

松尾鉱山坑廃水処理における省エネルギー技術開発の成果

鉱害防止支援業務グループ

はじめに

休廃止鉱山から流出する坑廃水による水質汚染を防止するため、国内 80 か所の処理場で坑廃水処理が実施されている。こうした処理事業は坑廃水の流出が続く限り 即ち半永久的に継続しなければならない。坑廃水処理に費やされるコストは全国で年間約 30 億円と膨大で、これまでもコスト削減のための様々なアプローチが行われている。

独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構（JOGMEC）では、坑廃水処理コストのうち、主に電力エネルギーコストの削減を目標に、平成 11 年度より「省エネルギー総合実証試験」を実施してきた。実証試験のモデル鉱山となった旧松尾鉱山（岩手県）は、国内休廃止鉱山のうち最大規模の坑廃水量を有し、その処理設備は全国の処理場中、最大の電力エネルギーを消費している。

本技術開発事業は JOGMEC が経済産業省の委託を受け、事業の一部を財団法人資源環境センター及び同和テクノエンジニアリング株式会社に再委託して実施した。本稿ではこの実証試験で得られた知見と結果について報告する。

1. 旧松尾鉱山での従来の坑廃水処理

旧松尾鉱山では昭和 57 年に建設した新中和処理施設によって、平均水量毎分 18m³、pH2.3、全鉄約 230mg/L の坑廃水を処理している。昭和 57 年当初の水質と現在の水質を表 1 に示す。

表1 旧松尾鉱山処理原水の水質

年度	水量 (m ³ /min)	pH	8.4Ax (mg/L)	T-Fe (mg/L)	Fe ²⁺ /T-Fe (%)	Al (mg/L)	As (mg/L)
昭和57年	17.2	1.93	2,453	504	89	114	2.84
平成15年	17.5	2.28	1,123	227	88	70	1.06

8.4Axとは、対象となる水溶液をpH8.4まで中和するのに必要なアルカリ量を表したもので、ここでは、アルカリ剤をCaCO₃とした場合の値を示す。pHが低く、重金属イオンを多く含む坑廃水ほどこの値が大きくなる。

表 1 のとおり、坑廃水中の鉄の約 90 % は Fe²⁺ の形で存在するが、Fe²⁺ は pH を 9 程度まで上げないと沈殿除去できない。ただし Fe²⁺ を Fe³⁺ に酸化すれば、pH4 での沈殿除去が可能となる。

旧松尾鉱山で行われている坑廃水処理は、鉄酸化細菌による酸化工程と炭酸カルシウムによる中和工程及び後段の中和物沈降分離工程からなる。酸化工程では坑廃水中に生存する鉄酸化細菌の働きにより Fe²⁺ を Fe³⁺

に酸化する。引き続き中和工程では安価な中和剤である炭酸カルシウムを用いて pH を 4 に調整し、Fe³⁺ を沈殿させると共に砒素を同時に共沈除去する。このようにして鉄と砒素が取り除かれた坑廃水（処理水という）は、後段のシクナーで SS（中和物）を沈降分離し、上澄み液を旧松尾鉱山周辺の自然汚染レベルであった pH4 で放流する。鉄や砒素が取り込まれた中和物は隣接して造成された貯泥ダムに堆積される。図 1 に旧松尾鉱山での従来型の坑廃水処理フローを示す。

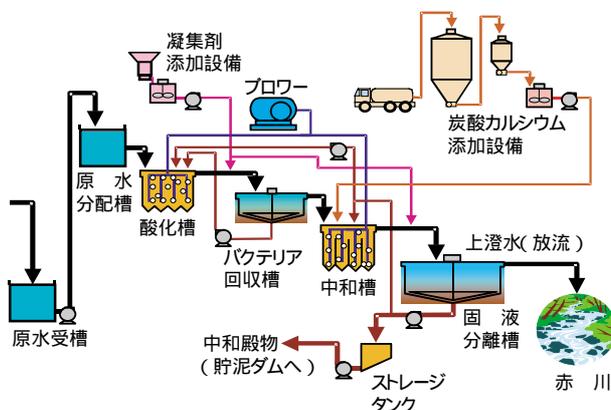


図1 旧松尾鉱山新中和処理施設の従来型処理フロー図

新中和処理施設は1系列当たりの処理能力9m³/minの処理設備を4系列有し、これらを交互に運転し処理を行ってきた。水量が平常の際は2系列で処理を行い、増水時には3系列運転での対応となる。

2. 省エネルギー総合実証試験

旧松尾鉱山をモデルに坑廃水処理の省エネルギー化を図るため、平成11～14年度に酸化工程と中和工程を一体化した酸化中和一体型処理方式についての実証試験を行った。この試験の結果、残念ながら同方式には問題のあることが明らかとなったため、それまでの試験結果を参考に新たな処理方式を考案した。こうして構築された新省エネルギー中和処理方式について、平成15、16年度に実施した実証試験により省エネルギー化に関する様々なデータを取得し、総合評価を行った。表2に本技術開発の実施経緯を示す。

表2 省エネルギー総合実証試験の実施経緯

年度	平成11年	平成12年	平成13年	平成14年	平成15年	平成16年
処理方法	酸化中和一体型処理法			新省エネ中和処理法		
基本設計	■			■		
詳細設計	■			■		
設備製作		■	■	■	■	■
実証試験・酸化中和一体型	■			■		
実証試験・新省エネ中和	■			■		
総合評価				■		■

2.1 酸化中和一体型処理方式

2.1.1 試験概要

表1に示されるように、旧松尾鉱山の坑廃水水質が処理場建設当時より次第に改善されてきた結果、酸化槽及び中和槽の設備能力（容量）に余力が生じていた。また、従来鉄酸化バクテ

リアは、強酸性の条件下で高い鉄酸化能力（活性）を有するとされていたが、pH4程度の条件でもかなりの活性を持つことが小規模試験により確認されてきた。こうした状況、知見を踏まえ、酸化工程と中和工程を一体化することにより、以下のような省エネルギー効果を発揮することが期待された。

酸化中和工程を一つの槽で行うことにより、従来工程毎に設置されていた空気酸化のためのブローワーをまとめることで動力が削減される。

施設配置等の関係上、処理原水を酸化工程に送水するポンプが不要となり、これに係る動力の全てが削減される。

炭酸カルシウム供給設備の閉塞トラブル対策としての新設備や、自動監視制御、遠隔操作を可能にする自動制御システムDCS（Distributed Control System）を導入することにより、坑廃水処理が効率化する。

*自動制御システム（DCS）：ポンプ、攪拌機、ブローワー、薬剤供給設備などの動力機器の現場制御盤と中央のコントロールシステム（PC）を2重化されたネットワークで接続した制御システムであり、全ての機器を中央のPCで簡易に一括管理・制御することが可能となる。またネットワークが2重化されているので万が一の故障の際も他方のネットワークにより制御可能な状態にあり安全性も高い。

酸化中和一体型の処理フローを図2に示す。

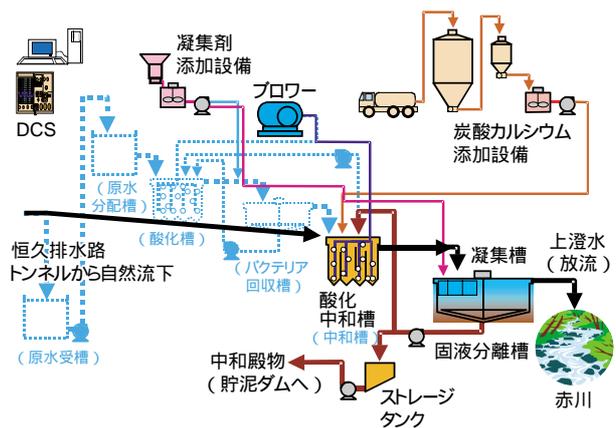


図2 旧松尾鉱山酸化中和一体型の処理フロー図

2 1 2. 試験結果

平成 12 年度は第 2 系列、平成 13 年度は第 3 系列、平成 14 年度は第 1 系列について、設備を酸化中和一体型処理方式に改造してそれぞれ約 50 日間の実証試験を実施した。

酸化中和一体型処理方式の実現のためには先

ず、通常 pH2.5 程度で高い酸化能力を有する鉄酸化バクテリアを、pH4 の環境に順応（馴養という）させる必要がある。馴養は 20 日間程度をかけて徐々に pH を上昇させることにより行う。図 3 に馴養試験の一例を示す。

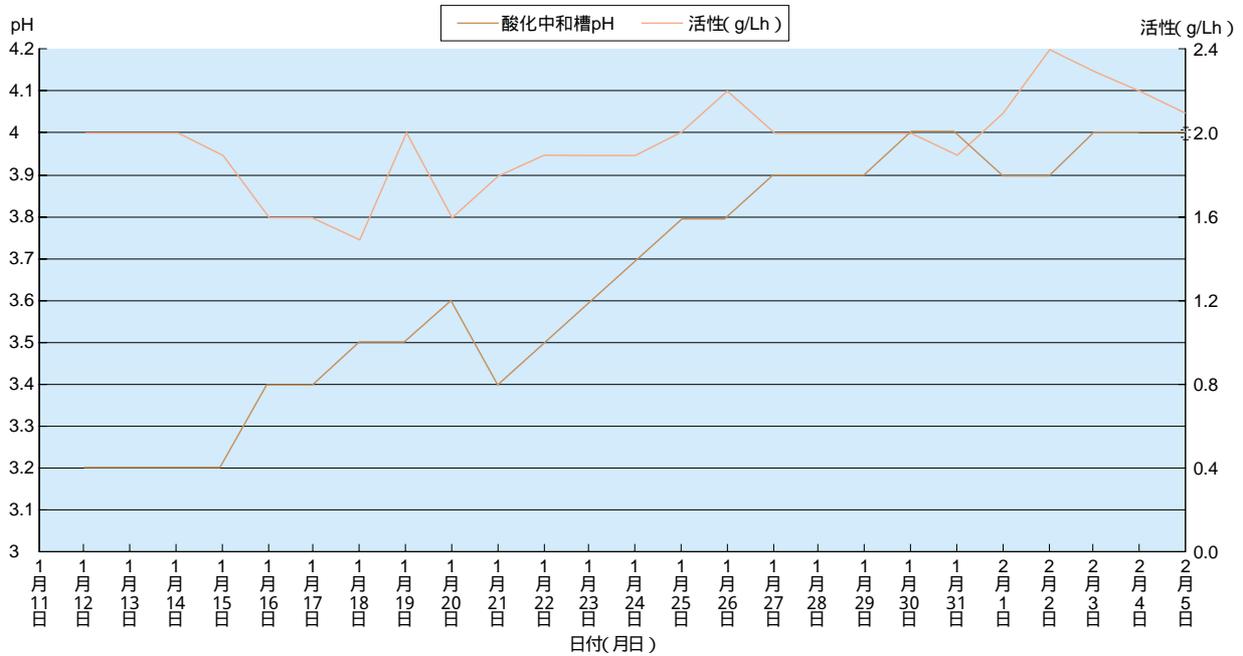


図3 バクテリア馴養期間の活性

最終的に（グラフ右端）pH4 で 2g/Lh の活性（1 時間で 1 リットル当たり 2g の鉄を酸化する能力）を有しており、旧松尾鉱山坑廃水処理における滞留時間や処理原水の鉄濃度の面から見て十分な酸化能力を持つと言える。

このようなバクテリア馴養が終了した後、酸化中和槽の pH を 4 とした条件で酸化中和一体型処理方式の実証試験をそれぞれの年度に約 30 日間実施した。試験結果の一例を図 4 に示す。

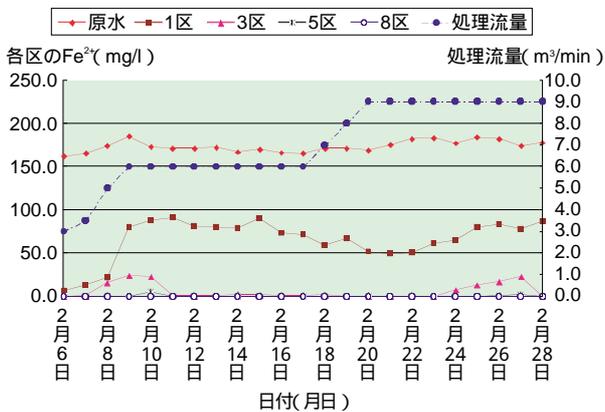


図4 酸化中和槽内のFe²⁺濃度

試験では酸化中和槽の内部を、原水の入口である 1 区から、出口となる 8 区までに区分し、各区での鉄の酸化状況を確認した。図 4 によれば、1 区、3 区、5 区と槽内を通過するに連れて Fe²⁺ が減少し、出口となる 8 区では Fe²⁺ が殆ど残存していないことから、この時点で Fe³⁺ への酸化がほぼ完全に終了している事が分かる。試験ではまた、処理流量を変化させ、酸化能力の流量増大に対する追従性についても確認した。図 4 より、処理流量が毎分 9m³ まで増加した場合でも、出口の 8 区では完全に酸化が行われていることが分かり、酸化中和一体型処理方式の酸化能力に問題がないことを確認した。

酸化中和槽を出た処理水は、シックナー上部に設けられた凝集反応槽を通過し、SS の沈降分離性を向上させてからシックナーに導水され固液分離が図られる。しかしながら、本方式によるシックナーのオーバーフロー（河川への放流水）中の SS 濃度は、7 ~ 10mg/L と従来処理に比べ高い値となった（図 5）。この結果は、

酸化中和一体槽から高濃度のSSが供給されたことにより、現状のシックナーでは滞留時間を十分に確保できず、中和殿物が完全に沈降分離されないためと考えられた。

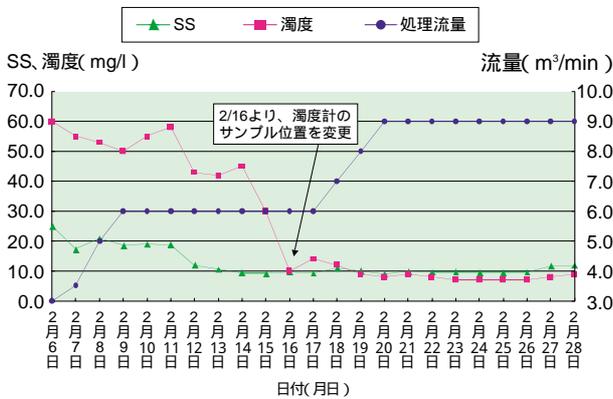


図5 処理流量とSS濃度

SSに関する放流水の水質目標である7mg/Lを達成するためには、従来1.9mg/Lであった凝集剤を大幅に増量(7mg/L)添加せざるを得ないが、凝集剤の添加量の増大に伴うコスト増が、省エネルギー化による電力等削減によるコスト削減を上回ってしまうと試算された。さらに毎分9m³の増水時には、こうした凝集剤の多量添加によっても水質目標の達成は困難であり、最終的に酸化中和一体型処理方式の導入は不適切と判断されるに至った。

2. 新省エネルギー中和処理方式

平成14年度までの酸化中和一体型処理方式に関する実証試験の結果、一体化による省エネ効果を確認したものの、放流水のSS濃度の課題を満足に解決することができなかった。そのため平成15年度以降は、酸化中和一体型処理方式の適用を見直し、従来どおりの酸化・中和分離方式での新省エネルギー中和処理方式について検討した。

2.2.1. 試験概要

それまでの酸化中和一体型実証試験の結果、バクテリア泥濃度を上げれば酸化に要する時間を短縮できることが明らかになっていたことから、1系列当たりの処理能力を従来の9m³/minから12m³/minに増大させ、常時2系列の運転体制とすることによって省エネ化及び効率化を図るという方針転換を行った。併せて酸化中和

一体型処理方式で導入した炭酸カルシウム供給の新設備、自動制御システム(DCS*)を生かしつつ、導水工程では送水ポンプのインバータ化、曝気用ブローの適正化により総合的に省エネ化を図る計画とした。新省エネ処理方式による省エネルギー等検討課題を以下に記す。

常時稼働の系列を削減(3系列運転→2系列運転)することにより、動力費削減及び効率化を図る。

原水揚水ポンプのインバータ化や、ブローの適正化により、モーター動力費を削減する。

中和槽の改造により、中和効率を向上させる。

凝集反応槽の設置により、凝集剤の削減及び放流水質の向上を図る。

炭酸カルシウムの供給設備改良によって閉塞トラブルを防止し、効率化を図る。

自動制御システム(DCS)の導入による効率化、安定化及び省人化を図る。

図6に、新省エネルギー中和処理方式のフローを示す。

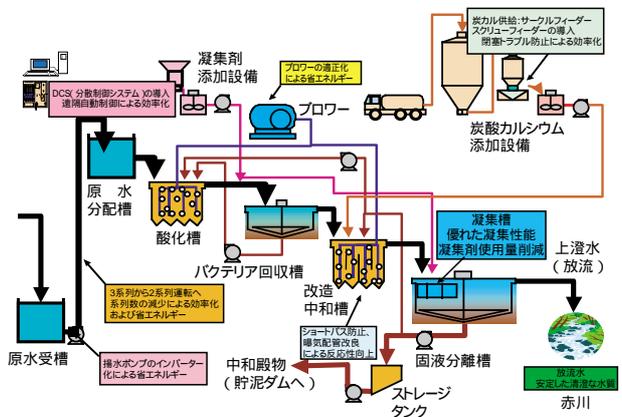


図6 新省エネルギー中和処理方式のフロー図

2.2.2. 試験結果

平成15、16年度の2年間において新省エネルギー中和処理方式の実証試験を実施した。実証試験は平成15年度に約2か月間、平成16年度に約10か月間実施した。

表3に実証試験期間中及び、従来型処理を行っていた平成11年度のそれぞれの処理水の水量と水質を示す。表3から明らかなように、放流水の水質は以前と同等か、それ以上であるこ

とが確認できる。また、表4に示す平成15年度の各系列放流水のSS濃度比較は、凝集反応槽設置の効果を明示している。凝集反応槽は平成14年度までに第1～3系列への設置を終え、平成15年度以降は通年運転を行っているため、凝集反応槽を設置していない第4系列と他の系列を比較することで、凝集反応槽が顕著にSS濃度低減に寄与していることが読み取れる。このように、新省エネルギー中和処理方式は1系列当たりの処理水量を9m³/minから12m³/minに引き上げたにもかかわらず、従来型の処理方式を上回る、良好な処理成績を収めることが確認できた。

表3 実証試験期間中の処理水の水量・水質と薬剤使用量〔平成11年度との比較〕

期 間	原水水量 (m ³ /分)	薬剤使用量		水量当り 薬剤使用量		処理水の水質 (単位:mg/L(pH以外))			
		炭カル (t/月)	凝集剤 (kg/月)	炭カル (g/m ³)	凝集剤 (mg/L)	pH	8.4Ax	T-Fe	SS
省エネルギー実証試験期間の実績									
H16.4～H17.2平均	19.1	649.5	1,510	774	1.80	4.30	310	2.0	3.8
参考:省エネルギー実証試験以前の状況									
H11.4～H12.2平均	18.9	721.9	1,580	869	1.90	4.14	332	2.1	5.2

表4 固液分離槽溢流水のSS濃度平均値(平成15年度)

凝集反応槽設置			凝集反応槽無し
第1系列	第2系列	第3系列	第4系列
3.0mg/L	2.7mg/L	3.3mg/L	5.4mg/L

次に、新処理方式による省エネルギー効果について、表5に実証試験期間中と、従来方式であった平成11年4月～平成12年2月の坑廃水処理に係る電力使用量の比較を示す。表5が示すように、新処理方式による省エネルギー効果は、消費電力、電力量原単位ともに約26%と大幅な削減率を達成した。

表5 消費電力・電力費(試算)と電力量原単位

項 目	原水水量 (m ³ /分)	消費電力 (kW)	電力費(試算) 1		電力量原単位		
			(千円/月)	削減額	削減率	(kWh/m ³)	削減率
省エネルギー運転実績(2)							
H16.4.21～ H17.2平均	19.1	513	4,113	1,428	25.6%	0.447	26.2%
参考:省エネルギー実証試験前時点実績							
H11.4～ H12.2平均	18.9	689	5,541			0.611	

原水水量、消費電力、電力費、電力原単位の数値は、各々月データを平均したもの。
 1: 設定電力単価: 11円/kWh
 2: 4月21日から本格省エネルギー処理を開始したため消費電力データはそれ以降のデータを使用。

旧松尾鉱山新中和処理施設の電力量は、送水ポンプ電力量、ブロー電力量、動力盤(主に200V機器の電力量合計)、照明・ヒーターその他(主に100V機器の電力量合計)で構成されている。消費電力の内訳を表6に示す。表6によるとブローの消費電力は大幅に低下し、送水ポンプと動力盤の割合が上昇していることが分かる。照明・ヒーター等はほぼ同等の値となった。

表6 各分類項目別の消費電力とその割合(平成11、16年度実績比較)

		合計値	送水ポンプ	ブロー	動力盤	照明・ヒーター等
消費電力(kW)	H16年度実績	513	156	143	156	58
	H11年度実績	689	187	248	177	76
割合(%)	H16年度実績	100%	30.4%	27.9%	30.4%	11.3%
	H11年度実績	100%	27.1%	36.1%	25.8%	11.0%

図7に、平成16年度実証試験期間中の消費電力の内訳別推移を示す。この図から、今後の課題として注目されるのは、冬期間の凍結防止用ヒーターによる消費電力量の増加である。ヒーターへの依存度が低い効果的な凍結防止対策が見出せれば、省エネルギー効果はさらに拡大すると考えられる。

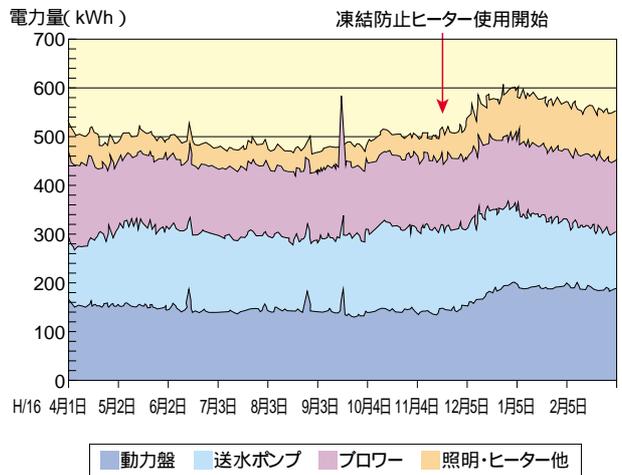


図7 内訳別消費電力量

3. まとめ

平成11～16年度に旧松尾鉱山をモデルに実施した省エネルギー実証試験において、原水送水ポンプのインバータ化、ブローの適正化や2系列運転体制化などの総合的対策を盛り込んだ新省エネルギー中和処理方式の導入により、従来の処理方式に比べて約26%の消費電力量

削減を達成した。冬期間における凍結防止対策の検討によっては、一層の電力量削減の余地がある。また、凝集反応槽の設置により、凝集剤の添加量を削減することが可能となった。これら電力費および薬剤費の削減によるコスト削減効果は、年間約2千万円と試算されている。

なお、新処理方式は大幅な省エネルギー効果をもたらすとともに、従来方式を上回る良好な処理水質を安定的に得ることが出来る。処理水質の安定化は、今回導入を図ったDCSによる薬剤添加の自動制御によるところが大きい。また、DCSを含めた新省エネルギー中和処理システムの導入は、運転管理の一層の効率化に寄与する。

最後に、平成17年度に実施された本技術開発事業の事後評価において、同実証試験の達成した成果に対して各評価委員より高い評価を頂戴したことを付記しておく。

(2005.12.9)