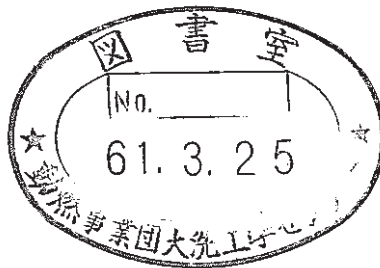


# 「常陽」MK-I 炉心燃料(PPJX12)の照射後試験(2)

—— 被覆管の強度試験 ——



1986年2月

| 技術資料コード                             |                   |
|-------------------------------------|-------------------|
| 開示区分                                | レポートNo.           |
|                                     | PNC TN9410 86-138 |
| この資料は 図書室保存資料です<br>閲覧には技術資料閲覧票が必要です |                   |
| 動力炉・核燃料開発事業団大洗工学センター技術管理室           |                   |

動力炉・核燃料開発事業団  
大洗工学センター

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせください。

〒311-13 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002

動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター システム開発推進部・技術管理室

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

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

1986 年 2 月

## 「常陽」MK-I 炉心燃料(PPJX12)の照射後試験(2)

### ——被覆管の強度試験——

実施責任者 柚原 俊一\*

報告者 谷 賢\*, 大原 清海\*, 吉沼 明彦\*,  
椎名 章\*, 佐藤 義則\*, 小形 佳昭\*

### 要 旨

高速実験炉「常陽」MK-I 炉心燃料集合体 PPJX12 の燃料被覆管 (最大中性子照射量  $6.4 \times 10^{22} \text{ n/cm}^2$ ,  $E > 0.1 \text{ MeV}$ ) を用いて、「常陽」MK-I 被覆管の引張試験において見られた特異破断の原因を究明するための試験を行った。試験雰囲気の影響を調べるため、被覆管内面を窒素雰囲気とした引張試験及び急速加熱バースト試験を実施した。

主な結果は以下のとおりである。

- (1) 「常陽」MK-I 被覆管の  $500^\circ\text{C}$  での引張試験において、燃焼度が約  $25,000 \text{ MWD/T}$  以上の場合に見られた特異破断は、試料保管中及び試験中に被覆管内面が空気にさらされたことによることが明らかとなった。被覆管内面を窒素雰囲気に維持すれば、特異破断は生じない。
- (2) 急速加熱バースト試験においても、引張試験の場合と同様、空気雰囲気の影響が認められたが、被覆管内面を窒素雰囲気とすれば、破損温度の低下は見られない。
- (3) 以上の結果から、いわゆる FAE (fuel adjacency effect: 燃料隣接効果) は炉内における燃料ピンの使用条件下では無視できると考えられる。

---

\* 大洗工学センター，燃料材料開発部，照射材料試験室

## 目 次

|                       |    |
|-----------------------|----|
| 1. まえがき .....         | 1  |
| 2. 供試材 .....          | 2  |
| 2.1 素材 .....          | 2  |
| 2.2 炉内履歴 .....        | 2  |
| 2.3 ナトリウム洗浄及び保管 ..... | 2  |
| 2.4 試験片 .....         | 3  |
| 3. 試験方法 .....         | 4  |
| 3.1 外観検査 .....        | 4  |
| 3.2 外径測定 .....        | 4  |
| 3.3 引張試験 .....        | 4  |
| 3.4 急速加熱バースト試験 .....  | 4  |
| 4. 試験結果及び検討 .....     | 6  |
| 4.1 引張試験 .....        | 6  |
| 4.2 急速加熱バースト試験 .....  | 7  |
| 5. まとめ .....          | 10 |
| 6. 謝辞 .....           | 11 |
| 7. 参考文献 .....         | 12 |

## 1. ま え が き

高速実験炉「常陽」MK-Iの炉心構成要素の健全性に関しては、燃料材料開発部の各施設における照射後試験等により1本の燃料も破損していないことが既に確認されている<sup>(1)</sup>。炉心燃料集合体PPJX12の本来の試験目的はナトリウム洗浄を十分行っていない集合体を長時間水中保管した場合の、炉心材料の健全性を調べることであった<sup>(2)</sup>。

しかし、「常陽」MK-I被覆管の照射後引張試験において、特異破断が見られたため、PPJX12の被覆管を使って、その原因を究明することとした。この特異破断は燃焼度約25,000MWD/T以上、照射量約 $3 \times 10^{22}$  n/cm<sup>2</sup> (E>0.1MeV)以上で、試験温度500℃の場合に限って発生し、伸びの著しい低下と引張強さのかなりの低下を示すのが特徴である。予備的な検討の結果、特異破断の原因は試料保管中及び試験中の雰囲気は空気であることによる可能性が強くなった。

そのため、被覆管内面を窒素雰囲気とした引張試験及び急速加熱バースト試験を実施し、その結果を空気雰囲気の場合と比較・検討した。本試験結果は「常陽」MK-I被覆管で見られた異常破断の原因を明らかにするだけでなく、いわゆるFAE(fuel adjacency effect:燃料隣接効果)が実際の高速炉における燃料ピン使用環境下で発生するかどうかを判断するためにも極めて重要なデータとなる。

なお、特異破断の原因については、燃料材料開発部内に被覆管強度J/Gを設置して検討しており、各室で分担して、金相試験、機器分析等を実施している。これらの結果については、別途報告書として取りまとめられる予定である。

## 2. 供 試 材

### 2.1 素 材

「常陽」MK-Iの燃料ピンに用いた燃料被覆管は、昭和46年度に神戸製鋼、住友金属及びCarpenter Technology (Car-Tech)でそれぞれ18,33及び1ロット製作されたものである。燃料被覆管の素材は、10%冷間加工を施したSUS316鋼であり、公称寸法は外径；6.3mm, 肉厚；0.35mmである。

今回の照射後試験に供した燃料被覆管は神戸製鋼製（以下K材とする）K002、住友金属製（以下S材とする）S008, S012及びCar-Tech製（以下R材とする）R001である。

別添資料1に照射後試験に供した燃料被覆管ロットのミルシート（DBS出力）を、Table 1にミルシートから化学成分及び機械的性質を抜き出したものを示す。

### 2.2 炉内履歴

PPJX-12は「常陽」MK-Iの臨界から75MW第6サイクル終了まで、MK-I炉心第1列(1D1)に装荷されていた。Fig.1にPPJX12の炉心装荷位置、Fig.2にPPJX12の集合体内ピン配置を示す。

試験に供した燃料被覆管は、Fig.2に示したごとく、No.6765（燃料被覆管はK002）、No.6755（S008）、No.6726、No.6727、No.6758（以上S012）、No.6745、No.6748（以上R001）の燃料ピンから切り出された。Fig.3に炉心燃料ピンの形状を示す。

なお、今回の試験の主目的は試料保管中及び試験中の雰囲気照射済燃料被覆管の強度に及ぼす影響を明らかにすることであり、従ってピン選択の考え方も従来の定常試験の場合と異っている。

PPJX12の燃焼度はバンドル平均で38,900MWD/T（ペレット最大は48,300MWD/T）、中性子照射量は最大 $6.4 \times 10^{22}$  n/cm<sup>2</sup> (E>0.1MeV)であった。以下中性子照射量はすべて0.1MeV以上の値を用いる。

Fig.4に75MW第6サイクル末期の炉内温度分布及び中性子照射量分布を示す。燃料被覆管の温度及び中性子照射量はJYHISTによるNo.6746ピンの計算結果を示した。ただし、燃料被覆管の温度としては肉厚中心温度を示した。

### 2.3 ナトリウム洗浄及び保管

PPJX12の本来の試験目的はナトリウム洗浄を十分に行わない集合体を水プールに長期間保管後各種照射後試験を実施し、その結果をPPJX13（照射条件がPPJX12とほぼ同等）と比較

することにより、ナトリウム洗浄不足及びその後の長期水中保管が炉心材料の特性に及ぼす影響を明らかにすることであった<sup>(2)</sup>。そのため、通常3回行う脱塩水洗浄を1回に減らし、その後約1年8ヶ月に渡って「常陽」水プール中で水中保管した。

## 2.4 試験片

「常陽」より取り出された集合体は、照射燃料集合体試験施設(FMF)へ搬入され、照射後試験に供する燃料ピンが切断された。切断長さは、引張試験用74mm、急速加熱バースト試験用80mmとした。試験片形状をFig.5に示す。

切断後、FMFにおいて、押出式の脱ミート装置を用いて燃料ペレットを抜いた。以上の切断、脱ミートは窒素雰囲気中のFMF試験セルで行われた。

一部の試料はそのまま照射材料試験施設(MMF)に移送され、空気雰囲気中のMMF被覆管試験セルで強度試験に供された。他の試料は被覆管内面を不活性雰囲気中を保つため、FMFでスウェージロック取付後、MMFに移送された。この際、引張試験片は両端がキャップで密封される問題はないが、急速加熱バースト試験片は通常は一端しかキャップで密封されず、ユニオン側は開放となる。そのため、ユニオンを改造して、アルミフォイルで密封できるようにした。改造後のスウェージロックをFig.6に示す。これにより、MMF被覆管試験セルで保管中に、試料内面が空気に接触することが妨げられる。なお、急速加熱バースト試験時には、アルゴンガスで加圧されることによりアルミフォイルが破れ、被覆管に正規の試験圧力がかかり、なおかつ、被覆管の内面は不活性雰囲気中を保たれることになる。そのほか、窒素中の不純物濃度の影響を調べるため、一部の試料はFMF金相セルに15日間保管した後、FMF試験セルでスウェージロック取付を行った。

引張試験片はK材及びS材から採取し、急速加熱バースト試験片はK材、S材の残材がないため、R材から採取した。引張試験片は被覆管内面が空気雰囲気のもの4本、FMF金相セル窒素雰囲気のもの2本、FMF試験セル窒素雰囲気のもの8本を試験に供した。急速加熱バースト試験は被覆管内面が空気雰囲気のもの5本、FMF試験セル窒素雰囲気のもの8本について実施した。

Table2, Table3に引張試験片、急速加熱バースト試験片を照射条件、試験条件とともに示した。

FMF試験セルにおける窒素中の不純物濃度は、酸素について保管期間中50~100ppmにコントロールされていた。水分は通常150~200ppmにコントロールされていたが、セルポートの開閉に伴い、瞬時ではあるが300~1000ppmに上昇した時があった。FMF金相セルについては保管期間中の酸素濃度は800ppm程度であった。水分濃度は測定されていないが、通常1000ppm程度であると推定される。

### 3. 試験方法

#### 3.1 外観検査

試験前後の全ての試験片の外観検査をペリスコープにより行い、外観写真を撮影した。

#### 3.2 外径測定

レーザー外径測定器（測定精度 $\pm 1.5\mu\text{m}$ ）を用いて、急速加熱バースト試験片の試験前後の外径測定を行った。試験前は軸方向3ヶ所について、円周方向 $45^\circ$ 毎4点、試験後は2.5mm間隔で同様の測定を行った。測定前後には標準ゲージ（ $6.300\pm 0.001\text{mm}$ ）を用いてキャリブレーションした。

#### 3.3 引張試験

両端にスウェーجزロックを締めつけた試験片を、インストロン引張試験機にセットし、昇温した。試験温度で15分間保持後、引張速度 $0.2\text{mm}/\text{min}$ （ひずみ速度 $0.4\%/ \text{min}$ ）で破断まで試験を行った。試験雰囲気の影響を調べるため、被覆管内面を空気雰囲気、FMF金相セル雰囲気（ $\sim 800\text{ppmO}_2$ ）、FMF試験セル雰囲気（ $\sim 75\text{ppmO}_2$ ）としたものを試験に供した。

Table 2に各試験片の照射条件と試験条件を示す。以前の試験で被覆管の異常破断が見られた $500^\circ\text{C}$ で重点的に試験を行い、試験温度の影響を調べるため、一部 $550^\circ\text{C}$ 、 $600^\circ\text{C}$ の試験を追加実施した。試験温度と照射温度はできるだけあわせるよう考慮したが、試験片の制約上、 $550^\circ\text{C}$ 、 $600^\circ\text{C}$ では両者の差がかなり大きくなっている。

試験後、荷重-伸び曲線より0.2%耐力、引張強さ、一様伸び及び破断伸びを求めた。

#### 3.4 急速加熱バースト試験

両端にスウェーجزロックを締めつけた試験片を試験リグに取り付け、それを急速加熱バースト試験機にセットした。試験片に加圧し、 $450^\circ\text{C}$ の初期温度に加熱後、 $5^\circ\text{C}/\text{s}$ の加熱速度で試験片が破断するまで加熱した。試験雰囲気の影響を調べるため、被覆管内面を空気雰囲気、FMF試験セル雰囲気（ $\sim 75\text{ppmO}_2$ ）としたものを試験に供した。

Table 3に各試験片の照射条件と試験条件を示す。試験条件の選定にあたっては、いわゆるFAEの有無をできるだけ明確にできるように考慮した。HEDLにおけるFCTT試験（fuel cladding transient test）の結果では、燃料カラム部から採取した被覆管の破損温度は、プレナム部から採取した被覆管の破損温度にくらべてかなり低い。HEDLではこの現象をFAE（fuel adjacency effect：燃料隣接効果）と呼んでいる。いわゆるFAEは高応力側で顕著に



見られるので、フープ応力を試験機の最高試験圧力  $350 \text{ kg/cm}^2$  に対応する  $29.8 \text{ kg/mm}^2$  と  $20.0 \text{ kg/mm}^2$  の2レベルとした。また、加熱速度が遅いほうがFAEが現われやすいので、HEDLデータとも比較しやすいよう考慮して、加熱速度を  $5 \text{ }^\circ\text{C/s}$  とした。

破断試験片の破断部近傍（破断き裂端より  $2.5\text{mm}$  の箇所）の外径を測定し、その外径変化率を diametral failure strain（以下DFSとする）とした。

---

HEDL<sup>(3)</sup>及びECN<sup>(4)</sup>では diametral failure strain と circumferential failure strain を下記のように定義しており、これになった。

diametral failure strain : 破断部近傍における外径変化率

circumferential failure strain : 破断部における周長変化率

## 4. 試験結果及び検討

### 4.1 引張試験

Table 4 に引張試験結果を照射条件とともに示す。また、Fig.7～Fig.10 に照射量と引張特性の関係を、非照射材及び以前実施した他の集合体についての試験結果とあわせて示す。さらに、Fig.12～Fig.13 に stress-strain curve を示す。

試験温度500°Cの場合について被覆管内面の雰囲気の影響をみると、空気雰囲気の場合、照射量が $\sim 3 \times 10^{22} \text{ n/cm}^2$ 以上になると伸びが急激に低下し、強度もかなり低下するのに対し、窒素雰囲気にするところのような特異破断は発生せず、照射量 $\sim 5 \times 10^{22} \text{ n/cm}^2$ でもほぼ非照射材並みの強度及び伸びを有することがわかった。

空気雰囲気の影響は一様伸び及び破断伸びの低下に最も顕著に現われ、照射量 $\sim 5 \times 10^{22} \text{ n/cm}^2$ における破断伸びは1%程度になる。引張強さも非照射材に比べて15kg/mm<sup>2</sup>程度低下するが、0.2%耐力の低下は小さい。空気雰囲気の場合、データのバラツキが大きいことも特徴として挙げられる。

窒素雰囲気の場合でも、FMF金相セル窒素雰囲気( $\sim 800 \text{ ppm O}_2$ )ではFMF金相セル窒素雰囲気( $\sim 75 \text{ ppm O}_2$ )の場合に比べて強度、伸びとも低く、窒素の純度がある程度以上高くないと、引張試験結果に若干悪影響があることがわかる。

試験温度550°Cの場合はデータが少ないが、500°Cの場合と同様、空気雰囲気では伸びがほとんどなくなっており、引張強さも低下しているのに対し、窒素雰囲気では $5.6 \times 10^{22} \text{ n/cm}^2$ まで照射された被覆管は十分な強度及び延性を示している。試験温度600°Cの場合は空気雰囲気のデータがないが、窒素雰囲気ではやはり十分な強度及び延性を示している。なお、550°Cの試験において、窒素雰囲気では試験された被覆管が1本かなり低い強度及び延性を示している。(Fig.7～Fig.10)この原因はスウェージロックの締めつけが不十分であったか、又はスウェージロックに傷があったため、空気が被覆管内に入ったためと考えているが、スウェージロックの気密試験と外観検査結果からは確認できなかった。

Fig.13～Fig.14 に引張試験後の外観写真を示す。空気雰囲気の場合は引張方向に対してほぼ直角に破断しているのに対し、窒素雰囲気の場合は引張方向に対して斜めに破断している場合が多く、延性の差が表われている。

Fig.15 に EBR-II 及び Phenix で照射された20%冷間加工 SUS316 被覆管の0.2%耐力と引張強さを示す。EBR-II 照射データは HEDL の R. L. Fish らによるもの<sup>(5)</sup>であり、Phenix 照射データは Phenix-P2 として MMS で照射後試験を実施したもの<sup>(6)</sup>である。いずれも燃料ピンとして照射されたものでなく、被覆管のみ照射されている。

Fig.15から約500°Cを境にして、それ以下では照射硬化により強度が増加し、それ以上では冷間加工の回復により軟化がおこっていることがわかる。燃料ピンについての今回の試験結果では、Fig.7~Fig.8に示したように、FMF試験セル窒素雰囲気(~75ppmO<sub>2</sub>)の場合、500°Cにおける0.2%耐力と引張強さはいずれも非照射材よりわずかに低い程度であった。この結果はFig.15に示した材料照射の場合とほぼ一致している。

以上の結果をまとめると、「常陽」MK-I被覆管の照射後試験において、燃焼度が比較的高い場合に見られた特異破断の原因は試験雰囲気によるものであることが明らかとなった。試験雰囲気を高純度の窒素雰囲気とすることにより、特異破断は防止できる。このようにして得られた「常陽」MK-I被覆管の強度の500°Cにおける照射量依存性は、材料照射された被覆管の場合と類似していた。これにより、本試験の範囲内では、燃料ピン照射と材料照射で引張特性に大差はなく、いわゆるFAEは無視できることがわかった。

特異破断の原因については、破断前後の試験片の金相試験、SEM観察、EPMA分析、IMA分析等による検討がAESを中心に実施されている。また、模擬FPによる炉外試験、メカニズムについての理論的検討も行われている。これらの結果は別途報告書としてまとめられる予定であるが、今のところFPとして被覆管の内面に付着したCsと空気中の水分が反応してCsOHとなり、約500°C以上の高温で引張試験を行うと、CsOHによる応力腐食割れを生じるという考えが有力である。

## 4.2 急速加熱バースト試験

Table 5に急速加熱バースト試験結果を照射条件とともに示す。また、照射条件と試験雰囲気が破損強度に及ぼす影響について、Fig.16に破損温度とフープ応力<sup>\*</sup>の関係、Fig.17に照射量と破損温度の関係で整理して示す。さらに diametral failure strain (DFS) に及ぼす影響について、Fig.18に破損温度とDFSの関係、Fig.19に照射量とDFSの関係で整理して示す。

Fig.16とFig.17から全般にFMF試験セル窒素雰囲気(~75ppmO<sub>2</sub>)の場合の破損温度は、非照射材とほぼ同等か、むしろ若干高目であるのに対して、空気雰囲気の場合は破損温度は大巾に低下していることがわかる。なお、フープ応力29.8kg/mm<sup>2</sup>の場合、窒素雰囲気でも2本の試験片について、大巾な破損温度の低下がみられているが、この2本だけがpinhole型破損している(他は全てviolent型破損)ことからみて、試験片に空気の混入等破損温度の低下をまねく何らかの異常があった可能性が強いと考えている。

空気雰囲気の場合の破損温度低下の程度は照射量が増加しても大きくならず、むしろ照射温度が高い場合に破損温度の低下が大きくなる傾向がみられる。

Fig.18から破損温度が低いほど、DFSが小さくなることがわかる。この傾向は非照射材の傾

---


$$\text{平均径の式: } \sigma = \left( \frac{D_o}{2t} - 0.5 \right) P \times \frac{1}{100} \text{ でフープ応力を算出している。}$$

向と一致している。

Fig.19から pinhole 型破損した 2 本を除けば、全般に窒素雰囲気の場合の DFS は、非照射材とほぼ同等であるのに対して、空気雰囲気の場合は照射材の DFS は非照射材に比べて低下している。その低下の程度は照射量が増加しても大きくなり、むしろ照射温度が高いと DFS の低下が大きい傾向が見られる。これは前述の破損温度で見られた傾向と一致している。

Fig.20～Fig.21 に急速加熱バースト試験後の外観写真を示す。pinhole 型破損した試験片を除き、他は全て violent 型の破損を示しており、内圧が高いためと通常の燃料ピン内ガス容積より試験時のガス容積が大きいため、破損時の衝撃により、試験片は分断されている。試験雰囲気の影響は外観写真からは明確にわからなかった。

急速加熱バースト試験は HEDL でも G. D. Johnson<sup>(5)</sup>により FCTT 試験 (fuel cladding transient test) として実施されている。HEDL の試験結果では、燃料カラム部から採取した被覆管では Fig.22 に示したように、非照射材に比べて破損温度が大巾に低下するのに対して、プレナム部から採取した被覆管では Fig.23 に示したように、破損温度はあまり低下しない。

HEDL ではこの現象を FAE (fuel adjacency effect : 燃料隣接効果) と呼んでいる。FAE の原因としては、ヘリウム脆化、FCMI、残留応力、被覆管内の温度勾配、被覆管内面腐食、粒界脆化などが考えられたが、最近では GE の M. G. Adamson<sup>(8)</sup>らが提唱している LME (liquid metal embrittlement : 液体金属脆化) が FAE の原因であるという考え方が有力である。

これは FP 中に Cs と Te が適当な割合 ( $2:1 > \text{Cs:Te} \geq 1:9$ ) で共存する場合、これが被覆管の内面に付着すると、高温 ( $450^{\circ}\text{C} \sim 700^{\circ}\text{C}$ ) で液体金属となって粒界を脆化させ、これにより被覆管の強度が低下するという考えである。Adamson らは模擬 FP を使った炉外試験結果に基づいて、FAE は LME によるものであると結論している。

しかし、今回の試験結果では被覆管内面を高純度の窒素雰囲気に維持すれば、照射材の破損温度は低下しないことがわかった。一方、空気雰囲気では破損温度が大巾に低下しており、いわゆる FAE は試験雰囲気が適切でないことにより生じた被覆管の脆化を実際の燃料ピンの使用条件下で起こると誤認したものである可能性が高い。

Fig.24 に空気雰囲気で実施された今回の試験結果を燃料カラム部から採取された被覆管についての HEDL の試験結果と比較して示す。比較しやすくするため、照射量は  $(3 \sim 6) \times 10^{22} \text{ n/cm}^2$ 、加熱速度は約  $5^{\circ}\text{C/s}$  のデータを選んだ。本試験で用いた被覆管の冷間加工度は 10% であるのに対して、HEDL では 20% 冷間加工材を用いており、非照射材の強度は HEDL のほうが高い。しかし、照射材の破損温度低下の程度は両者で類似している。

HEDL において FCTT 試験を行うセルの雰囲気は空気であり、前述の窒素雰囲気での試験結果とあわせて考えると、HEDL での試験雰囲気には問題があることがわかる。

試験雰囲気の影響については、引張試験の場合と同様、破断前後の試験片の金相試験、SEM 観

察，EPMA分析，IMA分析等による検討がAESを中心に実施されている。これらの結果は別途報告書としてまとめられる予定である。

今回の試験結果では，窒素雰囲気でも2本の被覆管で大きな強度低下が見られており，破断形態が他の試験片と異なることから，試料に何らかの異常があった可能性が強いと考えているものの，具体的な証拠は得られていない。従って，今回の試験結果だけで，FAEは試験雰囲気の影響によるものと断言するのは時期尚早であり，今後さらに確認する必要がある。

しかし，引張試験結果とあわせて検討すると，いわゆるFAEは実際の燃料ピンの使用条件下では無視できる可能性が強い。すなわち，従来FAEといわれていた現象は，試験雰囲気が適切でなかったことによる強度低下を，照射済燃料被覆管が本来持っている強度と誤認したものと思われる。具体的にはFPとして被覆管内面に付着したCsと空気中の水分が反応してCsOHとなり，これにより高温高応力下で応力腐食割れを生じた可能性が強い。

従来MMFでは主として比較的燃焼度が低い燃料ピンについて強度試験を実施しており，その範囲では試験雰囲気の影響はあまり問題とならなかった。今後不活性雰囲気で試験を実施することにより，高燃焼度の燃料ピンについても照射済燃料被覆管が本来持っている強度及び延性を正確に把握でき，より合理的な燃料設計が行えるようになると考えられる。

---

以上の試験結果は直ちに試験設備に反映された。すなわち，第2照射材料試験施設(MMF-2)のNo.1セル及びNo.2-1セルを不活性雰囲気とするために，セル内窒素供給設備が設置され，昭和60年9月から稼動している。

## 5. ま と め

高速実験炉「常陽」MK-I 炉心燃料集合体 PPJX12 の燃料被覆管（最大中性子照射量  $6.4 \times 10^{22} \text{ n/cm}^2$ ,  $E > 0.1 \text{ MeV}$ ）を用いて、「常陽」MK-I 被覆管の引張試験において認められた特異破断の原因を究明するための試験を行った。試験雰囲気の影響を調べるため、被覆管内面を窒素雰囲気とした引張試験及び急速加熱バースト試験を実施した。

主な結果を以下に示す。

- (1) 「常陽」MK-I 被覆管の  $500^\circ\text{C}$  での引張試験において、燃焼度が約  $25,000 \text{ MWD/T}$  以上の場合に見られた特異破断は、試料保管中及び試験中に被覆管内面が空気にさらされたことによることが明らかとなった。被覆管内面を窒素雰囲気に維持すれば、特異破断は生じない。
- (2) 急速加熱バースト試験においても、引張試験の場合と同様、空気雰囲気の影響が認められたが、被覆管内面を窒素雰囲気とすれば、破損温度の低下は見られない。
- (3) 以上の結果から、いわゆる FAE は炉内における燃料ピンの使用条件下では無視できると考えられる。

従来 MMF では主として比較的燃焼度が低い燃料ピンについて強度試験を実施しており、その範囲では試験雰囲気の影響はあまり問題とならなかった。今後不活性雰囲気で試験を実施することにより、高燃焼度の燃料ピンについても照射済燃料被覆管が本来持っている強度及び延性を正確に把握でき、より合理的な燃料設計が行えるようになると考えられる。

なお、特異破断のメカニズムについては、破断前後の試験片の金相試験、機器分析結果等を含めて、別途報告書として取りまとめられる予定である。本報告書では FAE の有無について最終的な結論は出していないが、今後の知見により FAE を設計上考慮する必要がないことがはっきりすれば、燃料設計上大きなメリットとなると考えられる。

## 6. 謝 辞

本試験の実施にあたり、試験計画の立案及び金相セルでの試料保管に協力いただいた AES 甲野室長を始めとする関係各位並びに試験セルでの脱ミート、スウェーヂロック取付に協力いただいた FMS 田地室長及び担当者各位に深く感謝いたします。

## 7. 参 考 文 献

- (1) 井滝ら, "高速実験炉「常陽」炉心燃料集合体の照射後試験結果概要(第3報)" PNC SN941 84-05, 1984年1月
- (2) 燃料材料試験部, "「常陽」MK-I炉心構成要素第2期照射後試験計画" PNC N908 82-01, 1982年8月
- (3) C.W. Hunter et al., "Mechanical Properties of Unirradiated Fast Reactor Cladding During Simulated Overpower Transients", HEDL-SA 770 (1974).
- (4) H. Kwast, "Transient Burst Tests on Fast Reactor Fuel Cladding", ECN-21 (1977).
- (5) R.L. Fish et al., "Tensile Property Correlations for Highly Irradiated 20 Percent Cold-Worked Type 316 Stainless Steel", Effects of Radiation of Structural Materials, ASTM STP 683 (1979).
- (6) 野村ら, "Phenix-P2の照射後試験(1)" PNC SN941 83-78, 1983年6月
- (7) G.D. Johnson & C.W. Hunter, "Mechanical Behavior of Fast Reactor Fuel Pin Cladding Subjected to Simulated Overpower Transients", HEDL-TME 78-13 (1978).
- (8) M.G. Adamson et al., "Liquid Metal Embrittlement of AISI 316 Stainless Steel by Te-Cs Mixtures", GEFR-SP-269 (1982).



Table 1 Properties of investigated material (PPJX12)

|                    |                              | K002            | S008           | S012           | R001            |
|--------------------|------------------------------|-----------------|----------------|----------------|-----------------|
| Solution treatment |                              | 1010°C<br>2 min | 980°C<br>4 min | 980°C<br>4 min | 1050°C<br>1 min |
| Cold work (%)      |                              | 10              | 12             | 12             | 13              |
| C (wt/o)           |                              | 0.05            | 0.06           | 0.06           | 0.06            |
| Si                 |                              | 0.56            | 0.51           | 0.50           | 0.50            |
| Mn                 |                              | 1.54            | 1.75           | 1.75           | 1.69            |
| P                  |                              | 0.018           | 0.020          | 0.020          | 0.005           |
| S                  |                              | 0.010           | 0.007          | 0.006          | 0.004           |
| Ni                 |                              | 12.91           | 12.97          | 13.05          | 13.71           |
| Cr                 |                              | 16.45           | 16.90          | 16.78          | 17.37           |
| Mo                 |                              | 2.33            | 2.49           | 2.49           | 2.32            |
| Co                 |                              | 0.04            | 0.01           | 0.01           | 0.01            |
| B                  |                              | <0.0010         | 0.0001         | 0.0001         | 0.0009          |
| N                  |                              | 0.0179          | 0.0310         | 0.0301         | 0.0040          |
| Grain size         | Circumf.                     | 9.0             | 9.0            | 9.0            | 7.0             |
| ASTM No.           | Axial                        | 9.0             | 9.0            | 9.0            | 7.0             |
| Hardness (Hv)      |                              | 253             | 265 265        | 266 263        | 222 221         |
| R.T.               | U.T.S. (kg/mm <sup>2</sup> ) | 78.8 78.3       | 82.7 81.7      | 78.2 77.7      | 70.4 71.1       |
|                    | Y.S. (kg/mm <sup>2</sup> )   | 66.1 65.7       | 70.5 69.8      | 64.3 64.4      | 55.4 55.5       |
|                    | Elong. (%)                   | 32 32           | 28 29          | 29 29          | 38 36           |
| 650°C              | U.T.S. (kg/mm <sup>2</sup> ) | 50.1 49.5       | 44.6 44.6      | 44.7 44.3      | 36.8 41.3       |
|                    | Y.S. (kg/mm <sup>2</sup> )   | 43.9 43.0       | 38.2 38.8      | 37.5 38.0      | 30.7 33.5       |
|                    | Elong. (%)                   | 16 17           | 22 22          | 25 21          | 26 25           |

Table 2 Tensile specimens and test conditions of irradiated fuel claddings (PPJX12, Material K and S)

| Specimen number | Lot number | DFPB* (mm) | Irrad. temp. (°C) | Fluence $10^{22}$ n/cm <sup>2</sup> (E>0.1MeV) | Test temp. (°C) | Atmosphere                                     |
|-----------------|------------|------------|-------------------|--|-----------------|--|
| 67582C          | S012       | 882~ 958   | 512               | 5.1  | 500             | Air  |
| 67584C          | S012       | 986~1062   | 528               | 3.6  | 500             |  |
| 67652           | K002       | 758~ 834   | 481               | 6.1  | 550             |  |
| 67654           | K002       | 910~ 986   | 517               | 4.7  | 550             |  |
| 67274           | S012       | 910~ 986   | 514               | 4.6  | 500             | N <sub>2</sub> **<br>(~800 ppmO <sub>2</sub> ) |
| 67275           | S012       | 986~1062   | 525               | 3.5  | 500             |  |
| 67262C          | S012       | 882~ 958   | 509               | 5.0  | 500             | N <sub>2</sub> ***<br>(~75 ppmO <sub>2</sub> ) |
| 6755EC          | S008       | 986~1062   | 528               | 3.6  | 500             |  |
| 67264C          | S012       | 986~1062   | 525               | 3.5  | 500             |  |
| 67657           | K002       | 1072~1148  | 524               | 2.0  | 500             |  |
| 67653           | K002       | 834~ 910   | 501               | 5.6  | 550             |  |
| 67655           | K002       | 986~1062   | 529               | 3.7  | 550             |  |
| 67272           | S012       | 758~ 834   | 478               | 6.0  | 600             |  |
| 67273           | S012       | 834~ 910   | 498               | 5.5  | 600             |  |

\* Distance from pin bottom

\*\* FMF metallography cell

\*\*\* FMF examination cell

Table 3 Transient Burst Specimens and Test Conditions of Irradiated Fuel Cladding (PPJX12, Material R)

| Specimen number | DFPB* (mm)   | Irrad. temp. (°C) | Fluence $10^{22}$ n/cm <sup>2</sup> (E>0.1MeV) | Hoop stress (kg/mm <sup>2</sup> ) | Trans. rate (°C/s) | Atmosphere                                    |
|-----------------|--------------|-------------------|--|-----------------------------------|--------------------|---|
| 67484           | 718 ~ 798    | 468               | 6.1  | 20.0                              | 5                  | Air   |
| 67488           | 894 ~ 974    | 512               | 4.8  |                                   |                    |   |
| 67453           | 657 ~ 738    | 450               | 6.1  |                                   |                    | N <sub>2</sub> **<br>(~75 ppmO <sub>2</sub> ) |
| 67455           | 820.5~ 901.5 | 497               | 5.6  |                                   |                    |   |
| 67457           | 983.5~1068.5 | 528               | 3.6  |                                   |                    |   |
| 67459           | 1153 ~1234   | 523               | 1.0  |                                   |                    |   |
| 67482           | 629 ~ 709    | 441               | 5.9  | 29.8                              | 5                  | Air   |
| 67486           | 806 ~ 886    | 493               | 5.7  |                                   |                    |   |
| 6748A           | 986 ~1066    | 528               | 3.6  |                                   |                    |   |
| 67452           | 576 ~ 657    | 425               | 5.6  |                                   |                    | N <sub>2</sub><br>(~75 ppmO <sub>2</sub> )    |
| 67454           | 738 ~ 820.5  | 474               | 6.1  |                                   |                    |   |
| 67456           | 901.5~ 983.5 | 515               | 4.8  |                                   |                    |   |
| 67458           | 1068.5~1153  | 523               | 2.0  |                                   |                    |   |

\* Distance from pin bottom

\*\* FMF examination cell

Table 4 Fuel cladding tensile test results (PPJX12)

| Specimen number<br>(Lot No.) | Irradiation   |               |  | Test Conditions |                        | Test Results                          |                                 |                          |                        |                       | Atmosphere                                  |
|------------------------------|---------------|---------------|--|-----------------|------------------------|---------------------------------------|---------------------------------|--------------------------|------------------------|-----------------------|---|
|                              | DFPB*<br>(mm) | Temp.<br>(°C) | Fluence<br>$10^{22}$ n/cm <sup>2</sup><br>(E>0.1MeV) | Temp.<br>(°C)   | Strain rate<br>(%/min) | 0.2%<br>Y.S.<br>(kg/mm <sup>2</sup> ) | U.T.S.<br>(kg/mm <sup>2</sup> ) | Uniform<br>elong.<br>(%) | Total<br>elong.<br>(%) | Failure**<br>location |   |
| 67582C<br>(S012)             | 882~958       | 512           | 5.1  | 500             | 0.4                    | 46.3                                  | 48.8                            | 1.0                      | 1.1                    | C                     | Air   |
| 67584C<br>(S012)             | 986~1062      | 528           | 3.6  | 500             | 0.4                    | 43.0                                  | 48.9                            | 3.6                      | 3.9                    | C                     |   |
| 67652<br>(K002)              | 758~834       | 481           | 6.1  | 550             | 0.4                    | 50.9                                  | 51.2                            | 0.4                      | 0.5                    | D                     |   |
| 67654<br>(K002)              | 910~986       | 517           | 4.7  | 550             | 0.4                    | 45.0                                  | 45.9                            | 0.4                      | 0.5                    | A                     |   |
| 67274<br>(S012)              | 910~986       | 514           | 4.6  | 500             | 0.4                    | 44.6                                  | 56.0                            | 6.6                      | 6.7                    | D                     | N <sub>2</sub><br>(~800 ppmO <sub>2</sub> ) |
| 67275<br>(S012)              | 986~1062      | 525           | 3.5  | 500             | 0.4                    | 42.7                                  | 55.4                            | 9.5                      | 11.5                   | C                     |   |
| 67262C<br>(S012)             | 882~958       | 509           | 5.0  | 500             | 0.4                    | 47.6                                  | 60.4                            | 9.1                      | 10.4                   | C                     | N <sub>2</sub><br>(~75 ppmO <sub>2</sub> )  |
| 6755EC<br>(S008)             | 986~1062      | 528           | 3.6  | 500             | 0.4                    | 44.3                                  | 57.9                            | 11.7                     | 11.8                   | A                     |   |
| 67264C<br>(S012)             | 986~1062      | 525           | 3.5  | 500             | 0.4                    | 44.3                                  | 57.6                            | 10.6                     | 11.9                   | C                     |   |
| 67657<br>(K002)              | 1072~1148     | 524           | 2.0  | 500             | 0.4                    | 45.7                                  | 59.0                            | 10.9                     | 13.0                   | C                     |   |
| 67653<br>(K002)              | 834~910       | 501           | 5.6  | 550             | 0.4                    | 46.9                                  | 57.6                            | 7.9                      | 9.1                    | C                     |   |
| 67655<br>(K002)              | 986~1062      | 529           | 3.7  | 550             | 0.4                    | 42.8                                  | 48.2                            | 2.8                      | 2.9                    | A                     |   |
| 67272<br>(S012)              | 758~834       | 478           | 6.0  | 600             | 0.4                    | 44.6                                  | 51.1                            | 4.6                      | 5.8                    | C                     |   |
| 67273<br>(S012)              | 834~910       | 498           | 5.5  | 600             | 0.4                    | 41.7                                  | 49.1                            | 5.7                      | 6.9                    | D                     |   |

\* Distance from pin bottom

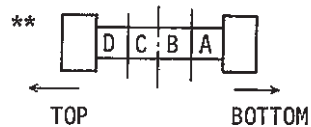


Table 5 Fuel cladding transient burst test results (PPJX12)

| Specimen number | Irradiation  |            |  | Test Conditions                |                                   |                    |                    | Test Results       |           |                 | Atmosphere |     |      |         |  |
|-----------------|--------------|------------|--|--------------------------------|-----------------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|-----------|-----------------|------------|-----|------|---------|--|
|                 | DFPB* (mm)   | Temp. (°C) | Fluence $10^{22}$ n/cm <sup>2</sup> (E>0.1MeV) | Pressure (kg/cm <sup>2</sup> ) | Hoop stress (kg/mm <sup>2</sup> ) | Initial temp. (°C) | Trans. rate (°C/s) | Failure temp. (°C) | DFS** (%) | Type of failure |            |     |      |         |  |
| 67484           | 718 ~ 798    | 468        | 6.1  | 235                            | 20.0                              | 450                | 5                  | 720                | 0.7       | violent         | Air        |     |      |         |  |
| 67488           | 894 ~ 974    | 512        | 4.8  |                                |                                   |                    |                    | 645                | 0.1       | violent         |            |     |      |         |  |
| 67453           | 657 ~ 738    | 450        | 6.1  |                                |                                   |                    |                    | 235                | 20.0      | 450             | 5          | 865 | 1.1  | violent | N <sub>2</sub><br>(~75 ppmO <sub>2</sub> ) |
| 67455           | 820.5~ 901.5 | 497        | 5.6  |                                |                                   |                    |                    |                    |           |                 |            | 875 | 1.4  | violent |  |
| 67457           | 983.5~1068.5 | 528        | 3.6  |                                |                                   |                    |                    |                    |           |                 |            | 895 | 0.8  | violent |  |
| 67459           | 1153 ~1234   | 523        | 1.0  |                                |                                   |                    |                    |                    |           |                 |            | 900 | 0.9  | violent |  |
| Unirrad.        | —            | —          | —  |                                |                                   |                    |                    | 235                | 20.0      | 450             | 5          | 835 | 0.7  | violent | —  |
| Unirrad.        | —            | —          | —  |                                |                                   |                    |                    |                    |           |                 |            | 845 | 1.1  | violent | —  |
| 67482           | 629 ~ 709    | 441        | 5.9  |                                |                                   |                    |                    | 350                | 29.8      | 450             | 5          | 700 | 1.0  | violent | Air  |
| 67486           | 806 ~ 886    | 493        | 5.7  |                                |                                   |                    |                    |                    |           |                 |            | 640 | 0.8  | violent |  |
| 6748A           | 986 ~1066    | 528        | 3.6  | 585                            | 0.3                               | violent            |                    |                    |           |                 |            |     |      |         |  |
| 67452           | 576 ~ 657    | 425        | 5.6  | 350                            | 29.8                              | 450                | 5                  |                    |           |                 |            | 570 | 0.05 | pinhole | N <sub>2</sub><br>(~75 ppmO <sub>2</sub> ) |
| 67454           | 738 ~ 820.5  | 474        | 6.1  |                                |                                   |                    |                    |                    |           |                 |            | 780 | 1.1  | violent |  |
| 67456           | 901.5~ 983.5 | 515        | 4.8  |                                |                                   |                    |                    |                    |           |                 |            | 615 | 0.1  | pinhole |  |
| 67458           | 1068.5~1153  | 523        | 2.0  |                                |                                   |                    |                    |                    |           |                 |            | 805 | 2.1  | violent |  |
| Unirrad.        | —            | —          | —  | 350                            | 29.8                              | 450                | 5                  |                    |           |                 |            | 765 | 1.5  | violent | —  |

\* Distance from pin bottom

\*\* Diametral failure strain

"JOYO" MK-I Core Map

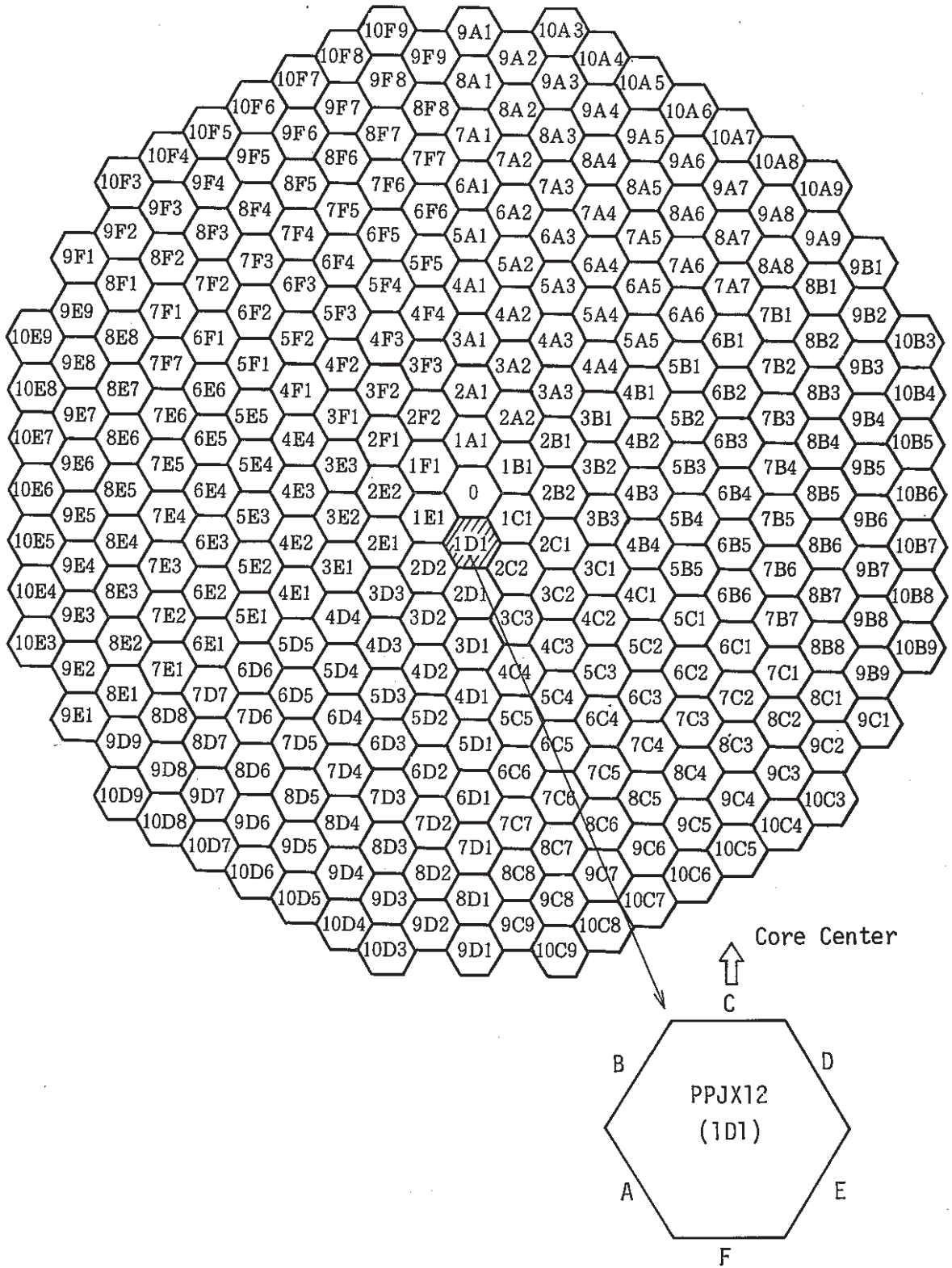


Fig. 1 Subassembly (PPJX12) orientation in core.

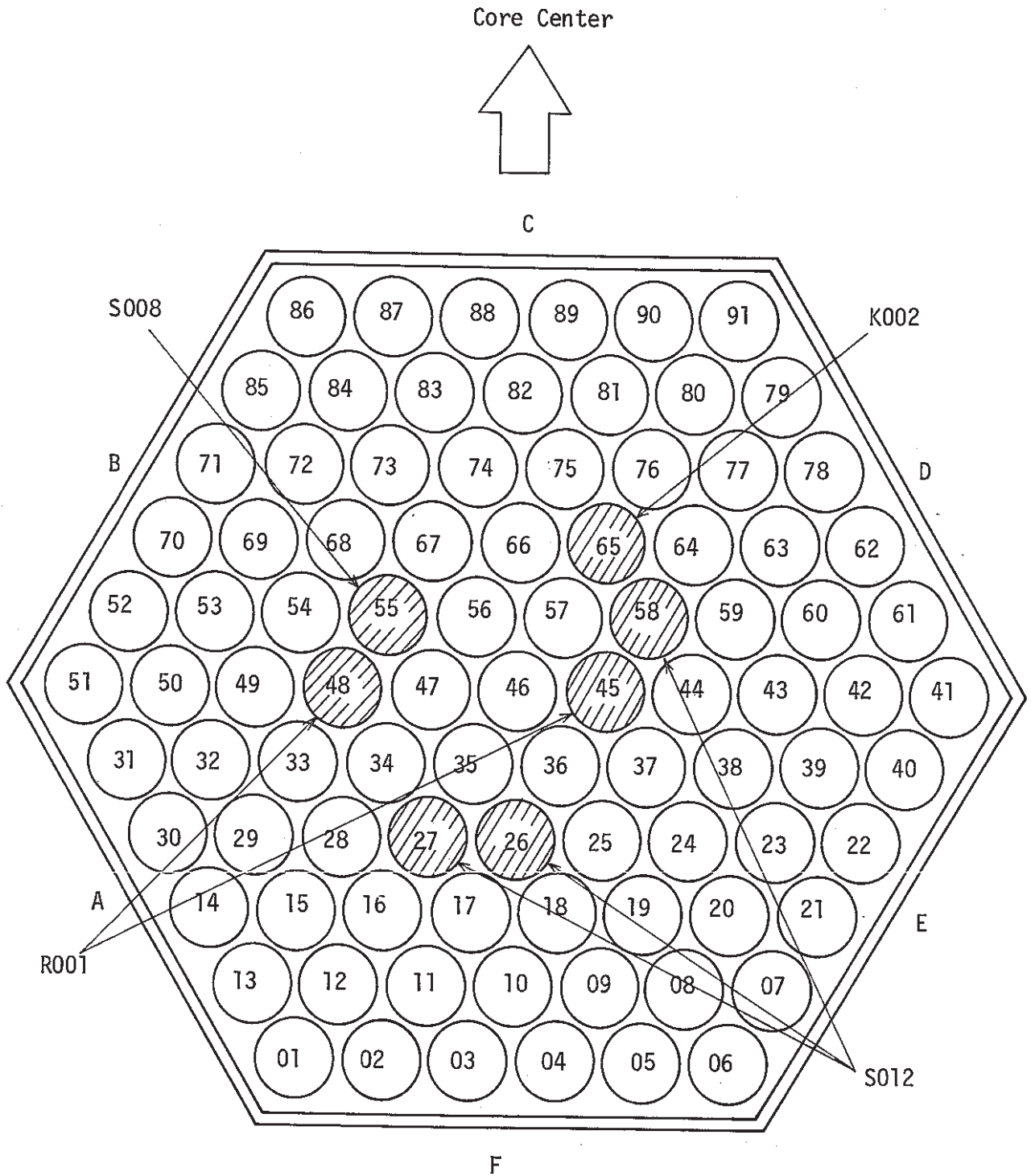
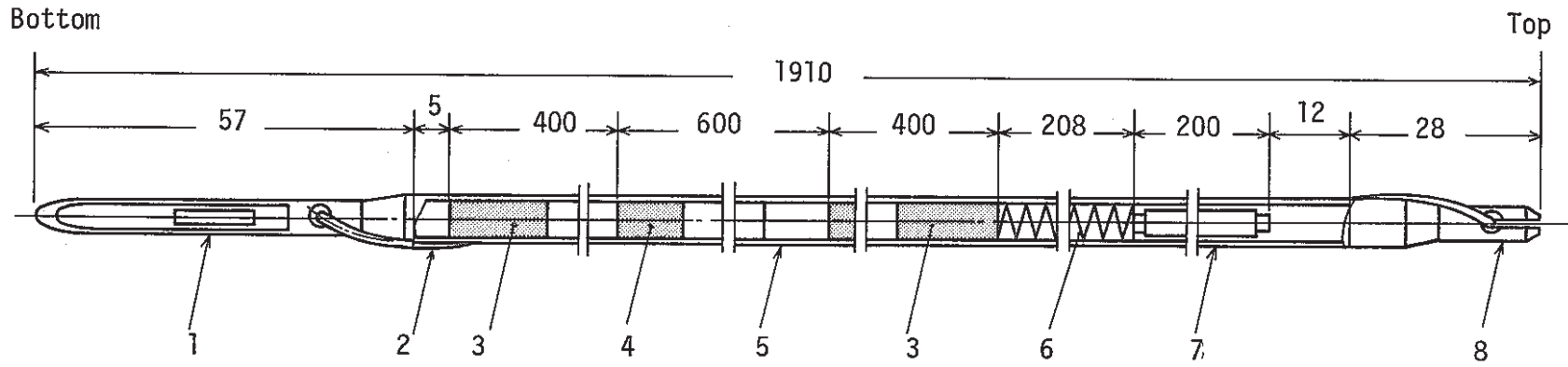


Fig. 2 Location of the pin in the subassembly (PPJX12)



|     |                |                                   |                      |
|-----|----------------|-----------------------------------|----------------------|
| 8   | upper end plug | SUS316                            |                      |
| 7   | sleeve         | SUS316                            |                      |
| 6   | spring         | SUS316                            |                      |
| 5   | cladding       | SUS316                            | I.D. 5.6φ, O.D. 6.3φ |
| 4   | core pellet    | PuO <sub>2</sub> -UO <sub>2</sub> |                      |
| 3   | blanket        | UO <sub>2</sub>                   |                      |
| 2   | wrapping wire  | SUS316                            | 1.2φ                 |
| 1   | lower end plug | SUS316                            |                      |
| No. | parts name     | material                          | remarks              |

Fig. 3 JOYO MK-I core fuel pin



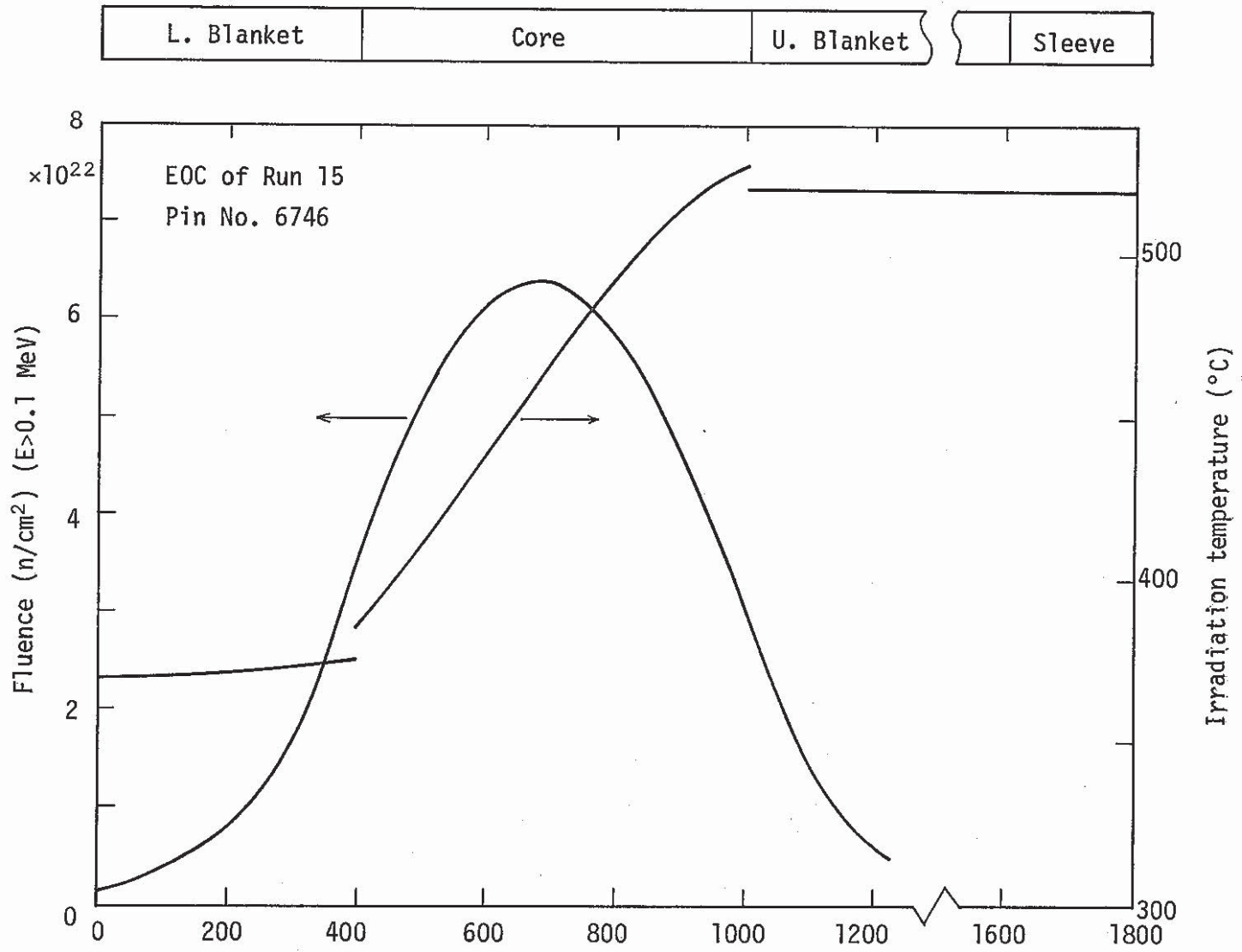


Fig. 4 Irradiation condition of fuel cladding (PPJX12)

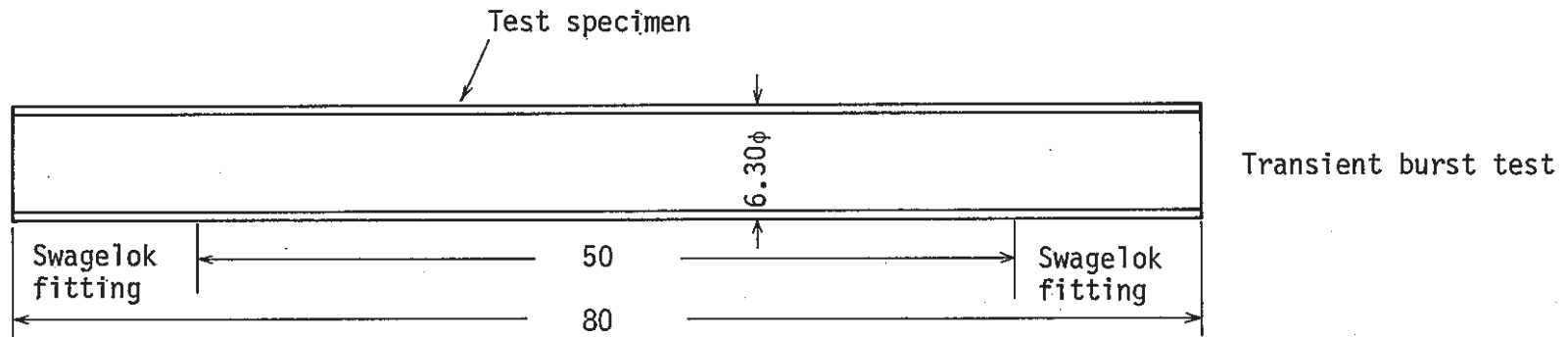
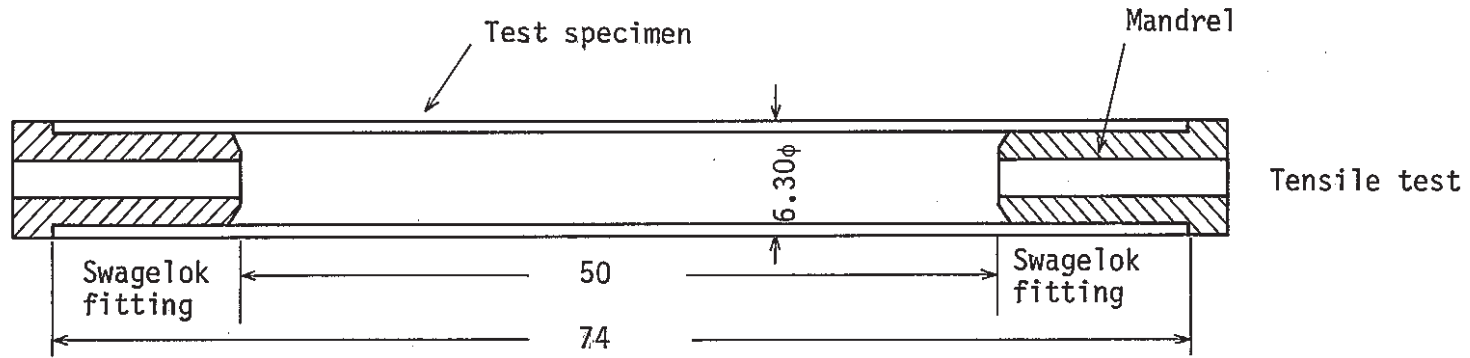


Fig. 5 Schematic drawing of the specimen

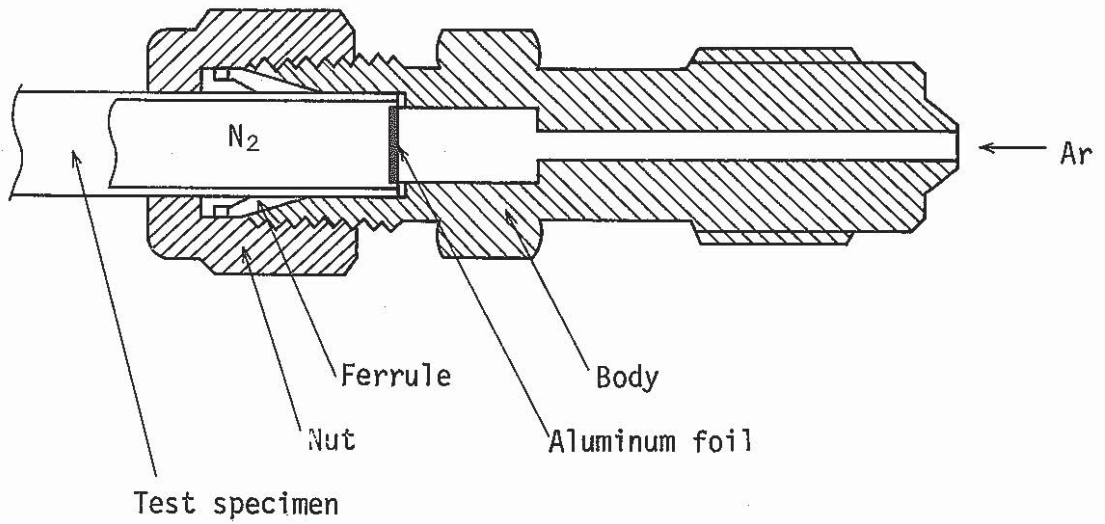


Fig. 6 Improved swagelok fitting for transient burst test

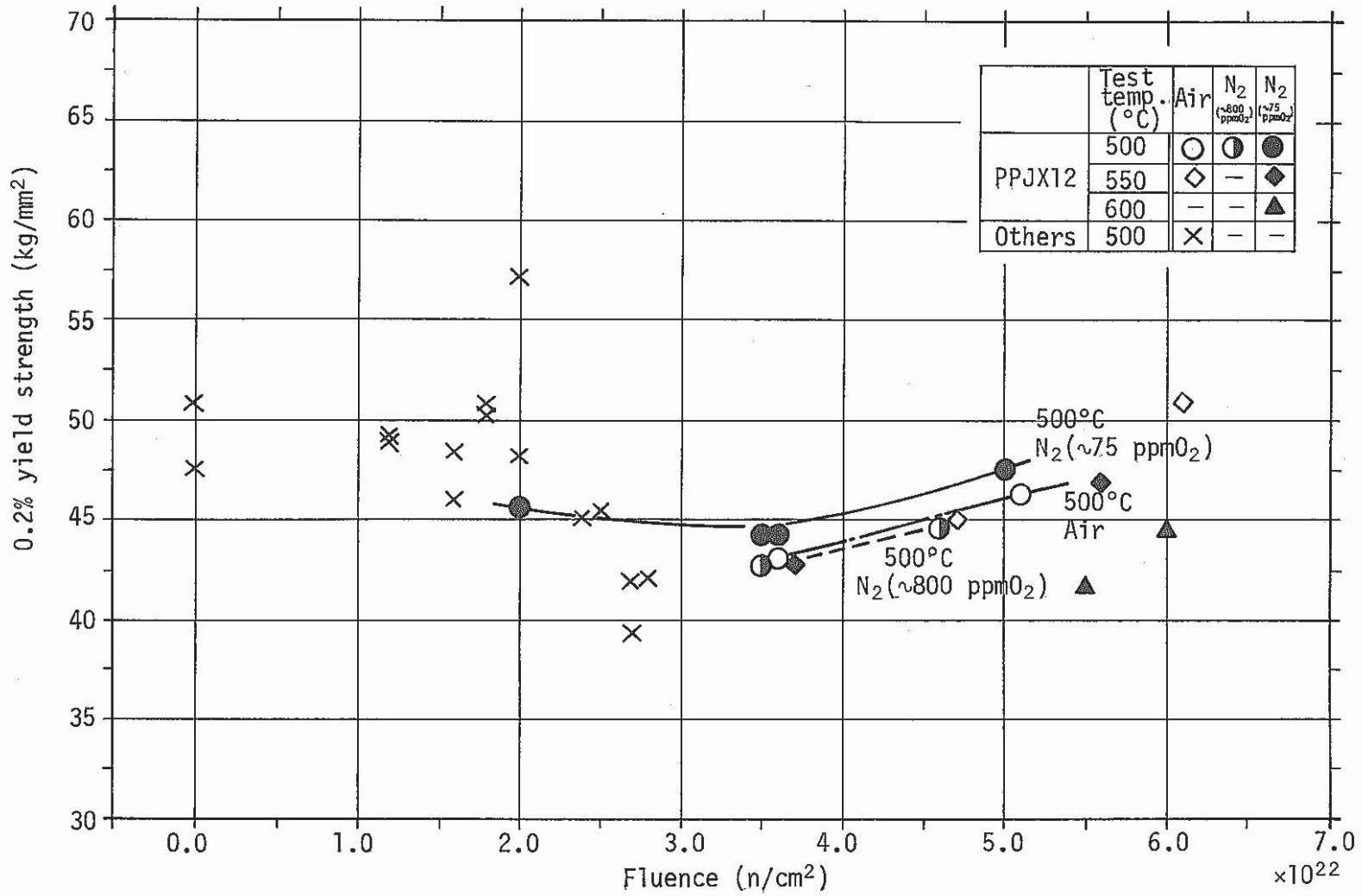


Fig. 7 Yield strength as a function of fluence

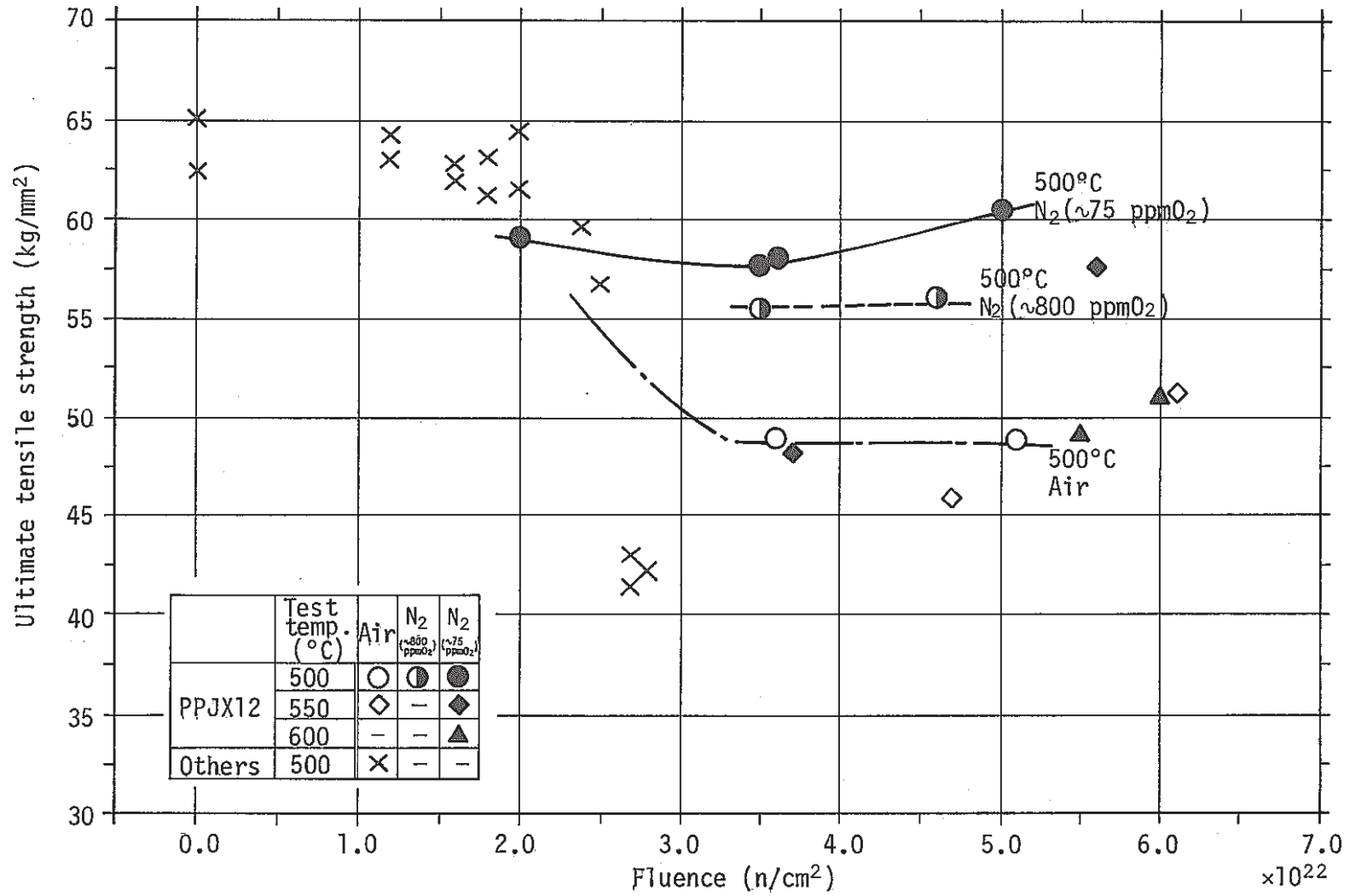


Fig. 8 Ultimate tensile strength as a function of fluence (PPJX12)

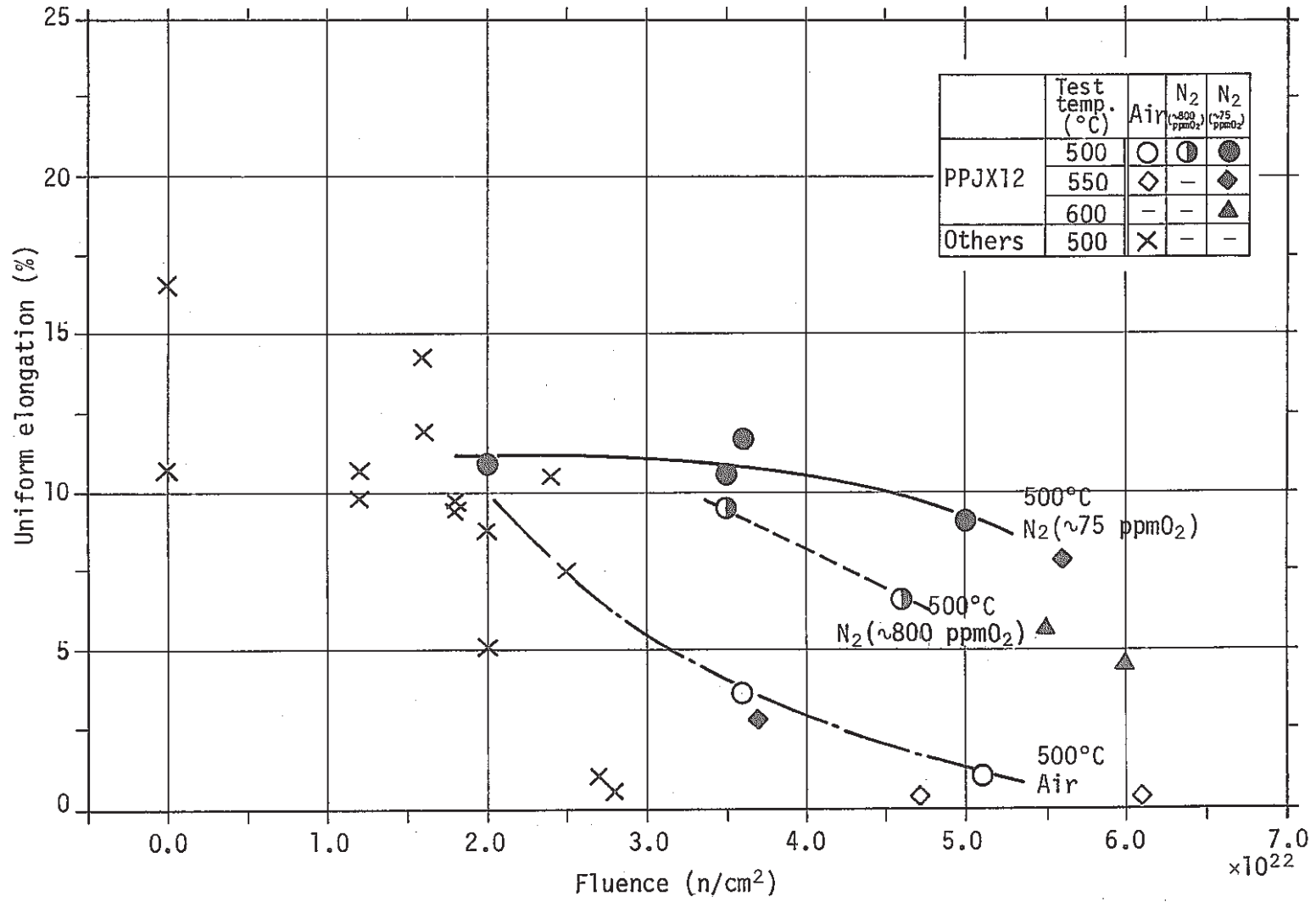


Fig. 9 Uniform elongation as a function of fluence

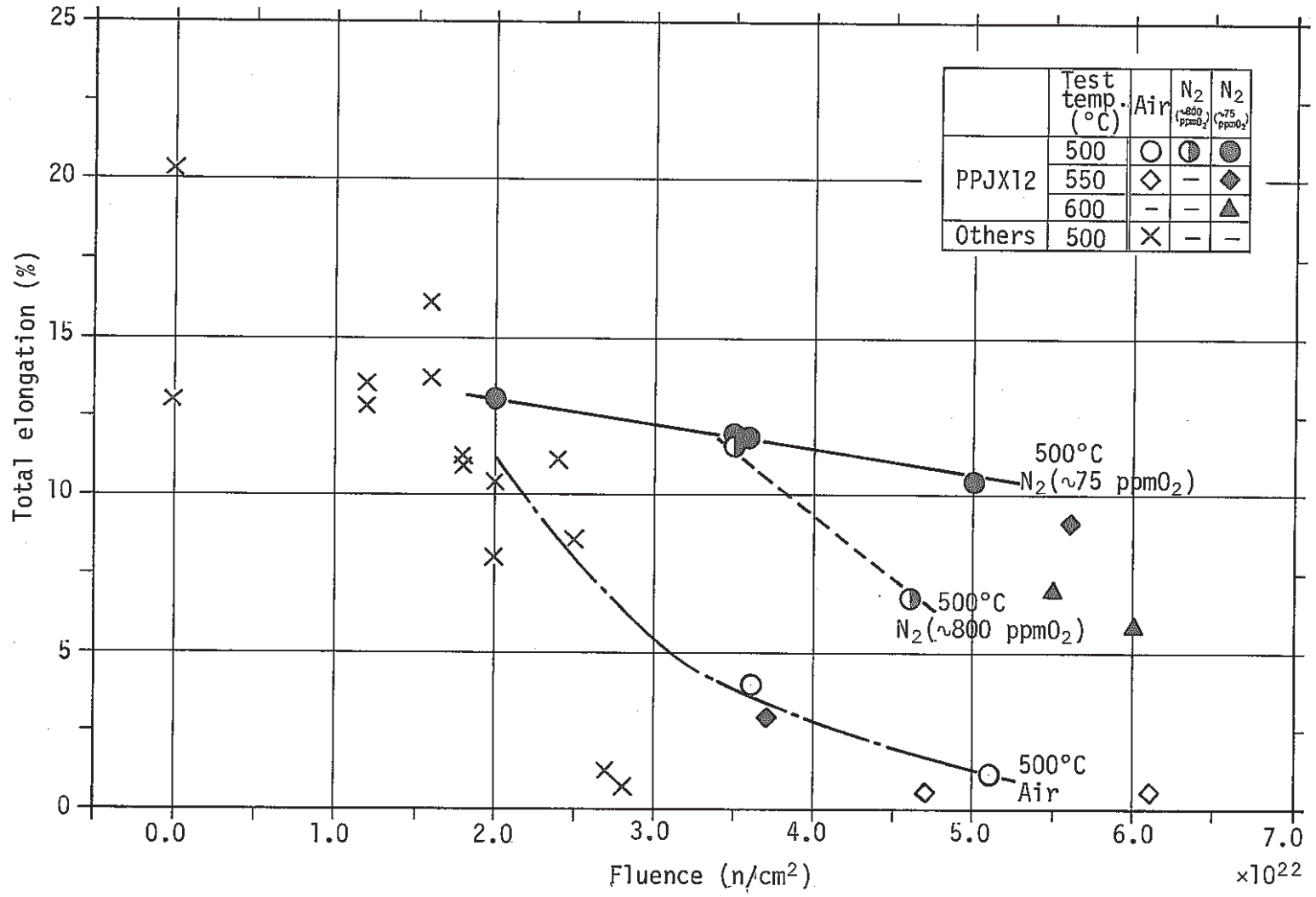


Fig. 10 Total elongation as a function of fluence

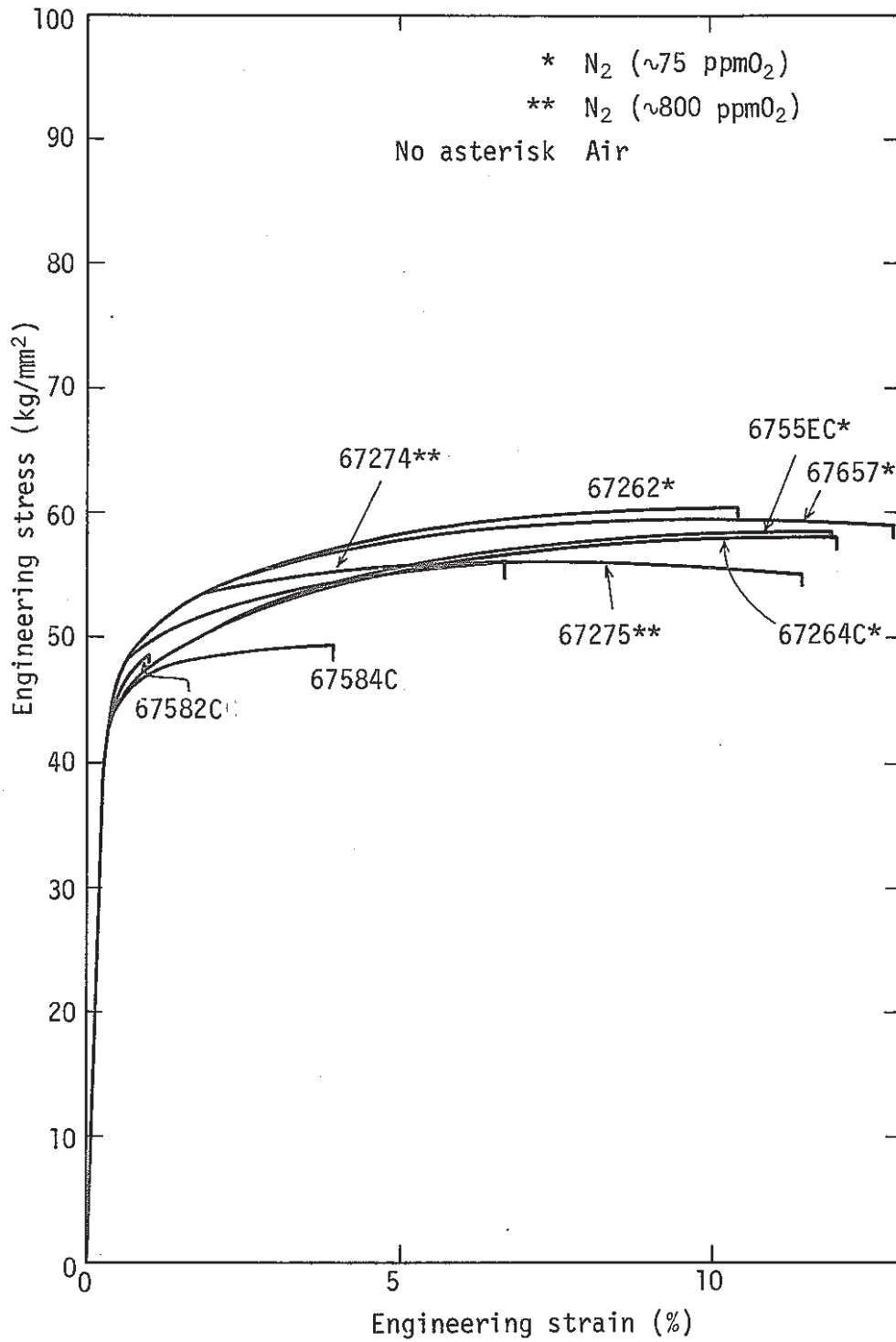


Fig. 11 Stress-strain curve at 500°C (PPJX12)



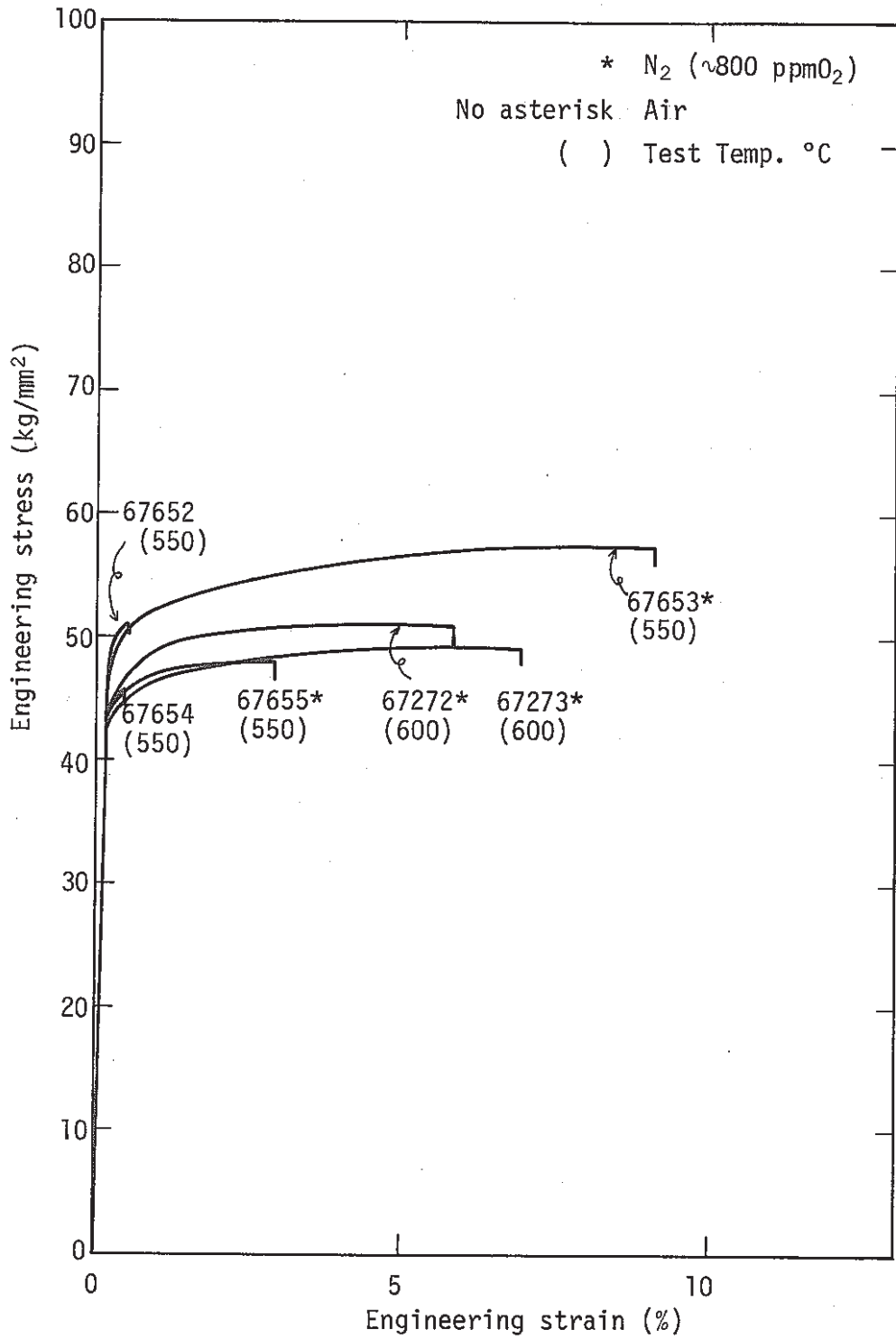


Fig. 12 Stress-strain curve at 550°C and 600°C

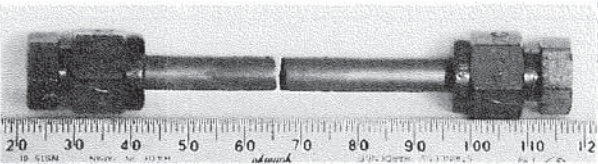
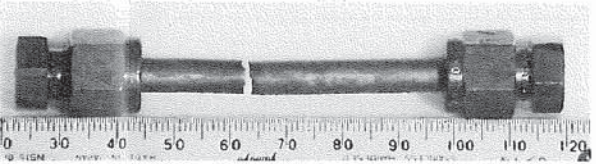
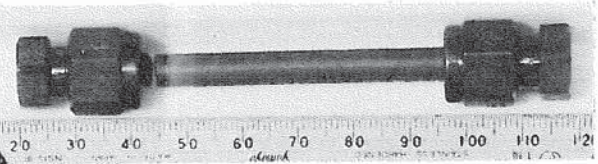
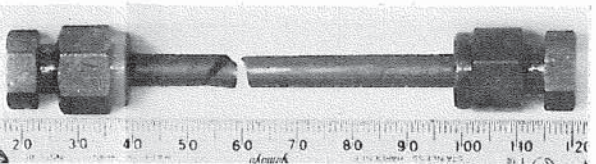
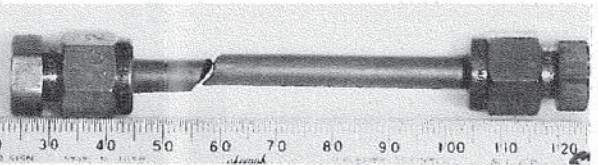
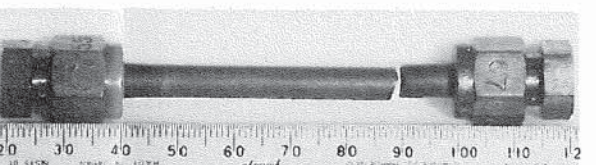
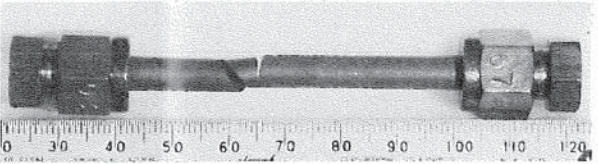
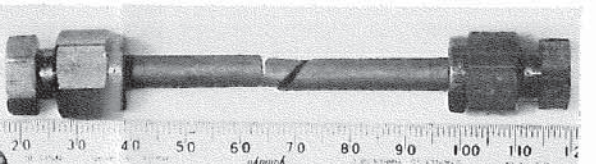
|  |   |  |
|--|---|--|
| <p>Air</p>                                       |  <p>S012, 512°C, <math>5.1 \times 10^{22}</math> n/cm<sup>2</sup></p>   |  <p>S012, 528°C, <math>3.6 \times 10^{22}</math> n/cm<sup>2</sup></p>   |
| <p>N<sub>2</sub><br/>(~800 ppmO<sub>2</sub>)</p> |  <p>S012, 514°C, <math>4.6 \times 10^{22}</math> n/cm<sup>2</sup></p>   |  <p>S012, 525°C, <math>3.5 \times 10^{22}</math> n/cm<sup>2</sup></p>   |
| <p>N<sub>2</sub><br/>(~75 ppmO<sub>2</sub>)</p>  |  <p>S012, 509°C, <math>5.0 \times 10^{22}</math> n/cm<sup>2</sup></p>   |  <p>S008, 528°C, <math>3.6 \times 10^{22}</math> n/cm<sup>2</sup></p>   |
|  |  <p>S012, 525°C, <math>3.5 \times 10^{22}</math> n/cm<sup>2</sup></p> |  <p>K002, 524°C, <math>2.0 \times 10^{22}</math> n/cm<sup>2</sup></p> |

Fig. 13 Appearance of irradiated fuel cladding after tensile test at 500°C (PPJX12)

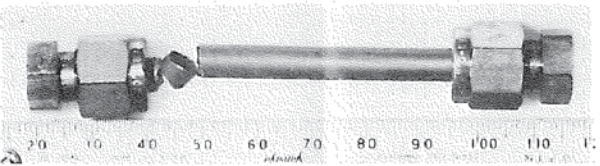
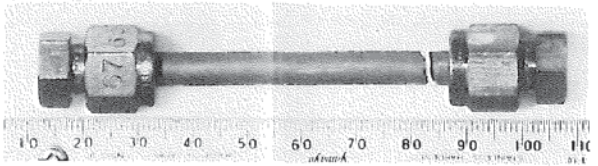
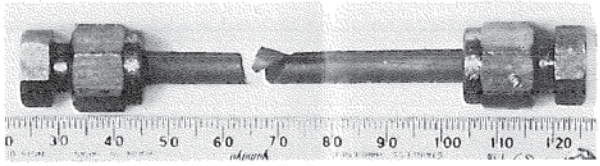
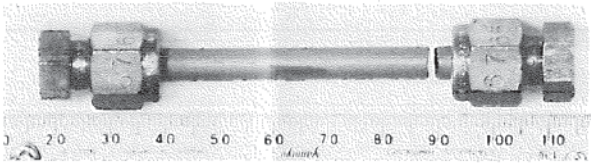
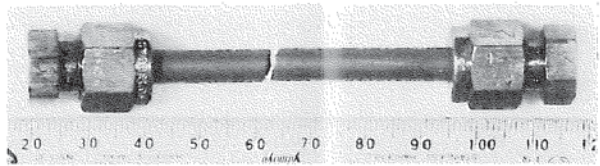
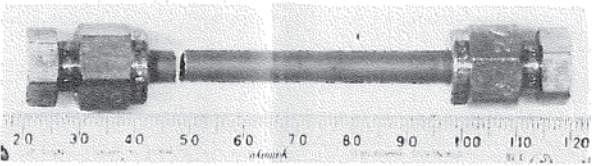
|   |  |   |
|---|--|---|
| <p>Air<br/>Test temp.: 550°C</p>                                      |  <p>K002, 481°C, <math>6.1 \times 10^{22}</math> n/cm<sup>2</sup></p>  |  <p>K002, 517°C, <math>4.7 \times 10^{22}</math> n/cm<sup>2</sup></p>  |
| <p>N<sub>2</sub><br/>(~75 ppmO<sub>2</sub>)<br/>Test temp.: 550°C</p> |  <p>K002, 501°C, <math>5.6 \times 10^{22}</math> n/cm<sup>2</sup></p>  |  <p>K002, 529°C, <math>3.7 \times 10^{22}</math> n/cm<sup>2</sup></p>  |
| <p>N<sub>2</sub><br/>(~75 ppmO<sub>2</sub>)<br/>Test temp.: 600°C</p> |  <p>S012, 478°C, <math>6.0 \times 10^{22}</math> n/cm<sup>2</sup></p> |  <p>S012, 498°C, <math>5.5 \times 10^{22}</math> n/cm<sup>2</sup></p> |

Fig. 14 Appearance of irradiated fuel claddings after tensile test at 550°C and 600°C (PPJX12)

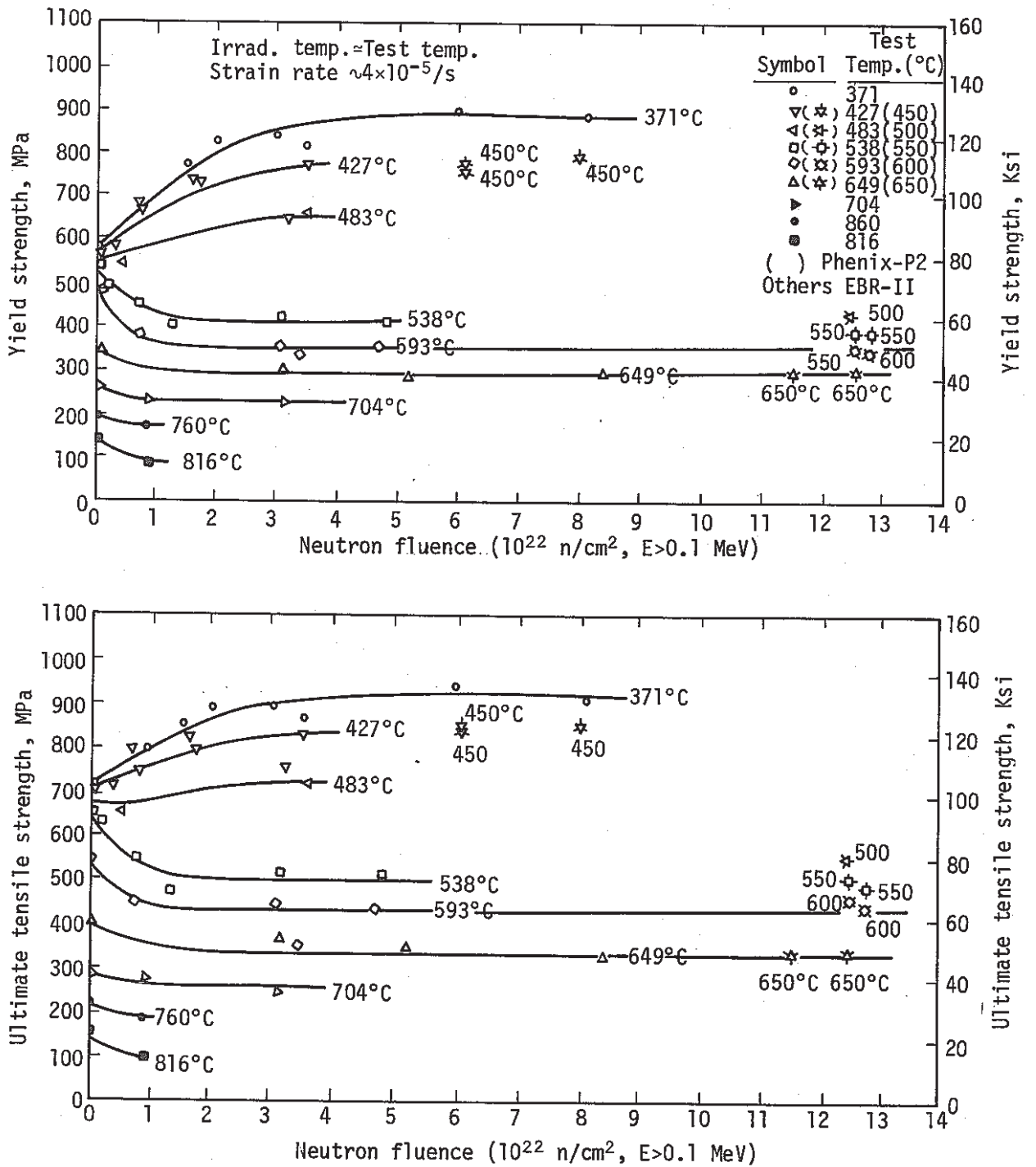


Fig. 15 Tensile properties of 20% cold-worked Type 316 stainless steel irradiated in EBR-II and Phenix

EBR-II data: R.L. Fish et al.<sup>(3)</sup>  
Phenix data: S. Nomura et al.<sup>(4)</sup>

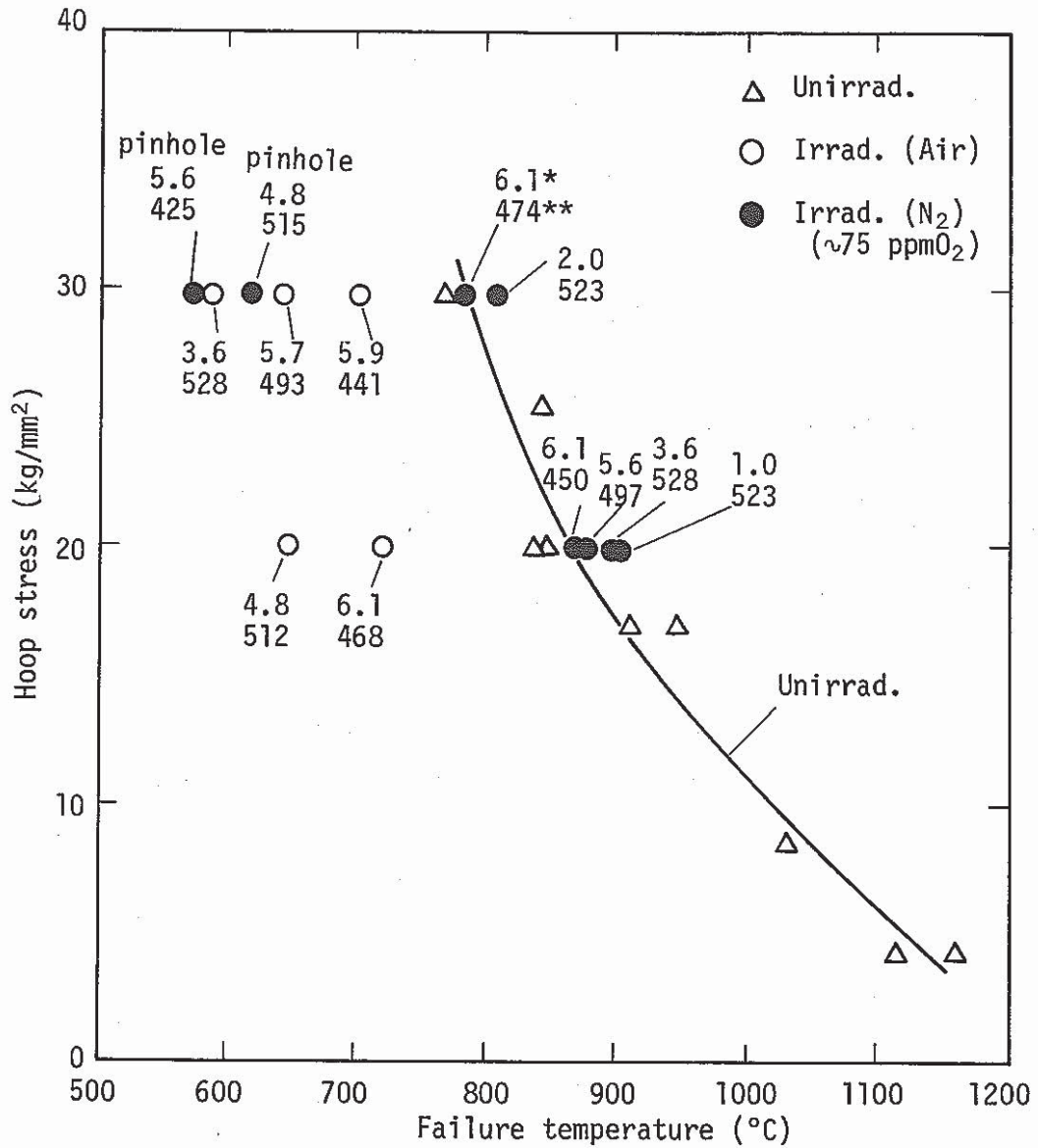


Fig. 16 Effects of irradiation condition and test atmosphere on failure temperature of irradiated fuel cladding (PPJX12)

\*: Fluence ( $\times 10^{22}$  n/cm<sup>2</sup>, E>0.1 MeV)

\*\* Irradiation temperature (°C)

Transient rate: 5°C/s

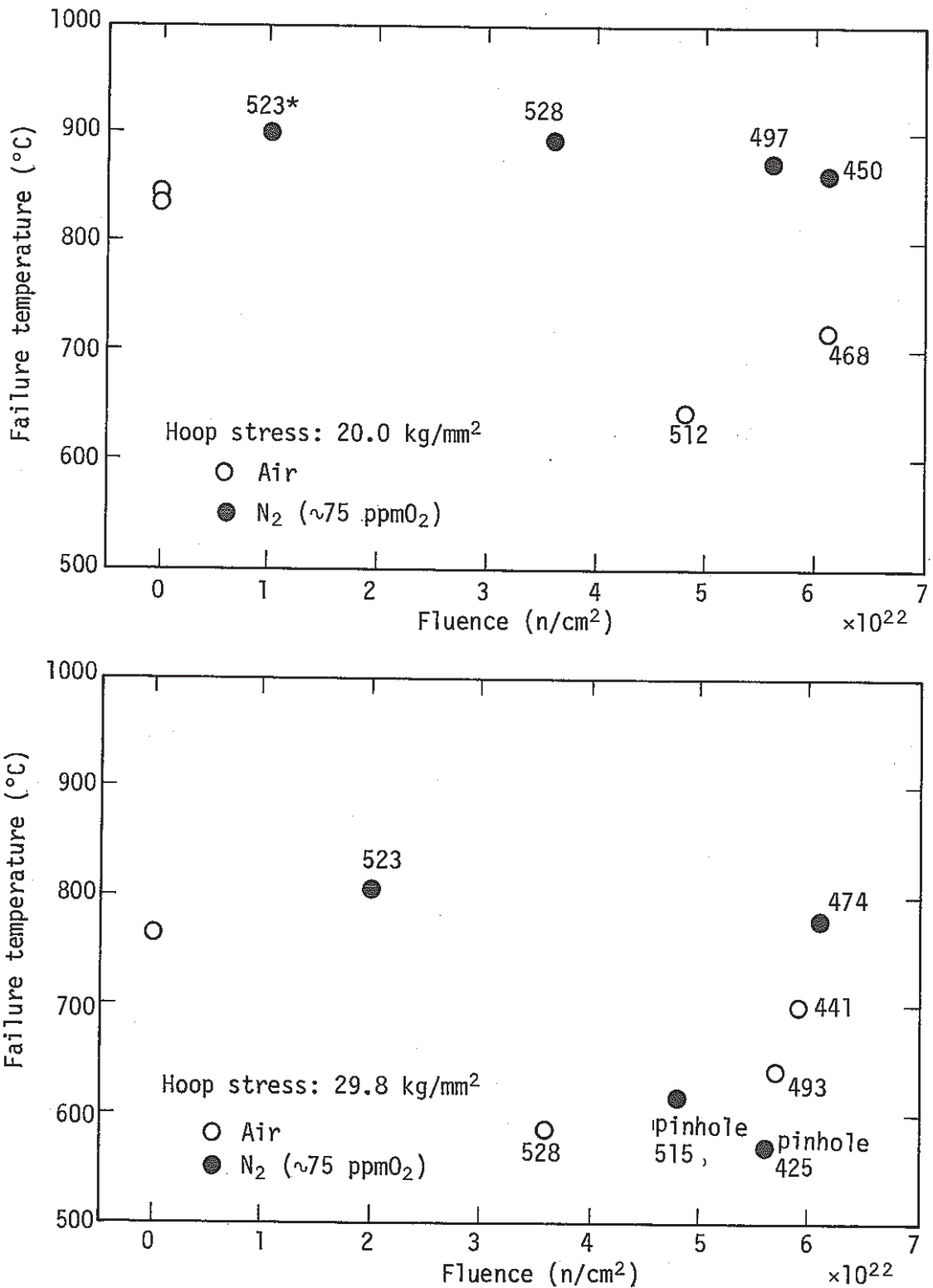


Fig. 17 Failure temperature as a function of fluence (PPJX12)

\* Irradiation temperature (°C)

Transient rate: 5°C/s

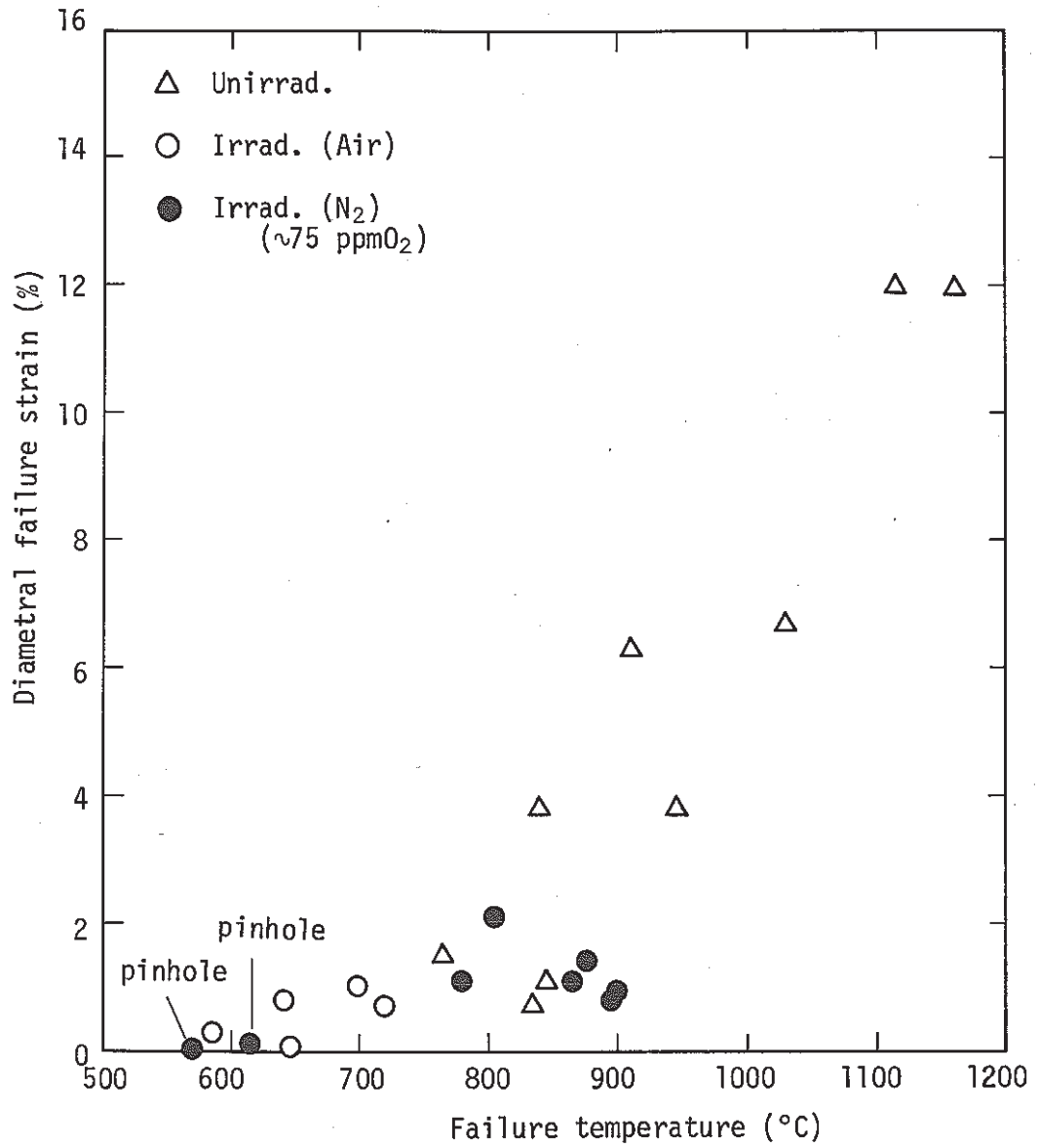


Fig. 18 Effects of irradiation condition and test atmosphere on diametral failure strain of irradiated fuel cladding (PPJX12)

Transient rate: 5°C/s

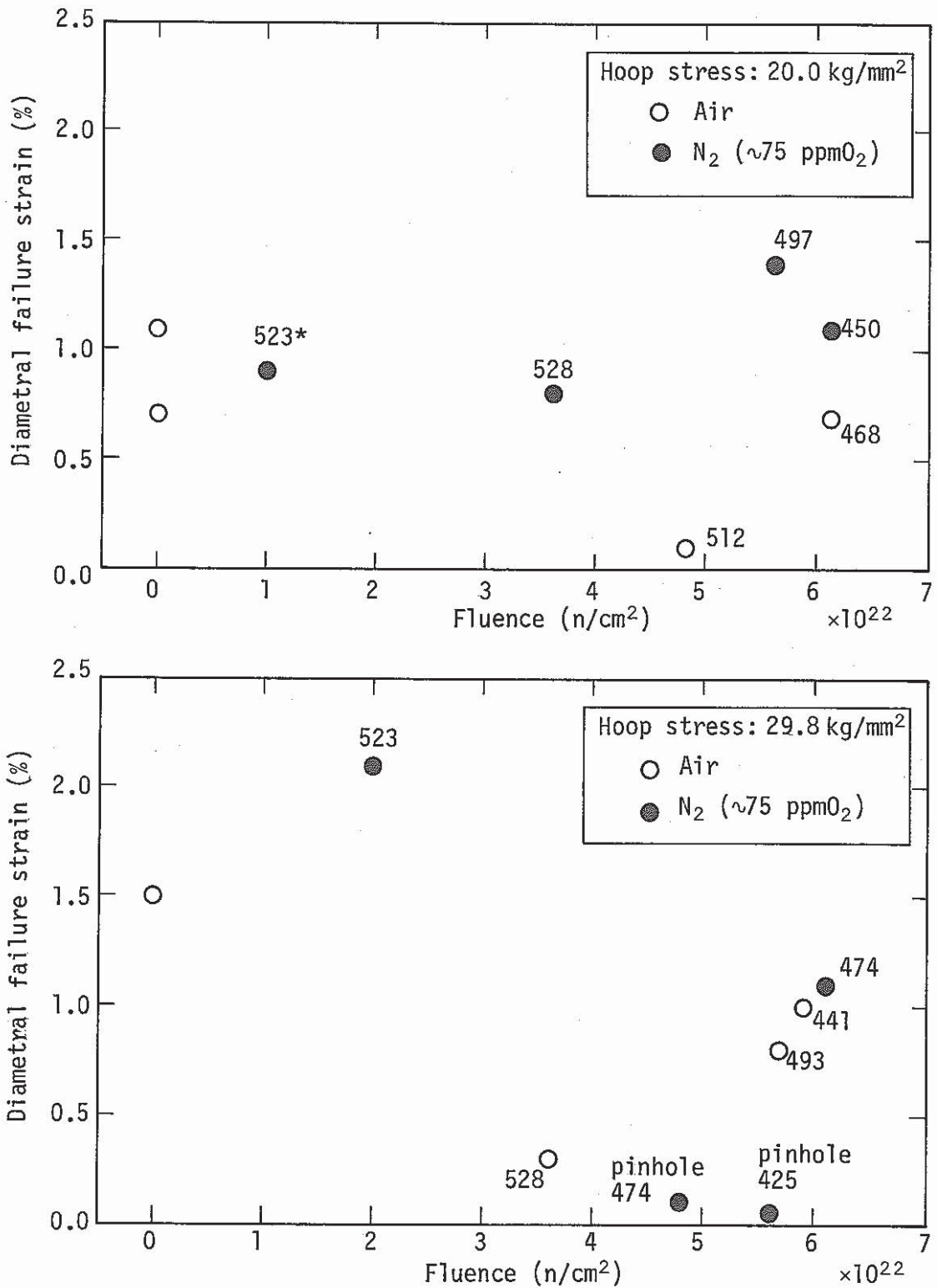


Fig. 19 Diametral failure strain as a function of fluence (PPJX12)  
 \* Irradiation temperature (°C)



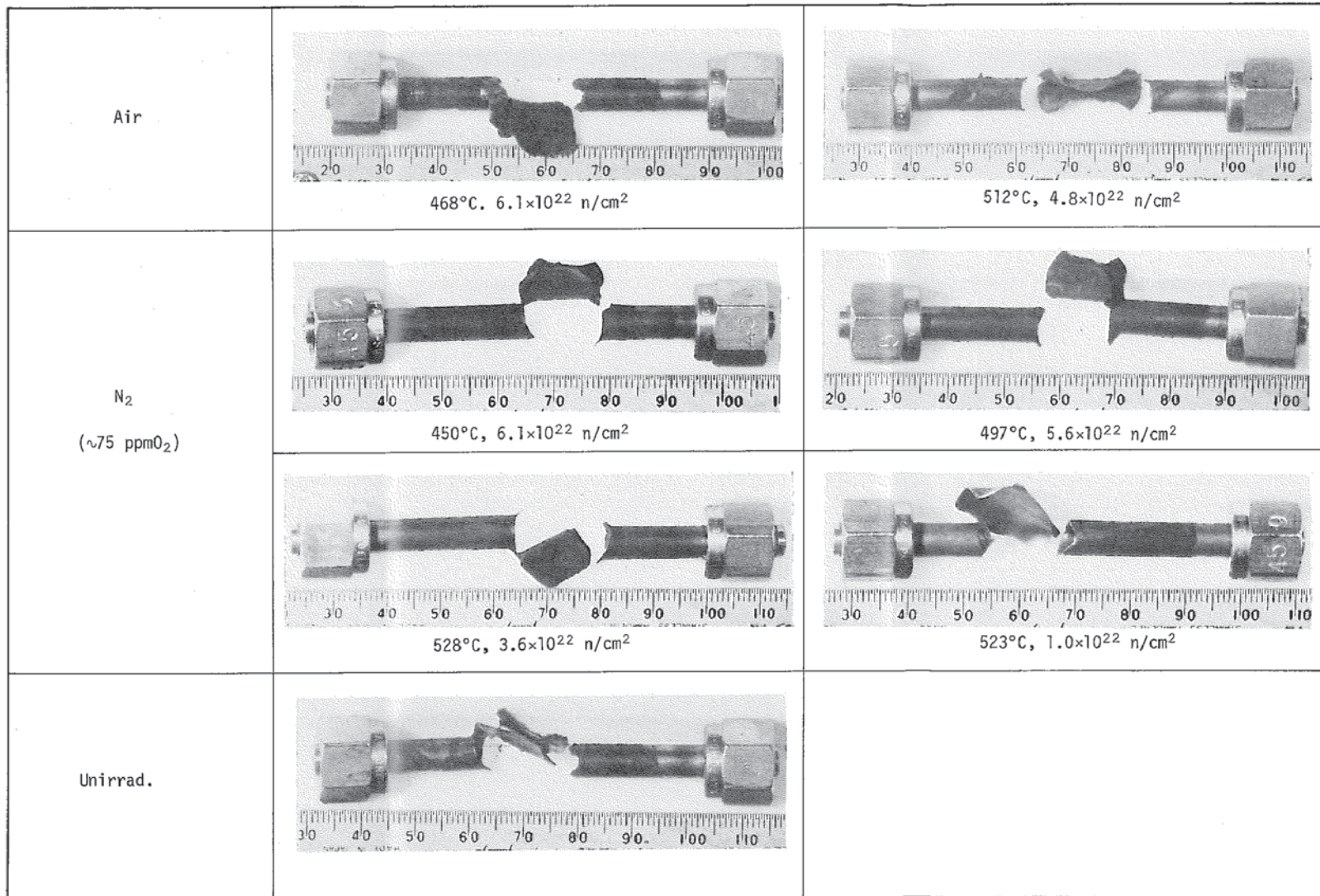


Fig. 20 Appearance of irradiated fuel claddings after transient burst test at hoop stress of 20.0 kg/mm<sup>2</sup> (PPJX12)

Lot No.: R001      Transient rate: 5°C/s

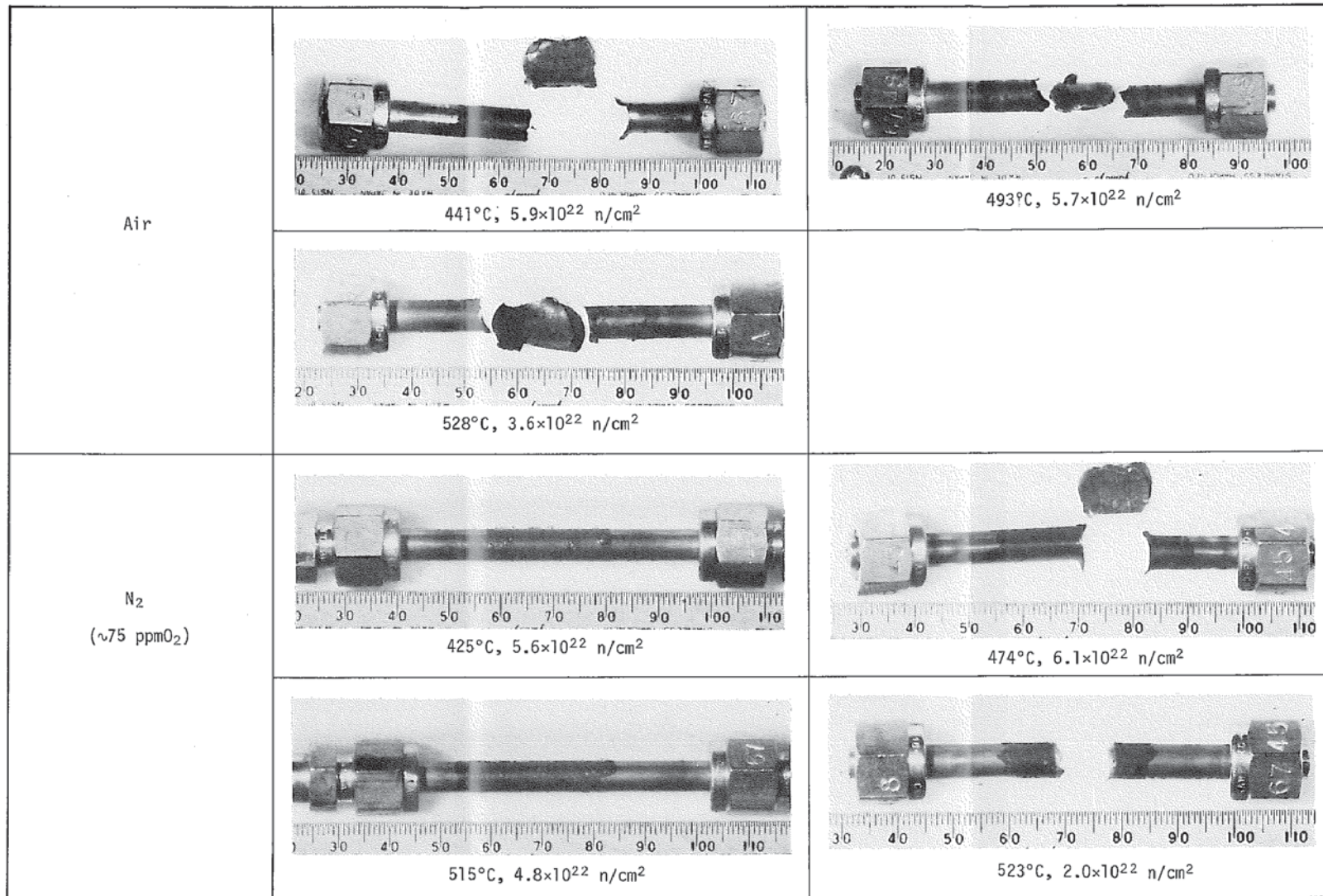


Fig. 21 Appearance of irradiated fuel claddings after transient burst test at hoop stress of 29.8 kg/mm<sup>2</sup> (PPJX12)

Lot No.: R001      Transient rate: 5°C/s

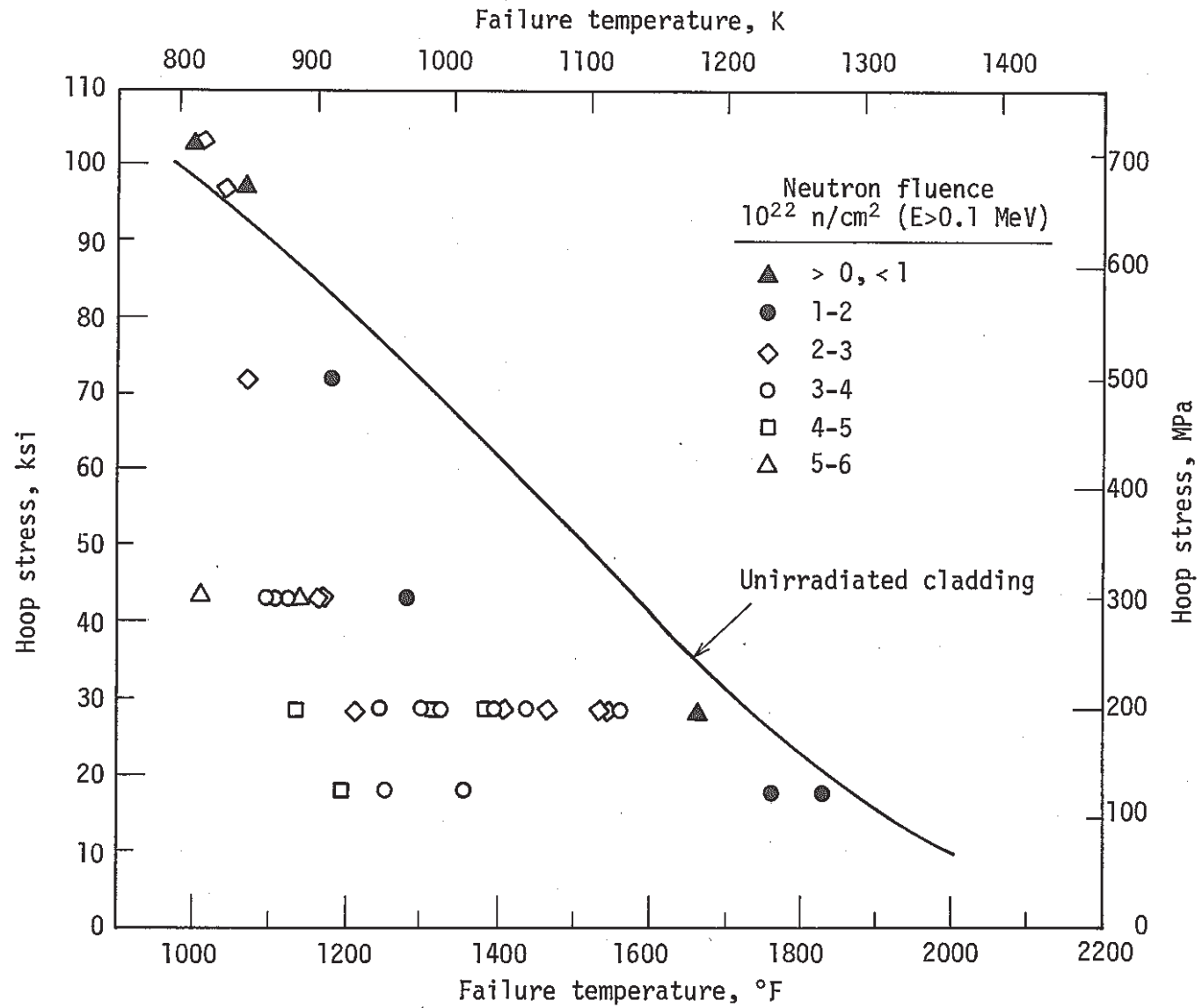


Fig. 22 Failure temperatures for irradiated cladding specimens taken from the fuel column and tested at 10°F/s (5.6 K/s) (HEDL data)

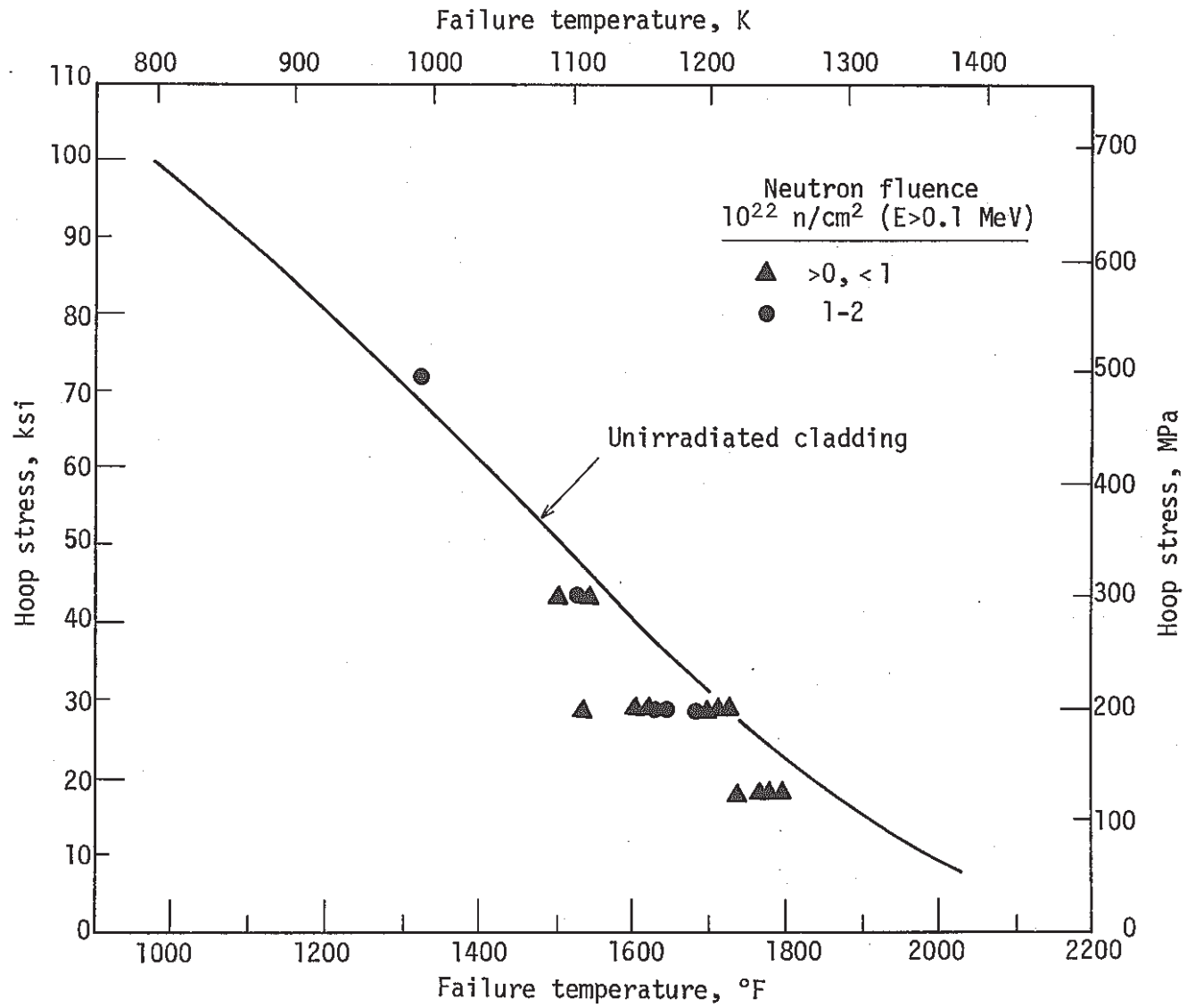


Fig. 23 Failure temperatures for irradiated cladding specimens taken from the plenum and tested at 10°F/s (5.6 K/s) (HEDL data)

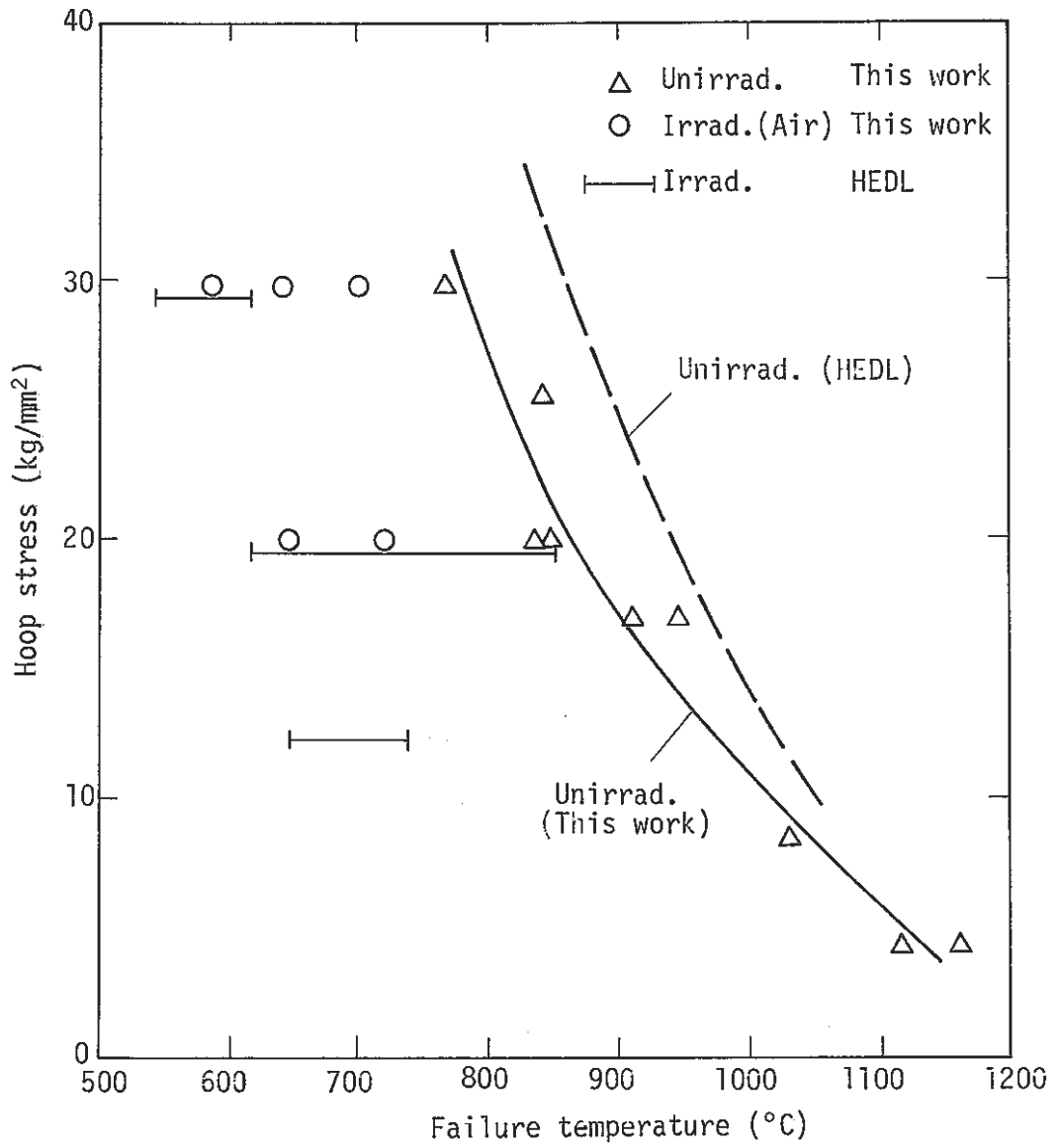


Fig. 24 Failure temperature of irradiated fuel claddings tested at PNC and HEDL

Fluence :  $(3\sim 6) \times 10^{22}$  n/m<sup>2</sup> (E>0.1 MeV)  
 Transient rate :  $\sim 5^\circ\text{C/s}$

\*\*\*\*\*  
 \* CLADDING TUBE \* +++++ CHEMICAL ANALYSIS AND DESTRUCTIVE TEST +++++ LOT NO = K002  
 \*\*\*\*\*  
 ( MAKER'S DATA )

| SOLN TREATMENT |       |            | COLD WORK |      |     | TEST SAMPLE |     |     |       |          |  |
|----------------|-------|------------|-----------|------|-----|-------------|-----|-----|-------|----------|--|
| TEMP           | TIME  | (8 - 15 %) | (1)       | (2)  | (3) | (4)         | (5) | (6) | INGOT | RAW TUBE |  |
| 1010 °C        | 2 MIN | 10 %       | 0501      | 0750 |     |             |     |     | 3     | 3        |  |

\*\*\* CHEMICAL COMPOSITION ( JOYO STD #2.1 & #2.2 ) \*\*\*

|                | C    | SI   | MN   | P    | S    | NI    | CR    | MO   | CO    | B     | N     | AL    | AS    | CU      | HB+TA | V     |
|----------------|------|------|------|------|------|-------|-------|------|-------|-------|-------|-------|-------|---------|-------|-------|
| SPEC. MAX(W/O) | 0.08 | 0.75 | 2.00 | 0.03 | 0.03 | 14.00 | 18.00 | 3.00 | 0.10  | 0.001 | 0.035 | -     | -     | -       | -     | -     |
| MIN(W/O)       | 0.04 | -    | 1.50 | -    | -    | 11.00 | 16.00 | 2.00 | -     | -     | -     | -     | -     | -       | -     | -     |
| INGOT          | .06  | .53  | 1.54 | .017 | .010 | 12.92 | 16.36 | 2.32 | .04   | .0003 | .0224 | -     | -     | -       | -     | -     |
| PRODUCT (1)    | .05  | .56  | 1.52 | .018 | .009 | 13.00 | 16.45 | 2.32 | .04 < | .0010 | .0181 | .0210 | .0040 | .0280 < | .0010 | .0250 |
| PRODUCT (2)    | .05  | .56  | 1.55 | .018 | .010 | 12.82 | 16.45 | 2.34 | .04 < | .0010 | .0177 | .0210 | .0040 | .0280 < | .0010 | .0200 |

\*\*\* TENSILE PROPERTIES ( JOYO STD #4.1 & #4.2 ) \*\*\*

| SPEC. MIN   | ROOM TEMP                  |                     |            |               | SPEC. MIN | 650°C                      |                     |            |               |
|-------------|----------------------------|---------------------|------------|---------------|-----------|----------------------------|---------------------|------------|---------------|
|             | TENSILE STRENGTH (KG/MM#2) | 0.2% Y.S. (KG/MM#2) | ELONG. (%) | REDUCTION (%) |           | TENSILE STRENGTH (KG/MM#2) | 0.2% Y.S. (KG/MM#2) | ELONG. (%) | REDUCTION (%) |
|             | 60                         | 40                  | 25         | -             | 30        | 20                         | 15                  | -          |               |
| PRODUCT (1) | 78.8                       | 66.1                | 32         | -             | 50.1      | 43.9                       | 16                  | -          |               |
| PRODUCT (2) | 78.3                       | 65.7                | 32         | -             | 49.5      | 43.0                       | 17                  | -          |               |

\*\*\* INCLUSIONS ( JOYO STD #3.1 & #3.2 ) \*\*\*

|             | TYPE-A |     | TYPE-B |     | TYPE-C |     | TYPE-D |     |
|-------------|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|
|             | (T)    | (H) | (T)    | (H) | (T)    | (H) | (T)    | (H) |
| RAW TUBE    | .0     | .0  | .5     | .0  | .5     | .0  | .0     | .0  |
| PRODUCT (1) | .0     | .0  | .5     | .0  | .0     | .0  | .5     | .0  |
| PRODUCT (2) | .0     | .0  | .0     | .0  | .0     | .0  | .5     | .0  |

\*\*\* BURST TEST ( ROOM TEMP ) ( JOYO STD #4.5 ) \*\*\*

| SPEC. MIN | BURST PRESSURE | 0.2% Y.S. (OFFSET) | ELONG. |
|-----------|----------------|--------------------|--------|
|           | (KG/CM#2)      | (KG/CM#2)          | (%)    |
| (1)       | 940            | 860                | 25     |
| (2)       | 980            | 910                | 20     |

\*\*\* HARDNESS ( JOYO STD #3.6 ) \*\*\*

| SPEC. MAX | HV(500G) |
|-----------|----------|
|           | 290      |
| (1)       | 253      |
| (2)       | 25       |

\*\*\* GRAIN SIZE ( JOYO STD #3.4 ) \*\*\*

|     | CIRCUMF. |     | AXIAL |     |
|-----|----------|-----|-------|-----|
|     | (1)      | 9.0 | 9.0   | 9.0 |
| (2) | 9.0      | 9.0 | 9.0   |     |

\*\*\* CARBIDE AGGLOMERATION ( JOYO STD #3.3 ) \*\*\*

|  | (1) | (2) |
|--|-----|-----|
| *** INTERGRANULAR ATTACK ( JOYO STD #3.5 ) *** | 1   | 1   |
| *** FLARING TEST ( JOYO STD #4.3 ) ***         | 1   | 1   |

\*\*\* FLATTENING TEST ( JOYO STD #4.4 ) \*\*\*

|   | (1) | (2) |
|---|-----|-----|
| *** PENETRANT INSP. ( JOYO STD #5.1 ) *** | 1   | 1   |

\*\*\*\*\*  
 \* CLADDING TUBE \*  
 \*\*\*\*\*

+++++ CHEMICAL ANALYSIS AND DESTRUCTIVE TEST +++++ LOT NO = S008  
 ( MAKER'S DATA )

| SOLN TREATMENT |       |              | COLD WORK |  | TEST          |      |           |      |               |      | S A M P L E |           |
|----------------|-------|--------------|-----------|--|---------------|------|-----------|------|---------------|------|-------------|-----------|
| TEMP           | TIME  | ( 8 - 15 % ) | ( 12 % )  |  | P R O D U C T |      | I N G O T |      | R A W T U B E |      |             |           |
| 980 °C         | 4 MIN |              |           |  | (1)           | (2)  | (3)       | (4)  | (5)           | (6)  |             |           |
|                |       |              |           |  | 0671          | 0727 | 0671      | 0727 | 0671          | 0727 | 280002      | SJE000181 |

\*\*\* CHEMICAL COMPOSITION ( JOYO STD #2.1 & #2.2 ) \*\*\*

|                   | C    | SI   | MN   | P    | S    | NI    | CR    | MO   | CO   | B     | N     | AL      | AS    | CU      | NB+TA | V     |
|-------------------|------|------|------|------|------|-------|-------|------|------|-------|-------|---------|-------|---------|-------|-------|
| SPEC. MAX(W/O)    | 0.08 | 0.75 | 2.00 | 0.03 | 0.03 | 14.00 | 18.00 | 3.00 | 0.10 | 0.001 | 0.035 | -       | -     | -       | -     | -     |
| MIN(W/O)          | 0.04 | -    | 1.50 | -    | -    | 11.00 | 16.00 | 2.00 | -    | -     | -     | -       | -     | -       | -     | -     |
| I NG O T          | .07  | .50  | 1.71 | .020 | .009 | 13.05 | 16.90 | 2.30 | .01  | .0002 | .0305 | -       | -     | .2300   | -     | -     |
| P R O D U C T (1) | .06  | .50  | 1.74 | .020 | .007 | 12.94 | 16.90 | 2.47 | .01  | .0001 | .0280 | .0010 < | .0020 | .2300 < | .0020 | .0010 |
| P R O D U C T (2) | .06  | .52  | 1.75 | .020 | .007 | 12.99 | 16.90 | 2.50 | .01  | .0001 | .0340 | .0010 < | .0020 | .2300 < | .0020 | .0010 |

\*\*\* TENSILE PROPERTIES ( JOYO STD #4.1 & #4.2 ) \*\*\*

| SPEC. MIN   | R O O M T E M P  |                    |        |           |                   | SPEC. MIN   | 650°C            |                    |        |           |                   |
|-------------|------------------|--------------------|--------|-----------|-------------------|-------------|------------------|--------------------|--------|-----------|-------------------|
|             | TENSILE STRENGTH | 0.2% Y.S. (OFFSET) | ELONG. | REDUCTION | FRACTURE POSITION |             | TENSILE STRENGTH | 0.2% Y.S. (OFFSET) | ELONG. | REDUCTION | FRACTURE POSITION |
|             | (KG/MM**2)       | (KG/MM**2)         | (%)    | -         |                   |             | (KG/MM**2)       | (KG/MM**2)         | (%)    | -         |                   |
| PRODUCT (1) | 82.7             | 70.5               | 28     | -         | B                 | PRODUCT (1) | 44.6             | 38.2               | 22     | -         | B                 |
| PRODUCT (2) | 81.7             | 69.8               | 29     | -         | A                 | PRODUCT (2) | 44.6             | 38.8               | 22     | -         | A                 |

\*\*\* INCLUSIONS ( JOYO STD #3.1 & #3.2 ) \*\*\*

|             | TYPE-A |     | TYPE-B |     | TYPE-C |     | TYPE-D |     |
|-------------|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|
|             | (T)    | (H) | (T)    | (H) | (T)    | (H) | (T)    | (H) |
| RAW TUBE    | 2.5    | .0  | 2.0    | .5  | 2.0    | .0  | 2.5    | .5  |
| PRODUCT (1) | 1.0    | .0  | 1.0    | .0  | .0     | .0  | 2.0    | .0  |
| PRODUCT (2) | 2.0    | .0  | 1.0    | .0  | .0     | .0  | 2.5    | .0  |

\*\*\* BURST TEST ( ROOM TEMP ) ( JOYO STD #4.5 ) \*\*\*

| SPEC. MIN | BURST PRESSURE | 0.2% Y.S. (OFFSET) | ELONG. |
|-----------|----------------|--------------------|--------|
|           | (KG/CM**2)     | (KG/CM**2)         |        |
| (1)       | 1100           | 1030               |        |
| (2)       | 1080           | 1020               |        |

\*\*\* HARDNESS ( JOYO STD #3.6 ) \*\*\*

| SPEC. MAX | HV(500G) |
|-----------|----------|
| (1)       | 265      |
| (2)       | 265      |

\*\*\* GRAIN SIZE ( JOYO STD #3.4 ) \*\*\*

| SPEC. MIN | C I R C U M F. |     | A X I A L |     |
|-----------|----------------|-----|-----------|-----|
|           | (1)            | (2) | (1)       | (2) |
| (1)       | 9.0            |     | 9.0       |     |
| (2)       | 9.0            |     | 9.0       |     |

\*\*\* CARBIDE AGGLOMERATION ( JOYO STD #3.3 ) \*\*\*

| (1) | (2) |
|-----|-----|
| 1   | 1   |
| 1   | 1   |

\*\*\* FLATTENING TEST ( JOYO STD #4.4 ) \*\*\*

| (1) | (2) |
|-----|-----|
| 1   | 1   |
| 1   | 1   |

\*\*\* INTERGRANULAR ATTACK ( JOYO STD #3.5 ) \*\*\*

\*\*\* PENETRANT INSP. ( JOYO STD #5.1 ) \*\*\*

\*\*\* FLARING TEST ( JOYO STD #4.3 ) \*\*\*

\*\*\*\*\*  
 \* CLADDING TUBE \*  
 \*\*\*\*\*

\*\*\*\*\* CHEMICAL ANALYSIS AND DESTRUCTIVE TEST \*\*\*\*\*  
 ( MAKER'S DATA )

LOT NO = S012

| SOLN TREATMENT |       |            | COLD WORK |      |      | TEST SAMPLE   |      |      |  |  |        | INGDT     | RAW TUBE |
|----------------|-------|------------|-----------|------|------|---------------|------|------|--|--|--------|-----------|----------|
| TEMP           | TIME  | (8 - 15 %) |           |      |      | P R O D U C T |      |      |  |  |        |           |          |
| 980 °C         | 4 MIN | 12 %       | (1)       | (2)  | (3)  | (4)           | (5)  | (6)  |  |  |        |           |          |
|                |       |            | 1782      | 1857 | 1782 | 1857          | 1782 | 1857 |  |  | 280001 | SJE000112 |          |

\*\*\* CHEMICAL COMPOSITION ( JOYO STD #2.1 & #2.2 ) \*\*\*

| SPEC.       | C    | SI   | MN   | P    | S    | NI    | CR    | MO   | CU   | B     | N     | AL      | AS    | CU      | NB+TA | V     |
|-------------|------|------|------|------|------|-------|-------|------|------|-------|-------|---------|-------|---------|-------|-------|
| MAX(W/O)    | 0.08 | 0.75 | 2.00 | 0.03 | 0.03 | 14.00 | 18.00 | 3.00 | 0.10 | 0.001 | 0.035 | -       | -     | -       | -     | -     |
| MIN(W/O)    | 0.04 | -    | 1.50 | -    | -    | 11.00 | 16.00 | 2.00 | -    | -     | -     | -       | -     | -       | -     | -     |
| INGDT       | .07  | .50  | 1.75 | .022 | .010 | 13.25 | 16.65 | 2.45 | .01  | .0001 | .0285 | -       | -     | .2300   | -     | -     |
| PRODUCT (1) | .06  | .50  | 1.75 | .020 | .006 | 13.01 | 16.75 | 2.47 | .01  | .0001 | .0298 | .0010 < | .0020 | .2300 < | .0010 | .0010 |
| PRODUCT (2) | .06  | .50  | 1.75 | .020 | .006 | 13.08 | 16.80 | 2.50 | .01  | .0001 | .0304 | .0010 < | .0020 | .2300 < | .0010 | .0010 |

\*\*\* TENSILE PROPERTIES ( JOYO STD #4.1 & #4.2 ) \*\*\*

| SPEC. MIN   | ROOM TEMP        |            |        |           |                   | SPEC. MIN   | 650°C            |            |        |           |                   |
|-------------|------------------|------------|--------|-----------|-------------------|-------------|------------------|------------|--------|-----------|-------------------|
|             | TENSILE STRENGTH | 0.2% Y.S.  | ELONG. | REDUCTION | FRACTURE POSITION |             | TENSILE STRENGTH | 0.2% Y.S.  | ELONG. | REDUCTION | FRACTURE POSITION |
|             | (KG/MM**2)       | (KG/MM**2) | (%)    | -         |                   |             | (KG/MM**2)       | (KG/MM**2) | (%)    | -         |                   |
| PRODUCT (1) | 78.2             | 64.3       | 29     | -         | B                 | PRODUCT (1) | 44.7             | 37.5       | 25     | -         | A                 |
| PRODUCT (2) | 77.7             | 64.4       | 29     | -         | A                 | PRODUCT (2) | 44.3             | 38.0       | 21     | -         | B                 |

\*\*\* INCLUSIONS ( JOYO STD #3.1 & #3.2 ) \*\*\*

|             | TYPE-A |     | TYPE-B |     | TYPE-C |     | TYPE-D |     |
|-------------|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|
|             | (T)    | (H) | (T)    | (H) | (T)    | (H) | (T)    | (H) |
| RAW TUBE    | 2.0    | .0  | 2.0    | .0  | .5     | .0  | 2.5    | .5  |
| PRODUCT (1) | 1.5    | .0  | 1.0    | .0  | .0     | .0  | 2.0    | .0  |
| PRODUCT (2) | 1.5    | .0  | 1.5    | .0  | .0     | .0  | 2.5    | .0  |

\*\*\* BURST TEST ( ROOM TEMP ) ( JOYO STD #4.5 ) \*\*\*

| SPEC. MIN | BURST PRESSURE | 0.2% Y.S. (OFFSET) | ELONG. |
|-----------|----------------|--------------------|--------|
|           | 670 (KG/CM**2) | 500 (KG/CM**2)     |        |
| (1)       | 1090           | 1020               |        |
| (2)       | 1100           | 1020               |        |

\*\*\* HARDNESS ( JOYO STD #3.6 ) \*\*\*

| SPEC. MAX | HV(500G) |
|-----------|----------|
| (1)       | 266      |
| (2)       | 263      |

\*\*\* GRAIN SIZE ( JOYO STD #3.4 ) \*\*\*

| SPEC. MIN | CIRCUMF. |     | AXIAL |     |
|-----------|----------|-----|-------|-----|
|           | (1)      | (2) | (1)   | (2) |
| (1)       | 9.0      |     | 9.0   |     |
| (2)       | 9.0      |     | 9.0   |     |

\*\*\* CARBIDE AGGLOMERATION ( JOYO STD #3.3 ) \*\*\*

| (1) | (2) |
|-----|-----|
| 1   | 1   |
| 1   | 1   |
| 1   | 1   |

\*\*\* INTERGRANULAR ATTACK ( JOYO STD #3.5 ) \*\*\*

\*\*\* FLARING TEST ( JOYO STD #4.3 ) \*\*\*

\*\*\* FLATTENING TEST ( JOYO STD #4.4 ) \*\*\*

\*\*\* PENETRANT INSP. ( JOYO STD #5.1 ) \*\*\*

| (1) | (2) |
|-----|-----|
| 1   | 1   |
| 1   | 1   |



\*\*\*\*\*  
 \* CLADDING TUBE \*  
 \*\*\*\*\*

+++++ CHEMICAL ANALYSIS AND DESTRUCTIVE TEST +++++ LOT NO = R001  
 ( MAKER'S DATA )

| SOLN TREATMENT |       |  | COLD WORK  |  | TEST SAMPLE   |     |           |     |               |     |          |
|----------------|-------|--|------------|--|---------------|-----|-----------|-----|---------------|-----|----------|
| TEMP           | TIME  |  | (8 - 15 %) |  | P R O D U C T |     | I N G O T |     | R A W T U B E |     |          |
|                |       |  |            |  | (1)           | (2) | (3)       | (4) | (5)           | (6) |          |
| 1050 °C        | 1 MIN |  | 13 %       |  |               |     |           |     |               |     | K81621-1 |

\*\*\* CHEMICAL COMPOSITION ( JOYO STD #2.1 & #2.2 ) \*\*\*

|                | C    | SI   | MN   | P    | S    | NI    | CR    | MO   | CO   | B     | N       | AL      | AS      | CU      | NB+TA   | V     |
|----------------|------|------|------|------|------|-------|-------|------|------|-------|---------|---------|---------|---------|---------|-------|
| SPEC. MAX(W/D) | 0.08 | 0.75 | 2.00 | 0.03 | 0.03 | 14.00 | 18.00 | 3.00 | 0.10 | 0.001 | 0.035   | -       | -       | -       | -       | -     |
| MIN(W/D)       | 0.04 | -    | 1.50 | -    | -    | 11.00 | 16.00 | 2.00 | -    | -     | -       | -       | -       | -       | -       | -     |
| INGOT          | .06  | .52  | 1.75 | .004 | .003 | 13.67 | 17.26 | 2.28 | .01  | .0009 | .0030   | -       | -       | -       | -       | -     |
| PRODUCT (1)    | .06  | .50  | 1.68 | .005 | .004 | 13.71 | 17.38 | 2.32 | .01  | .0009 | .0040 < | .0050 < | .0050 < | .0100 < | .0200 < | .0100 |
| PRODUCT (2)    | .06  | .50  | 1.69 | .005 | .003 | 13.71 | 17.36 | 2.32 | .01  | .0009 | .0040 < | .0050 < | .0050 < | .0100 < | .0200 < | .0100 |

\*\*\* TENSILE PROPERTIES ( JOYO STD #4.1 & #4.2 ) \*\*\*

| SPEC. MIN   | ROOM TEMP        |            |        |           | SPEC. MIN | 650°C            |            |        |           |
|-------------|------------------|------------|--------|-----------|-----------|------------------|------------|--------|-----------|
|             | TENSILE STRENGTH | 0.2% Y.S.  | ELONG. | REDUCTION |           | TENSILE STRENGTH | 0.2% Y.S.  | ELONG. | REDUCTION |
|             | (KG/MM**2)       | (KG/MM**2) | (%)    | (%)       |           | (KG/MM**2)       | (KG/MM**2) | (%)    | (%)       |
|             | 60               | 40         | 25     | -         | 30        | 20               | 15         | -      |           |
| PRODUCT (1) | 70.4             | 55.4       | 38     | -         | 36.8      | 30.7             | 26         | -      |           |
| PRODUCT (2) | 71.1             | 55.5       | 36     | -         | 41.3      | 33.5             | 25         | -      |           |

\*\*\* INCLUSIONS ( JOYO STD #3.1 & #3.2 ) \*\*\*

|             | TYPE-A |     | TYPE-B |     | TYPE-C |     | TYPE-D |     |
|-------------|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|
|             | (T)    | (H) | (T)    | (H) | (T)    | (H) | (T)    | (H) |
| RAW TUBE    | .0     | .0  | .5     | .0  | .5     | .0  | 1.0    | .0  |
| PRODUCT (1) | 1.5    | .0  | .0     | .0  | .0     | .0  | 1.0    | 1.0 |
| PRODUCT (2) | 1.5    | .0  | .0     | .0  | .0     | .0  | 1.5    | .0  |

\*\*\* BURST TEST ( ROOM TEMP ) ( JOYO STD #4.5 ) \*\*\*

| SPEC. MIN | BURST PRESSURE |     | 0.2% Y.S. (OFFSET) | ELONG. |
|-----------|----------------|-----|--------------------|--------|
|           | 670            | 500 |                    |        |
|           | (KG/CM**2)     |     | (KG/CM**2)         | (%)    |
| (1)       | 917            |     |                    | 14     |
| (2)       | 910            |     |                    | 17     |

\*\*\* HARDNESS ( JOYO STD #3.6 ) \*\*\*

| SPEC. MAX | HV(500G) |  |
|-----------|----------|--|
|           | 290      |  |
| (1)       | 222      |  |
| (2)       | 221      |  |

\*\*\* GRAIN SIZE ( JOYO STD #3.4 ) \*\*\*

| SPEC. MIN | CIRCUMF. |     | AXIAL |     |
|-----------|----------|-----|-------|-----|
|           | (1)      | (2) | (1)   | (2) |
| (1)       | 7.0      |     | 7.0   |     |
| (2)       |          |     |       |     |

\*\*\* CARBIDE AGGLOMERATION ( JOYO STD #3.3 ) \*\*\*

|  | (1) | (2) |
|--|-----|-----|
| *** INTERGRANULAR ATTACK ( JOYO STD #3.5 ) *** | 1   | 1   |
| *** FLARING TEST ( JOYO STD #4.3 ) ***         | 1   | 1   |

\*\*\* FLATTENING TEST ( JOYO STD #4.4 ) \*\*\*

|   | (1) | (2) |
|---|-----|-----|
| *** PENETRANT INSP. ( JOYO STD #5.1 ) *** | 1   | 1   |