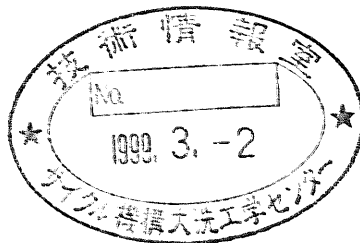


位置

# 燃料ピン加熱試験による熱過渡時燃料ピンの挙動評価

1998年10月



核燃料サイクル開発機構  
大洗工学センター

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1194 茨城県那珂郡東海村村松4番地49  
核燃料サイクル開発機構  
技術展開部 技術協力課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:  
Technical Cooperation Section,  
Technology Management Division,  
Japan Nuclear Cycle Development Institute  
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1194,  
Japan.

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)  
1998

## 燃料ピン加熱試験による熱過渡時燃料ピンの挙動評価

皆藤 威二\*<sup>1</sup>、水野 朋保\*<sup>2</sup>、浅賀 健男\*<sup>1</sup>

## 要 旨

大型炉設計研究において、厳しい熱過渡事象として全交流電源喪失を想定した場合、炉停止後の燃料の除熱は冷却材の自然循環によりなされる。このとき、プラントの一次系および非常用冷却系の構成によっては、自然循環冷却モードとなっている数時間の間、被覆管は比較的高い温度に保持される評価例が得られている。

このような長時間熱過渡時におけるPNC316および15Cr-20Ni鋼製の被覆管強度に関する知見を得ることを目的として、日米共同のEBR-II運転信頼性試験の一環として行った照射済み燃料ピンの炉外加熱試験（TOH試験）による取得データを評価し、以下の結果を得た。

- (1) TOH試験データを未照射材のクリープ破断強度データと比較すると、PNC316被覆管では破断時間にして1/2程度の低下が認められた。これに対し、15Cr-20Ni鋼被覆管では1/10程度の破断時間低下がみられ、破断時間の低下はPNC316被覆管に比較して大きいことが明らかとなった。
- (2) 15Cr-20Ni鋼被覆管の破断時間低下が大きい原因として、定常照射中のクリープ損傷が大きかった可能性も残されていた。そこで、定常照射時におけるクリープ損傷値（寿命分数和）を評価した結果、その値は最大でも0.13程度と評価された。これにより、定常照射時におけるクリープ損傷がTOH試験による破断時間低下に及ぼす影響は小さいことが明らかとなり、破断時間の低下は照射による材料特性の変化およびTOH試験環境による材料強度の低下を示しているものと考えられた。
- (3) 高温データを含む未照射材のクリープ破断強度式をもとに、PNC316および15Cr-20Ni鋼被覆管のTOH試験強度式を暫定的に作成した。また、ここで作成したPNC316被覆管のTOH試験強度式を用い、PNC316被覆管燃料ピンを用いた温度変動型のTOH試験についてクリープ損傷値（寿命分数和）を評価した結果、被覆管の破断をほぼ妥当に予測できることが明らかとなった。

---

\* 1 大洗工学センター システム技術開発部 燃料材料技術開発グループ

\* 2 大洗工学センター システム技術開発部 炉心燃料工学グループ

## An Evaluation of Fuel Pin Behavior in Thermal Transient Event

Takeji KAITO<sup>1</sup>, Tomoyasu MIZUNO<sup>2</sup> and Takeo ASAGA<sup>1</sup>

### ABSTRACT

In some of large scale FBR design studies the complete loss of alternative current electric power supply is considered as one of severe thermal transient events. In this event the reactor core may be cooled by natural circulation for several hours. Thermal hydraulic analysis of certain plant cooling system design showed that cladding temperature may be kept high during the event.

In order to obtain the knowledge concerning to PNC316 and 15Cr-20Ni type cladding tube strength of irradiated fuel pin in such high temperature condition, the results of Transient Over-Heating (TOH) test performed as a part of PNC-DOE Collaborative Program of Operational Reliability Testing in EBR-II was evaluated.

Following results were obtained.

- (1) The rupture time of irradiated PNC316 clad fuel pin in TOH test was decreased to about a half compared with unirradiated creep rupture time. On the other hand the rupture time of irradiated 15Cr-20Ni type clad fuel pin was decreased to about 1/10. It was recognized that the rupture time degradation of 15Cr-20Ni type clad fuel pin was much larger than that of PNC316 clad fuel pin in TOH test.
- (2) In order to investigate the cause of the rupture time degradation of 15Cr-20Ni type clad fuel pin, the contribution of creep damage during the steady state irradiation was evaluated. The maximum cumulative damage fraction (CDF) in steady state irradiation was evaluated as "0.2". It was found that the contribution of creep damage in steady state irradiation was negligible for the rupture time degradation in TOH test. It was suggested that the rupture time degradation showed the degradation of material strength during steady state irradiation and/or TOH test.
- (3) Creep rupture correlations of PNC316 and 15Cr-20Ni type cladding tube were made to fit with TOH test data by modification of the unirradiated creep rupture ones. And calculated CDF of a temperature ramp type TOH test of PNC316 clad fuel pin showed that the correlation gave a reasonable prediction of irradiated PNC316 fuel pin cladding rupture time.

---

\*1 Nuclear Fuel Research Group, System Engineering Technology Division, OEC

\*2 Fuel and Core Engineering Group, System Engineering Technology Division, OEC

## 目 次

1. はじめに .....	1
2. 炉外燃料ピン加熱試験の概要 .....	2
2.1 燃料ピンの仕様および照射条件 .....	2
2.2 試験内容 .....	2
2.3 試験結果 .....	3
2.4 試験結果の評価 .....	6
3. 定常照射時におけるクリープ損傷の影響に関する検討 .....	8
4. 現状での強度式の検討（暫定案） .....	10
4.1 TOH試験強度式の作成 .....	10
4.2 温度変動型TOH試験結果の評価 .....	11
5. まとめと今後の課題 .....	13
6. 謝 辞 .....	14
7. 参考文献 .....	15
付 録 .....	47

## 表リスト

表2. 1	TOH試験に供した燃料ピンの仕様	16
表2. 2	TOH試験に供した燃料ピン被覆管の化学成分	17
表3. 1	CEDARコードによる定常照射時の被覆管クリープ損傷評価結果	18

## 図リスト

図1. 1	LOF型事象時の被覆管温度変化評価例	19
図2. 1	TOH試験装置概念図および被覆管温度プロファイル例	20
図2. 2	TOH試験時の被覆管温度履歴	21
図2. 3	TOH試験における破断時間と被覆管温度との関係	22
図2. 4	燃料ピン外径測定結果 (WT001)	23
図2. 5	燃料ピン外径測定結果 (WT002)	24
図2. 6	燃料ピン外径測定結果 (WT003)	25
図2. 7	燃料ピン外径測定結果 (WT168)	26
図2. 8	燃料ピン外径測定結果 (UW08035)	27
図2. 9	燃料ピン外径測定結果 (UW08037)	28
図2.10	燃料ピン外径測定結果 (UW08038)	29
図2.11	燃料ピン外径測定結果 (UW08039)	30
図2.12	破損孔位置特定のための試験装置概念図 および破損孔近傍の外観写真	31
図2.13	TOH試験における破断時間と被覆管フープ応力との関係	33
図2.14	TOH試験による破断時間の低下 (PNC316)	34
図2.15	TOH試験による破断時間の低下 (15Cr-20Ni鋼)	35
図3. 1	CEDARコードによる定常照射時の被覆管クリープ損傷評価	36
図3. 2	破断時間低下に及ぼす定常照射時の被覆管クリープ損傷の影響	37
図4. 1	TOH試験強度式 (PNC316)	38
図4. 2	TOH試験強度式 (15Cr-20Ni鋼)	39
図4. 3	温度変動型TOH試験結果の評価	40

## 写真リスト

写真2. 1	TOH試験後の断面金相写真 (WT001)	41
写真2. 2	TOH試験後の断面金相写真 (UW08037)	43
写真2. 3	TOH試験後の断面金相写真 (WT001、エッチング後)	45

## 1. はじめに

大型炉設計研究において、厳しい熱過渡事象として全交流電源喪失を想定している場合があり、炉停止後の燃料の除熱は冷却材の自然循環によりなされる。このとき、プラントの一次系および非常用冷却系の構成によっては、図1.1に示すように一次ピーク、二次ピークに続き、自然循環冷却モードにおいて三次ピークが発生する評価例が得られており、この数時間の間、被覆管は比較的高い温度で保持されることになる。

この三次ピークを含む熱過渡事象中の燃料破損防止を目的として、以下に示すような制限が考えられている。

(1) 一次ピークの被覆管最高温度制限

(2) 事象中の被覆管クリープ損傷値（寿命分数和）制限

なお、(1)については、クリープ損傷値評価結果に基づき、温度制限を設定する選択肢も考えられている。

これらの制限に対して、現状考えられる主要課題としては以下のようなものがある。

(1) 制限設定の論理構築

(2) 事象中の強度式設定

本報告書は、三次ピークにおける被覆管強度に関する知見を得ることを目的として、PNC/DOE共同研究のEBR-II運転信頼性試験<sup>[1]</sup>の一環として行った照射済み燃料ピンの炉外加熱試験<sup>[2]</sup>による取得データを評価し、その結果についてまとめたものである。

## 2. 炉外燃料ピン加熱試験の概要

炉外燃料ピン加熱試験 (Transient Over-Heating: TOH試験) <sup>[2]</sup> は、PNC/DOE共同研究のEBR-IIにおける運転信頼性試験 (Operational Reliability Testing: ORT) <sup>[1]</sup> の一環として

(1) LOF型事象下における被覆管破損特性の把握

(2) 燃料およびFP存在下における被覆管破損特性の把握

を目的として行った照射済み燃料ピンの炉外加熱試験である。

### 2.1 燃料ピンの仕様および照射条件

TOH試験に供した8本の燃料ピン仕様を表2.1に示す。このうち4本の燃料ピンはPNC316被覆管であり、被覆管外径および肉厚はそれぞれ7.0mm、0.37mmとなっている。残り4本の燃料ピンは15Cr-20Ni鋼被覆管で、被覆管の外径および肉厚はそれぞれ7.5mm、0.4mmであり、PNC316被覆管燃料ピンに比べ太径となっている。また、スミア密度は、PNC316被覆管燃料ピンのうち3本が約80%であり、残りの1本と15Cr-20Ni鋼被覆管燃料ピンが約90%となっている。これらTOH試験に供したPNC316および15Cr-20Ni鋼被覆管の化学成分を表2.2に示す。

PNC316被覆管燃料ピンは、EBR-II炉心のTOP-4BBB試験で照射されたもので、ピンNo. WT001、WT002およびWT003は燃料の仕様も同じであり、ピーク燃焼度は12~13at.%、ピーク照射量は $14\sim 15\times 10^{26}\text{ n/m}^2$  ( $E>0.1\text{ MeV}$ ) となっている。これに対し、WT168はピーク照射量は他の3本と同等の $14\times 10^{26}\text{ n/m}^2$  ( $E>0.1\text{ MeV}$ ) であるが、ピーク燃焼度は15at.%となっている。

15Cr-20Ni鋼被覆管燃料ピンは、EBR-II炉心のSPA-2試験で照射されたもので、ピーク燃焼度、ピーク照射量はそれぞれ11~12at.%、 $10\sim 11\times 10^{26}\text{ n/m}^2$  ( $E>0.1\text{ MeV}$ ) であり、ともにPNC316被覆管燃料ピンに比べ低くなっている。

### 2.2 試験内容

上述の照射済み燃料ピンを、図2.1に示すような燃料ピン加熱装置に装荷し、250℃で1時間、装置内の脱ガスを行った後、以下の3つの被覆管温度履歴のもとでTOH試験を実施した。

#### (1) 定常温度型 (図2.2(1))

目的：熱過渡時における被覆管破損特性、燃料およびFP存在下における被覆管破損特性を評価する。

対象ピン：WT001、WT002、WT168、UW08035、UW08037、UW08039

温度履歴：所定の温度まで急速加熱し、破損が検出されるまでその温度を保持する。



## (2) 緩慢なランプ型 (図2.2(2))

目的：熱過渡時の評価に用いている累積損傷則が適用可能か否かを確認する。

対象ピン：WT003

温度履歴：一度800℃まで急速加熱し、その後破損が検出されるまで20℃/hrで温度を上げる。

## (3) 自然循環冷却模擬型 (図2.2(3))

目的：大型炉設計研究で検討されている全交流電源喪失時の自然循環冷却モードの典型的温度履歴における燃料ピンの健全性を確認する。

対象ピン：UW08038

温度履歴：被覆管最高温度は一次、二次および三次ピークを包絡するように、一度880℃まで急速加熱し、その後750℃で24時間保持する。

被覆管温度は図2.1の「●」で示す6つの熱電対により計測し、照射中の軸方向温度プロファイルに類似したプロファイルが与えられるように制御している。

被覆管の破損は、燃料ピン加熱装置に取り付けられた圧力計によって検出し、加熱開始から破損に至るまでの時間を測定する。また、被覆管破損時に放出されたガス量およびガス組成を測定し、照射により生じたFPガスの放出量を評価する。

TOH試験終了後、全てあるいは一部の試験燃料ピンについて、被覆管の外径測定、破損孔位置の特定、燃料ペレットと被覆管との化学的相互作用 (Fuel-Cladding Chemical Interaction: FCCI) および破損クラック形態を調べるための金相試験を行った。

## 2.3 試験結果

### 2.3.1 被覆管温度と破断時間

各燃料ピン毎に被覆管温度設定の狙いと試験結果として得られた破断時間について、TOH試験を行った順番に示す。

- (1) WT001 初めてのTOH試験となるWT001では、現実的に試験可能な時間 (約40時間) 内に破損させるために、PNC316被覆管の炉外クリープ破断強度データに基づき試験可能な時間で破断する条件を予測し、被覆管最高温度部の目標温度を900℃に設定して試験を行った。実際に計測された被覆管最高温度は923℃で、試験開始後49分で被覆管最高温度部に破損が生じた。
- (2) WT168 (1)と同等の温度条件で、より高応力での試験を目的として、燃焼度が高いWT168を用いて試験を行った。実際に計測された被覆管最高温度は922℃で、試験開始後33分、WT001と比較して約2/3の時間で被覆管最高温度部に破損が生じた。
- (3) WT002 (1)に比べ低温で、かつ長時間側でのデータを得るために、WT001と照射条件が同等のWT002について、被覆管最高温度873℃で試験を行った。この結果、試験

開始後5.6時間で被覆管最高温度部に破損が生じた。

- (4) UW08037 初めての15Cr-20Ni鋼被覆管燃料ピンの試験であり、炉外クリープ破断強度データに基づき試験可能な時間内に破損が生じるように、被覆管最高温度部の目標温度を900℃に設定した。実際に計測された被覆管最高温度は920℃で、試験開始後20分で被覆管最高温度部に破損が生じた。この結果は、炉外クリープ破断強度データに基づく予測を大きく下回る破断時間であった。
- (5) WT003 上記(1)～(3)の試験により、PNC316のおおまかな傾向が確認できたことから、熱過渡時の評価に用いている従来の累積損傷則が適用可能か否かを確認するために、被覆管最高温度で800℃まで急速に加熱した後、20℃/hrで昇温する緩慢なランプ型での試験を行った。この結果、試験開始後4.5時間、被覆管最高温度が909℃に到達した時点で被覆管最高温度部に破損が生じた。
- (6) UW08035 (4)のUW08037を用いた試験において、15Cr-20Ni鋼被覆管の炉外クリープ破断データから予測される時間に比べ、非常に短い時間で破損が生じた。このため、より低温で長時間側のデータを得るために、被覆管最高温度830℃を目標に試験を行った。実際の被覆管最高温度は832℃で、試験開始後28時間で被覆管最高温度部に破損が生じた。
- (7) UW08038 全交流電源喪失時の自然循環冷却モードにおける燃料ピンの健全性を確認することを目的に試験を行った。被覆管最高温度は一次、二次および三次ピークを包絡するように、一度900℃を目標（実際は878℃）に急速加熱し、これを200秒保持した後、750℃まで下げ24時間保持した。この試験では24時間保持した時点でも破損は生じず、未破損のまま試験を終了した。
- (8) UW08039 (4)、(6)に比べ、さらに低温側でのデータを得るために、被覆管最高温度810℃を目標に試験を行った。実際に計測された被覆管最高温度は809℃で、試験開始後47時間で被覆管最高温度部に破損が生じた。

上述のTOH試験結果のうち、定常温度型で試験を行った6本の燃料ピンについて、被覆管温度と破断時間で整理したものを図2.3に示す。この図から、PNC316被覆管燃料ピン、15Cr-20Ni鋼被覆管燃料ピンともに被覆管温度が高いほど破断時間が短くなる傾向がみられ、鋼種間での大きな差は認められなかった。

### 2.3.2 被覆管外径測定

TOH試験を実施した各燃料ピンの試験前後の外径測定結果から算出した被覆管周方向ひずみを図2.4～2.11に示す。これらの周方向ひずみは、45° 間隔で4方向測定した値の平均値である。

PNC316被覆管燃料ピンでは、図2.4～2.7に示すように、すべての燃料ピンで燃料ラム上半部および上部プレナム部においてTOH試験による明らかな外径増加がみられ

た。しかし、破損位置でのTOH試験による被覆管ひずみ増加量は0.5～1.4%であり、未照射材の内圧クリープ破断試験における破断ひずみに比べ非常に小さいことが明らかとなった。

15Cr-20Ni鋼被覆管燃料ピンでは、図2.8および2.9に示すように、UW08035とUW08037でPNC316被覆管燃料ピンと類似した傾向の外径増加が認められた。しかし、破損位置でのTOH試験による被覆管ひずみ増加量はそれぞれ0.5%および0.3%であり、未照射材のクリープ破断試験における被覆管ひずみ、さらには上述のPNC316被覆管燃料ピンのひずみ増加量と比べても小さい値であった。自然循環冷却模擬型で試験を行ったUW08038（未破損）、比較的低温で試験を行ったUW08039（ピンホール破損）では、図2.10および2.11に示すように、TOH試験による有意な外径増加はほとんどみられなかった。

また、燃料ピンの破損は、未破損のUW08038を除き、すべて燃料カラム上端部近傍の最高温度部で生じていた。このように燃料カラム上端部で破損が生じる現象は、TOH試験による軸方向温度分布、FCCIによる被覆管肉厚の減少および定常照射時におけるクリープ損傷の蓄積等が影響していると考えられる。これは、LOF型事象時の燃料ピン破損限界を評価する上では、炉心上端部条件の被覆管強度特性が重要であることを示している。

### 2.3.3 破損孔位置の特定

金相試験に先立ち、破損孔位置の確認を行ったが、外観観察では特定できなかったため、エチルアルコール浴による破損孔位置の確認を行った。これは、図2.12に示すように、上部プレナム部を切断し、ゴムチューブを接続した燃料ピンをエチルアルコール中に浸し、Heガスで加圧することにより破損孔から放出される気泡を確認し、破損孔位置を同定するものである。

ほとんどの燃料ピンでは軸方向に5mm程度の範囲で数ヶ所から気泡が発生していた。また、UW08039では気泡の発生が1ヶ所のみであったことから、ピンホール型の破損であることが確認できた。

### 2.3.4 金相試験

TOH試験による被覆管の破損形態とFCCIの確認のために、PNC316被覆管燃料ピンのWT001、WT002およびWT168、15Cr-20Ni鋼被覆管燃料ピンのUW08037、UW08038およびUW08039の計6本の燃料ピンについて破損位置での断面金相試験を行った。

PNC316被覆管燃料ピンの代表的な断面金相写真としてWT001のものを写真2.1に示す。WT001では破損部近傍で局部的に顕著なFCCIを生じており、その値（製造时被覆管肉厚に対する減肉量）は最大で140 $\mu$ mであった。また、TOH試験による破損は、このFCCIにより減肉した部分で発生していた。さらに、WT002ではWT001でみられたような

FCCIが被覆管内面全周にわたって生じており、その値も最大で $150\mu\text{m}$ と非常に大きく、被覆管の破損は最大減肉部で生じていた。これに対し、WT168ではFCCIによる減肉量は $40\mu\text{m}$ 程度と小さかった。

同じ条件で照射され、TOH試験を経験していない燃料ピンの断面金相試験は実施されていないが、照射条件が同等の一般的なPNC316被覆管燃料ピンと比較しても、WT001およびWT002のFCCIの程度は非常に大きいと考えられる。

つぎに、15Cr-20Ni被覆管燃料ピンの代表的な断面金相写真としてUW08037のものを写真2.2に示す。UW08037では被覆管内面全周にわたり顕著なFCCIが観察され、被覆管肉厚が比較的薄くなった周方向位置で破損が生じていた。この部分でのFCCIによる減肉量は $140\mu\text{m}$ であった。UW08039では、ピンホール型の破損であったために貫通したクラックは観察できなかったが、クラックが被覆管内面から肉厚中心付近まで進展している様子が観察できた。また、TOH試験により破損に至らなかったUW08038でも顕著なFCCIが観察され、FCCIによる減肉量は $70\mu\text{m}$ であった。

また、写真2.3にWT001の電解エッチング後の断面金相写真を示す。破損クラックは被覆管組織の結晶粒界に沿って走っていることが観察でき、被覆管の破損モードは粒界破断型であることが明らかとなった。

## 2.4 試験結果の評価

### 2.4.1 被覆管フープ応力の評価

まず、燃料ピンの製造時データ等から燃料ピン内の室温における自由体積を求め、つぎに、燃料ピン内のガス量を算出した。基本的に、燃料ピン内のガス量は、TOH試験における燃料ピン破損時に回収されたガス量であり、PNC316被覆管燃料ピンではその値を燃料ピン内のガス量とした。しかし、15Cr-20Ni鋼被覆管燃料ピンでは、回収されたガス量からFPガス放出率を計算すると21~59%となり、同じ条件で照射し、別途照射後試験を実施したUW08036のFPガス放出率82%と比較しても非常に小さい値であった。これは、破損後のガス放出の過程で燃料ピン内のガスが多量に残存しているまま、何らかの原因により破損孔が閉塞したためと推測されている。このため、回収されたガス量をそのまま用いると内圧を過小評価する可能性があることから、15Cr-20Ni鋼被覆管燃料ピンでは、UW08036のFPガス放出率82%を用い、製造時に封入したHeガスおよびTagガス量とあわせて燃料ピン内のガス量を評価することとした。

これら燃料ピン内のガス量とTOH試験時に測定した被覆管温度から燃料ピン内圧を計算し、この結果から薄肉円筒近似の式を用いてTOH試験時の被覆管フープ応力を計算した。なお、被覆管フープ応力の計算ではFCCIによる減肉量を考慮しているが、金相試験を行っていないWT003およびUW08035では、それぞれ比較的条件の近いWT001、UW08039の

減肉量をそのまま用いることとした。

このようにして求めた被覆管フープ応力と破断時間との関係を、定常温度型で試験を行った6本の燃料ピンについて図2.13に示す。これらの被覆管フープ応力は84～99MPaと評価され、被覆管フープ応力が大きいほど破断時間が短くなる傾向がみられた。また、PNC316被覆管と15Cr-20Ni鋼被覆管との間に大きな差は認められなかった。

#### 2.4.2 TOH試験結果の評価

定常温度型で試験を行った6本の燃料ピンについて、被覆管温度、破断時間および被覆管フープ応力についてラーソンミラーパラメータ (Larson-Miller Parameter: LMP) で整理し、炉外大気中における未照射材 (以下、未照射材) および炉内Na中における材料照射試験材 (以下、照射材) のクリープ破断強度データと比較したものをPNC316被覆管について図2.14に、15Cr-20Ni鋼被覆管について図2.15に示す。

これらの図において、LMPの材料定数は高温データ ( $\geq 800^{\circ}\text{C}$ ) を含む未照射材のクリープ破断強度データの最小自乗処理により求めた値を使用しており、図中の実線はそれぞれのクリープ破断強度式を示す。なお、高温データを含む未照射材のクリープ破断強度式の策定方法については付録1に示す。

図2.14から、PNC316被覆管のTOH試験時の破断時間は、未照射材と比較して低下しており、試験温度範囲は異なるものの照射材と同程度まで低下していることがわかる。また、高温データを含む未照射材のクリープ破断強度式を用いて算出した予測破断時間と、TOH試験時の実測破断時間とを比較すると、TOH試験時の破断時間は未照射材の約1/2程度に低下する。

これに対し、図2.15から、15Cr-20Ni鋼被覆管のTOH試験時の破断時間は、未照射材、さらには照射材と比較しても低下していることがわかる。また、高温データを含む未照射材のクリープ破断強度式を用いて算出した予測破断時間と、TOH試験時の実測破断時間とを比較すると、TOH試験時の破断時間は未照射材の約1/10程度に低下する。

これらのことから、PNC316被覆管、15Cr-20Ni鋼被覆管ともに、TOH試験においては破断時間が低下していることが明らかとなった。また、図2.13に示したように、TOH試験時の被覆管強度はPNC316と15Cr-20Ni鋼との間で大きな差は認められないものの、TOH試験による15Cr-20Ni鋼被覆管の未照射材からの破断時間低下は、PNC316被覆管のそれに比べて非常に大きいことが明らかとなった。

### 3. 定常照射時におけるクリープ損傷の影響に関する検討

上述のように、TOH試験時の被覆管破断時間は、未照射材と比較して低下することが明らかとなり、とくに15Cr-20Ni鋼被覆管の方が破断時間の低下割合が大きいことが明らかとなった。また、その破損形態は粒界破断であり、TOH試験による破損部の被覆管歪み増分もPNC316被覆管に比較して小さいことから粒界脆化の可能性が示された。

これらのことから、15Cr-20Ni鋼被覆管の破断時間低下の原因としては、15Cr-20Ni鋼の材料特性が照射により変化したために強度が低下した可能性が考えられる。また、この他に定常照射時における被覆管のクリープ損傷の影響等が考えられる。

そこで、まずここでは、定常照射時における被覆管のクリープ損傷の蓄積がTOH試験時の破断時間の低下に及ぼす影響について検討することとした。

評価対象として、定常照射後に被覆管に生じていた歪みが0.4%と最も大きい、つまり定常照射時における被覆管のクリープ損傷が最も大きいと考えられるUW08037を選び、定常照射時における被覆管クリープ損傷値（寿命分数和）の評価を行った。被覆管クリープ損傷値（寿命分数和）の評価には、高速炉燃料ピン挙動解析コード「CEDAR」<sup>[3]</sup>を用い、被覆管にかかる応力を「ガス圧のみ」の場合と「ガス圧+PCMI応力」の場合について図3.1に示すような4つのモデルケースについて評価を行った。

なお、15Cr-20Ni鋼のクリープ破断強度式としては、図2.15に示す照射材のクリープ破断強度データから作成したものをを用いた。これを付録2に示す。

- (1) ガス圧のみ UW08037の仕様、照射条件等を用いて評価した場合
- (2) ガス圧のみ (1)をベースに照射終了時に被覆管に0.4%の歪みを生じさせるように、被覆管内面圧力を上げた場合
- (3) ガス圧+PCMI模擬 (1)をベースに照射終了時に被覆管に0.4%の歪みを生じさせるように、PCMI開始時から被覆管内面圧力を一定値上げた場合
- (4) ガス圧+PCMI模擬 (1)をベースに照射終了時に被覆管に0.4%の歪みを生じさせるように、PCMI開始時から被覆管内面圧力を徐々に上げた場合

なお、PCMI開始時期は、「常陽」MK-IIドライバ燃料の照射後試験結果に基づく燃料ペレットと被覆管との初期ギャップと燃焼度との関係<sup>[4]</sup>から照射開始後400日と仮定した。

以上の4ケースについて評価した結果を表3.1に示す。

ケース(1)では、照射終了直前の被覆管フープ応力は52MPa、被覆管の歪みも0.1%程度であり、このときのクリープ損傷値（寿命分数和）は $1.8 \times 10^{-3}$ と非常に小さい。

つぎに、照射終了時の被覆管歪みを0.4%とするために被覆管内面圧力を上げた場合、ガス圧のみのケース(2)では照射終了直前の被覆管フープ応力は136MPa、クリープ損傷値

(寿命分数和)は $2.4 \times 10^{-2}$ であった。同様に、ガス圧+PCMI模擬の場合、ケース(3)では165MPa、 $6.8 \times 10^{-2}$ 、ケース(4)では263MPa、 $1.3 \times 10^{-1}$ であった。

この結果、照射終了時の被覆管クリープ損傷値(寿命分数和)は最大でもケース(4)の0.13程度であることが明らかとなった。また、この値から計算した破断時間の低下分を考慮したものを図3.2に破線で示す。この図からわかるように、定常照射時における被覆管のクリープ損傷が、TOH試験時の破断時間の低下に及ぼす影響は非常に小さいことが明らかとなった。

これにより、TOH試験時の破断時間低下の原因として、定常照射中の被覆管のクリープ損傷のみが寄与していた可能性は非常に小さいと考えられ、TOH試験時の被覆管強度は照射による材料特性の変化に加え、高温加熱の影響により低下していると考えることが妥当と判断される。

今後は、その強度低下の原因を絞り込んでいくために、照射済み燃料ピン被覆管の高温クリープ破断試験を実施することにより、高温加熱による被覆管の破損メカニズム、FCCI挙動およびFPの影響等を評価し、TOH試験による強度低下のメカニズムを評価していく必要がある。

#### 4. 現状での強度式の検討（暫定案）

上述のように、TOH試験条件下での被覆管破断時間は未照射材と比較して低下することが明らかとなった。現状では、TOH試験時の破断時間低下のメカニズムは明らかとなっていないが、暫定的にここでは、高温データを含む未照射材のクリープ破断強度式をもとに、すべてのTOH試験データを包絡する形で破断時間の低下分を考慮し、三次ピークでの健全性評価に適用することを意図したTOH試験評価用の強度式（以下、TOH試験強度式）を作成することとした。

また、ここで作成したTOH試験強度式を用い、2.2で述べた「緩慢なランプ型」および「自然循環冷却模擬型」で試験を行った燃料ピンについて、TOH試験中の被覆管のクリープ損傷値（寿命分数和）を評価した。

##### 4.1 TOH試験強度式の作成

2.4.2でTOH試験結果の評価に用いた高温データを含む未照射材のクリープ破断強度式（付録1参照）をもとに、PNC316被覆管、15Cr-20Ni鋼被覆管それぞれについてTOH試験強度式を作成した。

###### (1) PNC316

付録1に示すPNC316の高温データを含む未照射材のクリープ破断強度式に対し、TOH試験で破断時間低下のもっとも大きかったWT168の破断時間比0.39の逆数を保守側に切り上げた数値として、時間係数3を設定すると以下ようになる。

$$LMP = (T + 273.15) \{18.02 + \log(3 \cdot t_R)\} / 1000$$

$$\sigma_H \geq 100 \text{MPa}$$

$$LMP = 43.115 - 30.252(\log \sigma_H) + 15.677(\log \sigma_H)^2 - 2.959(\log \sigma_H)^3$$

$$\sigma_H < 100 \text{MPa}$$

$$LMP = 27.753 - 3.0529(\log \sigma_H)$$

ここで、

LMP : ラーソンミラーパラメータ

T : 試験温度 (°C)

$t_R$  : 破断時間 (hr)

$\sigma_H$  : 被覆管フープ応力 (MPa)

このようにして求めたTOH試験強度式を用い、WT168の試験温度922°Cにおける破断時間を算出すると図4.1の破線のようになる。



## (2) 15Cr-20Ni鋼

付録1に示す15Cr-20Ni鋼の高温データを含む未照射材のクリープ破断強度式に対し、TOH試験で破断時間低下のもっとも大きかったUW08037の破断時間比0.093の逆数を保守側に切り上げた数値として、時間係数11を設定すると以下ようになる。

$$LMP = (T + 273.15) \{18.77 + \log(11 \cdot t_R)\} / 1000$$

$$\sigma_H \geq 100 \text{MPa}$$

$$LMP = 91.501 - 96.242(\log \sigma_H) + 46.487(\log \sigma_H)^2 - 7.742(\log \sigma_H)^3$$

$$\sigma_H < 100 \text{MPa}$$

$$LMP = 29.429 - 3.2013(\log \sigma_H)$$

ここで、

LMP : ラーソンミラーパラメータ

T : 試験温度 (°C)

$t_R$  : 破断時間 (hr)

$\sigma_H$  : 被覆管フープ応力 (MPa)

このようにして求めたTOH試験強度式を用い、UW08037の試験温度920°Cにおける破断時間を算出すると図4.2の破線のようになる。

ここで、図4.1に着目すると、PNC316被覆管ではTOH試験強度式よりも照射材データの方が低いという結果になっている。これは、照射による材料強度の低下がTOH試験強度式では適切に評価できていない可能性があるためと考えられる。

今後、各鋼種の照射による強度低下やTOH試験のような高温加熱試験による破断時間低下のメカニズムを明らかにし、適切な強度式を検討して行く必要がある。

そこで、当面は保守側の評価として、PNC316被覆管、15Cr-20Ni鋼被覆管ともに、上述の未照射材に対する破断時間低下分を照射による強度低下分に重ね合わせて評価することがより適切であると考えられる。

## 4.2 温度変動型TOH試験結果の評価

ここでは、4.1で作成したPNC316および15Cr-20Ni鋼被覆管のTOH試験強度式を用い、緩慢なランプ型で試験を行ったWT003、自然循環冷却模擬型で試験を行ったUW08038について、TOH試験中の被覆管のクリープ損傷値（寿命分数和）を評価した。

## (1) 緩慢なランプ型

緩慢なランプ型で試験を行ったWT003について、4.1(1)で暫定的に求めたPNC316被覆管のTOH試験強度式を用い、TOH試験中の被覆管クリープ損傷値（寿命分数和）を評価した。このときの被覆管フープ応力は、FCCIによる被覆管の減肉分を考慮し、800°C時点

で87MPa、909℃時点で95MPaと評価した。

この結果、図4.3(1)に示すように、本温度履歴のTOH試験による被覆管のクリープ損傷値（寿命分数和）は1.2と評価され、1データのみではあるが、4.1(1)に示したTOH試験強度式にて破損がほぼ妥当に予測できることが確認できた。

## (2) 自然循環冷却模擬型

自然循環冷却模擬型で試験を行ったUW08038について、4.1(2)で暫定的に求めた15Cr-20Ni鋼被覆管のTOH試験強度式を用い、TOH試験中の被覆管クリープ損傷値（寿命分数和）を評価した。このときの被覆管フープ応力は、FCCIによる被覆管の減肉分を考慮し、880℃時点で75MPa、750℃時点で67MPaと評価した。

この結果、図4.3(2)に示すように、本温度履歴のTOH試験による被覆管クリープ損傷値（寿命分数和）は0.03となり、被覆管のクリープ損傷の観点からは被覆管破損には至らないと評価された。これは、TOH試験において24hr加熱後も破損には至らなかったという結果と一致している。

ここで、今回のTOH試験結果の評価に用いた被覆管フープ応力は、試験終了後に行った金相試験結果から評価したFCCIによる被覆管減肉量を考慮した値であり、TOH試験強度式はこの被覆管フープ応力を用いて作成したものである。このため、今回の温度変動型TOH試験結果の評価のようにFCCIによる被覆管減肉量が明確になっている場合には、TOH試験強度式を用いた被覆管のクリープ損傷値（寿命分数和）評価はほぼ妥当な結果を示していると考えられる。しかし、FCCIによる被覆管減肉量が明確になっていない場合には、被覆管に生じる応力を精度良く評価することは困難であり、被覆管のクリープ損傷値（寿命分数和）についても妥当な評価結果が得られない可能性が考えられる。

このことから、今後、TOH試験時の破断時間低下について、照射による材料特性の変化の影響と、高温加熱条件下でのFCCIによる被覆管減肉の影響とに分離して詳細に評価する必要があると考えられる。

## 5. まとめと今後の課題

PNC/DOE共同のEBR-II運転信頼性試験の一環として行ったTOH試験による取得データを評価することにより、以下の結果を得た。

- (1) TOH試験データを未照射材のクリープ破断強度データと比較すると、PNC316被覆管では破断時間にして1/2程度の低下が認められた。これに対し、15Cr-20Ni鋼被覆管では1/10程度の破断時間低下がみられ、破断時間の低下はPNC316被覆管に比較して大きいことが明らかとなった。しかしながら、従来検討における保守側の設定値(1/500)ほどの強度低下は認められなかった。
- (2) 15Cr-20Ni鋼被覆管の破断時間低下が大きい原因として、定常照射中のクリープ損傷が大きかった可能性も残されていた。そこで、定常照射時におけるクリープ損傷値(寿命分数和)を評価した結果、その値は最大でも0.13程度と評価された。これにより、定常照射時におけるクリープ損傷がTOH試験による破断時間低下に及ぼす影響は小さいことが明らかとなり、破断時間の低下は照射による材料特性の変化およびTOH試験環境による材料強度の低下を示しているものと考えられた。
- (3) 高温データを含む未照射材のクリープ破断強度式をもとに、PNC316および15Cr-20Ni鋼被覆管のTOH試験強度式を暫定的に作成した。また、ここで作成したPNC316被覆管のTOH試験強度式を用い、PNC316被覆管燃料ピンを用いた温度変動型のTOH試験についてクリープ損傷値(寿命分数和)を評価した結果、被覆管の破断をほぼ妥当に予測できることが明らかとなった。

今後は、照射済み燃料ピン被覆管の高温クリープ破断試験を実施することにより、高温加熱によるFCCI挙動やFPの影響等を含めた被覆管の破損メカニズムを明確にし、TOH試験による強度低下のメカニズムを解明する必要がある。さらに、これらの結果の高燃焼度燃料ピンへの適用性を検討する必要がある。

## 6. 謝 辞

クリープ寿命分数和の計算に関し、原子力システム(株)根本潤一氏にご協力いただいたことを付記し、ここに感謝の意を表します。

## 7. 参考文献

- [1] 浅賀 健男 他、「EBR-II炉における高速炉燃料の運転信頼性試験」、動燃技報 No. 77、1991年3月
- [2] 山本 一也 他、「高速炉燃料の熱過渡時破損試験評価-I（燃料ピン加熱試験装置による試験）」、日本原子力学会「1995年秋の大会」H43、1995年10月
- [3] 水野 朋保 他、「燃料挙動解析コードCEDARの開発」、動燃技報No. 76、1990年12月
- [4] 鹿倉 栄 他、「「常陽」MK-II炉心燃料の照射挙動」、動燃技報No. 86、1993年6月

表2.1 TOH試験に供した燃料ピンの仕様

ピンNo.	被覆管			スミア密度 (%)	O/M比	燃焼度 (at.%)	照射量 *1 ( $10^{26}$ n/m <sup>2</sup> )
	材質	外径(mm)	肉厚(mm)				
WT001	PNC316	7.0	0.37	81	1.99	12	15
WT002	PNC316	7.0	0.37	81	1.99	12	15
WT003	PNC316	7.0	0.37	81	1.99	13	14
WT168	PNC316	7.0	0.37	89	1.96	15	14
UW08035	15Cr-20Ni	7.5	0.40	90	1.99	11	10
UW08037	15Cr-20Ni	7.5	0.40	90	1.99	12	10
UW08038	15Cr-20Ni	7.5	0.40	90	1.99	12	10
UW08039	15Cr-20Ni	7.5	0.40	90	1.99	12	11

\*1 E&gt;0.1MeV

表2.2 TOH試験に供した燃料ピン被覆管の化学成分

	(wt.%)												
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	B	N	Ti	Nb	Ta
PNC316 Spec. *1	0.040 ~0.080	0.60 ~1.00	1.40 ~2.00	0.015 ~0.040	≦0.010	13.00 ~14.00	16.00 ~18.00	2.00 ~3.00	0.0020 ~0.0060	≦0.010	0.06 ~0.10	0.06~0.10	
WTピン *3	0.060	0.77	1.66	0.025	0.007	13.84	16.74	2.38	0.0030	0.005	0.080	0.050	
PNC1520 Spec. *2	0.040 ~0.080	0.60 ~1.00	1.40 ~2.00	0.015 ~0.040	≦0.010	19.50 ~21.50	13.50 ~15.50	2.00 ~3.00	0.0020 ~0.0060	≦0.010	0.15 ~0.35	0.05 ~0.15	≦0.05
UWピン *3	0.059	0.42	1.86	0.029	0.001	19.70	15.11	2.45	0.0025	0.004	0.23	0.11	<0.01

\*1 平成6年度見直し

\*2 平成3年度見直し

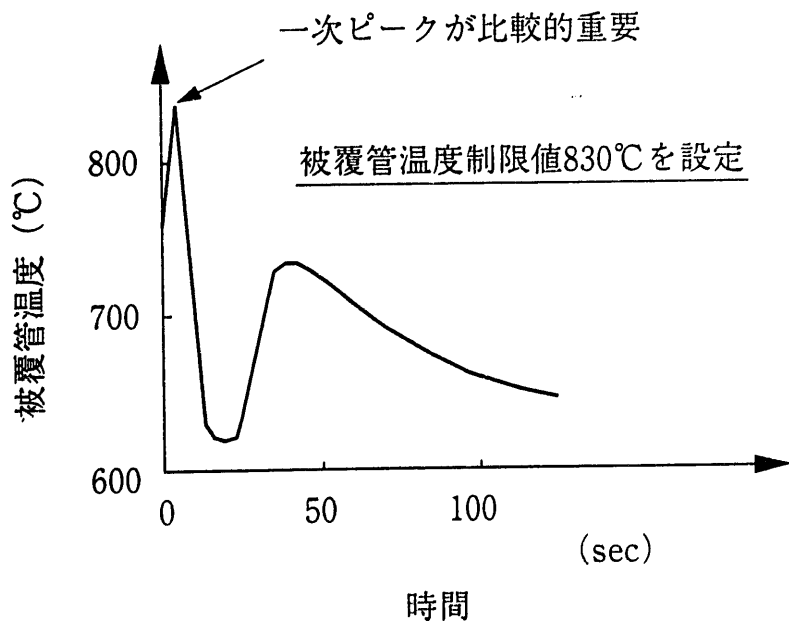
\*3 表2.1参照

表3.1 CEDARコードによる定常照射時の被覆管クリープ損傷評価結果

評価ケース	被覆管応力 (MPa)	被覆管歪み (%)	クリープ損傷値 (寿命分数和)
(1)	52	0.1	1.8E-03
(2)	136	0.4	2.4E-02
(3)	165	0.4	6.8E-02
(4)	263	0.4	1.3E-01



従来型ループ型炉の評価例



配管短縮型大型炉設計例  
(自然循環冷却モード)

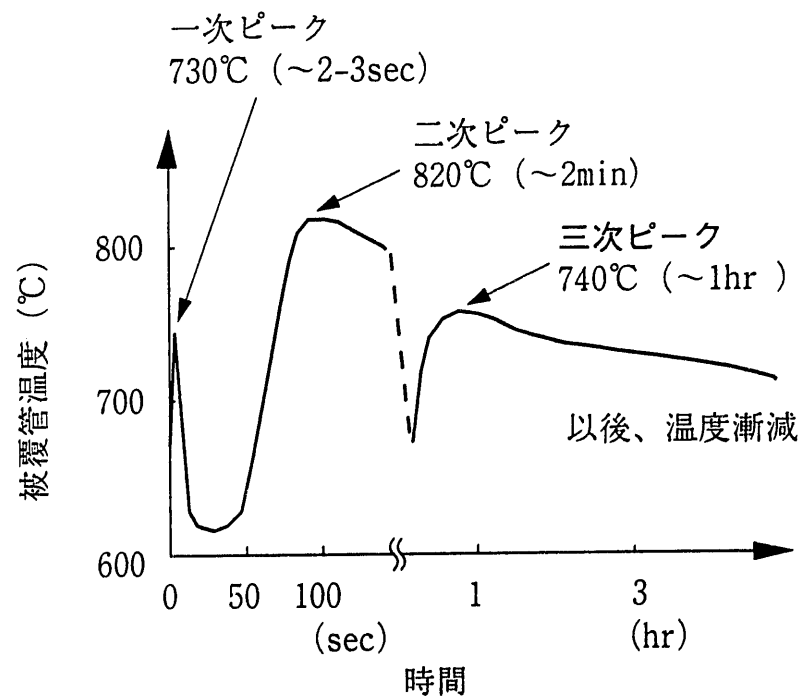


図1.1 LOF型事象時の被覆管温度変化評価例

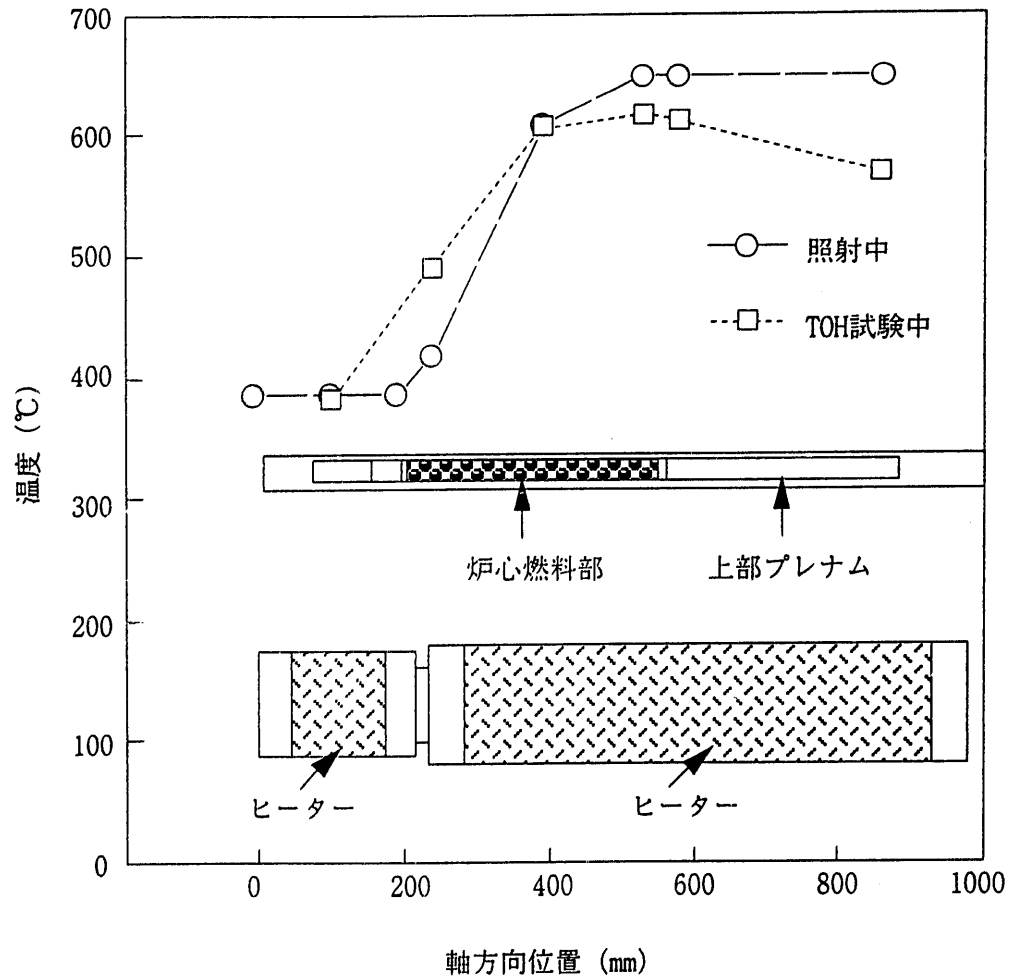
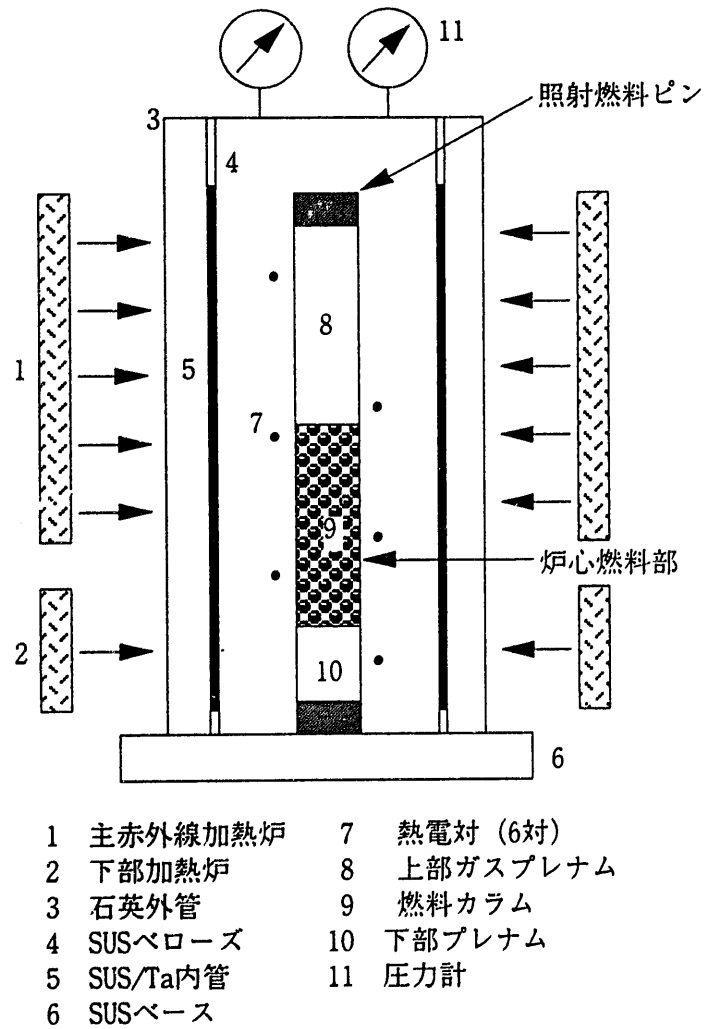


図2.1 TOH試験装置概念図および被覆管温度プロファイル例

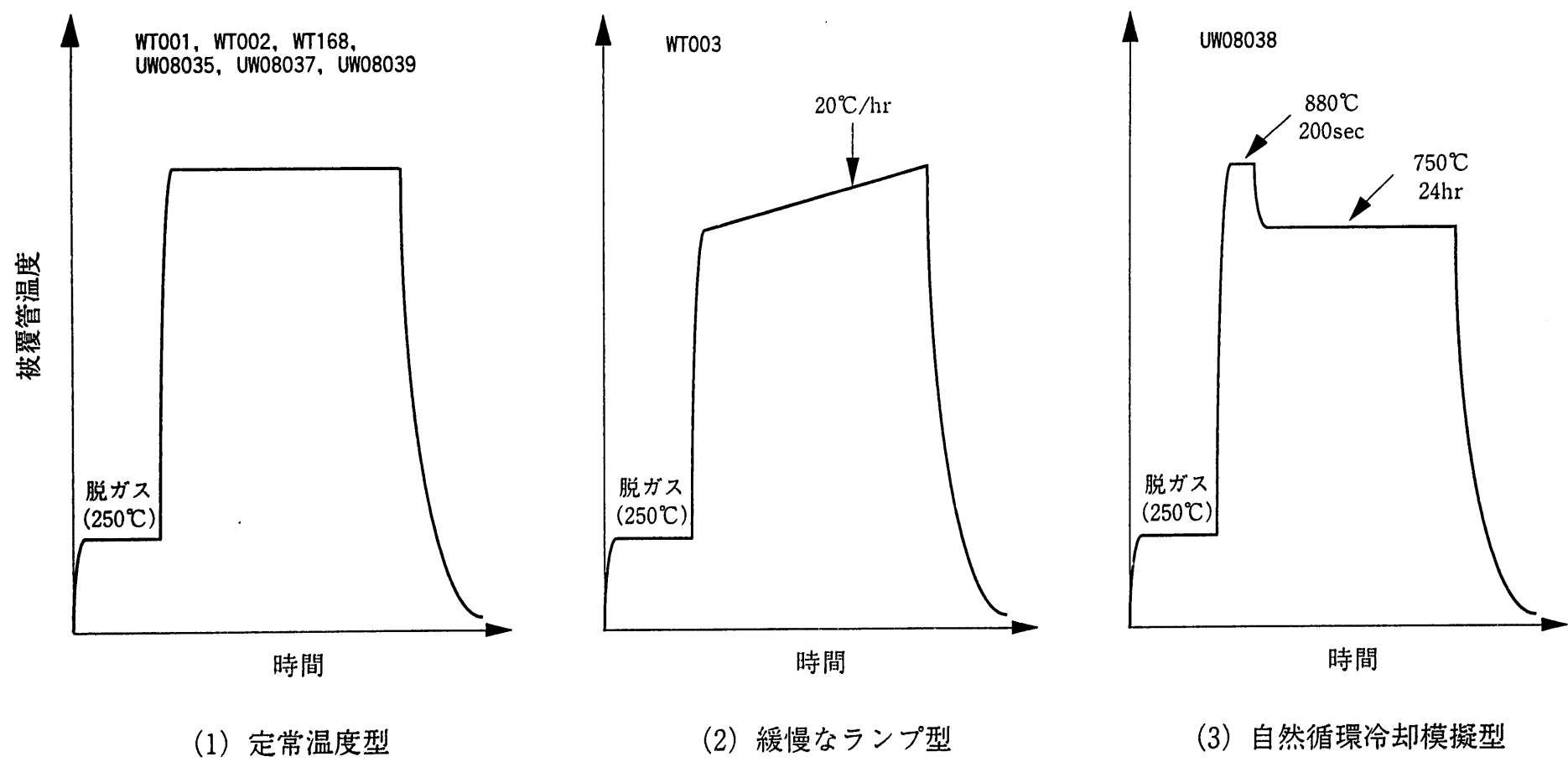


図2.2 TOH試験時の被覆管温度履歴

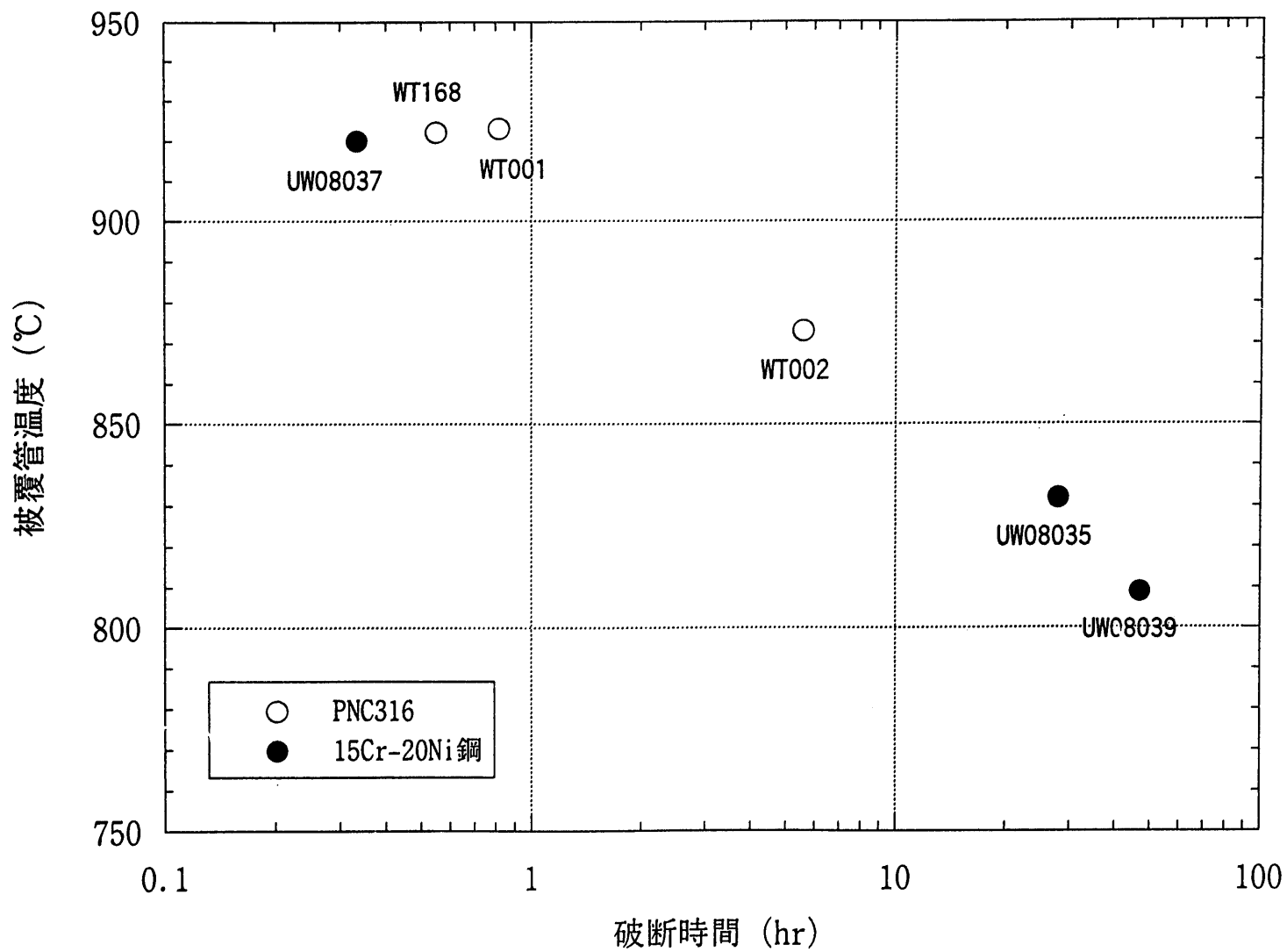


図2.3 TOH試験における破断時間と被覆管温度との関係

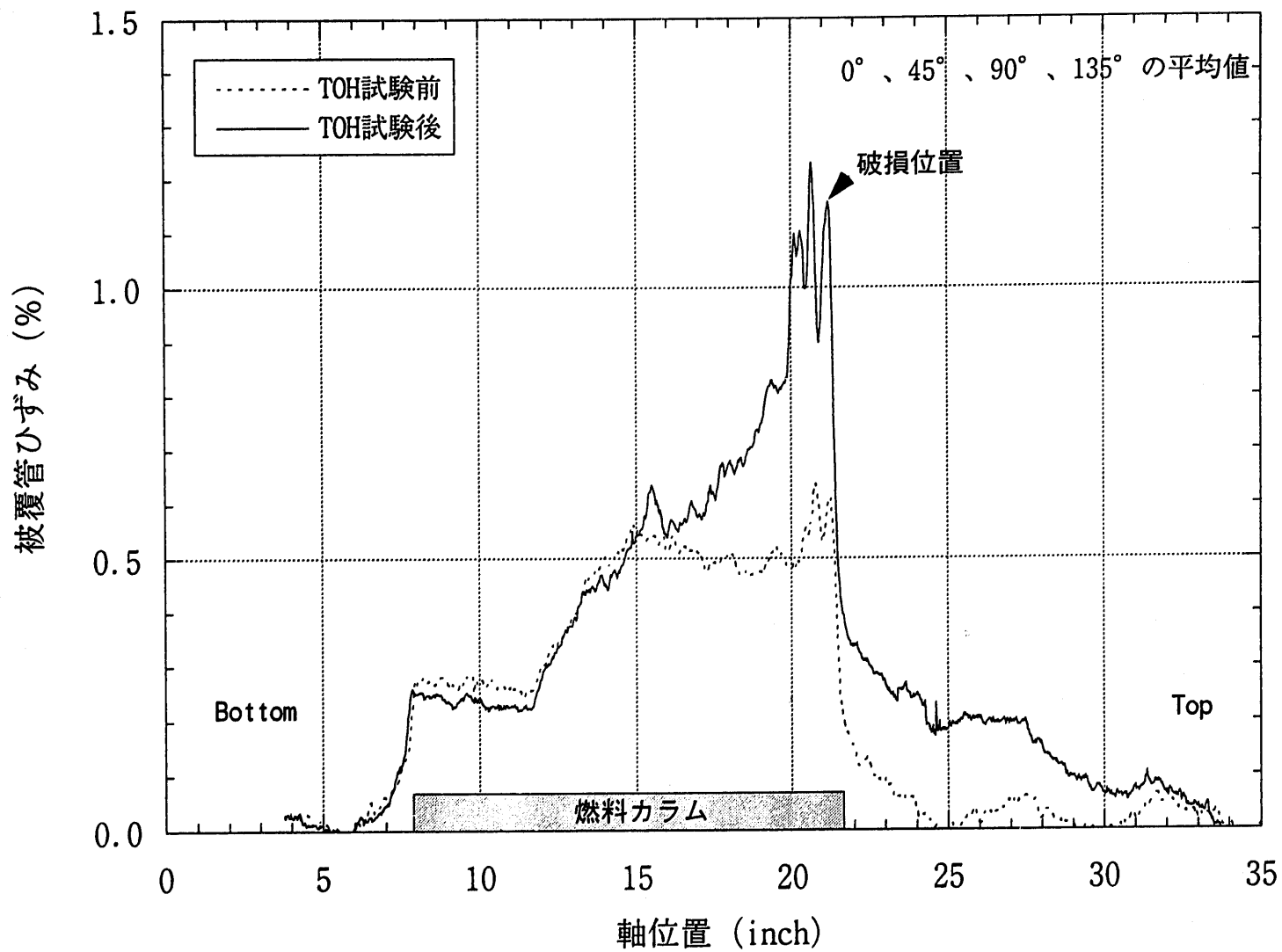


図2.4 燃料ピン外径測定結果 (WT001)

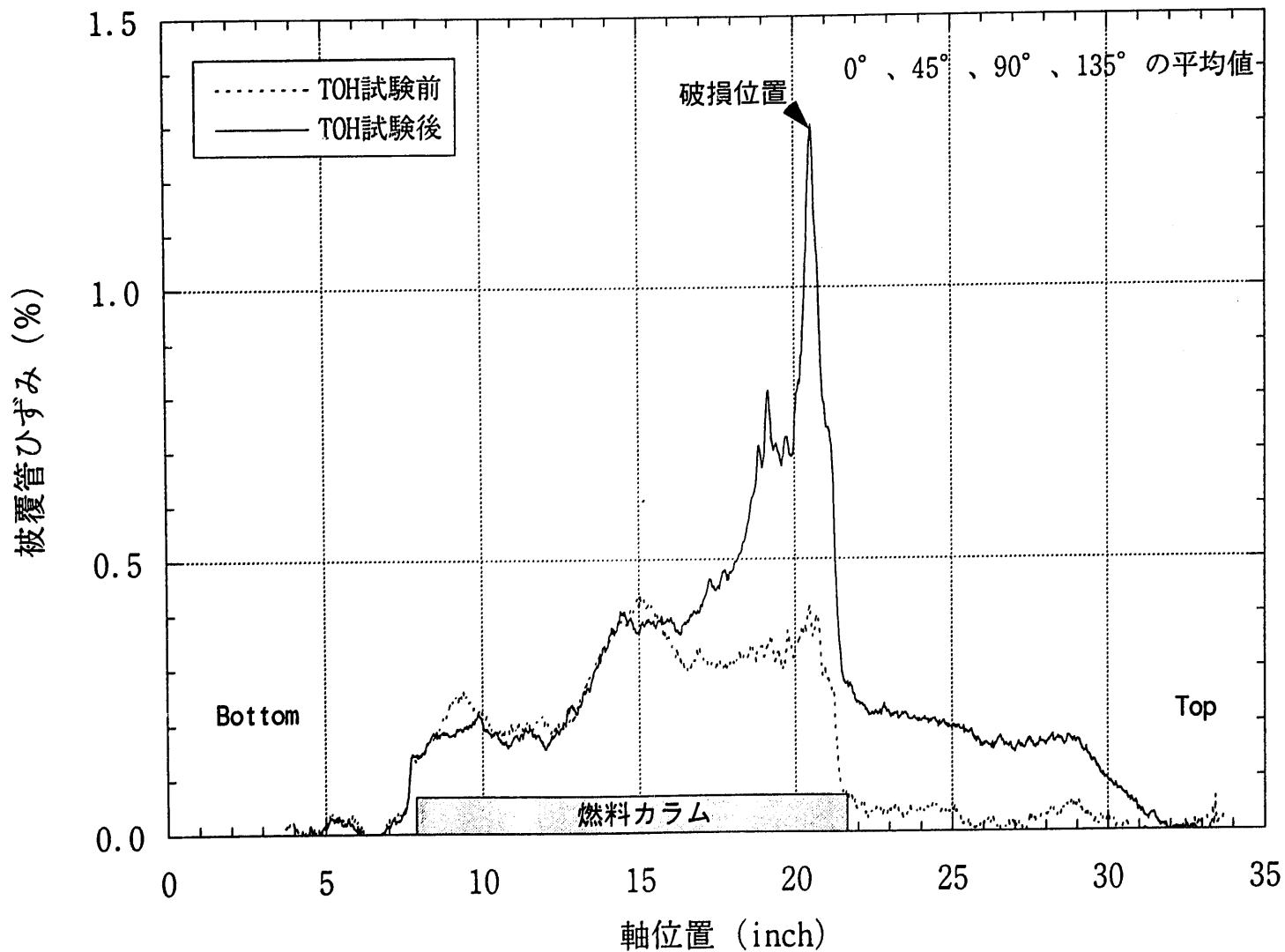


図2.5 燃料ピン外径測定結果 (WT002)

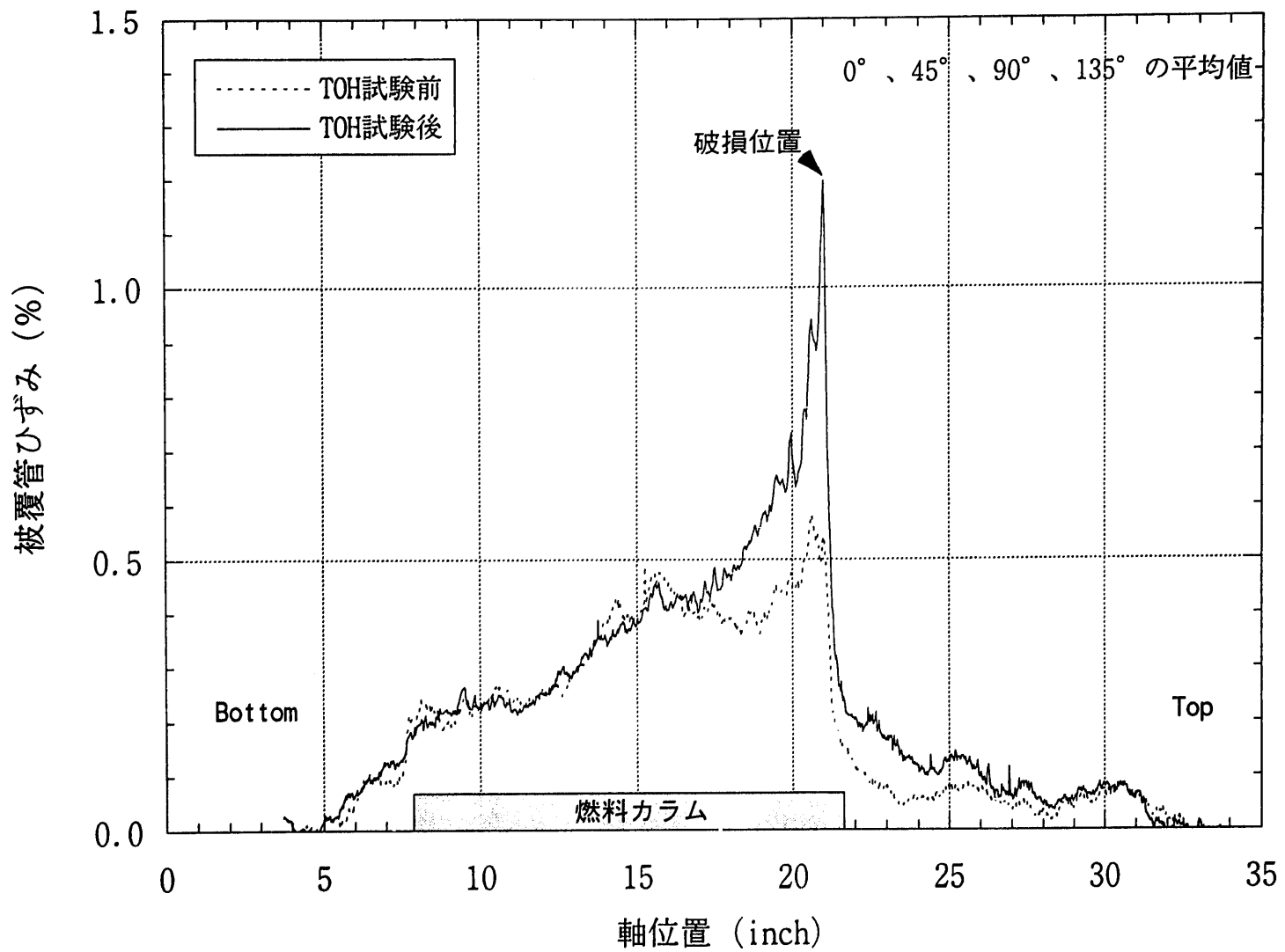


図2.6 燃料ピン外径測定結果 (WT003)

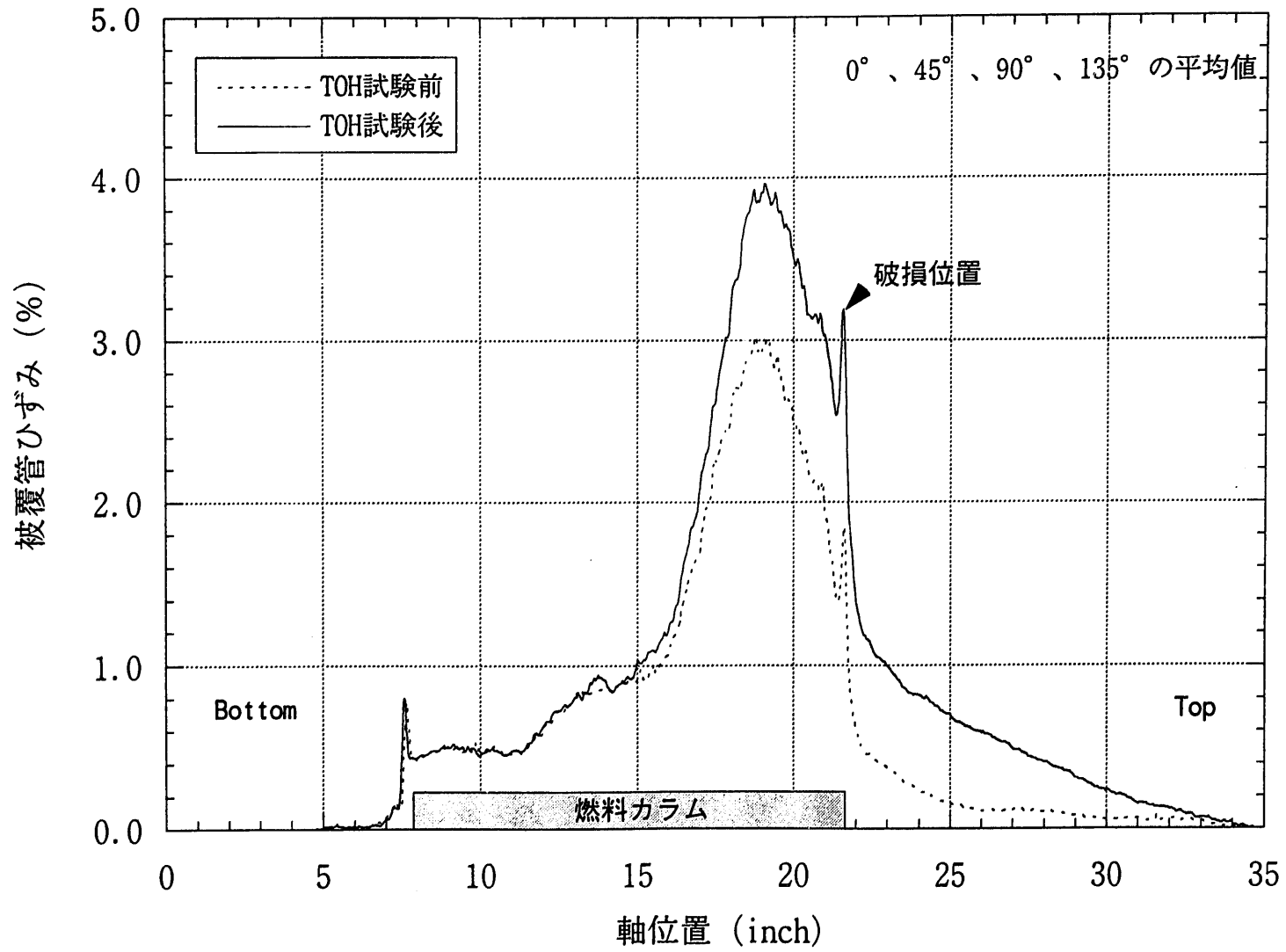


図2.7 燃料ピン外径測定結果 (WT168)



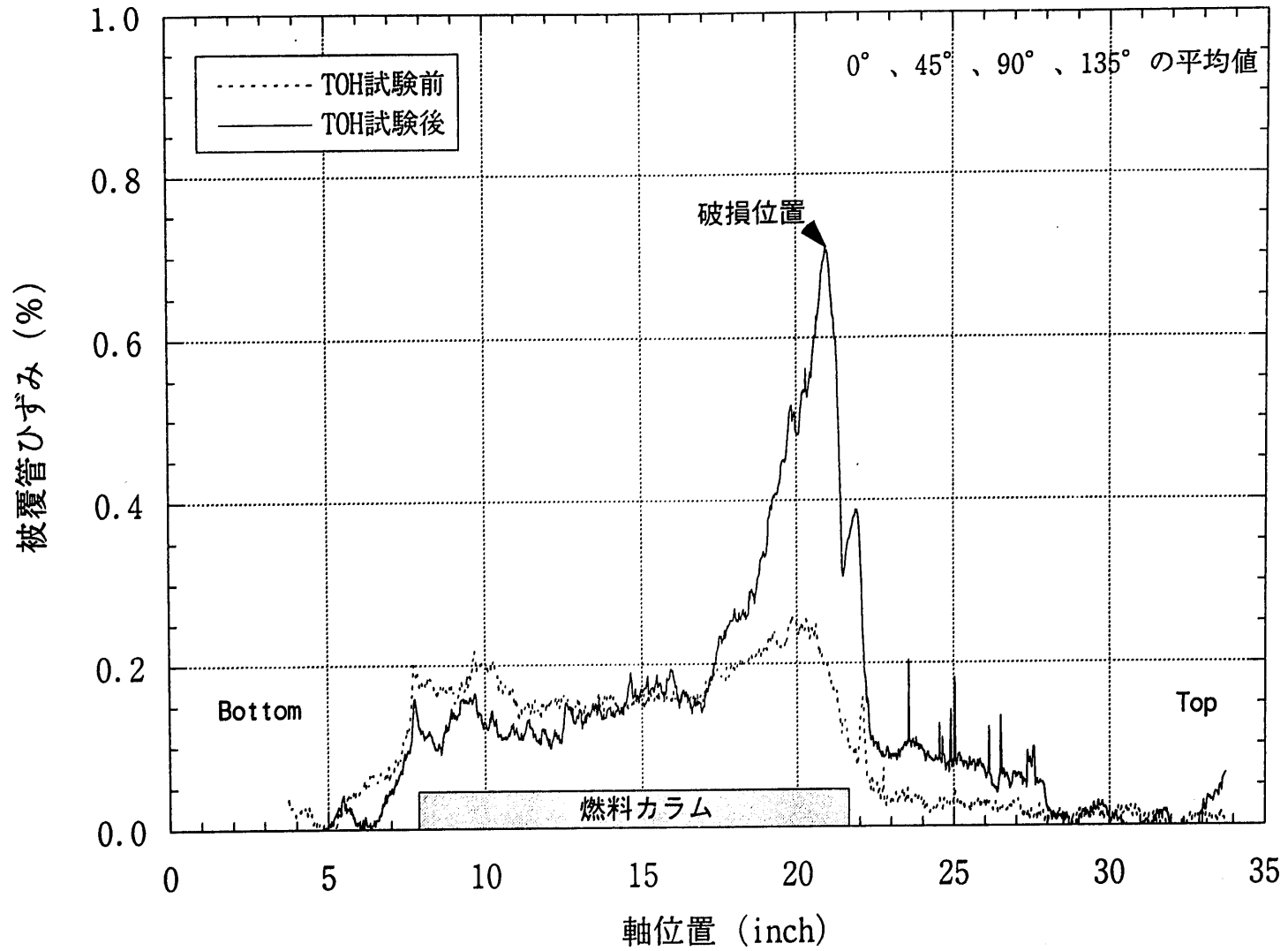


図2.8 燃料ピン外径測定結果 (UW08035)

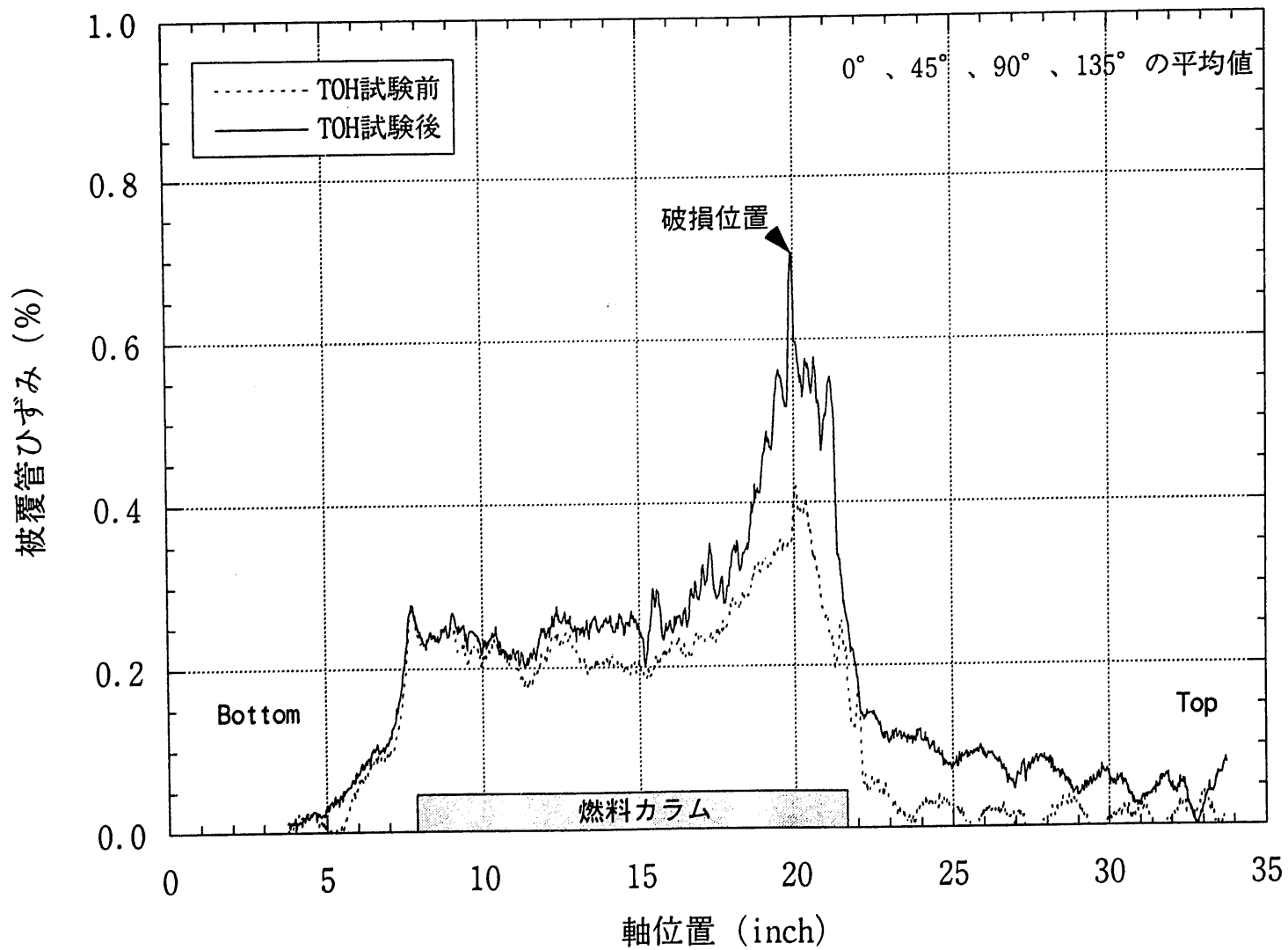


図2.9 燃料ピン外径測定結果 (UW08037)

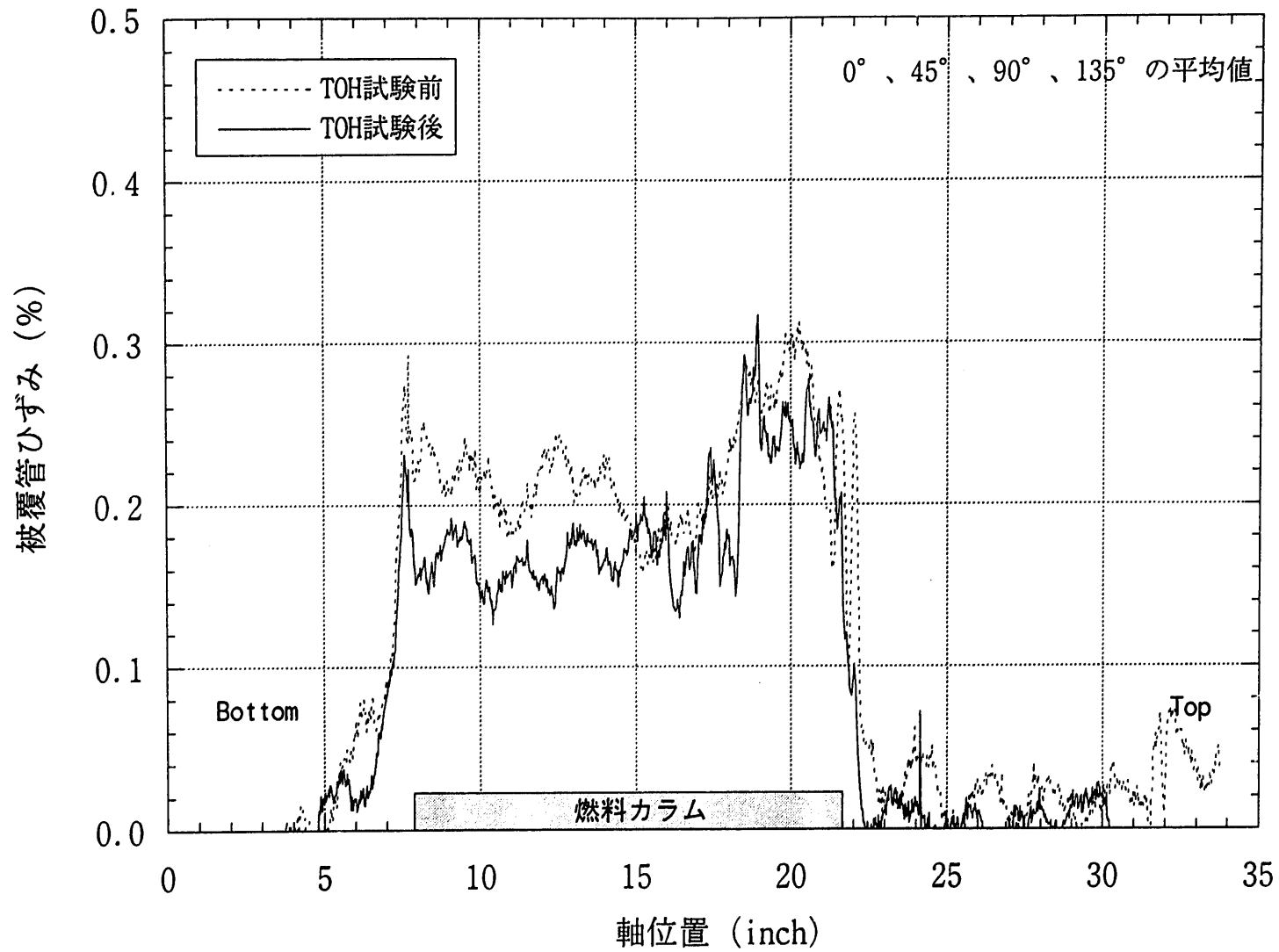


図2.10 燃料ピン外径測定結果 (UW08038)

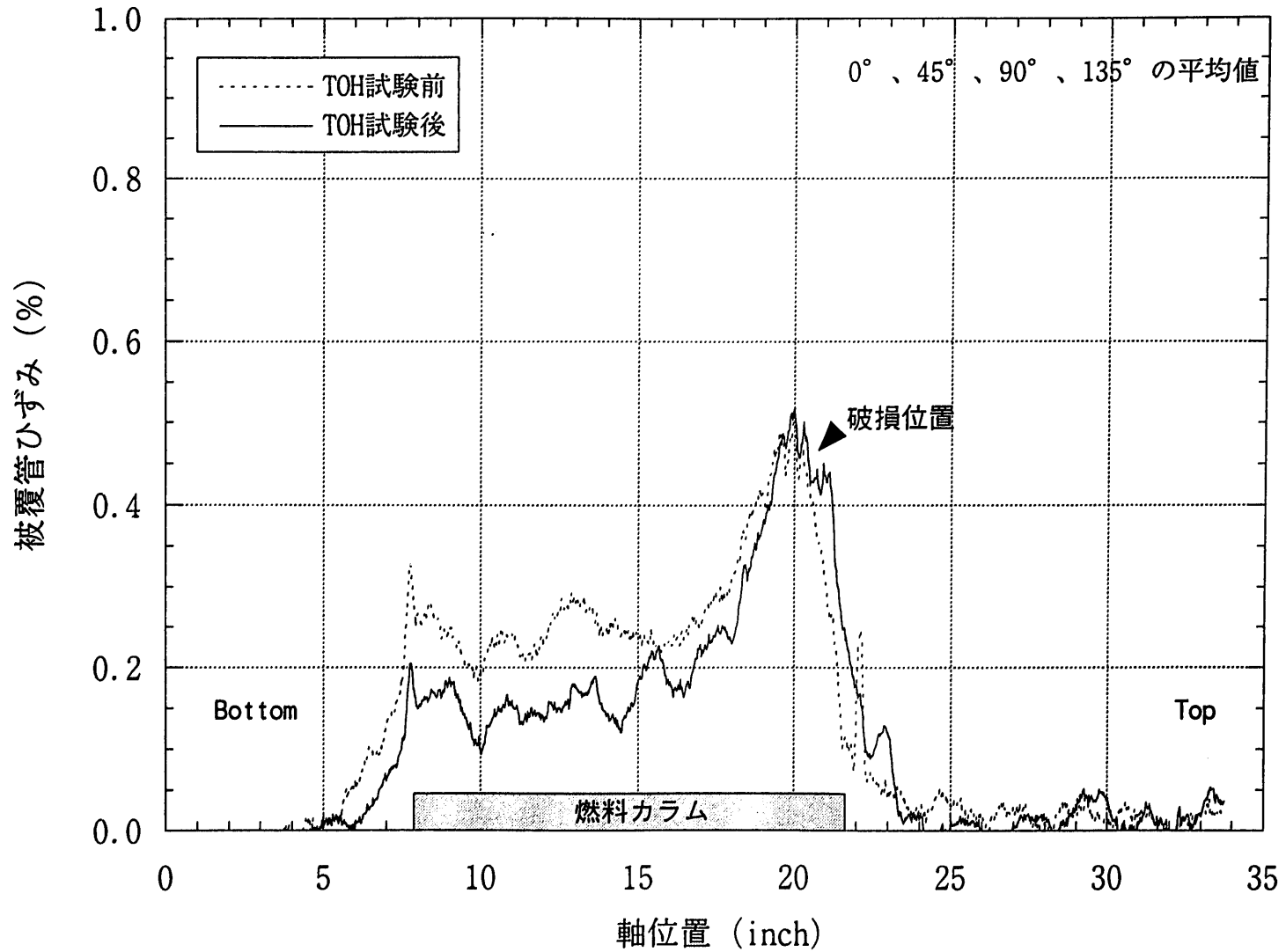
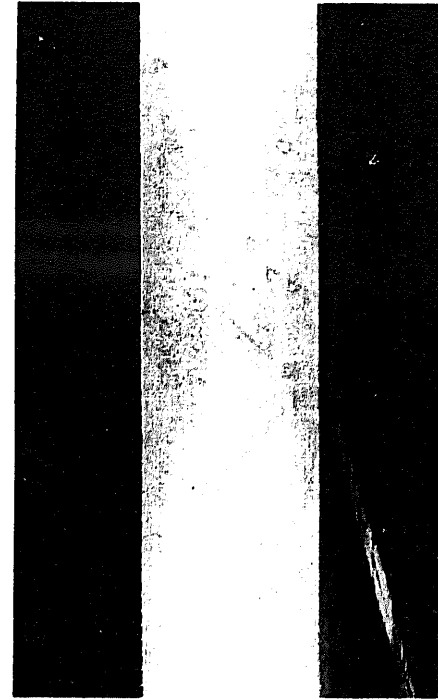
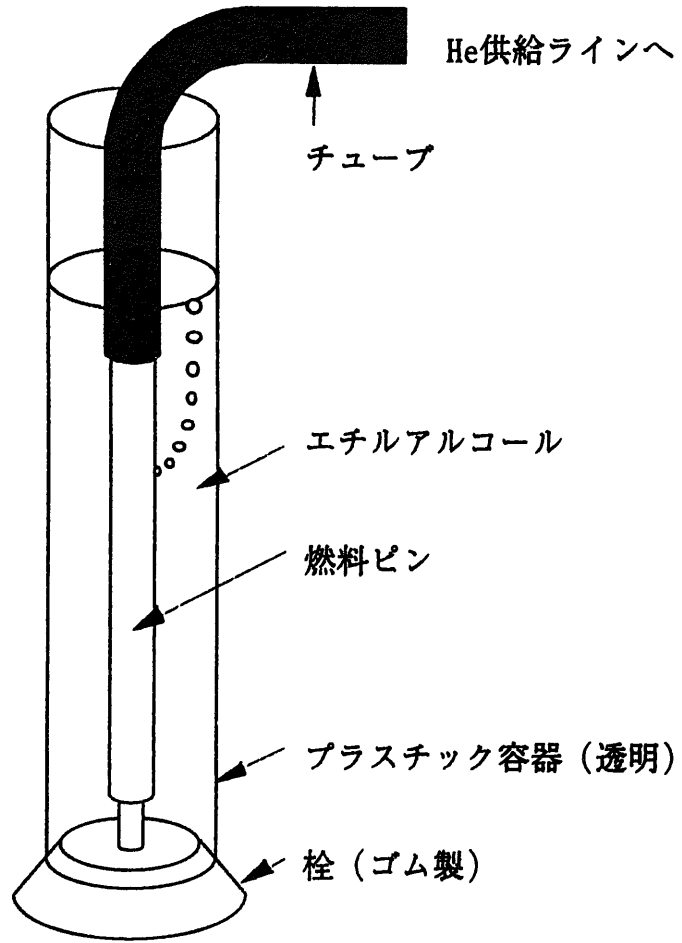


図2.11 燃料ピン外径測定結果 (UW08039)



破損孔は長さ5mm程度のクラックで  
暗いスポットの中に位置している。

破損孔近傍の外観写真 (WT001)

図2.12 破損孔位置特定のための試験装置概念図および破損孔近傍の外観写真

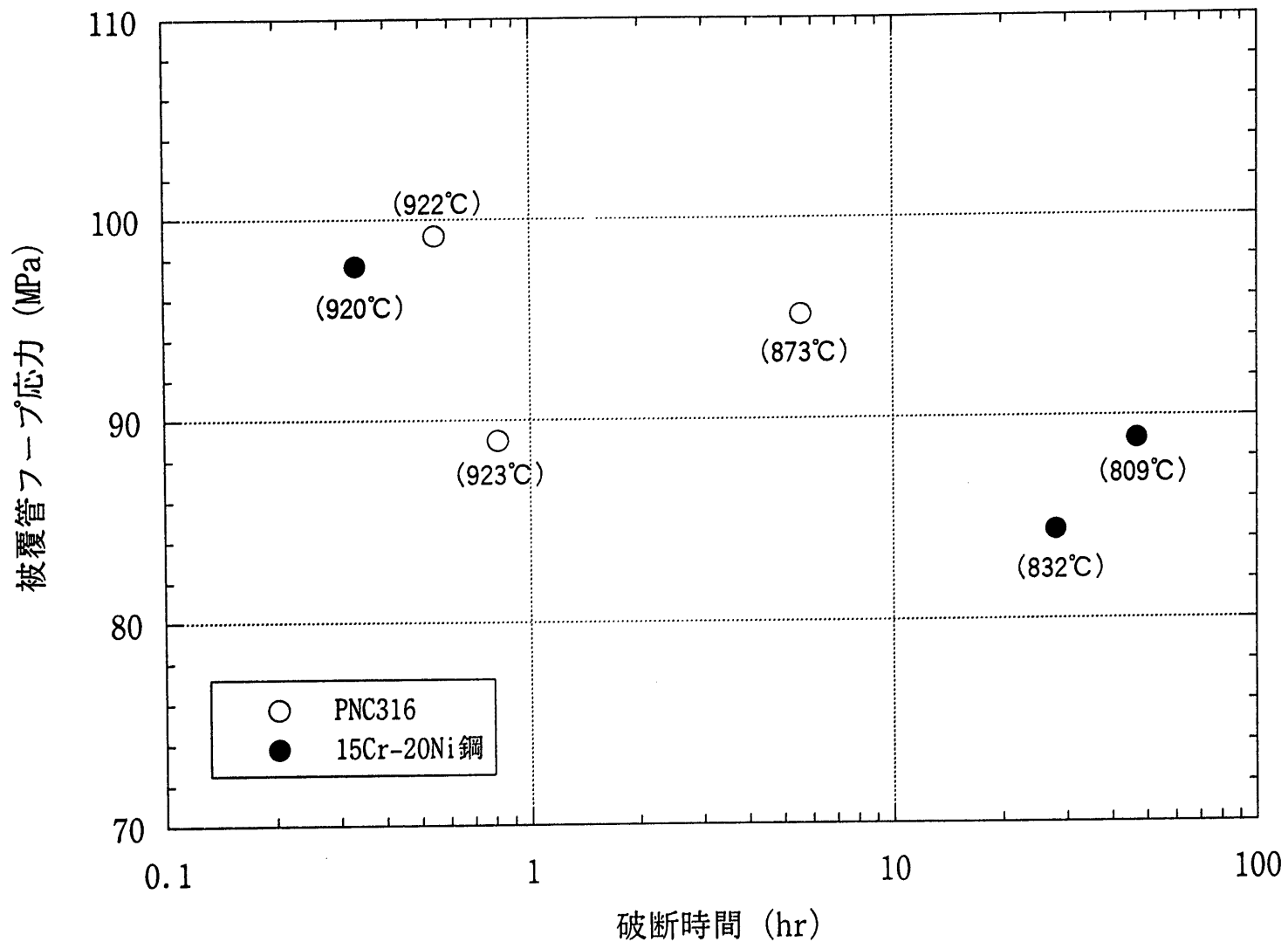


図2.13 TOH試験における破断時間と被覆管フープ応力との関係

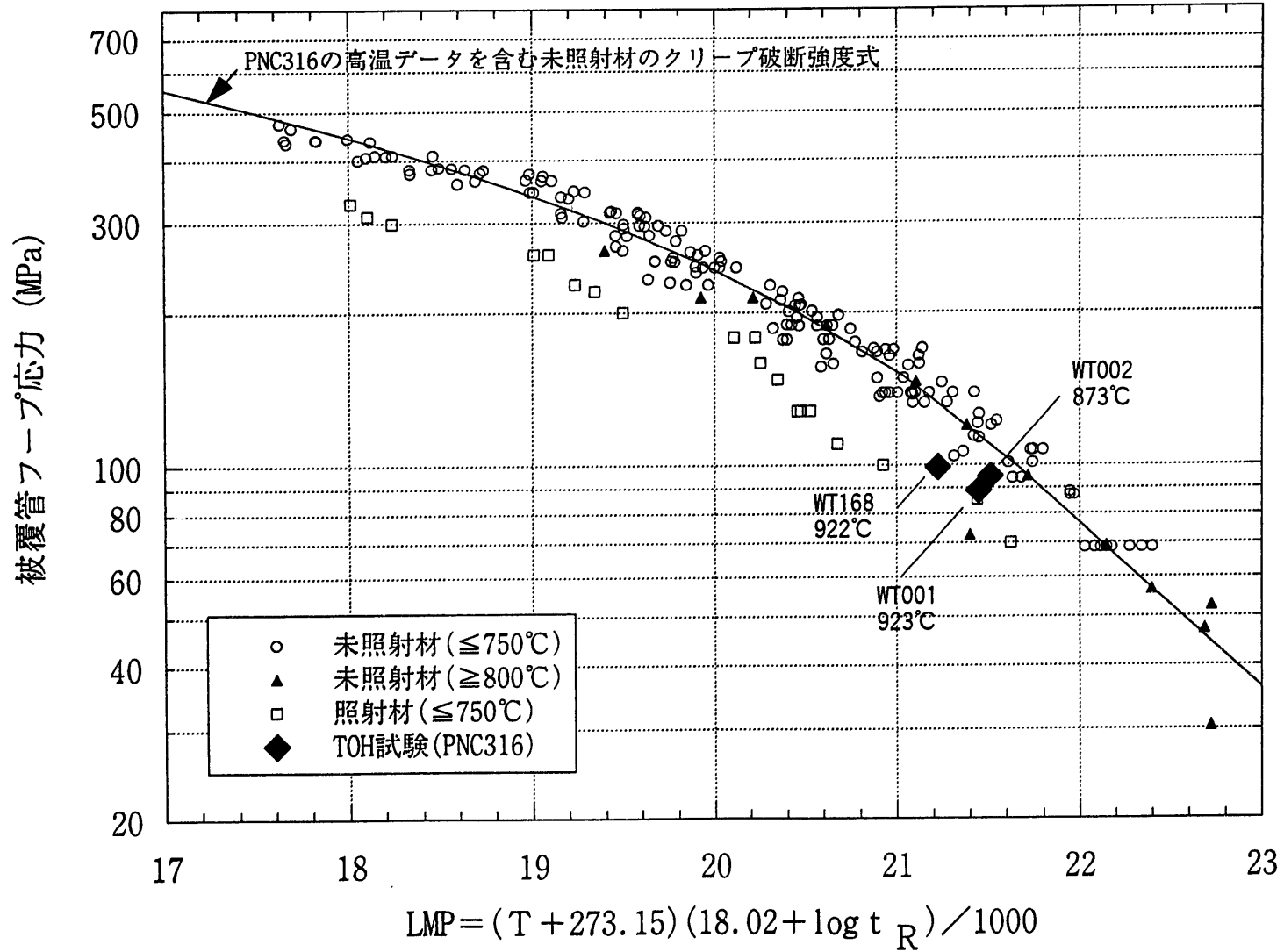


図2.14 TOH試験による破断時間の低下 (PNC316)

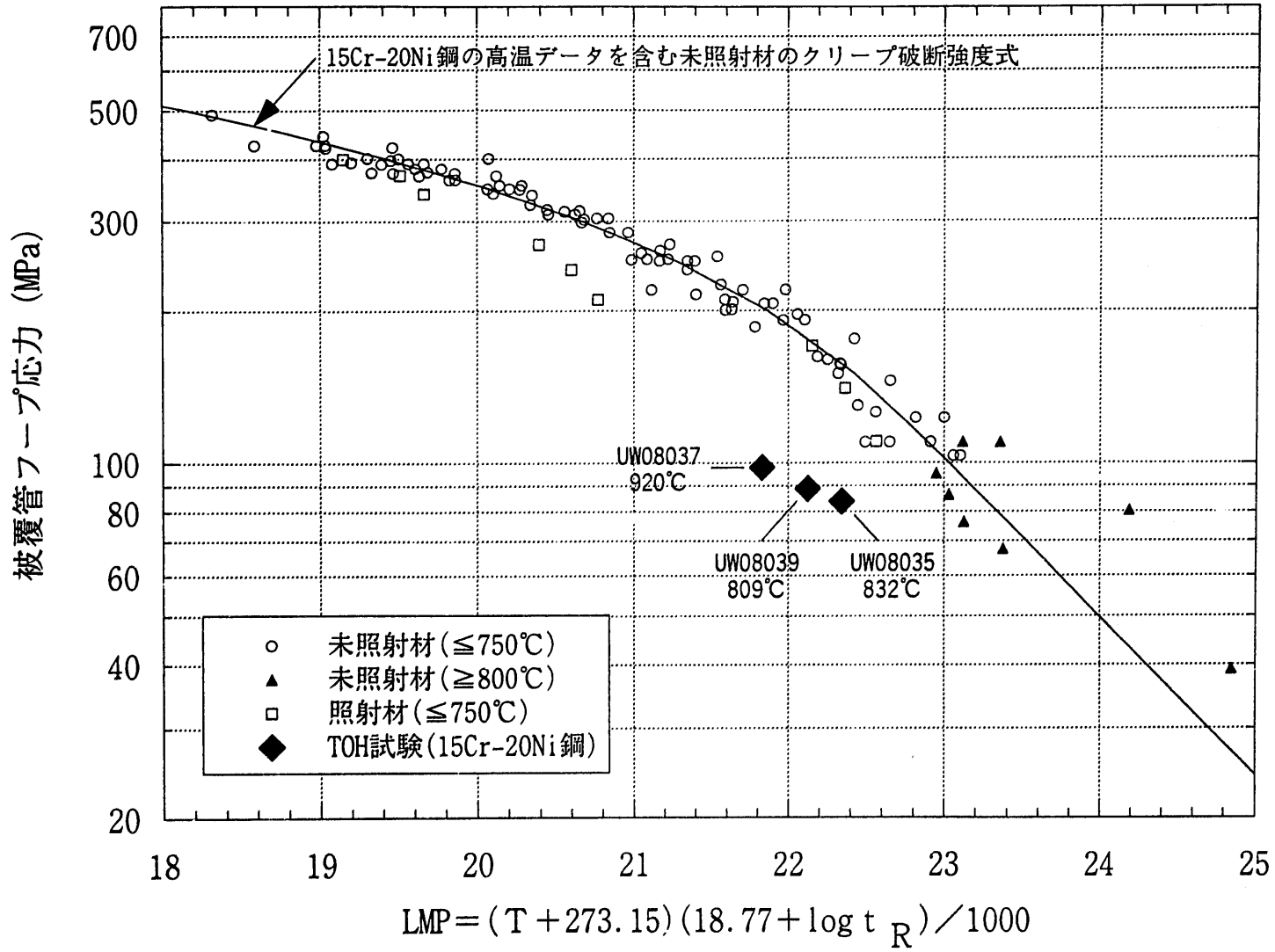


図2.15 TOH試験による破断時間の低下 (15Cr-20Ni鋼)



## (1) ガス圧のみ

UW08037の仕様、照射条件等を用いて評価した場合

## (2) ガス圧のみ

(1)をベースに照射終了時に被覆管に0.4%の歪みを生じさせるように、被覆管内面圧力を上げた場合

## (3) ガス圧+PCMI模擬

(1)をベースに照射終了時に被覆管に0.4%の歪みを生じさせるように、PCMI開始時から被覆管内面圧力を一定値上げた場合

## (4) ガス圧+PCMI模擬

(1)をベースに照射終了時に被覆管に0.4%の歪みを生じさせるように、PCMI開始時から被覆管内面圧力を徐々に上げた場合

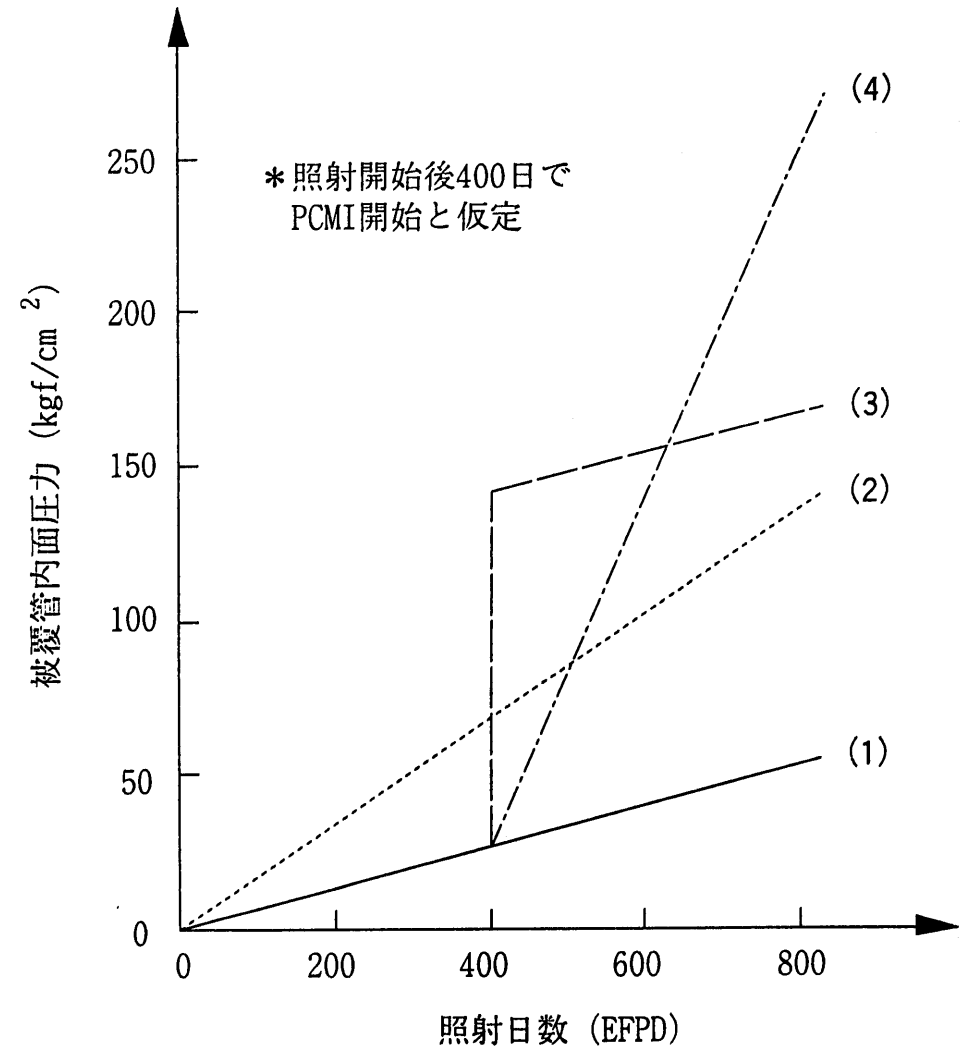


図3.1 CEDARコードによる定常照射時の被覆管クリープ損傷評価

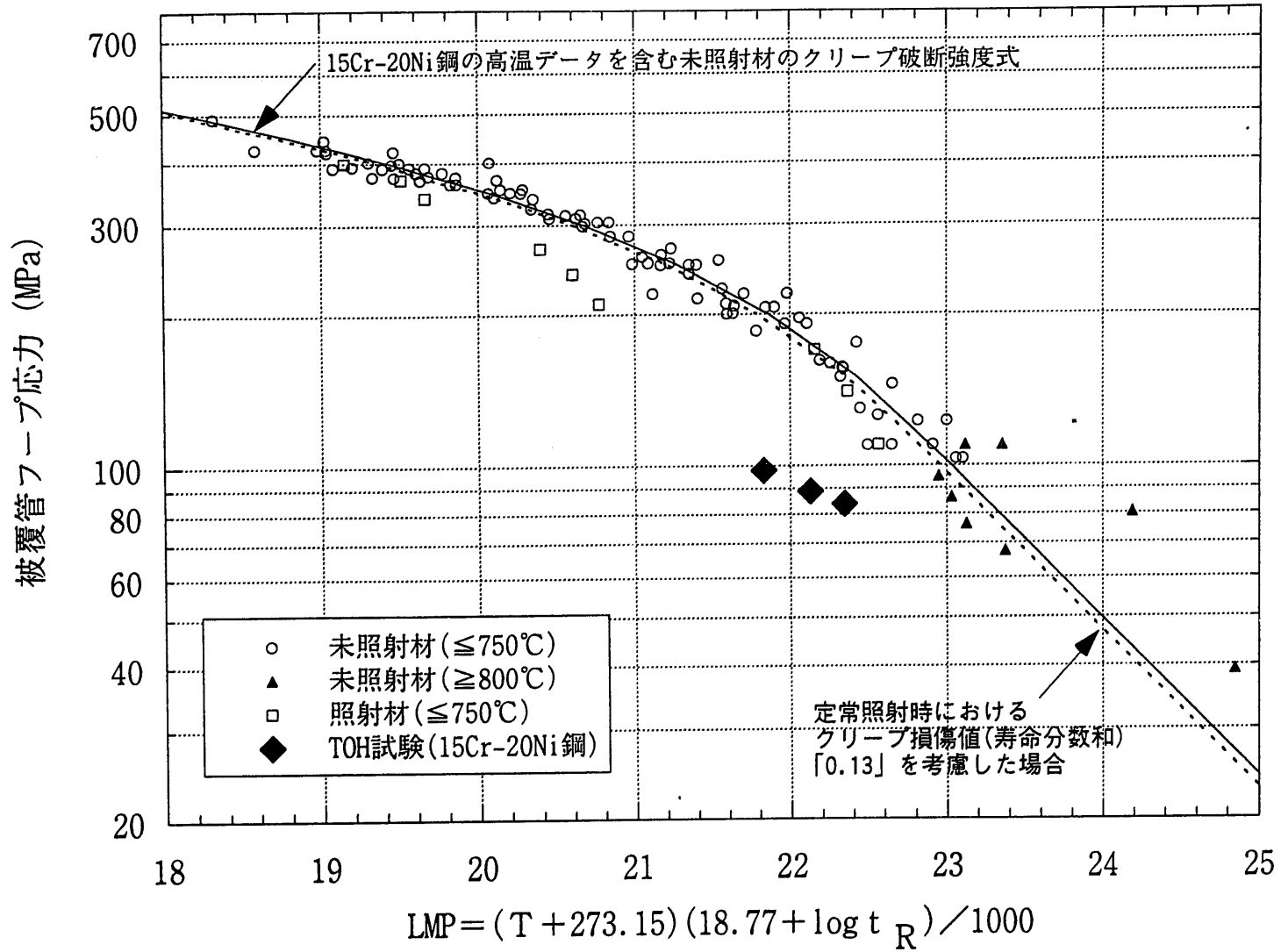


図3.2 破断時間低下に及ぼす定常照射時の被覆管クリープ損傷の影響

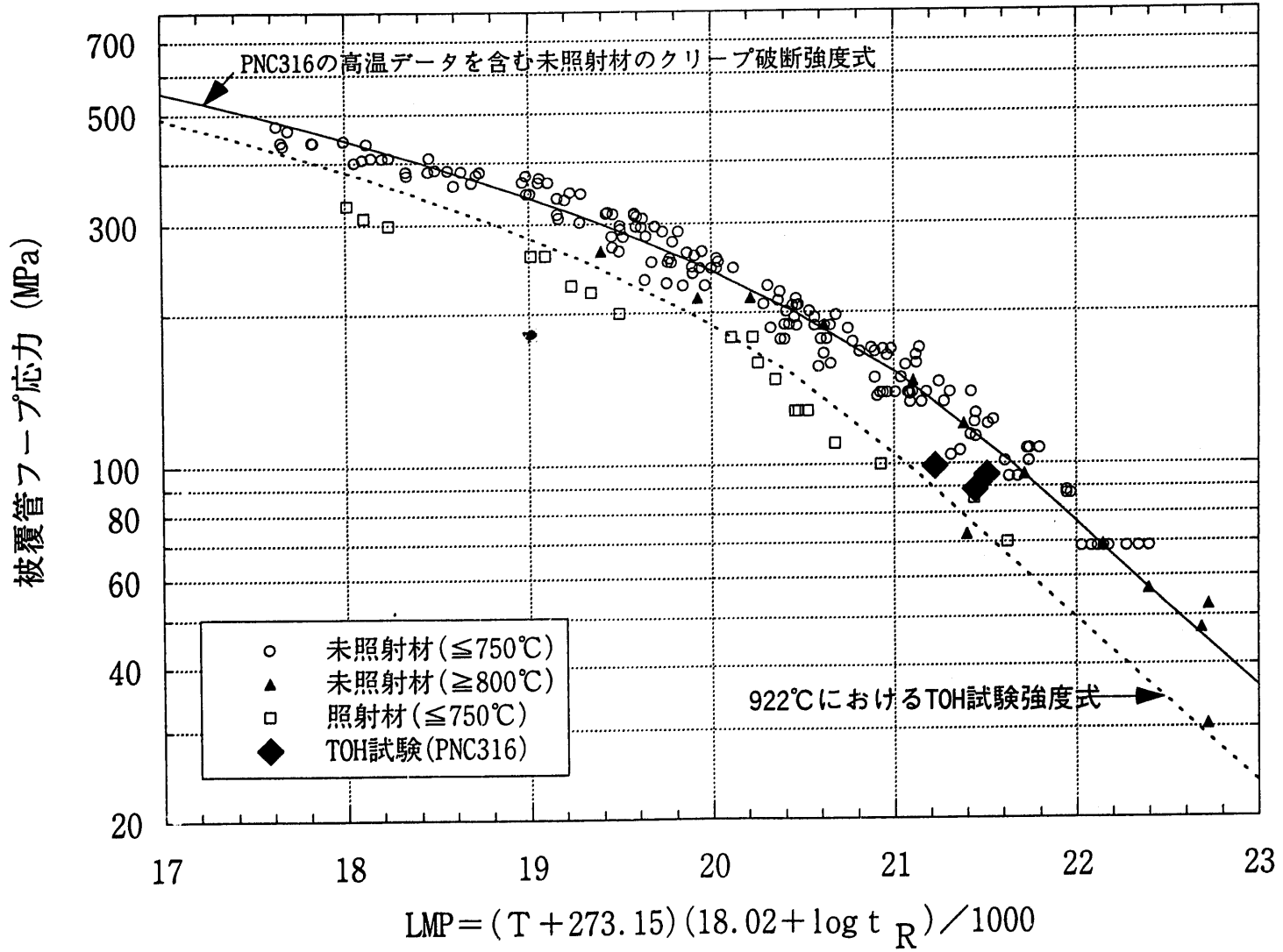


図4.1 TOH試験強度式 (PNC316)

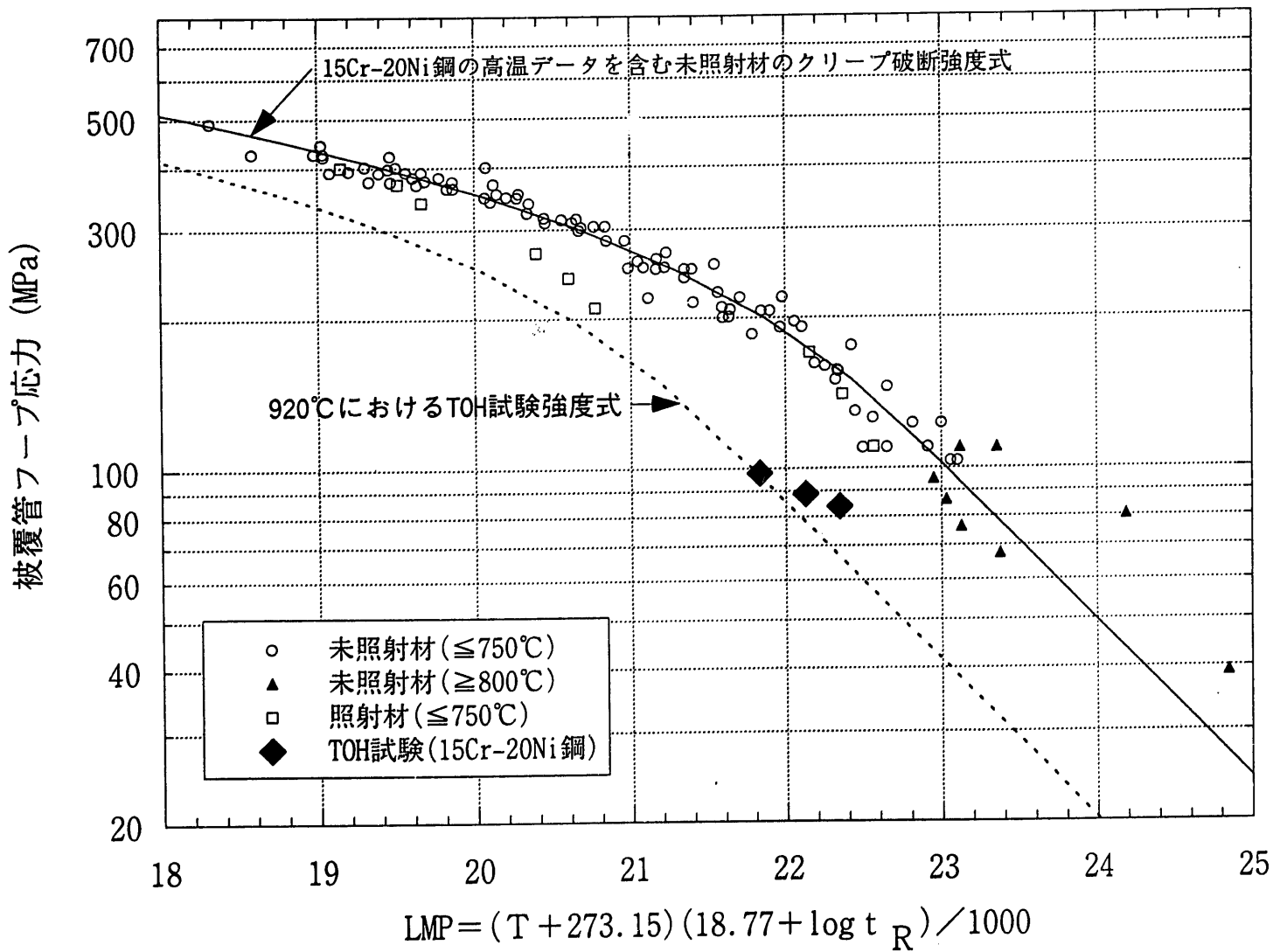
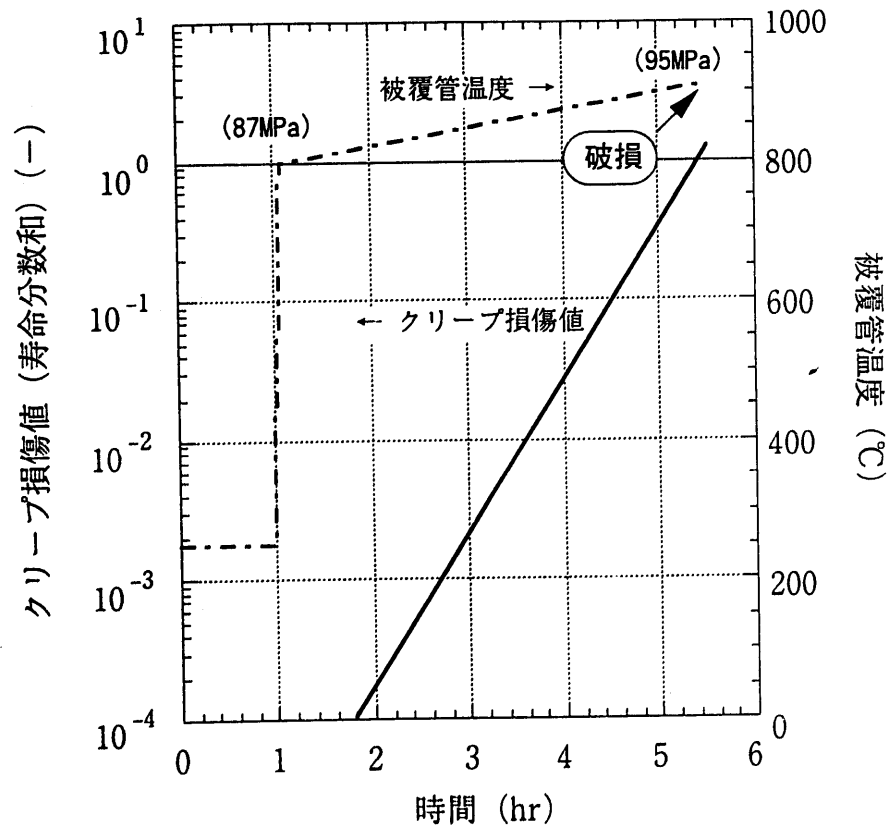
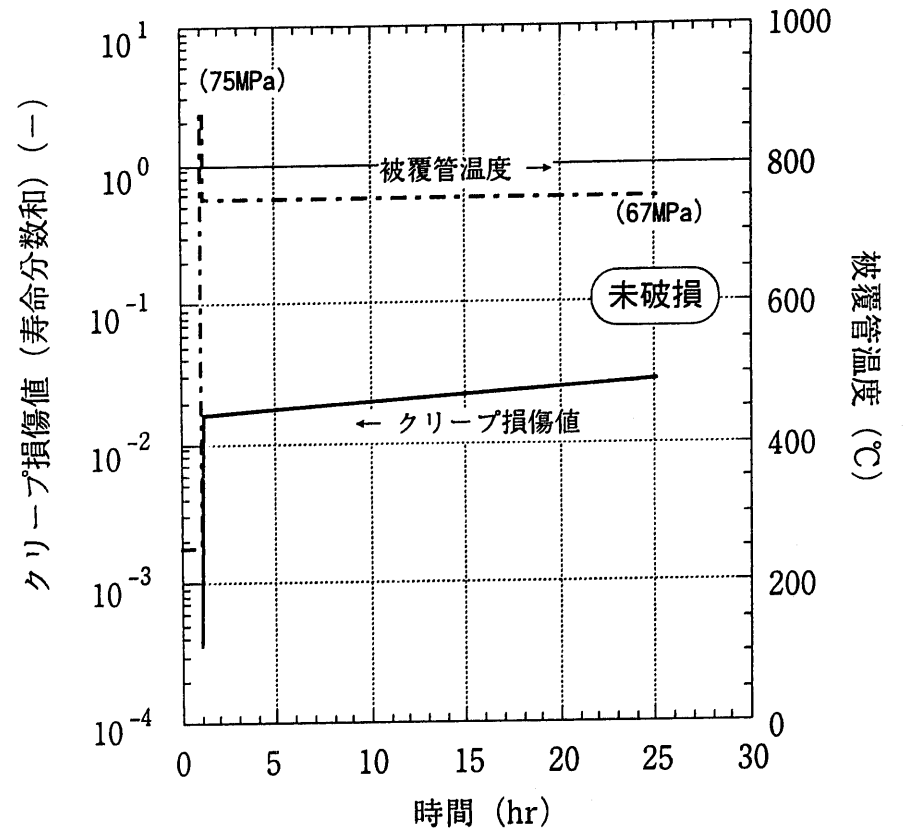


図4.2 TOH試験強度式 (15Cr-20Ni鋼)



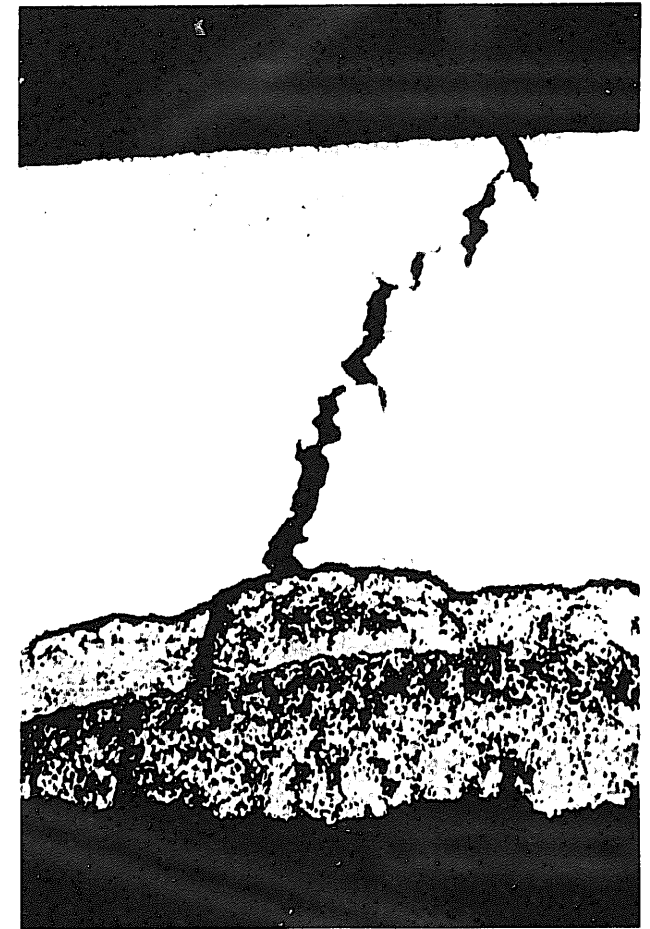
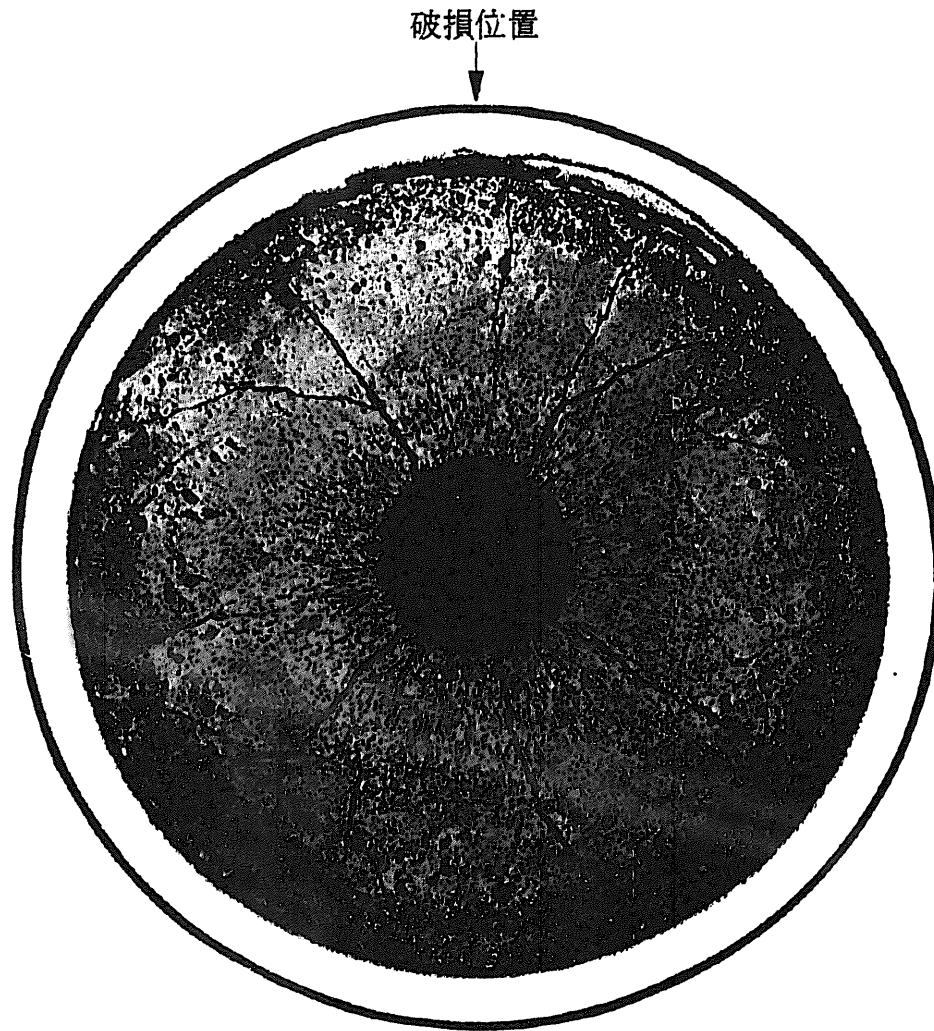
(1) 緩慢なランプ型 (WT003)



(2) 自然循環冷却模擬型 (UW0808)

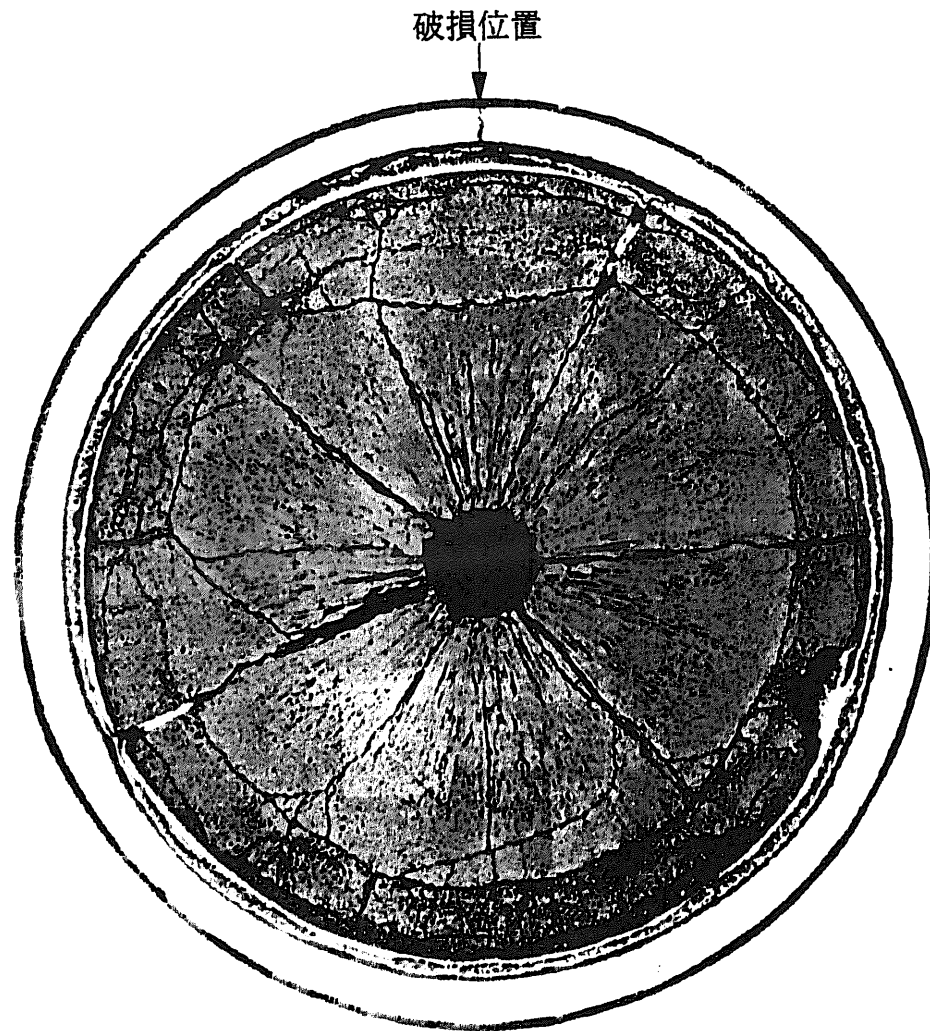
※ ( )内の数字は各温度での被覆管フープ応力

図4.3 温度変動型TOH試験結果の評価



被覆管材 : PNC316  
ピーク燃焼度 : 12.3at. %  
ピーク照射量 :  $14.5 \times 10^{26} \text{ n/m}^2$   
( $E > 0.1 \text{ MeV}$ )  
試験温度 : 923°C (破損位置)  
破断時間 : 49min

写真2.1 TOH試験後の断面金相写真 (WT001)



1mm



100 μm

被覆管材 : 15Cr-20Ni鋼  
ピーク燃焼度 : 11.7at. %  
ピーク照射量 :  $10.2 \times 10^{26} \text{ n/m}^2$   
( $E > 0.1 \text{ MeV}$ )  
試験温度 : 920℃ (破損位置)  
破断時間 : 20min

写真2.2 TOH試験後の断面金相写真 (WT08037)



被覆管材 : PNC316  
ピーク燃焼度 : 12.3at. %  
ピーク照射量 :  $14.5 \times 10^{26} \text{ n/m}^2$  ( $E > 0.1 \text{ MeV}$ )  
試験温度 : 923°C (破損位置)  
破断時間 : 49min

50  $\mu\text{m}$

写真2.3 TOH試験後の断面金相写真 (WT001、エッチング後)



## 付 録

付録1 高温データを含む未照射材のクリープ破断強度式

付録2 15Cr-20Ni鋼の照射材のクリープ破断強度式

## 付録1 高温データを含む未照射材のクリーブ破断強度式

## 1. 策定方法

試験温度  $T$  (°C)、破断時間  $t_R$  (hr)、被覆管フープ応力  $\sigma_H$  (MPa) についてラーソンミラーパラメータ (LMP) で整理し、クリーブ破断強度式を策定した。

## 2. PNC316

## (1) データベース

- a) 53、54、55年度試作PNC316鋼の炉外大気中内圧クリーブ破断試験  
 試験温度 600°C、650°C、700°C、750°C  
 フープ応力 68~470MPa
- b) 55年度試作PNC316の炉外大気中高温内圧クリーブ破断試験  
 試験温度 800°C、850°C、900°C、950°C、1000°C  
 フープ応力 30~265MPa

## (2) クリーブ破断強度式 (別図1参照)

$$LMP = (T + 273.15) (18.02 + \log t_R) / 1000$$

$$\sigma_H \geq 100\text{MPa}$$

$$LMP = 43.115 - 30.252(\log \sigma_H) + 15.677(\log \sigma_H)^2 - 2.959(\log \sigma_H)^3$$

$$\sigma_H < 100\text{MPa}$$

$$LMP = 27.753 - 3.0529(\log \sigma_H)$$

## 3. 15Cr-20Ni鋼

## (1) データベース

- a) 60、62年度試作PNC1520鋼の炉外大気中内圧クリーブ破断試験  
 試験温度 600°C、650°C、700°C、750°C  
 フープ応力 68~470MPa
- b) 60、62年度試作PNC1520鋼の炉外大気中高温内圧クリーブ破断試験  
 試験温度 800°C、850°C  
 フープ応力 39~110MPa

## (2) クリーブ破断強度式 (別図2参照)

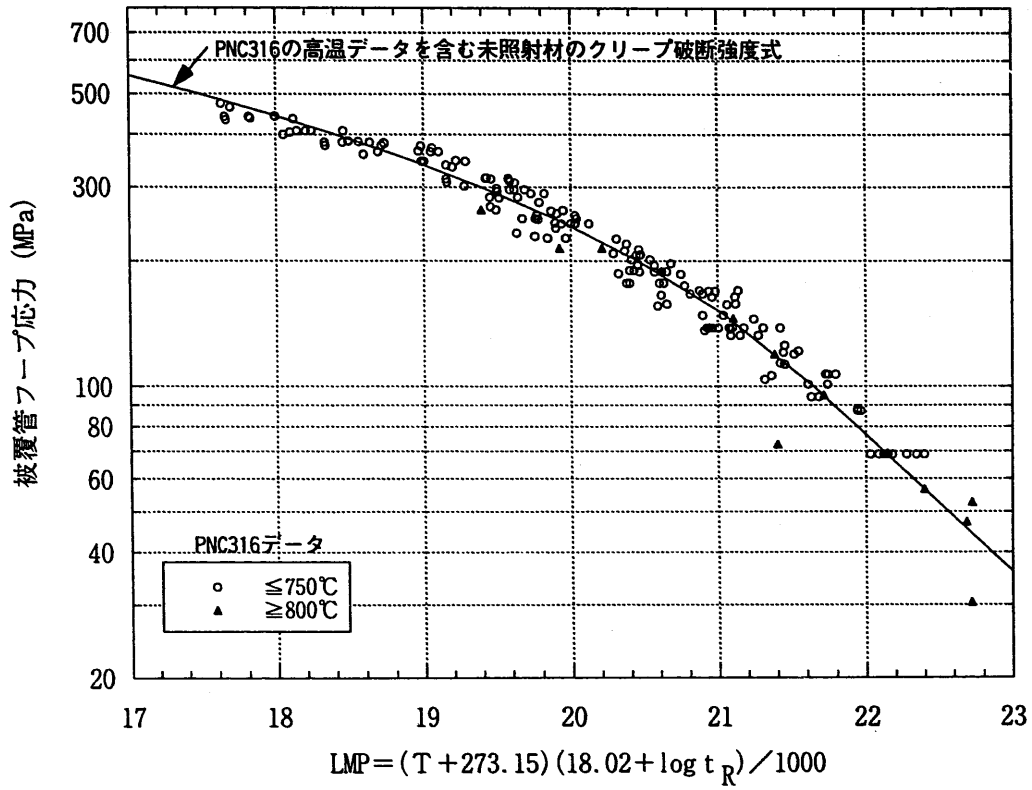
$$LMP = (T + 273.15) (18.77 + \log t_R) / 1000$$

$$\sigma_H \geq 100\text{MPa}$$

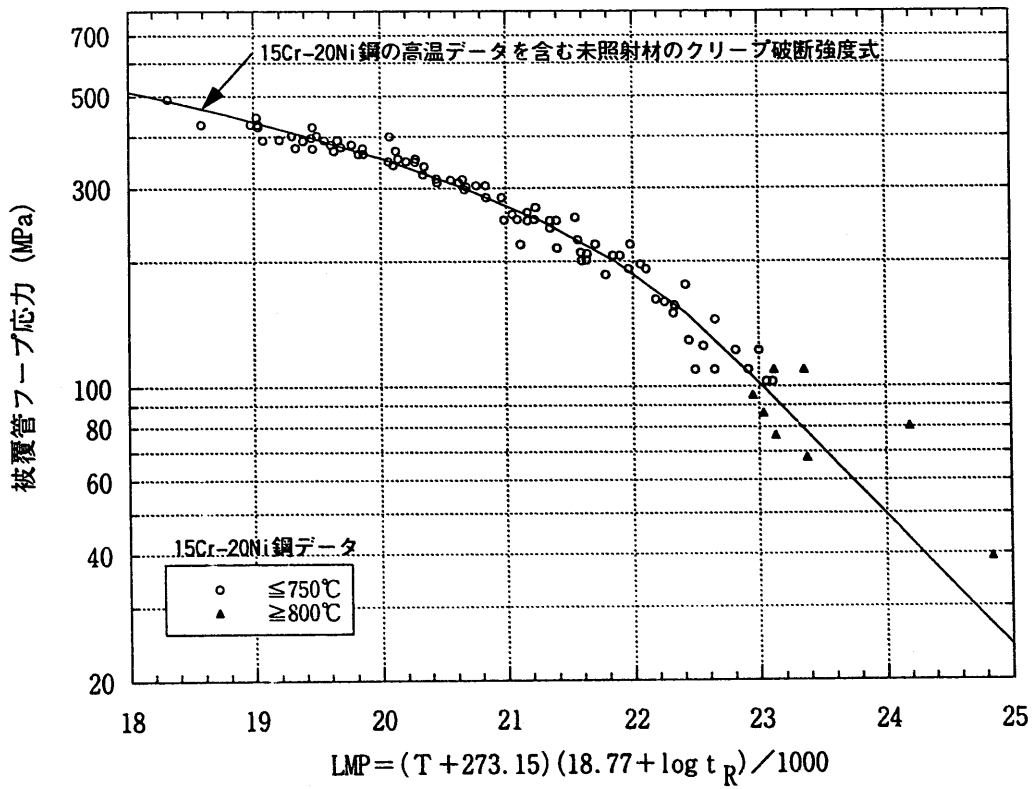
$$LMP = 91.501 - 96.242(\log \sigma_H) + 46.487(\log \sigma_H)^2 - 7.742(\log \sigma_H)^3$$

$$\sigma_H < 100\text{MPa}$$

$$LMP = 29.429 - 3.2013(\log \sigma_H)$$



別図1 PNC316の未照射材のクリープ破断強度



別図2 15Cr-20Ni鋼の未照射材のクリープ破断強度

付録2 15Cr-20Ni鋼の照射材のクリープ破断強度式

1. 策定方法

試験温度  $T$  (°C)、破断時間  $t_R$  (hr)、被覆管フープ応力  $\sigma_H$  (MPa) についてラーソンミラーパラメータ (LMP) で整理し、クリープ破断強度式を策定した。

2. クリープ破断強度式

(1) データベース

60年度試作PNC1520鋼の炉内Na中内圧クリープ破断試験

試験温度 605°C、670°C、750°C

フープ応力 110~400MPa

(2) クリープ破断強度式 (別図3参照)

$$LMP = (T + 273.15) (7.98 + \log t_R) / 1000$$

$$\sigma_H > 400 \text{MPa}$$

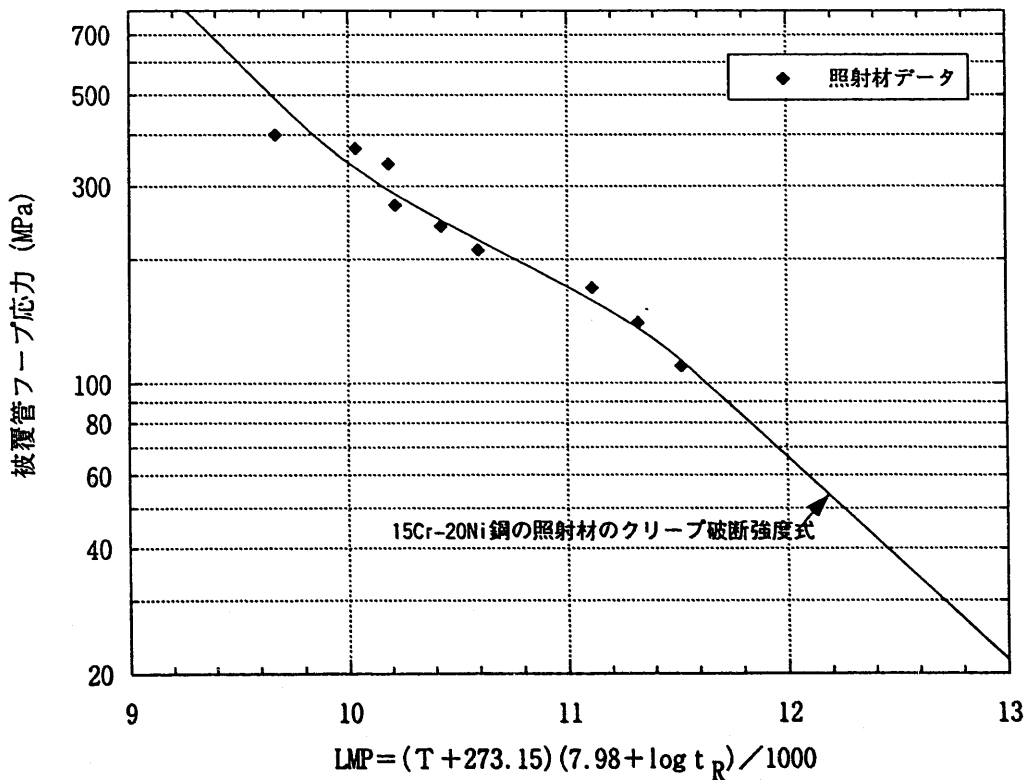
$$LMP = 14.809 - 1.910 (\log \sigma_H)$$

$$400 \text{MPa} \geq \sigma_H \geq 110 \text{MPa}$$

$$LMP = -65.864 + 106.386 (\log \sigma_H) - 47.494 (\log \sigma_H)^2 + 6.837 (\log \sigma_H)^3$$

$$\sigma_H < 110 \text{MPa}$$

$$LMP = 15.737 - 2.050 (\log \sigma_H)$$



別図3 15Cr-20Ni鋼の照射材のクリープ破断強度