

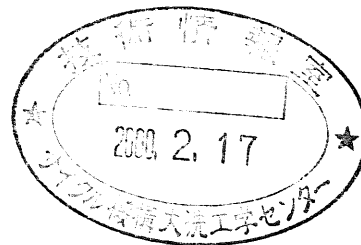


集合体変形挙動解析手法の高度化

— 「常陽」内側反射体湾曲解析 —

(研究報告書)

1999年12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。

〒319-1194 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 Sections,

Technology Management Division,

Japan Nuclear Cycle Development Institute

4-49, Muramatsu, Tokai-Mura, Naka-Gun, Ibaraki-Ken, 319-1194,

Japan

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

1999

集合体変形挙動解析手法の高度化

－「常陽」内側反射体湾曲解析－

(研究報告書)

小泉敦裕¹⁾ 菊地 晋²⁾ 伊藤邦博³⁾

要 旨

集合体変形挙動を把握することは、集合体の寿命及び集合体引き抜き荷重の増加などを評価する観点から重要である。このため、集合体変形挙動を評価するために、炉心変形解析コード「BEACON」が開発されてきた。しかし、従来の炉心核・熱流動解析によって設定した炉内照射条件を入力し、「常陽」反射体を解析した計算値は実測値であるPIEデータと比較すると、湾曲方向が逆になるという問題があった。

そこで、本報では「常陽」反射体の照射変形に関わるPIEデータの分析及び集合体の炉内照射変形解析を通して「常陽」炉心内の集合体照射変形に使用する解析コード及び解析モデルの適用性、解析条件等について、検討した。

-
- 1) 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 (現 照射燃料試験室)
 - 2) 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
 - 3) 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 (現 ニュークリア・テクノロジー・インフラメント株式会社)

Improvement on Core Assembly Irradiation Bowing Analysis Method

-Irradiation Bowing Analysis of JOYO Inner Reflector-

A.Koizumi¹⁾ S.Kikuchi²⁾ K.Ito³⁾

Abstract

It is important to understand the deformation behaviors of core assembly in the aspect of the assembly life and the increase of removal load of assembly.

Therefore, deformation behaviors of core assembly code: "BEACON" was being developed in order to evaluate these behaviors.

However, there is a problem that the irradiation bowing modes and displacements of the JOYO assemblies obtained by the analysis were so different from the PIE data.

In this study, the analysis condition, the application of analysis code and model were investigated through analysis on the JOYO Inner Reflector assembly based on PIE data.

-
- 1) Fuels Monitoring Section , Fuels and Materials Division.
Irradiation Center , O-arai Engineering Center (Alpha-Gamma Section)
 - 2) Fuels Monitoring Section , Fuels and Materials Division.
Irradiation Center , O-arai Engineering Center
 - 3) Fuels Monitoring Section , Fuels and Materials Division.
Irradiation Center , O-arai Engineering Center (Nuclear Development Co. LTD)

目 次

1. 緒言	1
2. 照射後試験及び集合体変形解析コードの課題	2
2.1 照射後試験方法	2
2.2 照射後試験結果	2
2.3 解析コードの問題点と改良の進め方	2
3. 解析モデル及び解析条件	8
3.1 解析コード	8
3.2 解析モデル	8
3.2.1 ビームモデル	8
3.2.2 シェルモデル	9
3.3 解析条件	9
3.3.1 集合体残留湾曲のメカニズム	9
3.3.2 単体解析と群解析	9
3.3.3 変位境界条件	9
3.3.4 照射条件及び温度条件	10
3.3.5 材料物性値	10
3.3.6 パッド部バネ定数と初期ギャップ	10
3.3.7 温度分布、中性子分布	11
3.3.8 過重履歴	11
4. 解析コードと解析モデルの適用性検討	24
4.1 解析コードの検討	24
4.2 解析モデルの検討	26
4.3 解析コード間及び解析モデル比較評価のまとめ	27
5. 集合体湾曲解析評価上の課題と解析条件の検討	55
5.1 従来の集合体湾曲解析の課題	55
5.2 解析条件の検討	55
5.3 検討結果のまとめ	60

6. まとめ	81
7. 謝辞	82
8. 参考文献	82
Appendix	83

1. 緒言

集合体変形挙動を把握することは、集合体の寿命及び集合体引き抜き荷重の増加などを評価する観点から重要であり、炉心変形解析コード「BEACON」が開発されてきたが、「常陽」反射体を解析した計算値は、実測値である PIE データと比較すると、湾曲方向が逆になるという問題があった。

そこで、本報では「常陽」炉心構成要素の照射変形に関わる PIE データの分析及び集合体の炉内照射変形解析を通して、「常陽」炉心内の集合体照射変形に使用する解析コード及び解析モデルの適用性、解析条件等について、検討した。

本報の前半では「BEACON」自身もつコード上の特性がないかを確認するために、同一の解析モデル及び解析条件を使用して、汎用有限要素法解析コード「FINAS」¹⁾、炉心湾曲解析コード「RAINBOW」²⁾などの他コードとの比較を行なった。さらに、解析モデルの適用性を確認するため、「FINAS」のビームモデル^{*1}とシェルモデル^{*2}についての比較検討をした。

後半部分では、従来の集合体湾曲解析の課題を抽出し、PIE データを基に炉内の照射条件（温度場、拘束条件等）、スエリング式及びクリープ式、内部構造物（反射体要素）とラッパ管との相互作用の可能性等の解析条件について検討した。

※1 ビームモデル

集合体を線または棒状（ビーム）でモデル化したもの。（詳細は後述を参照）

※2 シェルモデル

集合体をシェル要素で分割することによりモデル化したもの。（詳細は後述を参照）

2. 照射後試験及び集合体変形解析コードの課題

2.1 照射後試験方法

集合体湾曲の測定方法を図 2.1-1 に示す。測定装置は、3 対の接触式のセンサーを持つ集合体寸法装置を用いた。変位方向（湾曲方向）については、MAX キー位置を基準とした。さらに、変位量（湾曲量）については図 2.1-1 に示すようにエントランスノズル下端より 570mm の位置にある球面座上部の溝部を基準として、変位量及び軸方向の測定を AD 対面、BE 対面、CF 対面の各集合体対面間について実施した。測定は 2 回ずつ実施し、それらを平均した座標データをベクトル合成することにより、集合体の湾曲方向及び湾曲量を求めた。なお、湾曲方向は反時計回りを基準に角度で定義した。

2.2 照射後試験結果

「常陽」MK-II 反射体 9 体について照射後試験（PIE）を実施した。そのうち、2 体が外側反射体、7 体が内側反射体である。照射後試験に供した反射体の残留湾曲量及び照射条件を表 2.2-1 に示す。また、図 2.2-1 に「常陽」炉心マップ内における各内側反射体の上部パッド部残留湾曲方向及び湾曲量を示す。中性子照射量と残留湾曲量の関係は、図 2.2-2 に示すように中性子照射量の増大に伴い残留湾曲量は増加する傾向にある。これら 7 体の内側反射体のうち最大値を示したのは NFRI0F の 33.7 mm ($6.87 \times 10^{22} \text{n/cm}^2$) であった。

2.3 解析コードの問題点と改良の進め方

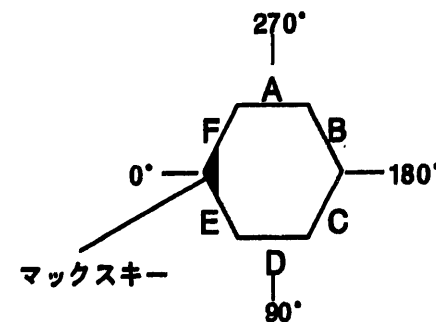
現行の炉心変形解析コード「BEACON」の解析結果と上記の照射後試験結果とでは、湾曲方向が逆になる等の問題点がある。そこで、解析結果が試験結果に近づくように解析コードの改良を行なった。解析対象とした反射体は、照射後試験に供された 7 体の内側反射体のうち、残留湾曲量が最大となった NFRI0F を選定した。解析コードの改良については、以下のことを主眼に進めることとした。

- ① 「BEACON」とその他の解析コード（「FINAS」、「RAINBOW」）の比較検討を行ない、「BEACON」で算出された解析結果の妥当性を確認する。
(第3章)
- ② 解析モデルとしては、シェルモデルとビームモデルという2種類の解析モデルがある。「BEACON」で使用している解析モデルは、ビームモデルであり、ビームモデルの集合体湾曲評価への適用性について検討する。そこで、最も汎用性の高い「FINAS」を使用し、シェルモデルとビームモデルについて解析モデル間の比較検討を行なう。
(第3章)
- ③ 「BEACON」で使用している解析条件（炉内温度分布、物性式など）について検討する。
(第4章)

表2.2-1 PIE実施反射体の残留湾曲量

反射体名	反射体種類	PIE NO.	照射サイクル	装荷位置	最大中性子照射量 n/cm ² (E≥0.1MeV)	上部パッド部残留湾曲量		中間パッド部残留湾曲量	
						湾曲量(mm)	湾曲方向(度)	湾曲量(mm)	湾曲方向(度)
NFR109	内側	95	0~7"	5C2	3.48×10^{22}	6.3	192	0.7	154
NFR10D	内側	A3	0~11	5D2	5.21×10^{22}	13.3	200	1.5	205
NFR101	内側	B7	0~13	5A2	6.26×10^{22}	20.0	206	2.3	213
NFR10X	内側	C9	0~16	6B4	5.96×10^{22}	19.5	174	1.8	163
NFRM02	外側	E1	0~20'	6C1	4.64×10^{22}	4.7	3	2.6	14
NFRM00	外側	G1	0~22	6A1	5.00×10^{22}	10.4	177	2.9	183
NFR11F	内側	H2	0~20'	6F2	5.76×10^{22}	30.1	215	3.6	215
RIN105	内側	J1	17~27	5F1	4.75×10^{22}	11.1	255	2.6	255
NFR10F	内側	J2	0~14	5D5	6.87×10^{22}	33.7	163	7.5	166

※湾曲方向は0° がマックスキーの方向とし、
反時計方向()に90°、180°、270°となる。



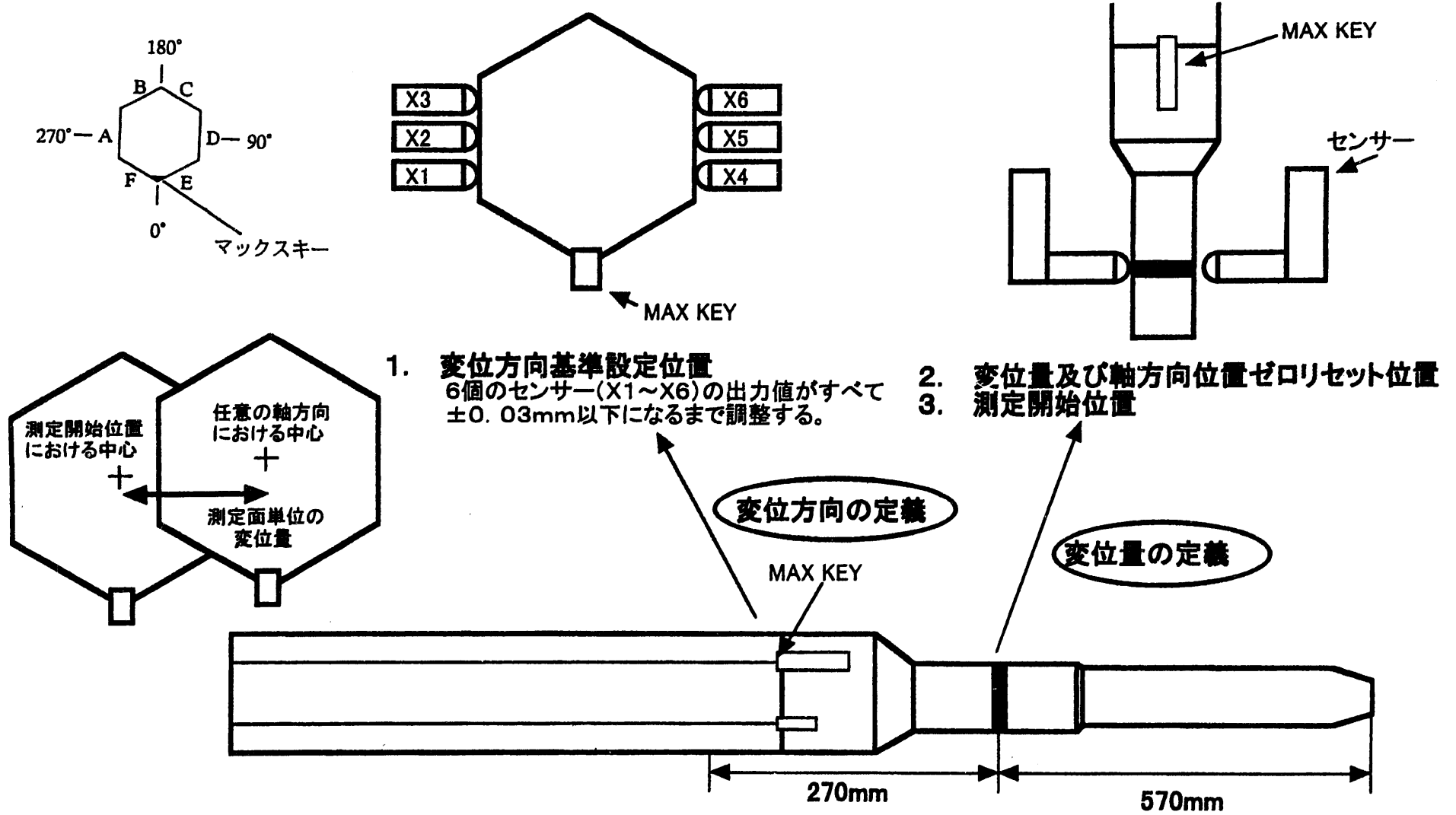


図2.1-1 集合体湾曲の測定方法

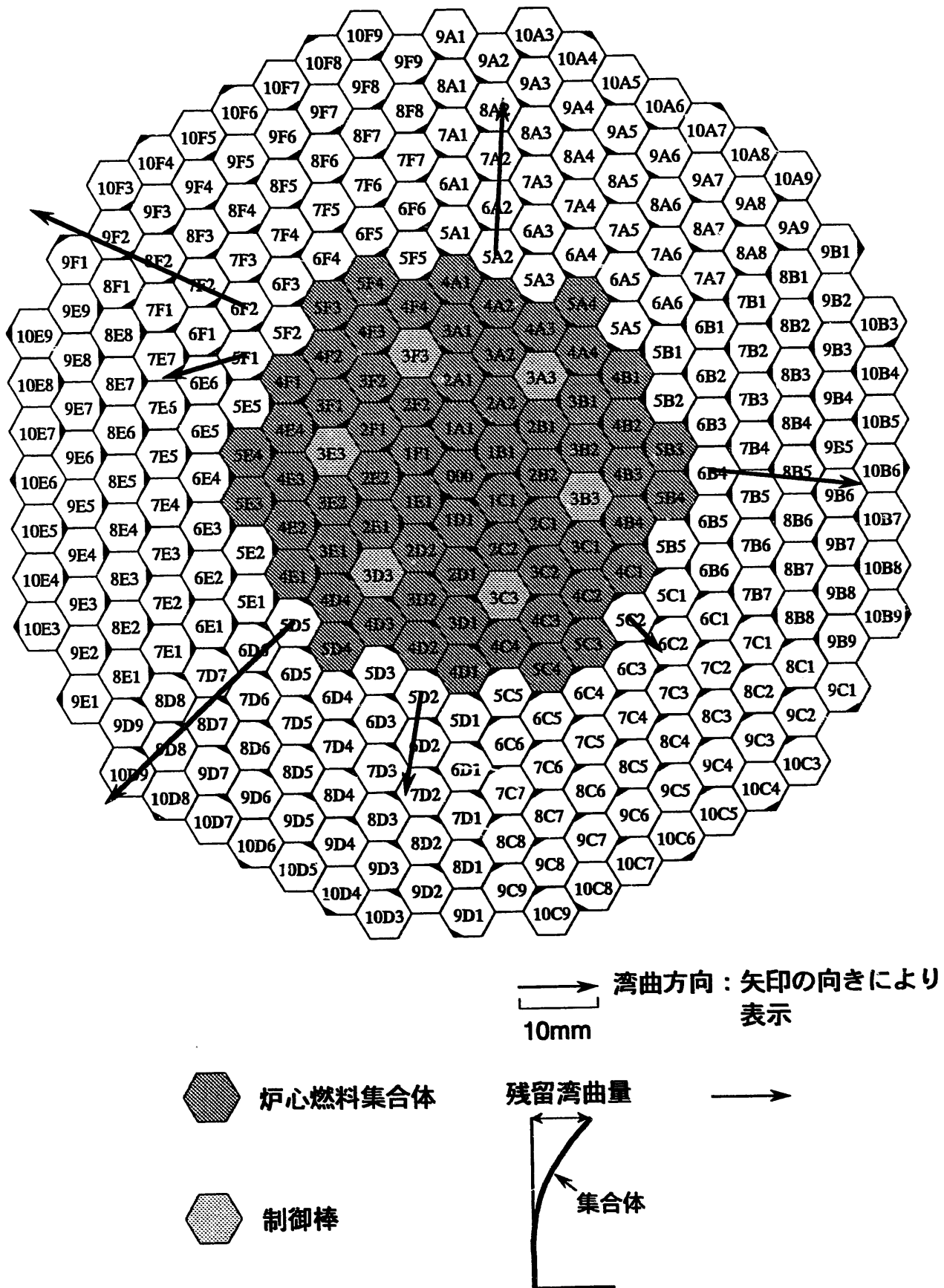


図2.2-1 内側反射体の照射後残留湾曲

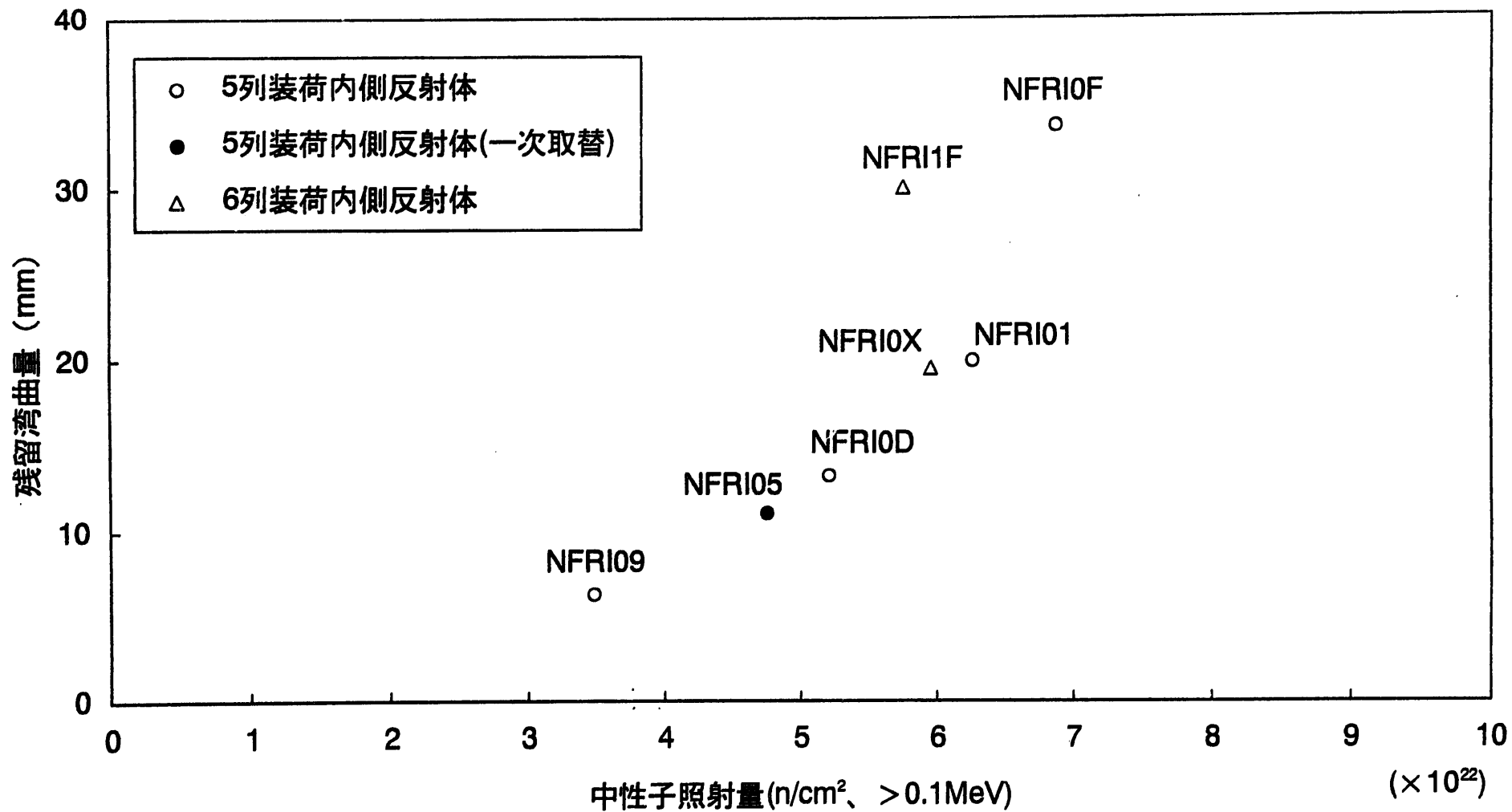


図2.2-2 中性子照射量と残留湾曲量の関係

3. 解析モデル及び解析条件

本報告で使用した解析コードの解析モデル、解析条件についての詳細を以下に示す。

3.1 解析コード

「BEACON」の解析結果の妥当性を確認するため、「BEACON」と他のコードとの比較検討をした。本報で使用した解析コードを以下に示す。

- ① 炉心変形解析コード「BEACON」
- ② 有限要素法解析コード「FINAS」¹⁾
- ③ 炉心湾曲解析コード「RAINBOW」²⁾

3.2 解析モデル

集合体変形の解析モデルは、集合体を線または棒状でモデル化したビームモデルと集合体をシェル要素で分割することによりモデル化したシェルモデルとに大別される。以下にこれらの解析モデルについて示す。

3.2.1 ビームモデル

ビームモデルは「BEACON」、「FINAS」、「RAINBOW」のすべての解析コードについて適用されている解析モデルである。ビームモデルの例として、図 3.2-1 に「BEACON」の反射体の形状・寸法図及びビーム要素の分割モデルを示す。図 3.2-1 に示すように「BEACON」については軸方向のビーム要素を 20 分割して、それぞれの分割した要素について解析値を求めた。なお、「FINAS」におけるビームモデルはパイプ要素で分割しているため、パイプモデルと一般に呼ばれている。また「FINAS」の使用要素は「PIPE3 要素 (3 節点配管要素)」及び「CONT2 要素 (2 節点接触要素)」とした。それぞれの解析コードにおける総節点数、総要素数等を表 3.2-1 に示す。

3.2.2 シェルモデル

シェルモデルは本解析において「FINAS」についてのみ適用した。「FINAS」シェルモデルの形状・寸法図及びシェル要素の分割モデルを図 3.2-2 に示す。シェルモデルの使用要素は「QFLA4S 要素（4 節点四辺形シェル要素）」及び「CONT2 要素（2 節点接触要素）」とした。またシェルモデルにおけるパッド部の接触要素のモデル化を図 3.2-3 に示す。

3.3 解析条件

3.3.1 集合体残留湾曲のメカニズム

集合体湾曲は炉内における中性子束及び温度勾配により生じるラッパ管対面間のスエリング差及び熱膨張差により生じると考えられている。湾曲した集合体が隣接集合体と相互干渉し集合体間の機械的相互作用が発生した場合には反力により照射クリープが生じる。そして、原子炉が停止すると、湾曲に及ぼす熱膨張の影響は取り除かれ、スエリング及び照射クリープによる歪が集合体の残留湾曲として発現する。これらの集合体残留湾曲のメカニズムを図 3.3-1 に示す。なお、本解析で使用したコードはすべてこのメカニズムを採用した。

3.3.2 単体解析と群解析

本解析では内側反射体一体を想定した単体解析を採用した。ただし、後述する「5.3 (2) 多集合体解析法との比較」においてのみ、内側反射体周辺の集合体について考慮した群解析を行ない、単体解析結果と群解析結果を比較検討した。

3.3.3 変位境界条件

本解析の変位境界条件は、以下のような 2 種類の条件を設定した。

- ①上部及び中間パッド部で一定の間隙をもって剛な壁に拘束される集合体拘束条件

- ②パッド部の拘束条件をはずして、反射体がエントランスノズル部のみで拘束されたフリースタANDING条件

なお、集合体拘束条件では図 3.3-2 に示すように上部パッド部の片側で約 5mm、中間パッド部においては上部パッド部と逆側の 1mm の間隙をもつ条件とした。

3.3.4 照射条件及び温度条件

炉内を想定した入力データとして、温度条件及び高速中性子照射条件をそれぞれ表 3.3-1、表 3.3-2 に示す。これらの条件は以前に「BEACON」で解析実績のあるデータを使用した。

3.3.5 材料物性値

本解析で使用了材料のヤング率ポアソン比、線膨張係数を表 3.3-3 に示す。またスエリング式、照射クリープ式については表 3.3-4 に示すものを使用した。

なお、ここでのスエリング式及び照射クリープ式は次章の「4.解析コードと解析モデルの適用性検討」において、使用したものである。「5. BEACON の課題と解析条件の検討」以降については、Appendix で示された最終報告の式を導入した。

3.3.6 パッド部バネ定数と初期ギャップ幅

単一集合体のパッド部におけるバネ定数は下記のとおりに設定した。

- ・ 中間パッド 1020 kg/mm
- ・ 上部パッド 7231 kg/mm

本解析では隣接集合体の接触を連成バネとして取扱い、入力値を以下のように設定した。

- ① ビームモデルではパッド 5 個分を直列バネとして扱い、単一集合体におけるバネ定数の 1/5 の値を入力値とした。

- ② シェルモデルではビームモデルと想定した状況は同一であるが、解析対象としている集合体のシェルモデル自体は伸縮を模擬しているため、その集合体を除く4個分のパッドを直列バネとして扱う。従って、単一集合体におけるバネ定数の1/4の値を入力値とした。さらに、各辺を4等分しているため、支配長さに応じた値を入力した。

以上のように設定したバネ定数と初期ギャップ幅を表 3.3-5 に示す。

3.3.7 温度分布、中性子束分布

図 3.3-3 に反射体温度のコンター図 (20℃からの増分値)、図 3.3-4 に中性子束分布をそれぞれ示す。これらはパイプ要素の積分点における値をシェル要素用に節点における値に補間したものである。

3.3.8 荷重履歴

照射開始から常温解放までの荷重履歴と解析ステップ数を図 3.3-5 に示す。

表3.2-1 解析モデルの要素

		BEACON	FINAS	RAINBOW
ビームモデル	総節点数		53	
	総要素数	20	32	20
	3節点配管要素(PIPE3)	-	20	-
	2節点接触要素(CONT2)	-	12	-
シェルモデル	総節点数		1512	
	総要素数		1500	
	4節点四辺形シェル要素(QFLA4S)		1440	
	2節点接触要素(CONT2)		60	

表3.3-1 温度条件

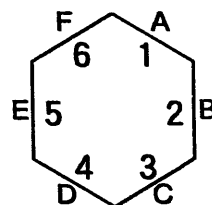
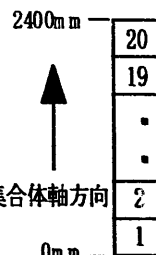
単位[°C]

軸 ノード	ラッパ管面番号					
	1	2	3	4	5	6
1	370.739	370.597	370.769	371.406	371.528	371.305
2	371.478	371.194	371.538	372.813	373.056	372.611
3	372.198	371.777	372.289	374.186	374.547	373.885
4	373.253	372.630	373.387	376.195	376.730	375.750
5	375.169	374.177	375.381	379.842	380.692	379.134
6	378.916	377.206	379.282	386.976	388.442	385.755
7	385.674	382.668	386.319	399.846	402.423	397.699
8	397.118	391.917	398.233	421.636	426.094	417.921
9	410.843	403.010	412.521	447.769	454.482	442.174
10	424.243	413.840	426.472	473.285	482.202	465.854
11	435.025	422.555	437.698	493.816	504.505	484.908
12	440.643	427.095	443.546	504.512	516.125	494.835
13	443.602	429.487	446.627	510.147	522.246	500.064
14	445.411	430.948	448.510	513.591	525.987	503.260
15	447.184	432.382	450.356	516.968	529.656	506.394
16	448.969	433.824	452.214	520.365	533.346	509.547
17	450.727	435.245	454.044	523.712	536.982	512.654
18	452.415	436.610	455.802	526.928	540.475	515.638
19	454.023	437.909	457.476	529.990	543.802	518.479
20	457.350	444.842	460.871	532.698	542.271	518.306

表3.3.2 高速中性子照射条件

単位[n/cm²・s]

軸 ノード	ラッパ管面番号					
	1	2	3	4	5	6
1	6.004E+13	5.222E+13	5.719E+13	7.810E+13	9.207E+13	8.355E+13
2	6.004E+13	5.222E+13	5.719E+13	7.810E+13	9.207E+13	8.355E+13
3	6.004E+13	5.222E+13	5.719E+13	7.810E+13	9.207E+13	8.355E+13
4	1.025E+14	8.919E+13	9.769E+13	1.334E+14	1.573E+14	1.427E+14
5	1.945E+14	1.691E+14	1.852E+14	2.530E+14	2.982E+14	2.706E+14
6	3.174E+14	2.761E+14	3.024E+14	4.129E+14	4.868E+14	4.417E+14
7	7.010E+14	6.097E+14	6.678E+14	9.119E+14	1.075E+15	9.755E+14
8	9.571E+14	8.325E+14	9.117E+14	1.245E+15	1.468E+15	1.332E+15
9	1.025E+15	8.911E+14	9.760E+14	1.333E+15	1.571E+15	1.426E+15
10	8.771E+14	7.629E+14	8.356E+14	1.141E+15	1.345E+15	1.221E+15
11	5.770E+14	5.019E+14	5.497E+14	7.507E+14	8.850E+14	8.030E+14
12	3.195E+14	2.779E+14	3.044E+14	4.156E+14	4.900E+14	4.446E+14
13	1.589E+14	1.382E+14	1.514E+14	2.067E+14	2.437E+14	2.211E+14
14	8.284E+13	7.205E+13	7.891E+13	1.078E+14	1.270E+14	1.153E+14
15	8.284E+13	7.205E+13	7.891E+13	1.078E+14	1.270E+14	1.153E+14
16	8.284E+13	7.205E+13	7.891E+13	1.078E+14	1.270E+14	1.153E+14
17	8.284E+13	7.205E+13	7.891E+13	1.078E+14	1.270E+14	1.153E+14
18	8.284E+13	7.205E+13	7.891E+13	1.078E+14	1.270E+14	1.153E+14
19	8.284E+13	7.205E+13	7.891E+13	1.078E+14	1.270E+14	1.153E+14
20	8.284E+13	7.205E+13	7.891E+13	1.078E+14	1.270E+14	1.153E+14



(ラッパ管面番号)

表 3.3-3 ヤング率、ポアソン比、線膨張係数

ヤング率 [kg/mm ²]	ポアソン比	平均線膨張係数 (温度依存) [1/°C]
1.72 × 10 ⁴	0.3	16.5 × 10 ⁻⁶ + 3.0 × 10 ⁻⁹ T

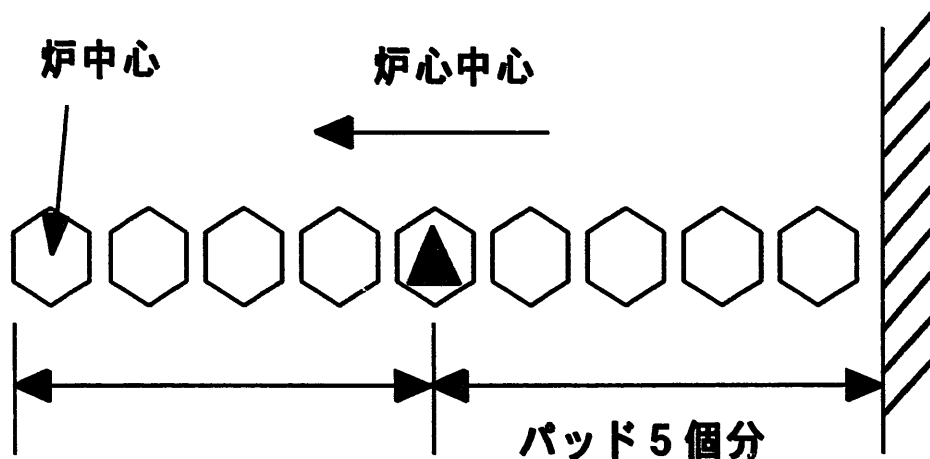
T: 温度[°C]

表 3.3-4 スエリング式、照射クリープ式

スエリング式	照射クリープ式
$\Delta V/V = R \left\{ \Phi t + \frac{1}{\alpha} \ln \left[\frac{(1 + \exp[\alpha(\tau - \Phi t)])}{1 + \exp(\alpha\tau)} \right] \right\}$	$k = B_0 \Phi t + DS [kg/mm^2]^{-1}$
$R = \exp(0.0419 + 1.498\beta + 0.122\beta^2 - 0.332\beta^3 - 0.441\beta^4)$	$B_0 = 4.16 \times 10^{-27} [kgf \cdot mm^2 \cdot n \cdot cm^2]^{-1}$
$\beta = (T - 463)/100$	$D = 6.01 \times 10^{-2} [kgf \cdot mm^2]$
$\alpha = 0.3$	S: スエリング [Volume fraction]
$\tau = 8.3$	Φ t: 高速中性子照射量
$\Phi t: \text{高速中性子照射量}$ $[n/cm^2, E > 0.1MeV]$	$[n/cm^2, E > 0.1MeV]$

表3.3-5 バネ定数、初期ギャップ

モデル	ビームモデル		シェルモデル			
	中間パッド	上部パッド	中間パッド		上部パッド	
			辺端点	辺中間点	辺端点	辺中間点
バネ定数(kg/mm)	205.0	1446.0	31.875	63.750	225.969	451.938
初期ギャップ(mm)	0.9	5.0	0.9	0.9	5.0	5.0



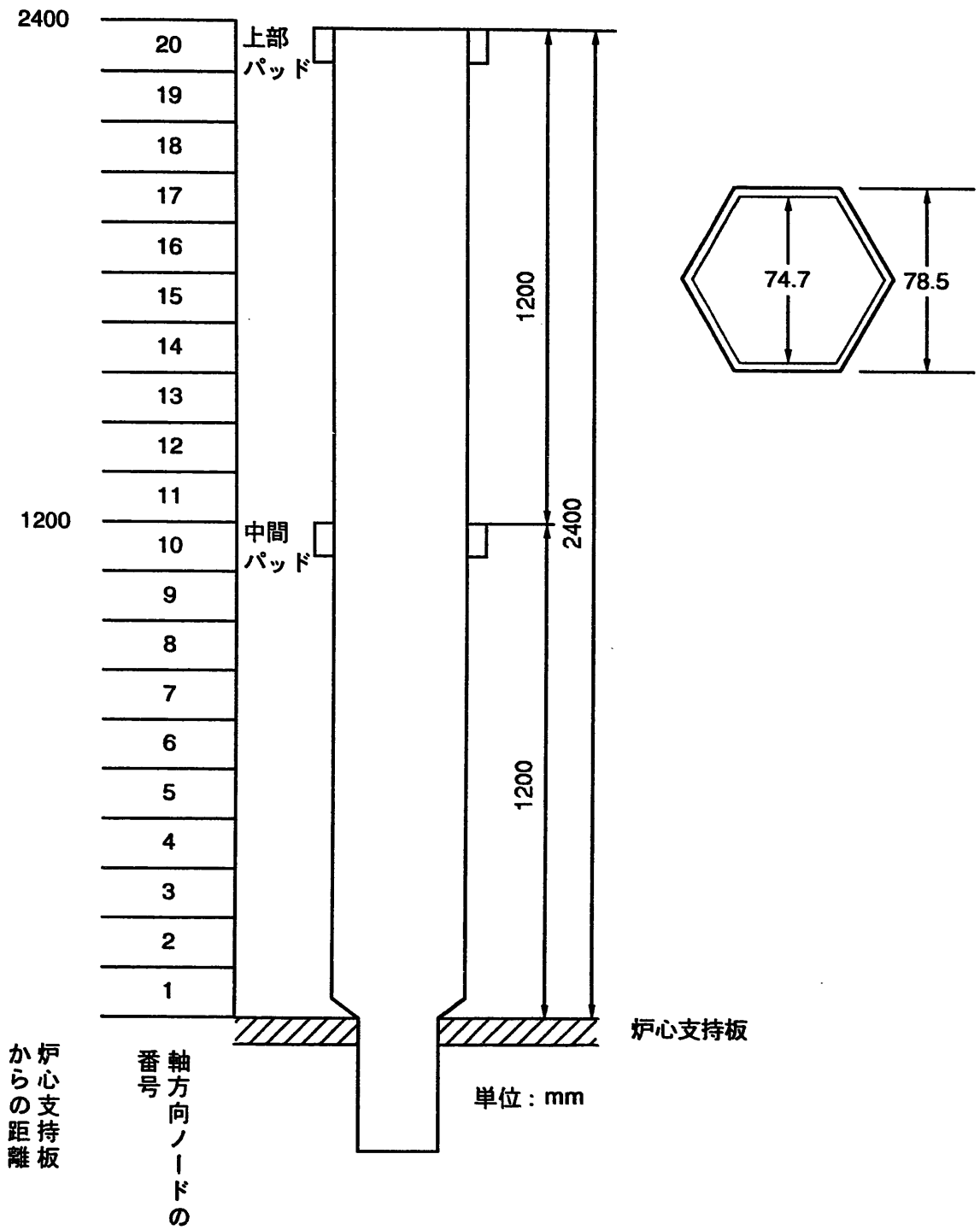


図3.2-1 「BEACON」 ビームモデルの形状・寸法

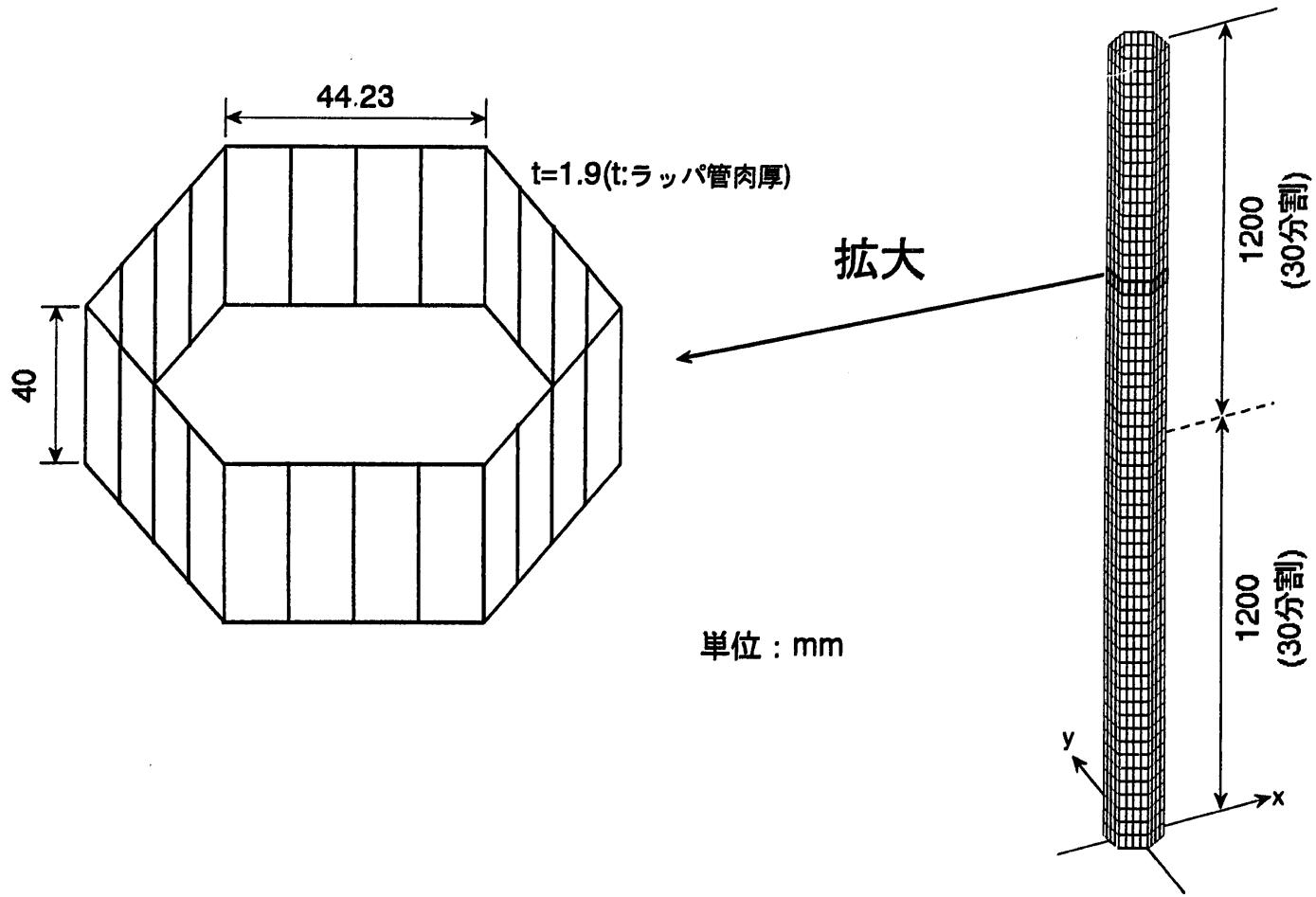


図3.2-2 「FINAS」シェルモデルの形状・寸法図

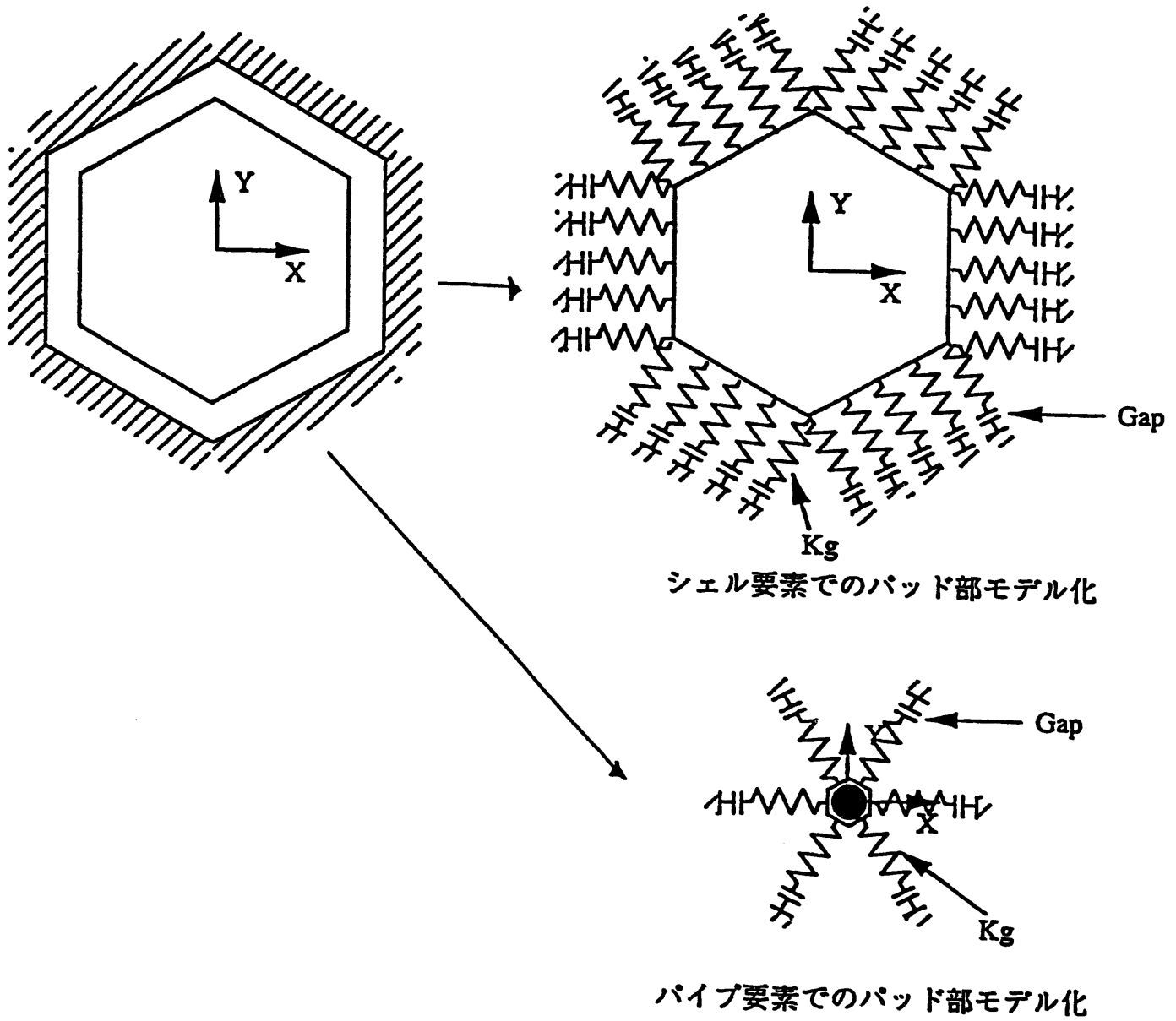


図3.2-3 パッド部のモデル化

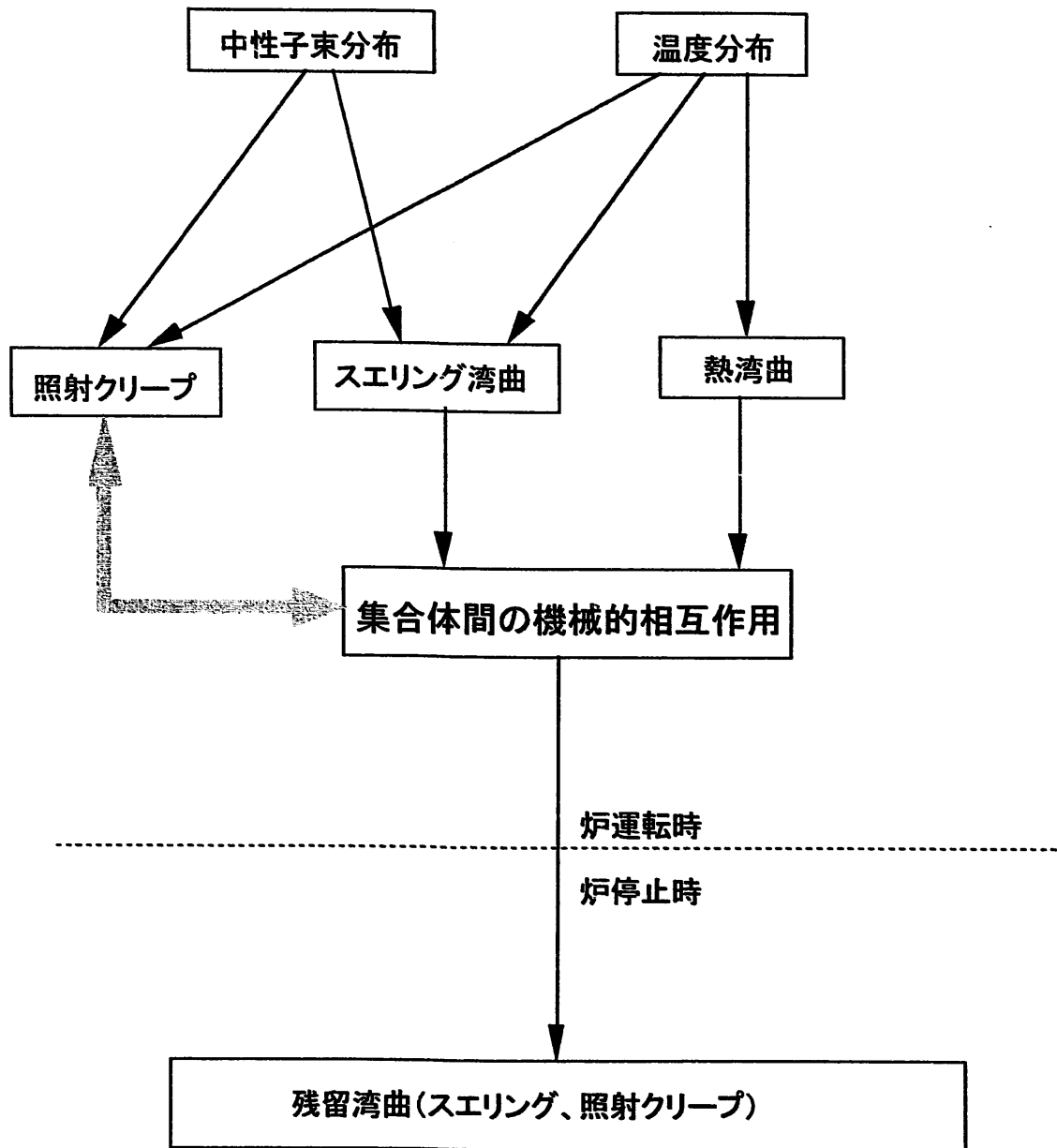


図3. 3-1 集合体湾曲メカニズム

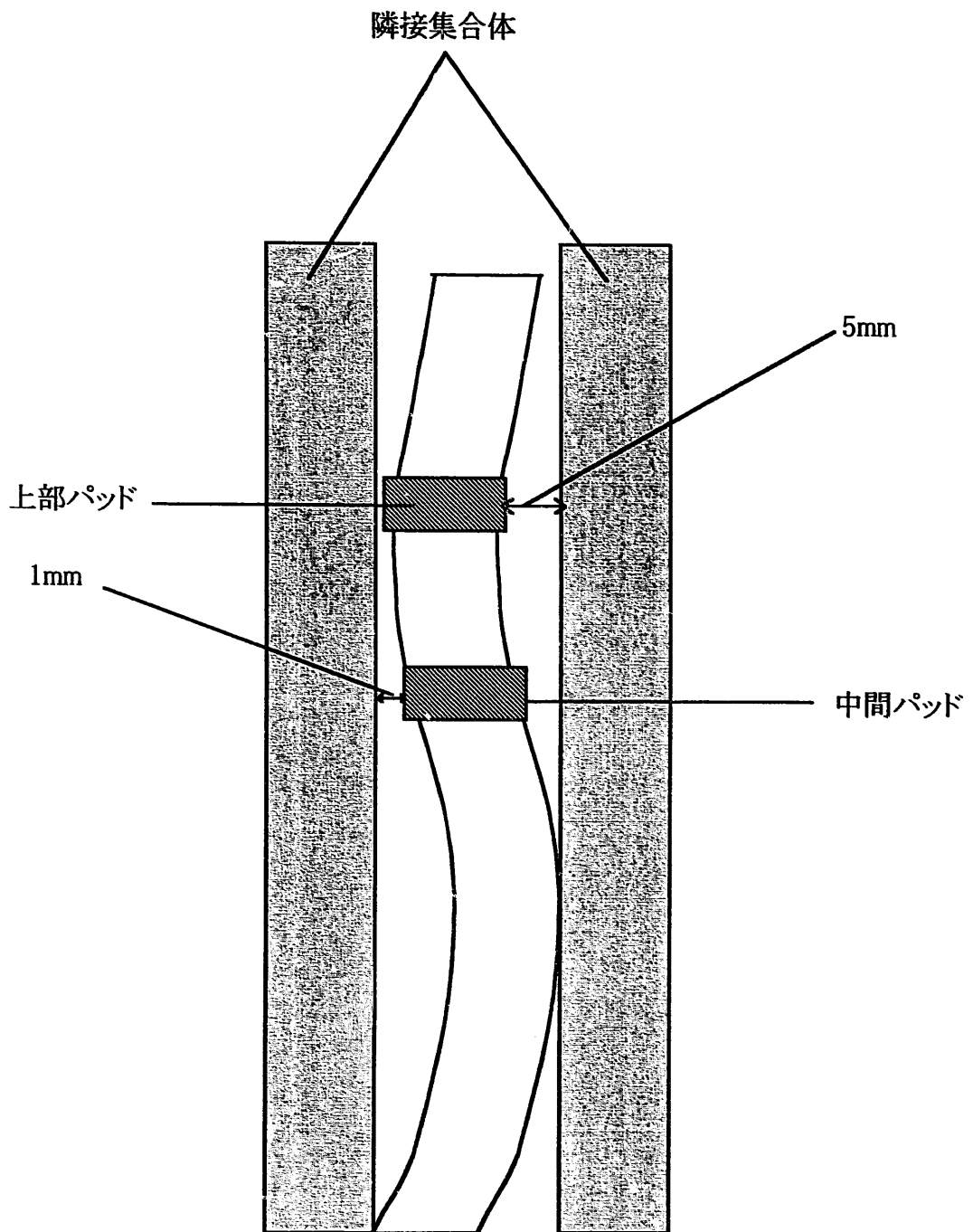


図3. 3-2 湾曲集合体の拘束条件

STEP = 1

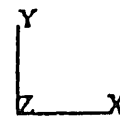
GVAL PAINT COMP = [1:TEMP]

AXIS: Z X Y

R = 0.0

S = 0.0

T = 0.0



TIME = 0.0000 []

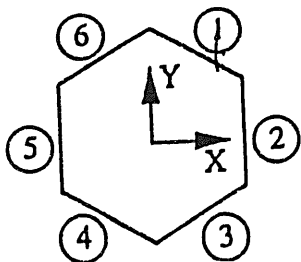
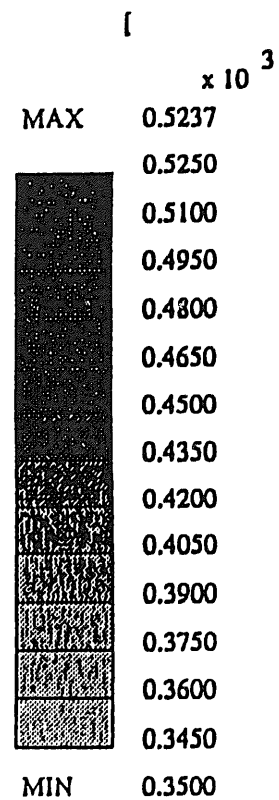
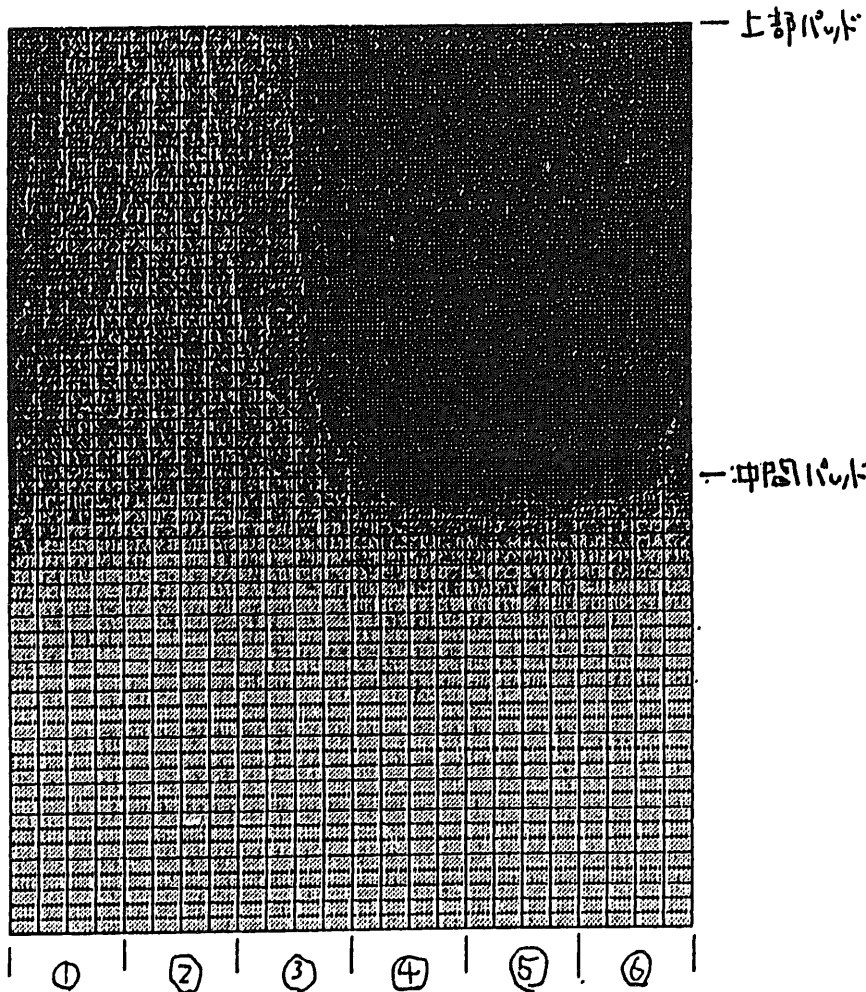


図 3.3-3 反射体温度コンター図 (20°Cからの増分)

GEOM. SCALE []
x 10³
0.2020

CRC/ATLAS

Vcr.950402

STEP = 1

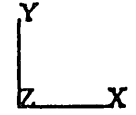
GVAL PAINT COMP = [2:FLUX]

AXIS : Z X Y

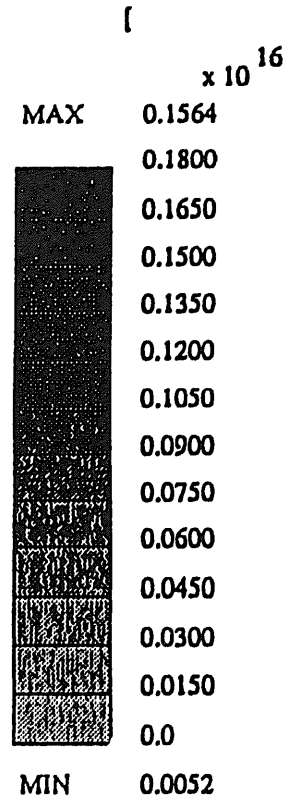
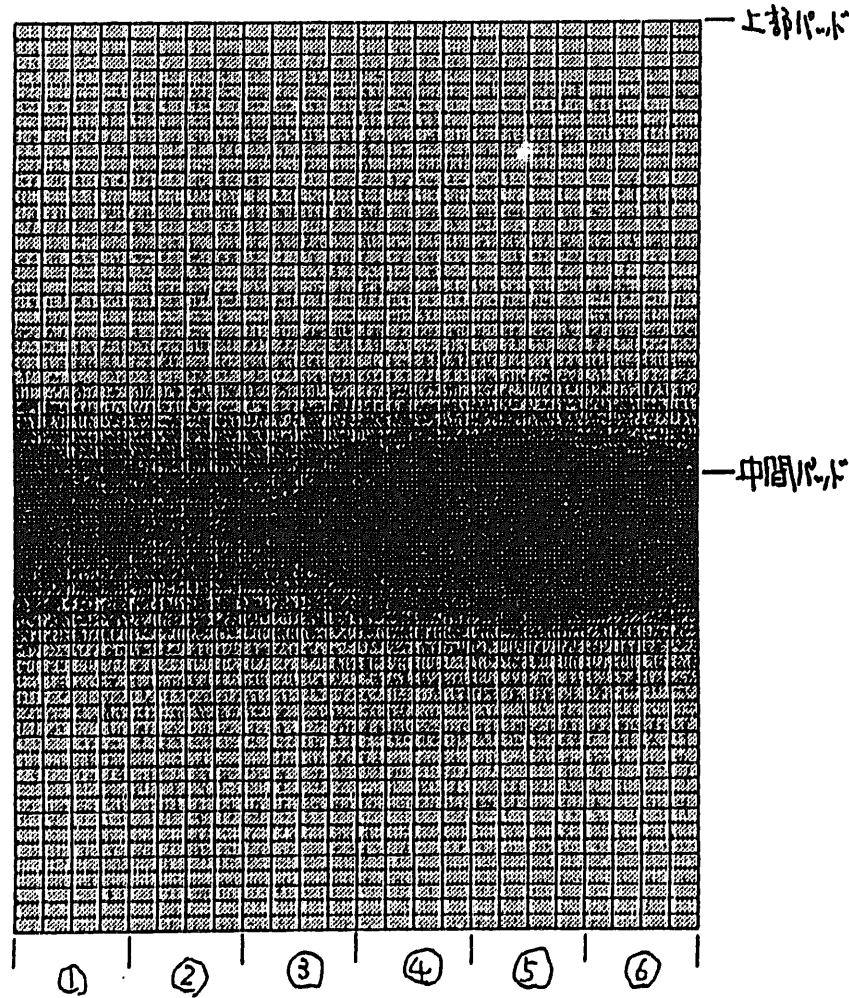
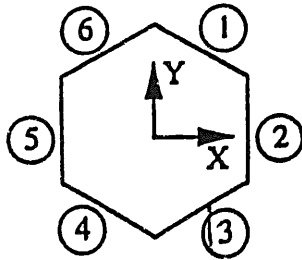
R = 0.0

S = 0.0

T = 0.0



TIME = 0.0000 []



GEOM. SCALE [] x 10^3

图 3.3-4 中性子分布

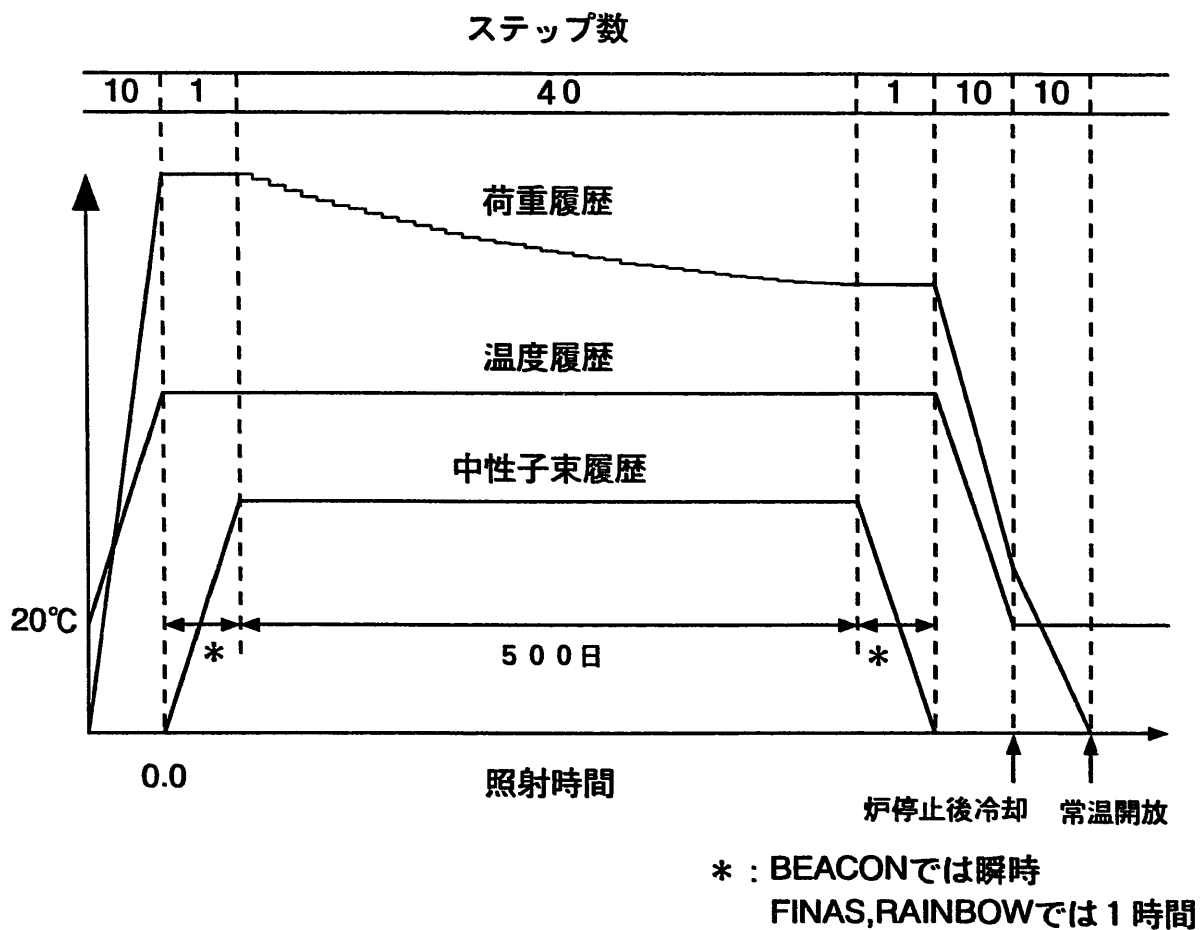


図3.3-5 荷重履歴(例)とステップ分割数

4. 解析コードと解析モデルの適用性検討

既存解析コードの「BEACON」と他の解析コード及び解析モデルについて比較を行い、「BEACON」についての解析コード及び解析モデルの適用性を検討する。

4.1 解析コードの検討

「BEACON」と他の解析コードである「FINAS」、「RAINBOW」とを比較して、解析コードの適用性を検討した。解析条件は前章で設定した照射条件、物性値、拘束条件を使用した。なお、拘束条件については集合体拘束条件下とフリースタANDING下での2つの条件についてそれぞれ解析を実施した。また解析モデルはすべての解析コードにおいてビームモデルで統一した。

「BEACON」、「FINAS」、「RAINBOW」のそれぞれの解析コードの解析結果を以下に示す。解析結果は集合体拘束条件下とフリースタANDING条件下における単体集合体解析（単体解析）の結果である。

(1) 集合体拘束条件下

① 「BEACON」

「BEACON」ビーム要素による反射体湾曲解析の結果を図 4.1-1～図 4.1-3 に示す。また、これらのまとめを表 4.1-1 に示す。

② 「FINAS」

「FINAS/PIPE3」要素による反射体湾曲解析の結果を図 4.1-4～図 4.1-10 に示す。また、これらのまとめを表 4.1-2 に示す。

③ 「RAINBOW」

「RAINBOW」ビーム要素による反射体湾曲解析の結果を図 4.1-11 に示す。また、これらのまとめを表 4.1-3 に示す。

(2) フリースタANDING条件下

① 「BEACON」

「BEACON」ビーム要素による反射体湾曲解析の結果を図 4.1-12 に示す。

また、これらのまとめを表 4.1-4 に示す。

② 「FINAS」

「FINAS/PIPE3」要素による反射体湾曲解析の結果を図 4.1-13 に示す。

また、これらのまとめを表 4.1-5 に示す。

③ 「RAINBOW」

「RAINBOW」ビーム要素による反射体湾曲解析の結果をビーム要素数 20、100 にした場合について、それぞれ図 4.1-14,15 に示す。また、これらのまとめを表 4.1-6、表 4.1-7 に示す。

(3) 上部パッド部の変位量

表 4.1-8 に集合体拘束条件下における各解析コードによる上部パッド部変位量を示す。さらに、表 4.1-9 にフリースタANDING条件下における変位量を示す。「BEACON」、 「FINAS」 及び「RAINBOW」のビームモデルによる上部パッド部変位量に若干の差は見られるものの、変位の傾向については、ほぼ同等であると考えられる。従って、同一の解析モデル及び解析条件を使用した場合、各解析コードによる解析結果の差異は認められなかった。

4.2 解析モデルの検討

ここでは解析コードに「FINAS」を使用し、ビームモデルとシェルモデルを適用した場合におけるそれぞれの解析結果の比較から、解析モデルの適用性を検討をした。ビームモデルには「FINAS/PIPE3」要素、シェルモデルには「FINAS/QFLA4S」要素を使用した。集合体拘束条件下とフリースタANDING条件下における単体集合体解析（単体解析）の結果を以下に示す。なお、シェルモデルの解析結果（パッド位置での変位量）は、パッド高さの接点（24点）の変位量の平均値とした。

(1) 集合体拘束条件下

① ビームモデル

ビームモデルの解析結果については、前述の「FINAS」パイプモデルの解析結果と同様であり、図 4.1-4～図 4.1-10 に示すとおりである。

② シェルモデル

シェルモデルによる反射体湾曲解析の結果を図 4.2-1～図 4.2-10 に示す。また、表 4.2-1 にこれらの解析結果のまとめを示す。

(2) フリースタANDING条件下

① ビームモデル

ビームモデルの解析結果については、前述の「FINAS」パイプモデルの解析結果と同様であり、図 4.1-13 に示すとおりである。

② シェルモデル

シェルモデルによる反射体湾曲解析の結果を図 4.2-11～図 4.2-16 に示す。また、表 4.2-2 にこれらの解析結果のまとめを示す。

(3) 上部パッド部の変位量

前述の表 4.1-8 に集合体拘束条件下での「FINAS」のビームモデルとシェルモデルにおける上部パッド部変位量が示されている。同様に表 4.1-9 にフリースタANDING下における解析モデルの比較が示されている。これらの結果から、「FINAS」のビームモデルとシェルモデルによる上部パッド部変位量については、両者の差はほとんどないことがわかった。従って、解析モデルの簡略化、計算時間の短縮等の観点から、ビームモデルによる集合体湾曲変形のモデル化は有効であると考えられ、「BEACON」にビームモデルを適用することは妥当であると言える。

4.3 解析コード及び解析モデル比較評価のまとめ

「BEACON」、「FINAS」、「RAINBOW」の各解析コードにおいて、同一の解析モデル及び解析条件を使用した場合には、それらの結果に顕著な差異は認められなかった。また、「FINAS」のビームモデルとシェルモデルの解析結果から、解析モデルの相違による結果の差異は認められず、簡略なモデルであるビームモデルが有効であることが確認された。

以上から、「BEACON」ビームモデルは反射体湾曲解析に有効であるとの知見を得た。また、上記の各解析コードの比較結果から、「BEACON」のコード自体の改良は、湾曲メカニズムの考え方等の評価上の見なおしを除いて、今後大幅に行なう必要はないと考える。なお、集合体湾曲解析評価上の課題の抽出及び見なおしの詳細については次章で検討する。

表4.1-1 「BEACON」(ビーム要素)を用いた残留湾曲と接触荷重(集合体拘束条件下)

照射量 n/cm ² (×10 ²²)	中間パッド		上部パッド		接触荷重(kgf)											
	変位置 (mm)	方向 (°)	変位置 (mm)	方向 (°)	(1-1)中間 free ^{*1}	(1-1)上部 free	(1-2)中間 free	(1-2)上部 free	(2-1)中間 free	(2-1)上部 free	(2-2)中間 free	(2-2)上部 free	(3-1)中間 0.9 ^{*2}	(3-1)上部 free	(3-2)中間 free	(3-2)上部 5.0 ^{*2}
0.00	1.68	296.3	5.30	140.4									170.8			83.7
0.51	1.50	295.9	5.29	140.5									133.2			64.6
1.02	1.36	295.6	5.28	140.6									107.1			51.2
1.53	1.27	295.5	5.27	140.5									89.8			42.3
2.05	1.22	295.6	5.26	140.4									79.4			36.7
2.56	1.18	295.9	5.25	140.1									74.2			33.6
3.07	1.17	296.3	5.23	139.6									72.5			32.4
3.58	1.16	296.9	5.21	139.0									73.3			32.3
4.09	1.16	297.7	5.18	138.2									75.7			33.0
4.60	1.17	298.6	5.15	137.2									78.8			34.2
5.12	1.18	299.6	5.12	135.9									82.2			35.5
炉停止後冷却	1.14	305.1	11.01	302.3									12.0			0.0
常温解放	2.11	302.7	13.46	301.9									0.0			0.0

*1: 拘束棒との接触なし

*2: 拘束棒とのギャップ量(mm)

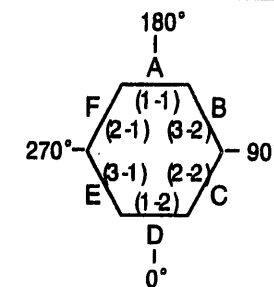


表4.1-2 FINAS(PIPE3要素)を用いた湾曲と接触荷重 (集合体拘束条件下)

照射量 n/cm ² (×10 ²²)	中間パッド		上部パッド		接触荷重(kgf)												
	変位量 (mm)	方向 (°)	変位量 (mm)	方向 (°)	①-中間	①-上部	②-中間	②-上部	③-中間	③-上部	④-中間	④-上部	⑤-中間	⑤-上部	⑥-中間	⑥-上部	
0.00	1.68	177.5	5.30	17.5				77.2					158.0				
0.51	1.46	177.0	5.28	17.2				55.6					113.5				
1.02	1.35	176.9	5.26	16.9				44.6					91.0				
1.53	1.28	177.0	5.24	16.5				37.4					76.7				
2.05	1.24	177.1	5.23	16.1				33.0					68.2				
2.56	1.21	177.4	5.21	15.6				30.6					63.9				
3.07	1.21	177.8	5.20	15.0				29.5					62.5				
3.58	1.21	178.2	5.18	14.2				29.5					63.1				
4.09	1.22	178.8	5.16	13.3				30.0					65.1				
4.60	1.23	179.4	5.14	12.3				31.0					67.9				
5.12	1.25	179.9	5.12	11.0				32.1					71.1				
炉停止後冷却	0.43	11.1	5.05	172.7				0.0					0.0	10.2			
常温解放	1.66	177.1	11.69	176.9				0.0					0.0				

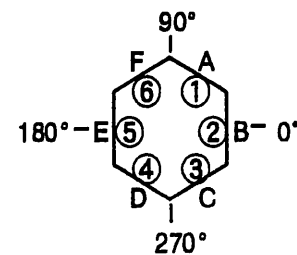


表4.1-3 「RAINBOW」(20ビーム要素)を用いた湾曲と接触荷重(集合体拘束条件下)

上部パッド

照射量 n/cm ² (×10 ²³)	変位 mm		角度 °	変位量 mm	荷重 kg
	X	Y			
0.00	-5.05	1.60	-17.55	5.29	68.0
0.51	-5.04	1.59	-17.46	5.28	60.0
1.02	-5.04	1.57	-17.34	5.28	54.8
1.53	-5.03	1.56	-17.18	5.27	51.4
2.05	-5.03	1.54	-17.01	5.26	49.1
2.56	-5.03	1.50	-16.61	5.25	47.8
3.07	-5.03	1.46	-16.21	5.24	47.0
3.58	-5.03	1.42	-15.71	5.23	46.7
4.09	-5.03	1.36	-15.15	5.21	46.7
4.60	-5.03	1.29	-14.34	5.19	47.3
5.12	-5.03	1.19	-13.34	5.17	47.9
炉停止後冷却	5.00	-0.41	- 4.63	5.02	2.3 *
常温開放	6.49	-0.41	- 3.57	6.50	0.0

*: 0° 側

中間パッド

照射量 n/cm ² (×10 ²³)	変位 mm		角度 °	変位量 mm	荷重 kg
	X	Y			
0.00	1.57	0.08	3.02	1.57	136.9
0.51	1.50	0.08	3.10	1.50	121.3
1.02	1.45	0.08	3.09	1.45	111.5
1.53	1.42	0.08	3.03	1.42	105.4
2.05	1.40	0.07	2.91	1.40	101.4
2.56	1.39	0.07	2.72	1.39	99.7
3.07	1.39	0.06	2.48	1.39	98.9
3.58	1.39	0.05	2.15	1.39	99.1
4.09	1.39	0.05	1.85	1.39	100.0
4.60	1.40	0.04	1.43	1.40	102.1
5.12	1.41	0.02	0.93	1.41	104.4
炉停止後冷却	0.82	-0.06	-4.19	0.82	0.0
常温開放	1.29	-0.06	-2.67	1.29	0.0

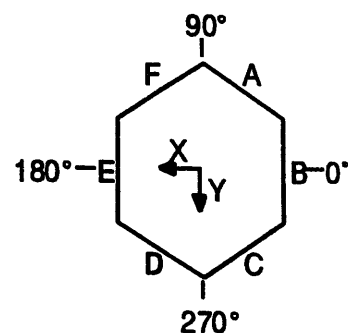


表4.1-4 「BEACON」(ビーム要素)を用いた残留湾曲と接触荷重(フリースタANDING条件下)

照射量 n/cm ² (×10 ²²)	中間パッド		上部パッド		接触荷重(kgf)											
	変位置 (mm)	方向 (°)	変位置 (mm)	方向 (°)	(1-1)中間 free ¹	(1-1)上部 free	(1-2)中間 free	(1-2)上部 free	(2-1)中間 free	(2-1)上部 free	(2-2)中間 free	(2-2)上部 free	(3-1)中間 free	(3-1)上部 free	(3-2)中間 free	(3-2)上部 free
0.00	1.46	124.3	24.80	124.3												
0.51	1.58	123.8	26.29	124.1												
1.02	1.72	123.3	27.99	123.8												
1.53	1.89	122.8	29.94	123.5												
2.05	2.09	122.4	32.17	123.3												
2.56	2.32	121.9	34.72	123.0												
3.07	2.59	121.4	37.63	122.7												
3.58	2.91	121.0	40.93	122.3												
4.09	3.27	120.5	44.68	122.0												
4.60	3.68	120.2	48.91	121.7												
5.12	4.16	119.8	53.66	121.4												
炉停止後冷却	2.70	117.4	28.92	119.0												

*1: 拘束棒との接触なし

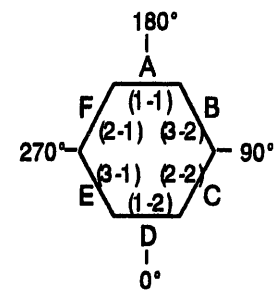


表4.1-5 FINAS(PIPE3要素)を用いた残留湾曲と接触荷重 (フリースタANDING)

照射量 n/cm ² (×10 ²²)	中間パッド		上部パッド		接触荷重(kgf)											
	変位置 (mm)	方向 (°)	変位置 (mm)	方向 (°)	①-中間	①-上部	②-中間	②-上部	③-中間	③-上部	④-中間	④-上部	⑤-中間	⑤-上部	⑥-中間	⑥-上部
0.00	1.17	4.0	23.22	4.0												
0.51	1.26	3.5	24.63	3.7												
1.02	1.36	3.0	26.22	3.4												
1.53	1.48	2.5	28.02	3.1												
2.05	1.62	2.0	30.06	2.8												
2.56	1.78	1.6	32.37	2.5												
3.07	1.97	1.2	34.99	2.2												
3.58	2.18	0.8	37.94	1.9												
4.09	2.42	0.4	41.27	1.6												
4.60	2.70	0.0	44.99	1.3												
5.12	3.01	0.3	49.15	1.1												
伊停止後冷却	1.84	3.0	25.99	1.6												

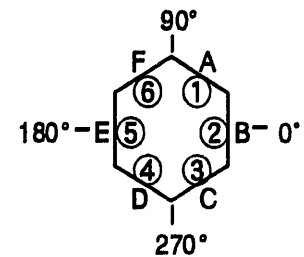


表4.1-6 「RAINBOW」(20ビーム要素)を用いた残留湾曲と接触荷重
(フリースタANDING)

上部パッド

照射量 n/cm ² (×10 ²²)	変位 mm		角度 °	変位量 mm
	X	Y		
0.00	-21.47	1.60	-4.25	21.53
0.51	-22.55	1.57	-3.99	22.60
1.02	-23.76	1.56	-3.77	23.81
1.53	-25.15	1.54	-3.49	25.20
2.05	-26.71	1.52	-3.25	26.75
2.56	-28.48	1.47	-2.95	28.52
3.07	-30.52	1.40	-2.63	30.55
3.58	-32.73	1.38	-2.41	32.76
4.09	-35.30	1.26	-2.05	35.32
4.60	-37.91	1.27	-1.91	37.93
5.12	-40.64	1.26	-1.77	40.66
炉停止後冷却	-17.62	-0.86	2.80	17.64

中間パッド

照射量 n/cm ² (×10 ²²)	変位 mm		角度 °	変位量 mm
	X	Y		
0.00	-1.12	0.08	-4.25	1.12
0.51	-1.19	0.08	-3.82	1.19
1.02	-1.27	0.08	-3.44	1.27
1.53	-1.36	0.07	-3.01	1.36
2.05	-1.47	0.07	-2.60	1.47
2.56	-1.59	0.06	-2.17	1.59
3.07	-1.74	0.05	-1.71	1.74
3.58	-1.90	0.04	-1.34	1.90
4.09	-2.08	0.03	-0.94	2.08
4.60	-2.29	0.03	-0.78	2.29
5.12	-2.50	0.03	-0.64	2.50
炉停止後冷却	-1.31	-0.08	3.32	1.31

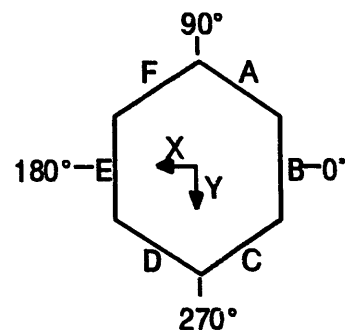


表4.1-7 「RAINBOW」(100ビーム要素)を用いた残留湾曲と接触荷重
(フリースタANDING)

上部パッド

照射量 n/cm ² (×10 ²²)	変位 mm		角度 °	変位量 mm
	X	Y		
0.00	-21.44	1.59	-4.25	21.50
0.51	-22.53	1.57	-3.99	22.58
1.02	-23.74	1.56	-3.76	23.79
1.53	-25.13	1.53	-3.49	25.18
2.05	-26.71	1.51	-3.24	26.75
2.56	-28.49	1.46	-2.94	28.53
3.07	-30.53	1.40	-2.63	30.56
3.58	-32.76	1.36	-2.38	32.79
4.09	-35.37	1.21	-1.96	35.39
4.60	-38.01	1.19	-1.79	38.03
5.12	-41.02	1.22	-1.70	41.04
炉停止後冷却	-18.05	-1.01	3.20	18.08

中間パッド

照射量 n/cm ² (×10 ²²)	変位 mm		角度 °	変位量 mm
	X	Y		
0.00	-1.10	0.08	-4.25	1.11
0.51	-1.17	0.08	-3.82	1.17
1.02	-1.25	0.07	-3.43	1.25
1.53	-1.34	0.07	-3.00	1.34
2.05	-1.45	0.07	-2.58	1.45
2.56	-1.57	0.06	-2.14	1.57
3.07	-1.71	0.05	-1.68	1.71
3.58	-1.87	0.04	-1.32	1.87
4.09	-2.05	0.03	-0.84	2.05
4.60	-2.26	0.02	-0.59	2.26
5.12	-2.49	0.02	-0.40	2.49
炉停止後冷却	-1.34	-0.08	3.40	1.34

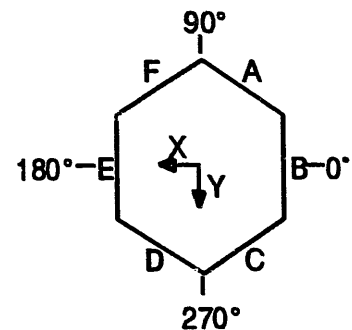


表4.1-8 各コードによる上部パッド部変位量の比較 (集合体拘束条件下)

照射量 n/cm ² (×10 ²³)	BEACON(ビーム)		FINAS(ビーム)		RAINBOW(ビーム)		FINAS(シェル)	
	変位量(mm)	方向(°)	変位量(mm)	方向(°)	変位量(mm)	方向(°)	変位量(mm)	方向(°)
0.00	5.30	140.4	5.30	137.5	5.29	102.5	5.12	136.3
1.02	5.28	140.6	5.26	136.9	5.28	102.7	5.02	135.7
2.05	5.26	140.4	5.23	136.1	5.26	103.0	4.99	135.1
3.07	5.23	139.6	5.20	135.0	5.24	103.8	4.97	134.2
4.09	5.18	138.2	5.16	133.3	5.21	104.9	4.95	132.8
5.12	5.12	135.9	5.12	131.0	5.17	106.7	4.93	130.5
冷却	5.26	304.9	5.05	292.7	5.02	295.4	5.15	290.9
解放	13.46	301.9	11.69	296.9	6.50	296.4	11.93	296.1

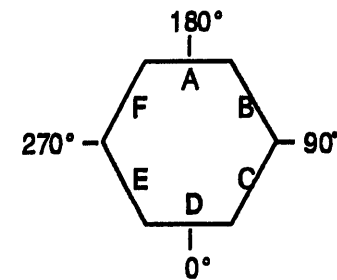


表4.1-9 各コードによる上部パッド部変位置の比較 (フリースタANDING条件下)

照射量 $n/cm^2(\times 10^{23})$	BEACON(ビーム)		FINAS(ビーム)		RAINBOW(ビーム)		FINAS(シェル)	
	変位置(mm)	方向($^{\circ}$)	変位置(mm)	方向($^{\circ}$)	変位置(mm)	方向($^{\circ}$)	変位置(mm)	方向($^{\circ}$)
0.00	24.80	124.3	23.22	124.0	21.53	115.8	23.03	124.1
1.02	27.99	123.8	26.22	123.4	23.81	116.2	26.03	123.4
2.05	32.17	123.3	30.06	122.8	26.75	116.8	29.85	122.8
3.07	37.63	122.7	34.99	122.2	30.55	117.4	34.75	122.2
4.09	44.68	122.0	41.27	121.6	35.32	118.0	40.97	121.6
5.12	53.66	121.4	49.15	121.1	40.66	118.2	48.77	121.1
冷却	28.92	119.0	25.99	121.6	17.64	122.8	25.80	121.6

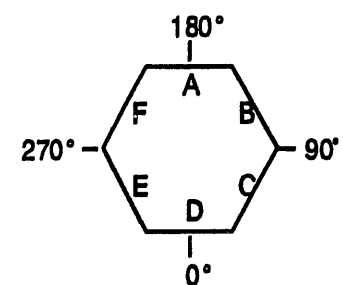


表4.2-1 FINAS(QFLA4S 要素)を用いた残留湾曲と接触荷重 (集合体拘束条件下)

照射量 n/cm ² (×10 ²³)	中間パッド		上部パッド		接触荷重(kgf)											
	変位置 (mm)	方向 (°)	変位置 (mm)	方向 (°)	①-中間	①-上部	②-中間	②-上部	③-中間	③-上部	④-中間	④-上部	⑤-中間	⑤-上部	⑥-中間	⑥-上部
0.00	1.30	179.8	5.12	16.3				82.5			23.6		151.0		24.7	
0.51	1.17	179.8	5.06	15.9				57.9			15.8		105.8		16.7	
1.02	1.11	179.8	5.02	15.7				45.7			13.1		82.3		14.0	
1.53	1.06	179.8	5.00	15.4				37.9			12.3		66.8		13.0	
2.05	1.03	179.9	4.99	15.1				33.2			12.6		57.0		13.2	
2.56	1.02	179.9	4.97	14.7				30.6			13.7		51.1		14.2	
3.07	1.01	179.9	4.97	14.2				29.6			15.4		48.1		15.7	
3.58	1.00	179.9	4.96	13.6				29.6			17.3		46.9		17.5	
4.09	0.99	180.0	4.95	12.8				30.4			20.0		47.0		19.9	
4.60	0.98	179.9	4.94	11.4				31.8			23.9		47.6		23.6	
5.12	0.97	179.9	4.93	10.5				32.8			26.1		48.3		25.7	
炉停止後冷却	0.61	11.0	5.15	170.9				0.0			0.0		0.0	10.5	0.0	
常温解放	1.53	175.6	11.93	176.1				0.0			0.0		0.0		0.0	

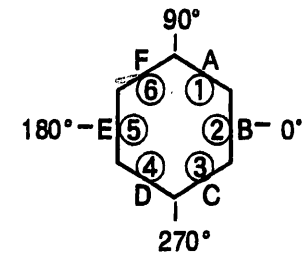
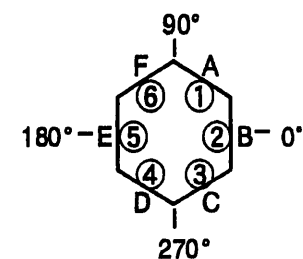


表4.2-2 FINAS(QFLA4S 要素)を用いた残留湾曲と接触荷重 (フリースタANDING条件下)

照射量 n/cm^2 ($\times 10^{22}$)	中間パッド		上部パッド		接触荷重(kgf)											
	変位置 (mm)	方向 ($^{\circ}$)	変位置 (mm)	方向 ($^{\circ}$)	①-中間	①-上部	②-中間	②-上部	③-中間	③-上部	④-中間	④-上部	⑤-中間	⑤-上部	⑥-中間	⑥-上部
0.00	1.15	4.0	23.03	4.1												
0.51	1.24	3.5	24.45	3.7												
1.02	1.35	3.0	26.03	3.4												
1.53	1.47	2.5	27.83	3.1												
2.05	1.61	2.0	29.85	2.8												
2.56	1.77	1.6	32.15	2.5												
3.07	1.95	1.1	34.75	2.2												
3.58	2.16	0.7	37.68	1.9												
4.09	2.40	0.3	40.97	1.6												
4.60	2.67	0.0	44.66	1.3												
5.12	2.97	0.4	48.77	1.1												
炉停止後冷却	1.82	3.1	25.80	1.6												



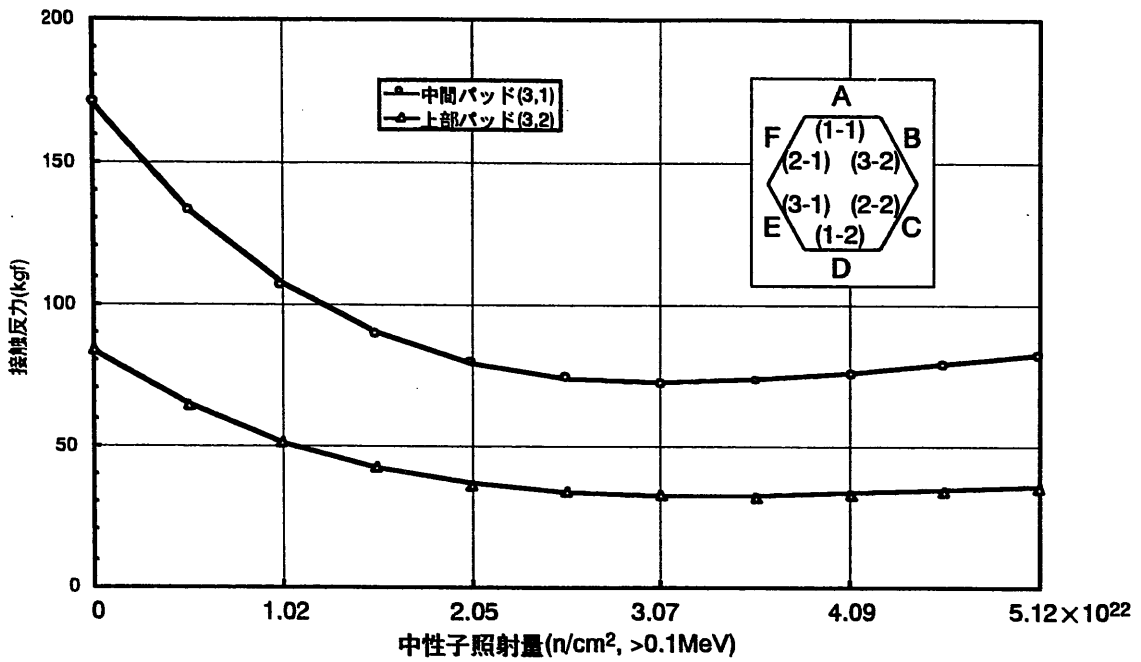


図4.1-1 パッド部反力履歴(「BEACON」(ビーム要素)、集合体拘束条件下)

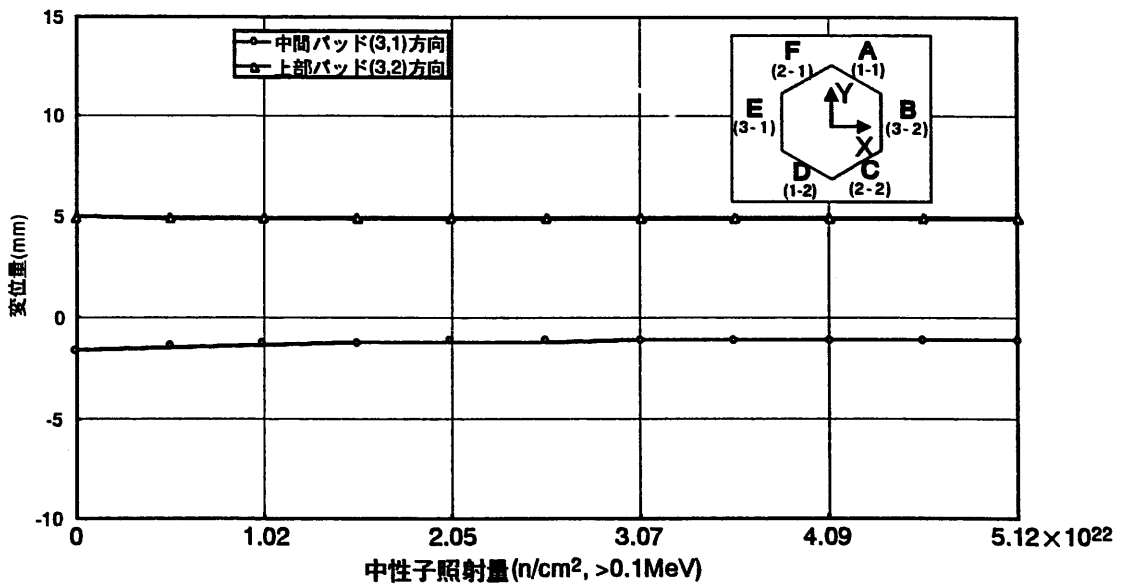


図4.1-2 パッド部X方向変位履歴(「BEACON」(ビーム要素)、集合体拘束条件下)

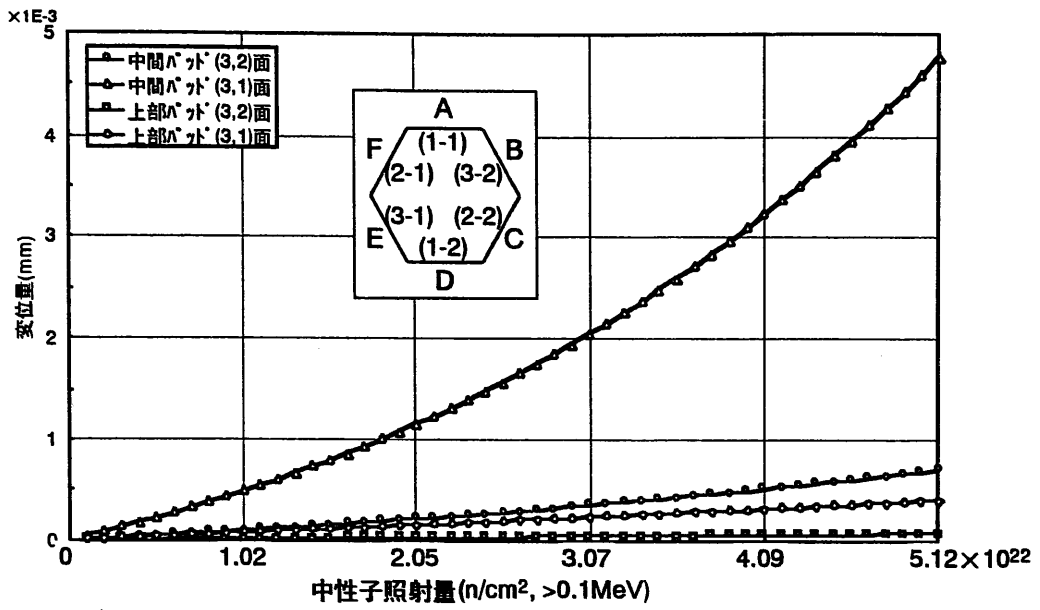


図4.1-3 パッド部スエリング歪履歴(「BEACON」(ビーム要素)、集合体拘束条件下)

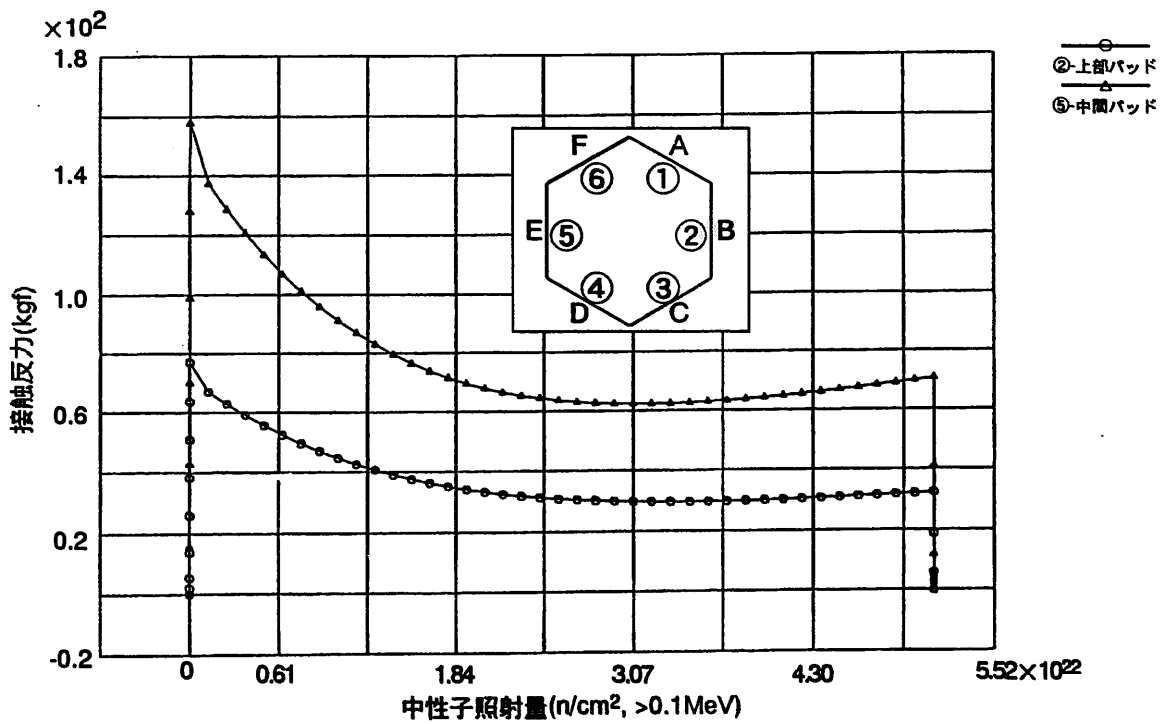


図4.1-4 パッド部反力履歴(「FINAS」(PIPE3要素)、集合体拘束条件下)

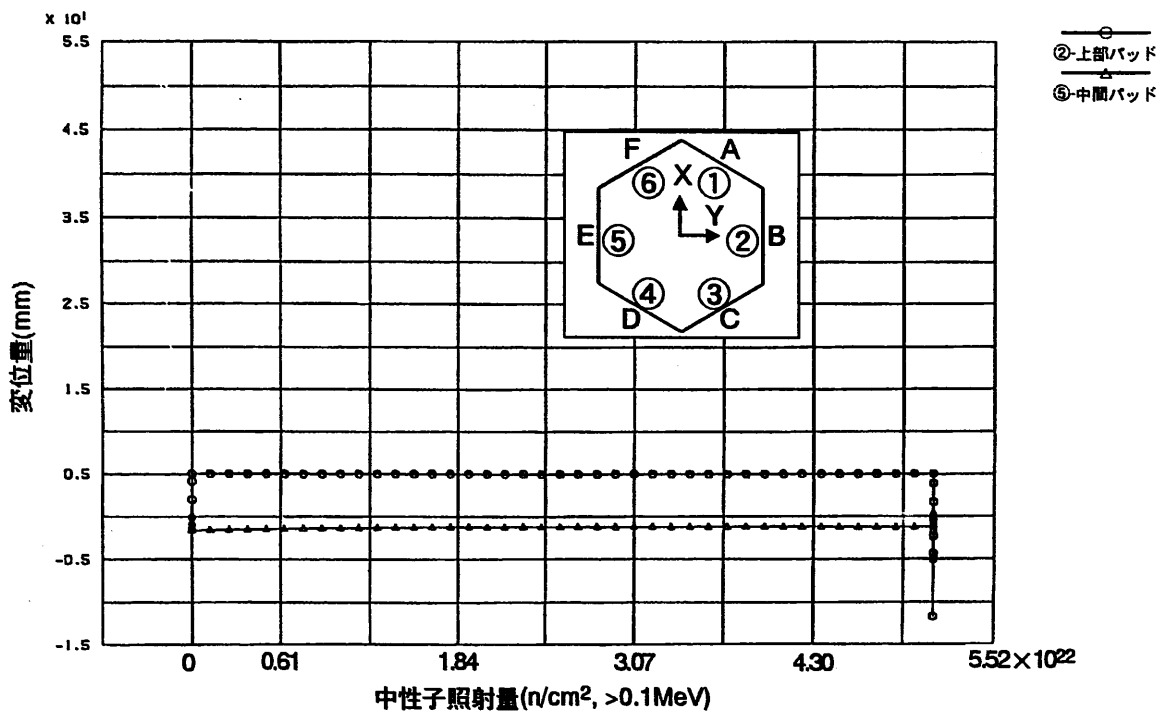


図4.1-5 パッド部X方向変位履歴(「FINAS」(PIPE3要素)、集合体拘束条件下)

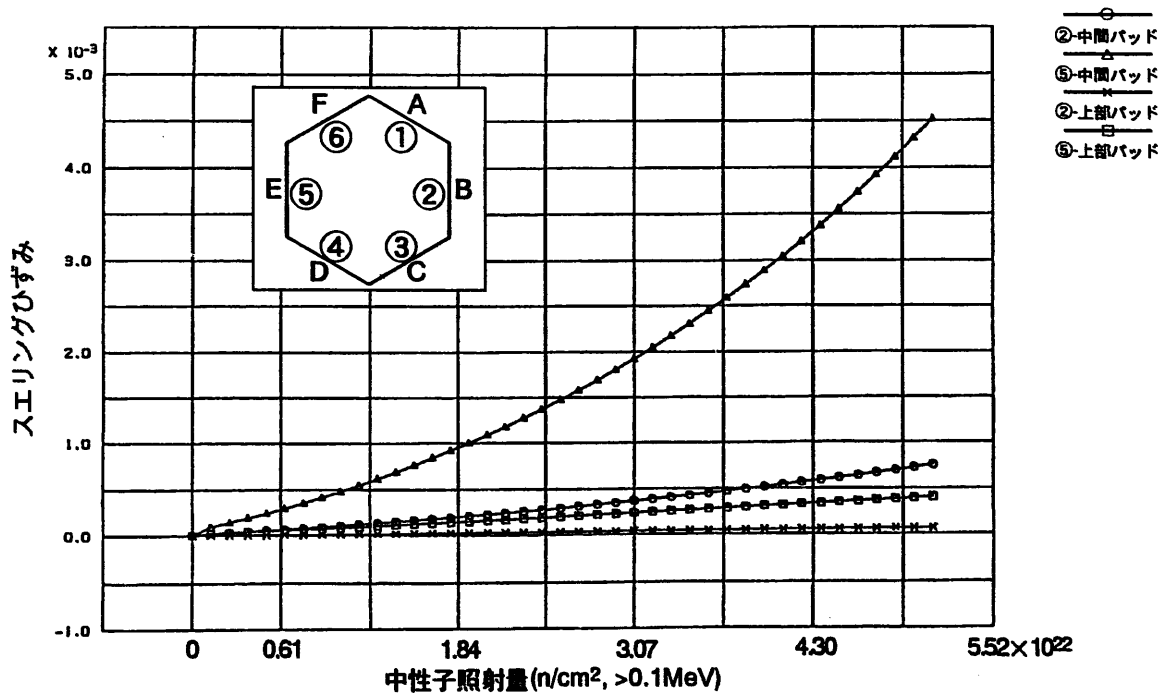


図4.1-6 パッド部スエリング歪履歴(「FINAS」(PIPE3要素)、集合体拘束条件下)

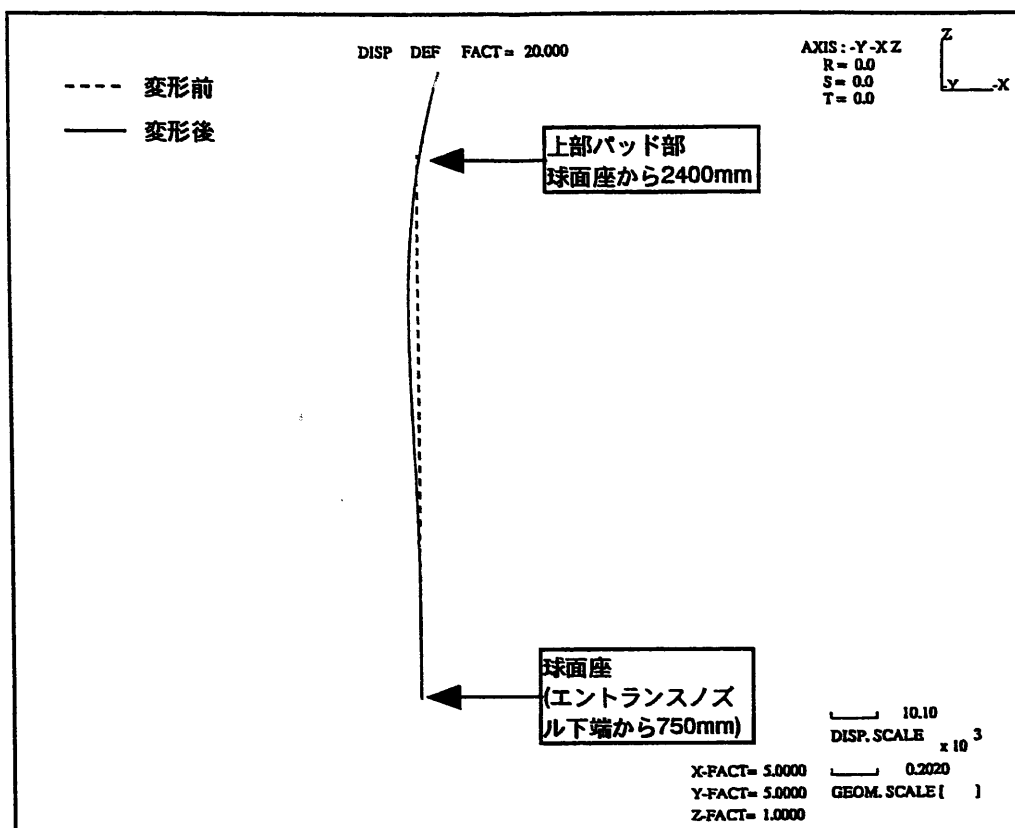


図4.1-7 照射量 0.0 時の変形図(「FINAS」(PIPE3要素)、集合体拘束条件下)

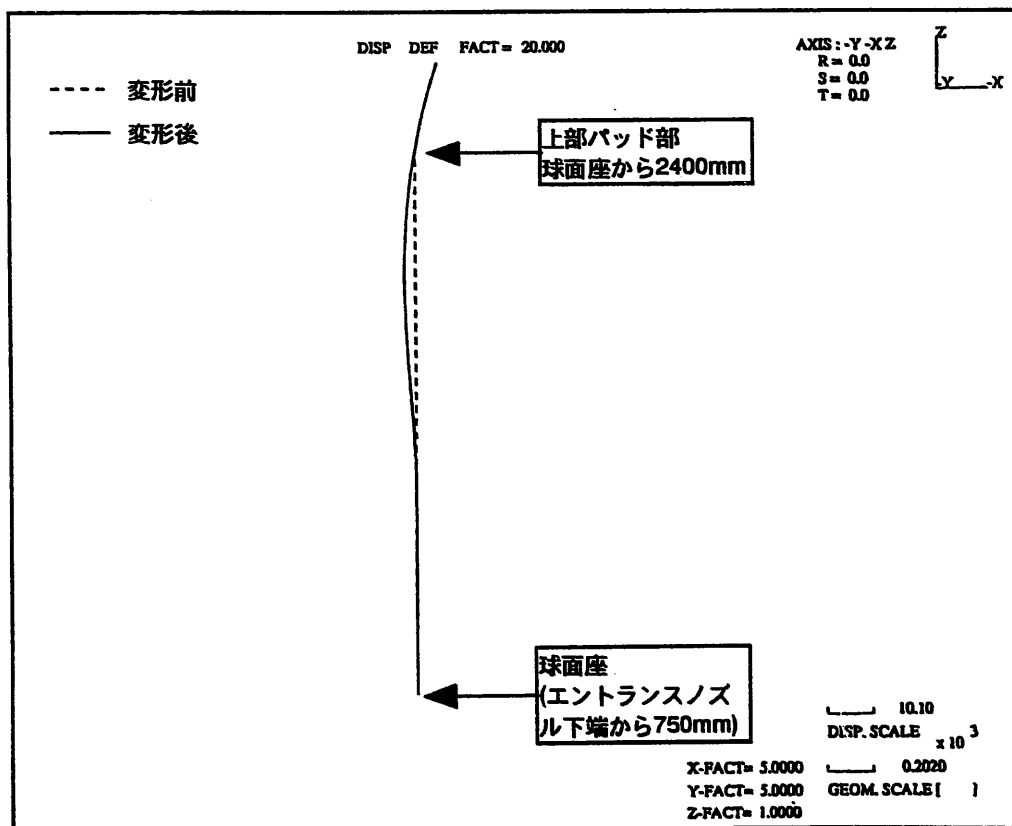


図4.1-8 照射量 $5.12 \times 10^{22} (n/cm^2)$ 時の変形図 (「FINAS」(PIPE3要素)、集合体拘束条件下)

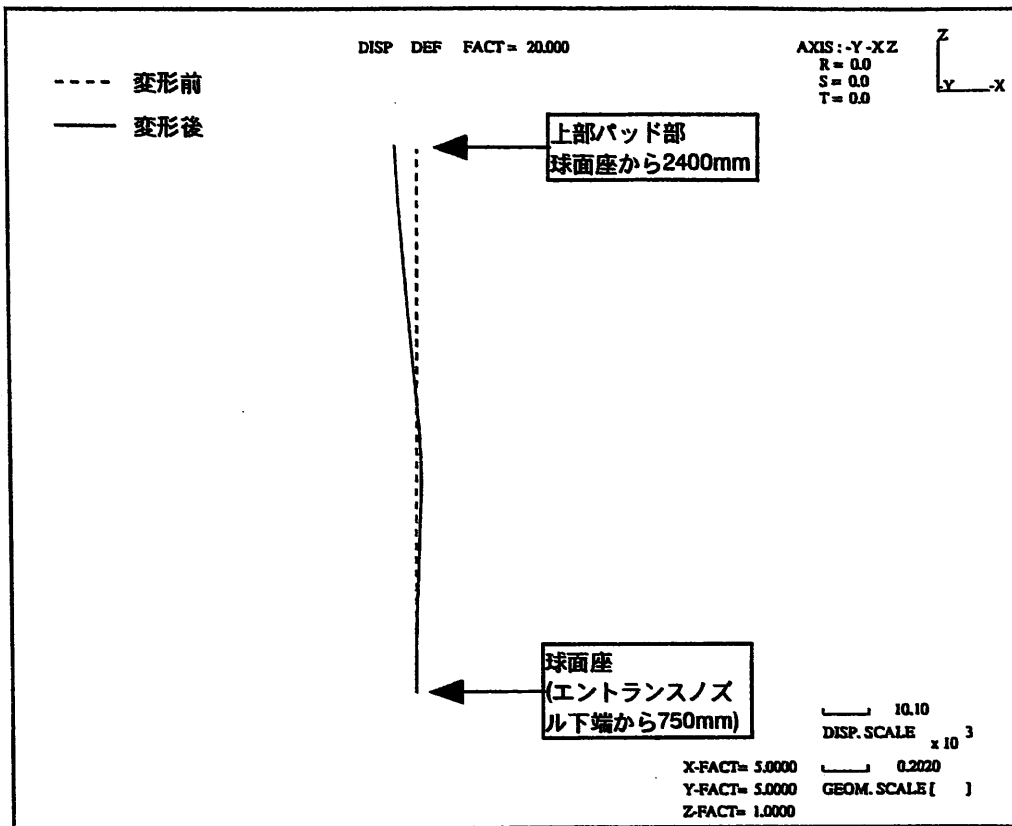


図4.1-9 炉停止後冷却時の変形図(「FINAS」(PIPE3要素)、集合体拘束条件下)

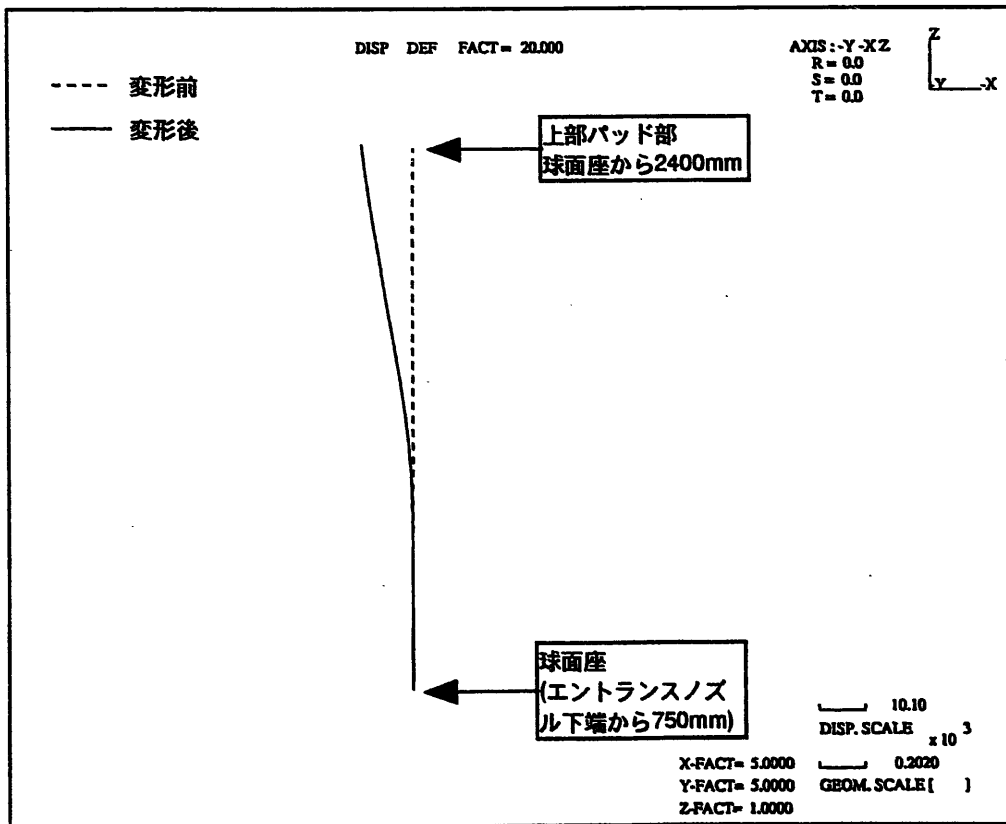


図4.1-10 炉停止後冷却時の変形図(「FINAS」(PIPE3要素)、集合体拘束条件下)

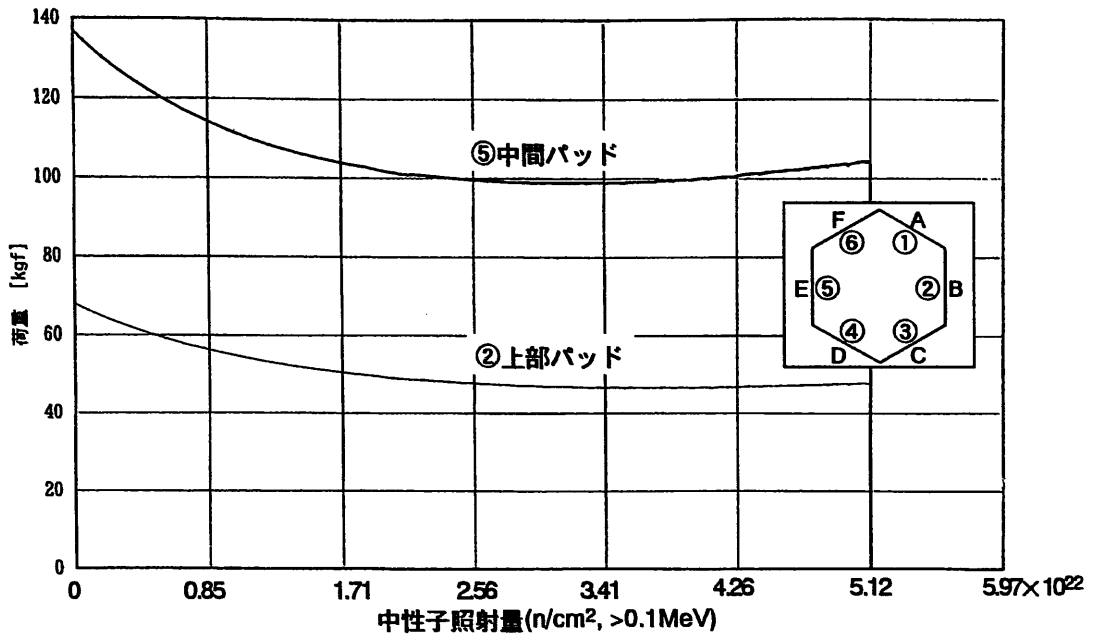


図4.1-11 パッド部反力履歴(「RAINBOW」(20ビーム要素)、集合体拘束条件下)

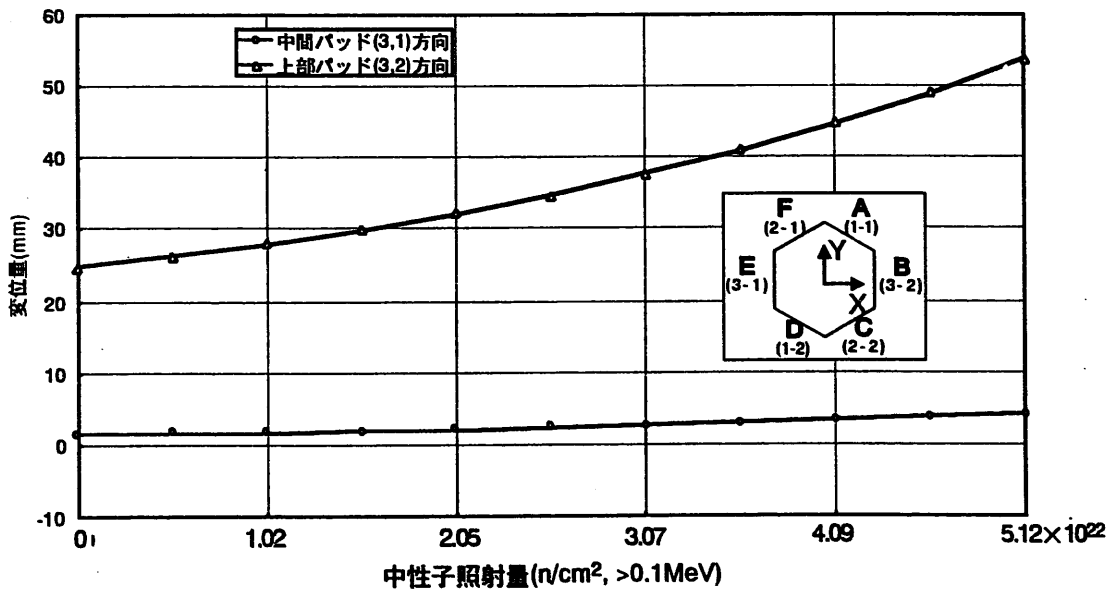


図4.1-12 パッド部X方向変位履歴(「BEACON」(ビーム要素)、フリースタANDING条件下)

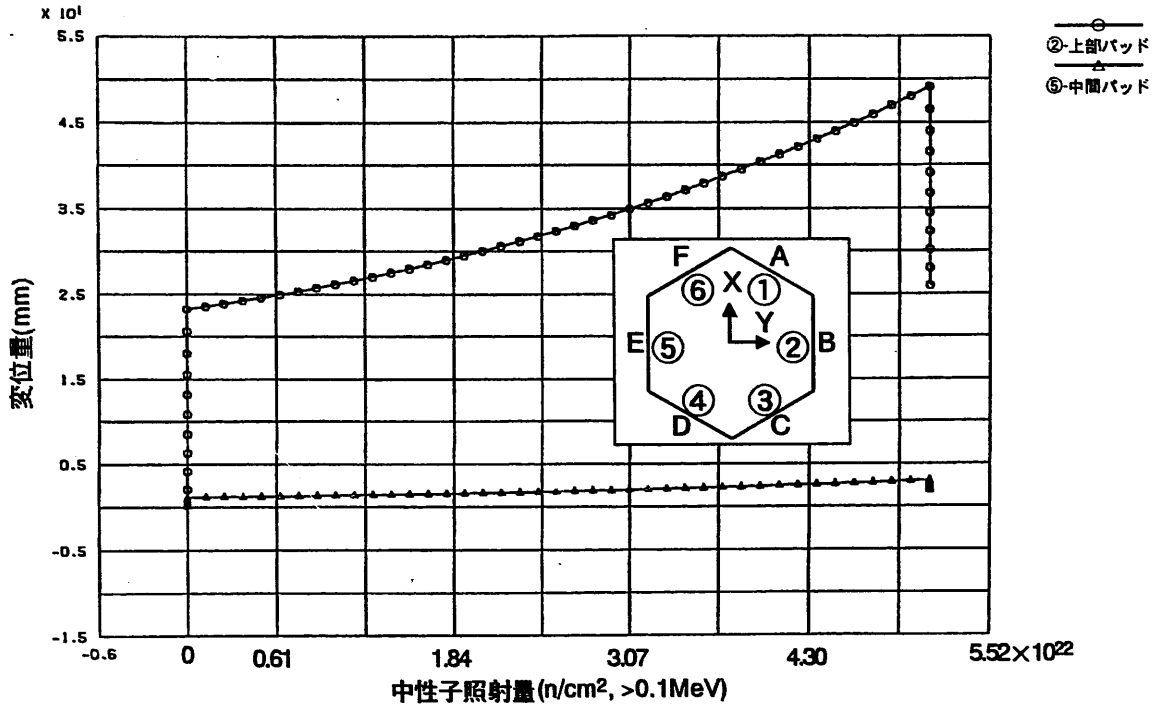


図4.1-13 パッド部X方向変位履歴(「FINAS」(PIPE3要素)、
フリースタANDING条件下)

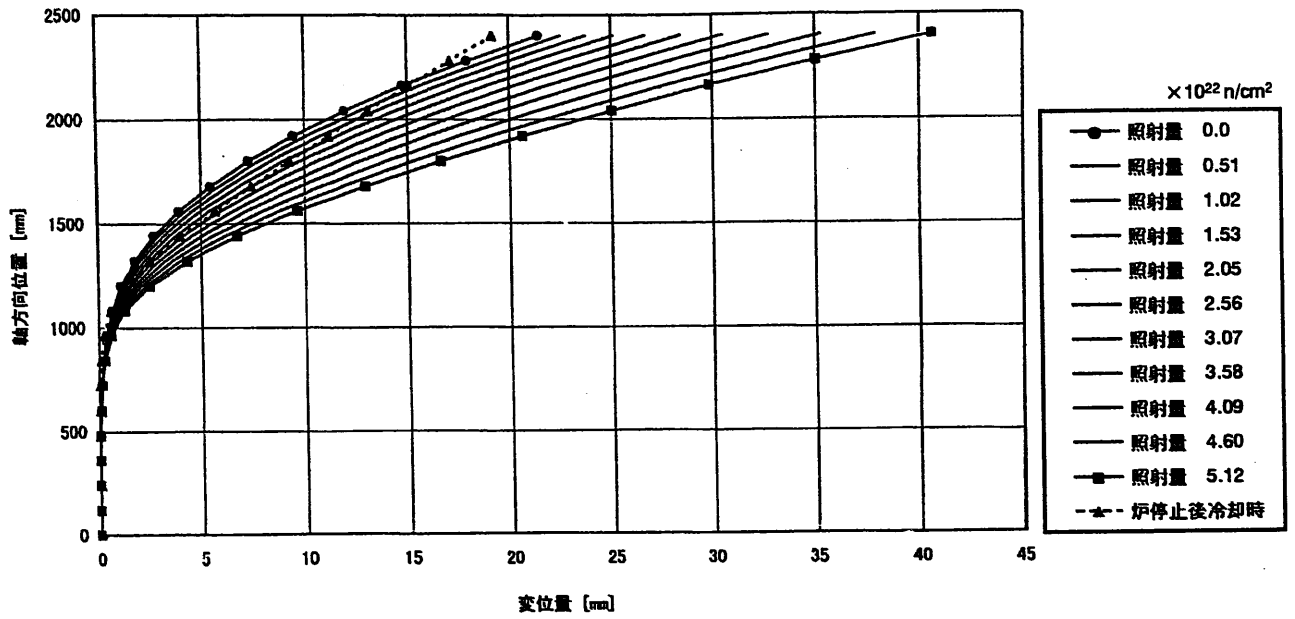


図4.1-14 運転期間中の集合体湾曲状況の推移(「RAINBOW」(20ビーム要素)、フリースタンディング条件下)

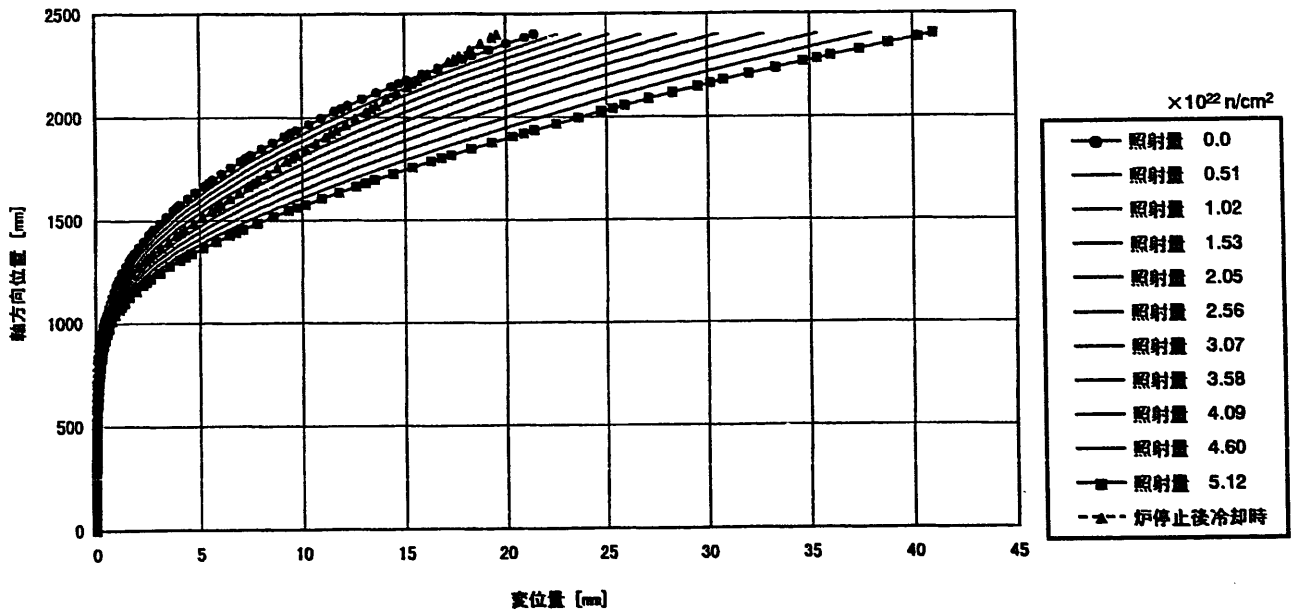


図4.1-15 運転期間中の集合体湾曲状況の推移(「RAINBOW」(100ビーム要素)、フリースタンディング条件下)

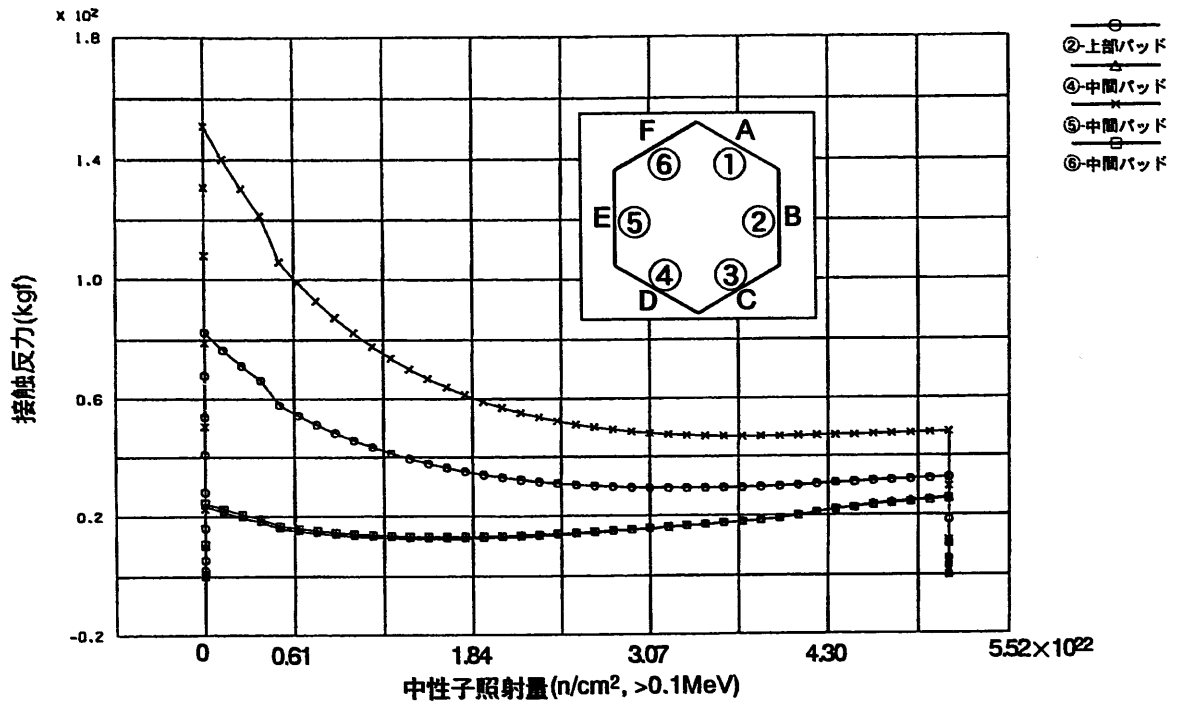


図4.2-1 パッド部の反力履歴(「FINAS」(QFLA4S要素)、集合体拘束条件下)

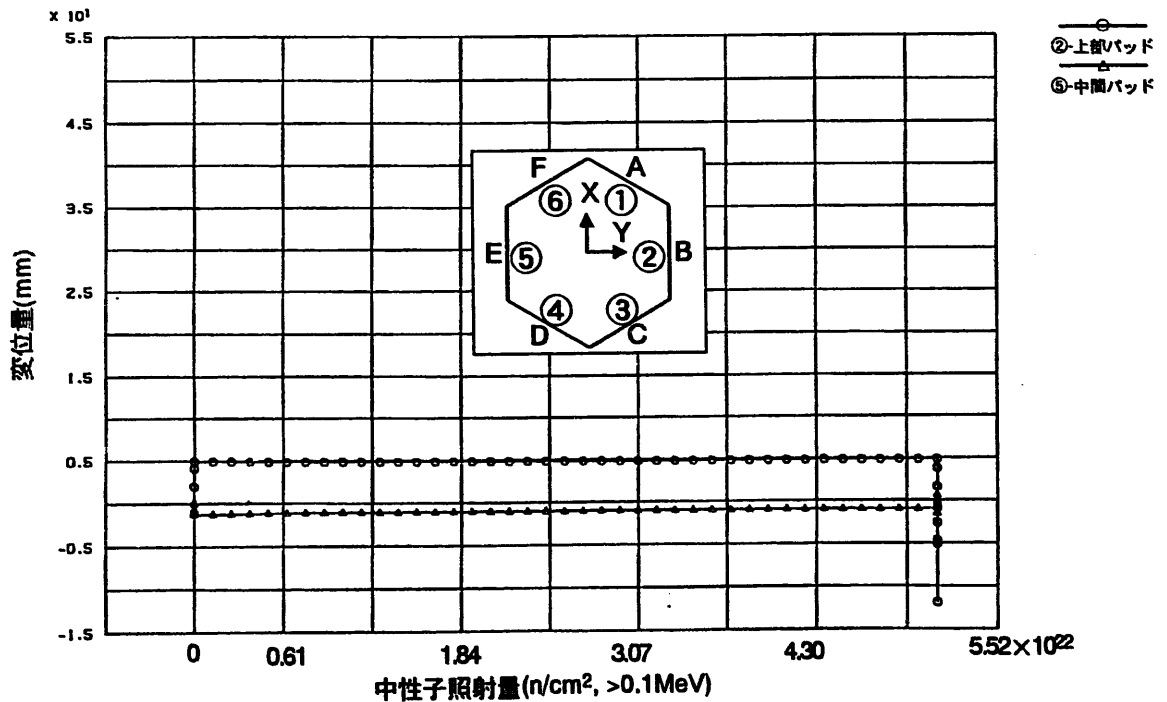


図4.2-2 パッド部X方向変位履歴(「FINAS」(QFLA4S要素)、集合体拘束条件下)

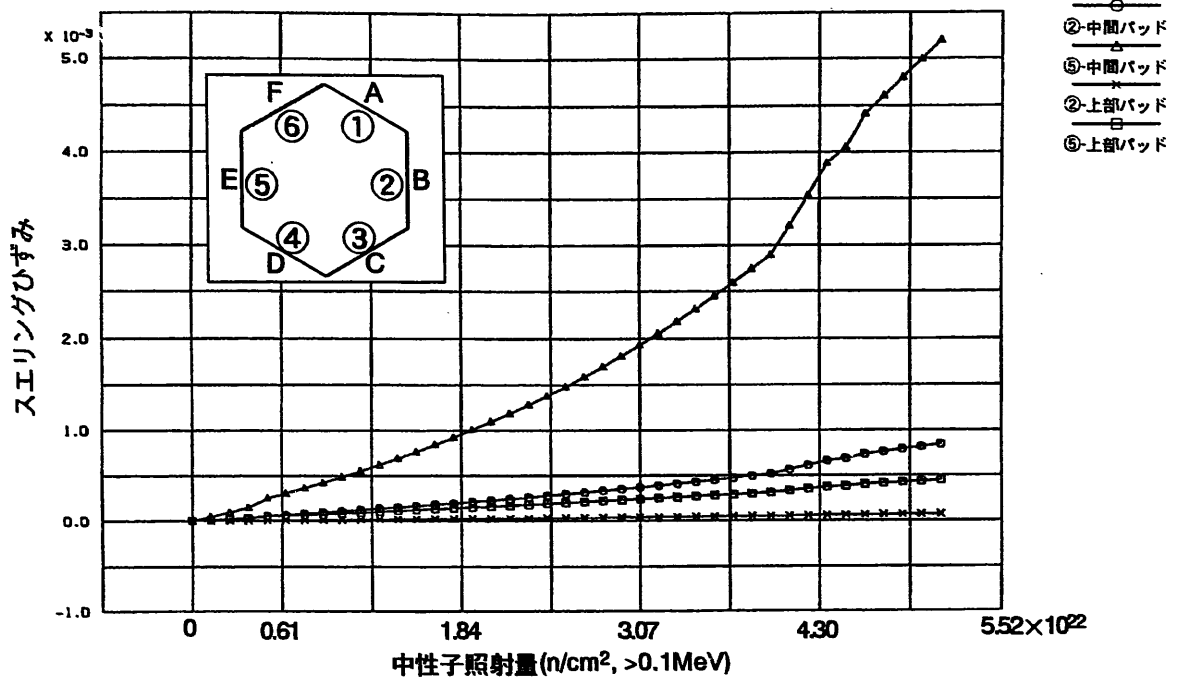


図4.2-3 パッド部スエリング歪履歴(「FINAS」(QFLA4S要素)、集合体拘束条件下)

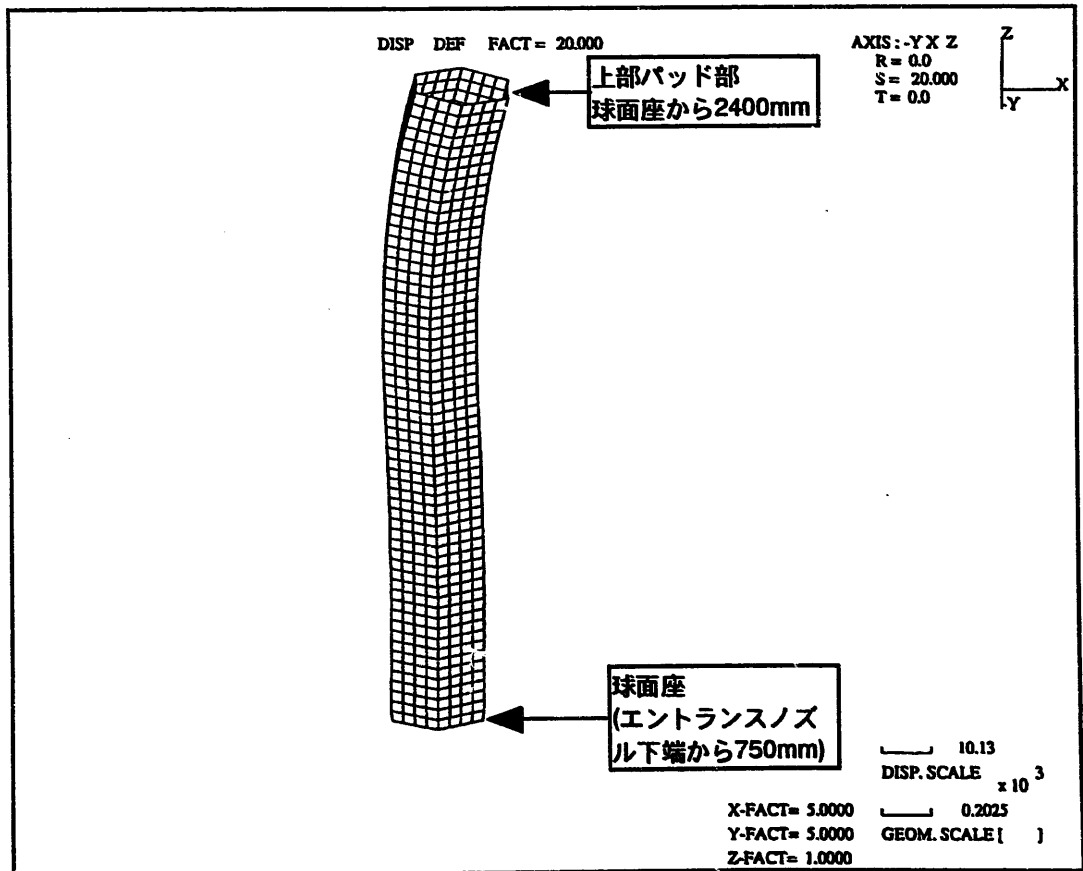


図4.2-4 照射量 0.0 時の変形図(「FINAS」(QFLA4S要素)、集合体拘束条件下)

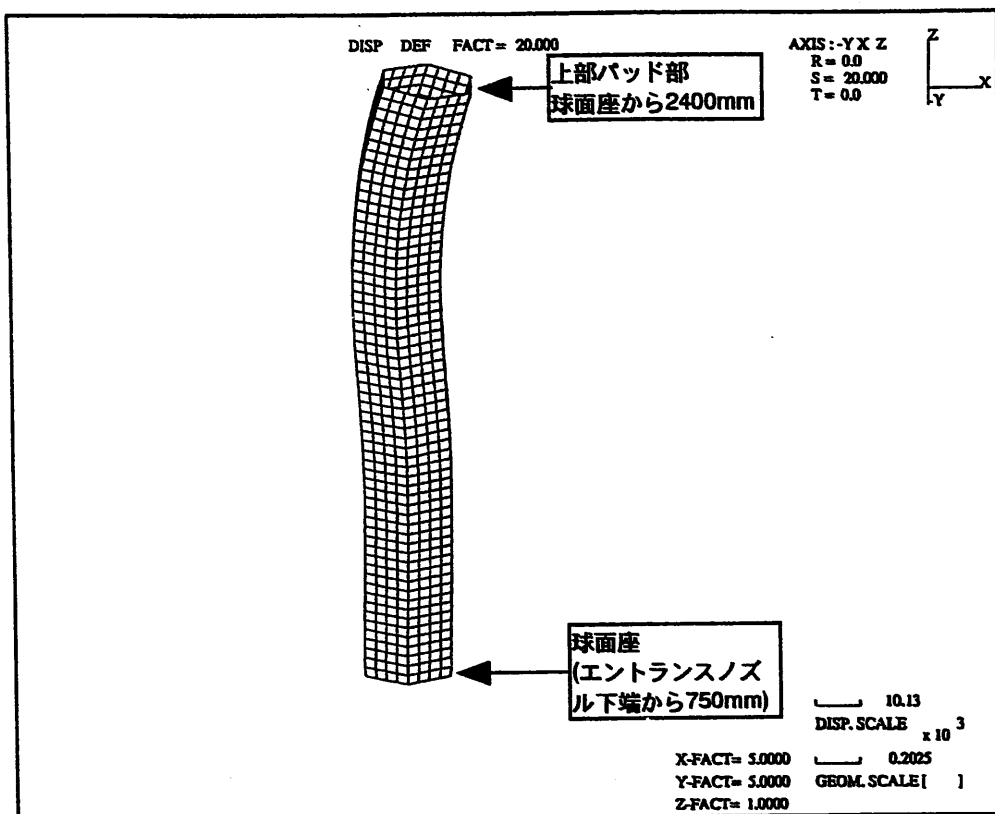


図4.2-5 照射量 $5.12 \times 10^{22}(\text{n}/\text{cm}^2)$ 時の変形図(「FINAS」(QFLA4S要素)、集合体拘束条件下)

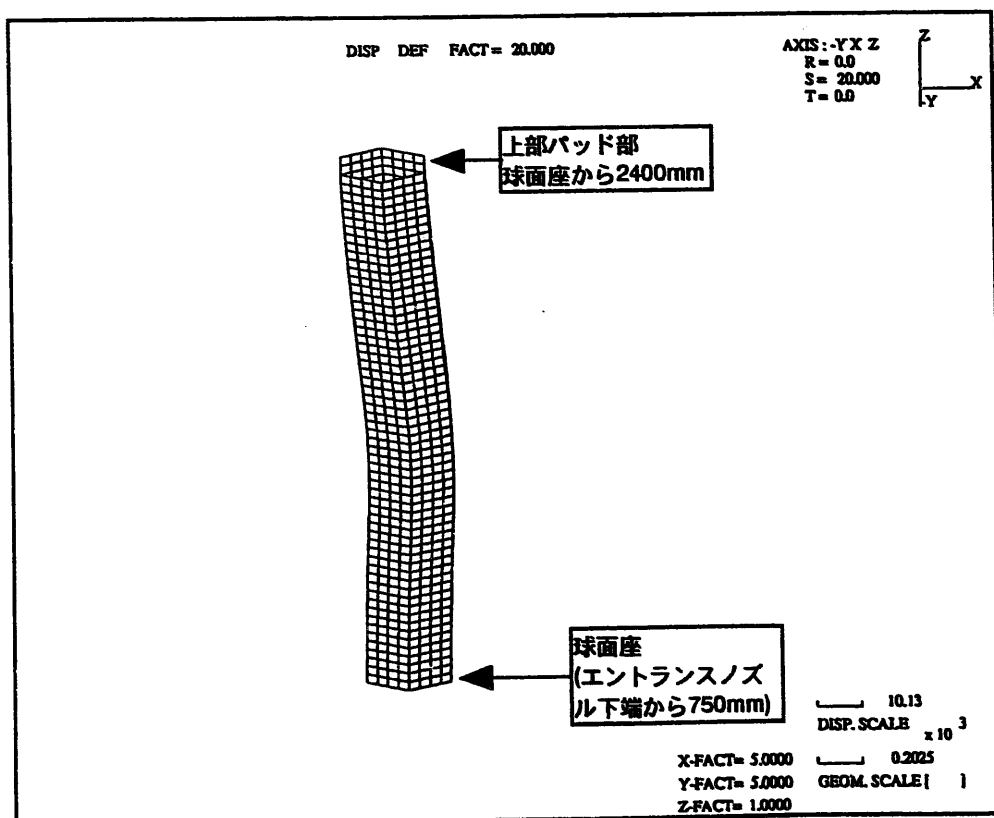


図4.2-6 炉停止後冷却時の変形図(「FINAS」(QFLA4S要素)、集合体拘束条件下)

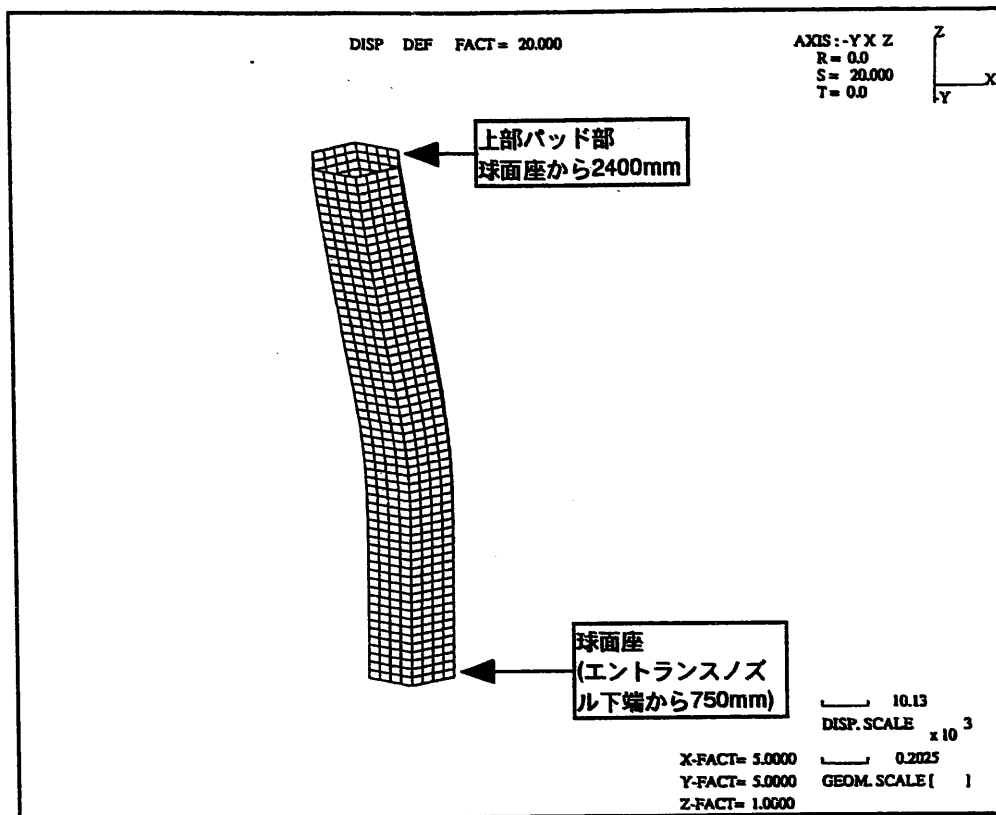


図4.2-7 常温開放時の変形図(「FINAS」(QFLA4S要素)、集合体拘束条件下)

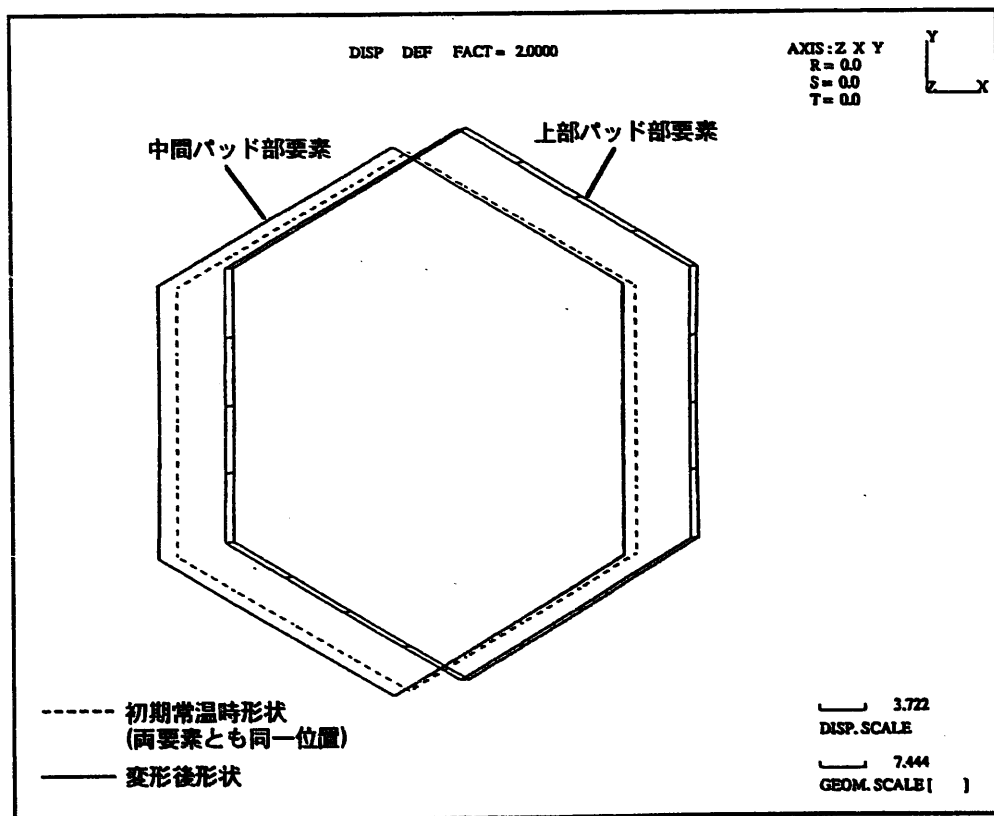


図4.2-8 パッド断面の照射量 0.0 時の変形図(「FINAS」(QFLA4S要素)、集合体拘束条件下)

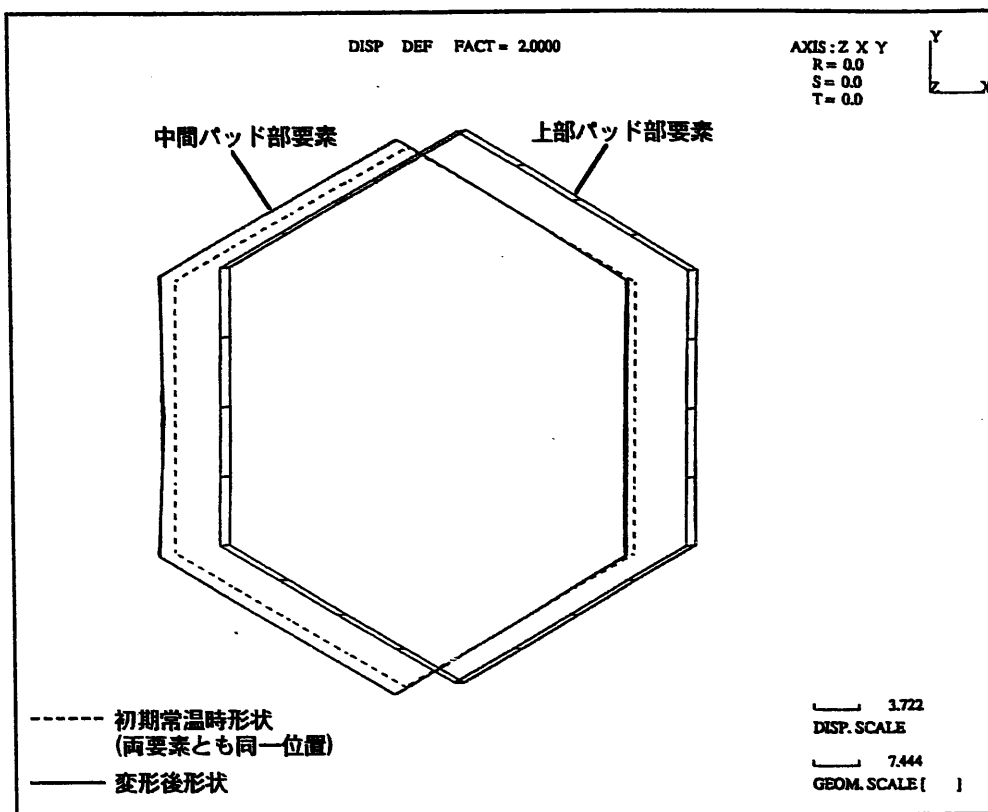


図4.2-9 パッド断面の照射量 $5.12 \times 10^{22} (\text{n/cm}^2)$ 時の変形図(「FINAS」(QFLA4S要素)、集合体拘束条件下)

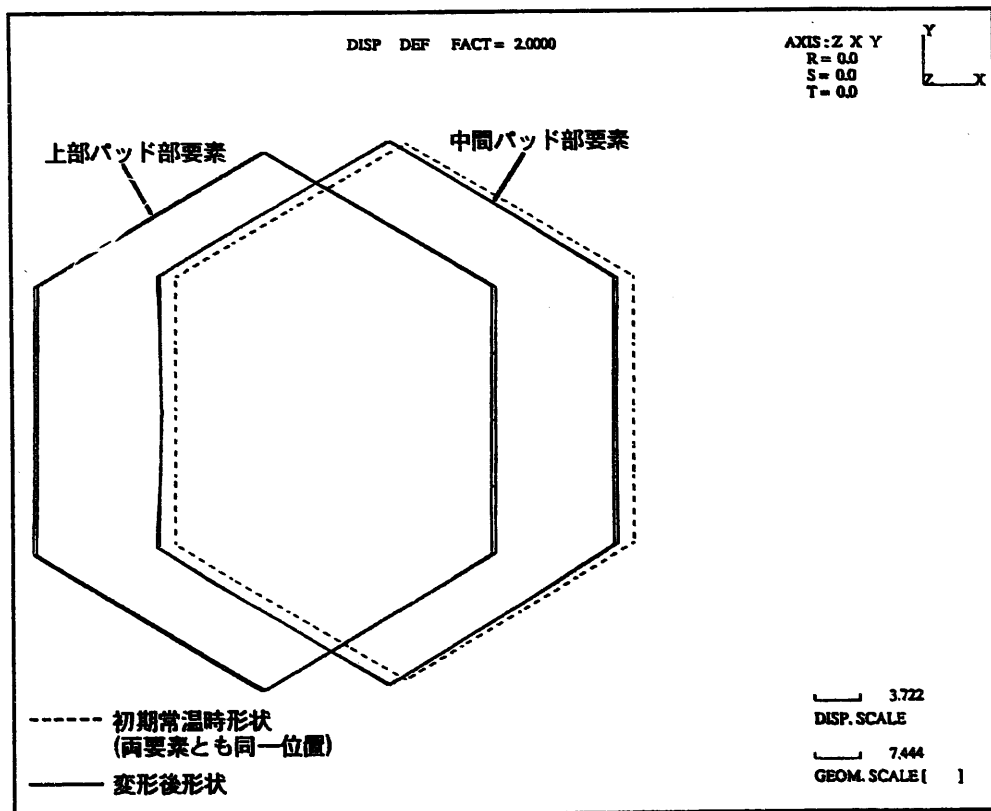


図4.2-10 パッド断面の常温開放時の変形図(「FINAS」(QFLA4S要素)、集合体拘束条件下)

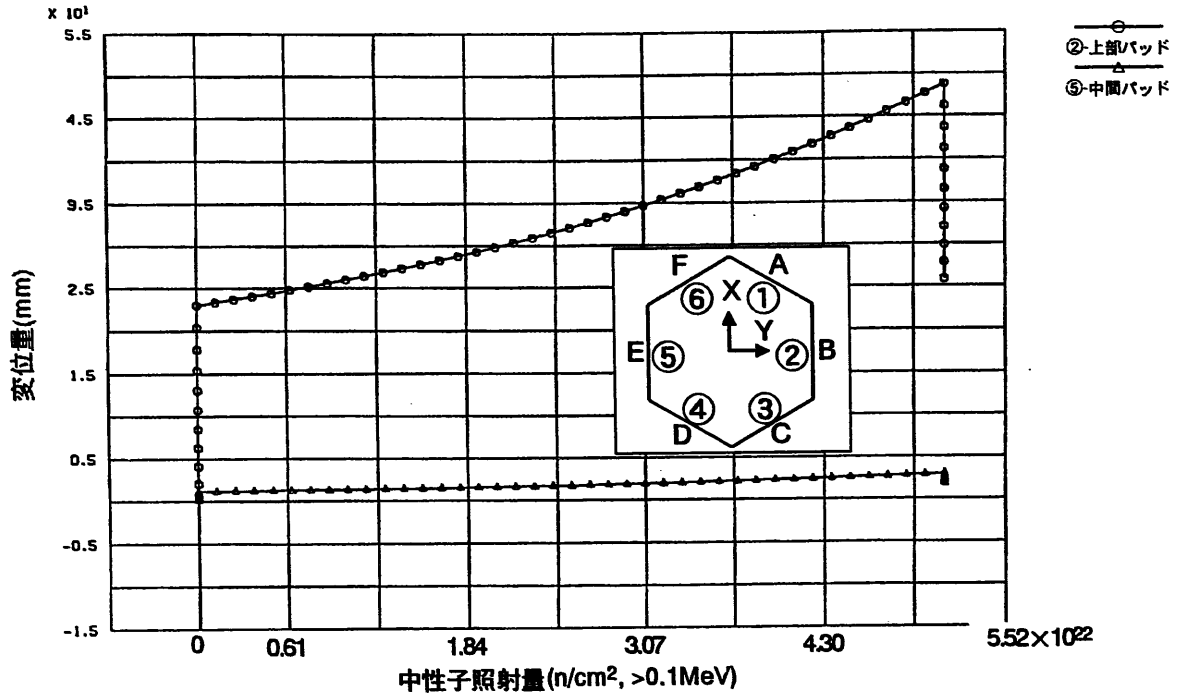


図4.2-11 パッド部X方向変位履歴(「FINAS」(QFLA4S要素)、フリースタANDING条件下)

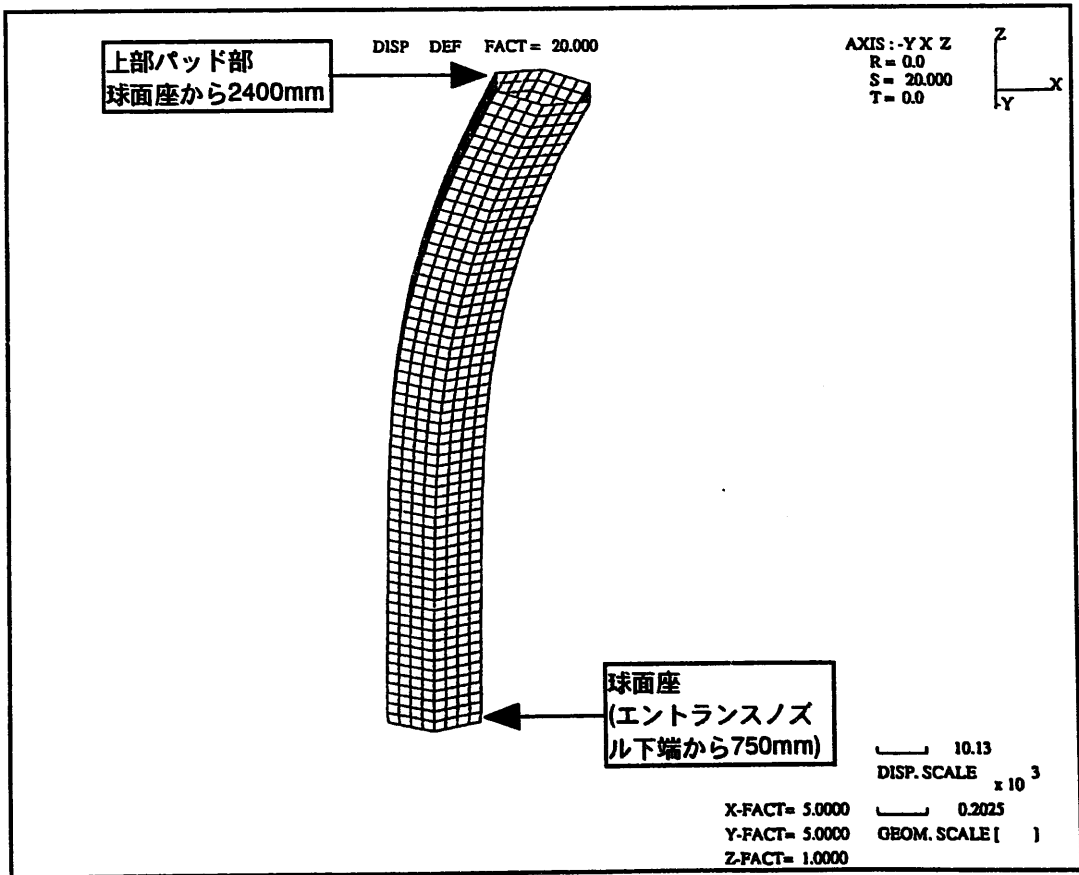


図4.2-12 照射量 0.0 時の変形図(「FINAS」(QFLA4S要素)、フリースタANDING条件下)

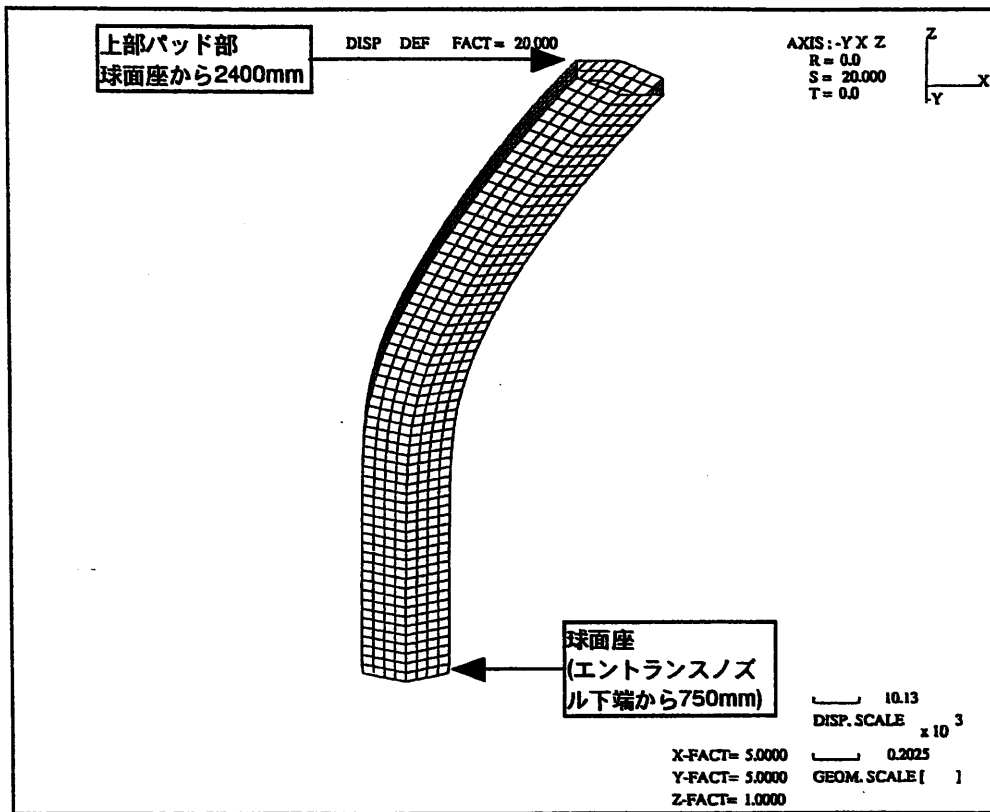


図4.2-13 照射量 $5.12 \times 10^{22}(\text{n}/\text{cm}^2)$ 時の変形(「FINAS」(QFLA4S要素)、フリースタンディング条件下)

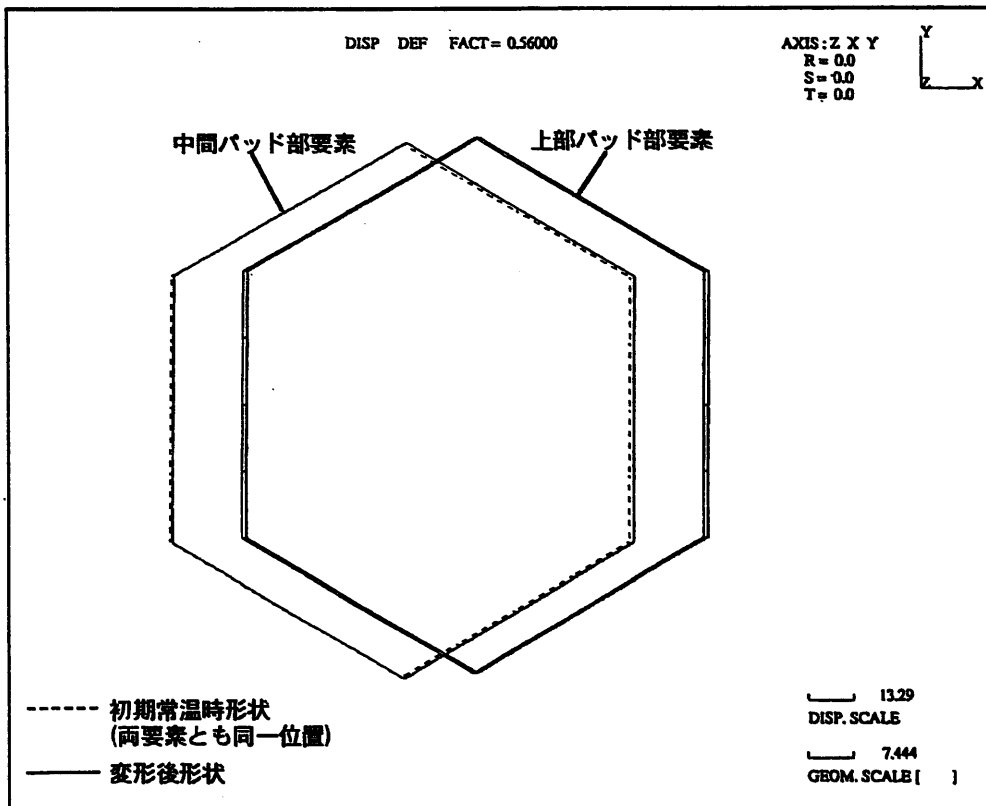


図4.2-14 パッド断面の照射量0.0時の変形図(「FINAS」(QFLA4S要素)、フリースタンディング条件下)

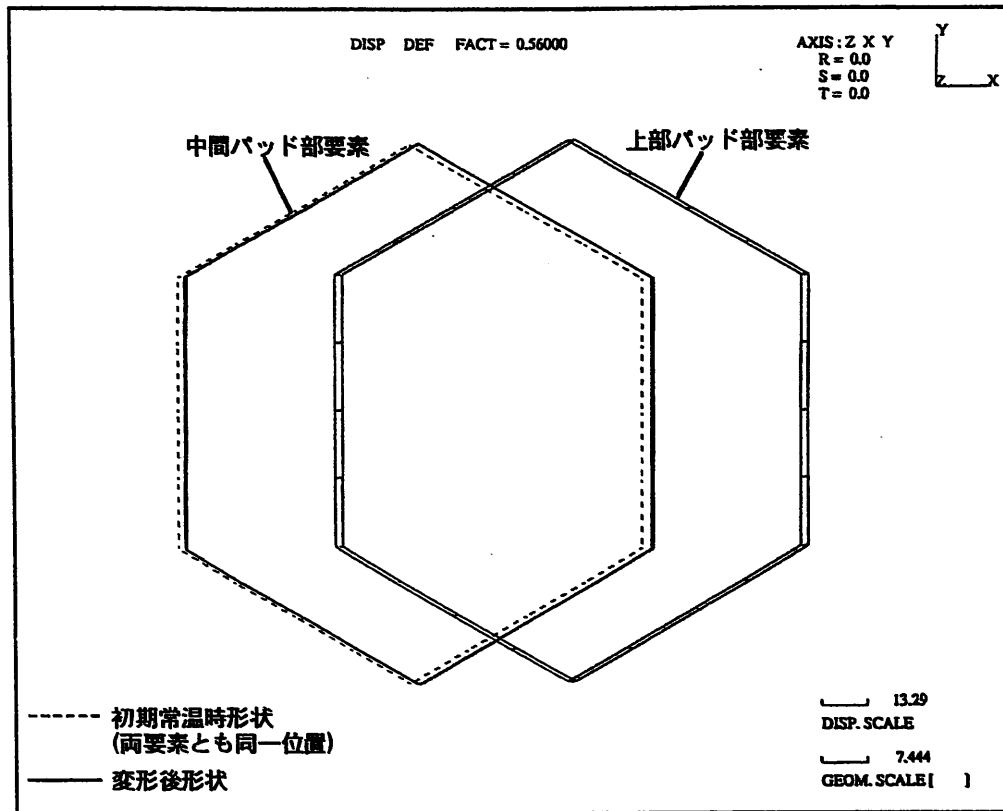


図4.2-15 パッド断面の照射量 $5.12 \times 10^{22} (\text{n/cm}^2)$ 時の変形 (「FINAS」(QFLA4S要素)、フリースタンディング条件下)

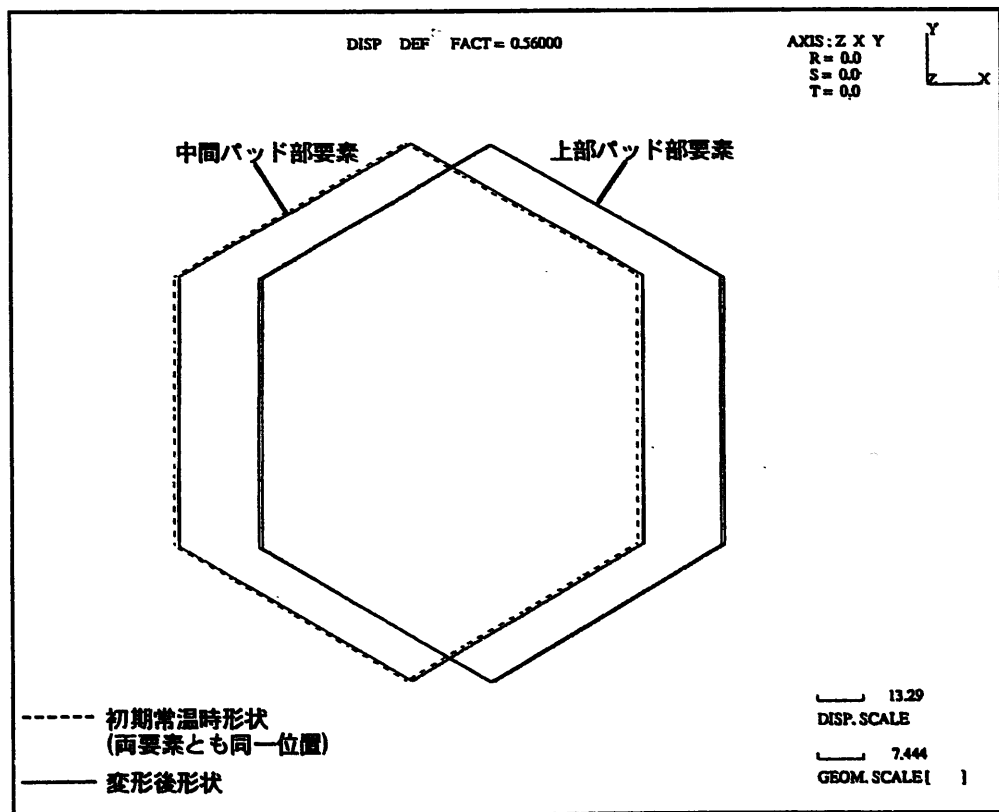


図4.2-16 パッド断面の炉停止後冷却時の変形図 (「FINAS」(QFLA4S要素)、フリースタンディング条件下)

5. 集合体湾曲解析評価上の課題と解析条件の検討

前章で解析コード及び解析モデルの違いによる解析結果に差異が認められず、「BEACON」の適用性が確認された。ここでは、解析コードに「BEACON」を用いて、集合体湾曲解析評価上の課題を抽出し、検討した。主な課題としては、解析上の支配要因と思われる解析条件（照射条件、物性値等）について検討した。

5.1 従来 of 集合体湾曲解析の課題

従来 of 集合体湾曲解析評価上の課題を以下に示す。また、これらの課題の代表例として、内側反射体の残留湾曲について、照射後試験結果と解析値との相違を図 5.1-1 に示す。

- ① 従来 of 解析条件で計算した結果は、残留湾曲の方向が PIE 結果と逆になっている。
- ② リファレンスとした温度条件では、照射クリープを小さく見積もらないと湾曲量、湾曲方向が PIE 結果を模擬できない。
- ③ 温度条件について、PIE データに基づいて推定する必要がある。
- ④ 中性子照射量の増加に伴い、残留湾曲量は増加するが、高照射領域において残留湾曲量の変化は小さくなる。これは反射体の内部構造物の影響を受けた可能性がある。この原因を特定するには、炉内温度場の特定が必要である。

5.2 解析条件の検討

上記の課題を考慮して、集合体湾曲に影響を与える因子として、以下に示すような項目について検討することにした。

- ・ 炉内温度条件
- ・ スエリング式、照射クリープ式
- ・ 炉内拘束条件
- ・ 内部構造物の影響

(1) 炉内温度条件の検討

炉内温度評価の不確かさが残留湾曲量に与える影響が大きいと考えられることから、内側反射体ラッパ管の硬さ測定により炉内照射温度を推定した。³⁾ 対象集合体は PIE 結果から、最大残留湾曲を示した NFRI0F を用いた。NFRI0F の温度、フラックス分布を表 5.2-1 に示す。また、これから求めた中性子照射量の分布を図 5.2-1 に示す。図 5.2-1 から、炉心外側ラッパ管 (C 面) の照射量は、炉心部約 60 cm にわたり反射体周方向に照射による硬さの変化が飽和する $2.5 \times 10^{22} \text{n/cm}^2$ を越える。そのため、ラッパ管の軸方向 3 点 (炉心下端、中心、上端) の試料を採取した。ラッパ管硬さ測定から求めた炉内照射温度を表 5.2-2 に示す。求めた照射温度は、計算した照射温度と比較してラッパ管の炉心中心側と炉心外側の温度差が小さかった。そこで、ラッパ管硬さ測定から求めた温度を基に温度分布を推定した。これを表 5.2-3 に示す。温度分布の推定は、以下の手順で行った。

- ① 表 5.2-1 の各面で、炉心支持板の温度を 0、反射体頂部の温度を 1 として、各ノードにおける温度増分の軸方向相対値を求める。
- ② 表 5.2-1 の各軸方向ノードで、最低温度 (炉心外側 : C 面) を 0、最高温度 (炉心側 : F 面) を 1 として各面における温度増分の径方向相対値を求める。
- ③ C 面及び F 面について、MMS の硬さ測定から推定した DFCEB-550 mm における照射温度を基準として、①で求めた軸方向相対値から C 面と F 面について軸方向温度分布を求める。
- ④ C 面と F 面を除く各面について、②で求めた径方向相対値から、各面の温度を求める。

計算した照射温度と推定した温度分布の比較を図 5.2-2 に示す。推定した温度分布は、反射体上端部において、面によっては軸方向温度勾配の増大が見られる。この温度分布を反射体残留湾曲の計算に用いることとした。

また、周方向入力データ点数については、各面につき 1 点（全部で 6 点）のみとっている。これは、各面における周方向の温度分布が存在せず、面全体の温度が一定であるとの考えに基づいている。ただし、温度が周方向に急激に変動するような場合には正確な曲がり表現することが難しい可能性がある。

(2) スエリング、クリープ式の検討

① 測定データの分析

「常陽」MK-II 炉心の初装荷、一次取替及び二次取替の一部の燃料集合体には、ラッパ管に 20%冷間加工 SUS316 鋼が用いられている。スエリング式及び照射クリープ式の導出の経緯について Appendix に示す。導出されたスエリング式及び照射クリープ式により試算した MK-II ラッパ管の中央部のふくれ量が PIE データとよく一致することから、これらのスエリング式及び照射クリープ式を計算に用いた。

これらのスエリング式及び照射クリープ式を用いて、従来の温度分布と硬さ測定により推定した温度分布のそれぞれの場合について NFRIOF の残留湾曲量を解析した。解析の結果、図 5.2-3 に示すように PIE データを基に推定した温度分布を用いることにより、湾曲方向については PIE 結果と一致した。

② 密度再測定データの検討

ラッパ管のスエリング式の妥当性を評価するために、NFRIOF のラッパ管の密度測定を実施した。ラッパ管の密度測定結果を表 5.2-4 に示す。図 5.2-4 に密度測定により得られたラッパ管スエリング量とスエリング式との比較を示す。この図から、スエリング式は過大評価する傾向になった。従って、PIE データに一致するようにスエリング式に 1/3 の係数を掛け合わせて補正し、これを計算に用いることにした。

③ 補正スエリング式を用いた解析結果

補正したスエリング式を用いて NFRIOF の残留湾曲量を解析した結果を、補正前のスエリング式による結果と合わせて図 5.2-5 に示す。補正後の解析結果は、補正前と比

較して、残留湾曲量は小さくなった。図 5.2-6 に温度分布及びスエリング式補正前後における NFRIOF の残留湾曲量解析結果と PIE 結果を示す。

以上から、PIE 結果を基に推定した結果、残留湾曲の方向は PIE 結果と一致したが、湾曲量については、過小に評価することがわかった。

(3) 炉内拘束条件の検討

① 中間パッド拘束条件の見直し

「常陽」では中間パッド間のギャップが製造時寸法で 0.3 mm と非常に狭いので、原子炉運転時にはパッド部分は熱膨張で接触し合っていると考えられる。現実には PIE でもパッド部分の接触跡が観察されている。本検討では単体集合体解析を実施しているが、多体集合体解析（群解析）においても隣接集合体から受ける荷重の評価を行い、拘束条件の妥当性を確認しておくことが重要と考えられる。

② 多集合体解析法との比較

ここでは、物性値については最終報告におけるスエリング式及び照射クリープ式（Appendix の式）を用いて、NFRIOF の周辺の集合体について考慮した群解析と NFRIOF 単体とした解析を行なう単体解析とを比較検討する。温度分布、フラックス分布については、前述の表 3.3-1、表 3.3-2 に示した条件を使用し、NFRIOF が装荷されていた D 領域の 0~14 サイクルまでについて集合体の交換履歴を模擬した解析を実施した。群解析の解析例として、14 サイクル EOC における NFRIOF を含む列の湾曲状況を図 5.2-7 に示す。また、図 5.2-8 に単体解析と群解析のそれぞれにおけるパッド部接触反力の変化を示す。図中の群解析においてパッド部接触反力が不連続になっているのは、まわりの集合体の交換によるものと考えられる。群解析における炉心中心側と炉心外側の中間パッド部接触反力の差、炉心外側と炉心中心側の上部パッド部接触反力の差は、単体解析における炉心中心側中間パッド部接触反力及び炉心外側上部パッド部接触反力にほぼ等しくなっている。従って、この範囲の照射条件では他集合体から顕著な荷重を受けてはならず、拘束条件は妥当であり、単体解析で十分評価が可能であると考えられる。

③ 中間パッドのクリープ圧縮モデル

炉内構成要素群が炉心変形により相互作用を生じている状況下では、パッド間の相互作用力を緩和するメカニズムとしてパッドのクリープ圧縮変形を考慮することが必要である。特に中間パッド間ギャップが 0.3 mm と非常に狭い「常陽」炉心では、中間パッド同士は熱膨張及びクリープバルジング変形で接触力が増大する。これを緩和するパッド圧縮変形を取り込まないと接触荷重が一様に増加する評価となり、実測の集合体引き抜き力と大きな不整合が生ずる。そこで、中間パッドのクリープ圧縮モデルとして図 5.2-9 のようなものが考えられる。なお、六角筒のクリープを解析的に表現するためには、シェル要素等を用いたモデル構築が必要となる。従って、クリープ圧縮モデルの使用は、今後シェルモデルによる解析において、検討されるべきであると考えられる。今回は「BEACON」ビームモデルについて言及しているため、これらの検討は本報告では実施しなかった。

(4) 内部構造物（反射体要素）の影響検討

「常陽」内側反射体はラッパ管の内側に SUS304 製の反射体要素 7 本を装荷したものである。反射体要素はアニール材でもあるためにスエリングが大きく、図 5.2-10 に示すように炉心方向側の要素の伸びがラッパ管よりも大きい。従って、このような内部構造物がモーメントを生じ、ラッパ管を曲げる可能性が考えられる。

X 線ラジオグラフィ試験の結果から、表 5.2-5 に示すように上部グリッド板と反射体要素とのギャップ量は製造時の 5 mm から減少しており、NFRI1F では 1 本の反射体要素でギャップが閉じているのが観察されている。さらに、照射中には反射体要素と上部グリッド板が相互作用を起こしていたと思われる接触跡があることが PIE で確認されている。NFRI0F においても、上部グリッド板の下面に接触跡が観察されており、しかも炉心側の要素にのみ観察されている。この様子を図 5.2-11 に示す。そこで、内部構造物（反射体要素）によるラッパ管の湾曲量を以下の手順で試算した。

- ① 熱膨張及びスエリングによるラッパ管と反射体要素の伸び量を計算する。

- ② 反射体要素とラッパ管の伸び差が 5 mm（反射体要素と上部グリッド板との製造時ギャップ量）で両者が接触するものとして、ラッパ管の照射クリープ量から曲げモーメントを計算する。
- ③ 曲げモーメントを片持はりと想定した内側反射体の炉心中心に負荷したときの自由端におけるたわみを計算する。

ここで、ラッパ管の温度分布については前述のラッパ管の硬さ測定から求めた温度（表 5.2-2）を基に推定した温度分布を用いた。反射体要素についてはラッパ管の温度分布から平面近似により求めた温度分布を用いた。また、ラッパ管の照射クリープ式は最終報告における式を、スエリング式については前述の密度再測定データの検討から、PIE データを基に補正した式を用いた。反射体要素の物性式については、SUS304ST 材の式を用いた。スエリング式については図 5.2-12 に示すように、反射体要素の外径プロファイルにフィッティングさせるため、0.6 の係数を掛け合わせて補正した式を使用した。内部構造物の影響による試算された湾曲量を、「BEACON」によって解析された残留湾曲量に加えた結果を図 5.2-13 に示す。この図から、残留湾曲量は PIE 結果に近づくこととなった。また、内側反射体の構造は図 5.2-14 に示すように特に炉心位置近傍において反射体要素が集積する割合が大きく、 γ 発熱により反射体要素の温度がラッパ管の温度よりも高い可能性がある。従って、反射体要素の温度がラッパ管の温度よりも高くなる温度分布を用い、同様の計算を行った。解析の結果、図 5.2-13 に示すように、さらに PIE 結果に近づく方向となった。

5.3 検討結果のまとめ

- ① ラッパ管の硬さ測定（実測値）から推定した温度分布を用いると、残留湾曲の方向は PIE 結果と一致した。
- ② スエリング、クリープ式について、PIE 結果を基に推定したのものを用いると、残留湾曲方向については一致した。しかし、湾曲量については、過小に評価することがわかった。
- ③ 内部構造物（反射体要素）のスエリング膨張による集合体の湾曲モーメントが反射体の湾曲に寄与している可能性が高いことがわかった。

表5.2-1 内側反射体NFRI0Fの温度、フラックス分布

温度(°C)

(91km1で代表)

軸方向 ノード	ラ ッ パ 管 面 番 号					
	(A)	(B)	(C)	(D)	(E)	(F)
1	371.410	370.770	370.600	370.740	371.310	371.530
2	372.810	371.540	371.190	371.480	372.610	373.060
3	374.190	372.290	371.780	372.200	373.890	374.550
4	376.200	373.390	372.630	373.250	375.750	376.730
5	379.840	375.380	374.180	375.170	379.130	380.690
6	386.980	379.280	377.210	378.920	385.760	388.440
7	399.870	386.330	382.680	385.690	397.720	402.440
8	421.760	398.300	391.970	397.180	418.040	426.230
9	448.100	412.700	403.150	411.020	442.480	454.840
10	473.900	426.810	414.100	424.570	466.420	482.870
11	494.750	438.210	422.950	435.520	485.780	505.520
12	505.700	444.200	427.600	441.270	495.940	517.420
13	511.500	447.370	430.060	444.310	501.320	523.720
14	515.010	449.290	431.550	446.160	504.580	527.530
15	518.400	451.140	432.990	447.930	507.720	531.210
16	521.750	452.970	434.410	449.690	510.830	534.850
17	525.000	454.750	435.790	451.410	513.850	538.390
18	528.110	456.450	437.110	453.040	516.730	541.760
19	531.040	458.050	438.360	454.580	519.460	544.950
20	530.180	459.910	445.180	458.930	522.360	543.620

フラックス(n/cm²・s)

軸方向 ノード	ラ ッ パ 管 面 番 号					
	(A)	(B)	(C)	(D)	(E)	(F)
1	7.792×10 ¹³	5.694×10 ¹³	5.230×10 ¹³	6.007×10 ¹³	8.359×10 ¹³	9.195×10 ¹³
2	7.792×10 ¹³	5.694×10 ¹³	5.230×10 ¹³	6.007×10 ¹³	8.359×10 ¹³	9.195×10 ¹³
3	7.792×10 ¹³	5.694×10 ¹³	5.230×10 ¹³	6.007×10 ¹³	8.359×10 ¹³	9.195×10 ¹³
4	1.331×10 ¹⁴	9.726×10 ¹³	8.933×10 ¹³	1.026×10 ¹⁴	1.428×10 ¹⁴	1.571×10 ¹⁴
5	2.524×10 ¹⁴	1.844×10 ¹⁴	1.694×10 ¹⁴	1.946×10 ¹⁴	2.707×10 ¹⁴	2.978×10 ¹⁴
6	4.120×10 ¹⁴	3.011×10 ¹⁴	2.765×10 ¹⁴	3.176×10 ¹⁴	4.419×10 ¹⁴	4.861×10 ¹⁴
7	9.098×10 ¹⁴	6.649×10 ¹⁴	6.107×10 ¹⁴	7.014×10 ¹⁴	9.760×10 ¹⁴	1.074×10 ¹⁵
8	1.242×10 ¹⁵	9.078×10 ¹⁴	8.337×10 ¹⁴	9.577×10 ¹⁴	1.332×10 ¹⁵	1.466×10 ¹⁵
9	1.330×10 ¹⁵	9.717×10 ¹⁴	8.925×10 ¹⁴	1.025×10 ¹⁵	1.426×10 ¹⁵	1.569×10 ¹⁵
10	1.138×10 ¹⁵	8.319×10 ¹⁴	7.641×10 ¹⁴	8.776×10 ¹⁴	1.221×10 ¹⁵	1.343×10 ¹⁵
11	7.489×10 ¹⁴	5.473×10 ¹⁴	5.027×10 ¹⁴	5.774×10 ¹⁴	8.034×10 ¹⁴	8.838×10 ¹⁴
12	4.147×10 ¹⁴	3.030×10 ¹⁴	2.783×10 ¹⁴	3.197×10 ¹⁴	4.448×10 ¹⁴	4.893×10 ¹⁴
13	2.062×10 ¹⁴	1.507×10 ¹⁴	1.384×10 ¹⁴	1.590×10 ¹⁴	2.212×10 ¹⁴	2.433×10 ¹⁴
14	1.075×10 ¹⁴	7.857×10 ¹³	7.216×10 ¹³	8.289×10 ¹³	1.153×10 ¹⁴	1.269×10 ¹⁴
15	1.075×10 ¹⁴	7.857×10 ¹³	7.216×10 ¹³	8.289×10 ¹³	1.153×10 ¹⁴	1.269×10 ¹⁴
16	1.075×10 ¹⁴	7.857×10 ¹³	7.216×10 ¹³	8.289×10 ¹³	1.153×10 ¹⁴	1.269×10 ¹⁴
17	1.075×10 ¹⁴	7.857×10 ¹³	7.216×10 ¹³	8.289×10 ¹³	1.153×10 ¹⁴	1.269×10 ¹⁴
18	1.075×10 ¹⁴	7.857×10 ¹³	7.216×10 ¹³	8.289×10 ¹³	1.153×10 ¹⁴	1.269×10 ¹⁴
19	1.075×10 ¹⁴	7.857×10 ¹³	7.216×10 ¹³	8.289×10 ¹³	1.153×10 ¹⁴	1.269×10 ¹⁴
20	1.075×10 ¹⁴	7.857×10 ¹³	7.216×10 ¹³	8.289×10 ¹³	1.153×10 ¹⁴	1.269×10 ¹⁴

表5.2-2 内側反射体NFRI0Fラッパ管試料の照射温度

試料No.	面	軸位置 (DFCB,mm)	照射量 (10^{22} n/cm ²)	照射温度(計算) (°C)	照射温度(測定) (°C)
J2WT12	C	0	2.9	380	402
	F	0	5.1	397	394
J2WT14	C	275	5.2	403	452
	F	275	9.1	453	444
J2WT16	C	550	2.5	424	489
	F	550	4.4	506	499

表5.2-3 内側反射体NFRI0Fの補正後温度分布

(単位：℃)

軸方向 ノード	ラ ッ パ 管 面 番 号					
	(A)	(B)	(C)	(D)	(E)	(F)
1	371.427	371.357	371.339	371.354	371.416	371.440
2	372.854	372.715	372.678	372.708	372.832	372.880
3	374.247	374.041	373.985	374.031	374.214	374.286
4	376.284	375.978	375.895	375.963	376.235	376.342
5	379.984	379.498	379.367	379.475	379.907	380.077
6	387.222	386.385	386.159	386.345	387.089	387.382
7	400.297	398.825	398.428	398.755	400.063	400.577
8	422.510	419.958	419.270	419.836	422.105	422.996
9	449.225	445.375	444.336	445.192	448.614	449.958
10	475.398	470.277	468.896	470.034	474.586	476.374
11	496.553	490.403	488.744	490.110	495.577	497.724
12	507.660	500.970	499.165	500.651	506.598	508.934
13	513.545	506.570	504.688	506.238	512.438	514.873
14	517.104	509.956	508.027	509.615	515.970	518.466
15	520.537	513.223	511.249	512.875	519.376	521.931
16	523.936	516.456	514.438	516.100	522.748	525.360
17	527.242	519.601	517.539	519.237	526.029	528.697
18	530.390	522.596	520.493	522.225	529.153	531.874
19	533.370	525.431	523.289	525.053	532.110	534.882
20	534.312	537.854	538.596	537.904	534.706	533.634

表5.2-4 内側反射体NFRI0Fラッパ管試料の照射温度

試料No.	軸位置 (DFCB,mm)	面	照射量 (10^{22}n/cm^2)	照射温度 (計算、 $^{\circ}\text{C}$)	スエリング (%)	硬さ測定による 温度 ($^{\circ}\text{C}$)
J2WT16	275	A	7.7	448	0.1 ± 0.1	453
		D	5.9	411	0.0 ± 0.1	469
		C	5.2	403	-0.1 ± 0.1	452
		F	9.1	453	0.4 ± 0.1	444

表5.2-5 内側反射体上部グリッド板とロックナット及び反射体要素とのギャップ量

(X線ラジオグラフィーから)

反射体名	ギャップ量(mm)	
	上部グリッド板-ロックナット	上部グリッド板-反射体要素
NFRI09	2.3	2.5
NFRI0D	3.5	1.7
NFRI01	3.4	1.6
NFRI0X	3.3	1.7
NFRI1F	3	2.0 (1本は接触)
NFRI0F	3.5	0.5~1.7

PIEで観察された湾曲
方向を正とする。

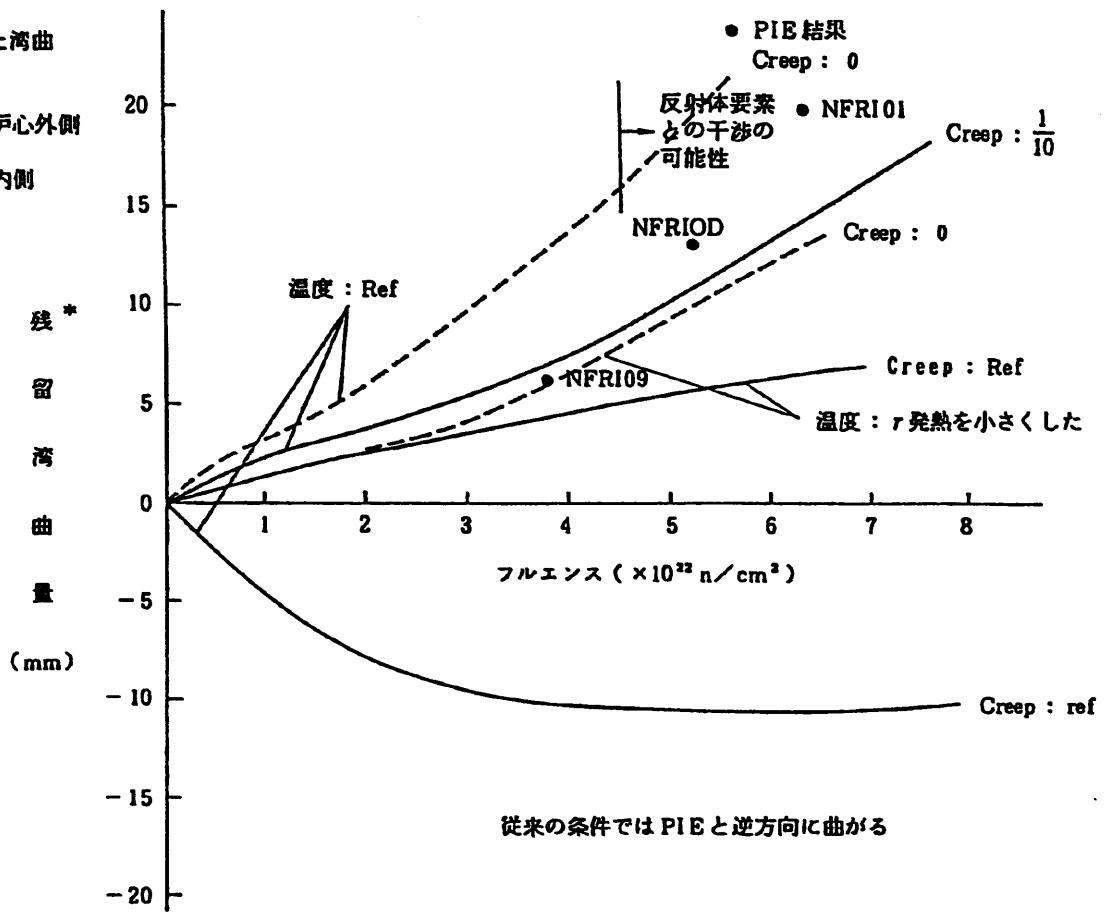
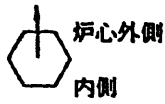


図5.1-1 残留湾曲量の経時変化

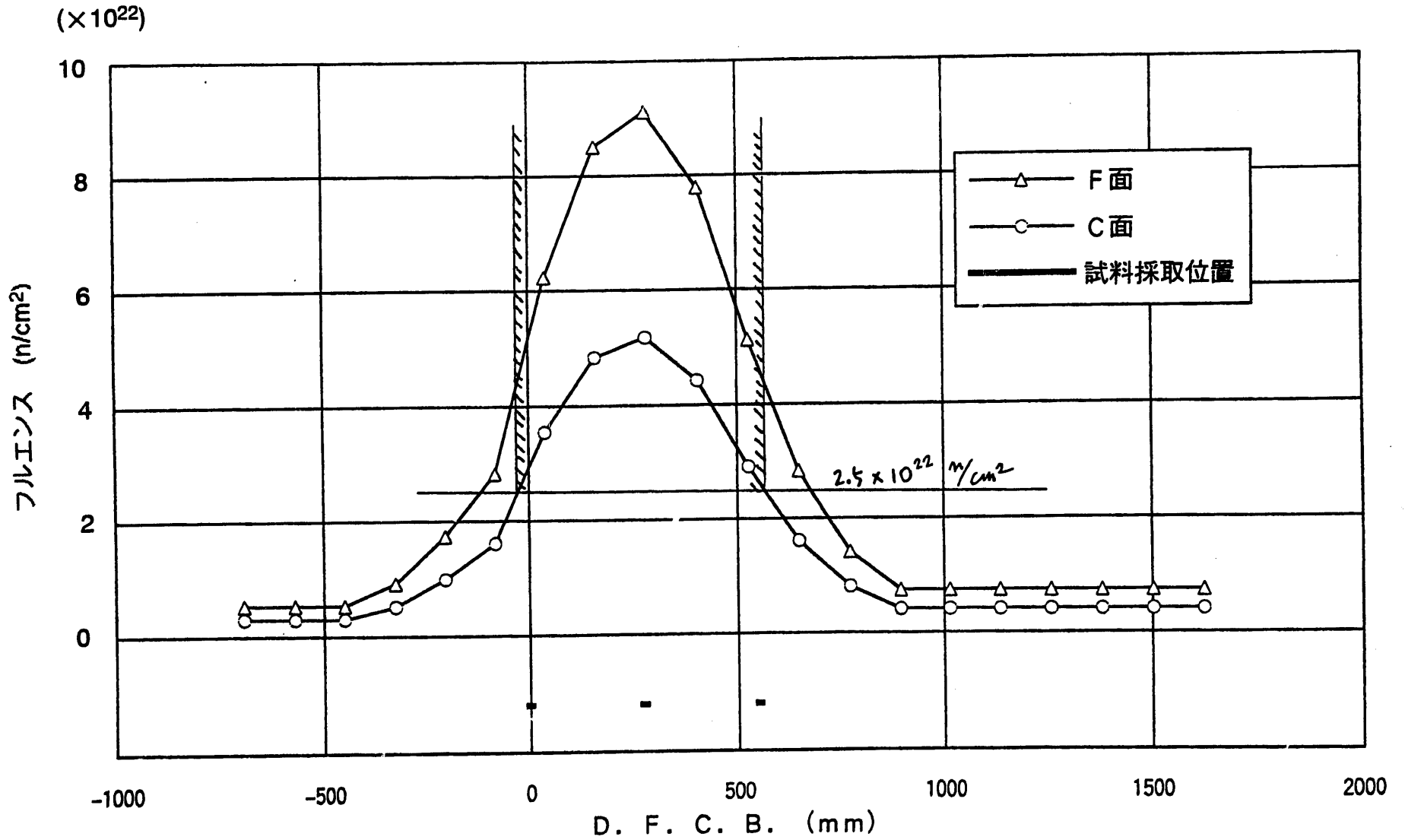


図5.2-1 フルエンスの軸方向分布 (NFRI0F)

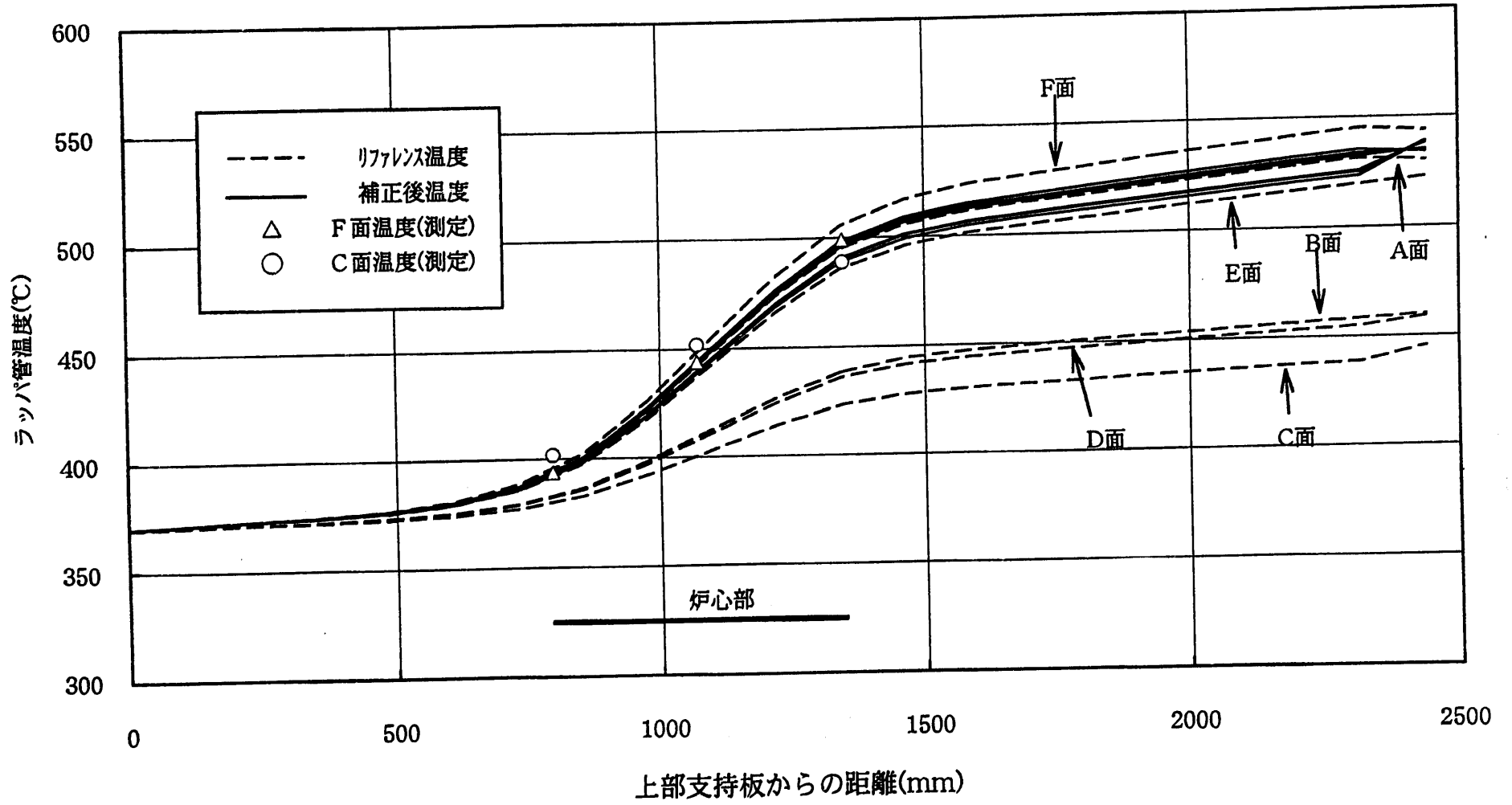


図5.2-2 ラップ管硬さ測定結果から補正した温度分布

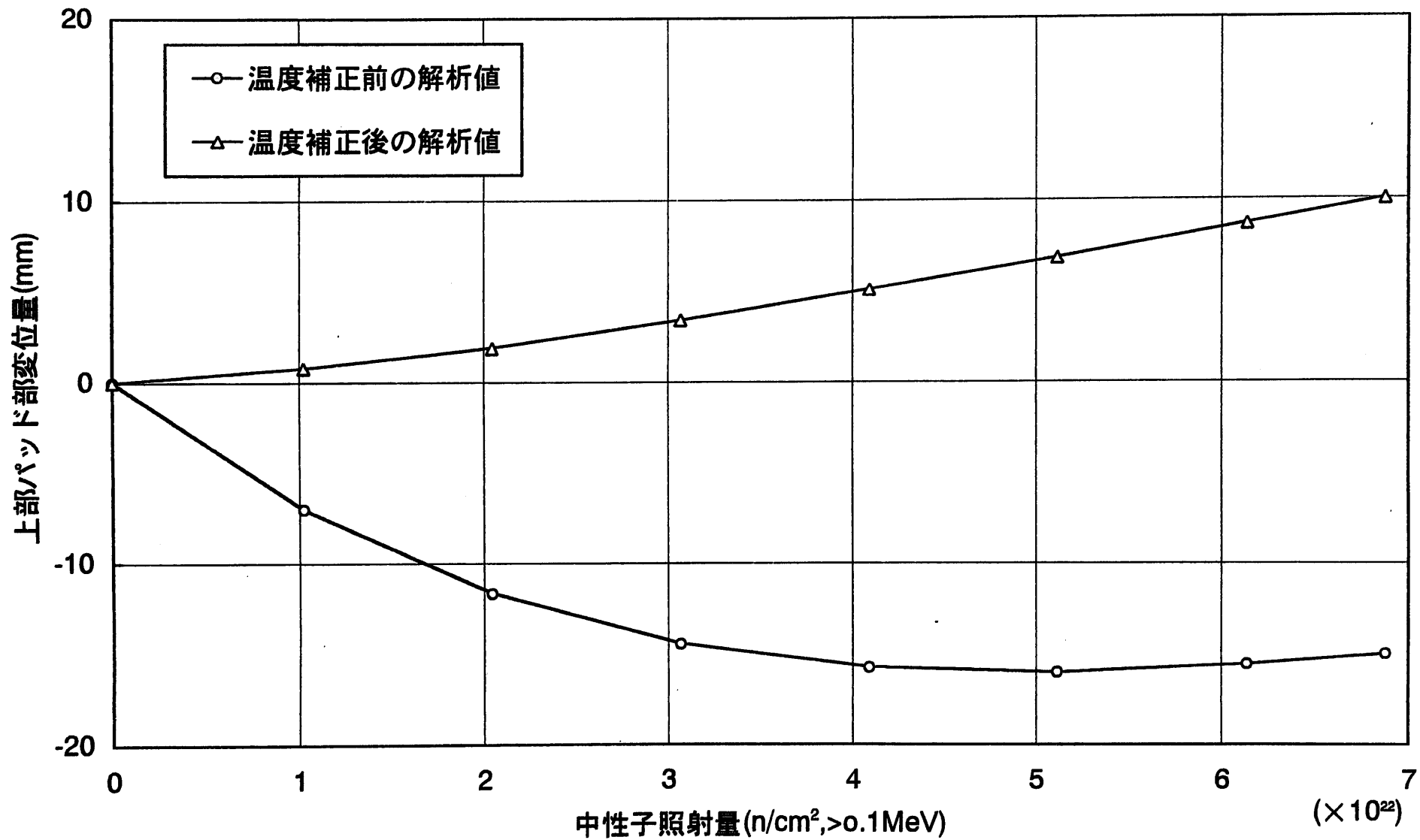


図5.2-3 「BEACON」による温度補正前後の解析結果の比較

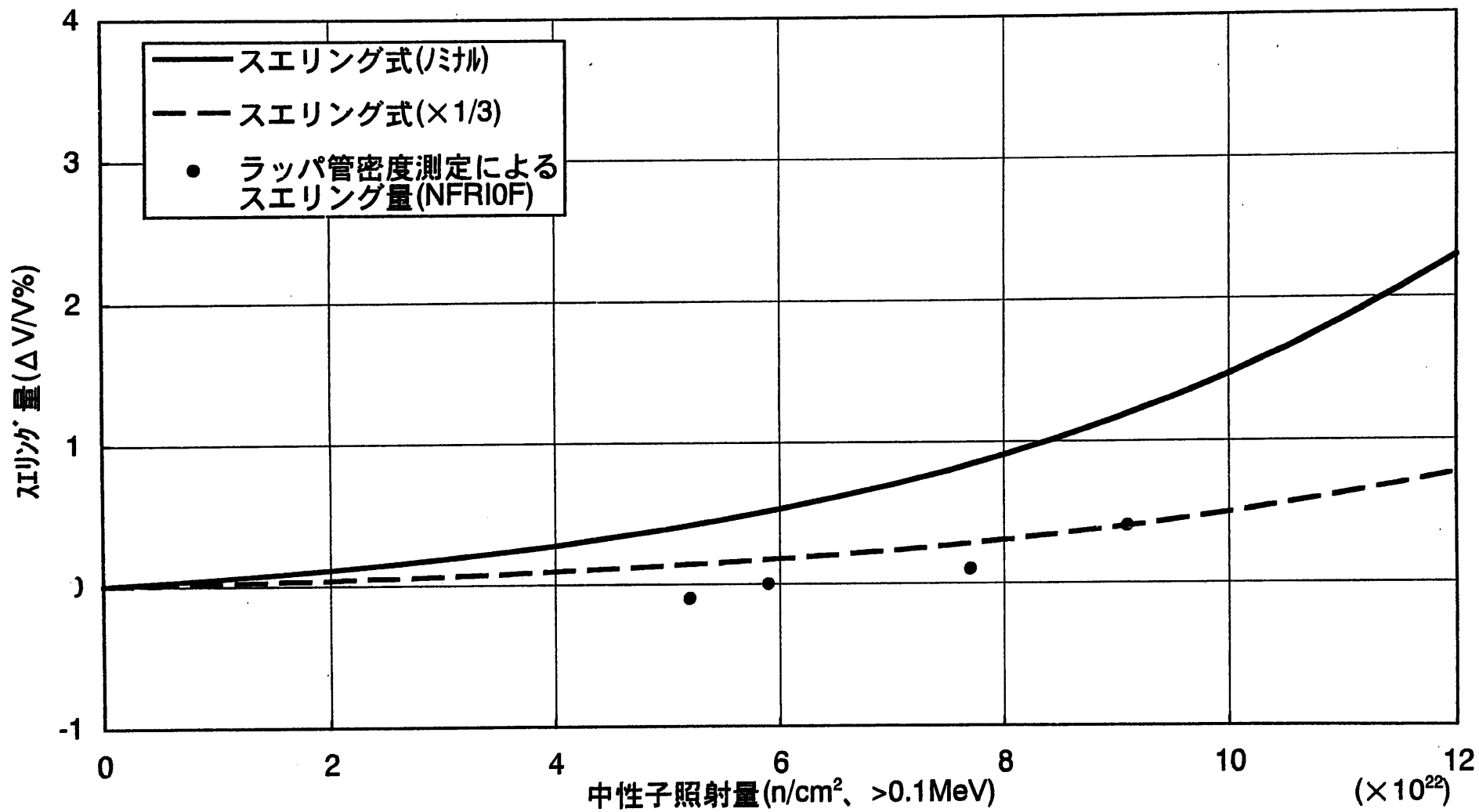


図5.2-4 評価式によるスエリング量の比較

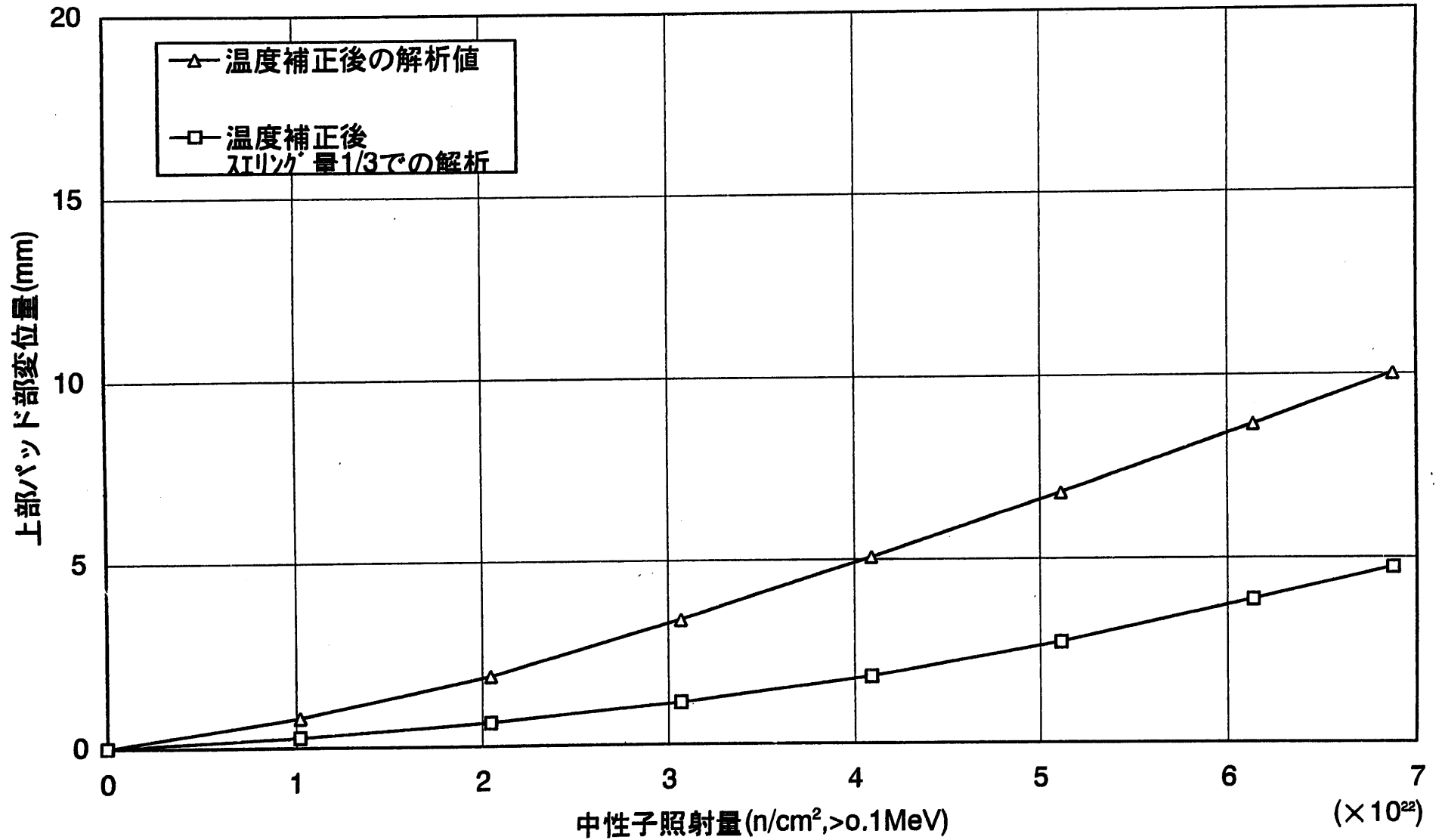


図5.2-5 「BEACON」解析結果とスエリング量の関係

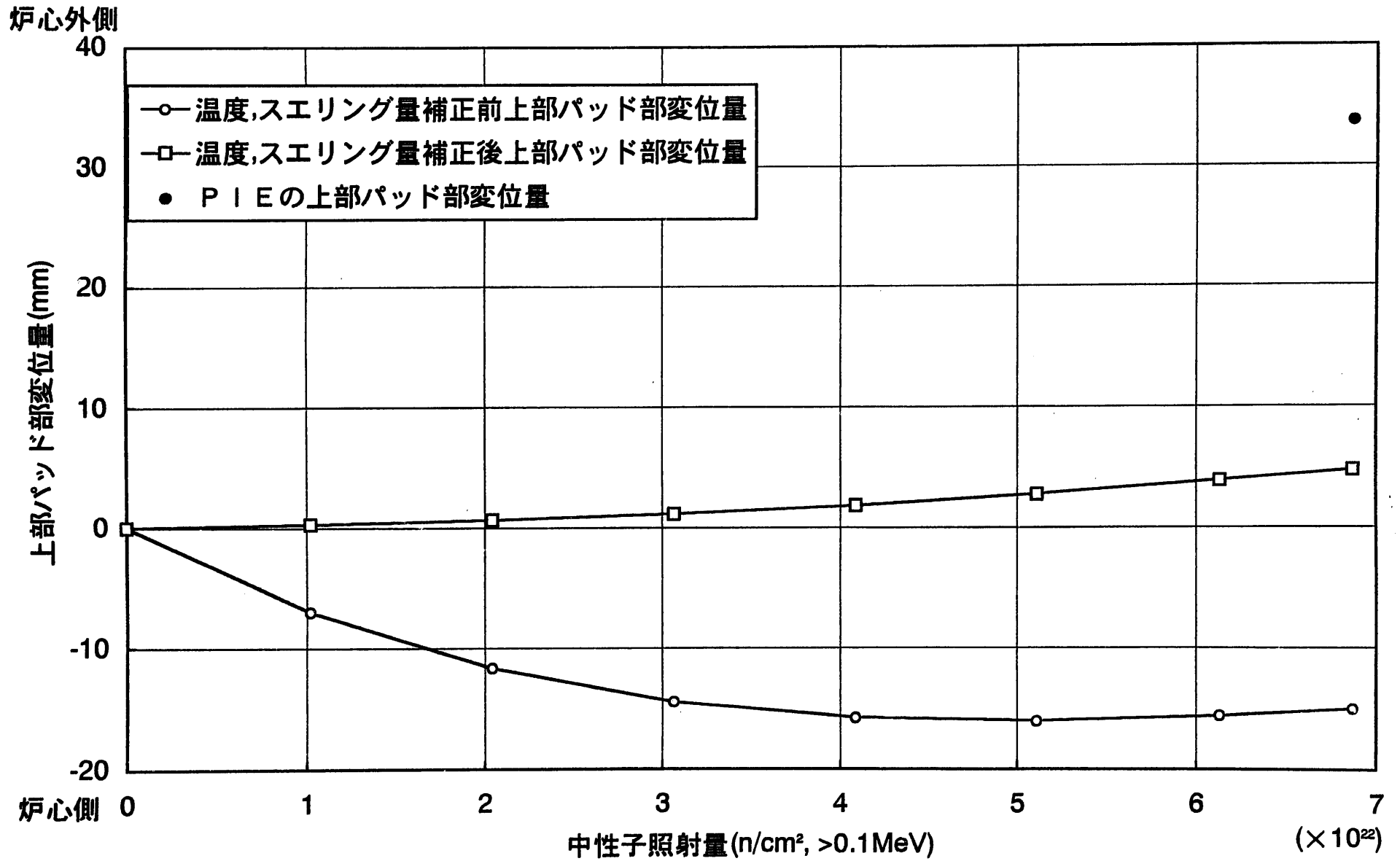
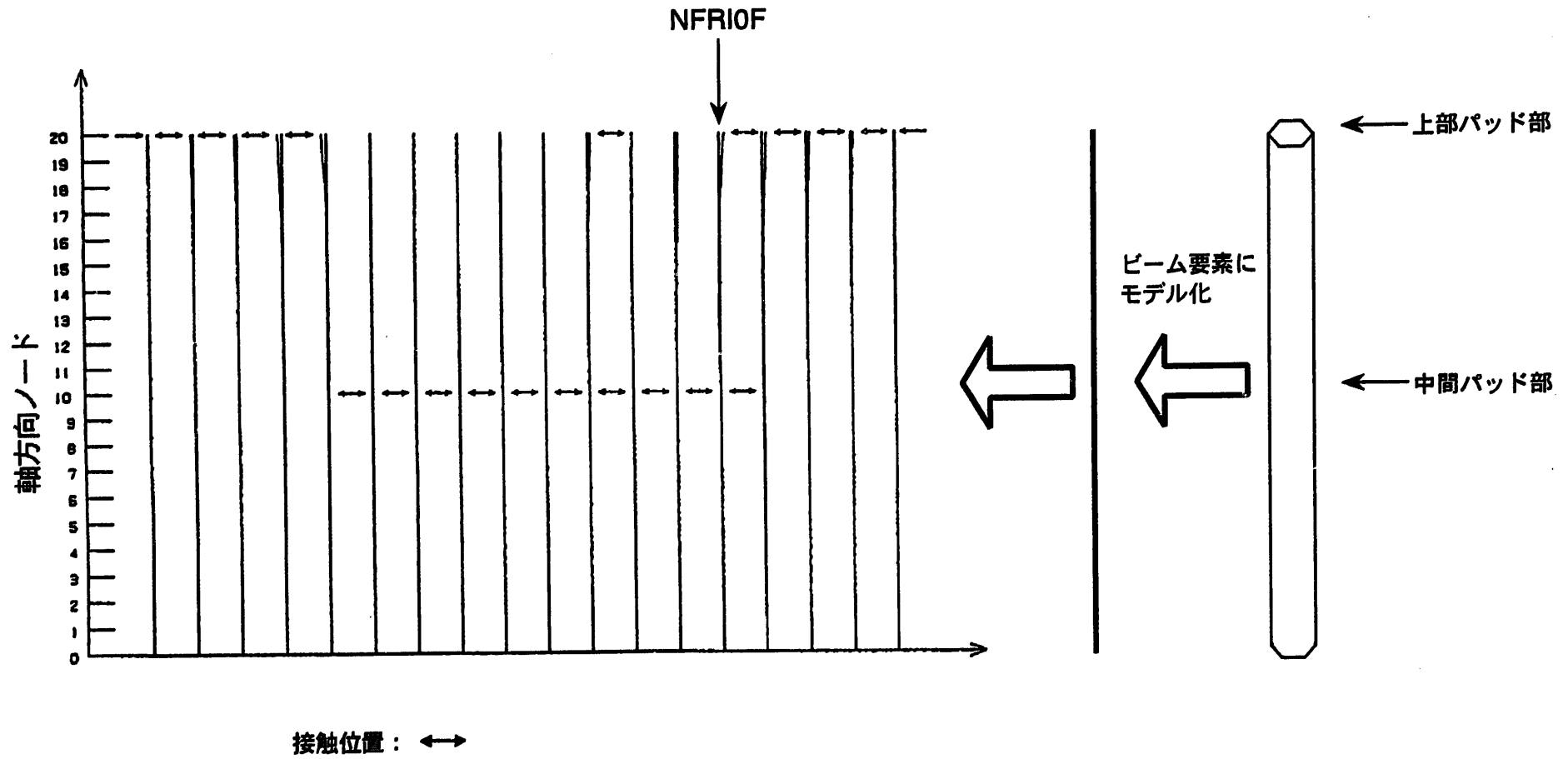


図5.2-6 温度補正前後の上部パッド部残留湾曲量の変化の比較



接触位置：↔

図5.2-7 内側反射体NFRI0Fを含む燃料列の湾曲状況(14サイクル,EOC)

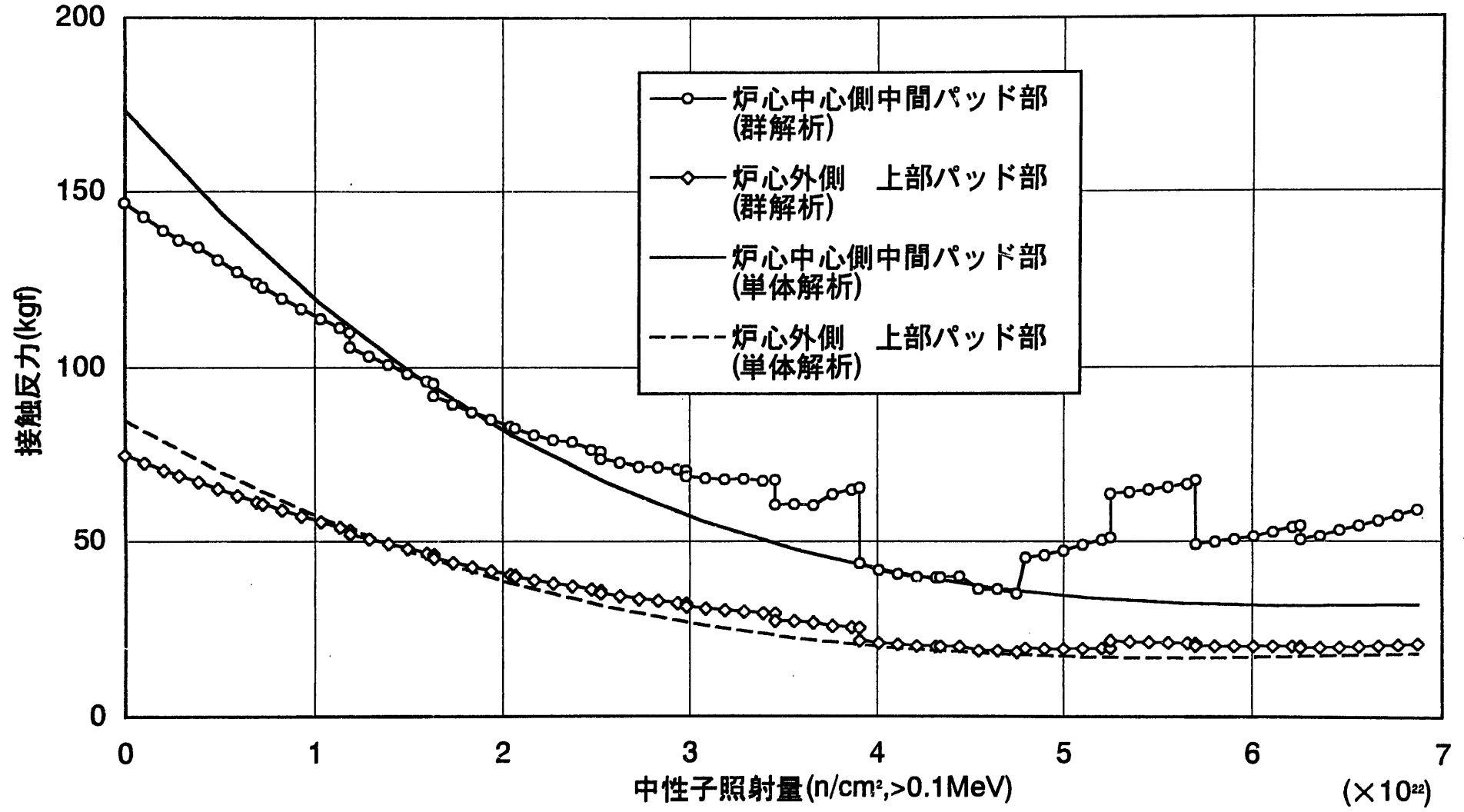


図5.2-8 パッド部接触反力の照射による変化(NFRI0F)

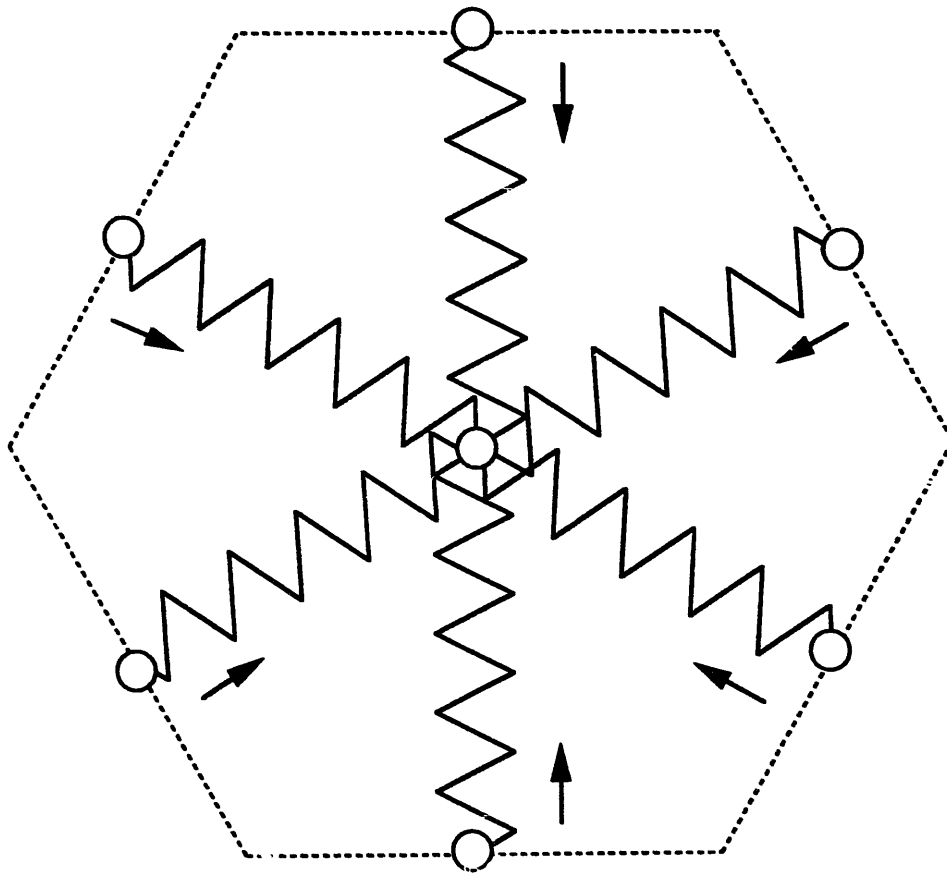


図5.2-9 中間パッドのクリープ圧縮モデル

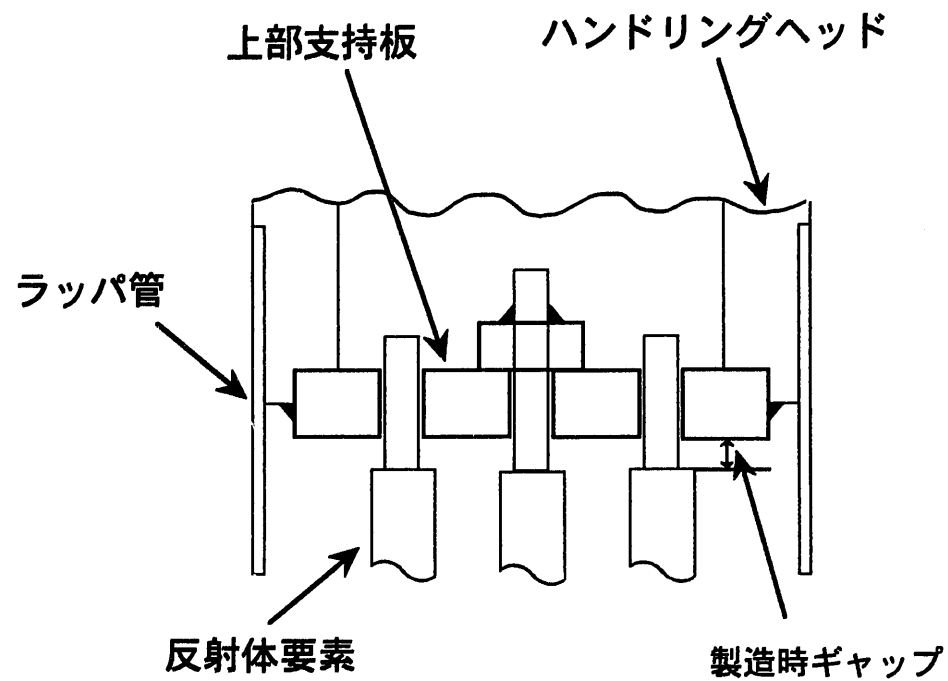
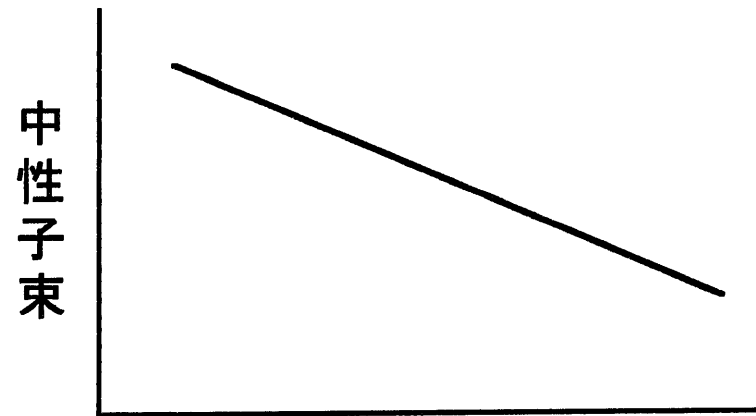
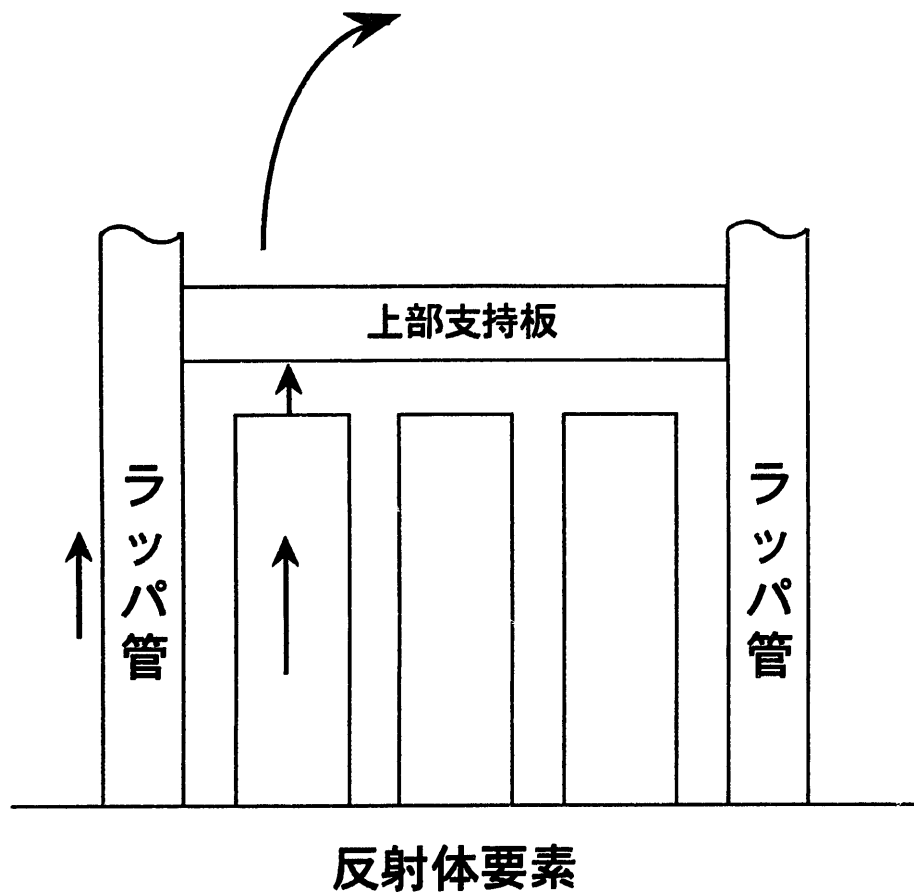


図5.2-10 内側反射体構造（上部構造）

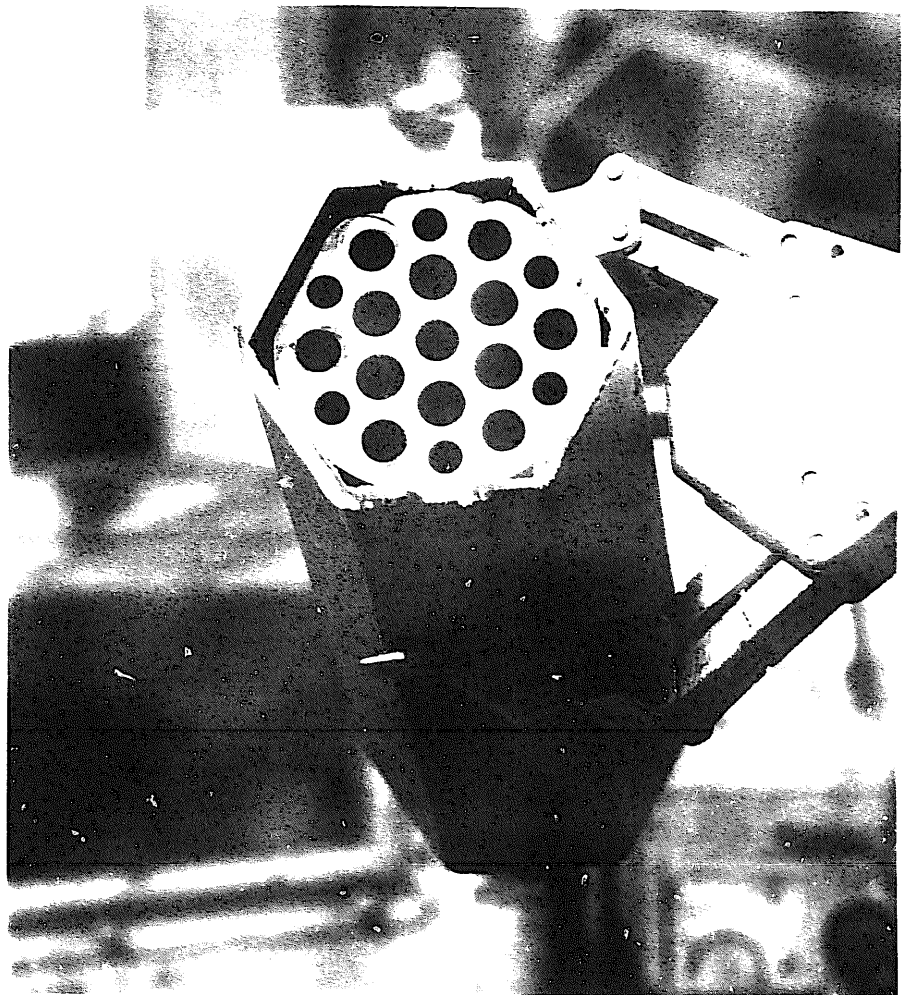
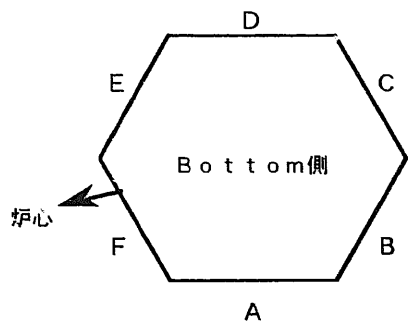


図5.2-11 内側反射体上部グリッド板の外観 (NFRI0F)

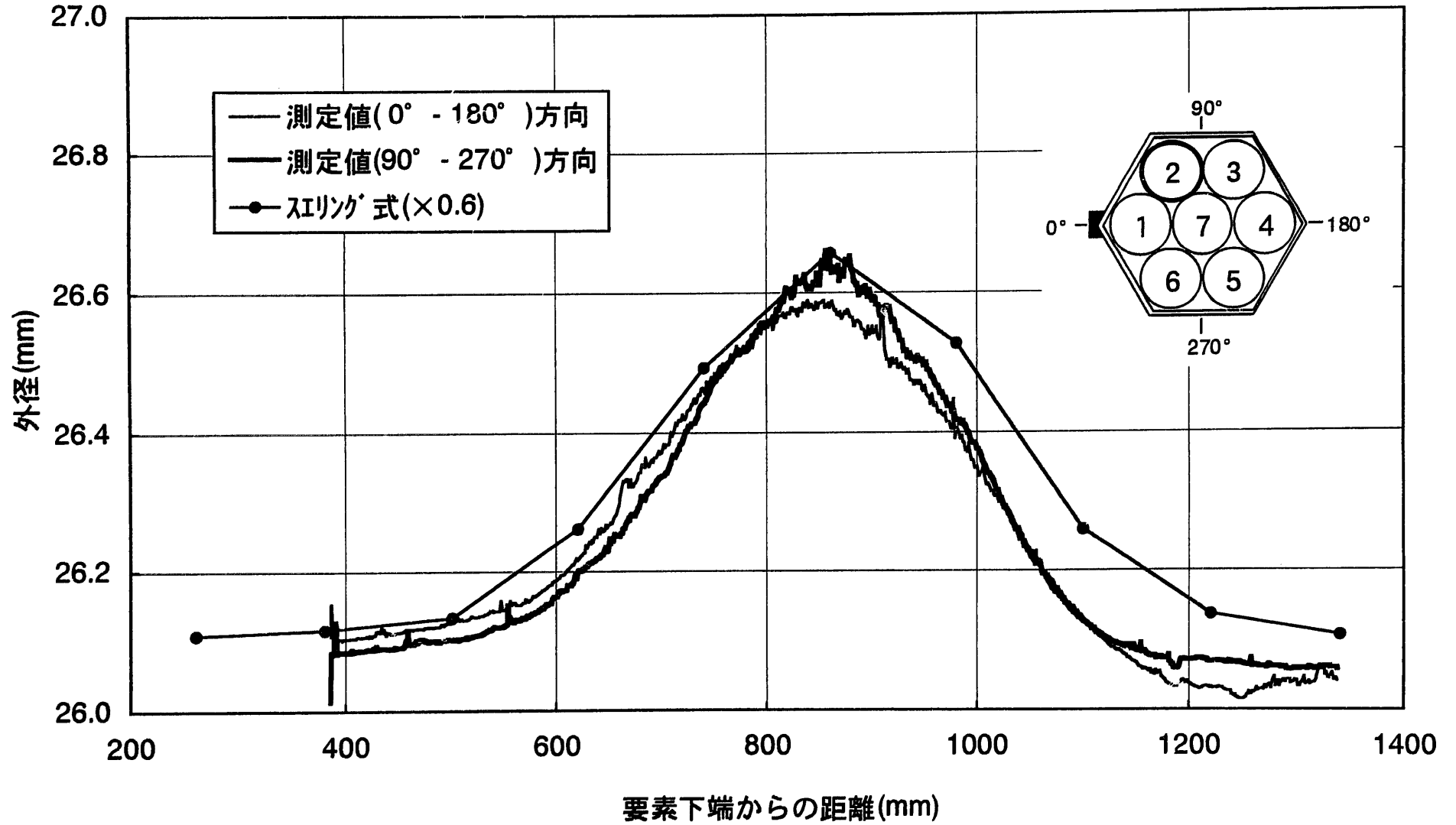


図5.2-12 反射体要素外径軸方向分布の比較 (NFRI0F, No.2要素)

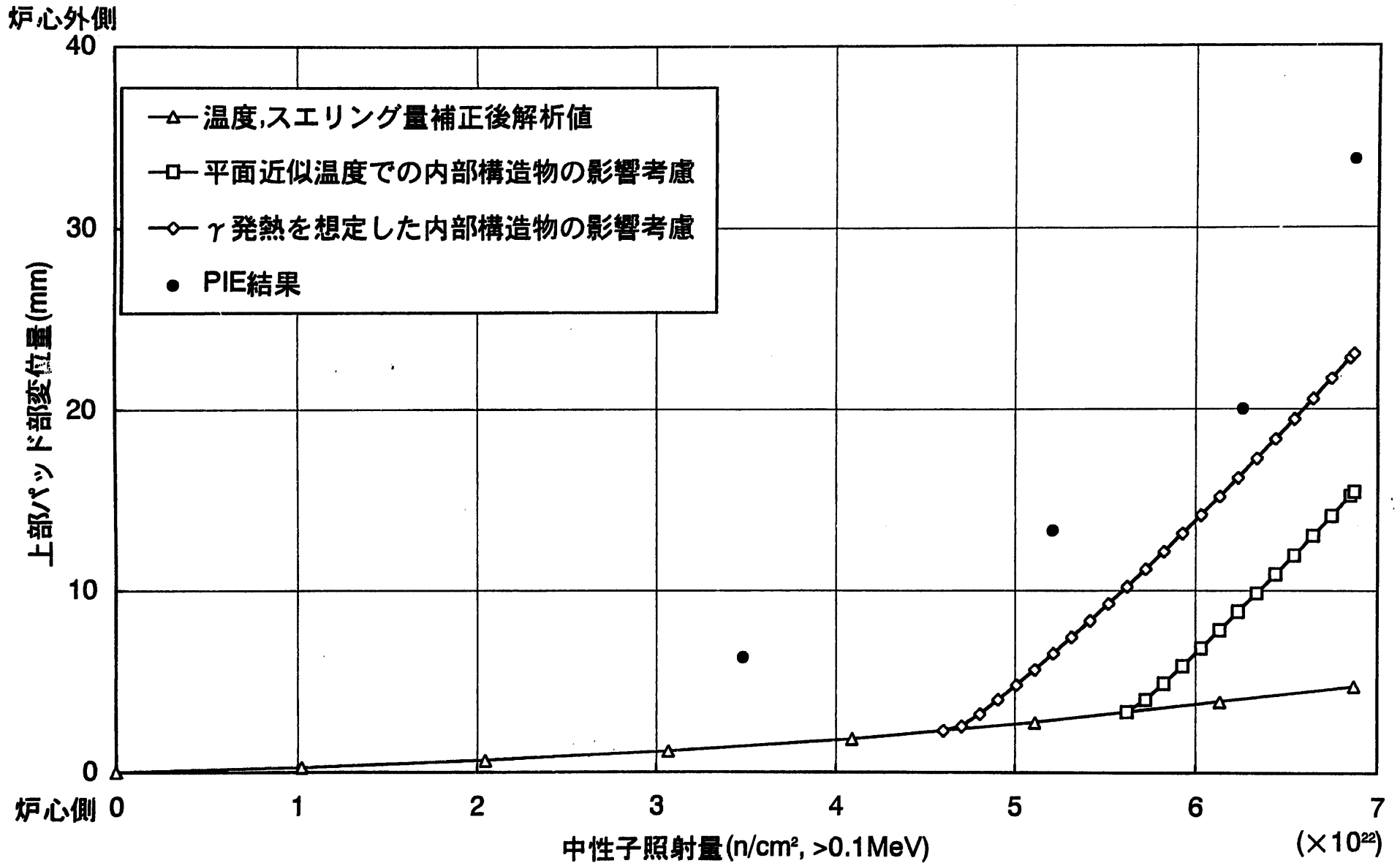


図5.2-13 ラubber管上部パッド部残留湾曲量変化

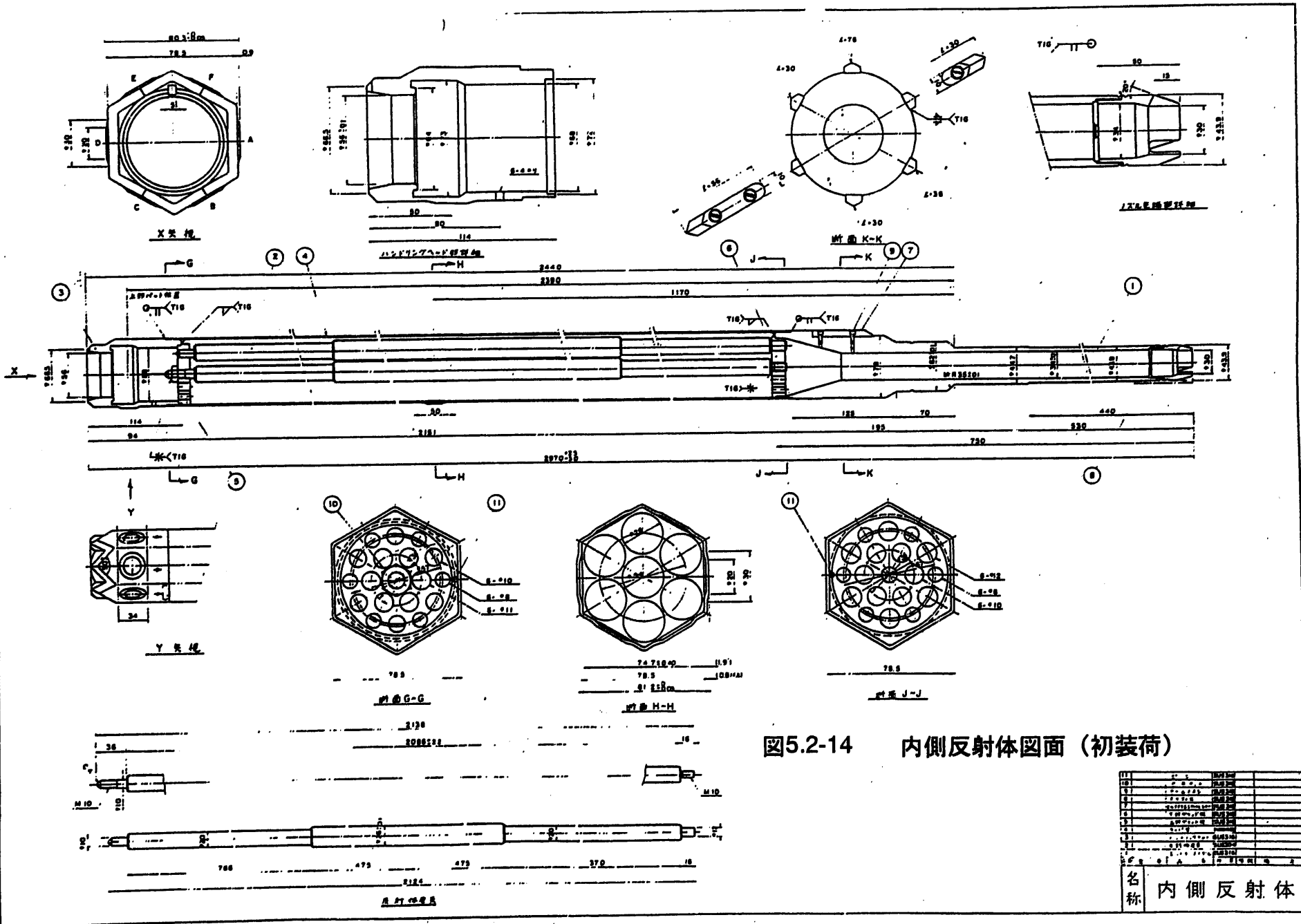


图5.2-14 内側反射体図面 (初装荷)

10	...	...
9	...	...
8	...	...
7	...	...
6	...	...
5	...	...
4	...	...
3	...	...
2	...	...
1	...	...
0	...	...
名称		内側反射体

6. まとめ

「常陽」反射体の照射変形に関わる PIE データの分析及び炉内照射変形解析を行った結果、以下の結論が得られた。

- ①「BEACON」、「FINAS」、「RAINBOW」の各解析コードにおいて、同一の解析モデル及び解析条件を使用した場合には、それらの結果に顕著な差異は認められなかった。また、ビームモデルとシェルモデルの比較結果から、両者の差はほとんどなく、解析モデルの簡略化、計算時間の短縮等の観点から、ビームモデルによる集合体湾曲変形のモデル化は有効であることを確認した。
- ②ラッパー管の照射後硬さ測定から推定した炉内温度分布と、従来の炉心温度解析手法によって予測した温度分布との間に差異が認められた。炉内温度分布は、ラッパー管の周方向温度差について実測値が解析した予測値に比べて小さいことが特徴的であった。実測値に基づいて補正した温度条件を用いると、集合体湾曲の方向について解析結果が PIE 結果と一致した。
- ③ラッパー管の密度測定から見直したスエリング式を使用した結果、従来のスエリング式を用いた結果より歪が小さくなり、さらに PIE 結果と比較しても、湾曲量については過小評価していることがわかった。
- ④内部構造物（反射体要素）のスエリング膨張による集合体の湾曲モーメントが反射体の湾曲に寄与している可能性が高い。「常陽」炉心変形解析を行う場合にはラッパー管と内部構造物との相互作用を考慮した湾曲解析手法を確立する必要がある。

7. 謝辞

本検討を行うにあたり、大洗工学センター システム技術開発部 燃料材料技術開発グループ 浅賀健男グループリーダーより有益な助言をいただきました。また、密度測定及び硬さ測定のデータを提供して頂いた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 照射材料試験室の関係者の方々、湾曲解析を行うにあたり、多大なるご助力を頂いた瑞豊産業株式会社 天沼伸幸氏に対して、ここに深く感謝の意を表します。

8. 参考文献

- 1) 動燃事業団「FINAS 汎用非線形構造解析システム解析例題書」
PNC TN941 85-172 1985 年
- 2) 「Developing of FBR core irradiation-induced bowing analysis code RAINBOW」 Transactions of the 14th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMiRT 14) , Lyon , France , August 17-22,1997
- 3) 動燃事業団「被覆管硬さ測定による高速炉燃料ピンの炉内照射温度評価」
PNC TN9410 94-302 1994 年 12 月

Appendix

「常陽」MK-II炉心燃料集合体によるスエリング式及び照射クリープ式の導出について

「常陽」MK-II炉心燃料の挙動評価の中間報告及び最終報告におけるスエリング式及び照射クリープ式の導出経緯について示す。

1. 中間報告におけるスエリング式

初装荷及び一次取り替え材(PFD001,PFD003,PFD029,PFD105,PFD153)の密度測定データ6点から導出された式である。 α については一定値を取ると仮定し、 T_0 及び τ を適切と思われる範囲で独立に変化させ、計算値とスエリング実測値との差が最小となる T_0 、 τ の組み合わせを求めた。

$$\alpha = 0.75$$

$$T_0 = 450$$

$$\tau = 8.4$$

2. 中間報告における照射クリープ式

ラップ管面中央の膨れ量の測定値を $\Delta D1$ 、その両側の測定値を $\Delta D2'$ とすれば、スエリング量 ΔDs 及び照射クリープ量 ΔDc はそれぞれ次式のように表させる。

$$\Delta Dc = (\Delta D1 - \Delta D2') / 0.7$$

$$\Delta Ds = (\Delta D2' - 0.3 \Delta D1) / 0.7$$

$$\text{ここで、} \Delta Dc = \frac{K}{16} \cdot \frac{[(L_F + T) / \sqrt{3}]^4}{T^3} \cdot P$$

から、PIEデータより求めた照射クリープ量 ΔDc とラップ管内外圧差 P より、クリープ定数 K を求めた。さらに、

$$K/S = B_0 \cdot \phi t / S + D$$

において、横軸に $\phi t / S$ 、縦軸に K/S のデータをプロットし最小二乗法により B_0 と D を決定した。

$$B_0 = 4.16 \times 10^{-27} (\text{kgf/mm}^2 \cdot \text{n/cm}^2)^{-1}$$

$$D = 6.01 \times 10^{-2} (\text{kgf/mm}^2)^{-1}$$

3. 最終報告書におけるスエリング式

初装荷、一次取り替え及び一部の二次取り替え材(PFD001,PFD003,PFD018,PFD029,PFD153,PFD209,PFD210)7体82点のラップ管変形量データから導出された式である。比較的データが豊富であったため、 α 、 T_0 、 τ の3つのパラメータとも適切と思われる範囲で独立に変化させ、実測値との差が最小となるパラメータの組み合わせを求めた。

$$\alpha = 0.22$$

$$T_0 = 356$$

$$\tau = 18.5$$

4. 最終報告における照射クリープ式

ラップ管面中央の膨れ量の測定値を $\Delta D1$ 、その両側の測定値を $\Delta D2'$ とすれば、スエリング量 ΔDs 及び照射クリープ量 ΔDc はそれぞれ次式のように表させる。

$$\Delta Dc = (\Delta D1 - \Delta D2') / 0.7$$

$$\Delta Ds = (\Delta D2' - 0.3 \Delta D1) / 0.7$$

ここで、
$$\Delta Dc = \frac{K}{16} \cdot \frac{[(L_F + T) / \sqrt{3}]^4}{T^3} \cdot P \cdot \frac{Dc}{Dc - s}$$

$Dc / Dc - s$: 軸方向の拘束による補正係数

から、PIEデータより求めた照射クリープ量 ΔDc とラップ管内外圧力差 P より、クリープ定数 K を求めた。さらに、

$$K / S = B_0 \cdot \phi t / S + D$$

において、横軸に $\phi t / S$ 、縦軸に K / S のデータをプロットし最小二乗法により B_0 と D を決定した。

$$B_0 = 2.98 \times 10^{-27} (\text{kgf/mm}^2 \cdot \text{n/cm}^2)^{-1}$$

$$D = 6.75 \times 10^{-2} (\text{kgf/mm}^2)^{-1}$$

以下に、スエリング式及び照射クリープ式をまとめて示す。

(スエリング式)

$$\frac{\Delta V}{V} = R \left[\phi t + \frac{1}{\alpha} \ln \left[\frac{1 + \exp[\alpha(\tau - \phi t)]}{1 + \exp(\alpha\tau)} \right] \right]$$

$$R = \exp(0.0419 + 1.498\beta + 0.122\beta^2 - 0.332\beta^3 - 0.441\beta^4)$$

$$\beta = (T - 450) / 100$$

中間報告 $\alpha = 0.75$

$$\tau = 8.4$$

$$\beta = (T - 356) / 100$$

最終報告 $\alpha = 0.22$

$$\tau = 18.5$$

$\Delta V / V$: スエリング	(Vol%)
ϕt : 中性子照射量	($10^{22} \text{n/cm}^2, E > 0.1 \text{MeV}$)
T : 温度	($^{\circ}\text{C}$)
R : 定常スエリング速度	(%/ 10^{22}n/cm^2)
τ : 潜伏期間	(10^{22}n/cm^2)

(照射クリープ式)

$$K = B_0 \cdot \phi t + D \cdot S$$

K = クリープ定数 (kgf/mm²)⁻¹

ϕt = 中性子照射量 (n/cm², E>0.1MeV)

S = スエリング (Volume fraction)

中間報告 B₀ : 4.16 × 10⁻²⁷ (kgf/mm² · n/cm²)⁻¹

D : 6.01 × 10⁻² (kgf/mm²)⁻¹

最終報告 B₀ : 2.98 × 10⁻²⁷ (kgf/mm² · n/cm²)⁻¹

D : 6.75 × 10⁻² (kgf/mm²)⁻¹