

高速炉用 MOX バイパック燃料の照射挙動解析手法の開発

学位論文内容の要旨

ロシアで発生する余剰核兵器解体に伴うプルトニウムを、国際的な協力体制の下に BN600 等のロシアの高速炉で燃焼処分する計画が、現在、検討されている。核兵器解体プルトニウムをロシアの電解共析技術により不定形状の MOX 顆粒に加工し、酸素ゲッター機能を有する金属顆粒(金属ウランゲッターと呼ばれているロシア独自の技術である)とともに燃料ピン内に振動充填するバイパック燃料の使用が提案されている。しかしながら、ロシアが提案する金属ウランゲッターを用いた高速炉用 MOX バイパック燃料の安全性は、燃料性能評価技術が未整備であること等により、ロシア以外の国では検証されていなかった。

一方、次世代の基幹電源として期待される商業用高速炉については、現在、短期間での実用化が期待できるペレット型 MOX 燃料を有力な燃料概念として研究開発が進められている。一方、経済面での優位性等の点から、長期的には、前出の MOX バイパック燃料もペレット燃料の代替候補概念としての魅力を有するものである。即ち、未整備である MOX バイパック燃料性能評価技術の基礎を確立することは、ロシアの余剰核兵器解体プルトニウムを MOX バイパック燃料として高速炉で燃焼処分する場合の燃料健全性に関する国際的なクロスチェックを可能とすると同時に、日本の高速炉開発の選択肢拡大をもたらし、ひいては、日本の将来のエネルギー源選択の自由度を高めるものであると期待される。

そこで本研究では、この高速炉用 MOX バイパック燃料について、炉外試験等により、バイパック燃料に特有な諸特性の定量評価モデルを開発した。併せて、ロシア独自の技術である金属ウランゲッターの機能を炉外試験により検証し、その機能を評価する機構論的モデルを開発した。また、ペレット燃料との照射挙動の類似性から、ペレット燃料用に開発された評価モデルにはバイパック燃料に対して適用可能なものがあるが、それらの一部について、最新の知見に基づき既存モデルを改良した。更に、これらモデル群を統合することにより、燃料性能評価における重要技術である、照射挙動解析コードを国内で初めて開発し、その妥当性を、照射試験結果との対比により確認した。

本論文は全 5 章で構成されており、各章の概要は以下の通りである。

第 1 章では、研究の背景として MOX バイパック燃料の研究開発の現状について述べるとともに、MOX バイパック燃料の照射挙動解析コードを開発するうえでの課題と研究目的を示している。

第 2 章では、MOX バイパック燃料特有の技術である金属ウランゲッターがもたらす効果を炉外試験で検証する上で必須となる、金属ウランの顆粒化技術開発について述べる。金属ウランは活性であることから、溶湯を利用するアトマイズ法ではルツボとウラン溶湯との化学反応が問題となる。本研究では、高速回転させた丸棒状の原料棒をプラズマ照射により溶解させ、遠心力を利用して球状液滴を飛散させて凝固させるプラズマ回転電極法を利用した顆粒化技術開発を、株式会社東芝及び日本核燃料開発株式会社と共同で行った。その結果、この方式では、世界で初めて、連続に

安定して数百 g 規模の高真球度金属ウラン顆粒を製造することに成功し、独自の炉外試験による金属ウランゲッターの効果確認を可能とした。

第 3 章では、MOX バイパック燃料の特性評価モデルの開発について述べる。原子炉用燃料の照射挙動は、燃料の種類や形態によらず、燃料温度に支配される。このため、挙動評価においては、特に燃料温度に影響を及ぼす燃料の諸特性を精度良く再現できる評価モデルが不可欠である。本研究では、まず、既存のペレット型燃料用の特性評価モデルのうち、挙動の類似性からバイパック燃料にも適用可能なものを抽出するとともに、最新の知見に基づく改良が可能なものについてモデルの改良を行った。これにより、バイパック燃料のみでなく、ペレット燃料の挙動評価においても、評価精度の大きな改善をもたらした。また、バイパック燃料に特有の顆粒充填体形態であることに起因する圧縮歪み特性や伝熱特性については、外部機関の協力のもとに炉外試験を行い、実測された圧縮歪み特性や熱伝導度を定量的に評価するモデルを開発した。ロシアにおけるバイパック燃料の特性評価には経験的モデルが多用されていることから、本研究により、従来の経験的モデル主体の挙動評価に大きな改善をもたらした。

第 4 章では、MOX バイパック燃料の挙動解析コードの開発について述べる。本研究では、既に開発中であったペレット型の高速炉用 MOX 燃料挙動解析コード CEDAR(Code for Thermal and Deformation Analysis of Reactor fuel pin) をベースコードとして、第 3 章に述べた特性評価モデル群を組み込むことにより、MOX バイパック燃料用の挙動解析コードを開発した。コードの機能については、ロシアとの共同研究として実施した照射試験結果を用いた較正並びに検証を行い、その結果、良好な精度で実際の現象を再現できることを確認した。これにより、本研究で目的とした燃料性能評価技術の基盤技術確立を達成した。

第 5 章では、本研究で得られた成果を総括している。

以上の研究により、これまで国内で未確立であった高速炉用 MOX バイパック燃料の照射挙動解析手法を新たに開発した。この新技術は、MOX バイパック燃料の、実用高速炉用燃料概念としての成立性の定量評価を可能とするものであり、日本における将来の高速炉開発の選択肢拡大に寄与するものである。

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 鵜 飼 重 治

学 位 論 文 題 名

高速炉用 MOX バイパック燃料の照射挙動解析手法の開発

ロシアで発生する余剰核兵器解体に伴うプルトニウムを、国際的な協力体制の下に BN600 等のロシアの高速炉で燃焼処分する計画が検討されている。核兵器解体プルトニウムをロシアで開発された電解共析技術により不定形状の MOX 顆粒に加工し、酸素ゲッター機能を有する金属ウランゲッターと呼ばれている金属顆粒とともに燃料ピン内に振動充填するバイパック燃料の使用が提案されている。しかしながら、ロシアが提案するこの種の高速炉用 MOX バイパック燃料の安全性は、燃料性能評価技術が未整備であること等により、ロシア以外の国では検証されていなかった。

一方、次世代の基幹電源として期待される商業用高速炉については、現在、短期間での実用化が期待できるペレット型 MOX 燃料が最も有力視される中で研究開発が進められている。これとは別に、経済性の観点から長期的には、MOX バイパック燃料もペレット燃料の代替燃料の一つとして魅力を有するものである。すなわち、未整備である MOX バイパック燃料性能評価技術の基礎を確立することは、ロシアの余剰核兵器解体プルトニウムを MOX バイパック燃料として高速炉で燃焼処分する場合の燃料健全性に関する国際的なクロスチェックを可能とすると同時に、日本の高速炉開発の選択肢拡大をもたらし、ひいては、日本の将来のエネルギーの選択に柔軟性を持たせるものとして期待される。

そこで本研究では、この高速炉用 MOX バイパック燃料について、炉外試験等により、バイパック燃料に特有な諸特性の定量評価モデルを開発した。併せて、ロシア独自の技術である金属ウランゲッターの機能を炉外試験により検証し、その機能を評価する機構論的モデルを開発した。また、ペレット燃料との照射挙動の類似性から、ペレット燃料用に開発された評価モデルにはバイパック燃料に対して適用可能なものがあるが、それらの一部について、最新の知見に基づき既存モデルを改良した。更に、これらモデル群を統合することにより、照射挙動解析コードを国内で初めて開発し、その妥当性を、照射試験結果との対比により確認した。

本論文は全 5 章で構成されており、各章の概要は以下の通りである。

第 1 章では、研究の背景として MOX バイパック燃料の研究開発の現状について述べるとともに、MOX バイパック燃料の照射挙動解析コードを開発するうえでの課題と研究目的を示している。

第 2 章では、MOX バイパック燃料特有の技術である金属ウランゲッターがもたらす効果を炉外試験で検証する上で必須となる、金属ウランの顆粒化技術開発について記述している。金属ウランは活性であることから、熔融金属を利用するアトマイズ法ではルツボとウラン融体との化学反応が問題となる。本研究では、高速回転させた丸棒型金属ウランをプラズマ照射により熔融し、遠心力

を利用して球状液滴を飛散させて凝固させるプラズマ回転電極法を利用した顆粒化技術開発を、株式会社東芝及び日本核燃料開発株式会社と共同で行った。この方式で世界で初めて、連続に安定して数百 g 規模の高真球度金属ウラン顆粒を製造することに成功し、独自の炉外試験による金属ウランゲッターの効果確認を可能とした。

第 3 章では、MOX バイパック燃料の特性評価モデルの開発について記述している。原子炉用燃料の照射挙動は、燃料の種類や形態によらず、燃料温度に支配される。このため、挙動評価においては、特に燃料温度に影響を及ぼす燃料の諸特性を精度良く再現できる評価モデルが不可欠である。本研究では、まず、既存のペレット型燃料用の特性評価モデルのうち、挙動の類似性からバイパック燃料にも適用可能なものを抽出するとともに、最新の知見に基づく改良が可能なものについてモデルの改良を行った。これにより、バイパック燃料のみでなく、ペレット燃料の挙動評価においても、評価精度の大きな改善をもたらした。また、バイパック燃料に特有の顆粒充填体形態であることに起因する圧縮歪み特性や伝熱特性については、外部機関の協力のもとに炉外試験を行い、実測された圧縮歪み特性や熱伝導度を定量的に評価するモデルを開発した。ロシアにおけるバイパック燃料の特性評価には経験的モデルが多用されていることから、本研究により、従来の経験的モデル主体の挙動評価に大きな改善をもたらした。

第 4 章では、MOX バイパック燃料の挙動解析コードの開発について記述している。本研究では、既に開発中であったペレット型の高速炉用 MOX 燃料挙動解析コード CEDAR(Code for Thermal and Deformation Analysis of Reactor fuel pin) をベースコードとして、第 3 章に述べた特性評価モデル群を組み込むことにより、MOX バイパック燃料用の挙動解析コードを開発した。コードの機能については、ロシアとの共同研究として実施した照射試験結果を用いた較正並びに検証を行い、その結果、良好な精度で実際の現象を再現できることを確認した。これにより、本研究の目的である燃料性能評価技術の基盤技術確立を達成した。

第 5 章では、本研究で得られた成果を総括している。

これを要するに著者は、これまで未確立であった高速炉用 MOX バイパック燃料の照射挙動解析手法を新たに開発した。この新技術は、実用高速炉用燃料の代替燃料の一つとして、MOX バイパック燃料の成立性に関する定量評価を可能とするものであり、日本における将来の高速炉開発の選択肢拡大に寄与するものである。これらの研究成果には高く評価できる新規性が含まれており、原子力工学に貢献するところ大なるものがある。よって著者は、北海道大学博士(工学)の学位を授与される資格があるものと認める。