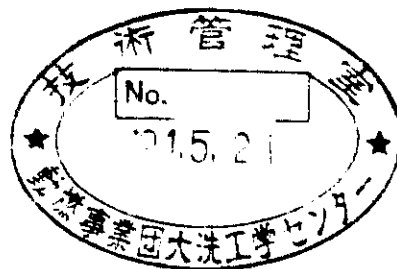


# 高速炉用フェライト系ステンレス鋼 燃料被覆管物性及び特性評価

(「常陽」IV型特殊燃料要素用被覆管)



平成2年12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。(注)

〒107 東京都港区赤坂1-9-13

動力炉・核燃料開発事業団

技術協力部 技術管理室

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to: Technical Evaluation and Patent Office, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation 9-13, 1-chome, Akasaka, Minato-ku, Tokyo 107, Japan (注)

動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation) 平成2年12月

〒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 (O-arai Engineering Center)

技術開発部・技術管理室

(Technology Management Section)

高速炉用フェライト系ステンレス鋼燃料被覆管物性及び特性評価  
(「常陽」IV型特殊燃料要素被覆管)

楠 政敏\* , 瀬下 一郎\*\*

宮川 俊一\* , 榎戸 裕二\*

要 旨

本報告は、「常陽」IV型特殊燃料要素に用いられる高速炉用フェライト系ステンレス鋼被覆管の物性及び特性評価結果について記述するものである。

標記高速炉用フェライト系ステンレス鋼は従来のオーステナイト系ステンレス鋼に比し良好な諸性質、例えば耐スエリング、耐クリープ性、熱伝導度、熱膨張率を有するため、「常陽」にてIV型特殊燃料要素用被覆管として燃焼度約13万Mwd/t までの照射に用いることが可能であることが判った。

---

\* 実験炉部 照射課

\*\* 燃料材料開発部 燃料材料技術開発室

目 次

1. 高速炉用フェライト系ステンレス鋼の概要 .....	1
2. 高速炉用フェライト系ステンレス鋼被覆管材料を用いた燃料照射試験の必要性 .....	2
3. 高速炉用フェライト系ステンレス鋼被覆管の熱設計基準値 及び熱的制限値について .....	3
4. 高速炉用フェライト系ステンレス鋼被覆管材料の成分とその一般特性 .....	4
4.1 被覆管材料の成分 .....	4
4.2 被覆管材料の一般特性 .....	4
(1) 機械的性質 .....	4
(2) 一般特性 .....	5
(3) 環境効果 .....	5
5. 照射実績 .....	10

## 図表一覧

第1表	高速炉用フェライト系ステンレス鋼の主要成分（代表例）	11
第2表	高速炉用フェライト系ステンレス鋼被覆燃料要素の照射仕様の比較	40
第1図	高速炉用フェライト系ステンレス鋼の降伏強さ	12
第2図	高速炉用フェライト系ステンレス鋼の引張強さ	13
第3図	高速炉用フェライト系ステンレス鋼の破断伸び	14
第4図	高速炉用フェライト系ステンレス鋼の熱時効による強度低減係数	15
第5図	高速炉用フェライト系ステンレス鋼の脱炭による強度低減係数	16
第6図	高照射量条件下における降伏強度	17
第7図	高照射量条件下における引張強さ	18
第8図	降伏応力に対する照射効果	19
第9図	引張強さに対する照射効果	20
第10図	大気中クリープ破断強度	21
第11図	大気中及びナトリウム中クリープ破断強度	22
第12図	炉内クリープ破断試験（FFTF-MOTA）	23
第13図	高速炉用フェライト系ステンレス鋼とSUS316相当鋼のクリープ破断強度の比較	24
第14図	被覆管急速加熱時の破損温度（高速炉用フェライト系ステンレス鋼）	25
第15図	高速炉用フェライト系ステンレス鋼の高温疲労特性	26
第16図	ステンレス鋼の密度	27
第17図	ステンレス鋼の比熱	28
第18図	ステンレス鋼の熱伝導率	29
第19図	ステンレス鋼の平均熱膨張率	30
第20図	ステンレス鋼のヤング率	31
第21図	ステンレス鋼のポアソン比	32
第22図	高速炉用フェライト系ステンレス鋼のスエリング特性	33
第23図	ステンレス鋼のスエリング（I）	34
第24図	ステンレス鋼のスエリング（II）	35
第25図	高速炉用フェライト系ステンレス鋼の炉内クリープ特性（FFTF-MOTA）	36
第26図	高速炉用フェライト系ステンレス鋼のナトリウム中腐食	37
第27図	HT9の内面腐食量（EBR-II照射）	38

第28図	高速炉用フェライト系ステンレス鋼被覆燃料要素の照射実績 .....	39
第29図	高速炉用フェライト系ステンレス鋼の材料照射実績（「常陽」） .....	41
第30図	高速炉用フェライト系ステンレス鋼の材料照射実績（FFTF-MOTA） .....	42

## 1. 高速炉用フェライト系ステンレス鋼の概要

一般にフェライト系ステンレス鋼は、12～25%Crを含有するFe-Cr系合金で、体心構造をもっている。また、一般にフェライト系ステンレス鋼は、オーステナイト系ステンレス鋼（面心構造）より熱伝導率がよく熱膨張率が小さいため熱応力を低減できる他、耐スエリング性に優れていることが知られている。

今回使用を計画している高速炉用フェライト系ステンレス鋼は、Fe-12Crを主成分とした合金の高温強度（主に耐クリープ強度）を改良した、Fe-10～13Crを主成分とするフェライト系ステンレス鋼である。

## 2. 高速炉用フェライト系ステンレス鋼被覆管材料を用いた燃料照射試験の必要性

将来の大型高速炉における経済性を向上させる重要な手段の一つとして、燃料の長寿命化がある。この長寿命燃料の実用化にあたっては、燃料被覆管が高燃焼度下においてスエリング及びクリープにより変形（外径増加）し難く、集合体の健全性が確保できることが確認される必要があり、具体的には今まで以上に耐照射性（耐スエリング、耐クリープ）のある被覆管材料の開発と燃料照射によるその性能の最終確認が不可欠である。

高速炉用フェライト系ステンレス鋼（体心立方晶）は、オーステナイト系ステンレス鋼（面心立方晶）に比し、スエリングが著しく小さいことがこれまでの国内外の照射試験から確認されており、この材料の課題は、高温における材料強度、特に長時間側での耐クリープ強度であったが、これを改良し、「常陽」及びFFTF炉で材料照射試験を行い、被覆管として使用可能なデータを得た。

今回、本鋼被覆管を用いた燃料照射試験の目的は、耐照射性に優れた本鋼の長寿命燃料の被覆管として実用化するに先立ち、高燃焼度における長寿命燃料要素としての基本的照射特性を確認し、長寿命燃料としての合理的な設計手法の確立を図るための貴重なデータを取得するものである。

なお、今回使用を計画している高速炉用フェライト系ステンレス鋼には、動燃の開発した鋼種と共に、米国製の鋼種も同時に「常陽」で照射することになるが、これは日米共同実験として位置付けられ、両者の特性の比較を行いつつ、高速炉用フェライト系ステンレス鋼共通の照射特性に関する重要なデータを得ていく計画である。

また、本鋼種の強度は、オーステナイト系ステンレス鋼と比べると、高温域で低下するが、熱的制限値を低く制限することによってその健全性は十分確保される。



### 3. 高速炉用フェライト系ステンレス鋼被覆管の 熱設計基準値及び熱的制限値について

(1) 熱設計基準値〔被覆管最高温度（肉厚中心）約810℃〕

熱設計基準値は、被覆管が運転時の異常な過渡変化時に急速な温度上昇により破損することを防止するため、照射後及び未照射の被覆管の応力10kg/mm<sup>2</sup>時における急速加熱バースト試験（20℃/s）時の下限値（約850℃）から保守側に温度を制限し、約810℃とした。

(2) 熱的制限値〔被覆管最高温度（肉厚中心）約610℃〕

熱的制限値は、被覆管の引張試験結果より定めるSm値（ $S_m = \min(1/2S_u, 3/4S_y)$ ）から、被覆管の内圧による応力約7kg/mm<sup>2</sup>に対し、保守側にSm値で約10kg/mm<sup>2</sup>まで健全性が確保可能な温度として約610℃を定めた。

#### 4. 高速炉用フェライト系ステンレス鋼被覆管材料の成分とその一般特性

IV型特殊燃料要素用の被覆管材料（高速炉用フェライト系ステンレス鋼）の選定に当たって用いた物性式及び設計式等については、これまでに開発して来た高速炉用フェライト系ステンレス鋼及び諸外国の高速炉用フェライト系ステンレス鋼の炉外並びに炉内データを用いた。

##### 4.1 被覆管材料の成分

IV型特殊燃料要素に用いる被覆管材料は、高速炉用フェライト系ステンレス鋼を使用する計画である。第1表に使用を計画している材料の成分とこれまでに開発して来た高速炉用フェライト系ステンレス鋼及び諸外国の高速炉用フェライト系ステンレス鋼の成分並びに高速炉用フェライト系ステンレス鋼の成分の範囲を示した。

##### 4.2 被覆管材料の一般特性

前項で示した材料は、以下のような機械的、物理的特性を有しており、特殊燃料要素用の材料として適用可能なものであり、照射試験のための燃料設計においても適度な設計余裕を考慮することによってその健全性は確保される。

###### (1) 機械的性質

###### ① 引張強さ

代表的な高速炉用フェライト系ステンレス鋼の引張強度について、第1図に降伏強さ、第2図に引張強さ、第3図に破断伸びを示す。第1図及び第2図から高温域ではSUS316相当鋼より低い値を示すが、通常運転時の最高使用温度（610℃）を制限することによりその健全性は十分確保される。また、第6図～第9図に照射により材料の引張強度に与える影響について示した。

###### ② クリープ破断強度

代表的なクリープ破断強度を第10、11、12図に示した。第10図は、Fe-11～12Crを主成分とした材料の大気中におけるデータ、第11図はFe-12Crを主成分とした材料の大気中及びN<sub>2</sub>データ、第12図は、Fe-11Crを主成分とした材料の炉内クリープ破断データと大気中データとの比較である。また、第13図に高速炉用フェライト系ステンレス鋼とSUS316相当鋼のクリープ破断強度の比較を示した。

## ③ 急速加熱バースト特性

急速加熱バーストデータは、運転時の異常な過渡変化時において被覆管が機械的に破損しない値として温度を制限するもので、今回使用を計画している材料は、未照射及び照射後の試験データから保守側に温度（810 °C）を制限している。第14図に使用計画とほぼ同一の国産試作材の急速加熱バースト試験データ及び米国のHT-9材の未照射及び照射後の急速加熱バースト試験データを示した。第14図に示したように国産試作材及びHT-9材の何れにおいても未照射と照射後の試験データに有意な差は認められない。

## ④ 疲労特性

疲労特性については、国産試作材を用いた高温低サイクル疲労試験を実施している。その結果、ASME CODE CASE N-47におけるSUS316の疲労特性より優れていることを示したが、設計にあたっては保守的に、ASME CODE CASE N-47のSUS316の疲労曲線を用いた。第15図に国産試作材の高温低サイクル疲労試験結果から得られた歪み範囲-繰返し数の関係を示した。

## (2) 一般特性

燃料要素の設計に用いる材料の物理的性質データをSUS316相当鋼と比較して示した。高速炉用フェライト系ステンレス鋼の特徴としては、熱伝導率がSUS316相当鋼より格段に良く、熱膨張率が小さい事その他は、SUS316相当鋼とほぼ同程度または、それより優れた性質を有している。

- |                 |                 |
|-----------------|-----------------|
| ① 密度-----第16図   | ④ 熱膨張率-----第19図 |
| ② 比熱-----第17図   | ⑤ ヤング率-----第20図 |
| ③ 熱伝導率-----第18図 | ⑥ ポアソン比----第21図 |

## (3) 環境効果

材料を高温Na中及び高中性子束下で使用すると特性が変化する。ここでは、Na環境効果、照射に伴い生ずる材料のスエリング、照射クリープ、腐食等について現在迄得られた知見について述べる。

## ① Na環境効果

高速炉用フェライト系ステンレス鋼の材料強度に対するNa環境効果については、500 °C以上の高温域での使用時間の増加に伴い脱炭及び熱時効効果により材料強度が低下する傾向がある。引張強度については、炉外での流動Na中浸漬試験及び熱時効試験に基づき引張強度の低減係数を求めその積をNa環境効果としている。この各

引張強度の低減係数の導出については、次のように行い、申請燃焼度（13万MWd/t）程度までの長時間側（約25,000時間）まで外挿して決定した。

熱時効試験は61年度試作A材を600℃、650℃、700℃の各温度レベルで2,570時間アルゴンガス中に晒した後引張試験を行い、受入れ材との強度比をとって熱時効による強度低減係数とした。熱時効の25,000時間への外挿としては、通常用いられるラーソンミラーパラメータ法を用いたが、設計条件の610℃、25,000時間のラーソンミラーパラメータは約21.5であるのに対し、当熱時効試験の2,570時間600℃及び700℃のラーソンミラーパラメータは第4図に示すように各々20.4及び22.8となって内挿範囲内にあり、長時間側への外挿は十分妥当なものと判断される。

次に脱炭については、61年度試作A材の流動Na中浸漬試験（4m/sec、2570時間、600℃、650℃、700℃、板厚2mm、両面曝露）を行い、Na浸漬後の全炭素量分析（LECO社、IR-212型、炭素分析装置）及び引張試験を行い、平均炭素量の低下割合と引張強度の低減係数（時効材の結果との比をとる）との相関を求めこれを脱炭による強度低減係数とした。この相関図を第5図に示す。

一方、全炭素分析から脱炭速度定数（K）が求まりこれは次のように表される。

$$K = 0.589 \exp(-30,090/R \cdot T) \quad \text{--- (1)}$$

K：脱炭速度定数（g/cm<sup>2</sup>・sec<sup>0.5</sup>）

R：ガス定数

T：絶対温度（K）

また、平均炭素量（C<sub>m</sub>）は被覆管のように片面曝露の場合次のように表される。

$$C_m = C_0 - 100K \sqrt{3600t} / (2\rho \cdot h) \quad \text{--- (2)}$$

C<sub>m</sub>：平均炭素量（w/o）

C<sub>0</sub>：初期炭素量（w/o）

t：時間（hr）

ρ：材料密度（g/cm<sup>3</sup>）

h：板厚（cm）

以上の(1)(2)式から、設計条件の最小肉厚0.56mm、25,000時間、610℃近傍での平均炭素量を求め、第5図の強度低減係数との相関図から、長時間側での脱炭のみによる強度低下を求めた。設計条件での平均炭素量の低下割合は約0.215であり、Na中浸漬試験での約0.35までの内挿範囲内にあるので、本短時間試験結果から長時間側の脱炭による強度低下を決定することは妥当なものであると判断される。

以上のようにして求めたNa環境効果を考慮した引張強度の設計カーブを第1図に

降伏強さ ( $S_y$ )、第2図に引張強さ ( $S_u$ )として示した。

また、クリープ破断強度については、第11図に示すNa環境中においても強度の低下が見られないデータも得られているが、脱炭による軟化過程の類似性を勘案して、設計評価では保守的に上記の降伏強さ・引張強さと同等に強度の低下があるものとして、同一の脱炭の強度低減係数を用いる。

## ② 照射効果

### (a) 引張強度

照射材の引張試験のデータは多くないが、EBR-IIにおけるHT-9材の試験から第6図及び第7図に示すような高照射量条件での結果が得られている。これらのデータを「常陽」での材料照射データ (61年度試作B材)と合せ、未照射材からの強度変化割合 (照射効果)として第8図及び第9図に示すとおり整理した。

これらのデータから、本使用温度 (610°C) レベルでは、 $2.5 \times 10^{23} \text{ n/cm}^2$ の高照射領域まで引張強度の劣化がないものと判断される。これは、SUS316相当鋼でも同様の傾向が見られるが、一般に低温側では照射による転位組織の創成により硬化 ( $\sigma_y$ ,  $\sigma_u$ の上昇)が生じるのに対し、高温側ではスエリングが消失すると同様に焼鈍効果により硬化が生ぜず、未照射材との強度の相異はないとされていることに合致している。

### (b) クリープ破断強度

炉内クリープ破断強度のデータとしては第12図に示す61年度試作B材のFFTF-MOTAにおけるものがあり、これによれば $8.2 \times 10^{23} \text{ n/cm}^2 (E > 0.1 \text{ Mev})$ まで照射による強度の低下は見られない。これは500°C以上の高温領域ではスエリングが消失するように照射欠陥が焼鈍効果により消失し、照射の効果が表れないためと考えられ、これは $25 \times 10^{23} \text{ n/cm}^2$ 程度の高照射領域においても同様と判断される。

FFTFにおいては、HT-9材を被覆材とする燃料要素を $24 \times 10^{23} \text{ n/cm}^2$ まで500本照射 (推定内圧応力は $10 \text{ kg/cm}^2$ , 最高温度610 ~ 670 °C) しているが1本の破損もないとの報告があり、クリープ破断強度の照射による劣化はないことの傍証になると考えられる。

設計にあたっては、総合的な安全余裕として大気中クリープ破断強度式に0.8の安全係数を乗じることとしており、照射効果の不確かさはこの余裕の中に吸収されるものと判断する。

## ③ スエリング特性

一般にフェライト系ステンレス鋼の、高速中性子照射によるスエリング特性は、オーステナイト系ステンレス鋼より非常に小さい。事業団では、米国のHT-9等

のスエリング特性を基に下記に示す評価式を作成し、さらに国産試作材を「FFTF」及び「常陽」並びにイオン照射において照射データを取得しており、評価式が十分安全側であることを現在迄のデータにおいて確認している。

(スエリング評価式)

$$\Delta V/V = R \cdot \phi t$$

$$R = \exp(-4.260 - 1.825 \beta - 2.176 \beta^2 + 0.579 \beta^3 - 0.027 \beta^4)$$

$$\beta = (T - 437) / 100$$

ここで、 $\Delta V/V$  : スエリング量 (Vol.%)

R : 定常スエリング速度 (%  $\cdot (10^{22} \text{n/cm}^2)^{-1}$ )

$\phi t$  : 中性子照射量 ( $10^{22} \text{n/cm}^2$ ,  $E > 0.1 \text{ Mev}$ )

$\beta$  : スエリング量の温度依存性を示すパラメータ

T : 温度 ( $^{\circ}\text{C}$ )

第22図に高速炉用フェライト系ステンレス鋼のスエリングデータと評価式の関係を示した。第23、24図に設計に用いた高速炉用フェライト系ステンレス鋼の温度、照射量とスエリング量評価カーブを示した。また、SUS316相当鋼のスエリングデータ評価カーブも比較用として併せて示した。

#### ④ 炉内クリープ特性

炉内クリープ特性 (照射クリープ及び熱クリープ) については、EBR-IIで照射されたHT-9のデータを基に下記に示す評価式を作成し、国産試作材をFFTF-MOTAにおいて照射し、そのデータから十分安全側であることを確認している。

第25図に国産試作材の応力、温度一定の炉内クリープデータと設計評価式との関係を示した。

(炉内クリープ評価式)

(照射クリープ)

$$\epsilon_r = 100 \cdot (B \cdot \phi t \cdot \sigma^{1.3})$$

ここで、 $\epsilon_r$  : 照射クリープ歪 (%)

B : 照射クリープ係数 ( $(\text{kg/mm}^2)^{-1.3} \cdot (\text{n/cm}^2)^{-1}$ )

$\phi t$  : 中性子照射量 ( $10^{22} \text{n/cm}^2$ ,  $E > 0.1 \text{ Mev}$ )

$\sigma$  : 応力 ( $\text{kg/mm}^2$ )

(熱クリープ)

$$\epsilon_r = 3.49 \times 10^8 \exp(-4.182 \times 10^4/T) \sigma^2 \cdot t$$

$$+ 3.94 \times 10^8 \exp(-5.435 \times 10^4/T) \sigma^3 \cdot t$$

ここで、 $\varepsilon_T$  : 熱クリープ歪(%)  
 $T$  : 温度 (K)  
 $\sigma$  : 相当応力 (MPa)  
 $t$  : 時間 (sec)

## ⑤ 腐食

### (a) Na 腐食 (外面腐食)

高速炉用フェライト系ステンレス鋼のNa腐食量については、米国のHT-9材においてSUS316相当鋼より小さいことが報告されている。事業団においても国産試作材を用いたNa腐食試験を実施し、SUS316相当鋼より腐食量が小さいことを確認しているが、設計では保守的にSUS316相当鋼と同程度の腐食量を用いることとした。第26図に国産の高速炉用フェライト系ステンレス鋼のNa腐食速度とSUS316相当鋼のNa腐食速度の関係を示す。

### (b) FCCI (内面腐食)

FCCIデータについては、米国においてHT-9材を用いた燃料を約17at%まで燃焼させたデータが公開されており、これによるとSUS316相当鋼より優れた耐食性を示している。この他、国産試作材を用いた炉外試験においていくつかのデータを有している。これらのデータから高速炉用フェライト系ステンレス鋼のFCCIは、SUS316相当鋼より優れているものと判断されるが、ここではSUS316相当鋼の評価式(もんじゅ設計式)を用いることとした。第27図に米国HT-9材のFCCIデータを示した。

## 5. 照射実績

高速炉用フェライト系ステンレス鋼被覆管を用いた燃料照射については、米国のFFTF及びEBR-IIにおいて実施されている。FFTFにおいては、HT-9材を用いて676本の燃料照射（ピーク燃焼度195,000MWd/t）及び、1690本（ピーク燃焼度165,000MWd/t）の燃料照射が既に終了している。また、EBR-IIにおいては、PNC材を用いた燃料照射（現状ピーク燃焼度約44,000MWd/t）を行っている。FFTF、EBR-IIの燃料照射のいずれにおいても破損は生じてない。

材料照射については、「常陽」及び「FFTF-MOTA」により行われており、「常陽」で、450°C～740°C： $\sim 10 \times 10^{22} \text{ n/cm}^2$ （ $E > 0.1 \text{ Mev}$ ）、「FFTF-MOTA」で405°C～750°C： $\sim 26 \times 10^{22} \text{ n/cm}^2$ （ $E > 0.1 \text{ Mev}$ ）の照射実績を有している。

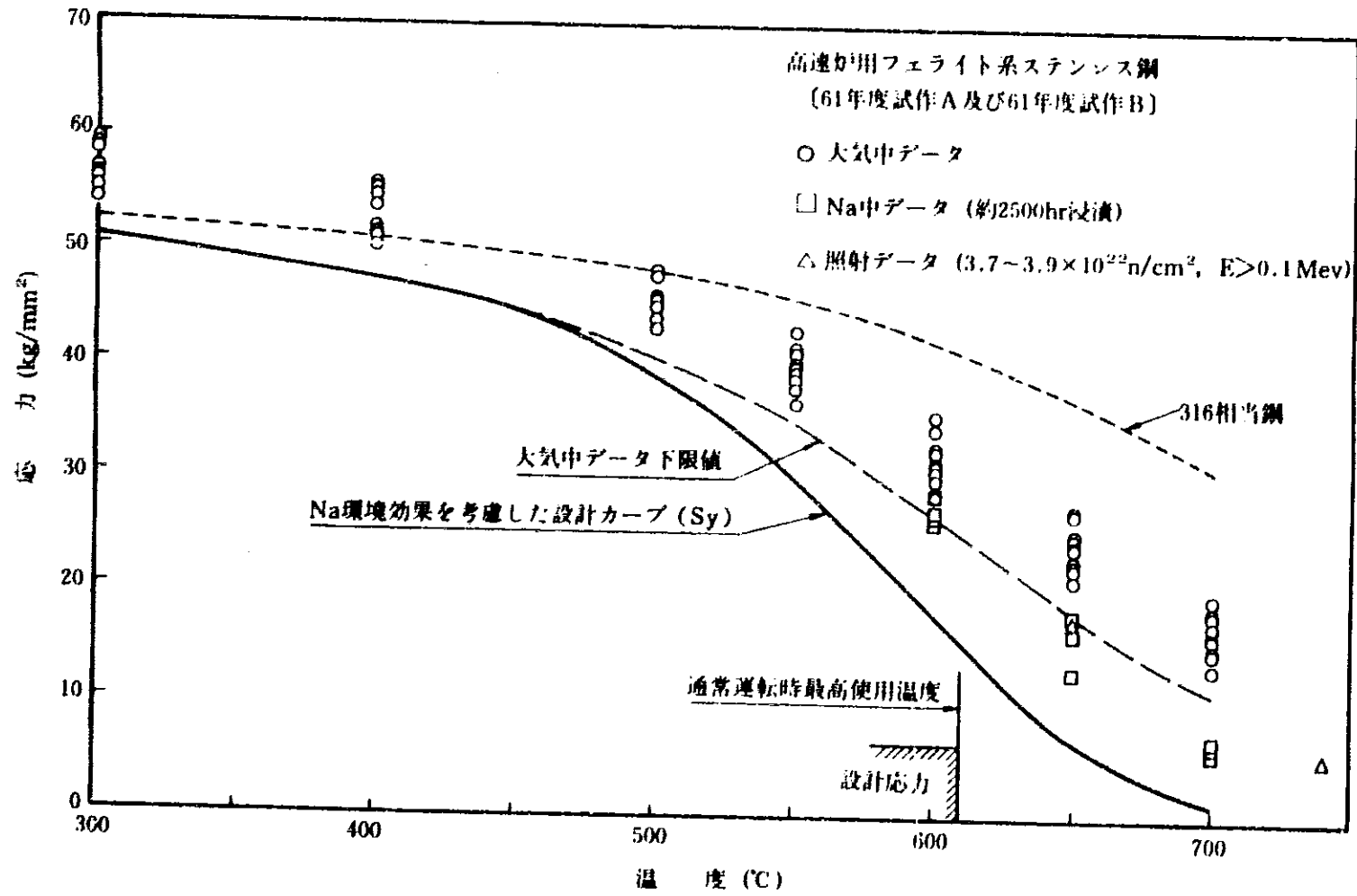
第28図に高速炉用フェライト系ステンレス鋼被覆燃料要素の照射実績を、第2表に高速炉用フェライト系ステンレス鋼被覆燃料要素の照射仕様の比較を、また、第29、30図に高速炉用フェライト系ステンレス鋼の材料照射実績を示した。



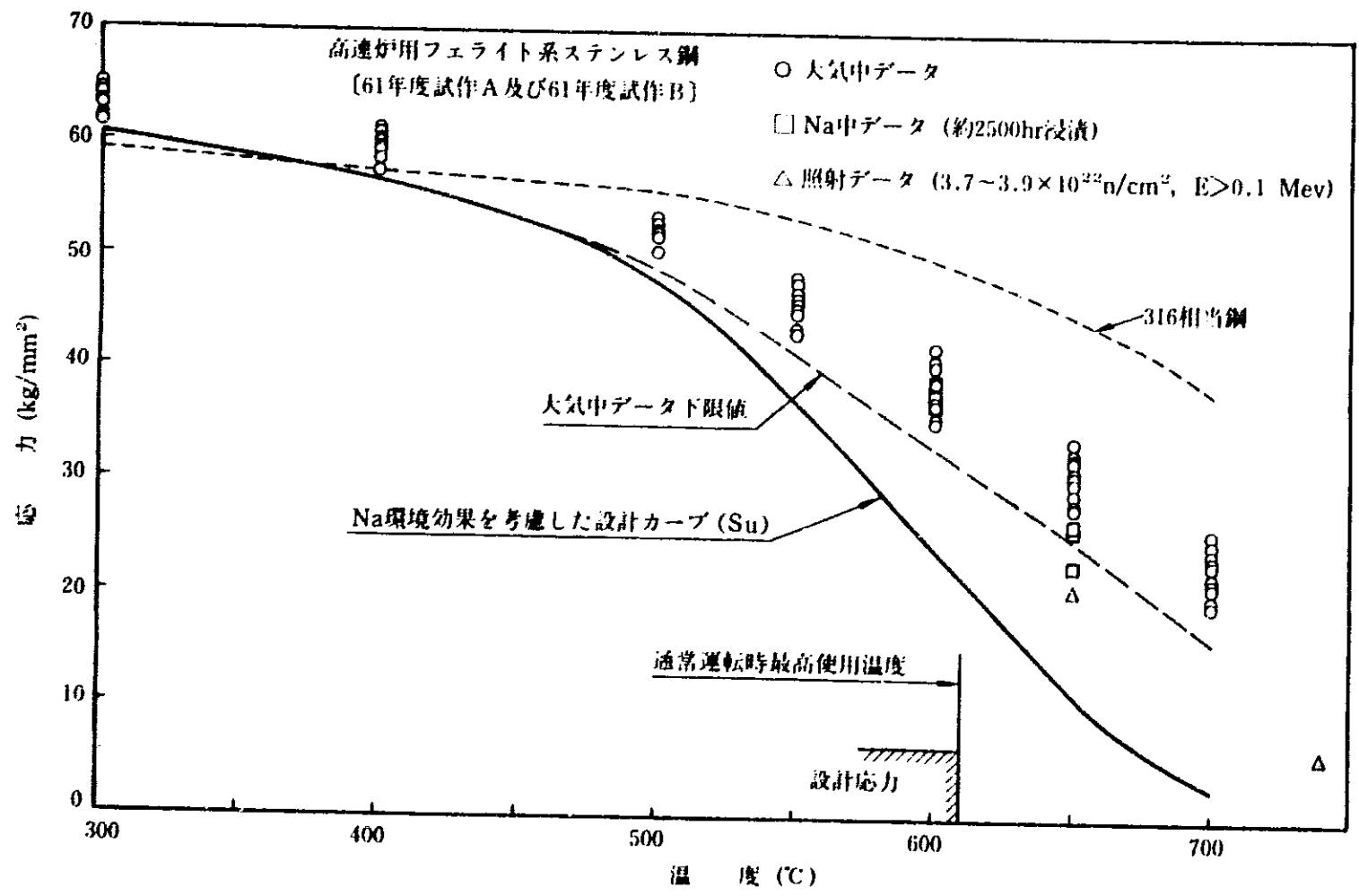
第1表 高速炉用フェライト系ステンレス鋼の主要成分 (代表例)

	鋼種	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	W	N	Nb	V	熱処理条件
使用計 画中の 鋼種	PNC材	0.12	0.05	0.60	<0.02	<0.01	0.40	11.0	0.5	2.0	0.05	0.05	0.20	1,100°C×10分 780°C×60分
	米国材	0.21	0.37	0.73	—	—	—	10.48	1.52	—	0.022	0.20	0.21	677°C×120分
データ 取得の 鋼種	59年度試作	0.21	0.28	0.54	0.004	0.003	0.051	11.80	1.0	0.49	0.0236	0.06	0.32	1,000°C×1分 780°C×60分
	61年度試作A	0.10	0.07	0.54	0.002	0.002	0.32	11.05	0.45	1.89	0.044	0.055	0.21	1,100°C×10分 780°C×60分
	61年度試作B	0.12	0.06	0.69	0.002	0.002	0.82	11.00	0.09	2.11	0.043	0.056	0.20	1,060°C×10分 750°C×10時間
	HT-9 (米国)	0.20	0.38	0.59	—	—	0.62	11.95	0.99	0.52	—	—	0.30	1,038°C×5分 760°C×30分
JIS の類似 鋼種	SUS405	<0.08	<1.00	<1.00	<0.040	<0.030	—	11.50 14.50	—	—	—	—	—	—
	SUS410L	<0.030	<1.00	<1.00	<0.040	<0.030	—	11.00 13.50	—	—	—	—	—	—
高速炉用フェライト系ステ ンレス鋼の範囲	0.07 0.25	<0.5	0.3 1.0	<0.03	<0.03	<1.0	10 13	<2.0	<2.5	<0.1	<0.25	0.15 0.35	—	

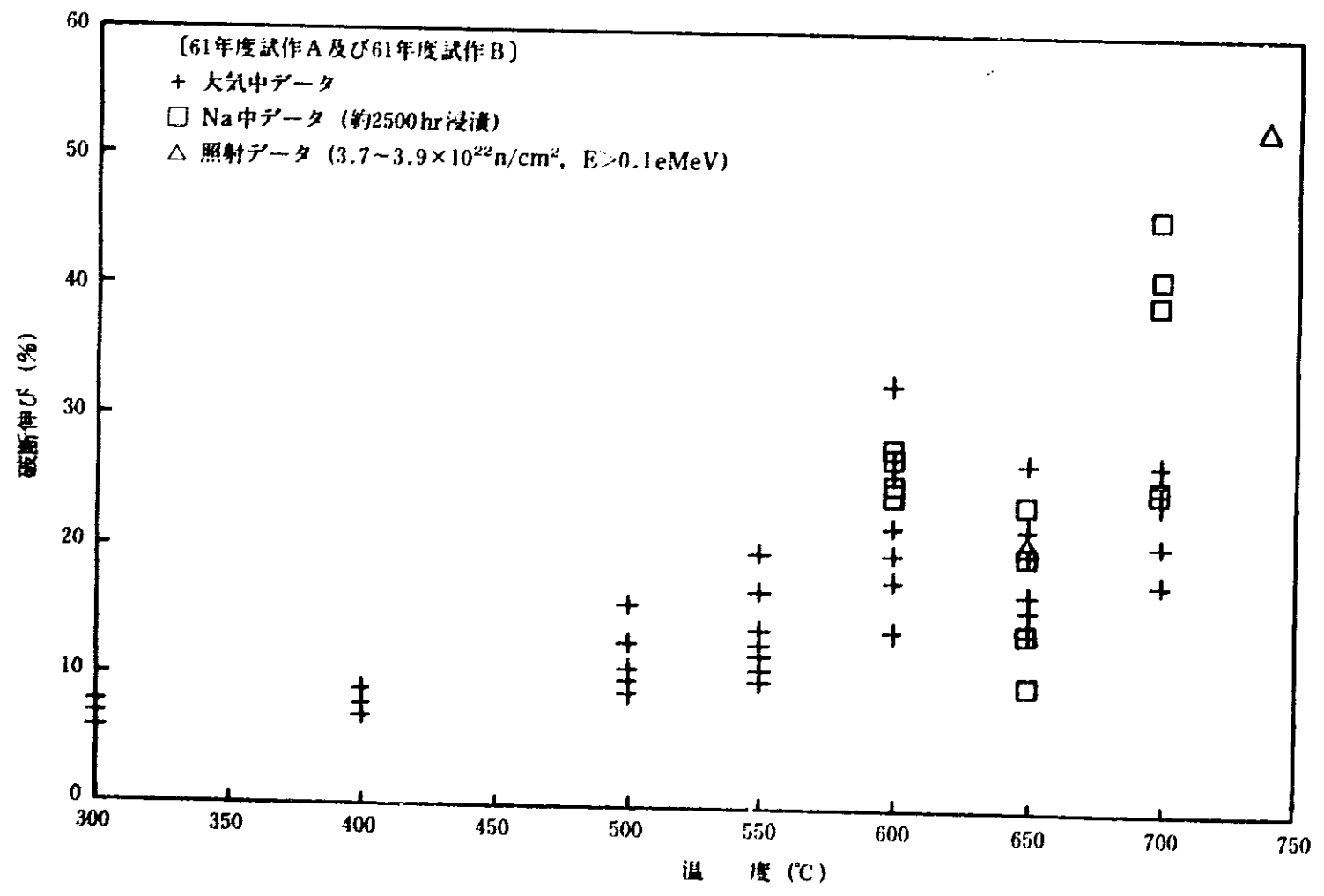
使用を計画している鋼種



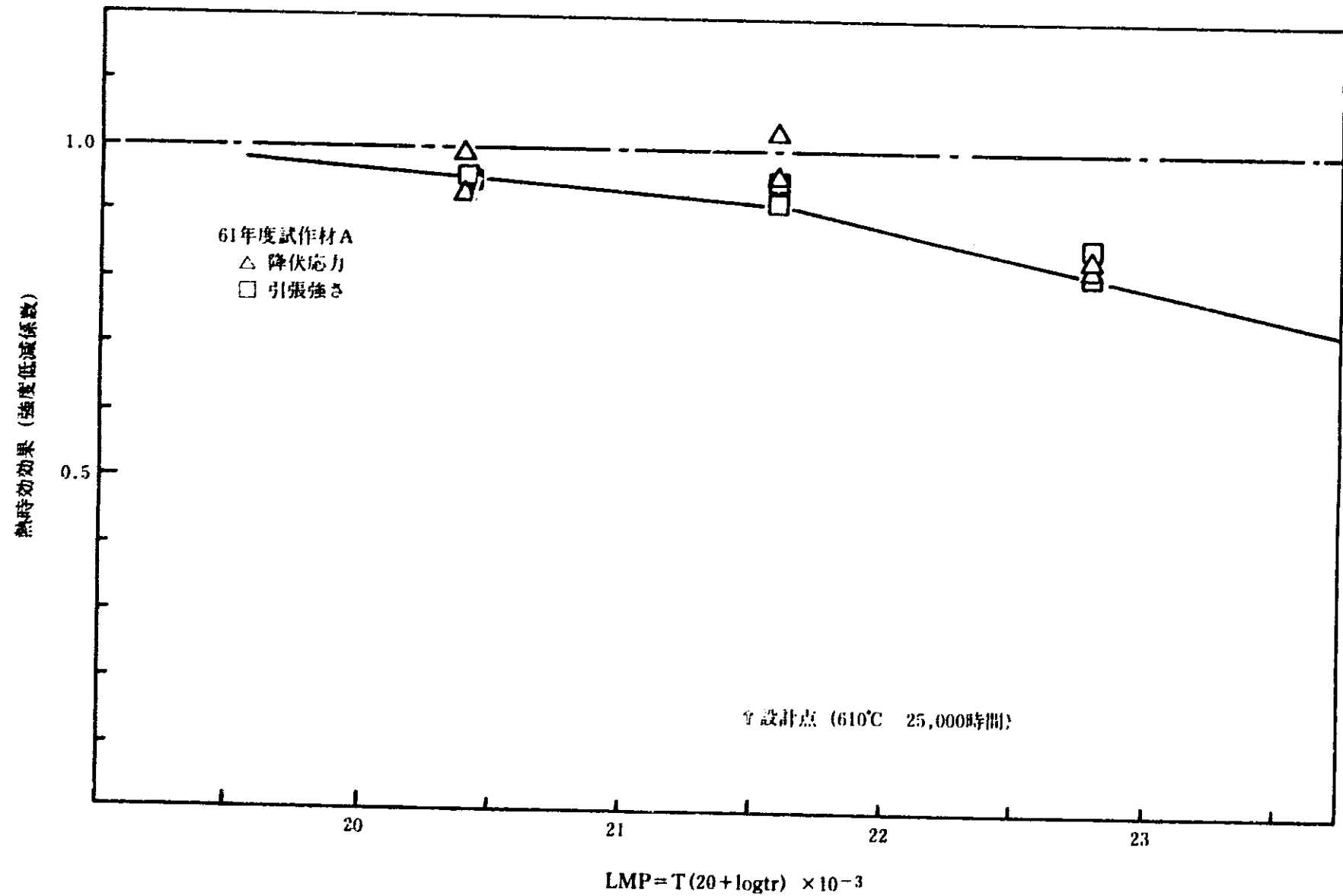
第1図 高速炉用フェライト系ステンレス鋼の降伏強さ



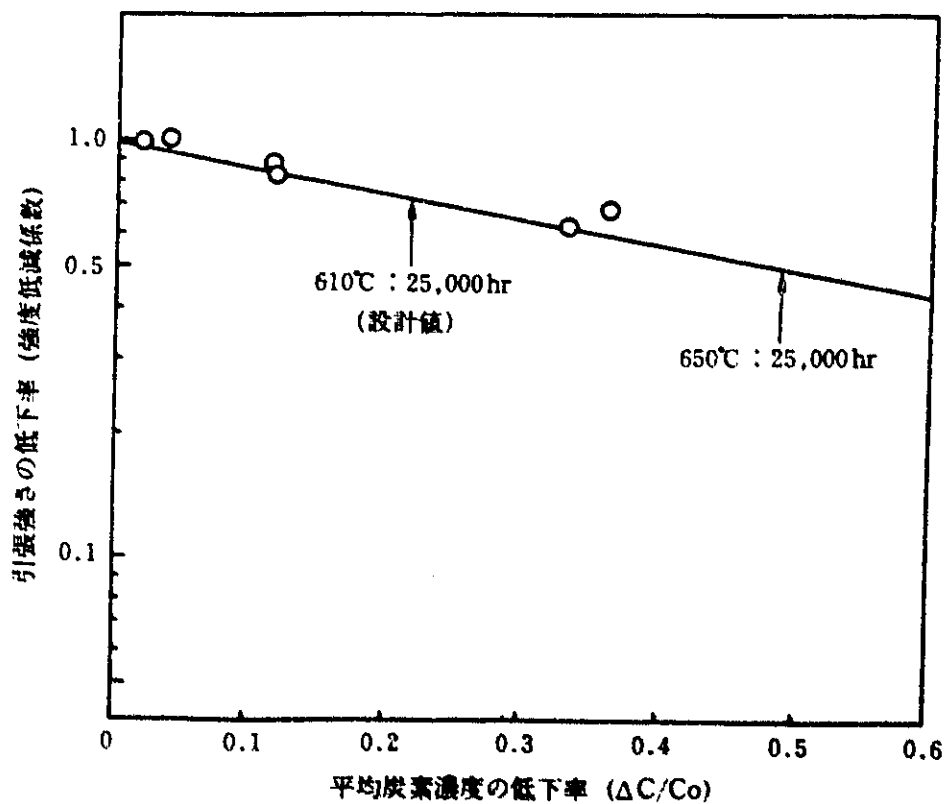
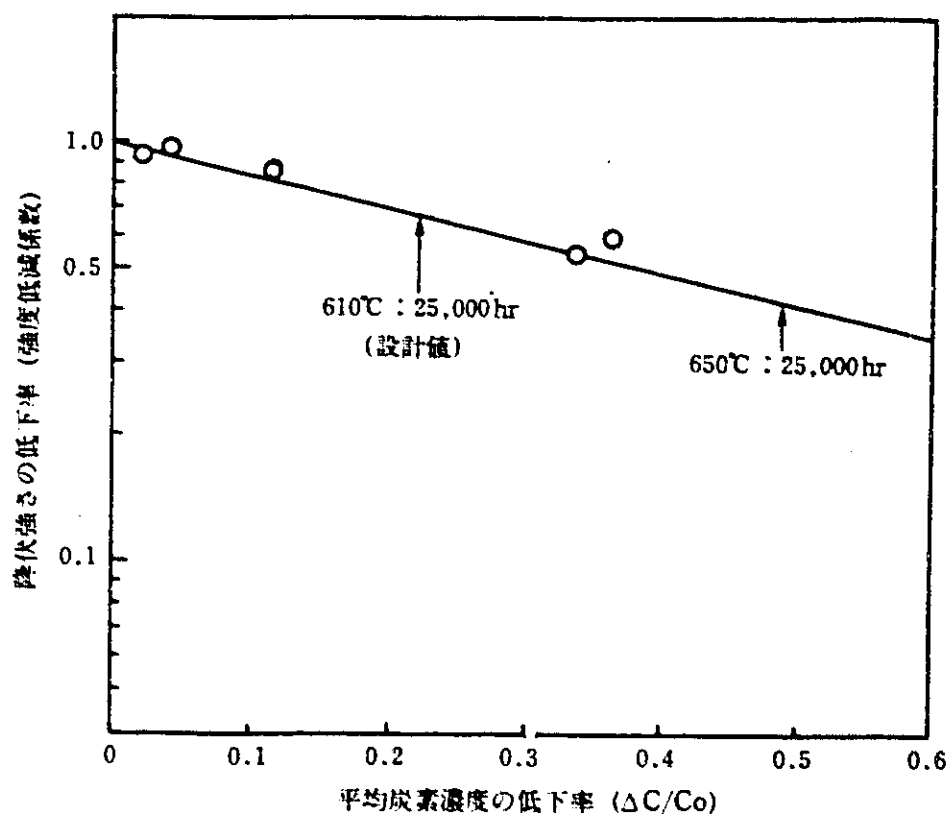
第2図 高速炉用フェライト系ステンレス鋼の引張強さ



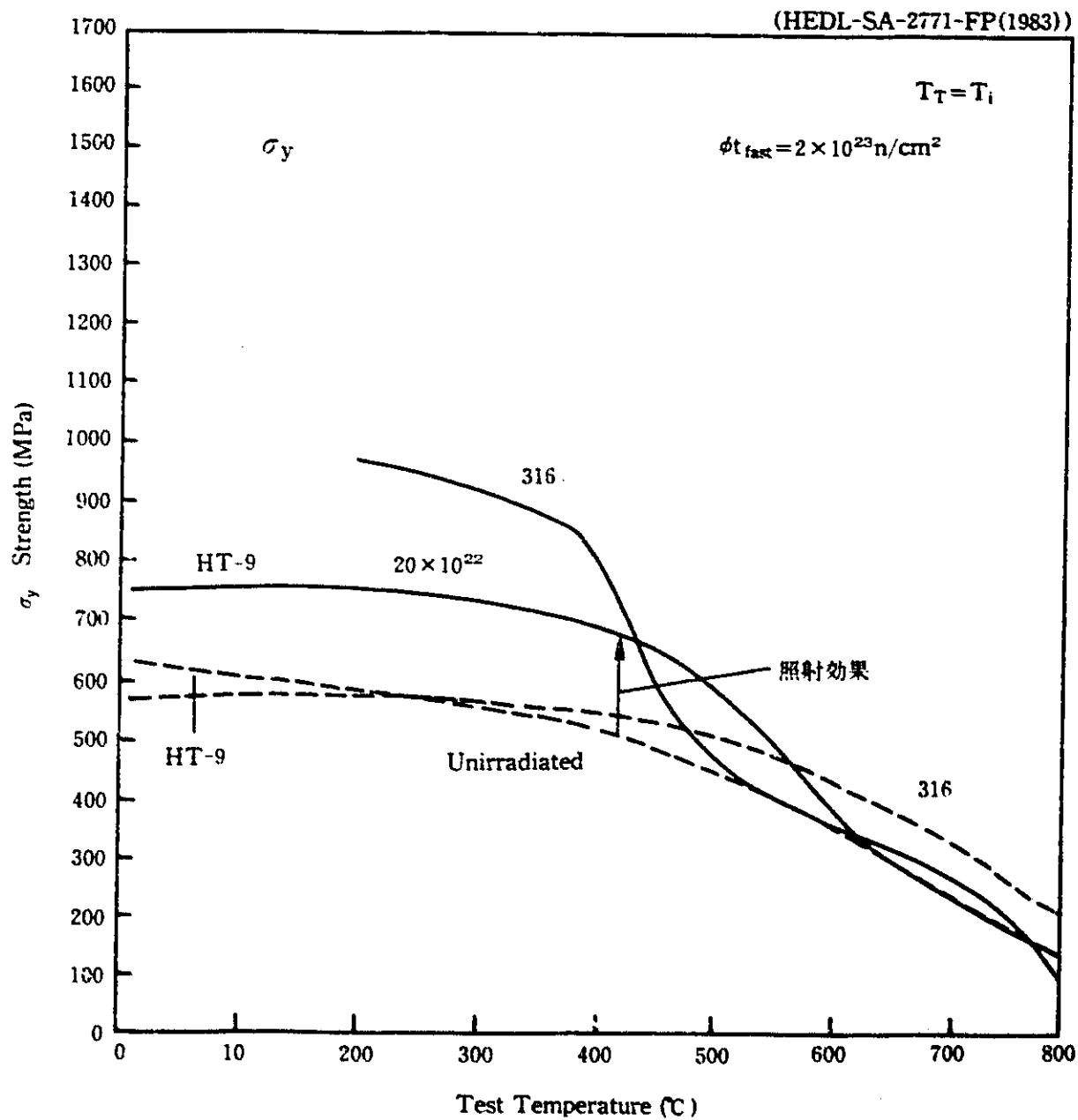
第3図 高速炉用フェライト系ステンレス鋼の破断伸び



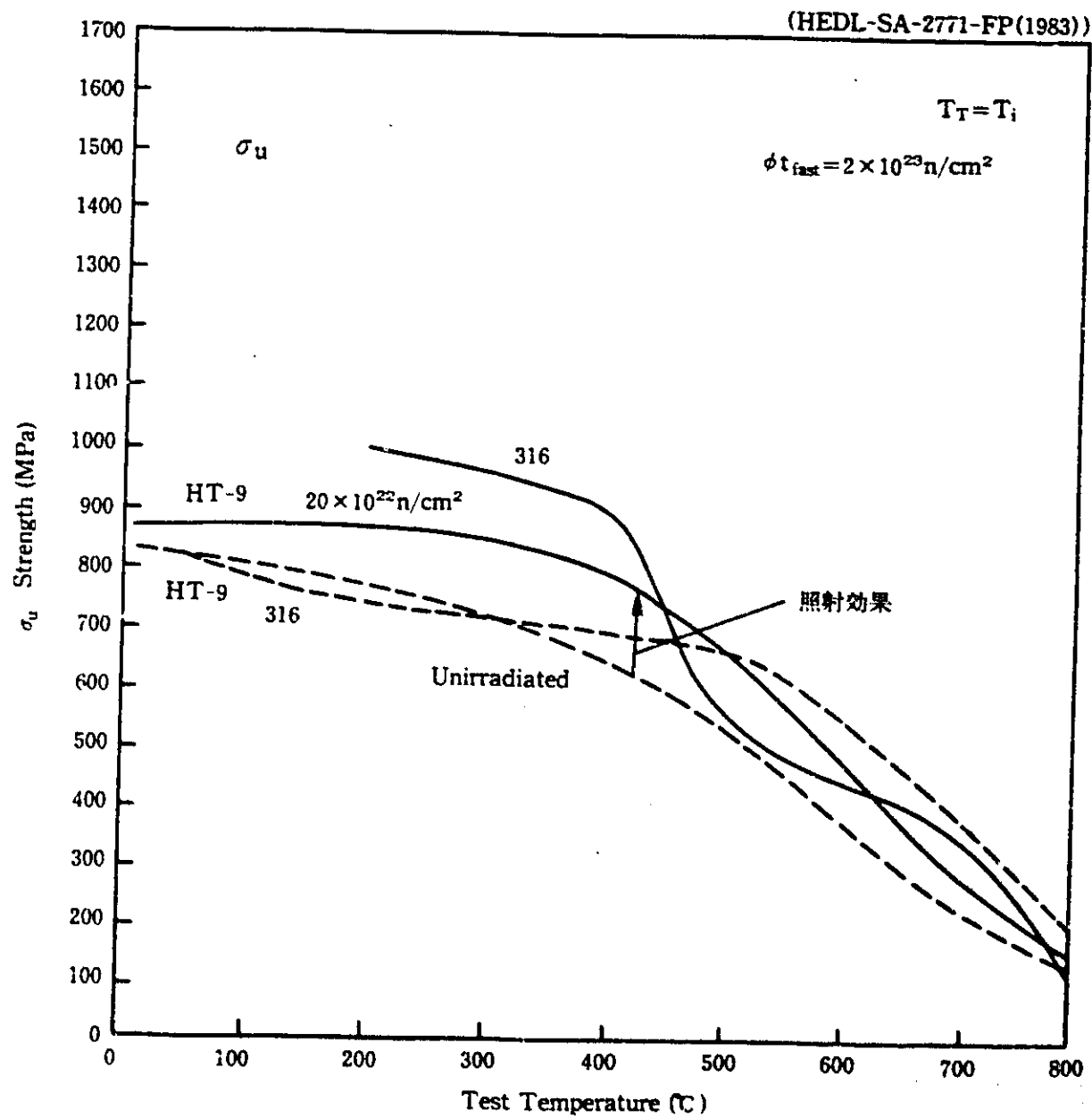
第4図 高速炉用フェライト系ステンレス鋼の熱時効による強度低減係数



第5図 高速炉用フェライト系ステンレス鋼の脱炭による強度低減係数

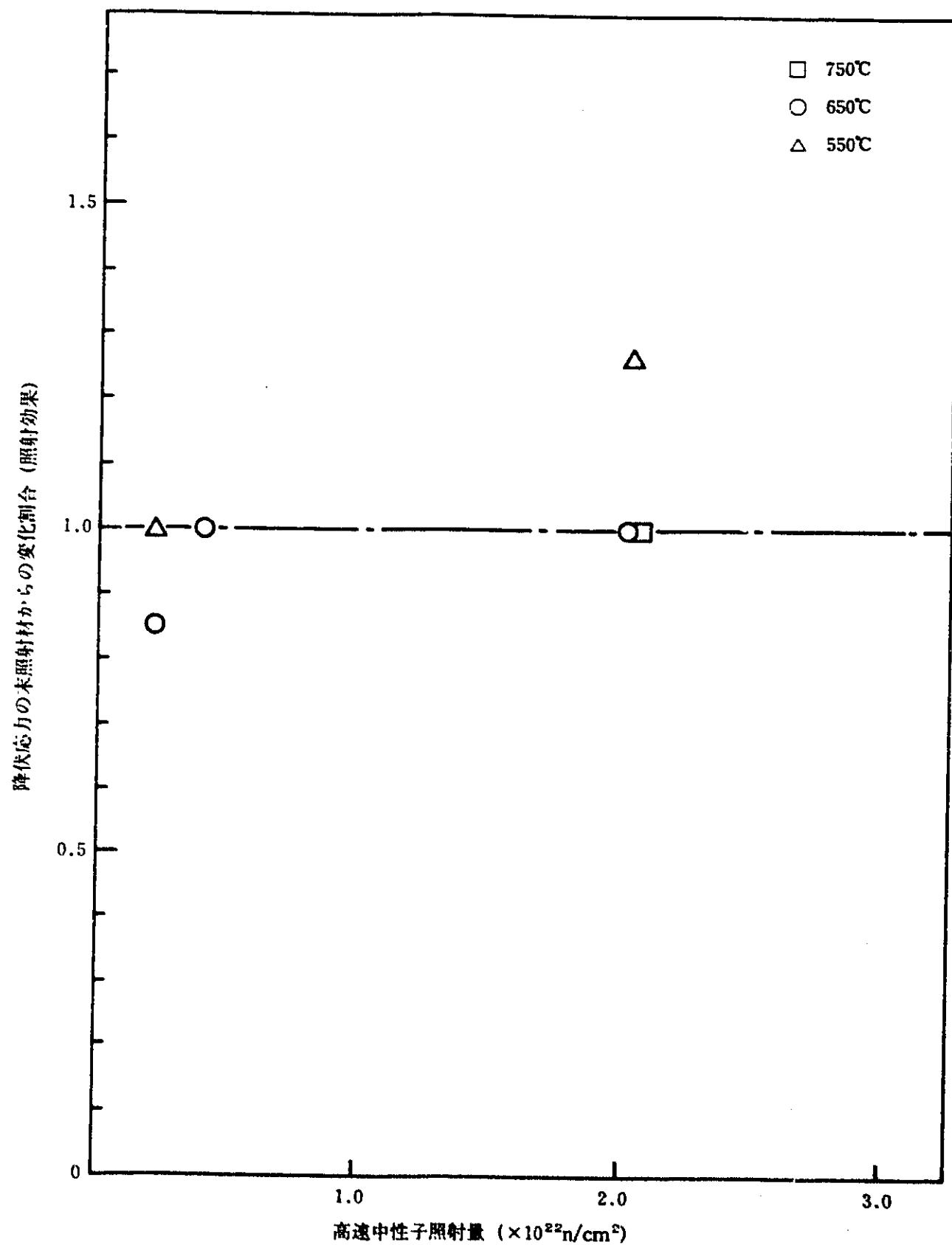


第6図 高照射量条件下における降伏強度

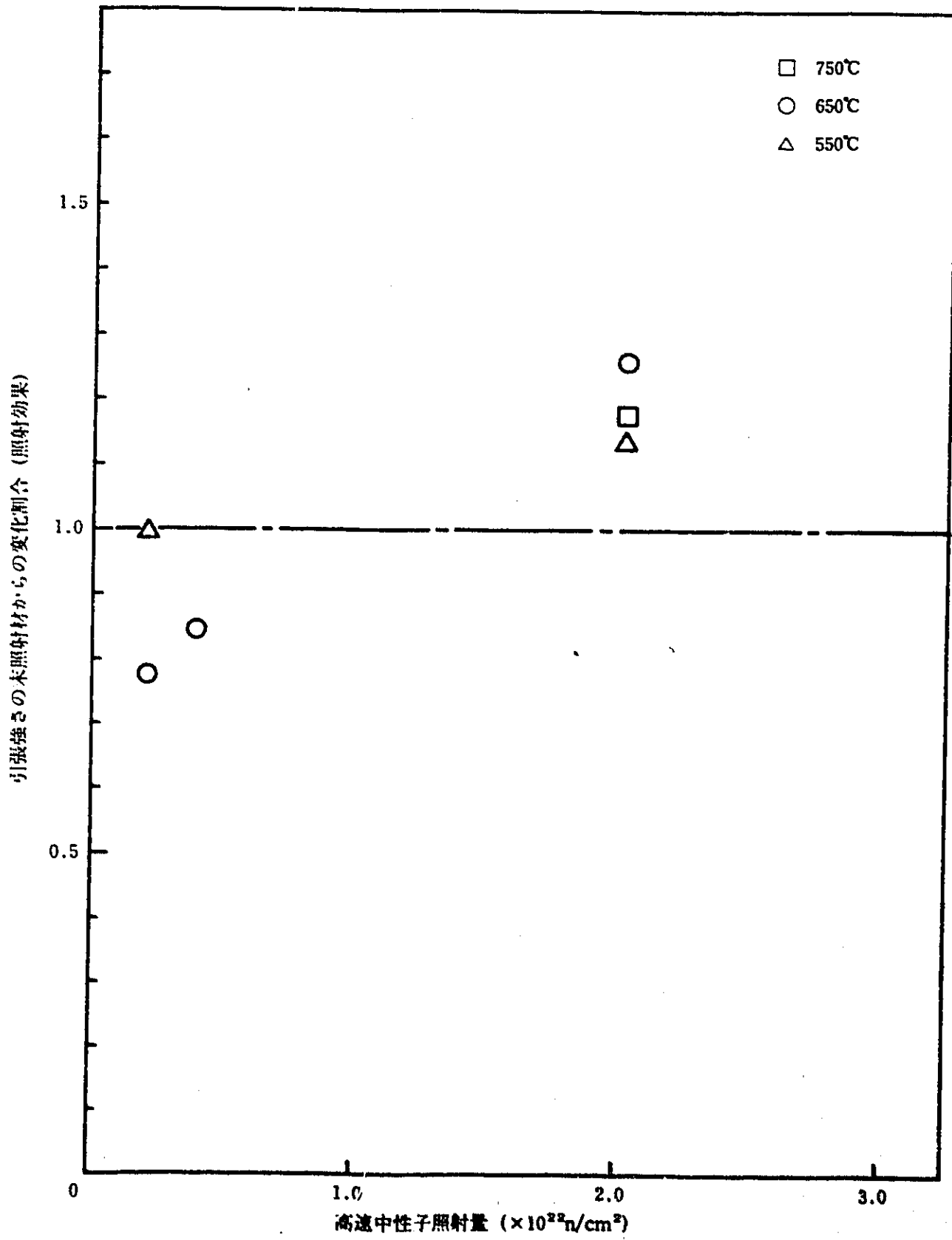


第7図 高照射量条件下における引張強さ

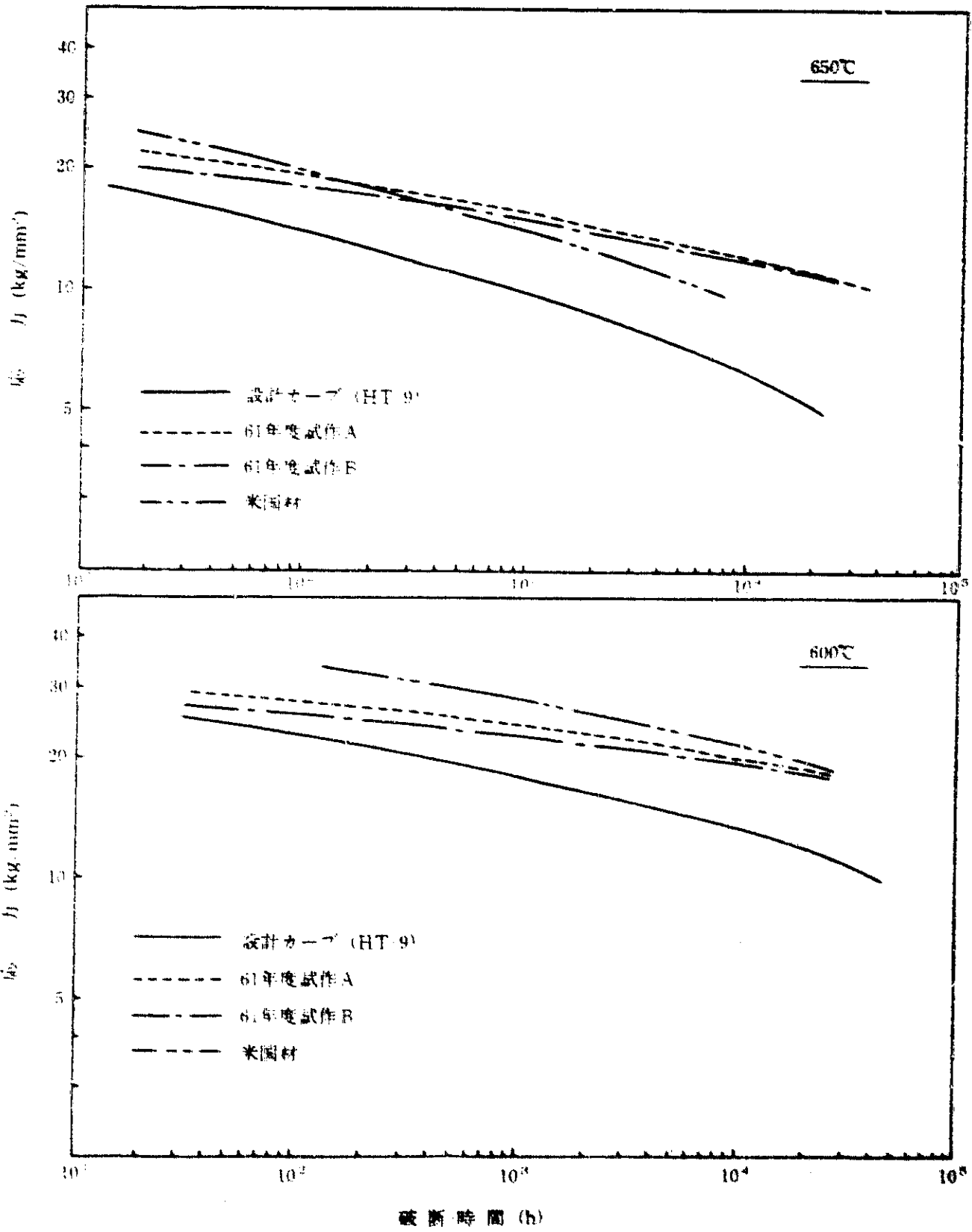




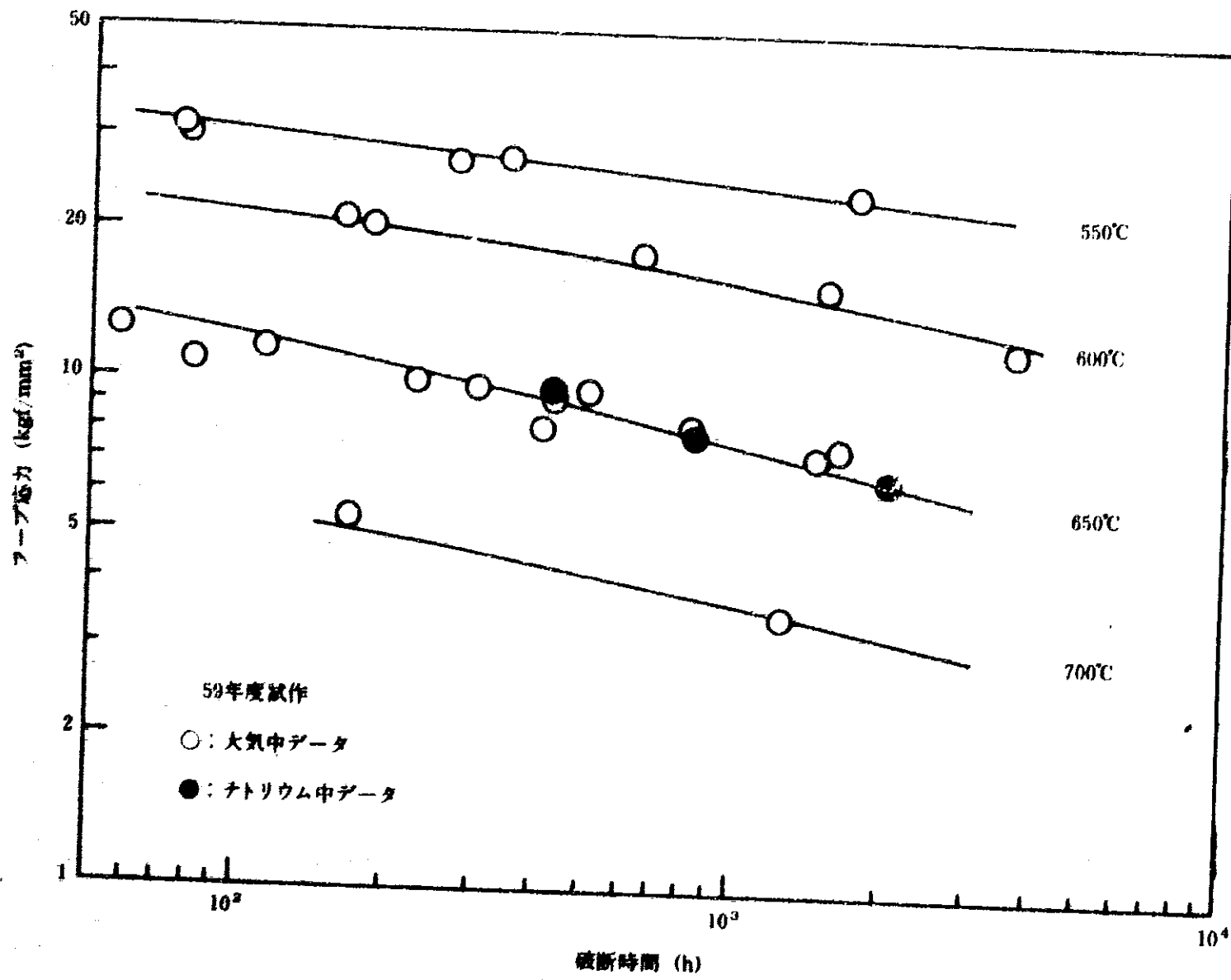
第8図 降伏応力に対する照射効果



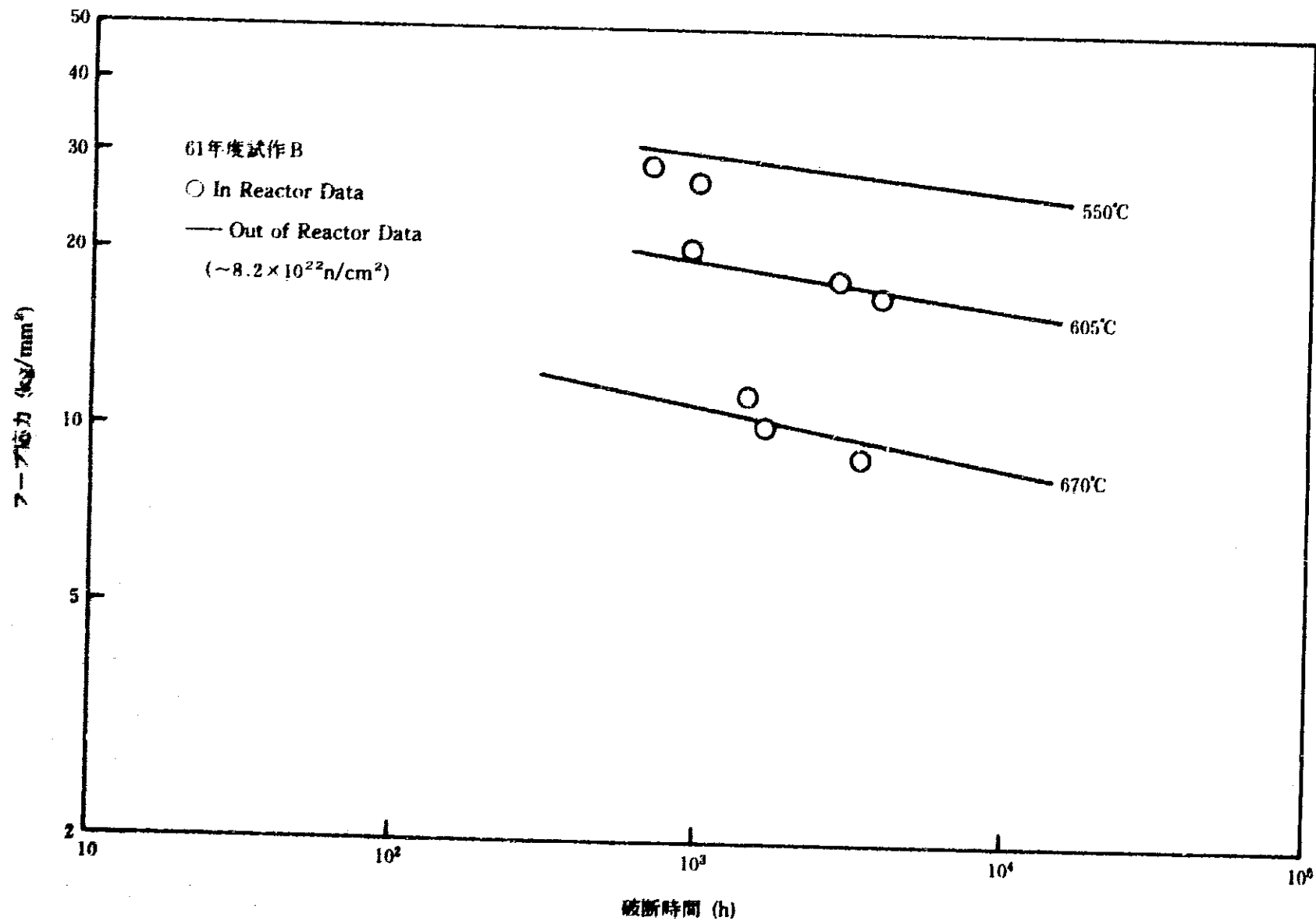
第9図 引張強さに対する照射効果



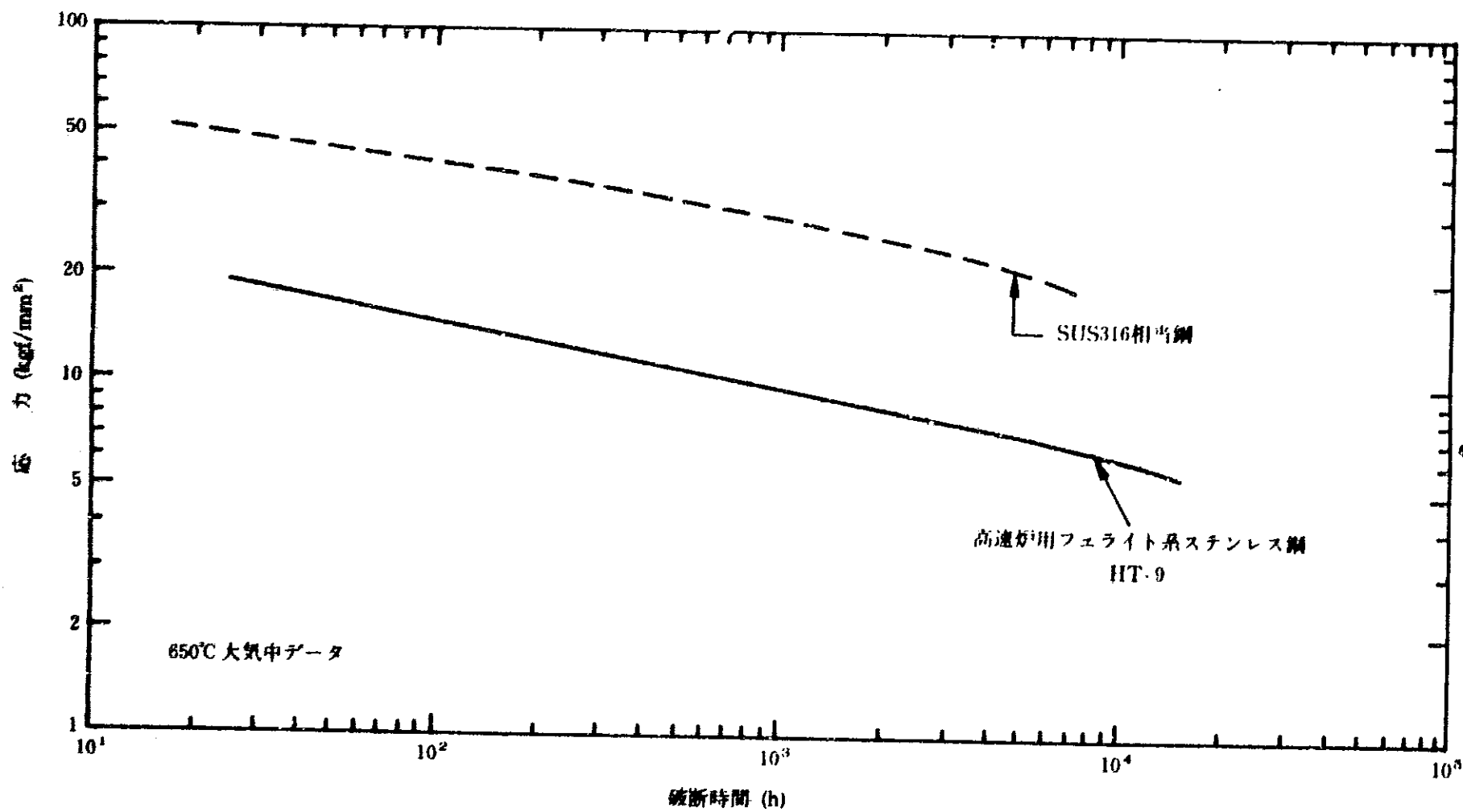
第10図 大気中クリープ破断強度



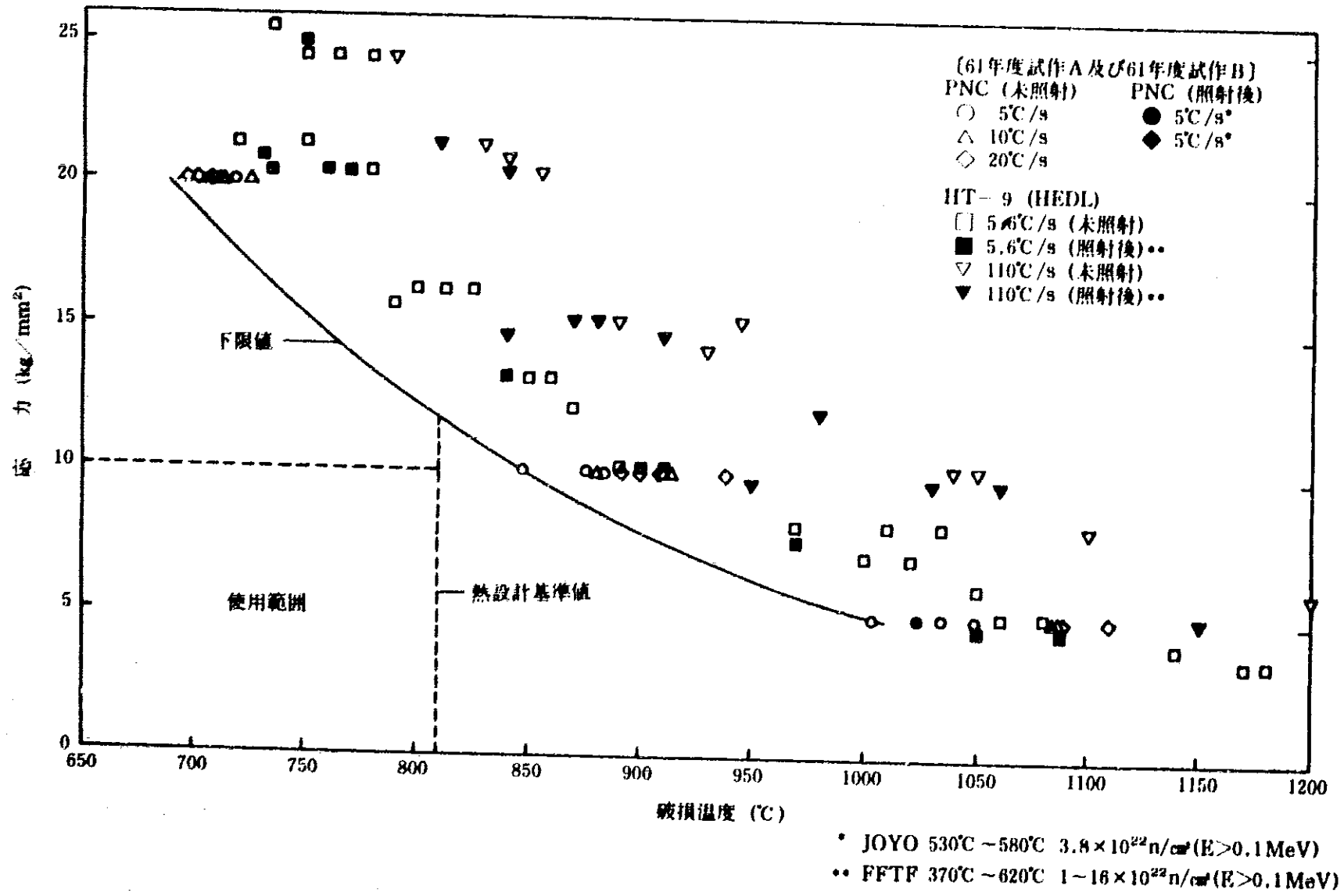
第11図 大気中及びナトリウム中クリープ破断強度



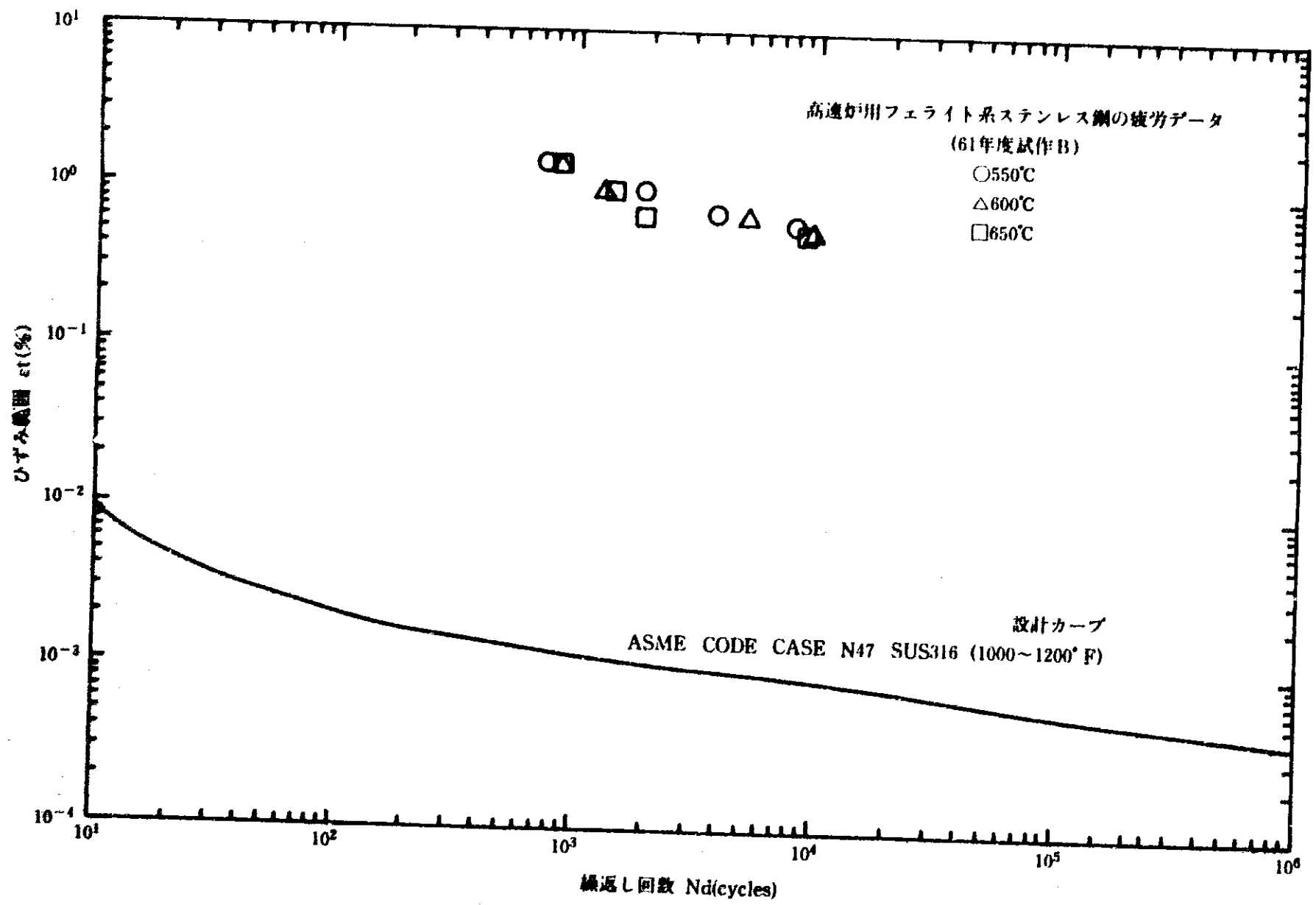
第12図 炉内クリープ破断試験 (FFTF-MOTA)



第13図 高速炉用フェライト系ステンレス鋼とSUS316相当鋼のクリープ破断強度の比較

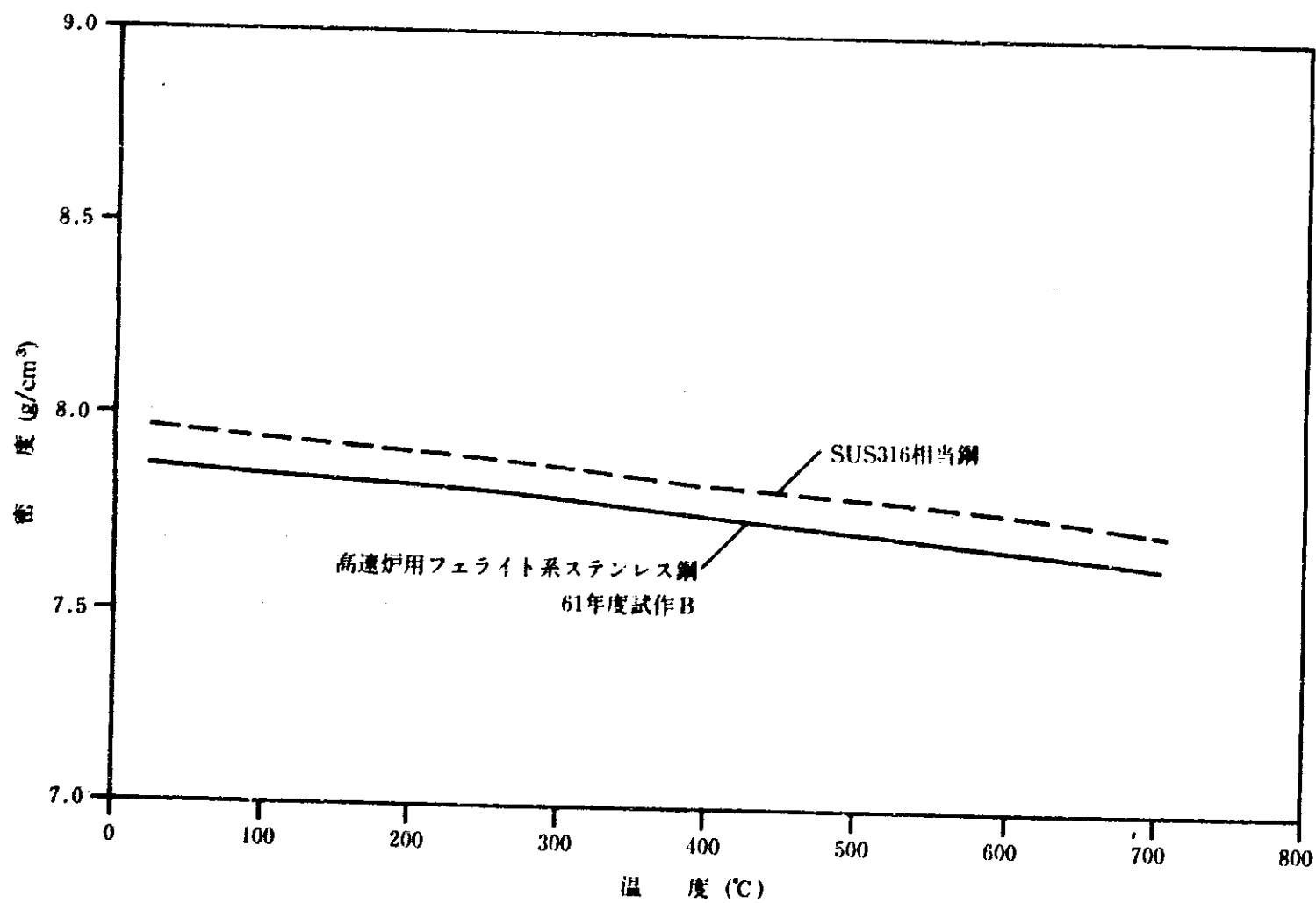


第14図 被覆管急速加熱時の破損温度 (高速炉用フェライト系ステンレス鋼)

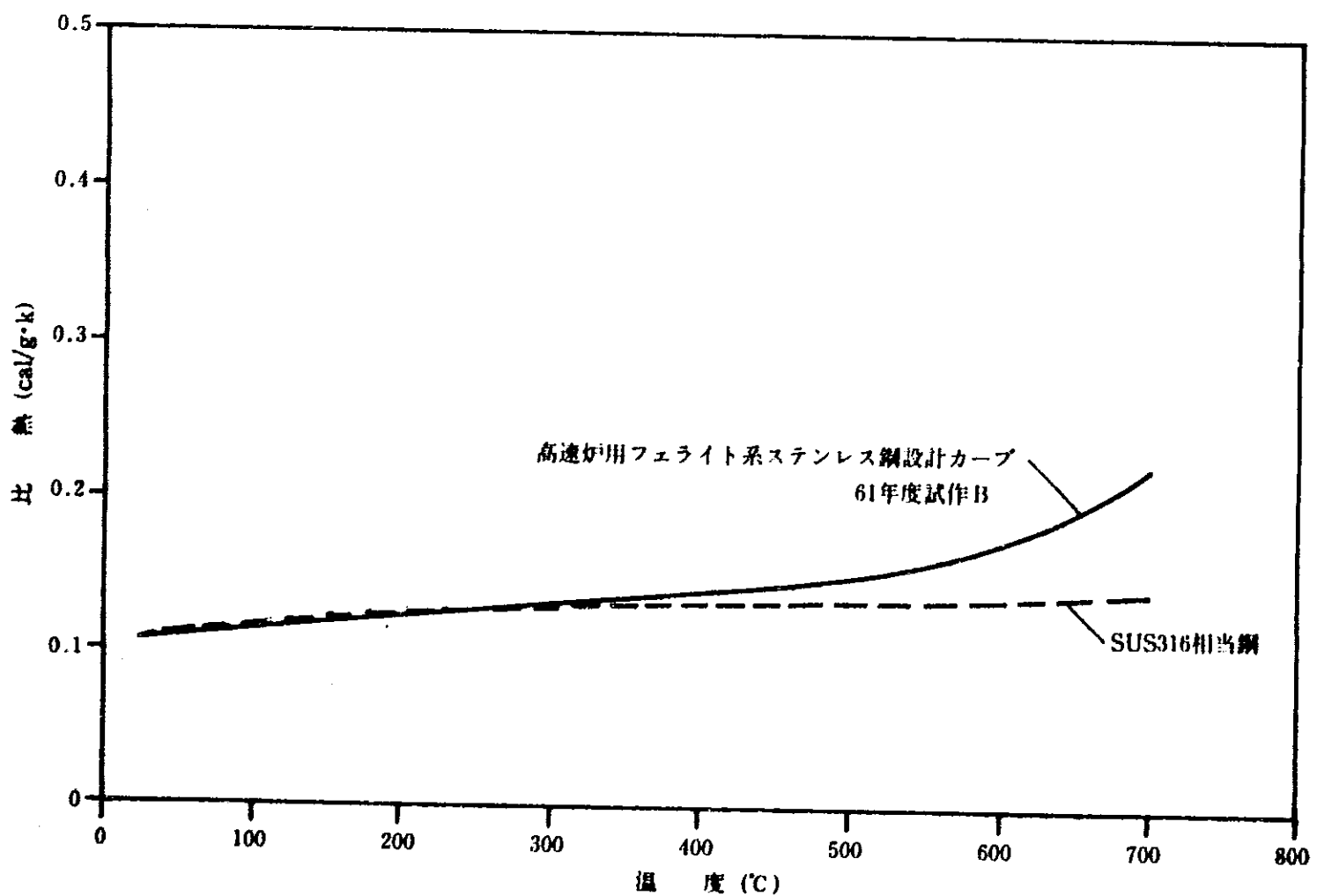


第15図 高速炉用フェライト系ステンレス鋼の高温疲労特性

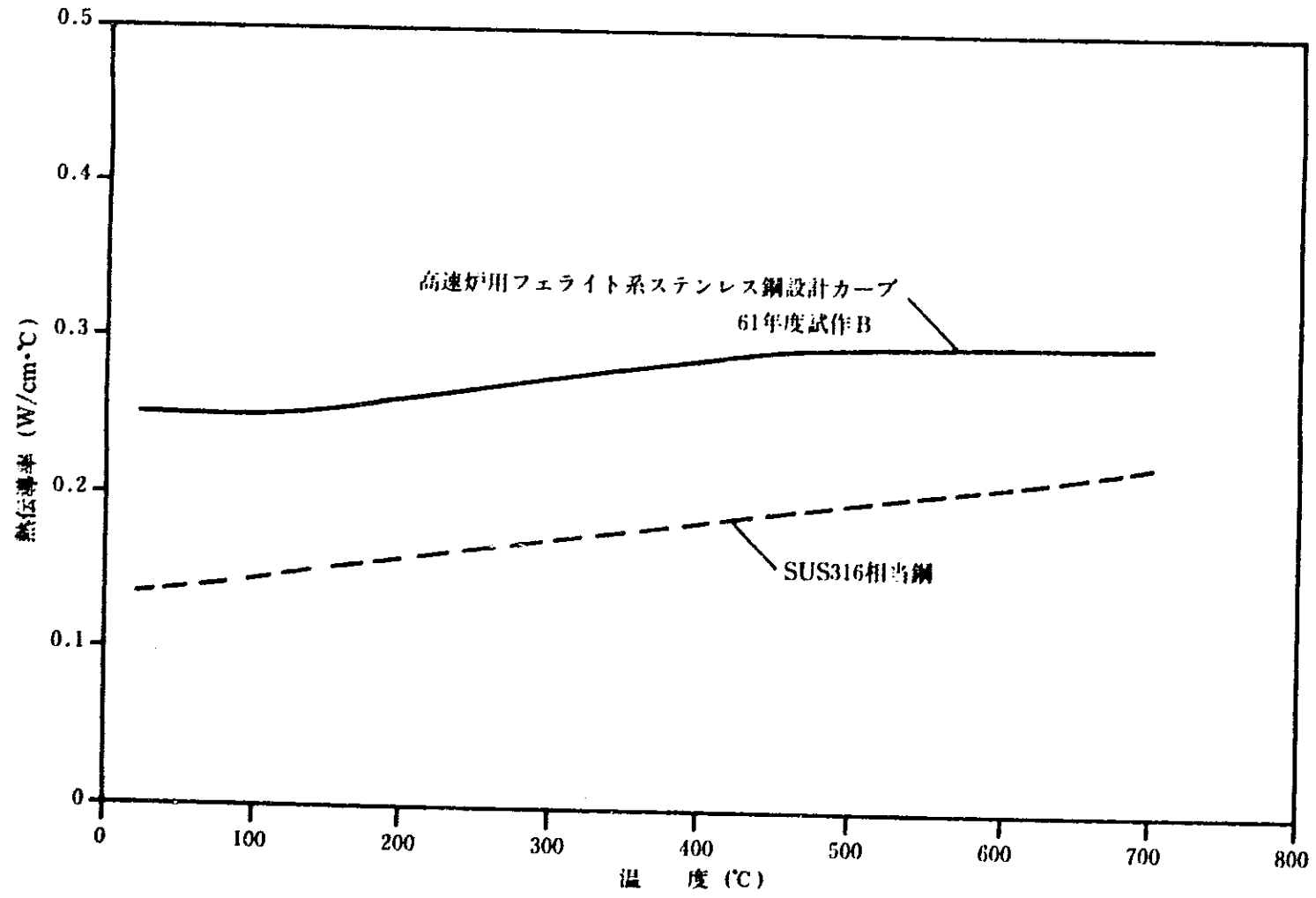




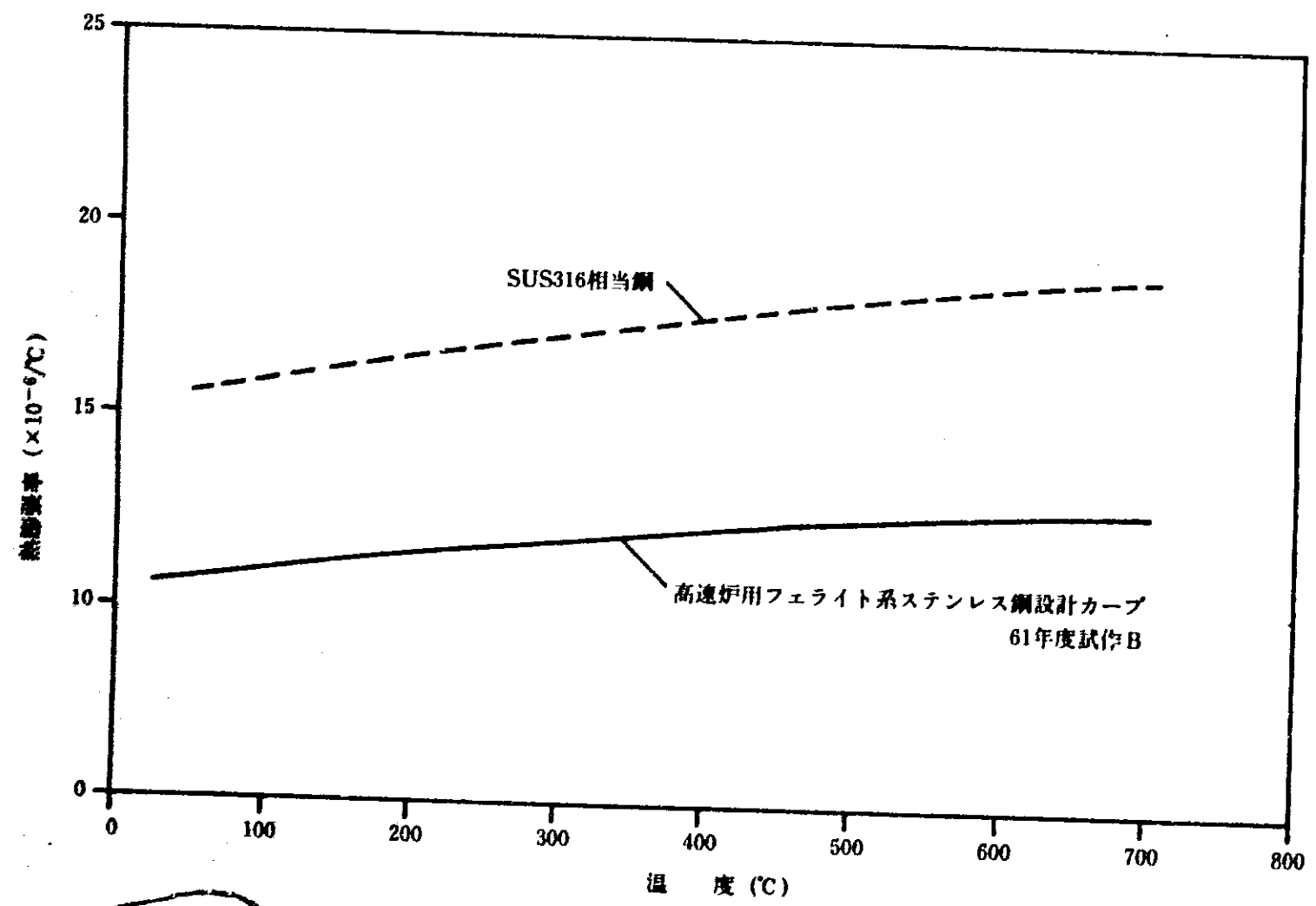
第16図 ステンレス鋼の密度



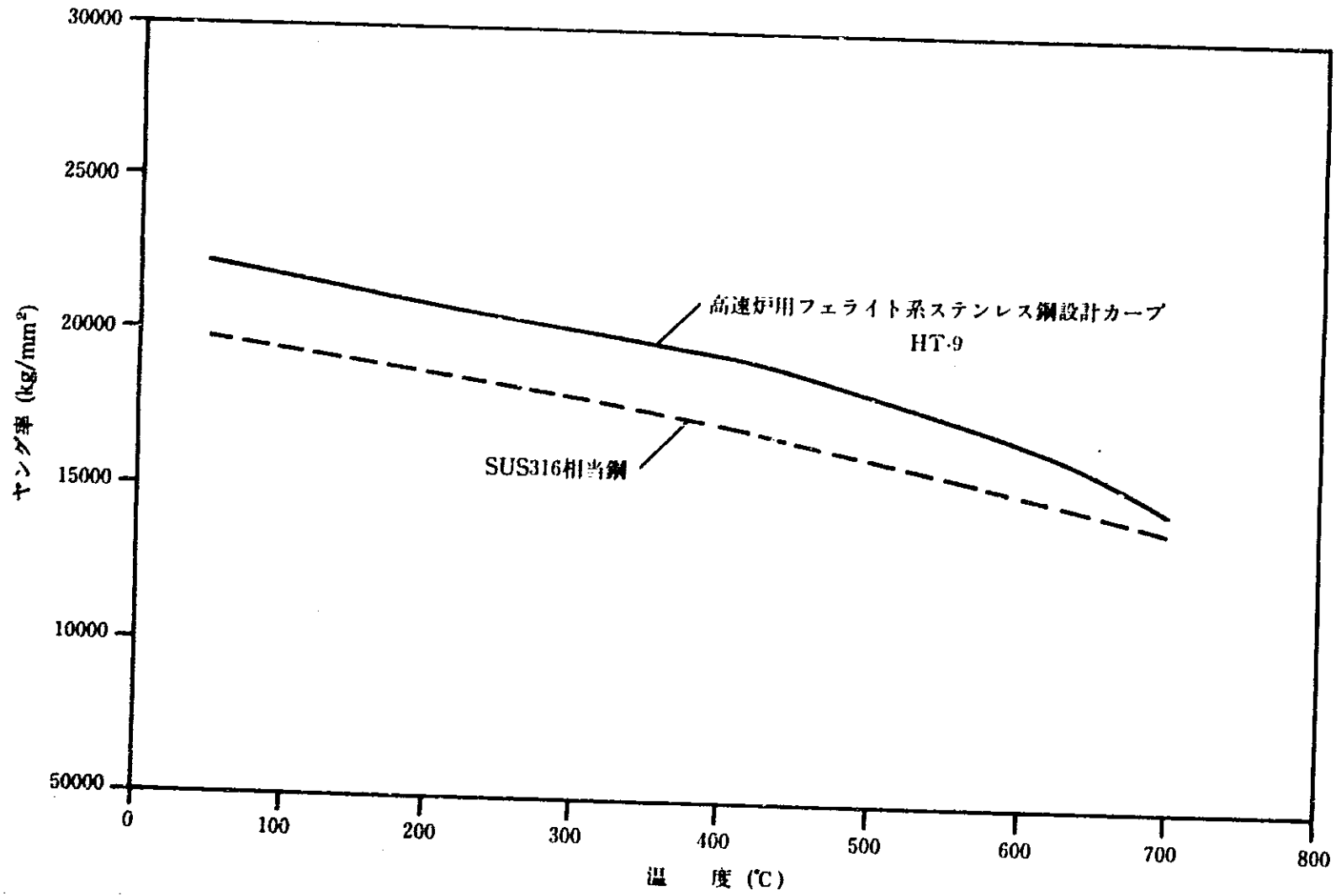
第17図 ステンレス鋼の比熱



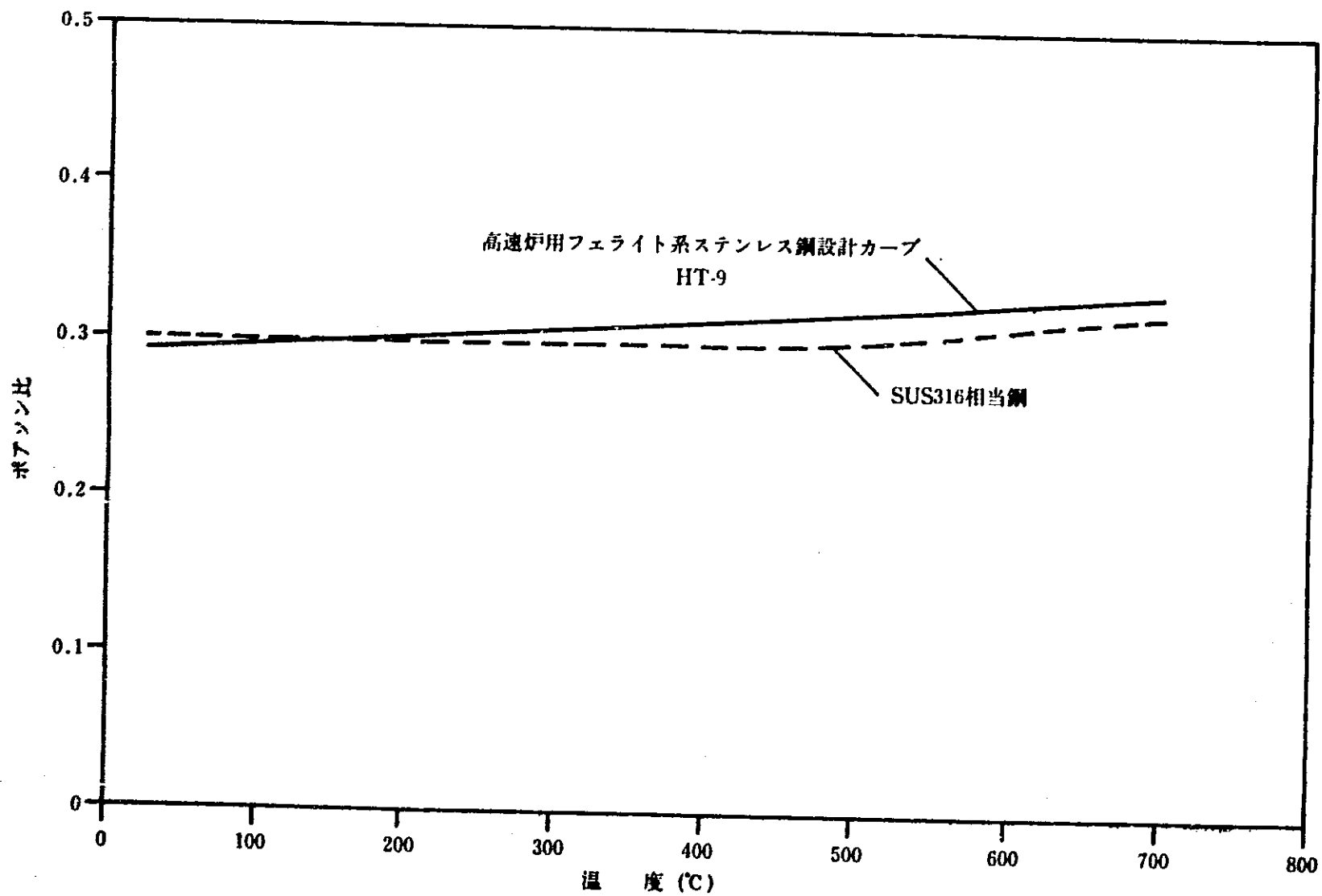
第18図 ステンレス鋼の熱伝導率



第19図 ステンレス鋼の平均熱膨張率

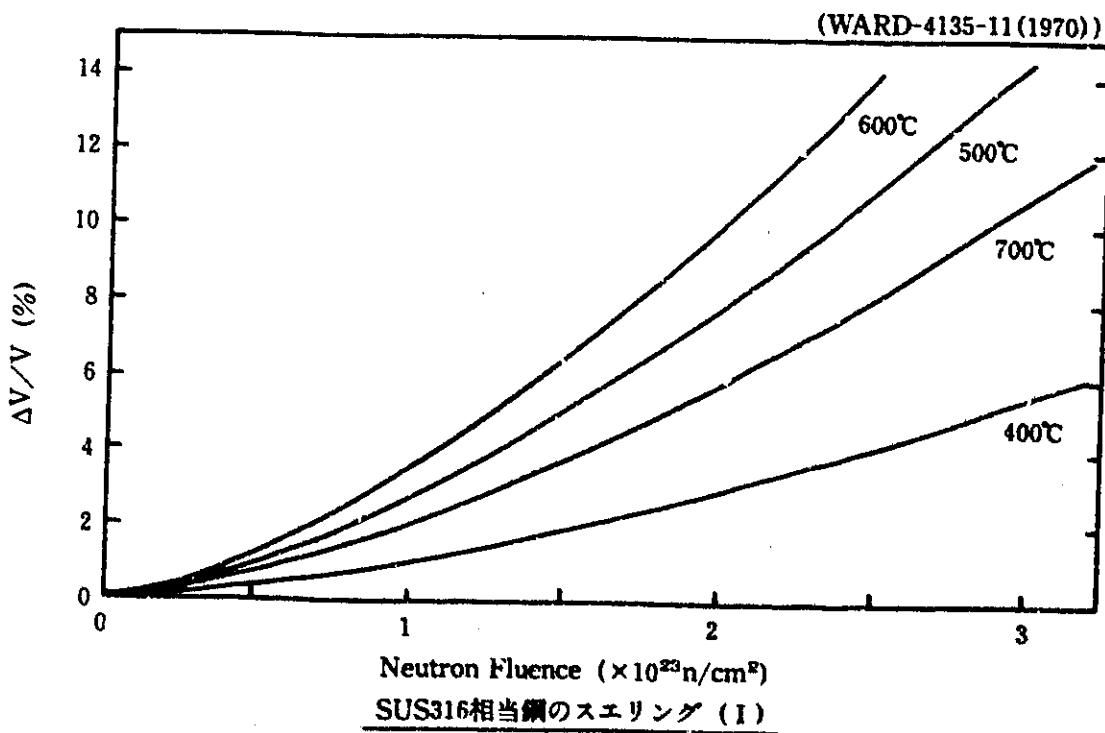
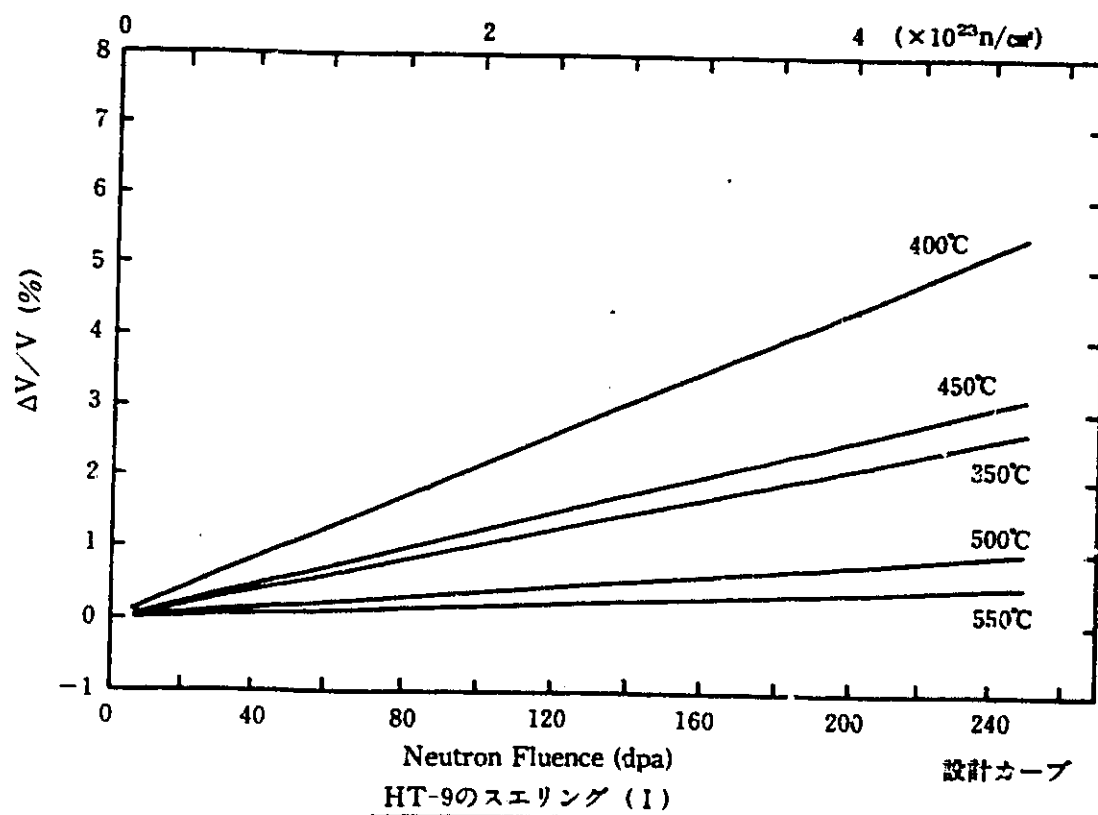


第20図 ステンレス鋼のヤング率



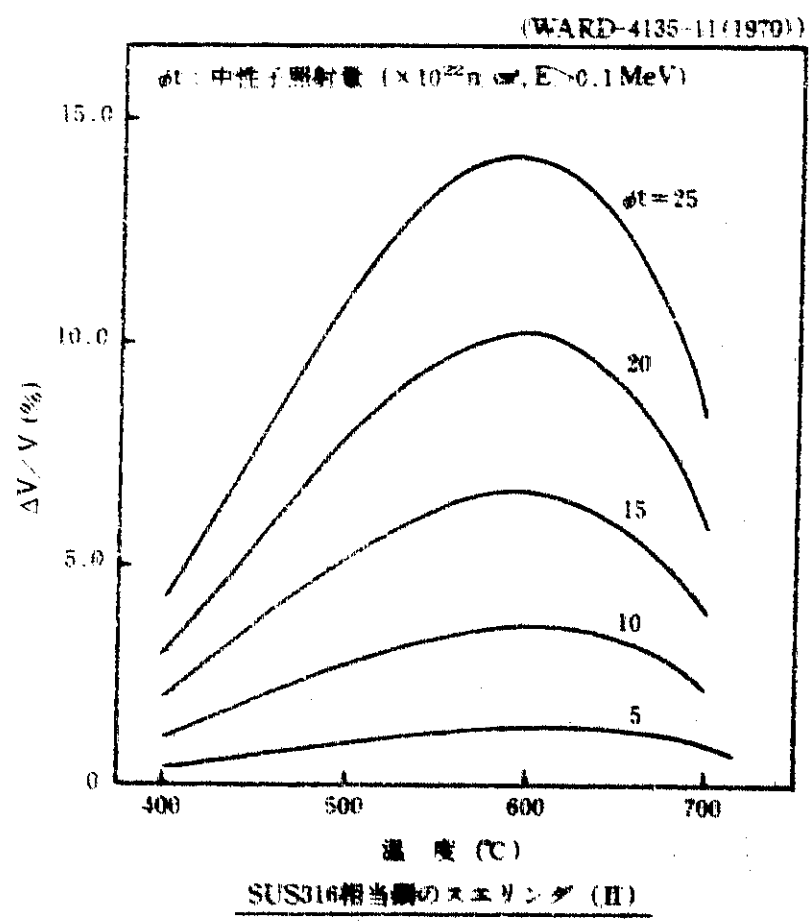
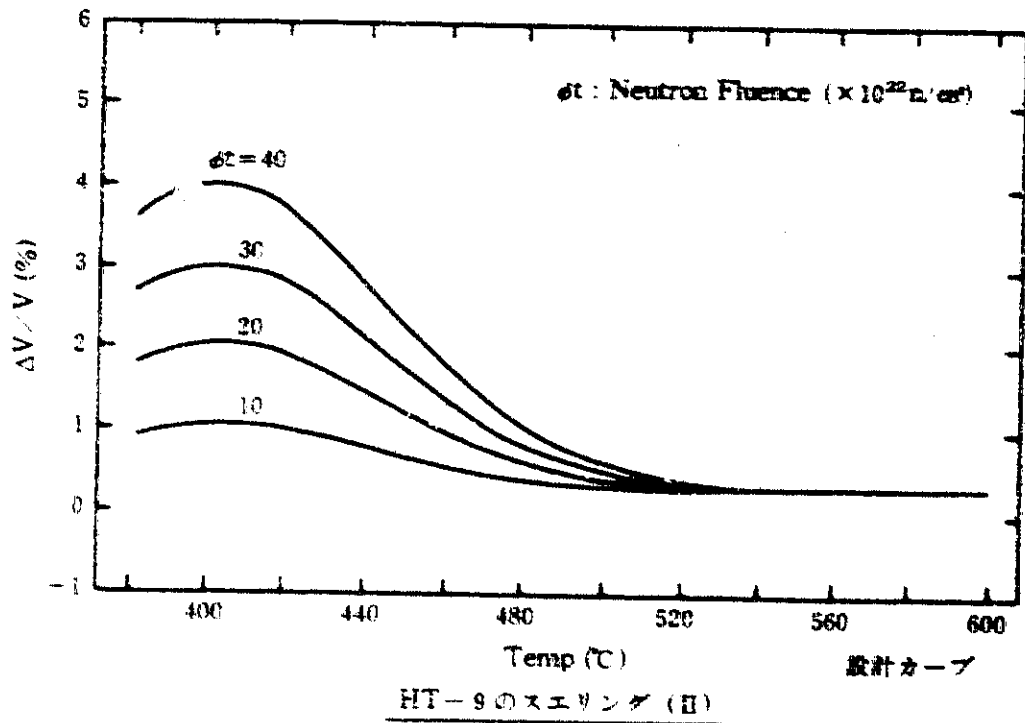
第21図 ステンレス鋼のポアソン比



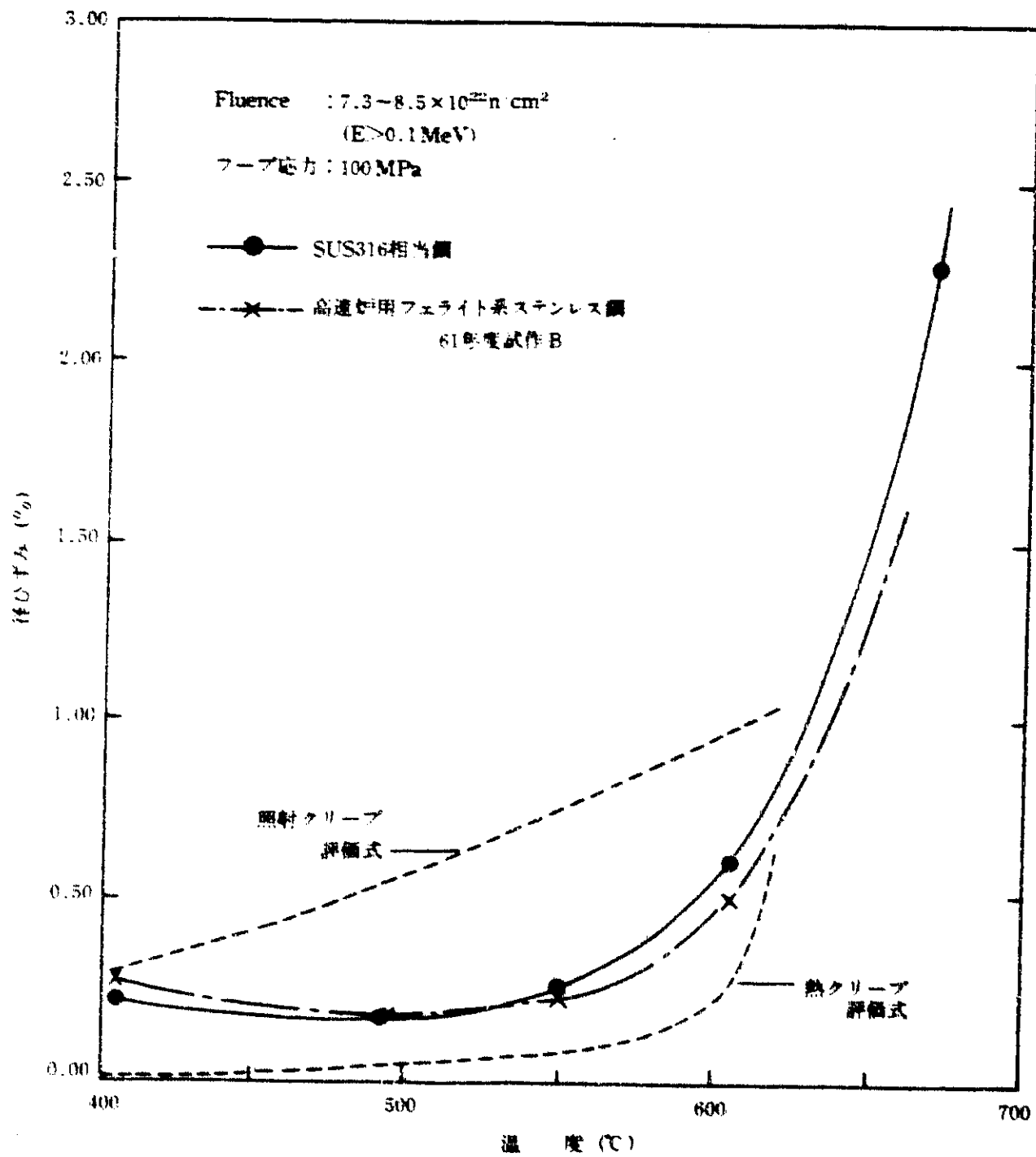


第23図 ステンレス鋼のスエリング (I)

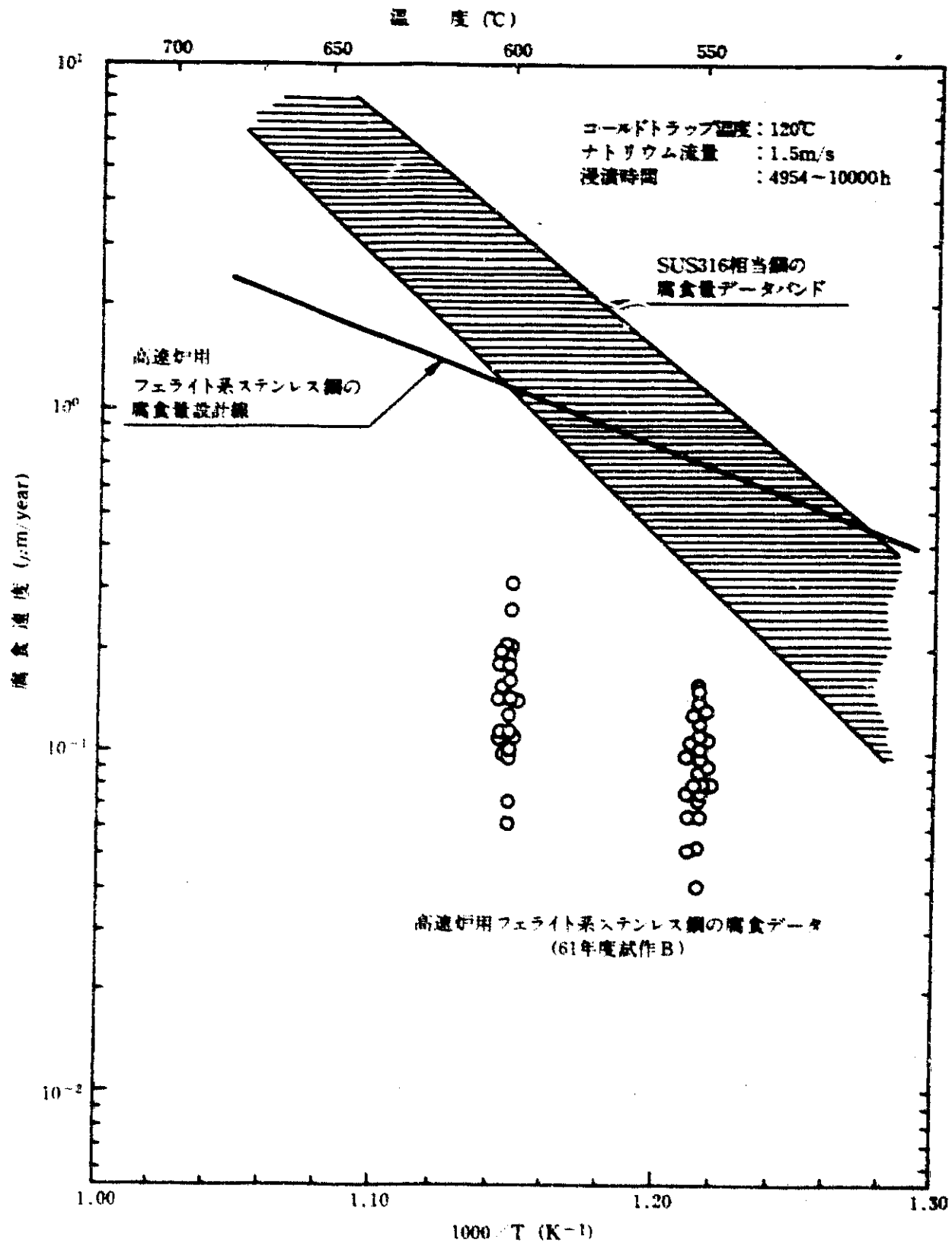




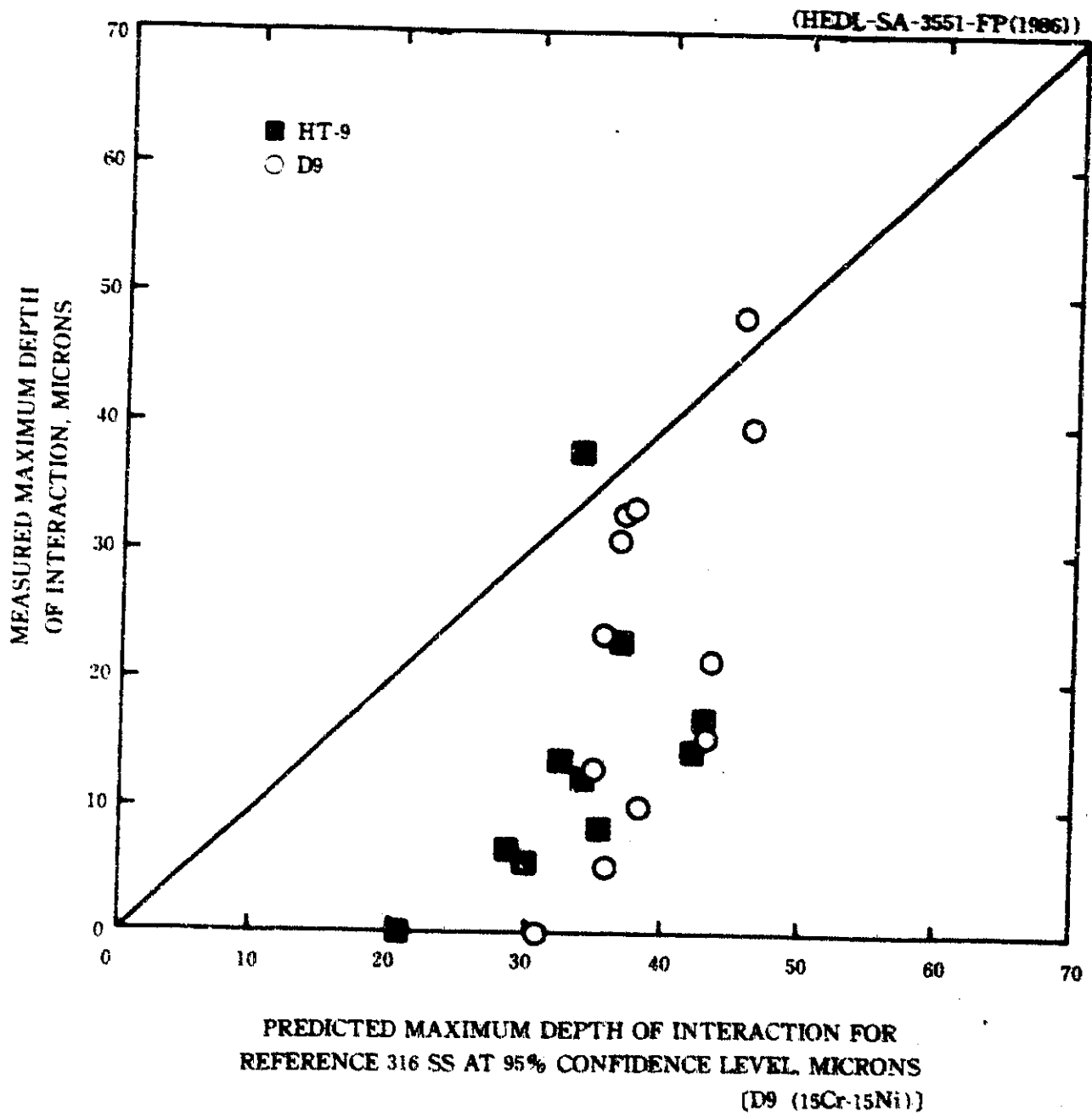
第24図 ステンレス鋼のスエリング (I)



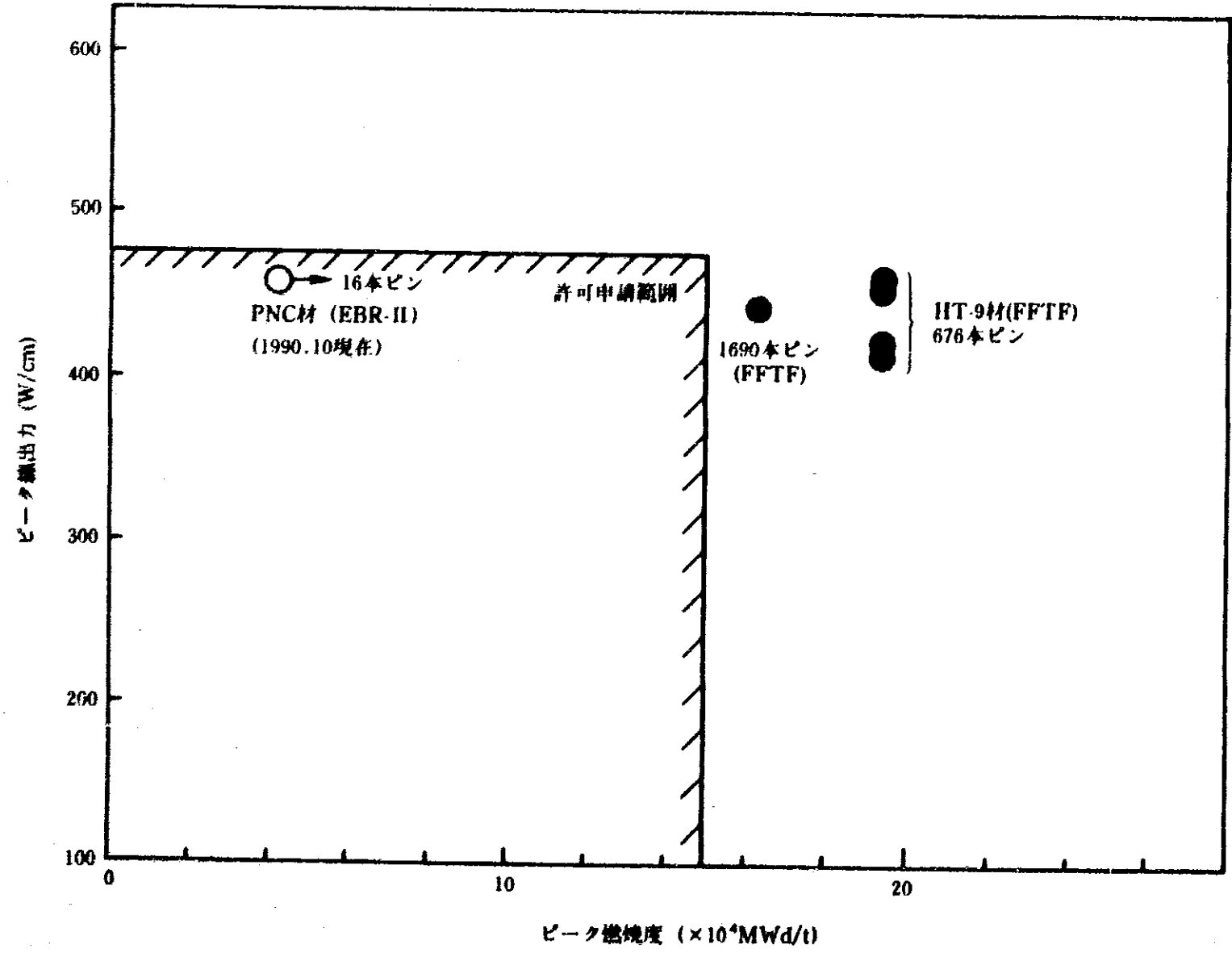
第25図 高速炉用フェライト系ステンレス鋼の炉内クリープ特性 (FFTF-MOTA)



第26図 高速炉用フェライト系ステンレス鋼のナトリウム中腐食



第27図 HT9の内面腐食量 (EBR-II照射)



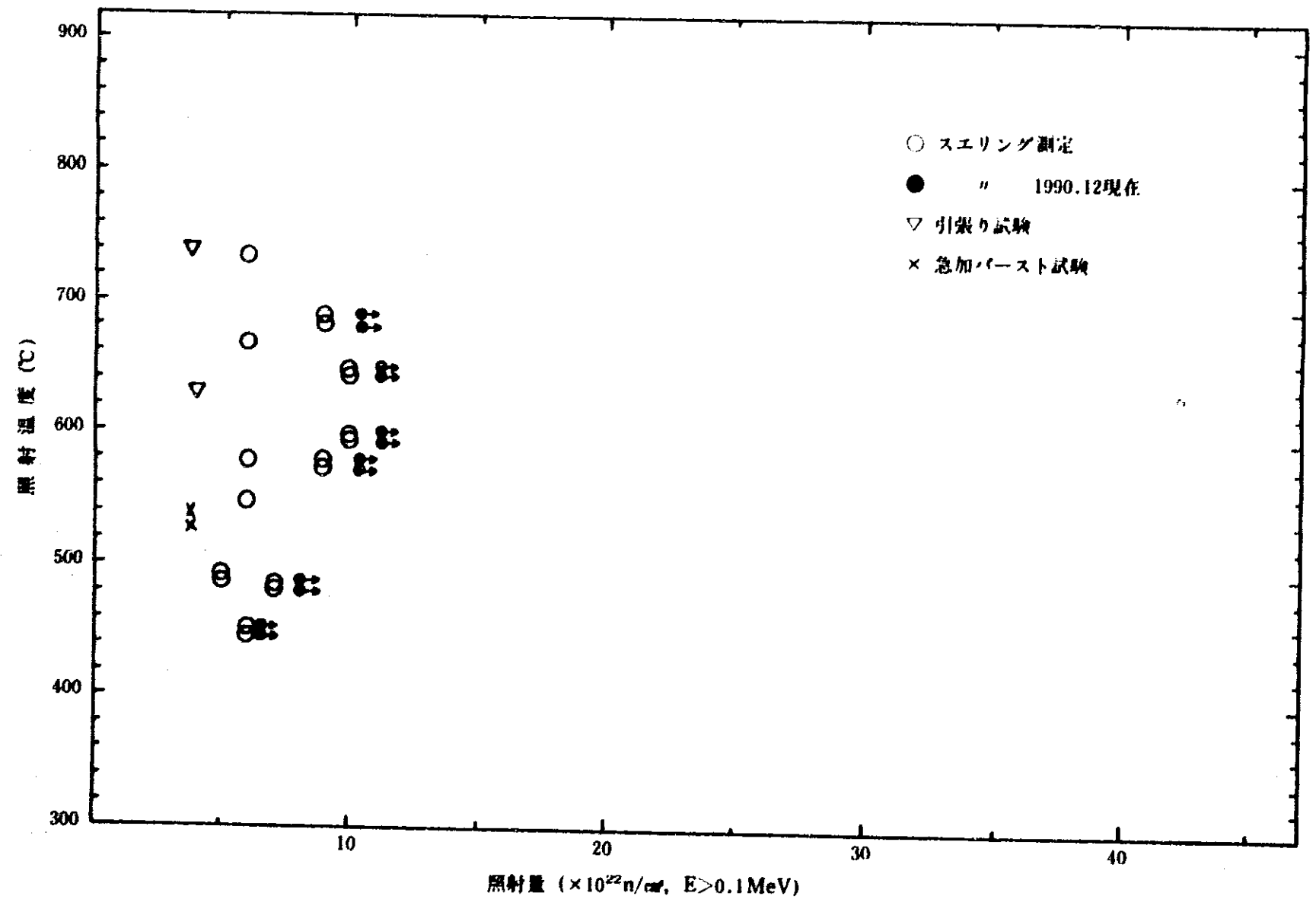
第28図 高速炉用フェライト系ステンレス鋼被覆燃料要素の照射実績

第2表 高速炉用フェライト系ステンレス鋼被覆燃料要素の照射仕様の比較

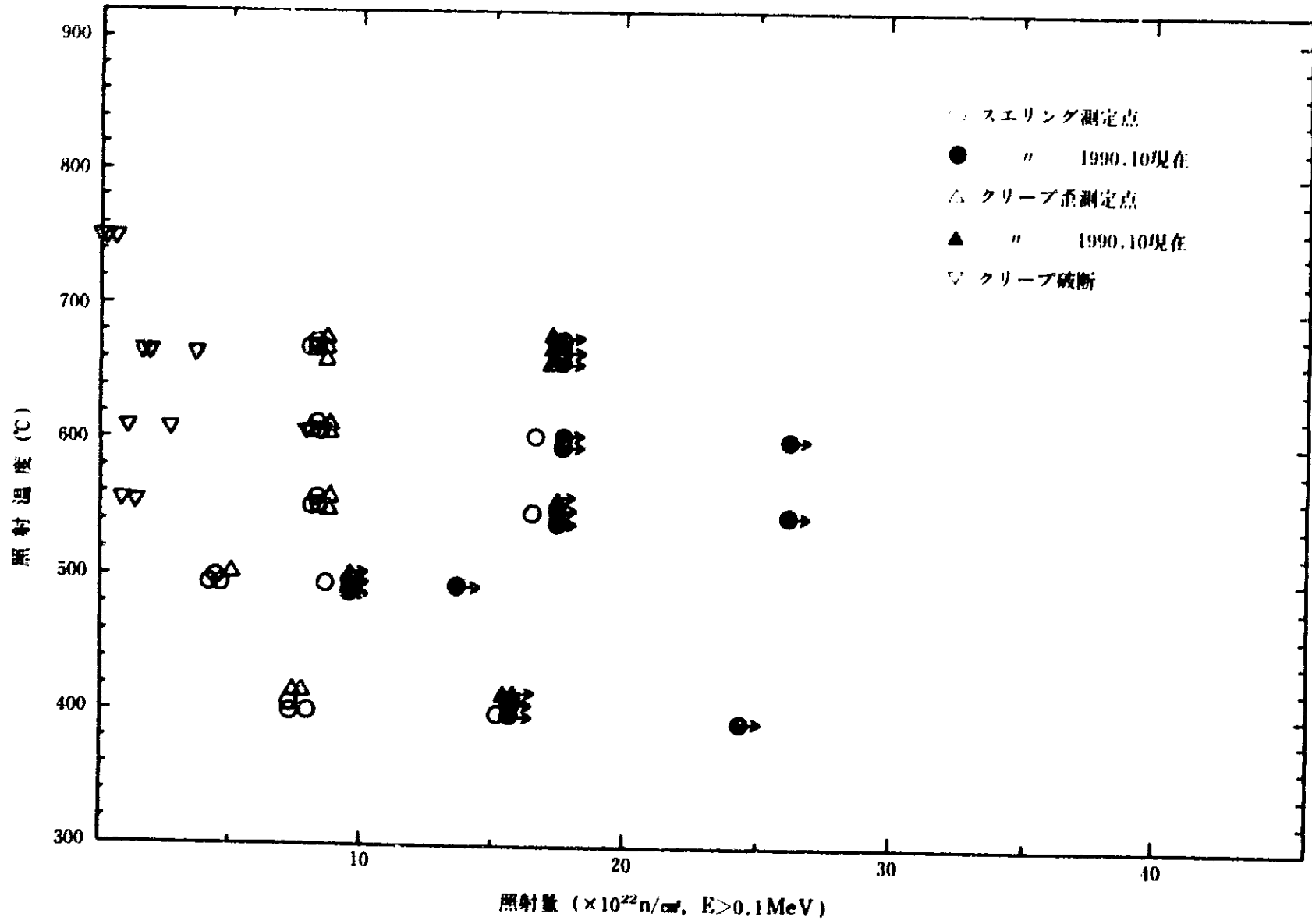
PNC TR9430 90-003

	照射炉	被覆材	被覆管 外径/肉厚 (mm)	同左 最高温度 (°C)	ピーク線 出力 (W/cm)	現状ピー ク燃焼度 (MWd/t)	現状高速中性子 ピーク照射量 (n/cm <sup>2</sup> )	現状P. P. ガス 圧による応力 (kg/mm <sup>2</sup> )	備 考
当面のIV型特殊燃料 要素の照射計画	「常陽」	PNC材 米国材	6.86/0.56	610	450	(150,000)	(2 × 10 <sup>23</sup> )	(6 <sup>**</sup> )	計 画 中
FFTFでの照射試験 リーディング照射(1)	FFTF	HT-9	6.85/0.53	622	466	195,000	1.25 × 10 <sup>23</sup>	10 <sup>**</sup>	照射終了・破損無し (109ピン)
" (2)			6.86/0.53	612	420	195,000	2.0 × 10 <sup>23</sup>	10 <sup>**</sup>	同 上
" (3)			6.86/0.56	666	426	195,000	2.3 × 10 <sup>23</sup>	10 <sup>**</sup>	同 上
" (4)			6.86/0.56	671	457	195,000	2.4 × 10 <sup>23</sup>	10 <sup>**</sup>	同 上
炉心実証試験			6.86/0.56	616	443	165,000	—	8 <sup>**</sup>	照射終了・破損無し (1690ピン)
FBR-IIでの照射試験	FBR-II	PNC材	7.5/0.4	620	360 460	44,000	4.0 × 10 <sup>21</sup>	4 <sup>**</sup>	照射中・破損無し

\* 計画値 \*\* 推定値



第29図 高速炉用フェライト系ステンレス鋼の材料照射実績（「常陽」）



第30図 高速炉用フェライト系ステンレス鋼の材料照射実績 (PFTP-MOTA)