

休廃止鉱山における坑廃
水処理の高度化技術調査
令和6年度 別添1-3

休廃止鉱山における
自然回帰型坑廃水浄化システム
(パッシブトリートメント)
の導入ガイダンス

概要版

令和7年9月

経済産業省
独立行政法人エネルギー・金属鉱物資源機構

1章 はじめに

1.1 本ガイダンス策定の背景・目的

坑廃水処理は半永久的に継続する必要があることから、現在～将来にわたり莫大な費用が費やされ、その削減が大きな課題である。一方、自然浄化作用を活用するパッシブトリートメント（以下、「PT」という）は、一般的な坑廃水処理方法（アクティブトリートメント、以下、「AT」という）に比べて、「コスト削減」、「導入のしやすさ」、「将来的な坑廃水処理の負荷軽減」について利点がある手法で導入が期待されている。そこで、PTの詳細を解説するとともに、導入の手順や留意事項をまとめ、国内の坑廃水処理への導入のためのガイドラインを策定した。

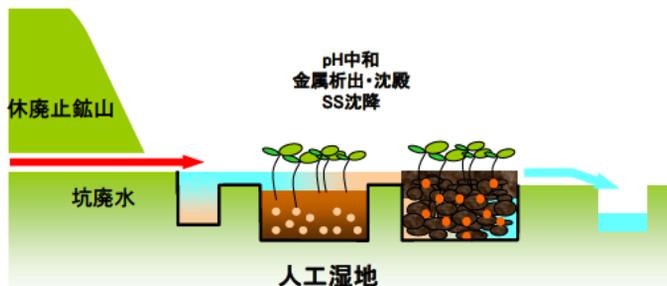


図1 代表的なPTプロセス（人工湿地型）の概念図



図2 PTの一例（人工湿地型）
北海道立総合研究機構より提供

表1 PT導入の利点とその概要

利点	概要
コスト削減	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 電力、薬剤不使用 ✓ 機械設備無し、メンテナンスは低頻度
導入のしやすさ	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 複雑な機械設備、管理システム無し ✓ 最低限の土木工事
将来的な坑廃水処理の負荷軽減	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 自然調和型の処理 ✓ 経験、知見の蓄積余地がある

本ガイダンスは、坑廃水処理にとって多くの利点が考えられるPTの導入について、これまでに実施してきた実証試験等の知見をもとに国内坑廃水処理への導入の一助となるべく作成したものである。PTの詳細解説（第2章）、PT導入に向けた検討フローに基づく各検討項目の解説、具体的には現状把握（第3章）、事前調査（第4章）、コストの検討（第5章）、実際の導入にあたっての留意点（第6章）をこれまでの事例を紹介しながら記載したものである。

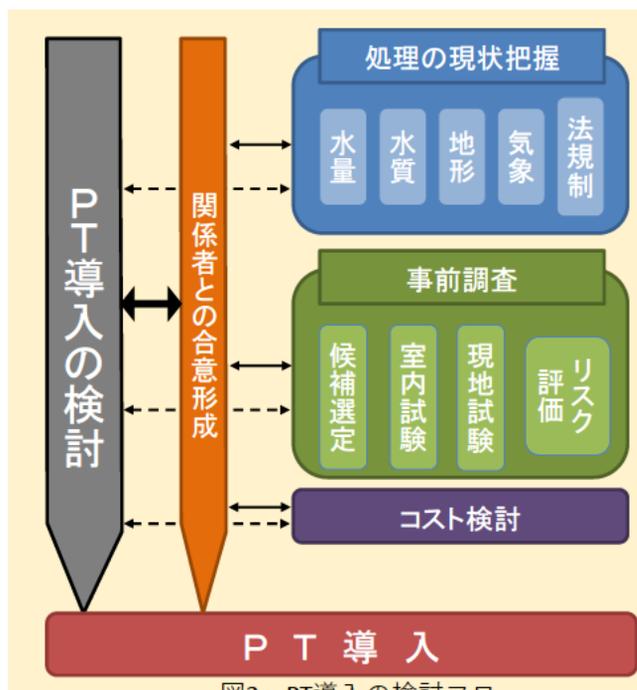


図3 PT導入の検討フロー

2章 PTの概要

PTの概要、各プロセスの詳細な特徴等について、実際の事例の写真も含めて記載しています。→本編p7～34

2.1 PTの総論

一般的な坑廃水処理は、処理原水を集水し、薬剤を添加して中和し溶存金属を析出させ、固液分離後に清澄水を放流する。薬剤による処理のため確実性が高い一方で、処理や管理のためには動力が必要でありマンパワーも必要となる。一方、PTは、“自然力”を活用する処理技術全般のことであり、微生物の活性や植物による吸収作用など自然の浄化作用や坑廃水自体が持つ位置エネルギーを利用して坑廃水を処理する技術である。

2.2 PTの主要プロセス

PTには坑廃水の中和を主目的とするもの、金属除去を主目的とするもの、その両方を同時に実現することを目的とするものなど様々なタイプが考案されており、それぞれについて多様なプロセスが存在する。ここでは、大まかに微生物活用型、人工湿地型、その他の型に分類し紹介する。

表2 PTのプロセスの一覧と主な特徴

大分類	中分類	小分類	処理可能金属と濃度目安	滞留時間目安	特徴	課題
微生物活用型	-	鉄酸化細菌	Fe: ~50 mg/L (As)	0.5~5時間	多様なpH範囲に対応可能 原水pHによっては発生酸物の嵩が小さい 微生物型の中では高速処理が可能	槽内が閉塞しやすい 定期的(数ヶ月単位)なメンテ(表層攪拌)が必要 定期的(数年単位)な浚渫が必要
	-	硫酸還元菌	Cu: ~10 mg/L Pb: ~1.2 mg/L Zn: ~100 mg/L Cd: ~0.15 mg/L	10~50時間	ATで処理にコストがかかる金属種を安価に処理可能 酸物の嵩が小さい	処理速度が遅い 栄養源が必須 定期的(5~10年単位)な浚渫が必要 低温下では活性が弱く、処理能力が低下する懸念(反応場の温度4℃台は処理継続した実績あり)
	-	マンガン酸化菌	Mn	24時間程度	ATで処理にコストがかかるMnに対処可能	中性pHのみ対応 ラボ試験段階
人工湿地	-	好気性(表面流)人工湿地	Fe: ~20 mg/L	10~50時間	コスト安価 単純な水質に好適	処理可能な金属種が限定 pH中和能がない 定期的(10年単位)な浚渫が必要
	-	嫌気性(浸透流)人工湿地	Cu, Pb, Zn, Cd	15時間~	コスト安価 pH中和能も有する	FeやAlによる目詰まりの可能性 処理速度が遅い 定期的(10年単位)な浚渫が必要
人工湿地型	石灰石水路	好気性石灰石水路 (含まれないことが望ましい)	Fe: ~5 mg/L	2~10時間	シンプルな構造 目詰まり状況など目視可能 温度の影響は小さい	FeやAlによる目詰まりの可能性 定期的(数ヶ月単位)なメンテ(清掃)が必要 定期的(数年単位)な浚渫が必要
		嫌気性石灰石水路	- (pH中和が目的)	2~10時間	Fe酸物による被覆起こりにくい 設備は埋設が基本 温度の影響は小さい	状況の目視が困難 定期的(数ヶ月単位)なメンテ(清掃が必要) 浚渫の際、大規模工事が必要な可能性
その他の型	-	植物吸収 (ファイトレメディエーション)	As, Pb, Zn, Cd	20~50時間	植物体に金属を集積 中和酸物の発生無し	定期的に植物体を刈り取る必要性 生育条件に限られる (極端な高温、低温の耐性がやや弱い)
	-	天然材による吸着	Zn: ~5 mg/L Cd等		天然資材を活用可能 中和酸物の発生無し	充填槽が短絡しやすい 破過したら都度交換が必要 低温下は資材の固化が起こりやすく注意が必要 (反応場の温度5℃までは処理継続した実績あり)

●微生物活用型

鉄酸化細菌や硫酸還元菌、マンガン酸化菌などを活用するプロセスで、ATに比べ処理に時間を要するが恒常的な薬剤添加がほとんど必要無く、安価に処理が行えるプロセスである。処理が可能である金属種はやや限定されるが、一度環境を整えることができれば、微生物の活性が維持され、長期安定的に金属除去が期待できる。

課題としては槽内にバイオフィームが生成するなどして閉塞することや、温度などの環境条件によっては微生物の活性が弱まり、処理性が不安定になる場合がある。

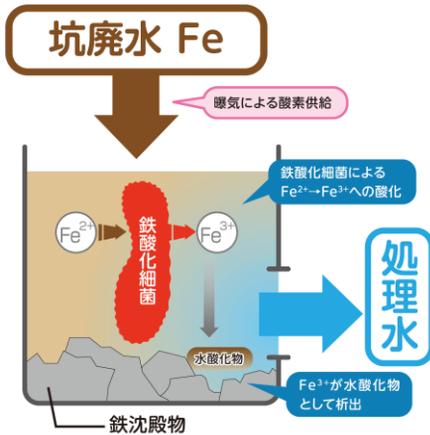


図4 鉄酸化細菌を活用するプロセスの概念図

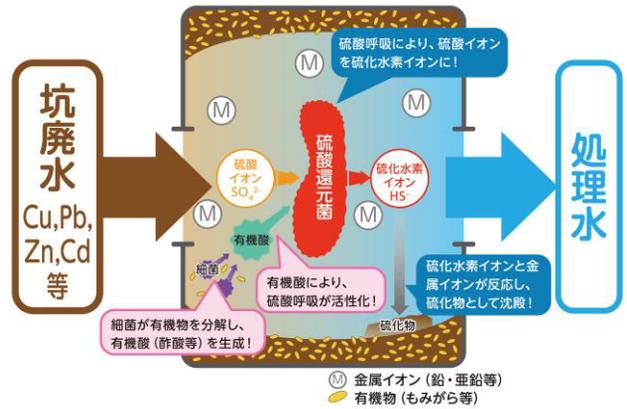


図5 硫酸還元菌のプロセスの概念図

●人工湿地型

機械的なプラント設備ではなく、ヨシやガマが繁茂するような自然の湿地を模した人工湿地を造成し、pHを中和したり金属を除去したりするものである。好気的な環境にして、Feを酸化処理するものや、嫌気的な環境でpH上昇を狙うなど、様々な手法がある。非常にシンプルな設備構成となり、pHを中和すれば一律排水基準をクリアできるといったような比較的単純な水質について適しているものである。

●石灰石水路

石灰石を充填した水路で、pHを中和することを主目的としたプロセスである。Feなどの金属も除去できるが、石灰石表面に殿物が付着し石灰石の反応性が低下することが課題である。処理対象とする水質、特に含まれる金属によってpHをアルカリ領域まで上昇させる必要がある場合には、石灰石のみではなく、廃コンクリート由来の中和材を水路に充填することも考えられる。

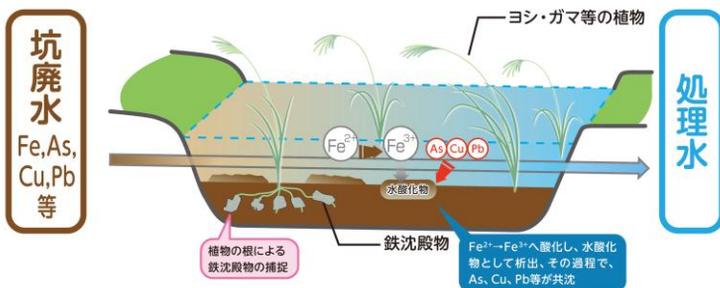


図6 好気性人工湿地の概念図

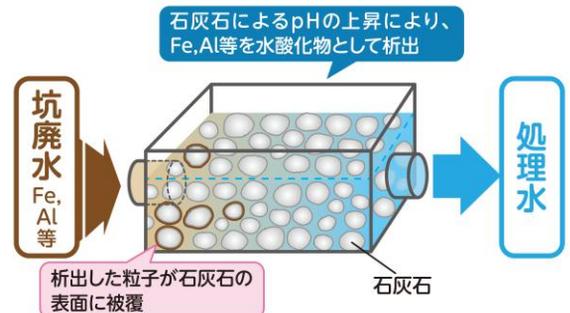


図7 石灰石水路の概念図

3章 PT適用に向けた現状把握

PT適用に向けた現状把握について、把握が必要な項目や必要なデータ頻度等について記載しています。
→本編p35~40

3.1 総論

PTの適用可能性を検討するため、まずは既存の処理状況含め現場の現状把握が重要である。把握が必要な項目としては、水量・水質、地形（立地）条件、気象条件、法規制等が挙げられる。PTは急激な水量・水質変動への追従性が弱いことがデメリットとされており、年間通してどの程度水量・水質が変動するのか把握が必要となる。年間の平均値の把握に留まらず、最大値・最小値を把握することが重要である。

年間の季節変動の把握に加え数年間（最低でも3年程度。長期間（10年単位）データがあればなお良い）の変動幅まで把握できると良い。また、複数の発生源が存在する場合は、個別にデータを取得することが理想的である。

3.2 水量・水質の把握

●水量の把握

水量については、設計段階においてPT処理に必要な設備規模に直結するものであり、特に降雨後（近年は短期間の局所的な豪雨が多発しており、豪雨後の水量増加の挙動は重要）の水量変動の様子や、積雪地域では融雪期の水量増加の様子が重要となる。

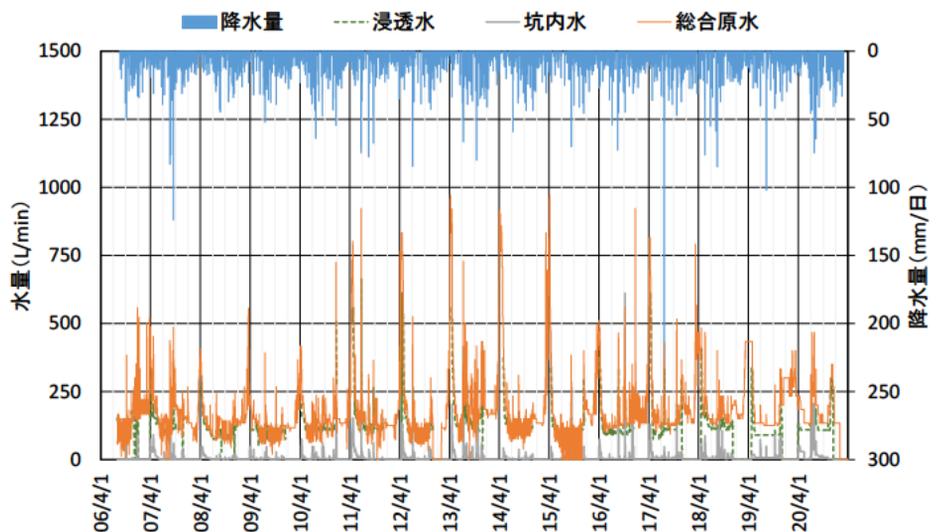


図8 水量把握の一例（過去15年分）

●水質の把握

水質については、pHに加え様々な元素についても測定すると良い。例えば、T-Fe（全鉄）、S-Fe（溶解性鉄。Fe²⁺、Fe³⁺）、Al、Cd、Cu、Pb、Zn、Ca、Mg、Mnに加え、Si、As、SO₄²⁻、HCO₃⁻なども重要なデータとなる。ほかにECやDOのデータも重要となる。

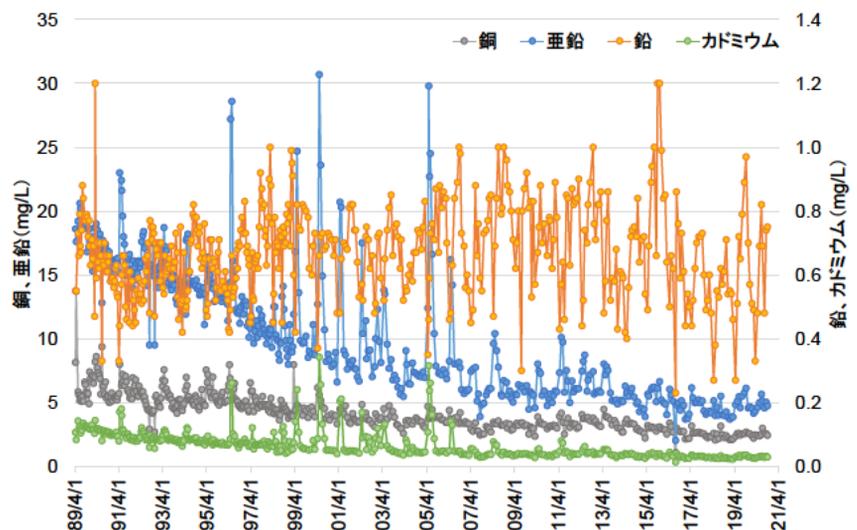


図9 水質把握の一例（過去30年分）

3.3 地形（立地）条件の把握

PTの導入においては現場の地形（立地）、アクセスの条件はコストに大きく影響するものであり、導入の可否及び設備設計に大きく影響を及ぼす。坑廃水の発生源のレベル（標高）が高い場合は、PT設備をその下流側に配置することで自然流下での導水が可能となるが、発生源のレベルが低い場合ポンプアップが必要となる場合がある。

多くの休廃止鉱山では処理施設周辺の平面図、断面図等が存在すると考えられ、それらの情報に加え踏査により現場状況を確認する必要がある。近年は空撮技術が急速に発展し、ドローンを活用した測量も行えるようになっており、それらも活用できると考えられる。



図10 地形（立地）条件の把握の例

3.4 気象条件の把握

近年では局所的な集中豪雨の発生により急激に水量が増加する現象が確認されていたり、長雨の影響あるいは豪雪の影響で通常では考えられないような水量を記録したりすることもあるため、気象庁のデータ等も活用し、可能な限り長期間のデータを把握できるとよい。

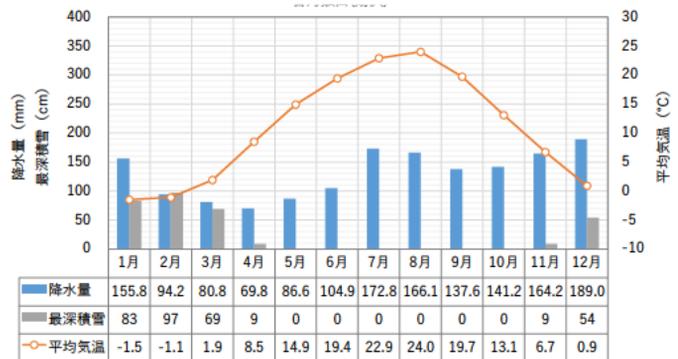


図11 気象データの一例（過去30年間の気温、降水量、積雪深の平年値）気象庁HPより作成

3.5 法規制関係の把握

義務者存在鉱山においては金属鉱業等鉱害対策特別措置法に基づき、公共用水域へ排出する地点での排水基準を遵守するよう厳密な管理のもとで坑廃水処理が実施されている。従って、現状（2021年9月時点）においては、義務者存在鉱山の坑廃水処理にPTプロセスを導入する場合は、従前の設備更新と同様に各種法令等に従い適切に届出等の手続きを実施する必要がある。

義務者不存在鉱山においては、坑廃水処理において排水基準に適合を求められる法的な根拠はない。従って、当該鉱山に関係する利害関係者が新たな水質管理方法に合意をした場合には、当該管理方法での柔軟な対応が可能であり、「下流の利水点等における水質の安全性を確保した上で、坑廃水を管理・監視する」利水点等管理の検討が可能である。

4.3 室内試験、シミュレーションによる平衡計算

導入の候補として挙げられた各プロセスについて、水質面で適用可能かどうか基礎試験を実施する。ビーカーレベルのバッチ試験やカラムを用いた連続試験などが挙げられる。連続試験では設定した滞留時間で処理対象の金属が安定的に除去可能かどうかなどに着目して試験を実施する。

鉄酸化細菌や硫酸還元菌によるプロセス、石灰石水路のプロセス、一部の人工湿地によるプロセスなどについては研究機関による処理メカニズムの解明が進められており、一部はシミュレーションモデル化が進められている。それらを活用することによって、机上計算により目的の坑廃水の処理に必要な滞留時間などを把握することが可能である。

4.4 現地試験

室内で実施する基礎試験については、模擬廃水を使用することもあるが、現場で流出する実廃水を試験に供することが望ましい。しかし、実廃水を実験室で保管する際には水質が徐々に変動することがあり、実際の坑廃水の水質とは異なる条件で試験を実施している状況になる場合がある。そのため、より精緻な検討のため、現地で連続試験を実施し、処理性能について評価する必要がある。

試験規模としては、ベンチスケール試験（実規模の1/100～1/500程度）、パイロットスケール試験（実規模の1/10～1/100程度）、実規模相当試験（1/10～1/1程度）などが考えられる。小規模の試験では各データの取得は容易であるが、特に温度については気温などの影響を受けやすく注意が必要である。水質面での適用性については、ある程度小規模の試験でも把握できると思われ、大規模の試験では実際の操業に近い状況で試験を行うことから、維持管理に必要なメンテナンス等の知見を得ることができると考えられる。

研究所内
カラム試験
流量：1～10 mL/min



現地プレパブ内
ボックス試験
流量：10～50 mL/min



現地
ベンチスケール(BS)試験
流量：50～200 mL/min



現地
パイロットスケール(PS)試験
流量：1～10 L/min



現地
実規模相当(FS)試験
流量：100 L/min



図14 実施した試験規模とイメージ

4.5 現状把握及び各種試験を踏まえた導入システムの検討

現状把握及び各種試験を踏まえ導入するPTについて詳細に選定する。現場の状況次第では、複数のプロセスを組み合わせる場合なども考えられる。本編では、これまでにPTの実証試験を実施した現場について、導入システム検討の一例を示す。

4.6 リスク評価

PTを導入することで坑廃水処理に関する抜本的なコストダウンを図ることができたり、将来的な自然回帰が期待できたり、またカーボンニュートラルに資する可能性もあるなど多くのメリットが考えられる。しかし、以下に代表されるようなリスクは必ずあり、PT導入時の設備設計等である程度軽減できる可能性はあるが、完全にゼロリスクにすることは難しい。つまりあらゆるリスクに対してPTが対応可能かと言えばそうではなく、100%の対応は困難なものであることは十分認識する必要がある。そのような場合には、例えばバックアップ用に既存のAT設備を一時的に活用するとか（ただしコスト面ではPT導入前より高価になる可能性がある）、利水点等管理の考えを適用するなどの対応も考えられる。

現場によって想定されるリスクは異なるため、現場毎にPT導入のリスクを洗い出し、最終的には関係者との合意形成に向けたコミュニケーションが重要であると考えられる。

表3 各リスクの原因、リスクと必要な検討の例

	原因	考えられるリスク	必要な検討
水量の急激な変動	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 局所的な集中豪雨 ✓ 大型台風 ✓ 融雪期 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 処理の滞留時間が短くなることにより反応が不十分となり、金属除去が不十分となる可能性 ✓ 沢水が増加し、大量の土砂や流木の影響による、導水設備や反応槽の破損 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 水量の日変動や降雨応答の把握 ✓ 滞留時間の設定の検討 ✓ 貯留槽設置による水量変動の調整
水質の急激な変動	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 局所的な集中豪雨 ✓ 大型台風 ✓ 融雪期 ✓ 坑内や集積場内の水位変動 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 水質悪化により反応が不十分となり、金属除去が不十分となる可能性 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 水質の日変動の把握 ✓ 滞留時間の設定の検討 ✓ 利水点管理の導入検討など
気候の急激な変動	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 局所的な集中豪雨 ✓ 冬季の寒冷化 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 水量増加、水質悪化により反応が不十分となり、金属除去が不十分となる可能性 ✓ 冬季における設備の凍結 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ PTの後段にバックアップとしての処理施設設置の検討 ✓ 利水点管理の導入検討 ✓ 凍結防止のための水温、気温、導水方法等を勘案した設備設計

5章 コストに関する検討

PT導入に関するコストの検討について、海外事例を紹介し、実際のコスト試算について事例を交えて記載しています。→本編p52～59

PT導入にあたっては、導入コスト、運転コストを試算し、導入の意思決定を行う必要があり、既存のAT施設と比較する必要がある。PT導入は既存設備の更新のタイミングで検討されることが基本となると考えられる。その際、坑廃水全量をPTで処理するのか、あるいは一部をPTで処理し、残りを既存設備の更新により対処するのか等の検討が必要となる。

本編では、ニュージーランドの旧炭鉱から流出する坑廃水についてのコスト検討の事例やPTの実規模実証試験を参考事例とした導入コスト及び運転コストについて記載した。

6章 PTの実導入

PTの実導入に向けた手順と具体的な設計・施工、立ち上げ等の留意点を記載しています。→本編p60～74

6.1 関係者とのコミュニケーション及び合意形成

PT導入にあたっては、関係者とのコミュニケーション、そして合意形成が不可欠である。坑廃水処理を含む鉱害防止事業の円滑な実施にあたっては、当該の休廃止鉱山周辺の地元住民あるいは休廃止鉱山に関与してきた関係者（関係自治体、利水者、利害関係者）から十分な理解を得ることが非常に重要である。既存の坑廃水処理にPTを導入することは、処理手法を変更することであり、どのような利点があり、またリスクとしてどのような点が挙げられ、従来手法との違いがどういった点なのかを科学的な根拠に基づき関係者に説明し理解を得る必要があり、また関係者の不安を払拭する必要がある。

6.2 設計・施工

PTの設計にあたっては、多様なデータに加え各休廃止鉱山固有の事情も考慮して進める必要がある。対象とする坑廃水の水量・水質、その変動幅、また土地の状況・高低差などを考慮し、どのようなプロセスを選定するかを検討する。また、具体的にPTでどのように、そしてどのレベルまで処理を行うかを定義づける必要がある。特定の金属のみを除去するのか、処理対象である全ての金属を除去するのか、また水量的に常時全量を処理するのかなどによって選定するプロセスの種類、そして設置する反応槽の規模などが大きく変わってくることが考えられる。

6.3 システムの立ち上げ

PT導入時の立ち上げについては、表4に示すような各プロセス固有の課題がある。

表4 各PTプロセスのシステム立ち上げ時の課題への対応の例

	想定される課題	課題への対応
鉄酸化細菌	<ul style="list-style-type: none">✓ 酸素不十分による鉄酸化細菌の不活性✓ 鉄酸化細菌不活性によるFeの析出・設備の目詰まり✓ 酸素不十分・嫌気化による鉄酸化細菌以外の微生物の増殖	<ul style="list-style-type: none">✓ 酸素の安定的な供給✓ 「種菌」としての鉄酸化細菌の添加
硫酸還元菌	<ul style="list-style-type: none">✓ 温度低下による微生物の活性低下✓ 硫酸還元菌以外の微生物が活性化する環境✓ 高温により有機物分解・有機酸濃度の上昇による微生物にとって不適な環境	<ul style="list-style-type: none">✓ 微生物活性化温度範囲の20～25°Cに設定✓ 春・秋頃の立ち上げ
人工湿地	<ul style="list-style-type: none">✓ 植生が繁茂しないことによるSS捕捉の不十分✓ 水の短絡	<ul style="list-style-type: none">✓ 水深、土壌の深さ、植生の密度、温度、日射等の十分な検討
石灰石	<ul style="list-style-type: none">✓ 石灰石の微粉と坑廃水の反応によるpHの急激な上昇✓ 析出した金属による目詰まり	<ul style="list-style-type: none">✓ 後段に沈殿槽の設置により、大気中CO₂溶解によるpH低下作用の利用※約1～2日で微粉による反応は収まる可能性

6.4 維持管理

PT導入にあたっては、ATに比べれば点検・修繕項目等は少なくなると想定されるが、各プロセスにおいて表5に示すような適切な維持管理が必要である。

表5 各PTプロセスの課題と維持管理の例

	想定される課題	課題への対応
鉄酸化細菌	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Fe析出による槽表層（水封部付近）の目詰まり ✓ Fe殿物による槽内の閉塞 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 重機による表層攪拌 ✓ 内容物の搬出・更新
硫酸還元菌	<ul style="list-style-type: none"> ✓ バイオフィルムの生成による透水性の低下 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 表層攪拌
石灰石	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 目詰まりの発生 ✓ 石灰石表層の被覆による反応性の低下 ✓ 水路閉塞による透水性の低下 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 反応槽の洗浄 ✓ バブリング等による表層被覆の除去
天然資材	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 腐葉土の固化による短絡発生、反応不十分 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 固化部分の破碎

6.5 想定される不具合と対処方法

PTは現在も多くの現場で試験運用され、多角的に知見が蓄積されているものである。これまで複数の現場で実証試験を実施し得られた知見について、特に不具合の事例と考えられ得る対処方法について記載する。

表6 各PTプロセスの不具合と対処方法の例

	想定される不具合	対処方法
鉄酸化細菌	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 鉄酸化細菌不活性化によるFeの不十分な除去 ✓ Fe殿物蓄積による目詰まりの発生 ✓ 目詰まり発生による透水性の低下、槽内水位の上昇、曝気不十分によって鉄酸化細菌の活性の低下 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 恒常的な好気環境の維持 ✓ 定期的な槽内の攪拌 ✓ 槽へ蓋や遮光ネットの設置
硫酸還元菌	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 透水性低下による槽内水位の上昇やSSの系外流出 ✓ 温度低下からの活性低下による処理性の低下 ✓ 処理水への有機物の残存 ✓ H₂Sの発生 ✓ 動物の場内侵入 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 定期的な槽内の攪拌 ✓ 反応槽の半埋設構造化 ✓ 有機物の添加量・濃度調整や適切な滞留時間での運転 ✓ 好気性人工湿地導入による有機物の処理 ✓ H₂S検知器の設置 ✓ 速やかな処分の実施、電気柵等の設置
石灰石	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 目詰まりの発生による反応性の低下 ✓ 短絡発生による処理不十分 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 定期的な洗浄や槽内の攪拌

「休廃止鉱山における自然回帰型坑廃水浄化システム（パッシブトリートメント）の導入ガイダンス」の構成

「休廃止鉱山における自然回帰型坑廃水浄化システム（パッシブトリートメント）の導入ガイダンス」は、本編及び導入・試験事例集の2部で構成されています。

本編		導入・試験事例集	
目的	PTの詳細を解説するとともに、国内の坑廃水処理への導入を推進する	目的	PTの各プロセスについて、実際の導入事例を紹介する
特徴	PTにはどのようなタイプがあり、それぞれどのような特徴をもつのかを解説する。 また、実際の導入検討にあたり手順や留意する点を解説する。	特徴	それぞれの休廃止鉱山固有の状況にあわせて各プロセスがどのように導入あるいは試験実施されたのか、事例としてタイプごとに掲載する
1章	はじめに	●微生物活用型	6事例
2章	PTの概要	●人工湿地型	7事例
3章	PT適用に向けた現状把握	●その他の型	2事例
4章	PTに向けた事前調査		
5章	コストに関する検討		
6章	PTの実導入		
7章	おわりに		
8章	引用文献		



図15 PTの国内導入事例（人工湿地型）

問い合わせ先

本ガイダンス策定に関するお問い合わせ先



経済産業省
Ministry of Economy, Trade and Industry

経済産業省 産業保安・安全グループ 鉱山・火薬類監理官付
〒100-8912 東京都千代田区霞が関1丁目3番1号
TEL：03-3501-1870

PT導入や技術等に関するお問い合わせ先



JOGMEC

独立行政法人エネルギー・金属鉱物資源機構
金属環境事業部 調査技術課
〒105-0001 東京都港区虎ノ門2丁目10番1号
虎ノ門ツインビルディング西棟 14階
TEL：03-6758-8032 メール：chosa-tech@jogmec.go.jp