

改良オーステナイト鋼の炉内クリープひずみ  
挙動評価式の策定  
(研究報告書)

1999年10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 Section,  
Technology Management Division,  
Japan Nuclear Cycle Development Institute  
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1194,  
Japan.

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)  
1999

## 改良オーステナイト鋼の炉内クリープひずみ挙動評価式の策定

(研究報告書)

水田 俊治<sup>1)</sup> 鵜飼 重治<sup>1)</sup> 上平 明弘<sup>1)</sup>

## 要旨

FFTF/MOTAで照射された内圧封入型クリープ試験片について、照射材料試験室で被覆管部分の照射後密度測定を実施して、スエリングひずみとクリープひずみを精度良く分離することにより、照射クリープ係数を算出した。その結果、照射量依存項の係数 ( $B_0$ ) とスエリング依存項の係数 (D) は、PNC316鋼、15Cr-20Ni鋼及び14Cr-25Ni鋼で統一して表すことができ、照射中の熱クリープひずみ係数はそれぞれの鋼について各々策定した。

得られた成果は以下のとおりである。

- (1) 応力の効果によるスエリングは405~605°Cの温度範囲で認められ、応力レベルの高い方がスエリングは増加傾向にあることがわかった。
- (2) PNC316鋼と15Cr-20Ni鋼について算出した照射クリープ係数の値は、20%CW316S.S., CW316Ti 及びCW15-15Tiについて求められた海外報告値と同程度の範囲にあることがわかった。
- (3) FFTF/MOTA材料照射試験で求めた照射クリープ係数を用いて、燃料ピンのクリープひずみを適切に表すことができた。

---

1) 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

## Irradiation creep equation of the advanced austenitic stainless steels

Shunji MIZUTA<sup>1)</sup>, Shigeharu UKAI<sup>1)</sup>, Akihiko Uehira<sup>1)</sup>

### Abstract

The density measurement of the internal creep specimens irradiated in FFTF/MOTA (Fast Flux Test Facility / Material Open Test Assembly) was conducted MMF (Material Monitoring Facility) and accurate separation of swelling strain from total strain leaded in the derivation of the irradiation creep coefficients.

Irradiation creep coefficients for PNC316, 15Cr-20Ni base S.S. and 14Cr-25Ni base S.S. were systematically expressed , while thermal creep coefficients K, under irradiation were separately expressed for above three steels.

The results obtained are follows,

(1) The effect of stress induced swelling was recognized in the temperature range from 405 to 605°C.

The swelling in high stress specimens have a tendency to increasing swelling.

(2) The irradiation creep coefficients derived from PNC316 and 15Cr-20Ni are similar to that of derived from 20%CW316S.S., CW316Ti and CW15-15Ti which were reported by other authors.

(3) The irradiation creep coefficient derived from gas pressurized tube irradiation using FFTF/MOTA expressed appropriately irradiation creep strain from fuel pins using FFTF/MFA-2(15Cr-20Ni base S.S.).

---

1) O-arai engineering center, Nuclear fuel research group, System engineering technology division

## 目 次

1. はじめに .....	1
2. 供試材及び照射条件 .....	2
3. スエリングに及ぼす応力の効果 .....	3
4. 改良オーステナイト鋼炉内クリープひずみ式の策定にあたっての考え方 .....	4
5. 改良オーステナイト鋼の炉内クリープひずみ式の策定方法 .....	6
1) 炉内クリープひずみ量の算出 .....	7
2) スエリング及び熱クリープひずみが無視できる領域における炉内クリープひずみ の照射量及び応力依存性 .....	7
3) スエリング及び熱クリープが無視できる領域における炉内クリープひずみ の温度依存性 .....	8
4) 热クリープ依存項の照射時間及び応力依存性 .....	8
5) 热クリープ依存項の温度依存性 .....	9
6) スエリング依存項D・ $\epsilon_s$ の解析 .....	10
7) 測定データとの比較 .....	10
6. 改良オーステナイト鋼の炉内クリープひずみ式の策定結果 .....	12
7. 考察 .....	13
1) MFA-2燃料ピンデータとの比較 .....	13
2) 海外データとの比較 .....	13
8. まとめ .....	15
9. 謝辞 .....	16
10. 引用文献 .....	16

## 表

表1. 各鋼種の化学成分（ミルシート値）	17
表2. 各鋼種の熱処理条件等（ミルシート値）	17
表3. FFTF/MOTA炉内クリープひずみデータ (60AK, 18%CW)	18
表4. FFTF/MOTA炉内クリープひずみデータ (60AS, 16%CW)	19
表5. FFTF/MOTA炉内クリープひずみデータ (55MK, 19%CW)	20
表6. FFTF/MOTA炉内クリープひずみデータ (60AK, 18%CW, 相当応力及び相当ひずみに変換)	21
表7. FFTF/MOTA炉内クリープひずみデータ (60AS, 16%CW, 相当応力及び相当ひずみに変換)	22
表8. FFTF/MOTA炉内クリープひずみデータ (55MK, 19%CW, 相当応力及び相当ひずみに変換)	23

## 図

図1.1	スエリングの応力効果 (60AK, 405°C)	24
図1.2	スエリングの応力効果 (60AS, 405°C)	24
図1.3	スエリングの応力効果 (60AK, 495°C)	25
図1.4	スエリングの応力効果 (60AS, 495°C)	25
図1.5	スエリングの応力効果 (60AK, 550°C)	26
図1.6	スエリングの応力効果 (60AS, 550°C)	26
図1.7	スエリングの応力効果 (60AK, 605°C)	27
図1.8	スエリングの応力効果 (60AS, 605°C)	27
図1.9	スエリングの応力効果 (60AK, 670°C)	28
図1.10	スエリングの応力効果 (60AS, 670°C)	28
図1.11	スエリングの応力効果 (55MK, 405°C)	29
図1.12	スエリングの応力効果 (55MK, 440°C)	29
図1.13	スエリングの応力効果 (55MK, 495°C)	30
図1.14	スエリングの応力効果 (55MK, 550°C)	30
図1.15	スエリングの応力効果 (55MK, 605°C)	31
図1.16	スエリングの応力効果 (55MK, 670°C)	31
図2.1	スエリングに及ぼす応力効果 (鋼種による比較)	32
図2.2	スエリングに及ぼす応力効果 (照射温度による比較)	32
図3.1	中性子照射量と炉内クリープひずみの関係 (60AK, 405°C)	33
図3.2	中性子照射量と炉内クリープひずみの関係 (60AS, 405°C)	33
図3.3	中性子照射量と炉内クリープひずみの関係 (60AK, 495°C)	34
図3.4	中性子照射量と炉内クリープひずみの関係 (60AS, 495°C)	34
図3.5	中性子照射量と炉内クリープひずみの関係 (60AK, 550°C)	35
図3.6	中性子照射量と炉内クリープひずみの関係 (60AS, 550°C)	35
図3.7	中性子照射量と炉内クリープひずみの関係 (60AK, 605°C)	36
図3.8	中性子照射量と炉内クリープひずみの関係 (60AS, 605°C)	36
図3.9	中性子照射量と炉内クリープひずみの関係 (60AK, 670°C)	37
図3.10	中性子照射量と炉内クリープひずみの関係 (60AS, 670°C)	37
図3.11	中性子照射量と炉内クリープひずみの関係 (55MK, 405°C)	38
図3.12	中性子照射量と炉内クリープひずみの関係 (55MK, 440°C)	38
図3.13	中性子照射量と炉内クリープひずみの関係 (55MK, 495°C)	39
図3.14	中性子照射量と炉内クリープひずみの関係 (55MK, 550°C)	39

図3.15 中性子照射量と炉内クリープひずみの関係 (55MK, 605°C) .....	40
図3.16 中性子照射量と炉内クリープひずみの関係 (55MK, 670°C) .....	40
図4. 炉内クリープひずみ速度の応力依存性 (スエリングと熱クリープが無視できる領域) .....	41
図5. Boの温度依存性 .....	42
図6. 热クリープ依存項の照射時間依存性 .....	43
図7. 热クリープ依存項の応力依存性 .....	44
図8.1 Kの温度依存性 (I) 60AK .....	45
図8.2 Kの温度依存性 (I) 60AS .....	45
図8.3 Kの温度依存性 (I) 55MK .....	46
図8.4 Kの温度依存性 (I) 14Cr-25Ni .....	46
図9.1 K (60AK) の温度依存性 (II) .....	47
図9.2 K (60AS) の温度依存性 (II) .....	47
図9.3 K (55MK) の温度依存性 (II) .....	48
図9.4 K (14Cr-25Ni) の温度依存性 (II) .....	48
図10. Dの温度依存性 .....	49
図11.1 炉内クリープひずみ計算値と実測値の比較 (60AK, 405°C) .....	50
図11.2 炉内クリープひずみ計算値と実測値の比較 (60AS, 405°C) .....	50
図11.3 炉内クリープひずみ計算値と実測値の比較 (60AK, 495°C) .....	51
図11.4 炉内クリープひずみ計算値と実測値の比較 (60AS, 495°C) .....	51
図11.5 炉内クリープひずみ計算値と実測値の比較 (60AK, 550°C) .....	52
図11.6 炉内クリープひずみ計算値と実測値の比較 (60AS, 550°C) .....	52
図11.7 炉内クリープひずみ計算値と実測値の比較 (60AK, 605°C) .....	53
図11.8 炉内クリープひずみ計算値と実測値の比較 (60AS, 605°C) .....	53
図11.9 炉内クリープひずみ計算値と実測値の比較 (60AK, 670°C) .....	54
図11.10 炉内クリープひずみ計算値と実測値の比較 (60AS, 670°C) .....	54
図11.11 炉内クリープひずみ計算値と実測値の比較 (55MK, 405°C) .....	55
図11.12 炉内クリープひずみ計算値と実測値の比較 (55MK, 440°C) .....	55
図11.13 炉内クリープひずみ計算値と実測値の比較 (55MK, 495°C) .....	56
図11.14 炉内クリープひずみ計算値と実測値の比較 (55MK, 550°C) .....	56
図11.15 炉内クリープひずみ計算値と実測値の比較 (55MK, 605°C) .....	57
図11.16 炉内クリープひずみ計算値と実測値の比較 (55MK, 670°C) .....	57
図12.1 実測評価値とノミナル式計算値との比較 (鋼種別) .....	58
図12.2 実測評価値と式計算値との比較 .....	58
図13.1 照射クリープ歪みの実測評価値と計算値の比較 (ピンID: 187041) .....	59
図13.2 スエリングの実測評価値と計算値の比較 (ピンID: 187041) .....	59
図13.3 外径変化率の実測値と計算値の比較 (ピンID: 187041) .....	59

- 図14. 1 照射クリープ歪みの実測評価値と計算値の比較（ピンID：187104） ..... 60  
図14. 2 スエリングの実測評価値と計算値の比較（ピンID：187104） ..... 60  
図14. 3 外径変化率の実測値と計算値の比較（ピンID：187104） ..... 60

## 1. はじめに

米国のFFTF/MOTA (Fast Flux Test Facility/ Material Open Test Assembly) は照射温度計測及び照射温度制御可能な材料照射リグであり、本照射リグを用いたJNC開発材の炉内クリープひずみ試験を日米共同研究長寿命炉心材料開発の一環として進め、照射データの取得を実施してきた。これはCCR-2プログラムと呼ばれるクリープ／クリープ破断計画の中のクリープ計画に位置づけられ、JNC開発材被覆管から製作された内圧封入型クリープ試験片を1984年～1991年の間にFFTFにおいて照射した。その後NAM-1プログラムにおいてそれら内圧封入型クリープ試験片を1992年3月までFFTF/MOTAで継続照射した。それらの照射後試験片は米国での非破壊検査後に日本に輸送され、照射後試験に供された。本報告書は照射後試験に供された内圧封入型クリープ試験片の密度測定結果を用いて導かれた照射クリープひずみ式についてまとめたものである。

FFTF/MOTAにおいて照射された内圧封入型クリープ試験片は、1996年12月21日に照射材料試験室に搬入され、 $\alpha$ 汚染チェック、外観観察、外観撮影及びレーザー外径測定が実施された後に、内圧封入型クリープ試験片の端栓部分を切断して、被覆管部分のみの照射後密度測定が実施された。それらの液浸法による密度測定から得られたスエリングには応力効果によると考えられるスエリングの増大が認められた。そのため、密度測定結果を用いて照射後の内圧封入型クリープ試験片の外径変化に及ぼすスエリングひずみとクリープひずみの分離を行い、照射クリープ係数を算出した。

照射クリープ係数の算出は照射後密度測定試験を実施した順にPNC316鋼、15Cr-20Ni鋼について行いそれぞれの結果を得た。それらの結果を見比べたところ、PNC316鋼の $B_0$ （照射量依存項の係数）とD（スエリング相互作用項の係数）は15Cr-20Ni鋼の $B_0, D$ の範囲に含まれていたことから両者を総合的に評価して、改良オーステナイト鋼の $B_0$ とDとして評価した。本報告書は改良オーステナイト鋼の炉内クリープひずみ挙動評価式の策定結果についてまとめたものである。

## 2. 供試材及び照射条件

FFTF/MOTAにおいて照射された供試材は昭和60年度に試作された15Cr-20Ni鋼（60AK,60AS）及び昭和55年度試作PNC316鋼（55MK）である。化学成分及び熱処理条件等をそれぞれ表1、表2に示す。60AK,60ASは15Cr-20Ni鋼であり、PNC1520の開発途中材である。そのため、60AK及び60ASはPNC1520のスペックを全て満足できておらず、60AKはSi添加量が0.4Siとスペックの0.6~0.8Si添加量に比較して少なくなっており、60ASは冷間加工度が15.6%とスペックの17~23CWよりも小さくなっている。これに対して55MKは高速増殖原型炉「もんじゅ」仕様PNC316鋼のスペック内にある。

各々の鋼種について照射条件を以下に示す。

15Cr-20Ni鋼はFFTF/MOTAにおいて第9サイクル（1986年9月）～第12サイクル（1992年3月）の期間に照射された。

照射温度 : 405、495、550、605、670°C

周応力 : 70、100 MPa

照射量 : 最大  $31.8 \times 10^{26} \text{n/m}^2$  (E>0.1MeV)

PNC316鋼はFFTF/MOTAにおいて第5サイクル（1984年6月）～第12サイクル（1992年3月）の期間に照射された。

照射温度 : 405、440、495、550、605、670°C

周応力 : 70、100 MPa

照射量 : 最大  $47.1 \times 10^{26} \text{n/m}^2$  (E>0.1MeV)

### 3. スエリングに及ぼす応力の効果

内圧封入型クリープ試験片の端栓部分を切断して、被覆管部分のみの密度測定を実施した。密度測定はMMF-2, No.4セルの密度測定装置を用いて小数点第5位までの精度で求め、1試料当たり最低3回測定し、その平均値を密度値として採用した。スエリング評価は、同ロットの非照射材との比較により行った。

今回実施したFFTF/MOTA内圧封入型クリープ試験片の密度変化の結果とこれまでに得られている内圧封入型クリープ試験片及びOpen Tubeの外径変化測定結果と比較して図1.1～1.16に示す。密度変化は外径変化と直接比較できるように1/3密度変化にしており、図中の黒シンボルが1/3密度変化である。これらの図より、405～605℃では応力誘起のスエリング(1/3密度変化-Open Tube外径変化)が認められ、Open Tubeのスエリングと比べて、応力を負荷したクリープ試験片ではスエリングが大きくなっている。また、応力の高い方が応力誘起のスエリングは大きくなる傾向が見受けられる。

図2.1,図2.2に示すように、それらの内圧封入型クリープ試験片より採取した被覆管部のスエリングはOpen Tube(応力：ゼロ)のスエリングよりも僅かに大きい傾向にあり、応力効果によるスエリングの増大が認められる。内圧がスエリングに及ぼす応力効果は内圧封入型クリープ試験片の端栓を切断した後の密度測定に依らねばならないために、図1.1～1.16には最終の密度測定結果のみについてOpen Tubeのスエリングと比較して示した。また、図2.1,図2.2ではなるべく正確にスエリングに及ぼす応力効果を比較するために、高速中性子照射量( $E>0.1\text{MeV}$ )はほぼ同じ条件のものだけについて示した。周応力のレベルとしては70MPaと100MPaの2レベルがあり、どの照射条件についても周応力の高い100MPaの方がスエリングの増大は大きい傾向にあることがわかる。

#### 4. 改良オーステナイト鋼炉内クリープひずみ式の策定にあたっての考え方

改良オーステナイト鋼の炉内クリープひずみ式を策定するにあたっての考え方について、以下に述べる。詳細な策定方法については4.改良オーステナイト鋼の炉内クリープひずみ式の策定方法に示した。

改良オーステナイト 鋼の炉内クリープひずみ式は以下の式のように、照射量依存項、熱クリープ依存項及びスエリング依存項の和で表される。

$$\epsilon = \frac{B_0 \cdot \phi t \cdot \sigma + K \cdot t^{1.9} \cdot \sigma^{2.4}}{\text{照射量依存項}} + \frac{D \cdot \epsilon_s \cdot \sigma}{\text{スエリング依存項}}$$

##### 使用単位

$\epsilon$ :	炉内クリープひずみ	(相当ひずみ,-)
$\epsilon_s$ :	スエリングひずみ	(ひずみ,-)
$\phi t$ :	中性子照射量	( $\times 10^{26}$ n/m <sup>2</sup> , E>0.1MeV)
$\sigma$ :	応力	(相当応力, MPa)
$t$ :	照射時間	(h)
T :	照射温度	(K)
$B_0$ :	照射クリープ係数	(( $\times 10^{26}$ n/m <sup>2</sup> ) <sup>-1</sup> ) · MPa <sup>-1</sup> )
K :	熱クリープ係数	(h <sup>-1.9</sup> · MPa <sup>-2.4</sup> )
D :	スエリングとの相互作用係数	(MPa <sup>-1</sup> )

##### (1) $B_0, D$

評価したPNC316鋼の $B_0$ （照射量依存項の係数）とD（スエリング依存項の係数）は15Cr-20Ni鋼の $B_0, D$ の範囲に含まれていることが判明したため、両鋼を合体して改良オーステナイト鋼の $B_0$ とDとして統一的に表わした。

Dの上下限は $B_0$ の上下限を用いて設定すると平均値を越えて上下限が逆転してしまうため、 $B_0$ のノミナル値を用いて、Dの上下限値を設定した。ただし、Dの値を求める際のスエリングひずみ  $\epsilon_s$  は各内圧クリープ試験片で2%よりも大きなスエリングが認められたものについて、

$$\epsilon_s = (\text{密度測定結果}/3) - (\text{応力フリー試験片の焼きしまりの最小値})$$

を用いた。

これまでの解析では上下限値を求める際にはデータを包絡するようにしていたが、今回の解析ではデータの上下限値を用いることにした（Kについても同様）。

##### (2) K

PNC316鋼, 15Cr-20Ni鋼 (60AK及び60AS) の炉内熱クリープひずみ式をそれぞれについて策定した。また改良オーステナイト鋼の範疇にある14Cr-25Ni鋼の炉内熱クリープひずみ式についても検討

した。ここで、これら改良オーステナイト鋼の照射時間依存性及び応力依存性は鋼種によって変わらないとして、K（熱クリープ依存項の係数）の値を変えることによって表した。具体的には14Cr-25Ni鋼の炉外のクリープ破断強度はPNC316鋼と15Cr-20Ni鋼の中間の強度であることがわかっているため、14Cr-25Ni鋼の炉内熱クリープひずみ式は3鋼種（60AK, 60AS, 55MK）の平均式で表し、上限式には最もクリープ強度の低いPNC316のKを採用し、下限式には最もクリープ強度の高い60AKのKの値を採用することにした。

## 5. 改良オーステナイト鋼の炉内クリープひずみ式の策定方法

### データベース

- (1) 材料：昭和60年度試作改良オーステナイト鋼(60AK,60AS)、及び昭和55年度試作改良SUS316鋼(55MK)
- (2) 試験方法：FFTF/MOTA炉内クリープ試験
- (3) 試験条件
  - ・照射試験：405～670°C
  - ・周応力：70, 100 MPa
  - ・照射量：最大 $47.13 \times 10^{26} \text{n/m}^2$ , E>0.1MeV

### 策定方法

一般に、炉内クリープひずみは次式の関係にあることが知られている。

$$\varepsilon = K' \cdot \phi t^m \cdot \sigma^n + D \cdot \varepsilon_s \cdot \sigma \quad \dots \quad (1)$$

ここで、

$\varepsilon$ ：炉内クリープひずみ (相当ひずみ,-)

$\varepsilon_s$ ：スエリングひずみ (ひずみ,-)

$\phi t$ ：中性子照射量 ( $\times 10^{26} \text{n/m}^2$ , E>0.1MeV)

$\sigma$ ：応力 (相当応力, MPa)

$D$ ：スエリングとの相互作用係数 (MPa<sup>-1</sup>)

$K'$ ：照射クリープ係数 ( $(\times 10^{26} \text{n/m}^2)^{-1}$  · MPa<sup>-1</sup>)

(1) 式の第一項は照射量に依存するひずみと熱クリープひずみを表しており、第二項はスエリング依存項である。今回の解析では、(1)式の第一項を(2)式に示すように、熱クリープに関係しない項( $B_0 \cdot \phi t^m \cdot \sigma^n$ )と、熱クリープに関する項( $K \cdot t^{m'} \cdot \sigma^{n'}$ )に分割して解析を行った。

$$\varepsilon = B_0 \cdot \phi t^m \cdot \sigma^n + K \cdot t^{m'} \cdot \sigma^{n'} + D \cdot \varepsilon_s \cdot \sigma \quad \dots \quad (2)$$

ここで、

$B_0$ ：照射クリープ係数 ( $(\times 10^{26} \text{n/m}^2)^{-1}$  · MPa<sup>-1</sup>)

また、炉内クリープひずみと応力は周ひずみと周応力から以下の関係を用いて相当ひずみと相当応力に換算した。

$$\varepsilon = 2/\sqrt{3} \cdot \varepsilon_H \quad (\varepsilon_H \text{は周ひずみ})$$

$$\sigma = \sqrt{3}/2 \cdot \sigma_H \quad (\sigma_H \text{は周応力})$$

(2) 式をもとに、以下の手順で解析を行った。

- 1) 炉内クリープひずみ量の算出
- 2) スエリング及び熱クリープが無視できる領域における炉内クリープひずみ  $\epsilon$  の照射量依存性と応力依存性
- 3) スエリング及び熱クリープが無視できる領域における炉内クリープひずみ  $\epsilon$  の温度依存性
- 4) 热クリープ依存項の照射時間及び応力依存性
- 5) 热クリープ依存項の温度依存性
- 6) スエリング依存項D・ $\epsilon_s$ の解析

#### 1) 炉内クリープひずみ量の算出

炉内クリープひずみ  $\epsilon$  は、スエリングが生じていない領域については次式によって求めることができる。

$$\epsilon = \epsilon_{\text{Total}} - \epsilon_0 \quad \dots \dots \dots (3)$$

$\epsilon_{\text{Total}}$ ：内圧封入型試験片の外径変化

$\epsilon_0$ ：応力フリー試験片の外径変化

$\epsilon_{\text{Total}}$  と  $\epsilon_0$  は FFTF/MOTA の照射試験結果を用いた。

一方、スエリングの生じている領域の炉内クリープひずみ  $\epsilon$  は次式によって求められる。

$$\epsilon = \epsilon_{\text{Total}} - \rho/3 \quad \dots \dots \dots (3)'$$

$\epsilon_{\text{Total}}$ ：内圧封入型試験片の外径変化

$\rho$ ：内圧封入型試験片の密度変化

各温度・応力における  $\epsilon_{\text{Total}}$  と  $\epsilon_0$  及び  $\rho$  より算出した  $\epsilon$  を策定用データとして表 3～8 に示した。また、中性子照射量と炉内クリープひずみの関係を図 3.1～図 3.16 に示した。

#### 2) スエリング及び熱クリープひずみが無視できる領域における炉内クリープひずみの照射量及び応力依存性

ここでは、熱クリープの影響を受けていない 495°C 以下で、かつ応力フリー試験片でスエリングを生じていないデータを用いて解析を行った（図 3.1～3.4 及び 図 3.11～3.13）。

スエリングと熱クリープが無視できる領域においては、各温度とも炉内クリープひずみと中性子

照射量との関係が、原点を通る直線上にあるので、炉内クリープひずみは(2)式より次のように表される。

$$\varepsilon = B_0 \cdot \phi t \cdot \sigma^n \quad \dots \dots \dots (4)$$

次に、応力指数nを算出するため(4)式から炉内クリープひずみ速度( $\varepsilon / \phi t$ )を求め、両辺の常用対数をもとめると(5)式になる。

$$\log(\varepsilon / \phi t) = \log(B_0) + n \log(\sigma) \quad \dots \dots \dots (5)$$

一般に、照射クリープひずみは応力の1次に比例することが知られており<sup>10</sup>、図4に示すように、解析でもこれに近い値として0.89が得られたため、ここではn=1.0とした。

### 3) スエリング及び熱クリープが無視できる領域における炉内クリープひずみの温度依存性

2で得られたn=1.0を用いて、(4)式よりB<sub>0</sub>を求め、それを温度との関係として整理した結果を図5に示す。B<sub>0</sub>の温度依存性はないものとして、それらの平均値よりB<sub>0</sub>のノミナル値を求め、またB<sub>0</sub>のデータより最大値と最小値を求めた。

$$\text{ノミナル値(平均値)} : B_0 = 3.98 \times 10^{-6} (\times 10^{26} \text{n/m}^2)^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1}$$

$$\text{最大値} : B_0 = 6.36 \times 10^{-6} (\times 10^{26} \text{n/m}^2)^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1}$$

$$\text{最小値} : B_0 = 2.17 \times 10^{-6} (\times 10^{26} \text{n/m}^2)^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1}$$

### 4) 热クリープ依存項の照射時間及び応力依存性

热クリープが顯著に生じている670°C及び605°Cでスエリングが生じていない領域のデータを用いて、それぞれの銅種に対して熱クリープ依存項の解析を行った。

热クリープひずみは60AK及び60ASにおいてSi濃度、冷間加工度の違いと考えられる差が認められたため(Siが低く冷間加工度の高い60AKの方が熱クリープひずみが小さい)、15Cr-20Ni鋼については、各々に対して熱クリープ依存項を解析した。

スエリングの生じていない領域での、热クリープ依存項は、炉内クリープひずみとB<sub>0</sub>・φt・σの差として(6)式のように求められる。

$$K \cdot t^{m'} \cdot \sigma^{n'} = \varepsilon - B_0 \cdot \phi t \cdot \sigma \quad \dots \dots \dots (6)$$

ここで、B<sub>0</sub>の値は3)で求めた平均値を用いた。(6)式は、両辺の常用対数をとり(7)式のように変形できる。

$$\log(\varepsilon - B_0 \cdot \phi t \cdot \sigma) = \log(K) + m' \log(t) + n' \log(\sigma) \quad \dots \dots \dots (7)$$

まず、照射時間依存性を求めるため、熱クリープ依存項と照射時間を両対数のグラフにプロットした結果を図6に示す。同一温度・応力のデータの傾きから照射時間指数 $m'$ が求められ、その平均値より $m'=1.9$ とした。

次に、応力指数 $n'$ についても同様に解析した。(6)式は(9)式のように変形できる。

$$(\varepsilon - B_0 \cdot \phi t \cdot \sigma) / t^{m'} = K \cdot \sigma^{n'}, \dots \dots \dots (8)$$

$$\log((\varepsilon - B_0 \cdot \phi t \cdot \sigma) / t^{m'}) = \log(K) + n' \log(\sigma) \dots \dots \dots (9)$$

ここで $m'$ は上で得られた1.9を用いた。 $(\varepsilon - B_0 \cdot \phi t \cdot \sigma) / t^{m'}$ と応力を両対数のグラフにプロットした結果を図7に示す。応力指数 $n'$ は、この傾きより求められ、2温度条件(605°C及び670°C)の平均値より $n'=2.4$ とした。

### 5) 热クリープ依存項の温度依存性

4.で得られた $m', n'$ を用いて(6)式よりKを60AK,60AS,55MKデータよりそれぞれ求め、それと温度の関係を整理した結果を図8～図9に示す。14Cr-25Ni鋼の炉外のクリープ破断強度はPNC316鋼と15Cr-20Ni鋼の中間の強度であることがわかっている。そのことから、14Cr-25Ni鋼の熱クリープひずみ式は3鋼種(60AK,60AS,55MK)の平均式で表すことにし、上限値は55MKデータ、下限値は60AKデータを用いて決めた。

図8.1～図8.4に見られるように、 $\ln(K)$ と $1/T$ は直線的な関係にあり、Kは両者を1次式でフィッティングしてノミナル式を求めた。また、上限式及び下限式については、上限値及び下限値により設定した。

<60AK>

ノミナル式 :  $K = 1.11 \times 10^{-3} \cdot \exp(-24300/T)$

上限式 :  $K = 1.80 \times 10^{-3} \cdot \exp(-24300/T)$

下限式 :  $K = 6.96 \times 10^{-4} \cdot \exp(-24300/T)$

<60AS>

ノミナル式 :  $K = 1.02 \times 10^{-4} \cdot \exp(-21800/T)$

上限式 :  $K = 1.65 \times 10^{-4} \cdot \exp(-21800/T)$

下限式 :  $K = 6.71 \times 10^{-5} \cdot \exp(-21800/T)$

<55MK>

ノミナル式 :  $K = 2.20 \times 10^{-3} \cdot \exp(-23900/T)$

上限式 :  $K = 2.88 \times 10^{-3} \cdot \exp(-23900/T)$

下限式 :  $K = 1.76 \times 10^{-3} \cdot \exp(-23900/T)$

&lt;14Cr-25Ni鋼&gt;

$$\begin{array}{ll} \text{ノミナル式} & : K = 3.16 \times 10^{-4} \cdot \exp(-22700/T) \\ \text{上限式} & : K = 8.09 \times 10^{-4} \cdot \exp(-22700/T) \\ \text{下限式} & : K = 1.27 \times 10^{-4} \cdot \exp(-22700/T) \end{array}$$

6) スエリング依存項D・ $\epsilon_S$ の解析

スエリングは熱クリープを無視できる低温側(405, 440°C)と、熱クリープの無視できない高温側(550, 605°C)で生じており、照射データより求めた炉内クリープひずみ $\epsilon$ と $B_0 \cdot \phi t \cdot \sigma$ 及び $K \cdot t^{1.9} \cdot \sigma^{2.4}$ の差をスエリング依存項とみなすとDは(10)式により求められる。

$$D = (\epsilon - B_0 \cdot \phi t \cdot \sigma - K \cdot t^{1.9} \cdot \sigma^{2.4}) / (\epsilon_S \cdot \sigma) \quad \dots \dots \dots (10)$$

ここでは、Dの値の上下限を精度良く求めるためには、熱クリープひずみの影響のない405°CでDの上下限値を求めて高温側に外挿することが必要と考えた。そのため、スエリングの生じている405°Cにおける高照射量の密度測定を行ったデータ((3)'式)を用いて、スエリング依存項Dを求めた。 $B_0$ の値は3)で得られた値の中から、同一の照射条件から求められた値に1対1に対応させた値を用い(例えば60ASの405°Cで100MPaの時のDは、60ASの405°C, 100MPaで求めた $B_0$ の値を用いて算出する)、また $\epsilon_S$ は各内圧クリープ試験片で2%よりも大きなスエリングが認められたものについて、物理的な意味を考慮して以下の式より求めた値を用いた。

$$\epsilon_S = (\text{測定したスエリング}/3) - (\text{応力フリー試験片の焼きしまりの最小値})$$

得られた結果を図10に示した。ノミナル値は405°Cで求めたDの平均値とし、最大値及び最小値の外挿性は550°Cの55MK材の値を用いて確認した。550°Cの55MK材の計算には、 $B_0$ の値は同一照射条件から求められた値に1対1に対応させた値を用い、Kの値には55MK材のノミナル値を用いた。

$$\begin{array}{ll} \text{ノミナル値(平均値)} & : D = 5.5 \times 10^{-3} \text{ (MPa}^{-1}\text{)} \\ \text{最大値} & : D = 8.2 \times 10^{-3} \text{ (MPa}^{-1}\text{)} \\ \text{最小値} & : D = 3.8 \times 10^{-3} \text{ (MPa}^{-1}\text{)} \end{array}$$

## 7) 測定データとの比較

図11.1～図11.1.6には各温度における炉内クリープひずみのノミナル式・上限式・下限式と中性子照射量との関係をMOTAデータと比較して示す。ここで、内圧封入型クリープ試験片からの密度測定が行われたのは各試料の最後のデータ点のみであり、照射途中のスエリングに及ぼす応力効果は不明である。そのため、途中のスエリングは便宜上、応力フリーのOpen Tube試験片で測定した

スエリングひずみを用いた。なお、焼きしまりの最小値を示すまでの途中の焼きしまりについてはスエリングはゼロとして評価し、それ以降については焼きしまりを考慮して、焼きしまりの最小値を減じることでスエリングひずみを評価した。

図12.1、図12.2では密度測定が行われた各試料の最後のデータ点に対して、実測評価値と今回作成した炉内クリープひずみ式による計算値とを比較した。炉内クリープひずみは5%くらいまではノミナルの計算値は実測評価値と良く合っていることがわかり、全範囲に渡って実測データは上下限式に殆ど包絡されていることもわかる。

## 6. 改良オーステナイト鋼の炉内クリープひずみ式の策定結果

改良オーステナイト鋼の炉内クリープひずみ式は以下の式のように、照射量依存項、熱クリープ依存項及びスエリング依存項の和で表される。

$$\epsilon = \frac{B_0 \cdot \phi t \cdot \sigma}{\text{照射量依存項}} + \frac{K \cdot t^{1.9} \cdot \sigma^{2.4}}{\text{熱クリープ依存項}} + \frac{D \cdot \epsilon_s \cdot \sigma}{\text{スエリング依存項}}$$

ノミナル式

$$B_0 = 3.98 \times 10^{-6}$$

$$D = 5.5 \times 10^{-3}$$

上限式

$$B_0 = 6.36 \times 10^{-6}$$

$$D = 8.2 \times 10^{-3}$$

下限式

$$B_0 = 2.17 \times 10^{-6}$$

$$D = 3.8 \times 10^{-3}$$

<15Cr-20Ni鋼>

$$\text{ノミナル式} : K = 1.11 \times 10^{-3} \cdot \exp(-24300/T)$$

$$\text{上限式} : K = 1.80 \times 10^{-3} \cdot \exp(-24300/T)$$

$$\text{下限式} : K = 6.96 \times 10^{-4} \cdot \exp(-24300/T)$$

<PNC316>

$$\text{ノミナル式} : K = 2.20 \times 10^{-3} \cdot \exp(-23900/T)$$

$$\text{上限式} : K = 2.88 \times 10^{-3} \cdot \exp(-23900/T)$$

$$\text{下限式} : K = 1.76 \times 10^{-3} \cdot \exp(-23900/T)$$

<14Cr-25Ni鋼>

$$\text{ノミナル式} : K = 3.16 \times 10^{-4} \cdot \exp(-22700/T)$$

$$\text{上限式} : K = 8.09 \times 10^{-4} \cdot \exp(-22700/T)$$

$$\text{下限式} : K = 1.27 \times 10^{-4} \cdot \exp(-22700/T)$$

### 使用単位

$\epsilon$  : 炉内クリープひずみ (相当ひずみ,-)

$\epsilon_s$  : スエリングひずみ (ひずみ,-)

$\phi t$  : 中性子照射量 ( $\times 10^{26} \text{n}/\text{m}^2$ ,  $E > 0.1 \text{MeV}$ )

$\sigma$  : 応力 (相当応力, MPa)

$t$  : 照射時間 (h)

$T$  : 照射温度 (K)

$B_0$  : 照射クリープ係数 ( $(\times 10^{26} \text{n}/\text{m}^2)^{-1}$ ) · MPa $^{-1}$ )

$K$  : 熱クリープ係数 ( $\text{h}^{-1.9} \cdot \text{MPa}^{-2.4}$ )

$D$  : スエリングとの相互作用係数 (MPa $^{-1}$ )

## 7. 考察

### 1) MFA-2燃料ピンデータとの比較

15Cr-20Ni鋼であるMFA-2燃料ピンデータについて、MOTAデータを用いて導出した照射クリープひずみ式（ノミナル式）とMFA-2燃料ピンのスエリングデータより作成したスエリング上限式（MFA-2）の組合せで照射クリープひずみを計算し、測定された外径変化率と比較検討した。MFA-2燃料ピンの照射条件については、ピン187041では被覆管肉厚中心部の寿命平均温度は367～601°C、最大照射量は $21.7 (\times 10^{26} \text{n/m}^2, E > 0.1 \text{MeV})$ であり、ピン187104では寿命平均温度と最大照射量はそれぞれ367～547°C、 $23.4 (\times 10^{26} \text{n/m}^2, E > 0.1 \text{MeV})$ である。また寿命末期にかかる周応力は以下に述べる燃料ピンの照射変形解析コードによる計算の結果、ピン187041では48MPa、ピン187104では49MPaであった。照射クリープひずみの計算は、燃料ピンにおける被覆管の照射変形を照射時刻歴に従って簡易計算するコードを用いて行った。本コードは、被覆管のスエリング及び照射クリープによる外径変化を炉心軸方向全体について解析するものである。また解析における被覆管の応力源は製造時封入ガスと燃料の燃焼に伴いピン内に蓄積するFPガスによるガス内圧である。

対象とした2本の燃料ピンについて、照射クリープひずみとスエリング及びそれらの和である外径変化率の実測評価値と計算値の比較を図13、図14に示す（外径変化率は実測値）。変形が大きい軸方向中央部では計算値の方が実測評価値より若干大きくなっているが、概ね燃料ピンの変形を表現できていると判断される。このことは重要な結論であり、スエリングはMOTA材料照射とMFA-2では全く一致しなかったにも係わらず（MFA-2の方がかなり大きい）、MOTA材料照射データで作成した照射クリープ係数を用いて、燃料ピン変形を適切に表現できた（燃料軸方向中央部のスエリングが大きい位置）。一方、変形が小さい範囲では計算値の方が実測評価値よりも小さくなっている軸位置に着目すると、その位置でのスエリングはいずれも計算値の方が大きくなっていた。変形が小さい範囲で計算値が過小評価になっている可能性としては、照射クリープひずみ式の係数 $B_0$ またはDが過小評価になっていることやFCMIにより実際の付加応力がガス圧応力よりも大きくなっていることも考えられる。

### 2) 海外データとの比較

オーステナイト鋼の照射クリープ係数については、海外においても内圧封入管の照射試験により測定した結果が報告されており、それらの値を整理すると以下のようになる。

#### (1) 照射クリープ係数 ( $B_0$ )

① Garnerら<sup>1)</sup> : 20%CW316SSに対して、 $B_0 = 2 \sim 10 \times 10^{-6} \text{ dpa}^{-1} \text{ MPa}^{-1}$

② K.Ehrlich<sup>2)</sup> : 20%CW316SSに対して、 $B_0 = 1 \sim 3 \times 10^{-6} \text{ dpa}^{-1} \text{ MPa}^{-1}$

- ③ M.B.Toloczo<sup>3)</sup> : 20%CW316SSに対して、 $B_0 = 1 \sim 2 \times 10^{-6} \text{ dpa}^{-1} \text{ MPa}^{-1}$
- ④ Krasnoselovら<sup>4)</sup> : 20%CW316SSに対して、 $B_0 = 1.0 \sim 2.5 \times 10^{-6} \text{ dpa}^{-1} \text{ MPa}^{-1}$
- ⑤ Toloczkoら<sup>5)</sup> : 20%CW316SSに対して、 $B_0 = 1.7 \times 10^{-6} \text{ dpa}^{-1} \text{ MPa}^{-1}$
- ⑥ F.A.Garner<sup>6)</sup> : 20%CW316SSに対して、 $B_0 = 1 \times 10^{-6} \text{ dpa}^{-1} \text{ MPa}^{-1}$
- ⑦ J.L.Seran<sup>7)</sup>, CW316Tiに対して、 $K(B_0) = 0.25 \sim 2 \times 10^{-6} \text{ dpa}^{-1} \text{ MPa}^{-1}$
- ⑧ A.Maillard<sup>8)</sup>, CW15-15Tiに対して、 $K(B_0) = 0.5 \sim 2 \times 10^{-6} \text{ dpa}^{-1} \text{ MPa}^{-1}$
- また燃料ピンの外径変化から求められた結果として、
- ⑨ J.L.Seran<sup>9)</sup>, CW15-15Ti燃料被覆管のスエリングしていない領域より求めた結果として、

$$B_0 = 0.5 \sim 1.0 \times 10^{-6} \text{ dpa}^{-1} \text{ MPa}^{-1}$$

一方、本試験において得られた改良オーステナイト鋼 (PNC316、15Cr-20Ni) の照射クリープ係数 ( $B_0$ ) は  $2.17 \sim 6.36 \times 10^{-6} (\times 10^{26} \text{n/m}^2)^{-1} \text{ MPa}^{-1}$  の範囲にあり、これはdpaの単位に変換すると  $0.55 \sim 1.5 \times 10^{-6} \text{ dpa}^{-1} \text{ MPa}^{-1} \sim 10^{-6}$  となる。この値はこれまでの海外報告値の範囲にあることが判る。また、燃料ピンの外径変化より推定された  $B_0$  は MOTA による材料照射で得られた値とほとんど違わない。

照射クリープ係数 ( $B_0$ ) の温度依存性については、本試験結果において、400°Cから500°Cに温度が上昇するに伴い低下する傾向にある。BOR-60やPhenixにおける照射試験においても同様の結果が報告されている。

## (2) スエリングとの相互作用係数 (D)

- ① Garnerら<sup>10)</sup> : 20%CW316SSに対して、 $D = \sim 0.6 \times 10^{-2} \text{ MPa}^{-1}$
- ② Toloczkoら<sup>5)</sup> : 20%CW316SSに対して、 $D = 0.3 \sim 0.5 \times 10^{-2} \text{ MPa}^{-1}$
- ③ F.A.Garnerら<sup>6)</sup> : 20%CW316SSに対して、 $D = \sim 1 \times 10^{-2} \text{ MPa}^{-1}$
- ④ J.L.Seranら<sup>7)</sup> : CW316Tiに対して、 $\alpha(D) = 0.17 \times 10^{-2} \text{ MPa}^{-1}$
- ⑤ A.Maillard<sup>8)</sup>, CW15-15Tiに対して、 $\alpha(D) = 0.2 \times 10^{-2} \text{ MPa}^{-1}$

一方、本試験で得られた改良オーステナイト鋼 (PNC316、15Cr-20Ni) のスエリングとの相互作用係数 (D) は  $0.38 \sim 0.82 \times 10^{-2} \text{ MPa}^{-1}$  の範囲にある。この値はスエリングをひずみで表した場合であり、上記海外の報告値は体積スエリングに対応する値である。従って、体積スエリングで表現するため得られた結果を1/3すると、Dの値は  $0.13 \sim 0.27 \times 10^{-2} \text{ MPa}^{-1}$  となり、およそ海外で報告されている範囲にあることがわかる。

## 8. まとめ

本研究により得られた成果は以下の通りである。

- (1) 応力の効果によるスエリングの増大は405~605°Cの温度範囲で認められ、応力レベルの高いフープ応力100MPaの方がスエリングの増加は大きい傾向にある。
- (2) PNC316鋼と15Cr-20Ni鋼について、 $B_0$ の値は $2.17 \times 10^{-6} \sim 6.36 \times 10^{-6}$ (( $\times 10^{26} n/m^2$ ) $^{-1} \cdot MPa^{-1}$ )の範囲にあり、Dの値は、 $3.8 \times 10^{-3} \sim 8.2 \times 10^{-3}$  (MPa $^{-1}$ ) の範囲にある。
- (3) 15Cr-20Ni鋼の $B_0$ の値は、Si添加量の少ない60AK材とSiを添加している60AS材においてスエリング特性が大きく異なるにも関わらずほぼ同じ範囲を示した。
- (4) 热クリープひずみ依存項の係数Kの値をPNC316鋼、15Cr-20Ni鋼及び14Cr-25Ni鋼でそれぞれ策定することによって、改良オーステナイト鋼の照射クリープひずみ式を策定することができた。
- (5) MFA-2燃料ピンデータとの比較では、照射クリープひずみ式（ノミナル式）とスエリング式（MFA-2）上限式の組み合わせで実測評価値を評価したところ、変形が大きい範囲では計算値の方が実測評価値よりも大きく、保守性が担保されていた。

## 9. 謝辞

本報告書を作成するにあたり、多大なる助言を頂きました大洗工学センター システム部  
炉心燃料工学グループ 水野朋保研究主幹に感謝いたします。また、照射後試験として内圧封  
入型クリープ試験片の外観撮影、レーザ外径測定及び密度測定を実施して精度の高いデータ  
を取得して頂きました大洗工学センター 照射センター 燃料材料試験部 照射材料試験室 炉心  
チームの大森雄TL、金成孝志氏及び検査開発（株）重篠好克氏に感謝いたします。

## 10. 引用文献

- (1) Garnerら, DOE-ER-313-12 (1992)
- (2) K.Ehrlichら、J.Nucl.Mater.100 (1981)149
- (3) M.B.Toloczoら、DOE-ER-0313-9 (1991)
- (4) Krasnoselovら, Atommaya Energiya ,Vol.63, No.4, P.240 (1987)
- (5) Toloczkoら, ICFRM-6, (1994)
- (6) F.A.Garnerら, Materials Science and Technology, 10A
- (7) J.L.Seranら, ASTM STP 1046, P.739 (1990)
- (8) A.Maillardら, ASTM STP 1175 , P.824 (1994)
- (9) J.L.Seran ら, ASTM STP 1125, P.1209 (1992)

表1 各鋼種の化学成分（ミルシート値）

鋼種	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Ti	Nb+Ta	V	Al	B	N	O	(wt.%)
60AK	0.057	0.41	1.72	0.026	0.005	19.66	15.05	2.55	0.28	0.09	0.02	0.026	0.0024	0.006	0.0009	
60AS	0.064	0.75	1.91	0.028	0.002	19.73	15.05	2.57	0.25	0.11	<0.01	0.034	0.0031	0.002	0.0020	
55MK	0.052	0.82	1.83	0.028	0.009	13.84	16.52	2.49	0.080	0.079	0.01	0.016	0.0031	0.003	0.0016	

表2 各鋼種の熱処理条件等（ミルシート値）

鋼種	熱処理条件	CW (%)	結晶粒度	硬さ (Hv)	引張強さ(RT) (MPa)	0.2%耐力(RT) (MPa)	伸び(RT) (%)	引張強さ(650°C) (MPa)	0.2%耐力(650°C) (MPa)	伸び(650°C) (%)
60AK	1125°C×2min	18.0	7.5～8.0	262	808	760	11	604	540	10
60AS	1080°C×1min	15.6	8.5	252	759	693	18	526	461	18
55MK	1080°C×2min	20	8.0～8.5	255	808	689	17	540	448	8

表3 FFTF/MOTA炉内クリープひずみデータ (60AK,18%CW)

目標温度 (°C)	照射温度 (°C)	周応力 (MPa)	周応力 (kgf/mm <sup>2</sup> )	中性子照射量 (×10 <sup>20</sup> n/m <sup>2</sup> )	DOSE (dpa)	照射時間 (h)	応力ゲージ試験片 ひずみ* (△D/D%)	内圧クリープ試験 片ひずみ (△D/D%)	炉内クリープひずみ (△D/D%)	エリング量 (△V/V%)	炉内クリープひずみ** (△D/D+1/3△ V/V%)
405	414	70	7.14	9.60	41.1	8160.0	-0.06	0.26	0.32		
405	405	70	7.14	18.54	78.9	16159.2	0.56	1.43	0.87		
405	417	70	7.14	25.76	112.4	23284.8	1.79	3.40	1.61		
405	428	70	7.14	31.34	136.6	28068.0	3.29	5.62	2.33	11.42	1.81
405	414	100	10.2	9.60	41.1	8160.0	-0.06	0.36	0.42		
405	405	100	10.2	18.54	78.9	16159.2	0.56	1.77	1.21		
405	417	100	10.2	25.76	112.4	23284.8	1.79	4.21	2.42		
405	428	100	10.2	31.34	136.6	28068.0	3.29	6.78	3.49	12.25	2.70
495	484	70	7.14	4.97	19.9	7843.2	-0.10	-0.02	0.08		
495	494	70	7.14	10.42	41.3	15576.0	-0.12	0.01	0.13		
495	495	70	7.14	14.28	58.1	22629.6	-0.11	0.09	0.20		
495	495	70	7.14	17.39	71.2	27436.8	-0.10	0.13	0.23	0.00	0.13
495	494	100	10.2	4.97	19.9	7843.2	-0.10	0.01	0.11		
495	494	100	10.2	10.42	41.3	15576.0	-0.12	0.07	0.19		
495	495	100	10.2	14.28	58.1	22629.6	-0.11	0.17	0.28		
495	495	100	10.2	17.39	71.2	27436.8	-0.10	0.24	0.34	0.01	0.24
550	549	70	7.14	10.20	43.7	7833.6	-0.10	0.02	0.12		
550	550	70	7.14	19.75	84.1	15561.6	-0.11	0.10	0.21		
550	550	70	7.14	26.76	116.5	22603.2	-0.07	0.24	0.31		
550	549	70	7.14	31.57	137.0	27410.4	-0.08	0.33	0.41	0.14	0.28
550	549	100	10.2	10.20	43.7	7833.6	-0.10	0.09	0.19		
550	550	100	10.2	19.75	84.1	15561.6	-0.11	0.30	0.41		
550	550	100	10.2	26.76	116.5	22603.2	-0.07	0.55	0.62		
550	549	100	10.2	31.57	137.0	27410.4	-0.08	—	—	0.39	—
605	602	70	7.14	10.20	43.7	7735.2	0.14	0.14	0.00		
605	605	70	7.14	19.72	84.0	15460.8	-0.15	0.38	0.53		
605	606	70	7.14	27.72	121.2	22500.0	0.27	0.88	0.61		
605	599	70	7.14	30.48	132.7	27309.6	0.91	1.22	0.31	0.96	0.90
605	605	100	10.2	9.52	40.3	7725.6	0.14	0.24	0.10		
605	606	100	10.2	17.52	77.5	14764.8	-0.15	0.80	0.95		
605	599	100	10.2	20.28	89.0	19574.4	-0.15	1.01	1.16	0.08	0.98
670	670	70	7.14	9.55	40.4	7720.8	-0.06	0.32	0.38		
670	670	70	7.14	17.55	77.7	14760.0	-0.08	1.12	1.20		
670	670	70	7.14	23.51	103.4	19567.2	-0.13	2.14	2.27	-0.01	2.14
670	670	100	10.2	9.55	40.4	7720.8	-0.06	0.82	0.88		
670	670	100	10.2	17.55	77.7	14760.0	-0.08	4.19	4.27		
670	670	100	10.2	23.51	103.4	19567.2	-0.13	4.80	4.93	0.18	4.74

\*: Open Tubeの照射量はクリープ試験片の照射量にはほぼ等しい。

\*\*: 炉内クリープひずみ=内圧クリープ試験片ひずみ(△D/D%) - 1/3スエリング量(△V/V%)

表4 FFTF/MOTA炉内クリープひずみデータ (60AS,16%CW)

目標温度 (°C)	照射温度 (°C)	周応力 (MPa)	周応力 (kgf/mm <sup>2</sup> )	中性子照射量 (×10 <sup>26</sup> n/m <sup>2</sup> )	DOSE (dpa)	照射時間 (h)	応力クリープ試験片 ひずみ* (△D/D%)	内圧クリープ試験 片ひずみ (△D/D%)	炉内クリープひずみ (△D/D%)	スエリング量 (△V/V%)	炉内クリープひずみ** (△D/D-1/3△ V/V%)
405	414	70	7.14	9.60	41.1	8160.0	-0.10	0.13	0.23		
405	405	70	7.14	18.54	78.9	16159.2	-0.03	0.60	0.63		
405	417	70	7.14	25.76	112.4	23284.8	0.23	1.23	1.00		
405	428	70	7.14	31.34	136.6	28068.0	0.50	1.91	1.41	2.16	1.19
405	414	100	10.2	9.60	41.1	8160.0	-0.10	0.24	0.34		
405	405	100	10.2	18.54	78.9	16159.2	-0.03	0.83	0.86		
405	417	100	10.2	25.76	112.4	23284.8	0.23	1.62	1.39		
405	428	100	10.2	31.34	136.6	28068.0	0.50	2.56	2.06	2.50	1.73
495	484	70	7.14	4.97	19.9	7843.2	-0.10	-0.01	0.09		
495	494	70	7.14	10.42	41.3	15576.0	-0.11	0.03	0.14		
495	495	70	7.14	14.28	58.1	22629.6	-0.10	0.11	0.21		
495	495	70	7.14	17.39	71.2	27436.8	-0.09	0.17	0.26	0.03	0.16
495	494	100	10.2	4.97	19.9	7843.2	-0.10	0.01	0.11		
495	494	100	10.2	10.42	41.3	15576.0	-0.11	0.07	0.18		
495	495	100	10.2	14.28	58.1	22629.6	-0.10	0.18	0.28		
495	495	100	10.2	17.39	71.2	27436.8	-0.09	0.26	0.35	0.03	0.25
550	549	70	7.14	10.20	43.7	7833.6	-0.08	0.08	0.16		
550	550	70	7.14	19.75	84.1	15561.6	-0.06	0.26	0.32		
550	550	70	7.14	26.76	116.5	22603.2	0.06	0.61	0.55		
550	549	70	7.14	31.80	138.1	27410.4	0.24	1.14	0.90	1.71	0.57
550	549	100	10.2	10.20	43.7	7833.6	-0.08	0.20	0.28		
550	550	100	10.2	19.75	84.1	15561.6	-0.06	0.46	0.52		
550	550	100	10.2	26.76	116.5	22603.2	0.06	1.05	0.99		
550	549	100	10.2	31.80	138.1	27410.4	0.24	1.91	1.67	2.16	1.19
605	605	70	7.14	9.55	40.4	7725.6	0.09	0.25	0.16		
605	606	70	7.14	17.55	77.7	14764.8	0	0.74	0.74		
605	599	70	7.14	20.31	89.2	19574.4	0	0.88	0.88	0.20	0.81
605	602	100	10.2	10.20	43.7	7735.2	0.09	0.5	0.41		
605	605	100	10.2	19.75	84.1	15460.8	0	1.08	1.08		
605	606	100	10.2	27.75	121.4	22500.0	0.12	3.08	2.96		
605	599	100	10.2	30.51	132.9	27309.6	0.28	3.77	3.49	2.62	2.90
670	670	70	7.14	9.55	40.4	7720.8	-0.05	0.53	0.58		
670	670	70	7.14	17.55	77.7	14760.0	-0.06	1.47	1.53		
670	670	70	7.14	23.51	103.4	19567.2	-0.09	2.66	2.75	0.04	2.65
670	670	100	10.2	9.55	40.4	7720.8	-0.05	1.21	1.26		
670	670	100	10.2	17.55	77.7	14760.0	-0.06	3.33	3.39		
670	670	100	10.2	23.51	103.4	19567.2	-0.09	3.32	3.41	0.17	3.26

\*: Open Tubeの照射量はクリープ試験片の照射量にはほぼ等しい。

\*\*: 炉内クリープひずみ=内圧クリープ試験片ひずみ (△D/D%) - 1/3スエリング量 (△V/V%)

表5 FFTF/MOTA炉内クリープひずみデータ (55MK,19%CW)

目標温度 (°C)	照射温度 (°C)	周応力 (MPa)	周応力 (kgf/mm <sup>2</sup> )	中性子照射量 (10 <sup>20</sup> n/m <sup>2</sup> )	DOSE (dpa)	照射時間 (h)	応力クリープ試験 片ひずみ* (△D/D%)	内圧クリープ試験 片ひずみ (△D/D%)	炉内クリープひずみ (△D/D%)	スリッジ量 (△V/V%)	炉内クリープひずみ** (△D/D-1/3△ V/V%)
405	420	70	7.14	9.16	40.2	5868.0	-0.06	0.12	0.18		
405	404	70	7.14	15.79	69.3	9897.6	0.04	0.46	0.42		
405	414	70	7.14	25.39	110.4	18057.6	0.58	1.80	1.22		
405	405	70	7.14	34.33	148.2	26056.8	1.73	3.54	1.81		
405	417	70	7.14	41.55	181.7	33182.4	2.74	5.89	3.15	10.59	2.36
405	420	100	10.2	9.16	40.2	5868.0	-0.06	0.19	0.25		
405	404	100	10.2	15.79	69.3	9897.6	0.04	0.65	0.61		
405	414	100	10.2	25.39	110.4	18057.6	0.58	2.00	1.42		
405	405	100	10.2	34.33	148.2	26056.8	1.73	4.25	2.52		
405	417	100	10.2	41.55	181.7	33182.4	2.74	6.76	4.02		
405	428	100	10.2	47.13	205.9	37965.5	4.32	9.10	4.78	15.07	4.08
440	438	70	7.14	4.27	17.6	5863.2	-0.03	0.03	0.06		
440	438	70	7.14	7.36	30.3	9338.4	-0.06	0.11	0.17		
440	425	70	7.14	12.07	50.4	17419.2	-0.05	0.26	0.31		
440	426	70	7.14	13.26	54.5	25305.6	-0.04	0.28	0.32		
440	424	70	7.14	18.53	78.5	32380.8	0.14	0.58	0.44	0.45	0.43
440	438	100	10.2	4.27	17.6	5863.2	-0.03	0.06	0.09		
440	438	100	10.2	7.36	30.3	9338.4	-0.06	0.19	0.25		
440	425	100	10.2	12.07	50.4	17419.2	-0.05	0.40	0.45		
440	426	100	10.2	13.26	54.5	25305.6	-0.04	0.44	0.48		
440	424	100	10.2	18.53	78.5	32380.8	0.14	0.83	0.69	0.56	0.64
495	494	70	7.14	4.97	19.9	7843.2	-0.08	-0.01	0.07		
495	494	70	7.14	10.42	41.3	15576.0	-0.10	0.02	0.12		
495	495	70	7.14	14.28	58.1	22629.6	-0.11	0.09	0.20	-0.07	0.11
495	494	100	10.2	4.97	19.9	7843.2	-0.08	0.00	0.08		
495	494	100	10.2	10.42	41.3	15576.0	-0.10	0.07	0.17		
495	495	100	10.2	14.28	58.1	22629.6	-0.11	0.17	0.28		
495	495	100	10.2	17.39	71.2	27436.8	-0.08	0.25	0.33	-0.11	0.29
550	549	70	7.14	10.20	43.7	7833.6	-0.16	0.03	0.19		
550	550	70	7.14	19.75	84.1	15561.6	-0.18	0.24	0.42		
550	550	70	7.14	26.76	116.5	22603.2	-0.12	0.72	0.84	0.60	0.52
550	549	100	10.2	10.20	43.7	7833.6	-0.16	0.10	0.26		
550	550	100	10.2	19.75	84.1	15561.6	-0.18	0.46	0.64		
550	550	100	10.2	26.76	116.5	22603.2	-0.12	1.30	1.42		
550	549	100	10.2	32.00	139.1	27410.4	0.23	3.23	3.00	3.75	1.98
605	602	70	7.14	10.20	43.7	7735.2	-0.11	0.24	0.35		
605	605	70	7.14	19.72	84.0	15460.8	-0.21	0.74	0.95		
605	606	70	7.14	27.72	121.1	22500.0	-0.07	1.65	1.72	0.90	1.35
605	602	100	10.2	10.20	43.7	7735.2	-0.11	0.47	0.58		
605	605	100	10.2	19.72	84.0	15460.8	-0.21	1.49	1.70		
605	606	100	10.2	27.72	121.2	22500.0	-0.07	3.37	3.44		
605	599	100	10.2	30.48	132.7	27309.6	-0.05	3.85	3.90	2.38	3.06
670	670	70	7.14	9.52	40.3	7720.8	-0.07	0.83	0.90		
670	670	70	7.14	17.52	77.5	14760.0	-0.08	3.02	3.10		
670	670	70	7.14	23.52	103.3	19567.2	-0.12	7.02	7.14	0.07	7.00
670	670	100	10.2	9.52	40.3	7720.8	-0.07	2.19	2.26		
670	670	100	10.2	17.52	77.5	14760.0	-0.08	7.23	7.31		

\*: Open Tubeの照射量はクリープ試験片の照射量にはほぼ等しい。

\*\*: 炉内クリープひずみ=内圧クリープ試験片ひずみ (△D/D%) - 1/3スリッジ量 (△V/V%)

表6 FFTF/MOTA炉内クリープひずみデータ (60AK,18%CW,相当応力及び相当ひずみに変換)

目標温度 (°C)	照射温度 (°C)	周応力 (MPa)	相当応力 (MPa)	相当応力 (kgf/mm <sup>2</sup> )	中性子照射量 (×10 <sup>26</sup> n/m <sup>2</sup> )	照射時間 (h)	炉内クリープ相当 ひずみ (△D/D%)	炉内クリープ相当 ひずみ (△D/D- 1/3△V/V%)
405	414	70	60.6	6.18	9.60	8160.0	0.37	
405	405	70	60.6	6.18	18.54	16159.2	1.00	
405	417	70	60.6	6.18	25.76	23284.8	1.86	
405	428	70	60.6	6.18	31.34	28068.0	2.69	2.09
405	414	100	86.6	8.83	9.60	8160.0	0.48	
405	405	100	86.6	8.83	18.54	16159.2	1.40	
405	417	100	86.6	8.83	25.76	23284.8	2.79	
405	428	100	86.6	8.83	31.34	28068.0	4.03	3.11
495	484	70	60.6	6.18	4.97	7843.2	0.09	
495	494	70	60.6	6.18	10.42	15576.0	0.15	
495	495	70	60.6	6.18	14.28	22629.6	0.23	
495	495	70	60.6	6.18	17.39	27436.8	0.27	0.15
495	494	100	86.6	8.83	4.97	7843.2	0.13	
495	494	100	86.6	8.83	10.42	15576.0	0.22	
495	495	100	86.6	8.83	14.28	22629.6	0.32	
495	495	100	86.6	8.83	17.39	27436.8	0.39	0.27
550	549	70	60.6	6.18	10.20	7833.6	0.14	
550	550	70	60.6	6.18	19.75	15561.6	0.24	
550	550	70	60.6	6.18	26.76	22603.2	0.36	
550	549	70	60.6	6.18	31.57	27410.4	0.47	0.33
550	549	100	86.6	8.83	10.20	7833.6	0.22	
550	550	100	86.6	8.83	19.75	15561.6	0.47	
550	550	100	86.6	8.83	26.76	22603.2	0.72	
550	549	100	86.6	8.83	31.57	27410.4	—	—
605	602	70	60.6	6.18	10.20	7735.2	0.00	
605	605	70	60.6	6.18	19.72	15460.8	0.61	
605	606	70	60.6	6.18	27.72	22500.0	0.70	
605	599	70	60.6	6.18	30.48	27309.6	0.36	1.04
605	605	100	86.6	8.83	9.52	7725.6	0.12	
605	606	100	86.6	8.83	17.52	14764.8	1.10	
605	599	100	86.6	8.83	20.28	19574.4	1.34	1.14
670	670	70	60.6	6.18	9.55	7720.8	0.44	
670	670	70	60.6	6.18	17.55	14760.0	1.39	
670	670	70	60.6	6.18	23.51	19567.2	2.62	2.47
670	670	100	86.6	8.83	9.55	7720.8	1.02	
670	670	100	86.6	8.83	17.55	14760.0	4.93	
670	670	100	86.6	8.83	23.51	19567.2	5.69	5.47

表7 FFTF/MOTA炉内クリープひずみデータ (60AS,16%CW,相当応力及び相当ひずみに変換)

目標温度 (°C)	照射温度 (°C)	周応力 (MPa)	相当応力 (MPa)	相当応力 (kgf/mm <sup>2</sup> )	中性子照射量 (10 <sup>26</sup> n/m <sup>2</sup> )	照射時間 (h)	炉内クリープ相当 ひずみ (△D/D%)	炉内クリープ相当ひ ずみ (△D/D%) △V/V%)
405	414	70	60.6	6.18	9.60	8160.0	0.27	1.37
405	405	70	60.6	6.18	18.54	16159.2	0.73	
405	417	70	60.6	6.18	25.76	23284.8	1.15	
405	428	70	60.6	6.18	31.34	28068.0	1.63	
405	414	100	86.6	8.83	9.60	8160.0	0.39	1.99
405	405	100	86.6	8.83	18.54	16159.2	0.99	
405	417	100	86.6	8.83	25.76	23284.8	1.61	
405	428	100	86.6	8.83	31.34	28068.0	2.38	
495	484	70	60.6	6.18	4.97	7843.2	0.10	0.18
495	494	70	60.6	6.18	10.42	15576.0	0.16	
495	495	70	60.6	6.18	14.28	22629.6	0.24	
495	495	70	60.6	6.18	17.39	27436.8	0.30	
495	494	100	86.6	8.83	4.97	7843.2	0.13	0.29
495	494	100	86.6	8.83	10.42	15576.0	0.21	
495	495	100	86.6	8.83	14.28	22629.6	0.32	
495	495	100	86.6	8.83	17.39	27436.8	0.40	
550	549	70	60.6	6.18	10.20	7833.6	0.18	0.66
550	550	70	60.6	6.18	19.75	15561.6	0.37	
550	550	70	60.6	6.18	26.76	22603.2	0.64	
550	549	70	60.6	6.18	31.80	27410.4	1.04	
550	549	100	86.6	8.83	10.20	7833.6	0.32	1.37
550	550	100	86.6	8.83	19.75	15561.6	0.60	
550	550	100	86.6	8.83	26.76	22603.2	1.14	
550	549	100	86.6	8.83	31.80	27410.4	1.93	
605	605	70	60.6	6.18	9.55	7725.6	0.18	0.94
605	606	70	60.6	6.18	17.55	14764.8	0.85	
605	599	70	60.6	6.18	20.31	19574.4	1.02	
605	602	100	86.6	8.83	10.20	7735.2	0.47	
605	605	100	86.6	8.83	19.75	15460.8	1.25	3.34
605	606	100	86.6	8.83	27.75	22500.0	3.42	
605	599	100	86.6	8.83	30.51	27309.6	4.03	
670	670	70	60.6	6.18	9.55	7720.8	0.67	3.06
670	670	70	60.6	6.18	17.55	14760.0	1.77	
670	670	70	60.6	6.18	23.51	19567.2	3.18	
670	670	100	86.6	8.83	9.55	7720.8	1.45	
670	670	100	86.6	8.83	17.55	14760.0	3.91	3.77
670	670	100	86.6	8.83	23.51	19567.2	3.94	

表8 FFTF/MOTA炉内クリープひずみデータ (55MK,19%CW,相当応力及び相当ひずみに変換)

目標温度 (°C)	照射温度 (°C)	周応力 (MPa)	相当応力 (MPa)	相当応力 (kgf/mm <sup>2</sup> )	中性子照射量 (10 <sup>20</sup> n/m <sup>2</sup> )	照射時間 (h)	炉内クリープ相当 ひずみ (△D/D%)	炉内クリープ相当ひずみ (△D/D-1/3△V/V%)
405	420	70	60.6	52.5	9.16	5868.0	0.2078	
405	404	70	60.6	52.5	15.79	9897.6	0.4850	
405	414	70	60.6	52.5	25.39	18057.6	1.4087	
405	405	70	60.6	52.5	34.33	26056.8	2.0900	
405	417	70	60.6	52.5	41.55	33182.4	3.6373	2.73
405	420	100	86.6	75.0	9.16	5868.0	0.2887	
405	404	100	86.6	75.0	15.79	9897.6	0.7044	
405	414	100	86.6	75.0	25.39	18057.6	1.6397	
405	405	100	86.6	75.0	34.33	26056.8	2.9098	
405	417	100	86.6	75.0	41.55	33182.4	4.6419	
405	428	100	86.6	75.0	47.13	37965.5	5.5195	4.71
440	438	70	60.6	52.5	4.27	5863.2	0.0693	
440	438	70	60.6	52.5	7.36	9338.4	0.1963	
440	425	70	60.6	52.5	12.07	17419.2	0.3580	
440	426	70	60.6	52.5	13.26	25305.6	0.3695	
440	424	70	60.6	52.5	18.53	32380.8	0.5081	0.50
440	438	100	86.6	75.0	4.27	5863.2	0.1039	
440	438	100	86.6	75.0	7.36	9338.4	0.2887	
440	425	100	86.6	75.0	12.07	17419.2	0.5196	
440	426	100	86.6	75.0	13.26	25305.6	0.5543	
440	424	100	86.6	75.0	18.53	32380.8	0.7967	0.74
495	494	70	60.6	52.5	4.97	7843.2	0.0808	
495	494	70	60.6	52.5	10.42	15576.0	0.1386	
495	495	70	60.6	52.5	14.28	22629.6	0.2309	0.13
495	494	100	86.6	75.0	4.97	7843.2	0.0924	
495	494	100	86.6	75.0	10.42	15576.0	0.1963	
495	495	100	86.6	75.0	14.28	22629.6	0.3233	
495	495	100	86.6	75.0	17.39	27436.8	0.3811	0.33
550	549	70	60.6	52.5	10.20	7833.6	0.2194	
550	550	70	60.6	52.5	19.75	15561.6	0.4850	
550	550	70	60.6	52.5	26.76	22603.2	0.9699	0.60
550	549	100	86.6	75.0	10.20	7833.6	0.3002	
550	550	100	86.6	75.0	19.75	15561.6	0.7390	
550	550	100	86.6	75.0	26.76	22603.2	1.6397	
550	549	100	86.6	75.0	32.00	27410.4	3.4641	2.29
605	602	70	60.6	52.5	10.20	7735.2	0.4041	
605	605	70	60.6	52.5	19.72	15460.8	1.0970	
605	606	70	60.6	52.5	27.72	22500.0	1.9861	1.56
605	602	100	86.6	75.0	10.20	7735.2	0.6697	
605	605	100	86.6	75.0	19.72	15460.8	1.9630	
605	606	100	86.6	75.0	27.72	22500.0	3.9722	
605	599	100	86.6	75.0	30.48	27309.6	4.5033	3.53
670	670	70	60.6	52.5	9.52	7720.8	1.0392	
670	670	70	60.6	52.5	17.52	14760.0	3.5796	
670	670	70	60.6	52.5	23.52	19567.2	8.2446	8.08
670	670	100	86.6	75.0	9.52	7720.8	2.6096	
670	670	100	86.6	75.0	17.52	14760.0	8.4409	

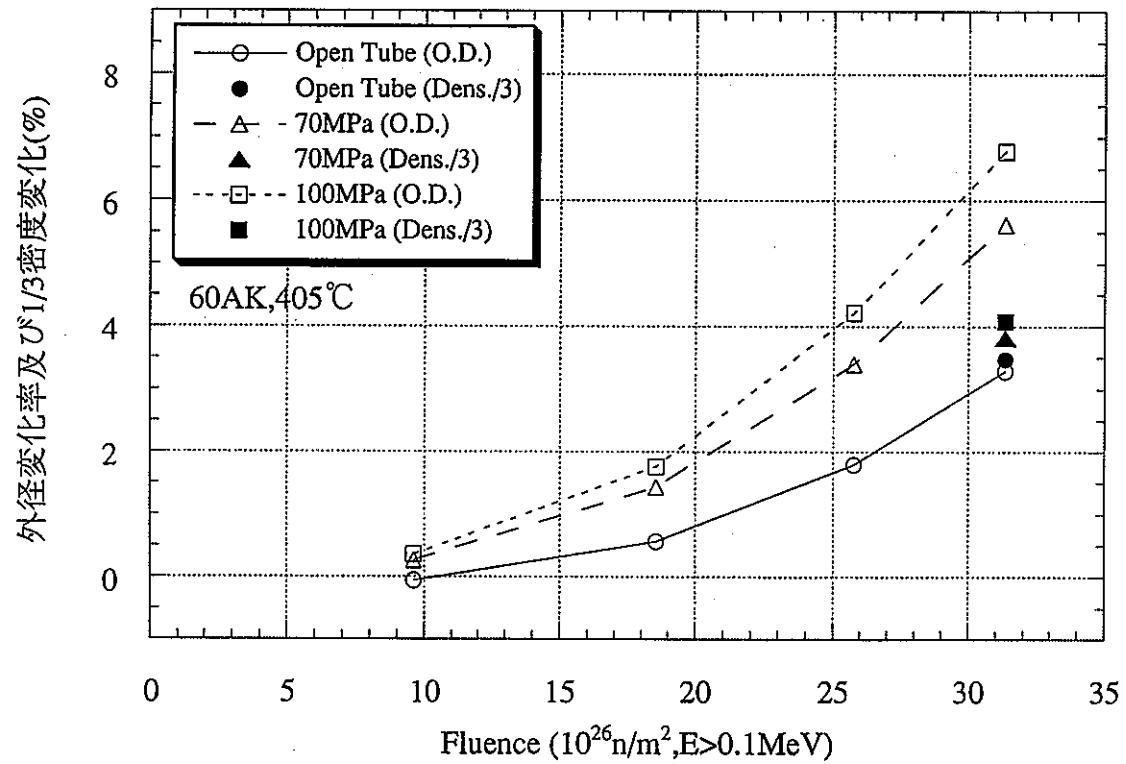


図1.1 スエリングの応力効果 (60AK,405°C)

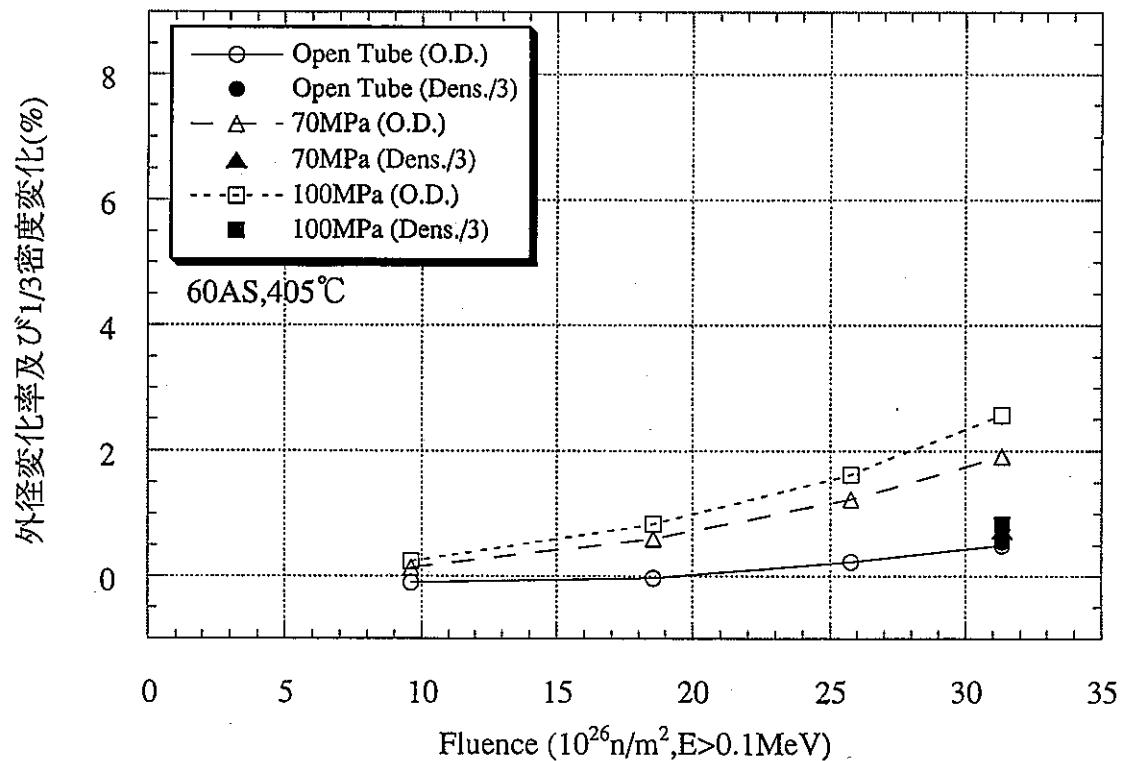


図1.2 スエリングの応力効果 (60AS,405°C)

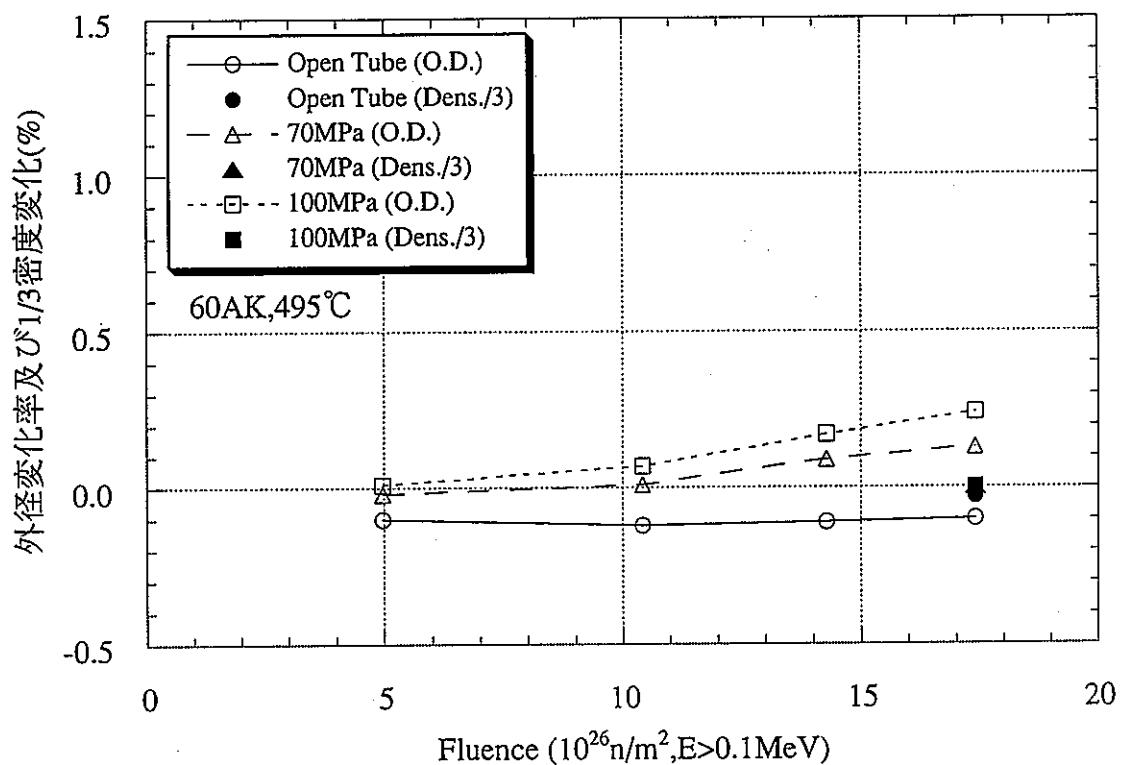


図1.3 スエリングの応力効果 (60AK,495°C)

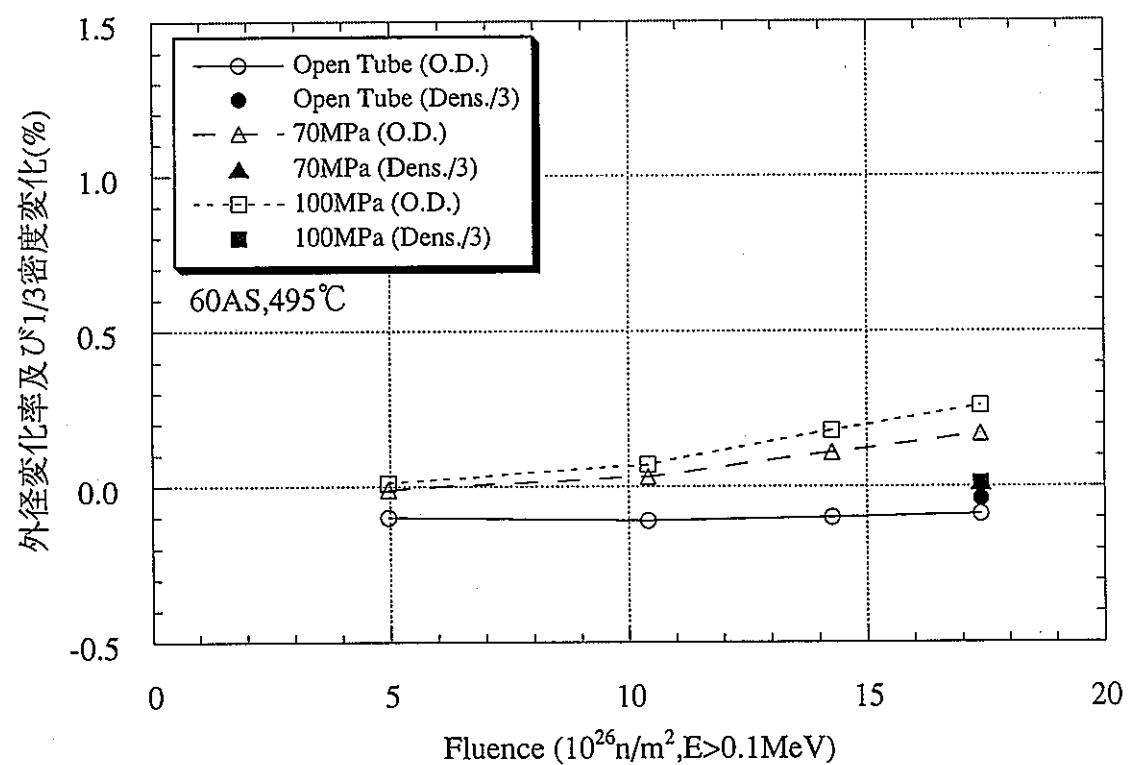


図1.4 スエリングの応力効果 (60AS,495°C)

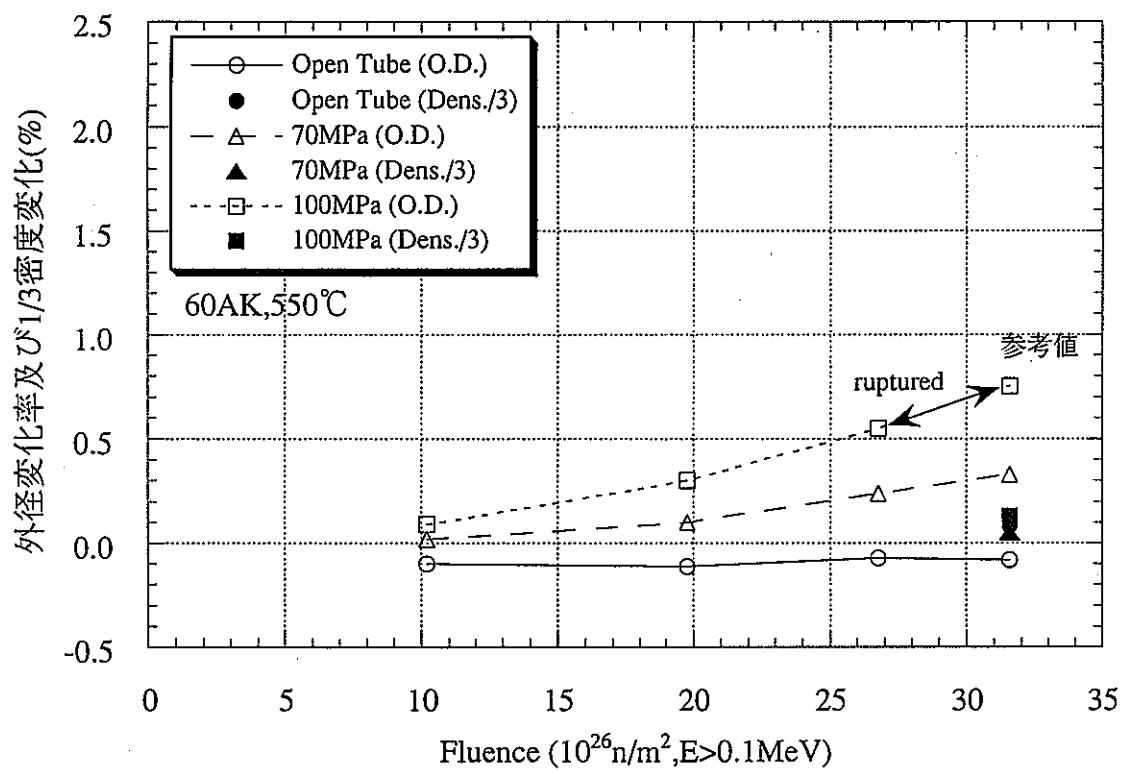


図1.5 スエリングの応力効果 (60AK,550°C)

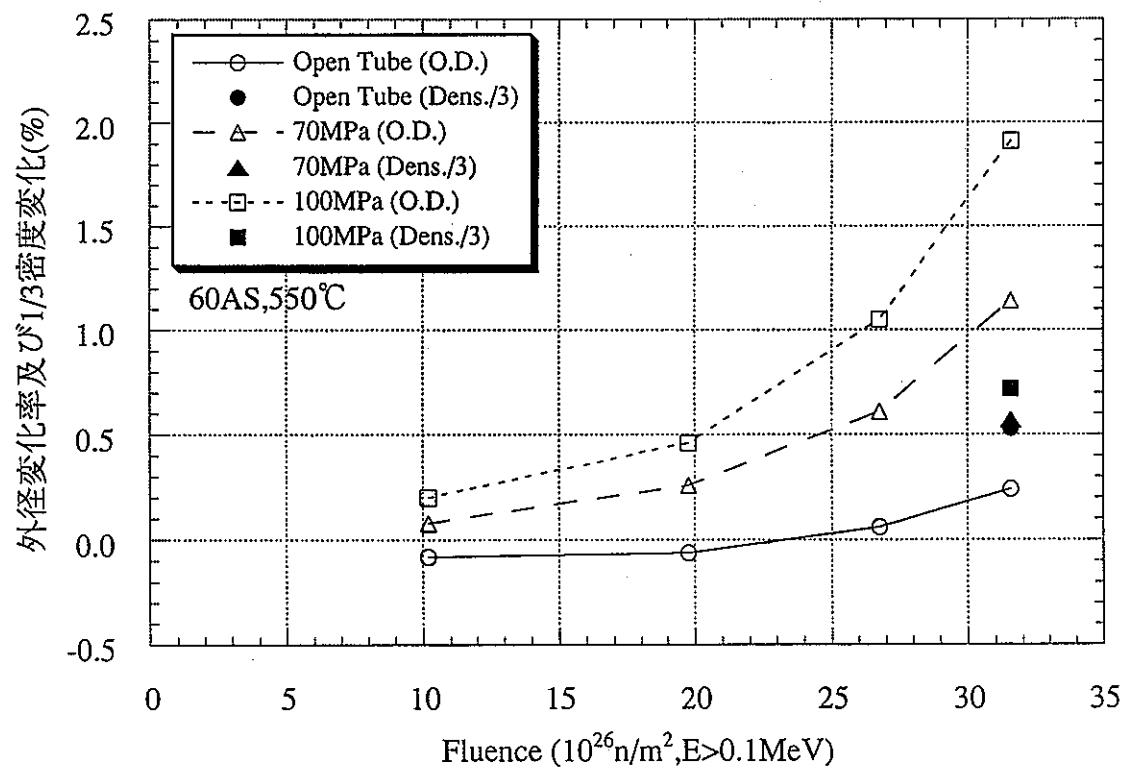


図1.6 スエリングの応力効果 (60AS,550°C)

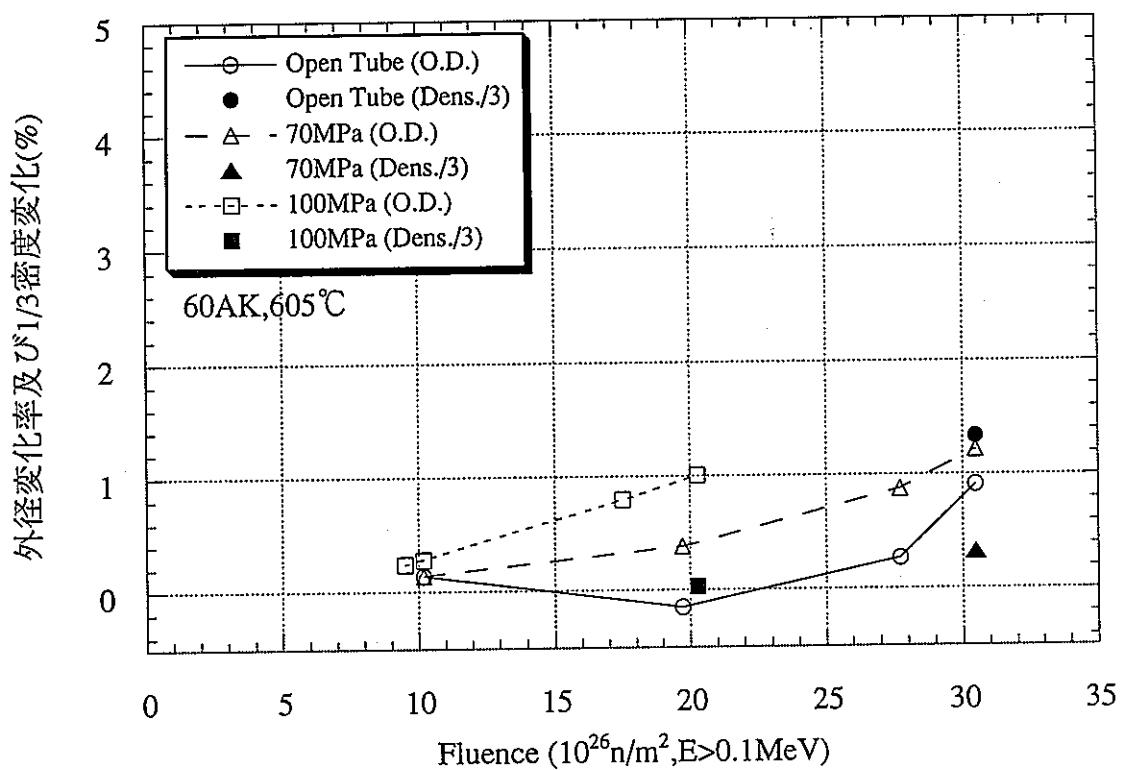


図1.7 スエリングの応力効果 (60AK,605°C)

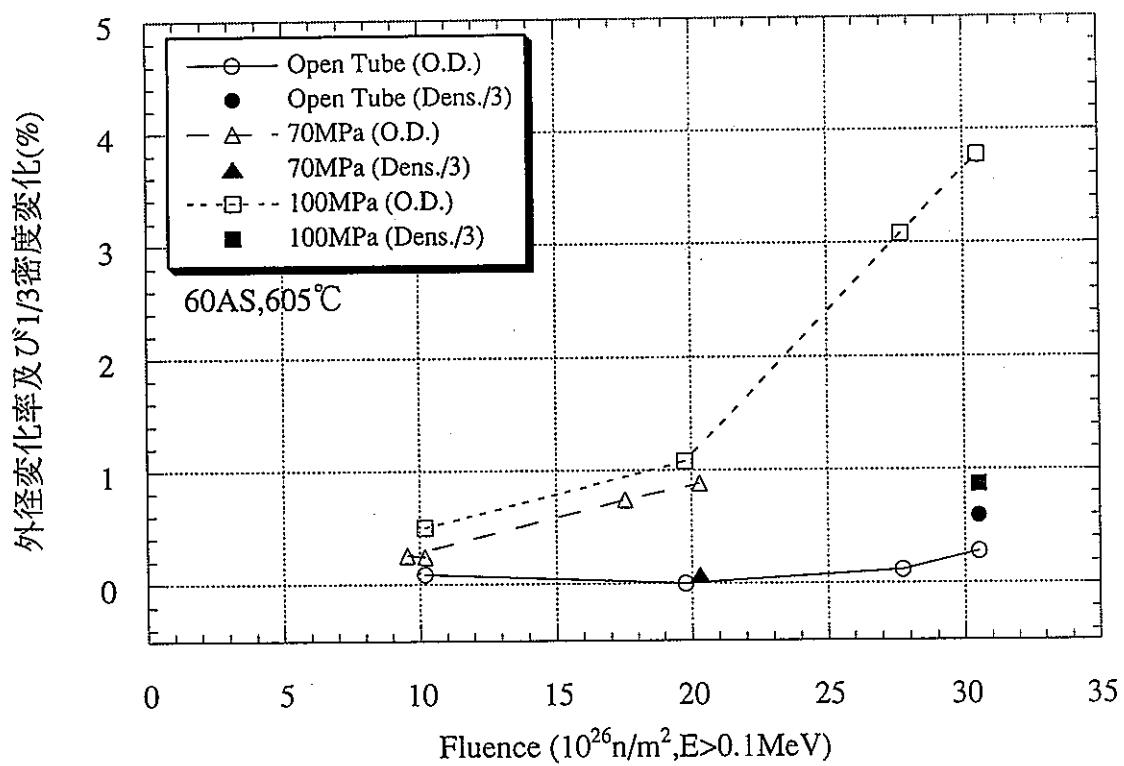


図1.8 スエリングの応力効果 (60AS,605°C)

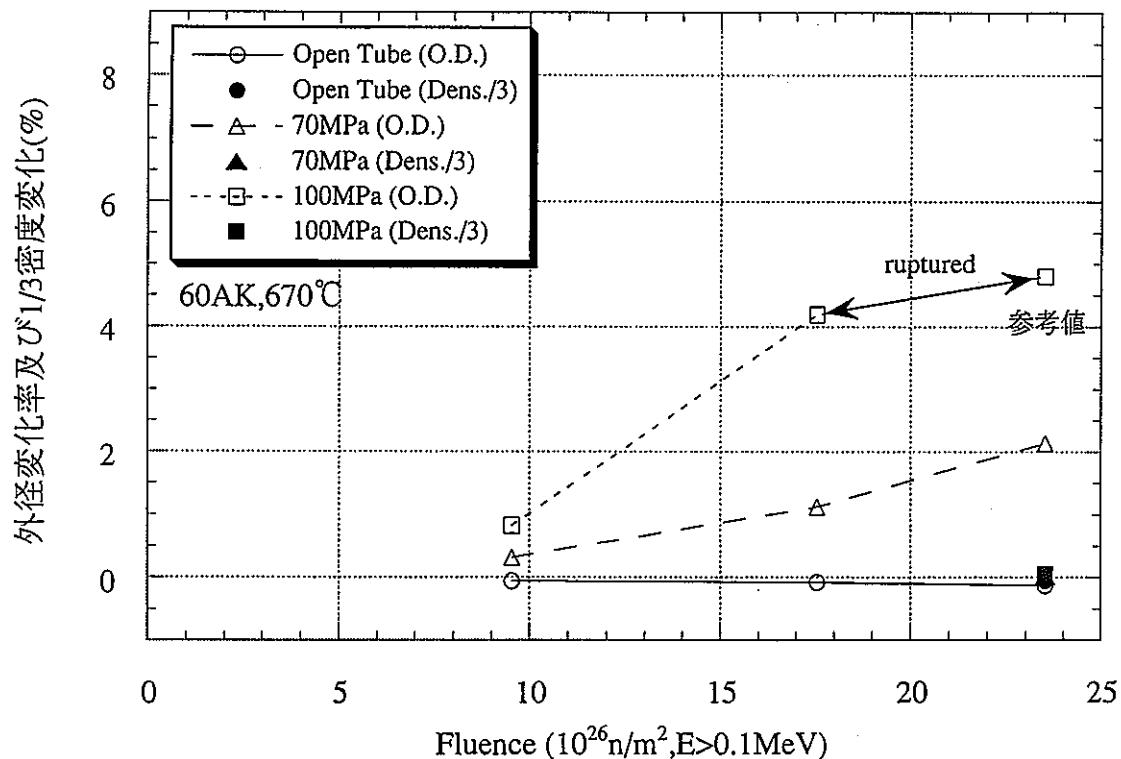


図1.9 スエリングの応力効果 (60AK,670°C)

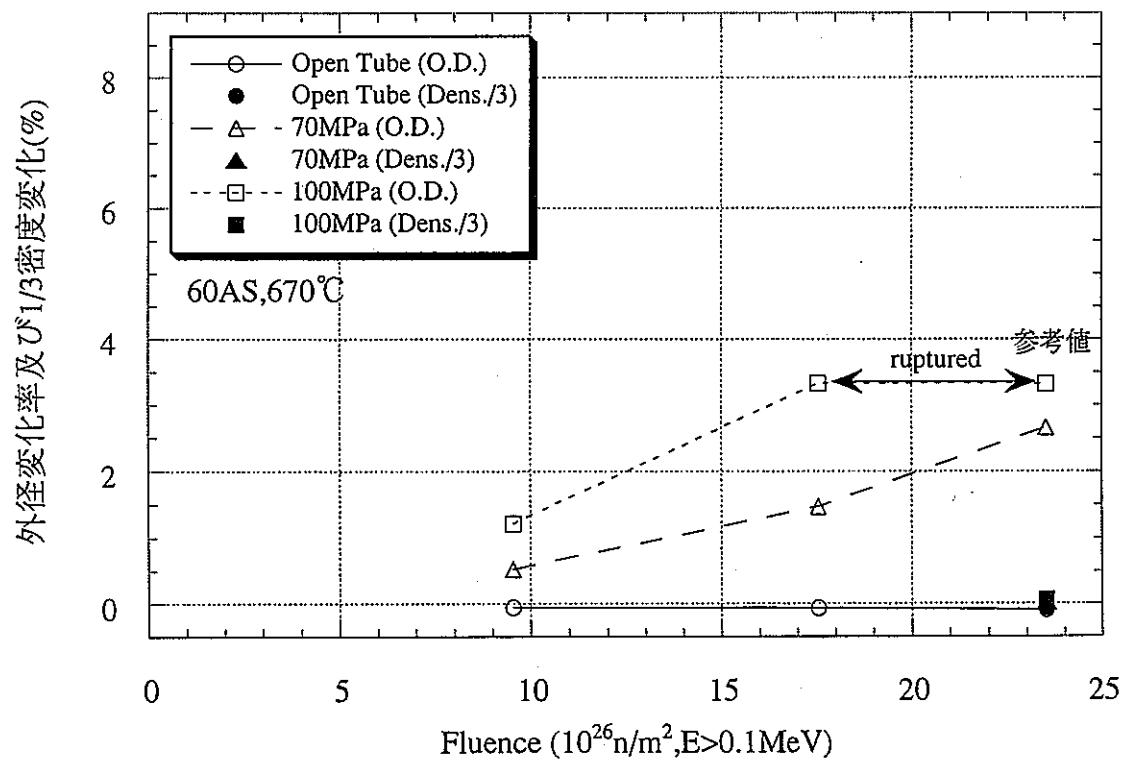


図1.10 スエリングの応力効果 (60AS,670°C)

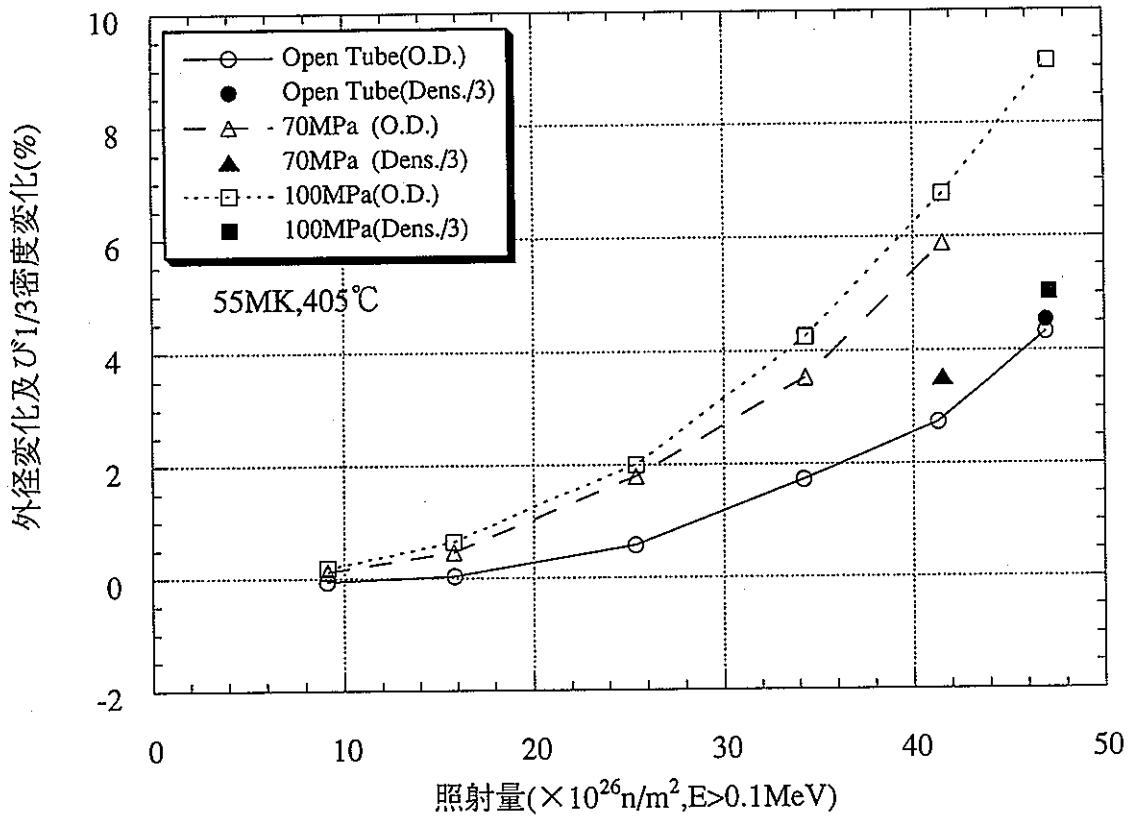


図1.11 スエリングの応力効果 (55MK,405°C)

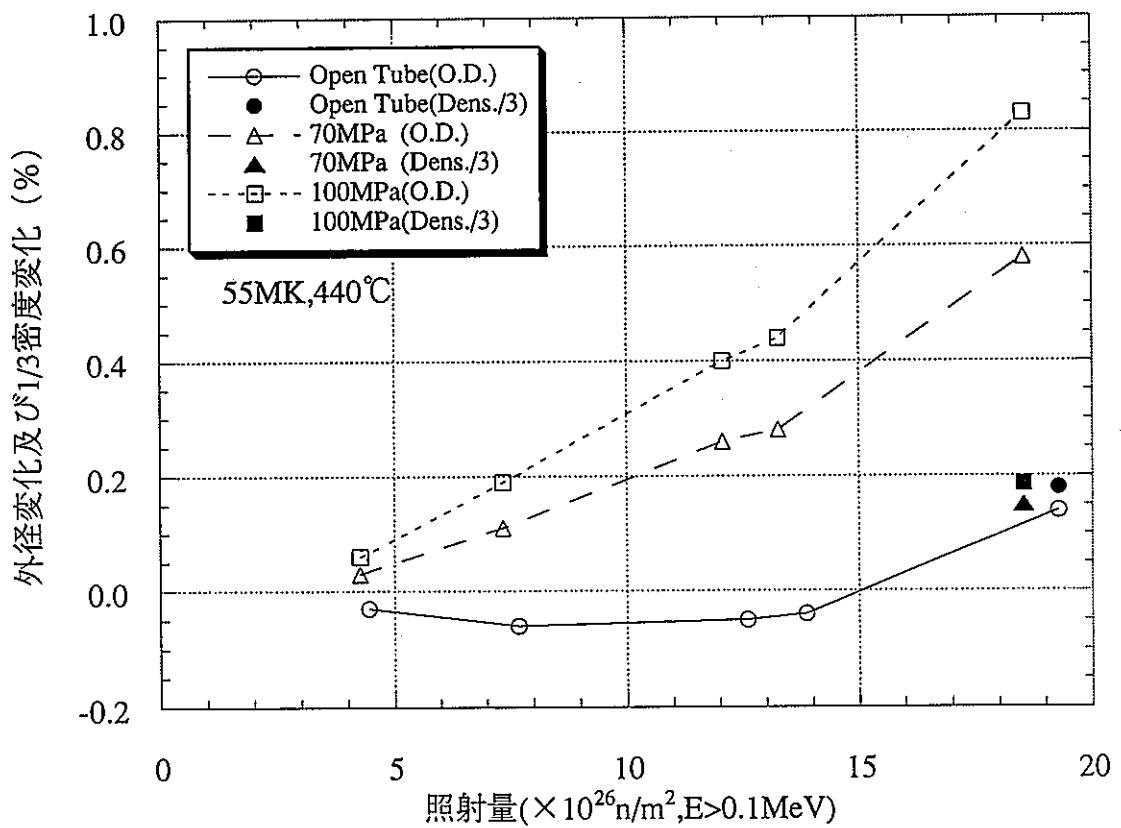


図1.12 スエリングの応力効果 (55MK,440°C)

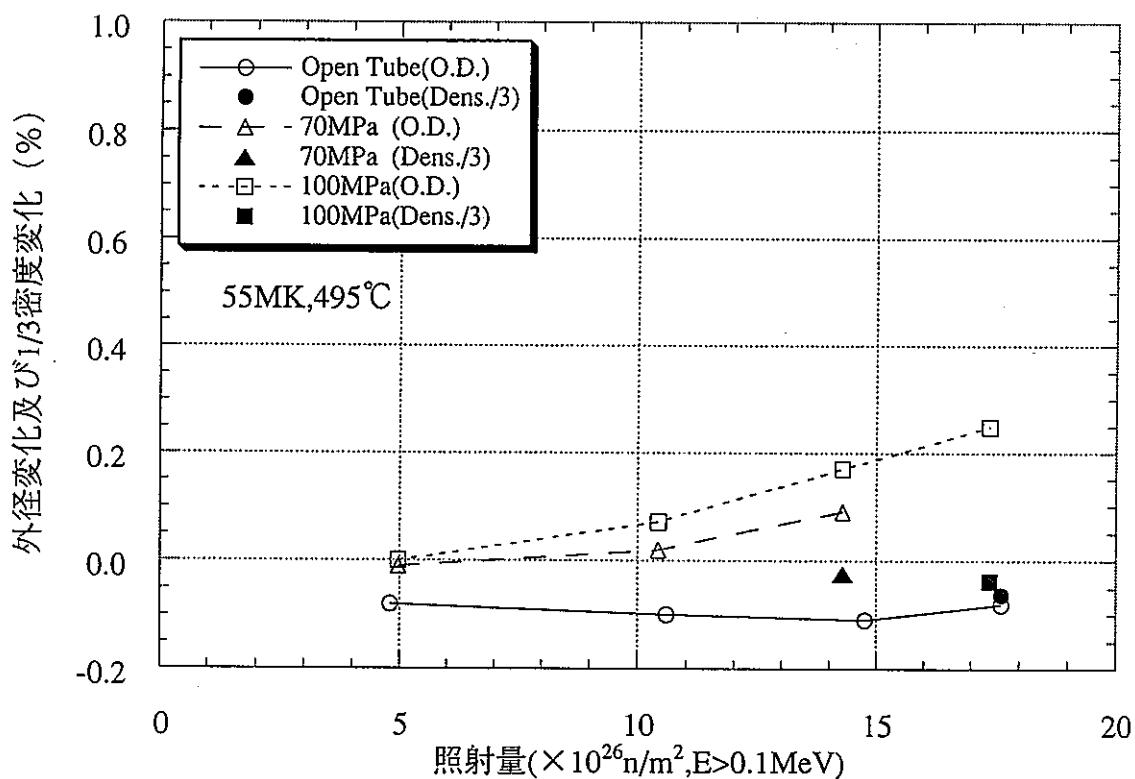


図1.13 スエリングの応力効果 (55MK,495°C)

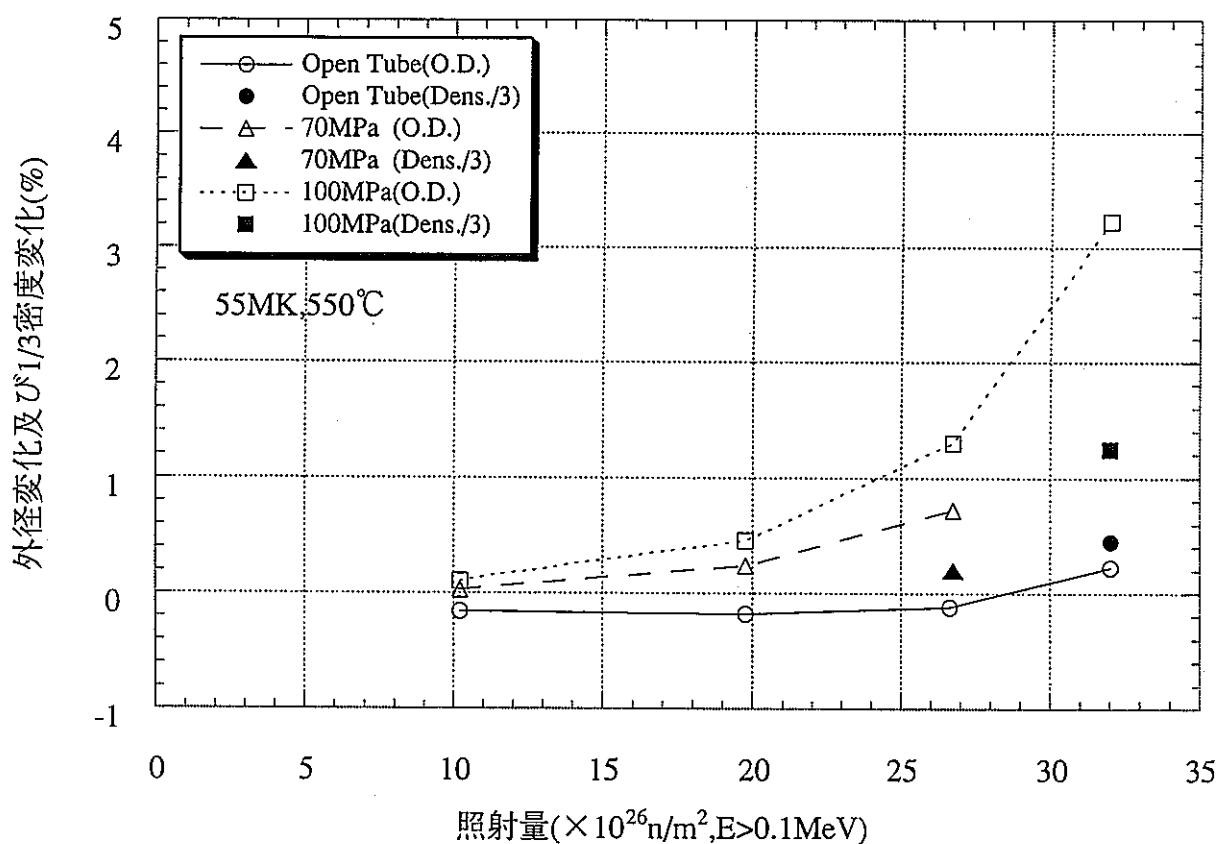


図1.14 スエリングの応力効果 (55MK,550°C)

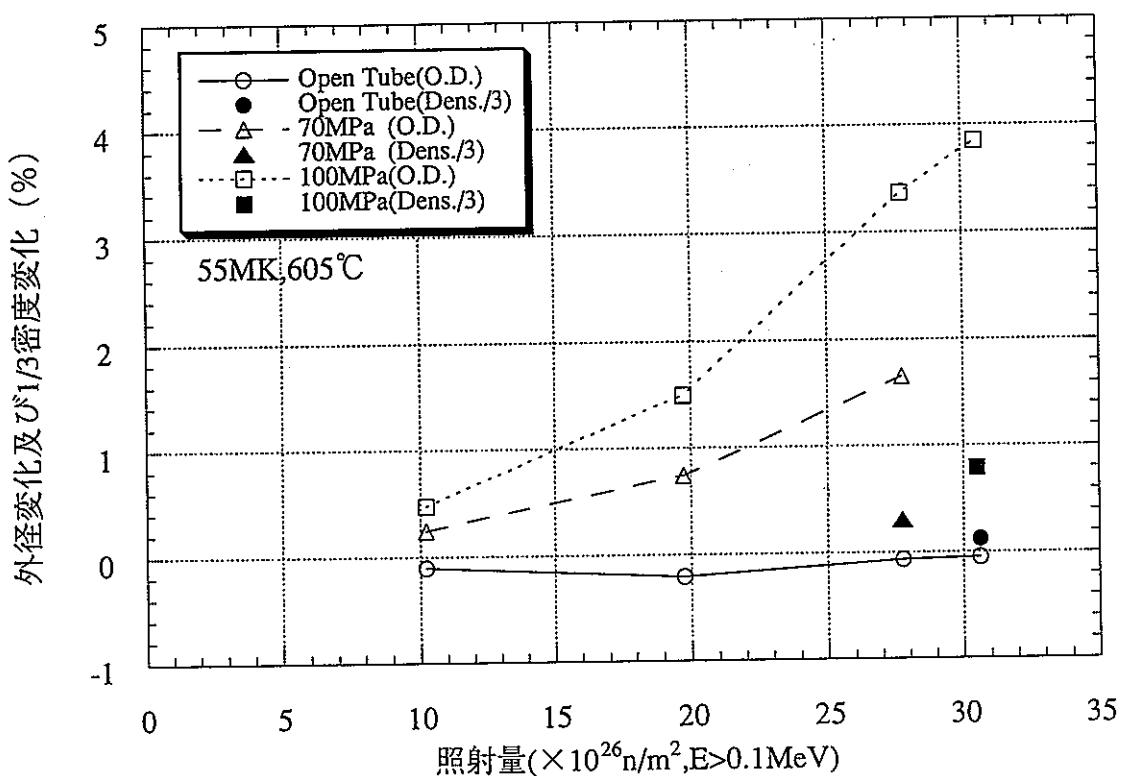


図1.15 スエリングの応力効果 (55MK,605°C)

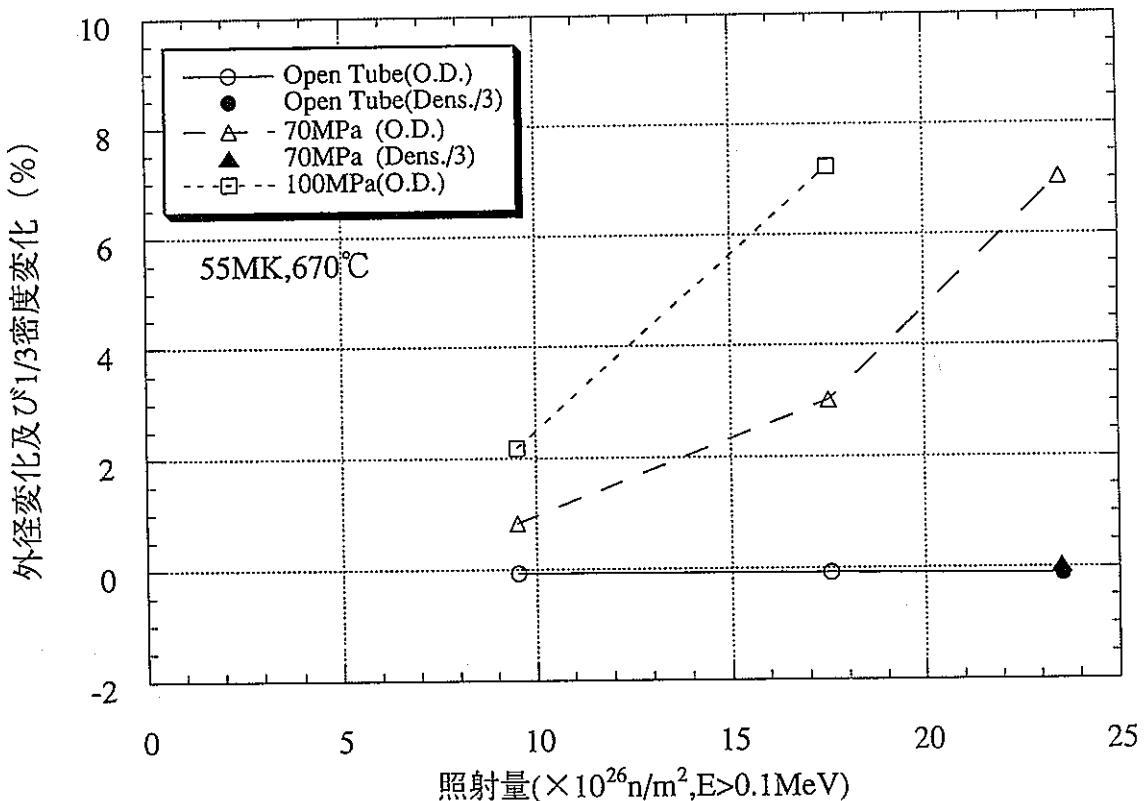


図1.16 スエリングの応力効果 (55MK,670°C)

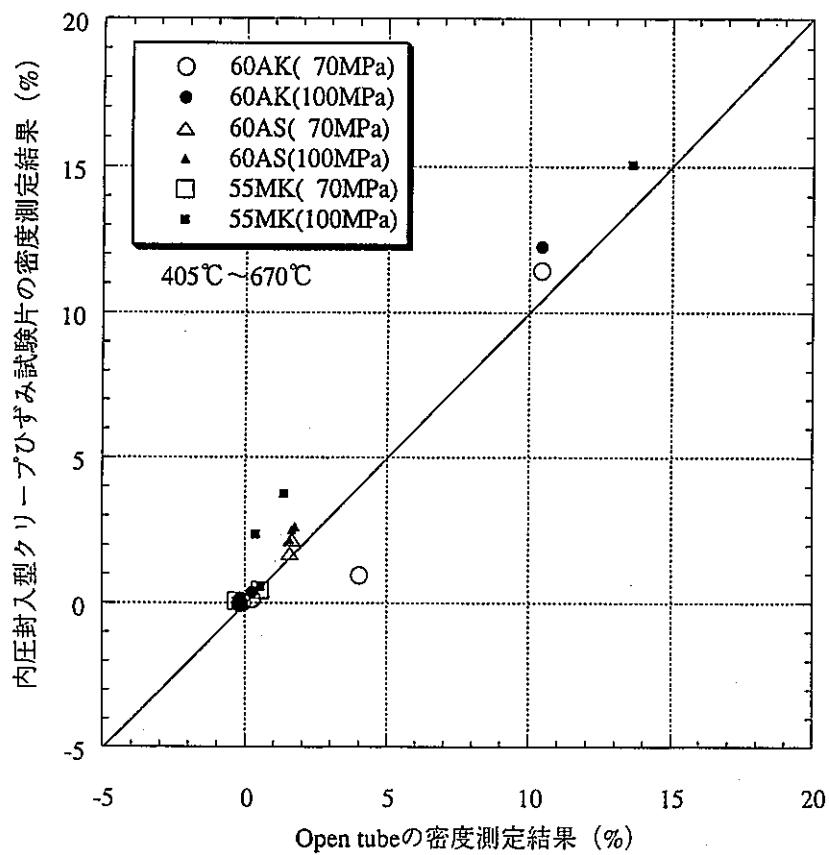


図2.1 スエリングに及ぼす応力効果（鋼種による比較）

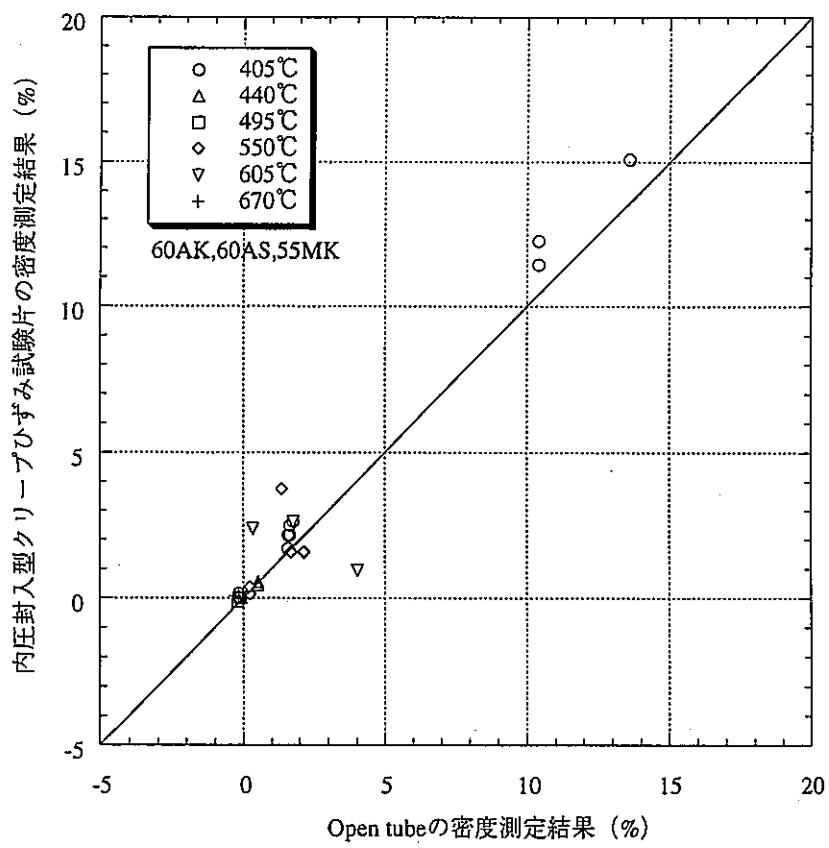


図2.2 スエリングに及ぼす応力効果（照射温度による比較）

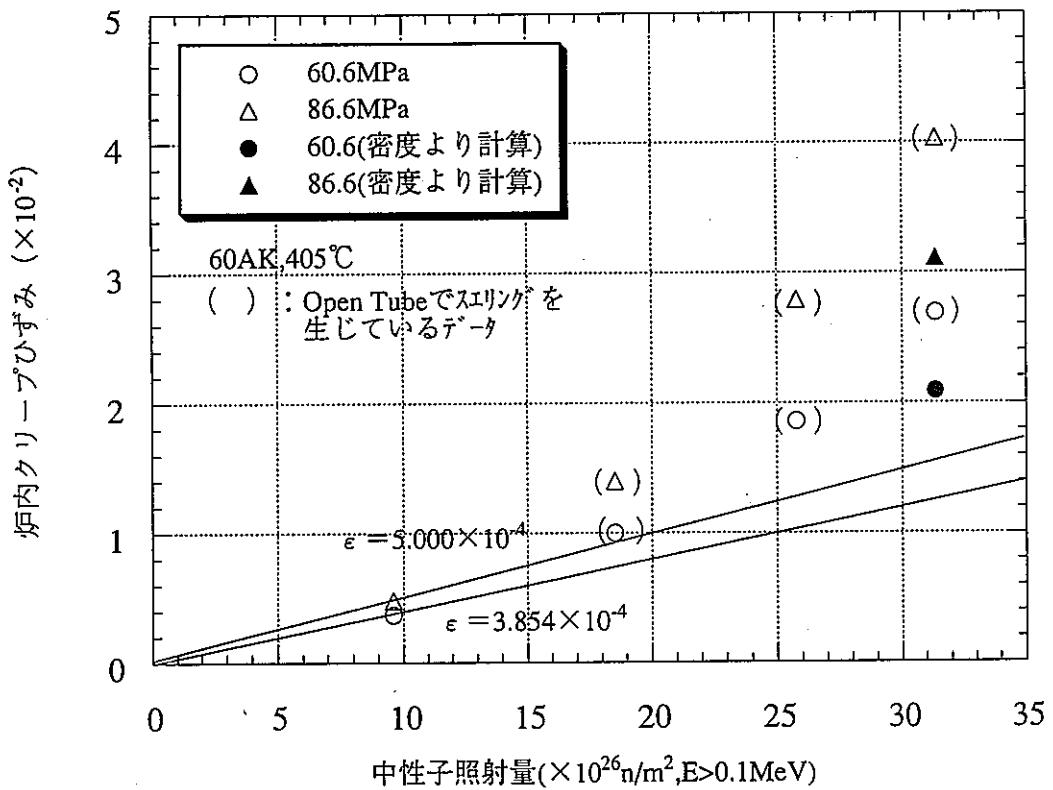


図3.1 中性子照射量と炉内クリープひずみの関係 (60AK,405°C)

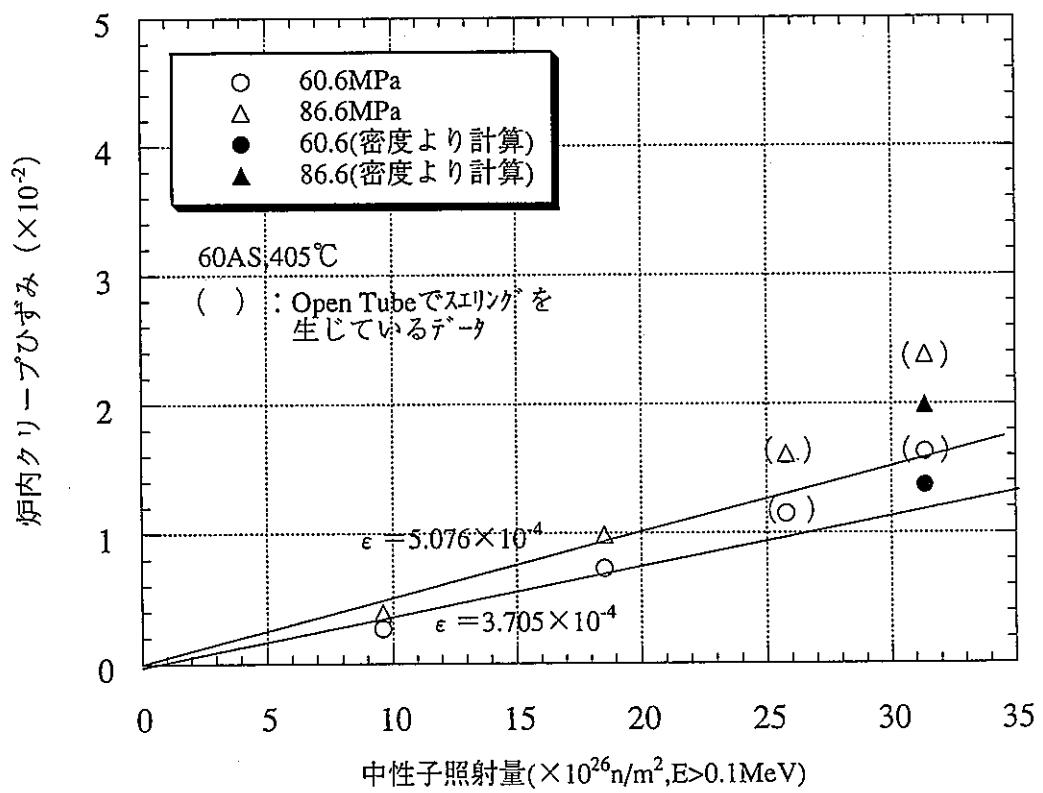


図3.2 中性子照射量と炉内クリープひずみの関係 (60AS,405°C)

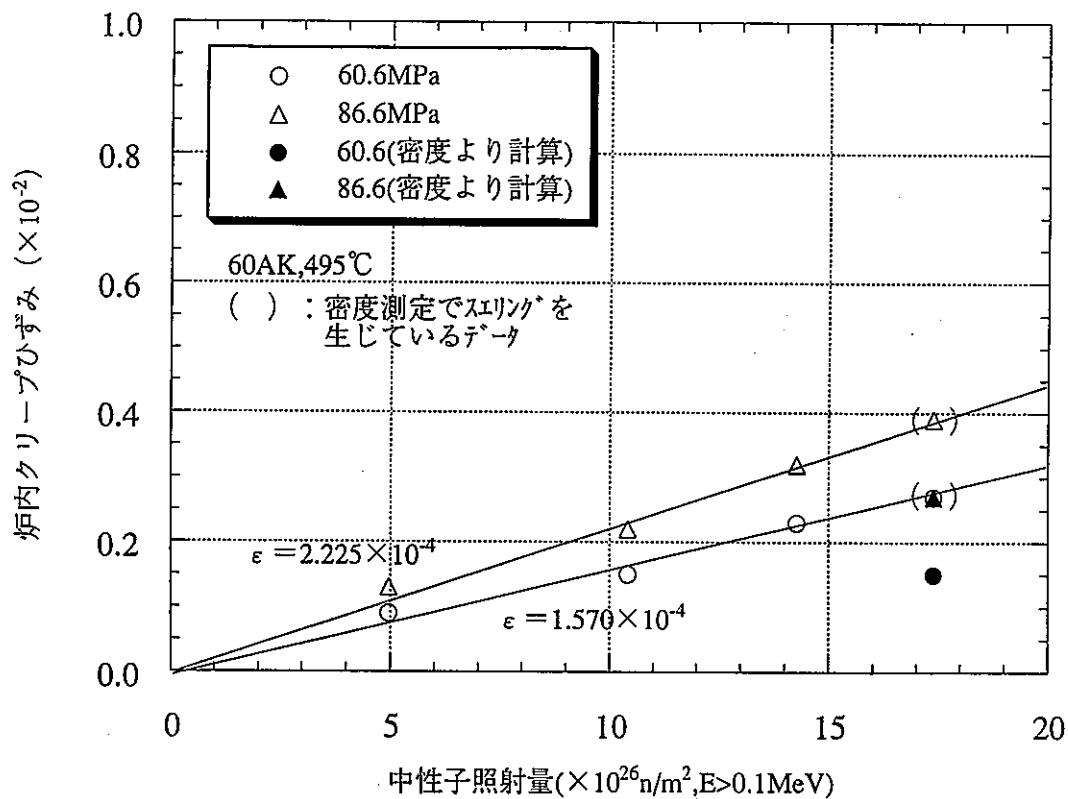


図3.3 中性子照射量と炉内クリープひずみの関係 (60AK,495°C)

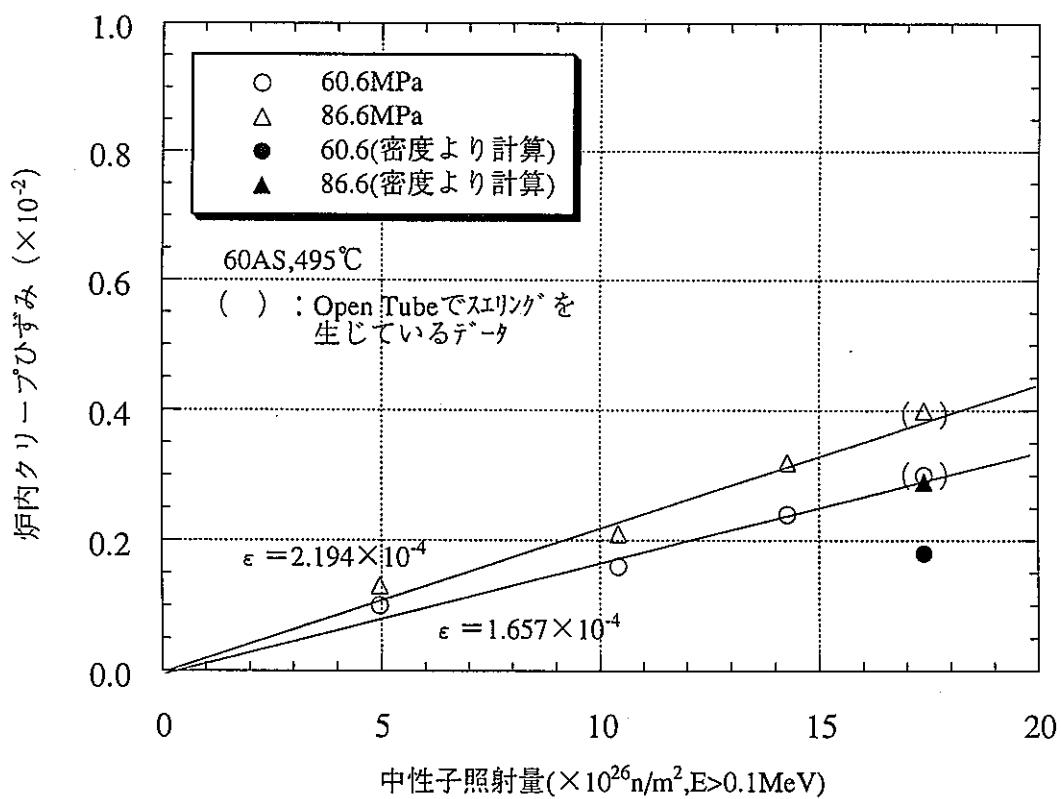


図3.4 中性子照射量と炉内クリープひずみの関係 (60AS,495°C)

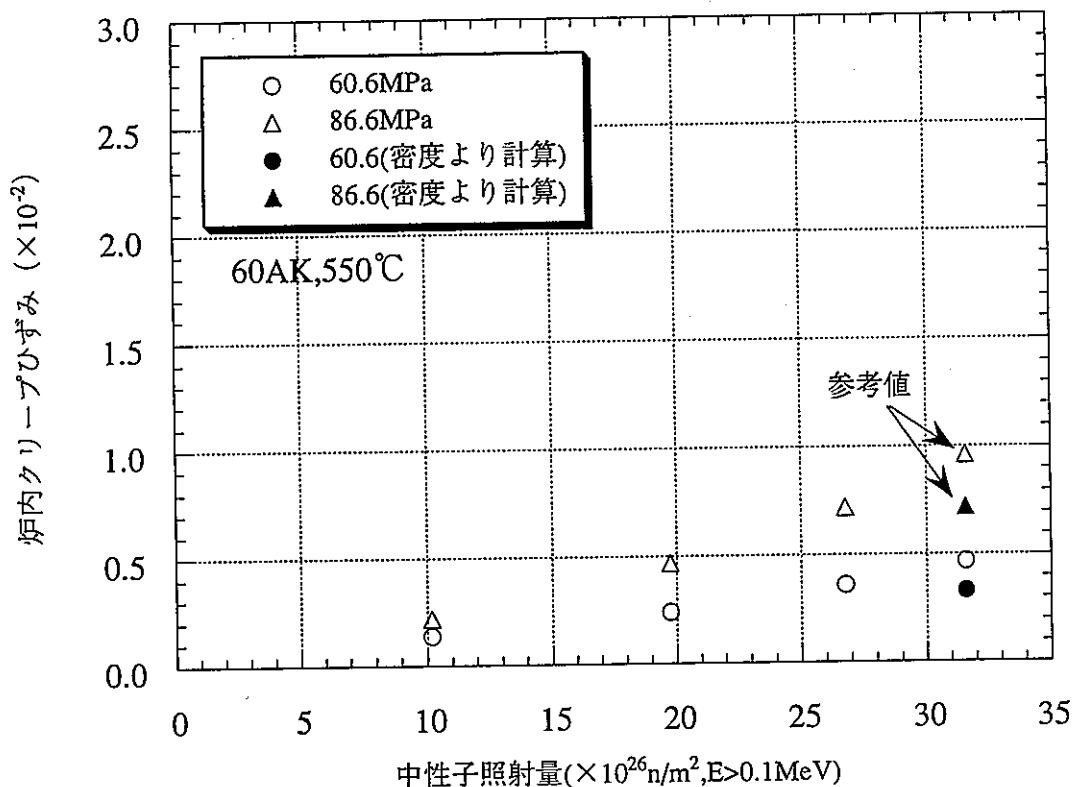


図3.5 中性子照射量と炉内クリープひずみの関係 (60AK,550°C)

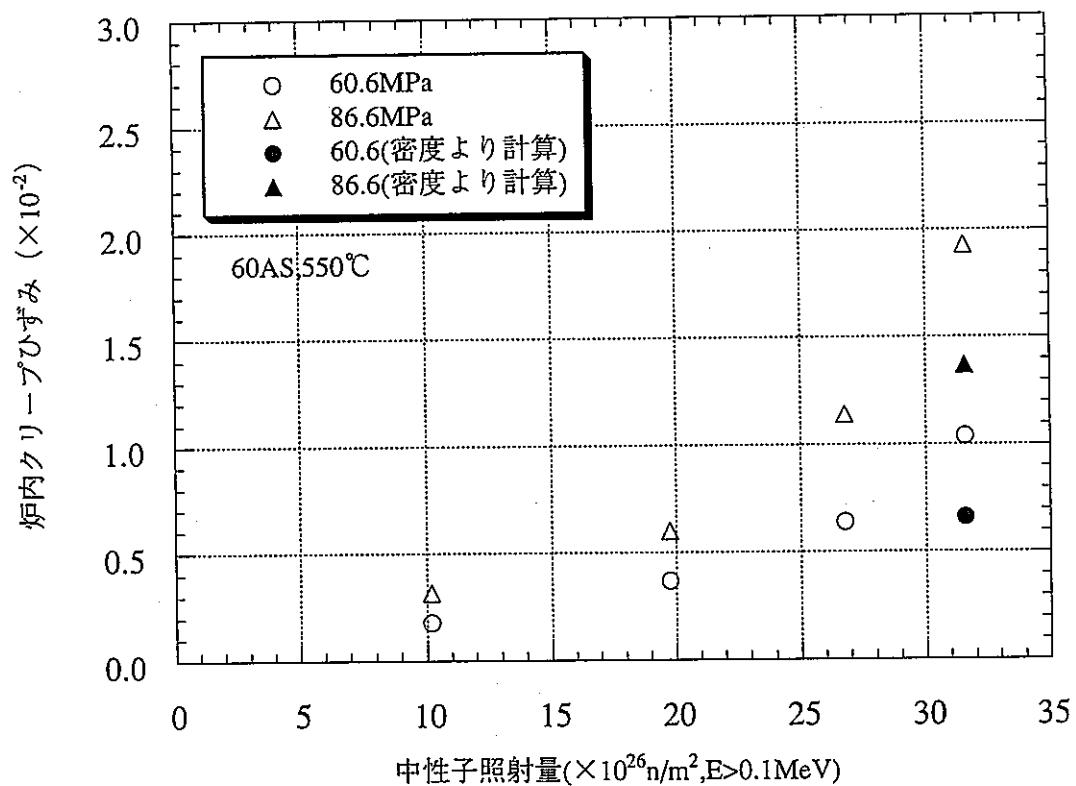


図3.6 中性子照射量と炉内クリープひずみの関係 (60AS,550°C)

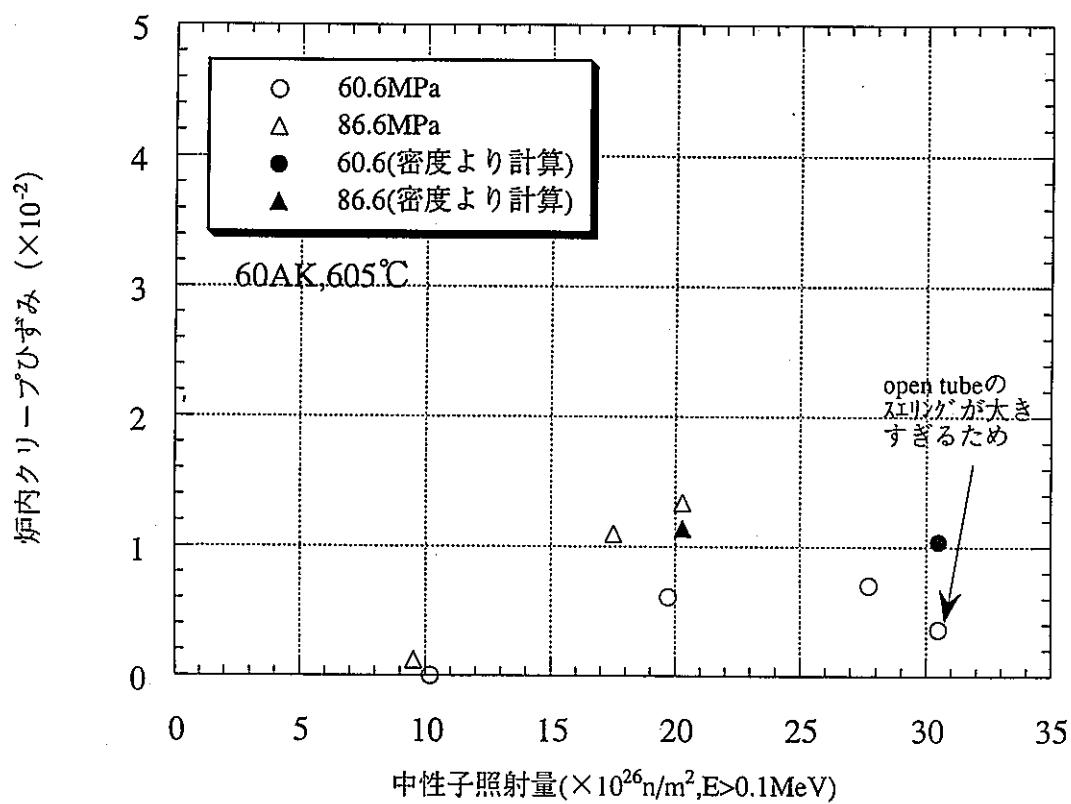


図3.7 中性子照射量と炉内クリープひずみの関係 (60AK,605°C)

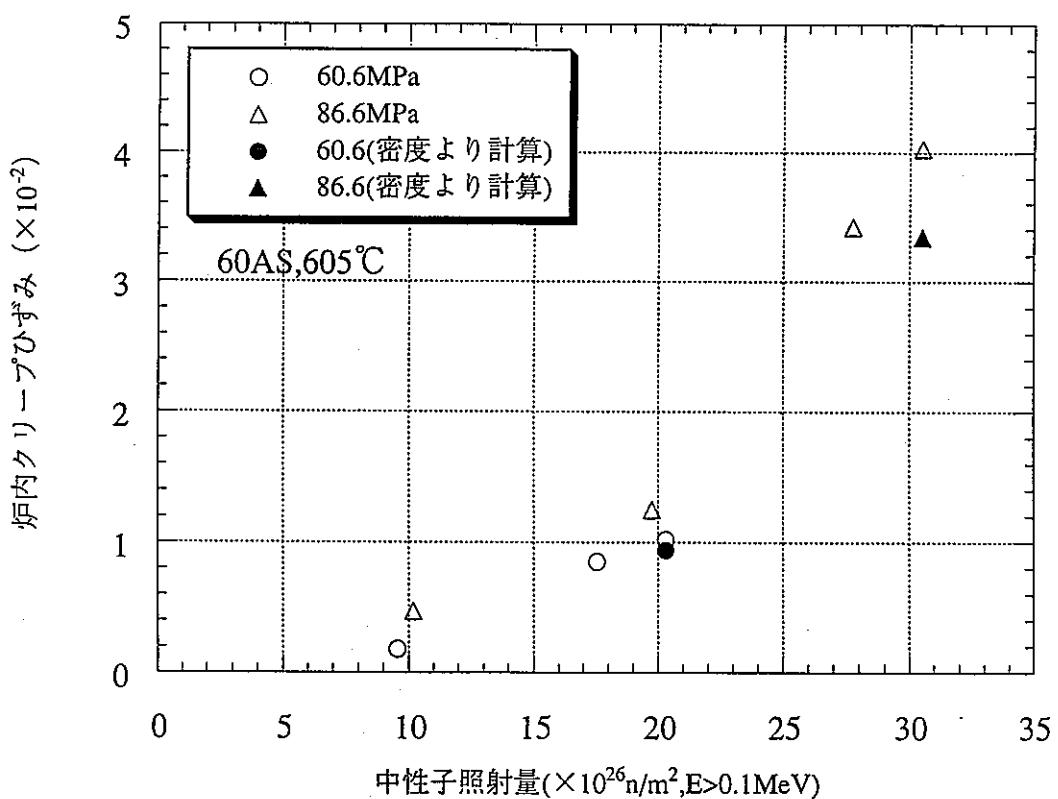


図3.8 中性子照射量と炉内クリープひずみの関係 (60AS,605°C)

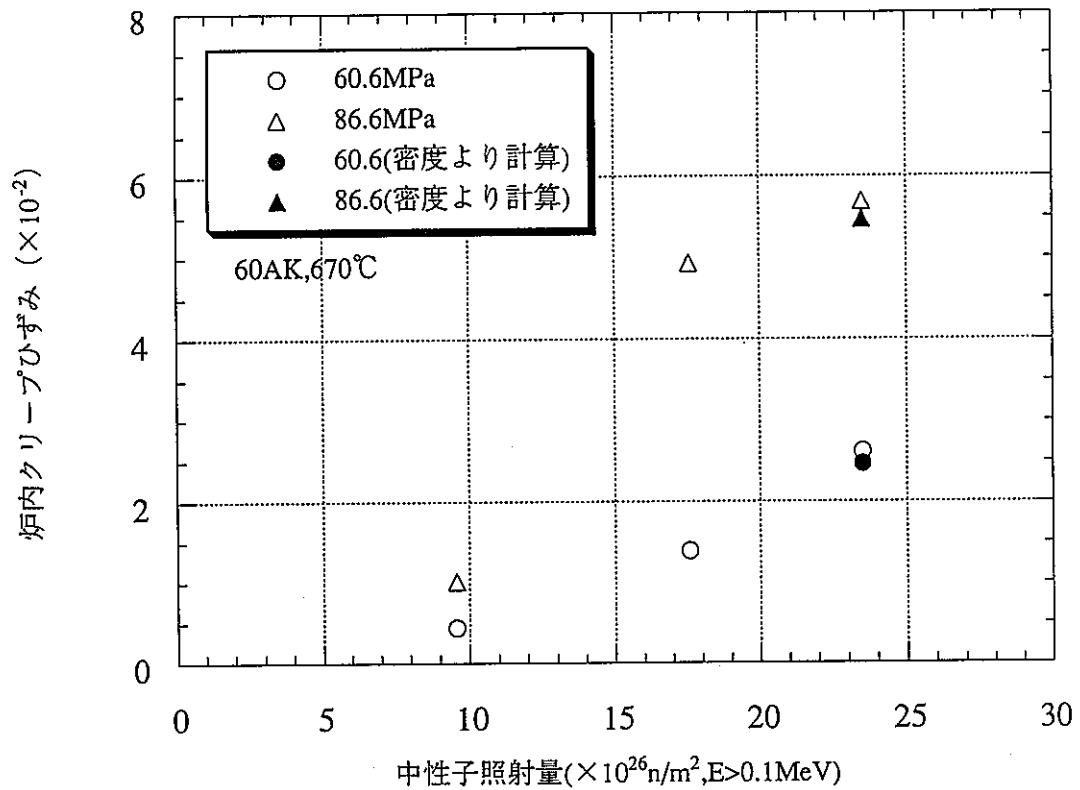


図3.9 中性子照射量と炉内クリープひずみの関係 (60AK,670°C)

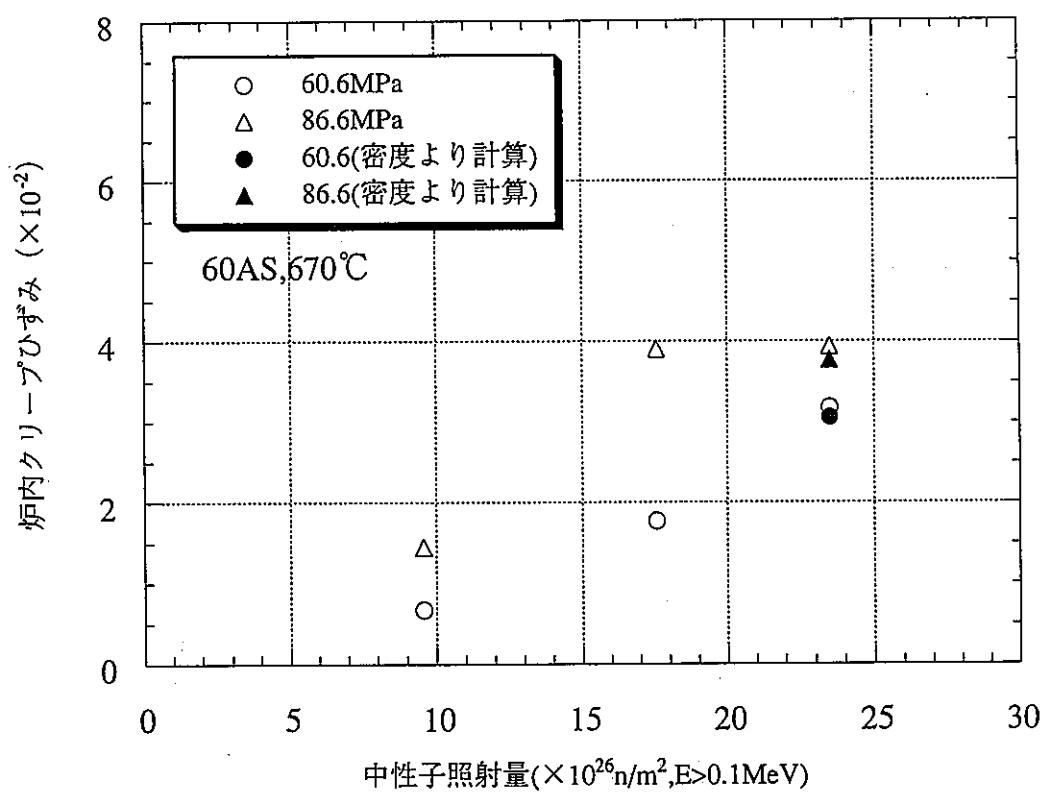


図3.10 中性子照射量と炉内クリープひずみの関係 (60AS,670°C)

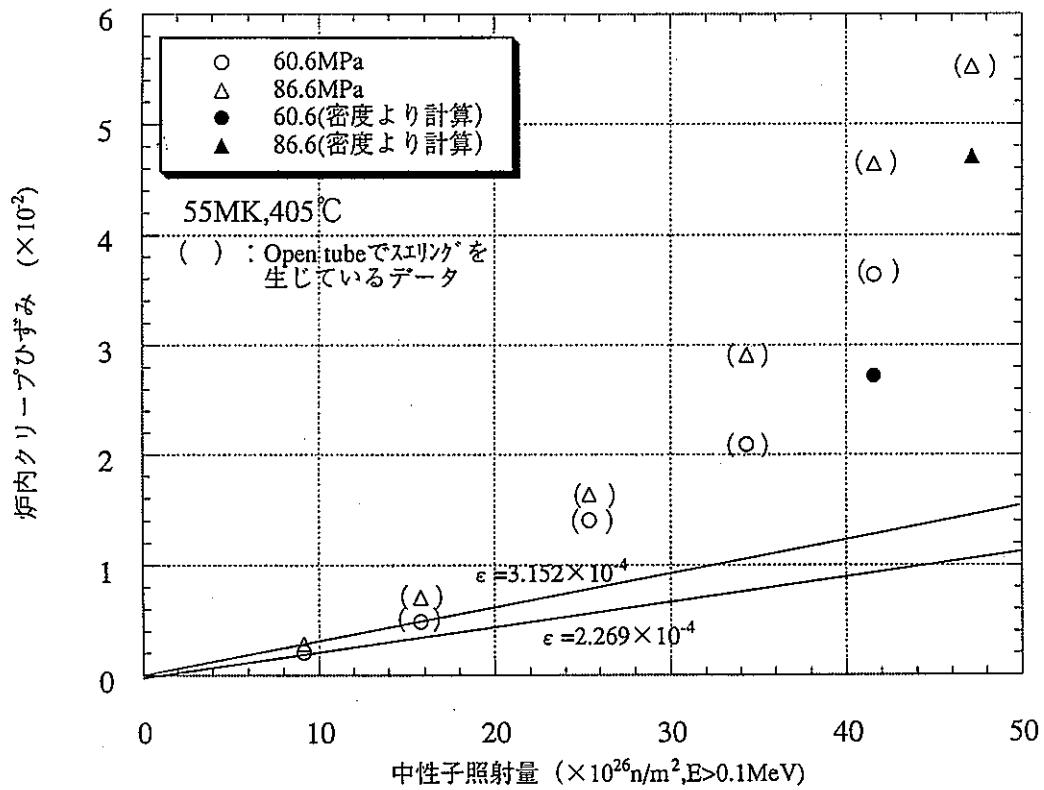


図3.11 中性子照射量と炉内クリープひずみの関係 (55MK, 405°C)

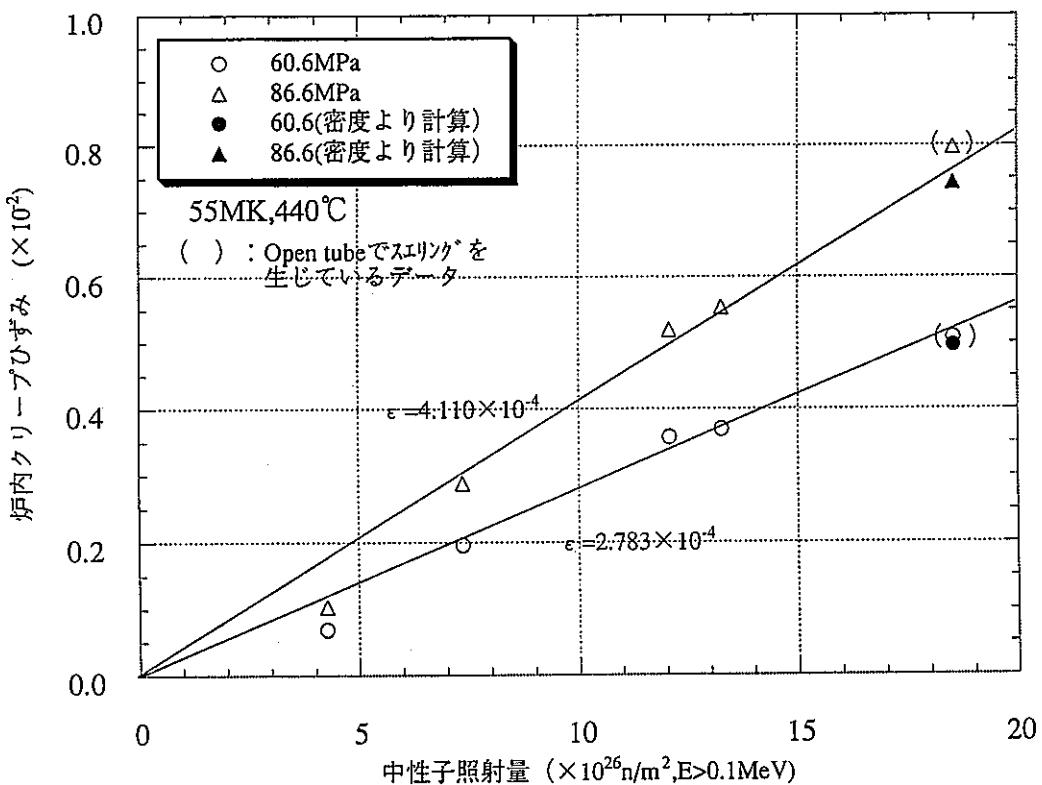


図3.12 中性子照射量と炉内クリープひずみの関係 (55MK, 440°C)

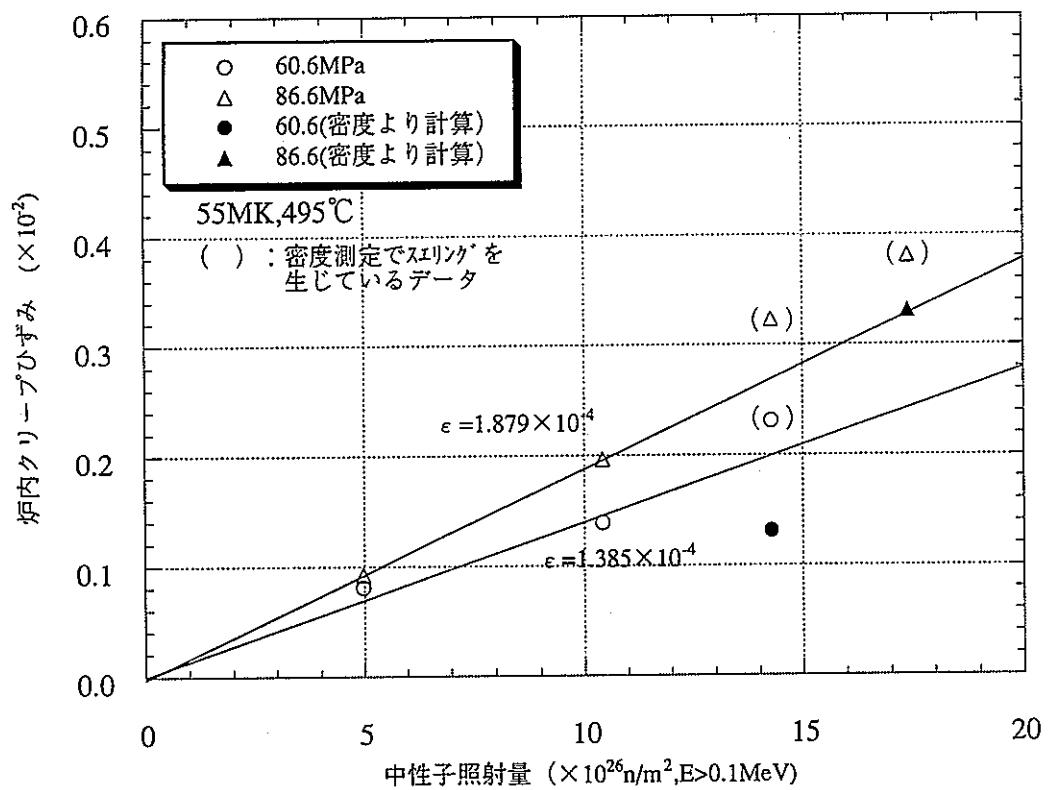


図3.13 中性子照射量と炉内クリープひずみの関係 (55MK,495°C)

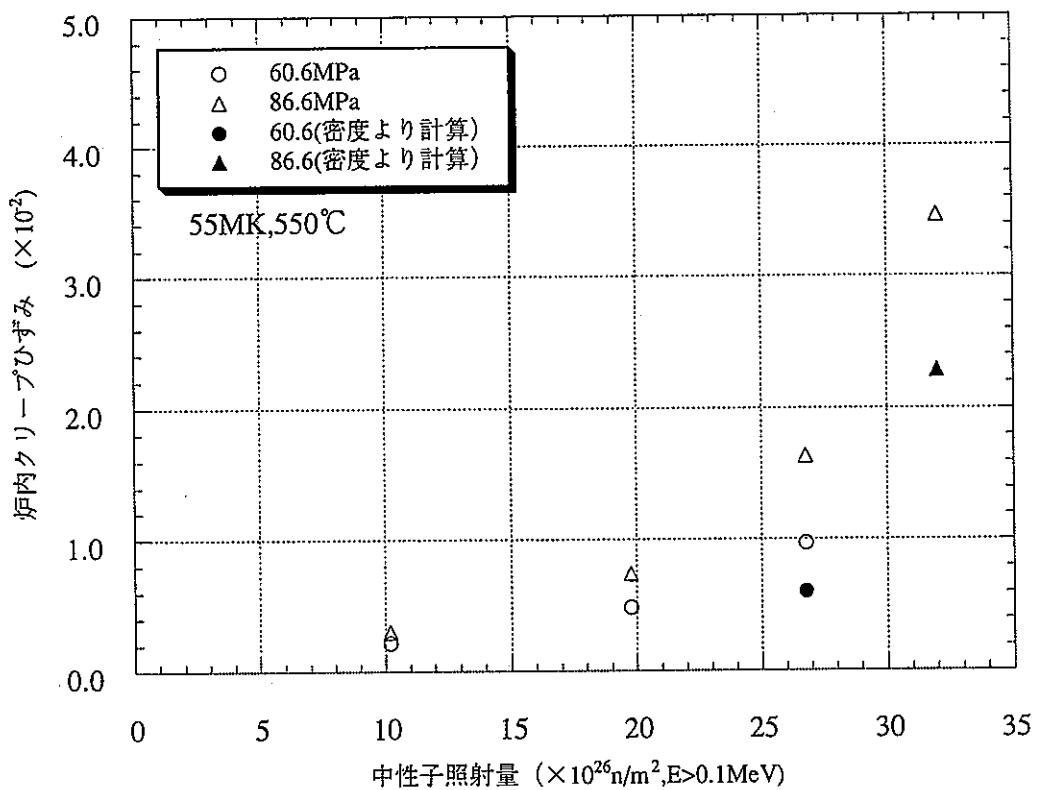


図3.14 中性子照射量と炉内クリープひずみの関係 (55MK,550°C)

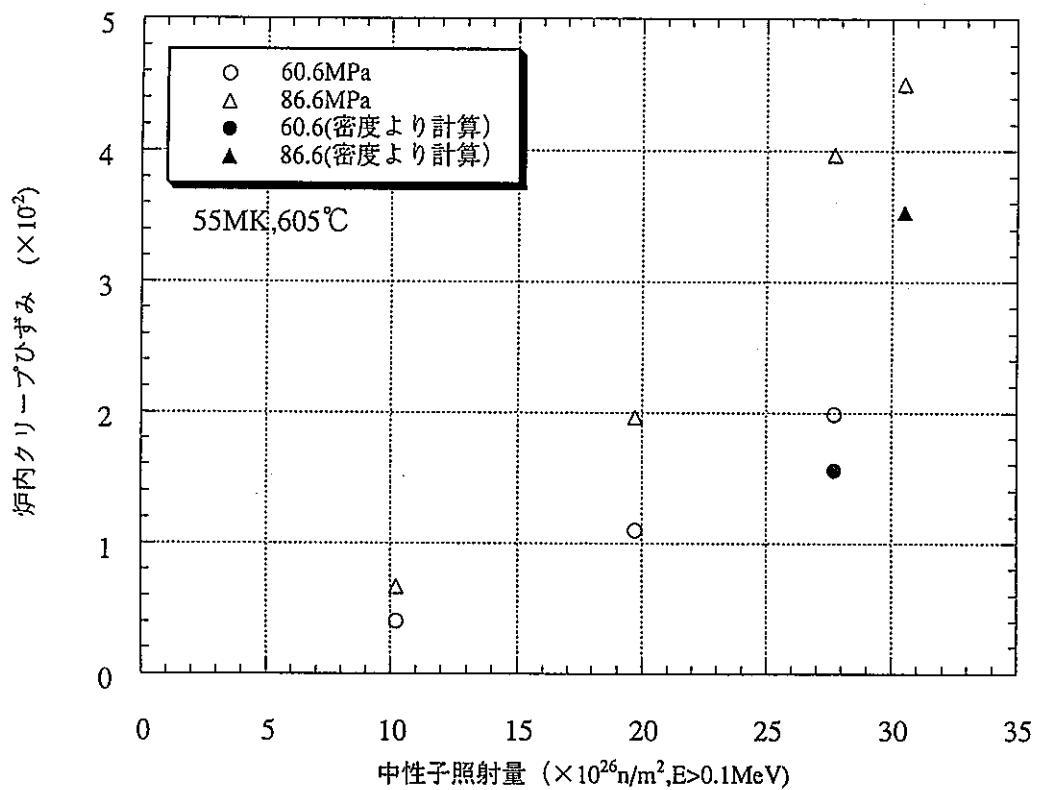


図3.15 中性子照射量と炉内クリープひずみの関係 (55MK,605°C)

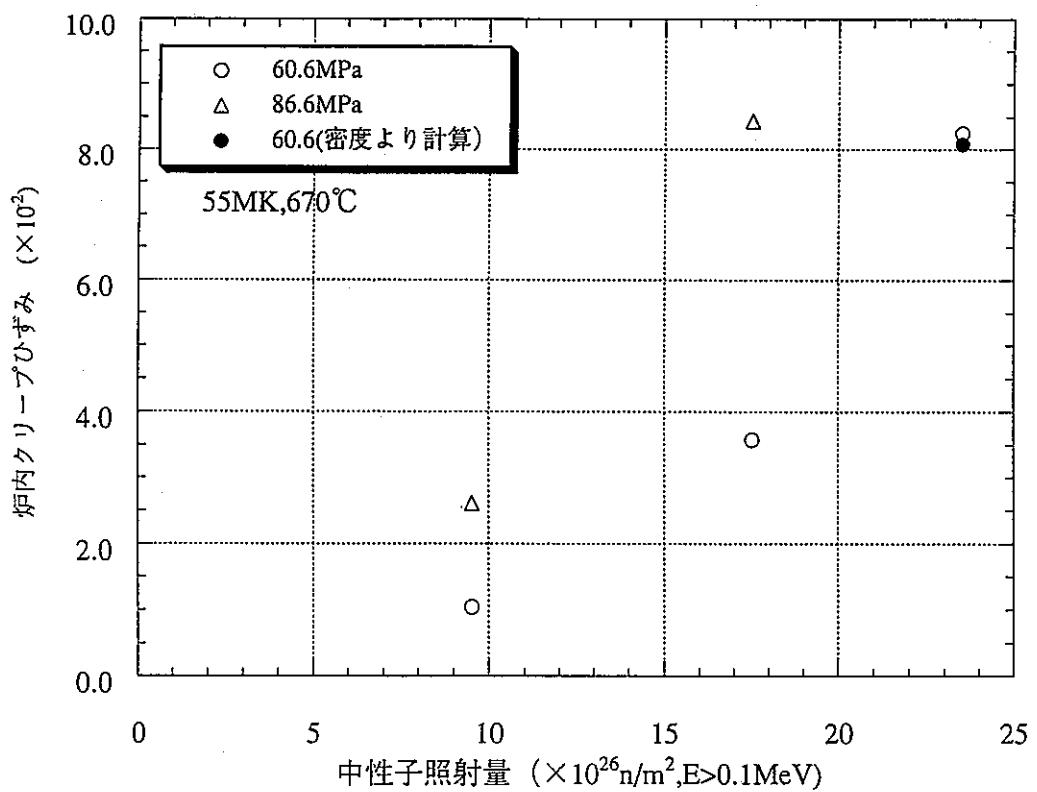


図3.16 中性子照射量と炉内クリープひずみの関係 (55MK,670°C)

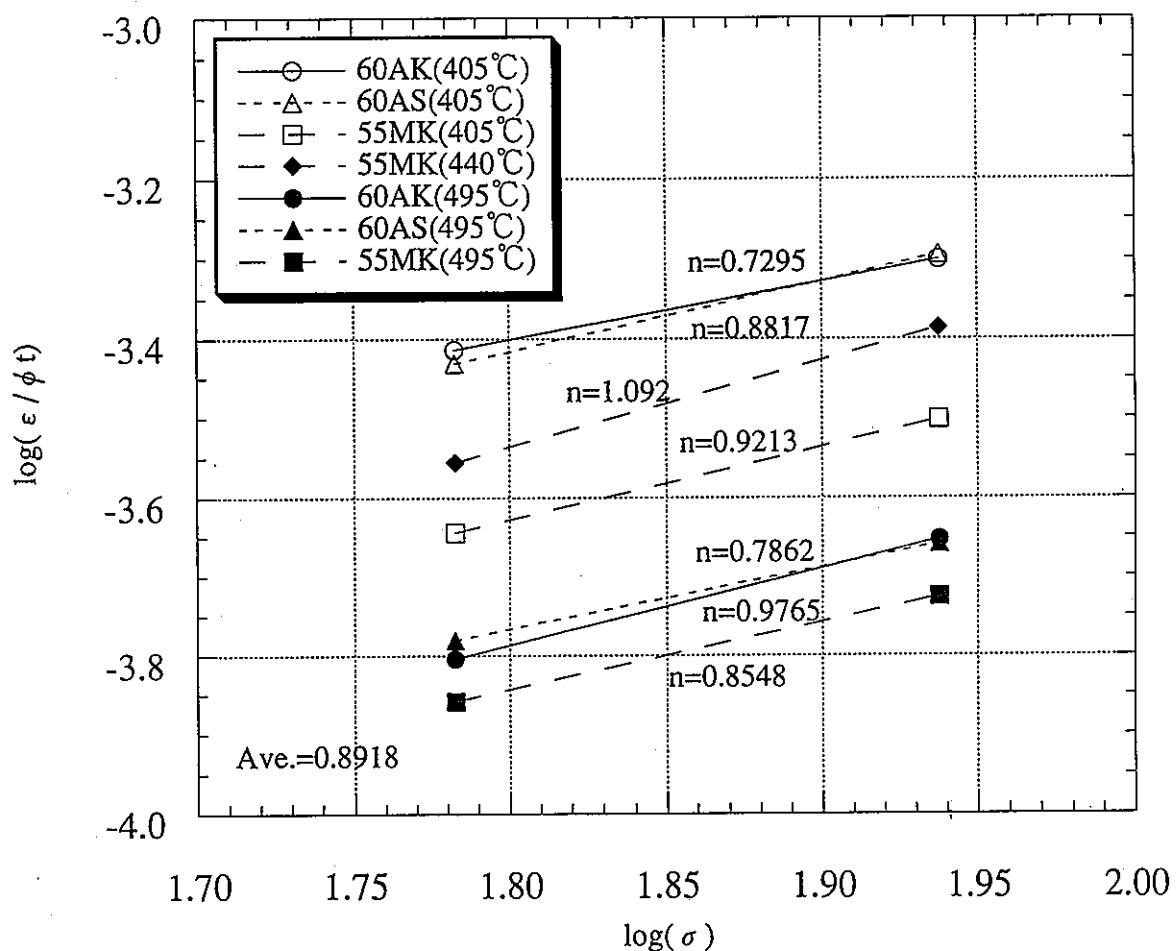


図4 炉内クリープひずみ速度の応力依存性  
(スエリングと熱クリープが無視できる領域)

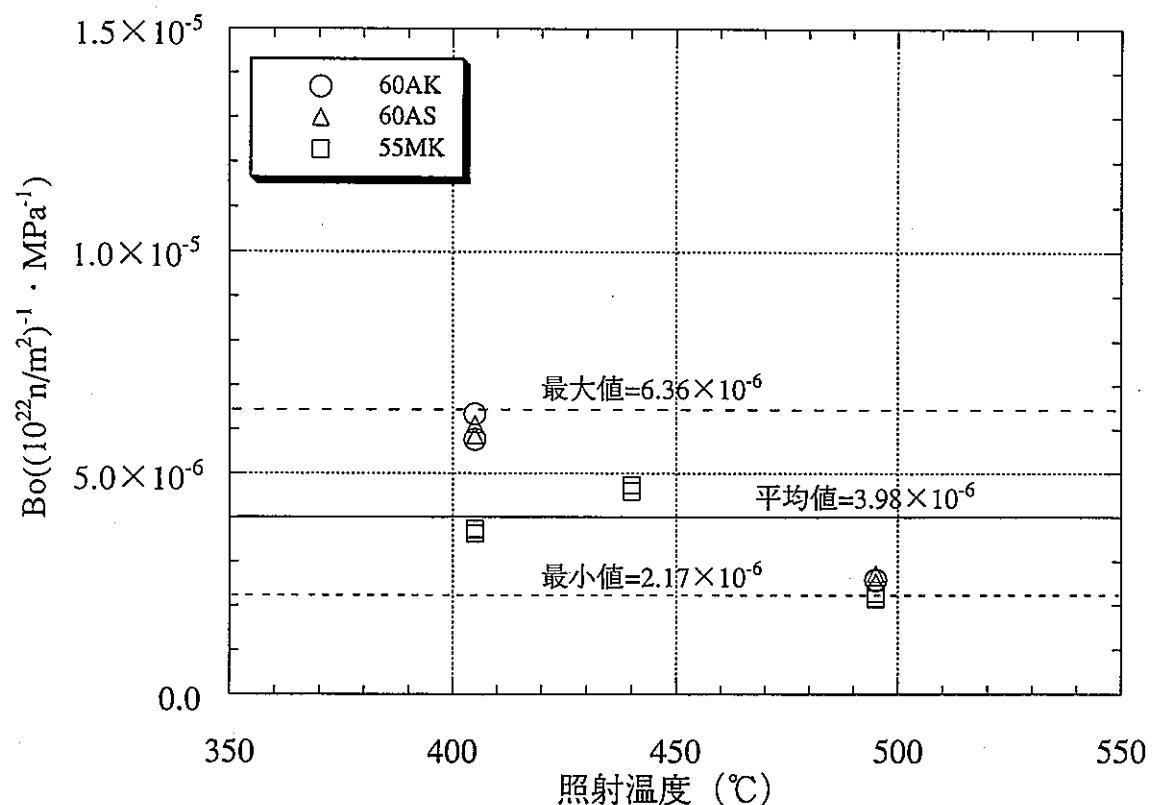


図5 Boの温度依存性

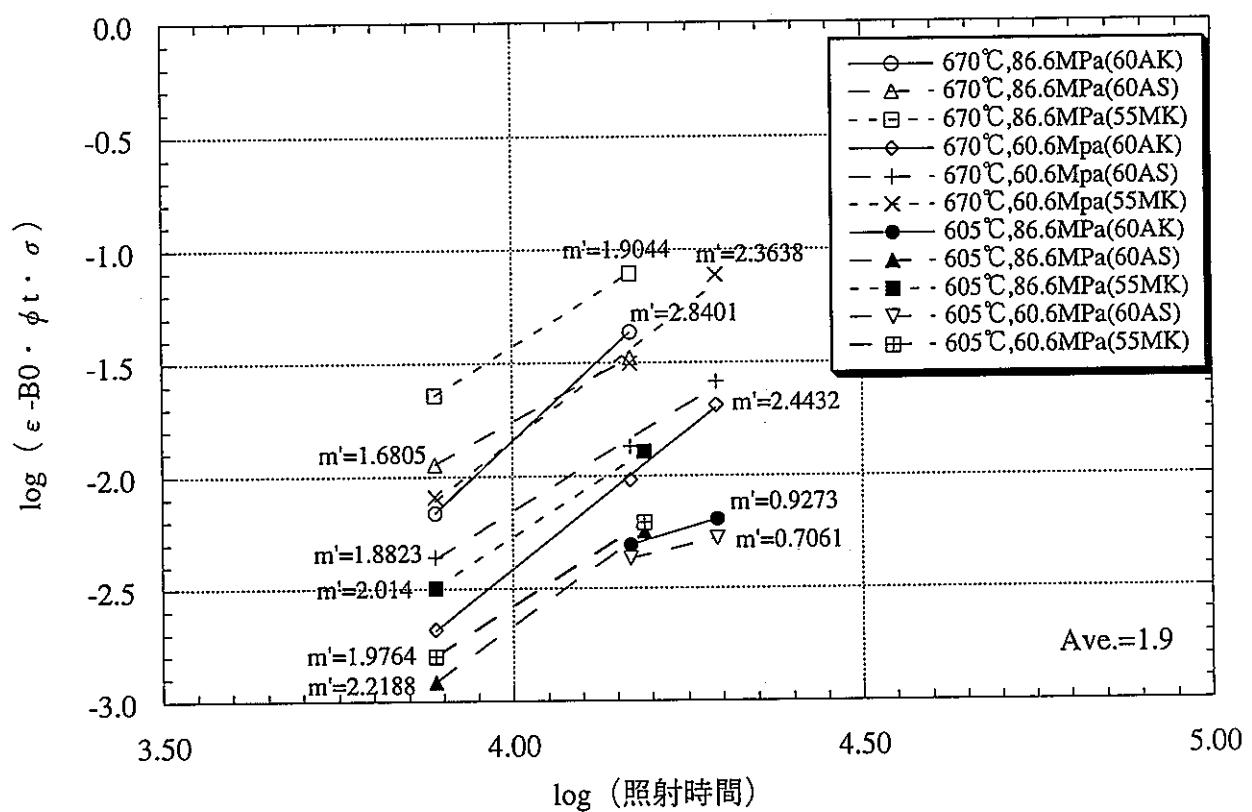


図 6 热クリープ依存項の照射時間依存性

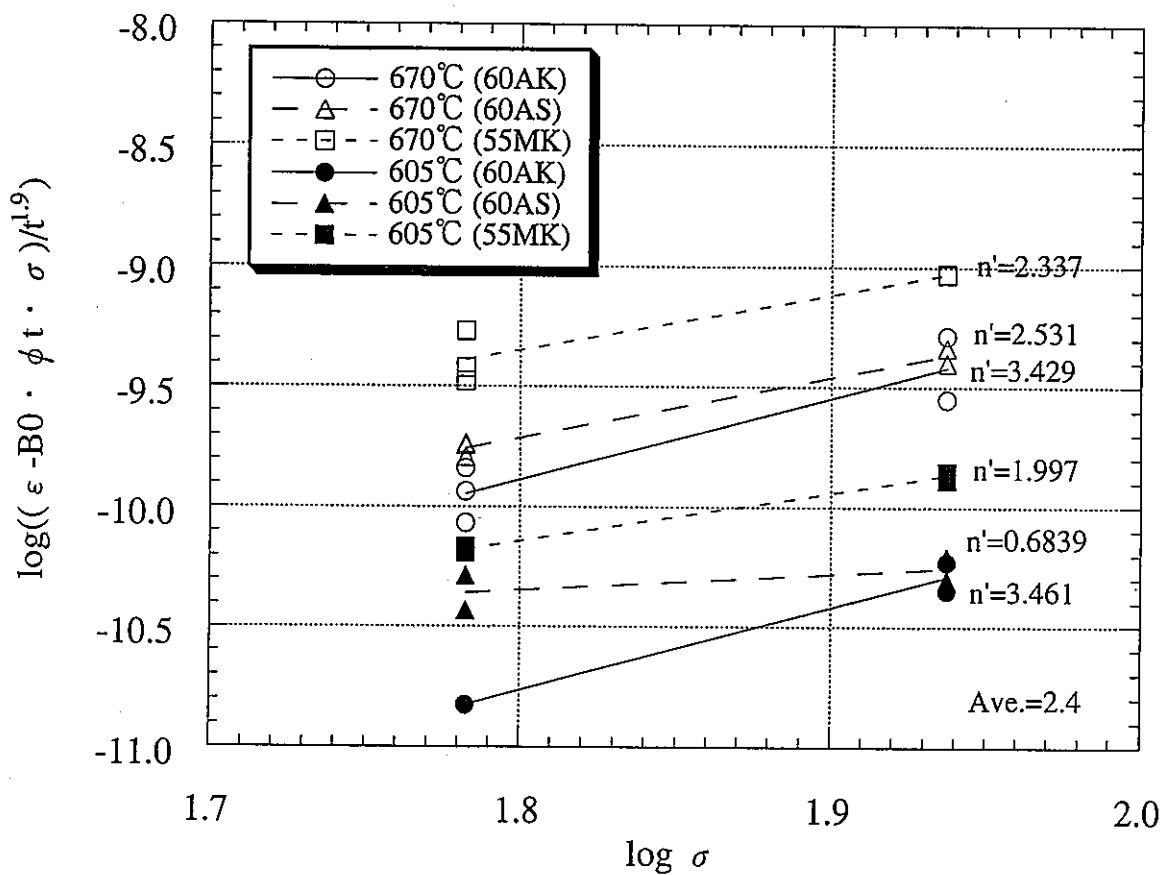


図 7 熱クリープ依存項の応力依存性

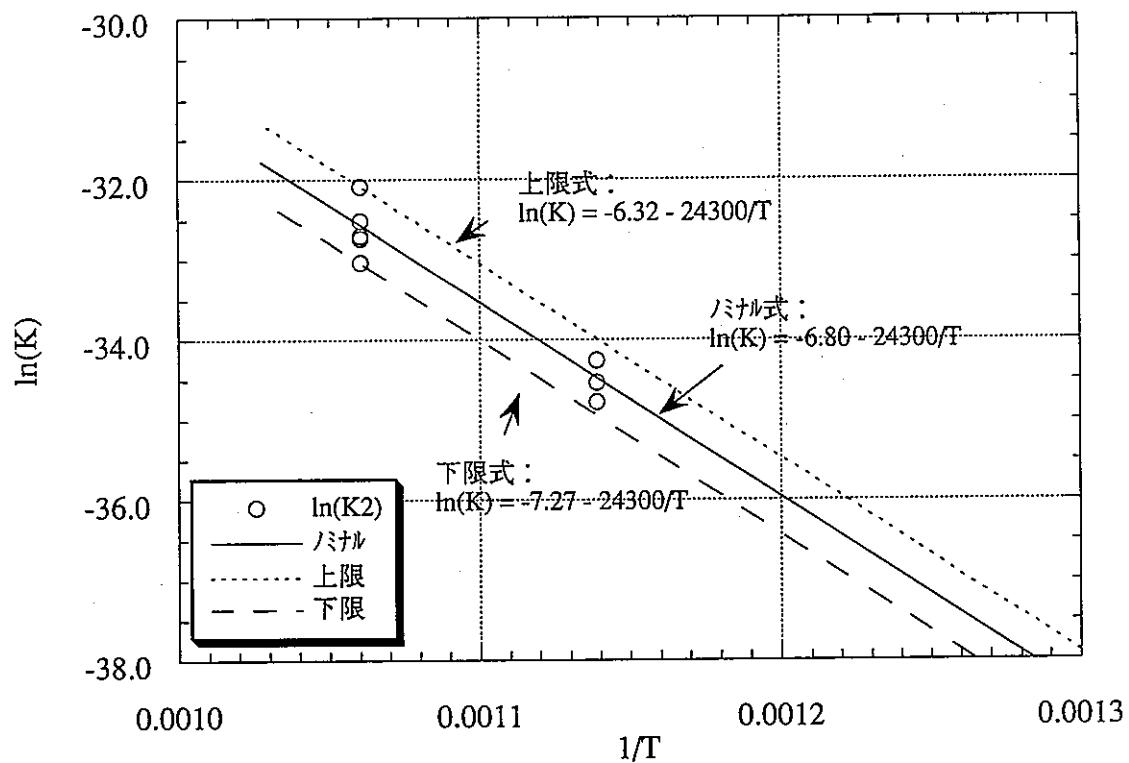


図8.1 Kの温度依存性 (I) 60AK

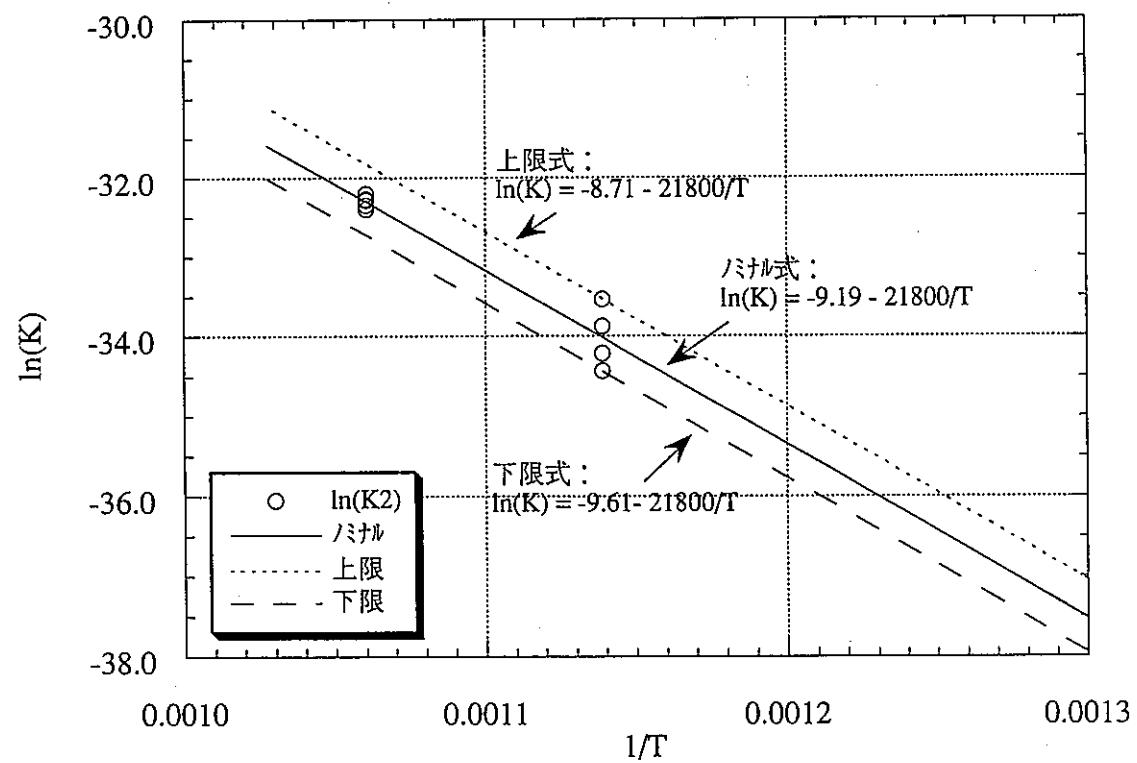
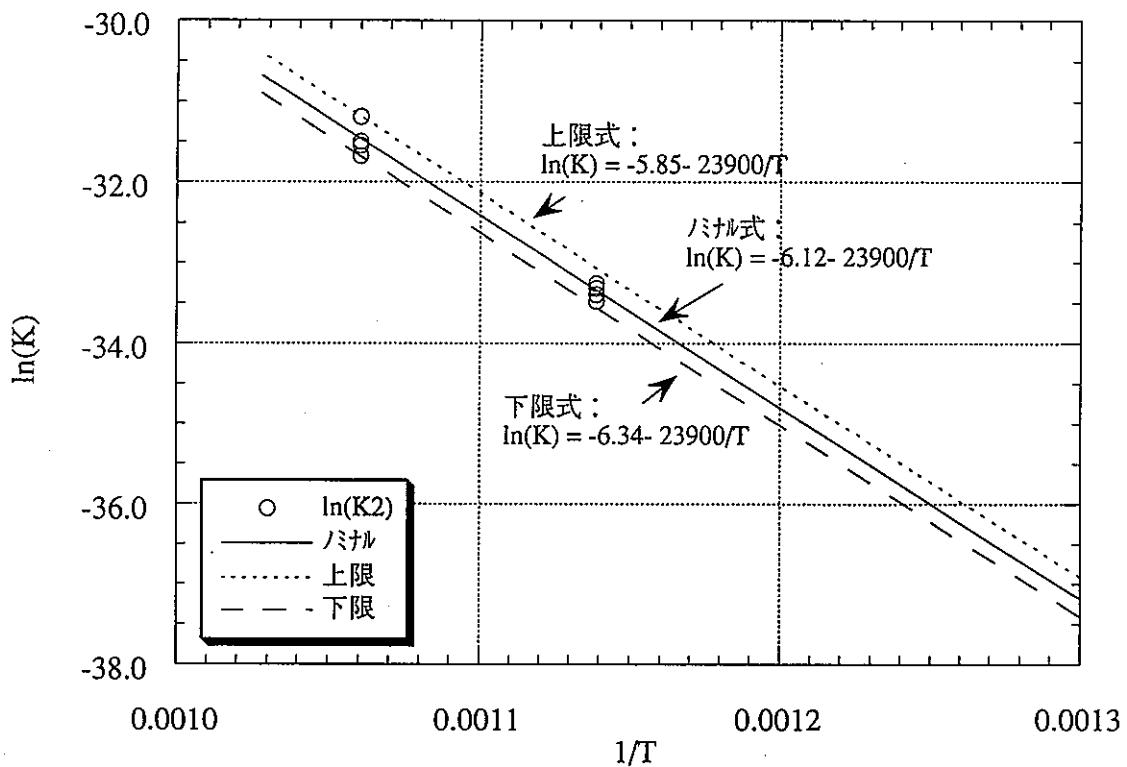
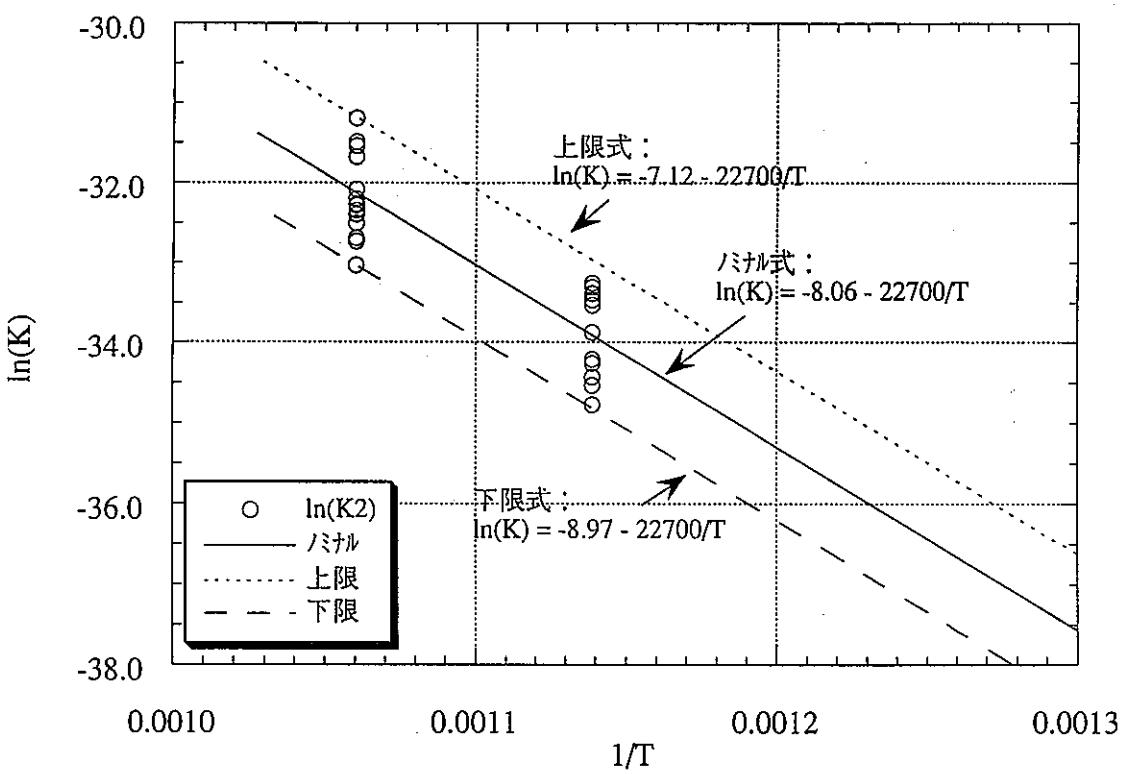
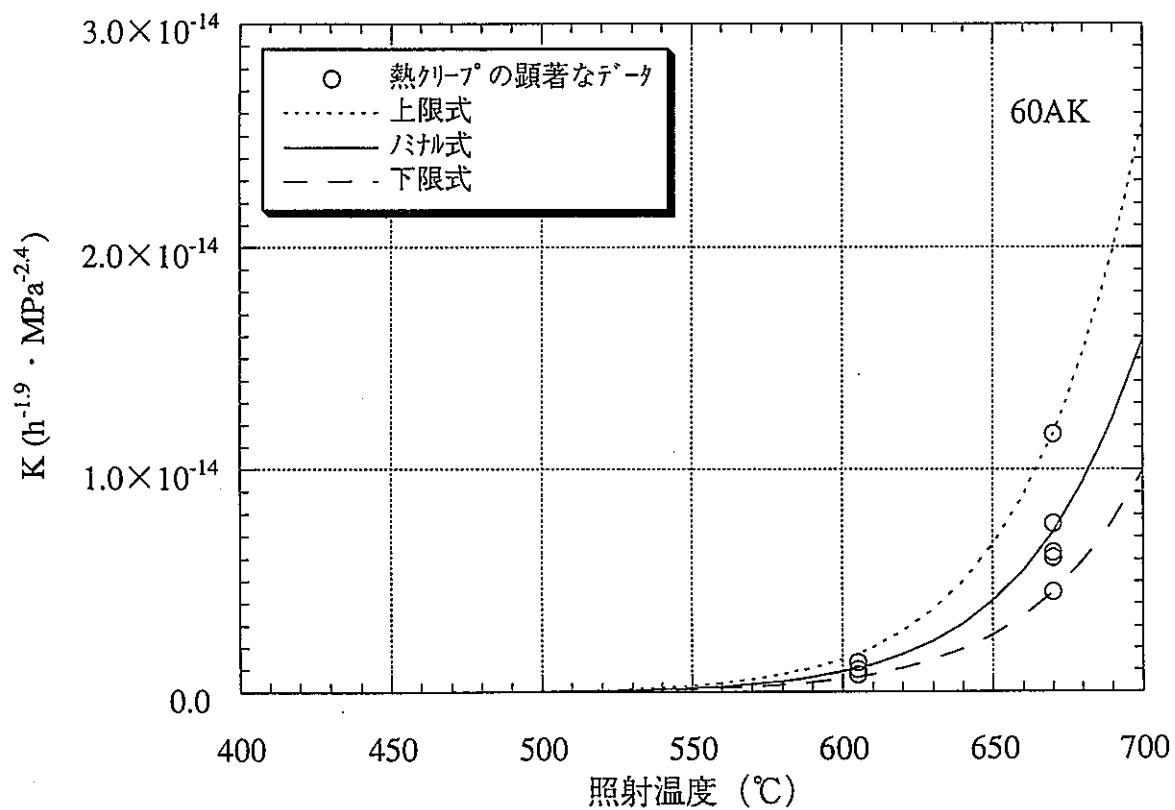
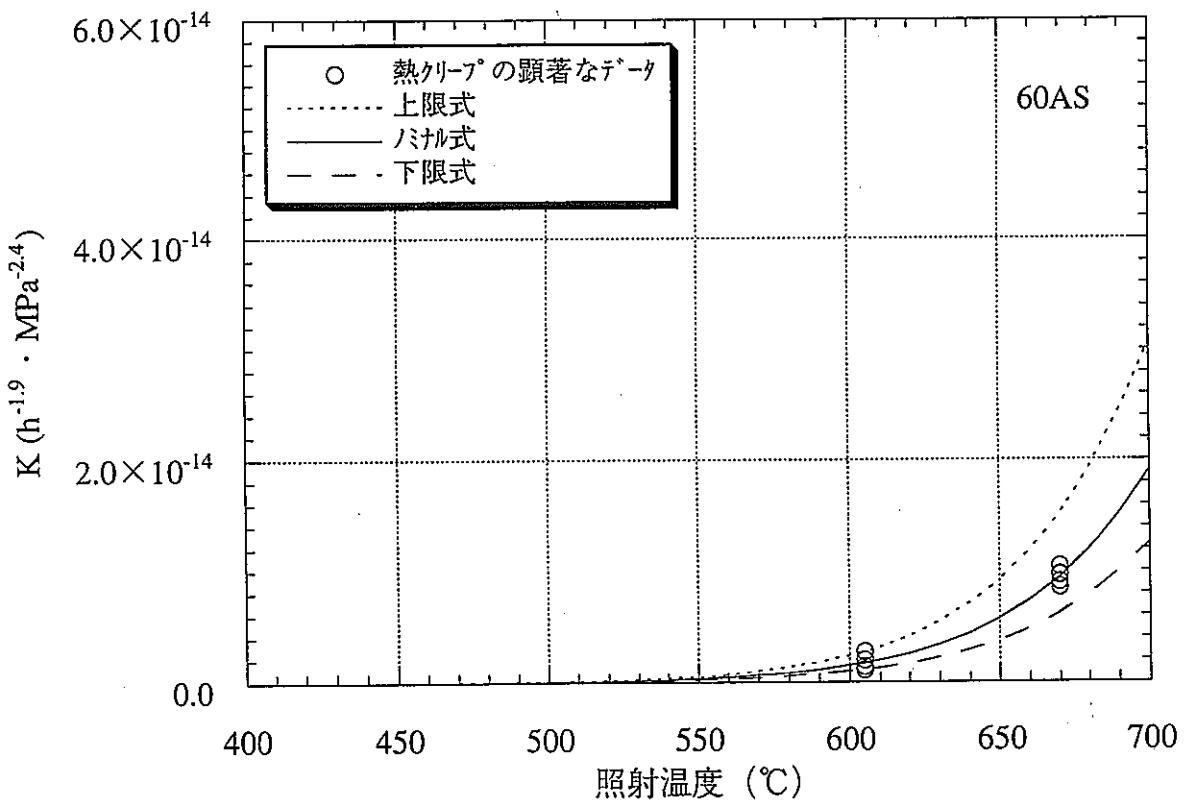
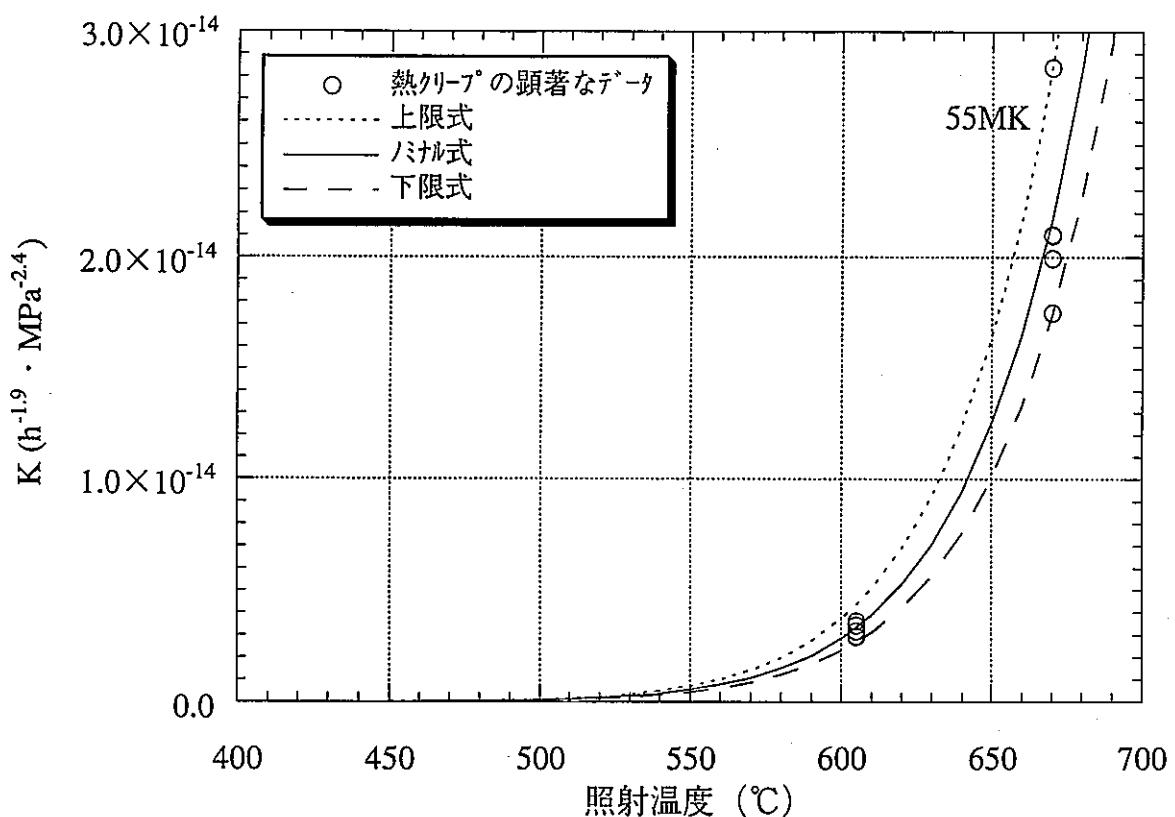
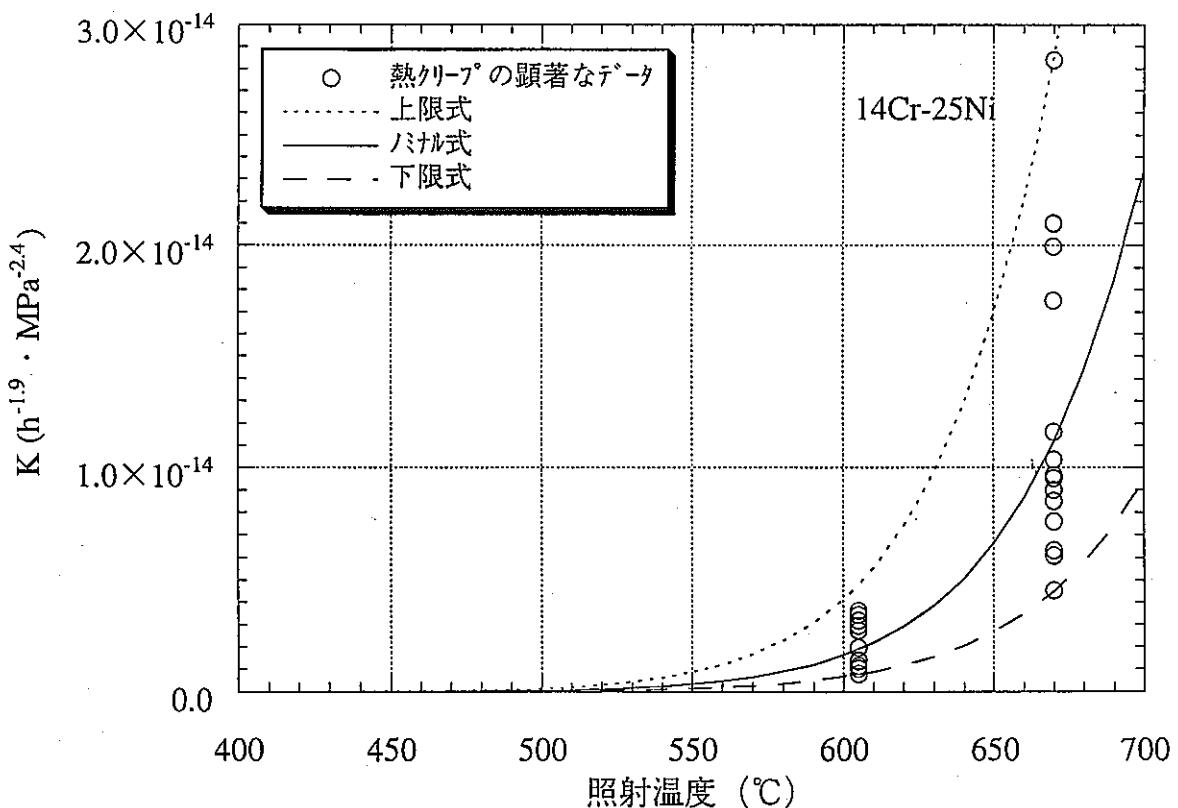


図8.2 Kの温度依存性 (I) 60AS

図8.3  $K$ の温度依存性 (I) 55MK図8.4  $K$ の温度依存性 (I) 14Cr-25Ni

図9.1  $K$  (60AK) の温度依存性 (II)図9.2  $K$  (60AS) の温度依存性 (II)

図9.3  $K$  (55MK) の温度依存性 (II)図9.4  $K$  (14Cr-25Ni) の温度依存性 (II)

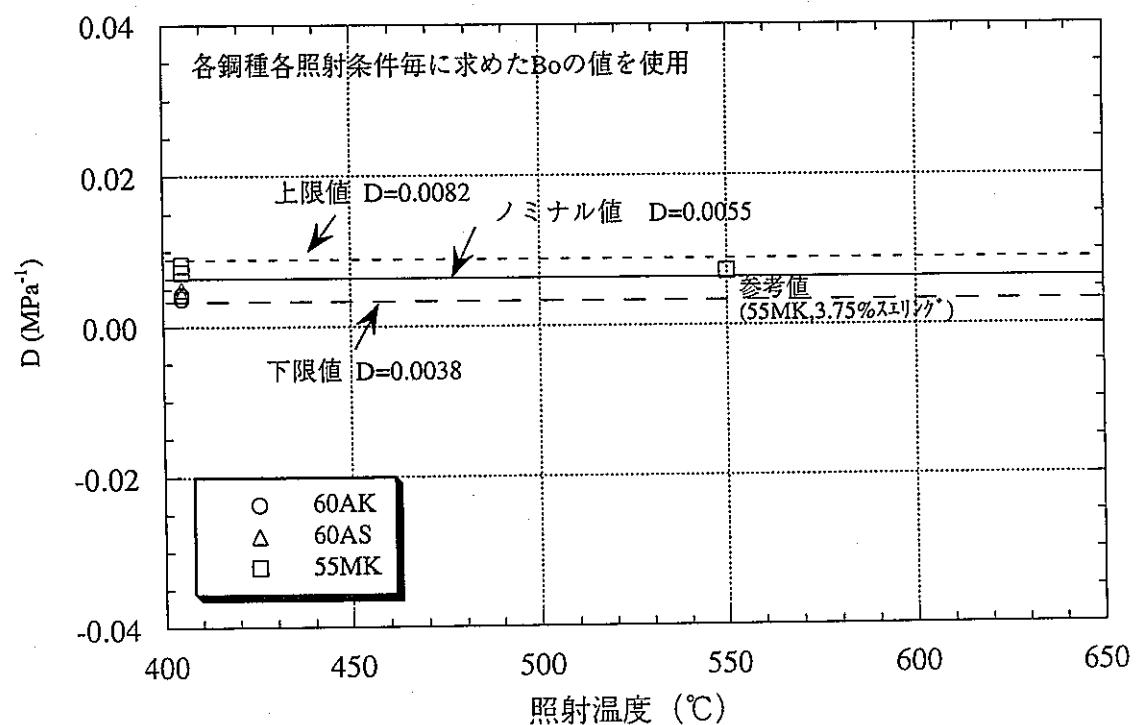


図10 D の温度依存性

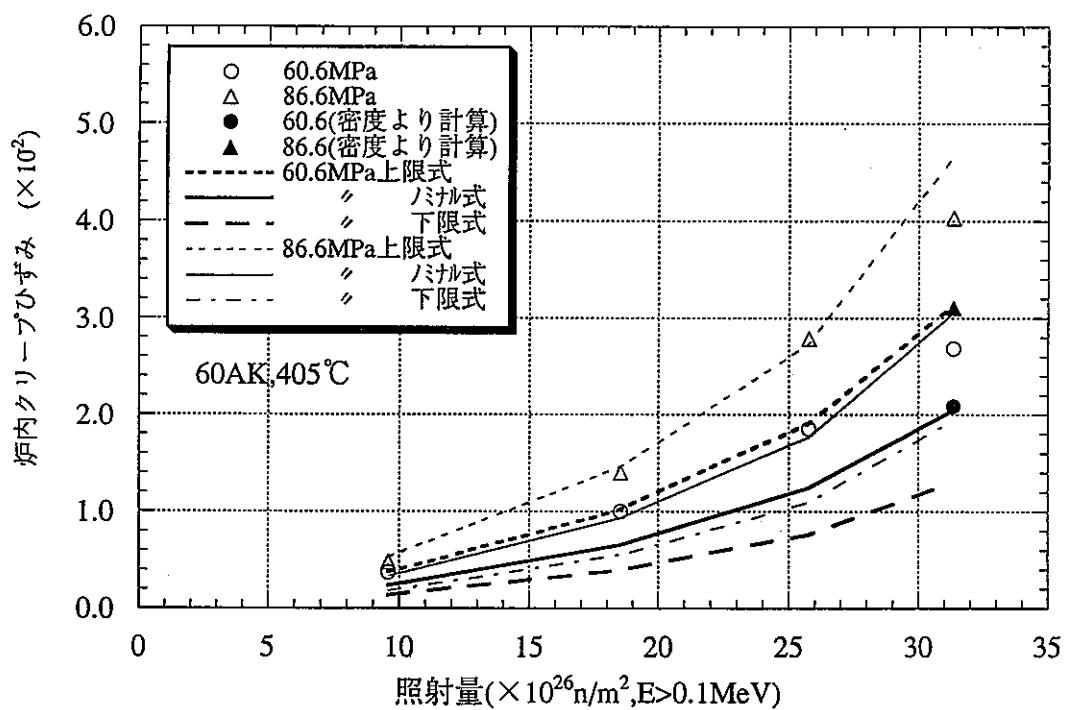


図11.1 炉内クリープひずみ計算値と実測値の比較 (60AK,405°C)

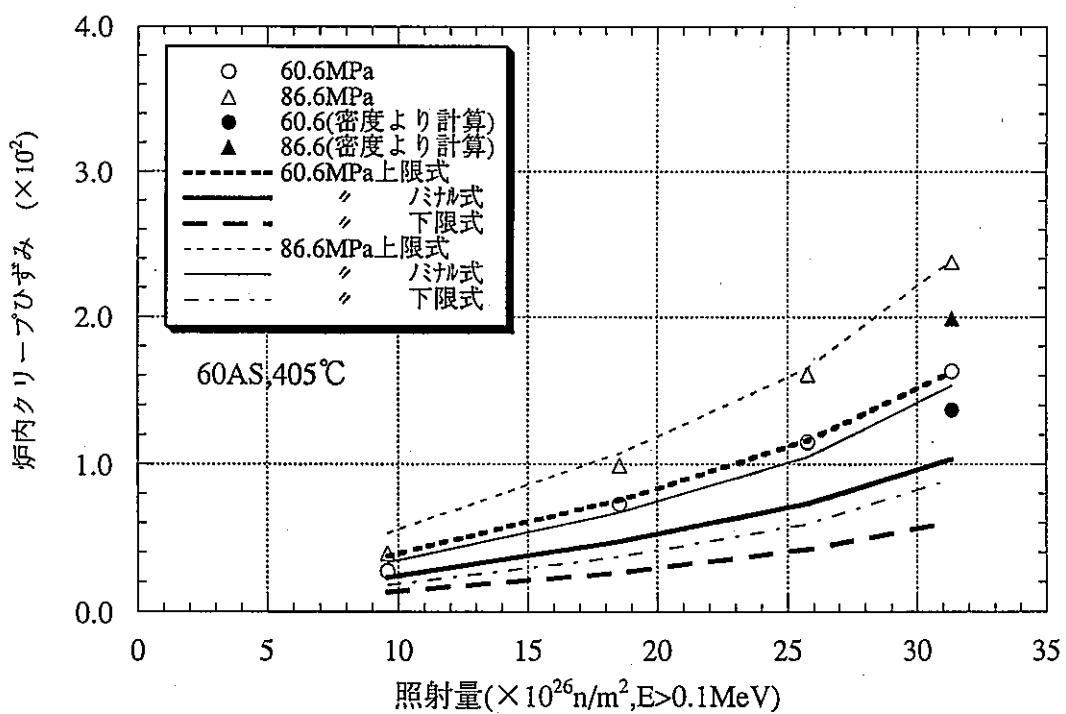


図11.2 炉内クリープひずみ計算値と実測値の比較 (60AS,405°C)

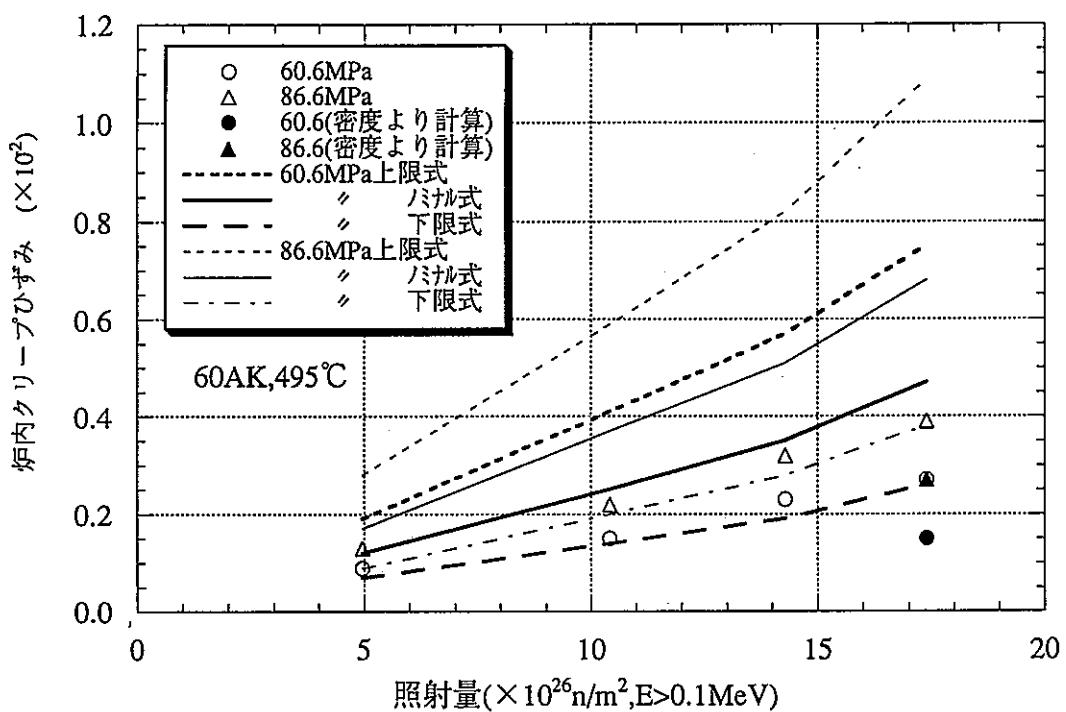


図11.3 炉内クリープひずみ計算値と実測値の比較 (60AK,495°C)

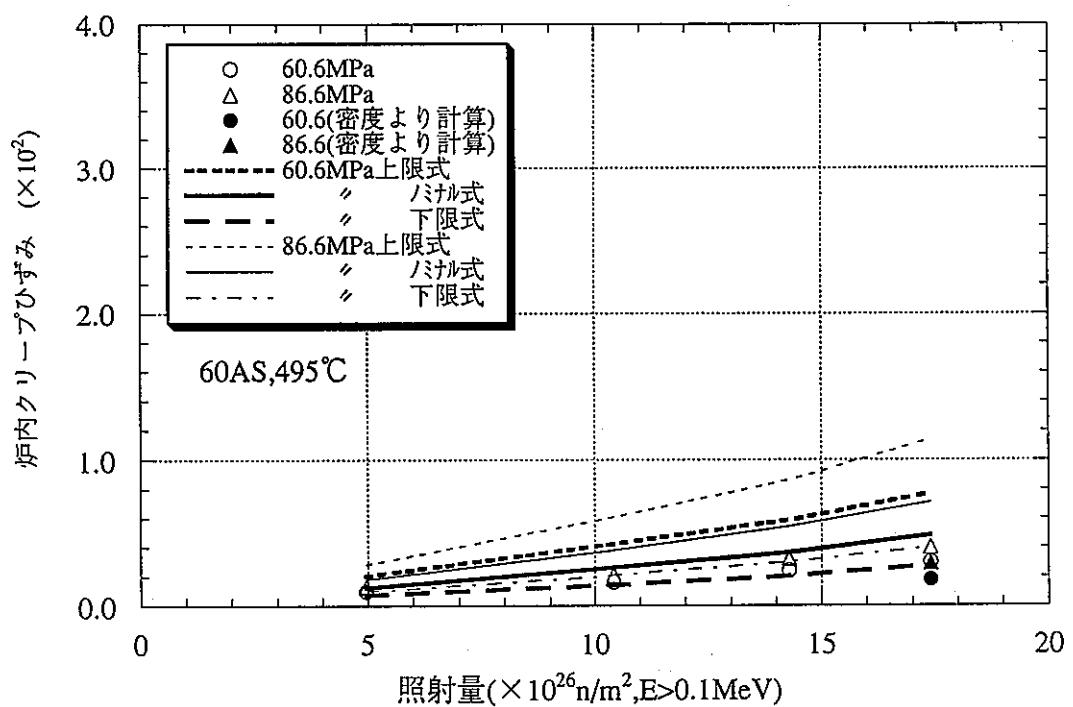


図11.4 炉内クリープひずみ計算値と実測値の比較 (60AS,495°C)

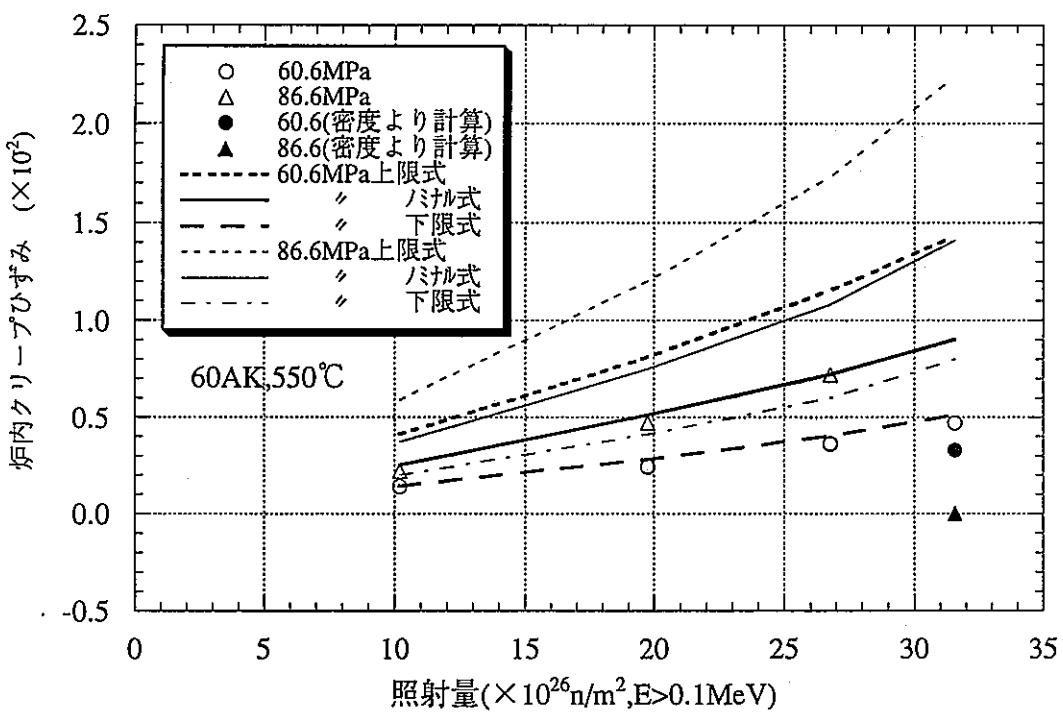


図11.5 炉内クリープひずみ計算値と実測値の比較 (60AK,550°C)

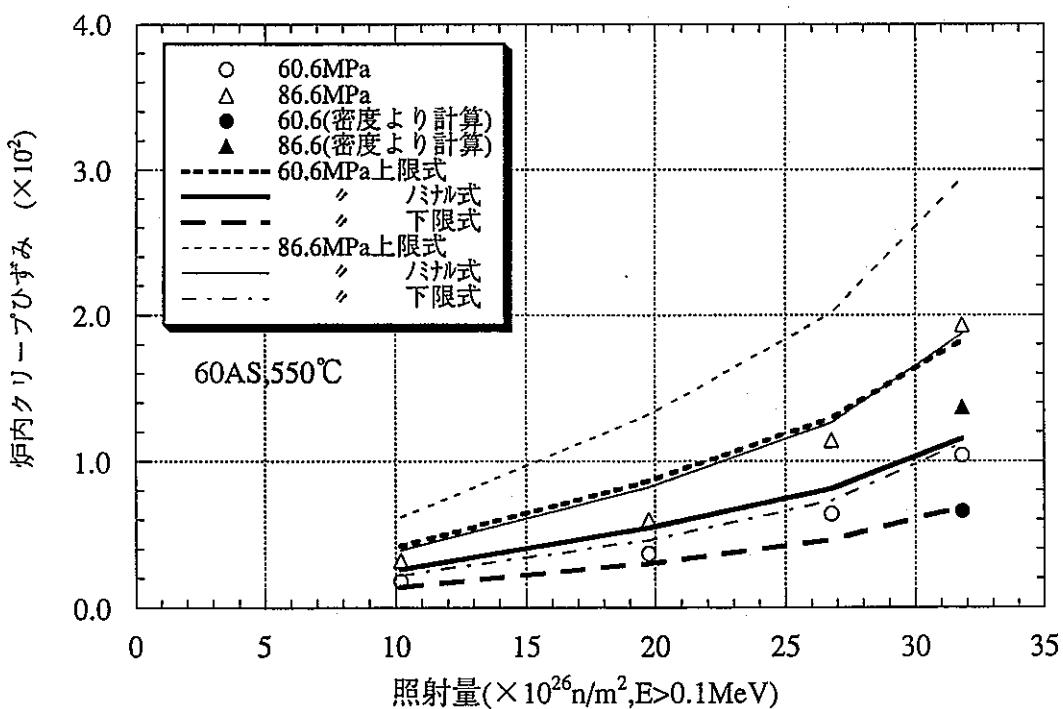


図11.6 炉内クリープひずみ計算値と実測値の比較 (60AS,550°C)

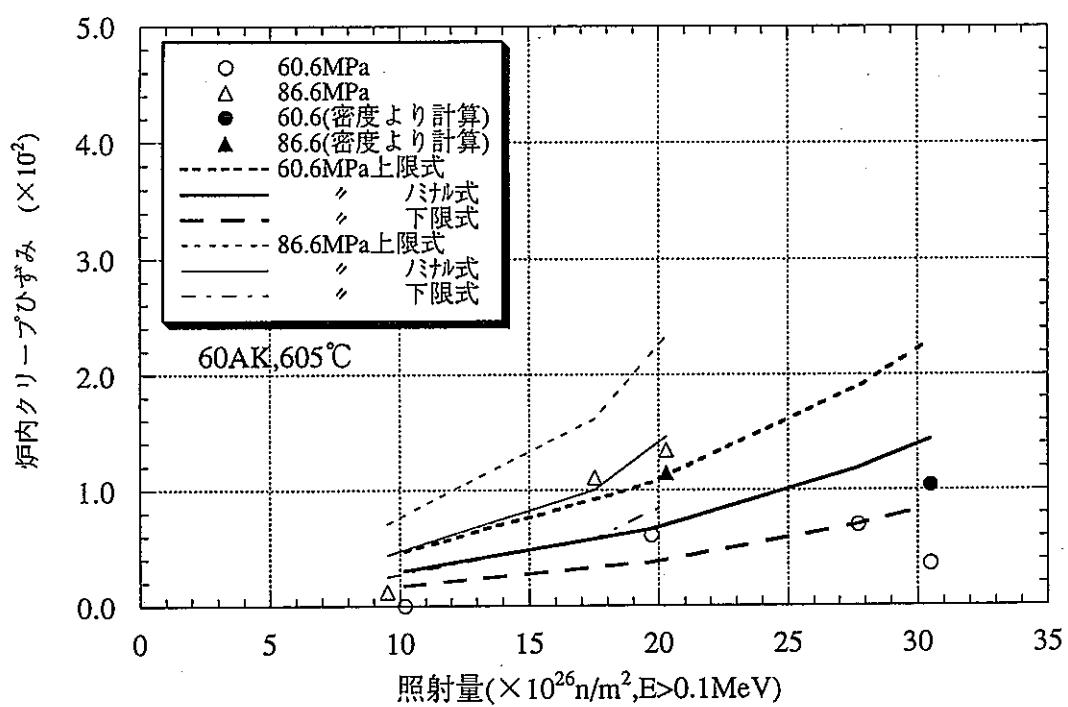


図11.7 炉内クリープひずみ計算値と実測値の比較 (60AK,605°C)

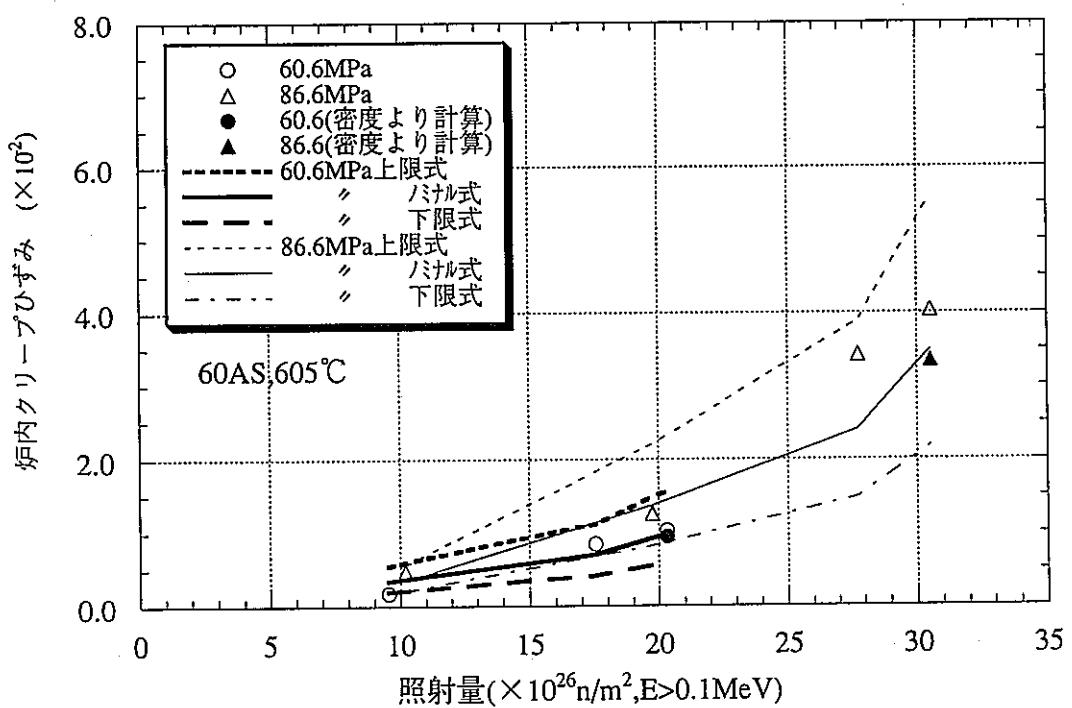


図11.8 炉内クリープひずみ計算値と実測値の比較 (60AS,605°C)

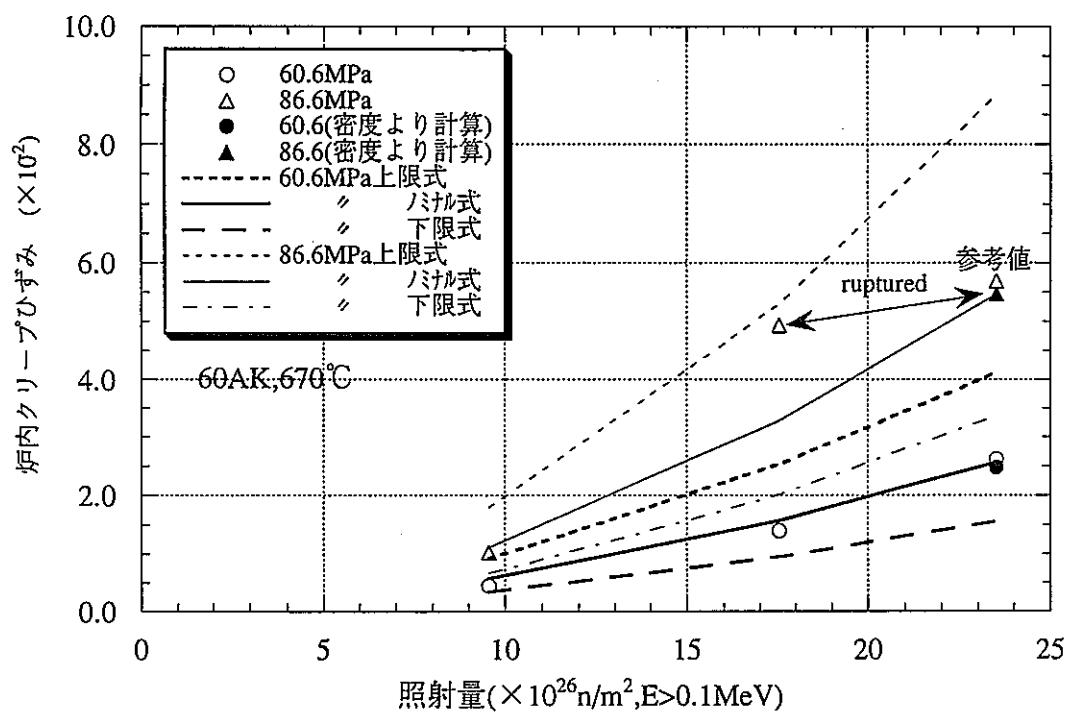


図11.9 炉内クリープひずみ計算値と実測値の比較 (60AK,670°C)

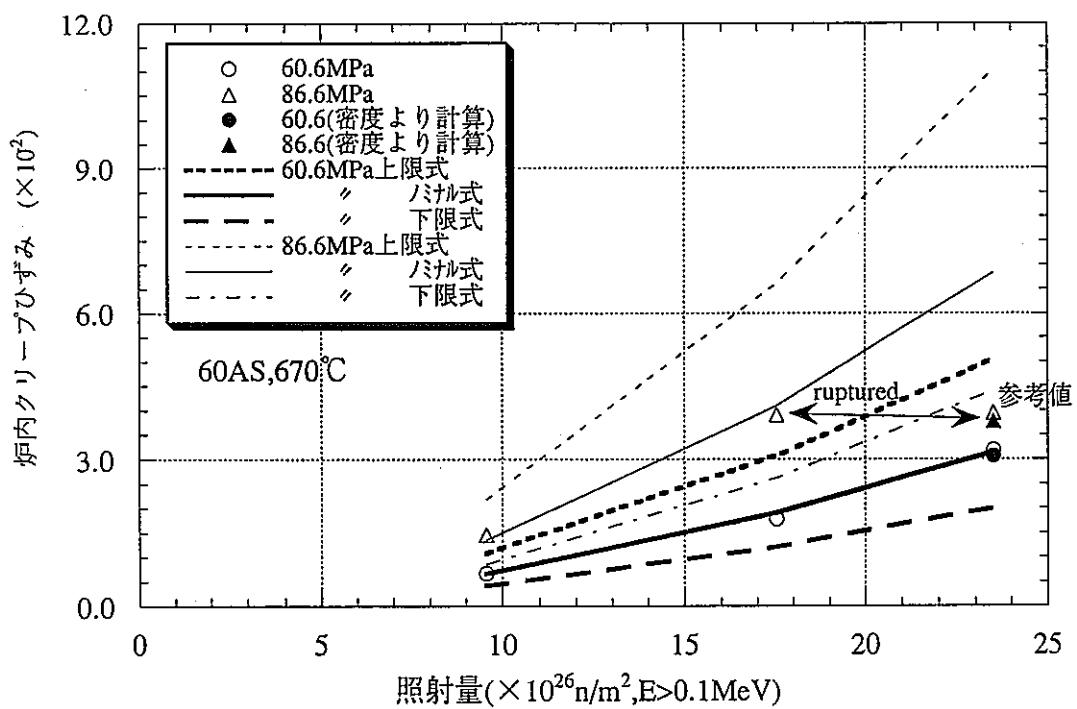


図11.10 炉内クリープひずみ計算値と実測値の比較 (60AS,670°C)

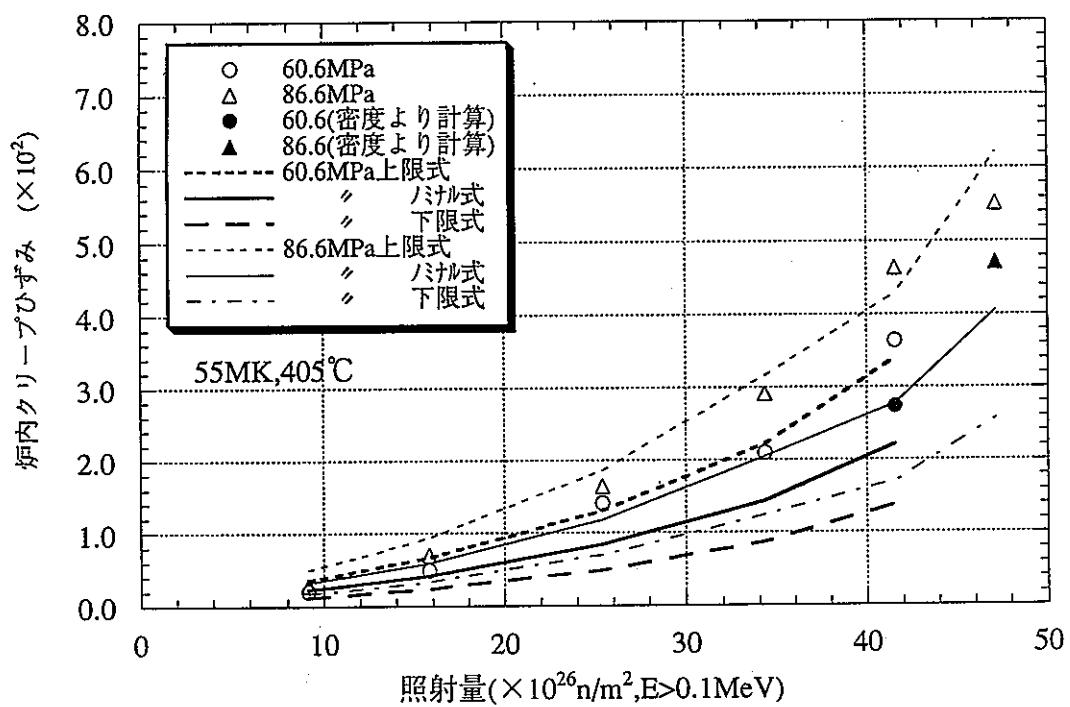


図11.11 炉内クリープひずみ計算値と実測値の比較 (55MK,405°C)

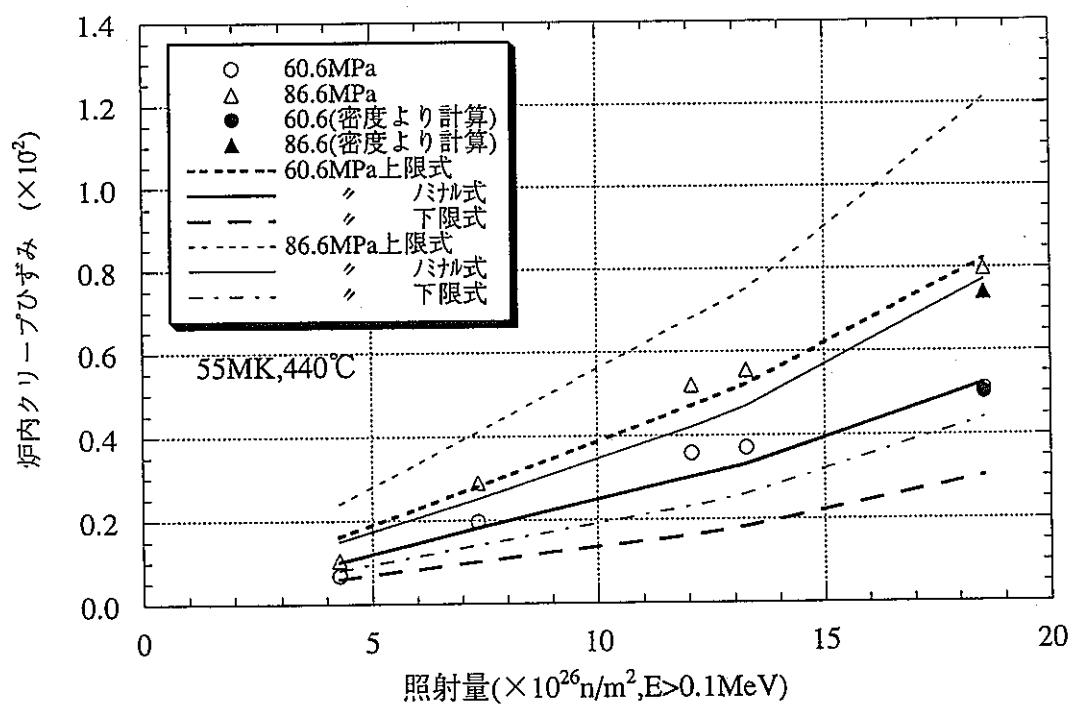


図11.12 炉内クリープひずみ計算値と実測値の比較 (55MK,440°C)

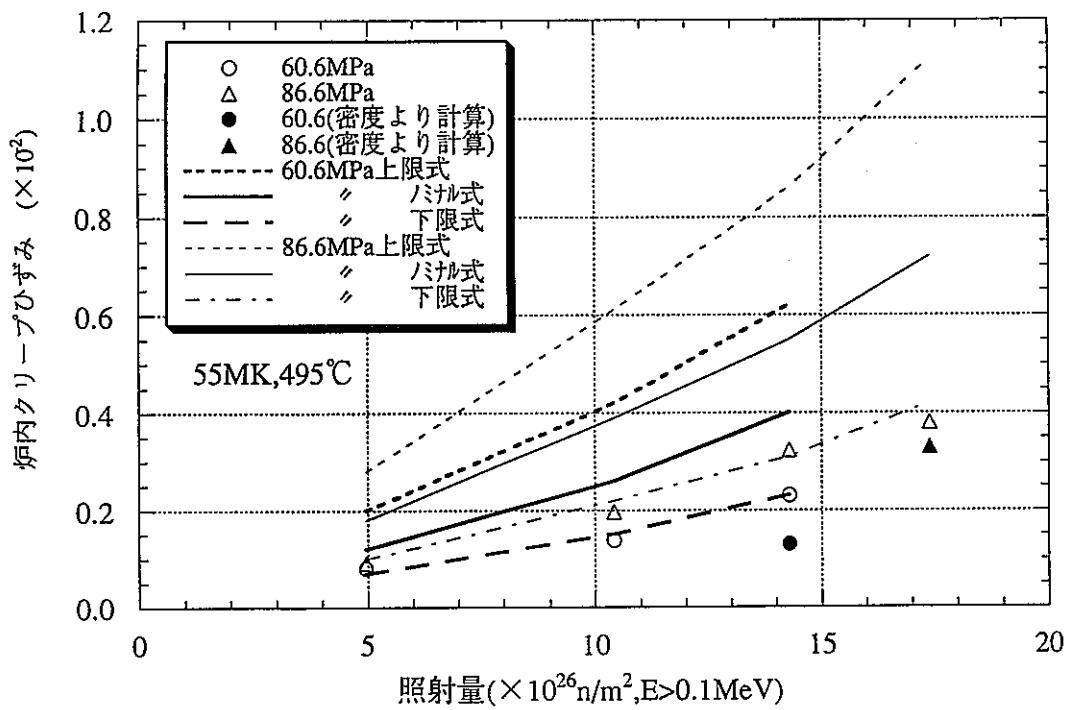


図11.13 炉内クリープひずみ計算値と実測値の比較 (55MK, 495°C)

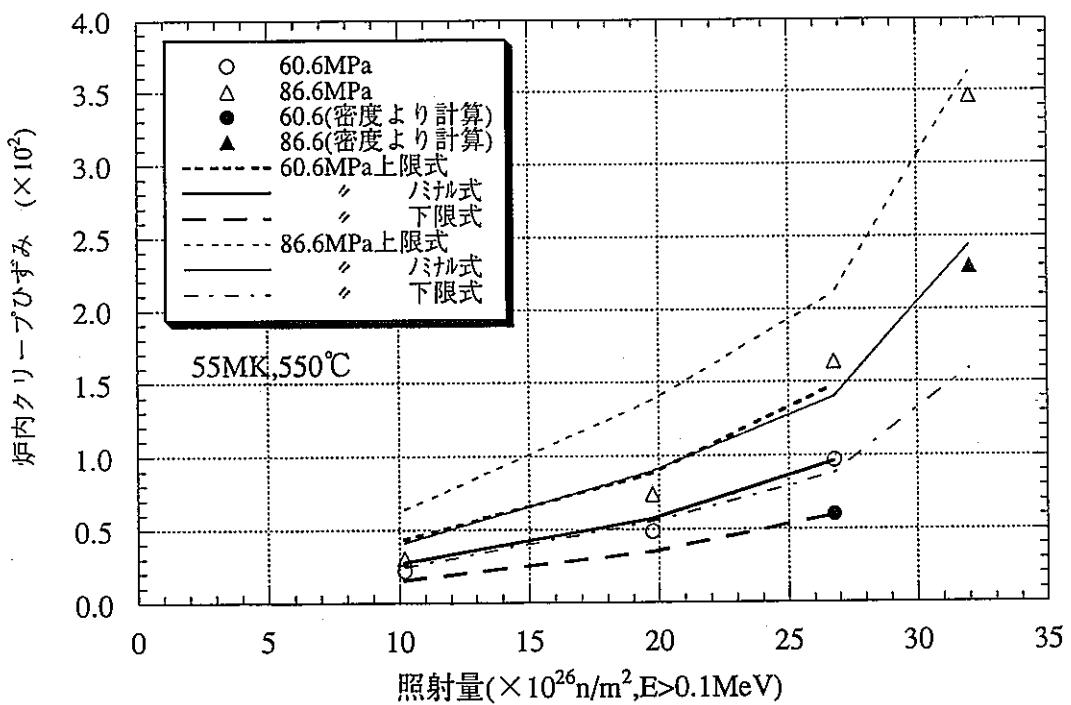


図11.14 炉内クリープひずみ計算値と実測値の比較 (55MK, 550°C)

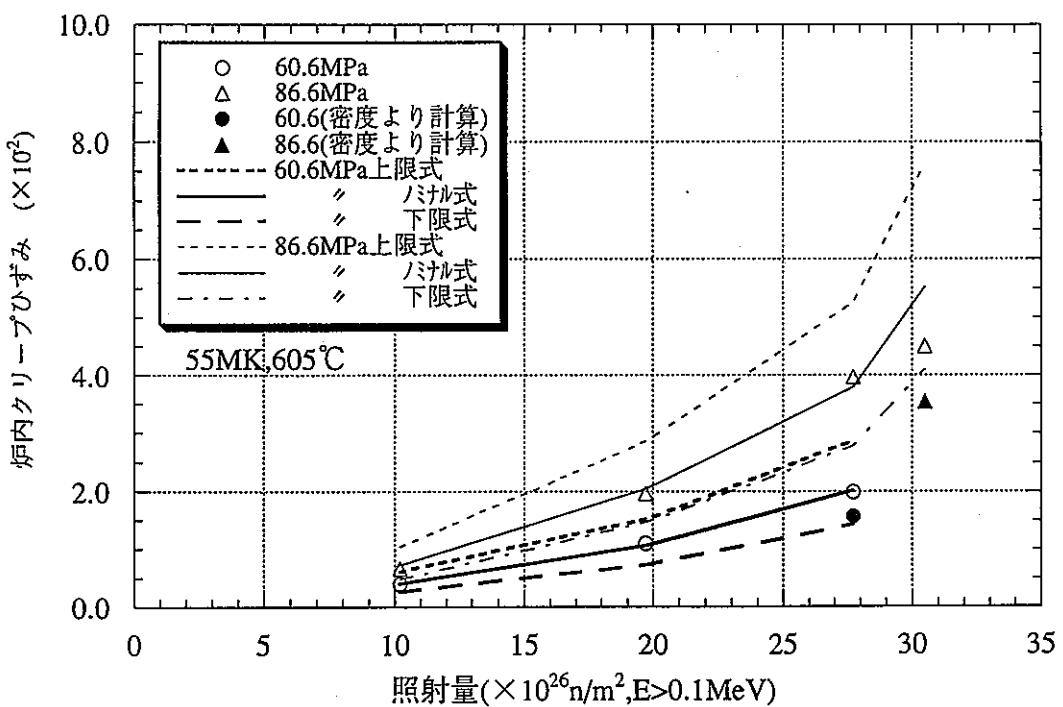


図11.15 炉内クリープひずみ計算値と実測値の比較 (55MK,605°C)

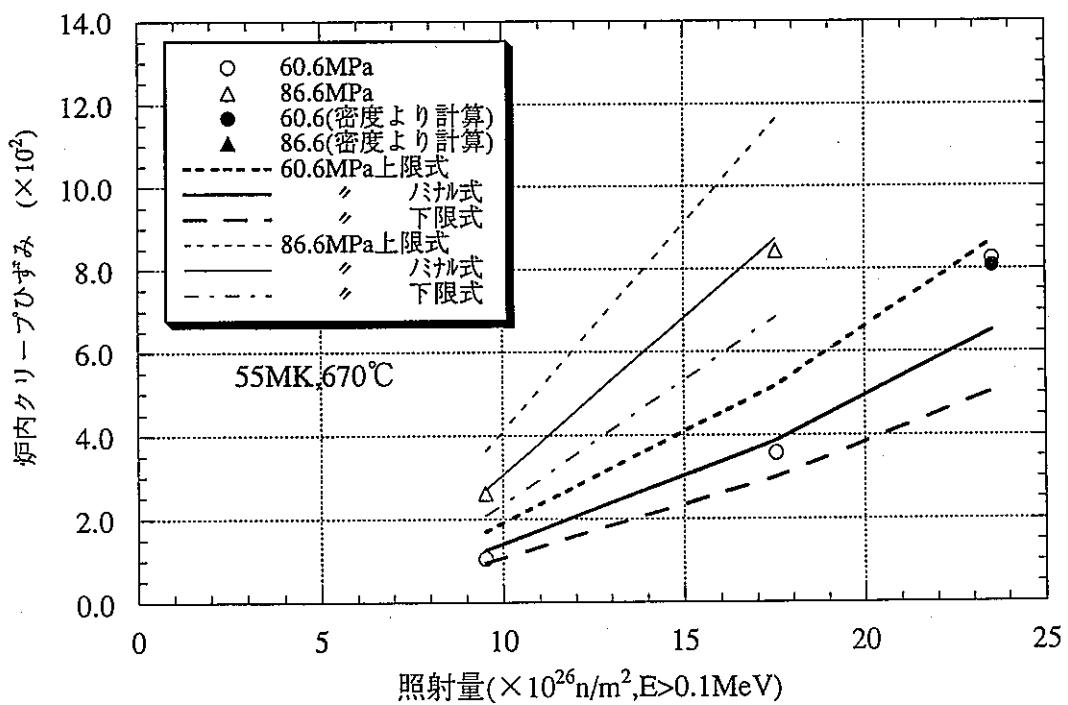


図11.16 炉内クリープひずみ計算値と実測値の比較 (55MK,670°C)

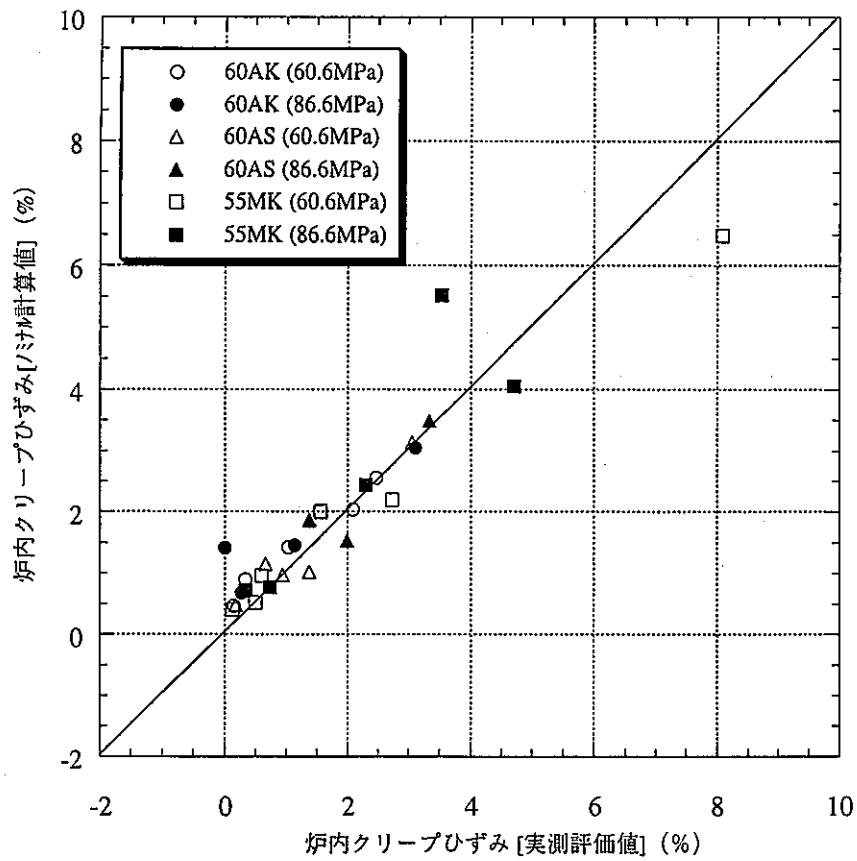


図12.1 実測評価値とバカル式計算値との比較（鋼種別）

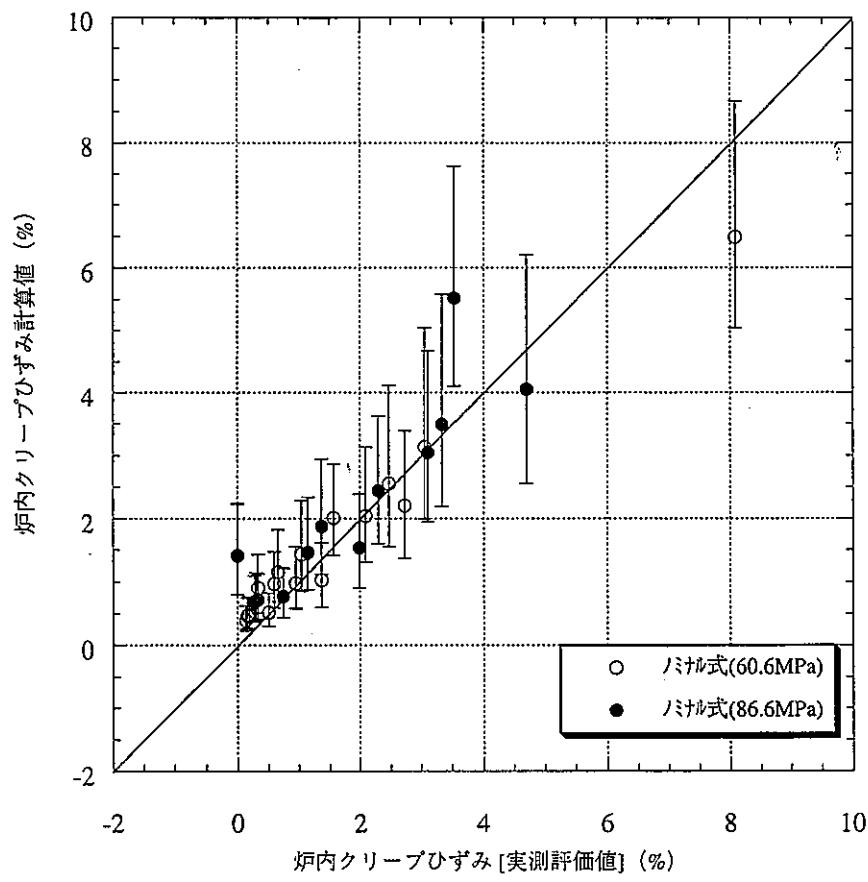


図12.2 実測評価値と計算値との比較

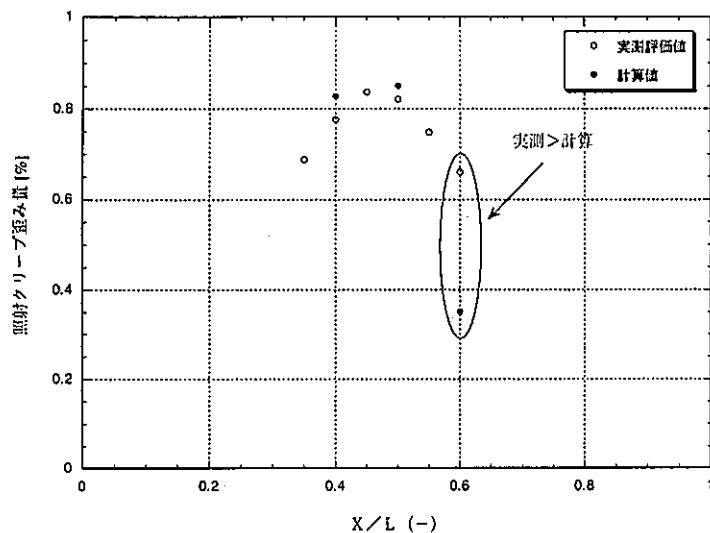


図13.1 照射クリープ歪みの実測評価値と計算値の比較  
(ピンID：187041)

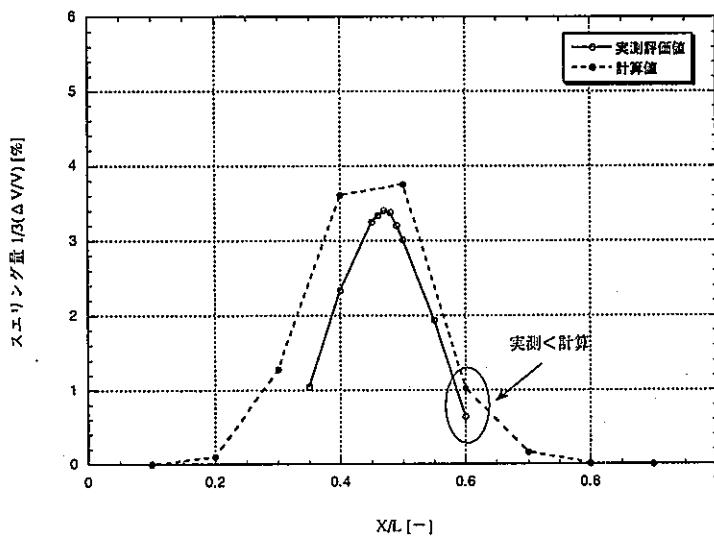


図13.2 スエリングの実測評価値と計算値の比較  
(ピンID：187041)

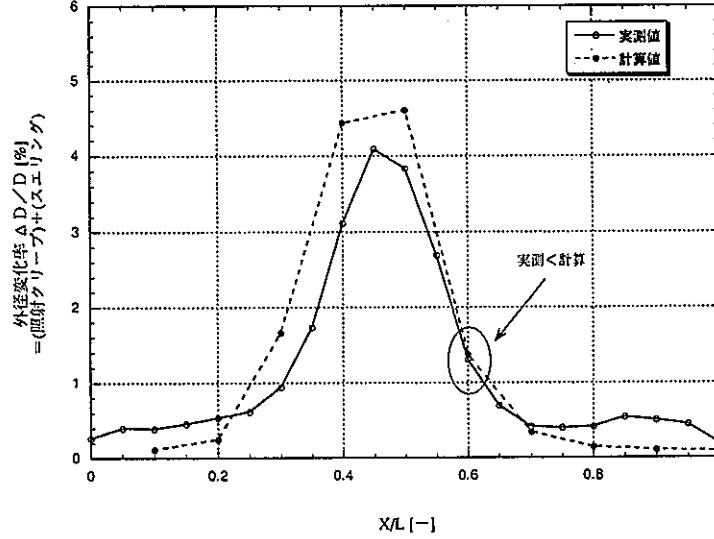


図13.3 外径変化率の実測値と計算値の比較  
(ピンID：187041)

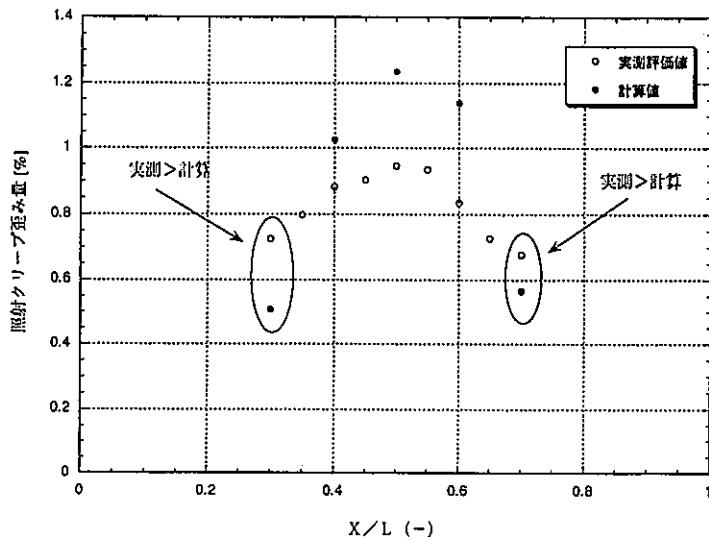


図14.1 照射クリープ歪みの実測評価値と計算値の比較  
(ピンID: 187104)

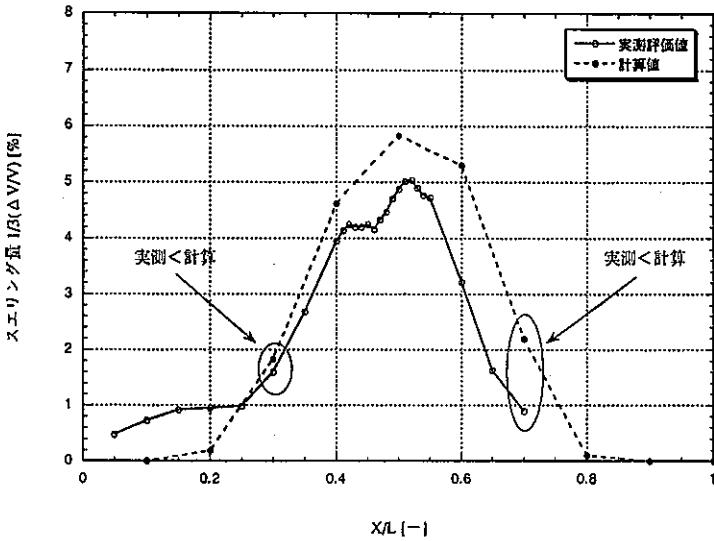


図14.2 スエリングの実測評価値と計算値の比較  
(ピンID: 187104)

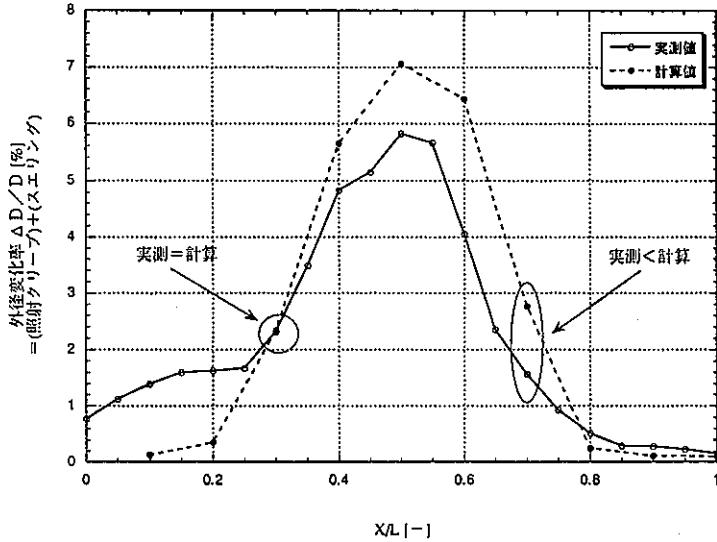


図14.3 外径変化率の実測値と計算値の比較  
(ピンID: 187104)