



Title	Research on the thermal conductivity of MOX fuel with heterogeneous plutonium distribution
Author(s)	北野, 剛司
Citation	大阪大学, 2026, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/105462
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

論文内容の要旨

氏 名 (北 野 剛 司)

論文題名

Research on the thermal conductivity of MOX fuel with heterogeneous plutonium distribution
(不均一なプルトニウム分布を持つMOX燃料の熱伝導率に関する研究)

論文内容の要旨

混合酸化物 (MOX) 燃料は、プルトニウムとウランの酸化物 (U, Pu) O_2 で構成されている。現在、軽水炉で利用されているMOX燃料は両酸化物の粉末を micronized master blend (MIMAS) と呼ばれる方法により混合して製造されており、MIMAS法で製造されたMOX燃料は、局所的にPu濃度が高いスポットが分散している微細構造を有する。本論文は、MIMAS-MOX燃料の熱伝導率に関する研究結果をまとめたものであり、以下の五章で構成されている。

第一章では、序論として現状の課題を述べた。燃料特性や燃料照射挙動は温度に依存するため、熱伝導率は重要な燃料物性であり、いくつかの研究において、MIMAS-MOX燃料の不均一なPu分布が熱伝導率に与える影響が検討されている。いずれの研究もPuスポットの体積率に注目し、電子線マイクロアナライザー (EPMA) 画像を分析して、Puスポットの面積率からその影響を評価しているが、この評価方法では、面積率が同じ場合、Puスポット個々の大きさや分布状態の違いが反映されないという問題があった。そこで、本研究では、不均一なPu分布が熱伝導率に与える影響を検討し、MIMAS-MOX燃料の熱伝導率をより適切に評価できる方法の策定を目的とした。

第二章では、未照射 UO_2 単結晶及び多結晶試料の熱伝導率を測定し、温度依存性を明らかにした。熱伝導率の逆数である熱抵抗率を整理して、未照射 UO_2 の熱抵抗率を温度の一次式で表した。また、単結晶材料と多結晶材料の熱伝導率の比較から、 UO_2 の熱伝導率は結晶粒径に依存しないことを示し、(U, Pu) O_2 の熱伝導率も結晶粒径に依存しないと仮定した。

第三章では、MIMAS-MOX燃料とPu分布が均一なMOX燃料 (SBR-MOX燃料) について、未照射試料及び照射済試料を用いて熱伝導率を測定した。その結果、既往研究のとおり、Pu濃度と燃焼度の増加に伴い熱伝導率が低下することを確認した。さらに、照射済試料ではPu分布の影響によりMIMAS-MOX燃料とSBR-MOX燃料の熱伝導率に差があることを確認した。また、未照射のMIMAS-MOX燃料について、EPMAと電子後方散乱回折法 (EBSD) による観察を実施して、MIMAS-MOX燃料をPuスポット、中間相、U相の三相に領域分けし、これを不均一Pu分布の影響の検討に用いた。未照射試料に加えて、照射済試料のEPMA観察も実施して、照射後においても不均一なPu分布が残存していることを確認するとともに、拡散しにくい核分裂生成物 (FP) 元素であるNdの分布を調べ、Nd濃度が初期Pu濃度に比例していることを示した。

第四章では、熱伝導率の逆数である熱抵抗率に着目し、フォノン散乱理論に基づき、Pu原子及び核分裂による格子欠陥等をフォノン散乱源と仮定して、第二章で得られた未照射 UO_2 熱抵抗率に $(1 + \text{Pu濃度補正項} + \text{燃焼度補正項})$ を乗じることで、(U, Pu) O_2 の熱抵抗率を表した。この式による評価値はPu分布が均一であるSBR-MOX燃料の測定値とよく一致した。さらに、電気抵抗合成の考え方を応用し、熱の流れに対して、まず、直列に並んだ熱抵抗を合成し、その後、並列に並んだ熱抵抗を合成して全体の熱抵抗率、つまり、全体の熱伝導率を評価するモデルを提案した。第三章のEPMA観察より得られたMIMAS-MOX燃料のPu分布を、 $(\text{未照射}UO_2\text{熱抵抗率}) \times (1 + \text{Pu濃度補正項} + \text{燃焼度補正項})$ を用いて熱抵抗率分布に変換し、提案したモデルで熱抵抗率を合成して全体の熱伝導率を評価した。ここでは、第三章の観察結果に基づき、不均一なPu分布は照射前後で変化せず、また、燃焼度は初期Pu濃度に比例すると仮定した。Pu分布から評価された熱伝導率は測定値と一致したが、一部、乖離が見られたため、それらがよく一致するよう、熱抵抗率に与えるFP生成の影響について新たなモデル式を提案した。その結果、不均一なPu分布がMIMAS-MOX燃料の熱伝導率に与える影響をより精度良く評価することができた。

第五章では結論として、本論文の内容を総括し、不均一なPu分布を考慮して、MIMAS-MOX燃料の熱伝導率を適切に評価する方法を策定できたことを述べた。研究結果にもとづけば、不均一分布ではPu濃度の低い領域の燃焼度が低く熱抵抗が小さいため、その領域が熱伝導の高速経路として機能し、均一分布より熱伝導率が高くなりうることを示した。

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏 名 (北 野 剛 司)		
	(職)	氏 名
論文審査担当者	主 査 教授	牟 田 浩 明
	副 査 教授	北 田 孝 典
	副 査 教授	大 石 佑 治

論文審査の結果の要旨

混合酸化物 (MOX) 燃料は、プルトニウムとウランの酸化物 (U, Pu) O_2 で構成されている。現在、軽水炉で利用されている MOX 燃料は両酸化物の粉末を micronized master blend (MIMAS) と呼ばれる方法により混合して製造されており、MIMAS 法で製造された MOX 燃料は、局所的に Pu 濃度が高いスポットが分散している微細構造を有する。本論文は、MIMAS-MOX 燃料の熱伝導率に関する研究結果をまとめたものであり、以下の五章で構成されている。

第一章では、序論として現状の課題が述べられている。燃料特性や燃料照射挙動は温度に依存するため、熱伝導率は重要な燃料物性であり、いくつかの研究において、MIMAS-MOX 燃料の不均一な Pu 分布が熱伝導率に与える影響が検討されている。いずれの研究も Pu スポットの体積率に注目し、電子線マイクロアナライザー (EPMA) 画像を分析して、Pu スポットの面積率からその影響を評価しているが、この評価方法では、面積率が同じ場合、Pu スポット個々の大きさや分布状態の違いが反映されないという問題があった。以上を踏まえ、不均一な Pu 分布が熱伝導率に与える影響を検討し、MIMAS-MOX 燃料の熱伝導率をより適切に評価できる方法を策定するという本研究の目的が示されている。

第二章では、未照射 UO_2 単結晶及び多結晶試料の熱伝導率を測定し、その温度依存性が報告されている。熱伝導率の逆数である熱抵抗率を整理して、未照射 UO_2 の熱抵抗率を温度の一次式で表している。また、単結晶材料と多結晶材料の熱伝導率の比較から、 UO_2 の熱伝導率は結晶粒径に依存しておらず、(U, Pu) O_2 の熱伝導率も結晶粒径に依存しないと仮定できることを示している。

第三章では、MIMAS-MOX 燃料と Pu 分布が均一な MOX 燃料 (SBR-MOX 燃料) について、未照射試料及び照射済試料の熱伝導率を測定しその結果が示されている。既往研究のとおり、Pu 濃度と燃焼度の増加に伴い熱伝導率が低下することが確認され、さらに照射済試料では Pu 分布の影響により MIMAS-MOX 燃料と SBR-MOX 燃料の熱伝導率に差があることが確かめられている。また、未照射の MIMAS-MOX 燃料について、EPMA と電子後方散乱回折法 (EBSD) による観察を実施して、MIMAS-MOX 燃料を Pu スポット、中間相、U 相の三相に領域分けし、不均一 Pu 分布の影響の検討に適用している。未照射試料に加えて、照射済試料の EPMA 観察も実施して、照射後においても不均一な Pu 分布が残存していることを確認するとともに、拡散にくい核分裂生成物 (FP) 元素である Nd の分布を調べ、Nd 濃度が初期 Pu 濃度に比例していることを明らかにしている。

第四章では、熱伝導率の逆数である熱抵抗率に着目し、フォノン散乱理論に基づき、Pu 原子及び核分裂による格子欠陥等をフォノン散乱源と仮定して、第二章で得られた未照射 UO_2 熱抵抗率に $(1 + \text{Pu 濃度補正項} + \text{燃焼度補正項})$ を乗じることで、(U, Pu) O_2 の熱抵抗率を表すことに成功している。この式による評価値は Pu 分布が均一である SBR-MOX 燃料の測定値とよく一致しており、さらに電気抵抗合成の考え方を応用し、熱の流れに対して、まず直列に並んだ熱抵抗を合成し、その後並列に並んだ熱抵抗を合成して全体の熱抵抗率、つまり全体の熱伝導率を評価するモデルを提案している。第三章の EPMA 観察より得られた MIMAS-MOX 燃料の Pu 分布を、 $(\text{未照射 } UO_2 \text{ 熱抵抗率}) \times (1 + \text{Pu 濃度補正項} + \text{燃焼度補正項})$ を用いて熱抵抗率分布に変換し、提案したモデルで熱抵抗率を合成して全体の熱伝導率を評価している。ここでは、第三章の観察結果に基づき、不均一な Pu 分布は照射前後で変化せず、また、燃焼度は初期 Pu 濃度に比例すると仮定している。Pu 分布から評価された熱伝導率は測定値と一致したが、一部、乖離が見られたため、それらがよく一致するよう、熱抵抗率に与える FP 生成の影響について新たなモデル式が提案されており、その結果、不均一な Pu

分布が MIMAS-MOX 燃料の熱伝導率に与える影響をより精度良く評価することに成功している。

第五章では結論として、本論文の内容を総括し、不均一な Pu 分布を考慮して、MIMAS-MOX 燃料の熱伝導率を適切に評価する方法を策定できたことが述べられている。研究結果にもとづけば、不均一分布では Pu 濃度の低い領域の燃焼度が低く熱抵抗が小さいため、その領域が熱伝導の高速経路として機能し、均一分布より熱伝導率が高くなりうることが示されている。

以上のように、本論文は微細組織観察にもとづいた分析をもとに、工学的に重要である MOX 燃料の熱伝導率を定量的に評価する手法を構築している。よって本論文は博士論文として価値あるものと認める。