斜方位にややばらつきがあるものの、大局的には南東へ 0~30°程度で傾斜するものが多い(図 2.1-95)。



2.1-96

#### 図 2.1-94 見かけ傾斜図(鉱染脈)



- 2.2. 地下水制御に資する地下水・地表水統合解析モデルの構築・改良及びそれを用 いた坑廃水量削減に資する対策工の効果予測解析
- 2.2.1. 資料収集整理及び現地調査
- 2.2.1.1. 不足するデータの抽出と追加収集・整理

### (1) 気象情報

気象庁ホームページ及び新中和処理施設内観測データより、旧松尾鉱山周辺における気象観測 地点の 2016 年~2019 年の観測データ(降水量、気温、日照時間、平均風速、相対湿度、積雪深) を追加収集・整理した。本検討で追加収集した気象関連資料を表 2.2-1 に示す。

項目	資料名	資料管理者	観測点等の箇所情報	備考
	雨量観測データ	岩手県/JOGMEC	新中和処理施設内 観測点	・2018(H30)年度~2019(H31)年度の観測データ(日単位)
降水量	気象台、アメダス	気象庁	旧松尾鉱山周辺11地点	・2016/6/1~2019/9/30の観測データ(日単位)
	解析雨量	気象庁	対象領域全域	・2016/1/1~2019/9/30の雨量解析データ(30分単位)
積重変	積雪観測データ	岩手県/JOGMEC	新中和処理施設内 観測点	・2018(H30)年度~2019(H31)年度の観測データ(日単位)
12 = 17	気象台、アメダス	気象庁	旧松尾鉱山周辺6地点	・2016/6/1~2019/9/30の観測データ(日単位)
信泪	気象観測データ	岩手県/JOGMEC	新中和処理施設内 観測点	・2018(H30)年度~2019(H31)年度の観測データ(日単位)
ж. <u>ш</u>	気象台、アメダス	気象庁	旧松尾鉱山周辺11地点	・2016/6/1~2019/9/30の観測データ(日単位)
同志	気象観測データ	岩手県/JOGMEC	新中和処理施設内 観測点	・2018(H30)年度~2019(H31)年度の観測データ(日単位)
風迷	気象台、アメダス	気象庁	旧松尾鉱山周辺11地点	・2016/6/1~2019/9/30の観測データ(日単位)
気圧	気象観測データ	岩手県/JOGMEC	旧松尾鉱山周辺11地点	・2018(H30)年度~2019(H31)年度の観測データ(日単位)
日照時間	気象台、アメダス	気象庁	旧松尾鉱山周辺11地点	・2016/6/1~2019/9/30の観測データ(日単位)
相対湿度	気象台	気象庁	旧松尾鉱山周辺1地点	・2016/6/1~2019/9/30の観測データ(日単位)

表 2.2-1 追加収集した気象関連資料

## 降水量

降水量資料は、気象庁ホームページより気象台及びアメダスの観測データ 11 地点及び新中和 施設内観測データを追加収集した。図 2.2-1 に気象観測点の位置図、図 2.2-2 に新中和処理施設の 年間降水量の推移グラフを示す。

また、気象庁業務支援センターより刊行されている「解析雨量」の 2016 年~2019 年のデータ を追加入手した。解析雨量は、気象庁・国土交通省・地方自治体が保有する観測データを組み合 わせて、30 分単位の降水量分布を解析したものである。図 2.2-3、図 2.2-4 に解析雨量より作成し た 2017 年と 2018 年における年間降水量分布を示す。

なお、本書で作成した図面には、背景図として国土地理院の「地理院タイル」を透過し、使用 した。



図 2.2-1 旧松尾鉱山周辺の気象観測地点位置図





図 2.2-3 降水量分布 (気象庁 『解析雨量』を加工し、2017年の総雨量を図化)



図 2.2-4 降水量分布 (気象庁『解析雨量』を加工し、2018年の総雨量を図化)

# 2 積雪深

気象庁ホームページより、気象台・アメダスの観測データ6地点及び中和処理施設内観測デー タを追加収集した。表 2.2-2 に各地点におけるデータの入手状況を整理した。図 2.2-5 に積雪深の 推移グラフを示す。

		諸元		欠測日数(日)				
No	観測所名	区分	標高 (m)	2016/6/1 ~2016/12/31	2017/1/1 ~2017/12/31	2018/1/1 ~2018/12/31	2019/1/1 ~2019/9/30	
1	鹿角	アメダス	123	0	0	0	7	
2	湯瀬	アメダス	214	_	_	_	_	
3	田沢湖	アメダス	230	_	_	_	_	
4	阿仁合	アメダス	120	0	0	0	0	
5	八幡平	アメダス	578	_	_	_	_	
6	岩手松尾	アメダス	275	0	0	0	0	
7	雫石	アメダス	195	0	0	0	0	
8	盛岡	気象台	155.2	0	0	0	0	
9	好摩	アメダス	205	_	_	—	—	
10	荒屋	アメダス	290	_	_	_	_	
11	奥中山	アメダス	430	0	0	0	0	
12	新中和処理施設	施設内観測データ	882	0	0	1	0	
							ー:データなし	

表 2.2-2 積雪深データの入手状況



図 2.2-5 積雪深の経年変化
### ③ 気温

気象庁ホームページより、気象台・アメダスの観測データ 11 地点及び中和処理施設内観測データを追加収集した。ただし、施設内観測データは、日最高気温、最低気温のデータに限られる。 表 2.2-3 に各地点におけるデータの入手状況を整理した。図 2.2-6 に日平均気温の推移グラフを示 す。

		諸元										
No	観測所名	区分	標高(m)	2016/6/1 ~2016/12/31	2017/1/1 ~2017/12/31	2018/1/1 ~2018/12/31	2019/1/1 ~2019/9/30					
1	鹿角	アメダス	123	0	0	0	0					
2	湯瀬	アメダス	214	0	0	0	0					
3	田沢湖	アメダス	230	0	0	0	0					
4	阿仁合	アメダス	120	0	0	2	0					
5	八幡平	アメダス	578	0 0		0	0					
6	岩手松尾	アメダス	275	0	0	0	0					
7	雫石	アメダス	195	0	0	0	0					
8	盛岡	気象台	155.2	0	0	0	0					
9	好摩	アメダス	205	0	0	0	0					
10	荒屋	アメダス	290	0	0	0	0					
11	奥中山	アメダス	430	0	0	0	0					
12	新中和処理施設 施設内観測データ 88		882	0	0 0		0					

表 2.2-3 気温データの入手状況



図 2.2-6 日平均気温の経年変化

### ④ 風速

気象庁ホームページより、気象台・アメダスの観測データ 11 地点及び中和処理施設内観測デ ータを追加収集した。ただし、施設内観測データは、瞬間最大風速データに限られる。表 2.2-4 に各地点におけるデータの入手状況を整理した。図 2.2-7 に日平均風速の推移グラフを示す。

		諸元										
No	観測所名	区分	標高(m)	2016/6/1 ~2016/12/31	2017/1/1 ~2017/12/31	2018/1/1 ~2018/12/31	2019/1/1 ~2019/9/30					
1	鹿角	アメダス	123	0	0	0	0					
2	湯瀬	アメダス	214	0	0	0	0					
3	田沢湖	アメダス	230	0	0	1	0					
4	阿仁合	アメダス	120	0	0	4	0					
5	八幡平	アメダス	578	0	1	0	0					
6	岩手松尾	アメダス	275	0	0	0	0					
7	雫石	アメダス	195	0	0	0	0					
8	盛岡	気象台	155.2	0	0	0	1					
9	好摩	アメダス	205	0	1	1	0					
10	荒屋	アメダス	290	0	0	1	0					
11	奥中山	アメダス	430	0	0	0	0					
12	新中和処理施設 施設内観測データ 882		882	0	0 0 0							

表 2.2-4 風速データの入手状況



図 2.2-7 日平均風速の経年変化

### ⑤ 日照時間

気象庁ホームページより、気象台・アメダスの観測データ 11 地点を追加収集した。表 2.2-5 に 各地点におけるデータの入手状況を整理した。図 2.2-8 に日照時間の推移グラフを示す。

		諸元		欠測日数(日)								
No	知识市夕	区公	插支 (…)	2016/6/1	2017/1/1	2018/1/1	2019/1/1					
	1110月11日	区方	你同(11)	~2016/12/31	~2017/12/31	~2018/12/31	<b>~</b> 2019/9/30					
1	鹿角	アメダス	123	0	0	0	0					
2	湯瀬	アメダス	214	0	0	0	0					
3	田沢湖	アメダス	230	0	0	1	0					
4	阿仁合	アメダス	120	0	0	4	0					
5	八幡平	アメダス	578	0	1	0	0					
6	岩手松尾	アメダス	275	0	0	0	0					
7	雫石	アメダス	195	0	0	0	0					
8	盛岡	気象台	155.2	0	0	0	1					
9	好摩	アメダス	205	0	1	1	0					
10	荒屋	アメダス	290	0	0	1	0					
11	奥中山	アメダス	430	0	0	0	0					
12	新中和処理施設	施設内観測データ	882	_	_	—	_					
							ー:データなし					

表 2.2-5 日照時間データの入手状況



図 2.2-8 日照時間の経年変化

### ⑥ 相対湿度

気象庁ホームページより、気象台の観測データ 1 地点を追加収集した。表 2.2-6 に各地点にお けるデータの入手状況を整理した。図 2.2-9 に相対湿度の推移グラフを示す。

		諸元		欠測日数(日)								
No	観測所名	区公	標高 (m)	2016/6/1	2017/1/1	2018/1/1	2019/1/1					
	B/6/9/11/1 14	臣乙	1末日 (11)	~2016/12/31	~2017/12/31	~2018/12/31	~2019/9/30					
1	鹿角	アメダス	123	_	_	_	-					
2	湯瀬	アメダス	214	-	-	_	-					
3	田沢湖	アメダス	230	-	-	_	-					
4	阿仁合	アメダス	120	_	_	_	-					
5	八幡平	アメダス	578	_	_	_	_					
6	岩手松尾	アメダス	275	_	_	_	-					
7	雫石	アメダス	195	_	_	_	_					
8	盛岡	気象台	155.2	0	1	0	0					
9	好摩	アメダス	205	_	_	_	-					
10	荒屋	アメダス	290	_	_	_	_					
11	奧中山	アメダス	430	_	_	_	_					
12	新中和処理施設	施設内観測データ	882	_	-	_	_					
							ー:データなし					

表 2.2-6 相対湿度データの入手状況



図 2.2-9 日平均相対湿度の経年変化

#### (2) 地質情報

不明

水理構造モデルの検討の中で、既存資料の見直しは適宜行ったが、地質に関する情報のうち、 改めて収集したものは限られている。また、新たに入手した地質関連資料を表 2.2-7 に示す。

本年度、掘削を実施したボーリングデータの整理を行った。掘削地点は、鉱山の採掘範囲の北 側隣接部で、採掘跡へ流入する地下水の通過する箇所に当たる(図 2.2-10)。深度 110 m、コア ボーリング、透水試験 10回、孔壁画像撮影、孔内微流速測定実施。調査結果の要点を図 2.2-11 に 示す。

著者名	資料名/論文名等
大滝武道	松尾硫黄・硫化鉄鉱床の構造規制(鉱山地質第 11 巻(6)第 50 号, 1961 年)
藤田浩司・他	八幡平火山群形成史ー1m メッシュ DEM を用いた火山地形判読とK-Ar 年 代測定値にもとづく解析ー(岩手の地学第 49 号, 2019 年)
高橋維一郎·南部松夫	新岩手県鉱山誌(東北大学出版会, 2003 年)

表 2.2-7 追加入手した地質関連資料



松尾鉱山写真ニュース(鉱山地質第 9 巻第 33 号, 1959 年)

図 2.2-10 本事業におけるボーリング実施地点

2.2-14



図 2.2-11 本事業において実施したボーリングの結果概要

#### (3) 鉱山関連情報

鉱山関連資料については、表 2.2-8 に示す資料及び文献を新たに入手した。

また、2016 年~2019 年の坑内排水量と水質に関するデータは、日単位の坑内水の水量・水質 について日単位で観測されたものである。2016 年 4 月~2019 年 9 月の坑内排水量の推移グラフを 図 2.2-12 に示す。

著者名	資料名/論文名等								
三富正夫	松尾鉱山の採鉱法(日本鉱業会誌 73 巻 832 号, 1957 年)								
藤田勇雄	松尾鉱山における廃水の地下水化処理法(1955年)								
仙台鉱山保安監督部	松尾鉱山 3m 坑道の閉塞工事について(保安東北 4 月号, 1971 年)								
矢野陽子	濁る大河~赤い北上川と闘った男たち~(東北建設協会, 2006 年)								
岩手県	よみがえる北上川旧松尾鉱山坑廃水処理 10 年-(金属鉱業事業団, 1993 年)								
松尾管理事務所	坑内貯水試験(1998年)								
建設省東北地方建設局	北上川水質改善対策調査(赤川地区地質地下水調査)報告書(1974年)								
建設省東北地方建設局	北上川治水読本(1983年)								
通商産業省 関東東北鉱山保安監督 部	旧松尾鉱山 3M 坑調査報告書(1998 年)								
JOGMEC	平成 18 年度旧松尾鉱山新中和処理施設改善調査設計「恒久排水路亀								
	裂調査」報告書(2006年)								
JOGMEC	鉱害対策技術 発生源対策と坑廃水処理(旧松尾鉱山の事例)(1990 年)								

表 2.2-8 追加入手した鉱山関連資料



図 2.2-12 坑内排水量の経年変化

## 2.2.1.2. 現地調査

現地調査として、表 2.2-9 に示す項目を実施した。

調査	項目	実施期間	調査地点数·調査箇所				
	文纽测	2019年6月10日~6月13日	54 地点				
河川法景	一月說別	2019年10月10日~2019年10月11日	56 地点				
內川加里	連続観測	2018 年 9 月 7 日~2019 年 11 月 5 日	3 地点				
		2019年6月10日~6月13日	54 地点				
河川水質	月凱別	2019年10月10日~2019年10月11日	56 地点				
冲川小貝	水質分析	2019 年 5 月 14 日~2019 年 12 月 18 日	37 地点				
珀柳柳	哲钿本	2019年6月10日~6月12日	_ <b>+</b>				
况吧吧	貝训且	2019 年 8 月 29 日~2019 年 8 月 30 日	Ľ				

表 2.2-9 現地調査項目

### (1) 河川流量一斉観測

流量一斉観測は、旧松尾鉱山周辺山体の基底流量、及び各河川へのその配分を把握することを 目的として実施した。観測は、図 2.2-13の赤丸に示す 56 地点(6月観測時は IO2 及び IO9 を除く 54 地点)を対象とした。



図 2.2-13 流量一斉観測地点位置図

## 表 2.2-10 流量一斉観測結果(6月-1)

											比流重昇	出			
No.	測定日時	天候	気温	Tw	EC	pН	RpH	DO	実測流量 O	精度	流量 S	流域面積	比》	充量	備考
			[°C]	[°C]	[µS/cm]			[mg/L]	[L/分]	[A·B·C]	[L/:	ት] [km²]	[L/s/km <sup>2</sup> ]	[mm/day]	
K01	6/10 12:30	曇り	14	10.6	41	7.0	7.1	-	1,910	А	1,9	10 -	-	-	取水量。取水施設 W01 下流へ流入 W01 からは要差
夜沼川	6/10 13:00	曇り	15	10.5	41	6.9	7.1	-	9,172	A	9,1	72 1.609	94	8.12	自記水位計設置 (10:50)手測り水 (11:06)データ回 S/N=58306、電 =4946 コ (13:38)手測り水 (13:44)スタート
K08	<mark>6/10 11:08</mark>	曇り	15	8.4	43	6.9	7.1	-	14,353	А	14,3	53 -	-	-	取水施設下流(取
W01-K08											1,9	69	-	-	取水施設前後の (W21に要加算、
W01	6/10 11:52	曇り	14	8.7	43	6.9	7.1	-	16,322	А	14,4	13 1.724	139	12.01	取水施設上流。
W03	6/10 13:00	曇り	15	-	-	-	-	-	-	-	9,1	72 1.646	92	7.95	夜沼川(自記)、K 夜沼川の流量を
W04-1	6/11 12:32	曇り	12	-	-	-	-	-	25	A		- 25	-	-	
W04-2	6/11 12:32	曇り	12	7.2	71	6.7	6.9	-	296	А	2	96 -	-	-	
W05	6/11 12:18	曇り	12	7.6	68	6.5	6.6	-	68	А		- 58	-	-	W06 は水なし
W04~W05											3	0.068	95	8.21	
W07	6/11 12:00	曇り	11	7.0	54	6.7	6.5	-	553	А	5	53 -	-	-	
W08-1	<mark>6/11 11:26</mark>	曇り	11	6.7	91	4.4	4.5	-	517	Δ	5	17 -	-	-	右支川。
W08-2	6/11 11:35	曇り	11	5.7	47	6.3	6.3	-	517				-	-	左支川。
W09	6/11 11:05	曇り	11	6.7	99	4.3	4.4	-	98	A		- 88	-	-	W10~W16 は水な
W07~W09											1,1	67 0.560	34	2.94	
W17	6/11 10:50	曇り	10	7.2	33	6.9	6.9	-	90	A		- 00	-	-	林道下流側左岸 EC=33.4 出所不明。流量に
W18	6/11 10:15	曇り	10	6.2	35	6.9	6.9	-	405	А	4	0.170	39	3.37	
W17~W18											4	95 0.254	32	2.76	
W20	6/11 9:42	曇り	10	7.2	29	6.9	7.0	-	88	А		38 0.177	8.2	0.71	流域面積は、隣接
W21	6/11 10:22	曇り	11	8.0	43	7.0	-	-	22,153	А	24,1	4.111	97	8.38	夜沼川。最下流。 水力発電用取水 中和施設への取

# 観測: 令和元年(2019) 6 月 10 日~6 月 13 日

の沢へ流域変更。
「夜沼川」から取水。
1、W03に要加算
也点。
Z=瑥ヒ官頭-0.600m
く h(从 部-12 8\/(100%) 内部-9 ?\/) データオーブ
B(9Fap-12.0V(100%), PJap-3.2V), ) — > E— >
5=塩ビ管頭-0.601m
自記值=0.596
水後)。
自分
W38・I22・I21 から要差引)
01(取水)の下流。
記。
Nから塩ビ管流入あり、Q=12.3L/min、T=7.4、
は加算していない。
する W19 を合わせた面積
画の上法側で測史
gの上流側で測足。 と書を主己
「里で左丁」

表 2.2-11 流量一斉観測結果(6月-2)

											比流量算出				
No.	測定日時	天候	気温	Tw	EC	pН	RpH	DO	実測流量 〇	精度	流量 S	流域面積	比》	<b>流量</b>	備考
			[°C]	[°C]	[µS/cm]			[mg/L]	[L/分]	[A•B•C]	[L/分]	[km <sup>2</sup> ]	[L/s/km <sup>2</sup> ]	[mm/day]	
追加 A	6/11 9:54	曇り	12	6.9	48	6.9	7.1	-	790	А	790	1.510	8.7	0.75	落峯沢川。
W22	<mark>6/11 10:49</mark>	曇り	11	7.6	74	6.9	-	-	2,083	А	2,083	0.914	37	3.20	
W23	6/11 11:10	曇り	12	7.3	45	6.9	-	-	2,087	А	2,087	0.595	58	5.01	
W24	6/11 11:29	曇り	12	7.8	43	6.9	-	-	1,138	А	1,138	0.216	87	7.52	
W25	6/11 11:45	曇り	13	9.0	57	7.1	-	-	30	В	30	0.068	7.3	0.63	
W26	6/11 11:53	曇り	13	9.7	44	6.9	-	-	11	А	11	0.066	2.8	0.24	
W27	6/11 12:24	曇り	14	9.0	42	6.9	-	-	3,937	А	3,937	2.392	27	2.33	
W28(三米坑)	6/11 12:45	曇り	14	16.5	275	7.1	-	-	338	А	338	0.135	41	3.54	
K11	6/13 10:30	曇り	15	6.2	104	6.9	7.0	-	155	А	155	0.060	43	3.72	
K13	6/13 10:50	曇り	16	10.0	210	4.5	-	-	206	А	206	0.349	9.8	0.85	本川。
К23	6/10 10:35	롪り	16	12.8	820	3.0	-	-	2,353	A	2,353	0.152	258	22.29	御在所沼流路 1。 0.927m E 自記センサーのメ 空中に。再設置時 0.929m 自
K24	6/10 10:45	曇り	16	9.2	201	3.9	-	-	1,291	А	1,291	-	-	-	御在所沼流路2。
K23~K24											3,644	0.906	67	5.79	
W31	6/11 9:40	曇り	10	-	-	-	-	-	0	A	-	-	-	-	左支川。 流水なし。 G080teramoto
W32	6/11 10:15	曇り	9	7.6	49	6.9	7.0	-	-	-	-	-	-	-	左支川。 水質のみの観測。 G081teramoto
W33	6/11 10:50	曇り	9	5.1	41	-	-	-	-	-	-	-	-	-	赤川、本川。三面 水質のみの観測。 G082teramoto
W36	6/11 12:50	曇り	12	8.2	92	6.0	6.2	-	1,162	А	1,162	0.452	42	3.63	右岸側排水路。地 G086teramoto
W37	6/10 16:32	曇り	15	15.6	533	3.3	-	-	4,752	Α	4,752	2.296	34	2.94	赤川左支川。
W38	6/10 16:32	曇り	15	13.8	1240	3.5	-	-	26,306	А	24,336	6.548	61	5.27	赤川、本川。 中和施設への取っ

観測: 令和元年(2019) 6 月 10 日~6 月 13 日
自記水位計設置地点。(10:35) WL = 塩ビ菅頭- ヨ記 実水位 = ±0.186 白記地下水位 = ±0.927
ンテのため(6/10 11:35~6/12 17:23)までセンサー
の水位(6/12 17:23) WL = 塩ビ菅頭-
記 美水位 = +0.186、 日記地下水位 = +0.927
張り。
すべり対策?
k量を差引

101	6/12 14:42	曇り	11	4.8	23	6.8	6.8	-	3,797	А		3,797	0.842	75	6.48	
-----	------------	----	----	-----	----	-----	-----	---	-------	---	--	-------	-------	----	------	--

表 2.2-12 沉重一角衡	観 祐 禾(0 月-5)	
----------------	--------------	--

											比流量算出	H l			
No.	測定日時	天候	気温	Tw	EC	pН	RpH	DO	実測流量 〇	精度	<mark>流量</mark> S	流域面積	比》	充量	備考
			[°C]	[°C]	[µS/cm]			[mg/L]	[L/分]	[A•B•C]	[L/分	[km <sup>2</sup> ]	[L/s/km <sup>2</sup> ]	[mm/day]	
102	6/12 14:08	曇り	12	4.9	28	5.1	5.4	-	-	-		-	-	-	
104	6/11 13:30	曇り	14	11.7	50	6.8	6.8	-	2,612	А	2,61	2 2.529	17	1.47	
105	6/10 12:55	曇り	16	14.2	169	4.1	-	-	5,617	A	5,61	7 4.312	21	1.81	流量は橋の下流 (13:20) WL = 塩L 自記 実 自記センサーの 空中に。 再設置時の水位 WL = 塩L 自記地下
<b>I</b> 08	<mark>6/10 14:10</mark>	曇り	16	15.3	581	3.2	-	-	5,730	А	5,73	0 1.522	62	5.36	
109	6/12 15:50	曇り	15	11.9	301	3.84	-	-	-	-		- 5.680	-	-	水質のみの観測
中和処理水	6/12 15:45	曇り	15	14.6	1433	4.35	-	-	-	-			-	-	水質のみの観測
l11	6/11 16:10	曇り	17	10.3	129	7.0	7.1	-	7,080	А	7,08	0 6.693	17	1.47	アセ沼川、最下涼
<b>I</b> 16	6/11 15:50	曇り	17	10.0	207	5.9	6.3	-	320	А	32	0 0.219	24	2.07	林道下流側の土
117	6/11 15:41	曇り	18	-	-	-	-	-	0	Α		0 0.275	0	0.00	水なし。くま笹。
l18	6/11 15:20	曇り	18	10.4	148	6.3	6.9	-	617	А	61	7 0.421	24	2.07	林道下流側の土
119	6/11 14:55	曇り	17	10.7	86	6.9	6.9	-	3,809	Α	3,80	9 5.548	11	0.95	鴨田川。
121	6/10 15:15	曇り	18	15.6	110	3.4	-	-	39,810	В	37,84	0 12.776	49	4.23	赤川、最下流。 唐 小和施設への取
122	6/10 15:40	曇り	16	14.5	1154	3.4	-	-	34,827	В	32,85	8 9.506	57	4.92	赤川。砂防堰堤の 中和施設への取
124	6/12 16:40	曇り	18	10.1	135	7.0	7.1	-	9,896	Α	9,89	6 6.818	24	2.07	鴨田川。最下流。
<b>T</b> 01	6/12 9:40	曇り	12	8.1	51	7.0	7.1	-	115	А	11	5 0.370	5.1	0.44	大沼池への流入 旧取水施設 取っ
T02	6/12 10:15	曇り	11	9.3	86	6.9	6.9	-	4,640	А	4,64	0 5.044	15	1.30	本川
T04	6/12 11:40	曇り	13	9.1	82	5.1	5.2	-	1,701	А	1,70	1 -	-	-	右支川 河床の石や草が
T06	6/12 13:05	曇り	14	7.4	56	7.1	7.1	-	2,067	А	2,06	7 0.050	687	59.36	湿原出口北側の
Т07	6/12 13:15	曇り	14	11.1	143	6.0	-	-	838	В	83	8 -	-	-	湿原からの流出 流量は下流での
T04+T07											2,54	0 3.574	11	0.95	

2.2-22

観測: 令和元年(2019) 6月1(	0日~6月13日
---------------------	----------

で測定。自記水位計設置地点。
菅頭−0.866m k位 = +0.259. 白記地下水位 = +0.863
ンテのため(6/10 13:20~6/11 15:37)までセンサー
6/11 15:37)
官與−0.886m 水位 = +0.880
o
<b>管出口で測定。</b>
<b>管出口で測定。</b>
敷台砂防ダムの下流。 K量を差引
なれている可能性あり。
赤く金気が多い
竜下流 4か所の流量の合計
塩分希釈法と T06 分流の差分で算出。

T12	6/12 16:57	曇り	18	11.3	144	6.9	-	-	647	A		647	1.026	10	0.86	
-----	------------	----	----	------	-----	-----	---	---	-----	---	--	-----	-------	----	------	--

表 2.2-13 流量一斉観測結果 (6月-4)

No.	測定日時	天候	気温	Tw	EC	pН	RpH	DO	実測流量O	精度	流量S	流域面積	比》	充量	備考
			[°C]	[°C]	[µS/cm]			[mg/L]	[L/分]	[A•B•C]	[L/分	[km²]	[L/s/km <sup>2</sup> ]	[mm/day]	
追加 B	6/11 14:34	曇り	17	12.4	130	6.9	-	-	81	А	8	2.347	0.5	0.04	
追加 C	6/11 16:50	曇り	18	12.1	503	4.5	-	-	1,728	А	1,728	0.563	51	4.41	
追加 F−1	6/11 16:49	曇り	18	11.3	91	7.1	-	-	468	А	4,037	0.132	510	44.06	比流量は(追加 F-
追加 F−2	6/11 16:34	曇り	18	11.2	92	7.1	-	-	3,569	А			-	-	
追加 G	6/11 15:55	曇り	18	10.9	109	7.1	-	-	1,294	А	1,294	0.216	100	8.64	流量は本川と分流
追加 H	6/11 15:16	曇り	18	10.7	210	6.9	-	-	1,152	А	1,152	0.611	31	2.68	
追加I	6/11 15:00	曇り	18	-	-	-	-	-	162	А			-	-	追加Jの上流から
追加 J	6/11 14:51	曇り	18	14.5	98	6.9	-	-	249	А	41	0.069	99	8.55	比流量は(追加 I)·
1	6/12 9:20	曇り	14	9.5	156	7.2	-	9.2	-	-			-	-	産総研データ。追 (産総研メモ)時間 のほとり、土壌間:
2	6/12 10:50	曇り		10.8	274	6.2	-	8.3	-	-			-	-	産総研データ。 (産総研メモ)別荘 かも?
3	6/12 11:50	曇り	12	7.2	443	3.2	-	4.1	-	-			-	-	産総研データ。追 (産総研メモ)位置 39.93543、経度:1
4	6/12 13:15	曇り		16.9	1035	3.0	-	0.0	-	-			-	-	産総研データ。 (産総研メモ)スノ・ い、泥沼、大気接
5	6/12	曇り		6.5	250	4.4	-	7.2	-	-			-	-	産総研データ。 (産総研メモ)発電 るかも?
6	6/12	曇り		15.1	1002	3.0	-	0.0	-	-			-	-	産総研データ。 (産総研メモ)発電 湧水発見、流量少
7	6/13 9:20	曇り		9.5	119	6.7	-	7.1	-	-			-	-	産総研データ。 (産総研メモ)さくら なし

### 観測:令和元年(2019)6月10日~6月13日

-1)+(追加 F−2)で算出

統の合計。

らの取水

+(追加 J)で算出

加E。

間が経つと pH, DO の値が大きく変化、さくら公園池 から流出、大気接触あるかも?

Eエリア奥、登ったところ、流量多い、大気接触ある

加 D の近く。 置がずれている?:地図上から判読、緯度: 40.93835、堆積場か坑内からの湧水?

ーシェルターの間からアクセス、亜硫酸ガスのにお 触なし、硫黄コンタミあるかも

『所横からアクセス、赤褐色の酸性水、大気接触あ

『所横から下ってアクセス、遊歩道横を掘り起こして ♪ない、大気接触なし

ら公園の岩がみえる斜面を登ったところ、大気接触

# 表 2.2-14 流量一斉観測結果(10 月-1)

											比流量算	Ц			
No.	測定日時	天候	気温	Tw	EC	pН	RpH	DO	実測流量 〇	精度	流量 S	流域面積	比	流量	備考
			[°C]	[°C]	[µS/cm]			[mg/L]	[L/分]	[A·B·C]	[L/5	}] [km²]	[L/s/km <sup>2</sup> ]	[mm/day]	
K01	10/10 10:55	晴れ	12	-	-	-	-	-	3,586	-	3,58	6 -	-	-	取水量。取水施設 W01下流へ流入 W01からは要差
夜沼川	10/10 11:22	晴れ	12	9.2	47	7.0	7.1	-	3,586	A	3,58	6 1.609	37	3.20	自記水位計設置 (11:00)手測り水 (11:35)データ回J S/N=58306、電 ト)=0.662 (11:42)スタート
K08	10/10 10:15	晴れ	10	8.1	47	7.0	-	-	5,295	А	5,29	5 -	-	-	取水施設下流(取
W01-K08											2,00	8	-	-	取水施設前後の (W21に要加算、
W01	10/10 10:35	晴れ	10	8.1	47	7.0	7.1	-	7,303	А	3,71	7 1.724	35	3.02	取水施設上流。
W03	10/10 11:22	晴 <mark>れ</mark>	13	-	-	-	-	-	-	-	3,58	6 1.646	36	3.11	夜沼川(自記)、K 夜沼川の流量を
W04-1	10/10 11:57	晴 <mark>れ</mark>	14	-	-	-	-	-	3	А	3	0 -	-	-	
W04-2	10/10 11:59	晴れ	14	7.3	69	6.8	6.9	-	234	А	23	- 4	-	-	
W05	10/10 12:10	晴れ	15	9.6	57	6.6	6.8	-	74	Α	7	- 4	-	-	W06 は水なし
W04~W05											31	1 0.068	76	6.57	
W07	10/10 12:33	晴れ	15	9.1	53	6.5	<b>6</b> .7	-	227	А	22		-	-	
W08-1	10/10 12:52	晴れ	15	10.0	<mark>8</mark> 5	4.0	4.8	-	35	^	3	-5	-	-	右支川。
W08-2	10/10 12:52	晴れ	15	10.4	93	5.8	6.0	-		~			-	-	左支川。
W09	10/10 13:32	晴れ	15	-	-	-	-	-	0	А		0 -	-	-	
W07~W09											26	0.560	7.7	0.67	
W17	10/10 13:45	晴 <mark>れ</mark>	16	9.5	32	6.0	6.9	-	35	А	3	-5	-	-	林道下流側左岸 出所不明。流量(3
W18	10/10 13:58	晴 <mark>れ</mark>	15	7.1	39	6.9	7.0	-	222	А	22	0.170	21	1.81	
W17~W18											25	0.254	16	1.38	
W20	10/10 14:14	晴 <mark>れ</mark>	15	10.1	34	7.0	7.0	-	41	А	4	0.177	3.8	0.33	流域面積は、隣接
W21	10/10 10:34	晴れ	12	9.0	45	6.9	-	-	6,877	A	8,88	5 4.111	36	3.11	夜沼川。最下流。 水力発電用取水 中和施設への取
追加 A	10/10 10:12	晴れ	11	8.7	46	7.0	-	-	210	Α	21	0 1.510	2.3	0.20	落峯沢川。

### 観測:令和元年(2019) 10 月 10 日~10 月 11 日

との沢へ流域変更。 。「夜沼川」から全量取水。 引、W03 に要加算
也点。 立=塩ビ管頭ー0.660m <sup>双</sup>
x 也(外部=13.0V(100%)、内部=???V)、自記値(テス
手測り水位=塩ビ管頭-0.660m 水後)。
差分 W38・I22・I21 から要差引)
01(取水)の下流。 云記。
則から塩ビ管流入あり、Q=16L/min、T=9.6、EC=32.1 には加算していない。
する W19 を合わせた面積
<b>愿の上流側で測定。</b> K量を差引

表 2.2-15 流量一斉観測結果(10月-2)

											比流量算出				
No.	測定日時	天候	気温	Tw	EC	pН	RpH	DO	実測流量 〇	精度	流量 S	流域面積	比》	<mark>流量</mark>	備考
			[°C]	[°C]	[µS/cm]			[mg/L]	[L/分]	[A•B•C]	[L/分]	[km <sup>2</sup> ]	[L/s/km <sup>2</sup> ]	[mm/day]	
W22	10/10 11:06	晴れ	13	9.5	69	6.2	-	-	1,111	Α	1,111	0.914	20	1.73	
W23	10/10 11:27	晴れ	14	8.6	44	6.9	-	-	710	Α	710	0.595	19	1.64	
W24	10/10 11:50	晴れ	15	8.8	40	7.0	-	-	762	Α	762	0.216	58	5.01	
W25	10/10 11:58	晴れ	16	10.6	51	7.0	-	-	22	Α	22	0.068	5.3	0.46	
W26	10/10 11:03	晴 <mark>れ</mark>	14	12.4	41	6.9	-	-	15	Α	15	0.066	3.7	0.32	
W27	10/10 12:28	晴れ	17	10.6	52	6.7	-	-	1,998	А	1,998	2.392	13	1.12	
W28(三米坑)	10/10 12:49	晴れ	17	18.7	345	7.2	-	-	401	А	401	0.135	49	4.23	坑内工事のため7 水質はパイプのも 水路(Tw = 13.4 I
K11	10/11 9:43	曇り	12	6.9	108	6.4	-	-	38	А	38	0.060	10	0.86	
K13	10/11 10:23	曇り	12	10.1	237	3.79	-	-	143	А	143	0.349	6.8	0.59	本川。
K18~K22											0	0.064	0.0	0.00	
K23	10/11 9:15	曇り	12	13.0	835	3.03	-	-	1,591	A	1,591	0.152	174	15.03	御在所沼流路 1。 0.944mWL = 橋 <sup>-</sup> 記実水位 = +0.16
K24	10/11 9:56	曇り	12	9.8	234	3.89	-	-	799	А	799	-	-	-	御在所沼流路2。
K23~K24											2,390	0.906	43	3.72	
W31	10/10 11:00	晴れ	12	11.4	22	6.5	6.5	-	-	-	-	-	-	-	左支川。 水質のみの観測。
W32	10/10 11:40	晴れ	13	8.4	51	6.9	6.9	-	-	-	-	-	-	-	左支川。 水質のみの観測。
W33	10/10 12:25	晴れ	14	10.7	89	4.4	-	-	-	-	-	-	-	-	赤川、本川。三面 水質のみの観測。
W36	10/10 15:35	晴れ	14	9.1	70	6.9	6.9	-	715	А	715	0.452	26	2.25	右岸側排水路。地
W37	10/10 16:09	晴れ	14	12.1	551	3.25	-	-	4,295	А	4,295	2.296	31	2.68	赤川左支川。
W38	10/10 15:47	晴れ	15	13.9	1217	3.48	-	-	19,246	А	17,238	6.548	43	3.72	赤川、本川。 中和施設への取っ
101	10/10 16:15	晴れ	10	8.6	23	6.7	6.7	-	479	Α	479	0.842	9.4	0.81	
102	10/10 16:55	晴れ	11	5.8	25	5.2	5.7	-	0.8	-	0.77		-	-	

観測:令和元年(2019) 10 月 10 日~10 月 11 日
Kか水路とバイフに分かれていた。 のを入力。流量は合計値を入力。
EC = 338.1  pH = 7.0
自記水位計設置地点。(9:15)WL = (新)塩ビ菅頭- F基準-0.956m = (旧)塩ビ管頭(基準点)ー0.928 自
52 目記地下水位 = +0.951 電圧=メイン 2.90
張り。
っていたので、
水量を差引

104	10/10 17:20	   晴れ	11	9.3	78	5.2	5.4	-	1,467	Α	1,467	2.529	9.6	0.83	
									 表 2.2-16	 流量一斉観	 測結果(10月	-3)			
		-	-			-			-		比流量算出		-		
No.	測定日時	天候	気温	Tw	EC	pН	RpH	DO [mg/[1]	実測流量 〇	精度	流量 S	流域面積	比》	充量 │[mm/dav]	備考
105	10/10 16:44	晴れ	13	12.4	146	4.21	-	-	1,903	A	1,903	4.312	7.3	0.63	流量は橋の下流で (16:39) WL = 塩ビ 自記 実水位 = +(
108	10/10 17:25	晴れ	13	13.0	655	3.20	-	-	3,578	А	3,578	1.522	39	3.37	
109	10/10 16:15	晴れ	14	11.6	313	3.84	-	-	2,403	-	2,403	5.680	7.0	0.60	
中和処理水	10/10 15:58	晴れ	14	14.7	1373	4.27	-	-	-	-	-	-	-	-	水質のみの観測。
<mark> </mark> 11	10/11 11:57	曇り	18	11.1	176	6.9	7.0	-	2,334	А	2,334	6.693	<mark>5.</mark> 8	0.50	アセ沼川、最下流
<mark> </mark> 16	10/11 11:35	曇り	17	-	-	-	-	-	0	А	0	0.219	0.0	0.00	林道下流側の土管
<mark> </mark> 17	10/11 11:25	曇り	16	-	-	-	-	-	0	А	0	0.275	0.0	0.00	水なし。くま笹。
<mark> </mark> 18	10/11 11:15	曇り	16	10.1	154	6.5	7.0	-	594	А	594	0.421	23	1.99	林道下流側の土管
l19	10/11 11:02	曇り	16	10.4	96	6.9	7.1	-	1,239	А	1,239	5.548	3.7	0.32	鴨田川。
<mark>l</mark> 21	10/10 14:20	晴れ	19	14.5	1021	3.38	-	-	23,514	А	21,506	12.776	28	2.42	赤川、最下流。屋 中和施設への取れ
122	10/10 15:06	晴れ	16	13.8	1203	3.40	-	-	24,331	В	22,322	9.506	39	3.37	赤川。砂防堰堤の 中和施設への取れ
124	10/11 14:55	曇り	21	10.4	138	7.1	7.1	-	7,551	А	7,551	6.818	18	1.56	鴨田川。最下流。 上流での塩ビ取水
T01	10/11 9:00	晴れ	12	8.9	59	6.9	7.1	-	30	А	30	0.370	1.3	0.11	大沼池への流入。 旧取水施設 取水
T02	10/11 9:35	晴れ	13	9.0	89	6.8	6.9	-	2,757	А	2,757	5.044	9.1	0.79	本川
T04	10/11 10:35	晴れ	14	9.1	80	5.0	5.0	-	645	А	645	-	-	-	右支川 河床の石や草が剥
T06	10/11 11:15	曇り	15	8.1	51	6.9	7.1	-	1,090	А	1,090	0.050	362	31.28	湿原出口北側の減
Т07	10/11 11:45	曇り	16	11.0	147	5.7	6.3	-	722	В	722	-	-	-	湿原からの流出 流量は下流での増
T04+T07											1,367	3.574	6.3	0.54	
T12	10/11 15:14	曇り	21	12.0	160	6.9	7.1	-	466	А	466	1.026	7.5	0.65	
追加 B	10/11 13:45	曇り	20	13.1	148	6.9	-	-	72	Α	72	2.347	0.5	0.04	
追加 C	10/11 14:30	曇り	20	12.4	472	4.5	4.6	-	900	Α	900	0.563	26	2.25	
追加 F−1	10/11 15:36	曇り	21	12.0	103	6.9	7.0	-	548	Α	1, <mark>1</mark> 07	0.132	140	12.10	比流量は(追加 F-

## 観測:令和元年(2019) 10 月 10 日~10 月 11 日

で測定。自記水位計設置地点。 菅頭-0.920m

0.204、地下水位 = +0.919、電圧=メイン 2.9v

0

管出口。

管出口で測定。

敷台砂防ダムの下流。 水量を差引 D下流。 水量を差引

、70L/分を加算した。

kされている可能性あり。

赤く金気が多い

滝下流 3か所の流量の合計

塩分希釈法と T06 分流の差分で算出。

-1)+(追加 F-2)で算出

|--|

表 2.2-17 流量一斉観測結果(10月-4)

	No.	測定日時	天候	気温	Tw	EC	pН	RpH	DO	実測流量 〇	精度	]	流量 S	流域面積	比》	充量	備考
				[°C]	[°C]	[µS/cm]			[mg/L]	[L/分]	[A·B·C]		[L/分]	[km <sup>2</sup> ]	[L/s/km <sup>2</sup> ]	[mm/day]	
	追加 G	10/11 15:20	晴れ	21	11.8	108	7.0	-	-	1,048	А		1,048	0.216	80	6.91	流量は本川と分泳
	追加 H	10/11 15:10	晴れ	21	11.2	195	6.9	-	-	857	А		857	0.611	23	1.99	
	追加I	10/11 15:05	晴れ	21	-	-	-	-	-	260	А		-	-	-	-	追加Jの上流から
	追加 J	10/11 15:00	晴れ	21	12.7	88	6.9	-	-	63	А		323	0.069	78	6.74	比流量は(追加 I)-
	1	10/11			9.2	146	7.1	-	-	-	-		-	-	-	-	産総研データ
	2	10/11			11.7	250	5.8	-	-	-	-		-	-	-	-	産総研データ
	3	10/11			7.4	296	3.4	-	-	-	-		-	-	-	-	産総研データ
	4	10/11			16.8	920	3.1	-	-	-	-		-	-	-	-	産総研データ
	5	10/11			-	-	-	-	-	-	-		-	-	-	-	産総研データ、湧
	6	10/11			15.3	926	2.9	-	-	-	-		-	-	-	-	産総研データ
	$\overline{O}$	10/11			-	-	-	-	-	-	-		-	-	-	-	産総研データ、採
ĺ	8	10/11			13.3	493	3.4	-	-	-	-		-	-	-	-	産総研データ、新
. L									1						1	1	

# 観測:令和元年(2019) 10 月 10 日~10 月 11 日

流の合計。

らの取水

)+(追加 J)で算出

勇水なし。

采水せず。

所規ポイント。



c) 2019年6月

図 2.2-14 比流量分布図





#### (2) 河川流量連続観測

流量連続観測は、2018 年度(平成 30 年度)に設置した自記水位計を用いて旧松尾鉱山周辺 3 河川における流域からの流出状況を把握することを目的として実施した。図 2.2-15 に示す夜沼川、 赤川、赤沢川(湧水帯)の連続観測を引き続き実施した。自記水位計の観測データ(回収データ) は、時系列変化図に整理するとともに、回収時の水位(H)と流量値(Q)から H-Q 相関を求め た上で、水位から流量への換算を行った。

地点	<mark>流域面積</mark> [km <sup>2</sup> ]	観測地点概要
赤川	4.312	同時流量観測 IO5 地点(新中和処理施設から約 1km 上流)
赤沢川(湧水帯)	0.152	同時流量観測 K23 地点(五色沼下流)
夜沼川	1.609	瀞川(新中和処理施設取水沢)への導水箇所上流

表 2.2-18 流量連続観測地点一覧表



図 2.2-15 流量連続観測地点位置図







a) 赤川



c) 夜沼川



H-√Q(赤沢川-K23)

2019年融雪以降

1

[H-QD]2018/9/8~2019/4/5

-0.85

ロ=253,0008(H+0964730)? パ=ー(2点データによる)

-0.BD

水位 H [基準点+m]

-0.75

[H-G@]2019/4/5~2019/11/5 Q=261.5983(H+1.013417)?

r<sup>2</sup> =0.28

-0.95

-0.90

b) 赤沢川

4

з

2

1

-1.00





(3) 河川水質一斉観測

流量一斉観測と併せて、EC(電気伝導度)、pH、DO(溶存酸素濃度)の現地水質の測定を行った。採水地点は、前述の図 2.2-13 に示した。また、各地点の測定結果については表 2.2-10~表 2.2-17 を参照されたい。

測定結果から、各地点の pH について分布図を図 2.2-19 に示す。6 月・10 月の観測時期とも、 電気伝導度が 500~600 µ S/cm と高い傾向を示す赤川及び赤沢川の流域において、pH 値が低く強 酸性となっている。赤川・赤沢川流域で特に低い pH 値を示す地点としては、御在所沼付近の K23 や湧水地点⑥地点で最も低い 2.9~3.0の値を示している。赤川本川区間では、I04 地点より上 流側では 4.4~6.0の値を示すが、旧松尾鉱山に近い I05 地点より下流ではで 3~4 程度と低い値を 示している。赤沢川においても、上流部の K13 で 3.8~4.4、赤川の合流部の W37 地点で 3.3 と全 体的に低い値を示している。中和処理水排水後の W38 より下流部でもその傾向は同じである。 その他の流域では、御在所沼の東側から低い pH 値 (pH=3.0~3.1)が流入する鴨田川上流の湿 地付近や大沼下流部の一部の湧水箇所、夜沼川流域内の W08 地点の湧水で 4.0~5.0 の値となるほ かは概ね 6.0~7.0 の値を示している。



図 2.2-19 現地水質(pH)分布図

(4) 地質調査

#### ① 既存資料による広域地質に関する予察

過年度及び本年度の検討の中で収集した既存資料のうち、旧松尾鉱山周辺の広域地質について まとめられた資料は表 2.2-19 に示すとおりである。このうち、藤田浩司・他の研究論文は、この 年度中に発表されたものである。他には、採掘範囲の坑内地質図、探鉱ボーリング柱状図集、八 幡平地域の地熱調査データなどが参考になる。

表 2.2-19 旧松尾鉱山周辺地質に関する既存資料 著者名/発行機関 論文名等 北上川を清流に(1984年) 建設省東北地方建設局 高橋維一郎 松尾硫黄硫化鉄鉱山の地質鉱床および母岩の変質に関する研 究(岩手大学工学部研究報告第15巻第1号別冊, 1962年) 旧建設省東北地方建設局 北上川水質改善対策調査(赤川地区地質地下水調査, 1974 年) 岩手県金属鉱業事業団 よみがえる北上川(1993年) 高橋維一郎·南部松夫 新岩手県鉱山誌(2003 年) 河野義礼·上村不二雄 松尾•八幡平硫黄•硫化鉄鉱床地帯地質調査報告書(地質調査 所報告第 158 号, 1954 年) 河野義礼・上村不二雄 5万分の1地質図幅 八幡平(1964年) 宮野豊 日本鉱業会誌(1967年) 不明(旧松尾鉱業株式会社) 松尾鉱山資料館から借用資料(不明) 大場司·梅田浩二 八幡平火山群の地質とマグマ組成の時間-空間変化(1999年) 藤田浩司·他 八幡平火山群形成史-1m メッシュ DEM を用いた火山地形判読 とK-Ar 年代測定値にもとづく解析-(岩手の地学第49号,2019 年)

#### 2 現地踏査

本年度、地質踏査における現地踏査は、2019年6月10日~6月12日(第一期)及び2019年8 月29日~2019年8月30日(第二期)に実施した。第二期は、既に調査を行った箇所のうち、重 要と考えられる露頭を秋田大学大場教授(地下水制御技術の調査研究ワーキンググループ委員) 及び担当者とともに再確認を行った。地質に関する現地踏査結果を取りまとめて図2.2-20に示 す。この中には、2018年度に実施した踏査の結果も含まれている。



図 2.2-20 現地踏査ルートマップ (2万5千分1地形図「松川温泉」及び「茶臼岳」(国土地理院)を加工)

上図の内、北ノ又川沿いについては図 2.2-21 に詳細と写真を示す。ここでは、溶岩、溶岩の下 部の自破砕部、近傍の溶岩起源とみられる巨礫の集合が見られる。この溶岩は夜沼川低地内で噴 出し、夜沼川沿いに流下したものとみられ、最も下流側の露頭の東側にみられる丘陵も、この溶 岩流で形成されたものとみられる。

なお、藤田・他(2019)では、八幡平東麓の柏平地区の平坦面に流山群が存在することから 「松尾岩屑なだれ堆積物」を認定し、これは夜沼低地で発生して北ノ又川沿いに流下したものと 推定している。「松尾岩屑なだれ堆積物」の存在と起源に関する判断は支持できる。ただし、北 ノ又川沿いの北岸には、露頭状況から、岩屑なだれ堆積物が通過した後に流下した溶岩が分布し ていると考えられる(2018年度のモデルの踏襲が可能)。

\* 夜沼低地: 仮称。夜沼川、瀞川流域。北西側から東側を連続した急崖で囲まれ、南側に開いた地域。



図 2.2-21 現地踏査ルートマップ(北ノ又川周辺)

図 2.2-22 に赤川中流部のルートマップを示す。ここでは地形判読から、石山付近で噴出した溶 岩が流下した跡を、赤川が浸食して谷を作っていると予想した。したがって、谷壁で溶岩が観察 できると考え、河床に下りるルートを探した結果である。

赤川の左岸側の溶岩の露頭のスケッチを図 2.2-23 に示す。

溶岩の最下部に、赤色を呈す自破砕部が見られる。同様の自破砕部は図 2.2-21 の夜沼川の最下 流部でも観察した。2018 年度の調査では、夜沼川の上流部でも河床付近に自破砕部を観察して いる。

スケッチした露頭では、その自破砕部の上に3層の溶岩が重なっている。各溶岩は、節理の形 態が多少異なることと、境界部で節理が多くなっていることで識別できる。ただし、境界部に は、最下部にみられたような自破砕部は形成されていない。このことは、下位の溶岩の冷却が進 まないうちに上位の溶岩が重なって、溶岩の下部に急速冷却部が生じなかったことを示してい る。一方、下位の溶岩の下部(河床標高)に自破砕部が生じているのは、その直下に下位の地層 (鉱山跡東側の大規模な山体崩壊の堆積物と推定)が分布していることを示している。

夜沼川沿いでも、河床付近に自破砕部が見られたことから、分布する溶岩の基底面は、河床に 近い標高にあると判断される。このように、溶岩の堆積後に形成される渓流の河床標高が、溶岩 の基底面付近となることには、そのようになる浸食のメカニズムが関わっていると考えられる。



図 2.2-22 現地踏査ルートマップ(赤川中流域)



図 2.2-23 赤川中流左岸の溶岩の露頭スケッチ

通常、冷却節理が発達した溶岩は透水性が高い。このため溶岩中の自由地下水面は深くなり、 末端部では、量の多い湧水がその基底面付近に形成されることが多く、そこから、新しい渓流の 浸食が進んでいったものと想像される。

この露頭で観察された節理の状況からも、溶岩の透水性はかなり高い。最下部の自破砕部は、 透水性が低いとみられるが、厚さが薄く、広域の水理構造に対する効果は限定的と考えられる。

赤川銃流域のルートマップを図 2.2-24 に示す。

赤川沿いには、旧建設省が施工した三面張り工の工事用道路の跡が残されており、これをたど ることで、両岸の多数の露頭を観察することができる。露頭の多くは、赤川の浸食に伴う崩壊地 で、高橋(1962)の八幡平層の上部〜最上部の状況を観察することが可能である。この地層は、 鉱山の採掘跡への地下水流入の通路と考えられる。同時に鉱床を胚胎する八幡平層の堆積岩優勢 部の一部に対比され、多少なりとも鉱染を受けて、黄鉄鉱などの硫化鉱物を含み、地下水を酸性 化する可能性のある地層である。赤川沿いに観察される、八幡平層の堆積岩優勢部とそれに挟在 するとみられる溶岩を、仮に「鉱床胚胎層」と呼ぶ(後述で再定義する)。



図 2.2-24 現地踏査ルートマップ (赤川上流域)

ルートマップの範囲で、4 箇所の露頭をスケッチした。何れも、高橋維一郎(1962)の八幡平 層の上部〜最上部に当たるとみられる。

図 2.2-25 は、八幡平層(鉱床胚胎層)中の溶岩の露頭である(ルートマップのほぼ中央)。この付近では、河床標高から上方に厚い溶岩が連続している。スケッチした露岩は、急崖で、やや 傾斜した箇所に崩積土が覆っているが、ほぼ全体に堅硬な溶岩が露出している。2 層の溶岩が重 なって、下位の溶岩は流理方向の節理が発達している。透水性はかなり高いとみられる。露頭に 接近して観察することはできないが、変質も進んでいるものとみられる。



図 2.2-25 赤川上流右岸の八幡平(鉱床胚胎層)中の溶岩のスケッチ

図 2.2-26 は、上記のスケッチの約 500 m 下流(南東側)の、大きな露頭のスケッチである。



図 2.2-26 赤川上流右岸の八幡平層(鉱床胚胎層)の大きな露頭のスケッチ

この露頭で観察できる地層も八幡平層(鉱床胚胎層)である。上半部は変質した火砕岩(一部 堆積岩?)で、全体に軟質で、表面は褐色を呈す。特に変質(珪化変質)が進んだ箇所は脱色さ れて白色を呈している。透水性は、やや低いとみられる。

下半部は溶岩で、流理に沿った節理が発達している。透水性は高いとみられる。

ルートマップの中央部右手(東側)の、地熱発電所生産井背後の露頭のスケッチを図 2.2-27 に 示す。この露頭では、八幡平層(鉱床胚胎層)中に6層の溶岩が見られるが、何れも連続性に乏 しい。溶岩流の断面が見えていると考えられる。溶岩周辺の火砕岩の強変質部は脱色(珪化変質) されて、白色を呈しているが、必ずしも層理方向に延びておらず、この露頭では右手(北北東部) の変質が著しい。



図 2.2-27 地熱発電所生産井背後の八幡平層(鉱床胚胎層)の大きな露頭のスケッチ

アスピーテライン南側の露頭(ルートマップで右下隅)のスケッチを図 2.2-28 に示す。この露 頭では大長根上部溶岩が露頭の上部に、八幡平層(鉱床胚胎層)を覆って分布している。大長根 上部溶岩は、明瞭な直線的節理が発達し、変質・変成作用などは被っていないものとみられる。

八幡平層(鉱床胚胎層)は、表面が褐色を呈す火砕岩類、若しくは、堆積岩が主体で、断片的 な溶岩を挟んでいる。溶岩に節理が発達しているが、直線的ではない。多少丸まって連続的では ない。八幡平層(鉱床胚胎層)中の溶岩が、変質・変成作用を被った結果とみられる。

これらの露頭を観察した限りでは、火砕岩・堆積岩類は明るい褐色を呈し、溶岩は概ね暗色を 呈している。ボーリングコアでも、溶岩は暗色を呈すが、溶岩の暗色は輝石などの有色鉱物及び サポナイトなどの Fe、Mg に富む変質鉱物によるもので、これらは露頭表面の風化によっても、
色調が変化しにくいと考えられる。

一方、火砕岩・堆積岩は、表面は明るい色調であるが、ボーリングコア(新鮮部)では溶岩以 上に暗色を呈す。特に硫化鉄の鉱床は、黒に近い色調である。新鮮部の暗色は微粒の黄鉄鉱に起 因し、表面では風化(酸化、流出、褐鉄鉱化)によって黄鉄鉱が消失して、色調が変化したもの と考えられる。ただし、白色を呈す脱色した箇所は、珪化変質により新鮮部でも明色を呈す可能 性もある。



図 2.2-28 アスピーテライン南側の八幡平層(鉱床胚胎層)の大きな露頭のスケッチ

## ③ 現地踏査を踏まえた既存資料の再点検

# A. 既存資料の再点検

既存の地質文献に示された地質図・地質構造は互いに整合しない。主要な文献に関して、評価 上の着眼点を表 2.2-20 に示す。既存資料の地質図類では、鉱床を胚胎する層及びその下位の溶岩 を主体とするゾーンの構造に関する情報は限られている。また、大規模山体崩壊とその後の溶岩 の活動については、見解が分かれている。一方で、茶臼岳~西森岳に至る頂稜部の溶岩の分布が 狭く、稜線の北側にも八幡平層相当層が露出している点については、各文献が一致しており、地 形の観察結果とも整合している。

表 2.2-20 既存地質図類の看眼点
---------------------

1	高橋維一郎(1962)及び「北上川を清流に」の地質図(高橋維一郎の見解)	
	(「松尾硫黄硫化鉄鉱山の地質鉱床および母岩の変質に関する研究」 岩手大学	学工学部研究報告第 15 巻
	第1号别冊,昭和37年3月)	
	着目点	資料の評価
	● 基本的な層序(特に旧松尾鉱山坑内地質等)に関しては、最も妥当と	鉱床胚胎層と下部溶岩
	判断される。	が一括されている点
	● 大規模山体崩壊に対する認識がなく、夜沼低地には鉱床胚胎層及び下	で、両者を区分する水
	部溶岩に相当する「八幡平層」を広く分布させている。御在所低地で	理構造に関しては不足
	は、下位より「八幡平層」、「赤川溶岩集塊岩」、「石山溶岩」の順	がある。
	で重なっているが、「赤川溶岩集塊岩」は「大長根下部溶岩」の下位	
	に位置し、大長根の溶岩形成以降の大規模山体崩壊の堆積物には相当	
	しない。	
	<ul> <li>● 上部の堆積岩の多いゾーンと下部の溶岩主体のゾーンは一括して「八</li> </ul>	
	幡平層」としている。なお、これまでの水理地質の検討では、鉱床は	
	多く胚胎する上部と溶岩主体の下部では、鉱床の有無だけではなく透	
	水性の点でも区別する必要がある。八幡平層の下位は、玉川溶結凝灰	
	岩類に属する「黒沢層」とされている。	
	*御在所低地:仮称。赤川、鴨田川の流域。西側~北側を不連続な急崖	
	で囲まれ、南東側に開いた地域。	
2	地質図幅「八幡平」	
	着目点	資料の評価
	● 「C4丸森凝灰岩」が鉱床を胚胎する層、「C3大長根下部溶岩」がその	地質図幅「八幡平」
	下部の溶岩主体のゾーンに相当するとみられる。	は、坑道内を調査した
	● 両者の境界は、中和工場付近で赤川の河床標高(EL880m)にあり、	高橋(1962)との違い
	EL760m 付近である鉱山の情報(3m 坑道の地質状況)とは一致しな	があり、鉱山付近の地
	<i>ل</i> ، ۲ <sup>°</sup> م	質構造に関してはあま
	● 「C2石山溶岩」、「C1鴨田山外輪山溶岩」を、鉱床を胚胎する層より	り参考にはならない。
	下位にしているが、これは熱水変質を被っておらず、「北上川を清流	
	に」の地質図のように、石山溶岩は鉱床を胚胎する層の上位とするのが	
	正しいと考えられる。	
3	日本鉱業会誌 1967 の地質図	
	着目点	資料の評価
	● 鉱床を胚胎する「赤川砕屑岩層」の下位に下部の溶岩に相当する「赤	鉱床の胚胎する層と下
	川山集塊岩」を設定しており、鉱山の地質データとの矛盾はない。	部の溶岩の層序につい
	● 大規模山体崩壊に対する認識はなく、夜沼低地、御在所低地には下部	ては妥当とみられる
	溶岩に相当する「赤川山集塊岩」が広く分布させている。なお、その	が、詳細な構造は読み
	上位に石山溶岩を分布させている。	取れない。

2.2-44

4	資料館資料手書き原稿												
	着目点	資料の評価											
	<ul> <li>大長根溶岩の下位に、アスピーテライン沿いにから露天採掘跡付近に</li> </ul>	鉱床の胚胎する層と下											
	厚い「森山溶岩」を分布させているが、その実態は不明。	部の溶岩の構造に関し											
	<ul> <li>● 鉱床胚胎層に相当する「丸森凝灰岩」の下位は「北ノ又デイサイト質</li> </ul>	ては参考にならない。											
	凝灰岩」(玉川溶結凝灰岩類)としており、下部の溶岩に相当する地												
	層は記載されていない。												
	● 御在所低地に「鴨田火山岩屑」を分布させている。これは山体崩壊の												
	堆積物と認識している可能性がある。最新の藤田・他(2019)や地質												
	図幅は、鴨田山に溶岩を分布させている。												
	● 他の地質図の「石山溶岩」を、「大長根溶岩」と一括している。岩質												
	は似ているが、両者の間に大規模崩壊が発生しており、同一時代の溶												
	岩とは考えにくい。「石山溶岩」相当部分を、「鴨田火山岩屑」(山												
	体崩壊堆積物)の上位にしている点は、評価したい。												
5	大場・梅田 1999												
	着目点	資料の評価											
	<ul> <li>● 鉱床を胚胎する層に相当する地層は記載されていない(現八幡平火山)</li> </ul>	鉱床を胚胎する層に関											
	以降が研究の対象)。	する情報は無い。											
	● 夜沼低地、御在所低地に「山体崩壊堆積物」を分布させている。												
	● 他の地質図が一様に記載している「石山溶岩」を欠いていることか												
	ら、山体崩壊以降の溶岩の流出は考えていない。												

## B. 大規模山体崩壊の認識

検討対象地域で、大規模山体崩壊により「夜沼低地」と「御在所低地」が形成された点は極め て重要である。この点について整理すると次のとおりである。

- 「夜沼低地」、「御在所低地」などは大規模山体崩壊で形成され、その中に夜沼低地の溶岩、
   「石山溶岩」などの最も新しい溶岩が噴出している。したがって、低地の中は崩壊堆積物を
   溶岩が覆う構造になっている。
- 大長根溶岩、八幡平~茶臼岳~西森山の頂稜部の溶岩が「夜沼低地」、「御在所低地」に向かって流れ下った構造はない。したがって、これらの溶岩は大規模山体崩壊以前に形成された。
- 西森山東方では山体崩壊が生じ、その後に前森山火山の噴出・形成があった。この活動と 「夜沼低地」などの山体崩壊の前後関係は不明である。ただし、噴出物が直接重ならないた め、地質構造を組み立てる障害にはならない。
- 山体崩壊堆積物を明示しているのは、大場・梅田 1999 のみ。資料館手書き原稿の「鴨田山 火山岩屑」は崩壊堆積物を意図している可能性あり。
- 最新の研究(藤田・他2019)は、夜沼低地を「夜沼崩壊地」と呼び、岩屑なだれの発生源と 考えている。御在所低地については明示していないが、その頭部に「主要滑落崖」を記入し ている。低地内に噴出した石山火山、鴨田山火山と崩壊の前後関係は説明されていない。

## C. 採掘範囲の地質に関する高橋(1962)の研究成果

高橋は、3m、6m、36m、66m、72m、100m、136m、160m、184m、248mの各坑道を観察して 坑内地質図を作成し(6m と 72m については報文には図示していない)、採掘対象範囲の地質を、 下位より八幡平層最下部(溶岩、集塊岩)、下部安山岩(LA)、下部堆積層(LS)、中部安山 岩(MA)、中部堆積層(MS)、上部安山岩(UA)、上部堆積層(US)、最上部安山岩、八幡 平層最上部に区分しており、これらをまとめて八幡平層と呼んでいる。安山岩の岩質は複輝石安 山岩で、著しく変質している。高橋は、「鉱床は下部安山岩上縁より上部堆積層までの間に胚胎 するが、主要部の上限は通常中部堆積層までである。」と述べている。

坑内地質図の例として、100m坑道の地質図(図2.2-29)を示す。図の下方が東側で、坑口側で ある。地層は東に向かって10°~20°傾斜しており、西側(坑道の奥)ほど下位の地層が分布す る。下部安山岩(LA)と下部堆積層(LS)の境界に凹凸があって複雑り、両者は不整合関係で あると説明されている。下部堆積層(LS)が鉱床の母岩として最も重要としている。

高橋の研究の主題は、鉱石化と変質鉱物である。顕微鏡観察、示差熱分析、X線回折などを用いて検討している。研究成果の要点は、図 2.2-30に示されている。高橋の研究から、水理地質構造に関する情報は次のとおりと考える。

- 坑道が展開している範囲で下部安山岩の上面が低くなっていることから、上位の地層の堆積 盆の中心が鉱山付近にあったことを伺わせる。その場合、地質構成をそのまま広域に拡張す ることには慎重である必要がある。
- 下部安山岩の最上部、堆積層との境界付近は鉱染を受け、堆積層と同様の変質も被っている
   ため、サポナイトが進んだ安山岩(溶岩や緻密な粗粒火砕岩)の深部とは、状況が異なって

いるとみられる。

● 透水性に関する直接的な情報は無い。この点は、2019年度の調査ボーリング結果(後述)で 判断することになる。



図 2.2-29 高橋(1962) に示された 100m 坑坑内地質図(モノクロの原図に着色)



第309図 鉱化作用と変質作用の模式理想図(高橋, 1962)

図 2.2-30 鉱化作用と変質作用の模式理想図(転記・清書された図に着色)

## D. 地質形成史

既存資料の点検、地形の実態視判読、既存の文献の評価を踏まえ、八幡平火山の形成史を次のように考える(図 2.2-31 参照)

I)下部の溶岩と鉱床を胚胎する層の堆積 広く分布している鮮新世の玉川溶結凝灰岩類及び北ノ又川層等を不整合に覆って、下部の溶岩が 噴出・堆積し、その活動の後期に形成された凹地に堆積岩・凝灰岩(鉱床胚胎層)が堆積した。

Ⅱ)地域の傾動、大長根溶岩・頂稜部の溶岩の噴出と鉱床の形成

北西側が隆起し、全域が傾き、上昇量の大きい北西側は浸食された。

新期の火山活動が開始し、八幡平から茶臼岳、大長根、西森山などの溶岩が噴出した。頂稜部の 溶岩は八幡平から東側に順次新しくなっている。大長根は茶臼岳とは別の単独の火山とみられる。 この火山活動(主に大長根火山)に伴って、下部の溶岩が変質し、堆積岩・凝灰岩を主地とする 堆積岩中に鉱床が形成された。

Ⅲ)夜沼低地・御在所低地を形成した山体崩壊とその後の溶岩の噴出

頂稜部の溶岩の活動が一段落した後、夜沼低地、御在所低地などに大規模な山体崩壊が発生し、 崩壊跡を埋めて溶岩が流れた。西森山の東側も山体崩壊が生じ、その中に前森山(玄武岩)が形 成された。これらの山体崩壊の前後関係は不明である。

御在所低地では、その後も小規模な活動が継続して、丸森、五色沼などが形成された。

なお、大長根の溶岩については、大場・他(1999)や藤田・他(2019)が茶臼岳火山の一部と しているが、溶岩が連続していないこと、いったん途切れた溶岩が、大長根の幅の広い尾根部で、 厚さ150mを超えること(2018年度ボーリング結果)、源太岩の露頭で、鉛直方向の流理が見ら れることなどから、茶臼岳とは独立した火山の噴出物と考える。 I-1

I -2

下部

Ⅰ)下部溶岩の噴出鉱床胚胎層の堆積 Ⅰ-1:鮮新世の玉川熔結凝灰岩類お よび北ノ又川層等を覆って、安山岩溶 岩(下部溶岩)が噴出した。

I-2:その活動の後期に形成された 凹地に堆積岩(鉱床胚胎層)が堆積した。 堆積物は泥岩・砂岩もみられるが、安 山岩の活動は続いて、火山礫凝灰岩、凝 灰角礫岩等が多く、溶岩・火山角礫岩も 挟まれている。

#### Ⅱ)地域の傾動、大長根溶岩・頂稜部の 溶岩の噴出と鉱床の形成

Ⅱ-1:新規の火山活動の前駆的現象 で、北西側が隆起し、全域が傾き、上昇 量の大きい北西側は特に浸食された。

Ⅱ-2:新期の火山活動が開始し、八幡 平、茶臼岳、大長根などの溶岩が噴出。 同時に、将来の夜沼低地、御在所低地付 近でも火山が形成されたとみられる。

周辺では熱水が侵入し、下部溶岩は 変質し、空隙の多い堆積岩・凝灰岩から なる胚胎層中には鉱床が形成された。

Ⅲ)夜沼低地・御在所低地を形成した山 体崩壊とその後の溶岩の噴出

Ⅲ-1: 頂稜部の溶岩の活動が一段落 した後、鉱山の西側、東側で再度マグマ が上昇し、地下水に接触して山体中の 水蒸気圧が高まった。

Ⅲ-2:高い水蒸気圧のため、山体が不 安定になり大規模な崩壊が発生した。 この崩壊で、夜沼低地、御在所低地など の原型が形成された。

西森山の東側にも山体崩壊が生じた。 Ⅲ-3:山体崩壊の結果マグマが上昇

しやすくなり、溶岩が噴出し、低地の崩 壊堆積物を覆って流れた。

火山活動は休止している。

採掘跡に坑道が残されている。

Ⅳ) 現在

西森山の東側では前森山が噴出した。

鉱床が発見され、採掘がおこなわれ、

:小野金 II-1 п-2 茶日岳 大森山 西森山 根溶岩 ш-1 Ш-2 III-3 )前森山 広床胚胎層 IV 茶臼岳 大森山 西森山 前森山 大長根溶岩 夜沼低地 御在所低地 下部溶岩、採掘路 基盤岩 (玉川溶結凝灰岩類)---

基盤岩(玉川溶結凝灰岩類)

鉱床胚胎層

図 2.2-31 八幡平火山の形成史

2.2-49

# E. 水理構造の検討で踏まえる必要のある項目

検討地域の水理構造を検討する上での着目点は次のとおり。

- 鉱床を胚胎するゾーンの下位に、緻密で難透水性の溶岩主体のゾーンが広がっている。下部の溶岩は、安山岩質の火山角礫岩~自破砕溶岩で広域熱水変質(鉱床形成と同時)を受けている。
- 下部の溶岩の堅硬さと難透水性は、3m 坑道のプラグの実績で証明されている。
- 鉱床を胚胎する層と下部の溶岩の境界面は半すり鉢状の形状をし、採掘跡の東縁で EL760 m 付近にあり、西側、北側で高くなっている。
- これらの地層は、東に傾斜している(堆積後に傾動)。
- 採掘跡の北側(アスピーテライン南側の露頭付近)で、八幡平層(鉱床胚胎層)を覆う「大 長根溶岩」は厚さ 10~20 m で、その下位に厚い溶岩は見られない。ただし大長根の高標高 部では、2018年度のボーリングで厚い(合計厚さ150 m 以上)溶岩が確認されており、広い 大長根(尾根)の低標高部まで溶岩が分布している。
- 大長根の深部の溶岩は、透水試験の結果、極めて低透水性であることが確認されており、夜 沼低地から鉱山採掘跡への地下水の流れを遮断している。

### F. 「鉱床胚胎層」の定義

高橋(1962)の八幡平層は、下部堆積層より上の、坑内の湧水状況などからある程度の透水性 があるとみられるゾーンと、3m 坑道のプラグでほぼ完全な止水ができていることから概ね透水 性が低いとみられる下部安山岩とに大きく区分される。鉱床は、下部堆積層より上のゾーンに大 半があり、下部安山岩の深部には鉱化は及んでいない。したがって、水循環と水質形成に係わる 解析モデルでは、両者を区別する必要がある。

この解析モデルでは、高橋(1962)の八幡平層のうち、透水性が高く鉱床が主に分布する層準 を「鉱床胚胎層」、難透水性の下部安山岩の深部以下を「下部溶岩」と再定義(基本は透水性で 区分)する。「鉱床胚胎層」は、高橋(1962)の八幡平層の下部堆積層から最上部層までに、概 ね当たるが、下部安山岩の最上部(2019年度のボーリングで透水性を確認)を含んでいる。高橋 によれば、八幡平層のうち、最上部安山岩と最上部層には鉱化が及んでいないが、その境界を解 析領域全体に追跡することが困難であることから、ここでは便宜上「鉱床胚胎層」に含めた。

「下部溶岩」は高橋の「下部安山岩」に概ね相当するが、完全には一致しないので、異なった名 称としている。

鉱山採掘跡への地下水の流入通路であり、また地山内での酸性水発生の場とみられる鉱床胚胎 層について、現状での認識を整理すると次のとおりである。

- 鉱床胚胎層は、下部溶岩を形成した火山活動の後期に、凹地(湖沼)を埋めて堆積した、堆 積岩、火砕岩とそれらに挟在する溶岩。分布範囲は、凹地の広がりに規制される。
- 泥岩、砂岩などの記載があり、胚胎層の少なくとも一部は水中堆積。このような、内陸部に 水域が形成されたのは、下部溶岩を形成した火山活動と関連しているとみられる。したがっ て、下部溶岩と鉱床胚胎層の関係は、非整合であっても不整合ではない。一連の火山活動で

形成され、一部は指交関係の可能性もある。

- 鉱床胚胎層の堆積層・火砕岩は間隙が多く、破砕されやすかったため、鉱化流体が広く浸透し、鉱染・交替が生じた。特に高品位の鉱床は間隙の多いゾーンに生じたと考えられる。
- 鉱床の分布は、必ずしも堆積岩、火砕岩中に限られず、高橋(1962)の下部安山岩(概ね下 部溶岩に対応)の上部も鉱染を受け、採掘対象となっている。この部分は、下部安山岩の主 要部のサポナイト化とは、変質の状況も異なっている。2019年度のボーリング孔の透水試験 では、下部安山岩相当層の透水性は高い。したがって、鉱床が存在し、かつ透水性の高い 「鉱床胚胎層」には、高橋(1962)の下部安山岩の上部が含まれる。
- 下部安山岩で鉱床が小規模(第3鉱床は下部安山岩中)であるのは、下部安山岩が一般に緻密で堅硬であったため、鉱化流体(熱水・硫化水素)の移動箇所が限定されためと考える。
   変質作用は受けており、鉱床形成の影響は受けている。その一部が変質や鉱染の結果、透水性が高まったとみられる。
- 鉱床形成の時期は、大規模な火山活動の末期の、胚胎層形成と同時期か、大長根溶岩や茶臼 岳などの頂稜部の一連の溶岩の活動時期と考える(通常、熱水鉱床は火山活動本体の火山岩 中にはなく、その周辺部に形成される)。夜沼低地や御在所低地を形成した山体崩壊時の火 山活動は、大長根溶岩への鉱染・変質作用がほとんどないことから、鉱床形成に係わった可 能性は小さい。

## G. 水理構造モデル構築上の着目点

水理構造を組立てる上での認識、着目点は次のとおりである。

- 3m 坑道のプラグの状況などから、下部溶岩以下は、地下水の流動にはほとんど関与していないと考えられ、深部の構造は重要でない。
- 大長根溶岩(上部・下部)や頂稜部の溶岩は、地表から涵養された水を鉱床胚胎層へ通過させるのみで、胚胎層中の地下水流動には大きな影響は与えない。その透水性がかなり低い場合は、融雪期の坑道への湧水量の増加に影響する。大長根の地表部に分布するそのほかの堆積物も同様に、鉱山跡付近の地下水の涵養・流動に与える効果は小さいとみられる。
- 鉱床胚胎層の基底面の形状と平面分布が、3m 坑道プラグ前の坑廃水量を直接決定づけ、最 も重要。高橋(1962)の坑道内の地質情報などから、堆積盆の中心が鉱山付近にあったとみ られ、周囲から地下水が集まって来やすい形状をしている。解析範囲の東部では情報がほと んどないが、坑道の集水域は採掘跡の西部〜北部とみられることから、モデル構築の大きな 支障にはならない。
- 鉱床胚胎層の透水性は、3m 坑道プラグ後の坑廃水量、及び赤川上流の河川流量に係る。したがって、これらを同定対象にして、透水性を絞り込むことができる。透水性については、2019年度のボーリング調査で10点の透水試験結果が得られたが、1E-7 m/sec~1E-3 m/secの間でばらついている。試験地点が代表点とは限らないことと、試験数が少ないことなどから、その平均を鉱床胚胎層の値として固定することはできない。河川流量などを対象にした同定結果の透水係数が、透水試験結果のばらつきの範囲に入っておれば、両者に矛盾はないと評価できる。

- 大規模山体崩壊堆積物の形状と透水性は、採掘跡から東側の地下深部への浸出水の量に係る。
   特に、坑道からの排水を抑制(抑止)した場合の、坑道内の水位上昇量に影響する。
- 大規模崩壊堆積物とその上位の溶岩の構造と透水性は、夜沼川、鴨田川などの流量に係る。
   したがって、これを検証対象として、山体崩壊エリアにおける解析モデルの妥当性を評価できる。

このような状況から、坑廃水量の推移・季節変化をある程度再現するモデルは構築可能と考え ている。このモデルは、対策工の効果予測にも使用できるが、必ずしも完璧ではない。

仮に、具体的に対策工を計画する場合は、その形状や配置を検討するため、水理構造、水理物 性に関する調査が改めて必要になる。

実際の施工段階では「モニタリング施工」が必要で、段階を追って施工し、モニタリングで効 果を確認し、必要に応じて追加施工や設計変更を実施することになる。これに関連して追加調査 が必要になる場合もある。

#### H. 解析モデルの層序と既存文献地質図の対比

以上の検討結果を踏まえ組立てた水循環解析のための水理構造モデルの層序(構成員)と既存 文献の地質図との対比を整理すると次のとおりである。層序関係を本業務の解析モデルと比較し て表 2.2-21 に示す。

#### ● 難透水基盤岩

地域の深部に広がる鮮新統及び中新統を一括している。

<北上川を清流に>の黒沢層、北ノ又川層に当たる。

- <八幡平図幅>では玉川溶結凝灰岩類、北又川層に当たる。
- <鉱業会誌1967>では黒沢層、北ノ又川層、山津田層に当たる。
- <資料館資料>では北ノ又デイサイト質凝灰岩に当たる。
- <大場ほか1999>の基盤岩に当たる。

層序、対比に関して各資料相互の矛盾はない。

● 下部溶岩

高橋(1962)及び<北上川を清流に>の八幡平層最下部(溶岩・集塊岩)及び下部安山岩の大 半に当たる。採掘対象層準の下位にあり、鉱染がほとんどないため採掘の対象となっていない。 3m 坑道のプラグにより、難透水性であることは確認されている。

<八幡平図幅>では大長根下部溶岩に当たるが、分布範囲ははるかに広い。

<鉱業会誌1967>では、層序から赤川山集塊岩に当たるとみられるが、確証はない。

<資料館資料>では、鴨田火山岩屑が、上位の丸森凝灰岩の下位とも見えるように描かれているが、そのような意図があったとは考えにくい。

<大場ほか1999>には記載がない。

● 鉱床胚胎層

鉱山で採掘対象になった層準で、赤川の上流域に広く分布している。熱水変質を受け、多様な 変質鉱物が生じている。

高橋(1962)及び<北上川を清流に>の八幡平層の内、下部安山岩の最上部~下部堆積層~最 上部層に当たる。解析モデルは細分化せず一括している。

<八幡平図幅>では丸森凝灰岩に当たる。<鉱業会誌 1967>は赤川砕屑岩層としている。

<資料館資料>では丸森凝灰岩に対比される。

何れも赤川上流域に分布させていることから、対比上の疑問点はない。

<大場ほか1999>には記載がない。

● 大長根深部溶岩

2018年度に掘削されたボーリングの深度 120 m 以深、新鮮、堅硬な溶岩で透水性は極めて低い。 既存の地質図類には記載されていない。

● 大長根低部溶岩

2018 年度に掘削されたボーリングの深度 56~120 m、3 枚の溶岩を主体とし、堆積層、凝灰岩 などを挟む。大長根の低標高部に流れている溶岩はこれと同じ層準であると考えた。溶岩は一部 時自破砕して赤色を呈す。新鮮で変質はしていない。透水性は低い。

<北上川を清流に>では、大長根下部溶岩に当たる。

</i><八幡平図幅>には記載がない。この図の大長根下部溶岩は、鉱床胚胎層の下位にされており、 層序から対比できない。

<鉱業会誌1967>では樅山溶岩に当たるが、この図では、アスピーテラインの九十九折り部に も分布させており、付近の露頭と整合しない。

<資料館資料>では、森山溶岩に当たるが、<鉱業会誌1967>の樅山溶岩と同様、分布に疑問がある。

これらの地質図は、後述の山体崩壊を認識しておらず、そのイベント時期を、鉱床胚胎層を覆 う各溶岩の層序の基準としている解析モデルとは、対比がしにくい。

<大場ほか1999>は茶臼岳火山噴出物の一部としている。

● 大長根上部溶岩

2018 年度に掘削されたボーリングの深度 56 m までの溶岩。新鮮で堅硬であるが、透水性はかなり高い。

<北上川を清流に>の大長根上部溶岩、<八幡平図幅>、<鉱業会誌1967>、<資料館資料>の、 大長根溶岩に当たる。

<大場ほか1999>は茶臼岳火山噴出物の一部としている。

● 頂稜部溶岩

八幡平~茶臼岳~黒森山~西森山に至る稜線に分布する溶岩、火砕岩。鉱山北方の稜線に分布 する、新しい時期の新鮮な火山岩類で、透水性が高いものと推定され、鉱山付近への地下水の主 要な供給源とみられる。ただし、細区分して水理特性を設定するだけの情報がないことから、解 析モデルでは一括している。

<北上川を清流に>の茶臼岳溶岩、大黒森集塊岩、<八幡平図幅>の八幡平溶岩、茶臼岳溶岩、 大黒森集塊岩、大谷地溶岩、<鉱業会誌 1967>の、茶臼岳溶岩、大黒森集塊岩、大黒森溶岩 <資料館資料>の、茶臼岳溶岩、大黒森集塊岩、恵比須森溶岩、屋棟岳溶岩にあたる。

<大場ほか1999>では、八幡平火山噴出物、安比火山列噴出物、源太森火山噴出物、恵比寿-大黒森火山噴出物、茶臼岳火山噴出物、西森山火山噴出物などに区分されている。ただし、示さ れた図では分布は概念で、具体的な構造組立の参考にはなりにくい。

#### 低地の大規模山体崩壊堆積物

夜沼低地と御在所低地の形成が、大規模山体崩壊に起因していると考えて、そこに広く分布していると想定している堆積物。夜沼低地のものはその後の溶岩に覆われ、広く露出している地域はない。藤田・他(2019)では、夜沼低地から流れた岩屑なだれが北ノ又川沿いに流下し、柏台の平坦地に堆積しているとみている。

御在所低地でも、広く溶岩(石山溶岩など)に覆われているが、東麓部の凹凸に富む地形を示 すエリアには露出していると考えている。

<北上川を清流に>では、御在所低地の石山溶岩の下位に赤川溶岩集塊岩を分布させており、 これが崩壊堆積物に当たる可能性がある。ただし、この層は大長根下部溶岩の下位にも当たり、 層準は解析モデルと一致しない。

</i><八幡平図幅>では、御在所低地の東縁部に分布する火山岩屑が、これに相当するとみられる。<鉱業会誌1967>には相当する地層はない。赤川山集塊岩の分布が似ているが、赤川砕屑岩層(鉱床胚胎層相当)の下位としている。

< 資料館資料>では、御在所低地に分布する鴨田火山岩屑が相当する可能性があるが、大長根 溶岩の下位、場合によっては丸森凝灰岩(鉱床胚胎層相当)の下位としている。

<大場ほか1999>では、両低地に山体崩壊堆積物を分布させている。

低地の上部溶岩

大規模山体崩壊に引き続いて、夜沼低地、御在所低地に噴出した溶岩。夜沼低地のものは、何 れの資料にも記載がない。

御在所低地については、<北上川を清流に>では、石山溶岩が相当する。<八幡平図幅>では、 石山溶岩と鴨田山外輪山溶岩が分布は似ているが、これらを大長根下部溶(下部溶岩相当)、丸 森凝灰岩(鉱床胚胎層相当)の下位にしている。変質の見られない新鮮な溶岩であり、層序には 疑問が多い。<鉱業会誌1967>では、石山溶岩が相当する。<資料館資料>では、<北上川を清 流に>などの石山溶岩の分布域を大長根溶岩としている。藤田・他(1962)は石山と鴨田山をそ れぞれ独立した火山としており、火山岩の分布を示している。

<大場ほか1999>には記載がない。

頂稜部の山体崩壊堆積物

前森山火山の噴出に先立って生じたとみられる、西森山東側の山体崩壊の堆積物。前森山東麓に流山などを伴って広く分布しているとみられる。

<八幡平図幅>では、前森山東麓に分布する火山岩屑が、これに相当するとみられる。<大場ほか 1999>には、砂、礫、火山灰などが分布している。

<北上川を清流に>、<鉱業会誌1967>、<資料館資料>は、このエリアまで描かれていない。

頂稜部の崩壊跡溶岩

頂稜部の大規模山体崩壊に引き続いて活動した前森山火山の噴出物。火砕岩と溶岩からなる成 層火山とみられるが、地形から溶岩流が判読でき、玄武岩であることからも、溶岩流が主体と考 えられる。

<北上川を清流に>、<八幡平図幅>、<鉱業会誌1967>の前森山溶岩が相当する。<資料館 資料>では、この地域まで描かれていない。<大場ほか1999>では、前森山火山噴出物としてい る。

● 凹地堆積物、段丘堆積物、湖沼堆積物、地すべり土塊、人工地盤

鉱山周辺の地形(人工地形の分布、地滑り地形など)、鉱山のボーリング資料(砂、粘土など、 明らかに火山岩や鉱床胚胎層とは異なる記載が散見される)などから設定した、鉱山周辺の地表 部に分布する地層、盛土など。大半が、地下水面より上の地表部に分布しており、地下水の挙動 に与える効果は限定的とみられる。地すべり土塊は、ボーリング資料で礫混じり粘土とされてい ることが多い。

これらの地層は、八幡平火山や鉱山の地質を論じた文献にはほとんど記載されていない。

時代区分 区分 地圏環境解析モデル 高橋 1962・「北上川を清流に」旧建設省・「よみがえ」地質図幅 日本鉱業会誌 1967 資 「八幡平」(該当部) <松尾鉱山> る北上川」岩手県・他 手 完新世 沼 湖沼堆積物・他 谷地堆積層(沖積層) 沖積層 山崩れ堆積物 붇 谷地堆積物 段丘堆積物・他 段丘堆積物 河岸段丘堆積層(洪積層)  $\star$ 頂稜部の崩壊跡溶岩 前森山溶岩集塊岩 C10 前森山溶岩 前森山溶岩 山体崩壊 (前森山成層火山) C8茶臼岳溶岩 石山溶岩 茶 茶臼岳溶岩 恵 以降の 低地の上部溶岩 茶臼岳溶岩 大長根上部溶岩 C7 大長根溶岩 溶岩類 (夜沼低地・御在所 大長根下部溶岩 H8 安比岳知恵ノ沢溶岩 大長根溶岩 屋 第 大 新期 低地の石山溶岩) 大黒森集塊岩 H2 源太森安比岳溶岩 大黒森集塊岩 森 八幡平 石山溶岩 C6 大谷地溶岩 樅山溶岩 新 JL 火山 赤川溶岩集塊岩 C5 大黒森集塊岩 更新世 紀 生 大規模 頂稜部崩壊堆積物 (大規模山体崩壊に関す 赤川溶岩集塊岩? 山体崩壊 低地の崩壊堆積物 る記載なし。ただし、山 代 麓部に「vd 火山岩屑」を 頂稜部溶岩 広く分布させている。vd 大長根上部溶岩 山体崩壊 の層序は、C3 大長根下 以前の 大長根低部溶岩 部溶岩などより下位にあ 溶岩類 大長根深部溶岩 るように作図されてい る。 鉱床胚胎層 最上部(集塊岩・溶岩:鉱化は弱い 赤川砕屑岩層 C4 丸森凝灰岩 (熱水変質·鉱化作 八 最上部安山岩(鉱石化の勢い減じ 用) 幡 上部堆積層(凝灰岩等:変質·鉱石化) 旧期八幡平火山? 巫 上部安山岩(溶岩:変質·鉱石化) 層 中部堆積層(凝灰岩等:変質·鉱石化) 中部安山岩(溶岩:変質·鉱石化) 下部堆積層(凝灰岩等:粘土化・珪化) 下部溶岩 C3大長根下部溶岩 赤川山集塊岩 下部安山岩(溶岩:多様・鉱床は少ない (広域変成・熱水) 最下部(溶岩·集塊岩) (旧期八幡平火山? C2 石山溶岩 図幅の層序に疑問あ C1 鴨田山外輪山溶岩 り) 難透水基盤岩 新第三紀 鮮新世 黒沢層 At・Rt 玉川溶結凝灰岩類 黒沢層 北ノ又川 コ 北ノ又川層 Ki 北又川層 鮮新世以前 玉川溶結凝灰岩等 (広域変成作用) 層 山津田層

f料館	大場・梅田 1999
三書き原図	(簡略化した地質図)
日地 <mark>堆積物</mark>	
冒屑流堆積物	
、長根溶岩	前森山火山噴出物(0.4~
\$ 臼岳溶岩	0.2MA)
原比須森溶岩	西森山火山噴出物
屋棟岳溶岩	安比火山列噴出物(0.5~
、黒森溶岩	0.4MA)
系山溶岩	源太火山噴出物
	恵比寿 - 大黒森火山噴出物
	(0.5~0.4MA)
制田火山	砂、礫、火山灰など
計屑?	山体崩壊堆積物:層序不明)
	蒸湯火山噴出物(0.5MA?)
	茶臼岳火山噴出物(1.2~
	0.5MA)
	八幡平火山噴出物(1~0.7MA)
	北部古期火山噴出物(2MA 以
	降?
	諸桧岳火山群噴出物
L森凝灰岩	(記載なし)
鳴田火山	(記載なし)
詩脣?)	
とノ又デイサ	基盤岩
' 卜質凝灰岩	

### I. 水質形成に係わる水理・地質状況

降雨、又は融雪起源で地下に涵養される地下水は、地層に含まれる鉱物と反応して水質を形成 する。その過程で、当初は飽和に近く溶存していた酸素を消費していく。黄鉄鉱など、硫化金属 が含まれる場合は、急速に反応が進んで酸性水が形成される。地山が地下水で飽和されている場 合は、酸素が消費されると反応は終了する。地下水の不飽和ゾーンでは、空気が侵入するため、 酸素が供給されて、反応は継続し、極めて pH の低い酸性水が生成しうる。したがって、硫化鉱 物の分布域と地下水の飽和、不飽和のゾーン区分は極めて重要である(モデルでは解析で決定さ れる)。

地山内の硫化鉱物は、すべてが反応に参加するわけではない。2019年度のボーリング調査のコ アでは、典型的鉱体は緻密で堅硬で、その内部を多量の地下水が浸透するようなものではない。 鉱床胚胎層内では、地下水は限定された亀裂などの中を流れており、反応は亀裂の表面で発生し ているものとみられる。したがって、反応に係る鉱物は亀裂の表面に配置されたもののみで、存 在量のごく一部に限られる。

これに対し、採掘跡に充填された土砂は、低品位の掘削ズリとみられる。硫化鉱の含有量は少ないが、破砕されて土砂化し地下水と触れることのできる表面積は大きく、これが地下水もしくは坑道内を流れる水と接触するようであれば、反応が進んで pH の低い酸性水を生成するものと考えられる。

通常、安山岩質の火山岩が広域変成作用を受けると、有色鉱物から緑泥石などの変成鉱物が生 じプロピライト(変朽安山岩)化するとされているが、高橋(1962)は、八幡平層(次の鉱床胚 胎層も同様)の火山岩は、プロピライト化はしておらず、生じている変質鉱物の主体はサポナイ ト(鉄、マグネシウムに富むスメクタイト族の粘土鉱物)であると報告している。

緑泥石やサポナイトは、酸性水と反応して pH を上昇させる。それが実際に生じている減少に 効果を持つかどうかは、存在割合と反応速度が関わるが、坑道内に残されたズリなどを通じて、 滞留している坑廃水の水質に影響を与えたこともあり得る。

難透水性の岩盤を、時間をかけて通過すれば、酸性水とサポナイトの反応は十分に進行する。 このことが、3mプラグの背後の湧水(採掘跡からの漏水)がほぼ中性となった可能性もある。

# 2.2.1.3. 水質分析

水質分析は、旧松尾鉱山周辺の河川水・湧水から測定される水質、自然由来トレーサに基づき、 表流水・地下水の流動の実態、及び坑内の排水起源の実態を把握することを目的として実施した。

## (1) 試料採取箇所

岩手県八幡平市に位置する旧松尾鉱山の周辺地域において、河川水・湧水の試料を採取した。 2019年6月12~13日には河川水・湧水試料を計36試料と年代測定用の試料を7試料、2019年10 月10~11日には河川水・湧水試料を計36試料と年代測定用の試料を8試料採取した。採取した地 点を図2.2-32に示す。調査地域の中では、茶臼岳が最も標高が高く、1,578mである。旧松尾鉱 山で現在処理されている坑廃水は、A坑及びB坑より排水される坑水と、1号沢水、褐鉄湧水と 呼ばれる採掘跡地周辺の廃水を統合した坑廃水であるが、上述の採取した水試料に加え、これら を2019年5月から12月まで毎月それぞれ採取した。本鉱山で処理された坑廃水は、図2.2-32の 「中和処理水」の地点にて、pH 4.0以上の状態で赤川に放流されている。



図 2.2-32 採水地点位置図

(2) 実施結果

## 水質・同位体比分析による結果

2019年6月及び10月に採取した水試料の分析結果を、表 2.2-22 と表 2.2-23 にそれぞれ示す。 pH に着目すると、6月と10月の何れにおいても、図 2.2-32 の中央付近に位置する赤川に沿って pH 3.0~4.0 程度の水質が分布することがわかる。「中和処理水」の地点で坑廃水の中和処理水が 放流されているが、これよりも上流側の「I05」地点や赤沢川の上流域の河川水・湧水でpH 3.0~ 4.0 を観測されていることから、赤川・赤沢川上流付近における鉱床胚胎層(黄鉄鉱を含む層) の露出部において酸性水が自然由来で発生し、それらが本河川の pH を 3.0~4.0 に至らしめてい ると考えられる。実際に、赤沢川の上流付近(K11 付近)にて採水調査中に、この鉱床胚胎層 (黄鉄鉱を含む層)の露出部や酸性水の発生が確認された。また、EC の各河川における傾向に 関しても、pH のこのような傾向と一致した。

各溶存イオン濃度に着目すると、6月と10月の何れにおいても、夜沼川では溶存イオン濃度が低く、赤川では Ca-SO4<sup>2</sup>型の水質であり、鴨田川では赤川より若干溶存イオン濃度が高い Ca-SO4<sup>2</sup>型の水質を示していることがわかる。また、地形分水嶺で大きく分かれる3つの流域(夜沼川流域、赤川流域、鴨田川流域)は水質の傾向においても異なる性質を持っているといえる。

さらに、δ<sup>18</sup>O(酸素同位体)とδD(水素同位体)に着目すれば、何れの採水月においても、 鴨田川、赤川、夜沼川の順に同位体比が小さい(軽い)値を示していることがわかる。薮崎ら (2008)によると、高標高域で相対的に同位体比は軽い値を示すとされる「高度効果」と呼ばれ る現象はあるものの、鴨田川の流域は他の流域よりも標高が高いとは言えない。したがって、本

3.残素はあるものの、幅山川の加坡は他の加坡よりも奈向か高いとは言えない。したからて、本地域にもたらされる降雨の同位体比は流域毎に微妙に異なると推定される。このような同位体比の傾向は、上述したように本地域に大きく3つの流域が存在することと一致する。また、10月に採水した試料が示する<sup>18</sup>OとるDと比較すると、6月の試料が示する<sup>18</sup>OとるDの方が全体的に軽い値を示している。本地域では、5月ごろまで積雪があり、4月から6月にかけて多量の雪が溶解するため、その雪解け水が周辺の河川に流入すると考えられる。このような融雪水は軽い同位体比を示すことを考えれば、これにより、6月の試料が示する<sup>18</sup>OとるDの方が10月の結果と比較して、全体的に軽い値を示したといえる。加えて、酸素と水素の安定同位体比の間には d-excess (檜山ら,2008)と呼ばれる水蒸気形成時の状況を反映するパラメータがあり、それらを6月と10月の同位体比より計算して比較した結果、6月と10月の結果で大きな差異はなく、それらは本地域の冬季の降水が示すd-excessに近い値を示した(一柳,2016)。このことから、本地域では、冬季に降った降水が地域の地下水や河川水の主な起源となっていると推察される。一方で、7月以降には、融雪水の周辺河川への流入量が減少するとともに、それ以降のより重い同位体比を示す降水が浸透するため、地域全体としてる<sup>18</sup>OとるDの値は10月でより重い値を示したと推測される。

# 表 2.2-22 水質分析結果(6月)

No	测定口時	水泪	EC	лЦ	E-	CI⁻	NO.⁻	NO. <sup>-</sup>	SO. <sup>2-</sup>	No <sup>+</sup>	NЦ. <sup>+</sup>	<b>K</b> +	Ma <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup>		ୡଂଠ	മ	3Ц
NO.	別た口时	小血		pri	י [	01 [ma/1]	$\left[\frac{1}{2}\right]$		504			[mar/1]		Ua [ma/l]	[ma/L]	СС Г%-1	لى 104-1	
			[µ3/ cm]			[mg/ L]	[mg/ L]		[mg/ L]		[mg/ L]				[mg/ L]	[%00]	[%00]	1.0.
夜沼川	6/10	10.5	40	6.9	0.0	3	0.0	1	3	3	-	1	1	3	14	-11.5	-70	5.2
W07	6/11	7.0	50	6.7	0.0	3	0.0	0	13	3	-	1	1	3	4	-11.5	-71	_
W21	6/11	8.0	40	7.0	0.0	3	0.0	1	3	3	-	0	1	3	16	-11.5	-70	_
W22	6/11	7.6	70	6.9	0.1	3	-	0	22	4	0	1	2	5	2	-11.4	-72	-
W18	6/11	6.2	30	6.9	0.0	2	0.0	0	2	2	-	0	1	3	13	-11.9	-74	-
W27	6/11	9.0	40	6.9	0.0	2	0.0	0	7	3	-	0	1	3	8	-11.7	-72	4.1
W33	6/11	5.1	40	—	0.0	2	0.0	0	11	2	0	0	1	2	1	-11.9	-71	4.3
W32	6/11	7.6	40	6.9	0.0	2	0.0	0	7	3	0	1	1	3	12	-11.8	-74	4.1
I02	6/12	4.9	20	5.1	0.0	2	-	0	5	2	0	0	1	1	4	-12.0	-72	-
W36	6/11	8.2	90	6.0	0.0	2	0.0	0	17	3	0	1	2	5	9	-11.9	-74	-
I04	6/11	11.7	50	6.8	0.0	2	0.0	0	12	2	0	0	1	3	4	-11.9	-72	-
105	6/10	14.2	160	4.1	0.1	2	0.0	1	51	6	0	1	2	6	-	-11.2	-70	-
5	6/12	6.5	250	4.4	0.2	2	-	0	91	5	0	1	3	18	-	-12.2	-76	-
K13	6/13	10.0	210	< 4.4	0.2	2	-	0	61	3	-	1	2	7	-	-12.0	-74	5.1
K11	6/13	6.2	100	6.9	0.1	3	0.0	0	33	5	0	0	2	9	5	-11.9	-76	3.3
6	6/12	15.1	1000	3.0	0.5	3	0.0	0	301	7	0	2	4	62	-	-12.2	-77	2.3
108	6/10	15.3	580	3.2	0.3	3	-	0	165	6	0	1	3	34	-	-11.6	-74	-
109	6/12	11.9	300	3.8	0.2	2	0.0	1	111	7	1	1	3	12	-	-11.2	-71	-
中和処理水	6/12	14.6	1430	4.4	0.9	2	0.0	0	870	8	0	3	7	267	-	-11.9	-75	-
③(追加 D)	6/12	7.2	440	3.2	0.1	2	0.0	0	101	3	0	1	2	8	-	-11.6	-74	3.7
W38	6/10	13.8	1240	3.5	0.7	2	-	0	620	8	0	3	6	165	-	-11.6	-74	-
W37	6/10	15.6	530	3.3	0.3	3	-	0	156	6	0	1	3	32	-	-11.5	-73	-
I22	6/10	14.5	1150	3.4	0.7	2	0.0	0	576	8	0	2	6	148	-	-11.8	-73	-
I21	6/10	15.6	1100	3.4	0.6	3	0.0	0	527	8	0	2	6	133	-	-11.7	-74	-
4	6/12	16.9	1030	3.0	0.6	3	0.0	0	312	8	0	2	4	55	-	-12.2	-77	2.4
Т06	6/12	7.4	50	7.1	0.0	3	-	0	4	3	-	1	1	4	22	-12.1	-77	2.6
Т07	6/12	11.1	140	6.0	0.2	4	-	_	45	7	-	1	3	11	5	-11.8	-76	3.2
T02	6/12	9.3	80	6.9	0.1	3	0.0	0	22	4	-	1	2	6	11	-12.0	-76	-
T01	6/12	8.1	50	7.0	0.0	4	0.0	0	3	3	-	0	2	5	24	-11.9	-76	3.9
I19	6/11	10.7	80	6.9	0.1	3	0.0	0	22	4	-	1	2	6	10	-11.9	-76	-
124	6/12	10.1	130	7.0	0.1	3	0.0	0	36	5	-	1	3	13	19	-11.7	-75	-
2	6/12	10.8	270	6.2	0.2	3	0.0	0	89	9	_	2	5	25	9	-11.8	-75	2.4
追加 B	6/11	12.4	120	6.9	0.1	3	-	-	40	5	-	1	3	11	-	-10.8	-71	-
①(追加 E)	6/12	9.5	150	7.2	0.0	6	0.1	0	29	5	-	1	4	13	32	-11.0	-71	-
$\bigcirc$	6/13	9.6	110	6.7	0.0	6	0.0	0	16	5	-	1	4	10	33	-10.9	-71	3.6
追加 C	6/11	12.1	500	4.5	0.3	6	0.0	1	223	12	0	3	9	49	-	-11.0	-71	3.0

観測:令和元年(2019)6」	月	10日	~6 月	13	日

観測: 令和元年(2019) 10 月 10 日~10 月 11 日

No.	測定日時	水温	EC	pН	08 ľó	ති	3H
		[°C]	[µS∕cm]		[‰]	[‰]	T.U.
夜沼川	10/10	9.2	40	7.0	-10.7	-67	_
W07	10/10	9.1	50	6.5	-10.9	-68	-
W21	10/10	9.0	40	6.9	-11.0	-68	-
W22	10/10	9.5	60	6.2	-10.8	-67	-
W18	10/10	7.1	30	6.9	-11.8	-74	_
W27	10/10	10.6	50	6.7	-10.8	-67	_
W33	10/10	10.7	80	4.4	-10.7	-67	_
W32	10/10	8.4	40	6.9	-11.6	-73	_
W31	10/10	11.4	20	6.5	-10.0	-63	-
102	10/10	5.8	20	5.2	-11.7	-72	-
W36	10/10	9.1	60	6.9	-11.3	-70	-
I04	10/10	9.3	70	5.2	-10.8	-68	_
8	10/11	13.3	490	3.4	-6.8	-59	2.3
105	10/10	12.4	140	4.2	-10.4	-66	_
K13	10/11	10.1	230	3.8	-11.3	-71	-
K11	10/11	6.9	100	6.4	-11.8	-75	-
6	10/11	15.3	920	2.9	-12.0	-76	2.5
108	10/10	13.0	650	3.2	-11.2	-71	_
109	10/10	11.6	310	3.8	-10.5	-67	_
中和処理水	10/10	14.7	1370	4.3	-11.8	-74	-
③(追加 D)	10/11	7.4	290	3.4	-11.6	-73	2.9
W38	10/10	13.9	1210	3.5	-11.6	-73	Ι
W37	10/10	12.1	550	3.3	-10.9	-69	-
I22	10/10	13.8	1200	3.4	-11.5	-72	_
I21	10/10	14.5	1020	3.4	-11.4	-72	-
4	10/11	16.8	920	3.1	-12.1	-76	2.3
Т06	10/11	8.1	50	6.9	-11.9	-76	-
Т07	10/11	11.0	140	5.7	-11.6	-74	Ι
T02	10/11	9.0	80	6.8	-11.6	-74	Ι
T01	10/11	8.9	50	6.9	-11.6	-75	Ι
I19	10/11	10.4	90	6.9	-11.6	-74	-
I24	10/11	10.4	130	7.1	-11.4	-74	Ι
2	10/11	11.7	250	5.8	-11.6	-74	2.4
追加 B	10/11	13.1	140	6.9	-10.8	-70	_
①(追加 E)	10/11	9.2	140	7.1	-10.8	-70	3.0
追加 C	10/11	12.4	470	4.5	-10.7	-70	-

#### CFCs 及び SF6 に着目した年代分析の考察

年代トレーサによる年代分析は、自然界においてある程度変動特性をもって分布する物質を追跡して年代を推定する方法である。一般的に、滞留時間が50年未満の地下水の推定には、12.3年の半減期を持つ水素の放射性同位体(<sup>3</sup>H:トリチウム)を使用する。しかし、近年ではトリチウムの降水中濃度に変動がなくなってきたことから、希ガス(<sup>3</sup>He)、不活性ガス(CFCs、SF<sub>6</sub>)、放射性同位体(<sup>85</sup>Kr、<sup>36</sup>Cl、<sup>14</sup>C)などが年代指標として使用されている(IAEA, 2006)。

本検討においては、トレーサとして CFCs (クロロフルオロカーボン類) 及び SF6 (六フッ化 硫黄)を用いて分析を実施した。CFCs は化学的に極めて安定な性質を持っているため、地下水 中では基本的に涵養された時の濃度を保存したまま流動し流出すると考えることができる(浅野, 2011)。そのため、地下水中で観測されたトレーサ濃度を測定することで、降水時の年代を推定 することが可能である。2019 年 6 月及び 10 月に採取した水試料のトレーサ分析の結果を、表 2.2-24 と表 2.2-25 にそれぞれ示す。また、トレーサによる推定される年代を表 2.2-26 に示す。表 中に示す涵養条件に関して、涵養標高は過去の文献(風早, 1999)で示された岩手山の地下水の 涵養線を適用して、今回観測した同位体比から計算した。なお、計算の結果、涵養標高が近傍の 茶臼岳より高くなった場合には、採水位置と周辺地形の集水域を考慮して 1,500 m と設定した。 涵養温度は、近傍の気象庁観測所(岩手松尾:標高 275 m)の降水量と気温データを基に計算し た。2009 年から 2018 年の間の平均気温を計算し、「気温の低減率」と「降水量による加重平均」 に基づいて平均気温を計算した結果を涵養温度とした。

表2.2-26の結果によれば、旧松尾鉱山周辺の周辺湧水の年代は、CFCsでは30~60年程度、SF6では若いもので2年と示された。本報告では、各種 CFC に着目した年代分析の結果が示されているが、これまでの研究により、好気的条件では CFC-12、CFC-11、CFC-113 は安定であるが、嫌気的条件では CFC-11 及び CFC-113 は微生物分解の影響を受けることが報告されている (Chambers et al., 2019)。6月の現地測定結果において、④及び⑥の溶存酸素(DO)がともに0.0mg/L(表 2.2-24)を示したことや、それらの地点の CFC-11の濃度が極端に低いことを考えれば、微生物分解が起きていると推察される。③においてもDOは4.1 mg/Lと低い値を示し、CFC-12と CFC-11 の濃度比が低いことを考慮すれば、微生物分解の影響を受けている可能性が示唆される。 一方で、SF6では微生物分解や吸着の影響は小さいとされている(浅井, 2010)。しかしながら、火山活動が活発な地域等ではSF6の値に影響があることが示されており、今回の地域に火山が存在しその活動の活発さが不明瞭であること、火成岩地域で自然由来のSF6の付加が影響すること、CFCs の結果と比較して若い年代の値が示されていること等、不確定な要素が多いため、本報告ではSF6による年代推定結果を考慮しなかった。以上より、本地域では分析を行った年代トレーサのうち、CFC-12に着目した年代推定が最も適切であると考える。

表 2.2-24 トレーサ分析結果(6月)

# 観測:令和元年(2019)6月13日

No.	測定日時	CFC12	CFC11	CFC113	SF6	DO <sup>*</sup>	
		[pg/kg]	[pg/kg]	[pg/kg]	[fmol/kg]	[mg/L]	
①(追加 E)	6/13	303.4	620	44.3	3.4	9.2	
2	6/13	283.3	504	37.7	4.0	8.3	
③(追加 D)	6/13	311.5	348	42.1	3.9	4.1	
4	6/13	194.1	42	17.4	1.3	0.0	
5	6/13	311.5	409	46.0	3.5	7.2	
6	6/13	320.6	203	22.0	1.6	0.0	
$\overline{\mathcal{O}}$	6/13	298.0	608	54.8	3.3	7.1	
8	6/13	_	_	-	_	Ι	
A 坑	6/13	_	_	_	_	-	
B 坑	6/13	-	_	_	_	_	

※表 2.2-13 より再掲

表 2.2-25 トレーサ分析結果(10月)

観測: 令和元年(2019) 10 月 11 日

No.	測定日時	CFC12	CFC11	CFC113	SF6	DO <sup>*</sup>	
		[pg/kg]	[pg/kg]	[pg/kg]	[fmol/kg]	[mg/L]	
①(追加 E)	10/11	286.5	778	64.3	3.5	-	
2	10/11	278.8	649	56.8	3.6	-	
③(追加 D)	10/11	291.8	294	46.5	1.6	-	
4	10/11	191.7	39	20.8	1.3	-	
5	10/11	-	-	-	-	-	
6	10/11	314.9	152	17.9	1.3	-	
$\bigcirc$	10/11	-	-	-	-	-	
8	10/11	263.4	460	49.7	3.6	-	
A 坑	10/11	163.6	57	18.5	1.7	-	
B 坑	10/11	170.5	63	11.5	1.4	_	

※表 2.2-17 より再掲

表 2.2-26 トレーサによる年代推定

涵養条件 滞留時間 [PEM]

大気換算濃度 [pptv]

No.	温度	標高	CF	C12	CF	C1	CFC	2113	SF6 [PEM]		SF6 [PEM]		SF6 [PEM		SF6 [PEM		SF6 [PEM]		SF6 [PEM]		SF6 [PEM]		SF6 [PEM]		SF6 [PEM]		CF	C12	CF	C11	CFC	0113	SI	F6
	[°C]	[m]	6 月	10 月	6 月	10 月	6 月	10 月	6 月	10 月	6 月	10 月	6 月	10 月	6 月	10 月	6 月	10 月																
1	6.8	1400	29.5	30.5	33.5	22.5	34.5	31.5	5.5	5	466	4	213.3	267.9	35.6	51.7	9	9.3																
2	6.3	1500	31.5	31.5	38	32.5	36.5	34	1.5	4.5	429	4	170.5	219.6	29.7	44.7	10	9.5																
3	6.3	1500	30	30.5	43	44.5	35.5	34.5	2	23	472	2	117.6	99.4	33.1	36.6	10	4.1																
4	6.3	1500	39	39.5	56.5	57.5	42	41	26	25.5	294	1	14.1	13.2	13.7	16.3	3	3.5																
5	6.3	1500	29	-	41.5	-	34.5	-	5	-	472	-	138.4	-	36.2	-	9	-																
6	6.3	1500	28.5	29	47.5	49.5	41	42	22.5	25.5	485	1	68.6	51.4	17.3	14.1	4	3.5																
$\bigcirc$	6.9	1400	30	-	33.5	-	33	_	7	-	460	-	210.6	-	44.3	-	9	-																
8	6.3	1500	-	33	-	40.5	-	34	-	4.5	-	4	-	155.4	-	39.1	-	9.5																
A 坑	6.3	1500	_	42	_	55	-	41.5	_	21.5	-	2	-	19.2	-	14.6	-	4.5																
B 坑	6.3	1500	-	41.5	-	54.5	-	45.5	-	25	-	1	-	21.3	-	9.1	-	3.6																

## 3 坑廃水の同位体比変化

表 2.2-27 に、A 坑、B 坑、1 号沢水、及び褐鉄湧水と、それらを統合した総合源水の5 種類の 水試料の分析結果を示す。結果より、1 号沢水を除く何れの試料においても5~6月からそれ以降 の月にかけてδ<sup>18</sup>OとδDの値が大きく変化し、7月以降重い値を示していることがわかる。これ は、前述したように、4~6月に多量の融雪水が坑道に浸透し、7月以降にはより重い同位体比を 示す降水が浸透することに起因すると考えられる。また、表 2.2-27の6月の1号沢水を除く結果 と表 2.2-22の結果を比較すると、坑廃水でδDは凡そ-77‰、表 2.2-22で平均値が凡そ-74‰であ った。表 2.2-22の平均値は、1号沢水の6月の結果と近い値を示しており、1号沢水は、A 坑、B 坑、及び褐鉄湧水とは異なる同位体比の傾向を示すといえる。このことから、5~6月において、 A 坑と B 坑の坑廃水と褐鉄湧水は、周辺地域の河川水や湧水より高標高域の降水か融雪水の影響 を大きく受けていることが考えられる。前述の結果と併せて考えると、坑道には冬季の降水を主 な起源とする地下水が流入しており、それに加え 5~6月ごろの融雪期には多量の融雪水が、7月 以降にはより重い同位体比を示す降水が坑道真上付近から流入していると考えられる。

項目	資料名		試料採水日												
		5/14	6/2	7/25	8/3	9/1	10/28	11/21	12/18						
	1号沢水	2.5	3	2.6	2.7	3	2.5	2.3	2.5						
	A坑	2.3	2	2.3	2.3	2	2.1	2.2	2.2						
pН	B坑	2.2	2	2.2	2.2	2	2.2	2.2	2.1						
	総合原水	2.2	2	2.3	2.1	2	2.3	2.3	2.1						
	褐鉄	2.2	2	2.3	2.2	2	2.1	2.3	2.1						
	1号沢水	-	1850	1870.0	1730.0	4470	1510.0	2190	1780						
50	A坑	-	2280	2390.0	2390.0	5410	2940.0	2860	2550						
EC	B坑	_	3240	3230.0	3280.0	5730	3760.0	3530	3310						
[uS/cm]	総合原水	_	2750	2600.0	2700.0	4080	2810.0	2780	2840						
	褐鉄	_	3080	3090.0	3170.0	6530	3410.0	11/21       12/18         2.3       2.5         2.2       2.2         2.2       2.1         2.3       2.1         2.3       2.1         2.3       2.1         2.3       2.1         2.3       2.1         2.3       2.1         2.3       2.1         2.3       2.1         2.10       1780         2860       2550         3530       3310         2780       2840         3280       3170         5.3       3.9         13.3       13         14.8       14.8         14       13.2         14       14.2         -       -         -       -         -       -         -       -         -       -         -       -         -       -         -       -         -       -         -       -         -       -         -       -         -       -         -       -         - </td							
	1号沢水	-	16	_	17.9	21	11.5	5.3	3.9						
	A坑	_	14	_	13.8	14	13.2	13.3	13						
水洫 [°C]	B坑	_	15	_	15.8	16	14.8	14.8	14.8						
	総合原水	_	15	_	15.5	17	15.5	14	13.2						
	褐鉄	_	15	_	15.3	16	14.0	14	14						
	1号沢水	5.3	5	_	_	-	-	-	-						
211	A坑	2.3	2	-	_	-	_	_	-						
3H [T]]	B坑	2.6	3	_	_	_	-	-	-						
[1.0.]	総合原水	2.6	3	_	_	_	_	_	-						
	褐鉄	2.3	3	_	_	_	_	_	_						
	1号沢水	-12.2	-12	-11.2	-10.8	-11	       	-11.3							
800	A坑	-12.9	-13	-12.0	-11.8	-12	-11.9	-11.9	-11.9						
0000 [%_]	B坑	-12.8	-13	-12.0	-11.9	-12	-11.9	-12	-12						
[700]	総合原水	-12.8	-13	-11.9	-12.0	-12	-11.9	-12	-11.9						
	褐鉄	-12.8	-13	-11.9	-11.8	-12	-11.9	-12	-11.8						
	1号沢水	-72.0	-74	-71.0	-71.0	-70	-71.0	-70	-69						
ð	A坑	-78.0	-78	-74.0	-75.0	-74	-75.0	-75	-75						
[%_]	B坑	-78.0	-78	-75.0	-74.0	-76	-75.0	-75	-75						
[300]	総合原水	-78.0	-78	-75.0	-77.0	-74	-75.0	-75	-76						
	褐鉄	-77.0	-78	-75.0	-74.0	-74	-75.0	-75	-75						

表 2.2-27 2019 年 5 月から 12 月における坑廃水 (原水)の水質分析結果

# ④ 坑道内への流入水路

これまでの結果を整理すれば、坑道内には冬季の降水を主な起源とする地下水が流入しており、 5~6月には坑道直上付近より融雪水が多量に流入し、7月以降にはより重い同位体比を示す降水 が流入していると考えられる。本報告では、1月~4月のデータはないが、本鉱山の坑廃水量の データをみれば、本地域では、融雪水は主に4月~6月に坑道に多量に流入し、11月~3月には 積雪により地表が覆われると推測される。以上の坑道への流入水経路を図2.2-33に概念図として 示す。これまでの結果より、図2.2-33に示すように、坑道への浸透水は4月~6月ごろの融雪水 と、7月~10月ごろの降水、地下水の3成分に分類されると考えられる。CFC-12に基づく坑廃水 の年代は、40年と推定されるが、実際には、より年代の古い水や近年の融雪水等が複雑に混合し、 坑廃水を形成しているため、定量的な議論を行うためには更なる情報の蓄積が必要である。



断面位置図



図 2.2-33 坑道内への流入水経路の断面イメージ

2.2.2. 広域の地下水・地表水流動シミュレーションモデルの修正

# 2.2.2.1. 水理地質構造の修正

# (1) 地下地質構造のモデル化

広域の地下水・地表水流動シミュレーションモデル(バージョン 2)は、2018 年度に作成した 広域モデル(バージョン 1)と同範囲とする。解析領域を図 2.2-34 に示す。

新たに加わった地質情報、現地踏査結果、既存資料の再点検、解析結果の評価とモデルの再検 討(同定解析)などのより、地下地質構造モデルを修正した。水理地質区分を表 2.2-28 に示す。 2018年度モデルと比べ、大長根深部溶岩及び坑道掘削箇所を新たに考慮した。藤田・他(2019) の松尾岩屑なだれ堆積物は、表 2.2-28 の段丘堆積物に含まれるが、解析モデルの最も下流側で、 全体の地下水流動に与える効果は小さいため、あえて区分しなかった。また、2018年度モデルか ら基底面及び分布域の変更を行った区分については、表 2.2-28 の最右列に印を加えた。



図 2.2-34 解析領域

区分	構成員	記号	モデル 更新対象
被覆層	表土	TS	
	貯泥ダム沈殿物	PR	
	貯泥ダム堤体	FD	
	捨土	DS	
	地すべり土塊	SB	
	湖沼堆積物	LD	
	段丘堆積物	TR	
	凹地堆積物	DD1	
掘削箇所	坑道掘削箇所	DUG	1
低地の分布地質	低地の上部溶岩	UL1	1
	低地崩壊堆積物	AB1	
頂稜部の地質	頂稜部崩壊跡溶岩	UL2	
	頂稜部溶岩	UL3	
	頂稜部崩壊堆積物	AB2	
大長根の地質	大長根上部溶岩	UL4	1
	大 <mark>長</mark> 根凹地堆積物	DD2	
	大長根低部溶岩	UL5	1
	大 <mark>長</mark> 根深部溶岩	UL6	1
鉱床胚胎層	鉱床胚胎層高透水部	OCH	1
	鉱床胚胎層低透水部	OCL	<ul> <li>✓</li> </ul>
	下部溶岩	LL	<ul> <li>✓</li> </ul>
難透水基盤岩		BR	

表 2.2-28 考慮する水理地質区分(モデルバージョン 2)

2019年度のボーリングは、採掘跡のすぐ北側に位置している。採掘範囲については高橋(1962) が下部安山岩、下部堆積層、中部安山岩、中部堆積層と地質区分をしている(坑道レベルの平面 図)。また、坑道の配置とその平面形状から、採掘範囲を決定できる。したがって、レベル平面 図から、採掘状況と地質区分を断面図に変換し、ボーリング情報と比較して図 2.2-35 に示す。

断面図の位置は、ボーリング地点を通過する磁石の南北方向(西偏6°:鉱山稼行当時)で、8 坑道と呼ばれた基準坑道沿いである。

既存資料とボーリングデータの対比は明瞭で、ボーリングの深度 17 m までの溶岩は採掘範囲 の中部安山岩、82 m 以深の溶岩は下部安山岩、両者の間は下部堆積層に当る。採掘範囲の鉱体の 詳細な分布は明らかでないが、採掘範囲の分布から、下部堆積層とくにその下部に鉱体が分布し ていたと推定される。この点も、ボーリングで確認された鉱体の分布と整合する。



図 2.2-35 坑道付近の地質断面概念図

昨年までのモデルでは、透水性の「鉱床胚胎層」は下部堆積層までとし、下部安山岩はそのま ま難透水性の下部溶岩に含めていた。しかし、2019 年度のボーリング孔を用いた透水試験の結果、 下部安山岩の少なくとも上部 30m は、透水係数 3.3×10<sup>-6</sup> m/sec、1.7×10<sup>-7</sup> m/sec、4.5×10<sup>-5</sup> m/sec と比較的高い透水性であることが確認された。この部分は、下部安山岩の中でも、深部とは異な った変質を受け(図 2.2-30)、一部に亀裂沿いの溶脱などが生じ、透水性が高くなったものと考 える。

下部安山岩の主要部は、3m プラグ位置では明らかに難透水性で、1.5 km に及ぶ坑道内の湧水 量も限られていることから、下部安山岩深部全体の透水性を見直す必要はないと考えられる。し たがって、従来の下部溶岩(高橋 1962 の下部安山岩)の最上部 30~40 m を、上位の鉱床胚胎層 に含めることとした。坑内の採掘跡は、下部安山岩の上部にも散見され、これを「鉱床胚胎層」 に含めることに違和感はない。

2019年度に修正した解析モデルの地質分布を図 2.2-36 に示す。ごく一部(大長根深部溶岩の追加など)を除き、昨年モデルと変わっていない。

低地の上部溶岩については、鴨田川の流量の再現性を向上させるために、図 2.2-37 に示すよう に鴨田川付近で基底面形状を修正した。昨年のモデルよりむしろ単純化している。



図 2.2-36 表層地質図 (モデルバージョン 2)



図 2.2-37 低地の上部溶岩(UL1)の分布域及び基底面標高

大長根に分布する3層の溶岩については、2018年度のボーリング結果を反映して基底面形状を 修正、もしくは作成した。

図 2.2-38 は上部溶岩の基底面の修正結果である。

図 2.2-39 は低部溶岩の基底面形状である。この溶岩については、2018 年度のモデルと比較して 分布域も高標高側に広がっている。

図 2.2-40 は 2019 年度に新設した深部溶岩の分布域と基底面形状である。この溶岩は極めて難 透水性で、夜沼低地から鉱山採掘跡への地下水の流れを遮断している。

図 2.2-41 には鉱床胚胎層の基底面形状の修正を示す。この修正は、2019 年度のボーリング調査 結果を踏まえ、前述のように高橋(1962)の八幡平層下部安山岩の上部を加えたものである。同 時に、2018 年度のモデルでは坑廃水量の再現性が不十分であったことから、採掘跡への地下水流 入がより増加しやすいように基底面形状を作っている。

図 2.2-42 には、下部溶岩の基底面形状の修正を示す。この修正は、地熱調査の情報の再検討と、 鉱床胚胎層の形状との整合性(極端な層厚の変化の排除)などを検討した結果であるが、この結 果、下部溶岩が、鉱山付近を中心とした限られた地域の火山噴出物である印象が強くなった。

なお、下部溶岩は極めて難透水性であることから、その形状の変化が解析結果に及ぼす効果は 極めて小さい。



図 2.2-38 大長根上部溶岩(UL4)の分布域及び基底面標高





図 2.2-40 大長根深部溶岩(UL6)の分布域及び基底面標高



図 2.2-42 下部溶岩(LL)の分布域及び基底面標高

# (2) 三次元数値シミュレーションモデルの構築

上述した地下地質構造モデルを組み込んだ3次元数値シミュレーションの構築を行った。鉛直 方向は地層構造や坑道形状を考慮しながら、大気層(地表面標高+101 m)から最下層(標高-1000 m)までを77層で分割を行った。総格子数は、9,450,980(361格子×340格子×77層)とな った。図2.2-43 にシミュレーションモデルの水理地質区分を示した鳥瞰図を示す。また、図 2.2-44 に示す断面測線に従った水理地質断面図を図2.2-45 に示す。図2.2-45の上段が更新前の 2018年度モデル(広域モデルバージョン1)を示しており、下段が更新後の2019年度モデル(広 域モデルバージョン2)を示している。鉱床胚胎層や下部溶岩、大長根深部溶岩の基底面形状が 更新されたことが確認できる。加えて、坑道付近に、掘削活動によって生じた坑道周りの脆弱ゾ ーンを新たに設置した。



図 2.2-43 3 次元数値シミュレーションモデル鳥瞰図 (モデルバージョン 2)



図 2.2-44 3 次元数値シミュレーションモデル鉛直断面位置図



(上段:モデルバージョン1、下段:モデルバージョン2)

## 2.2.2.2. 現況再現解析

## (1) 検証の考え方

地下水・地表水流動シミュレーションにおける現況再現解析は、以下の3つのステップに従っ て検討を行った。使用した検証データを表2.2-29に示す。

ステップ 1:平均的な気象外力を与えた平衡流動場を用いて、坑道掘削後の坑内排水量や、昭和 45 年以降の 3m 坑閉塞プラグ措置や赤川保全水路工等の対策後、つまり、現況の坑内排水量・河 川流量・湧水地点の概略再現を行った。

ステップ 2:日単位の気象外力を与えた非定常解析によって、近年の坑内排水量の時間変化(季節変動)の再現を行った。なお、坑内排水量に影響を及ぼす冬季の積雪については、新中和処理施設内観測データを用いて確認を行う。

ステップ3:ステップ1の平衡流動場を用いた物質移行解析によって、平成31年度に観測を行った年代トレーサ(CFC-12)を検証対象とした妥当性の検討を行う。

データ項目	資料名	観測期間	観測頻度	調査地点		
河川流量	平成 30 年度流量一斉観測データ	2018/8/2 - 8/4 2018/10/30 - 11/1	2 回	99 地点 65 地点		
	令和元年度流量一斉観測データ	2019/6/10 - 6/13 2019/10/10 - 10/11	2 回	54 地点 56 地点		
	平成 30 年度~令和元年度 流量連続観測データ	2018/9/7 - 2019/11/5	B	3 地点		
坑内排水量	坑内排水量	2004/4/1 - 2019/9/30	B	1 地点		
湧水点	平成 30 年度現地踏査	2018/8/2 - 8/4 2018/10/30 - 11/1	2 回	13 地点		
	平成 30 年度構造物調査	2018/8/2 - 8/4	1 回	25 地点		
積雪深	新中和処理施設内観測データ	2004/4/1 - 2019/9/30	B	1 地点		
年代トレーサ	令和元年度年代トレーサ分析データ	2019/6/13 2019/10/11	2 回	8 地点		

表 2.2-29 検証データー覧

(2) 解析コード

本解析では、地圏流体シミュレータ GETFLOWS<sup>®</sup>(K.Mori, et al., 2015)を用いた。

## (3) 解析条件

#### ① 対象期間

ステップ2(現況再現解析)の対象期間は2017年4月1日~2019年9月30日とした。なお、 対象期間前の1年間をステップ1からステップ2へ移行するための助走期間とした。

ステップ 3 (物質移行解析)の対象期間は、CFC-12 の生産量の増加が始まった 1940 年を起点 とし、2019 年までの 80 年間とした。
### 2 降水

ステップ1では、時間変化を考慮しない一定の降水量を用いる。対象領域内の空間分布は、掘 削後を対象とした場合にはメッシュ気候値2000(1971年~2000年の30年間の平年値データ)、 現況を対象とした場合ではメッシュ平年値2010(1981年~2010年の30年間の平年値データ)よ り水平解像度1kmの日平均降水量を用いた。計算上の取り扱いは、後述する蒸発散量を降水量か ら差し引いた有効降水量を求め、地表層格子に割り当てた。

ステップ2では、解析雨量(気象庁)を日単位データに集計して用いた。

ステップ3では、ステップ1で使用した一定の有効降水量を用いた。降水に含まれる CFC-12 濃度は、当該地域並びに日本においては文献調査では得ることが出来なかった。そのため、アメ リカ地質調査所(USGS)及びアメリカ海洋大気庁(NOAA)に報告された北半球大気中の CFC-12濃度から降雨中濃度に換算し使用した。換算に用いる気温データはメッシュ平年値2010の水 平解像度1kmの平均気温を用いた。に使用した CFC-12の大気中濃度の推移グラフを示す。大気 中濃度から降水中濃度への換算は、次式に従う。

 $C_w = C_a M e^K (P_a - P_v)$ 

式中の記号の説明は以下のとおりである。

*C<sub>w</sub>*;降水中の濃度(*pg/kg*)

*C*<sub>a</sub>; 大気中濃度(*pptv*)

M ; 分子量(g/mol)

K ; 平衡定数(-)

 $P_a$ ; 気圧(atm)

*P*, ; 水蒸気圧(*atm*)

平衡定数K、気圧Pa、水蒸気圧Pvは以下の式より求めた。

$$K = 124.4395 + \frac{1842.99}{T + 243.15} + 51.6383 \times \log(\frac{T + 243.15}{100})$$
$$P_a = e^{-\frac{h+1}{8300}}$$

$$P_{v} = e^{24.4543 - \frac{6745.09}{T - 243.15} - 4.8489 \times \log(\frac{T + 243.15}{100})}$$

式中の説明は以下のとおりである。

*h* ; 涵養標高(*m*)



図 2.2-46 CFC-12 の大気中濃度 (1940 年~2017 年は USGS、2018 年~2019 年は NOAA のデータから作成)

### ③ 蒸発散量

ステップ1では、ハーモン法(Hamon W. R., 1961)を用いて可能蒸発散量を求めた。ハーモン 法に用いる気温データについて、対象領域内の空間分布は、掘削後を対象とした場合にはメッシ ュ気候値 2000(1971年~2000年の 30年間の平年値データ)、現況を対象とした場合ではメッシ ュ平年値 2010(1981年~2010年の 30年間の平年値データ)より水平解像度 1 kmの平均気温を 用いた。

ステップ2における可能蒸発散量は、気象庁から公開されているアメダスや気象台の解析対象 期間の気温、風速、日照時間、相対湿度を日単位データとして与え、地表面における熱収支式を 解くことで算出される潜熱量から評価する。気温、風速、日照時間、相対湿度データの空間分布 はクリギング法によって補間を行い作成した。さらに、気温データに関しては高度効果を考慮す る。高度効果を考慮するための気温減率は、観測地点の標高と多年平均温度との関係から 0.61℃ /100 mを用いた。地表面における熱収支の取扱いは、単層熱収支法を適用した。図 2.2-47 に単層 熱収支法の概念を示す。表 2.2-30 は熱収支を構成する各項の評価式をまとめたものである。



図 2.2-47 地表面における熱収支の取扱い(単層熱収支法)の概念

項目	評価式	概要
正味の	$(1-ref)\{a+b(N+\Delta N)/N_0\}S_{0d}$	日照時間から全天日射量の平均値を算
短波放射		定。被覆状態に応じてアルベドを与える
		(積雪面のアルベドは気温の線形関数と
		する)
正味の	$\sigma T^4 (0.51 + 0.066 \sqrt{e})(1 + C)$	倉島・佐藤の手法(1991)による。雲の影響
長波放射	$-\varepsilon\sigma T_s^4$	は日照率の関数形で表現する。
顕熱	$c_p \rho_a C_H U(T_s - T)$	バルク法による
潜熱	$l\rho_a\beta C_H U(q_s-q)$	同上
降雨による	c <sub>w</sub> RT	降雨の温度は気温と等しいと仮定
搬送熱		
貯熱量	$\Delta G$	被覆状態に応じて評価

表 2.2-30 熱収支式の取扱い

なお、表中の記号は記号の説明は以下のとおりである。

S <sub>0d</sub>	;大気上端における水平面日射量(W/m²)
No	;可照時間(hr)
Ν	; 日照時間(hr)
a, b	;日照計の種類に応じて計算する係数(-)
ref	;アルベド(-)

ε ;射出率(-)

- $\sigma$  ; ステファン・ボルツマン定数( $W/m^2/K^4$ )
- *T*,*T*<sub>s</sub>; 気温及び地表面温度(°C)
  - *e* ; 水蒸気圧(*Pa*)
  - *C* ; 雲の影響を表す係数(-)
  - *U* ; 風速(*m*/*s*)
- *C<sub>H</sub>*; バルク輸送係数(-)
- c<sub>p</sub>;空気の定圧比熱(J/kg/K)
- $\rho_a$ ;空気の密度 $(kg/m^3)$
- *R* ;降水量
- *c*w ; 水の比熱(*J*/*kg*/*K*)
- *l* ; 蒸発潜熱(*J*/*kg*)
- β ; 蒸発効率(-)
- *q*,*q*, ; 比湿及び表面比湿

④ 積雪・融雪

ステップ1では、時間変化を考慮しない一定の気象条件を与えるため、積雪・融雪の効果は考 慮しない。

ステップ2では、積雪・融雪を考慮する。積雪は、平面格子毎にタンクを設け、ある閾値温度 を日平均気温が下回った場合にタンクに雪として蓄えられる。日平均気温が閾値温度を上回った 場合には、上述した熱収支法を用いて、地表面温度を0℃としたときに生じる熱収支式の残差が 雪の融解熱に使われたと考え、融雪量を算出し、タンクからその分を差し引く。融雪量は降雨と 同様に地表面に与えられる。本解析では、閾値温度を2℃に設定した。

### ⑤ 降水遮断

ステップ1では、樹冠や林床による降水遮断の効果は考慮しない。

ステップ2では、図 2.2-48 に示す樹冠及び林床での降水遮断プロセスを考慮する。林外雨量は 樹冠、林床で遮断・貯留され、それぞれで貯留された水量については単層熱収支法で求められた 蒸発散量に応じて系外へ流去する。残った水量のみが樹冠を通過し林床に達し、さらにその一部 は林床を通過して地表面に到達する。林外雨量には上述のレーダーアメダス解析雨量を用いる。 各降水成分の関係は次のようになる。

林外雨量:	Pg = Pt + Pi + Ps
林内雨量:	Pt = Pd + Pl
正味の林内雨量:	Pn = Pt + Ps = Lt + Li

樹冠、林床のそれぞれに対して、土地利用や植生区分等に対応付けた貯留量、被覆率をパラメ ータとして与える。本検討では、土地被覆状況は宇宙航空研究開発機構(JAXA)地球観測研究 センターの陸域観測技術衛星「だいち」(ALOS)による高解像度土地利用土地被覆図を基に区 分し、その区分に応じて貯留量、被覆率を与えるものとした。設定値を表 2.2-31 に示す。



林床通過雨量Lt

図 2.2-48 降水遮断の模式的概念図

表 2.2-31 樹冠・林床パラメータ

十十十十十	樹冠貯留量	樹冠被覆率	林床貯留量	林床被覆率	
	(mm)	(-)	(mm)	(-)	
舗装面	考慮しない		考慮しない		
草原・裸地	考慮しない		1.09 <sup>2)</sup>	0.75	
落葉広葉樹	1.775 <sup>1)</sup> 0.9		1.09 <sup>2)</sup>	0.75	
常緑広葉樹	1.775 <sup>1)</sup>	0.9	1.09 <sup>2)</sup>	0.75	
針葉樹林	0.70 <sup>1)</sup>	0.9	1.09 <sup>2)</sup>	0.75	
水域	考慮しない		考慮し	しない	

1) 塚本良則編, 2006. 森林水文学, 文永堂出版.

2) 森林水文学編集委員会編, 2007. 森林水文学 森林の水のゆくえを科学する, 森北出版.

### 6 等価粗度係数

地表水流れに対する粗度係数は、対象領域内の土地利用や植生被覆に応じて地表層格子に与え られる。これらの値は、観測データの再現性を検証しながら適宜見直しを行うこととする。

表 2.2-32 に土地利用区分毎に与えた等価粗度係数を示す。土地利用区分は、国土交通省によっ て公開されている国土数値情報土地利用細分メッシュ(平成 26 年度)を用い、等価粗度係数の 空間分布に反映した。具体的には、格子モデルの各平面格子の中心に該当する土地利用を用いて、 粗度係数を各地表層格子に割り当てた。

土地利用区分	粗度係数(m <sup>-1/3</sup> s)	
田	2.0	
その他の農用地	0.31)	
森林	0.61)3)	
荒地	0.31)3)	
建物用地	0.051)2)	
道路	0.051)2)	
鉄道	0.05 <sup>1)2)</sup>	
その他の用地	0.05 <sup>1)2)</sup>	
河川地及び湖沼	0.021)2)	
ゴルフ場	0.033)	
1) 建設省河川砂防技術基準	(案)調査編	

表 2.2-32 土地利用区分毎の等価粗度係数(モデルバージョン 2)

2) 土木学会水理公式集

3) Morgan, R.P.C., et al. 1998

## ⑦ アルベド・バルク輸送係数

地表面における熱収支を取扱う際の、上向きの短波放射量の算定に用いるアルベドと、潜熱輸送量・顕熱輸送量の算定に用いるバルク輸送係数を設定する。土地被覆状況は宇宙航空研究開発 機構(JAXA)地球観測研究センターの陸域観測技術衛星「だいち」(ALOS)による高解像度土 地利用土地被覆図を基に区分し、その区分に応じてバルク輸送係数とアルベドを与えるものとし た。設定値を表 2.2-33 に示した。

土地利用区分 バルク輸送係数(-) アルベド(-) 草原・裸地  $0.002^{(1),2)}$ 0.21<sup>2)</sup> 0.0015<sup>2)</sup> 市街地  $0.15^{-3}$ 0.005<sup>2)</sup> 落葉広葉樹 0.175<sup>2)</sup> 0.005 2) 常緑広葉樹 0.175<sup>2)</sup> 針葉樹林  $0.005^{(2)}$  $0.1^{,2)}$ 水域 0.001<sup>2)</sup> 0.1 2)

表 2.2-33 土地利用区分毎に設定したバルク輸送係数及びアルベド

1) 近藤純正, 1994. 水環境の気象学―地表面の水収支・熱収支―, 朝倉書店.

2) 新井正著, 2004. 地域分析のための熱・水収支水文学, 古今書院.

3) G. S. Campbell, John M. Norman, 1998. An Introduction to Environmental Biophysics, Springer.

### ⑧ 土壤蒸発効率

林床土壌からの蒸発は、土壌間隙中の水分量の多少に応じて異なる。湿った土壌に対して乾燥 した状態では、間隙水は土粒子と結びつき蒸発しにくくなる。具体的には、土壌中の水分量(水 飽和率)の関数として表された蒸発効率を用いて評価されるが、十分な実測値が得られているわ けではない。

ここでは、土壌水分量(体積含水率)と蒸発効率の一般的な関係として以下の図 2.2-49 に示す 非線形関係を用いた。なお、熱収支法で推定される可能蒸発散量は、地上から地下へ順次の水を 取り除く機構として考慮される。可能蒸発散量に対して地上の水分量が十分である場合は、土壌 蒸発は行われないが、地上の水分量を超える場合は、その不足水分を土壌蒸発によるものとする。 林床土壌中に十分な間隙水が存在しない場合は、不足分の土壌蒸発量は考慮しない。



図 2.2-49 土壤蒸発効率(近藤, 1994)

#### 9 分子拡散係数

分子拡散は、濃度に偏りがある場合に均一になろうとする現象であるが、元素種により変化する。ステップ3におけるCFC-12の分子拡散係数は、文献調査では得ることが出来なかったため、 一般的な数値として 1.93×10<sup>-9</sup> m<sup>2</sup>/s と仮定した。

#### 10 屈曲度·分散長

分散長は、移動する物質が流れの中でばらつく度合いを表したものである。自然界での分散長 は、元素種により変化するが、本検討においては分散長を考慮しないものとした。

### ① 水理物性

水理物性は水理地質構造の区分毎に与える。表 2.2-34 に透水係数、有効間隙率、2 相流パラメ ータの設定値を示す。2 相流パラメータ(相対浸透率、毛細管圧力)については、砂礫、砂、粘 土、岩盤に区分し、一般的な性状のものを用いた。これらの初期設定値は、2018年度モデルより 同定された値を使用した。また、後述のマッチング経緯により同定した透水係数、有効間隙率に ついても併記する。

# 表 2.2-34 水理地質区分毎の水理物性の設定値(モデルバージョン 2)

(初期設定値)

(2019 年月

区分	構成	員	記号	透水係数 [m/s]	有効間隙率 「—]	2 相流物性	透水係数 「m/s]	有効間隙率
	表:	表土		1 × 10 <sup>-4</sup>	0.3	砂	[, 0]	
	 貯泥ダム	貯泥ダム沈殿物		1 × 10 <sup>-8</sup>	0.2			
	貯泥ダム	貯泥ダム堤体		H : 1 × 10 <sup>−7</sup> V : 1 × 10 <sup>−6</sup>	0.2	砂礫		
<b>汝</b> 專 网	捨:	捨土		1 × 10 <sup>-5</sup>	0.3	砂		
恢復盾	地すべい	り土塊	SB	H:1×10 <sup>-6</sup> V:1×10 <sup>-7</sup>	0.2	粘土		
	湖沼堆	積物	LD	1 × 10 <sup>-8</sup>	0.2	粘土		
	段丘堆	積物	TR	1 × 10 <sup>-5</sup>	0.2	砂礫		
	凹地堆	積物	DD1	1 × 10 <sup>-6</sup>	0.2	砂		
掘削箇所	坑道掘削	削箇所	DUG	1 × 10 <sup>-3</sup>	0.5	砂礫		
	低地の	東部	111.1	1 × 10 <sup>-5</sup>	0.05	上船	1 × 10⁻⁵	←
低地の	上部溶岩	西部	ULI	1 × 10 -	0.05	石盛	1 × 10 <sup>-7</sup>	←
分布地質	低地崩壊 堆積物	東部	AD1	1 × 10 <sup>-8</sup>	0.1	砂	1 × 10⁻⁵	←
		西部	ADT				1 × 10 <sup>-8</sup>	←
	頂稜部崩壊跡溶岩		UL2	1 × 10⁻⁵	0.05	岩盤	Ļ	←
」 〕 し 検 部の ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・	頂稜部溶岩		UL3	1 × 10 <sup>-5</sup>	0.05	岩盤	→	←
	頂稜部崩壊堆積物		AB2	1 × 10 <sup>-6</sup>	0.1	砂	→	←
	大長根上	大長根上部溶岩		1 × 10 <sup>-5</sup>	0.05	岩盤	Ļ	←
大長根の	大長根凹地堆積物		DD2	1 × 10 <sup>-6</sup>	0.2	砂	→	←
地質	大長根低	大長根低部溶岩		1 × 10 <sup>-5</sup>	0.05	岩盤	1 × 10⁻7	←
	大長根深部溶岩		UL6	1 × 10 <sup>-8</sup>	0.05	岩盤	+	←
	鉱床胚胎層上部			OCH H:4×10 <sup>-5</sup> V:4×10 <sup>-6</sup>	0.05	岩盤	H:5×10 <sup>-7</sup> V:5×10 <sup>-8</sup>	0.2
鉱床胚胎層			UCH				H:6×10 <sup>-6</sup> V:4×10 <sup>-7</sup>	0.2
	鉱床胚胎層	鉱床胚胎層低透水部		H:1×10 <sup>−6</sup> V:1×10 <sup>−7</sup>	0.02	岩盤	H:6×10 <sup>-6</sup> V:4×10 <sup>-7</sup>	0.2
	下部》	容岩	LL	1 × 10 <sup>-8</sup>	0.01	岩盤	←	←
難透水基盤岩			BR	1 × 10 <sup>-9</sup>	0.005	岩盤	←	←
							H:鉛直方向 V:水平方向	←:初期設定値から変更なし

度同	定	値)
----	---	----

12 初期条件

ステップ1では、気象外力を一定条件として与え続け、地表水・地下水同時流れの定常状態を 求める。この定常状態はステップ2の初期条件として用いる。

ステップ1の解析自体にも初期条件が必要となる。どのような初期条件を与えても定常状態の 解析結果に相違はなく、そこに到達するまでの時間(計算時間)のみが異なる。ここでは、地下 地盤中を完全に飽和させた静水圧分布、地上を水のない乾燥した標準大気圧とした以下の表 2.2-35 に示す初期条件を用いた。

ステップ3では、ステップ1の流動場(飽和率・圧力)を用い、CFC-12濃度は全域を0.0 mg/L とした。

変数		<u>⊰</u> ⊐ ⊟	光子	初期条件		
		記写	単位 地上		地下	
飽和率	水相	Sw	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>	0.0	1.0	
	気相	Sg	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>	1.0	0.0	
圧力	水相	Pw	MPa	0.1013	静水圧	
	気相	Pg	MPa	0.1013	水相と同じ	
濃度	水相	Cw	mg/L	0.0	0.0	
	気相	Cg	mg/L	0.0	0.0	

表 2.2-35 平衡流動場の解析に用いる初期条件

### 13 境界条件

解析モデル上面は、格子モデルの最上層の第1層に大気層、第2層に地表層を設け、大気層に は標準大気圧(0.1013 MPa)、地表層には上述した気象条件を与えた。また、地下地層では旧坑 道からの排水を考慮し、旧坑道に該当する格子を流出境界(大気圧固定に設定)とした。掘削後 を対象とした解析では全坑道を、現況を対象とした解析では、100m 坑より標高の高い坑道に対 して設定した。側面は、地表を流出境界とし、地下は流体の出入りがない閉境界とした。モデル 底面も同様に閉境界とした。

### (4) マッチング経緯

2.2.2.2(1)章に示した検証手順に従って、再現解析のマッチングを実施した経緯を表 2.2-36 に示した。

まず、初期設定値による検討(casel)では、赤川の河川流量が極端に少なくなり、坑内排水 量は降雨に対して敏感に反応するようになった。これは、2018年度モデルから基底面が深く更新 されたことによって、地表水が浸透しやすくなる状態になったからであると考えられる。これら、 鉱床胚胎層の透水性がより小さいことが推察されたため、鉱床胚胎層お透水性を 1/4 倍小さく変 更し、検討を行った(case2)。これにより、赤川の流量が増大することが確認できた。

同様にして、case3から case6 では、赤川、夜沼川、鴨田川の河川流量に着目し、岩盤の透水性 のマッチングを実施した。case7 では、坑内排水量の非定常応答が過敏であったことから、鉱床 胚胎層の有効間隙率のマッチングを実施した。

検討ケース	内容	観測結果との対応	推定される仮説 など
case 1	初期設定値による検討	<ul> <li>・夜沼川は基底流量が観測よりも少なく、降雨時においても流量が不足している</li> <li>・赤川上流の流量は常時なく、中流域においても過小に評価される</li> <li>・鴨田川は上流域で湧出し、全体的に過大な傾向・3河川において2019年の融雪期に流量が不足</li> <li>・坑内排水量は観測よりも降雨に対して、敏感に反応しており、挙動が異なる</li> </ul>	<ul> <li>・夜沼川周辺の地質(低地溶岩、崩壊堆積物)の透水性がより小さい</li> <li>・赤川周辺の地質(鉱床胚胎層)の透水性がより小さい、また空隙のより大きい</li> <li>・鴨田川周辺の地質(低地溶岩、崩壊堆積物、鉱床胚胎層)の透水性がより大きい</li> <li>・降水量(降雪量)の過小評価?</li> </ul>
case 2	鉱床胚胎層の透水性を 1/4 倍小さく変更 (H:1×10 <sup>-5</sup> V:1×10 <sup>-6</sup> m/s)	・赤川の流量が増大 ・赤川の中流域は流量は観測よりも過大 ・坑内排水量の増加(定常:3m3/分程度増加)	・赤川の上流部において局地的な透水性 が低いゾーンが分布している可能性
case 3	鉱床胚胎層の上流部に低透水ゾーンに設定 (H:1×10 <sup>-6</sup> V:1×10 <sup>-7</sup> m/s)	<ul> <li>・赤川上流の流量が増大</li> <li>・坑内排水量の減少</li> </ul>	・赤川の流量及び坑内排水量の水収支は 鉱床胚胎層の微調整により同定可能
case 4	鴨田川周辺の低地崩壊堆積物の透水性を 100 倍 (1 × 10 <sup>-6</sup> m∕s)	・鴨田川の上流域の流量が減少	・鴨田川周辺の深部構造(鉱床胚胎層)の 透水性がより大きい
case 5	鉱床胚胎層低透水部(下流部)を 10 倍大きく 変更 (H:1×10 <sup>-5</sup> V:1×10 <sup>-6</sup> m/s)	・鴨田川の上流~中流域の流量が減少	・鴨田川の流量に対しては、低地溶岩や崩 壊堆積物より、深部に分布する鉱床胚胎 層の影響度が大きい
case 6	夜沼川周辺の低地上部溶岩の透水性を 1/100 倍 (1×10 <sup>-7</sup> m/s)	・夜沼川の基底流量が増大	・これらの検討において、平常時、融雪水の挙動を同時に再現することが困難であった
case 7	鉱床胚胎層の有効間隙率を大きく変更 0.05 ⇒0.2 透水性の微調整	・坑内排水量の降雨応答がより緩慢に	・鉱床胚胎層全体、若しくは坑道付近の有 効空隙率は大きい可能性がある

表 2.2-36 再現解析におけるマッチングの経緯

2.2.2.3. 坑廃水量及び河川流量観測結果を検証したシミュレーションモデルの評価

(1) 河川流量

解析期間(2017/4/1~2019/9/30)における赤川の日単位の連続流量観測データと計算流量をそれぞれ、縦軸と横軸で比較を行ったグラフを図2.2-50に示す。2018年度モデルは、該当期間における解析を行っていないため、未検証である。観測値に対する解析モデルの整合性を確認するために、ここでは、下記の式で表される Nash-Sutcliffe efficiency (NSE) (Nash & Sutcliffe, 1970)を用いて評価を実施した。

NSE = 
$$1 - \frac{\sum_{i} (y_{obs,i} - y_{sim,i})^2}{\sum_{i} (y_{obs,i} - \overline{y_{obs}})^2}$$

ここで、*y<sub>obs,i</sub>、y<sub>sim,i</sub>、y<sub>obs</sub>は、それぞれ、観測値、解析値、観測平均値を表す。NSE 値は、1 から−∞までの範囲をとり、1 に近いほど整合していることを示す。赤川においては、初期設定 値では NSE 値-0.41 であったのに対して、前述のマッチングにより、NSE 値は 0.43 へ改善した。* 

また、夜沼川、赤川、鴨田川における一斉観測流量と計算流量を比較したグラフを図 2.2-51 に 示す。2018年度モデルで課題であった赤川上流域での基底流量や鴨田川の湧出状況が改善してお り、観測値(点線)に対して計算値(実線)の傾向が整合するようになった。

加えて、夜沼川、赤川、赤沢川の連続流量観測データと計算流量を比較したグラフを図 2.2-52 に示す。夜沼川では、特に 2018 年 9 月~2019 年 3 月の降雨に対する応答パターンや基底流量が よく再現されている。しかし、融雪期に対する流量が過小であり、これは冬季の積雪量が少ない、 若しくは、融雪期の流出状況が実態とは異なることが考えられる。赤川については、降雨応答パ ターンは再現しているが、基底流量がやや過大にある傾向がある。融雪期の流量は、夜沼川の再 現状況と同様である。積雪量については、特に後背山地の気象状況や観測降雪量の捕捉率など、 不確実な要因を含んでいる。そこで参考ではあるが、積雪期の降水量を 1.5 倍であると想定した 検討を実施した。図 2.2-53 に連続流量観測データと計算流量の比較を行ったグラフを示す。その 結果、融雪期の流量が増大したことによる整合性の改善が見込まれた。



図 2.2-50 検証期間における日単位の河川流量(赤川)に関する観測流量と計算流量の評価





<sup>2.2-93</sup> 



図 2.2-52 各河川の連続流量の観測流量と解析結果の比較



### (2) 坑内排水量

解析期間(2017/4/1~2019/9/30)における坑内排水量の日単位の観測データと計算値をそれぞ れ、縦軸と横軸で比較を行ったグラフを図2.2-54に示す。2018年度モデルの解析(検証対象)期 間は、2014/1/1~2016/12/31であったため、それを用いた。坑内排水量については、2018年度モ デルの NSE 値が-0.51であったところ、本年度モデル(同定値)では、-0.40へと改善した。

また、坑内排水量の観測データと計算流量を比較したグラフを図 2.2-55 に示す。坑内排水量の 絶対値、季節的な変動ともに、概ね再現する結果が得られている。融雪期の坑内排水量について も過小評価する傾向がみられる。河川流量及び坑内排水量の水収支の観点から積雪期の水量が実 測よりも不足していることが伺える。



図 2.2-54 検証期間における日単位の坑内排水量に関する観測流量と計算流量の評価



図 2.2-55 坑内排水量の観測水量と解析結果の比較

2.2-97



図 2.2-56 降雪量を 1.5 倍にした場合の坑内排水量の観測水量と解析結果の比較(参考)

# (3) 湧水量分布

平衡状態における湧出量分布と現地で確認された湧水地点を比較したものを図 2.2-57 に示す。 湧出量分布は、地表面を上向きに通過する水量で色分けしたものである。赤川最上流部での湧水 地点や東側(図面右端)で湧水地点が多くみられる現地での傾向を良く表している結果が得られ ている。特に、2018 年度モデルより赤川上流域で多く湧水する傾向がみられる。



図 2.2-57 湧出量分布と現地湧水地点との比較

# (4) 積雪深

図 2.2-58 に新中和処理施設で観測された積雪深データと解析結果を比較したグラフを示す。計 算上、得られる値は水量であるため、一般的な積雪の密度 0.2 g/cm<sup>3</sup>、0.3 g/cm<sup>3</sup>、0.4 g/cm<sup>3</sup>を乗じ、 積雪深を比較対象とした。3 シーズンの解析結果は密度が 0.3~0.4 g/cm<sup>3</sup>の場合、観測データと概 ね整合する。また、積雪開始時期と終了時期が一致していることから、新中和処理施設における 積雪状況は、概ね再現されていると考えられる。



図 2.2-58 新中和処理施設における積雪深の観測量と解析結果の比較

### (5) 年代トレーサ濃度

図 2.2-59 に検証対象とした地点位置図を示す。図 2.2-60 に、CFC-12 濃度に対して観測データ と解析結果を比較したグラフを示す。グラフには、入力条件の基にした CFC-12 の大気中濃度 (赤線)と湧水中の観測値(赤丸)、解析による水中濃度(青線)を載せている。CFC-12 から、 年代を推定することも可能であるが、年代推定には不確定な涵養条件を含む。そのため、実測さ れた CFC-12 濃度との比較検証を行った。湧水中の観測値と解析による水中濃度を比較すると、 2019 年時点の濃度は、①、②、⑦の地点において概ね整合する結果が得られている。これらの地 点は、他地点よりも下流側に位置しており、上流から下流までの大局的な経路及び浸透時間がよ り再現できていると考えられる。解析結果との不整合がみられる③、④、⑤、⑥、⑧は総じて、 観測よりも年代の若い(CFC-12 濃度が高い)水が流れている結果となった。③、⑤、⑥、⑧の CFC-12 濃度は約 300 pg/kg であり、下流側の①、②、⑦と同等である。つまり、下流側と同程度 の年代の水が流動する必要がある。また、④の観測 CFC-12 濃度は約 200 pg/kg であり、他の地点 よりもさらに年代が古い。赤沢川上流で、より年代の古い水が流動するためには、地下深部から の湧き出し構造など地質構造の不均質性や局地性によるものであると考えられるが、坑道への大 局的な流動には影響は少ないと考えられる。



図 2.2-59 CFC-12 観測点位置図



図 2.2-60 各地点における CFC-12 の観測濃度と計算結果の比較

(6) 流動経路

地表面直下に配置した粒子の流動経路を図 2.2-61 に示す。地上と地下の流動経路をそれぞれ、 青と赤で色分けして表示している。水収支が比較的閉じている夜沼川流域では、地下水の経路は 短く、近傍の沢で湧き出し、地表水として流動している傾向がみられる。

一方、赤川流域及び鴨田川流域では、夜沼川流域に比べると地下水の経路が長く、坑道に湧出 する地下水の多くは、坑道掘削範囲の真上と赤川流域の上流部から浸透したものであることが分 かる。また、坑道に湧出する水の一部は、地表分水嶺を超えた範囲(茶臼岳より北側)から経路 が延びていることから、流域外からも水を引き込んでいることが示唆される。

図 2.2-62 には、坑道へ湧出する水に起因する地表浸透水の確率を分布で示した図である。浸透 確率が1に近いほど、その地点で浸透する水が坑道に達する可能性が高いことを意味する。

坑道の上流側、茶臼岳の頂稜に向かって、坑道へ流入する確率が高くなっている。夜沼川と赤 川の分水嶺に沿って浸透確率が分かれており、夜沼川流域で浸透する水は、坑道に湧出する水に 対しての影響は小さいと考えられる。

坑道掘削範囲直上の浸透確率が小さくなっているが、これは直上で降った雨が一部は浸透する ものの、地形なりに流下しているためであると考えられる。



処理場位置
 掘削範囲
 解析領域
 流動軌跡
 地表水
 地下水

図 2.2-61 地表面直下に配置した粒子の流動経路



図 2.2-62 坑道に到達した水の地表水における浸透確率

2.2.3. 坑道範囲周辺(局所)の地下水・地表水流動シミュレーションモデルの構築

# 2.2.3.1. 局所モデルの構築

# (1) 対象領域の設定

局所モデルの解析範囲については、2.2.2 章で示した解析結果等から坑道に集水範囲に対して境 界条件が影響を及ぼさない適切な対象領域を決定した。西側を夜沼川、東側を鴨田川が境界とな るような範囲を設定した。広域モデルの面積が約 108 km<sup>2</sup>に対して、局所モデルは約 35 km<sup>2</sup>が領 域範囲となった。図 2.2-63 に局所モデルの領域範囲を示す。



図 2.2-63 局所モデルの領域範囲

# (2) 陸面過程のモデル化

局所モデルでは、詳細設計を行うための陸面における水文プロセスの精緻化を行った。特に地 表面の土地被覆状況については、宇宙航空研究開発機構(JAXA)地球観測研究センター (EORC)が公開している高解像度土地利用土地被覆図の土地利用・土地被覆区分を基本とし、 一部、実態に合わせた修正を加えたものを使用した。実態に合わせた修正とは、貯泥ダムの被覆 状況が「田」とされている状態を「水域」に変更する等である。図 2.2-64 に作成した土地被覆分 布を示す。



図 2.2-64 旧松尾鉱山周辺の土地被覆分布 高解像度土地利用土地被覆図(JAXA)を基に、一部修正を加えた

## (3) 三次元数値シミュレーションモデルの構築

広域モデルと同様の地下地質構造モデルを組み込んだ3次元数値シミュレーションモデルの構築を行った。鉛直方向は地層構造や坑道形状を考慮しながら、大気層(地表面標高+101m)から 最下層(標高-1000m)までを79層で分割を行った。なお、広域モデルに比べ、土壌層における 分割を詳細に行い、最小層厚を30cmとした。層格子数は、6,936,358(307格子×286格子×79 層)となった。図2.2-65にシミュレーションモデルの水理地質区分を示した鳥瞰図を示す。



図 2.2-65 3 次元数値シミュレーションモデル鳥瞰図 (モデルバージョン 2-1)

2.2.3.2. 現況再現解析

(1) 検証の考え方

局所モデルにおける地下水・地表水流動シミュレーションにおける現況再現解析は、以下の 2 つのステップに従って検討を行った。

ステップ1:平均的な気象外力を与えた平衡流動場を用いて、坑道掘削後の坑内排水量や、対策 後の坑内排水量・赤川の河川流量の概略再現を行った。

ステップ 2:日単位の気象外力を与えた非定常解析によって、近年の坑内排水量の時間変化(季節変動)の再現を行った。

これらの手順により、広域モデルとの不整合がある場合には、物性値や境界条件の見直しを行った。

(2) 解析条件

原則、広域モデルと同様の解析条件とした。変更を行った項目について記述を行う。

#### ① 等価粗度係数

地表水流れに対する粗度係数は、対象領域内の土地利用や植生被覆に応じて地表層格子に与え られる。これらの値は、観測データの再現性を検証しながら適宜見直しを行うこととする。

表 2.2-37 に土地利用区分毎に与えた等価粗度係数を示す。土地被覆区分は、JAXA によって公開されている高解像度土地利用土地被覆図を基に作成した土地被覆を用い、等価粗度係数の空間 分布に反映した。具体的には、格子モデルの各平面格子の中心に該当する土地利用を用いて、粗 度係数を各地表層格子に割り当てた。

土地利用区分	粗度係数(m <sup>-1/3</sup> s)
水域	0.02 <sup>1)2)</sup>
舗装面	0.05 <sup>1)2)</sup>
草地	0.31)3)
落葉広葉樹	0.6 <sup>1)3)</sup>
落葉針葉樹	0.6 <sup>1)3)</sup>
常緑広葉樹	0.6 <sup>1)3)</sup>
常緑針葉樹	0.6 <sup>1)3)</sup>
裸地・露頭	0.3 <sup>1)3)</sup>

表 2.2-37 土地被覆区分毎の等価粗度係数(モデルバージョン 2-1)

1) 建設省河川砂防技術基準(案)調查編

2) 土木学会水理公式集

3) Morgan, R.P.C., et al. 1998

## 2 水理物性

水理物性は水理地質構造の区分毎に与える。土地被覆状態に応じて、土壌層を3つに分類し、 一般的な土壌、アスファルト舗装、岩盤露頭とした。土地被覆状態が「舗装面」である範囲は、 地表から30 cm がアスファルトに舗装されているとし、比較的透水性の低い物性を与えた。また、 土地被覆状態が「裸地・露頭」である範囲は、岩盤が露頭している、若しくは、相当層が分布し ているとし、アスファルトと同様にして比較的透水性の低い物性を与えた。表 2.2-38 に透水係数、 有効間隙率、2 相流パラメータの設定値を示す。2 相流パラメータ(相対浸透率、毛細管圧力) については、砂礫、砂、粘土、岩盤に区分し、一般的な性状のものを用いた。これらの設定値は、 広域モデルより同定された値を使用した。

区分	構成員		記号	透水係数	有効間隙率	2 相流物性
		<b>≠</b> ⊥	то	[m/s]	[-]	
	マフファルト			1 × 10 <sup>-8</sup>	0.3	石小
	、 デベー 岩!		TSD	$1 \times 10^{-7}$	0.1	μy
	 貯泥ダ	ふ沈殿物	PR	1 × 10 <sup>-8</sup>	0.2	粘土
	貯泥	ダム堤体	FD	H:1×10 <sup>-7</sup> V:1×10 <sup>-6</sup>	0.2	砂礫
被覆層	1	舎土	DS	1 × 10 <sup>-5</sup>	0.3	砂
	地す	べり土塊	SB	H:1×10 <sup>-6</sup> V:1×10 <sup>-7</sup>	0.2	粘土
	湖沼	堆積物	LD	1 × 10⁻ <sup>8</sup>	0.2	粘土
	段丘	堆積物	TR	1 × 10⁻⁵	0.2	砂礫
	凹地	堆積物	DD1	1 × 10⁻ <sup>6</sup>	0.2	砂
掘削箇所	坑道	屈削箇所	DUG	1 × 10⁻³	0.5	砂礫
	低地の 上部溶岩	東部	111.1	1 × 10⁻⁵	0.05	岩盤
低地の		西部	ULI	1 × 10 <sup>-7</sup>	0.05	
分布地質	低地崩壊 堆積物	東部		1 × 10⁻⁵	0.1	저
		西部	ABT	1 × 10⁻ <sup>8</sup>	0.1	199
	頂稜部詞	崩壊跡溶岩	UL2	1 × 10⁻⁵	0.05	岩盤
頂稜部の 地質	頂稜	部溶岩	UL3	1 × 10⁻⁵	0.05	岩盤
	頂稜部	崩壊 <mark>堆</mark> 積物	AB2	1 × 10⁻ <sup>6</sup>	0.1	砂
	大長根	上部溶岩	UL4	1 × 10⁻⁵	0.05	岩盤
大長根の	大長根[	凹地 <mark>堆</mark> 積物	DD2	1 × 10⁻ <sup>6</sup>	0.2	砂
地質	大長根	低部溶岩	UL5	1 × 10 <sup>-7</sup>	0.05	岩盤
	大長根	深部溶岩	UL6	1 × 10 <sup>-8</sup>	0.05	岩盤
	鉱床胚胎層上部			H:5×10 <sup>-7</sup> V:5×10 <sup>-8</sup>	0.2	岩盤
鉱床胚胎層	鉱床胚胎	層高透水部	oon	H∶6 × 10 <sup>-6</sup> V∶4 × 10 <sup>-7</sup>	0.2	
	鉱床胚胎	層低透水部	OCL	H: $6 \times 10^{-6}$ V: $4 \times 10^{-7}$	0.2	岩盤
	ł۲	邹溶岩	LL	Ļ	Ļ	岩盤
難透水基盤岩			BR	Ļ	Ļ	岩盤

表 2.2-38 水理地質区分毎の水理物性の設定値(モデルバージョン 2-1)

H:鉛直方向 V:水平方向

2.2.3.3. 坑内排水量、河川流量観測結果を検証対象としたシミュレーションモデルの評価 (1) 河川流量

図 2.2-66 に日単位の赤川の河川流量に対する観測流量と解析結果の比較を行ったグラフを示す。 左に広域モデルの同定値を用いた結果(図 2.2-50 において既出)、右に局所モデルによる結果を 示す。NSE 値はそれぞれ 0.43 であり、観測値に対して同程度の再現状況であるといえる。

また、図 2.2-67 に赤川の連続河川流量について、観測データ、広域モデルの解析結果、局所モ デルの解析結果を比較したグラフを示す。



a) 広域モデル

b) 局所モデル





図 2.2-67 赤川河川流量の再現状況

## (2) 坑内排水量

図 2.2-68 に日単位の坑内排水量に対する観測流量と解析結果の比較を行ったグラフを示す。左 に広域モデルの同定値を用いた結果(図 2.2-54 において既出)、右に局所モデルによる結果を示 す。NSE 値はそれぞれ-0.40、0.19 であり、局所モデルの方がより観測を再現するようになった。

図 2.2-69 に坑内排水量の観測データ、広域モデルの解析結果、局所モデルの解析結果を比較し たグラフを示す。





b) 局所モデル





図 2.2-69 坑内排水量の再現状況

2.2.4. 水量・水質シミュレーションモデルの構築

2.2.4.1. 連成解析ツールの概要

(1) 連成解析ツール要件

旧松尾鉱山施設を対象とし、地下水・地表水流動解析シミュレーションモデルと水質シミュレー ションモデルの連成を行う際の、適用するツールの要件を以下に示す。

- 主に、旧松尾鉱山施設の坑道周辺に存在する鉱床胚胎層内での水質形成を対象とする(鉱床 胚胎層に流入する地下水の水質形成については対象とせず、観測データを用いて与条件とす る)。
- 水・空気の流体解析及び水中の全元素種の移流分散解析には地圏流体シミュレータ GETFLOWS®(K. Mori, et al., 2015)を、化学反応解析には PHREEQC(D. L. Parkhurst, et al., 2013)を用いる。
- 希薄溶液系(溶質濃度に応じた流体物性の変化は無視できるほど小さい)を前提とする
- 化学反応に伴う流体の温度変化は考慮しない。ただし、化学反応計算で与える温度は設定可能とする。
- 化学反応計算による水相の増減、気相(酸素等)の溶解、固相の溶解・沈殿(間隙変化)を 流体解析に引き渡し、質量収支を保存する。ただし、この機能を有効にするか否かは選択可 能とする。

### (2) 解析手順

連成解析ツールの解析手順を図 2.2-70 に示す。はじめに、地圏流体シミュレータ GETFLOWS<sup>®</sup> によって水・空気の流体解析が行われ、格子間流速や、飽和率や温度等の気液固相の状態量が計 算される。それらを用いて、GETFLOWS<sup>®</sup>によって溶質の移流分散解析が元素種毎に実施され、 各元素種の濃度場が計算される。その次に、計算された濃度場が PHREEQC へ引き渡され、1 つ の格子毎に化学反応解析が行われる。求められた全元素種の濃度変化や、空気や固相の溶解量等 から、濃度場や気液固相の状態量が更新され、流体解析へ戻るといった手順で解析が進められる。

流体解析や移流分散解析を個別に考えると、時間離散化には完全陰解法を適用しているため、 時間刻み幅に制約は無いが、連成解析では、流体解析と移流分散解析の演算を分離し(分離型解 法)、逐次時差解法によって連成しているため、CFL 条件を満たしながら解いていくことが必要 となる。CFL 条件から最大時間刻み幅の制約が設けられ、解析の中での時間刻み幅は、流体解析 や移流分散解析の双方が収斂する条件によって決定される。



図 2.2-70 連成解析ツールの解析手順

## 2.2.4.2. 検証の考え方

旧松尾鉱山においては、鉱山活動が行われたことによる水位の低下(不飽和ゾーンの拡大)と、 その後の対策工による水位の上昇(不飽和ゾーンの縮小)が鉱物の酸化反応に影響を及ぼしてい ると考えられる。そこで、水量・水質シミュレーションにおける再現解析では、まず、考慮する 鉱物組成や反応系が水質に与える感度と対策による流動場の変化によって現れる現象を把握する ことを目的に感度解析を実施する。その後、旧松尾鉱山の最深部の3m坑が運用された昭和26年 ~昭和45年の水質場(pH1.5程度)、及び対策後、つまり現況の水質場(pH2.3程度)を対象と して、概略再現を行う。図2.2-71に水量・水質シミュレーションの検討フローを示す。


図 2.2-71 水量・水質シミュレーションの検討フロー

# 2.2.4.3. 概略モデルを用いた感度解析

感度解析では、試行錯誤を重ねて検討するため、格子解像度の粗い概略モデルを用いて実施した。

## (1) 解析条件

① 降水

感度解析では、対策工後と同様の降水量を用いた。降水に含まれる物質濃度は、当該地域の地下水水質を使用した。試料は、鉱床胚胎層と接触する前の地下水であると考えられるため、これを適用した。溶液組成を表 2.2-39 に示す。

変数	単位	降水条件
рН	[-]	6.0
温度	[°C]	14.4
Na	[mmol/kgw]	0.091
Κ	[mmol/kgw]	0.008
CI	[mmol/kgw]	0.230
Ca	[mmol/kgw]	0.044
S	[mmol/kgw]	0.004
Mg	[mmol/kgw]	0.026
0	[mmol/kgw]	0.474

表 2.2-39 降水条件に適用した溶液組成

## 2 分子拡散係数

分子拡散は、濃度に偏りがある場合に均一になろうとする現象であるが、元素種により変化す る。ここでは、分子拡散係数は、溶液中の元素種によらず限りなく小さい値に設定した。

#### ③ 屈曲度・分散

分散長は、移動する物質が流れの中でばらつく度合いを表したものである。自然界での分散長 は、元素種により変化するが、本検討においては分散長を考慮しないものとした。

## ④ 固相の溶解速度式

固相の溶解反応を非平衡状態として取り扱う。本検討においては、鉱床胚胎層中に存在する硫 黄鉱物(黄鉄鉱、白鉄鉱等)の溶解反応について考慮する。黄鉄鉱(pyrite)及び白鉄鉱 (marcasite)の溶解反応は以下の式で示される。なお、データベースには地球化学コード PHREEQC内に収納されている minteq.v4.dat (Enbrionmental Protection Agency. U. S., 1998)を使用 した。

 $FeS_2(s) + 7/2O_2 + H_2O \rightarrow Fe^{2+} + 2SO_4^{2-} + 2H^+$ 

pyrite からの Fe<sup>2+</sup>と SO4<sup>2-</sup>の溶出速度モデルとして Williamson と Rimstidt (Williamson, M. A. and Rimstidt, J. D., 1994) が提唱する以下の式を用いた。

$$R_{pyrite} = kS_{pyrite} (\frac{m}{m_0})^n [DO]^a [H^+]^l$$

ただし、 $R_{pyrite}$ は pyrite の溶解速度であり、 $S_{pyrite}$ は反応に寄与する比表面積、[DO]は溶存酸素の活量を表している。変数k、n、a、bの理論値は、それぞれ 10<sup>-10 19</sup>、0.5、-0.11、0.67 であるが、旧松尾鉱山で採取した試料を用いた早稲田大学による溶解試験の実験値はそれぞれ 10<sup>-10 45</sup>、0.5、-0.11、0.67 であったため、これを用いた。本検討においては、 $S_{pyrite} = \frac{A}{v}$ をフィッティングパラメータとして取り扱う。

marcasite からの Fe<sup>2+</sup>と SO4<sup>2-</sup>の溶出速度モデルとして、pyrite と同様の式を提議する。

$$R_{marcasite} = kS_{marcasite} (\frac{m}{m_0})^n [D0]^a [H^+]^b$$

同様にして、変数k、n、a、bの理論値は、それぞれ10<sup>-66</sup>、0.45、-0.02、0.67であるが、早稲田大 学による溶解試験の実験値から10<sup>-8 85</sup>、0.5、-0.11、0.67であったため、これを用いた。

#### ⑤ 鉄酸化速度式

Fe<sup>2+</sup>から Fe<sup>3+</sup>への速度式として、Singer と Stumm (Singer, P.C. and Stumm, W., 1970)の提唱した 以下の1次反応速度式を使用している。

$$\frac{d[Fe(II)]}{dt} = -(k_1 + k_2[OH^-]^2 P_{02})[Fe(II)]$$
(2.2-1)

ただし、[Fe(II)]は Fe<sup>2+</sup>活量、[OH<sup>-</sup>]は水酸化物イオンの活量、P<sub>02</sub>は酸素分圧、 $k_1$ 及び $k_2$ は速度定数を表している。 $k_1 \ge k_2$ に対しては Singer  $\ge$  Stumm (Singer, P.C. and Stumm, W., 1970)が $k_1=2.91\times10^9$ 、 $k_2=1.33\times10^{12}k_1=2.91\times10^{-9}$ 、 $k_2=1.33\times10^{12}$ という値を提案しており、本検討

2.2-116

でもこれらの値を用いた。

# ⑥ 初期条件

流体における初期条件(空気相圧力、水飽和率)は、平均的な気象条件を与えた平衡流動場を 初期値として与えた。

化学反応場における初期状態は、表 2.2-40 に示す初期溶液組成を全域に与え、鉱床胚胎層に初 期鉱物組成を与えた。旧松尾鉱山に関する資料によると、鉱物品位は 10%程度であったことから、 体積当たり 10%になる値を設定した。

変数	単位	濃度	適用範囲
рН	[-]	6.0	全域
温度	[°C]	14.4	全域
Na	[mmol/kgw]	0.091	全域
К	[mmol/kgw]	0.008	全域
CI	[mmol/kgw]	0.230	全域
Ca	[mmol/kgw]	0.044	全域
S	[mmol/kgw]	0.004	全域
Mg	[mmol/kgw]	0.026	全域
0	[mmol/kgw]	0.474	全域
Ferrihydrite	[mol/kgw]	0	鉱床胚胎層
Pyrite	[mol/kgw]	0.656	鉱床胚胎層
Marcasite	[mol/kgw]	0.656	鉱床胚胎層

表 2.2-40 初期溶液組成及び鉱物組成

# ⑦ 境界条件

流動場における境界条件は、2.2.2.2(3)⑬章で述べた条件に準ずる。濃度場については、初期溶液組成の濃度固定境界とした。また、流動場において不飽和ゾーンについては、酸素が十分にあると仮定し、初期溶液組成の酸素濃度と常に平衡状態になるように設定した。

⑧ 解析結果

表 2.2-41 に示す検討ケースに関して、感度解析を行った。

各感度解析ケースの結果については、図 2.2-72 に概略モデルの地質断面図、図 2.2-73~図 2.2-78 に各ケースの pH、Fe<sup>2+</sup>、SO4<sup>2-</sup>の分布を示す。各図の流動場解析から抽出した地下水面を白色の破線を示した。

ベースケースによる検討では、不飽和帯(地下水面よりも上方)で反応が急速に進み pH が 1.9 程度まで低下した(図 2.2-73)。フィッティングパラメータ(比表面積)の初期設定値は、溶解 試験で求められた実験値であるため、鉱体と酸素が十分に接触する場合の値である。自然界に分 布する鉱体が酸素と接触するのは極めて限定的であると考えられる。そのため、反応する比表面 積を 1/100 倍、1/1,000 倍にしたケースを行った。

比表面積を 1/100 倍、1/1,000 倍小さくすることによって、低下は緩やかになる。坑道付近の pH は、それぞれ 2.5、3.2 となった(図 2.2-74、図 2.2-75)。現在の坑廃水のが、2.3 程度である ことを勘案すると比表面積 1/100 ケースが最も妥当であると考えた。

pyrite と同等量の marcasite が鉱床胚胎層中に分布するとした場合、pyrite 単体のケースと比べ、 pH は 2.5 程度と同程度、反応生成物である  $Fe^{2+}$ 及び  $SO_4^2$ -は増加する傾向がみられた(図 2.2-76)。 これは、pyrite よりも反応が早い marcasite が溶解によるためである。このことから、marcasite に よる水質形成への影響を無視することはできないと考えられる。一方で、現在の pyrite や marcasite の存在量や分布、及び 2 種の鉱物の存在比等は、既存資料からは推定することが困難な 要素でもあるため、さらに定量的な検討を行うためには情報の蓄積や分析が必要である。

自然状態における不飽和ゾーンに鉱体が分布しないとした場合(鉱物分布の変更ケース)、反 応範囲は限定的である結果となった。pHは、比表面積1/100ケースと比べると同程度である(図 2.2-77)。坑道掘削が行われる自然状態の地下水面は、現状よりも高かったと推察される。この 時、不飽和ゾーンにおける鉱床は、鉱床形成から長期間かけて空気に暴露されている状況である ため、反応鉱物は少なくなっていると考えられる。河川水質一斉観測による測定結果からも、 pHが低い範囲は坑道付近や御在所沼周辺と限定的であるため、実態とも違わないと考えられ る。

地下水位が低下した場合、反応範囲は地下水面に応じて拡大する傾向が見られた(図 2.2-78)。pHは、比表面積1/100ケースと比べると同程度である。実測の対策前のpHは、現在 (対策後)よりも低く1.5程度であったが、本検討における感度解析ではその傾向は確認できな かった。このことから、地下水面の変化だけでは、pHの差(対策前:1.5程度、現在:2.3程 度)を再現することが困難であると考えられる。現在の地下水面より下位の鉱体の不均質性や反 応速度の速い鉱物の分布等の検討が必要であると考える。

	フィッティング パラメータ (A/V)	主要反応系	鉱物分布	流動場
ベースケース	1 × 10 <sup>3.3</sup>	pyrite	鉱床胚胎層	対策後
比表面積 1/100	1 × 10 <sup>1.3</sup>	pyrite	鉱床胚胎層	対策後
比表面積 1/1,000	1 × 10 <sup>0.3</sup>	pyrite	鉱床胚胎層	対策後
pyriteと marcasite が混在	1 × 10 <sup>1.3</sup>	pyrite + marcasite	鉱床胚胎層	対策後
鉱物分布の変更	1 × 10 <sup>1.3</sup>	pyrite	鉱床胚胎層 (局所)	対策後
流動場(地下水面)の変更	1 × 10 <sup>1.3</sup>	pyrite	鉱床胚胎層 (局所)	対策前

表 2.2-41 感度解析における検討ケース一覧



図 2.2-72 概略モデルにおける地質断面図





図 2.2-74 反応鉱物係数 1/100 による水質場の状況



図 2.2-75 反応鉱物係数 1/1,000 による水質場の状況



図 2.2-76 pyrite と marcasite が共存した水質場の状況





## 2.2.4.4. 現況再現解析

再現解析では、2.2.3 章で構築を行った局所モデルを用いて実施した。図 2.2-79 に用いた解析モ デルの地質断面図を示す。

#### (1) 解析条件

## ① 対象期間

対策前の再現解析は、3m 坑が運用された昭和 26 年~昭和 45 年の凡そ 20 年間を対象とする。 また、対策後については、恒久排水路から新中和処理施設への導水が始まった昭和 59 年から水 量・水質が安定した凡そ 30 年間を対象とする。

# 2 降水

降水量は、流動場解析で用いたものと同等の降水量を使用した。降水に含まれる物質濃度は、 感度解析と同様にして、当該地域の地下水水質を使用した。2.2.4.3(1)①章を参照されたい。

#### ③ 分子拡散係数

感度解析と同様にして、溶液中の元素種によらず限りなく小さい値に設定した。

#### ④ 屈曲度·分散

感度解析と同様にして、分散長を考慮しないものとした。

#### ⑤ 固相の溶解速度式

固相の溶解反応を非平衡状態として取り扱う。本検討においては、鉱床胚胎層中に存在す黄鉄 鉱(pyrite)のみを採用した。pyriteの反応については、2.2.4.3(1)④章を参照されたい。

#### 6 鉄酸化速度式

Fe<sup>2+</sup>から Fe<sup>3+</sup>への速度式として、Singer と Stumm (Singer, P.C. and Stumm, W., 1970)の提唱した 1 次反応速度式を使用している。詳細については、2.2.4.3(1)⑤章を参照されたい。

#### ⑦ 初期条件

対策工前については、章で求めた平均的な気象条件を与えた対策前の流動場(空気相圧力、水 飽和率)を初期値として与えた。また、化学反応物質においては、感度解析と同様にして、正気 溶液組成を全域に与え、鉱床胚胎層に初期鉱物組成を与えた。

対策工後は、2.2.3 章で求めた対策後の平衡流動場を初期値として与え、化学反応場における初 期状態は、対策前の水質場を用いた。

#### ⑧ 境界条件

流動場における境界条件は、2.2.2.2(3)⑬章で述べた条件に準ずる。濃度場については、初期溶 液組成の濃度固定境界とした。また、流動場において不飽和ゾーンについては、酸素が十分にあ



ると仮定し、初期溶液組成の酸素濃度と常に平衡状態になるように設定した。

## (2) 解析結果

図 2.2-80 に対策前の pH、Fe<sup>2+</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>の水質場の状況を示す。白色の点線で示した地下水面より 上位の範囲のうち、上流側では pH が高く 6.0 近く、坑道付近から 3m 坑付近まで pH が 1.9~2.0 になっており、pH が低い状況となった。Fe<sup>2+</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>の分布は、pH の分布とも対応している。ま た、下流側の pH 4.0 程度の分布の広がりは、移流によって水質場の傾向が拡散しているためであ る。対策工前の坑廃水の pH は 1.5 程度であったのに対して pH は高い状況であるが、水質場の大 局的な傾向は捉えられている解析結果となった。

また、図 2.2-81 に対策後の水質場の状況を示す。濃淡 2本の白色の点線は地下水面を示し、濃 い白色の点線は対策後の地下水面、薄い白色の点線は対策前の地下水面を表す。水質場の初期状 態を図 2.2-80 の分布を用いて行ったものであるが、地下水面が上昇したことによって、地下水面 以下の水質場 (pH、Fe<sup>2+</sup>、SO4<sup>2-</sup>)は、濃度の低下がみられる。これは、地下水位が上昇に伴う酸 素の供給が少なくなったことによって、pyrite の溶解反応が制御されたためである。また、流動 場に従って、元の水質場は拡散される。実測では、対策後の坑廃水の pH は、2.3 程度まで上昇す るが、解析上、地下水面上位の水質場に大きな変動はない。実際には、鉱床胚胎層内の鉱物分布 や組成は不均質に分布していることが想定される。また、坑道掘削におけるずり等を経由して坑 廃水を形成しているため、定量的な議論を行うためには更なる情報の精緻化やモデリングによる 検討が必要である。



図 2.2-80 対策前の水質場の状況



図 2.2-81 対策後の水質場の状況

2.2.5. 鉱害防止対策工の検討及び効果予測解析

2.2.5.1. 鉱害防止対策工の基本検討及び効果解析検討ケースの抽出

坑廃水量削減に向けた対策工の具体的な検討と、その効果予測解析は、次年度に本格的な検討 を実施する予定である。2019年度に構築したモデルで対策工の水量・水質に対する効果を算出し、 次年度の予測解析が実施できることを確認する。以下の3つのケースの解析を実施する。なお、 これらの解析については2.2.3章で構築、及び解析を実施した局所モデルに、対策工モデルを組 み込む。

- ① 上流側の排水トンネル
- ② 赤川保全水路工(計画区間)
- ③ 赤川上流・支川の保全水路工

排水トンネルは、地下構造物が地下水の流れに与える影響を適切に評価できることの確認のため、実施した。また、保全水路工は、地表構造物を解析モデルに適切に組み込み、評価ができる ことの確認のために実施したものである。

#### 2.2.5.2. 鉱害防止対策工の効果予測解析

- (1) 鉱害防止対策工のモデル化
- ① 上流側の排水トンネル

採掘跡の上流側に排水トンネルを設け、採掘跡に流入する地下水量を低減する対策案である。 排水トンネルの設置箇所を図 2.2-82 に示す。坑道の上流側で浸透した地下水は、鉱床胚胎層中 を流れて、坑道へ達する。ここでは、鉱床胚胎層中を流れる地下水は、下位に分布する難透水岩 盤である下部溶岩との境界に沿って流動していることを想定し、坑道へ流入する地下水を捕捉す る。そのために、図 2.2-82 に示すように鉱床胚胎層の基底面標高 1,000 m に沿った南北に延びる 集水トンネル、赤川への排水を考慮した東西に延びる排水トンネルを設計する。トンネルの高さ を 5 m 程度とし、解析上、集水トンネル、及び排水トンネルに該当する格子を内部流出境界に設 定し、集水される水は速やかに系外に排水されるものとした。

降雨条件については、局所モデルと同じ平均的な降水量を与え、対策工による平衡状態を効果 予測の比較対象とした。

実際には、地下水が流れている箇所をボーリング調査等で把握した上で実際の施工時にも地質 と湧水状況を観察してトンネルの配置を修正する必要がある。また、旧松尾鉱山においては、地 下水位低下に伴う排水の強酸性化が予想されることから、解析モデルにおける水質変化の動作確 認を念頭に解析を実施する。



#### 図 2.2-82 排水トンネル設置箇所

## ② 赤川保全水路工(計画区間)

現在、赤川には坑道への河川水の伏没を防止するために水路保全工が施されている。昭和 47 年に対策の必要性が答申され、昭和 56 年に緊急施行区間が概成された。当初の計画区間では、 赤川上流端から元山堆積場付近までの流路延長 5,640 m であったが、特に伏没が顕著な 2,046 m が 施行された。本解析ケースでは、赤川の計画区間全てに水路保全工が施された場合の坑内排水量 について行う。図 2.2-83 に水路保全工の設置箇所を示す。赤川の水路保全工の計画区間について は、「北上川を清流に」(建設省東北地方建設局,昭和 57 年)を基に、設置箇所を決定した。水 路保全工として、河床には層厚 30 cm のコンクリート等の難透水素材で被覆することを想定とし た。解析上、河床に当たる格子の透水係数を 1×10<sup>-10</sup> m/s に設定した。降雨条件については、同 様にして平均的な降水量を与えた。



図 2.2-83 赤川保全水路工の追加設置箇所

# ③ 赤川上流·支川の保全水路工

赤川の上流域で浸透する水量を、水路保全工によって浸透量、つまり坑道へ向かう水量を低減 する対策工案である。坑道へ流入する水の多くは、赤川上流域で浸透するすることが示唆されて いることから、赤川上流・支川において浸透水を捕捉するため、図 2.2-84 のように赤川の上流・ 支川における 2 本の水路保全工設置による効果予測解析を行った。水路保全工は、②と同様にし て、河床には層厚 30 cm のコンクリート等の難透水素材で被覆することを想定とした。解析上、 河床に当たる格子の透水係数を 1×10<sup>-10</sup> m/s に設定した。降雨条件については、同様にして平均 的な降水量を与えた。



図 2.2-84 赤川支川の保全水路工の追加設置箇所

## (2) 解析結果

各対策工についての解析ケースに対する坑内排水量を表 2.2-42 に示す。局所モデルの同定値に よる坑内排水量の解析値 15.14 m<sup>3</sup>/min を比較対象として、上流側の排水トンネルを考慮したケー スの坑内排水量は 12.67 m<sup>3</sup>/min (16.3%減)、赤川保全水路工(計画区間)を考慮したケースの 坑内排水量は 15.05 m<sup>3</sup>/min (0.6%減)、赤川上流域(支川)の保全水路工を考慮したケースの坑 内排水量は 15.02 m<sup>3</sup>/min (0.7%減)であった。

上流側の排水トンネルによる解析ケースでは、排水トンネルの設置によって、約 2.5 m<sup>3</sup>/min の 坑内排水量が低減する結果となった。ただし、実際に排水トンネルを設ける場合には、2019 年度 のボーリングで調査された地下水の水質、pH 3.0 程度の地下水が排水されることが予想される。

次に、赤川保全水路工を当初計画どおり施行した場合には、現況より約 0.1 m<sup>3</sup>/min 程度の坑廃 水の低減が図れることになった。ただし、既施工範囲が 2,046 m で一定の効果があったことに比 べると、計画区間全て(5,640 m)を施行することは効率がよいとはいえないと考えられる。図 2.2-85 に示す浸透確率においても、赤川保全水路工(計画区間)を設置する区間からの浸透は比 較的少ないことが分かる。また、赤川上流・支流の保全水路工(総延長 800 m)に対する効果は、 0.7%の坑内排水量減であった。この区間は河川の幅も狭く、距離当たりの工費も少なく済むと みられるため、本川の保全水路工よりは費用対効果が良くなるとみられる。

これらの対策工を想定した解析モデルによって、対策工による効果(坑内排水量の減少)を算 出することができた。よって、解析モデルに対策工を組み込むことで、水量に対する効果を評価 できる見込みが立てられた。

解析ケース	坑内排水量(m <sup>3</sup> /min)	現況からの減少割合
現況	15.14	_
排水トンネル	12.67	16.3 %減
赤川保全水路工(計画区間)	15.05	0.6 %減
赤川上流域の保全水路工	15.02	0.7 %減

表 2.2-42 鉱害防止対策工ケースによる坑内排水量の比較



図 2.2-85 対策工案と浸透確率分布の対比

#### 2.2.5.3. 鉱害防止対策工の水質変化予測解析

前述の対策工案のうち、上流側の排水トンネルを実施したケースに関して、水質場の変化について、解析を行った。解析条件については、2.2.4.4(1)章に示す水量・水質シミュレーションの現況再現に用いた各種条件に準ずる。水質場の初期条件は、図 2.2-81 に示した対策工後(現況)の水質を使用した。図 2.2-86 に排水トンネルを考慮した対策工による水質場の状況(pH、Fe<sup>2+</sup>、SO4<sup>2-</sup>)を示す。現況ケースの水質場に対して、対策工の解析ケースの pH、Fe<sup>2+</sup>、SO4<sup>2-</sup>の坑道付近の分布には大きな変化は見られなかった。これは、排水トンネルが坑道付近の地下水の変動に与える影響が小さいことから坑廃水の水質には変化が見られなかったものと考えられる。排水トンネルが位置している箇所は、鉱床胚胎層内部に位置しており、解析における水質は pH 2.1 である。上述したように、実際には、2019年度のボーリングで調査された地下水の水質、pH 3.0 程度の地下水が排水されることになると考えられる。水質の場合、赤川に放流することができず、有効な対策工ではないと考えられる。観測との不整合については、鉱物の反応速度パラメータが実際より大きいことが一因であると考えられる。

本解析ケースにおいては、排水トンネル地点の水質は 2019 年度ボーリングの観測結果よりも pH が低くなる可能性も示唆された。解析モデルの反応速度パラメータや鉱床分布については、 今後検討を行う余地があるが、水質シミュレーションモデルを用いて、坑道付近の水質場、排水 トンネル地点の水質について算出できた。実際には、排水トンネル地点の地質分布や、流動経路 上の鉱床分布、反応速度には不確実な要素が含まれる。次年度の検討においては、幅広い対策工 効果予測解析についても扱う予定であるが、不確実性を考慮したモデル構築や、より詳細な水 量・水質シミュレーションを実施する予定である。



図 2.2-86 上流側の排水トンネル設置による水質場の状況

#### 2.2.6. 参考文献

#### 2.2.6.1. 文献一覧

- Chambers, D., Gooddy, D.C. and Binley, A, 2019. Use and Application of CFC-11, CFC-12, CFC-113 and SF6 as Environmental Tracers of Groundwater Residence Time: A Review. Geosci. Front., 10(2019), pp. 1643-1652.
- D. L. Parkhurst and C. A. J. Appelo, 2013. Description of Input and Examples for PHREEQC Version 3--A Computer Program for Speciation, Batch-Reaction, One-Dimensional Transport, and Inverse Geochemical Calculations, U. S. Geological Survey.
- Enbrionmental Protection Agency. U. S., National Expoure Research Laboratory and Ecosystems Research Division. 1998. Minteqa2/prodefa2, geochemical assessment model for environmental systems: user manual supplement for version 4.0. Athenas, Georgia, USA.
- 4) Gaylon. S. Campbell, J. M. Norman, 1998. An Introduction to Environmental Biophysics, Springer.
- 5) Hamon, W. R., 1961. Estimating potential evapotranspiration, Journal of the Hydraulics Division, ASCE, 87 (HY3), 107-120.
- 6) H. Tosaka and Y. Matsumoto, 1987. An Efficient Reservoir Simulation by The Successive Explicitization Process, Journal of the Japanese Association for Petroleum Technology Vol.52, No.4.
- 7) H. Tosaka, K. Itoh and T. Furuno, 2000. Fully coupled formulation of surface flow with 2-phase subsurface flow for hydrological simulation, Hydrological Processes, 14, 449-464.
- IAEA, 2006. IAEA Guidebook on the use of chlorofluorocarbons in hydrology. Technical Report Series, No.438, p 277.
- 9) Koji Mori, Kazuhiro Tada, Yasuhiro Tawara, Koichi Ohno, Mari Asami, Koji Kosaka and Hiroyuki Tosaka, 2015. Integrated watershed modeling for simulation of spatiotemporal redistribution of postfallout radionuclides: Application in radiocesium fate and transport processes derived from the Fukushima accidents, Environmental Modelling & Software, 72, 126-146.
- Lowe, P. R., 1977. An approximating polynomial for the computation of saturation vapor pressure, J. Appl. Meteor. 16, 100-103.
- Morgan R. P. C., Quinton J. N., Smith R. E., Govers G., Poesen J. W. A., Auerswald K., Chisci G., Torri D., Styczen M. E., Folly A. J. V., 1998. The European soil erosion model (EUROSEM): documentation and user guide, Silsoe College, Cranfield University.
- Nash JE, Sutcliffe JV. 1970. River flow forecasting through conceptual models: Part I. A discussion of principles. Journal of Hydrology 10(3):282–290
- Singer, P.C. and Stumm, W. 1970. Acidic mine drainage: the rate-determining step. Science, 167(3921), 1121-3.
- 14) Williamson, M. A. and Rimstidt, J. D. 1994. The kinetics and electrochemical rate-determing step of aqueous pyrite oxidation. Geochimica et Cosmochimica Acta, 58(24), 5443-5454.
- 15) 浅井和由, 辻村真貴, 2010. トレーサーを用いた若い地下水の年代推定法-火山地域の湧水への CFCs 年代推定法の適用-. 日本水文科学会誌, 39, pp. 67-78.

- 16) 浅野智子, 芝野博文, 田中延亮, 大川あゆ子, 浅井和由, 2011. フロン類をトレーサに用いた西達 布川源流湧水の平均滞留時間推定. 演習林(東大), 50, pp. 41-48.
- 17) 新井正著, 2004. 地域分析のための熱・水収支水文学, 古今書院.
- 18) 一柳錦平,田上雅浩,2016.日本全域における降水の安定同位体比-2013 年集中観測の結果より-.日本水文科学会誌,46(2),pp.123-138.
- 19) 風早康平,安原正也,1999. 岩手火山の地下水流動系-同位体水文学的手法による予察結果-.
   月刊地球,21(5), pp. 290-295.
- 20) 建設省河川局監修,日本河川協会編,1997. 建設省河川砂防技術基準(案) 同解説 調査編,山海堂.
- 21) 近藤純正, 1994. 水環境の気象学--地表面の水収支・熱収支--, 朝倉書店.
- 22) 森林水文学編集委員会編, 2007, 森林水文学 森林の水のゆくえを科学する, 森北出版.
- 23) 地下水ハンドブック編集委員会, 1979. 地下水ハンドブック, 建設産業調査会.
- 24) 塚本良則編, 2006, 森林水文学, 文永堂出版.
- 25) 土木学会, 1999. 水理公式集 平成 11 年版.
- 26) 檜山哲哉, 阿部理, 栗田直幸, 藤田耕史, 池田健一, 橋本重将, 辻村真貴, 山中勤, 2008. 水の酸素・水素安定同位体を用いた地球水循環研究と今後の展望. 水文・水資源学会誌, 21(2), pp. 158-176.
- 27) 藪崎志穂,田瀬則雄,辻村真貴,林陽生,2008. 筑波山南斜面における降水の安定同位体比特性. 筑波大学陸域環境研究センター報告,9, pp. 15-23.

## 2.3. 坑廃水発生の水質予測モデルの構築

## 2.3.1. 昨年度の検討内容及び課題

#### 2.3.1.1. 旧松尾鉱山における酸性坑廃水生成シミュレーション及び将来予測モデルの検討

旧松尾鉱山における酸性坑廃水(pH~2.3、鉄(Fe)濃度~190 mg dm<sup>-3</sup>、ヒ素(As)濃度~0.9 mg dm<sup>-3</sup>)の発生シミュレーションモデルを構築するために、黄鉄鉱の溶出試験を実施し統合型水循環シ ミュレーションシステム GETFLOWS に組み込む溶解速度定数を決定した。また、坑廃水モニタ リングデータを解析することで、今後必要となる坑廃水の処理期間を算出した。

## (1) 黄鉄鉱の溶解モデルの検討

酸性坑廃水生成に関与する主要鉱物を特定するために、旧松尾鉱山にて採取した2種類の鉱石 試料を蛍光X線(XRF:X-ray Fluorescence)及び粉末X線回折(XRD:X-ray Diffraction)で分析し、 全岩化学組成及び鉱物組成を決定した。その結果、硫黄(S)が66~74 wt.%、Fe が9~14 wt.%含ま れており、主要硫化鉱物は黄鉄鉱(FeS<sub>2</sub>)であることが分かった。

この鉱石試料の分析結果をもとに、黄鉄鉱標本を用いて超純水に対する浸出実験を実施し黄鉄 鉱の溶解速度を決定した。粉末化(<2 mm)した黄鉄鉱を超純水とビーカー内で最大 9 時間反応さ せたところ、開始後 5 分で急激に Fe 及び硫酸イオン(SO4<sup>2-</sup>)濃度が 25 mg dm<sup>-3</sup>、50 mg dm<sup>-3</sup>まで溶 出し、その後は緩やかに増加した。濃度値に対するフィッティングから黄鉄鉱の溶解速度定数(*k*) を算出した。その結果、*k*=10<sup>-9 30</sup> となり、過去の文献で報告されている値(*k*=10<sup>-10 19</sup>)(Williamson and Rimstidt, 1994)よりもかなり大きな値を示した。これは実験前の黄鉄鉱試料表面に硫酸鉄など の二次鉱物が大量に生成しており、その影響で黄鉄鉱の溶解が促進されたためだと考えられる。 実際、浸出試験に供した黄鉄鉱標本表面の硫黄種を X 線光電子分光(XPS: X-ray Photoelectron Spectroscopy)で分析したところ、実験前の試料表面に大量の硫酸鉄(FeSO4)が生成していることが わかった。

今年度はまず、実験に使用する鉱物表面の化学状態を復元する前処理方法を検討し、黄鉄鉱の 溶出速度を再評価した。また、超純水だけでなく模擬地下水でも溶出実験を実施し、黄鉄鉱に加 えて白鉄鉱と磁硫鉄鉱の溶解速度も評価した。この結果を今年度採取したボーリングコアの観察 結果と合せて評価することで、旧松尾鉱山における酸性坑廃水発生に関わる詳細な化学反応メカ ニズムについても検討した。

#### (2) 旧松尾鉱山における酸性坑廃水の水質将来予測

1982 年 4 月から 2017 年 3 月までの水量(m<sup>3</sup>/min)、鉄(Fe)・ヒ素(As)・アルミニウム(Al)濃度 (mg/dm<sup>3</sup>)と pH の測定値の月測定値を解析し、各成分が一律排水基準値を下回るまでに必要な年 数を算出した。測定データをから鉱山が有する溶出金属ポテンシャル量(鉱物種)を算出し、一次 反応曲線に従って減衰すると仮定して将来における濃度推移を算出した(Koide et al., 2012)。pH に ついては、取得した水質化学組成を PHREEQC に入力し、算出された SO<sub>4</sub><sup>2</sup>濃度をもとに計算し た。解析の結果、Fe は 2,171 年、As は 2,108 年、pH は 2,234 年に一律排水基準値を下回ると予 想される。また、95%信頼区間を導入した場合、Fe は 2,095~5,260 年、As は 2,078~2,190 年、 pH は 2,150~2,971 年の範囲となることが分かった。この結果から、旧松尾鉱山の酸性坑廃水処 理は95%の確率で最短で2,150年、最長で5,260年まで継続する必要があることがわかった。

昨年度の検討方法では坑廃水量はほぼ変動しないと仮定して、データ保有期間の平均流量値を 使用した。しかし実際には融雪や豪雨など鉱山付近の気象現象に応じて坑廃水の水量は大きく変 動し、それに伴って水質も変化すると予想される。本年度は坑廃水の日水量変動を考慮したモデ ルを作成し、水量変動が坑廃水処理の予測期間に与える影響を評価した。

- 2.3.2. 旧松尾鉱山における坑廃水発生モデル及び将来予測モデルの構築
- 2.3.2.1. 溶出試験に基づく各種硫化鉱物の溶出速度の評価
- (1) 硫化鉱物の前処理方法ならびに溶出実験の最適条件の検討

黄鉄鉱粒子表面に生成する酸化物、水酸化物、硫酸化物、単体硫黄(S<sup>0</sup>)等の二次鉱物を除去し、 黄鉄鉱表面の化学状態を復元する前処理方法を検討した。まずは黄鉄鉱を塩酸で洗浄し、酸化物、 水酸化物、硫酸化物を除去した(Moses and Herman, 1991)。粉砕・篩分け(106-150 μm)した黄鉄鉱 30 gを 500 mdm<sup>3</sup>ビーカーに入れ、6 M HClを 300 mdm<sup>3</sup>加えて 80 ℃まで加温して 20 分間攪拌し た。その後、容器を室温まで冷やし 0.1 μm のメンブレンフィルターで残渣を回収した。次に単体 硫黄やその他疎水性の化合物を除去するために、残渣をアセトンで洗浄した(Moses and Herman, 1991)。ろ過後の残渣に 10%アセトン(1 dm<sup>3</sup>)を加えて 5 分間攪拌し、0.1 μm のメンブレンフィルタ ーで残渣を回収した。それらを凍結乾燥機で 24 時間乾燥させたものを溶出試験に供した。洗浄 処理後の試料を XPS で分析したところ、99%以上が硫化物で硫酸塩は殆ど存在しないことが分か った。したがって、今回検討した前処理方法を適用することで黄鉄鉱表面の二次鉱物を除去し、 その化学状態を十分に復元できることが分かった。

前処理した黄鉄鉱試料を使用して、超純水に対する溶出実験を行った。PTFE チューブ(50 mdm<sup>3</sup>)に 30 mdm<sup>3</sup>の超純水を加え、乾燥後の試料を 1 g 加えて 150 rpm で振とうした。振とう時間 ごとに各バッチ系を作成し、最大 24 時間反応させた。振とう後、溶液の pH、溶存酸素濃度(DO) を測定し、濾液(<0.1  $\mu$ m)中の全 Fe 濃度を誘導結合プラズマ質量分析計(ICP-MS : Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry)で、SO4<sup>2</sup>濃度をイオンクロマトグラフィー(IC : Ion chromatography)で測定した。また再現性を担保するために、各条件 2 回ずつ実験を行い、解析に はその平均値を使用した。

黄鉄鉱溶解モデルを構築するにあたり、考慮した元素及びそのイオン種を表 2.3-1 に示す。また、考慮した沈殿種を表 2.3-2 に示す。データベースは PHREEQC 内に収納されている MINTEQ.v4.dat を使用した(Allison et al., 1998)。

元素	イオン種
Fe <sup>2+</sup>	$Fe^{2+}$ , $FeSO_4^0$ , $FeOH^+$ , $Fe(OH)_2^0$ , $Fe(OH)_3^-$ , $FeSO_4^0$
Fe <sup>3+</sup>	$Fe^{3+}$ , $FeOH^{2+}$ , $Fe(OH)_2^+$ , $Fe(OH)_3^0$ , $Fe(OH)_4^-$ ,
	$Fe_2(OH)_2^{4+}$ , $Fe_3(OH)_4^{5+}$ , $FeSO_4^+$ , $Fe(SO_4)_2^{-1}$
SO <sub>4</sub>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> 、HSO <sub>4</sub> -

表 2.3-1 FeS2 溶出モデルに考慮した元素とそのイオン種

#### 表 2.3-2 FeS2 溶出モデルに考慮した沈殿種

沈殿種	反応式	Log_K
Fe(OH) <sub>3</sub> (ferrihydrite)	$Fe(OH)_3 + 3H^+ \rightleftharpoons Fe^{3+} + 3H_2O$	3.191

黄鉄鉱の溶解により溶液中に溶出する Fe<sup>2+</sup>の酸化速度式は以下(2.3.1)にように定義した(Singer and Stumm, 1970)。

$$\frac{d[Fe(II)]}{dt} = -(k_1 + k_2[OH^-]^2 P_{O2})[Fe(II)]$$
(2.3.1)

ただし、[Fe(II)]は Fe<sup>2+</sup>の活量、[OH<sup>-</sup>]は水酸化物イオンの活量、 $P_{02}$ は酸素分圧、 $k_1$ 及び  $k_2$ は速度定数を表している。 $k_1 \ge k_2$ は理論値として  $k_1=2.91\times10^{-9}$ 、 $k_2=1.33\times10^{12}$ と定義されている(Singer and Stumm, 1970)。

また、黄鉄鉱の溶解速度式は以下の式(2.3.2)のように定義した(Williamson and Rimstidt, 1994)。

$$R = k_3 \left(\frac{A}{V}\right) \left(\frac{m}{m_0}\right)^n [DO]^a [H^+]^b$$
(2.3.2)

 $k_3$ は黄鉄鉱の溶解速度定数、Aは黄鉄鉱の比表面積(cm<sup>2</sup>/g)、Vは反応溶液の体積(cm<sup>3</sup>)、 $m_0$ は黄 鉄鉱の初期量(mol)、mは反応後の黄鉄鉱の量(mol)、nは形状係数、[DO]及び[H<sup>+</sup>]は溶液中の溶存 酸素濃度及び水素イオン濃度(mol/dm<sup>3</sup>)を表している。ここで[DO]及び[H<sup>+</sup>]の次数 a 及び b は文献 値(a=0.5、b=-0.11)を使用した(Williamson and Rimstidt, 1994)。また、比表面積は同文献を参考に粒 径から 0.04 m<sup>2</sup>/g と仮定した。

実験値に対するフィッティングから速度定数 k3 を決定した(図 2.3-1)。その結果、k3=10<sup>-10 19</sup>となり、同条件で実験を行った文献値(10<sup>-10 19</sup>)(Williamson and Rimstidt, 1994)と同じになることが確認された。この値は昨年度の実験値(10<sup>-9 30</sup>)より小さく、二次鉱物が存在することで黄鉄鉱の溶解速度が過大評価されるため前処理操作による鉱物の化学状態の復元が必要であることがわかった。ここで確立した方法に準じて、以下、模擬地下水中での黄鉄鉱、白鉄鉱、磁硫鉄鉱の溶解実験を実施した。



図 2.3-1 前処理の有無による超純水への黄鉄鉱溶解試験結果の比較

## (2) 模擬地下水に対する各種硫化鉱物溶出速度モデルの構築

## 黄鉄鉱

前項(1)で確立した実験方法を適用して、模擬地下水中における黄鉄鉱反応速度式の速度定数 (k4)を決定した。実験に使用した模擬地下水の組成は表 2.3-3 のように決定した。模擬地下水の調 製にはNaHCO3、KCl、CaSO4・H2O、MgCl2(特級以上)を使用し、それらを超純水に溶解してHCl で pH を 6 に調整した。

μU	Concentration (mmol dm <sup>-3</sup> )							
рп	Fe	Na	K	Ca	Mg	Cl	SO4 <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> -
6.0	0.0	0.091	0.0077	0.042	0.025	0.15	0.042	0.18

表 2.3-3 本研究で作成した模擬地下水の組成

黄鉄鉱溶解モデルの構築にあたって考慮した元素及びそのイオン種、沈殿種や鉄酸化速度モデルは前項(1)と同様のものを使用した。黄鉄鉱の溶解反応速度式は超純水系で使用したものと同じ式を使用し、実験値に対するフィッティングから反応速度定数 k4を求めた(図 2.3-2)。その結果、 模擬地下水における黄鉄鉱の溶解速度反応定数 k4 は 10<sup>-10 45</sup> となり、超純水系における速度定数 (k3=10<sup>-10 19</sup>)よりもわずかに小さくなることが確認された。これは模擬地下水中に溶存する炭酸水 素イオンの緩衝作用や Ca 等の陽イオンの吸着反応の影響が考えられる。



図 2.3-2 模擬地下水を用いた黄鉄鉱の浸出試験結果

# 2 白鉄鉱

黄鉄鉱の多形である白鉄鉱(marcasite、FeS<sub>2</sub>)についても同様の実験を行い、模擬地下水中にお ける溶解速度定数( $k_5$ )を決定した。実験方法及び溶解反応速度式は黄鉄鉱と同様のものを使用し た。[DO]及び[H<sup>+</sup>]の次数 a 及び b は文献値(a=0.45、b=-0.02)を使用した(Asta et al., 2010)。模擬地下 水に対する白鉄鉱標本の浸出試験の結果及び、フィッティング結果を図 2.3-3 に示す。この結果 から、白鉄鉱の溶解反応速度定数  $k_5$  は 10<sup>-8 85</sup> となり、黄鉄鉱( $k_4$ =10<sup>-10 45</sup>)よりかなり大きくなった。 これは白鉄鉱の結晶構造(orthorhombic crystal)が黄鉄鉱(cubic crystal)に比べて不安定であることが 理由で(Asta et al., 2010)、より溶けやすい白鉄鉱が存在する場合、その量が少なくても坑廃水の生 成機構において関与が大きいと考えられる。



#### 図 2.3-3 模擬地下水を用いた白鉄鉱の浸出試験結果

## ③ 磁硫鉄鉱

黄鉄鉱、白鉄鉱に加えて、磁硫鉄鉱(Pyrrhotite、Fe<sub>1-x</sub>S、x=0-0.17)についても実験を行い、模擬 地下水中の溶解反応速度定数を求めた。磁硫鉄鉱は酸に対する反応性が高く溶解しやすいため、 試料の前処理は加温せず室温で実施した。磁硫鉄鉱中組成は溶液中のFeとSの比率から推測し、 Fe:S=1:1 (x=0)として取り扱った。模擬地下水に対する磁硫鉄鉱の浸出試験の結果及び、フィッテ ィング結果を図2.3-4に示す。Fe濃度及びpH結果へのフィッティングから求めた模擬地下水中の 磁硫鉄鉱の溶解速度定数 k<sub>6</sub>は、10<sup>-1061</sup>となった。この値は白鉄鉱と比較して 2-3 桁程度小さく、 黄鉄鉱と近い値である。ただし、磁硫鉄鉱は結晶構造中に多くの格子欠損(vacancy defect)を有す るため、見かけ上は白鉄鉱と同程度の濃度で Fe が溶出するが、粒子の比表面積が同粒径の黄鉄 鉱・白鉄鉱よりも 50 倍程度大きくなり速度定数もかなり小さくなったと考えられる(Janzen et al., 2000)。



図 2.3-4 磁硫鉄鉱を用いた浸出試験結果

## (3) 溶出試験結果のまとめ

本研究では、旧松尾鉱山の坑廃水に含有される鉄のポテンシャルとなる3種類の硫化鉱物(黄鉄 鉱、白鉄鉱、磁硫鉄鉱)について、溶出実験結果に基づき模擬地下水に対する溶解速度定数を決 定した。まず、黄鉄鉱を酸及びアルコールで洗浄し鉱物表面に生成する二次鉱物を除去した後、 超純水及び旧松尾鉱山周辺の地下水を模擬した溶液中で反応させて速度定数を算出した。その結 果、超純水と模擬地下水を用いた際の黄鉄鉱の溶解速度定数はほぼ同程度になったが、模擬地下 水を用いたほうがわずかに小さくなった(超純水:k3=10<sup>-10 19</sup>、模擬地下水:k4=10<sup>-10 45</sup>)。これは模擬 地下水中に溶存する炭酸水素イオンの緩衝作用やその他の陽イオンとの相互作用が影響し、溶解 反応が抑制されたためだと考えられる。また同様に、模擬地下水に対する白鉄鉱と磁硫鉄鉱の溶 解速度定数も求めたところ、

# 白鉄鉱 (10<sup>-8 85</sup>) >> 黄鉄鉱(10<sup>-10 45</sup>) > 磁硫鉄鉱(10<sup>-10 61</sup>)

となった。この結果から、鉱床胚胎層中の黄鉄鉱が白鉄鉱に置換されている場合、その存在量が 微量である場合でも坑廃水の生成に一定の影響を及ぼしている可能性が考えられる。また磁硫鉄 鉱の溶解速度は白鉄鉱と比べて2桁程度小さいものの、その結晶特性から反応性が黄鉄鉱よりも 高いと考えられる。 2.3.2.2. ボーリングコア観察に基づく旧松尾鉱山坑廃水生成プロセスの検討

2019年8月~10月にかけて鉱床胚胎層を含む深度110mまでのボーリングコアを図2.3-5の地 点で採取した。回収されたコアの異なる深度(19.7m、28.5m、32.5m、35.0m、39.5m、47.4m、 52.5m、54.8m、58.5m、67.0m、72.0m、73.5m、78.5m、81.0m、84.2m、84.5m、84.7m、93.5 m)から計18試料を採取し、全岩化学組成分析及び顕微鏡観察に供した。観察に基づき、硫化鉱 物の空間分布や存在量、Asの形態を把握し、旧松尾鉱山坑廃水生成プロセスについて推察した。



図 2.3-5 ボーリング調査地点

## (1) 全岩化学組成分析結果

採取した試料を粉砕(<1 mm)した後、全岩化学組成を蛍光 X 線分析計(XRF)で測定した。得られ た元素組成をもとに造岩鉱物組成を算出したところ(表 2.3-4)、大部分は SiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> であること が分かった。FeS<sub>2</sub>の割合は 32m 以深より徐々に増加し、52.5 ~73.5 m では最大 68.5 wt.%まで増 えた。それより以深の 72 ~82 m では単体硫黄が多く、78.5 m では 77.3 wt.%まで増加した。84.2 m 以深では再び黄鉄鉱や単体硫黄の存在割合が低くなることから、このコアの鉱床胚胎層に当た る深度は約 50~80 m であると推察される。この結果は過去のボーリング調査で得られた結果と 一致している(鈴木, 1952)。

深度	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeS <sub>2</sub>	FeAsS	Sulfur
[m]	[wt.%]	[wt.%]	[wt.%]	[wt.%]	[wt.%]	[wt.%]
19.7	68.0	23.4	23.4	5.5	0.0	0.0
28.5	64.9	28.7	28.7	4.0	0.0	0.0
32.5	62.9	17.6	17.6	13.8	0.0	0.0
35.0	71.3	12.0	12.0	12.2	0.1	0.0
39.5*	75.1	0.4	0.4	18.8	0.3	0.0
47.4	79.0	0.6	0.6	8.7	0.2	11.6
52.5*	55.5	0.1	0.1	38.1	0.3	0.0
54.8*	77.2	0.2	0.2	10.7	0.2	11.7
58.5*	39.6	0.0	0.0	48.4	0.3	0.0
67.0*	27.5	0.3	0.3	68.5	0.2	0.0
72.0*	62.1	0.3	0.3	17.7	0.3	19.6
73.5*	4.8	0.1	0.1	63.1	1.8	29.3
78.5*	17.6	0.1	0.1	4.8	0.2	77.3
81.0*	50.9	0.8	0.8	8.1	0.2	40.0
84.2*	90.0	1.7	1.7	6.2	0.0	0.0
84.5	64.2	28.6	28.6	3.2	0.0	0.0
84.7*	71.9	20.8	20.8	2.4	0.0	0.0
93.5*	70.6	18.9	18.9	2.8	0.0	0.0

表 2.3-4 ボーリング試料の XRF 分析結果に基づく鉱物組成計算結果

\*:研磨片を作成した試料を採取した深度

# (2) コア研磨片観察結果

表 2.3-4 に示した 12 試料について未粉砕試料を用いて研磨片を作成し、反射顕微鏡及び走査型 電子顕微鏡(SEM-EDS)で鉱物組織を観察した。この方法では XRD では判別の難しい黄鉄鉱、白 鉄鉱、磁硫鉄鉱、硫砒鉄鉱の存在量を定性的に把握することができる。各種鉱物は以下表 2.3-5 のような光学的な特徴を示すことから、各々に適した分析を選択して実施した。

	黄鉄鉱	白鉄鉱	磁硫鉄鉱	硫砒鉄鉱
化学組成	FeS <sub>2</sub>	$FeS_2$	Fe <sub>1-x</sub> S	FeAsS
			(x=0-0.17)	
反射色	クリーム黄色	クリーム黄色~	灰褐~	ഥ~
		带褐黄白色	クリーム褐色	クリーム白色
多色性	×	0	$\odot$	0

表 2.3-5 各種硫化鉄鉱物の特徴

判定方法	反射顕微鏡	
	SEN	1-EDS

はじめに、反射顕微鏡を用いて黄鉄鉱及び白鉄鉱の存在を確認した。図 2.3-6 (a)(b)に示したように、黄鉄鉱、白鉄鉱は顕微鏡下では異なる色を示す。作成した 12 地点の研磨片を観察し、代表的な視野を(c)~(n)に示した。この観察から、鉱床胚胎層の鉱石の大部分は黄鉄鉱によって構成されているが、深度 75 m 以浅では一部白鉄鉱に鉱化している箇所が見つかった。75 m 以深では白鉄鉱はほとんど観察されなかった。



図 2.3-6 (a) 黄鉄鉱(b) 白鉄鉱の標準試料、(c)~(n) ボーリングコア研磨片の反射顕微鏡像

次に同じ研磨片を使用して SEM-EDS により、磁硫鉄鉱・硫砒鉄鉱の含有の有無の観察と各鉱

物の As 濃度測定を実施した。全岩化学組成(表 2.3-4)から鉱床胚胎層に位置すると考えられる深 度 52.5 m、67.0 m、72.0 m、84.7 mの試料の SEM 観察画像を図 2.3-7、図 2.3-8、図 2.3-9、図 2.3-10 に示す。通常、磁硫鉄鉱と硫砒鉄鉱は反射電子像で観察した場合、他の硫化鉱物より強い放出信 号強度で明るく観察される。深度 67.0 m から採取したコア試料では磁硫鉄鉱もしくは硫砒鉄鉱の 何れかの鉱物の存在が確認された。EDS による元素分析の結果、この鉱物には As は含まれてい ないため磁硫鉄鉱と同定される(表 2.3-6)。同様に他深度の試料についても観察・分析を進めたが、 硫砒鉄鉱の存在は確認されなかった。

反射顕微鏡で黄鉄鉱及び白鉄鉱を確認された箇所に対して EDS で As の含有量を分析した結果、 深度 52.5 m の試料の白鉄鉱に 2.6 wt.%の As が含まれていることがわかった。これは XRF による 分析結果(<0.3 wt.% as FeAsS)よりもかなり高い値である。また、深度 84.7 m の試料の黄鉄鉱には 0.3 wt.%の As が含まれていた。この深度では XRF による分析では As は検出されなかったが、 EDS で分析することで黄鉄鉱中にわずかに As が含まれていることが分かった。この結果から、 鉄二硫化鉱物中に As が含まれており、特に鉱床胚胎層浅部の白鉄鉱中に As が濃集していること が明らかとなった。



図 2.3-7 52.5 m 地点試料の(a)SEM 画像及び(b)分析ポイント



図 2.3-8 67.0 m 地点試料の(a)SEM 画像及び(b)分析ポイント



図 2.3-9 72.0 m 地点の試料の(a)SEM 画像及び(b)分析ポイント



図 2.3-10 84.7 m 地点の試料の(a)SEM 画像及び(b)分析ポイント

	A 2.5 0 SER			
分析ポイント	深度	S	Fe	As
_	[m]	[wt.%]	[wt.%]	[wt.%]
ポイント①	52.5	45.7	39.3	2.6
ポイント②	67.0	51.3	43.9	<0.1
ポイント③	67.0	43.9	54.5	<0.1
ポイント④	67.0	18.9	29.9	<0.1
ポイント⑤	72.0	99.9	<0.1	<0.1
ポイント⑥	72.0	54.3	39.7	1.0
ポイント⑦	84.7	26.8	23.8	0.3

表 2.3-6 SEM-EDS の各ポイントの分析結果

## 2.3.2.3. 水量日変動を考慮した旧松尾鉱山の酸性坑廃水発生予測モデルの検討

旧松尾鉱山で発生する酸性坑廃水の水質変動シミュレーションにおいて、昨年度の解析では坑 廃水量はほぼ変動しないと仮定して、平均水量値(データ保有期間分)を使用した。しかし実際に は融雪や豪雨など鉱山付近の気象現象に応じて坑廃水の水量は大きく変動し、それに伴って水質 も変化すると予想される。そこで今年度は坑廃水の日水量変動を考慮した解析を行い、水量変動 が坑廃水処理の予測期間に与える影響を調べた。その際、タンクモデルを使用して鉱山付近の降 水量から坑廃水の水量変動を予測可能なモデルを確立し、実測値と計算値を比較することでその 妥当性を評価した。そして、将来の降水値データを用いて坑廃水水量及び水質変動を予測し、坑 廃水処理が必要となる期間を算出した。

# (1) 使用したタンクモデル概要

本研究では、旧松尾鉱山を図 2.3-11 に示すような 3 段直列タンクとして取り扱った。上段タン クは鉱山付近の雨水・融雪水の表面流出と内部への浸透(蒸発散は考慮していない)、中段は鉱 山内部の表層流出及びさらに深部への浸透、下段タンクは深部地下水に対応させている。

なお、集水域への降水について蒸発散は考慮しないものとする。



図 2.3-11 本研究で使用したタンクモデルの概要図

ある時刻 t において、各タンクにおける流出量と浸透量の関係を表す式は次式(2.3.3)及び式 (2.3.4)で表される。

$$\frac{dx_{s}[t]}{dt} = Sr[t] - Q_{sF}[t] - Q_{so}[t]$$

$$\frac{dx_{o}[t]}{dt} = Q_{so}[t] - Q_{oF}[t] - Q_{ou}[t]$$
(2.3.3)
$$\frac{dx_u[t]}{dt} = Q_{ou}[t] - Q_{uF}[t]$$

$$Q_{SF}[t] = a_{SF}(x_S[t] - b_S)$$

$$Q_{so}[t] = a_{so}x_S[t]$$

$$Q_{oF}[t] = a_{oF}(x_o[t] - b_o)$$

$$Q_{ou}[t] = a_{ou}x_o[t]$$

$$Q_{uF}[t] = a_ux_u[t]$$
(2.3.4)

ここで、 $x_s[t]$ 、 $x_o[t]$ 、 $x_u[t]$ はそれぞれ表面、表層、地下水層タンクの貯留高、 $a_{sF}[t]$ 、  $a_{oF}[t]$ 、 $a_{uF}[t]$ はそれぞれ表面、表層、地下水層タンクからの流出係数、 $a_{so}[t]$ 、 $a_{ou}[t]$ は表層及 び表層タンクの流出係数、 $b_{so}[t]$ 、 $b_{ou}[t]$ は表層及び表層タンクの流出孔の高さ、Sは集水域、r[t]は入力降水、 $Q_{sF}[t]$ 、 $Q_{oF}[t]$ 、 $Q_{uF}[t]$ はそれぞれ表面、表層浸透、地下水流出量、 $Q_{so}[t]$ 、 $Q_{ou}[t]$ は下段タンクへの浸透流出量、 $a_i$ は孔係数である。また、地下水層タンクの流出孔については、 地下水層の貯留量に比例して流出すると仮定した。

今回、旧松尾鉱山の坑道掘削範囲約 3.8 km<sup>2</sup>を集水域 S とし、各タンクの流出係数(a<sub>s</sub>[t]、 a<sub>o</sub>[t]、a<sub>u</sub>[t])及び浸透係数(a<sub>so</sub>[t]、a<sub>ou</sub>[t])をフィッティングパラメーターとして取り扱った。な お、鉱山掘削範囲外からの地下水の流入も考えられるが、本解析では鉱山掘削範囲を集水域とし た。集水域へ地下浸透した水量のうち、坑廃水量とならず下流域へ流出する水量もあるが、集水 域へ地下浸透した水量はすべて坑廃水量となると仮定する。この時の各タンクからの流出量 Q と 貯留高 x は多田(2007)が提案した粒子群最適化法により算出した。このうち、地下水流出量 (Q<sub>uF</sub>[t])に相当する部分を本研究では坑廃水とした。また、入力降水量r[t]は次項で説明する方法 で算出し、タンクモデルにインプットした。

## (2) 旧松尾鉱山周辺の降水量の補正計算

タンクモデルにインプットする降水量r[t]を算出するために、旧松尾鉱山近くの AMeDAS 観測 データ(岩手松尾)の降水量、平均気温、日照時間の日観測データを用いて、鉱山付近の気象条件 に合うよう図 2.3-12 で示したフローチャートに従って補正した。



図 2.3-12 降水量の補正フローチャート

# ① 降水量の補正

一般に、降水量は標高分布が見られるため、使用するデータと対象とする地点の標高差による 補正が必要となる。今回データを使用した AMeDAS 観測地点(岩手松尾)と旧松尾鉱山付近の標高 差は地形図から判読して凡そ 825 m である。この標高差による降水量の補正は一次関数として取 り扱い、近藤ら(1995)を参考に標高差 1000 m で降水量が 2 倍となるように補正した。また、雨量 計による降水粒子の捕捉率は風速の増加にしたがって小さくなることから(Sevruk, 1985)、以下の 式を用いて標高補正した降水量値をさらに補正した。

 $P_{cor} = P_{obs}(1.25 + 0.15 \cos[\omega(DOY - 20)])$ 

ここで、*Pr<sub>cor</sub>*:捕捉率補正をした降水量(mm/day)、*Pr<sub>obs</sub>*:降水量の観測値(mm/day)、ω = 2π/ 365 日、*DOY*:1月1日からの日数である。

## ② 熱収支法による融雪量の算出

旧松尾鉱山では、冬季の積雪が融雪期(春季)になると融雪水が鉱山周辺の地下に流入すると考 えられる。そこで、融雪による流入水量の増加を考慮するため、熱収支法を用いて融雪量を算出 した。融雪量を算出する熱収支は以下の式(2.3.5)のように表され、融雪量は式(2.3.6)で表される。 (水津, 2001)

$$Q_{M} = Q_{NRS} + Q_{NRL} + H + \lambda E + Q_{r} + Q_{i} + Q_{G}$$
(2.3.5)

$$M = Q_M / l_F \tag{2.3.6}$$

ここで、 $Q_M$ :融雪熱量、 $Q_{NRS}$ :短波長放射量、 $Q_{NRL}$ :長波長放射量、H:顕熱輸送量、 $\lambda E$ :

2.3-16

潜熱輸送量、 $Q_r$ :降雨による搬送熱、 $Q_i$ :積雪相中の貯熱変化量、 $Q_G$ :地中から積雪への伝導 熱、M:融雪量、 $l_F$ :氷の融解潜熱(=333.6 kJ/kg)である。 $Q_{NRS}$ 及び $Q_{NRL}$ は鉱山付近の日照時間と 日平均気温から、H及び $\lambda E$ は日平均気温から、 $Q_r$ は日平均気温と降水量値から求まる。また、 $Q_i$ 及び $Q_G$ は積雪相内の状態を示すが、積雪相内の熱変化と地面からの伝導熱は限りなく小さいので (栗原ら, 2007)、これらのパラメータは0として取り扱った。

## 3 積雪量の算出

冬季における鉱山周辺の積雪水量を次式(2.3.7)より推算した。

$$SWE = SWE_0 + SF - SM \tag{2.3.7}$$

ここで、*SWE*:積雪水量(mm)、*SWE*<sub>0</sub>:前日の積雪水量(mm)、*SF*:日降雪量(mm)、*SM*:日融 雪量(mm)である。各パラメータはAMeDAS観測データ(岩手松尾)を補正した値を用いた。また、 降水形態の判別については、平均気温 2 ℃以上で降雨、2 ℃未満で降雪として定義した(朝岡ら, 2005)。

### (3) 旧松尾鉱山水量の水量予測結果

これまで説明した方法を適用して旧松尾鉱山付近の気象条件に補正した日データ1年分を使用 して、タンクモデルのパラメータを決定した。その際、流出量*Q*と貯留高*x*が最適となるようフ ィッティングし(図 2.3-13)、その際の流出係数と浸透係数をそれぞれ求めた。



図 2.3-13 水量予測結果と観測値の比較

この時得られたタンクモデルの各フィッティングパラメーターを表 2.3-7 に、表面タンク・表 層タンク・地下水層タンクにおける水量割合の積算グラフを図 2.3-14 に示す。このグラフでは表 面,表層,地下水層タンクのそれぞれの水量の合計を 100%となるように示している。得られた パラメータのうち、各タンクからの流出量を示す流出係数は、表面・表層に比べて地下水層タン クでかなり小さくなることから、地下深部の浸透水は、長時間滞留した後坑廃水として流出する と考えられる。また,2015.4~2016.4 年の降水のうち,54%が表面に流出,44%が地下へ浸透す ることが分かった。

タンク	流出係数	浸透係数	流出孔の高さ
表面	$a_{sF} = 0.768$	$a_{so} = 0.568$	$b_{sF} = 4.84 \times 10^{-4}$
表層	$a_{oF} = 0.936$	$a_{ou} = 0.352$	$b_{oF} = 1.40 \times 10^{-3}$
地下水層	$a_{uF} = 2.82 \times 10^{-3}$	_	_

表 2.3-7 本研究で得られたタンクモデルの各パラメータ値



図 2.3-14 表面タンク・表層タンク・地下水層タンクにおける水量の割合の推移 (a): 縦軸 100 %、(b): 縦軸 10 %

## (4) 気候変動を考慮した坑廃水の水量変動予測

構築した水量予測モデルを用いて、旧松尾鉱山坑廃水の水量及び水質の将来における変動を予 測した。将来の気候変動を考慮した水量の変動を予測するために、ドイツ学術研究機関マック ス・プランク研究所による地球システムモデル MPI-ESM(Max-Planck-Institut-ESM)の日単位出力 データを使用した(マックス・プランク研究所, 2020)。このモデルでは温室効果ガス排出量を抑制 した際の2℃上昇シナリオ(RCP2.6シナリオ)と21世紀の温室効果ガス排出量が最大となる4℃上 昇シナリオ(RCP8.5シナリオ)における全球規模での気温と降水量変化を予測しており、凡そ 100 km<sup>2</sup>程度の解像度で出力される(標高0m)。旧松尾鉱山付近の予測値を鉱山のある標高に補正し、 日射量を以下の式(篠原ら, 2007)で求めることで将来の坑廃水流量の変動を予測した。

$$S \downarrow = A\{1 - \exp(-B\Delta T^c)\}S_0 \downarrow \tag{2.3.8}$$

2.3-18

ただし、B は気温の日較差と大気透過率(S/S<sub>0</sub>)との関係が季節によって変化するのを調整する定数で、月平均日較差より求められる。ただし、 $\overline{\Delta T}$ :気温の日較差の月平均値である。

$$B = 0.036 \exp(-0.154\overline{\Delta T}) \tag{2.3.9}$$

その結果、現在と比較して 2100 年における旧松尾鉱山付近の 10 年間平均降水量は 2 ℃上昇シ ナリオ・4 ℃上昇シナリオともに約 21 %増加すると予想される。また、4 ℃上昇シナリオでは将 来の降水量の変動幅が現在と比べ大きくなり、その変動の頻度が増えると予想される。

次に図 2.3-15 に各シナリオにおける旧松尾鉱山の水量変動予測結果を示す。坑廃水量は現在と 比べ2℃上昇シナリオで 27%、4℃上昇シナリオで 31%増加すると予想される。4℃上昇シナリ オでは強雨頻度が増加するため、2100~2120年の坑廃水量予測では特に大きな変動が見られる。



図 2.3-15 将来の坑廃水量予測結果

## (5) 気候変動及び坑廃水量の変動を考慮した坑廃水の水質変動予測

坑道付近の鉱石の溶出速度は鉱石の溶出ポテンシャル(*L*)に比例すると仮定した場合 (Koide et al., 2012)、時間 *t* との関係式は以下のようになる。

$$\frac{dL}{dt} = -kL \tag{2.3.10}$$

2.3-19

すなわち、初期ポテンシャルをLoとすると以下の式(2.3.11)が得られる。

$$L = L_0 \exp(-kt) \tag{2.3.11}$$

実際に観測された水量値と各元素の濃度値を掛け合わせることにより各重金属の溶出重量を算出した。次に溶出ポテンシャルを式(2.3.11)について非線形重回帰分析を行い、初期溶出ポテンシャル量*L*<sub>0</sub>と*k*を推定した。そして、重回帰分析で得られた重金属の溶出ポテンシャルと将来の水量の予測値から、将来の酸性坑廃水中の各金属の濃度を算出した。

図 2.3-16 に各シナリオの旧松尾鉱山における T-Fe と As の濃度推移変動予測結果を示す。また、表 2.3-8 に水量変動を考慮しない場合のモデルと本モデルの解析結果の比較をまとめた。



図 2.3-16 坑廃水の水質変動予測結果

元素	これまでの解析結果	2℃上昇シナリオ	4℃上昇シナリオ
T-Fe	2,109年	2,105 年(4 年)	2,100 年(9 年)
As	2,113 年	2,105 年(8 年)	2,100年(13年)

表 2.3-8 一律排水基準値以下となる年月

※()内の数字は短くなった期間を示す

水量変動・気候変動を考慮しない場合と比較すると、これらを考慮した場合に T-Fe は 4-9 年、 As については 8-13 年程度早く一律排水基準値を下回るという予測結果となった。坑廃水量が増 加することによりポテンシャルの減少が進むとともに、希釈効果が見られるため、排水基準値未 満となる年月が早くなったと予想される。 2.3.2.4. まとめ

## (1) 旧松尾鉱山における坑廃水発生予測及び将来予測モデルの構築

旧松尾鉱山における酸性坑廃水の発生シミュレーションモデルを構築するために、模擬地下水 を用いて黄鉄鉱、白鉄鉱、磁硫鉄鉱の溶出試験を実施して GETFLOWS に組み込む各鉱物の溶解 速度定数を決定した。また、旧松尾鉱山で採取されたボーリングコアの分析結果と合せて坑廃水 発生プロセスについて検討した。その結果、以下のことが明らかとなった。

- ・ 黄鉄鉱を酸及びアルコールで洗浄し鉱物表面の化学状態を復元して溶出試験に供した。その 結果、同条件で実験を行った文献値(10<sup>-10 19</sup>)(Williamson and Rimstidt, 1994)と同じになること が確認された。この値は昨年度の実験値(10<sup>-9 30</sup>)より小さく、二次鉱物が存在することで黄鉄 鉱の溶解速度が過大評価されるため前処理操作による鉱物の化学状態の復元が必要であるこ とがわかった。
- ・ 超純水と模擬地下水を用いた際の黄鉄鉱の溶解速度定数を比較したところ、模擬地下水を用いたほうがわずかに小さくなった(超純水: 10<sup>-10 19</sup>、模擬地下水: 10<sup>-10 45</sup>)。
- 旧松尾鉱山で採取したコア研磨片を作成して反射顕微鏡で観察したところ、一部白鉄鉱に置換している部分が認められた。よって、その存在量が微量である場合でも坑廃水の生成に一定の影響を及ぼしている可能性が考えられる。
- ・ また溶解しやすい白鉄鉱中には2.6 wt.%のAsが含まれていた。その一方で、黄鉄鉱及び磁硫 鉄鉱中のAs濃度は0.3 wt.%以下であった。この結果から、旧松尾鉱山酸性坑廃水中のAsは 白鉄鉱分解に由来する可能性も考えられる。

#### (2) 水量日変動を考慮した旧松尾鉱山の酸性坑廃水発生予測モデルの検討

坑廃水量の日変動を考慮し、降水量データから水質の変動を予測できるモデルを構築した。その際、鉱山の表面、表層、地下深部に相当する3段タンクモデルを使用し、将来の気候変動を考慮した坑廃水量及び水質変動を予測した。その結果、以下のことが明らかとなった。

- 気象観測データから旧松尾鉱山付近の気象条件を補正し1年分のデータを解析することで融 雪期や多雨期の流量変動を予測できる。
- ・ 表面タンク・表層タンク・地下水層タンク中の水量の割合を調べると、地下水層が多く占め ることが確認され、坑廃水の大半は地下深部に浸透した地下水由来である。
- ・ 将来の坑廃水の日変動を考慮した水質予測モデルを検討した結果、Fe・As 両元素ともに処理が必要な期間はわずかに(4~13年)短くなることが分かった。

## 2.3.3.参考文献

- Allison, J.D., Brown, D.S., Novo-Gradac, K.J., 1998. Minteqa2/Prodefa2-A Geochemical Assessment Model for Environmental Systems: User Manual Supplement for Version 4.0.
- Asta, M.P., Cama, J., Acero, P., 2010. Dissolution kinetics of marcasite at acidic pH. Eur. J. Mineral. 22, 49–61. https://doi.org/10.1127/0935-1221/2010/0022-1981
- Janzen, M.P., Nicholson, R. V., Scharer, J.M., 2000. Pyrrhotite reaction kinetics: Reaction rates for oxidation by oxygen, ferric iron, and for nonoxidative dissolution. Geochim. Cosmochim. Acta. 64, 1511–1522. https://doi.org/10.1016/S0016-7037(99)00421-4
- Koide, R., Tokoro, C., Murakami, S., Adachi, T., Takahashi, A., 2012. A Model for Prediction of Neutralizer Usage and Sludge Generation in the Treatment of Acid Mine Drainage from Abandoned Mines : Case Studies in Japan. Mine Water Env. 31, 287–296. https://doi.org/10.1007/s10230-012-0200-x
- Moses, C.O., Herman, J.S., 1991. Pyrite oxidation at circumneutral pH. Geochim. Cosmochim. Acta. 55, 471–482. https://doi.org/10.1016/0016-7037(91)90005-P
- Sevruk, B., 1985. WHO/IAHS/ETH workshop on correction of precipitation measurement,.
- Singer, P.C., Stumm, W., 1970. Acidic mine drainage: the rate-determining step. Science (80-. ). 167, 1121– 1123.
- Williamson, M.A., Rimstidt, J.D., 1994. The kinetics and electrochemical rate-determining step of aqueous pyrite oxidation. Geochim. Cosmochim. Acta. 58, 5443–5454. https://doi.org/10.1016/0016-7037(94)90241-0
- 朝岡良浩,風間聡,沢本正樹,2005.積雪域における融雪期の植生活動と気候因子の解析.水工学論文集 49,313-318.
- 近藤純正,本谷研,松島大,1995.新バケツモデルを用いた流域の土壌水分量,流出量,積雪水当量,及 び河川水温の研究.日本気象学会 42,821-831.多田毅,2007.PSOアルゴリズムによる流出モデ ルパラメータの最適化,水文・水資源学会誌,20,450-461.
- 水津重雄,2001,簡易熱収支法による融雪・積雪水量モデル, 日本雪氷学会誌(雪氷), 63, 307-318.
- 栗原純一・山越隆雄・井良沢道也・笹原克夫・高橋正昭・吉田真理夫,2007,芋川流域における融 雪量の簡易な予測手法の適用性の検討,砂防学会誌, 59,47-54.
- 篠原慶規,小松光,大槻恭一,2007.日最高気温,最低気温から全天日射量を推定する方法-日本への適用可能性-,水文・水資源学会誌,20,462-469.
- マックス・プランク研究所HPより 〔https://cera
  - www.dkrz.de/WDCC/ui/cerasearch/q?query=cmip&aggregation\_descr\_ss=day&general\_key\_ss =rcp85&general\_key\_ss=MPI-ESM-LR&project\_name\_ss=IPCC-

AR5\_CMIP5%20(IPCC%20Assessment%20Report%205%20and%20Coupled%20Model%20In tercomparison%20Project%20data%20sets)&page=0&rows=15&startyear=2019&startmonth=1 &endyear=2200&endmonth=1&t\_op=Contains〕(最終檢索日:2020年2月15日) 2.4. 地下水制御ガイドライン

2.4.1. ガイドラインの作成目的・方針

2.4.1.1. 目的

休廃止鉱山における坑廃水量削減に資する発生源対策を検討するためのガイドラインを作成する。

2.4.1.2. 作成方針

本ガイドラインは、旧松尾鉱山における検討で得られた知見を基に地下水制御のガイドライン を作成することとしており、鉱山の管理者である自治体等関係者のための技術的な資料であり、 処理費削減対策の立案検討時の参考資料となる。ガイドライン使用イメージは図 2.4-1 に示すと おりである。



図 2.4-1 ガイドライン使用イメージ

# 2.4.2. ガイドライン目次(案)

地下水制御のガイドラインの目次(案)と構成内容は表 2.4-1 に示すとおりである。また、各 章の作成方針を 2.4.3 章に示す。

			章	内容
1章	はじめに	1.1 章	ガイドラインの目的	ガイドラインの目的
		1.2章	ガイドラインの適用範囲	や適用範囲について
		1.3 章	全体の構成	
2 章	鉱害防止事業			実施した鉱害防止事
	について			業について
3 章	坑廃水量削減	3.1章	必要な情報	坑廃水量削減に向け
	に向けた <mark>情</mark> 報	3.2章	情報の整理・収集方法	て、収集・整理すべ
	整理			き情報について
4 章	坑廃水量削減	4.1章	坑廃水量削減のための解析手法の概要	坑廃水量削減のため
	のための解析	4.2章	数値シミュレーション手法(水量)	の解析手法の概要と
	手法	4.3 章	数値シミュレーション手法(水質)	それぞれの手法につ
		4.4章	統計解析手法	いて
5 章	鉱山地域にお	5.1 章	鉱山地域における水量シミュレーションモ	鉱山地域において水
	ける水量シミ		デル構築の手順	量シミュレーション
	ュレーション	5.2 章	鉱山地域における水量シミュレーションモ	モデルを構築する際
	モデルの構築		デル構築に必要なデータ	の手順やモデルの検
		5.3 章	鉱山地域における水量シミュレーションモ	証方法について
			デルの構築	
		5.4章	水量シミュレーションモデルの検証	
6章	鉱山地域にお	6.1 章	鉱山地域における水量・水質シミュレーシ	鉱山地域において水
	ける水量・水		ョンモデル構築の手順	量・水質シミュレー
	質シミュレー	6.2 章	鉱山地域における水量・水質シミュレーシ	ションモデルを構築
	ションモデル		ョンモデル構築に必要なデータ	する際の手順やモデ
	の構築	6.3 章	鉱山地域における水量・水質シミュレーシ	ルの検証方法につい
		<del></del>	ョンモデルの構築	て
		6.4 草	水量・水質シミュレーションモナルの検証	
7 章	統計解析	7.1 章	鉱山地域における統計解析の手順	鉱山地域において統
		7.2 章	鉱山地域における統計解析に必要なデータ	計解析をする際の手
		7.3 草	統計解析	順やモデルの検証方
		7.4 草	統計解析の検証	法について
8章	地下水制御に	8.1章	発生源対策	発生源対策の項目と
	係る発生源対	8.2章	予測解析	予測解析方法、評価
	策	8.3 草	評価方法 	手法について
(別	冊)旧松尾鉱山	1. 旧7	松尾鉱山について	旧松尾鉱山での解析
	での事例	2. 旧	松尾鉱山におけるシミュレーションモデル	事例について
		0	構築	
		3. 旧	松尾鉱山におけるシミュレーションモデル	
			用いた現況解研	
		4. 旧	松毛駄山におけるシミュレーションモデル PPいたス別的た	
1		を	用いたす測解析	1

表 2.4-1 地下水制御ガイドライン目次(案)と構成内容

#### 2.4.3. 各章の作成方針

#### 2.4.3.1. 「1章 はじめに」の作成方針

1 章は、「1.1 章 ガイドラインの目的」、「1.2 章 ガイドラインの適用範囲」、「1.3 章 全体の構成」で構成される。

## (1) 1.1 章 ガイドラインの目的

1.1 章は、ガイドラインの目的について記載する。また、自治体や鉱山管理者等が本ガイドラインの使用対象者であることを明記する。

### (2) 1.2 章 ガイドラインの適用範囲

1.2 章は、ガイドラインの適用範囲について記載する。本ガイドラインは地下水制御に着目す ることから、対象となる鉱山や坑廃水の水量、水質の特徴について明記し、パッシブトリートメ ントのガイドラインの適用範囲との違いを記載する。なお、坑廃水量が比較的小規模な鉱山でも、 シミュレーションによる発生源対策検討は有用である場合もあることを明記する。

### (3) 1.3章 全体の構成

1.3 章は、ガイドラインの各章について簡単な概要を記載する。

## 2.4.3.2. 「2章 鉱害防止事業について」の作成方針

2章は、今まで国内で行われてきた鉱害防止事業について記載する。

#### 2.4.3.3. 「3章 坑廃水量削減に向けた情報整理」の作成方針

3 章は、「3.1 章 必要な情報」、「3.2 章 情報の整理・収集方法」で構成される。自治体等 事業者が、対象鉱山で坑廃水量削減を行う際に必要となる情報やその整理方法を記載する。

### (1) 3.1章 必要な情報

3.1 章は、対象鉱山で坑廃水量削減を行う際に必要となる情報の一覧、概要を記載する。

#### 3.2章 情報の整理・収集方法

3.2 章は、3.1 章で記載した必要な情報の項目ごとに、情報の整理方法や収集先、また調査が必要な場合の調査内容について記載する。

## 2.4.3.4. 「4章 坑廃水量削減のための解析手法」の作成方針

4 章は、「4.1 章 坑廃水量削減のための解析手法の概要」、「4.2 章 数値シミュレーション 手法(水量)」、「4.3 章 数値シミュレーション手法(水質)」、「4.4 章 統計解析手法」で 構成される。

#### (1) 4.1章 坑廃水量削減のための解析手法の概要

4.1 章は、坑廃水量削減のための解析手法について記載する。一般的な解析手法の一覧を示し、 各解析手法の目的、必要性について記載する。また、鉱山の管理としてどのようなデータを取 得・蓄積しているのか、その活用方法についてを記載する。

### (2) 4.2章 数値シミュレーション手法(水量)

4.2 章は、水量に関する数値シミュレーション手法について記載する。水量の数値シミュレーションモデルは数多くあるため、各モデルの概要、解析手法や長所・短所等の比較表を作成し、 各モデルの違いについて言及する。その際、鉱山での発生源対策検討に係る予測解析に必要な項 目(機能)が分かるように記載し、オープンコードなのか商業コードなのかも記載する。また、 モデルの選択方法についても説明するとともに、解析事例の概要を掲載する。

#### (3) 4.3章 数値シミュレーション手法(水質)

4.3 章は、4.2 章と同様に作成する。

#### (4) 4.4章 統計解析手法

4.4 章は、4.2 章と同様に作成する。

# 2.4.3.5. 「5章 鉱山地域における水量シミュレーションモデルの構築」の作成方針

5 章は、「5.1 章 鉱山地域における水量シミュレーションモデル構築の手順」、「5.2 章 鉱 山地域における水量シミュレーションモデル構築に必要なデータ」、「5.3 章 鉱山地域におけ る水量シミュレーションモデルの構築」、「5.4 章 水量シミュレーションモデルの検証」で構 成される。

#### (1) 5.1 章 鉱山地域における水量シミュレーションモデル構築の手順

5.1 章は、鉱山地域において一般的な水量シミュレーションを構築する際の手順について、フ ロー図を交えて説明する。5.2 章以降は作成したフロー図に沿って作成する。

#### (2) 5.2章 鉱山地域における水量シミュレーションモデル構築に必要なデータ

5.2 章は、モデル構築に必要なデータ(項目、入手先、データの使用方法等)について整理する。また、鉱山の対策工事の履歴を把握することが必要なことも明記する。

#### (3) 5.3 章 鉱山地域における水量シミュレーションモデルの構築

5.3 章は、モデル構築の際に留意すべき点について記載する。一般的な点ではなく、鉱山に特化した記述とし、坑道の設定方法等についても記載する。

#### (4) 5.4章 水量シミュレーションモデルの検証

5.4 章は、構築したモデルの検証方法について記載する。

- 2.4.3.6. 「6章 鉱山地域における水量・水質シミュレーションモデルの構築」の作成方針 6章は、5章と同様に作成する。
- 2.4.3.7. 「7章 統計解析」の作成方針
   7章は、5章と同様に作成する。

#### 2.4.3.8.「8章 地下水制御に係る発生源対策」の作成方針

8章は、「8.1章 発生源対策」、「8.2章 予測解析」、「8.3章 評価手法」で構成される。

#### (1) 8.1章 発生源対策

8.1 章は、旧松尾鉱山を対象とした発生源対策だけでなく、他の鉱山の参考となるような、普 遍的な発生源対策を示す。

なお、現時点では技術・工法等が未成熟・未確立である発生源対策も記載し、検討時の参考と なる資料とする。

#### (2) 8.2章 予測解析

8.2 章は、8.1 章で記載した発生源対策の各項目の予測解析の概要について記載する。また、予 測解析時の物性値等のモデルへの設定方法、着眼点等を記載する。

なお、旧松尾鉱山での実例は参考資料として別冊に掲載する。

## (3) 8.3章 評価方法

8.3 章は、予測解析で得られた結果の評価方法について記載・解説する。

#### 2.4.3.9.「(別冊) 旧松尾鉱山での事例」の作成方針

別冊は、「1. 旧松尾鉱山について」、「2. 旧松尾鉱山におけるシミュレーションモデルの 構築」、「3. 旧松尾鉱山におけるシミュレーションモデルを用いた現況解析」、「4. 旧松尾 鉱山におけるシミュレーションモデルを用いた予測解析」で構成される。

# (1) 1. 旧松尾鉱山について

1 は、旧松尾鉱山の概要(地形、地質、気象、坑廃水データ等、一般的な項目)について記載 する。また、旧松尾鉱山で実際に施工した発生源対策や、その費用についても記載する。

#### (2) 2. 旧松尾鉱山におけるシミュレーションモデルの構築

2 は、旧松尾鉱山で構築したモデルについて詳細に記載する。他の鉱山においてシミュレーションモデルを構築する際の参考となるように、モデルを構築する際の留意点や工夫した点についても記載する。

# (3) 3. 旧松尾鉱山におけるシミュレーションモデルを用いた現況解析

3では、旧松尾鉱山での現況解析について記載する。

# (4) 4. 旧松尾鉱山におけるシミュレーションモデルを用いた予測解析

4では、旧松尾鉱山での予測解析について、予測解析の項目ごとに記載・解説する。

# 3. 自然回帰型坑廃水浄化システム導入に向けた調査研究

# 3.1. 人工湿地型

- 3.1.1. 業務概要
- 3.1.1.1. 目的

一部の休廃止鉱山では、坑口や集積場等から As、Cd、Pb 等の有害な元素を含む坑廃水が流出 し続ける状況にある。坑廃水が河川等に流出した場合、健康被害、農作物被害、漁業被害等が発 生し、深刻な社会問題を引き起こすことがあるため、休廃止鉱山を管理する地方公共団体等は、 大量の電力を消費し、坑廃水処理を昼夜問わず継続して行っていることから、当該処理の省エ ネ・省コスト化の対策が求められている。このため、省エネ化の対策として期待できる、自然回 帰型坑廃水浄化システム(金属除去作用を有する植物や天然材料等を活用する処理システム)を 導入するのであれば、坑廃水の状況や立地条件等を勘案した最適な浄化システムの導入を検討す る必要がある。

本業務では昨年度に引き続き、A 鉱山(山形県尾花沢市)への人工湿地型の自然回帰型坑廃水 浄化システムによる坑廃水処理導入に資することを目的とした検討を実施する。

## 3.1.1.2. 実施内容

A 鉱山の坑廃水に対して人工湿地型の浄化システムの導入を検討するため、同鉱山敷地内にお ける現地試験を実施し、処理プロセスの最適化を行う。更に既往の研究で得られた知見も踏まえ、 実規模相当の実証試験に向けて詳細設計を行う。実施内容の概略を表 3.1-1 に示す。

実施項目	内容
①坑廃水のデータの収集及び解析	既往の研究で取得したデータに加え、処理プロセスの最適 化に資する水量・水質等のデータを取得し、評価した。
②連続処理試験及び室内試験	A 鉱山の敷地内に連続試験設備を設置し、実際の坑廃水を 用いた連続処理試験を実施し、既往の研究で構築した基本 プロセスについて評価した。また同設備を用いてプロセス の最適化を行った。次に、データ補強のため室内試験を実 施した。
③実規模相当実証試験の準備	連続処理試験の結果を踏まえ、2020年度に実規模相当の実 証試験を実施するための準備を実施した。具体的には、処 理プロセスの検討、試験設備の設計を実施した。
④自然回帰型坑廃水浄化システムの導入による効果の検討	A 鉱山に自然回帰型坑廃水浄化システムを導入した場合の 効果(省エネ、省コスト等)について机上検討した。
⑤自然回帰型坑廃水浄化システム の導入ガイドライン作成に資する 情報の整理	①~④で得られた結果を踏まえ、導入ガイドライン作成に 資する情報(例えば石灰石の持続期間、殿物による目詰ま り、など)を整理した。

表 3.1-1 実施内容の概略

# 3.1.2. 坑廃水のデータの収集及び解析

既往の研究で取得したデータに加え、処理プロセスの最適化に資する水量・水質等のデータを 取得し、評価した。昨年度までのデータに加え、今年度新たに収集したデータを踏まえた坑廃水 の解析を実施した。

3.1.2.1. 方法

## (1) 流量及びサンプルリング

A鉱山ではいくつかの場所から坑廃水が流出しており、総合原水合流地点(図3.1-1:左)まで パイプを通して坑廃水を集約している。本調査では集水マスの本坑坑内水及び坑口前の本坑坑内 水(図3.1-1)から流量測定及びサンプリングを実施した。本調査では試験対象とした本坑坑内 水(坑口前)を主として調査を実施した。なお、水量は容器法にて測定した。



図 3.1-1 流量測定実施場所(左:総合原水合流地点、右:本坑坑内水)

(2) 水質分析

採水したサンプルについて水質分析を実施した。分析項目と分析法及び検出下限値を表 3.1-2 に示した。

なお、後述の現地連続試験及び室内試験でも同様の分析方法で測定を実施した。

項目名	測定法	検出下限値
pН	JIS K0102 12 ガラス電極法	-
EC	13 白金黒電極法	-
ORP	土壤養分分析法 白金電極法	-
Cu	JIS K0102 52.4 ICP 発光分光分析法	0.01 mg/L
Zn	53.3 ICP 発光分光分析法	0.005 mg/L
Cd	52.4 ICP 発光分光分析法	0.001 mg/L
As	61.2 水素化物発生原子吸光法	0.001 mg/L
Fe	57.4 ICP 発光分光分析法	0.1 mg/L
Al	58.4 ICP 発光分光分析法	0.1 mg/L
Mn	56.4 ICP 発光分光分析法	0.01 mg/L
Na	48.3 イオンクロマトグラフ法	0.1 mg/L
Mg	51.4 イオンクロマトグラフ法	0.1 mg/L
Ca	50.4 イオンクロマトグラフ法	0.1 mg/L
К	49.3 イオンクロマトグラフ法	0.1 mg/L
Pb	54.3 ICP 発光分光分析法	0.01 mg/L
SiO <sub>2</sub>	JIS K0101 44.1.2 モリブデン青吸光光度法	0.1 mg/L
Cl-	JIS K0102 35.3 イオンクロマトグラフ法	0.1 mg/L
SO42-	41.3 イオンクロマトグラフ法	0.2 mg/L

表 3.1-2 分析項目

# 3.1.2.2. 結果

(1) 水圧

本坑坑内水(坑口前)は坑道内部のコンクリート壁に設置されたバルブ(図 3.1-2)から排出 されている。表 3.1-3 に同バルブにかかる水圧、水量、水頭を示す。本坑坑内水のバルブからの 水頭は 0.5 m から 12.2 m であった。連続試験の水槽設置の際の参考とした(表 3.1-3)。



図 3.1-2 坑口と本坑坑内水排出バルブ

		5月	6月	7月	8月	9月	10月	min	max	average
2018	水圧	0.82	0.039	0.02	0.08	0.07	0.035	0.02	0.82	0.18
	水量	194	121	85	143	185	118	85	194	141
	水頭	83.7*	4.0	2.0	8.2	7.1	3.6	2.0	83.7**	18.1
2017	水圧	0.055	0.025	0.035	0.02	0.015	0.015	0.015	0.055	0.028
	水量	150	109	130	82	73	73	73	150	103
	水頭	5.6	2.6	3.6	2.0	1.5	1.5	1.5	5.6	2.8
2016	水圧	0.045	0.015	0.015	0.015	0.015	0.005	0.005	0.045	0.018
	水量	190	105	107	87	115	85	85	190	114.83
	水頭	4.6	1.5	1.5	1.5	1.5	0.5	0.5	4.6	1.9
2015	水圧	0.115	0.095	0.085	0.075	0.085	0.08	0.075	0.115	0.089
	水量	51	45	39	36	36	33.5	33.5	51	40
	水頭	11.7	9.7	8.7	7.7	8.7	8.2	7.7	11.7	9.1
2014	水圧	0.12	0.095	0.095	0.075	0.06	0.065	0.06	0.12	0.085
	水量	85.7	75	65	60	49	53	49	85.7	64.6
	水頭	12.2	9.7	9.7	7.7	6.1	6.6	6.1	12.2	8.7
2013	水圧	-	-	-	-	-	-	0	0	-
	水量	120	95.2	117	102	90.9	93.8	90.9	120	103
	水頭	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2012	水圧	-	-	0.02	0.04	-	-	0.02	0.04	0.03
	水量	200	133	100	66	43	-	43	200	108
	水頭	-	-	2.0	4.1	-	-	-	-	-
2011	水圧	-	-	0.03	-	0.015	0.012	0.012	0.03	0.019
	水量	240	148	170	100	116	103.4	100	240	146
	水頭	-	-	3.1	-	1.5	1.2	1.2	3.1	1.9

表 3.1-3 本坑坑内水排出バルブの水圧データ(水圧[MPa] 水量[L/min] 水頭[m])

(坑道内部に立ち入ることのできない積雪期間を除く)

※2018年5月のデータは誤記の可能性があるため除く

(2) 流量・水質

昨年度から継続的に本坑坑内水(坑口前)の水量データを収集しており、現地連続試験前 (2018/9/14~2019/7/1)のデータを以下に示す。本坑坑内水(坑口前)の流量及び水質のデータ (2018/9/14~2019/7/1)を表 3.1-4 に示す。

流量は平均 154 L/min であった(表 3.1-3)。また、最大値は 235 L/min で最小値は 103 L/min で あった。

坑口前においては年間を通じて大きな変動は見られなかったが、融雪期(4月)に200 L/min以上の流量を記録した(図 3.1-3)。また、積雪・融雪期には集水マスにおいて流量が増加する傾向がみられた。

pH については、最高値が pH 4.2、最低値が pH 3.3 であった。季節を通じて大きな変動は見られなかった(図 3.1-4)。

鉄(Fe) については最高値が 3.0 mg/L、最低値が 0.54 mg/L であった。季節による傾向は見られなかった(図 3.1-5)。

亜鉛(Zn)については、最高値が 25 mg/L、最低値が 14 mg/L であった。積雪・融雪期に増加 する傾向があった(図 3.1-6)。

カドミウム(Cd)については最高値が 0.27 mg/L、最低値が 0.15 mg/L であった。積雪・融雪期 に増加する傾向があった(図 3.1-7)。

表 3.1-4 流量及び水質(2018/9/14~2019/7/1)

(単位:mg/L (流量・pHを除く))

(n=28)	流量(L/min)	pН	Fe	Zn	Cd
平均	154	3.7	1.4	18	0.21
最高值	235	4.2	3.0	25	0.27
最低值	103	3.3	0.54	14	0.15



図 3.1-3 坑口前及び集水マスの流量経時変化



図 3.1-4 流量と pH の経時変化



図 3.1-5 流量と Fe 濃度の経時変化



図 3.1-6 流量と Zn 濃度の経時変化



図 3.1-7 流量と Cd 濃度の経時変化

# 3.1.2.3. 既往の研究情報

# (1) 人工湿地のコンセプト

本調査のモデルである旧本庫鉱山(北海道)に設置されている人工湿地の概念図を図 3.1-8 に、 それぞれの要素で期待される効果を表 3.1-5 に示した。旧本庫鉱山に導入された人工湿地の形式 (以下、本庫方式)は石灰石中和槽、表面流型人工湿地及び浸透流型人工湿地の 3 つの要素から 構成されている(表 3.1-5)。



図 3.1-8 旧本庫鉱山坑廃水処理のための人工湿地

表 3.1-5 本庫方式の人工湿地における各構成要素で期待される効果

名称	石灰石中和槽	表面流型人工湿地	浸透流型人工湿地
内容	石灰石	ヨシ、土壌	石灰石
効果	pH の上昇	鉄等の除去	その他金属の除去

旧本庫鉱山の人工湿地では、以下のような結果が得られている\*\*①。

表面流型:FeやAsに対しての除去効果は高くなっているが、Znなどに対しての除去効果は低い。FeやAsは、表面流型人工湿地流入時では非溶存状態の割合が高くなっていることから植物の根による濾過効果により効果的に除去され、より除去効果が高くなったものと考えられる。

浸透流型:pH は流入時と比較すると大きく上昇し、また各金属成分は大きく減少し、表面流型において除去効果が低かった Pb や Zn に対しても排水基準を下回り高い除去効果が確認された。 浸透流型では、内部の石灰砂利の効果により pH が大きく上昇することから、各金属成分は水酸 化物等となり、沈殿除去されたものと考えられる。

旧本庫鉱山の坑廃水と、A鉱山の坑廃水(本坑坑内水)の比較を表3.1-6に示した。A鉱山の坑 廃水では旧本庫鉱山と比較して、pH が低く、Cu、Pb、Zn 濃度が高く坑廃水の水質がかなり異な るため、他の事例について文献調査を行った。

表 3.1-6 A鉱山及び旧本庫鉱山坑廃水の平均濃度比較

(pH を除く) ) (単位:mg/L pН Fe Cu Pb Zn Cd As 旧本庫鉱山※① 0.53 0.75 5.45 0.038 5.2 6.63 0.112 A 鉱山<sup>1)</sup> 3.7 1.4 9.5 1.9 0.002 18 0.20

1)本事業で対象とする本坑坑内水(坑口前)の平均値(期間:2018/9/14~2019/7/1)

(2) 文献調査

A 鉱山の坑廃水と水質が類似している好気性石灰石処理の文献調査を行った(表 3.1-7~表 3.1-8)。

好気性石灰石処理で坑廃水中の金属濃度低減の効果が報告されており、これらの文献を参考に し、A鉱山の坑廃水の水質に対して石灰石処理の限界を検討することとした。

また、旧本庫鉱山の構成要素のひとつとなっている、ヨシが植栽されている表面流型人工湿地 については、外国において同様の植栽がある湿地で金属濃度低減の効果が確認されており<sup>※②</sup>、 個別でヨシの効果を確認することとした。

玉	原水濃度	処理水濃度	処理水量	処理フロー	材料	文献名
米国	pH: 3 Al(60 mg/L) Fe(200 mg/L) Mn(10 mg/L) 水温(20±1℃)	pH: 7 Al (>85%減) Fe (>85%減) Mn (<10%減) Zn (<10%減)	230 L/min	石灰槽 二酸化炭素 槽	石灰石 二酸化炭素	*3
米国	pH: 5-6.5 Fe (40 mg/L) Zn(5-75 mg/L)	pH: 5.2-6.5 Fe(<0.1 mg/L) Zn(1-55 mg/L)	石灰反応 器:1000 mL/日 バイオカラム: 30-60 mL/日	石灰反応炉 バイオカラ ム	石灰石 :0.75インチ トウモロコシ茎 葉:クルミ殻= 1:1	*4
カナダ	pH: 2.3-2.6 Fe (838-3200 mg/L) Mn(9.2-18.3 mg/L) Ni (0.21-9.5 mg/L) Zn (0.19-1 mg/L)	pH: 6.2-6.8	114-235 L/h	石灰水路	石灰岩及び砂利 ドロマイト	*5
米 国	pH: 3 Fe(55 mg/L)	рН:3-7	記載なし	開放石灰石 水路	石灰石	*6
米国	pH: 4 Fe Al	pH: 6.2-7 Fe(>95%減) Al (>95%減)	29.9 m <sup>3</sup> /day	好気性石灰 石排水路	石灰石	*7

表 3.1-7 文献調査まとめ(1)

処理 (%) 植物種 人工湿地 原水 (mg/L) 文献名 Surface pH: 2.65±0.02 • Carex Carex rostrate Flow  $Fe(260.5 \pm 23.7)$ -0.8-0.4 Eripphorum angustifolium Zn  $(5.9\pm0.3)$  Eripphorum Phragmites australis \*8 Cu  $(1.44 \pm 0.1)$ -3.4-8.5  $Cd(0.006 \pm 0.0)$ • Phragmites 50-57 Surface pH:2.6 Typhia latifolia Flow Al(30-100) 23-30(Al) Ca(-) 5-8(Ca) Fe(200-250) \*9 25-31(Fe) Mg(30-100) 17(Mg) Mn(30-100) 18-19(Mn) S(-) 17-18(S) Surface pH: 2.93-3.31 Desmostachya bipinnata Flow Fe(17.816) 95-96(Fe) Cu (14.620) 89-92(Cu) Zn (29.367) 77-78(Zn) \*10 Pb(1.753) 89-90(Pb) Co(0.323) 68-72(Co) Ni(0.388) 30-64(Ni) Mn(2.143) 36-76(Mn) Subsurface pH: 3.38±0.45 Typha latifolia flow Al  $(12.6 \pm 4.1)$ 95.8(Al) Scirpus validus ×(11)  $Fe(787 \pm 121)$ 99.9(Fe) Bidens aristosa  $Mn(10.9\pm2.1)$ 98.4(Mn) Subsurface pH:4.2 Typhia latifolia flow Fe(38.1) 98.6/89.8(Fe) ×10 Mn(2.6)75.5/-20.3(Mn) Ni(0.4) 88.5/58.1(Ni) Zn(9.0) 96.7/96.3(Zn) Hybrid pH:2.73-3.08 Typha sp. (surface+ Fe(166) Typha latifolia 82.35(Fe) \*(12) subsurface Al(83) 61.25(Al) Mn(250) 94.9(Mn) flow)

表 3.1-8 文献調査まとめ(2)

- 3.1.3. 現地連続処理試験
- 3.1.3.1. 連続処理試験
- (1) 目的

A 鉱山の敷地内に連続試験設備を設置し、実際の坑廃水を用いた連続処理試験を実施し、基本 プロセスの構築を目指すと共に、その最適化に資するデータを取得する。

- (2) 試験方法
- ① 試験水槽

全体のプロセスフローとしては原水を受ける集水槽から、粗石系列、細石系列、その他系列に 分かれる設定とした(図 3.1-9)。



図 3.1-9 プロセスフロー

現地試験は以下の目的から石灰石系列とその他の系列の2系列を設定した。

①石灰石系列

・粗石系列(石灰石粒径 60-80 mm)

来年度 A 鉱山に導入を想定している人工湿地の設計に資するデータを取得する。

・細石系列(石灰石粒径 20-40 mm)

粗石系列との比較を行う。

②その他系列:ヨシ槽の効果を確認する。

沈殿槽の効果を確認する。

石灰石系列は粒径 60-80 mm を使用した系列と粒径 20-40 mm を使用した系列の 2 系列の試験を 実施し、大きい粒径を粗石系列、細かい粒径を細石系列とした。粗石系列は、図 3.1-10 のように A~C 槽の 3 槽の系列として、細石系列は図 3.1-11 のように D~E 槽の 2 槽の系列とした。

その他の系列は集水槽からの原水を一度石灰石槽に通過させ、pH4程度の坑廃水をpH5.5~6.0 程度に中和し、ヨシ槽と沈殿槽へ導水した(図 3.1-12)。試験水槽設置の状況を図 3.1-13 及び図 3.1-14に示す。



図 3.1-12 その他系列



図 3.1-13 連続処理試験反応槽設置状況(1)



図 3.1-14 連続処理試験反応槽設置状況(2)

# ② サンプリング及び分析方法

連続試験の実施に当たって各槽のサンプリングを行なった。集水槽は流入部よりサンプリング を実施した。石灰石系列は各槽の排水チューブからサンプリングを実施した。その他の系列も同 様に槽の排水チューブからサンプリングを実施した。

それぞれのサンプルの分析については「3.1.2.1(2)章水質分析」と同様に分析を行った。



図 3.1-15 集水槽のサンプリング位置



図 3.1-16 A~E 槽のサンプリング位置



図 3.1-17 その他系列のサンプリング位置

# ③ 集水槽

本坑坑内水原水の排水位置は図 3.1-18 のように水頭が低く、既存の中和処理施設への流路に放流しているため、直接試験槽に導水することができなかった。そのため、一度、集水槽に原水を 貯留し、その後各系列の槽へと導水した。本坑坑内水原水は「3.1.2.2(1)章水圧」で示したように バルブからの水頭が最低で 0.5 m で、地表からの高さは凡そ 1.1 m (地表からバルブの高さは凡そ 0.6 m) であった。集水槽へ導水した際の地表面からの水頭は安全を見て 0.7 m で実施した。



図 3.1-18 坑内水原水

4 槽の構造

石灰石槽に使用する反応槽は上下迂流式となるように迂流板を設置した。上下迂流式イメージ を図 3.1-19 に示す。



図 3.1-19 各槽の構造

⑤ 石灰石

本試験では2種類の粒径の石灰石を使用しており、石灰石は大窪炉材㈱より入手したものを使 用した。大窪炉材㈱より入手した成分を表3.1-9に示す。

表 3.1-9 石灰石成分表

成分	含量 (%)
酸化カルシウム (CaO)	55.57
珪酸不溶解物(SiO <sub>2</sub> )	0.24
酸化マグネシウム (MgO)	0.38
酸化鉄(Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	0.10
酸化アルミニウム (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	0.08
強熱減量(Ig - Loss)	43.26
水分	0.08%

※JIS R 9011:2006「蛍光 X 線分析法」による。

# 6 流量

現地試験では、粗石系列の滞留時間を各槽 5 時間の合計 15 時間(500 mL/min)、各槽 10 時間 の合計 30 時間(250 mL/min)、各槽 20 時間の合計 60 時間(125 mL/min)の3パターン実施し、 細石系列では、各槽 5 時間の合計 10 時間(500 mL/min)と各槽 20 時間の合計 40 時間(125 mL/min)の2パターン実施した。

流量は各槽の容量(300 L)に対して空隙率が約 50%のため、500 mL/min~125 mL/min の間で 各系列の流量を変更した。

また、その他系列の石灰石槽の滞留時間は5時間とし、石灰石通過後のヨシ槽及び沈殿槽のそれぞれの流量は約110 mL/min とした。

# ⑦ 詰まり・水位の確認

反応槽に図 3.1-20 のような覗き穴を作製し、ここから水位と石灰石の状態を観察した。



図 3.1-20 水位・詰まりの確認窓



図 3.1-21 詰まり・水位の確認

(3) 試験結果

原水の流量・水質(現地試験時)

現地試験開始時からの原水の流量及び水質のデータを以下に示す(表 3.1-10)。

連続試験中の原水の流量は平均で 61 L/min であった。最大値は 78 L/min、で最小値は 48 L/min であった。試験前の原水流量の 154 L/min(表 3.1-11)から減少したのは集水槽へ抗内水を導水す るために水頭を上げたためと考えられた。

pH については、平均値が pH 4.0、最高値が pH 4.3、最低値が pH 3.8 であった。期間を通じて 大きな変動はなかった(図 3.1-22)。

Fe については平均値が 2.2 mg/L、最高値が 7.9 mg/L、最低値が 1.0 mg/L であった。

Zn については、平均値が 15 mg/L、最高値が 28 mg/L、最低値が 9.4 mg/L であった。

Cd については平均値が 0.19 mg/L、最高値が 0.32 mg/L、最低値が 0.11 mg/L であった。

期間中の10月15日には他の測定日と比較すると重金属濃度が高くなった。また、11月16日 以降は重金属濃度が増加傾向であった(図3.1-23)。

pH は平均値、最高値、最低値は期間前後で明確な差はなかった。

Fe 濃度は p 値が 0.054 と有意傾向(0.05 0.1)。

図 3.1-24 に降水量と現地流量を、表 3.1-12 に尾花沢市と山形市の降水量・天気概況を示す。

10月12日に大雨が発生し、尾花沢市、山形市ともに降水量が多かった。積雪・融雪時の水の 量が多くなる日には金属濃度が高くなる傾向があるため、10月15日に見られた重金属濃度の増 加は10月12日の大雨が影響した可能性がある。

表 3.1-10 現地試験(2019/8/8~2019/11/18)の流量及び水質

(単位:mg/L (流量・pHを除く))

				0	1 = · · · · ·
(n=15)	流量(L/min)	pН	Fe	Zn	Cd
平均	61	4.0	2.2	15	0.19
最高値	78	4.3	7.9	28	0.32
最低值	48	3.8	1.0	9.4	0.11
標準偏差	8.41	0.12	1.63	4.9	0.05
P 値			0.054	0.25	0.86

表 3.1-11 現地試験前(2018/9/14~2019/7/1)の流量及び水質(一部再掲)

(単位:mg/L (流量・pH を除く))

				0	1 = · · · · ·
(n=28)	流量(L/min)	pН	Fe	Zn	Cd
平均	154	3.7	1.4	18	0.21
最高値	235	4.2	3.0	25	0.27
最低值	103	3.3	0.54	14	0.15
標準偏差	39.8	0.21	0.53	2.68	0.03

※10/15のデータを除く



図 3.1-22 流量と pH



図 3.1-23 金属濃度 (Fe、Zn、Cd) の変化 120 120 ■現地流量 ■降水量の合計(mm) 100 100 隣大量の合計(mm) 80 80 現地流量(L/min) 60 60 40 40 20 20 0 0 8/16 8/26 9/15 9/25 10/5 10/15 10/25 11/4 11/14 9/5 8/6

図 3.1-24 原水の連続試験時流量と尾花沢市の降水量

表 3.1-12 尾花沢及び山形の降水量と天気概況

	尾花沢 尾花沢		山形	山形	山形	山形
	降水量の	10分間降水量の	天気概況	天気概況	降水量の	10分間降水量の
	合計(mm)	最大(mm)	(昼:06時~18時)	(夜:18時~翌日06時)	合計(mm)	最大(mm)
2019/10/11	1.5	0.5	曇時々雨	雨	12.5	2
2019/10/12	97	4	大雨	大雨	147.5	4.5
2019/10/13	24.5	4	曇後晴	晴後曇	22.5	2.5
2019/10/14	1	0.5	雨一時曇	曇時々晴一時雨	0.5	0.5
2019/10/15	0.5	0.5	曇一時雨	晴一時曇	0	0
2019/11/14	32	1.5	雨後一時曇	雨時々曇	3	0.5
2019/11/15	16.5	1	雨時々晴一時曇	雨後一時曇	1.5	0.5
2019/11/16	2	0.5	晴れ時々曇一時雨	雨時々曇一時晴	1	0.5
2019/11/17	5.5	1	晴時々薄曇一時雨	曇後一時晴	0	0
2019/11/18	4.5	1	曇時々晴一時雨	雨一時曇	2	1

## 連続処理試験での流量設定

現地試験時の流量の推移を図 3.1-25 及び図 3.1-26 に示す。

現地試験の開始当初(8/1)では、流量を 500 mL/min で設定しても翌日には通水が停止してい る状況が多発した(図 3.1-25)。そこで、導水部では、集水槽からの導水を下方(図 3.1-27)か らのホースではなく、上方から(図 3.1-28)の塩ビ管による直管へ変更した。また、排水部では、 最終槽の後段に排水の受け槽を追加することで対応した(図 3.1-29 及び図 3.1-30)。

流量の安定後の滞留時間は、粗石系列では各槽 5 時間の合計 15 時間(500 mL/min)、各槽 10 時間の合計 30 時間(250 mL/min)、各槽 20 時間の合計 60 時間(125 mL/min)の3 パターンに設定した(図 3.1-26)。

細石系列では、各槽5時間の合計10時間と各槽20時間の合計40時間の2パターンに設定した (図 3.1-26)。



図 3.1-25 流量推移(8/1~8/31)



図 3.1-26 流量推移 (8/30~11/18)



図 3.1-27 通水状況 (下方からの通水)



図 3.1-28 通水状況(上方からの通水)



図 3.1-29 受け槽の設置 (A~C槽)



図 3.1-30 受け槽の設置 (D~E 槽)

### ③ 水質(連続処理試験)

A. 試験第一期(2019/7/30~2019/8/21)

試験開始時(試験第一期)の連続処理結果を表 3.1-13 に示す。 試験第一期は、多くの金属が除去できていた。流量が不安定であったため滞留時間は不明であ るが、pH が 7.9(現地測定値)まで上昇し、多くの金属が除去されていた。

粗石系列では Pb、Cu が排水基準値以下まで低減した。細石系列では Pb、Cu に加えて Cd が排水基準値以下まで低減した。

表 3.1-13 流量不安定時の結果(8月7日)

(単位:mg/L)

系列	pH (現地測定)	Fe	Zn	Pb	Cu	Cd	Mn
原水	4.4	1.5	15	1.8	5.8	0.21	0.35
粗石系列 3槽目	7.9	0	4.9	0.03	0.2	0.04	0.27
細石系列 2槽目	7.9	0	3.9	0.01	0.1	0.01	0.21
一律排水基準	5.8~8.6	10	2	0.1	3(1)	0.03	10(5)

※一番除去できた日(8月7日)のデータを示す。
 溶存態の濃度を示す。
 下限値以下は0と示す。
 赤字:一律排水基準以上
 pHは四捨五入した値を示す。
 一律排水基準の括弧は山形県の上乗せ基準を示す。

# B. 試験第二期 (2019/8/27~2019/11/18)

試験第二期の pH 及び重金属の経時変化を図 3.1-31 に示す。

3パターンの流量(合計滞留時間15時間、30時間、60時間)で実施したが、pHの上昇は粗石 系列では6.6~7.1、細石系列では6.7~7.5までであった。また、1~3槽目の各槽内で到達するpH はどの滞留時間でも差はなかった。細石系列でpHの上昇が速いのは粒径が小さく表面積が大き いためと考えられた。

Cu 濃度については、粗石系列、細石系列ともに、各槽ごとに減少し、原水の流量が少ない場合に限り、排水基準値(3 mg/L)以下まで減少した。

Pb 濃度については、粗石系列では各槽ごとに減少したが、排水基準値(0.1 mg/L)以下まで減 少するサンプルは少なかった。細石系列については滞留時間が 40 時間の場合に限り、排水基準 を満たすサンプルが多くなった。

Cd 及び Zn 濃度については粗石系列、細石系列ともに、各槽ごとに減少はせず、ほぼ横ばいの サンプルが多数であった。



 ※■:HRT 各槽 5時間、◆:HRT 各槽 10時間、▲:HRT 各槽 20時間 pHのハッチング部分は排水基準(5.6以上 8.6以下)を満たしていないことを示す。
 赤点線は排水基準、青点線は山形県の上乗せ排水基準を示す。
 図 3.1-31 粗石系列(左)と細石系列(右)の滞留時間による pH 及び重金属濃度の変化

# C. その他の系列

ヨシ槽及び沈殿槽のサンプル分析の結果を図 3.1-32~図 3.1-37 に示す。

10/24と10/29においてFe及びPb濃度はヨシ槽で減少した。また、SS濃度は石灰石槽では高いのに対し、ヨシ槽では低くなった。石灰石槽で生成されたSSがヨシ槽で捕捉されたためと考えられた。

しかし、Fe 及び Pb 濃度が減少した 10/24 と 10/29 では、Cu、Cd、Zn 濃度はすべての槽で横ば いとなっており、金属を除去することができなかった。



図 3.1-32 サンプルごとの Fe 濃度



図 3.1-33 サンプルごとの Cu 濃度





図 3.1-35 サンプルごとの Cd 濃度




# (4) 詰まり・水位

粗石系列・細石系列の水位の平均値を(表 3.1-14)に、経時変化を図 3.1-38 及び図 3.1-39 に示 す。

粗石系列、細石系列ともに流量変更後に出口側で水位が下がる傾向があった。しかし、石灰石 の状態の観察からは詰まりを確認することはできず、試験にも影響がなかった。

	AX 5.1-14		加及しり宿日	<u>п,</u> (		小型(CIII)	
観察点	15 時間	30 時間	60 時間		観察点	10時間	40 時間
Ain	8.1	8.0	7.9		Din	11.6	11.3
Aout	9.1	9.0	8.7		Dout	9.5	8.9

表 3.1-14 A 槽 in、out 及び D 槽 in、out での平均水位(cm)



図 3.1-38 粗石系列の水位の経時変化



図 3.1-39 細石系列の水位の経時変化

(4) 現地試験まとめ

- ・石灰石槽で滞留時間が60時間であってもpH上昇の到達点はpH7付近であった。
- ・pH7程度だったためZn、Cd濃度は排水基準値以下にはならなかった。
- ・ヨシ槽では Fe 及び Pb 濃度が減少したのは、根によるフィルター効果であると考えられた。
- ・実証試験では長期間運転するための詰まりの評価は必要であるが、今回の現地試験では詰まりの現象は確認できなかった。また、水位に 0.1%程度の降下がみられたが、流量変更による影響が大きいと考えられた。
- ・滞留時間の延長が pH 上昇につながることはなかった。

#### 3.1.3.2. 室内試験

現地試験では、pHの上昇が7付近まででCu、Pbの除去が不十分で、Zn、Cdはほぼ除去されなかったことから、その原因究明のための室内試験を以下のとおり実施した。

#### (1) 石灰石の成分分析

# ① 目的

A 鉱山の連続試験による pH の上昇と旧本庫鉱山での pH の上昇の状況が大きく異なっており、 中和剤である石灰石の成分が異なっている可能性が考えられた。そこで、旧本庫鉱山で使用して いる石灰石と A 鉱山での連続試験で使用している石灰石の成分の比較を行った。

# 2 方法

旧本庫鉱山で使用している石灰石及び A 鉱山での試験で使っている石灰石を XRD 分析、XRF 分析、TG-DTA 分析に供試し、石灰石の成分を確認した。

#### ③ 結果

XRF分析から旧本庫鉱山で使用している石灰石とA鉱山での試験で使用している石灰石とも主 成分は Ca (CaO として 98-99%以上)を主体としていた(表 3.1-15)。

XRD 分析では2 試料とも CaCO<sub>3</sub>が第一ピークであった(表 3.1-16、図 3.1-40、図 3.1-41)。

TG-DTA 分析では2 試料とも CaCO<sub>3</sub>が 99%以上であることを示した(表 3.1-17)。

以上から、現地試験で pH が上昇しなかったのは石灰石成分の相違ではないことが示唆された。

					主要元素					微量元素	
No.	ID	$SiO_2$	$A1_{2}0_{3}$	$Fe_2O_3$	MgO	Ca0	$K_2O$	$P_{2}O_{5}$	$SO_3$	C1	NiO
		mass%	mass%	mass%	mass%	mass%	mass%	mass%	mass%	mass%	mass%
1	石灰石(旧本庫鉱山)	0.07	0.04	0.14	0.20	99.27	-	0.05	0.02	0.07	-
2	石灰石(A鉱山)	0.39	0.04	0.23	0.64	98.12	0.01	0.05	0.04	0.06	0.02
						微量	元素				
No.	ID	Cu0	Zn0	$GeO_2$	$As_2O_3$	Br	$Rb_2O$	Sr0	$Y_{2}O_{3}$	$ZrO_2$	$Nb_2O_5$
		mass%	mass%	mass%	mass%	mass%	mass%	mass%	mass%	mass%	mass%
1	石灰石(旧本庫鉱山)	0.01	0.01	-	0.01	0.01	-	0.09	0.01	-	-
2	石灰石(A鉱山)	-	0.07	0.02	-	-	0.02	0.06	-	0.01	0.01
		微量	元素								
No.	ID	MoO3	$La_2O_3$								
		mass%	mass%								
1	石灰石(旧本庫鉱山)	_	_								
2	石灰石(A鉱山)	0.01	0.20								

表 3.1-15 XRF 成分分析結果

	鉱物名(方解石)
石灰石 (旧本庫鉱山)	57.7
石灰石(A鉱山)	51.4

表 3.1-16 XRD 成分分析結果

※石英指数(標準石英の第1ピークの高さを100とした時の、各鉱物の第1ピークの高さの率による表示)



図 3.1-40 旧本庫鉱山の石灰石の XRD チャート



図 3.1-41 A 鉱山の石灰石の XRD チャート

	CaCO <sub>3</sub>	残
石灰石(旧本庫鉱山)	99.1%	0.9%
石灰石(A鉱山)	99.2%	0.8%

表 3.1-17 TG-DTA 測定結果

(2) 石灰石による中和実験

① 目的

石灰石によって坑廃水の pH がどこまで上昇するのかをバッチ試験により確認し、中和の限界 について検討を行った。

# 2 方法

坑廃水又は純水を1Lビーカーに入れ、石灰石は粗石系列で使用している石を1個、石灰石以外については試料をCaCO3の溶解度を超えて過剰に(1Lに対して5g)添加しスターラーで攪拌し、一日以上反応させた。

使用した試料は以下のとおりである。

- ・石灰石(洗浄済) : 現地で使用している石灰石を超音波洗浄(純水で5時間)したもの
- ・破砕パウダー :洗浄した石灰石を破砕してパウダー状にしたもの
- ・試薬(CaCO<sub>3</sub>) : CaCO<sub>3</sub> 99.9%(特級 和光製薬)
- ・石灰石(未洗浄) :未洗浄の現地で使用している洗っていない石灰石
- ・表面パウダー:購入時の石灰石の表面に付着していたパウダー

# ③ 結果

飽和実験の結果を表 3.1-18 及び表 3.1-19 に示した。

洗浄済石灰石で pH は 6.67 まで上昇し、石灰石の破砕パウダーでは pH 7.4 まで上昇した。

試薬では pH 8.0 まで上昇し、表面パウダー及び未洗浄の石灰石では、それぞれ試薬を上回る pH 8.1、pH 8.2 まで上昇した。

連続処理試験での試験第一期にpHが7.9まで上昇したのは、表面パウダーによるものと考えられた。

うちょい な		EC	Cu	Zn	Cd	Fe	Al	Mn	Na	Mg	Ca	K	Pb	C1	${\rm S0_4}^{2-}$	${\rm CO_3}^{2-}$	$HCO_3^-$
武州石	рн	mS/m	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	$\mathrm{mg/L}$	$\mathrm{mg/L}$	$\mathrm{mg/L}$	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
坑廃水 (初期値)	4.02	29	4.7	13	0.15	1.9	1.9	0.34	9.8	6.3	8.6	3.3	1.4	10	110	-	-
坑廃水+石灰石(洗浄)	6.67	28	0.82	11	0.13	0.014	0.016	0.32	10	6.4	23	3.4	0.095	10	110	-	-
坑廃水+石灰石(破砕パウダー)	7.41	32	0.063	3.9	0.077	0.003	0.010	0.33	10	6.5	37	3.7	0.013	11	110	-	-
坑廃水+CaC03	8.00	35	0.041	0.43	0	0	0.022	0.033	9.9	6.3	49	3.3	0.005	10	110	-	-
純粋水+石灰石(未洗浄)	8.24	11	0.010	0.028	0	0	0.045	0.002	0.11	0.60	21	0.10	0.003	0.15	0.40	-	-

表 3.1-18 飽和実験結果(1)

※下限値以下は0と示す

#### 表 3.1-19 飽和実験結果(2)

ままれ 々	ъЦ	EC	Cu	Zn	Cd	Fe	Al	Mn	Na	Mg	Ca	K	Pb	C1 <sup>-</sup>	${\rm S0_4}^{2^-}$	$CO_3^{2-}$	$\mathrm{HCO_3}^-$
武小子石	рп	mS/m	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	$\mathrm{mg/L}$	mg/L	$\mathrm{mg/L}$	$\mathrm{mg/L}$	$\mathrm{mg/L}$	mg/L
坑廃水(初期値)	4.24	27.1	3.8	9.7	0.13	1.4	2.1	0.25	11	5.2	9.7	3.5	1.0	10	96	0	0
表面パウダー	8.07	38.4	0.003	0.30	0	0.002	0.014	0.091	12	5.8	49	3.8	0.003	12	100	0	330

※下限値以下は0と示す

(3) 炭酸カルシウムの溶解実験

① 目的

現地試験では pH が 7 付近までしか上昇しなかった。これを受けて、室内試験により坑廃水の 温度や金属濃度等による、炭酸カルシウムの溶解に対する影響を評価し、現地試験での pH 上昇 が浮上分であったことの原因を解明した。

カラム試験(方法)

洗浄した石灰石を用いて現地試験を再現する目的で現地試験と同じ滞留時間(15時間、30時間)でカラム式によりpHの上昇を確認した。

洗浄した石灰石をカラムに充填し、石灰石の上面まで純水を加えて、入った容量から空隙率を 算出した。純水を抜いた後、1日程度乾燥させた。その後ポンプにより、各設定滞留時間での流 量をカラムに通水し、試験を実施した。

滞留時間は15時間(流量5mL/min)及び30時間(2.5mL/min)に設定した。

サンプリングした試料はフィルター(0.45 μm)でろ過し、pH の測定及び重金属分析に供試した(水質分析は 3.1.2.1(2)章に記載)。



図 3.1-42 カラム試験の実施状況

3 カラム試験(結果)

滞留時間 15時間、30時間での結果を図 3.1-43 に示す。

現地試験同様に Zn、Cd、Mn 濃度は原水とほぼ同等で除去できなかった。Cu、Fe、Al、Pb 濃度は原水よりも減少した。なお、Cu 濃度は排水基準値(3 mg/L)以下まで低減したが、Pb 濃度は排水基準値(0.1 mg/L)よりも高くなった。pH 上昇の到達点は現地試験と同様 pH 7 付近であった。



図 3.1-43 カラム試験結果

#### ④ バッチ試験(方法)

現地試験の A 槽で鉄水和物と思われるオレンジ色の殿物(図 3.1-44)が多くみられた。この殿物は A 槽内で多く見られ、B 槽、C 槽でも見られた。この殿物が石灰石の表面へ堆積し表面が被 覆されることによる石灰石の反応性の差異の有無を確認した。



図 3.1-44 石灰石に付着している殿物

バッチ試験は洗浄した石灰石と連続処理試験での A 槽、B 槽、C 槽から収集した石灰石(以下、 それぞれ「洗浄石灰石」、「A 槽石」、「B 槽石」、「C 槽石」と記載)の 4 種類について試験 を実施した。

反応器(5Lポリビーカー)に各石灰石を充填し(各反応器に約 6.86 kg 充填)、坑廃水を入れて 600 rpm で攪拌した。

pHを確認しながら変動が大きい時(約 pH 0.5 上昇ごと)にサンプリングを実施した。

石灰石をそのまま充填してスターラーで攪拌することはできないため、図 3.1-45 のようにスタ ーラーバーをカバーで覆い攪拌できるようにした。また、サンプル水は図 3.1-45 のようなチュー ブを垂らし、下方からサンプリングを実施した。

サンプリングした試料はフィルター(0.45 µm)でろ過し、pH 測定及び重金属分析に供試した。 ※1回のサンプルで必要な水量が多いためそれぞれの反応器について 2つ用意した(例 A-1,A-2)。

採水後、水位がスターラーカバーへ達した場合に、もう一つの反応器からのサンプリングを実施した。

洗浄石灰石と各槽から採石した石灰石(3種類)の試験は別日に実施した。



図 3.1-45 反応器のイメージ及びサンプリング用チューブの状況



図 3.1-46 石灰石充填後

⑤ バッチ試験(結果)

# A. pHと重金属濃度について

pHの経時変化を図 3.1-47 に、各石灰石での分析結果を表 3.1-20~表 3.1-23 に示し、pH と重金属の関係を図 3.1-48 に示す。

pH はどの石灰石も反応初期に急激に上昇した。その後、凡そ 60 分後から上昇速度が急落し、 pH 7 付近まで達した。1500 分(25 時間)までは更に緩慢な上昇となり、1500 分以降にプラトー となった。上昇の限界は pH 7.5 付近であり、どの石灰石も大きな差は見られなかった。

また、pHと重金属の関係をみるとpHが7.5を超えるとPbとCuは排水基準値以下まで減少した(図3.1-48)。また、ZnとCdは、pH7.5~7.6で排水基準値近くまで低減された。



図 3.1-47 pHの経時変化

経過時間	рН	EC	Cu	Zn	Cd	Fe	A1	Mn	Na	Mg	Са	K	Pb	C1 <sup>-</sup>	S04 <sup>2-</sup>
(分)	<b>P</b>	mS/m	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
0	4.24	27.2	3.8	9.8	0.12	0.6	2.0	0.27	10	5.3	9.3	3.7	1.1	9.7	94
5	5.00	27.1	3.5	9.8	0.12	0.006	0.71	0.27	11	5.4	14	3.9	0.86	10	96
15	5.70	27.3	3.4	10	0.12	0.07	0.30	0.27	11	5.5	16	3.9	0.76	11	100
30	6.21	27.9	2.9	9.7	0.12	0.003	0.090	0.26	11	5.5	18	3.9	0.57	10	94
60	6.69	29.4	2.4	10	0.12	0	0.026	0.27	11	5.5	21	3.9	0.32	11	100
180	6.98	30.5	1.9	9.8	0.12	0.001	0.012	0.27	11	5.6	24	4.0	0.22	15	130
1380	7.33	32.0	0.33	7.4	0.075	0.002	0.010	0.26	11	5.6	28	4.1	0.058	12	99
3000	7.39	33.2	0.17	5.7	0.057	0	0.014	0.26	13	5.8	29	4.6	0.011	15	100
													E LE DI	<b>L</b> )- <b>L</b> 0	1

表 3.1-20 洗浄した石灰石での分析結果

※下限値以下は0とする

表 3.1-21 A 槽の石灰石で分析結果

経過時間	рH	EC	Cu	Zn	Cd	Fe	A1	Mn	Na	Mg	Ca	K	Pb	C03 <sup>2-</sup>	$\mathrm{HCO_3}^-$	C1 <sup>-</sup>	S04 <sup>2-</sup>
(分)	рп	mS/m	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
0	4.00	35.0	8.7	18	0.23	0.18	3.7	0.41	8.9	8.1	8.5	3.0	1.9	0	0	9.3	130
6	5.42	36.7	7.7	17	0.22	0.001	0.99	0.42	9.0	8.2	23	3.0	1.7	0	15	9.4	140
16	5.80	39.0	6.8	17	0.21	0	0.30	0.41	8.9	8.2	27	3.0	1.2	0	11	9.4	140
38	6.19	38.5	5.5	16	0.20	0	0.075	0.40	9.0	8.3	31	3.0	0.75	0	13	9.4	150
127	6.61	40.9	3.1	15	0.19	0	0.002	0.42	9.0	8.3	38	3.0	0.26	0	20	9.5	150
461	7.02	43.7	0.69	12	0.15	0	0.004	0.39	9.1	8.3	48	3.0	0.09	0	27	9.7	160
1401	7.34	46.7	0.085	3.4	0.069	0	0.017	0.36	9.6	8.4	59	3.1	0.01	0	25	10.6	180
2831	7.45	54.1	0.15	2.2	0.044	0	0.019	0.34	8.9	8.6	78	3.0	0.02	0	65	9.5	190
8624	7.61	56.2	0.044	0.28	0.010	0	0.064	0.21	9.0	8.5	82	3.0	0	0	57	9.5	200

※下限値以下は0とする

表 3.1-22	B槽の石灰石	での分析結果
----------	--------	--------

経過時間	рН	EC	Cu	Zn	Cd	Fe	A1	Mn	Na	Mg	Ca	K	Pb	C03 <sup>2-</sup>	$\mathrm{HCO_3}^-$	C1 <sup>-</sup>	S04 <sup>2-</sup>
(分)	рп	mS/m	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
0	4.00	35.0	8.7	18	0.23	0.18	3.7	0.41	8.9	8.1	8.5	3.0	1.9	0	0	9.3	130
3	6.49	36.0	7.5	17	0.22	0.002	0.045	0.42	9.0	8.2	24	3.0	1.1	0	31	9.4	130
11	6.58	36.0	6.4	17	0.22	0	0.023	0.41	8.9	8.2	26	3.0	0.91	0	31	9.4	130
42	6.72	36.4	4.6	17	0.22	0	0.010	0.40	9.0	8.2	29	3.0	0.52	0	32	9.4	130
276	7.07	38.6	1.6	14	0.19	0	0.002	0.39	9.0	8.3	38	3.1	0.17	0	42	9.6	130
407	7.19	39.5	0.91	12	0.16	0	0.002	0.40	9.1	8.3	41	3.1	0.10	0	42	9.7	130
1371	7.40	39.3	0.18	3.9	0.067	0	0.045	0.37	9.5	8.3	45	3.2	0.18	0	37	10.6	130
2811	7.55	42.0	0.28	4.8	0.067	0	0.003	0.37	9.0	8.4	50	3.0	0.065	0	58	9.5	130
8591	7.57	41.9	0.12	1.2	0.022	0	0.011	0.28	9.0	8.4	52	3.0	0.030	0	55	9.6	130

※下限値以下は0とする

表 3.1-23 C槽の石灰石での分析結果

経過時間	ъН	EC	Cu	Zn	Cd	Fe	A1	Mn	Na	Mg	Ca	K	Pb	C03 <sup>2-</sup>	HCO3	$C1^{-}$	S04 <sup>2-</sup>
(分)	рп	mS/m	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
0	4.00	35.0	8.7	18	0.23	0.18	3.7	0.41	8.9	8.1	8.5	3.0	1.9	0	0	9.3	130
4	6.42	34.5	7.6	18	0.22	0	0.1	0.41	9.0	8.2	21	3.1	1.4	0	22	9.4	130
16	6.45	34.8	6.8	17	0.22	0	0.065	0.41	9.0	8.2	23	3.1	1.1	0	21	9.4	130
82	6.71	36.0	5.0	17	0.22	0	0.005	0.42	9.0	8.3	28	3.1	0.58	0	26	9.4	130
390	7.01	37.6	2.2	16	0.20	0	0	0.40	9.1	8.3	34	3.1	0.23	0	35	9.6	130
1326	7.34	37.7	0.39	11	0.14	0	0	0.40	9.4	8.3	37	3.2	0.092	0	30	10.2	130
2790	7.40	40.5	0.53	11	0.11	0	0.031	0.40	9.0	8.4	44	3.1	0.090	0	48	9.5	130
8550	7.34	40.8	0.23	5.4	0.058	0	0	0.36	9.1	8.5	47	3.1	0.034	0	45	9.5	130

※下限値以下は0とする





赤:洗浄石灰石、青:A槽石灰石、緑:B槽石灰石、紫:C槽石灰石
 ※赤線は排水基準、赤点線は山形県の上乗せ排水基準を示す。
 図 3.1-48 pHと重金属の関係

B. A 槽石灰石からの Ca<sup>2+</sup>及び SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>の溶出について

図 3.1-49 及び図 3.1-50 に Ca<sup>2+</sup>と SO<sub>4</sub><sup>2</sup> 濃度の経時変化を示す。また、図 3.1-51 には Ca<sup>2+</sup>と SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 濃度で補正した経時変化、図 3.1-52 には CaSO<sub>4</sub>の溶解度を示す。

A槽から採集した石灰石ではCa<sup>2+</sup>濃度の上昇が他の石灰石に比べて大きかった。同時に、SO4<sup>2-</sup> 濃度も時間と共に上昇していた。

 $Ca^{2+}$ 濃度と SO4<sup>2-</sup>濃度が同時に上昇したことから、CaSO4の溶解を想定し SO4<sup>2-</sup> 濃度の原水からの過剰分は CaSO4 が溶解したものと仮定した。

また、A 槽の石灰石を用いた実験結果で SO4<sup>2</sup>濃度で補正した Ca<sup>2+</sup>濃度の上昇傾向は、他の石 灰石とほぼ同様であった(図 3.1-51)。

この結果から、現地試験の A 槽では原水が 10℃程度と低温なため CaSO4 が生成され、A 槽の 石灰石に CaSO4 が付着し、室内試験中は室温が 25℃と高いため CaSO4 が徐々に溶解したと考え られた。

石灰石による坑廃水処理では石灰石表面が CaSO4 で覆われる可能性がある。しかし、補正した Ca<sup>2+</sup>濃度の上昇傾向は他の石灰石と同様であったことから、CaSO4 の生成が石灰石溶解に与える 影響は本実験では限定的であると考えられた。



図 3.1-49 Ca<sup>2+</sup>濃度の経時変化



図 3.1-50 SO4<sup>2</sup>濃度の経時変化



図 3.1-51 補正した Ca<sup>2+</sup>濃度の経時変化



図 3.1-52 CaSO4の溶解度(梅津 1991) \*1

# C. 溶解速度とpHの関係について

4 種類の石灰石の溶解速度を比較したものを図 3.1-53 に示し、溶解速度と pH の関係を示した ものを図 3.1-54 に示す。

全ての石灰石において初期に反応速度が速く、それ以降に速度が大きく減少した(図 3.1-53)。

また、溶解速度とpHの関係図(図 3.1-54)と Plummer の研究例(図 3.1-55)を比較すると類 似のグラフが得られ、石灰石の溶解速度は接している水溶液のpHに最も依存したと考えられた。



図 3.1-53 CaCO3の溶解速度



図 3.1-54 CaCO3の溶解速度と pHの関係



図 3.1-55 Plummer の CaCO3 溶解速度の研究例 (Plummer et al. 1978) ※<sup>10</sup>

# (4) 室内試験まとめ

- ・XRD等の解析から使用していた石灰石は旧本庫鉱山とA鉱山ではほとんど差はなかった。
- ・連続処理の試験第一期にpHが7.9まで上昇したのは、表面パウダーによるものと考えられた。
- ・カラム試験でHRT15時間、30時間でも到達したpHは現地試験と同様pH7付近であった。
- ・表面の殿物付着程度にかかわらずどの石灰石も反応初期に急激に pH が上昇した。
- ・1500分(25時間)以降、pHはプラトーになり、上昇の到達点はpH 7.5付近であった。
- ・Zn、Pbは pH 7.5 まで上昇すれば排水基準値以下まで除去されることが期待された。

3.1.3.3. PHREEQC による思考実験

- (1) シミュレーション①
- ① 目的

現地で実施した連続試験ならびに室内試験で実施したバッチ試験やカラム試験では pH の到達 点が pH 7 付近と低かった。原因を探るため、地球科学コード PHREEQC を用いて様々な水溶液で の CaCO3 溶解時の水質変化のシミュレーションを実施し、バッチ試験により得られた結果と比較 した。

2 計算方法

水溶液 1 L に CaCO<sub>3</sub>を少量(0.01 mmol ずつ 1 mmol まで)加えて溶解させ、ステップごとに pH を計算した。

PHREEQC での計算では minteq.v4 のデータベースを使用した。

【PHREEQC条件】

- ・水温は25℃、O2、CO2は大気と平衡
- ・CaCO<sub>3</sub>は"飽和指数<0"では加えた瞬間に溶解し、"飽和指数 = 0"に達するとそれ以上は溶 解しない(過飽和状態は考慮しない)。
- ・A 鉱山本坑坑内水(以下、本坑坑内水)の化学物質濃度は表 3.1-24 に示したパラメーターを使用した。
- ・「水溶液の種類」を変えて以下のとおり計算した。
- 水溶液①: PHREEQC データに入っている pH7.0 の純水
- 水溶液②:pH4の塩酸+硫酸溶液
- 水溶液③:アルカリ金属(Na<sup>+</sup>、K<sup>+</sup>)及びアルカリ土類金属(Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>)濃度を本坑坑内水 と同じにした pH 4 の塩酸+硫酸溶液
- 水溶液④:水溶液③に Al<sup>3+</sup>、Cd<sup>2+</sup>、Cu<sup>2+</sup>、Fe<sup>2+</sup>、Mn<sup>2+</sup>、Zn<sup>2+</sup>を加えて本坑坑内水と同じ濃度に した溶液
- 得られた水溶液④のシミュレーション結果とバッチ試験の結果を以下で比較した。

pH	4.0
Al <sup>3+</sup>	0.074
Ca <sup>2+</sup>	0.21
Cd <sup>2+</sup>	0.0013
Cu <sup>2+</sup>	0.076
Fe <sup>2+</sup>	0.029
Mg <sup>2+</sup>	0.26
Mn <sup>2+</sup>	0.0062
Pb <sup>2+</sup>	0.0068
Zn <sup>2+</sup>	0.20
Na <sup>+</sup>	0.43
K <sup>+</sup>	0.084
H+	0.10
SO4 <sup>2-</sup>	1.14
Cl-	0.28
NO3 <sup>-</sup>	0.00097
PO4 <sup>3-</sup>	0.00042

表 3.1-24 本坑坑内水の化学物質濃度のパラメーター(単位: mmol/L: pHを除く)

③ 結果

シミュレーション及びバッチ試験との比較により得られた結果を図 3.1-56~図 3.1-60 に示す。

純水では、1 L に CaCO3 0.12 mmol を加えた段階で飽和に達し、pH も 9.91 になった。

水溶液②~水溶液④と水溶液組成を本坑坑内水に近づけていくと、飽和に達するまでに必要と する CaCO<sub>3</sub>が増え、到達する pH が低下した。

到達する pH の低下、必要とする CaCO<sub>3</sub>の量は確認できたが、実測値と有意の差があった(図 3.1-60)。

pHは水溶液の組成にも大きく依存しており、金属濃度が高くなるほど pH 上昇に必要な CaCO<sub>3</sub> 量が多くなると考えられた。



図 3.1-56 水溶液①への CaCO3の添加



図 3.1-57 水溶液②への CaCO3の添加



図 3.1-58 水溶液③への CaCO3の添加



図 3.1-59 水溶液④への CaCO3の添加



図 3.1-60 本坑坑内水のシミュレーション結果とバッチ試験の実測値の比較

(2) シミュレーション②

① 目的

シミュレーション①(図 3.1-60) により pH のシミュレーション結果と実測値に差があった。 原水中の Ca (0.21 mmol/L) と Mg (0.26 mmol/L) 濃度は高く原水中の pH は 4 と低いため、 CaCO<sub>3</sub> と MgCO<sub>3</sub>の溶解が原因として考えられた。よって、炭酸塩が溶解して生成した CO<sub>2</sub> が大 気に逃散せず水溶液中に保存される場合のシミュレーションを行った。

2 方法

シミュレーション①での水溶液④に初期の溶存無機炭素(DIC: Dissolved inorganic Carbon)の パラメーターを追加し pH の変化を確認した。

③ 結果

原水中に溶存している DIC が多くなるほど飽和に必要な CaCO<sub>3</sub> 量が多くなり、到達する pH が 低くなった。

実測値とシミュレーション結果を比較すると DIC が 0.21 mmol/L と 0.47 mmol/L の中間地点に 実測値が存在するため、初期の本坑坑内水には DIC が 0.3 mmol/L 程度含まれていると考えられ た。



図 3.1-61 初期の DIC 濃度が与える影響(25℃)

- (3) シミュレーション③
- ① 目的

旧本庫鉱山とA鉱山を比較し、pHの上昇に影響している要因の検討を行った。

② 方法

旧本庫鉱山と A 鉱山の坑廃水に、DIC が保存されていた場合と大気と平衡であった場合の pH の変化を比較した。

次に、除去ができないNa及びK溶液に1元素ずつ加えていき、CaCO<sub>3</sub>の必要量とpHの到達点を確認した。

なお、使用したパラメーターは表 3.1-25 に示す。

表 3.1-25	A鉱山及び旧本庫鉱山	の坑廃水の化学物	質濃度のパラ	メーター
----------	------------	----------	--------	------

中位 · IIIIIO/L · pr、 小価を除く						
項目	旧本庫鉱山	A鉱山				
水温	8.5	10				
pН	5.7	4.0				
Na	0.33	0.43				
K	0.026	0.084				
Ca	0.584	0.21				
Mg	0.136	0.26				
Cl-	0.152	0.28				
SO4 <sup>2-</sup>	0.917	1.14				
DIC	0.067	0.3				
DO	0.04	ND				
Fe	0.036	0.029				
Al	0.007	0.074				
Mn	0.006	0.0062				
Cu	0.0017	0.076				
Pb	0.0021	0.0068				
Zn	0.037	0.2				
Cd	0.00012	0.0013				
As	0.00031	ND				

(単位:mmol/L:pH、水温を除く)

※A鉱山のDICは仮定として記載

ND:not determined

# ③ 結果

旧本庫鉱山及びA鉱山を比較した結果を図3.1-62及び図3.1-63に示す。旧本庫鉱山とA鉱山の pHの上がり方は大きく異なっており、pHの飽和に必要なCaCO3も差があった。DICが保存され ていた場合のpHの変化は大気平衡に比べて到達点は低くなり、CaCO3の必要量も多くなった。



図 3.1-62 DIC が保存されていた場合の旧本庫鉱山と A 鉱山の pH 比較



図 3.1-63 大気平衡であった場合の旧本庫鉱山と A 鉱山の pH 比較

旧本庫鉱山及び A 鉱山ともに CaCO<sub>3</sub>による坑廃水の中和を行う場合、到達する pH は Ca、Al が影響し、CaCO<sub>3</sub>必要量は Al、Cu、Zn が影響すると考えられた(図 3.1-64、図 3.1-65)。



図 3.1-64 A 鉱山坑廃水の pH 上昇に対する各金属の影響



図 3.1-65 旧本庫鉱山坑廃水の pH 上昇に対する各金属の影響

(4) 全炭酸低濃度でのバッチ試験

① 目的

シミュレーション②(図 3.1-61)により、pH の上昇は原水の DIC に影響していると考えられた。そのため、エアレーションにより炭酸ガスを低下させた坑廃水を用いて、炭酸ガスが少量の場合の pH への影響について検討した。

2 方法

反応器(5Lポリビーカー)に石灰石を充填し、これに別途エアレーション(8日間)を実施した坑廃水(図 3.1-66)を添加して 600 rpm で攪拌し、石灰石の反応性を確認した。

また、全炭酸濃度は通気有、通気無での初期と最終サンプルで分析した。その他の操作は 3.1.3.2(3)④章のバッチ試験と同様に実施した。

初期に測定した全炭酸濃度をパラメーターとして PHREEQC による解析を実施した。

PHREEQC による解析は通気有の場合は大気と平衡状態、通気無の場合は炭酸が保存されている状態として解析を行った。



図 3.1-66 エアレーション状況

# ③ 結果

A. 重金属等濃度

全炭酸分析の結果を表 3.1-26 に、バッチ試験により得られた結果を表 3.1-27 及び表 3.1-28 に示す。また、pH と重金属の関係を図 3.1-67 示す。

原水中の全炭酸濃度は通気無で 61.1 μmol/L、通気有で 19.6 μmol/L であった(表 3.1-26)。 通気有、無それぞれでで最終的に到達した pH は 7.25、7.35 であった(表 3.1-27、表 3.1-28)。 また、pH の上昇や重金属濃度は 3.1.3.2(3)④章のバッチ試験と優位な差は見られず、CO<sub>2</sub>の低

減が不十分だったため差がなかった可能性が考えられた。

全炭酸	通気						
( $\mu  {\rm mol/L}$ )	有		無				
初期値	19.4	19.8	63.4	58.7			
平均值	19.	6	61	.1			
24時間後	716.0	711.5	424.4	425.1			
平均值	713.	8	424	4.8			

表 3.1-26 全炭酸濃度

# 表 3.1-27 通気有の重金属濃度

経過時間	ъН	EC	Cu	Zn	Cd	Fe	A1	Mn	Na	Mg	Ca	K	Pb	C03 <sup>2-</sup>	HCO3	C1 <sup>-</sup>	S042-
(分)	pn	mS/m	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L											
0	3.58	48.0	13.0	26.0	0.30	0.37	6.10	0.53	8.5	10.0	8.2	2.7	2.3	0	0	9.5	180
3	4.35	42.0	12.0	26.0	0.30	0.25	5.00	0.53	8.6	11.0	17.0	2.7	2.1	0	0	9.6	180
9	4.63	42.0	10.0	26.0	0.30	0.10	3.40	0.53	8.6	11.0	21.0	2.7	1.9	0	0	9.7	180
18	4.90	43.0	11.0	26.0	0.30	0.04	1.90	0.56	8.6	11.0	26.0	2.7	1.7	0	5.8	9.7	180
30	5.80	43.0	9.7	27.0	0.30	0.02	0.44	0.53	8.6	11.0	29.0	2.7	1.5	0	6.1	9.7	180
59	6.20	43.0	8.9	26.0	0.30	0.01	0.11	0.54	8.7	11.0	33.0	2.8	1.2	0	16.0	9.8	180
150	6.55	44.0	6.3	26.0	0.31	0	0.02	0.54	8.7	11.0	36.0	2.8	0.8	0	19.0	9.8	180
445	7.02	47.0	3.0	24.0	0.27	0	0.01	0.53	8.7	11.0	46.0	2.7	0.3	0	38.0	9.9	190
1443	7.25	48.0	1.0	21.0	0.22	0	0.01	0.53	9.0	11.0	51.0	2.8	0.1	0	43.0	10.0	190

※下限値以下は0と示す。

表 3.1-28 通気無の重金属濃度

経過時間	ъH	EC	Cu	Zn	Cd	Fe	A1	Mn	Na	Mg	Ca	K	Pb	C032-	HCO3	C1	S04 <sup>2-</sup>
(分)	pn	mS/m	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
0	3.58	49.0	12	26	0.30	0.22	5.7	0.53	8.3	10	8.1	2.6	2.3	0	0	9.4	180
5	4.64	42.0	12	26	0.30	0.099	4.4	0.51	8.5	11	20	2.7	1.9	0	3.4	9.5	180
39	5.91	43.0	8.6	26	0.29	0.007	0.31	0.53	8.4	11	32	2.7	1.3	0	14	9.5	180
67	6.32	44.0	9.5	18	0.30	0.003	0.10	0.53	8.5	11	35	2.7	1.1	0	19	9.5	180
177	6.81	45.0	5.0	16	0.28	0.002	0.016	0.54	8.5	11	41	2.7	0.65	0	33	9.6	180
405	7.02	47.0	4.5	17	0.27	<0.001	0.008	0.54	8.7	11	44	2.7	0.36	0	35	9.8	180
1445	7.35	46.0	8.4	21	0.24	<0.001	0.003	0.52	9.0	11	47	2.8	0.095	0	30	10	180

※下限値以下は0と示す。



※赤線は排水基準、赤点線は山形県の上乗せ排水基準を示す。図 3.1-67 pHと重金属の関係

#### B. シミュレーション

前項の重金属等の濃度結果により得られた DIC 濃度を用い、CaCO<sub>3</sub>溶解のシミュレーションを 行った(図 3.1-68、図 3.1-69)。

なお、通気有は CO<sub>2</sub>が大気と平衡であると仮定し、通気無は保存されていると仮定してシミュレーションを実施した。

シミュレーション結果から通気有では通気無しに比べて飽和に達する CaCO<sub>3</sub>の必要量が少量となった。

シミュレーション結果による pH の到達点は通気有、無それぞれ pH 8.1、pH 7.8 で、通気を行った方が pH の到達点が高く、DIC 濃度が低い場合に pH が上昇することが考えられた。

全炭酸の実測値は通気有、無ともにシミュレーション結果と大きく異なっていた。そこで、試験実施場所の CO<sub>2</sub> 濃度が 1000µatm と仮定してシミュレーションを行うと全炭酸の実測値と近く なった。シミュレーション結果と異なった理由として、バッチ試験実施場所が通常の CO<sub>2</sub> 濃度の 400µatm と比べて高いと想定される室内だったため、シミュレーション結果と異なったと考えら れた。



図 3.1-68 バッチ試験のシミュレーション結果



図 3.1-69 pH と DIC の関係

#### (5) 思考実験まとめ

- ・石灰石の溶解は水溶液の組成に大きく依存しており、金属濃度が高くなるほど pH 上昇に必要 な CaCO<sub>3</sub>の量が多くなる。
- ・原水中に溶存している CO<sub>2</sub>が多くなるほど飽和に必要な CaCO<sub>3</sub>の量が多くなり、到達する pH が低くなる。
- ・CaCO<sub>3</sub>による坑廃水の中和を行う場合、到達する pH は溶液中の Ca、Al 濃度が影響し、CaCO<sub>3</sub> 必要量は溶液中の Al、Cu、Zn 濃度が影響する。
- ・原水中の全炭酸濃度を低減するために新鮮な空気で通気を実施することができればより少量の CaCO3で pH を上げることができると考えられる。

#### 3.1.3.4. 試験結果まとめ

本年度実施した試験結果を以下にまとめた。

- ・ZnとCdを除去するにはpH7.5を超える必要がある。
- ・現地試験では pH 7.5 までしか上昇しなかった。
- ・室内試験とシミュレーション結果から CaCO3 で pH を 7.5 まで上げることは可能である。
- ・室内試験とシミュレーション結果から DIC を下げると pH が上昇しやすくなる。
- ・ヨシ槽でSSが除去された。
- ・現地試験では滞留時間に関係なく、単位水量が接触する石灰石量に依存して pH が上昇した。

最適プロセスとしては、「①曝気槽→②石灰石槽→③ヨシ槽→④浸透流型(石灰石槽)」が考 えられた。なお、滞留時間は本試験で最短の 15 時間を想定した。また、各槽でのメカニズム及 び役割は以下のとおりである。

①石灰石による処理の前に、曝気槽(シャワー等)を設け、大気との気体交換を十分に行う。

- →原水中に溶存している CO<sub>2</sub>を減らし、また、Fe<sup>2+</sup>の酸化を促進する。溶存の CO<sub>2</sub>を低減する ことよって pH を上昇しやすくし、Fe<sup>2+</sup>を酸化することで後段の石灰石槽で影響が出ないよ うにする。
- ②石灰石で中和処理し、Al<sup>3+</sup>及び Fe<sup>3+</sup>を水酸化物の殿物にする。
  - →Alはシミュレーションにより pHの上昇や CaCO<sub>3</sub>の必要量に大きな影響を与えることが考え られたため初段の石灰石槽で殿物にする。Fe<sup>2+</sup>は水酸化物となる pH が高いため、曝気槽で の酸化で生成促進した Fe<sup>3+</sup>を殿物にする。

③石灰石槽で生成された水酸化物をヨシ槽で水溶液から除去する。

→Al<sup>3+</sup>、Fe<sup>3+</sup>が次の「浸透流型石灰石槽」に影響しないようにする。

④Al<sup>3+</sup>及び Fe<sup>3+</sup>の水酸化物を除いた水溶液を浸透流型で処理をする。なお、できるだけ水路を長くする。

→Al<sup>3+</sup>、Fe<sup>3+</sup>がない溶液の pH はより上がりやすいと考えられ、Zn<sup>2+</sup>、Cd<sup>2+</sup>の殿物が生成される ことが期待できる。

#### 3.1.4. 実規模相当実証試験の準備

#### 3.1.4.1. 処理プロセスの検討

処理プロセスは前項「試験結果まとめ」より「①曝気槽→②石灰石槽→③ヨシ槽→④浸透流型(石灰石槽)」とする。

①石灰石による処理の前に、曝気槽(シャワー等)を設け、大気との気体交換を十分に行う。

②石灰石で中和処理し、Al<sup>3+</sup>及び Fe<sup>3+</sup>を水酸化物の殿物にする。

③石灰石槽で生成された水酸化物をヨシ槽で水溶液から除去する。

④Al<sup>3+</sup>及びFe<sup>3+</sup>の水酸化物を除いた水溶液を浸透流型で処理する。

## 3.1.4.2. 試験設備の設計

前述の「①曝気槽→②石灰石槽→③ヨシ槽→④浸透流型(石灰石槽)」の設計図を図 3.1-70 に 示した。

人工湿地設置予定地には雨水管(U字溝)が通っているため、人工湿地を1池及び2池として 分割した。それぞれの面積及び体積を表 3.1-29 に示す。

人工湿地の体積の内、1池のヨシ植栽区画面積は92.4 m<sup>2</sup>(体積 62.3 m<sup>3</sup>)で2池のヨシ植栽区画 面積は37.1 m<sup>2</sup>(体積 27.7 m<sup>3</sup>)である。

なお、坑口へのユニック車のアクセスを確保することや、地面の掘削を行わないことを条件に 設計を実施し、人工湿地の面積は設置可能な最大面積とした。

	上面積(m²)	底面積(m²)	高さ(m)	体積(m <sup>3</sup> )
1池	108.9	118.5	0.700	79.6
2 池	195.5	210.2	0.700	142.0
合計				221.5

表 3.1-29 人工湿地の面積及び体積

・上面積:人工湿地上部の表面積

・底面積:人工湿地下部の表面積

・高さ:人工湿地の上面積から底面積までの高さ



3.1.5. 自然回帰型坑廃水浄化システムの導入による効果の検討

#### 3.1.5.1. 導入コスト試算

A 鉱山に人工湿地を導入した場合のコストを試算した。人工湿地の直接工事費のみに必要な金額(仮設費、管理費等を除く)は 8,145 千円と概算される(表 3.1-30)。ヨシポット及びヨシの 植栽に用いる土壌は直接工事費(その他工事)に含まれており、本項では金額に含まれていない 石灰石の金額を試算した。

なお、石灰石は納入業者の単価(1 t:9千円)を用い、空隙率は50%、密度は2.7(g/cm<sup>3</sup>)として試算した。

始めに、人工湿地の石灰中和及び浸透流型で使用する石灰石の体積を試算した。

1 池での石灰中和槽の体積は 17.2 m<sup>3</sup> (全体体積 79.5 m<sup>3</sup>-ヨシ使用分体積 62.3 m<sup>3</sup>) で、2 池での浸透流型石灰中和槽の体積は 117.2 m<sup>3</sup> (全体体積 141.9 m<sup>3</sup>-ヨシ使用分体積 24.7 m<sup>3</sup>) であった。

これにより石灰石分の体積は134.4 m<sup>3</sup>(1池体積17.2 m<sup>3</sup> + 2池体積117.2 m<sup>3</sup>)となる。

石灰石分の体積 134.4 m<sup>3</sup>の内、石灰石の空隙率は 50%であるため、石灰石として使用する体積 は 67.2 m<sup>3</sup>であることから人工湿地での石灰石の必要な重量は 181,440 kg となる。

1tあたり9千円であるため、石灰石の調達費用は1,633千円と試算した。

工事が必要な費用は直接工事費(8,145 千円)に石灰石費(1,633 千円)を追加した費用 9,778 千円と試算された(表 3.1-30)。

表 3.1-30 A 鉱山に人工湿地を導入した場合のコスト

単位	立 (	Ŧ	円	)
				•

1、直接工事費	8,145
土工事	2,117
防水工事	1,367
その他工事	3,695
排水設備工事	965
2、石灰石費	1,633
計	9,778

#### 3.1.5.2. コスト削減について

A 鉱山における人工湿地導入によるコスト削減について検討した。一般的なアクティブトリー トメント(以下、AT)施設に係るコストの項目を表 3.1-31 に、A 鉱山の AT 施設の費用構成を図 3.1-71 に示す。

一般的な中和処理施設の代替として人工湿地を導入した場合、以下の項目によるコスト削減が 考えられる。

- ・薬剤費用 : 消石灰等の中和剤や逆中和並びに凝集剤の使用量削減による費用削減
- ・殿物処理費用 : 中和剤や凝集剤の使用量減少や人工湿地による SS 捕捉による費用削減
- ・労務費用 : 中和処理の回数、殿物処理の回数の減少による費用削減
- ・修繕費 :処理施設のメンテナンスの一部減少
- ・電力費 : 中和処理や逆中和処理設備の稼動削減による電力消費量減少

A 鉱山の費用の特徴として、豪雪帯に施設があるため、除雪費がある。また、設備が新しいため、補修費の計上はされておらず、労務費が 32%と大きい割合を示している。

なお、殿物処理費用は計上されていないため、削減できる項目としては材料費(薬剤費)が考 えられる。労務費、修繕費、電力費も削減できる可能性はあるが、中和処理に関わっている割合 が不明瞭であるため、材料費(薬剤費)の削減についてのコスト試算を行った。

A 鉱山には多くの坑廃水の系統があり各系統の流量比を表 3.1-32 に示す(昨年度の報告書より)。なお、表面流型の空隙率はヨシの重さや土壌の状態によって変わるため、本項では石灰石 槽のみの体積を使って試算を行った。

人工湿地の対象としている本坑坑内水の割合は凡そ 50%であった(表 3.1-32)。そのため、薬 剤の 50%は坑内水処理で使用しているとして試算した(式1)。

本坑坑内水処理の材料費(円)=平成27年度材料費(円)×0.5・・・・・・(式1)

坑廃水の処理流量は平均流量 154 L/min のうち滞留時間 15 時間で処理可能な流量が約 75 L/min (Q (m<sup>3</sup>/min)=人工湿地体積(134.4 m<sup>3</sup>)/滞留時間(900 min)より算出) (湿地の体積が 134.4 m<sup>3</sup>の場 合で算出)であることから約 48%の坑廃水を処理できるものとして試算した(式2)。材料費は 平成 25 年度から平成 27 年度の内、費用が高かった平成 27 年度の金額を使用し、最大限削減可能 な材料費は 1,403 千円となった。

最大限削減可能な材料費(円)=本坑坑内水処理の材料費(円)×0.48・・・・(式2)

削減可能な材料費に初期導入コストとして人工湿地のコストを含めて試算をした(図 3.1-72)。 次に、材料費コストから削減時コストを差し引いた削減分から、人工湿地導入の初期投資額が何 年で回収できるかを試算した(図 3.1-73)。

人工湿地の導入額(凡そ 6,484 千円)が回収できる年数はコストが 20%削減時だと 47 年、50% 削減時だと 19 年、80%削減時だと 12 年となった。 今回は材料費のみでの試算であったので、労務費、修繕費及び電力費の削減が加わるとより短 い期間での投資回収が期待できる。

コスト		内容
如期設備费		原水処理槽、中和攪拌槽
初期試開貨		凝集反応槽、沈降分離槽
設備更新非		一般的に 30 年内に必要
	薬剤費用	pH 調整剤、凝集剤、中和剤
	電气中	pH 調整、凝集剤混合
コンーンガーフレ	电入口	沈殿分離、逆中和処理
)/_///×	殿物処理費用	沈降分離槽
	修繕費	設備のメンテナンス
	人件費	点検等

表 3.1-31 アクティブトリートメントコスト項目



図 3.1-71 A 鉱山の坑廃水処理費用(3年平均)

表 3.1-32	A鉱山坑廃水の各系統割合
----------	--------------

系統名	流量 [L/min] (百分率)
<ol> <li>①本坑坑内水(現地試験で使用)</li> </ol>	144.0 (47%)
②ヒューム管流出水	30.3 (10.1%)
③濁水路下流道路審透水(その1)	13.4 (4.5%)
④濁水路下流道路審透水(その2)	6.8 (2.3%)
⑤3 · 1 号堆積場暗渠水	97.5 (32.5%)
⑥第2号堆積場暗渠水	8.4 (2.8%)

2018年12月5日のデータを使用







図 3.1-73 材料費コスト余剰分の推移

# 3.1.6. 自然回帰型坑廃水浄化システムの導入ガイドライン作成に資する情報の整理

3.1.2~3.1.5 章から導入ガイドライン作成に資する情報を表 3.1-33 に整理した。

項目	考えられる課題	本業務での結果
石灰石の粒径	石灰石の粒径により、	連続処理試験では2種類の粒径の石灰石
	表面積が変わるため、	(60-80 mm、20-40 mm)で試験を実施し
	反応速度に影響する可	た。粒径は、pH の上昇に多少影響するが、
	能性がある。	大きな差は見られなかった。
滞留時間	滞留時間の長短で pH の	現地試験では滞留時間を 15、30、60 時間の
	上昇速度が変化する可	3パターンで処理を実施したが、滞留時間を
	能性がある。	長くしたとしても pH の到達点は変わらなか
		った。単位水量あたりに接触する石灰石量
		を増やす必要がある。
石灰石の持続期間	殿物が石灰石に付着	現地試験で使用していた各槽(A槽、B槽、
	し、覆われると反応が	C 槽)で使用していた石灰石を回収し、試
	抑制される可能性があ	験(3.1.3.2(3)④~⑤章バッチ試験)を行っ
	る。	たところ、影響はなかったが、長期間で実
		施すると影響が出る可能性はある。
殿物による目詰まり	石灰石で中和処理を行	連続処理による試験用コンテナに石灰石の
	うと pH 上昇に伴う殿物	状態が見える窓を設置し、8月~11月中旬
	(水酸化物、炭酸塩	に水位及び石灰石に蓄積する殿物を確認し
	等)が生成される。生	たところ影響は見られなかった。また、詰
	成された殿物が反応槽	まりが細石系列で発生すると予想していた
	に溜まることによって	が今回の試験の期間では見られなかった。
	詰まりが生じる可能性	
	がある。	
全炭酸濃度	pH の上昇幅が理論値よ	PHREEQC による予測計算で初期の DIC 濃
	りも低い。	度が高いと pH の到達点が低くなり、CaCO <sub>3</sub>
		の要求量も増加する結果が得られた。パッ
		シブトリートメント導入予定鉱山には、全
		炭酸を測定し、理論上の pH 到達点を確認し
		て導入を検討する必要がある。
植物の活性	SS捕捉の効果が低い。	ヨシを pH の低い坑廃水にさらすと根を張ら
		ない可能性が考えられた。坑廃水に通水す
		る前に植物を十分に活着させることが必要
		である。

表 3.1-33 ガイドライン作成に資する情報の整理

#### 3.1.7. 中和水路型処理の中和剤等の追加検討

#### 3.1.7.1. 石灰石を用いた中和水路型処理の課題

室内試験及び現地試験の結果により、石灰石を用いた中和型水路での処理性の確認を行った。 中和バッチ試験では、pHは最大で7.4 (50時間経過時)までしか上がらなかった。また、 2019/8/7~2019/11/18に本坑坑内水を対象に実施した現地試験では、滞留時間を10~60時間まで 変化させた期間(水が安定的に流れていた期間)にも、目標であるpH8まで中和することはで きなかった(図3.1-74)。この際、ZnやCdはほとんど除去されなかったが、Pbは水酸化物とし て沈殿が期待できる理論上のpH(9.47)に達していないにも関わらず40~99%の範囲で除去さ れており、炭酸塩として沈殿していることが示唆された。これを受けて、中和水路型処理により Zn、Cd、Pb及びCuを除去し得る中和剤の選定について、石灰石に拘らずに行い、またそれを用 いた際の滞留時間の検討等を実施し、令和2年度に予定している現地での実規模相当試験の基本 設計が可能なデータの収集整理を行った。

なお、原水の Fe の濃度は平均で 1.4 mg/L であるが、2 ヶ月程度の連続試験により石灰石表面 に褐色被膜が生じ(図 3.1-75)、現地試験を実施していた期間中に石灰石の中和機能に大きく影 響を及ぼす程度ではなかったものの、試験継続時間とともに石灰石の中和効果に悪影響を及ぼす 可能性が示唆された。よって、前処理として曝気槽や鉄酸化菌を用いた除鉄プロセスを検討する 必要があるが、A 鉱山をモデル鉱山として選定し、人工湿地型のパッシブトリートメント技術の 調査を行うという目的を考慮し、中和水路型処理に関する検討業務を優先・先行して実施した。



図 3.1-74 現地試験の pH 挙動概要



図 3.1-75 現地試験実施後(2019/10/30)の石灰石の様子

# 3.1.7.2. バッチ試験による検討

# (1) 検討した中和剤の種類及び性状

坑廃水に対して中和効果が見込めることによりバッチ試験で検討対象とした中和剤の種類及び 特性を表 3.1-34 にまとめる。また、それぞれの中和剤の写真を図 3.1-76 に示す。

種類	Ą	石灰石	ドロマイト	半焼成 ドロマイト	PAdeCS ※1			
主な構成成分		CaCO <sub>3</sub>	CaMg(CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	MgO	CaCO <sub>3</sub>			
(XRD)			CaCO <sub>3</sub>	CaCO <sub>3</sub>	Ca(OH) <sub>2</sub>			
ナわ港出二書	Ca	70.1%	50.9%	₩2	43.5%			
土/s. 博成兀茶	Mg	0.386%	15.7%	*2	0.7%			
(IIIaSS%)	Si	0.182%	0.243%	*2	9.87%			
(ARF)	Al	0.0212%	0.0952%	*2	3.16%			

表 3.1-34 中和剤の種類及び性状の概要

※1 Phosphorus Adsorbent derived from Concrete Sludge の略。高性能脱リン材。

※2データなし。



図 3.1-76 中和剤の写真

石灰石は、99.2%の Caが CaCO3 として存在している、純度の高いものを使用した。

ドロマイトは、CaCO<sub>3</sub>に加えて MgCO<sub>3</sub>も含まれており、石灰石よりも pH 上昇効果が見込める ため、試験対象とした。また、半焼成ドロマイトは、CaCO<sub>3</sub>に加えて、MgO が含まれており

(CaO含有比は1%以下)、ドロマイトよりもpH上昇効果がさらに高い材料として試験に供した。ただ、ドロマイト及び半焼成ドロマイトは石灰石と比較するとその調達コストが高いという デメリットがある。

PAdeCSは、CaCO<sub>3</sub>に加えてCa(OH)<sub>2</sub>が含まれており、pH上昇効果が見込まれる。さらに、コンクリート廃材を再資源化したものであるため、調達コストも抑えることができコストメリットも期待できるため選定した。

#### (2) バッチ試験の実施方法及び条件

バッチ試験で使用した試験水は、本坑坑内水で2019年12月と2020年1月に採水した。水質 を表 3.1-35 に示す。

	pН	Zn	Cd	Cu	Pb	Fe	Al	Mn	Ca	Mg
	-	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
2019年12月	3.50	41.2	0.464	23.2	2.97	3.17	9.29	0.681	7.57	12.8
2020年1月	3.75	27.5	0.312	17.7	2.28	1.34	6.85	0.479	5.86	9.47
一律排水 基準	$5.8 \sim 8.6$	2	0.03	3	0.1	10	-	10	-	-
↑Cu:山形県上乗せ基準1 mg/L が適用										
水酸化物沈殿に より基準を満たす 理論 <b>n</b> H		7.87	6.77	9.47 <sup>*</sup>	10.2	9.52				

表 3.1-35 バッチ試験の試験対象水の水質

※一律排水基準値に対して

バッチ試験は、1Lプラスチック製ビーカーを用いて、全容量1Lで行った。使用する中和剤 の種類、粒径及び固液比を条件ごとに設定し、試験を行った。ビーカーに中和剤を入れた状態で スターラーと撹拌子で攪拌ができるように、スターラーカバーを設置して試験を行った。



図 3.1-77 バッチ試験の様子

また、A鉱山の現地中和水路に2種類の中和剤を前段と後段に分けて充填して処理を行うこと も可能であると考え、2種類の中和剤の組み合わせも条件として加えた。基本的には、前段で安 価な石灰石を用いて、後段でより高い中和効果を持つ中和剤により処理を行うことを想定して、 石灰石でのバッチ試験後に試験水だけを、別の中和剤を所定の固液比になるように入れた別のビ ーカーに移し替えて、バッチ試験を行った。

なお、試験実施前の中和剤の洗浄については、中和剤表面に付着した微粉による pH 上昇効果 が、連続通水処理を行った際の最適条件の検討に影響を与えるために行ったが、バッチ試験で連 続通水処理をより再現するためには、水道水の代わりに試験水(酸性水)で洗浄することが望ま しいと考え、試験途中から水道水による洗浄から試験水による洗浄に切り替えた。洗浄時間は、 水道水・試験水に関わらず 15 分間とした。 バッチ試験実施中、pHは5分間に1度測定し、金属濃度やIC(全無機炭素)測定用のサンプルについては、適宜採水した。ICに関しては、全ての無機炭素はH2CO3として存在すると仮定して、測定結果をH2CO3に換算してまとめた(実際は、溶存CO2などが存在するであろうことから、参考値としての取り扱いが必要)。

表 3.1-36 に実施した試験条件一覧を示す。実験 No. 1~11の試験水は 2019 年 12 月採水分、実験 No. 11~28 の試験水は 2020 年 1 月採水分である。

実験No.		前段				後段			
		中和剤	洗浄	重量 (kg)	固 液比	中和剤	洗浄	重量 (kg)	固 液比
1	<u>(</u> )-1	石灰石(20-40mm)(75%)+ ドロマイト(5-20mm)(25%)	水	石灰石 0.902 ド미국사 0.303	45 55				
2	<u>1</u> -2	石灰石(20-40mm)(50%)+ ドロマイト(5-20mm)(50%)	水	石灰石 0.602 ド 마기가 0.605	45 55				
3	<u>(</u> ]-3	石灰石(20-40mm)(25%)+ ドロマイト(5-20mm)(75%)	水	石灰石 0.307 ド 마카 0.907	45 55				
4	1-4	⊦ ¤∢1⊦(5-20mm)	水	1.210	45 55				
5	<b>①-5</b>	⊦ ¤⊽1⊦(5-20mm)	水	1.377	55 45				
6	<u></u> 1-6	PAdeCS(P20)	水	0.812	45 55				
7	<u>1</u> -7	PAdeCS(P20)	水	0.008	0.45 99.55				
8	<u>(</u> ]-8	PAdeCS(P20)	水	0.081	4.5 95.5				
9	<u>(</u> )-9	PAdeCS(P20)	水	0.041	2.25 97.75				
10	<b>①-11</b>	半焼成ドロマイト(40-60mm)	水	0.020	1 99				
11	2-1	半焼成ドロマイト(40-60mm)	水	1.030	41 59				
12	<b>②-2</b>	PAdeCS(40-60mm)	水	0.656	41 59				
13	2-4	石灰石(20-40mm)	水	1.048	40 60	半焼成ドロマイト(40-60mm)	水	0.507	20 80
14	2-7	石灰石(5-10mm)	原水		40 60	PAdeCS(40-60mm)	原水	0.250	15 85
15	2-8	石灰石(20-40mm)	水		41 59	半焼成ドロマイト(40-60mm)	原水	1	41 59
16	@-11	半焼成ドロマイト(40-60mm)	原水	1.035	41 59				
17	@-12	半焼成ドロマイト(40-60mm)	原水	1.03	20 80				
18	@-13	PAdeCS(40-60mm)	原水	0.73	47 53				
19	@-14	石灰石(10-20mm)	原水	1.165	47 53				
20	@-15	石灰石(10-20mm)	原水	1.144	47 53	半焼成ドロマイト(40-60mm)	原水	0.508	20 80
21	@-16	石灰石(10-20mm)	洗浄無し		40 60				
22	@-17	石灰石(1-10mm)	原水		40 60	半焼成ドロマイト(40-60mm)	原水	0.251	18 82
23	@-20	石灰石(15-30mm)	原水		40 60				
24	@-21	石灰石(5-15mm)	原水		40 60	半焼成ドロマイト(40-60mm)	原水	0.508	20 80
25	2-PAdeCS1	PAdeCS(40-60mm)	原水	0.140	140 860				
26	2-PAdeCS2	PAdeCS(40-60mm)	原水	0.400	300 700				
27	2-PAdeCS3	PAdeCS(40-60mm)	原水	0.400	310 690				
28	③-PAdeCS	PAdeCS(40-60mm)	原水	0.400	300 700				

表 3.1-36 バッチ試験条件一覧表
#### (3) バッチ試験の結果及び考察

図 3.1-78 に示す凡例について説明する。

「石灰石系の条件」及び「前段が石灰石で後段が他の中和剤の条件」→緑色系統

※「石灰石(5-10 mm)(40:60)/PAdeCS(40-60 mm)(15:85)」は、粒径 5-10 mmの石灰石を固液比
 40:60で試験し、その後、粒径 40-60 mmの PAdeCS を固液比 15:85 で試験したもの。

「石灰石とドロマイト混在の条件」→桃色系統

※「石灰石(20-40 mm)(75%)+ドロマイト(5-20 mm)(25%)(45:55)」は、粒径 20-40 mmの石灰石を 全体の 75 wt%、粒径 5-20 mmのドロマイトを全体の 25 wt%使用し、固液比 45:55 で試験し た系。

「ドロマイト系の条件」→紫色系統

「半焼成ドロマイト系の条件」→青色系統

「PAdeCS 系の条件」→橙色系統

~	
半焼成ドロマイト:青系、ドロマイト:紫系、	石灰石+ドロマイト:桃系、石灰石:緑系、 <mark>PAdeCS:橙系</mark> 、
	/ 直線:前段のみ、破線:前段+後段
——— 石灰石(20-40mm)(75%)+ド 収仆(5-20mm)(25%)(45:55)	—————————————————————————————————————
—————————————————————————————————————	— <b>o</b> — ド ロマイト <b>(5-20mm)(45:55)</b>
— <b>□</b> — ド ロマイト(5-20mm)(55:45)	— PAdeCS(P20)(45:55)
	——————————————————————————————————————
— <u>▲</u> PAdeCS(P20)(2.25 ÷ 97.75)	—●— 半焼成ト゚ロマイト <b>(40-60mm)(1:99)</b>
—■— 半焼成ド ロマ仆(40-60mm)(41:59)	— PAdeCS(40-60mm)(41:59)
● 石灰石(20-40mm)(40:60)/半焼成ドロマ仆(40-60mm)(20:80)	
* 石灰石(20-40mm)(41:59)/半焼成ド ロマイト(40-60mm)(41:59)	—————————————————————————————————————
—▲— 半焼成ド ロマ仆(40-60mm)(20:80)	
—▲— 石灰石(10-20mm)(47:53)	<del>-</del> 石灰石(10-20mm)(47:53)/半焼成ド 収仆(40-60mm)(20:80)
—●— 石灰石(10-20mm)(40:60)	<b></b>
—————————————————————————————————————	▲ 石灰石(5-15mm)(40:60)/半焼成ド ロマ仆(40-60mm)(20:80)
——————————————————————————————————————	PAdeCS(40-60mm)(300∶700)
	——— PAdeCS(40-60mm)(300∶700)
排水基準	

図 3.1-78 バッチ試験の凡例

## 1 pH

全ての試験条件の pH の経時変化については、図 3.1-79 の左図に「石灰石系の条件」、「前段 が石灰石で後段が他の中和剤の条件」、「石灰石とドロマイト混在の条件」及び「ドロマイト系 の条件」を示し、右図に「半焼成ドロマイト系の条件」、「PAdeCS 系の条件」及び「その他の 条件」を示している。



図 3.1-79 バッチ試験の pH 経時変化

横軸の経時変化の時間が滞留時間を意味しており、滞留時間6時間までを拡大表示したものを 図 3.1-80 に示す。

※A 鉱山の本坑坑道内で中和水路型試験を行う場合、利用可能空間体積から考えて、滞留時間 5 時間程度で 20 L/min の水を流すことが可能であるため、5~6 時間を滞留時間の一つの目安として 考察を行うこととする。



図 3.1-80 バッチ試験の pH 経時変化(拡大版)

図 3.1-80 左図では、石灰石を用いた場合、粒径による中和効果の差は確認できるものの、どの 粒径を使用しても滞留時間5時間前後でpHは7前後までしか上昇しない結果となった。これは、 A 鉱山での現地試験の結果と整合的であり、バッチ試験においても石灰石だけで pH を 8 以上ま で上昇させることが困難なことが示唆された。

なお、「石灰石(10-20 mm)/(40:60)」の系は、試験開始後 30 分弱で pH 7.2 程度まで上昇してい るが、これは、石灰石表面の微粉が付着したままの状態で試験を行ったことによる急激な pH 上 昇挙動であり、連続通水試験を行った際には、この中和能力の維持は難しいと考える。

石灰石に、石灰石よりも中和効果が高いとされるドロマイトを混在させると、中和効果の改良 が確認され、滞留時間 5 時間程度で 7.3~7.5 程度まで pH が上昇した。また、pH 上昇挙動の立ち 上がりの速度にも有意差が見られた。しかしながら、ドロマイトが混在している条件で 15 時間 以上試験を継続しても、pH は 8.0 まで届かないことが分かった。ドロマイトが石化積と比較して 調達コストが高いこともあり、ドロマイトの中和効果(効率)は十分ではないことが分かった。

一方、石灰石を通した後の試験水に対して PAdeCS や半焼成ドロマイトで試験を継続した場合、 切り替えたタイミングで pH 上昇速度が一変し、pH が即座に上昇した。前段の石灰石の系では、 pH は 7 程度まで上昇しており、切り替えのタイミングで半焼成ドロマイト(固液比は凡そ 20: 80~40:60 程度)で試験を始めて 30 分~1 時間程度で、pH の排水基準上限である 8.6 を超えて おり、半焼成ドロマイトは非常に強い pH 上昇効果を示すことが示された(後述するが、図 3.1-80 右図で、半焼成ドロマイトだけで試験を行った結果、開始2時間程度で pH 10まで上昇し、 pH 10.5 前後で平衡に達した)。PAdeCS についても、pH 上昇効果が高いことが確認され、石灰石 の滞留時間2時間でpH 6.8 まで上昇した状態で PAdeCS に切り替えると、切り替えてから 1.5 時間(合計 3.5 時間)で 8.6 に到達した。この系では、PAdeCS の固液比を 15:85 と、比較的固体分を低めに設定していることから(PAdeCS 溶解時の平衡pHが12前後であることを考慮すると)、 PAdeCS による pH 上昇効果は、固液比を調整することである程度制御可能である可能性が示唆された。これは、半焼成ドロマイトでも同様の考え方ができる可能性がある。

他方で、図 3.1-80 右図では、半焼成ドロマイトや PAdeCS の固液比の設定によって、pH 上昇効 果が著しく異なることが分かった。例えば、PAdeCS (5-20 mm)を固液比 45:55 とすると、pH は 15 分程度で 12 以上まで上昇してしまうが、PAdeCS (5-20 mm)を固液比 2.25:97.75 とする と、約 3 時間程度かけて pH 8 まで上昇した。半焼成ドロマイトでも同様の傾向が確認された。

#### [H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>](参考值)

※ICに関しては、全ての無機炭素がH<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>として存在すると仮定して、ICの測定結果をH<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> に換算したが、実際は溶存 CO<sub>2</sub>などが存在するであろうことから、参考値としての取り扱いが必 要。

図 3.1-81 に pH、[H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>]、[Ca]、[Zn]、[Cd]、[Mg]、[Cu]、[Pb]、[Mn]、[Fe]、[Al]、[As]の経時 変化を、図 3.1-82 に各元素濃度と pH との相関を、図 3.1-83 に各元素濃度と[H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>]との相関を示 す。

[H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>]の図 3.1-81 及び図 3.1-82 のグラフを見てみると、石灰石(緑色系統)の炭酸イオン濃度を基準として考えると、ドロマイト(紫色系統や桃色系統)を使用している系では、炭酸イオン濃度が高く、pH 上昇に伴う炭酸イオンの生成比率が高いことが分かり、これはドロマイトの化学式(CaMg(CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>)と調和的である。一方で、PAdeCS(橙色系統)や半焼成ドロマイト(青色系統)を使用している系では、比較的炭酸イオン濃度が低い。これは、PAdeCSを使用した場合、CaCO<sub>3</sub>よりも Ca(OH)<sub>2</sub>成分の方が早く溶解して pH を上昇させ、CaCO<sub>3</sub>の溶解速度が遅くなる pH 領域まで早めに到達してしまい、結果として CaCO<sub>3</sub>の溶解が抑制されているのではないかと考えられる。また、半焼成ドロマイトについても、CaCO<sub>3</sub>よりも MgO の方が溶解速度が速いということで、炭酸イオンについては PAdeCS と同様の現象が起こっていると考えられる。

3 [Ca], [Mg]

図 3.1-81 及び図 3.1-82 で、Ca については、石灰石やドロマイト、PAdeCS などは、濃度の差異 はあるものの、ある程度の溶出が確認された。一方で、半焼成ドロマイトについては、滞留時間 (pH) に関わらず Ca の溶出はほとんど起こっていなかった。図 3.1-81 の Ca のグラフを見ると、 石灰石の後に半焼成ドロマイトに切り替えた条件では、切り替えたタイミングで Ca の溶出が止 まっていた。これは、半焼成ドロマイト中の CaCO<sub>3</sub>がほとんど溶解していないことを示している。 また、図 3.1-81 の Mg のグラフを確認すると、半焼成ドロマイトを使用した試験条件のみで Mg の急激な溶出が確認されたため、これは半焼成ドロマイト中の MgO からの溶出と考えられる。 この結果は、[H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>]の挙動と調和的である。



3.1-63

凡例
単規成ドロマイト:青系、ドロマイト:紫系、 石沢石+ドロマイト:紫系、石沢石:緑系、 Patters:第系。
線: 前段のみ、破線: 前段 + 後段
石灰石(20-40mm)(75%)+ドロマイト(5-20mm)(25%)(45:55)
_=_石灰石(20-40mm)(50%)+ド ☞什(5-20mm)(50%)(45:55)
——石灰石(20-40mm)(25%)+ト゚ロマイト(5-20mm)(75%)(45:55)
-o- ドロマイト(5-20mm)(45:55)
-e- F 마건ト(5-20mm)(55:45)
PAdeCS(P20)(45:55)
- PAdeCS(P20)(0.45 : 99.55)
PAdeCS(P20)(4.5 : 95.5)
半焼成ド ロマイト(40-60mm)(1:99)
半焼成ドロイト(40-60mm)(41:59)
石灰石(20-40mm)(40:60)/半焼成ドロイト(40-60mm)(20:80)
- ● - 石灰石(5-10mm)(40:60)/PAdeCS(40-60mm)(15:85)
*石灰石(20-40mm)(41:59)/半焼成ドロイト(40-60mm)(41:59)
半焼成ドロイト(40-60mm)(20:80)
-e- PAdeCS(40-60mm)(47 : 53)
——— 石灰石(10-20mm)(47:53)
—— 石灰石(10-20mm)(40:60)
——石灰石(15-30mm)(40:60)
石灰石(5-15mm)(40:60)/半焼成ドロ小(40-60mm)(20:80)
-*- PAdeCS(40-60mm)(140 : 860)
PAdeCS(40-60mm)(310 : 690)
PAdeCS(40-60mm)(300 : 700)
排水基準



図 3.1-82 バッチ試験の各元素濃度と pH との相関

凡例
中観成ドロマイト:青糸、ドロマイト:紫糸、
PAdeCS: 股东。
直線:前段のみ、破線:前段+後段
石灰石(20-40mm)(50%)+ド 四小(5-20mm)(50%)(45:55)
——石灰石(20-40mm)(25%)+ドロマイト(5-20mm)(75%)(45:55)
├ ार्ग ो (5-20mm)(45:55)
<b>e</b> ⊢` ଘマイ├(5-20mm)(55:45)
PAdeCS(P20)(45 : 55)
PAdeCS(P20)(4.5 ÷ 95.5)
PAdeCS(P20)(2.25 : 97.75)
——半焼成下四个(40-60mm)(1:99)
_=_ 半焼成F 四个h(40-60mm)(41:59)
石灰石(20-40mm)(40:60)/半焼成下四小(40-60mm)(20:80)
石灰石(20-40mm)(41:59)/半焼成ドロ小(40-60mm)(41:59)
—— 半焼成F ロマイト(40-60mm)(41:59)
—— 半燒成F ロマイト(40-60mm)(20:80)
—— 石灰石(10-20mm)(47:53)
石灰石(10-20mm)(47:53)/半焼成ドロ仆(40-60mm)(20:80)
—— 石灰石(10-20mm)(40:60)
——石灰石(15-30mm)(40:60)
PAdeCS(40-60mm)(140 : 860)
PAdeCS(40-60mm)(310 : 690)
排水基準



図 3.1-83 バッチ試験の各元素濃度と[H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>]との相関

<b>卜</b> L191
半焼成ドロマイト:青茶、ドロマイト:紫茶、
石灰石+ドロマイト:進系、石灰石:緑画、
PAdeC5: 世紀、 直線:前段のみ、破線:前段+後段
石灰石(20-40mm)(75%)+\*□マイト(5-20mm)(25%)(45:55)
石灰石(20-40mm)(50%)+\ <sup>*</sup> □<1\(5-20mm)(50%)(45:55)
—— 石灰石(20-40mm)(25%)+ドロマイト(5-20mm)(75%)(45:55)
—e— ⊦ें ¤र1ो(5-20mm)(45:55)
——— F 四付上(5-20mm)(55:45)
PAdeCS(P20)(45:55)
PAdeCS(P20)(0.45 : 99.55)
PAdeCS(P20)(4.5 : 95.5)
—— 半焼成ドロマ仆(40-60mm)(1:99)
—— 半姨成ドロマ仆(40-60mm)(41:59)
PAdeCS(40-60mm)(41 ÷ 59)
石灰石(20-40mm)(40:60)/半焼成片 四小(40-60mm)(20:80)
石灰石(20-40mm)(41:59)/半焼成下口小(40-60mm)(41:59)
—— 半焼成ド ロマイト(40-60mm)(41:59)
—▲— 半焼成ド ロマイト(40-60mm)(20:80)
—— 石灰石(10-20mm)(47:53)
石灰石(10-20mm)(47:53)/半焼成ドロ小(40-60mm)(20:80)
—— 石灰石(10-20mm)(40:60)
—— 石灰石(15-30mm)(40:60)
PAdeCS(40-60mm)(310 : 690)
—— 排水基準

## ④ [Zn]、[Cu]、[Pb]

Zn、Cu及びPbの除去(沈殿)条件について考察するために、各金属とpHとの相関を図3.1-82 で確認した。Zn及びCuは、どの中和剤の条件でもそれぞれpH 8.2 程度及びpH 8 程度で各排水 基準値を満たすような結果となっていた。これにより、何かしらの中和剤の組み合わせ等により、 pHを8.2 程度まで上昇させることができれば、Zn及びCuの沈殿除去が期待できると考えられる。 また、Znの沈殿生成に関してpH 依存性が特に高いので、生じる沈殿物は水酸化物系であると考 えられる。

一方で、Pbと pHとの相関についても同様に図 3.1-82 で確認すると、どの条件でも、pH 7 程度 で排水基準値(0.1 mg/L)を満たす結果となっていた。しかしながら、Pb が水酸化物として沈殿 し、0.1 mg/L を下回る際の理論上の pH は 9.47 であり、バッチ試験で実際に除去されている pH と 大きな乖離がある。ここで、Pb は炭酸塩としても沈殿しやすいことから、(中和剤により炭酸イ オンを供給しているということもあり)PbCO<sub>3</sub> として沈殿除去されているのではないかと考えた。 Pb が除去されている pH 7 における [H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>]を図 3.1-82 で見てみると、条件によって 20~90 mg/L の幅があるが、H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 最低濃度である 20 mg/L でも、約 3 mg/L の Pb を沈殿させるには十分であ ると示唆された。pH 7 であれば、石灰石だけでも上昇させることができる pH であり、また、Zn 及び Cu の除去をするために pH 8.2 程度まで上げる必要があることを考えると、Zn 及び Cu を処 理するための条件に、Pb を処理できる条件は含まれると考えることができる。

5 [Cd]

図 3.1-82 で、Cd と pH との相関を確認すると、使用する中和剤や滞留時間等の条件次第で pH 7.4~8.6 程度の範囲内において、排水基準値である 0.03 mg/L を下回ることが分かった。理論上、Cd が水酸化物として沈殿し、0.03 mg/L を下回る際の pH は 10.2 であり、バッチ試験で実際に除去されている pH 範囲と大きな乖離がある。Pb 同様、Cd も炭酸塩としても沈殿しやすいことから、炭酸塩として沈殿している可能性が示唆された。

試験を行った条件の中から、①滞留時間 5 時間以内に pH 8.0 程度まで到達し、且つ②滞留時間 5 時間以内に、Cd が排水基準値以下になった条件を抜粋した経時変化のグラフを図 3.1-84 に示す。 赤字又は青字で記載のある数字は、それぞれ Cd の排水基準を満たすタイミングの前又は後の採 水時の Cd 濃度である。また、抜粋した各条件について、pH、[Cu]、[Zn]、[Pb]、[Cd]の各項目が 排水基準を満たした時点(採水のタイミング)の直前/直後の採水ポイントでの滞留時間を表 3.1-37 にまとめる。





図 3.1-84 抜粋した試験条件

3.1-67



# 表 3.1-37 抜粋した試験条件の詳細データ

中和剤 実験No. 前段 後段			pН	pН	Cu	Zn	Pb	Cd	H2CO3				
		LH HJ			5.8	8.6	3 mg/L	2 mg/L	0.1 mg/L	0.03 mg/L	[Cd]基準値以下		
		後戶	л Х		各項目が排	水基準を満た ※pH	した時点の直 8.6は、排水基	前/直後の採: 準を超過した	水ポイントで <sup>。</sup> =時点	の滞留時間	の時の濃度 (mg/L)		
13	2-4	石灰石(20-40mm)	40:60	半速成F uz / F(40-60mm)	20:80	直前の滞留時間(hour)	0.3	2.5	2.2	2.5	2.2	2.5	42.5
10	C T		40 0 00		20:00	直後の滞留時間(hour)	0.3	2.6	2.3	2.8	2.3	2.8	45.8
1/	7	石灰石(5-10mm)	10 . 60	PAdeCS(40-60mm)	15:85	直前の滞留時間(hour)	0.1	3.5	1.5	3.0	2.0	3.0	37.5
14	+ (2)-7 石灰石(S-10mm) 40・00	40.00	T Adec3 (40-001111)	10.00	直後の滞留時間(hour)	0.2	3.6	2.0	3.5	2.1	3.5	38.4	
17	_12	半倍成5° nz (5(40-50mm)	20 . 80			直前の滞留時間(hour)	1.1	3.1	1.0	2.5	1.5	2.5	25.7
11	2-12	- MERCI - 411 (40-001111)	20.00			直後の滞留時間(hour)	1.2	3.2	1.5	16.7	2.0	16.7	46.5
20	@ 15	五匹五(10-20mm)	47.52	半焼成ドロマイト(40-60mm)	20:80	直前の滞留時間(hour)	0.3	4.5	1.5	4.4	4.0	4.5	32.0
20	۷-15	172년(10-2011111)	47.55			直後の滞留時間(hour)	0.3	4.6	3.0	4.5	4.1	4.8	44.9
22	<u>م</u> 17	<b>エモエ(1,10mm)</b>	10 . 60	米納式に n= (1(40,60mm))	10 . 02	直前の滞留時間(hour)	0.0	3.0	0.5	2.0	0.5	2.0	35.4
	۷-11	石灰石(1-10000)	40 • 00	+36801 0411(40-00000)	10 • 82	直後の滞留時間(hour)	0.0	3.1	1.0	2.5	1.0	2.5	37.3
24	@ 21	て匹乙(F 15mm)	10 . 60	米納式に n= (1(40,60mm))	20 . 00	直前の滞留時間(hour)	0.2	4.3	2.5	4.0	3.1	4.3	73.1
24	(2)-21	(2)-21 石灰石(5-15mm) 40:60 <sup>半#</sup>		+36801 4411(40-00000)	20 • 60	直後の滞留時間(hour)	0.3	4.4	3.0	4.3	3.2	4.7	61.9
26	@ DA4-00@	DA4-00(40,60)	200 · 700			直前の滞留時間(hour)	0.2	1.4	—	—	—	—	—
20	C-FADECSC	F AUECS (40-0011111)	500 + 700			直後の滞留時間(hour)	0.3	1.9		<u> </u>			

表 3.1-37 で、[Cu]、[Zn]、[Pb]、[Cd]の各項目で排水基準を満たし、且つその時点での pH が排 水基準範囲(5.8~8.6)内であるのは、「石灰石(1-10 mm)(40:60)/半焼成ドロマイト(18:82)」及 び「石灰石(5-10 mm)(40:60)/PAdeCS(40:60)」であり、両条件の Cd 濃度はそれぞれ 0.026 mg/L (滞留時間 2.5 時間)及び 0.013 mg/L(滞留時間 3.5 時間)であった。

これにより、バッチ試験の結果を基にすると、「石灰石(1-10 mm)(40:60)/半焼成ドロマイト (18:82)」又は「石灰石(5-10 mm)(40:60)/PAdeCS(40:60)」の条件であれば、滞留時間 5 時間以内 に、本坑坑内水の処理ができることが推定できる。この両条件においては、まずは石灰石で炭酸 イオン(炭酸水素イオン)を供給し、その後に半焼成ドロマイトや PAdeCS のような pH 上昇効 果の高い中和剤を用いて(適切な粒径・固液比・滞留時間等を設定して) pH を 8.6 手前まで上昇 させて、全ての有害金属類を沈殿除去する、というメカニズムが機能していることが示唆された。

## 6 [Fe], [AI]

Fe及びAlについては、中和剤や滞留時間等の条件に寄らず、ある一定のpHで沈殿することが 確認できた(図3.1-82)。特にFeについては既往知見により、水酸化第二鉄による表面被覆によ り中和剤の溶解反応を妨害し得ることが分かっており、今回の試験対象水である本坑坑内水では 平均約2 mg/L程度の含Fe濃度であるが、その影響は顕著に現れると考えられる。Feの対策は、 別途必要である。

## ⑦ [Mn]、[As]

今回の試験対象水である本坑坑内水には、Asはほとんど入っていない。また、Mnについては、排水基準値の 1/10 の濃度である 1 mg/L 以下の濃度で含まれており、pH 上昇とともに、多少の濃度減少が認められた。

### 3.1.7.3. まとめ

表 3.1-38 に各中和剤使用時の結果・特徴をまとめた。

	石灰石	ドロマイト	半焼成ドロマイト	PAdeCS	
	・試験水の水質に	・試験水の水質に	・試験水の水質に	・試験水の水質に対して	
	対しては、pH 7~	対しては、pH 8 弱	対しては、pH 10.5	は、pH 12 程度で平衡とな	
	7.5 程度で平衡とな	で平衡となり、石灰	程度で平衡となり、	り、非常に pH 上昇効果が	
	る。	石よりも pH 上昇効	非常に pH 上昇効	高い。また、製品自体の表	
pn上 見 动	・粒径(比表面積)	果が高い。	果が高い。	面性質の個体差による影	
升勿	及び固液比によっ		・40-60 mm を固液	響が大きい。	
木	て、pH 上昇速度に		比 4:6 では滞留時	・40-60 mm を固液比 4:6	
	違いがみられ、20-		間 1 時間で約 pH	では滞留時間 20 分で約	
	40 mmを固液比 4:6		10.5 となるが、固液	pH 11 となるが、固液比を	
	では滞留時間 5 時		比を 2:8 程度では	15:85程度にするとpH9ま	

表 3.1-38 中和剤特徴まとめ

	石灰石	ドロマイト	半焼成ドロマイト	PAdeCS
	間で約 pH7となる。		pH 9 までの上昇が	での上昇が比較的緩やか
			比較的緩やかに	に(数時間かけて)起こる。
			(数時間かけて)起	
			こる。	
炭酸	・粒径及び固液比に	も寄るが、概ね、以下の	)とおり。	
イオ	PAG	leCS < 半焼成ドロマ	マイト <石灰石 <<	ドロマイト
ンの				
供給	※炭酸イオンは、Cd	とPbを炭酸塩系沈殿	物として除去するために	こ有効。
能力				
	・炭酸イオンの供給	・石灰石よりも炭酸	・炭酸イオンの供給に	はあまり起こらず、化学組成と
	により、Cd が炭酸	イオンの供給能力	も整合的。	
	塩系沈殿物として	が高く(pH 上昇効	・pH の排水基準値内	oで Cd(Pbも同様)を除去し
	除去可能。	果に対する炭酸イ	ようとすると、炭酸塩~	での除去が望ましいため、前
Cd Ø	·滞留時間1時間以	オン供給能力が石	段で石灰石により炭	酸イオンの供給をする工程
除去	内で炭酸イオン濃	灰石よりも高い)、よ	を組み込むことが良い	<b>)</b> <sub>0</sub>
	度は 40-50 mg/L 程	り低い pH で Cd が		
	度まで上昇し、その	除去された。		
	後の濃度はほぼ一			
	定。			
	・使用する中和剤の種	重類やその固液比、粒	· 径等に寄らず、pH 7 程	程度で排水基準 0.1 mg/L を
Pb の	満たす。			
除去	・水酸化物として沈殿	とする理論 pH(9.47)と	の乖離から、炭酸塩系	気沈殿として除去された可能
	性あり。			
Zn•	・使用する中和剤の種	重類やその固液比、粒	径等に寄らず、Znはp	H 8.2 程度、Cuは pH 8 程度
Cu Ø	で各排水基準を満た	す。		
除去	・水酸化物として沈殿	していると考えられる。		
取り	・単価は安く、調達	・単価は高い。粒径	・単価は高い。粒径	・単価は安い。粒径は比
扱い	は容易。粒径の自	は比較的自由度が	の自由度が低く、特	較的自由度が高い。
等	由度は高い。	高い。	注となる	

pHの排水基準値の範囲内でCd及びPbを沈殿除去するためには、水酸化物としてではなく、 炭酸塩や硫化物として沈殿させる必要があり、中和剤を活用して処理を行う場合は、硫化物では なく炭酸塩系沈殿物として除去することが考えられる。また、炭酸イオンの供給とpHを上昇さ せるという2つの役割を、1つの中和剤ではなく、それぞれの目的に合った中和剤を活用するこ とも考えられる。例えば、前段で石灰石やドロマイトを用いて炭酸を供給し、後段でPAdeCSや 半焼成ドロマイトを用いてpHを8.6弱まで上昇させることで、Cd及びPbが主に炭酸塩とし て、Zn及びCuが主に水酸化物として沈殿することが示唆された。PAdeCSや半焼成ドロマイト も CaCO<sub>3</sub>を含んではいるが、Ca(OH)<sub>2</sub>や MgO が先に溶解して CaCO<sub>3</sub>の溶解量が十分でなく Cd や Pb を沈殿させるほどの炭酸供給がなされない可能性があるため、「組み合わせる」ことによ ってプロセスとしての安定性が確保できると考えられる。ただ、後段の PAdeCS や半焼成ドロマ イトについては、使用する粒径や固液比等によって、pH の排水基準値を大幅に超過してしまう 可能性があり、この点については、バッチ試験ではなく連続通水型の試験で確認が必要である。 バッチ試験では、スターラーによって撹拌して試験を実施したが、その際のビーカー内の撹拌状 態は、水路型で通水をした時よりも激しく撹拌されている可能性がある。また、一般的に、バッ チ試験から連続通水試験に移行した際には、中和効率が低下することが多く、今回の試験も例外 ではないと推察されるため、連続通水試験での滞留時間等は、バッチ試験の結果よりも長くなる と考えられる。

なお、上記4種類の中和剤以外のもの(ALC(Autoclaved Lightweight Concrete の略。軽量気泡 コンクリート※)等)についても、バッチ試験を実施してその有効性を評価し、最適な中和剤の スクリーニング作業を厚くすることが、プロセスの最適化の検討に資すると考えられる。 ※ALCは、トバモライト(汎用化学式: Cas(Si<sub>6</sub>O<sub>18</sub>H<sub>2</sub>)・4H<sub>2</sub>O)を主成分として、非常に多孔質で 密度が小さいことが特徴として挙げられる。中和剤の溶解速度は比表面積に影響を受けるため、 多孔質であることは滞留時間の短縮にも繋がり、また、軽量であることから取り扱いもしやすい というメリットがある。

次年度の検討内容については、追加のバッチ試験によって中和剤のスクリーニング作業を重ね ることに加え、中規模程度の連続通水試験を中心に実施し、中和水路型のパッシブトリートメン トの導入に関して、総合的に検討を行い、その過程や結果をパッシブトリートメント導入のガイ ドライン作成に活用することが重要である。

なお、実際にパッシブトリートメントでの処理を継続して実施するに当たっての適切な組み合わせを設定するためには、pH上昇効果及び金属除去挙動に加えて、コストやメンテナンス等の取り扱いも考慮する必要があるため、次年度はその点についても検討を進めていく必要がある。

## 3.1.8. 参考文献

- ①「平成 26 年度休廃止鉱山鉱害防止技術等調査研究事業報告書」地方独立行政法人北海道立総 合研究機構地質研究所(平成 27 年 3 月)
- ②MDPI Water 2018,10 ,1685 Aurora M et al. "Review of Constructed Wetland for Acid Mine Drainage Treatment
- ③P L Sibrell et al., "Demonstration of a pulsed limestone bed process for the treatment of acid mine drainage at the Argo Tunnel site, Idaho Springs, Colorado"American Society of Mining and Reclamation, 19-23 June 2005,
- (4) Linda Figueroa et al., "Evaluation of a two-stage passive treatment approach for mining influenced waters" 2007 National Meeting of the American Society of Mining and Reclamation, 2-7 June, 2007,
- (5) Louis R Bernier et al., "Limestone drain design criteria in AMD passive treatment: Theory, practice and hydrogeochemistry monitoring at Lorraine Mine Site, Temiscamingue"CIM Minespace 2001 Annual Meeting, Technical paper No. 48, 2001,
- <sup>(6)</sup>Qingyun Sun et al., "Effects of armoring on limestone neutralization of AMD"West Virginia Surface Mine Drainage Task Force Symposium, 4-5 April 2000,
- ⑦Mary Kay Trahan et al., "Limestone drains to increase pH and remove dissolved metals from acidic mine drainage "Applied Geochemistry, 14 (5): 581-606, July 1999,
- (8) Nyquist, J.; Greger, M."A field study of constructed wetlands for preventing and treating acid mine drainage." Ecol. Eng. 2009,35,630-642
- Would, C.; Ngwenya, B.T."Geochemical processes governing the performance of a constructed wetland treating acid mine drainage, central Scotlamd." Appl. Geochem. 2004, 19, 1773-1783
- Dufresne, K; Neculita, C.M.;Brisson, J.; Gentry, T." Metal retention mechanisms in pilot scale constructed wetlands receiving acid mine drainage."In Proceedings of the 10h ICARD(International conference on Acid Rock Drainage)-IMWA(International Mine Water Association), Santiago, Chile, 21-24 Aplil 2015.
- ①Karathanasis,S.D.;Jonthon,C.M"Metal removal potential by three aquatic plants in an acid mine drainage wetland. Mine Water Environ. 2003,22,22-30.
- <sup>(1)</sup>Mitsch, W.J.; Wise, K.M "Water quality, fate of metals, and predictive model validation of a constructed wetland treating acid mine drainage." Water Res. 1998,32,1888-1900
- ⑬梅津芳生「硫酸酸性水の石灰石による析出セッコウ」,Gypsum&Lime No.234(1991)p.299
- (I) L.N. PLUMMER, T.M.L. WIGLEY, D.L.PARKHURST, The Kinetics of Calcite Dissolution In CO<sub>2</sub>-Water Systemd At 5° To 60°C And 0.0 To 1.0 Atm CO<sub>2</sub>.: American Journal of Science, Vol.278, February, 1978, P. 179-216.

#### 3.2. 微生物活用型

#### 3.2.1. 目的

金属鉱業等の休廃止鉱山は、事業活動終了後も坑口や集積場等から重金属等を含んだ坑廃水が 永続的に流出し続けるため、地方公共団体等は廃水処理等の鉱害防止事業を実施している。この 鉱害防止事業は収益を伴わない永続的な事業であることから、これに要するランニングコストの 低減は、国民経済負担の軽減という観点からも重要な課題である。このコストの主な要因として は、重金属除去のための薬剤費用、それに伴って発生する多量の沈殿物の浚渫費用、設備運転の ための電力費及び設備の更新・維持管理費用であるため、これらの費用の低減が主な課題である。

上記の課題を解決するため、硫酸還元菌等による微生物反応と、化学反応を活用して、坑廃水 中の溶存重金属を除去するプロセスの実地適用性を確認し、最終的には国内休廃止鉱山において 実規模相当の設備による坑廃水処理実証試験を実施することを目的とする。

### 3.2.2. 調査の内容

本調査研究では、硫酸還元菌等による微生物学的反応と化学的反応を活用し、モデル鉱山にお ける坑廃水中の溶存金属を除去しうる、パッシブトリートメント技術(以下、「SRB 処理法」と 言う。)の導入に向けた調査研究として、平成30年度には、下記の3.2.2.1~3.2.2.3章についての 評価を実施した。また、令和元年度においては、3.2.2.4章に記載の内容について評価を行うこと とした。

#### 3.2.2.1. コスト削減/省エネ化のための現状把握(平成 30 年度)

モデル鉱山として選定された B 鉱山(秋田県横手市)について、現在の処理プロセスにおける コスト構造の解析を実施した。

B 鉱山において現在稼働している坑廃水処理施設は、老朽化しており施設設備の更新が必要な 時期に来ている。施設を更新するに当たり、現行の処理プロセスに換えて、もしくは現行の処理 プロセスに加えて、SRB 処理法を導入することで、コスト削減や省エネ化を図ることが可能かど うか、検討を進める必要がある。そのため、まず現行の坑廃水処理施設の運転・維持管理におけ るコスト構造を解析した。

#### 3.2.2.2. 処理プロセスの特性把握と最適化(平成 30 年度)

SRB 処理法についてその特性を把握した上で、B 鉱山での坑廃水発生量及び水質データに基づいて処理プロセスの最適化を行った。

### (1) 坑廃水に係るデータの収集及び解析

#### ① 坑廃水発生量調査

発生した坑廃水が集約し、流下している水路の途中に三角堰及び自記式水位計を設置し、坑廃 水の発生量を評価した。調査地点については現地調査を行い、今年度は2地点について選定を行 い、三角堰により流量の測定を実施した。

### 2 水質調査

発生した坑廃水が集約し、流下している水路の途中に設置した三角堰の流出部にて採水を行い、 Cd、Pb、Cu、Zn、SO4<sup>2-</sup>、pHの分析評価を実施した。調査地点については、坑廃水発生量調査の ために設置した三角堰の流出部2地点とした。

さらに、現場坑廃水処理施設において実施している水質分析の結果を横手市から受領し、今年 度複数回実施した水質分析結果の補完を実施した。

### (2) 坑廃水データの解析結果に基づく処理プロセスの設計

石灰水路及びバイオプロセスについてラボ及び現地にて評価試験を実施し、基本プロセスの見 直し及び実稼働した際に必要となる管理項目についての検討を実施した。

#### 3.2.2.3. 実処理規模の設備設置検討(平成 30 年度)

SRB 処理法について、3.2.2.1~3.2.2.2 章にて検討を行った結果を踏まえて、実規模相当の実証 試験実施に向けた現地測量や設計業務を実施した。

## (1) 測量·地盤調査業務

基本処理プロセスの内容に基づいて実規模の坑廃水処理プロセスを設置するために、必要な広 さ、高低差を含めた土地の状態を把握するために測量を実施した。

#### (2) 設計及び設置費用見積の作成

坑廃水発生量や水質の調査結果に基づく坑廃水処理プロセスの検討結果に加え、測量の結果を 基にして、設備設計及び設置業務に係る諸工事の見積を作成した。

#### 3.2.2.4. 実処理規模実証試験設備の設計・施工

平成30年度における上記3.2.2.1~3.2.2.3章の結果を踏まえて、令和元年度は以下に示す実規模 相当の実証試験実施に向けた現地測量や設計業務を実施した。

#### (1) 坑廃水データの収集及び解析業務(継続)

発生した坑廃水が集約し、流下している水路の途中に三角堰及び自記式水位計を設置し、坑廃 水の発生量を評価する。調査地点については現地調査を行い、2地点を選定し、三角堰により流 量の測定を実施した。

### (2) 小型試験装置による連続処理試験業務(現地実証及び評価実施)

設備の設計と操業管理手法の確立において必要となる情報の取得を目的として以下の評価を開始した。

①石灰水路及び微生物処理の両プロセスともに、水温の違いによる処理能力の違いについて、 定量的に取り扱ってはいないため、両プロセスにおいて、設計に必要な処理特性データを 取得 ②石灰水路については、石灰石の粒度についての議論ができていないため、反応表面積を考 慮した評価を実施

## (3) 実規模相当実証試験の準備(設計・施工、年内完工)

B 鉱山地内において、実規模相当の実証試験を実施するために、試験設備の設計施工を行い、 令和元年度内での試験設備設置を完了した。

## (4) 自然回帰型坑廃水浄化システムの導入による効果の検討

B 鉱山に自然回帰型坑廃水浄化システムを導入した場合の効果(省エネ、省コスト等)について検討を実施した。

3.2.3. 坑廃水データの収集及び解析業務(継続)

- 3.2.3.1. B 鉱山概要
  - 鉱山名 :B鉱山

鉱業権者:義務者不存在であり、秋田県横手市による管理が実施されている。

処理方法:消石灰、鉄塩薬剤(硫酸第二鉄)、高分子凝集剤を用いた中和処理

特記事項:既存設備は建設後30年を経過しており、大規模な改修あるいは更新が必要

平成 27 年度より硫酸還元菌を活用した水質浄化法である SRB 処理法の実証試験 を開始している。

## 3.2.3.2. 現行の坑廃水処理システム

横手市提供資料ほか、経済産業省提供資料を参考に、現行設備の運転実績、フローを以下にま とめる。

	pН	銅(Cu)	鉛(Pb)	亜鉛 (Zn)	カドミウム(Cd)
	[-]	[mg/L]	[mg/L]	[mg/L]	[mg/L]
目標水質	5.8~8.6	3.00	0.10	5.00	0.08
原水	3.8~4.2	1.08~3.38	0.230~0.860	2.02~6.04	0.0132~0.0442
中和処理水	7.0~8.4	0.09~0.44	0.018~0.100	0.21~0.81	0.0017~0.0071
成瀬川流入点	7.0~7.8	0.16	0.072	0.365	0.0026

表 3.2-1 平成 28 年度水質実績

表 3.2-2 水量、薬品原単位等

項目	値	単位	備考
処理能力	0.97	m3/分	平成27年度4月分の最大処理実績
処理水量	91,634	m3/年	日量平均251.1m3(0.17m3/分)
消石灰使用量	5,710	kg/年	62g/m3
高分子凝集剤使用量	107	kg/年	1.2g/m3
鉄塩薬剤使用量	4,620	L/年	51g/m3
電力量	72,856	kWh/年	平成26~28年度平均值
運転員	1,460	Hr 人/年	朝2時間、夕方2時間、毎日

※ただし、原水は5か所の水源水を混合したものである。



図 3.2-1 処理設備系統図



図 3.2-2 坑廃水処理施設全体図(配置図)



図 3.2-3 凝集槽、沈降槽、汚泥槽



図 3.2-4 薬注室内部



図 3.2-5 第一調整槽(左)、第二調整槽(右)

## 3.2.3.3. 坑廃水発生量調査

発生した坑廃水が集約し、流下している水路の途中に三角堰及び自記式水位計を設置し、坑廃 水の発生量を評価した。調査地点については現地調査を行い、今年度も継続して2地点について 選定を行い、三角堰により流量の測定を実施した。



図 3.2-6 水量の現状把握~測定方法~



図 3.2-7 水位計設置位置及び設置状況



図 3.2-8 総合原水水量測定結果(2018年4月下旬から 2019年10月下旬まで)



図 3.2-9 浸透水①水量測定結果(2018年4月下旬から2019年10月下旬まで)

図 3.2-8 及び図 3.2-9 のとおり、今年度の総合原水の平均流量は

総流量 133,821 m<sup>3</sup>

平均流量 0.173 m<sup>3</sup>/min

最大流量 1,630 m<sup>3</sup>/min であった。

春の融雪時には流量が増加し、その他期間の豪雨時に短期間の流量ピークがみられるのは、例 年と同じ傾向であった。

また、浸透水①水量は、総水量 25,940 m<sup>3</sup>であり、総合原水と同じ増減傾向であった。

#### 3.2.4. 小型試験装置による連続処理試験業務

### 3.2.4.1. SRB 処理プロセスの検討

SRB 処理法を活用した坑廃水処理システム構築の検討を行った。ただし、設計に必要なデータの不足に加え、透水性低下の改善方法や硫酸還元菌の活性化条件など未確認事項が多いことから、当初の米ぬかを用いた SRB 処理法からエタノール添加に変更したうえで、昨年度に引き続き微生物処理プロセスの検討を行った。

#### 3.2.4.2. 試験の目的

ラボにおける基礎評価や現地実証試験実施においては、以下の内容を目的とした。

- スケールアップや運転管理方法を見据えたプロセス設計を実施するために必要な設計デー タを取得するため、単位操作の基礎データを収集しなおす。
- コスト削減や省エネ化を達成していくために必要かつ適正なモニタリング手法について検 討する。

#### 3.2.4.3. 試験系について

試験系について、図 3.2-10 に示す。SRB 処理法は、主に 2 つのプロセスから成る。初めに、坑 廃水原水を石灰水路に流すことによって、pH 3~4 程度の原水を中性域にする中和反応プロセス があり、その後、もみ殻充填槽における微生物処理プロセスがある。

ここでは、石灰水路を用いた中和反応プロセスと微生物処理プロセスについて個別に評価検討 を実施した。なお、プロセスで生じる重金属殿物の固液分離は、今回試験の範囲外とした。



図 3.2-10 SRB 処理法の実証試験イメージ

## 3.2.4.4. 石灰水路 中和試験(a) 基礎試験(ビーカー試験)の結果

ビーカー試験は、原水1Lに反応面積既知(85 cm<sup>2</sup>)の石灰石を用いて、液温、攪拌周速を変化させて攪拌時間毎の液性変化を測定した。

20°C 92cm/sec					20°C 13cm/sec				1 5°C 5cm/sec					
min	温度(°C)	pН	Ca (mg/L)	)AI (mg/L)	min	温度(°C)	pН	Ca (mg/L)	Al (mg/L)	min	温度(°C)	pН	Ca (mg/L)	Al (mg/L)
0	19.2	3.74	10.3	4.3	0	18.2	3.77	10.3	4.3	0	13.4	3.74	10.3	4.3
2	19.2	3.84	12.0	4.4	6	18.3	3.84	11.2	4.4	9	13.4	3.83	12.0	4.3
4	19.2	3.94	12.6	4.3	15	18.6	3.94	12.0	4.4	22	13.4	3.93	12.7	4.2
5	19.2	4.04	13.5	4.3	23	19.2	4.04	12.6	4.3	37	13.4	4.04	13.6	4.2
7	19.3	4.14	13.5	4.1	31	19.7	4.14	13.1	4.3	51	13.4	4.14	14.1	4.1
9	19.3	4.24	14.4	4.2	40	20.0	4.24	13.8	4.2	62	13.4	4.23	14.6	4.1
11	19.4	4.34	14.7	4.1	49	19.2	4.34	14.2	4.2	76	13.4	4.33	14.8	4.0
13	19.5	4.44	15.0	4.0	57	19.3	4.44	14.7	4.1	96	13.4	4.48	15.5	3.9
14	19.6	4.54	15.4	4.0	68	19.8	4.54	15.2	4.0	106	13.4	4.55	15.8	3.9
17	19.7	4.64	15.8	3.9	81	19.4	4.64	15.7	3.9	121	13.4	4.63	16.1	3.8
21	19.9	4.74	16.5	3.8	111	20.0	4.74	16.8	3.6	143	13.4	4.74	16.5	3.6
31	19.5	4.84	17.9	3.4	159	19.2	4.84	18.1	3.2	179	13.4	4.84	17.2	3.5
47	19.2	4.94	19.2	3.0	232	19.2	4.96	19.8	2.7	258	13.4	4.93	19.0	3.2
65	20.1	5.04	20.1	2.5	277	19.6	5.04	20.5	2.5	365	13.4	5.04	20.6	2.8
76	19.1	5.14	21.2	2.4	331	19.3	5.16	21.4	2.2	516	13.4	5.14	21.4	2.5
88	19.3	5.24	21.2	2.2	366	19.3	5.25	21.8	2.0	1,285	13.4	6.27	25.6	1.2
98	19.8	5.34	21.6	2.1	400	19.8	5.34	22.0	1.8	1,380	13.4	6.35	25.9	1.2
107	20.1	5.44	22.1	2.0	433	20.1	5.44	22.3	1.6					
114	19.1	5.54	22.4	2.0	466	19.9	5.54	22.7	1.5	]				
122	19.1	5.64	22.3	1.9	500	19.6	5.64	22.9	1.3					
132	19.6	5.74	22.6	1.9	537	19.6	5.74	23.0	1.2	]				
144	20.2	5.84	22.6	1.8	624	19.4	5.94	23.3	0.9					
155	19.1	5.94	23.0	1.8	1,391	19.2	6.63	25.1	0.1					
174	19.8	6.04	23.5	1.8	1,668	19.3	6.74	25.4	0.0					
191	19.1	6.14	23.6	1.7	2,030	20.1	6.81	25.7	0.0					
219	20.1	6.24	23.8	1.6										
251	19.8	6.34	23.9	1.5										
298	20.2	6.44	24.3	1.4	]									

表 3.2-3 中和試験 基礎試験 (ビーカー試験)の結果

15°C 92c	m.sec				5°C 92ci	m/sec				5°C 13c	m/sec			
min	温度(°C)	pН	Ca (mg/L)	Al (mg/L)	min	温度(°C)	pН	Ca (mg/L)	AI (mg/L)	min	温度(°C)	pН	Ca (mg/L)	Al (mg/L)
0	13.4	3.83	10.3	4.3	0	3.7	3.72	10.3	4.3	0	5.2	3.68	10.3	4.3
2	13.2	3.94	11.9	4.5	4	3.5	3.84	11.4	4.4	3	4.8	3.74	10.7	4.3
5	13.1	4.03	12.5	4.5	8	3.2	3.96	12.3	4.5	33	3.3	3.94	12.2	4.2
8	13.1	4.13	13.1	4.5	11	3.3	4.08	12.8	4.4	47	4.6	4.04	12.8	4.1
10	13.2	4.23	13.5	4.5	14	3.4	4.14	13.0	4.4	58	4.1	4.15	12.8	4.1
12	13.3	4.34	13.8	4.4	17	3.6	4.24	13.3	4.3	71	3.0	4.25	13.5	4.0
14	13.4	4.43	14.1	4.4	19	3.8	4.34	13.6	4.3	81	2.9	4.33	13.8	3.9
16	13.6	4.53	14.5	4.3	22	4.0	4.44	13.9	4.3	97	4.2	4.47	14.4	3.9
19	13.7	4.63	14.7	4.2	25	4.3	4.54	14.1	4.2	104	4.9	4.54	14.6	3.9
22	13.9	4.73	15.0	4.1	28	4.5	4.66	14.4	4.2	115	5.5	4.64	14.9	3.8
27	13.8	4.83	15.6	4.0	31	4.9	4.74	14.9	4.2	126	4.0	4.74	15.1	3.7
41	13.1	4.93	16.9	3.7	35	4.9	4.84	15.0	4.1	138	2.9	4.84	15.4	3.7
67	12.9	5.03	18.6	3.2	40	4.4	4.94	15.4	4.1	159	3.5	4.95	15.8	3.6
100	12.9	5.17	20.3	2.7	48	3.3	5.03	15.7	3.9	194	3.0	5.04	16.5	3.4
115	13.7	5.23	20.7	2.5	95	3.6	5.16	18.0	3.3	290	3.7	5.14	18.0	3.0
131	12.9	5.33	21.2	2.3	119	3.7	5.22	18.7	3.0	405	3.0	5.25	19.3	2.6
148	13.8	5.43	21.7	2.2	160	2.9	5.33	19.9	2.6	506	3.5	5.34	20.5	2.3
162	12.9	5.54	21.9	2.1	203	3.0	5.47	20.9	2.3	1,343	3.1	6.32	23.5	1.4
175	13.4	5.63	22.2	2.0	238	4.8	5.56	21.7	2.1	1,507	3.3	6.44	24.0	1.2
189	13.5	5.73	22.4	2.0	261	2.9	5.69	21.8	2.0	1,769	3.7	6.53	23.9	1.2
204	13.2	5.83	22.6	1.9	296	3.7	5.82	21.9	1.8	2,797	3.2	6.77	24.8	0.9
224	13.0	5.94	23.0	1.9	335	4.9	5.94	22.6	1.8					
249	13.9	6.03	23.1	1.8	364	3.0	6.05	22.6	1.7					
277	13.8	6.14	23.4	1.8	406	2.9	6.16	23.1	1.6					
312	14.0	6.23	23.7	1.7	451	3.3	6.25	23.2	1.6					
355	12.9	6.34	24.0	1.6	507	2.9	6.34	23.3	1.5					
413	13.2	6.43	24.3	1.5	1,377	3.5	6.84	25.1	0.6					

表 3.2-3 より pH 値とカルシウム濃度の関係を図 3.2-11 に示した。中和の進行とともに Ca、pH は上昇するが、Ca 濃度が 15~20 mg/L の範囲では pH の上昇が鈍くなり、Ca 濃度が 20 mg/L 以上 では Ca とともに pH も上昇する。データのばらつきは、主に試験温度の違いによるものである。

既存の情報により、石灰中和の目標値は、pH = 5と設定した。原水においては、Ca = 20 mg/Lに相当するため、今後の石灰中和設計検討では、Ca 濃度 20 mg/Lを到達目標値とした。



図 3.2-11 Ca 濃度と pH 値の関係

上記の Ca-pH の段階的な挙動は、石灰石の酸溶解、Al など共存物の水和、石灰石の水への溶解 など複数の反応が関係しているため、すべての挙動を炭酸カルシウム溶解の一次反応式で表すこ とはできない。しかしながら、pH 5 未満の範囲に限れば実験データはおおむね一時反応式にフィ ットしており、設計検討には前述の炭酸カルシウム溶解の一次反応式を用いても支障がないと判 断した。表 3.2-3 から 20℃、13 cm/sec の試験を図 3.2-12 にグラフ化する。

すなわち、原水の石灰中和の状態は、

反応速度式 In ([A]/[A],)= - kt, [A]=[A], exp (- kt)  $\ln\left(\frac{c_{ca,t}-c_{ca,sat}}{c_{ca,o}-c_{ca,sat}}\right) = -\left(\frac{s}{v}k\right)t$ 

S:反応面積、V:水量、t:経過時間、k:反応速度定数 を用いて、上式右辺である、S/V×k×tの値で表現できることとなる。



図 3.2-12 基礎試験(ビーカー試験)のデータ例(S/V=85/1000、20°C、攪拌周速 13cm/sec)

基礎試験(ビーカー試験)では、単一攪拌条件(水温、攪拌速度)ごとに、図 3.2-12 と同様の データフィッティングを行って、速度定数 k、見掛けのカルシウム飽和濃度 Cs を求めた。その結 果を下表に示す。

°C	cm/sec	Cs	K	Со
20	92	20.5	0.5	11.2
20	13	21.0	0.1	10.7
15	92	18.5	0.45	11.0
5	92	18.0	0.32	10.6
5	13	18.5	0.077	10.6
15	5	20.3	0.082	11.2

表 3.2-4 温度・周速条件ごとのデータフィッティング結果



図 3.2-13 石灰水路試験(ラボ試験)の結果

表 3.2-4 から得られた対散布図が、図 3.2-13 である。

炭酸カルシウム溶解の速度定数 k は、温度よりも撹拌速度(水の動き)に強く影響を受けることがわかった。

基礎試験(ビーカー試験)の結果を総括すると以下のとおりである。

- ・反応速度は、攪拌速度に大きく影響を受ける。
- ・反応速度定数は、撹拌子の周速 10 cm/sec で k≦0.1 であった。
- ・B 鉱山の原水に関して、S/V×k×tの目標値は、2.5 cm/sec となった。

## 3.2.4.5. 石灰水路 中和試験(b) 現地試験(小型水路試験)の結果

現地に設置した液相断面 100×150 mm、長さ 900 mm の水路に、20 mm~40 mm の大きさの石 灰石を充填して、5 か月間の観測を実施した。



図 3.2-14 石灰水路での試験状況

表 3.2-5 石灰水路 観測データ

		7/3	7/10	7/17	7/24	7/31	8/7	8/21	8/28	9/4	9/11	9/18	9/25	10/2	10/9	10/16	10/23	10/30	11/7	11/13	11/20	11/27	12/4	12/11	12/18
	原水	20.4	20.3	21	23.8	22.9	25.1	22.7	19.7	22.2	20.2	16.2	17.1	15.3	13.8	10.6	13.6	12.8	10.6	8.9	9.9	8.5	8.9	8.4	11.1
	S-1	19.8	18.6	18.5	22.3	19.9	22.7	20.1	17	19.1	17.1	14.7	15.6	14.5	12.8	10.7	13	12.3	10.8	9	8.9	8.4	7.9	9.8	10.1
水温	S-2	20.4	19.5	19.6	23.4	23.7	24.8	21.5	17.8	20.5	18.1	14.8	16.1	14.7	12.9	10.5	13.3	12.5	10.6	8.6	8.2	7.8	7.5	9.7	10.1
	S-3	21.2	19.8	19.8	23.7	24.6	25.5	22.3	18.3	21.3	18.4	15.8	16.5	14.8	12.9	10.3	13.3	12.7	10.4	8.2	7.9	7.1	6.4	9.6	10.2
	S-4	22.4	21.3	20.6	24.7	24.8	26.3	22.8	19	21.6	19.1	15.9	16.7	15.1	13.1	10.3	13.6	12.7	10.4	8.4	7.8	7	7	9.9	10.2
	原水	3.88	3.9	3.89	3.91	3.91	3.94	4.02	4.02	4.09	4.04	3.98	3.97	3.97	3.96	3.91	3.96	4.04	3.98	4.06	4.38	4.1	4.01	3.94	4.33
	S-1	3.8	3.83	3.82	3.86	3.86	3.9	3.93	3.89	3.93	3.91	3.87	3.85	3.82	3.78	3.76	3.78	3.8	3.86	3.86	3.82	3.84	3.89	4.2	3.88
pН	S-2	4.09	4.1	4.1	4.52	4.5	4.43	4.39	4.28	4.25	4.34	4.24	4.22	4.09	4.11	4.1	4.13	4.21	4.18	4.12	4.19	4.19	4.18	4.32	4.26
	S-3	4.32	4.34	4.32	4.81	4.78	4.68	4.68	4.59	4.49	4.54	4.54	4.49	4.38	4.35	4.29	4.38	4.36	4.37	4.38	4.42	4.47	4.42	4.48	4.4
	S-4	4.51	4.54	4.48	4.85	4.74	4.71	4.72	4.68	4.66	4.58	4.69	4.61	4.5	4.48	4.5	4.52	4.52	4.48	4.49	4.54	4.54	4.52	4.49	4.49
	原水	275	265	292	291	300	324	350	312	347	363	337	358	322	344	353	317	342	331	336	296	326	302	302	294
	S-1	330	323	229	339	346	380	390	382	398	412	421	416	411	404	390	368	394	391	375	353	376	250	260	236
ORP	S-2	286	277	202	305	303	339	362	336	358	370	362	370	354	362	362	330	357	354	349	321	345	322	309	318
	S-3	299	293	211	301	280	331	339	335	345	368	365	366	364	367	366	338	362	359	348	327	348	221	324	334
	S-4	307	300	216	294	291	336	349	339	347	374	382	371	367	366	361	341	366	370	353	332	354	234	333	225
流量 [mL/m in]		678	124	822	390	432	342	420	450	468	444	420	432	474	444	462	414	438	444	426	450	408	498	444	522

表 3.2-6 石灰水路 計算結果

pHより推定したCa濃度 (ラボラ	·ストpH3.9~4.7	データから得た近似式	[Ca] = 20.0*In(pH) - 14.9	7を用いて計算)
-------------------	--------------	------------	---------------------------	----------

 		-							· · · · · · ·					A										
S-1	11.7	11.9	11.8	12.1	12.1	12.3	12.4	12.2	12.4	12.3	12.1	12.0	11.8	11.6	11.5	11.6	11.7	12.1	12.1	11.8	11.9	12.2	13.7	12.2
S-2	13.2	13.3	13.3	15.2	15.1	14.8	14.6	14.1	14.0	14.4	13.9	13.8	13.2	13.3	13.3	13.4	13.8	13.6	13.4	13.7	13.7	13.6	14.3	14.0
S-3	14.3	14.4	14.3	16.5	16.3	15.9	15.9	15.5	15.1	15.3	15.3	15.1	14.6	14.4	14.2	14.6	14.5	14.5	14.6	14.8	15.0	14.8	15.0	14.7
S-4	15.2	15.3	15.0	16.6	16.2	16.0	16.1	15.9	15.8	15.5	15.9	15.6	15.1	15.0	15.1	15.2	15.2	15.0	15.1	15.3	15.3	15.2	15.1	15.1

Ca溶解速度定数 K (空隙率 0.4、 石灰比表面積 2.4cm2/cm3 として計算)

1	0.045	0.008	0.055	0.014	0.016	0.015	0.020	0.024	0.028	0.022	0.024	0.025	0.032	0.027	0.028	0.025	0.024	0.027	0.029	0.026	0.024	0.032	0.041	0.029
2	0.048	0.008	0.059	0.021	0.024	0.021	0.024	0.025	0.031	0.031	0.024	0.027	0.029	0.030	0.036	0.028	0.037	0.034	0.028	0.031	0.025	0.033	0.035	0.045
3	0.050	0.009	0.065	0.046		0.045	0.051	0.043	0.034	0.056	0.032	0.037	0.042	0.038	0.032	0.034	0.034	0.041	0.039	0.040	0.043	0.047	0.079	0.052

表 3.2-5 及び表 3.2-6 を以下にグラフ化する。



図 3.2-15 pHの経時変化



図 3.2-16 溶解速度定数 k の経時変化

試験の結果、当初目標とした pH 5 には至らなかったが、期間中に中和能力の低下は見られなかった。また、流水速度は 0.15 cm/sec、濃度変化から計算された反応速度定数 k = 0.02~0.05 であった。

以上の結果をうけて、スケールアップして設置する石灰中和の設計は、以下を基本とすること にした。

 $S/V \times k \times t = 2.5 \text{ cm/sec}$ 

(S:反応面積、V:水量、k:反応速度定数 t:経過時間)

を実現するために、

- ・S/Vを向上(40/20 mmよりも細粒の石灰石の利用を検討)
- ・kを向上(流路を細くして、流速を上げる工夫)

させることで、設備サイズ(必要な滞留時間 t)をなるべく小さくする。

## 3.2.4.6. 管理方法

図 3.2-17 に石灰水路の管理方法について示した。また、管理方法の概要を次に示す。

<管理方法>

- ・各管理ポイントの pH を測定し、性能の管理を実施。
- ・各区間の反応性を維持するために、石灰石の補充、水洗、殿物除去、被膜剥離等を行う。
- ・前述の維持管理を実施できるような石灰水路を設計する。
- ・各区間の設計に合わせた安全率の検討が必要である。



図 3.2-17 石灰水路の目標 pH 値達成に向けた管理方法について

## 3.2.4.7. 重金属処理用バイオプロセスの検討

硫酸還元菌の栄養源として市販のエタノール混合溶剤を用い、スケールアップや運転管理に資 するデータを取得するためのラボ試験を実施した。



図 3.2-18 重金属処理用バイオプロセスの検討

試験の目的:

- ・ 微生物反応速度の温度特性及び処理水 pH の与える影響について評価する。
- ・ 微生物の活性状態を把握するための評価手法を確立する。

試験水準:

- · 温度 : 5℃、25℃、水道水温
- ・ 中和 pH : pH 5 及び pH 6

試験装置は、恒温水槽中の透明塩ビパイプ(150A)をもみ殻反応槽として用いた。

石灰石で所定の pH まで中和された原水をアルコールとともに所定の流速で供給し、反応槽深 度ごとに水質の時間変化を観測した。

評価項目は、水質については、pH、ORP(酸化還元電位)、EC(電気伝導率)、DO(溶存酸素)、TOC(全有機炭素)、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、HS<sup>-</sup>、ATP(アデノシン三リン酸)である。

試験、サンプリングの様子を図 3.2-19~図 3.2-22 に、観測データを表 3.2-7、図 3.2-23 に示す。



図 3.2-19 バイオプロセス試験装置イメージ



図 3.2-20 バイオプロセス試験装置



図 3.2-21 バイオプロセス試験装置でのサンプリング位置等

【基礎試験】

もみ殻層上部





図 3.2-22 バイオプロセス試験状況

		ATP[mol/I]	SO4(2-) [mg/L]	HS- [mg/L] パックテスト	S2- [mg/L] イオン電極	TOC [mg/L]	рН	ORP [mV]	EC [mS/m]	DO [mg/L]
原水	1	2.13.E-10	131	0.00	0.00	1.846	4.28	428	35.9	9.53
石灰石槽	2	1 71 E-11	144	0 00	0 00	1 543	6 98	283	38 1	9 25
水槽	3	341E-11	133	0 00	0 00	1 527	7 29	260	38 5	9 63
水槽(小)	4	4 21 E-11	132	0 00	0 00	0817	7 51	253	38 9	987
水槽	5	8.45.E-11	121	0.00	0.00	0.719	7.47	244	38.5	9.64
0 0cm	6	6 30E-10	108	0 88	2 77	1883	7 23	-167	38 7	615
22.5cm	7	6.89E-10	122	1.30	4.27	5.842	7.38	-225	38.1	4.94
45 0cm	8	8 72E-10	0	0 47	1367	24 05	7 46	-235	33 9	2 37
67.5cm	9	5.75E-10	0	0.05	10.33	12.96	7.34	-225	33.7	2.46
90 0cm	10	6 59E-10	0	0 63	10 00	1461	7 15	-233	31 2	2 56
出口	11	616E-09	0	0 00	0 23	7 489	7 64	88	33 3	5 46

表 3.2-7 バイオプロセス試験開始後1ヶ月での測定結果



図 3.2-23 バイオプロセス 微生物活性化状況の把握(評価開始後1ヶ月)

図 3.2-23 及び実験観察により、微生物の活性化状態判断として、以下の事象を読み取ることができた。

- ・ ATPの値が石灰槽<もみ殻槽である
- もみ殻槽で ORP 及び DO が低下、S<sup>2</sup>-濃度値(イオン電極測定)の上昇 強い H<sub>2</sub>S 臭がある
- ・ 槽内及び出口に黒色殿物発生
   →硫酸還元菌が活性化していると判断可能

## <微生物の活性をモニタリングする指標について>

硫酸還元菌の活性度を評価するモニタリング指標としては、当初から ATP の活用が検討されて きたが、現場に導入する手法としては誤差要因が多いため、他の指標の活用が望まれた。

今回の試験で、ATPと同様の挙動を示したのは、ORP、pH次いでEC、DOであった。

## <硫黄成分の測定について>

硫酸還元菌の効果を直接把握する手段として、硫酸還元で生成した HS-の測定が考えられる。 今回の試験では、S 成分の測定方法としてパックテスト(共立理化学)と、イオン電極法の活用 を比較検討した。

## 表 3.2-8 S 成分の測定法比較

	メリット	デメリット
パックテスト	<ul> <li>・現場での簡易測定が可能</li> <li>→分光光度計の持ち込みが必要</li> </ul>	<ul> <li>・共存物質の影響により、負の誤差を生じやすい</li> <li>→サンプリングの仕方によって共存物質の含有量が変わる為、外挿が困難 濾過でも除去しきれず、作業工程が増えるため、誤差が大きくなる</li> </ul>
	型式:WAK-SであればデジタルバックテストマルチSPで測定が出来る	<ul> <li>・高濃度であると発色遅延が起き、また強度も不十分</li> <li>→希釈で対応可能だが、その分ロスが発生する</li> </ul>
イオン電極法	・共存物質を気にすることなく、より正確な測定が可能	<ul> <li>・1mol/L NaOHを使用するため、薬傷を負うリスクがある         →作業担当者は薬品および作業RA必須</li> <li>・標準液が不安定で作り置きが出来ないうえ、検量線のメモリー機能が無い         →現場で標準液調整からしなければならない</li> </ul>

操作の簡便さ、薬品取り扱いの安全性から、現場での活用を考えるとパックテストが望ましい が、共存成分による誤差が懸念される。硫酸還元菌の活性度を確かめる目的では、パックテスト と臭気判断を併用して検出漏れ、誤検出を防止する必要がある。

## < 操業管理指標の検討について>

操業管理指標は、その特性から次の内容が要求される。

- ・ 状態異常となる前の兆候をとらえられること
- ・ 容易に校正・測定出来て、人的誤差が生じないこと
- センサー類については、堅牢であること

この視点から、現時点で硫酸還元菌の活性度をモニタリングする手段としては、

- ・ pH、ORP の測定
- ・ パックテストと臭気判断によるS成分の検知

が適当であると考えられる。
### 3.2.5. 実規模相当実証試験の準備

### 3.2.5.1. SRB 処理法の概要

現在想定している SRB 処理法の実処理フロー(案)は、図 3.2-24 に記載のとおりである。

坑廃水原水を一旦原水槽に貯留した後、石灰水路を通過させてpH3~4程度の坑廃水原水をpH 5以上に中和する。その後、微生物処理槽にて重金属を硫化物として固定し、調整池を通って放 流する。また、この処理フロー(案)では、設計流量を超える融雪や突発的な豪雨、また定期修 繕時には原水槽からオーバーフローさせ、既存の坑廃水処理施設にて処理を行った後、放流する ことを想定している。



図 3.2-24 SRB 処理法の実処理フロー(案)

# 3.2.5.2. 最終規模における設計概念

図 3.2-24 のとおり、原水槽→石灰水路→微生物処理槽→既存施設(貯水槽、調整池)の流れ での坑廃水処理を検討した。そのイメージを図 3.2-25 に示す。



図 3.2-25 SRB 処理法の最終規模設計概念(案)

図 3.2-25 では、石灰水路については pH 等により管理を実施する。一方、微生物処理槽については以下の理由から、5 系統の並列化を想定している。

- ・ 原水の汚染濃度は放流基準の5倍以内であり、万一1系統が機能を失っても他系統の希 釈効果で放流基準を維持することができる。
- それぞれの系統において、設計安全率を25%以上確保することで、トラブル発生時に1 系統をメンテナンス停止しても全体処理能力を維持することが可能となる。
   具体的には、総合原水を200 m<sup>3</sup>/day(実績平均は180 m<sup>3</sup>/day)として、バイオプロセス1
   系統当りの処理能力を、50 m<sup>3</sup>/dayとする。

## 3.2.5.3. SRB 処理法の実規模設備設置

実規模設置のイメージを、図 3.2-26 に示す。



図 3.2-26 SRB 処理法の実規模実証処理フローイメージ

石灰中和においては、先述のラボ試験の結果をうけて、流水速度をなるべく早めて、反応表 面積と滞留時間の関係から設備設計する必要がある。原水 35 L/min の処理において、流水速度 0.5 cm/sec、1 槽当たり滞留時間 23 分、石灰石粒径 5/20 mm、k=0.02 cm/min とすると、一槽で の S/V×kt=2.7(中和の目安は 2.5)を確保した石灰反応槽を準備することとした。

微生物処理槽も含めた設置状況を図 3.2-27~図 3.2-30 に示す。



図 3.2-27 SRB 処理法の実規模処理(石灰水路)



図 3.2-29 実証処理設備(水槽)の設置状況



図 3.2-30 実証処理設備(水槽)の設置状況

### 3.2.6. 自然回帰型坑廃水浄化システムの導入による効果の検討

3.2.6.1. ランニングコスト削減効果

本事業の目的は、国の基本方針に則って処理のコストダウンを目的としている。 昨年度には、現状処理のコスト構造をもとに、

- コストの大半を占める人件費、薬剤、除雪費についてはパッシブ導入で大きな効果は期 待できない。
- ・ 金属負荷量が高い処理場であるため、殿物処理費用は継続して発生する。
- ・ 建設投資の縮小による減価償却負担の低減、機械設備の維持管理費低減が期待できる。 と分析した。



図 3.2-31 コスト削減効果の見積

今年度事業での検討によって、次年度稼働を予定する原水 35 L/min の実規模相当の設備設置 には、おおむね数千万円の建設費が必要であることは判明したが、最終規模、土木整地、季節 変動への対応など最終的に設置費用を大きく左右する要素が不確定なため、設備償却費の定量 的な推定には至らなかった。

# 3.2.6.2. バイオプロセス導入で期待されるランニングコスト低減以外の効果

本事業は、国の基本計画に則ってコスト削減を目的とした技術検討を行っているが、ここで はB鉱山の既存処理にバイオプロセスを組み込むことで期待される副次効果について述べる。



# 現在の処理プロセス

図 3.2-32 現在の処理プロセス

### <負荷量低減への期待>

現在のB鉱山処理プロセスでは、図 3.2-32 のとおり、放流に適さない Zn を水酸化物として 旧坑道に返送している。これにより坑内で鉱体の酸化による酸性水に Zn が再溶解し、坑廃水 処理の Zn 負荷として循環している可能性がある。

硫酸還元菌で固定された Zn は硫化亜鉛であり、水酸化亜鉛よりも坑内での溶解量は少ない。さらに、適当な栄養源の供給が条件ではあるものの、硫酸還元菌の活性状態がそのまま坑内に持ち込まれたとすれば、坑内水の酸性化と Zn の溶出そのものが抑制され、坑廃水処理のZn 負荷が低減することが期待される。

## <殿物量削減への期待>

上記水酸化亜鉛と硫化亜鉛を比べると、同じZn負荷では硫化亜鉛の方が沈降容積が小さい。すなわち、汚泥処分の負担削減が期待される。

3.3. 人工湿地・微生物/植物併用型もしくはその他の型について

3.3.1. 目的

「平成31年度休廃止鉱山における坑廃水処理の高度化調査研究事業に係る自然回帰型坑廃水浄化 システム導入に向けた調査研究業務」におけるパッシブトリートメントの型として「人工湿地・微 生物/植物併用型もしくはその他の型」において、「腐葉土による重金属の吸着作用を活用したパッ シブトリートメント技術」を休廃止鉱山の坑廃水処理に導入するに当たって、実証フィールドの対 象鉱山である C 鉱山の通洞坑水を用いて、平成 30 年度に開始した小型試験装置による少水量の処 理試験の実施を継続し、腐葉土の持つ重金属の吸着性能の確認、装置設計のために必要となる諸元、 及び運転上に係る留意点を明らかにするとともに、実証処理装置の設計・製作、及び設置を行い、 令和 2 年度に予定している実証処理試験の処理規模を設定するため、実証処理装置の試運転を行う ことを目的とする。

また、本パッシブトリートメント技術を他の休廃止鉱山へ導入するため、ガイドライン作成に資 する情報の整理を行うものとする。

### 3.3.2. 対象鉱山の概要

### 3.3.2.1. 対象鉱山の概要

パッシブトリートメントを導入するための実証フィールドである対象鉱山は、昭和10年代に本格 的な開発が始まり、キースラガー鉱床をレッグ・ハンマーによる穿孔、ローダーによる積込方法で 推進し、粗鉱出鉱量は685万トンを計上した。

選鉱は摩鉱、浮遊選鉱により、主に金、銀、銅、亜鉛、コバルト、パイライト等を生産していた が、鉱量枯渇により昭和末期閉山に至った。

### 3.3.2.2. 対象鉱山の鉱害対策状況

対象鉱山では、堆積場や坑内の維持管理、及び坑廃水の処理など、危害・鉱害防止に係る活動を 継続している状況である。

### 3.3.2.3. 実証処理試験の実施場所

対象鉱山における実証処理試験の実施場所の候補を写真 3.3-1、図 3.3-1 に示す。

通洞坑入口から約 40 m 奥の地点から、幅 2 m×長 40 m のスペースを実証処理試験の実施スペースとしている。

坑内の気温は、外気温の変化に影響を受け、冬季にはマイナスにまで低下するものの、降雨や積 雪等の気象条件の変化を受けない環境が維持されることから、本パッシブトリートメントの処理性 能を評価する上で優位性があると考えられる。



写真 3.3-1 実証処理試験の実施予定場所



図 3.3-1 実証処理試験の実施予定場所

## 3.3.2.4. 実証処理試験の処理原水

実証処理試験の処理対象となる処理原水は、通洞坑から排出している通洞坑水とする。処理原水 となる通洞坑水の主要成分を表 3.3-1 に示す。

水量は平均で約 217 L/分、pH は 6.5 と中性を呈している。本原水は、Zn が排水基準を超過する場合があり、この Zn の除去を目的として、本パッシブトリートメントに係る調査研究を行うものとする。

ただし、本原水には S-Fe も含まれており、pH が中性域であることを考慮すると Fe<sup>2+</sup>であると考 えられる。この Fe<sup>2+</sup>が処理過程においてスケールとして析出すると、装置の閉塞等トラブルの発生 が懸念されることから、事前に除去しておく必要があると考えられる。

なお、主要項目の変化を図 3.3-2~図 3.3-4 に示す。

項目	平均	最大	最小		
Q (L/分)	217	429	109		
pH	6.5	7.1	5.4		
水温 (℃)	14.2	20.0	9.4		
ORP (mV)	192	320	14		
EC (mS/m)	245	298	217		
Zn (mg/L)	4.6	9.1	2.1		
Cu (mg/L)	0.46	1.3	0.09		
T-Fe (mg/L)	49	83	35		
S-Fe (mg/L)	8.9	40.9	2.5		
Pb (mg/L)	<0.01	0.03	<0.01		
S-Mn (mg/L)	1.3	1.7	0.8		
SS (mg/L)	104	150	82		

表 3.3-1 処理原水(通洞坑水)の主要成分

2015.10-2018.4 の測定結果 (S-Fe のみ 2017.4~2018.3)



図 3.3-2 原水流量の経時変化



図 3.3-3 pHとECの経時変化



### 3.3.3. 小型試験装置処理試験

実証処理試験を実施するに当たっては、本調査の目的である Zn の処理を目的として、実証処理 装置を設計製作するための設計諸元を明らかにする必要がある。

このため、実証処理装置を想定した小型の試験装置を製作し、少水量の通水試験を実施して処理 効果を確認するとともに、実証処理装置の設計に必要な諸元及び運転上の留意点を整理するものと する。

小型の試験装置は、過年度に実施した室内カラム試験等のデータを基礎として、Znを処理するために必要な装置を製作するものとする。

また、処理原水には、S-Fe として  $Fe^{2+}$ が含まれており、Zn を処理するに当たって、この  $Fe^{2+}$ を前 処理として除去する必要がある。

以上を考慮し、平成 30 年度の小型試験装置処理試験は、除鉄を行う前処理設備と Zn 除去を行う 設備を組み合わせた処理フローにより通水試験を開始し、令和元年度まで継続して実施した。

本単元では、平成30年度からの試験の継続性を考慮して令和元年度の成果を含めて取り纏めることとした。

### 3.3.3.1. 腐葉土の測定

(1) 目的

腐葉土に鉄粉と石灰石をブレンドすることにより、Znの除去性能を高める効果が得られることを 確認しているが、腐葉土の種類と坑廃水の性状には相性があり、Zn除去性能に差異が生じる可能性 があることがわかっている。

また、腐葉土は、同じ製品・生産者であっても、原料となる腐葉土は育成条件が変わると品質に 差異が生じ、生産年によって処理性能に差異が生じる可能性がある。

本調査においては、過年度に実施した室内カラム試験の結果より、現地で生産又は販売されている腐葉土の内、対象原水に対して処理効果の高い腐葉土を選定している。

しかしながら、腐葉土の品質は生産年により変化する可能性があることから、今年度に購入する 予定の腐葉土についても、基本的な項目について測定と分析を行い、データを蓄積しておくことを 目的とする。 (2) 腐葉土の測定項目

対象腐葉土の仕様を表 3.3-2、測定項目を表 3.3-3、測定結果を表 3.3-4 に整理する。

表 3.3-4 より、腐葉土は落葉枝葉の破砕された一般的な性状であるが、含水率 63%と発酵が終了 して程なく袋詰された製品と推察される。

浸漬 pH は、6.35(21.8℃)で中性であり、処理水に大きな影響は与えないと考えられる。

CEC は 100 mEq/100 g-dry、Zn の吸着量は 5 mg/g-wet であったが、これは小型試験装置による通 水が終了した時点において、装置に充填した腐葉土に補足された Zn 量と比較するものとする。

なお、CECから換算した単位腐葉土当たりの亜鉛吸着量は、32.7 mg-Zn/g-dryと求められる。

産地 原料 肥料の種類 販売者/生産者 値				
<u>/41</u> /10	20117	1011 111111111111111111111111111111111	败几日/工/主伯	C (HI)
栃木県	広葉落葉	堆肥栃木県第 890 号	(株) プロトリーフ /植木健一	北海道内販売

表 3.3-2 対象腐葉土の仕様

測定項目	目的	測定方法
外観	腐葉土の形状	写真撮影
嵩比重	単位体積当たりの腐葉土重 量(水分を含む)の把握	1Lビーカーに腐葉土を充填し、その重量 を測定する
空隙率	腐葉土中を通水する原水の 滞留時間の把握	1Lビーカーに腐棄土を充填し、水道水を 1Lまで注入し、増加した重量を測定す る。
含水率	単位重量当たりの腐葉土重 量(水分を含まない)の把 握	約 100 g の腐葉土(水分を含む)を採取 し、100℃で 24 時間乾燥させ、減少した重 量を測定する。
浸漬 pH	腐葉土の緩衝効果の把握	蒸留水1Lに対し、腐葉土を10%の容積で 充填し、24時間後の pH を測定する。
CEC (mEq/100 g)	陽イオン交換容量	土壌養分分析法 3.2.2 (1994) 腐葉土に吸着している陽イオンを酢酸アン モニアでアンモニウムイオンに置換し、さ らに塩化カリウムで置換して、アンモニア イオン量を測定する。
振とうによる Zn 吸 着試験	腐葉土の Zn 吸着量の把握	Zn 8 mg/L の模擬坑水 500 mL に対し、腐葉 土(0.6 mm <x<2 g="" mm="" に分級)0.6="" を添加<br="">し、1 時間振とう後のろ液を分析し、原水 濃度の低下から、腐葉土に吸着された Zn 量を求める。</x<2>

表 3.3-3 腐葉土の測定項目

測定項目	測定結果	備考
外観		
嵩比重	0.32 kg/L	_
空隙率	63%	_
含水率	47%	_
浸漬 pH	6.35 (21.8°C)	
CEC	100 mEq/100 g-dry	32.7 mg-Zn/g-dry(CEC から換算)
Zn吸着量	5 mg/g-wet	原水 Zn 8.9 mg/L⇒処理水 Zn 2.9 mg/L

表 3.3-4 腐葉土の測定結果

3.3.3.2. 処理原水の前処理試験

(1) 目的

原水に含まれている S-Fe (Fe<sup>2+</sup>)を酸化して除去するために必要な知見を得ることを目的とする。

(2) 前処理試験方法

① 酸化試験

表 3.3-1 より、処理原水である通洞坑水には S-Fe が含まれており、この S-Fe は Fe<sup>2+</sup>であると考え られることから、Fe<sup>2+</sup>が処理過程において酸化することにより、装置内にスケールが発生して不具 合を発生させることが懸念される。

通洞坑水による小型試験装置処理試験の実施に当たって、この S-Fe の酸化除去に係る知見を得る 必要があることから、原位置において、S-Fe の酸化試験を実施した。

S-Feの酸化試験は、静置酸化方式と散気酸化方式について実施するものとし、試験の手順を図 3.3-5 に示す。酸化試験の結果より、小型試験装置における接触酸化槽の構造(散気酸化の有無)と 容積(滞留時間)を設定するものとする。



図 3.3-5 S-Feの酸化試験のフローチャート

## 2 固液分離試験

図 3.3-5 に示した酸化処理の過程で発生した殿物は、後段の天然材充填槽へ移流する前に、除去 する必要がある。

ここでは、図 3.3-6 のフローに従い S-Fe の酸化処理に必要な反応時間を経過した後、発生した殿物の沈降分離性を確認するため、上澄水の T-Fe 濃度の変化を測定するものとする。

上澄水の SS 濃度が概ね 1 mg/L 以下に低下できる静置時間を確保することで、後段における閉塞 を防止できると考えられる。

なお、静置酸化において、S-Feの酸化と沈降分離が同時に進行する場合、図 3.3-5 における酸化 試験において、S-Feと T-Feを同時に測定するものとする。



図 3.3-6 酸化した鉄の固液分離試験のフローチャート

(3) 前処理試験結果

1 酸化試験

酸化試験の試験状況を写真 3.3-2、試験結果を図 3.3-7~図 3.3-8 に示す。酸化試験は、通洞坑入口 付近で実施した。

原水は、通洞坑水の排水路から採水し、試験に供した。

図 3.3-7 より、静置酸化、散気酸化ともに、酸化初期段階において、S-Fe の低下が大きいものの、 時間の経過とともに S-Fe の酸化が律速する傾向が認められる。

図 3.3-8 より、原水 DO は 6 mg/L 以上含まれており、DO 不足により S-Fe の酸化が律速している 状況では無いと考えられる。また、散気酸化において、2 時間程で S-Fe の低下する速度が低下する 傾向が認められるが、この時の pH は 6 より低下しており、この pH 低下が S-Fe の酸化を抑制して いると考えられる。

酸化試験の結果、S-Feの酸化を促進するためには、pH を上昇させる過程が必要になると判断した。



写真 3.3-2 酸化試験の試験状況



図 3.3-7 酸化試験の結果(1)



### 2 固液分離試験

酸化試験の結果、散気によっても S-Feを十分酸化することが出来なかったことから、S-Feの酸化 終了後、その混合液を静置して上澄水の T-Fe の変化を測定する試験(図 3.3-6 参照)は実施しない ものとした。従って固液分離試験は、静置による酸化(図 3.3-5 参照)において、時間経過におけ る S-Fe 濃度変化の測定時に上澄水の T-Fe を測定する方式で行った。固液分離試験の結果を図 3.3-9 に示す。

図 3.3-9 より、静置時間の経過とともに上澄水に含まれる Fe は、ほぼ Fe<sup>2+</sup>となる結果が得られて いる。また、写真 3.3-2 より、酸化された Fe は、殿物として速やかに沈降している。

以上より、原水の除鉄を行うためには、図 3.3-8 で示されたとおり、pH を上昇させて Fe<sup>2+</sup>の酸化 を促進する必要があると結論付けられる。なお、前処理工程で発生する殿物量は、原水 T-Fe 濃度を 考慮する必要がある。



図 3.3-9 **固液分離試験の結果** 

### ③ 中和試験

酸化試験の結果、原水の除鉄を行うためには、原水の pH を上昇させる必要があると考えられた。 原水の pH を上昇させる方式としては、日本国内における賦存量、調達の容易さ、価格等を勘案し、 パッシブトリートメントにおいて一般的に活用されている石灰石が、天然資材として優れていると 考えられる。

よって、静置酸化後の原水に対し、石灰石を浸漬させて pH を調整し、上澄水の Fe<sup>2+</sup>と T-Fe の経時変化を測定するための中和試験を実施した。

中和試験の実施状況を写真3.3-3、試験結果を図3.3-10に示す。

中和試験に用いる原水は、C 鉱山の通洞坑水を試験室へ運搬し、運搬過程において静置による Fe<sup>2+</sup>の酸化が終了したと考えられる原水を用いた。

また、石灰石は、事前に水洗し微粉末を除去したものを用い、原水と石灰石の容積を同等に計量 した検体を複数作製し、経過時間毎に上澄水を採取して T-Fe と Fe<sup>2+</sup>の測定を行った。 図 3.3-10 より、Fe<sup>2+</sup>は1時間で1 mg/L 未満、この時の pH は 6.7、また、T-Fe についても、4 時間 経過で1 mg/L 以下となっており、中和によって鉄を除去できることが確認できた。



【石灰石の水洗浄及び風乾】



容積比=1:1(酸化後の通洞坑水 500mL:石灰石 500mL)

写真 3.3-3 中和試験の試験状況



図 3.3-10 中和試験の結果

# (4) 前処理試験結果のまとめ

前処理試験によって得られた知見を表 3.3-5 に整理する。

試験項目	試験結果	その他考慮すべき事項
酸化試験	<ul> <li>・酸化の初期においては、静置酸 化より散気酸化の方が Fe<sup>2+</sup>の酸化 を促進させる効果が認められる。</li> <li>・Fe<sup>2+</sup>の酸化により pH が低下する と、Fe<sup>2+</sup>の酸化が抑制される。</li> </ul>	_
固液分離試験	<ul> <li>・静置後の上澄水の T-Fe は、ほぼ Fe<sup>2+</sup>となる。</li> <li>・Fe<sup>2+</sup>が酸化して発生した殿物は、 速やかに沈降性し上澄水の T-Fe は 低下する。</li> </ul>	・原水の前処理工程から発生する 殿物は、原水 T-Fe 濃度を考慮して 見込む必要がある。
中和試験	・pH を上昇させることで Fe <sup>2+</sup> の酸 化が促進される。	・前処理工程のフローは、酸化工 程と中和工程を組み合わせる必要 がある。

表 3.3-5 前処理試験によって得られた知見

### 3.3.3.3. 小型試験装置による処理試験

#### (1) 目的

実証処理装置の設計製作に必要となる諸元を整理するために必要となる知見を得るとともに、装置の運転管理を行う上で留意すべき知見を得ることを目的とする。

通水期間は、水温変化を含めた処理効果の持続性、装置製作上の問題点、運転上の留意点等を明 らかにすると共に、次年度予定されている実証処理試験の工程(10月以降の通水を予定)を考慮し、 約半年間の連続通水を行う計画とした。

また、過年度に実施したカラム試験の結果、Znを除去するため資材に充填した鉄粉に起因して、 資材内に殿物のスケールが発生して通水性が低下し、水頭が上昇する結果が得られている。資材の 通水性が低下すると Zn の処理効果を十分発揮できない可能性もあることから、資材内部の通水性 を改善する手立てとして、資材中に網状の接触材を充填する試験も行うものとする。原水は資材中 を上向流式で通水させるが、資材の内部に網状充填材を混入させることで、通水する水道を複雑に 変えることにより、原水と資材の接触する面積を増やして水頭の低下を防止できる可能性があると 考えられる。

なお、通水性が低下して Zn 処理効果が低下した場合(通水量が低下しても処理水 Zn<2 mg/L を 満足している)においても、資材自体の Zn 除去性能は失われないと考えられることから、網状接 触材が占める容積に相当する混合資材の容積を減じて資材を作製するものとする。

# (2) 小型試験装置の設計条件

# ① 処理規模

設備	処理水槽	系列	通水量
前処理設備	接触酸化槽、中和槽	1	200 mL/分
Zn 処理設備	天然材充填槽	2	100 mL/分

#### 2 前処理設備

処理水槽	設計基準	容量計算	
接触酸化槽			1槽
・散気ゾーン	接触時間2時間	200 mL/分×60 分/時×2 時間≒24 L	-
・固液分離ゾーン	2 ケ月間の発生殿物	(50-10) mg/L×107/56×200 mL/分 ×	-
	を貯留できる容量	1440 分/ 日×60 日×10 <sup>-6</sup> ÷25 g/L≒53 L	
中和槽			1槽
・中和ゾーン	接触時間4時間及び	<sup>そ</sup> (10-1) mg/L×107/56×200 mL/分×1440	
	半年間に発生する殿	∀ 分/日×180 日×10 <sup>-6</sup> ÷25 g/L÷0.47 (空隙)	
	物を貯留できる容量	率) ≒76L	
・流量調整ゾーン	滞留時間2時間	200 mL/分×60 分/時×2 時間	
		$\doteq 24L$	

# ③ Zn 除去設備

処理水槽	設計基準	容量計算	
天然材充填槽			
RUN1、RUN2 共通			
・資材容積	通水回数 1200 回	100 mL/分×1440 分/日×185 日/半年×10 <sup>-3</sup> ÷	-
		1200回/半年≒22 L	
・資材高	過年度実施した	20 cm (資材の実容積 24 L)	-
	カラム試験等を		
	考慮して決定		
・資材面積	同上	資材容積と資材高さを考慮して面積を設定	-
	3-9 m/日以下	する。 $(30 \text{ cm} \times 40 \text{ cm})$	
・接触時間	同上	実接触時間=24L÷/100mL/分×103	-
	0.6-1.6 時間以上	=240分(4時間)	
・充填資材	実績を考慮	腐葉土:鉄粉:石灰石(体積比)	-
		=73.4 : 9 : 26.6	
		(資材中の鉄粉容積は無視する)	
・通水時間	約半年間		
RUN1			
・充填資材			-
腐葉土	73.4%	24 L×73.4%≒17.6 L	-
		17.6 L×0.32 kg/L≒5.6 kg	
鉄粉	9.0%	24 L×9.0%≒2.16 L	-
		$2.16 L \times 3.4 \text{ kg/L} = 7.3 \text{ kg}$	
石灰石	26.6%	24 L×26.6%≒6.38 L	-
		6.38 L×1.5 kg/L≒9.6 kg	
RUN2			1槽
・充填資材			-
腐葉土	73.4%	$24 L \times 73.4\% \times (15/20 \times 0.8 + 5/20) \approx 15.0 L$	-
		15.0 L×0.32 kg/L≒4.8 kg	
鉄粉	9.0%	$24 L \times 9.0\% \times (15/20 \times 0.8 + 5/20) \approx 1.84 L$	-
		$1.84 L \times 3.4 \text{ kg/L} = 6.3 \text{ kg}$	
石灰石	26.6%	$24 L \times 26.6\% (15/20 \times 0.8 + 5/20) \approx 5.43 L$	-
		5.43 L×1.5 kg/L≒8.1 kg	
充填材	資材容積の20%	% 網状接触材を第 2 系列 (RUN2)のみに混 -	
(網状接触材)		在(上層 5 cm には混入しない)	
		$24 L \times 15/20 \times 0.2 = 3.6 L$	

## ④ 処理フローシート

本原木の処理を行う小型試験装置に採用する処理フローを図 3.3-11 に示す。 酸化試験結果を基に、接触酸化槽の後段に中和槽を設け、原木の除鉄の促進を図ることとした。 原木は、排水溝より原水移送ポンプにより定量的に接触酸化槽へ供給され、散気による Fe<sup>2+</sup>の酸 化を促進し、その後接触材を充填したゾーンにて、水酸化鉄の殿物として固液分離を行う。残存し た Fe<sup>2+</sup>を含む原水は、石灰石を充填した中和槽へ移流し、水酸化鉄の殿物として固液分離され、一 旦貯留される。

除鉄された原水は、原水計量ポンプにより、定量的に天然材充填槽へ、上向流式に移送され、Zn を吸着除去したのち、処理水は排水溝へ流下するフローを採用した。



No.	水槽名称	台数	仕様	充填材	備考
1	原水移送ポンプ	1	φ13 (φ8) ×200mL/分×200kPa×100V×24w		ダイヤフラムポンプ
2	接触酸化槽	1	W300 × L850 × H450	紐状接触材	透明アクリル板
3	エアポンプ	1	60L/時×100V×3w程度		エアストーン
4	中和槽	1	W300 × L850 × H450		透明アクリル板
5	原水計量ポンプ	2	φ13 (φ8) ×100mL/分×200kPa×100V×20w		ダイヤフラムポンプ
6	天然材充填槽	1	W300 × L400 × H450	腐葉土+鉄粉+石灰石	透明アクリル板
		1	W300 × L400 × H450	網状接触材+腐葉土+鉄粉+石灰石	透明アクリル板

図 3.3-11 小型試験装置の処理フロー

# ⑤ 小型試験装置の構造図

小型試験装置の構造図を図 3.3-12~図 3.3-14 に示す。



図 3.3-12 小型試験装置(接触酸化槽)の構造図



図 3.3-13 小型試験装置(中和槽)の構造図



# (3) 測定項目及び分析項目

原水と処理水を対象に測定及び分析する項目をそれぞれ表 3.3-6、表 3.3-7 に整理する。

測定項目及び分析項目		頻度	備考
原水	pH(水温)、ORP、DO 通水量、	2回/月程度	通水中は継続測定
酸化処理水 中和処理水 天然材処理水	pH(水温)、ORP、DO	2回/月程度	通水中は継続測定
天然材充填槽内部	Eh、水頭、色相	2回/月程度	通水中は継続測定 下 中 上 層 層 層 Eh Eh Eh i i j 天然材 (単位:mm) 砂利 上向流通水方式

表 3.3-6 測定項目

表 3.3-7 分析項目

測定項目及び分析項目		頻度	備考
原水	Zn、T-Fe、S-Fe、SO4 <sup>2-</sup>	2回/月程度	通水中は継続サンプリング
酸化処理水 中和処理水 天然材処理水	Zn、T-Fe、S-Fe、SO4 <sup>2-</sup>	2回/月程度	通水中は継続サンプリング

# (4) 小型試験装置の設置

小型試験装置の設置計画図及び設置状況をそれぞれ図 3.3-15、写真 3.3-4 に示す。



図 3.3-15 小型試験装置の設置計画図



写真 3.3-4 小型試験装置の設置状況

### (5) 小型試験装置の処理結果

小型試験装置の Zn 除去を担う天然材充填槽の実容積は 24 L(W0.3 m×H0.4 m×H0.2 m)より、 目標とする累積通水量は、約 28.8 m<sup>3</sup>(資材容積に対する通水回数 1200 回)となる。

1 Zn

Znの変化を図 3.3-16 に示す。

図 3.3-16 より、原水である通洞坑水は、平均 4.5 mg/L であり、表 3.3-1 と同程度である。接触酸 化処理水は、大きな変動が認められるが、これは槽内に堆積した殿物が増加し、接触酸化処理水へ 流出したことから、殿物起因の Zn が増加したためと考えられる。(図 3.3-18 参照)

中和処理水は、石灰石による中和効果で原水より平均で約1mg/Lほど低下し平均3.4mg/Lで推移し、また融雪時期を除けば変動も比較的少ない。

RUN1 は、累積通水量 10 m<sup>3</sup>を超える辺りから上昇する傾向が認められ、若干 2 mg/L を超過した が、坑内温度の低下の影響を受けて水温が極端に低下した時期と合致しており(図 3.3-25 参照)、 水温低下の影響を受けている可能性があると考えられる。処理水 Zn が 2 mg/L を越えたことから、 資材の固化部分を破砕する措置を行ったところ(図 3.3-24 参照)、暫くは処理水 Zn の改善が認め られなかったものの、水温の上昇に伴い(図 3.3-25 参照)、処理水 Zn に改善が認められる。

RUN2 は目標である 2 mg/L を満足して推移しているが、累積通水量 17 m<sup>3</sup>付近で 1.5 mg/L まで上 昇が認められる。図 3.3-25 では、RUN1 と同様の水温変化を示しており、RUN1 と同様に水温低下 の影響を受けていると考えられるが、その影響は RUN1 と比較して小さい。

RUN2 は、資材の閉塞を緩和する目的で、網状接触材を混入しているが、その効果により比較的 水頭上昇が小さくなり短絡の発生も少なかったことによるものと考えられる。(図 3.3-30 参照)

その後、処理水 Zn は上昇が認められるものの、目標である通水回数 1200 回まで 2 mg/L を満足して推移した。



坑内温度の低下-8℃

図 3.3-16 Zn の変化

3.3-23

2 pH

pHの変化を図 3.3-17 に示す。通洞坑水は 6.5~7.2 程度で推移している。接触酸化処理水は、融雪時期を除けば 6.6~7.1 程度で推移しておりほぼ中性である。中和処理水は、通水初期は 7.2~7.7 程度であったが、徐々に 6.5 付近まで低下している。

RUN1 と RUN2 は、通水初期は 8 程度で推移したが、徐々に 7 程度まで低下する傾向が認められるが、共に排水基準を満足して推移している。



図 3.3-17 pH の変化

# 3 T-Fe

T-Feの変化を図 3.3-18 に示す。通洞坑水は、平均値 49 mg/L(表 3.3-1 参照)を超過する大きな変 動が認められる。この変動が接触酸化槽に堆積される殿物量に影響を与えていると考えられる。接 触酸化処理水には大きな変動が認められるが、これは槽内に堆積した殿物が流出したためと考えら れる。接触酸化槽内に堆積される殿物量の管理に留意する必要があると考えられる。



図 3.3-18 T-Feの変化

# (4) S-Fe

S-Feの変化を図 3.3-19 に示す。通洞坑水は、融雪時期を除けば平均 5.3 mg/L である。接触酸化処 理水は融雪時期を除けば平均 0.9 mg/L であり、中和処理工程を割愛しても目標の 1 mg/L を満足して いる状況である。

RUN1、RUN2 共に資材中の Fe に由来すると考えられる S-Fe が認められるが、排水基準を満足して推移している。また、緩やかに低下する傾向が認められる。



図 3.3-19 S-Fe の変化

## (5) D0

DO の変化を図 3.3-20 に示す。通洞坑水は、4~6 mg/L 含まれているが、散気により後段の接触酸 化槽と中和槽では 1~2 mg/L 増加する傾向が確認できる。なお、累積通水量 19 m<sup>3</sup> 時点ではエアポ ンプは凍結のため故障したため(写真 3.3-5 参照)、通洞坑水 DO との差が小さくなっている。

RUN1 と RUN2 では、天然材を通過することで DO が低下する状況であったが、徐々に DO の上 昇が認められる傾向を示し、その後再び低下が認められる。

RUN1とRUN2のDO上昇は、天然材充填槽に充填された資材に短絡が生じた可能性が考えられ、 この短絡の影響を受けたと推察される。



写真 3.3-5 エアポンプの凍結状況



図 3.3-20 DO の変化

6 ORP

ORP の変化を図 3.3-21 に示す。通洞坑水 ORP は、250~300 mV で推移しており、散気により後段の接触酸化槽と中和槽では 50 mV 程度の上昇が認められる。RUN1 と RUN2 では、天然材を通過することで ORP が低下する状況であったが、急激に ORP の上昇が認められることから、DO と同じような傾向を示しており、短絡の影響を受けていると考えられる。

また、RUN1 では、累積通水量約 32 m<sup>3</sup>を越えた時期から、水温に上昇が認められ(図 3.3-25 参照)、処理水 Zn にも改善が認められるが(図 3.3-16)、ORP も低下傾向が認められる。これは、 水温が上昇し鉄粉の反応が回復したことが ORP の低下に影響したと考えられる。



図 3.3-21 ORP の変化

⑦ Eh (RUN1)

RUN1 の Eh の変化を図 3.3-22 に示す。天然材を上向流式で通水しており、下層 Eh は変動が大き く高い値で推移している。一方、中層と上層の Eh は、低く安定していたが、累積通水量 17 m<sup>3</sup>付近 で急激な上昇が認められる。図 3.3-25 より水温の極端な低下が続き鉄粉の溶解が阻害され、還元雰 囲気を維持する能力が低下した可能性が考えられる。また、累積通水量 19 m<sup>3</sup>付近で再び Eh が低下 しているが、水温が上昇し、鉄粉の効果が回復した可能性が考えられる。

しかしながら、その後は中層、上層共に低く安定して推移し、処理水 Zn の変化との相関は認め られない状況となった。



図 3.3-22 Eh (RUN1)の変化

8 Eh (RUN2)

RUN2のEhの変化を図 3.3-23に示す。図 3.3-22と同様の変化を示しており、累積通水量 12 m<sup>3</sup>付 近から上昇傾向が認められたが、その後再び低下している。

RUN1 と同様に、水温の低下が続いて、鉄粉の効果が抑制されたものの、水温が上昇に転じて、 効果が回復していると考えられる。しかしながら、その後は中層、上層共に低く安定して推移し、 処理水 Zn の変化との相関は認められない状況となった。



図 3.3-23 Eh (RUN2)の変化

9 水頭

水頭の変化を図 3.3-24 に示す。RUN1 は、累積通水量の増加に伴い水頭の上昇が認められた後、 水頭の大きな低下が認められるが、短絡の発生により充填材の圧力損失が低下したと考えられる。 図 3.3-16 において、RUN1 処理水 Zn が 2 mg/L を超過したのは、この短絡の影響を受けたと考えら れる。一方、RUN2 は、累積通水量の増加に伴い水頭の上昇が認められるものの、その上昇傾きは RUN1 と比較して小さく、充填材を混入した効果が発揮されていると考えられる。

なお、RUN1 は、資材の通水性を改善する目的で、下層部の固化部分を破砕する措置を 2 回実施 したことから、水頭の急激な低下が認められる。



## 10 水温

水温の変化を図 3.3-25 に示す。通洞坑水は、外気温の低下に伴い 15℃から 9~10℃まで低下が認められる。さらに、各水槽を通過する過程で水温の低下も認められる。

RUN1 と RUN2 の処理水は、この影響を受け極端な水温低下が認められるが、鉄粉の効果の低下 や、充填資材の収縮等による短絡の発生(3.3.3.3(5)⑪章参照)など処理機能を低下させる要因にな っていると考えられる。



図 3.3-25 水温の変化

3.3-28
短絡発生時の状況

短絡発生前後の天然材充填槽の通水状況を写真 3.3-6、写真 3.3-7、累積通水量約 17 m<sup>3</sup>時における 水質を表 3.3-8 に示す。

累積通水量約17 m<sup>3</sup>時点(図 3.3-16参照)において、RUN1 処理水 Zn 2.1 mg/L、RUN2 処理水 Zn 1.5 mg/L と Zn の上昇が認められたが、写真 3.3-6 より、RUN1 処理水と RUN2 処理水に濁りが認められ、また、写真 3.3-7 より、RUN1 水槽、RUN2 水槽共に、壁面に茶系色の殿物が付着しており、特に RUN1 は充填資材の上部(水面との境界)まで成長していることから、原水(中和処理水)の一部は、充填資材を短絡していたと考えられる。

表 3.3-8において、中和処理水の SS 性 Zn は 0.4 mg/L に対して、RUN1 処理水 SS 性 Zn は 0.4 mg/L、 RUN2 処理水 SS 性 Zn は 0.2 mg/L であり、天然材充填槽における SS 性 Zn の除去が低下しているこ とも確認できる。

この短絡の発生原因は、天然材充填槽の水温の極端な低下(図 3.3-25 参照)にあると考えられ、 水温の低下により充填資材の収縮が発生したと考えられる。

資材が収縮した場合、腐葉土は絡み合っているため、材質が異なる資材と水槽壁面の隙間が大き くなり、また水圧の影響も受けて、間隙が広がり、短絡する水量も増加したと考えられる。

RUN1 では、水温の極端な低下により、充填資材と水槽壁面の間隙が広がり、短絡が徐々に発生し、処理水 Zn の上昇する傾向に現れていたと考えられる。(短絡の発生により水頭は低下)

一方、RUN2 では、RUN1 と比較して、処理水 Zn の上昇は抑えられていたが、これは網状接触材 を混入した効果により、通水の水道が下から上への一方方向ではなく、資材内部の充填材を通じて、 四方八方へ広がったことにより、資材と水槽壁面の間に作用する水圧が比較的小さく抑えられたた めと考えられる。

なお、累積通水量 19 m<sup>3</sup>時点では、RUN1、RUN2 共に処理水の濁りが小さくなっており、処理水 Zn に改善が認められる。(図 3.3-16 参照)また、図 3.3-25 においても、水温上昇が認められること から、鉄粉の作用の改善、及び充填資材が膨張し水槽壁面との間隙が小さくなっている可能性が考 えられる。



写真 3.3-6 天然材充填槽の運転状況(1)



写真 3.3-7 天然材充填槽の運転状況(2)

項目	通洞坑水	接触酸化処理水	中和処理水	RUN1 処理水	RUN2 処理水
Zn (mg/L)	6.0	4.4	3.8	2.1	1.5
S-Zn (mg/L)	3.4	3.6	3.2	1.7	1.3
T-Fe (mg/L)	87	38	20	13	11
S-Fe (mg/L)	4.0	1.3	0.64	2.2	3.3

表 3.3-8 累積通水量約 17 m<sup>3</sup>時点の処理過程における水質

### (12) SO4<sup>2-</sup>

SO4<sup>2-</sup>の変化を図 3.3-26 に示す。原水である通洞坑水と RUN1 処理水と RUN2 処理水には特筆できる変化は認められない状況である。



## 13 保温工事

外気温(12/7AM9:00頃、-7℃)の低下に伴い、坑内温度も-3℃まで低下しており、小型試験装置 内の滞留水や接続配管が凍結する可能性があることから、エアキャップやスタイロフォームによる 簡易的な保温工事を施した。

しかしながら、1/23 に RUN2 の天然材充填槽の処理水管内が凍結する現象が確認されたことから、 投光器による保温対策を行った。

冬期間は坑内が負圧となり、外気が通洞坑口から入気する現状が発生すること、また RUN2 系統 が通洞坑口側に配置されていたことから、入気が最も接触しやすい環境にあったためと考えられる。 また、通水量が 100 mL/分と少水量であったことも、配管内の凍結に至った要因と考えられる。小 型試験装置の保温工事の状況を写真 3.3-8 に示す。

なお、その後の運転状況であるが、2/12、RUN1 処理水管に凍結(写真 3.3-6 参照)が認められ、 処理槽上部から処理水が溢流したことから、投光器を中央に配置して、RUN1、RUN2 の処理水管 共に加温できるように調整している。



写真 3.3-8 小型試験装置の保温状況

- (6) 硫酸還元反応確認試験
- ① 室内培養試験

天然材充填槽の Eh は(-)で推移していることから、硫酸還元菌が活性化している可能性が考 えられた。

そこで硫酸還元菌を培養し同定する代わりに、原水及び処理水を培地に植種し、培地内で硫酸還 元菌が増殖した場合に算出される硫化物により、培地内の鉄が硫化鉄として黒色に変化する反応を 利用し、間接的に硫酸還元菌の活性を確認する試験を行った。

簡易試験装置は、三愛石油㈱のバイオチェッカーSを用い、キャピラリーにより対象水を採取し 培地へ植種して、30℃で3日間培養した後、培地の色の変化を確認した。

硫化物が産出されていれば、培地はキャピラリーに沿って下層から上層に向かって、黒色に変色 する変化が認められ、変色範囲の大小によって、硫酸還元菌の菌数や活性の具合を相対的に比較で きる。

試験状況と試験結果を写真 3.3-9 に示す。

写真 3.3-9 より、植種した培地とブランクを比較し、ほとんど差異が認められなかったことから、 腐葉土中には硫酸還元菌は存在すると考えられるものの、その活性は低い状態であると推察される。



30℃-3日間



写真 3.3-9 硫酸還元反応確認試験の状況(1)

### 2 現地養試験

硫酸還元菌は、自然界の多種多様な環境に存在しており、試験を実施している環境に馴致している種も存在していると考えられる。そのため、三愛石油㈱のバイオチェッカーSを用いた簡易試験を、小型試験装置を実施している原位置において実施した。

現地における試験状況を写真 3.3-10 に示す。原位置では、通洞坑水を導水する排水路内にサンプ ルをジップロップ内に封印してから浸漬させ、水路の水温と同じ約 12℃で約 25 日間培養した。

試験の結果、Blank との差が認められない結果が得られたことから、原位置において硫酸還元菌の活性はほとんど期待できないと考えられる。





写真 3.3-10 硫酸還元反応確認試験の状況(2)

#### (7) 前処理設備の処理効果

#### S-Feの酸化処理

接触酸化槽と中和槽は、Zn 除去の前処理として S-Fe (Fe<sup>2+</sup>)の酸化と水酸化鉄の殿物として固液 分離を行う機能を担っている。また、実証処理試験は限られた坑内のスペースを活用する計画であ り、前処理設備である接触酸化槽と中和槽は可能な限りコンパクトに抑え、Zn 除去を担う天然材充 填槽の容積を確保し、処理規模を可能な限り大きくする必要がある。

接触酸化槽は、酸化試験の結果を考慮し、S-Feを10 mg/L以下にまで処理し、残りのS-Feは後段の中和槽で1 mg/Lまで除去する計画であったが、処理結果は図3.3-19 に示すとおり、融雪時期を除くものの接触酸化処理水 S-Fe は平均で1 mg/L 未満で推移している。

通洞坑水の S-Fe が想定より低く推移したこともあるが、接触酸化槽内に堆積した殿物に原水の S-Fe が接触することで酸化が促進されている可能性も考えられ、酸化処理水の S-Fe は中和処理水に対して設定した目標を満足していることから、中和槽は割愛できると考えられる。

#### 2 殿物の除去

酸化された S-Fe は、水酸化鉄の殿物として槽内に堆積し、除鉄された処理水を得ることが出来る。 計画では、槽内に充填した接触材に殿物は濃縮され、濃度 25,000 mg/L 程度で引き抜くことができ る試算を行った。

接触酸化槽の運転状況を写真 3.3-11、引抜後の状況を写真 3.3-12、引抜殿物の濃度測定結果を表 3.3-9 に示す。

写真 3.3-11 より、発生した殿物は、接触材の周囲に濃縮されているように視認できるが、実際に 引き抜いた殿物濃度は、平均で約 9,850 mg/L であった。殿物の引抜濃度が想定より薄くなったのは、 槽内殿物の濃度に差が生じたためと考えられる。

従って、接触酸化槽からの殿物引抜は、想定の約3倍量を定期的に引き抜く管理を行うこととした。しかしながら、図3.3-18に示すように、通洞坑水のT-Feが想定の50 mg/Lより大きく変動しており、接触酸化槽内の殿物堆積量が多くなる要因となっている。

写真 3.3-11 で示すように、接触酸化槽から後段の中和槽へ殿物がキャリオーバーしており、さら に中和槽から天然材充填槽へ殿物が流出される状況が生じているため、殿物は連続的な引抜が必要 であると判断された。

以上を考慮し、写真 3.3-14 で示すようにダイヤフラムポンプによる殿物の連続引抜試験を行った。 その結果、ポンプ稼働直後は、濃度の高い殿物を引き抜くことが出来たが、その後の殿物はほぼ透 明な処理水となった。これは、ポンプのサクション管周囲の殿物がブリッジを生成し、ろ過層を構 成したためと考えられた。従って、殿物の引抜は、ある程度の流量を確保して間欠的に引き抜く必 要があると考えられた。

なお、写真 3.3-10 より、引き抜いた殿物は、約 4 時間程度静置させると沈降し、容積が約 1/4 に 濃縮されたことから、約 4 倍の 26,000~28,000 mg/L 程度まで濃縮されている。

従って、十分な静置時間を確保し、間欠的に殿物を引き抜いた場合、殿物濃度は当初に想定した 25,000 mg/L 程度まで濃縮できると考えられる。



写真 3.3-11 接触酸化槽の運転状況



写真 3.3-12 殿物引抜後の接触酸化槽の状況



写真 3.3-13 4時間静置後の殿物の状況



写真 3.3-14 ダイヤフラムポンプによる殿物の連続引抜状況

採取日	引抜場所	殿物濃度(mg/L)
H30/11/27	接触酸化槽	8,800
H30/12/6	接触酸化槽	8,400
H30/12/25	接触酸化槽	6,600
H31/1/8	接触酸化槽	6,900
H31/2/12	接触材 (付着殿物)	21,700
H31/3/28	接触酸化槽	14,300
H31/4/10	接触酸化槽	14.100
平均(接触材付着殿物を除く)		9,850

表 3.3-9 引抜殿物濃度の測定結果

- (8) 通水終了時の資材の成分分析
- ① 通水終了時の状況

通水終了時の天然材充填槽の状況を写真 3.3-15 に示す。

写真写真 3.3-15 より、RUN1、RUN2 共に壁面に茶褐色の殿物が認められ、また RUN1 は、上部から観察すると、周囲の面から発生している殿物量が多いことが確認できる。

RUN2 は、資材上に敷いたトリカルネットの浮き上がりが認められ、資材が膨張していると考えられる。天然材充填槽から排水すると、この膨張は失われたことから、資材内部に帯水層または空隙(内部には水が滞水)が発生していたと考えられる。



処理水管出口まで資材膨張

周辺の殿物量増加



写真 3.3-15 通水終了時の天然材充填槽の状況

- ② 資材内部の状況
- A. RUN1

通水終了時の RUN1 の資材内部の状況を写真 3.3-16 に示す。

写真写真3.3-16より、資材の下層約5cmに固化した茶褐色の層が認められた。また、資材の上層 部分は、あまり変質していないから、劣化していない状態であると考えられる。(図3.3-16参照) 砂利層部分は、茶褐色の殿物の付着が認められるが、原水由来の成分が蓄積したと考えられる。



写真 3.3-16 通水終了時の天然材充填槽 1 の内部の状況

B. RUN2

通水終了時のRUN2の資材内部の状況を写真 3.3-17 に示す。

写真 3.3-17 より、RUN1 と同様に、資材の下層約 5 cm に固化した茶褐色の層が認められた。また、 資材の上層部分は、RUN1 と比較して資材は固く、ところどころ茶褐色を呈していたことから、資 材の劣化が進んでいる状態であると考えられる。

砂利層部分は、茶褐色の殿物の付着が認められるが、原水由来の成分が蓄積したと考えられる。 また、資材内部に充填した網状充填材は、空隙が残った充填材も認められたものの、内部に殿物 が蓄積た充填材が多く存在し、その殿物は容易に剥離しない性状となっていた。



写真 3.3-17 通水終了時の天然材充填槽 2 の内部の状況

## ③ 資材内部の成分分析

通水終了後のRUN1、RUN2の資材の成分分析結果を表 3.3-10 に示す。

表 3.3-10 より、RUN1、RUN2 とも、流入側である下層の Zn 含有量が流出側である上層の Zn 含 有量より大きい結果が得られた。

また、RUN1より RUN2は、資材充填量が少ないことから、単位重量当たりの Zn含有量は大きかった。(表 3.3-11 参照)

一方、腐葉土と比較すると RUN1、RUN2 ともに Zn 含有量が大きいにも関わらず、Zn 溶出量は 同程度であることから、資材に除去された Zn 成分は安定した性状で固定されていると考えられる。

採取場所	区分	RU	N1	RU	N2	腐葉土
分析方法	位置	下層	上層	下層	上層	-
	Fe	0. 98	0.27	0.18	1.35	0.44
	Zn	0. 05	<0.01	0.05	0. 01	0.08
溶出量(mg/L)	Cd	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
環境省告示第18号	Pb	<0.005	<0.005	<0. 005	<0.005	0.017
	As	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	0.003
	Ca	39	39	46	36	22
含有量(mg/kg) 環境省告示第19号	Fe	340, 000	330, 000	350, 000	300, 000	2,900
	Zn	7, 400	560	8, 200	1, 900	86
	Cd	<15	<15	<15	<15	<15
	Pb	<15	<15	<15	<15	<15
	As	<15	<15	<15	<15	<15
	Ca	10, 000	9, 500	9, 800	9, 500	17, 000

表 3.3-10 資材の成分分析結果

表 3.3-11 充填資材量の比較

充填資材量	RUN1	RUN2
腐葉土 (kg)	5.6	4.8
鉄粉(kg)	7.3	6.3
石灰石(kg)	9.6	8.1
充填材(L)	-	3.6

(9) 過年度試験との比較

過年度実施したカラム試験装置を図 3.3-27、試験状況を写真 3.3-18 に示す。カラム試験は室内で 実施し、対象鉱山から通洞坑水を原水として運搬して試験に供した。

小型試験装置による処理試験は、過年度実施した室内カラム試験の結果を基に計画したことから、 これらのデータを比較して処理効果の検証を行い、実証処理装置の設計等の諸元の整理に活用する ものとする。



図 3.3-27 過年度実施したカラム試験装置図



写真 3.3-18 カラム試験の試験状況

### ① 処理水 Zn と通水回数

本試験の小型試験処理装置における処理水Zn、水頭、水温について、過年度実施室内カラム試験 結果との比較を図 3.3-28~図 3.3-33 に示す。

図 3.3-28 より、RUN1、RUN2 の処理水 Zn は、RUN5、RUN6 と比較すると、処理性能の低下が早 い傾向が認められる。

カラム試験は、室内にて実施しており、開始時の水温は RUN506 で 13~15℃付近、RUN902 で 18 ~22℃付近であり、試験期間中は平均 16~18℃であった。(図 3.3-31 参照)一方、本試験では、開 始時の水温は 6~7℃付近、通水回数 1200 回までの平均で 5~6℃である。

水温が低い場合、ORP に上昇が認められることから(図 3.3-21 参照)、鉄粉の反応が抑制される と考えられ、Zn の処理効果も低下すると考えられる。



図 3.3-28 過年度実施したカラム試験との比較(1)

### ② 処理水 Zn と通水日数

Zn 処理効果を通水日数で比較した場合、RUN1、RUN2 は RUN506、RUN902 と遜色のない Zn 処 理効果が認められる(図 3.3-29 参照)。

従って、混合資材の性能を評価する場合、通数回数に加えて通水日数を考慮する必要があると考 えられる。



図 3.3-29 過年度実施したカラム試験との比較(2)

### ③ 水頭と通水回数

図 3.3-30 において水頭の上昇を通水回数で比較した場合、RUN2 は RUN506、RUN902 と同じ傾向 を示しており、資材充填高さが 2 倍であることを考慮すると、資材の閉塞が抑制されていると考え られる。通水回数 1400 回以降は水頭の低下が認められるが、水温が上昇(図 3.3-31 参照)したこと により粘性が低下したためと考えられる。



図 3.3-30 過年度実施したカラム試験との比較(3)

### ④ 水温と通水回数

図 3.3-31 において、水温を通水回数で比較した場合、RUN1、RUN2 は RUN506、RUN902 と比較 し、通水初期から 8℃以下の低い水温で通水されており、このため鉄粉の反応が抑制されたと考え られる(図 3.3-32 参照)。



図 3.3-31 過年度実施したカラム試験との比較(4)

### 5 処理水 Zn と S-Fe の推移

図 3.3-32 において、処理水 Zn と処理水 S-Fe を通水回数で比較した場合、RUN506、RUN902 は通 水初期の S-Fe が非常に高く、その後急激に低下しているのに対し、RUN1、RUN2 は、初期濃度が 低く緩やかに低下傾向が認められる。

室内カラム試験では、鉄粉の反応が高く処理水 Zn が安定しているものの、資材の閉塞が進んだ ことにより処理性能の低下が起きているのに対し、本試験では資材の閉塞は抑制されているものの、 処理水 Zn が目標である 2 mg/L を超過したことで処理性能の低下が起きている。(図 3.3-28、図 3.3-30 参照)



図 3.3-32 過年度実施したカラム試験との比較(5)

## ⑥ 単位腐葉土当たりの Zn 除去量

図 3.3-33 より、処理水 Zn と単位腐葉土当たりの Zn 除去量で比較した場合、単位腐葉土当たりの Zn 除去量は、RUN1、RUN2 ともに CEC から換算された Zn 吸着量 32.7 mg/g より大きいことから (表 3.3-4 参照)、腐葉土の吸着以外にも Zn の除去に関与している因子があると考えられる。

RUN506は、閉塞による処理性能低下の時点において、CECから求められたZn吸着量まで到達していないが、これは原水Zn濃度が低かったためと考えられる。



図 3.3-33 過年度実施したカラム試験との比較(6)

(10) 小型試験装置のまとめと実証処理装置への適用

小型試験装置を用いた試験の成果と実証処理試験への適用について表 3.3-12 に整理する。

表 3.3-12 より、接触酸化処理においては、融雪時期を除くものの、処理水 S-Fe<1 mg/L を満足で きると考えられる。実証処理試験では、S-Fe(Fe<sup>2+</sup>)の酸化を促進するため、散気装置による送気 やバクテリアを馴致するため接触材を充填するとともに、殿物の間欠引抜を計画するものとする。

中和処理では、pH の上昇効果を期待できるが、実証処理試験では規模が大きくなることから石 灰石表面に発生する殿物の除去を効率よくできる工夫が必要となる。また、設置スペースも大きく 必要であることから、接触酸化処理において、S-Fe の除去が達成できる範囲において割愛するのが 望ましいと考えられる。

天然材処理では、低温時には処理効果が低下するものの、網状充填材の効果により短絡の発生や 水頭の上昇を抑制し、通数回数 1200 回、通水日数は約半年間、Zn の処理効果を持続することが出 来た。処理規模が大きくなれば水温の低下も小さくなると予測されることから、天然材充填槽の処 理規模を大きくすることで水温低下による影響を緩和できると考えられる。

実証処理試験では、小型試験装置における資材調整を基に、通水回数を確保しながら、より大き な通水速度で処理効果を確認し、効果的な処理規模を模索するものとする。

項目	小型試験装置による試験の成果	実証処理試験への適用
1.接触酸化処理		
①S-Fe 除去性能	平均 S-Fe<1 mg/L(融雪期を除く)	馴致による効果を生かす
		(接触材の充填)
②散気による効果	S-Feの酸化に必要な DO が原水に確	馴致期間のみ散気
	保(1.43 mg/L(S-Fe10 mg/L))	(散気ゾーンの設置)
③殿物引抜	連続引抜はブリッジ発生	固液分離ゾーンの設置
		複数水中ポンプによる間欠引抜
2.中和処理		割愛可能
①S-Fe 除去効果	接触酸化処理で目標達成	pH 上昇効果有
②交換時期	表面の殿物付着状況で判断	定期的な交換
3.天然材処理		
①Zn 処理効果	通水回数 1200 回程度	通水回数による処理規模(通水速
	通水期間半年程度	度)の拡大の可能性を調査
②低温時処理効果	水温 1.5~3℃でも Zn 除去性能有	高通水速度時の性能を調査
	(低温時は処理性能が低下)	
③単位資材当たりの Zn	CEC から求めた Zn 除去量を満足	CEC による処理性能低下の時期の
除去量	吸着と Fe による共沈効果	予測も考慮
④水頭の上昇	RUN2の水頭上昇<300 mm で推移	網状充填材による抑制効果を検証

表 3.3-12 小型試験の結果及び実証処理試験への適用

(11) 実証処理試験へ供する原水の前処理について

小型試験装置における処理試験で得られた原水(通洞坑水)、酸化処理水、中和処理水の変化を図 3.3-34~図 3.3-36 に示す。

図 3.3-34 より、融雪時期には、通洞坑水 pH と接触酸化処理水 pH は、低下する傾向が認められる。特に接触酸化処理水は、通洞坑水 S-Fe が急激に上昇し(図 3.3-36 参照)、その酸化と殿物の生成過程によりアルカリ度が消費されることから pH の低下が顕著である。

また、図 3.3-35 より、融雪時期は、通洞坑水、接触酸化処理水、中和処理水とも Zn 濃度が高くなる傾向が認められる。



図 3.3-34 小型試験で得られた原水水質の変化(1)



図 3.3-35 小型試験で得られた原水水質の変化(2)



図 3.3-36 小型試験で得られた原水水質の変化(3)

原水(通洞坑水)、酸化処理水、中和処理水の集計を表 3.3-13 に整理する。

表 3.3-13 より、融雪時期を除くと、酸化処理水は、平均で S-Fe<1 mg/L、pH もほぼ中性であることから、中和処理水と大きな乖離は小さいと考えられる。

また、実証処理試験の実施時期は、融雪時期以降であることから、急激な pH 低下と S-Fe 上昇に 対応する必要は無いと考えられる。

本業務が腐葉土の混合資材による Zn 処理を主プロセスとしたパッシブトリートメントの研究開 発を目的としていることを考慮すると、実証処理装置においては中和処理を割愛し、酸化処理と天 然材処理の組み合わせにより実証処理試験を実施する方が、より処理規模を大きくし水温低下の影 響を緩和できることから、腐葉土の混合資材の Zn 処理効果を正確に評価できると考えられる。

項目	平均	最大	最小最			
(通洞坑水)						
pH	6.8	7.1	6.3			
Zn	4.9	8.7	3.7			
S-Fe	8	28	3. 2			
(酸化処理水	.)					
pН	6.7	7.1	5.6			
Zn	5	9.4	2.5			
S-Fe	2.5	22	0.3			
(酸化処理水	: 融雪期(20	19. 4. 23-6. 24	)を除く			
pН	6.9	7.1	6.6			
Zn	4.5	9.4	2.5			
S-Fe	0, 9	2.5	0, 25			
(中和処理水)						
pH	7.1	7.7	6.3			
Zn	3.8	7.6	2.4			
0 -						

表 3.3-13 原水水質のまとめ

(12) 実証処理試験における通水速度の設定について

実証処理試験における通水速度の設定に当たり、過年度実施した室内カラム試験と本試験である 小型処理試験で用いた試験装置の仕様を表 3.3-14 に整理する。

表 3.3-14 より、室内カラム試験では、模擬坑水を用いてはいるものの、通水速度 9.3 m/日において、通水回数 1200 回以上の Zn 処理効果を確認している。また、同じ原水(通洞坑水)を用いて、通水速度 3 m/日において、通水回数 1200 回以上の Zn 処理効果を確認している。

実証処理試験では、Zn処理効果を持続できる通水回数や通水日数、及び天然材充填槽における通水可能量を確認する必要があることから、表 3.3-14 より処理性能を期待できる通水速度として 3~9 m/日を通水範囲の目安に設定するものとする。

表 3.3-16 における天然材充填槽の仕様(W1140×L3640×H900×4 槽)に対し通水速度 1.2 m/日、 3 m/日、9 m/日(9.3 m/日⇒9 m/日と端数処理)で原水を通水した場合、処理水量はそれぞれ約 14 L/ 日、35 L/日、100 L/分と算定される。

	項目	室四	<b>タカラム試験装置</b>		小型	試験装置
通水	、速度	9.3m/日	3m/E	3	1.	2m/日
装置	です法	$\phi$ 9 × H100	φ 20 × H	1100	W300×I	_400 × H200
通水	、量(mL/分)	0. 41	0.65	5		100
接角	由時間(時)	0. 26	0.80	)		4.0
資	腐葉土	長野産、 嵩比重0.3、 空隙率0.65	H29年栃木産、 嵩比重0.31、 空隙率0.56	H30栃木産、 嵩比重0.32、 空隙率0.63	H31机 嵩比重 空隙	厉木産、 1:0.32、 18率0.64
11	鉄粉		神戸製鋼2520:嵩	s比重3.4、真比	之重7.85	
	石灰石	石灰	え石:嵩比重1.5、真	毛比重2.24(日:	本石灰協会)	
資材	「の混合比率		腐葉土:鉄粉:石	5灰石=73.4:9	9:26.6	
網状	充填材	_	—	—	—	中空
充填	<b>į</b> 材容積	_	—	—	ー 下層15cmの20%	
原水	< Comparison of the second sec	模擬坑水		通洞坑	水	
原水	の前処理	_	自然酸化(運搬)	石灰石中和	接触酸化	+石灰石中和
	試験番号	_	RUN506	RUN902	RUN1	RUN2
装置	団の外観	201				

表 3.3-14 室内カラム試験と小型試験における通水速度のまとめ

(13) 実証処理試験における設計条件のまとめ

小型試験装置による試験結果を考慮して整理した実証処理試験に用いる実証処理装置の設計基準 について、表 3.3-15 に整理する。

接触酸化槽では、S-Fe(Fe<sup>2+</sup>)の酸化を促進するため、2時間散気ゾーンと発生殿物の固液分離ゾーンを組み合わせている。固液分離ゾーンでは、自動運転により殿物を間欠的に引き抜く方式を採用する。

中和槽は、融雪時期を除いて接触酸化槽における酸化と固液分離でS-Feの除去が期待できることから割愛する。

天然材充填槽では、通水回数と通水期間をそれぞれ 1200 回と半年間に渡って Zn 処理効果を持続 できる資材容量を確保するとともに、通水速度を最大 9 m/日まで流量調整可能な設備仕様にする。

また、資材閉塞の抑制を期待し、網状充填材を資材容積の20%を充填するものとする。

水槽名称	小型試験装置設計基準	実証処理装置設計基準
接触酸化槽		
・散気ゾーン	接触時間2時間程度	接触時間2時間程度
・固液分離ゾーン	2ヶ月間に発生する殿物を貯留でき る容量	1-2ヶ月間に発生する殿物を貯留できる容量 間欠的自動運転による殿物引抜
中和槽		
・中和ゾーン	滞留時間4時間	割愛
・流量調整ゾーン	ポンプの吐出量を考慮	無し(自然流下により天然材充填槽へ移流)
天然材充填槽		
	通水回数1200回程度	通水回数1200回程度
▪通水回数/日数	通水日数半年間程度	通水日数 <mark>半年間</mark> 程度 (経日による劣化を考慮)
・資材高	20cm	20-30cm
・通水速度	1.2m/日(3m/日以下)	<mark>3−9m/日</mark> 以下 (室内カラム試験の結果を考慮)
・充填資材	腐葉土:鉄粉:石灰石(体積比) =73.4:9:26.6	腐葉土:鉄粉:石灰石(体積比) =73.4:9:26.6 (弊社の実績を考慮)
<ul> <li>・充填材(網状)</li> </ul>	資材容積の20%	資材容積の20% (流出部(上層)5㎝厚は混入しない)

表 3.3-15 小型試験装置と実証処理装置の設計条件について

### 3.3.4. 実証処理装置における試運転

### 3.3.4.1. 試験の目的

令和 2 年度に実証処理試験を実施するに当たっては、実証処理装置の処理性能を明らかにし、実 証処理試験における連続通水試験の処理規模を明らかにしておく必要がある。

このため、小型試験装置による処理試験結果から得られた知見を基に製作した実証処理装置を用いて、通水量を変えた試験や殿物の引抜を確認する試運転を実施し、実証処理試験の実施において 留意すべき事項を明らかにするものとする。

また、次年度の実証処理試験の実施に当たって、試運転で得られた知見を基に必要に応じて実証 処理装置の改善や改造を計画するものとする。

### 3.3.4.2. 実証処理装置の設計製作

実証処理装置の設計製作は、小型試験装置による処理試験で得られた知見に準拠するとともに、 実証処理試験の実施場所の地理的、物理的、及び対象鉱山に特有の制約を考慮し、処理規模の設定 を行うものとする。

### (1) 設計条件

実証処理装置の設計条件を表 3.3-16 に整理する。容量計算は、50 L/分の処理規模を想定して算定 するものとするが、通水試験の規模は 100 L/分まで対応できる設備仕様とする。

設備名称	処理水槽	通水量	系列数
その他の型	接触酸化槽、天然材充填槽	50-100L/分(MAX)	1
処理水槽	設計基準	容量計算	槽数
接触酸化槽		W1.14m×L3.64m×H1.45m(有効水深1.0m)、実容積:16.6m <sup>3</sup>	4
・散気ゾーン	接触時間2時間	0.05m³/分×60分/時×2時間=6.0m³	2
・固液分離ゾーン	1ヶ月間の発生殿物を貯留	(50-1) g/m <sup>3</sup> ×107/56×0.05m <sup>3</sup> /分×1440分/日×30日×10 <sup>-3</sup> ÷ 25kg/m <sup>3</sup> =8.1m <sup>3</sup>	2
天然材充填槽		W1.14m×L3.64m×H0.9m(有効水深0.5m) 天然材充填厚:0.25m×4.15m <sup>3</sup> ×16.6m <sup>2</sup>	4
・連続通水時間	試験スペース等を考慮	60日間	_
・資材容積	通水回数1200回(目標)	0.05m <sup>3</sup> /分×1440分/日×60日÷1200回=3.6m <sup>3</sup>	-
・資材高	通水試験結果等を考慮	0. 25m	-
• 資材面積	ろ過速度3−9m/日以下	0.05m <sup>3</sup> /分×1440分/日÷ (3-9) m/日=8-24m <sup>2</sup> Lv= (0.05-0.1m <sup>3</sup> /分×1440分/日) ÷ (1.14×3.64×4)m <sup>2</sup> =4.3-8.7m/日	-
・接触時間	0.6-1.6時間以上	接触時間=4.15m <sup>3</sup> ÷(0.05-0.1)m <sup>3</sup> /分÷60分/時 =0.69~1.4時間	_
・充填資材	弊社の実績を考慮	腐葉土:鉄粉:石灰石(体積比)=73.4:9:26.6 (資材中の鉄粉容積は無視する)	-
腐葉土	73. 40%	4. 15m <sup>3</sup> × 73. 4% × (0. 05+0. 2 × 0. 8 ) /0. 25≒2. 56m <sup>3</sup>	-
鉄粉	9.00%	4.15 $m^3 \times 9\% \times (0.05+0.2 \times 0.8) / 0.25 \times 3.4t/m^3 \approx 1.06t$	-
石灰石	26. 60%	4. $15m^3 \times 26.6\% \times (0.05+0.2 \times 0.8) / 0.25 \times 1.5t/m^3 \approx 1.39t$	-
充填材(網状)	資材容積の20%	4. 15m <sup>3</sup> ×73. 4%×0.2 ≒0. 61m <sup>3</sup> (上層5cmには混入しない)	-

表 3.3-16 実証処理装置の設計条件について

(2) 処理フローシート

実証処理試験の処理フローシートを図 3.3-37 に示す。

図 3.3-37 より、前段に原水計量槽を設置し、計量後の原水を接触酸化槽~天然材充填槽へと自然 流下で通水できる構造とする。原水である通洞坑水を導水する排水路に水中ポンプを設置し、連続 的に原水計量槽へ送水する。水量は、三角堰で計量して余剰水は排水路へオーバーフローする構造 とする。

原水計量槽には、モニタリングの間隔における水量変化を確認するため、三角堰の越流深を水圧 で測定できる水位計を設置して連続測定するものとする。なお、原水 pH の変化を確認するため、 原水計量槽内に pH 計を追加設置する。

接触酸化槽は4槽直列構造とし、前段の2槽において散気し、後段の2槽で殿物を引抜できる構造とする。殿物の引抜は、水中ポンプによりタイマー設定により間欠的に引き抜くことができる制御としている。なお、接触酸化処理水のpH変化を確認するため、接触酸化槽第4槽にpH計を追加設置する。

天然材充填槽は、4 槽並列で運転できる構造とし、各槽の流入量を調節できる構造とする。また、 前段の2槽と後段の2槽に分けて、変則的な直列通水も可能な構造とする。

天然材充填槽の処理水は、1本の処理水管に合流させて、排水路へ導水し、通洞坑水と一緒に坑 廃水処理設備にて処理する。



No.	水槽名称	数量	仕様	付属品等	備考
1	原水計量ポンプ	1	$\phi$ 50×100L/分×5m×100V×250w	タイマー運転	水中ポンプ
2	原水計量槽	1	三角堰式 W450×L800×H400	据付架台SS400 (錆止め)	
3	接触酸化槽	4	W1140×L3640×H1000(有効水深)	紐状接触材	単管組立仮設水槽
4	エアポンプ	1	50L/分×0.015MPa×100V×27w程度	エアパイプ φ50×L500×2基	
5	殿物引抜ポンプ	4	φ40×10L/分×5m×100V×150w	タイマー運転	水中ポンプ
6	天然材充填槽	4	W1140×L3640×H500(有効水深)	腐葉土 (網状接触材) +鉄粉+石灰石	単管組立仮設水槽
				ループ式配水管 <b>φ</b> 65	

#### 実証処理試験装置主要機器リスト

図 3.3-37 実証処理試験における処理フローシート

## (3) 配置計画

実証処理試験の処理フローシートを図 3.3-38 に示す。

実証処理装置は、通洞坑の入口から約 40 m の地点から奥へ幅 2 m×長 40 m 程度のエリアに設置 し、坑内のメンテナンス用のトロッコ軌道の運用に支障を来さないように配置する。



図 3.3-38 実証処理装置の配置計画

- (4) 水槽計画図
- ① 接触酸化槽

接触酸化槽の構造図を図 3.3-39 に示す。



図 3.3-39 接触酸化槽の構造図

# 2 天然材充填槽

天然材充填槽の構造図を図 3.3-40 に示す。





# (5) 坑内の配置状況

① 装置外観

実証処理装置の坑内設置状況を写真 3.3-19 に示す。実証処理装置の上部には、坑内の岩盤や補強 枠の修繕用の送風ダクトが配置されている。また、実証処理装置の全面には、トロッコ軌道が配置 されている。







写真 3.3-19 実証処理装置の設置状況

### 檀内の状況

実証処理装置の槽内状況を写真 3.3-20 に示す。

接触酸化槽では、散気装置に閉塞が発生したことから、エアストーンから多孔管に変更している。 また、バクテリアの馴致を促進するため、槽内に紐状接触材を吊り下げている。

天然材充填槽では、φ80×1000の網状接触材を資材容積の 20%の割合で資材内部に充填している。





写真 3.3-20 実証処理装置の水槽内部の状況

# (6) 測定項目と分析項目

原水と処理水を対象に測定及び分析する項目をそれぞれ表 3.3-17、表 3.3-18 に整理する。

測定項目	及び分析項目	頻度	備考
原水	pH(水温)、ORP、DO 通水量、	適時	_
酸化処理水 天然材処理水	pH(水温)、ORP、DO	適時	_
天然材充填槽内部	Eh、水頭、色相	適時	下         上           Eh         Eh           Image: Second Se

表 3.3-17 **測定項目** 

表 3.3-18 分析項目

測定項目	及び分析項目	頻度	備考
原水	Zn、T-Fe、S-Fe、SO4 <sup>2-</sup>	適時	_
酸化処理水 天然材処理水	Zn、T-Fe、S-Fe、SO4 <sup>2-</sup>	適時	_

### (7) 試運転条件の変更及び資材調整

### ① 通水初期の天然材充填槽の処理状況

通水開始直後の状況を写真 3.3-21 に示す。通水翌日の処理水は無色透明であったが、2 日後には 濁りが認められる状況となり、小型試験装置において短絡が発生した状況(写真 3.3-9 参照)と酷 似していた。

暫くは、濁りの減少が認められたことから通水を継続したが、原水水質の悪化もあり処理水 Zn が改善しなかったことから、処理性能を改善するため試運転条件の変更を行った。



写真 3.3-21 試運転開始の状況

### ② 試運転条件の変更

試運転条件の変更履歴を表 3.3-19 に示す。水量を低減する措置を実施したが、処理水 Zn が改善しないのは短絡の発生に起因すると推察されたことから、天然材充填槽内に充填された資材の調整 を適時実施した。

項目	当初条件	変更1	変更2	変更3	変更 4	変更 5
実施日	9月25日	10月8日	10月30日	11月7日	11月12日	11月26日
通水量(L/分)	50	15	8	8	8	15
天然材充填槽	第1槽~第4槽	同左	同左	第 4 槽のみ の変更	第3槽のみ の変更	第2槽のみ の変更
腐葉土	650L	同左	同左	同左	同左	同左
鉄粉 (2520)	260kg	同左	同左	同左	同左	同左
石灰石 (5-15mm)	340kg	同左	同左	同左	同左	同左
網状充填材	165L Ø 80 × 1000 × 33本	同左	同左	撤去	撤去	撤去
転圧	無し	同左	同左	人力転圧	無し	人力転圧
資材充填厚	約25cm	同左	同左	約18cm	約21cm	約18cm
配水部 (下層流入部)	玉砂利	同左	同左	同左	同左	同左

表 3.3-19 試運転条件の変更

③ 天然材充填槽4の資材調整状況

表 3.3-19 の変更 3 において実施した天然材充填槽 4 における資材調整の実施状況を写真 3.3-22 に 示す。

まず、資材内に充填した網状充填材を取出し、水槽の水抜き後に資材の高さを調整して整地後、 人力により転圧して資材を圧密した。

取り出した網状充填材の一部は、茶褐色の殿物が内部に析出しており、資材内に通水の斑が生じ ていたと考えられる。





(8) 試運転結果

試運転は、9/25 に開始し、12/9 で一旦終了したが、その間、表 3.3-19 に示した運転条件や資材調 整を適時行った。

1 Zn

Znの変化を図 3.3-41 に示す。

図 3.3-41 より、通水初期から処理水の Zn 濃度は目標である 2 mg/L を越えて推移したことから、 水量負荷が大きいと判断し、通水量を 50 L/分⇒15 L/分に調整した。15 L/分の設定は、小型試験装 置における通水速度 1.2 m/日に相当する水量(1.14 m×3.64 m×4 槽×1.2 m/日≒14 L/分)を目安に 設定した。

しかしながら、変更1を実施したその時点において、原水の水質に大きな変化が生じ、特に S-Fe の急上昇(図 3.3-45 参照)により、酸化処理水の pH 低下(図 3.3-42 参照)、酸化しきれない S-Fe の残存、及び原水由来の高い濃度の Zn が天然材充填槽へ流入し、水量を低減したにもかかわらず 処理水 Zn は、逆に高い値となった。

そのため、まず処理水Znを改善することを念頭に置き、変更2において、水量を約半分量である 8 L/分まで低下させたものの、あまり改善できなかったことから、変更3において第4槽の資材調 整を実施した。なお、変更2以降は、4槽ある天然材充填槽について、それぞれの処理水を採水し て、測定及びZn分析を行うこととした。

変更3において、天然材充填槽4の処理水Znに改善が認められたことから、比較のため変更4において天然材充填槽3の資材調整、及び変更5において天然材充填槽2の資材調整を実施した。

資材調整の結果、資材を圧密したことにより、処理水量 8 L/分において処理水 Zn を安定して 2 mg/L以下を満足できる結果が得られたことから、短絡の発生を抑制する対策が必要であると考えられる。



図 3.3-41 試運転における Zn の変化

2 pH

pHの変化を図 3.3-42 に示す。図 3.3-42 より、原水 pH と酸化処理水 pH は、10/8~10/30 において 低く推移している。通洞坑水の S-Fe(図 3.3-45 参照)が高い場合、後段の接触酸化槽においてアル カリ度が消費されることにより、酸化処理水の pH が低下すると考えられる。

S-Fe の変化は、10/8 以降は極端に高い値は測定されていないものの接触酸化処理水 pH が低く推移しているのは、測定間隔の合間に通洞坑水の S-Fe が変動している可能性が考えられる。

変更3による天然材充填槽4の資材調整により、天然材充填槽4の処理水pHは上昇が認められる ことから、短絡が抑制され原水と資材の接触が改善されたと考えられる。



図 3.3-42 試運転における pH の変化

モニタリングの合間において通洞坑水の水質の変化を確認するため、原水計量槽と接触酸化槽第4槽にpH計を設置して連続的に測定を実施した。pH測定結果を図3.3-43に示す。

図 3.3-43 より、概ね接触酸化槽第4槽 pH は通洞坑水より高く推移しているが、1/7 において接触酸化槽第4槽 pH の低下が認められ、通洞坑水 S-Fe の高い時期と一致する(図 3.3-56 参照)



図 3.3-43 原水計量槽と接触酸化槽 4 に設置した pH の推移

3 T-Fe

T-Feの変化を図3.3-44に示す。通洞坑水は平均44 mg/L であり表3.3-1と同程度で推移している。 酸化処理水T-Feは、平均10 mg/L と試運転開始時と比較すると増加している。接触酸化槽の殿物引 抜は良好に制御されていることから、沈降が難しい微細なSSがキャリオーバーしていると考えら れる。

天然材処理水 T-Fe は、天然材充填槽に充填した資材中の鉄粉からの溶解及び前段の酸化処理水中の T-Fe が短絡により流出していると考えられる。



図 3.3-44 試運転における T-Feの変化

④ S-Fe

S-Fe の変化を図 3.3-45 に示す。通洞坑水は 10/8 に急激な上昇が認められ、酸化処理水 S-Fe の上 昇が認めらるものの、天然材処理水 S-Fe の上昇は小さい。

10/8 を除けば、酸化処理水 S-Fe は、平均で約 0.5 mg/L であり、50 L/分の水量においても S-Fe の酸化が達成されていると考えられる。

天然材処理水 S-Feは、資材中の鉄粉由来と考えれ、小型試験装置における処理試験と同様に緩やかに低下する傾向が認められる。(図 3.3-19 参照)



図 3.3-45 試運転における S-Feの変化

5 Fe<sup>2+</sup>

接触酸化槽における Fe<sup>2+</sup>の変化を図 3.3-46 に示す。Fe<sup>2+</sup>濃度は、原水、接触酸化槽 1~接触酸化槽 4 の処理水をプロットしている。原水の通水量により酸化時間が変化する。

図 3.3-46 より、10/8 を除くと、接触酸化槽第 4 槽において、概ね S-Fe≦1 mg/L を達成できている と考えられる。



図 3.3-46 試運転における Fe<sup>2+</sup>の変化

6 D0

DO の変化を図 3.3-47 に示す。通洞坑水や酸化処理水の DO は、5 mg/L 以上で推移しており、接触酸化処理水は散気の効果により、通洞坑水より 1 mg/L ほど DO が高い。

天然材充填槽は、変更3による天然材充填槽4処理水、及び変更5直後の天然材充填槽2の処理 水 DO に低下が認められる。原水の短絡抑制、及び天然材との接触促進により、資材中から鉄粉が 溶解することで、還元雰囲気下でDOの消費が促進されると考えられる。



図 3.3-47 試運転における DO の変化

### ⑦ ORP

ORP の変化を図 3.3-48 に示す。接触酸化槽は散気の効果により、通洞坑水より ORP は高く推移 している。天然材充填槽 ORP は、DO と同様に(図 3.3-47 参照)原水の短絡が抑制され、天然材と の接触が十分行われることにより、資材中から鉄粉が溶解することで、還元雰囲気が強くなり ORP が低下すると考えられる。



3.3-64
(8) Eh

Ehの変化を図3.3-49に示す。流出側の上部 Ehが流入側の下部 Ehがより低く推移している傾向が 認められるものの、Eh電極に測定用ケーブルを接続する時に電極が動くことから、電極周囲の空隙 が徐々大きくなっている可能性が考えられ、試運転後半における Eh は、上部と下部の差異が小さ く推移している。

変更3における天然材充填槽4のEhには、資材調整による効果は認められない状況である。



図 3.3-49 試運転における Ehの変化

## (9) 水頭

水頭の変化を図 3.3-50 に示す。通水により水頭の上昇が認められ、水量の変化により水頭の上昇 又は低下の傾向も確認できる。

変更3による天然材充填槽4水頭、及び変更5による天然材充填槽2水頭は、転圧による資材調 整後に水頭の上昇が認められ、短絡の抑制と水頭の上昇には相関が認められる。



10 水温

水温の変化を図 3.3-51 に示す。通水開始直後は 17℃付近で推移したが、坑内温度の低下の影響を 受けて、天然材処理水も 7~11℃まで低下している。

しかしながら、小型試験装置と比較し(図 3.3-25 参照)、装置が大きい事、通水量が多いことか ら、水温の低下は比較的小さい状況で推移している。



図 3.3-51 試運転における水温の変化

# (1) SO4<sup>2-</sup>

SO4<sup>2-</sup>の変化を図 3.3-52 に示す。原水である通洞坑水、接触酸化槽と天然材処理水には特筆できる 変化は認められない状況である。



図 3.3-52 試運転における SO42-の変化

## ① 試運転結果のまとめ

試運転の結果を表 3.3-20 に整理する。

接触酸化処理では、原水の急激な性状変化時を除くものの、概ね二価鉄の酸化を達成できており、 多孔管による散気、及び殿物の間欠引抜も機能していた。

天然材処理では、通水直後から処理水 Zn が目標を満足できない状態であり、原水が資材と接触 しないで短絡して通過していると考えられた。

処理性能を改善するため、水量の調整、資材の調整等、試運転の条件を変更して試験を継続した 結果、資材を転圧することで短絡を抑制し、処理水質を改善することができたものの、処理水量は 目標に届かない結果となった。

そこで、どのような条件が、より Zn の処理性能に影響を与えているかを確認するため、4 槽の条件を変えて、試運転の追試を行うこととした。

また、水量の設定については、まず小型試験装置における資材内の空隙に対する滞留時間を考慮 し、約10.7 L/分に設定することとした。試運転の追試の内容についても表3.3-20 に整理する。

項目	試運転結果	追試の内容
1.接触酸化処理		
①S-Fe 除去性能	接触酸化槽第1槽でFe <sup>2+</sup> の酸化終了 (50 L/分:滞留時間約1.3時間) (原水 pH 低下、S-Fe 増加時を除く)	変更なし
②散気による効果	多孔管式散気装置による酸化促進	11
③殿物引抜	タイマー間欠運転による引抜管理	11
2.天然材処理		
①通水量	処理水量 8 L/日(通水速度 0.7 m/日)で処 理効果を持続 (目標 100 L/分に届かない)	処理水量(通水速度)の上積み ⇒まず10.7 L/分に設定 (資材内部の空隙を考慮) ⇒4 槽で資材の充填条件を変更 ⇒各槽の処理水質を分析
②資材の圧密	資材の整地(小型試験装置と同じ)のみ では、短絡発生⇒転圧により短絡防止	資材は転圧により圧密
③網状充填材	小型試験装置と寸法・構造が異なる	網状充填材の変更
(4)Eh	電極付近で短絡流発生の可能性	サポート管設置により短絡防止

表 3.3-20 試運転結果と追試の内容

3.3.4.3. 試運転の追試

# (1) 試験の目的

試運転では、天然材充填槽に充填した資材において原水の短絡が生じて、Znを安定して処理する ことが難しい状況が継続した。

また、天然材充填槽に充填した資材を転圧することにより、短絡の発生を抑制し処理水 Zn を目標である 2 mg/L 以下で持続できたものの、処理水量は目標に届かない結果であった。

令和 2 年度の実証処理試験を実施するに当たっては、実証処理装置における連続通水試験の処理 規模を明らかにしておく必要があることから、試運転の結果を考慮し、短絡の発生を抑制し処理性 能を安定させるために効果的な対策を確認するため、試運転の追試を行うものとする。

また、次年度の実証処理試験の実施に当たって、試運転及び追試で得られた知見を基に必要に応じて実証処理装置の改造や改善を行うものとする。

## (2) 測定項目と分析項目

測定項目と分析項目は、試運転に準じるものとする。

測定項目	及び分析項目	頻度	備考
原水	pH(水温)、ORP、DO 通水量、	適時	_
酸化処理水 天然材処理水	pH(水温)、ORP、DO	適時	_
天然材充填槽内部	Eh、水頭、色相	適時	下         上           Eh         Eh           Eh         Eh           Image: Second state sta

表 3.3-21 測定項目

表 3.3-22 分析項目

測定項目	及び分析項目	頻度	備考
原水	Zn、T-Fe、S-Fe、SO4 <sup>2-</sup>	適時	—
酸化処理水 天然材処理水	Zn, T-Fe, S-Fe, SO4 <sup>2-</sup>	適時	_

### (3) 追試の条件

小型試験装置による処理試験では、Znの処理効果を持続できていたこと、試運転において資材調整によりZn処理効果を回復出来たことを考慮し、資材の短絡を抑制しZn処理効果を持続できる因子は以下のとおりと推察される。

①転圧による資材圧密により短絡の発生を抑制

②通水面の小型化による単位区画当たりの通水量の均一化

③網状充填材の交換による資材内の短絡を抑制

④石灰石による中和処理による原水水質の変動を抑制

以上を考慮し、追試における装置の修正及び資材調整の内容を表 3.3-23 に整理する。

天然材充填槽1では、資材を均等に整地し、人力転圧により資材を圧密する。

天然材充填槽2では、槽内を6区画に分割し、単位区画当たりの面積を小さくする。

天然材充填槽 3 では、小型試験装置と同じ形状寸法の網状充填材に交換して資材内部に充填する。 天然材充填槽 4 では、小型試験装置の処理フローにおいて石灰石の中和処理を組み合わせていた ことから、天然材充填槽の流入用配水管を埋設して砂利層を石灰石に置換する。

項目	天然材充填槽1	天然材充填槽2	天然材充填槽3	天然材充填槽4
水槽寸法	W1140×L3640	同左	同左	同左
腐葉土	650L	同左	同左	同左
鉄粉(2520)	260kg	同左	同左	同左
石灰石 (5-15mm)	340kg	同左	同左	同左
網状充填材	_	_	165L <i>ϕ</i> 50 × 50 × 1680個	_
転圧	人力圧密	人力圧密	人力圧密	人力圧密
資材充填厚	約18cm	約18cm	約22cm	約18cm
槽内仕切	_	6区分(W600)	_	—
配水部 (下層流入部)	玉砂利	玉砂利	玉砂利	石灰石 (5-20mm)

表 3.3-23 追試における天然材充填槽の資材調整の内容

(4) 資材調整状況

① 天然材充填槽 1

天然材充填槽1における資材調整の実施状況を写真3.3-23に示す。

水槽の水抜き後に資材の高さを調整して整地後、人力により転圧して資材を圧密した。また、Eh 電極周りに水みちが発生し易いことを考慮し、Eh 電極のサポート管を埋め込んだ。他の水槽におい ても同様にサポート管を埋め込んでいる。





# ② 天然材充填槽 2

天然材充填槽2における資材調整の実施状況を写真3.3-24に示す。

水槽の水抜き後に資材の一部を取出し、仕切り板を設置後、資材を埋戻して整地後、人力により 転圧して資材を圧密した。







写真 3.3-24 天然材充填槽 2 の資材調整状況

# ③ 天然材充填槽 3

天然材充填槽3における資材調整の実施状況を写真3.3-25に示す。

水槽の水抜き後に資材を4区画に分類して1区画毎に資材を取出し、4等分した網状充填材を資 材内に撹拌混合し、混合資材を埋戻して整地後、人力により転圧して資材を圧密した。







⑤網状充填材混合資材充填状況

⑥上層の資材充填状況

写真 3.3-25 天然材充填槽 3 の資材調整状況

# ④ 天然材充填槽 4

天然材充填槽4における資材調整の実施状況を写真3.3-26に示す。

水槽の水抜き後に全資材を一旦取出し、下層の砂利を取出して石灰石に置換した後、資材を埋戻 して整地後、人力により転圧して資材を圧密した。







写真 3.3-26 天然材充填槽 4 の資材調整状況

(5) 試運転の追試の結果

1 Zn

Zn の変化を図 3.3-53 に示す。図 3.3-53 より、天然材充填槽 1 では、処理水 Zn が安定して目標を 満足したが、天然材充填槽 2~4 では、目標を超過する結果となった。

また、天然材充填槽 2-天然材充填槽 4 では、資材の調整をやり直して再通水を行っている状況である。



図 3.3-53 試運転の追試における Zn の変化

2 pH

pH の変化を図 3.3-54 に示す。図 3.3-54 より、1/7 に通洞坑水 pH の低下が認められ、酸化処理水 pH もその影響により 1/15 に低下が認められる。天然材処理水 pH もその影響を受けて低下している ものの、天然材処理水 1、及び下層の流入部に石灰石を充填した天然材処理水 4 の低下は小さい。 なお、資材の再調整後、天然材充填槽 3 の pH 上昇が大きい。



図 3.3-54 試運転の追試における pH の変化

3 T-Fe

T-Feの変化を図 3.3-55 に示す。通洞坑水は平均 46 mg/L であり表 3.3-1 と同程度で推移している。 酸化処理水 T-Fe は、平均 20 mg/L と増加傾向が認められる。接触酸化槽の殿物引抜は良好に制御さ れていることから、沈降が難しい微細な SS が増加している可能性がある。

天然材処理水 T-Feは、10~14 mg/L で推移しており、試運転開始時から変化は小さい。



図 3.3-55 試運転の追試における T-Fe の変化

④ S-Fe

S-Feの変化を図 3.3-56 に示す。通洞坑水は 10/8 に急激な上昇が認められるものの、酸化処理水 S-Fe に大きな上昇は認められない。天然材処理水 S-Fe にも影響は認められない。

天然材処理水 S-Fe は、資材中の鉄粉由来と考えれ、処理水 Zn が低く安定している天然材充填槽 1の S-Fe は比較的高く推移している。



図 3.3-56 試運転の追試における S-Feの変化

(5) D0

DO の変化を図 3.3-57 に示す。通洞坑水や酸化処理水の DO は、6 mg/L 以上で推移しており、接触酸化槽は散気の効果により、通洞坑水より 0.5~1 mg/L ほど DO が高い。

天然材充填槽は、1/27の資材の再調整後(天然材充填槽1は除く)、天然材充填槽1を除いてDOの低下が認められるものの、その後は上昇に転じている。

資材調整後は、短絡が抑制され、原水(酸化処理水)と資材の接触が回復し、鉄粉の溶解による 還元雰囲気へ変化し DO が消費されたと考えられる。しかしながら、天然材充填槽 3 以外はその後 DO 上昇が認められることから、還元雰囲気が弱くなっていると考えられる。



図 3.3-57 試運転の追試における DO の変化

## 6 ORP

ORP の変化を図 3.3-58 に示す。接触酸化槽は散気の効果により、通洞坑水より ORP は高いく推移している。天然材充填槽 ORP は、1/27 の資材の再調整後(天然材充填槽 1 は除く)、ORP の低下が認められるものの、その後上昇に転じている。



図 3.3-58 試運転の追試における ORP の変化

⑦ Eh

Eh の変化を図 3.3-59 に示す。上部 Eh と下部 Eh には、特筆できる相関は認められない状況であり、天然材充填槽 4 では、流出側である上部 Eh のほうが流入側である下部 Eh より高く推移している。



図 3.3-59 試運転の追試における Eh の変化

8 水頭

水頭の変化を図 3.3-60 に示す。通水により水頭の上昇が認められるが、網状充填材を混入した天 然材充填槽 3 は、比較的緩やかな水頭上昇となっている。

1/29 の資材の再調整直後(天然材充填槽 1 を除く)は、一時的に水頭の低下が認められたものの、 その後は上昇に転じている。

天然材充填槽 1 は、水頭の上昇が若干低下に転じており、短絡が発生している可能性が考えられる。





9 水温

水温の変化を図 3.3-61 に示す。坑内温度の低下の影響を受け、通洞坑水、酸化処理水、及び天然 材処理水の水温は、緩やかな低下傾向が認められる。



図 3.3-61 試運転の追試における水温の変化

10 SO4<sup>2-</sup>

SO4<sup>2-</sup>の変化を図 3.3-62 に示す。原水である通洞坑水、接触酸化槽と天然材処理水には特筆できる 変化は認められない状況である。



図 3.3-62 試運転の追試における SO42-の変化

## ① 追試を含めた試運転結果のまとめ

試運転の追試は継続中ではあるが、現時点における追試の結果を考慮し、試運転から得られた知 見と次年度試験に対する課題と対策について、表 3.3-24 に整理する。

追試における水量設定は10.7 L/分であったが、概ね第1槽で Fe<sup>2+</sup>の酸化が達成できていると考えられる。また、殿物の間欠引抜も機能していると考えられる。

天然材処理では、資材の転圧により、10.7 L/分で処理性能を持続できる可能性が得られており、 原水の短絡を抑制することで、さらなる処理性能の向上が期待できると考えられる。

また、追試においても試運転同様、Znが除去されていない状況では、pHの上昇は小さい、DOと ORPは低下しない、水頭の上昇が抑制されるという傾向が認められる。

以上を考慮し、次年度、実証処理試験の実施に当たっては、短絡防止と通水量の増量を達成する ため、4 槽においてそれぞれの処理条件を変更できる構造とするなど、処理性能に影響を与える因 子、またその効果の把握を目的として、実証処理装置の改善・改造を検討するものとする。

項目	実証処理装置による試運転の結果	次年度試験に対する課題と対策			
1.接触酸化処理					
①S-Fe 除去性能	接触酸化槽第1槽でFe <sup>2+</sup> の酸化終了(50 L/分:滞留時間約1.3時間) (原水 pH 低下、S-Fe 増加時を除く)	原水 pH 低下、S-Fe 増加時は、 通水を休止を検討			
②散気による効果	多孔管式散気装置で十分酸化促進	_			
③殿物引抜	タイマー間欠運転による引抜管理	_			
2.天然材処理					
①Zn 処理効果	処理水量 8L/分(通水速度 0.7 m/日) で処 理効果を持続(10.7 L/分は経過観察中) ただし、目標 100 L/分に届かない (資材との接触不足⇒資材厚不足)	処理水量(通水速度)の上積み ⇒資材厚や資材転圧の検討 (短絡防止対策) ⇒4槽で試験条件を変更			
@рН	原水と資材の接触不足時は上昇しない	資材厚や資材転圧の検討			
③DOとORP	原水と資材の接触不足時は低下しない	11			
④Eh	相関は不明(電極付近で短絡流発生)	撤去(処理水 ORP で管理可能)			
⑤水温	水温低下 10℃以下でも支障なし	_			
⑥水頭	原水と資材の接触不足時は上昇しない	流入管嵩上(水頭上昇に対応)			
⑦S-Fe	排水基準を若干超過する可能性	実証処理試験では対応しない			

表 3.3-24 試運転結果と次年度の課題と対策

- 3.3.4.4. 令和元年度の試験結果のまとめと次年度の改善検討
- (1) 令和元年度の試験結果と課題
- 小型試験装置による処理試験

実証処理装置の設計・製作に係る知見を得るため、小型試験装置による処理試験を実施した。 試験条件は、前段において S-Feの酸化工程を設け、後段の天然材充填槽に対する原水(酸化処理 水)の通水回数 1200 回を目標とし、連続的に通水した。その結果、以下の知見が得られた。

○網状充填材を設置することにより、水頭上昇を抑制できた。鉄殿物等による閉塞を押さえるこ とができたと考えられる。

小型試験装置により処理試験の結果、目標の通水回数1200回を達成できたが、通水期間が長くなると通水回数に関わらず資材の劣化も進む可能性のあることが示唆されたことから、原位置処理に 当たっては、通水回数を処理性能の低下を判断する目安とし、資材に対する通水量を効率的に設定 することが必要と考えられた。

以上を踏まえて、実証処理装置の設計・製作に係る条件を設定した。

### ② 実証処理装置による試運転結果

次年度に実施する実証処理試験の処理規模を設定するため、実証処理装置による試運転を実施した。試験条件は、過年度実施したカラム試験結果及び小型試験の結果を考慮して、50 L/分に設定して通水を開始した。その結果、以下の知見が得られた。

- ○接触酸化処理では、原水水質に変化(pH低下、S-Fe濃度上昇)が認められた時期を除いては、 8~50 L/分の通水量において、S-Feを1mg/L以下まで処理することができた。
- ○天然材処理では、通水速度 0.7 m/日(≒8 L/分)の場合、Zn 濃度は 2 mg/L 以下で推移したが、 通水速度が 1.3 m/日(≒15 L/分)の場合、Zn 濃度は 2 mg/L 以上となった。
- ○0.9 m/日(≒10.7 L/分)では、試験を継続中ではあるものの、処理水 Zn 濃度は上昇傾向にある。 また、小型試験(1.2 m/日)より遅い通水速度であることを考慮すると、資材の処理原水通過 面積が大きくなると、短絡経路が発生し易い可能性がある。
- ○天然材処理では、原水水質に変化(pH 低下、Zn 濃度上昇、S-Fe 濃度上昇)が見られた時、処 理水 Zn も上昇する傾向が見られた。

実証処理装置による試運転の結果、過年度実施したカラム試験及び小型試験装置による処理試験の結果と比較すると、Zn処理性能と通水速度に大きな差異が認められた。これは、資材の処理水通過面積が広くなると天然材充填槽内の処理水浸透の均一性が損なわれ、短絡経路が発生し易いためと考えられる。資材の充填高さに対する処理水通過面積の比が、ある程度まで大きくなると短絡が発生し易くなる可能性が考えられる。

<sup>○</sup>通水速度は 1.2 m/日の条件で、通水回数 1200 回及び 6 ヶ月間、Zn 濃度 2 mg/L 以下を維持できた。

# ③ 現状の課題と次年度に向けた検討

実証処理装置の試運転により明らかになった課題と次年度に向けた改善対策に係る検討を表 3.3-25 に整理する。

課題	考えられる要因	次年度に向けた検討
実証処理装置において	スケールアップによる影響が考	小型試験装置を用いて、カラム試
は、通水速度 0.7 m/日以	えられる。例えば、規模が大き	験と同レベルの通水速度で処理試
下の条件で Zn 濃度 2	くなったことにより短絡経路が	験を実施する。また、処理水通過
mg/L 以下を達成でき	形成されるなど。	面積比の影響などにも着目しつ
た。		つ、短絡経路形成に係る検討を進
ただし、カラム試験結		める。
果から想定した目標であ	十分な滞留時間(Zn の天然資材	天然充填材槽の資材の充填高さを
る「通水速度が 3~9 m/	への接触時間)が不十分である	高くする。
日で Zn 濃度 2 mg/L 以	可能性が考えられる。	
下」を実現できていな	その他の要件	カラム試験-小型試験-実証試験のそ
い。(カラム試験では実		れぞれの装置の特徴(Zn 除去に係
現できることを確認して		る反応性、流速、短絡経路形成の
いる)		可能性など)を考慮したとき、多
		様な面から原因を確認するため
		に、天然材充填槽の4槽それぞれで
		独立した試験を実施できるように
		する。

表 3.3-25 現状の課題と次年度に向けた検討

# (2) 令和2年度の改善・改造案

次年度に向けた改善・改造の内容を表 3.3-26、写真 3.3-27 に整理する。

カラム装置、小型試験装置、実証処理装置を比較した場合、資材の面積に対する資材の充填厚は 大きな違いがある。天然材における短絡防止のためには、水頭の上昇は予測されるものの、資材の 充填厚を厚くできる改造が有効であると考えられる。

また、4 槽ある天然材充填槽において、処理水量をそれぞれ測定できる構造とし、それぞれの負 荷量を正確に把握することで、処理性能に影響を及ぼす因子を把握できると考えられる。

項目	目的	改造内容	備考
1.接触酸化槽			
1	天然材充填槽の水頭を 確保する	第4槽移流部にエルボ返し をつけ水位上昇に対応する	20 cm 程度増
2.天然材充填槽			
2	水頭上昇に対応	横引き管の高さ変更	30 cm 程度
3	各槽毎に通水量を変更	各槽毎に処理水管を分岐	集合管の撤去
4	資材充填厚を増加	処理水出口部にエルボ返し	15 cm 程度(セパレータ下)

表 3.3-26 次年度の改善・改造内容



①④水位上昇



**②流入管嵩上** 



③処理水量測定

写真 3.3-27 次年度の改造内容

### 3.4. 水質予測モデルを用いたパッシブトリートメント導入の事前検討

## 3.4.1. 昨年度の検討内容及び課題

### 3.4.1.1. 人工湿地によるパッシブトリートメントの水質シミュレーションモデルの検討

旧本庫鉱山の酸性坑廃水(pH 4~6, 亜鉛(Zn)~3 mg dm<sup>-3</sup>、鉛(Pb)、銅(Cu)、マンガン(Mn)~1 mg dm<sup>-3</sup>、カドミウム(Cd)~0.01 mg dm<sup>-3</sup>に対して試験導入されている人工湿地(表面流型及び浸透流型湿地)を対象に、現地調査結果から各湿地内の水質予測シミュレーションモデルを構築した。現地で採取した水試料及び堆積物試料を分析した結果、表面流型人工湿地で Fe が酸化され ferrihydrite(Fe(OH)<sub>3</sub>)として沈殿していることが分かった。その速度は 2.4×10<sup>-9</sup>~7.4×10<sup>-11</sup>となり、理論値(2.9×10<sup>-11</sup>~9.0×10<sup>-11</sup>) (Singer and Stumm, 1970)より 25 倍程度大きかった。また PHREEQC による解析の結果、坑廃水中のヒ素(As)は湿地内で生成する ferrihydrite との表面錯体形成によって除去されていることがわかった。浸透流型人工湿地ではマンガン(Mn)及びカドミウム(Cd)が通常水酸化物を生成する pH 領域(8~10)よりも低い pH 領域(6~8)で除去されていることが分かった。 堆積物を X 線吸収微細構造(XAFS : X-ray Absorption Fine Structure)で分析した結果、湿地内に生息する *Pseudomonas* sp.等の Mn 酸化菌により Mn の酸化が促進され、Cd は生成した δ-MnO<sub>2</sub> との表面錯体形成反応によって除去されていることがわかった。これら素反応を組み込んだ PHREEQC を GETFLOWS と連成させることで湿地内の移流、拡散を考慮した水質予測モデルを構築した。

構築したモデルを用いて、A鉱山、G鉱山、H鉱山、I鉱山の4鉱山について本庫型表面流型湿地を適用した際の鉄処理能力について評価した。その結果、Feを1mgdm<sup>-3</sup>以下まで除去するのに必要な滞留時間は、A鉱山(Fe: 6.0 mg dm<sup>-3</sup>)で2035時間(≒85日)、G鉱山(Fe: 36 mg dm<sup>-3</sup>)で8530時間(≒355日)、H鉱山ではFeの処理は必要なく、I鉱山(Fe: 4.8 mg dm<sup>-3</sup>)で23.1時間となった。この結果から、全ての鉱山において本庫型表面流型人工湿地を導入することは難しく、各鉱山の水質に合致した処理技術を選択する必要がある。

本年度はまず複数のパッシブトリートメント技術を整理し、各鉱山の水質組成をもとにその技術を選択するフローシートを作成した。さらに対象鉱山を 13 鉱山に拡大し、それぞれの鉱山の水質と水量を作成したフローシートに当てはめ、必要な処理プロセスを選別した。そのなかで、 Fe 除去後に Zn や Cd、Cu 等の処理が必要な坑廃水に対して、本庫型浸透流型湿地の適用可能性を検討した。 3.4.2. 水質予測モデルを用いたパッシブトリートメント導入の事前検討

3.4.2.1. パッシブトリートメント適用フローシートの作成

現在、旧本庫鉱山に試験導入された表面流型・浸透流型湿地をはじめとして、石灰石路や微生 物反応槽など数多くのパッシブトリートメント技術が既に確立されている。昨年度の検討結果か らわかるように、全ての鉱山に同一の技術を適用するのは難しく、それぞれの鉱山の水質や水量 に合致した処理技術を選択していく必要がある。国外の石炭鉱山を例に挙げると、図 3.4-1 に示 すような坑廃水処理のパッシブトリートメント適用フローシートが考案されている(産業技術研 究所報告書, 2013)。



図 3.4-1 海外の石炭鉱山におけるパッシブトリートメント適用フローシート (産業技術研究所報告書, 2013 より抜粋)

そのなかでまず、坑廃水の総負荷量(酸度、アルカリ度)の計算により好気性処理と嫌気性処理 のどちらを適用するか決定する。その後、処理に酸化処理が必要な Fe や Al の濃度を基準に最適 な処理方法を選択する。またその際、水量や使用可能な土地面積など他要素も考慮する必要があ る。このフローシートは国外の広大な敷地や法律を基準に作成されたものであり、水質や水量の 異なる日本国内の金属鉱山にそのまま適用することは難しい。そこで、モデル計算に基づく国内 の金属鉱山に適用可能なフローシートの作成を進めた。そのなかで、(1)坑廃水の負荷量の計算 (好気処理・嫌気処理の選択)、(2)鉄処理の必要性の検討及び処理方法の選択、(3)嫌気処理の選択 の3つのプロセスに注目した。

#### (1) 坑廃水の負荷量の計算

アルカリ度が高い坑廃水(pH が比較的高く炭酸イオンを多く含む坑廃水)は中和プロセスを必要 とせず、滞留時間を稼いで酸化を促進させることで処理できるため好気的な処理が適している。 その一方で、酸度が高い坑廃水は負荷量が高く中和が必要となるため好気処理には適しておらず、 大気と接触しない嫌気的な処理が適している。

一般的に、負荷量の判定には Net Acidity が使用されている。Net Acidity は酸度(Acidity)とアル カリ度(Alkalinity)の差で表され、Net Acidity<0 でアルカリ度が高く負荷量の小さい坑廃水、Net Acidity>0 で酸度が高く負荷量の大きい坑廃水として判断される。酸度は試料の pH を 8.3 とする のに必要なアルカリの消費量、アルカリ度は pH を 4.3 とするのに必要な酸消費量である。通常、 これらの値は滴定試験で求めることが多いが、酸度は以下の式(3.4.1)によっても求まる(Hedin et al., 1994)。ただし、C[M]は元素 M の濃度(mg dm<sup>-3</sup>)を意味する。

酸度= $50(2C[Fe^{2+}]/56 + 3C[Fe^{3+}]/56 + 3C[Al^{3+}]/27 + 2C[Mn^{2+}]/55 + 1000(10^{-pH})$  (3.4.1)

しかし、実際の坑廃水には Fe、Al、Mn 以外にも Zn や Cu など高い濃度で含まれている場合が あり、正確な負荷量を算出するためには全ての元素を考慮した計算が必要となる。そこで、水質 組成を PHREEQC にインプットし、pH 8.3 になるまでに必要となるアルカリの消費量(mol)及び pH 4.3 になるまでに必要となる酸の消費量(mol)を算出した。算出したアルカリ消費量から酸消費 量を引いた後、CaCO<sub>3</sub>換算し当量濃度で表した。

#### (2) 鉄処理の必要性の検討及び処理方法の選択

坑廃水中の Fe は、As など様々な有害元素の共沈・吸着処理を行う上で重要となる一方で、パ ッシブトリートメントの処理能力低下に繋がる目詰まりの原因にもなる。坑廃水処理を持続的か つ効率的に進めるためには、嫌気処理を適用する前段で Fe を十分に除去することが重要となる。 その設定基準について、図 3.4-1のフローチャートでは 1 mg dm<sup>-3</sup>としている。これは米国の石炭 鉱山に導入された石灰石路、嫌気性湿地を運用した際の経験則から決定されている(Hedin et al., 1994)。たとえば 1 mg dm<sup>-3</sup>以上の坑廃水を処理した場合、運用開始後数ヶ月で処理能力が著しく 低下し石灰石の浚渫が必要となると報告されている(Hedin et al., 1994)。本検討でも同様に、Fe 濃 度を 1 mg dm<sup>-3</sup>基準として鉄処理の必要性の有無を判断することとした。

坑廃水中の Fe を効率的に処理する方法として、(a)石灰石添加型好気性湿地の利用、(b)開放型 石灰石路の利用、(c)微生物処理(鉄酸化槽)などが挙げられる(図 3.4-2)。

(a)石灰石添加型好気性湿地は石灰石による中和能力を有し、湿地内の微生物活動や植物吸着に よって鉄酸化を促進する仕組みとなっている。しかし、中和処理能力がさほど高くはないため、 負荷量の高い水質の処理には不向きである。

(b)開放型石灰石路の利用では石灰石を敷き詰めた水路に坑廃水を流して処理する。この水路は 設置が容易であり、流量の多い鉱山に適用できるという利点がある。その一方で、常時大気と接 触するため被覆による中和能力の低下が顕著となる。 (c)微生物処理(鉄酸化槽)では鉄酸化細菌を用いた鉄酸化処理方法となっている。鉄酸化細菌は酸素による酸化を促進する働きを持つため、処理を行う際には酸素を効率よく坑廃水に曝気させる必要がある(Kobayashi, 2017)。



図 3.4-2 パッシブトリートメントにおける鉄の処理方法の例

## (3) 嫌気処理方法の選択

Fe 処理後の坑廃水に対し、そのほかの有害金属元素の除去を目的として嫌気性処理を行う。 (a)旧本庫鉱山の浸透流型人工湿地以外の嫌気性処理方法として(b)硫酸還元菌の利用、(c)腐葉土 等吸着材を用いた処理、(d)製鋼スラグ浸出床などが検討されている(図 3.4-3)。

(a)旧本庫鉱山の浸透流型湿地は大気と接触せずに石灰石と反応することで中和処理を行う。各 種元素は水酸化物及び炭酸塩として除去される一方で、Cd や Zn など石灰石による中和では十分 に除去できない元素があるため追加処理が必要な場合がある。

(b)硫酸還元菌を活用した手法は微生物による硫酸の還元反応によって重金属元素を硫化物として除去する手法である。中和処理ではないため、中和剤の使用量が抑えられる一方、水温や水質 組成など、微生物活性が最大となる条件を定量的に評価・把握する必要がある。

(c)腐葉土等吸着剤を用いた処理については腐葉土を充填した槽に坑廃水を流すことで、腐葉土 への表面錯体形成反応と有機物分解に伴う還元雰囲気下での硫酸還元菌活性によって有害元素を 除去する。

(d)製鋼スラグ浸出床は河川水等と製鋼スラグを接触させることによって高アルカリとなった水 を坑廃水と接触させ、中和する手法である。この方法では pH を上昇させることで Zn や Cd を効 率的に除去できるが、被覆による処理能力の低下が著しいことが問題となる。また、pH が高く なる傾向にあるため、場合によっては逆中和処理が必要となる。

本庫浸透流湿地 (嫌気性石灰水路)	硫酸還元菌	腐葉土等吸着材を用い た処理	製鋼スラグ浸出床
<ul> <li>酸素非接触系で石灰 石と反応</li> </ul>	<ul> <li>硫酸還元菌によるSO<sub>4</sub></li> <li>還元反応と金属イオンの硫化物生成反応</li> </ul>	<ul> <li>腐葉土に対する表面 錯体形成によって金属 元素を吸着除去</li> </ul>	<ul> <li>水との接触によりCaや Mg酸化物を放出し, pH&gt;10となる。</li> </ul>

図 3.4-3 パッシブトリートメントにおける嫌気処理方法の例

以上の検討を考慮し、以下の図 3.4-4 のようにフローチャートを作成した。鉄処理や嫌気処理 を行った場合にも、Asに対する Fe モル比が 0.21以下、Cd に対する Mn のモル比が 0.23 以下の場 合は As、Cd の除去は難しい。また、石灰石によって十分に中和しきれない場合(酸度が高い坑廃 水など)には、ZnやCd は基準値以下まで除去されない。こうした場合には植物への吸着など、Zn や Cd などへの追加処理が必要となるなど、鉱山の水質や水量等の特徴ごとに複合的なプロセス を検討していく必要があると考えられる。



図 3.4-4 パッシブトリートメント適用フローシート

## 3.4.2.2. パッシブトリートメント適用フローシートによる 13 鉱山への適用検討

作成したフローチャート(図 3.4-4)に基づき、表 3.4-1 の 13 鉱山について検討する。この表では 対象鉱山の坑廃水の最大流量と最小流量のデータ、pH 及び各種元素濃度については負荷量が最 も高い時期と最も低い時期のデータを示した。鉱山ごとにこの 2 種類のデータをインプットデー タとして適用の検討を行った。

	Flow rate	pН	T- Fe	As	Zn	РЬ	Cu	Cd	T- Mn	Al	HCO <sub>3</sub>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
	m <sup>3</sup> /min						m	g/dm <sup>3</sup>				
A鉱山	0.18	3.6	9.6	*<0.01	61	2.7	45	0.64	0.67	11	*29	260
_	0.099	4.3	1.2	*<0.01	23	2.1	8.1	0 23	0.49	4.4	*29	130
D鉱山	0.13	2.6	66	0.34	37	0.020	0.37	0 25	1.8	4.8	< 0.01	330
	0.096	3.2	11	<0.01	3.8	<0.01	0.025	<0.01	1.4	2.0	<0.01	170
E鉱山	0.70	2.8	18	9.7	1.3	1.0	0.24	0.042	1.0	1.1	*7.0	120
	0.12	6.8	< 0.01	0.028	0.61	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.86	0.25	*7.0	78
F鉱山	0.014	6.3	0.20	0.35	3.8	< 0.01	0.12	0.026	0.020	0.060	96	30
	0.0010	7.2	0.025	0.053	0.46	< 0.01	0.030	< 0.01	0.020	0.020	96	21
G鉱山	0.098	3.0	146	0.010	110	0.13	2.8	0.41	14	4.0	2.5	780
	0.046	6.0	3.0	< 0.01	3.7	0.056	0.44	0.019	10	2.5	1.7	530
H鉱山	0.048	6.1	5.6	< 0.01	4.8	< 0.01	8.9	0.010	0.63	17	71	260
	0.010	7.8	0.050	< 0.01	0.33	< 0.01	0.43	< 0.01	0.27	1.1	31	150
I鉱山	0.43	3.2	9.6	*<0.01	8.1	*<0.01	6.2	0.019	*1.2	45	*27	590
	0.036	7.6	0.050	*<0.01	2.2	*<0.01	0.69	<0.01	*1.2	1.8	*27	330
J鉱山	0.076	3.1	92	0.14	85	0.98	0.88	0 17	2.4	16	< 0.01	500
	0.0070	3.5	20	< 0.01	17	0.53	0.080	0.035	1.8	8.2	< 0.01	290
K鉱山	0.74	6.6	0.20	*<0.01	0.66	*<0.01	0.27	0.050	*<0.01	*0.040	85	200
	0.38	7.5	0.050	*<0.01	0.30	*<0.01	0.070	0.024	*<0.01	*0.040	70	130
L鉱山	3.00	3.3	21	0.015	7.6	0.043	0.43	0.049	6.5	11	2.5	480
	0.57	6.8	1.4	< 0.01	2.1	< 0.01	0.010	< 0.01	1.6	1.7	0 30	150
M鉱山	0.64	3.1	17	*<0.01	26	0.080	4.0	0 10	1.8	37	*<0.01	690
	0.060	4.6	1.3	*<0.01	5.8	0.030	1.0	0.026	1.0	13	:<0.01	350
N鉱山	0.090	2.8	124	*<0.01	3.0	0.011	2.6	*<0.01	*2.8	35	*<0.01	1180
	0.090	3.3	45	*<0.01	1.1	< 0.01	1.2	*<0.01	*2.8	13	*<0.01	610
O鉱山	0.12	2.4	625	3.0	2.1	< 0.01	0.40	< 0.01	3.0	42	< 0.01	1100

表 3.4-1 13 鉱山の坑廃水組成と水量データ

0.030 2.7 81 0.058 0.60 <0.01 0.030 <0.01 3.0 37 <0.01 9
--

(1) 13 鉱山坑廃水の負荷量の計算結果

この水質化学組成を PHREEQC にインプットし、各鉱山の Net Acidity 値(mg dm<sup>-3</sup>)を計算した。 A 鉱山、D 鉱山、E 鉱山、G 鉱山、J 鉱山、M 鉱山、N 鉱山では常時 Net Acidity>0 となり、好気性 処理の適用が難しいことが分かった。F 鉱山、H 鉱山、I 鉱山、L 鉱山では負荷量が小さい時に Net Acidity<0 となるが、負荷量が大きい時に Net Acidity>0 となるため嫌気性処理を選択したほう が良いと言える。K 鉱山では常時 Net Acidity<0 となっているため、人工湿地等の好気性処理が適 用できる可能性が十分ある。

鉱山名	Net Acidity (mg dm <sup>-3</sup> )
A鉱山	72~171
D鉱山	67~338
E鉱山	3~149
F鉱山	-48~27
G鉱山	3~373
H鉱山	-33~16
I鉱山	-35~418
J鉱山	89~314
K鉱山	-456~-4
L鉱山	-12~140
M鉱山	93~337
N鉱山	182~652
O鉱山	606~1978

表 3.4-2 13 鉱山における Net Acidity の計算値

## (2) Fe 処理の検討

嫌気性処理が必要となる鉱山のうち、F 鉱山以外の坑廃水は全て Fe を 1 mg dm<sup>-3</sup>以上含んでお り、作成したフローチャートに基づくと嫌気処理の前段に Fe 処理プロセスの導入が必要性とな る。Fe 処理方法を選択する場合、水質のみならず水量を踏まえた最適な方法を選択する必要があ る。何れの手法を選択した場合でも基本的には第二鉄イオン Fe(III)が ferrihydrite(Fe(OH)<sub>3</sub>)として 沈殿する pH 3.5 以上に中和する必要があることから、化学平衡論に基づき坑廃水中の Fe の 1 mg dm<sup>-3</sup>以下としたときの化学組成ならびに pH を PHREEQC により算出した。化学平衡計算の際に 考慮した沈殿生成反応を表 3.4-3 に、Fe(OH)<sub>3</sub>、Al(OH)<sub>3</sub>、 $\delta$ -MnO<sub>2</sub> に対する表面錯体形成反応をそ れぞれ表 3.4-4~表 3.4-6 に示す。なお計算にあたり使用したデータベースは phreeqc.dat (Parkhurst et al., 1980)と minteq.v4.dat (Allison et al., 1998)である。

Precipitation species	resaction	Log_K
Al(OH) <sub>3</sub> (gibbsite)	$\mathrm{Al}(\mathrm{OH})_3 + 3\mathrm{H}^+ \rightleftarrows \mathrm{Al}^{3+} + 3\mathrm{H}_2\mathrm{O}$	8.11
Fe(OH) <sub>3</sub> (ferrihydrite)	$Fe(OH)_3 + 3H^+ \rightleftharpoons Fe^{3+} + 3H_2O$	3.19
Pb(OH) <sub>2</sub>	$Pb(OH)_2 + 2H^+ \rightleftharpoons Pb^{2+} + 2H_2O$	8.15
δ-MnO <sub>2</sub>	$MnO_2 + 4H^+ \rightleftarrows Mn^{4+} + 2H_2O$	-56.0
Zn(OH) <sub>2</sub>	$Zn(OH)_2 + 2H^+ \rightleftharpoons Zn^{2+} + 2H_2O$	11.5
Mg(OH) <sub>2</sub> (brucite)	$Mg(OH)_2 + 2H^+ \rightleftharpoons Mg^{2+} + 2H_2O$	16.8
Cu(OH) <sub>2</sub>	$Cu(OH)_2 + 2H^+ \rightleftharpoons Cu^{2+} + 2H_2O$	8.67
Cd(OH) <sub>2</sub>	$Cd(OH)_2 + 2H^+ \rightleftharpoons Cd^{2+} + 2H_2O$	13.6
Cu <sub>2</sub> (OH) <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> (malachite)	$Cu_2(OH)_2CO_3 + 2H^+ \rightleftarrows 2Cu^{2+} + 2H_2O + CO_3^{2-}$	22.8
Pb <sub>3</sub> (OH) <sub>2</sub> (CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	$\mathbb{D}^{1}$ (OII) (CO) + 211+ $\rightarrow$ 2 $\mathbb{D}^{12+}$ + 211 O + 2CO 2-	10.0
(hydrocerrusite)	$PD_{3}(OH)_{2}(CO_{3})_{2} + 2H^{2} \neq 3PD^{2} + 2H_{2}O + 2CO_{3}^{2}$	-18.8

表 3.4-3 考慮した沈殿生成反応及び化学種

Reactions	Log_K
$\equiv Fe_{s,w}OH^0 + H^+ \rightleftharpoons \equiv Fe_{s,w}OH_2^+$	7.29
$\equiv Fe_{s,w}OH^{0} \rightleftarrows \equiv Fe_{s,w}O^{-} + H^{+}$	-8.93
$\equiv Fe_{s}OH^{0} + Ca^{2+} \rightleftharpoons \equiv Fe_{s}OHCa^{2+}$	4.97
$\equiv Fe_{w}OH^{0} + Ca^{2+} \rightleftarrows \equiv Fe_{w}OCa^{+} + H^{+}$	-5.85
$\equiv Fe_{w}OH^{0} + Mg^{2+} \rightleftharpoons \equiv Fe_{w}OMg^{+} + H^{+}$	-4.6
$\equiv Fe_{s}OH^{0} + Cd^{2+} \rightleftharpoons \equiv Fe_{s}OCd^{+} + H^{+}$	0.47
$\equiv Fe_{w}OH^{0} + Cd^{2+} \rightleftharpoons \equiv Fe_{w}OCd^{+} + H^{+}$	-2.9
$\equiv Fe_{s}OH^{0} + Zn^{2+} \rightleftharpoons \equiv Fe_{s}OZn^{+} + H^{+}$	0.99
$\equiv Fe_{w}OH^{0} + Zn^{2+} \rightleftharpoons \equiv Fe_{w}OZn^{+} + H^{+}$	-1.99
$\equiv Fe_{s}OH^{0} + Cu^{2+} \rightleftharpoons \equiv Fe_{s}OCu^{+} + H^{+}$	2.89
$\equiv Fe_{w}OH^{0} + Cu^{2+} \rightleftharpoons \equiv Fe_{w}OCu^{+} + H^{+}$	0.6
$\equiv Fe_{s}OH^{0} + Pb^{2+} \rightleftharpoons \equiv Fe_{s}OPb^{+} + H^{+}$	4.65
$\equiv Fe_{w}OH^{0} + Pb^{2+} \rightleftarrows \equiv Fe_{w}OPb^{+} + H^{+}$	0.3
$\equiv Fe_{s}OH^{0} + Mn^{2+} \rightleftharpoons \equiv Fe_{s}OMn^{+} + H^{+}$	-0.4
$\equiv Fe_{w}OH^{0} + Mn^{2+} \rightleftharpoons \equiv Fe_{w}OMn^{+} + H^{+}$	-3.5
$\equiv Fe_{s,w}OH^0 + H_3AsO_4 \rightleftharpoons \equiv Fe_{s,w}H_2AsO_4 + H_2O$	8.61
$\equiv Fe_{s,w}OH^0 + H_3AsO_4 \rightleftharpoons \equiv Fe_{s,w}HAsO_4 + H_2O + H^+$	2.81
$\equiv Fe_{s,w}OH^0 + H_3AsO_4 \rightleftharpoons \equiv Fe_{s,w}OHAsO_4^{3-} + 3H^+$	-10.12
$\equiv Fe_{s,w}OH^0 + SO_4^{2-} + H^+ \rightleftharpoons = Fe_{s,w}SO_4^{-} + H_2O$	7.78
$\equiv Fe_{s,w}OH^0 + SO_4^{2-} \rightleftharpoons \equiv Fe_{s,w}OHSO_4^{2-} + H_2O$	0.79
$\equiv Fe_{s,w}OH^0 + H_4SiO_4 \rightleftharpoons \equiv Fe_{s,w}H_3SiO_4 + H_2O$	3.62

表 3.4-4 水酸化第二鉄への表面錯体を考慮した平衡反応及び平衡定数

Dzombak, 2010)	
Reactions	$\operatorname{Log} K^{\operatorname{int}}$
$\equiv AlOH^0 + H^+ \rightleftarrows \equiv AlOH_2^+$	7.17
$\equiv AlOH^0 + Zn^{2+} \rightleftharpoons \equiv AlOZn^+ + H^+$	-0.96
$\equiv AlOH^0 + Cd^{2+} \rightleftharpoons \equiv AlOCd^+ + H^+$	-2.73
$\equiv AlOH^0 + Cu^{2+} \rightleftharpoons \equiv AlOCu^+ + H^+$	0.25
$\equiv AlOH^0 + Pb^{2+} \rightleftharpoons \equiv AlOPb^+ + H^+$	0.37
$\equiv AlOH^0 + Ca^{2+} \rightleftharpoons \equiv AlOCa^+ + H^+$	-10.49
$\equiv AlOH^0 \rightleftharpoons \equiv AlO^- + H^+$	-11.18
$\equiv AlOH^0 + AsO_4^{3-} + 3H^+ \rightleftharpoons \equiv AlH_2AsO_4 + H_2O$	26.94
$\equiv AlOH^0 + AsO_4^{3-} + 2H^+ \rightleftharpoons \equiv AlHAsO_4^{-} + H_2O$	21.79
$\equiv AlOH^0 + AsO_4^{3-} \rightleftharpoons \equiv AlOHAsO_4^{-3}$	6.39
$\equiv AlOH^0 + H_2SiO_4^{2-} + H^+ \rightleftharpoons \equiv AlH_2SiO_4^{-} + H_2O$	18.88
$\equiv AlOH^0 + SO_4^{2-} + H^+ \rightleftharpoons \equiv AlSO_4^- + H_2O$	-0.45
$\equiv AlOH^0 + SO_4^{2-} \rightleftharpoons \equiv AlOHSO_4^{2-}$	1.19

表 3.4-5 水酸化アルミニウムへの表面錯体を考慮した平衡反応及び平衡定数(Karamalidis and

表 3.4-6 δ-MnO<sub>2</sub>への表面錯体を考慮した平衡反応及び平衡定数(Yao and Millero, 1996)

Reactions	Log K <sup>int</sup>
$\equiv MnOH^0 + H^+ \rightleftarrows \equiv MnOH_2^+$	-1.6
$\equiv MnOH^{0} \rightleftharpoons \equiv MnO^{-} + H^{+}$	-6.2
$\equiv MnOH^0 + Cd^{2+} \rightleftarrows \equiv MnOCd^+ + H^+$	2.90

#### (3) 本庫型浸透流型湿地導入の可能性についての検討

嫌気処理のうち、本庫型浸透流型湿地を導入した際に必要となる滞留時間及び容積を算出した。 湿地に導入する坑廃水組成は(2)で検討した Fe を 1 mg dm<sup>-3</sup>以下まで除去した後のものを使用し、 坑廃水中の有害金属元素濃度を一律排水基準値以下まで除去するのに必要となる滞留時間を計算 した。その滞留時間と水量を掛け合わせて一般的な砂利の間隙率(0.4)を考慮することで、処理に 必要となる浸透流型人工湿地の容積を計算した。ただし、好気性湿地による処理が適している K 鉱山を検討の対象から除外した。

## A 鉱山への適用結果

A 鉱山の坑廃水に対して浸透流型人工湿地モデルを適用した際の滞留時間と各元素の濃度推移の関係を図 3.4-5 に示した。A 鉱山の坑廃水から Zn、Cd 以外の元素を除去する場合、水質が最も悪い場合には 77.8 時間、水質が改善されている場合には 28.9 時間の滞留時間を設ける必要があることが示唆された。A 鉱山では滞留時間を延ばした場合でも、Zn、Cd を一排水基準値以下まで除去できないため、追加処理が必要となることが示唆された。水量を考慮すると水質悪化時は 2.073 m<sup>3</sup>、水質改善時には 430 m<sup>3</sup>の容積が必要となることが示唆された。これは旧本庫鉱山の浸透流型湿地(670 m<sup>3</sup>)の約 0.64~3.1 倍の容積である。



図 3.4-5 A 鉱山の坑廃水へのモデル適用結果:(a)pH、(b)Cu、(c)Zn、(d)Cd、(e)Pb

## D 鉱山への適用結果

D 鉱山の坑廃水に対して浸透流型人工湿地モデルを適用した。その結果得られた滞留時間と各 元素の濃度推移の関係を図 3.4-6 に示した。D 鉱山の坑廃水の水質が最も悪い場合には Zn 以外の 元素を除去するために 6.7 時間、水質が改善されている場合には Zn を含めて 20 時間の滞留時間 で処理できることが示唆された。D 鉱山では水質が悪い場合には滞留時間を延ばした場合でも、 Zn を一律排水基準値以下まで除去できないため、追加処理が必要となることが示唆された。ま た水量を考慮すると水質悪化時は 290 m<sup>3</sup>、水質改善時には 133 m<sup>3</sup>の容積が必要となることが示唆 された。これは旧本庫鉱山の浸透流型湿地(670 m<sup>3</sup>)の約 0.20~0.43 倍の容積である。



図 3.4-6 D 鉱山の坑廃水へのモデル適用結果:(a)pH、(b)Zn、(c)Cd

# ③ E 鉱山への適用結果

E 鉱山の坑廃水に対して浸透流型人工湿地モデルを適用した。その結果得られた滞留時間と各 元素の濃度推移の関係を図 3.4-7 に示した。E 鉱山の坑廃水から As 以外の元素を除去する場合は、 水質が最も悪い場合には 13 時間、水質が改善されている場合には処理の必要がないことが示唆 された。E 鉱山では滞留時間を延ばした場合でも、As を一律排水基準値以下まで除去できないた め、追加処理が必要となることが示唆された。また水量を考慮すると水質悪化時は 1,365 m<sup>3</sup>の容 積が必要となることが示唆された。



図 3.4-7 E 鉱山の坑廃水へのモデル適用結果:(a)pH、(b)Cd、(c)Pb、(d)As

# ④ F 鉱山への適用結果

F 鉱山の坑廃水に対して浸透流型人工湿地モデルを適用した。その結果得られた滞留時間と各元素の濃度推移の関係を図 3.4-8 に示した。F 鉱山の坑廃水に対しては滞留時間を延ばした場合でも、水質がいい場合には As、水質が悪い場合には Zn と As を一律排水基準値以下まで除去できないことが確認された。よって F 鉱山に対しては浸透流型人工湿地による処理は適しておらず、植物や腐葉土への吸着、Mn 酸化菌の活用等、別の処理を検討する必要があると考えられる。



図 3.4-8 F 鉱山の坑廃水へのモデル適用結果:(a)pH、(b)As、(c)Zn

## ⑤ G 鉱山への適用結果

次にG鉱山の坑廃水に対して浸透流型人工湿地モデルを適用した。その結果得られた滞留時間 と各元素の濃度推移の関係を図 3.4-9 に示した。G鉱山の坑廃水からZn以外の元素を除去する場 合は、水質が最も悪い場合には86.7 時間、水質が改善されている場合には4.5 時間の滞留時間を 設ける必要がある。G鉱山では滞留時間を延ばした場合でも、Znを一律排水基準値以下まで除去 できないため、追加処理が必要となることが示唆された。また水量を考慮すると水質悪化時は 1,275 m<sup>3</sup>、水質改善時には31 m<sup>3</sup>の容積が必要となることが示唆された。これは旧本庫鉱山の浸透 流型湿地(670 m<sup>3</sup>)の約 0.046~1.9 倍の容積である。



図 3.4-9 G 鉱山の坑廃水へのモデル適用結果:(a)pH、(b)Mn、(c)Cd、(d)Zn、(e)Pb

# ⑥ H鉱山への適用結果

H 鉱山の坑廃水に対して浸透流型人工湿地モデルを適用した。その結果得られた滞留時間と各 元素の濃度推移の関係を図 3.4-10 に示した。H 鉱山の坑廃水の水質が悪い場合、Zn 以外の元素を 除去するために 6.7 時間の滞留時間を設ける必要があることが示唆された。一方で水質が改善さ れている場合には処理の必要がないことが示唆された。また水量を考慮すると水質悪化時は 48 m<sup>3</sup>の容積が必要となることが示唆された。これは旧本庫鉱山の浸透流型湿地(670 m<sup>3</sup>)の約 0.072 倍 の容積である。



図 3.4-10 H鉱山の坑廃水へのモデル適用結果:(a)pH、(b)Zn、(c)Cu

## ⑦ | 鉱山への適用結果

I 鉱山の坑廃水に対して浸透流型人工湿地モデルを適用した。その結果得られた滞留時間と各 元素の濃度推移の関係を図 3.4-11 に示した。I 鉱山の坑廃水の水質が悪い場合、Zn 以外の元素を 除去するために 8.9 時間の滞留時間を設ける必要があることが示唆された。一方で水質が改善さ れている場合には処理の必要がないことが示唆された。また水量を考慮すると水質悪化時は 578 m<sup>3</sup>の容積が必要となることが示唆された。これは旧本庫鉱山の浸透流型湿地(670 m<sup>3</sup>)の約 0.86 倍 の容積である。



図 3.4-11 I鉱山の坑廃水へのモデル適用結果:(a)pH、(b)Zn、(c)Cu

# ⑧ J 鉱山への適用結果

J 鉱山の坑廃水に対して浸透流型人工湿地モデルを適用した。その結果得られた滞留時間と各 元素の濃度推移の関係を図 3.4-12 に示した。J 鉱山の坑廃水から Zn 以外の元素を除去する場合は、 水質が最も悪い場合には 86.7 時間、水質が改善されている場合には 33.3 時間の滞留時間を設ける 必要があることが示唆された。J 鉱山では滞留時間を延ばした場合でも、Zn を一律排水基準値以 下まで除去できないため、追加処理が必要となることが示唆された。また水量を考慮すると水質 悪化時は 988 m<sup>3</sup>、水質改善時には 35 m<sup>3</sup>の容積が必要となることが示唆された。これは旧本庫鉱 山の浸透流型湿地(670 m<sup>3</sup>)の約 0.052~1.47 倍の容積である。



図 3.4-12 J 鉱山の坑廃水へのモデル適用結果:(a)pH、(b)Zn、(c)Cd、(d)Pb
## ⑨ L 鉱山への適用結果

L 鉱山の坑廃水に対して浸透流型人工湿地モデルを適用した。その結果得られた滞留時間と各 元素の濃度推移の関係を図 3.4-13 に示した。L 鉱山の坑廃水の水質が悪い場合、Zn 以外の元素を 除去するために 4.4 時間の滞留時間を設ける必要があることが示唆された。一方で水質が改善さ れている場合には処理の必要がないことが示唆された。また水量を考慮すると水質悪化時は 1,980 m<sup>3</sup>の容積が必要となることが示唆された。これは旧本庫鉱山の浸透流型湿地(670 m<sup>3</sup>)の約 3.0 倍の容積である。



図 3.4-13 L 鉱山の坑廃水へのモデル適用結果:(a)pH、(b)Zn、(c)Cd

## M 鉱山への適用結果

M 鉱山の坑廃水に対して浸透流型人工湿地モデルを適用した。その結果得られた滞留時間と各 元素の濃度推移の関係を図 3.4-14 に示した。M 鉱山の坑廃水から Zn 以外の元素を除去する場合 は、水質が最も悪い場合には 15.6 時間、水質が改善されている場合には 6.7 時間の滞留時間を設 ける必要があることが示唆された。M 鉱山では滞留時間を延ばした場合でも、Zn を一律排水基 準値以下まで除去できないため、追加処理が必要となることが示唆された。また水量を考慮する と水質悪化時は 1,498 m<sup>3</sup>、水質改善時には 60 m<sup>3</sup>の容積が必要となることが示唆された。これは 旧本庫鉱山の浸透流型湿地(670 m<sup>3</sup>)の約 0.090~2.24 倍の容積である。



図 3.4-14 M 鉱山の坑廃水へのモデル適用結果:(a)pH、(b)Cu、(c)Zn、(d)Cd

## N 鉱山への適用結果

N 鉱山の坑廃水に対して浸透流型人工湿地モデルを適用した。その結果得られた滞留時間と各 元素の濃度推移の関係を図 3.4-15 に示した。N 鉱山の坑廃水の水質が悪い場合、pH を環境基準値 まで上昇させるため 8.9 時間の滞留時間を設ける必要があることが示唆された。また、水質が改 善されている場合には 6.7 時間の滞留時間で十分であることがわかった。その他、水質が悪い場 合は Zn が基準値を超えているが、処理時間を十分設けても本庫型浸透流型湿地では除去しきれ ないことが分かった。水量を考慮すると水質悪化時は 120 m<sup>3</sup>、水質改善時は 91 m<sup>3</sup>の容積が必要 となるが、これは旧本庫鉱山の浸透流型湿地(670 m<sup>3</sup>)の約 0.14~0.18 倍の容積である。



図 3.4-15 N 鉱山の坑廃水へのモデル適用結果:(a)pH、(b)Zn

## ① 0 鉱山への適用結果

O 鉱山の坑廃水に対して浸透流型人工湿地モデルを適用した。その結果得られた滞留時間と各 元素の濃度推移の関係を図 3.4-16 に示した。O 鉱山の坑廃水の水質が悪い場合、改善されている 場合共に pH を一律排水基準値内にするためには 8.9 時間の滞留時間を設ける必要があることが示 唆された。また水質が悪い場合には滞留時間を延ばした場合でも、Zn を一律排水基準値以下ま で除去できないため、追加処理が必要となることが示唆された。また水量を考慮すると水質悪化 時は 160 m<sup>3</sup>、水質改善時には 40 m<sup>3</sup>の容積が必要となることが示唆された。これは旧本庫鉱山の 浸透流型湿地(670 m<sup>3</sup>)の約 0.060~0.24 倍の容積である。



図 3.4-16 O鉱山の坑廃水へのモデル適用結果:(a)pH、(b)Zn

以上、嫌気性処理が必要となる鉱山への検討結果を以下の表 3.4-7 にまとめた。Cu 及び Pb については浸透流型人工湿地を用いることで十分に処理できることが示唆された。また Cd 及び As はそれぞれ吸着剤となる Mn、Fe の濃度が低い場合に除去できないことが確認された。Zn は主に自身の水酸化物の生成によって除去されるが、石灰石による中和によって一律排水基準値以下まで除去することは難しいことが示唆された。

	Items exceeding the	Residence time required for processing [h]		Required volume [m <sup>3</sup> ]		Items cannot processe	that be d
	standard value	Water quality ×	Water quality ()	Water	Water	Water	Water
				quality ×	quality	quality ×	quality 〇
A鉱山	pH, Cu, Pb, Zn, Cd	77.8 (Zn, Cd 以外)	28.9 (Zn, Cd 以外)	2,073	430	Zn, Cd	Zn, Cd
D鉱山	pH, Fe, As, Zn, Cd	6.7 (Zn以外)	20 (Zn 含む)	133	290	Zn	無し
E鉱山	pH, Fe, As, Cd, Pb	13 (As 以外)	0	1,365	0	As	無し
F鉱山	As, Zn	0 (Zn, As 以外)	0 (As 以外)	0	0	Zn, As	As
G鉱山	pH, Fe, Mn, Zn, Cd, Pb	86.7 (Zn 以外)	4.5 (Zn以外)	1,275	31	Zn	Zn
H鉱山	pH, Zn, Cd	6.7 (Zn以外)	0	48	0	Zn	無し
I鉱山	pH, Zn	8.9 (Zn以外)	0	578	0	Zn	無し
J鉱山	pH, Fe, As, Zn, Cd, Pb	86.7 (Zn以外)	33.3 (Zn以外)	988	35	Zn	Zn
K鉱山	Cd	0 (Cd以外)	0 (Cd以外)	0	0	Cd	Cd
L鉱山	pH, Fe, Zn, Cd	4.4 (Zn以外)	0	1,980	0	Zn	無し
M鉱山	pH, Fe, Zn, Cd, Pb	15.6 (Zn 以外)	6.7 (Zn以外)	1,498	60	Zn	Zn
N鉱山	pH, Fe, Zn	8.9 (Zn以外)	6.7	120	91	Zn	無し
O鉱山	pH, Fe, As, Zn	8.9 (Zn 以外)	8.9 (Zn 含む)	160	40	Zn	無し

表 3.4-7 13 鉱山の基準値超過項目、滞留時間、容積、処理不可項目

## 3.4.2.3. まとめ及び今後の課題

本研究では、海外の石炭鉱山向けのフローシートをもとに、国内の非鉄金属鉱山向けのパッシ ブトリートメントの適用フローシートを作成した(図 3.4-4)。作成したフローシートに基づき国内 13 鉱山の坑廃水組成を適用したところ、大部分の鉱山に対して鉄処理及び嫌気性処理の必要性が 示唆された。Fe 除去後の坑廃水に対して旧本庫鉱山の浸透流型人工湿地モデルを適用することで、 各鉱山の坑廃水の処理に必要な滞留時間及び各鉱山の水量から、処理に必要となる容積を算出し た(表 3.4-7)。計算の結果、Zn 及び Cd、As について、多くの鉱山で浸透流型人工湿地のみでは一 律排水基準値以下まで処理することが難しいことが示唆された。浸透流型人工湿地による処理が 難しい場合、製鋼スラグ等高アルカリ剤で処理することで pH を上昇させるか、Mn 酸化菌あるい は植物吸着などの方法による追加処理、硫酸還元菌や腐葉土による処理などを検討する必要があ る。パッシプトリートメントの導入には上記のプロセスを組み合わせた複合的な処理を鉱山ごと に検討していく必要がある。

## 3.4.3. 参考文献

- Allison, J.D., Brown, D.S., Novo-Gradac, K.J., 1998. Minteqa2/Prodefa2-A Geochemical Assessment Model for Environmental Systems: User Manual Supplement for Version 4.0.
- Hedin, R.S., Nairn, R.W., Kleinmann, R.L.P., 1994. Passive treatment of coal mine drainage. Infromation Circ. 9389 1–44.
- Karamalidis, A.K. and Dzombak, D.A. 2010. Surface Complexation Modeling: Gibbsite, John Wiley & Sons, Inc.
- Kobayashi, M., 2017. Technical Aspects of Some Foreign Passive Treatment Cases for the Remediation of Mine Drainage. J. MMIJ J. Min. Mater. Process. Inst. Japan. 133, 193–206.
- Parkhurst, D.L., Thorstenson, D.C., Plummer, L.N., 1980. Preeqe-A Computer Program for Geochemical Calculations.
- Singer, P.C., Stumm, W., 1970. Acidic mine drainage: the rate-determining step. Science (80-. ). 167, 1121–1123.
- Yao, W., Millero, F.J., 1996. Adsorption of Phosphate on Manganese Dioxide in Seawater. Environ. Sci. Technol. 30, 536–541. https://doi.org/doi.org/10.1021/es950290x
- 産業技術総合研究所, 2013. パッシブ・トリートメントの導入に向けて -休廃止鉱山の坑廃水処理-.

3.5. パッシブトリートメント導入に向けたガイドライン

3.5.1. ガイドラインの目的・作成方針

3.5.1.1. 目的

鉱害防止事業者が、パッシブトリートメント導入を検討する際にまず参照する「導入ガイドラ イン」を作成する。

## 3.5.1.2. 作成方針

自治体・民間事業者等関係者のための技術的な資料となる。また、パッシブトリートメント導 入を検討する際に参照する資料となる。

JOGMEC がこれまで取り組んできたパッシブトリートメント調査研究、情報収集を踏まえ、導入の際に検討すべき事項などを取りまとめる。本事業でモデル鉱山とした A 鉱山、B 鉱山、C 鉱山における具体的な取組については検討事例集として取りまとめる。

## 3.5.2. ガイドライン目次(案)

パッシブトリートメントのガイドラインの目次(案)と構成内容は表 3.5-1 に示すとおりである。また、各章の作成方針を 3.5.3 章に示す。

			章	内容
1章	はじめに	1.1 章	ガイドラインの目的	ガイドラインの目的
		1.2 章	ガイドラインの適用範囲	等について
		1.3 章	全体の構成	
		1.4 章	坑廃水処理の課題	
2章	パッシブト	2.1 章	パッシブトリートメントの概要	パッシブトリートメ
	リートメン	2.2 章	各プロセスの特徴	ントの概要、各プロ
	トの <mark>概</mark> 要	2.3 章	パッシブトリートメント各プロセスのまとめ	セスの紹介・特徴等
				について
3 章	パッシブト	3.1章	水量の把握	検討すべき項目等に
	リートメン	3.2章	水質の把握	ついて
	ト適用可能	3.3 章	菌叢の把握	
	性の検討方	3.4 章	地形(立地)条件の把握	
	法	3.5章	気象条件の把握	
		3.6章	水質シミュレーションを用いた解析	
		3.7 章	パッシブトリートメント適用可能性の検討	
		3.8章	パッシブトリートメントの型の決定	
4 章	パッシブト	4.1 章	基礎試験	パッシブトリートメ
	リートメン	4.2 章	連続試験	ントの事前調査(基
	ト事前調査	4.3 章	コスト比較	礎試験、連続試験
	方法	4.4 章	リスク評価	等)の方法について
5 章	パッシブト	5.1 章	設計・施工	パッシブトリートメ
	リートメン	5.2 章	システムの立ち上げ・運転	ント導入の具体的手
	ト導入方法	5.3 章	維持管理	法、リスク等につい
				τ
6章以降		6章	人工湿地型(A鉱山)	A鉱山、B鉱山、C鉱
		7章 1	散生物活用型(B 鉱山)	山、旧本庫鉱山等で

表 3.5-1 パッシブトリートメント導入に向けたガイドライン目次(案)と構成内容

8章	人工湿地・微生物型/植物併用型またはその他	の事例について
	の型(C鉱山)	
9章	人工湿地型(旧本庫鉱山、旧新屋敷炭鉱等)	

3.5.3. 各章の作成方針

#### 3.5.3.1. 「1章 はじめに」の作成方針

1章は、「1.1章 ガイドラインの目的」、「1.2章 ガイドラインの適用範囲」、「1.3章 全体の構成」、「1.4章 坑廃水処理の課題」で構成される。

## (1) 1.1章 ガイドラインの目的

1.1 章は、ガイドラインの目的について記載する。また、自治体や鉱山管理者等が本ガイドラインの使用対象者であることを明記する。

#### (2) 1.2章 ガイドラインの適用範囲

1.2 章は、ガイドラインの適用範囲について記載する。本ガイドラインはパッシブトリートメントに着目することから、対象となる鉱山や坑廃水の水量、水質の特徴について明記し、地下水制御のガイドラインの適用範囲との違いを記載する。

### (3) 1.3章 全体の構成

1.3 章は、ガイドラインの各章について簡単な概要を記載する。

#### (4) 1.4章 坑廃水処理の課題

1.4 章は、坑廃水処理の課題について記載する。

#### 3.5.3.2. 「2章 パッシブトリートメントの概要」の作成方針

2章は、「2.1章 パッシブトリートメントの概要」、「2.2章 各プロセスの特徴」、「2.3章 パッシブトリートメント各プロセスのまとめ」で構成される。

#### (1) 2.1章 パッシブトリートメントの概要

2.1 章は、アクティブトリートメントとパッシブトリートメントの比較や、パッシブトリート メントの概要について記載する。「パッシブ=受動的」ということで「積極的な処理をしないプ ロセス」という捉え方をされないような記載とする。また、単にコスト削減だけではなく、坑廃 水処理に伴う様々な環境負荷(CO<sub>2</sub>の排出、エネルギーや資材の消費、廃棄物の削減等)の低減 につながるという側面も記載する。

#### (2) 2.2章 各プロセスの特徴

2.2 章は、パッシブトリートメントの各プロセスの特徴について記載する。実際にパッシブト リートメントを導入する際には複数のプロセスを組み合わせていく場合が多いため、プロセスの 組み合わせについて言及する。

## (3) 2.3 章 パッシブトリートメント各プロセスのまとめ

2.3 章は、2.2 章に記載された内容を一覧表にまとめ、日本だけでなく、海外でのパッシブトリ

ートメント適用鉱山名を記載する。記載した鉱山については参考資料に掲載する。また、国内に おける炭鉱廃水の実例も紹介する。

3.5.3.3. 「3章 パッシブトリートメント適用可能性の検討方法」の作成方針

3 章は、「3.1 章 水量の把握」、「3.2 章 水質の把握」、「3.3 章 菌叢の把握」、「3.4 章 地形(立地)条件の把握」、「3.5 章 気象条件の把握」、「3.6 章 水質シミュレーションを用いた解析」、「3.7 章 パッシブトリートメント適用可能性の検討」、「3.8 章 パッシブトリートメントの型の決定」で構成される。

PT 適用可能性の検討の流れは図 3.5-1 に示すとおりである。



図 3.5-1 パッシブトリートメント適用可能性の検討の流れ

## (1) 3.1章 水量の把握

3.1 章は、水量についての概要と、調査方法について記載する。パッシブトリートメント適用 可能性を調査するための調査項目、調査頻度、留意点等について記載する。

## (2) 3.2章 水質の把握

3.2章は、3.1章と同様に記載する。

(3) 3.3章 菌叢の把握

3.3 章は、3.1 章と同様に記載する。

(4) 3.4章 地形 (立地) 条件の把握

3.4 章は、3.1 章と同様に記載する。

(5) 3.5章 気象条件の把握

3.5章は、3.1章と同様に記載する。

(6) 3.6章 水質シミュレーションを用いた解析

3.6章は、PHREEQC等の水質シミュレーションモデルを紹介する。

(7) 3.7章 パッシブトリートメント適用可能性の検討

3.7 章は、3.1~3.6 章の結果を用いたパッシブトリートメント適用可能性の検討方法について記載する。

(8) 3.8章 パッシブトリートメントの型の決定

3.8章は、3.1~3.7章の結果を用いたパッシブトリートメントの型の決定方法について記載する。

3.5.3.4. 「4章 パッシブトリートメント事前調査方法」の作成方針

4 章は、「4.1 章 基礎試験」、「4.2 章 連続試験」、「4.3 章 コスト比較」、「4.4 章 リ スク評価」で構成される。パッシブトリートメント事前調査フロー図(図 3.5-2)に基づき、基 礎試験(カラム試験)、連続試験等の各調査の概要について記載する。



図 3.5-2 パッシブトリートメント事前調査方法の流れ

#### (1) 4.1章 基礎試験

4.1 章は、基礎試験の実施方法について記載する。また、次の段階へ進むことができる条件について記載する。また、結果が芳しくない場合の対処方法や、パッシブトリートメントの導入の

可否の検討方法についても記載する。

## (2) 4.2章 連続試験

4.2章は、4.1章と同様に記載する。

#### (3) 4.3章 コスト比較

4.3 章は、コスト比較の方法について、どんな項目にどれだけの費用がかかるかを記載する。 また、次の段階へ進むことができる条件や、パッシブトリートメントの導入の可否の検討方法に ついて記載する。

#### (4) 4.4章 リスク評価

4.4 章は、留意点(特に豪雨時、積雪時、地震時)や、パッシブトリートメントの導入の可否 の検討方法について記載する。

3.5.3.5. 「5章 パッシブトリートメント導入方法」の作成方針

5章は、「5.1章 設計・施工」、「5.2章 システムの立ち上げ・運転」、「5.3章 維持管理」 で構成される。パッシブトリートメント導入へのフロー図(図 3.5-3)に基づき、各実施内容の 概要について記載する。また、どのようなことに留意するか記載する。



図 3.5-3 パッシブトリートメント導入の流れ

(1) 5.1章 設計・施工

5.1 章は、設計・施工の実施方法について記載する。

## (2) 5.2章 システムの立ち上げ・運転

5.2章は、システムの立ち上げ・運転の実施方法について記載する。

## (3) 5.3章 維持管理

5.3 章は、維持管理のためのモニタリング項目やメンテナンス方法について記載する。

## 3.5.3.6. 6章以降の作成方針

6章以降は、「6章 人工湿地型(A鉱山)」、「7章 微生物活用型(B鉱山)」、「8章 人工湿地・微生物/植物併用型またはその他の型(C鉱山)」、「9章 人工湿地型(旧本庫鉱山、 旧新屋敷炭鉱等)」で構成される。

他の鉱山へのパッシブトリートメント適用の際の参考資料となるように、各鉱山の特徴や試験 内容について同じ構成で記載する。また、2章で記載された海外・国内の事例について A4 両面 2p 程度でまとめる。

## 4. 総論

## 4.1. 地下水制御技術の調査研究

本事業のうち、地下水制御技術の調査研究については、引き続き旧松尾鉱山をモデル鉱山とし て、過年度事業の成果を踏まえ、鉱山関連データの追加収集、シミュレーションモデルの精緻化、 またそれを用いた現況再現解析を行った。さらに、休廃止鉱山における水量シミュレーション及 び水量・水質シミュレーションの効果予測解析結果に基づく鉱害防止対策の検討並びに地下水制 御による発生源対策のためのガイドラインの作成に向けた検討を行った。

鉱山関連データの追加収集の一環として、水理地質構造ボーリング調査を旧松尾鉱山坑道掘削 範囲の地下水流路の上流側(平成 30 年度とは異なる地点)で行った(掘進長 110 m)。平成 30 年度の調査では、目的の1つであった「鉱床胚胎層」の透水性を直接確認することができなかっ たが、今回は旧松尾鉱山の第四鉱体に着鉱(GL-42.7~-80.7 m 区間:旧松尾鉱山稼行時呼称の典 型的な富鉱部は、いわゆる「硫化鉱(黄鉄鉱主体)」(GL-62.2~-74.6 m 区間)、いわゆる「縞 状鉱(自然硫黄主体)」(GL-74.6~-80.7 m 区間)に該当する。)の透水係数(注水による透水 試験)や亀裂の状態(孔壁映像・微流速測定)、また、鉱体周辺部への遷移状況等を確認するこ とができた。GL-36~-52 m は、黄鉄鉱の鉱染を受けている鉱化変質帯であり、透水係数は 10<sup>6</sup> m/s オーダーを示し、透水性は比較的低い。GL-52.5~-80.7 m は黄鉄鉱や自然硫黄を多く含み、 GL-56~-75 m は黄鉄鉱鉱染を強く受けている。ただ、透水係数については、GL-50~-60 m 及び GL-70~-80 m は 10<sup>-4</sup> m/s オーダーであるのに対し、GL-60~-70 m は 10<sup>-8</sup> m/s オーダーであり、透 水性に大きな差異が認められた。これにより、透水性については、主に亀裂状態に基づくもので あるということを再確認した。GL-50.5 m付近、GL-75 m付近及び GL-107.5 m付近にはみず路と 思われる空洞が観察され、これらの箇所を含む区間における透水係数が高い結果となり、微流速 測定の結果とも調和的であった。得られたボーリングコアの固体分析の結果では、鉱体部では主 に石英、黄鉄鉱、自然硫黄が確認されたが、含 As 鉱物については、存在量や分布が少なく、明 確な情報を得ることができなかった。また、掘削後のボーリング孔は孔内水位自動観測孔として 活用しており、得られた連続観測データは、次年度以降、モデルの再現解析対象となる。本ボー リング調査で得られたデータは、シミュレーションモデルの精緻化や水質モデルで検討対象とす るべき鉱物種の選定等に活用した。

水量シミュレーションモデル(GETFLOWS を使用)については、過年度事業の成果に加え、 今年度事業で得られた追加データや現況再現解析の結果、また各パラメータへの応答パターン等 を総合的に考慮して、モデルの精緻化を行った。その結果、坑内排水量の絶対値、季節的な変動 ともに、概ね再現する結果が得られた。ただ、融雪期の坑内排水量については過小評価する傾向 が認められ、また河川流量及び坑内排水量の水収支の観点から積雪期の水量が実測よりも不足し ていることが伺えた。これらの点は、次年度に向けて改善の余地が多少残されていると言える。

また、地表面直下に配置した粒子の流動経路の結果では、水収支が比較的閉じている夜沼川流 域では、地下水が近傍の沢で湧出し、地表水として流動している傾向が認められた。一方で、赤 川流域及び鴨田川流域では、夜沼川流域に比べると、坑道に湧出する地下水の多くが坑道掘削範 囲の直上と赤川流域の上流部から浸透したものであった。坑道に湧出する水の一部は、地表分水 嶺を超えた範囲(茶臼岳より北側)由来である可能性も示され、流域外からも水を引き込んでい る可能性が伺えた。同位体比分析の結果からは、坑道内には冬季の降水を主な起源とする地下水 が流入しており、5~6月には坑道直上付近より融雪水が多量に流入し、7月以降にはより重い同 位体比を示す降水が流入していると考えられる。坑道への浸透水は4月~6月ごろの融雪水と、7 月~10月ごろの降水、地下水の3成分に分類されると考えられ、CFC-12に基づく坑廃水の年代は 40年と推定されたが、実際には坑道範囲において、より年代の古い水や近年の融雪水等が複雑に 混合して坑廃水を形成しているため、定量的な議論を行うためには更なる情報の蓄積が必要であ る。

上記の GETFLOWS を用いた水量シミュレーションモデルに、PHREEQC を用いた水質シミュ レーションモデルを連成させた水量・水質シミュレーションモデルについては、まず、水質の再 現対象を pH と Fe 濃度に絞って (As については、含 As 鉱物の種類やその存在量等、不明点が多 いため対象から除外)検討し、Fe の溶出ポテンシャルを有する鉱物種としては、溶出速度が著し く速い白鉄鉱と、最優先種である黄鉄鉱を考慮することとした。坑道掘削・採鉱等の鉱山開発に 伴う水位の低下 (不飽和ゾーンの拡大) と、閉山後の対策工による水位の上昇 (不飽和ゾーンの 縮小)が鉱物の酸化反応に影響を及ぼしているなどの前提の下、3 m 坑プラグ打設工事前の水質 場の大局的な傾向は捉えられている解析結果となった。一方で、同工事後の水質場に大きな変動 が見られなかった。これは実際には、「鉱床胚胎層」内の鉱物分布や組成は不均質に分布してお り、坑道掘削におけるずり等を経由して坑廃水を形成しているためだと考えられる。黄鉄鉱品位 の分布やその存在量等、ほとんどの地質情報が不足(散逸・亡失)していることもあり、さらな る定量的な考察を行うには、相当量の情報収集を行う必要がある。

発生源対策工事の検討については、上流側の排水トンネルを考慮したケース(坑内排水量 16.3%減)、赤川保全水路工(計画区間)を考慮したケース(坑内排水量 0.6%減)、赤川上流域 (支川)の保全水路工を考慮したケース(坑内排水量 0.7%減)の3種類について効果予測解析を 行った(なお、上流側の排水トンネルを考慮したケースでは約 16%の削減量だが、実際に旧松尾 鉱山で上記排水トンネルを設ける場合には、中和処理を要する pH 3.0 程度の酸性地下水が新たに 排水される懸念があることに十分留意する必要がある)。次年度は、数種類の発生源対策工事を シミュレーションモデル上で模して効果予測解析を行い、その効果について評価を行う。また、 本事業では、鉱害防止対策工の水質変化予測解析も行ったが、予測結果の pH が実際よりも低く 計算された。解析モデルの反応速度パラメータや鉱床分布については、今後検討を行う余地があ るが、水質シミュレーションモデルを用いて、坑道付近の水質場、排水トンネル地点の水質につ いて算出できた。実際には、排水トンネル地点の地質分布や、流動経路上の鉱床分布、反応速度 には不確実な要素が含まれる。次年度の検討においては、幅広い対策工効果予測解析についても 扱う予定であるが、不確実性を考慮したモデル構築や、より詳細な水量・水質シミュレーション を実施することが重要である。

なお、本事業では、上記のような多量の地質学的データを収集して構築する3次元水量・水質 シミュレーションモデルの他に、坑廃水量の日変動データを考慮して統計学的に水質の変動を予 測できるモデルの構築も行った。その際、鉱山の表面、表層、地下深部に相当する3段タンクモ デルを使用し、将来の気候変動を考慮した坑廃水量及び水質変動を予測した。その結果、気象観 測データから旧松尾鉱山付近の気象条件を補正し1年分のデータを解析することで融雪期や多雨 期の流量変動を予測することができた。また、解析検討の際の将来の坑廃水量日変動の考慮の有 無により、Fe及びAsの濃度が排水基準を満足するまでに要する年数に差異が見られ、日変動を 考慮した方が、同年数が4~13年程度短くなることが分かった。

次年度事業における最終目標であるガイドライン作成に向けて、令和元年度はその検討を行った。ガイドラインの全体構成については概ね固めることができたと考えられる。次年度の効果予 測解析などの結果を事例集としてまとめ、ガイドラインの中で記載する方針とした。

## 4.2. 自然回帰型坑廃水浄化システム導入に向けた調査研究

本事業の内、自然回帰型坑廃水浄化システム導入に向けた調査研究については、過年度事業に おいて選定した「人工湿地型」、「微生物活用型」、「人工湿地・微生物/植物併用型もしくは その他の型」のパッシブトリートメントの効果検証を行うための3つのモデル鉱山において、実 際に連続試験を実施することで、それぞれのパッシブトリートメント導入の検討を行った。また、 将来パッシブトリートメント導入の可能性のある鉱山について、過年度に構築したシミュレーシ ョンモデルを活用し、金属を除去するために必要な湿地の面積計算などの導入検討に資するデー タ収集を行った。さらに、パッシブトリートメントの導入による効果の予測、導入ガイドライン 作成に向けた検討を実施した。

人工湿地型の調査研究では、A 鉱山(山形県)をモデル鉱山として、旧本庫鉱山での実規模試 験を実施中である表面流型及び浸透流型人工湿地をベースとしたプロセスの適用可能性について 検討した。具体的には、石灰石水路を模した反応槽(石灰石を内容物として充填した角型反応槽) に A 鉱山の坑廃水を連続的に通水し、反応槽を通過することによる pH の上昇及び金属除去性能 を確認した。その結果、処理原水のpHは3~4程度であるのに対し、反応槽を通過することでpH は最大でも7程度までしか上昇せず、条件によっては5程度までしか上昇しないことが確認され た。金属除去性能については pH が 7 程度まで上昇した条件ではわずかに Pb や Zn が除去された ものの、排水基準値を満足する結果は得られなかった。また Cd についてはほとんど除去されな いという結果が得られた。石灰石を充填した反応槽を通過させても pH が上昇しない原因として は、処理原水に含まれる炭酸系イオン濃度が元々高いことで、石灰石の溶解が抑制されることや、 滞留時間が長いことで、坑廃水と石灰石の接触性が鈍くなったことなどが考えられた。そこで、 調査研究のワーキンググループ委員の助言を踏まえ、石灰石以外の中和材の可能性についても検 討を進めることとし、廃コンクリートを活用し生産されている中和材等についてバッチ試験を実 施し処理性能について検討した。その結果、条件によっては pH が 8 以上にまで上昇する中和材 が確認され、一方で pH が 7 程度であっても Cd を排水基準を満足するまで除去できる条件も確認 され、当該条件において Cd は主に炭酸塩として析出している可能性も示唆された。よって、中 和材の選定方針として、単純に pH を上昇させる能力に優れたものだけでなく、炭酸系イオンを 上昇させるものも適用可能性があることが示唆され、それらを組み合わせることで、金属を効率 的に除去できる可能性が示唆された。今後、さらにバッチ試験や連続試験を実施し、最適な中和 材の選定、組み合わせ条件を検討し、実規模相当実証試験を実施することで処理の継続性等を確 認する必要があると考えられる。

微生物活用型の調査研究では、B 鉱山(秋田県)をモデル鉱山として、JOGMEC がこれまでに 調査研究を進めてきた JOGMEC プロセス(もみがら、米ぬか等を用いて硫酸還元菌を活用し、 金属を主に硫化物として析出させる)の適用可能性を検討した。具体的には過年度に現場に設置 した小規模の連続試験装置を用いて、処理性を確認する試験を実施した。その結果、石灰石の溶 解速度は主に2段階に分けられることが示唆され、pH 5程度までであれば迅速に溶解が進むこと が確認された。硫酸還元プロセスについては、処理原水の pH が 5程度であれば、反応槽内に石 灰石が充填されていなくても硫酸還元反応が継続することを確認できた。しかし原水の pH が 4 程度となると硫酸還元反応が鈍くなることも確認され、原水の pH は 5以上に維持することが望 ましいことが確認された。

また、これまでに実施してきた連続試験を踏まえ、実規模相当での実証試験を実施し、より精 緻に導入効果について検証するため、実規模相当実証試験設備を設置し、試運転を実施した。具 体的には、処理水量約 35 L/min (平時の処理水量の 1/4 程度)で導水可能な設備規模とし、金属 製の水槽5基(容積は3m<sup>3</sup>程度)を石灰水路を模したプロセスとして設置し、また金属製の水槽 3基(容積は 16 m<sup>3</sup>程度)を嫌気反応プロセスの反応槽として設置した。それぞれの槽に内容物 を充填し、硫酸還元菌の炭素源となるエタノールは添加せずに、処理原水のみを導水することで、 設備的な不具合がないか確認するための試運転を実施した。その結果、1 月初頭など、特に厳冬 期においては槽の一部で水が凍結することが確認され、当該部分においては断熱の加工が必要で あることが示唆された。また石灰石槽を通過後の坑廃水が3基ある嫌気反応槽へ均等に分配され ていないことも確認され、均等に分配されるような造作が必要であることも確認された。今後の 試験においては適切な凍結対策や導水系統の改良を実施する必要がある。

人工湿地・微生物/植物併用型もしくはその他の型の調査研究では、C 鉱山(北海道)をモデ ル鉱山として、腐葉土による Zn を主とした金属吸着作用を活用したプロセスの適用可能性を検 討した。具体的には、過年度に現場に設置した小規模の連続試験装置を用いて、処理性を確認す る試験を実施した。さらに、実規模相当実証試験設備を設置し、実際に坑廃水を通水する試運転 を実施した。具体的には、処理水量として最大 100 L/min 程度を導水可能な設備規模とし、Fe を 除去するための接触酸化槽と Zn を除去するための天然材充填槽を設置した。試運転の結果とし ては、天然材充填槽内で坑廃水の短絡と思われる現象が発生し、これまでに実施した小規模の連 続試験に比べ Zn の除去性は低い結果となった。充填する材料が天然材であるために、槽内の空 隙が不均一であり短絡が起こりやすいことが考えられた。導水量を減少させた場合は、Zn が問 題無く除去できることも確認でき、導水量を増加させた場合の処理性能については今後の課題で ある。今後は、今回設置した実規模相当の実証試験設備を用いてより導水量を多くする場合の処 理性について検証する必要がある。特に、槽に充填する天然材の充填高さと処理性の関係につい て検証を進める必要があると考えられる。

また過年度に構築した、旧本庫鉱山の表面流型人工湿地と浸透流型人工湿地を元に構築したシ ミュレーションモデルを活用し、比較的パッシブトリートメントが導入しやすいと考えられる複 数の鉱山において、金属を除去するために必要な湿地の面積等を算出し、導入の可能性について 机上検討した。表面流型人工湿地については Fe、As を除去し、浸透流型人工湿地においては pH 及びその他の重金属類を除去できるとして検討を実施した。その結果、複数の鉱山においては、 さほど広大な湿地を造成せずとも、金属を除去できる可能性が示唆されたが、一方で Fe を含む 鉱山ではその酸化のために膨大な面積の湿地を造成する必要があることも示唆された。これによ り、あらかじめ処理対象の坑廃水の水質データを入手することで、処理対象の金属を除去するた めに必要な湿地の面積を概算で算出可能となったと考えられる。

上述した調査研究、特にモデル鉱山におけるパッシブトリートメントの適用可能性の調査を通 じ、各現場に適していると考えられるタイプのパッシブトリートメントの導入について、過年度 に比べ、具体的な適用可能性や導入における課題などを抽出した。特に実規模相当実証試験の試 運転まで実施したことで、想定していなかった設備の凍結や導水路の短絡などの現象が確認され、 新たな課題を抽出することができたと考えられる。今後、実規模相当実証試験を実施することに より、パッシブトリートメントの処理能力やメンテナンス頻度を把握することでより精緻な検討 が行えるようになると考えられる。

また、ガイドライン作成の検討を行い、全体の構成については概ね固めることができたと考え られる。パッシブトリートメントの各タイプの導入については、実規模相当実証試験を実施する ことで、実用化において重要であると考えられるメンテナンスの内容やその頻度について精緻に 把握する必要がある。

# 二次利用未承諾リスト

報告書の題名 平成31年度休廃止鉱山における坑廃水処理の高度化調査研究事業報告書

委託事業名 平成31年度休廃止鉱山における坑廃水処理の高度化調査研究事業

受注事業者名 独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構

頁	図表番号	タイトル
2.2-6	<b>図</b> 2.2−5	積雪深の経年変化
2.2-17	⊠2.2-12	坑内排水量の経年変化
2.2-96	図2.2-54	検証期間における日単位の坑内排水量に関する 観測流量と計算流量の評価
2.2-97	図2.2-55	坑内排水量の観測水量と解析結果の比較
2.2-98	図2.2-56	降雪量を1.5倍にした場合の坑内排水量の観測水 量と解析結果の比較(参考)
2.2-112	図2.2-68	広域モデルと局所モデルにおける坑内排水量の 観測流量と計算流量の評価
2.2-112	図2.2-69	坑内排水量の再現状況
2.3-17	⊠2.3-13	水量予測結果と観測値との比較
3.1-52	図3.1-71	A鉱山の坑廃水処理費用(3年平均)
3.1-53	図3.1-72	人工湿地適用時の材料費の推移
3.1-53	図3.1-73	材料費コスト余剰分の推移
3.2-8	図3.2-8	総合原水水量測定結果(2018年4月下旬から2019 年10月下旬まで)
3.2-8	図3.2-9	浸透水①水量測定結果(2018年4月下旬から2019 年10月下旬まで)
3.3-4	図3.3-2	原水流量の経時変化
3.3-4	図3.3-3	pHとECの経時変化
3.3-4	図3.3-4	重金属濃度の経時変化
3.3-42	送3.3-28	過年度実施したカラム試験との比較(1)
3.3-42	⊠3.3-29	週午度美施したカフム試験との比較(2) 限を度度なしたよう。計算していた(2)
3.3-43	⊠3.3-30	適牛皮美施しにカフム試験との比較(3) 源左南実施したカニノ 計除しの比較(4)
3.3-43 2.2-44	図3. 5 <sup>-</sup> 51 図2-2-22	週午皮夫旭しにカノム武敏との比較(4) 過年南宝紘したカラム試験しの比較(5)
3. 3-43 3. 3-43 3. 3-44	⊠3. 3-30 ⊠3. 3-31 ⊠3. 3-32	過午度実施したカラム試験との比較(2) 過年度実施したカラム試験との比較(3) 過年度実施したカラム試験との比較(4) 過年度実施したカラム試験との比較(5)