

高速炉燃料集合体用CT画像数値化処理システムの開発と 適用結果

(技術報告書)

2002年8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

高速炉燃料集合体用 CT 画像数値化処理システムの開発と

適用結果

(技術報告書)

報告者 勝山幸三¹⁾ 永峯剛¹⁾ 松元慎一郎¹⁾

要旨

ワイヤスペーサ型の高速炉燃料集合体では、燃料ピンバンドルとそれを囲むラッパ管(ダクト)との機械的相互作用: BDI (Bundle-Duct-Interaction) が主要な寿命制限因子の一つと考えられている。その BDI 挙動を把握するために、燃料集合体の内部の状況を非破壊で観察できる照射後試験用 X 線コンピュータトモグラフィ(X-CT)を開発した。

本装置を用いて、すでにいくつかの照射済燃料集合体に対する試験を実施している。その結果得られる CT 画像から、燃料ピン等の配置状況を定性的に確認できる。しかし、定量的に配置状況を把握するためには、画像データを数値化処理する必要がある。その数値化処理について、炉外バンドル圧縮試験用に作られたシステムをもとに、実機の燃料集合体に適用可能なよう開発を行った。

本報告では、その数値化処理システムについて述べるとともに、「常陽」で照射された炉心燃料集合体に対して適用した結果を示す。その結果として、被覆管やラッパ管のスエリングがわずかな段階でも、最外周のサブチャンネル流路断面積や外周装荷燃料ピンの曲がりについて有意な変化が確認された。

1) 核燃料サイクル開発機構 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 the Computer Program for the CT Image Analysis of the Fuel Assembly and Applying to the Irradiated Fuel

KOZO KATSUYAMA¹⁾ TSUYOSHI NAGAMINE¹⁾

SHIN-ICHIRO MATSUMOTO¹⁾

Abstract

It is recognized that one of main factors limiting fuel life in a wrapping wire typed fuel assembly is BDI (Bundle-Duct Interaction). In order to observe this phenomenon occurring in a fuel assembly with a non-destructive method, the X-ray computer tomography (X-ray CT) apparatus was developed and used as a tool of post-irradiation-examinations.

Several fuel assemblies have been tested with the X-ray CT. The data of CT image can show the location of fuel pins and wrapping wires. However, numerical analysis should be applied to the CT image to obtain the displacements of fuel pins and so on quantitatively. The numerical analysis was developed on the basis of the computer program made for the out of pile tests of fuel pin bundle compression using the X-ray CT.

In this report, the numerical analysis system and the results gained by applying the system to the fuel assembly irradiated in Joyo are described. As the results, it was confirmed that significant change of flow area in outermost sub-channels and meaningful bowing in outermost fuel pins occurred even in case that the swelling of cladding and wrapper tube was very small.

¹⁾ JNC, O-arai Engineering Center, Irradiation Center, Fuels and Materials Division, Fuel Monitoring Section

目次

1. はじめに	1
2. 「実機燃料用数値化処理システム」の開発	2
2.1 システムの概要	2
2.2 CT 画像数値化処理のフロー	2
2.3 ラッパ管形状認識方法	3
2.4 燃料ピン形状評価方法	4
2.5 「実機燃料用数値化処理システム」による寸法測定精度	5
3. 照射済燃料集合体への適用	6
3.1 供試体の照射条件	6
3.2 取得データ	6
3.3 結果	6
3.3.1 ラッパ管内対面間距離	6
3.3.2 燃料ピン中心座標	7
3.3.3 燃料ピン自己ワイヤ方向	7
3.3.4 サブチャンネル面積変化挙動	7
3.4 考察	8
3.4.1 ラッパ管の変形挙動	8
3.4.2 燃料ピン湾曲挙動	8
1) 燃料ピン湾曲量の測定結果	8
2) 燃料ピン湾曲の要因検討	9
3) 燃料ピンの局所的湾曲と曲がりとの関係に関する考察	10
4. まとめ	12
5. 謝辞	13

図リスト

図 2.1	CT 画像データ数値化処理フロー	15
図 2.2	ラップ管形状認識方法	16
図 2.3	線形補間による境界座標算出	16
図 2.4	燃料ピン外形データ抽出処理概要	17
図 2.5	ワイヤ方向検索処理概要	18
図 2.6	楕円フィッティング算出結果及び楕円方程式	19
図 2.7	実機燃料集合体燃料ピン形状評価結果例	20
図 2.8	模擬燃料試料を用いた精度確認試験	21
図 3.2.1	X・C T 撮像結果	22
図 3.3.1	ラップ管内対面間距離測定結果（軸方向分布）	23
図 3.3.2	ラップ管内対面間距離測定結果（径方向分布）	24
図 3.3.3	集合体寸法測定結果と数値化処理結果比較	25
図 3.3.4	燃料ピンの正規配列からの変位量と方向	26
図 3.3.5	自己ワイヤ方向分布	27
図 3.3.6	ワイヤピッチ測定結果	28
図 3.3.7	サブチャンネル面積変化割合バンドル内分布	29
図 3.4.1	ラップ管の膨れ機構	30
図 3.4.2	集合体軸位置における外周燃料ピン・ラップ管間距離	31
図 3.4.3	燃料ピンの変位量測定結果	32
図 3.4.4	BDI によるバンドル変形	33
図 3.4.5	BDI の定義	34
図 3.4.6	単純支持梁モデル	35
図 3.4.7	燃料ピンの曲がり挙動	36
図 3.4.8	燃料ピンの曲がりプロファイル	37

1. はじめに

高速炉燃料集合体では、燃料ピンの間隔を一定にし、冷却材である Na の流路断面積を確保するために、燃料ピンにはらせん状にワイヤスペーサが巻きつけられている。このワイヤスペーサ型燃料集合体では、燃料ピンバンドルとそれを囲むラップ管（ダクト）との機械的相互作用：BDI（Bundle-Duct-Interaction）が主要な寿命制限因子の一つと考えられている。BDI が過度に進行すると、バンドルの変形が顕著になり、被覆管の熱的および機械的健全性に影響を及ぼす可能性がある。その BDI 挙動を把握するために、燃料集合体の内部の状況を非破壊で観察できる照射後試験用 X 線コンピュータトモグラフィ(X-CT)を開発した¹⁾。

これまでに、高速実験炉「常陽」で照射された燃料集合体の X-CT 試験を実施し、得られた CT 画像から、燃料ピン等の配置状況を定性的に確認した。しかしながら、CT 画像による定性的な確認では、燃料ピンどうしの接触有無等については把握できるが、燃料ピンの詳細な配置状況等定量的なデータの取得は不可能であった。定量的に配置状況を把握するためには、得られた CT 画像データを数値化処理する必要がある。

CT 画像の数値化処理については、これまで炉外バンドル圧縮試験²⁾³⁾の CT 画像用に開発された「高速炉燃料集合体バンドル断面 CT 画像数値化処理システム³⁾」（以下「バンドル圧縮試験用数値化処理システム」）があった。本システムでは、ラップ管を圧縮板とし、燃料ペレットは装荷されていない状態のものを数値化するものであるため、実機燃料への適用が不可能であった。このため、炉外バンドル圧縮試験用に作られたシステムをもとに、実機の燃料集合体に適用できる「実機燃料用数値化システム」の開発を行った。

本報告では、「バンドル圧縮試験用数値化処理システム」を改造し、「実機燃料用数値化システム」を開発した結果について述べるとともに、この「実機燃料用数値化処理システム」を利用して高速実験炉「常陽」で照射した炉心燃料集合体に適用し、燃料ピンの変位挙動等について検討した結果を報告する。

2. 「実機燃料用数値化処理システム」の開発

2.1 システムの概要

「バンドル圧縮試験用数値化処理システム」は、CT 画像マトリクスデータ作成、圧縮板外側画素削除、燃料ピン形状評価および評価結果整理の4つのプロセスで構成されている。それぞれのプロセスの概要については 2.2 項で述べる。

バンドル圧縮試験用に開発された「バンドル圧縮試験用数値化処理システム」を実機燃料集合体に適用するためには、以下の二つの対応が必要である。

一つは、燃料ピンの形状を求める際の問題である。バンドル圧縮試験では、被覆管の中に燃料ペレットは入っていない。そのため、内部から被覆管の内側境界を検出して燃料ピンの中心座標等定めていた。しかし、実機の燃料集合体ではペレットがあるために、そのような手法は取れない。その代わりに、燃料ピンそのものの形状を認識することが必要となる。「実機燃料用数値化処理システム」では、この燃料ピン形状評価プロセスについて新規追加することとした。

二つ目は、燃料ピンバンドルを取り囲む構造の違いである。実機では、六角形のラッパ管を用いている。それに対し、バンドル圧縮試験では、ラッパ管を模擬しているとはいえ、平らで少し厚みのある圧縮板である。その構造の違いを考慮して、圧縮板外形画素削除プロセスに代わるものを作成することとした。

なお、「バンドル圧縮試験用数値化処理システム」の各プロセスは、独立したモジュールとして作られている。そのため、入力データ・出力データのフォーマットを同じとすることにより、幾つかの既存のプロセス（CT 画像マトリクスデータ作成と評価結果整理の2プロセス）については、そのまま用いることとした。

2.2 CT 画像数値化処理のフロー

「実機燃料用数値化処理システム」の処理フローを図 2.1 に、各プロセスの概要を以下に示す。

(1) CT 画像マトリクスデータ作成プロセス（バンドル圧縮試験用をそのまま流用）

本プロセスでは、CT 画像バイナリデータから数値化処理に必要なマトリクスデータを作成する。マトリクスデータを作成する際、その縮小を目的に数値化処理に必要な集合体部の画像データ以外は削除する。また、コーナー燃料ピンの概略中心をユーザーが画面上で確認しながらマウスで指定することによって求めておく。CT 画像マトリクスデータは、ヘッダー情報にコーナー燃料ピン概略中心座標データを含んだものとなる。

(2) ラッパ管画素削除プロセス（旧：圧縮板画素削除プロセス、実機燃料用に作成）

本プロセスは、上記(1)で作成した CT 画像マトリクスデータおよびコーナー燃料ピン概略中心座標データを用い、ラッパ管の各内面の境界データ（6面）をフィッ

ティングして、最小2乗近似によりその内面境界を4次関数として求める。求められた4次関数をラッパ管位置解析結果としてテキストファイルに出力する。この4次関数を算出するラッパ管位置解析方法については、2.3項において詳細に述べる。

これ以降のプロセスにおいて、ラッパ管画素が燃料ピン形状評価等に影響を及ぼさないようにすることが必要である。そのため、得られたラッパ管内面境界位置解析結果を用いて、境界外のラッパ管画素データを削除する。作成したCT画像データは、ユーザーが画面上でラッパ管画素削除プロセスが適切に実行されたのを確認する。

(3) 燃料ピン形状評価プロセス（実機燃料用に制作）

本プロセスは、上記(2)で作成したラッパ管画素削除後のCT画像マトリクスデータをもとに、全燃料ピンの形状を評価し、その結果をテキストファイルに出力するものである。

先に述べたように、燃料ピンの形状に関して、実機燃料集合体ではペレットが入っているため、バンドル圧縮試験の場合と同様な手法は取れない。そこで、燃料ピンの形状評価をその外形から行うこととした。

最初にコーナー燃料ピンの概略中心座標から全燃料ピンの各々の値を算出し、その結果から燃料ピン毎に分割したマトリクスデータを作成する。作成したマトリクスデータから燃料ピン外形データを抽出する。この時点では、燃料ピン外形データにワイヤが含まれている。そこで、正確な燃料ピン外形データを抽出するために、ワイヤ位置検索を行い、ワイヤ位置に相当する燃料ピン外形データを取り除く。残った燃料ピン外形データを用いて、最小2乗近似による楕円フィッティングを行う。燃料ピン外形データ抽出処理、ワイヤ位置検索処理、楕円フィッティング等燃料ピン形状評価方法については、2.4項で詳細に述べる。

(4) 評価結果整理プロセス（バンドル圧縮試験用をそのまま流用）

このプロセスでは(2),(3)で算出したデータを用いて、ラッパ管内対面間距離等のデータを計算し、これらをテキストファイルに出力する。

2.3 ラッパ管形状認識方法

ラッパ管形状認識は以下の4つの過程を有する。

(1) ラッパ管内面概略位置の算出

コーナー燃料ピン概略中心座標データおよび初期値として与えられるパラメータ（ラッパ管肉厚、燃料ピン直径、ワイヤ径）を用いて、ラッパ管内面の概略位置を求める（図2.2参照）。

(2) ラッパ管外面の近似関数の算出

上記(1)で求めたラッパ管内面の概略位置から、パラメータとして与えたラッパ管肉厚等のデータを用いて、その外面概略位置を推定する。この推定された概略位置

付近の CT 値からラップ管外面境界座標を抽出する。この抽出方法は、ラップ管の材質であるステンレス鋼の CT 値を閾値として、それをまたぐ 2 つの画素の座標データを用い、線形補間により境界座標データを算出する (図 2.3 参照)。算出した座標データによりラップ管外面境界を表す直線を最小 2 乗近似により求める。

(3) ラップ管内面の近似関数の算出

上記(2)で求めたラップ管外面近似関数をもとに、その管内面に相当する位置の境界データを外面抽出方法と同様に算出する。算出した境界データを用いて最小 2 乗近似を行い、4 次関数を求める。

(4) テキストファイル出力

上記(3)で求めたラップ管内面を近似する 4 次関数をテキストファイルに出力する。

2.4 燃料ピン形状評価方法

燃料ピン形状評価方法は、燃料ピン外形データ抽出処理、ワイヤ位置検索処理、楕円フィッティング、算出結果出力の 4 つの過程で構成される。

(1) 燃料ピン外形データ抽出処理

燃料ピン外形データ抽出処理の概要を図 2.4 に示す。燃料ピン毎に分割したマトリクスデータを用い、各々の外形データを抽出する。燃料ピン外形座標の算出は図 2.3 に示すように、被覆管材質であるステンレス鋼の CT 値を閾値とし、それをまたぐ 2 つの画素の座標データを抽出し、線形補間により行う。

燃料ピン概略中心座標の補正を行うため、算出した境界データを使用して楕円フィッティングを行う。フィッティング前後の中心座標データを比較し、変位量が基準値以下($1 \times 10^{-4} \text{mm}$)になるまで境界データ抽出と楕円フィッティングを繰り返す。変位量が基準値以下になった時点で、燃料ピン概略中心座標の補正が終了する。

(2) ワイヤ位置検索処理

ワイヤ位置検索処理の概要を図 2.5 に示す。上記(1)で求めた燃料ピン外形データ、燃料ピン概略中心座標および初期値として入力するパラメータ (ノミナルにおけるワイヤ方向) を用いて、ワイヤ位置を検索する。ワイヤ位置の判定方法は、燃料ピン概略中心座標から燃料ピン外径境界までの距離が最大となる方向をワイヤ存在位置方向と判定する。フィッティング結果からワイヤ位置検索処理が適切に行われなない場合は、その検索パラメータを変更することで、ワイヤずれの大きい特異な燃料ピンにおいても、検索処理が可能である。

(3) 楕円フィッティング

上記(2)で求めたワイヤ存在方向をもとに、ワイヤ部分に相当する燃料ピン外形データを取り除き、最小 2 乗近似による楕円フィッティングを行う。楕円フィッティング算出結果および楕円方程式を図 2.6 に示す。

実機燃料集合体の燃料ピン形状評価の結果例を図 2.7 に示す。

(4) 算出結果出力

上記(3)で求められた燃料ピン中心座標データおよび燃料ピン形状評価結果は、数値データとしてテキストファイルに出力する。

2.5 「実機燃料用数値化処理システム」による寸法測定精度

「実機燃料用数値化処理システム」による寸法測定精度を確認するため、燃料ピン-燃料ピン間距離、燃料ピン-ラッパ管間距離、ラッパ管内対面間距離の実寸法データのある模擬集合体を用いて、精度確認を行った。結果を図 2.8 に示す。その結果、以下の寸法精度で数値化処理できることを確認した。

燃料ピン-燃料ピン間距離 : ±0.1mm
ラッパ管内対面間距離 : ±0.2mm
燃料ピン-ラッパ間距離 : ±0.15mm

3. 照射済燃料集合体への適用

「実機燃料用数値化処理システム」を高速実験炉「常陽」で照射した炉心燃料集合体 PFD512 の CT 断面像に適用した。その結果、ラッパ管および燃料ピン形状認識が正確に実施できるようになった。

以下に、その燃料ピンの変位挙動等について検討した結果を報告する。

3.1 供試体の照射条件

本試験に供した試料は「常陽」で照射した炉心燃料集合体であり、主な照射条件を以下に示す。

燃料集合体名 : PFD512
 集合体平均燃焼度 : 59.3GWd/ t
 最大燃焼度 : 74.2GWd/ t
 最大中性子照射量 : 8.91×10^{22} n/c m² (E>0.1MeV)
 照射サイクル : 「常陽」第 24 サイクル～第 31 サイクル

3.2 取得データ

X - CT 試験を集合体軸方向 20 断面について実施し、断面像を取得した。CT 断面像の代表例を図 3.2.1 に示す。これら画像を「実機燃料用数値化処理システム」で定量化した。CT 断面像から本システムで取得できるデータは、ラッパ管内対面間距離、燃料ピン中心座標、燃料ピン自己ワイヤ方向である。

3.3 結果

3.3.1 ラッパ管内対面間距離

「実機燃料用数値化処理システム」により得られたラッパ管の内対面間距離測定結果の軸方向分布を図 3.3.1 に示す。図から面の径方向中央部におけるラッパ管内対面間距離は、炉心下端付近から炉心中央部付近にかけてノミナルよりも大きい。ラッパ管のエッジ部(ラッパ管の頂角部から 3mm、面中央部側を測定)の軸方向分布は、測定誤差範囲(±0.2mm)内でノミナルとほぼ一致している。

軸方向位置 1540.8mm におけるラッパ管内対面間距離の径方向分布を図 3.3.2 に示す。これらの図においても面中央部のみが膨れているように観察された。

本集合体は寸法測定装置にてラッパ管外対面間距離を実測しており、それと数値化処理による結果を比較して図 3.3.3 に示す。なお、ラッパ管肉厚の仕様値は両面合わせて 3.8mm であり、製造時に実測されたデータは 3.80～3.82mm であった。図から、両者の軸方向分布の定性的傾向はほぼ一致しており、また絶対値についても本シス

テムによる測定誤差 ($\pm 0.2\text{mm}$) の範囲内で一致している。

従来は集合対寸法測定によるラッパ管外対面間距離の情報しかなかったが、このように CT 画像から $\pm 0.2\text{mm}$ の精度でラッパ管内対面間距離を得ることが可能となった。

3.3.2 燃料ピン中心座標

数値化処理により算出された全燃料ピンの照射後の中心座標データを用いて、正規配列からの変位量を求めた。その結果を図 3.3.4 に示す。図中、燃料ピンの中心点から引かれた線の向きが変位した方向を、線の長さが変位量を示している。全体的傾向として、集合体の最外周に装荷された燃料ピンの変位量が大きい。

軸位置 1749.8mm (DFCB(Distance From Core Bottom : 炉心燃料下端からの距離):424.8mm) について詳細に観察すると、F,A,B,C 面にそれぞれ近接する燃料ピンはラッパ管側への移動量が大きい。一方、E,D 面に近接する燃料ピンではその傾向が顕著に確認されない。この軸位置では自己ワイヤが E-D コーナー方向を向いているため、E,D 面に近接した燃料ピンとラッパ管の隙間が確保される。このように外周燃料ピンの変位は自己ワイヤの方向と関係がある。

3.3.3 燃料ピン自己ワイヤ方向

燃料ピン自己ワイヤ方向測定結果を図 3.3.5 に示す。自己ワイヤがノミナルと比較して時計回り方向にずれている場合はオレンジ色、反時計回り方向を緑色、変化無しを黄色で表示した。軸方向炉心下部側 DFCB : 76.5mm および炉心中心付近 DFCB : 285.5mm では、燃料ピンの自己ワイヤ方向は時計周りにずれている。また、炉心燃料上部付近 DFCB : 494.5mm では、反時計回り方向にずれる傾向にある。

燃料ピン自己ワイヤ方向から算出したワイヤピッチを図 3.3.6 に示す。図には自己ワイヤが 180° 方向を向く軸位置 1401.5mm、1608.5mm、1815.5mm での値を各燃料ピンについて一点ずつプロットしている。図の実線はノミナル位置を示す。図から、1401.5mm、1608.5mm の軸位置では、ノミナル位置よりも上側にワイヤが移動している。しかし、1815.5mm ではその傾向は観察されない。

3.3.4 サブチャンネル面積変化挙動

燃料ピンの中心座標データを用いて、各軸位置の Na 流路断面積 (サブチャンネル) を算出し、それらについてノミナル値と比較した結果を図 3.3.7 に示す。図では、ノミナルと比較してオレンジ色がサブチャンネル面積の減少、緑色が増加、黄色が変化なしを表している。

図から一部の最外周サブチャンネル面積の減少が確認される。その減少はワイヤの向きと関係があり、ワイヤが燃料ピンとラッパ管の間に存在しない最外周サブチャン

ネルではノミナルに対して最大 70%程度までに減少している。

3.4 考察

ラップ管内対面間距離、燃料ピン中心座標、ラップ管内対面間距離の定量化結果から、ラップ管の変形挙動および燃料ピンの湾曲挙動について考察した。

3.4.1 ラップ管の変形挙動

3.3.1 項で確認されたラップ管の変形挙動について考察する。一般的なラップ管の膨れは、図 3.4.1 に示すようにスエリングによるラップ管の等方的拡大と照射クリープによる面中央部のふくれの 2 つの重なったものと考えられる。そのため面エッジ部ではスエリングのみに起因した寸法増加が、面中央部ではスエリングと照射クリープに起因した寸法増加が予測される。図 3.3.1 および 3.3.2 に示す PFD512 のラップ管内対面間距離においても、照射クリープに起因して中央部がエッジ部よりも大きくなったものと予測される。

図 3.3.1 では、面中央部の寸法増加が、炉心燃料中央部から下部側にかけて大きい。これは、照射クリープによる変形が、中性子照射量に加え、冷却材のラップ管内外の圧力差により生じるためである。その圧力差は、下端側の方が大きい。中性子照射量は炉心中心部で最大となる。

3.4.2 燃料ピン湾曲挙動

1) 燃料ピン湾曲量の測定結果

図 3.3.4 では、最外周燃料ピンの集合体外側への変位傾向が顕著に見られた。この傾向をさらに詳細に調べるため、個々の最外周燃料ピンについて近接ラップ管内面との距離を軸方向に算出して図 3.4.2 に示す。

図 3.4.2 により全般的傾向として、燃料ピンは炉心燃料部において軸方向に波打つように変形している。すなわち、燃料ピンは、ラップ管側にワイヤの存在する位置(図中赤線)ではその径の分(0.9mm)だけ内側に、その間は外側に曲がっている。

その燃料ピンが外側に曲がっている部分では、一部にラップ管にかなり接近している場合もある。その最小間隔は約 0.15mm であった。

一部にワイヤ位置にありながらその外径値よりも小さい距離を示しているものも確認される。これは、ワイヤがノミナル位置からずれているために発生していると予測される。

今回観察された燃料ピンの湾曲を定量的に評価するため、正規配列からの中心座標のずれ量について、軸方向分布に算出して図 3.4.3 に示す。図には集合体中心列の 13 本の燃料ピンについて結果を示した。

図から、湾曲は集合体中心装荷燃料ピン(No.64)においても確認された。しかし、その湾曲量は最外周燃料ピンと比較すると小さい。ワイヤピッチ間の湾曲量を測定すると、中心装荷燃料ピンでは最大で約 0.2mm、最外周燃料ピンでは最大で約 0.6mm 程度(No.01)になる。

2)燃料ピン湾曲の要因検討

一般に、燃料ピンがこのように湾曲する要因を列挙すると、BDI(Bundle Duct Interaction)、自己ワイヤの引張り力、燃料ピンの曲がり等があげられる。

BDI というのは、図 3.4.4 に示すように燃料ピン束(バンドル)の膨れの方が、ダクト(ラッパ管)の膨れよりも大きくなった場合に生じる両者の相互作用のことである。BDI が発生した場合、図に示すように燃料ピンの湾曲が生じることが予測される。その作用量を評価する指標として BDI 量がある。その定義を図 3.4.5 に示す。

BDI は、被覆管およびワイヤが主にスエリングと照射クリープで膨れることによって発生する。今回の PFD512 の最大中性子照射量は $8.91 \times 10^{22} \text{ n/cm}^2$ ($E > 0.1 \text{ MeV}$) であり、本使用材料(PNC316)では、スエリングはほとんど発生していないと予測される⁹⁾。また、照射クリープについても、ほぼ同様の照射条件の外径測定結果から、ほとんどないことが確認されている。このことから、BDI 量は 0 以下であり、BDI 量が 0 以下では、燃料ピンの湾曲等は発生しない。このことからいわゆる BDI によって燃料ピンが湾曲している可能性は少ないと考えられる。

次に自己ワイヤの引張り力による湾曲の可能性について検討した。一般に燃料ピンはワイヤ巻き付け荷重によりワイヤピッチに沿った弾性的な湾曲が発生することが知られている¹⁰⁾。その湾曲は、ワイヤピッチの長い方が顕著である。ワイヤ巻き付け荷重と 1 ワイヤピッチ内の最大湾曲量は、図 3.4.6 に示す簡易的なモデルをもとに次の関係式より求まることが報告されている。

$$y = \frac{2 \cdot H \cdot F_1}{\beta^2 \cdot E_p \cdot I_p}$$

$$F_1 = \frac{\frac{1}{E_w \cdot A_w} + \frac{H^2}{E_p \cdot I_p}}{\frac{1}{E_w \cdot A_w} + \frac{1}{E_p \cdot A_p} + \frac{H^2}{E_p \cdot I_p}} \cdot F_0 \quad \beta = \frac{2\pi}{P} \quad I_p = \frac{\pi}{64} (D_0^4 - D_1^4)$$

$$A_p = \frac{\pi}{4} (D_0^2 - D_1^2) \quad A_w = \frac{\pi}{4} dw$$

ここで

y : 最大湾曲量(mm)、 F_1 : 巻き付け状態のワイヤ張力(kgf)
 F_0 : ワイヤ巻き付け荷重(kgf)、 H : 被覆管軸中心からワイヤ軸中心までの距離(mm)
 β : 定数、 P : ワイヤピッチ(mm)、 I_p : 被覆管の断面 2 次モーメント(mm⁴)
 A_p : 被覆管の断面積(mm²)、 A_w : ワイヤの断面積(mm²)、 D_0 : 被覆管外径(mm)
 D_i : 被覆管内径(mm)、 d_w : ワイヤ径(mm)、 E_p : 被覆管のヤング率(kgf/mm²)
 E_w : ワイヤのヤング率(kgf/mm²)

今回の「常陽」の炉心燃料仕様で計算すると、1 ワイヤピッチ内の最大湾曲量は約 0.17mm と求まった。つまり、0.17mm 程度の湾曲は製造時にワイヤを巻きつけた時点で生じていたと予測される。CT 画像の定量化により測定された湾曲量は、中心装荷燃料ピンでは最大で約 0.2mm であった。このことから、この中心装荷燃料ピンでは自己ワイヤの引張り力による湾曲が支配的であり、製造段階からの湾曲が影響したものと予測される。

一方、最外周燃料ピンでは最大で約 0.6mm 程度湾曲していたことから、これ以外の要因が考えられる。外周燃料ピンでは、照射中の被覆管温度は、ラッパ管側ではその反対側である燃料束側に比べ温度が低くなり、周方向の温度勾配が発生する。このため照射中は、図 3.4.7 に示すようにラッパ管側よりも燃料ピン束側の方が、熱膨張量が大きくなり、結果として燃料ピンがラッパ管側に曲がろうとする応力が発生する。しかし、実際にはラッパ管やワイヤによって燃料ピンの曲がりは拘束される。この応力は照射とともにクリープによって緩和される。

照射後は被覆管の周方向温度勾配がなくなるため、クリープ歪のみが残留し、燃料ピンが燃料ピン束側に曲がろうとする。しかし、実際にはここでもラッパ管やワイヤによって燃料ピンの曲がりは拘束される。

燃料集合体を解体し、燃料ピンを取り出した状態で曲がり方向を測定すると、燃料ピンは集合体中心側に曲がっていることが確認されている。この結果は、上述した燃料ピンの曲がり挙動を裏付けるデータである。

以上述べた最外周燃料ピンの曲がり挙動が、今回確認されたワイヤピッチに沿った局所的湾曲の発生に影響を及ぼしている可能性がある。

3)燃料ピンの局所的湾曲と曲がりとの関係に関する考察

熱膨張差に起因した燃料ピンの曲がりとワイヤピッチに沿った燃料ピンの局所的湾曲との関係について考察した。

集合体解体後、燃料ピン寸法測定にて得られた燃料ピンの曲がりプロファイルを図 3.4.8 に示す。今回 X - CT 試験に供された燃料集合体 PFD512 は解体せずに PIE を終了しているため、燃料ピン寸法測定による曲がりデータはない。そのため、比較的照射条件に近い PFD538 の外周燃料ピン No.58 の曲がりプロファイルを図 3.4.8 に示す。

本結果は、集合体から燃料ピンを取り出した状態であり、集合体内ではこの曲がり
がラッパ管およびワイヤによって拘束されている。燃料スタック部では、ワイヤピッチ
に沿った局所的な湾曲が観察される。この局所的な湾曲が、X線 CT においても観察さ
れ、図 3.4.7 の②照射中に示すように、燃料ピンの局所的湾曲は照射中からクリーブに
より発生していたものと予測される。

4. まとめ

高速実験炉「常陽」で照射された燃料集合体内の燃料ピンの詳細な配置状況等について、定量的なデータの取得を目的として、「実機燃料用数値化システム」の開発を行った。CT画像の定量化については、これまで炉外バンドル圧縮試験のCT画像用に開発された「バンドル圧縮試験用数値化処理システム」があった。今回、本システムをもとに燃料ピン形状評価手法等を改良し、実機の燃料集合体に適用できる「実機燃料用数値化システム」を開発した。

さらに、本システムを用いて高速実験炉「常陽」で照射した炉心燃料集合体内の燃料ピンの詳細な配置状況等定量的データを取得するとともに、燃料ピンの湾曲挙動について検討した。

今回得られた主な結果を以下に示す。

1) 実機燃料用数値化処理システムの開発

- ・ 照射済燃料集合体に適用できるようにCT画像数値化処理システムを改良し、燃料ピンの再配置挙動等を定量的に把握するためのデータ取得が可能となった。

2) 「常陽」照射済み燃料集合体 PFD512 の定量化結果

- ・ サブチャンネル面積の定量化結果から、炉心燃料部では最外周サブチャンネル面積の減少が確認された。
- ・ 外周装荷燃料ピンではワイヤピッチに沿った湾曲が確認され、その湾曲量は最大約0.6mmであった。このワイヤピッチに沿った湾曲は、被覆管の径方向温度差に起因した熱膨張差が要因として挙げられた。

5. 謝辞

本開発を実施するにあたり、システムの開発および照射後試験データの整理等を協力していただきました検査開発㈱の三澤 進氏に感謝致します。

参考文献

- 1) T.NAGAMINE, *et al.*, "Development of a Non-destructive Post-Irradiation Examination Technique using High-energy X-ray Computed Tomography," *Trans. At. Energy Soc. Japan, Vol.1, No.2, pp.209-219 (2002)*
- 2) 田中 他 JNC TN9400 2001-077 「炉外圧縮試験による高速炉燃料ピンバンドル変形挙動評価」、2001年6月
- 3) 上羽 他、JNC TN9410 97-078 「高速炉燃料集合体バンドル断面 CT 画像数値化処理システムの開発」、1997年8月
- 4) 田中 他 JNC TN9400 2001-022 「炉外圧縮試験による高速炉燃料ピンバンドル変形挙動評価—FFTF 炉燃料条件—」、2000年10月
- 5) N.AKASAKA, *et al.*, "Effect of Irradiation Environment of Fast Reactor's of Fast Elements on Void Swelling in P, Ti-Modified Stainless Steel," *Effects of Radiation on Materials:20th International Symposium, ASTM, July 2001*
- 6) J.Rousseau, *et.al.*, "DEFORMATION DES AIGUILLES FIL ESPACEUR EN PRESENCE DE GONFLEMENT ET DE FLUAGE D'IRRADIATION" ,Conference d'Ajaccio, 4-8 June 1979
- 7) 堂野前 他、 JNC TN9401 2000-075、「「もんじゅ」型燃料集合体 (MFA-1) の照射挙動評価」、1999年8月
- 8) 柴原 他、 PNC ZN941 81-77 「被覆管とワイヤの相互作用による燃料ピン局所曲がり評価」、(1981)

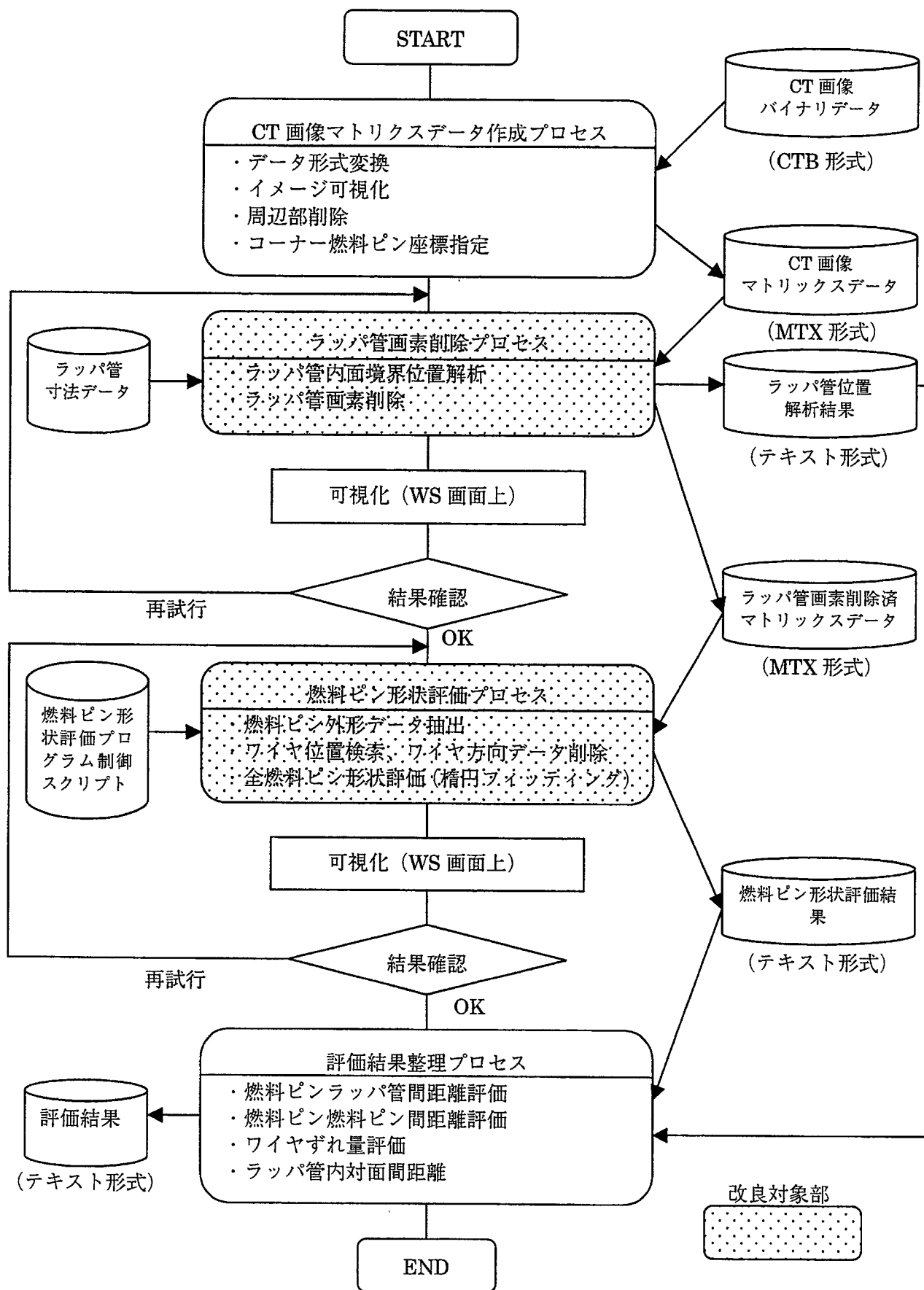


図 2.1 CT 画像データ数値化処理フロー

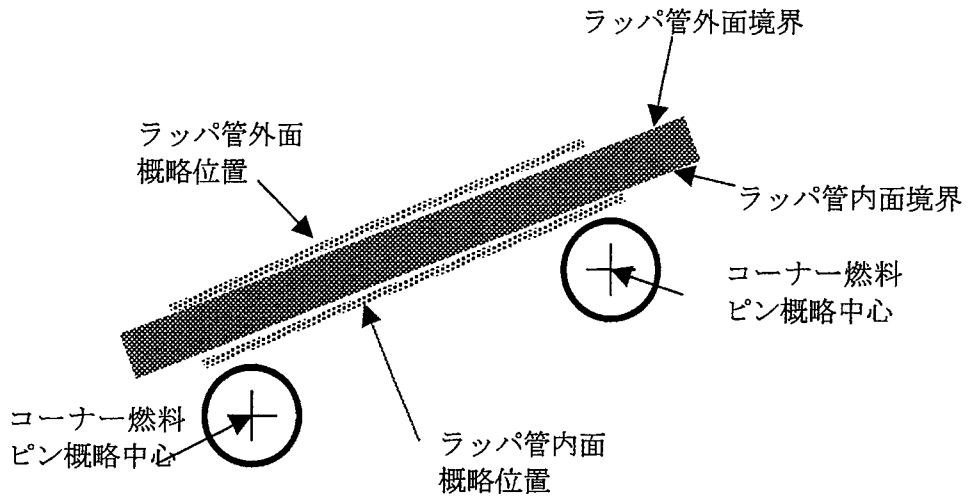
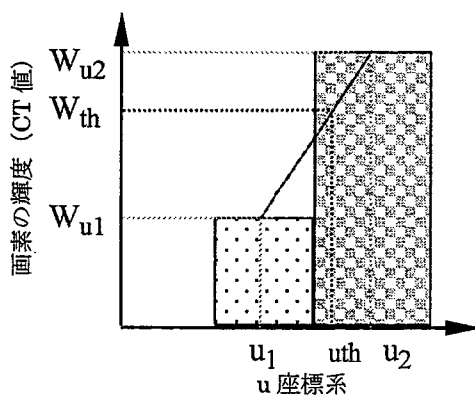


図 2.2 ラッパ管形状認識方法



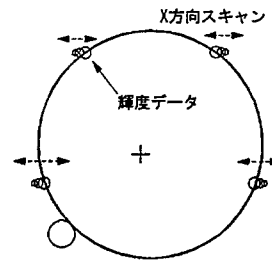
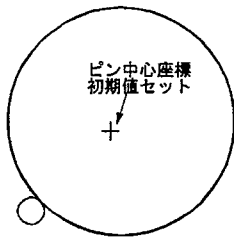
W_{th} =閾値
 u_1, u_2 =画素境界 u 座標値
 u_{th} =補間した閾値境界 u 座標値

$$u_{th} = (W_{th} - W_{u2}) \left(\frac{u_1 - u_2}{W_{u1} - W_{u2}} \right) + u_2$$
 … u 座標補間式

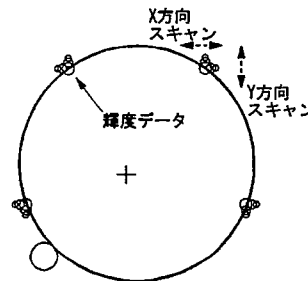
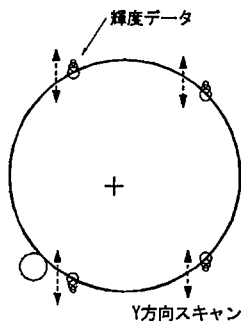
* v 座標に関しても同様に算出する。

図 2.3 線形補間による境界座標算出

- ① 燃料ピン中心座標に初期値をセットする。
燃料ピン中心座標の初期値は、ユーザーが画像上で指定した位置より全ピン概略中心を算出する。
- ② X方向にスキャンパラメータで指定した閾値をまたぐ2点の輝度データをX方向の外形データとして用いる。



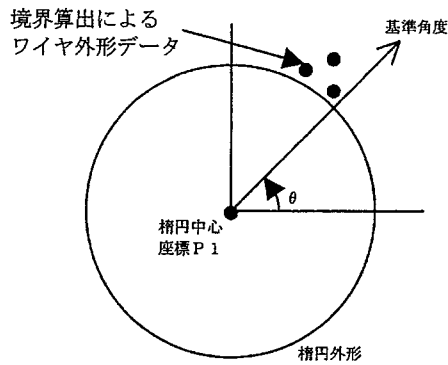
- ③ Y方向にスキャンパラメータで指定した閾値をまたぐ2点の輝度データをY方向の外形データとして用いる。
- ④ X方向、Y方向にスキャンした結果を元にX Y両方の方向に閾値をまたぐ1点の輝度データをピン外形データとして仮設定する。



- ⑤ ④で抽出した燃料ピン外形データを用いて楕円フィッティングを行い、楕円データ（楕円中心座標、長径、短径、楕円回転角度）を算出する。
- ⑥ ⑤で計算した楕円中心座標と現在の燃料ピン中心座標の位置を比較し、変化が入力で設定した基準値以下（デフォルト： $1.0E-4$ ）になるまで、⑤で求めた楕円中心座標を燃料ピン中心座標に設定し②～⑤を繰り返す。
- ⑦ ⑥の変化が基準値以下になった時点で算出して得られた結果を他の処理（ワイヤ位置検索処理、燃料ピン外形データの補間）で使用する。

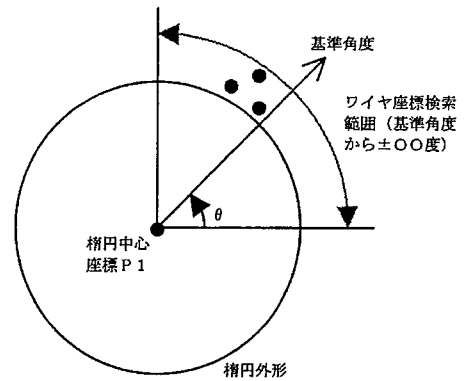
図 2.4 燃料ピン外形データ抽出処理概要

- ① 燃料ピン外形抽出処理で算出された楕円中心座標をP1とする。パラメータとして与えられているワイヤ存在方向基準角度を設定する。



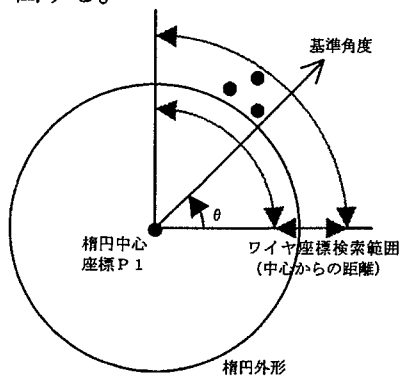
楕円中心座標及び基準角度設定

- ② 基準角度を元に±〇〇度の範囲内の外形データを抽出する。



検索角度範囲設定

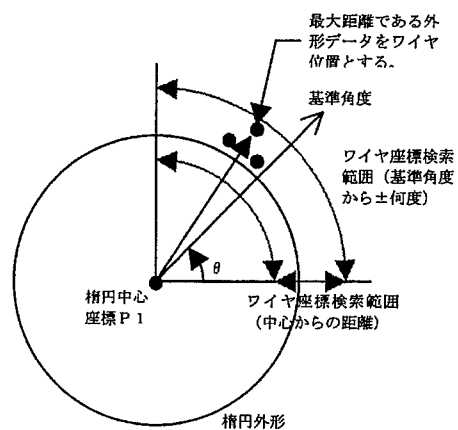
- ③ ②の抽出データから検索距離範囲内の外形データを抽出する。



検索距離範囲設定

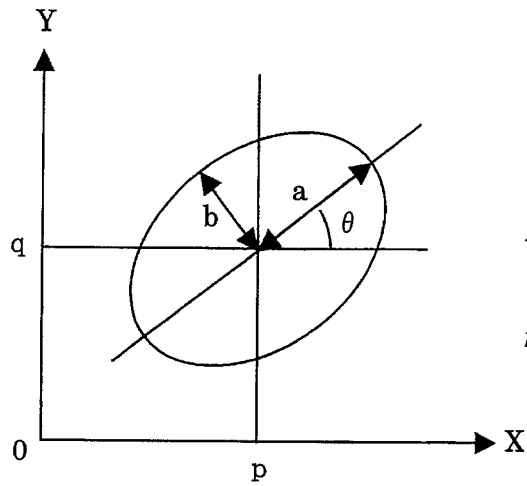
- ④ ③によって抽出された外形データをワイヤ位置検索データとする。

- ⑤ ワイヤ位置検索データの中で中心座標から燃料ピン外形境界までの距離が最大となる外形データと楕円中心のなす角度をワイヤ存在位置方向とする。



ワイヤ位置検索

図 2.5 ワイヤ方向検索処理概要



$$\frac{r^2 \cos^2(\theta)}{a^2} + \frac{r^2 \sin^2(\theta)}{b^2} - 1 = 0 \quad \dots \text{①}$$

$$r = \sqrt{(x-p)^2 + (y-q)^2} \quad \dots \text{②}$$

p : 燃料ピン中心 X 座標

q : 燃料ピン中心 Y 座標

θ : 楕円回転角度

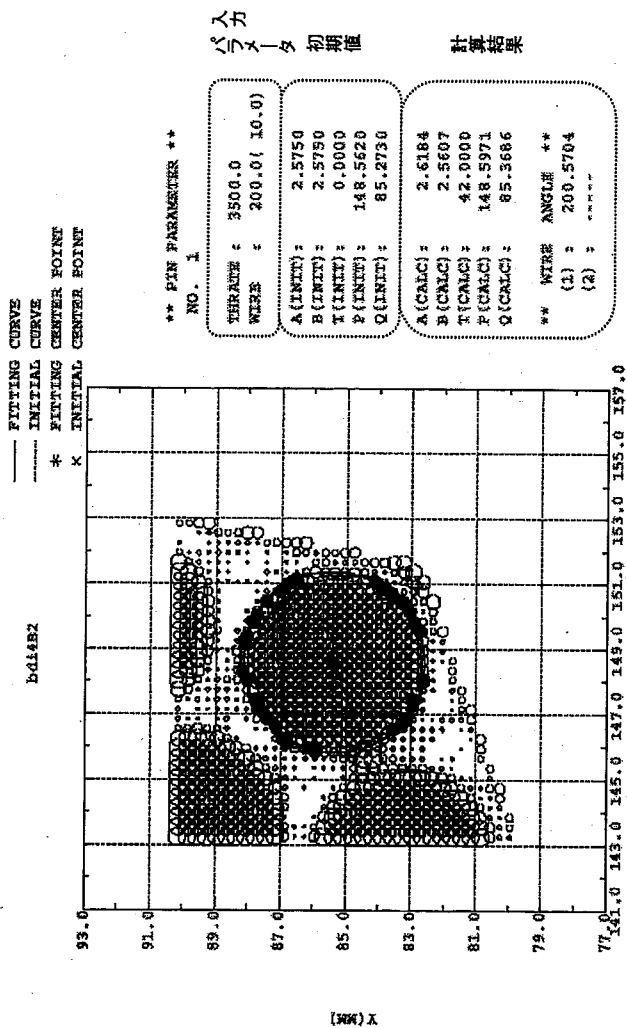
a : 楕円長径

b : 楕円短径

x : 燃料ピン外形データ X 座標

y : 燃料ピン外形データ Y 座標

図 2.6 楕円フィッティング算出結果及び楕円方程式



拡大図

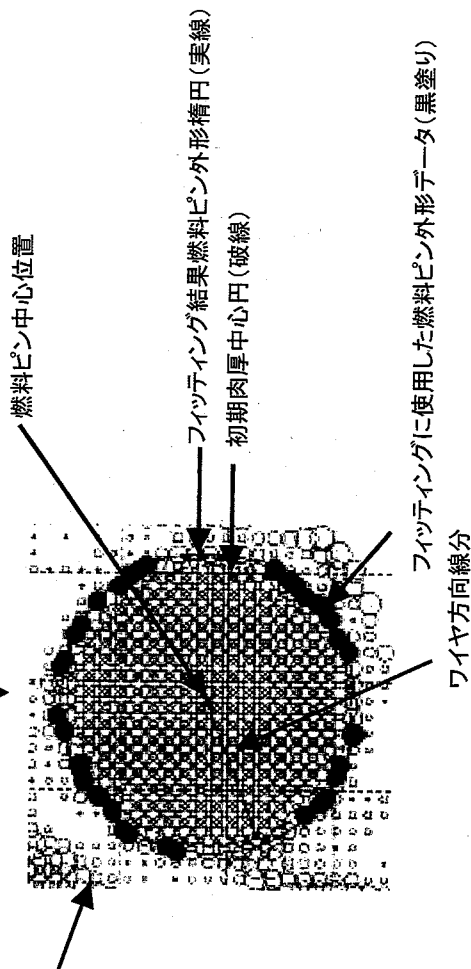
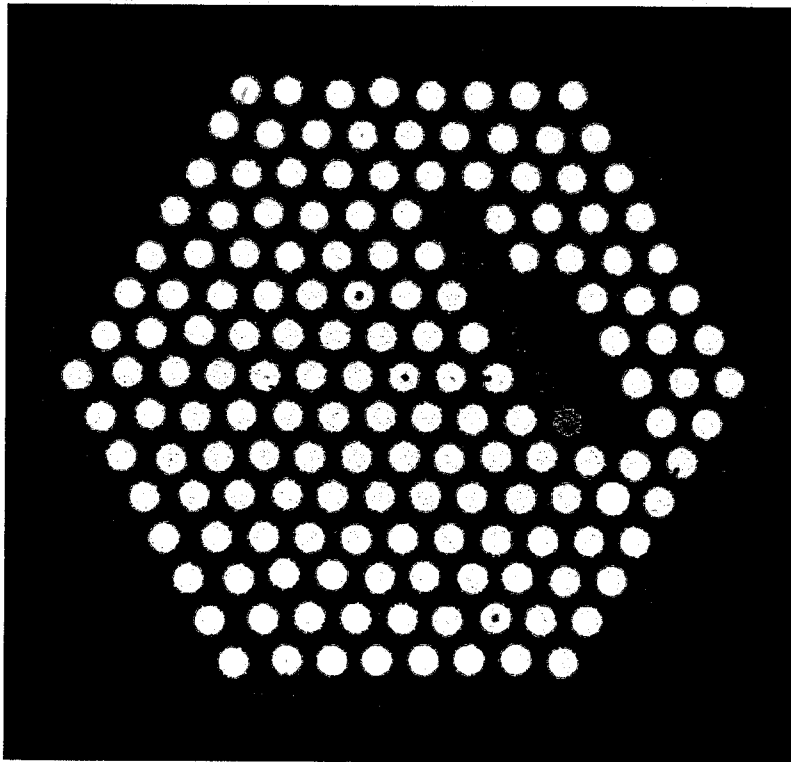
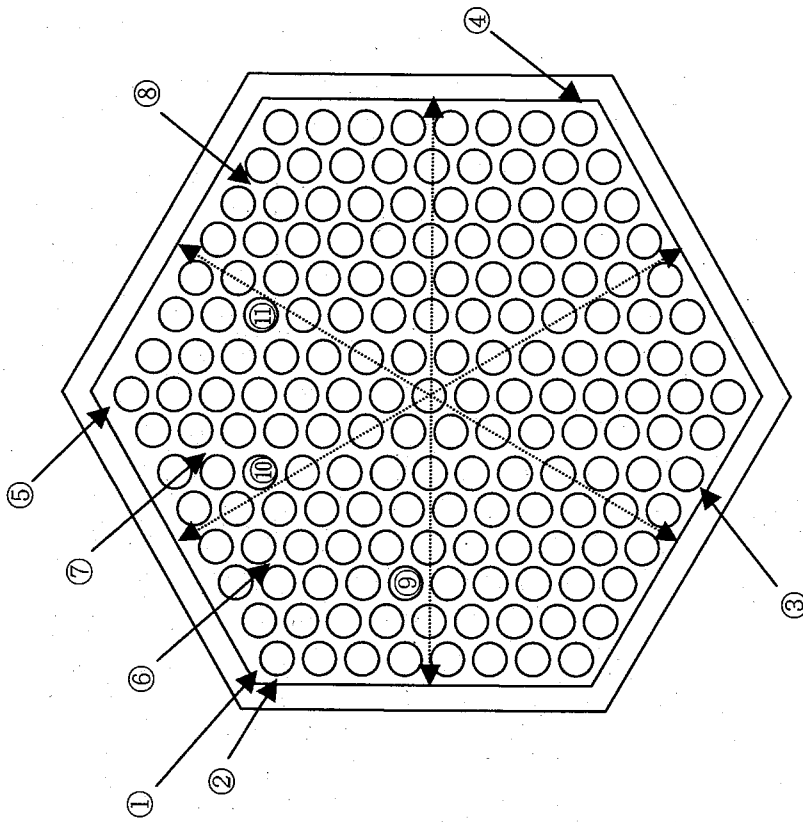


図 2.7 実機燃料集合体燃料ピン形状評価結果例



模擬集合体 CT 像



模擬集合体寸法データ

模擬フアントム数値化結果

燃料ピンラッパ管内面間距離箇所	実寸法	数値化結果	燃料ピンピーン間距離箇所	実寸法	数値化結果	ラッパ管内対面距離	実寸法	数値化結果
①	0.4	0.35 (-0.05)	⑥	1.0	1.09 (+0.09)	⑨	104.6	104.71(+0.11)
②	1.2	1.18 (-0.02)	⑦	1.3	1.37 (+0.07)	⑩	104.6	104.77(+0.17)
③	1.6	1.54 (-0.06)	⑧	2.5	2.44 (-0.06)	⑪	104.6	104.70(+0.10)
④	1.5	1.64 (+0.14)						
⑤	1.0	1.04 (+0.04)						

*単位 = (mm)

図 2.8 模擬試料を用いた精度確認結果

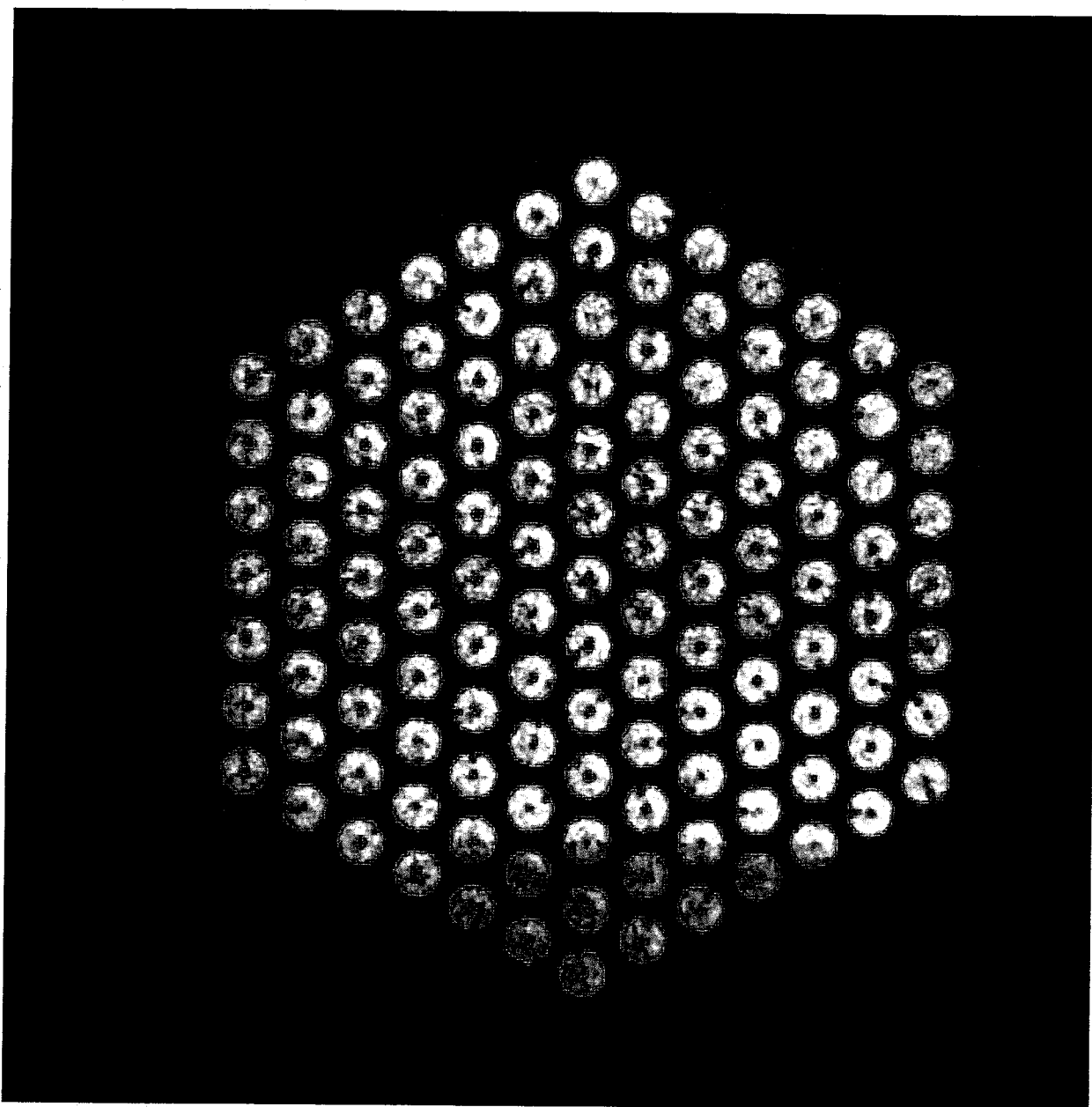


图 3.2.1 X-CT 撮像結果 (代表例 軸位置 1610.5 mm)

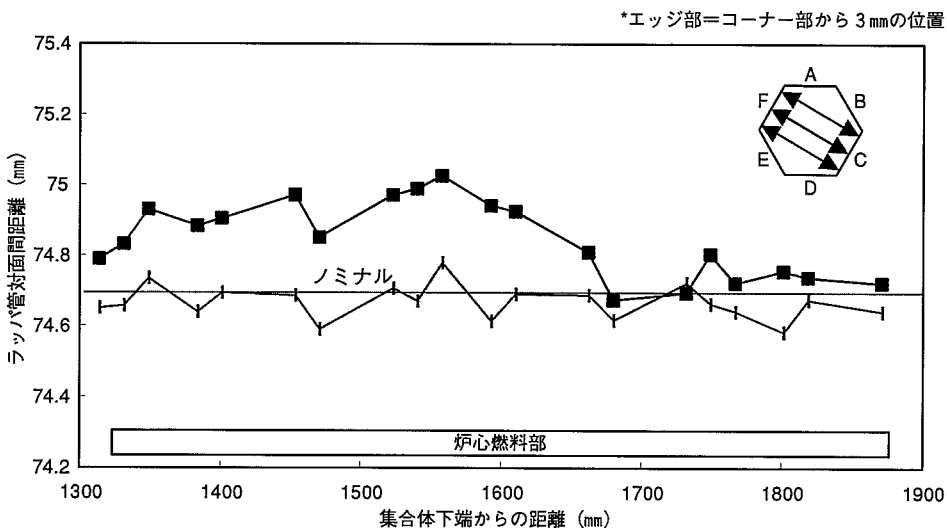
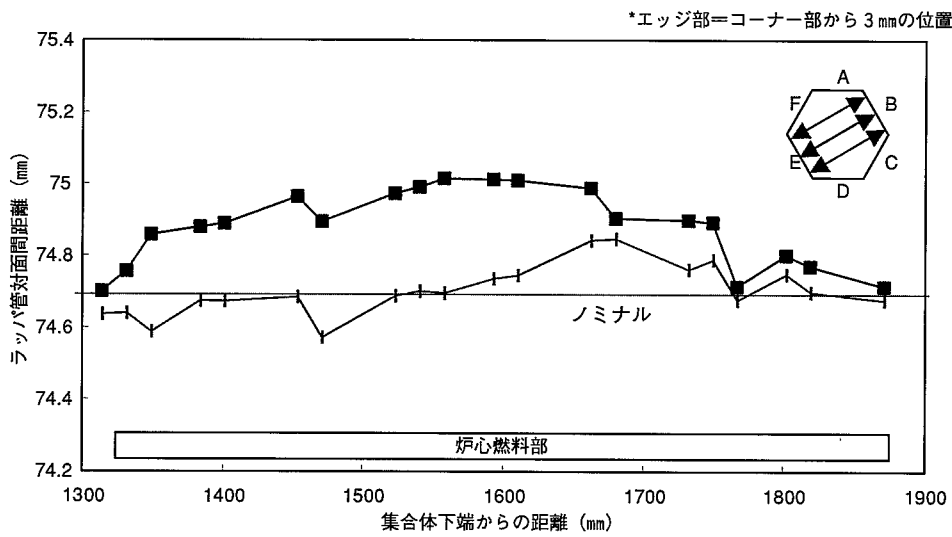
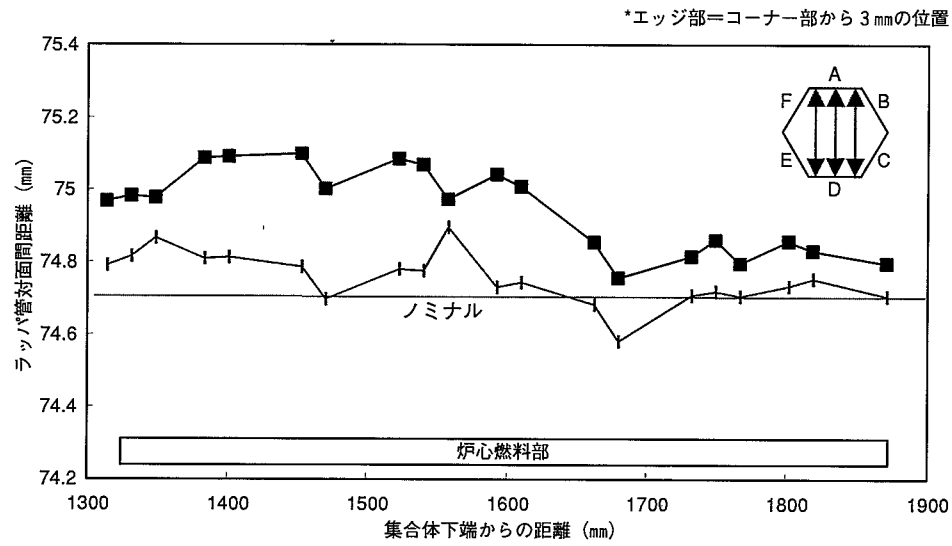


図3.3.1 ラッパ管内対面間距離測定結果(軸方向分布)

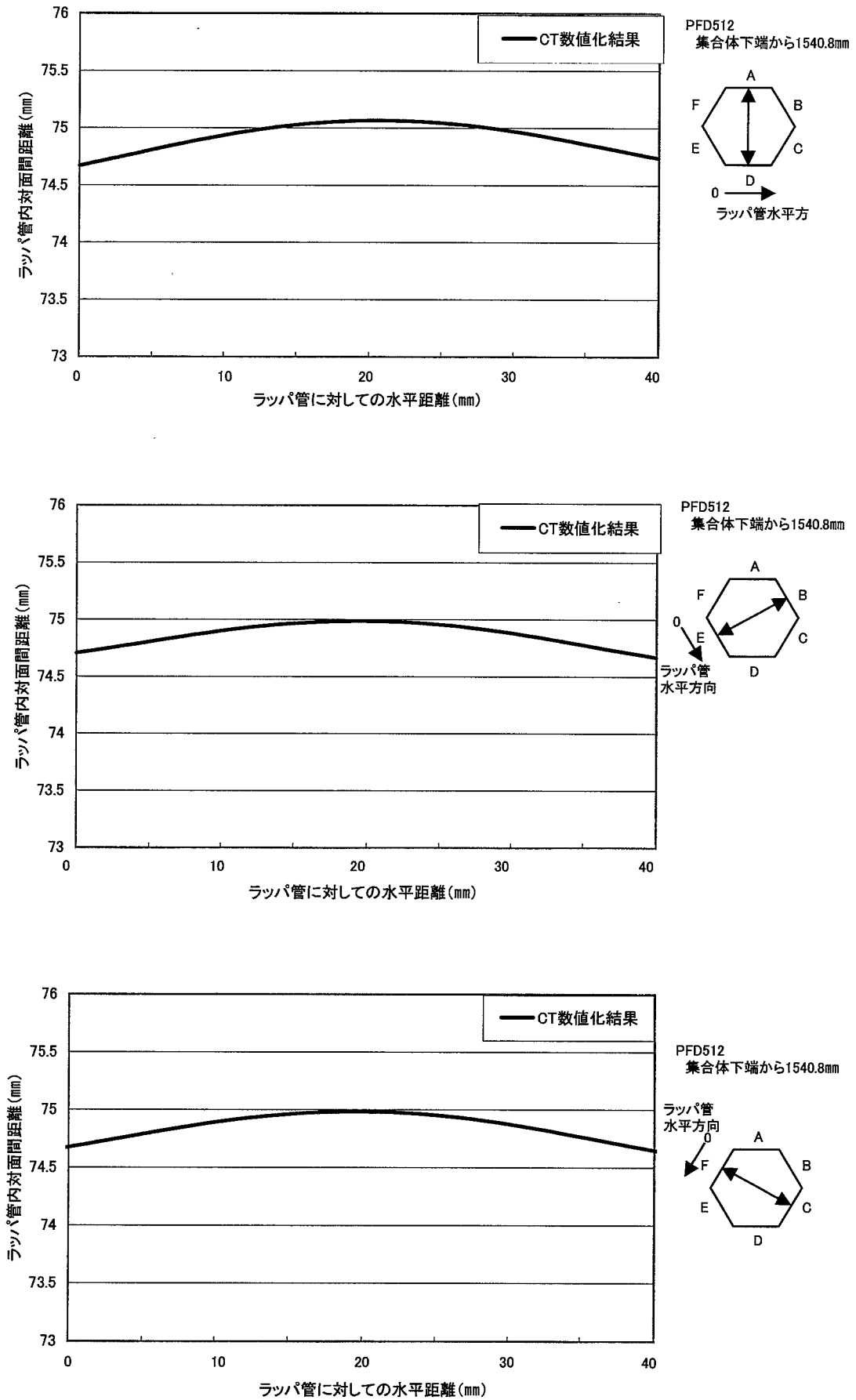


図3.3.2 ラッパ管内対面距離測定結果(径方向分布)

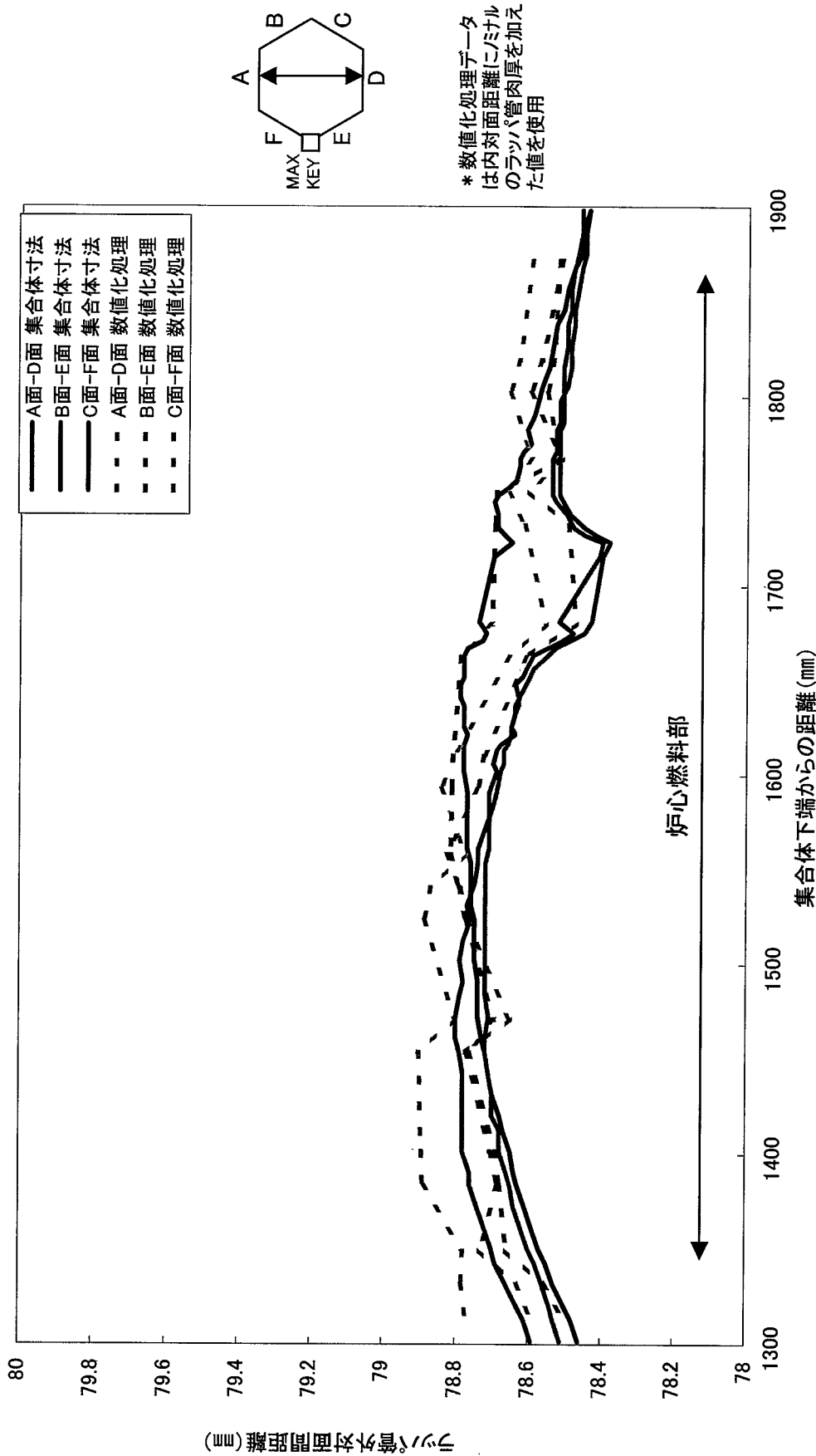
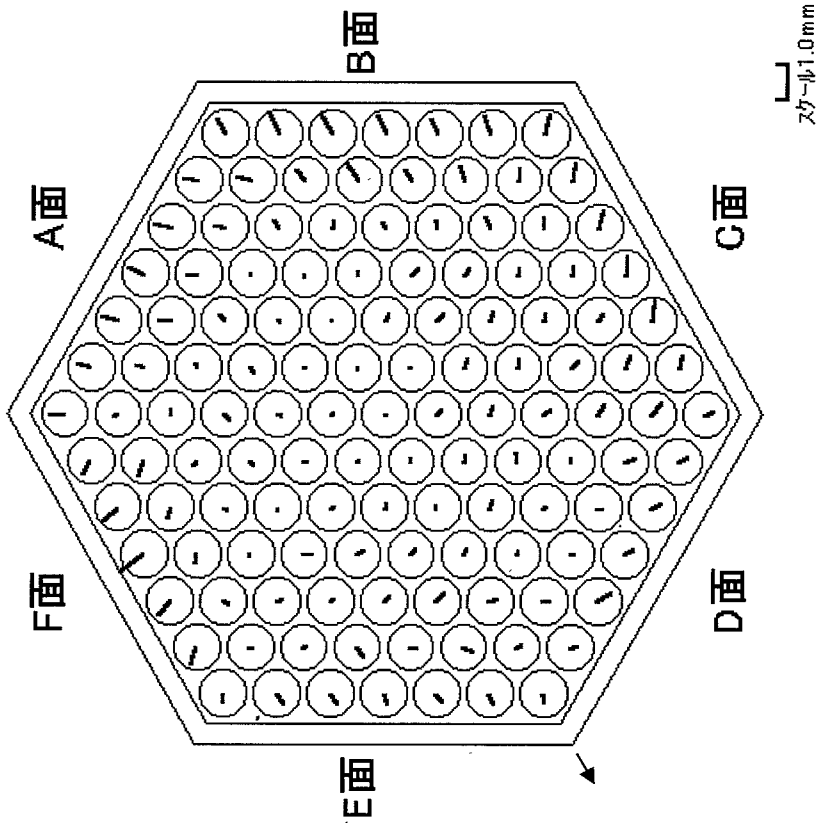
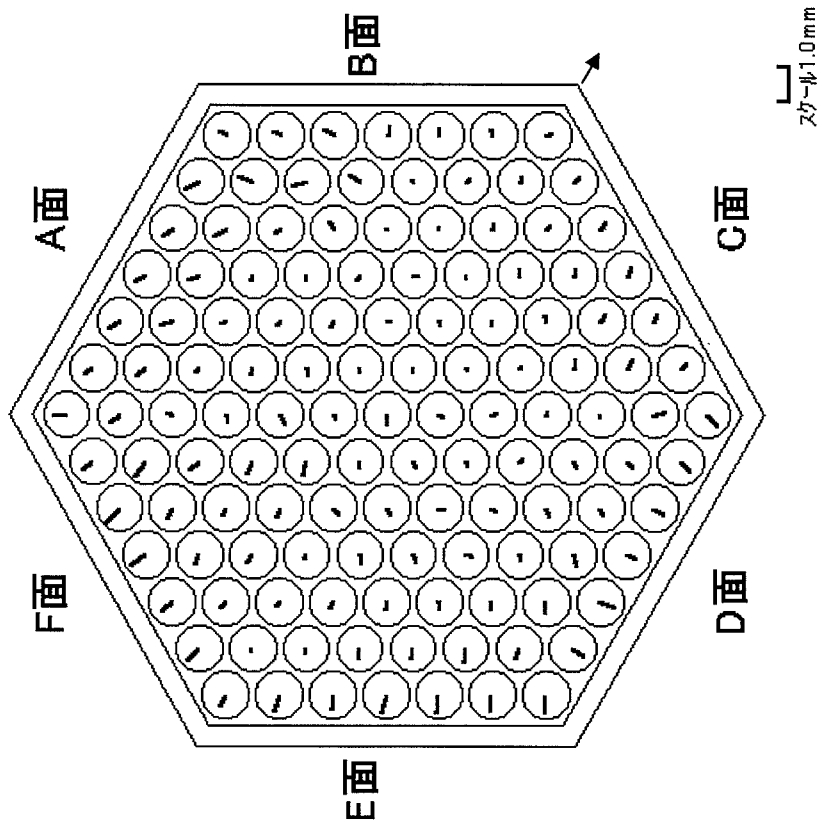


図3.3.3 集合体寸法測定結果と数値化処理結果比較 (PFD512)



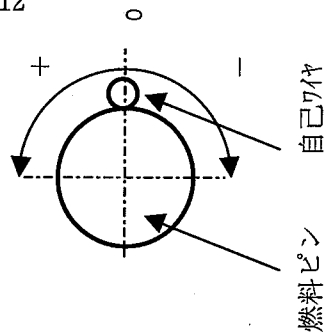
D-Eコーナー、1749.8mm (424.8mm)



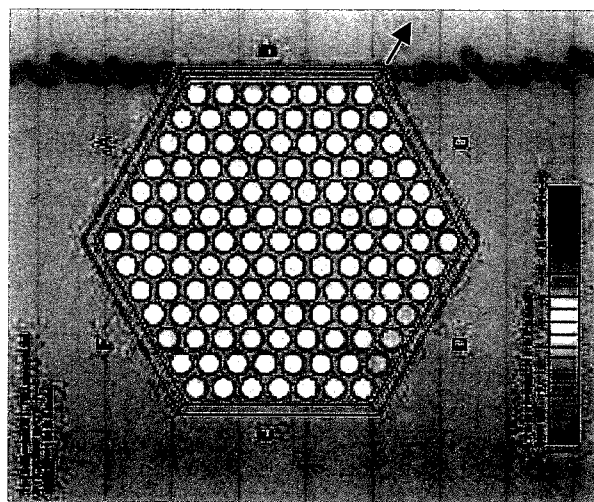
B-Cコーナー、1610.5mm (285.5mm)

矢印は自己ワイヤ方向を示す。
 表記方法：ワイヤ方向、集合体下端からの距離（スタック下端からの距離）

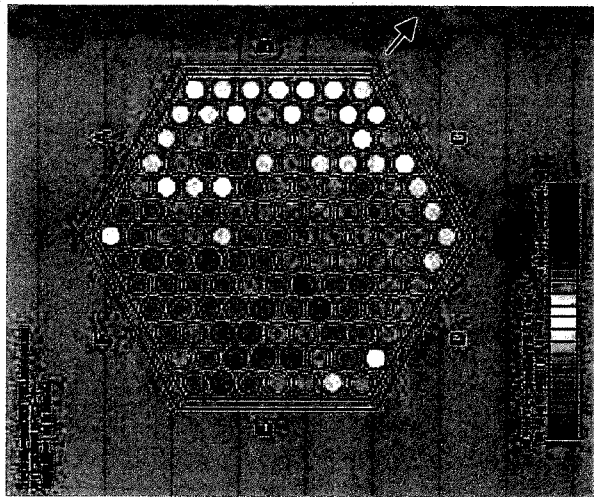
図 3.3.4 燃料ピンの正規配列からの変位量と方向



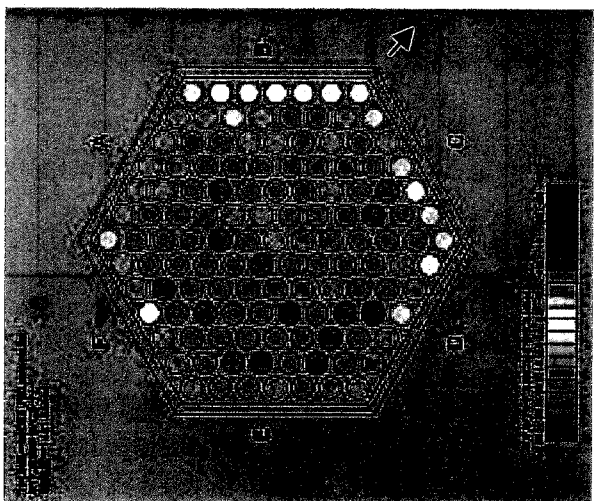
矢印は自己ワイヤ方向を示す。
表記方法：ワイヤ方向、集合体下端からの距離（スタック下端からの距離）



(1) B-Cコーナ一、1401.5 mm (76.5 mm)



(2) B-Cコーナ一、1610.5 mm (285.5 mm)



(3) B-Cコーナ一、1819.5 mm (494.5 mm)

図 3.3.5 自己ワイヤ方向分布

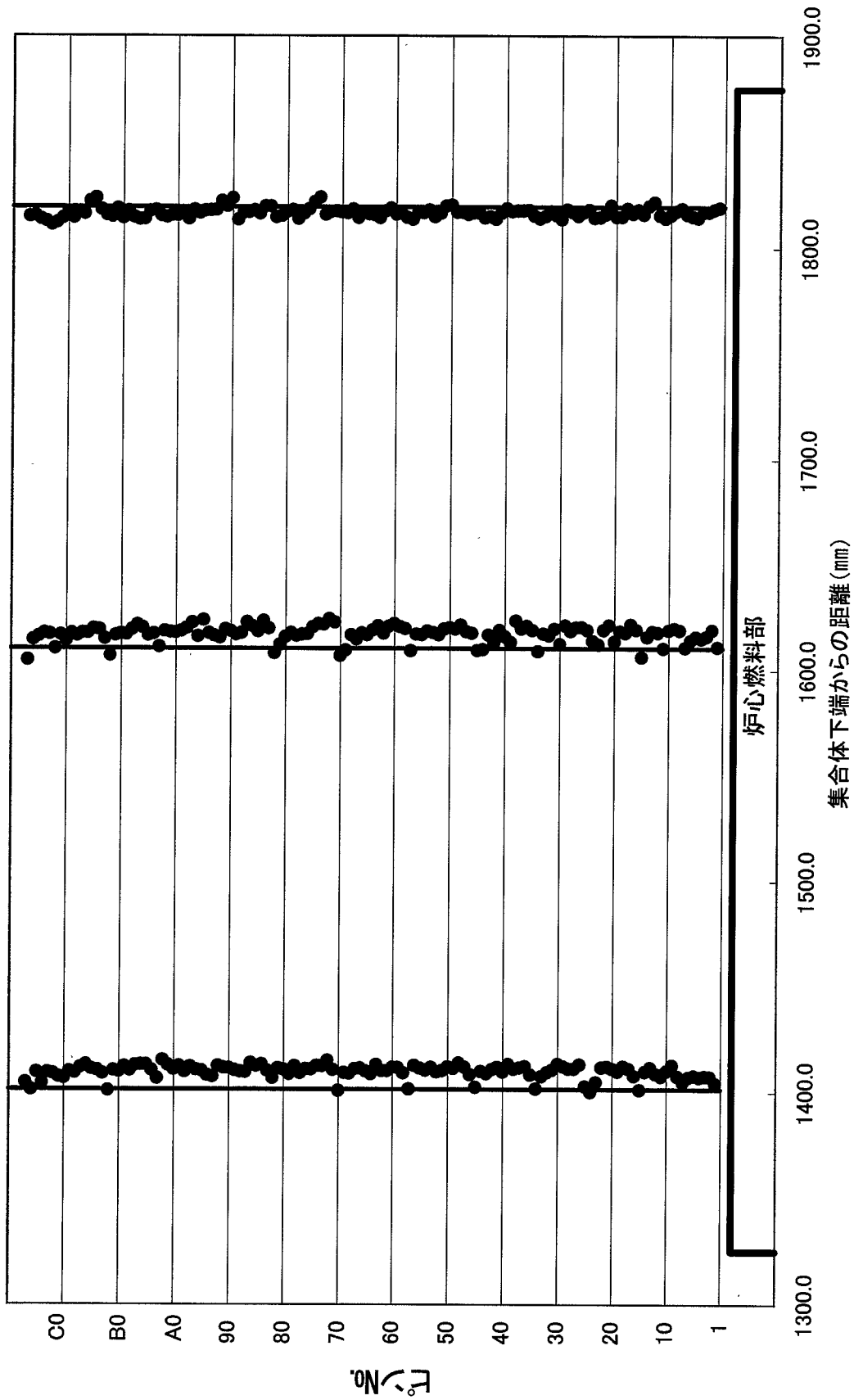
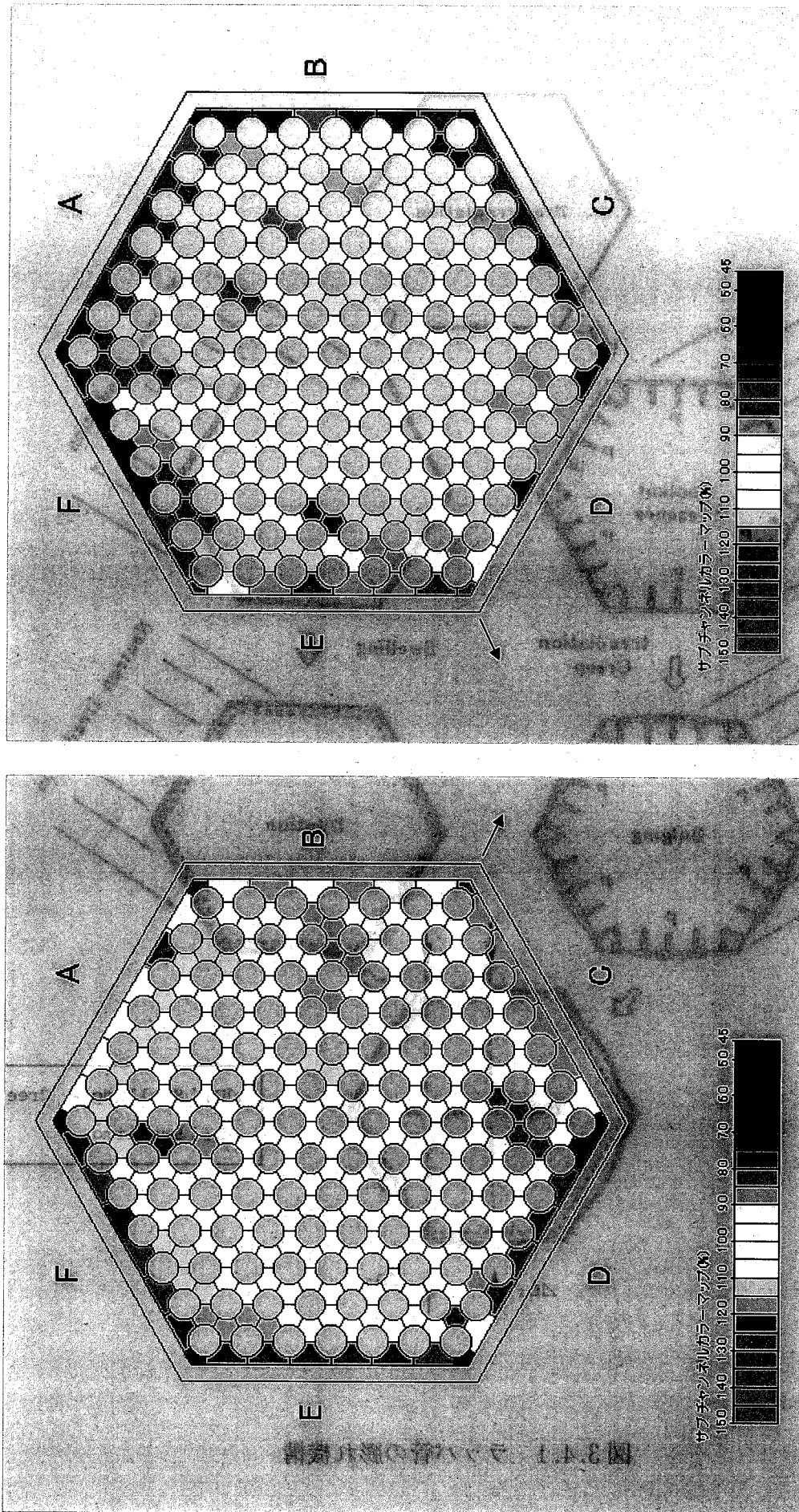


図3.3.6 ワイヤピッチ測定結果



B-Cコーナー、1610.5 mm (285.5 mm)

D-Eコーナー、1749.8 mm (424.8 mm)

矢印は自己ワイヤ方向を示す。

表記方法：ワイヤ方向、集合体下端からの距離（スタック下端からの距離）

図 3.3.7 サブチャンネル面積変化割合バンドル内分布図

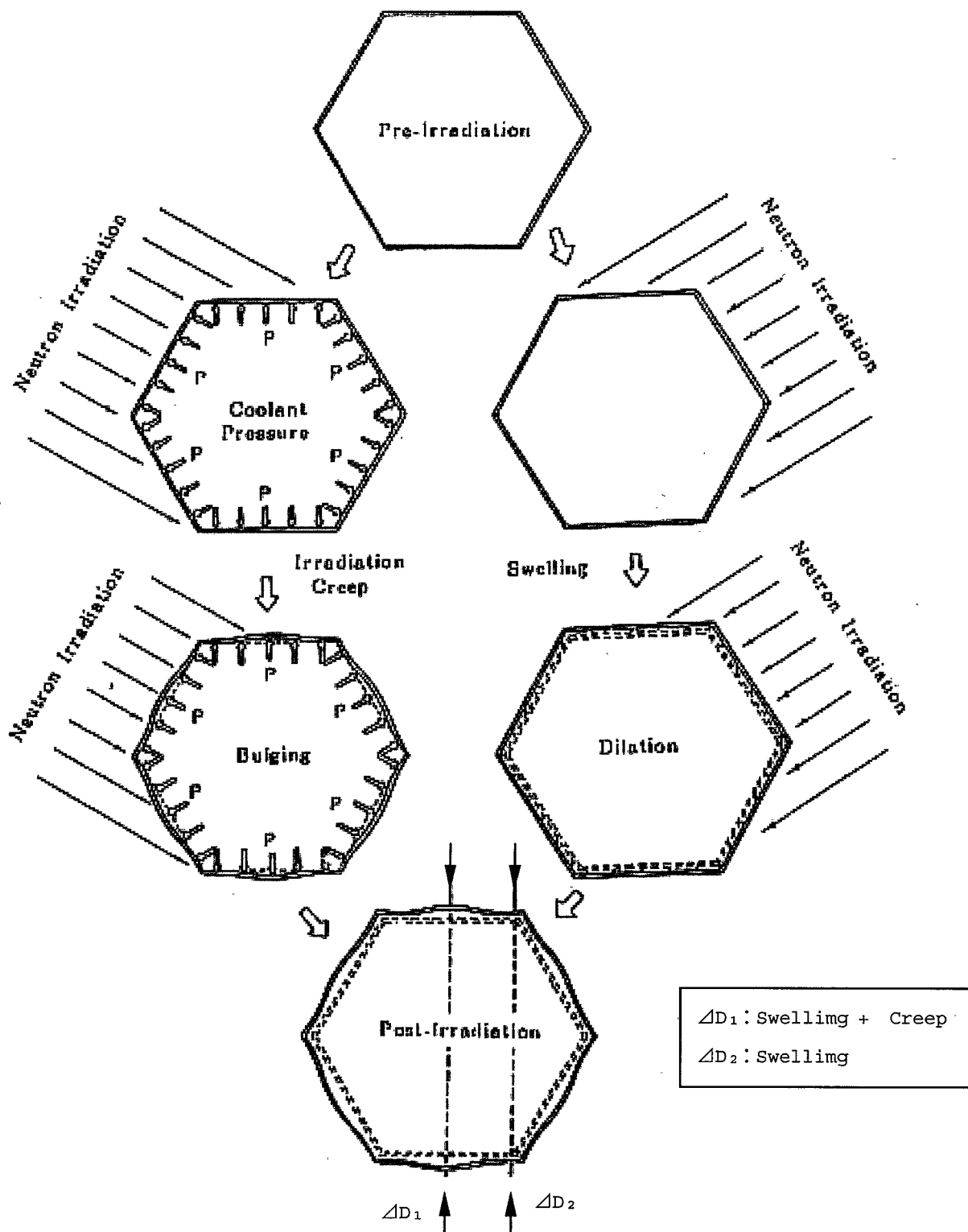


図 3.4.1 ラッパ管の膨れ機構

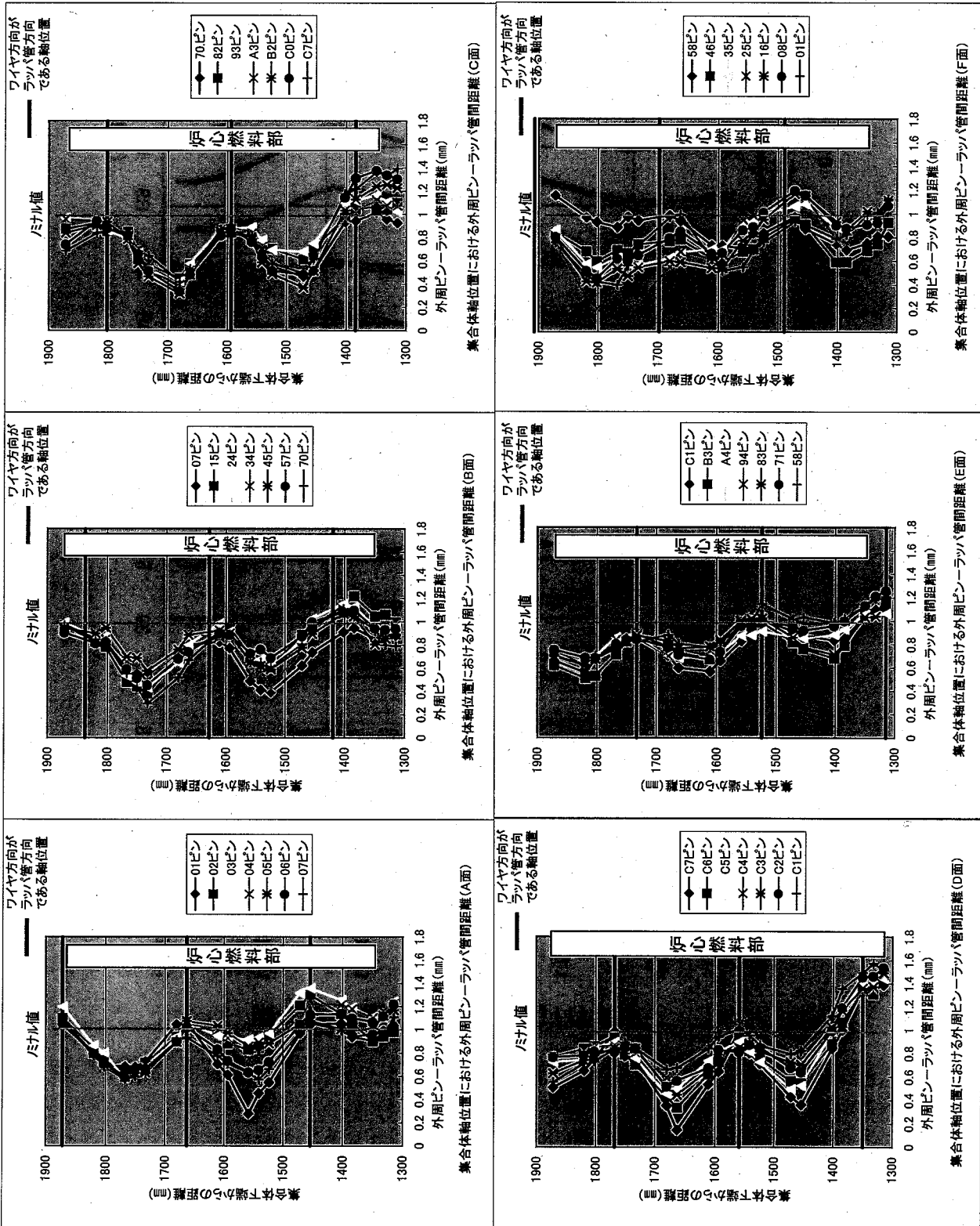
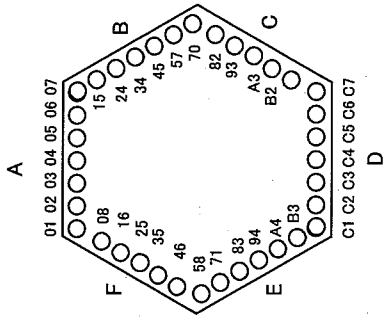


図3.4.2 集合体軸位置における外周ピン-ラッパ管間距離

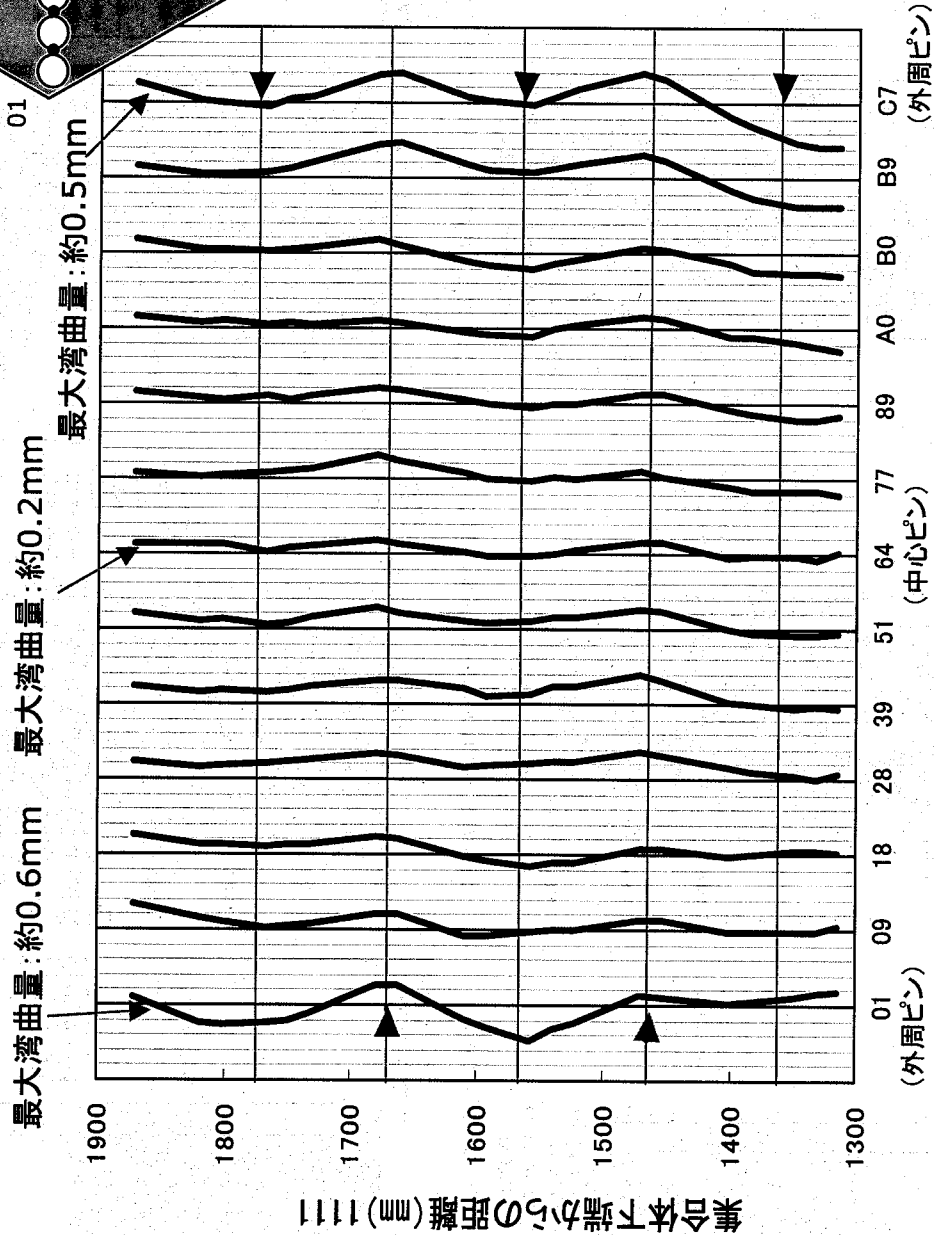
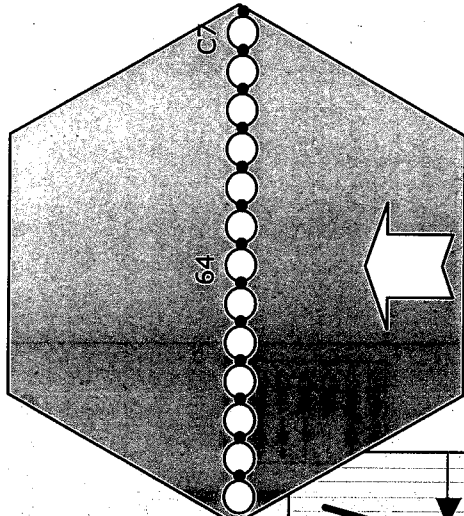


図3.4.3 燃料ピン変位置量測定結果

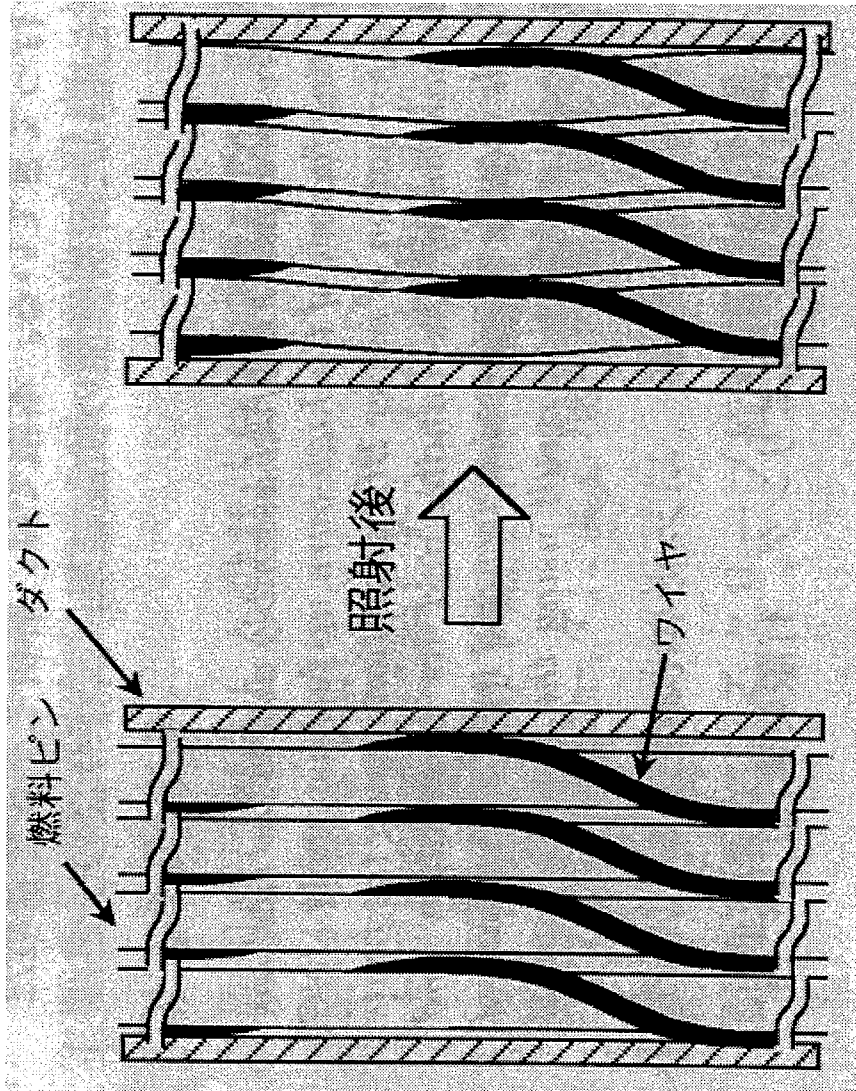


図3.4.4 BDIによるバンドル変形

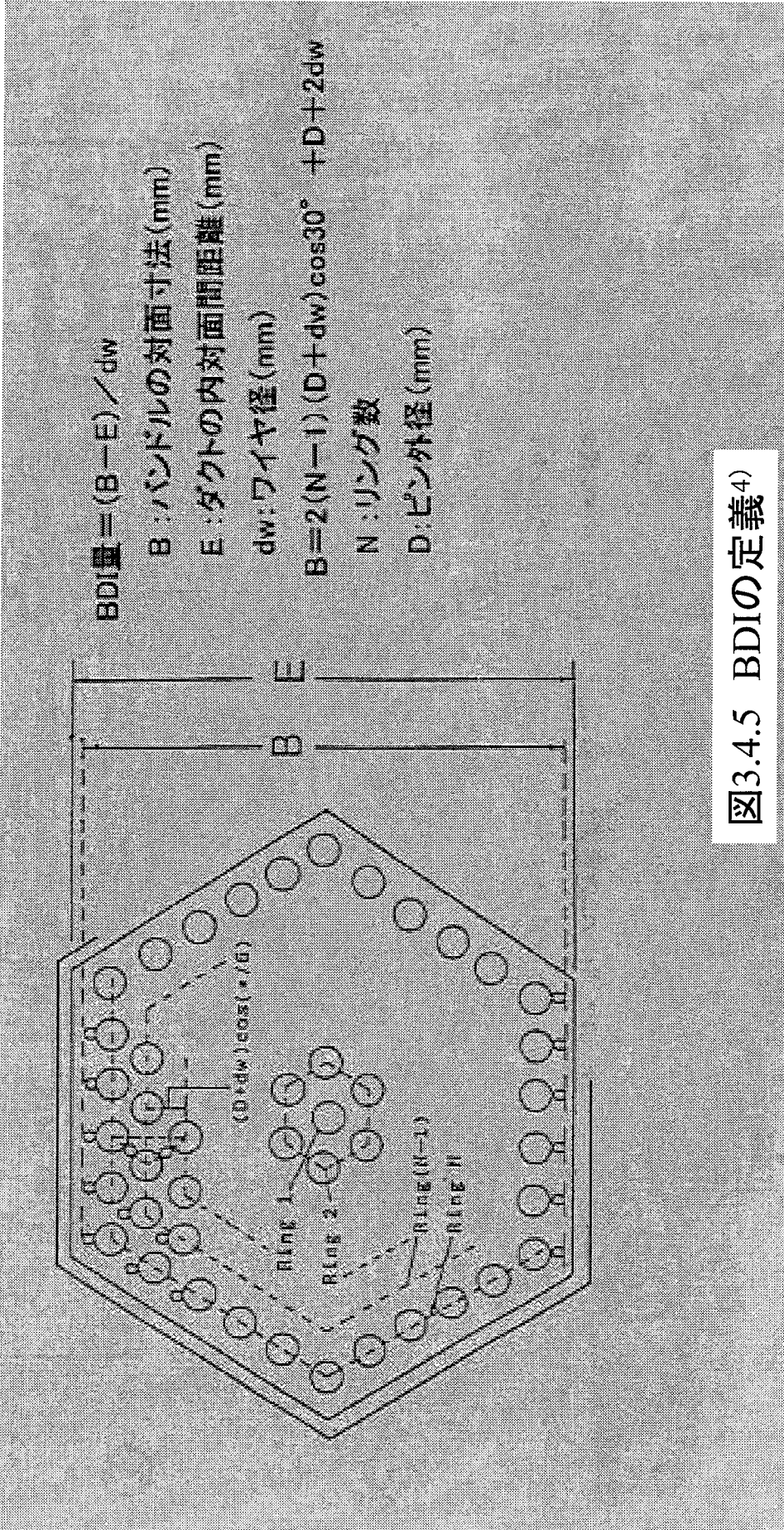


図3.4.5 BDIの定義⁴⁾

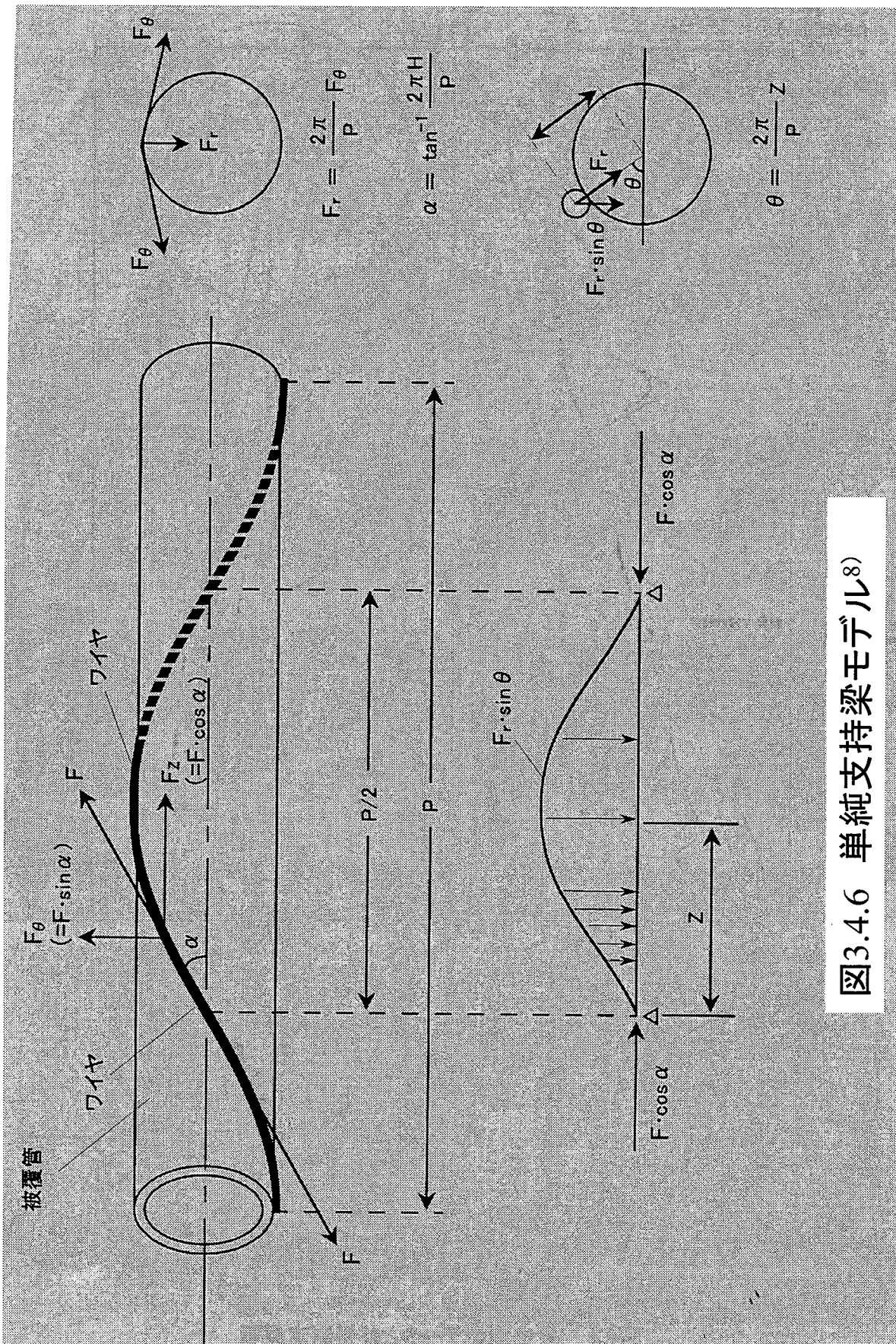


図3.4.6 単純支持梁モデル⁸⁾

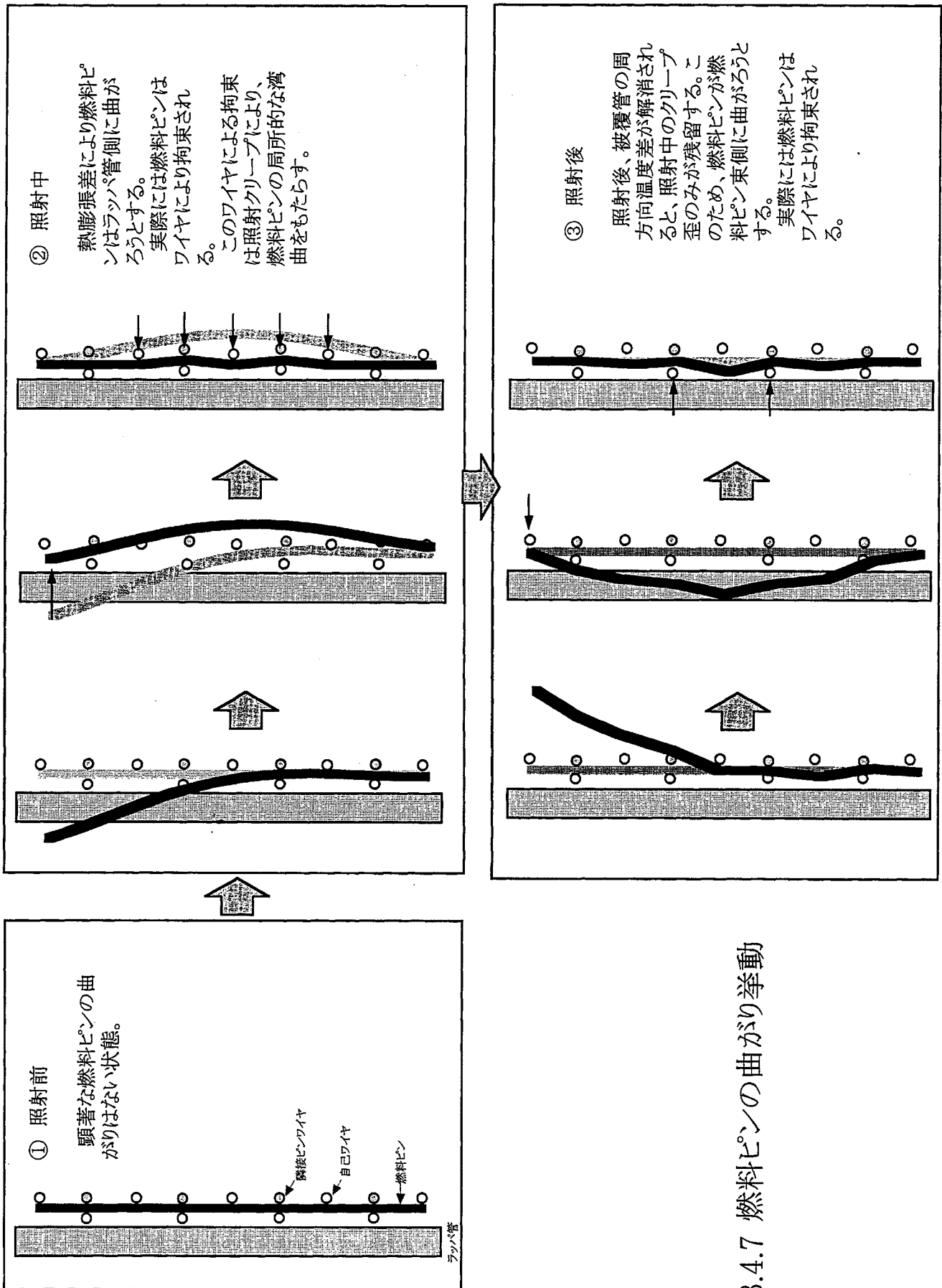


図3.4.7 燃料ピンの曲がり挙動

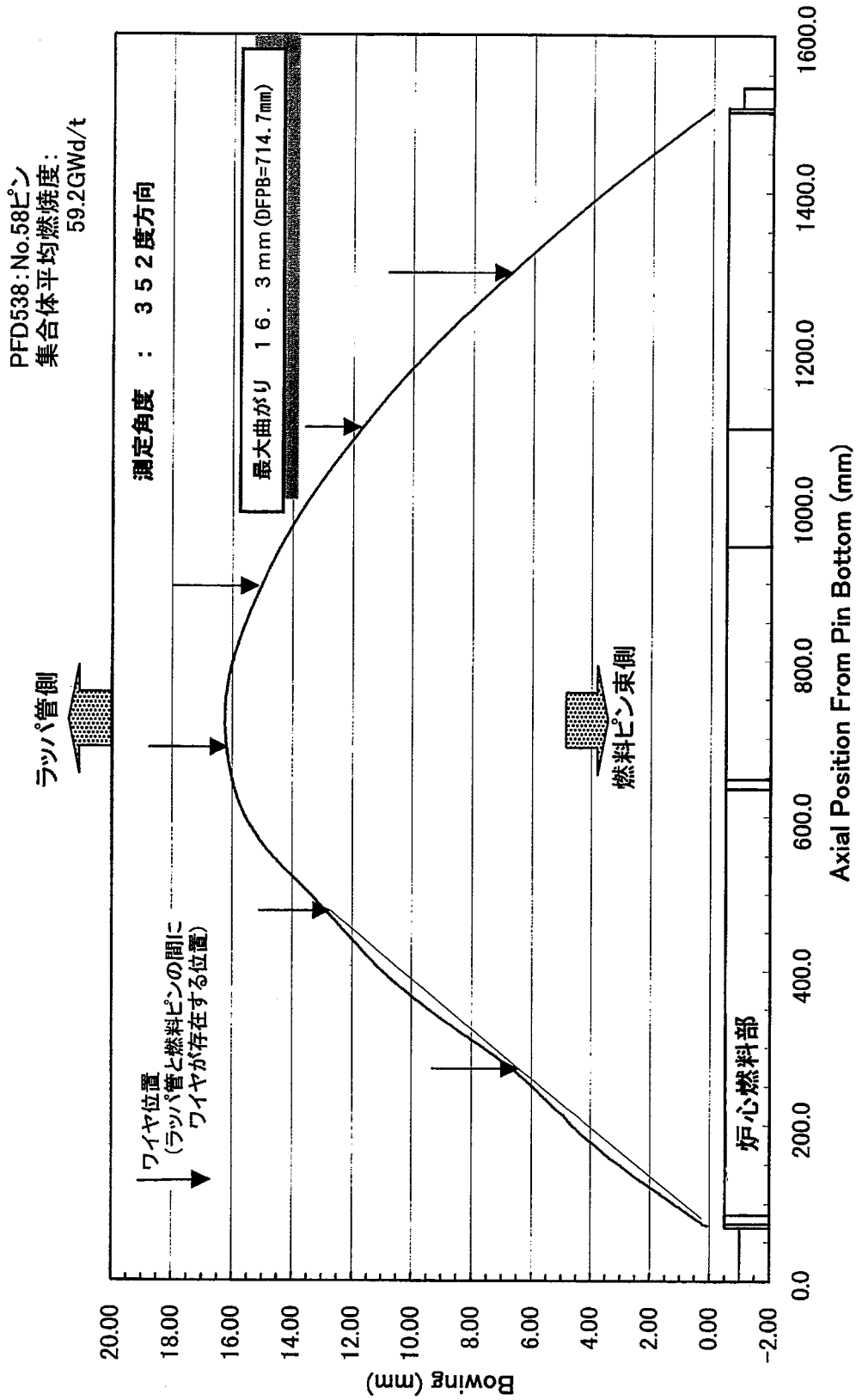


図 3.4.8 燃料ピンの曲がりプロファイル