

## 高速炉MOX燃料の照射挙動把握に向けたX線CT技術の開発と照射挙動評価

石見, 明洋

<https://hdl.handle.net/2324/2236223>

---

出版情報 : Kyushu University, 2018, 博士 (工学), 課程博士  
バージョン :  
権利関係 :

氏 名 : 石見 明洋

論 文 名 : 高速炉 MOX 燃料の照射挙動把握に向けた X 線 CT 技術の開発と照射挙動評価

区 分 : 甲

## 論 文 内 容 の 要 旨

高速炉燃料は原子炉内での燃焼に伴い、燃料ペレットと被覆管との機械的相互作用 (PCMI) や集合体ラッパー管と燃料ピンとの相互作用 (BDI) 等による変形および破損の可能性がある。このため、高速炉燃料の開発では、実機燃料を用いた照射試験を行い、照射後試験にて燃料の組織変化等を定量的に評価することで照射挙動について把握し、それらのデータを設計へ反映することが必要である。従来の照射後試験では、燃料集合体を解体し燃料ピンを切断して金相データを取得してきたが、燃料ペレットの一断面のデータを取得するまでに多大な時間を必要し、得られるデータ数に限りがあるという課題があった。さらに、試験に伴い多くの放射性廃棄物が発生していた。そのため、高速炉燃料の照射後試験技術として、短時間に多数のデータを取得し、データ取得による放射性廃棄物が発生しない非破壊検査技術の導入が求められてきた。

非破壊検査法としては、X 線ラジオグラフィ試験があったが、燃料集合体から放出される  $\gamma$  線の影響により鮮明な透過像が得られないこと、一方向からの透過像であることから、燃料ピンの詳細な配置状況等を観察することが困難であった。X 線 CT 技術は、医療診断分野の他に自動車等の検査として産業分野においても広く適用されており、三次元的な観察が可能である。高速炉燃料の照射後試験へ X 線 CT 技術を適用することができれば、集合体を解体せずに三次元的な観察ができることが期待される。

本論文では、X 線 CT 技術を照射済燃料の非破壊検査技術として適用するための技術開発、本技術を用いた高速炉燃料の照射挙動を評価することを目的として実施した研究について記した。

第 1 章では、本研究の背景として高速炉燃料の開発状況及びこれまでの照射後試験技術について説明し、高速炉燃料の照射挙動把握に向けた課題と本研究の目的を示した。

第 2 章では、高速炉燃料の照射挙動把握に向けた照射後試験技術として X 線 CT 技術を適用させるために実施した技術開発について記した。照射後試験への適用検討を開始した当初は、照射済燃料集合体から放出される高強度の  $\gamma$  線の影響により鮮明な画像が得られなかったが、よりエネルギーの高い (加速電圧 12MV) パルス X 線源を用いることで、外形変化だけでなく、燃料ピン内部の燃料ペレットも観察できることが判った。設計に反映するためには、より高効率、高解像度の観察を行う必要があった。そこで、X 線の焦点サイズを可能な限り小さくするとともに、コリメータスリット形状に調整すること、検出器の半導体素子の最適設計および稠密配置をすることで透過 X 線の利用効率の向上に成功した。また、0.1 mm の極細スリットを持つコリメータを開発することで、0.1 mm の画素サイズを持つ世界で唯一の照射済燃料に対する高解像度 X 線 CT 画像の取得に成功した。高速炉燃料の照射挙動把握には、組織変化を定量的に評価することから、取得される X 線 CT 画像より、中心空孔、燃料ペレット・被覆管外径、ペレット-被覆管ギャップ、密度分布、組織変化領域径を定量的に評価するための画像解析手法を構築した。

第3章では、開発した高エネルギーX線CT技術で得られた照射済燃料の観察データと、別途計算評価した稼動中の燃料の線出力やペレット内温度分布とを対比することにより、高密度燃料ペレット、低密度燃料ペレット及び中空燃料ペレットの照射挙動についての新知見について記した。

高密度燃料ペレットでは、線出力に依存して中心空孔が形成され、約320W/cm以上の局所的な線出力において中心空孔が形成されることが分かった。照射初期における温度評価の結果、本線出力ではレンズ状ボイドが移動すると考えられる温度まで上昇していることを確認した。なお、照射末期には温度が低下することを確認した。燃料ペレット内の密度評価結果より、低線出力環境下において燃料ペレット中心付近にFPガスの蓄積、析出によるガスバブル領域が発生することがわかった。高線出力にて照射された燃料ペレットは、レンズ状ボイドの移動に伴い、中心空孔の形成、中心空孔周辺において高密度化（柱状晶領域の形成と予測される）を確認した。また、50GWd/t以上の燃焼度になると、燃料ペレット外周部にてFPガスが蓄積し、周方向にリング状のFPガスバブル領域（密度低下領域）が形成されることがわかった。

低密度燃料ペレットでは、線出力約180W/cm以上で中心空孔が形成されていることを確認した。低密度燃料ペレットでは、照射末期においてレンズ状ボイドが移動する温度まで上昇していることが分かった。これはギャップ幅拡大等によるギャップコンダクタンスの低下によって温度上昇が発生したと考えられる。同等の線出力および燃焼度の高密度燃料ペレットにおいては、照射末期における温度上昇は確認されなかったことから、低密度燃料ペレットにおいては、線出力と燃焼度（燃焼の進行）に依存して中心空孔が形成されることが推定された。

中空燃料ペレットでは、約370W/cm（燃焼度は約26GWd/t）以上の線出力を持つ燃料ペレットの中空周辺にて密度低下が生じていることが確認された。また、約370W/cm以上において中空孔サイズが縮小していることから、ペレット中心方向にスエリングが発生することで中空孔のサイズが縮小していることが推定された。また、400W/cm以上においては中空孔サイズが拡大していること、温度評価の結果レンズ状ボイドが移動する温度まで上昇していることから、気泡移動（中空に吸収）に伴う中空孔サイズの拡大が発生していることが考えられる。中空孔周辺の密度低下の条件は、中空孔周辺の温度上昇に伴う気泡の移動及び中空孔周辺部での蓄積から発生することがわかった。本結果より、線出力（燃焼度）の増加と共に、中空孔サイズが縮小して、その後に拡大する挙動を示すことが分かった。

最後に第4章では、第1章から第3章までに得られた主な知見についてまとめて、本論文の総括とした。