

X線CTデータを用いた高速炉燃料ピンの曲がり測定及びその解析

(研究報告書)

2004年3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
電話：029-282-1122（代表）
ファックス：029-282-7980
電子メール：jserv@jnc.go.jp

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)
2004

X線 CTデータを用いた高速炉燃料ピンの曲がり測定及びその解析

(研究報告書)

報告者 勝山幸三¹⁾ 永峯剛¹⁾ 松元慎一郎¹⁾

要旨

高速炉燃料集合体に装荷された燃料ピンは、照射されると熱の影響やワイヤスペーサとの相互作用等により曲がりが発生する。高速炉燃料集合体では、外側にラッパ管があるため、装荷された状態での燃料ピンの曲がりは、これまで直接測定することができなかつた。

本研究では、その燃料ピン曲がり挙動を把握するため、「常陽」で照射した炉心燃料集合体に対しX線コンピュータトモグラフィ(X線CT)試験を実施し、その断面画像から当該データを評価した。この結果、集合体の外周に装荷された燃料ピンは、内部のものと比較すると曲がりが大きく、ラッパ管側へ変位している傾向が確認された。

集合体の外周に装荷された燃料ピンの曲がりメカニズムについて検討するために、簡易計算コードによる解析を実施した。その結果、CTにより実測された燃料ピンの曲がりを再現することができた。本解析手法を用いることにより、実測できない照射中の燃料ピン曲がり挙動の予測も可能となる。

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

Measurement and Analysis of the Fuel Pin Deflection Irradiated in Fast Reactor using the X-Ray CT Image

KOZO KATSUYAMA ¹⁾ TSUYOSHI NAGAMINE ¹⁾

SHIN-ICHIRO MATSUMOTO ¹⁾

Abstract

Under irradiation, the fuel pins of a fast breeder reactor (FBR) are deflected in the axial direction, which is caused by thermal bending and interaction between the wrapping wire and cladding. In the case of FBR fuel assembly, it was impossible to observe the fuel pin deflection because the wrapper tube completely surrounded the fuel pins.

In order to evaluate the irradiation behavior of fuel pins, X-ray CT test was carried out for the fuel assembly irradiated in the experimental fast reactor "JOYO" and fuel pin deflection was measured, based on the analysis of CT image. It was observed that the fuel pins loaded in the outermost row of the fuel assembly were deflected largely, compared with the fuel pins loaded in the inner region, and markedly displaced in the direction of wrapper tube.

In order to study the deflection mechanism of fuel pin loaded in the outermost row, the analysis was carried out using a calculation code. The results are in approximate agreement with measured values gained from CT image. This knowledge makes it possible to predict the fuel pin deflection loaded in the fuel assembly under irradiation.

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

目 次

1. はじめに.....	1
2. 測定対象集合体.....	2
3. 燃料ピン曲がり測定.....	3
3.1 燃料ピン曲がり測定手法	3
3.2 X線 CT撮像結果	3
3.3 CT画像の定量化	3
3.4 燃料ピン曲がり測定結果	4
4. 燃料ピン曲がり解析.....	5
4.1 燃料ピンの周方向熱膨張差に起因した曲がり	5
4.2 ワイヤとの相互作用による燃料ピン曲がり	7
4.3 燃料ピンの曲がり解析結果.....	9
4.4 解析結果と CTによる実測値の比較	10
5. おわりに	11
6. 謝辞	11
7. 参考文献	12

図リスト

図 1 「常陽」炉心燃料集合体及び燃料ピンの概要	13
図 3.1 CT 断面像(炉心中心)	14
図 3.2 境界位置の算出方法	15
図 3.3 燃料ピン曲がり測定結果(1)	16
図 3.4 燃料ピン曲がり測定結果(2)	17
図 3.5 燃料ピン曲がり測定結果(3)	18
図 3.6 外周燃料ピンの変位量(E 面)	19
図 4.1 燃料ピンの全体曲がり挙動	20
図 4.2 UNIBOW コードへの主な入力データ (代表例)	21
図 4.3 照射条件(No.94 ピン)	22
図 4.4 UNIBOW 解析結果(1)	23
図 4.5 UNIBOW 解析結果(2)	24
図 4.6 UNIBOW 解析結果(3)	25
図 4.7 燃料ピンの接触荷重の比較	26
図 4.8 UNIBOW 解析結果(4)	27
図 4.9 ワイヤ張力と燃料ピン局所曲がりの変化	28
図 4.10 ワイヤ張力による燃料ピンの軸方向曲がり	29
図 4.11 燃料ピンの曲がり解析結果	30
図 4.12 解析結果と実測値の比較	31
図 4.13 E 面隣接ピンの燃料ピン曲がり測定結果	32

1. はじめに

高速炉燃料集合体の燃料ピンには、間隔を一定に保ち、冷却材であるNaの流路断面積を確保するために、らせん状にワイヤスペーサ(以下、ワイヤ)が巻きつけられている。高速実験炉「常陽」(以下、「常陽」)の炉心燃料集合体の場合、このタイプの燃料ピン127本が三角格子状に束ねられ、6角形のラッパ管に収納されている。(図1参照)

照射中、高速炉の燃料ピンには、様々な要因で曲がりが発生する。一つは熱湾曲である。これは、集合体の外周に装荷された燃料ピンで、ラッパ管側とピン束側とで冷却材温度が異なるため、被覆管の熱膨張差によって生じる。二つ目には、ワイヤとの相互作用¹⁾を挙げることができる。これは、らせん状に巻きつけられているワイヤの巻きつけ荷重によって局所的な曲がりが発生するものである。さらに照射が進んだ場合重要となるのがBDI(Bundle-Duct-Interaction)²⁾である。これは、ピン束のスエリングによる膨れが、ラッパ管よりも大きい場合に、機械的な相互作用により発生する。

このような燃料ピンの曲がりが発生した場合、燃料ピン間やラッパ管との間の冷却材流路断面積が変化することになる。これらにより被覆管温度等への影響が予測されることから、照射中の燃料ピン曲がりを把握することは燃料寿命を評価するうえで極めて重要である。

これまで、集合体に装荷された状態での燃料ピンの曲がりは、外側にラッパ管があるため、直接測定することができなかった。このためその測定は、ラッパ管から燃料ピンを取り出した状態で行っていた。この方法では、燃料集合体内で実際にどのように燃料ピンが変形しているか、把握することができない。

照射燃料集合体試験室(以下FMF)では、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装置(以下、X線CT装置)を開発した³⁾。X線CT装置では、得られた断面画像から集合体内における燃料ピンの状況を把握できる。その断面像を軸方向に幾つか測定し、それらを合成することにより、集合体に装荷された状態での燃料ピンの曲がり等を評価できるようになる。

本報では、燃料ピンの曲がりについてX線CT装置を用いた測定手法及び、そのメカニズムのために実施した計算コードによる評価結果について報告する。

2. 測定対象集合体

本研究の対象とした集合体は、「常陽」照射済炉心燃料集合体 PFD512 である。図 1 に示すように、本集合体には $\phi 5.5\text{mm}$ の燃料ピン 127 本が装荷され、その周囲をラッパ管が覆っている。燃料ピンには、 $\phi 0.9\text{mm}$ のスペーサワイヤが 209mm のピッチでらせん状に巻かれている。被覆管等すべての部材の材質は PNC316 鋼である。

測定対象とした集合体は、「常陽」で 7 サイクル照射された。照射条件は、最大燃焼度が 74.2GWd/t 、最大高速中性子照射量が $8.91 \times 10^{22}\text{n/cm}^2$ ($E \geq 0.1\text{MeV}$) である。

3. 燃料ピン曲がり測定

3.1 燃料ピン曲がり測定手法

炉心燃料集合体 PFD512 に対し、CT 試験を主に炉心燃料部について軸方向 20 断面実施した。得られた CT 断面像から、各々の軸位置における燃料ピンの配置状況を測定した。この配置状況を軸方向に合成することにより、燃料ピンの曲がり量を把握した。

以下に詳細を示す。

3.2 X 線 CT 撮像結果

図 3.1 に本燃料集合体の軸方向中心位置における CT 断面像を示す。目視による観察では、6 角形のラッパ管内に 127 本の燃料ピンが整然と配列しているように見える。また、燃料ピンにはそれぞれワイヤがついており、概ね同じ方向を向いているのがわかる。

3.3 CT 画像の定量化^{4,5)}

CT 画像は、密度に応じた輝度で表される。これは、デジタル値 (CT 値) により、 1024×1024 の画素で構成され、1 画素の 1 辺の長さは 0.3mm である。燃料ピンやラッパ管の存在する空間の画素は明るく (CT 値は大きく) なっており、その他の何も存在しない空間と区別することができる。

ラッパ管や被覆管などの境界算出方法を図 3.2 に示す⁵⁾。試料の存在する領域では CT 値は高く、何もない領域では低くなっている。あらかじめ設定したしきい値 (境界) をまたぐ隣接画素の CT 値から、線形補間によって境界座標を算出した。

上述した方法により求めた被覆管外面の境界座標を用いて、燃料ピンの中心座標を算出した。被覆管外面の境界座標を楕円方程式に最小二乗法で最適化し、その楕円の重心を燃料ピンの中心座標とした。これら定量化データの誤差は、寸法が既知の模擬燃料集合体の数値化処理を実施することにより、比較評価して求めた。この結果、測定誤差は燃料ピンの中心座標が ±0.05mm 以内であることを確認した。

各断面において求めた対象燃料ピンの中心座標について、20 断面の結果を軸方向に合成した。燃料ピンの中心座標は、ラッパ管の重心座標を基準としており、軸方向の合成にあたって、ラッパ管は軸方向に曲がりがないものと仮定した。なお、集合体寸法測定により本集合体の曲がりは確認されなかつた。

3.4 燃料ピン曲がり量測定結果

以上述べた方法により求めた燃料ピンの曲がり量測定結果を図 3.3～3.5 に示す。図 3.3 は、No.34 ピンから No.94 ピンの一列分(7 ピン)の曲がりを横方向から 2 次元的に観察したものである。図 3.4 及び 3.5 についても、対面する一列分の燃料ピンの曲がりをそれぞれ示したものである。

図からすべての燃料ピンにおいて、ワイヤピッチ(209mm)に沿った局所的な曲がりが確認された。この曲がりの周期は、列内でほぼ一致している。局所的な曲がり量は、集合体の最も外側に装荷された燃料ピンにおいて、それより内側のものと比較して大きいことが確認された。

燃料ピンの全体的な曲がり傾向については、外周ピン以外はノミナル位置上からの変位量は少ない。これに対し、外周ピンはラッパ管側へ変位する傾向が比較的大きく観察される。

この傾向を確認するために、ラッパ管 E 面に接する燃料ピンについての曲がりを図 3.6 に示す。これら集合体の外周に装荷された 7 燃料ピンについては、炉心燃料軸方向中心位置から上部位置にかけてラッパ管側への変位が比較的大きい。この外周燃料ピンのラッパ管側への変位については、すべての面に接する外周ピンで確認されている。

4. 燃料ピン曲がり解析

照射中、集合体内においては、①燃料ピンの周方向熱膨張差に起因した曲がり、②自己ワイヤの引張り力による曲がり(ワイヤとの相互作用)、③BDI(Bundle-Duct-Interaction)に起因した燃料ピンの曲がりの発生が予測される。

BDIに起因した曲がりについては、被覆管及びワイヤのスエリングに起因して発生する。今回の集合体の最大中性子照射量は $8.91 \times 10^{22} \text{ n/cm}^2$ ($E \geq 0.1 \text{ MeV}$) であり、スエリングはほとんど発生していない⁶⁾ことから、BDIによって燃料ピンが湾曲している可能性は少ない。

以上のことから、ここでは上記の①及び②に起因した燃料ピンの曲がりについて、それぞれ計算コードによる解析を実施した。

4.1 燃料ピンの周方向熱膨張差に起因した曲がり

この曲がりについては、計算コード：UNIBOW を利用して計算した。以下に詳細を示す。

4.1.1 曲がりメカニズム

燃料ピン全体の曲がり発生メカニズムを図 4.1 に示す⁷⁾。照射前、燃料ピンはほぼまっすぐの状態である〔図中 1〕。原子炉に装荷され、照射されると、集合体内の燃料ピンには、冷却材の温度分布により、被覆管の周方向に温度差が生じる。この温度差は集合体の外周に装荷された燃料ピンで最も大きく、その熱膨張差により湾曲が生じる〔図中 2 の破線〕。

一方、この熱湾曲は、隣接するラッパ管壁及び隣接燃料ピンとワイヤを介して接触・拘束される〔図中 2 の実線〕。これにより、燃料ピン間、燃料ピン-ラッパ管間で接触荷重が発生し、この応力は、照射クリープにより、照射とともに緩和される〔図中 3〕。これが歪となって蓄積し、照射後、温度勾配がなくなると塑性変形で燃料ピンは内側に曲がろうとする〔図中 4〕。

4.1.2 UNIBOW コードの概要

UNIBOW は、高速炉燃料集合体の最外周に装荷された燃料ピンを対象にして、ラッパ管側とバンドル側の被覆管温度差から生じる熱湾曲、ラッパ管あるいは内側の隣接燃料ピンとの接触拘束下での全長にわたる曲がり等を計算するコードである。

なお、燃料ピンの曲がり解析は以下の条件で計算される。

- ・ 燃料ピン曲がりに伴う温度条件の変化は考慮しない。
- ・ 燃料ピン曲がりには、片端を固定した1次元梁モデルを適用する。
- ・ 燃料ピン曲がり要因として、弾性、熱、スエリング、照射クリープを考慮する。

4.1.3 解析条件

計算に用いた入力データの代表例(No.94 ピン)を図 4.2 に示す。また、No.94 ピンの照射条件を図 4.3 に示す。

4.1.4 解析結果

・ 照射中(フリー条件下)

燃料ピンをフリーな状態と仮定した場合の照射初期における熱膨張差による曲がり予測を図 4.4 に示す。燃料ピンは、被覆管の周方向温度勾配による熱膨張差によって、頂部がラッパ管側に曲がろうとする。曲がりは、燃料ピンの頂部で約 150mm 前後になり、スタック中心部からスタック上部にかけて発生している。

・ 照射中(拘束条件下)

上記のフリーな状態から、集合体内でラッパ管及び隣接燃料ピンに拘束された状態での燃料ピンの曲がり解析結果を図 4.5 に示す。熱膨張差により図 4.4 のようにラッパ管側に曲がろうとした燃料ピンは、頂部がワイヤを介してラッパ管に接触し、図 4.5 のような曲がりを示す。燃料ピンはスタック上部付近がラッパ管側に変位し、その量は最大で 0.2mm と予測された。

・ 照射中と照射後の比較

集合体内の拘束条件下での燃料ピンの曲がりについて、照射中と照射後の比較を行った。その結果を図 4.6 に示す。照射後の曲がりは、集合体の出力をなくし、温度分布を室温で均一とすることにより、塑性ひずみによる反対方向への曲がり応力が発生するとして計算される。

照射中には存在した被覆管の周方向温度勾配が、照射後には解消されるため、照射中に蓄積した塑性ひずみに起因して、燃料ピンはピン束側に曲がろうとする。しかし、隣接ピン等によって拘束されるため図 4.6 に示すように、スタック部上部付近では、ラッパ管側に変位しようとする応

力が発生し、照射中よりも照射後の方がラッパ管側に接近するようになる。

ラッパ管内面とワイヤの接触荷重の計算結果を図 4.7 に示す。DFPB700mm では、照射中 0.09kg であったラッパ管内面との接触荷重が照射後には 0.2kg に増加していた。このラッパ管内面との接触荷重の増加は、燃料ピンの塑性ひずみによる曲がり挙動に起因していると予測される。

- 照射後(フリー条件下)

集合体を解体し、燃料ピンを取り出した状態での曲がり解析結果を図 4.8 に示す。上述したように、塑性ひずみにより燃料ピンはピン東側に頂部が約 100mm 前後変位すると予測される。

4.2 ワイヤとの相互作用による燃料ピン曲がり

自己ワイヤの巻きつけ荷重よって生ずる燃料ピンの局所曲がり解析は、SPILE コードにより実施した。

4.2.1 ワイヤとの相互作用による燃料ピン曲がりメカニズム

ワイヤは、張力を加えられて燃料ピンにらせん状に密着して巻き付けられる。この張力は、ワイヤをピンに密着させるとともに、等間隔に保つ役割を有している。炉内で燃料ピンが照射されると被覆管及びワイヤの寸法変化によって張力が変化し、場合によつてはワイヤの緩みが発生することもある。

照射前、燃料ピンはらせん状に巻き付けられたワイヤの張力によつて、軸方向の圧縮荷重とワイヤピッチに沿つた横荷重を受ける。これによつて燃料ピンには、らせん状の局所曲がり(たわみ)が発生する。一方、ワイヤには弾性的な伸びが生ずる。

この状態の燃料ピンを炉内で照射すると、最初に被覆管とワイヤの熱膨張差による変化が生ずる。つまり、炉内における被覆管温度はワイヤ温度よりも高く、被覆管の熱膨張による軸方向伸びはワイヤより大きいために、ワイヤ張力は通常、製造時よりも増加すると考えられる。

照射が進むにつれて、ワイヤ張力はクリープ変形によつて緩和される。これは、ワイヤがクリープ変形によつて伸びることと、被覆管は横荷重によるクリープたわみが発生することを意味する。

さらに照射が進むと、被覆管とワイヤのスエリング差に起因した変形等

が発生することになる。これは、主に炉内における被覆管とワイヤの温度差によってスエリングによる軸方向伸び量が異なるためである。また、FP ガス内圧增加による被覆管のクリープ変形や、被覆管のスエリングによる外径増加によつてもワイヤ張力が変化することも考えられる。

今回の「常陽」炉心燃料集合体 (PFD512) の解析では、照射量が比較的低いため被覆管のスエリングはほとんど寄与が無く、熱膨張や照射クリープ歪の影響が主体となっている。

4.2.2 SPILE コードの概要

SPILE は、ワイヤと燃料ピンの機械的相互作用を解析するコードであり、ワイヤ張力による燃料ピンの局所曲がりを熱膨張、照射クリープ、スエリングの影響を加味して解析することが可能である。

本コードは、以下の条件で解析される。

- ・ 燃料ピンを1次元梁モデルとする。
- ・ ワイヤの剛性は無視し、ワイヤは被覆管上を自由に滑りうるものとする。
- ・ 被覆管内に存在する燃料ペレットの曲げ剛性への寄与は考慮しない。
- ・ ワイヤ張力の変化要因として、熱膨張、スエリング、クリープの影響を考慮する。

4.2.3 解析条件

計算に利用した入力データの代表例(No.94 ピン)を以下に示す。

被覆管外径 : 5.5mm

被覆管内径 : 4.8mm

ワイヤ径 : 0.9mm

ワイヤ巻きつけ長さ : 1468mm

ワイヤ張力 : 5kg

ワイヤ巻数 : 7

なお、スエリングについては、PFD512 の最大照射量が $8.9 \times 10^{22} \text{ n/cm}^2$ ($E > 0.1 \text{ MeV}$) であることから、0 として解析した。

4.2.4 解析結果

SPILE により解析したワイヤ張力と燃料ピンの局所曲がり (たわみ) 最大値の照射による変化を図 4.9 に示す。

ワイヤ張力 (図中 ○印) は製造時 5kg である。解析では、照射前でもワイヤ張力による弹性的な燃料ピンの局所曲がり (たわみ) が約

0.04mm 程度発生し(図中 ●印)、ワイヤ張力は約 4.5kg を示した。

炉内に装荷され、照射が開始されると被覆管とワイヤの温度差に伴う軸方向の熱膨張差により、ワイヤ張力は約 5.2kg まで増加する。このため、燃料ピンの局所曲がり(たわみ)も約 0.06mm まで増大する。

その後、ワイヤ張力は照射とともに低下する。これは、照射クリープによりワイヤ自身の伸びと燃料ピンの局所曲がり(たわみ)の増加が起因している。照射終了時点でワイヤ張力は約 0.5kg まで低下し、燃料ピン局所曲がり(たわみ)は約 0.17mm を示した。

照射後、原子炉から取り出した状態を模擬するため、解析上の温度を室温にすると、ワイヤ張力は 0 となり、燃料ピンの局所曲がり(たわみ)量も若干戻る傾向にあった。温度を室温に戻した時点で、ワイヤ張力がほとんどなくなるのは、ワイヤよりも被覆管の軸方向熱膨張量の方が大きかった分、これらの温度差から開放されると、ワイヤ張力が減少する方向に働くためと考えられる。

燃料ピンの局所曲がりの軸方向分布を図 4.10 に示す。照射前、ワイヤ張力による弾性的なたわみが軸方向均一に約 0.04mm 発生している。炉内に装荷され照射が開始されるとスタック部において局所曲がりが大きくなり、照射末期には最大で約 0.17mm 程度を示す。局所曲がりが最大となる軸位置は炉心燃料軸方向中心位置である。また、炉内から取り出した照射後の軸方向分布は、照射中よりも 0.005mm 程度局所曲がりが減少する。

4.3 燃料ピンの曲がり解析結果

UNIBOW による燃料ピン全体にわたる曲がり解析結果に、SPILE によるワイヤとの相互作用によって生ずる局所曲がりを合成したものを見図 4.11 に示す。図には外周ピンの No.94 ピンの結果を示す。

図からスタック上端部でラッパ管側への変位が大きく、ワイヤピッチに沿った局所曲がりが確認された。燃料ピンのスタック上端部におけるラッパ管側への変位量は、燃料ピンの局所的曲がりが加わったことにより、約 0.35mm を示した。

照射中と照射後の曲がり挙動を比較すると、大きな相違は確認されないが、照射後の方がラッパ管側への変位量は大きい傾向にある。

4.4 解析結果と CT による実測値の比較

実際に CT で測定された燃料ピンの曲がりと解析結果(照射後)を比較し、図 4.12 に示す。

ここでは、集合体の外周に装荷された燃料ピンのなかで、ラッパ管に接する各列の中心ピンについての結果を示す。PFD512 では、図に示すようにスタック部からはずれた燃料ピン上部については撮像していないため、DFPB:650mm 以上の比較はできない。

スタック部について解析結果と CT による実測結果を比較すると、ワイヤピッチに沿った局所的な曲がりの傾向や、燃料スタック部におけるラッパ管側への変位の傾向についてはほぼ一致している。

燃料ピンのラッパ管側への変位に関しては、CT による実測値の方が解析による予測値よりも全体的に大きい傾向にある。特に、No.25 ピン、No.34 ピンで比較的顕著に現れており、No.25 ピンではスタック上部に近い DFPB : 550mm 付近で、No.34 ピンではスタック中央部に近い DFPB : 300mm 付近でその傾向が顕著である。

No.25 ピンと接する E 面の外周列の変位量測定結果を図 4.13 に示す。No.25 ピンについては、燃料上端部付近において特異な挙動を示しており、ワイヤのずれ等の要因により、このような現象が発生したと予測される。このような特異な挙動が発生した場合には、計算による予測はできない。

また、ラッパ管側への変位量が解析値よりも CT による実測値のほうが大きくなる要因としては、ラッパ管のバルジングが予測される。図 4.12 に示す燃料ピンの変位量は、集合体内の各燃料ピンのノミナル位置からの変位を測定したものである。実際にラッパ管はバルジングにより外側に膨れており、本集合体では寸法測定結果から、対面間距離で中央部が約 0.3mm 膨れていることがわかっている。

仮に、膨れ量の半分が片方のラッパ管面で発生したとすると、約 0.15mm ということになり、ラッパ管と外周の燃料ピンのクリアランスがこの分だけ増加することになる。これにより、ラッパ管側への変位が大きくなることも考えられる。

解析値と実測値の差については、例えば先ほどの No.34 ピンでは約 0.3mm 程度あることから、バルジングの影響のみでは説明できないが、一要因であることは十分考えられる。このほかにもワイヤのずれ等が発生して、ワイヤピッチが長くなり、ラッパ管側への接近が計算値よりも大きくなることが要因として考えられる。

5. おわりに

X線CT試験にて得られた断面像から集合体内での燃料ピンの配置状況を測定し、それらを軸方向に合成することによって集合体に装荷された状態での燃料ピン曲がり量を定量的に把握することが可能となった。その結果、「常陽」で照射した炉心燃料集合体 PFD512 では、すべての燃料ピンにおいてワイヤピッチに沿った局所的な曲がりが観察され、外側に装荷された燃料ピンではラッパ管側への変位が明確に確認された。

このため集合体の外周に装荷された燃料ピンの曲がりを計算コードにより予測した。その結果、スタック部について解析結果と CT による実測結果を比較すると、ワイヤピッチに沿った局所的な曲がりや、燃料スタック部におけるラッパ管側への変位の傾向がほぼ一致した。

本解析手法を用いることにより、実測できない照射中の燃料ピン曲がり挙動の予測も可能となる。

6. 謝 辞

本研究を実施するにあたり、照射後試験データの整理及び計算コードによる解析等を協力していただきました検査開発係三澤 進氏、原子力技術係芳賀 広行氏に深く感謝致します。

7. 参考文献

- 1) K.Katsuyama, *et al.*, "Application of X-Ray Computer Tomography for Observing the Deflection and Displacement of Fuel Pins in an Assembly Irradiated in FBR," *Journal of Nuclear Science and Technology*, Vol.40, No.4, p.220-226(April 2003)
- 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) 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)
- 4) 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
- 5) 勝山 他 JNC TN9410 2002-012 「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」、2002年8月
- 6) 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
- 7) 柴原 他 内部資料

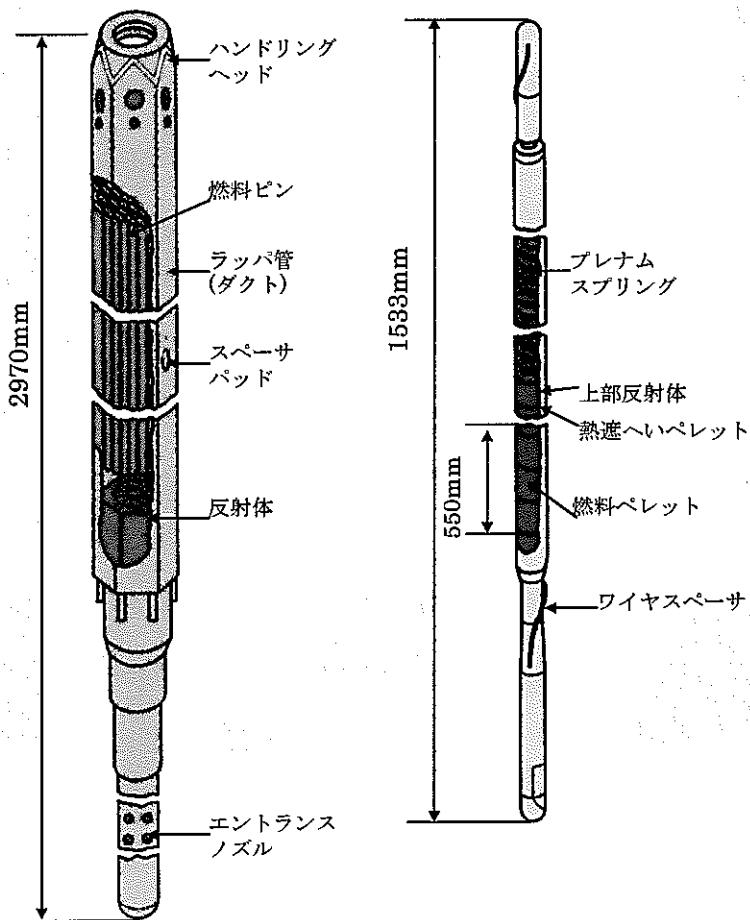


図1 「常陽」炉心燃料集合体及び燃料ピンの概要

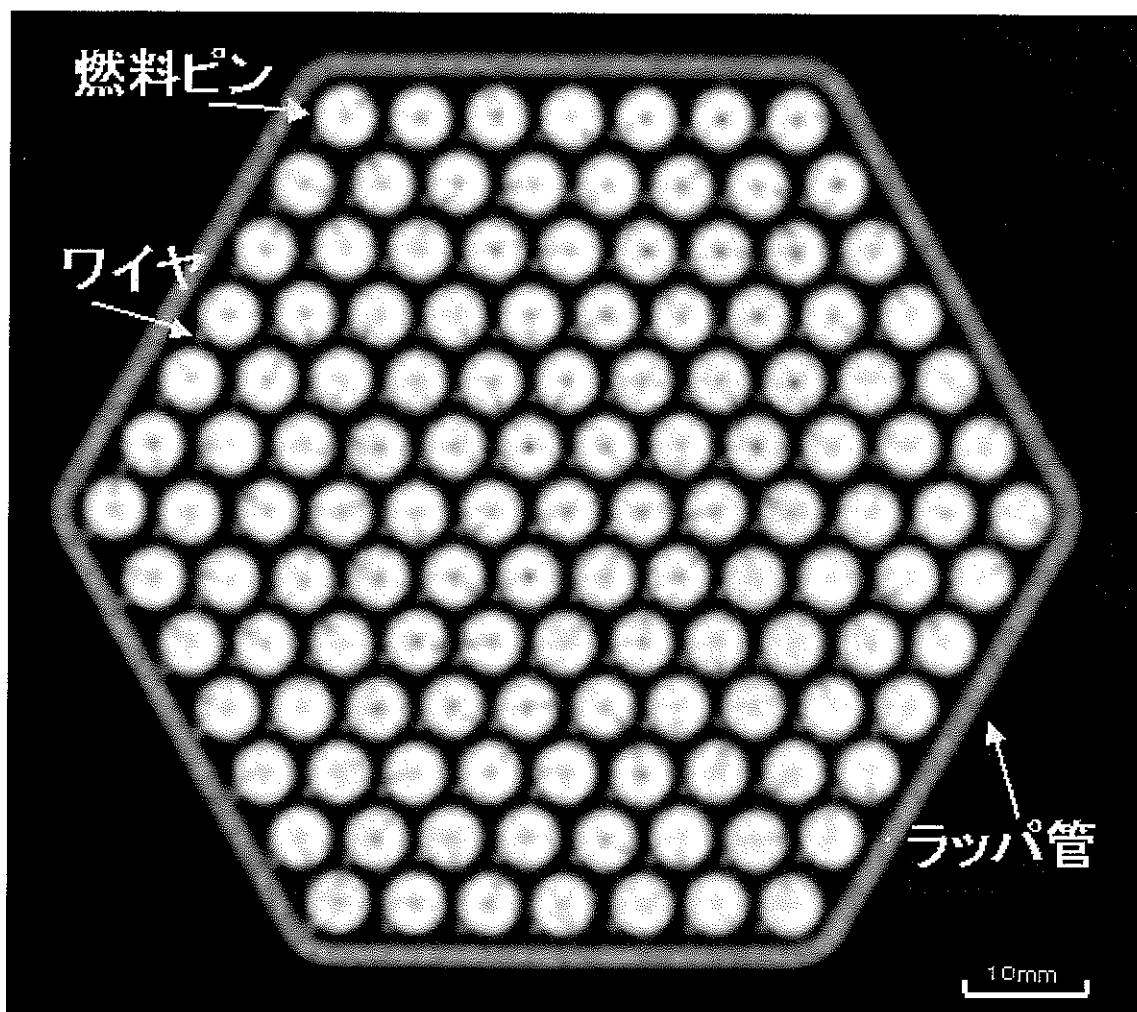


図 3.1 CT 断面像 (炉心中心)

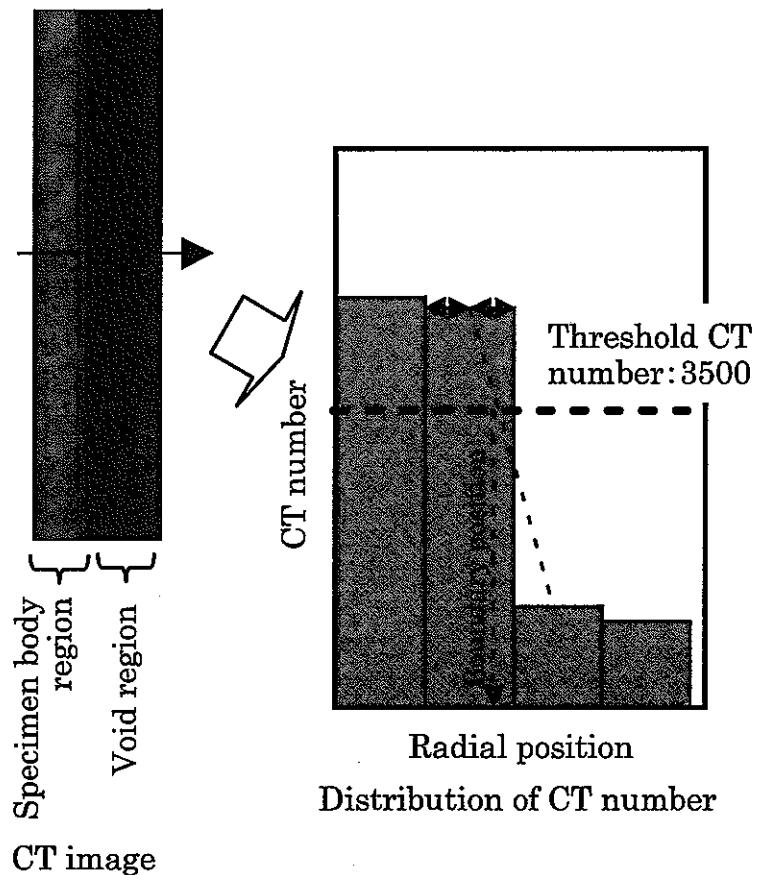
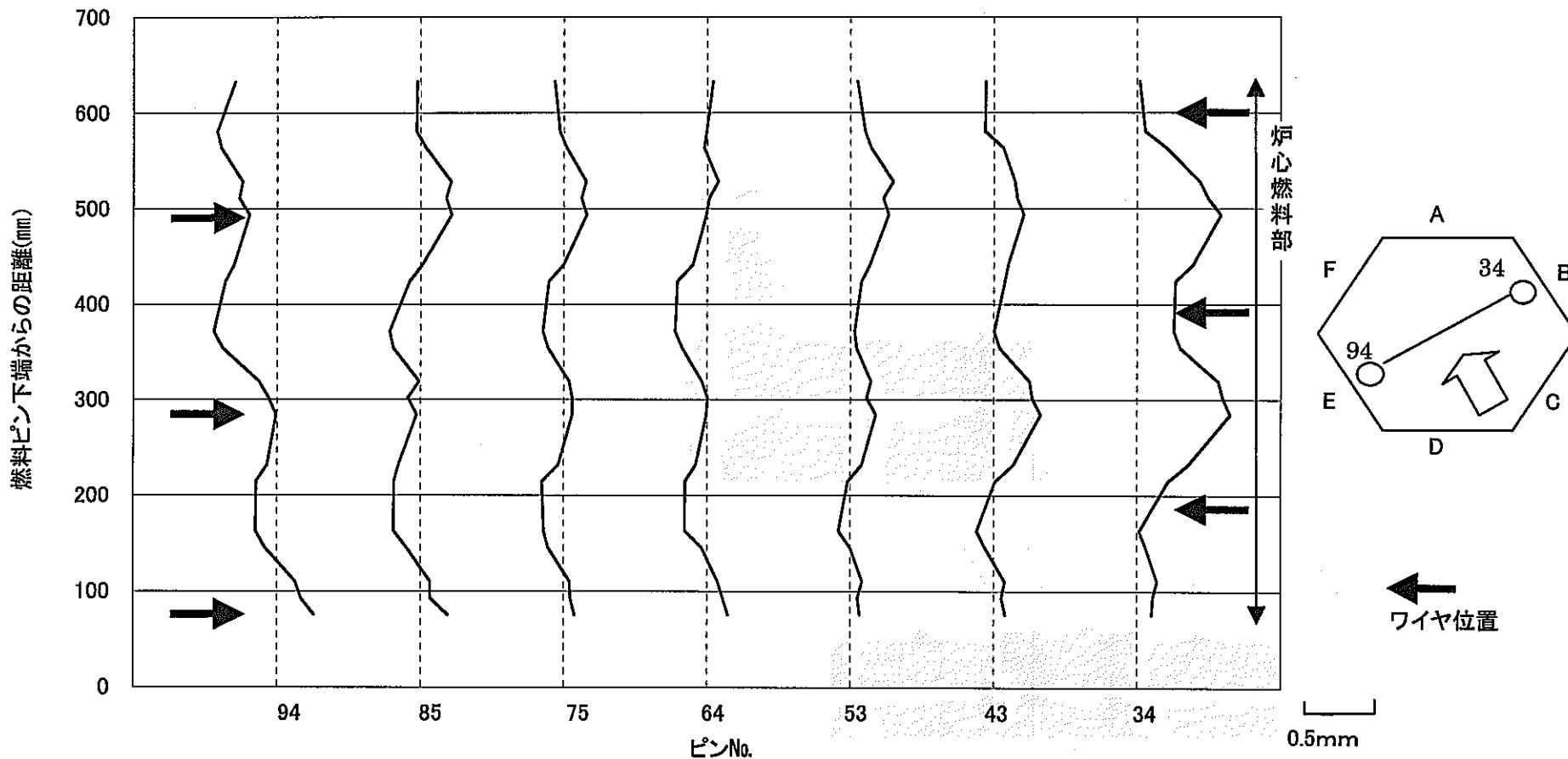


図 3.2 境界位置の算出方法⁵⁾



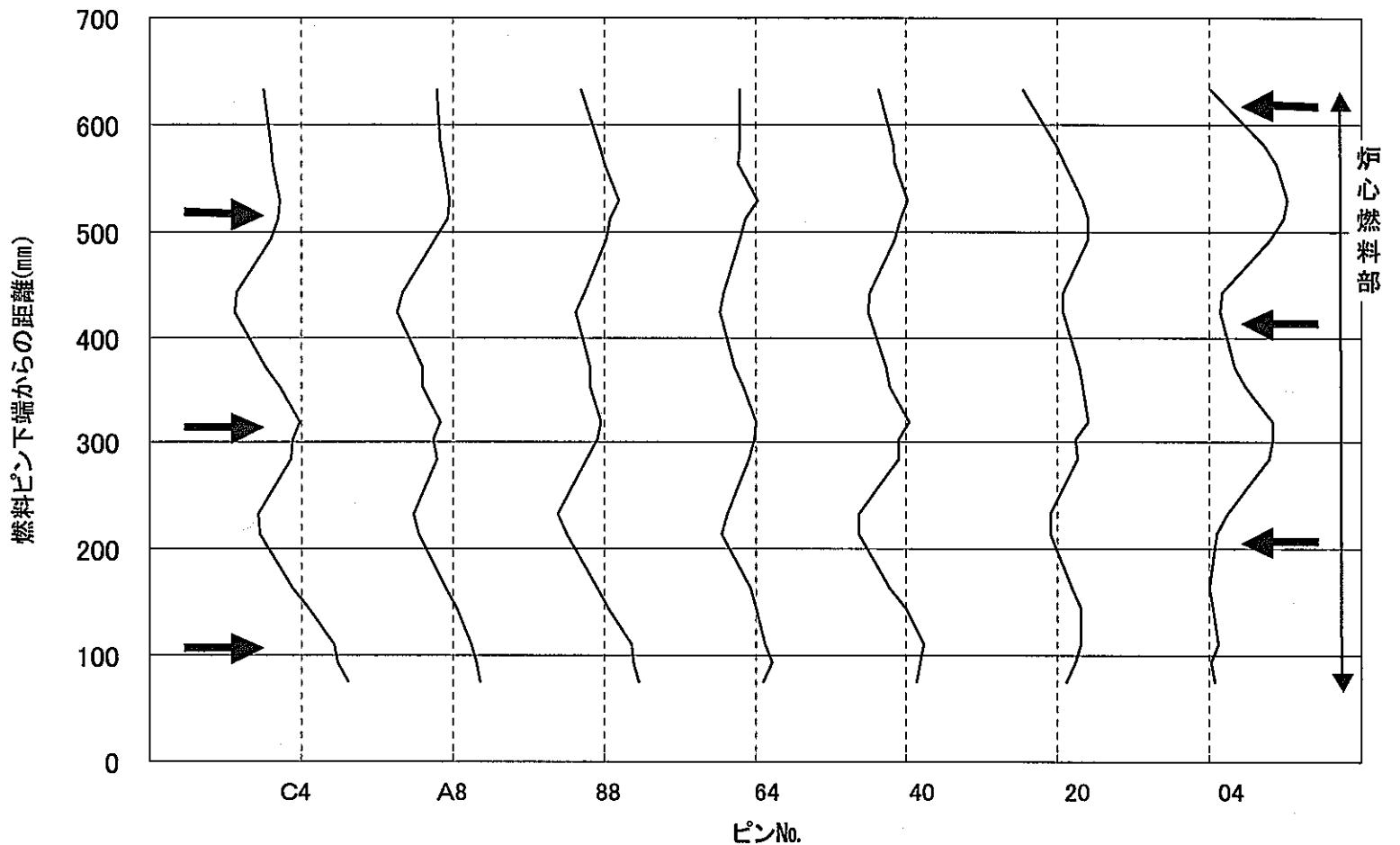


図3.4 燃料ピン曲がり測定結果(2)

*線は中心座標の変位を示す。

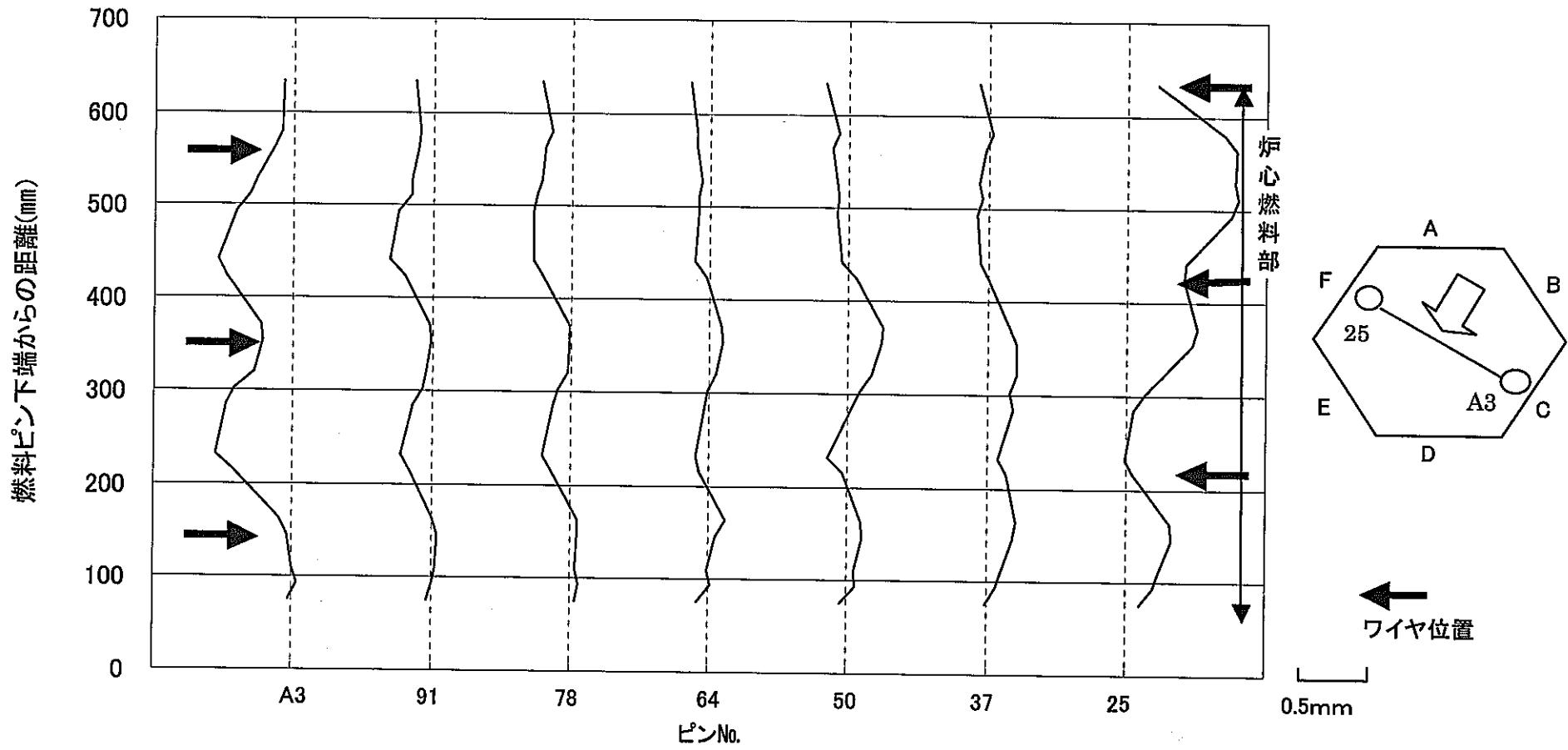


図3.5 燃料ピン曲がり測定結果(3)

*線は中心座標の変位を示す。

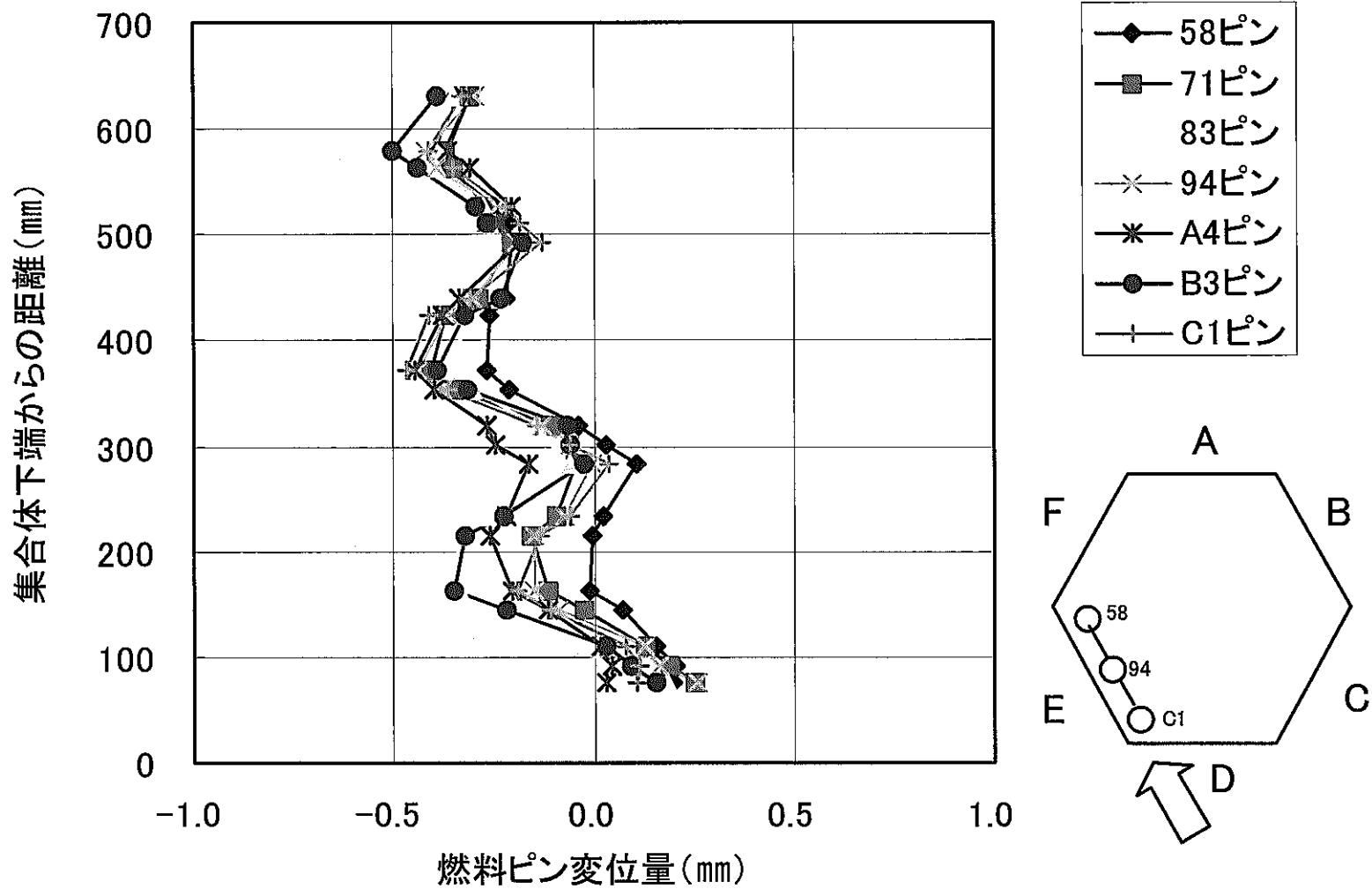


図 3.6 外周燃料ピンの変位量(E面)

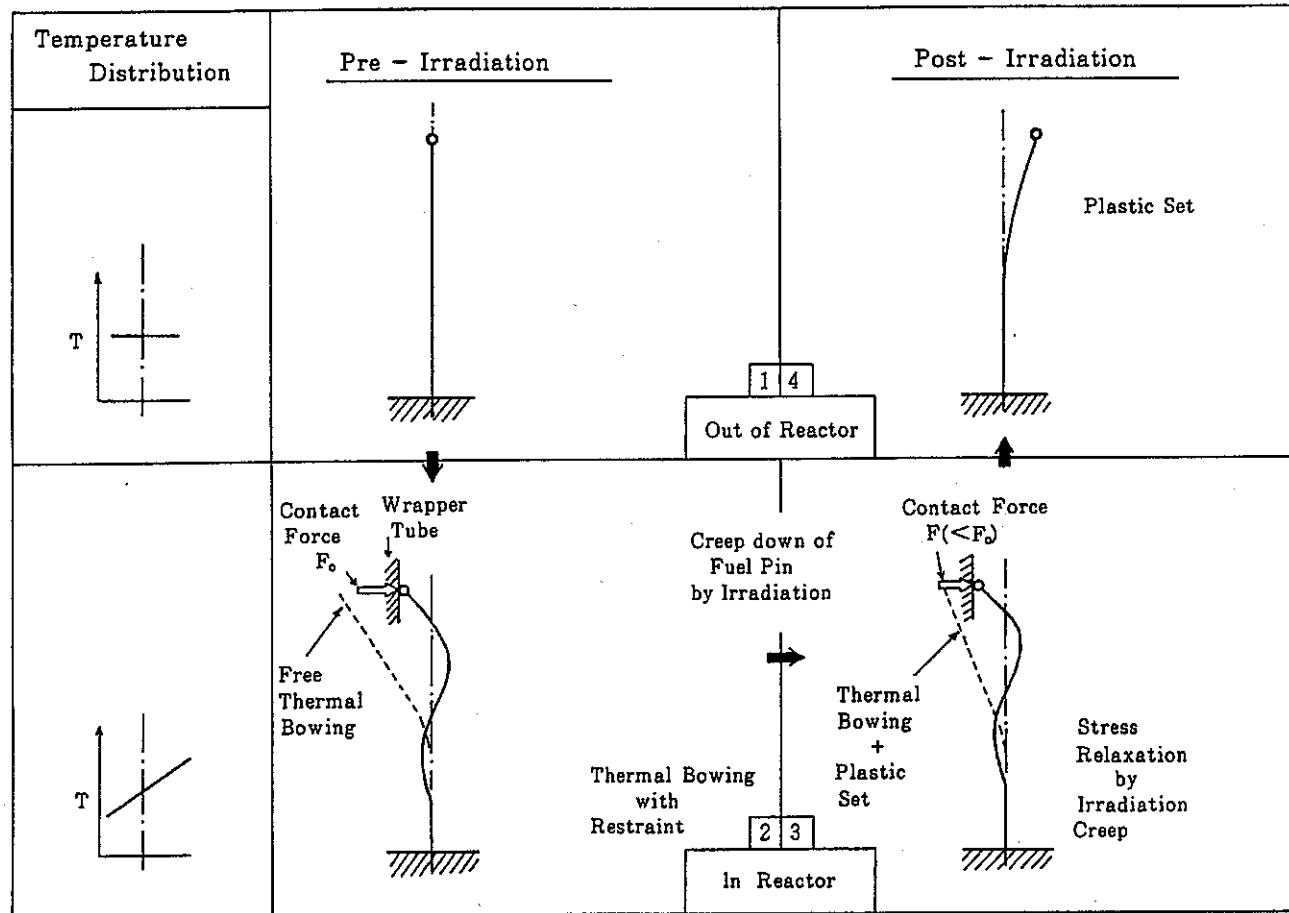


図 4.1 燃料ピンの全体曲がり挙動⁷⁾

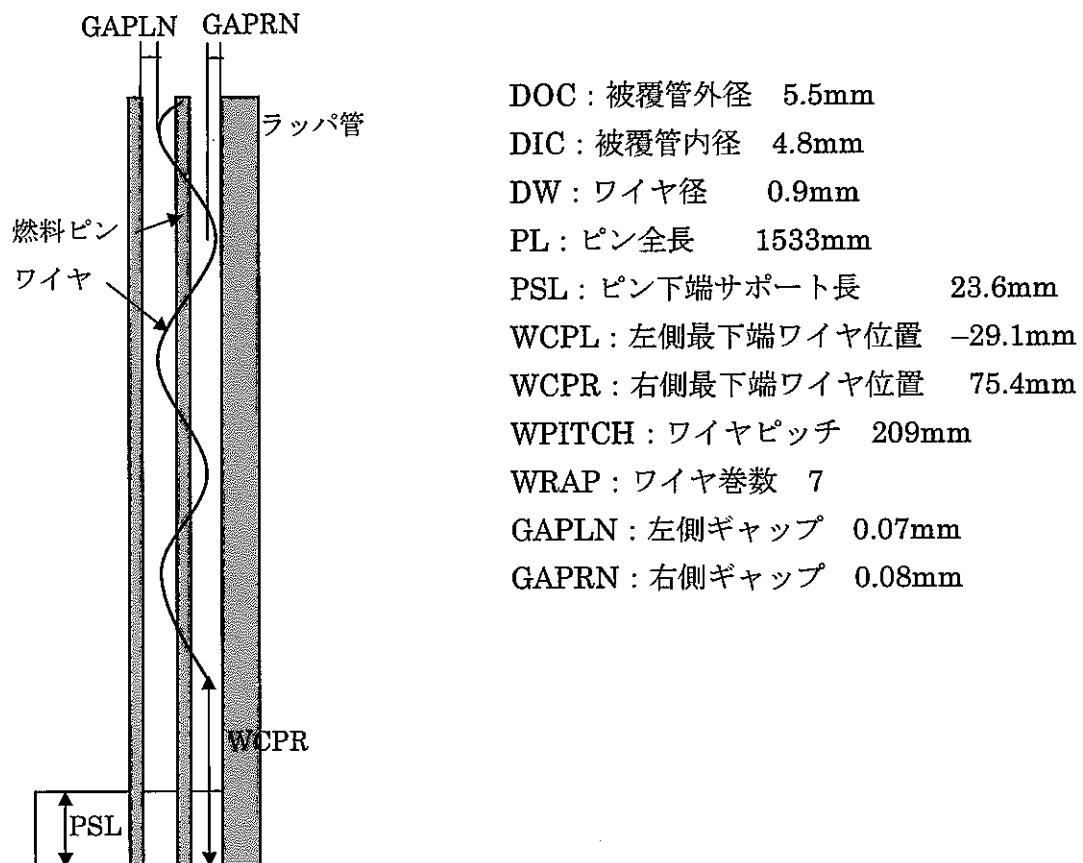
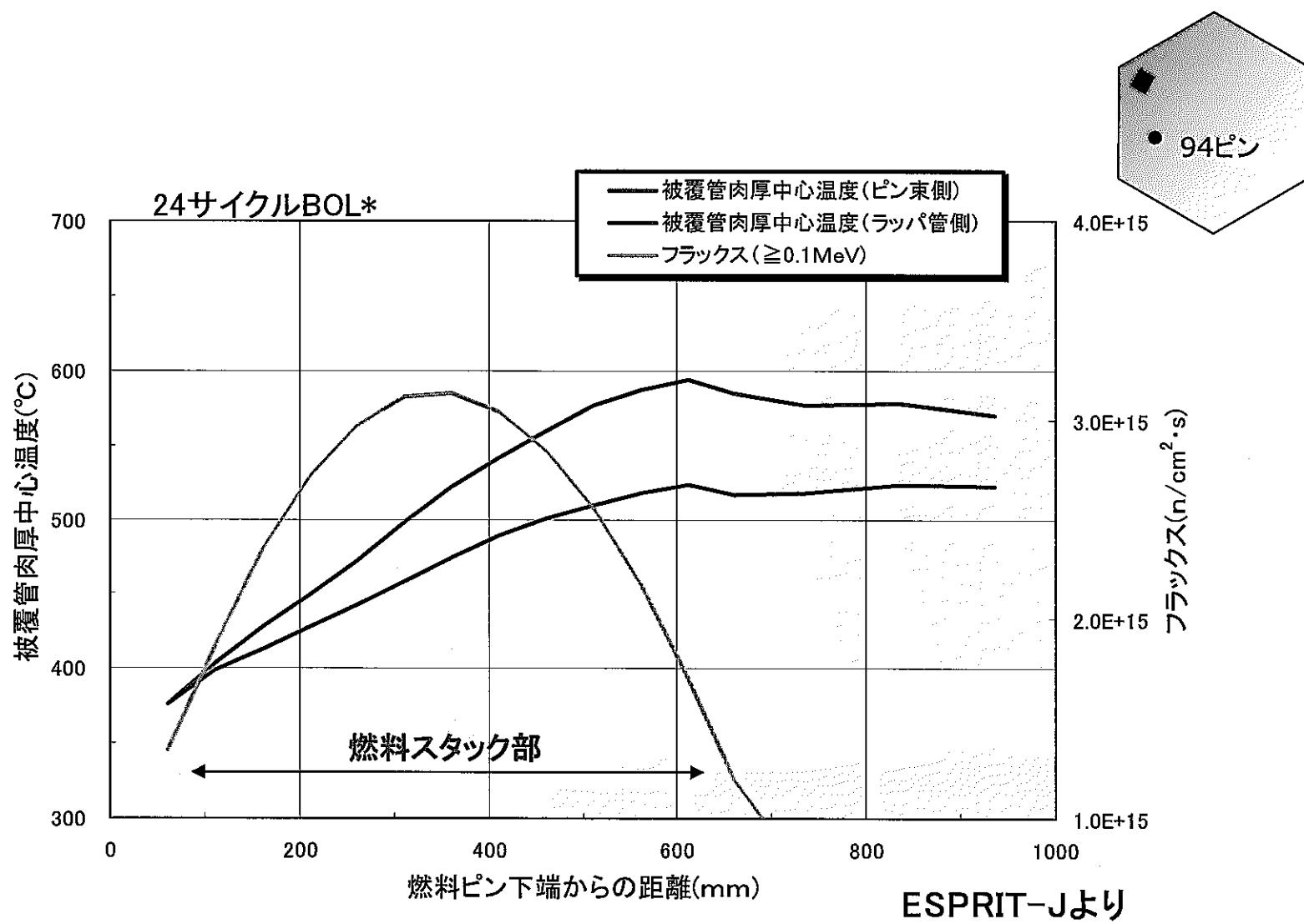
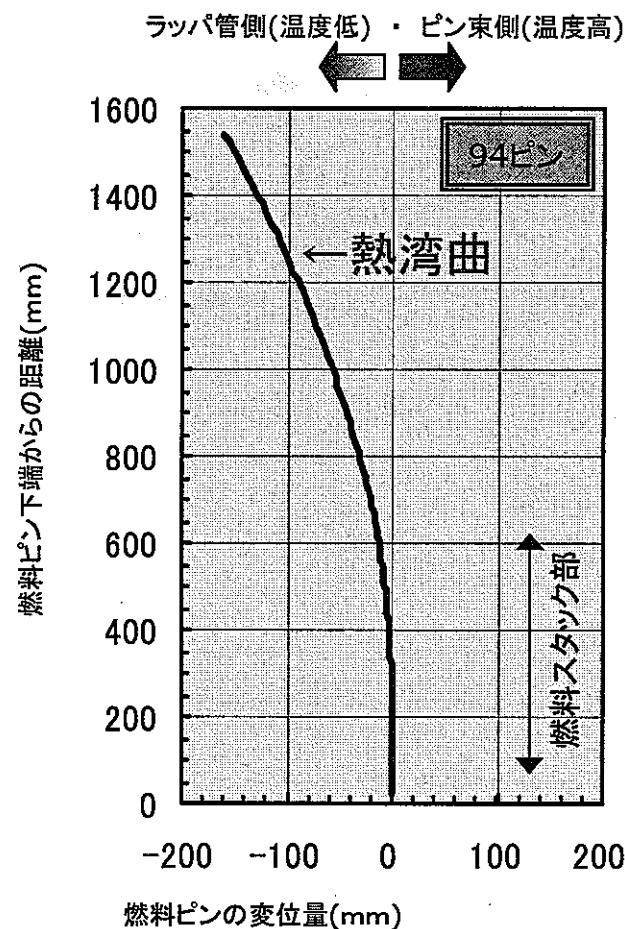


図 4.2 UNIBOW コードへの主な入力データ(代表例)



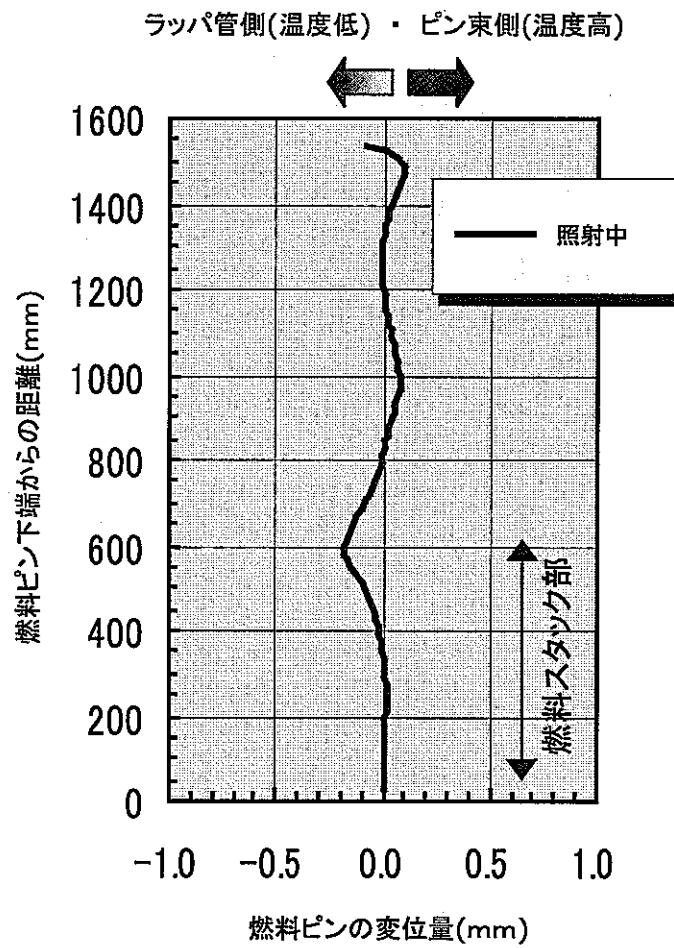
*本集合体は24サイクル
から照射された。

図4.3 照射条件(No.94ピン)



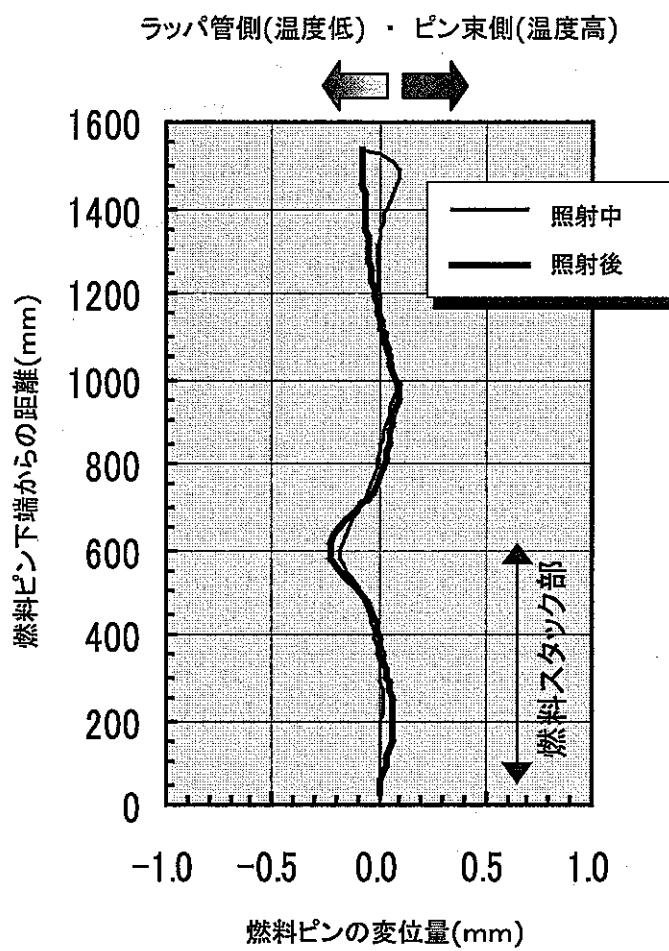
照射初期(拘束なし)

図4.4 UNIBOW解析結果(1)



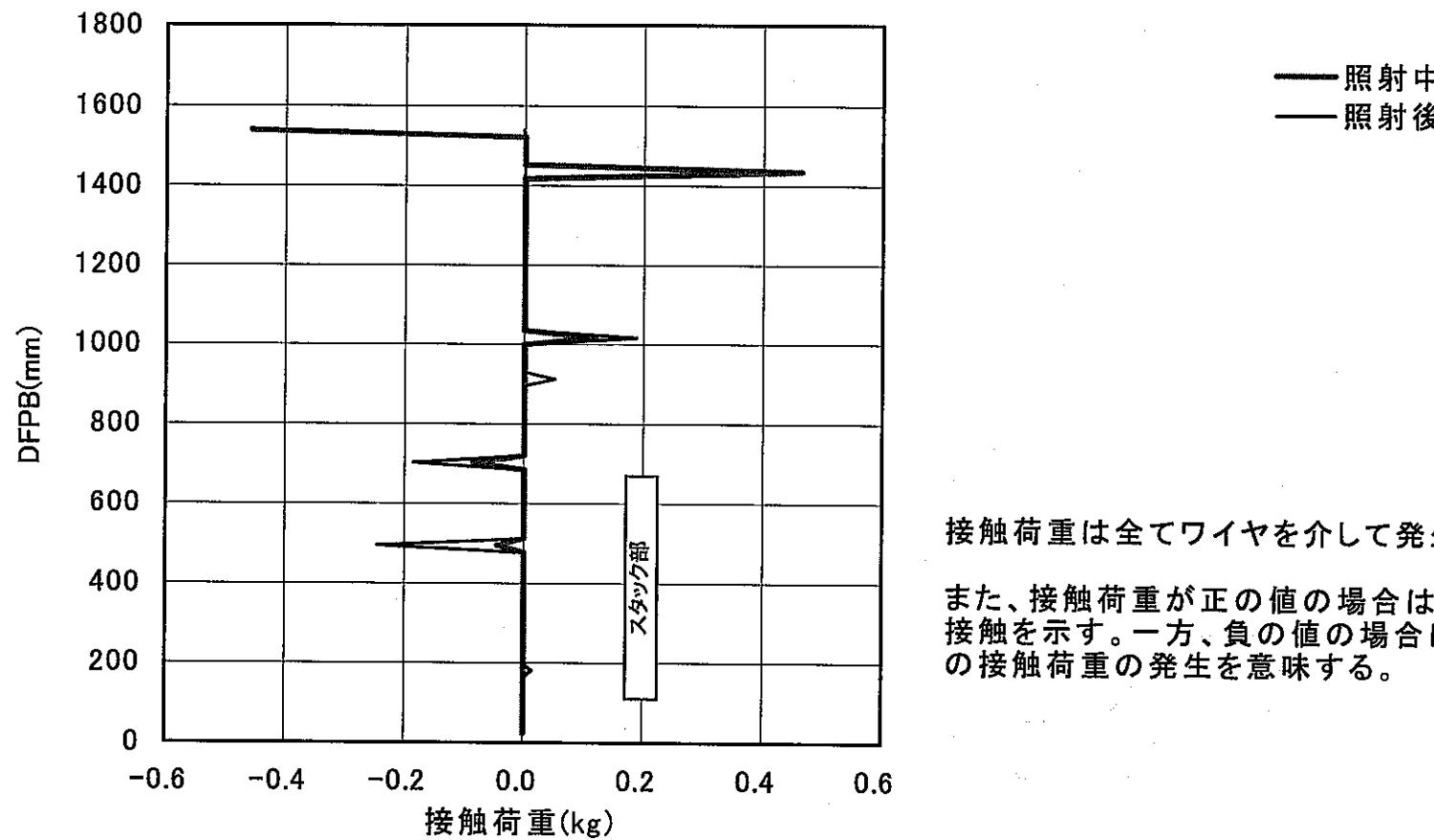
照射末期(拘束あり)

図4.5 UNIBOW解析結果(2)



照射末期(拘束あり)

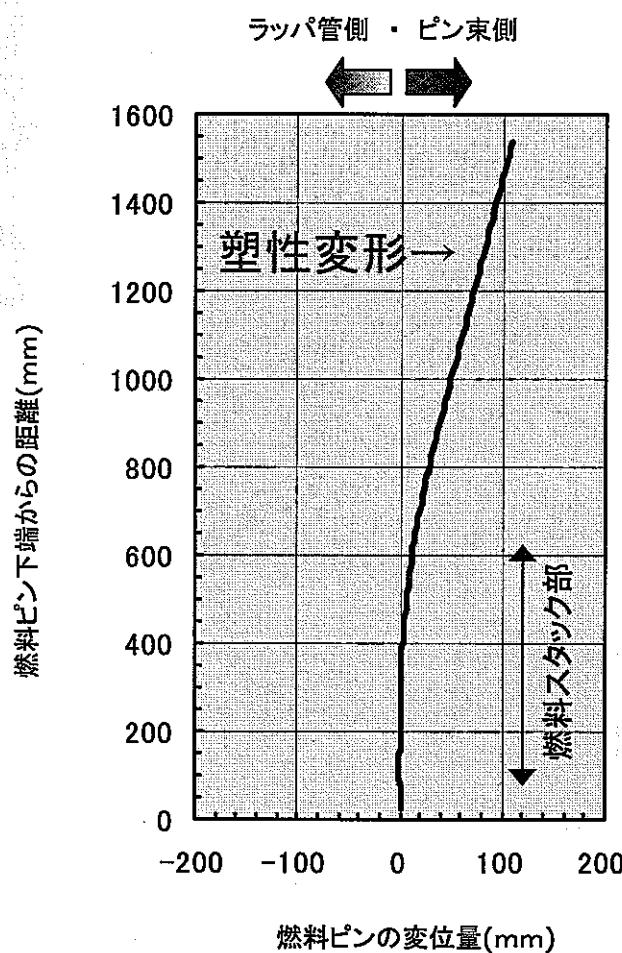
図4.6 UNIBOW解析結果(3)



接触荷重は全てワイヤを介して発生する。

また、接触荷重が正の値の場合は、ピン束との接觸を示す。一方、負の値の場合はラッパ管との接觸荷重の発生を意味する。

図4.7 燃料ピンの接觸荷重の比較



照射後(拘束なし)

図4.8 UNIBOW解析結果(4)

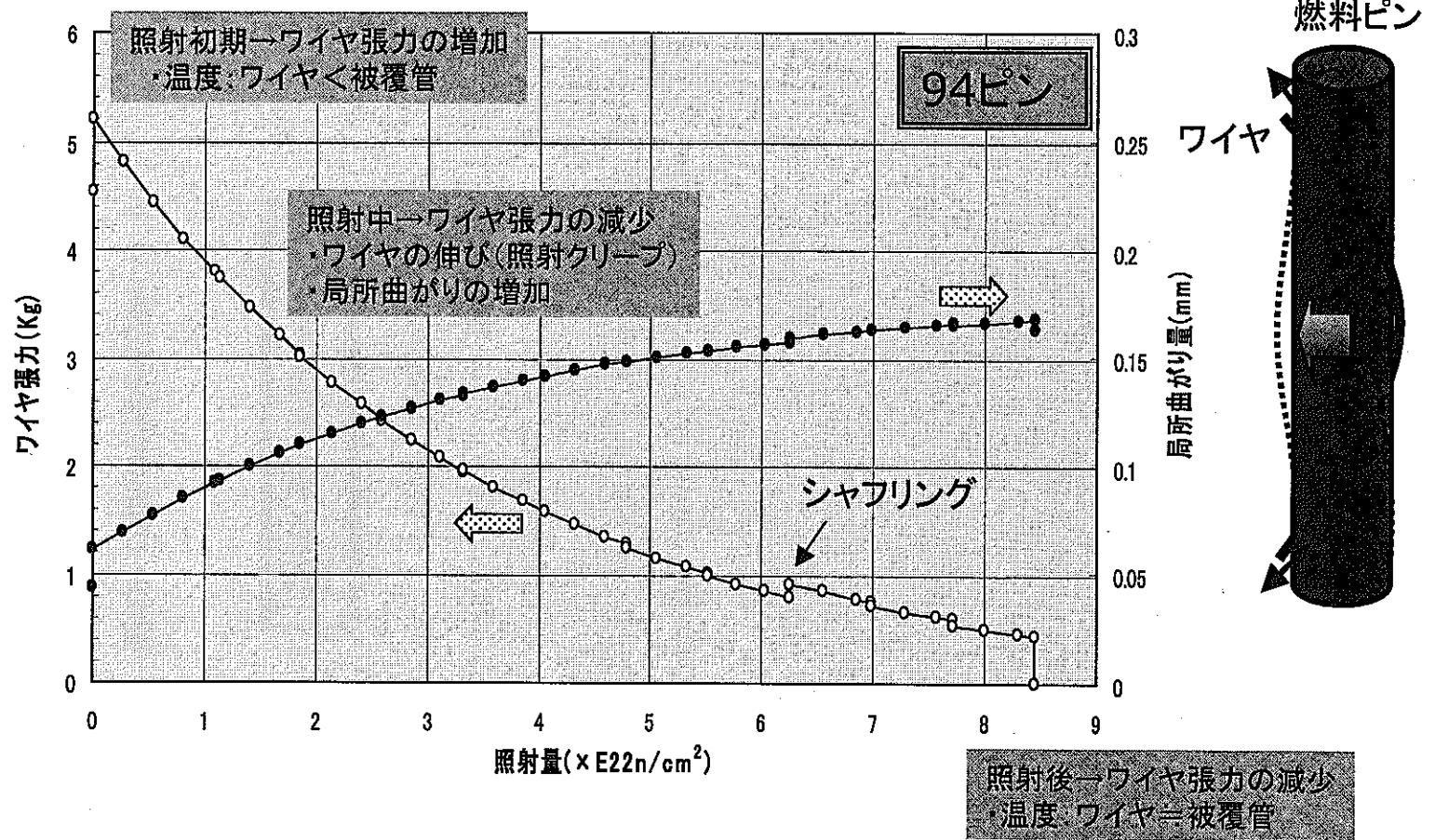
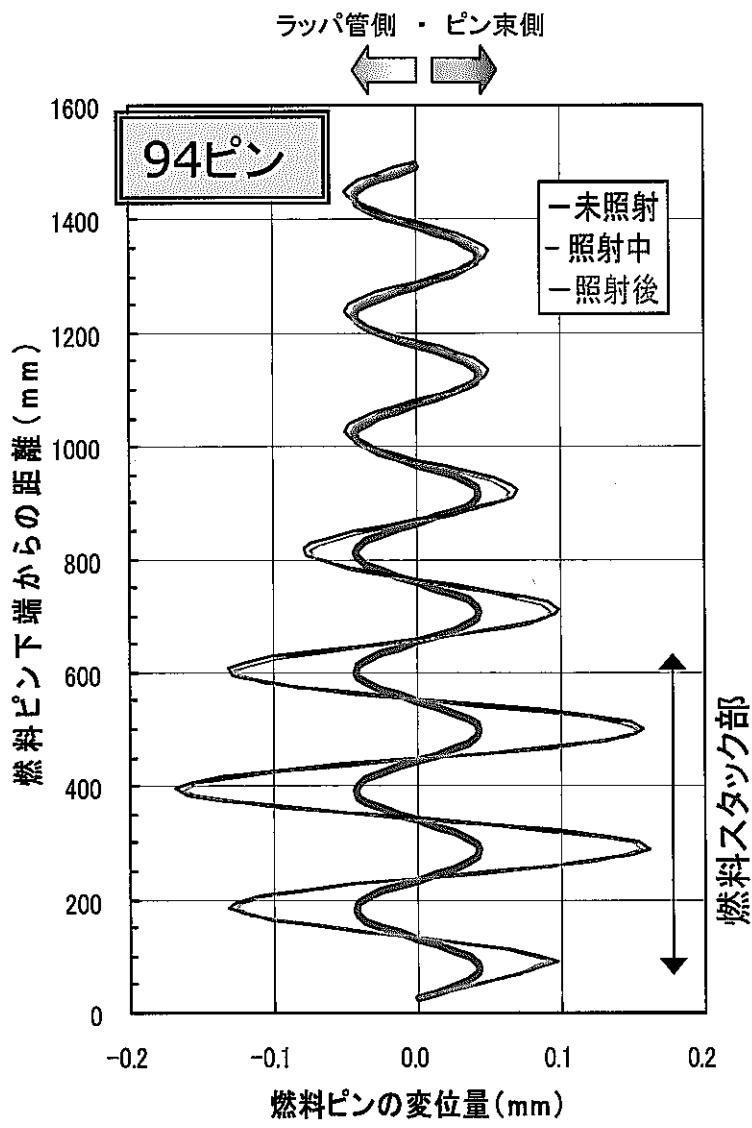
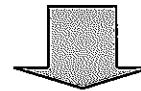


図4.9 ワイヤ張力と燃料ピン局所曲がりの変化



ワイヤとの相互作用による曲がり



照射前 均一に約0.04mm変位

照射後 燃料スタック部を中心
最大で約0.17mm変位

図4.10 ワイヤ張力による燃料ピンの軸方向曲がり

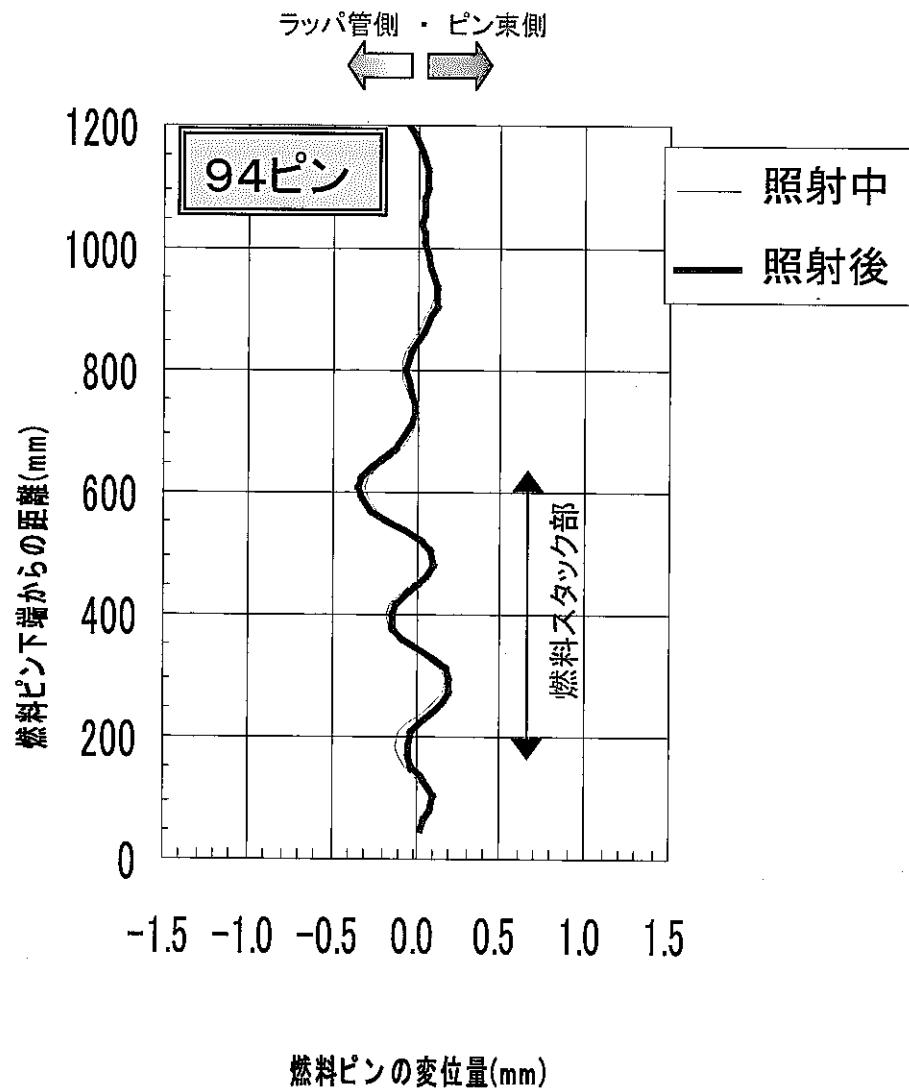


図4.11 燃料ピンの曲がり解析結果

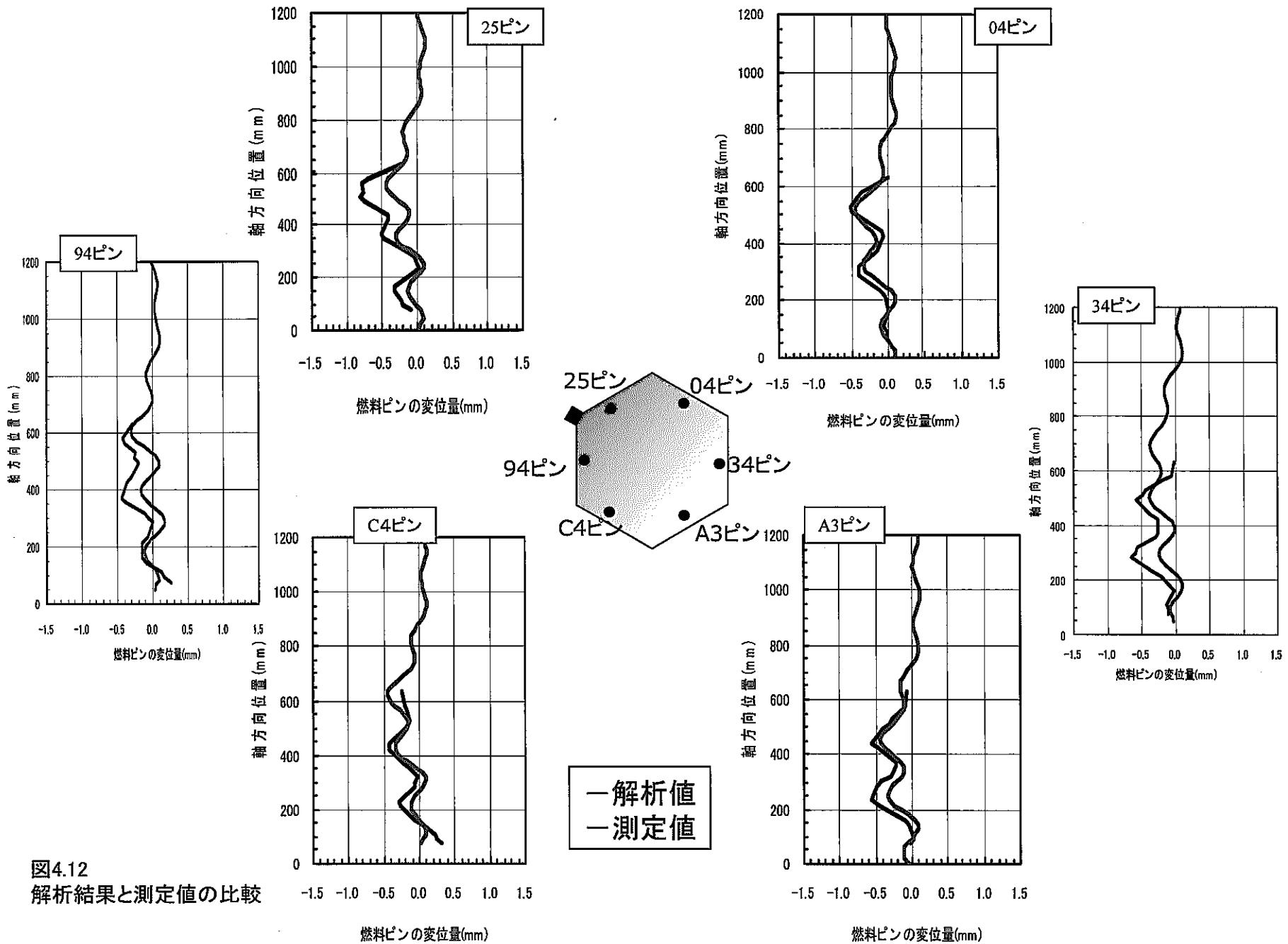


図4.12
解析結果と測定値の比較

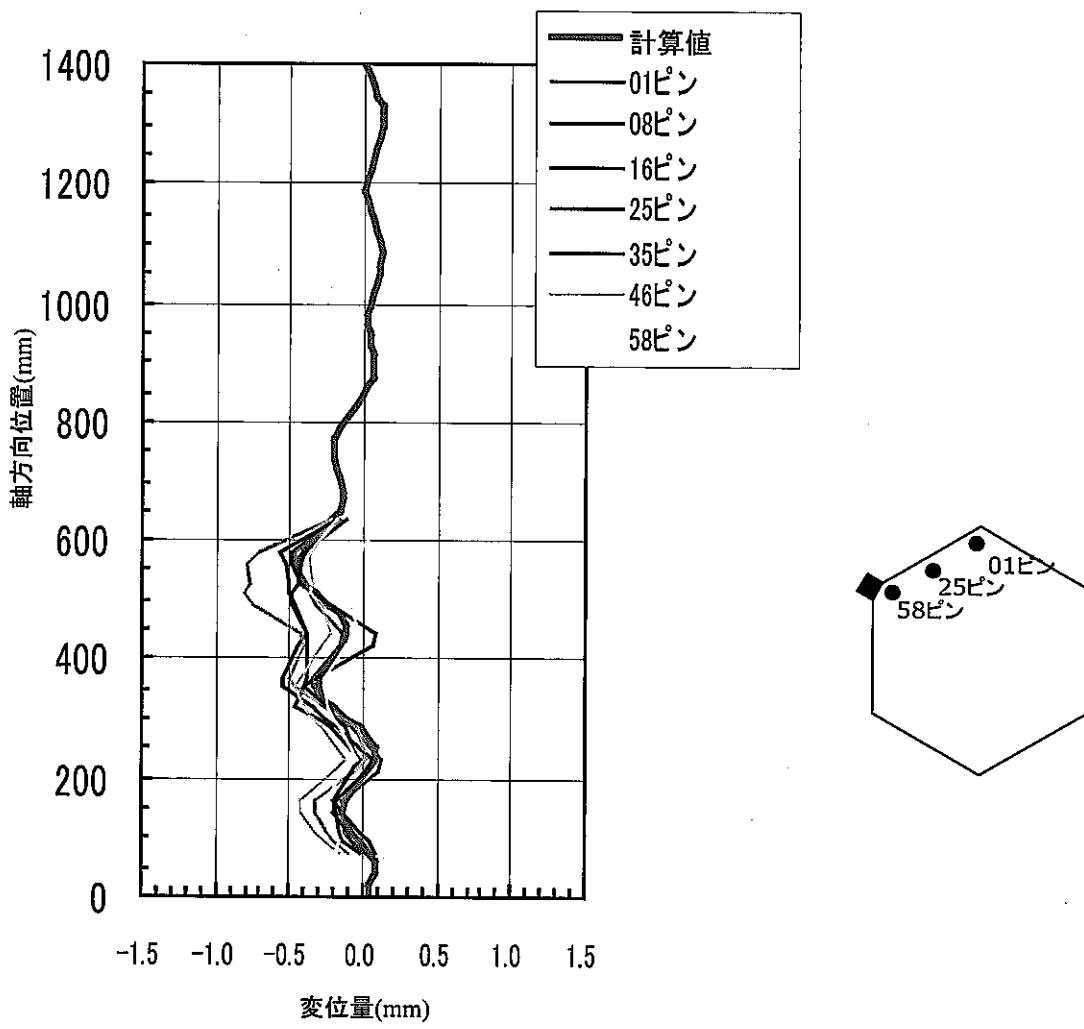


図4.13 E面隣接ピンの燃料ピン曲がり測定結果