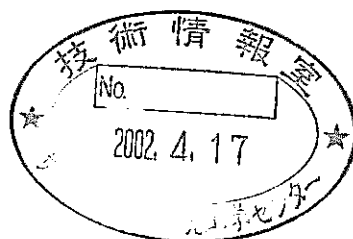


照射後試験用 X 線 CT 装置の開発

— データ活用法の検討 —

(技術報告)



2002年2月

核燃料サイクル開発機構
大洗工学センター

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村村松4番地49

核燃料サイクル開発機構

技術展開部 技術協力課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:
Technical Cooperation Section,
Technology Management Division,
Japan Nuclear Cycle Development Institute
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki, 319-1184,
Japan

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)
2002

照射後試験用 X 線 CT 装置の開発

—データ活用法の検討—

(技術報告)

永峯 剛* 勝山幸三*
松元慎一郎*

要 旨

照射燃料集合体試験施設では、照射後試験用 X 線 CT 装置を開発・設置し、平成 11 年から供用を開始した。本報は「常陽」使用済炉心燃料集合体 (PFD512) の CT 画像データに基づき本装置の活用方法について検討したものである。

以下に結果を示す。

- (1) 3次元可視化像によって集合体内部状況の観察における視認性が格段に向上する。
- (2) 断層画像の数値化処理による燃料ピン配置状況などの定量情報は、サブチャンネル解析などに反映できるデータとして期待される。
- (3) CT 値によって燃料ペレットやラップ管の密度が得られることを確認した。破壊試験結果との比較評価が必要であるが大きなスエリングについては評価に役立つ。
- (4) 燃料ペレットの中心空孔径を $\pm 0.1\text{mm}$ 程度の精度で測定できる見通しが得られた。このデータは照射条件の確認、金相観察位置の選定の際に役立つ。
- (5) 3次元可視化によって燃料スタックや燃料ピン全長データが集合体を解体せず取得できる。

以上の様に照射後試験用 X 線 CT 装置は、集合体の異常の早期発見、解体を許されない継続照射用リグの中間検査に有効である。また詳細な破壊試験計画立案時のピン選定及び観察位置特定などにも活用が期待される。

*大洗工学センター 照射施設運転管理センター 燃料材料試験部 照射燃料集合体試験室

Development of X-ray CT Apparatus for the Post-Irradiation Examination
- Practical application of the CT images -

TSUYOSHI NAGAMINE*, KOZO KATSUYAMA*
SHIN-ICHIRO MATSUMOTO*

Abstract

The X-ray CT apparatus for post-irradiation examination (PIE) was developed and installed in the Fuel Monitoring Facility (FMF). The apparatus started the common use for PIE in 1999.

In this paper, the practical applicability of the CT image of this apparatus, based on the CT data of JOYO fuel subassembly (PFD512) is described.

The results are as follows.

- (1) By the three-dimensional visualization of the CT images, the visibility to observation of the inside situation of the fuel assemblies was remarkably improved.
- (2) CT image analysis provides quantitative information such as the fuel pin rearrangements. It is expected as the data, which can reflect in the sub-channel analysis, etc.
- (3) By the CT data, it was confirmed that the information of the density variation of fuel pellets and ducts was obtained. Though the comparison with the destructive tests was necessary, this data is useful for evaluation when the swelling is big.
- (4) The apparatus measured fuel pellet center void diameters with an accuracy of about ± 0.1 mm. This data is useful for confirming irradiation conditions and for selecting the position for optical macrograph observations.
- (5) The three-dimensional image provides fuel stack length and overall pin length without dismantling the fuel subassembly.

The X-ray CT apparatus for PIE is useful for the early detection of fuel subassembly abnormalities and intermediate inspections of continuous irradiation rigs where dismantling is not permitted. The apparatus is also useful for the selection of pins and observation positions in detailed destructive tests.

*JNC, OEC, Irradiation Center, Fuel Materials Division, Fuel Monitoring Section

目 次

1. はじめに	1
2. X線 CT データ活用法の検討	2
2.1 定性的な観察	2
2.1.1 集合体の健全性確認	2
2.1.2 集合体内ピン照射挙動把握	2
2.2 定量的な観察	4
2.2.1 燃料ピンなどの配置状況	4
2.2.2 内部構成部材の情報	8
3. 「常陽」炉心燃料集合体 PFD512 への適用	13
3.1 定性的な観察	13
3.1.1 断層画像による観察	13
3.1.2 透過画像による観察	17
3.1.3 3次元可視化による観察	17
3.2 定量的な観察	22
3.2.1 断層画像の数値化処理による観察	22
3.2.2 CT 値に基づく観察	26
3.2.3 3次元可視化像による測定	29
4. 結果の考察	30
4.1 定性的な観察	30
4.2 定量的な観察	30
4.2.1 断層画像の数値化処理による観察	30
4.2.2 CT 値に基づく観察	32
4.2.3 3次元可視化像による測定	33
5. おわりに	35
6. 謝辞	36
7. 参考文献	37

表 目 次

表 2-1	物質毎のCT値の精度	4
表 2-2	断層画像の数値化処理による取得情報一覧	5
表 3-1	ラッパ管対面間距離測定結果	22
表 3-2	ワイヤ方向測定結果	25
表 3-3	燃料ペレットCT値及び密度測定結果	26
表 3-4	ラッパ管CT値及び密度測定結果	26
表 3-5	CT直径方向分布による欠陥寸法測定結果	27
表 3-6	中心空孔径の測定結果	29
表 4-1	燃料スエリング測定結果	32

図 目 次

図 2-1	X線CTデータの活用案（データ取扱手法と反映先）	3
図 2-2	燃料要素間隙減少時の被覆管温度上昇	7
図 2-3	BDI量およびピンダクト間最小距離の履歴（「もんじゅ」ドライバ）	7
図 2-4	CT値と密度の関係	9
図 2-5	燃焼度と線出力で整理した燃料ピンの金相断面	11
図 2-6	孔状欠陥とCT値径方向分布（鉛製模擬ペレット）	12
図 3-1	「常陽」炉心燃料集合体の断層画像	14, 15
図 3-2	断層画像の画像表示機能活用例	16
図 3-3	「常陽」炉心燃料集合体のX線透過画像	18
図 3-4	X線ラジオグラフィ及びCT装置によるX線透過画像	19
図 3-5	燃料ピン頂部の3次元可視化例	20
図 3-6	ペレット境界部の断層画像及び縦断層画像例	21
図 3-7	ラッパ管ーピン間、ピンーピン間距離測定位置	24
図 3-8	ラッパ管とピン間距離の測定結果	24
図 3-9	ピン列毎の両端ピン中心間距離（PFD512 炉心中心）	25
図 3-10	模擬欠陥（中心空孔）径の算出方法の概念	27
図 3-11	中心空孔径測定結果（PFD512）	28
図 3-12	燃料スタック長さ測定結果（PFD512）	29
図 4-1	サブチャンネル面積の算出結果	31
図 4-2	燃料スエリングの燃焼度依存性	34

1. はじめに

照射燃料集合体試験施設（FMF）増設施設では、照射後試験用 X 線 CT 装置を開発導入し、使用済燃料集合体の断層画像取得に成功した¹⁾。本装置は、高速炉燃料集合体の燃料ピン束とラッパ管の機械的相互作用^{2) 3)}（BDI; Bundle Duct Interaction）の挙動解明のため、使用済燃料集合体内部のピン配列状況を非破壊で観察することを主目的としている。取得した画像は、上記に加え燃料ペレットの中心空孔生成状況なども観察できることが明らかになり、改めて本装置による取得画像データの活用方法の検討が期待されている。

本報告は、X 線 CT 装置で取得できる断層画像と透過画像について、定性的な観察と定量的な観察に大別し、断層画像の 3 次元可視化、数値化処理などによる画像データの活用方法について検討し、「常陽」使用済炉心燃料集合体（PFD512）の画像データについてこれらの手法を試み、結果をまとめたものである。

2. X線 CT データ活用法の検討

X線 CT 装置は、使用済燃料集合体などの断層画像（CT 画像）及び透過画像（スキヤノグラム像）を取得する照射後試験装置である。断層画像は、燃料集合体の任意の軸方向位置に対して水平方向に切断したような状態が画像として得られる。また透過画像は、燃料集合体の特定軸方向領域に対して X 線を照射し、集合体径方向全体の透過像（医療世界でのレントゲン写真）が得られる。

本章では、これら画像の定性的な観察と定量的な観察に大別してデータの活用法について検討を行う。X 線 CT データの想定される活用について取得データ、データ取扱手法、反映先などをまとめて図 2-1 に示す。

2.1 定性的な観察

取得画像を直接目視することによって燃料集合体内部を、感覚的に観察する。このため、観察者個人の主観が入る可能性があるが、集合体解体を要せず短時間で確認ができること、解体しないためピン束の状態が炉内装荷状態（停止時）とほぼ同じ状態で観察できる特徴を有している。

2.1.1 集合体の健全性確認

集合体内の燃料ピン、組み枠部など構成部材の形状、配置状態などについて製造図面との比較や異物混入有無の確認によって集合体の健全性評価に資する情報を得ることができる。特に断層画像では、燃料ピンの配置・配列として燃料ピン被覆管表面と隣接する燃料ピンとの接触の有無及びワイヤの配置など透過画像では得られない情報を観察できるため、BDI を調べる有効な手段となる。

また、断層画像を集合体の軸方向に連続して撮像し、そのデータを 3 次元処理可視化することで集合体内部状況の観察性能はさらに向上する。

2.1.2 集合体内ピン照射挙動把握

(1) 燃料ペレット

断層画像によって燃料ペレットの中心空孔生成やクラックの発生状況について集合体の全燃料ピンを対象とした集合体内分布を把握することができる。これらは、燃料ペレットの中心温度（線出力）など照射情報の確認に資する情報となる。

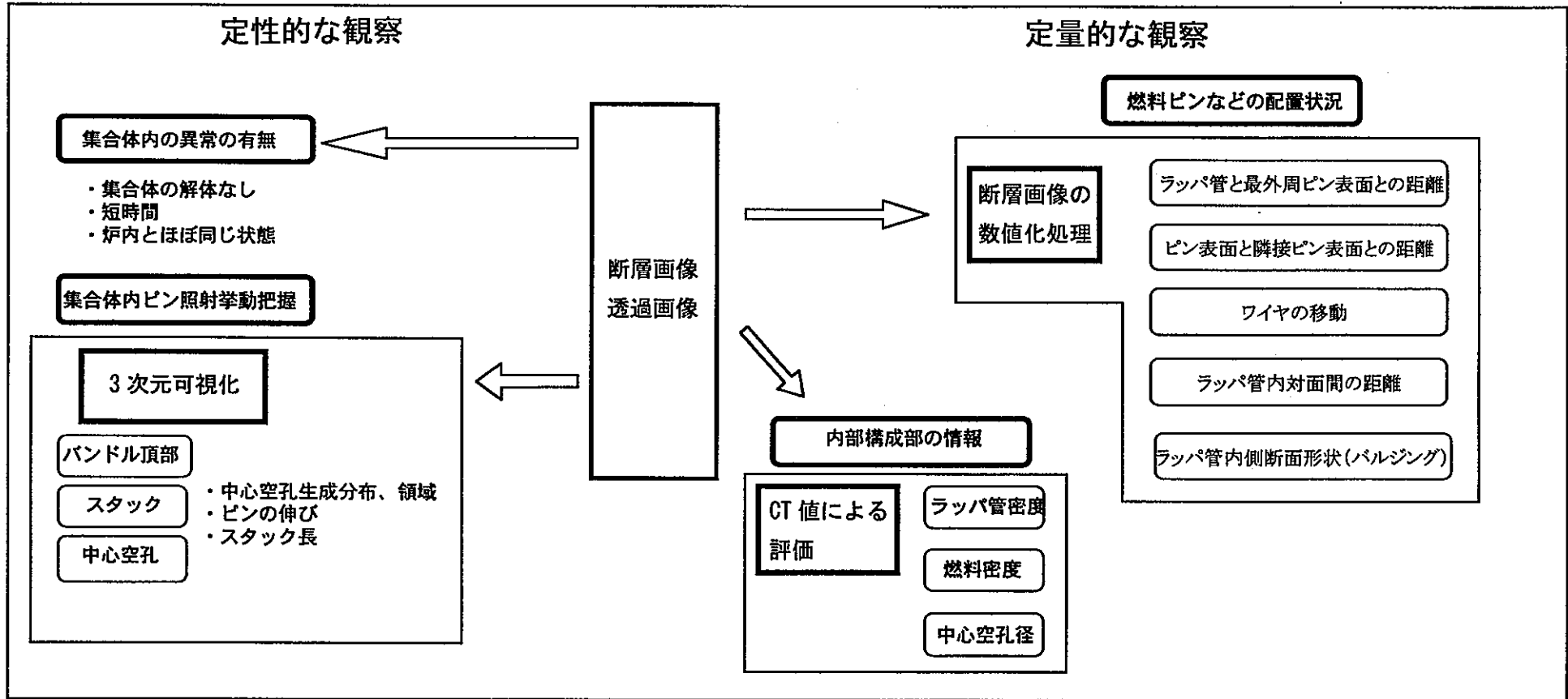


図2-1 X線CTデータの活用案（データ取扱手法と反映先）

- 反映先**
- 集合体の健全性確認**
 - 形状変化
 - 異物混入
 - 合理的な破壊試験計画・立案**
 - ピンの選択
 - 試験位置、領域の設定
 - スエリング等照射挙動評価**
 - スエリング評価式
 - 燃料中心温度
 - BDI挙動評価**
 - コードの検証
 - 冷却材流路断面面積評価**
 - 炉心核熱評価情報の妥当性追認
 - 流路変形効果
 - 周辺流れ効果係数
 - 核熱情報に基づくサブチャンネル解析
 - ホットスポット温度

また同様に、スタック長さの変化についても把握できることから、燃料の焼きしまりやスエリング挙動に資する情報となる。

(2) 燃料ピン

燃料ピンの伸び変化量は、燃料ピンの下端を組み枠に固定する集合体の構造上、燃料ピン頂部における断層画像の3次元可視化によって、マクロ的な傾向分布を見極めるのに有効である。燃料ピンの伸び（被覆管のスエリング）は、被覆管材質、照射量、照射温度などによって異なった挙動を示すものと考えられ、照射情報やスエリング挙動検討の参考情報となる。

2.2 定量的な観察

断層画像は、1024×1024のマトリックスで2バイトのデジタル値（CT値）で濃淡を表しており、1画素サイズは0.3mm×0.3mmである。（但し通常スキャンの場合）この情報を定量的に観察するため以下の手法を用いる。

- 1) 断層画像の数値化処理による観察(座標精度；±0.1mm)
- 2) CT値による観察(CT値精度；表2-1参照)

これらの観察手法は、定性的な観察と比べ観察者の主観が入りにくい特徴を有する。

表 2-1 物質毎の CT 値の精度

物質名		鉄	SUS316	黄銅	銅
密度	[g/cm ³]	7.85	7.98	8.60	8.96
CT 値 (A)	[-]	224	226	255	264
標準偏差 (B)	[-]	12	14	13	12
精度 (B/A*100)	[%]	5.4	6.2	5.1	4.5

2.2.1 燃料ピンなどの配置状況

断層画像の数値化処理によって燃料ピン中心、ワイヤ位置の座標及びラップ管の内面形状を数値化し、燃料ピンなどの配置状況を定量的に求める。表 2-2 に断層画像の数値化処理による取得情報一覧を示す。この数値化処理結果から、冷却材流路断面積やサブチャンネル面積の変化が得られる。また、BDI 挙動評価の観点では、解析コード“BAMBOO”の検証に役立てられる。

さらに数値化処理情報は、解析評価への活用の観点から核熱情報に基づくサブチャンネルの解析、ホットスポット温度、流路変形効果、周辺流れ効果係数の評価への活用が期待される。

表 2-2 断層画像の数値化処理による取得情報一覧

算出項目	備考
ラッパ管内対面距離 (両端、中心、平均)	3対面について算出
BDI量 (両端、中心、平均)	3対面を対象
ラッパ管-ピン間距離 (ラッパ管と最外周全ピンの距離)	
ピン-ピン間距離	全ての隣接ピンとの被覆管間距離
ワイヤが存在しない方向のピン間隔平均値 (平均値、標準偏差、最小間隔及びその対象ピン番号、間隔毎のヒストグラム)	ピンチプレーンのみ
ピン毎のワイヤ方向とワイヤ方向平均値からのズレ量 (平均値、標準偏差、最大ズレ量とその対象ピン)	バンドル内全ピンの結果及び列毎の計算結果
ピン列毎の両端ピン中心距離 (理想値、評価値、評価値と理想値の差、ワイヤ方向ズレ量の平均値)	

(1) 冷却材流路断面積

集合体ピンバンドル部のラッパ管内断面積に対する流路断面積の割合は、製造時において「もんじゅ」炉心燃料集合体の場合 37~40%、「常陽」Mk-II炉心燃料集合体の場合 34~38%である。流路断面積は燃料ピン(バンドル)のふくれとラッパ管のふくれの程度差(BDI)によって変化し、集合体圧力損失が大きくなった場合は冷却材温度が全体的に上昇する可能性があるため、十分確保されていることと変化の有無を確認することが重要である。

また、燃料ピンやラッパ管のふくれは熱及び照射クリープ変形とスエリングによるもので、その変形割合はバンドル軸方向で異なるため、バンドル軸方向位置における流路断面積の変化の把握は大切である。

断層画像の数値化処理によるラッパ管内対面間寸法の測定精度は、±0.2mm程度であり、これは「常陽」バンドルの流路断面積の割合として±0.4%に相当する。

(2) 被覆管温度の評価

燃料集合体内冷却材温度及び被覆管温度の評価は、サブチャンネル解析によって行われている。本解析は、集合体1体を対象にラッパ管内を正規配列した燃料ピンによって囲まれる流路、又は燃料ピンとラッパ管内壁によって囲まれる流路によって分割して、これをサブチャンネルとして集合体内流路のモデル化し、燃料集合体への冷却材流入流量と燃料ピン毎の発熱分布を入力値として冷却材温度分布及び被覆管温度分布を計算するものである。従ってサブチャンネル解析に反映できるサブチャンネル面積の変化に着目する必要がある。ここでは、断層画像データの活用観点からサブチャンネル面積と温度変化の関係を確認し、断層画像から求めるサブチャンネル面積の算出精度がサブチャンネル解析精度を満足するか調査する必要がある。

また被覆管上昇温度は、画像上から求める燃料ピン間隔から、燃料ピン間ギャップ減少時の被覆管温度上昇を実験的に調べた例を活用することによって推定できる。図2-2の燃料要素間隙減少時の被覆管温度上昇は、ヒータピンを用いた19本バンドル中で燃料ピン間ギャップ寸法を変化させて被覆管温度上昇を測定した Moeller らの実験⁴⁾と同じく7本バンドル中で2本の燃料ピンが接触した場合の温度上昇を測定した Miyaguchi らの実験⁵⁾によって、「もんじゅ」の条件に規格化した例である。これによれば、燃料ピン間ギャップ S/S_0 が 0.6 (0.8mm) 以下になると直線的に温度が上昇するから $\pm 0.1\text{mm}$ の測定精度であれば十分推定できる。

(3) 解析コード“BAMBOO”の検証

BDI 挙動解析コード“BAMBOO”は、高速炉燃料の BDI 発生下における燃料集合体内のバンドルの主要な変形挙動である燃料ピンの湾曲と偏平化を解析するものである。図2-3に「もんじゅ」ドライバ型燃料ピンバンドルの“BAMBOO”コードによるバンドル照射変形解析例(コード計算上の仮想的なもの)を示す。本コードの検証は、炉外バンドル圧縮試験(ラッパ管を模擬した圧縮板をバンドル内側方向へ変位させバンドルを圧縮することによって炉外にてBDIを模擬した試験)の結果を用いて行っており、照射試験データをBDI挙動解析コードの改良に反映する³⁾。

BDIは、燃料ピンのふくれに起因することから集合体軸方向位置では炉心中心付近が厳しく、燃料ピンの湾曲(再配置)と偏平化及びワイヤの移動によって緩和される。従って解析コード“BAMBOO”の検証は、ラッパ管の対面間内寸法と燃料集合体を解体して取り出した燃料ピンとワイヤの外径寸法データが必要であると

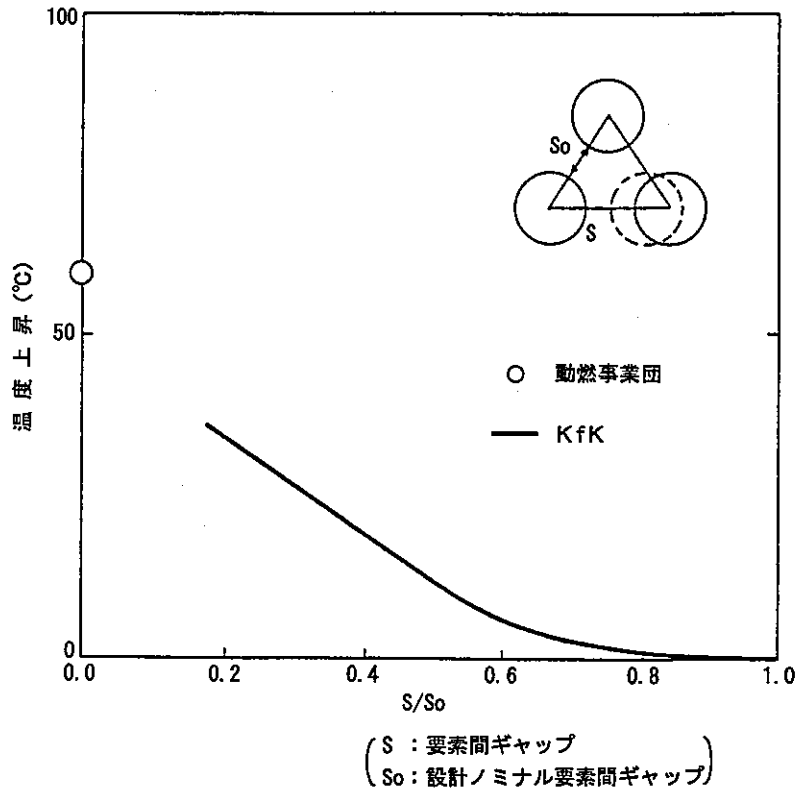


図 2-2 燃料要素間隙減少時の被覆管温度上昇

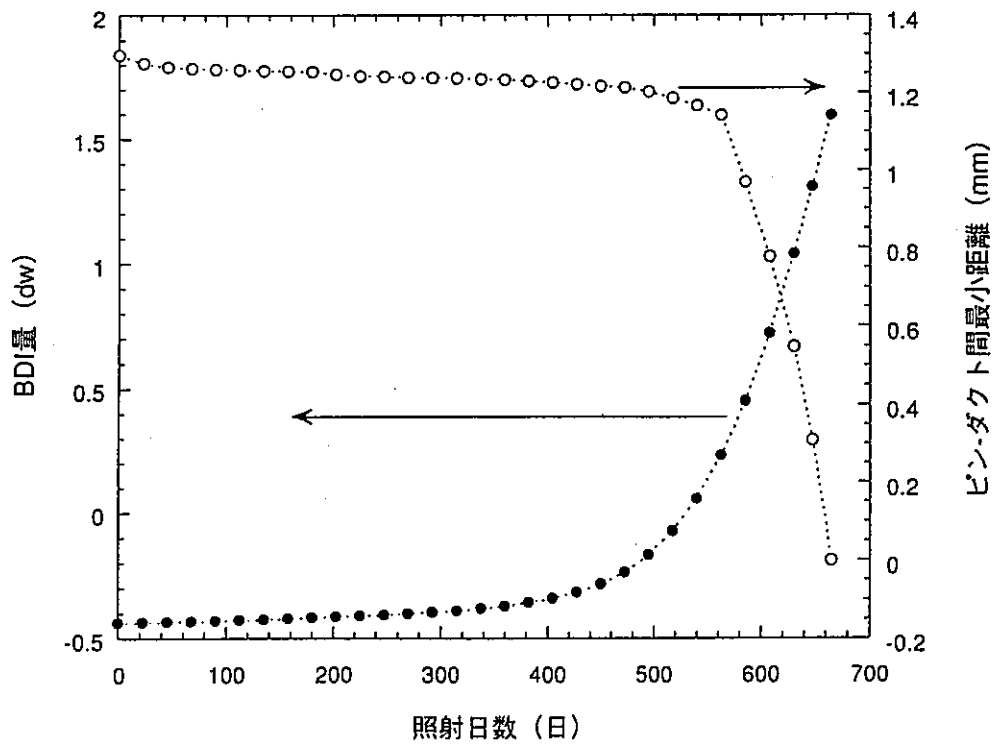


図 2-3 BDI 量およびピンダクト間最小距離の履歴(「もんじゅ」ドライバ)

もに集合体解体前の燃料ピンやワイヤの移動情報が必要となる。

断層画像は、集合体解体前のラッパ管で拘束された状態でのバンドル情報を任意な軸方向位置で取得できるため、燃料ピンの湾曲による再配置、ワイヤの移動状況はもとより燃料ピン被覆管とラッパ管間距離、燃料ピン被覆管間距離を得ることができ BDI 挙動解析コード”BAMBOO”の検証に直接反映することができる。

2.2.2 内部構成部材の情報

X線 CT 装置は、物体内部を X線吸収分布 (CT 値) としてとらえるものである。X線の吸収は、X線のエネルギー及び物質の密度と相関関係があり、エネルギーが一定であれば密度分布を表現していることになる。図 2-4 に模擬体の撮像結果から得た CT 値と密度の関係を示す。

燃料集合体は、ステンレス鋼(約 8g/cc)と燃料(約 11g/cc)で構成しており、空間部は、密度が小さい空気 (ピン外部; 窒素, ピン内部; He, Xe, Kr) であるため、内部構成部材の状況 (形状・寸法) が観察できるとともに燃料・材料の照射挙動として密度変化、中心空孔の有無などを定量的に得られることが期待できる。

(1) 密度測定

ステンレス鋼の中性子照射によるスエリングは、従来から被覆管及びラッパ管について寸法・重量測定及び液浸法によって密度を測定し、評価式に反映している。X線 CT 装置の密度識別性能は、銅 (密度; 8.96g/cc) と黄銅 (密度; 8.6g/cc) を張り合わせた (密度差 4% 以上) 円柱 (φ50mm) では目視観察でも識別可能であることが確認されている。「常陽」照射用炉心燃料集合体の燃料被覆管スエリングは、照射末期で約 1.5% 以下であり、被覆管やラッパ管の断面積も小さいことから CT 画像で密度変化を見極めることは困難と考えられるが、5% 以上スエリングした材料については判別が可能と考えられる。

$$\text{スエリング } \Delta V/V(\%) = (\text{未照射密度} - \text{照射済密度}) / \text{照射済密度}$$

燃料ペレットの燃焼度に依存するスエリングや照射初期における焼きしまりは、金相写真の燃料ペレット面積変化から燃料ペレットの体積変化を求め挙動を評価した例がある。液浸法や気相置換法もあるが気孔への液やガスの浸入状況が不安定なため信頼できる、かさ密度が得られず、密度を直接測定する手法の確立が望まれている。

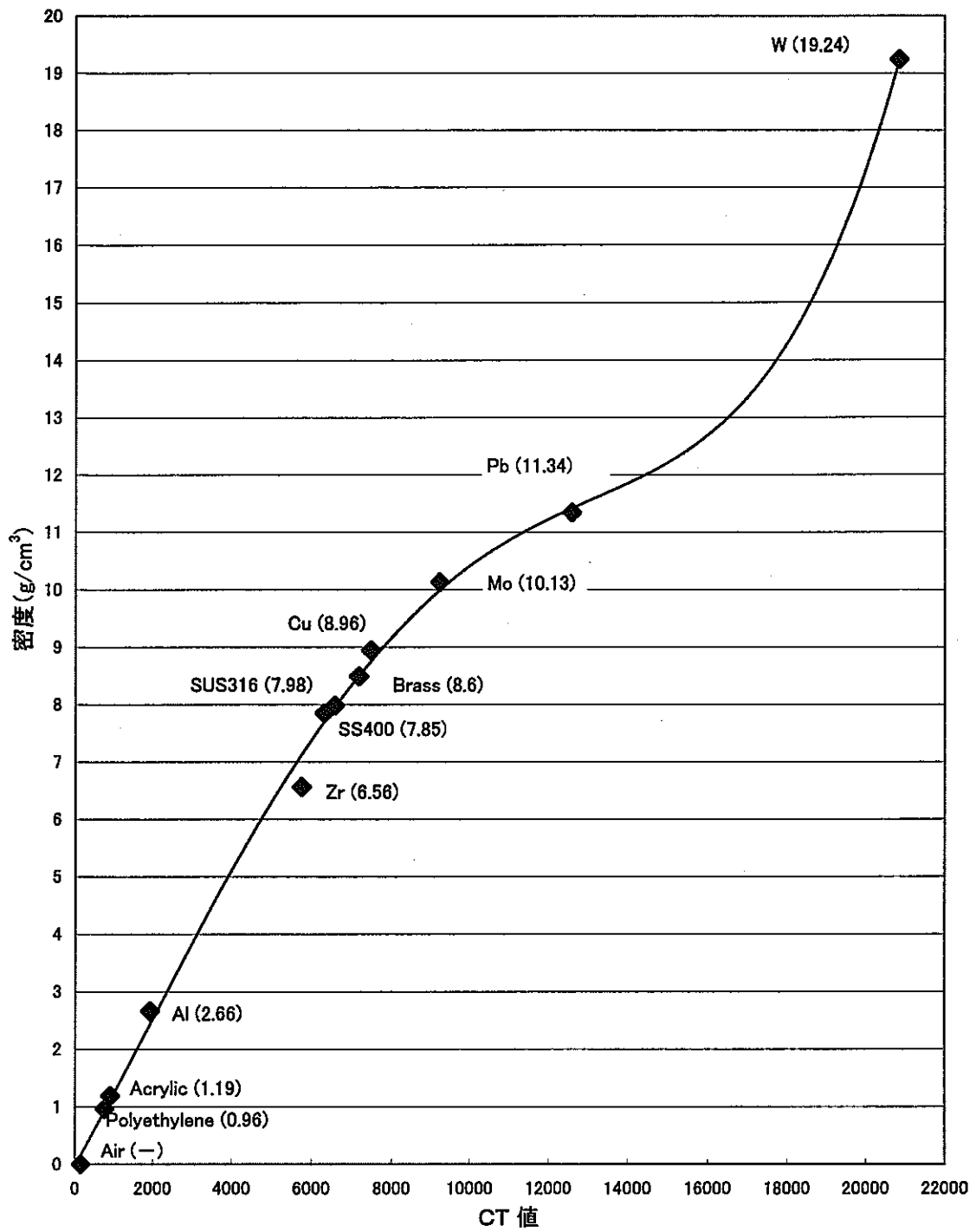


図2-4 CT値と密度の関係

照射によって燃料ペレットは、半径方向の温度勾配による割れや組織変化による中心空孔が生じる。このうち割れは熱膨張差による熱応力によって発生することから焼きしまりやスエリングを評価するうえで無関係として金相写真の解析では扱っていない。また中心空孔は、その周りの柱状晶領域内の気孔が中心部に移動することによって形成されたもので、高密度化した柱状晶領域と中心空孔を合わせて平均化した密度は、製造時の密度を保存していると考え、中心空孔もペレットの一部とみなして扱っている。一方、断層画像では、大きな中心空孔や割れが観察できるが、金相写真のように割れ分を除いた精度の高い面積を求めることはできず、燃料ペレットのCT値をもって体積変化を見極めることになる。「常陽」炉心燃料のスエリングは、燃焼度が70GWd/tの場合、約6.8% ($\Delta V/V = 1.25 \times (\text{燃焼度} - 15) / 10 \text{GWd/t}$) と推定され、割れの影響が懸念されるが材料のスエリングに比べれば密度差として観察できる可能性がある。

(2) 中心空孔

図2-5は、「常陽」Mk-II炉心燃料における燃料ピン軸方向中央部の組織変化について燃焼度と線出力で整理した例である。この図から中心空孔の形成は、燃焼度と線出力に依存しており、低燃焼度60GWd/t以下では線出力が $\sim 320 \text{W/cm}$ までは発生せず、70GWd/tでは290W/cmで発生することがわかる。

X線CT装置による模擬中心空孔を設けた鉛製模擬ペレットの撮像結果による孔状欠陥とそのCT値の径方向分布を図2-6示す。画像の目視観察では、 $\phi 0.5 \text{mm}$ 以上の模擬中心空孔の識別が可能であり、それ以下では識別できない。しかし、CT値の径方向分布に着目すれば、模擬中心空孔の寸法によってそれぞれ異なっており、CT値の径方向分布から中心空孔径を求める手法を確立することによって定量的な測定が期待できる。

これらの観察データは、金相観察や機器分析など破壊試験計画立案に際し、試験対象ピンの選択や試験位置、領域の設定に反映することで、従来の機械的な選定方法に比べ取得する破壊試験データが集合体を代表することを客観的に示すことが可能となり合理的に試験を行うことができるものと考えられる。

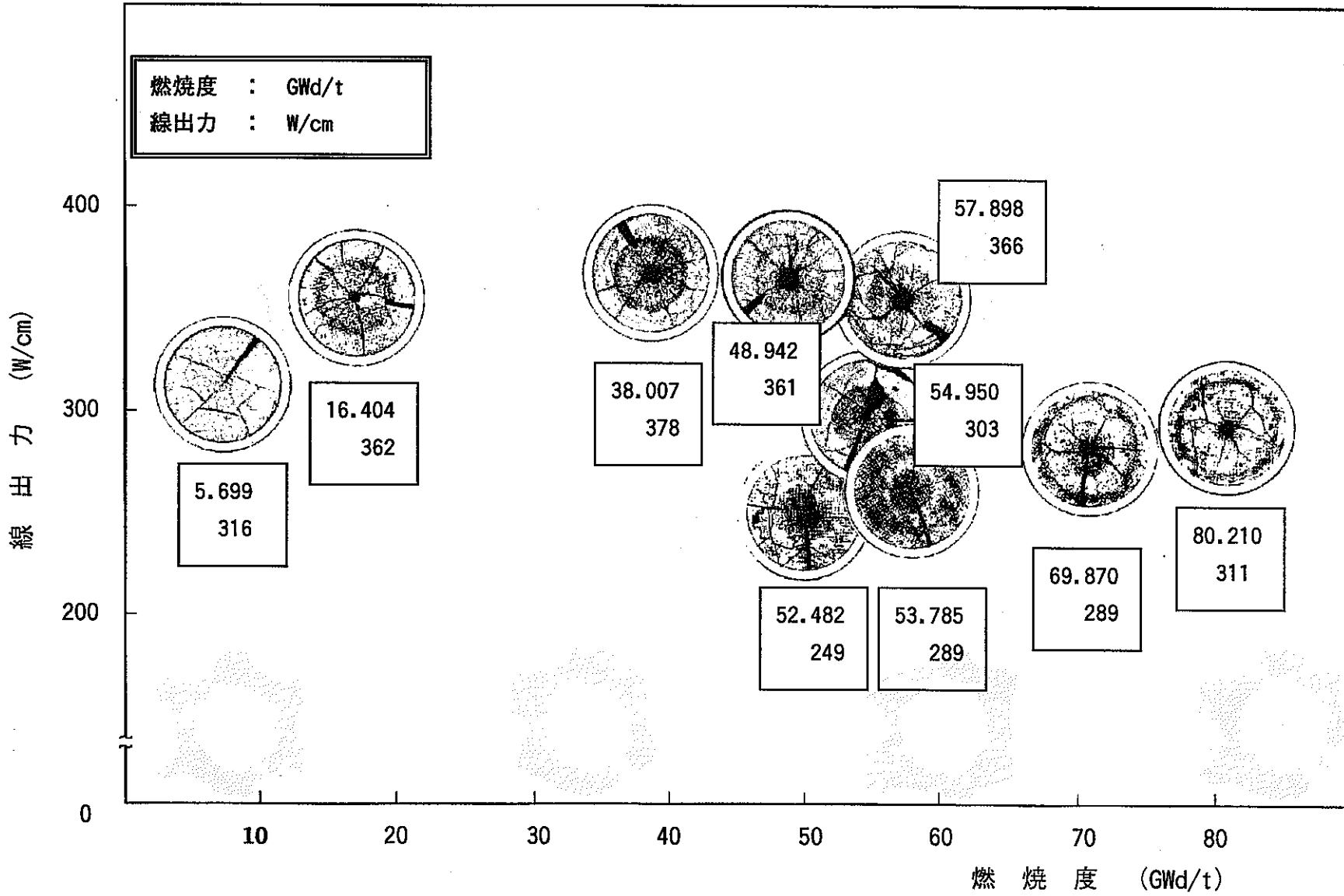
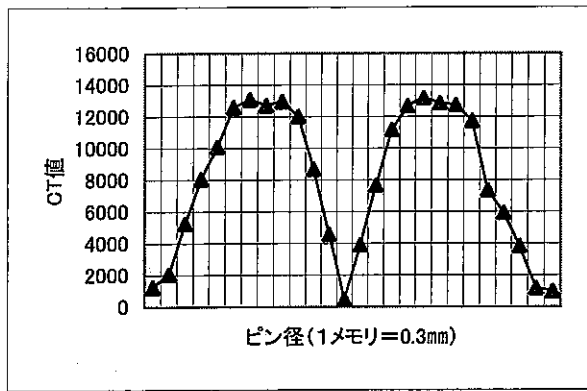
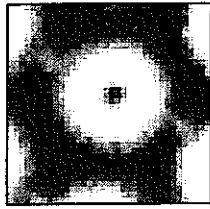
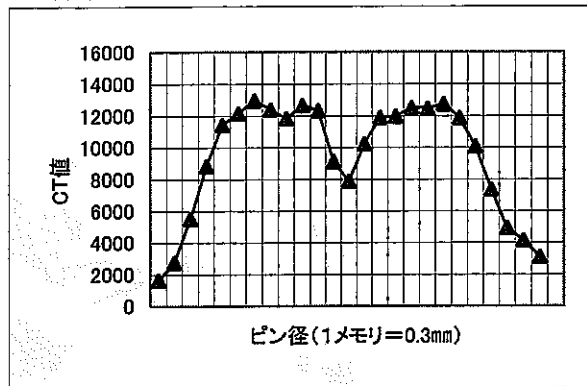
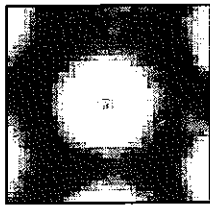


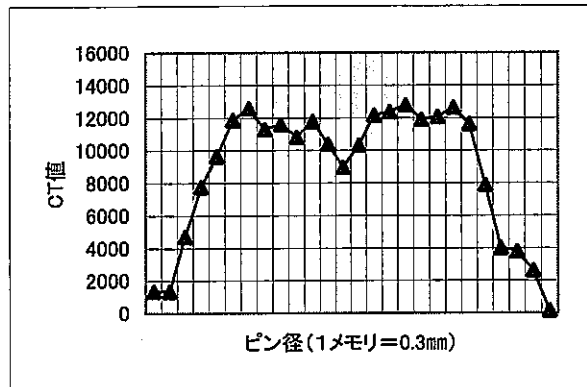
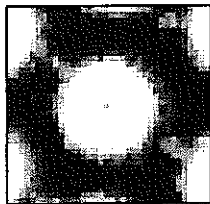
図 2-5 燃燒度と線出力で整理した燃料ピンの金相断面



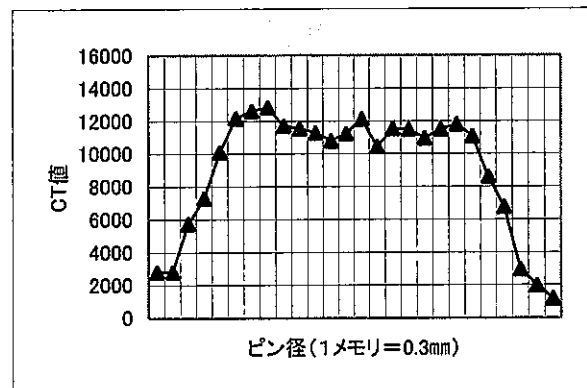
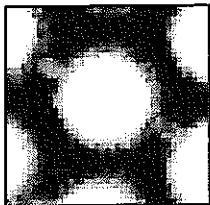
φ1.0模擬欠陥



φ0.5模擬欠陥



φ0.3模擬欠陥



模擬欠陥無し

図2-6 孔状欠陥とCT値径方向分布(鉛製模擬ペレット)

3. 「常陽」炉心燃料集合体 PFD512 への適用

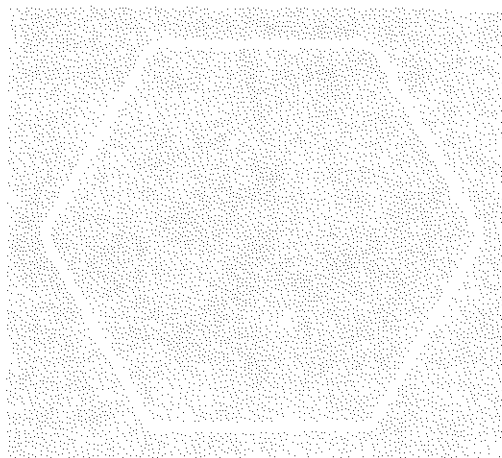
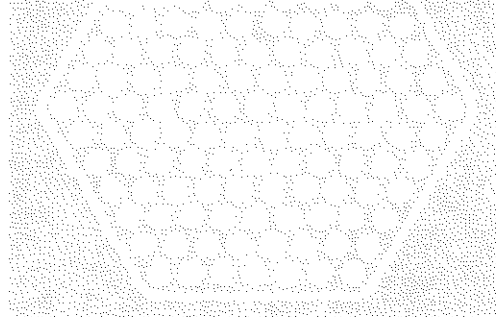
「常陽」炉心燃料集合体 PFD512 は、平均燃焼度 58.6GWd/t, ピークフルエンス $8.89 \times 10^{22} \text{n/cm}^2$ ($E \geq 0.1 \text{MeV}$) の履歴を有する。本集合体を用いた照射後試験用 X 線 CT 装置のホット試験結果については永峯らにより報告¹⁾しているが、CT データ活用の観点から改めて観察を行った。以下にその結果を示す。

3.1 定性的な観察

3.1.1 断層画像による観察

図 3-1 に「常陽」炉心燃料集合体 PFD512 の断層画像を示す。全ての断層画像は鮮明であり、直径 0.9mm のラッピングワイヤを含む構造物の形状や材料の違い（燃料とステンレス鋼）を含む情報が再現できていることが確認できた。従って、これら断層画像による集合体内の特定軸方向位置における内部構造物の変形・配置・配列の乱れ、異物混入の有無などに着目した目視観察することによって、集合体の健全性の確認に資する情報が得られる。

なお断層画像は、画素幅 0.3mm 高さ 0.3mm で 1024×1024 の画素数で構成し、それぞれの画素の CT 値（画像再構成演算結果）を基に擬似カラー又は白黒濃淡として表現するため X 線 CT 装置の画像表示機能のひとつであるウィンドウ処理によって特定物質を強調するなど自在な操作による画像表示が可能である。また、拡大・ズームなどの画像表示機能を活用し有用な情報を取り出すことができる。図 3-2 に炉心燃料部の断層画像について画像表示機能の活用による表示した結果を示す。



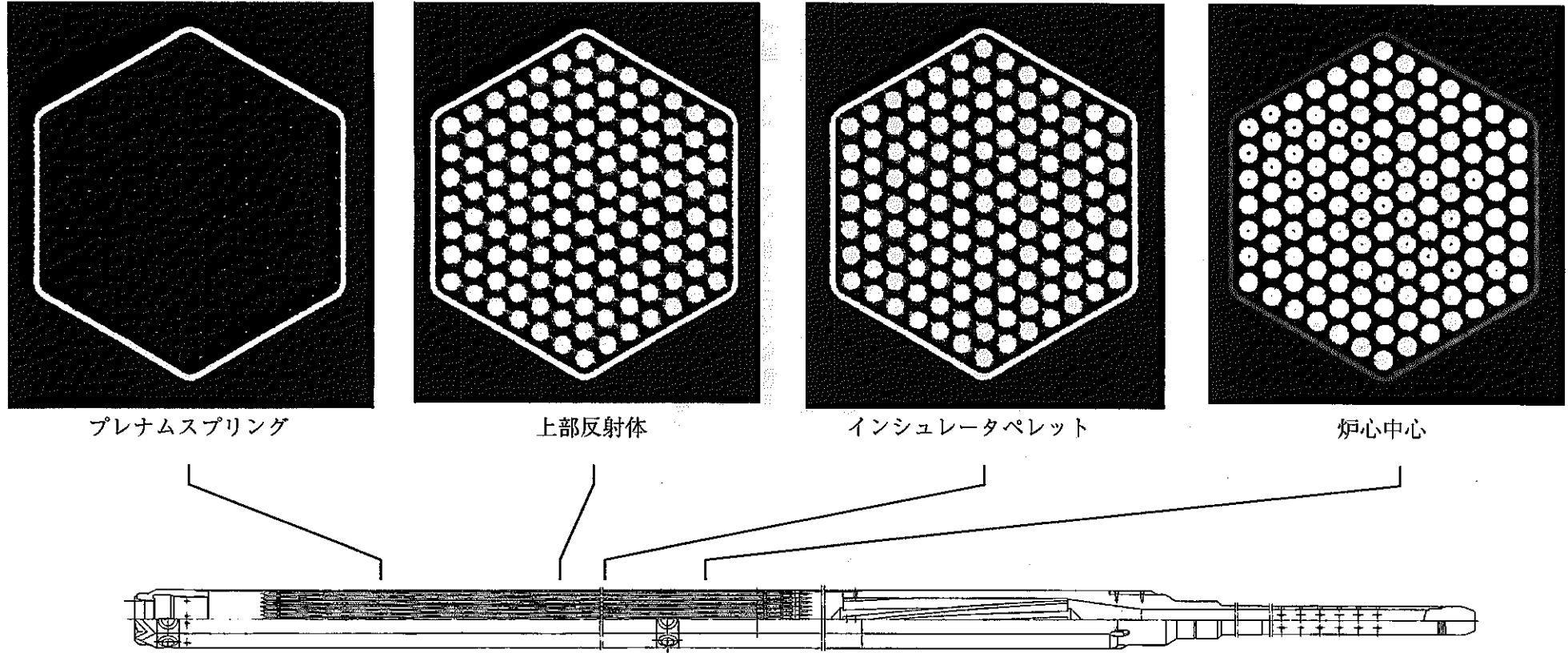
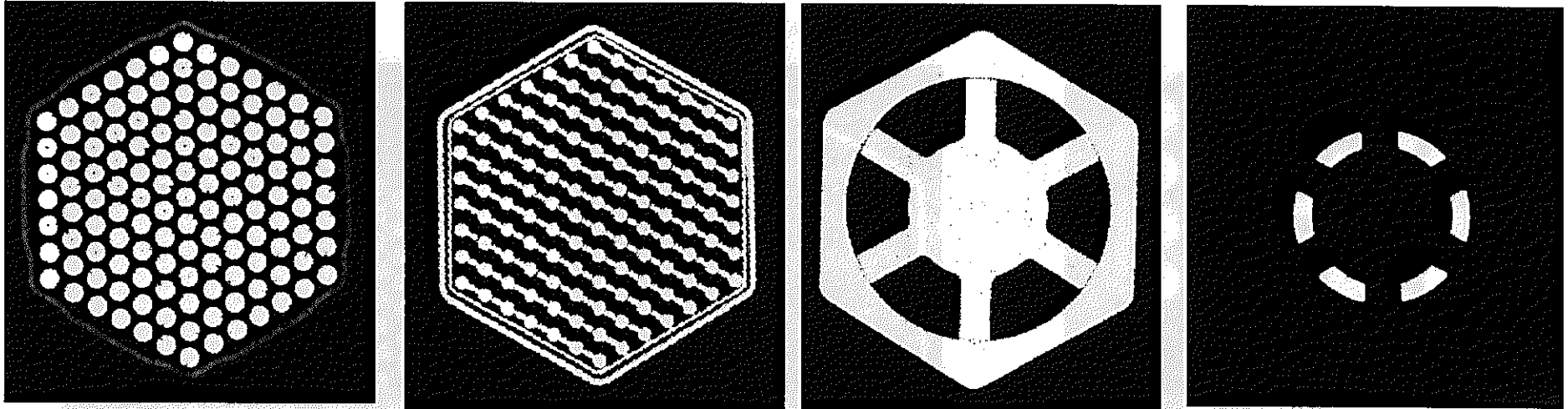


図3-1 「常陽」炉心燃料集合体 (PFD512) の断層画像 (1 / 2)



中間パッド部

組枠

下部反射体

エントランスノズル

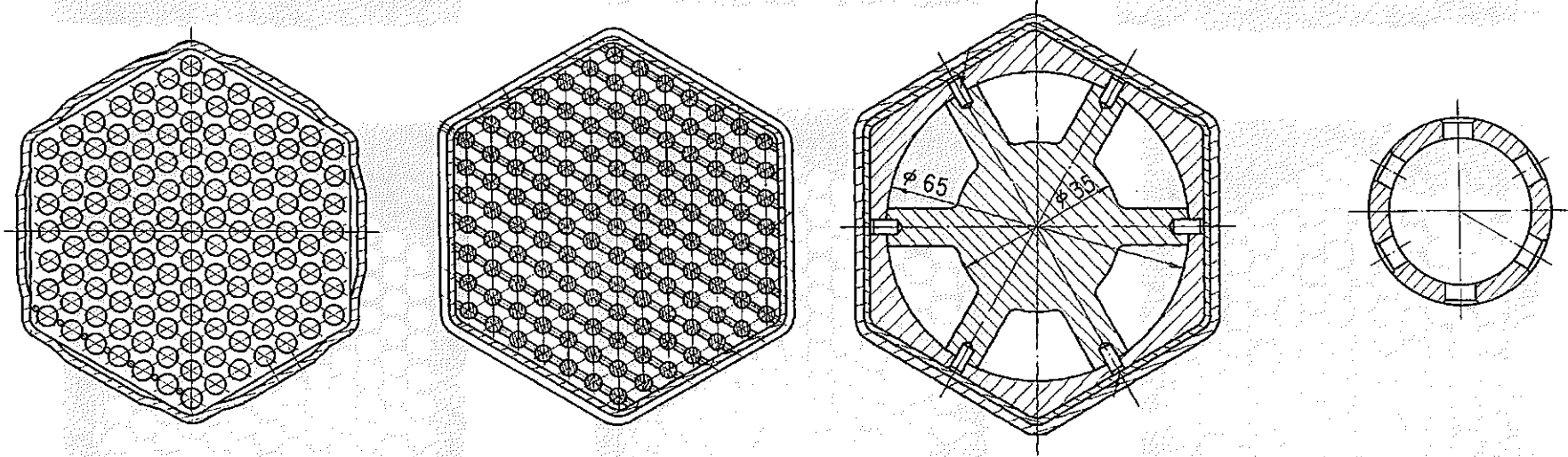
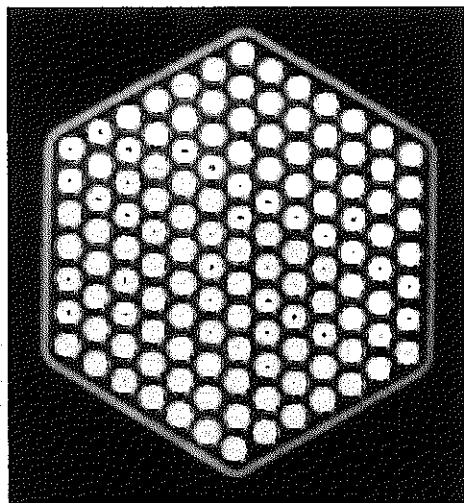
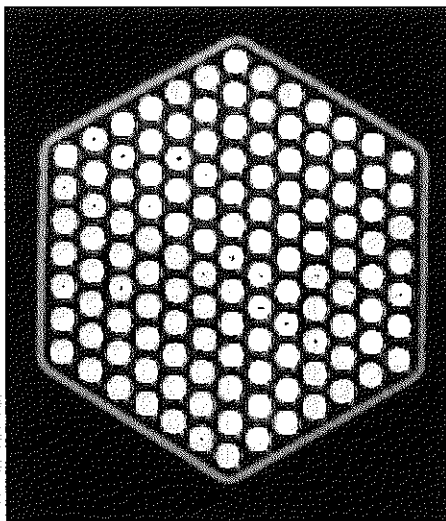


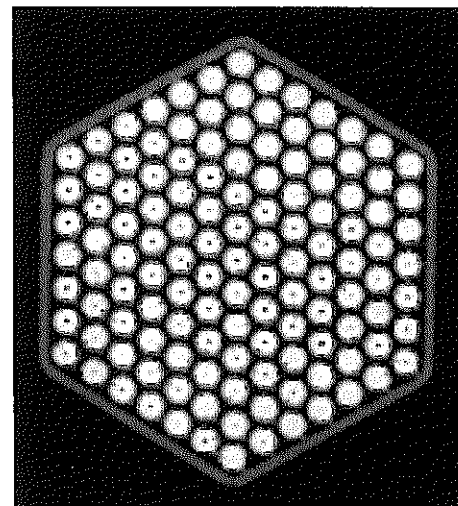
図 3 - 1 「常陽」炉心燃料集合体 (PFD512) の断層画像 (2 / 2)



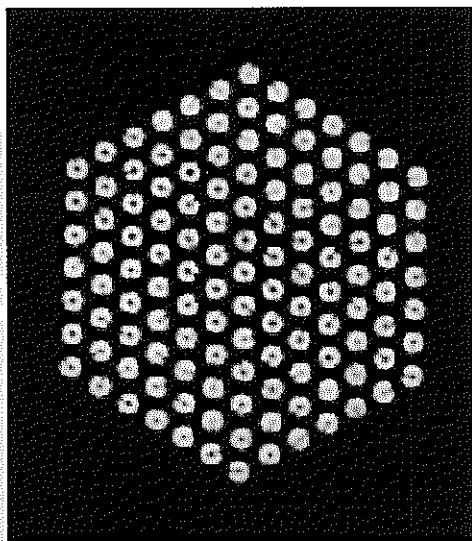
オリジナル表示



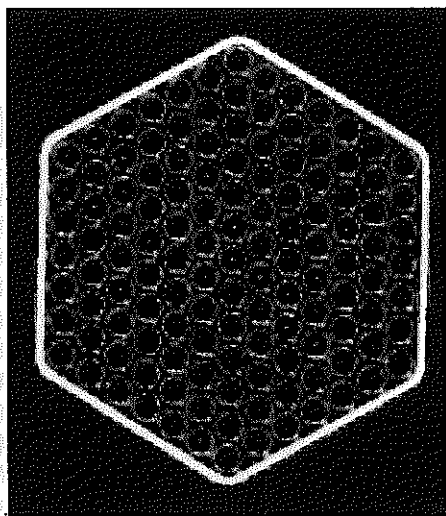
グレースケール最適化表示



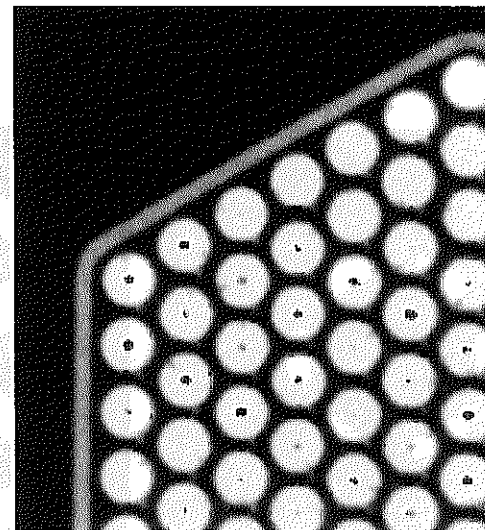
擬似カラー表示



燃料ペレットのみ表示



ラッパ管、被覆管のみ表示



拡大、ズーム表示

図 3 - 2 断層画像の画像表示機能活用例

3.1.2 透過画像による観察

図 3-3 に「常陽」炉心燃料集合体 PFD512 の X 線透過画像を示す。集合体全体を軸方向スライスピッチ 3mm、燃料ピン頂部など着目部はスライスピッチ 0.3mm で詳細に撮像したものである。断層画像では、特定軸方向位置を切断した様にして内部状況が確認できたが、透過画像では集合体の軸方向範囲全体を透過した画像であるため燃料ピンなど重なった状況での情報が得られ、内部構成部材などの配置・配列の乱れ、異物混入など集合体軸方向の観察ができる。

図 3-4 は、燃料ピン頂部及び炉心燃料部についてスライスピッチの異なる透過画像と既設 X 線ラジオグラフィ装置（以下 X-RG と称す）による写真とともに示す。燃料ピン頂部の画像によればスライスピッチ 0.3mm の画像は、X-RG と同等な画像を取得できる（但し撮像時間が約 10 倍要する）ことを確認した。さらに炉心燃料部の画像では、X-RG がフィルムへの γ 線のかぶりによって不鮮明であるのに対し X 線 CT 装置による X 線透過画像は γ 線のノイズの影響はなく鮮明であることが確認された。

以上 X 線 CT 装置による透過画像は、X-RG に比べ撮像時間が長いが γ 線の影響を受けず鮮明な画像を得ることができることを確認した。

3.1.3 3次元可視化による観察

先に述べたように、断層画像は集合体の特定軸方向位置における観察、透過画像は集合体軸方向範囲の観察とそれぞれ特徴を有している。3次元可視化による観察は、断層画像を集合体の軸方向に連続撮像し、結果を画像処理によって軸方向につなぎ合わせ 3次元画像として表示するもので、断層画像による観察と透過画像による観察の優位な点を併せたものである。

図 3-5 に「常陽」炉心燃料集合体の燃料ピン頂部の X 線透過画像、軸方向連続断層画像とそれによる 3次元可視化表示の例を示す。透過画像では、伸びの大きい燃料ピンを特定することができず、断層画像でも全体的な傾向分布を得ることが困難である。しかし 3次元可視化表示によって集合体内燃料ピン伸び状況を判りやすく観察できるようになることがわかる。

図 3-6 は、上部インシュレータペレット近傍について 3次元可視化処理による縦断層画像表示例を示す。UO₂ 製インシュレータペレットとステンレス鋼製上部反射体の境界部が明瞭に識別できるため、この軸方向位置の変位から燃料スタック長さの相対的变化を把握することが可能となる。

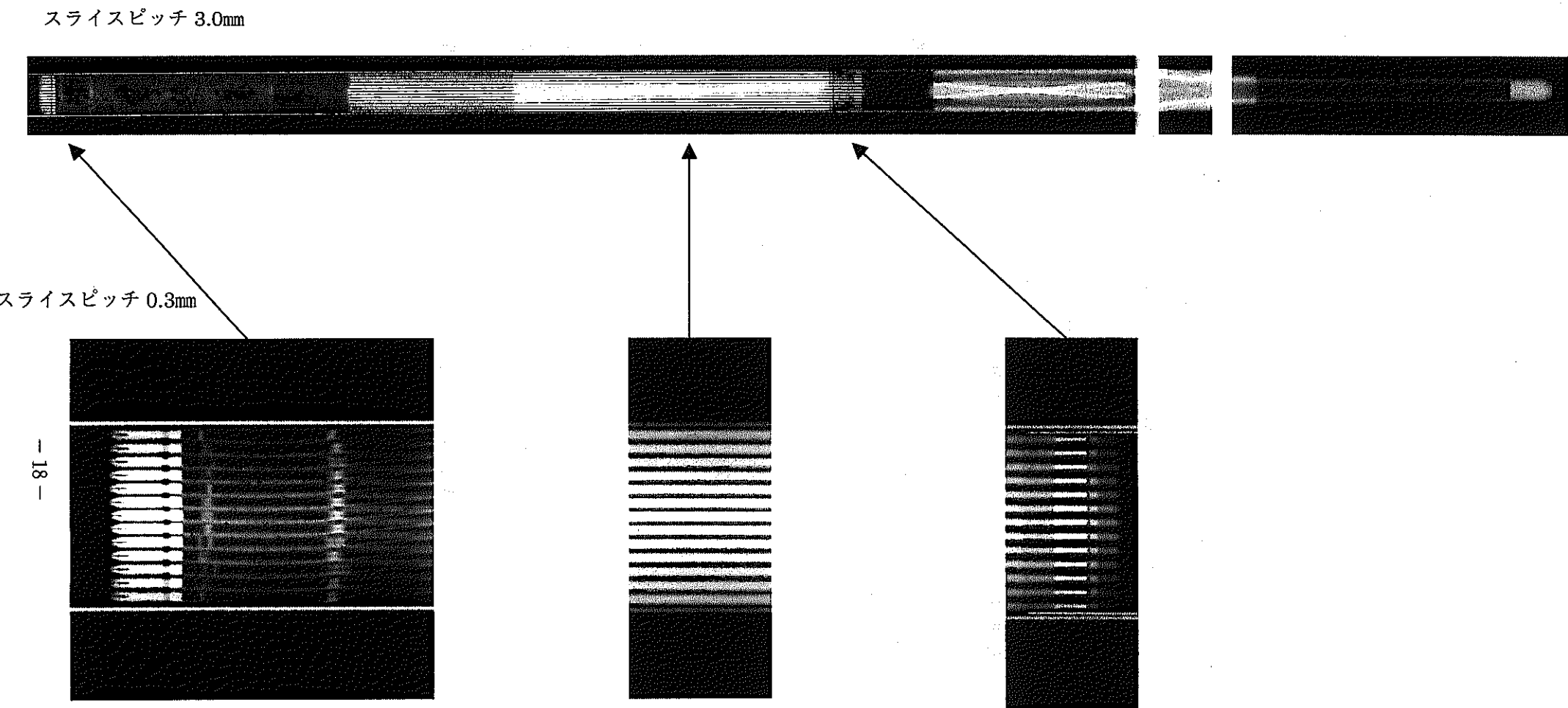
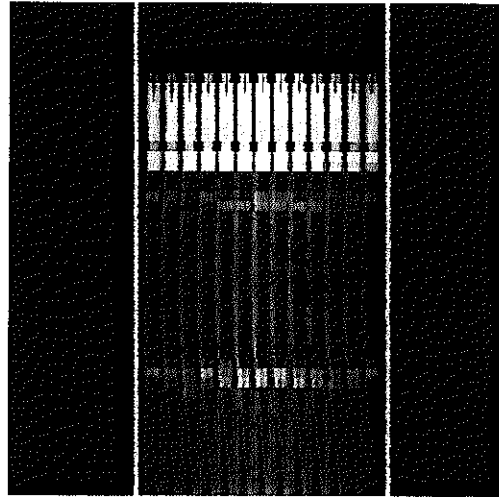


図 3 - 3 「常陽」炉心燃料集合体の X線透過画像

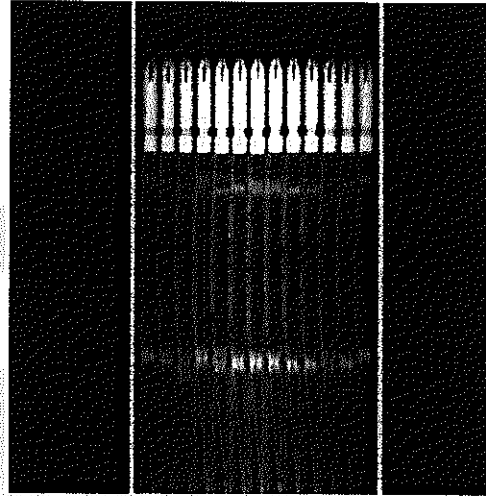
CT 装置による X 線透過像
(PFD512)

X-RG (PFD549)

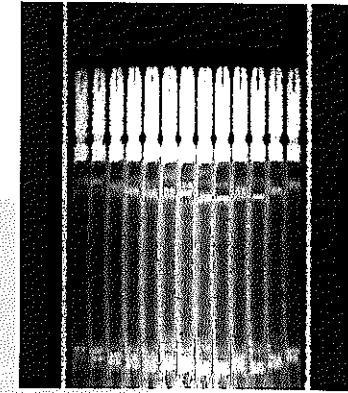
燃料ピン
頂部



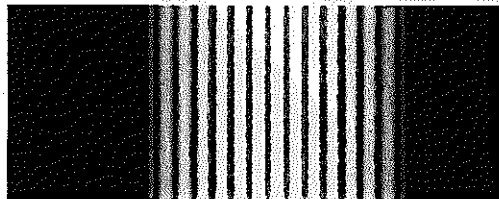
スキャンピッチ 3.0 mm



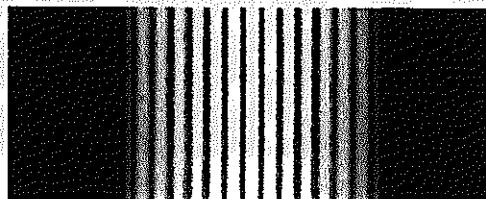
スキャンピッチ 0.3 mm



炉心
燃料部



スキャンピッチ 3.0 mm



スキャンピッチ 0.3 mm

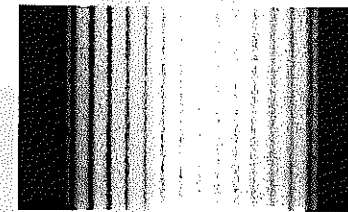
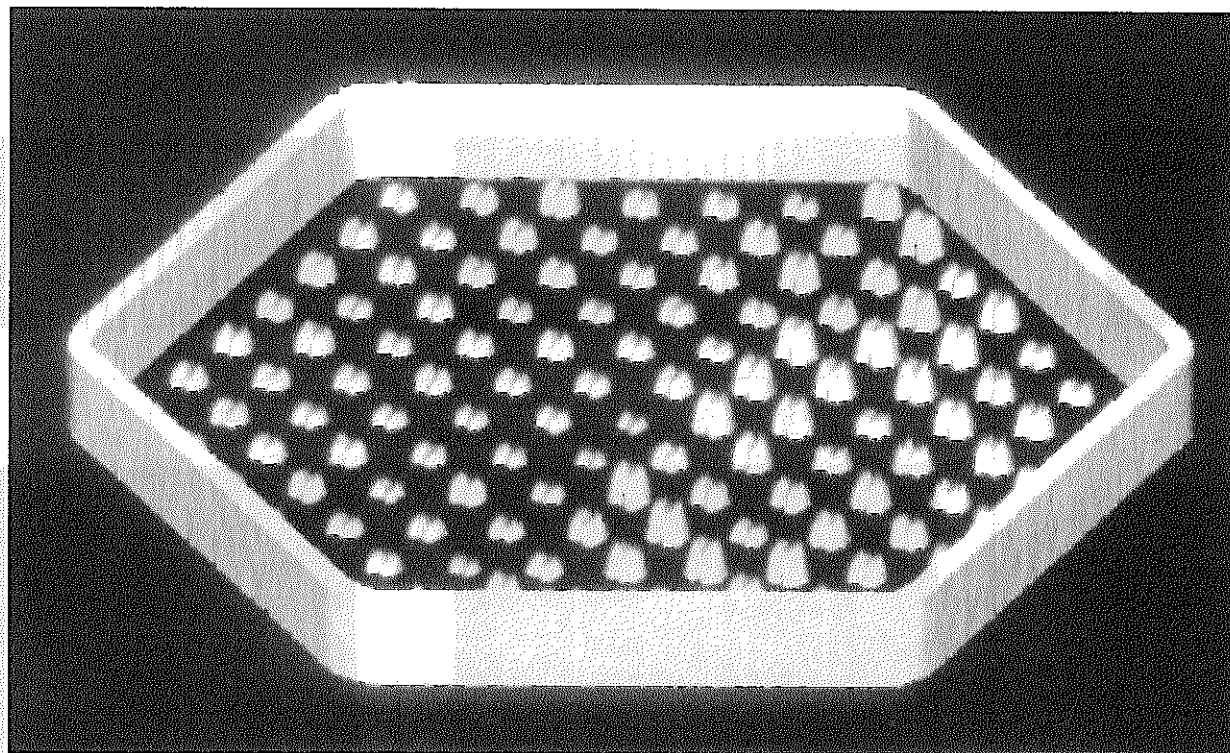


図 3 - 4 X 線ラジオグラフィ及びCT装置による X 線透過画像



軸方向
× 2 倍表示

連続断面画像による 3 次元可視化表示例 (1 mm ピッチ断面による)

図 3 - 5 燃料ピン頂部の 3 次元可視化例

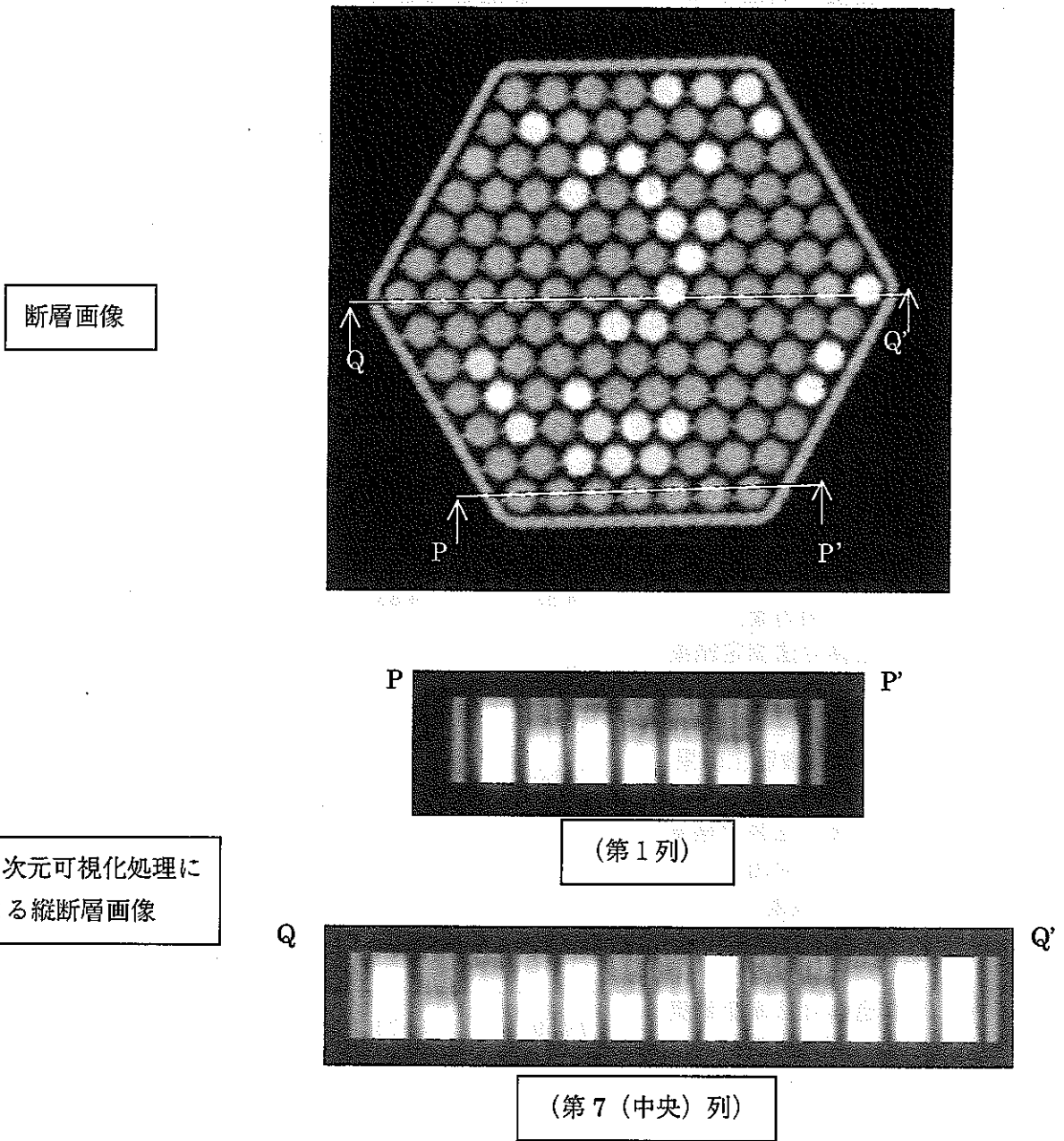


図 3-6 ペレット境界部の断層画像及び縦断層画像例

3.2 定量的な観察

3.2.1 断層画像の数値化処理による観察

炉心中心位置の断層画像について数値化処理を行い、ラッパ管、燃料ピン及びワイヤの位置座標を求めラッパ管内対面間距離等を算出した。

(1) ラッパ管内対面間距離と BDI 量

表3-1にラッパ管内対面間距離の算出結果を集合体縦型試験装置によるラッパ管外側形状測定結果と合わせて示す。測定位置は、ラッパ管の中央と両端位置の3箇所であり、3対面ともに両端より中央位置の対面間距離が長く照射クリープに伴うと推定されるバルジングが認められ、外側形状測定結果と傾向が一致している。またラッパ管外側形状測定結果からラッパ管のノミナル肉厚(1.9mm)を差し引き求めた内対面間距離を基準として数値化処理結果と比較すると±0.4mm以内で、またバルジング量も±0.2mm以内で一致していることを確認した。

表3-1 ラッパ管対面間距離測定結果

対面間	項目	単位(mm)			
		端Ⅰ	中央Ⅱ	端Ⅲ	バルジング量
A-D	CT画像数値化結果 (内対面)	74.52	74.83	74.52	0.31
	集合体寸法測定結果 (外対面)	78.58	78.72	78.58	0.14
	偏差*	0.26	0.09	0.26	0.17
B-E	CT画像数値化結果 (内対面)	74.50	74.83	74.59	0.28
	集合体寸法測定結果 (外対面)	78.64	78.80	78.68	0.14
	偏差*	0.34	0.17	0.29	0.14
C-F	CT画像数値化結果 (内対面)	74.58	74.80	74.56	0.23
	集合体寸法測定結果 (外対面)	78.59	78.73	78.59	0.14
	偏差*	0.21	0.13	0.23	0.09

注* : 外対面間距離測定結果からラッパ管肉厚ノミナル値を減じた値を基準とした内対面測定結果の差

BDI 量は、正規配列バンドルの対面間距離とラッパ管内対面間距離との差に対し、ワイヤ直径を単位として表したバンドルとダクトの干渉量を表すパラメータである。数値化処理システムは、バンドルの膨れをダクトの圧縮で模擬する炉外バンドル圧縮試験に適用するため開発されたものであり、正規配列のバンドル対

面間距離は、被覆管とワイヤのノミナル値を使って算出している。一方、実使用済燃料集合体では、被覆管やワイヤの膨れによるバンドル対面間距離とラップ管内対面間距離から算出する必要があるが、現状では対応していない。数値化処理による被覆管の長径・短径から算出することも考えられるが、 μm オーダで測定が可能な解体後のピン寸法測定結果を利用しバンドル対面間距離を求めBDI量を評価するのが適切と考える。

(2) ラップ管—ピン間とピン—ピン間距離

ラップ管—ピン間距離は、集合体内の最外周ピン 36 本が測定対象ピンであり、その内 6 本のコーナピンは両側ラップ管内面との距離、残りのピンは隣接ラップ管内面との距離を、ピン—ピン間は全ての隣接ピンとの距離を算出している。(図 3-7 ラップ管—ピン間とピン—ピン間距離測定位置を参照のこと)

図 3-8 にラップ管—ピン間距離の測定結果を示す。横軸は、ラップ管各面毎の測定位置 (ピン番号) で縦軸がラップ管—ピン間距離である。測定の結果から全てのラップ管とピン間距離は 0.45mm 以上確保されており、E 面、F 面側が比較的狭いことが判る。なお、炉心中心位置におけるワイヤは、ほぼ C 面の位置にあり、C 面ではワイヤ径 (0.9mm) とほぼ同じ 0.8mm~0.9mm と測定された。

また、ピン—ピン間距離の測定結果は、平均 1.07mm、最大 1.51mm、最小 0.79mm であり、極端にピン間隔の狭い箇所は認められず、ピンが整然と配置されていることが数値化処理結果からも明らかになった。

(3) ワイヤ方向とワイヤ方向平均からの変位量

集合体炉心中心位置における製造図面上のワイヤ方向のノミナル位置は、 162 度 ± 26 度である。表 3-2 に示した「PFD512」燃料集合体の断層画像数値化処理によるワイヤ方向は 180 度 ± 10 度であり、製造時から 18 度の変位量であった。これは、ワイヤピッチが平均 18 度燃料ピンの上側に密になる方向に移動していることを示しているが、ばらつきは少なく製造公差を大きく超えるものではない。

(4) ピン列毎の両端ピン中心間距離

ピン列毎の両端ピン中心間距離は、炉外バンドル圧縮試験においてピンの変形により減少し、BDI 緩和を評価するために求めていた算出項目である。使用済燃料集合体の炉心中心位置における数値化処理結果は、図 3-9 に示すとおりノミナル値に対して 0.4~0.75mm 程度大きい結果が得られた。特に C-F 面に着目すると中央列が両端列に比べて 0.2~0.3mm 程度大きく、これはラップ管のバルジング変形と合致する。

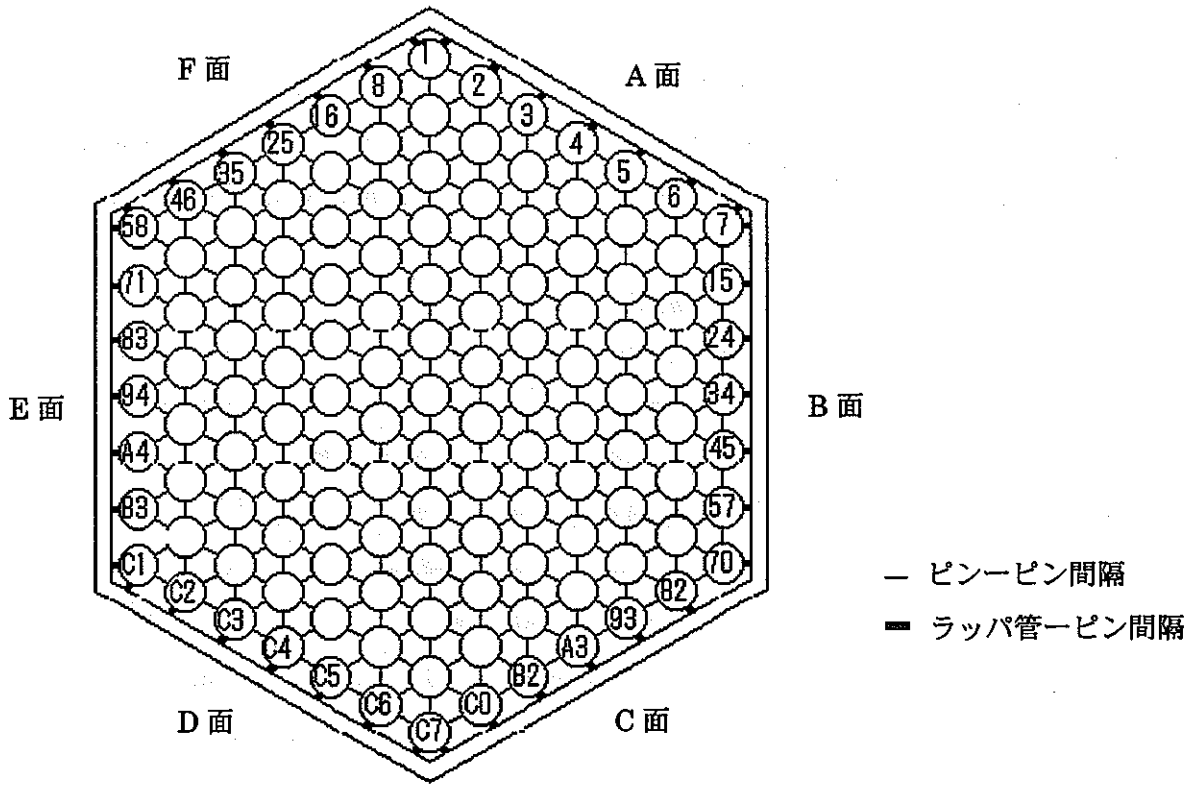


図3-7 ラッパ管-ピン間、ピン-ピン間距離測定位置

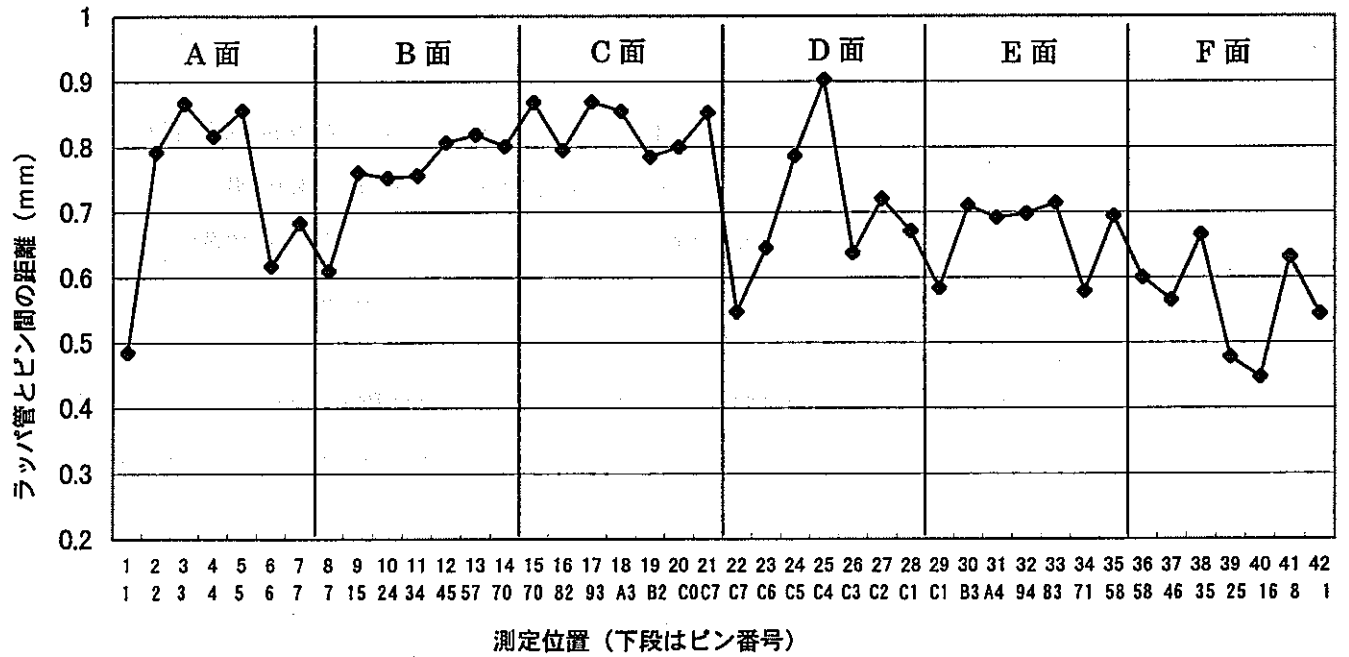
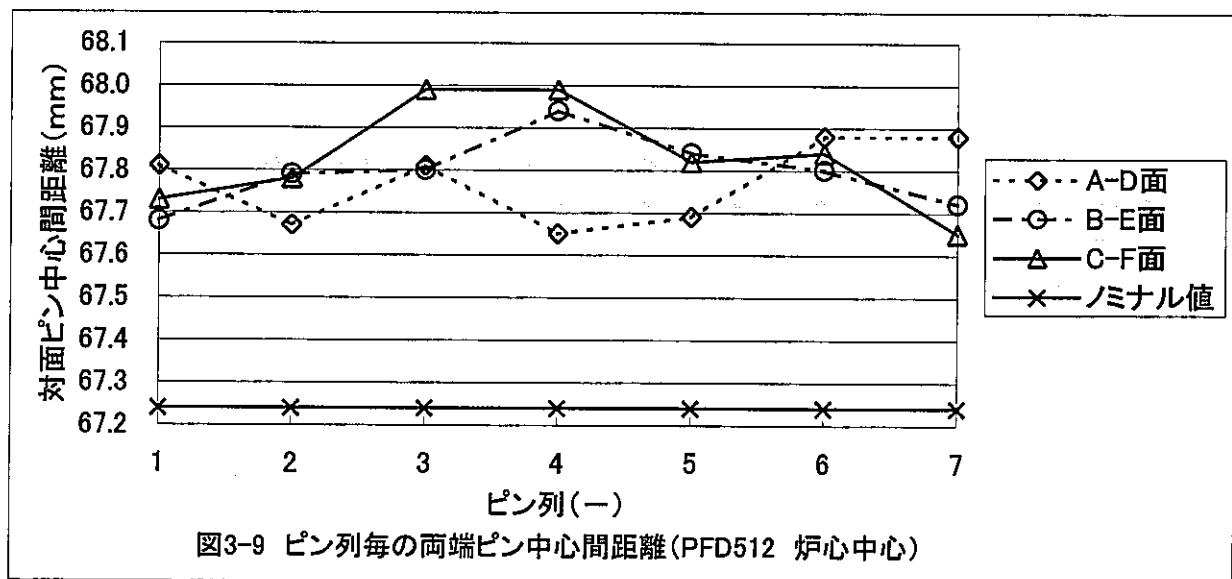


図3-8 ラッパ管とピン間距離の測定結果

表 3-2 ワイヤ方向測定結果

ピンNo.	推定 方向(度)	ピンNo.	推定 方向(度)	ピンNo.	推定 方向(度)	ピンNo.	推定 方向(度)	ピンNo.	推定 方向(度)
1	183	28	174	55	181	82	188	A9	172
2	182	29	178	56	183	83	179	B0	185
3	177	30	180	57	186	84	176	B1	186
4	184	31	177	58	172	85	174	B2	190
5	187	32	185	59	171	86	180	B3	188
6	184	33	182	60	173	87	170	B4	181
7	186	34	189	61	174	88	177	B5	173
8	182	35	177	62	173	89	178	B6	175
9	179	36	179	63	175	90	180	B7	180
10	175	37	175	64	182	91	179	B8	186
11	181	38	181	65	182	92	181	B9	181
12	184	39	180	66	184	93	185	C0	185
13	176	40	184	67	185	94	178	C1	183
14	182	41	178	68	177	95	173	C2	180
15	185	42	181	69	187	96	179	C3	183
16	181	43	187	70	184	97	178	C4	184
17	176	44	183	71	174	98	181	C5	187
18	175	45	186	72	171	99	184	C6	183
19	179	46	181	73	174	A0	176	C7	189
20	174	47	177	74	177	A1	180	データ集計	
21	179	48	176	75	178	A2	177		
22	180	49	176	76	179	A3	188		
23	186	50	175	77	175	A4	179		
24	187	51	176	78	181	A5	186	最小値	170
25	179	52	184	79	183	A6	172	最大値	190
26	181	53	184	80	180	A7	180	平均値	180
27	175	54	181	81	179	A8	178	標準偏差	4.59



3.2.2 CT 値に基づく観察

(1) 燃料ペレットの密度測定

微細スキャンで撮像した断層画像から燃料ピン全数である 127 本の燃料ペレット部（中心空孔含む）の CT 値について画像処理機能である関心領域機能（画像の任意の部分について領域を設定し、CT 値の平均値、最大・最小値、標準偏差を得る機能）を用い求めた。表 3-3 は、燃料ペレットについての測定結果と図 2-4 示した CT 値と密度の関係から密度に換算した結果を示す。

表 3-3 燃料ペレットの CT 値及び密度測定結果

軸方向位置 (コア下端からの距離)	CT 値(-)			密度(g/cc)		
	最小値	平均値	最大値	最小値	平均値	最大値
25mm	10889	11209±124	11437	10.74	10.93	11.06
275mm	10797	11075±117	11372	10.70	10.86	11.02
525mm	10745	11141±108	11319	10.62	10.89	11.06

各軸方向位置における平均値に対する標準偏差は約 1 % であるが最大値・最小値によるばらつきは±2～4 % の範囲にある。

(2) ラッパ管の密度測定

標準スキャンで撮像した断層画像から燃料ペレットと同様にラッパ管の密度測定を試みた。表 3-4 は、中性子照射量が多い炉心燃料部のラッパ管部の CT 値（6 面の平均値）から密度を求め、照射温度及び中性子照射量が少ない集合体下端から 1350mm の位置を基準としたスエリング量を算出した結果である。スエリングとして 0.75 % と評価されたが、CT 値のばらつきが多く有意な密度変化とは言えず信頼度は低い。

表 3-4 ラッパ管の CT 値及び密度測定結果

集合体下端からの距離(mm)	A面 (-)	B面 (-)	C面 (-)	D面 (-)	E面 (-)	F面 (-)	平均 (-)	密度 (g/cc)	スエリング (%)
1700	6585	6595	6509	6623	6656	6547	6585±53	7.91	0.75
1350	6649	6663	6611	6620	6637	6612	6632±21	7.95	基準

(3) 中心空孔径の測定

模擬燃料ペレットの中心付近の CT 値径方向分布は、中心空孔に相当する模擬欠陥の大きさによって分布が異なることが判っている。(図 2-6 参照) この CT 値径方向分布から模擬欠陥サイズを求め、欠陥公称サイズとの比較を試みた。

CT 値の径方向分布から模擬欠陥寸法を求める手法の概念を図 3-10 に示す。模擬欠陥部による CT 値の減少分の面積を求め、ペレット部の CT 値相当で除することによって欠陥部径を算出する面積換算方法である。本手法による模擬欠陥の測定結果は、表 3-5 に示すとおり欠陥の公称サイズに対して±0.1mm程度で一致することが確認できた。

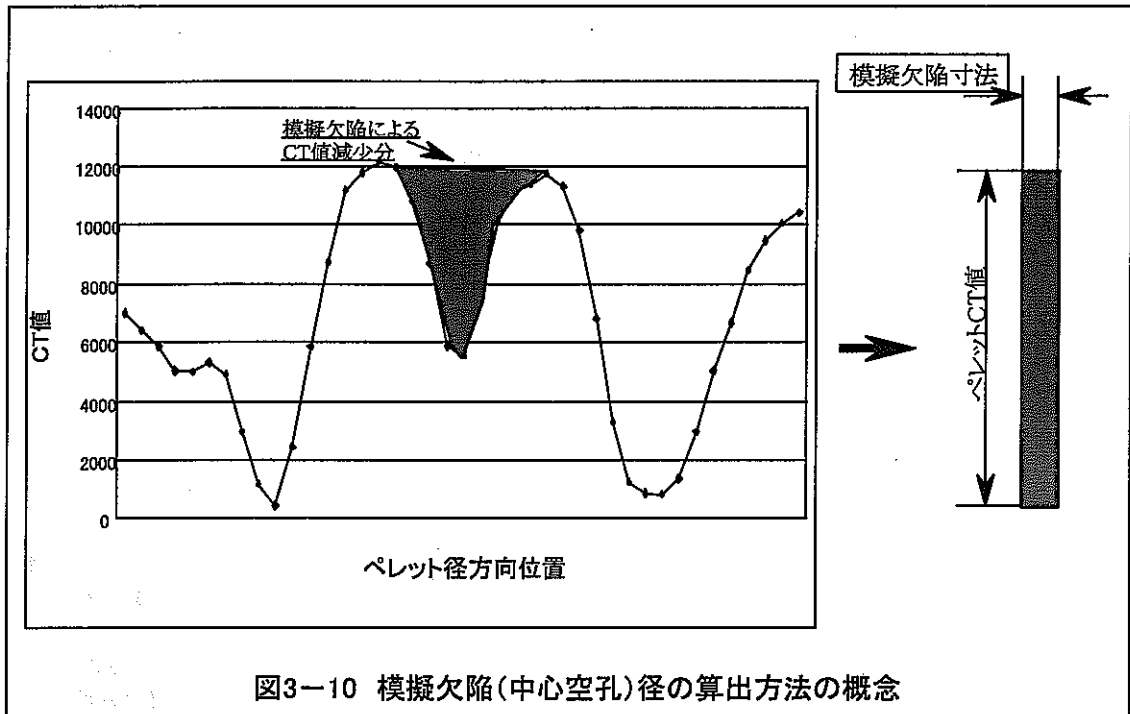


図3-10 模擬欠陥(中心空孔)径の算出方法の概念

表 3-5 CT 値径方向分布による欠陥寸法測定結果

	(mm)			
模擬欠陥寸法	1.0	0.5	0.3	無(0.0)
CT 値径方向分布による欠陥寸法	0.92	0.54	0.23	0.11
誤 差	-0.08	0.04	-0.07	0.11

面積換算手法を用いた炉心中心位置における燃料ペレットの中心空孔径測定結果を表 3-6、図 3-11 に示す。推定した中心空孔径は、最大 0.64、最小 0.06、平均 0.28mm であり、0.1 から 0.4mm の中心空孔径を有する燃料ペレットが多いことがわかる。

表3-6 中心空孔径の測定結果

ピンNo.	推定 サイズ(mm)	ピンNo.	推定 サイズ(mm)	ピンNo.	推定 サイズ(mm)	ピンNo.	推定 サイズ(mm)	ピンNo.	推定 サイズ(mm)
1	0.1	28	0.31	55	0.23	82	0.15	A9	0.19
2	0.17	29	0.11	56	0.3	83	0.37	B0	0.28
3	0.08	30	0.27	57	0.3	84	0.21	B1	0.13
4	0.15	31	0.16	58	0.41	85	0.34	B2	0.16
5	0.06	32	0.6	59	0.36	86	0.32	B3	0.42
6	0.09	33	0.31	60	0.45	87	0.37	B4	0.23
7	0.1	34	0.26	61	0.35	88	0.37	B5	0.27
8	0.14	35	0.23	62	0.31	89	0.2	B6	0.23
9	0.19	36	0.32	63	0.41	90	0.34	B7	0.27
10	0.16	37	0.56	64	0.52	91	0.15	B8	0.17
11	0.2	38	0.59	65	0.62	92	0.07	B9	0.27
12	0.1	39	0.36	66	0.4	93	0.11	C0	0.26
13	0.1	40	0.45	67	0.39	94	0.12	C1	0.28
14	0.07	41	0.38	68	0.24	95	0.28	C2	0.28
15	0.1	42	0.36	69	0.38	96	0.45	C3	0.32
16	0.12	43	0.3	70	0.3	97	0.15	C4	0.31
17	0.21	44	0.3	71	0.48	98	0.19	C5	0.21
18	0.14	45	0.31	72	0.44	99	0.34	C6	0.42
19	0.18	46	0.5	73	0.51	A0	0.31	C7	0.21
20	0.19	47	0.64	74	0.52	A1	0.34		
21	0.13	48	0.42	75	0.36	A2	0.27		
22	0.15	49	0.3	76	0.51	A3	0.19		
23	0.09	50	0.26	77	0.3	A4	0.43	データ集計	
24	0.11	51	0.38	78	0.48	A5	0.26	最小値	0.06
25	0.07	52	0.38	79	0.57	A6	0.29	最大値	0.64
26	0.15	53	0.21	80	0.53	A7	0.18	平均値	0.28
27	0.24	54	0.41	81	0.18	A8	0.15	標準偏差	0.14

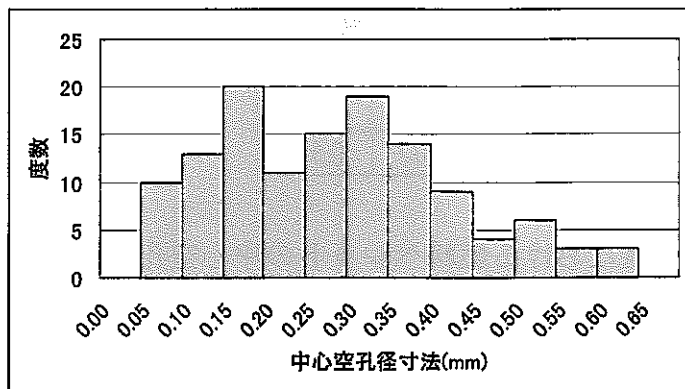
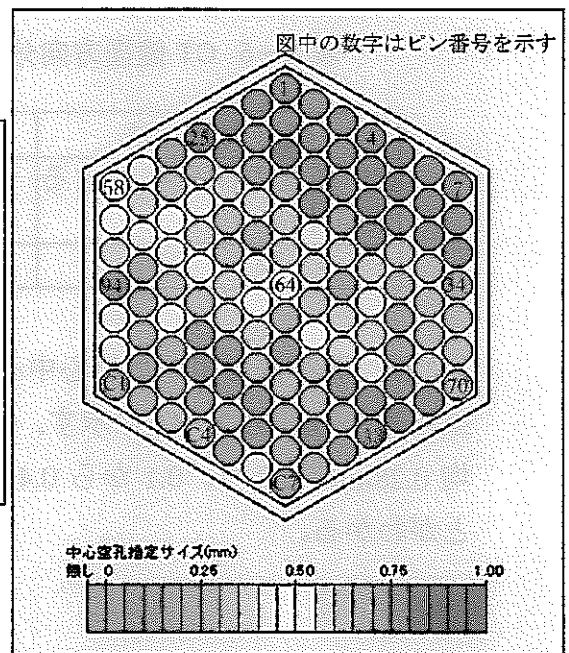


図3-11 中心空孔径測定結果 (PFD512)



3.2.3 3次元可視化像による測定

3次元可視化による目視観察については、3.1.3 項に述べているが、さらにその定量的観察として燃料スタック長さや燃料ピン長さ測定を試みた。

(1) 燃料スタック長さ測定

燃料ピンの上部インシュレータペレットとステンレス鋼製反射体の境界部（集合体下端から 1887mm）の 3次元可視化像が得られるように集合体下端から 1879～1891mm の範囲について軸方向 2mm ピッチにて断層画像 7 断面の撮像を行い、3次元可視化画像上（図 3-6 参照）の境界部位置についてスケールを用い測定した。測定結果を基に設計図面上の基準位置からの距離を求め、集合体内装荷全ピン毎に整理した結果を図 3-12 に示す。撮影領域が不足していたため、伸び方向で 4mm を超えるピン（28 本）の測定ができなかったが下部インシュレータペレット境界位置を基準とした場合のインシュレータペレットを含む燃料スタック長さ測定ができることを確認した。

(2) 燃料ピン長さ測定

燃料ピン頂部 3次元可視化像から燃料ピン頂部位置について測定し、スタック長さ測定と同様に設計図面上の基準位置と比較した結果、基準位置に比べ 0.9～1.8mm 低く燃料ピンが短い結果が得られた。これは、燃料ピン全長の仕様が±2mm であること及び集合体内での燃料ピン束全体が下方に組み込まれている可能性があることが考えられる。

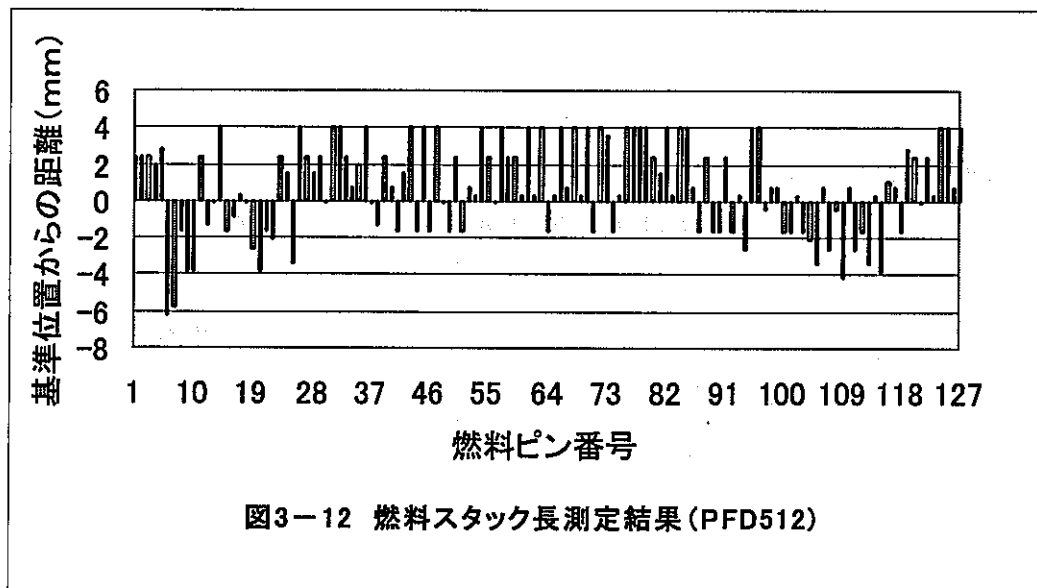


図3-12 燃料スタック長測定結果 (PFD512)

4. 結果の考察

4.1 定性的な観察

X線CT装置の照射後試験装置としての導入によって、従来のX-RG機能である透過画像に加え断層画像及び断層画像の3次元可視化が可能となった。断層画像による観察では、特定軸方向位置における燃料ピンの配置・配列状況等の観察が可能となるとともに、3次元可視化によって燃料ピンの伸び等の集合体内分布を得ることができ、非破壊試験によって燃料集合体の健全性評価に資する高度な情報の取得が可能となった。

また透過画像については、従来のX-RGのフィルムに比べ撮像時間を要するものの γ 線の影響を受けることなく同等以上の画像性能で画像が得られることを確認できた。

4.2 定量的な観察

4.2.1 断層画像の数値化処理による観察

炉外バンドル圧縮試験データの処理を目的に開発された数値化処理技術について、使用済燃料ピン等の配置状況を定量的な観察への適用性を確認した。

BDI量を評価するには、燃料ピン及びワイヤの外径を断層画像から求めると測定精度が劣ることから、集合体解体後の燃料ピン寸法測定結果を併用して評価することが適切と考えられる。

以下に燃料ピンなどの配置状況から求めた冷却材流路断面積やサブチャンネル解析について述べる。

(1) 冷却材流路断面積

集合体ピンバンドル部の冷却材流路断面積の算出には、燃料ピンとワイヤの断面積及びラッパ管内断面積を求める必要がある。ラッパ管内対面間距離の測定結果(表3-1参照)は、製造寸法公差($74.7 \pm 0.4\text{mm}$)や集合体試験装置によるラッパ管の外側形状測定結果から推定される値と比較しても妥当な精度で測定できているものと考えられる。この結果を基にラッパ管内断面積を求めても製造時と大きな変化はなく、本集合体では燃料ピン、ワイヤ断面積に大きな変化がないと考えられることから冷却材流路断面積は、十分確保されていると推定される。

(2) サブチャンネル解析

サブチャンネル面積は、3本の燃料ピン中心座標で囲む3角形の面積からノミナ

ル外径寸法による燃料ピン断面積の 1/2 を減じて算出したものでワイヤは無いものとした。図 4-1 に集合体炉心中心位置におけるサブチャンネル面積の算出結果を示す。算出値は、平均 6.49mm²、最小 5.74 mm²、最大 7.88 mm²であり、製造図面から求めたノミナル値 6.25mm² に比べ拡大傾向は伺えるものの寸法精度や被覆管の製造公差 (±0.03mm) を考慮すると有意な変化とはいえない。これらの情報は、流路変形評価や被覆管上昇温度の評価に期待できる。

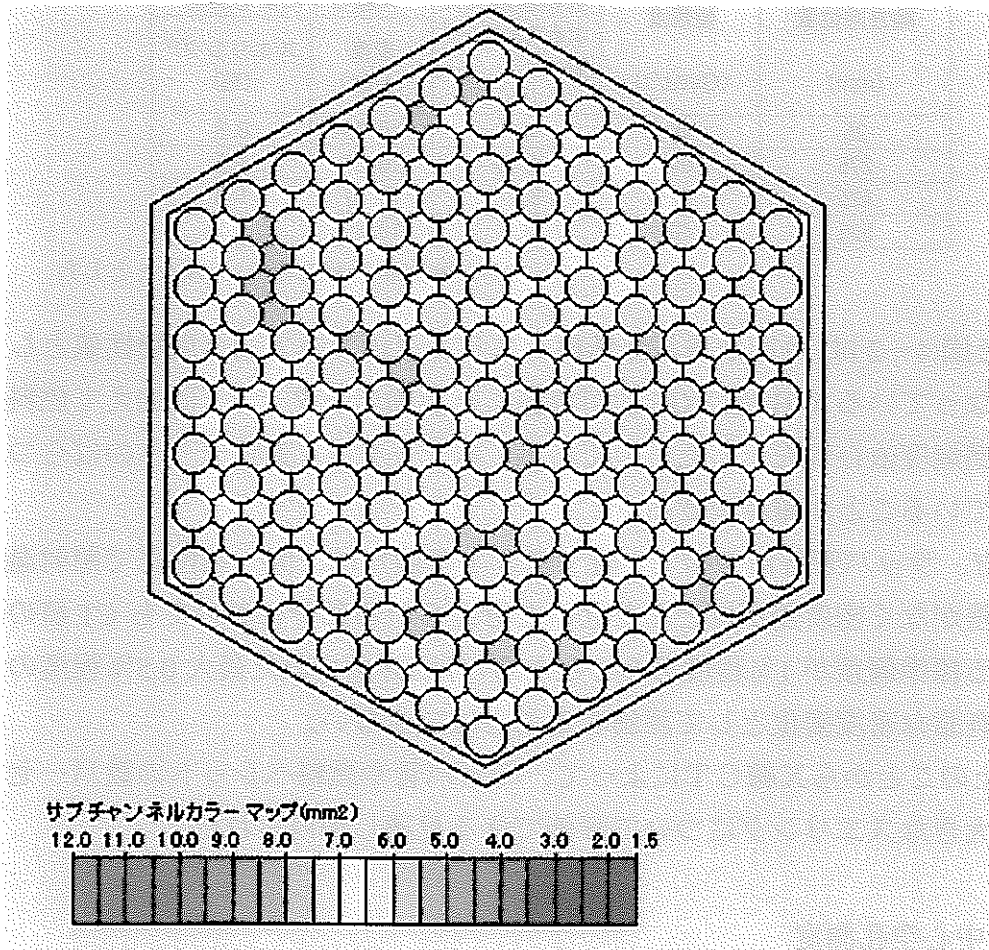


図 4-1 サブチャンネル面積の算出結果

4.2.2 CT値に基づく観察

(1) 密度測定

表 4-1 に今回測定した燃料密度の測定結果から求めた燃料スエリング量と金相試験に基づく評価式による値とあわせて示す。X線CTによる燃料スエリング量は、金相試験による評価式の値と比べ 1/5～1/3 小さい結果となった。

表 4-1 燃料スエリング測定結果

軸方向位置 (mm)	燃焼度 (GWd/t)	金相経験式に よるスエリング 値 (%)	X線CTによる測定	
			密度 (g/cc)	スエリング*1 (%)
25	48	4.1	10.93	0.8
275	69	6.75	10.86	1.5
425	57	5.25	10.82	1.8
525	40	3.1	10.89	1.2

*1 未照射燃料密度を 11.02g/cc とした

また図 4-2 は、今回取得した燃料スエリングについて設計用物性値として策定根拠となっている WH 及び GE 社が実施した実験データ^{6) 7)}に加えて燃料スエリングの燃焼度依存性を示したものである。本データは、実験データのばらつき内に収まっていることが確認できる。

一方、ラッパ管各面毎の CT 値 (表 3-1 参照) は、同一軸位置で照射温度、照射量の差がなく密度差がほとんどないと考えられる部分においても CT 値の平均値に対する標準偏差が 1% 程度あることから、今回評価された最大 0.5% 程度のスエリングを有意な密度変化として評価することはできない。

以上のことから X線CT によって、ラッパ管や燃料ペレットの数パーセントを超える大きなスエリングについて評価できる見通しが得られた。

(2) 中心空孔測定

模擬燃料ペレット中心付近の CT 値の径方向分布から孔状欠陥径を求める面積換算法の測定精度は、±0.1mm 程度と画像上の欠陥識別性能である φ0.5mm に比べ優れている。本手法による実燃料ペレットに対する測定結果は、3.2.2 項で述べたとおりであるが、今後金相試験による測定結果との相互比較によって測定精度の確認が必要である。

なお今回の「常陽」炉心燃料集合体 PFD512 は、2 種類のペレット副製造ロット (L2C00010 及び L2C00011) で燃料ピンを構成しており、製造ロット毎の中心空孔

径は、 0.14 ± 0.06 、 0.33 ± 0.12 mm であった。各ロットの燃料ペレット平均外径は、 $4.631, 4.601$ mm（燃料ペレットの製造規定値は 4.63 ± 0.05 mm）であり、中心空孔径の小さいロットのペレットは、平均ペレット外径が大きくギャップ熱伝達率が大きくなりペレット中心温度が低く中心空孔が小さくなることが考えられ、定性的な照射挙動としては一致している。

4.2.3 3次元可視化像による測定

3次元可視化像から燃料スタックや燃料ピン全長測定が可能であることを確認した。従来これらの測定は、集合体を解体し燃料ピン単体の寸法測定や X-RG 又は γ スキャニングによる測定以外手段がなかったが 3次元可視化によって集合体を解体せずにデータを取得できる。

X線 CT 装置による透過画像と断層画像の観察によって、集合体を解体せずに（炉内装荷状態とほぼ同じ状態）短時間で集合体の内部状況を観察できるため、詳細な破壊試験計画への反映、異常の早期発見及び解体の許されない継続照射用集合体の中間検査に本装置が発揮することが期待される。また X線 CT 装置による情報は、一部の破壊試験の代行機能を有しており、集合体の解体以降の照射後試験を合理的に行うため十分なデータであり、破壊試験を最小限に抑えることができ、放射性廃棄物の削減に寄与できるものと考えられる。

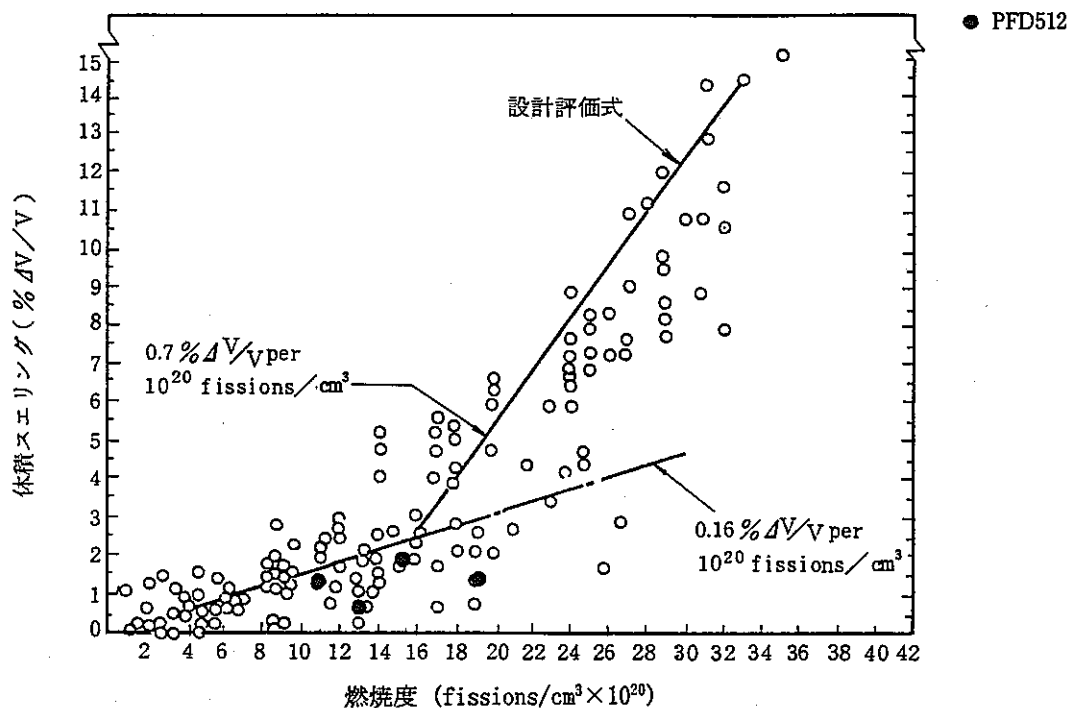


図4-2-1 UO₂ペレットのスエリングの燃焼度依存性⁽⁶⁾

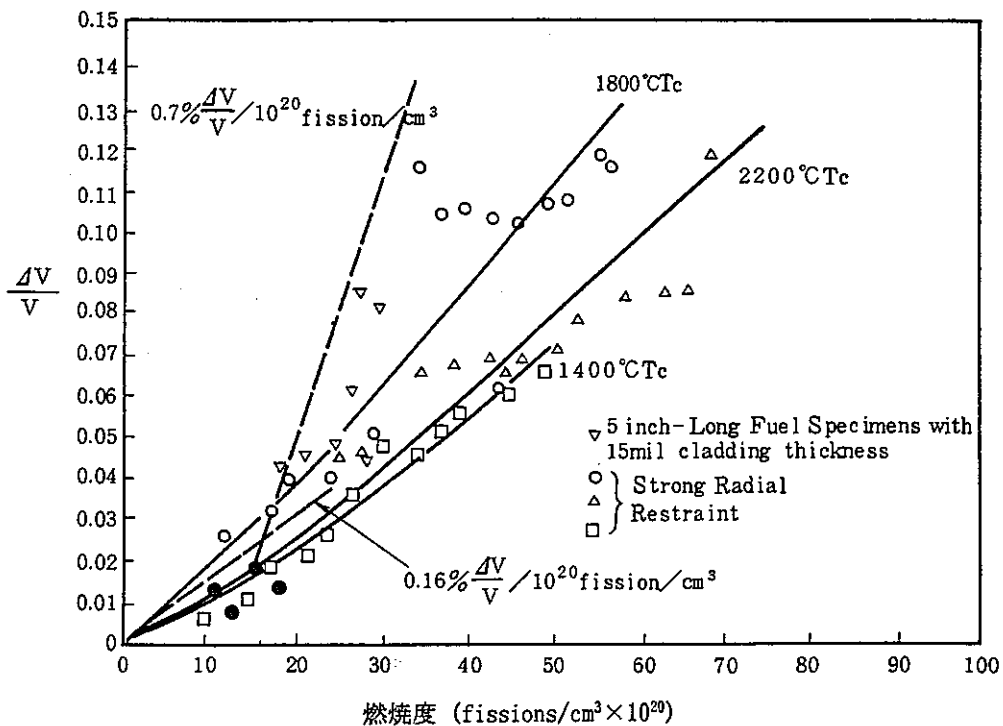


図4-2-2 混合酸化物ペレットのスエリングの燃焼度および温度依存性⁽⁷⁾

図4-2 燃料スエリングの燃焼度依存性

5. おわりに

X線CT装置を照射後試験装置として開発・導入し、使用済燃料集合体の断層画像取得に成功した。取得した画像は、燃料ペレットの中心空孔生成状況なども観察できることが明らかになり、改めて本装置による取得画像データの活用方法の検討が期待されていた。このためX線CT装置で取得できる断層画像と透過画像について、画像データの活用方法について検討し、「常陽」使用済炉心燃料集合体（PFD512）の画像データについて観察を試み、適用性を検討した。以下に結果を示す。

- (1) 従来の透過画像及び断層画像に加え3次元可視化が可能となり集合体内部状況の観察性能が格段に向上した。
- (2) 断層画像の数値化処理によって、ラッパ管内対面間距離、燃料ピン等の座標を定量的に求めることができた。これらのデータは、サブチャンネル解析等に反映できるデータとして期待される。
- (3) CT値によって燃料ペレットやラッパ管の密度が得られることを確認した。破壊試験結果との比較評価が必要だが、数%を超える大きなスエリングの評価に役立つ。
- (4) 燃料ペレットの中心空孔径を±0.1mm程度の精度で測定できる見通しが得られた。このデータは、集合体内での中心空孔成長分布を得ることができ、照射条件の確認、金相観察位置の選定の際に役立つ。
- (5) 3次元可視化によって燃料スタックや燃料ピン全長データが集合体を解体せずに取得できる。

以上のとおりX線CT装置の導入によって炉内装荷状態とほぼ同じ状態の集合体について、解体せずに内部状況を短時間で定量的に観察できることを確認した。このためX線CT装置は、集合体の異常の早期発見、解体を許されない継続照射用リグの中間検査に有効である。また詳細な破壊試験計画立案時の選択ピン選定及び観察位置特定などにも活用が期待される。

6. 謝 辞

X線CT装置による取得データの活用検討に際し、本装置の運転・維持管理を担当している検査開発(株)久保宏明氏、三澤進氏に深く感謝致します。特に三澤進氏には、断層画像の数値化処理システムの改良、3次元可視化ソフトの制作にあたってプログラムロジックの提案・検討作業の助勢を担当し、さらにパソコン用データ処理ツールを作成して頂きました。

また、BDI挙動や解析コード“BAMBOO”、数値化処理システムに関して助言を頂いたシステム技術開発部燃料材料技術開発グループ上羽智之氏に深く感謝致します。

7. 参考文献

- 1) 永峯 剛 他：照射後試験用 X 線 CT 検査装置の開発—「常陽」使用済燃料集合体を用いたホット試験— JNC TN9410 99-020 (1999)
- 2) 瀬下一郎 他：高速炉大型集合体のピン束変形挙動評価
動燃技報 No.79 (1991)
- 3) 上羽智之, 水野朋保：高速炉燃料ピン束変形解析コード”BAMBOO”によるバンドル変形解析 PNC TN9410 97-067 (1997)
- 4) R.Moeller et, al., "In fluence of Rod Bowing on the Measured Local Temperature Distribution In Fuel Rod Cladding Tubes with Sodium Cooling" Trans. ANS 31 177-174(1979)
- 5) K.Miyaguchi et, al., "Thermal-Hydraulic Experiments with Simulated LMFBR Sub-Assemblies under Nominal and Non-Nominal Operating Conditions", IAEA IWGFR Specialists Meeting on Thermo dynamics of FBR Sub-Assembly, Karlsruhe Garmany, (Feb.1979)
- 6) M.L.bleiberg et, al.:(WH) WAPD-BT-18(1960)
- 7) Nelson, R. C. and Zebroski, et, al. :Tans. ANS, 9, 412(1966)