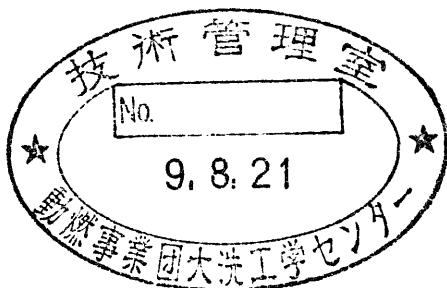


分置

# 高照射 PNC316 被覆管の急速加熱破裂挙動評価

1996年9月



動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせ下さい。

〒311-13 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002

動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター

システム開発推進部・技術管理室

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

動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation) 1997

## 高照射PNC316被覆管の急速加熱破裂挙動評価

吉武庸光<sup>1)</sup>、大森 雄<sup>1)</sup>、坂本直樹<sup>1)</sup>、  
鶴飼重治<sup>1)</sup>

### 要 旨

FBR炉心の冷却能力低下型事象（LOF）下における燃料被覆管の健全性評価のためには、熱過渡時の被覆管の寿命評価が重要である。この任意の温度履歴に対応した燃料被覆管の寿命予測を目的として、評価ニーズに対応した急速加熱破裂（バースト）試験技術の高度化、高速実験炉「常陽」で高照射量域まで高速中性子照射された高速増殖原型炉「もんじゅ」用改良316ステンレス鋼（PNC316）燃料被覆管の急速加熱バースト試験及び本試験結果に基づいた照射済被覆管の寿命予測評価を行った。

本試験及び評価で得られた主な結果は以下の通りである。

- ① 急速加熱バースト試験技術の高度化に取り組んだ結果、被覆管試験片温度計測時の測温精度の向上、外径変化及び高応力条件（周応力294MPa）での破裂温度データの取得を達成した。
- ② 「常陽」で照射された特殊燃料集合体PFC030M、炉心燃料集合体PFD304を対象に高照射PNC316燃料被覆管の急速加熱バースト試験を行った。その結果、今回の供試材で得られた高速中性子照射量（ $\sim 17.5 \times 10^{26} n/m^2$ 、 $E > 0.1 MeV$ ）の範囲では、LOF時に想定される応力条件下（周応力～100MPaまで）においては破裂温度は非照射材と同等であり、破裂に際してよい延性を示した。また照射量の増大に伴う破裂温度の低下は見られなかった。
- ③ ラーソン・ミラー・パラメータ（LMP）と Life Fraction Ruleを適用することにより、熱過渡時の被覆管寿命を評価できる手法を確立した。これを用いて高照射PNC316被覆管の急速加熱時の破裂温度下限値を計算した結果、現状の照射量範囲（ $\sim 17.5 \times 10^{26} n/m^2$ ）においては、「もんじゅ」の被覆管最高温度制限値830℃の合理化が可能であることを示した。

---

1) 動燃大洗工学センター 燃料材料開発部 照射材料試験室

## Evaluation on Rapid Heating Rupture Behavior in Heavily Irradiated PNC316 Fuel Claddings

Tsunemitsu Yoshitake\*, Tsuyoshi Ohmori\*,  
Naoki Sakamoto\* and Shigeharu Ukai\*.

### Abstract

The estimation of the life of fuel claddings at thermal transient event is important for evaluating of the fuel claddings validity under the loss of coolant flow (LOF) accident. In order to estimate the life time of the fuel claddings corresponding to any temperature rising condition, the instrumental technique was first improved in the post-irradiation examination and the temperature-transient-to-burst tests were extensively conducted on PNC316 claddings which were irradiated in JOYO as a fuel test assembly PFC030M and a driver fuel assembly PFD304. The life time evaluation of the irradiated PNC316 fuel claddings was carried out, based on these test results.

The results obtained in this work are as follows;

- (1) As a result of the improvement in the temperature-transient-to-burst testing, the diametral change data and higher hoop stress data were obtained. And the highly accurate measurement of rupture temperature was also achieved.
- (2) The temperature-transient-to-burst test results showed that the rupture temperature of the irradiated PNC316 cladding was equal to that of unirradiated one up to present neutron fluence in LOF stress condition. It was indicated that the temperature-transient-to-burst property of PNC316 was not influenced by irradiation in lower hoop stress region.
- (3) The life time of the irradiated PNC316 cladding at any thermal transient condition was evaluated by means of LMP-Life Fraction Rule method. Consequently, the result of estimation for failure temperature of heavily irradiated PNC316 showed the possibility for rising the design limit of the cladding highest temperature for MONJU.

---

\*) Material Monitoring Section, Fuel and Material Division, OEC.

## 目 次

1. 緒 言 .....	1
2. LOF事象下における被覆管の温度履歴と寿命予測評価 .....	2
2.1 FBR炉心の熱過渡事象 .....	2
2.2 「もんじゅ」設計時のデータベースと その後の照射後試験結果の拡充 .....	2
2.3 被覆管の寿命予測 .....	3
3. 急速加熱バースト試験技術の高度化 .....	4
3.1 被覆管試験セルの整備と新試験機器の設置 .....	4
3.2 試験性能の向上 .....	4
4. 供試材 .....	6
4.1 PNC 316鋼 .....	6
4.2 試験対象集合体及び照射条件 .....	6
4.3 試料調整 .....	7
5. 試験方法 .....	8
5.1 急速加熱バースト試験片 .....	8
5.2 急速加熱バースト試験方法 .....	8
6. 試験結果 .....	9
6.1 各周応力での破裂温度 .....	9
6.2 破裂温度の照射量及び照射温度依存性 .....	10
7. 考 察 .....	12
7.1 高照射PNC316被覆管の急速加熱破裂挙動 .....	12
7.1.1 破裂温度に及ぼす試料調整雰囲気の影響 .....	12
7.1.2 破裂温度に及ぼす照射の影響 .....	12
7.1.3 急速加熱バースト試験結果と降伏強さ、引張強さとの関係 .....	13
7.1.4 急速加熱時の外径変化 .....	14
7.2 急速加熱バースト試験結果に基づく寿命評価 .....	17
7.2.1 LMP・Life Fraction Ruleを用いた試験結果の整理手法 .....	17
7.2.2 試験結果の整理 .....	18
7.2.3 照射済PNC316被覆管の急速加熱破裂温度下限値 .....	19
7.2.4 照射後試験結果に基づく被覆管寿命評価の課題 .....	20
8. 結 言 .....	21
謝 辞 .....	22
参考文献 .....	23

## 表目次

表3.1	被覆管高温強度試験機仕様	24
表4.1	PNC316被覆管化学成分	25
表4.2	PFC030M試験片の照射条件	26
表4.3	PFD304試験片の照射条件	27
表6.1	PFC030Mの急速加熱バースト試験結果	28
表6.2	PFD304の急速加熱バースト試験結果	29
表7.1	外径ひずみ計算結果	30
表7.2	PNC316非照射材のLMP、 $\sigma_m$ 計算結果	34
表7.3	PNC316照射材のLMP、 $\sigma_m$ 計算結果	39

## 図目次

図2.1	FBR炉心の熱過渡事象	41
図3.1	急速加熱バースト試験機（被覆管高温強度試験機）構成図	42
図5.1	急速加熱バースト試験片	43
図6.1	PFC030MとPFD304の破裂温度と周応力の関係	44
図6.2	PNC316の破裂温度と周応力の関係（加熱速度5°C/s）	45
図6.3	PNC316の破裂温度と周応力の関係（加熱速度100°C/s）	46
図6.4	急速加熱バースト試験結果と破裂温度評価線の比較	47
図6.5	PNC316の破裂温度と中性子照射量の関係（加熱速度5°C/s）	48
図6.6	PNC316の破裂温度と照射温度の関係（加熱速度5°C/s）	49
図7.1	急速加熱バースト試験結果と0.2%耐力、引張強さの関係	50
図7.2	急速加熱時の熱膨張外径ひずみ（内圧負荷なし、非照射）	51
図7.3	各試験片の熱過渡ひずみ	52
図7.4	熱過渡ひずみと温度の関係	54
図7.5	縦弾性率から求めた各周応力での弾性ひずみ	55
図7.6	各試験片の外径ひずみ	56
図7.7	外径塑性ひずみと温度の関係	58
図7.8	破裂温度と外径変化率の関係	59
図7.9	急速加熱バースト試験結果に基づく寿命評価	60
図7.10	LMPと $\sigma_m$ の関係	61
図7.11	$\Delta LMP$ と照射量の関係	62
図7.12	PNC316照射材の急速加熱時の破裂温度下限値評価結果	63

## 写真目次

写真 1	PFC030M試験片の試験前後の外観写真	64
写真 2	PFD304試験片の試験前後の外観写真	70

## 1. 緒 言

FBR炉心の通常時あるいは非通常時の熱過渡事象下における燃料被覆管の健全性評価のためには、これまでの照射後試験結果に基づいた評価に加えて、評価ニーズに対応した照射後試験技術の高度化、燃料の使用末期条件までカバーできる信頼性の高い高照射材データの取得及びこれに基づいた寿命評価手法の確立が不可欠である。

このような背景から、照射材料試験室では被覆管試験セルの整備と照射済燃料被覆管を対象とした強度試験機器の更新を実施した。また「もんじゅ」炉心燃料被覆管であるPNC316については、これまで精力的に燃料照射あるいは材料照射試験が実施され照射特性が評価されてきたが、「常陽」特殊燃料集合体PFC030Mにおいてこれまで最高の高速中性子照射量 ( $18.1 \times 10^{26} \text{n}/\text{m}^2$  (最高燃焼度121,600MWd/t) ) を達成し、高照射量域での燃料・材料挙動の解析、評価が進められている。

本報では、燃料被覆管の照射後試験の一つである急速加熱バースト試験について取り組んだ試験技術の高度化と本装置を用いて実施したPFC030M等を対象とした高照射PNC316被覆管の急速加熱バースト試験結果及びこれに基づいて実施した熱過渡時の寿命予測評価について報告する。

燃料被覆管の熱過渡時の寿命予測評価では、予想される被覆管の温度履歴を考慮すると照射後試験項目としては本報の急速加熱バースト試験だけではなく、照射後クリープ等の長時間側の試験データも重要であり、今後照射後クリープ試験を実施してこの結果に基づいた寿命評価及び各試験結果の相関あるいは統一化を検討し、より精度の高い寿命予測に取り組む予定である。

## 2. LOF事象下における被覆管の温度履歴と寿命予測評価

### 2.1 FBR炉心の熱過渡事象

原子炉の燃料は、その全使用期間に渡ってその健全性を確保しなければならない。従ってFBRの燃料被覆管の健全性を評価するためには、熱過渡時の被覆管寿命を予測する必要がある。FBR炉心の非通常時の熱過渡事象では、反応度挿入型事象(TOP)と冷却能力低下型事象(LOF)がある。このうちLOF時の一例として外部電源喪失時の被覆管の温度変化を評価すると、図2.1に示すように「もんじゅ」においては1次ピークが比較的重要であるとの評価結果から被覆管最高温度制限値を設定しているが、実証炉の設計例の中で全交流電源喪失時の自然循環モードにおいては2次ピーク、3次ピークが生じることから、被覆管の寿命を評価する上ではこれらの温度履歴を総合的に評価する必要がある。

### 2.2 「もんじゅ」設計時のデータベースとその後の照射後試験結果の拡充

「もんじゅ」の安全設計<sup>1)</sup>においては、運転時の異常な過渡変化時の燃料の許容設計限界として

- ①被覆管肉厚中心最高温度は830℃以下であること。
  - ②炉心ナトリウム温度は沸点未満であること。
  - ③燃料最高温度は融点未満であること。
- の3つの評価基準を設定している。

このうち①の基準が前項に示したLOF時の温度評価から設定されたものである。この評価は、急速加熱バースト試験結果に基づいており、データベースとしては、PNCが実施した「常陽」用被覆管10%CW-316（「常陽」照射：高速中性子照射量0～ $3.4 \times 10^{26}$ n/m<sup>2</sup>、照射温度370～530℃）及びHEDLが実施したFFTF用被覆管20%CW-316（EBR-II照射：高速中性子照射量0～ $6 \times 10^{26}$ n/m<sup>2</sup>、照射温度370～700℃）であった。これらの中性子照射後の試験データは、「もんじゅ」燃料の使用末期での高速中性子照射量（ $24 \times 10^{26}$ n/m<sup>2</sup>）を満足していないため、これまで「もんじゅ」と同鋼種の被覆管について「常陽」及び海外炉を用いて燃料照射あるいは材料照射試験を実施し、その後被覆管の照射後試験を行って照射材の強度データを拡充してきた。

このような背景のなかで、今回取得した「常陽」特殊燃料集合体PFC030M燃料被

覆管の急速加熱バースト試験データは、「もんじゅ」用燃料被覆管PNC316鋼ではこれまで最高の高速中性子照射量 ( $\sim 17.5 \times 10^{26} n/m^2$ ) に到達したデータであることから、高照射量域での材料挙動の解明及び「もんじゅ」設計時の被覆管最高温度制限値830℃の保守性を確認するうえで非常に貴重なデータである。

本報では、新規取得の試験結果とあわせてこれまでに取得したPNC316照射材の急速加熱バースト試験結果についてまとめた。

### 2.3 被覆管の寿命予測

LOF時においては、被覆管は数秒単位の短時間から数時間に及ぶ比較的長時間にわたって高温 (700℃以上) にさらされることから、従来は各々の事象を模擬した照射後の急速加熱試験を実施して被覆管の健全性を確認してきた。しかしこの方法では、予想される任意の事象に対して燃料被覆管の寿命を評価できないため、熱過渡時に予想される任意の温度履歴に対応できる統一的な被覆管寿命予測評価手法が必要である。

具体的な寿命予測手法としては、照射材についてのLarson-Miller-Parameter (ラーソン・ミラー・パラメター : LMP) と応力の関係で表せる一般式を考えており、本報告では、LOF時を模擬した急速加熱バースト試験結果を基にLMPと応力の関係式を作成して、被覆管の寿命評価を行った。

### 3. 急速加熱バースト試験技術の高度化

#### 3.1 被覆管試験セルの整備と新試験機器の設置

照射材料試験施設（以下 MMF という）の被覆管試験セルは、燃料被覆管の主に強度関連の照射後試験を実施するためのホットセルであるが、20年余に渡る使用により試験機器の老朽化や内装設備の不具合が生じたため、照射後試験の実施に支障をきたしていた。

このため、平成 4 年度から 7 年度にかけて被覆管試験セルの整備工事を実施してセル内装機器の更新・整備を行った<sup>2)</sup>。セル整備と平行してPIE技術の高度化に取り組み、引張試験機、バースト試験機、内圧クリープ試験機及び被覆管高温強度試験機の 4 種の新たな強度試験機及び密度測定装置等のPIE 機器を製作・設置した。

#### 3.2 試験性能の向上

急速加熱バースト試験はLOF時の被覆管温度履歴の1次ピークを模擬した試験である。この試験技術に対しては、これまでの試験機能に加えて設計側の評価上のニーズあるいは材料挙動評価の観点から、

- ・破裂挙動と延性の関係の解明
- ・熱過渡時の被覆管形状安定性の評価
- ・被覆管の太径化への対応
- ・高応力条件下における破裂挙動評価
- ・破裂温度測定の高精度化

等の要求が高まってきた。そこでこれらに対応することを目的として、急速加熱バースト試験技術の高度化に取り組んだ。具体的な改良目標として、

- ・外径変化データの取得
- ・高応力試験の実現
- ・測温技術の高度化

を設定した。新型の試験機は、従来の急速加熱バースト試験（圧力一定、温度上昇）に加えて、バースト試験（温度一定、圧力上昇）及びクリープ試験（温度、圧力共に一定）の試験モードを可能とした「被覆管高温強度試験機」として新規に開発し、セル内に設置した。試験機の仕様を表3.1に示す。また試験機の構成を図3.1に示す。

試験機性能の改良点としては、

- ・ レーザ外径測定法を適用することにより、試験片軸方向中心部 1 点について、試験中の外径変化測定を可能とした（測定精度  $\pm 3 \mu\text{m}$ ）。
- ・ 最大負荷内圧を  $350\text{kg/cm}^2$  から  $825\text{kg/cm}^2$  に増大することにより、「もんじゅ」サイズ被覆管で周応力  $519\text{MPa}$  まで試験可能とした。
- ・ 熱電対（R）を採用することにより、以前の 2 色温度計に比べて測温精度が 10 倍向上した。遠隔操作による被覆管表面への熱電対素線の溶接技術を確立した。

の 3 点である。

なお、試験機の各機能については、セル内設置前にモックアップ試験を実施し当初の目標を達成したことを確認した。さらにセル内設置後もコールド材を用いた動作確認を実施した。

## 4. 供試材

### 4.1 P N C 3 1 6 鋼

供試材は、昭和55年度及び60年度に（株）神戸製鋼所、住友金属工業（株）において製造されたPNC316燃料被覆管である。以下、各鋼種を製造年度、メーカー別に55MK、55MS、60MK、60MS（K：（株）神戸製鋼所製、S：住友金属工業（株）製）と呼ぶ。

PNC316は、316ステンレス鋼の耐スウェーリング性能を向上させる目的で、

- 1) 酸素、窒素等の不純物元素の低減
- 2) 冷間加工度の増加
- 3) 微量元素の添加

の3項目の方策をJIS規格の化学成分範囲内で取り組んだ結果、昭和55年に最適化された仕様が選定された鋼種であり、優れた高温クリープ強度と耐スウェーリング性能を有している<sup>3)</sup>。PNC316被覆管の化学成分の基本仕様を表4.1に示す。また、最終製管仕上げ時の冷間加工度は20%である。

### 4.2 試験対象集合体及び照射条件

本試験の供試材は、高速実験炉「常陽」で照射された。以下に集合体及び照射条件を示す。

#### 1) P F C 0 3 0 M (以下C3M)

C3Mは「もんじゅ」燃料の高燃焼度確証試験を目的として、「もんじゅ」燃料とほぼ同一仕様の特殊燃料要素を用いて、「もんじゅ」の最高燃焼度13万MWd/tと同等の燃焼度に到達させた照射試験集合体である。「常陽」MK-II第9サイクルから第23サイクルにて照射され、装荷位置は、3E1、2D2（第21サイクルから）である。100MW相当日数（EFPD）は844.986日である。

照射実績を以下に示す。

- ①最高燃焼度 : 121,600MWd/t
- ②ポイント最大中性子照射量 :  $18.13 \times 10^{26} \text{ n/m}^2$  ( $E > 0.1 \text{ MeV}$ )
- ③ポイント最大線出力 : 346W/cm

なお、被覆管の公称寸法は外径6.5mm、内径5.56mm、肉厚0.47mmである。

## 2) PFD304

PFD304は、「常陽」MK-II炉心燃料集合体として第13サイクルから第19サイクルまで装荷位置3C1において照射された。100MW相当日数(EFPD)は421.17日である。

照射実績を以下に示す。

- ①最高燃焼度 : 79,800MWd/t
- ②ポイント最大中性子照射量 :  $8.93 \times 10^{26} \text{ n/m}^2$  ( $E > 0.1 \text{ MeV}$ )
- ③ポイント最大線出力 : 316W/cm

なお、被覆管の公称寸法は外径5.5mm、内径4.8mm、肉厚0.35mmである。

両集合体の燃料被覆管について、急速加熱バースト試験を実施した。表4.2、4.3に試験に供した各試験片の照射条件を示す。ここで照射条件は、試験片軸方向中心位置を評価位置として、燃料材料開発部照射情報システムから求めた。

## 4.3 試料調整

「常陽」から取り出された集合体は照射燃料集合体試験施設(FMF)に搬入され、各受け入れ検査、解体等の後、各試験に供する試料が切断され、キャスク輸送によりMMFに移送された。

強度試験片については、第2照射材料試験施設(以下MMF-2)のNo.1セルにおいて、脱ミート装置を用いて燃料ペレットの除去を行った。燃料除去後の被覆管試験片は、試験片内面の気密保持と試験機への装着のために、スウェジロックチューブ継ぎ手の締め付けを実施した。これらの試料調整に際しては、セル内雰囲気を不活性ガス(窒素)に置換し、酸素及び水分濃度を200ppm以下に管理した。これは、被覆管内面に残った核分裂生成物(FP)が空気中の水分と反応して被覆管に応力腐食割れ等による強度低下を起こすことを防止するためである。

なお、PFD304の一部の試験片については、強度に及ぼす試料調整雰囲気の影響を確認するために、空気雰囲気中で試料調整を行った。

## 5. 試験方法

### 5.1 急速加熱バースト試験片

被覆管試験片長さは約80mmであり、その上下端に中子を挿入し前項に述べたチューブ継ぎ手を締め付けた。急速加熱バースト試験では試験内圧を試験片下側から導入するため、試験片下側に装着する中子とチューブ継ぎ手には孔が開いているが、試験開始までの気密保持のために、アルミ箔とシールテープを重ねたラップチュアディスクが入っている。試験片の概略図を図5.1に示す。

### 5.2 急速加熱バースト試験方法

急速加熱バースト試験は、被覆管試験片に一定内圧を負荷した後、所定の一定加熱速度で試験片を加熱し、試験片の破裂温度等を測定する試験である。試験条件としては周応力（内圧）と加熱速度を設定する。また加圧媒体には高純度アルゴンガスを使用した。

試験手順としては、はじめに高圧ガス導入配管系を真空排気した後に高圧アルゴンガスを導入して、試験片に所定の内圧を負荷する。この時、気密保持用のラップチュアディスクが破られる。次に、初期設定温度450°Cまで予備加熱を行い、ここから設定加熱速度で自動加熱し試験を開始した。本試験での設定加熱速度は主として5°C/sとし、一部は100°C/sで試験した。

周応力条件としては、49~294MPaの範囲で設定した。温度計測は、試験片表面にスポット溶接したR熱電対で行った。また、試験片軸方向中心部1点について、レーザ外径測定器により試験中の外径変化を測定した。

なお、試験中は試験片の酸化を防止するため、試験片全体をベルジャで覆い真空排気 (~0.05Torr) した。

## 6. 試験結果

C3M及びPFD304の急速加熱バースト試験条件及び結果を表6.1、6.2に示す。また、試験前後の試験片外観写真を写真1、2に示す。なお、周応力294MPaの試験は今回の試験機（高圧ガス製造設備を含む）の更新により可能となった。

### 6.1 各周応力での破裂温度

本試験結果を、破裂温度と周応力の関係で整理して図6.1に示す。破裂温度は周応力の増加に伴って低下しており、PFD304の方がC3Mに比べて高周応力での低下傾向が大きかった。加熱速度100°C/sでの破裂温度は各周応力において5°C/sでの破裂温度より高くなっている、これまでの加熱速度と破裂温度の傾向と一致した。

加熱速度5°C/sの試験結果について、破裂温度と周応力の関係を図6.2に示す。図6.2には、これまでに得られたPNC316被覆管の試験結果を合わせて示した。ここで照射材（図中◇印）には材料照射材及び燃料ピン照射材があり、被覆管サイズはφ5.5、φ6.5mmがある。

本試験結果をこれまでの結果と比較すると、破裂温度は周応力49、98MPaでは非照射材、他の照射材と同等であり、破裂温度の低下は見られなかった。しかし、周応力200MPaを越える高周応力条件では、PFD304の破裂温度が低下する傾向があり、特に294MPaでは破裂温度は非照射材よりも低下した。C3Mではこのような強度低下は見られず、周応力294MPaにおいても破裂温度は非照射材とほぼ同等であった。また、本試験結果をふくめ、PNC316の破裂温度は周応力100MPa以上においてHEDLのデータの下限に対して十分上回った。

PFD304では、破裂温度に及ぼす試験片内面雰囲気による「見かけのFAE（燃料隣接効果）<sup>\*)</sup>」の有無を確認する目的で、一部の試験片について脱ミート等の試料調整を空気雰囲気で行った。これらの試験結果（図中■印）は、通常の窒素雰囲気で試料調整した試験片と比べて強度の低下は見られなかった。

<sup>\*)</sup> 被覆管内面に残った燃料中のセシウムと空気中の水分が反応してできる水酸化セシウムによる応力腐食割れが原因で強度が低下する現象とPNCでは考えている。

各試験片の破裂形態は violent であり、破裂は低周応力では試験片の膨れを伴っているが、高周応力では外観写真を見る限り、ほとんど試験片の膨れを生じないで起こっていた。破裂位置はC3M及びPFD304の低周応力条件では、軸方向ほぼ中心位置であった。しかし、周応力294MPaの高応力条件では破裂位置は軸方向中心よりずれる傾向にあった。

C3Mの加熱速度100°C/sの試験結果について、破裂温度と周応力の関係を図6.3に示す。本試験結果は、周応力294MPaでは既取得データが無いため直接の比較はできないが、これまでの照射材の傾向によく一致しており、HEDLデータの下限に対して十分余裕があった。

本試験のうちで保守的な試験条件である加熱速度5°C/sの結果を、もんじゅ設計時に用いたHEDLのデータとPNCデータ（常陽照射材10%CW-316）を基に求めた加熱速度10°C/sでの破裂温度下限値、及び瀬下らがPNC316データを基に評価した破裂温度下限値と比較して図6.4に示す。図からも分かるように、本試験結果はもんじゅ設計時の破裂温度下限値（10°C/s）を十分満足した。またPNC316データを基にした評価線についても、加熱速度5°C/sにおける破裂温度下限値に対して、本試験結果は余裕のある結果となった。

## 6.2 破裂温度の照射量及び照射温度依存性

加熱速度5°C/sの結果について、破裂温度を照射量で整理して図6.5に示す。本試験結果のC3Mは、PNC316ではこれまでの中で最も照射量が大きいデータであるが、各周応力において非照射材及び他の照射材と比較して破裂温度は同等で、今までの照射量範囲においては照射量の増大による破裂温度の低下は見られなかった。しかし、PFD304は照射量はC3Mよりも低いが高周応力条件（294MPa）で破裂温度の低下が見られた。

次に、破裂温度と照射温度の関係を図6.6に示す。本試験片の照射温度は、約400～530°Cであり、これまでの取得データ範囲内である。照射量と同様に、C3Mでは周応力49、98、196MPaにおける破裂温度は他の照射温度の照射材の結果とよく一致し、破裂温度の照射温度依存性は見られなかった。PFD304も周応力49～216MPaの範囲で破裂温度はこれまでの結果とよく一致した。周応力294MPaについては、本試験結果のみであるため他との比較はできないが、C3MとPFD304の破裂温度は絶対値のレ

ベルの違いはあるが、共に照射温度による差は見られなかった。

## 7. 考 察

### 7.1 高照射PNC316被覆管の急速加熱破裂挙動

#### 7.1.1 破裂温度に及ぼす試料調整雰囲気の影響

PFD304の本試験結果では、破裂温度に及ぼす試験片内面雰囲気の影響は現れなかつた。雰囲気による見かけのFAEについては、Shibaharaら<sup>4)</sup>はホットセル内の試験片調整雰囲気の制御が照射後試験結果に大きく影響することを示し、急速加熱バースト試験結果に関して、周応力200MPa付近でのHEDLの試験での破裂温度の低下は空気雰囲気による見かけのFAEが原因であるとしている。しかし本試験結果では、窒素及び空気雰囲気とで破裂温度には差がなかった。その一方で、周応力294MPaでは非照射材に比べて破裂温度が大きく低下したことから、雰囲気制御をした場合でも試験条件によっては特に高周応力において、F.P.の影響による液体金属脆化等のFAEやヘリウムによる脆化等が破裂挙動に影響している可能性が考えられる。

一方、C3Mでは294MPaにおいても破裂温度は低下しなかった。PFD304とC3Mでは試料調整や試験方法等で違いはないことから、PFD304で破裂温度が低下した原因については、PFD304被覆管そのものに原因があったと思われる。現時点で考えられる原因としては両者の肉厚の違いが挙げられる。C3MとPFD304の被覆管の公称肉厚はそれぞれ0.47、0.35mmである。周応力の設定に際しては肉厚は考慮されているが、被覆管内面の腐食を考えた場合は、同じ割合で腐食が進行すると仮定するととの肉厚が薄いPFD304の方が影響を受けやすいと考えられる。双方の被覆管の金相観察結果では、最大腐食量はPFD304：25  $\mu\text{m}$ 、C3M：14  $\mu\text{m}$ で PFD304の方が大きいが、内面腐食そのものはピンの炉心上部のみで観察されていることから、炉心中央部付近から取り出した本試験片について直接当てはめることはできないと思われる。しかし、周応力が大きい294MPaではこのような肉厚の差の影響が顕著になり、上述の脆化の影響が現れて、C3Mと比較して破裂温度の低下が生じたと考えられる。この試験片サイズの影響については、周応力294MPaの高応力データが本試験結果の他にないため、今後データの拡充を行って検討したい。

#### 7.1.2 破裂温度に及ぼす照射の影響

これまでの急速加熱バースト試験の結果から、照射材の破裂温度は取得データ範囲

内においては非照射材と同等で、破裂温度に及ぼす照射の影響はないと考えてきた。本試験結果では、PFD304は高周応力で破裂温度の低下があったが、C3Mは照射量は約 $17.5 \times 10^{26} \text{ n/m}^2$  ( $E > 0.1 \text{ MeV}$ ) とこれまでのPNC316の照射後試験の中で最も大きいが、いずれの周応力条件においても破裂温度は非照射材と比較して極端な低下はなく、照射による影響は現れなかった。

今後、急速加熱破断寿命の予測評価や設計線（破裂温度・周応力曲線）の合理化を検討する上では、照射による強度低下をどう見積もるかが重要である。この点を考慮すると、図6.5、図6.6に示したような、CMIRで照射した照射温度700°Cを越える試験片の高周応力条件で破裂温度が低下した結果及び本試験のPFD304で破裂温度が低下した結果をどう扱うかが問題となる。現時点ではこれらの強度低下の原因については不明であるが、破裂形態等を考慮すると、延性の低下が関係していることが示唆されることから、照射による強度低下の解明には、照射後の組織が試験結果に出やすい条件で試験することが必要であるとともに、特異破裂部の組織面からの調査や被覆管の外径変化と延性からの検討及び通常運転時や異常な熱過渡時等に想定される被覆管温度と評価に用いるデータの照射温度範囲の検討等を行う必要があると考える。

### 7.1.3 急速加熱バースト試験結果と降伏強さ、引張強さとの関係

急速加熱バースト試験で試験片が破裂した際に、その時の周応力が試験片の降伏強さや引張強さに対してどのレベルなのかは、被覆管の急速加熱破裂挙動を評価する上で重要である。そこでここでは、基準としてPNC316非照射材の引張試験結果を選んで本試験結果と比較した。図7.1には、非照射材の被覆管単軸引張試験の0.2%耐力と引張強さを Mises の相当応力の式を用いて周応力を換算して示した。これより、全体的な傾向として、低周応力条件では0.2%耐力や引張強さを越えて破裂しており、高周応力条件では降伏点付近で破裂していることが分かる。ここでC3Mの加熱速度5°C/sのG3215とG3473に着目すると、G3215は引張強さを越えて破裂しており、外径変化（伸び）も十分あるのに対し、G3473は見かけ上弾性変形内で破裂しており、外径変化も非常に小さかった。このようなひずみ制限での破裂の機構を解明することが、今後急速加熱破裂挙動を評価するうえで重要な課題であると考える。

急速加熱バースト試験では一定の加熱速度で試験するため、相対的に低周応力条件では破裂までの加熱時間が長くなり、高周応力条件では短くなる。したがって、試験

での設定応力、破裂温度及び伸び（外径変化）については、低周応力の試験では、照射後の組織が試験加熱中に十分回復するため材料の組織が照射材と非照射材とで差がなくなる結果、照射材の破裂温度が非照射材とほぼ同等となり伸びも大きくなるが、一方高周応力の試験では、加熱時間が短いために照射後の組織が十分回復できないうちに破裂にいたる結果、照射材の破裂温度が非照射材に比べて低下し、伸びも小さくなると考えている。

このように考えると、照射硬化が大きい試験片を高周応力で試験する場合が、延性に関しては最も厳しい条件となる。上述のG3473の照射温度は401°Cであるが、400°C位の照射では照射硬化が大きく延性が厳しくなることがこれまでのPNC316の照射後引張試験結果から分かっており、G3473の試験ではこのような照射後の組織の特徴が結果によく現れたといえる。

PFD304の周応力294MPaの3試験片の照射温度も412°Cと477°Cであることから、破裂温度の低下には照射硬化による延性の低下が影響していると考えられる。

#### 7.1.4 急速加熱時の外径変化

被覆管高温強度試験機では、試験中の試験片外径変化をレーザ外径測定器で軸方向1点測定することができる。そこでC3Mについて、試験片軸方向ほぼ中心位置の外径変化を測定した。加熱時の温度分布は試験片軸方向中心部が最も高くなるため、この部分で破裂が起こるとすればこの位置の外径測定結果から破裂時の外径変化を求めることができる。試験片の破断後写真を見ると、G3473とG3543Aを除けば破裂位置は軸方向中心位置なので、本試験結果は厳密ではないにしろ、試験中の外径変化を良くとらえていると考えられる。

急速加熱時の試験片の外径変化には、熱膨張による変形、弾性変形及び塑性変形が含まれているが、この中でLOF時の外径変化について分かっている成分は熱膨張による変形分のみであるという考え方から、全変形から熱膨張分を差し引いた「熱過渡ひずみ」を定義し外径変化を評価している。そこで本考察では、これにならってはじめに熱過渡ひずみを求めた。

急速加熱時の熱膨張による外径ひずみは、非照射材の試験片内面に内圧を負荷せずに試験片を急速加熱して外径測定することにより求めることができる。本試験片と同一鋼種であるPNC316の加熱速度5、100°C/sについてはこの熱膨張外径ひずみデータ

タは得られていないが、他の加熱速度条件、鋼種については幾つかデータが得られている。図7.2はPNC316の1°C/sとPNC1520の5°C/sでの急速加熱時の熱膨張外径ひずみのフィッティング曲線であるが、各条件ともほぼ同様のひずみ挙動を示している。そこでここでは、加熱速度5°C/sでの熱膨張外径ひずみデータについては55MS材の1°C/sのデータを用いることとした。このフィッティング式を以下に示す。

熱膨張外径ひずみ (%)

$$= -5.4612E\cdot 2 + 1.6096E\cdot 3 \times T + 4.3249E\cdot 7 \times T^2 + 1.7116E\cdot 11 \times T^3 \quad (T : \text{温度}^{\circ}\text{C})$$

本来、熱膨張は温度（場合によっては圧力も）に依存するので加熱速度には無関係であるが、被覆管高温強度試験機での急速加熱では試験片軸方向の温度勾配等の影響を考慮すると、5°C/sと100°C/sでは熱膨張による外径変化に差が生じる可能性があることから、ここでは本試験のうち5°C/sの結果について外径変化を評価することにした。

各試験片の全ひずみ、熱膨張分及びこれらから求めた熱過渡ひずみを図7.3に示し、4試験片の熱過渡ひずみを図7.4に示す。またこれらの計算値を表7.1に示す。各試験片とも、熱過渡ひずみは破裂間近になって増大している。もんじゅ燃料の使用末期条件7kgf/mm<sup>2</sup>に近い周応力49MPaでの、被覆管許容設計限界温度830°Cにおける熱過渡ひずみは0.15%であった。一方周応力294MPaでは、2本の試験片のうち破裂温度が低かったG3473の熱過渡ひずみは非常に小さく、破裂時で約0.2%であった。これより、破裂温度の低下が延性の低下に起因していることが示唆される。

ところで、熱過渡ひずみの中には、弾性変形と塑性変形の両方が含まれていることから、本考察では弾性変形分を計算して、急速加熱時の塑性変形を求めた。各温度における負荷内圧による弾性ひずみは、SUS316-20%CWの縦弾性係数からひずみと応力の関係式

$$\sigma = \epsilon E \quad (\sigma : \text{応力}, \epsilon : \text{ひずみ}, E : \text{縦弾性係数})$$

を用いて求めた。縦弾性係数は425~850°Cについて定義されているが、ここでは計算した弾性ひずみについてはフィッティング式を求め850°C以上の温度にも外挿した。こうして求めた各周応力での弾性ひずみと温度の関係を図7.5に示す。また、各周応力におけるフィッティング式を以下に示す。

弾性ひずみ=

$$2.5027E\cdot 4 + 6.5336E\cdot 8 \times T + 6.2840E\cdot 11 \times T^2 + 7.7917E\cdot 14 \times T^3 \quad (\text{周応力 } 49\text{MPa})$$

$$5.0054E\cdot 4 + 1.3067E\cdot 7 \times T + 1.2568E\cdot 10 \times T^2 + 1.5583E\cdot 13 \times T^3 \quad (\text{周応力 } 98\text{MPa})$$

$$1.0011E\cdot 3 + 2.6135E\cdot 7 \times T + 2.5136E\cdot 10 \times T^2 + 3.1167E\cdot 13 \times T^3 \quad (\text{周応力 } 196\text{MPa})$$

$$1.5016E\cdot 3 + 3.9202E\cdot 7 \times T + 3.7704E\cdot 10 \times T^2 + 4.6750E\cdot 13 \times T^3 \quad (\text{周応力 } 294\text{MPa})$$

(T : 温度°C)

よって塑性ひずみは、熱過渡ひずみ（全変形-熱膨張分）から上記の弾性ひずみを引いて求めた。それぞれのひずみの計算結果を表7.1に示し、各試験片の各外径ひずみと温度の関係を図7.6に示す。これより、急速加熱バースト試験における外径変化の大部分は熱膨張による変形分であり、塑性ひずみは破裂直前に急激に増加することが分かる。ここでG3473は塑性ひずみが負になっているが、この原因としては今回の評価では、熱膨張と弾性ひずみに非照射材の結果を用いていること等の影響が考えられるが、現状はっきりとした検討はできていない。4試験片のうち1本のみでこのような結果となったが、試験中の外径測定結果がこの1本だけおかしいとは考えにくいので、今後の検討課題としたい。

次に、4本の試験片の塑性ひずみと温度の関係を図7.7に示す。熱過渡ひずみの場合と同様に周応力49MPaでの塑性ひずみをみると、830°Cにおける塑性ひずみは約0.1%であった。図7.7より、周応力が大きいほど破裂直前の塑性ひずみの増加が小さくなっていることが分かる。この中で同じ周応力条件であるG3546とG3473を比較すると、破裂温度が低いG3473は塑性ひずみがほとんどなかった。破裂後の写真からも試験片の局部的な膨れはほとんどないので、したがってひずみの計算からみても、破裂温度の低下は延性の低下に起因していると考えられる。

一方、急速加熱破裂温度に関しては、スウェーリングが発生すると破裂温度が低下する<sup>4)</sup>ことが報告されている。本試験結果では各試験片のスウェーリング（外径変化率）は約0.4~0.7%であったが、スウェーリングと破裂温度低下の明確な相関は見られなかつた（図7.8）。これは、PNC316では50年度材より耐スウェーリング性が改善されていることから、この程度のスウェーリングでは強度には影響がでなかったからと考えられる。スウェーリングと破裂温度の低下については、より高照射量域で問題になるとから、今後さらにデータを拡充して検討する必要があると考える。

## 7.2 急速加熱バースト試験結果に基づく寿命評価

### 7.2.1 LMP - Life Fraction Ruleを用いた試験結果の整理手法

被覆管の寿命予測に際しては、各PIE結果を統一的に扱うことを目的として、Larson-Miller-Parameter (ラーソンミラーバラメーター : LMP) を用いて試験結果を整理した<sup>5)</sup>。

LMPは一定応力、温度条件でのクリープ破断試験結果をもとに、任意の一定応力、温度条件下での破断寿命を予測する際に良く用いられるパラメータで、

$$LMP = T \left( \log_{10} tr + C \right) \quad \dots \dots \dots \quad (1)$$

T : 絶対温度 (K)

tr : 破断時間 (h)

C : 定数

で定義される。一方、Life Fraction Ruleは

$$L(t) = \int_0^t \frac{dt}{tr(\sigma, T)} \quad \dots \dots \dots \quad (2)$$

t : 時間 (h)

tr : 応力  $\sigma$ 、温度Tにおける破損時間関数 (h)

が1になったときに破損が起こるとするものであり、これら(1)、(2)式を用いて急速加熱バースト試験結果から寿命を予測した。

応力一定と仮定し、この応力に対してLMPが一義的に定まるとして、(1)式より、

$$tr = 10^{-C} \exp(2.3LMP/T) \quad \dots \dots \dots \quad (3)$$

(2)、(3)式より、

$$L(t) = 10^C \int_0^t \exp\left(-\frac{2.3LMP}{T}\right) dt \quad \dots \dots \dots \quad (4)$$

(4)式の右辺は温度Tのみが変数であるので、従って熱過渡事象下における温度を時間の関数で表せば、 $L(t)$ が求まり  $L(t^*) = 1$  より破損寿命  $t^*$  を計算できる。

応力については、弾性率の温度変化を考慮したModified Stress  $\sigma_m$  を用いる。

$$\sigma_m = \sigma_T \frac{E_{1023}}{E_T} \quad \dots \dots \dots \quad (5)$$

$\sigma_T$  : 温度T(K)での応力

$E_{1023}$  : 温度1023Kの弾性率

$E_T$  : 温度T(K)の弾性率

ここで、弾性率は、SUS316ST及び20% CWの弾性率を用いた。なお適用範囲を越える温度については外挿して求めた。

急速加熱バースト試験時の温度は温度上昇率、初期温度及び時間から

$\dot{T}$  : 温度上昇率 (K/h)

$T_1$ ：初期温度 (K)

(4)式、(6)式及び $L(t^*)=1$ より

$$\frac{10^c}{\dot{T}} \frac{T^*}{T_1} \frac{2.3LMP}{T} \int_{T_1}^{T^*} \exp(-\frac{2.3LMP}{T}) dT = 1 \quad \dots \dots \dots \quad (7)$$

$T^*$  : 破裂温度 (K)

(7)式を整理すると

$$\frac{LMP}{T^*} + \log_{10} \frac{LMP}{T^*} = C - \log_{10} 2.3 - \log_{10} \frac{\dot{T}}{T^*} \quad \dots \dots \dots \quad (8)$$

となり、この式から急速加熱バースト試験結果からLMPを計算した。

寿命予測の具体的な進め方は、はじめに非照射材についてLMP - 応力関係式を求め、その後照射による影響を評価して照射材についてLMP - 応力関係式を決定した。

図7.9に手順の概略を示す。

### 7.2.2 試験結果の整理

非照射材の急速加熱バースト試験結果から各試験片についてLMPと応力  $\sigma_m$  を求め、非照射材のLMP -  $\sigma_m$  フィッティング式を決定した。ここでLMPの定数CはLMP -  $\sigma_m$  の関係式の残差平方和が最も小さくなる値を用いた。またフィッティング次数は3次とした。この計算結果を表7.2に示し、LMPと  $\sigma_m$  の関係を図7.10に示す。非照射材のフィッティング式は図中の実線で、

$$\begin{aligned} \text{LMP} &= T(22.35 + \log_{10} \text{tr}) \\ &= 41.55 - 38.70 \log_{10} \sigma_m + 35.41 (\log_{10} \sigma_m)^2 - 12.51 (\log_{10} \sigma_m)^3 \quad \dots \dots \dots \quad (9) \\ &\quad (\sigma_m : \text{kg/mm}^2) \end{aligned}$$

である。

実際の被覆管の内圧条件を考慮すると周応力約100MPa程度までの範囲が重要であることから、照射材の寿命評価に際しては、周応力49～147MPaまでの試験結果に限定して評価した。なおこの応力範囲では、外径ひずみ評価結果等から破裂に際して十分延性が確保されていることが確認されている。

照射材についてLMPと応力  $\sigma_m$  を計算した結果を表7.3に示す。ここでLMPの定数Cは非照射材での値22.35を用いた。照射材の評価結果を図7.10にあわせて示す。照射による影響を、同じ  $\sigma_m$  における非照射材フィッティング式からのLMPの差 ( $\Delta LMP$ )として考え、 $\Delta LMP$  と照射量との関係を図7.11に示す。照射材データは非照射材のバラツキの範囲内にほぼ入っており、照射量の増大に伴い低下することもないことから、これまでの照射量範囲内においては 明確な照射による影響はないと考えられる。従つて本評価では、図中に示したようにバラツキの下限を基に照射材のLMP -  $\sigma_m$  関係式(下限式)を決定した。この照射材下限式は

$$\begin{aligned} LMP &= T(22.35 + \log_{10} tr) \\ &= 39.04 - 38.70 \log_{10} \sigma_m + 35.41 (\log_{10} \sigma_m)^2 - 12.51 (\log_{10} \sigma_m)^3 \quad \dots \dots \dots \quad (10) \\ &\quad (\sigma_m : \text{kg/mm}^2) \end{aligned}$$

である。これを図7.10に破線で示す。

本評価には、今回取得した試験結果及び以前の取得データの双方を用いた。従つてこれらの破裂温度測定値は2色温度計と熱電対の異なる測温手法による結果が含まれている。上述したように温度精度は熱電対が10倍高いため、本来であれば破裂温度の誤差評価をする必要があるが、今回の寿命評価では破裂温度は測定値のノミナル値を用いた。今後は熱電対を用いたデータを拡充し、誤差評価を行う必要がある。

### 7.2.3 照射済PNC316被覆管の急速加熱破裂温度下限値

前項にて求めた照射材のLMP -  $\sigma_m$  下限式 ((10)式) は照射による影響が考慮されているため、これを基にして任意の温度履歴での寿命を予測することができる。本評価では、寿命予測の一例として照射済PNC316の急速加熱時の破裂温度下限値を計算した。この結果を図7.12に示す。本照射量範囲における温度上昇率5°C/s及び10°C/sの破裂温度下限値 - 周応力曲線はそれぞれ

$$\text{温度上昇率 } 5^\circ\text{C/s} : \sigma = 2641.4 - 4.8186T + 2.2149 \times 10^{-3}T^2$$

$$\text{温度上昇率 } 10^\circ\text{C/s} : \sigma = 2637.2 - 4.7271T + 2.1349 \times 10^{-3}T^2$$

( $\sigma$  : 周応力 (MPa) 、  $T$  : 破裂温度下限値 (°C) )

となった。

ここで「もんじゅ」燃料の使用末期周応力条件7 kg/mm<sup>2</sup> における破裂温度下限値を求めると、温度上昇率10°C/sでは956°Cとなり「もんじゅ」の被覆管最高温度制限

値830°Cに対して十分余裕があることから、現状の照射量範囲においてはこの合理化が可能であることが示された。また同様に実証炉設計例における燃料使用末期周応力条件 $11\text{kg/mm}^2$ では、温度上昇率 $5\text{ }^\circ\text{C/s}$ の破裂温度は889°Cとなり、現状設計例で考えられている制限値830°Cの保守性を示す結果となった。

#### 7.2.4 照射後試験結果に基づく被覆管寿命評価の課題

本評価では、急速加熱バースト試験結果のみに基づいて照射材のLMP・ $\sigma_m$ 下限式を策定した。これは任意の温度履歴に対応できるので、クリープのような長時間側の事象についても適用できるはずであるが、現状では長時間側に対する適用性は検討できていない。従って今後早急に照射後クリープ試験を実施して長時間側のデータを拡充し本下限式の適用性を評価するとともに両試験結果をあわせた検討を行う必要がある。また、照射による影響を把握するためには実際の使用末期条件までの照射材データが必要であり、より高照射試料のPIEを行っていくことが不可欠である。さらにFCCI等による被覆管の広範囲あるいは局部的な腐食、また被覆管肉厚のばらつき等の2次的な要因についても影響を考慮する必要がある。寿命予測評価に際しては、設計の保守性等を定量的に示すことが重要である。

ところで、今回の評価では想定事象として単に健全な被覆管の温度が急上昇する場合を考えたが、実際には原子炉通常運転時のクリープ寿命分数和を考慮しなければならない。すなわち、例えば燃料使用末期ではそれまでの通常運転のうちにクリープ寿命分数和を消費しているので、同じ急速加熱事象でも今回の評価結果より低い温度で破裂する場合も考えられるからである。従って寿命予測に際しては、被覆管が経験する全ての温度履歴と使用条件を考慮することが重要である。この点については、CDF評価の中で各温度履歴パターンを考慮して積分区間を設定し、 $\Sigma \Delta CDF$ を評価していく対応できると考えられる。

## 8. 結 言

LOF事象下における任意の温度履歴に対応した燃料被覆管の寿命予測を目的として、急速加熱バースト試験技術の高度化、「常陽」で照射されたPFC030M、PFD304を対象とした高照射PNC316燃料被覆管の急速加熱バースト試験及び本結果に基づいた寿命予測評価を行った結果、以下の結論を得た。

- ① 急速加熱バースト試験技術の高度化に取り組んだ結果、温度精度の向上、外径変化データ及び高応力試験データの取得を達成した。
- ② 「常陽」で照射されたPFC030M、PFD304を対象に高照射PNC316燃料被覆管の急速加熱バースト試験を行った結果、本中性子照射量範囲では、低応力条件においては破裂温度は非照射材と同等であり、破裂に際してよい延性を示した。また照射量の増大に伴う破裂温度の低下は見られなかった。一方高応力においては、破裂温度が低下する傾向が見られたが、これは外径ひずみの評価結果から延性の低下に起因していることが示された。
- ③ LMP - Life Fraction Ruleを適用することにより、熱過渡時の被覆管寿命を評価できる手法を確立した。これを用いて高照射PNC316被覆管の急速加熱時の破裂温度下限値を計算した結果、現状の照射量範囲においては、「もんじゅ」の被覆管最高温度制限値の合理化が可能であることを示した。

被覆管の寿命予測評価に関しては、前項で述べたようにいくつかの課題が残されていることから、本報の結果を踏まえて①より高照射量データの拡充、②被覆管の使用全期間を考慮に入れた寿命評価、③定量的な保守性の評価等について今後順次検討していく予定である。

## 謝 辞

急速加熱バースト試験をはじめとする照射後試験の実施、ならびに本報告書作成にあたり多大なるご協力を頂いた検査開発株式会社 遠藤敏明氏、重藤好克氏に深く感謝致します。また、試験結果の整理に関して貴重なご助言、ご協力を頂いた原子力システム株式会社 福本俊彦氏に深く感謝致します。

## 参考文献

- 1) 高速増殖炉もんじゅ発電所原子炉設置許可申請書 添付書類（十）、1980.
- 2) 秋山 隆ら、照射後試験施設 ( $\alpha \cdot \gamma$  セル) のデコミッショニング技術、  
PNC TN9410 95-076、動燃技報No.93 別刷、1995年3月.
- 3) 高速増殖炉 (FBR) の研究開発 4. 燃料材料開発、PNC TN1340 90-001、動燃  
技報No.73、1990年3月.
- 4) Shibahara et al. : Mechanical property degradation of fast reactor fuel  
cladding during thermal transients、Effects of radiation on materials、  
16th international symposium、ASTM STP 1175、1994、p.664.
- 5) J. L. Straalsund et al. : Correlation of transient-test data with conventional  
mechanical properties data, Nucl. Technology, 25(1975), 531.

表 3. 1 被覆管高温強度試験機仕様

	被覆管高温強度試験機 (新 急速加熱バースト試験機)	旧試験機
最大内圧	81 MPa (もんじゅ型被覆管で周応力519MPaに相当)	34 MPa (同左被覆管で周応力 220MPaに相当)
加圧媒体	高純度 圧縮アルゴンガス	同左
加熱方式	直接通電加熱	同左
温度測定方式	熱電対 (R) (外径0.2mmの素線を 被覆管表面にスポット溶接)	2色温度計
試験温度範囲	300～1600°C	300～1300°C
試験雰囲気	真空 (~7 MPa)	同左
オンライン 外径測定機能	レーザ外径測定器 (試験片軸方向中心部1点測定可能)	なし
データ 計測処理	デジタル記録 (温度、内圧、外径 最小サンプリングレート20ms)	同左 (外径測定なし)

表4.1 PNC316被覆管化学成分

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Co	B	N	Cu	Ti	V
0.040~ 0.080	0.40~1.00	1.40~ 2.00	0.015~ 0.040	≤0.010	13.00~ 14.00	16.00~ 18.00	2.00~ 3.00	≤0.05	0.0020~ 0.0060	≤0.0100	≤0.20	0.05~ 0.10	≤0.20

Nb	Al	Zr	O	その他	Fe
0.05~ 0.10	≤0.050	≤0.10	≤0.0040	As≤ 0.030	bal. (wt%)

目標組成 Fe-0.05C-0.70Si-0.025P-0.0040B-0.10Ti-0.10Nb-2.5Mo-16Cr-14Ni

表 4. 2 P F C 0 3 0 M 試験片の照射条件

試験片No.	鋼種	照射条件（試験片軸方向中心位置）			備 考
		照射温度 (°C)	照射量 ( $\times 10^{26} \text{n}/\text{m}^2$ , $E > 0.1 \text{MeV}$ )	D F C B (mm)	
G 3 2 1 5	5 5 MS	4 8 1	1 7. 3	2 3 0. 0	
G 3 3 0 6	5 5 MS	5 0 4	1 7. 4	2 8 3. 0	
G 3 3 0 5	5 5 MS	4 6 9	1 7. 0	2 0 3. 0	
G 3 5 4 6	5 5 MS	4 8 6	1 7. 4	2 3 5. 0	
G 3 0 8 5	5 5 MS	4 8 9	1 6. 9	2 7 5. 0	
G 3 1 5 3	5 5 MS	4 7 9	1 6. 8	2 3 5. 0	
G 3 4 7 6	5 5 MS	5 0 1	1 7. 5	2 7 5. 0	
G 3 5 4 7 A	5 5 MS	5 1 9	1 7. 2	3 1 5. 0	
G 3 4 7 3	5 5 MS	4 0 1	1 1. 5	4 0. 0	
G 3 5 4 3 A	5 5 MS	4 0 1	1 1. 5	4 0. 0	
G 3 2 0 4 A	5 5 MK	5 2 8	1 6. 5	3 5 5. 7	

表 4. 3 P F D 3 0 4 試験片の照射条件

試験片No.	鋼種	照射条件（試験片軸方向中心位置）			備 考
		照射温度 (°C)	照射量 ( $\times 10^{26} n/m^2$ , $E > 0.1 MeV$ )	D F C B (mm)	
E 2 6 5 4 1	5 5 MK	4 1 2	7. 0	2 9 8. 8	
E 2 5 2 6	5 5 MK	4 7 4	8. 9	2 6 4. 0	
E 2 5 2 8	5 5 MK	5 2 0	7. 8	4 0 4. 0	
E 2 6 2 2	5 5 MK	4 7 7	9. 2	2 6 4. 0	
E 2 7 7 2	5 5 MK	4 7 7	9. 2	2 6 4. 0	
E 2 8 7 2	5 5 MK	4 7 7	9. 2	2 6 4. 0	
E 2 8 8 2	5 5 MK	4 7 7	9. 2	2 6 4. 0	

表6. 1 PFC030Mの急速加熱バースト試験結果

試験片No	照射後 外径 <sup>1)</sup> mm	スウェーリング (外径変 化率 <sup>2)</sup> %)	試験条件				試験結果			備考
			内圧 kg/cm <sup>2</sup>	周応力 MPa	初期温度 °C	加熱速度 °C/s	破裂温度 °C	破断形態	破裂時外径 ひずみ <sup>3)</sup> %	
G 3 2 1 5	6.526	0.4000	7 8	4 9	4 5 0	5	1066.6	violent	3.413	
G 3 3 0 6	6.537	0.5692	1 5 6	9 8	4 5 0	5	984.6	violent	—	外径測定失敗
G 3 3 0 5	6.524	0.3692	3 1 2	1 9 6	4 5 0	5	852.7	violent	2.800	
G 3 5 4 6	6.534	0.5231	4 6 8	2 9 4	4 5 0	5	807.8	violent	2.338	
G 3 0 8 5	6.531	0.4769	7 8	4 9	4 5 0	1 0 0	—	violent	2.094	温度計測失敗
G 3 1 5 3	6.526	0.4000	1 5 6	9 8	4 5 0	1 0 0	1079.3	violent	2.485	
G 3 4 7 6	6.545	0.6923	3 1 2	1 9 6	4 5 0	1 0 0	923.0	violent	2.034	
G 3 5 4 7 A	6.540	0.6154	4 6 8	2 9 4	4 5 0	1 0 0	870.3	violent	2.064	
G 3 4 7 3	6.526	0.4000	4 6 8	2 9 4	4 5 0	5	771.6	violent	1.664	
G 3 5 4 3 A	6.532	0.4923	4 6 8	2 9 4	4 5 0	1 0 0	827.3	violent	1.713	
G 3 2 0 4 A	6.551	0.7846	1 5 6	9 8	4 5 0	5	—	—	—	試験未実施

1) 照射後外径は、被覆管試験セル内のレーザ外径測定装置での測定値（軸方向中心位置）

2) 照射前の外径は、6.500 mmとした。

3) 内圧負荷前外径値と破裂時外径測定値からの計算値。

表 6. 2 PFD304 の急速加熱バースト試験結果

試験片No.	試験条件				試験結果		備考 スウェジロック 締めつけ雰囲気
	内圧 kg/cm <sup>2</sup>	周応力 MPa	初期温度 °C	加熱速度 °C/s	破裂温度 °C	破断形態	
E 2 6 5 4 1	4 0 8	2 9 4	4 5 0	5	717.9	violent	窒素 <sup>1)</sup>
E 2 5 2 6	1 3 6	9 8	4 5 0	5	979.7	violent	窒素 <sup>1)</sup>
E 2 5 2 8	6 8	4 9	4 5 0	5	1070.5	violent	窒素 <sup>1)</sup>
E 2 6 2 2	6 8	4 9	4 5 0	5	1049.0	violent	空気
E 2 7 7 2	2 9 9	2 1 6	4 5 0	5	855.6	violent	空気
E 2 8 7 2	4 0 8	2 9 4	4 5 0	5	693.5	violent	窒素 <sup>1)</sup>
E 2 8 8 2	4 0 8	2 9 4	4 5 0	5	712.0	violent	空気

1) 酸素及び水分 200ppm 未満

表7. 1 外径ひずみ計算結果 (1 / 4)

試験片No : G 3 2 1 5  
 内圧負荷前外径 : 6. 5 0 4 mm  
 周応力 : 4 9 MPa

温度 (°C)	外径測定値mm	全外径ひずみ(%)	熱膨張ひずみ(%)	熱過度ひずみ(%)	弾性ひずみ(%)	塑性ひずみ(%)
425.4	6.555	0.784	0.710	0.074	0.0295	0.0449
440.5	6.557	0.815	0.740	0.075	0.0298	0.0453
453.7	6.559	0.846	0.766	0.079	0.0300	0.0493
464.0	6.560	0.861	0.787	0.074	0.0302	0.0438
475.7	6.562	0.892	0.811	0.081	0.0304	0.0506
485.9	6.563	0.907	0.832	0.076	0.0306	0.0450
493.3	6.565	0.938	0.847	0.091	0.0307	0.0605
515.2	6.567	0.969	0.892	0.077	0.0311	0.0457
525.5	6.569	0.999	0.913	0.086	0.0313	0.0549
541.6	6.571	1.030	0.947	0.083	0.0316	0.0518
556.7	6.573	1.061	0.978	0.082	0.0320	0.0505
573.8	6.575	1.092	1.015	0.077	0.0323	0.0447
582.1	6.577	1.122	1.032	0.090	0.0325	0.0576
593.8	6.578	1.138	1.057	0.081	0.0328	0.0478
604.1	6.580	1.169	1.079	0.089	0.0330	0.0562
626.6	6.583	1.215	1.128	0.087	0.0335	0.0532
648.6	6.586	1.261	1.176	0.085	0.0340	0.0507
668.6	6.590	1.322	1.220	0.102	0.0345	0.0677
690.6	6.593	1.368	1.269	0.100	0.0351	0.0644
715.0	6.597	1.430	1.324	0.106	0.0358	0.0705
741.8	6.601	1.491	1.384	0.107	0.0365	0.0705
759.4	6.605	1.553	1.425	0.128	0.0370	0.0912
792.2	6.610	1.630	1.500	0.129	0.0380	0.0913
816.1	6.614	1.691	1.556	0.135	0.0388	0.0962
849.3	6.620	1.784	1.635	0.149	0.0399	0.1088
894.7	6.630	1.937	1.744	0.193	0.0415	0.1518
940.6	6.640	2.091	1.856	0.235	0.0432	0.1915
965.5	6.650	2.245	1.918	0.327	0.0442	0.2825
996.8	6.660	2.399	1.997	0.402	0.0455	0.3565
1034.9	6.684	2.768	2.093	0.674	0.0472	0.6270
1044.6	6.691	2.875	2.118	0.757	0.0476	0.7093
1049.0	6.706	3.106	2.130	0.976	0.0478	0.9285
1054.9	6.709	3.152	2.145	1.007	0.0481	0.9591
1056.4	6.714	3.229	2.149	1.080	0.0481	1.0321
1060.3	6.716	3.260	2.159	1.101	0.0483	1.0526
1062.7	6.719	3.306	2.165	1.141	0.0484	1.0924
1066.2	6.726	3.413	2.174	1.239	0.0486	1.1908

表 7. 1 外径ひずみ計算結果 (2 / 4)

試験片No. : G 3305  
 内圧負荷前外径 : 6.501 mm  
 周応力 : 196 MPa

温度 (°C)	外径測定値mm	全外径ひずみ(%)	熱膨張ひずみ(%)	熱過度ひずみ(%)	弾性ひずみ(%)	塑性ひずみ(%)
452.2	6.569	1.046	0.763	0.283	0.120	0.163
524.5	6.580	1.215	0.911	0.304	0.125	0.179
589.0	6.590	1.369	1.047	0.322	0.131	0.191
612.9	6.595	1.446	1.098	0.348	0.133	0.215
638.3	6.600	1.523	1.153	0.369	0.135	0.234
684.7	6.610	1.677	1.256	0.421	0.140	0.281
727.7	6.620	1.830	1.352	0.478	0.144	0.334
742.4	6.625	1.907	1.386	0.522	0.146	0.376
759.0	6.627	1.938	1.424	0.514	0.148	0.366
767.7	6.631	2.000	1.444	0.556	0.149	0.407
770.6	6.632	2.015	1.450	0.565	0.149	0.415
779.5	6.634	2.046	1.471	0.575	0.151	0.424
797.5	6.640	2.138	1.513	0.625	0.153	0.473
802.4	6.643	2.184	1.524	0.660	0.153	0.507
806.8	6.645	2.215	1.535	0.681	0.154	0.527
812.2	6.647	2.246	1.547	0.699	0.155	0.544
820.0	6.650	2.292	1.566	0.726	0.156	0.571
821.0	6.652	2.323	1.568	0.755	0.156	0.599
826.8	6.655	2.369	1.582	0.787	0.157	0.631
830.8	6.657	2.400	1.591	0.809	0.157	0.652
834.2	6.660	2.446	1.599	0.847	0.157	0.689
841.0	6.664	2.507	1.615	0.892	0.158	0.734
842.5	6.667	2.553	1.619	0.935	0.159	0.776
843.9	6.671	2.615	1.622	0.993	0.159	0.834
851.3	6.679	2.738	1.640	1.098	0.160	0.939
852.7	6.683	2.800	1.643	1.157	0.160	0.997

表 7. 1 外径ひずみ計算結果 (3 / 4)

試験片No. : G 3 5 4 6  
 内圧荷重前外径 : 6. 5 4 4 mm  
 周応力 : 2 9 4 MPa

温度 (°C)	外径測定値mm	全外径ひずみ(%)	熱膨張ひずみ(%)	熱過度ひずみ(%)	弾性ひずみ(%)	塑性ひずみ(%)
450. 8	6. 606	0. 947	0. 760	0. 187	0. 1798	0. 0072
471. 3	6. 610	1. 009	0. 802	0. 207	0. 1819	0. 0248
536. 7	6. 620	1. 161	0. 936	0. 225	0. 1893	0. 0356
600. 7	6. 630	1. 314	1. 072	0. 242	0. 1974	0. 0447
651. 0	6. 640	1. 467	1. 181	0. 286	0. 2046	0. 0812
696. 5	6. 650	1. 620	1. 282	0. 338	0. 2116	0. 1262
714. 0	6. 655	1. 696	1. 321	0. 375	0. 2144	0. 1605
736. 0	6. 660	1. 773	1. 371	0. 401	0. 2181	0. 1834
749. 7	6. 665	1. 849	1. 402	0. 447	0. 2204	0. 2262
763. 9	6. 670	1. 925	1. 435	0. 490	0. 2229	0. 2675
778. 5	6. 676	2. 017	1. 469	0. 548	0. 2256	0. 3229
784. 4	6. 681	2. 094	1. 482	0. 611	0. 2267	0. 3845
786. 3	6. 683	2. 124	1. 487	0. 637	0. 2270	0. 4103
786. 8	6. 684	2. 139	1. 488	0. 651	0. 2271	0. 4244
790. 2	6. 686	2. 170	1. 496	0. 674	0. 2277	0. 4464
792. 1	6. 690	2. 231	1. 500	0. 731	0. 2281	0. 5027
797. 5	6. 693	2. 277	1. 513	0. 764	0. 2291	0. 5350
800. 9	6. 697	2. 338	1. 521	0. 817	0. 2298	0. 5875

表 7. 1 外径ひずみ計算結果 (4 / 4)

試験片No. : G 3473  
 内圧負荷前外径 : 6. 552 mm  
 周応力 : 294 MPa

温度 (°C)	外径測定値mm	全外径ひずみ(%)	熱膨張ひずみ(%)	熱過度ひずみ(%)	弾性ひずみ(%)	塑性ひずみ(%)
450. 3	6. 607	0. 839	0. 759	0. 080	0. 180	-0. 100
467. 4	6. 610	0. 885	0. 794	0. 091	0. 181	-0. 090
539. 2	6. 620	1. 038	0. 942	0. 096	0. 190	-0. 093
576. 3	6. 625	1. 114	1. 020	0. 094	0. 194	-0. 100
606. 1	6. 630	1. 190	1. 084	0. 107	0. 198	-0. 091
633. 0	6. 635	1. 267	1. 142	0. 125	0. 202	-0. 077
656. 9	6. 640	1. 343	1. 194	0. 149	0. 205	-0. 057
683. 2	6. 645	1. 419	1. 252	0. 167	0. 209	-0. 042
712. 6	6. 650	1. 496	1. 318	0. 178	0. 214	-0. 037
716. 0	6. 651	1. 511	1. 326	0. 185	0. 215	-0. 030
720. 8	6. 652	1. 526	1. 337	0. 190	0. 216	-0. 026
726. 2	6. 653	1. 542	1. 349	0. 193	0. 216	-0. 024
729. 1	6. 654	1. 557	1. 355	0. 201	0. 217	-0. 016
740. 9	6. 656	1. 587	1. 382	0. 205	0. 219	-0. 014
747. 2	6. 658	1. 618	1. 397	0. 221	0. 220	0. 001
756. 0	6. 660	1. 648	1. 417	0. 232	0. 222	0. 010
761. 4	6. 662	1. 679	1. 429	0. 250	0. 223	0. 027

表7.2 PNC316非照射材のLMP、 $\sigma_m$ 計算結果(1/5)

試験片番号	$\sigma_m$ (kgf/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_m$ (MPa)	LMP/1000
A4C553S	6.8	66.6	26.505
A4C552S	6.9	67.9	26.885
A4C551S	6.8	66.7	26.525
55MKF53	6.9	67.7	26.825
KA-2	6.8	67.1	26.665
KA-20	6.9	68.0	26.925
Z8C5K1	6.8	66.3	26.425
Z8C5K2	6.7	65.6	26.225
KA-3	7.2	70.1	26.678
KB-1	7.2	70.5	26.775
55MKF51	7.0	68.3	26.985
KA-1	6.4	63.2	26.356
KA-19	6.6	64.7	26.852
55MKF52	6.9	67.3	26.705
SA-1	6.6	64.4	26.769
KA-4	7.0	68.2	25.917
KB-2	7.2	70.5	26.533
SB-21	6.6	64.7	26.852
SA-2	6.9	67.4	26.745
SB-22	6.9	67.4	26.745
SA-3	7.1	70.0	26.639
SB-23	7.2	70.7	26.814
SA-4	7.1	69.3	26.225
SB-24	7.2	70.2	26.456
MK9386-1	6.7	65.5	27.097
MK9386-9	6.7	65.4	27.057
MK9386-13	6.5	63.8	26.572
MK9386-2	7.2	70.6	27.212
MK9386-10	7.3	71.2	27.366
MK9386-14	7.1	69.9	27.019
MS10223-1	6.6	65.0	26.955
MS10223-5	6.6	65.0	26.935
MS10223-9	6.6	64.9	26.915
MS10223-2	7.2	70.7	27.231
MS10223-6	7.0	69.1	26.808
Z883A5	6.3	62.2	25.146
MS10223-10	6.9	67.6	26.403

表7.2 PNC316非照射材のLMP、 $\sigma_m$ 計算結果(2/5)

試験片番号	$\sigma_m$ (kgf/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_m$ (MPa)	LMP/1000
Z883C5	6.7	65.4	25.378
KA-10	13.0	127.2	24.609
KB-8	12.9	126.6	24.513
Z8C5S1	13.3	130.7	24.446
Z8C5S2	13.8	135.8	25.138
55MKF101	12.7	124.3	25.146
A4C5102S	12.7	124.2	25.126
A4C5101S	12.4	121.8	24.726
55MKF103	12.9	126.6	25.505
55MKF102	12.8	125.6	25.345
A4C5103S	12.5	122.1	24.786
A4C5151K	18.3	179.5	24.367
A4C5153K	18.1	178.0	24.187
A4C5152K	18.3	179.3	24.347
A4C5151S	18.1	177.1	24.087
A4C5153S	17.6	172.9	23.589
A4C5152S	18.3	179.3	24.347
Z8C5K3	18.0	176.1	23.968
Z8C5K4	17.8	174.8	23.808
Z8C5S3	12.4	121.5	24.686
KA-6	12.5	122.6	25.361
KB-4	12.5	122.3	25.300
KA-7	12.8	125.4	25.325
KB-5	12.9	126.1	25.425
Z8C5S4	12.4	121.4	24.666
Z8C5S5	17.8	174.9	23.828
Z8C5S6	17.9	175.4	23.888
KA-5	12.4	121.2	25.488
KB-3	12.4	122.0	25.633
KA-11	22.6	221.8	23.549
KB-9	21.9	214.5	22.786
KA-15	31.3	306.6	21.633
55MKF223	25.0	245.5	22.891
55MKF222	25.0	245.1	22.851
55MKF221	25.5	250.1	23.289
KB-13	31.2	305.6	21.550
KA-12	23.0	225.5	23.110

表7.2 PNC316非照射材のLMP、 $\sigma_m$ 計算結果(3/5)

試験片番号	$\sigma_m$ (kgf/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_m$ (MPa)	LMP/1000
KB-10	23.3	228.0	23.349
KA-16	31.7	311.3	21.257
KB-14	32.0	314.0	21.456
KA-8	12.8	125.4	24.944
KB-6	13.0	127.2	25.220
KA-9	12.9	126.6	24.737
KB-7	13.1	128.6	25.048
KA-13	23.0	225.5	22.413
KB-11	22.7	223.0	22.181
SA-5	12.0	118.1	24.931
SB-25	12.4	121.2	25.488
SA-6	12.5	123.0	25.422
SB-26	12.5	122.3	25.300
SA-7	12.9	126.6	25.505
SB-27	12.8	125.4	25.325
SA-8	13.0	127.7	25.299
SB-28	13.0	127.7	25.299
SA-10	12.3	120.5	23.768
SB-29	13.0	127.5	24.873
SA-11	13.0	127.7	24.686
SB-30	13.0	127.3	24.628
MK9386-3	12.5	122.7	25.745
MK9386-7	12.5	122.9	25.785
MK9386-11	12.5	122.2	25.664
MK9386-4	12.9	126.5	25.115
MK9386-8	13.2	129.3	25.538
MK9386-12	13.3	130.1	25.653
MS10223-3	12.5	123.0	25.805
MS10223-7	12.4	121.3	25.503
MS10223-11	12.6	123.9	25.946
MS10223-4	12.8	125.9	25.019
MS10223-8	13.2	129.2	25.518
MS10223-12	13.0	127.2	25.211
Z883A10	11.6	113.7	23.289
Z883C10	12.1	118.2	23.381
A4C100101K	13.6	133.9	24.876
A4C100102K	13.6	133.7	24.857

表7.2 PNC316非照射材のLMP、 $\sigma_m$ 計算結果(4/5)

試験片番号	$\sigma_m$ (kgf/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_m$ (MPa)	LMP/1000
A4C100103K	13.8	135.1	25.045
A4C100151K	19.7	193.5	24.202
A4C100153K	19.8	194.5	24.296
A4C100152K	19.5	191.6	24.015
KB-15	30.9	303.3	20.016
KA-14	23.2	227.4	22.382
KB-12	22.9	224.4	22.113
KA-18	31.7	311.3	20.427
KA-17	32.0	314.3	20.827
KB-16	31.5	308.9	20.255
SA-12	22.5	221.0	23.466
SB-31	22.5	221.0	23.466
SA-16	31.3	306.6	21.633
SB-35	31.3	306.6	21.633
SA-13	22.9	224.7	23.030
SB-32	22.3	218.6	22.432
SA-17	31.7	311.3	21.257
SC-36	31.5	309.2	21.098
SA-14	22.9	224.7	22.335
SB-33	22.8	223.6	22.239
SA-18	30.6	299.8	19.746
SC-37	30.9	303.5	20.035
SA-15	23.4	229.3	22.554
SB-34	22.6	221.8	21.864
SA-19	31.4	307.6	20.159
SC-38	31.5	308.9	20.255
A4100152S	20.0	196.5	24.483
Z883C20	22.3	218.4	21.736
Z883A15	21.1	207.0	21.197
98221S	23.8	233.7	21.901
98223S	23.9	234.7	22.001
A4C100221K	27.8	272.7	23.454
A4C100222K	27.3	267.9	23.117
A4C100223K	27.3	268.2	23.136
A4100151S	20.5	201.2	24.914
A4100153S	20.2	198.5	24.670
A4100221S	26.1	256.1	22.239

表7.2 PNC316非照射材のLMP、 $\sigma_m$ 計算結果(5/5)

試験片番号	$\sigma_m$ (kgf/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_m$ (MPa)	LMP/1000
A4100222S	26.4	258.5	22.426
A4100223S	26.6	261.0	22.613

表7.3 PNC316照射材のLMP、 $\sigma_m$ 計算結果 (1/2)

集合体名	試験片番号	鋼種	照射温度 (°C)	照射量 ( $\times 10^{26}n/m^2$ , E>0.1MeV)	周応力 (MPa)	加熱速度 (°C/s)	破裂温度 (°C)	周応力 (kgf/mm <sup>2</sup> )	綫弾性率 (kgf/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_m$ (kgf/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_m$ (MPa)	LMP	LMP/1000	$\Delta LMP/1000$
PFC020	A4145	55MK	628.0	5.2	49	5	1070.0	5	10129.43	6.7	65.8	26284.84	26.28	-0.396
PFC020	A4164	55MK	574.0	8.0	98	5	1015.0	10	10706.85	12.7	124.6	25185.63	25.19	0.045
PFC020	A4165	55MK	606.0	6.9	147	5	973.0	15	11156.59	18.3	179.3	24346.90	24.35	0.399
PFC020	A4212	55MS	541.0	8.7	49	5	1060.0	5	10233.29	6.6	65.2	26084.90	26.08	-0.621
PFC020	A4213	55MS	580.0	8.3	98	5	980.0	10	11081.19	12.3	120.4	24486.65	24.49	-0.746
PFC020	A4214	55MS	611.0	7.1	98	5	988.0	10	10995.22	12.4	121.3	24646.38	24.65	-0.566
PFC020	A4215	55MS	629.0	5.2	147	5	953.0	15	11372.89	17.9	175.9	23947.72	23.95	-0.076
PFC020	A4225	55MK	581.0	8.1	49	5	1090.0	5	9923.36	6.9	67.2	26684.78	26.68	0.056
PFC020	A4226	55MK	609.0	7.0	49	5	1078.0	5	10046.73	6.8	66.4	26444.80	26.44	-0.215
PFC020	A4242	55MK	535.0	8.3	147	5	928.0	15	11644.82	17.5	171.8	23448.94	23.45	-0.665
PFC020	A4243	55MK	573.0	7.9	98	5	1013.0	10	10728.11	12.7	124.3	25145.67	25.15	0.000
PFC020	A4334	55MK	568.0	7.8	49	5	1081.0	5	10015.81	6.8	66.6	26504.79	26.50	-0.147
PFC020	A4382	55MK	541.0	8.8	147	5	938.0	15	11535.86	17.7	173.4	23648.42	23.65	-0.430
PFC020	A4384	55MK	612.0	7.1	147	5	976.0	15	11124.25	18.3	179.9	24406.79	24.41	0.470
Phenix P-4	ZD4B02	55MK	430.0	8.4	49	5	1058.0	5	10254.13	6.6	65.0	26044.92	26.04	-0.666
Phenix P-4	ZD4B15	55MK	620.0	5.6	49	5	1067.0	5	10160.53	6.7	65.6	26224.85	26.22	-0.463
Phenix P-4	ZD4B01	55MK	420.0	12.1	98	5	1051.0	10	10327.22	13.2	129.2	25905.00	25.91	0.864
PRC010	C5BT6	60MK	728.0	3.8	49	5	1058.0	5	10254.13	6.6	65.0	26044.92	26.04	-0.666
PRC010	C5BU7	60MS	582.0	3.8	98	5	989.0	10	10984.49	12.4	121.4	24666.34	24.67	-0.543
PRC010	C5BUF	60MS	493.0	3.2	147	5	966.0	15	11232.15	18.2	178.1	24207.17	24.21	0.232
PRC020	D9ZUA	60MS	656.0	3.6	49	5	1062.7	5	10205.20	6.7	65.3	26138.88	26.14	-0.560
PRC020	D9ZT8	60MK	708.0	3.6	98	5	980.7	10	11073.65	12.3	120.4	24500.62	24.50	-0.730
PRC030	F7BT81	60MK	549.0	14.8	49	5	1033.4	5	10512.07	6.5	63.4	25553.25	25.55	-1.222
PRC030	F7BU31	60MS	702.0	15.1	49	5	1122.3	5	9595.64	7.1	69.5	27330.97	27.33	0.785
PRC030	F7BU61	60MS	582.0	14.3	98	5	1020.7	10	10646.35	12.8	125.3	25299.50	25.30	0.174
PRC030	F7BT51	60MK	728.0	14.2	147	5	848.8	15	12513.96	16.3	159.9	21870.27	21.87	-2.504
PFC010	83668		586.0	3.7	49	5	997.0	5	10898.78	6.2	61.2	24826.10	24.83	-2.044
PFC010	83377		600.0	2.8	98	5	935.0	10	11568.52	11.8	115.3	23588.57	23.59	-1.756
PFD209	C7772		499.4	8.3	49	5	1031.0	5	10537.39	6.5	63.3	25505.29	25.51	-1.276
PFD209	C7762		399.6	5.1	98	5	1015.0	10	10706.85	12.7	124.6	25185.63	25.19	0.045

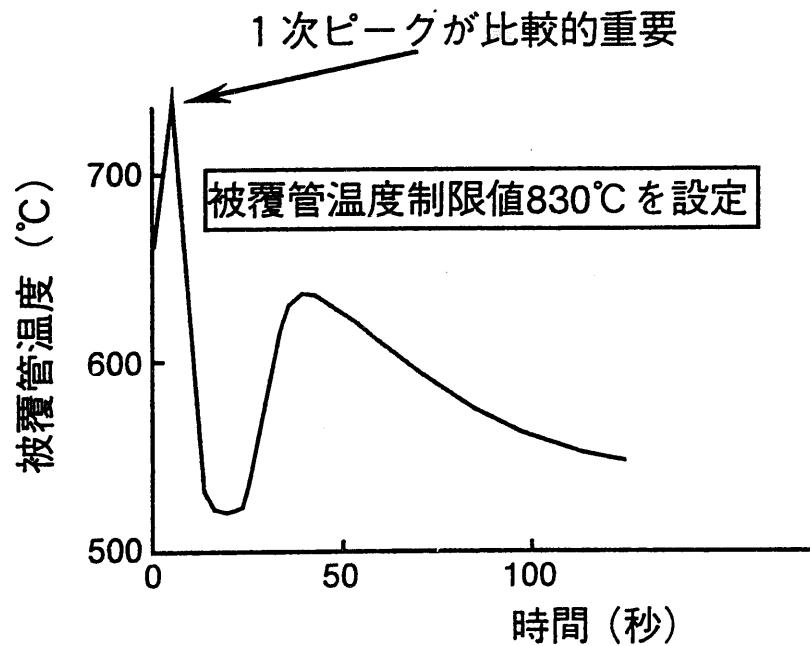
表7.3 PNC316照射材のLMP、 $\sigma_m$ 計算結果 (2/2)

集合体名	試験片番号	鋼種	照射温度 (°C)	照射量 ( $\times 10^{26} \text{n/m}^2$ , E>0.1MeV)	周応力 (MPa)	加熱速度 (°C/s)	破裂温度 (°C)	周応力 (kgf/mm <sup>2</sup> )	繊維性率 (kgf/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_m$ (kgf/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_m$ (MPa)	LMP	LMP/1000	$\Delta LMP/1000$
PFD304	E2526	55MK	474.0	12.8	98	5	979.7	10	11084.41	12.3	120.3	24480.66	24.48	-0.753
PFD304	E2528	55MK	520.0	11.1	49	5	1070.5	5	10124.25	6.7	65.9	26294.83	26.29	-0.384
PFD304	E2622	55MK	477.0	13.1	49	5	1049.0	5	10348.15	6.6	64.4	25865.02	25.87	-0.870
PFC030	G3215	55MS	481.0	17.3	49	5	1066.6	5	10164.68	6.7	65.6	26216.85	26.22	-0.472
PFC030	G3306	55MS	504.0	17.4	98	5	984.6	10	11031.73	12.3	120.9	24578.49	24.58	-0.642
PFC030	G3153	55MS	479.0	16.8	98	100	1079.3	10	10033.33	13.6	132.9	24750.68	24.75	-0.208
PFC020	A4167		626.0	4.7	78	100	1102.0	8	9800.85	11.1	108.9	25175.81	25.18	-0.313
PFC020	A4236		606.0	6.8	147	100	1027.0	15	10579.64	19.3	189.1	23771.81	23.77	0.040
PFC020	A4325		574.0	8.0	78	100	1103.0	8	9790.68	11.1	109.0	25194.55	25.19	-0.292
PFC020	A4326		606.0	6.8	98	100	1035.0	10	10495.20	13.0	127.1	23921.48	23.92	-1.164
PFC020	A4332		532.0	8.3	78	100	1103.0	8	9790.68	11.1	109.0	25194.55	25.19	-0.292
PFC020	A4335		604.0	6.7	49	100	1145.0	5	9369.43	7.3	71.2	25981.57	25.98	-0.507
PFC020	A4336		623.0	4.9	98	100	1097.0	10	9851.79	13.8	135.4	25082.16	25.08	0.177
PFC020	A4385		629.0	5.2	147	100	1023.0	15	10621.97	19.2	188.4	23696.98	23.70	-0.051
PFC020	A4405		572.0	8.1	98	100	1098.0	10	9841.59	13.8	135.5	25100.89	25.10	0.198
PFC020	A4407		607.0	6.9	98	100	1088.0	10	9943.87	13.7	134.1	24913.60	24.91	-0.019
PFC020	A4482		535.0	8.4	147	100	1012.0	15	10738.74	19.0	186.3	23491.22	23.49	-0.302
PFC020	A4484		605.0	6.8	147	100	1051.0	15	10327.22	19.8	193.7	24220.89	24.22	0.593
PFA010	98B44	55MS	450.0	3.4	98	4	946.0	10	11448.87	11.9	116.5	23923.62	23.92	-1.395
PFA010	98B4A	55MS	620.0	2.9	49	4	1017.0	5	10685.60	6.4	62.4	25347.90	25.35	-1.470
PFA010	98B52	55MK	425.0	3.0	147	80	1032.0	15	10526.83	19.4	190.1	23988.91	23.99	0.279
PFA010	98B57	55MK	600.0	2.7	49	80	1158.0	5	9241.53	7.4	72.2	26360.77	26.36	-0.094
PFC010	83373		471.0	4.2	98	20	942.0	10	11492.34	11.8	116.1	23012.79	23.01	-2.315
PFC010	83662		430.0	3.5	49	100	1125.0	5	9568.55	7.1	69.7	25606.73	25.61	-0.932
PFC010	83375		550.0	4.3	98	100	1086.0	10	9964.39	13.6	133.9	24876.14	24.88	-0.063
PRC010	C5BU4	60MS	680.0	4.0	98	100	1090.0	10	9923.36	13.7	134.4	24951.05	24.95	0.024
PFD209	C7775		544.9	4.4	49	100	1130.0	5	9518.51	7.1	70.1	25700.43	25.70	-0.826
PFD209	C7773		514.6	7.6	98	100	1048.0	10	10358.62	13.1	128.8	24164.75	24.16	-0.885

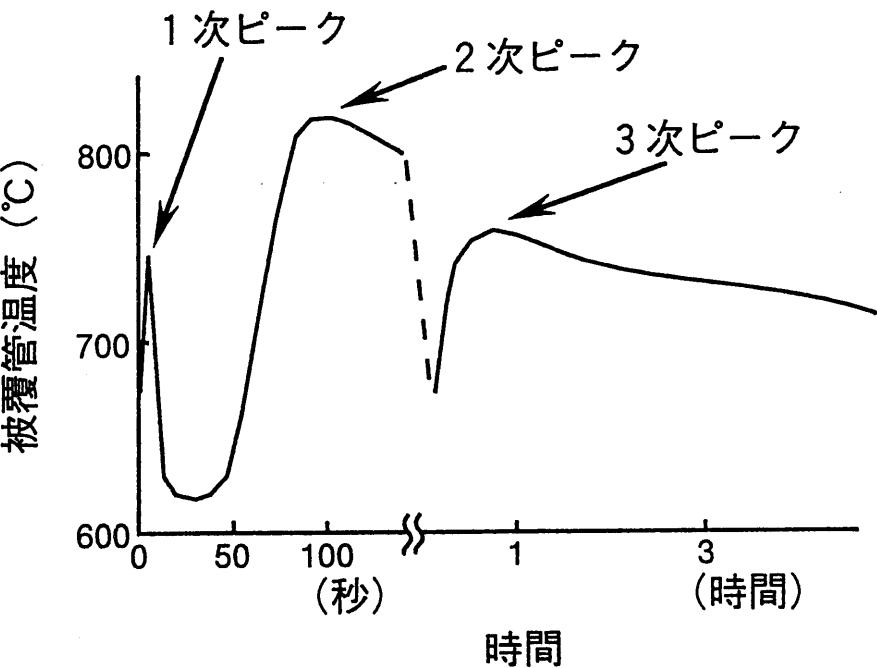
# FBR炉心の熱過渡事象

非通常時の熱過渡事象 → 反応度挿入型事象 (TOP)  
→ 冷却能力低下型事象 (LOF)

「もんじゅ」における評価



実証炉設計例（自然循環モード）



外部電源喪失時の被覆管温度変化

図2.1 FBR炉心の熱過渡事象

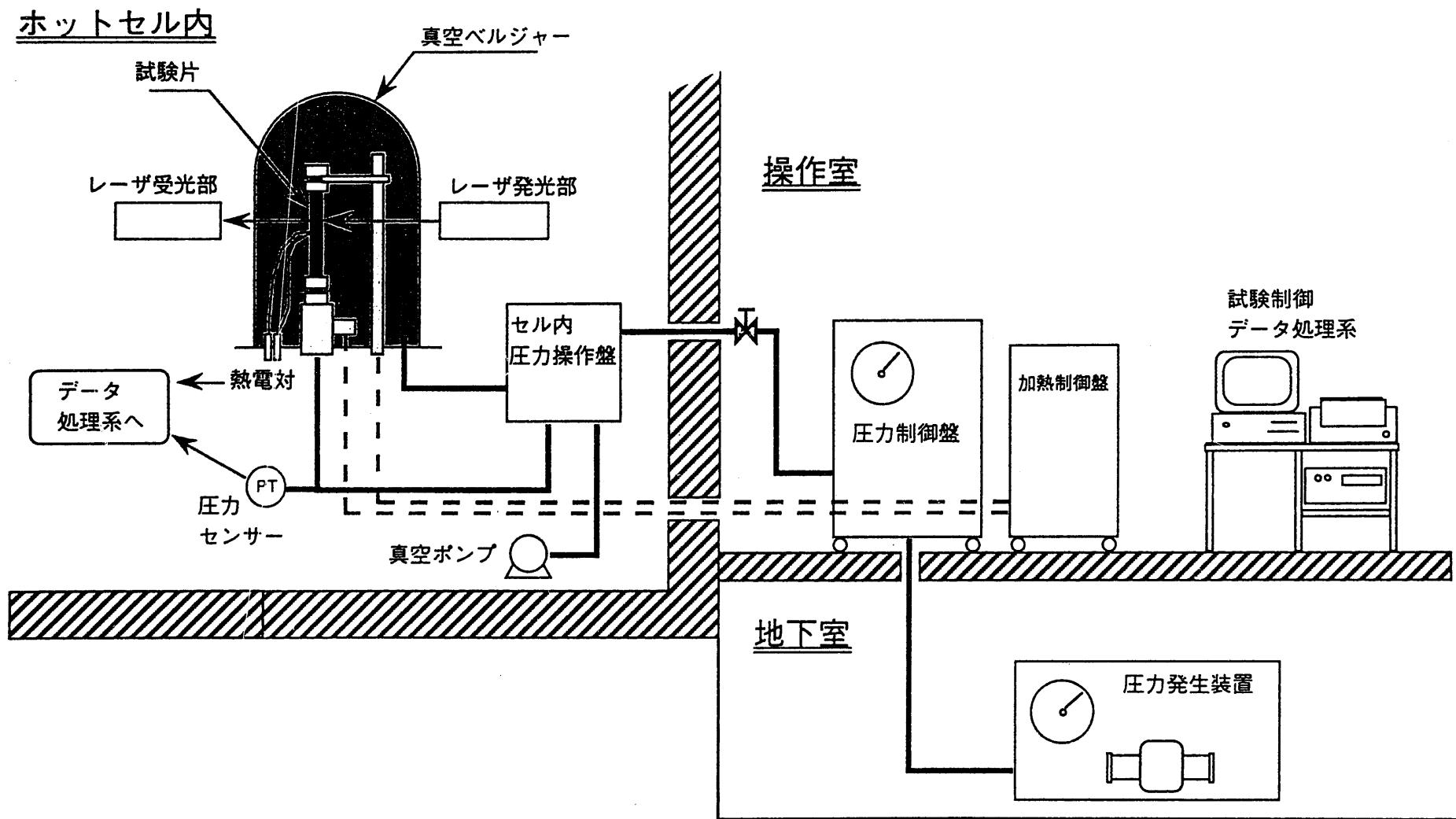


図3.1 急速加熱バースト試験機（被覆管高温強度試験機）構成図

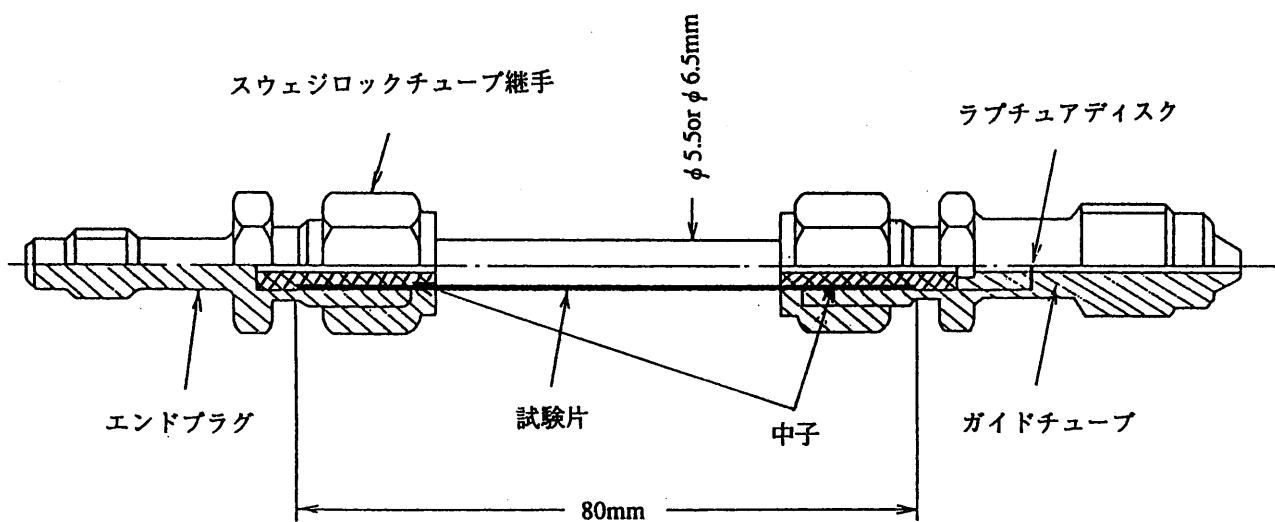


図5.1 急速加熱バースト試験片

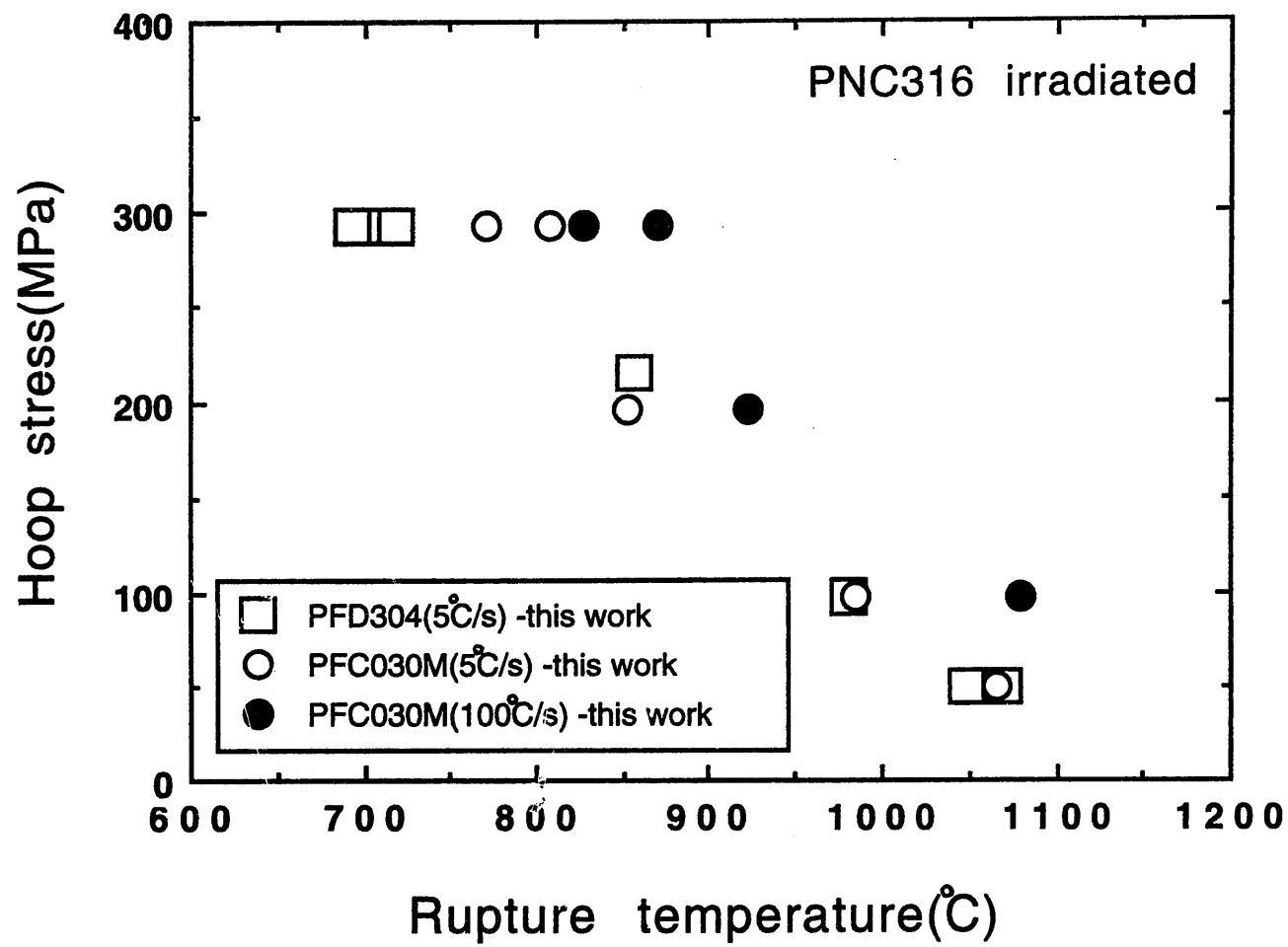


図6.1 PFC030MとPFD304の破裂温度と周応力の関係

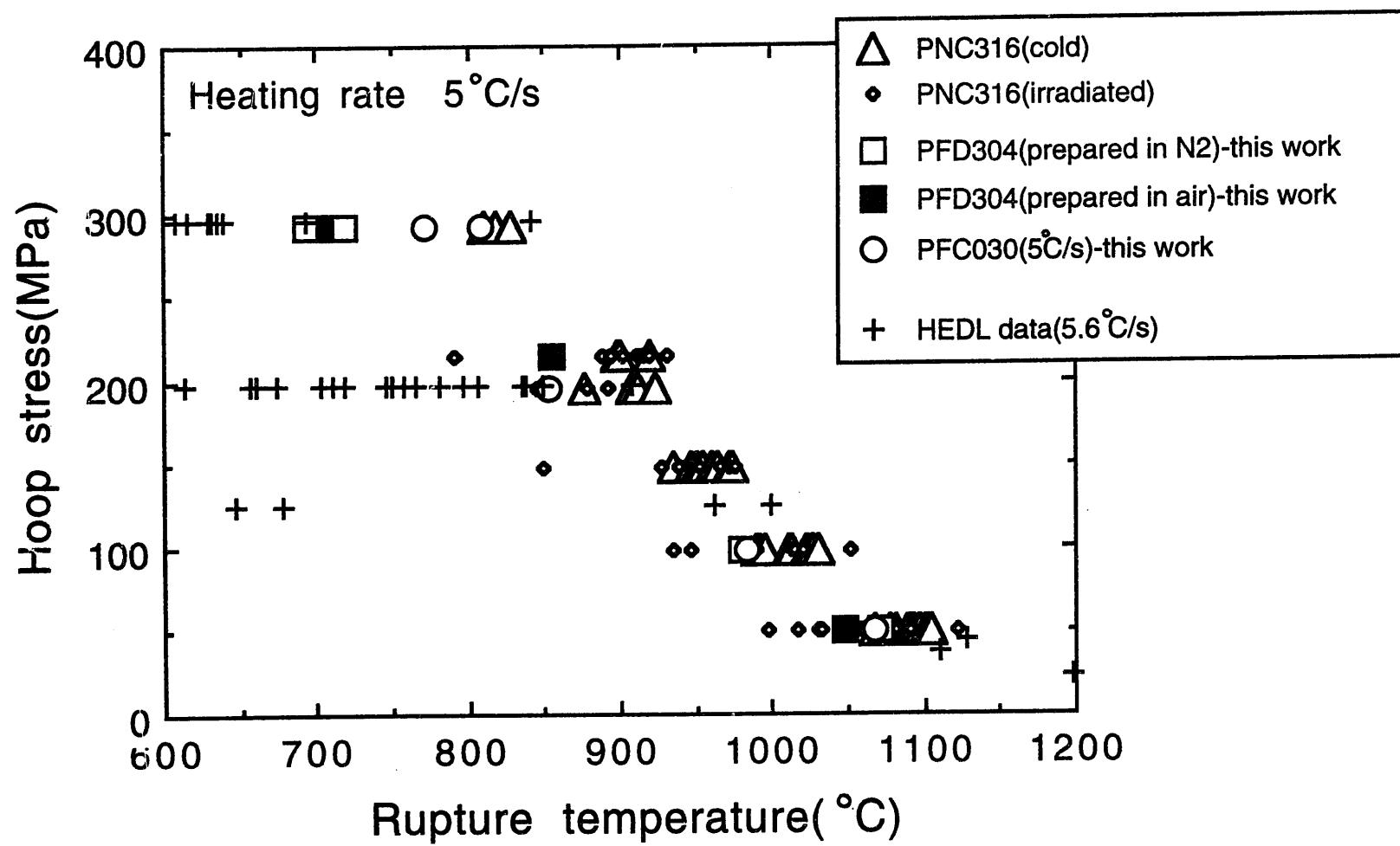


図6.2 PNC316の破裂温度と周応力の関係（加熱速度 $5\text{ }^{\circ}\text{C/s}$ ）

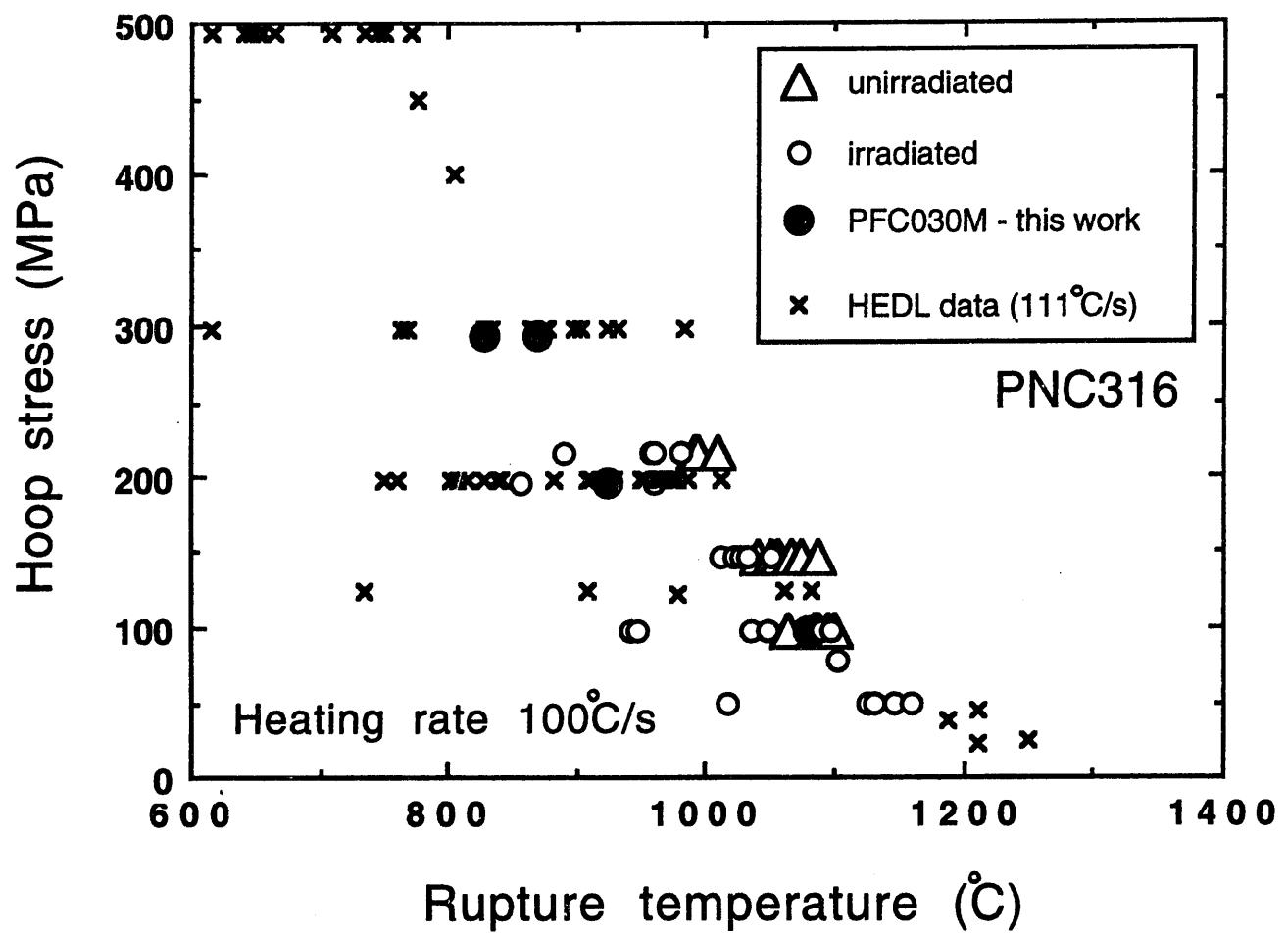


図6.3 PNC316の破裂温度と周応力の関係（加熱速度100°C/s）

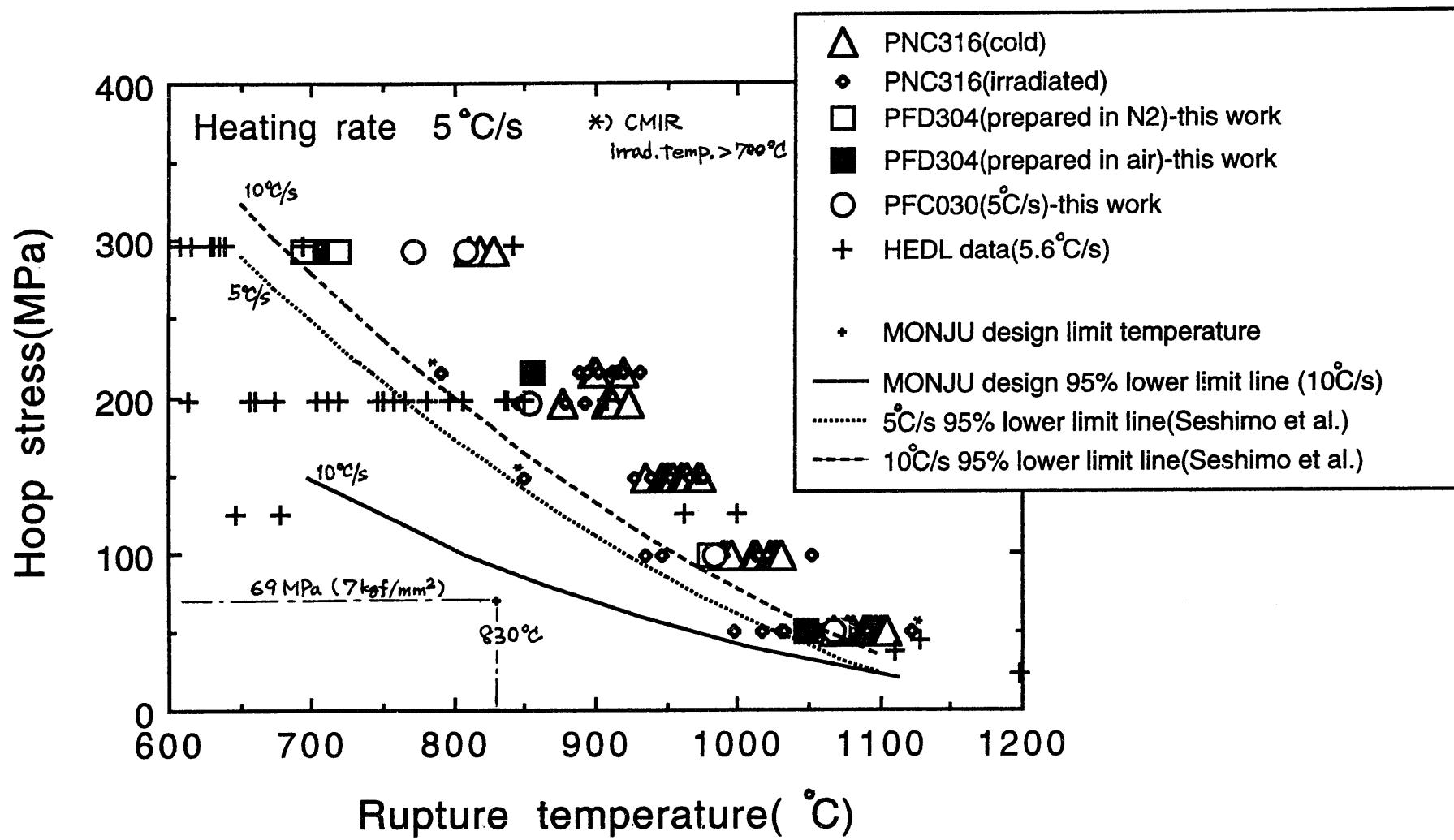


図6.4 急速加熱バースト試験結果と破裂温度評価線の比較

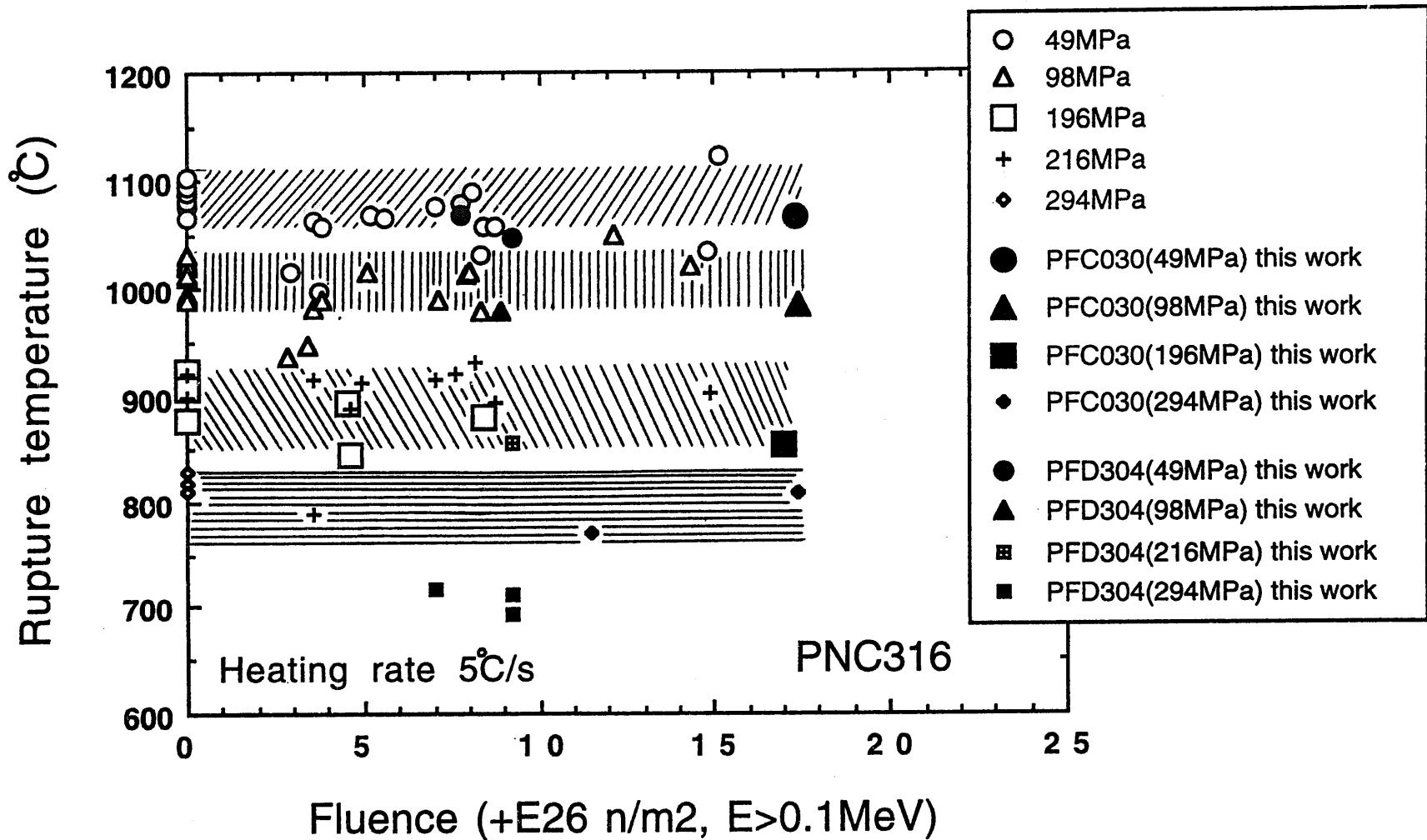


図6.5 PNC316の破裂温度と中性子照射量の関係（加熱速度 $5^\circ\text{C}/\text{s}$ ）

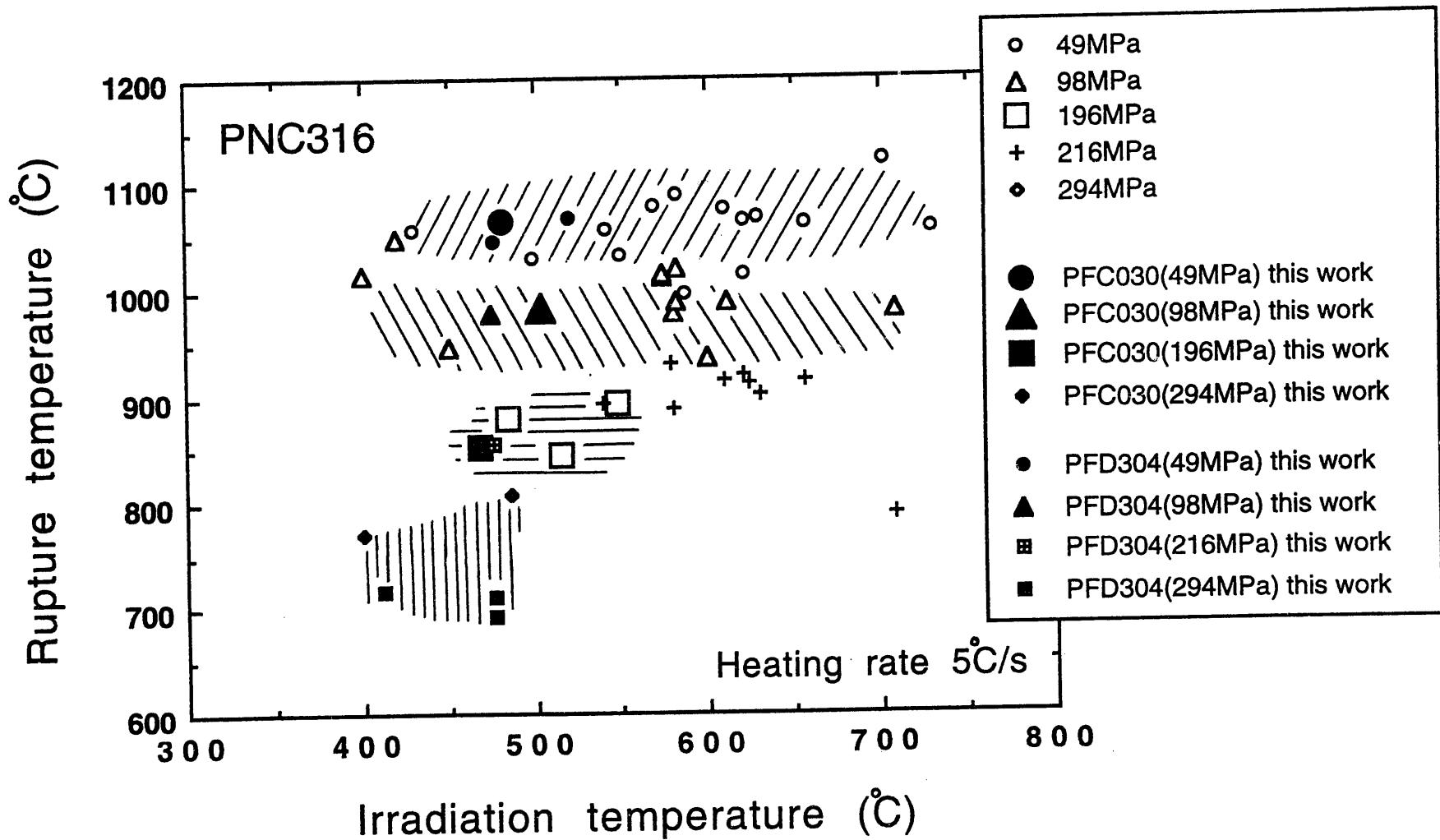


図6.6 PNC316の破裂温度と照射温度の関係（加熱速度5°C/s）

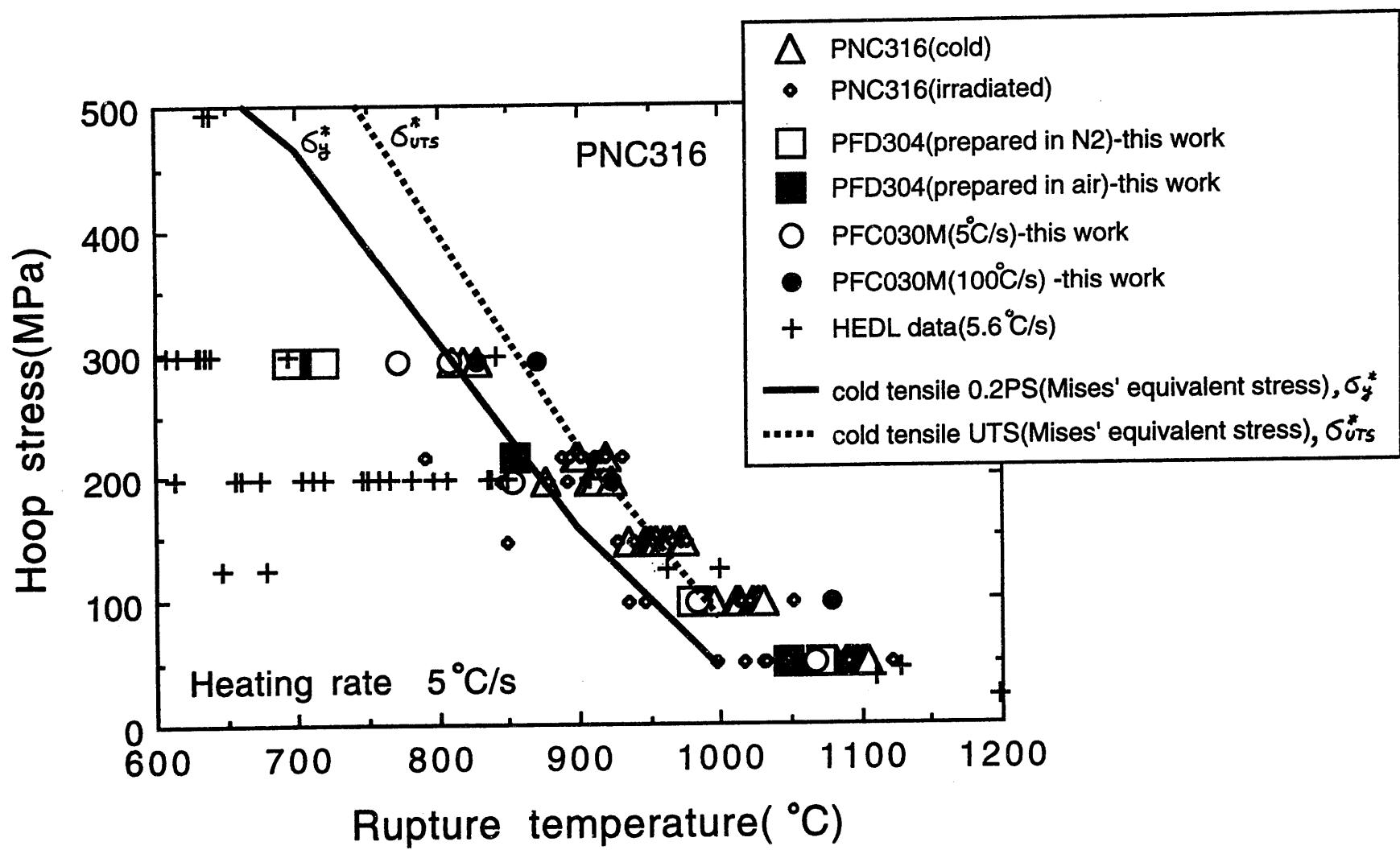


図7.1 急速加熱バースト試験結果と0.2%耐力、引張強さの関係

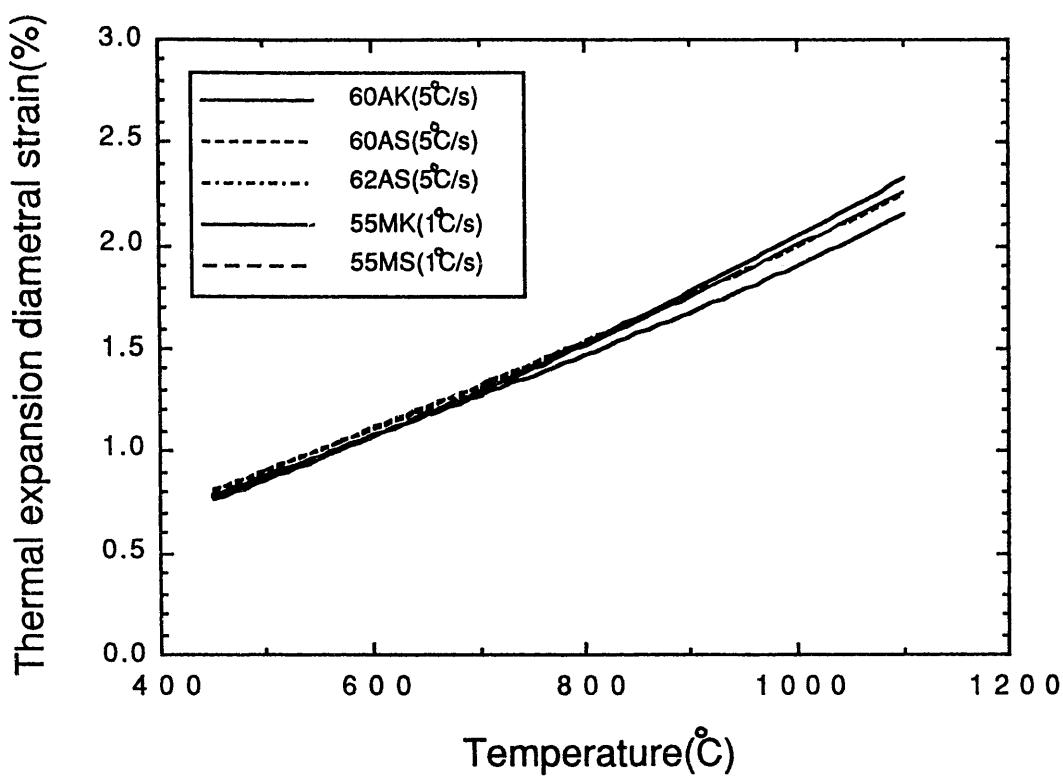
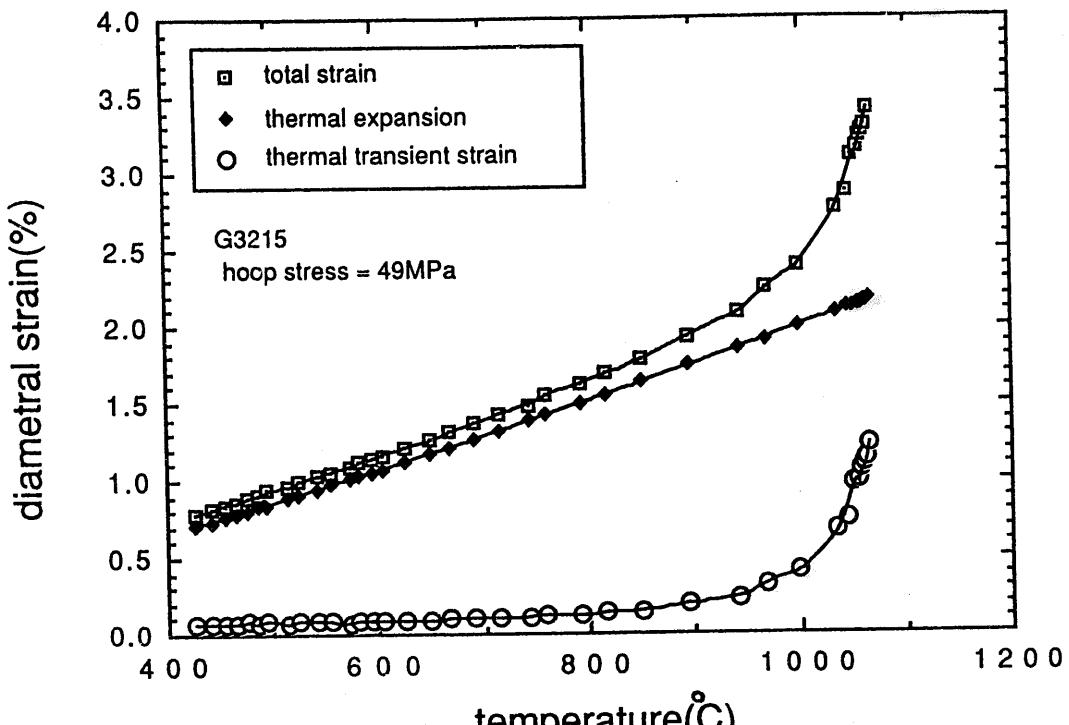
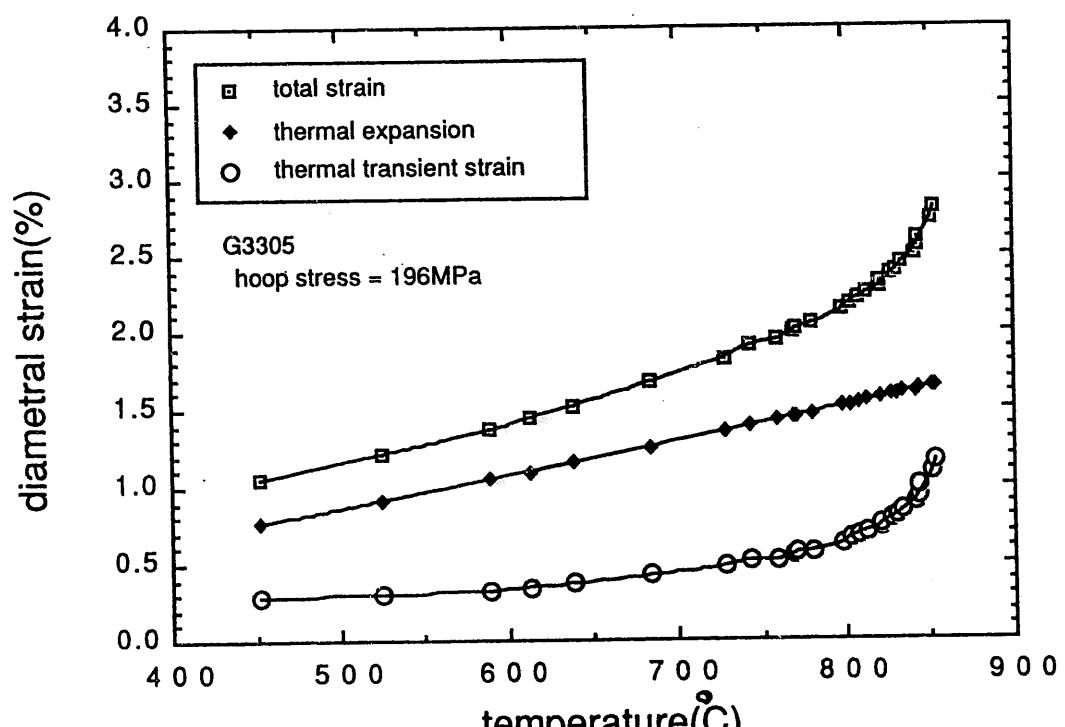


図7.2　急速加熱時の熱膨張外径ひずみ  
(内圧負荷なし、非照射)



(1) G3215



(2) G3305

図7.3 各試験片の熱過度ひずみ

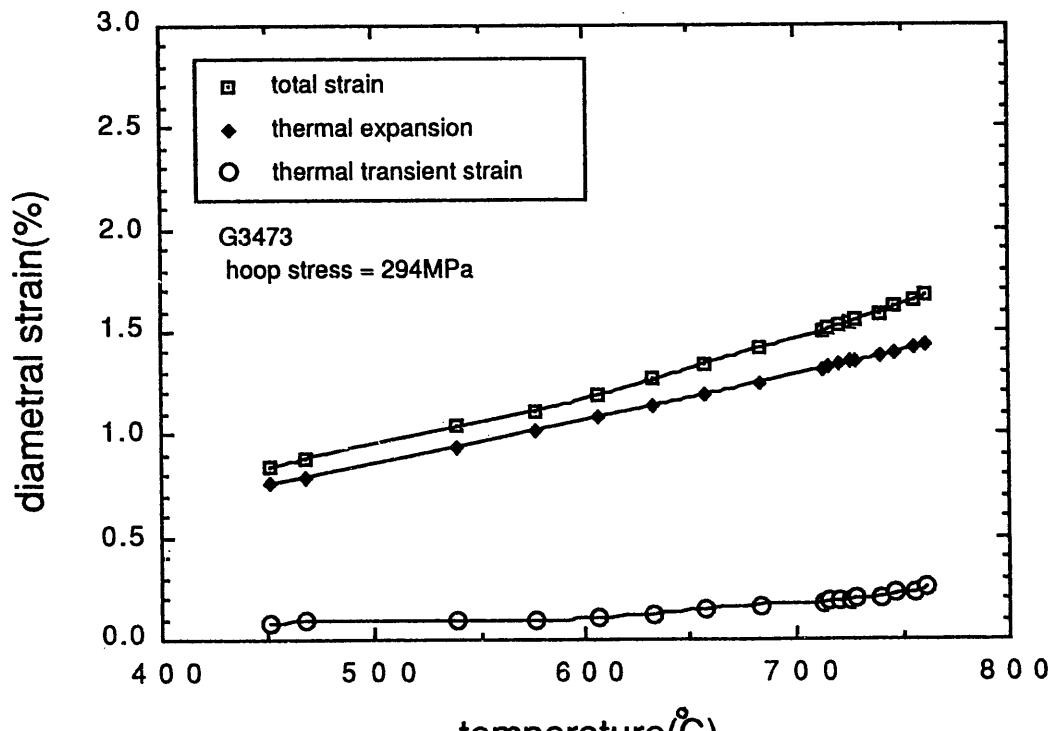
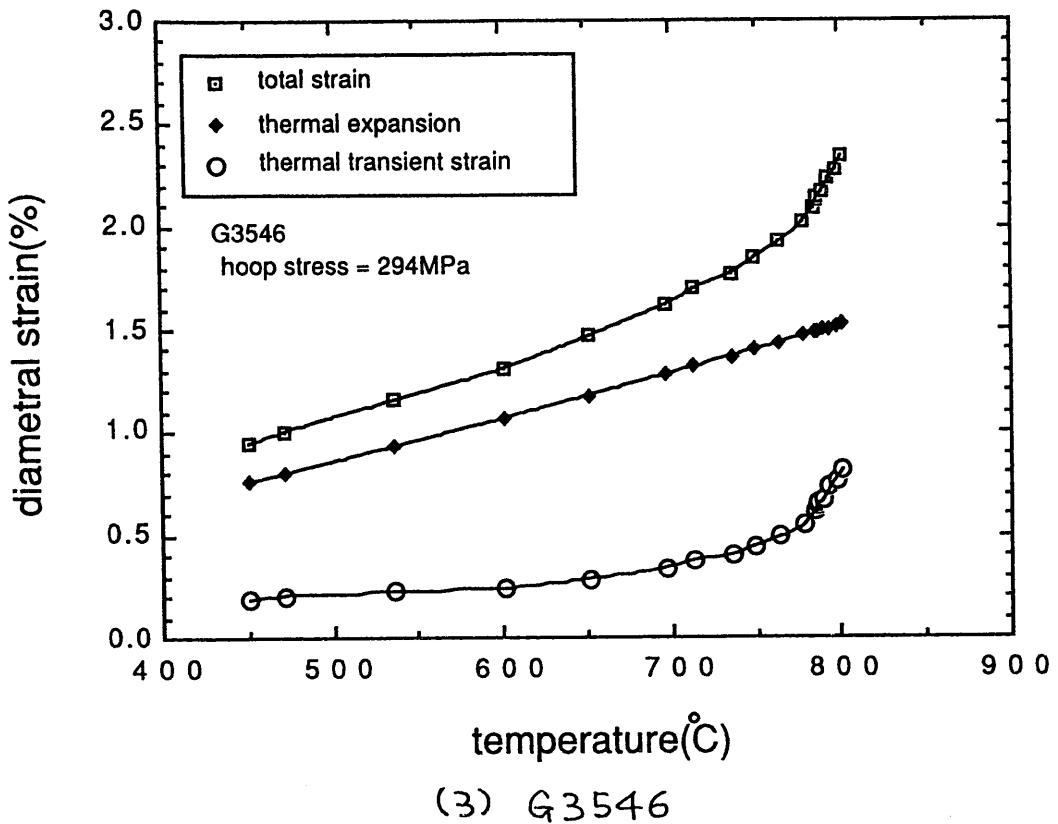


図7.3 各試験片の熱過度ひずみ

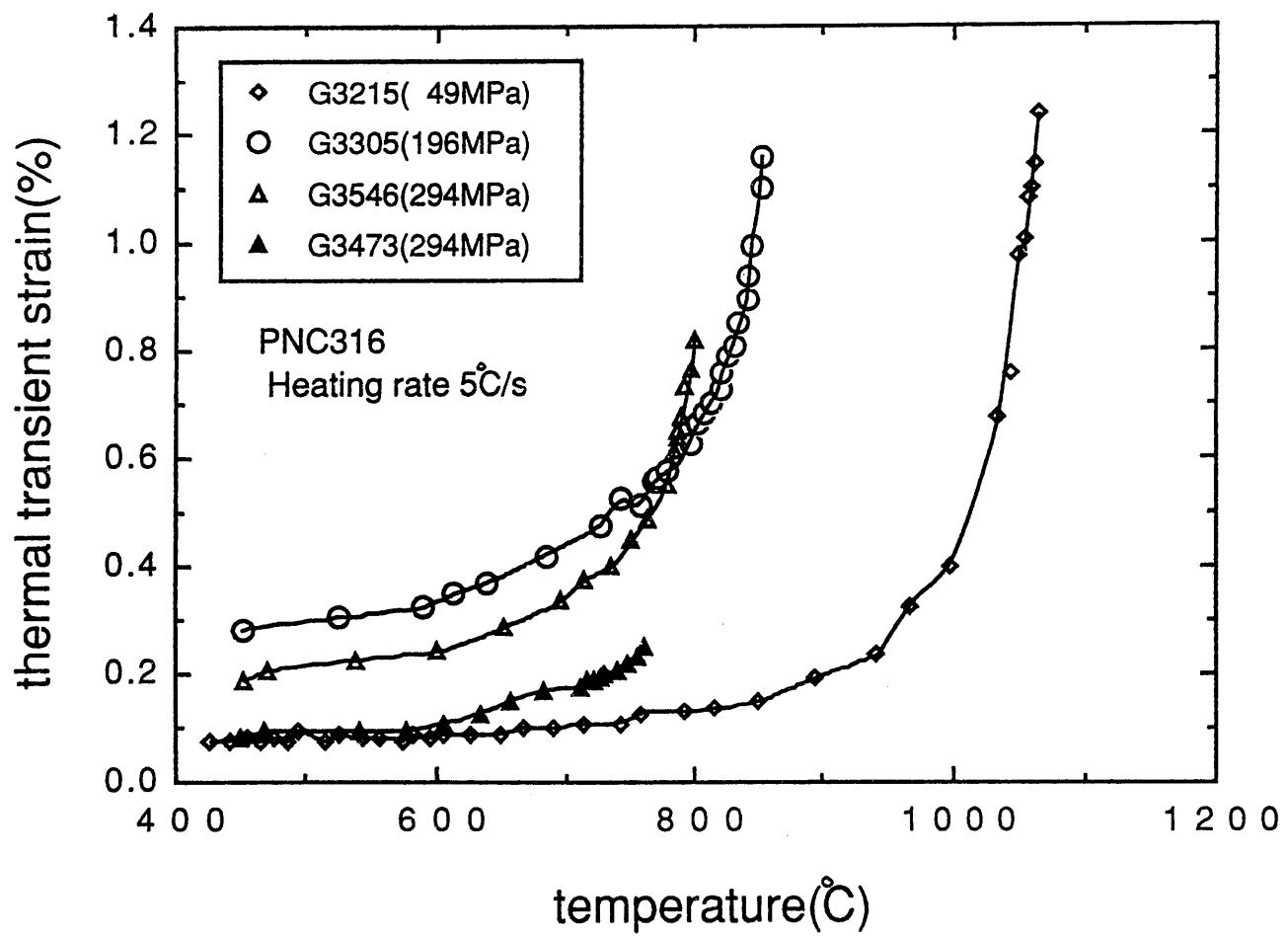


図7.4 热過度ひずみと温度の関係

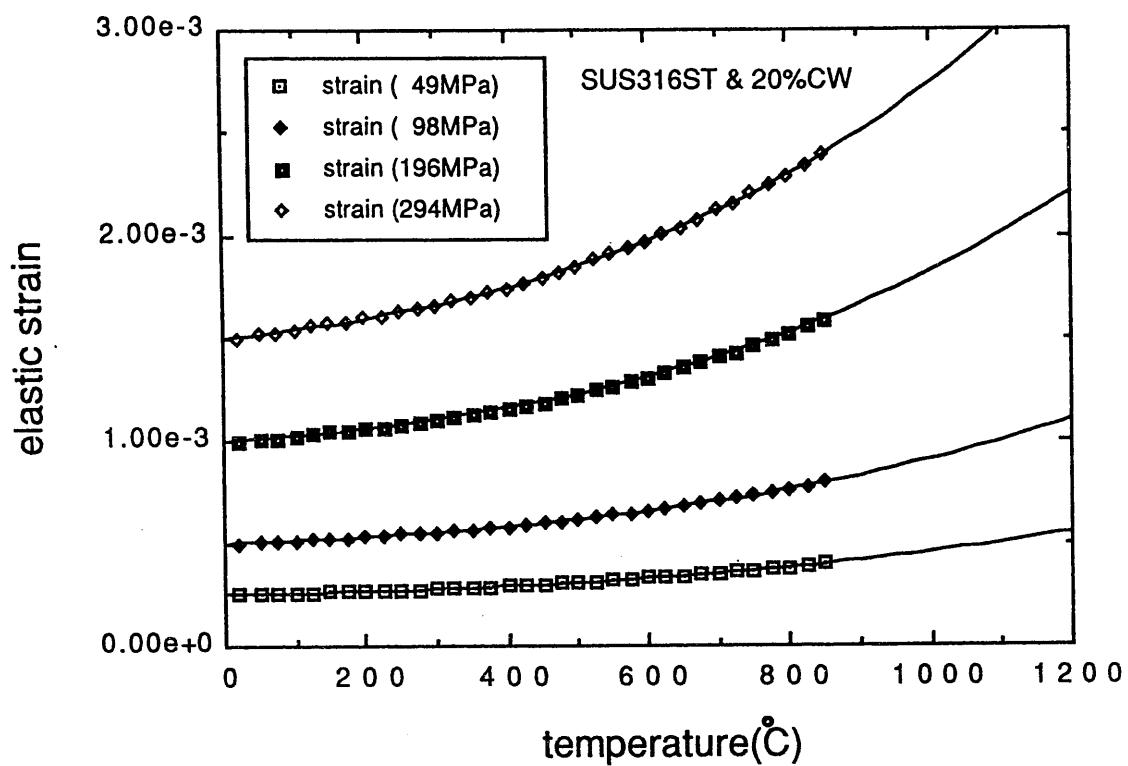
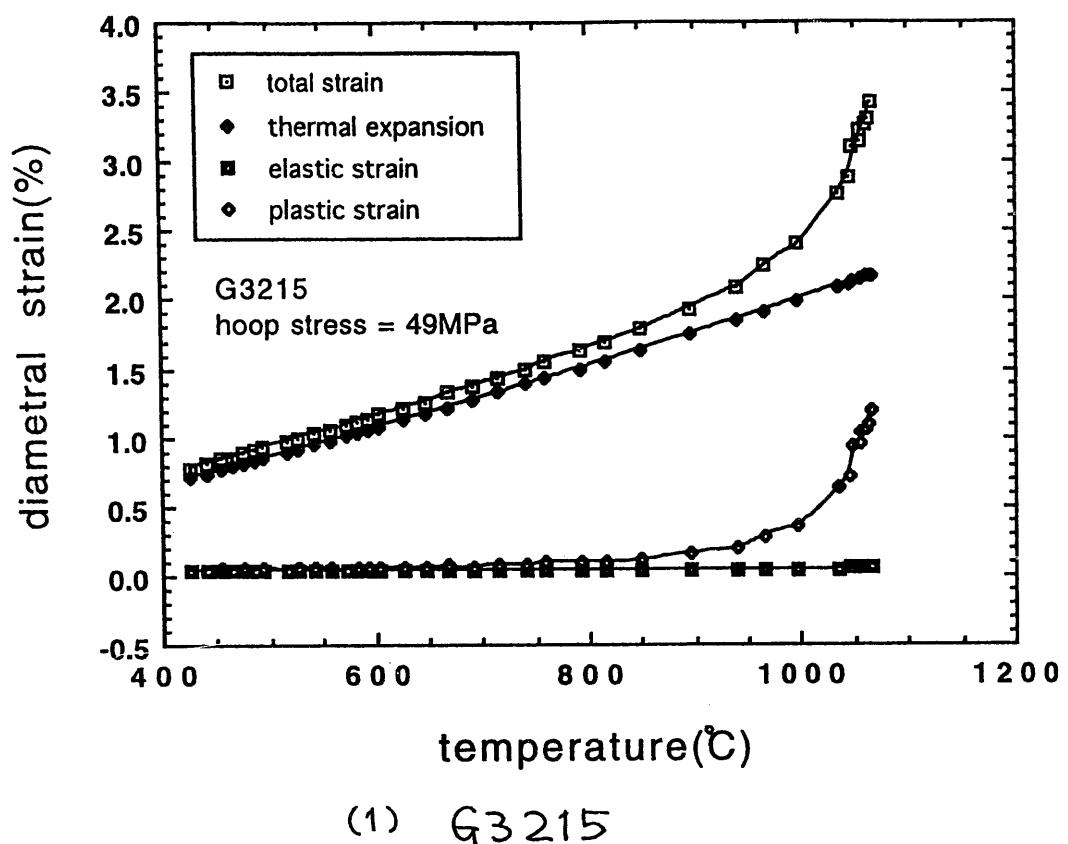
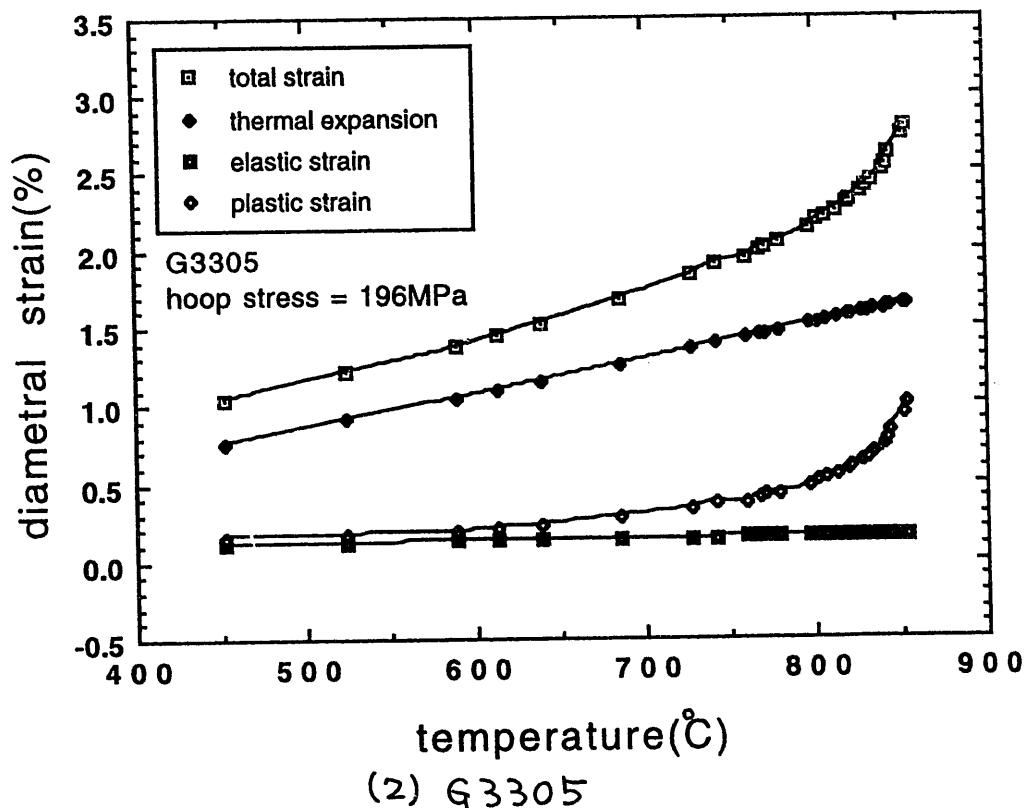


図7.5 縦弾性率から求めた各周応力での  
弾性ひずみ



(1) G3215



(2) G3305

図7.6 各試験片の外径ひずみ

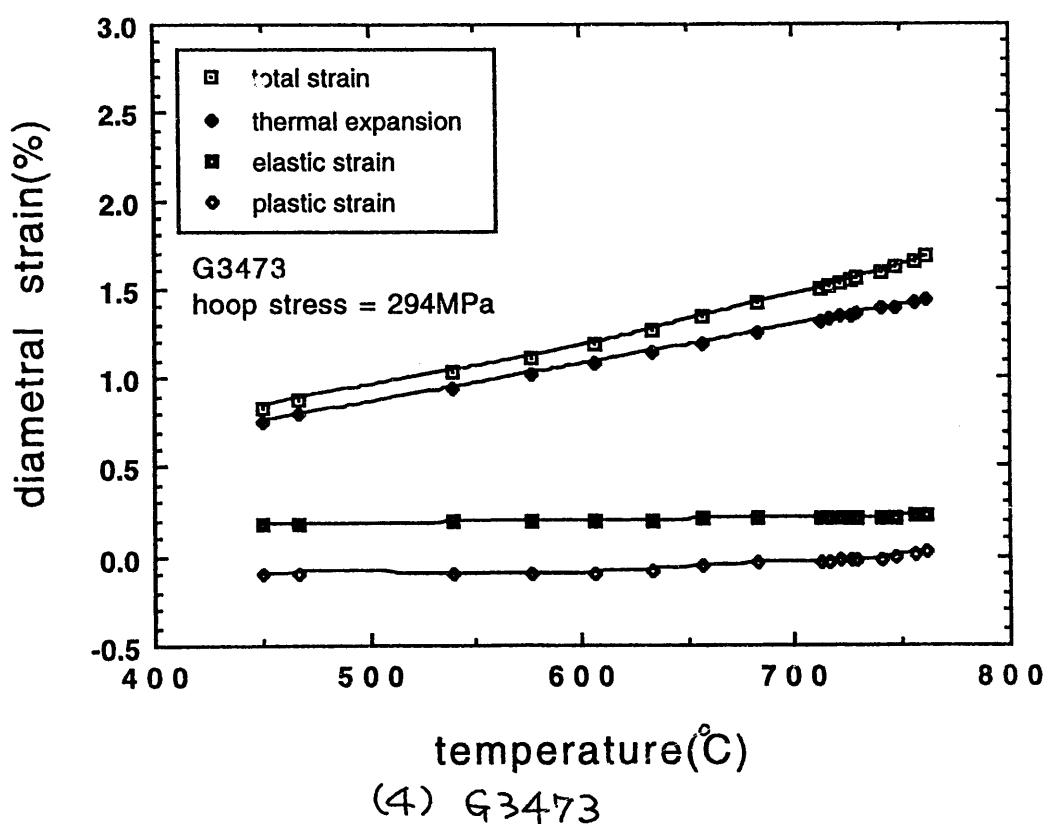
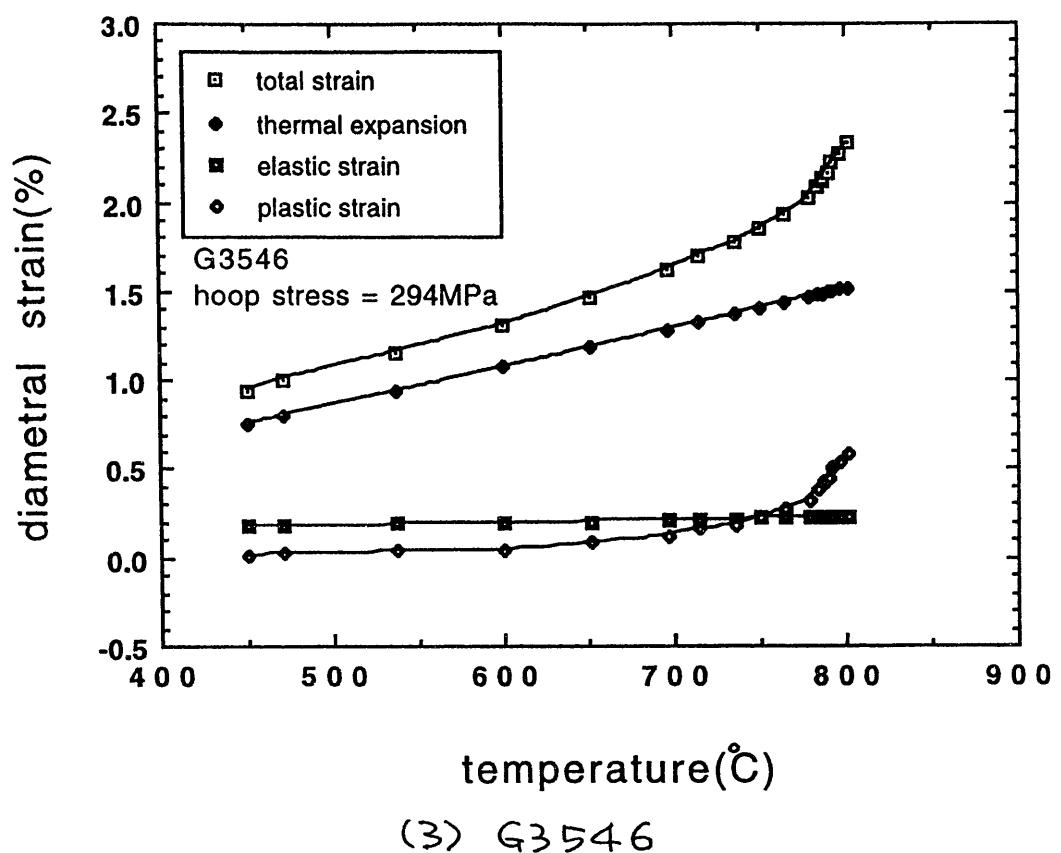


図7.6 各試験片の外径ひずみ

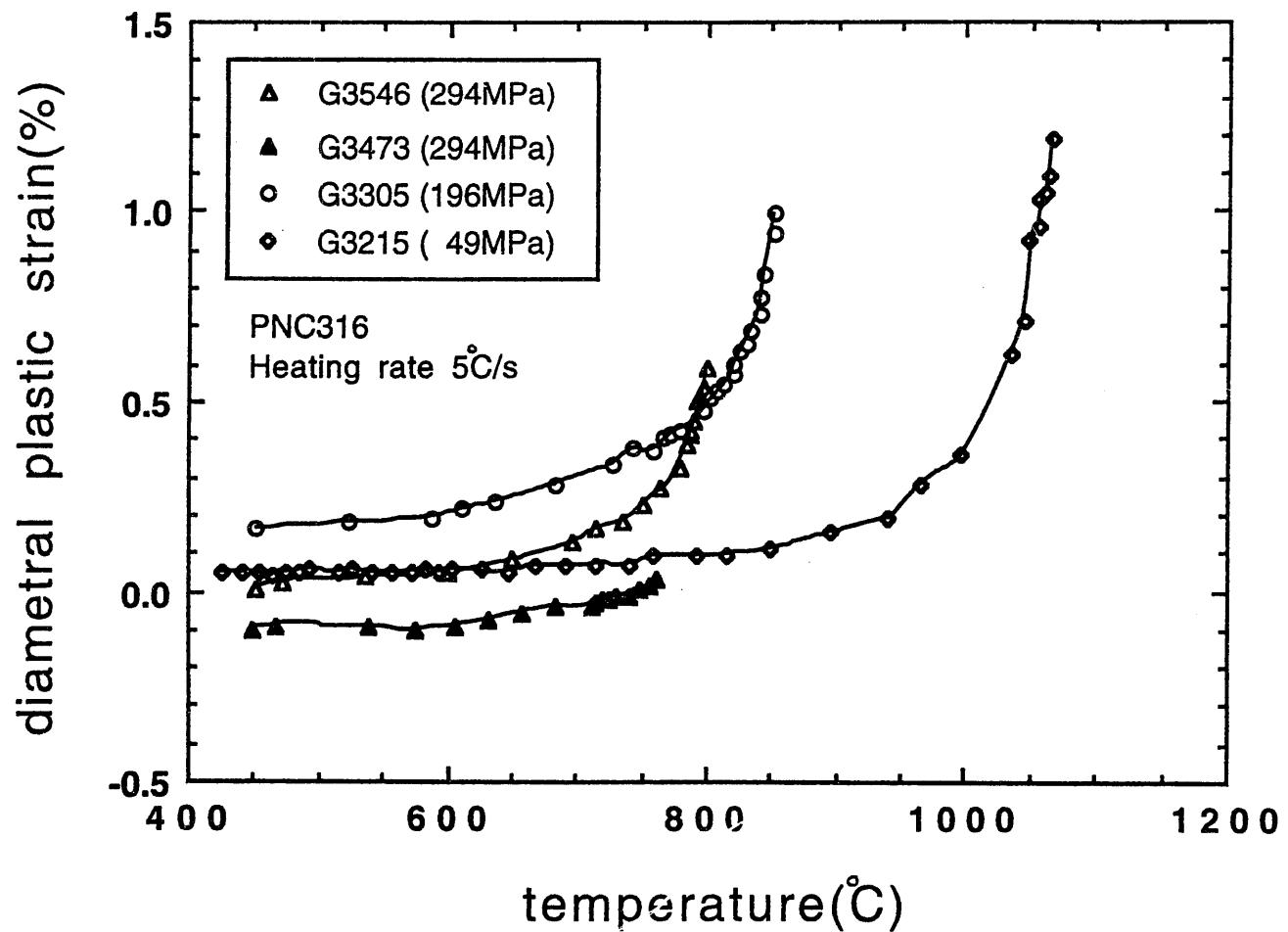


図7.7 外径塑性ひずみと温度の関係

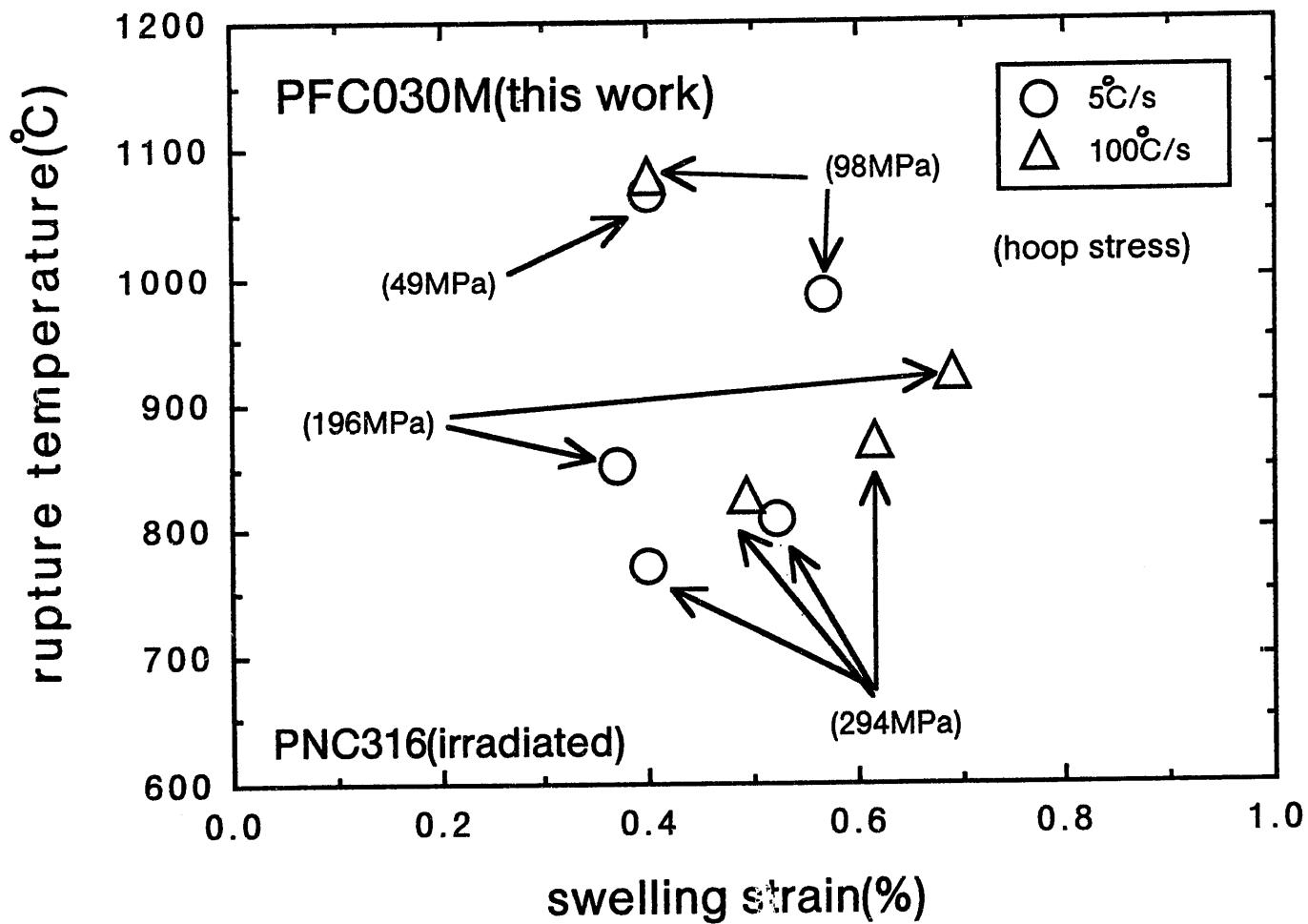


図7.8 破裂温度と外径変化率の関係

## 急速加熱バースト試験結果に基づく寿命評価

$$LMP = T(C + \log_{10} tr) \quad (T: \text{試験温度}, tr: \text{破断時間})$$

$$\text{Life Fraction Rule} \quad L(t) = \int_0^t \frac{dt}{tr(\sigma, T)} = 1$$

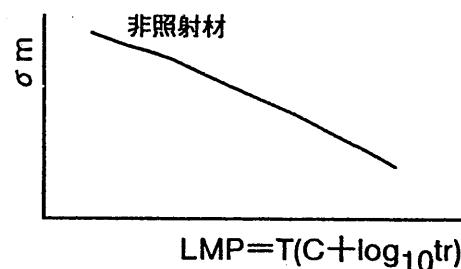
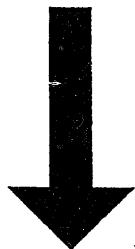
$$\rightarrow \frac{LMP}{T^*} + \log_{10} \frac{LMP}{T^*} = C - \log_{10} 2.3 - \log_{10} \frac{\dot{T}}{T^*}$$

( $T^*$ : 破裂温度、 $\dot{T}$ : 温度上昇率)

### 1) 非照射材データの整理

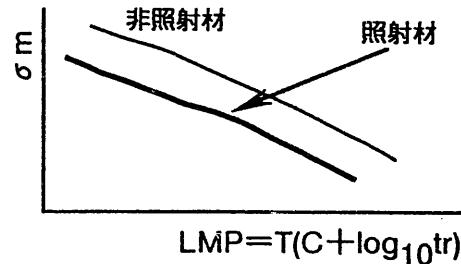
非照射材 LMP -  $\sigma_m$ 関係式を決定

( $\sigma_m$ : 弹性率の温度変化を考慮した応力)



### 2) 照射による影響評価

照射材 LMP -  $\sigma_m$ 関係式を決定



### 3) 照射材の寿命評価

照射材 LMP -  $\sigma_m$ 関係式を基に、照射材の熱過渡時の寿命を評価する。

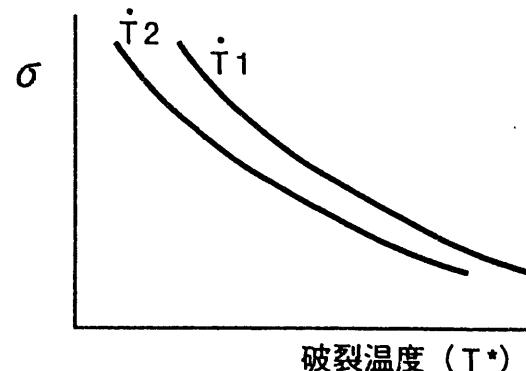
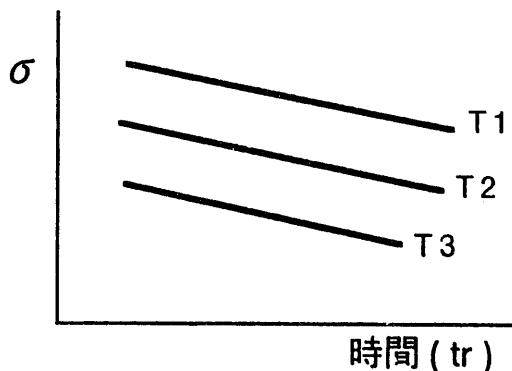
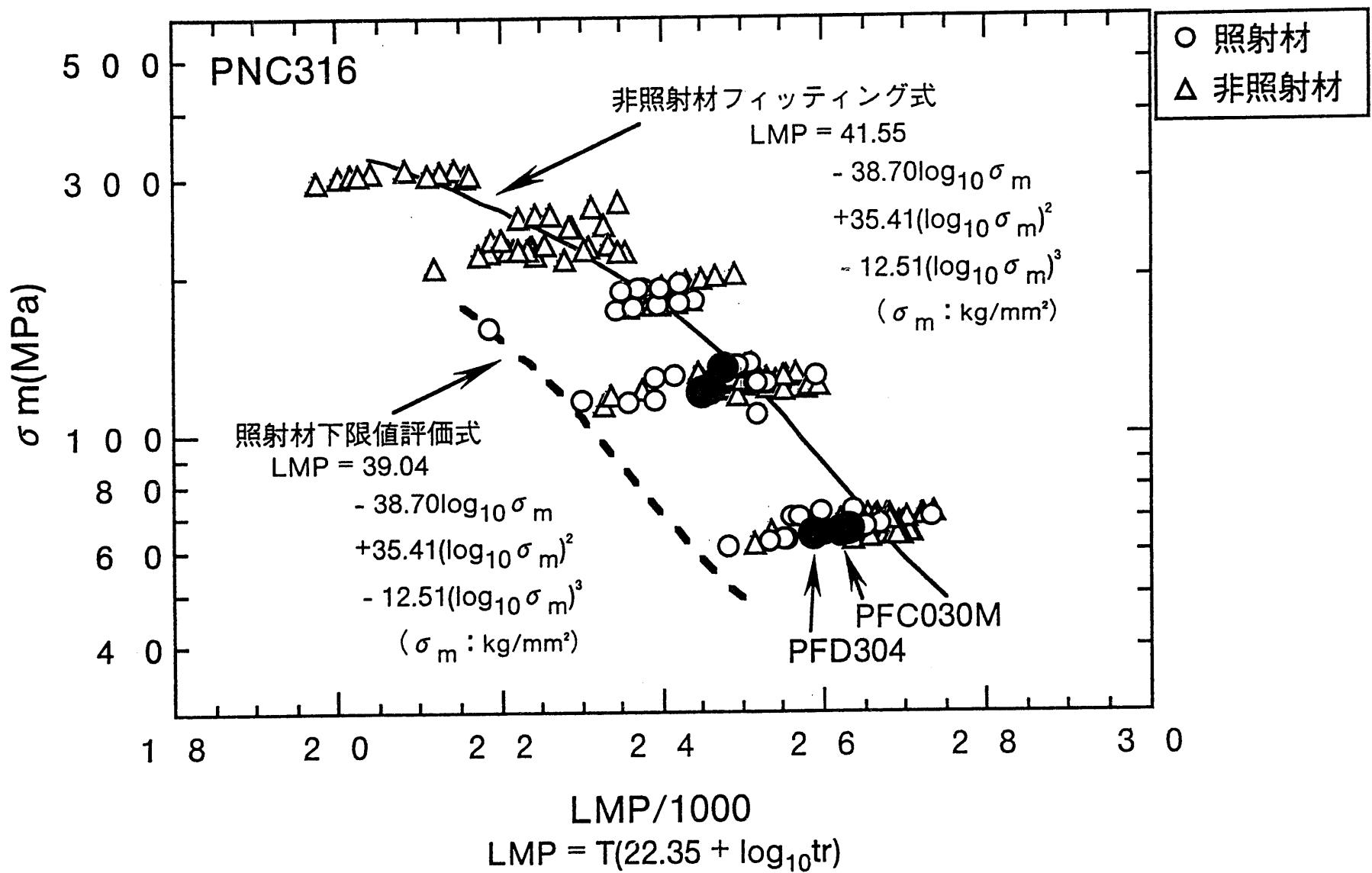
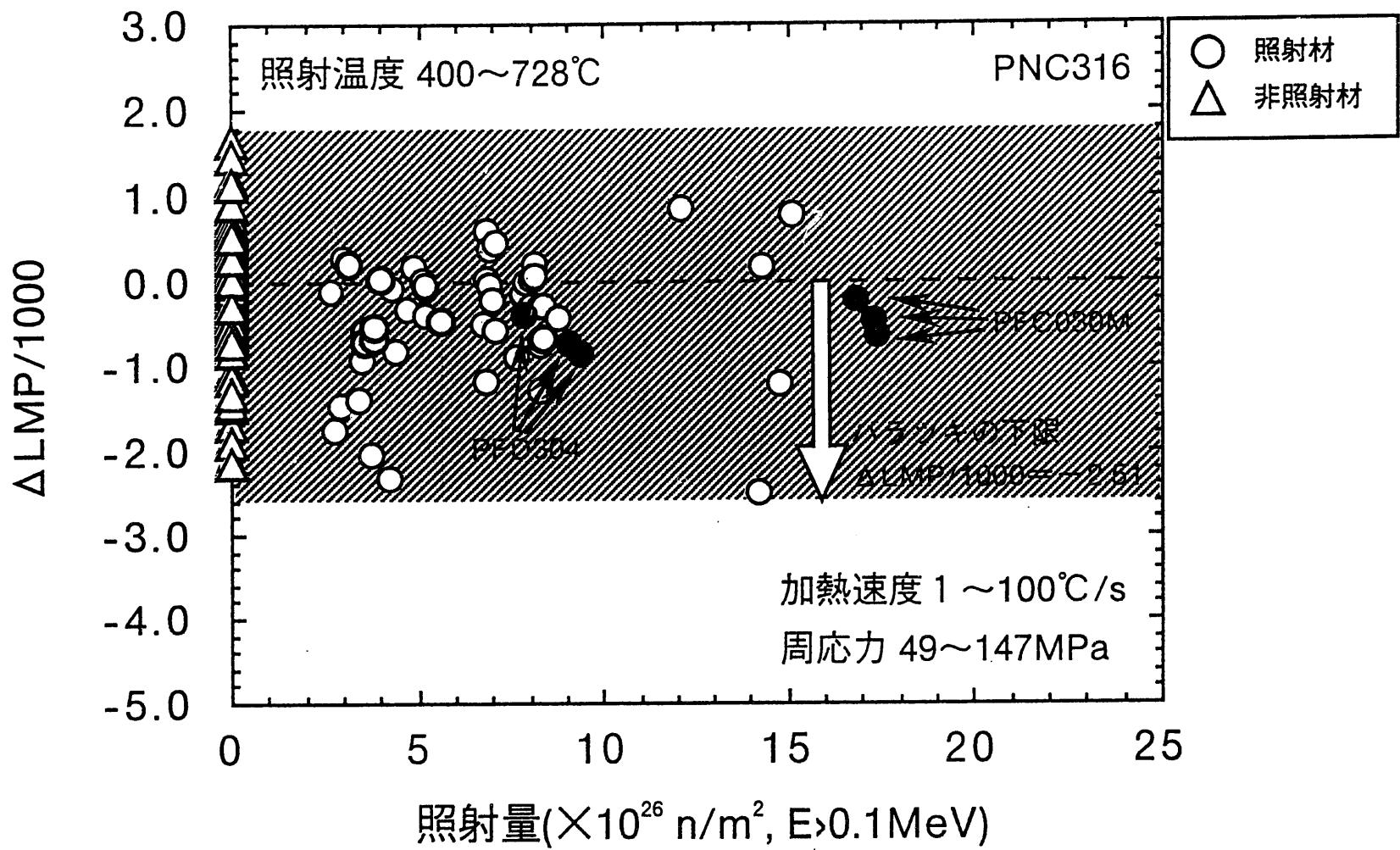


図7.9 急速加熱バースト試験結果に基づく寿命評価

図7.10 LMPと $\sigma_m$ の関係

図7.11  $\Delta LMP$ と照射量の関係

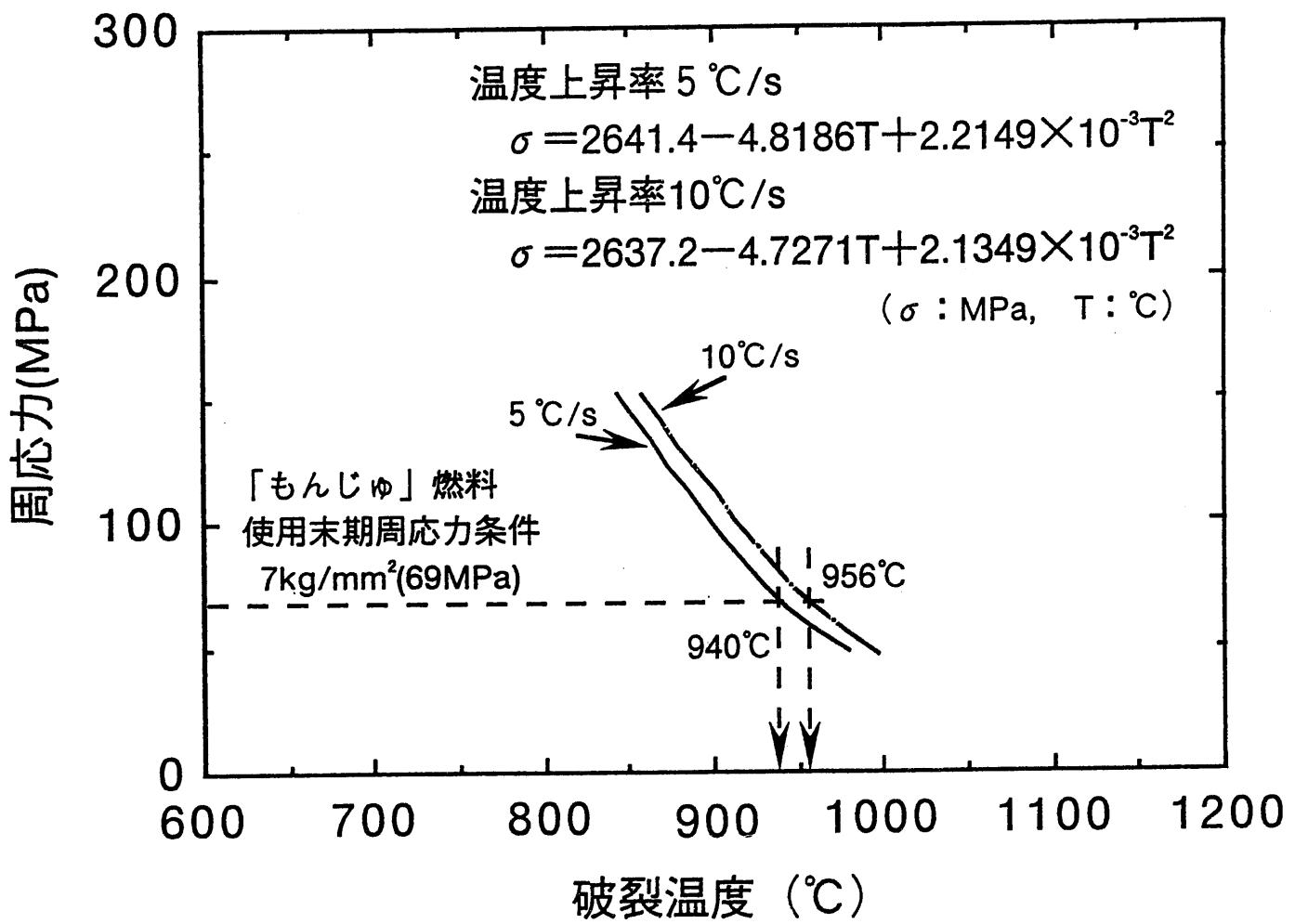
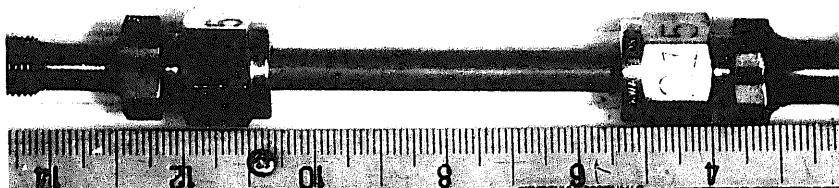


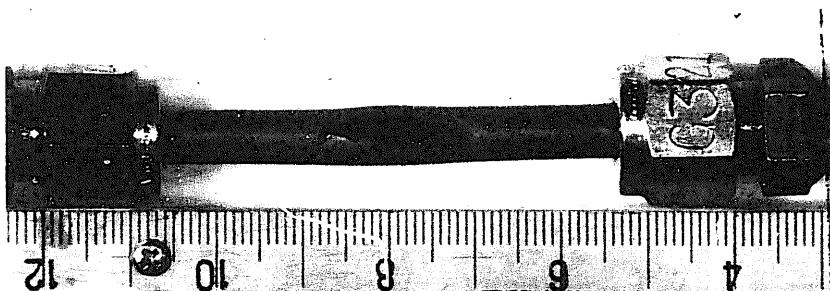
図7.12 PNC316照射材の急速加熱時の破裂温度下限値評価結果

## 試験前

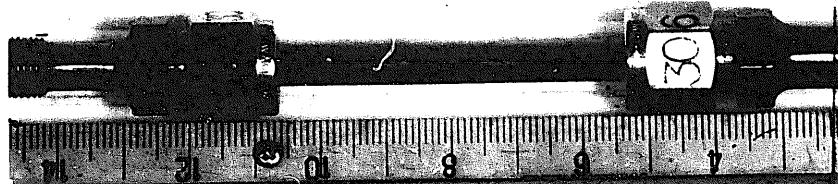


試験片 No.	G 3 2 1 5
照射温度	4 8 1 °C
照射量	$17.3 \times 10^{20} n/m^2$ ( $E > 0.1 MeV$ )
加熱速度	5 °C / S
周応力	4 9 M P a
破裂温度	1 0 6 6 . 6 °C

## 試験後



## 試験前



試験片 No.	G 3 3 0 6
照射温度	5 0 4 °C
照射量	$17.4 \times 10^{20} n/m^2$ ( $E > 0.1 MeV$ )
加熱速度	5 °C / S
周応力	9 8 M P a
破裂温度	9 8 4 . 6 °C

## 試験後

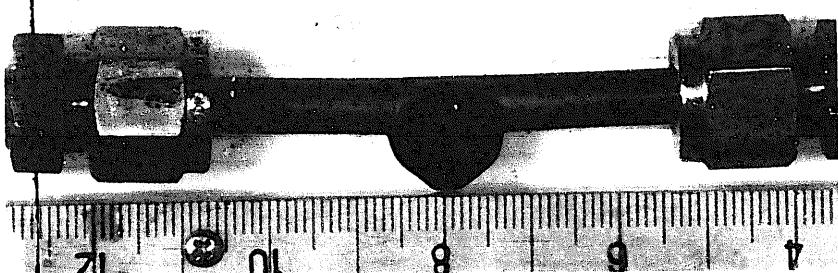
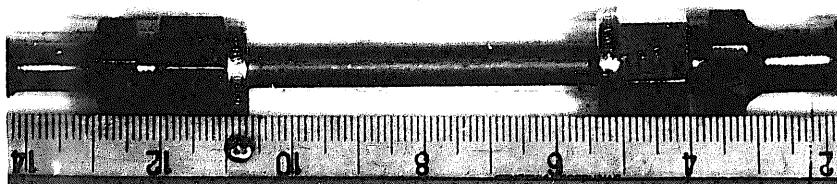


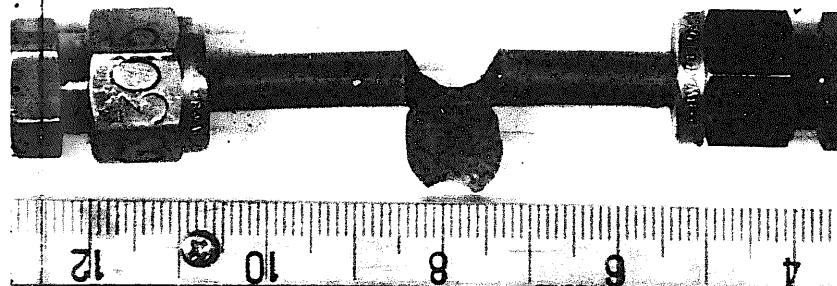
写真 1 P F C 0 3 0 M 試験片の試験前後の外観写真

## 試験前

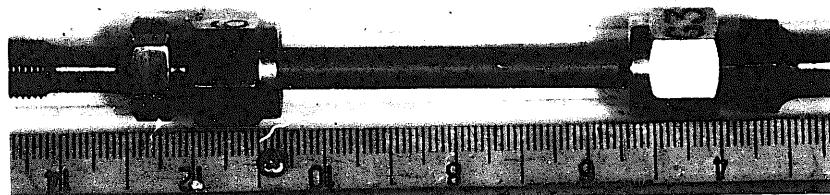


試験片 No.	G 3 3 0 5
照射温度	4 6 9 °C
照射量	$17.0 \times 10^{26} n/m^2$ ( $E > 0.1 MeV$ )
加熱速度	5 °C / S
周応力	1 9 6 M P a
破裂温度	8 5 2 . 7 °C

## 試験後



## 試験前



試験片 No.	G 3 5 4 6
照射温度	4 8 6 °C
照射量	$17.4 \times 10^{26} n/m^2$ ( $E > 0.1 MeV$ )
加熱速度	5 °C / S
周応力	2 9 4 M P a
破裂温度	8 0 1 . 8 °C

## 試験後

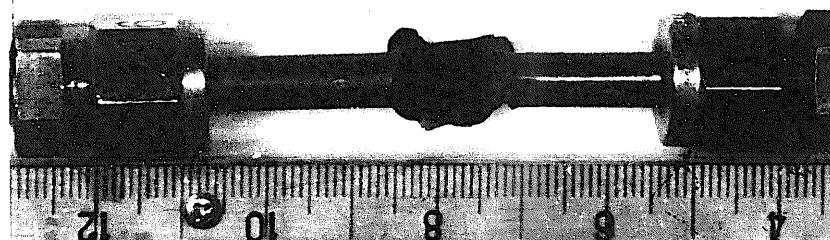
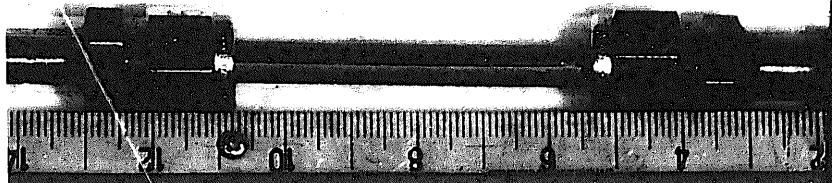


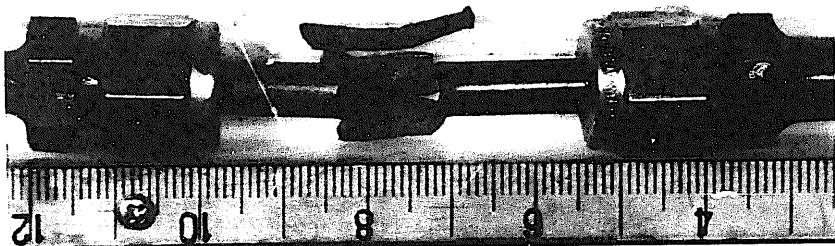
写真1 PFC030M試験片の試験前後の外観写真

## 試験前

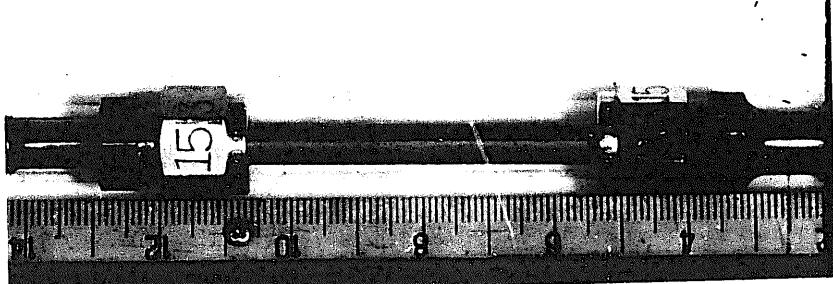


試験片 No.	G 3 0 8 5
照射温度	4 8 9 °C
照射量	$16.9 \times 10^{26} n/m^2$ ( $E > 0.1 MeV$ )
加熱速度	1 0 0 °C/S
周応力	4 9 MPa
破裂温度	測定不可 °C

## 試験後



## 試験前



試験片 No.	G 3 1 5 3
照射温度	4 7 9 °C
照射量	$16.8 \times 10^{26} n/m^2$ ( $E > 0.1 MeV$ )
加熱速度	1 0 0 °C/S
周応力	9 8 MPa
破裂温度	1 0 7 9. 3 °C

## 試験後

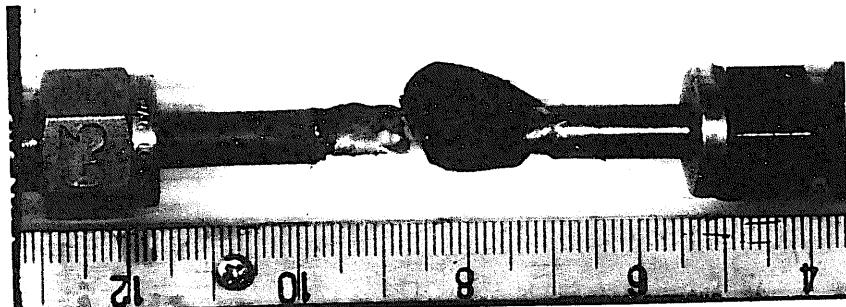
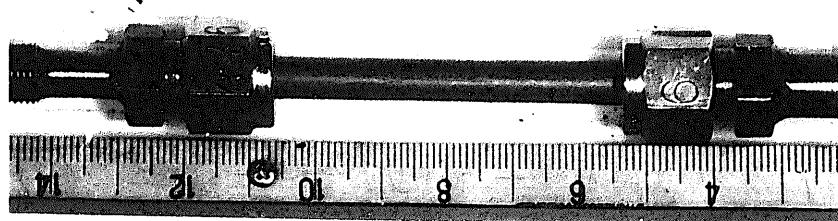


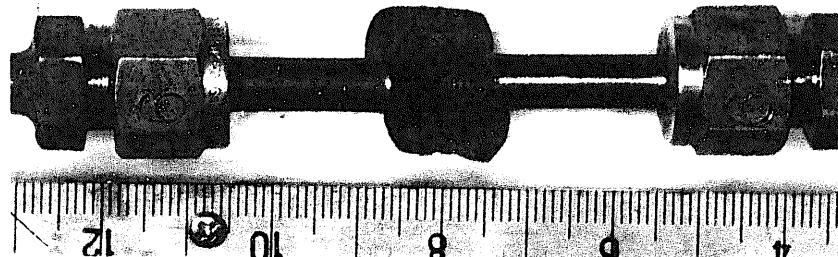
写真1 PFC030M試験片の試験前後の外観写真

## 試験前

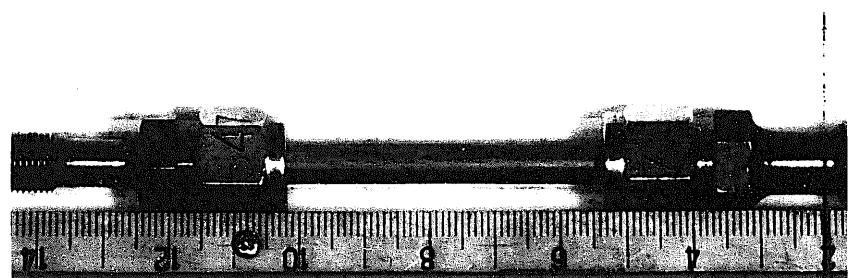


試験片 No.	G 3 4 7 6
照射温度	5 0 1 °C
照射量	$17.5 \times 10^{26} \text{n}/\text{m}^2 (\text{E}>0.1 \text{MeV})$
加熱速度	1 0 0 °C/S
周応力	1 9 6 M P a
破裂温度	9 2 3 . 0 °C

## 試験後



## 試験前



試験片 No.	G 3 5 4 7 A
照射温度	5 1 9 °C
照射量	$17.2 \times 10^{26} \text{n}/\text{m}^2 (\text{E}>0.1 \text{MeV})$
加熱速度	1 0 0 °C/S
周応力	2 9 4 M P a
破裂温度	8 7 0 . 3 °C

## 試験後

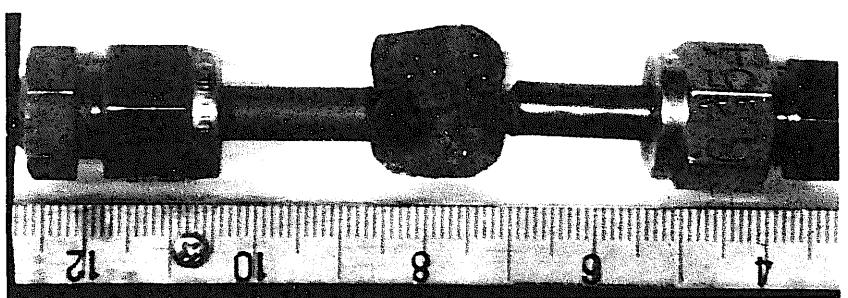


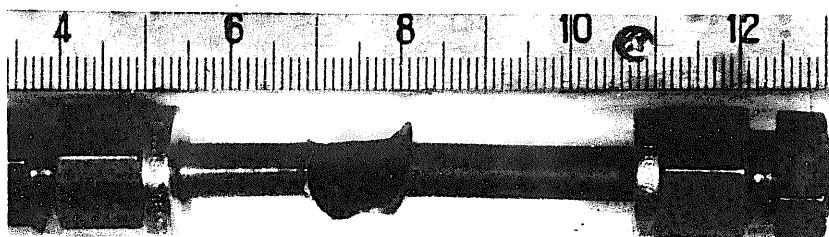
写真1 PFC030M試験片の試験前後の外観写真

## 試験前

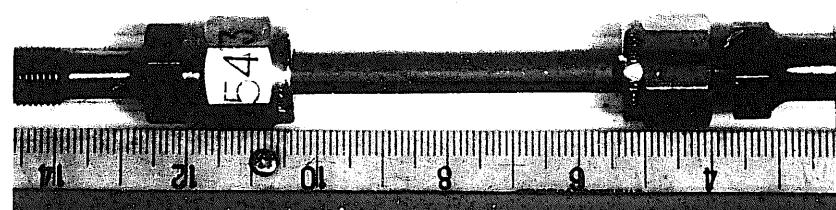


試験片 No.	G 3 4 7 3
照射温度	4 0 1 °C
照射量	$11.5 \times 10^{26} n/m^2$ ( $E > 0.1 MeV$ )
加熱速度	5 °C / S
周応力	2 9 4 M P a
破裂温度	7 7 1 . 6 °C

## 試験後



## 試験前



試験片 No.	G 3 5 4 3 A
照射温度	4 0 1 °C
照射量	$11.5 \times 10^{26} n/m^2$ ( $E > 0.1 MeV$ )
加熱速度	1 0 0 °C / S
周応力	2 9 4 M P a
破裂温度	8 2 7 . 3 °C

## 試験後

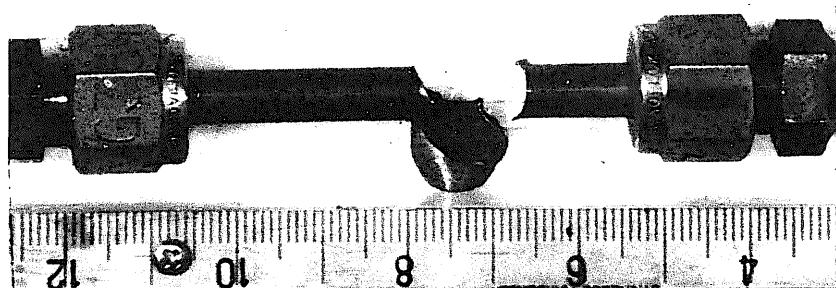
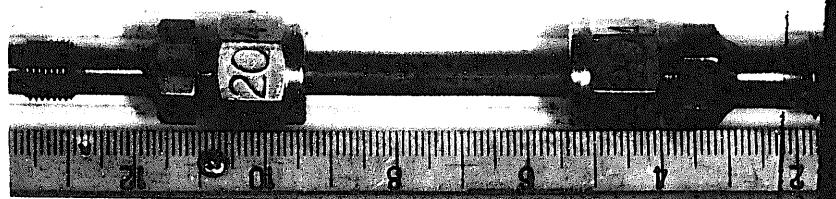


写真 1 PFC030M 試験片の試験前後の外観写真

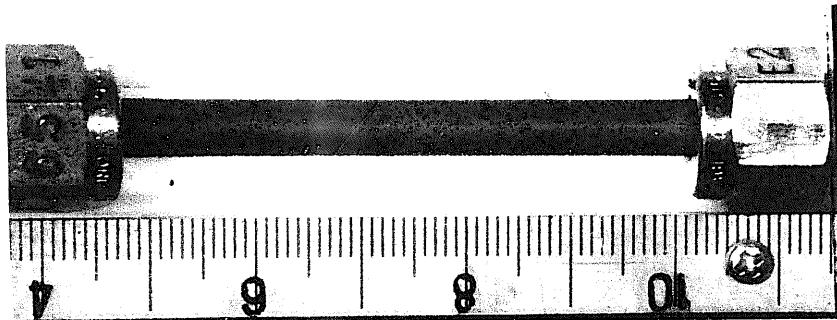
## 試験前



試験片 No.	G 3 2 0 4
照射温度	5 2 8 °C
照射量	$16.5 \times 10^{26} n/m^2$ ( $E > 0.1 \text{ MeV}$ )
加熱速度	5 °C / S
周応力	9 8 MPa
破裂温度	試験未実施 °C

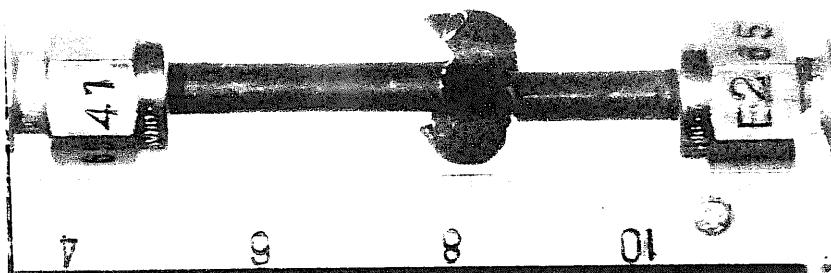
写真 1 P F C 0 3 0 M 試験片の試験前後の外観写真

## 試験前

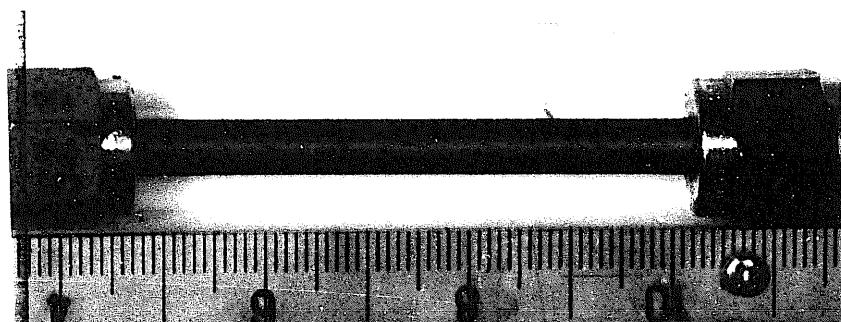


試験片 No.	E 2 6 5 4 1
照射温度	4 1 2 °C
照射量	$7.0 \times 10^{26} n/m^2$ (E>0.1 MeV)
加熱速度	5 °C / S
周応力	2 9 4 M P a
破裂温度	7 1 7 . 9 °C

## 試験後



## 試験前



試験片 No.	E 2 5 2 6
照射温度	4 7 4 °C
照射量	$8.9 \times 10^{26} n/m^2$ (E>0.1 MeV)
加熱速度	5 °C / S
周応力	9 8 M P a
破裂温度	9 7 9 . 7 °C

## 試験後

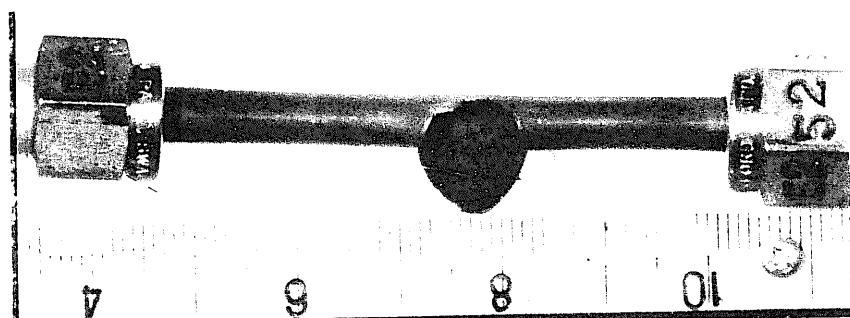


写真 2

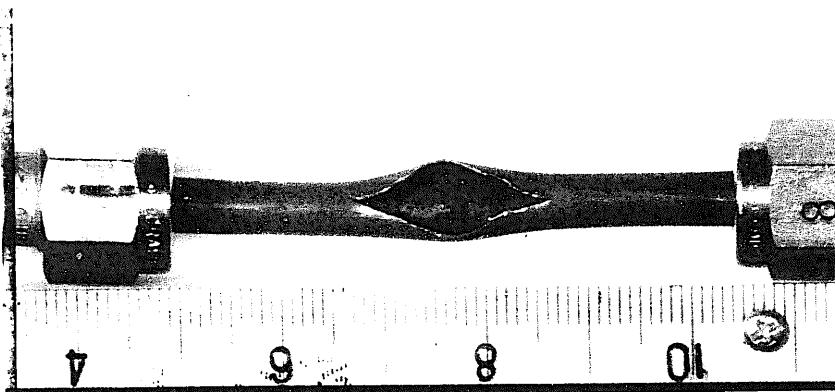
PFD304 試験片の試験前後の外観写真

## 試験前

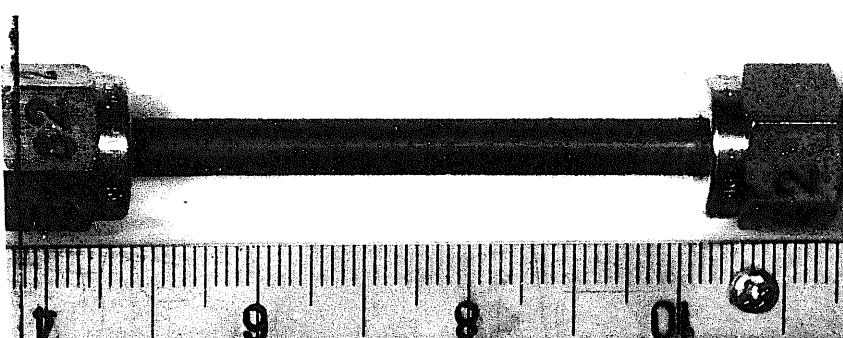


試験片 No.	E 2 5 2 8
照射温度	5 2 0 °C
照射量	$7.8 \times 10^{26} n/m^2$ ( $E > 0.1 MeV$ )
加熱速度	5 °C / S
周応力	4 9 M P a
破裂温度	1 0 7 0 . 5 °C

## 試験後



## 試験前



試験片 No.	E 2 6 2 2
照射温度	4 7 7 °C
照射量	$9.2 \times 10^{26} n/m^2$ ( $E > 0.1 MeV$ )
加熱速度	5 °C / S
周応力	4 9 M P a
破裂温度	1 0 4 9 . 0 °C

## 試験後

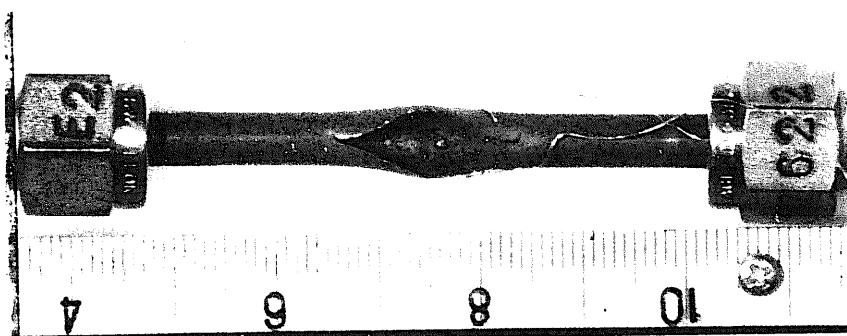
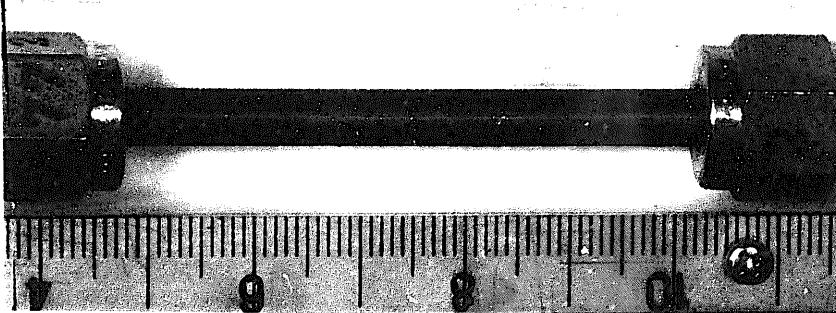


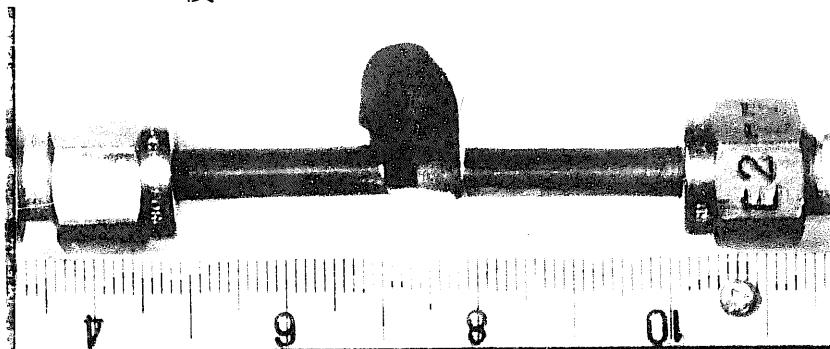
写真 2 P F D 3 0 4 試験片の試験前後の外観写真

## 試験前

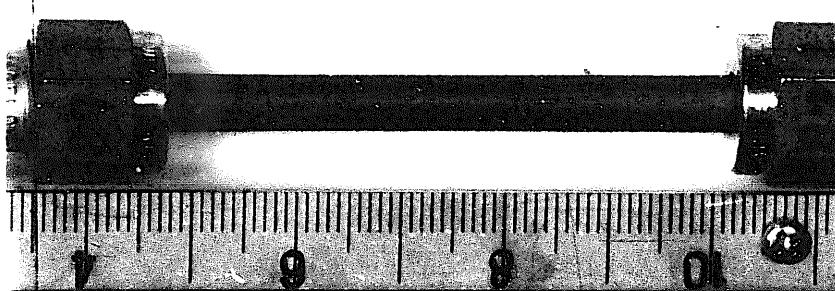


試験片 No.	E 2 7 7 2
照射温度	4 7 7 °C
照射量	$9.2 \times 10^{26} n/m^2$ ( $E > 0.1 MeV$ )
加熱速度	5 °C/S
周応力	2 1 6 MPa
破裂温度	8 5 5. 6 °C

## 試験後



## 試験前



試験片 No.	E 2 8 7 2
照射温度	4 7 7 °C
照射量	$9.2 \times 10^{26} n/m^2$ ( $E > 0.1 MeV$ )
加熱速度	5 °C/S
周応力	2 9 4 MPa
破裂温度	6 9 3. 5 °C

## 試験後

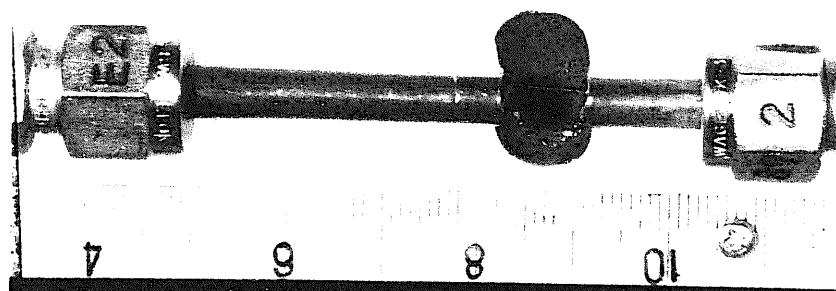
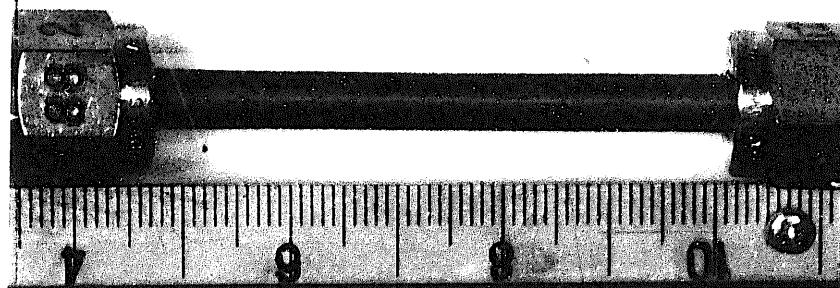


写真 2 PFD 304 試験片の試験前後の外観写真

試 驗 前



試験片 No.	E 2 8 8 2
照射温度	4 7 7 °C
照射量	$9.2 \times 10^{26} n/m^2$ ( $E > 0.1 \text{ MeV}$ )
加熱速度	5 °C / S
周応力	2 9 4 M P a
破裂温度	7 1 2 . 0 °C

試 驗 後

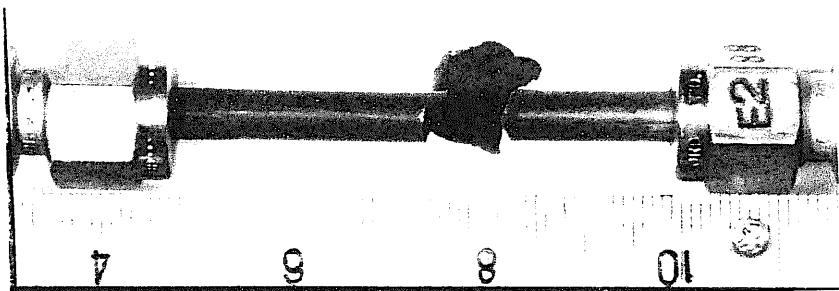


写真 2 P F D 3 0 4 試験片の試験前後の外観写真