

# 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

(受託者) 独立行政法人日本原子力研究開発機構

(研究代表者) 浅賀 健男 大洗研究開発センター 燃料材料試験部

(研究開発期間) 平成 20 年度～22 年度

## 1. 研究開発の背景とねらい

高速増殖炉燃料の研究開発では、燃料被覆管に ODS 鋼等を採用するとともに、燃料ペレットに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。これまで原子炉で照射した燃料の照射挙動解明に関しては、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。しかしながら従来の照射後試験手法では多大な時間と労力を要し、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き、得られるデータ数も限られていた。

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した。

### 1-1 高解像度 X 線 CT 検査技術の確立

既存の X 線 CT 検査装置 (図 1) は、高速増殖炉燃料の寿命制限因子であるバンドル-ダクト機械的相互作用 (BDI 挙動) の解明を主な目的として設計され、集合体内における燃料棒の位置識別等が可能である<sup>[1]~[3]</sup>。本研究では、燃料棒内に装荷されている燃料ペレットの組織変化状態等を把握するために高解像度化を図り、寸法測定精度 ( $\pm 0.1\text{mm} \rightarrow \pm 0.03\text{mm}$ )、密度識別性能 (4% $\rightarrow$ 1%) の向上を目指す。さらに、金相写真と同等な解像度レベルを目指し、革新的な技術を導入した超高解像度 X 線 CT 検査技術の開発に向けた検討を実施する。

### 1-2 高速増殖炉燃料の照射挙動の解明

MOX 燃料を高速増殖炉で照射すると、ペレット中心温度は 2000 °C を超え、半径方向に生じる大きな温度勾配によって、軽水炉燃料に比べ著しい組織変化を起こす。また、燃料密度はペレット熱伝導度を介して温度評価に影響するとともに、燃焼が進んだ場合 FP 蓄積によるスウェリング挙動を介して燃料と被覆管の機械的相互作用を支配する。

これら組織変化状態を知ることは燃料棒内の熱的・機械的挙動を知る上で極めて重要な情報であり、これまでは破壊試験(金相組織観察)により取得してきた。本研究で上記の目標が達成できれば、集合体に含まれる全燃料棒に関して任意の横断面でデータが取得できるので、燃料集合体、燃料棒の照射挙動解析精度は飛躍的に向上する。

## 2. 研究開発成果

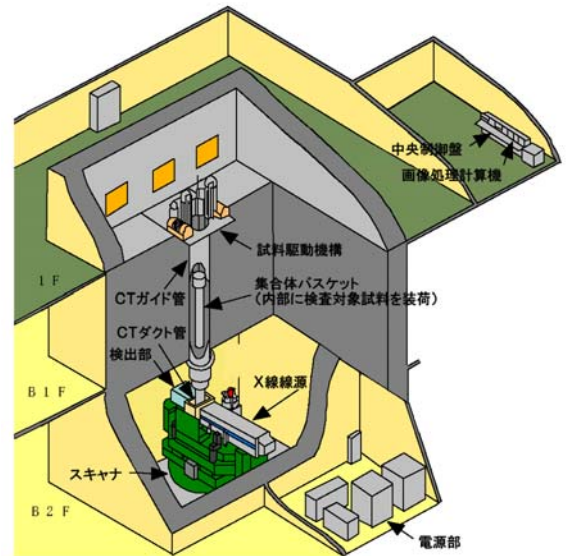


図 1 X 線 CT 検査装置の概要

## 2-1 高解像度 X 線 CT 検査技術の確立

高解像度 X 線 CT 検査技術を確立するため、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 (図 2 参照)。

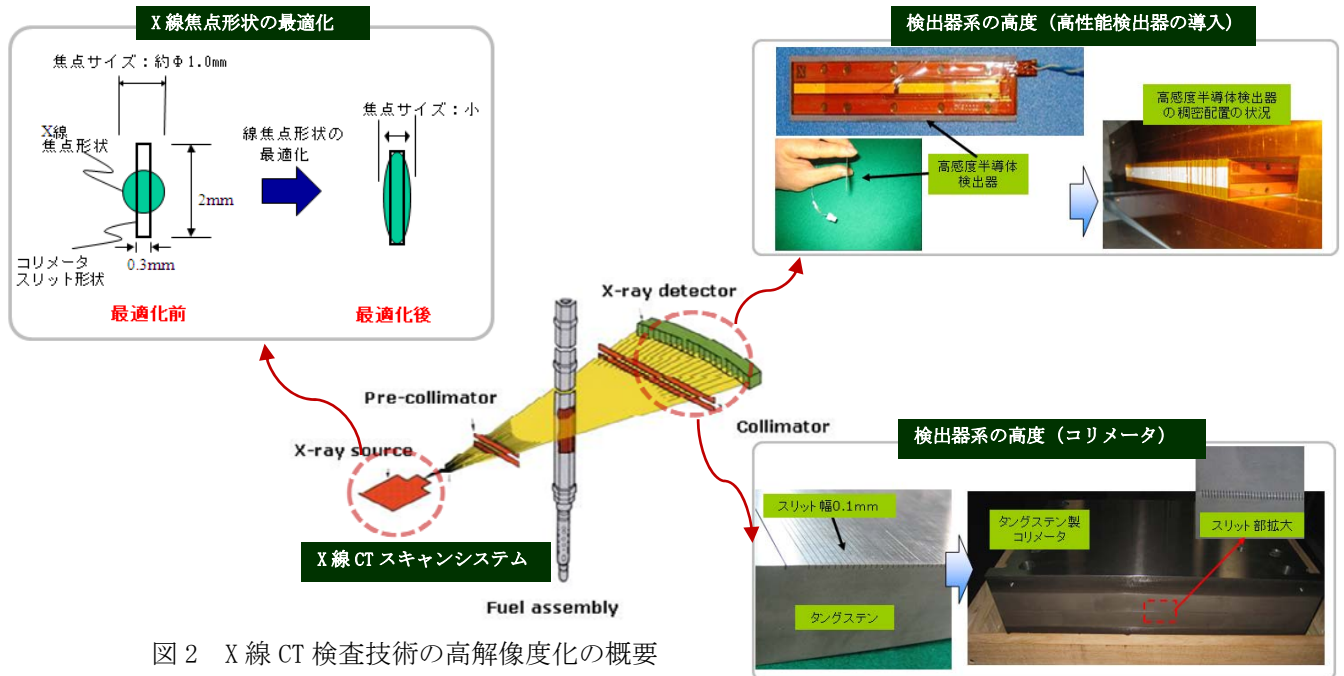


図 2 X 線 CT 検査技術の高解像度化の概要

X 線焦点形状の最適化では、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、焦点面積を変えずに水平方向の焦点サイズを微細化するために垂直方向に長尺な楕円形状に最適化した。これにより解像度を向上させるとともに、検出器への X 線の有効入射量を増加させた。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等により画像性能の大幅な向上を図った。コリメータスリットの微細化では加工性の悪いタングステン製コリメータにメタルソーにより幅 0.1mm (従来は幅 0.3mm) で長さ 230mm に渡りスリット加工する技術を確認し、扇状に 100 本 (従来は 30 本) 設けることに成功した。

得られた CT 画像から中心空孔径や密度分布を高精度で定量化する画像解析手法を構築するとともに、模擬試験体を用いた画像性能確認試験を実施した。その結果、従来の約 3 倍に相当する  $\pm 0.03 \text{ mm}$  以内の精度で中心空孔を測定することが可能になった。また燃料ペレット内の密度分布の可視化 (図 3 参照) に成功するとともに密度識別性能約 1% を達成した<sup>[4][5]</sup>。

さらに、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結果、ワイヤー形状の X 線ターゲット技術の利用による超微細 X 線焦点を備えた X 線 CT 検査技術により、現状の 3 倍程度の画像性能向上が見込める見通しを得た。

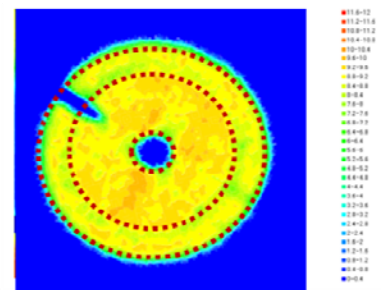


図 3 画像解析による燃料ペレット密度分布の可視化

## 2-2 高速増殖炉燃料の照射挙動の究明

### (1) 「常陽」照射燃料集合体の照射後試験

高解像度 X 線 CT 検査技術を高速実験炉「常陽」で照射した燃料集合体に適用し、実照射燃料の高解像度 X 線 CT 画像を取得した。試験対象とした燃料集合体は、「常陽」MK-III 炉心において照射さ

れ、集合体平均燃焼度は 53.5 GWd/t、最大中性照射量は  $8.89 \times 10^{22} \text{n/cm}^2 (E \geq 0.1 \text{MeV})$  である。

図4に高解像度X線CT検査装置にて取得した照射済み燃料集合体の軸方向炉心中心位置における横断面CT画像を、高解像度化前に撮像した結果とともに示す。高解像度化により、燃料ペレット内に形成された中心空孔やクラック等が鮮明なCT画像で観察可能となった。

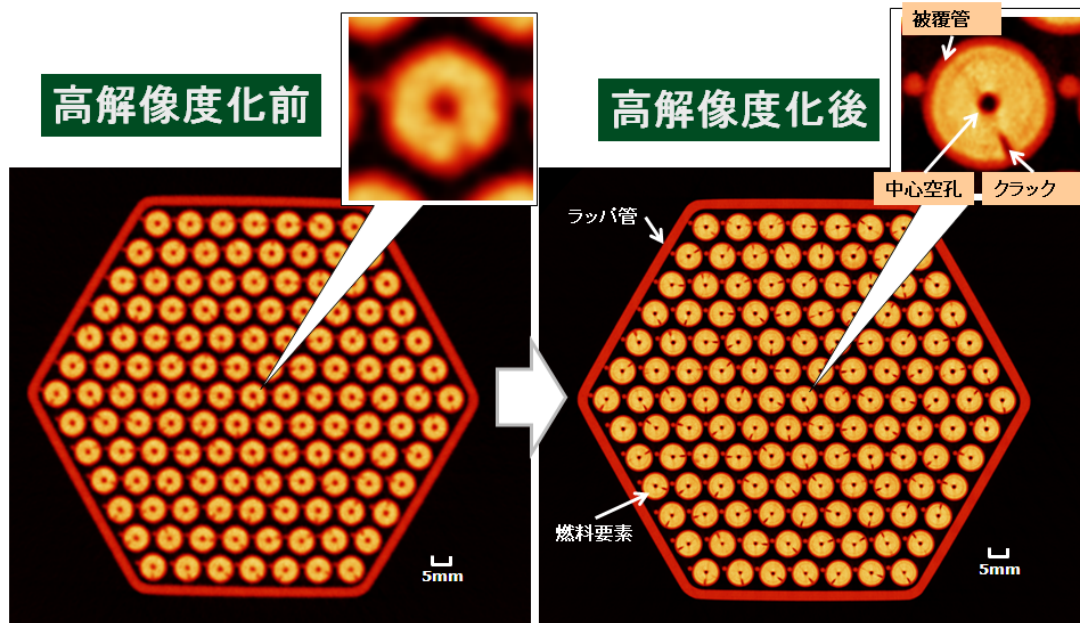


図4 実照射燃料の高解像度化前後のX線CT画像の比較

また、当該燃料を金相試験に供し、ペレットの詳細な組織観察を実施するとともに、高解像度X線CT検査技術で得られた結果と比較検証した。その結果、中心空孔が $\pm 0.03 \text{mm}$ 以内で一致する(図5参照)ことやガスバブル、クラック等組織変化状態がX線CTにより識別できる(図6参照)ことを確認した。

高解像度X線CT画像を用いて燃料ペレットの組織変化状態を観察した結果、中心空孔は軸方向炉心中心位置から上下約100mmの範囲で形成されており、軸方向炉心中心位置付近の中心空孔が大きいこと等が確認できた。軸方向炉心上部及び下部ではガスバブル領域がペレット中央部で観察される。

## (2) X線CTデータに基づく照射挙動評価

図7にCT画像から燃料ペレットに形成された中心空孔を画像解析により算出した結果を示す。中心空孔は線出力が  $300 \text{W/cm}$  を超えると形成され、その大きさは線出力にほぼ依存している。また、

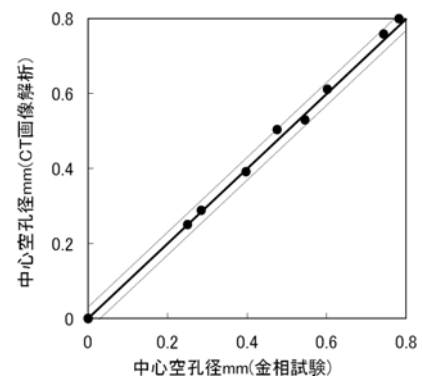


図5 中心空孔径の測定精度

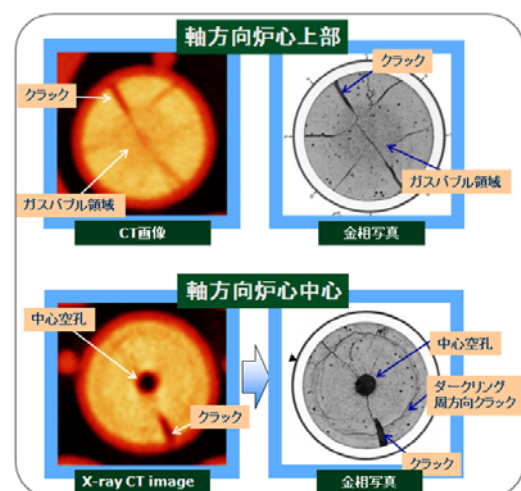


図6 高解像度X線CT画像と金相写真の比較

製造ロットの違い(密度、ペレット径等のわずかな相違)が、形成される中心空孔径に影響を及ぼしていることを大量の実測データから明らかにした。

CT 画像解析により燃料ペレット内の密度分布を可視化した結果(図8参照)から、中心空孔の周辺部では高密度化した領域が観察できる。同様に CT 画像解析から燃料ペレット内(直径約 4.63mm)の径方向密度分布を定量的に算出した結果を図9に示す。燃料ペレット外周部では、ほぼ製造時の密度が維持(約 94%T.D.)されているのに対し、中心空孔の周辺部では約 98%T.D.まで高密度化している。この高密度化した領域は、中心空孔、柱状晶領域形成によるものと予測され、金相写真で観察される柱状晶領域等とよく一致した。

以上、高解像度 X 線 CT 検査技術を照射済み燃料集合体に適用し、中心空孔形成に及ぼす製造仕様・照射条件依存性や燃料ペレット内での詳細な密度分布等、高速増殖炉燃料の照射挙動を実測による定量データにより明らかにしたことで、本技術が照射挙動解明に適用可能であることを実証した。

### 3. 今後の展望

今後、本技術を「常陽」や「もんじゅ」を利用した高性能燃料開発の照射後試験に適用することにより、実用化に向けた高速増殖炉燃料の設計、健全性評価に大きく貢献できる。一方で本技術は、軽水炉を含めた原子炉における使用済み燃料のオンサイト検査に適用可能であり、非破壊試験であることから供用中の検査により要素やペレットの燃焼に伴う変化を把握することができ、その波及効果は極めて大きい。また、強い放射能を有する高レベル放射性廃棄物(ガラス固化体等)の内部状況観察にも適用可能であり、高レベル放射性廃棄物の処理技術開発や海外返還廃棄物の品質検査への応用も期待される。

### 4. 参考文献

- [1] K. KATSUYAMA et al., Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Vol.B 255, p. 365-372(2007).
- [2] K. KATSUYAMA et al., NUCLEAR TECHNOLOGY VOL. 169 .pp73-80, JAN. (2010).
- [3] K. KATSUYAMA et al., IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol. 57, Issue 5, Part2(2010).
- [4] 浅賀 健男ら、日本原子力学会 2010 年秋の大会、F05、F06、F07
- [5] 勝山 幸三ら、検査技術 Vol. 16No. 2、平成 23 年 2 月 1 日

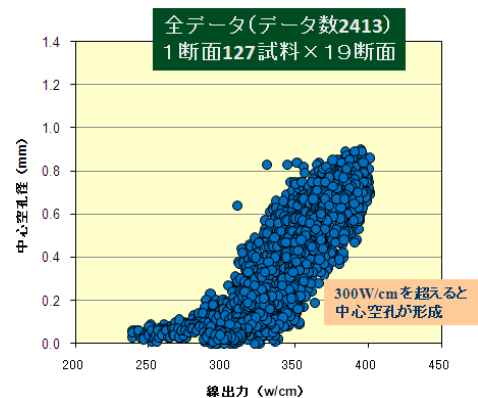


図7 中心空孔径と線出力の関係

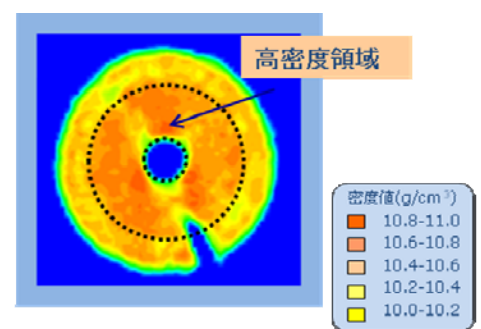


図8 CT 画像解析によるペレット内密度分布の可視化

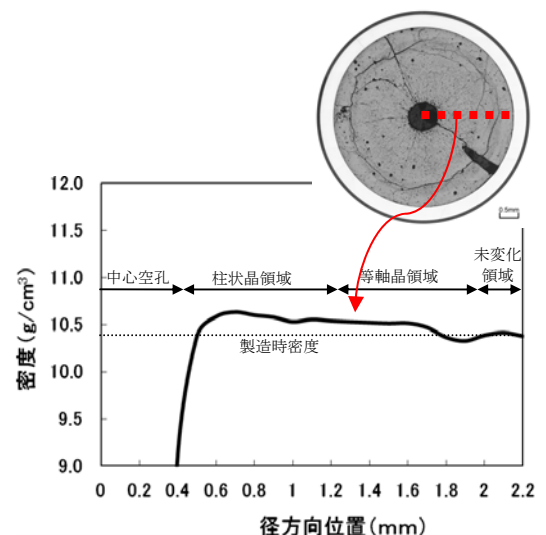


図9 CT 画像解析によるペレット内径方向密度分布