

軽水炉燃料の高燃焼度化および MOX 燃料の導入に伴い 発生する TRU 廃棄物の地層処分への影響

学位論文内容の要旨

経済性の向上と使用済燃料の発生量削減の両面から、軽水炉燃料の高燃焼度化が進められている。現在、最高燃焼度は 55 GWd/THM に達しているが、更なる高燃焼度化も視野に入れ、炉の安全性や経済性に関する検討が行われている。フランスやドイツなどではウランとプルトニウムの混合酸化物燃料 (MOX 燃料) が軽水炉で使用されているが、我が国においても軽水炉への MOX 燃料の導入を目指して準備が進められている。燃料の高燃焼度化や MOX 燃料の導入により、従来の UO_2 燃料の場合とは異なる特性を持つ放射性廃棄物の発生が予想される。しかし、炉の安全性や燃料の健全性や経済性に関する分野と比較して、核燃料サイクルのバックエンドへの影響については検討が進んでいない。特に、高燃焼度化や MOX 燃料の導入による、TRU 廃棄物 (超ウラン元素を含む廃棄物) の処理処分とその安全評価に与える影響については殆ど検討されていない。電気事業連合会と核燃料サイクル開発機構 (当時) が 2005 年度に公表した「TRU 廃棄物処分技術検討書-第 2 次 TRU 廃棄物処分研究開発取りまとめ-」(以下、TRU 2 次レポート) では、対象とする廃棄物は、燃焼度 45 GWd/THM の UO_2 使用済燃料の再処理に伴い発生するものに限られている。さらに高燃焼度化が進んだ UO_2 使用済燃料や MOX 使用済燃料の再処理で発生する廃棄物は対象とされていない。本研究では、軽水炉での高燃焼度燃料や MOX 燃料の使用による地層処分への熱影響を明らかにすることを目的とし、TRU 廃棄物で最も熱放出率の高いハル・エンドピース圧縮廃棄体を対象として評価を行った。

本論文は 5 章から構成される。第 1 章では、軽水炉燃料の高燃焼度化と軽水炉への MOX 燃料の導入が進められている背景と、放射性廃棄物の地層処分に対するこれらの影響について概観し、今後の核燃料サイクルを見直す上で、熱の影響について明らかにすることが極めて重要であることを明確にした。

第 2 章では、45、55、70 GWd/THM の燃焼度での UO_2 使用済燃料および MOX 燃料を想定した燃焼計算を行い、TRU 2 次レポートの処分概念に基づいてハル・エンドピース圧縮廃棄体を収納するキャニスター 1 本あたりの熱放出率の時間依存性を評価した。燃焼度 45 GWd/THM の UO_2 使用済燃料の結果は、TRU 2 次レポートの結果と良く一致した。MOX 使用済燃料の場合は、半減期 432 年の α 崩壊核種である Am-241 をはじめとする TRU 元素の崩壊熱の寄与が大きいため、従来型の廃棄体に比べると熱放出率は極めて緩やかに減少し、数百年から千年に渡る長時間経過後の廃棄体や処分場に与える熱影響が大きいことを明らかにした。

更に、TRU 2 次レポートと同様に、キャニスターを廃棄体パッケージに収納した後、円形断面の坑道の内部に積み重ねて処分する場合について、二次元熱伝導解析により坑道とその周辺領域の温

度分布を評価した。簡単のために、異なる熱放出率を持つ廃棄体パッケージを混在させて処分することは想定せず、廃棄体パッケージ内部の充填材であるセメントモルタル材の温度上限値を 80℃とした場合に、廃棄体パッケージに収納できるキャニスター本数の燃焼度依存性を決定した。燃焼度 45 GWd/THM の UO_2 燃料の場合は、TRU 2 次レポートと同様に、廃棄体パッケージに 4 本のキャニスターを収納できる。しかし、MOX 使用済燃料の場合は、1 本程度に減少すると共に、複数の坑道を含む領域全体が、1000 年以上の長期間に渡って 60～70℃の高い温度に曝されるとの結果を得た。このことから、高燃焼度化と MOX 燃料の導入に伴い、坑道内部の廃棄物密度が低下すると共に、極めて長期に及ぶ熱影響による地下水流動挙動の変化が生じ、安全評価手法の成立性が懸念される。

第 3 章では、燃焼前の MOX 燃料の初期組成が UO_2 使用済燃料の燃焼度や冷却期間あるいは MOX 燃料製造後の貯蔵期間に依存することに着目し、様々な Pu の富化度と同位体組成比を持つ MOX 燃料の使用による、ハル・エンドピース圧縮廃棄体の地層処分に及ぼす熱影響を評価した。 UO_2 燃料の燃焼計算の結果から求めた富化度を持つ MOX 燃料を対象として再び燃焼計算を行い、この結果に基づいてキャニスターの熱放出率を決定した。さらに第 2 章と同様に、熱伝導解析により地層処分後の坑道とその周辺の温度分布を求めた。 UO_2 使用済燃料の燃焼度を 28、45、70 GWd/THM、冷却期間を 4、30、50 年、MOX 燃料の照射前の貯蔵期間を 2、10 年として評価を行った。その結果、燃焼度 45 GWd/THM の MOX 使用済燃料の場合は、堆積岩の熱物性値を用いると、廃棄体パッケージに収納できるキャニスターの数が 0.7～1.6 本の範囲で変動した。しかし、坑道内部の廃棄物密度が 45 GWd/THM の UO_2 使用済燃料の場合に比べて大幅に低下すること、および坑道とその周辺において、1000 年を超える長期間に渡って高い温度が維持されることなど、基本的な結果は第 2 章で得られたものと変わらないことを明らかにした。

第 4 章では、MOX 使用済燃料の再処理で発生するハル・エンドピース圧縮廃棄体の合理的な処分方法について検討した。ハル・エンドピース圧縮廃棄体の地上での冷却貯蔵期間の長期化、ハルに対する燃料付着率の低下、および処分坑道の離間距離の拡大、の 3 点に着目し、TRU 2 次レポートの処分概念を前提とする場合の合理的な処分方法について検討した。その結果、ハルの燃料付着率の低下により、坑道内部の廃棄物密度を燃焼度 45 GWd/THM の UO_2 燃料の場合と同程度にできる可能性があること、および坑道周辺の温度を初期地温レベルまで下げるには、坑道離間距離を十分に拡大することが合わせて必要であることを明らかにした。

第 5 章では、本論文の成果を総括する。

以上、軽水炉における高燃焼度燃料および MOX 燃料の使用とその後の再処理による、ハル・エンドピース圧縮廃棄体の地層処分への熱影響について評価を行い、TRU 2 次レポートの処分概念を前提とする場合の合理的な処分方法について検討した。本論文の成果は、今後、軽水炉から高速炉への移行期を迎えるにあたり、放射性廃棄物管理と整合性を持つ合理的な核燃料サイクルの枠組みを検討する上で役立つものである。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 佐 藤 正 知

副 査 教 授 島 津 洋 一 郎

副 査 教 授 杉 山 憲 一 郎

学 位 論 文 題 名

軽水炉燃料の高燃焼度化および MOX 燃料の導入に伴い 発生する TRU 廃棄物の地層処分への影響

経済性の向上と使用済燃料の発生量削減の両面から、軽水炉燃料の高燃焼度化が進められている。現在、最高燃焼度は 55 GWd/THM に達しているが、さらなる高燃焼度化も視野に検討が進められている。フランスやドイツなどではウランとプルトニウムの混合酸化物燃料 (MOX 燃料) が軽水炉で使用されてきたが、我が国においても軽水炉への MOX 燃料の導入に向けて準備が進められている。燃料の高燃焼度化や MOX 燃料の導入により、従来とは異なる特性を持つ放射性廃棄物の発生が予想される。しかし、炉の安全性や核燃料の健全性に関する分野と比較して、特に TRU 廃棄物 (超ウラン元素を含む廃棄物) の処理処分とその安全評価に与える影響については、ほとんど検討されていない。電気事業連合会と核燃料サイクル開発機構 (当時) が 2005 年度に公表した「TRU 廃棄物処分技術検討書-第 2 次 TRU 廃棄物処分研究開発取りまとめ-」(以下、TRU2 次レポート) では、対象とする廃棄物は、燃焼度 45 GWd/THM の UO_2 使用済燃料の再処理に伴い発生するものに限定されている。本研究では、軽水炉での高燃焼度燃料や MOX 燃料の使用による TRU 廃棄物の地層処分への熱影響を明らかにすることを目的とし、TRU 廃棄物の中で最も熱放出率の高いハル・エンドピース圧縮廃棄体を対象として評価を行った。

本論文は 5 つの章から構成されている。第 1 章では、軽水炉燃料の高燃焼度化と軽水炉への MOX 燃料の導入が進められている背景と、高レベル放射性廃棄物や TRU 廃棄物の地層処分における熱影響の評価が極めて重要であることを明確にしている。

第 2 章では、45、55、70 GWd/THM の燃焼度での UO_2 使用済燃料および MOX 燃料について燃焼計算を行い、ハル・エンドピース圧縮廃棄体を収納するキャニスター 1 本あたりの熱放出率の時間依存性を評価している。燃焼度 45 GWd/THM の UO_2 使用済燃料の結果は、TRU 2 次レポートの結果と良く一致することを確認している。MOX 使用済燃料の場合は、TRU 元素の崩壊熱の寄与が大きく、従来型の廃棄体に比べると熱放出率は極めて緩やかに減少することを明らかにしている。さらに、TRU2 次レポートと同様に、

キャニスターを廃棄体パッケージにした後、円形断面の深地中の坑道内部に積み重ねて処分する場合について、有限要素法による二次元熱伝導解析により坑道とその周辺領域の温度分布を評価している。廃棄体パッケージ内部のセメント充填材の上限温度を 80℃とした場合について、廃棄体パッケージに収納できるキャニスター本数の燃焼度依存性を評価している。燃焼度 45 GWd/THM の UO_2 燃料の場合は、TRU2 次レポートに示されている結果と同様に、4 本のキャニスターを収納できる。一方、MOX 使用済燃料の場合は、1 本程度に減少すると共に、処分領域が 1000 年以上の長期間に渡って 60～70℃の高い温度に曝されるとの結果を示している。このことから、TRU2 次レポートの処分概念を採用すると、坑道内部の廃棄物密度が大幅に低下するとともに、極めて長期に及ぶ熱影響に伴う地下水流動挙動の変化が生じ、安全評価手法の成立性が懸念されるとしている。

第 3 章では、燃焼前の MOX 燃料の初期組成が UO_2 使用済燃料の燃焼度や冷却期間あるいは MOX 燃料製造後の貯蔵期間に依存することに着目し、様々な Pu の富化度と同位体組成比を持つ MOX 燃料の使用による、ハル・エンドピース圧縮廃棄体の地層処分に及ぼす熱影響を評価した。 UO_2 燃料の燃焼計算の結果から求めた富化度を持つ MOX 燃料について再び燃焼計算を行い、キャニスターの熱放出率を評価し、熱伝導解析により地層処分後の温度分布を求めている。その結果、坑道内部の廃棄物密度が 45 GWd/THM の UO_2 使用済燃料の場合に比べて大幅に低下すること、および坑道とその周辺において、1000 年を超える長期間に渡って高い温度が維持されることを明らかにしている。

第 4 章では、MOX 使用済燃料の再処理で発生するハル・エンドピース圧縮廃棄体の合理的な処分方法について検討した。ハル・エンドピース圧縮廃棄体の地上での冷却貯蔵期間、ハルに対する燃料付着率、および処分坑道の離間距離の 3 点に着目し、TRU 2 次レポートの処分概念を前提とする場合のより合理的な処分方法について検討している。

第 5 章では、本論文の成果を総括している。

これを要するに、著者は、軽水炉における使用済み高燃焼度燃料および使用済み MOX 燃料の再処理により発生するハル・エンドピース圧縮廃棄体の地層処分への熱影響について、燃焼計算と、有限要素法による二次元熱伝導解析により、はじめて評価を行った。本論文の成果は、核燃料サイクル・バックエンド分野の進歩に寄与するところ大なるものがあり、博士(工学)を授与される資格あるものと認める。