

MFA-1,2燃料照射データに基づく改良SUS316鋼、
および15Cr-20Ni鋼の照射クリープ特性の評価
(研究報告書)

2000年2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)
2000

MFA-1, 2 燃料照射データに基づく改良SUS316鋼、
および15Cr-20Ni鋼の照射クリープ特性の評価
(研究報告書)

上平 明弘* 鶴飼 重治*
水田 俊治*

要旨

サイクル機構が高速炉炉心材料として開発した改良SUS316鋼、および15Cr-20Ni鋼の照射クリープ特性については、MOTA材料照射データを用いて評価が行われ、照射クリープ歪み式が策定されている。しかし、海外炉心材料の評価報告において、材料照射データに基づいて作成された照射クリープ歪み式では燃料ピンの照射クリープ変形を適切に評価できない可能性が示されている。

そこで本報告では、改良SUS316鋼および15Cr-20Ni鋼それぞれを被覆管とするMFA-1, 2燃料照射データを用いて照射クリープ特性の評価を行い、さらに、MOTAデータに基づき策定された照射クリープ歪み式の燃料ピンへの適用性について検討を行った。得られた主な結果は次の通りである。

1. MFA-1, 2データに基づき算出した照射クリープ歪み式における照射クリープ係数「 B_0 」は $5.6 \sim 15.0 \times 10^{-6} [(x10^{26} \text{ n/m}^2, E > 0.1 \text{ MeV})^{-1} (\text{MPa})^{-1}]$ であり、MOTAデータから得られた「 B_0 」の値 $2.2 \sim 6.4 \times 10^{-6}$ に比べて大きい傾向にあるが、海外材料について報告されている値の範囲には十分含まれている。
2. MFA-1, 2データから照射クリープ歪み式におけるスエリング相互作用項の係数「 D 」を求めた結果、スエリング速度が増加するにつれて「 D 」は減少する傾向が見られた。MFA-1, 2データから求めた「 D 」の値の範囲は、MOTAデータから得られた「 D 」の値 $3.8 \sim 8.2 \times 10^{-3} [(\text{MPa})^{-1}]$ 、および海外材料の評価値を含んでいる。
3. MOTAデータに基づき策定された照射クリープ歪み式を用いてMFA-1, 2燃料ピンの照射クリープ変形を評価した結果、MOTAデータに基づく照射クリープ歪み式により燃料ピンの照射クリープ変形を概ね適切に評価できると考えられる。

*) 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Gr

Irradiation Creep of Modified 316 and 15Cr-20Ni base
Austenitic S.S. Fuel Pins (MFA-1, 2) Irradiated in FFTF

Akihiro UEHIRA* Shigeharu UKAI*
Shunji MIZUTA*

Abstract

Modified 316 and 15Cr-20Ni base austenitic Stainless Steels had been developed by Japan Nuclear Cycle Development Institute as the candidate materials for Monju and Demonstration fast breeder reactor. Previously, irradiation creep correlation of modified 316 and 15Cr-20Ni had been evaluated using pressurized tubes irradiated in FFTF/MOTA. On the other hand, for other austenitic S.S. developed abroad, it was reported that irradiation creep behavior of fuel pin could not be sufficiently described using results of pressurized tube experiments.

In this study, irradiation creep properties of modified 316 and 15Cr-20Ni fuel pins (MFA-1, 2) irradiated in FFTF were evaluated. And irradiation deformation of MFA-1, 2 fuel pins were estimated using the irradiation creep correlation based on MOTA data. The results are summarized as follows :

- a. Irradiation creep compliance B_0 calculated from MFA-1, 2 data are $5.6 \sim 15.0 \times 10^{-6}$ [$(\times 10^{26} \text{ n/m}^2, E > 0.1 \text{ MeV})^{-1} (\text{MPa})^{-1}$], which are larger than B_0 based on MOTA data of $2.2 \sim 6.4 \times 10^{-6}$, and are within the range of B_0 of other austenitic S.S. abroad.
- b. Creep-swelling coupling coefficient D derived from MFA-1, 2 data tend to decrease with increasing swelling rate. And the range of D based on MFA-1, 2 data include values calculated from MOTA data of $3.8 \sim 8.2 \times 10^{-3} [(\text{MPa})^{-1}]$ and for other austenitic S.S. abroad.
- c. As the result that irradiation creep deformation of MFA-1, 2 fuel pins could be appropriately estimated using the irradiation creep correlation derived from MOTA data, it is considered that the creep correlation based on MOTA data can be applied to estimation of fuel pin deformation.

*) Nuclear Fuel Research Group, System Engineering Technology Division, O-arai Engineering Center

目 次

1. はじめに	1
2. 海外炉心材料の評価報告に基づく燃料照射における 照射クリープ特性の検討課題	2
3. MFA-1,2 燃料照射ピンにおける照射クリープ歪み量の算出	
3.1 MFA-1,2 照射試験について	6
3.2 MFA-1,2 燃料ピンにおける照射クリープ歪み量の算出	8
4. MFA-1,2 燃料照射データに基づく照射クリープ歪み特性の評価	
4.1 照射クリープ歪み量とスエリング量の関係	11
4.2 照射クリープ係数「 B_0 」の評価	
4.2.1 燃料照射データに基づく「 B_0 」の算出方法	12
4.2.2 MFA1,2データに基づく照射クリープ係数「 B_0 」のMOTAデータおよび 海外材料の評価結果との比較	16
4.2.3 平均照射クリープ係数「 B_{ave} 」のスエリング速度および照射温度依存性	18
4.3 スエリング相互作用項の係数「 D 」の評価	
4.3.1 燃料照射データに基づく「 D 」の算出方法	19
4.3.2 MFA1,2データに基づく「 D 」のMOTAデータおよび海外材料の評価結果 との比較	20
4.3.3 「 D 」のスエリング速度、スエリング量、照射温度依存性	21
4.3.4 MOTAデータにおける「 D 」に対するスエリング量の影響の検討	22

5. MOTA材料照射データに基づく照射クリープ歪み評価式の 燃料ピンへの適用性の検討	
5.1 MFA-1燃料ピンの照射クリープ歪み量の推定	25
5.2 MFA-2燃料ピンの照射クリープ歪み量の推定	27
5.3 設計評価における照射クリープ歪み式とスエリング式の組み合わせ方の検討	29
6. おわりに	31
7. 謝辞	33
参考文献	34

表 目 次

表1	PNC316鋼の化学成分[wt.%]と製造条件	35
表2	15Cr-20Ni鋼の化学成分[wt.%]と製造条件	36
表3	PNC316鋼および15Cr-20Ni鋼のMOTAデータに基づく炉内クリープ歪み式	37
表4	MFA1,2データから求めた照射クリープ係数「 B_0 」とMOTAデータおよび 海外材料の評価値との比較	38

目 次

図2-1	Phenixで照射されたCW316Ti 鋼製燃料ピンの炉内クリープ歪みの実測値と材料照射データの評価結果に基づく推定値との比較	39
図2-2	EBR-IIで照射された20%CW316鋼製燃料ピンの外径変化率の実測値と材料照射データの評価結果に基づく推定値との比較	39
図2-3	Phenixで照射されたCW316Ti 鋼製ラッパ管の炉内クリープ歪みの実測値と材料照射データの評価結果に基づく推定値との比較	40
図2-4	CW316Ti鋼製内圧封入管照射データに基づくスエリング相互作用項の係数「D」のスエリング速度依存性	40
図3-1.1	MFA-1 燃料ピン配置図	41
図3-1.2	MFA-2 燃料ピン配置図	42
図3-2.1	MFA-1ピン外径変化プロフィールとスエリング量 (ピンNo.186019)	43
図3-2.2	MFA-1ピン外径変化プロフィールとスエリング量 (ピンNo.186023)	43
図3-2.3	MFA-1ピン外径変化プロフィールとスエリング量 (ピンNo.186091)	43
図3-2.4	MFA-1ピン外径変化プロフィールとスエリング量 (ピンNo.186101)	44
図3-2.5	MFA-1ピン外径変化プロフィールとスエリング量 (ピンNo.186102)	44
図3-2.6	MFA-1ピン外径変化プロフィールとスエリング量 (ピンNo.186104)	44
図3-2.7	MFA-2ピン外径変化プロフィールとスエリング量 (ピンNo.187017)	45

図3-2.8	MFA-2ピン外径変化プロフィールとスエリング量 (ピンNo.187041)	45
図3-2.9	MFA-2ピン外径変化プロフィールとスエリング量 (ピンNo.187074)	45
図3-2.10	MFA-2ピン外径変化プロフィールとスエリング量 (ピンNo.187104)	46
図3-2.11	MFA-2ピン外径変化プロフィールとスエリング量 (ピンNo.187164)	46
図3-3	炉内熱クリープ歪み量の算出例	47
図3-4	燃料ピンのある軸方向位置での照射温度履歴の例	47
図3-5	燃料ピンのある軸方向位置でのピン内圧履歴の例	47
図3-6.1	MFA-1ピンの炉内クリープ歪み量における炉内熱クリープの寄与の推定	48
図3-6.2	MFA-2ピンの炉内クリープ歪み量における炉内熱クリープの寄与の推定	48
図4-1.1	MFA-1ピンにおける外径変化率とスエリングの関係	49
図4-1.2	MFA-2ピンにおける外径変化率とスエリングの関係	49
図4-2.1	MFA-1ピンにおける外径変化率とスエリングの関係 (ピンNo.186019)	50
図4-2.2	MFA-1ピンにおける外径変化率とスエリングの関係 (ピンNo.186023)	50
図4-2.3	MFA-1ピンにおける外径変化率とスエリングの関係 (ピンNo.186091)	50
図4-2.4	MFA-1ピンにおける外径変化率とスエリングの関係 (ピンNo.186101)	51
図4-2.5	MFA-1ピンにおける外径変化率とスエリングの関係 (ピンNo.186102)	51

図4-2.6	MFA-1ピンにおける外径変化率とスエリングの関係 (ピンNo.186104)	51
図4-2.7	MFA-2ピンにおける外径変化率とスエリングの関係 (ピンNo.187017)	52
図4-2.8	MFA-2ピンにおける外径変化率とスエリングの関係 (ピンNo.187041)	52
図4-2.9	MFA-2ピンにおける外径変化率とスエリングの関係 (ピンNo.187074)	52
図4-2.10	MFA-2ピンにおける外径変化率とスエリングの関係 (ピンNo.187104)	53
図4-2.11	MFA-2ピンにおける外径変化率とスエリングの関係 (ピンNo.187164)	53
図4-3.1	MFA-1ピンにおける照射クリープ歪みとスエリングの関係	54
図4-3.2	MFA-2ピンにおける照射クリープ歪みとスエリングの関係	54
図4-4.1	MFA-1ピンにおける照射クリープ歪みとスエリングの関係 (ピンNo.186019)	55
図4-4.2	MFA-1ピンにおける照射クリープ歪みとスエリングの関係 (ピンNo.186023)	55
図4-4.3	MFA-1ピンにおける照射クリープ歪みとスエリングの関係 (ピンNo.186091)	55
図4-4.4	MFA-1ピンにおける照射クリープ歪みとスエリングの関係 (ピンNo.186101)	56
図4-4.5	MFA-1ピンにおける照射クリープ歪みとスエリングの関係 (ピンNo.186102)	56
図4-4.6	MFA-1ピンにおける照射クリープ歪みとスエリングの関係 (ピンNo.186104)	56
図4-4.7	MFA-2ピンにおける照射クリープ歪みとスエリングの関係 (ピンNo.187017)	57

図4-4.8	MFA-2ピンにおける照射クリープ歪みとスエリングの関係 (ピンNo.187041)	57
図4-4.9	MFA-2ピンにおける照射クリープ歪みとスエリングの関係 (ピンNo.187074)	57
図4-4.10	MFA-2ピンにおける照射クリープ歪みとスエリングの関係 (ピンNo.187104)	58
図4-4.11	MFA-2ピンにおける照射クリープ歪みとスエリングの関係 (ピンNo.187164)	58
図4-5	応力と中性子照射量の関係の算出例	59
図4-6	照射末期のスエリング速度の算出例	59
図4-7	PNC316、15Cr-20Ni鋼それぞれのスエリングノミナル式	60
図4-8	照射クリープ係数「 B_0 」の算出例	60
図4-9	MOTAデータからの照射クリープ係数「 B_0 」の算出における 照射クリープ歪み速度の算出例	61
図4-10.1	MFA-1データにおける平均照射クリープ係数「 B_{ave} 」と スエリング速度との関係	62
図4-10.2	MFA-2データにおける平均照射クリープ係数「 B_{ave} 」と スエリング速度との関係	62
図4-11.1	MFA-1データにおける平均照射クリープ係数「 B_{ave} 」と スエリング速度との関係 (ピンNo.186019の場合)	63
図4-11.2	MFA-1データにおける平均照射クリープ係数「 B_{ave} 」と スエリング速度との関係 (ピンNo.186023の場合)	63
図4-11.3	MFA-1データにおける平均照射クリープ係数「 B_{ave} 」と スエリング速度との関係 (ピンNo.186091の場合)	63
図4-11.4	MFA-1データにおける平均照射クリープ係数「 B_{ave} 」 スエリング速度との関係 (ピンNo.186101の場合)	64
図4-11.5	MFA-1データにおける平均照射クリープ係数「 B_{ave} 」と スエリング速度との関係 (ピンNo.186102の場合)	64

図4-11.6	MFA-1データにおける平均照射クリープ係数「Bave」とスエリング速度との関係（ピンNo.186104の場合）	64
図4-11.7	MFA-2データにおける平均照射クリープ係数「Bave」とスエリング速度との関係（ピンNo.187017の場合）	65
図4-11.8	MFA-2データにおける平均照射クリープ係数「Bave」とスエリング速度との関係（ピンNo.187041の場合）	65
図4-11.9	MFA-2データにおける平均照射クリープ係数「Bave」とスエリング速度との関係（ピンNo.187074の場合）	65
図4-11.10	MFA-2データにおける平均照射クリープ係数「Bave」とスエリング速度との関係（ピンNo.187104の場合）	66
図4-11.11	MFA-2データにおける平均照射クリープ係数「Bave」とスエリング速度との関係（ピンNo.187164の場合）	66
図4-12.1	MFA-1データにおける平均照射クリープ係数「Bave」と照射温度との関係	67
図4-12.2	MFA-2データにおける平均照射クリープ係数「Bave」と照射温度との関係	67
図4-13.1	MFA-1データにおける平均照射クリープ係数「Bave」と照射温度との関係（ピンNo.186019の場合）	68
図4-13.2	MFA-1データにおける平均照射クリープ係数「Bave」と照射温度との関係（ピンNo.186023の場合）	68
図4-13.3	MFA-1データにおける平均照射クリープ係数「Bave」と照射温度との関係（ピンNo.186091の場合）	68
図4-13.4	MFA-1データにおける平均照射クリープ係数「Bave」と照射温度との関係（ピンNo.186101の場合）	69
図4-13.5	MFA-1データにおける平均照射クリープ係数「Bave」と照射温度との関係（ピンNo.186102の場合）	69

図4-13.6	MFA-1データにおける平均照射クリープ係数「Bave」と 照射温度との関係（ピンNo.186104の場合）	69
図4-13.7	MFA-2データにおける平均照射クリープ係数「Bave」と 照射温度との関係（ピンNo.187017の場合）	70
図4-13.8	MFA-2データにおける平均照射クリープ係数「Bave」と 照射温度との関係（ピンNo.187041の場合）	70
図4-13.9	MFA-2データにおける平均照射クリープ係数「Bave」と 照射温度との関係（ピンNo.187074の場合）	70
図4-13.10	MFA-2データにおける平均照射クリープ係数「Bave」と 照射温度との関係（ピンNo.187104の場合）	71
図4-13.11	MFA-2データにおける平均照射クリープ係数「Bave」と 照射温度との関係（ピンNo.187164の場合）	71
図4-14	「D」算出式における積分項の中性子照射量とスエリングの 関係からの算出例	72
図4-15.1	MFA-1データに基づくスエリング相互作用項の係数「D」とMOTAデータ および海外材料の評価値との比較	73
図4-15.2	MFA-2データに基づくスエリング相互作用項の係数「D」とMOTAデータ および海外材料の評価値との比較	73
図4-16.1	MFA-1データにおけるスエリング相互作用項の係数「D」と スエリング速度との関係	74
図4-16.2	MFA-2データにおけるスエリング相互作用項の係数「D」と スエリング速度との関係	74
図4-17.1	MFA-1データにおけるスエリング相互作用項の係数「D」と スエリング速度との関係（ピンNo.186019の場合）	75
図4-17.2	MFA-1データにおけるスエリング相互作用項の係数「D」と スエリング速度との関係（ピンNo.186023の場合）	75
図4-17.3	MFA-1データにおけるスエリング相互作用項の係数「D」と スエリング速度との関係（ピンNo.186091の場合）	75

図4-17.4	MFA-1データにおけるスエリング相互作用項の係数「D」とスエリング速度との関係（ピンNo.186101の場合）	76
図4-17.5	MFA-1データにおけるスエリング相互作用項の係数「D」とスエリング速度との関係（ピンNo.186102の場合）	76
図4-17.6	MFA-1データにおけるスエリング相互作用項の係数「D」とスエリング速度との関係（ピンNo.186104の場合）	76
図4-17.7	MFA-2データにおけるスエリング相互作用項の係数「D」とスエリング速度との関係（ピンNo.187017の場合）	77
図4-17.8	MFA-2データにおけるスエリング相互作用項の係数「D」とスエリング速度との関係（ピンNo.187041の場合）	77
図4-17.9	MFA-2データにおけるスエリング相互作用項の係数「D」とスエリング速度との関係（ピンNo.187074の場合）	77
図4-17.10	MFA-2データにおけるスエリング相互作用項の係数「D」とスエリング速度との関係（ピンNo.187104の場合）	78
図4-17.11	MFA-2データにおけるスエリング相互作用項の係数「D」とスエリング速度との関係（ピンNo.187164の場合）	78
図4-18.1	MFA-1データにおけるスエリング相互作用項の係数「D」とスエリング歪みとの関係	79
図4-18.2	MFA-2データにおけるスエリング相互作用項の係数「D」とスエリング歪みとの関係	79
図4-19.1	MFA-1データにおけるスエリング相互作用項の係数「D」とスエリング歪みとの関係（ピンNo.186019の場合）	80
図4-19.2	MFA-1データにおけるスエリング相互作用項の係数「D」とスエリング歪みとの関係（ピンNo.186023の場合）	80
図4-19.3	MFA-1データにおけるスエリング相互作用項の係数「D」とスエリング歪みとの関係（ピンNo.186091の場合）	80
図4-19.4	MFA-1データにおけるスエリング相互作用項の係数「D」とスエリング歪みとの関係（ピンNo.186101の場合）	81

図4-19.5	MFA-1データにおけるスエリング相互作用項の係数「D」とスエリング歪みとの関係（ピンNo.186102の場合）	81
図4-19.6	MFA-1データにおけるスエリング相互作用項の係数「D」とスエリング歪みとの関係（ピンNo.186104の場合）	81
図4-19.7	MFA-2データにおけるスエリング相互作用項の係数「D」とスエリング歪みとの関係（ピンNo.187017の場合）	82
図4-19.8	MFA-2データにおけるスエリング相互作用項の係数「D」とスエリング歪みとの関係（ピンNo.187041の場合）	82
図4-19.9	MFA-2データにおけるスエリング相互作用項の係数「D」とスエリング歪みとの関係（ピンNo.187074の場合）	82
図4-19.10	MFA-2データにおけるスエリング相互作用項の係数「D」とスエリング歪みとの関係（ピンNo.187104の場合）	83
図4-19.11	MFA-2データにおけるスエリング相互作用項の係数「D」とスエリング歪みとの関係（ピンNo.187164の場合）	83
図4-20.1	MFA-1データにおけるスエリング相互作用項の係数「D」と照射温度との関係	84
図4-20.2	MFA-2データにおけるスエリング相互作用項の係数「D」と照射温度との関係	84
図4-21.1	MFA-1データにおけるスエリング相互作用項の係数「D」と照射温度との関係（ピンNo.186019の場合）	85
図4-21.2	MFA-1データにおけるスエリング相互作用項の係数「D」と照射温度との関係（ピンNo.186023の場合）	85
図4-21.3	MFA-1データにおけるスエリング相互作用項の係数「D」と照射温度との関係（ピンNo.186091の場合）	85
図4-21.4	MFA-1データにおけるスエリング相互作用項の係数「D」と照射温度との関係（ピンNo.186101の場合）	86
図4-21.5	MFA-1データにおけるスエリング相互作用項の係数「D」と照射温度との関係（ピンNo.186102の場合）	86

図4-21.6	MFA-1データにおけるスエリング相互作用項の係数「D」と 照射温度との関係（ピンNo.186104の場合）	86
図4-21.7	MFA-2データにおけるスエリング相互作用項の係数「D」と 照射温度との関係（ピンNo.187017の場合）	87
図4-21.8	MFA-2データにおけるスエリング相互作用項の係数「D」と 照射温度との関係（ピンNo.187041の場合）	87
図4-21.9	MFA-2データにおけるスエリング相互作用項の係数「D」と 照射温度との関係（ピンNo.187074の場合）	87
図4-21.10	MFA-2データにおけるスエリング相互作用項の係数「D」と 照射温度との関係（ピンNo.187104の場合）	88
図4-21.11	MFA-2データにおけるスエリング相互作用項の係数「D」と 照射温度との関係（ピンNo.187164の場合）	88
図4-22.1	MOTA材料照射データにおける中性子照射量と外径変化率の関係 (55MK：405℃)	89
図4-22.2	MOTA材料照射データにおける中性子照射量と外径変化率の関係 (60AK：405℃)	89
図4-23.1	MOTA材料照射データにおける中性子照射量と照射クリープ歪み量の関係 (55MK：405℃)	90
図4-23.2	MOTA材料照射データにおける中性子照射量と照射クリープ歪み量の関係 (60AK：405℃)	90
図4-24.1	MOTAデータにおける照射量と照射クリープ歪み量の関係の定式化 (55MK：405℃)	91
図4-24.2	MOTAデータにおける照射量と照射クリープ歪み量の関係の定式化 (60AK：405℃)	91
図4-25.1	MOTAデータにおける照射量とスエリングの関係の定式化 (55MK：405℃)	92
図4-25.2	MOTAデータにおける照射量とスエリングの関係の定式化 (60AK：405℃)	92

図4-26.1	MOTAデータにおけるスエリング相互作用項の係数「D」とスエリング量との関係 (55MK:405℃)	93
図4-26.2	MOTAデータにおけるスエリング相互作用項の係数「D」とスエリング量との関係 (60AK:405℃)	93
図5-1.1	MFA-1における照射クリープ歪み実測評価値とMOTAデータに基づく評価式による計算値との比較 (上限式の場合)	94
図5-1.2	MFA-1における照射クリープ歪み実測評価値とMOTAデータに基づく評価式による計算値との比較 (ノミナル式の場合)	94
図5-1.3	MFA-1における照射クリープ歪み実測評価値とMOTAデータに基づく評価式による計算値との比較 (下限式の場合)	94
図5-2.1	MFA-1における照射クリープ歪み実測評価値とMOTAデータに基づく評価式による計算値との比較 (上限式の場合:ピンNo.186019)	95
図5-2.2	MFA-1における照射クリープ歪み実測評価値とMOTAデータに基づく評価式による計算値との比較 (上限式の場合:ピンNo.186023)	95
図5-2.3	MFA-1における照射クリープ歪み実測評価値とMOTAデータに基づく評価式による計算値との比較 (上限式の場合:ピンNo.186091)	95
図5-2.4	MFA-1における照射クリープ歪み実測評価値とMOTAデータに基づく評価式による計算値との比較 (上限式の場合:ピンNo.186101)	96
図5-2.5	MFA-1における照射クリープ歪み実測評価値とMOTAデータに基づく評価式による計算値との比較 (上限式の場合:ピンNo.186102)	96
図5-2.6	MFA-1における照射クリープ歪み実測評価値とMOTAデータに基づく評価式による計算値との比較 (上限式の場合:ピンNo.186104)	96
図5-3.1	MFA-1における外径変化率の実測値とMOTAデータに基づく照射クリープ歪み式を用いた計算値との比較 (上限式の場合:ピンNo.186019)	97

図5-3.2	MFA-1における外径変化率の実測値とMOTAデータに基づく照射クリープ歪み式を用いた計算値との比較（上限式の場合：ピンNo.186023）	97
図5-3.3	MFA-1における外径変化率の実測値とMOTAデータに基づく照射クリープ歪み式を用いた計算値との比較（上限式の場合：ピンNo.186091）	97
図5-3.4	MFA-1における外径変化率の実測値とMOTAデータに基づく照射クリープ歪み式を用いた計算値との比較（上限式の場合：ピンNo.186101）	98
図5-3.5	MFA-1における外径変化率の実測値とMOTAデータに基づく照射クリープ歪み式を用いた計算値との比較（上限式の場合：ピンNo.186102）	98
図5-3.6	MFA-1における外径変化率の実測値とMOTAデータに基づく照射クリープ歪み式を用いた計算値との比較（上限式の場合：ピンNo.186104）	98
図5-4.1	MFA-1における照射クリープ歪み実測評価値とMOTAデータに基づく評価式による計算値との比較（ノミナル式の場合：ピンNo.186019）	99
図5-4.2	MFA-1における照射クリープ歪み実測評価値とMOTAデータに基づく評価式による計算値との比較（ノミナル式の場合：ピンNo.186023）	99
図5-4.3	MFA-1における照射クリープ歪み実測評価値とMOTAデータに基づく評価式による計算値との比較（ノミナル式の場合：ピンNo.186091）	99
図5-4.4	MFA-1における照射クリープ歪み実測評価値とMOTAデータに基づく評価式による計算値との比較（ノミナル式の場合：ピンNo.186101）	100

図5-4.5	MFA-1における照射クリーブ歪み実測評価値とMOTAデータに基づく評価式による計算値との比較（ノミナル式の場合：ピンNo.186102）	100
図5-4.6	MFA-1における照射クリーブ歪み実測評価値とMOTAデータに基づく評価式による計算値との比較（ノミナル式の場合：ピンNo.186104）	100
図5-5.1	MFA-1における外径変化率の実測値とMOTAデータに基づく照射クリーブ歪み式を用いた計算値との比較（ノミナル式の場合：ピンNo.186019）	101
図5-5.2	MFA-1における外径変化率の実測値とMOTAデータに基づく照射クリーブ歪み式を用いた計算値との比較（ノミナル式の場合：ピンNo.186023）	101
図5-5.3	MFA-1における外径変化率の実測値とMOTAデータに基づく照射クリーブ歪み式を用いた計算値との比較（ノミナル式の場合：ピンNo.186091）	101
図5-5.4	MFA-1における外径変化率の実測値とMOTAデータに基づく照射クリーブ歪み式を用いた計算値との比較（ノミナル式の場合：ピンNo.186101）	102
図5-5.5	MFA-1における外径変化率の実測値とMOTAデータに基づく照射クリーブ歪み式を用いた計算値との比較（ノミナル式の場合：ピンNo.186102）	102
図5-5.6	MFA-1における外径変化率の実測値とMOTAデータに基づく照射クリーブ歪み式を用いた計算値との比較（ノミナル式の場合：ピンNo.186104）	102
図5-6.1	MFA-1における照射クリーブ歪み実測評価値とMOTAデータに基づく評価式による計算値との比較（下限式の場合：ピンNo.186019）	103

図5-6.2	MFA-1における照射クリーブ歪み実測評価値とMOTAデータに基づく評価式による計算値との比較（下限式の場合：ピンNo.186023）	103
図5-6.3	MFA-1における照射クリーブ歪み実測評価値とMOTAデータに基づく評価式による計算値との比較（下限式の場合：ピンNo.186091）	103
図5-6.4	MFA-1における照射クリーブ歪み実測評価値とMOTAデータに基づく評価式による計算値との比較（下限式の場合：ピンNo.186101）	104
図5-6.5	MFA-1における照射クリーブ歪み実測評価値とMOTAデータに基づく評価式による計算値との比較（下限式の場合：ピンNo.186102）	104
図5-6.6	MFA-1における照射クリーブ歪み実測評価値とMOTAデータに基づく評価式による計算値との比較（下限式の場合：ピンNo.186104）	104
図5-7.1	MFA-1における外径変化率の実測値とMOTAデータに基づく照射クリーブ歪み式を用いた計算値との比較（下限式の場合：ピンNo.186019）	105
図5-7.2	MFA-1における外径変化率の実測値とMOTAデータに基づく照射クリーブ歪み式を用いた計算値との比較（下限式の場合：ピンNo.186023）	105
図5-7.3	MFA-1における外径変化率の実測値とMOTAデータに基づく照射クリーブ歪み式を用いた計算値との比較（下限式の場合：ピンNo.186091）	105
図5-7.4	MFA-1における外径変化率の実測値とMOTAデータに基づく照射クリーブ歪み式を用いた計算値との比較（下限式の場合：ピンNo.186101）	106

図5-7.5	MFA-1における外径変化率の実測値とMOTAデータに基づく照射クリープ歪み式を用いた計算値との比較（下限式の場合：ピンNo.186102）	106
図5-7.6	MFA-1における外径変化率の実測値とMOTAデータに基づく照射クリープ歪み式を用いた計算値との比較（下限式の場合：ピンNo.186104）	106
図5-8.1	MFA-2における照射クリープ歪み実測評価値とMOTAデータに基づく評価式による計算値との比較（上限式の場合）	107
図5-8.2	MFA-2における照射クリープ歪み実測評価値とMOTAデータに基づく評価式による計算値との比較（ノミナル式の場合）	107
図5-8.3	MFA-2における照射クリープ歪み実測評価値とMOTAデータに基づく評価式による計算値との比較（下限式の場合）	107
図5-9.1	MFA-2における照射クリープ歪み実測評価値とMOTAデータに基づく評価式による計算値との比較（上限式の場合：ピンNo.187017）	108
図5-9.2	MFA-2における照射クリープ歪み実測評価値とMOTAデータに基づく評価式による計算値との比較（上限式の場合：ピンNo.187041）	108
図5-9.3	MFA-2における照射クリープ歪み実測評価値とMOTAデータに基づく評価式による計算値との比較（上限式の場合：ピンNo.187074）	108
図5-9.4	MFA-2における照射クリープ歪み実測評価値とMOTAデータに基づく評価式による計算値との比較（上限式の場合：ピンNo.187104）	109
図5-9.5	MFA-2における照射クリープ歪み実測評価値とMOTAデータに基づく評価式による計算値との比較（上限式の場合：ピンNo.187164）	109

図5-10.1	MFA-2における外径変化率の実測値とMOTAデータに基づく照射クリーブ歪み式を用いた計算値との比較（上限式の場合：ピンNo.187017）	110
図5-10.2	MFA-2における外径変化率の実測値とMOTAデータに基づく照射クリーブ歪み式を用いた計算値との比較（上限式の場合：ピンNo.187041）	110
図5-10.3	MFA-2における外径変化率の実測値とMOTAデータに基づく照射クリーブ歪み式を用いた計算値との比較（上限式の場合：ピンNo.187074）	110
図5-10.4	MFA-2における外径変化率の実測値とMOTAデータに基づく照射クリーブ歪み式を用いた計算値との比較（上限式の場合：ピンNo.187104）	111
図5-10.5	MFA-2における外径変化率の実測値とMOTAデータに基づく照射クリーブ歪み式を用いた計算値との比較（上限式の場合：ピンNo.187164）	111
図5-11.1	MFA-2における照射クリーブ歪み実測評価値とMOTAデータに基づく評価式による計算値との比較（ノミナル式の場合：ピンNo.187017）	112
図5-11.2	MFA-2における照射クリーブ歪み実測評価値とMOTAデータに基づく評価式による計算値との比較（ノミナル式の場合：ピンNo.187041）	112
図5-11.3	MFA-2における照射クリーブ歪み実測評価値とMOTAデータに基づく評価式による計算値との比較（ノミナル式の場合：ピンNo.187074）	112
図5-11.4	MFA-2における照射クリーブ歪み実測評価値とMOTAデータに基づく評価式による計算値との比較（ノミナル式の場合：ピンNo.187104）	113

図5-11.5	MFA-2における照射クリープ歪み実測評価値とMOTAデータに基づく評価式による計算値との比較（ノミナル式の場合：ピンNo.187164）	113
図5-12.1	MFA-2における外径変化率の実測値とMOTAデータに基づく照射クリープ歪み式を用いた計算値との比較（ノミナル式の場合：ピンNo.187017）	114
図5-12.2	MFA-2における外径変化率の実測値とMOTAデータに基づく照射クリープ歪み式を用いた計算値との比較（ノミナル式の場合：ピンNo.187041）	114
図5-12.3	MFA-2における外径変化率の実測値とMOTAデータに基づく照射クリープ歪み式を用いた計算値との比較（ノミナル式の場合：ピンNo.187074）	114
図5-12.4	MFA-2における外径変化率の実測値とMOTAデータに基づく照射クリープ歪み式を用いた計算値との比較（ノミナル式の場合：ピンNo.187104）	115
図5-12.5	MFA-2における外径変化率の実測値とMOTAデータに基づく照射クリープ歪み式を用いた計算値との比較（ノミナル式の場合：ピンNo.187164）	115
図5-13.1	MFA-2における照射クリープ歪み実測評価値とMOTAデータに基づく評価式による計算値との比較（下限式の場合：ピンNo.187017）	116
図5-13.2	MFA-2における照射クリープ歪み実測評価値とMOTAデータに基づく評価式による計算値との比較（下限式の場合：ピンNo.187041）	116
図5-13.3	MFA-2における照射クリープ歪み実測評価値とMOTAデータに基づく評価式による計算値との比較（下限式の場合：ピンNo.187074）	116

図5-13.4	MFA-2における照射クリープ歪み実測評価値とMOTAデータに基づく評価式による計算値との比較（下限式の場合：ピンNo.187104）	117
図5-13.5	MFA-2における照射クリープ歪み実測評価値とMOTAデータに基づく評価式による計算値との比較（下限式の場合：ピンNo.187164）	117
図5-14.1	MFA-2における外径変化率の実測値とMOTAデータに基づく照射クリープ歪み式を用いた計算値との比較（下限式の場合：ピンNo.187017）	118
図5-14.2	MFA-2における外径変化率の実測値とMOTAデータに基づく照射クリープ歪み式を用いた計算値との比較（下限式の場合：ピンNo.187041）	118
図5-14.3	MFA-2における外径変化率の実測値とMOTAデータに基づく照射クリープ歪み式を用いた計算値との比較（下限式の場合：ピンNo.187074）	118
図5-14.4	MFA-2における外径変化率の実測値とMOTAデータに基づく照射クリープ歪み式を用いた計算値との比較（下限式の場合：ピンNo.187104）	119
図5-14.5	MFA-2における外径変化率の実測値とMOTAデータに基づく照射クリープ歪み式を用いた計算値との比較（下限式の場合：ピンNo.187164）	119
図5-15.1	PNC316鋼のスエリング上限式	120
図5-15.2	60MS1(低冷間加工材)鋼のスエリング上限式	120
図5-15.3	15Cr-20Ni鋼のスエリング上限式	120
図5-16.1	MFA-1ピンにおける外径変化率の実測値と照射クリープ歪みノミナル式とスエリング上限式を用いた計算値との比較（ピンNo.186019）	121

図5-16.2	MFA-1ピンにおける外径変化率の実測値と照射クリープ歪みノミナル式とスエリング上限式を用いた計算値との比較 (ピンNo.186023)	121
図5-16.3	MFA-1ピンにおける外径変化率の実測値と照射クリープ歪みノミナル式とスエリング上限式を用いた計算値との比較 (ピンNo.186091)	121
図5-16.4	MFA-1ピンにおける外径変化率の実測値と照射クリープ歪みノミナル式とスエリング上限式を用いた計算値との比較 (ピンNo.186101)	122
図5-16.5	MFA-1ピンにおける外径変化率の実測値と照射クリープ歪みノミナル式とスエリング上限式を用いた計算値との比較 (ピンNo.186102)	122
図5-16.6	MFA-1ピンにおける外径変化率の実測値と照射クリープ歪みノミナル式とスエリング上限式を用いた計算値との比較 (ピンNo.186104)	122
図5-16.7	MFA-2ピンにおける外径変化率の実測値と照射クリープ歪みノミナル式とスエリング上限式を用いた計算値との比較 (ピンNo.187017)	123
図5-16.8	MFA-2ピンにおける外径変化率の実測値と照射クリープ歪みノミナル式とスエリング上限式を用いた計算値との比較 (ピンNo.187041)	123
図5-16.9	MFA-2ピンにおける外径変化率の実測値と照射クリープ歪みノミナル式とスエリング上限式を用いた計算値との比較 (ピンNo.187074)	123
図5-16.10	MFA-2ピンにおける外径変化率の実測値と照射クリープ歪みノミナル式とスエリング上限式を用いた計算値との比較 (ピンNo.187104)	124

図5-16.11	MFA-2ピンにおける外径変化率の実測値と照射クリープ歪み上限式とスエリング上限式を用いた計算値との比較 (ピンNo.187164)	124
図5-17.1	MFA-2ピンにおける外径変化率の実測値と照射クリープ歪みノミナル式とスエリング上限式を用いた計算値との比較 (ピンNo.187017)	125
図5-17.2	MFA-2ピンにおける外径変化率の実測値と照射クリープ歪みノミナル式とスエリング上限式を用いた計算値との比較 (ピンNo.187041)	125
図5-17.3	MFA-2ピンにおける外径変化率の実測値と照射クリープ歪みノミナル式とスエリング上限式を用いた計算値との比較 (ピンNo.187074)	125
図5-17.4	MFA-2ピンにおける外径変化率の実測値と照射クリープ歪みノミナル式とスエリング上限式を用いた計算値との比較 (ピンNo.187104)	126
図5-17.5	MFA-2ピンにおける外径変化率の実測値と照射クリープ歪みノミナル式とスエリング上限式を用いた計算値との比較 (ピンNo.187164)	126

1. はじめに

核燃料サイクル開発機構では、高速炉炉心構成要素用材料として、JISのSUS316規格範囲内で最適量のP, B, Ti, Nbを添加し、かつ20%の冷間加工を施すことにより高温強度および耐スエリング性を向上させた改良SUS316鋼¹⁾（以降、PNC316鋼と呼ぶ）、およびさらに耐スエリング性の改善を図るために15Cr-20Niをベースに各種の微量添加元素を最適化した15Cr-20Ni鋼²⁾を開発している。PNC316鋼および15Cr-20Ni鋼の照射クリープ特性については、FFTF (Fast Flux Test Facility) /MOTA (Material Open Test Assembly) の材料照射試験において取得されたPNC316鋼および15Cr-20Ni鋼の照射データを用いて評価が行われ、照射クリープ歪み式が策定されている³⁾。

一方、海外炉心材料の照射クリープ特性に関する報告の中で、材料照射と燃料照射とでは照射期間中に材料にかかる応力の負荷履歴が異なることから、材料照射データに基づいて作成された照射クリープ歪み式では燃料ピンの照射クリープ変形を適切に評価できない可能性が示されている^{4, 5)}。

また、PNC316鋼および15Cr-20Ni鋼のMOTAデータに基づき策定された照射クリープ歪み式はスエリング量の増加に伴い照射クリープ歪み量が線形的に増加する関係式となっているが、海外炉心材料の評価ではスエリング量の増加割合がある定常状態になるとスエリングに伴い生じる照射クリープ歪み量は飽和する可能性が報告されている^{5, 6)}。

本報告では、材料強度基準の整備の一環として、PNC316鋼および15Cr-20Ni鋼それぞれを被覆管とするMFA-1, 2 (Monju Fuel Assembly-1,2) 燃料集合体照射試験にて取得されたデータを用いてPNC316鋼および15Cr-20Ni鋼の照射クリープ特性の評価を行った。さらに、MOTA材料照射データに基づき策定された照射クリープ歪み式の燃料ピンへの適用性について検討した。

2. 海外炉心材料の評価報告に基づく燃料照射における 照射クリープ特性の検討課題

PNC316鋼および15Cr-20Ni鋼の照射クリープ特性については、これまで、FFTF/MOTAにおいて照射された内圧封入管およびOpen tubeの外径測定データ、および密度測定データなどを用いて照射クリープ特性が評価されている³⁾。また海外の炉心材料についても内圧封入管などを用いた材料照射データに基づいて照射クリープ特性の評価が行われている^{4~7)}。

海外のオーステナイト系炉心材料について、材料照射と燃料照射とでは照射クリープ挙動が異なる可能性が報告されている。

CW316Ti鋼について、材料照射データから求めた照射クリープ歪み式を燃料ピンに適用した場合、Phenixにて照射された燃料ピンの変形を過小に評価することが示されている^{4, 5)}。図 2-1(a)のように外径変化率からスエリング歪み量を差し引くことによりクリープ歪み量を算出し（図中のハッチング領域であり、これを実測値としている。）、図 2-1(b)のように実測値と計算値を比較した結果、計算値は実測値の約1/3程度となっている。

一方、20%CW316鋼については、材料照射データの評価結果に基づきEBR-IIで照射された燃料ピンのクリープ変形を推定した結果、実測値に比べて過大評価することが報告されている⁵⁾。図 2-2 において、スエリング歪みの実測値にクリープ歪みの推定値を加えることにより推定した外径変化率は、外径変化率の実測値より大きくなっている。

図 2-1(b)と図 2-2 は相反する評価結果を示しており、その原因としては、燃料ピン照射試験の違い、材料照射データからの照射クリープ特性の評価方法の違いなどが考えられているが、明確な結論は得られていない。一方、材料照射データの評価結果を用いて、Phenixで照射されたCW316Ti鋼製ラップ管のクリープ変形を推定した場合、図 2-3(b)のように、概ねラップ管の変形を適切に評価できることが報告されて

いる^{4, 5)}。これは、ラッパ管には照射初期から末期までNaによるある程度大きな圧力が負荷されているためであり、材料にかかる応力履歴が材料照射試験とほぼ同様であるためと考えられている。

内圧封入管のような材料照射では照射期間中、常に、ある程度大きな内圧が負荷されているのに対し、燃料照射では照射初期には製造時封入ガスによるわずかな内圧が負荷されているだけであり、燃焼の進行に伴い発生するFPガスによって内圧が漸増する。このように材料照射と燃料照射とでは内圧の負荷履歴が異なるため、材料照射と燃料照射とでは照射中の転位は異なった挙動を示すと考えられる。照射クリープ変形は照射中の転位の挙動に密接に関連しているため、材料照射と燃料照射とでは照射クリープ特性が異なると考えられている⁵⁾。

照射クリープ変形は、主に2つの機構によって生じると考えられている⁸⁾。1つは、応力誘起優先吸収 (Stress Induced Preferential Absorption: SIPAと呼ばれる) 機構と呼ばれるものであり、応力軸に平行なバーガスベクトルをもつ転位に優先的に格子間原子が吸収され、クリープ変形が生じるものである。もう一つの機構は、Gittus機構と呼ばれるものであり、ポイドスエリングが生じる温度領域では、空孔がポイドに吸収される一方、格子間原子が転位に選択的に吸収され、これにより転位の上昇運動とすべり運動の繰り返しが生じ、クリープ変形が起こるものである。SIPA機構とGittus機構をむすびつけて、次のような照射クリープ歪み式が一般的に用いられている⁵⁾。

$$\dot{\epsilon} / \sigma = B_0 + D \dot{\epsilon}_s \quad \dots \dots (1)$$

$\dot{\epsilon}$: ある瞬間での照射クリープ歪み速度 (単位照射量当りの照射クリープ歪み変化量)

σ : ある瞬間での応力

B_0 : 照射クリープ係数

D : スエリング相互作用項の係数

$\dot{\epsilon}_s$: ある瞬間でのスエリング歪み速度 (単位照射量当りのスエリング歪み変化量)

式(1)の右辺の第1項がSIPA機構の寄与であり、第2項がGittus機構の寄与である。

材料照射では照射初期から高い応力が負荷されているため、まずSIPA機構によるクリープ変形が生じ、その後スエリングが発生するにつれてGittus機構によるクリープ変形が加わると考えられる。燃料照射では、照射初期には負荷される応力はわずかであり、スエリングも生じないため、クリープ変形は起こらない。照射が進行し、スエリングが発生するにつれてGittus機構によるクリープ変形が生じる。応力の増加に伴うSIPA機構によるクリープ変形も徐々に生じるが、スエリングの増加に比べて応力の増加は緩やかであるため、燃料ピンにおけるクリープ変形にはスエリングの発生に伴い生じるクリープ変形が大きく寄与していると考えられている⁵⁾。

またPNC316鋼および15Cr-20Ni鋼のMOTA材料照射データに基づき策定された照射クリープ歪み式は、スエリング量の増加に伴い照射クリープ歪み量が線形的に増加する関係式となっている。すなわち、式(1)の照射クリープ歪み式におけるスエリングとの相互作用項の係数である「D」を一定の値としている。

一方、CW316Ti鋼の照射クリープ特性の評価報告^{5, 6)}では、スエリング量の増加に伴い照射クリープ歪み量は増加するものの、スエリング量の増加割合がある定常状態になるとスエリングに伴い生じる照射クリープ歪みの増加量は飽和する可能性が示されている。すなわち、図2-4のようにとくに400~405℃のデータについて、スエリング速度が増加するにつれて照射クリープ歪み式におけるスエリングとの相互作用項の係数である「D」の値は減少し、ある一定値に飽和する傾向が見られる。これは、スエリングの進行の状態に応じてボイドが空孔を選択的に吸収する程度すなわちボイドの空孔に対するシンク強度、および転位の格子間原子に対するシンク強度が変化することに関連していると考えられる。スエリングの発生初期においては、ボイドに空孔が吸収される一方、格子間原子が転位に優先的に吸収される程度が大きくなり、Gittus機構によるクリープ変形が生じるが、スエリング挙動が定常状態すなわち定常スエリング速度になるとボイドに空孔が吸収される割合は一定となり、格子間原子が転位に優先的に吸収される程度が減少するため、Gittus機構によるクリープ変形の増加量は減少し、ある定常状態に収束すると考えられる。

以上のような海外炉心材料の評価報告から、PNC316鋼および15Cr-20Ni鋼について、材料照射と燃料照射における照射クリープ挙動の違い、および照射クリープ歪み式におけるスエリング相互作用項の扱いについて評価・検討した上で、MOTA材料照射データから策定された照射クリープ歪み式の燃料ピンへの適用性について検討することが重要であると考えられる。

本報告では、「4」で示すようにまずMFA-1,2燃料照射データに基づき、PNC316鋼および15Cr-20Ni鋼の照射クリープ歪み特性を評価した。すなわち、MFA-1,2データを用いて、照射クリープ歪み式における照射クリープ係数「 B_0 」およびスエリング相互作用項の係数「D」を求め、MOTAデータおよび海外材料の評価結果との比較を行った。またMFA-1,2データから求めた「D」のスエリング速度依存性、照射温度依存性などについても評価を行った。その後、「5」で示すようにMOTA材料照射データに基づき策定された照射クリープ歪み式を用いてMFA-1,2燃料ピンの照射クリープ変形の評価を行った。

3. MFA-1, 2 燃料照射ピンにおける照射クリープ歪み量の算出

3.1 MFA-1, 2 照射試験について

日米燃料材料共同開発計画の一環として、「もんじゅ」型燃料集合体であるMFA-1およびMFA-2集合体がFFTFにて高燃焼度まで照射され、照射後試験が実施されている。これらの照射試験の主な目的は次の通りである。

- ・「もんじゅ」高燃焼度炉心における燃料健全性を確認する。
- ・PNC316鋼と15Cr-20Ni鋼の照射性能を評価し、これらの耐照射性をより向上させるための改良に反映する。

MFA-1集合体では炉心材料（被覆管、ラップ管、ワイヤ）にPNC316鋼を使用しており、MFA-2集合体では炉心材料に15Cr-20Ni鋼を使用している。MFA-1,2それぞれに用いられたPNC316鋼、15Cr-20Ni鋼の化学成分と製造条件を表1, 2に示す。

表1において60MS1(低冷間加工材)鋼は最終冷間加工前に内面疵を除去するためにサンドブラストによる内面研削を実施しており、他の鋼種に比べて最終冷間加工度が低くなっている。また最終冷間加工における肉厚減少率と外径減少率の比であるQ値も小さく、残留応力が高くなっている。これらに起因して、60MS1(低冷間加工材)鋼を被覆管とするピンではスエリングが他の鋼種のピンよりも大きいデータが取得されている。またMFA-2ピンの被覆管材料として用いられた15Cr-20Ni鋼について、表2のように、60AK2鋼のSi量は60AS鋼に比べて低く、60AS鋼の冷間加工度は60AK2鋼に比べて低くなっている。

上記のように、MFA-1, 2ピンの被覆管材料として用いられた鋼種の一部については、冷間加工度が低く、またはSi量が低くなっている。冷間加工度およびSi量はスエリング特性に対しては大きな影響を及ぼすものの、材料の照射クリープ特性を表す材料定数である照射クリープ係数「 B_0 」およびスエリングとの相互作用項の係数「D」に対する影響は海外材料も含めて報告されておらず、またMFA-2燃料ピン被覆管と同じ鋼種である60AK2, 60AS鋼を内圧封入管材料として用いたMOTA材料照射データに

においても「B₀」「D」には鋼種間の差は見られない。よって、本報告では、MFA-1, 2ピンについて全ての鋼種のピンを、照射クリープ特性の評価対象とすることとした。

MFA-1,2集合体の主な仕様、および照射条件は次の通りである。

(1) 集合体仕様 (MFA-1,2共通)

ピンバンドル本数：169

被覆管外径／内径／肉厚 [mm]：6.5／5.56／0.47

ラッパ管内対面距離／外対面距離／肉厚 [mm]：104.6／110.6／3.0

ワイヤ径／ピッチ [mm]：1.32／307

燃料ペレットスタック長さ [mm]：914.4

(2) 照射条件 (MFA-1／MFA-2)

最高線出力 [W/cm]：349／352

最高燃焼度 [GWd/t]：147／162

最高照射量 [$\times 10^{26}$ n/m², E>0.1MeV]：21.4／23.9

被覆管肉厚中心最高温度 [°C]：650／640

照射日数 [EFPD]：903／1004

またMFA-1, 2燃料ピンの集合体内での配置を図3-1.1, 3-1.2に示す。図において、数字はピンNoを示し、「○」を付けたピンは外径測定などの照射後試験に供されたものであり、「★」を付けたピンは密度測定が実施されたものである。照射クリープ歪み量は外径変化率とスエリング歪み量から算出するためスエリング量を精度よく求める必要があることから、応力誘起スエリングを考慮して密度測定データから得られたスエリング量を用いることとした。よって、本報告では、密度測定が行われている「★」を付けたピンのデータを用いて、照射クリープ特性の評価を行った。

3.2 MFA-1, 2 燃料ピンにおける照射クリープ歪み量の算出

MFA-1, 2ピンの照射後試験として外径測定と密度測定が行われたピンについて、外径測定データから得られた外径変化率プロフィールと密度測定データから得られたスエリング量を図 3-2.1～3-2.11 に示す。外径プロフィール測定は米国で行われ、密度測定は米国およびサイクル機構にて行われている。ピンNo「187017」と「187164」についてはピン軸方向の数点の位置における外径および密度をサイクル機構にて測定した。

特にピンNo「186101」「186102」「186104」「187017」については、燃料スタックの上側で第2のピークが見られ、FCMI (Fuel Cladding Mechanical Interaction) の可能性が考えられることから、これらの位置のデータは今回の評価対象から除くこととした。また外径変化率の測定精度については、レーザー外径測定器の精度を $\pm 3\mu\text{m}$ とした場合、外径6.5mmの管の外径変化率は約 $\pm 0.05\%$ の精度となり、密度測定が行われている位置での外径変化率データは全て測定精度以上の値を示している。またスエリング歪み量の測定精度については、質量天秤の精度を $\pm 0.01\text{mg}$ とした場合、密度 8g/cm^3 の材料について、外径6.5mm、肉厚0.47mm、長さ1mmの試料のスエリング歪み量は約0.005%の精度となり、全てのデータは測定精度以上の値を示している。よって、本報告では、測定精度の観点からはデータを評価対象から除外することなしに「4」以降に示す評価を行った。

外径および密度が測定されている各ピンの各軸方向位置について、次式により炉内クリープ歪み量を算出した。

$$(\text{炉内クリープ歪み量}) = (\text{外径変化率}) - (\text{スエリング歪み量}) \quad \dots \dots (2)$$

式(2)で求めた炉内クリープ歪み量は周方向歪みであるため、Henckyの流動条件に従い、次のように相当歪みに換算する。

$$\epsilon = (2/\sqrt{3}) \epsilon_H \quad \dots \dots (3)$$

ϵ : 相当歪み

ϵ_H : 周方向歪み

炉内クリープ歪み量には照射クリープ歪み量と炉内熱クリープ歪み量が含まれているため、MFA-1,2データの炉内クリープ歪み量における炉内熱クリープの寄与を以下のようにして推定した。

MOTAデータに基づいて策定されている表3の炉内熱クリープ歪み式³⁾を用いて、図3-3のように、照射サイクル毎に熱クリープ歪み増加量を算出し、積算することにより、照射末期での熱クリープ歪み量を求めた。各照射サイクルでの熱クリープ歪み増加量については、当該照射サイクルの照射時間を100ステップに分割し、各ステップでの熱クリープ歪み増加量を算出し、積算することにより求めた。照射温度については各照射サイクルのサイクル初期およびサイクル末期の照射温度が図3-4のように評価されており、直線補間により各ステップでの照射温度を決定した。ピンにかかる内圧は製造時に封入されているHeガスと燃焼の進行にともない発生するFPガスにより生じることから、照射履歴に従い発生するFPガス量を算出することにより、各照射サイクルのサイクル初期およびサイクル末期での内圧を図3-5のように求めた上で、直線補間により各ステップでの内圧を決定した。

以上のように算出した炉内熱クリープ歪み推定値と炉内クリープ歪み実測値との比を計算した結果を図3-5.1, 3-5.2に示す。MFA-1,2いずれの場合でも、約500℃以下では炉内クリープ歪みにおける熱クリープの寄与は約1%以下であり、無視できるレベルであるが、約550℃では熱クリープの寄与は約10%となり、熱クリープの影響が大きくなっている。

このように、MFA-1,2データについて、約550℃以上の高温側では、炉内熱クリープ歪みが顕著に発生していると考えられるため、本報告では、炉内クリープ歪み量における炉内熱クリープの寄与を考慮し、次式のように照射クリープ歪み量を算出した。

$$(\text{照射クリープ歪み量}) = (\text{炉内クリープ歪み量}) - (\text{炉内熱クリープ量}) \cdots \cdots (4)$$

ここで、炉内クリープ歪み量は外径測定データと密度測定データから求めた「実測

値」であるのに対し、炉内熱クリープ歪み量は評価式を用いて算出した「推定値」であることから、式(4)により求めた照射クリープ歪み量を「実測評価値」として区別することとする。

4. MFA-1,2 燃料照射データに基づく照射クリープ歪み特性の評価

4.1 照射クリープ歪み量とスエリング量の関係

MFA-1,2ピンにおける外径変化率とスエリングの関係について、MFA-1,2それぞれについて全てのピンデータをプロットしたものを図 4-1.1, 4-1.2 に、ピン毎にデータをプロットしたものを図 4-2.1~4-2.11 に示す。いずれのピンについても、照射クリープと熱クリープの寄与の分だけ、外径変化率はスエリングより大きくなっているが、外径変化率とスエリング歪み量の差はスエリング歪みが増加してもほとんど変わらず、照射クリープ歪みがスエリングの増加に従って線形的に増加するものではないことを示している可能性が考えられる。

MFA-1,2ピンにおける照射クリープ歪みとスエリングとの関係について、MFA-1,2それぞれについて全てのピンデータをプロットしたものを図 4-3.1, 4-3.2 に、ピン毎にデータをプロットしたものを図 4-4.1~4-4.11 に示す。

まずMFA-1ピンについてピンNo「186091」以外のピンではデータのばらつきはあるものの、スエリングが増加するにつれて照射クリープ歪みも増加する傾向が見られる。ただし、データのばらつきが大きいため、スエリングと照射クリープ歪みの間に明確な線形の関係は見られない。

一方、ピンNo「186091」ではスエリング歪みが増加しても照射クリープ歪み量はほとんど変化していない。ピンの挙動の違いの原因として、被覆管の鋼種の違い、および集合体内での配置の影響が考えられる。ピンNo「186091」の被覆管の鋼種は60MS1(低冷間加工材)鋼であるが、ピンNo「186101」も同じく60MS1(低冷間加工材)鋼である。ピンの集合体内配置についてはピンNo「186091」は最外周ピンであるが、ピンNo「186023」も最外周ピンである。よって、被覆管の鋼種の違い、または集合体内での配置のためピンNo「186091」が他のピンと異なる挙動を示している可能性はあるが、現段階では明確に判断することはできない。

次にMFA-2のピンNo「187017」「187041」「187104」については、データのばら

つきはあるものの、スエリングが増加するにつれて照射クリープ歪みも増加する傾向が見られる。ただし、データのばらつきが大きいため、スエリングと照射クリープ歪みの間に明確な線形の関係は見られない

またピンNo「187074」ではスエリング歪み量が約1%以下のデータしかないため、スエリング量と照射クリープ歪み量の関係は不明である。ピンNo「187164」ではスエリング歪みが増加しても照射クリープ歪み量はほとんど変化していない。ピンNo「187164」の被覆管の鋼種は60AK2鋼であり、ピンNo「187104」と同じである。ピンの集合体内配置についてはピンNo「187164」は最外周ピンではない。よって、被覆管の鋼種の違いのため、ピンNo「187164」が他のピンと異なる挙動を示している可能性はあるものの、現段階では明確に判断することはできない。

以上のように、MFA-1,2ピンデータにおけるスエリング量と照射クリープ歪み量の関係については、スエリングが増加するにつれて照射クリープ歪みも増加する傾向が見られるが、データのばらつきが大きいため、スエリングと照射クリープ歪みの間に明確な線形の関係は見られない。

4.2 照射クリープ係数「 B_0 」の評価

4.2.1 燃料照射データに基づく「 B_0 」の算出方法

照射クリープ歪み式は一般に次のように表される¹¹⁾。

$$\dot{\epsilon} / (\sigma)^n = B_0 + D \dot{\epsilon} s \quad \dots \dots (5)$$

$\dot{\epsilon}$: ある瞬間での照射クリープ歪み速度

[(相当歪み : -) ($\times 10^{26} \text{n/m}^2$, $E > 0.1 \text{MeV}$)⁻¹]

σ : ある瞬間での相当応力 [MPa]

n : 応力指数 [-]

B_0 : 照射クリープ係数 [(相当歪み : -) ($\times 10^{26} \text{n/m}^2$, $E > 0.1 \text{MeV}$)⁻¹ (MPa)⁻¹]

D : スエリング相互作用項の係数 [(MPa)⁻¹]

$\dot{\epsilon} s$: ある瞬間でのスエリング歪み速度

[(相当歪み : -) ($\times 10^{26} \text{n/m}^2$, $E > 0.1 \text{MeV}$)⁻¹]

相当歪み「 ϵ 」および相当応力「 σ 」は、周方向歪み「 ϵ_H 」および周方向応力「 σ_H 」から、それぞれ次のように算出する。

$$\epsilon = (2/\sqrt{3}) \epsilon_H \quad \dots\dots\dots(6)$$

$$\sigma = (\sqrt{3}/2) \sigma_H \quad \dots\dots\dots(7)$$

式(5)の応力指数「 n 」について、一般に応力が150MPa以下では照射クリープ歪みは応力に比例し¹⁾、またPNC316鋼と15Cr-20Ni鋼のMOTAデータを用いた照射クリープ歪み特性の評価においても、応力指数「 n 」の値は概ね「1」となっている³⁾。MFA-1,2ピンの照射末期での被覆管にかかる相当応力は最大約45MPaと計算されること、およびMFA-1,2ピンの被覆管材料として鋼種は一部異なるもののそれぞれPNC316鋼と15Cr-20Ni鋼が用いられていることから、本報告では「 $n=1$ 」とすることとする。よって、式(5)は次のようになる。

$$\dot{\epsilon} / \sigma = B_0 + D \epsilon s \quad \dots\dots\dots(8)$$

まず、式(8)の右辺を

「 B_{ave} ：平均照射クリープ係数 [(相当歪み：-) ($\times 10^{26}n/m^2, E>0.1MeV$)⁻¹ (MPa)⁻¹]」

とおく。

$$B_{ave} = \dot{\epsilon} / \sigma \quad \dots\dots\dots(9)$$

ここで、「 $\dot{\epsilon}$ 」は次のように定義される。

$$\dot{\epsilon} = d\epsilon / d\phi t \quad \dots\dots\dots(10)$$

ϕt ：中性子照射量 [$\times 10^{26}n/m^2, E>0.1MeV$]

式(9)と式(10)から次式が得られる。

$$B_{ave} = (d\epsilon / d\phi t) / \sigma \quad \dots\dots\dots(11)$$

$$\Leftrightarrow d\epsilon = B_{ave} \sigma d\phi t \quad \dots\dots\dots(12)$$

よって、「 σ 」と「 ϕt 」の関係を下記のようにして求め、「 σ 」を「 ϕt 」を用いて表すこととする。

各照射サイクルで燃料ピンにかかる応力「 σ 」は、「3.2」の炉内熱クリープ歪みの推定の際に示したように求めることができる。各照射サイクルでの「 ϕt 」は照射条件データとして明らかである。「 σ 」と「 ϕt 」の関係は図4-5のようになり、いずれのピンのいずれの軸方向位置においても「 σ 」と「 ϕt 」はほぼ線形の関係であった。製造時の封入Heガスによる応力はいずれのピンでも同じであることから、次のような1次式で各ピンの各位置における「 σ 」と「 ϕt 」のデータに対して最小二乗法を用いてデータのノミナル式を求め、各ピンの各位置それぞれについて次式の係数「 a 」を決定する。

$$\sigma = a \phi t + b \quad \dots \dots (13)$$

a : 各ピンの各軸方向位置における定数 $[(x10^{26}n/m^2, E>0.1MeV)^{-1} (MPa)]$

b : 製造時封入ガスによる応力 $[MPa]$

式(12)に式(13)を適用して次式が得られる。

$$d\epsilon = Bave (a \phi t + b) d\phi t \quad \dots \dots (14)$$

両辺を積分して

$$\epsilon' = Bave (1/2 a \phi t'^2 + b \phi t') \quad \dots \dots (15)$$

ϵ' : 照射末期の照射クリープ歪み量 [(相当歪み：-)]

$\phi t'$: 照射末期の照射量 $[x10^{26}n/m^2, E>0.1MeV]$

式(15)より「 $Bave$ 」は次のように求められる。

$$Bave = \epsilon' / (1/2 a \phi t'^2 + b \phi t') \quad \dots \dots (16)$$

各ピンの各軸方向位置について、式(16)により「 $Bave$ 」を求める。

また式(8)と式(9)から「 $Bave$ 」とある瞬間でのスエリング速度「 $\dot{\epsilon}_s$ 」は次のような関係にある。

$$B_{ave} = B_0 + D \dot{\epsilon} s \quad \dots \dots \dots (17)$$

ここで、照射末期でのスエリング速度を次のようにして求める。照射末期の瞬間でのスエリング速度は不明であるため、図 4-6 のように、PNC316鋼および15Cr-20Ni鋼それぞれのスエリング式を用いて算出した照射サイクル毎のスエリング歪み量から、次式のように照射末期でのスエリング速度を算出する。

$$\Delta \epsilon s' / \Delta \phi t' = [\epsilon s' (EOC) - \epsilon s' (BOC)] / [\phi t' (EOC) - \phi t' (BOC)] \quad \dots \dots \dots (18)$$

- $\Delta \epsilon s' / \Delta \phi t'$: 照射末期でのスエリング速度
 $[- \cdot (x10^{26} n/m^2, E>0.1MeV)^{-1}]$
- $\epsilon s' (EOC)$: 最終の照射サイクルの終了時でのスエリング歪み量 [-]
- $\epsilon s' (BOC)$: 最終の照射サイクルの開始時でのスエリング歪み量 [-]
- $\phi t' (EOC)$: 最終の照射サイクルの終了時での中性子照射量
 $[x10^{26} n/m^2, E>0.1MeV]$
- $\phi t' (BOC)$: 最終の照射サイクルの開始時での中性子照射量
 $[x10^{26} n/m^2, E>0.1MeV]$

なおスエリング式については、各ピンの各軸方向位置におけるスエリングデータすなわち照射末期のスエリング実測値に計算値を一致させるようにPNC316鋼および15Cr-20Ni鋼それぞれのスエリングノミナル式におけるスエリング潜伏期間を調整することにより各ピンの各位置について作成したスエリング式を適用する。PNC316鋼のスエリングノミナル式は主にMFA-1データに基づくものであり、15Cr-20Ni鋼のスエリングノミナル式はMFA-2データに基づくものである。なおPNC316鋼のスエリング式については現在検討中であり、本報告で用いたPNC316鋼のスエリング式は検討途中の暫定的な式である。参考としてこれらのスエリングノミナル式を図 4-7 に示す。また各照射サイクルでのスエリング歪み量は各照射サイクルでのスエリング歪み増加量を積算することにより求め、スエリング歪み増加量については、当該照射サイクルの照射時間を100ステップに分割し、各ステップでのスエリング歪み増加量を算

出し、積算することにより求める。

以上のようにして求めた照射末期でのスエリング速度「 $\Delta \epsilon s' / \Delta \phi t'$ 」を用いて、次のように「 B_0 」を求める。すなわち、図4-8のように、縦軸に「 B_{ave} 」、横軸にスエリング速度「 $\Delta \epsilon s' / \Delta \phi t'$ 」をとり、式(16)により求めた「 B_{ave} 」をプロットする。「 B_{ave} 」とスエリング速度「 $\Delta \epsilon s' / \Delta \phi t'$ 」の間に1次の関係を仮定し、各ピンのデータに対して最小二乗法によりフィッティングを行い、ノミナル直線を求める。ノミナル直線の縦軸との切片が「 B_0 」である。

4.2.2 MFA1,2データに基づく照射クリープ係数「 B_0 」の

MOTAデータおよび海外材料の評価結果との比較

MFA1,2データから求めた「 B_0 」をPNC316鋼および15Cr-20Ni鋼のMOTAデータから得られた「 B_0 」、および海外材料について評価報告されている「 B_0 」と比較した結果を表4に示す。海外材料の評価値は、20%CW316鋼、CW316Ti鋼、CW15-15Ti鋼に関するものである。MFA-1, 2データに基づき算出した「 B_0 」は $5.6 \sim 15.0 \times 10^{-6} [(x10^{26} \text{ n/m}^2, E>0.1 \text{ MeV})^{-1} (\text{MPa})^{-1}]$ であり、MOTAデータから得られた「 B_0 」の値 $2.17 \sim 6.36 \times 10^{-6} [(x10^{26} \text{ n/m}^2, E>0.1 \text{ MeV})^{-1} (\text{MPa})^{-1}]$ に比べて若干大きい傾向にあるが、海外材料の評価値の範囲には十分含まれており、概ね妥当なレベルの値であると考えられる。

MFA1,2データから求めた「 B_0 」とMOTAデータから得られた「 B_0 」との違いについて以下のように検討した。MOTAデータからは次のように「 B_0 」が求められている³⁾。スエリングおよび熱クリープが生じていない範囲でのデータについて、次式に基づき、「 B_0 」を求める。

$$B_0 = \dot{\epsilon} / \sigma \quad \dots \dots (19)$$

ここで、 $\dot{\epsilon}$ は図4-9のように照射クリープ歪みと中性子照射量の関係図においてデータのノミナル直線の傾きとして算出している。また応力「 σ 」は照射期間中一定値としている。

一方、MFA1,2データから「 B_0 」を求める場合、まず「 $Bave = \dot{\epsilon} / \sigma (= B_0 + D \dot{\epsilon} s)$ 」として定義される「Bave」は、次式で求められる。

$$Bave = \epsilon' / (1/2 a \phi t^2 + b \phi t') \quad (\leftarrow \text{式(16)を再記載})$$

$$\Leftrightarrow Bave = (\epsilon' / \phi t') / (1/2 a \phi t' + b) \quad \dots \dots \dots (20)$$

式(20)の右辺の「 $\epsilon' / \phi t'$ 」は照射末期での照射クリープ歪み量と中性子照射量の比であり、スエリングが生じている範囲も含む全照射期間中での平均的な照射クリープ歪み速度を表している。また式(20)の右辺の「 $(1/2 a \phi t' + b)$ 」は照射期間中の平均の応力に相当するものであり、これはMOTAデータにおける一定応力「 σ 」に相当している。このようにして求めた「Bave」はスエリングが生じている範囲も含む全照射期間中での平均的な照射クリープ係数を表すものであり、「 $Bave = B_0 + D \dot{\epsilon} s$ 」の関係から「Bave」は「 B_0 」より大きくなるが、「Bave」の算出方法については特に問題はないと考えられる。

次に「 B_0 」は「 $Bave = B_0 + D(\Delta \epsilon' / \Delta \phi t')$ 」の関係を仮定して図4-8のように照射末期のスエリング速度「 $\Delta \epsilon' / \Delta \phi t'$ 」が「0」となる場合の「Bave」として求めている。 $\Delta \epsilon' / \Delta \phi t'$ は図4-6のように求めたものであり、照射末期のスエリング量については実測値と計算値を一致させているが、照射途中のスエリング履歴はスエリングノミナル式を用いて推定したものである。照射途中のスエリング量は測定されていないため、スエリング推定値のもつ不確かさの程度は不明であるが、照射途中のスエリングノミナル推定値のもつ不確かさに起因して、 $\Delta \epsilon' / \Delta \phi t'$ が照射末期での瞬間の実際のスエリング速度と異なっている可能性が考えられる。

また「 B_0 」は図4-8のようにデータのノミナル直線の縦軸の切片として求めているため、「Bave」の値が小さいデータの影響を大きく受けることになる。「Bave」の値が小さいデータは外径変化が小さいデータであることから、外径変化にはスエリング、照射クリープおよび熱クリープに加え、FCMIの寄与の可能性が考えられる。

「3.2」で示したように、照射クリープ歪み量の算出においては各ピンの外径変化プロフィールから明らかにFCMIの可能性が考えられるデータは評価対象から除外して

いる。しかし、評価対象としたデータの中で外径変化が小さいデータについては、外径変化におけるFCMIの寄与が照射クリープに比べて無視できないレベルである可能性が考えられる。外径変化が小さいデータにおけるFCMIの寄与を詳細に評価することは現段階では困難であるため、本報告で評価対象としたデータについてはFCMIの寄与を考慮していないが、FCMIの寄与が照射クリープに比べて無視できないレベルである場合、照射クリープ歪み量を過大に評価していることになる。このように照射クリープ歪み量が過大となっていることに起因して、MFA1,2データから求めた「 B_0 」がMOTAデータにおける「 B_0 」より大きな傾向を示している可能性が考えられる。

以上のように、MFA1,2データから得られた「 B_0 」は、MOTAデータから得られた「 B_0 」に比べて全体的に大きく、過大評価となっている可能性があるが、海外材料の評価値の範囲には含まれており、「 B_0 」の値のレベルとしては概ね妥当と考えられることから、「4.3」の照射クリープ歪み式におけるスエリング相互作用項「D」の算出において、MFA1,2データから求めた「 B_0 」を適用することとする。

4.2.3 平均照射クリープ係数「 B_{ave} 」のスエリング速度および照射温度依存性

平均照射クリープ係数「 B_{ave} 」と照射末期のスエリング速度「 $\Delta \epsilon' / \Delta \phi t'$ 」との関係を図 4-10.1, 4-10.2 に示す。データのばらつきが大きいため、これらの図からは「 B_{ave} 」と「 $\Delta \epsilon' / \Delta \phi t'$ 」の間には特に有意な関係は認められない。ピン毎にデータをプロットした結果を図 4-11.1～4-11.11 に示す。図中では、照射クリープ係数「 B_0 」を求めるために、データのノミナル直線を作成した結果も示している。ピンによって、「 B_{ave} 」と「 $\Delta \epsilon' / \Delta \phi t'$ 」との間に、異なった関係が認められるが、ピンNo「186019」「186023」「186091」「186101」「186102」「186104」「187041」「187104」の8本については「 $\Delta \epsilon' / \Delta \phi t'$ 」が増加するにつれて「 B_{ave} 」が増加している傾向を示している。これは「 $B_{ave} = B_0 + D \dot{\epsilon}_s$ 」の関係に対応していると考えられる。

一方、ピンNo「187074」「187164」の2本については、「 $\Delta \epsilon' / \Delta \phi t'$ 」が増加す

るにつれて「Bave」が減少している傾向を示しており、「 $B_{ave} = B_0 + D \dot{\epsilon} s$ 」の関係とは逆の関係になっている。被覆管の鋼種または集合体内での配置について、これらのピンと他のピンの間で特に有意な違いは認められておらず、これらのピンが示している挙動がピン特有のものか、データのばらつきによるものかは現段階では明確でない。表4に示すように、ピンNo「187164」の「 B_0 」は他のピンに比べて大きくなっており、「Bave」データのノミナル直線の切片として求められる「 B_0 」が過大となっている可能性が考えられる。

平均照射クリープ係数「Bave」の照射温度との関係を図4-12.1, 4-12.2に示す。データのばらつきはあるものの、MFA-1データについては高温側になると「Bave」が減少する傾向を示している。ピン毎にデータをプロットした結果を図4-13.1～4-13.11に示す。ピンによって「Bave」の値のレベルは異なるが、ほとんどのピンについて、照射温度が高温側になると「Bave」は減少している傾向が認められる。これは、約500～600℃の高温側ではSIPA機構による照射クリープのみが生じているのに対し、約400～500℃の低温側ではスエリングの発生に伴い生じるGittus機構による照射クリープの寄与が加わることを示していると考えられる。

4.3 スエリング相互作用項の係数「D」の評価

4.3.1 燃料照射データに基づく「D」の算出方法

式(8)と式(13)から

$$\dot{\epsilon} = (B_0 + D \dot{\epsilon} s) (a \phi t + b) \quad \dots \dots (21)$$

となり、これに式(10)を適用して次式が得られる。

$$d\epsilon = (B_0 + D \dot{\epsilon} s) (a \phi t + b) d\phi t \quad \dots \dots (22)$$

$$= \{B_0 (a \phi t + b) + D \dot{\epsilon} s (a \phi t + b)\} d\phi t \quad \dots \dots (23)$$

両辺を積分して

$$\epsilon' = B_0 (1/2 a \phi t^2 + b \phi t) + a D \int \dot{\epsilon} s \phi t d\phi t + b D \int \dot{\epsilon} s d\phi t \quad \dots \dots (24)$$

$$=B_0(1/2 a \phi t'^2 + b \phi t') + aD \int (d\epsilon s/d\phi t) \phi t d\phi t + bD \int (d\epsilon s/d\phi t) d\phi t \quad \dots \dots \dots (25)$$

$$=B_0(1/2 a \phi t'^2 + b \phi t') + aD \int \phi t d\epsilon s + bD \int d\epsilon s \quad \dots \dots \dots (26)$$

$$=B_0(1/2 a \phi t'^2 + b \phi t') + aD \int \phi t d\epsilon s + bD \epsilon s' \quad \dots \dots \dots (27)$$

$\phi t'$: 照射末期の中性子照射量 [x10²⁶n/m², E>0.1MeV]

$\epsilon s'$: 照射末期のスエリング歪み量 [-]

ここで、式(27)の右辺の第2項の積分項を次のようにして求める。第2項の積分項は図4-14において斜線部の面積に相当し、次式のように表すことができる。

$$\int \phi t d\epsilon s = \epsilon s' \phi t' - \int \epsilon s d\phi t \quad \dots \dots \dots (28)$$

式(28)の右辺の第2項を図4-14のように積算近似により求めることとすると、式(28)は次のようになる。

$$\int \phi t d\epsilon s = \epsilon s' \phi t' - \sum \{1/2 [\epsilon s(i) + \epsilon s(i+1)] [\phi t(i+1) - \phi t(i)]\} \quad \dots \dots \dots (29)$$

$\epsilon s(i)$: 第(i)サイクルでのスエリング歪み量 [-]

$\epsilon s(i+1)$: 第(i+1)サイクルでのスエリング歪み量 [-]

$\phi t(i)$: 第(i)サイクルでの中性子照射量 [x10²⁶n/m², E>0.1MeV]

$\phi t(i+1)$: 第(i+1)サイクルでの中性子照射量 [x10²⁶n/m², E>0.1MeV]

各照射サイクルでのスエリング歪み量の算出方法は、「4.2.1」の「B₀」の算出において用いた方法と同じである。

式(27)と式(29)から次式により「D」を求めることができる。

$$D = \{ \epsilon s' - B_0(1/2 a \phi t'^2 + b \phi t') \} / [a \epsilon s' \phi t' - a \sum \{ 1/2 [\epsilon s(i) + \epsilon s(i+1)] [\phi t(i+1) - \phi t(i)] \} + b \epsilon s'] \quad \dots \dots \dots (30)$$

4.3.2 MFA1,2データに基づく「D」の

MOTAデータおよび海外材料の評価結果との比較

MFA-1,2データから求めた「D」とMOTAデータに基づき得られた「D」、および海

外材料について報告されている「D」との比較を図4-15.1, 4-15.2に示す。MFA-1,2データから求めた「D」はMOTAデータから求めた「D」の範囲に比べてばらつきが大きいが、MOTAデータにおける「D」の範囲を含んでいる。またMFA-1,2データの「D」は、海外材料の「D」に比べて全体的に小さい傾向にあるが、MFA-1,2データの「D」の半数程度は、海外材料の「D」の範囲に含まれている。よって、MFA-1,2データから求めた「D」は、概ね妥当なレベルの値を示していると考えられる。

なお、いくつかのデータは負の値となっているが、これは次の理由によるものである。式(30)の分子における「 ϵ' 」は、「 $\epsilon' = Bave(1/2 a \phi t^2 + b \phi t)$ 」として表される。一方、「 B_0 」は図4-8のように求められるが、データのばらつきのため、一部のデータについては「Bave」が「 B_0 」より小さくなっている。そのため、式(30)の分子が負の値となり、「D」の値が負となっている。図4-15.1, 4-15.2において、「D」の値が負であるデータは全て、「Bave」が「 B_0 」より小さいためである。このように、「 B_0 」を求める際のデータのばらつきに起因して「D」の値は負になっており、材料の特性を示しているものではないため、以降の評価では正の値となっている「D」のデータのみを評価対象とした。

4.3.3 「D」のスエリング速度、スエリング量、照射温度依存性

MFA-1,2データについて「D」と照射末期のスエリング速度「 $\Delta \epsilon s' / \Delta \phi t$ 」との関係を図4-16.1, 4-16.2に示す。データのばらつきが大きいが、図4-16.1のMFA-1データについては、「 $\Delta \epsilon s' / \Delta \phi t$ 」が増加するにつれて「D」が減少する傾向が見られる。一方、図4-16.2のMFA-2データについては、「D」と「 $\Delta \epsilon s' / \Delta \phi t$ 」の間には特に有意な関係は認められない。ピン毎にデータをプロットした結果を図4-17.1～4-17.11に示す。ピンNo「186019」「186023」「186102」「186104」「187041」については、「 $\Delta \epsilon s' / \Delta \phi t$ 」が増加するにつれて「D」が減少する傾向が見られる。

「D」と照射末期のスエリング歪み量「 $\epsilon s'$ 」について、全てのピンのデータをプ

ロットした場合を図 4-18.1, 4-18.2 に、ピン毎にプロットした場合を図 4-19.1～4-19.11 に示す。いずれの図についても、「D」と照射末期のスエリング速度「 $\Delta \epsilon_s' / \Delta \phi_r$ 」との関係と同様の傾向が認められる。これらのことから、スエリング量またはスエリング速度の変化に応じて「D」は変化する可能性が考えられる。MOTAデータを用いて策定された照射クリープ歪み式において「D」は定数であるが、今後、「D」をさらに精度良く評価するためには、スエリング相互作用による照射クリープにおいて、スエリング量すなわち状態量（これは、ある瞬間において空孔または格子間原子それぞれをボイドが優先的に吸収する割合、すなわちシンク強度などに対応する）、またはスエリング速度すなわち状態の変化割合（ある瞬間におけるボイドのシンク強度の変化割合など）のいずれの影響が支配的であるかを明らかにすることが重要である。

「D」と照射温度との関係について、全てのピンのデータをプロットした場合を図 4-20.1, 4-20.2 に、ピン毎にプロットした場合を図 4-21.1～4-21.11 に示す。ピンNo「186023」「186101」「186102」「187017」「187041」については、データのばらつきはあるものの、高温になるにつれて「D」は減少する傾向が見られる。ただし、いずれのピンについても「D」の明確な照射温度依存性は認められず、海外材料についても「D」の照射温度依存性は報告されていない。

4.3.4 MOTAデータにおける「D」に対するスエリング量の影響の検討

MFA-1,2データから求めた「D」については、「4.3.3」で示したように、一部のピンについてスエリング量が増加すると「D」は減少する傾向が認められた。そこで、MOTAデータにおける「D」とスエリング量との関係について以下のような検討を行った。

すでに行われているMOTAデータの評価³⁾では、以下のように「D」を求めている。MOTA試験において、外径測定は照射の途中および照射終了後に行われているが、密度測定については照射試験終了後のみに行われている。そのため、密度測定により

得られたスエリング歪み量は照射末期でのデータのみである。よって、照射末期のスエリング歪み量「 $\epsilon s'$ 」および照射末期の照射量「 $\phi t'$ 」を用いて、次式により「D」を求めている。

$$\epsilon' = B_0 \phi t' \sigma + D \epsilon s' \sigma \quad \dots \dots (31)$$

$$\Leftrightarrow D = (\epsilon' / \sigma - B_0 \phi t') / \epsilon s' \quad \dots \dots (32)$$

本報告では、MOTAデータにおける「D」とスエリング量との関係を検討するために、照射末期だけでなく、照射途中での「D」を次のように算出した。照射途中において、内圧封入管とほぼ同じ照射条件でOpen tubeの外径測定が行われている。今回は照射途中で変化するスエリング量と「D」との関係の評価することを目的としているため、「D」の値の精度は劣るものの、応力誘起スエリングの影響を考慮せずに、Open tubeの外径変化率を内圧封入管のスエリング歪み量とすることとした。

今回の評価では、スエリング量と「D」との関係の評価するものであるからスエリングが顕著に生じている405℃のデータを用い、また鋼種としてはPNC316鋼である55MK鋼および15Cr-20Ni鋼である60AK鋼のデータを用いた。なお、15Cr-20Ni鋼である60AS鋼のデータもあるが、後で示すようにスエリング歪み量のノミナル式を求める際に、データ点数が少ないためにノミナル式を求めることができないことから、今回の評価対象から除いた。55MK鋼、60AK鋼それぞれについてOpen tubeおよび内圧封入管の照射量と外径変化率の関係を図4-22.1, 4-22.2に示す。405℃では熱クリープの影響を無視できるため、内圧封入管の外径変化率からOpen tubeの外径変化率を差し引いて照射クリープ歪み量を算出した結果を図4-23.1, 4-23.2に示す。

まず「 B_0 」を次のようにして求めた。図4-22.1, 4-22.2のようにスエリングが生じていないデータについて、次式に基づき、「 B_0 」を求めた。

$$B_0 = (\epsilon / \phi t) / \sigma \quad \dots \dots (33)$$

式(33)において、「 ϵ 」および「 ϕt 」はスエリングが生じていないデータに対応する照射クリープ歪み量と中性子照射量である。

次に、「D」は次式のように表されることから、以下のようにして「D」を求めた。

$$\dot{\epsilon} / \sigma = B_0 + D \dot{\epsilon} s \quad \dots \dots \dots (34)$$

$$\Leftrightarrow D = (\dot{\epsilon} / \sigma - B_0) / \dot{\epsilon} s \quad \dots \dots \dots (35)$$

照射途中での、照射クリープ歪み速度「 $\dot{\epsilon}$ 」およびスエリング歪み速度「 $\dot{\epsilon} s$ 」を求めるために、まず照射クリープ歪み量「 ϵ 」と照射量の関係、およびスエリング歪み量「 ϵs 」と照射量の関係それぞれについてノミナル式を次のように作成した。照射クリープ歪み量と照射量の関係については、データのフィッティング性を考慮して、照射クリープ歪み量を照射量の累乗の形で最小二乗法により図 4-24.1, 4-24.2 のようにデータのノミナル式を求めた。スエリング歪み量と照射量の関係については、PNC316鋼および15Cr-20Ni鋼のスエリング式の関数型を用いて図 4-25.1, 4-25.2 のようにデータのノミナル式を求めた。これらのノミナル式を微分することにより得られる照射クリープ歪み速度およびスエリング歪み速度のノミナル式を用いて、照射途中での照射クリープ歪み速度「 $\dot{\epsilon} = d\epsilon / d\phi t$ 」およびスエリング歪み速度「 $\dot{\epsilon} s = d\epsilon s / d\phi t$ 」を算出した。以上のようにして求めた「 $\dot{\epsilon}$ 」「 B_0 」「 $\dot{\epsilon} s$ 」を式(35)に適用して、各鋼種の各応力における「D」を算出した。算出した「D」の結果を図 4-26.1, 4-26.2 に示す。求めた「D」は、照射末期については、照射試験後の密度測定データを用いて得られた「D」のデータ範囲に含まれており、また海外材料について報告されている値の範囲に含まれており、今回算出した「D」の値は妥当なものであると考えられる。図 4-26.1 の55MK鋼では、スエリング量が増加するにつれて「D」が減少する傾向が明確に見られる。図 4-26.2 の60AK鋼においても、55MK鋼ほど明確ではないものの、スエリング量が増加するにつれて「D」が減少する傾向が認められる。

以上のように、「4.3.3」で示したMFA-1,2データの場合と同様に、MOTAデータにおいてもスエリング量が増加するにつれて「D」は減少する傾向が認められるため、「D」はスエリング量依存性をもつ可能性があると考えられる。

5. MOTA材料照射データに基づく照射クリープ歪み評価式の 燃料ピンへの適用性の検討

MOTAデータに基づき、表3のように、PNC-316鋼および15Cr-20Ni鋼を含むオーステナイト系鋼共通の照射クリープ歪み評価式が策定されている³⁾。本評価式の燃料ピンへの適用性を検討するために、以下のように、本評価式を用いてMFA-1,2燃料ピンの照射クリープ歪み量を推定し、実測評価値との比較を行った。

5.1 MFA-1燃料ピンの照射クリープ歪み量の推定

MOTAデータに基づき策定された照射クリープ歪み評価式のノミナル式および上下限式を用いてMFA-1燃料ピンの照射クリープ歪み量を推定した。各ピンの各軸方向位値について、各照射サイクルでの照射クリープ歪み増加量を算出し、それらを積算することにより照射クリープ歪み量を求めた。今回の評価では照射クリープ歪み量を評価することが目的のため、スエリング量については「4.2.1」で示した方法と同様にスエリング計算値を実測値と一致させて計算を行った。

照射クリープ歪み量の実測評価値と計算値とを比較した結果を図5-1.1～5-1.3に示す。図5-1.1は照射クリープ歪み式の上限式を用いた場合であり、図5-1.2はノミナル式を、図5-1.3は下限式を用いた場合である。上限式を用いた場合では、実測評価値に比べて計算値の方が小さくなるデータがあるものの、照射クリープ歪み量が大い範囲では、実測評価値より計算値が小さい程度は減少する傾向が見られ、照射クリープ歪み量の実測評価値が最も大きなデータについては、実測評価値と計算値は概ね一致している。ノミナル式を用いた場合、多くのデータにおいて実測評価値より計算値の方が小さい傾向が見られる。下限式を用いた場合、ピンNo「186091」以外のピンのほとんどのデータについては実測評価値より計算値の方が小さい。

上限式により求めた照射クリープ歪み量の計算値と実測評価値との比較をピン毎

に図 5-2.1～5-2.6 に示す。ピンNo「186091」については全てのデータにおいて計算値の方が実測評価値より大きくなっているが、ピンNo「186091」以外のいずれのピンについても、一部のデータは計算値の方が実測評価値より小さくなっている。ただし、これらのいずれのピンにおいても、照射クリープ歪み量が大きくなるにつれて実測評価値より計算値が小さい程度は減少する傾向が見られる。これは、計算ではスエリング量が増加するにつれて照射クリープ歪み量が線形的に増加するのに対して、実測評価値ではスエリング量の増加に応じた照射クリープ歪みの増加量が飽和するためである可能性が考えられる。よって、スエリング量が増加するにつれて照射クリープ歪み量をより大きく評価することになる。現状データの照射クリープ歪み量の範囲では、上限式による計算値の一部は実測評価値より小さくなっているが、現状データよりさらに高照射量の条件ではスエリング量が大きくなるため、上限式を用いた照射クリープ歪み量の計算値は実測評価値より大きくなる可能性が考えられる。

また外径変化率の実測値と計算値との比較を図 5-3.1～5-3.6 に示す。外径変化率の計算値は、上記のように算出したスエリング歪み計算値と照射クリープ歪み計算値の和である。ピンの上端側すなわち高温側では外径変化における熱クリープの寄与が大きくなるが、ここでは設計評価において重要となる外径変化が大きい範囲について着目しており、MFA-1,2データにおいて外径変化が大きい範囲は熱クリープがほとんど生じていない約400～500℃であるため、ここでは熱クリープの寄与を考慮せず、外径変化率を算出した。スエリング歪み量については計算値を実測値と一致させているため、外径変化率における実測値と計算値との比較は、照射クリープ歪み量の実測評価値と計算値との比較に相当するものである。いずれのピンについても、外径変化が大きい範囲では概ね外径変化率の計算値は実測値より大きくなっている。

ノミナル式により求めた照射クリープ歪み量の計算値と実測評価値との比較をピン毎に図 5-4.1～5-4.6 に示す。ピンNo「186091」以外の全てのピンにおいて、ほとんどのデータについて、実測評価値より計算値の方が小さくなっている。ただし、実測評価値と計算値の差は照射クリープ歪み量が大きくなってもほとんど変わらない

いことから、実測評価値に比べて計算値が小さく、過小評価となっている程度は、照射クリープ歪み量が増加するにつれて減少していると考えられる。参考として、外径変化率の計算値と実測値との比較を図 5-5.1～5-5.6 に示す。

下限式により求めた照射クリープ歪み量の計算値と実測評価値との比較をピン毎に図 5-6.1～5-6.6 に示す。ピンNo「186091」以外の全てのピンにおいて、ほとんどのデータについて、実測評価値より計算値の方が小さくなっている。これらのピンについて、照射クリープ歪み量が大きい範囲でも、計算値は実測評価値の約50%程度であり、過小評価となっている可能性がある。参考として、外径変化率の計算値と実測値との比較を図 5-7.1～5-7.6 に示す。

5.2 MFA-2燃料ピンの照射クリープ歪み量の推定

MOTAデータに基づき策定された照射クリープ歪み評価式のノミナル式および上下限式を用いてMFA-2燃料ピンの照射クリープ歪み量を推定した。各ピンの各位値での照射クリープ歪み量の計算方法は「5.1」の場合と同様である。

MFA-2データについて、照射クリープ歪み量の実測評価値と計算値とを比較した結果を図 5-8.1～5-8.3 に示す。図 5-8.1 は照射クリープ歪み式の上限式を用いた場合であり、図 5-8.2 はノミナル式を、図 5-8.3 は下限式を用いた場合である。上限式を用いた場合では、一部のデータについては実測評価値に比べて計算値の方が小さくなっているものの、照射クリープ歪み量が大きい範囲では、実測評価値より計算値の方が大きくなっている。ノミナル式を用いた場合、実測評価値と計算値はよく一致している傾向が見られる。下限式を用いた場合、一部のデータについては実測評価値に比べて計算値の方が大きくなっているものの、照射クリープ歪み量が大きい範囲では、実測評価値より計算値の方が小さくなっている。

上限式により求めた照射クリープ歪み量の計算値と実測評価値との比較をピン毎に図 5-9.1～5-9.5 に示す。いずれのピンについても、一部のデータは実測評価値より

計算値の方が小さくなっているが、ほとんどのデータについては実測評価値より計算値の方が大きくなっている。また外径変化率の実測値と計算値との比較を図 5-10.1～5-10.5 に示す。算出方法は「5.1」と同様である。いずれのピンについても、外径変化が大きい範囲では、計算値は実測値より大きくなっている。

ノミナル式により求めた照射クリープ歪み量の計算値と実測評価値との比較をピン毎に図 5-11.1～5-11.5 に示す。いずれのピンについても、データのばらつきはあるものの、実測評価値と計算値は良好な相関関係にあると考えられる。また外径変化率の実測値と計算値との比較を図 5-12.1～5-12.5 に示す。いずれのピンにおいても、計算値と実測値はよく一致していると考えられる。

下限式により求めた照射クリープ歪み量の計算値と実測評価値との比較をピン毎に図 5-13.1～5-13.5 に示す。ピンNo「187041」では、全てのデータについて、実測評価値より計算値の方が小さくなっている。ピンNo「186041」以外のピンにおいても、一部のデータについては計算値の方が実測評価値より大きいものの、ほとんどのデータでは計算値の方が実測評価値より小さくなっている。参考として外径変化率の実測値と計算値との比較を図 5-14.1～5-14.5 に示す。

以上のように、MOTAデータを用いて策定された照射クリープ歪み評価式を用いてMFA-1,2燃料ピンの照射クリープ変形を評価した結果、一部のデータについては上限式による計算値が実測評価値より小さい場合、または下限式による計算値が実測評価値より大きい場合があるものの、照射クリープ歪み量が大きい範囲ではほとんどのデータについて、上限式による計算値が実測評価値より大きく、または下限式による計算値が実測評価値より小さくなっていることが明らかとなった。またMFA-1データについてはノミナル式による計算値は実測評価値より若干小さい傾向があるものの、MFA-2データについてはノミナル式による計算値は実測評価値と概ね同等の値であった。とくに設計評価では高照射量側の照射変形が大きくなる範囲での評価が重要であり、上述のように照射クリープ歪み量が大きい範囲ではMOTAデータに基づく

評価式を用いてMFA-1,2ピンの照射クリープ変形を概ね適切に評価できることから、MOTAデータに基づき策定された照射クリープ歪み評価式は燃料ピンの照射クリープ変形の評価に適用可能であると考えられる。

5.3 設計評価における照射クリープ歪み式とスエリング式の組み合わせ方の検討

照射クリープ歪み式およびスエリング式については、それぞれノミナル式、上下限式が策定されており、設計において燃料ピンの外径変化を評価する際には、照射クリープ歪み式およびスエリング式としてともに上限式を用いることが考えられる。ただし、燃料ピンの外径変化における照射クリープおよびスエリングの寄与については、「5.1」で示したように外径変化の大部分はスエリングによるものである。また照射クリープ歪み式にはスエリング作用項が考慮されていることから、スエリング量の大きさに応じて照射クリープ歪み量も変化する。よって、スエリング上限式のもつ保守性が十分大きな場合、照射クリープの保守性を吸収できる可能性がある。そこで、本報告では、以下のように、照射クリープ歪み式およびスエリング式の両者とも上限式を用いた場合と、照射クリープ歪みノミナル式とスエリング上限式の組み合わせの場合について、MFA-1,2燃料ピンの外径変化を推定し、実測値との比較を行った。

照射クリープ歪み式の上限式およびノミナル式については、表3のPNC316鋼および15Cr-20Ni鋼共通の評価式を用いた。スエリング上限式については、図4-7に示したPNC316鋼、15Cr-20Ni鋼それぞれのノミナル式をベースに、MFA-1データ、MFA-2データそれぞれを概ね包絡するようにスエリング式における潜伏期間を調整した評価式を用いた。ただし、「3.1」で示したように、MFA-1データには冷間加工度が低いことに起因して他の鋼種に比べてスエリングが大きくなる「60MS1(低冷間加工材)鋼」を被覆管とするデータが含まれているため、60MS1(低冷間加工材)鋼を被覆管とする燃料ピンのデータを評価する際には、60MS1(低冷間加工材)鋼のMFA-1データに基づく上限式を用いた。また「4.2.1」で述べたように、PNC316鋼のスエリング式については現在検討中であり、本報告の評価で用いたPNC316鋼のスエリングノミナル

式および上限式は検討途中の暫定的な式である。参考としてそれぞれのスエリング上限式を図 5-15.1～5-15.3 に示す。

上記の照射クリープ歪み式の上限式またはノミナル式、およびスエリング上限式を用いて、MFA-1,2燃料ピンの外径変化率を推定した。「5.1」「5.2」の場合と同様、炉内熱クリープの寄与を考慮せず、照射クリープ歪み計算値とスエリング歪み計算値の和を外径変化率の計算値とした。

照射クリープ歪み式およびスエリング式としてともに上限式を用いて推定した外径変化率の計算値と実測値との比較を図 5-16.1～5-16.11 に示す。ただし、MFA-1ピンの場合については、今回用いたスエリング上限式が検討途中の式であることからスエリング計算値が実測値より小さい場合が多数あり、スエリング式における保守性の設定が適切でないと考えられるため、本報告では参考扱いとする。一方、MFA-2ピンの場合においては、ほとんどのデータについてスエリング計算値は実測値より大きくなっている。MFA-2ピンのいずれのピンにおいても、外径変化が大きい範囲では外径変化率の計算値は実測値より大きく、保守側の評価となっている。

また外径変化が大きい範囲については、外径変化率計算値におけるスエリング歪み計算値の寄与は約80%であり、外径変化におけるスエリングの寄与は照射クリープの寄与に比べて非常に大きくなっている。

次に照射クリープ歪みノミナル式とスエリング上限式を用いてMFA-2ピンの外径変化率を推定した場合の計算値と実測値との比較を図 5-17.1～5-17.5 に示す。「ピン No.187074」以外のいずれのピンにおいても、外径変化が大きい範囲では外径変化率の計算値は実測値より大きく、保守側の評価となっており、スエリング式のもつ保守性によって照射クリープの保守性を吸収できている。

以上のように、MFA-2ピンの場合、照射クリープ歪みノミナル式とスエリング上限式の組み合わせで、ほとんどのピンについて、設計評価で重要となる外径変化が大きい範囲における燃料ピンの外径変化を保守側に評価することができている。

ただし、スエリング上限式の保守性が合理的にさらに切り詰められた場合、照射クリープ歪みノミナル式とスエリング上限式の組み合わせでは燃料ピンの外径変化を保守側に評価することができない可能性が考えられる。

今後、MFA-1ピンについても、適切なスエリング式が策定された時点で、MFA-2の場合と同様の評価を行い、照射クリープ歪み式とスエリング式の組み合わせについて検討することが重要であると考えられる。

6. おわりに

MFA-1, 2燃料ピンにおけるPNC316鋼および15Cr-20Ni鋼の照射クリープ特性を評価した上で、MOTA材料照射データに基づき策定された照射クリープ歪み評価式の燃料ピンへの適用性について検討を行った。得られた主な結果は次の通りである。

- (1) MFA-1, 2ピンにおける照射クリープ歪み量とスエリング量の関係性を評価した結果、照射クリープ歪み式において表されるようにスエリング量が増加するにつれて照射クリープ歪み量は増加するが、スエリング量と照射クリープ歪み量の間に線形の関係は明確には見られなかった。よって、照射クリープ歪み式におけるスエリング相互作用項の係数「D」は一定値ではない可能性が考えられる。
- (2) MFA-1, 2データに基づき算出した照射クリープ係数「 B_0 」は $5.6 \sim 15.0 \times 10^{-6}$ [$(\times 10^{26} \text{ n/m}^2, E > 0.1 \text{ MeV})^{-1} (\text{MPa})^{-1}$]であり、MOTAデータから得られた「 B_0 」の値 $2.2 \sim 6.4 \times 10^{-6}$ [$(\times 10^{26} \text{ n/m}^2, E > 0.1 \text{ MeV})^{-1} (\text{MPa})^{-1}$]に比べて大きい傾向にあるが、海外のオーステナイト系炉心材料について報告されている値の範囲には十分含まれている。
- (3) MFA-1, 2データからスエリング相互作用項の係数「D」を求めた結果、スエリング量が増加するにつれて「D」は減少する傾向が見られた。MFA-1, 2データから求めた「D」の値の範囲は、MOTAデータから得られた「D」の値 $3.8 \sim 8.2 \times 10^{-3}$ [(MPa)⁻¹]を含み、また海外材料の評価値の範囲も含んでいる。
- (4) MOTAデータについても「D」のスエリング量依存性を評価した結果、MFA-1, 2データに基づく「D」の場合と同様に、スエリング量が増加するにつれて「D」は減少する傾向が認められた。
- (5) MOTAデータに基づき策定された照射クリープ歪み式を用いてMFA-1, 2燃料ピンの照射クリープ変形を評価した結果、MOTAデータに基づく照射クリープ歪み式により燃料ピンの照射クリープ変形を概ね適切に評価できると考えられる。

7. 謝辞

本研究を遂行するにあたり、数値計算および作図などを実施していただいた原子力システム(株)の伊藤 昌弘 氏、ならびに安貞 憲 氏に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 立石 嘉徳 他：高速炉炉心材料用改良SUS316ステンレス鋼の開発,
日本原子力学会誌, vol.30, No.11, pp.1005-1019 (1988)
- 2) 鹿倉 栄 他：高速炉炉心材料用改良オーステナイト鋼の開発,
日本原子力学会誌, vol.36, No.5, pp.441-455 (1994)
- 3) 水田 俊治 他：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,
JNC TN9400 99-082 (1999)
- 4) J.L.Selan et al. : The swelling behavior of titanium-stabilized austenitic steels used as
structural materials of fissile subassemblies in Phenix ,
ASTM STP 1046 , pp.739-752 (1990)
- 5) F.A.Garner : Irradiation performance of cladding and structural steels in liquid metal
reactors , Materials Science and Technology , vol.10 A , pp.420-543 (1994)
- 6) A.Maillard et al. : Swelling and irradiation creep of neutron-irradiated 316Ti and
15-15Ti steels , ASTM STP 1175, pp.824-837 (1994)
- 7) F.A.Garner et al. : Analysis of creep data from MOTA irradiation of 20% cold worked
316 stainless steel , DOE ER-313-12 , (1992)
- 8) 石野 栞：照射損傷, 東京大学出版会(1979)
- 9) K.Ehrlich : Irradiation creep and interrelation with swelling in austenitic stainless steels ,
Journal of nuclear materials 100 , pp.149-166 (1981)
- 10) J.L.Selan et al. : Behavior under neutron irradiation of the 15-15Ti and EM10 steels used
as standard materials of the Phenix fuel subassembly ,
ASTM STP 1125 , pp.1209-1233 (1992)

表1 PNC316鋼の化学成分 [wt.%] と製造条件

鋼種		C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	B	N	Ti	Nb+Ta
材料仕様	上限	0.080	1.00	2.00	0.040	0.010	14.00	18.00	3.00	0.0060	0.0100	0.10	0.10
	目標	0.055	0.70	1.75	0.025	—	14.00	16.00	2.50	0.0040	—	0.10	0.10
	下限	0.040	0.40	1.40	0.015	—	13.00	16.00	2.00	0.0020	—	0.05	0.05
60MK		0.054	0.78	1.72	0.028	0.003	13.45	16.22	2.35	0.0039	0.0090	0.078	0.080
60MS1		0.057	0.79	1.85	0.026	0.002	13.72	16.33	2.54	0.0036	0.0030	0.075	0.095
60MS1(低冷間加工材)(*)		↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑

鋼種	溶体化処理	冷間加工度 [%]
材料仕様	≥1040℃	20±3
60MK	1080℃×2min	18.0
60MS1	1095℃×1min	20.6
60MS1(低冷間加工材)(*)	↑	17.2

(*) 60MS1(低冷間加工材)は、最終冷間加工前にサンドブラストによる内面研削を行っているため、冷間加工度が低くなっている（影をつけたセル）。

表2・15Cr-20Ni鋼の化学成分 [wt.%] と製造条件

鋼種	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	B	N	Ti	Nb
60AK2	0.057	0.41	1.72	0.026	0.005	19.66	14.89	2.55	0.0044	0.002	0.28	0.09(*1)
60AS	0.064	0.75	1.91	0.028	0.002	19.73	15.05	2.56	0.0031	0.002	0.25	0.11(*1)

鋼種	溶体化処理	冷間加工度 [%]
60AK2	1125℃×2min	18.0
60AS	1080℃×1min	15.6

(*1) Nb+Taの成分量を記載している。

表3 PNC316鋼および15Cr-20Ni鋼のMOTAデータに基づく
炉内クリープ歪み式

$$\varepsilon = \underbrace{B_0 \cdot \phi_t \cdot \sigma}_{\text{照射量依存項}} + \underbrace{D \cdot \varepsilon_s \cdot \sigma}_{\text{スエリング依存項}} + \underbrace{K \cdot t^{1.9} \cdot \sigma^{2.4}}_{\text{熱クリープ依存項}}$$

照射クリープ歪み式の係数 <PNC316鋼・15Cr-20Ni鋼共通>

[上限式] $B_0 = 6.36 \times 10^{-6}$

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

[ノミナル式] $B_0 = 3.98 \times 10^{-6}$

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

[下限式] $B_0 = 2.17 \times 10^{-6}$

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

炉内熱クリープ歪み式の係数

[ノミナル式] $K = 2.20 \times 10^{-3} \exp(-23900/T)$ <PNC316鋼：55MK鋼の場合>

$K = 1.11 \times 10^{-3} \exp(-24300/T)$ <15Cr-20Ni鋼：60AK2鋼の場合>

$K = 1.02 \times 10^{-4} \exp(-21800/T)$ <15Cr-20Ni鋼：60AS鋼の場合>

(*1) 炉内熱クリープ歪み挙動は、鋼種間で有意な差があるため、係数「K」は鋼種別に策定されている。

(*2) 係数「K」は、ノミナル・上下限式が策定されているが、今回の評価ではノミナル式のみ用いるため、上下限式は未記載。

ε : 炉内クリープ歪み量 [相当歪み] [-]

B_0 : 照射量依存項の係数 [$(\times 10^{26} \text{ n/m}^2, E > 0.1 \text{ MeV})^{-1} \cdot (\text{MPa})^{-1}$]

ϕ_t : 中性子照射量 [$\times 10^{26} \text{ n/m}^2, E > 0.1 \text{ MeV}$]

σ : 応力 [相当応力] [MPa]

D : スエリング相互作用項の係数 [$(\text{MPa})^{-1}$]

ε_s : スエリング歪み量 [-]

K : 熱クリープ依存項の係数 [$(\text{hr})^{-1.9} \cdot (\text{MPa})^{-2.4}$]

T : 照射温度 [K]

表4 MFA-1,2データから求めた照射クリープ係数「 B_0 」とMOTAデータおよび海外材料の評価値との比較

集合体	ピンNo	被覆管の鋼種	B_0 [$\times 10^{-6} (\times 10^{26} \text{n/m}^2, E > 0.1 \text{MeV})^{-1} \cdot (\text{MPa})^{-1}$]	B_0 (*1) [$\times 10^{-6} (\text{dpa})^{-1} \cdot (\text{MPa})^{-1}$]
MFA-1	186019	60MK	5.6	1.1
	186023	60MK	11.5	2.3
	186091	60MS1(低冷間加工材)	6.3	1.3
	186101	60MS1(低冷間加工材)	14.1	2.8
	186102	60MS1	11.6	2.3
	186104	60MS1	10.4	2.1
MFA2	187017	60AS	8.5	1.7
	187041	60AS	14.3	2.9
	187074	60AS	9.0	1.8
	187104	60AK2	13.1	2.6
	187164	60AK2	15.0	3.0
MOTAデータの評価値(*2)			2.17~6.36	0.55~1.5
他のオーステナイト鋼の評価値(*3)			—	0.25~10

(*1) MFA1,2データから求めた「 B_0 」については、 $1 [\times 10^{26} \text{n/m}^2, E > 0.1 \text{MeV}] = 5 [\text{dpa}]$ にて換算した。

(*2) PNC-316, 15Cr-20Ni鋼のMOTAデータに基づく評価値³⁾

(*3) 20%CW316, CW316Ti, CW15-15Ti鋼の評価値^{4~7, 9, 10)}

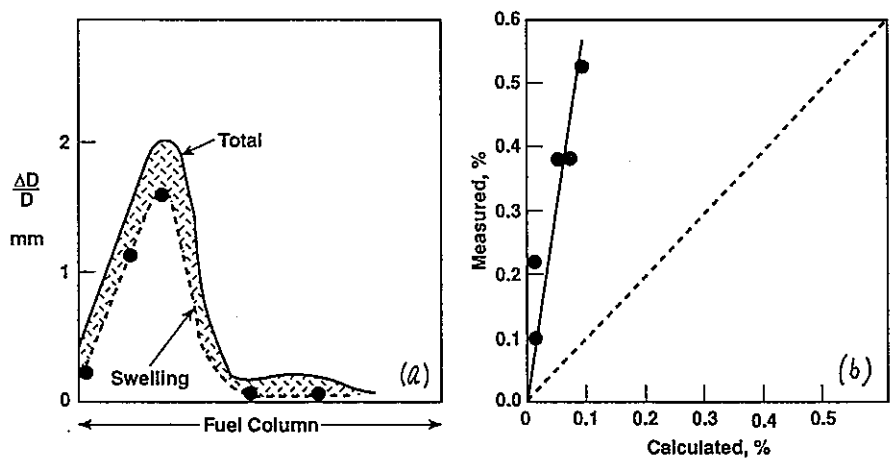


図 2-1 Phenix で照射された CW 316Ti 鋼製 燃料ピンの
炉内クリープ歪みの実測値と
材料照射データの評価結果に基づく推定値との比較

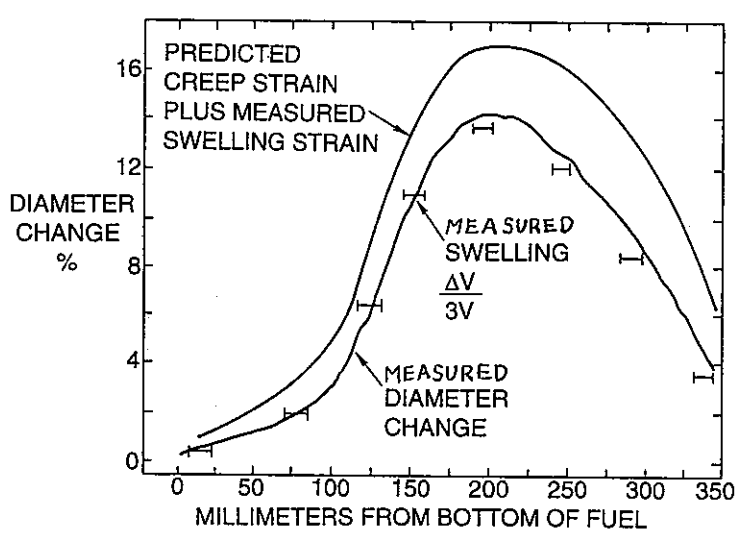


図 2-2 EBR-II で照射された 20%CW 316 鋼製 燃料ピンの
外径変化率の実測値と
材料照射データの評価結果に基づく推定値との比較

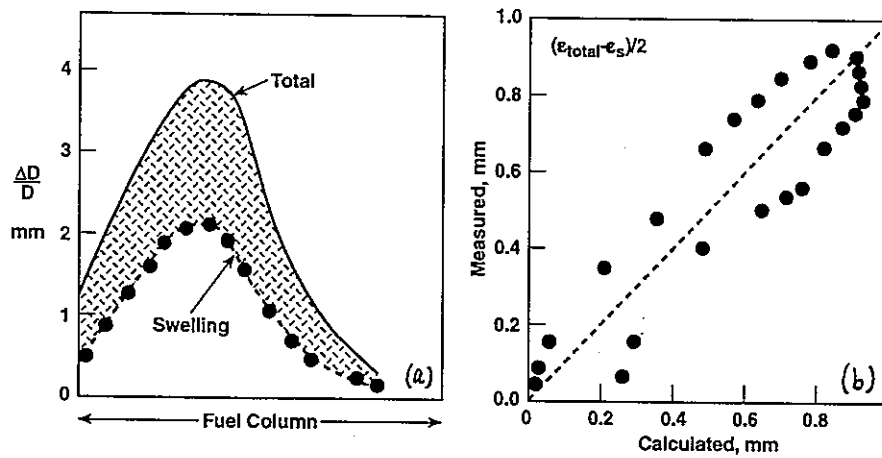


図 2-3 Phenix で照射された CW 316Ti 鋼製 ラッパ管の
炉内クリープ歪みの実測値と
材料照射データの評価結果に基づく推定値との比較

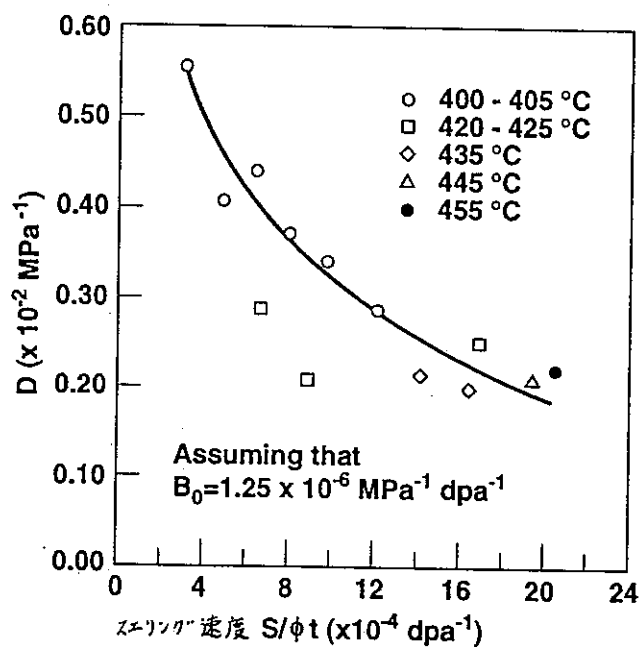
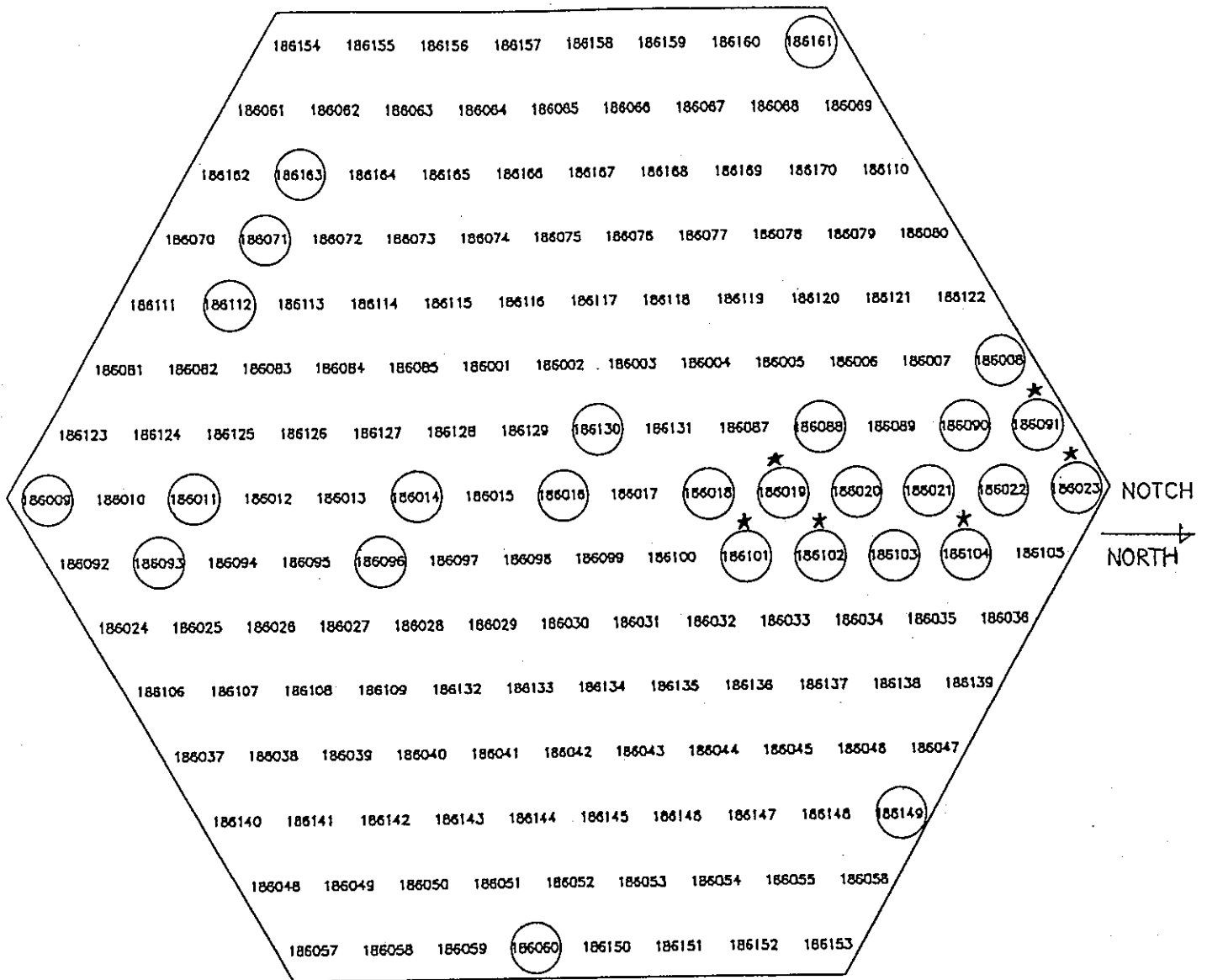


図 2-4 CW 316Ti 鋼製 内圧封入管照射データに基づく
スエリング相互作用項の係数「D」の
スエリング速度依存性



○ Fuel Pins selected for examination
 ★ 照射クリフ評価対象ピン
 (密度測定実施)

図 3-1.1 MFA-1燃料ピン配置図

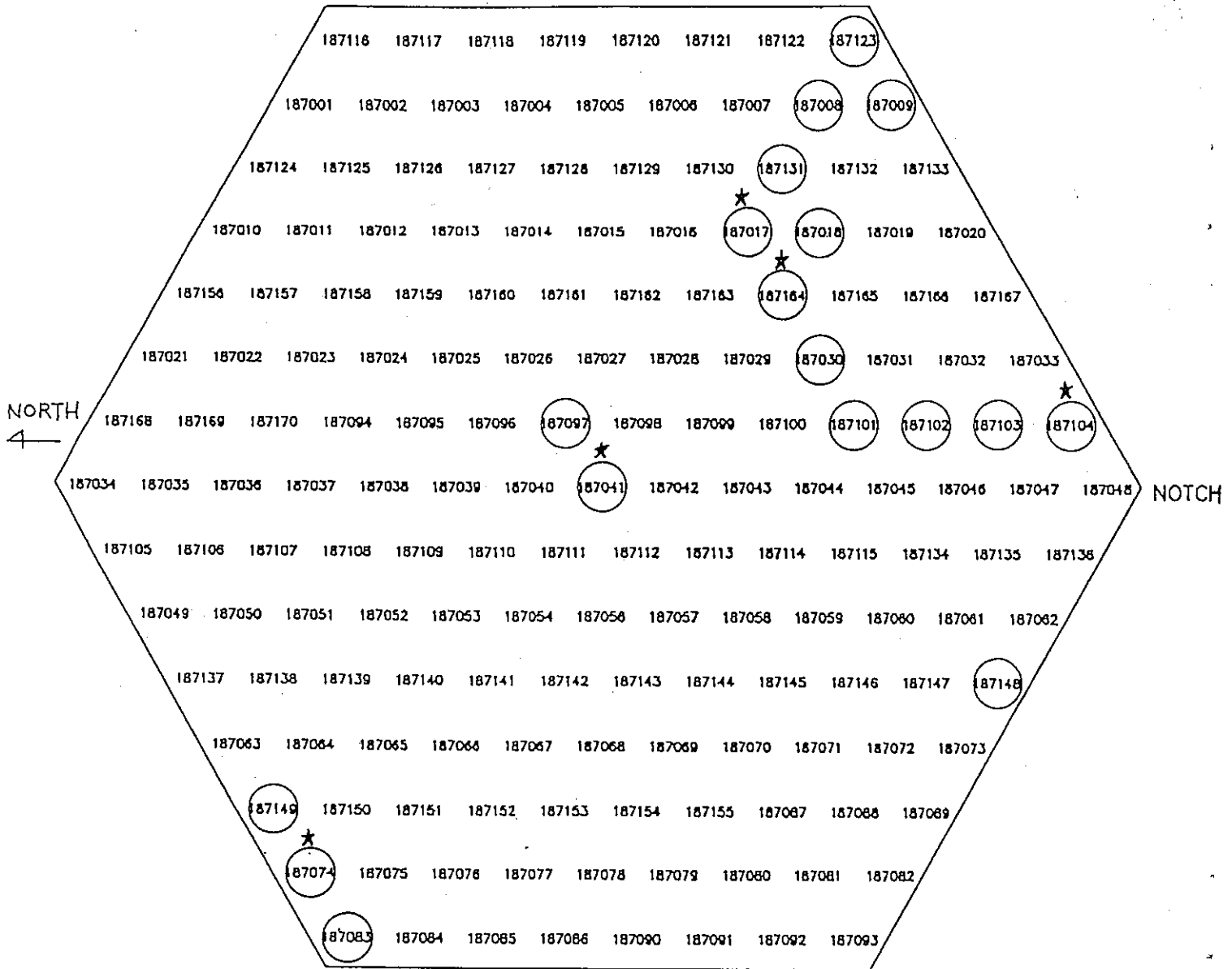


図 3-1.2 MFA-2燃料ピン配置図

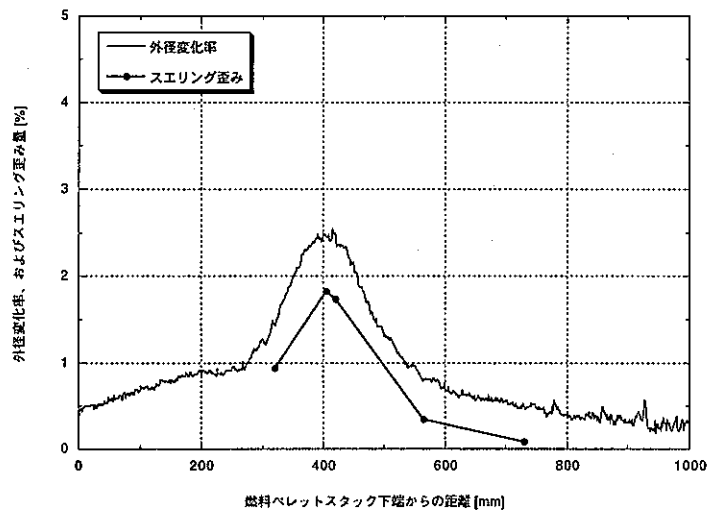


図 3-2.1 MFA-1ピン外径変化プロフィールとスエリング量 (ピンNo.186019)

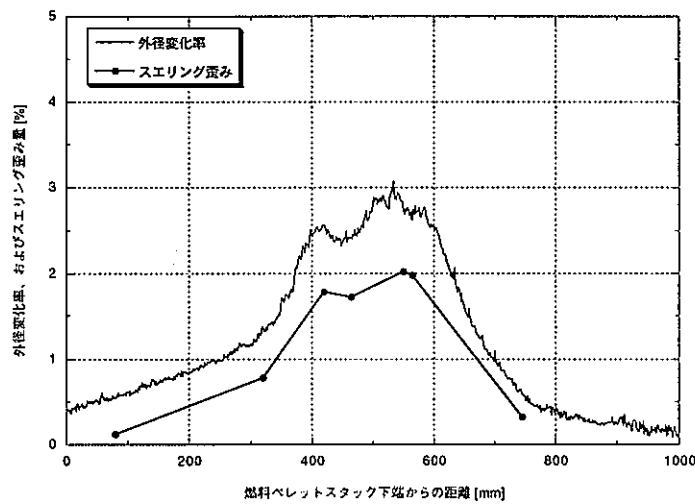


図 3-2.2 MFA-1ピン外径変化プロフィールとスエリング量 (ピンNo.186023)

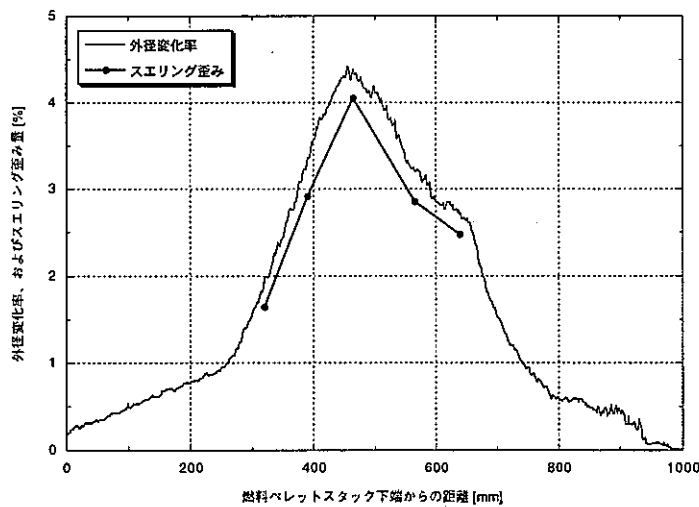


図 3-2.3 MFA-1ピン外径変化プロフィールとスエリング量 (ピンNo.186091)

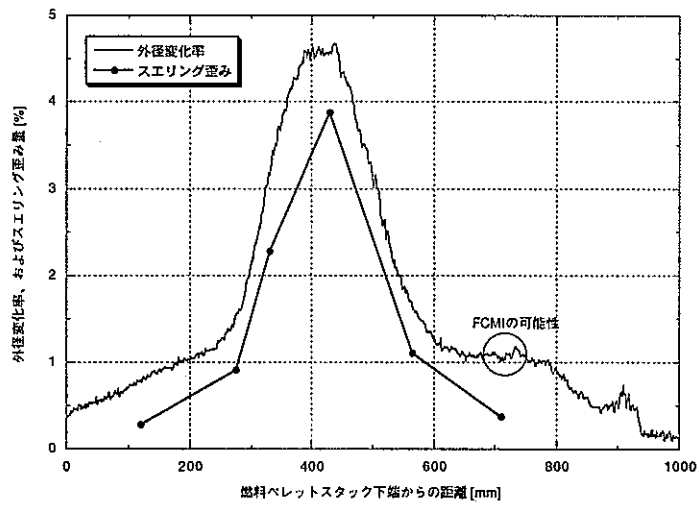


図 3-2.4 MFA-1ピン外径変化プロフィールとスエリング量 (ピンNo.186101)

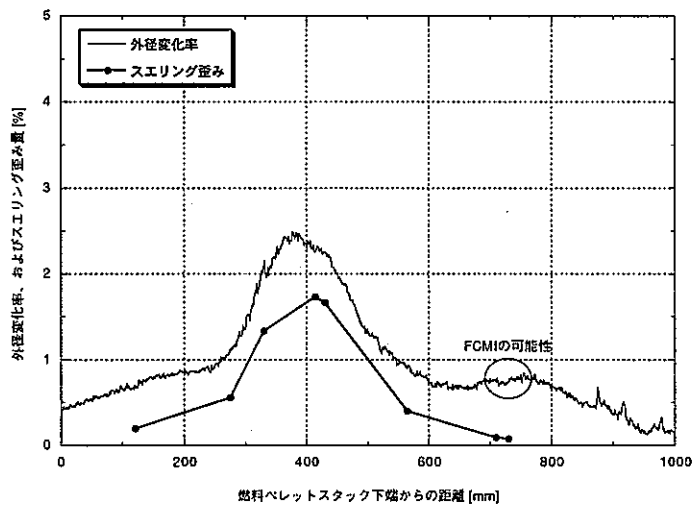


図 3-2.5 MFA-1ピン外径変化プロフィールとスエリング量 (ピンNo.186102)

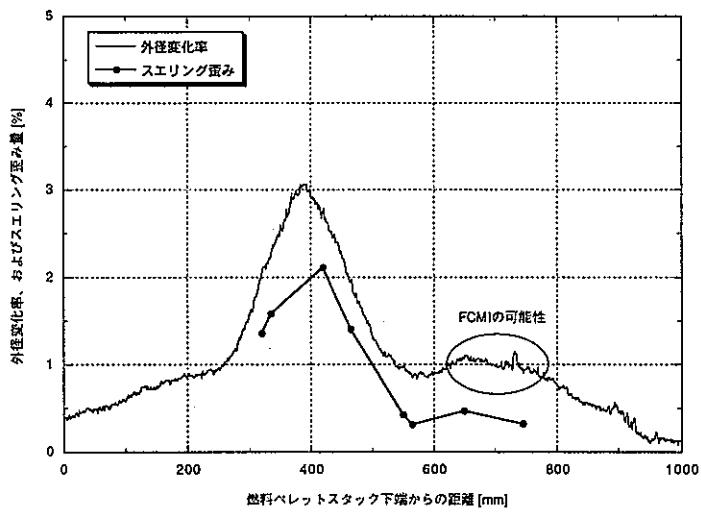


図 3-2.6 MFA-1ピン外径変化プロフィールとスエリング量 (ピンNo.186104)

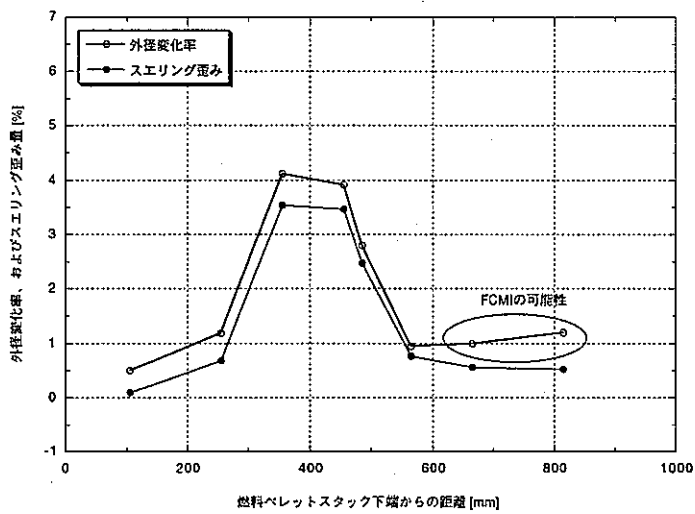


図 3-2.7 MFA-2ピン外径変化プロフィールとスエリング量 (ピンNo.187017)

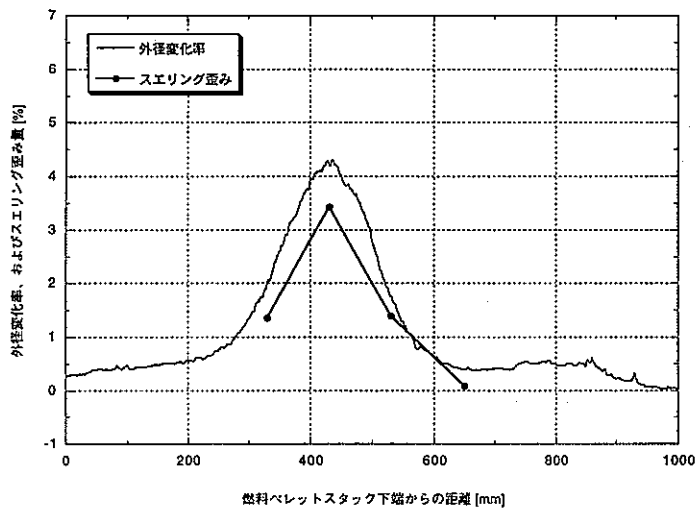


図 3-2.8 MFA-2ピン外径変化プロフィールとスエリング量 (ピンNo.187041)

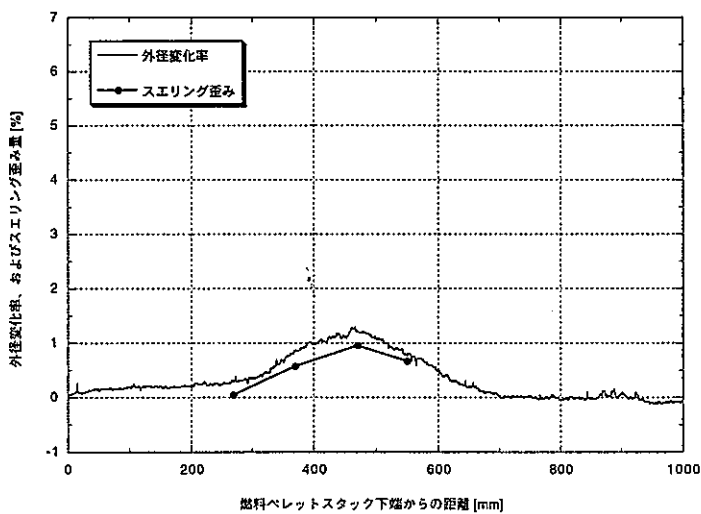


図 3-2.9 MFA-2ピン外径変化プロフィールとスエリング量 (ピンNo.187074)

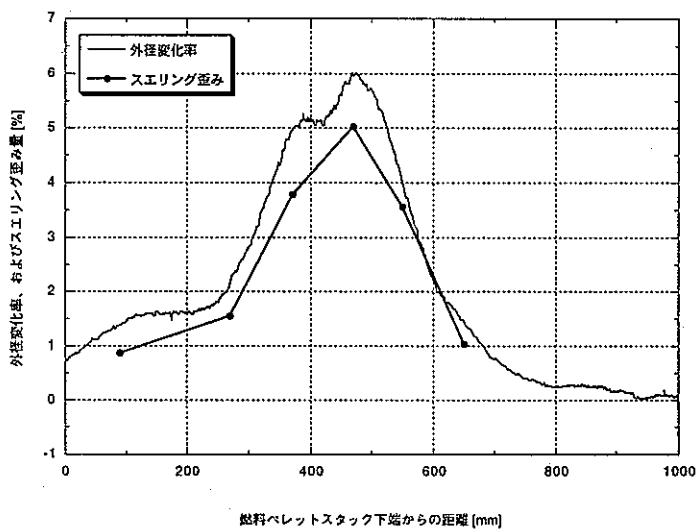


図 3-2.10 MFA-2ピン外径変化プロフィールとスエリング量 (ピンNo.187104)

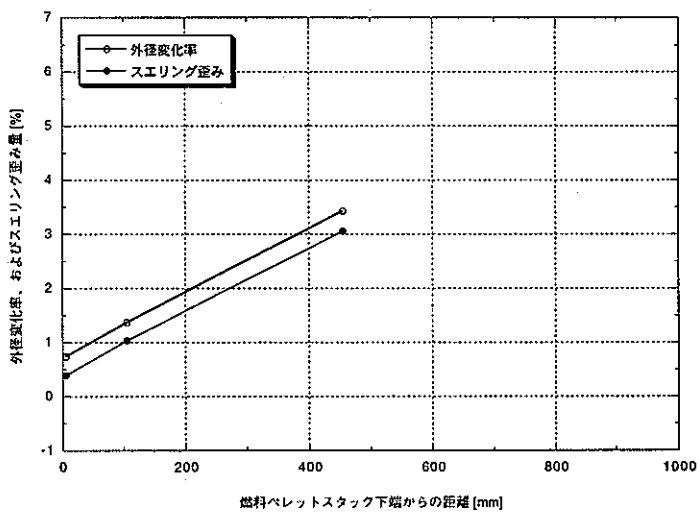


図 3-2.11 MFA-2ピン外径変化プロフィールとスエリング量 (ピンNo.187164)

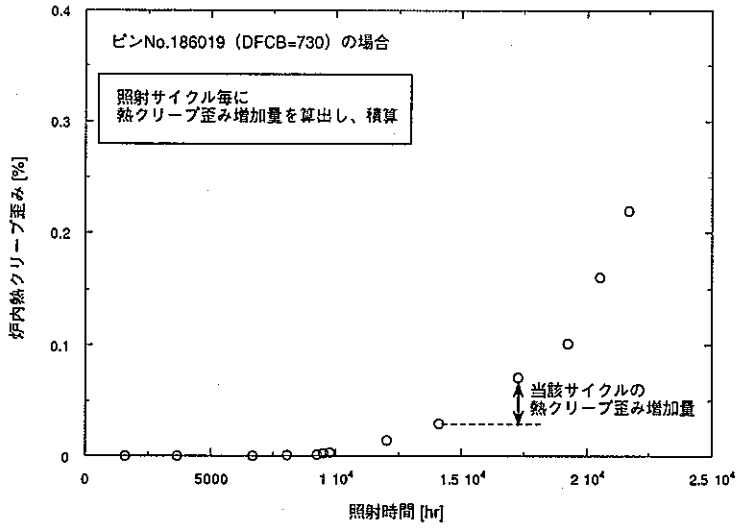


図 3-3 炉内熱クリープ歪み量の算出例

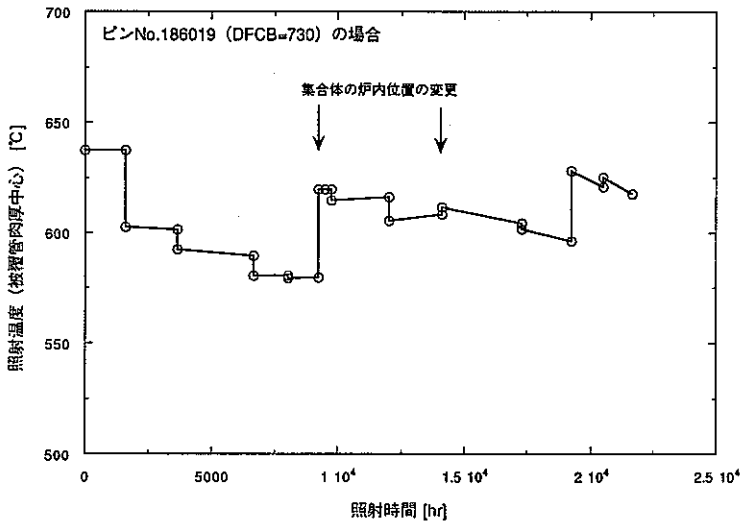


図 3-4 燃料ピンのある軸方向位置での照射温度履歴の例

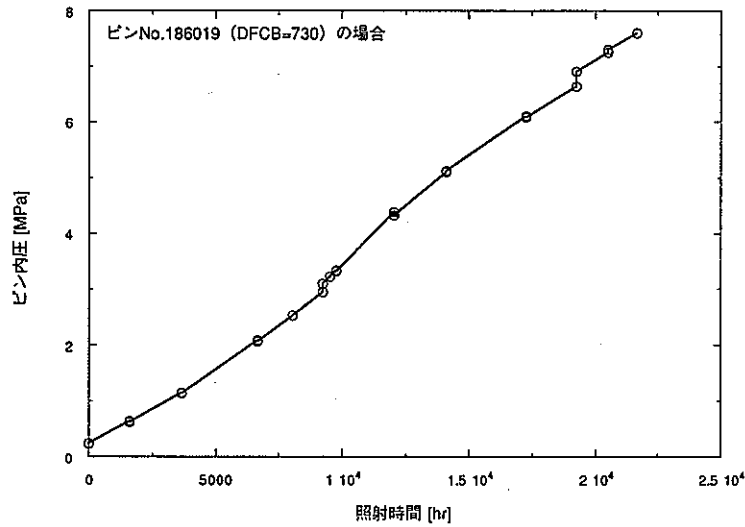


図 3-5 燃料ピンのある軸方向位置でのピン内圧履歴の例

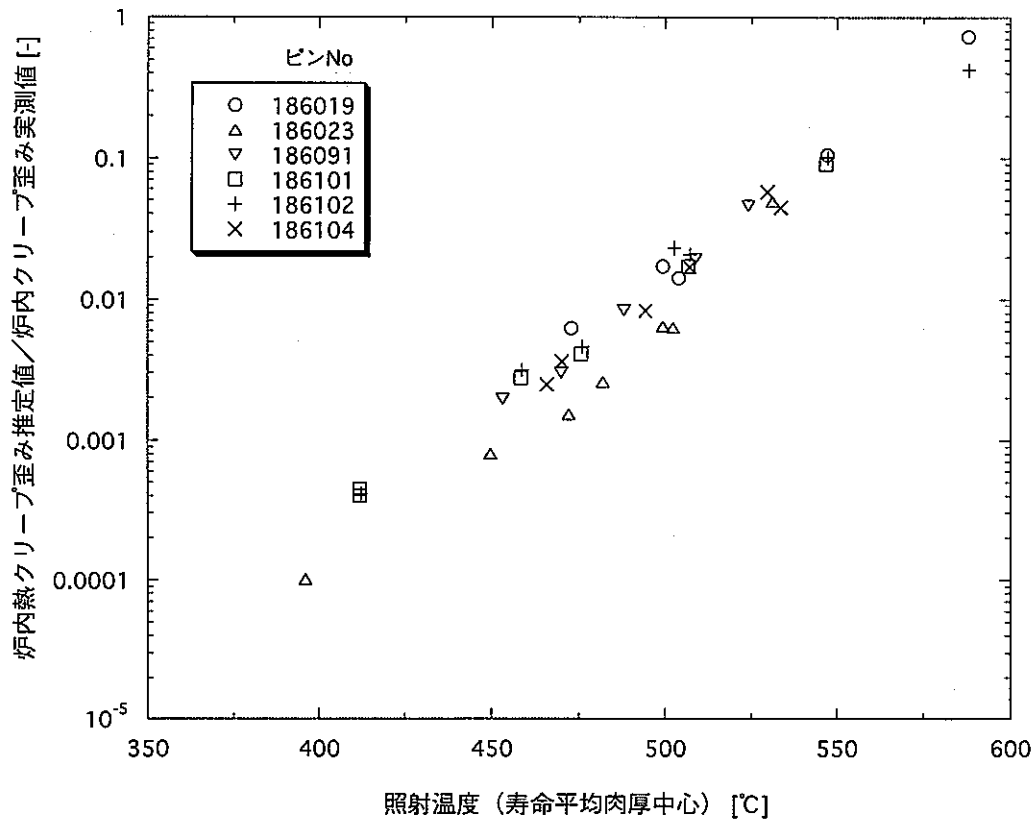


図 3-6.1 MFA-1ピンの炉内クリープ歪み量における熱クリープの寄与の推定

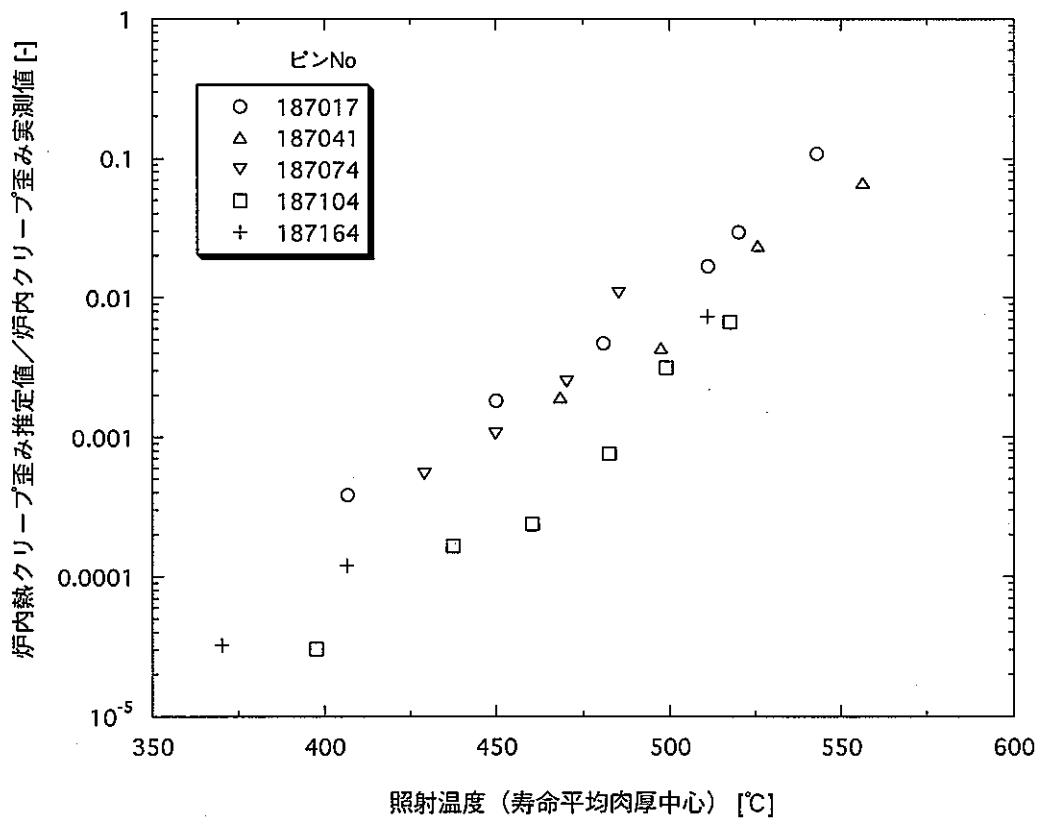


図 3-6.2 MFA-2ピンの炉内クリープ歪み量における熱クリープの寄与の推定

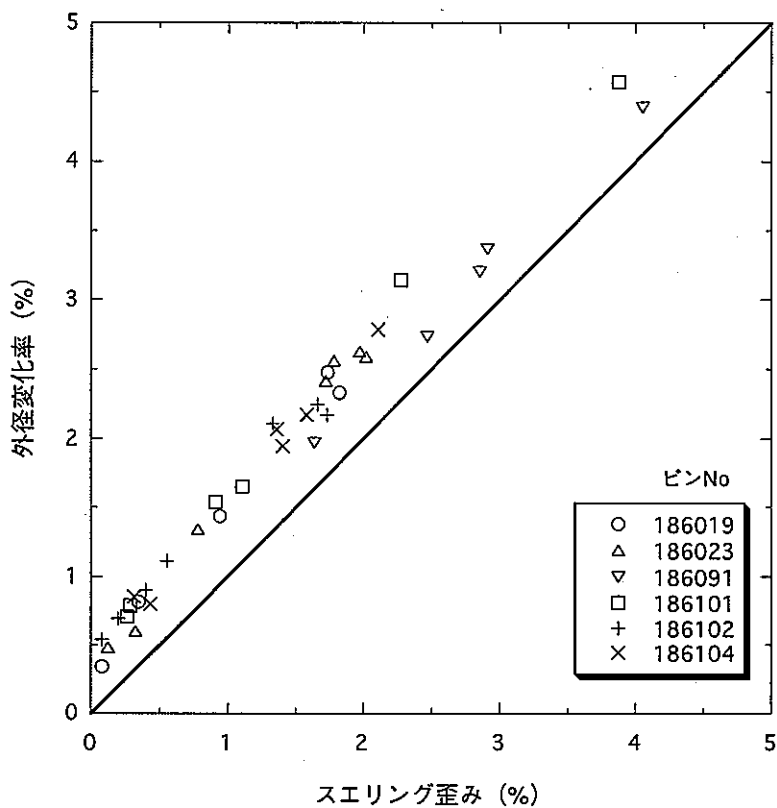


図 4-1.1 MFA-1ピンにおける外径変化とスエリングの関係

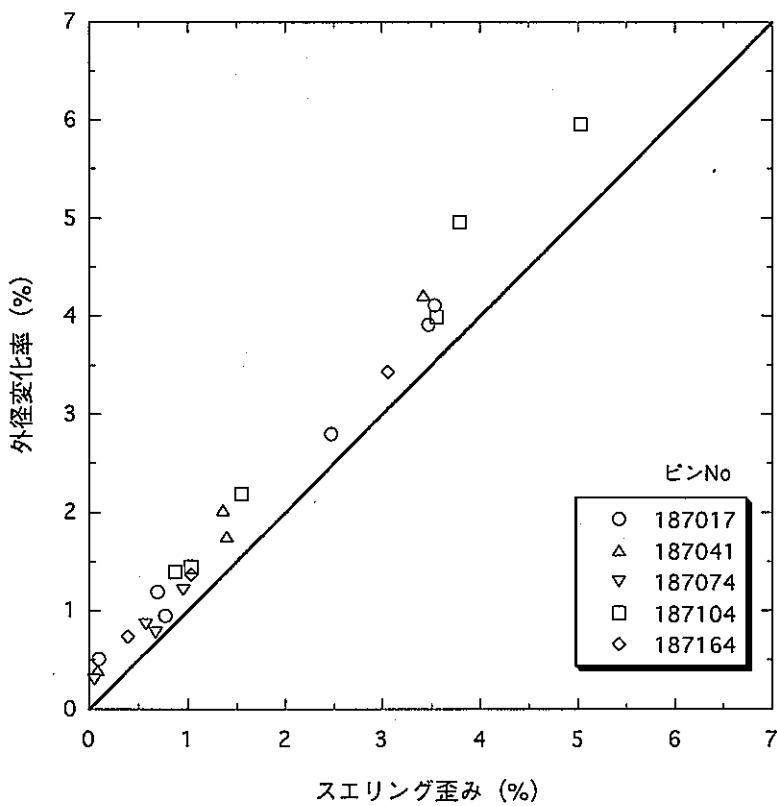


図 4-1.2 MFA-2ピンにおける外径変化とスエリングの関係

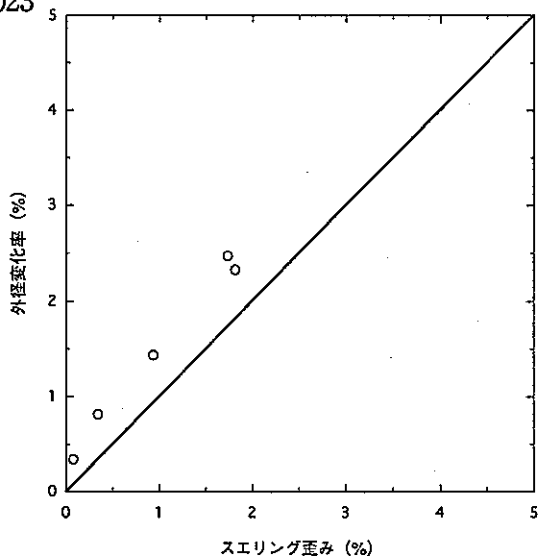


図 4-2.1 MFA-1ピンにおける外径変化とスエリングの関係 (ピンNo 186019の場合)

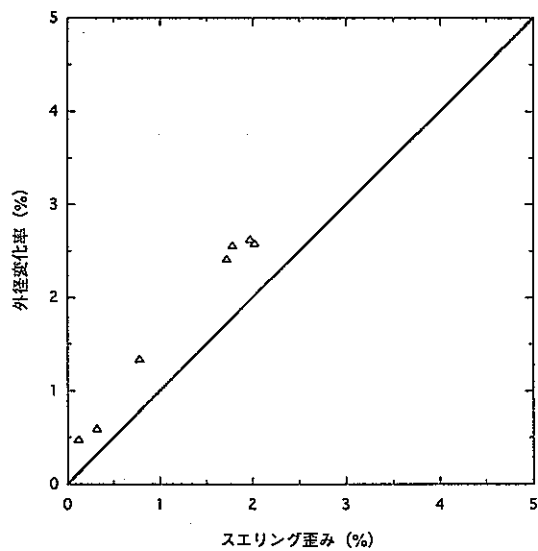


図 4-2.2 MFA-1ピンにおける外径変化とスエリングの関係 (ピンNo 186023の場合)

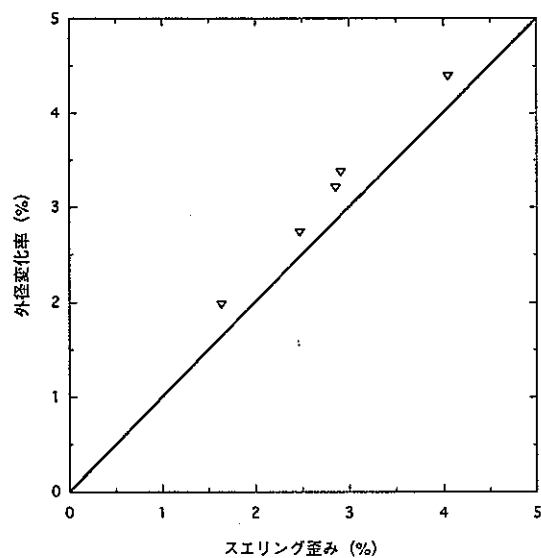


図 4-2.3 MFA-1ピンにおける外径変化とスエリングの関係 (ピンNo 186091の場合)

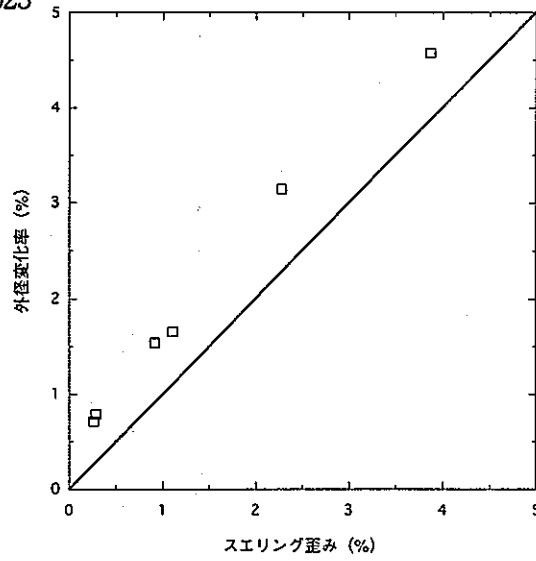


図 4-2.4 MFA-1ピンにおける外径変化とスエリングの関係
(ピンNo 186101の場合)

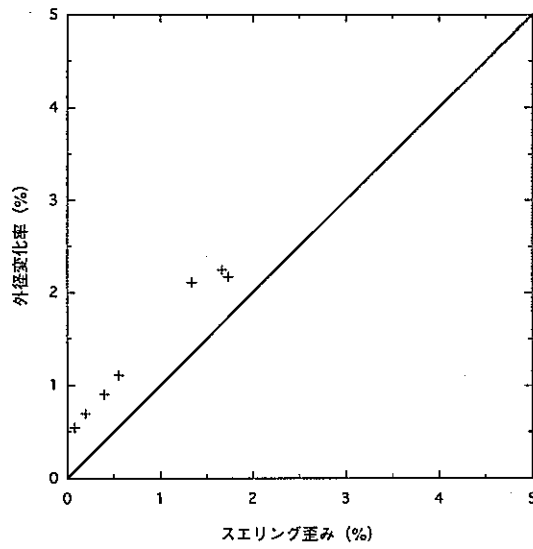


図 4-2.5 MFA-1ピンにおける外径変化とスエリングの関係
(ピンNo 186102の場合)

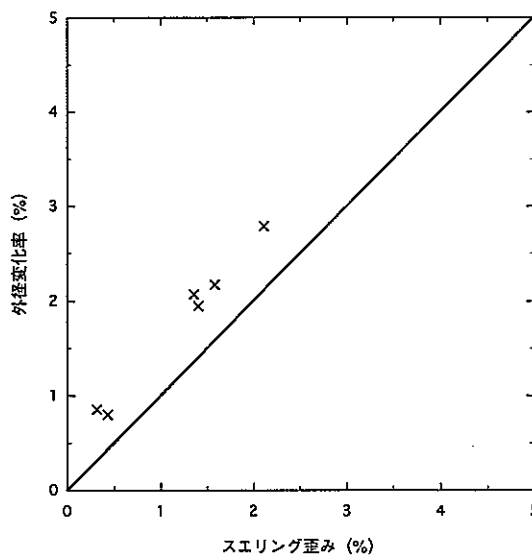


図 4-2.6 MFA-1ピンにおける外径変化とスエリングの関係
(ピンNo 186104の場合)

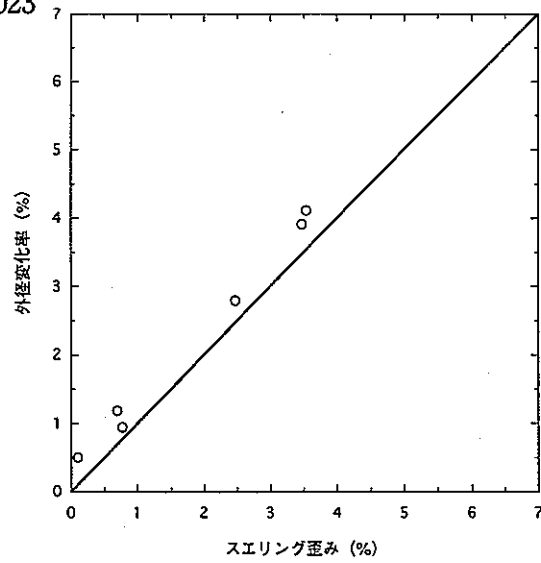


図 4-2.7 MFA-2ピンにおける外径変化とスエリングの関係
(ピンNo 187017の場合)

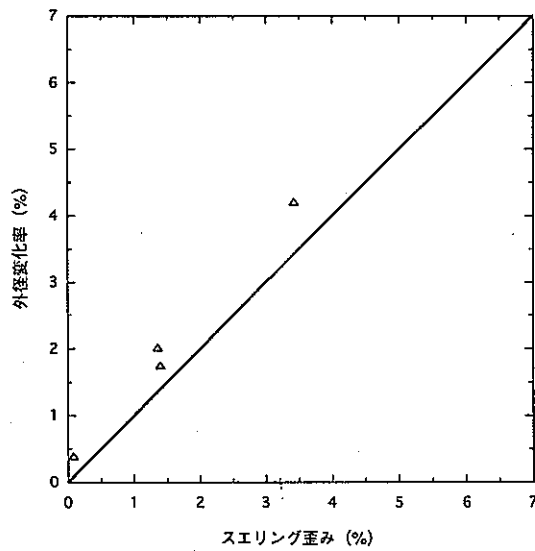


図 4-2.8 MFA-2ピンにおける外径変化とスエリングの関係
(ピンNo 187041の場合)

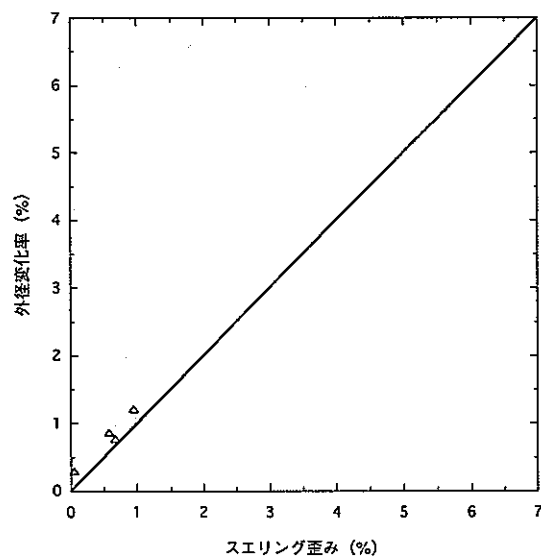


図 4-2.9 MFA-2ピンにおける外径変化とスエリングの関係
(ピンNo 187074の場合)

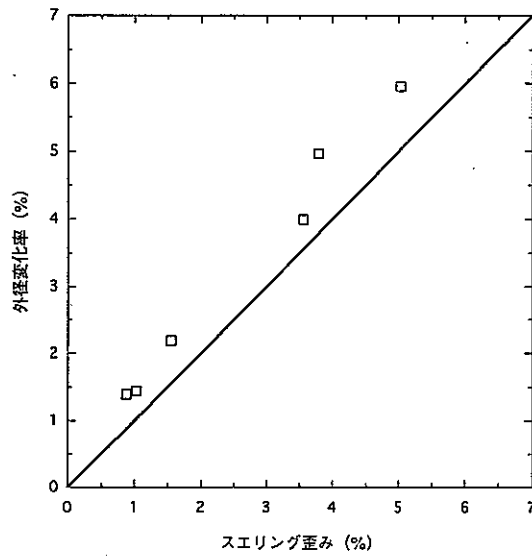


図 4-2.10 MFA-2ピンにおける外径変化とスエリングの関係
(ピンNo 187104の場合)

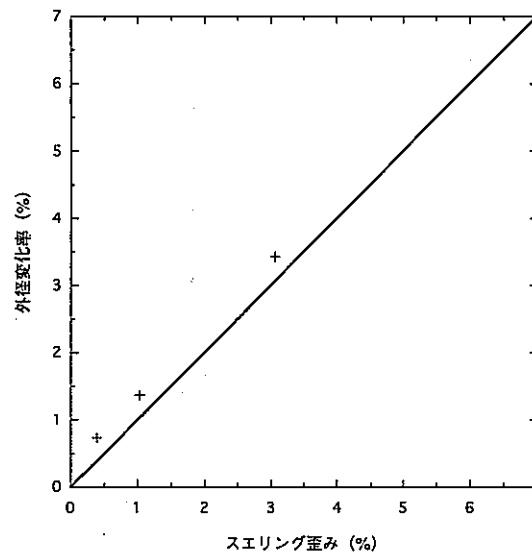


図 4-2.11 MFA-2ピンにおける外径変化とスエリングの関係
(ピンNo 187164の場合)

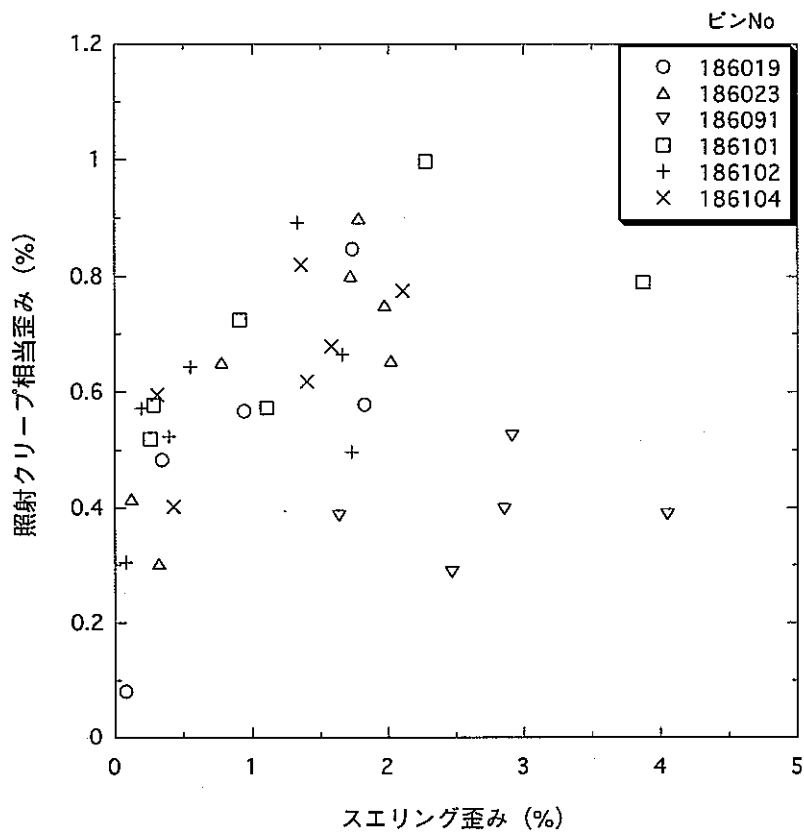


図 4-3.1 MFA-1ピンにおける照射クリープ歪みとスエリングの関係

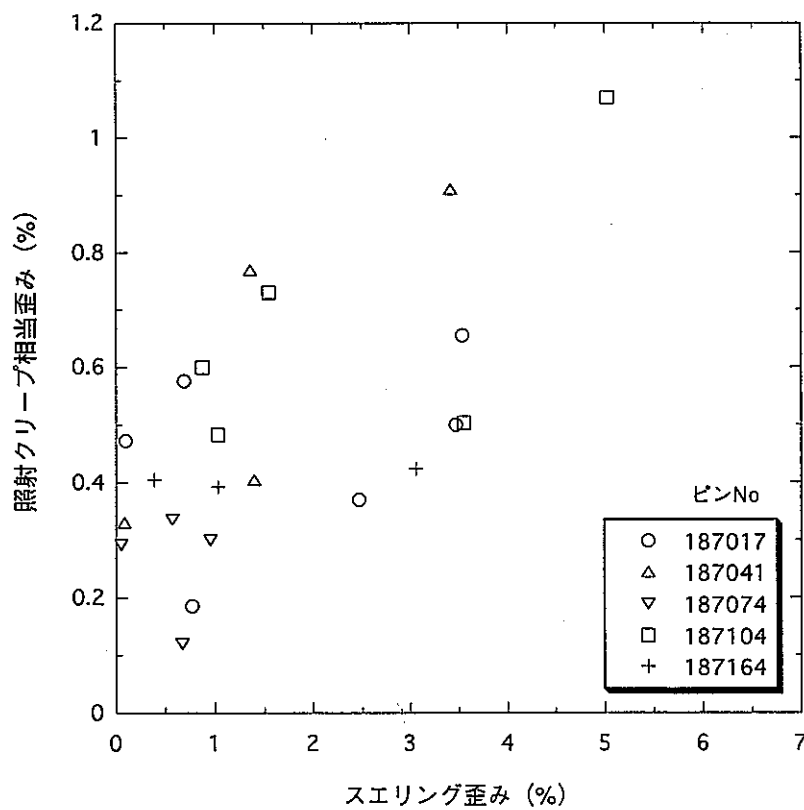


図 4-3.2 MFA-2ピンにおける照射クリープ歪みとスエリングの関係

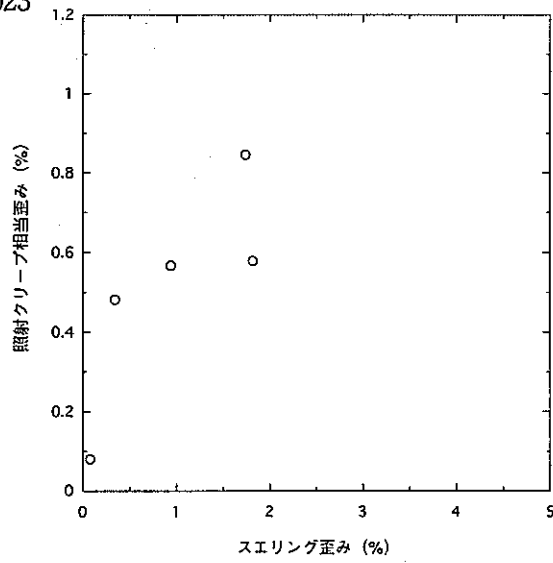


図 4-4.1 MFA-1ピンにおける照射クリープ歪みとスエリングの関係 (ピンNo: 186019)

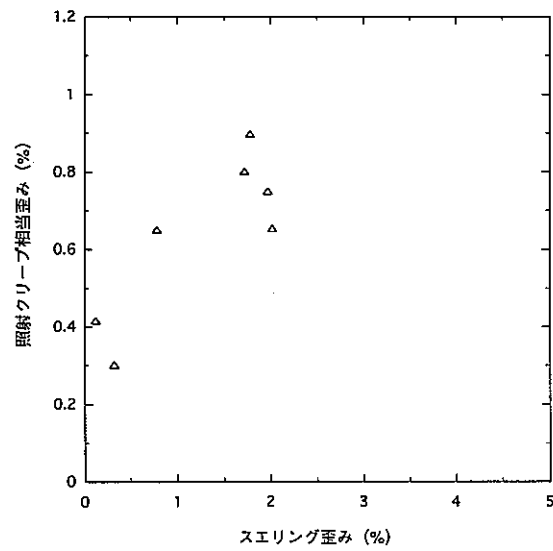


図 4-4.2 MFA-1ピンにおける照射クリープ歪みとスエリングの関係 (ピンNo: 186023)

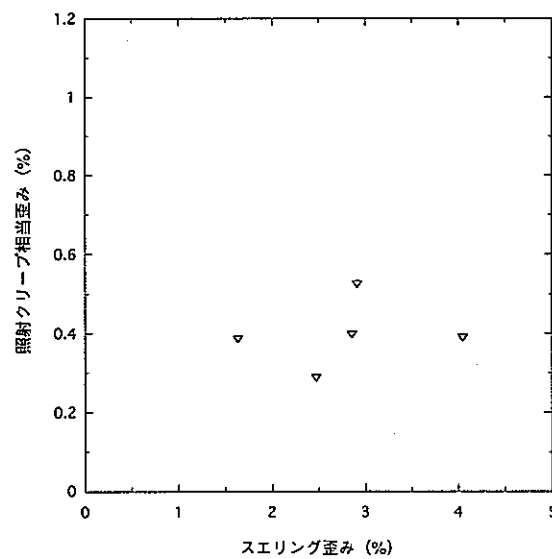


図 4-4.3 MFA-1ピンにおける照射クリープ歪みとスエリングの関係 (ピンNo: 186091)

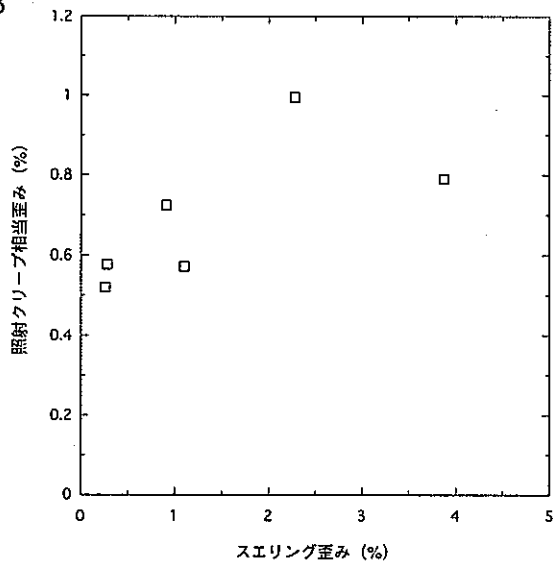


図 4-4.4 MFA-1ピンにおける照射クリープ歪みとスエリングの関係 (ピンNo: 186101)

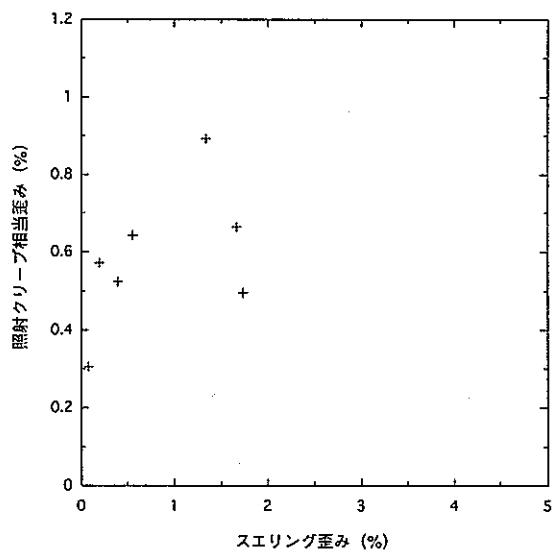


図 4-4.5 MFA-1ピンにおける照射クリープ歪みとスエリングの関係 (ピンNo: 186102)

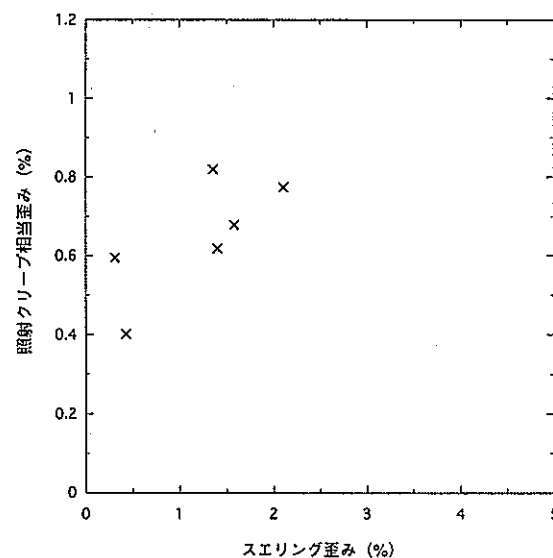


図 4-4.6 MFA-1ピンにおける照射クリープ歪みとスエリングの関係 (ピンNo: 186104)

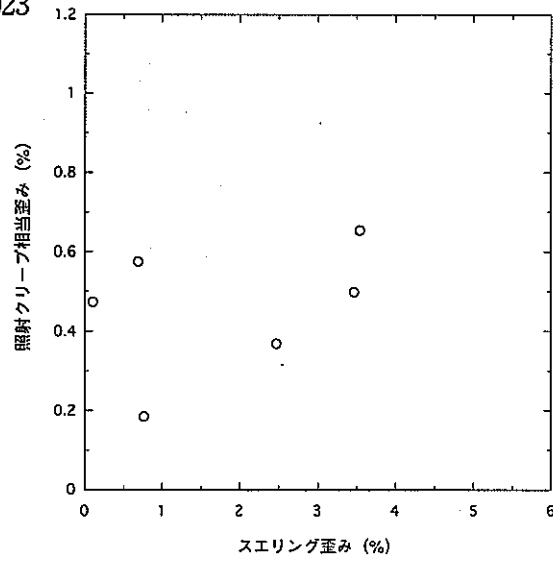


図 4-4.7 MFA-2ピンにおける照射クリープ歪みとスエリングの関係 (ピンNo: 187017)

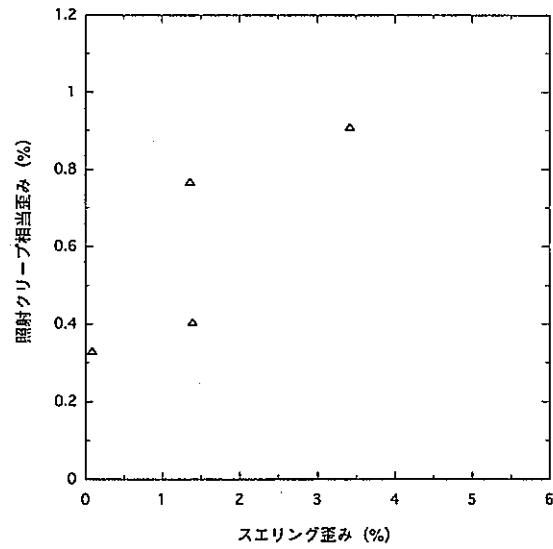


図 4-4.8 MFA-2ピンにおける照射クリープ歪みとスエリングの関係 (ピンNo: 187041)

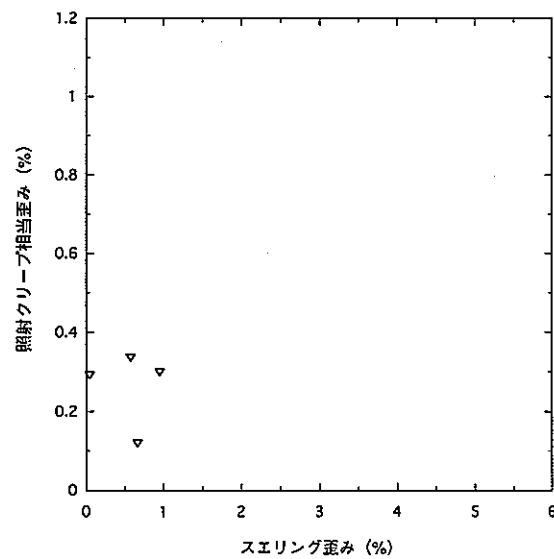


図 4-4.9 MFA-2ピンにおける照射クリープ歪みとスエリングの関係 (ピンNo: 187074)

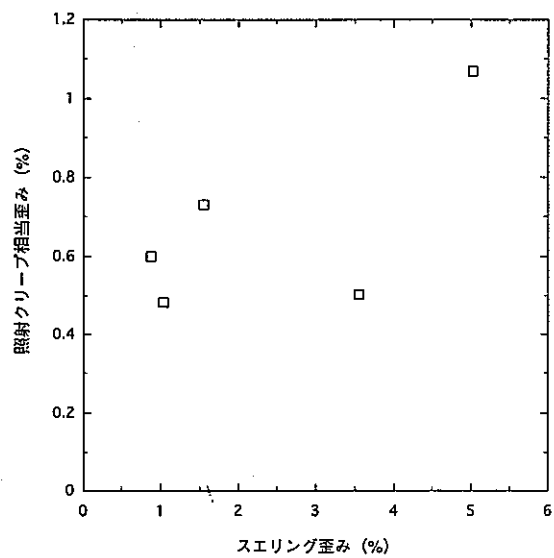


図 4-4.10 MFA-2ピンにおける照射クリープ歪みとスエリングの関係 (ピンNo : 187104)

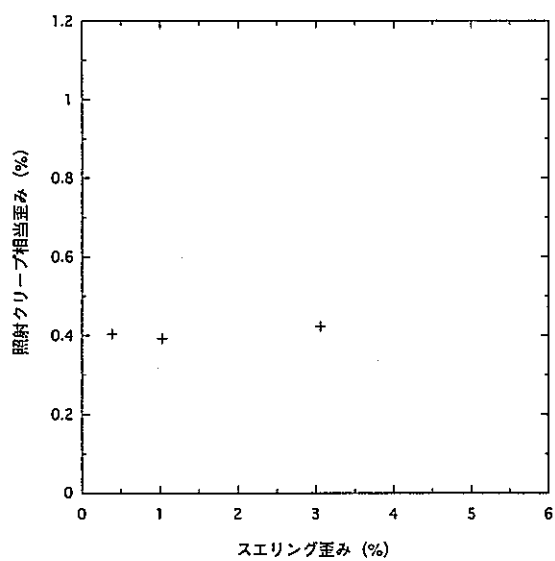


図 4-4.11 MFA-2ピンにおける照射クリープ歪みとスエリングの関係 (ピンNo : 187164)

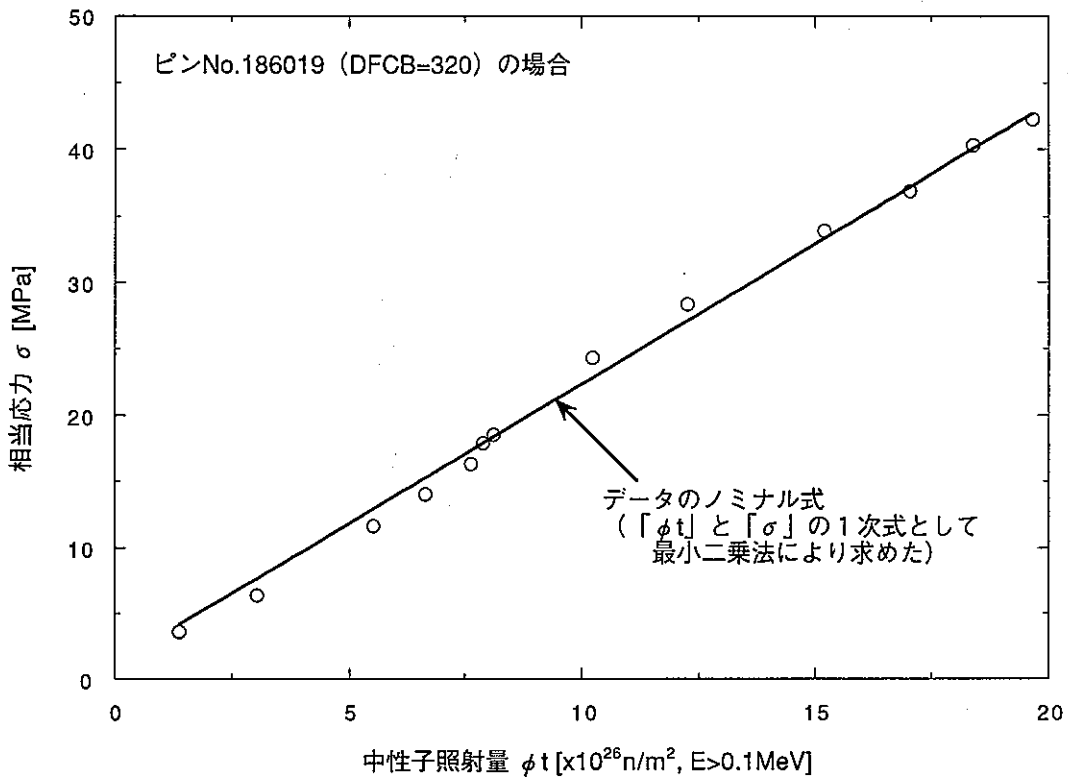


図 4-5 応力と中性子照射量の関係の算出例

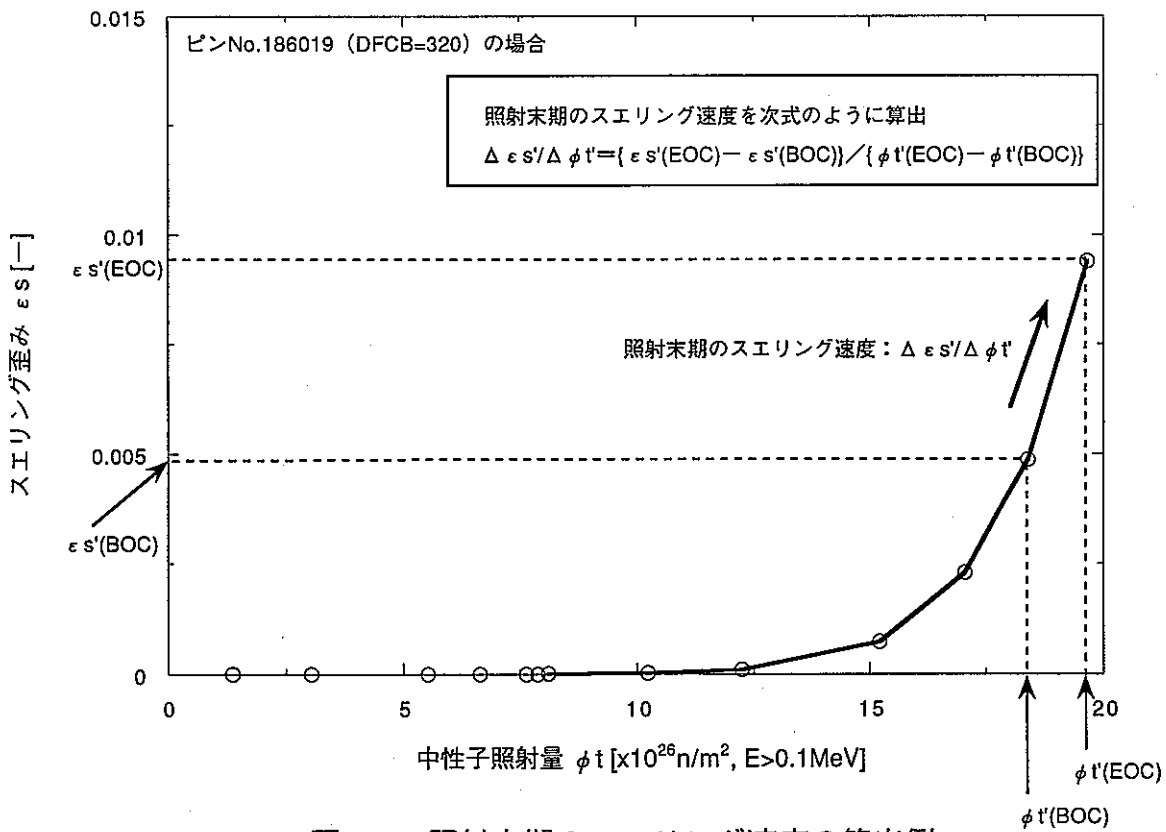


図 4-6 照射末期のスエリング速度の算出例

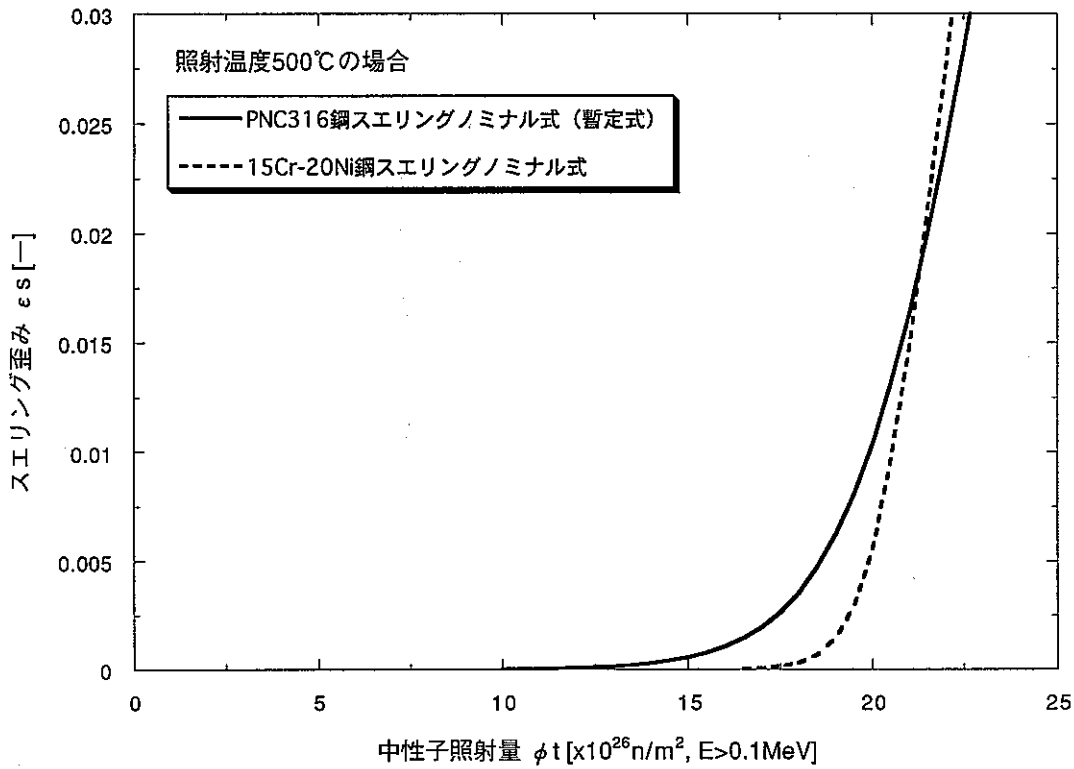


図 4-7 PNC316、15Cr-20Ni鋼それぞれのスエリングノミナル式

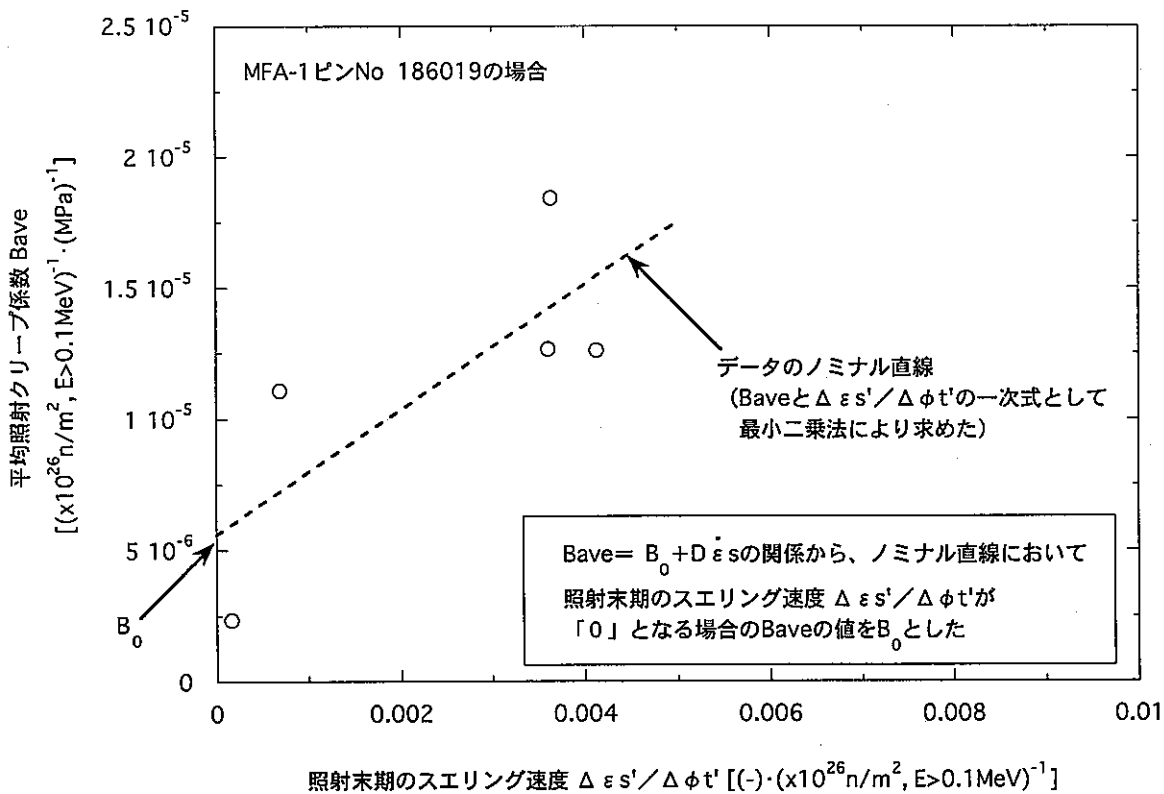


図 4-8 照射クリープ係数「 B_0 」の算出例

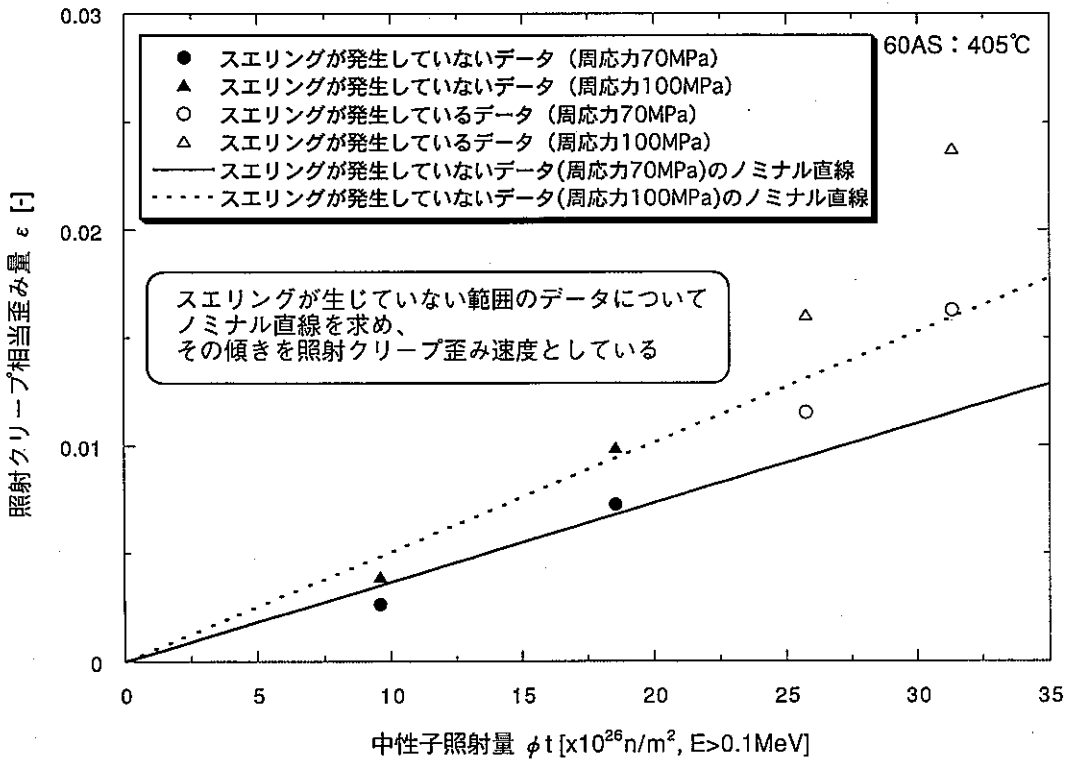


図 4-9 MOTAデータからの照射クリープ係数「 B_0 」の算出における
照射クリープ歪み速度の算出例

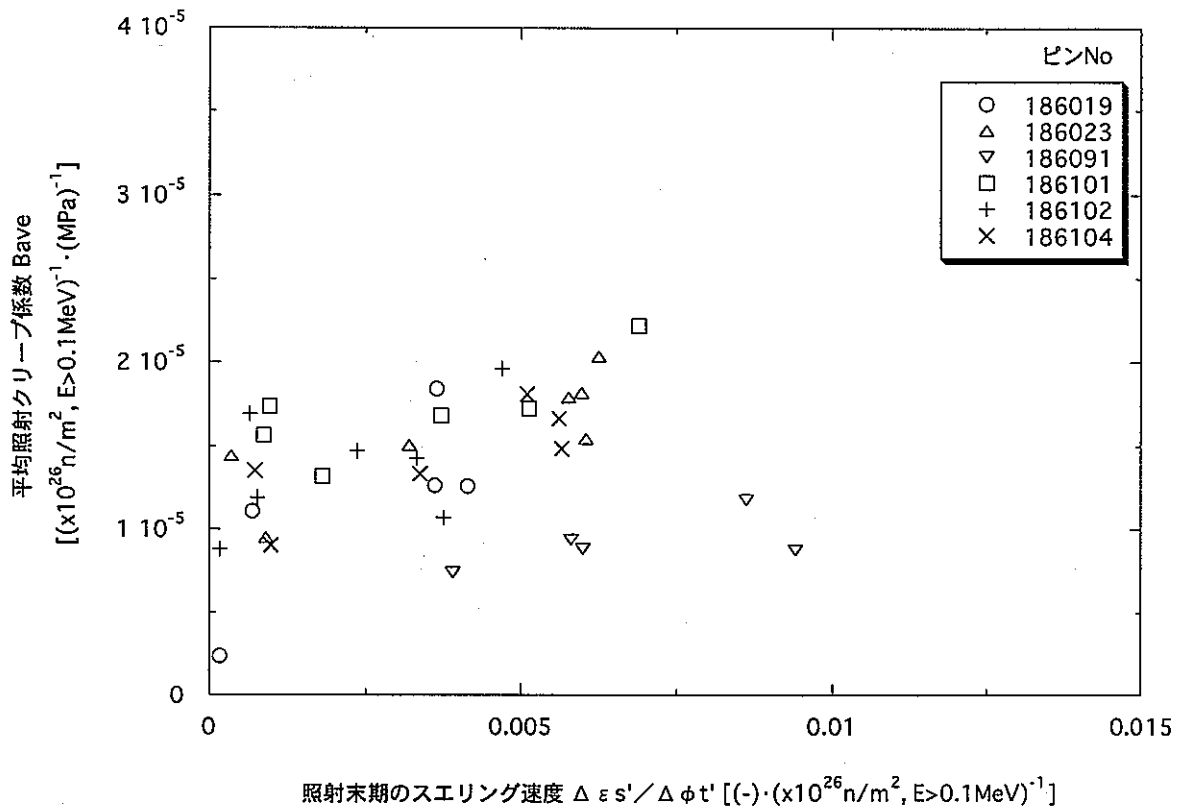


図 4-10.1 MFA-1データにおける平均照射クリープ係数「Bave」とスエリング速度との関係

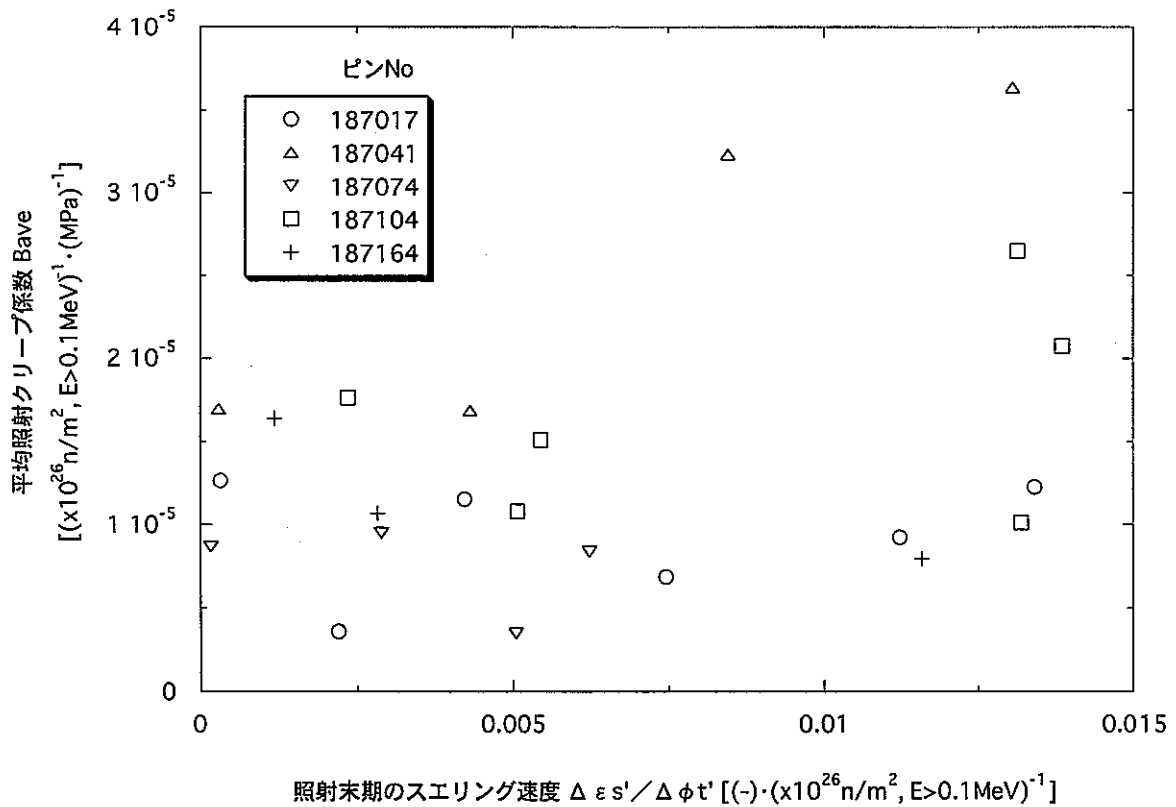


図 4-10.2 MFA-2データにおける平均照射クリープ係数「Bave」とスエリング速度との関係

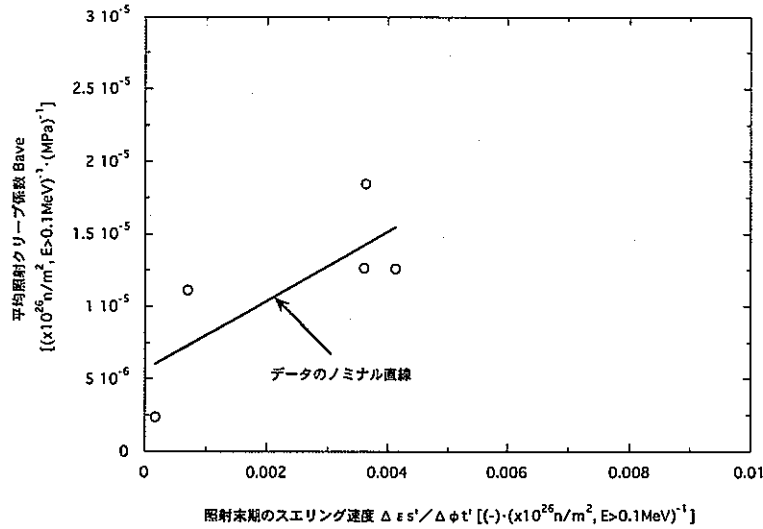


図 4-11.1 MFA-1データにおける平均照射クリープ係数「Bave」とスエリング速度との関係 (ピンNo 186019の場合)

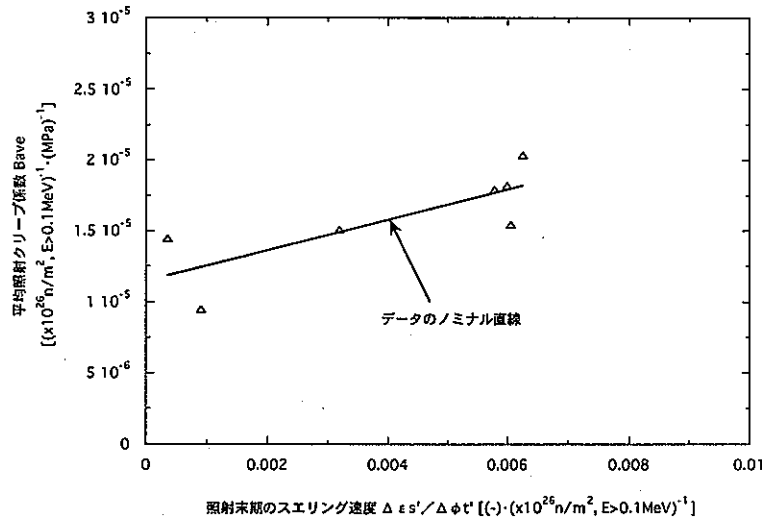


図 4-11.2 MFA-1データにおける平均照射クリープ係数「Bave」とスエリング速度との関係 (ピンNo 186023の場合)

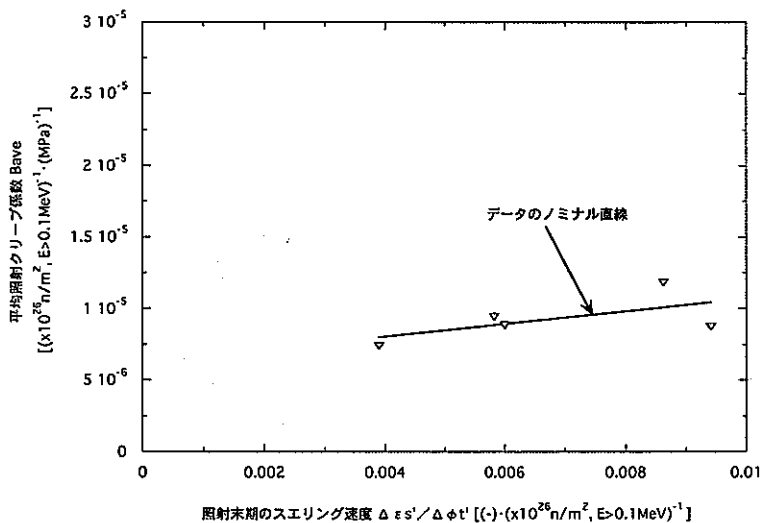


図 4-11.3 MFA-1データにおける平均照射クリープ係数「Bave」とスエリング速度との関係 (ピンNo 186091の場合)

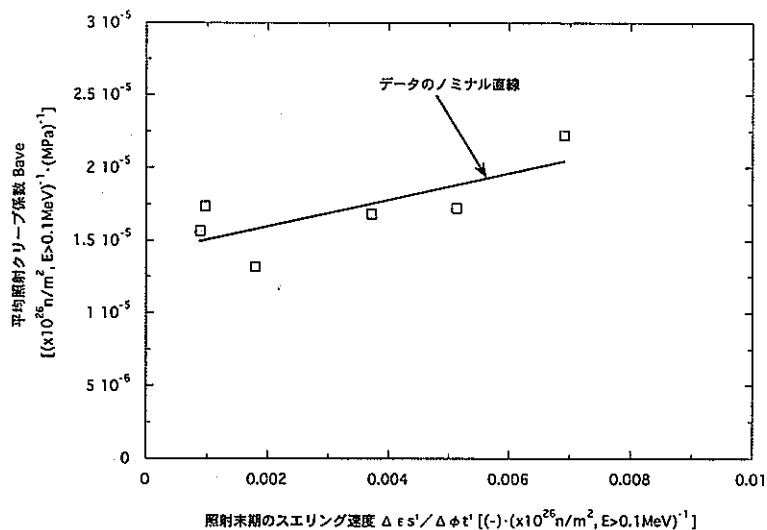


図 4-11.4 MFA-1データにおける平均照射クリープ係数「Bave」とスエリング速度との関係 (ピンNo 186101の場合)

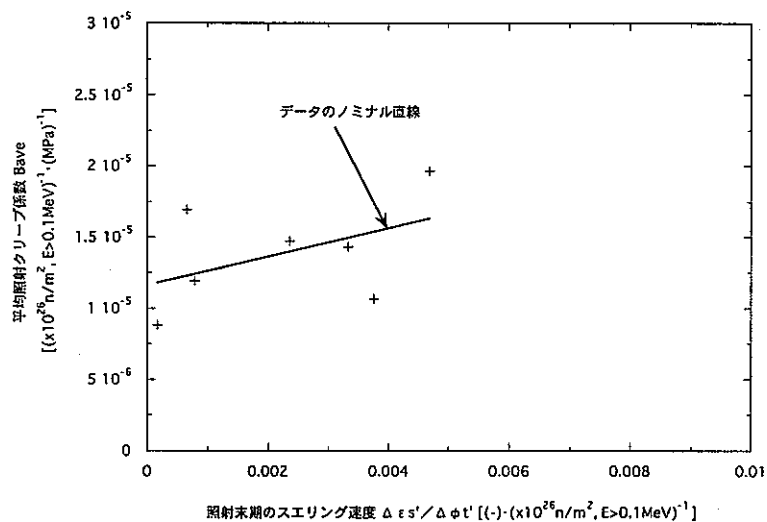


図 4-11.5 MFA-1データにおける平均照射クリープ係数「Bave」とスエリング速度との関係 (ピンNo 186102の場合)

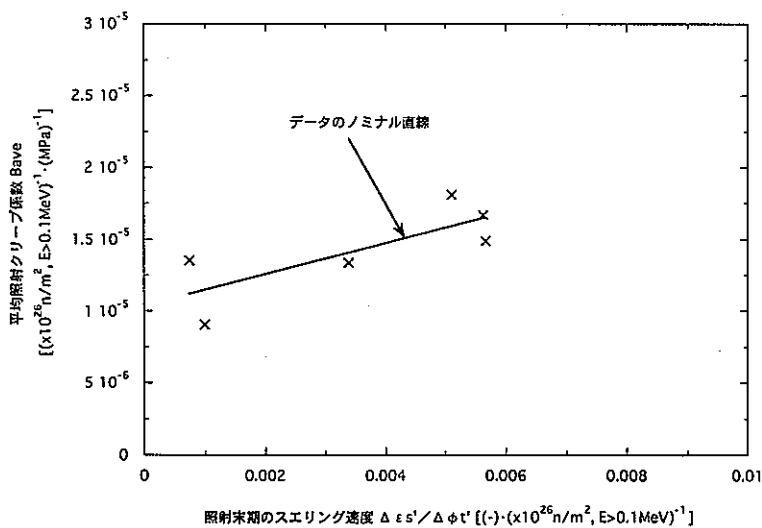


図 4-11.6 MFA-1データにおける平均照射クリープ係数「Bave」とスエリング速度との関係 (ピンNo 186104の場合)

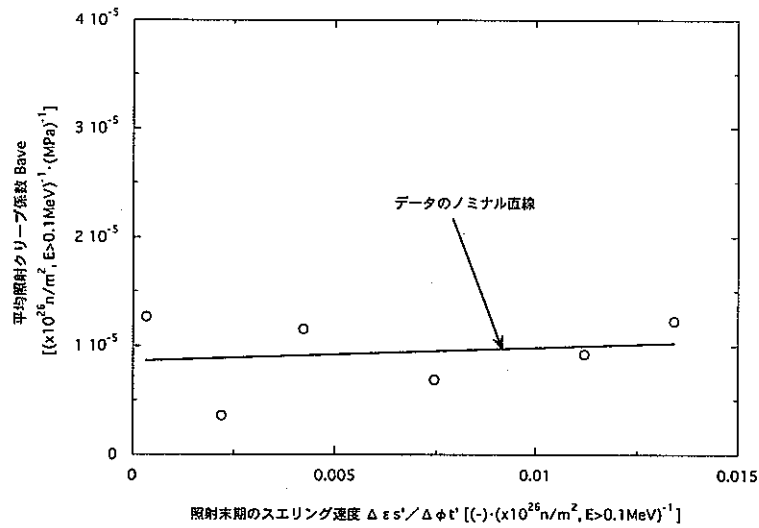


図 4-11.7 MFA-2データにおける平均照射クリープ係数「Bave」とスエリング速度との関係 (ピンNo 187017の場合)

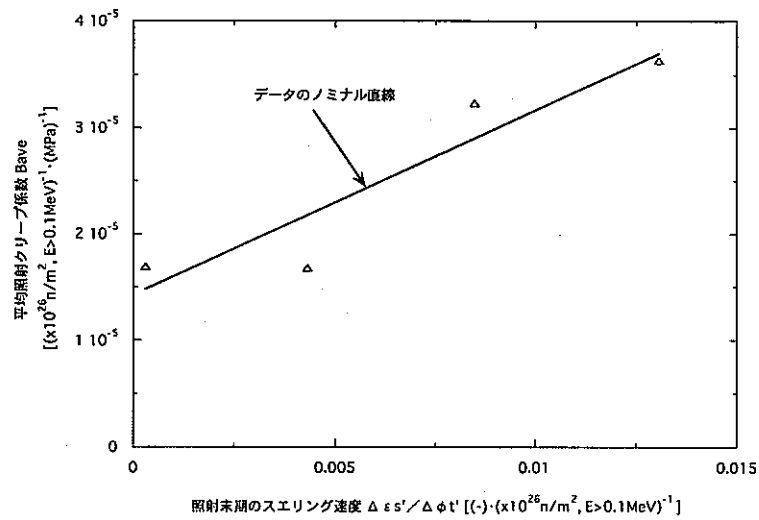


図 4-11.8 MFA-2データにおける平均照射クリープ係数「Bave」とスエリング速度との関係 (ピンNo 187041の場合)

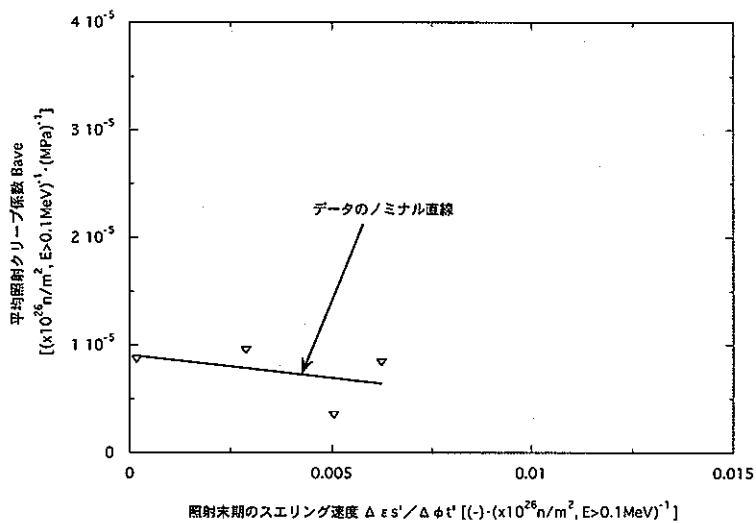


図 4-11.9 MFA-2データにおける平均照射クリープ係数「Bave」とスエリング速度との関係 (ピンNo 187074の場合)

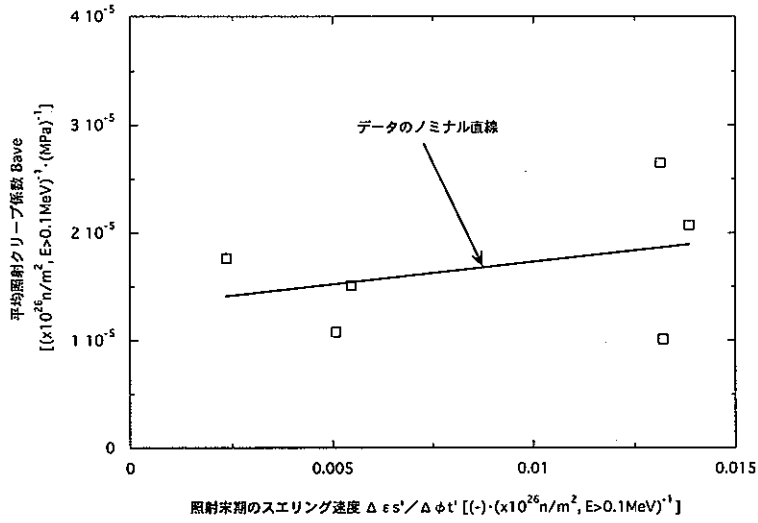


図 4-11.10 MFA-2データにおける平均照射クリープ係数「Bave」とスエリング速度との関係 (ピンNo 187104の場合)

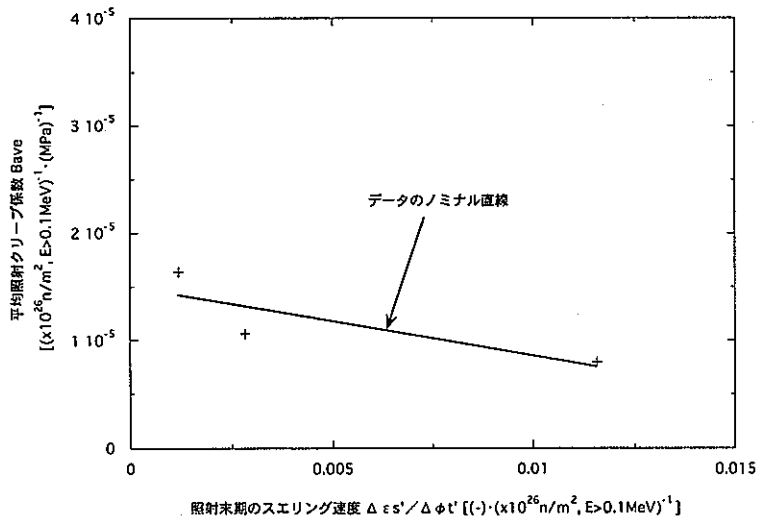


図 4-11.11 MFA-2データにおける平均照射クリープ係数「Bave」とスエリング速度との関係 (ピンNo 187164の場合)

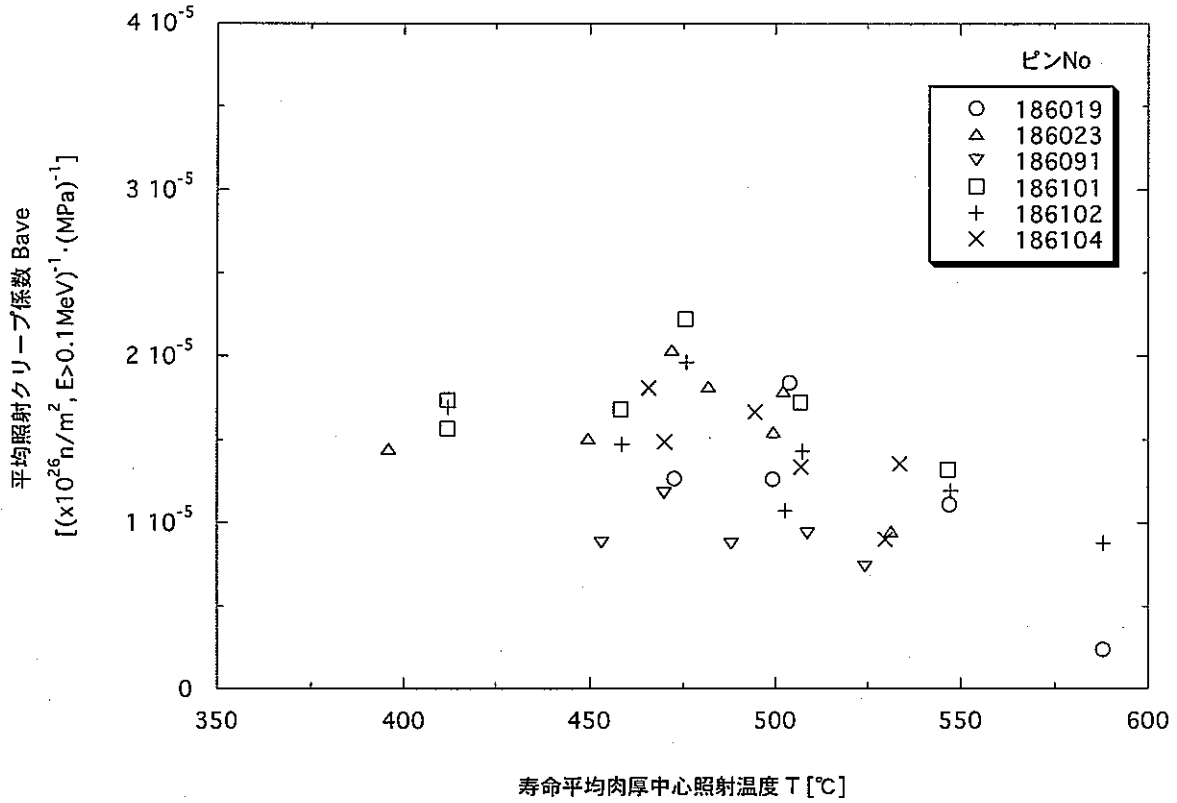


図 4-12.1 MFA-1データにおける平均照射クリープ係数「Bave」と照射温度との関係

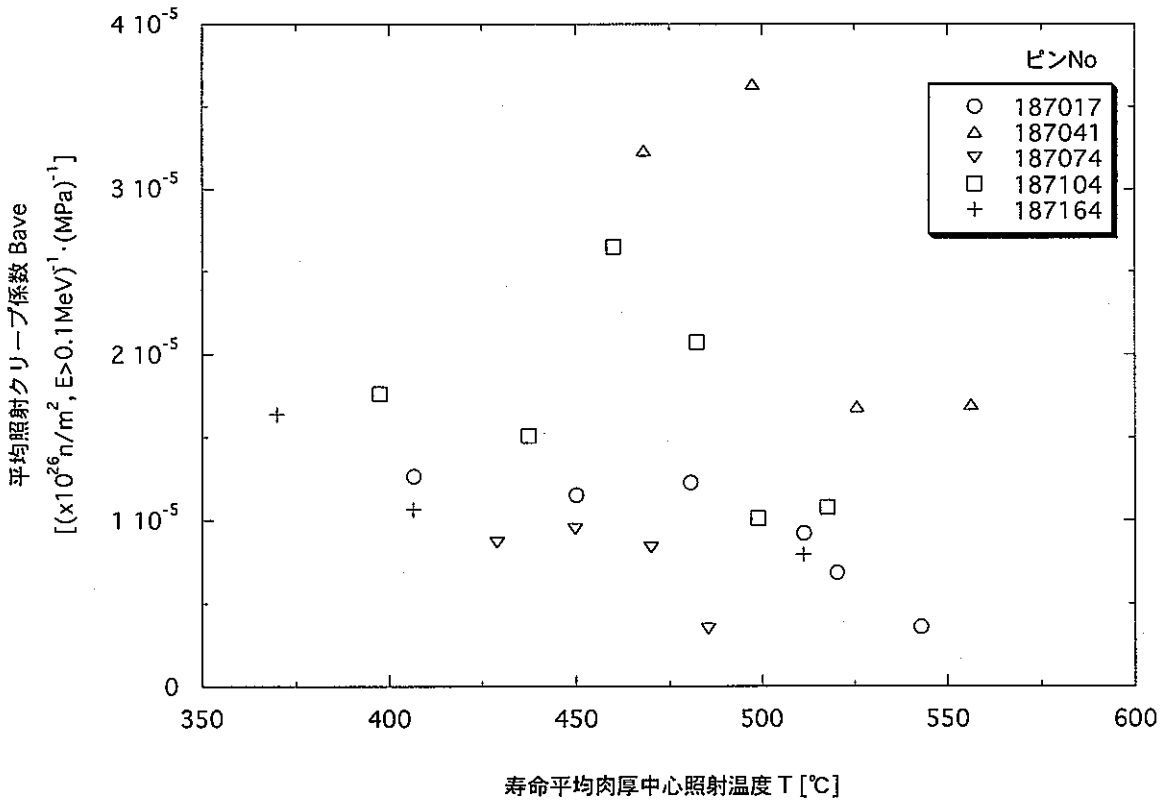


図 4-12.2 MFA-2データにおける平均照射クリープ係数「Bave」と照射温度との関係

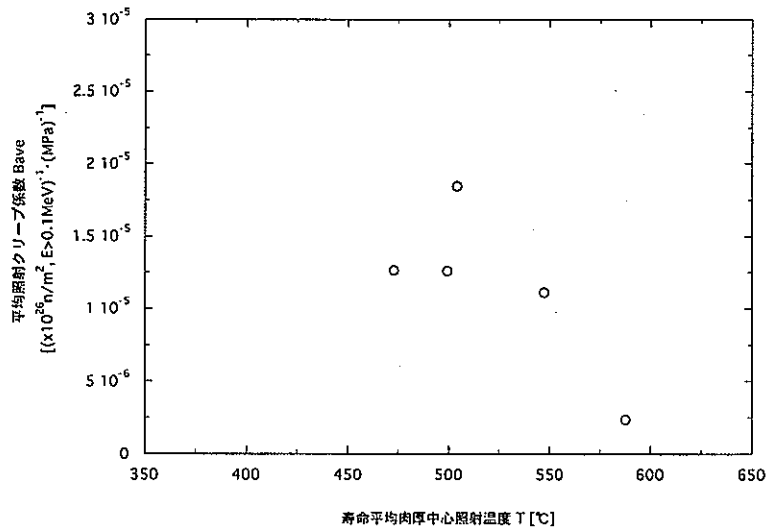


図 4-13.1 MFA-1データにおける平均照射クリープ係数「Bave」と照射温度との関係 (ピンNo 186019の場合)

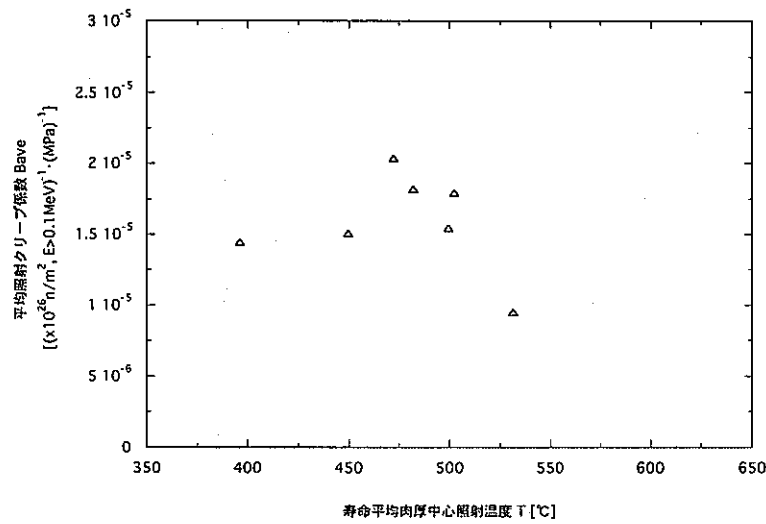


図 4-13.2 MFA-1データにおける平均照射クリープ係数「Bave」と照射温度との関係 (ピンNo 186023の場合)

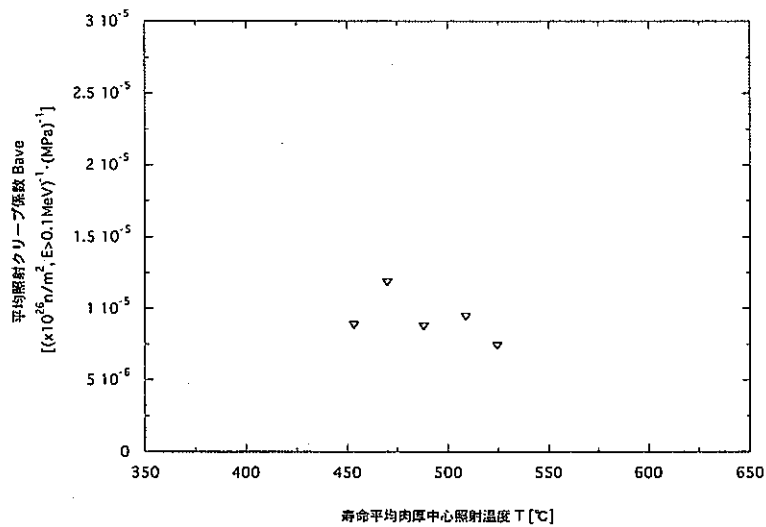


図 4-13.3 MFA-1データにおける平均照射クリープ係数「Bave」と照射温度との関係 (ピンNo 186091の場合)

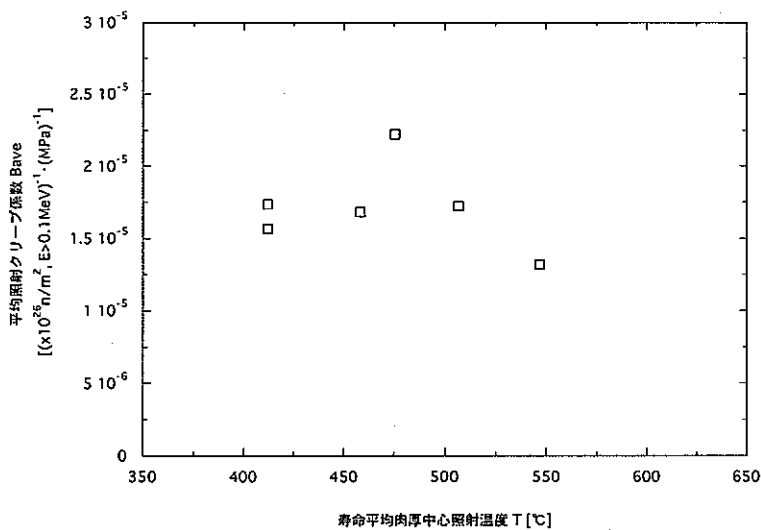


図 4-13.4 MFA-1データにおける平均照射クリープ係数「Bave」と照射温度との関係 (ピンNo 186101の場合)

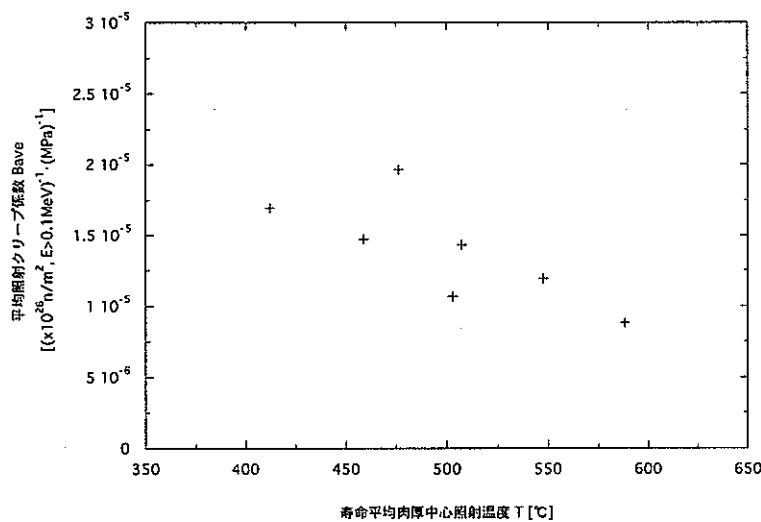


図 4-13.5 MFA-1データにおける平均照射クリープ係数「Bave」と照射温度との関係 (ピンNo 186102の場合)

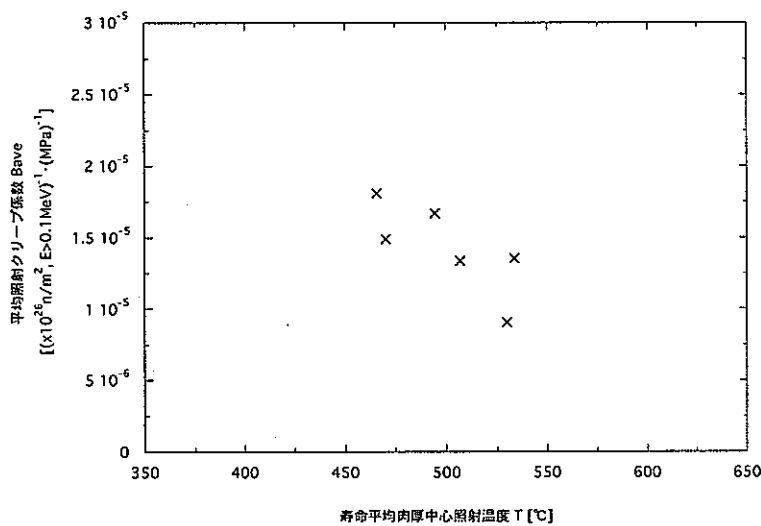


図 4-13.6 MFA-1データにおける平均照射クリープ係数「Bave」と照射温度との関係 (ピンNo 186104の場合)

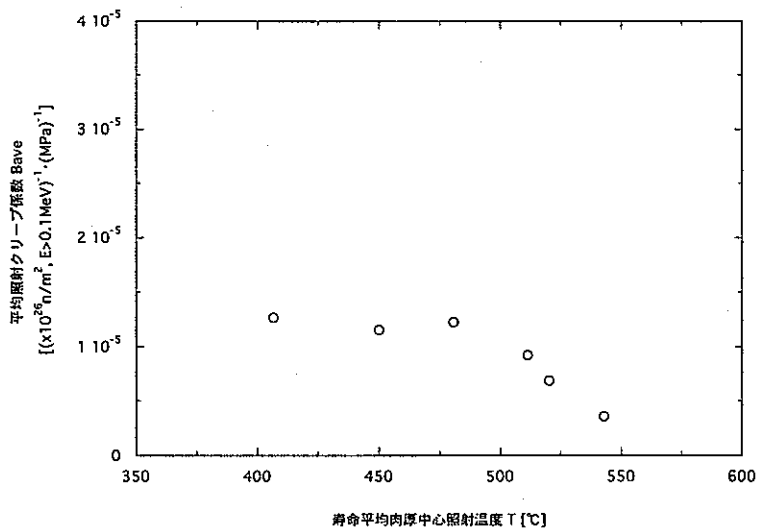


図 4-13.7 MFA-2データにおける平均照射クリープ係数「Bave」と照射温度との関係 (ピンNo 187017の場合)

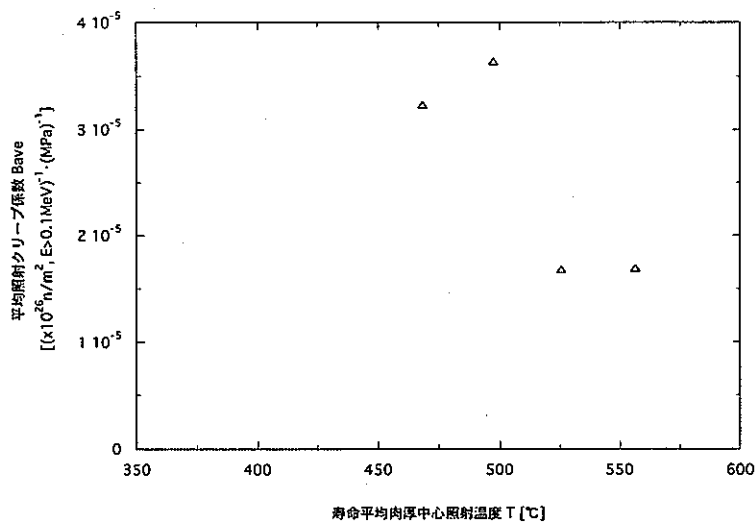


図 4-13.8 MFA-2データにおける平均照射クリープ係数「Bave」と照射温度との関係 (ピンNo 187041の場合)

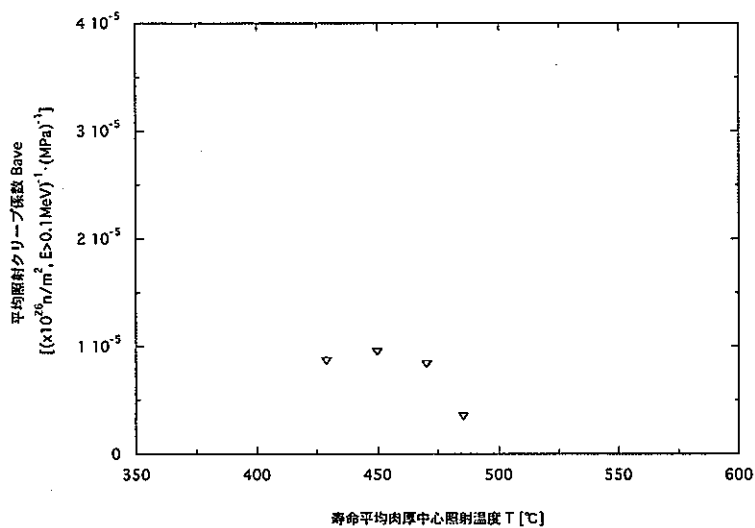


図 4-13.9 MFA-2データにおける平均照射クリープ係数「Bave」と照射温度との関係 (ピンNo 187074の場合)

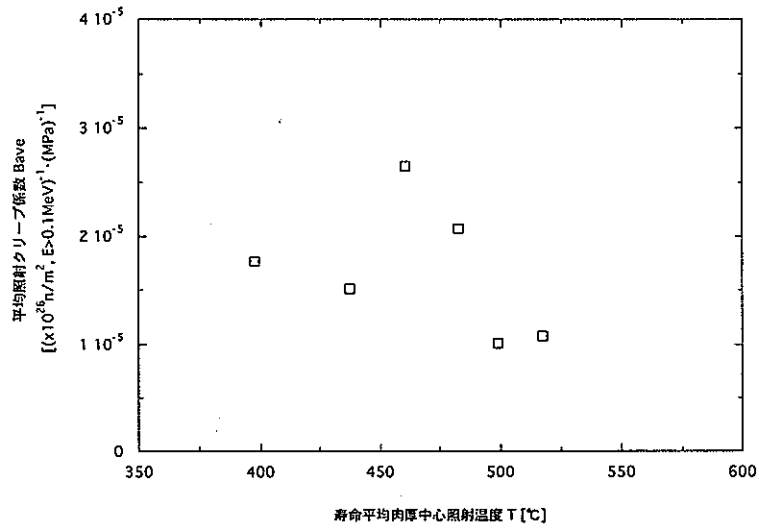


図 4-13.10 MFA-2データにおける平均照射クリープ係数「Bave」と照射温度との関係 (ピンNo 187104の場合)

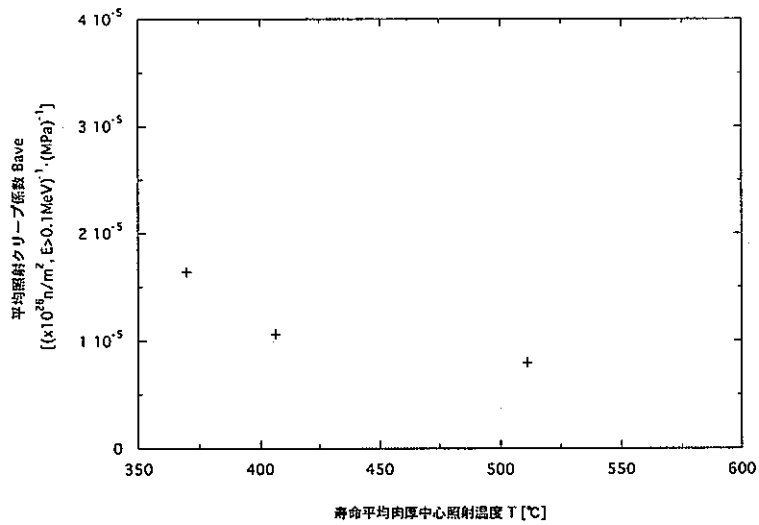


図 4-13.11 MFA-2データにおける平均照射クリープ係数「Bave」と照射温度との関係 (ピンNo 187164の場合)

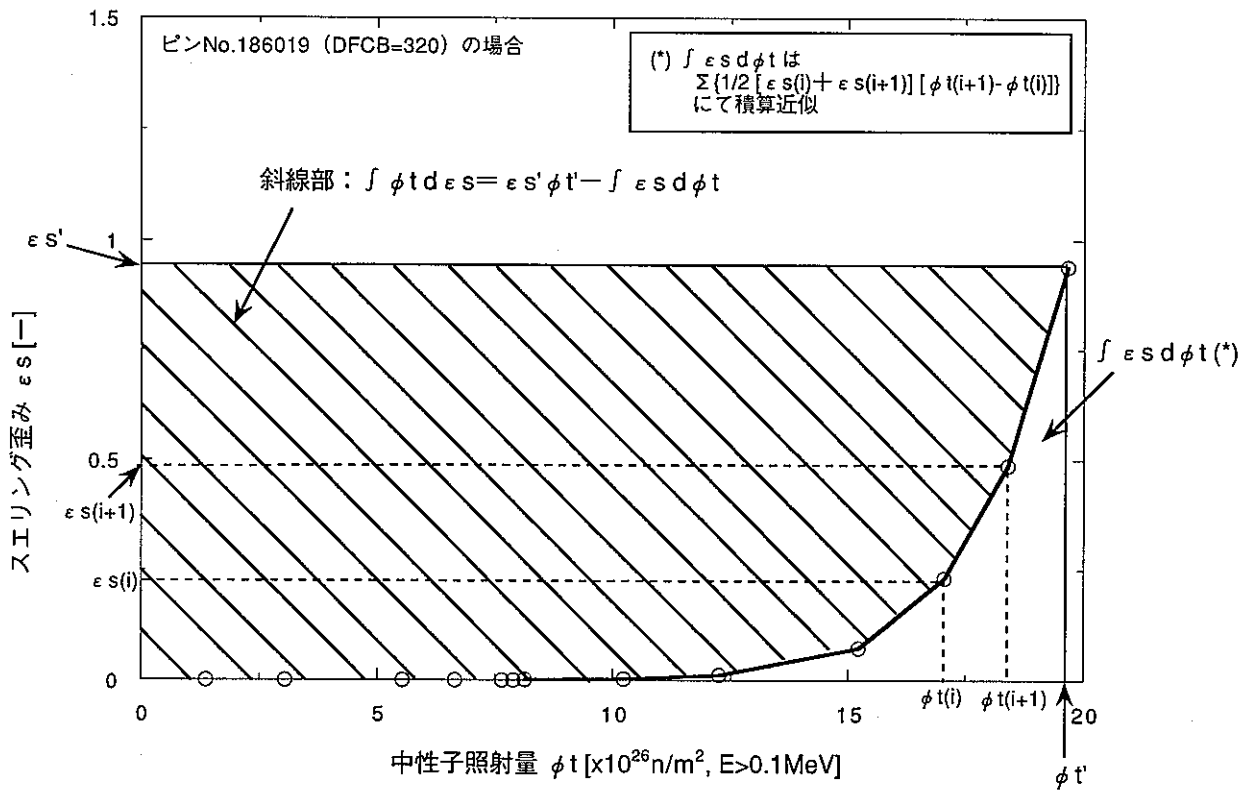


図 4-14 「D」算出式における積分項の中性子照射量とスエリングの関係からの算出例

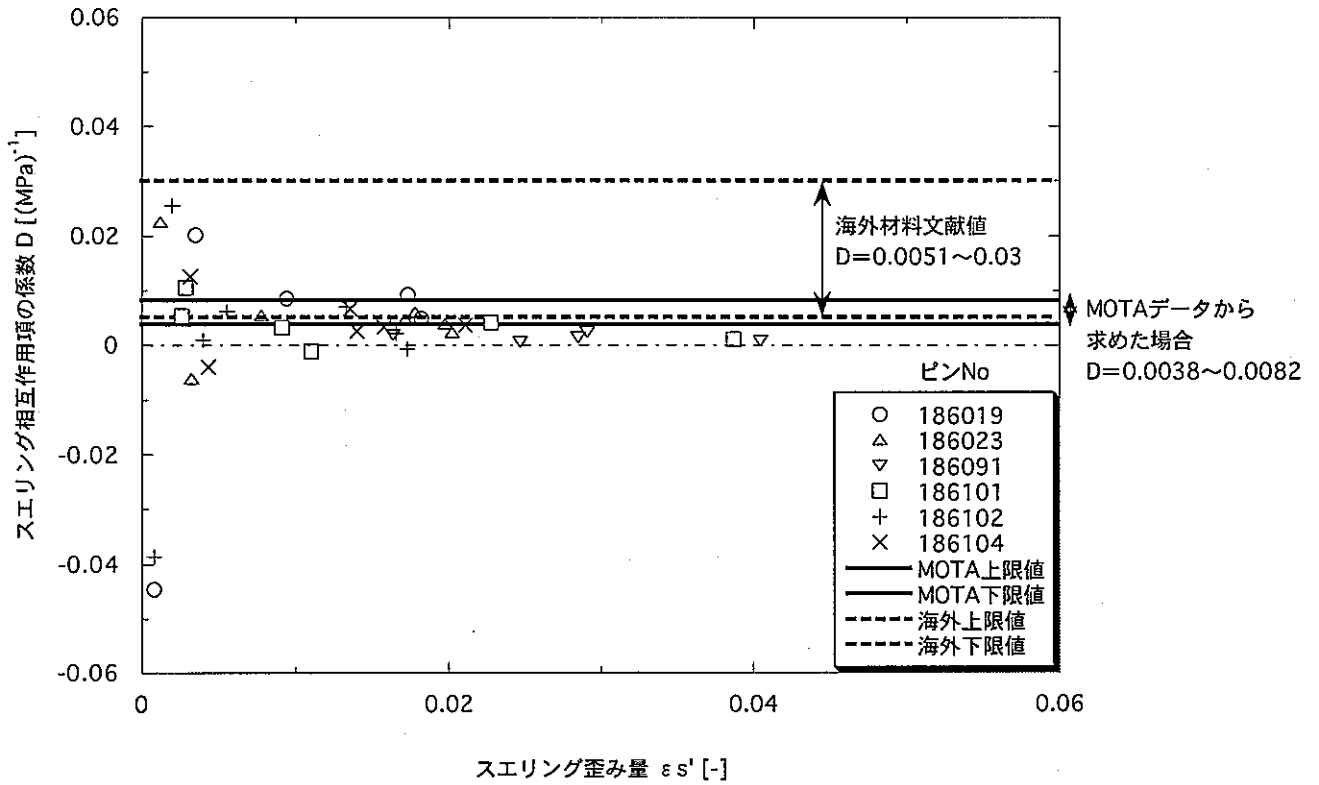


図 4-15.1 MFA-1データに基づくスエリング相互作用項の係数「D」とMOTAデータおよび海外材料の評価値との比較

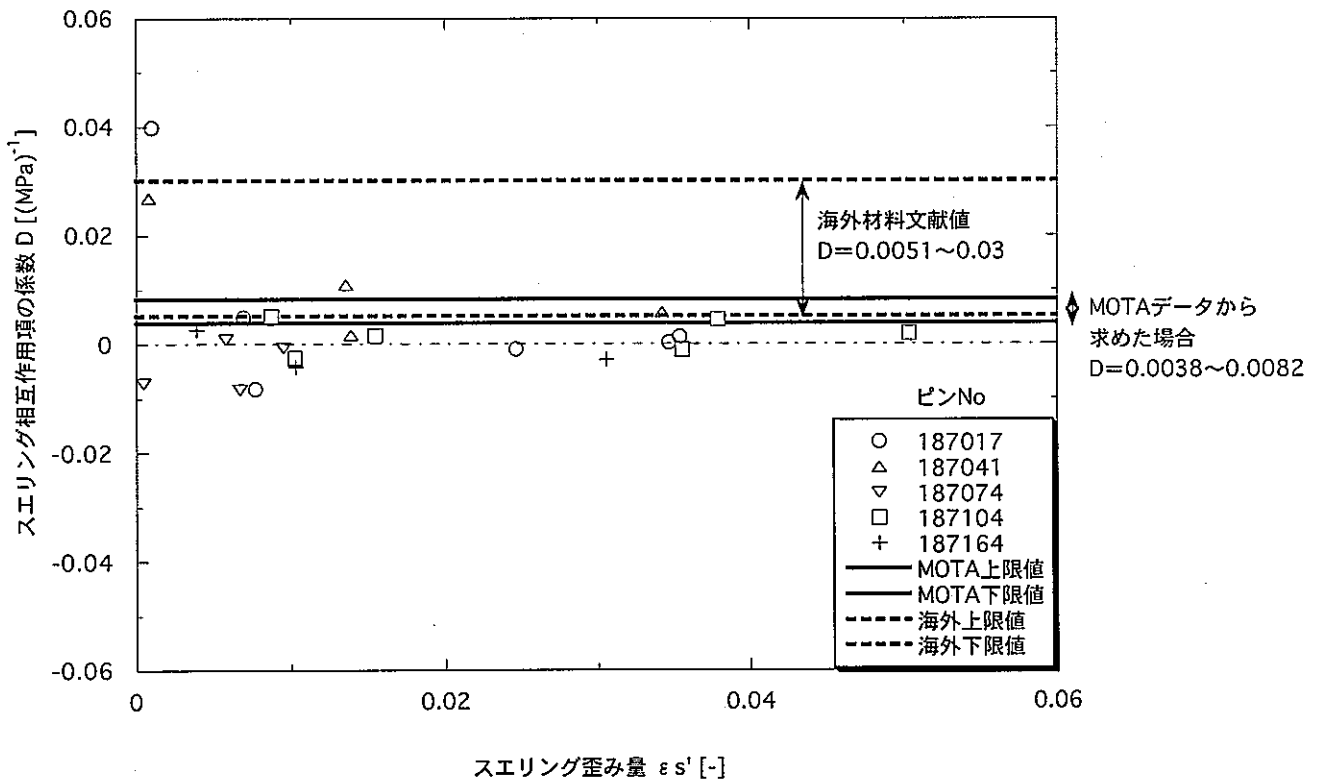


図 4-15.2 MFA-2データに基づくスエリング相互作用項の係数「D」とMOTAデータおよび海外材料の評価値との比較

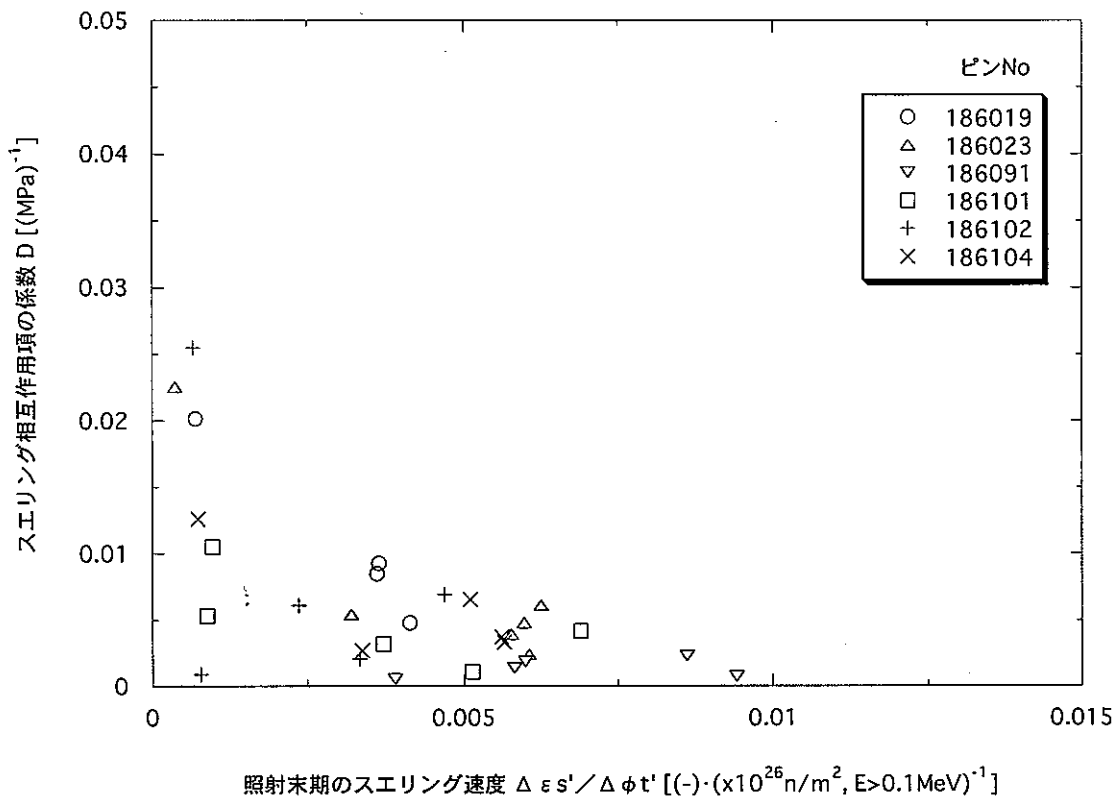


図 4-16.1 MFA-1データにおけるスエリング相互作用項の係数「D」とスエリング速度との関係

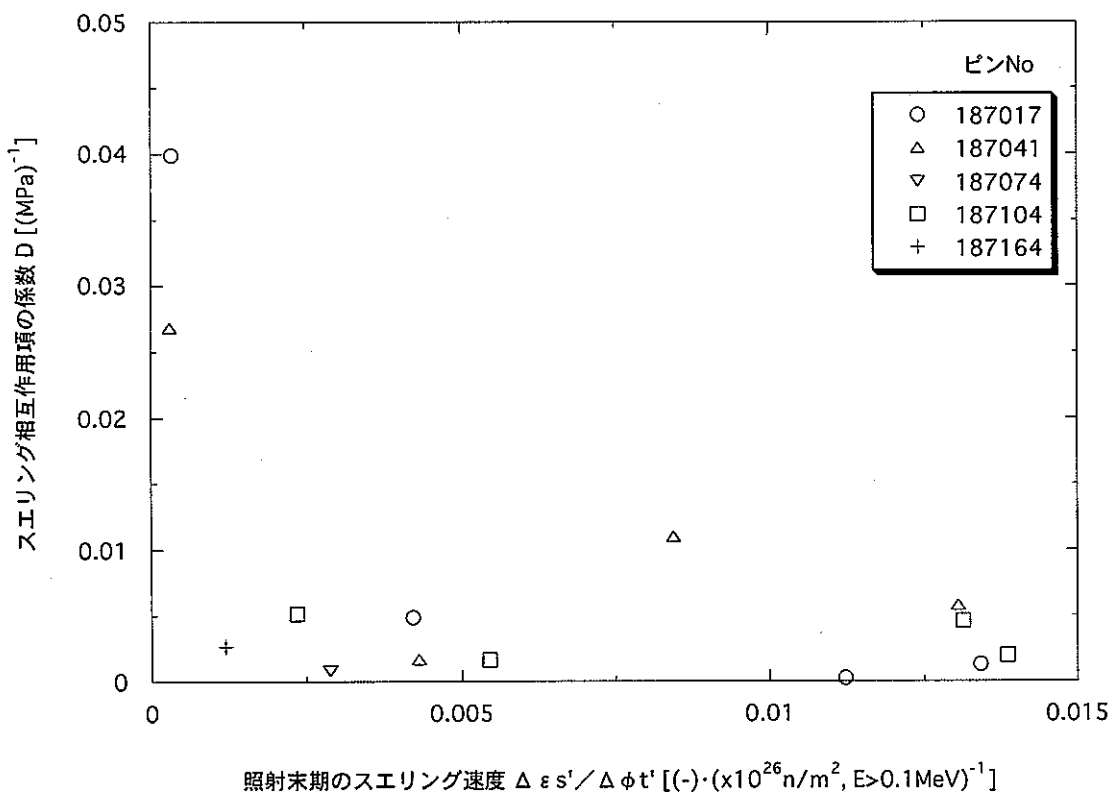


図 4-16.2 MFA-2データにおけるスエリング相互作用項の係数「D」とスエリング速度との関係

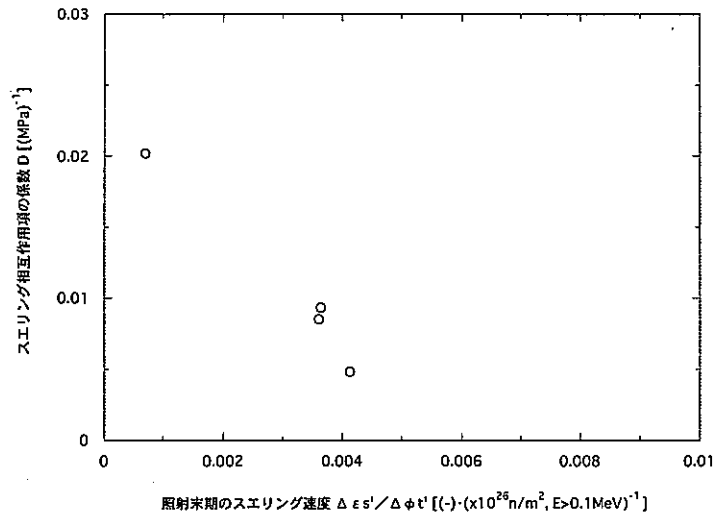


図 4-17.1 MFA-1データにおけるスエリング相互作用項の係数「D」とスエリング速度との関係 (ピンNo 186019の場合)

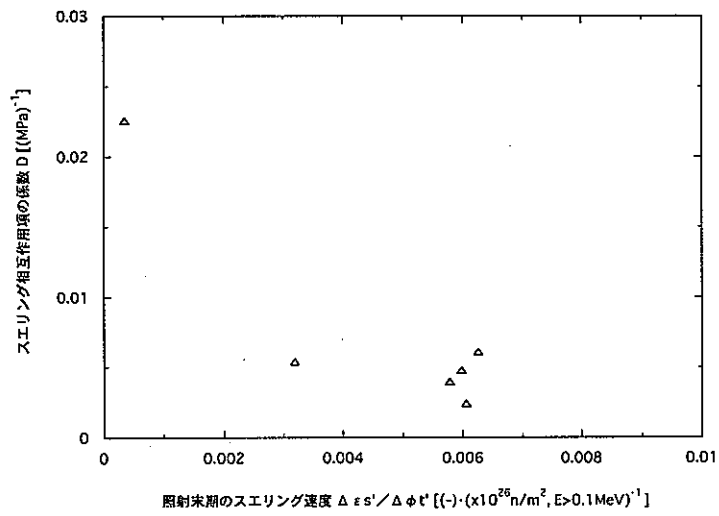


図 4-17.2 MFA-1データにおけるスエリング相互作用項の係数「D」とスエリング速度との関係 (ピンNo 186023の場合)

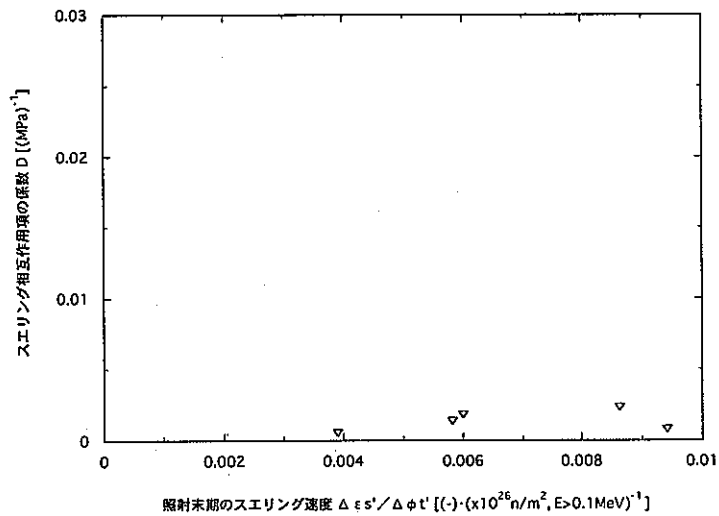


図 4-17.3 MFA-1データにおけるスエリング相互作用項の係数「D」とスエリング速度との関係 (ピンNo 186091の場合)

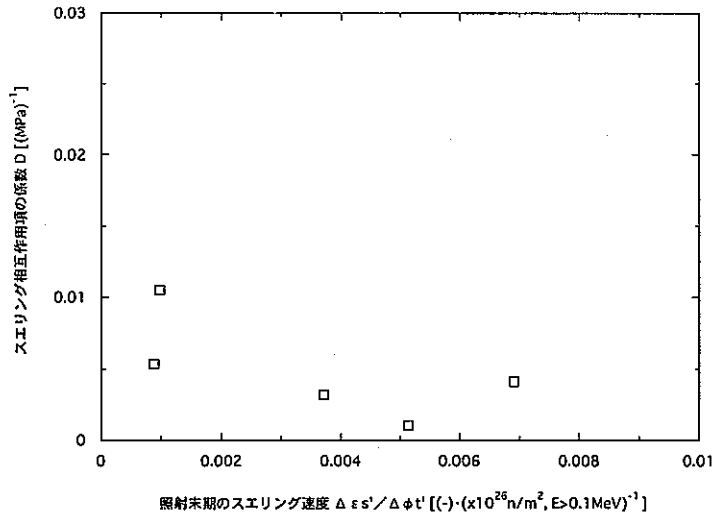


図 4-17.4 MFA-1データにおけるスエリング相互作用項の係数「D」とスエリング速度との関係 (ピンNo 186101の場合)

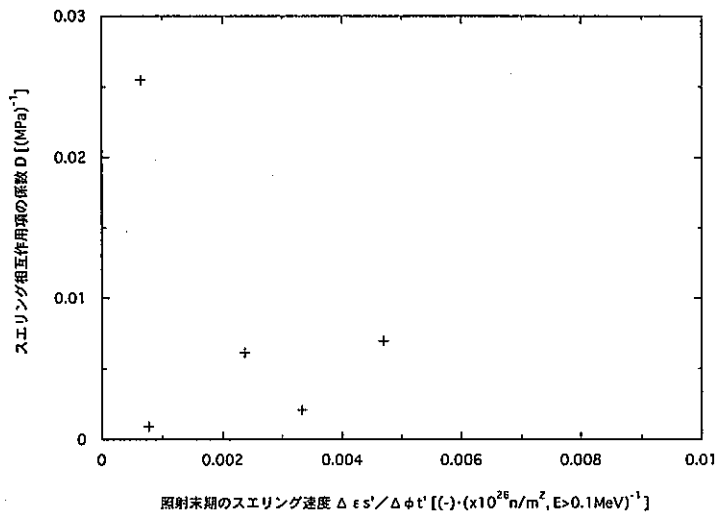


図 4-17.5 MFA-1データにおけるスエリング相互作用項の係数「D」とスエリング速度との関係 (ピンNo 186102の場合)

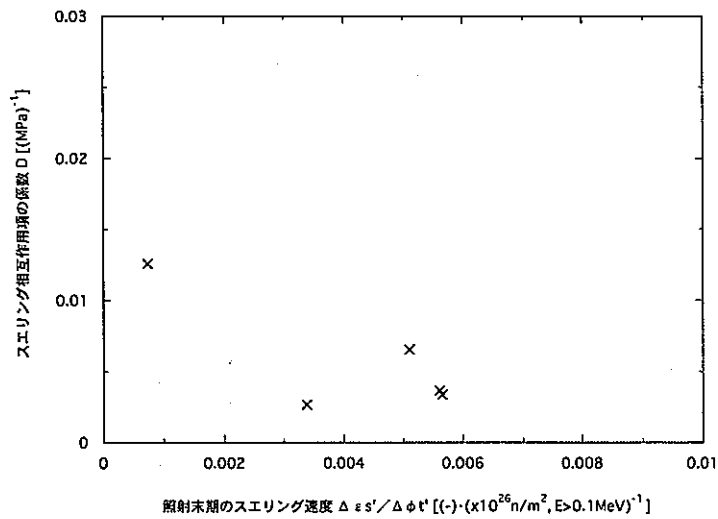


図 4-17.6 MFA-1データにおけるスエリング相互作用項の係数「D」とスエリング速度との関係 (ピンNo 186104の場合)

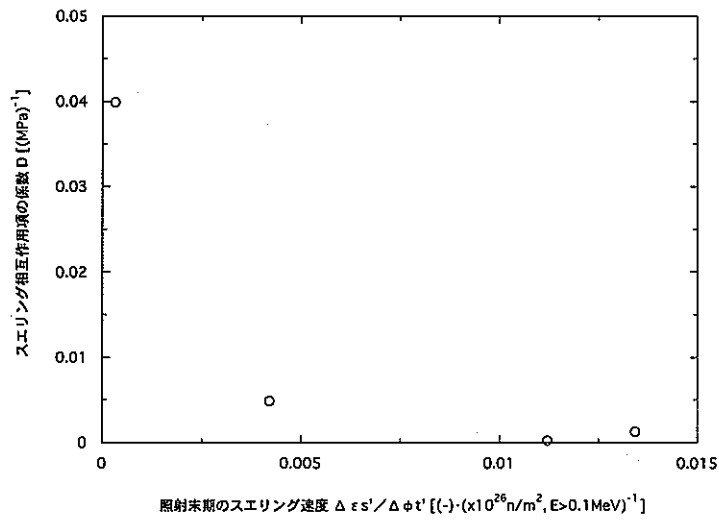


図 4-17.7 MFA-2データにおけるスエリング相互作用項の係数「D」とスエリング速度との関係 (ピンNo 187017)

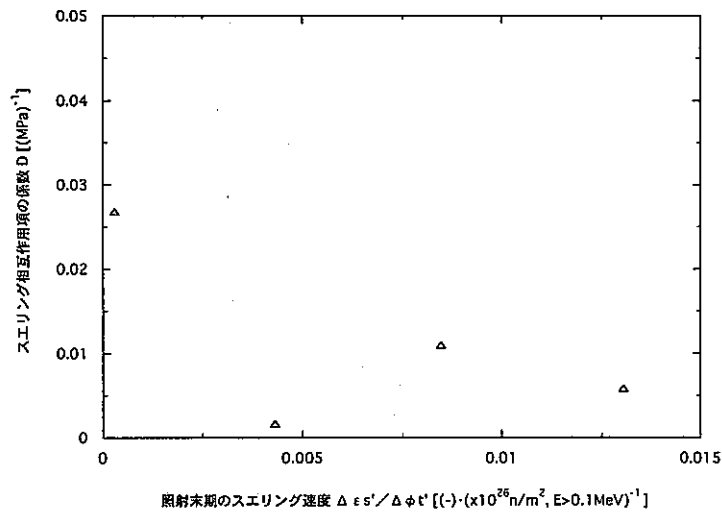


図 4-17.8 MFA-2データにおけるスエリング相互作用項の係数「D」とスエリング速度との関係 (ピンNo 187041)

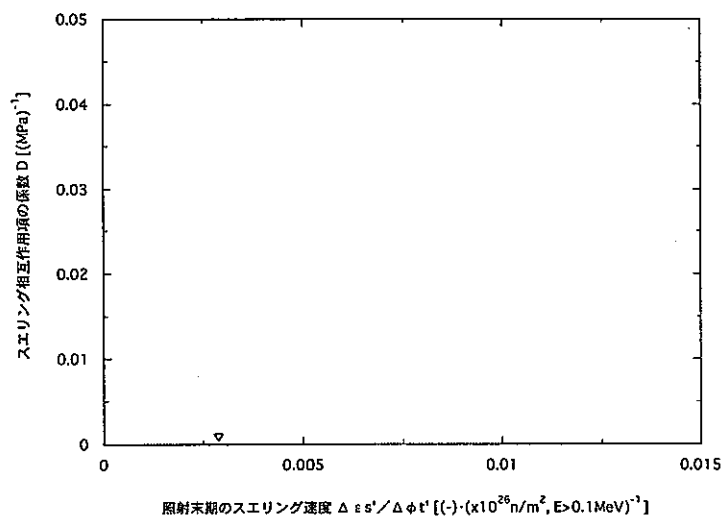


図 4-17.9 MFA-2データにおけるスエリング相互作用項の係数「D」とスエリング速度との関係 (ピンNo 187074)

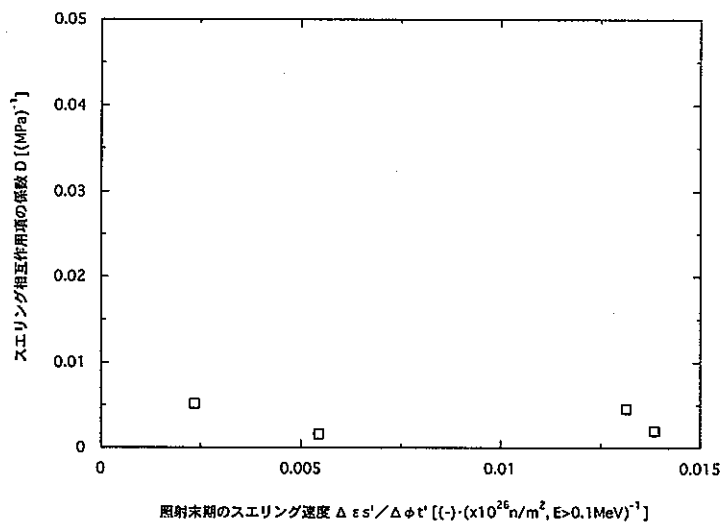


図 4-17.10 MFA-2データにおけるスエリング相互作用項の係数「D」とスエリング速度との関係 (ピンNo 187104)

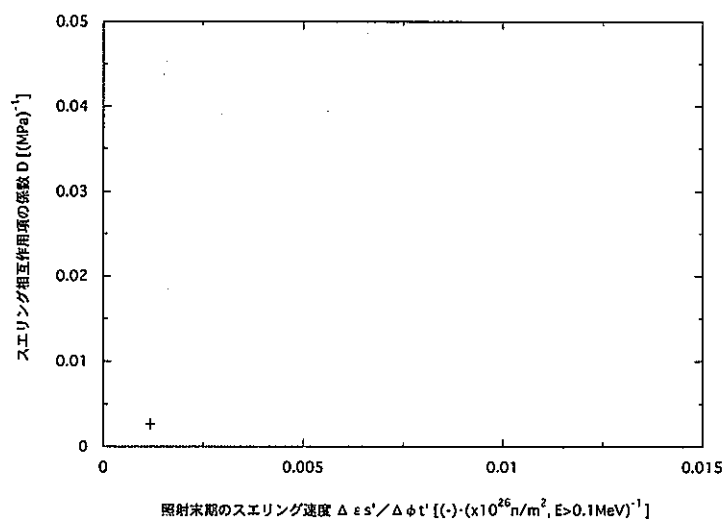


図 4-17.11 MFA-2データにおけるスエリング相互作用項の係数「D」とスエリング速度との関係 (ピンNo 187164)

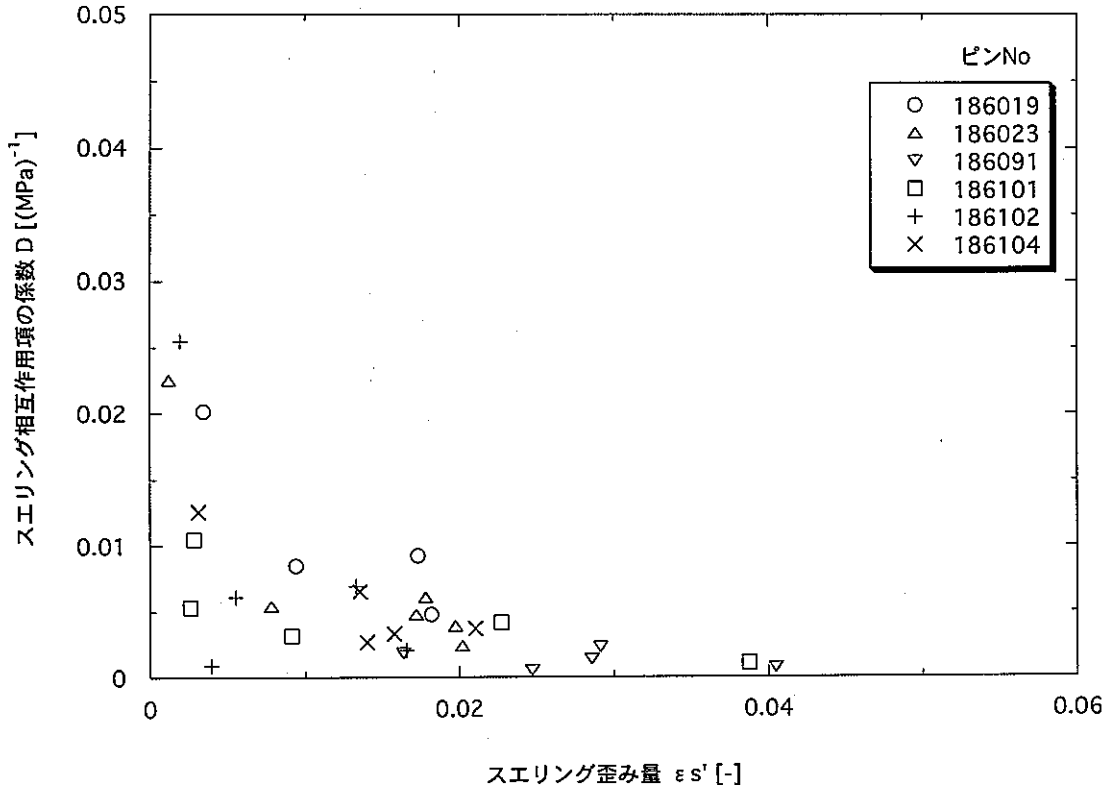


図 4-18.1 MFA-1データにおけるスエリング相互作用項の係数「D」とスエリング歪みとの関係

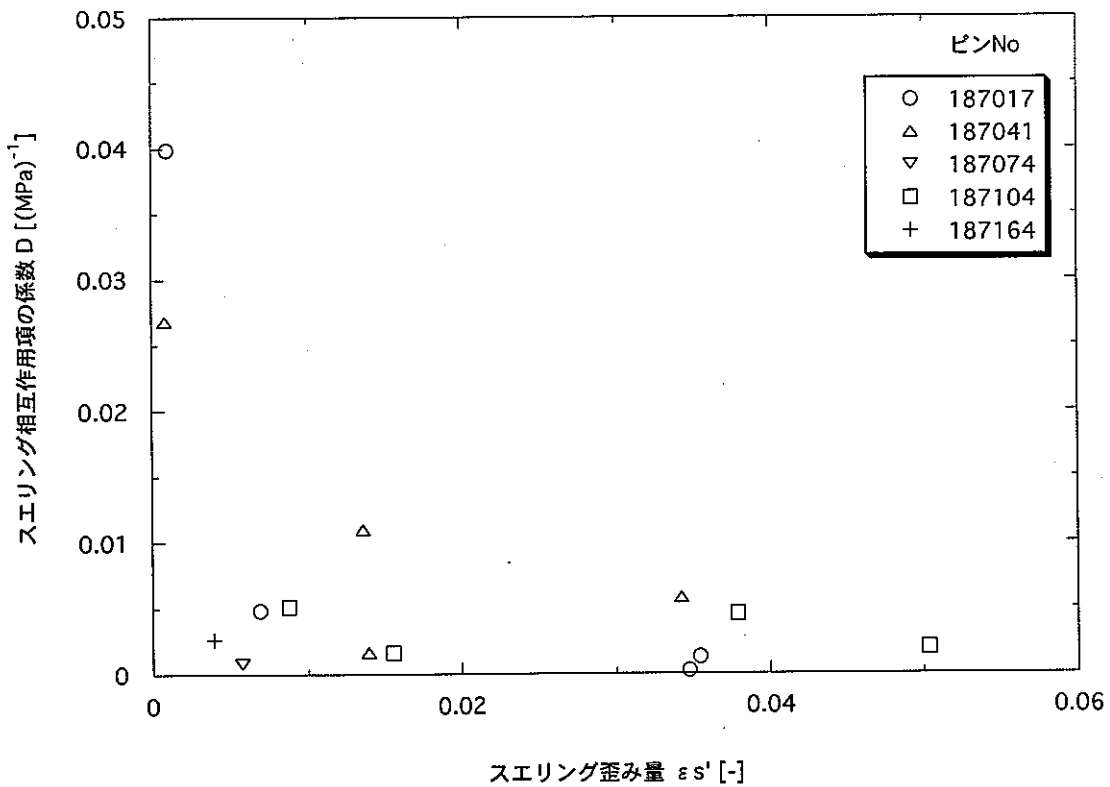


図 4-18.2 MFA-2データにおけるスエリング相互作用項の係数「D」とスエリング歪みとの関係

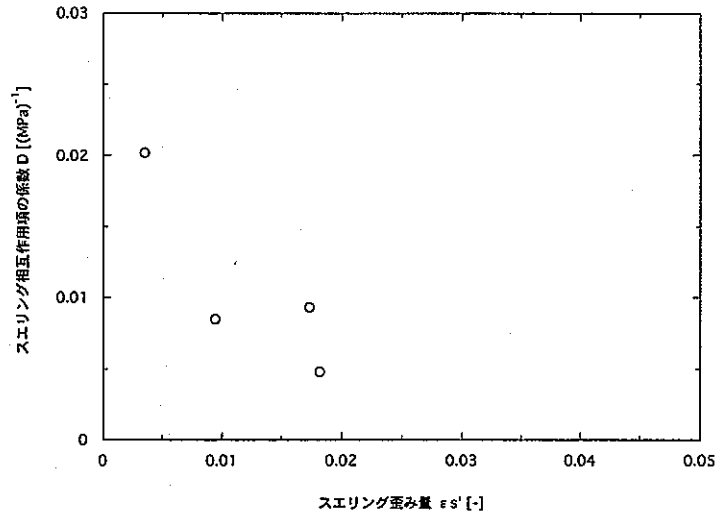


図 4-19.1 MFA-1データにおけるスエリング相互作用項の係数「D」とスエリング歪みとの関係 (ピンNo 186019の場合)

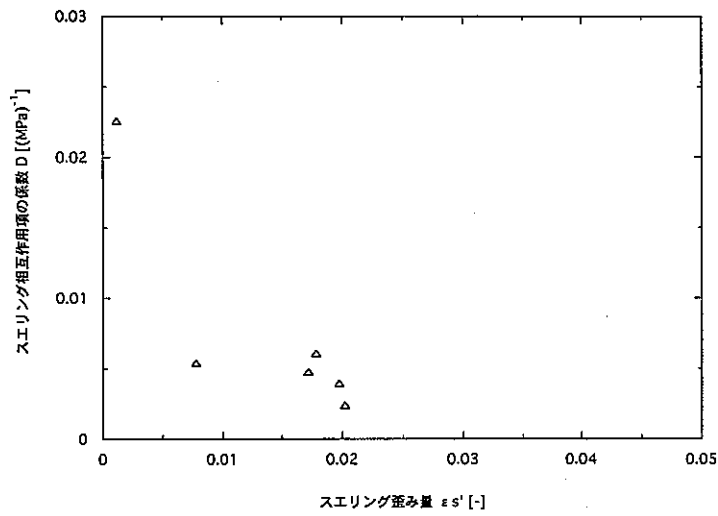


図 4-19.2 MFA-1データにおけるスエリング相互作用項の係数「D」とスエリング歪みとの関係 (ピンNo 186023の場合)

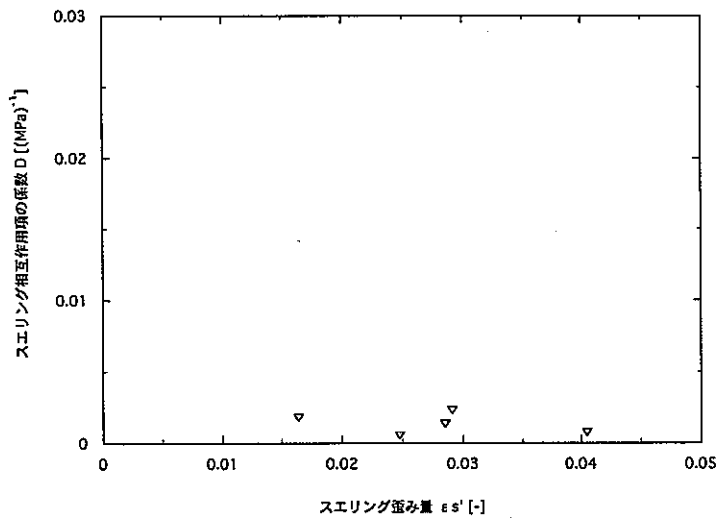


図 4-19.3 MFA-1データにおけるスエリング相互作用項の係数「D」とスエリング歪みとの関係 (ピンNo 186091の場合)

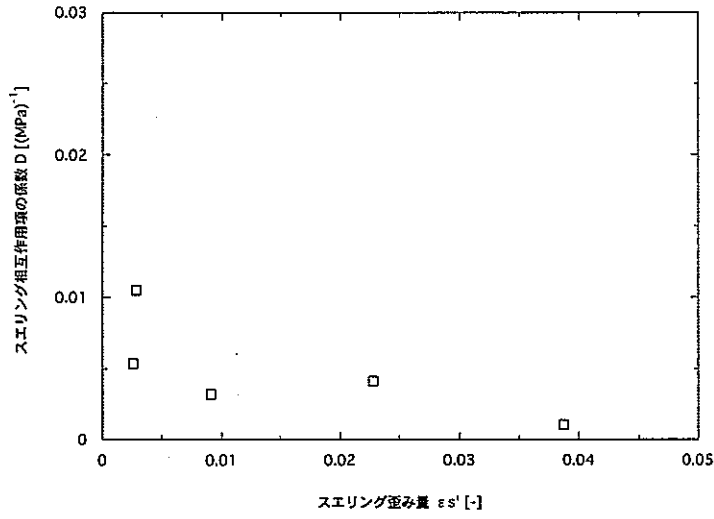


図 4-19.4 MFA-1データにおけるスエリング相互作用項の係数「D」とスエリング歪みとの関係 (ピンNo 186101の場合)

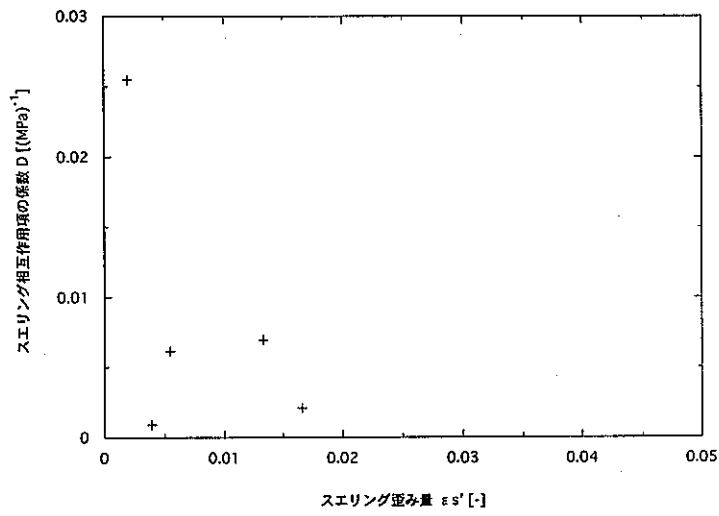


図 4-19.5 MFA-1データにおけるスエリング相互作用項の係数「D」とスエリング歪みとの関係 (ピンNo 186102の場合)

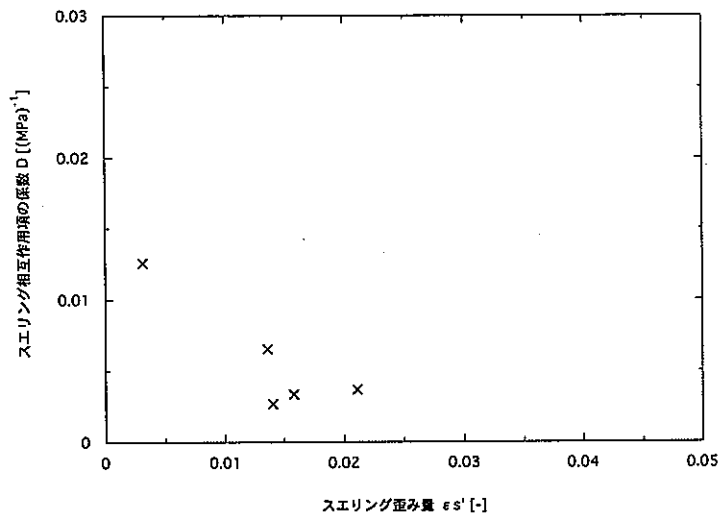


図 4-19.6 MFA-1データにおけるスエリング相互作用項の係数「D」とスエリング歪みとの関係 (ピンNo 186104の場合)

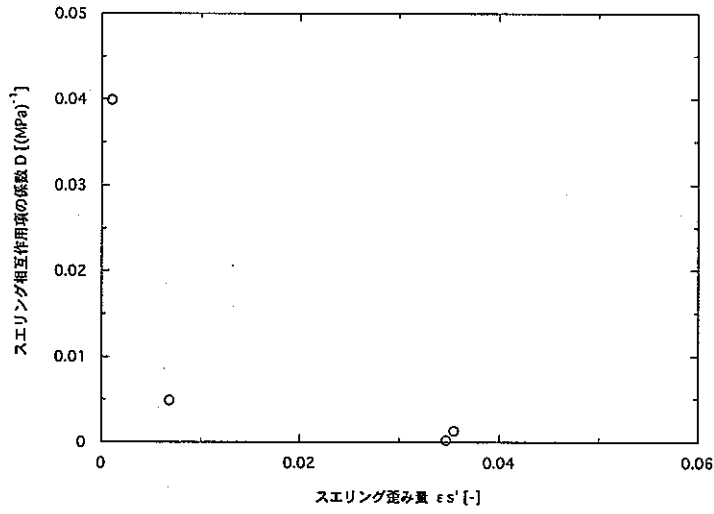


図 4-19.7 MFA-2データにおけるスエリング相互作用項の係数「D」とスエリング歪みとの関係 (ピンNo 187017の場合)

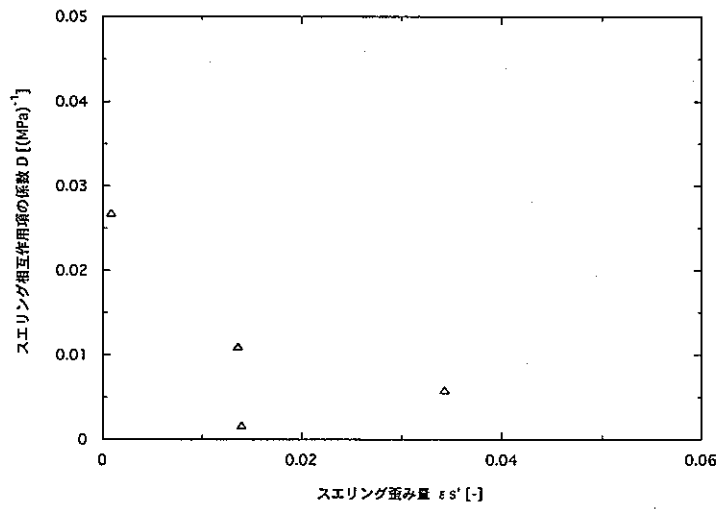


図 4-19.8 MFA-2データにおけるスエリング相互作用項の係数「D」とスエリング歪みとの関係 (ピンNo 187041の場合)

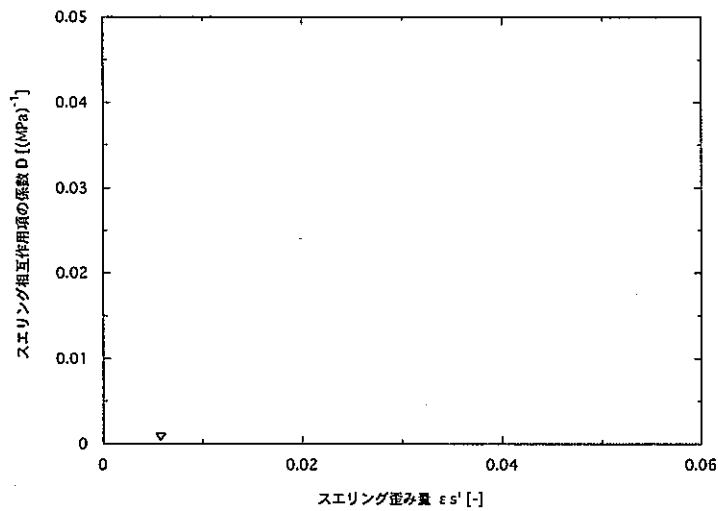


図 4-19.9 MFA-2データにおけるスエリング相互作用項の係数「D」とスエリング歪みとの関係 (ピンNo 187074の場合)

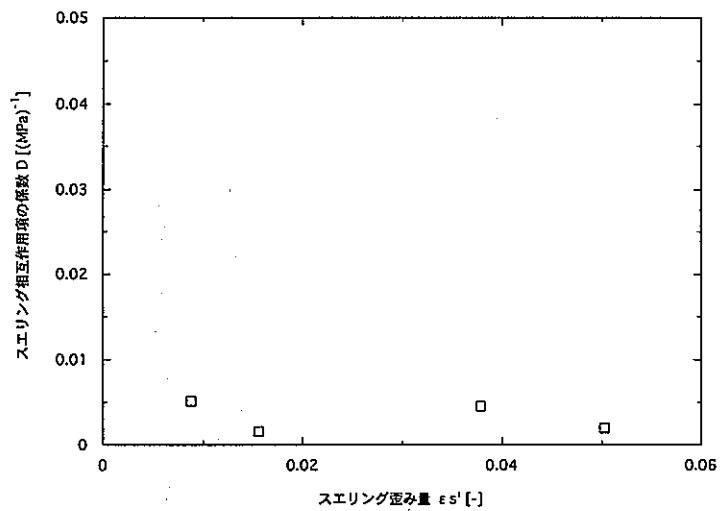


図 4-19.10 MFA-2データにおけるスエリング相互作用項の係数「D」とスエリング歪みとの関係 (ピンNo 187104の場合)

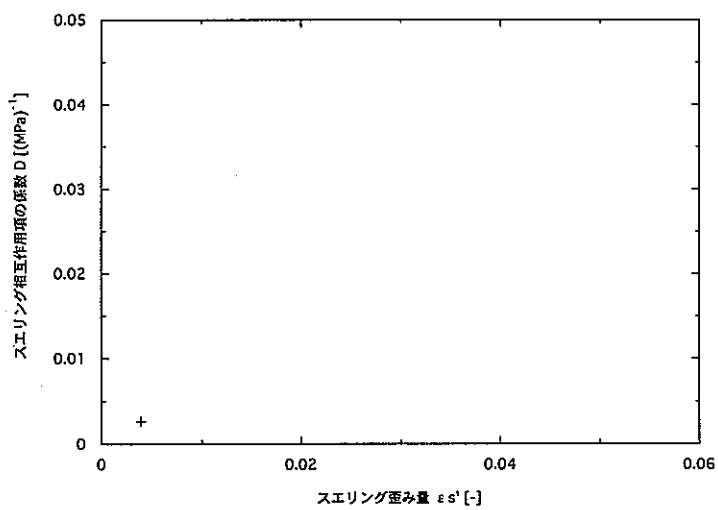


図 4-19.11 MFA-2データにおけるスエリング相互作用項の係数「D」とスエリング歪みとの関係 (ピンNo 187164の場合)

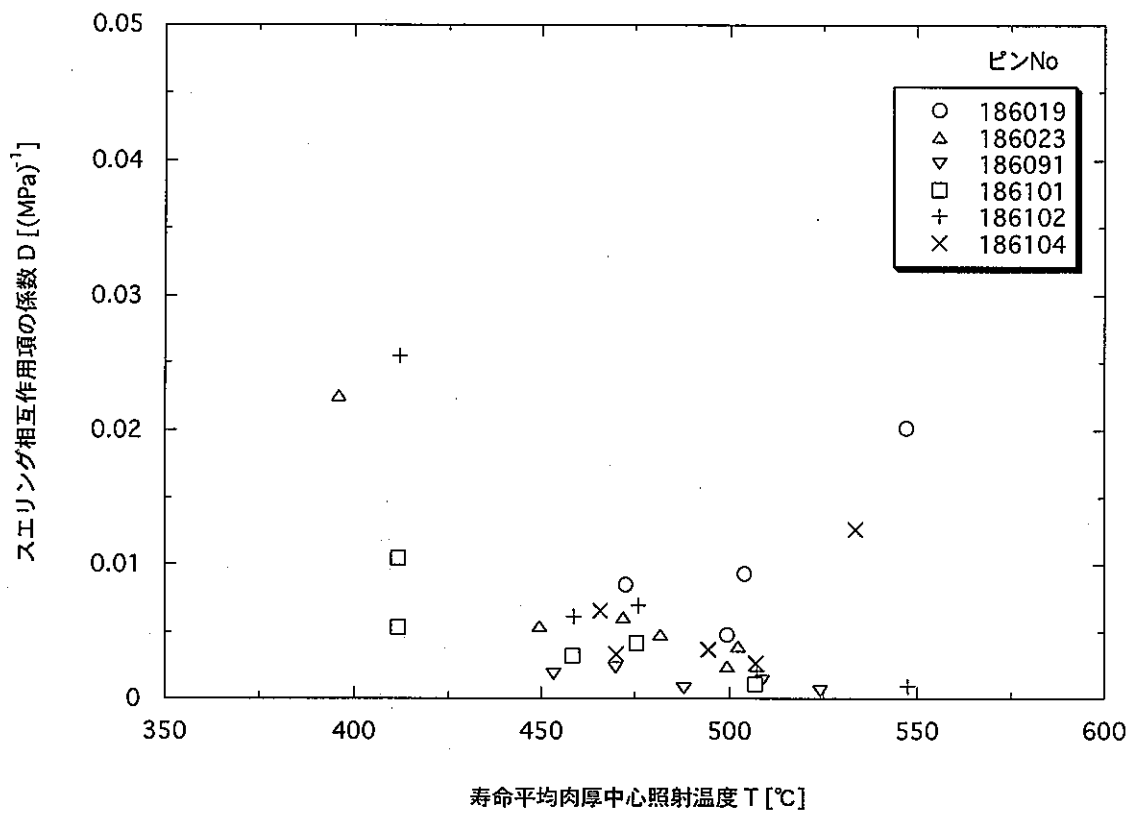


図 4-20.1 MFA-1データにおけるスエリング相互作用項の係数「D」と照射温度との関係

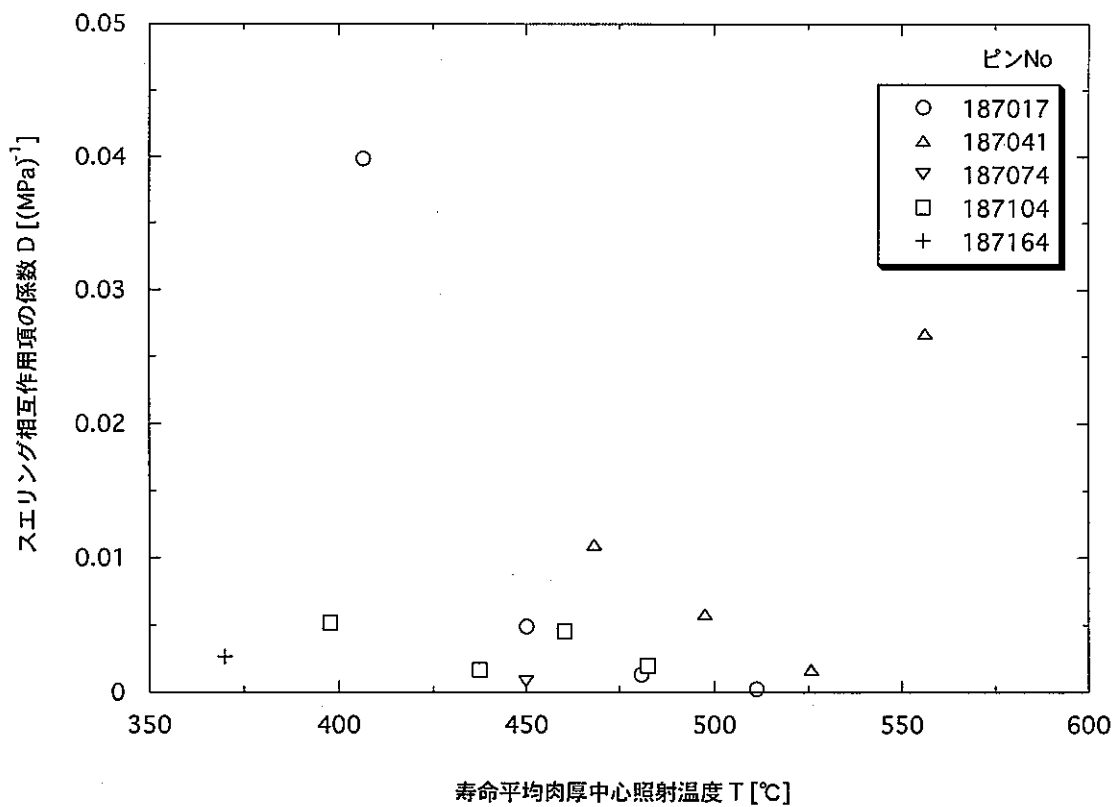


図 4-20.2 MFA-2データにおけるスエリング相互作用項の係数「D」と照射温度との関係

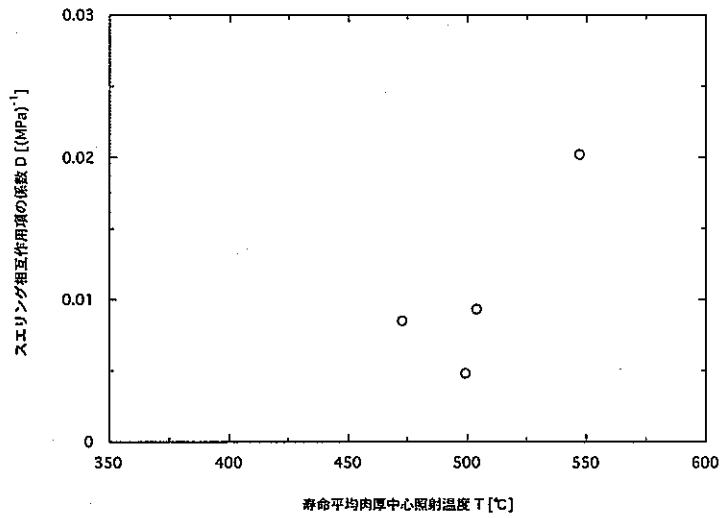


図 4-21.1 MFA-1データにおけるスエリング相互作用項の係数「D」と照射温度との関係
(ピンNo 186019の場合)

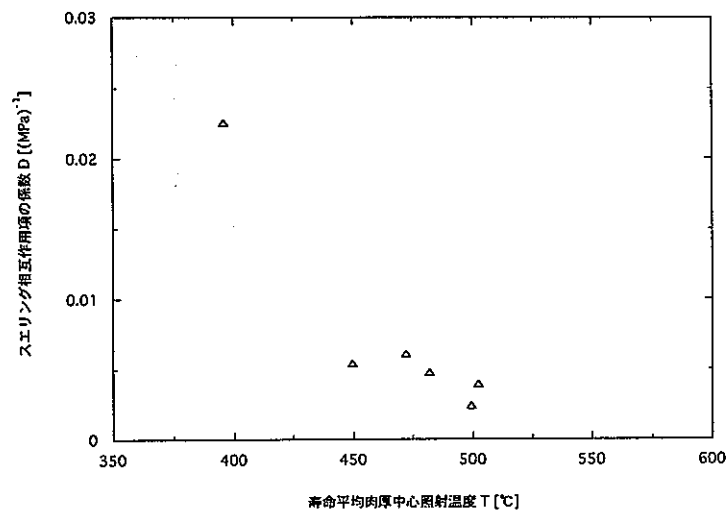


図 4-21.2 MFA-1データにおけるスエリング相互作用項の係数「D」と照射温度との関係
(ピンNo 186023の場合)

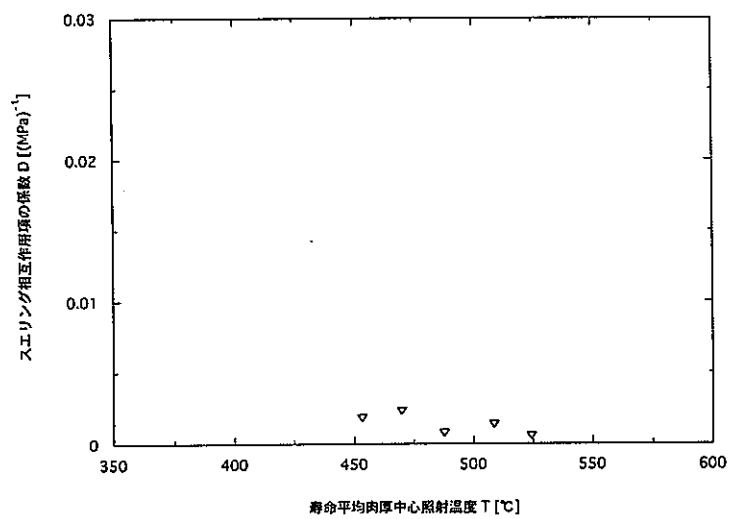


図 4-21.3 MFA-1データにおけるスエリング相互作用項の係数「D」と照射温度との関係
(ピンNo 186091の場合)

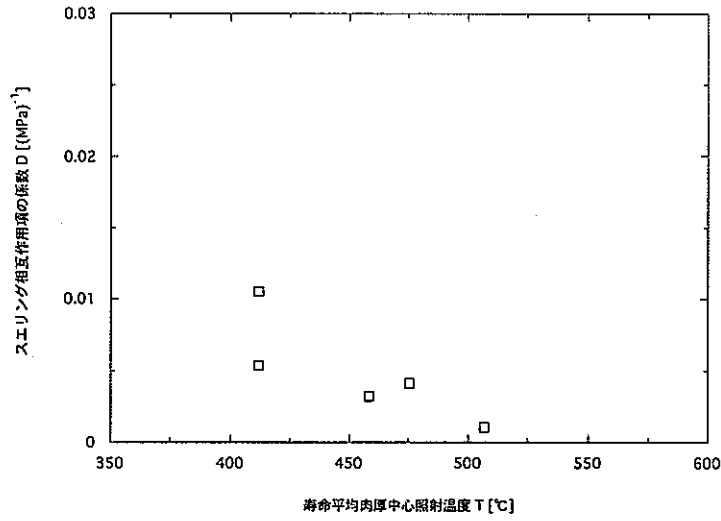


図 4-21.4 MFA-1データにおけるスエリング相互作用項の係数「D」と照射温度との関係 (ピンNo 186101の場合)

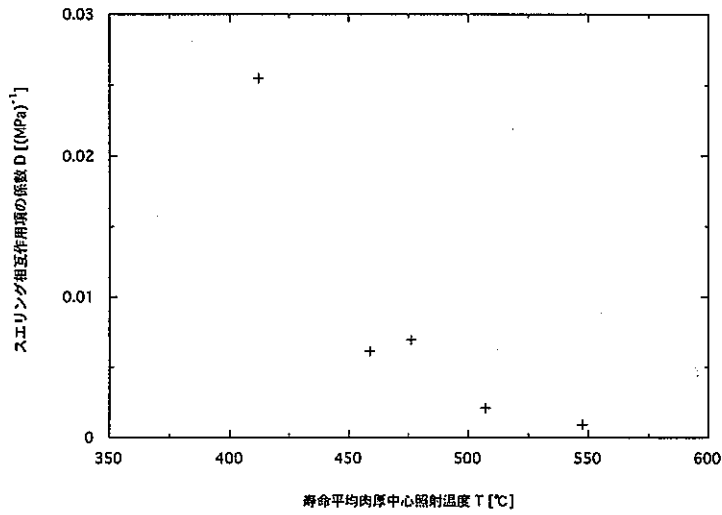


図 4-21.5 MFA-1データにおけるスエリング相互作用項の係数「D」と照射温度との関係 (ピンNo 186102の場合)

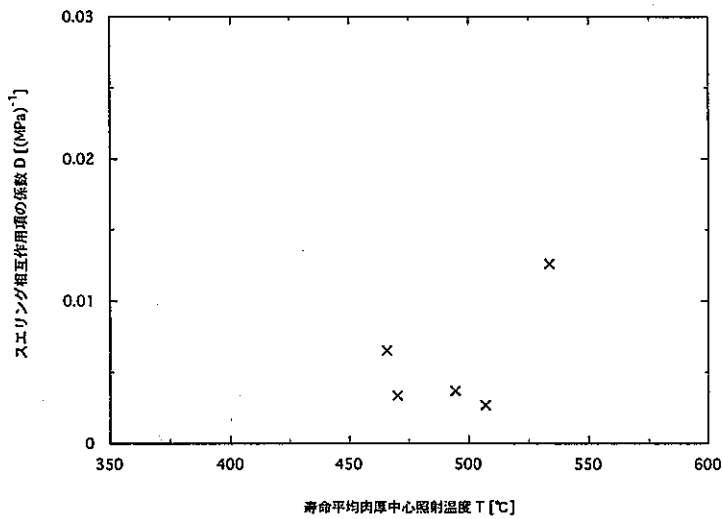


図 4-21.6 MFA-1データにおけるスエリング相互作用項の係数「D」と照射温度との関係 (ピンNo 186104の場合)

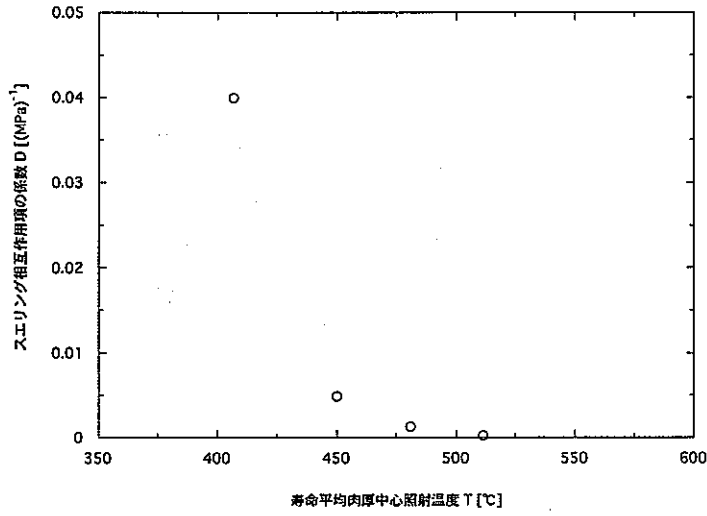


図 4-21.7 MFA-2データにおけるスエリング相互作用項の係数「D」と照射温度との関係
(ピンNo187017の場合)

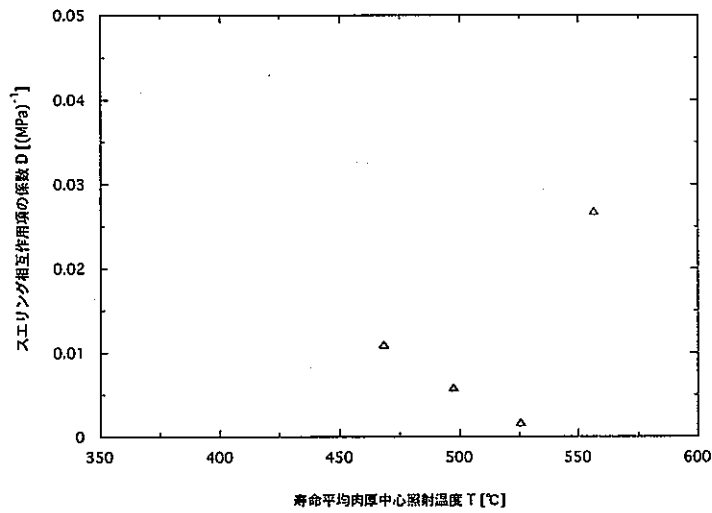


図 4-21.8 MFA-2データにおけるスエリング相互作用項の係数「D」と照射温度との関係
(ピンNo187041の場合)

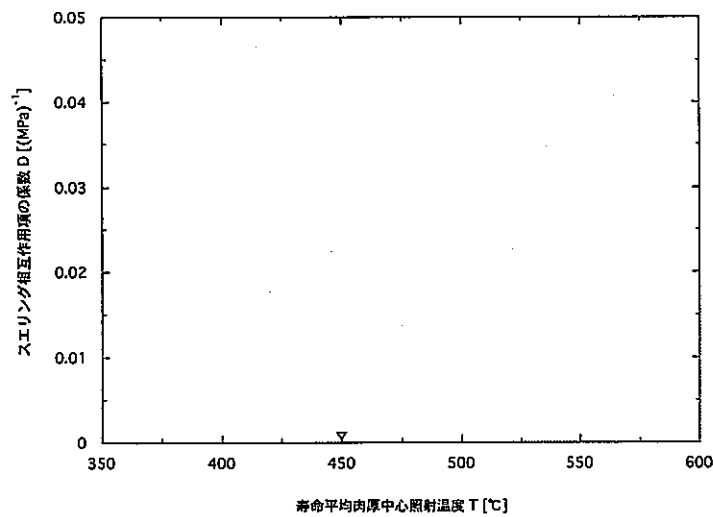


図 4-21.9 MFA-2データにおけるスエリング相互作用項の係数「D」と照射温度との関係
(ピンNo187074の場合)

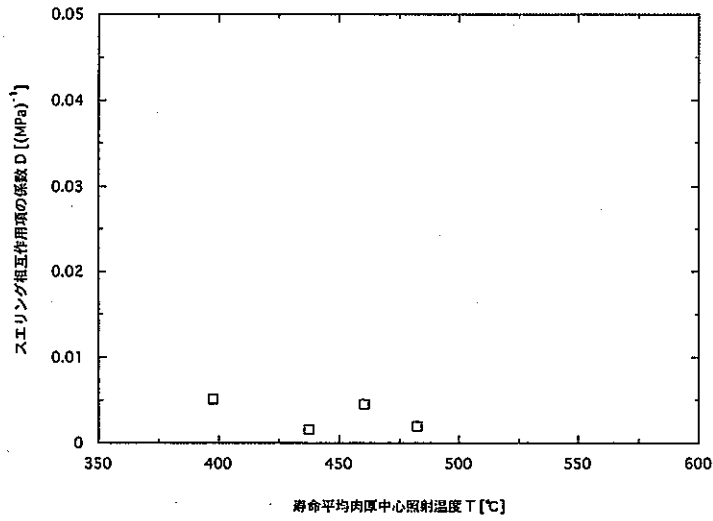


図 4-21.10 MFA-2データにおけるスエリング相互作用項の係数「D」と照射温度との関係 (ピンNo187104の場合)

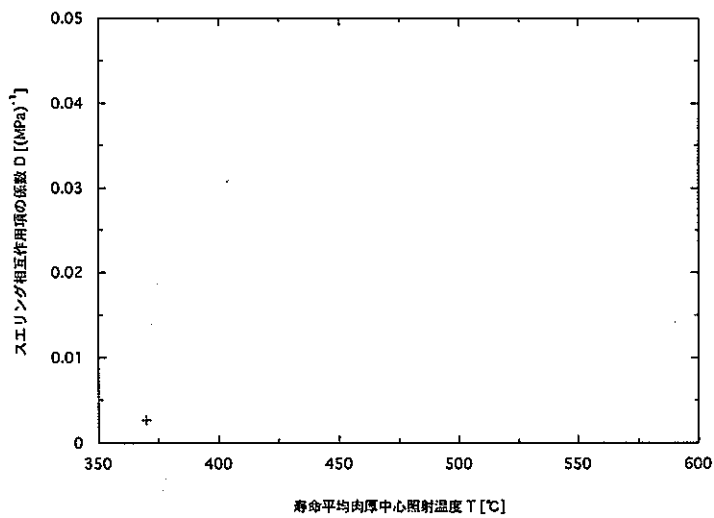


図 4-21.11 MFA-2データにおけるスエリング相互作用項の係数「D」と照射温度との関係 (ピンNo187164の場合)

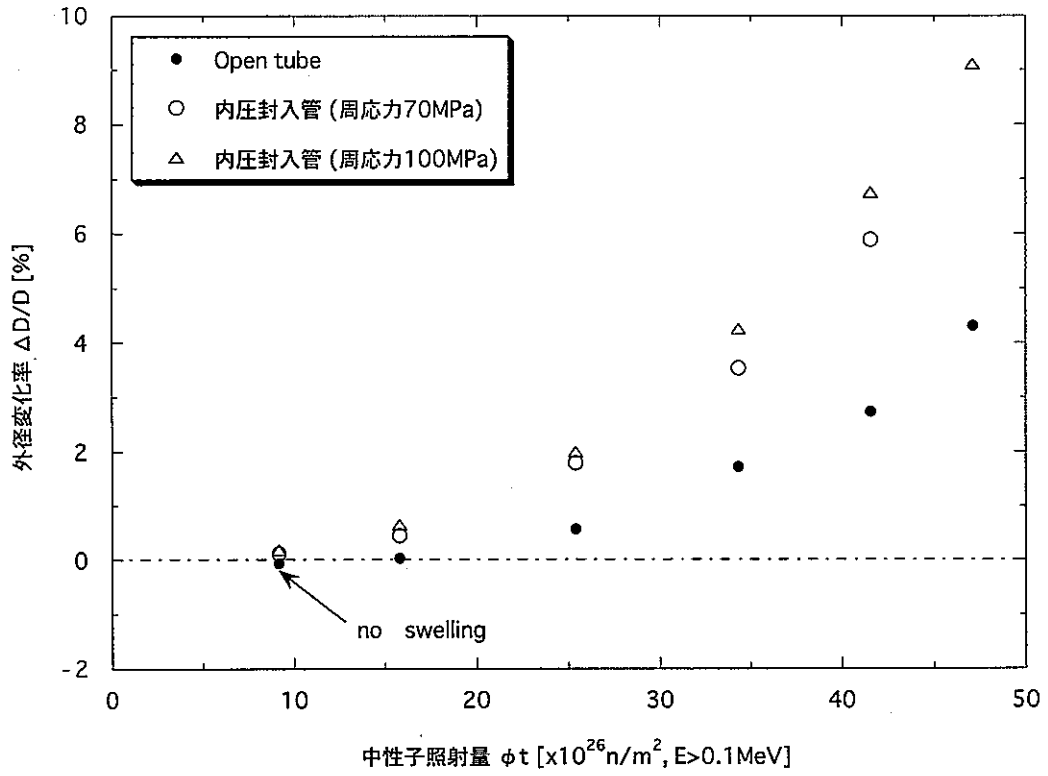


図 4-22.1 MOTA材料照射データにおける中性子照射量と外径変化率の関係 (55MK : 405°C)

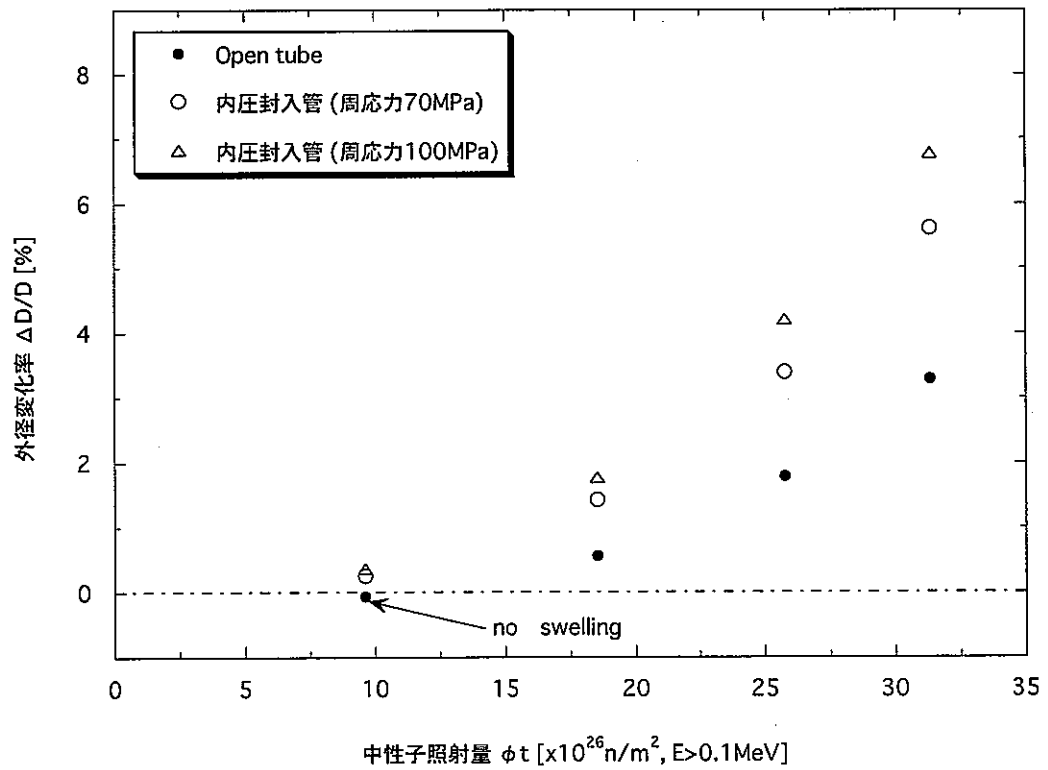


図4-22.2 MOTA材料照射データにおける中性子照射量と外径変化率の関係 (60AK : 405°C)

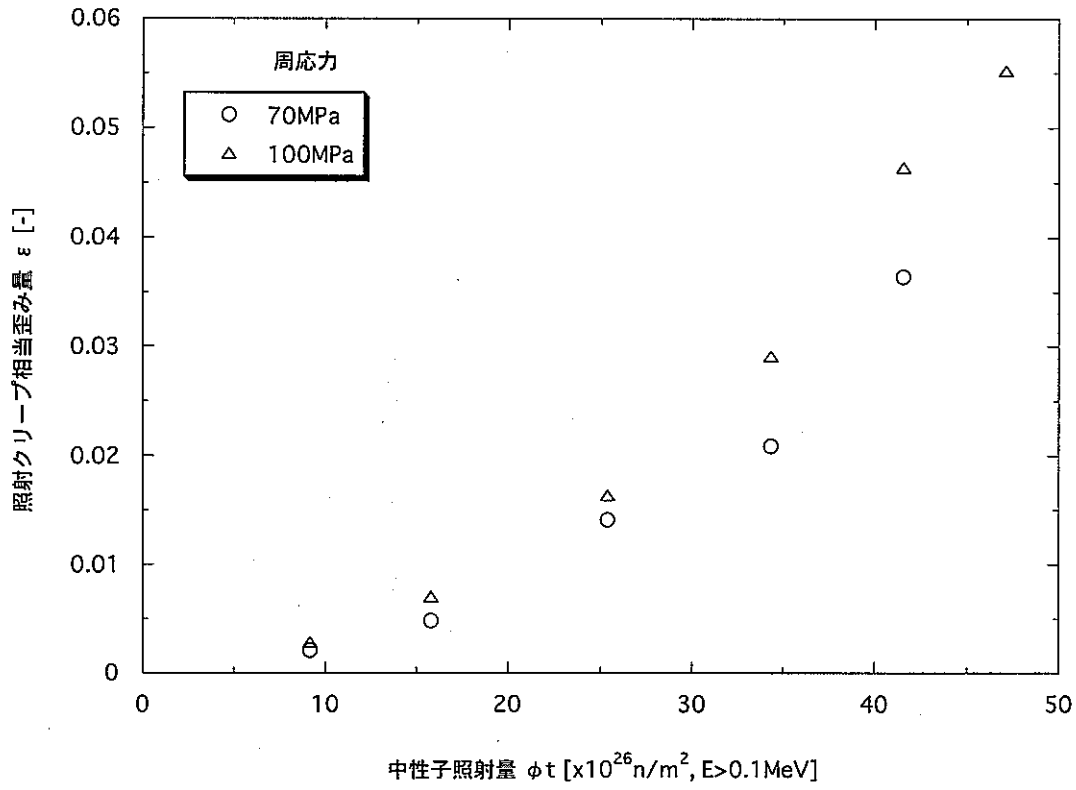


図 4-23.1 MOTA材料照射データにおける中性子照射量と照射クリープ歪み量の関係 (55MK : 405°C)

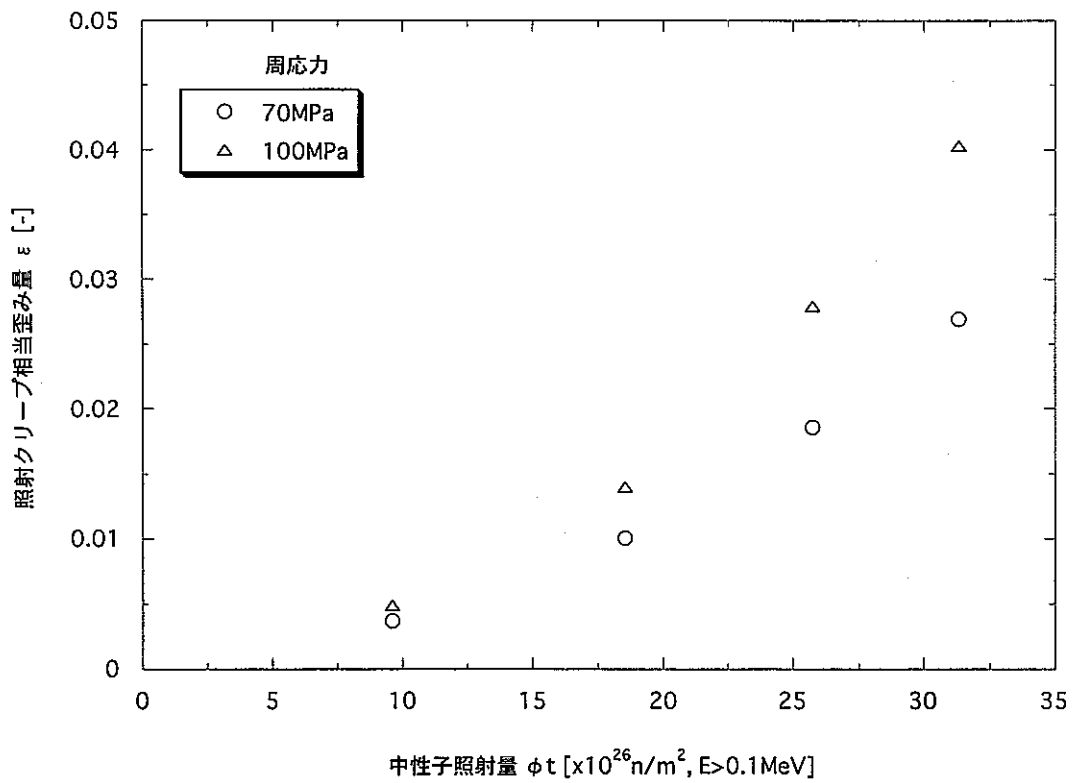


図 4-23.2 MOTA材料照射データにおける中性子照射量と照射クリープ歪み量の関係 (60AK : 405°C)

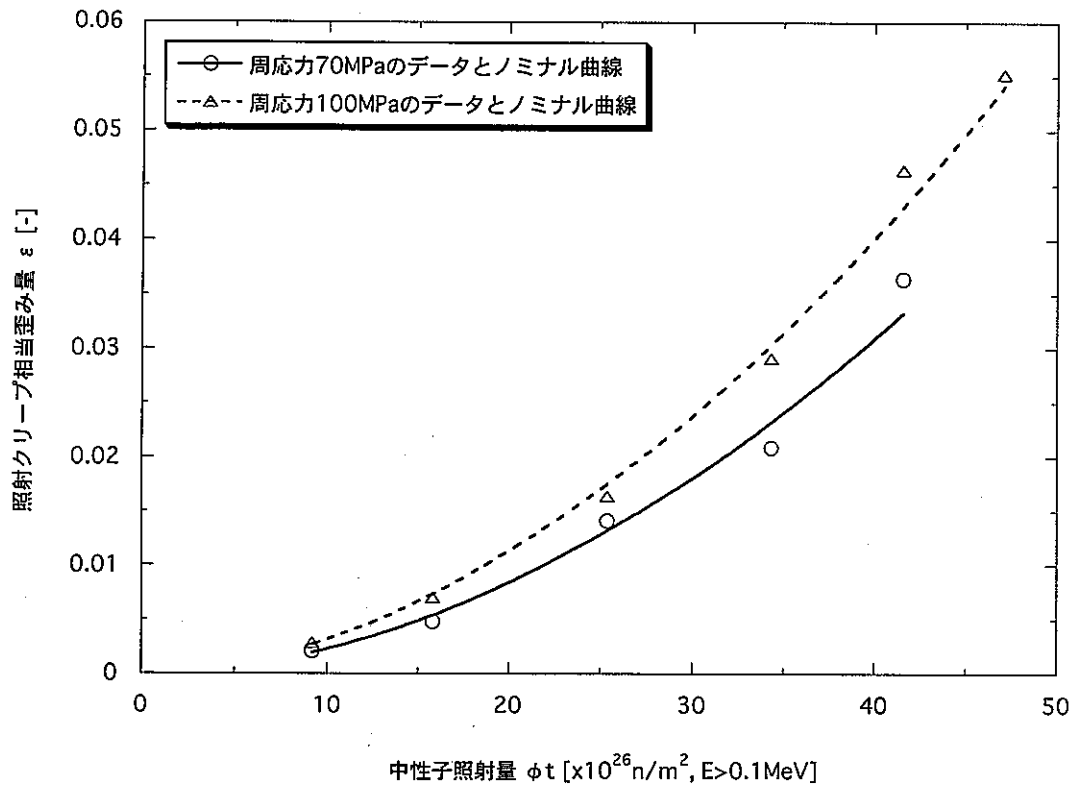


図 4-24.1 MOTAデータにおける照射量と照射クリープ歪み量の関係の定式化 (55MK : 405°C)

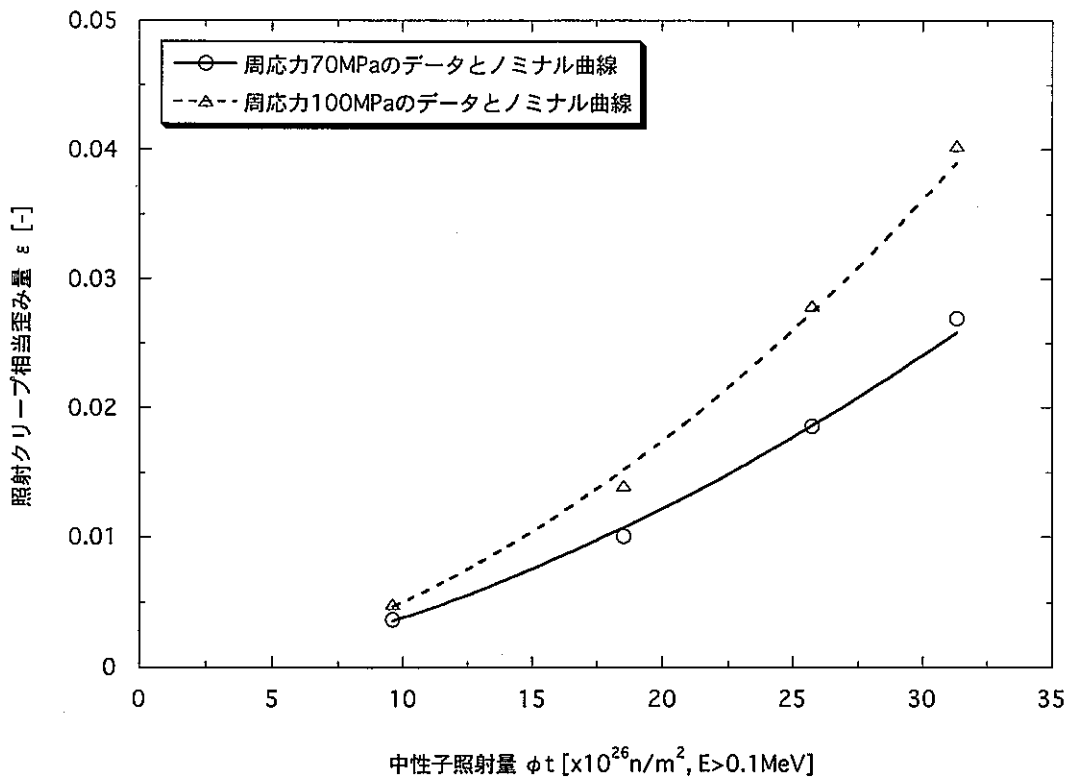


図 4-24.2 MOTAデータにおける照射量と照射クリープ歪み量の関係の定式化 (60AK : 405°C)

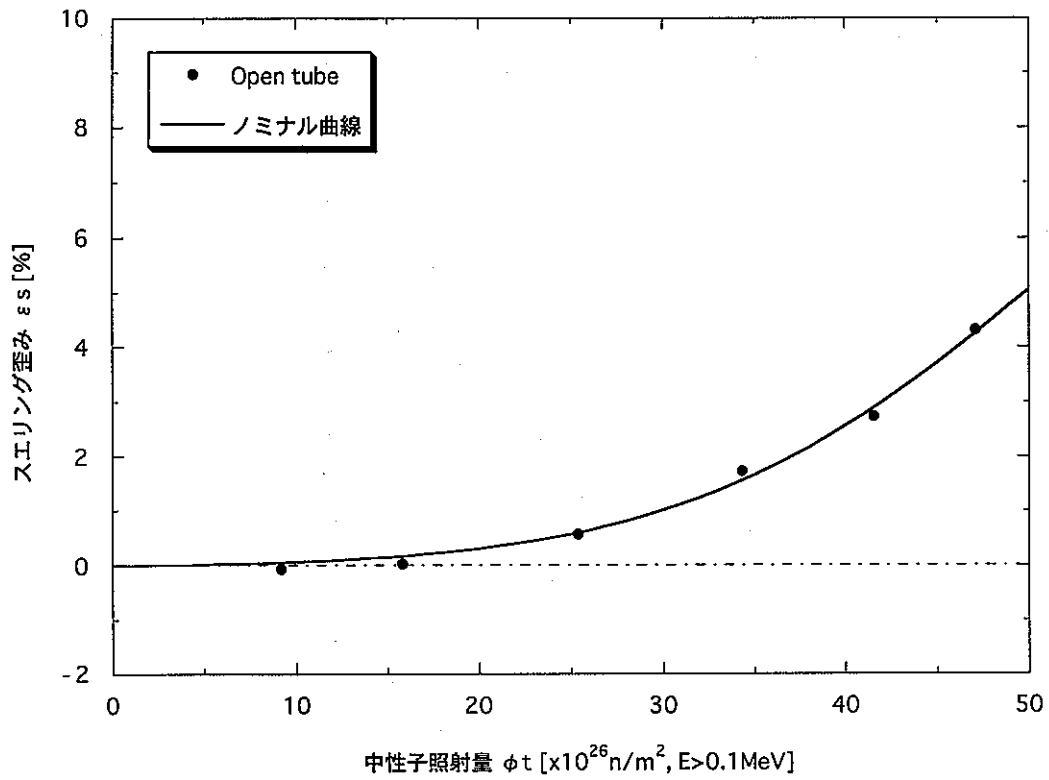


図 4-25.1 MOTAデータにおける照射量とスエリングの関係の定式化 (55MK : 405°C)

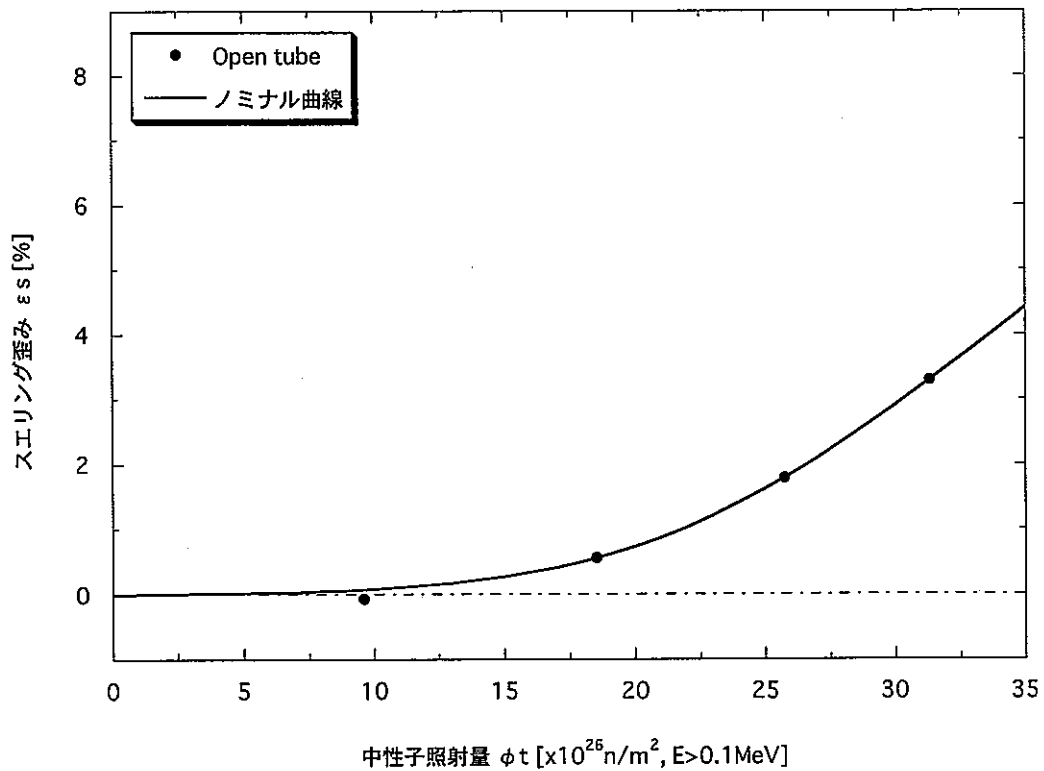


図 4-25.2 MOTAデータにおける照射量とスエリングの関係の定式化 (60AK : 405°C)

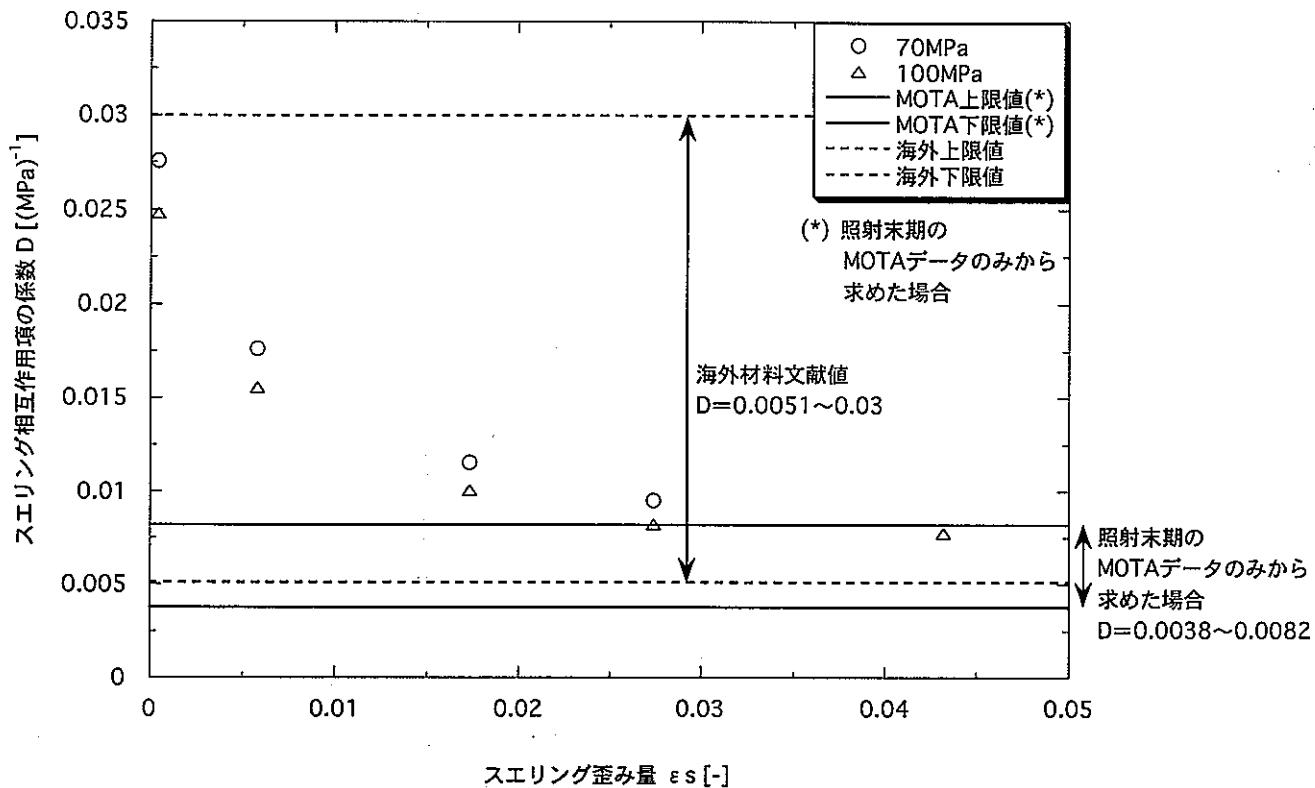


図 4-26.1 MOTAデータにおけるスエリング相互作用項の係数「D」とスエリング量との関係 (55MK : 405°C)

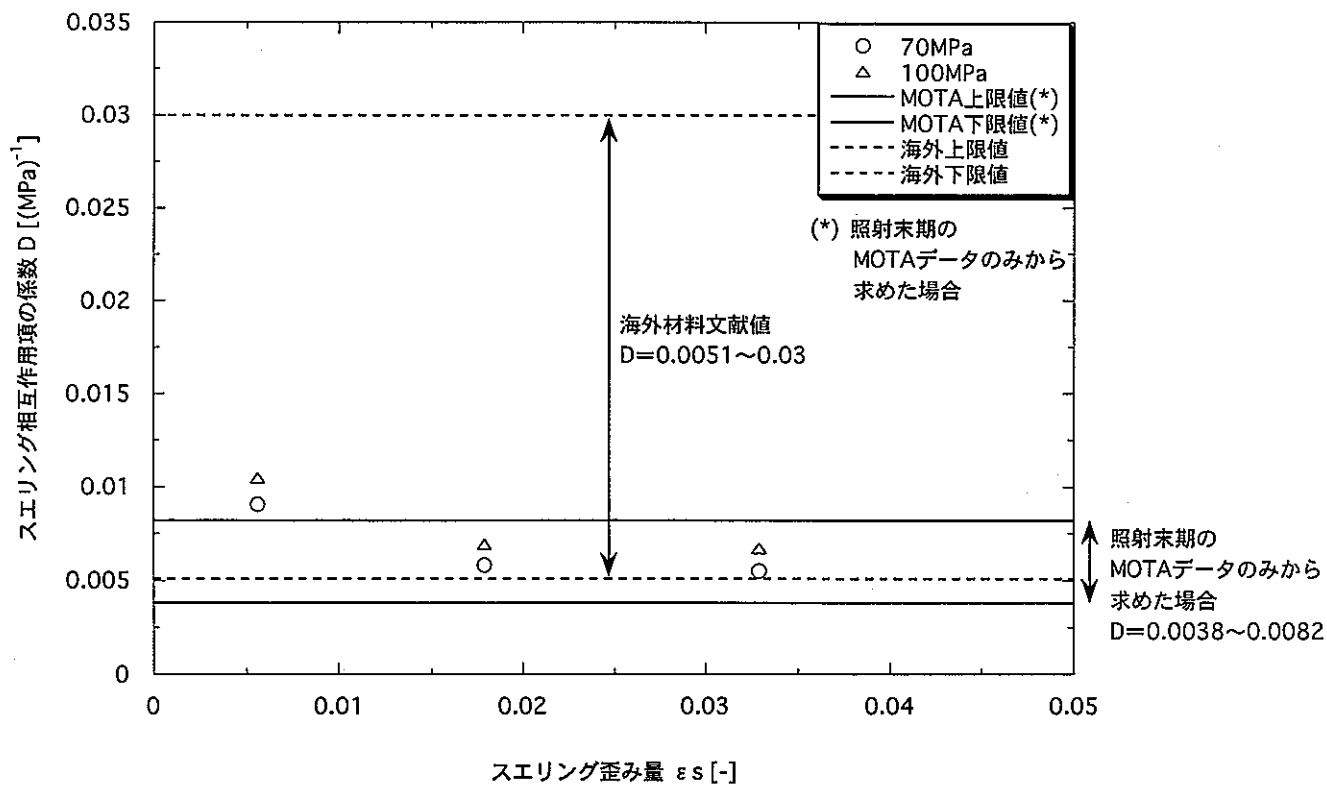


図 4-26.2 MOTAデータにおけるスエリング相互作用項の係数「D」とスエリング量との関係 (60AK : 405°C)

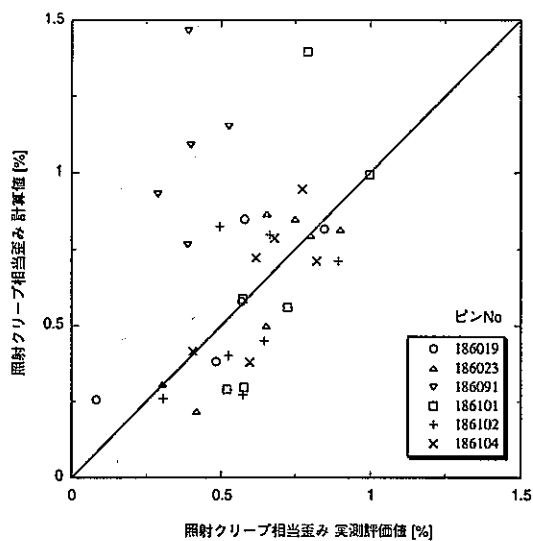


図 5-1.1 MFA-1における照射クリープ歪み 実測評価値と MOTAデータに基づく評価式による計算値との比較（上限式の場合）

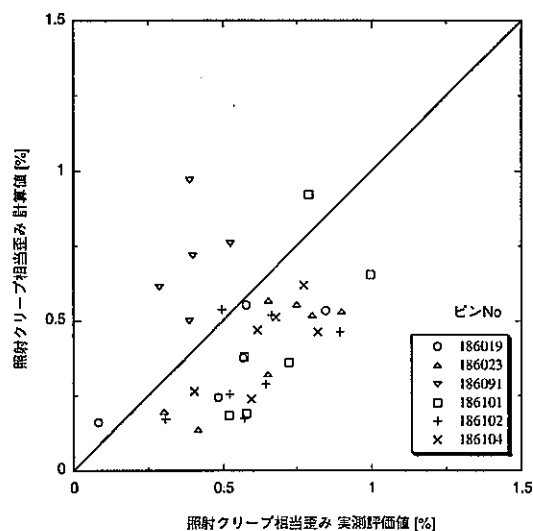


図 5-1.2 MFA-1における照射クリープ歪み 実測評価値と MOTAデータに基づく評価式による計算値との比較（ノミナル式の場合）

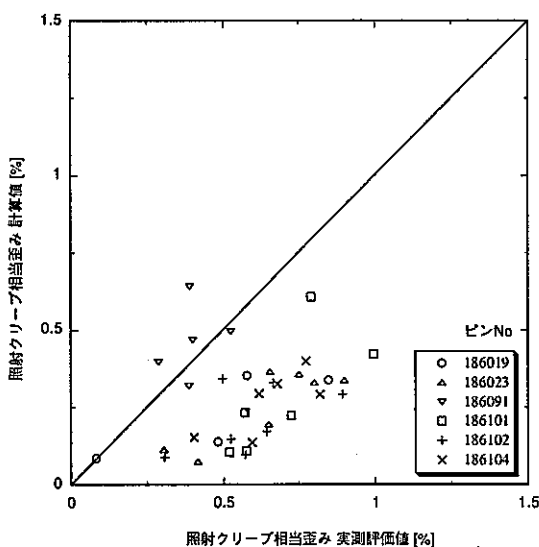


図 5-1.3 MFA-1における照射クリープ歪み 実測評価値と MOTAデータに基づく評価式による計算値との比較（下限式の場合）

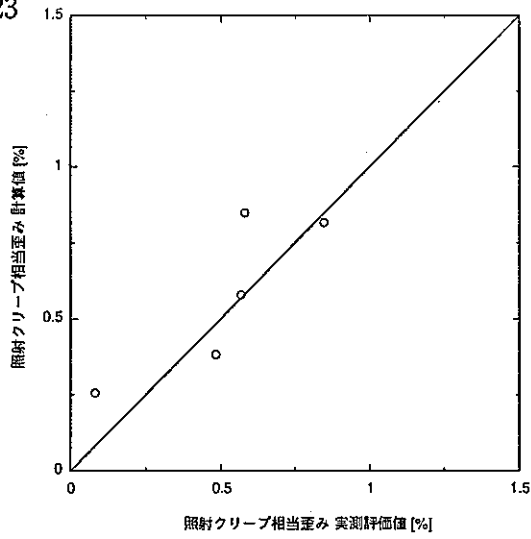


図 5-2.1 MFA-1における照射クリープ歪み 実測評価値と MOTAデータに基づく評価式による計算値との比較 (上限式の場合: ピンNo 186019)

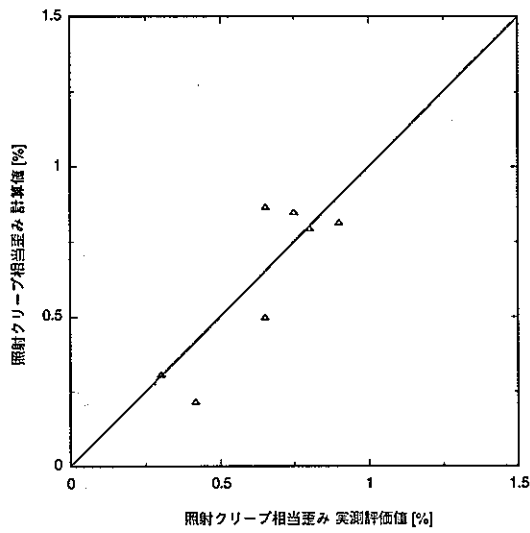


図 5-2.2 MFA-1における照射クリープ歪み 実測評価値と MOTAデータに基づく評価式による計算値との比較 (上限式の場合: ピンNo 186023)

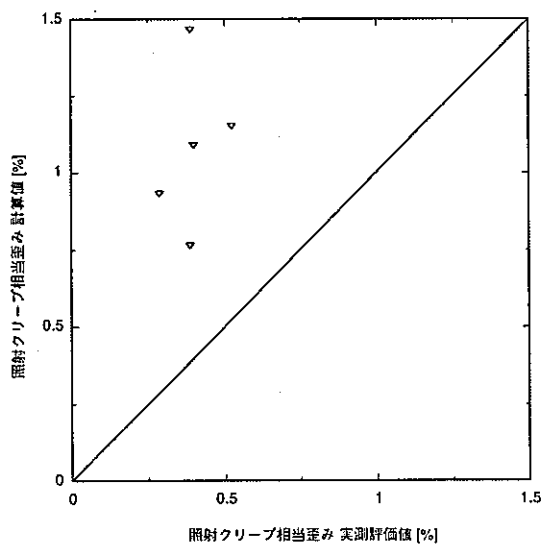


図 5-2.3 MFA-1における照射クリープ歪み 実測評価値と MOTAデータに基づく評価式による計算値との比較 (上限式の場合: ピンNo 186091)

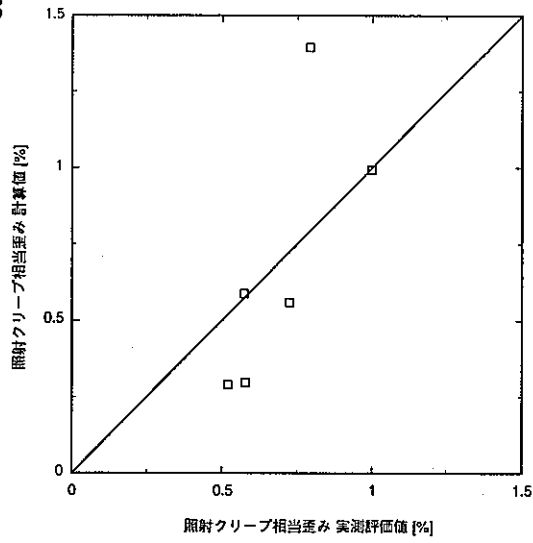


図 5-2.4 MFA-1における照射クリープ歪み 実測評価値と MOTAデータに基づく評価式による計算値との比較 (上限式の場合：ピンNo 186101)

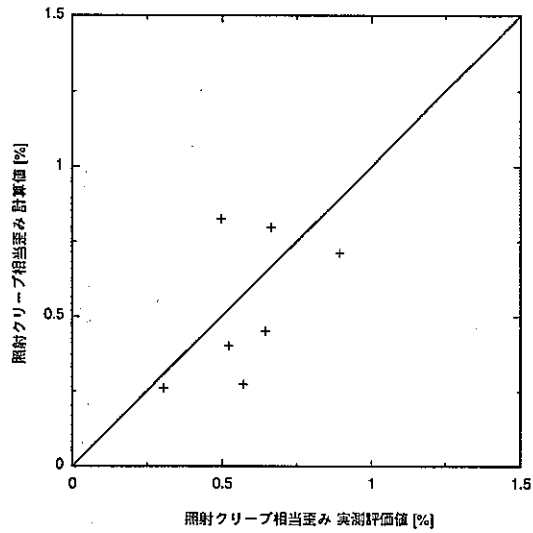


図 5-2.5 MFA-1における照射クリープ歪み 実測評価値と MOTAデータに基づく評価式による計算値との比較 (上限式の場合：ピンNo 186102)

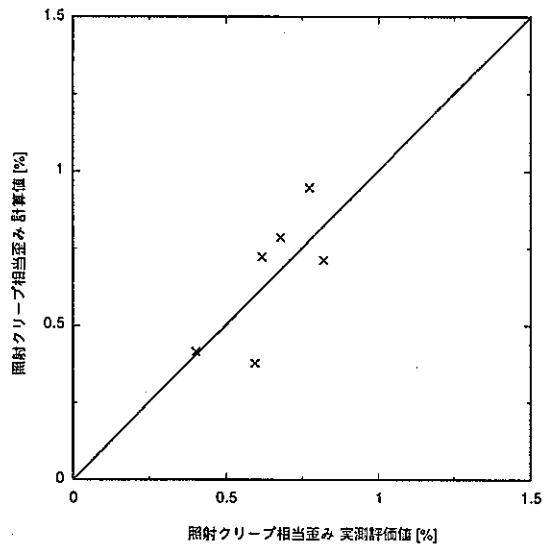


図 5-2.6 MFA-1における照射クリープ歪み 実測評価値と MOTAデータに基づく評価式による計算値との比較 (上限式の場合：ピンNo 186104)

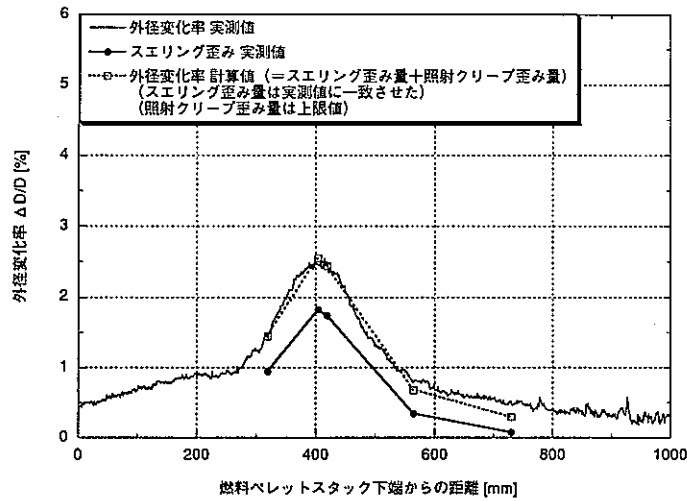


図 5-3.1 MFA-1における外径変化率の実測値とMOTAデータに基づく照射クリープ歪み式を用いた計算値との比較 (上限式の場合：ピンNo 186019)

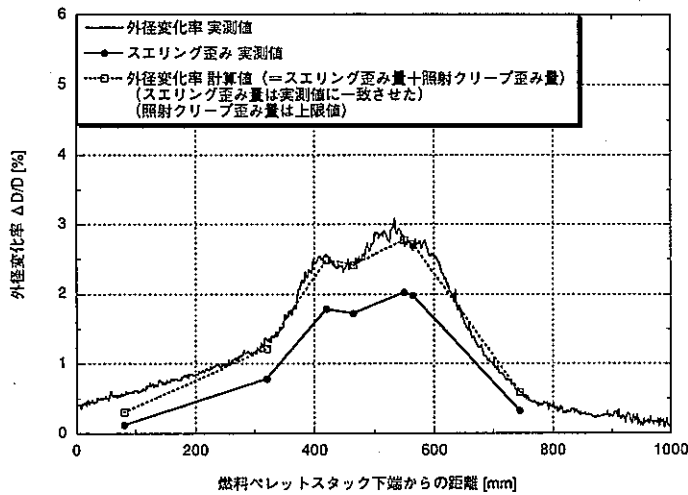


図 5-3.2 MFA-1における外径変化率の実測値とMOTAデータに基づく照射クリープ歪み式を用いた計算値との比較 (上限式の場合：ピンNo 186023)

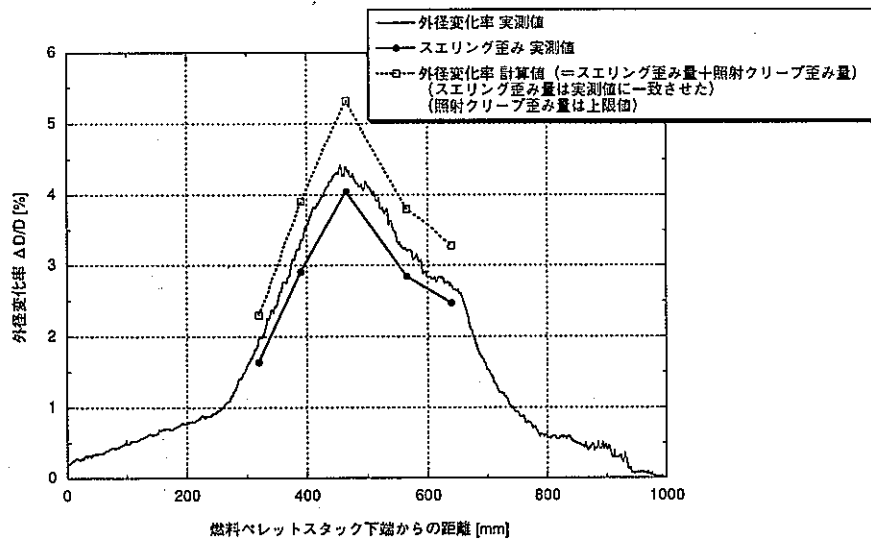


図 5-3.3 MFA-1における外径変化率の実測値とMOTAデータに基づく照射クリープ歪み式を用いた計算値との比較 (上限式の場合：ピンNo 186091)

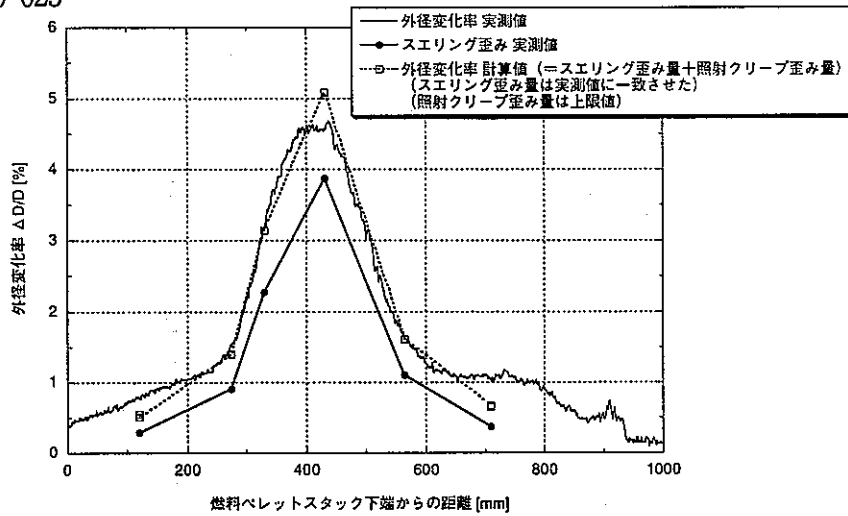


図 5-3.4 MFA-1における外径変化率の実測値とMOTAデータに基づく照射クリープ歪み式を用いた計算値との比較 (上限式の場合：ピンNo 186101)

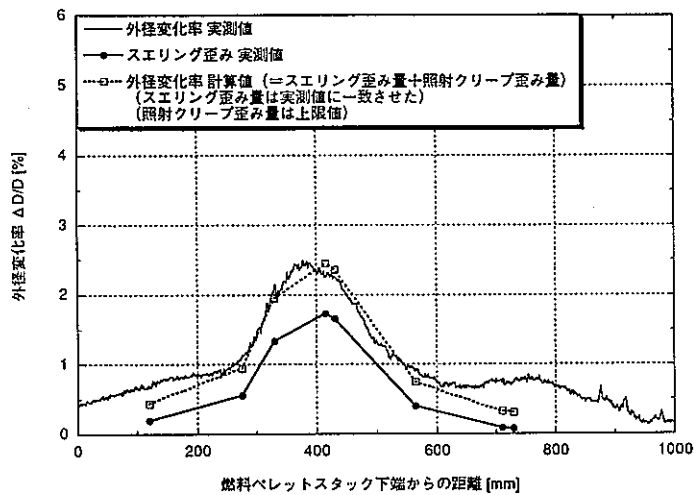


図 5-3.5 MFA-1における外径変化率の実測値とMOTAデータに基づく照射クリープ歪み式を用いた計算値との比較 (上限式の場合：ピンNo 186102)

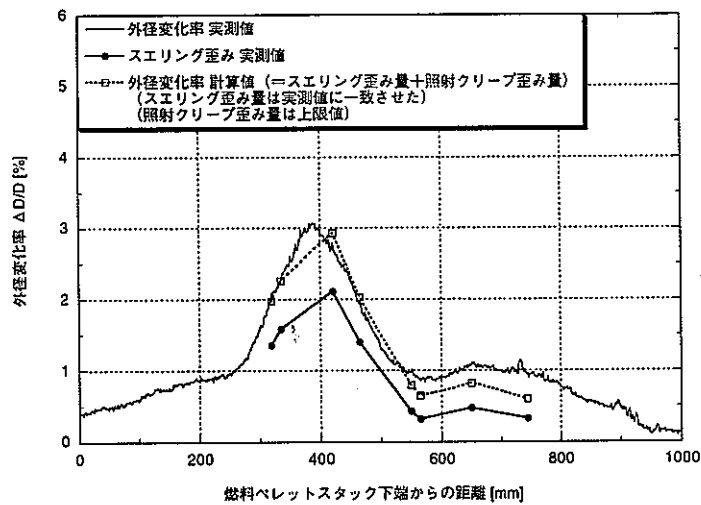


図 5-3.6 MFA-1における外径変化率の実測値とMOTAデータに基づく照射クリープ歪み式を用いた計算値との比較 (上限式の場合：ピンNo 186104)

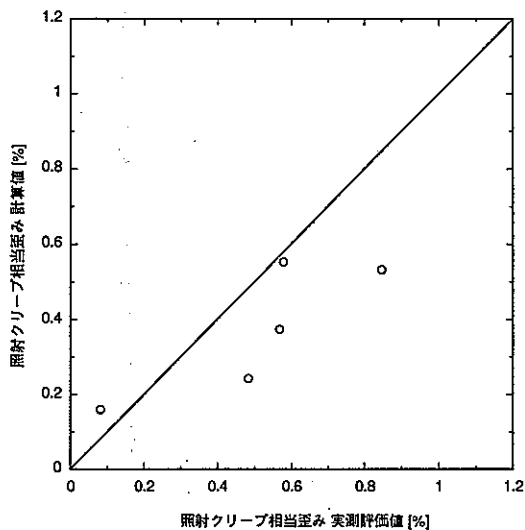


図 5-4.1 MFA-1における照射クリープ歪み 実測評価値と MOTAデータに基づく評価式による計算値との比較 (ノミナル式の場合:ピンNo 186019)

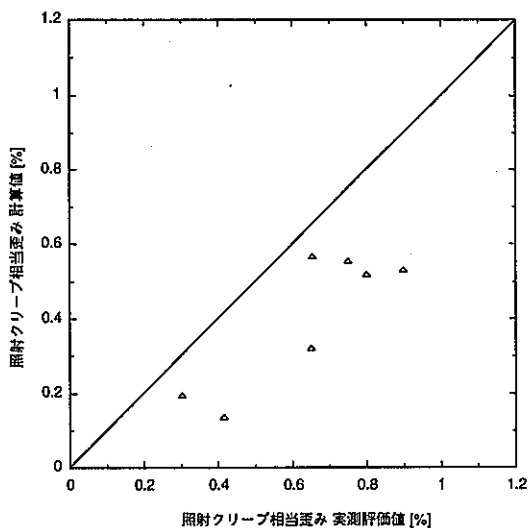


図 5-4.2 MFA-1における照射クリープ歪み 実測評価値と MOTAデータに基づく評価式による計算値との比較 (ノミナル式の場合:ピンNo 186023)

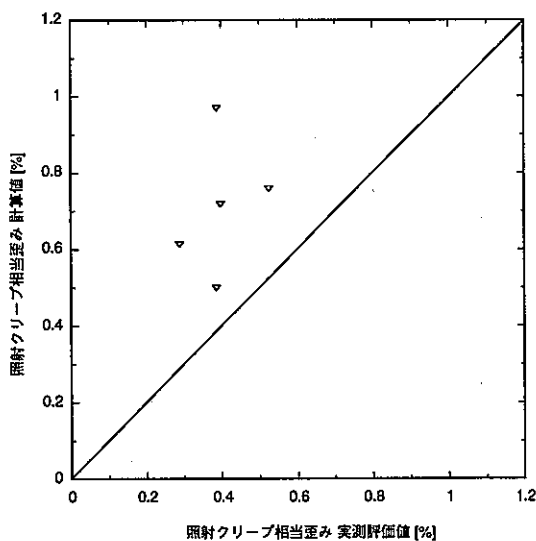


図 5-4.3 MFA-1における照射クリープ歪み 実測評価値と MOTAデータに基づく評価式による計算値との比較 (ノミナル式の場合:ピンNo 186091)

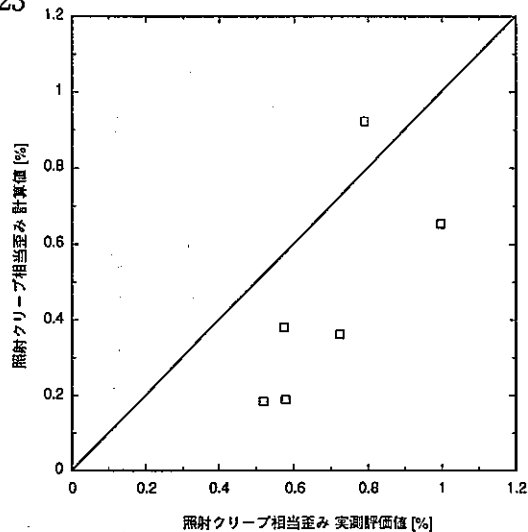


図 5-4.4 MFA-1における照射クリープ歪み 実測評価値と MOTAデータに基づく評価式による計算値との比較 (ノミナル式の場合:ピンNo 186101)

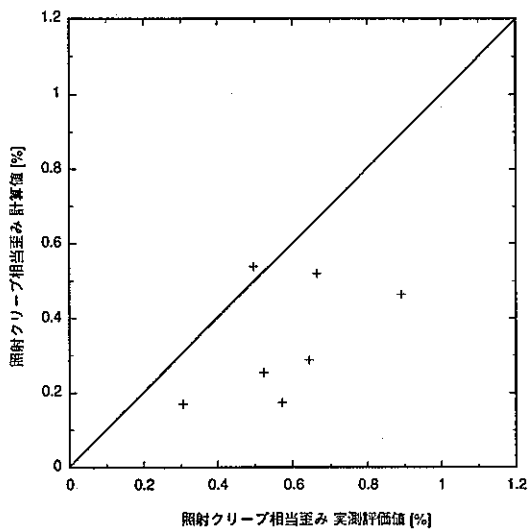


図 5-4.5 MFA-1における照射クリープ歪み 実測評価値と MOTAデータに基づく評価式による計算値との比較 (ノミナル式の場合:ピンNo 186102)

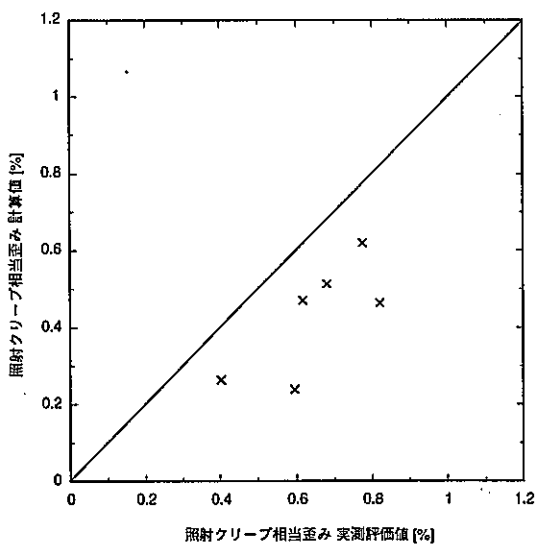


図 5-4.6 MFA-1における照射クリープ歪み 実測評価値と MOTAデータに基づく評価式による計算値との比較 (ノミナル式の場合:ピンNo 186104)

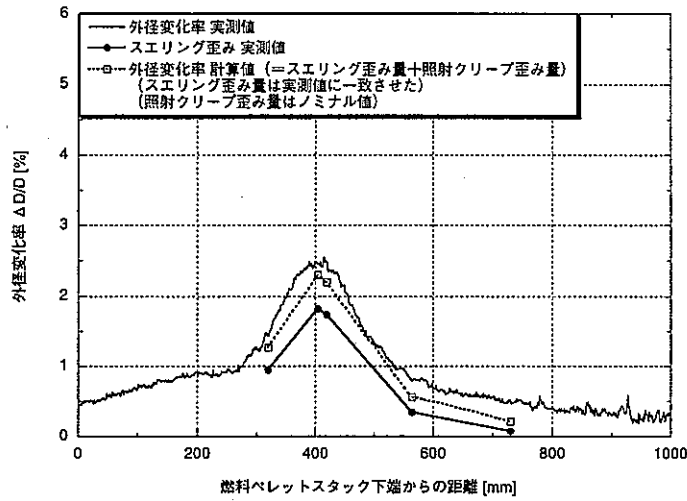


図 5-5.1 MFA-1における外径変化率の実測値とMOTAデータに基づく照射クリープ歪み式を用いた計算値との比較 (ノミナル式の場合: ピンNo 186019)

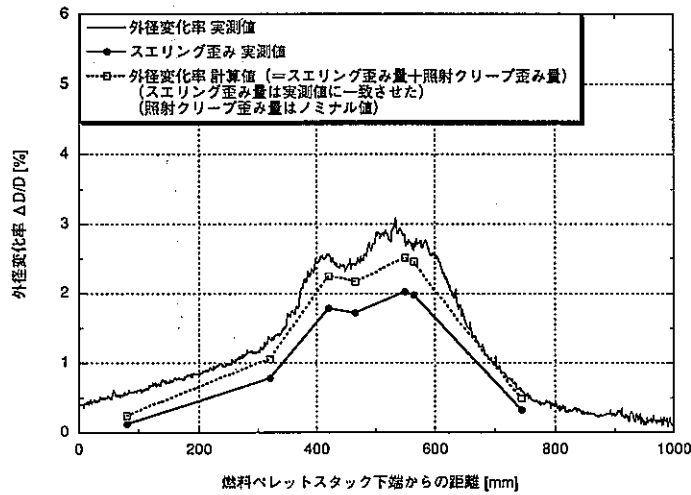


図 5-5.2 MFA-1における外径変化率の実測値とMOTAデータに基づく照射クリープ歪み式を用いた計算値との比較 (ノミナル式の場合: ピンNo 186023)

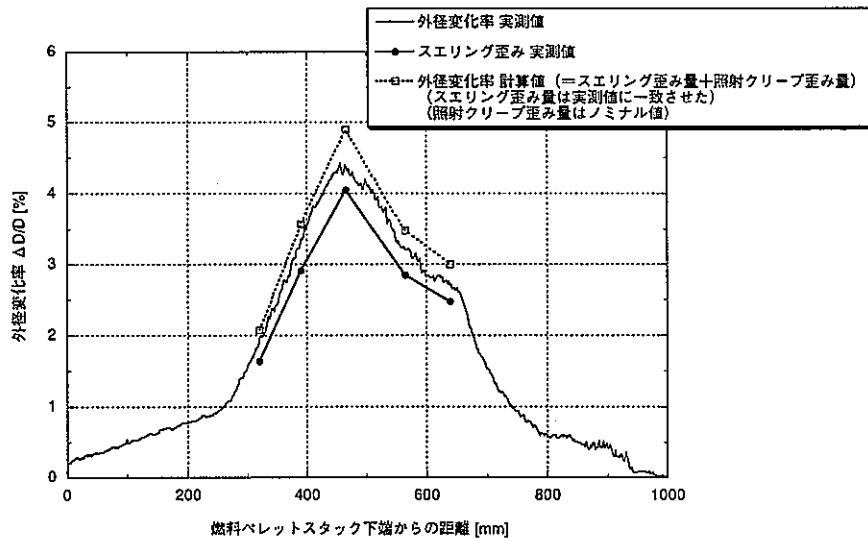


図 5-5.3 MFA-1における外径変化率の実測値とMOTAデータに基づく照射クリープ歪み式を用いた計算値との比較 (ノミナル式の場合: ピンNo 186091)

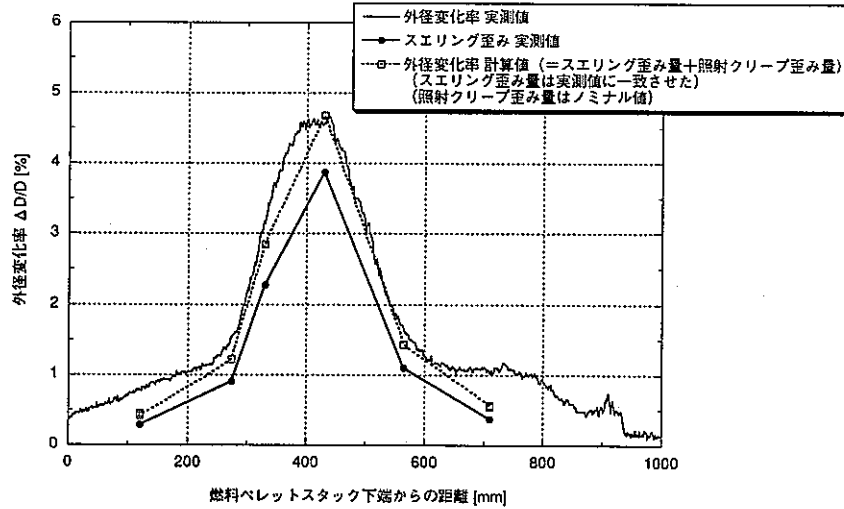


図 5-5.4 MFA-1における外径変化率の実測値と MOTAデータに基づく照射クリープ歪み式を用いた計算値との比較 (ノミナル式の場合: ピンNo 186101)

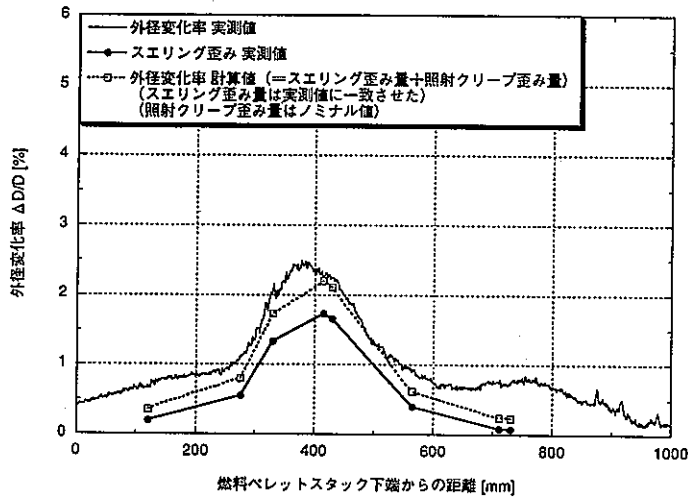


図 5-5.5 MFA-1における外径変化率の実測値と MOTAデータに基づく照射クリープ歪み式を用いた計算値との比較 (ノミナル式の場合: ピンNo 186102)

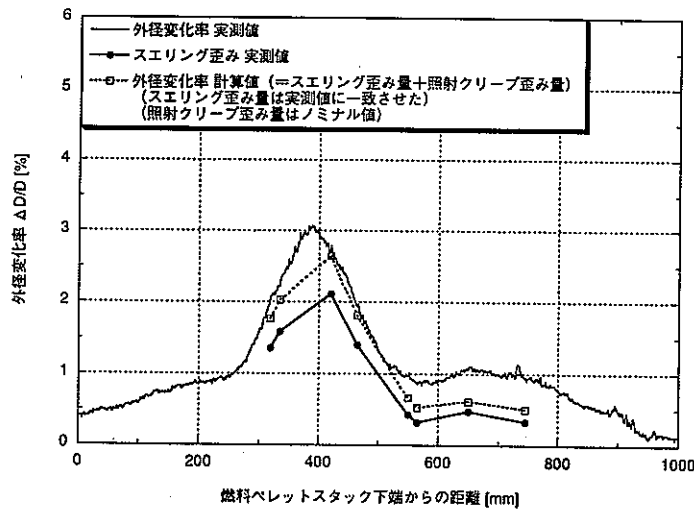


図 5-5.6 MFA-1における外径変化率の実測値と MOTAデータに基づく照射クリープ歪み式を用いた計算値との比較 (ノミナル式の場合: ピンNo 186104)

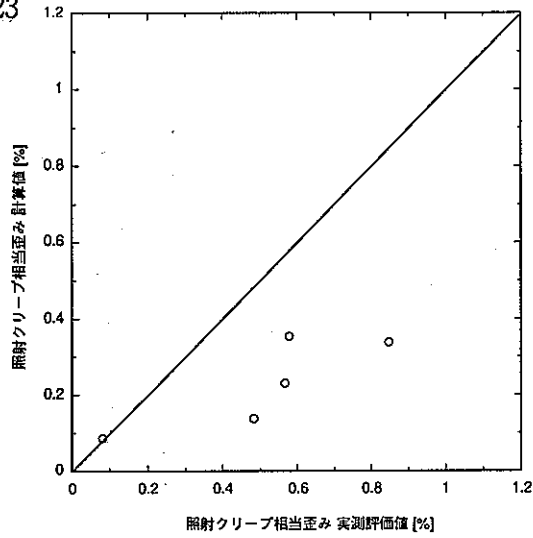


図 5-6.1 MFA-1における照射クリープ歪み 実測評価値と MOTAデータに基づく評価式による計算値との比較 (下限式の場合:ピンNo 186019)

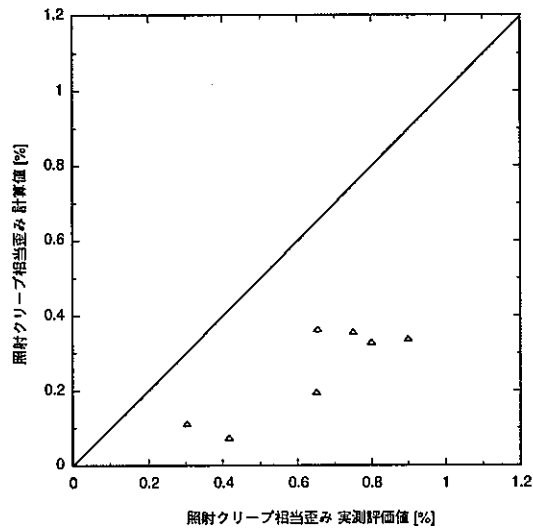


図 5-6.2 MFA-1における照射クリープ歪み 実測評価値と MOTAデータに基づく評価式による計算値との比較 (下限式の場合:ピンNo 186023)

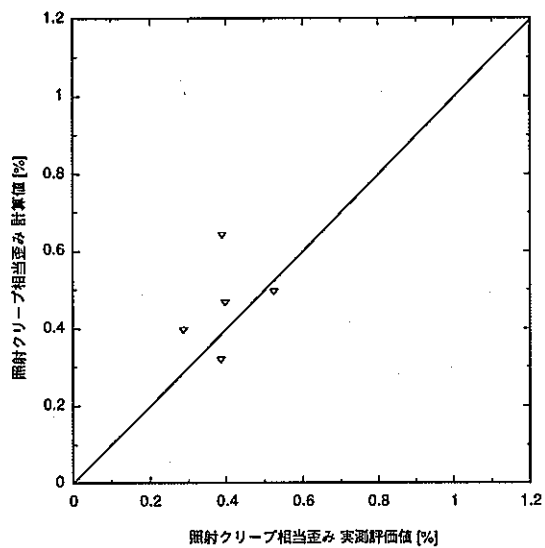


図 5-6.3 MFA-1における照射クリープ歪み 実測評価値と MOTAデータに基づく評価式による計算値との比較 (下限式の場合:ピンNo 186091)

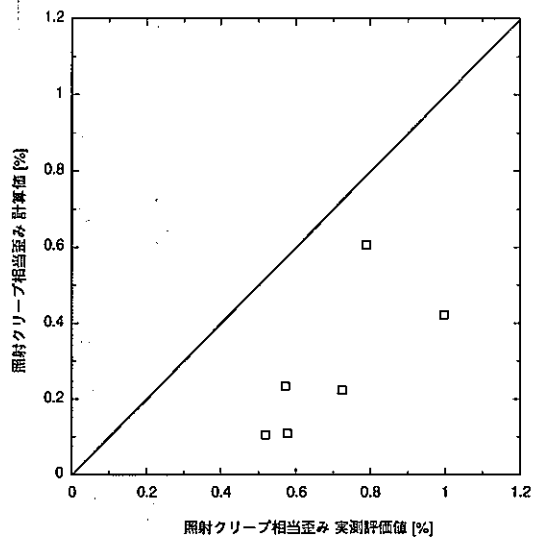


図 5-6.4 MFA-1における照射クリープ歪み 実測評価値と MOTAデータに基づく評価式による計算値との比較 (下限式の場合: ピンNo 186101)

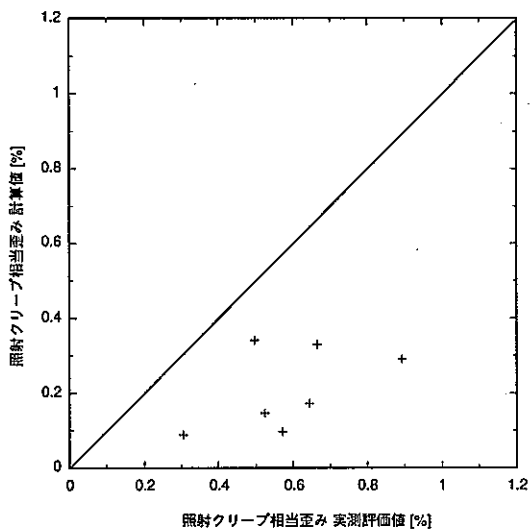


図 5-6.5 MFA-1における照射クリープ歪み 実測評価値と MOTAデータに基づく評価式による計算値との比較 (下限式の場合: ピンNo 186102)

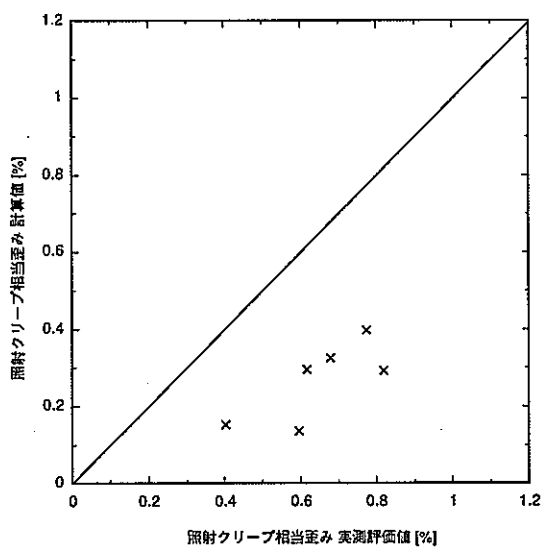


図 5-6.6 MFA-1における照射クリープ歪み 実測評価値と MOTAデータに基づく評価式による計算値との比較 (下限式の場合: ピンNo 186104)

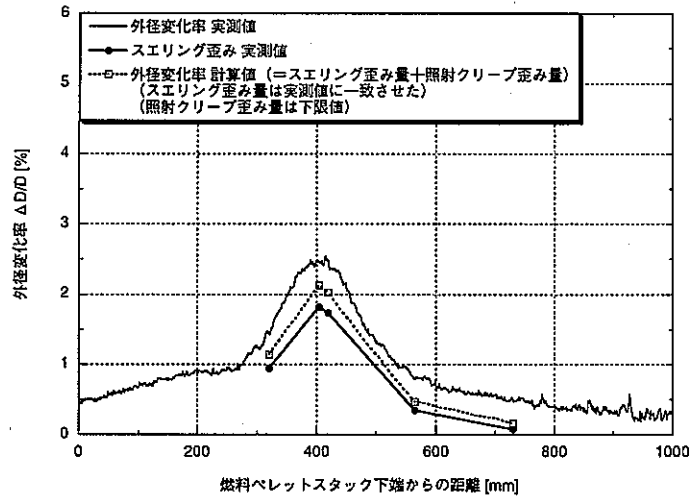


図 5-7.1 MFA-1における外径変化率の実測値とMOTAデータに基づく照射クリープ歪み式を用いた計算値との比較 (下限式の場合: ピンNo 186019)

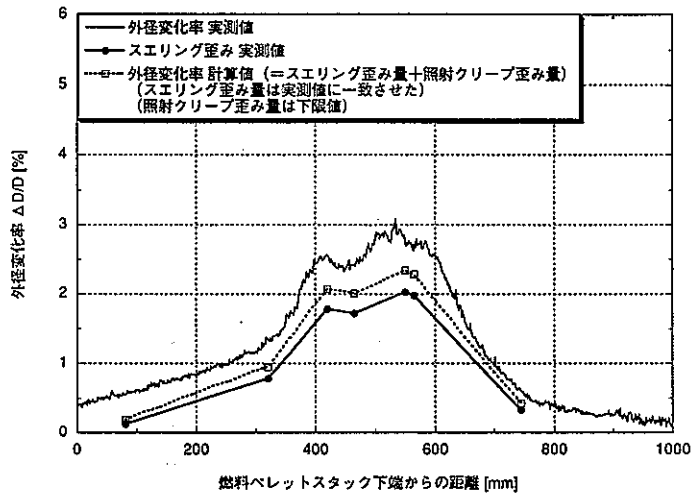


図 5-7.2 MFA-1における外径変化率の実測値とMOTAデータに基づく照射クリープ歪み式を用いた計算値との比較 (下限式の場合: ピンNo 186023)

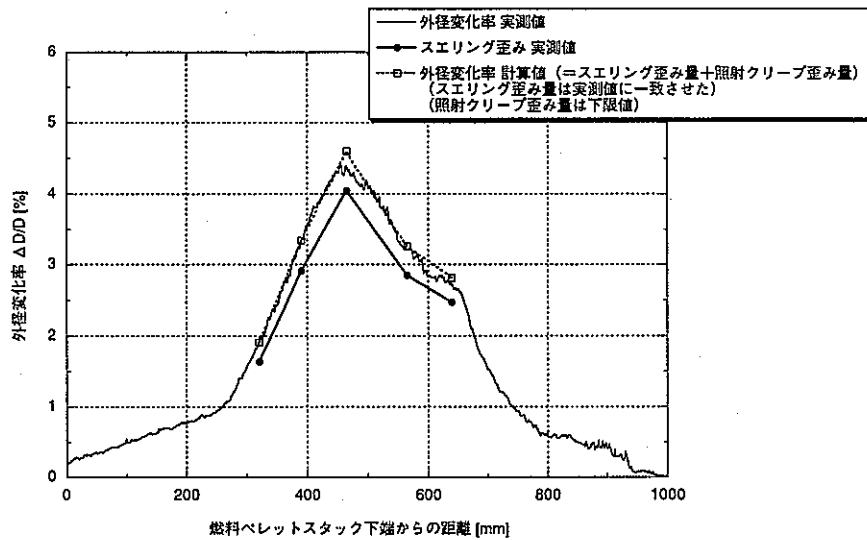


図 5-7.3 MFA-1における外径変化率の実測値とMOTAデータに基づく照射クリープ歪み式を用いた計算値との比較 (下限式の場合: ピンNo 186091)

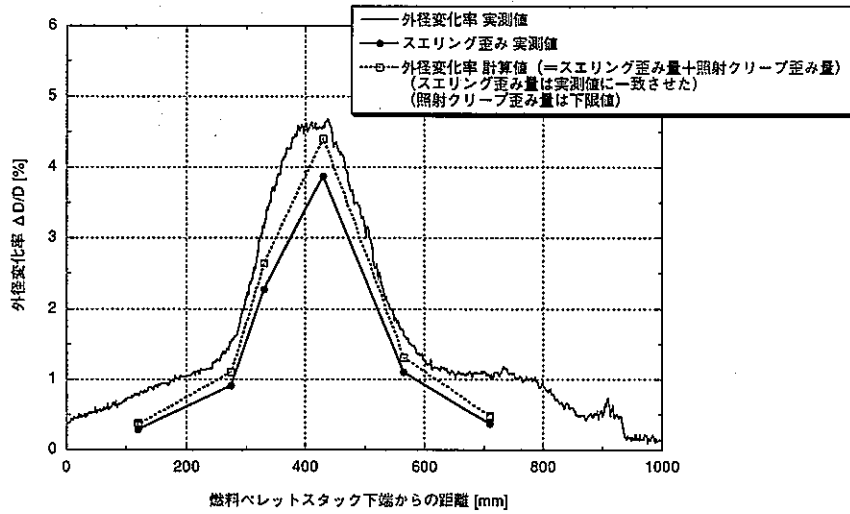


図 5-7.4 MFA-1における外径変化率の実測値と MOTAデータに基づく照射クリープ歪み式を用いた計算値との比較 (下限式の場合：ピンNo 186101)

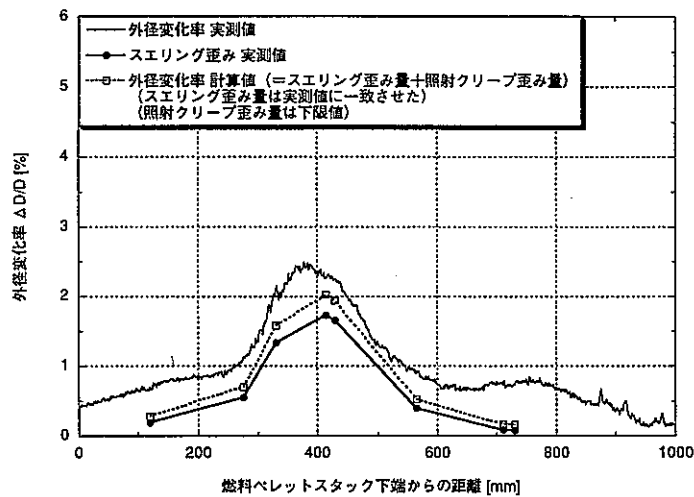


図 5-7.5 MFA-1における外径変化率の実測値と MOTAデータに基づく照射クリープ歪み式を用いた計算値との比較 (下限式の場合：ピンNo 186102)

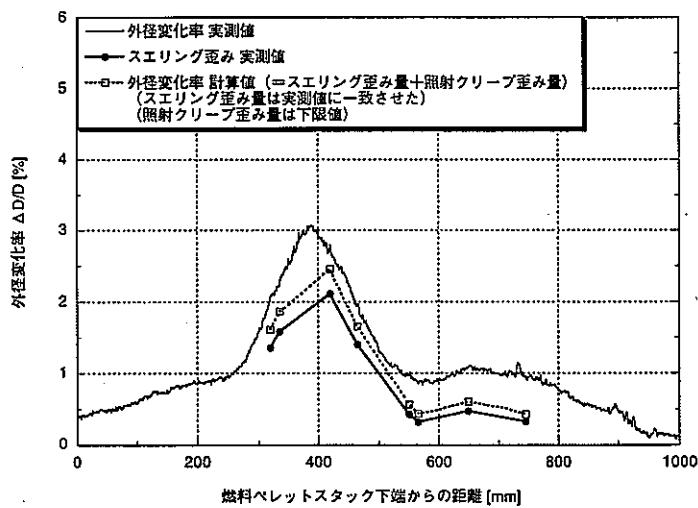


図 5-7.6 MFA-1における外径変化率の実測値と MOTAデータに基づく照射クリープ歪み式を用いた計算値との比較 (下限式の場合：ピンNo 186104)

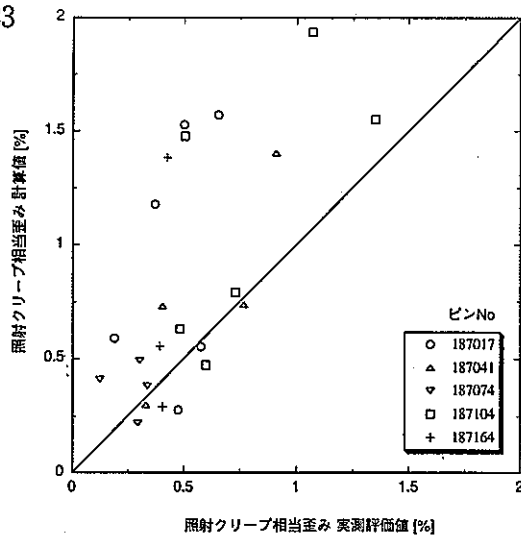


図 5-8.1 MFA-2における照射クリープ歪み 実測評価値と MOTAデータに基づく評価式による計算値との比較（上限式の場合）

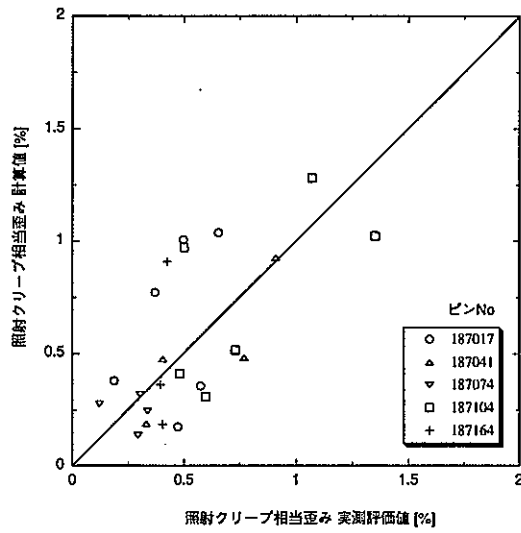


図 5-8.2 MFA-2における照射クリープ歪み 実測評価値と MOTAデータに基づく評価式による計算値との比較（ノミナル式の場合）

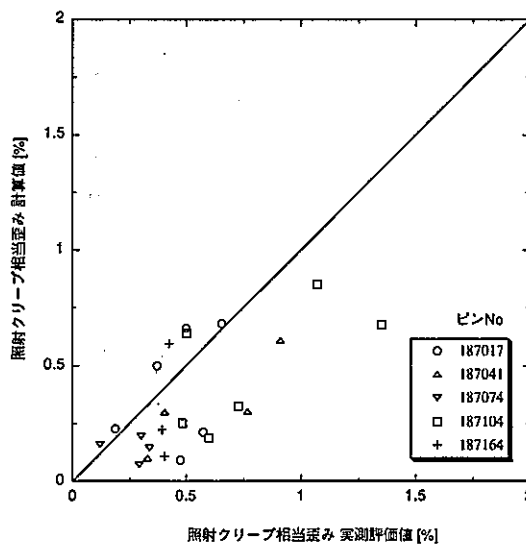


図 5-8.3 MFA-2における照射クリープ歪み 実測評価値と MOTAデータに基づく評価式による計算値との比較（下限式の場合）

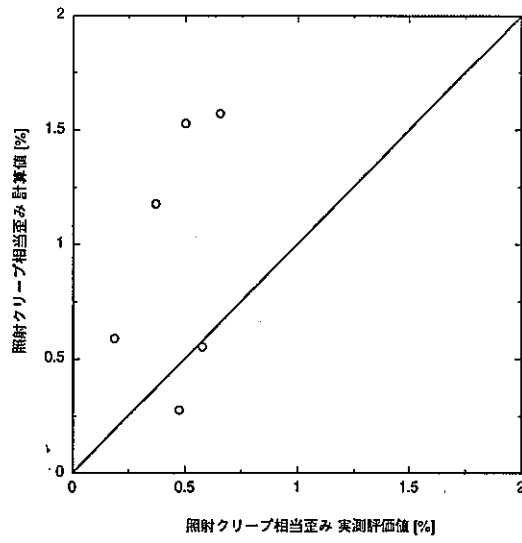


図 5-9.1 MFA-2における照射クリープ歪み 実測評価値と MOTAデータに基づく評価式による計算値との比較 (上限式の場合：ピンNo 187017)

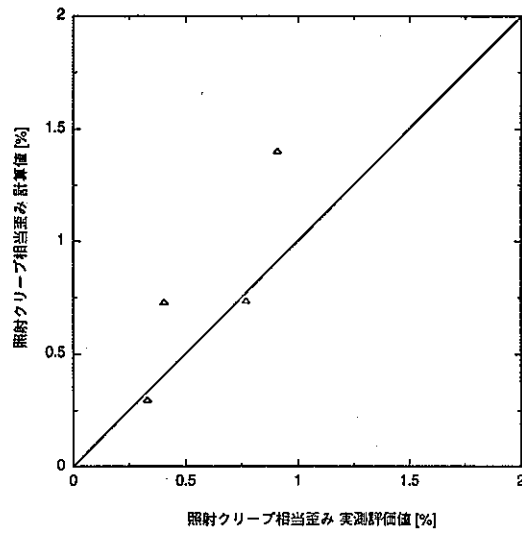


図 5-9.2 MFA-2における照射クリープ歪み 実測評価値と MOTAデータに基づく評価式による計算値との比較 (上限式の場合：ピンNo 187041)

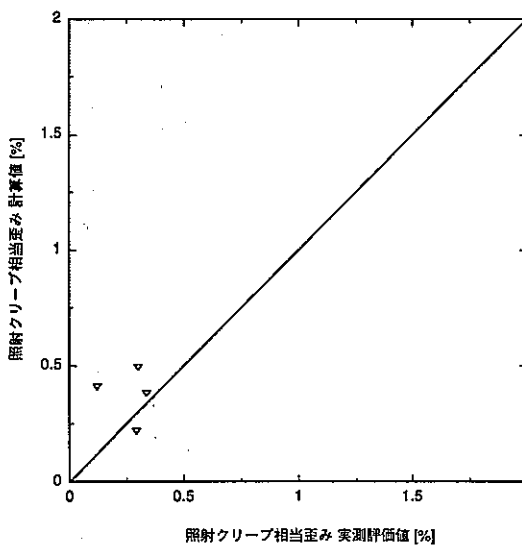


図 5-9.3 MFA-2における照射クリープ歪み 実測評価値と MOTAデータに基づく評価式による計算値との比較 (上限式の場合：ピンNo 187074)

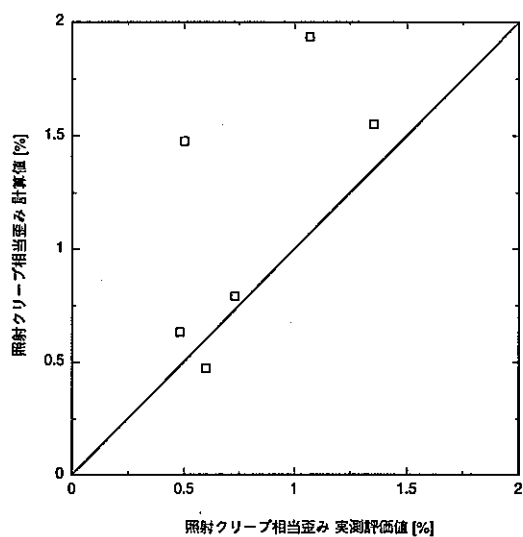


図 5-9.4 MFA-2における照射クリープ歪み 実測評価値と MOTAデータに基づく評価式による計算値との比較 (上限式の場合：ピンNo 187104)

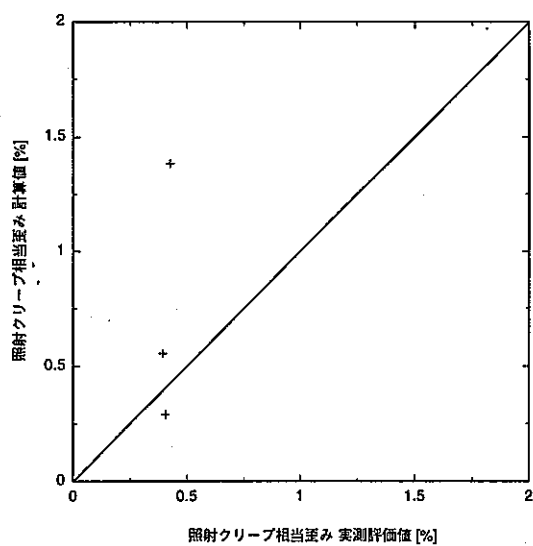


図 5-9.5 MFA-2における照射クリープ歪み 実測評価値と MOTAデータに基づく評価式による計算値との比較 (上限式の場合：ピンNo 187164)

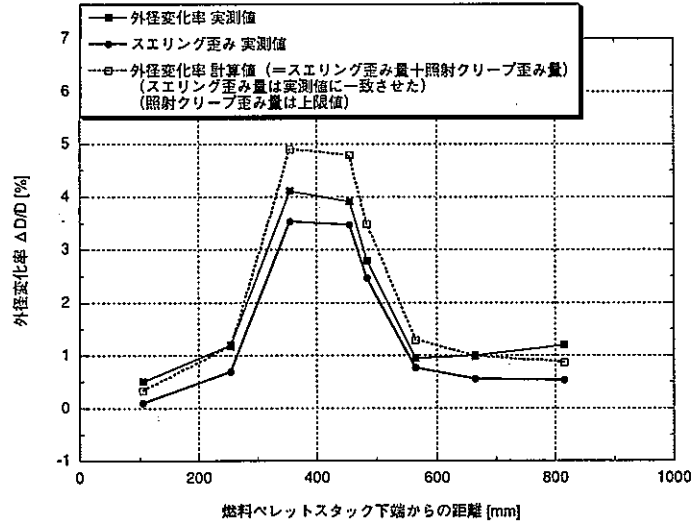


図 5-10.1 MFA-2における外径変化率の実測値とMOTAデータに基づく照射クリープ歪み式を用いた計算値との比較 (上限式の場合：ピンNo 187017)

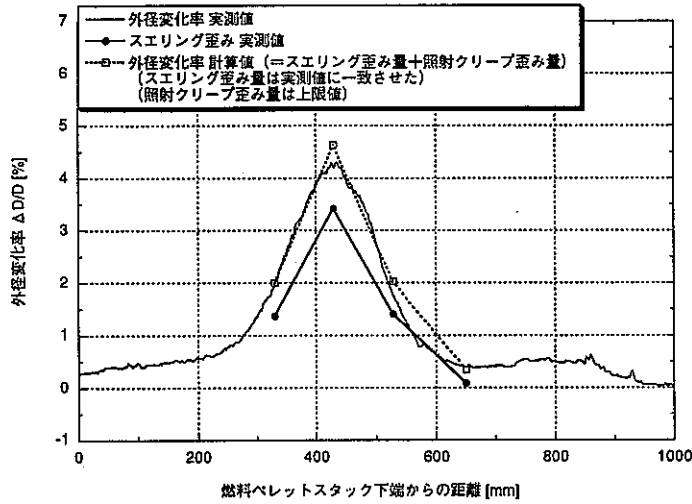


図 5-10.2 MFA-2における外径変化率の実測値とMOTAデータに基づく照射クリープ歪み式を用いた計算値との比較 (上限式の場合：ピンNo 187041)

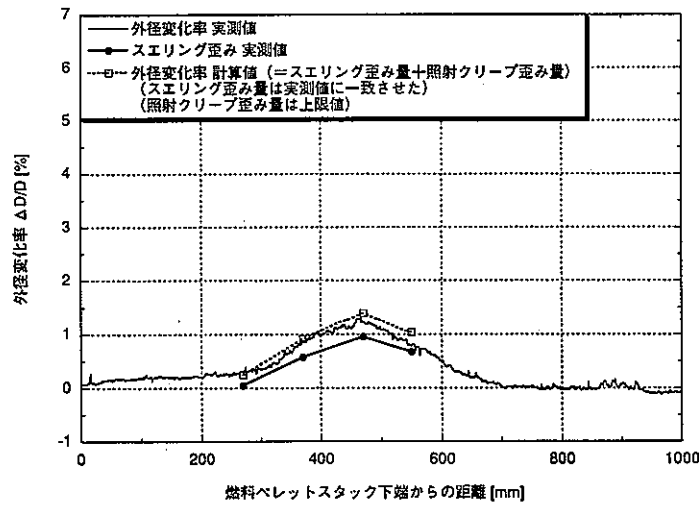


図 5-10.3 MFA-2における外径変化率の実測値とMOTAデータに基づく照射クリープ歪み式を用いた計算値との比較 (上限式の場合：ピンNo 187074)

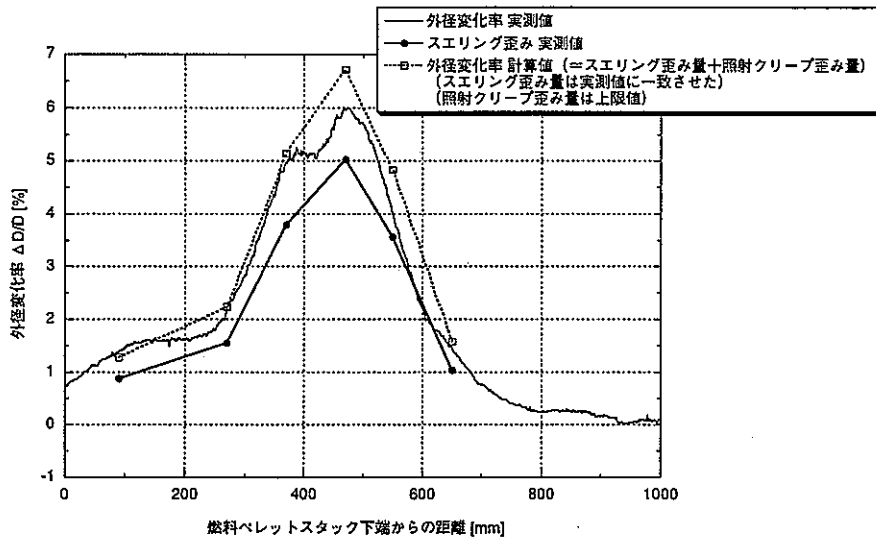


図 5-10.4 MFA-2における外径変化率の実測値と MOTAデータに基づく照射クリープ歪み式を用いた計算値との比較 (上限式の場合：ピンNo 187104)

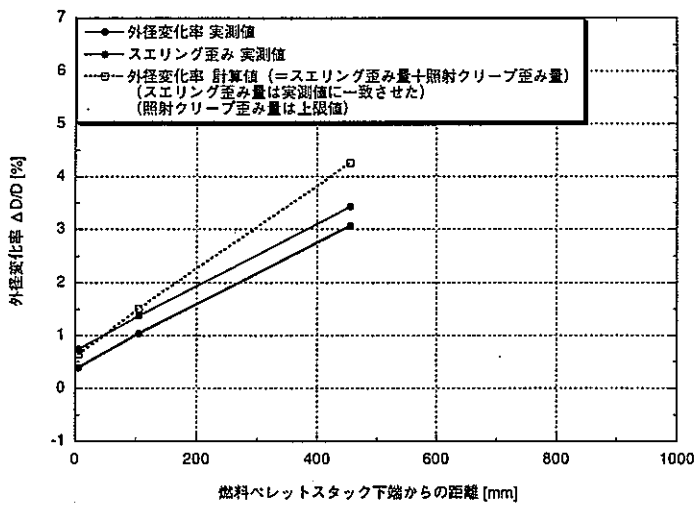


図 5-10.5 MFA-2における外径変化率の実測値と MOTAデータに基づく照射クリープ歪み式を用いた計算値との比較 (上限式の場合：ピンNo 187164)

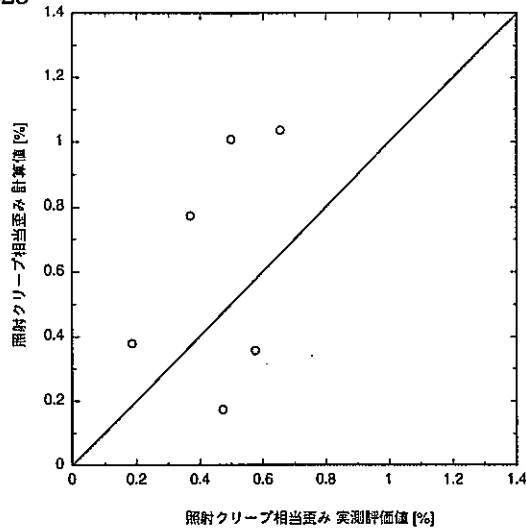


図 5-11.1 MFA-2における照射クリープ歪み 実測評価値と MOTAデータに基づく評価式による計算値との比較 (ノミナル式の場合: ピンNo 187017)

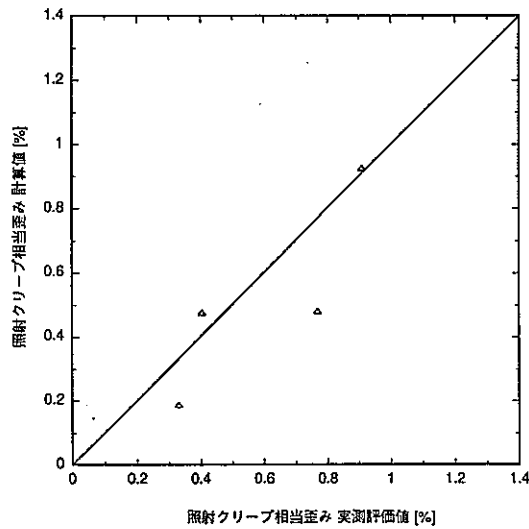


図 5-11.2 MFA-2における照射クリープ歪み 実測評価値と MOTAデータに基づく評価式による計算値との比較 (ノミナル式の場合: ピンNo 187041)

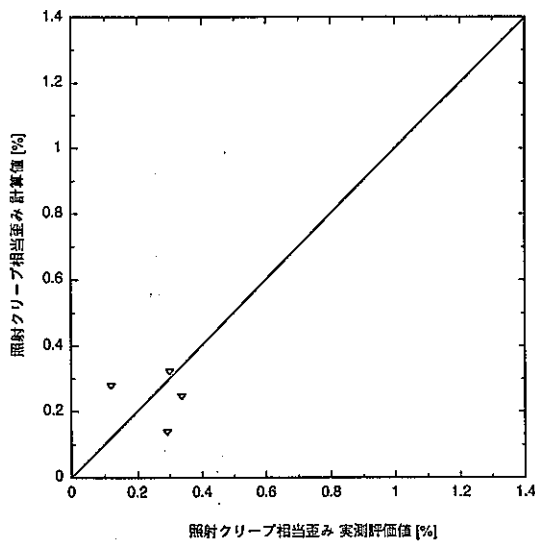


図 5-11.3 MFA-2における照射クリープ歪み 実測評価値と MOTAデータに基づく評価式による計算値との比較 (ノミナル式の場合: ピンNo 187074)

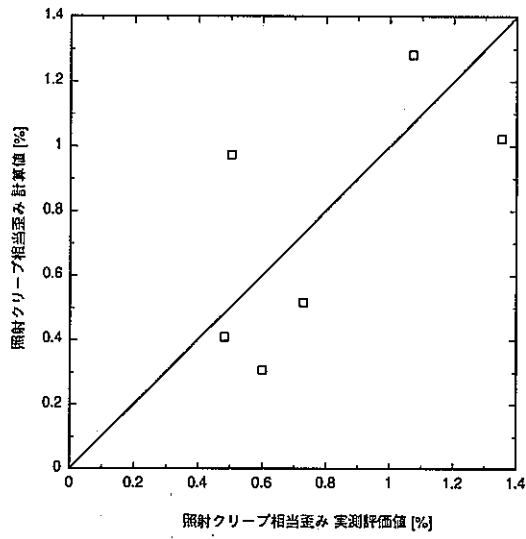


図 5-11.4 MFA-2における照射クリープ歪み 実測評価値と MOTAデータに基づく評価式による計算値との比較 (ノミナル式の場合:ピンNo 187104)

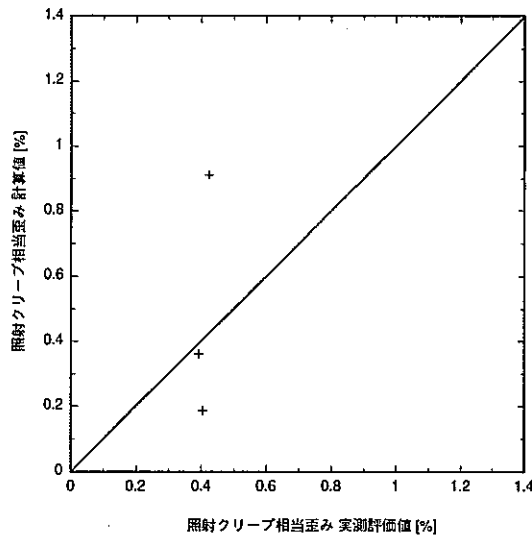


図 5-11.5 MFA-2における照射クリープ歪み 実測評価値と MOTAデータに基づく評価式による計算値との比較 (ノミナル式の場合:ピンNo 187164)

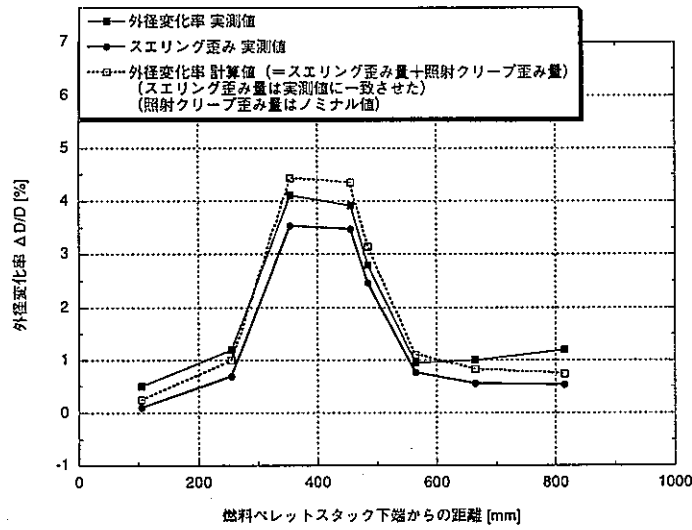


図 5-12.1 MFA-2における外径変化率の実測値とMOTAデータに基づく照射クリープ歪み式を用いた計算値との比較 (ノミナル式の場合: ピンNo 187017)

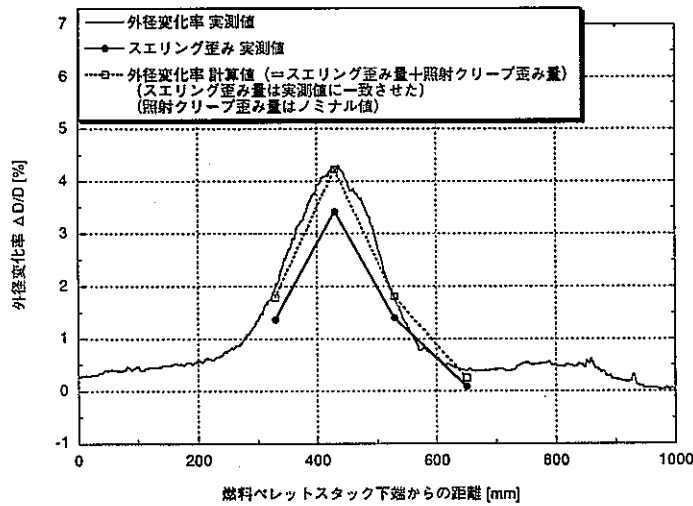


図 5-12.2 MFA-2における外径変化率の実測値とMOTAデータに基づく照射クリープ歪み式を用いた計算値との比較 (ノミナル式の場合: ピンNo 187041)

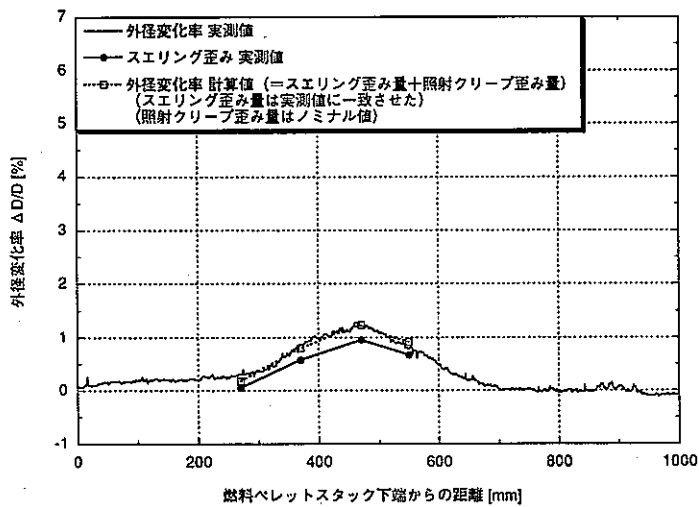


図 5-12.3 MFA-2における外径変化率の実測値とMOTAデータに基づく照射クリープ歪み式を用いた計算値との比較 (ノミナル式の場合: ピンNo 187074)

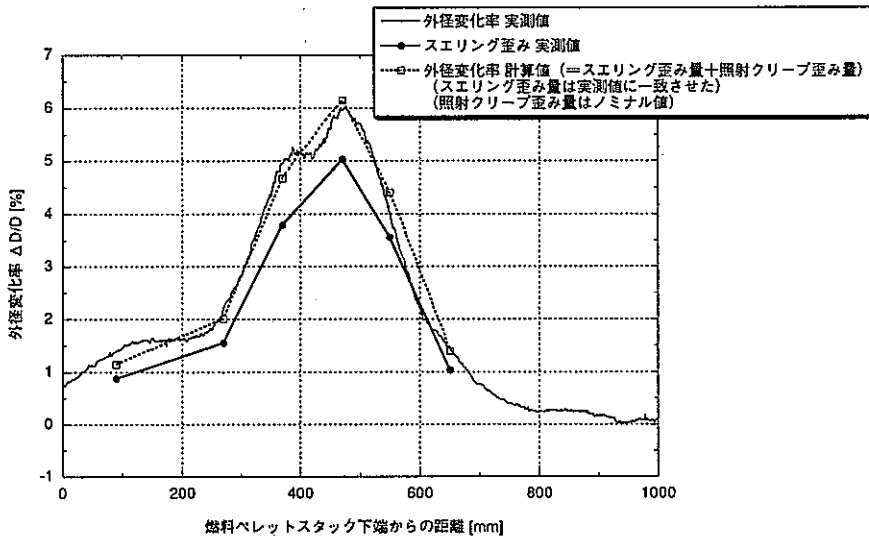


図 5-12.4 MFA-2における外径変化率の実測値と MOTAデータに基づく照射クリープ歪み式を用いた計算値との比較 (ノミナル式の場合：ピンNo 187104)

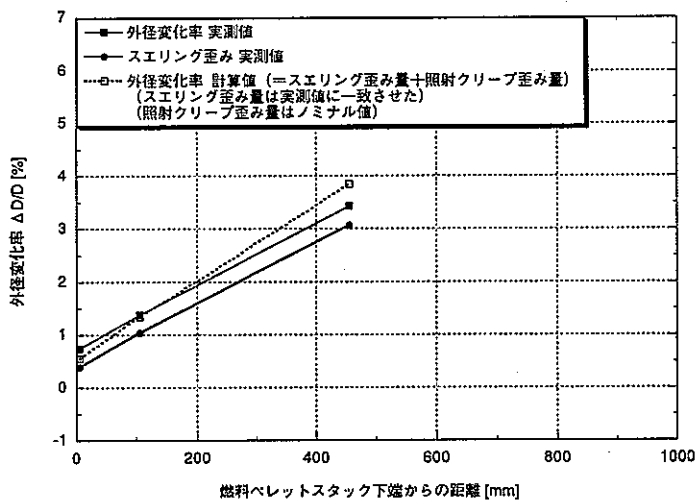


図 5-12.5 MFA-2における外径変化率の実測値と MOTAデータに基づく照射クリープ歪み式を用いた計算値との比較 (ノミナル式の場合：ピンNo 187164)

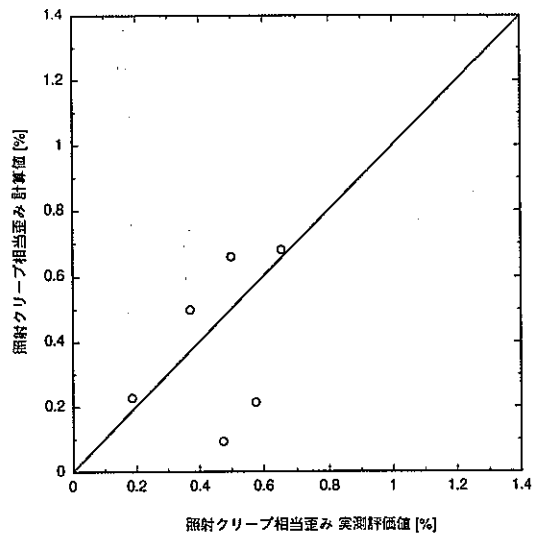


図 5-13.1 MFA-2における照射クリープ歪み 実測評価値と MOTAデータに基づく評価式による計算値との比較 (下限式の場合: ピンNo 187017)

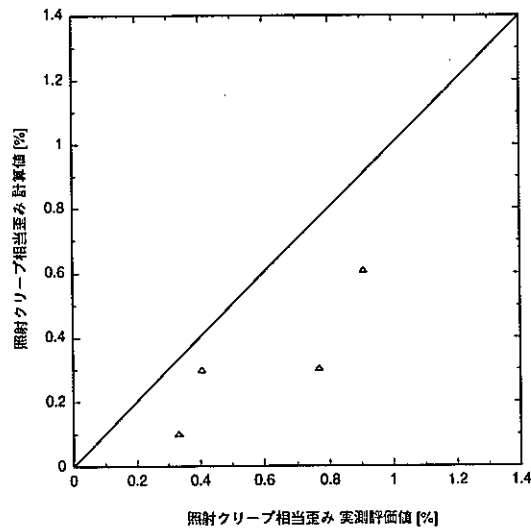


図 5-13.2 MFA-2における照射クリープ歪み 実測評価値と MOTAデータに基づく評価式による計算値との比較 (下限式の場合: ピンNo 187041)

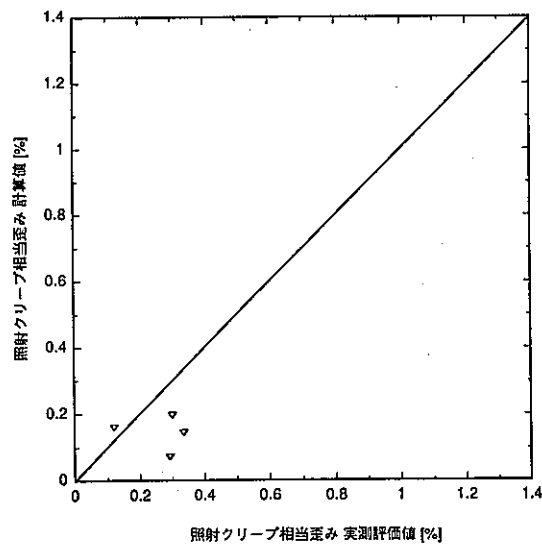


図 5-13.3 MFA-2における照射クリープ歪み 実測評価値と MOTAデータに基づく評価式による計算値との比較 (下限式の場合: ピンNo 187074)

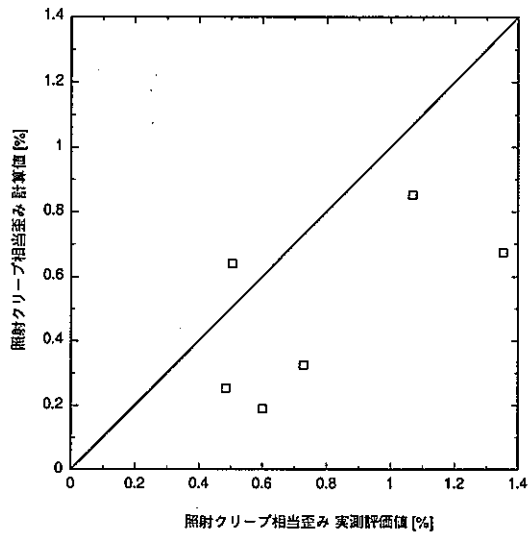


図 5-13.4 MFA-2における照射クリープ歪み 実測評価値と MOTAデータに基づく評価式による計算値との比較 (下限式の場合：ピンNo 187104)

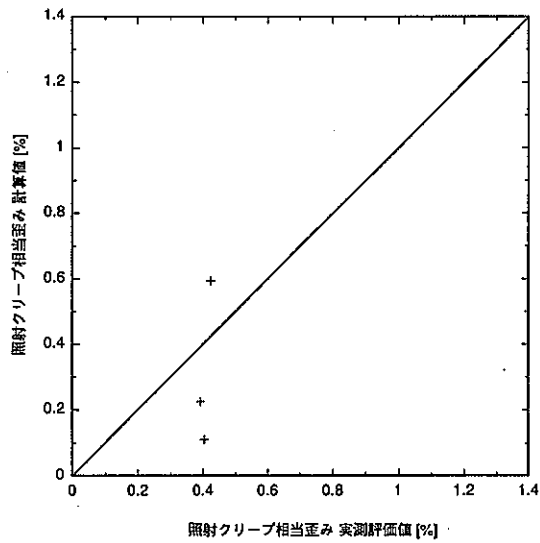


図 5-13.5 MFA-2における照射クリープ歪み 実測評価値と MOTAデータに基づく評価式による計算値との比較 (下限式の場合：ピンNo 187164)

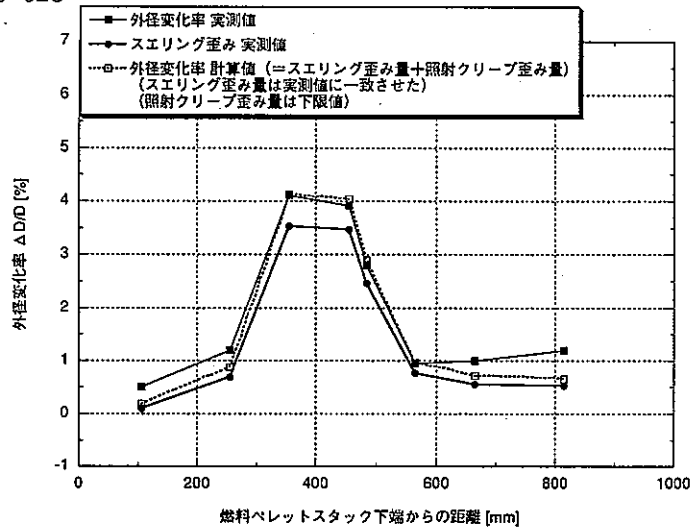


図 5-14.1 MFA-2における外径変化率の実測値とMOTAデータに基づく照射クリープ歪み式を用いた計算値との比較 (下限式の場合：ピンNo 187017)

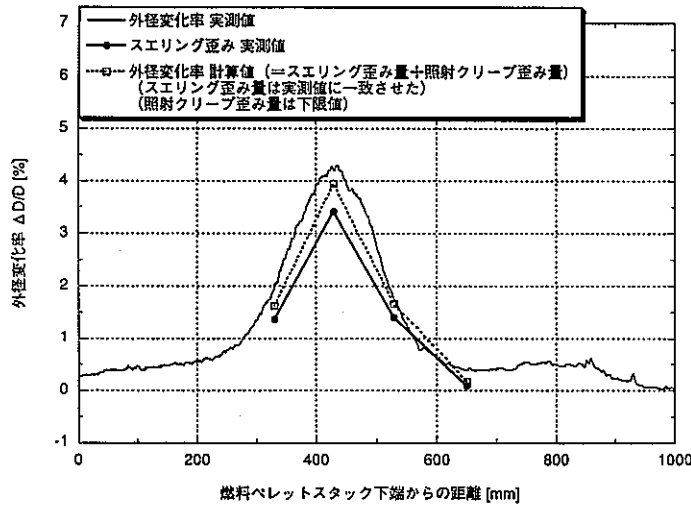


図 5-14.2 MFA-2における外径変化率の実測値とMOTAデータに基づく照射クリープ歪み式を用いた計算値との比較 (下限式の場合：ピンNo 187041)

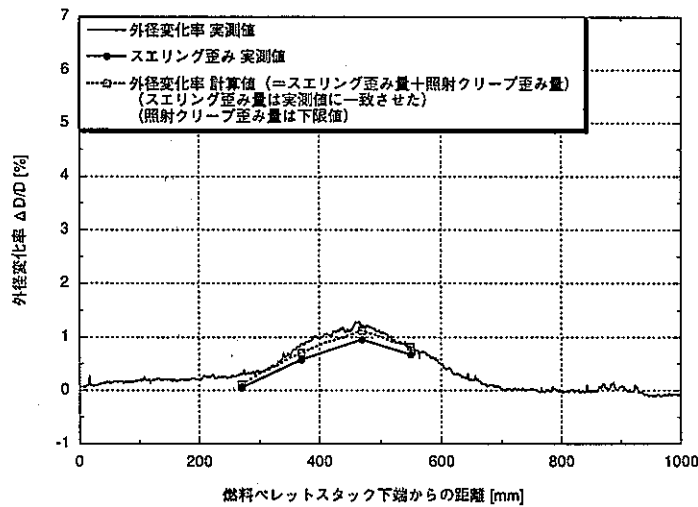


図 5-14.3 MFA-2における外径変化率の実測値とMOTAデータに基づく照射クリープ歪み式を用いた計算値との比較 (下限式の場合：ピンNo 187074)

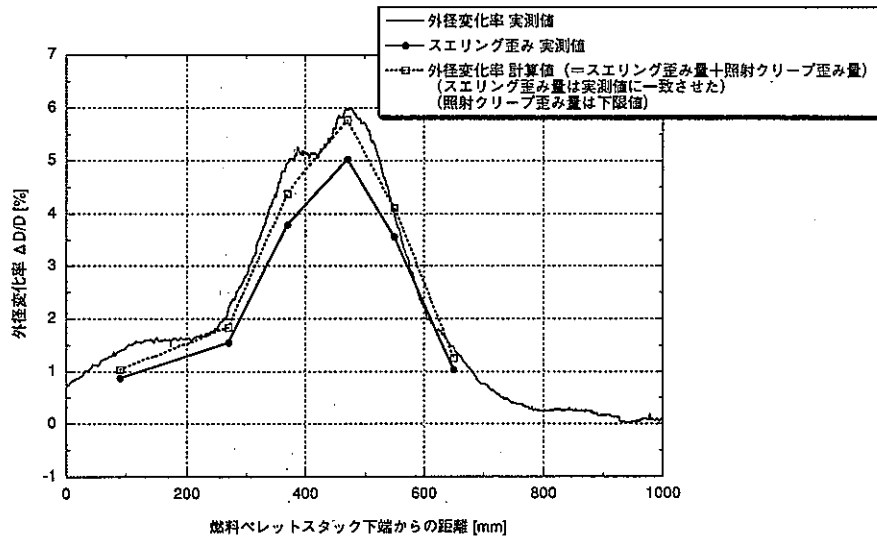


図 5-14.4 MFA-2における外径変化率の実測値とMOTAデータに基づく照射クリープ歪み式を用いた計算値との比較 (下限式の場合：ピンNo 187104)

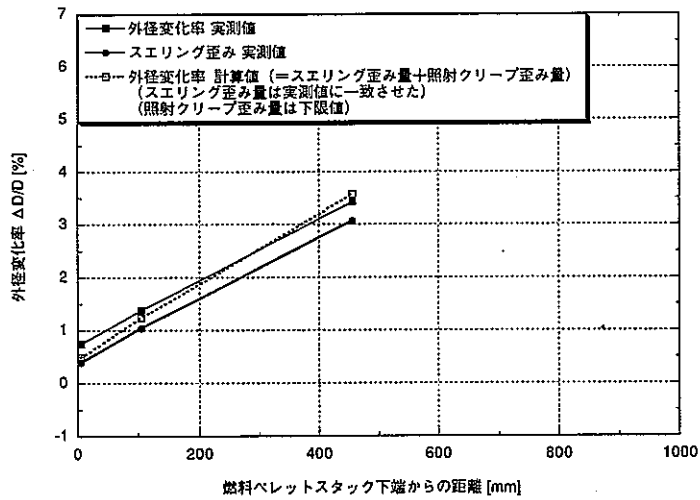


図 5-14.5 MFA-2における外径変化率の実測値とMOTAデータに基づく照射クリープ歪み式を用いた計算値との比較 (下限式の場合：ピンNo 187164)

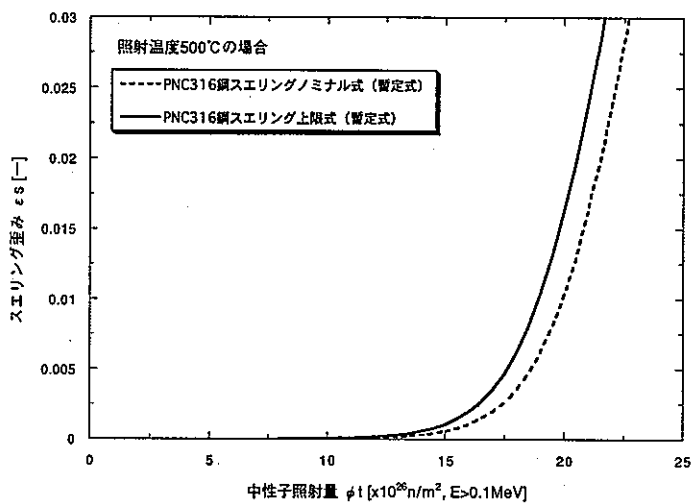


図 5-15.1 PNC316鋼のスエリング上限式

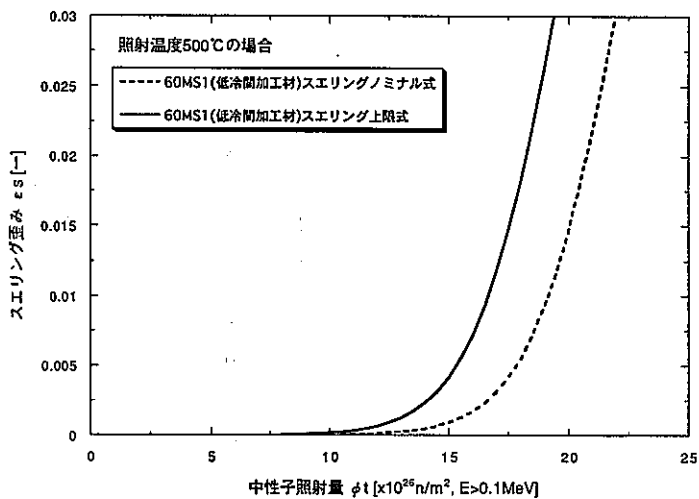


図 5-15.2 60MS1(低冷間加工材)鋼のスエリング上限式

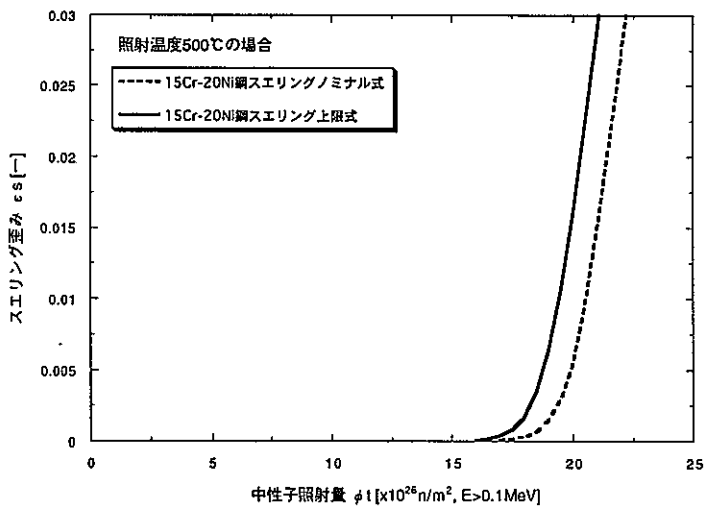


図 5-15.3 15Cr-20Ni鋼のスエリング上限式

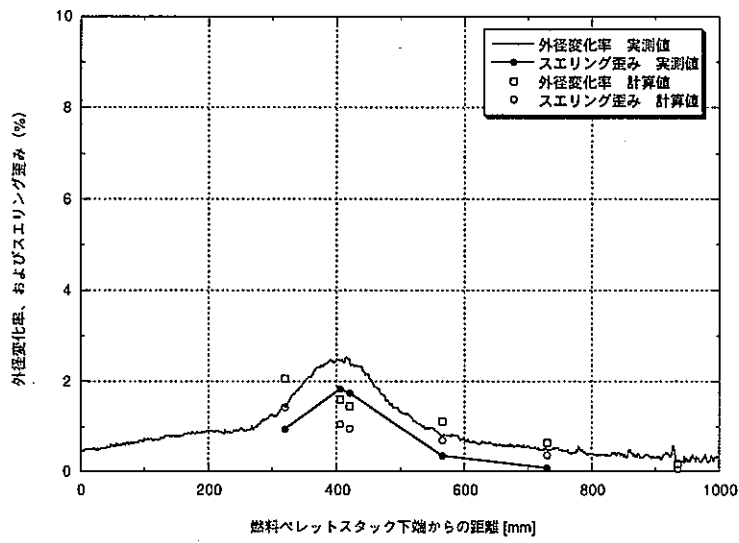


図 5-16.1 MFA-1ピンにおける外径変化率の実測値と照射クリープ歪み上限式とスエリング上限式を用いた計算値との比較 (ピンNo.186019)

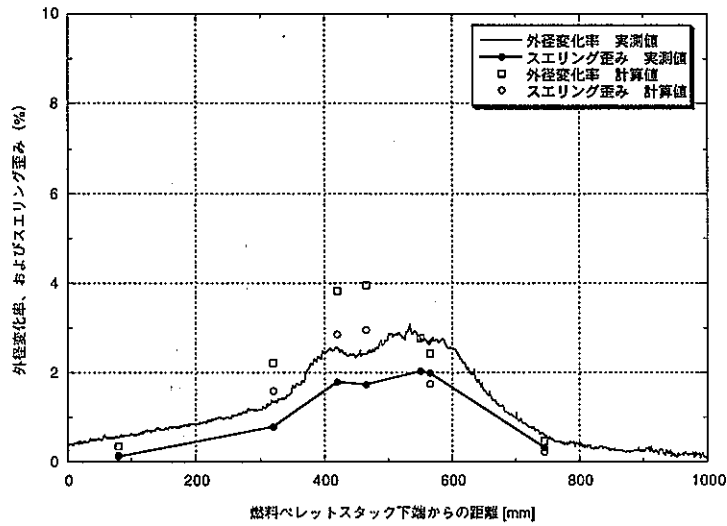


図 5-16.2 MFA-1ピンにおける外径変化率の実測値と照射クリープ歪み上限式とスエリング上限式を用いた計算値との比較 (ピンNo.186023)

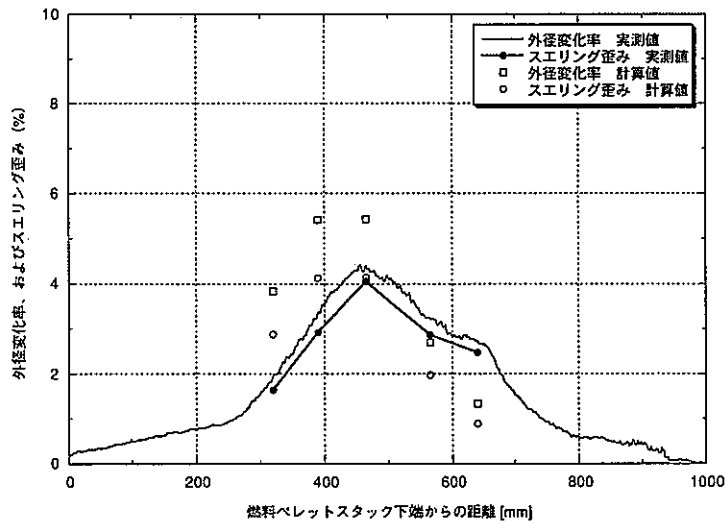


図 5-16.3 MFA-1ピンにおける外径変化率の実測値と照射クリープ歪み上限式とスエリング上限式を用いた計算値との比較 (ピンNo.186091)

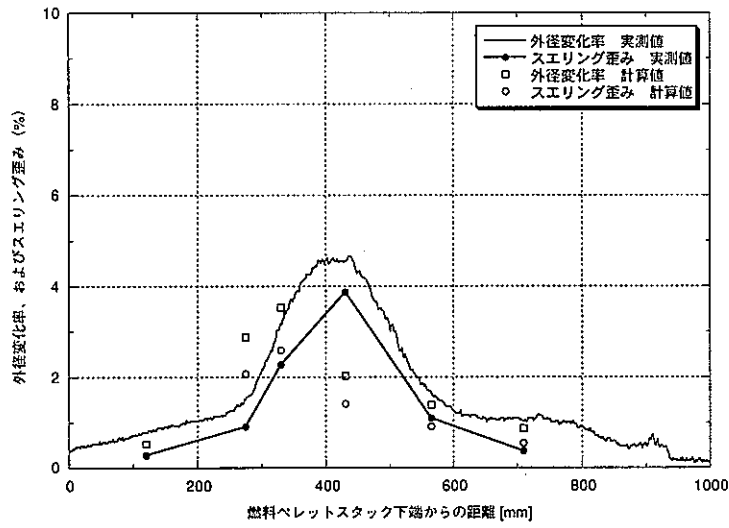


図 5-16.4 MFA-1ピンにおける外径変化率の実測値と照射クリープ歪み上限式とスエリング上限式を用いた計算値との比較 (ピンNo.186101)

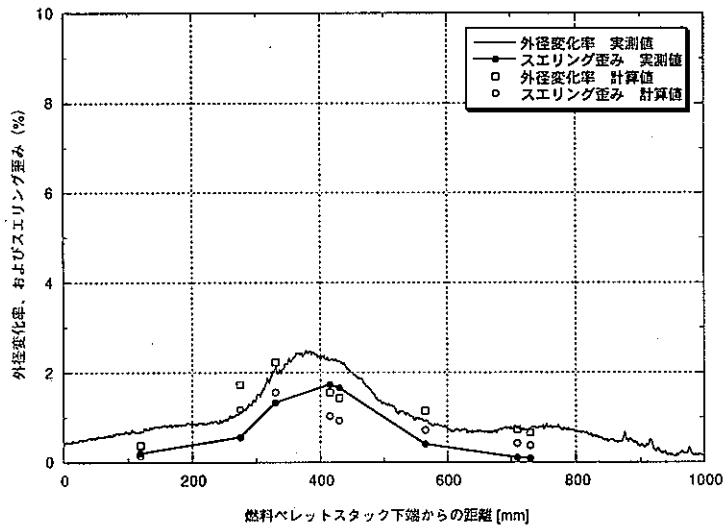


図 5-16.5 MFA-1ピンにおける外径変化率の実測値と照射クリープ歪み上限式とスエリング上限式を用いた計算値との比較 (ピンNo.186102)

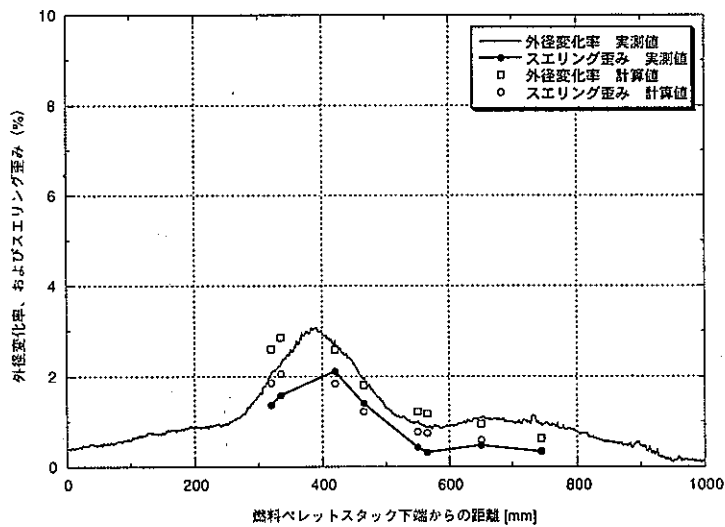


図 5-16.6 MFA-1ピンにおける外径変化率の実測値と照射クリープ歪み上限式とスエリング上限式を用いた計算値との比較 (ピンNo.186104)

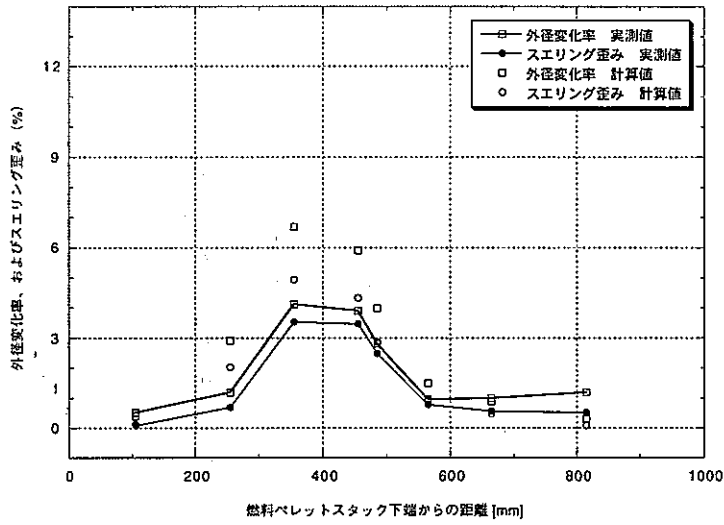


図 5-16.7 MFA-2ピンにおける外径変化率の実測値と照射クリープ歪み上限式とスエリング上限式を用いた計算値との比較(ピンNo.187017)

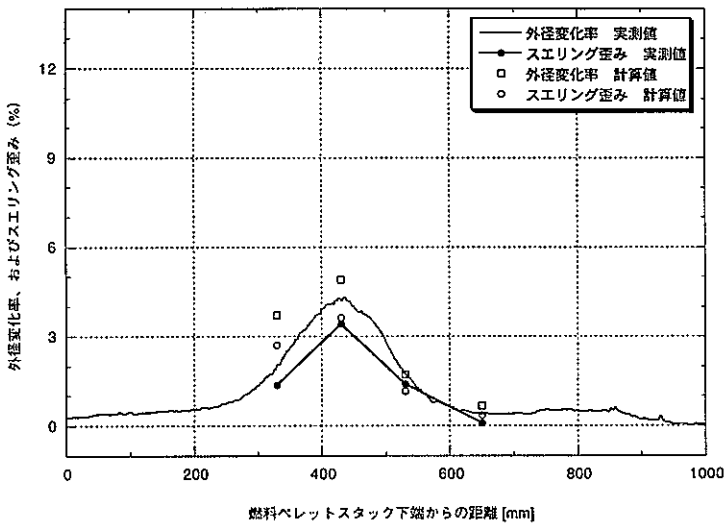


図 5-16.8 MFA-2ピンにおける外径変化率の実測値と照射クリープ歪み上限式とスエリング上限式を用いた計算値との比較(ピンNo.187041)

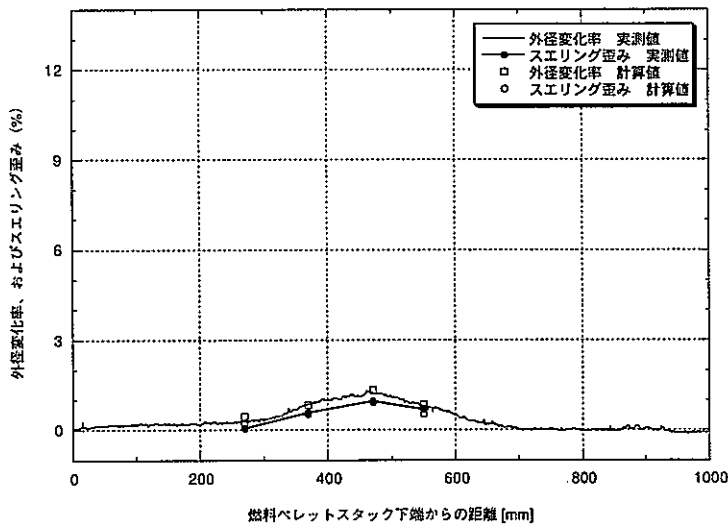


図 5-16.9 MFA-2ピンにおける外径変化率の実測値と照射クリープ歪み上限式とスエリング上限式を用いた計算値との比較(ピンNo.187074)

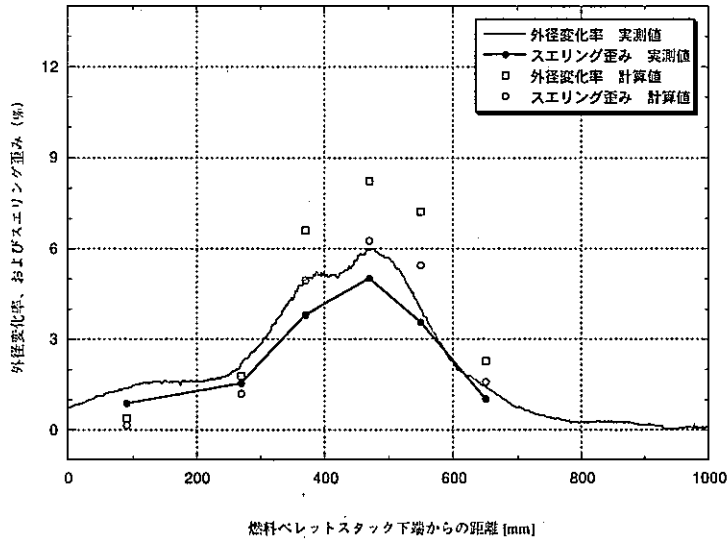


図 5-16.10 MFA-2ピンにおける外径変化率の実測値と照射クリープ歪み上限式とスエリング上限式を用いた計算値との比較(ピンNo.187104)

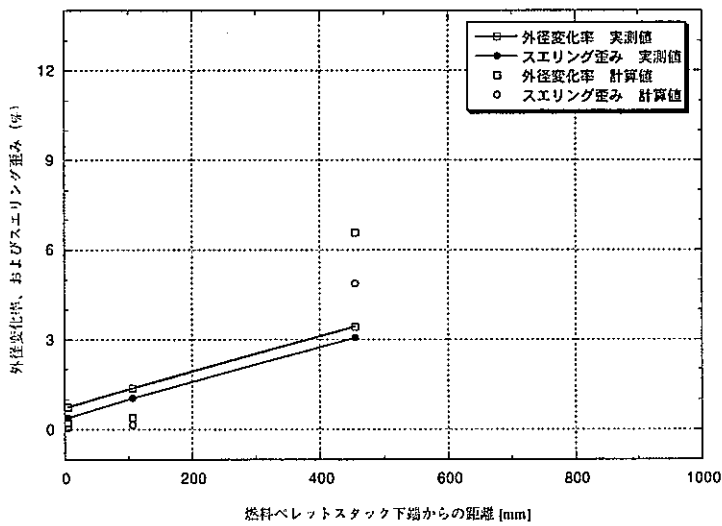


図 5-16.11 MFA-2ピンにおける外径変化率の実測値と照射クリープ歪み上限式とスエリング上限式を用いた計算値との比較(ピンNo.187164)

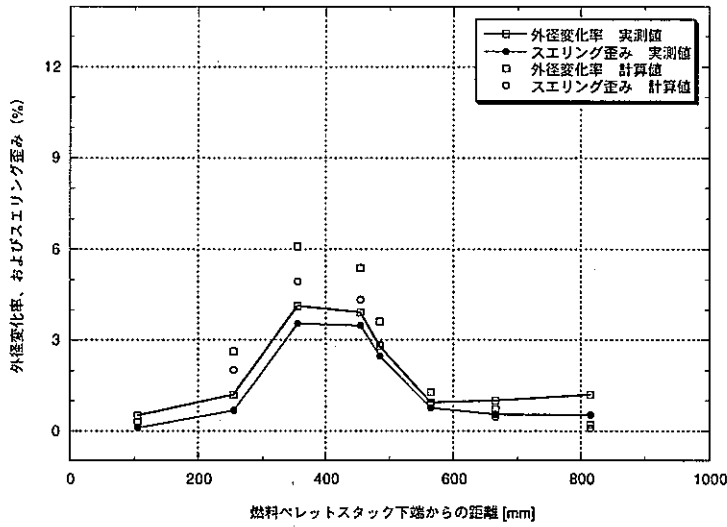


図 5-17.1 MFA-2ピンにおける外径変化率の実測値と照射クリープ歪みノミナル式とスエリング上限式を用いた計算値との比較(ピンNo.187017)

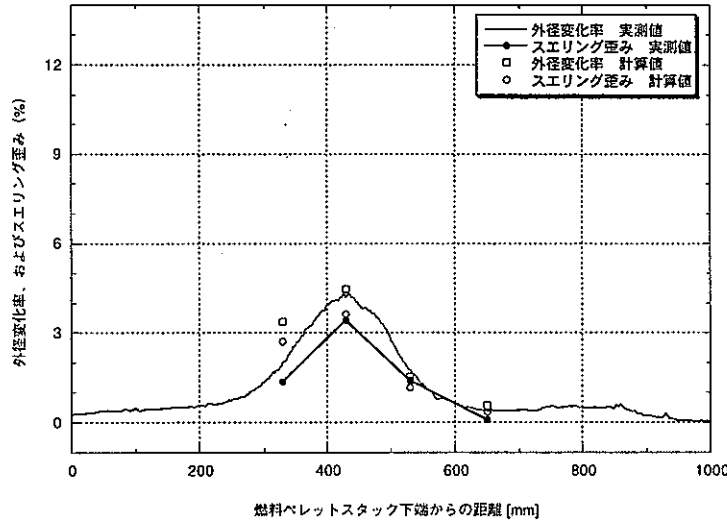


図 5-17.2 MFA-2ピンにおける外径変化率の実測値と照射クリープ歪みノミナル式とスエリング上限式を用いた計算値との比較(ピンNo.187041)

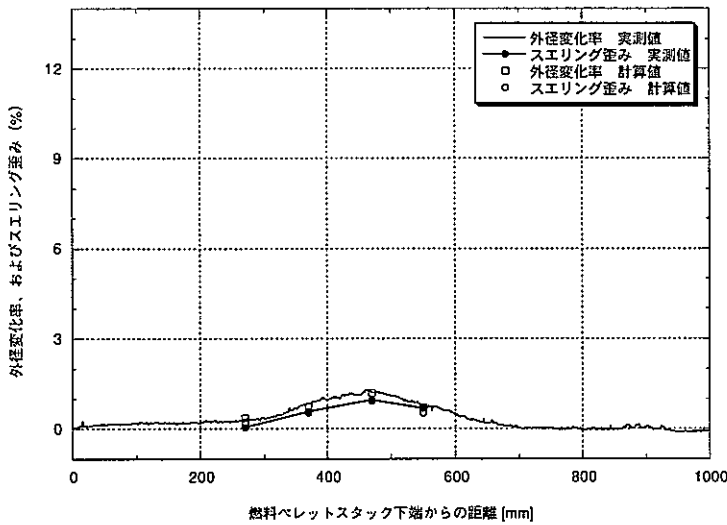
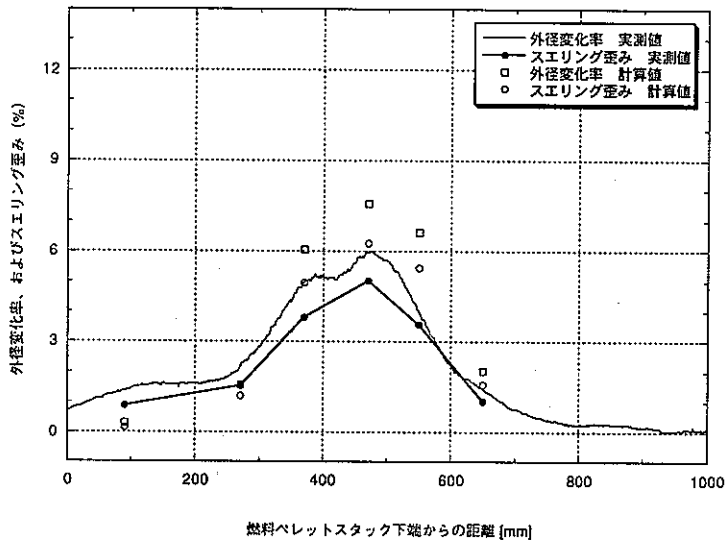
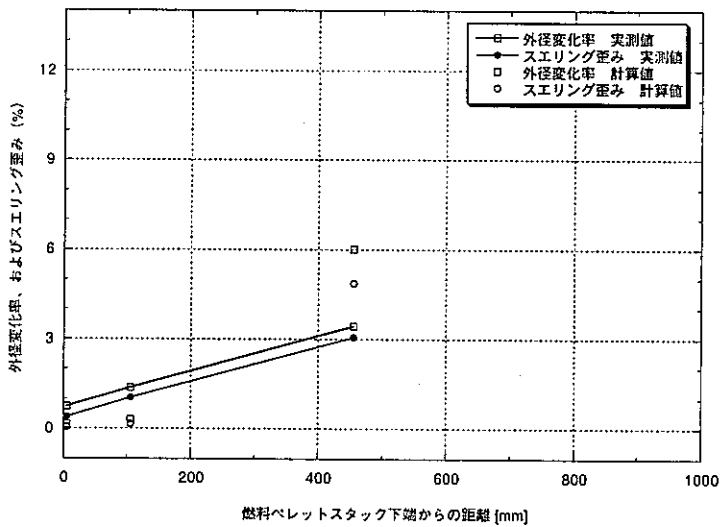


図 5-17.3 MFA-2ピンにおける外径変化率の実測値と照射クリープ歪みノミナル式とスエリング上限式を用いた計算値との比較(ピンNo.187074)



燃料ペレットスタック下端からの距離 [mm]
 図 5-17.4 MFA-2ピンにおける外径変化率の実測値と
 照射クリープ歪みノミナル式とスエリング上限式を用いた計算値
 との比較(ピンNo.187104)



燃料ペレットスタック下端からの距離 [mm]
 図 5-17.5 MFA-2ピンにおける外径変化率の実測値と
 照射クリープ歪みノミナル式とスエリング上限式を用いた計算値
 との比較(ピンNo.187164)