

令和 元年 5 月 23 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06950

研究課題名(和文) 合理的廃止措置のためのコンクリート構造物解体に係る新たなシナリオ評価ツールの構築

研究課題名(英文) Decommissioning Scenario Evaluation for Cost-Effective Demolition of Concrete Structures of Nuclear Power Plants

研究代表者

渡辺 直子 (Watanabe, Naoko)

北海道大学・工学研究院・准教授

研究者番号：20624711

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：原子力発電所の廃止措置で大量に発生する放射性コンクリート廃棄物の合理的な処理・処分のため、セメントペースト中の放射性核種の拡散係数を決定し、移行機構を検討した。熱による変質により見かけの拡散係数は増加するが、これは脱水・脱水和による細孔分布の増大による可能性が示唆された。また、廃止措置費用のうち、作業依存費用は安全貯蔵期間の影響をあまり受けないが期間依存費用は期間に比例して増大すること、放射性廃棄物量は減衰により顕著に減少する時が存在することから、即時解体した後に将来の処分を見越して分別して廃棄体化し、廃棄物量が減少する時点まで貯蔵するというシナリオも検討に値する可能性が考えられた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

熱遮蔽、生体遮蔽などの高温下、または高温により変質したコンクリート中では放射性核種の拡散係数が増大している可能性を示し、廃止措置のための特性把握の際に拡散による核種の移行についても考慮に入れる必要がある可能性があることを示した。

また、現在は、廃止措置の方式として一般的に安全貯蔵が考えられているが、放射能の減衰を考慮して区分ごとの廃棄物量を推計し、将来、放射性廃棄物の輸送・処分費用が有利となる時点を見越して、即時解体後、廃棄体化した上で貯蔵するオプションについては、処分単価等の不確かさを考慮しても、費用的に安全貯蔵方式と同等が有利であることを明らかにし、検討の意義がある可能性を示した。

研究成果の概要(英文)：Decommissioning cost for 1100 MWe BWR nuclear power plant was analyzed comparing multiple scenarios for the purpose of evaluating cost-effective ways to demolish concrete structures for waste disposal and clearance. Apparent diffusion coefficients and activation energies of diffusion of radionuclides in heat-altered hardened cement paste (HCP) were determined in order to estimate the depth profile in concrete structures. Dehydration of HCP enlarged the pore size distribution, resulting in greater apparent diffusion coefficients, and activation energies of diffusion closer to those in free water.

The total cost of decommissioning was estimated for 1) immediate dismantling scenario, 2) safe-storage scenario with various storage periods, 3) immediate dismantling followed by storage of waste packages until significant decay of radionuclides in the waste. The estimates showed that the scenario 3) is more or as cost effective as other scenarios, and may be worth considering.

研究分野：原子力学

キーワード：廃止措置 コンクリート廃棄物 放射性廃棄物 クリアランス シナリオ評価 コスト

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

コンクリートは原子力発電所で最も多用される材料であり、110万kW級のBWR原子炉では約50万トンのコンクリート廃棄物が発生する。原子力発電所の廃止措置において、大量のコンクリート材料が放射性廃棄物として生じることから、これらを安全かつ合理的に処理・処分することが重要となる。放射性コンクリート廃棄物は、他の放射性廃棄物と同様に、(1)汚染レベル、汚染核種毎に適切に分別、(2)[必要に応じて]汚染部位を的確に把握した上で除去(除染)、(3)安全に処分(クリアランス対象物については再利用を含む)することが求められる。

廃止措置によって発生するコンクリート廃棄物の処分費用は、一般に、ピット処分(L2) > トレンチ処分(L3) > 一般廃棄物の順に高い。このため、合理的(経済的)な処分を行うためには、適切な分別・除染を実施して、放射性廃棄物量を減らすとともに、放射性に分類されるものでも、できる限りトレンチ処分(L3)やクリアランスに分類されるように除染を行うことが肝要である。しかし、一方で除染およびその検認のための放射能測定は追加費用を要し、作業者の被ばく線量の増加および2次廃棄物の発生につながる場合もあるため、闇雲な除染は効果的でない可能性がある。すなわち、廃棄物の発生から処分までの全行程を見据えた上で、総合的に最適な措置を判断する必要がある。そのためには、(1)コンクリート材料中の放射性核種の分布を把握し、さらに(2)適切な廃止措置シナリオを選択するための評価を行うツールが必要である。廃止措置における放射性コンクリートの放射性核種の分布は、中性子到達範囲外では汚染面からの移行(主に拡散)によって決まると考えられている。一方、中性子到達範囲内では放射化と移行が同時に起こると考えられる。このうち、放射化量は放射化計算によって、実測値とのずれはあるものの、ある程度の精度で算出できる[1]が、拡散等による移行量に関する知見は限られている。特に、生体遮蔽コンクリートは比較的高い温度条件下におかれることから材質の変化が懸念されるが、そのような観点からの実験データは少ない。

2. 研究の目的

これらの背景を受け、本研究では、廃止措置におけるコンクリート材料の解体および解体作業から発生する放射性コンクリート廃棄物の合理的な処理・処分のために重要になると考えられる、(1)セメント材料中の放射性核種の分布把握、(2)コンクリート構造物の解体に係わる費用を評価するツールの開発を行う。

(1) セメント材料中の放射性核種の分布把握

セメント材料中のNa⁺、Cs⁺などの見かけの拡散係数を実験的に決定する。ここでは、生体遮蔽コンクリート構造物への適用も考え、比較的高い温度での拡散係数も決定するとともに、熱変質を受けた試料に対しても、拡散係数の温度依存性から拡散の活性化エネルギーを求めることで、支配的な拡散メカニズムを決定することを目標とする。

(2) コンクリート構造物の解体に係わる費用を評価するツールの開発

ここでは、従来用いられてきた核種の分布状況の評価手法に加え、(1)で求める拡散による移行を考慮して核種分布を設定し、解体、前処理、処分、再利用の費用を、代表的なシナリオに従って評価する手法を確立することを目的とする。なお、その際に問題となる、処分・再利用の関する不確定要素(安全貯蔵期間、処分場の整備状況、処分場までの距離、受入基準、処分単価、再利用単価)や、今後の廃止措置に関連する技術の発展や処分等に関する制度の変化については、パラメータとして整理し、費用への影響度合いを評価できるようにする。

3. 研究の方法

(1) セメント材料中の放射性核種の分布把握

硬化セメントペースト試料は、水セメント比が0.36となるように普通ポルトランドセメントとイオン交換水を混ぜ、ブリージング水が現れなくなるまで混練した。得られた混合物を、内径24.5mm、高さ54.5mmのポリプロピレン製の型枠(ニッコーハンセン株式会社製、プッシュバイアルPV-20)に注ぎ入れ、気泡を除去し、蓋をして1日間静置した後、容器から取り出し、セメント平衡水中で28日間、50℃で養生した。セメント平衡水は、セメント粉末200gとイオン交換水2Lを容器に入れ混ぜた後、2日間以上静置したものを使用した。養生が終了した硬化セメントペースト試料は、真空にした60℃のオーブンで3日間乾燥させた後、電気炉を用いて昇温速度1℃/分で目的温度(80, 200, 300, 400)まで加熱し、質量が恒量になるまで(72時間)その温度を維持した後に、炉内にて自然冷却した。加熱後、試料はセメント平衡水中にて5日間静置して再水和させた。未加熱試料及び加熱・再水和試料を対象としてガス吸着法により空隙構造を分析した。

拡散試験用の硬化セメントペーストは、上記と同様の方法で、水セメント比0.36、0.45、0.60となるよう調製した。拡散試験は、放射性トレーサー(²²Na、¹³⁷Cs)を用いて非定常拡散法(Back to back法)により実施した。その後、セメント試料を研磨し、深さ位置毎の放射能から拡散係数を決定した。また、拡散温度を10~50℃の範囲に設定し、実験から得られた拡散係数の温度依存性から拡散の活性化エネルギーを決定した。また、Cs⁺については、80~400℃で加熱・再水和させた試料についても、同様の方法で拡散係数及び拡散の活性化エネルギーを決定した。

(2) コンクリート構造物の解体に係わる費用を評価するツールの開発

費用評価は、110万kW級のBWRを対象として行った。遮蔽壁、生体遮蔽体等のコンクリート構造物を含む解体対象物の放射化放射能濃度は、Particle and Heavy Ion Transport Code System

(PHITS)とDCHAIN-SPのコードを用いて計算した。また、実験より得られた拡散係数を考慮し、実炉の条件を考慮して、コンクリート構造物中の放射性核種の分布を検討し、核種の深度分布を推定した。生体遮蔽等の放射化部位及び汚染部位(原子炉建屋、タービン建屋、廃棄物保管庫など放射性物質による汚染の懸念がある部分)のうち、除染の必要な面積及び除去深さをパラメータとして、放射性廃棄物量、クリアランス対象量を設定した。

廃止措置費用については、解体対象物の放射能、物量や解体工法に依存する作業依存費用、安全貯蔵期間中の維持管理費等の期間依存費用、廃棄物輸送・処分費用それぞれについて、Oak, HD et. al [2]による方法を基に人件費単価などについては日本の値を用いて算出した[3,4]。処分場の整備状況については不確かさが大きいため、処分場が整備されるまで安全貯蔵を継続するケース、及び運転停止後、即時解体し、処分場整備の目標年を設定してその目標年まで廃棄体として貯蔵するケースについて費用評価を実施した。また、処分場までの距離、処分単価等の不確定な要素については、三角分布を想定し、感度解析によって廃止措置費用の不確定さの範囲を算出した。

4. 研究成果

(1)セメント材料中の放射性核種の分布把握

硬化セメントペースト中の Na⁺及び Cs⁺の見かけの拡散係数は、図-1 に示すように 278(K)において 10-11 から 10-10(m²s⁻¹)のオーダーとなり、水セメント比の増加に伴い、増加した。また、見かけの拡散係数は、拡散温度が 278K から 323K に上昇すると、Na⁺では 2~4 倍程度、Cs⁺では 1.5~2 倍程度に増加することが明らかになった。Na⁺及び Cs⁺の見かけの拡散係数の温度依存性から決定した拡散の活性化エネルギーを図-2 に示す。拡散の活性化エネルギーは、水セメント比の上昇に伴い、減少する傾向を示した。Na⁺及び Cs⁺の自由水中の拡散の活性化エネルギーはそれぞれ 18.4、16.4 (kJ mol⁻¹) [6]であり、Na⁺、Cs⁺ともに、水セメント比が 0.36 の場合には自由水中の拡散の活性化エネルギーよりも明らかに大きな値を示したのに対し、水セメント比の増加に伴って自由水中の値に近づき、水セメント比 0.60 ではほぼ自由水中の値となった。セメント材料内部には、比較的サイズの大きい空間である「毛細管空隙」と、主なセメント水和物の 1 つである CSH ゲルに代表されるような「ゲル空隙」の 2 種類の空隙が存在すると考えられている。水セメント比 0.60 で自由水中の拡散の活性化エネルギーと同程度となったのは、Na⁺、Cs⁺の拡散経路として毛細管空隙が支配的であるためであり、水セメント比の減少に伴い、ゲル空隙の影響が顕著になり、活性化エネルギーが増加した可能性が考えられた。

水セメント比 0.36 の硬化セメントペースト試料を 80-300 に加熱・再水和した場合、Cs⁺の見かけの拡散係数は、未加熱の試料と比較して 3-10 倍に増加した(図-3)。一方、400 に加熱・再水和した場合には、80-300 と比較して、見かけの拡散係数の増加が顕著ではなかった。また、加熱試料の拡散の活性化エネルギーは、15~25 (kJ mol⁻¹)程度となり、未加熱試料の拡散の活性化エネルギー 37±2.0 (kJ mol⁻¹)より減少して自由水中の値(16.4 (kJ mol⁻¹) [6])に近づいた。また、図-4 に示すように、加熱により空隙サイズが全体に拡大する傾向にあることが明らかになった。未加熱セメント試料中の Cs⁺イオンはゲル空隙内の水のような束縛された水を介しての拡散が支配的であるために、拡散の

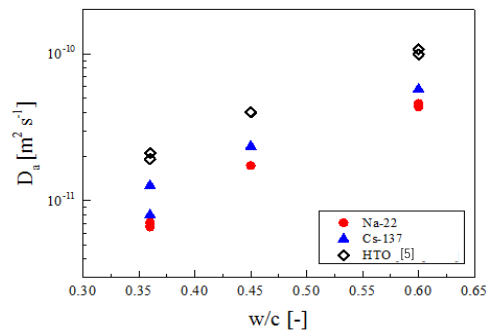


図-1 Na⁺及び Cs⁺の見かけの拡散係数の水セメント比依存性(278K)

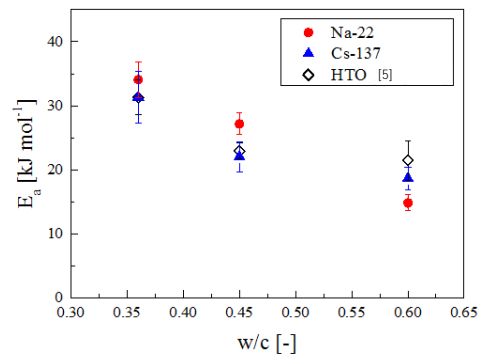


図-2 Na⁺及び Cs⁺の拡散の活性化エネルギーの水セメント比依存性

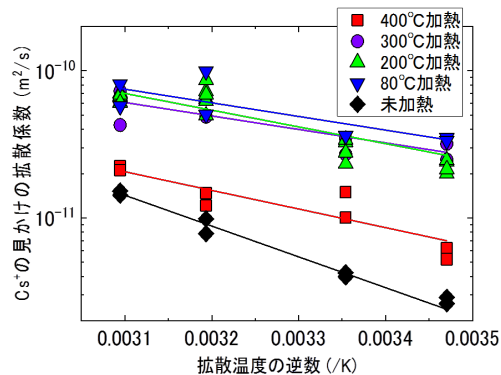


図-3 硬化セメントペースト試料中の Cs⁺の拡散係数の拡散温度依存性(水セメント比 0.36)

活性化エネルギーが 37 ± 2.0 (kJ mol⁻¹) と高い値となったのに対し、空隙の拡大した加熱試料では、毛細管空隙のような大きな空隙を介した拡散の割合が増加し、さらにセメント試料中に存在すると予想される拡散経路の屈曲度あるいは収斂度を低下したため、活性化エネルギーの減少及び見かけの拡散係数が増加した可能性が考えられた。また、400 加熱試料においては、図-4 で 80-300 加熱試料と比較して積算細孔容積の低下が認められたことから、こうした変化に伴う拡散経路の屈曲度あるいは収斂度の変化が見かけの拡散係数を低下させたことが示唆された。

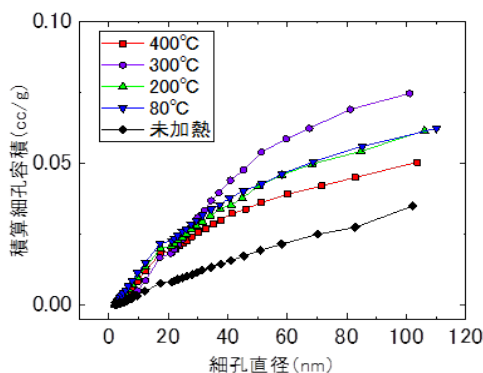


図-4 加熱・再水和後の硬化セメントペースト試料の細孔容積分布(ガス吸着法)

熱遮蔽壁のように運転中に高温下に置かれるコンクリート材料については、温度によっては熱変質により内部構造に変化が生じ、毛細管空隙のような大きな空隙が主な拡散経路となり、また、拡散係数の増大している可能性が示唆された。また、拡散時に温度が上昇している場合にも拡散係数が若干している可能性があることがわかった。

(2) コンクリート構造物の解体に係わる費用を評価するツールの開発

110 万 kW 級の BWR を即時解体で廃止措置する際の費用は総額 522 億円と見積もられた。この内訳は、解体撤去に係る費用が約 30%、廃棄物管理に係る費用が約 70%となった(図-5)。解体撤去に係る費用の割合が比較的小さいのは、Oak, HD et al.[2]による費用算定方法が、短期間での効率的な作業を想定しているためであると考えられる。解体撤去費用の内訳では、期間依存費用の占める割合が最も大きかった。また、廃棄物管理費用では、L2、L3 廃棄物の管理費用が大部分を占めた。

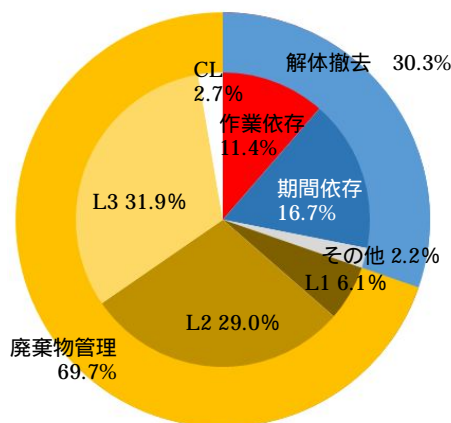


図-5 即時解体の費用見積り内訳(110 万 kW 級 BWR)

放射性廃棄物の処分施設ができるまで安全貯蔵を継続することで対応することを想定して、廃止措置が完了するまでの期間を 10 から 100 年のパラメータとして廃止措置費用を算定した結果を図-6 に示す。総費用は即時解体の場合が最少となった。安全貯蔵期間が増加しても作業依存費用は横ばいであるのに対し、期間依存費用は期間に比例して増加し、廃止措置期間 50 年以上で総費用の大部分を占めるようになった。廃棄物管理費用は、安全貯蔵期間の増加に伴い、放射能減衰によって減少する傾向にあった。廃棄物管理費用の減少は、このケーススタディでは廃止措置期間 60 年において顕著であり、60~100 年ではほぼ横ばいとなった。

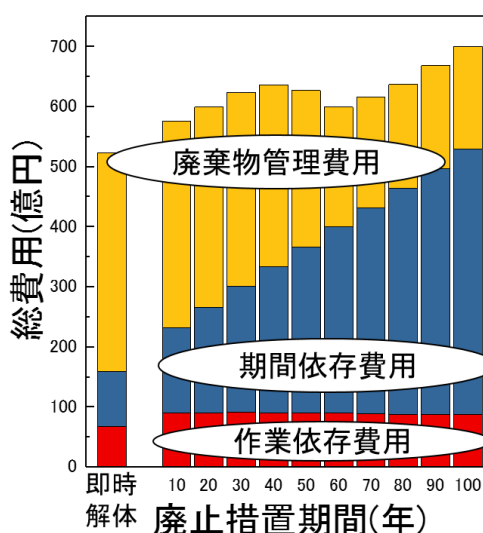


図-6 安全貯蔵期間をパラメータとした廃止措置費用

図-7 にコンクリート廃棄物管理費用を廃棄物区分ごとに示す。コンクリート廃棄物管理費用は、全廃棄物管理費用の 3 分の 1 程度である。60-70 年で L2 廃棄物がなくなっており、コンクリート廃棄物の放射能の減衰が全廃棄物管理費用の 60 年以降での減少の要因の 1 つであることがわかった。L3 クリアランスによる区分を厳密にし、クリアランスとするコンクリート量を増やす場合の廃棄物管理費用の減少は、総費用に対して 2%程度にとどまることがわかった。クリアランスの検認などに係る費用単価については、現状では実施事例が少ないことから不確かさが大きい。単価が上昇した場合には費用的なメリットは小さくなるため、クリアランス事業の実施に際しては十分な検討が必要である。

放射性廃棄物の処分場が整備されていない場合の廃止措置の考え方の一つとして、廃棄物処

分費用が顕著に減少する 60 年後を目標年とし、その時点で最終処分すると計画し、運転停止直後に即時解体するシナリオを想定した。このシナリオでは、作業依存、期間依存費用については即時解体が最小値をとり、廃棄物管理費用については、60 年を目処に減少することのコスト的な利点を生かすことができる。解体時には、放射能分布の特性把握をもとに、最終処分時(60 年後)までの減衰を見込んで廃棄物区分、廃棄体化を実施することとした。このシナリオ(即時解体・廃棄体で 60 年後まで貯蔵)での総費用を、処分場が整備されるまで安全貯蔵をするシナリオでの費用と比較すると、同程度か、即時解体・廃棄体で貯蔵シナリオの方が費用的に有利であるという結果となった。廃棄物処分単価に ±20% 程度の不確かさを見込んだ場合においても、即時解体・廃棄体で貯蔵するシナリオの費用面での利点は同じように見積もられた。即時解体・廃棄体での貯蔵シナリオには、運転時からの知識の継承や早期段階での跡地利用など、費用面以外のメリットも考えられ、廃止措置を計画の選択肢の一つとして検討する意味がある可能性が示された。

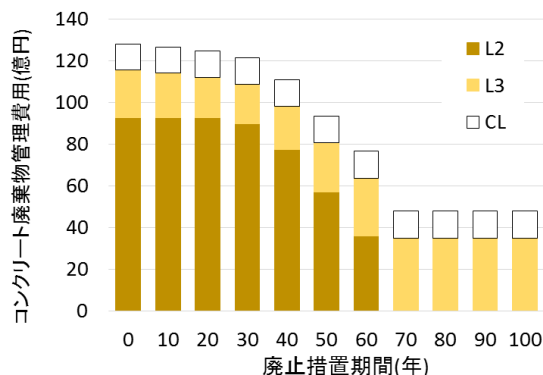


図-7 安全貯蔵期間をパラメータとしたコンクリート廃棄物管理費用

< 引用文献 >

- 1) 助川他、JAERI-Tech 2001-058, 2001 年 9 月、2) Oak, HD et.al, NUREG/CR-0672, Vol.2、3) 宮坂他「JPDR 解体実験試験の概要と成果」日本原子力研究所(1996 年 6 月 14 日)、4) 総合エネルギー調査会・原子力部会、「原子力発電所の解体廃棄物」(平成 10 年 8 月 28 日)、5) H. Takiya, et al., J. Nucl. Sci. Technol 52, 728-738 (2015)、6) R. Parsons, Handbook of Electrochemical Constants, Butterworths Sci. Publ., London (1959)

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 1 件)

N. Watanabe, R. Miyoshi, T. Kozaki, S. Tanaka, S. Yanagihara
 Cost analysis for decommissioning of nuclear power plants with uncertainties
 Proceedings of 26th International Conference on Nuclear Engineering (ICONE26)
 ICONE26-82572, (2018) 査読有り
 DOI: 10.1115/ICONE26-82572

〔学会発表〕(計 2 件)

三好亮平、渡辺直子、小崎完、田中真吾、柳原敏
 廃棄物処理処分を考慮した廃止措置シナリオ評価・最適化手法の研究
 原子力学会春の年会、 2018 年

Naoko Watanabe, Ryohei Miyoshi, Tamotsu Kozaki, Shingo Tanaka, Satoshi Yanagihara
 Cost Analysis for Decommissioning of Nuclear Power Plant with Uncertainties
 International Conference on Nuclear Engineering 26, 2018

〔図書〕(計 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 件)

名称：
 発明者：
 権利者：
 種類：
 番号：
 出願年：
 国内外の別：

取得状況 (計 件)

名称：
 発明者：

権利者：
種類：
番号：
取得年：
国内外の別：

〔その他〕
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名：小崎 完
ローマ字氏名：(KOZAKI, Tamotsu)
所属研究機関名：北海道大学
部局名：工学研究院
職名：教授
研究者番号(8桁)：60234746

研究分担者氏名：田中 真吾
ローマ字氏名：(TANAKA, Shingo)
所属研究機関名：北海道大学
部局名：工学研究院
職名：助教
研究者番号(8桁)：90749037

(2) 研究協力者

研究協力者氏名：柳原 敏
ローマ字氏名：(YANAGIHARA, Satoshi)

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。