

(続紙 1)

京都大学	博士 (地球環境学)	氏名	Angelica Mariko Naka Kishimoto
論文題目	Hydraulic Performance and Chemical Compatibility of Mineral Barriers to Mitigate Natural Contamination from Excavated Rocks (自然由来の有害物質を含む掘削岩石の対策における鉱物バリア材の遮水性能と緩衝能)		
(論文内容の要旨)			
<p>建設工事や鉱山開発等で生じる掘削岩石には自然由来で重金属類が含有している場合があり、不適切な処理によって土壌・地下水汚染を引き起こすことが懸念される。また、掘削岩石に硫化鉱物が含まれていると、それらが大気や雨水に曝露され酸化することにより酸性廃水の発生や重金属の溶出増加が誘発され、周辺環境を悪化させるおそれが潜在的にある。このような自然由来の重金属による地盤環境問題は、日本のように地質学的に活性に富む国や、鉱業が盛んに行われていながら経済的理由により廃棄物処分技術が十分に活用されていない国等で課題となっている。したがって適正かつ合理的に掘削岩石を利用・保管する技術や工法の開発が求められているが、管理型の廃棄物最終処分場並みの遮水工を設けることは合理的とは言えない。適切な対応策の一つとして、掘削岩石を盛土として利用したり土捨て場に堆積させた下部に、粘土などの鉱物によるバリア層を設けて、外部への重金属と酸性水の漏出を防止する方法が考えられる。鉱物バリアには遮水性能や吸着性能が期待されることから、ベントナイト、ゼオライト、フェリハイドライトなどの適用が考えられ、特にベントナイトを2枚のジオテキスタイルに挟み込んだジオシンセティッククレイライナーは現場の施工性にも優れており有効と考えられるものの、自然由来の重金属や酸性水に対するこれら鉱物バリアの性能に関する科学的な知見は限られている。本論文は、掘削岩石に含まれる自然由来の重金属類や酸性水を対象とした鉱物バリアの遮へい性能について実験的に検討を行ったものである。論文は7章からなっており、以下に各章の内容を説明する。</p> <p>第1章では、建設工事や鉱山活動による掘削土砂・岩石の発生と処理・有効利用に関する問題を概説するとともに、自然由来の重金属を含みうる岩石を盛土として利用したり土捨て場に堆積させる際に、周辺の土壌・地下水への環境リスクを減らす対応策の必要性を示している。特にわが国では関連法令の整備に伴い掘削土砂や岩石に含まれる重金属類への厳しい対応が求められるようになっており、鉱物バリアに代表される合理的な対応策の確立が急務であることを述べている。</p> <p>第2章では関連する先行研究をとりまとめている。岩石に含まれる自然由来の重金属や酸性水の成因と特徴を整理し、体系的な把握が重要であることを示している。鉱物バリアに関する先行研究に関しては、特にジオシンセティッククレイライナーの特徴と性能を詳細にとりまとめ、ジオシンセティッククレイ</p>			

ライナーの遮水性能を担っているベントナイトが化学的な影響に敏感で遮水性能の低下をもたらしうることから、浸出水の化学特性を考慮した検討が必要なことを述べ、本研究の意義を裏付けている。

第3章では、鉱山廃水の水質に関する既往のデータを整理することにより、掘削岩石からの重金属溶出や酸性廃水の発生の特徴を示している。既往のデータは800種類以上にのぼるもので、公表されている水素イオン濃度指数や電気伝導度、重金属濃度のデータの整理ならびに科学的な考察に基づき、酸性廃水の化学特性を特徴づけ、第4章以下で検討する模擬酸性廃水の水質の設定根拠としている。

第4章では、ジオシンセティッククレイライナー、ゼオライト、フェリハイドライトを対象に透水特性に関する実験検討を行い、遮水性能の観点から酸性廃水の封じ込めに適用しうることを示している。特にジオシンセティッククレイライナーについては、第3章の成果に基づいて選定した代表的な10種類の浸出水の模擬溶液を用いて透水試験を行い、純水の場合と比べて最大でも1オーダーの透水係数の増加にとどまることを示した。これらの透水試験は、ベントナイトと透水溶液の化学平衡を達成するという試験終了基準を満たすため数ヶ月継続して実施したもので、試験時間の経過に伴う透水係数の増加はみられず、遮水性の観点からジオシンセティッククレイライナーの適用性が示された。また、膨潤試験結果によって遮水性能を予測しうることを明らかにした。

第5章では、ベントナイト等への重金属類の吸着をバッチ吸着試験により検討している。掘削岩石には複数の重金属が含まれることが多いため、単一の重金属溶液を用いたバッチ吸着試験に加えて、二種類の重金属を含む溶液や模擬浸出水を用いた実験を体系的に実施し、重金属の封じ込めに及ぼす影響の広範な考察を試みている。その結果、浸出水中の金属濃度の低減には吸着現象に加えて沈殿現象の寄与が重要なこと、特に自然由来の重金属類として多く存在するヒ素の溶出防止には鉄分の存在が寄与していることを示した。また、透水試験における排出水の重金属濃度の定量によってもヒ素の封じ込め効果を明らかにし、特に鉱物バリアの低透水性が間隙中への鉄分等の沈殿物の析出を促進させることによる効果について考察した。これらの結果により、鉱物バリア、特にジオシンセティッククレイライナーの適用性が示された。

第6章では、第3章から第5章の結果を踏まえ、想定事例に基づいて掘削岩石の盛土や堆積場の下部に鉱物バリアを設ける際の、重金属類の遮へい性能を定量的に示し、具体的設計可能性を明らかにしている。

第7章では、第2章から第6章の研究を総括し本論文で得られた成果をまとめるとともに、今後の課題を示している。

(論文審査の結果の要旨)

建設工事や鉱山開発等で生じる掘削岩石には自然由来で重金属類が含有していたり、硫化鉱物の含有によって大気・雨水暴露されて酸性廃水を発生するものがあり、合理的な対応は地球上の様々な国・地域における重要な環境課題となっている。本論文は、掘削岩石に含まれる自然由来の重金属類や酸性水を対象とした鉱物バリアの遮へい性能について実験的に検討を行い、盛土や土捨て場における封じ込めへの適用性を議論したものである。得られた主な成果は以下の通りである。

第一に、掘削岩石からの浸出水に対する鉱物バリアの遮水性能を体系的に議論し、遮水性の観点から鉱物バリアの適用性を示した。掘削岩石や鉱山活動による廃水・浸出水の既往のデータから浸出水の化学特性を分類し、類型化に基づいた代表的な浸出水 10 種類について透水試験を実施することにより、鉱物バリアの遮水性能に及ぼす影響を網羅的に考察した。特に、2 枚のジオテキスタイルにベントナイトを挟み込んだジオシンセティッククレイライナーは、遮水性能をベントナイトの膨潤性に依存していることから水素イオン濃度指数や電解質濃度によっては膨潤阻害による遮水性能の低下が懸念されるが、化学平衡を満たすべく実施した長期の透水試験の結果、浸出水の種類によっては遮水性能への影響があるものの限定されており、封じ込めに適用するに十分低い透水係数を有することが示された。

第二に、鉱物バリアへの重金属類の吸着特性に関して、単一ならびに二種類の重金属類を含む溶液や模擬浸出水を用いた体系的な実験を行い、重金属類の封じ込めに及ぼす影響を整理した。特に複数の重金属類の相互影響について、自然由来の重金属類として多く存在するヒ素の封じ込めに鉄分等の他の金属の存在が寄与していることをバッチ吸着試験により示すとともに、透水試験における排出水の重金属類の定量により、ジオシンセティッククレイライナーなどの鉱物バリアが低透水性であることから鉄分等の沈殿物が物理的に捕捉されやすく、ヒ素の封じ込めの効果が高められることを示した。これらの成果は、鉱物バリアの緩衝特性を把握する上で重要な知見であり、地盤環境工学の成果として学術的意義が高い。

第三に、想定される掘削岩石の特性や封じ込め施設の条件下で鉱物バリアを用いる場合の遮へい性能を定量的に示すことにより、岩石ならびに浸出水の特性を踏まえた合理的な対応が可能であることを具体的に示した。この成果は、環境安全性の観点から盛土や土捨て場などにおける掘削岩石の封じ込め構造を設計する上でも重要な事項であり、社会的意義も高い。

以上の成果により、本論文は地球環境学の発展に大きく寄与した。よって本論文は博士（地球環境学）の学位論文として価値あるものと認める。また、平成 26 年 1 月 29 日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認められた。

論文内容の要旨及び審査の結果の要旨は、本学学術情報リポジトリに掲載し、公表とする。特許申請、雑誌掲載等の関係により、学位授与後即日公表することに支障がある場合は、以下に公表可能とする日付を記入すること。

要旨公開可能日： 年 月 日以降