

高レベル放射性廃棄物処分場の埋戻しに関する研究

学位論文内容の要旨

現在、わが国の原子力発電は総発電電力量の3割以上を占めている。原子力発電によって発生する使用済み燃料は、再処理することによって燃え残ったウランとプルトニウムを取り出し、残った抽出廃液つまり高レベル放射性廃棄物はガラス固化体にして貯蔵している。高レベル放射性廃棄物は長期間放射能を出すので生物圏に対して悪影響を及ぼさないように細心の注意を払って隔離する必要がある。この方法としては、ガラス固化体にした高レベル放射性廃棄物を耐腐食性に優れた厚肉の金属製容器（オーバーパック）に封じ込め、これを地下数百mの地下深部に埋設する地層処分法が技術の確実性から最良であるというのが国際的に一致した考え方であり、わが国でも国家プロジェクトとしてこの方法の研究開発を進めているところである。この処分方法においては高レベル放射性廃棄物を地層内に定置し、周囲に人工バリアを設置した後、坑道や立坑が核種の卓越移行経路にならないように埋戻し（シーリング）されるが、この埋戻しのシステムについては各国とも概念を示すに留まっている。

本論文は、性能評価と実証試験に基づいてシーリングシステムの仕様と施工法を提示することを目的に実施した研究を5章にわたって述べたものである。

第1章では、研究の目的と意義について述べている。

第2章では、主要な埋戻し材の候補であるベントナイト混合土について、配合率と乾燥密度の異なる供試体を用意し、核種移行遅延性能に大きな影響を及ぼす透水係数と膨潤量・膨潤圧を測定することにより、これらの値と配合率ならびに乾燥密度の関係を明らかにしている。そして十分な低透水性と高膨潤量・膨潤圧を得るには、乾燥密度を 1.6 t/m^3 以上、ベントナイトの配合率を15%以上にする必要があることを見いだしている。

また、ベントナイトがコンクリート覆工から溶出する Ca^{2+} イオンによりCa化する現象について、Ca化されたベントナイトの室内試験を基に、Ca化しても低透水性や自己シール性能の低下は少ないという予測を導いている。

第3章では、核種移行遅延性能を評価する方法について述べている。埋戻しの核種移行遅延性能は、埋設された高レベル放射性廃棄物から核種が漏洩し始めてから性能評価領域の外側に到達する時間が大きいほど優れている。そこで、性能評価領域の外側領域に到達する核種の濃度がピークになる時間を核種移行遅延性能指標と名付け、これを性能評価の尺度に使うことを提案している。埋戻し部と乱されていない岩盤の核種移行遅延性能に関する優劣は、それぞれの核種移行遅延性能指標の比をみればよい。この指標は極めて煩雑な計算を伴う核種の移行解析（厳密評価法と呼ぶ）によって評価されるが、坑道のように地下水の移行ルートを特定できる領域を比較の対象とする場合、この

比は見掛けの透水係数の比とほぼ一致することを見い出した。これは性能評価が見掛けの透水係数を評価することで可能なことを意味する。そして概略性能評価法と名づけたこの方法の正確度と適用性の限界を種々の条件に対して明かにしている。

また、厳密評価法と概略性能評価法の2つの方法によって、1個のプラグを設置した立坑と立坑掘削前のいわゆる天然バリアの性能を比較し、厳密評価法では核種移行遅延性能指標の比が1になること、この値に概略法で評価した見かけの透水係数の比がオーダーレベルで一致することを明らかにしている。

第4章では、埋戻し部が満たすべき核種移行遅延性能について次のような規準すなわち、「シーリングを施した坑道とこれを掘削する前のいわゆる天然バリアについて核種移行遅延性能指標を求め、両者の比が1以上であること」を提案している。この規準を満たせばシーリング部は核種の卓越移行経路とならず、性能評価領域における人工バリア以外の部分の核種移行遅延性能は天然バリアの性能と同等かそれ以上になるので合理的といえる。

核種の卓越移行経路となる坑道周辺岩盤の緩み域の透水性を改善する方法として、グラウティングによる方法とプラグを設置設置する方法がある。いずれの方法によっても埋戻し部は必要な核種移行遅延性能を持つことを概略評価法によって確認するとともに、施工技術の信頼性の観点から、プラグ方式の方が優れているという判断を下している。そして、プラグを設置するするシーリングシステムについて、プラグ数やプラグ周囲の緩み域に打設するグラウトの性能などが核種移行遅延性能に及ぼす影響について厳密評価法を用いて解析し、得られた結果を基に、埋戻しの最適なシステムと要求される核種移行遅延性能を満たすための仕様を以下のように提示している。すなわち、性能評価領域内の坑道は、乾燥密度 1.8t/m^3 でベントナイト配合率が15%（砂・レキ85%）のベントナイト混合土で埋戻し、領域の外部に通じる坑道にはさらに、乾燥密度 1.8t/m^3 でベントナイト配合率が70%（砂30%）のベントナイト混合土を用いたプラグを1個設置する。また、プラグ周辺の岩盤緩み域はベントナイトグラウトによって透水性を1オーダー改善する。

第5章では、4章で求めた最適なシーリングシステムを設計・施工するための技術開発について述べている。プラグ方式によるシーリングシステムが所期の核種移行遅延性能を発揮するには、高密度のベントナイト混合土を用いプラグを構築した上で両端の変位を拘束し、さらに、プラグ周囲に形成される緩み領域に対してグラウティングを施す必要がある。また、高密度のベントナイト混合土で坑道を埋戻さなければならない。これらの埋戻しに関する過酷な仕様を満たすことのできる施工技術を開発し、その有用性を地下の岩盤内坑道において原位置試験と実規模現場実証試験を実施することによって検証している。まず、閃緑花崗岩中の坑道壁面に現れた亀裂に対してベントナイトグラウトを実施し、岩盤の透水係数が原地盤の $10^{-6}\sim 10^{-7}\text{m/sec}$ から $10^{-8}\sim 10^{-9}\text{m/sec}$ に改善されたことを確認した。つぎに、約 10m^2 の断面積を持った花崗岩中の坑道において、ベントナイトブロックを積み上げることで長さ3mのプラグを構築した。プラグの片側に 0.9MPa の水圧を6ヶ月間負荷しているが、感知される量の水漏れが観察されず、高い遮水性能があることを確認した。

第6章は結論で、得られた主な結果を纏め、残された今後の課題を展望している。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 石 島 洋 二

副 査 教 授 大 橋 弘 士

副 査 教 授 三 田 地 利 之

副 査 教 授 金 子 勝 比 古

学 位 論 文 題 名

高レベル放射性廃棄物処分場の埋戻しに関する研究

原子力発電によって発生する高レベル放射性廃棄物は、長期間放射能を出すので生物圏に対して悪影響を及ぼさないように、ガラス固化体にし耐腐食性に優れた金属製容器に封じ込め、これを地下数百mの地下深部に埋設する地層処分法が最良であるというのが国際的に一致した考え方である。わが国でも国家プロジェクトとして本方法の研究開発を進めているところである。

この処分方法においては高レベル放射性廃棄物を地層内に定置した後、ここと地表を繋ぐ坑道が核種の卓越移行経路にならないように埋戻しされる。本研究は、現在、概念を示すに留まっているこの埋戻しについて、その仕様と施工法を性能評価と実証試験に基づいて提示することを目的に実施したものである。

以下、本論文各章の成果を要約する。

第1章は序論であり、研究の目的と意義を示すとともに、埋戻しに関する既往の研究を展望し、埋戻しの仕様と方法がまだ概念の段階に留まっていることを指摘している。

第2章では、主要な埋戻し材の候補であるベントナイト混合土について、透水係数および膨潤量・膨潤圧といった核種遅延性能に関係する特性値と配合率ならびに乾燥密度の関係を室内試験により明らかにし、十分な低透水性と高膨潤性を得るには、乾燥密度を 1.6t/m^3 以上、ベントナイトの配合率を15%以上にする必要があることを見いだしている。

また、Ca化したベントナイトの室内試験を基に、コンクリート覆工から溶出する Ca^{2+} イオンによりベントナイトがCa化しても、低透水性や自己シール性能は僅かしか低下しないという予測を導いている。

第3章では、核種移行遅延性能を評価する方法について述べている。まず、埋設された高レベル放射性廃棄物から核種が漏洩し始めてから性能評価領域の外側に到達する核種の濃度がある値（最大値など）になるまでの時間を核種移行遅延性能の指標として使うことを提案している。つぎに、核種の移行解析（厳密評価法と呼ぶ）によって評価されるこの指標が、移流が卓越し坑道のような細長い領域を解析の対象とす

る場合、見掛けの透水係数の逆数にほぼ比例することを見い出している。そして、計算が極めて容易な見掛けの透水係数によって指標を評価する方法（概略評価法と呼ぶ）の正確度と適用性の限界を種々の条件に対して示している。

また、1個のプラグを設置した立坑と掘削前のいわゆる天然バリア状態の立坑について、両者の核種移行遅延性能指標の比を厳密評価法と概略評価法によって評価し、いずれもほぼ1になること、したがってプラグを主要な構成要素とする埋戻しは満足すべき核種移行遅延性能を持っていることを明らかにしている。また、上記の比は埋戻しの核種移行遅延性能の合理的な規準となることを提案している。

第4章では、周囲岩盤を含めた坑道を埋戻す2つの代表的な方法、グラウティング法とプラグ設置法、の核種移行遅延性能指標がほぼ同じ値になるが、施工技術の信頼性の観点から、後者が優れているという判断を下している。そして厳密評価法によって、プラグ数やプラグ周囲の緩み域に打設するグラウトの性能などが核種移行遅延性能に及ぼす影響を調べている。この結果を基に要求される核種移行遅延性能を満たすための最適な埋戻しの仕様を以下のように提示している。すなわち、性能評価領域内の坑道は、乾燥密度 1.8t/m^3 でベントナイト配合率が15%（砂・レキ85%）のベントナイト混合土で埋戻し、領域の外部に通じる坑道にはさらに、乾燥密度 1.6t/m^3 以上でベントナイト配合率が70%（砂30%）のベントナイト混合土を用いたプラグを1個設置する。また、プラグ周囲の岩盤緩み域はベントナイトグラウトによって透水性を1オーダー改善する。

第5章では、4章で求めた最適な埋戻しの仕様を満たす設計・施工をするための技術開発について述べている。プラグが所期の核種移行遅延性能を発揮するには、高密度のベントナイト混合土を用いてプラグを構築した上で両端の変位を拘束し、さらにプラグ周囲の岩盤内に形成される緩み領域に対してグラウティングを施す必要がある。これらの過酷な仕様を満たす施工技術を開発し、坑道において原位置試験と実規模実証試験を実施することによってその有用性を検証している。

まず、閃緑花崗岩中の坑道壁面に現れた亀裂に対してベントナイトグラウトを実施し、岩盤の透水係数が原地盤の $10^{-6}\sim 10^{-7}\text{m/sec}$ から $10^{-8}\sim 10^{-9}\text{m/sec}$ に改善されたことを確認している。つぎに、断面積が約 10m^2 の花崗岩内坑道中に構築した長さ3mのベントナイトブロック集積構造プラグの片側に 0.8MPa の水圧を6ヶ月の間連続負荷し、感知される量の水漏れがなく、プラグが高い遮水性能を有していることを確認している。

第6章は結論であり、本研究で得られた成果をまとめている。

これを要するに、著者は、高レベル放射性廃棄物地層処分場の埋戻しに関して、要求される品質を満たす設計・施工が可能であることを実規模原位置試験で実証しており、地層処分技術ならびに岩盤工学の発展に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（工学）の学位を授与される資格あるものと認める。