

審査の結果の要旨

氏名 高阪 裕二

本論文は、燃焼に伴って酸化燃料の熱伝導率が低下する現象について、従来の UO_2 燃料と比較して、混合酸化燃料 (MOX 燃料) において、熱伝導率低下が緩和される主要なメカニズムを、特に局所的に Pu 濃度が高い領域 (Pu スポット) で燃焼が空間的に不均一に起こる効果に着目して解明するとともに、その影響を定量的に評価する手法を確立することを目的として行った研究成果について述べたものであり、全 8 章から構成されている。

第 1 章では、我が国における MOX 燃料利用の状況を概観するとともに、高燃焼度の MOX 燃料照射試験において、照射下燃料温度実測データの解析結果から、MOX 燃料では、 UO_2 燃料と比較して熱伝導率低下が緩和される現象が報告されていることを述べ、その現象について 6 つの主要要因を提示し、本研究の目的を設定している。

第 2 章では、MOX 燃料の熱伝導率の燃焼度依存性に関する既往の研究報告を調査し、MOX 燃料の燃焼に伴う熱伝導率低下については UO_2 燃料のそれと同等に取り扱われ、 UO_2 燃料の研究で得られている熱伝導率低下モデルがそのまま MOX 燃料に適用されているのが現状であり、両者の熱伝導率低下の違いを説明できるモデルの報告例が無いことを述べている。

第 3 章では、MOX 燃料の結晶構造における特徴を UO_2 燃料との比較において示し、MOX 燃料では、Pu 濃度に対して熱物性等が連続的に変化することを整理した。また、軽水炉用 MOX 燃料の製造方法を整理し、製造方法によっては燃料ペレット内 Pu 濃度の空間的な不均一分布が生じることを明らかにした。Pu 濃度の高い Pu スポット部は燃料ペレット内で分散相を形成し、非 Pu スポット部は連続相を形成するが、このような Pu 濃度不均一は、原子炉内における燃焼の不均一を生じる。燃料マトリックス中で連続相を形成する非 Pu スポット部は、バルクの平均燃焼度に対し燃焼度が低く抑えられるため、熱伝導率低下が平均燃焼度のそれに比べて緩和され、これによってバルク熱伝導率低下も緩和されるとする、MOX 燃料製造時特性に依存したバルクの熱伝導率低下緩和メカニズムを提示した。

第 4 章では Pu スポットが存在する MOX 燃料を擬似二相材として熱伝導率を取り扱う計算モデルとして Schulz モデルを選定し、その適用性について実験データと FEM 解析により検証した。その結果、分散相と連続相の熱伝導率比、分散相の形状、分散相の分布個数密度について適用範囲を明確にすることができ、MOX 燃料の Pu スポット条件に適用できることを確認した。

第5章では、照射実験で使用した MOX 燃料の製造時データを基に、分散相 (Pu スポット部) と連続相 (非 Pu スポット部) における体積割合や各相の平均 Pu 濃度を求める方法を検討し、EPMA による Pu 濃度マッピング画像の画像解析定量化手法により、これらの情報が妥当に得られることを示し、擬似二相材として MOX 燃料熱伝導率評価するための照射前 MOX 燃料特性データを取得した。そして、得られた照射前 MOX 燃料の Pu スポットに関わる特性データを入力値として、Schulz モデルによる解析計算を実施した。さらに、Pu スポットが存在するような擬似二相材と均一な単相材との熱伝導率低下の比較を行った結果、擬似二相材の熱伝導率は、燃焼度とともに、徐々に熱伝導率低下が緩和されることを明らかにした。

第6章では、MOX 燃料熱伝導率低下緩和の要因として、核分裂生成物 (FP) 収率の MOX 燃料と UO_2 燃料の相違に着目し、その違いの影響を定量的に評価した。その結果から、MOX 燃料の方が固溶性 FP 元素の収率は小さく、析出性金属 FP 元素の収率は大きいことを示し、固溶性 FP 元素蓄積、析出性 FP 元素蓄積のいずれも UO_2 燃料に比較して熱伝導率低下を緩和させる効果があるが、特に前者の効果が大きいことを明らかにした。

第7章では、前章までに検討した複数の要因による MOX 燃料熱伝導率低下への影響について、高燃焼度化の影響も加えて総合的に評価している。Pu スポット部では平均燃焼度と比較して、2倍を超える高い燃焼度に達すると推定されるが、その熱伝導率低下については不確定性が大きいものの、擬似二相材で得られるバルクの熱伝導率の低下が、均一相のそれと比較して緩和されることが確認できた。燃焼の伸長に伴う熱伝導率低下緩和の要因として、FP 収率差の効果と Pu 濃度不均一の効果为主要なメカニズムであることを示し、高燃焼度においては、FP 収率差効果に比較して Pu 濃度不均一効果が熱伝導率低下緩和に、より大きな影響をもつことが分かった。この熱伝導率低下が緩和する結果を適用して、照射試験の燃料中心温度を燃料挙動解析コードにより再評価した結果、熱伝導率低下緩和を考慮しない解析結果と比較して、より実測温度に近い結果が得られ、本研究で検討したメカニズムが、Pu 濃度が不均一な MOX 燃料における熱伝導率低下緩和の主要なメカニズムであることが裏付けられた。本研究で得られた MOX 燃料における熱伝導率低下緩和の評価モデルは、複数の不確定性要因を含むため、燃料メーカーが使用する燃料設計評価に直接適用するには、定量性の観点でまだ検討の余地があると考えられるものの、緩和のメカニズムを考慮する上では有用なモデルとなるものと考えられる。

第8章は結論であり、本研究で得られた成果を総括している。

以上をまとめると、本論文は、燃焼に伴って酸化物燃料の熱伝導率が低下する現象について、MOX 燃料特有の Pu 濃度不均一性による緩和効果のメカニズムを明らかにするとともに、その点を考慮した熱伝導率の燃焼度依存性を、より精度良く定量的に予測する手法を見出したものであり、原子力工学、特に核燃料工学に貢献するところが少なくない。

よって、本論文は合格と認められる。