

本資料は 年 月 日付で登録区分、
変更する。

01.11.30

[技術情報室]

高速炉用燃料被覆管のクリープ試験 (第13次クリープ試験)

1984年12月

動力炉・核燃料開発事業団
FBR. 材料専門委員会
クリープサブグループ

この資料は動燃事業団の開発業務を進めるため、限られた関係者だけに配布する

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

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村大字村松4番地49
核燃料サイクル開発機構
技術展開部 技術協力課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:
Technical Cooperation Section,
Technology Management Division,
Japan Nuclear Cycle Development Institute
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki, 319-1184
Japan

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

高速炉用燃料被覆管のクリープ試験

(第13次クリープ試験)

要旨

316ステンレス鋼被覆管の改良は前回の第12次試験で完了し、優れたクリープ強度を有する316相当ステンレス鋼が得られた。今後は高速原型炉「もんじゅ」高燃焼度炉心用あるいは実証炉用被覆管の開発を目標として、316相当ステンレス鋼よりも耐スエーリング性に優れていると考えられる改良オーステナイトステンレス鋼の開発（合金開発ワーキンググループによる）に連携して、管についての高温強度評価を行い、この開発に参加する。

今回の第13次試験では、改良オーステナイトステンレス鋼6鋼種のうち昭和57年度に試作した4鋼種 $15\text{Cr}-15\text{Ni}-2.5\text{Mo}-0.25\text{Ti}$ (57MS1), $15\text{Cr}-20\text{Ni}-2.5\text{Mo}-0.20\text{Ti}$ (57MK2), $15\text{Cr}-20\text{Ni}-2.5\text{Mo}-0.35\text{Ti}$ (57MS3), $15\text{Cr}-25\text{Ni}-2.5\text{Mo}-0.25\text{Ti}$ (57MK4)について引張試験、バースト試験、内圧クリープ破断試験、金属組織観察及び硬さ試験を行った。

試験結果をまとめると以下のとおりである。

- (1) 引張強さ、0.2%耐力及び伸びは4鋼種の間に大きな差はなかった。なお、これらの値は316相当ステンレス鋼と比較しても、大きな差はなかった。
- (2) バースト強度は今回試験した4鋼種のうち57MK2がやや高かった。
- (3) 内圧クリープ破断強度は、高温・長時間側で4鋼種とも316相当ステンレス鋼を若干上まわった。その中でも、57MK2の強度が最も高かった。

クリープ破断強度の長時間推定値($675^{\circ}\text{C} \times 17,760\text{h}$)は大きい順から $57\text{MK2} > 57\text{MK4} > 57\text{MS3} > 57\text{MS1} \geq 316$ 相当ステンレス鋼となった。

なお今回、昭和55年度試作「もんじゅ」用炉心燃料被覆管55MKについての単軸クリープ試験及び内圧クリープ試験も実施し、得られたデータを今までに得られている55MK及び55MSのデータと合わせて評価し、クリープひずみ式を提案した。

Creep test for FBR fuel cladding tubes (XIII)

Abstract

The development program for cladding tubes of 316 stainless steel was completed at 12th creep test, and cladding tubes of 316 modified stainless steel which indicated superior creep rupture strength were developed. From now on, high temperature strength of cladding tubes of solution hardened austenitic stainless steel will be evaluated, according to the development program for the stainless steel which is expected to have better void swelling resistance than 316 modified stainless steel.

The program is carried out by Alloy Development Working Group.

In the present 13th creep test, tensile test, burst test, creep rupture test under internal pressure and metallurgical observation have been performed for cladding tubes of four kinds of austenitic stainless steel, domestically trial-manufactured in fiscal year 1982, out of six kinds. The four kinds are 15Cr-15Ni-2.5Mo-0.25Ti(57MS1), 15Cr-20Ni-2.5Mo-0.20Ti(57MK2), 15Cr-20Ni-2.5Mo-0.35Ti(57MK3) and 15Cr-25Ni-2.5Mo-0.25Ti(57MK4).

Results obtained are:

- (1) There are little differences in tensile properties among the four kinds of solution hardened austenitic stainless steel and 316 modified stainless steel.
- (2) Burst strength of 57MK2 is the highest among those of the four kinds.

(3) Creep rupture strength of the four kinds under internal pressure are all higher than that of 316 modified stainless steel at high temperature and long time.

That of 57MK2 is the highest among those of the four kinds.

The order of calculated creep rupture strength of the four kinds and 316 modified stainless steel at 675°C and 17,760h is 57MK2>57MK4>57MS3>57MS1≥316 modified stainless steel.

Moreover, creep tests under uniaxial tension and internal pressure for the cladding tube 55MK (316 modified stainless steel), domestically trial-manufactured for "MONJU" core in fiscal year 1980, have been performed. By evaluation of creep data for 55MK and 55MS obtained these tests and the previous tests, an equation for creep strain is presented.

FBR材料専門委員会クリープサブグループ

(主査)	田中千秋	(金属材料技術研究所)
	八木晃一	(金属材料技術研究所)
	大場敏夫	(金属材料技術研究所)
	寺西洋志	(住友金属工業)
	上野憲市郎	(住友金属工業)
	太田定雄	(神戸製鋼所)
	藤原優行	(神戸製鋼所)
	内田博幸	(神戸製鋼所)
	湯谷順明	(日立製作所)
	土肥英司	(日立製作所)
	八木隆雄	(動燃事業団)
	池永慶章	(動燃事業団)
	金田健一郎	(動燃事業団)
	小幡真一	(動燃事業団)
	吉田英一	(動燃事業団)
(兼取まとめ担当)	袖原俊一	(動燃事業団)
(　　〃　　)	佐藤義則	(動燃事業団)

目 次

1. まえがき	1
2. 供 試 材	3
3. 試 験 方 法	5
3.1 内圧クリープ破断試験方法	5
3.2 単軸クリープ試験方法	5
3.3 内圧クリープ試験方法	5
4. 試 験 結 果	6
4.1 内圧クリープ破断試験結果	6
4.2 単軸クリープ試験結果	7
4.3 内圧クリープ試験結果	7
5. 試験結果の整理	9
5.1 内圧クリープ破断	9
5.2 55MK, 55MS のクリープひずみ式の検討	11
6. ま と め	13
7. 参 考 文 献	14
8. 付 錄	
8.1 クリープひずみ式の検討	65

表 の リ ス ト

- Table 1-1. 57年度試作被覆管の化学成分
Table 1-2. 被覆管 55MK の化学成分
Table 2-1. 57年度試作被覆管の製造条件と諸特性
Table 2-2. 被覆管 55MK の製造条件と諸特性
Table 3. 各被覆管の結晶粒度
Table 4. 各被覆管の硬さ
Table 5. 被覆管 57MS1 の引張試験結果
Table 6. 被覆管 57MK2 の引張試験結果
Table 7. 被覆管 57MS3 の引張試験結果
Table 8. 被覆管 57MK4 の引張試験結果
Table 9. 被覆管 57MS1 及び 57MS3 のバースト試験結果
Table 10. 被覆管 57MK2 及び 57MK4 のバースト試験結果
Table 11. 57年度試作被覆管の内圧クリープ破断試験条件の目標
Table 12. 被覆管 55MK の単軸クリープ試験条件
Table 13. 被覆管 55MK の内圧クリープ試験条件
Table 14. 被覆管 57MS1 及び 57MK2 の内圧クリープ破断試験結果
Table 15. 被覆管 57MS3 及び 57MK4 の内圧クリープ破断試験結果
Table 16. 被覆管 55MK の単軸クリープ試験結果
Table 17. 被覆管 55MK の内圧クリープ試験結果
Table 18. 「もんじゅ」設計使用条件における57年度試作被覆管の推定クリープ破断強度

付 錄

- Table 19. 被覆管55MKのクリープデータのまとめ
Table 20. 被覆管55MSのクリープデータのまとめ

図 の リ ス ト

- Fig 1. 被覆管 57MS1 の光学顕微鏡写真
Fig 2. 被覆管 57MK2 の光学顕微鏡写真
Fig 3. 被覆管 57MS3 の光学顕微鏡写真
Fig 4. 被覆管 57MK4 の光学顕微鏡写真
Fig 5. 被覆管 57MS1 の引張試験結果
Fig 6. 被覆管 57MK2 の引張試験結果
Fig 7. 被覆管 57MS3 の引張試験結果
Fig 8. 被覆管 57MK4 の引張試験結果
Fig 9. 57年度試作被覆管 4 種及び55年度試作被覆管の引張強さの比較
Fig 10. 57年度試作被覆管 4 種及び55年度試作被覆管の 0.2 %耐力の比較
Fig 11. 57年度試作被覆管 4 種及び55年度試作被覆管の破断伸びの比較
Fig 12. 57年度試作被覆管のバースト試験結果
Fig 13. 57年度試作被覆管のバースト応力
Fig 14. 内圧クリープ破断及び内圧クリープ試験片
Fig 15. 単軸クリープ試験片
Fig 16. 57年度試作被覆管の内圧クリープ破断試験結果
Fig 17. 57年度試作被覆管の内圧クリープ破断応力
Fig 18. 57MS1 と 55MK, 55MS の内圧クリープ破断応力の比較
Fig 19. 57MK2 と 55MK, 55MS の内圧クリープ破断応力の比較
Fig 20. 57MS3 と 55MK, 55MS の内圧クリープ破断応力の比較
Fig 21. 57MK4 と 55MK, 55MS の内圧クリープ破断応力の比較
Fig 22. 57年度試作被覆管のクリープ破断応力と Larson-Miller パラメータとの関係
Fig 23. 55MK と 55MS の単軸クリープ破断応力及び内圧クリープ破断応力と破断時間との関係
Fig 24. 55MK と 55MS の単軸クリープ破断応力及び内圧クリープ破断応力と最小クリープ速度との関係
Fig 25. 55MK の単軸クリープ曲線（試験温度 650°C 及び 700°C ）
Fig 26. 55MK の内圧クリープ曲線（試験温度 650°C ）
Fig 27. 55MK の内圧クリープ曲線（試験温度 700°C ）
Fig 28. 57MS1 の内圧クリープ破断試験におけるフープ応力と Larson-Miller パラメータとの関係
Fig 29. 57MK2 の内圧クリープ破断試験におけるフープ応力と Larson-Miller パラメータとの関係

- Fig.30. 57MS3 の内圧クリープ破断試験におけるフープ応力と Larson-Miller パラメータとの関係
 Fig.31. 57MK4 の内圧クリープ破断試験におけるフープ応力と Larson-Miller パラメータとの関係
 Fig.32. 316 相当ステンレス鋼及び改良オーステナイトステンレス鋼被覆管のクリープ破断強度の
 変遷

付 錄

- Fig.33. クリープひずみ式の各定数の意味を示す模式図
 Fig.34. 限界1次クリープひずみ ε_T と(推定)破断時間 t_R との関係
 Fig.35. 最小クリープひずみ速度 $\dot{\varepsilon}_S$ と(推定)破断時間 t_R との関係
 Fig.36. $(\varepsilon_T + \dot{\varepsilon}_S t - \varepsilon_0)/\varepsilon_T$ と t との関係の一例(55MK, 700°C, 5kgf/mm²)
 Fig.37. r と(推定)破断時間 t_R との関係
 Fig.38. クリープひずみの実測値と推定値との比較(650°C, 26 kgf/mm²)
 Fig.39. " (650°C, 22 kgf/mm²)
 Fig.40. " (650°C, 18 kgf/mm²)
 Fig.41. " (650°C, 14 kgf/mm²)
 Fig.42. " (650°C, 10 kgf/mm²)
 Fig.43. " (650°C, 7 kgf/mm²)
 Fig.44. " (700°C, 22 kgf/mm²)
 Fig.45. " (700°C, 18 kgf/mm²)
 Fig.46. " (700°C, 14 kgf/mm²)
 Fig.47. " (700°C, 10 kgf/mm²)
 Fig.48. " (700°C, 7 kgf/mm²)
 Fig.49. " (700°C, 5 kgf/mm²)
 Fig.50. " (750°C, 18 kgf/mm²)
 Fig.51. " (750°C, 14 kgf/mm²)
 Fig.52. " (750°C, 10 kgf/mm²)
 Fig.53. " (750°C, 7 kgf/mm²)
 Fig.54. " (750°C, 5 kgf/mm²)

1. まえがき

動力炉・核燃料開発事業団では、昭和43年以来、高速実験炉「常陽」及び高速原型炉「もんじゅ」用の、主に316ステンレス鋼燃料被覆管の研究開発を進めてきた。前年度までに実施した12回の試験結果^{1)~13)}と太田ら^{14)~16)}、行俊ら^{17), 18)}及び近藤ら¹⁹⁾の研究結果で、316ステンレス鋼被覆管のクリープ強度は、P, B, Ti, Nbの添加量、結晶粒度、冷間加工度及び溶体化処理温度に影響されることを明らかにした。この成果を基に昭和55年度の試作では、開発当初の20%冷間加工316ステンレス鋼に比べ「もんじゅ」設計条件で3倍以上の高いクリープ破断強度を有する世界に誇り得るSuper 316ステンレス鋼とも言うべき「もんじゅ」被覆管を得ることができた。更に、同一仕様で「常陽」MK-II第2次取替用被覆管を量産し、この高いクリープ破断強度が確保できた。

以上の成果が得られたことにより、316相当ステンレス鋼の開発と強度評価は終了した。本仕様の被覆管は「もんじゅ」初期炉心に使用されることになっている。

本年度からクリープサブグループの活動は原型炉「もんじゅ」高燃焼度炉心用、実証炉用、更には実用炉用被覆管として、316相当ステンレス鋼より強度ならびに耐スエリング性の向上が期待できる新材料被覆管の開発のためのクリープ試験に移行した。

本年度は現用316相当ステンレス鋼の改良型として照射・合金開発ワーキンググループでの検討²⁰⁾により選定されたバックアップ用炉心材料である改良オーステナイトステンレス鋼6鋼種(固溶強化型)

- | | |
|--------------------------------|----------|
| ① 15Cr-15Ni-2.5Mo-0.25Ti | 昭和57年度試作 |
| ② 15Cr-20Ni-2.5Mo-0.20Ti | |
| ③ 15Cr-20Ni-2.5Mo-0.35Ti | |
| ④ 15Cr-25Ni-2.5Mo-0.25Ti | |
| ⑤ 15Cr-20Ni-2.5Mo-0.25Ti-0.1Nb | |
| ⑥ 15Cr-30Ni-2.5Mo-0.25Ti-0.1Nb | |

のうち、①~④の鋼種についてクリープ破断試験を実施した。また、「もんじゅ」被覆管のクリープ曲線に関する設計データを取得するため、前年度及び前々年度に引き続き昭和55年度試作「もんじゅ」用316相当ステンレス鋼被覆管(55MK)の単軸クリープ及び内圧クリープ試験も実施した。

本試験は、金属材料技術研究所、神戸製鋼所、住友金属工業、日立製作所、動力炉・核燃

料開発事業団大洗工学センター及び東海事業所の 6 機関で実施した。各機関における試験結果については既に個々に報告されている^{21)~28)}。本報告書はこれらの試験結果をまとめ、総合的な検討をえたものである。

2. 供試材

内圧クリープ破断試験の供試材料は国内2社で昭和57年度に試作された4種の改良オーステナイトステンレス鋼製「もんじゅ」被覆管(57MS1, 57MK2, 57MS3, 57MK4)である。また、内圧クリープ及び単軸クリープ試験の供試材料は昭和55年度に試作された316相当ステンレス鋼製「もんじゅ」被覆管(55MK)である。これらの公称寸法は以下に示すとおりである。

外 径	6.50 mm
内 径	5.56 mm
肉 厚	0.47 mm
長 さ	3000 mm

これらのミルシートを付録8.2に示す。Table 1-1に改良オーステナイトステンレス鋼4種57MS1, 57MK2, 57MS3及び57MK4のミルシートに記載された化学成分を示す。各鋼種ともCrが約15%, Moが約2.5%であり, Niはそれぞれ15%, 20%, 20%及び25%, Tiはそれぞれ0.30%, 0.20%, 0.35%及び0.20%である。Table 2-1に改良オーステナイトステンレス鋼4種の被覆管の製造条件を示す。溶体化処理温度は57MS1が1050°C, 57MK2が1060°C, 57MS3及び57MK4が1040°Cであり, 57MK2が最も高い。冷間加工度は4鋼種とも約16%である。

316相当ステンレス鋼被覆管55MKの化学成分及び製造条件はそれぞれTable 1-1, Table 2-1に示すとおりである。

Fig. 1~Fig. 4にそれぞれ57MS1, 57MK2, 57MS3及び57MK4の横断面と縦断面の顕微鏡組織を示す。4鋼種の間に組織の違いは認められない。

Table 3及びTable 4に各試験機関で測定した結晶粒度(ASTM No.)及びビッカース硬さを示す。粒径, 硬さとも4鋼種の間に有意な差は認められない。また, 55MKと比較すると, 4鋼種とも冷間加工率が16%と, 55MKの20%より低いため, 4鋼種の硬さが約Hv 20程度低い。

Table 5~8に57MS1, 57MK2, 57MS3及び57MK4の引張試験結果を示す。Fig. 5~8にはそれぞれ4鋼種毎の引張強さ, 0.2%耐力, 破断伸びを示す。Fig. 9~11には, 引張強さ, 0.2%耐力及び破断伸びを4鋼種間と昭和55年度試作材とで比較した結果を示す。引張強さ及び0.2%耐力は, 全試験温度で改良オーステナイトステンレス鋼4鋼種及び55年度試作材の間に

顕著な差は認められない。破断伸びも、改良オーステナイトステンレス鋼4鋼種及び昭和55年度試作材の間に有意な差は認められない。

Table 9 及び Table 10 に、改良オーステナイトステンレス鋼4鋼種のバースト試験結果を示す。Fig.12 及び Fig.13 にそれぞれバースト圧力及びバーストフープ応力と試験温度との関係を示す。バースト強度は各温度とも 57MK2 が他の 3 鋼種よりもやや高い。

3. 試験方法

3.1 内圧クリープ破断試験方法

Table 11 に内圧クリープ破断試験計画を示す。Fig.14 には試験片の形状と寸法を示す。試験片は 57MS1, 57MK2, 57MS3 及び 57MK4 である。試験片, 試験装置, 試験方法の詳細は、「高速炉燃料被覆管の内圧クリープ破断試験要領」²⁸⁾及び各試験機関の報告書^{21)~26)}に記述されている。

3.2 単軸クリープ試験方法

Table 12 に単軸クリープ及び単軸クリープ破断試験計画を示す。試験片は 55MK である。Fig.15 には試験片の形状と寸法を示す。

被覆管の全長は115mmで、破断伸び測定用の GL は100mmである。試験方法は JIS Z 2271 に準拠して行った。試験装置の詳細は、各試験機関の報告書に記述されている。

3.3 内圧クリープ試験方法

Table 13 に内圧クリープ試験計画を示す。試験片の形状と寸法は Fig.14 に示すとおりである。試験片は 55MK である。ひずみ測定方法は神鋼, 住金, 金材技研の各試験機関では断続法であり、動燃東海及び動燃大洗の各機関では連続法である。試験片, 試験装置, 試験方法の詳細については「断続内圧クリープ試験による高速炉燃料被覆管外径寸法の測定要領」²⁹⁾及び各試験機関の報告書に記述されている。断続法の場合、試験時間は 2000 時間程度を目標とし、伸び測定間隔は約 200 時間とした。

4. 試験結果

4.1 内圧クリープ破断試験結果

改良オーステナイトステンレス鋼製「もんじゅ」被覆管 57MS1, 57MK2, 57MS3 及び 57MK4 の内圧クリープ破断試験結果を Table 14 及び Table 15 に示す。試験圧力からフープ応力への換算は次の平均径の式を用いて行った。

$$\sigma = \left(\frac{D_0}{2t} - 0.5 \right) P \times \frac{1}{100}$$

ただし

σ (kgf/mm²) : フープ応力

D_0 (mm) : 外径 (6.5 mm)

t (mm) : 肉厚 (0.47 mm)

P (kgf/cm²) : 試験圧力

Fig.16 に試験圧力と破断時間との関係を、Fig.17 にフープ応力と破断時間との関係を示す。クリープ破断強度は、600°C では 57MS1 > 57MS3 > 57MK2 > 57MK4, 650°C では 57MS1 > 57MK2 > 57MS3 > 57MK4, 700°C では 57MK2 > 57MS1 > 57MK4 > 57MS3, 750°C では 57MK2 > 57MS1 > 57MK4 > 57MS3 の順になった。57MK4 のクリープ破断強度が全般的に低いのは、その Ni 量が 25% と他の 3 鋼種に比べて增量されているため、C の固溶量が減少してクリープ破断強度を下げたためと思われる²¹⁾。また、クリープ破断強度に対する最適の Ti/C 比は 3 ~ 5 程度であるというデータがあるが²²⁾、57MS3 の Ti/C 比は 7.4 と最適比を外れているため、57MS3 のクリープ破断強度が全般的に低くなっていると考えられる²²⁾。

Fig.18~Fig.21 に改良オーステナイトステンレス鋼 4 種それぞれのクリープ破断強度を 55 年度試作材と比較して示す。57MS1 のクリープ破断強度は 600°C, 650°C 及び 750°C で 55 年度試作材よりもやや高く、700°C ではやや低くなっている。57MK2 は 600°C, 650°C 及び 700°C で、55 年度試作材とほぼ同程度の破断強度を示し、750°C では、長時間側で高い破断強度を示している。57MS3 は 600°C, 650°C 及び 750°C で 55 年度試作材とほぼ同程度の破断強度を示し、700°C でやや低くなっている。57MK4 は 600°C, 650°C 及び 700°C で 55 年度試作材よりもやや低い破断強度を示すが、750°C では高い破断強度を示す。

Fig.22 に各鋼種の破断強度を LMP で整理した結果を示す。LMP の定数は 55 年度試作材

における最適値 17.67 を用いた。改良オーステナイトステンレス鋼 4 種は高温・長時間側で全て 55 年度試作材のクリープ破断強度を若干上まわってはいるものの、顕著な差異は見られない。

今回の試作被覆管のクリープ破断強度が板材で検討した結果^{30),31)}ほどには高くない理由として、溶体化処理温度の低かったことが挙げられる²³⁾。この対策として、結晶粒を粗大化させることなく溶体化処理温度を上げることができるように、Nb 等を添加することが考えられる。

4.2 単軸クリープ試験結果

55MK の単軸クリープ試験結果を Table 16 に示す。また応力と破断時間との関係を Fig.23 に示す。同図には比較のため 55MS の内圧クリープ破断結果及び単軸クリープ破断結果も示した。650 及び 700 °C での単軸クリープ破断強度は内圧クリープ破断強度より若干低くなっている。

Fig.24 に試験応力と最小クリープ速度との関係を示す。同図には今回実施した 55MK の単軸クリープ試験結果の他に、11 次試験で行った 55MK の単軸クリープ試験結果、12 次試験で行った 55MS の単軸クリープ試験結果及び内圧クリープ試験結果も合わせて示してある。今回得られた 650 及び 700 °C で高応力側のデータは、11 次及び 12 次試験で得られた低応力側のデータの延長線上にあり、妥当な結果と思われる。55MK と 55MS との間には各試験温度とも応力と最小クリープ速度との関係に大きな違いは認められない。また、単軸クリープ試験で得られた応力対最小クリープ速度の関係と、内圧クリープ試験で得られたそれとはよい一致を示した。

Fig.25 に今回実施した単軸クリープ試験のクリープ曲線を示す。破断していない 650 °C, 22kgf/mm² のクリープ曲線についても、第 3 期クリープの開始が認められる。

4.3 内圧クリープ試験結果

内圧クリープ試験で得られた結果を Table 17 にまとめて示す。また、応力と最小クリープ速度との関係を Fig.24 に示す。前述のとおり、内圧クリープ試験で得られた結果は単軸クリープ試験で得られた結果とよい一致を示している。また 55MK と 55MS の間には、各試験温度とも、応力と最小クリープ速度との関係に大きな違いはなかった。

試験温度 650 °C で得られた内圧クリープ曲線を Fig.26 に、試験温度 700 °C で得られた

内圧クリープ曲線を Fig.27 に示す。第11次及び第12次試験では試験圧力が低く、ひずみ量が小さいため精度よいひずみの測定ができなく、特に外径を断続的に測定して得られたクリープ曲線（ KOBE, SUMITOMO, NRIM による）で妥当な結果が得られなかった。今回の試験では試験圧力を高めたため、外径断続測定法と外径連続測定法で良い一致が見られ、また結果も妥当なものが得られた。

5. 試験結果の整理

5.1 内圧クリープ破断

第1～12次クリープ試験で行ったと同様に、長時間データを推定するために、フープ応力と破断時間との関係を Larson-Miller パラメータ (LMP)

$$LMP = T(C + \log t_R)$$

ただし T : 試験温度 (K)

C : パラメータ定数

t_R : 破断時間 (h)

で整理した。フープ応力と破断時間との両対数関係に対して、多項式による曲線のあてはめを統計的手法により行った。なお、パラメータ定数 C の値は破断時間の実測値と推定値（ともに対数）の残差平方和が最小になるようなものを採用し、かつ、最適な回帰次数は不偏分散比の F 検定（危険率 5 %）及び閥与率より選択した。

フープ応力と LMP との関係に対して選択された回帰次数及びパラメータ定数に対する回帰線と信頼度 95 % における信頼区間を、57MS1, 57MK2, 57MS3 及び 57MK4 について Fig.28～Fig.31 にそれぞれ示す。得られたフープ応力と破断時間との関係は次のとおりである。

57MS1

$$T(21.03 + \log t_R) \times 10^{-3} = 25.472 + 3.035 \log \sigma - 3.453 (\log \sigma)^2$$

57MK2

$$T(17.99 + \log t_R) \times 10^{-3} = 74.275 - 113.074 \log \sigma$$

$$+ 82.325 (\log \sigma)^2 - 20.885 (\log \sigma)^3$$

57MS3

$$T(19.97 + \log t_R) \times 10^{-3} = 30.305 - 6.209 \log \sigma$$

57MK4

$$T(19.27 + \log t_R) = 24.893 + 1.580 \log \sigma - 3.176 (\log \sigma)^2$$

95 % 信頼限界は上式の右辺に $C\sqrt{1+D}$ を加減することにより得られる。C (LMP の C とは異なる) は定数であり、D は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} D = & C_0 + C_1 \log \sigma + C_2 (\log \sigma)^2 + C_3 (\log \sigma)^3 \\ & + C_4 (\log \sigma)^4 + C_5 (\log \sigma)^5 + C_6 (\log \sigma)^6 \end{aligned}$$

各鋼種に対する定数は次のとおりである。

57MS1

$$C = 0.31062417$$

$$C_0 = 9.1856160 \times 10^0$$

$$C_1 = -2.7369479 \times 10^2$$

$$C_2 = 3.0496444 \times 10^2$$

$$C_3 = -1.5044199 \times 10^2$$

$$C_4 = 2.7723074 \times 10^0$$

$$C_5 = C_6 = 0$$

57MK2

$$C = 0.36665730$$

$$C_0 = 1.1846756 \times 10^4$$

$$C_1 = -5.2315497 \times 10^4$$

$$C_2 = 9.5934788 \times 10^4$$

$$C_3 = -9.3499970 \times 10^4$$

$$C_4 = 5.1077929 \times 10^4$$

$$C_5 = -1.4828475 \times 10^4$$

$$C_6 = 1.7872165 \times 10^3$$

57MS3

$$C = 0.42145310$$

$$C_0 = 2.4006356$$

$$C_1 = -3.4635952$$

$$C_2 = 1.2758774$$

$$C_3 = C_4 = C_5 = C_6 = 0$$

57MK4

$$C = 0.36909273$$

$$C_0 = 1.2872213 \times 10^2$$

$$C_1 = -3.7869895 \times 10^2$$

$$C_2 = 4.1618452 \times 10^2$$

$$C_3 = -2.0238033 \times 10^2$$

$$C_4 = 3.6748958 \times 10$$

これらの式を用いて $675^{\circ}\text{C} \times 11,808\text{h}$ ('もんじゅ' 初期炉心被覆管の設計炉内温度と滞在時間) 及び $675^{\circ}\text{C} \times 17,760\text{h}$ ('もんじゅ' 高燃焼度炉心被覆管の設計炉内温度と滞在時間) でのクリープ破断強度を推定すると, 57MS1, 57MK2, 57MS3 及び 57MK4 でそれぞれ, $675^{\circ}\text{C} \times 11,808\text{h}$ では 15.5kgf/mm^2 , 16.7kgf/mm^2 , 16.0kgf/mm^2 及び 16.4kgf/mm^2 となり, $675^{\circ}\text{C} \times 17,760\text{h}$ では 14.4kgf/mm^2 , 15.6kgf/mm^2 , 15.0kgf/mm^2 及び 15.3kgf/mm^2 となる。これらの数値を 316 相当ステンレス鋼被覆管での最高の数値 (55MK で得られた数値) 15.3kgf/mm^2 及び 13.5kgf/mm^2 と比べると, 2 条件下とも $57\text{MK2} > 57\text{MK4} > 57\text{MS3} > 57\text{MS1} \geq 55\text{MK}$ の順となり, 4 鋼種とも 316 相当ステンレス鋼より高い値を示した。Table 18 にこれらをまとめて示す。また, Fig.32 に 4 鋼種のクリープ破断強度を 316 相当ステンレス鋼と比較して示す。

5.2 55MK, 55MS のクリープひずみ式の検討

第11次, 12次及び13次クリープ試験で 55MK, 55MS の単軸及び内圧クリープ試験を行ってきて, かなりの数のひずみデータが得られたので, 今回これらのデータをまとめる意味で, 2 次クリープひずみまでのデータに対して Garofalo の式のあてはめを行い, 以下に示すクリープひずみ式を得た。

$$\epsilon_c = \epsilon_T \{1 - \exp(-rt)\} + \dot{\epsilon}_s t$$

ただし

ϵ_c : クリープひずみ (%)

ϵ_T : 限界 1 次クリープひずみ (%)

$$\epsilon_T = 0.197$$

r : 定数 (h^{-1})

$$r = 206 \cdot t_R^{-1}$$

$\dot{\epsilon}_s$: 最小クリープひずみ速度 (%/h)

$$\dot{\epsilon}_s = 1.66 t_R^{-1}$$

t : 時間 (h)

なお

$$T(18.36 + \log t_R) = 46.868 - 57.265 \log \sigma + 45.135 (\log \sigma)^2 - 12.675 (\log \sigma)^3$$

ここで

T : 温度 (K)

t_c : クリープ破断時間 (h)

σ : 応力 (kgf/mm²)

本クリープひずみ式の作成方法及びクリープデータとの対応については、付録1に述べる。なお、59年度に実施中の第14次クリープ試験で55MSの単軸及び内圧クリープ試験をまだ行っているので、そのデータも含めて再整理し、第14次クリープ試験報告書の中で55MK, 55MSのクリープひずみ式を決定したい。

6. まとめ

316 相当ステンレス鋼をしのぐ耐スエリング性の必要な「もんじゅ」高燃焼度炉心用、あるいは実証炉用被覆管の基礎と考えられる改良オーステナイトステンレス鋼 6 鋼種のうち、昭和58年度に試作された「もんじゅ」用被覆管 4 鋼種 57MS1 (15Cr-15Ni-2.5Mo-0.25Ti) , 57MK2 (15Cr-20Ni-2.5Mo-0.20Ti), 57MS3 (15Cr-20Ni-2.5Mo-0.35Ti) 及び 57MK4 (15Cr-25Ni-2.5Mo-0.25Ti) について引張、バースト、内圧クリープ破断、金相、硬さの各試験を行った。その結果をまとめると、以下のとおりである。

- (1) 引張強さ、0.2%耐力及び伸びは 4 鋼種の間に大きな差はなかった。なお、これらの値は316 相当ステンレス鋼と比較しても、大きな差はなかった。
- (2) バースト強度は各試験温度とも、57MK2 が他の 3 鋼種よりも高かった。
- (3) 内圧クリープ破断試験結果では、高温、長時間側で 57MK2 が他の 3 鋼種及び55年度試作材よりも若干高いクリープ破断強度を示した。

改良オーステナイト鋼 4 鋼種の内圧クリープ破断強度の長時間推定値 (675°C × 17,760h) は、55年度試作材と同程度あるいは若干強い値を示した。

なお、昭和55年度試作 316 相当ステンレス鋼「もんじゅ」被覆管 55MKについて、単軸クリープ及び内圧クリープ試験を実施した。結果は以下のとおりである。

- (4) 55年度試作材についての試験温度 650 °C 及び 700 °C における単軸クリープ破断強度は、内圧クリープ破断強度より低い値を示した。内圧クリープ試験では、外径断続測定の場合と外径連続測定の場合で良い一致が見られ、またクリープ曲線も妥当な結果が得られた。
- (5) 55年度試作材のクリープひずみ式を検討し、Garofalo の式による定式化を行った。

7. 参考文献

- 1) 吉田ら, "高速実験炉用燃料被覆管のクリープ試験, (第1次試験)", S N 241 71-55, 動力炉・核燃料開発事業団, F B R 材料専門委員会, 構造設計委員会, クリープサブグループ, 昭和46年11月。
- 2) 吉田ら, "高速実験炉用燃料被覆管のクリープ試験" (第2次試験), S N 241 72-43, 動力炉・核燃料開発事業団, F B R 材料専門委員会, 構造設計委員会, クリープサブグループ, 昭和47年11月。
- 3) 吉田ら, "高速実験炉用燃料被覆管のクリープ試験, (第3次試験)", S N 241 74-22, 動力炉・核燃料開発事業団, F B R 核燃料・材料合同専門委員会, クリープサブグループ, 昭和49年5月。
- 4) 吉田ら, "高速炉用燃料被覆管のクリープ試験, (第4次試験)", S N 241 75-10, 動力炉・核燃料開発事業団, F B R 核燃料・材料合同専門委員会, クリープサブグループ, 昭和50年4月。
- 5) 吉田ら, "高速炉用燃料被覆管のクリープ試験, (第5次試験)", S N 241 77-23, 動力炉・核燃料開発事業団, F B R 核燃料・材料合同専門委員会, クリープサブグループ, 昭和52年8月。
- 6) 田中ら, "高速炉用燃料被覆管のクリープ試験, (第6次試験)", S N 241 78-13, 動力炉・核燃料開発事業団, F B R 核燃料・材料合同専門委員会, クリープサブグループ, 昭和53年1月。
- 7) 田中ら, "高速炉用燃料被覆管のクリープ試験, (第7次試験)", S N 241 79-29, 動力炉・核燃料開発事業団, F B R 核燃料・材料合同専門委員会, クリープサブグループ, 昭和54年9月。
- 8) 田中ら, "高速炉用燃料被覆管のクリープ試験, (第8次試験)", S N 241 80-07, 動力炉・核燃料開発事業団, F B R 核燃料・材料合同専門委員会, クリープサブグループ, 昭和55年6月。
- 9) 田中ら, "高速炉用燃料被覆管のクリープ試験, (第9次試験)", S N 241 81-08, 動力炉・核燃料開発事業団, F B R 材料専門委員会, クリープサブグループ, 昭和56年2月。
- 10) 田中ら, "高速炉用燃料被覆管のクリープ試験, (第9次試験)(2)一冷間加工度の影響", S N 241 81-15, 動力炉・核燃料開発事業団, F B R 材料専門委員会, クリープサブグループ

ープ，昭和56年5月。

- 11) 田中ら，『高速炉用燃料被覆管のクリープ試験，（第10次クリープ試験）』，S N 241 81-31，動力炉・核燃料開発事業団，F B R 材料専門委員会，クリープサブグループ，1981年12月。
- 12) 田中ら，『高速炉用燃料被覆管のクリープ試験，（第11次クリープ試験）』，S N 241 82-24，動力炉・核燃料開発事業団，F B R 材料専門委員会，クリープサブグループ，1982年12月。
- 13) 田中ら，『高速炉用燃料被覆管のクリープ試験，（第12次クリープ試験）』，S N 241 83-19，動力炉・核燃料開発事業団，F B R 材料専門委員会，クリープサブグループ，1983年12月。
- 14) 太田，藤原，内田，『高速炉燃料被覆管の高温強度(I)，化学成分の影響』，日本原子力学会年会，P.25，昭和51年3月。
- 15) 太田，藤原，内田，『18-8-Moステンレス鋼燃料被覆材の高温特性に及ぼす結晶粒度の影響』，日本学術振興会，耐熱金属材料研究第123委員会，研究報告，Vol. 15, No. 3, p. 243, 昭和49年12月。
- 16) 太田，藤原，内田，『18-8-Mo鋼燃料被覆管の高温特性に及ぼす冷間加工の影響』，日本学術振興会，耐熱金属材料研究第123委員会，研究報告，Vol. 14, No. 1, p. 7, 昭和48年3月。
- 17) 行俊，吉川，『オーステナイトステンレス鋼の高温強度に及ぼす微量元素の影響』，日本学術振興会，耐熱金属材料研究第123委員会，研究報告，Vol. 14, No. 1, p. 19, 昭和48年3月。
- 18) 行俊，吉川，上野，神山，『高速炉用SUS316燃料被覆管の研究（第2報）』，日本原子力学会，昭和50年秋の分科会予稿集，p. 75, 昭和50年11月。
- 19) Y. Kondo et al., "The effects of metallurgical variables on creep of Type 316 stainless steels", Proceedings of the international conference on radiation effects in breeder reactor structural materials, Scottsdale, Arizona, June 19-23, 1977.
- 20) 例えば『高速増殖原型炉「もんじゅ」用炉心材料の研究計画』S N 241 78-05，動力炉・核燃料開発事業団，高速増殖炉開発本部，昭和52年10月，
『高速増殖炉燃料被覆管材料の開発—改良ステンレス鋼及び新合金の検討—』，S N 241 81-16，動力炉・核燃料開発事業団，高速増殖炉開発本部，1981年5月。

- 21) 田中, 八木, 大場, 久保, 金丸, "高速炉燃料被覆管のクリープ試験(第13次)" , S J 255 84-01, 金属材料技術研究所, 昭和59年3月。
- 22) 藤原, 内田, 小織, "高速炉燃料被覆管のクリープ試験(XIII)(A)" , S J 216 84-01, 神戸製鋼所, 1984年3月。
- 23) 寺西, 岡本, 上野, "高速炉用燃料被覆管のクリープ試験(XIII)-B-", S J 209 84-01, 住友金属工業, 1984年3月。
- 24) 富永, 湯谷, 園部, 兵頭, 土肥, 萩田, 渡, "高速炉用燃料被覆管のクリープ試験(XIII)C" , S J 202 83-02, 日立製作所, 1984年3月。
- 25) 小幡ら, "第12次クリープ試験", クリープサブグループ資料C15-10, PNC東海事業所プル燃部設計開発課, 1984年6月。
- 26) 吉田ら, "大気中内圧クリープ試験の中間結果", クリープサブグループ資料C14-3, PNC大洗工学センター ナトリウム材料開発室, 1984年2月。
- 27) 田中ら, "高速炉用燃料被覆管の硬さおよび内圧クリープ破断データのバラツキに関する調査" , S N 241 81-14, 動力炉・核燃料開発事業団, FBR材料専門委員会, クリープサブグループ, 1981年5月。
- 28) "高速炉燃料被覆管の内圧クリープ破断試験要領" , N 252 80-02, 動燃事業団, FBR開発本部, 1980年8月。
- 29) "断続内圧クリープ試験による高速炉燃料被覆管外径寸法の測定要領" , N 252 81-01, 動燃事業団, FBR開発本部, 1981年6月。
- 30) "高速炉燃料被覆管材料新合金第三次試作のクリープ試験(A)" , S J 216 83-02, 神戸製鋼所, 1983年3月。
- 31) "高速炉燃料被覆管材料新合金第三次試作のクリープ試験(B)" , S J 209 83-03, 住友金属工業, 昭和58年3月。

Table 1-1. Chemical composition of cladding tube 57 series (mill sheet data).

	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Co	B	N	Ti	Al	O
Spec.	0.04 0.08	*	1.30 2.00	0.015 0.040	\leq 0.010	*	*	2.0 3.0	\leq 0.10	\geq 0.0020	\leq 0.010	*	<0.05	to be reported
57MS1	0.060	(0.30) 0.70	1.77	0.029	0.005	(14.5) 16.5 15.60	(14.0) 16.0 15.08	2.47	<0.01	0.0047	0.007	0.32	0.049	0.0015
57MK2	0.061	(0.60) 1.00	1.57	0.026	0.006	(18.5) 21.5 19.61	(13.5) 16.5 15.29	2.46	0.03	0.0043	0.006	0.180	0.014	0.0010
57MS3	0.050	(0.60) 1.00	1.48	0.029	0.006	(18.5) 21.5 20.17	(13.5) 16.5 15.13	2.59	<0.01	0.0045	0.003	0.37	0.027	0.0016
57MK4	0.060	(0.60) 1.00	1.47	0.020	0.004	(23.5) 26.5 24.41	(13.5) 16.5 15.09	2.34	0.03	0.0049	0.005	0.210	0.026	0.0009

*written at each column below within ()

Table 1-2. Chemical composition of cladding tube 55 MK (mill sheet data).

	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Co	B	N	Cu	Ti	V	Nb+Ta	As	Al	Zr	O
Spec.	0.045 0.085	\leq 1.00	\leq 2.00	\leq 0.040	\leq 0.010	13.00 14.00	16.00 18.00	2.00 3.00	\leq 0.10	\leq 0.0100	\leq 0.010	\leq 0.20	\leq 0.10	\leq 0.20	\leq 0.10	\leq 0.010	\leq 0.050	\leq 0.10	to be reported
55MK	0.052	0.82	1.83	0.028	0.009	13.84	16.52	2.49	0.01	0.0031	0.003	0.01	0.080	0.01	0.079	0.002	0.016	0.005	0.0016

Table 2-1. Fabrication conditions and properties of cladding tubes 57 series (mill sheet data).

Cladding tube	Heat No.	Mill Sheet No.	Lot No.	Cladding No.	Solution treatment	Cold work level	Grain size (ASTM No.)	Hardness (Hv 500g)
57MS1	V02271	MS-RD-0018-1	S571	S10801 S10850	1,050°C x 1 min.	15.6%	(L) *1 7.5	(T) *2 259
57MK2	AC5869	S-83-1	K571	K9901 K10100	1,060°C x 2 min.	15.8%	(L) 8.0	(T) 258
57MS3	V02272	MS-RD-0018-2	S572	S11051 S11136	1,040°C x 1 min.	16 %	(L) 8.0	(T) 254
57MK4	AC5868	S-83-1	K572	K10101 K10300	1,040°C x 2.2 min.	15.8%	(L) 7.5	(T) 258

*1 (T) : Transverse

*2 (L) : Longitudinal

Table 2-2. Fabrication conditions and properties of cladding tube 55MK

Cladding tube	Heat No.	Mill Sheet No.	Lot No.	Cladding No.	Solution treatment	Cold work level	Grain size (ASTM No.)	Hardness (Hv 500g)
55MK	CA0262	S-81-6	K554	K9301 ~ K9500	1,080°C x 2 min.	20 %	(T) *1 8.5 (L) *2 8.0	(T) 260 (L) 255

*1 (T) : Transverse

*2 (L) : Longitudinal

Table 3. Grain size of cladding tubes (ASTM No.).

Institutes		57MS1	57MK2	57MS3	57MK4	55MK ^{*3}
KOBE	T ^{*1}	8.0	-	8.5	-	
	L ^{*2}	8.0	-	8.0	-	
PNC —	T	8.5	8.5	8.5	8.5	
	L	8.0	8.0	8.0	8.0	
AVERAGE	T	8.3	8.5	8.5	8.5	8.9
	L	8.0	8.0	8.0	8.0	8.2

*1 T : Transverse

*2 L : Longitudinal

*3 : 11th creep test data

Table 4. Vickers hardness of cladding tubes (HV 500g load).

Institutes		57MS1	57MK2	57MS3	57MK4	55MK ^{*3}
HITACHI	T ^{*1}	265	256	251	256	
	L ^{*2}	274	266	250	260	
KOBE	T	264	-	264	-	
	L	265	-	264	-	
PNC —	T	255	253	254	252	
	L	266	268	254	255	
AVERAGE	T	261	255	256	254	274
	L	268	267	256	258	276

*1 T : Transverse

*2 L : Longitudinal

*3 : 11th creep test data

Table 5. Tensile properties of cladding tube 57MS1.

Test temp. (°C)	Specimen No.	Tensile strength (kgf/mm ²)	0.2% proof stress (kgf/mm ²)	Elongation (%)	Institute
R. T.	S10801-15	76.3	67.6	19.0	HITACHI
	S10801-14	75.5	71.9	20.0	PNC-TOKAI
	S10806-6	75.6	71.5	23.0	
	S10821-1	74.9	71.7	12.8	KOBE
100	S10802-15	70.5	64.5	7.2	HITACHI
	S10803-3	70.2	69.1	5.6	KOBE
200	S10803-5	68.3	59.2	3.4	HITACHI
	S10804-1	67.7	65.8	3.8	KOBE
300	S10804-5	64.7	56.0	3.4	HITACHI
	S10804-3	66.3	62.9	3.6	KOBE
400	S10805-5	63.2	53.6	4.8	HITACHI
	S10806-8	63.9	60.7	5.0	PNC-TOKAI
	S10809-2	63.5	58.7	4.0	
	S10807-3	63.5	60.2	3.0	KOBE
500	S10806-5	61.7	53.9	4.7	HITACHI
	S10809-5	62.0	58.4	8.0	PNC-TOKAI
	S10809-6	61.9	57.3	6.0	
	S10805-3	62.1	58.3	4.0	KOBE
600	S10807-5	54.3	45.7	7.4	HITACHI
	S10803-8	57.7	52.2	13.0	PNC-TOKAI
	S10807-6	57.6	51.8	11.0	
	S10806-1	58.7	53.0	6.8	KOBE
650	S10808-5	49.7	40.6	14.7	HITACHI
	S10803-10	53.3	48.7	12.0	PNC-TOKAI
	S10807-8	53.2	48.4	12.0	
	S10807-1	55.0	51.1	8.6	KOBE
700	S10808-10	47.7	38.2	19.1	HITACHI
	S10807-10	47.7	43.6	23.0	PNC-TOKAI
	S10808-16	46.8	42.5	23.0	
	S10822-2	50.3	45.2	9.6	KOBE
750	S10808-15	40.3	28.9	23.9	HITACHI
	S10809-7	39.7	34.9	25.0	PNC-TOKAI
	S10809-8	39.3	34.2	24.0	
	S10823-1	43.3	40.4	11.8	KOBE
800	S10821-7	31.7	25.0	23.9	HITACHI
	S10804-10	30.7	25.5	42.0	PNC-TOKAI
	S10808-11	31.3	27.1	31.0	
	S10822-4	36.9	33.4	13.6	KOBE

Table 6. Tensile properties of cladding tube 57MK2.

Test temp. (°C)	Specimen No.	Tensile strength (kgf/mm ²)	0.2% proof stress (kgf/mm ²)	Elongation (%)	Institute
R. T.	K9921-6	81.5	64.7	15.0	HITACHI
	K9901-14	79.2	64.9	12.0	PNC-TOKAI
	K9905-6	79.6	63.2	11.0	
	K9903-2	76.9	66.6	4.8	SUMITOMO
100	K9921-7	79.1	66.2	5.6	HITACHI
	K9903-4	73.3	63.7	8.2	SUMITOMO
200	K9903-5	72.7	59.7	4.6	HITACHI
	K9923-2	70.2	59.5	4.6	SUMITOMO
300	K9904-5	69.5	55.4	4.4	HITACHI
	K9904-4	69.9	65.4	4.8	SUMITOMO
400	K9905-5	70.2	52.4	6.0	HITACHI
	K9909-1	68.0	57.3	6.0	PNC-TOKAI
	K9909-19	68.7	58.8	5.0	
	K9922-1	68.2	59.9	6.2	SUMITOMO
500	K9906-5	68.6	50.3	8.5	HITACHI
	K9906-10	67.3	56.5	11.0	PNC-TOKAI
	K9905-10	67.8	57.1	10.0	
	K9905-4	67.4	58.4	10.8	SUMITOMO
600	K9907-5	62.2	45.2	10.5	HITACHI
	K9907-6	61.8	50.4	16.0	PNC-TOKAI
	K9909-5	62.4	50.7	13.0	
	K9922-3	60.9	51.8	7.8	SUMITOMO
650	K9908-5	51.1	36.3	16.0	HITACHI
	K9903-10	56.1	46.0	18.0	PNC-TOKAI
	K9905-8	56.0	46.9	15.0	
	K9906-4	56.9	47.8	11.4	SUMITOMO
700	K9908-10	46.2	31.9	22.0	HITACHI
	K9904-6	47.3	38.7	30.0	PNC-TOKAI
	K9907-10	46.8	38.5	33.0	
	K9907-2	54.1	39.8	15.2	SUMITOMO
750	K9921-8	39.2	25.7	24.7	HITACHI
	K9904-8	40.2	32.7	24.0	PNC-TOKAI
	K9908-6	40.1	33.1	27.0	
	K9907-4	41.4	34.2	20.2	SUMITOMO
800	K9922-6	31.7	17.5	26.4	HITACHI
	K9904-10	32.2	26.7	32.0	PNC-TOKAI
	K9908-11	32.4	26.6	45.0	
	K9922-5	34.4	28.8	17.6	SUMITOMO

Table 7. Tensile properties of cladding tube 57MS3.

Test temp. (°C)	Specimen No.	Tensile strength (kgf/mm ²)	0.2% proof, stress, (kgf/mm ²)	Elongation (%)	Institute
R. T.	S11051-15	77.1	67.7	13.8	HITACHI
	S11051-14	77.1	73.7	12.0	PNC-TOKAI
	S11056-6	77.1	73.5	14.0	
	S11053-1	77.1	72.4	8.6	KOBE
100	S11071-6	76.0	66.4	4.8	HITACHI
	S11053-3	71.1	69.6	4.8	KOBE
200	S11053-5	69.6	57.5	3.4	HITACHI
	S11054-1	69.0	65.5	2.2	KOBE
300	S11054-5	67.3	62.4	2.1	HITACHI
	S11054-3	68.9	67.0	-	KOBE
400	S11055-5	66.4	61.5	4.9	HITACHI
	S11059-5	65.0	61.4	4.0	PNC-TOKAI
	S11059-7	64.9	62.2	4.0	
	S11055-1	65.7	62.7	3.6	KOBE
500	S11056-5	65.2	59.1	5.7	HITACHI
	S11056-10	64.4	61.6	9.0	PNC-TOKAI
	S11059-3	64.0	60.5	8.0	
	S11055-3	64.5	61.0	3.8	KOBE
600	S11057-5	57.8	49.6	9.4	HITACHI
	S11053-8	59.6	55.2	12.0	PNC-TOKAI
	S11057-6	59.5	53.9	11.0	
	S11056-1	58.8	54.4	-	KOBE
650	S11058-5	54.4	44.9	10.4	HITACHI
	S11053-10	55.2	50.2	14.0	PNC-TOKAI
	S11057-8	54.9	50.1	17.0	
	S11056-3	58.2	53.5	-	KOBE
700	S11058-10	46.6	35.1	19.7	HITACHI
	S11057-10	47.8	43.4	27.0	PNC-TOKAI
	S11058-16	48.0	42.6	27.0	
	S11057-1	52.3	47.7	9.6	KOBE
750	S11058-15	37.4	27.2	24.7	HITACHI
	S11054-8	39.9	34.8	32.0	PNC-TOKAI
	S11058-6	39.7	34.6	36.0	
	S11073-1	45.2	42.6	11.4	KOBE
800	S11071-6	29.4	22.5	27.4	HITACHI
	S11058-11	31.1	26.2	27.0	PNC-TOKAI
	S11055-10	31.8	25.6	38.0	
	S11057-3	37.3	33.5	16.6	KOBE

Table 8. Tensile properties of cladding tube 57MK4.

Test temp. (°C)	Specimen No.	Tensile strength (kgf/mm ²)	0.2% proof stress (kgf/mm ²)	Elongation (%)	Institute
R. T.	K10121-7	79.2	63.6	13.6	HITACHI
	K10101-14	75.9	64.1	13.0	PNC-TOKAI
	K10106-6	76.3	67.3	13.0	
	K10103-2	76.6	64.9	5.6	SUMITOMO
100	K10121-8	73.8	58.6	6.9	HITACHI
	K10103-4	72.8	63.9	7.6	SUMITOMO
200	K10103-5	71.5	57.5	5.2	HITACHI
	K10104-2	66.8	60.9	2.2	SUMITOMO
300	K10104-5	68.9	58.1	6.5	HITACHI
	K10104-4	67.0	61.8	3.4	SUMITOMO
400	K10105-5	69.2	56.7	7.1	HITACHI
	K10102-14	68.8	59.7	9.0	PNC-TOKAI
	K10108-16	66.7	57.7	9.0	
	K10105-2	66.4	57.8	4.2	SUMITOMO
500	K10106-5	67.0	54.9	12.6	HITACHI
	K10103-6	66.1	56.9	10.0	PNC-TOKAI
	K10109-1	66.3	56.6	11.0	
	K10105-4	64.0	58.5	3.8	SUMITOMO
600	K10107-5	57.8	43.8	12.0	HITACHI
	K10103-8	61.1	52.0	17.0	PNC-TOKAI
	K10107-6	61.0	51.0	15.0	
	K10106-2	59.2	51.8	11.6	SUMITOMO
650	K10108-5	53.0	39.9	15.1	HITACHI
	K10103-10	55.7	47.8	21.0	PNC-TOKAI
	K10107-8	55.2	45.6	18.0	
	K10122-1	54.6	46.6	13.8	SUMITOMO
700	K10108-10	45.2	31.6	27.1	HITACHI
	K10105-6	46.8	38.6	28.0	PNC-TOKAI
	K10105-8	46.0	37.0	26.0	
	K10122-3	47.5	40.9	6.0	SUMITOMO
750	K10122-6	37.4	30.2	32.7	HITACHI
	K10108-6	38.7	32.7	38.0	PNC-TOKAI
	K10105-10	38.5	32.8	43.0	
	K10107-4	39.3	34.0	20.4	SUMITOMO
800	K10121-6	30.4	22.5	36.0	HITACHI
	K10104-10	29.1	24.2	32.0	PNC-TOKAI
	K10108-11	30.4	25.4	36.0	
	K10123-2	33.0	27.7	18.8	SUMITOMO

Table 9. Burst properties of cladding tubes 57MS1 and 57MS3

	Test temp. (°C)	Specimen No.	Press. rate (kgf/cm ² /min)	Burst press. (kgf/cm ²)	0.2% proof pressure (kgf/cm ²)	Circumf. elogn. (%)
57MS1	R.T.	S10803-7	174	1407	1309	5.4
		S10808-1	176	1403	1292	2.0
	400	S10803-9	175	1146		2.5
		S10808-2	175	1147		2.5
	500	S10804-7	174	1102		4.0
		S10808-3	175	1104		3.0
	600	S10804-9	174	1010		6.6
		S10808-4	175	1018		5.7
	650	S10805-7	176	969		5.2
		S10808-7	176	970		4.9
	700	S10805-9	176	886		3.9
		S10808-8	174	878		4.0
	750	S10806-7	176	775		3.2
		S10808-9	175	768		5.9
	800	S10806-9	174	611		6.6
		S10808-12	175	630		6.6
57MS3	R.T.	S11053-7	178	1394	1338	1.5
		S11058-1	175	1387	1315	3.0
	400	S11053-9	176	1156		3.5
		S11058-2	174	1142		3.5
	500	S11054-7	175	1091		3.0
		S11058-3	175	1082		3.0
	600	S11054-9	175	1040		4.9
		S11058-4	175	990		4.4
	650	S11055-7	176	980		4.4
		S11058-7	176	971		3.9
	700	S11055-9	175	892		4.2
		S11058-8	175	877		5.2
	750	S11056-7	175	773		6.2
		S11058-9	175	758		4.9
	800	S11056-9	176	617		6.9
		S11058-12	174	608		6.2

Table 10. Burst properties of cladding tubes 57MK2 and 57MK4.

	Test temp. (°C)	Specimen No.	Press. rate (kgf/cm ² /min)	Burst press. (kgf/cm ²)	0.2% proof pressure (kgf/cm ²)	Circumf. elong. (%)
57MK2	R.T.	K9903-7	178	1461	1386	2.3
		K9908-1	176	1450	1383	2.3
	400	K9903-9	175	1200		3.3
		K9908-2	174	1206		2.8
	500	K9904-7	175	1189		3.7
		K9908-3	175	1163		2.8
	600	K9904-9	174	1080		5.2
		K9908-4	175	1059		4.8
	650	K9905-7	175	1028		3.3
		K9908-7	175	1022		3.3
	700	K9905-9	175	926		5.2
		K9908-8	175	930		3.9
	750	K9906-7	175	775		4.5
		K9908-9	175	784		5.3
	800	K9906-9	173	673		4.7
		K9908-12	175	676		6.1
57MK4	R.T.	K10103-7	174	1372	1308	2.3
		K10108-1	172	1356	1297	3.3
	400	K10103-9	175	1158		2.8
		K10108-2	175	1140		3.3
	500	K10104-7	175	1067		3.8
		K10108-3	175	1090		4.8
	600	K10104-9	175	972		6.7
		K10108-4	175	990		6.2
	650	K10105-7	175	967		3.8
		K10108-7	175	963		4.7
	700	K10105-9	175	869		7.0
		K10108-8	175	860		3.8
	750	K10106-7	175	750		5.7
		K10108-9	176	753		7.2
	800	K10106-9	174	592		8.6
		K10108-12	175	604		9.6

Table 11. Conditions of creep rupture test under internal pressure for 57 series.

Test temp. (°C)	Aimed rupture time (h)						Institute
	100	300	1000	3000	10000	12000	
600	(1) ② ③ ④	(1) ② ③ ④	(1) ② ③ ④	-	-	-	HITACHI
650	(2) ④	(2) ④	(2) ④	(2) ④	-	-	PNC-TOKAI
	(1) ③	(1) ③	(1) ③	(1) ③	-	-	KOBE
	-	-	-	-	-	(1) ② ③ ④	PNC-OARAI
700	(2) ④	(2) ④	(2) ④	(2) ④	-	-	SUMITOMO
	(1) ③	(1) ③	(1) ③	(1) ③	-	-	NRIM
	-	-	-	-	(1) ② ③ ④	-	PNC-OARAI
750	(1) ③	(1) ③	(1) ③	(1) ② ③ ④	-	-	PNC-TOKAI
	(1) ③	(1) ③	(1) ③	-	-	-	KOBE
	(2) ④	(2) ④	(2) ④	-	-	-	SUMITOMO
	(2) ④	(2) ④	(2) ④	-	-	-	NRIM

* (1) 57SM1, (2) 57MK2, (3) 57MS3, (4) 57MK4

Table 12. Conditions of uniaxial creep test for 55MK.

Test temp. (°C)	Stress (kgf/mm ²)	26	22	18	Institute
650		○	○	-	KOBE
700		-	○	○	SUMITOMO

Table 13. Conditions of creep test for 55MK under internal pressure.

Test temp. (°C)	Hoop stress (kgf/mm ²)	26	22	18	14	10	Institute
650	○	○	-	-	-	-	KOBE
	-	○	○	-	-	-	SUMITOMO
	○	-	○	-	-	-	PNC-TOKAI
700	-	-	○	○	-	-	NRIM
	-	-	○	○	○	-	PNC-OARAI

Table 14. Results of creep rupture test under internal pressure for cladding tubes 57MS1 and 57MK2.

	Temp. (°C)	Pressure (kgf/cm ²)	Hoop stress (kgf/mm ²)	Time to rupture (h)	Rupture type*	Specimen No.	Institute
57MS1	600	780.0	50.2	329.2	V	S10801-3	
		730.0	47.0	770.0	V	S10801-11	
		680.0	43.9	1,584.3	V	S10802-3	
	650	580.0	37.2	314.0	V	S10801-4	
		540.0	34.6	1,136.0	F	S10801-13	KOBE
		470.0	30.2	2,201.0	F	S10801-1	
		430.0	27.6	3,050.0	F	S10801-10	
	700	500.0	32.1	43.0	V	S10802-5	
		420.0	26.9	223.3	V	S10801-8	
		320.0	20.5	687.5	V	S10801-5	
		200.0	12.9	(7,224.0)**		S10801-2	
	750	280.0	18.2	163.2	V	S10801-12	
		270.0	17.4	476.3	V	S10801-9	
		254.0	16.4	367.5	V	S10802-6	
		195.0	12.7	994.7	F	S10802-12	
		142.0	9.2	3,860.0	F	S10802-9	
		300.0	19.3	126.0	V	S10802-7	
		270.0	17.3	166.0	V	S10802-1	
		250.0	16.0	306.0	F	S10802-4	
		180.0	11.5	1,754.0	F	S10802-13	
		780.0	50.0	120.6	V	K9901-8	
57MK2	600	730.0	46.6	235.9	V	K9901-12	
		680.0	43.3	552.9	V	K9902-8	
		640.0	41.1	1,174.2	V	K9902-12	
	650	700.0	45.0	18.6	V	K9901-6	
		588.0	38.0	219.5	V	K9901-11	
		505.0	32.4	966.3	V	K9901-3	
		401.0	25.8	3,292.0	V	K9902-6	
	700	500.0	32.1	127.6	V	K9902-4	
		435.0	27.9	296.8	V	K9901-13	
		380.0	24.4	458.8	V	K9902-1	
		330.0	21.1	701.7	V	K9901-1	
		290.0	18.5	2,509.1	F	K9902-7	
	750	310.0	19.9	101.5	V	K9901-7	
		265.0	17.0	445.0	F	K9901-10	
		235.0	15.1	446.6	V	K9902-13	
		210.0	13.5	570.0	F	K9902-10	
		300.0	19.2	210.9	F	K9901-5	
		270.0	17.3	308.1	V	K9901-2	
		210.0	13.4	1,045.1	F	K9902-2	
		320.0	20.5	33.0		Pre- liminary tests	KOBE
		270.0	17.3	273.0			
		200.0	12.8	1,746.0			
		190.0	12.2	2,477.2	F	K9901-9	PNC-TOKAI

*V : Violent type, F : Fissure type, P : Pin hole type

** : Discontinued

Table 15. Results of creep rupture test under internal pressure for cludding tubes 57MS3 and 57MK4.

	Temp. (°C)	Pressure (kgf/cm ²)	Hoop stress (kgf/mm ²)	Time to rupture (h)	Rupture type*	Specimen No.	Institute
57MS3	600	780.0	50.1	211.0	V	S11051-3	
		730.0	47.0	559.0	V	S11051-11	HITACHI
		680.0	43.8	907.0	V	S11052-3	
	650	540.0	34.5	286.0	V	S11051-13	
		500.0	32.0	887.0	F	S11052-7	
		470.0	30.1	1,892.0	P	S11051-10	KOBE
		430.0	27.6	1,357.0	V	S11052-4	
		430.0	27.6	2,573.0	V	S11051-1	
	700	500.0	32.1	59.4	V	S11051-8	
		420.0	26.9	107.0	V	S11051-5	NRIM
		310.0	19.8	941.3	V	S11052-8	
		210.0	13.5	4,884.7	F	S11052-2	
	750	280.0	18.2	64.7	V	S11051-12	
		270.0	17.4	169.3	F	S11051-9	
		241.0	15.5	217.4	F	S11052-6	PNC-TOKAI
		217.0	14.0	302.2	V	S11052-9	
		176.0	11.4	4,011.0	F	S11052-12	
		270.0	17.3	84.0	V	S11052-1	
		230.0	14.8	396.0	F	S11051-7	KOBE
		180.0	11.6	1,337.0	F	S11052-10	
		780.0	49.7	58.7	V	K10101-8	
		730.0	46.6	96.0	V	K10102-8	
57MK4	600	680.0	43.6	293.3	V	K10102-12	HITACHI
		610.0	39.1	1,084.5	V	K10101-12	
	650	625.0	40.0	34.1	V	K10101-6	
		505.0	32.3	502.6	V	K10101-3	
		459.0	29.5	785.0	V	K10102-3	PNC-TOKAI
		347.0	22.5	3,560.0	F	K10102-6	
	700	405.0	25.9	168.0	V	K10102-13	
		360.0	23.0	262.5	V	K10101-1	
		310.0	19.9	527.9	V	K10102-1	SUMITOMO
		280.0	17.8	1,568.9	V	K10102-4	
	750	295.0	18.9	65.1	V	K10102-7	
		235.0	15.1	202.0	V	K10101-7	SUMITOMO
		171.5	11.0	1,761.8	F	K10101-4	
		300.0	19.2	56.6	V	K10102-5	
		270.0	17.3	167.8	V	K10102-2	NRIM
		200.0	12.8	865.3	V	K10101-5	
		270.0	17.3	430.0		Prelimi- nary tests	KOBE
		200.0	12.8	1,408.0			
		187.0	12.0	1,620.0	F	K10101-9	PNC-TOKAI

*V : Violent type, F : Fissure type, P : Pin hole type

Table 16. Results of creep test under uniaxial tension for cladding tube 55MK.

Temp. (°C)	Stress (kgf/mm ²)	Specimen No.	Time for total strain(h)				Minimum creep rate (%/h)	Tested time (h)	Rupture elongation (%)	Institute
			0.5%	1.0%	2.0%	5.0%				
650	26	K9381-5	72	765	1246	1366	7.56×10^{-4}	1375.2	10.0	KOBE
	22	K9381-1	569	1738	-	-	3.30×10^{-4}	2102.0	Nonrupture	
700	22	K9381-2	50	171	241	273	3.14×10^{-3}	289.7	11.1	SUMITOMO
	18	K9381-4	175	418	603	730	1.48×10^{-3}	743.6	8.4	

Table 17. Results of creep test under internal pressure of cladding tube 55MK.

Test temp. (°C)	Pressure (kgf/cm ²)	Hoop stress (kgf/mm ²)	Specimen No.	Minimum creep rate (%/h)	Testing time (h)	Maximum strain (%)	Institute	Strain measuring method*
650	404	26.0	K9381-15	4.9×10^{-4}	1386	1.092	KOBE	I
			K9382-2	2.98×10^{-4}	2042	0.836	PNC-TOKAI	C
	342	22.0	K9381-17	4.5×10^{-4}	1554	0.800	KOBE	I
			K9381-14	-	800	0.390	SUMITOMO	I
	280	18.0	K9381-16	-	800	0.320	SUMITOMO	I
			K9382-4	8.81×10^{-5}	3600	0.502	PNC-TOKAI	C
700	279	18.0	K9382-1	9.3×10^{-4}	1738(R) **	5.889 ***	NRIM	I
			K9334-15	1.1×10^{-3}	1287(R)	2.10 ***	PNC-OARAI	C
	218	14.0	K9382-5	3.6×10^{-4}	2009	1.061	NRIM	I
			K9333-15	1.6×10^{-4}	3416(R)	1.95 ***	PNC-OARAI	C
	155	10.0	K9330-15	6.0×10^{-5}	2960	0.580	PNC-OARAI	C

* I : Interrupted, C : Continuous

** (R) : Ruptured

*** : Rupture elongation

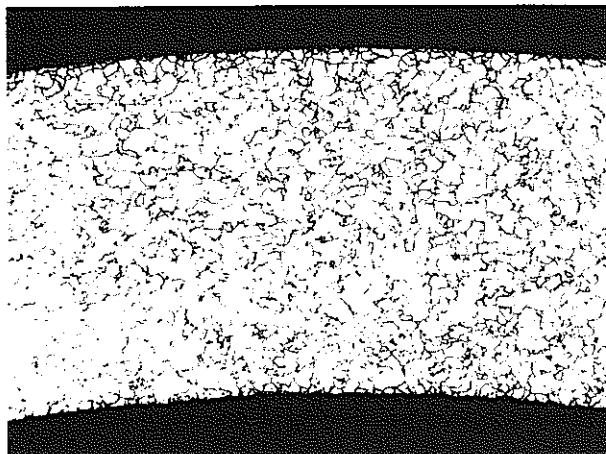
Table 18. Calculated creep rupture strength of cladding tubes of 57 series under the design conditions in "MONJU" cores.

Creep program	Cladding name	Calculated hoop stress to rupture (kgf/mm ²)	
		675°C	
		11,808 h	17,760 h
13th *	57MS1	15.5	14.4
	57MK2	16.7	15.6
	57MS3	16.0	15.0
	57MK4	16.4	15.3
11th **	55MK	15.6	14.1
	55MS	14.9	13.3

* Modified austenitic stainless steel.

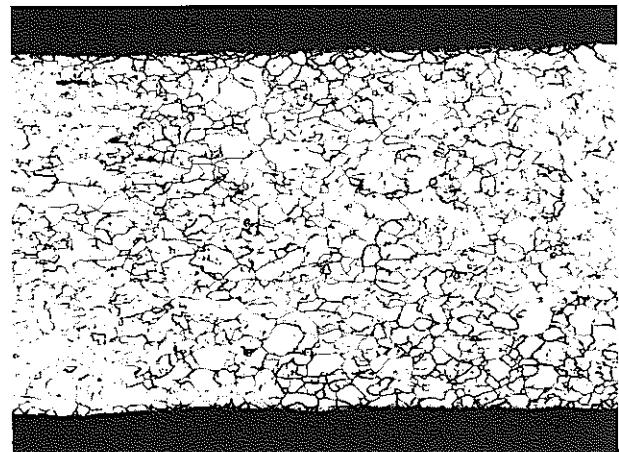
** Type 316 austenitic stainless steel.

Transvers



A S T M No. 8.5

Longitudinal



A S T M No. 8

100 μ

Transverse



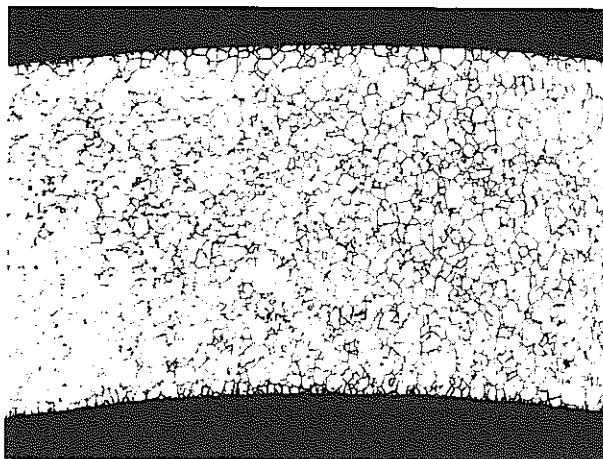
Longitudinal



25 μ

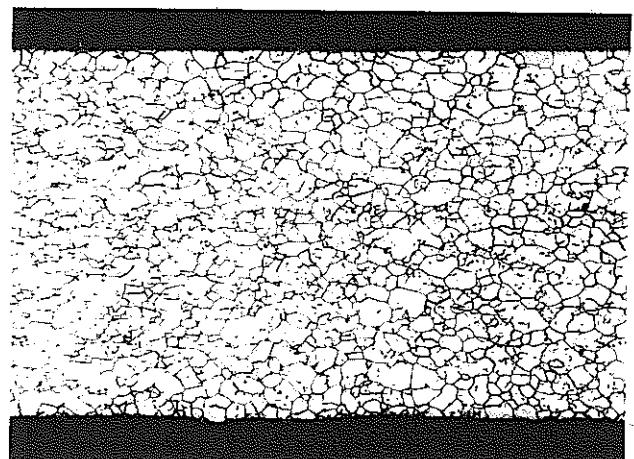
Fig. 1. Micrographs of as-received "MONJU" cladding tube 57MS1.

Transverse



A S T M No. 8.5

Longitudinal



A S T M No. 8

100 μ

Transverse



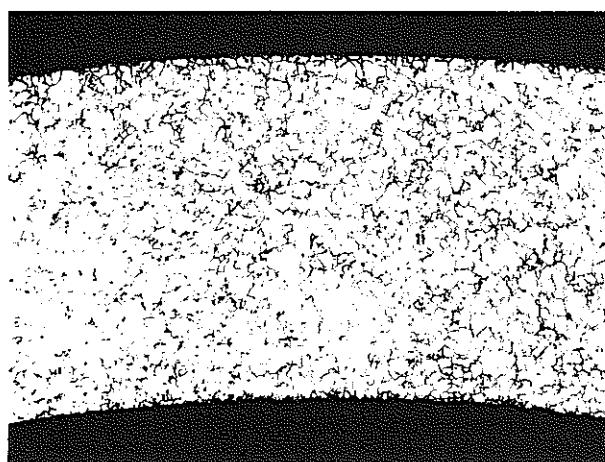
Longitudinal



25 μ

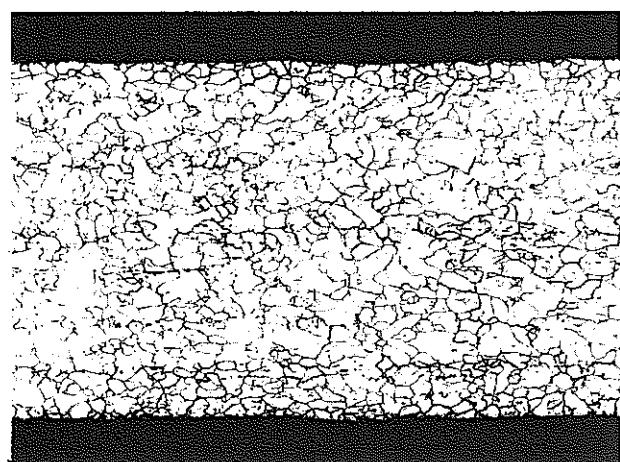
Fig. 2. Micrographs of as-received "MONJU" cladding tube 57MK2.

Transverse



A S T M No. 8.5

Longitudinal



A S T M No. 8

100 μ

Transverse



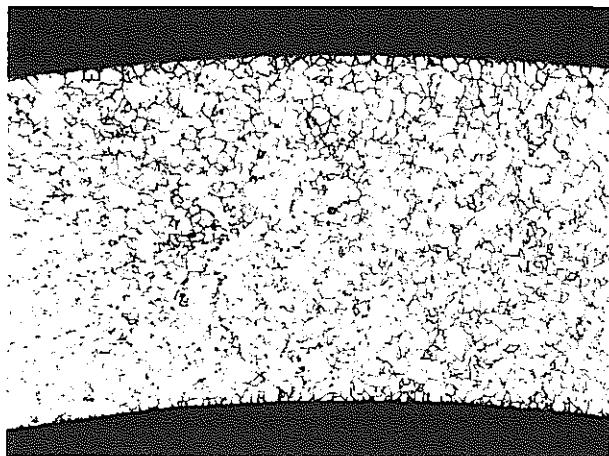
Longitudinal



25 μ

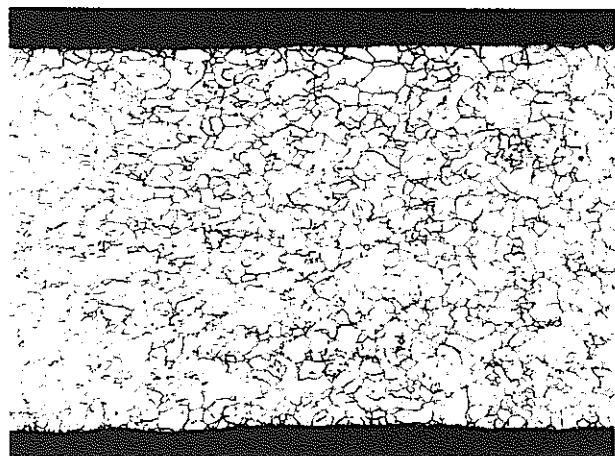
Fig. 3. Micrographs of as-received "MONJU" cladding tube 57MS3.

Transverse



A S T M No. 8.5

Longitudinal



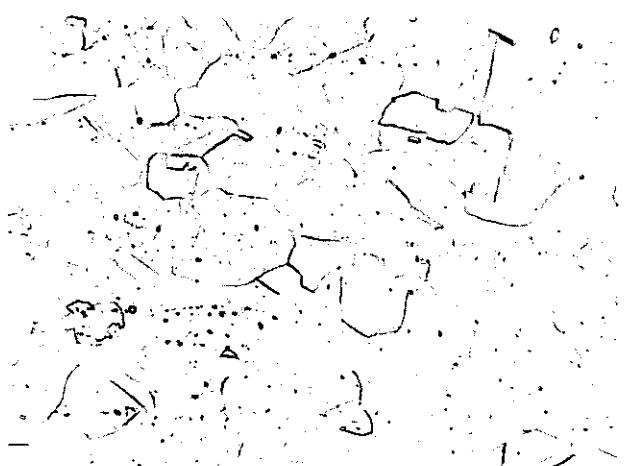
A S T M No. 8

100 μ

Transverse



Longitudinal



25 μ

Fig. 4. Micrographs of as-received "MONJU" cladding tube 57MK4.

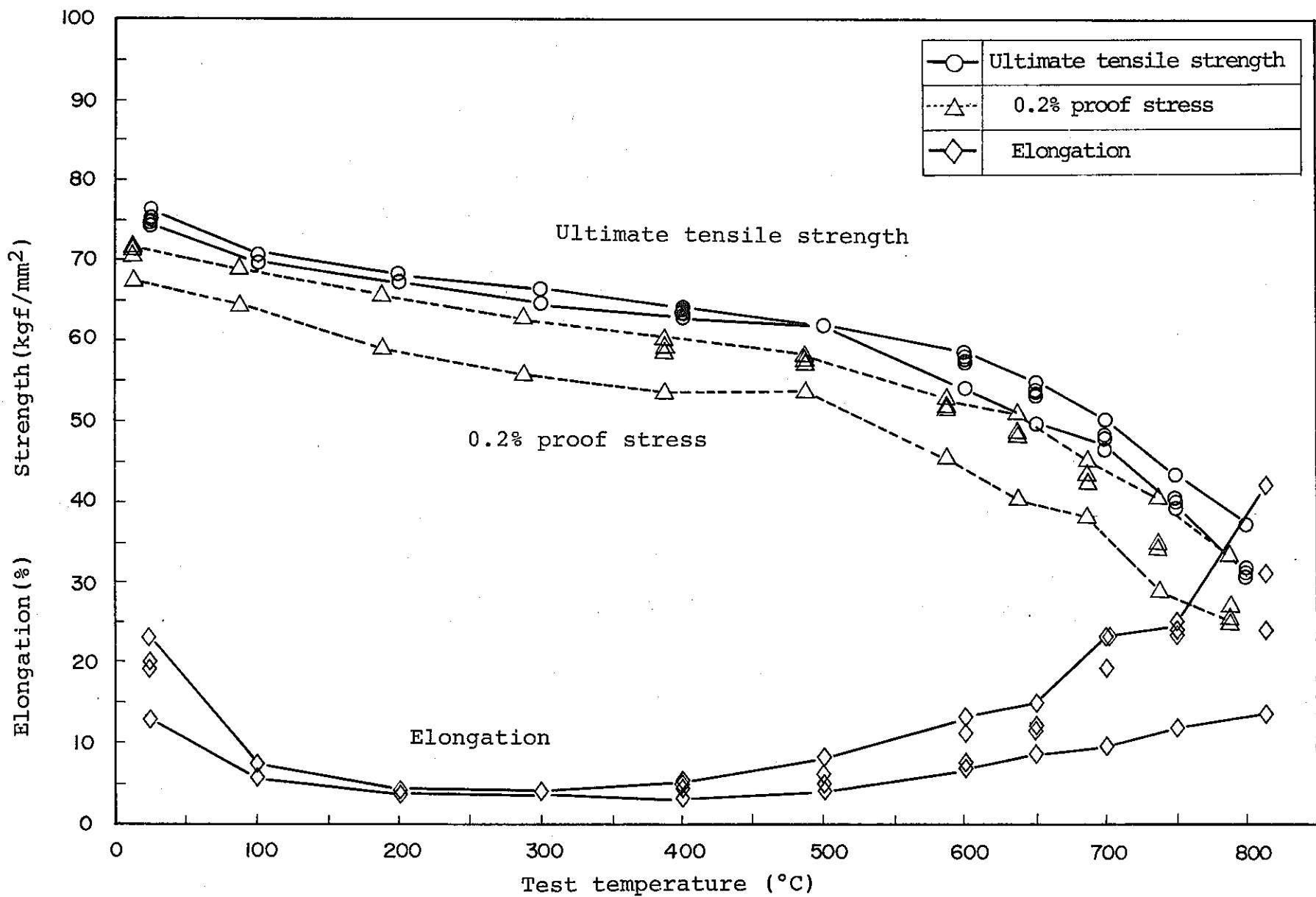


Fig. 5. Tensile properties of 57MS1.

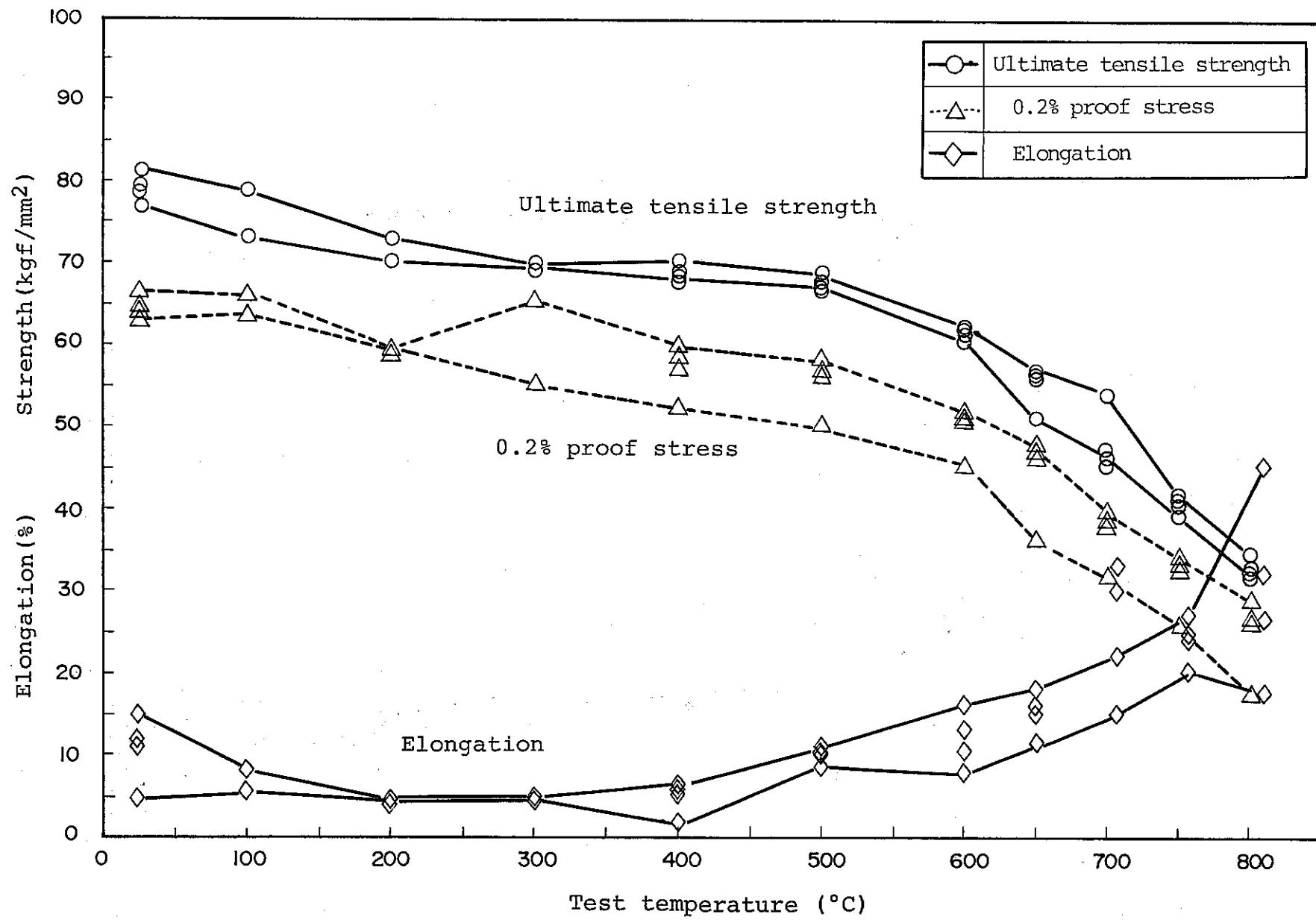


Fig.6. Tensile properties of 57MK2.

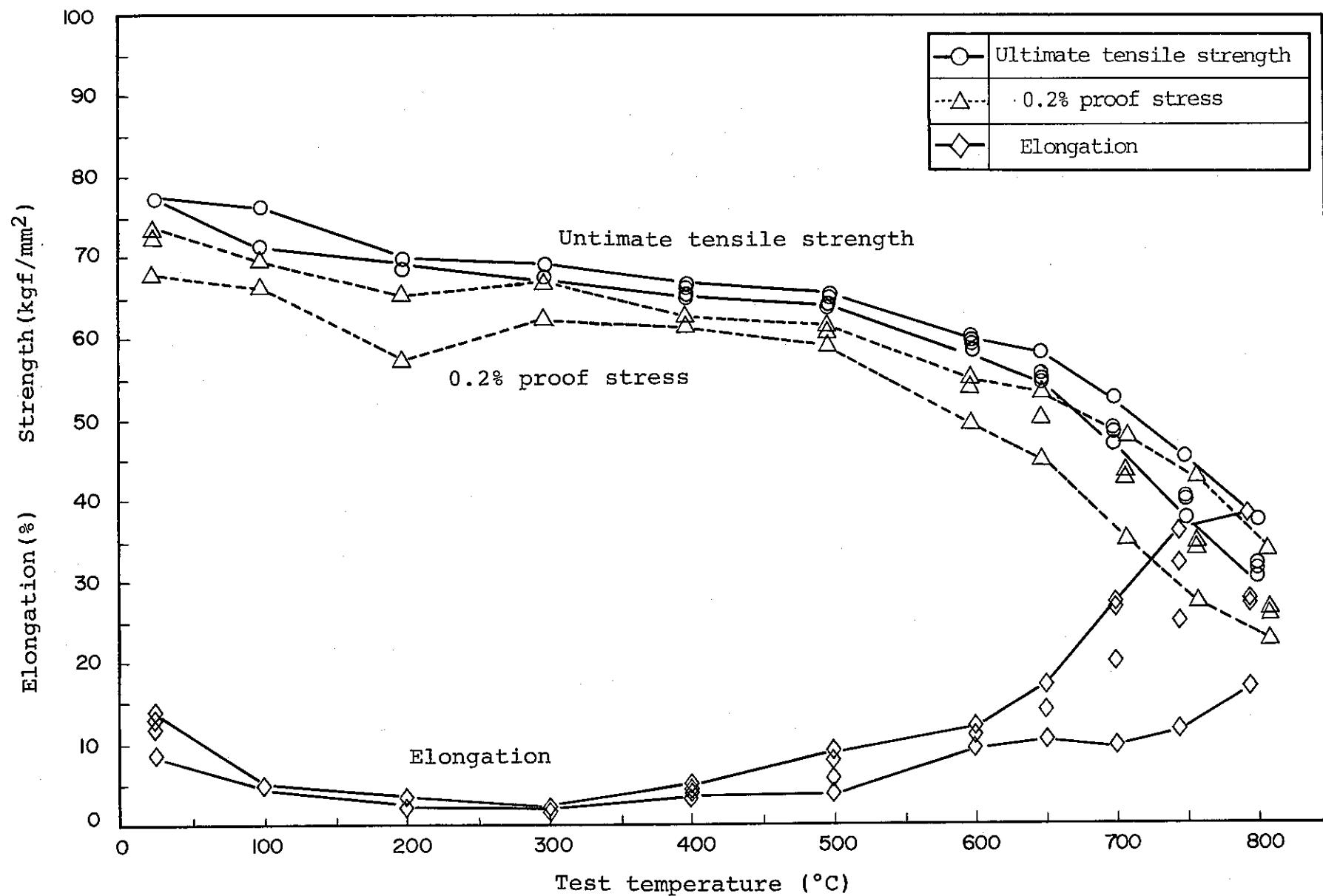


Fig. 7. Tensile properties of 57MS3.

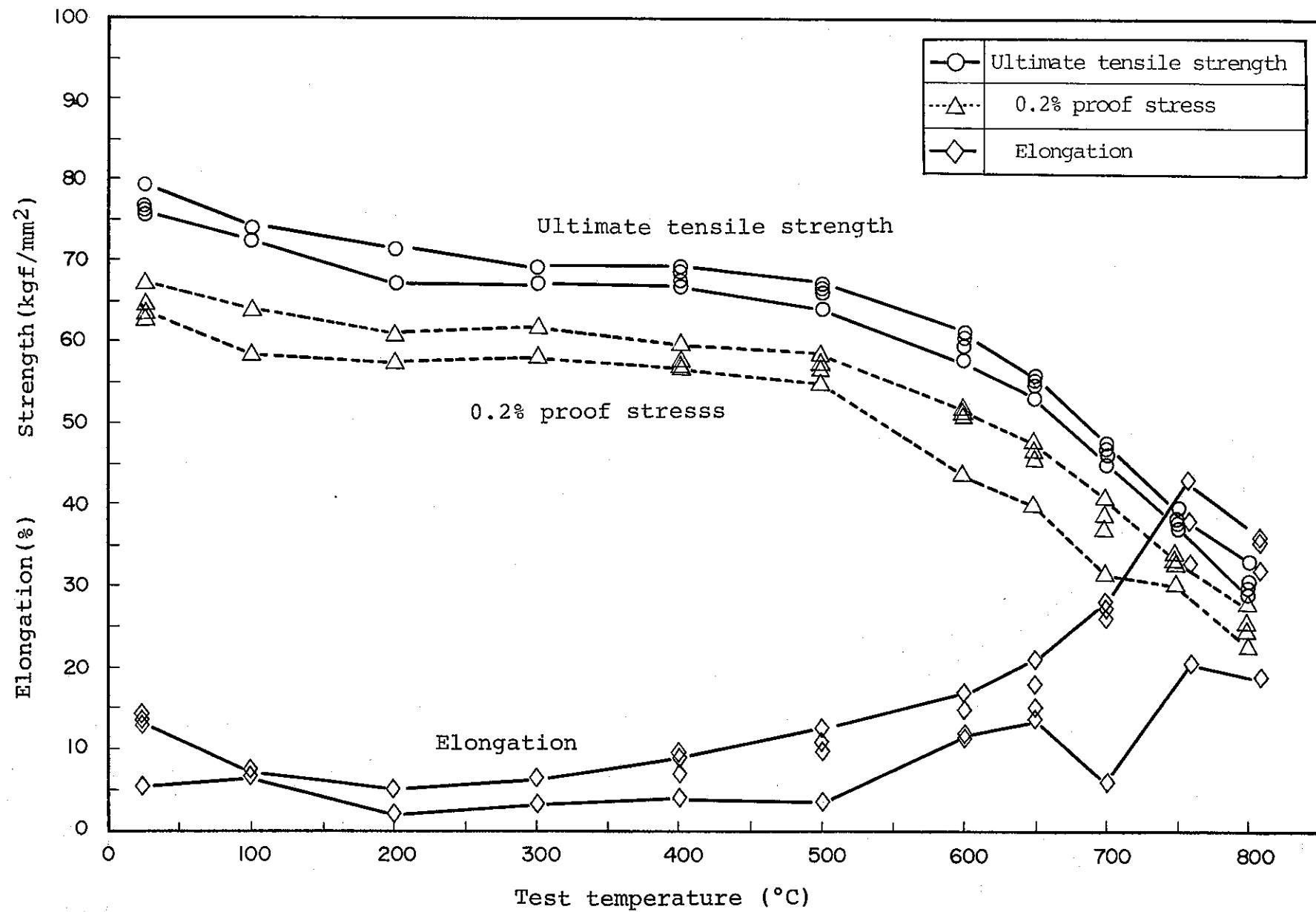


Fig.8. Tensile properties of 57MK4.

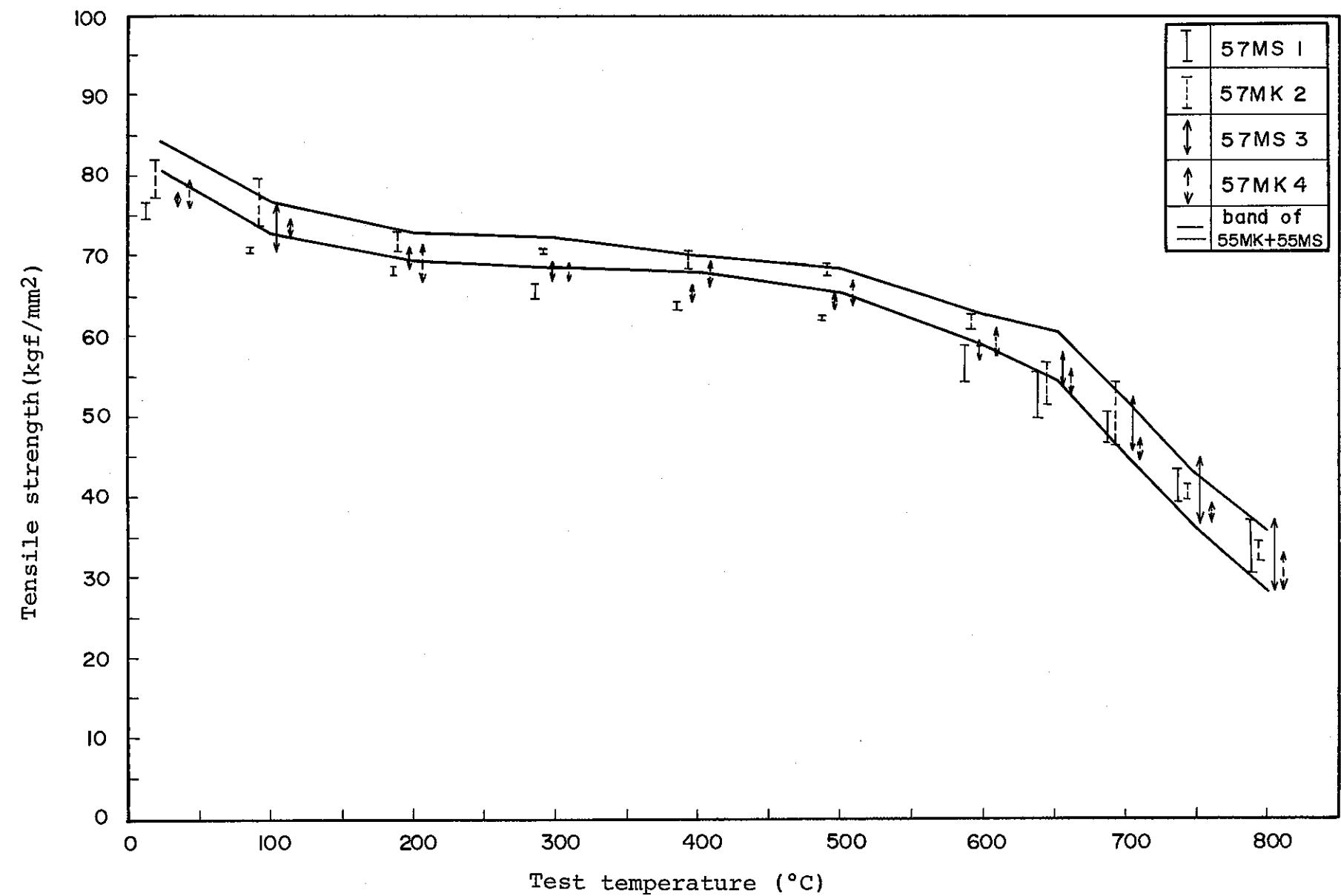


Fig.9. Tensile strength of 57MS1, 57MK2, 57MS3 and 57MK4 compared with 55MK and 55MS.

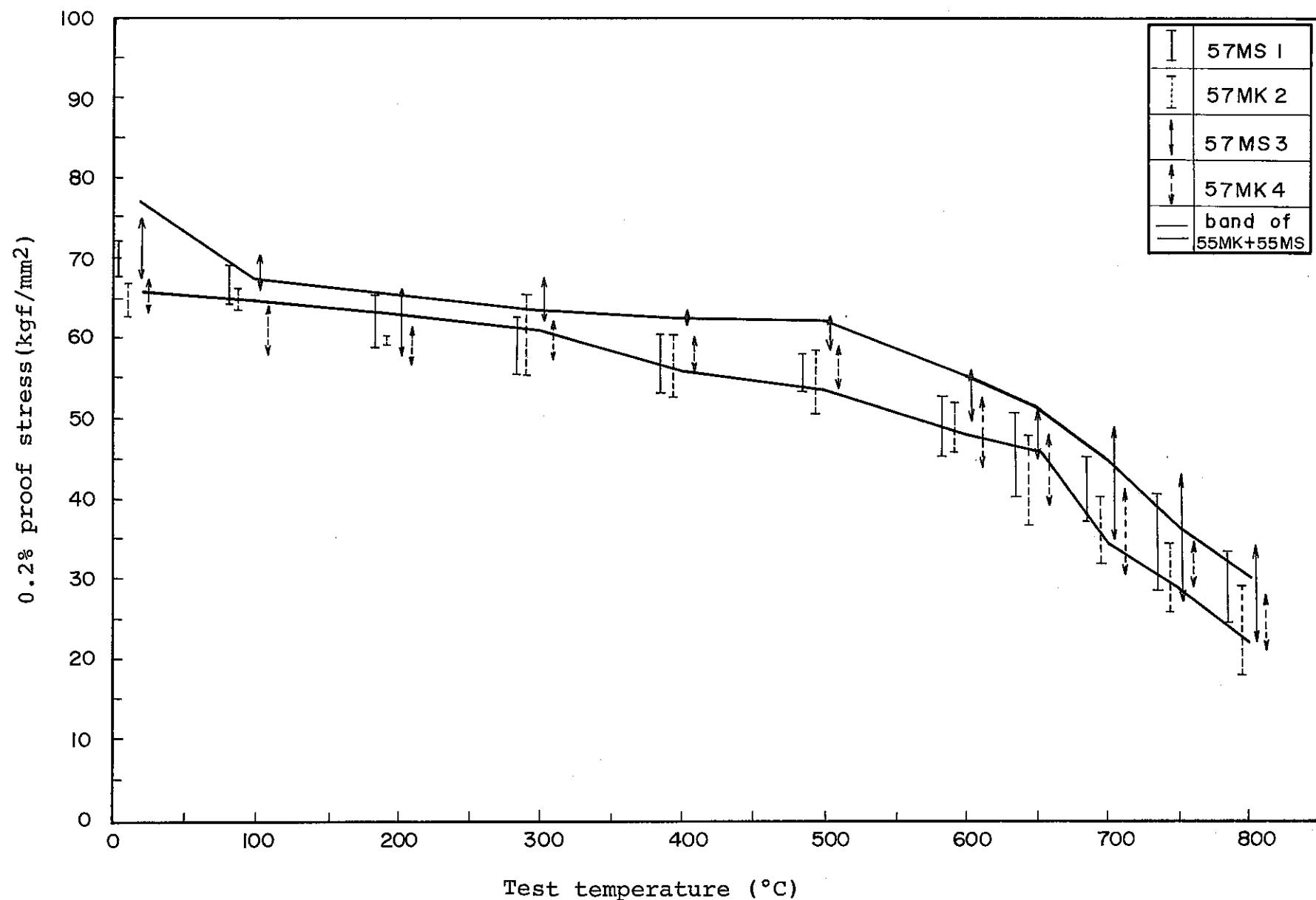


Fig.10. 0.2% proof stress of 57MS1, 57MK2, 57MK3 and 57MK4 compared with 55MK and 55MS.

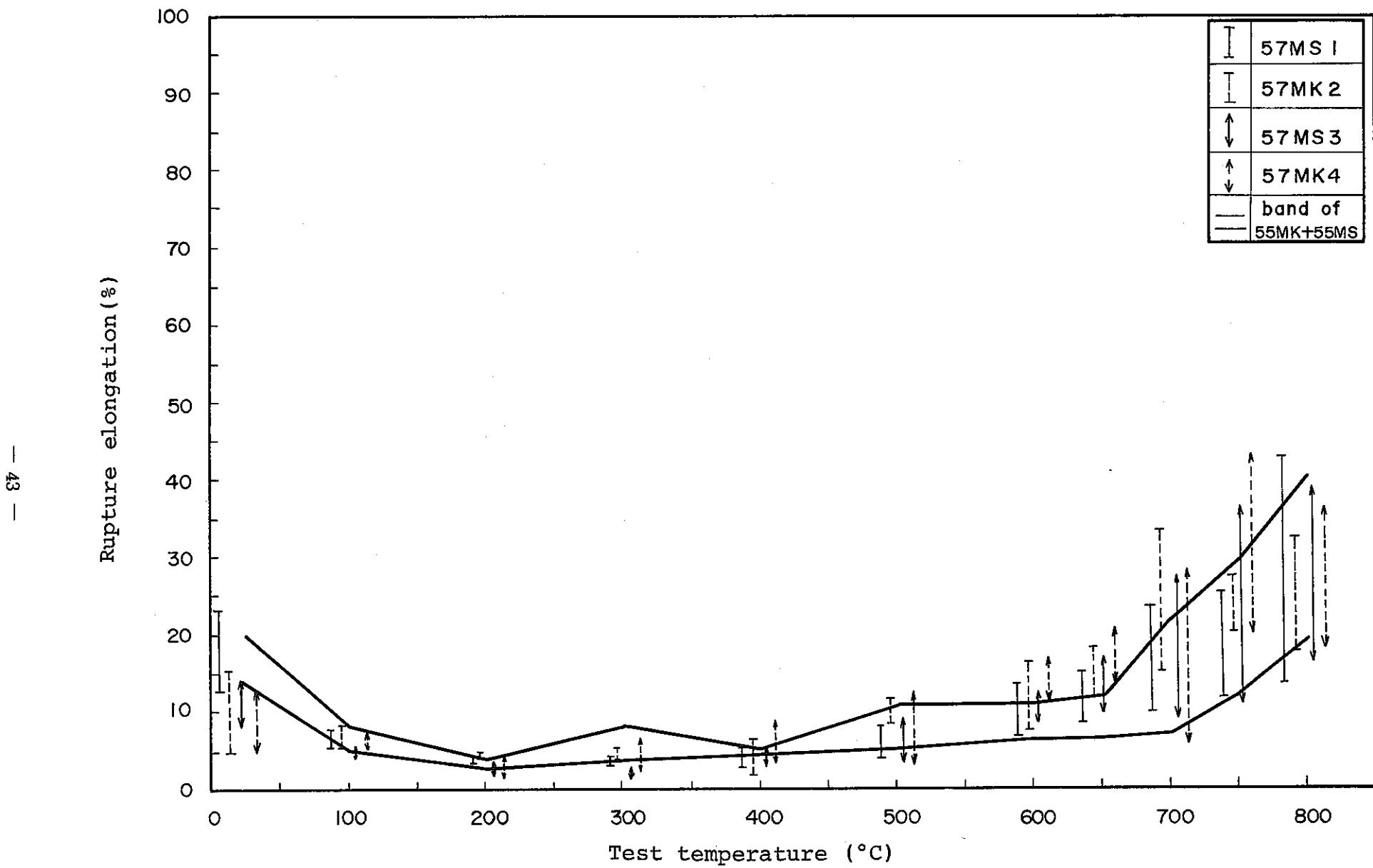


Fig.11. Rupture elongation of 57MS1, 57MK2, 57MS3 and 57MK4 compared with 55MK and 55MS.

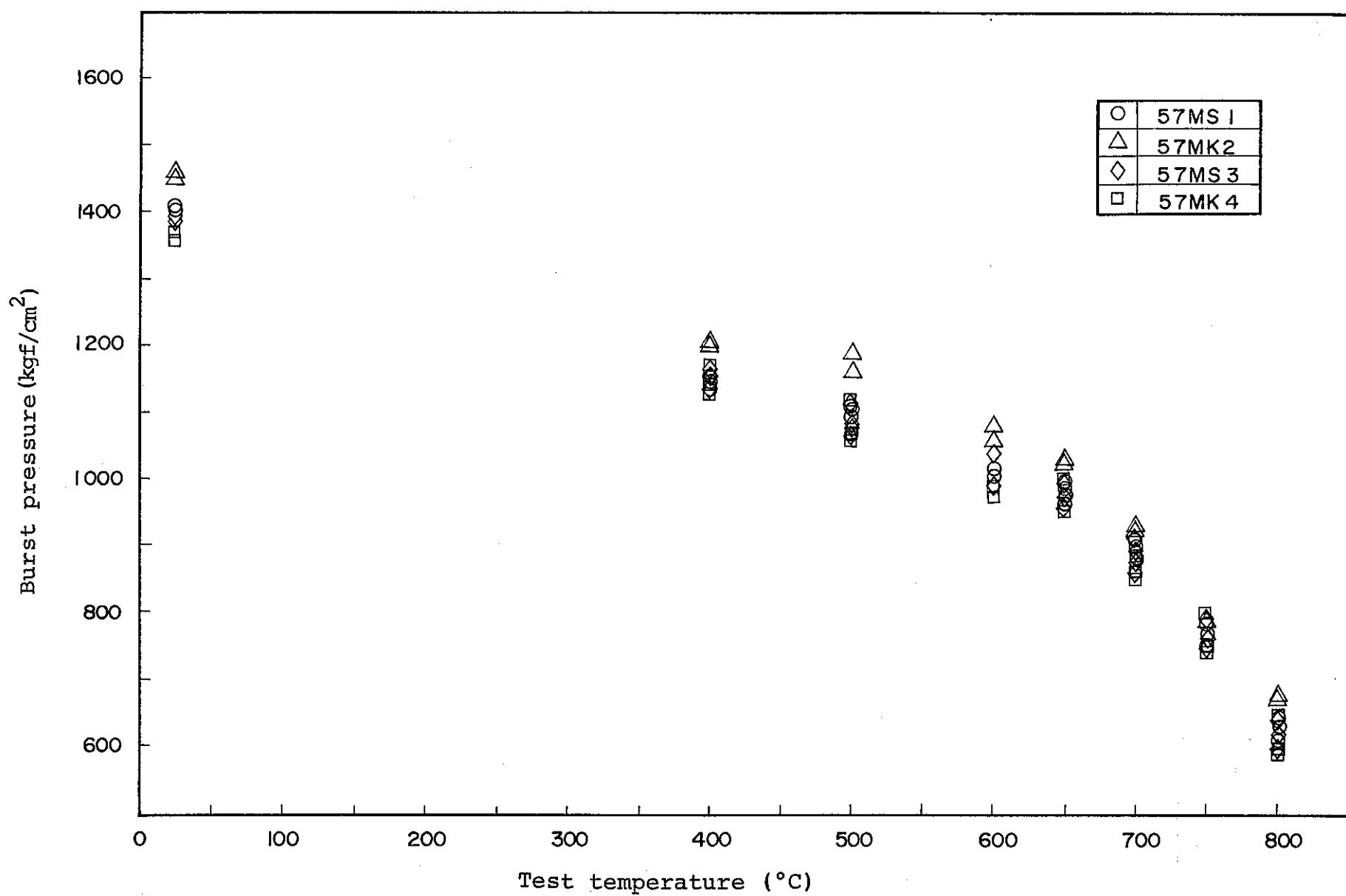


Fig. 12. Burst pressure of 57MS1, 57MK2, 57MS3 and 57MK4.

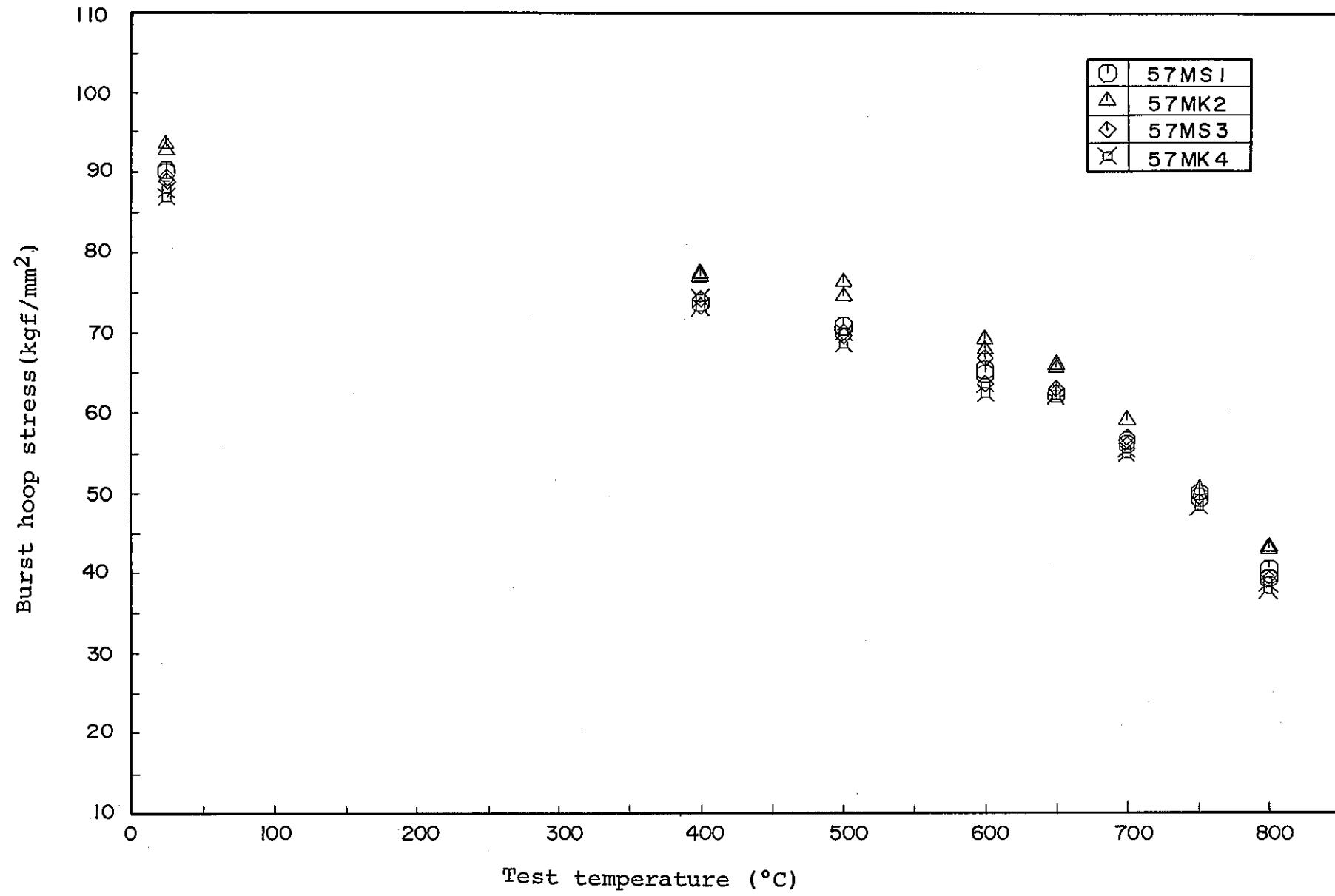


Fig. 13. Burst hoop stress of 57MS1, 57MK2, 57MS3 and 57MK4.

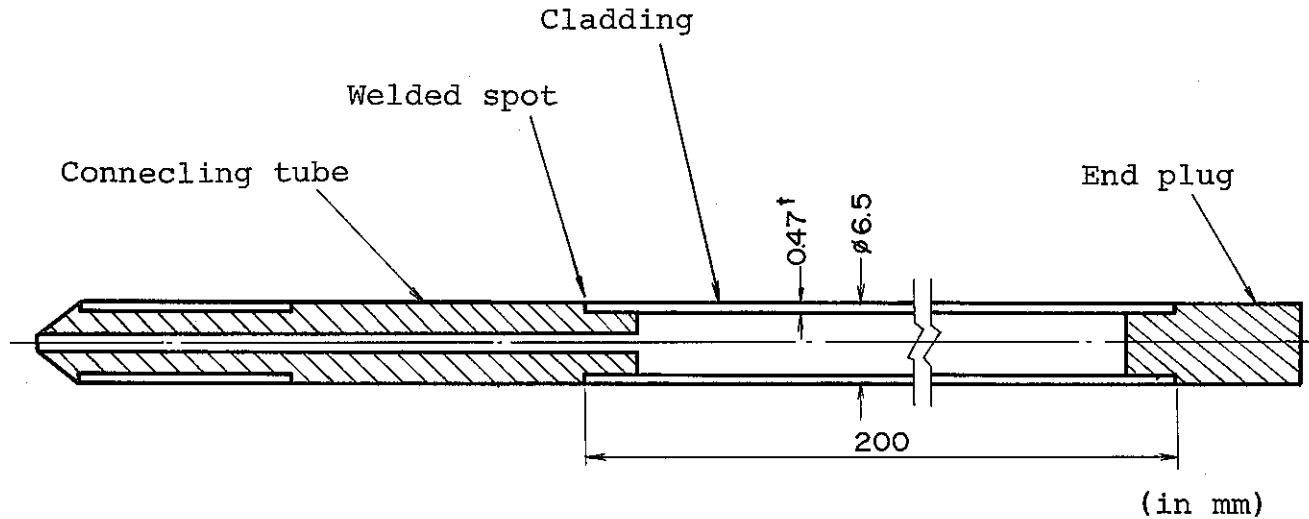


Fig. 14. Tubular creep-rupture and creep specimen under internal pressure.

- 19 -

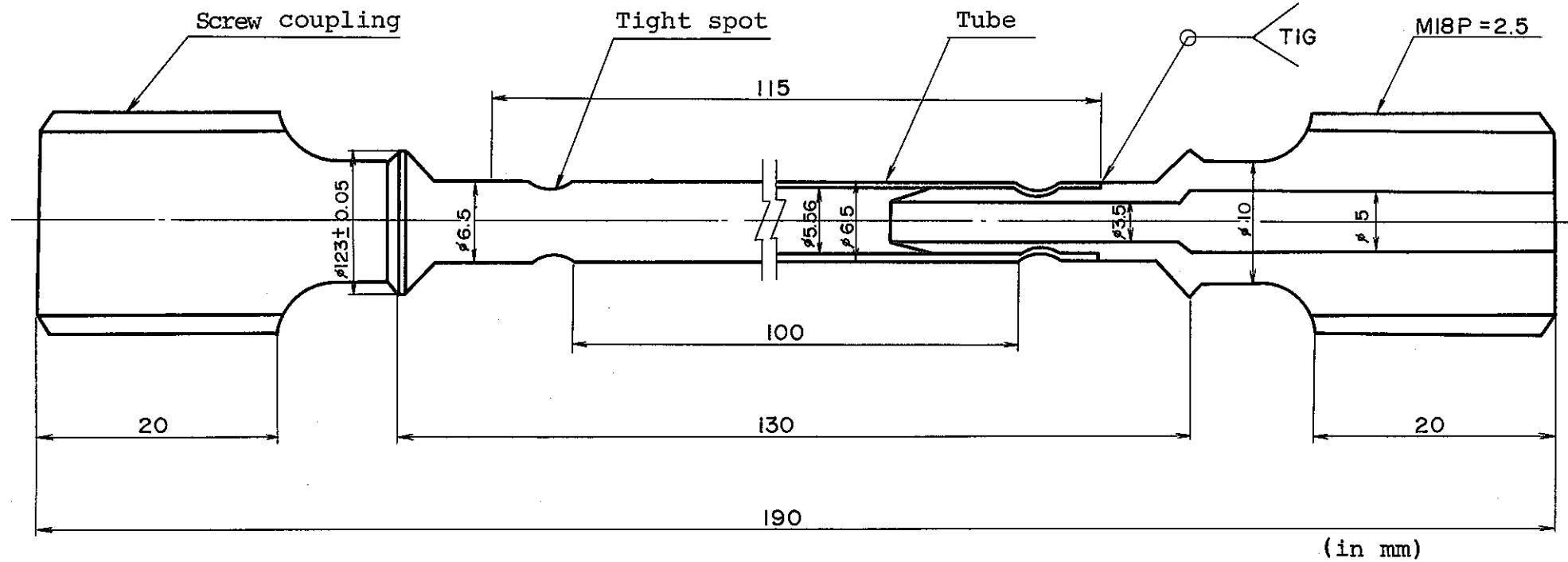


Fig. 15. Uniaxial tension creep specimen.

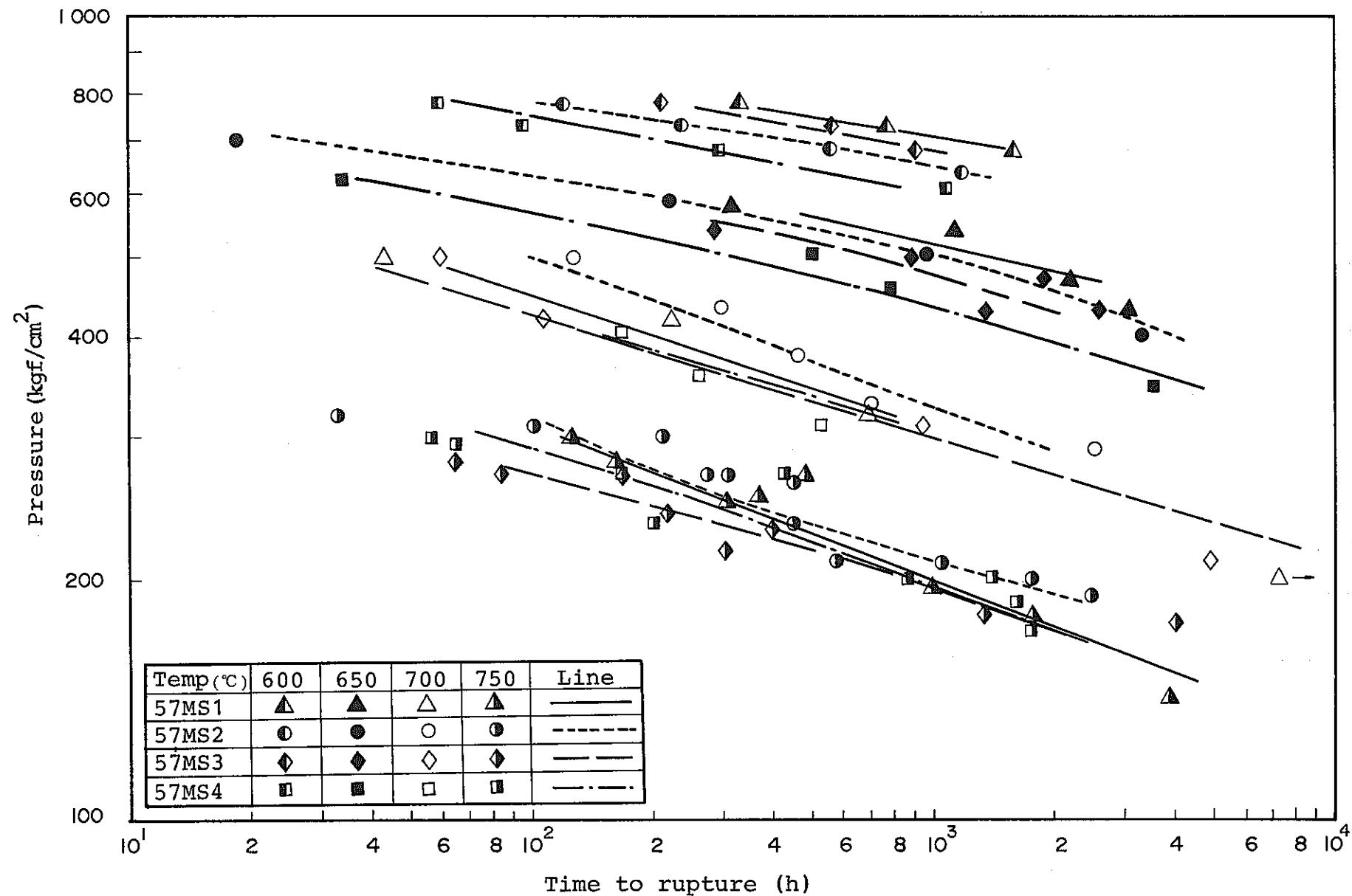


Fig.16. Creep rupture curves of 57MS1, 57MK2, 57MS3 and 57MK4 under internal pressure.

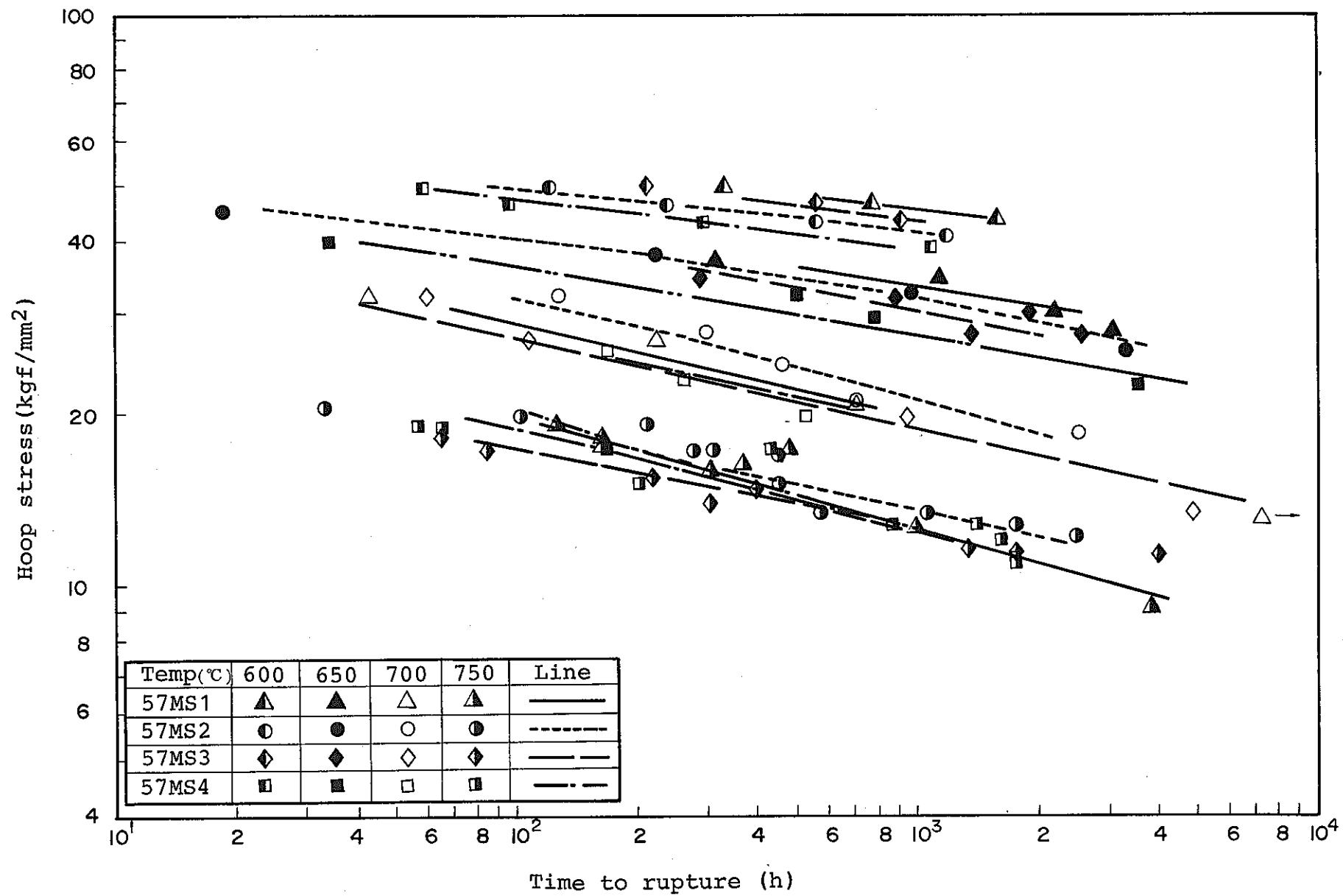


Fig.17. Creep rupture curves of 57MS1, 57MS2, 57MS3 and 57MK4 under internal pressure.

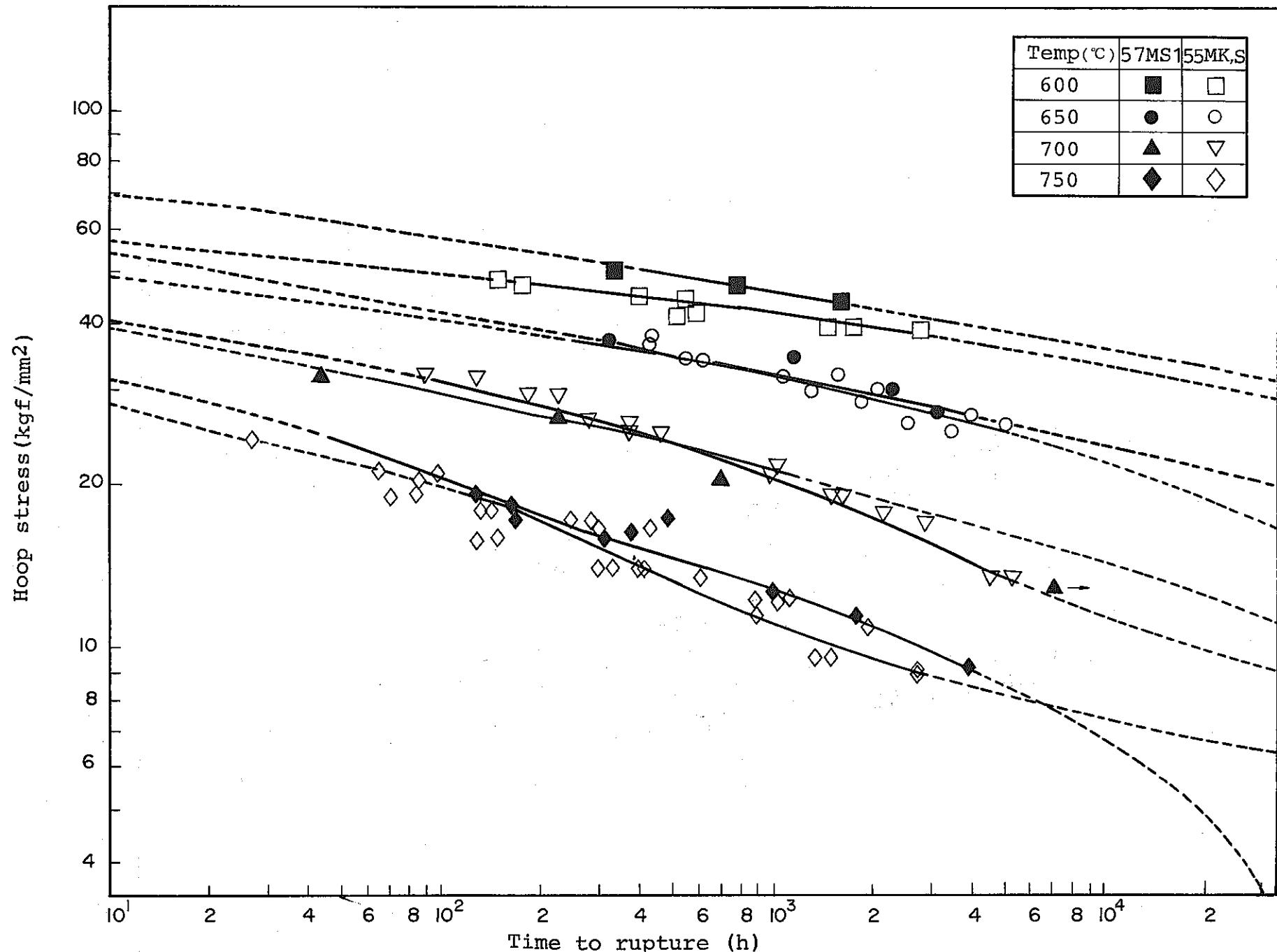


Fig. 18. Creep rupture curves of 57MS1 under internal pressure compared with 55MK and 55MS.

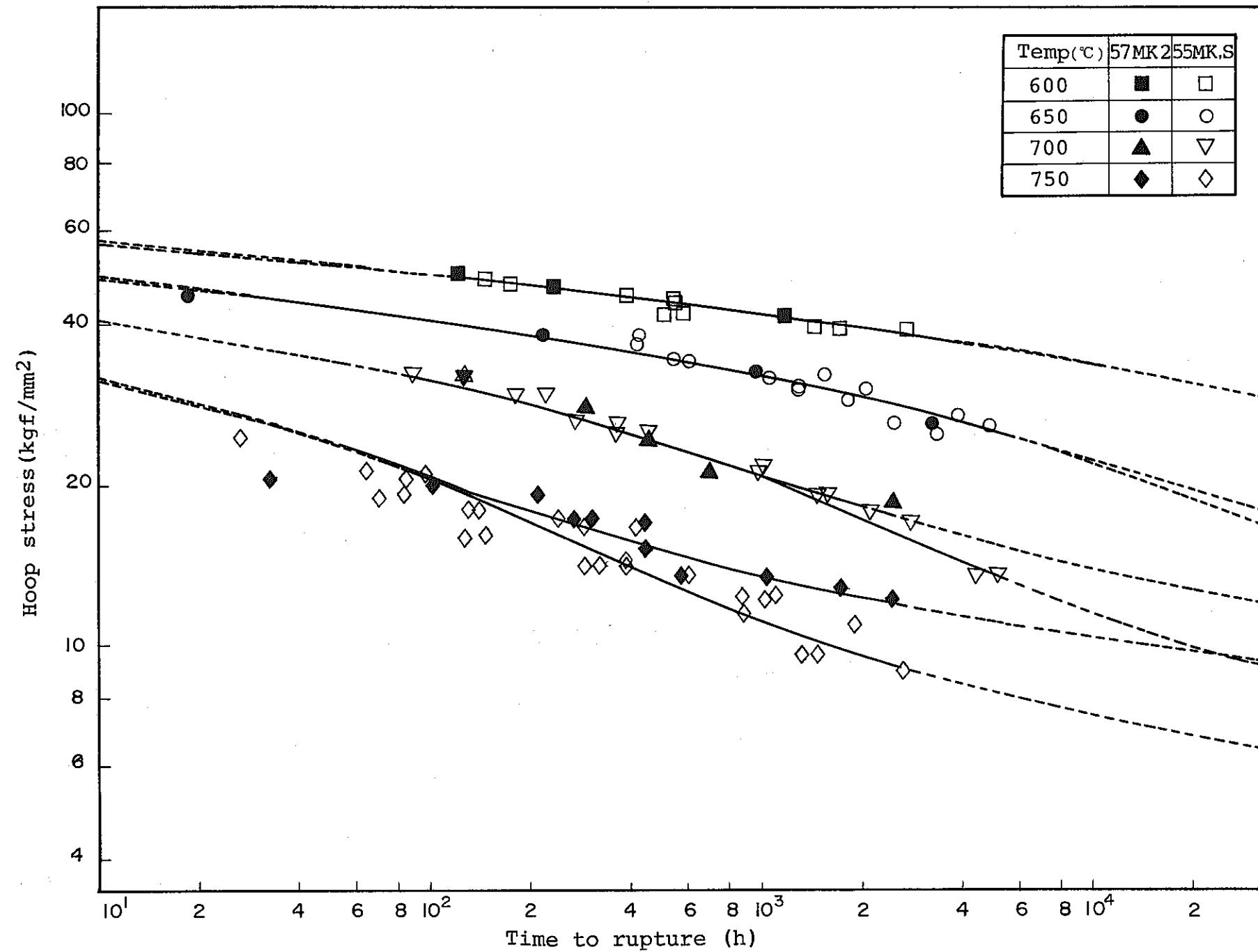


Fig.19. Creep curves of 57MK2 under internal pressure Compared with 55MK and 55MS.

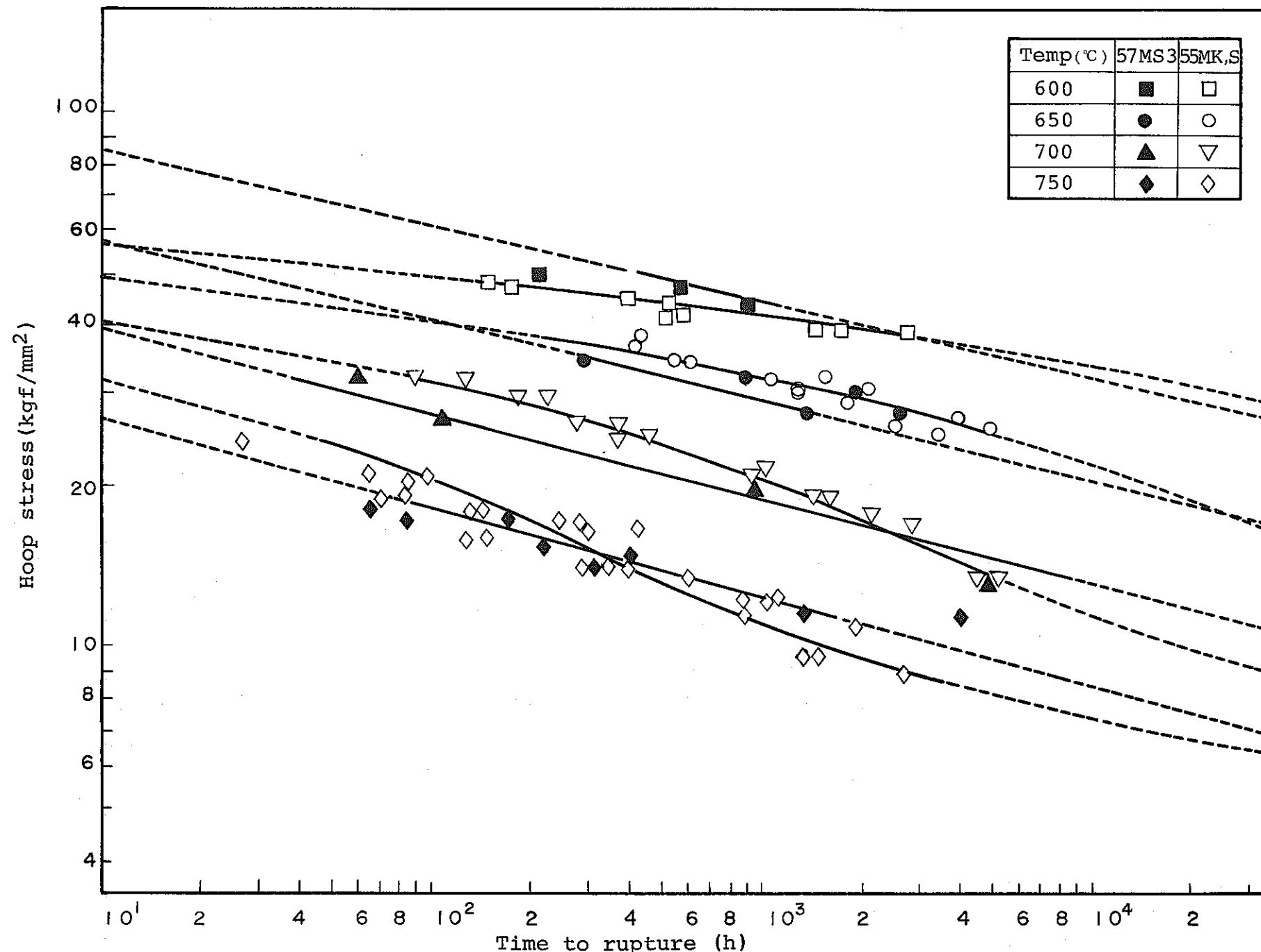


Fig. 20. Creep rupture curves of 57MS3 under internal pressure compared with 55MK and 55MS.

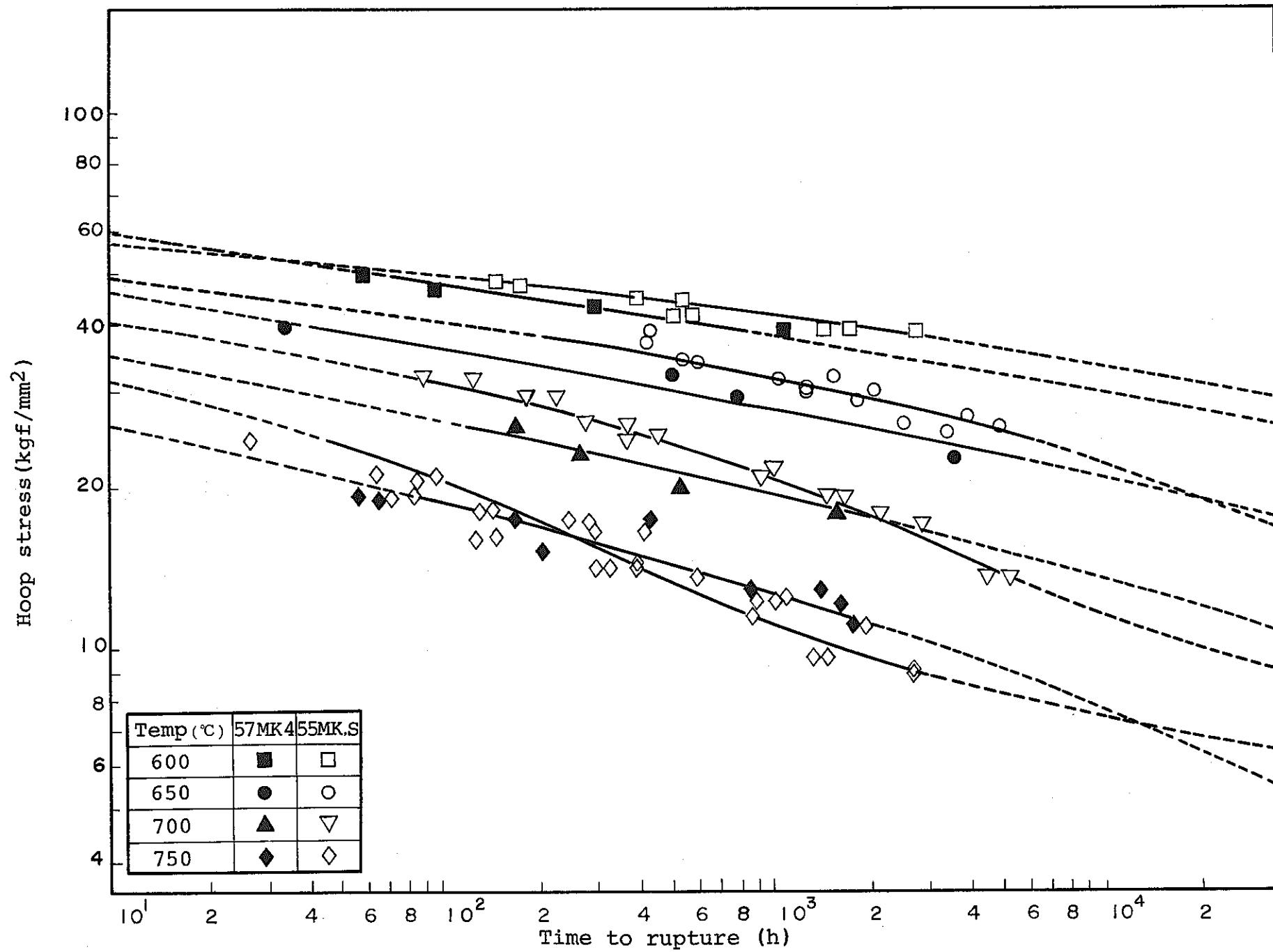


Fig. 21. Creep rupture curves of 57MK4 under internal pressure compared with 55MK and 55MS.

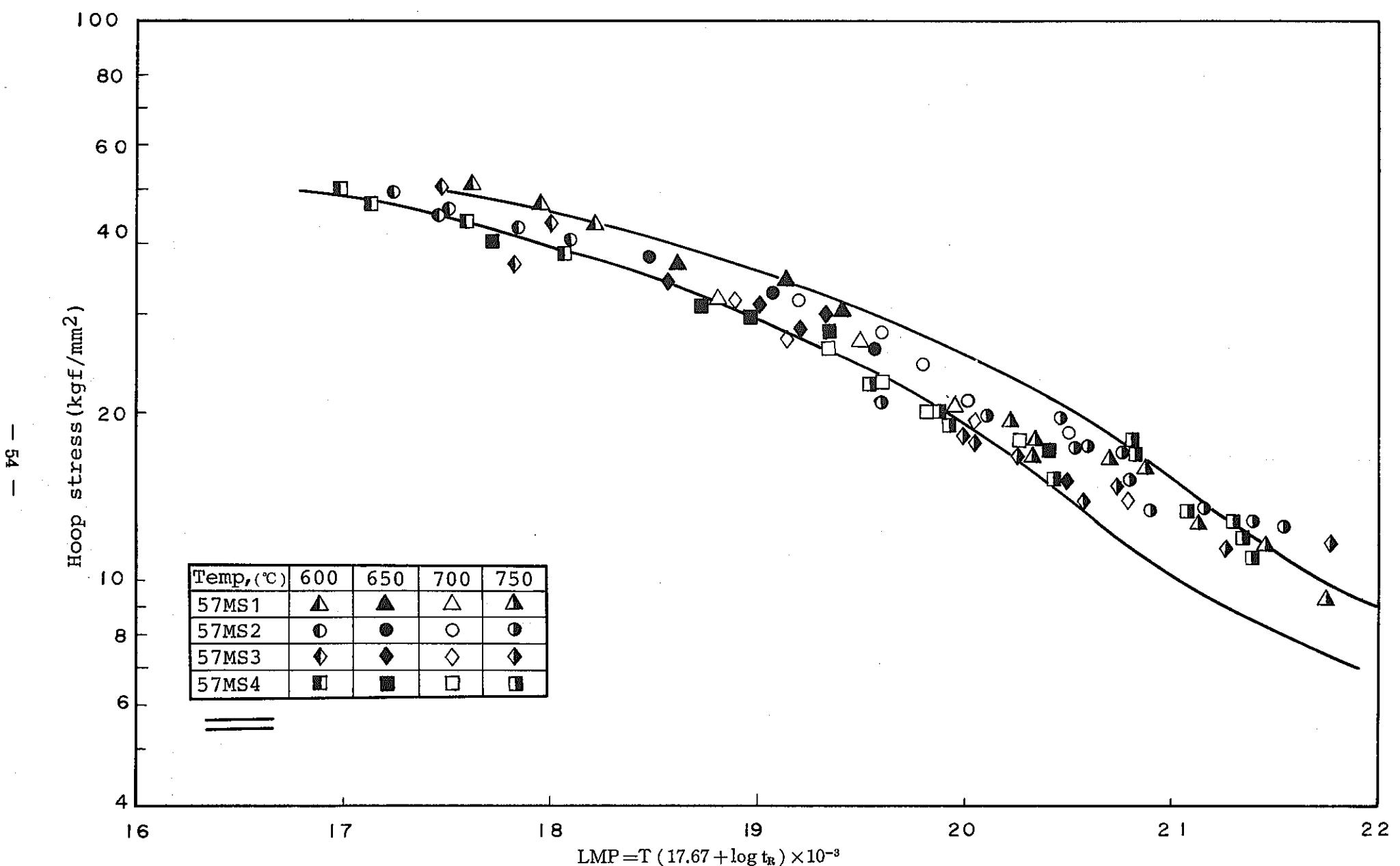


Fig. 22. Comparison of creep rupture strength among 57MS1, 57MK2, 57MS3 and 57MK4 by Larson-Miller parameter.

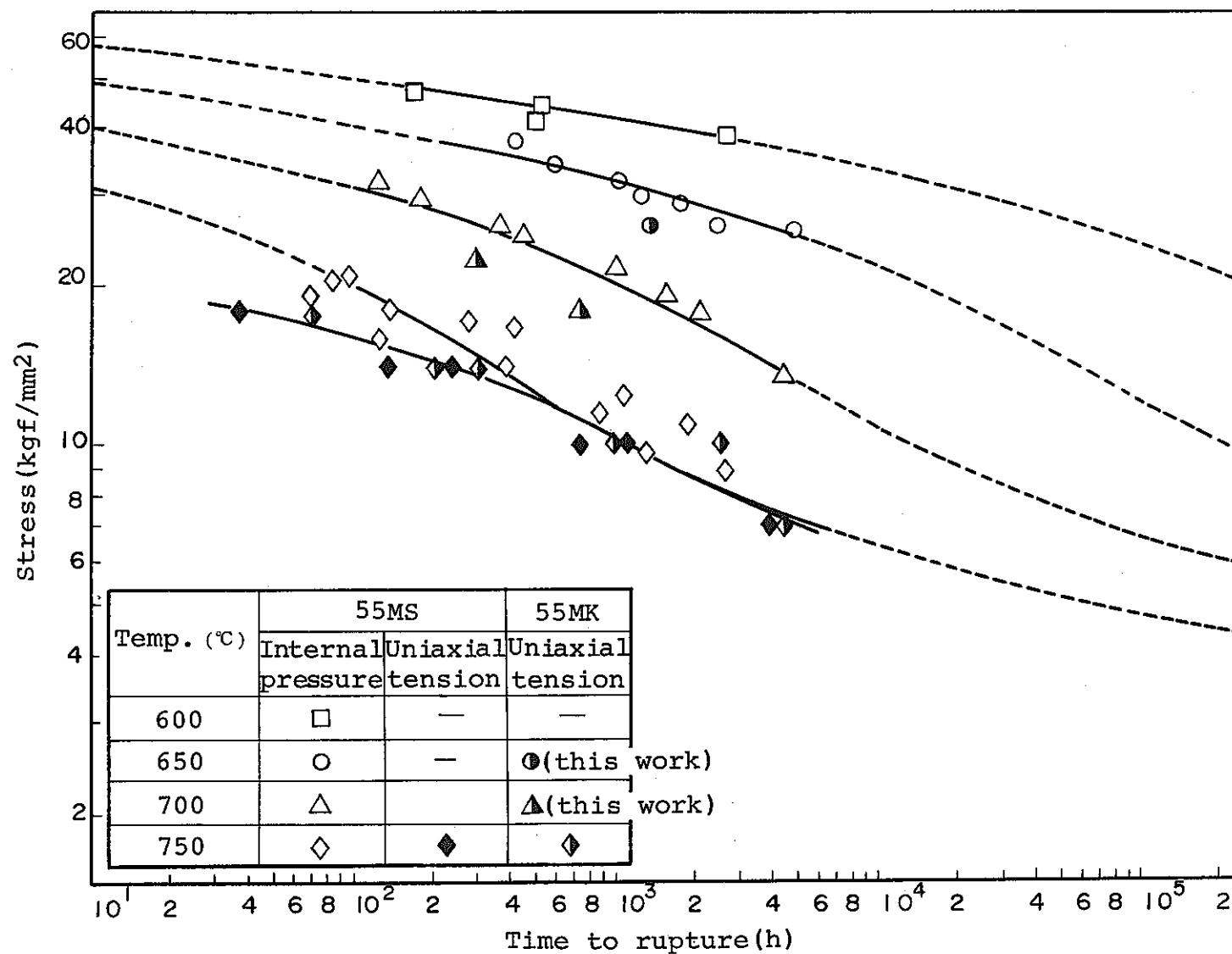


Fig.23. Relation of stress and time to rupture of cladding tubes 55MK and 55MS under uniaxial tension and internal pressure.

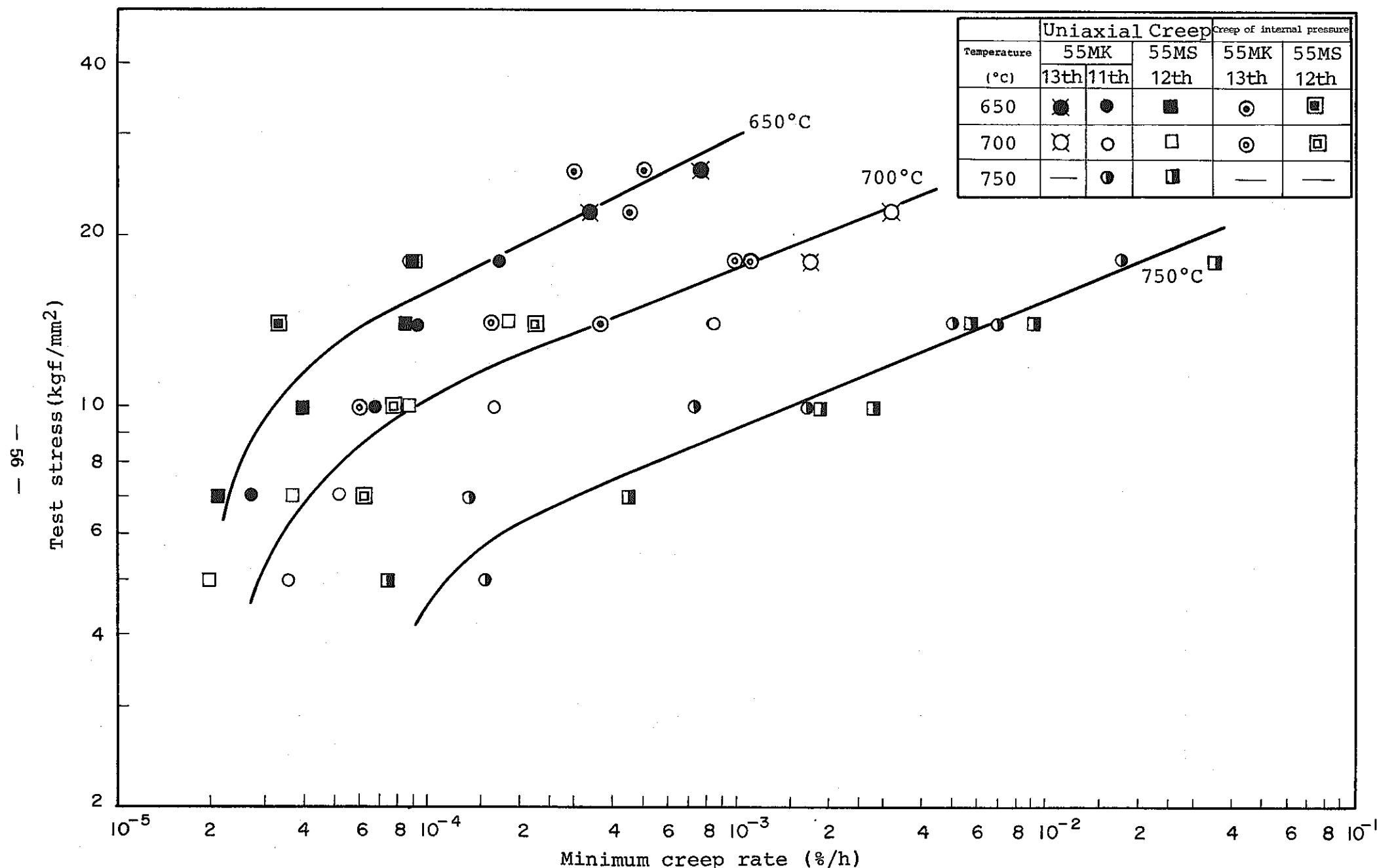


Fig. 24. Relation of stress and minimum creep rate under uniaxial tension and internal pressure for 55MK and 55MS.

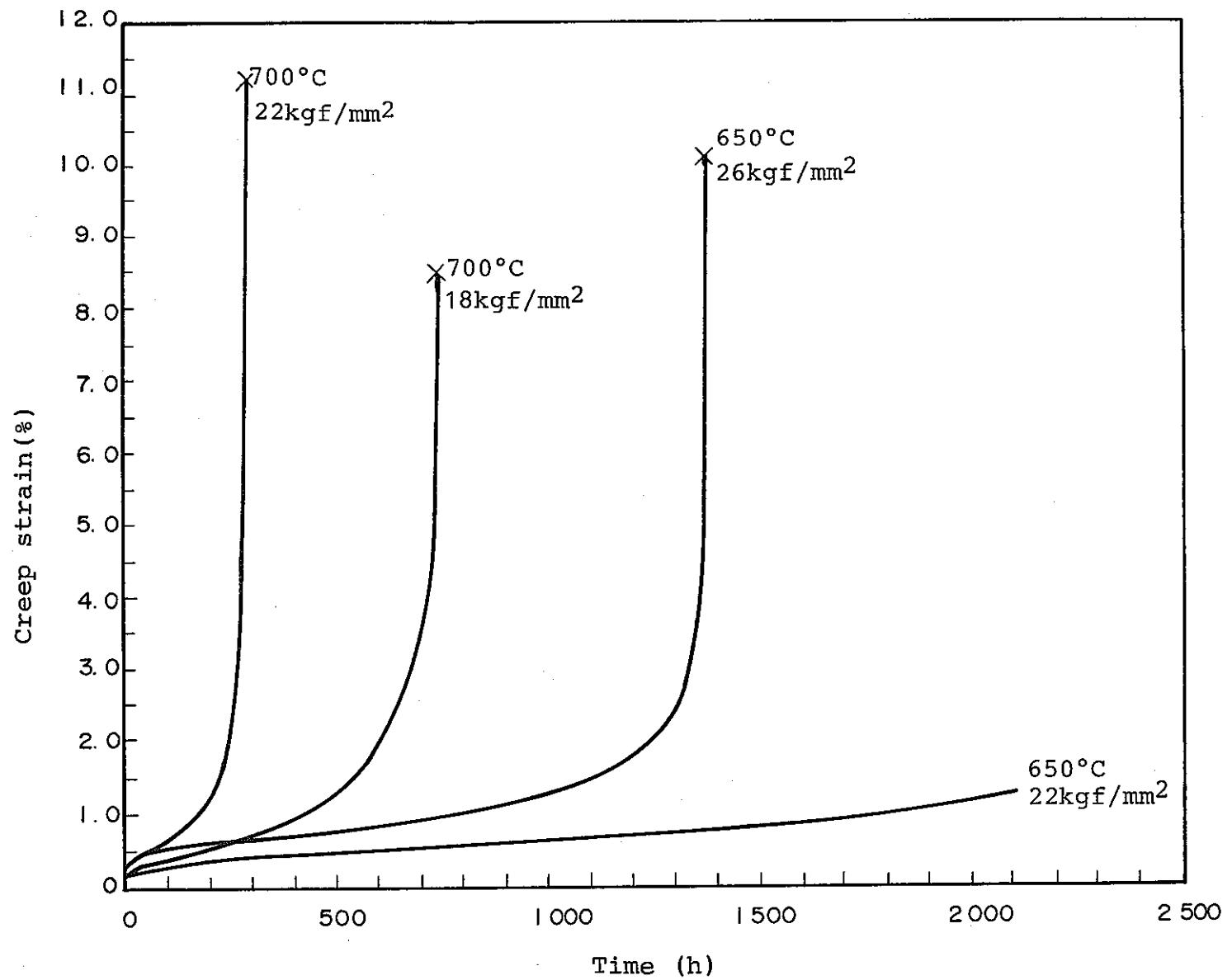


Fig. 25. Creep curves of 55MK under uniaxial tension at 650 and 700°C.

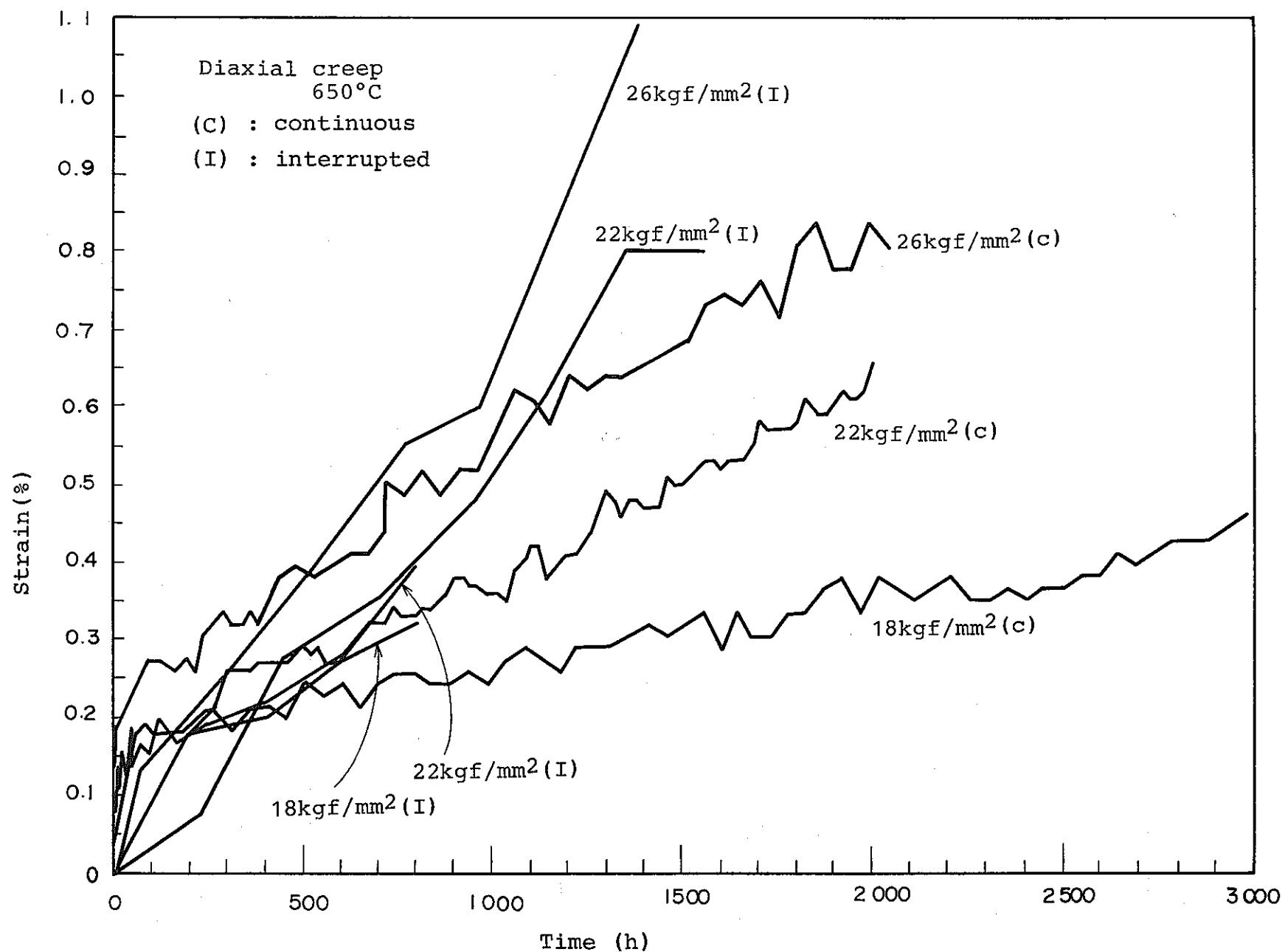


Fig. 26. Creep curves of 55MK under internal pressure at 650°C.

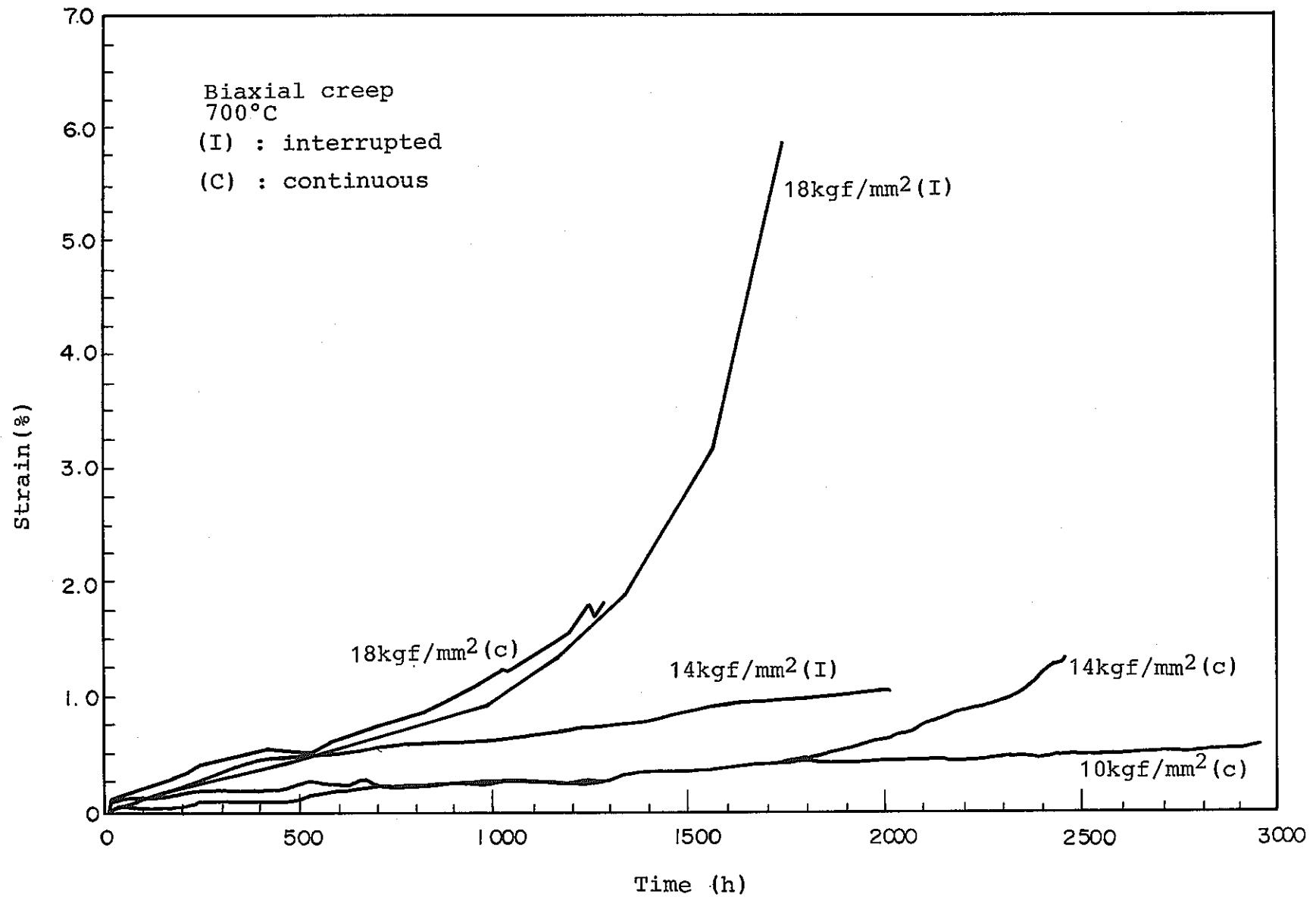


Fig. 27. Creep curves of 55MK under internal pressure
at 700°C

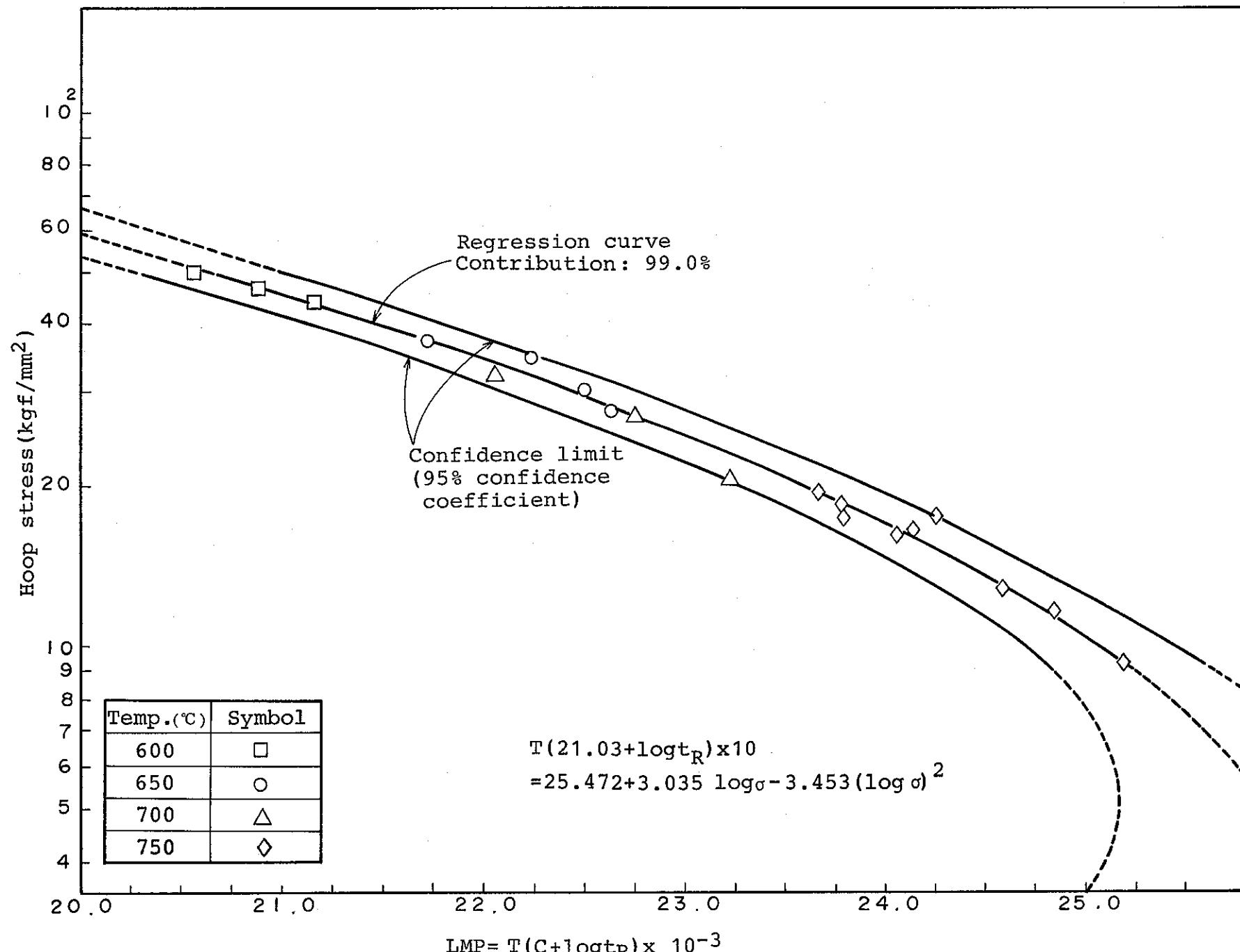


Fig. 28. Regression curve and confidence interval on rupture data under internal pressure for 57MS1.

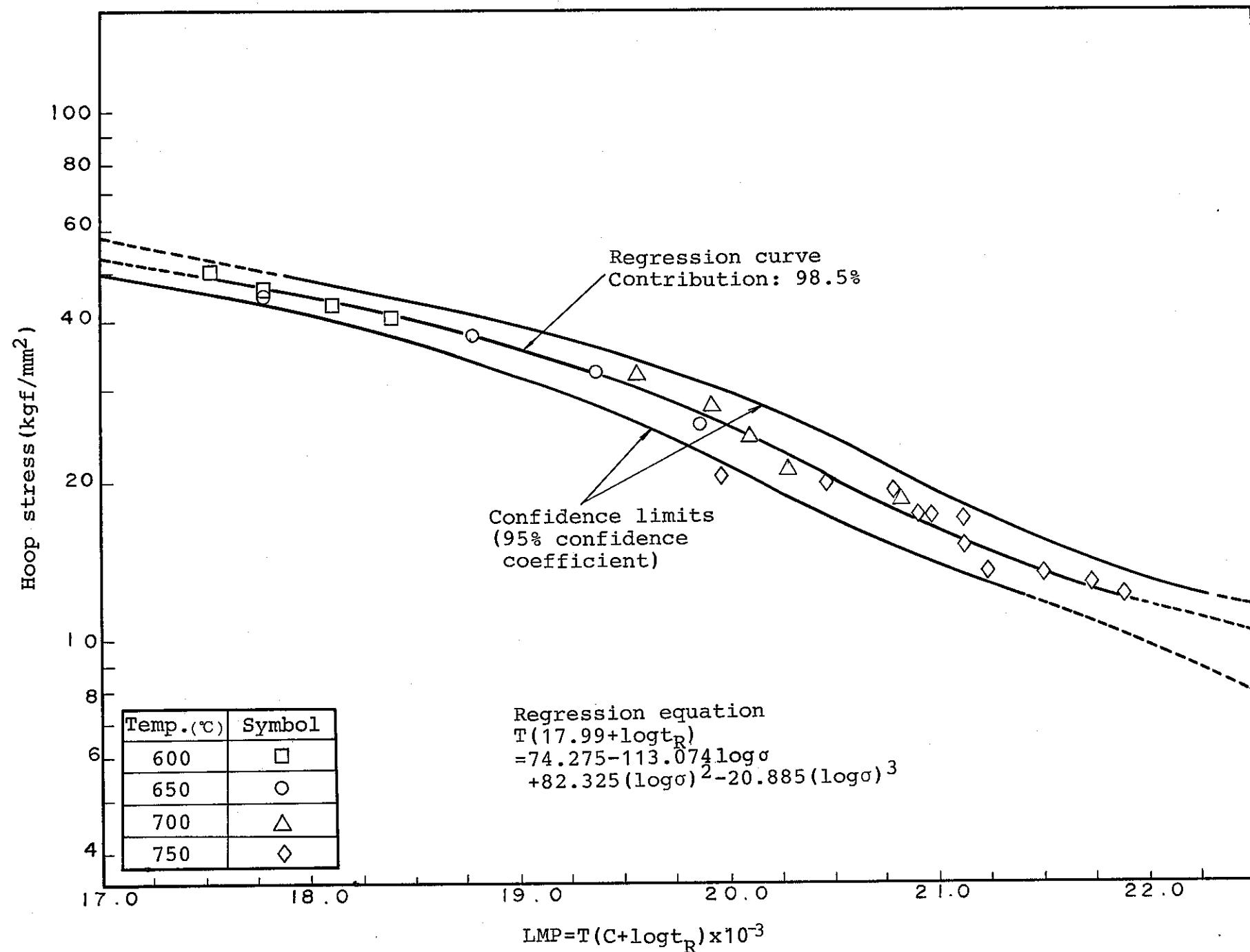


Fig. 29. Regression curve and confidence interval on rupture data under internal pressure for 57MK2.

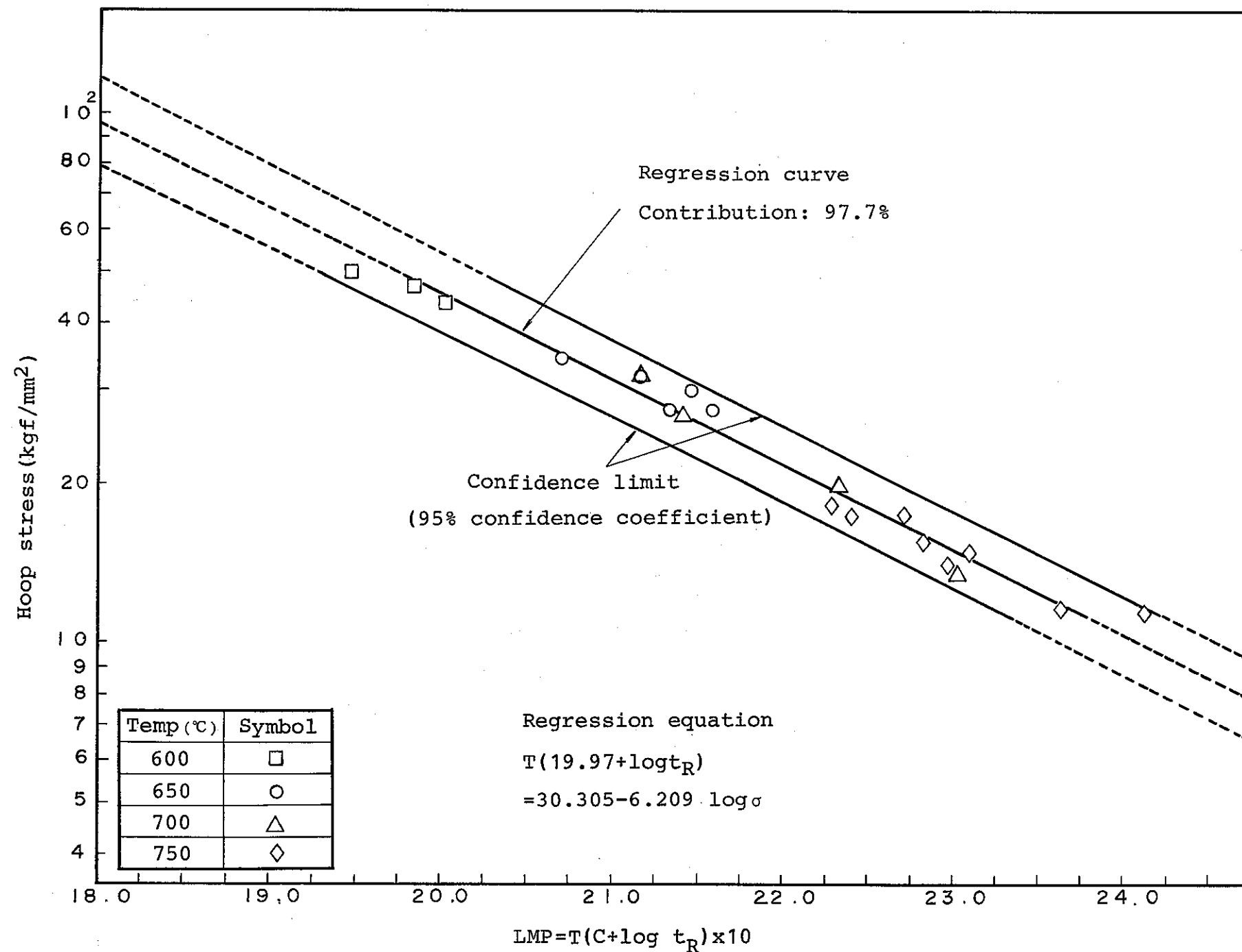


Fig. 30. Regression curve and confidence interval on rupture data under internal pressure for 57MS3.

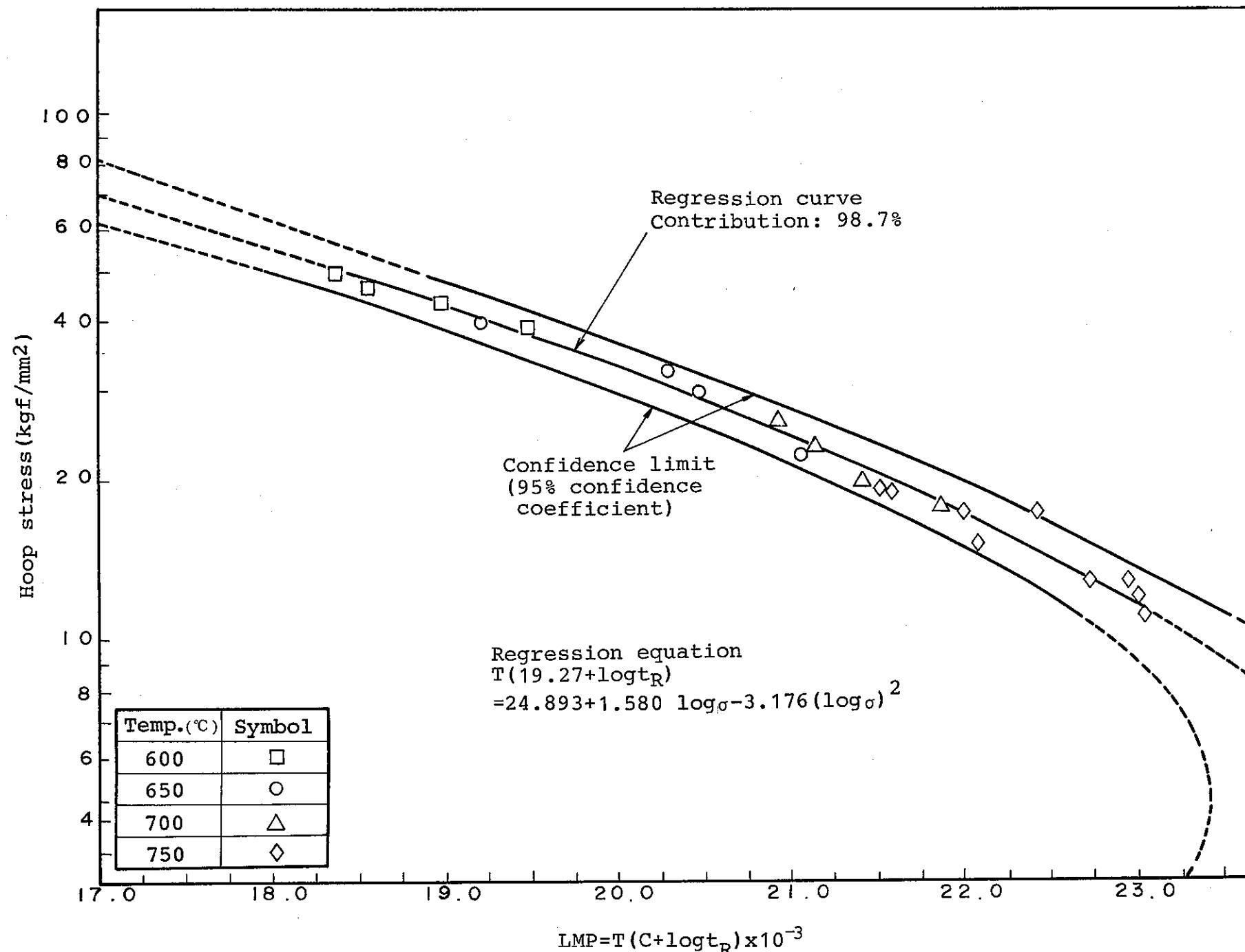


Fig.31. Regression curve and confidence interval on rupture data under internal pressure for 57MK4.

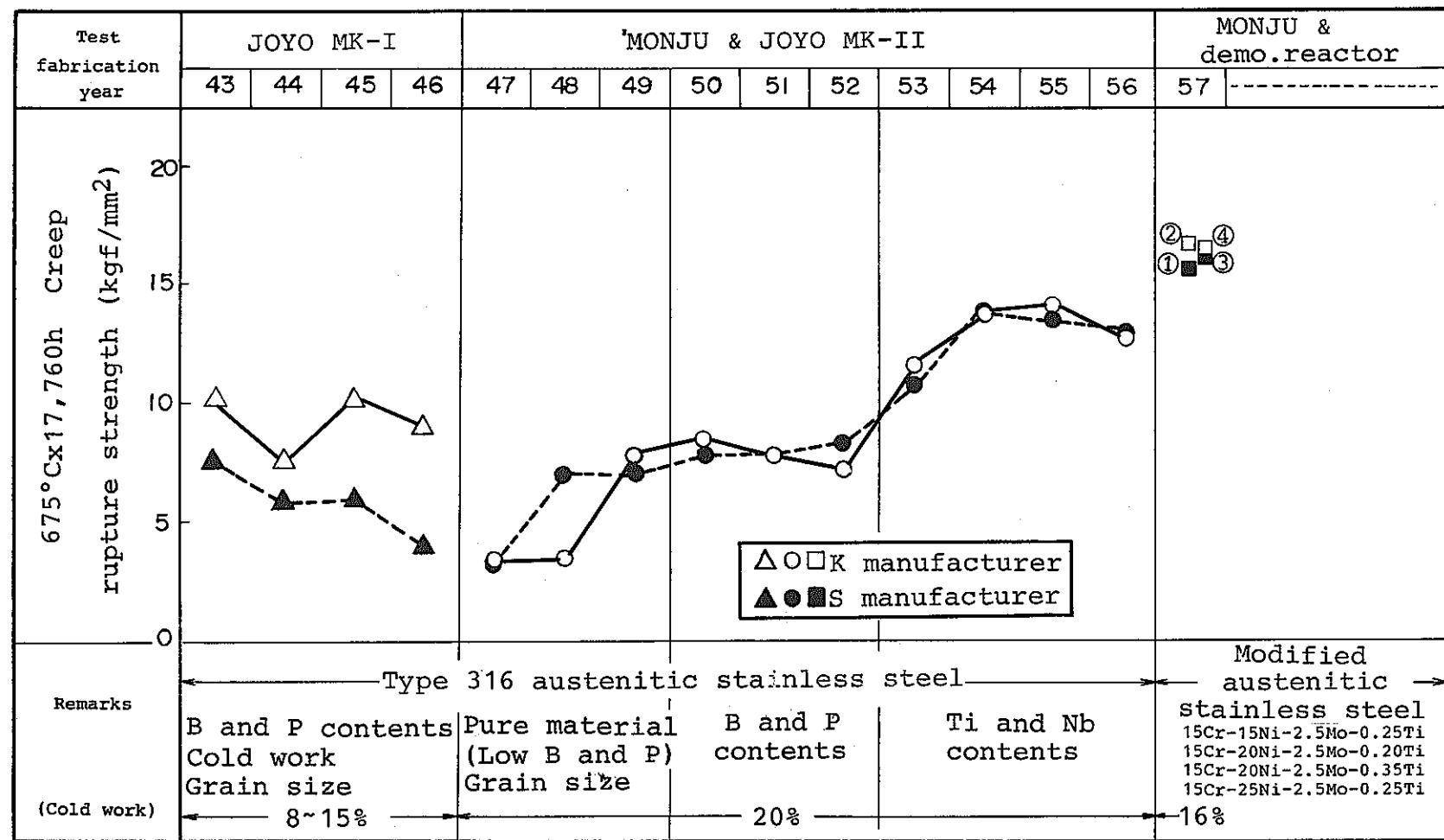


Fig.32. Progress of creep rupture strength for type 316 SS and modified austenitic SS fuel cladding tubes
 ① 57MS1, ② 57MK2, ③ 57MS3, ④ 57MK4.

8. 付 錄

8.1 55 MK, 55 MS のクリープひずみ式の検討

第11次、12次及び13次クリープ試験で55M K, 55M Sの単軸及び内圧クリープ試験を行ってきて、かなりの数のひずみデータが得られたので、今回これらのデータをまとめることで、2次クリープまでについてクリープひずみ式の作成を試みた。

クリープひずみは「もんじゅ」燃料設計材料強度基準において検討している方法に従って、Garofalo の式

ただし

ε_0 : クリープひずみ(%)

ϵ_T : 限界 1 次クリープひずみ(%)

r : 定数 (h^{-1})

t : 時間 (h)

$\dot{\epsilon}_s$: 最小クリープひずみ速度(%/h)

の形式で表現することとし、 ε_T 、 r 及び $\dot{\varepsilon}_S$ をクリープ破断時間の関数で表すことを試みた。

クリープ曲線と ϵ_T 及び $\dot{\epsilon}_S$ との対応関係を模式的に Fig. 33 に示す。クリープひずみ式の作成手順は以下の通りである。

- (1) 単軸及び内圧クリープデータの選別
 - (2) 限界1次クリープひずみ (ϵ_T) 及び最小クリープひずみ速度 ($\dot{\epsilon}_s$) の算出
 - (3) 限界1次クリープひずみの定式化 (ϵ_T と t_R との関係)
 - (4) 最小クリープひずみ速度の定式化 ($\dot{\epsilon}_s$ と t_R との関係)
 - (5) クリープひずみ式の作成 (r と t_R との関係, Garofalo の式)
 - (6) 推定値 (Garofalo の式) と実測値との比較

- ### (1) 単軸及び内圧クリープデータの選別

Table 19 及び20に今回の検討に使用したクリープデータの総括表を示す。データ選別に際して、単軸クリープデータについては全データを採用した。内圧クリープデータについては、試験条件の対応する単軸クリープデータと明らかに異なるデータバンドになるものを除外した。

- (2) 限界1次クリープひずみ(ε_T)及び最小クリープひずみ速度($\dot{\varepsilon}_S$)の算出

下の①または②の条件にあてはまるクリープ曲線を除いたクリープ曲線について、visual fitにより ϵ_T 及び $\dot{\epsilon}_S$ の値を算出した。

- ① 試験時間が推定破断時間の 1 割に満たない。
 - ② 時間一ひずみデータの数が少なく、かつばらつきが大きくて、滑らかな時間一ひずみ曲線近似が困難である。

Table 19 及び20の ϵ_T 及び $\dot{\epsilon}_S$ 欄に算出した値を示す。また、上の①または②の条件に該当した試料を同欄に X で示す。

なお、今回 ε_T と $\dot{\varepsilon}_S$ を同時に算出したため、 $\dot{\varepsilon}_S$ の値は各試験機関で算出した値、及び第11、12次クリープ試験報告書に掲載されている値と若干異なるものもある。

- ### (3) 限界1次クリープひずみの定式化(ε_T と t_R との関係)

算出した限界1次クリープひずみとクリープ破断時間（破断した試料について、 t_R ）または推定クリープ破断時間（未破断の試料について、 $t_{R\hat{e}}$ ）との関係を Fig. 34 に示す。推定クリープ破断時間は、55MK の式

$$\text{LMP} = T (18.36 + \log t_R) \times 10^{-3}$$

$$= 46.868 - 57.265 \log \sigma + 45.135 (\log \sigma)^2 - 12.675 (\log \sigma)^3 \dots \dots \dots (2)$$

ただし

T : 温度 (K)

t_R : 推定クリープ破断時間 (h)

σ : 殻力 (kgf/mm²)

より算出した。なお、55M S の推定クリープ破断時間は55M K のものと殆んど差がない¹²⁾ので、55M S のクリープひずみ式にも式(2)を使用した。

Fig. 34 で明らかなように ε_T と t_R との間に相関関係は認められなかつたので、クリープひずみ式で用いる ε_T は、 ε_T の平均値

とした。

- #### (4) 最小クリープひずみ速度の定式化 ($\dot{\epsilon}_s$ と t_R との関係)

今回算出した \dot{e}_S と t_R の関係を Fig. 35 に示す。Fig. 35 のデータより $\dot{e}_S \cdot t_R$ の平均値を求めて、 \dot{e}_S と t_R の関係

を得た。

(5) クリープひずみ式の作成(r と t_R との関係, Garofalo の式)

式(1)を変形すると

となる。それぞれのクリープ曲線に対して式(5)の右辺の値と時間(t)との関係を求めた。その結果の一例をFig. 36に示すが、両者の間にはよい直線関係が認められた。このことから右辺の値を $\exp(-rt)$ で近似し、各クリープ曲線に対して r を算出した。

次に r と t_R との関係を調べた。その結果を Fig. 37 に示す。これによると両対数関係で、 r と t_R との間には一定の関係が認められたが、 r の次元を考え、次式であてはめた。

回帰した結果

となつた。

上記の式(2)～(7)を式(1)に代入するとクリープひずみ式が得られる。

(6) 推定値と実測値との比較

以上により求めたクリープの推定値と実測値との比較を温度及び応力別に Fig. 38~Fig. 54 に示す。

単軸クリープの測定値 (Fig. 38~Fig. 54において①で示す曲線), 連続測定法による内圧クリープの測定値 (同図において②で示す曲線のうち, PNC-TOKAIおよびPNC-OARAIのもの) 及び断続測定法による内圧クリープ測定値 (同図において③で示す曲線のうち, NRIM, KOBE, SUMI, HITACHIのもの)と推定値とを個々に比較した。

推定値は単軸クリープ測定値及び両測定方法による内圧クリープ測定値とは 650°C で 7 kgf/mm^2 (Fig. 43), 700°C で 5 kgf/mm^2 (Fig. 49) 及び 750°C で 5 kgf/mm^2 (Fig. 54) という各温度とも低応力側において一致が悪かった。また推定値は単軸クリープ及び連続測定法による内圧クリープ測定値とは、各温度で上記以外の応力において良い一致を示した。しかし、断続測定法による内圧クリープ測定値とは、 650°C で 26 kgf/mm^2 (Fig. 38) 及び 700°C で 18 kgf/mm^2 (Fig. 45), 14 kgf/mm^2 (Fig. 46) という高応力側で良い一致を示したが、中応力及び低応力側では一致しなかった。中・低応力で、断続測定法による内圧クリープ測定値と推定値との一致が悪いという事実は、この応

力における断続測定法の内圧クリープ試験の困難さ、または限界を示唆している。

上記のクリープひずみ式を「もんじゅ」高燃焼度炉心のピン使用条件 $\sigma = 7.59 \text{ kgf/mm}^2$, $t = 17760 \text{ h}$ に適用すると $\epsilon_c = 0.26\%$ となった。これは「もんじゅ」炉心燃料設計の参考値である熱クリープひずみ制限値 $\epsilon_h^c = 0.5\%$ よりも小さかった。

今後の課題としては

1. r と t_R との関係式(6)及び(7)が実際のデータとあまりよく合っていない (Fig. 37 参照) ことに対する検討
 2. 3次クリープ開始点及び3次クリープひずみの定式化を行うこと
 3. 第14次クリープ試験データを加えて評価し、より信頼性の高いクリープひずみ式を作成すること
- が考えられる。

結論

1. 以下に示す2次クリープまでのクリープひずみ式を作成した。

$$\epsilon_c = \epsilon_T \{1 - \exp(-rt)\} + \epsilon_{st}$$

ただし

ϵ_c : クリープひずみ (%)

ϵ_T : 限界1次クリープひずみ (%)

$$\epsilon_T = 0.197$$

r : 定数 (h^{-1})

$$r = 206 \cdot t_R^{-1}$$

$\dot{\epsilon}_s$: 最小クリープひずみ速度 (%/h)

$$\dot{\epsilon}_s = 1.66 t_R^{-1}$$

t : 時間 (h)

なお

$$T(18.36 + \log t_R) \times 10^{-3} = 46.868 - 57.265 \log \sigma$$

$$+ 45.135(\log \sigma)^2 - 12.675(\log \sigma)^3$$

ここで

T : 温度 (K)

t_R : クリープ破断時間 (h)

σ : 応力 (kgf/mm²)

2. 得られたクリープひずみ式による推定値は 650 °C, 700 °C 及び 750 °C の各温度で,
低応力側を除いて測定値と一致した。

Table 19. Creep data summary for 55MK

No.	Test temp. (°C)	Test stress (kgf/mm ²)	Tested time ^{*1} (h)	Calculated rupture time (h)	Limiting 1st creep strain (ϵ_T) (%)	Minimum creep rate ($\dot{\epsilon}_S$) (%/h)	r	Method of creep test ^{*2}	Specimen No.	Institute	File No.
1	650	26	1375.2(r)	4200	0.491	5.46×10^{-4}	1.22×10^{-3}	U	K9381-5	KOBE	K701
2	650	26	1386 (d)	4200	0.171	4.36×10^{-4}	1.57×10^{-3}	B (I)	K9381-15	KOBE	K711
3	650	26	2041.9(d)	4200	0.255	2.87×10^{-4}	6.94×10^{-4}	B (C)	K9382-2	PNC-TOKAI	K720
4	650	22	2102 (d)	11000	0.306	3.21×10^{-4}	2.44×10^{-3}	U	K9381-1	KOBE	K702
5	650	22	1554 (d)	11000	0.145	2.88×10^{-4}	4.37×10^{-4}	B (I)	K9381-17	KOBE	K731
6	650	22	4312.5(r)	11000	0.207	1.52×10^{-4}	1.77×10^{-3}	B (C)	K9333-07	PNC-OARAI	K740
7	650	22	800 (d)	11000	X	X	1.51×10^{-3}	B (I)	K9381-14	SUMITOMO	K741
8	650	18	1995 (d)	27000	X	X	--	U	K9390-1	KOBE	K1
9	650	18	800 (d)	27000	X	X	1.90×10^{-3}	B (I)	K9381-16	SUMITOMO	K751
10	650	18	3605 (d)	27000	0.194	7.44×10^{-5}	7.09×10^{-4}	B (C)	K9382-4	PNC-TOKAI	K760
11	650	14	1995 (d)	74000	X	X	7.03×10^{-4}	U	K9390-16	KOBE	K2
12	650	14	2016.7(d)	74000	X	X	4.68×10^{-4}	B (C)	K9371-1	PNC-TOKAI	K55
13	650	14	2062 (d)	74000	X	X	1.01×10^{-3}	B (I)	K9369-7	KOBE	K91
14	650	10	2296 (d)	350000	X	X	2.88×10^{-4}	U	K9390-5	KOBE	K3
15	650	10	2000 (d)	350000	X	X	3.44×10^{-4}	B (C)	K9370-6	PNC-TOKAI	K54
16	650	10	2062 (d)	350000	X	X	--	B (I)	K9370-3	KOBE	K92
17	650	.7	2154 (d)	4100000	X	X	1.90×10^{-4}	U	K9390-13	KOBE	K4
18	700	22	289.7(r)	760	0.340	3.11×10^{-3}	0.0106	U	K9381-2	SUMITOMO	K703
19	700	18	743.6(r)	1800	0.257	1.45×10^{-3}	1.36×10^{-3}	U	K9381-4	SUMITOMO	K704
20	700	18	1738 (r)	1800	0.037	8.44×10^{-4}	1.73×10^{-3}	B (I)	K9382-1	NRIM	K771
21	700	18	1280 (r)	1800	0.183	7.30×10^{-4}	2.02×10^{-3}	B (C)	K9334-15	PNC-OARAI	K780
22	700	14	2011 (d)	4700	0.227	8.07×10^{-4}	6.14×10^{-4}	U	K9390-2	SUMITOMO	K5

^{*1} (r) : ruptured, (d) : discontinued^{*2} U : Uniaxial, B : Biaxial, (I) : Interrupted, (C) : Continuous

Table 19. Creep data summary for 55MK (continued)

No.	Test temp. (°C)	Test stress (kgf/mm ²)	Tested time ^{*1} (h)	Calculated rupture time (h)	Limiting 1st creep strain (ϵ_T) (%)	Minimum creep rate ($\dot{\epsilon}_S$) (%/h)	r	Method of creep test ^{*2}	Specimen No.	Institute	File No.
23	700	14	2460 (r)	4700	0.109	1.82×10^{-4}	0.0101	B (C)	K9333-15	PNC-OARAI	K 781
24	700	14	2009 (d)	"	0.264	3.85×10^{-4}	2.37×10^{-3}	B (I)	K9382-5	NRIM	K 791
25	700	10	2011 (d)	20000	0.361	1.29×10^{-4}	5.38×10^{-4}	U	K9390-6	SUMITOMO	K 6
26	700	10	1722 (d)	20000	X	X	—	B (C)	K9370-14	PNC-OARAI	K 74
27	700	10	2960 (d)	20000	0.184	1.29×10^{-4}	4.33×10^{-4}	B (C)	K9330-15	PNC-OARAI	K 782
28	700	7	2017 (d)	220000	X	X	1.42×10^{-3}	U	K9390-10	SUMITOMO	K 7
29	700	7	1899 (d)	220000	X	X	1.78×10^{-4}	B (C)	K9370-15	PNC-OARAI	K 77
30	700	7	2020 (d)	220000	X	X	3.50×10^{-3}	B (I)	K9369-4	NRIM	K 93
31	700	5	2011 (d)	7600000	X	X	4.56×10^{-4}	U	K9390-14	SUMITOMO	K 8
32	700	5	1947 (d)	7600000	X	X	2.89×10^{-4}	B (C)	K9371-15	PNC-OARAI	K 75
33	700	5	2000 (d)	7600000	X	X	—	B (I)	K9370-5	NRIM	K 94
34	750	18	70.7 (r)	160	0.187	1.51×10^{-2}	0.103	U	K9390-4	PNC-TOKAI	K 15
35	750	14	209.7 (r)	390	0.252	7.91×10^{-3}	0.0963	U	K9390-3	HITACHI	K 9
36	750	14	302.6 (r)	390	0.106	5.25×10^{-3}	0.0626	U	K9390-8	PNC-TOKAI	K 14
37	750	10	1056.4 (r)	1600	0.191	2.15×10^{-3}	7.82×10^{-3}	U	K9390-7	HITACHI	K 10
38	750	10	2545.5 (r)	1600	0.191	6.94×10^{-4}	4.13×10^{-3}	U	K9390-12	PNC-TOKAI	K 13
39	750	7	4296.2 (r)	15000	0.179	1.68×10^{-4}	8.42×10^{-4}	U	K9390-15	PNC-TOKAI	K 12
40	750	5	5106 (d)	450000	X	X	0.0015	U	K9390-18	PNC-TOKAI	K 11

*1 (r) : ruptured, (d) : discontinued

*2 U : Uniaxial, B : Biaxial, (I) : Interrupted, (C) : Continuous

Table 20. Creep data summary for 55MS.

No.	Test temp. (°C)	Test stress (kgf/mm ²)	Tested time ^{*1} (h)	Calculated rupture time (h)	Limited 1st creep strain(ϵ_T) (%)	Minimum creep rate($\dot{\epsilon}_S$) (%/h)	r	Method of creep test ^{*2}	Specimen No.	Institute	File No.
1	650	22	1400 (d)	9000	0.264	2.94×10^{-4}	1.16×10^{-3}	B (I)	S10494-2	SUMITOMO	S110
2	650	18	2016 (d)	21000	X	X	0.0288	U	S10495-13	KOBE	S5
3	650	18	2072 (d)	21000	X	X	—	B (I)	S10494-2	KOBE	S130
4	650	18	1839 (d)	21000	X	X	5.55×10^{-4}	B (C)	S10495-4	PNC-TOKAI	S161
5	650	14	2015 (d)	55000	X	X	1.33×10^{-3}	U	S10494-14	KOBE	S6
6	650	14	1600 (d)	55000	X	X	1.81×10^{-3}	B (I)	S10495-1	SUMITOMO	S120
7	650	14	2952 (d)	55000	X	X	6.73×10^{-4}	B (C)	S10495-6	PNC-TOKAI	S162
8	650	10	2015 (d)	240000	X	X	2.02×10^{-4}	U	S10494-12	KOBE	S7
9	650	10	2072 (d)	240000	X	X	—	B (I)	S10494-2	KOBE	S140
10	650	7	2041 (d)	2800000	X	X	1.41×10^{-4}	U	S10495-1	KOBE	S8
11	700	14	2063 (d)	4200	0.264	1.71×10^{-4}	3.59×10^{-4}	U	S10494-11	SUMITOMO	S1
12	700	14	2000 (d)	4200	0.144	2.74×10^{-4}	4.31×10^{-4}	B (C)	S10202-9	PNC-OARAI	S604
13	700	10	2057 (d)	18000	0.255	7.28×10^{-5}	2.06×10^{-4}	U	S10494-13	SUMITOMO	S2
14	700	10	2012 (d)	18000	X	X	—	B (I)	S10494-6	NRIM	S150
15	700	10	1980 (d)	18000	0.146	4.32×10^{-5}	6.01×10^{-4}	B (C)	S10205-7	PNC-OARAI	S603
16	700	7	2015 (d)	180000	X	X	2.08×10^{-4}	U	S10494-15	SUMITOMO	S3
17	700	7	2010 (d)	180000	X	X	2.88×10^{-3}	B (I)	S10495-5	NRIM	S160
18	700	7	1860 (d)	180000	X	X	3.75×10^{-4}	B (C)	S10292-8	PNC-OARAI	S602
19	700	5	2022 (d)	6000000	X	X	1.14×10^{-4}	U	S10495-10	SUMITOMO	S4
20	750	18	37.3(r)	180	0.136	3.52×10^{-2}	0.164	U	S10494-17	PNC-TOKAI	S11
21	750	14	241.4(r)	420	0.055	6.33×10^{-2}	0.0877	U	S10494-18	HITACHI	S9
22	750	14	136.9(r)	420	0.094	9.45×10^{-3}	0.102	U	S10494-19	PNC-TOKAI	S12

^{*1} (r) : ruptured, (d) : discontinued^{*2} U : Uniaxial, B : Biaxial, (I) : Interrupted, (C) : Continuous

Table 20. Creep data summary for 55MS (continued).

No.	Test temp. (°C)	Test stress (kgf/mm ²)	Tested time ^{*1} (h)	Calculated rupture time (h)	Limited 1st creep strain(ε_T) (%)	Minimum creep rate($\dot{\varepsilon}_S$) (%/h)	r	Method of creep test ^{*2}	Specimen No.	Institute	File No.
23	750	10	1124.2(r)	1600	0.036	2.25×10^{-3}	0.0944	U	S10494-16	HITACHI	S10
24	750	10	747.3(r)	1600	0.109	2.65×10^{-3}	2.74×10^{-3}	U	S10494-20	PNC-TOKAI	S13
25	750	7	3947.1(r)	15000	0.143	4.64×10^{-4}	2.77×10^{-3}	U	S10495-16	PNC-TOKAI	S14
26	750	5	3660 (d)	420000	X	X	7.41×10^{-4}	U	S10495-18	PNC-TOKAI	S15

*1 (r) : ruptured, (d) : discontinued

*2 U : Uniaxial, B : Biaxial, (I) : Interrupted, (C) : Continuous

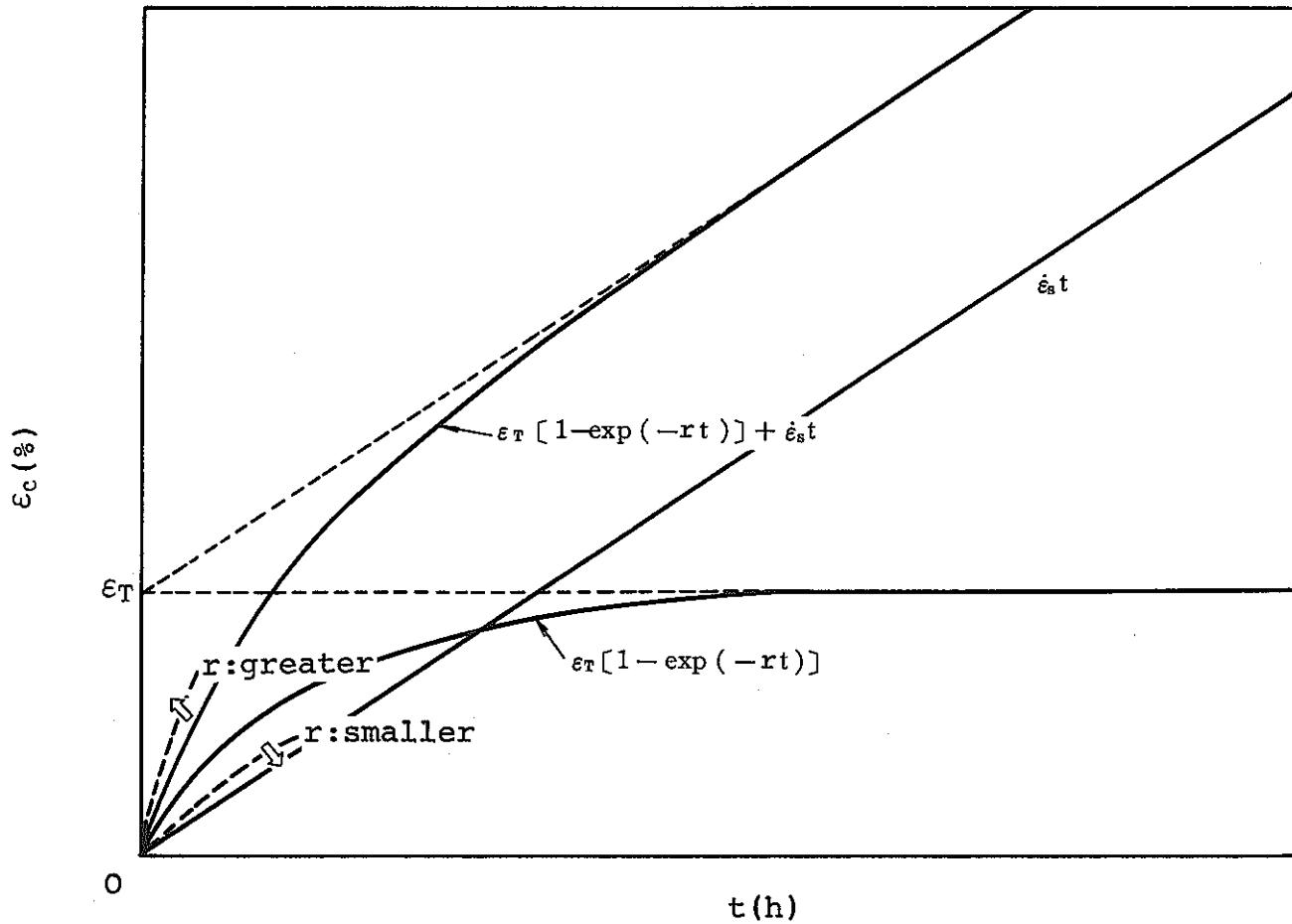


Fig.33. Schematic figure of creep curve equation.

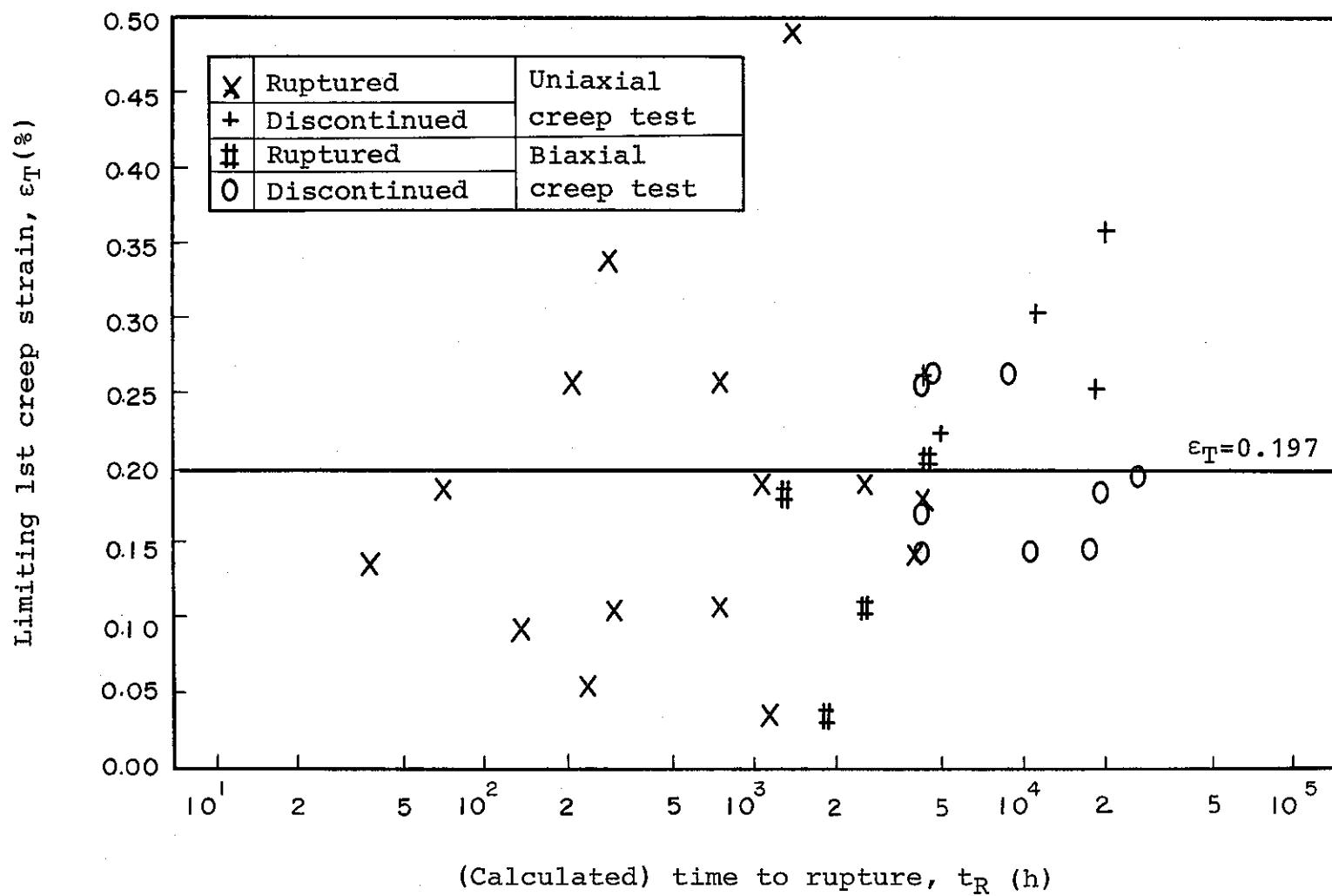


Fig. 34. Limiting 1st creep strain ϵ_T as a function of (calculated) time to rupture t_R .

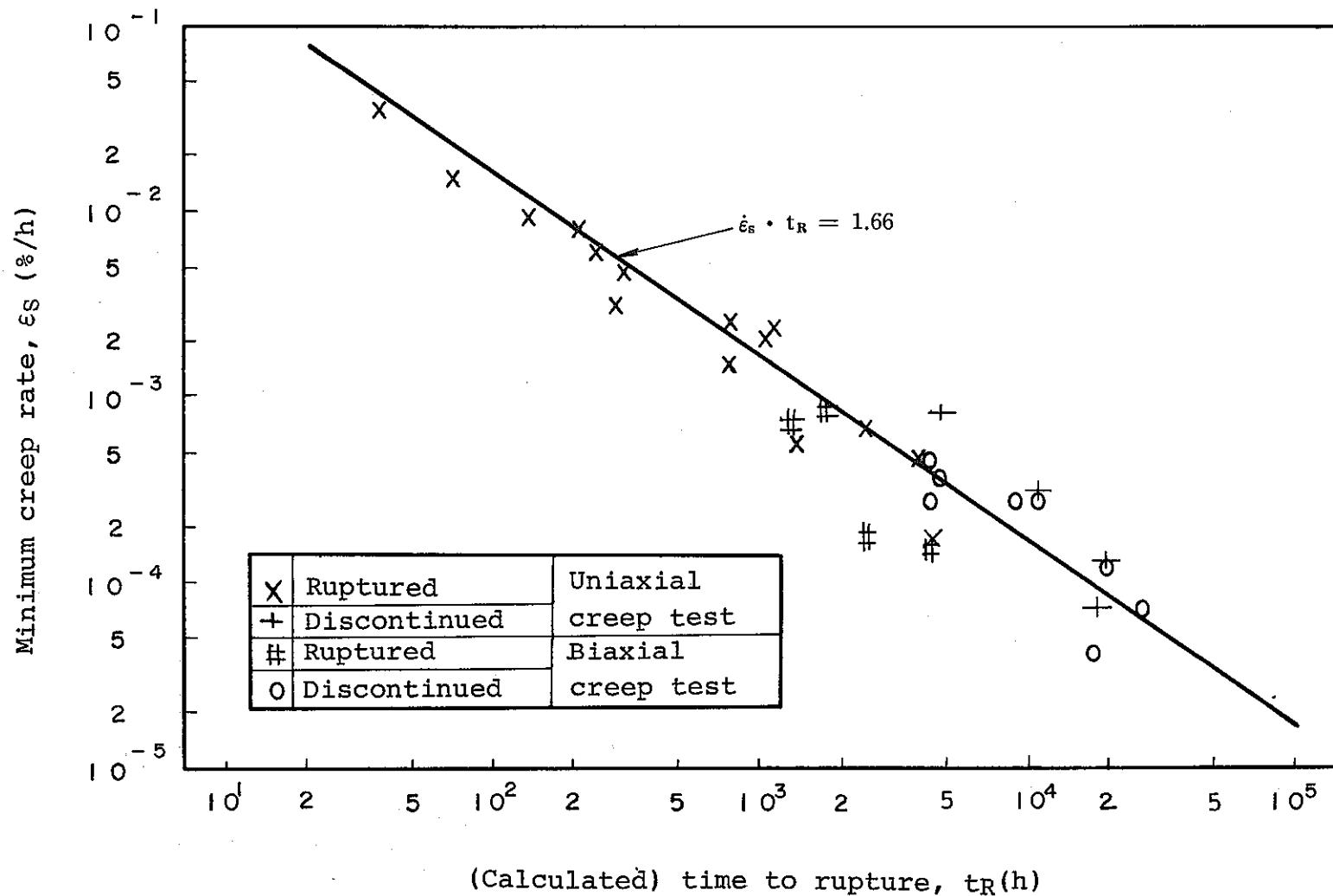


Fig. 35. Minimum creep rate $\dot{\epsilon}_s$ as a function of (calculated) time to rupture t_R .

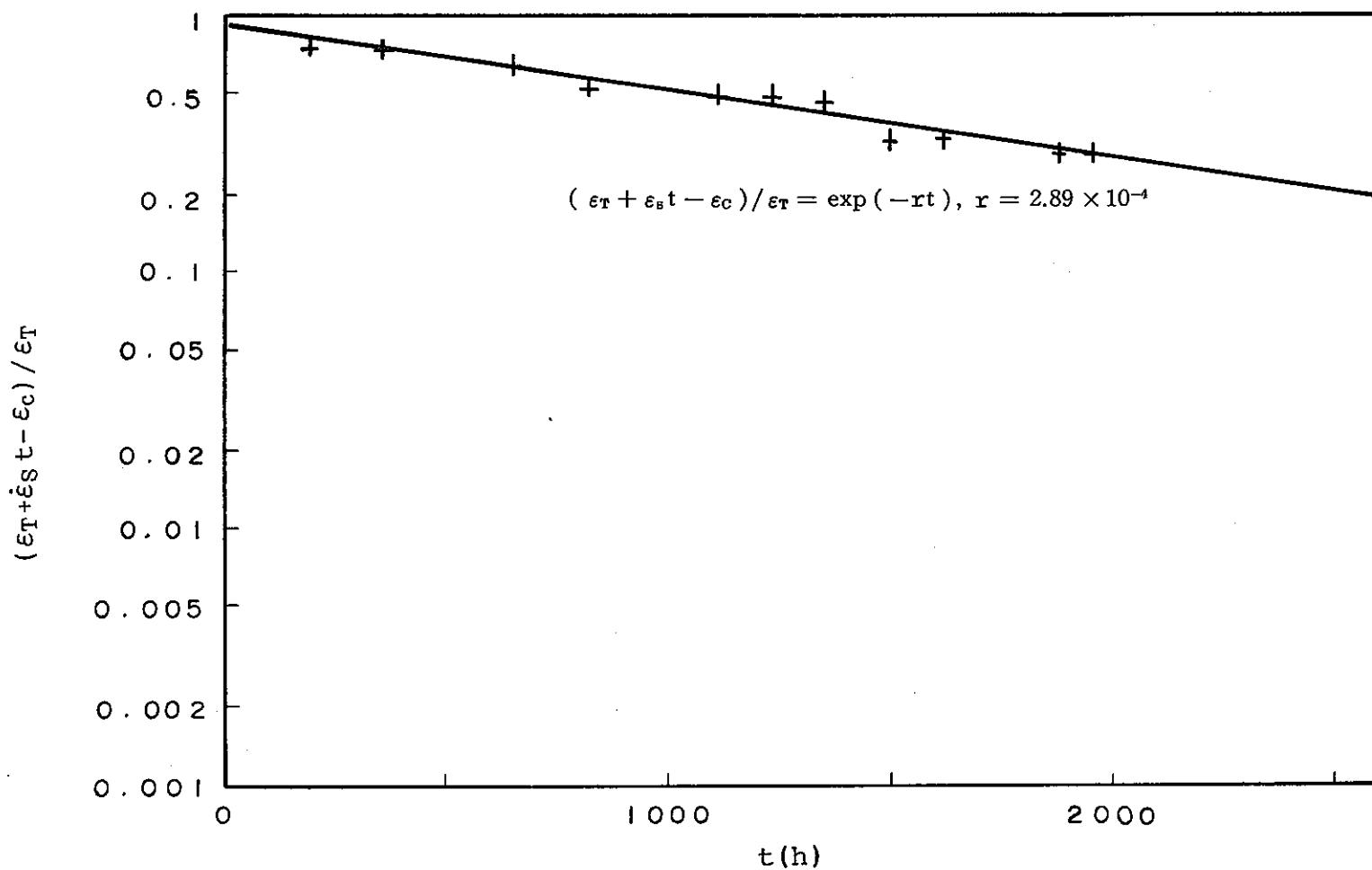


Fig.36. An example of relation between
 $(\epsilon_T + \dot{\epsilon}_s t - \epsilon_c) / \epsilon_T$ and t . (55MK, 700°C, 5kgf/mm²)

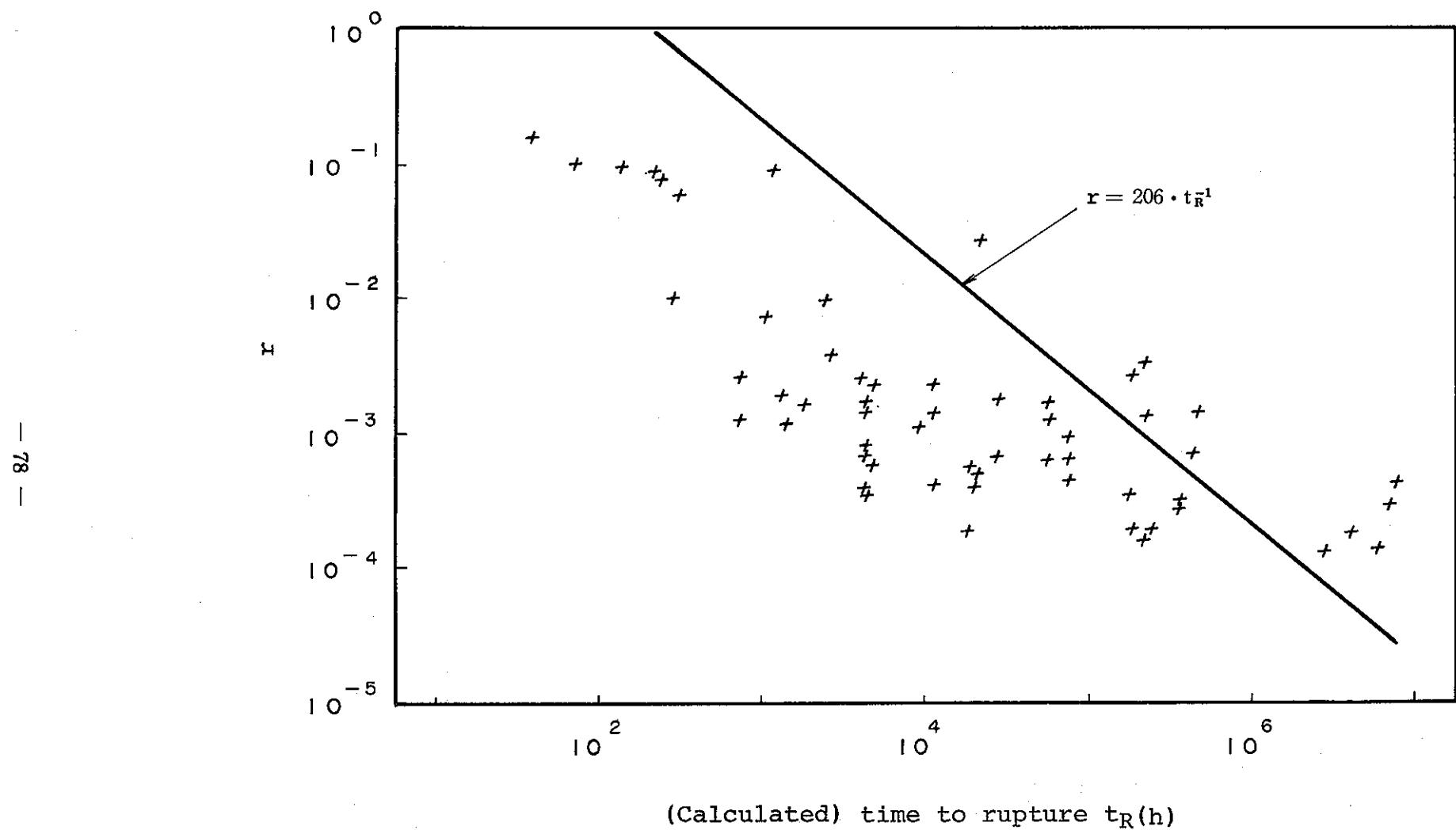


Fig.37. r as a function of (calculated) time to rupture t_R .

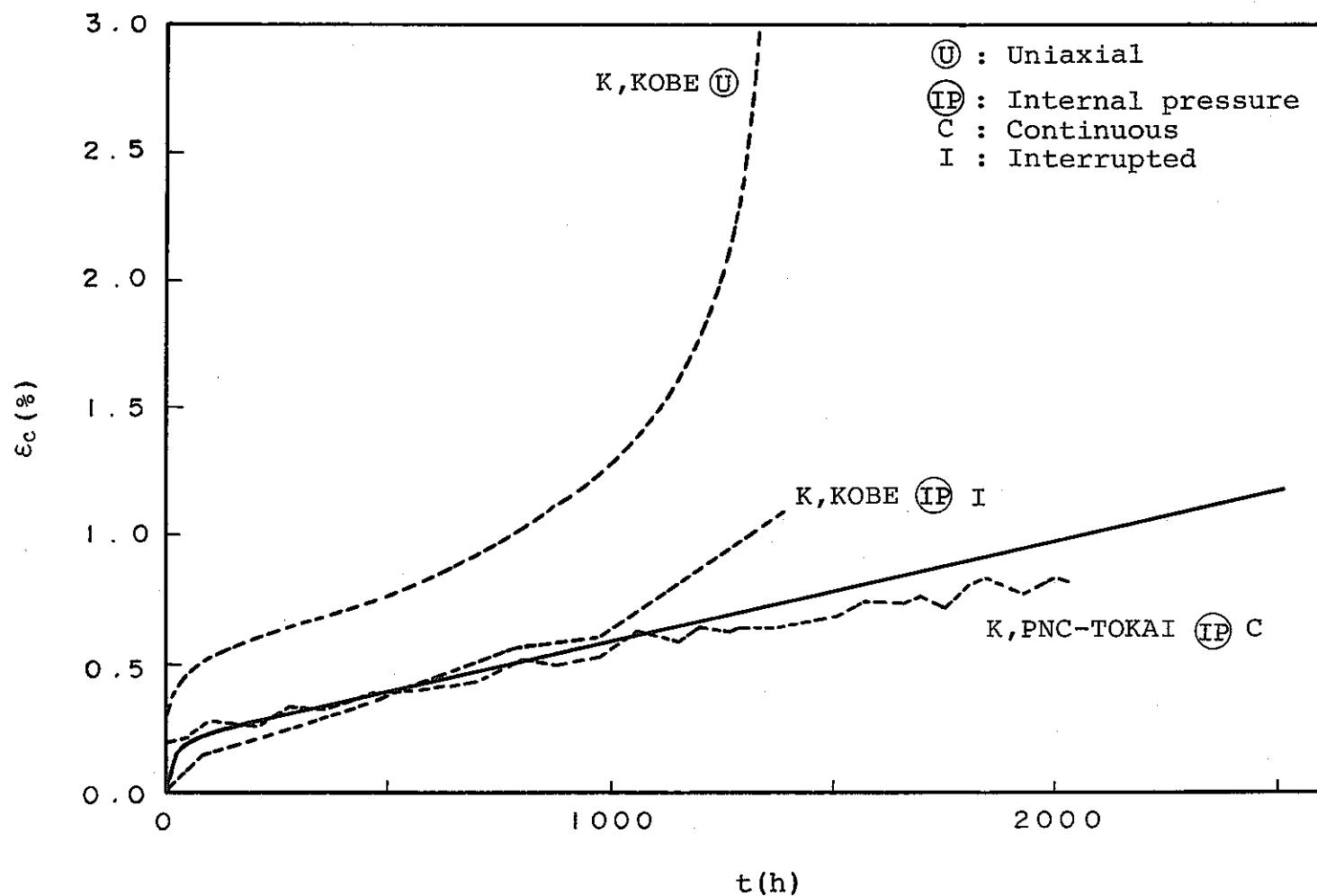


Fig.38. Comparison between measured creep curve and calculated one.
Temp.: 650°C, Stress: 26kgf/mm²,
(--- measured creep curve, — calculated creep curve)

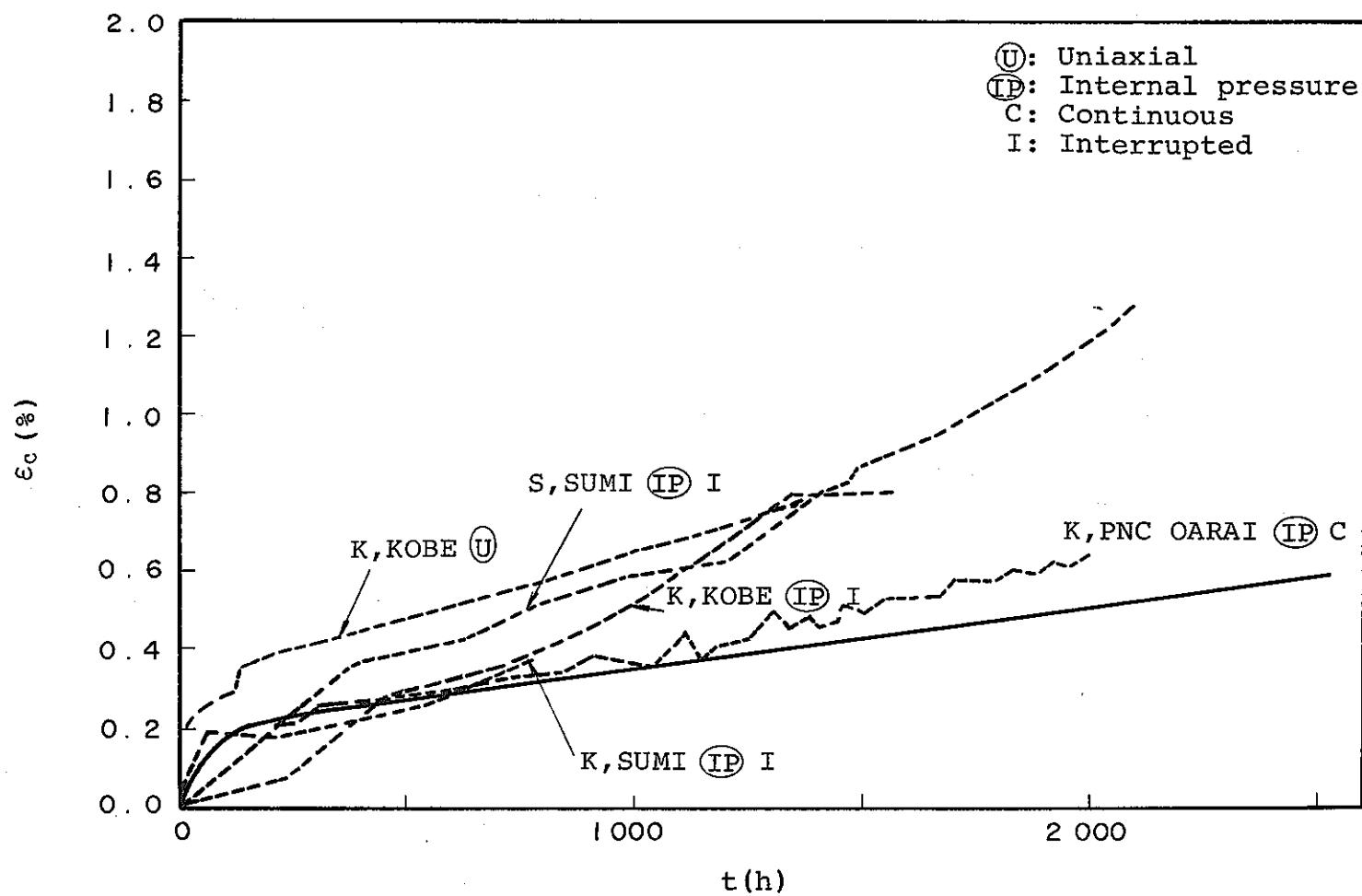


Fig.39. Comparison between measured creep curve and calculated one.
Temp.: 650°C, Stress: 22kgf/mm².
(--- measured creep curve, —— calculated creep curve)

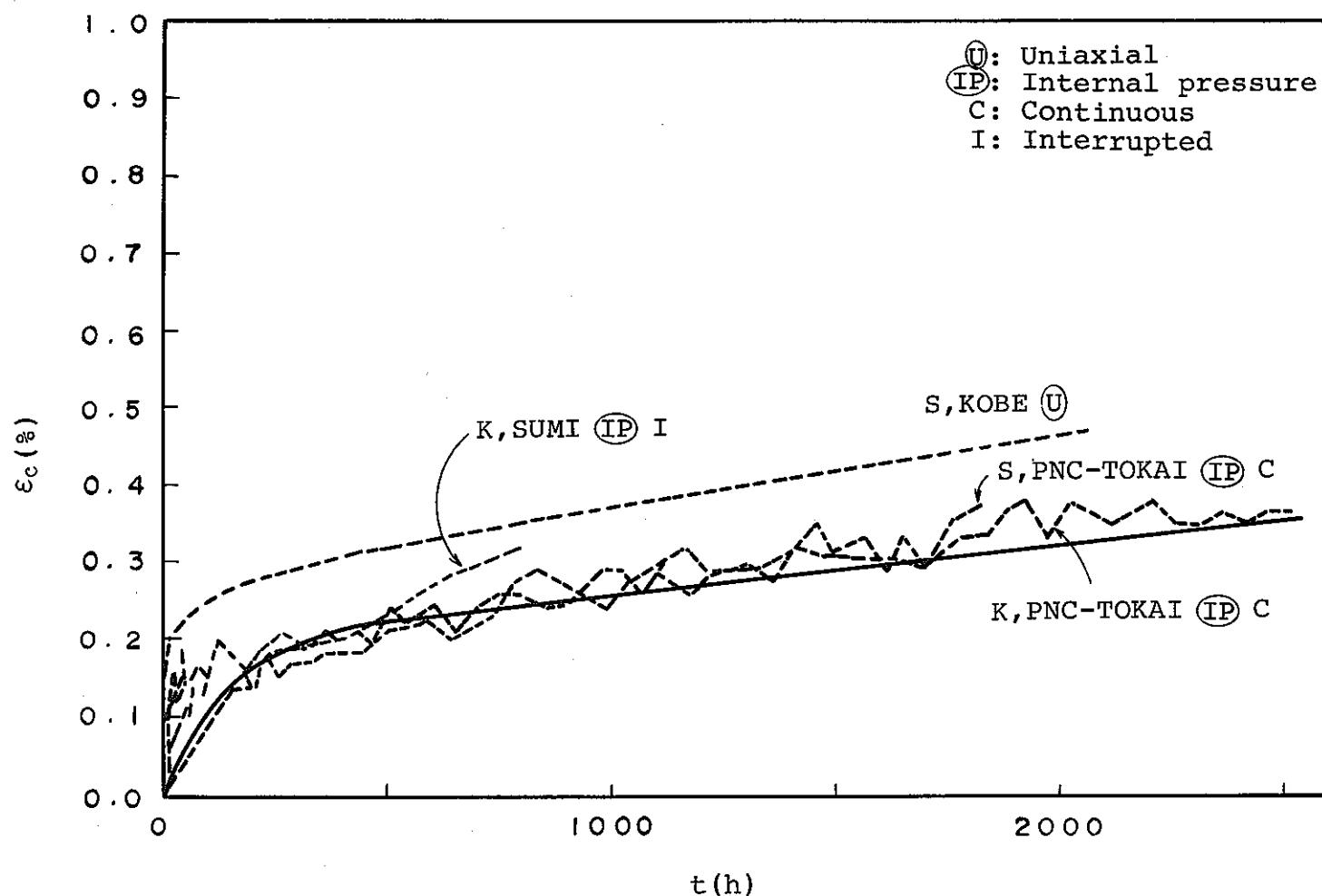


Fig.40. Comparison between measured creep curve and calculated one. Temp.: 650°C, Stress: 18kgf/mm².
(--measured creep curve, calculated creep curve)

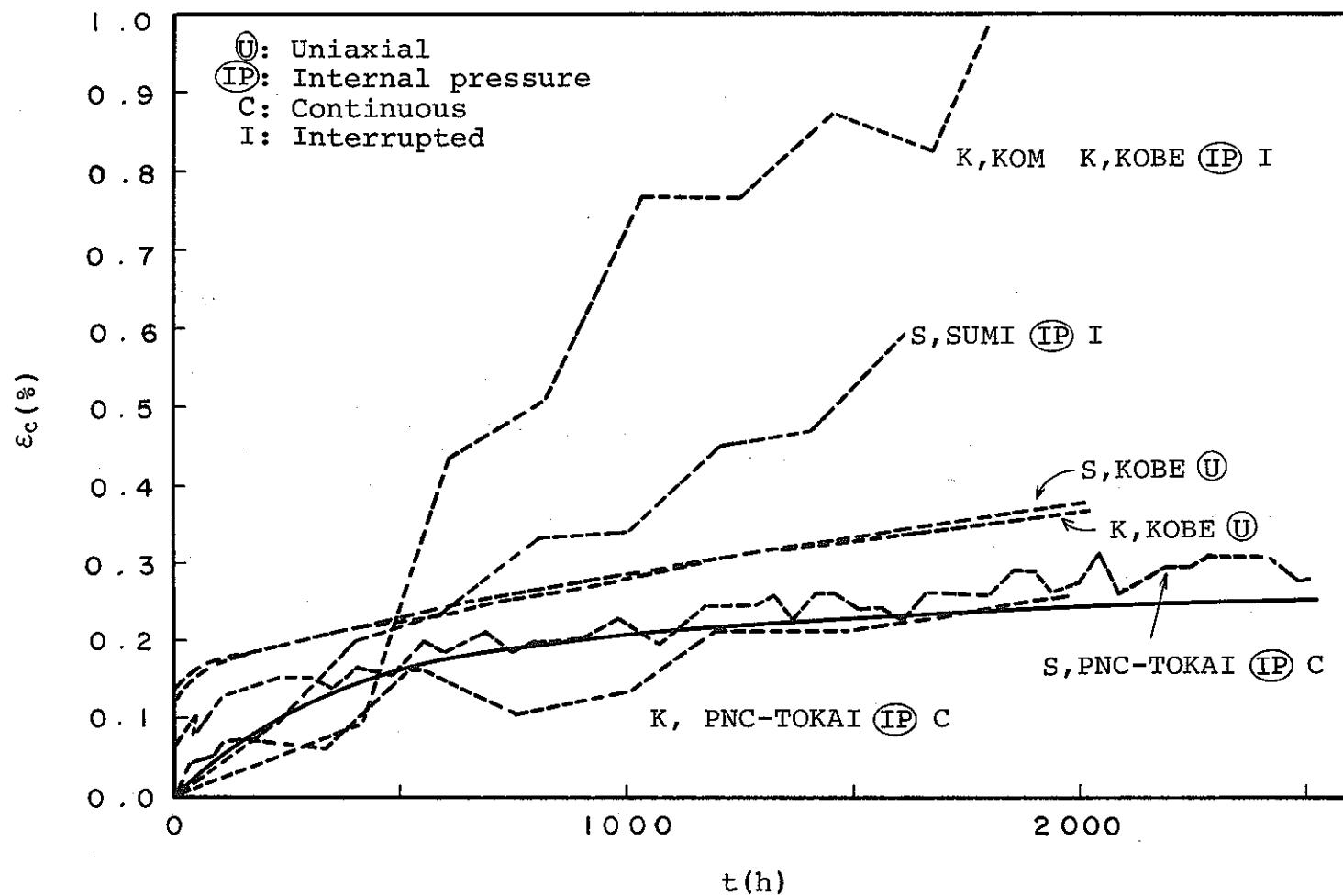


Fig.41. Comparison between measured creep curve and calculated one.
Temp.: 650°C, Stress: 14kgf/mm².
(--- measured creep curve, — calculated creep curve)

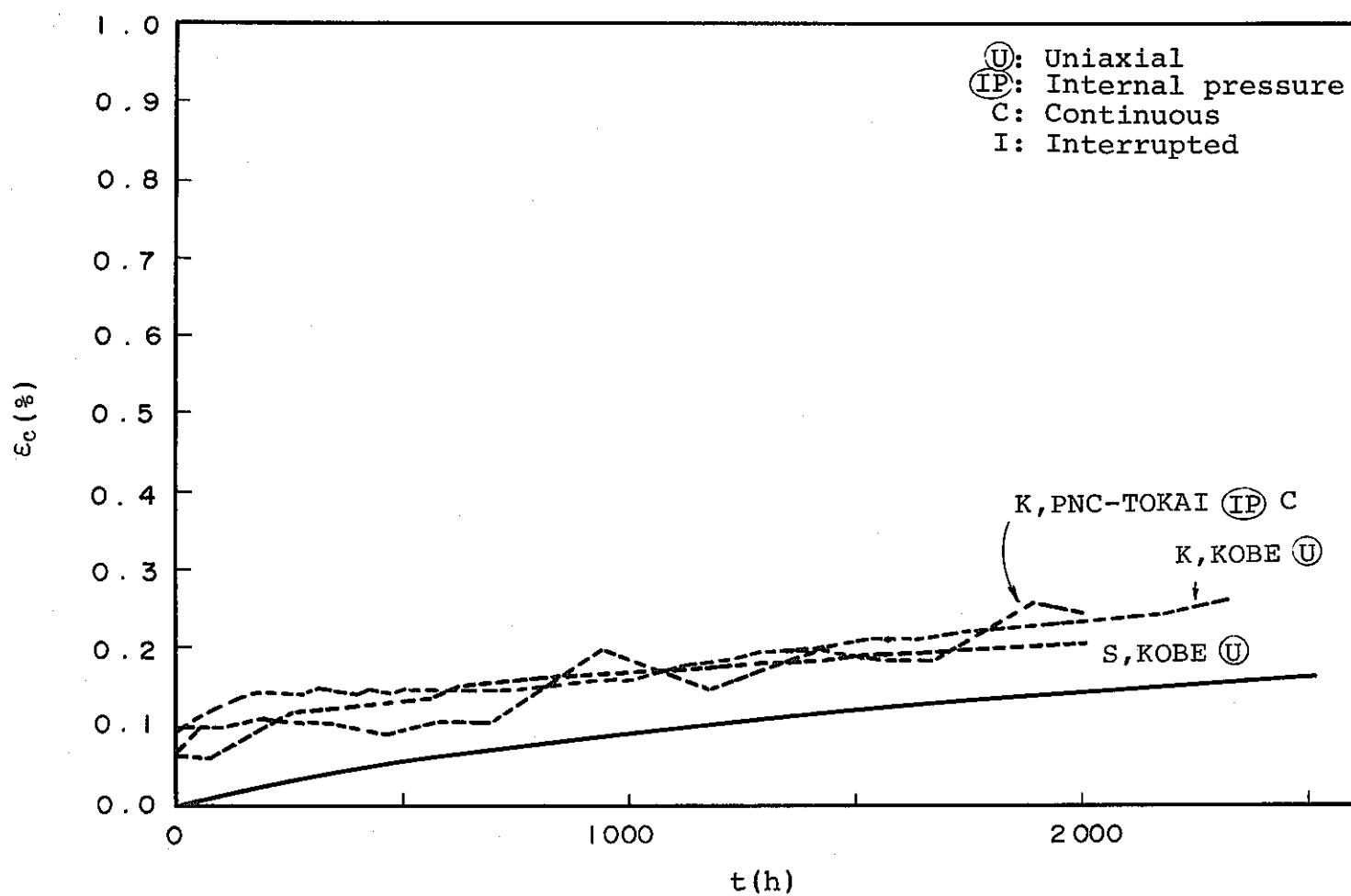


Fig.42. Comparison between measured creep curve and calculated one. Temp.: 650°C Stress: 10kgf/mm².
(- - - measured creep curve, — calculated creep curve)

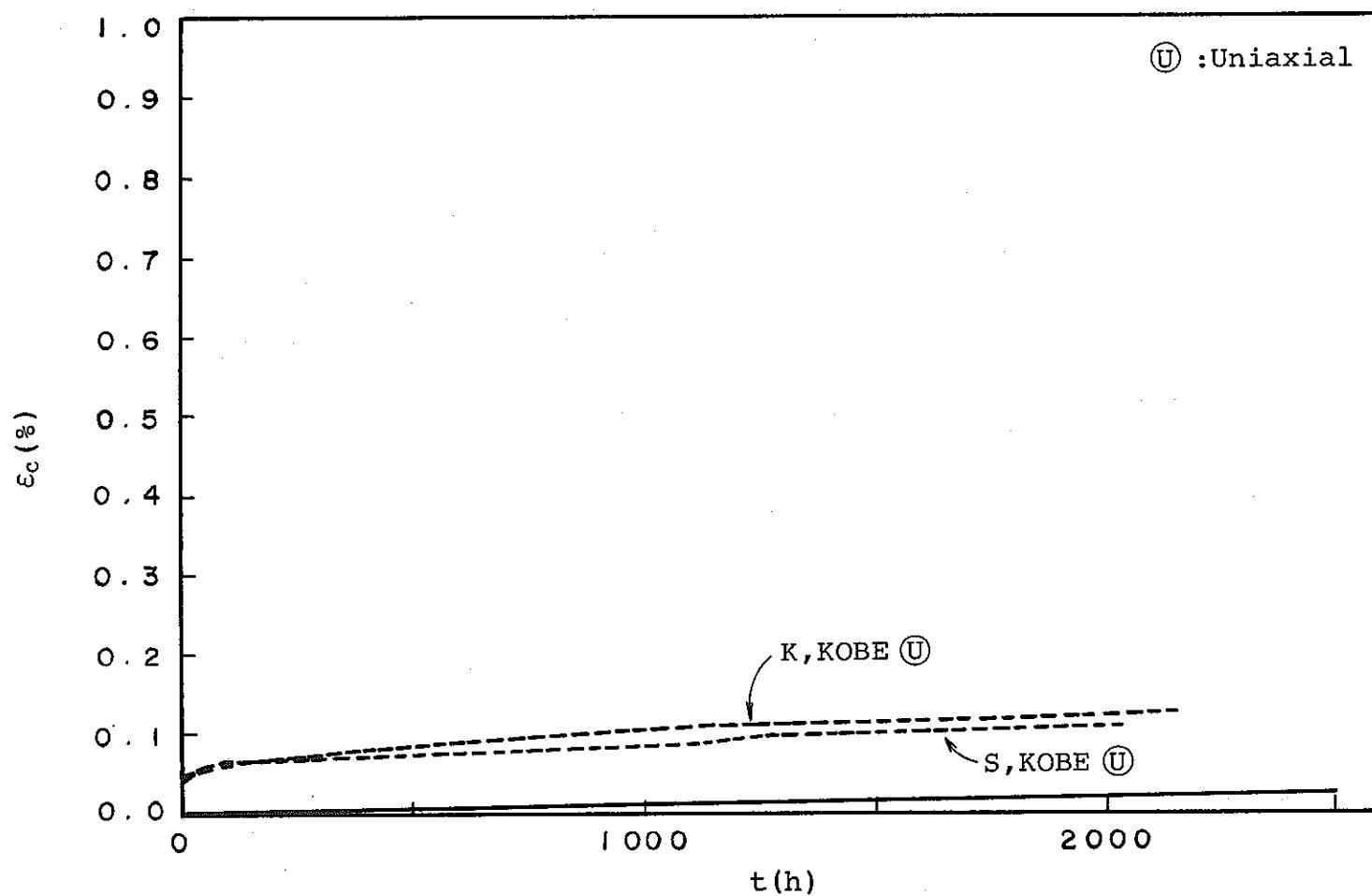


Fig.43. Comparison between measured creep curve and calculated one. Temp.: 650°C Stress: 7kgf/mm².
(- - - measured creep curve, — calculated creep curve)

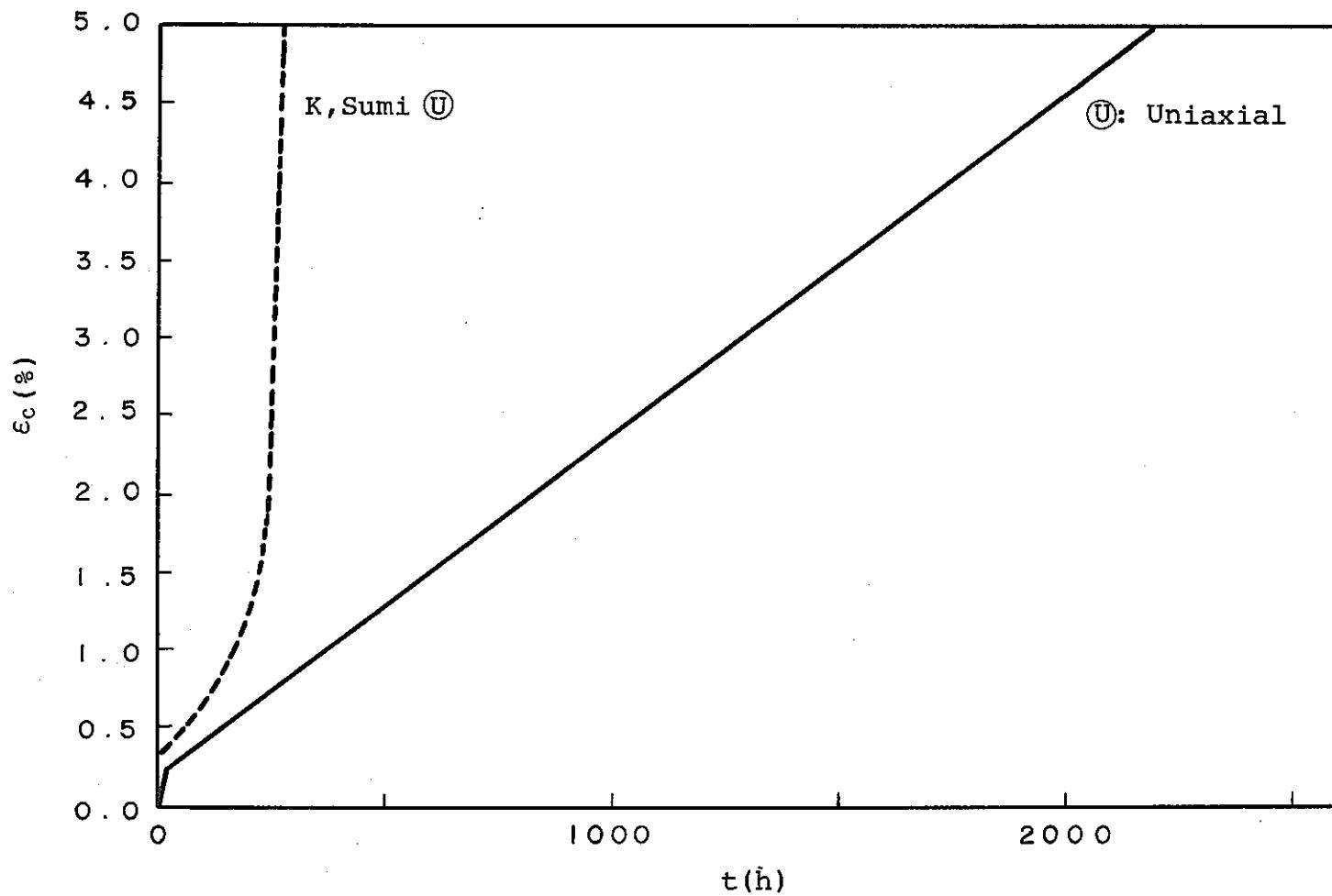


Fig.44. Comparison between measured creep curve and calculated one. Temp.: 700°C Stress: 22kgf/mm².
(- - - measured creep curve, — calculated creep curve)

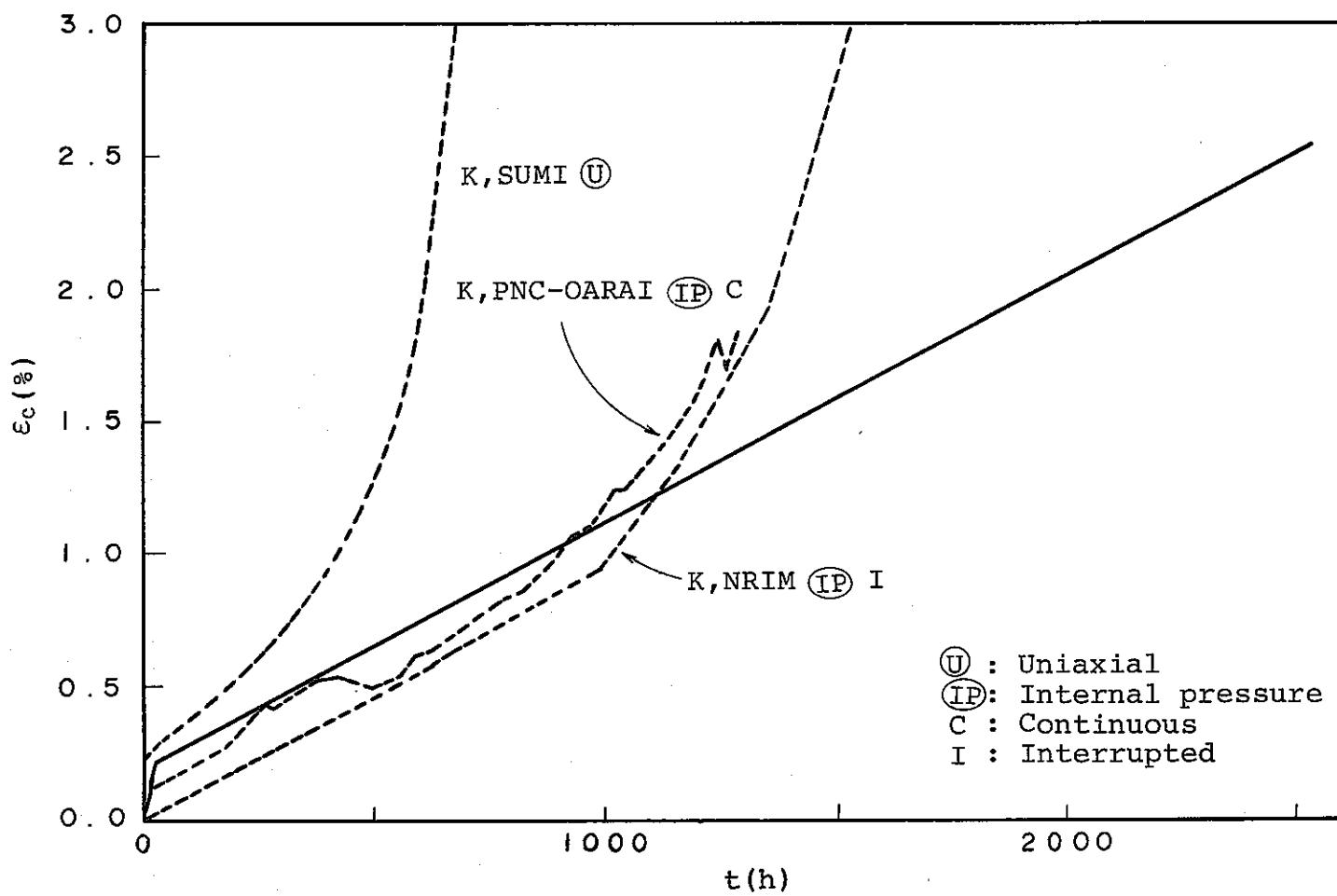


Fig.45. Comparison between measured creep curve and calculated one. Temp.: 700°C, Stress: 18kgf/mm².
(- - - measured creep curve, — calculated creep curve)

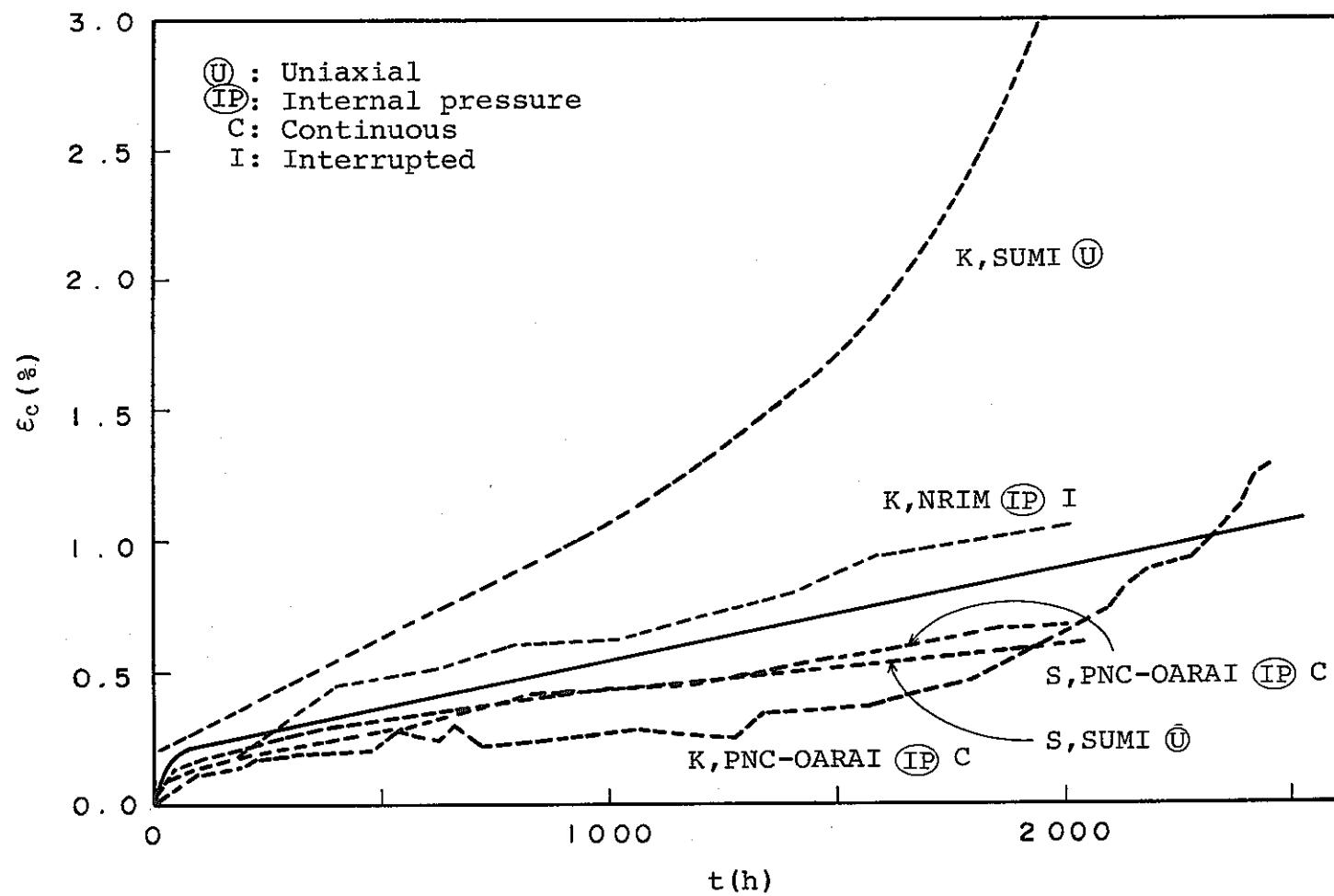


Fig.46. Comparison between measured creep curve and calculated one. Temp.: 700°C; Stress: 14kgf/mm².
(- - - measured creep curve, — calculated creep curve)

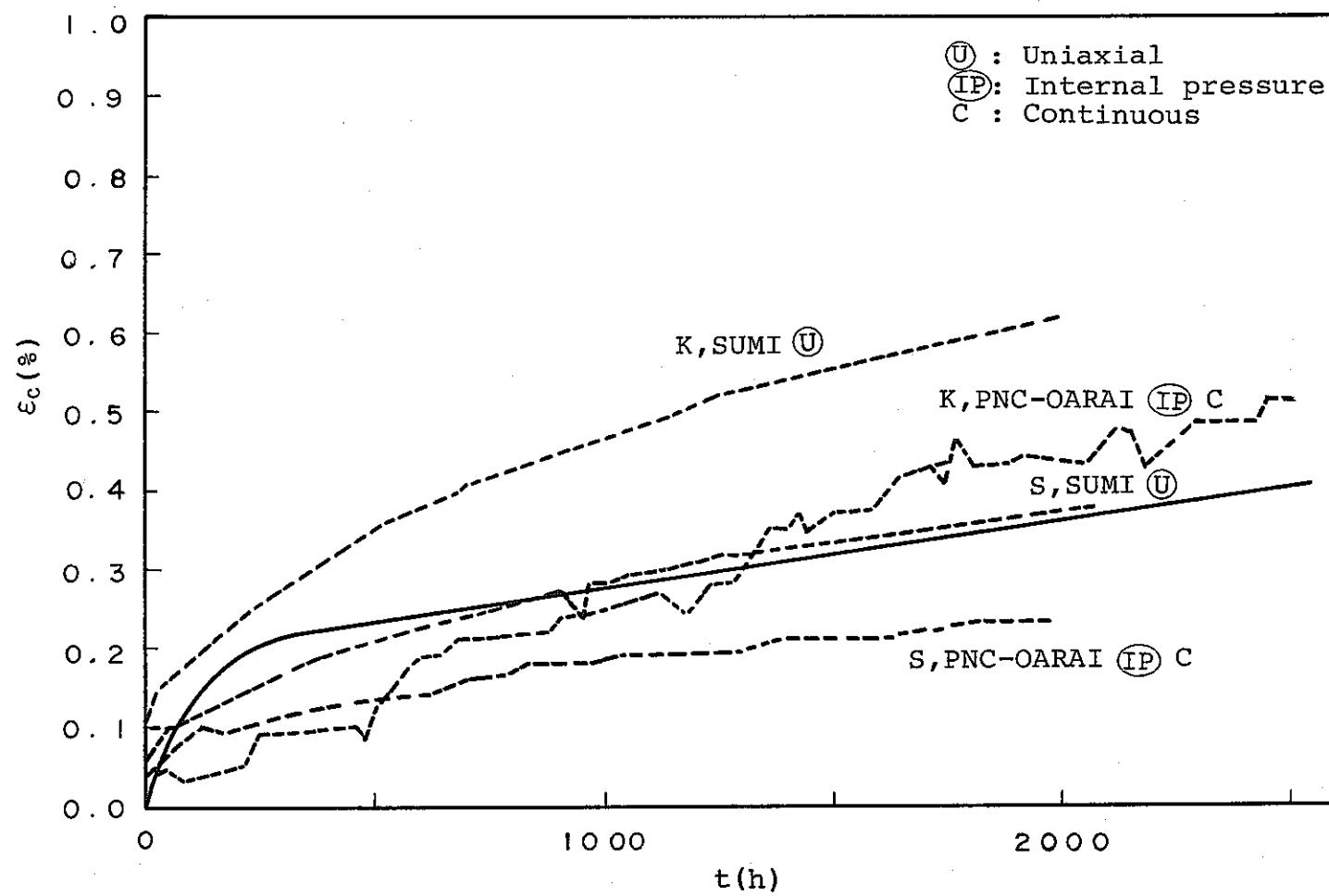


Fig. 47. Comparison between measured creep curve and calculated one. Temp.: 700°C, Stress: 10kgf/mm².
(- - - measured creep curve, — calculated creep curve)

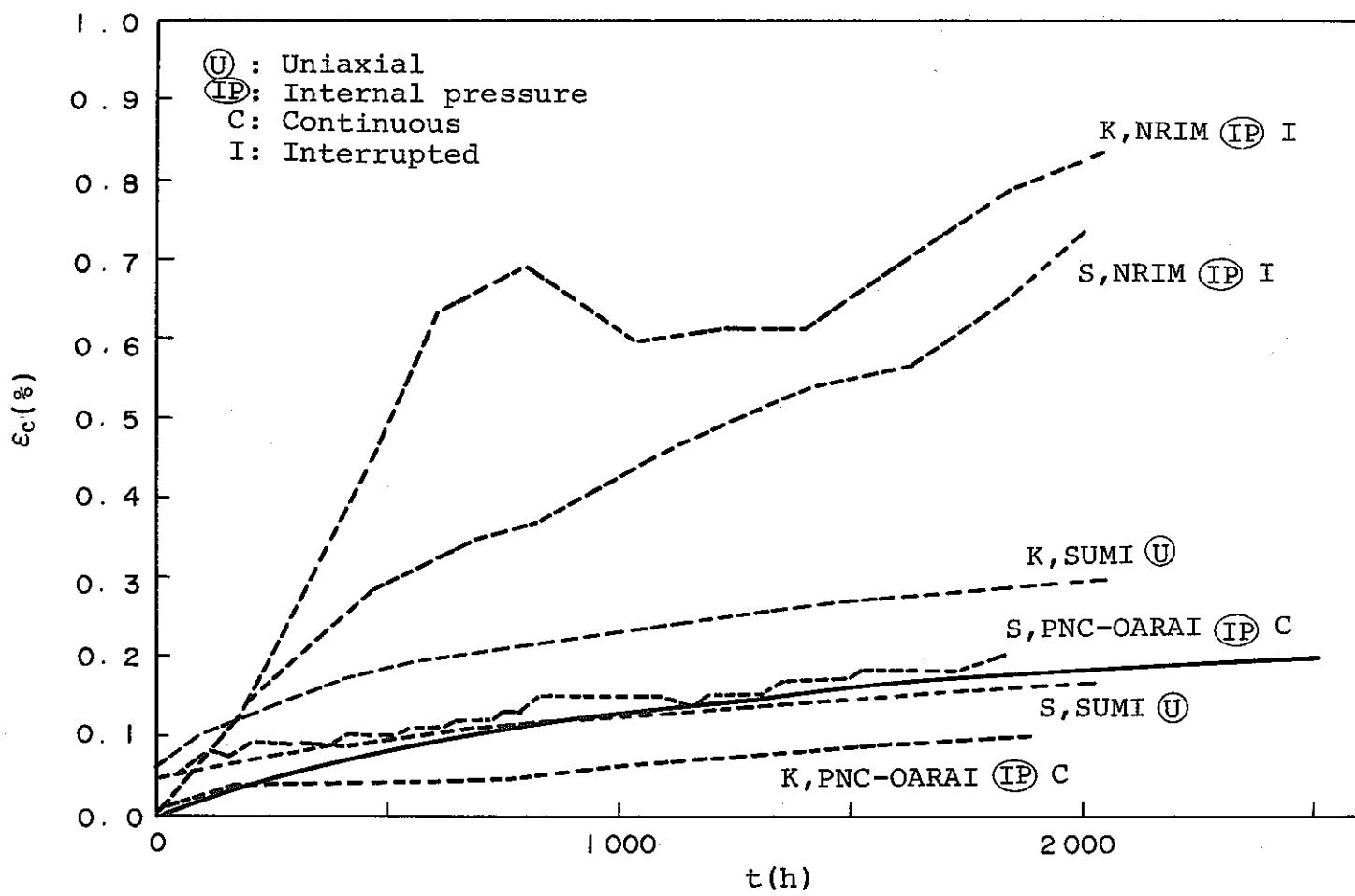


Fig.48. Comparison between measured creep curve and calculated one. Temp.: 700°C, Stress: 7kgf/mm².
(- - - measured creep curve, — calculated creep curve)

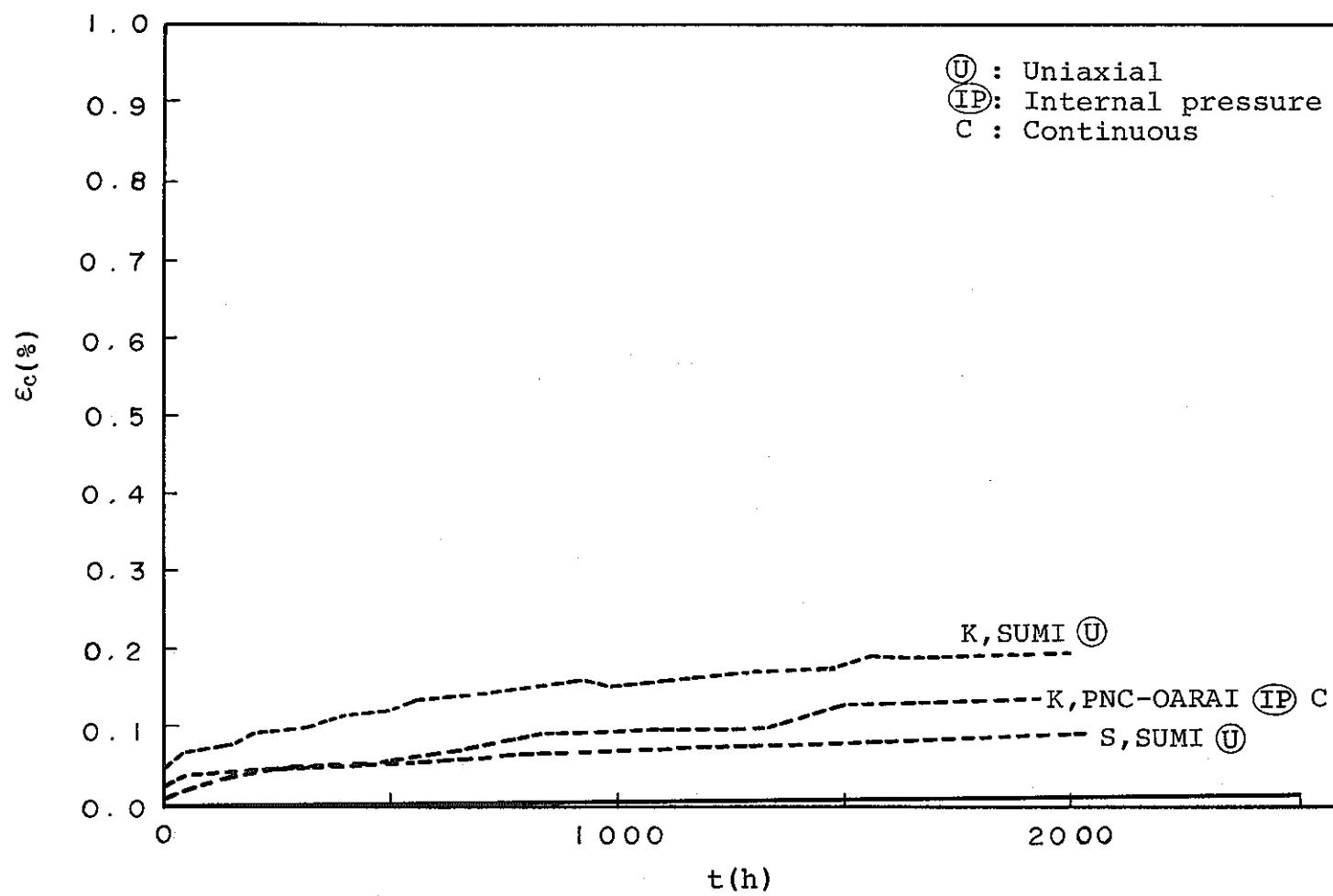


Fig.49. Comparison between measured creep curve and calculated one. Temp.: 700°C, Stress: 5kgf/mm².
(-- measured creep curve, — calculated creep curve)

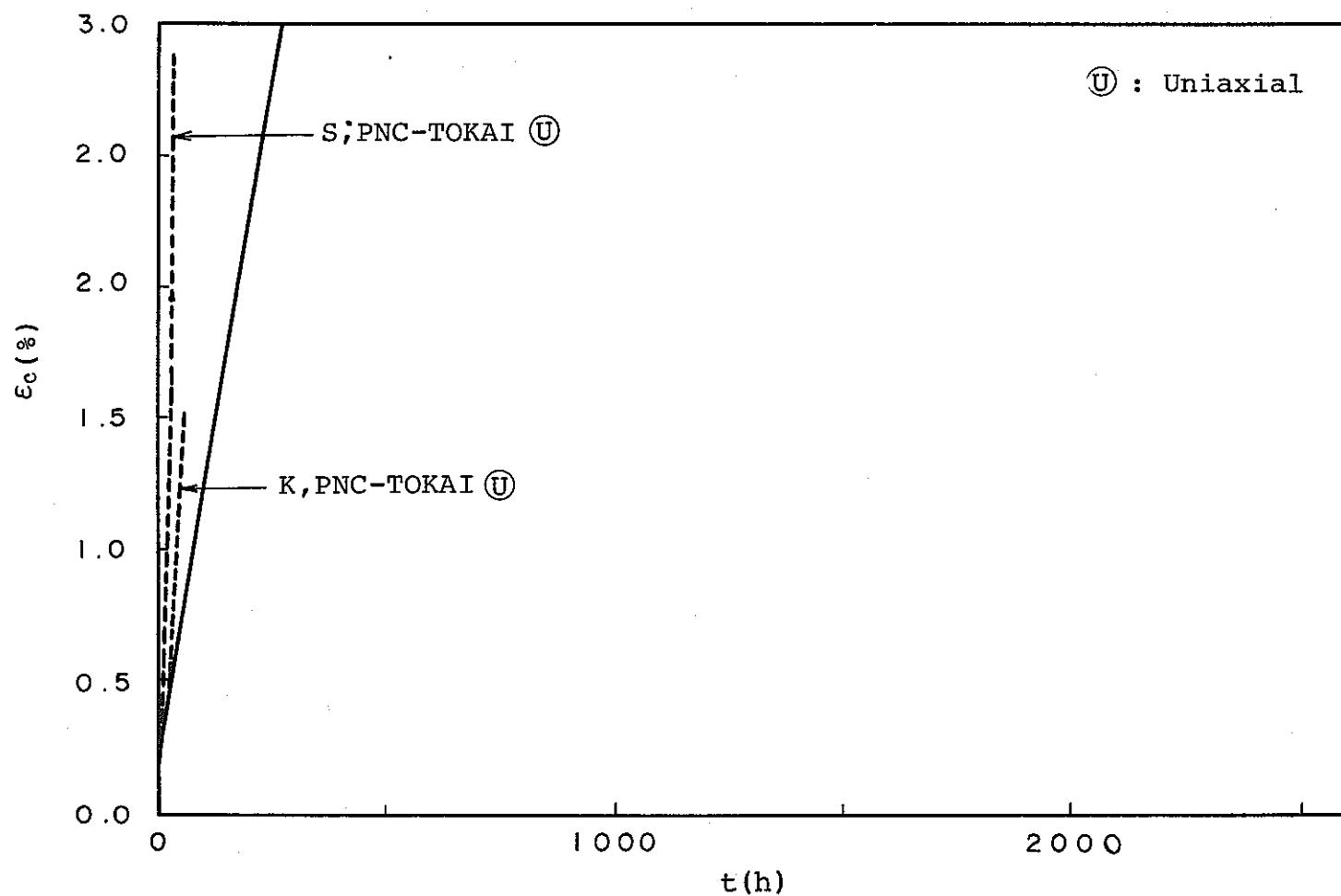


Fig.50. Comparison between measured creep curve and calculated one. Temp.: 750°C, Stress: 18kgf/mm².
(- - - measured creep curve, —— calculated creep curve)

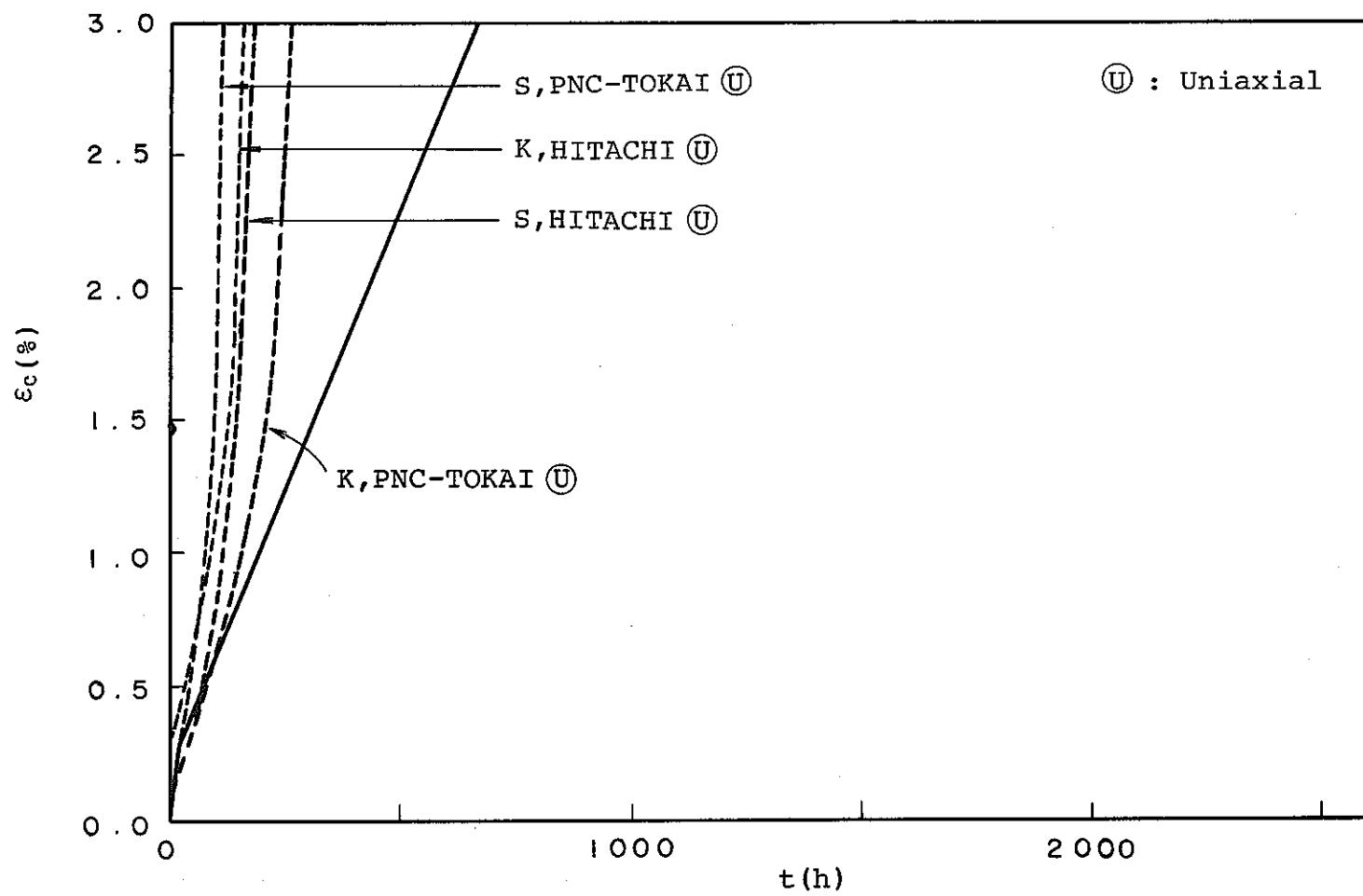


Fig.51. Comparison between measured creep curve and calculated one. Temp.: 750°C, Stress: 14kgf/mm².
(- - - measured creep curve, —— calculated creep curve)

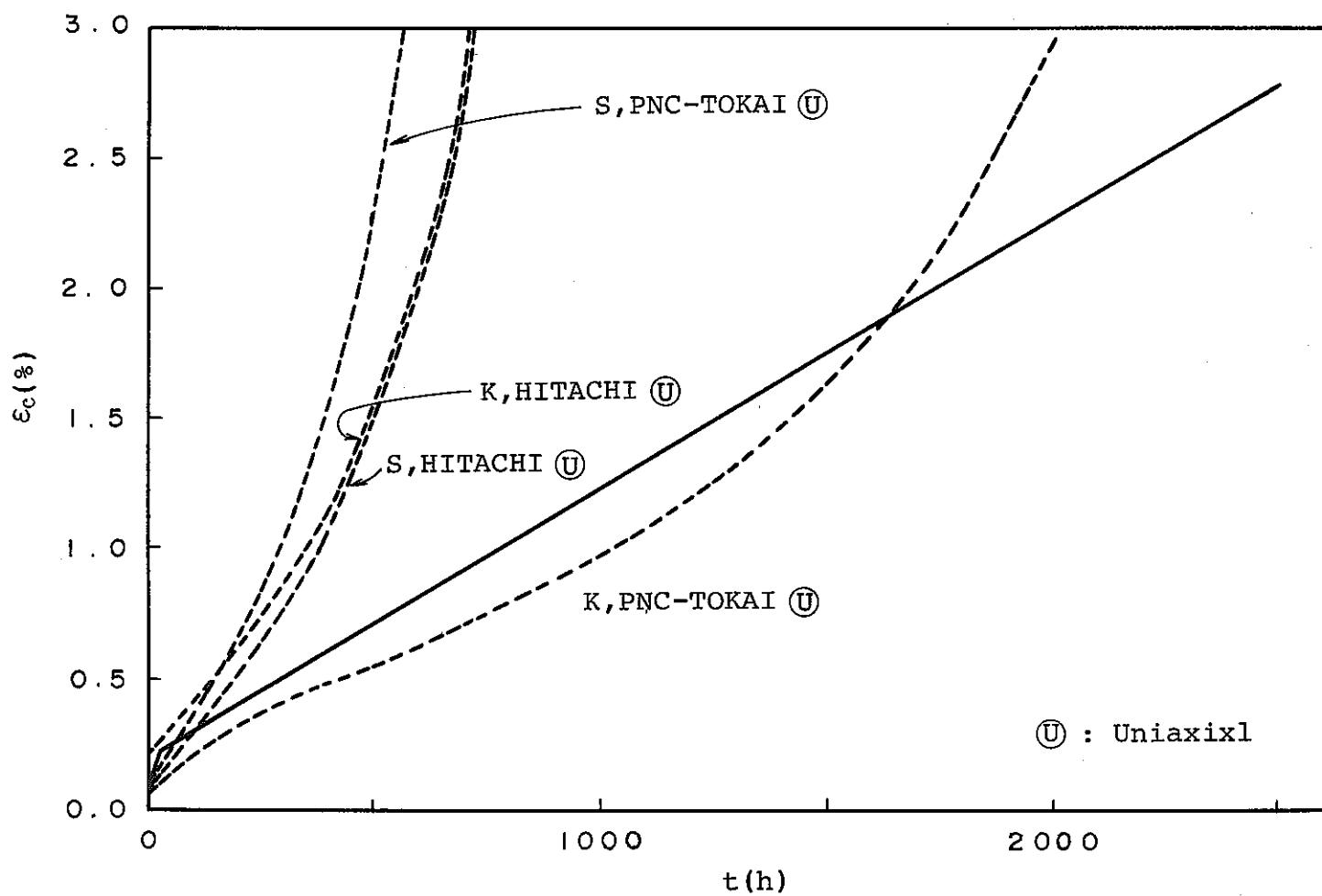


Fig.52. Comparison between measured creep curve and calculated one. Temp.: 750°C, Stress: 10kgf/mm².
(- - - measured creep curve, — calculated creep curve)

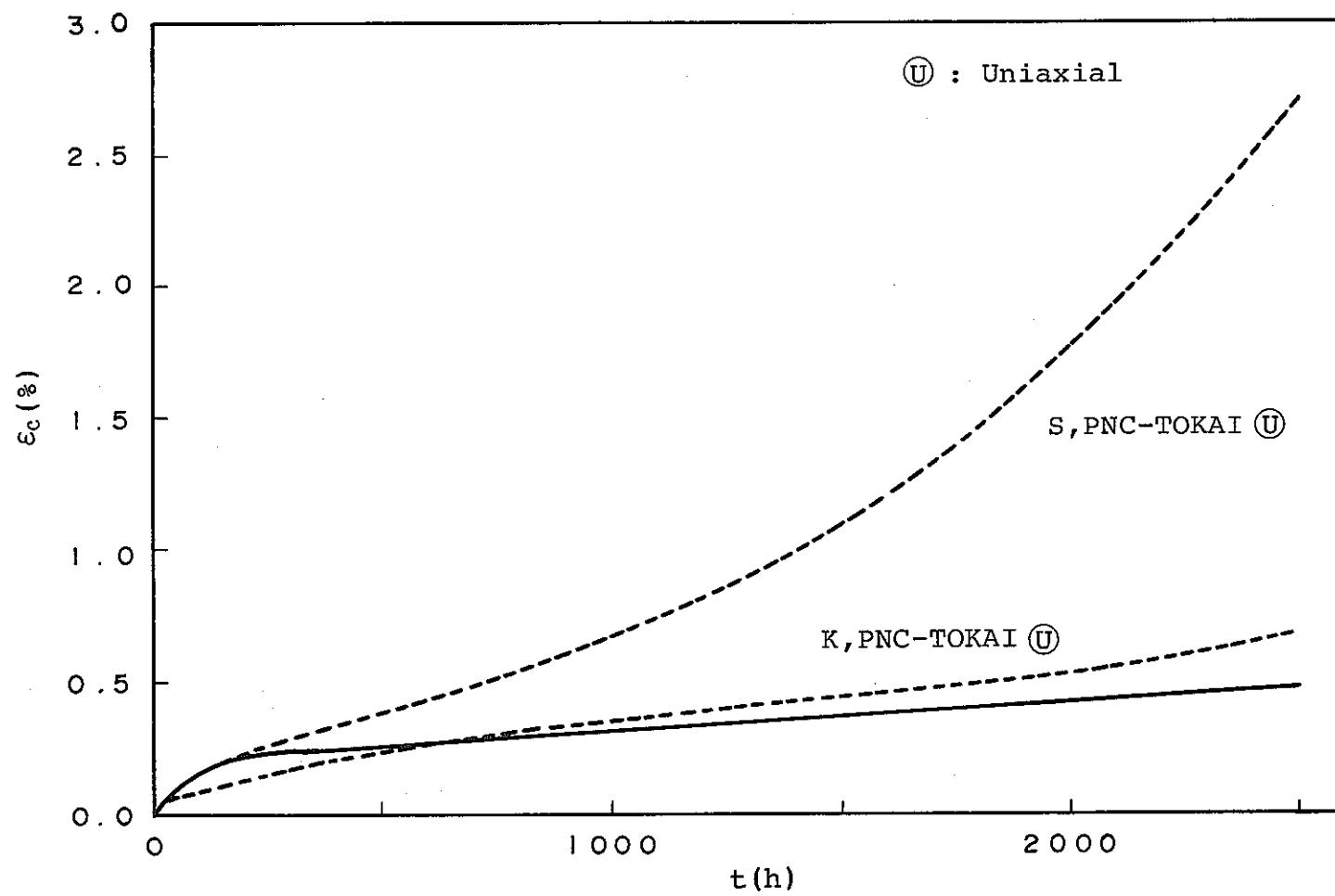


Fig.53. Comparison between measured creep curve and calculated one. Temp.: 750°C, Stress: 7kgf/mm².
(- - - measured creep curve, — calculated creep curve)

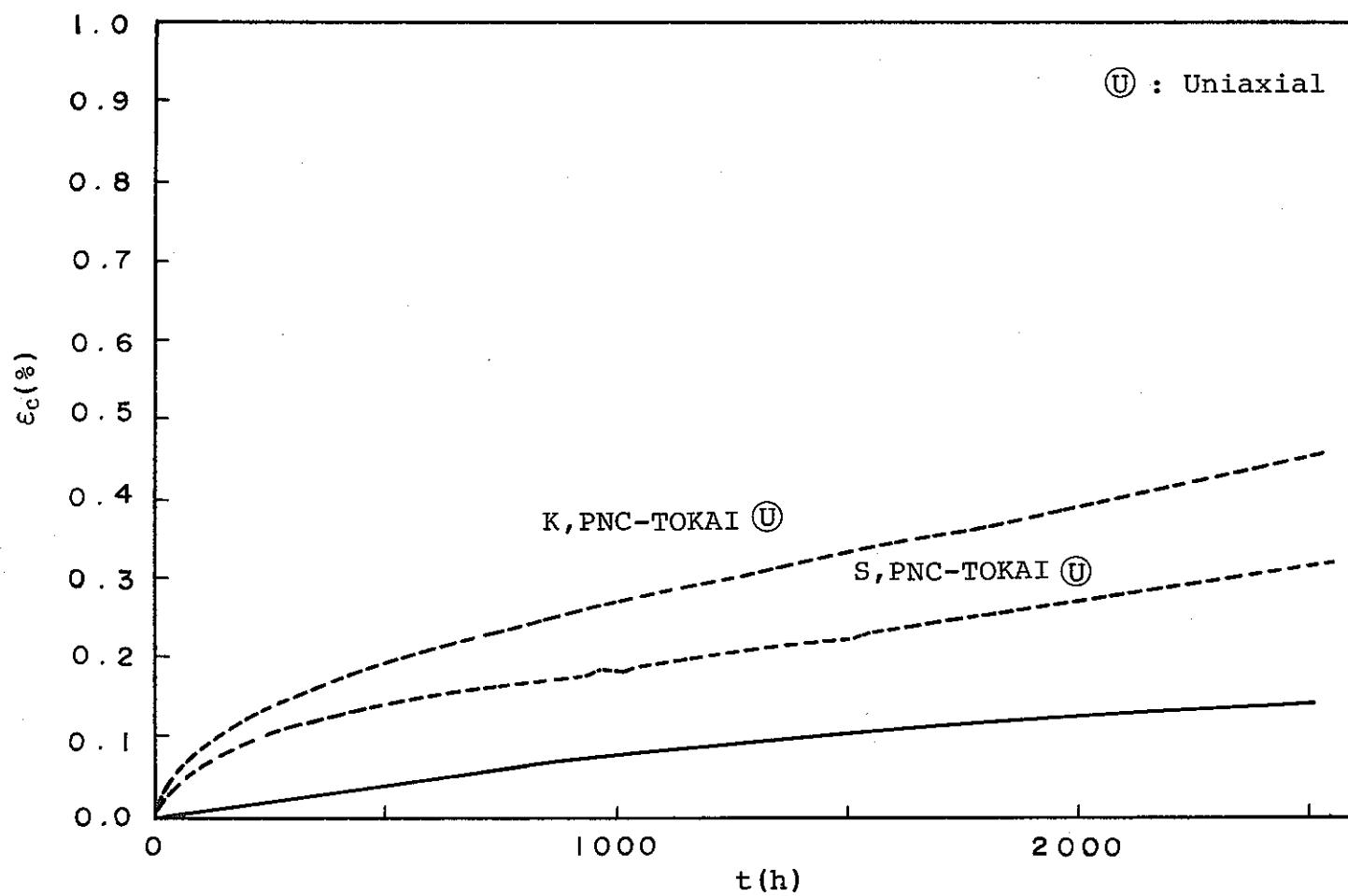


Fig.54. Comparison between measured creep curve and calculated one. Temp.: 750°C, Stress: 5kgf/mm².
(- - - measured creep curve, — calculated creep curve)