

氏名	宗像 雅広
博士の専攻分野の名称	博士（工学）
学位記号番号	博理工乙第 220 号
学位授与年月日	平成 26 年 3 月 24 日
学位授与の条件	学位規則第 4 条第 2 項該当
学位論文題目	放射性廃棄物処分に係る安全評価解析手法の実証的研究
論文審査委員	委員長 教授 渡邊 邦夫 委員 教授 川本 健 委員 准教授 長田 昌彦 委員 准教授 山辺 正

## 論文の内容の要旨

わが国の進める核燃料サイクル政策においては、原子力発電に伴って発生する放射性廃棄物の地中への安全な処分が想定されている。この放射性廃棄物の処分に係わる安全評価では、廃棄物埋設施設の人工バリアや周辺の地質環境の天然バリア等の廃棄物埋設施設全体について、放射性物質の閉じ込め機能並びに移行抑制機能等を適切に評価することが必須である。しかしながら、安全評価の対象期間は数千年から数 10 万年程度と非常に長く、この長期性に起因する不確実性が避けられないことから、長期性と不確実性を考慮した安全評価手法の確立が課題となっている。浅地層の処分の安全評価における課題の一つは、実地下環境での放射性核種の移行に関する実験データがほとんど無い点である。その理由は、放射性物質を用いた核種移行に関する室内実験等によりシミュレーション手法が提案されているものの、野外における実証試験による検証が不十分であることによる。地層処分の安全評価における課題の 1 つは、広域的な地下水流動を把握する解析手法の確立である。その理由は、地層処分の安全評価においては処分場内での地下水流動を正確に評価することが核種移行評価上重要であり、境界条件となる広域的な地下水流動の評価手法の確立が必要となるためである。また、地層処分の安全評価においては、長期的な地質環境の変化が想定されるため、隆起侵食現象等の天然現象の地下水流動への影響を評価する解析手法の開発も必要である。

本研究では、浅地層処分における安全評価解析手法の実証的研究として、野外試験等において地下水流動・核種移行試験を行い、地層の持つ放射性核種の閉じ込め機能並びに移行抑制機能を実証するとともに、地下水流動・核種移行評価モデルによって核種移行特性を定量的に明らかにした。また、地層処分における安全評価解析手法の実証的研究として、既存情報を集約して広域的な地下水流動モデルの構築及び解析を行うとともに、原位置試験により重要な地質構造の把握や水理特性に関するデータを取得して広域地下水流動の検証を行った。さらに、広域地下水流動解析手法に隆起侵食現象の影響評価手法を加え、将来的な地下水流動への影響を評価することを可能とした。

まず、浅地層処分における安全評価解析手法の実証的研究では、中国輻射防護研究院との 3 年間の共同研究においてアルファ核種を用いた野外核種移行実験を実施した。野外試験場は、中国山西省太原市近傍の海拔約 900m の黄土高原の中心部に位置し、年平均気温は約 10℃、平均降水量は 200 ～ 500mm 程度とやや乾燥した気候にある。現地は地下約 270m まで黄土が厚く堆積しており、地下水面は地表面下 30m に位置する。

黄土はシルトあるいはローム質で、陽イオン交換容量が比較的大きいなどの特徴がある。試験は地下の帯水層に試験ピットを造成して行われた。帯水層試験は、地下水の上流側に放射性核種を注入し、下流側に設けた複数の採取孔から地下水を採取して分析した。約3年後の試験終了時にはピット内の土壌を掘り起こし、核種の分布状況を調べた。3年経過後の放射性核種の分布では、Sr-90では分散による広がりを示しつつ、濃度ピーク位置が数mm下流方向に移行したが、Np-237とPu-238では土壌の吸着による大きな遅延効果により核種注入位置にとどまった。この実験に対し、MIG2DFコードによる地下水流動・核種移行解析を行った。地下水流動解析では地下水の季節的変動に伴う境界条件、実験装置レイアウトを適切に考慮し、核種移行解析では黄土に対する分配係数、拡散係数には取得されたデータの対数平均値を採用することとした。3核種に対する解析結果は、実験結果と概ね一致しており、地下水流動の評価と核種の吸着を伴う移流分散方程式による解析モデルが、天然の地層中での放射性核種の移行特性を合理的に説明できることを明らかにした。

次に、地層処分における安全評価解析手法の実証的研究として、地下水の流動状況を把握するためのボーリング調査と広域地下水流動モデルの構築および塩分を含む地下水の影響を考慮した広域地下水流動解析を行った。解析対象地域は日本原子力研究開発機構幌延深地層研究所を中心とした東西約40km、南北約60kmの領域であり、深度4,800mまでをモデル化した。モデル化に際しては、既存の広域地下水流動解析モデルでは十分に考慮されていなかった詳細な地形面モデルを採用するとともに、ボーリング調査で得られた透水係数の深度依存特性を考慮した。検証のための調査ボーリングは、解析で予測された涵養域および流出域において深度710m（涵養域）を1孔、深度160mを2孔（流出域）実施した。涵養域での調査結果からは、稚内層に対する透水係数の深度依存特性が明らかになったとともに、降水の地下への涵養により標高-450m付近まで古海水の洗い出しが進行していることが示唆された。解析は、対象領域が海成層であることから、初期条件として海水で飽和し、その後降雨による涵養が進んだとする洗い出し解析を行った。初期状態から10万年までの解析結果とこれら調査孔と既存情報での全水頭圧および塩分濃度を比較したところ、全水頭圧は標高-500m以浅では1万年以降淡水化してほとんど変化せず、浅部で観測された全水頭圧と良好な一致を示した。塩分濃度は観測データが大きくばらついているため解析結果との単純な比較が困難であるものの、5～10万年程度経過後の塩分濃度が傾向を再現できた。これら結果により、大まかではあるが対象地域の過去から現在にいたるまでの広域的な流動状況を推測できたとともに、涵養域から流出域にいたる広域流動範囲を特定することができた。

さらに、地層処分の安全評価解析手法における将来の地下水流動の予測モデルの開発として、気候変化と隆起侵食現象による将来的な地下水流動への影響モデルを検討した。年間約2mmの隆起速度の地域である房総半島地域を対象に、気候変動に伴う涵養量変化と隆起・侵食による地形変化の流動への影響を検討した。気候変化について過去の気候変動が繰り返され、降雨量も変化すると仮定し、河川による地形面の侵食量を地形変化モデルによってシミュレーションした。その後、時間的に変化する地形面情報と降雨量を解析コードに入力し、将来的な地下水流動の変化を予測した。その結果、12.5万年の評価期間内においては隆起侵食現象の地下水流動への影響は概ね小さいことが示唆された。これにより、上記の広域地下水流動の解析手法とあわせて、処分場での地下水流動解析・核種移行解析を正確に実施するための広域地下水流動の解析手法を提示することができた。

最後に、放射性廃棄物等の輸送に係わる安全評価解析手法として、実測データを収集して放射性物質の輸送時における輸送容器表面汚染からの作業員に対する安全解析を実施し、輸送における安全性を明らかにした。

## 論文の審査結果の要旨

わが国では、低レベル放射性廃棄物は浅地層中に、高レベル放射性廃棄物は深地層中への処分（以下地層処分と記す）が想定されている。これらの放射性廃棄物の処分では適切な安全評価が不可欠である。しかしながら、安全評価の対象期間は数千年から数10万年程度と非常に長く、この長期性に起因する不確実性が避けられないことから、長期性と不確実性を考慮した安全評価手法の確立が課題となっている。さらに、浅地層の処分の安全評価における課題の一つは、実地下環境での放射性核種の移行に関する実験データがほとんど無い点である。一方、地層処分では、広域的な地下水流動を把握する解析手法の確立が必要である。その理由は、地層処分の安全評価においては処分場内での地下水流動を正確に評価することが核種移行評価上重要であり、境界条件となる広域的な地下水流動の評価手法の確立が必要となるためである。さらに、地層処分の安全評価においては、長期的な地質環境の変化が想定されるため、隆起侵食現象等の天然現象の地下水流動への影響を評価する解析手法の開発も必要である。

本研究は、それらの困難な安全性の評価の問題に取り組み、従来に無い新しい知見を得、それを基に新しい評価技術の開発を行なったものである。本論文では、得られた研究成果を6章に分けて論述している。

第1章は、本論文の導入部であり、現在のわが国の放射性廃棄物処分の考えと安全評価上の問題について論述している。また本論文の構成について整理している。

第2章では、浅地層処分における安全評価解析手法の実証的研究について論述している。この研究では、放射性核種を用いて野外試験を行うことが難しい。本研究では中国輻射防護研究院との3年間の共同研究においてアルファ核種を用いた野外核種移行実験を実施した。野外試験場は、中国山西省太原市近傍の海拔約900mの黄土高原の中心部に位置している。現地は地下約270mまで黄土が厚く堆積しており、地下水面は地表面下30mに位置している。帯水層試験は、地下水の上流側に3種の放射性核種を注入し、下流側に設けた複数の採取孔から地下水を採取して分析した。さらに、実験終了後、土壌サンプルを採取し、核種濃度を分析した。この実験に対し、地下水流動・核種移行解析を行った。3核種に対する解析結果は、実験結果と概ね一致しており、地下水流動の評価と核種の吸着を伴う移流分散方程式による解析モデルが、天然の地層中での放射性核種の移行特性を合理的に説明できることを明らかにした。これらは、放射性核種を用いた現場実験でのみ得られる実証的成果である。

第3章では、地層処分の安全性評価技術開発を目的として、北海道幌延地区の深地層研究所周辺を対象とした研究について取りまとめている。この研究では、①広域の地下水解析の妥当性をどのように検証するか、②現状の地下の塩分分布や地下水流動の特徴を過去の地盤変動史を考慮して再現できるか、という極めて困難な問題に取り組んだ。まず、解析結果の検証のため、700 mボーリングをなど3本の調査孔を新たに掘削した。それらにより得られた地下の水圧分布、塩分濃度分布などを新たに開発したソフトによる広域地下水解析の結果と比較し、概ね妥当との新知見を得た。なお、解析では、要素数1千万以上とした。さらに、本研究では、地下の塩分濃度分布が、過去数万年の地盤変動を伴う地下水流動解析で説明できるか研究した。その結果、ほぼ現状の塩分濃度分布が説明できる事を明らかにした。

第4章では、幌延の研究を踏まえて更に発展した研究について論述している。前述のように、幌延地域でも地盤変動を考慮して概略的には超長期の地下水解析ができることが明らかとなったが、本地域では未来変動の予測が良くわかっていない。そのため、房総半島を対象にして、過去の地下水流動を解析し、さらに、未来予測を行った。未来予測では、気候変化と隆起侵食現象による将来的な地下水流動への影響モデルを検討した。なお、房総半島地域年間約2mmの隆起速度の地域である事が報告されている。気候変化については、過去の気候変動が繰り返され、降雨量も変化すると仮定し、河川による地形面の侵食量を地形変化モデルに

よってシミュレーションした。その後、時間的に変化する地形面情報と降雨量を解析コードに入力し、将来的な地下水流動の変化を予測した。その結果、12.5 万年の評価期間内においては隆起侵食現象の地下水流動への影響は概ね小さいことが示唆された。この結果を踏まえて、処分場での地下水流動解析・核種移行解析を正確に行うために必要な手法を体系化して整理する事ができた。

第5章では、放射性廃棄物等の輸送に係わる安全評価解析手法として、実測データを収集して放射性物質の輸送時における輸送容器表面汚染からの作業者に対する安全解析を実施し、輸送における安全性を明らかにした。

第6章では結論として、研究成果を整理している。

以上述べたように、本研究は、新規性に富んだ多くのテーマに取り組み、新しい知見を得たものである。また、地下水や物質移動解析結果の検証を実際の測定に基づいて行った点、実用性・発展性も大きい。本研究者は、長年地下水・物質移動解析の実証研究を行っており、連名論文を含め、すでに国内外の学術誌に14編の査読付き論文を発表している。さらに7編の査読付き国際講演会論文がある。以上を総合的に判断し、学位論文合格と判断した。