



Title	坑道充てんによる休廃止鉱山の酸性坑廃水の水量削減と水質改善に関する研究 [論文内容及び審査の要旨]
Author(s)	山口, 耕平
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(工学)
Dissertation Number	甲第14892号
Issue Date	2022-03-24
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/85420
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Type	doctoral thesis
File Information	Kohei_Yamaguchi_review.pdf, 審査の要旨



学位論文審査の要旨

博士の専攻分野の名称 博士 (工学) 氏名 山口 耕平

審査担当者 主 査 教 授 五十嵐 敏文
副 査 教 授 廣吉 直樹
副 査 客員教授 富山 眞吾

学位論文題名

坑道充てんによる休廃止鉱山の酸性坑廃水の水量削減と水質改善に関する研究
(Study on reduction of acid mine drainage flow rate and remediation of water quality in abandoned mines by backfilling excavated underground space)

本論文では、坑道を含む地下に掘削されて残されている空間を充てんすることによって、休廃止鉱山から流出する酸性の坑廃水を減少させ、かつ、水質を改善する対策を評価する手法を構築した。

第1章では、休廃止鉱山の酸性の坑廃水対策を研究することの必要性を示した。鉱山の開発が終了した後、酸性化し重金属を多く含む坑廃水が流出し、周囲の環境を汚染し続ける可能性がある休廃止鉱山が存在し、坑廃水の処理などの対策を継続する必要がある。処理を実施しない場合は、周囲の河川流域の住民の健康被害を引き起こしたり、農作物への被害が発生したりする可能性がある。酸性の坑廃水への対策として、掘削された地下空間を充てんすることは、坑廃水の量を減少させる点と、地下水流動を掘削前の状況に近づける点で、有効な対策となり得る。坑廃水量の減少に合わせて、地下水位が掘削前の状況に戻るとともに、坑廃水の水質がどのように改善されるかを同時に解析している研究例はほとんど存在していない。

第2章では、坑道の充てんによる鉱山からの坑廃水量の低減量について、宮崎県の休廃止鉱山を対象とし、地下水流動解析によって推測できる手法を示した。まず、現在の地下水流動の状況を地下水流動解析によって再現した。同モデルを使用し、坑道充てんに伴う坑廃水の低減量を解析結果から求めた。同時に、同休廃止鉱山の坑廃水が酸性化するメカニズムについて、地化学モデルを作成し、坑廃水の酸性化の地化学反応を明らかにした。本休廃止鉱山では地表から降水が涵養し、地下に水平に分布している坑道に到達し、同坑道を通過して、坑口へと水は流れている。地表から地下の水平な坑道までの鉛直方向の水みちにおいては、不飽和帯中に分布する黄鉄鉱などが酸化され、地下水のpHは3程度に低下した。水平な坑道の区間は、岩石中の硫化鉄との反応により溶存酸素は消費され、地下水で飽和しているため大気との接触がなく酸素の供給は無く、地化学解析によるpHは5.5でほぼ一定となった。坑廃水が流出する坑口に近づく区間は、不飽和状態であり、地化学解析のpHは3であった。降水が地下へ浸透している間に酸性化が進み、地下の水平な坑道へ到達した時点ではやや中性に近づいている。地化学的な観点からは、大気からの酸素の供給遮断とシデライトの共存が実現されれば、坑廃水の酸性化は緩和される可能性があることが分かった。

第3章では、東北地方の休廃止鉱山を対象とし、地下水流動解析にて、坑廃水量及び地下水位を再現したモデルを作成した。対象とした地域では冬の降雪にともない、融雪水により春に坑廃水量が増加する。一方、夏の雨量は年によって異なる。融雪水の影響を避けた夏の時期において、降雨量の多い年と降雨量の少ない年を選択して、坑廃水量を再現したモデルを作成した。新第三紀層

の透水係数は 1.0×10^{-9} m/s から 9.4×10^{-8} m/s の範囲で実測値に幅がある。この幅の範囲で変化させて坑廃水量を計算し、実測の坑廃水量と比較した。坑廃水量は、透水係数が高い場合に最も大きく、透水係数が低い場合にもっとも小さかった。新第三紀層の透水係数が 9.2×10^{-9} m/s の場合、坑廃水量は、降雨量が多い期間と少ない期間の両方で、それぞれ実測値ともっとも一致した。この坑廃水量を再現したモデルを使用し、坑道の充てんによって削減される坑廃水の量を解析によって求めた。その結果、坑道の充てんは、坑廃水量の低減とともに、地下水位の上昇をもたらすことが分かった。坑道を埋め戻した後、降雨量が多い時期の坑廃水の量は、埋め戻し前の坑廃水の量から約 35 % 減少した。降雨量が少ない時期では、坑廃水の量は埋め戻し前の流量から約 5 % 減少した。降雨の量が多い時期、少ない時期にかかわらず、埋め戻し後に坑廃水の量が減少した。特に、降雨量が多い時期には地下の掘削された空間の埋め戻しがより効果的であった。また、地下水位は、採掘された空間が埋め戻された後に上昇した。地下水が飽和している範囲で溶存酸素が消費された場合、新たな酸素の供給は少なく、黄鉄鉱の酸化反応は限定される。黄鉄鉱の酸化量を推定するには、地化学反応のモデル化のような地球化学的検討が必要となる。

第 4 章では、第 3 章と同じ東北地方の休廃止鉱山を対象とし、坑道の充てんによる地下水位の上昇によって、鉱山廃水の酸性化が緩和される効果を、地化学解析によって定量的に評価した。現状を再現する地化学解析の結果から、地表面から浸透した雨水がより深い層に移動するにつれて酸性になることが示された。地表からの雨水が速く移動してくるため、立坑内部の pH は中性に保たれた。坑道の坑口での計算結果として得られた pH は約 4 であり、これは坑道内の坑廃水として実測された 3.3~3.9 の pH とほぼ一致した。坑道から排出される坑廃水の鉄イオン濃度は、約 110 mg/L と計算された。実測された鉄イオン濃度は 22 mg/L から 610 mg/L であり、計算の結果得られた鉄イオン濃度と一致した。坑道の坑口での硫酸イオン濃度は約 290~490 mg/L と計算され、220~2900 mg/L の実測値とほぼ一致した。計算結果として得られた硫酸イオン濃度は、鉄イオン濃度が高い領域で高い値を示し、黄鉄鉱の溶解とともに鉄イオン濃度と硫酸イオン濃度の両方が増加していることが示された。坑道を充てん後の地化学解析によると、埋め戻し前の坑廃水の pH 3~4 は pH 4~5 に上昇した。地下水の pH が中性に近づくと、水酸化鉄(III)の沈殿が発生し、鉄イオン濃度も低下した。さらに、坑道を埋め戻す材料に方解石を添加すると、pH 5~6 となり坑廃水の水質がさらに改善された。大気からの酸素の供給が遮断されれば、方鉛鉱の溶解は起こらず、鉛の濃度もあわせて低下すると予想された。このように、坑道を埋め戻した後、鉄イオンの負荷は 7 分の 1 未満に減少した。坑道を埋め戻す効果により、坑廃水の流量が減少するだけでなく、坑廃水の水質も改善された。

第 5 章では、本論文で得られた充てん対策の効果を評価する手法の展開について述べた。充てんによる坑廃水量の削減と、坑廃水の水質の改善の効果は、各鉱山の地下の空洞の構造や坑廃水の量によって異なる。それぞれの鉱山の特性を地下水流動解析及び地化学解析でモデル化することによって、対策の効果を定量的に把握でき、効果的な対策を選択可能となる。

以上、これを要するに、著者は休廃止鉱山からの坑廃水の流量の低減と水質の改善の両方を一挙に解決するために、旧坑道の埋め戻しを提案し、地下水流動解析と地球化学解析とを併用し、その有効性を検証した。これは環境資源工学に対して貢献するところ大なるものがある。よって著者は、北海道大学博士(工学)の学位を授与される資格あるものと認める。