

高エネルギー X 線 CT を利用した照射後試験技術の 開発と高速炉燃料の照射挙動評価

学位論文内容の要旨

材料の形状変化測定、欠陥観察などの非破壊試験は、構造物の健全性確認や寿命評価において重要である。原子力の分野においても、多くの構造物、材料について数々の方法で非破壊試験が行われ、原子力施設の安全性向上に貢献している。

これまで、原子炉で照射し、高い放射能強度を有する燃料集合体内での変形測定と内部観察を目的とした非破壊透過試験方法として、X 線や中性子を線源としたラジオグラフィが実施されてきた。これらは、透過画像による内部構造物の変形の有無等の観察を目的としており、集合体横断面における燃料ピンの配置状況等の観察はできない。

医学的検査の重要な手段の一つとして開発されてきた X 線 CT (Computer Tomography) 技術は、複数方向の透過 X 線データを計算機で処理することにより横断面における断層画像を得ることができる。この手法により、従来の単純な透過法に比べ、人体内の異常組織の位置、大きさ、形状等の情報を詳細に把握でき、医学的検査法は飛躍的に進歩した。

本研究では、この X 線 CT 技術を照射済燃料集合体の非破壊試験に適用して、新しい照射後試験技術を確立した。本技術開発によって初めて燃料集合体の横断面 CT 画像を得るとともに、これを利用して集合体内における燃料ピンの変位挙動や燃料ペレットの中心空孔の形成挙動といった高速炉燃料特有の照射挙動をはじめて明らかにした。

本論文は以下の 5 章から構成されている。第 1 章では、研究の背景として高速炉燃料の研究開発や照射後試験の現状について述べるとともに、高速炉燃料の照射挙動を把握するうえでの課題と研究目的を示した。

第 2 章では、X 線 CT を利用した非破壊による照射後試験技術の確立について述べる。実際に照射した燃料集合体に本技術を適用し、得られた横断面 CT 画像の性能等について確認した。本研究では、高エネルギー X 線をパルス状に試験体に照射し、それと同期した検出システムを採用することにより、試験体からの極めて強い γ 線放射の影響を軽減し、高燃焼度まで照射した燃料集合体で鮮明な横断面 CT 画像を得ることに世界ではじめて成功した。この画像により、これまで破壊試験でしか得られなかったデータを非破壊試験で取得可能になり、作業効率の向上と放射性廃棄物の発生量の低減化にも貢献できることを確認した。

第 3 章では、X 線 CT 装置を高速実験炉「常陽」で照射した燃料集合体に適用し、得られた横断

面 CT 画像から集合体の形状や燃料ピンの配置状況を定量的に測定する手法を確立するとともに、高速炉燃料の照射挙動について考察した。その結果、集合体の最外周に装荷された燃料ピンのラッパ管側 (外側) への変位挙動やワイヤピッチに沿った局所的な曲がり挙動をはじめて把握することができた。さらに、最外周に装荷された燃料ピンの曲がり挙動を計算コードにより予測し、CT による実測値と比較した結果、ワイヤピッチに沿った局所的な曲がり等の傾向が両者でほぼ一致した。これにより実測できない燃料ピンの曲がり挙動を予測できる可能性も示唆された。

第 4 章では、X 線 CT 装置にて取得した照射済燃料集合体の横断面 CT 画像から、燃料ペレットに形成された中心空孔の大きさを測定する手法を確立するとともに、中心空孔の形成に及ぼす製造条件等の影響を評価した。その結果、実際に照射した燃料集合体では、中心空孔は炉心中心側に近い燃料ペレットで大きくなる傾向を確認した。さらに、中心空孔の形成に及ぼす製造条件等の影響について詳細に検討した結果、線出力とスミヤ密度の両者で整理した場合には、中心空孔径との相関関係が見出されることが確認された。本技術の確立により、集合体に装荷されている全ての燃料ペレットについてデータ取得が可能となった。これにより、これまで破壊試験で取得してきた手法と比べるとデータ数が格段に増えるだけでなく、中心空孔形成に及ぼす製造条件等の影響を精度良く把握することが可能となり、中心空孔の形成挙動を把握するうえで大きな進歩がもたらされた。

第 5 章では、本研究で得られた成果を総括するとともに、今後の展望等を示した。

本研究では、これまで不可能視されていた X 線 CT 技術を照射済燃料・材料の非破壊試験に応用して、照射した燃料集合体の鮮明な横断面画像や三次元画像をえることに世界ではじめて成功した。これにより、これまで確認できなかった照射済燃料集合体内での燃料ピンの配置状況等が実験的に測定でき、BDI (Bundle Duct Interaction) 挙動評価等に有力なデータ取得が可能となった。さらに、燃料ペレット内の中心空孔の大きさも把握することができ、これまで破壊試験で実施してきた観察の多くが非破壊試験で実施可能となった。

以上、本研究により高速炉燃料の高性能化・高燃焼度化を図る上で極めて有用な X 線 CT による非破壊照射後試験技術を確立することに成功した。この新技術は、高速炉燃料開発のみならず、「もんじゅ」燃料集合体等への適用を期待できる。

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

高エネルギー X 線 CT を利用した照射後試験技術の 開発と高速炉燃料の照射挙動評価

構成材料中の形状変化測定、欠陥観察などの非破壊試験は、構造物の健全性確認や寿命評価において重要である。原子力の分野においても、多くの構造物、材料について数々の方法で非破壊試験が行われ、原子力施設の安全性向上に貢献している。

これまで、原子炉で照射し、高い放射能強度を有する燃料集合体内での変形、内部観察を目的とした非破壊透過試験方法として、X 線や中性子を線源としたラジオグラフィが実施されてきた。これらは、透過画像による内部構造物の顕著な変形の有無等の観察を目的としており、集合体横断面における燃料要素の配置状況等の観察はできない。医学的検査の重要な手段の一つとして開発されてきた X 線 CT (Computer Tomography) 技術は、複数方向の透過 X 線データを計算機で処理することにより横断面における断層画像を得ることができる。この手法により、従来の単純な透過法に比べ、人体内の異常組織の位置、大きさ、形状等の情報をより詳細に把握でき、医学的検査法は飛躍的に進歩した。

本研究では、この X 線 CT 技術を照射済燃料集合体の非破壊試験に適用し、新しい照射後試験技術を確立した。さらに、本技術開発によって初めて取得した燃料集合体の横断面 CT 画像を利用して集合体内における燃料要素の変位挙動や燃料ペレットの中心空孔の形成挙動といった高速炉燃料特有の照射挙動を始めて明らかにした。

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、研究の背景として高速炉燃料の研究開発や照射後試験の現状について述べるとともに、高速炉燃料の照射挙動を把握するうえでの課題と研究目的を示している。

第 2 章では、X 線 CT を利用した非破壊による照射後試験技術を確立するとともに、実際に照射した燃料集合体に本技術を適用し、得られた横断面 CT 画像の性能等について確認した。本技術開発において、著者は γ 線の影響を排除するため、高エネルギー X 線をパルス状に試験体に照射すること等を培った放射線取扱い業務の経験から提案した。これらの提案を取り入れた装置を製作メーカーにおいて設計・製作し、試験体からの強度の γ 線放射の影響を受けずに、高燃焼度まで照射した燃料集合体で鮮明な横断面 CT 画像を得ることに世界で始めて成功した。この画像により、これまで破壊試験でしか得られなかったデータをも非破壊試験で取得可能になり、作業効率の向上、放射性廃棄物の発生の低減化にも貢献できることを確認した。

第3章では、X線CT装置を高速実験炉「常陽」で照射した燃料集合体に適用し、得られた横断面CT画像から集合体の形状や燃料要素の配置状況を定量的に測定する手法を確立するとともに、高速炉燃料の照射挙動について考察した。その結果、集合体の最外周に装荷された燃料要素のラッパ管側(外側)への変位挙動やワイヤピッチに沿った局所的な曲がり挙動をはじめて把握することができた。さらに、最外周に装荷された燃料要素の曲がり挙動を計算コードにより予測し、CTによる実測値と比較した結果、ワイヤピッチに沿った局所的な曲がり等の傾向が両者ではほぼ一致した。これにより実測できない燃料要素の曲がり挙動を予測できる可能性も示唆された。

第4章では、X線CT装置にて取得した照射済燃料集合体の横断面CT画像から、燃料ペレットに形成された中心空孔の大きさを測定する手法を確立するとともに、中心空孔の形成に及ぼす製造条件等の影響を評価した。その結果、実際に照射した燃料集合体では中心空孔は炉心中心側に近い燃料ペレットで大きくなる傾向が確認された。さらに、中心空孔の形成に及ぼす製造条件等の影響について詳細に検討した結果、線出力とスミヤ密度の両者で整理した場合には、中心空孔径との相関関係が見出されることが確認された。本技術の確立により、集合体に装荷されている全ての燃料ペレットについてデータ取得が可能となった。これにより、これまで破壊試験で取得してきた手法と比べるとデータ数が格段に増えるだけでなく、中心空孔形成に及ぼす製造条件等の影響を精度良く把握することが可能となり、中心空孔の形成挙動を把握するうえで大きな進歩がもたらされた。

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、 γ 線の影響を排除するためのパルス状X線検出システム等を導入するなどして、これまで不可能視されていたX線CT技術を照射済燃料等の非破壊試験に応用することを可能とした。これにより、照射した燃料集合体の鮮明な横断面画像や三次元画像の取得に世界で始めて成功している。さらに、著者は、高速実験炉「常陽」で照射した集合体の測定を行い、燃料要素の配置状況や燃料ペレット内の中心空孔の大きさ等を実験的に示すことにより、はじめて高速炉燃料の照射挙動を明らかにしている。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。