

FBR ラッパ管の冷却材圧力に起因する 炉内変形挙動評価

1991年3月

動力炉・核燃料開発事業団
大洗工学センター

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせください。

〒311-13 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002

動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター システム開発推進部・技術管理室

Enquires about copyright and reproduction should be addressed to: Technology Management Section O-arai Engineering Center, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation 4002 Narita-cho, O-arai-machi, Higashi-Ibaraki, Ibaraki-ken, 311-13, Japan

動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation)

FBRラッパ管の冷却材圧力に起因する炉内変形挙動評価

菟田成一*、若林利男*、山下芳興*

要 旨

(目的) 本研究の第一の目的は、FBR燃料集合体ラッパ管の冷却材圧力に起因する曲げ応力によるバルジング変形量に関する従来の簡易評価手法の妥当性を検証することである。第二の目的は、ラッパ管の最大対面巾を求める際に、冷却材圧力に起因する膜応力によるクリープ変形を無視して良いことを確認することである。第三の目的は、ラッパ管壁内外面温度差に起因する応力のバルジング変形挙動への影響を調べることである。

(方法) 簡易評価手法にてバルジング変形量を評価するとともに、汎用有限要素法非弾性解析システムFINASを使用して、バルジング変形を含めた炉内変形挙動を解析評価した。主要な評価条件は、以下の通りである。

- ラッパ管材質:改良オーステナイト鋼(PNC1520)、
- ラッパ管製作時肉厚:4.3 mm、
- ラッパ管壁内外面圧力差:2 kg/cm²、
- 高速中性子照射量:2.72×10²³ n/cm²

(結論) 本研究で得られた主要な結論を以下に示す。

- (1) 照射末期のバルジング量の簡易評価値は、ラッパ管の肉厚方向温度分布が平坦な条件での解析値より約15%大きく、簡易評価手法は保守性がある。
- (2) 膜応力によるクリープ変形に起因する対面巾増加率解析値は照射末期で0.03%と小さく、膜応力によるクリープ変形に起因する対面巾増加は無視して良い。
- (3) 管壁温度差(50°C)による応力を考慮した場合、照射末期のバルジング量は増加する可能性があるものの、その増加率は20%未満である。

Mar., 1991

Evaluation of in-reactor deformation behaviors of FBR duct tube due to coolant pressure

Seiichi Komoda*, Toshio Wakabayashi* and Yoshioki Yamashita*

Abstract

One of the aims of this work is to justify the conventional simple evaluation method on the magnitude of the bulging deformation due to bending stresses resulting from coolant pressure in the duct tube of FBR fuel assemblies. The second aim is to confirm that the creep deformation due to membrane stresses resulting from coolant pressure may be ignored in order to evaluate the maximum flat-to-flat distance of the duct. The other aim is to investigate an effect of stresses resulting from a temperature difference across the duct wall on bulging deformation behaviors.

The magnitude of the bulging deformation is evaluated by using the conventional simple evaluation method. In addition, the in-reactor deformation behaviors including the bulging deformation are analyzed by using the general purpose Finite Element Non-linear Structural Analysis System (FINAS). The main conditions of the evaluation and analysis are as follows.

- Duct material ; an advanced austenitic steel (PNC1520),
- As-fabricated duct thickness ; 4.3 mm,
- Pressure difference across the duct wall ; 2 kg/cm²,
- Fast neutron fluence ; 2.72×10^{23} n/cm²

The main conclusions drawn in this study are as follows.

- (1) The conventional simple evaluation method is conservative, since the magnitude of the bulging deformation at the end of irradiation evaluated by the method was about 15 % greater than that by FINAS under the condition that the temperature distribution along the tube wall was flat.
- (2) The increase of the maximum flat-to-flat distance of the duct caused by the creep deformation due to the membrane stresses may be ignored, since the rate of increase was evaluated by FINAS to be very small (0.03 %) at the end of irradiation.
- (3) Even if the magnitude of the bulging deformation may increase by the stresses resulting from the temperature difference across the duct wall, the rate of increase is less than about 20 % at the end of irradiation under the condition that the temperature difference is 50 °C.

* Plant Engineering Office, Technology Development Division, Oarai Engineering Center

目 次

1. 緒 言	-----	1
2. 解析条件	-----	2
2.1 材料特性	-----	2
2.2 寸法条件および炉内使用条件	-----	4
2.3 有限要素モデル	-----	5
3. バルジング量の簡易評価	-----	6
3.1 簡易評価手法	-----	6
3.2 簡易評価の結果	-----	8
4. FINASによる詳細解析に基づく妥当性の検証	-----	9
4.1 簡易評価手法の妥当性	-----	9
4.2 膜応力によるクリープ変形を無視することの妥当性	-----	11
4.3 肉厚方向温度分布を無視することの妥当性	-----	12
5. 結 言	-----	13
謝 辞	-----	14
参考文献	-----	14

表 リ ス ト

第3.1表	簡易評価結果 (冷却材圧力 : 2 kg/cm ²) -----	17
第3.2表	簡易評価結果 (冷却材圧力 : 3 kg/cm ²) -----	17
第3.3表	簡易評価結果 (冷却材圧力 : 4 kg/cm ²) -----	17
第4.1表	肉厚方向温度分布平坦条件でのFINASによる主要解析結果 -----	19
第4.2表	照射末期における 端部での周方向応力・歪解析結果 (冷却材圧力 : 2 kg/cm ²) --	20

図 リ ス ト

第2.1図	ラッパ管(1/4モデル)の周方向メッシュ分割と境界条件 -----	15
第2.2図	応力・歪計算値出力用積分点と、バルジング量算出用節点 -----	16
第3.1図	バルジング量簡易評価値の照射期間および冷却材圧力への依存性 -----	18
第4.1図	照射初期での応力と湾曲形状の解析結果 (冷却材圧力 : 2 kg/cm ² 、温度条件 : 478 °C均一) -----	21
第4.2図	照射末期での端部応力、クリープ歪と湾曲形状の解析結果 (冷却材圧力 : 2 kg/cm ² 、温度条件 : 478 °C均一) -----	22
第4.3図	バルジング量解析結果と簡易評価結果の比較 (温度条件 : 478 °C均一) ---	23
第4.4図	照射初期での応力と湾曲形状の解析結果 (冷却材圧力 : 2 kg/cm ² 、温度条件 : 肉厚方向直線分布) -----	24
第4.5図	照射末期での端部における応力と歪の解析結果 (冷却材圧力 : 2 kg/cm ² 、温度条件 : 肉厚方向直線分布) -----	25
第4.6図	照射末期でのラッパ管平坦部湾曲形状解析結果の比較 (冷却材圧力 : 2 kg/cm ²) -----	26
第4.7図	バルジング量解析結果および簡易評価結果の比較 (冷却材圧力 : 2 kg/cm ²) -----	26

第1章 緒 言

FBR燃料集合体のラッパ管は、内壁に加わる冷却材圧力と高速中性子照射に起因してクリープ変形するため、六角管の面(辺)中央部が外側に変位するバルジング現象が生じる。燃料集合体の寿命制限因子となるラッパ管同志の寸法干渉量(DDI)を評価する際には、このバルジング変形量(張り出し量)を含めた最大対面巾を評価する必要がある。従来の設計評価では、ラッパ管の肉厚方向温度分布を無視した条件で、ラッパ管の熱膨張とスエリングを考慮(膜応力によるクリープ変形は小さいものとし無視)した対面巾を求め、これに簡易評価手法を適用して求めたバルジング量を加えることで、最大対面巾を評価している。

このバルジング量の簡易評価手法は、以下のようなものである。

- (1) 六角管の一面(または一辺)を両端完全固定梁と見なし、等分布荷重作用下の梁の弾性たわみ問題に置き換える。この際、ラッパ管のコーナRは無視する。
- (2) 平面歪近似を適用し、また肉厚方向応力を無視した2軸応力状態と見なす。
- (3) クリープによるたわみ形状は弾性たわみ形状に一致し、たわみの大きさは固定端のクリープ歪の大きさに比例すると仮定する。
- (4) クリープ歪の大きさは、弾性たわみ状態での固定端の応力を用いて算出する。
- (5) 弾性たわみ変形は小さいものとし、バルジング量には含めない。

本研究の第一の目的は、有限要素法による構造解析コードとしてFINASを用い、ラッパ管の肉厚方向温度分布が平坦な条件で、ラッパ管の炉内変形挙動を詳細解析し、簡易評価手法での結果と比較することで、簡易評価手法の妥当性を検証することである。第二の目的は、詳細解析結果に基づき、膜応力によるクリープ変形を無視することの妥当性を確認することである。

本研究の第三の目的は、肉厚方向直線温度分布条件での炉内変形挙動を詳細解析し、上記の平坦な条件での解析結果と比較することで、管壁温度差(熱膨張差およびスエリング歪差)に起因する応力のバルジング変形挙動への影響を調べ、肉厚方向温度分布を無視することの妥当性を把握することである。

第2章 解析条件

2.1 材料特性

使用した改良オーステナイト鋼(PNC1520)の材料特性式¹⁾を以下に示す。スエリングおよび照射クリープ式の係数のうち、不確かさ巾が明示されているものについては、スエリングおよび照射クリープが大きくなる側の値とした。熱クリープひずみ式の係数はノミナル値としたが、時間係数を3として熱クリープひずみが大きくなる側とした。

(1) スエリング式

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

$$\text{ここで、 } R = R_0 \cdot \exp [A (T - T_p)^2]$$

$\Delta V/V$: スエリング量 (vol. %)

ϕ : 高速中性子束 ($10^{22} \text{ n/cm}^2 \cdot \text{sec}$,) 0.1MeV)、 T : 温度 ($^{\circ}\text{C}$)

t : 高速中性子照射時間(炉内滞在時間) (sec)、 A : -4.34×10^{-5} (-)、

α : 0.20 ($(10^{22} \text{ n/cm}^2)^{-1}$)、 R_0 : 2.50 (%/ 10^{22} n/cm^2)、 τ : 27 (10^{22} n/cm^2)

T_p : 475 ($^{\circ}\text{C}$)、 [但し、比較ケースとして 425°C の場合も実施。]

[適用範囲] $T = 400 \sim 850$ $^{\circ}\text{C}$ 、 $\phi t \leq 3 \times 10^{23} \text{ n/cm}^2$

(2) クリープひずみ式(炉内クリープひずみ式)

クリープひずみ(ϵ_{in})は、照射クリープひずみ(ϵ_{ir})と熱クリープひずみ(ϵ_{th})の和である。

① 照射クリープひずみ式

$$\epsilon_{ir} = B \cdot \phi t' \cdot \sigma^{1.3} + D \cdot S \cdot \sigma$$

ここで、 $B = 9.4425 \times 10^{-2} - 3.564 \times 10^{-4} \cdot T + 3.351 \times 10^{-7} \cdot T^2$ for $400 \leq T \leq 500$,

$$= 0$$

for $500 < T \leq 850$,

$$\phi t' = \phi t + \ln \{ (1 + \exp(\Omega - \phi t)) / (1 + \exp(\Omega)) \}$$

$$\Omega = 4.995、$$

$$D = 1.32 \times 10^{-2}$$

ϵ_{ir} : 照射クリープひずみ (%)、 σ : Mises型相当応力 (kgf/mm^2)、 T : 温度 ($^{\circ}\text{C}$)、

S : スエリング量($\Delta V/V$) (vol. %)、 ϕ : 高速中性子束 ($10^{22} \text{ n/cm}^2 \cdot \text{sec}$,) 0.1MeV)

t : 高速中性子照射時間(炉内滞在時間) (sec)

[適用範囲] $T = 400 \sim 850$ $^{\circ}\text{C}$ 、 $\phi t \leq 3 \times 10^{23} \text{ n/cm}^2$ 、 $\sigma \leq 15 \text{ kgf/mm}^2$

② 熱クリープひずみ式

$$\epsilon_{th}/100 = \epsilon_T \cdot \{1 - \exp(-\gamma \cdot t)\} + d\epsilon_S/dt \cdot t$$

ここで、 $\epsilon_T = 0.001411$ 、 $\gamma = 0.5427/t_R$ 、 $d\epsilon_S/dt = 4.505 \times 10^{-5} \cdot t_R^{-0.3261}$ 、

$$\log_{10}(3 \times t_R) = A_0 + A_1 \cdot \log_{10} \sigma' + A_2 \cdot (\log_{10} \sigma')^2 + A_3 \cdot (\log_{10} \sigma')^3 \quad \text{for } \sigma' \geq 12.5,$$

$$= B_0 + B_1 \cdot \log_{10} \sigma' \quad \text{for } \sigma' < 12.5,$$

$\sigma' = \sigma \times 2 / 1.7320508$ 、 t : 炉内滞在時間 (hr)、 t_R : 破断時間 (hr)、

$$A_0 = 55867 / (T + 273.15) - 20.63, \quad A_1 = -71174 / (T + 273.15),$$

$$A_2 = 56403 / (T + 273.15), \quad A_3 = -15894 / (T + 273.15),$$

$$B_0 = 28902 / (T + 273.15) - 20.63, \quad B_1 = -3846 / (T + 273.15),$$

ϵ_{th} : 熱クリープひずみ (%), σ : Mises型相当応力 (kgf/mm²), T : 温度 (°C)

[適用範囲] $T = 425 \sim 850$ °C、($\sigma \leq 18.4$ kgf/mm²)、($t \leq 0.5t_R$)

(3) 縦弾性係数 E (kgf/mm²)

$$E = 19917.9743 - 7.5086 \cdot T \quad \text{for } 20^\circ\text{C} \leq T \leq 600^\circ\text{C}$$

$$22613.0293 - 12.0004 \cdot T \quad \text{for } 600^\circ\text{C} < T \leq 850^\circ\text{C}$$

(4) ポアソン比 ν (-)

$$\nu = 0.300 \quad \text{for } 20^\circ\text{C} \leq T \leq 475^\circ\text{C}$$

$$0.300 + 8 \times 10^{-5} \cdot (T - 475) \quad \text{for } 475^\circ\text{C} \leq T \leq 850^\circ\text{C}$$

(5) 瞬間熱膨張係数 α (mm/mm/°C, $\times 10^{-6}$)

$$\alpha = 14.8778 + 1.6999 \times 10^{-2} \cdot T - 1.4541 \times 10^{-5} \cdot T^2 + 4.5925 \times 10^{-9} \cdot T^3$$

[適用範囲] R. T. $< T \leq 850$ °C

2.2 寸法条件および炉内条件

(1) 寸法条件

ラッパ管の内側封面巾と肉厚は、平成2年度FBR大型炉設計研究²⁾でのノミナル仕様である146.9 mmおよび4.3 mmとした。コーナRは、内面側ではピン配列ピッチの1/2、すなわち4.9 mm、外面側では肉厚分を加え9.2 mmとした。尚、ラッパ管一辺(コーナを除く平坦部)の長さは、 $146.9/\sqrt{3} - 2 \times 4.9 \times \tan 30^\circ = 79.2$ mmである。

(2) 高速中性子束

平成2年度FBR大型炉設計研究での核計算結果に基づき、高速中性子束ピーク値 2.3×10^{15} n/cm²·secを用いるものとした。尚、照射末期(45ヵ月後)の照射量は、 2.72×10^{23} n/cm²となる。

(3) 温度条件(およびスエリングピーク温度)

平成2年度FBR大型炉設計研究での高速中性子束ピーク位置での冷却材温度計算結果に基づき、ラッパ管内面温度は478℃とした。

管壁温度差を考慮する解析では、「もんじゅ」で中間パッド位置(上部ブランケット部高さ)での温度差を70℃としていることを参考とし、本解析対象部位(炉中心高さ)がより低い位置であることを考慮し、内面側で478℃、外面側で428℃の肉厚方向直線温度分布条件とした。この場合、スエリングピーク温度が475℃なので、内面側の方がよりスエリングする。しかし、ラッパ管温度やスエリングピーク温度の不確かさを考えるならば、外面側の方がスエリングしやすい条件での解析も実施しておくべきである。そこで、管壁温度差を考慮する解析では、スエリングピーク温度を425℃としたケースも追加解析するものとした。

(4) 荷重条件

内外面圧力差に意味があるので、ラッパ管外面での圧力は零とした。ラッパ管内面での冷却材圧力条件は、平成2年度FBR大型炉設計研究での集合体圧損評価結果に基づき、2 kg/mm²をリファレンスとした。また、バルジング量の冷却材圧力への依存性を把握するため、3 kg/mm²および4 kg/mm²のケースも一部検討するものとした。

尚、ラッパ管上半部の重量による応力が小さいことや、冷却材との摩擦抵抗による軸力が小さいと考えられることで、軸力は考慮不要とした。

2.3 有限要素モデル

軸方向長さ5mm(軸方向1層)の1/4モデルとし、肉厚方向に4等分割、周方向には第2.1図に示したように30分割とした。また、第2.1図に示したような、x方向およびy方向についての対称境界条件を用いた以外に、上端部に対しては軸方向対称境界条件($u_z=0$)、下端部に対しては平面歪条件($u_z=一定$)を課した。使用要素は、3次元6面体要素HEX20であり、20個の節点と27個の積分点からなる³⁾。

平坦面の端部、平坦面の中央部、およびコーナ部に着目し、応力・歪解析結果を整理するものとした。具体的には、第2.2図に示した破線上の積分点での値に対応する。また、バルジング量(張り出し量)は、第2.2図に示したように、端部、および中央部の各肉厚中心節点でのx方向変位量の差として算出し、整理するものとした。

第3章 バルジング量の簡易評価

3.1 簡易評価手法

第2章に示したリファレンスケース(478°C均一温度、冷却材圧力2 kg/mm²、スエリングピーク温度475°C)と、冷却材圧力条件だけ3 kg/mm²および4 kg/mm²に変えたケースの計3ケースについて、以下に示す簡易評価手法(燃料要素束照射変形挙動解析コードSHADOW⁴⁾⁻⁵や炉内流量再分布解析コードFDICA⁶)において採用の手法)を用いて、バルジング量を評価した。

1) 固定端応力

固定端(ラッパ管コーナ部)での周方向(長手方向)曲げ応力 σ_θ は、両端完全固定の弾性梁のたわみでモデル化すると

$$\sigma_\theta = \Delta P \times l^2 / (2 \times h^2) \quad \text{-----} \quad (3.1)$$

で与えられる。ここで、 ΔP はラッパ管の内外面圧力差、 l は内面六角形の一辺(コーナRは無視)、 h は肉厚である。相当応力 σ_{eq} は、平面歪近似を適用し、また肉厚方向応力を無視すると、

$$\sigma_{eq} = (1 - \nu + \nu^2)^{1/2} \times \sigma_\theta \quad \text{-----} \quad (3.2)$$

で与えられる。ここで ν はポアソン比である。

2) バルジング量

一般に、固定端から x だけ離れた点での弾性変形に伴うたわみ量 $vel(x)$ は、

$$vel(x) = \{\Delta P \times l^4 / (2 \times E \times h^3)\} \times \{(x/l)^2 - 2 \times (x/l)^3 + (x/l)^4\} \quad \text{-----} \quad (3.3)$$

で与えられる。ここで、 E は縦弾性係数である。上式を固定端での周方向弾性歪

$\epsilon_{\theta^{el}} = \Delta P \times l^2 / (2 \times E \times h^2)$ を用いて書き直すと、

$$vel(x) = (l^2/h) \times \{(x/l)^2 - 2 \times (x/l)^3 + (x/l)^4\} \times \epsilon_{\theta^{el}} \quad \text{-----} \quad (3.4)$$

が得られる。簡易評価では、クリープによるたわみ量 $v(x)$ は、上式において $\epsilon_{\theta^{el}}$ を周方向クリープ歪 ϵ_{θ^c} に置き換えることで得られるものとされる。すなわち、

$$v(x) = (l^2/h) \times \{(x/l)^2 - 2 \times (x/l)^3 + (x/l)^4\} \times \epsilon_{\theta}^c \quad \text{-----} \quad (3.5)$$

次に、 ϵ_{θ}^c を炉内クリープ歪(相当歪) ϵ_{in} を用いて表すため、Prandtl-Reussの流れ則

$$\epsilon_{\theta}^c = (3/2) \times (\epsilon_{in}/\sigma_{\theta q}) \times (\sigma_{\theta} - \sigma_{av}) \quad \text{-----} \quad (3.6)$$

を適用する。 σ_{av} は平均応力であり、一般的には

$$\sigma_{av} = (\sigma_r + \sigma_{\theta} + \sigma_z)/2 \quad \text{-----} \quad (3.7)$$

であるが、ここでは、2軸状態で平面歪条件を仮定しているので、

$$\sigma_{av} = \{(1+\nu)/3\} \times \sigma_{\theta} \quad \text{-----} \quad (3.8)$$

となる。したがって、

$$v(x) = (l^2/h) \times \{(x/l)^2 - 2 \times (x/l)^3 + (x/l)^4\} \times \{(1-\nu/2)/(1-\nu+\nu^2)^{1/2}\} \times \epsilon_{in} \quad \text{-----} \quad (3.9)$$

となる。バルジング量(張り出し量) v_{max} は、本式で $x=l/2$ とすることで得られる。

$$v_{max} = [l^2 \times (1-\nu/2) / \{16 \times (1-\nu+\nu^2)^{1/2} \times h\}] \times \epsilon_{in} \quad \text{-----} \quad (3.10)$$

尚、 $v(x)$ を v_{max} を用いて表すならば、

$$v(x) = 16 \times v_{max} \times \{(x/l)^2 - 2 \times (x/l)^3 + (x/l)^4\} \quad \text{-----} \quad (3.11)$$

と書き直すことができる。

3.2 簡易評価の結果

第3.1表～第3.3表に、冷却材圧力が 2 kg/cm^2 、 3 kg/cm^2 、および 4 kg/cm^2 の各ケースについて、簡易評価結果を示した。バルジング量だけではなく、内外面での相当応力、炉内クリープ歪、スエリング歪、および高速中性子照射量も示し、炉内クリープ歪についてはその内訳も示した。スエリング歪と高速中性子照射量は、冷却材圧力条件に依存しないので、 2 kg/cm^2 のケースにおいてだけ示した。ラッパ管温度条件を 478°C としているので、照射クリープ歪がほとんどで、熱クリープ歪の寄与は小さい結果となっている。

第3.1図に、バルジング量の照射期間および冷却材圧力への依存性を示した。照射クリープ歪のスエリング依存性に起因し、バルジング量の増加速度は照射末期において大きい結果となっている。EO1C(15ヵ月後)におけるバルジング量の冷却材圧力依存性に着目すると、照射クリープ歪式のスエリングに依存しない項が応力の1.3乗に比例することを反映した傾向(下に凸)が現れている。しかし、照射末期(45ヵ月後)では、スエリングに依存する項(応力に比例)の寄与が支配的となるので、バルジング量は冷却材圧力にほぼ比例する結果となっている。

第4章 FINASによる詳細解析に基づく妥当性の検討

4.1 簡易評価手法の妥当性

第4.1図に、冷却材圧力が 2 kg/cm^2 の場合について、平坦部の端部、中央部、およびコーナ部における応力と、平坦部の湾曲形状の照射初期における詳細解析の結果を示した。第4.2図に、照射末期(45ヵ月)での端部における応力、クリープ歪、および平坦部の湾曲形状の解析結果を示した。端部、中央部、コーナ部の各位置や平坦部の定義、および方向の定義は、既に第2.2図に示した。また、第4.3図に、冷却材圧力が2、3、および 4 kg/cm^2 の場合について、15、30、および45ヵ月におけるバルジング量解析結果を簡易評価結果と比較して示し、第4.1表に主要な数値解析結果をまとめた。

初期から末期までの時間増分中は予備解析にて3ヵ月以下とする必要があることを確認後、本解析では余裕をとって1.5ヵ月とした。計算所要時間は各ケースとも約12分である。第4.2図(a)において、応力分布の波打ち現象が現れており、有限要素分割法の改善の余地があると思われるが、以下に述べるような事実が明らかになった。

(1) 端部応力に関して

初期での最内層および最外層積分点における相当応力 σ_{eq} 解析値は、それぞれ 3.28 kg/mm^2 および 2.06 kg/mm^2 であり(cf. 第4.1図(a))、いずれも簡易評価値 3.46 kg/mm^2 (cf. 第3.1表)を下回っている。最内層積分点における解析値が最外層積分点を上回るのは、周方向膜応力が存在することによる。簡易評価手法では、その膜応力は無視されるが、固定端は完全固定支持とされるので、曲げ応力が過大評価となる結果、相当応力の簡易評価値は大きめになると考えられる。

冷却材圧力による応力は荷重制御型なので(ラッパ管がクリープ変形しても、圧力条件は一定としているので)、梁という理想的条件では、応力は緩和されない。実際には、15ヵ月後の最内層および最外層積分点での σ_{eq} は、 3.02 kg/mm^2 および 2.00 kg/mm^2 となっており、若干の応力緩和が生じ、第4.1表に示したように、その後は漸増する傾向にある。末期の応力分布(第4.2図(a))は、波打ち現象が現れていることを無視するならば、初期(第4.1図(a))にはほぼ一致している。これらの結果から分かるように、簡易評価手法において応力を時間的に一定とする仮定は妥当であることが確認された。

(2) コーナ部応力に関して

コーナ部での最大相当応力(最内層積分点における相当応力)解析値は、端部での解析値を上回るだけでなく、簡易評価値も上回っており(cf. 第4.1図(c)、第4.1表)、若干の応力集中の発生することが分かった。たとえば、初期での最大相当応力解析値は 3.96 kg/mm^2 であり、端部の解析値 3.28 kg/mm^2 より21%、簡易評価値より14%大きい。

(3) 中央部応力に関して

簡易評価手法(両端固定の弾性梁モデル)では、端部とは方向が逆で、大きさが1/2の周方向曲げ応力が中央部で生じる。実際、解析結果(第4.1図(b))でも、そのような傾向が現れている。

(4) 弾性変形に起因するバルジング量に関して

弾性変形に起因するバルジング量 v_{\max} 解析値は、冷却材圧力が 2 kg/cm^2 の場合、第4.1図(d)に示したように 0.024 mm である。冷却材圧力に比例し、 3 kg/cm^2 および 4 kg/cm^2 の場合では、それぞれ 0.036 mm および 0.046 mm である。

(5) 相当クリープ歪に関して

最大相当応力解析値は、上述のようにコーナ部において簡易評価値を上回るけれども、最大相当クリープ歪解析値は、第4.1表に示したように、端部だけではなくコーナ部においても、簡易評価値を下回っている。

(6) 湾曲形状に関して

第4.1図(d)および第4.2図(c)に示した端部での湾曲形状解析結果は、簡易評価手法で仮定される完全固定条件からの若干のズレを示している。

(7) バルジング量に関して

第4.1表や第4.3図に示したように、弾性変形分を除いたバルジング量 v_{\max} 解析結果は、いずれの冷却材圧力条件、照射期間においても、簡易評価結果と比較して小さいが、照射末期では20%以内の食い違いに収まっている。また、照射末期において、弾性変形分を含めたバルジング量解析結果に関しても、簡易評価結果を下回っており、食い違いは冷却材圧力が 2 kg/mm^2 のケースで12%である。

4.2 膜応力によるクリープ変形を無視することの妥当性

照射末期における膜応力によるクリープ変形に起因する対面巾増加率は、以下の式を用いて算出できるが、冷却材圧力条件が 2 kg/cm^2 、 3 kg/cm^2 、 4 kg/cm^2 の各ケースで、それぞれ 0.03% 、 0.05% 、 0.08% と小さく、無視することの妥当性が確認できた。

$$L \times \{ (1 + \epsilon_{th}) \times (1 + \epsilon_{sw}) \times (1 + \epsilon_{cr}) - 1 \} = u_x$$

ここで、 L : 端部節点の製作時 x 座標 (75.6 mm)

ϵ_{th} : 熱膨張率 (0.0082858)

ϵ_{sw} : スエリング率 (0.029459)

ϵ_{cr} : 膜応力によるクリープ変形に起因する対面巾増加率 (未知量)

u_x : 端部節点の x 方向変位量 (2.8922 mm for 2 kg/cm^2 のケース、
2.9124 mm for 3 kg/cm^2 のケース、
2.9329 mm for 4 kg/cm^2 のケース)

尚、冷却材圧力条件が 2 kg/cm^2 のケースでの照射末期におけるラッパ管外対面巾増加量は、解析結果に基づくと、 $(u_x + v_{max}) \times 2 = (2.8922 + 0.456) \times 2 = 6.70 \text{ mm}$ である。

4.3 肉厚方向温度分布を無視することの妥当性

第4.4図に、ラッパ管内面温度を478℃とし、外面側で50℃だけ下がる直線温度分布条件での、照射初期における解析結果を示した。管壁温度差に起因する応力が重畳するので、温度条件を478℃均一とした場合(cf. 第4.1図)と比較して、応力分布は全く異なっている。外面側の温度が低い(熱膨張歪が小さい)ので、第4.4図(d)に示したように、変位置 u_x 、すなわちラッパ管肉厚中心対面巾(の半分)の増加量は小さくなっているが、(弾性変形に起因する)バルジング量 v_{max} は均一温度条件の場合と良く一致している。

第4.5図に照射末期における応力と歪の解析結果を、第4.6図に照射末期における湾曲形状解析結果を、また第4.7図にバルジング量時間依存性の比較結果を示した。スエリングピーク温度を475℃としたケース、および425℃に変更したケースのいずれにおいても、応力の波打ち現象が現れており、肉厚方向メッシュ分割が粗すぎると推定されるが、以下の事実が明らかになった。

(1) ピーク温度が475℃のケースでは、照射末期相当応力および相当クリープ歪は、均一温度条件の場合(cf. 第4.2図)より小さくなる。熱膨張歪と同様にスエリング歪も内面側の方が大きいので、これらに起因する周方向曲げ応力が内面側で圧縮になることに起因する。

(2) ピーク温度が425℃のケースでは、照射末期相当応力および相当クリープ歪は、均一温度条件の場合(cf. 第4.2図)より大きくなる。スエリング歪が外面側の方で大きいので、これに起因する周方向曲げ応力が内面側で引っ張りになることに起因する。

(3) 上記いずれのケースにおいても、バルジング量 v_{max} は均一温度条件の場合より大きく、照射末期では約0.56 mm(約20%の増加)となっている。端部近傍における湾曲形状に着目すると、Y軸方向に対する傾き(完全固定条件からのズレ)がより大きくなっており(補足: 第4.2表に示したように、端部の内面と外面での周方向全歪の差が大きいことから分かる。)、このためバルジング量が大きくなったと思われる。

(4) 照射クリープ式のスエリングに依存しない項は低温側で大きいので、平均温度の低下もバルジング量増加に寄与している可能性が強い。したがって、管壁温度差に起因する応力発生に伴って、バルジング量の増加が生じるとしても、その増加率は20%程度未満である。

第5章 結 言

平成2年度FBR大型炉設計研究の条件(ラッパ管材質:改良オーステナイト鋼 PNC1520、内側対面巾:146.9 mm、肉厚:4.3 mm、設計寿命:45ヵ月、高速中性子照射量: 2.72×10^{23} n/cm²、冷却材圧力:2 kg/cm²、内面温度:478°C)に従って、ラッパ管のバルジング量(片側)を、簡易評価手法およびFINASを用いて評価解析した結果、以下の結論が得られた。

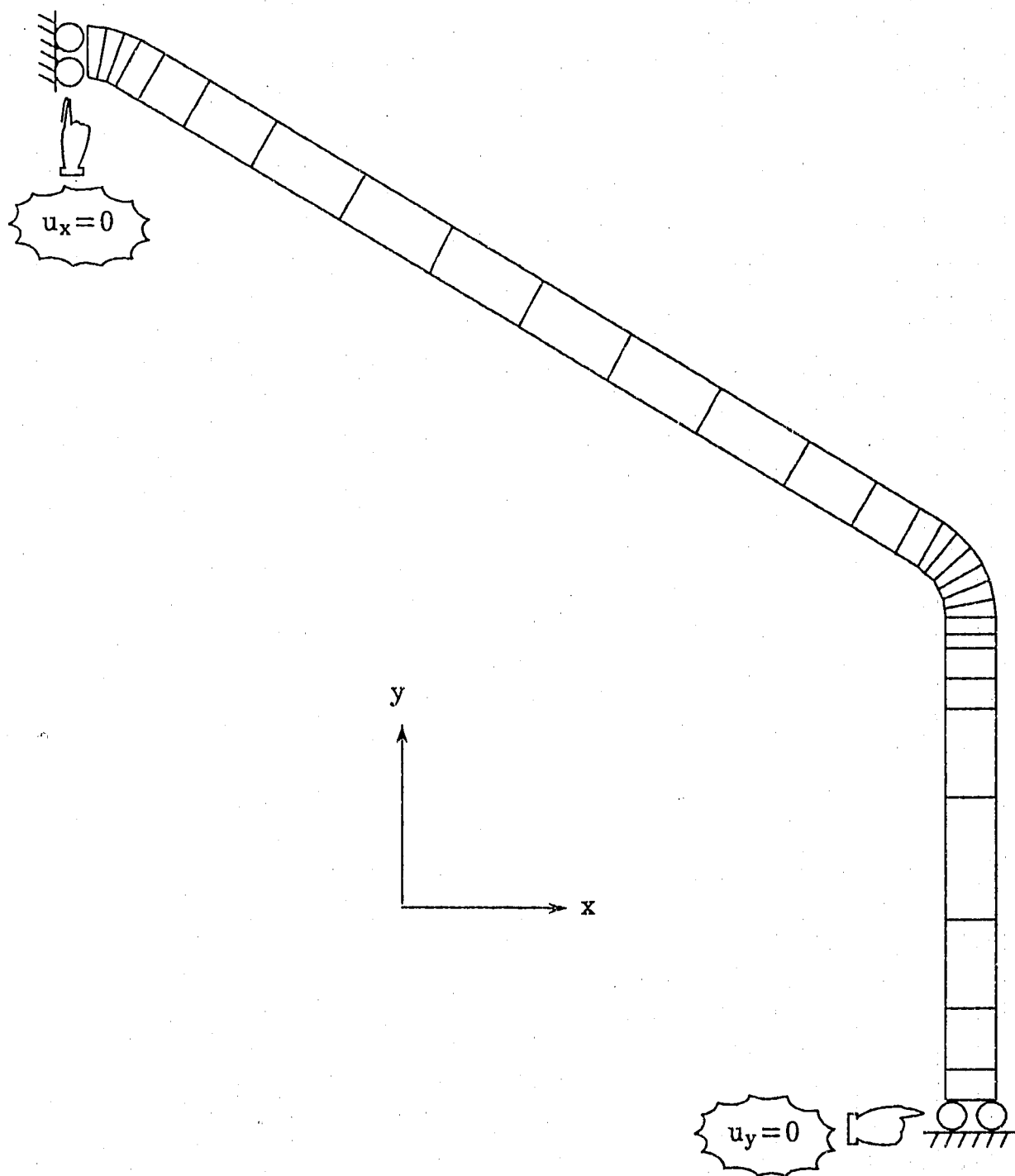
- (1) 照射末期のバルジング量の簡易評価値は、ラッパ管の肉厚方向温度分布を考慮しない条件での解析値より約15%大きく、簡易評価手法は保守性がある。
- (2) 簡易評価手法では、支持条件が完全固定と仮定されるので、湾曲モードの観点では非保守側であるが、完全固定とされることで曲げ応力が大きくなり、クリープ歪が大きくなるという効果が勝って、保守性が確保されている。
- (3) 弾性変形に起因するバルジング量解析値は0.024 mmと小さく、簡易評価手法において、弾性変形に起因するバルジング量を見捨てることは妥当である。
- (4) 膜応力によるクリープ変形に起因する対面巾増加率は照射末期で0.03%と小さく、膜応力によるクリープ変形に起因する対面巾増加は無視して良い。
- (5) 管壁温度差(50°C)による応力を考慮した場合、照射末期のバルジング量は増加する可能性があるものの、その増加率は20%未満である。

謝 辞

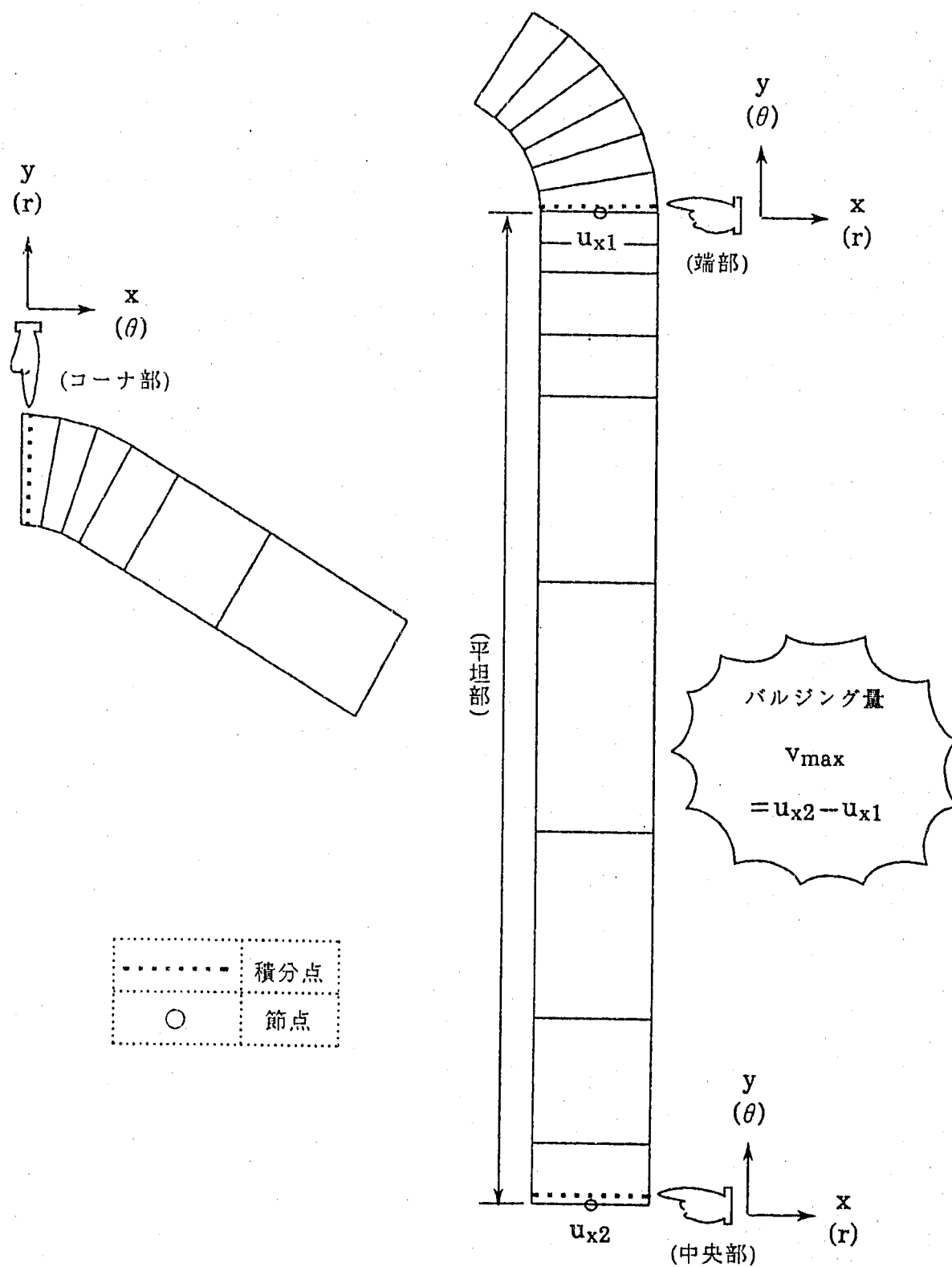
FINASを用いた解析の実施にあたっては、(株)CSK 白井浩史氏、川上一夫氏、および(株)アイ・エス・エル 梅木栄虎氏に多大なご協力を頂きました。ここに厚く感謝の意を表します。

参考文献

- (1) PNC SN9410 90-051, “高速炉炉心構成要素用改良オーステナイト鋼(PNC1520)材料強度基準案(暫定値)”, (1990年4月).
- (2) PNC SN 9410 90-180, “平成2年度 FBR大型炉設計研究-60万kWe級プラント-”, (1990年12月).
- (3) PNC N9520 89-019, “汎用非線形構造解析システムFINAS, VERSION 11.0, 使用説明書”, (1989年11月).
- (4) Miki, K. : J. Nucl. Sci. Technol. 14, 791 (1977).
- (5) Sawai, S., et al. : “Status Review of FBR Fuel Development in Japan”, Proc. International Conference on Reliable Fuels for Liquid Metal Reactors, Tucson, Arizona (1986).
- (6) PNC SN 9410 90-180, “高速増殖大型炉設計研究-照射変形に起因する炉内流量分布変化挙動の評価”, (1990年6月).



第2.1図 ラッパ管(1/4モデル)の周方向メッシュ分割と境界条件



第2.2図 応力・歪計算値出力用積分点と、バルジング量算出用節点

第3.1表 簡易評価結果 (冷却材圧力: 2 kg/cm²)

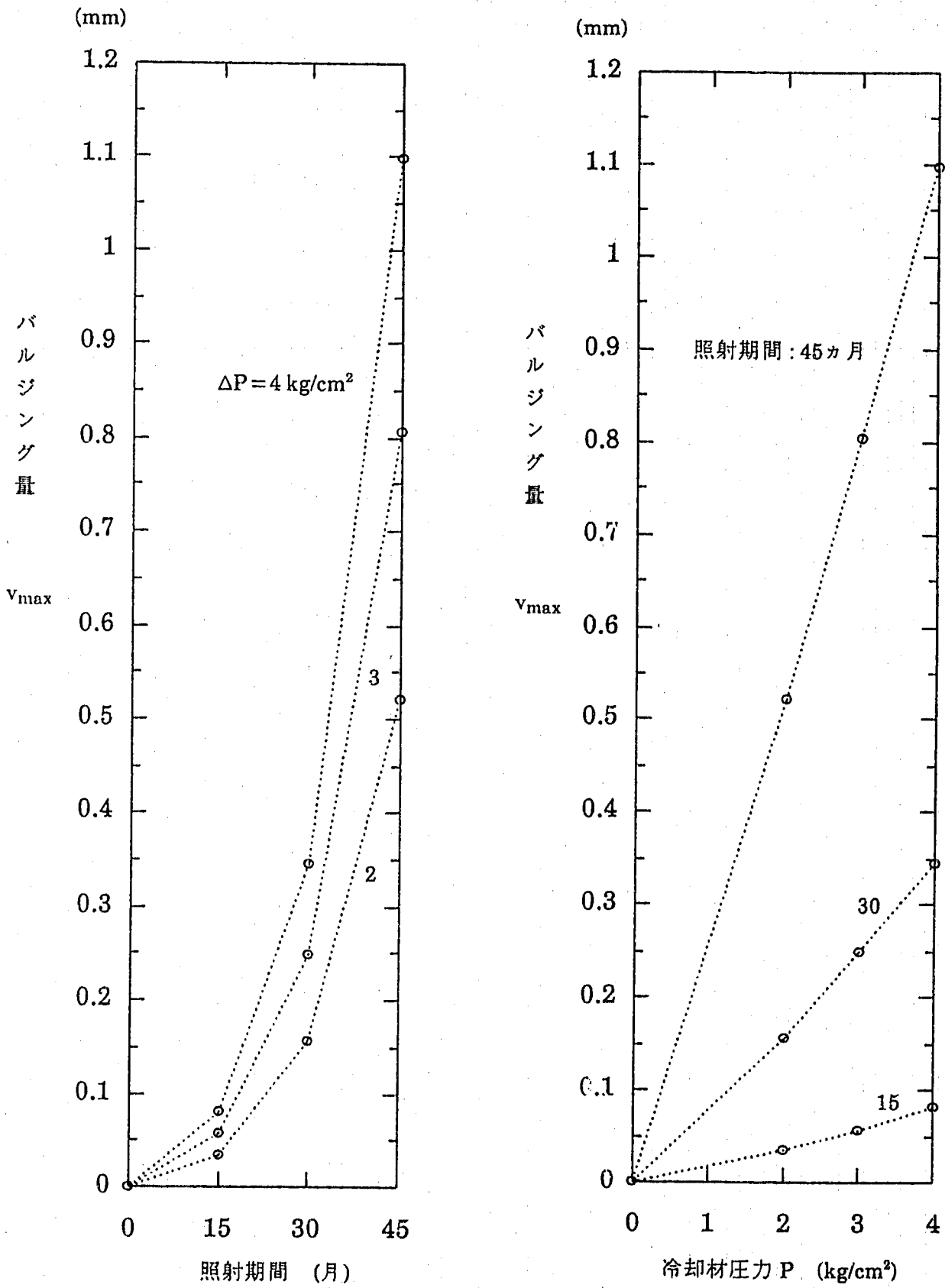
	456日(15ヵ月)後	912日(30ヵ月)後	1368日(45ヵ月)後
バルジング量 v_{\max} (mm)	0.035	0.156	0.521
相当応力 σ_{eq} (kg/mm ²)	3.46	→	3.46
炉内クリープ歪 ϵ_{in} (%)	0.035	0.156	0.521
照射クリープ歪 ϵ_{ir} (%)	0.034	0.154	0.518
熱クリープ歪 ϵ_{th} (%)	0.001	0.002	0.003
スエリング歪 ϵ_s (%)	0.095	0.634	2.950
高速中性子照射量 (n/cm ²)	9.06×10^{22}	1.81×10^{23}	2.72×10^{23}

第3.2表 簡易評価結果 (冷却材圧力: 3 kg/cm²)

	456日(15ヵ月)後	912日(30ヵ月)後	1368日(45ヵ月)後
バルジング量 v_{\max} (mm)	0.057	0.249	0.805
相当応力 σ_{eq} (kg/mm ²)	5.18	→	5.18
炉内クリープ歪 ϵ_{in} (%)	0.057	0.249	0.805
照射クリープ歪 ϵ_{ir} (%)	0.055	0.245	0.799
熱クリープ歪 ϵ_{th} (%)	0.002	0.004	0.006

第3.3表 簡易評価結果 (冷却材圧力: 4 kg/cm²)

	456日(15ヵ月)後	912日(30ヵ月)後	1368日(45ヵ月)後
バルジング量 v_{\max} (mm)	0.081	0.346	1.098
相当応力 σ_{eq} (kg/mm ²)	6.91	→	6.91
炉内クリープ歪 ϵ_{in} (%)	0.081	0.347	1.099
照射クリープ歪 ϵ_{ir} (%)	0.078	0.340	1.089
熱クリープ歪 ϵ_{th} (%)	0.003	0.007	0.010



第3.1図 バルジング量簡易評価値の照射期間および冷却材圧力への依存性

第4.1表 肉厚方向温度分布平坦条件でのFINASによる主要解析結果

	圧力条件: 2 kg/cm ²			圧力条件: 3 kg/cm ²			圧力条件: 4 kg/cm ²		
	15 ヵ月	30 ヵ月	45 ヵ月	15 ヵ月	30 ヵ月	45 ヵ月	15 ヵ月	30 ヵ月	45 ヵ月
バルジング量* (mm) & (-)	.047 1.34	.138 0.88	.456 0.88	.072 1.26	.213 0.86	.695 0.86	.099 1.22	.290 0.84	.938 0.85
バルジング量 (弾性変形分 を除いた量)* (mm) & (-)	.023 0.66	.114 0.73	.432 0.83	.036 0.63	.177 0.71	.659 0.82	.051 0.63	.242 0.70	.890 0.81
端部最大(内面) 相当応力* (kg/mm ²) & (-)	3.02 0.87	3.08 0.89	3.14 0.91	4.51 0.87	4.60 0.89	4.71 0.91	5.98 0.87	6.13 0.89	6.28 0.91
コーナ部最大(内面) 相当応力* (kg/mm ²) & (-)	3.63 1.05	3.72 1.08	3.78 1.09	5.42 1.05	5.56 1.07	5.67 1.09	7.19 1.04	7.40 1.07	7.55 1.09
端部最大(内面) 相当クリープ歪* (%) & (-)	.024 0.69	.114 0.73	.425 0.82	.039 0.68	.177 0.71	.649 0.81	.054 0.67	.244 0.70	.878 0.80
コーナ部最大(内面) 相当クリープ歪* (%) & (-)	.030 0.86	.140 0.90	.518 0.99	.048 0.84	.218 0.88	.791 0.98	.067 0.83	.300 0.86	1.07 0.97
端部外面 相当応力 (kg/mm ²)	2.00	2.02	2.04	2.99	3.03	3.05	3.98	4.04	4.07
コーナ部外面 相当応力 (kg/mm ²)	2.14	2.17	2.17	3.21	3.24	3.26	4.27	4.32	4.34
端部外面 相当クリープ歪 (%)	.014	.072	.273	.023	.112	.416	.032	.154	.563
コーナ部外面 相当クリープ歪 (%)	.016	.077	.292	.025	.121	.446	.035	.166	.603

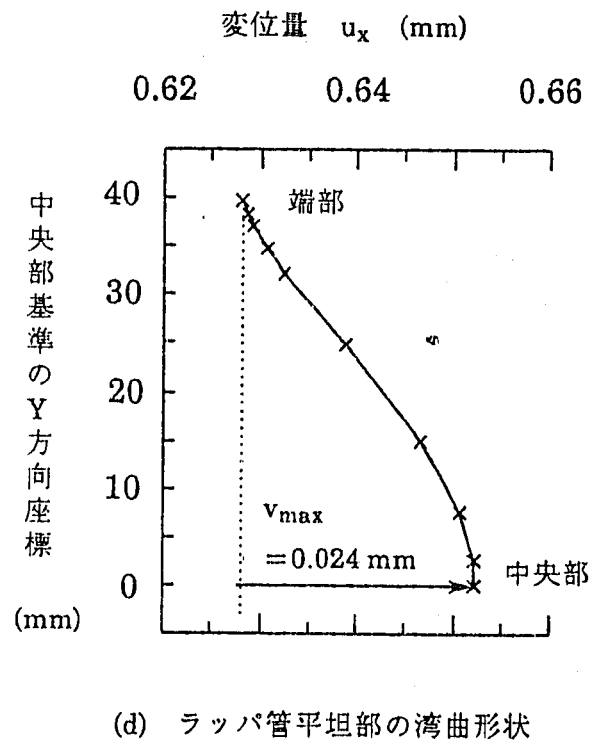
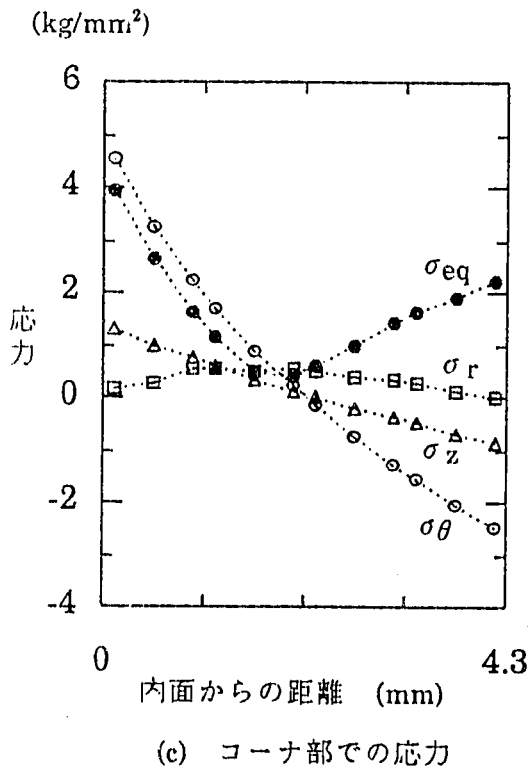
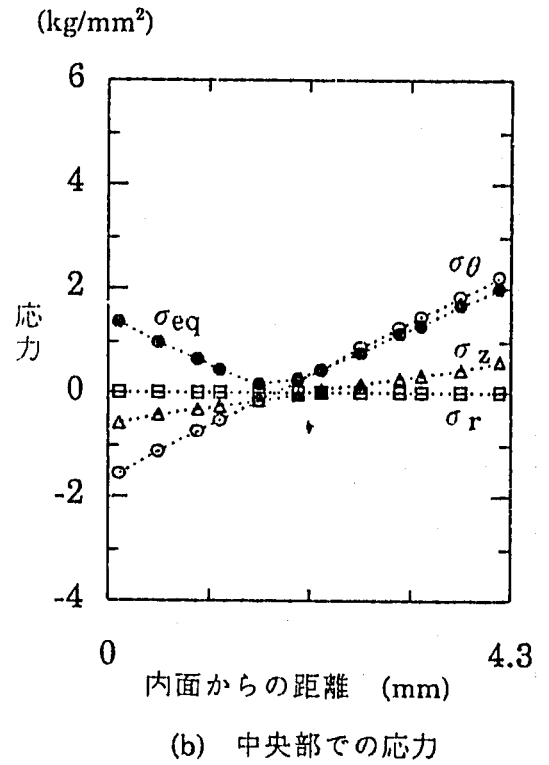
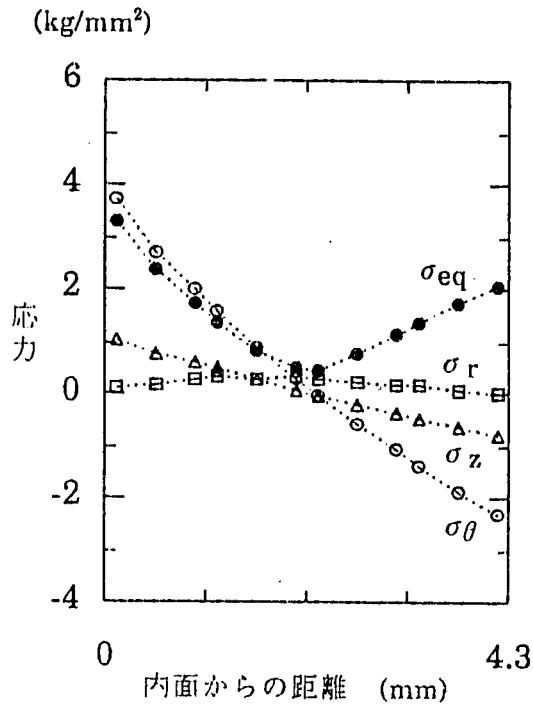
注記*) これらの解析結果については、簡易評価結果に対する相対値(比)も下段に示した。

第4.2表 照射末期における端部での周方向応力・歪解析結果 (冷却材圧力: 2 kg/cm²)

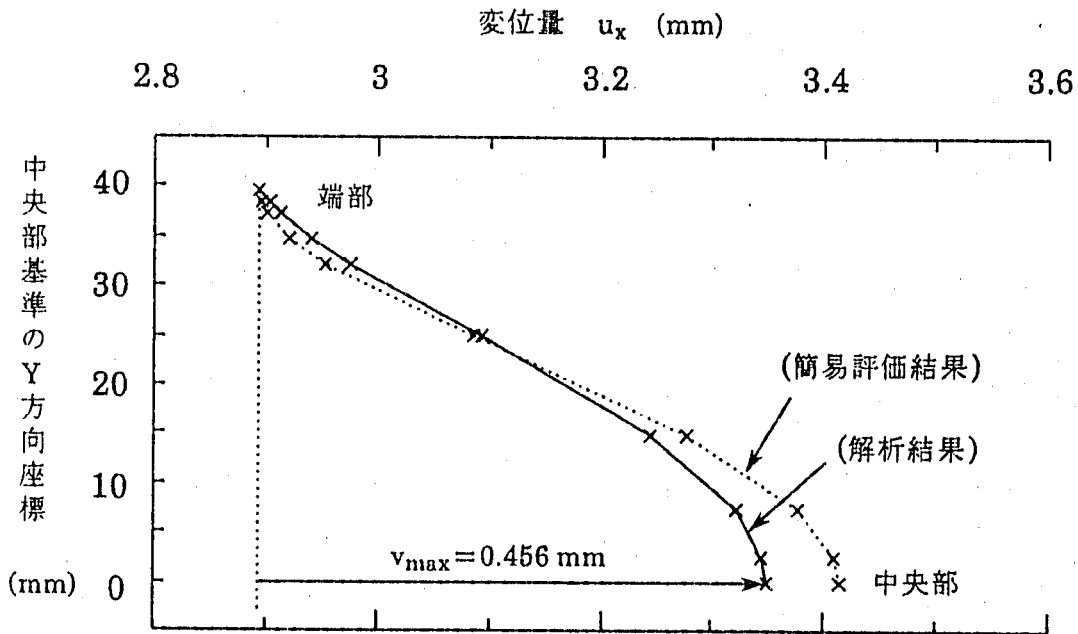
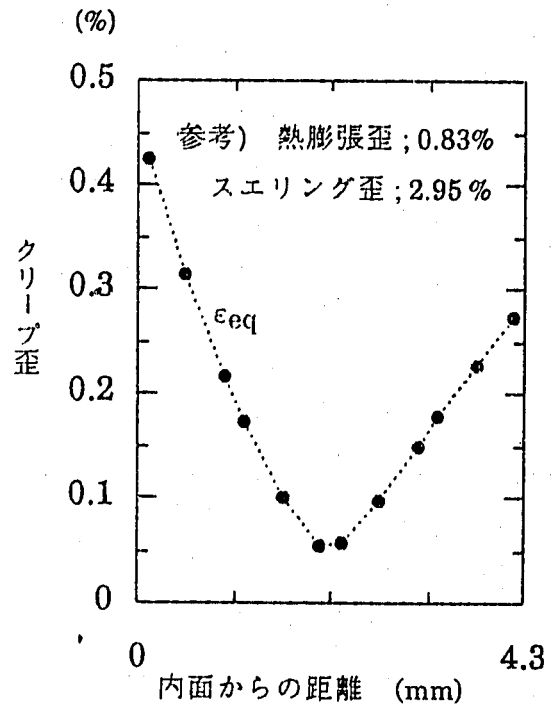
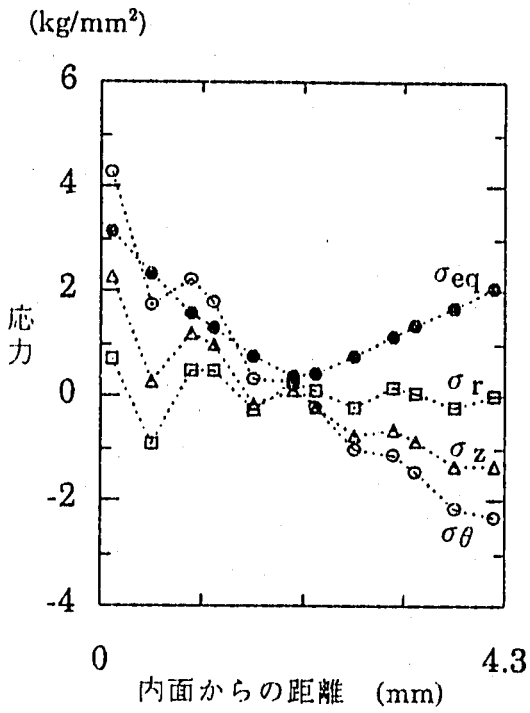
	平坦温度分布条件		直線温度分布条件			
			スエリング ピーク温度条件 : 475 °C		スエリング ピーク温度条件 : 425 °C	
	内面 & 外面*1	内面 - 外面*2	内面 & 外面*1	内面 - 外面*2	内面 & 外面*1	内面 - 外面*2
周方向応力 (kg/mm ²)	4.25 -2.35	6.6	3.40 0.38	3.0	9.02 -3.27	12.3
周方向弾性歪 (%)	0.021 -0.012	0.033	0.016 -0.001	0.017	0.040 -0.016	0.056
周方向クリープ歪 (%)	0.376 -0.226	0.602	0.305 -0.091	0.396	0.561 -0.377	0.938
熱歪 (%)	0.829 0.829	0	0.826 0.731	0.095	0.826 0.731	0.095
スエリング歪 (%)	2.95 2.95	0	2.95 2.69	0.26	2.63 2.94	-0.31
周方向全歪 (%)	4.17 3.54	0.63	4.09 3.33	0.76	4.05 3.28	0.77

注記 *1) 上段に内面での値、下段に外面での値を示すことを意味する。

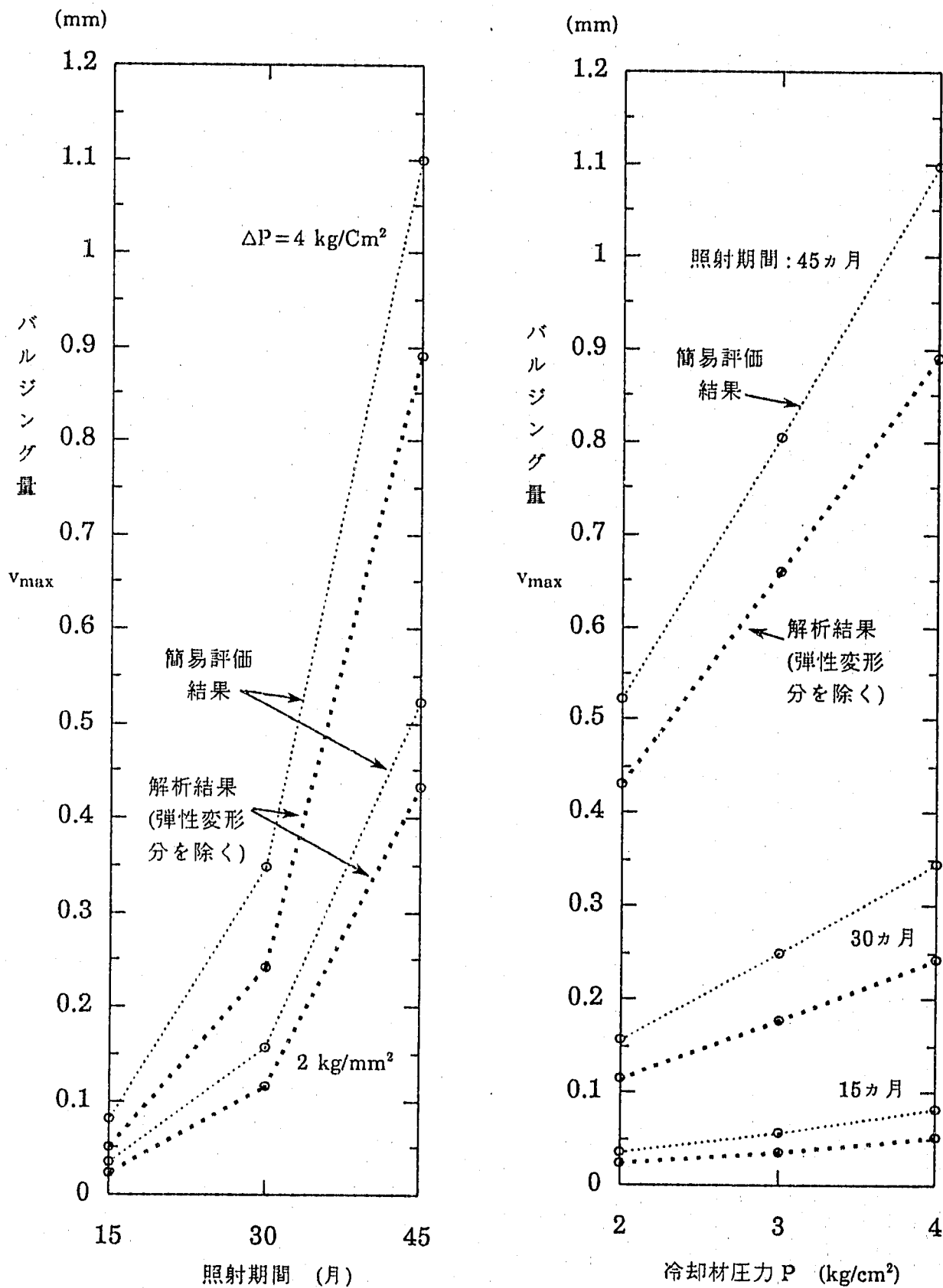
*2) 内面での値から外面での値を引いた値を示すことを意味する。



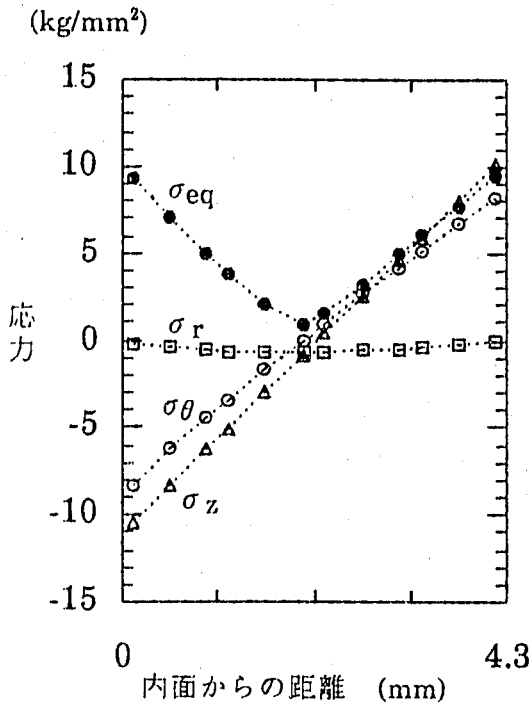
第4.1図 照射初期での応力と湾曲形状の解析結果
(冷却材圧力: 2 kg/cm²、温度条件: 478 °C均一)



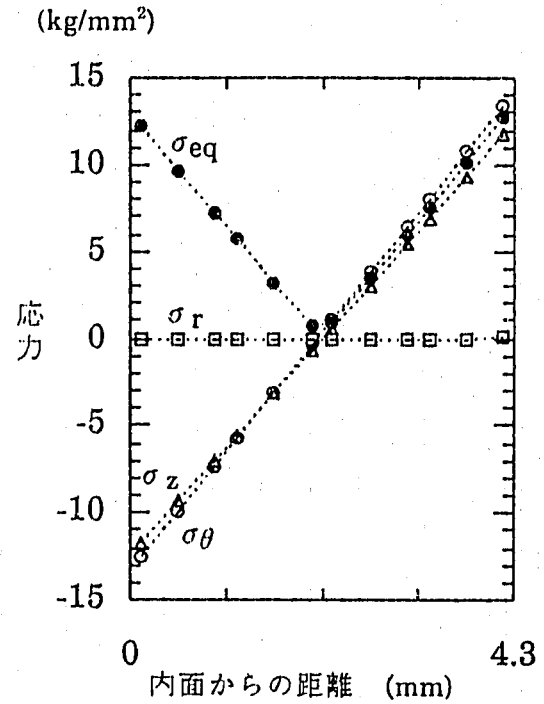
第4.2図 照射末期での端部応力、クリープ歪と湾曲形状の解析結果
(冷却材圧力: 2 kg/cm²、温度条件: 478 °C均一)



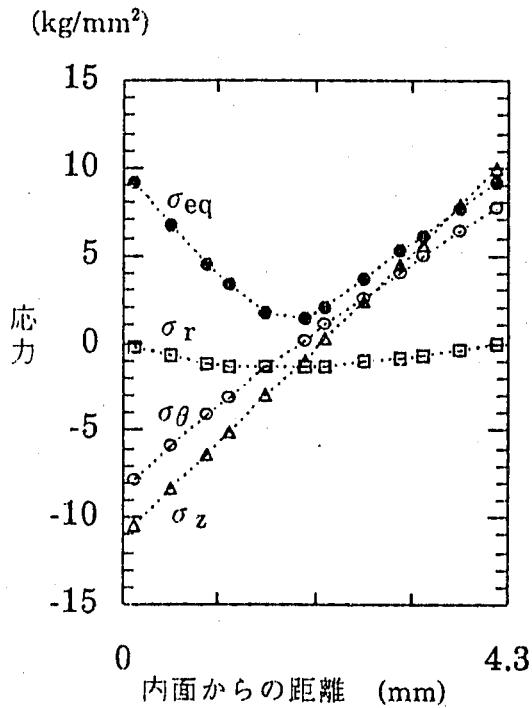
第4.3図 バルジング量解析結果と簡易評価結果の比較 (温度条件: 478°C 均一)



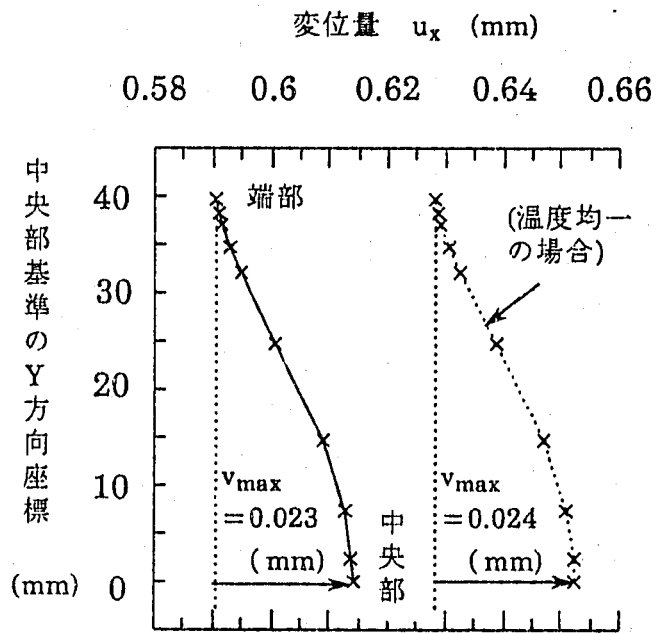
(a) 端部での応力



(b) 中央部での応力



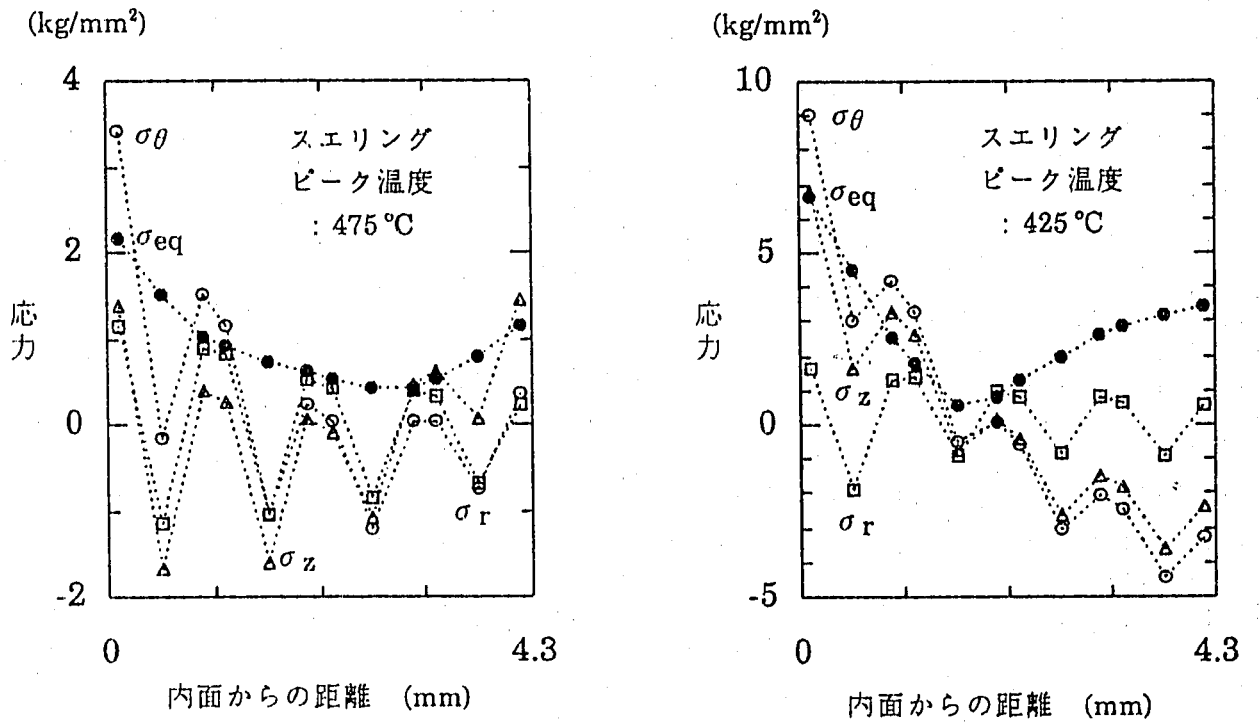
(c) コーナ部での応力



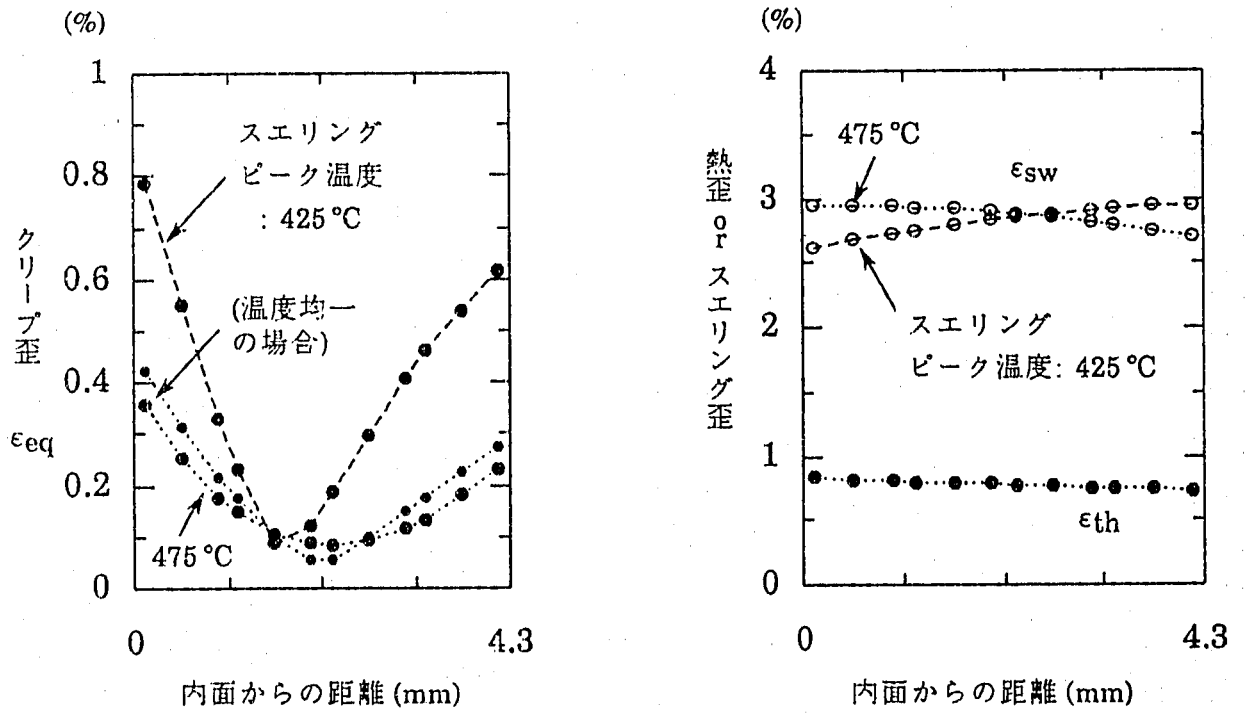
(d) ラップ管平坦部の湾曲形状

第4.4図 照射初期での応力と湾曲形状の解析結果

(冷却材圧力: 2 kg/cm²、温度条件: 肉厚方向直線分布)



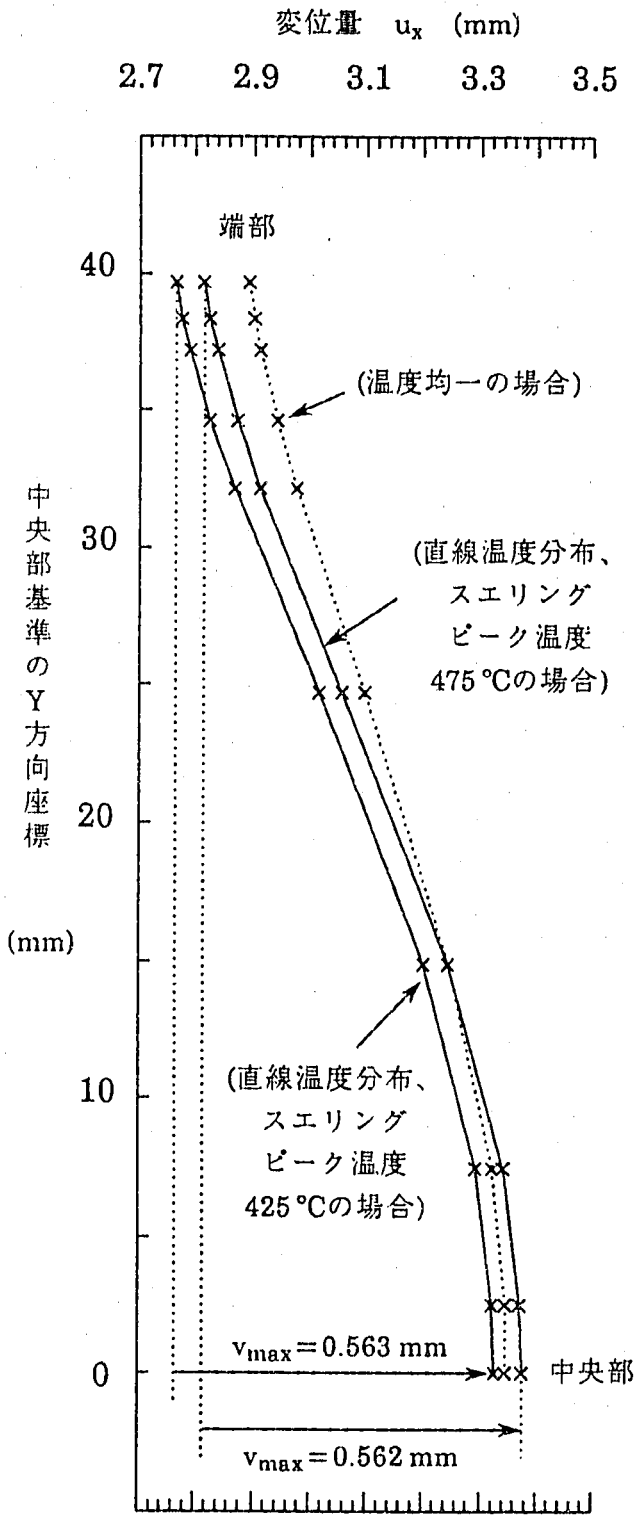
(a) 端部での応力



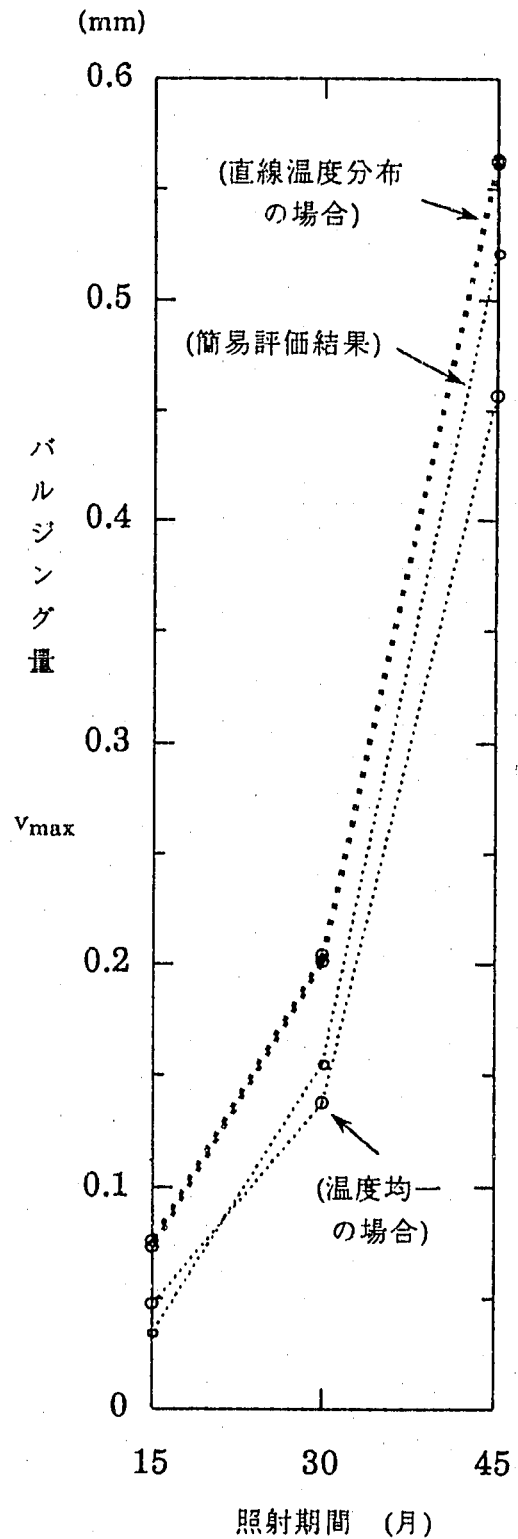
(b) 相当クリープ歪

(c) 熱歪とスエリング歪

第4.5図 照射末期での端部における応力と歪の解析結果
(冷却材圧力: 2 kg/cm²、温度条件: 肉厚方向直線分布)



第4.6図 照射末期でのラップ管平坦部
湾曲形状解析結果の比較
(冷却材圧力: 2 kg/cm²)



第4.7図 バルジング量解析結果
および簡易評価結果の比較
(冷却材圧力: 2 kg/cm²)