

原子力システム研究開発事業基盤技術開発分野  
革新技術創出型 事後評価総合所見

評価の概略	
研究開発課題名（研究機関名）： <b>「高解像度X線CTによる燃料棒、燃料集合体の照射挙動の究明」</b> （独立行政法人日本原子力研究開発機構）	
研究期間及び予算額：平成20年度～平成22年度（3年計画）256,315千円	
項目	要 約
1. 研究開発の概要	高速増殖炉の燃料集合体の全燃料棒の照射による変形、異常さらには全燃料ペレットの中心空孔径等を高精度で測定するために、既設の X 線 CT による寸法測定精度（画像性能）を 0.1 mm から 0.03 mm までに向上させた。CT 画像からの画像解析手法を開発し集合体を解体せずに燃料ペレット内の中心空孔や燃料ペレット密度等の膨大なデータを短時間に獲得する技術は軽水炉の燃料集合体にも適用を可能とした。
2. 総合評価	<div style="display: flex; align-items: center;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-right: 10px; font-size: 2em; font-weight: bold; text-align: center;">S</div> <div> <p>従来の金相法では困難であった多量の核燃料照射後データの取得・解析が短時間で可能となり、照射後データをフィードバックすることにより核燃料設計の革新に繋がることや X 線 CT 値から密度（相対値）の評価が可能であることを世界で初めて示す等、画期的な成果が得られており、今後の発展が大いに期待される。</p> <p>S) 極めて優れた成果を挙げ、今後の展開が大いに期待できる。            A) 優れた成果を挙げ、今後の展開が期待できる。            B) 成果の一部は得られてないが、他は相応の成果を挙げている。            C) 成果の多くが得られておらず、一部についてのみ相応の成果を挙げている。            D) 成果がほとんど挙げられていない。</p> </div> </div>

評価の詳細

研究開発課題名（研究機関名）：

「高解像度X線CTによる燃料棒、燃料集合体の照射挙動の究明」

(独立行政法人日本原子力研究開発機構)

機関名：独立行政法人日本原子力研究開発機構

代表者氏名：浅賀健男

研究期間及び予算額：平成20年度～平成22年度（3年計画） 256,315 千円

平成20年度 63,711 千円

平成21年度 162,025 千円

平成22年度 30,579 千円

項目	内容
1. 目的・目標	<p>高速増殖炉燃料の研究開発では、燃料被覆管に新型材料（ODS 鋼等）を採用するとともに、燃料ペレットについては中空形状を採用すること等により高燃焼度化を達成し、燃料費の大幅な低減を図っていく必要がある。このような高性能・高燃焼度燃料の開発にあたっては、種々な燃料を多数原子炉で照射し、その照射後試験を迅速に行って燃料や材料等のふるまいを確認することが不可欠である。これまで国内外において、原子炉で照射した燃料の照射挙動の解明に関しては、非破壊試験に加えて光学顕微鏡観察などの破壊試験を実施してきた。しかしながらこのような従来の照射後試験手法では、多大な時間と労力を必要とし、さらには破壊試験であるが故に放射性廃棄物の大量発生を招くとともに、得られるデータ数も限られていた。</p> <p>そこで本研究では、燃料ペレットの組織変化状態を把握するための非破壊による高解像度 X 線 CT 検査技術を確立した上で、燃料ペレット内で組織変化により生じた中心空孔の大きさや、ペレット内部の密度変化等を高解像度 X 線 CT 検査技術により短時間かつ高精度で測定し、照射に伴う状態変化を集合体全体にわたり定量化するとともに、得られたデータに対して製造仕様や照射条件等の影響を系統的に評価し、高速増殖炉燃料の照射挙動を解明することを目標とする。</p>
2. 研究成果	<p>【研究開発項目 1：高解像度 X 線 CT 検査技術の確立】</p> <p>[得られた成果]</p> <p>高解像度 X 線 CT 検査技術を確立するために、既存の X 線 CT 検査装置について、X 線発生側（X 線焦点形状の最適化）と X 線検出側（検出器系の高度化等）においてそれぞれ高性能化を図るとともに、得られた CT 画像から中心空孔径等を精度良く定量化する画像解析手法を構築した。</p> <p>1) X 線焦点形状の最適化</p> <p>X 線発生装置の X 線焦点形状の最適化作業を実施した。具体的には、直径 1.0mm の円状の X 線焦点形状を長方形形状の検出器コリメータのスリット形状に合致させた。これにより X 線焦点形状が垂直方向に長軸を持つ楕円形状となり、挙動評価上重要な水平方向の焦点サイズの微細化により解像度が向上するとともに、検出器のコリメータスリット形状と合致したことから、検出器への X 線の有効入射量も増加した。</p> <p>2) X 線源画像性能確認試験</p>

画像性能を詳細に確認するために燃料ペレットの中心空孔や組織変化状況等を模擬した試験体(模擬試験体)を製作し、CT 画像を定量的に評価するとともに、高解像度化による効果を定量的に評価する基礎データを取得した。

### 3) 検出器系の高度化

検出器系の高度化では、コリメータスリットの微細化、高感度半導体検出器の導入及び検出チャンネル数の増加等により画像性能の大幅な向上を図った。特にコリメータスリットの微細化については、加工性の悪いタングステン製のコリメータにメタルソーにより幅 0.1mm で長さ 230mm に渡りスリット加工する技術を確立し、それらを扇状に 100 本設けることに成功した。さらに検出器については、厚さが極めて薄く、検出器を密に配置できる高感度半導体検出器を採用し、検出チャンネル数の大幅な増加を達成し、X 線の利用効率を 3 倍以上に向上させた。

### 4) 画像解析手法の高度化

検出器系の高度化に伴い取扱い情報量が大幅に増大することから、これに適応した燃料ペレット内の中心空孔径算出手法を構築することによって CT 画像より得られる寸法測定精度の向上を図った。また、密度が既知の模擬試験体の CT 画像から、密度の定量化に資する校正データを取得し、燃料ペレット内の密度変化を定量的に評価する燃料ペレット密度識別手法を構築した。

### 5) 画像性能確認試験

高解像度 X 線 CT 検査技術について模擬試験体を用いた画像性能確認試験を実施し、寸法測定精度等を定量的に評価した。中心空孔測定性能については、従来は測定精度が $\pm 0.1$  mmであったが、高度化により従来の約 3 分の 1 に相当する $\pm 0.03$  mm以内となった。密度識別性能については、密度差が約 1.3%以上であれば、密度識別が可能であることを確認した。

## 【研究開発項目 2：高速増殖炉燃料の照射挙動の解明】

### [得られた成果]

高解像度 X 線 CT 検査技術を高速実験炉「常陽」で実際に照射した燃料集合体に適用し、得られた X 線 CT 画像から高速増殖炉燃料の照射挙動を解明した。

#### 1) 「常陽」照射燃料集合体の照射後試験

高速実験炉「常陽」で照射した燃料集合体の X 線 CT 試験を実施し、実照射燃料の高解像度 X 線 CT 画像を取得した。得られた画像を観察した結果、燃料ペレット内に形成された中心空孔やクラック、さらには微細な FP ガス気泡が多数集積して形成されたとみられる低密度化した領域まで明瞭に確認でき、照射後の燃料ペレットの組織変化状態が非破壊で把握できるようになった。また、X 線 CT データとの比較評価に資するために、当該燃料ペレットの金相試験を実施し、中心空孔の大きさ、柱状晶領域、等軸晶領域といった照射に伴う燃料組織状態変化に関する定量データを取得した。

#### 2) 画像解析手法の校正・検証

構築した画像解析手法(燃料ペレット内の中心空孔径算出手法、燃料ペレット密度識別手法)について、それぞれ金相試験結果との比較評価により、校正・検証を実施し、実照射燃料においても目標精度を達成していることを確認した。

#### 3) X 線 CT データに基づく照射挙動評価

中心空孔については、全燃料棒 127 本について軸方向 19 断面（19 断面×127 本：2413 データ）の高解像度 X 線 CT 画像の画像解析を実施し、製造仕様や照射条件等の影響を評価した。中心空孔形成に及ぼす製造仕様の影響として製造ロットによる差異を評価した結果、製造時のペレット外径平均値がわずかに大きく、ペレット密度平均値がわずかに高い製造ロットでは、形成される中心空孔径が小さい傾向にあることを大量の実測データから明らかにした。また、照射条件の影響として線出力による影響について評価した結果、中心空孔は線出力が約 300 W/cm を超えると形成され、線出力に依存して大きくなることがわかった。また、集合体内における径方向の中心空孔の分布状況を確認した結果、炉心中心側に装荷された燃料ペレットの中心空孔が大きくなることを明らかにした。

次に燃料ペレット内の径方向密度分布等を評価した結果、軸方向炉心上端及び下端部では、燃料ペレット外周部の密度は製造時と同じ約 94 %T.D. を示し、燃料ペレットの中央部に近づくにつれて密度が低下し、約 85 %T.D. 程度まで低下することを実測データにより明らかにした。この密度が低下した領域は、金相写真において燃料ペレット中央部に FP ガス気泡が粒界等に析出した、いわゆるガスバブル領域が観察された領域と概ね一致している。一方、中心空孔が確認された軸方向炉心中心位置では、燃料ペレット外周部の密度は約 94 %T.D. を示し、中央部に近づくにつれて密度が高くなり、中心空孔の周辺では約 98 %T.D. まで高密度化していることを明らかにした。この高密度化した領域は、金相写真で観察される柱状晶領域とよく一致した。

燃料ペレットの熱解析を実施し、照射温度を推定するとともに中心空孔の大きさを試算した結果、燃料集合体の中心に装荷された燃料棒の軸方向炉心中心位置における燃料ペレット最高温度は約 2260 °C と推定され、ここで形成される中心空孔の大きさは  $\phi 0.91$  mm と試算された。同じ位置において画像解析により実測された中心空孔径の直径は  $\phi 0.80$  mm であり、熱解析の結果とほぼ一致した。

### 【研究開発項目 3 超高解像度 X 線 CT 検査技術の開発】

#### 【得られた成果】

金相写真により近い解像度レベルでの燃料ペレット観察を目的とした超高解像度 X 線 CT 検査技術の開発に向けた検討を実施した。

#### 1) X 線焦点の超微細化の概念検討

燃料集合体を試験対象とした高エネルギー X 線焦点の超微細化の限界と同線源を導入した場合の到達可能な画像性能について検討した。数十  $\mu\text{m}$  の極細のタングステンワイヤーをターゲットに用いる方式では、X 線焦点サイズを  $\phi 100 \mu\text{m}$  まで超微細化可能であることがわかった。また、この X 線焦点サイズで性能を試算した結果、中心空孔径の寸法測定精度は  $\pm 0.01\text{mm}$  程度まで向上することを明らかにした。

#### 2) マイクロフォーカス X 線 CT 検査技術の検討作業

燃料棒単体を試験対象として、マイクロフォーカス X 線 CT 検査装置による予備実験及び検討作業を実施した。アルミニウム及びステンレス (SUS) の模擬燃料ペレットでは分解能の高い CT 画像が得られた一方、鉛のような高密度材料において分解能の高い CT 画像を得るためには、X 線のエネルギーを 800 kV 以上にすることがわかった。予備実験の結果から、マイクロフォーカス X 線 CT 検査技術により、ステンレスと鉛のほぼ中間の密度を持つ燃料ペレットを対象として分解能の

高い CT 画像を取得するためには 600kV 以上の高エネルギー化（現状の X 線エネルギーは最大でも 450 kV 程度）が必要であることを明らかにした。

【論文、特許等】

[受賞]

1) 石見 明洋ら、日本原子力学会北関東支部若手研究者発表会、最優秀発表賞、“高解像度 X 線 CT による燃料棒、燃料集合体の照射挙動の究明”、平成 22 年 4 月 23 日

[プレス発表]

1) 世界最高解像度の高エネルギー X 線 CT 検査装置の開発に成功、茨城県政記者クラブ、文部科学記者会、科学記者会及び経済産業記者会、平成 22 年 3 月 23 日（常陽新聞、日刊工業新聞、科学新聞に掲載）

[論文発表]

1) 勝山 幸三ら、“超高解像度高エネルギー X 線 CT 検査装置の開発”、検査技術 Vol. 16 No. 2、平成 23 年 2 月 1 日

[口頭発表]

1) 勝山 幸三ら、“Development of high resolution X-ray CT technique for the irradiated fuel pellet”、46th annual meeting ‘Hot laboratories and remote handling’ Working Group、平成 22 年 9 月 9 日

2) 浅賀 健男ら、“高解像度 X 線 CT による燃料棒、燃料集合体の照射挙動の究明；(1) 全体計画とこれまでの成果の概要”、日本原子力学会 2010 年秋の大会、平成 22 年 9 月 15 日

3) 永峯 剛ら、“高解像度 X 線 CT による燃料棒、燃料集合体の照射挙動の究明；(2) 高解像度 X 線 CT 検査技術の確立”、日本原子力学会 2010 年秋の大会、平成 22 年 9 月 15 日

4) 勝山 幸三ら、“高解像度 X 線 CT による燃料棒、燃料集合体の照射挙動の究明；(3) 照射済み燃料集合体の X 線 CT 撮像結果”、日本原子力学会 2010 年秋の大会、平成 22 年 9 月 15 日

5) 佐々木 新治ら、“高解像度 X 線 CT による燃料棒、燃料集合体の照射挙動の究明；(4) 照射済み燃料の金相試験結果”、日本原子力学会 2010 年秋の大会、平成 23 年 3 月 30 日

6) 勝山 幸三ら、“高解像度 X 線 CT による燃料棒、燃料集合体の照射挙動の究明；(5) X 線 CT データに基づく照射挙動評価”、日本原子力学会 2010 年秋の大会、平成 23 年 3 月 30 日

7) 勝山 幸三ら、“Development of high resolution X-ray CT technique for the irradiated fuel pellets”、International Conference on Advancements in Nuclear Instrumentation, Measurement Methods and their Applications -ANIMMA 2011, Ghent, Belgium. 平成 23 年 6 月 8 日

<p>3. 事後評価</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 目標達成度</li> <li>・ 技術の革新性</li> <li>・ 研究開発効果</li> </ul>	<p><b>【目標達成度】</b>      現有システムをベースとして大幅な改造を実施し、開発目標である照射済燃料体の寸法精度および密度識別性能の目標値は達成され、期待通りの大幅な性能向上が達成されたと認められる。</p> <p><b>【技術の革新性】</b>      核燃料開発に照射後試験は欠かせない。照射後試験で重きをなすのは破壊検査で、本研究は、その破壊検査を非破壊で代替させようとするものである。燃料照射挙動の理解には系統的なデータ取得がベースであるが、それに答えられる本手法は高速炉燃料（中空ペレットタイプ）を実用化する上で革新的な技術と考えられる。</p> <p><b>【研究開発効果】</b>      本研究により、燃料照射挙動に関する系統的なデータ取得が可能になり、合理的（経済的）で信頼性が高い燃料設計に寄与することが期待できる。</p>
<p>4. その他</p>	<p>開発した高精度化 X 線 CT 技術を生かした解析手法を更なる高度化を行って頂きたい。本研究成果の普及および波及効果は、解析技術の高度化に大きく左右されると考えられる。また、本事業にて検討を開始した超高解像度 CT 技術についても、更なる検討と将来的な実現を期待する。</p>