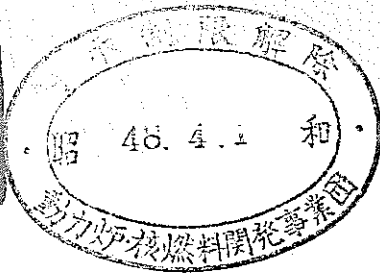
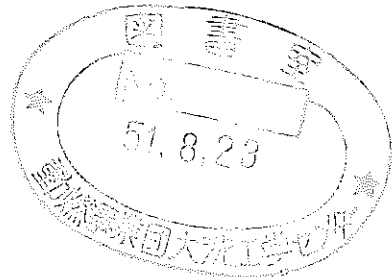


T&N241
71
55



技術資料コード	
開示区分	レポートNo.
	N241 71-55
この資料は 図書室保存資料です 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	

高速実験炉用燃料被覆管の クリープ試験 (第一次試験)



区分変更	
変更理由	〃
決裁年月日	平成 13 年 11 月 30 日

昭和 46 年 11 月

FBR 材料専門委員会
構造設計委員会
クリープサブグループ
(主査 吉田 進)

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)

担 当 者

主 査 担 当	吉	田	進	(金 属 材 料 技 術 研 究 所)
	田	中	秋	(金 属 材 料 技 術 研 究 所)
	太	田	千	(神 戸 製 鋼 所)
	藤	原	定	(神 戸 製 鋼 所)
	行	俊	優	(住 友 金 属 工 業)
	吉	川	照	(住 友 金 属 工 業)
	牧		洲	(住 友 金 属 工 業)
	原		英	(日 立 製 作 所)
	青	木	照	(日 立 製 作 所)
	小	原	利	(動 燃 事 業 団)
		勝	(動 燃 事 業 団)	

1. 緒 言

高速実験炉（常陽）用燃料被覆管は AISI 316 鋼よりなっている。これを使用するに際しては、

- (1) 高温強度特性
- (2) 照射特性
- (3) Na 中の挙動

の3点について、総合的な解析を行ない信頼性を高める必要がある。

なかでも、(1)の高温強度特性については、炉心設計上緊急性を要し、かつ上記(2)、(3)の2つの要因解析を行なううえでもこのデータが基礎となるため、信頼のおけるデータが要求される。一般に AISI 316 鋼に関する高温強度データは数多く提示されているが、被覆管のような薄肉細管そのもののデータはほとんどない現状なので、許容応力をどのように設定するかはかなり難かしい問題である。

そこで動力炉・核燃料開発事業団に燃料構造設計委員会（主査：鶴戸口英善）を設置し、

- (i) 炉心設計の基本条項の決定
- (ii) 高温強度特性の検討

を行なうこととした。(ii)項に関しては、被覆管自身についてクリープ試験と疲労試験を行なうこととし、試験実施にあたっては各々サブグループを設け、昭和44年に計画をたて試験を開始し、昭和46年3月に第1次試験が終了した。

本報告はクリープについての第1次試験に関するもので、クリープサブグループ（主査：吉田 進）の試験には金属材料技術研究所、神戸製鋼所、住友金属工業、日立製作所および動力炉・核燃料開発事業団が参画し、「常陽」用第1次試作被覆管（A、B2種類）について、内圧クリープ破断試験と単軸引張クリープ破断および単軸引張クリープ試験を実施した。試験条件は試験温度が600℃、650℃、700℃および750℃、最長破断時間は3,000～10,000 hr 目標とした。そして、得られたデータを統計的に解析し、10,000 hr における破断強さ、クリープ限度およびクリープ制限応力を推定した。そのほか、内圧クリープ破断と単軸引張クリープ破断の比較や類似鋼材のデータとの比較も行なった。

なお、これらの試験につづいて、第2次試作被覆管についての試験を現在行なっており、ここでは内圧クリープ試験におけるクリープ速度も求める計画である。

2. 供 試 材 料

2.1 概 要

高速実験炉用燃料被覆管の昭和43年度試作品として、国内2社（神戸製鋼所、住友金属工業）で製造された AISI 316 オーステナイト系ステンレス鋼の薄肉細管（A材、B材の2種類）を試験に供した（供試材料の購入仕様は付録参照）。

主な特徴は次のとおりである。

- (1) 寸 法 : 外径 6.3 ± 0.03 mm,
内径 5.6 ± 0.025 mm,
肉厚 0.35 ± 0.03 mm,
- (2) 製造方法 : 真空溶解,
冷間加工度 約 10%
- (3) 許容欠陥深さ : 25μ

2.2 化学成分

供試材の化学成分を Table 1 に示す。

2.3 性 質

供試材の光学顕微鏡組織, 結晶粒度, 表面アラサおよび硬さを Table 2 に示す。また, 高温引張試験結果を Fig.1 (A材), Fig.2 (B材) に, 高温バースト試験結果を Fig.3 に示す。

3. 試 験 方 法

3.1 試験片の抽出

供試材は, A材およびB材について各々同一ロットの被覆管より抽出された。そして, 試験片は超音波探傷検査により合格した供試材より抽出され, ランダムに試験に供された。

3.2 試験片の寸法形状

内圧クリーブ破断試験片を Fig. 4 に示す。試験片本体部の長さは 200 mm である。試験片本体部と端栓および導管との接合は TIG 溶接である。

単軸引張クリーブ試験片を Fig. 5 に示すが, 試験片本体部の長さは, クリーブ試験片の場合は 115 mm, クリーブ破断試験片の場合は 300 mm である。試験片本体部には溶接 (TIG) 部からの破断をさけるために絞りを付けてある。なお, 各試験片の溶接部は X線探傷を行なつて溶接欠陥の検査をしてある。

3.3 試 験 機

内圧クリーブ試験装置および単軸引張クリーブ試験機の概要をそれぞれ Table 3-1, および Table 3-2 に示す。

4. 試 験 条 件

試験条件を Table 4 に示す。

5. 試験結果

5.1 内圧クリーブ破断試験結果

各試験機関において求めた試験温度600℃, 650℃, 700℃および750℃における内圧クリーブ破断試験結果をTable 5, 6に示す。表中()で示したものは破断が試験片の溶接部かまたはその近傍からのもので参考値である。また, ・印と○印のものは圧力と破断時間, ・印のものは圧力と Larson - Miller パラメータの関係についての統計解析に用いたデータである。()印のものを除く全データについて, 圧力と破断時間の関係を示すと, Fig. 6, 7のとおりである。

これによると, データには各試験機関において一定の傾向がみられず, 各試験機関のデータの差異は全データのばらつきの中にかくれてしまつて有意な差はみられない。また, Ar ガス雰囲気中の試験の行なわれた650℃と700℃の試験温度と約3,000 hr 未満の試験時間の範囲内では, 試験を Ar ガス雰囲気中で行なつたものと大気中で行なつたものとは, 破断時間に有意な差がないようである。

クリーブ破断強さは, 本試験温度および試験時間の範囲内では, B材よりもA材のほうが大きい。

5.2 単軸引張クリーブ破断およびクリーブ試験結果

1試験機関*において求めた試験温度600℃, 650℃, 700℃および750℃における単軸引張クリーブ破断試験およびクリーブ試験結果をTable 7, 8に示す。なお, ・印と○印のものについては前項で述べたと同様である。全データについて, 応力と破断時間の関係を示すと Fig. 8 のとおりであるが, 内圧クリーブ破断の場合と同様に, 単軸引張クリーブ破断強さはB材よりもA材のほうが大きい。また, クリーブ破断試験片とクリーブ試験片とで求めた破断時間には大きな差はなく, かつ一定の傾向も示さない。

6. 試験結果の整理

6.1 内圧クリーブ破断

6.1.1 圧力—破断時間

圧力($\log P$)と破断時間($\log t_R$)の関係に対して, 次に示す多項式を用いて曲線のあてはめを統計的に行なつた。

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_i + \beta_2 x_i^2 + \dots + \beta_n x_i^n + e_i$$

ただし, y_i : 確率変数

x_i : 確定変数

β_0 : 定数

* 金属材料技術研究所材料試験部

$\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n$: 回帰係数

ϵ_i : 正規分布 $N(0, \sigma_g^2)$ をする誤差

i : 1, 2, \dots , m

ここで、確定変数 x_i としては圧力の対数 ($\log P$) をとり、確率変数 y_i としては破断時間の対数 ($\log t_R$) をとつた。そして確率変数 ($\log t_R$) は等分散で正規分布するものと仮定して回帰線を推定した。

実際の計算は、計算の簡便さから直交多項式を用いて行なつた。そして、 k 次の回帰式にさらに $K+1$ 次の項を加えることによつて生ずる回帰変動による不偏分散 V_{k+1} と $K+1$ 次の回帰式に対する残差変動による不偏分散 $V_{E(k+1)}$ の比 $V_{k+1} / V_{E(k+1)}$ を求め、これを危険率 5% における F -分布表の値と比較し、次数を高めることに意味があるかどうかの検討を行なつた。また、各次の回帰式に対し関与率を求め、回帰の次数を高めることによる x_i, y_i 間の関連の度合の強まり方を調べた。このようにして、直交多項式の次数を高めることに意味がなくなる次数より一つ低次の回帰式を選択し、選択した次数の妥当性を関与率の変化からも確認した。

以上の統計的手法による圧力と破断時間の関係に対する回帰分析表を Table 9 に示す。ここでは、まず A 材のデータおよび B 材のデータについて個々に回帰分析を行ない、つぎに A 材および B 材のデータを一緒に回帰分析した。前述のようやり方で、不偏分散比 [$F_0(RBS)$] と危険率 5% の F -値 [$F(0.05)$] との比較、および関与率 (r^2) の変化より有意な回帰式の次数を選択すると、表中○印で示す次数であつて、A 材および B 材のデータを個々に回帰した場合は全て 1 次であり、A 材と B 材のデータを一緒に回帰した場合は 600°C, 700°C および 750°C は 1 次で 650°C のみ 2 次であつた。

各供試材のデータについて選択された回帰式の次数における関与率と試験温度との関係を見ると、A 材のデータについては、関与率は 600°C では 67.2% であつたが、650°C 以上の試験温度では 91.7%, 94.7%, 97.0% と大きく、B 材のデータおよび A 材、B 材のデータが一緒の場合も同様な傾向がみられた。したがつて、関与率だけからみれば A 材および B 材のデータともに、データのばらつきは 600°C では大きく、650°C 以上では 600°C よりも小さいことがわかる。また、A 材と B 材のデータが一緒の場合は、A 材および B 材のデータが別々の場合よりも各試験温度において関与率は小さくなつており、このことから A 材と B 材のデータには大きな差があることが示唆される。なお回帰線からのデータのばらつきの尺度を示す標準偏差 [$SD(RBS)$] も関与率と同様な傾向を示していた。

A 材、B 材および A, B 材についての圧力と破断時間の関係に対して、選択された回帰式の次数における回帰線をそれぞれ Fig. 9, 10, 11 に示す。また同時に、各回帰推定値からのデータのばらつきに基づく信頼度 95% における信頼区間も示す。な

お、これらの図は、電子計算機 NEAC 3100 に直結されたデジタルプロッタ (N244A) によつてかけられたものである。A材およびB材の場合、選択された回帰式の次数は全て1次であつたが、回帰式の1次の項の回帰係数は試験温度が高くなるにしたがつて大きくなつていく。このことは高温側での $\log t_R$ に対する $\log P$ の直線の勾配が小さくなつていくこと、つまり $\log P$ に対する $\log t_R$ の直線の勾配が大きくなつていくことを示す。Fig.11の650°Cにおいては、回帰線が長時間側で急に曲がつている。これは回帰式として2次式が採用されたことと関連しているが、このような回帰線はデータへの傾向線として見た場合好ましいものとは思われない。

6.1.2 圧力 — Larson - Miller パラメータ

得られた約3,000hrまでの内圧クリープ破断データから、より長い時間の特定の破断時間に対する圧力や、特定の圧力に対する破断時間を推定するために、圧力と破断時間の関係を次に示す Larson - Miller パラメータ (LMP) で整理した。

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

ただし、 T : 絶対温度 (試験温度)

C : パラメータ定数

そして、圧力とLMPの関係に対して、圧力と破断時間について行なつたと同様な手法 (6.1.1) で曲線のあてはめを行なつた。

ここで、内外挿にもつとも適したパラメータ定数を得ることが重要であるが、それには最小二乗法の考え方にしたがつて、圧力とLMPの回帰線を直交多項式であてはめ、回帰推定値と実測の破断時間 (ともに対数) との残差平方和を求め、残差平方和を最小にするようなパラメータ定数を最適値として採用した。

パラメータ定数に最適値をとつた場合の圧力とLMPの関係に対する回帰分析表をTable 10に示す。6.1.1項の手法にしたがつて回帰式の次数を選択すると、A材については2次、B材は3次およびA、B材一緒の場合は2次であつた。有意な次数における関与率はA材は89.2%、B材は93.5%であつたが、A、B材の場合は72.6%と小さく、A材とB材を一緒に回帰することが適当でないことを示している。

圧力とLMPの関係に対して、先に述べた方法で採用されたパラメータ定数および選択された回帰式の次数における回帰線と信頼度95%における信頼区間をFig. 12, 13, 14に示す。採用されたパラメータ定数Cの値は、A材については17.01、B材は13.12およびA、B材一緒の場合は14.20であつた。A材 (Fig.12) とB材 (Fig.13) における回帰線の傾向は異なつており、高温長時間側でA材は回帰線が下に曲る傾向を示したが、B材は回帰線が上に曲る傾向を示

した。A, B材一緒の Fig. 14 のデータプロットを見ると A材は B材に比べて破断強さが大であることがわかる。そして、関与率が 72.8%と低いように曲線のあてはめがうまくゆかなかつた。これは、破断強さが A材と B材とでは比較的大きな差があつたことに起因するものである。

なお、5.1項でも述べたように、各試験機関のデータに有意な差がみられず、また試験片の雰囲気によつてもデータに差が現われていないことがわかる。

6.1.3 圧力 —— 温度

圧力と LMP の関係に対する選択された回帰線と信頼区間より、各試験温度において、破断時間が 1,000 hr, 3,000 hr, 10,000 hr および 15,000 hr における圧力の回帰推定値と信頼度 95% における信頼区間の上下限の値を求めた。そして、A材, B材および A, B材について、各破断時間における圧力と温度との関係を示すと Fig. 15, 16, 17 のとおりである。ここで、実線は回帰線より求めた推定値で、破線は信頼度 95% における信頼区間の下限の曲線より求めた値である。なお、信頼区間の上限より求めた値は図が煩雑になるので省略し、設計よりみてより重要と思われる下限の値のみを示した。

A材および B材をまとめた場合 (Fig. 17) は、種々の仮定 (例えば、ある圧力水準で破断時間が正規分布するという仮定など) をおけば、650° において約 150 Kg/cm^2 の圧力で被覆管の 50% が 10,000 hr で破断し、約 115 Kg/cm^2 の圧力で被覆管の 2.5% が 10,000 hr で破断するということになる。

6.2 単軸引張クリープ破断

6.2.1 応力 —— 破断時間

応力 ($\log \sigma$) と破断時間 ($\log t_R$) の関係に対して、6.1.1項と同様な統計的手法で、多項式による曲線のあてはめを行なつた。

Table 11 は応力と破断時間の関係に対する回帰分析表であるが、選択された有意な回帰式の次数は 1次と 2次であつた。関与率は、各材料、各試験温度において、圧力-破断時間の場合に比べて大きくなつている。これは、これらのデータが 1試験機関のみで得られたことに一因があるものと思われる。圧力-破断時間の場合においては、関与率は 600°C では他の試験温度に比べて小さいという現象がみられたが、ここでも、その現象が A, B材一緒の場合にみられた。

Fig. 18, 19, 20 は選択された回帰式の次数における回帰線と信頼度 95% における信頼区間をデジタルプロッタでかかせたものである。データのばらつきは、A, B材一緒の場合は、A材および B材の場合に比べて大きくなつている。

6.2.2 応力 —— Larson-Miller パラメータ

6.1.2項と同様な手法で求めた応力と LMP の関係に対する回帰分析表を Table 12 に示す。選択された有意な回帰式の次数は、A材については 2次、B材は 3次

および A, B 材の場合は 2 次で, 圧力-LMP の場合と全く同じである。

Fig. 21, 22, 23 に, 統計的手法により採用されたパラメータ定数および選択された回帰式の次数における回帰線と信頼度 95% における信頼区間を示す。A 材 (Fig. 21) と B 材 (Fig. 22) における回帰線の高温長時間側の傾向は異なっており, 圧力-LMP の場合と同様であつた。A 材と B 材を一緒に解析すると, 大きい関与率が得られず, 破断強さは B 材よりも A 材のほうが大であることが判然としている。

6. 2. 3 応力—温度

応力と LMP における選択された回帰線と信頼区間より求めた 1,000 hr, 3,000 hr, 10,000 hr, 15,000 hr および 30,000 hr における応力と温度との関係を Fig. 24, 25, 26 に示す。A 材および B 材を一緒にした場合 (Fig. 26) の 650°C, 10,000 hr における回帰線からの応力値は 11.8 Kg/mm², 信頼度 95% における信頼区間の下限からの応力値は 9.2 Kg/mm² であつた。

6. 3 単軸引張クリープ

6. 3. 1 クリープ曲線

得られたクリープ曲線の一例として, 650°C の場合を Fig. 27 に示す。同一初期応力および同一試験時間のとき, B 材は A 材に比べて, クリープ速度が大きいことがわかる。なお, 試験片のエッジ部間をもととして測定された伸びに対するエッジ部と絞り端部間の伸びは, 破断後約 1/20 以下であつたので, ひずみの計算において, エッジ部と絞り端部間の伸びは無視した。

6. 3. 2 応力—最小クリープ速度

応力と最小クリープ速度の関係を Fig. 28 に示す。材料別に各試験温度について, 得られたプロットに対し, Visual fit の手法で曲線をあてはめたが, A 材と B 材ではあきらかに差がみられ, A 材は B 材よりクリープ強さが大であつた。

6. 3. 3 応力—指定全伸びに達する時間

応力と 0.5%, 1% および 2% の全伸びに達する時間との関係を Fig. 29, 30 に示す。B 材の 4 本の試験片を除いて, 破断までにほとんどのものは 2% の全伸びを示した。

6. 3. 4 応力—温度

一定の最小クリープ速度を生じる応力と温度の関係について, 応力と最小クリープ速度の関係より求めたものを Fig. 31 に, 一定の時間に所定の全伸びを生ずる応力と温度の関係を Fig. 32, 33 に示す。前者は各温度におけるクリープ限度を示し, 後者は各全ひずみおよび各温度におけるクリープ制限応力を示すものである。クリープ限度およびクリープ制限応力ともに A 材のほうが B 材よりも大きい。最小クリープ速度が, 650°C において 10⁻⁴%/hr になるクリープ限度 (Fig. 31) は, A 材は 13.7 Kg/mm², B 材は 11.8 Kg/mm² であつた。また, 650°C において 10,000 hr

で1%の全伸びを生ずるクリープ制限応力は、A材 (Fig.32) は 13.0 Kg/mm^2 , B材 (Fig.33) は 10.4 Kg/mm^2 であつた。

6.3.5 破断時間——最小クリープ速度

単軸引張クリープ試験で得られた同一応力における破断時間と最小クリープ速度の関係を Fig. 34 に示す。A材およびB材について、ばらつきはあるが、ほぼ直線で近似できた。最小クリープ速度が同一の値のときは、B材よりA材のほうが破断時間が長いことがわかる。

6.4 内圧クリープ破断と単軸引張クリープ破断との関連

内圧クリープ破断試験を行なうより単軸引張クリープ破断試験を行なうほうが試験としてはより容易であるから、内圧クリープ破断と単軸引張クリープ破断との関連をあきらかにして、後者のデータから前者における破断時間を推定することができれば都合がよい。

そこで、内圧クリープ破断における試験圧力を内圧円筒の限界圧力と材料の引張強さの関連とをあらわす次の実験式を用いて Hoop stress に置きかえた。

$$\text{外 径 の 式 : } \sigma = P (D_0 / 2 t_K)$$

$$\text{平 均 径 の 式 : } \sigma = P (D_0 / 2 t_K - 0.5)$$

$$\text{内 径 の 式 : } \sigma = P (D_0 / 2 t_K - 1)$$

ここで、 σ は Hoop stress, P は試験圧力, D_0 は外径, t_K は肉厚である。そして、同一試験温度および同一破断時間において、単軸引張クリープ破断試験での引張応力と内圧クリープ破断試験の試験圧力より得た Hoop stress との関連を求めたところ Fig. 35, 36 のとおりになつた。

A材およびB材についてほぼ同様な結果が得られたが、これらより、各式から得られた Hoop stress は引張応力に比較的よく関連していることがわかつたが、なかでも、外径および内径の各プロットの中間的な値を示す平均径の式の関連の度合が一番よいように思われる。したがつて、本試験データの場合は、平均径の式で計算された Hoop stress で内圧クリープ破断と単軸引張クリープ破断とを関連付けてもおおむねよいものと思われる。

6.5 得られたデータと ISO のデータとの比較

被覆管と同じ鋼種の316鋼の管、板および棒材についてのイギリス、日本、スウェーデン、ベルギー、イタリーの引張クリープ破断データを集めた ISO のデータ (ISO / TG 17 / WG 10 / ETP-SG) と得られた単軸引張クリープ破断データおよび内圧力を平均径の式で Hoop stress に置きかえたデータと比較した結果を Fig. 37, 38 に示す。

これらより、本試験データは ISO のデータよりも破断強さが各試験温度においてやや大であることがわかつた。しかし、長時間側では本試験データは ISO のデータに近づいている傾向がみられた。

そこで、Fig. 39のように、ISOにおいて各温度について求められた10,000hrと30,000hrにおける平均的な破断応力の推定値と、A材とB材を一緒に解析した場合の応力とLMPの関係における回帰線から求めた同じ破断時間の破断応力の推定値との比較を行なった。これによると、650℃と700℃では本試験における破断強さはやや大きく、600℃においては逆にやや小さくなっていたが、応力の差は 1Kg/mm^2 以内であった。したがって、長時間側ではほとんど両者に差はないとみてさしつかえないものと思われる。

6.6 応力の推定値

以上に示した試験結果の整理・検討によつて得られた10,000hrと15,000hrにおける破断強さ、最小クリーブ速度が $10^{-4}\%/hr$ におけるクリーブ限度および10,000hrにおいて1%の全ひずみをあたえるクリーブ制限応力の各推定値をTable 13に示す。

6.7 内圧クリーブ破断後の試験片

内圧クリーブ破断後の試験片の外観の一例をPhoto. 1に示す。これは1試験機関におけるものであつて、圧力媒体はArガス、雰囲気は空気の場合である。この写真からは、破断部の破壊の様相は低温側では“Open-door”型で、高温側では次の写真に示すような“seam-like”あるいは“Pinhole”型であることがわかる。これらの破壊の様相の差異は、各試験状態における試験片の延性に関連しているものと思われる。

他の1試験機関で観察した破断部の様相の一例をPhoto. 2に示す。これらは“seam-like”および“Pinhole”型の破壊を示したものであつて、管壁の対称位置に“seam-like”型の破壊があるもの(Tube A, 186-4, 280Kg/cm^2 , 526.0 hr), また管壁の同一位置に平行な2本の“seam-like”型の破壊があるもの(Tube A, 186-5, 250Kg/cm^2 , 876.1 hr)などがあつた。

6.8 破断後の試験片の寸法

破断後の内圧クリーブ破断試験片の軸方向位置における外径の伸び(Δ^D/D_0 , %, 数測定値の平均値)を調べた結果の一例をFig. 40に示す。この図のように、各試験片の外径の伸びは軸方向位置によつてやや差異があつたが、破断部近傍を除いた値を平均し、その平均値がほぼ試験片の外径の伸びを示すものと考えて、各試験片の外径の伸びの平均値を破断時間に対してプロットしてみた結果をFig. 41に示す。この図から、A材に比べてB材の破断後の外径の伸びがやや小さいことがわかる。また、外径の伸びは破断時間にあまり依存せず一定のようであるが、750℃の長時間側ではやや大きくなる傾向がうかがえる。

破断後の単軸引張クリーブ試験片の伸びと破断時間の関係をFig. 42に示す。これは1試験機関で得られた結果であるが、破断伸びは破断時間に対してある一定の傾向をもつたふるまいを示している。すなわち、破断伸びは、短時間側では大きく、長時間側で小さ

い傾向を示すが、高温になるにしたがつて長時間側での曲線の傾斜がゆるやかになり、750℃では長時間側でかえつて伸びが大きくなっている。このことは、高温長時間側で再結晶が始まっていることを示すものではないかと思われる。また、A材の伸びは、B材に比べて低温側では大きい、高温長時間側になるとB材より小さく逆転している。総合的にみて、その逆転の時間は、高温になるにつれて短時間側に移動しているようである。したがってA材はB材よりも再結晶の開始がややおくらしているものと思われる。

いずれにしても、本試験温度および試験時間の範囲内では、内圧クリーブ破断後の試験片（破断部を除いた箇所）の外径の伸びの最低値が0.8%、単軸引張クリーブ試験後の破断伸びの最低値が0.6%というように伸びが非常に小さくなる場合があることがわかった。

6.9 破断後の試験片の硬さ

破断後の内圧クリーブ破断試験片の軸方向位置における硬さ（ H_V ）を測定したが、その一例として650℃におけるA材の長時間側の場合をFig.43に、650℃におけるB材の長時間側の場合をFig.44に示す。硬さ（各プロットは数測定値の平均値）は、ピツカース硬さ測定時の測定荷重が異なっている（各試験機関によつて異なる）のも一因であろうか、測定値にやや差異がみられる。また、同一試験片の測定値（破断部を除く）も軸方向位置によつてややばらつきがみられる。しかしこのばらつきはあまり大きなものではないとし、かつ他の試験温度でもほぼ同様なばらつきであると考えて、同一試験片の測定値を平均してみた。そして、4試験温度における長時間破断後の試験片の硬さの平均値をLarson-Millerパラメータ（定数の値を20とした）で整理してみたのがFig.45である。この図における各プロットは、同一試験片での縦断面の値と横断面の値をも平均してあるが、ばらつきが大きい。しかし総合的にみると、パラメータ値が20~22の間では硬さの低下の傾向がうかがえる。

単軸引張クリーブ破断後の試験片の各温度における長時間側の硬さ（ H_V , 200g, 数測定値の平均値）とLarson-Millerパラメータ（定数の値を20とした）の関係をFig.46に示す。A材の硬さはB材より大であり、パラメータ値の変化に対してあまり影響をうけていないが、B材の硬さは、パラメータ値が22~24.3の間では、小さくなる傾向がやや認められる。このことは、破断伸びのところで述べたように、B材の高温長時間側では再結晶がA材よりも早く始まるということに関連しているものと思われる。

6.10 破断後の組織

内圧クリーブ破断後の試験片の破断部とその裏側の部分の光学顕微鏡組織の一例をPhoto.3に示す。破壊は粒界で起つているが、B材700℃,815.0hrでは破断部近傍に多くの粒界亀裂があるのがわかる。なおこの写真では、縦断面において加工の影響が破断後もやや残っている（素材の加工の影響はTable 2を参照）のがわかる。

各試験温度における長時間破断後の光学顕微鏡組織（破断部近傍）をPhoto.4（内圧クリーブ破断）とPhoto.5（単軸引張クリーブ破断）に示す。高温になるにつれて結晶

粒内，粒界に析出物が多くなり，750℃では σ 相が析出し，再結晶により結晶粒が粗大化しているのがわかる。A材とB材とでは，結晶粒の大きさを除いて，組織上大きな差異は認められない。

これら炭化物の析出， σ 相の析出および再結晶のふるまいは，得られたクリーブ破断曲線，クリーブ曲線，破壊の様相，破断伸び，硬さなどのふるまいに密接に関連している。

7. ま と め

高速実験炉用燃料被覆管の内圧クリーブ破断試験と単軸引張クリーブおよびクリーブ破断試験を，非照射の条件下で行なった結果をまとめると次のとおりである。

- (1) 国内2製造会社で試作されたA材およびB材のクリーブ特性には差異があつた。
- (2) 内圧クリーブ破断試験において，各試験機関で得られたデータには有意な差がなかつた。
また，Arガス雰囲気中の試験の行なわれた試験温度650℃と700℃および試験時間約3,000hrの範囲内では，雰囲気によるデータの差異は認められなかつた。
- (3) 内圧クリーブ破断試験と単軸引張クリーブ破断試験の関連を調べた結果，平均径の式で両者をよく関連させることができることがわかつた。
- (4) クリーブ破断強さについて，本試験データとISOのデータとを比較すると，本試験データは，冷間加工されていない試験材料についてのISOのデータより，短時間側ではやや大であることがわかつたが，長時間側ではISOのデータに近づいている傾向がみられた。
- (5) 得られた試験結果を統計的に解析した結果，基礎的設計資料としての本文Table 13に示すような応力値が求まつた。

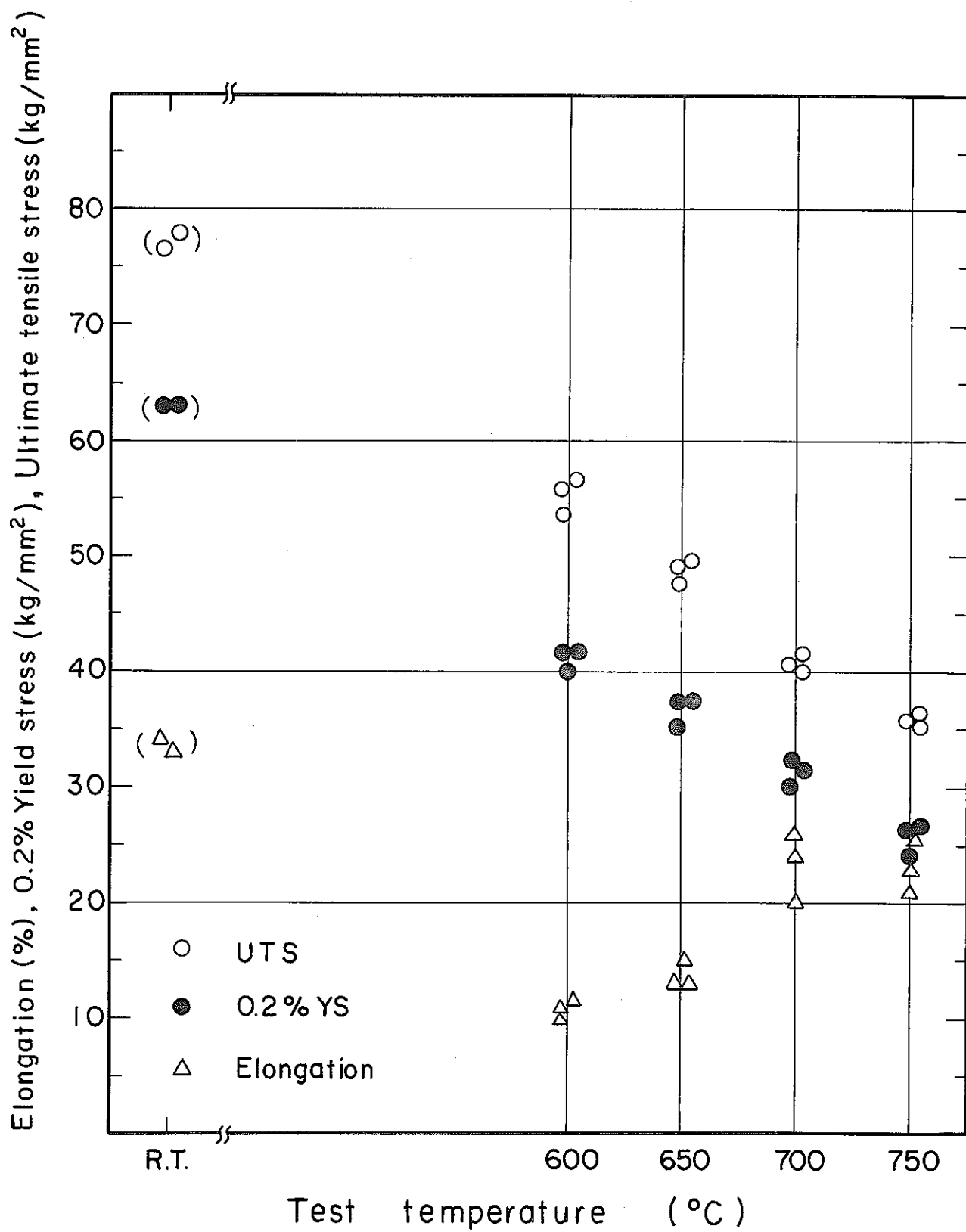


Fig. 1 Tensile properties vs. test temperature.
(Tube A)

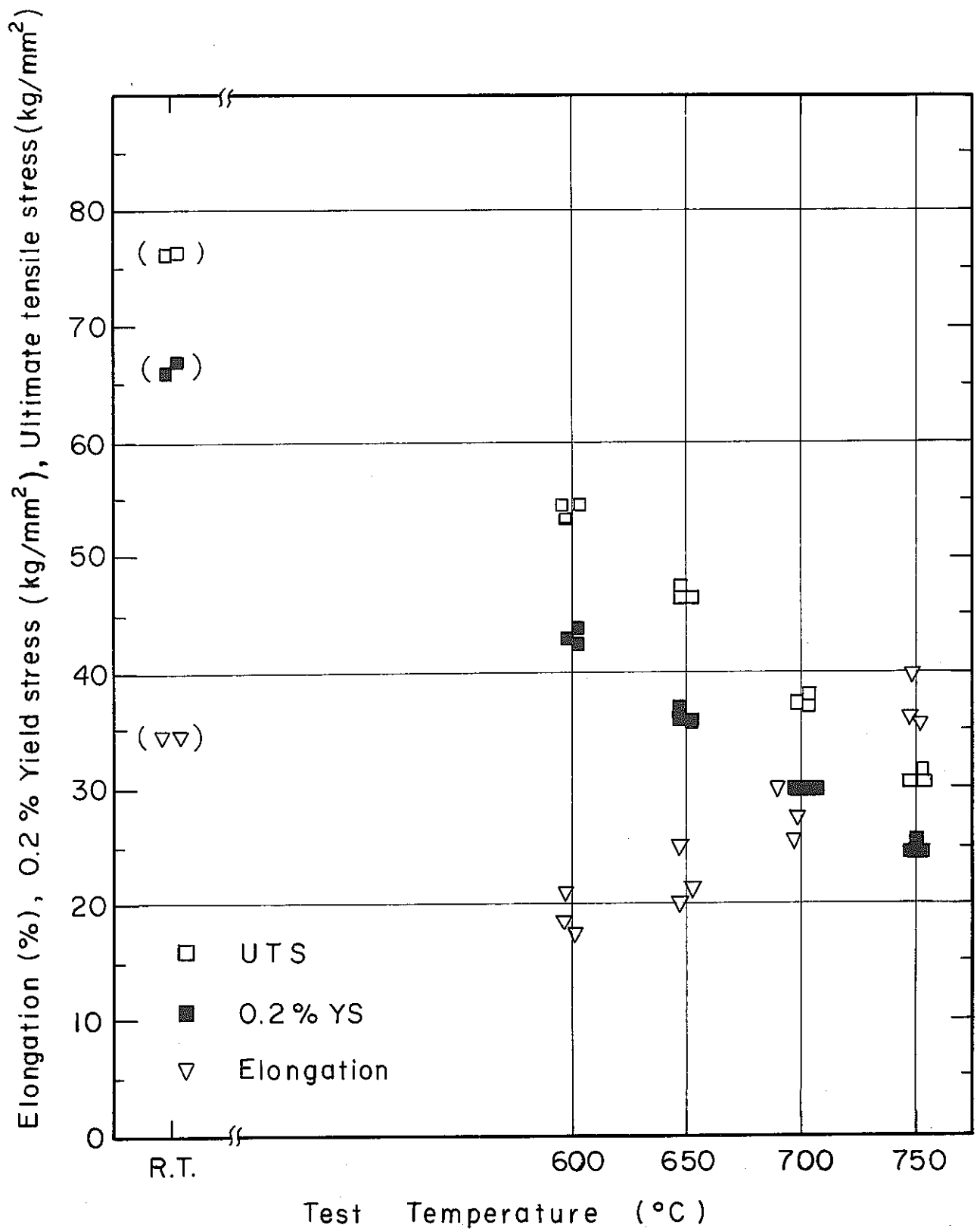


Fig. 2 Tensile properties vs. test temperature (Tube B)

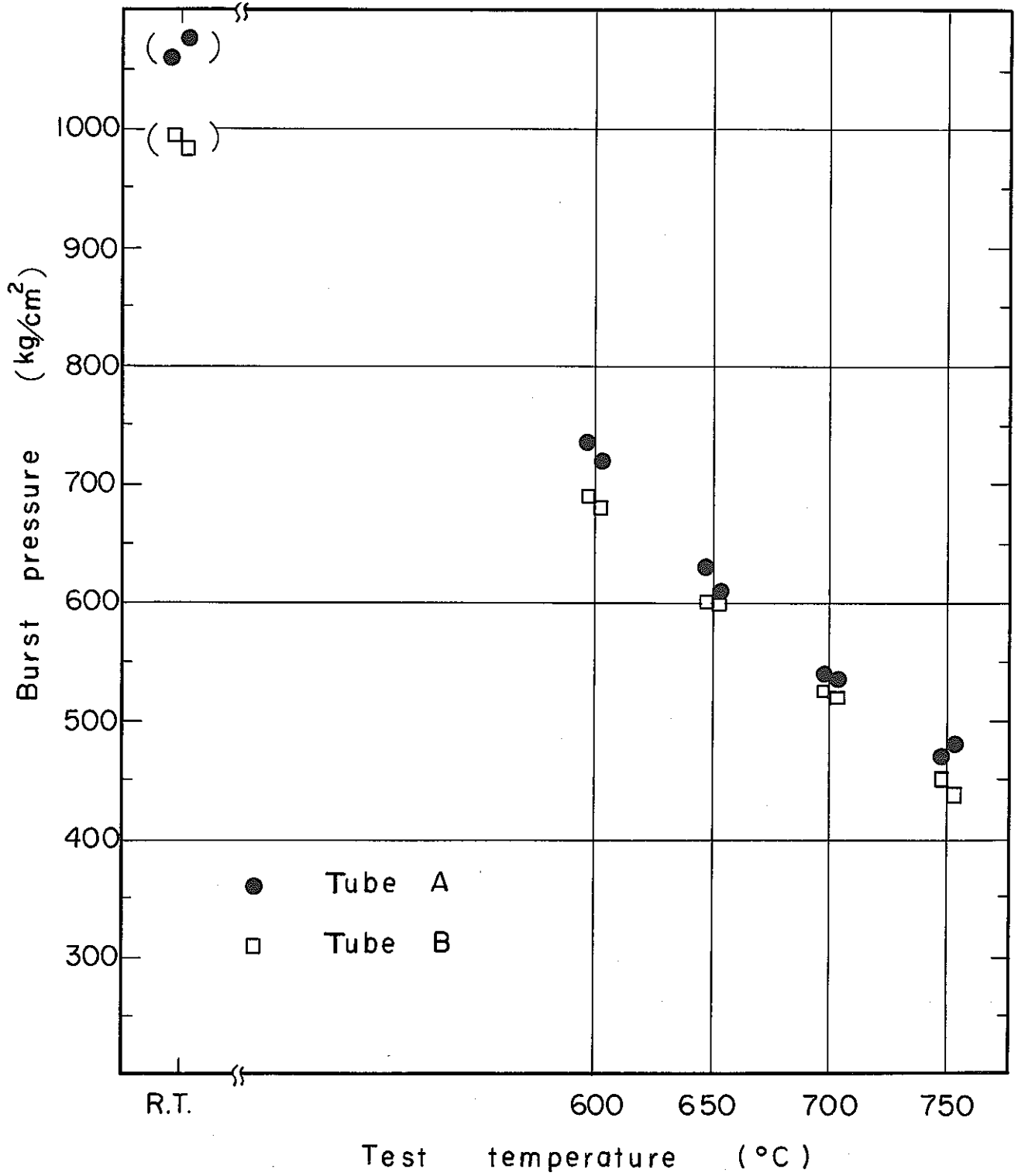


Fig. 3 Burst pressure vs. test temperature

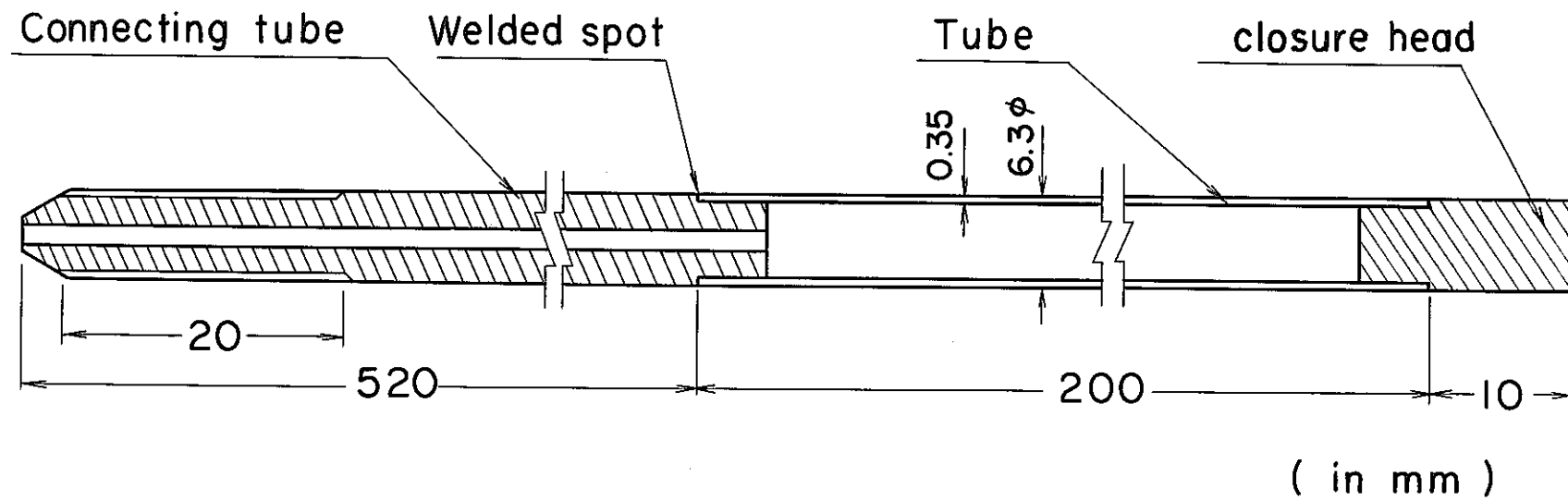


Fig. 4 Tubular creep-rupture specimen under internal pressure.

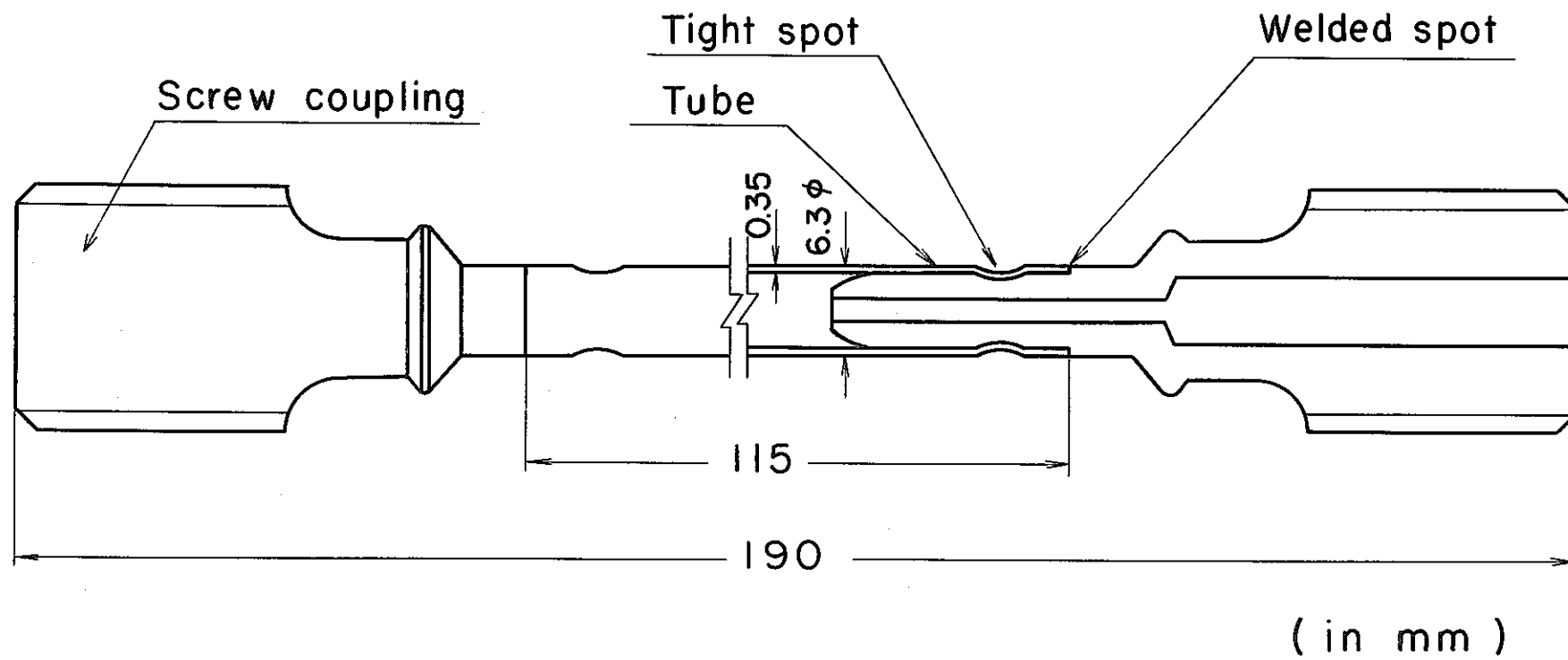


Fig. 5 Tubular creep specimen under uniaxial tension.

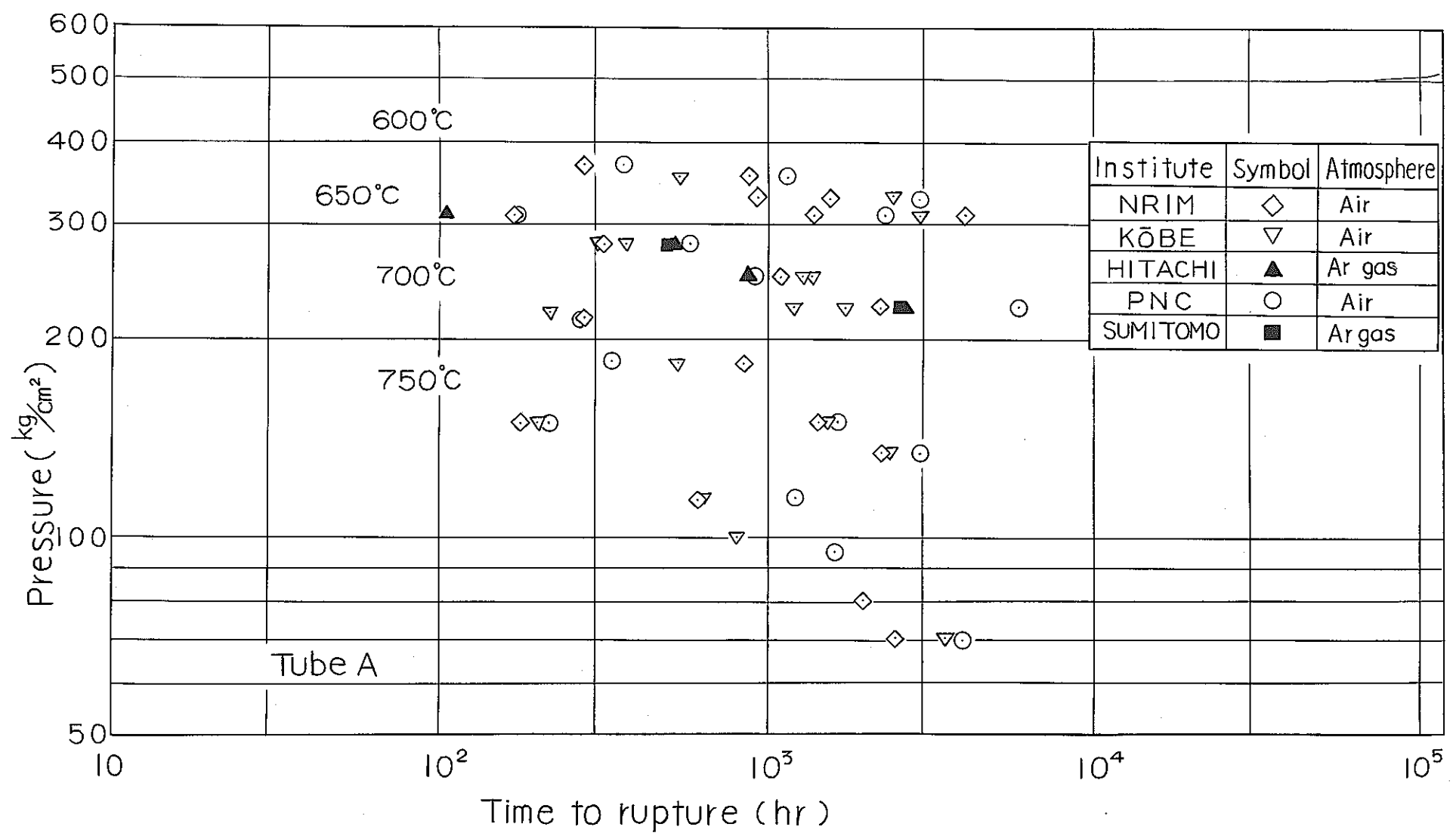


Fig. 6 Creep-rupture data under internal pressure for Tube A.

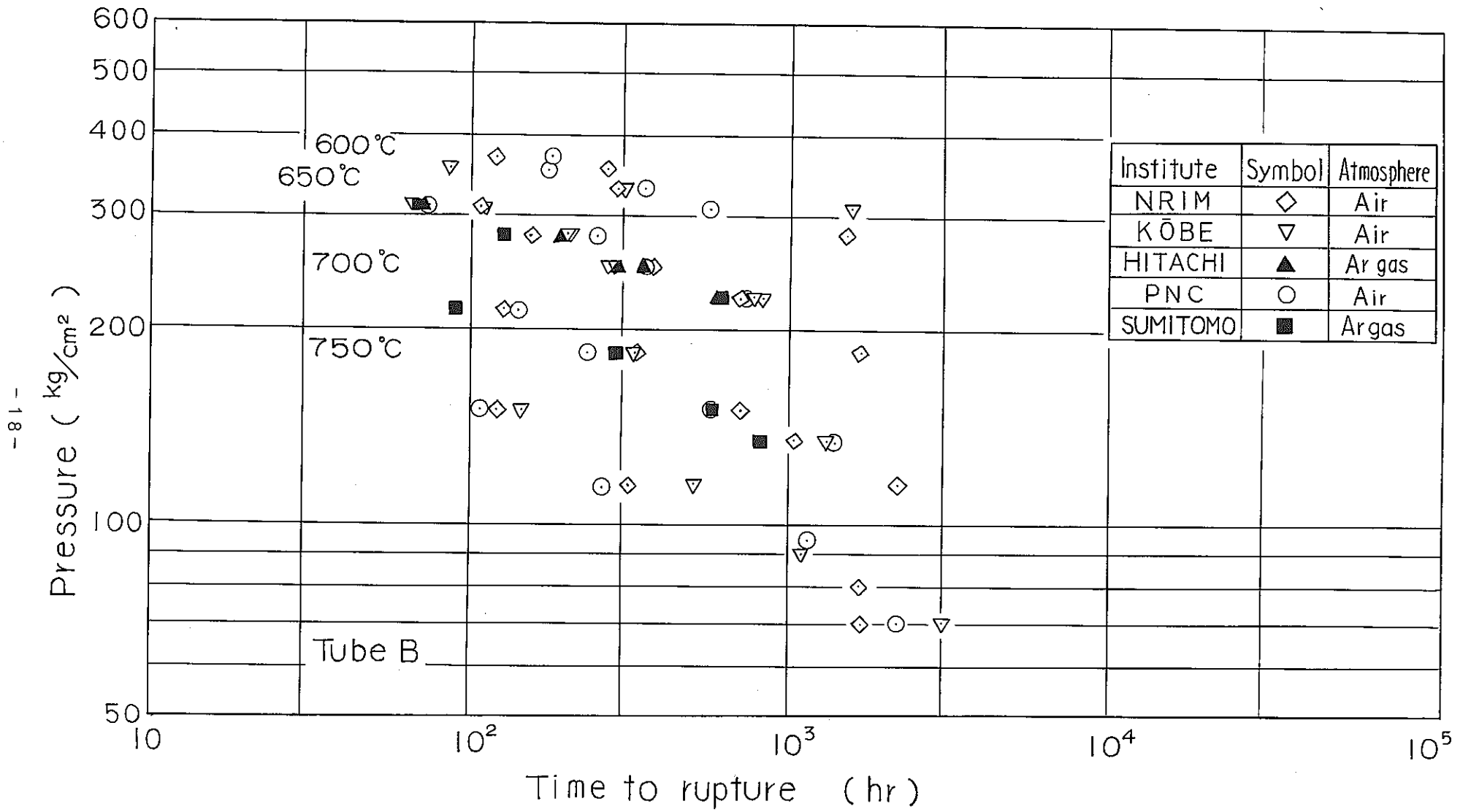


Fig. 7 Creep-rupture data under internal pressure for Tube B.

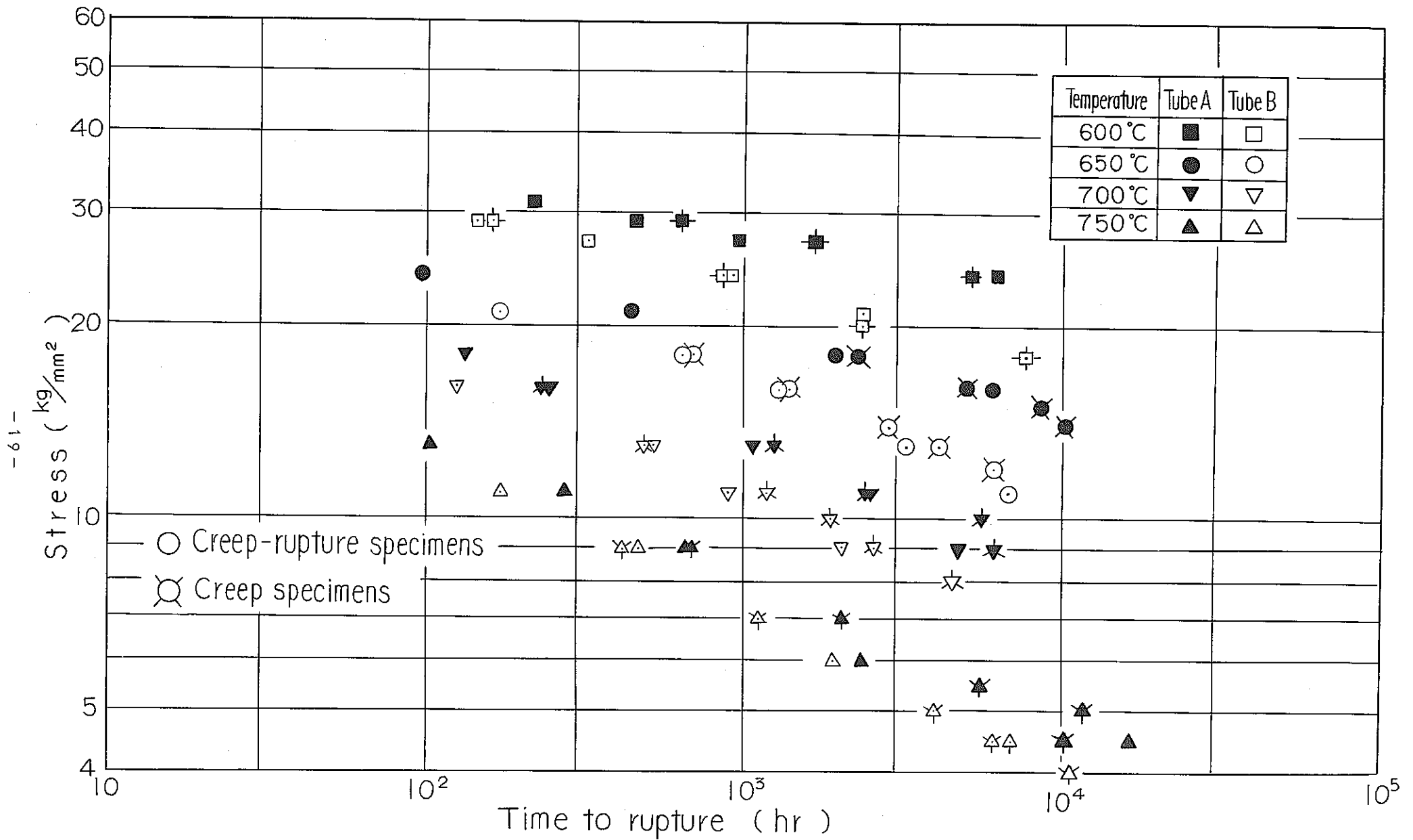


Fig. 8 Creep-rupture data under uniaxial tension for Tubes A and B.

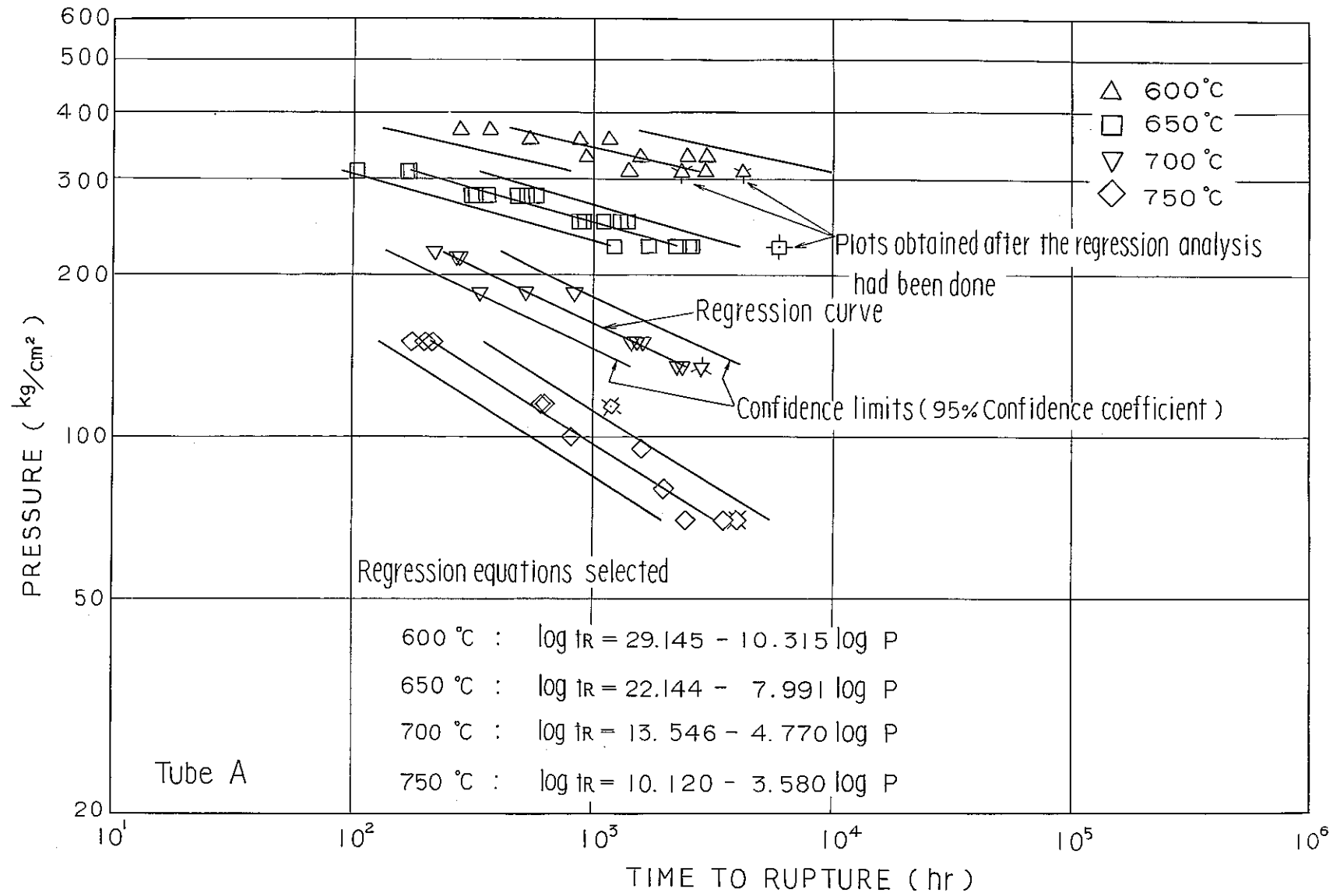


Fig. 9 Regression curves and confidence intervals on creep-rupture data under internal pressure for Tube A.

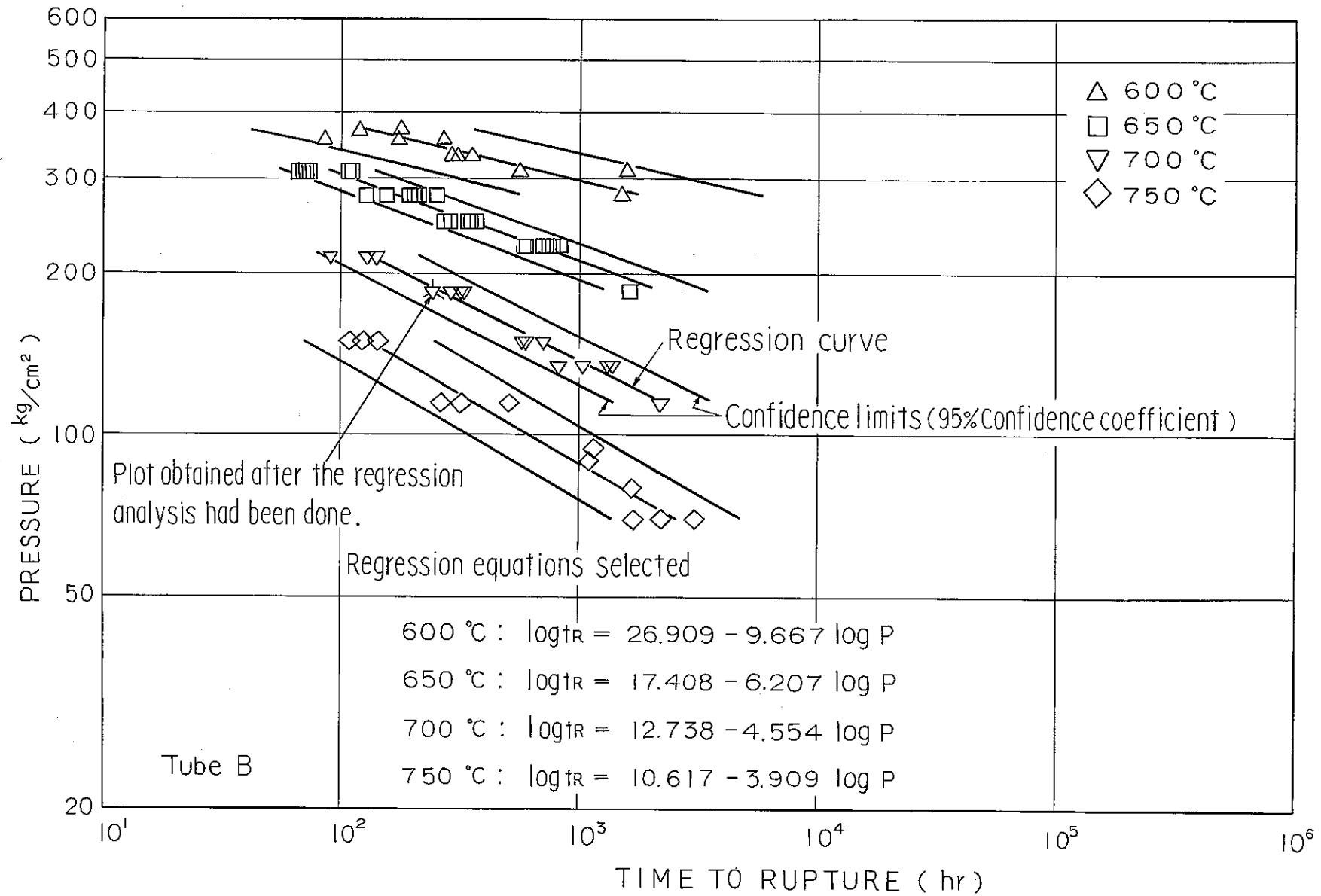


Fig. 10 Regression curves and confidence intervals on creep-rupture data under internal pressure for Tube B.

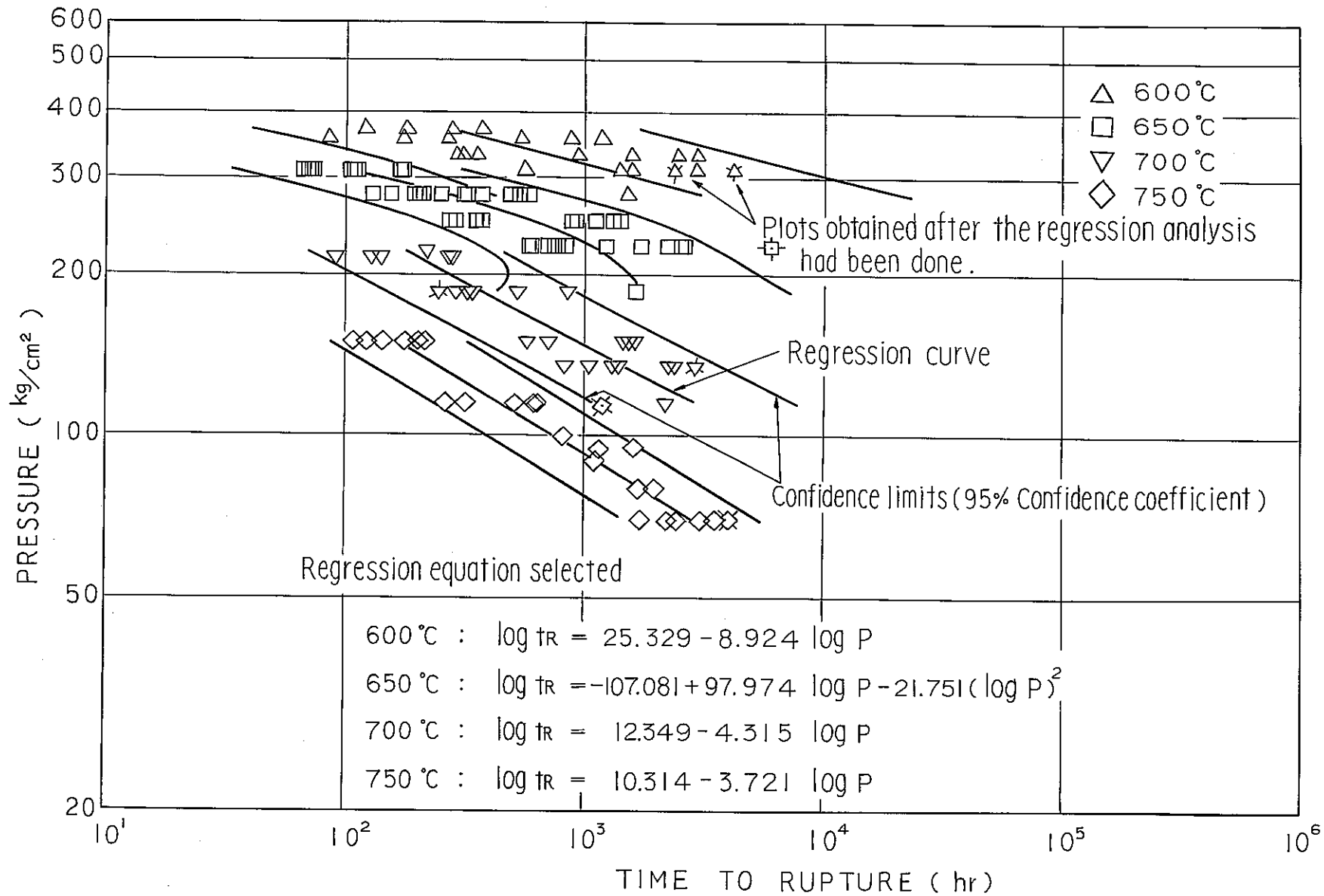


Fig.11 Regression curves and confidence intervals on creep-rupture data under internal pressure for Tubes A and B.

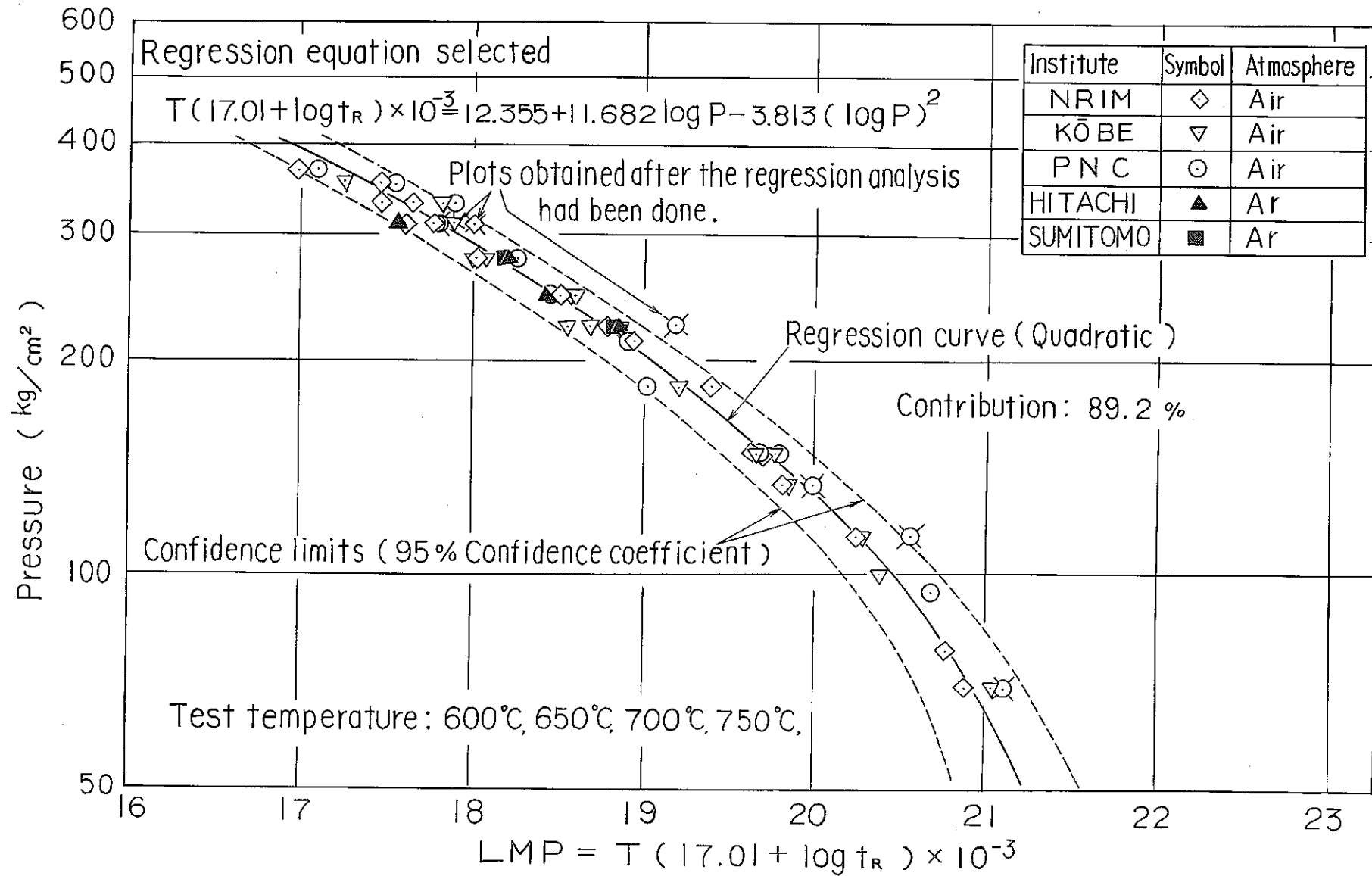


Fig.12 Regression curve and confidence interval on master rupture data under internal pressure for Tube A.

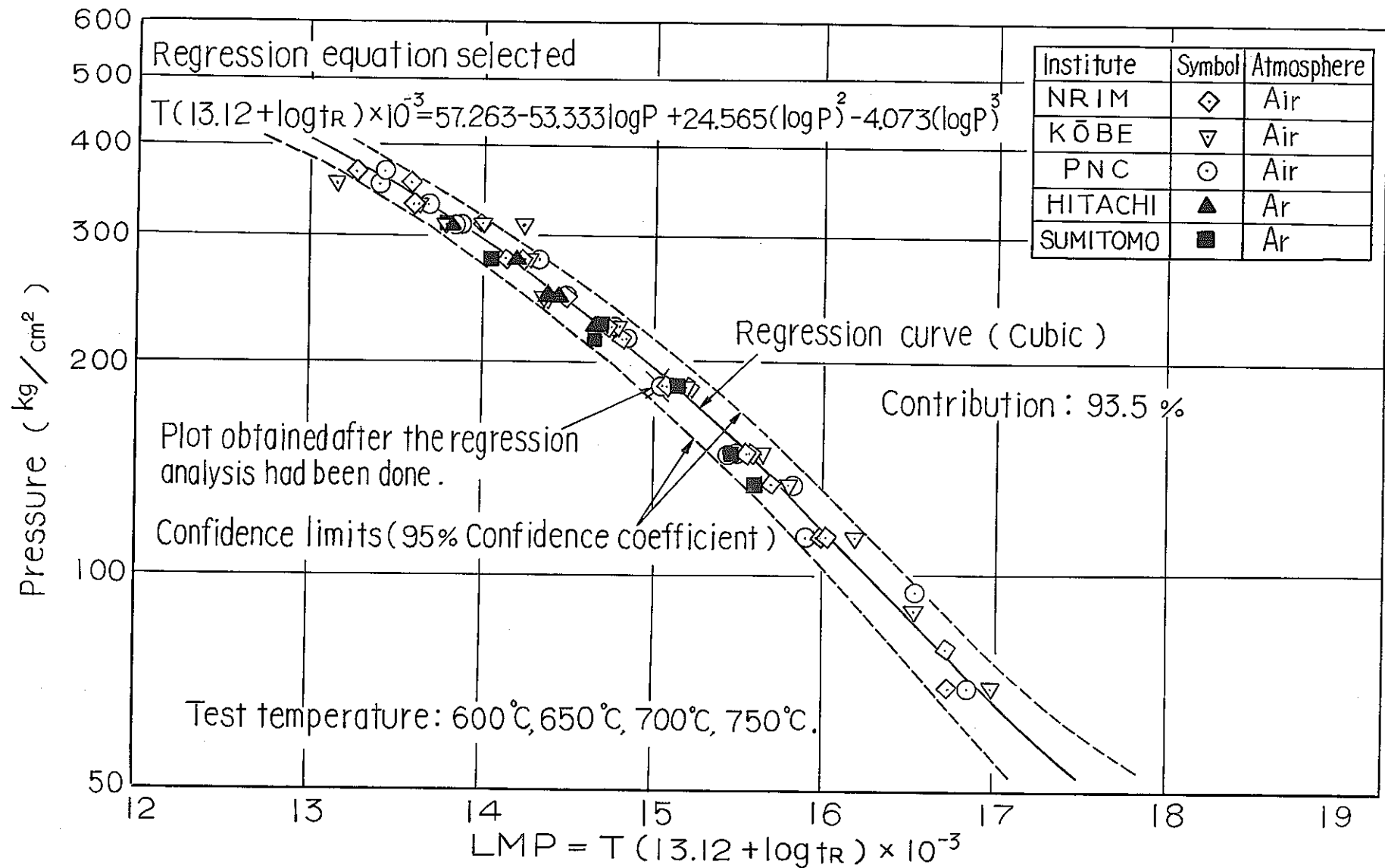


Fig.13 Regression curve and confidence interval on master rupture data under internal pressure for Tube B.

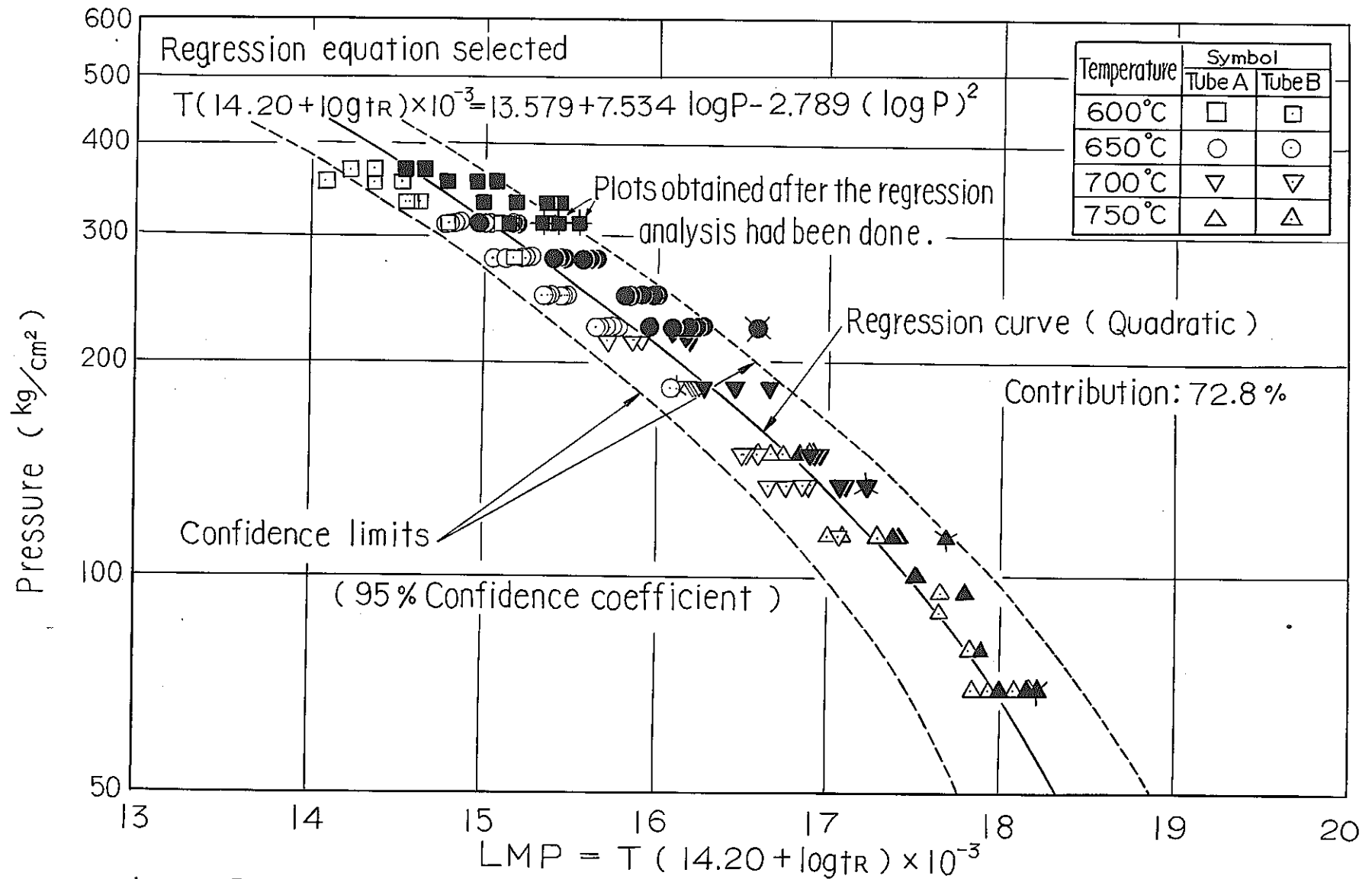


Fig. 14 Regression curve and confidence interval on master rupture data under internal pressure for Tubes A and B.

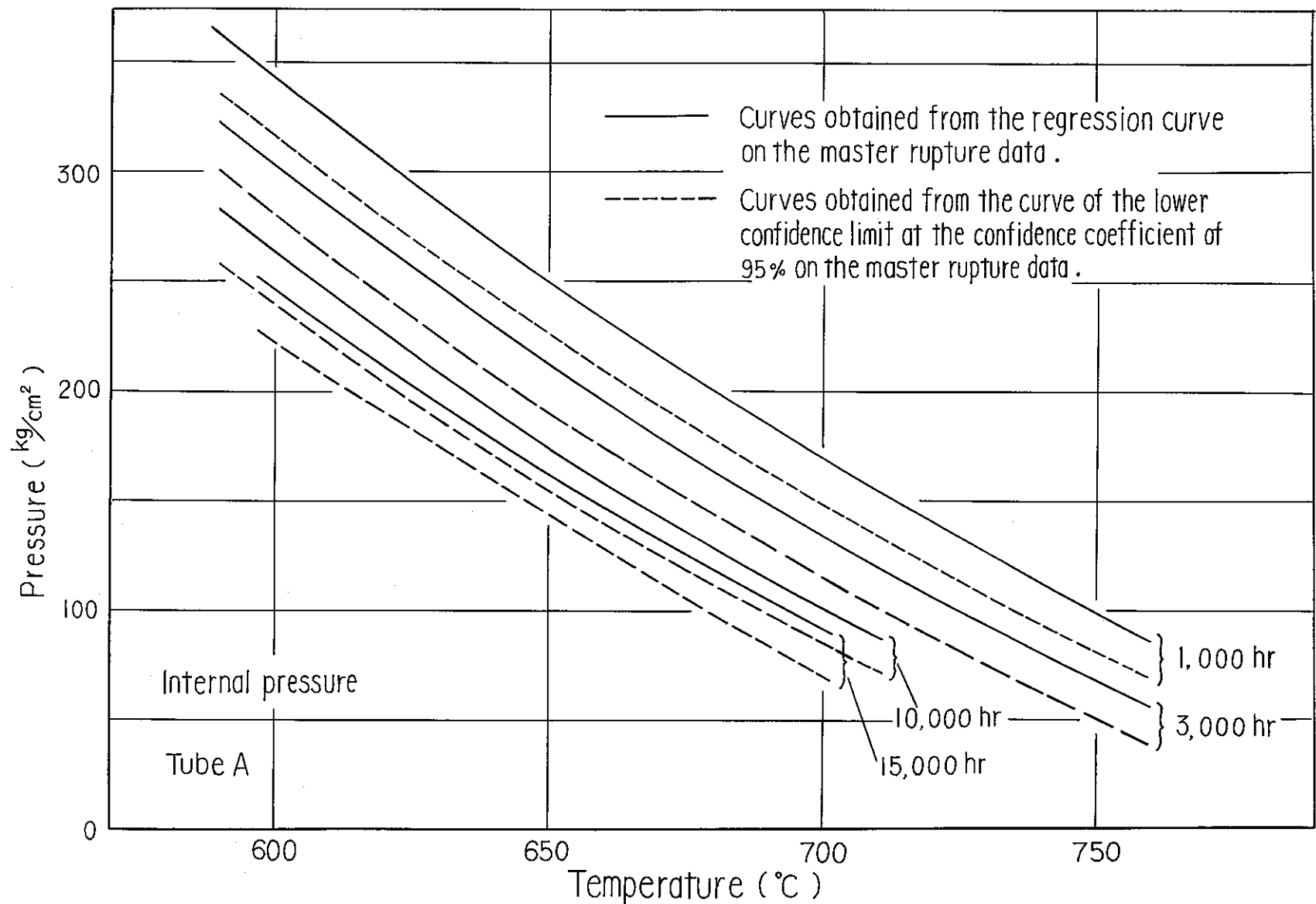


Fig. 15 Relations of temperature versus pressure estimated from the regression curve and the confidence interval on the master rupture data under internal pressure for Tube A.

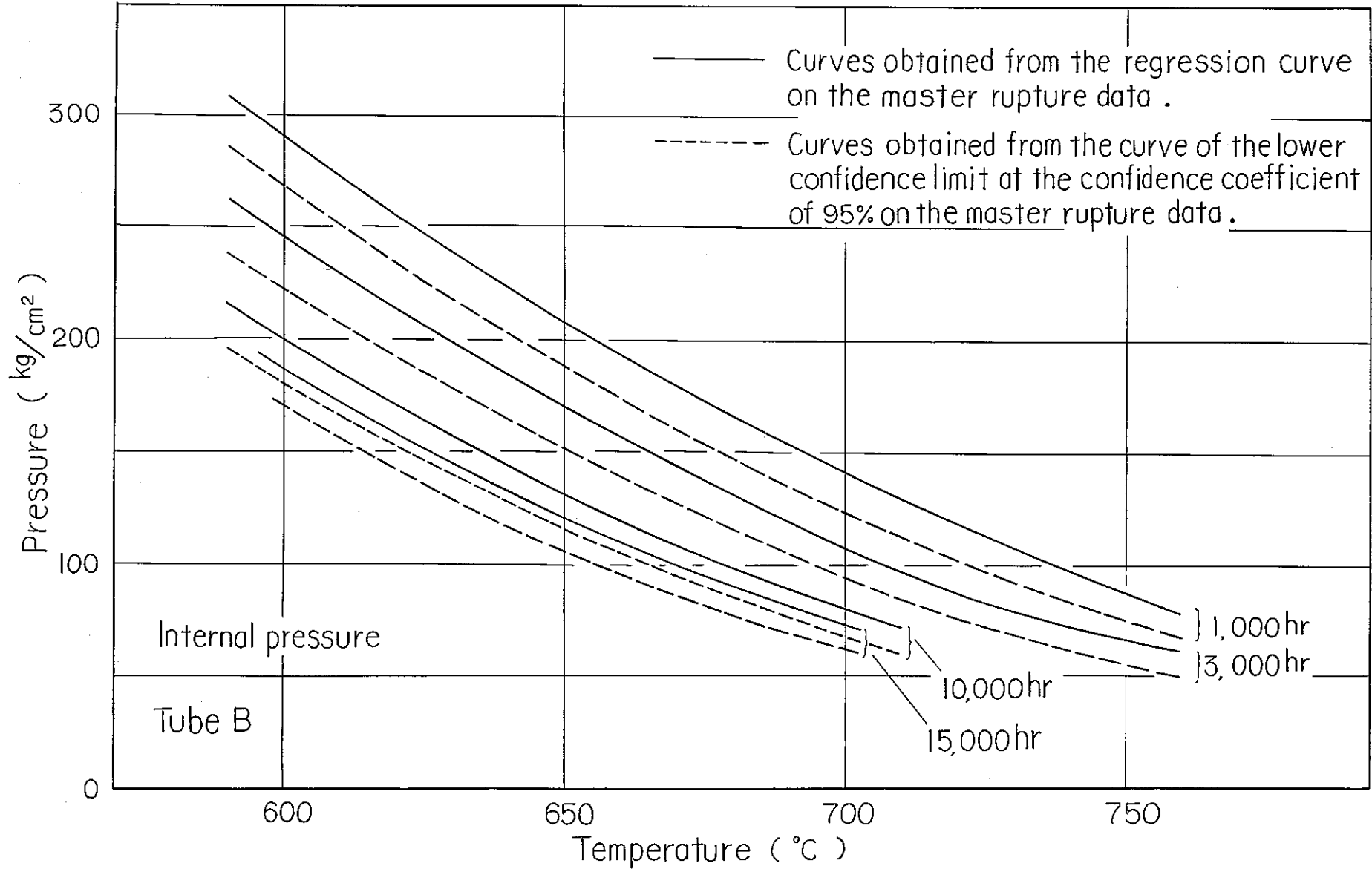


Fig.16 Relations of temperature versus pressure estimated from the regression curve and the confidence interval on the master rupture data under internal pressure for Tube B .

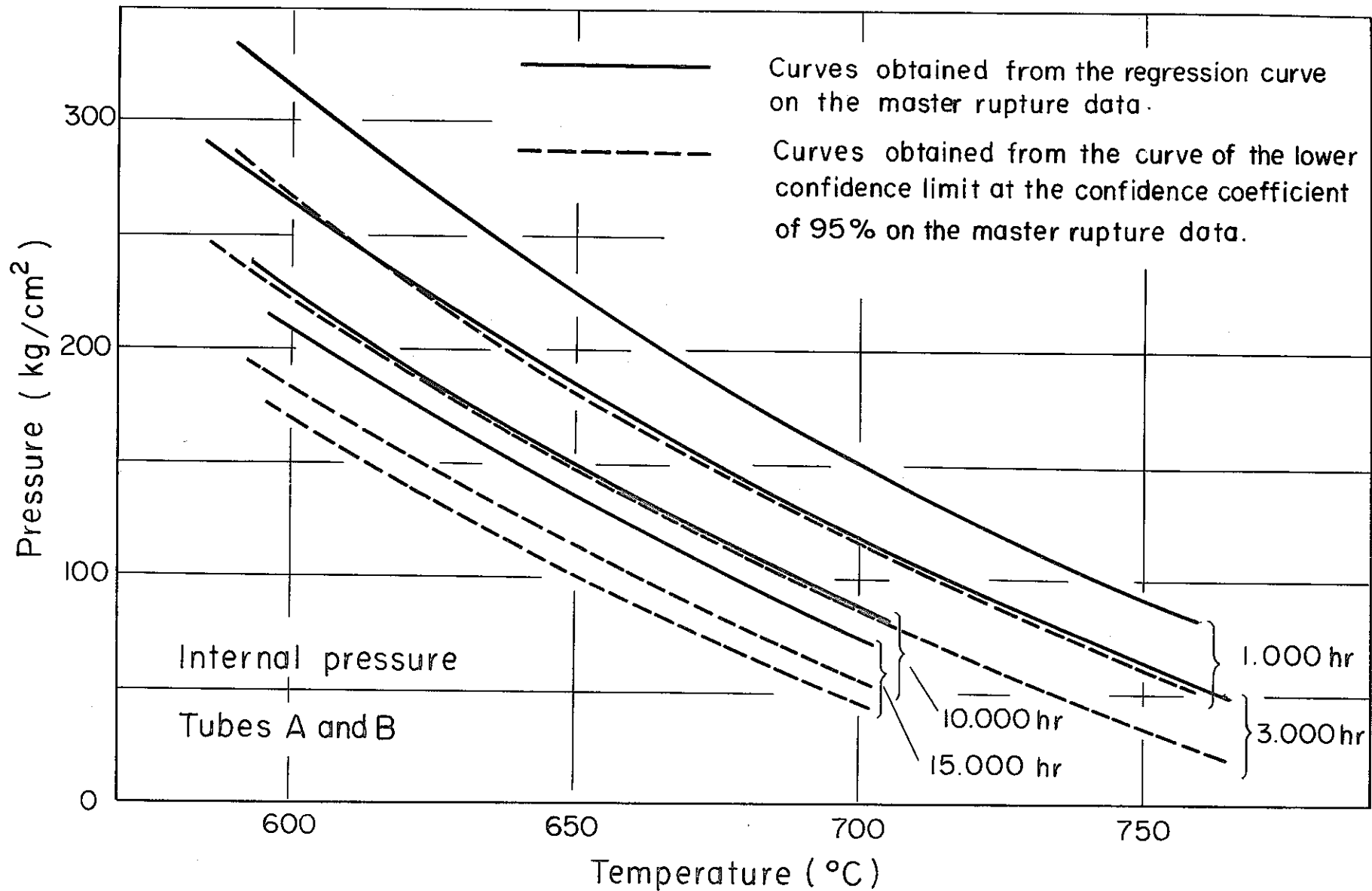


Fig. 17 Relations of temperature versus pressure estimated from the regression curve and the confidence interval on the master rupture data under internal pressure for Tubes A and B.

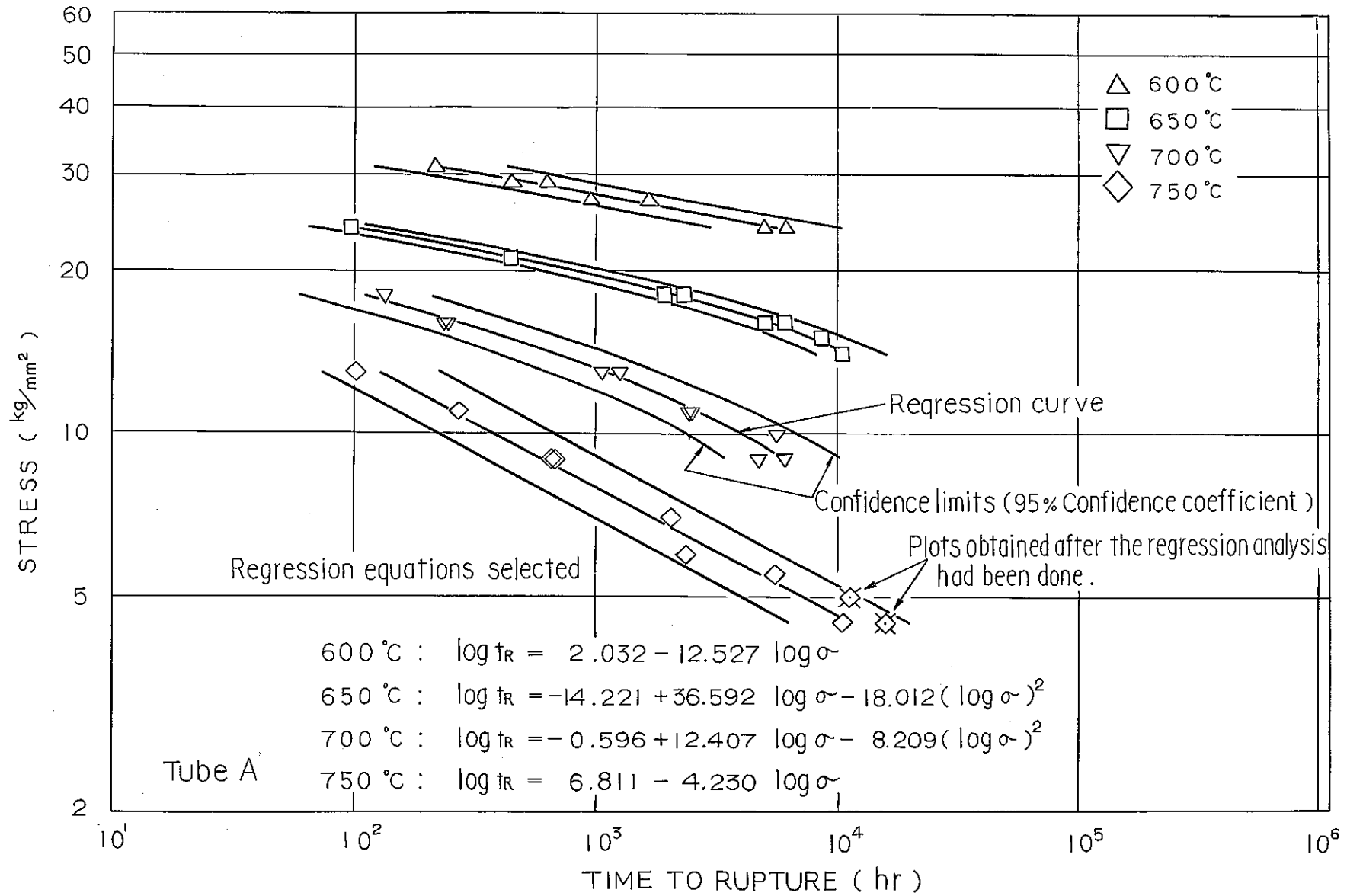


Fig. 18 Regression curves and confidence intervals on creep-rupture data under uniaxial tension for Tube A.

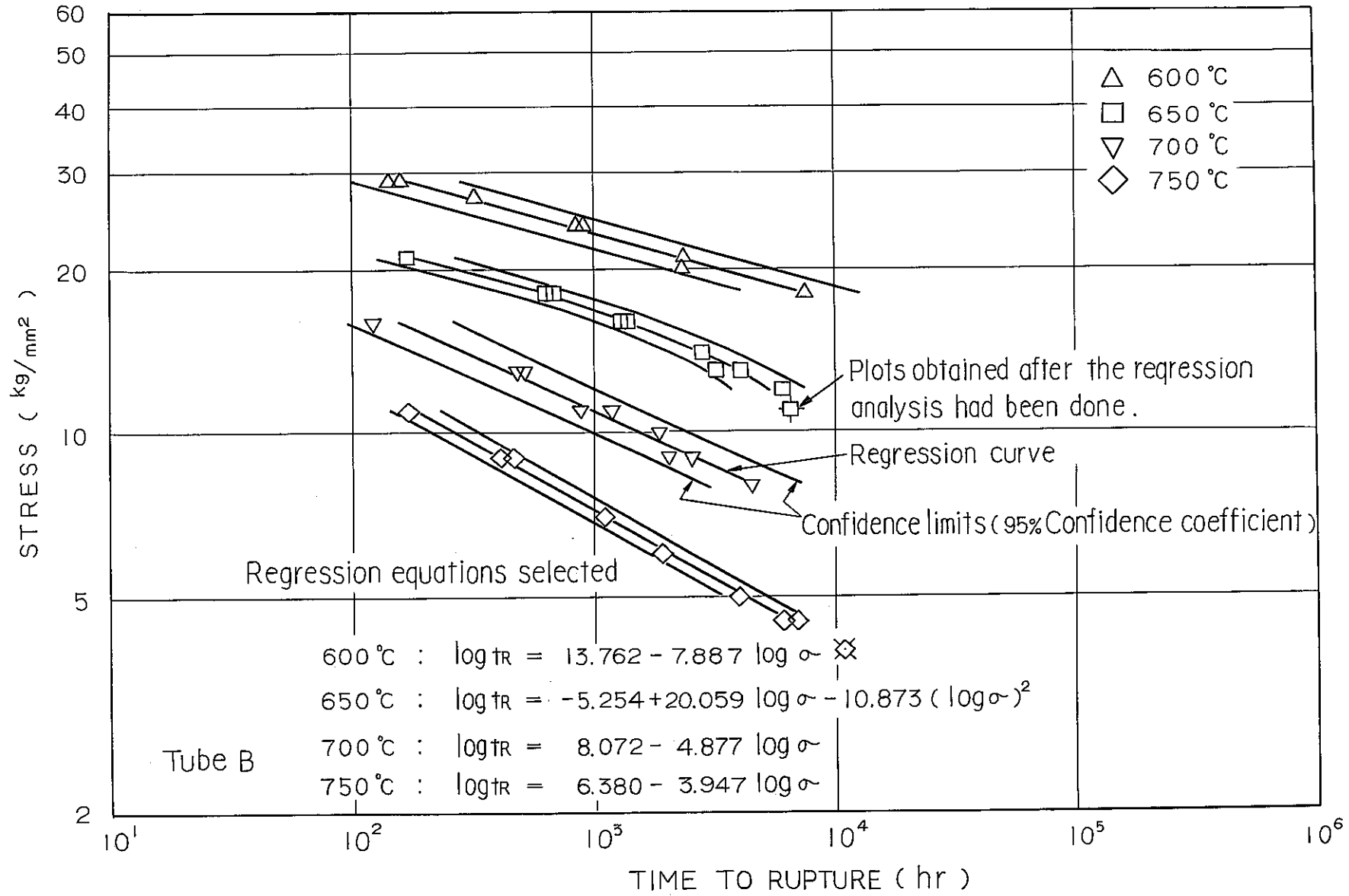


Fig. 19 Regression curves and confidence intervals on creep-rupture data under uniaxial tension for Tube B.

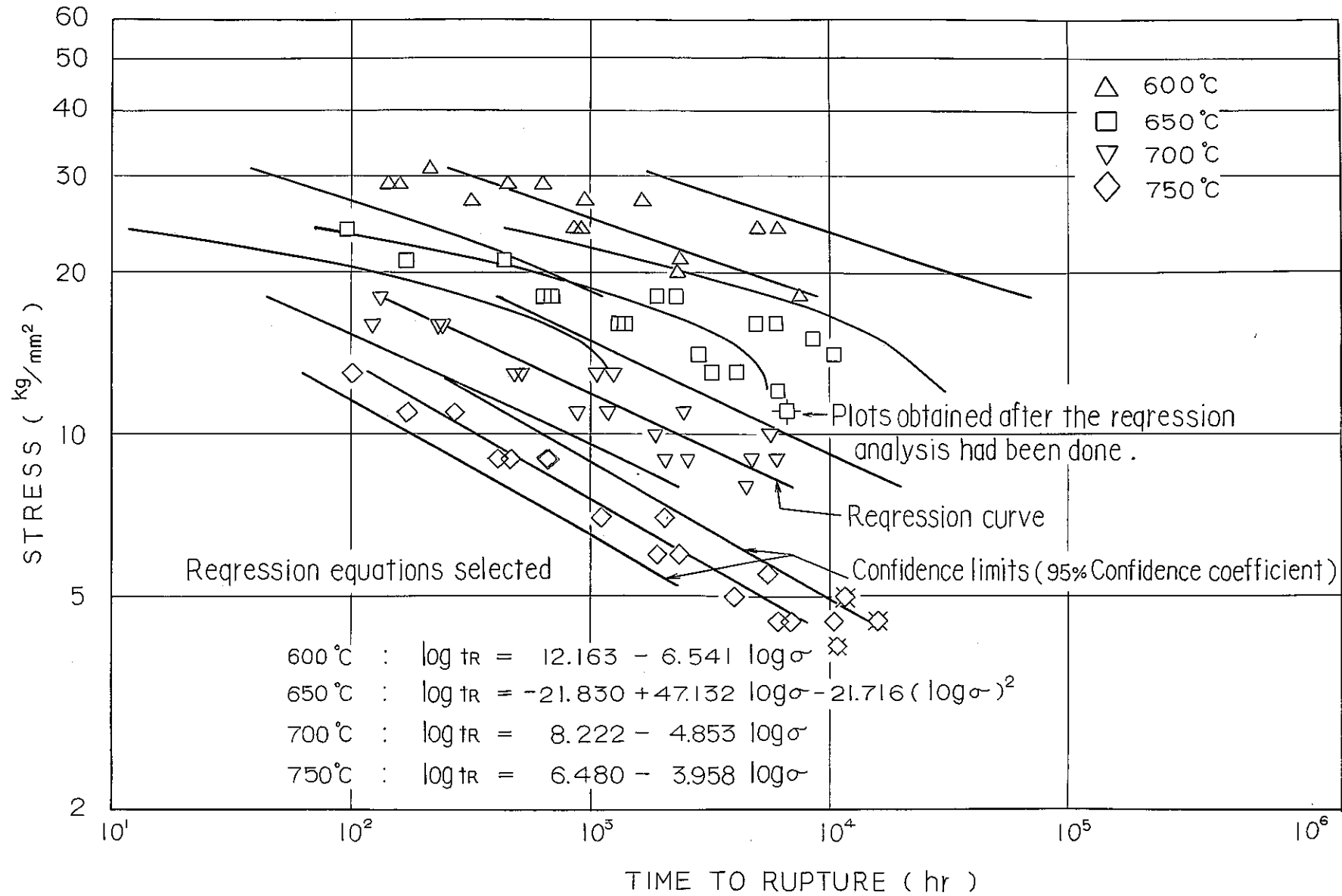


Fig.20 Regression curves and confidence intervals on creep-rupture data under uniaxial tension for Tubes A and B.

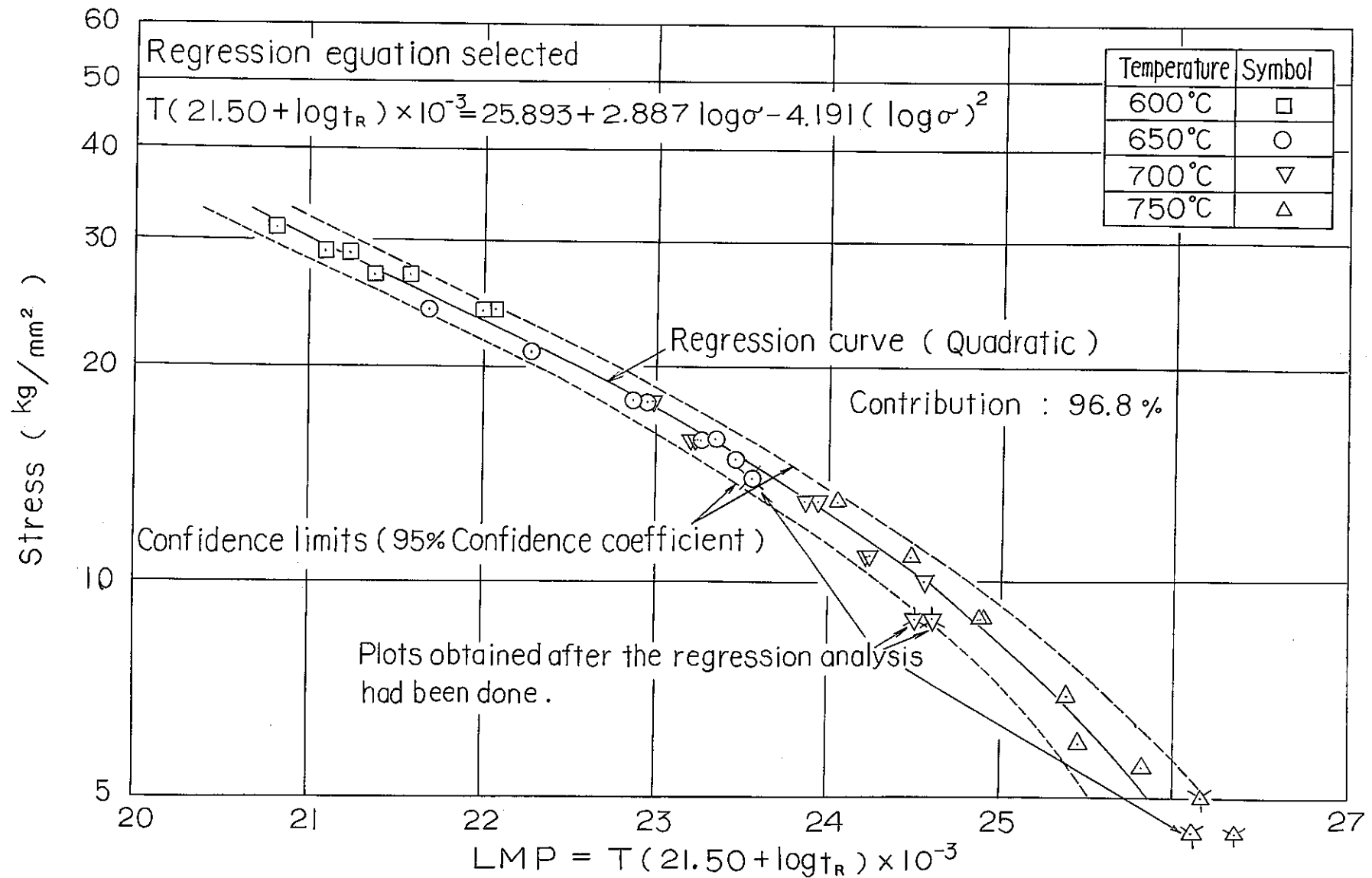


Fig. 21 Regression curve and confidence interval on master rupture data under uniaxial tension for Tube A.

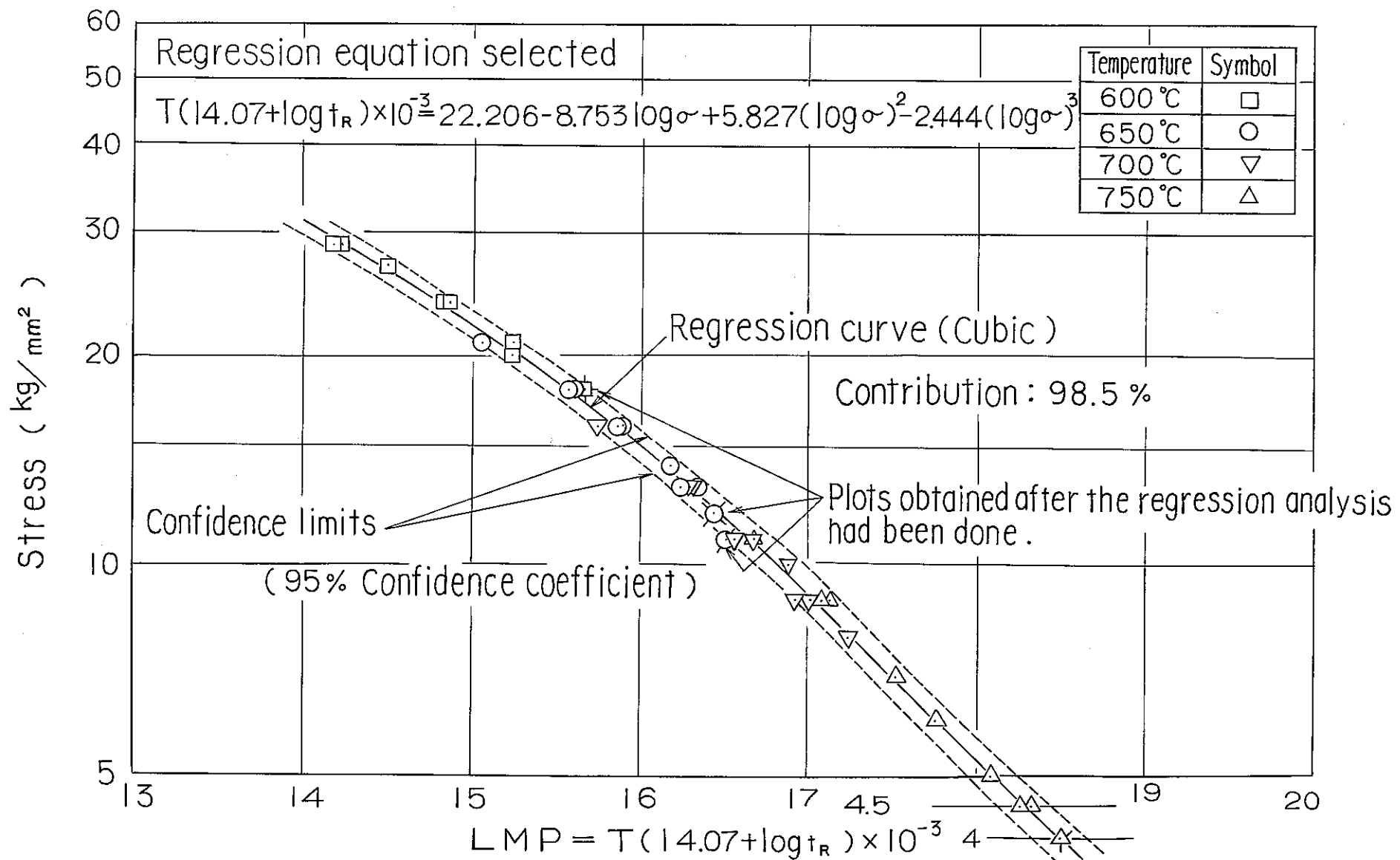


Fig. 22 Regression curve and confidence interval on master rupture data under uniaxial tension for Tube B.

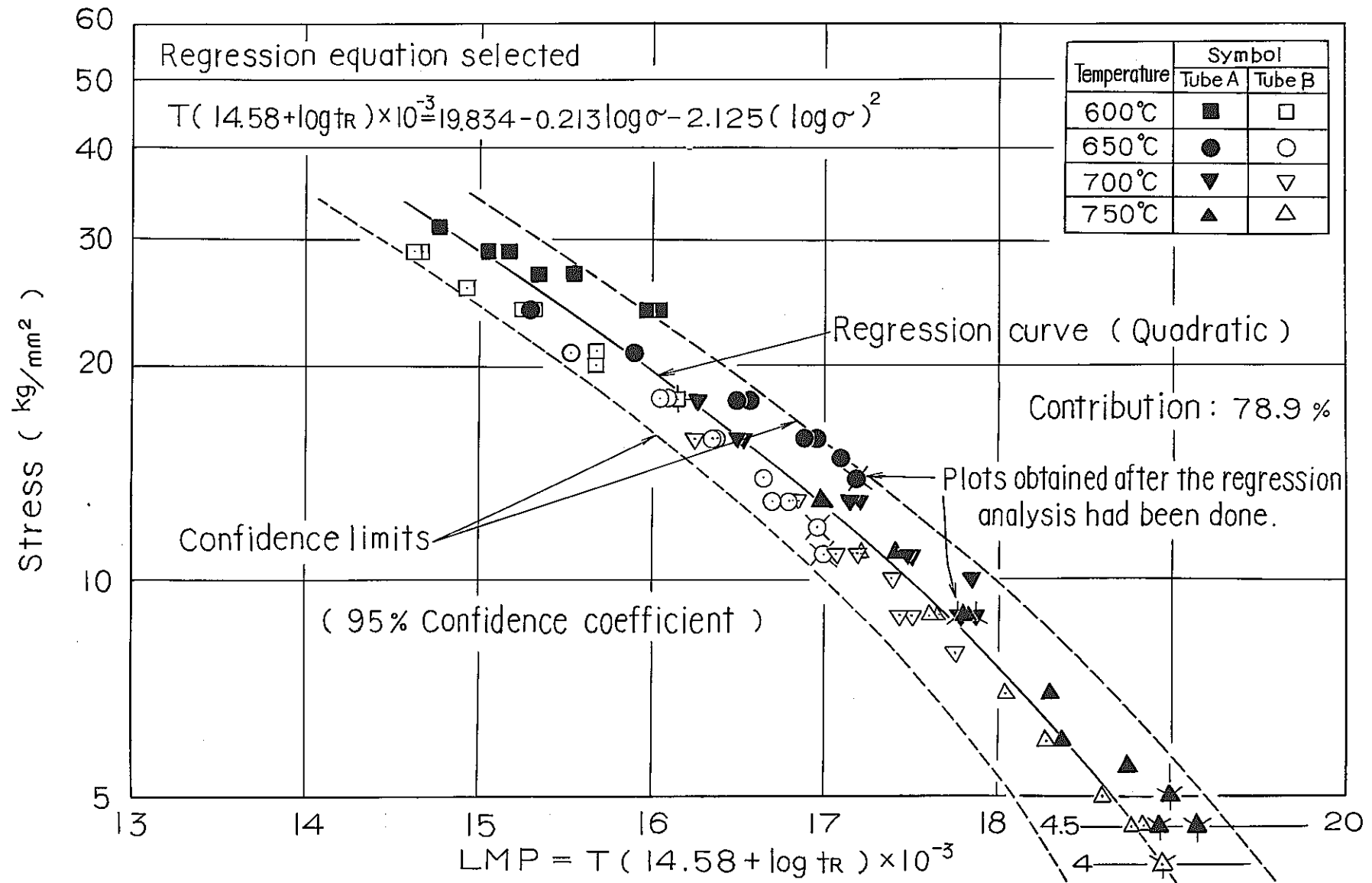


Fig. 23 Regression curve and confidence interval on master rupture data under uniaxial tension for Tubes A and B.

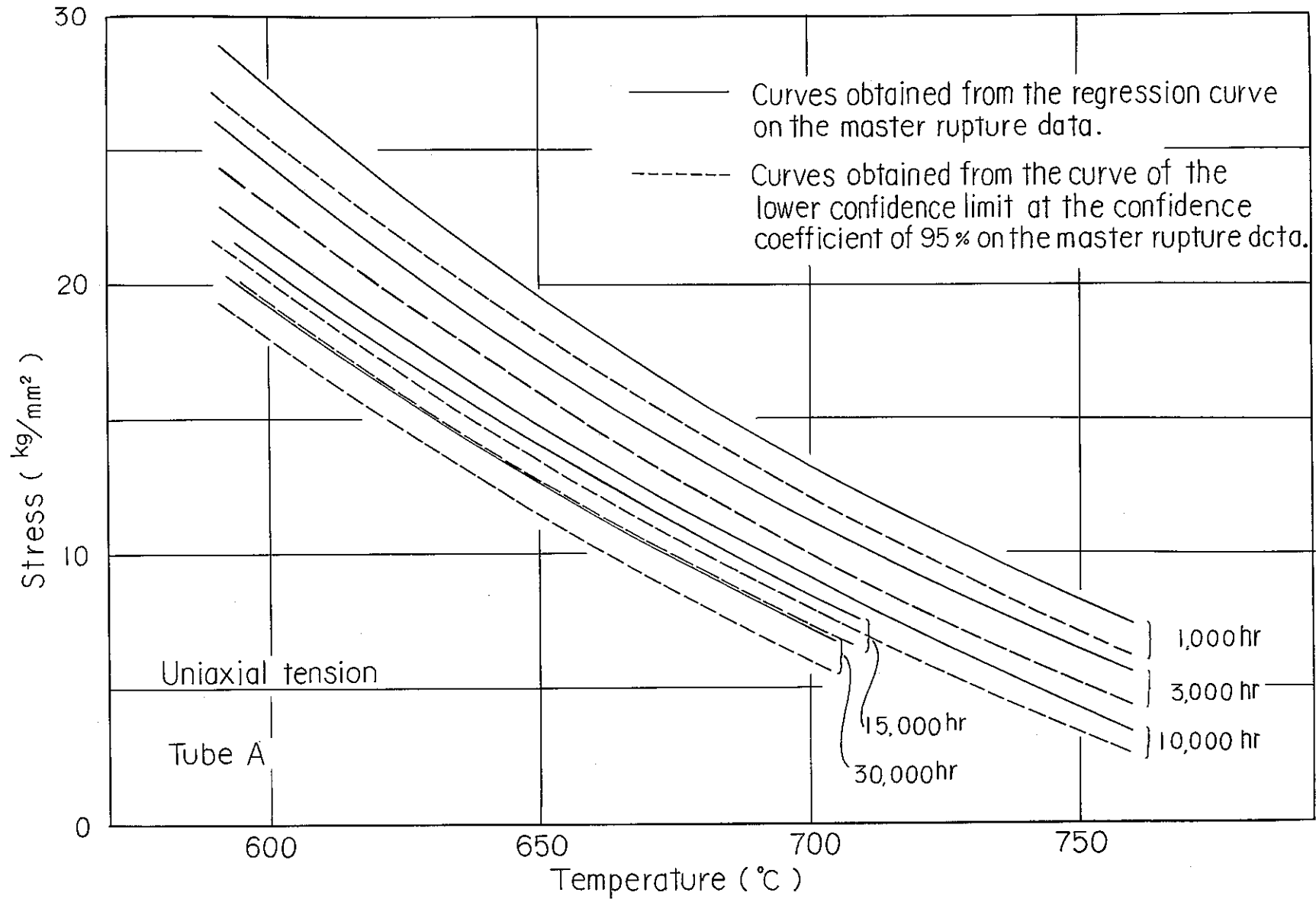


Fig. 24 Relations of temperature versus stress estimated from the regression curve and the confidence interval on the master rupture data under uniaxial tension for Tube A.

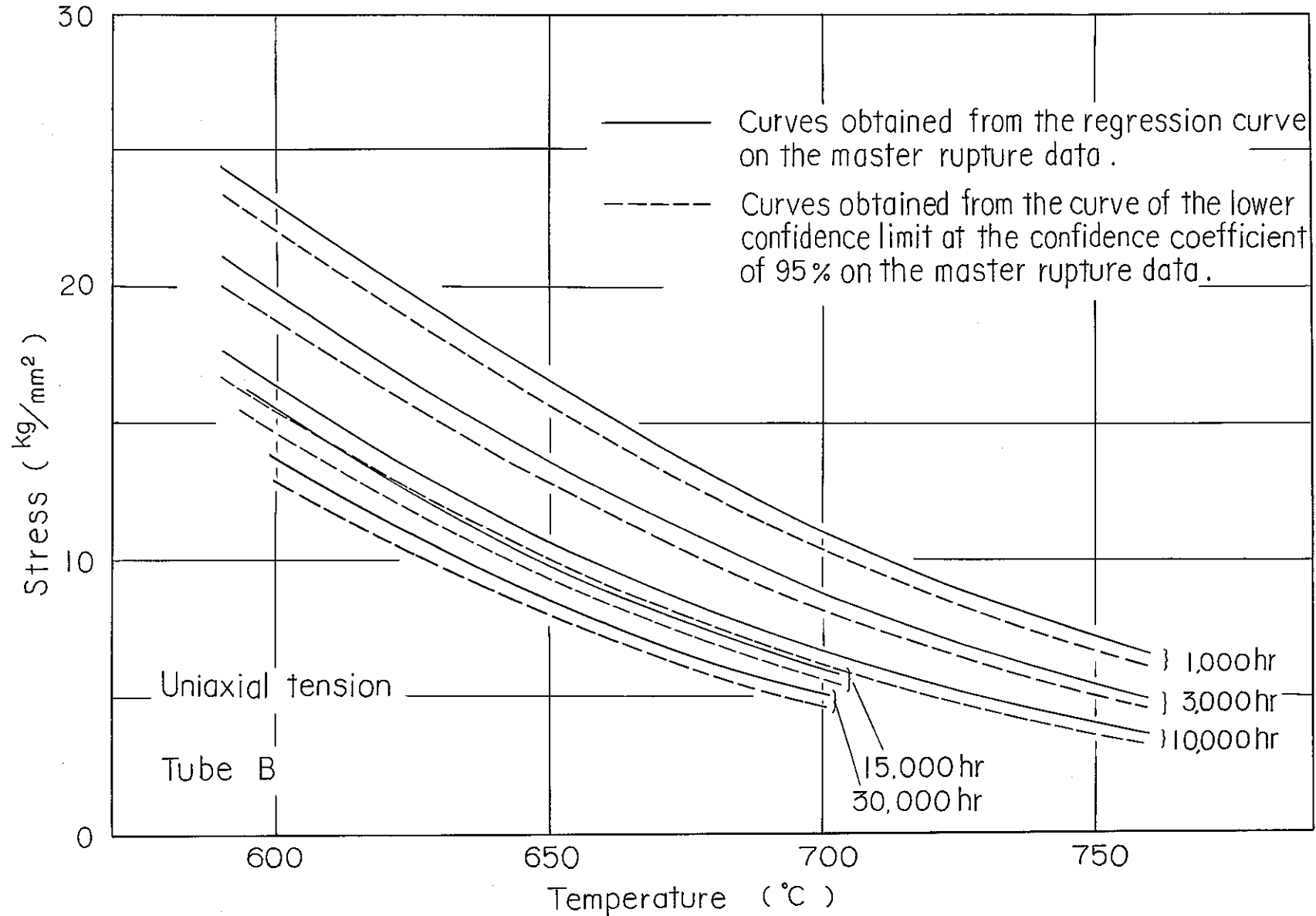


Fig. 25 Relations of temperature versus stress estimated from the regression curve and the confidence interval on the master rupture data under uniaxial tension for Tube B.

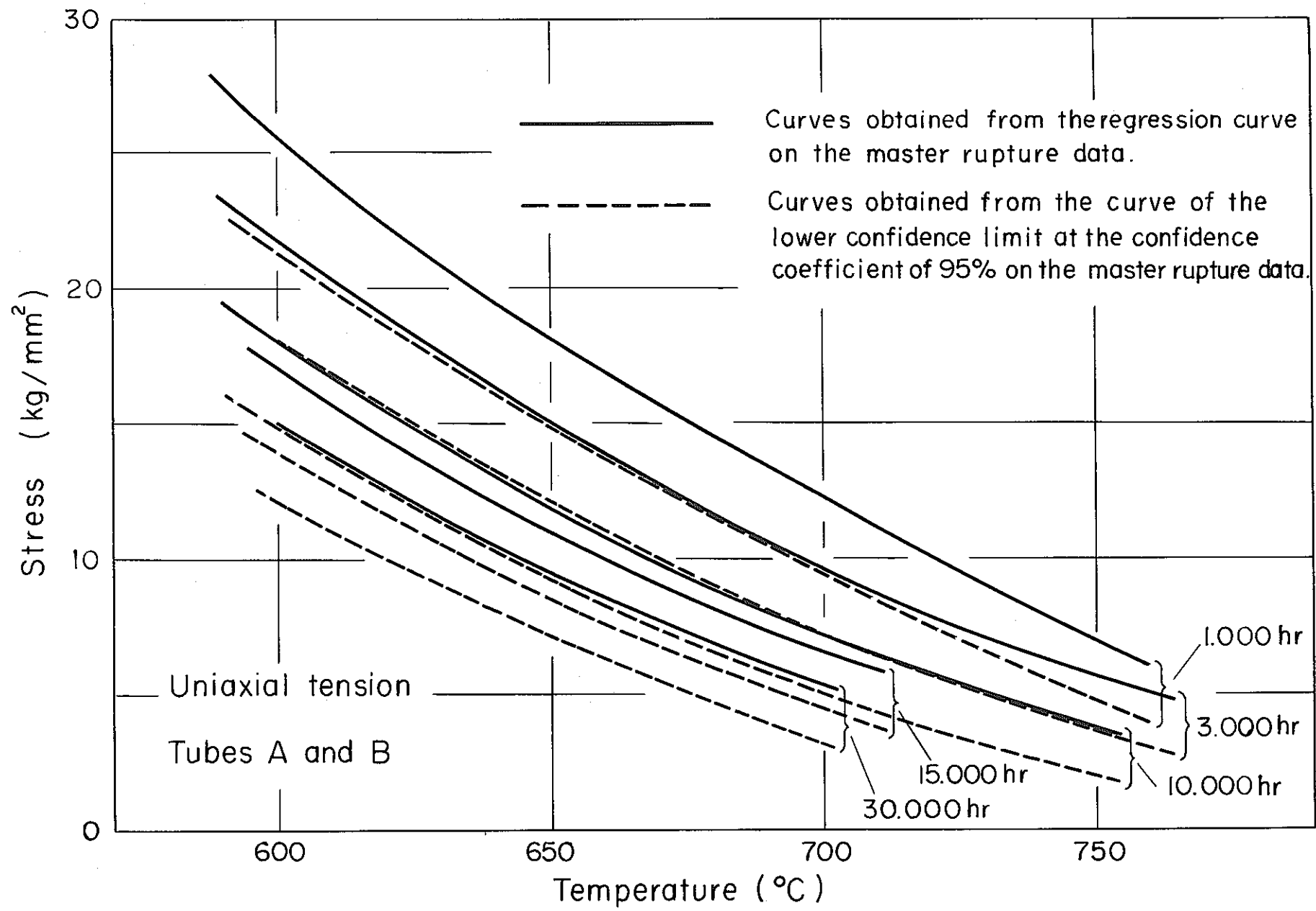


Fig. 26 Relations of temperature versus stress estimated from the regression curve and the confidence interval on the master rupture data under uniaxial tension for Tubes A and B.

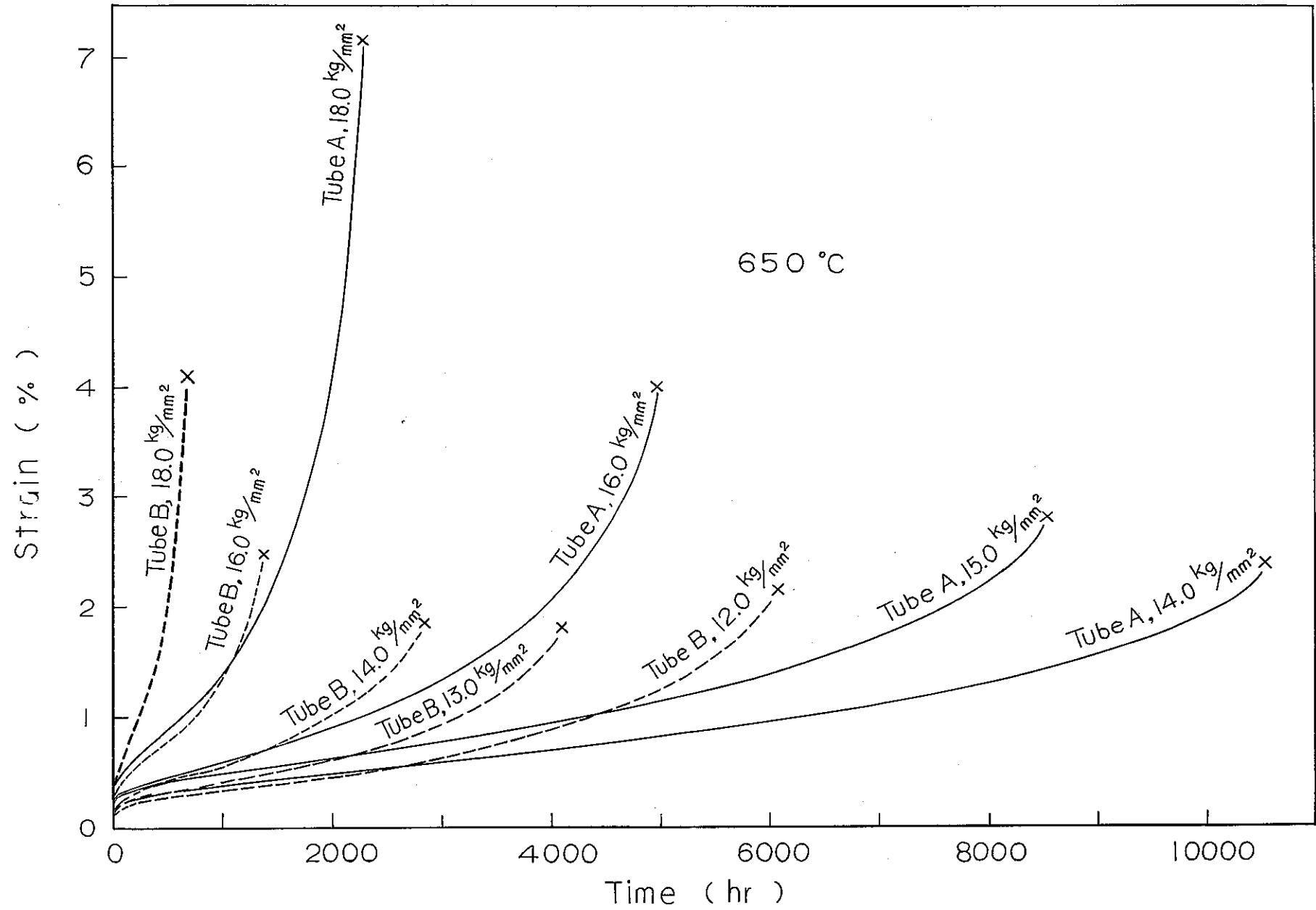


Fig. 27 Creep curves under uniaxial tension for Tubes A and B at 650 °C

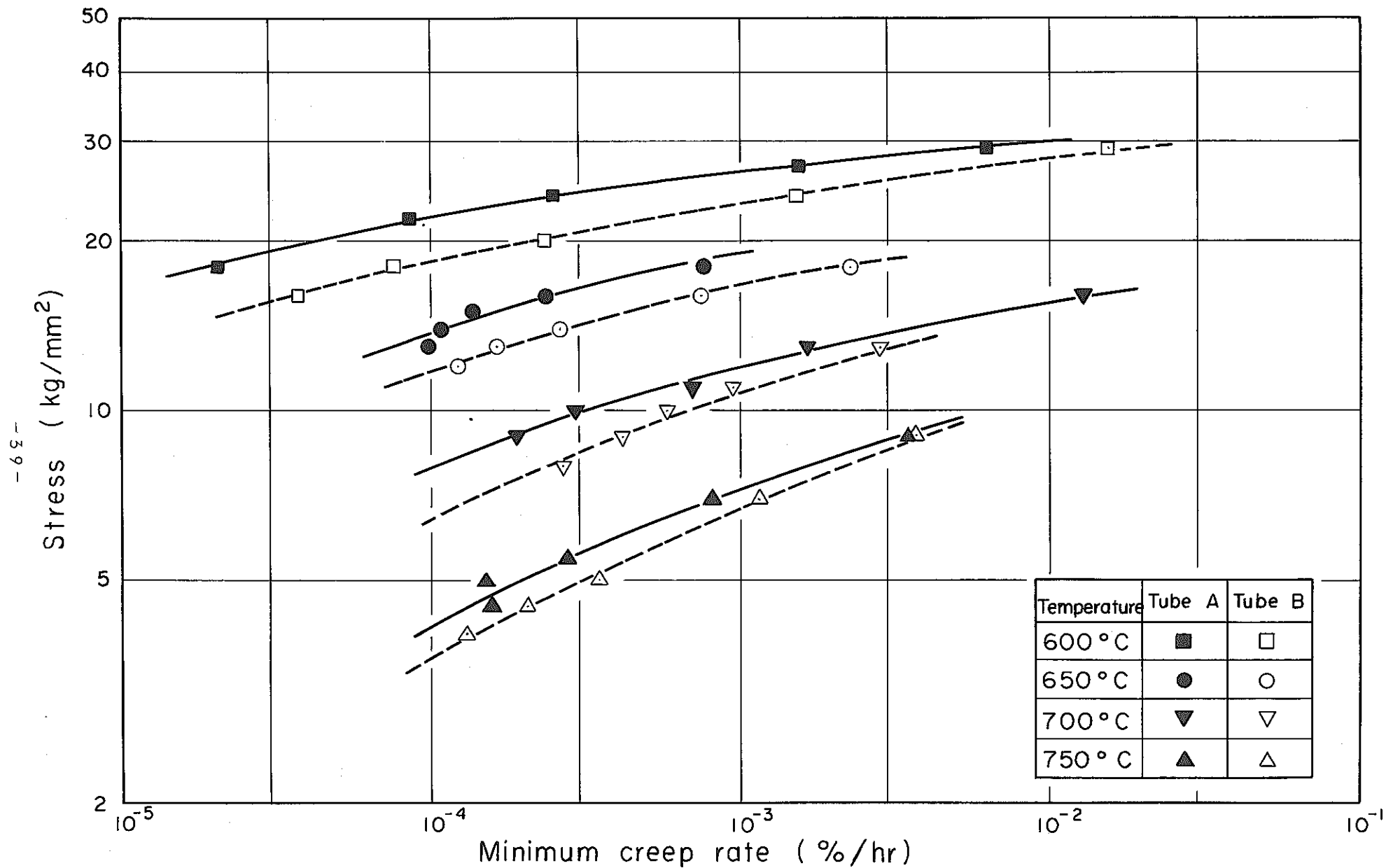


Fig.28 Relations of stress versus minimum creep rate under uniaxial tension for Tubes A and B.

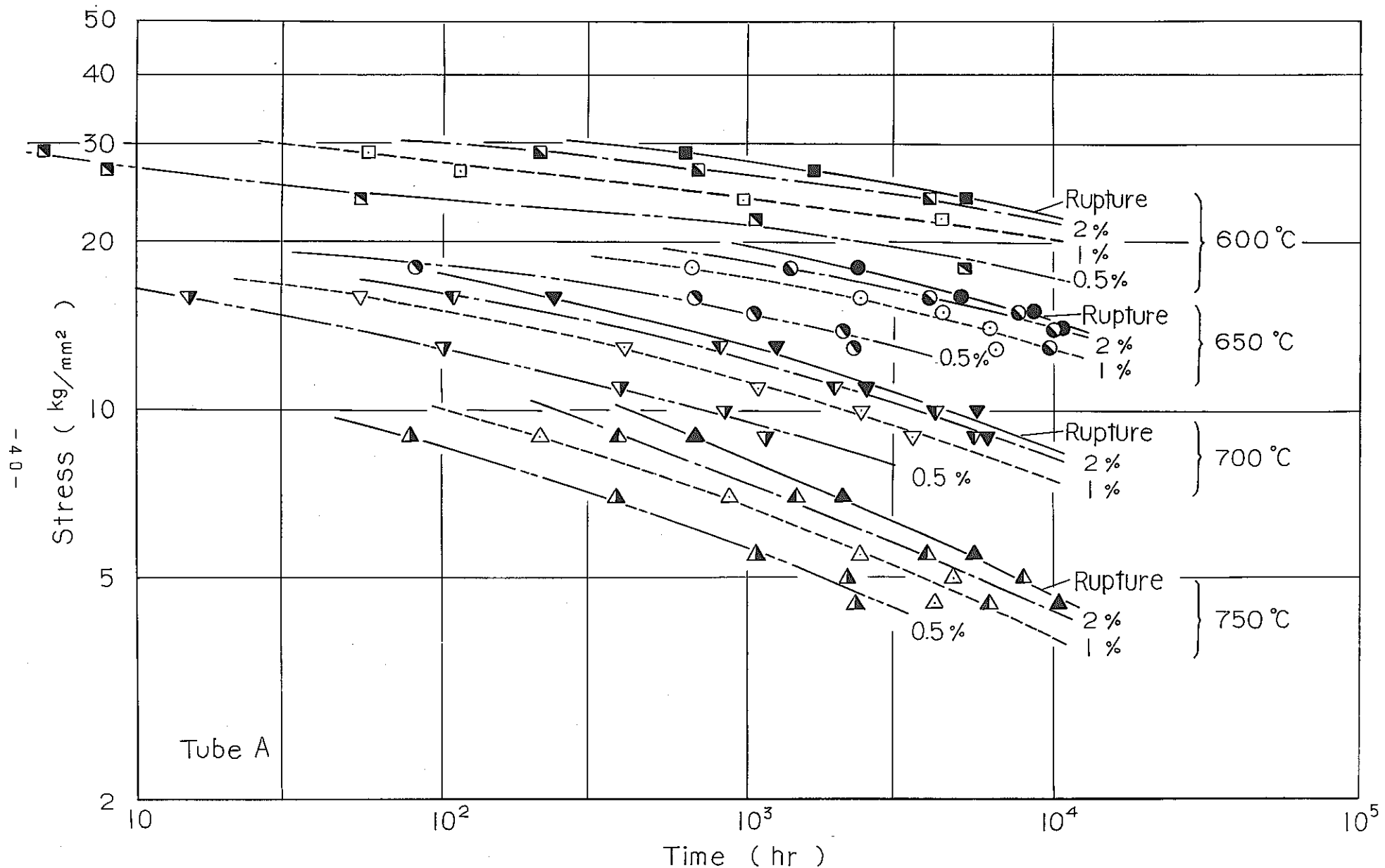


Fig.29 Relations of stress versus time for total strain of 0.5%, 1% and 2% under uniaxial tension for Tube A.

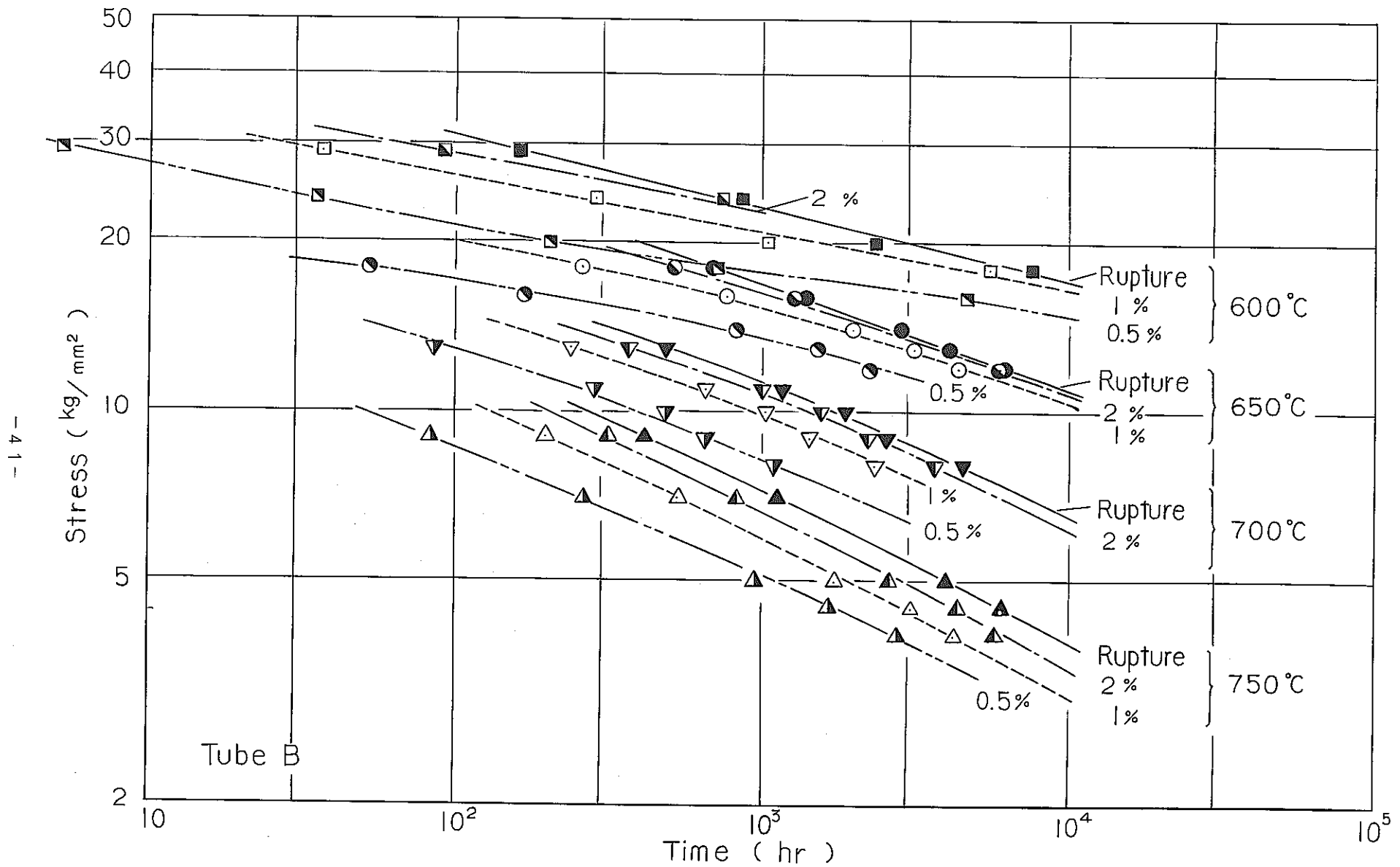


Fig.30 Relations of stress versus time for total strain of 0.5%, 1% and 2% under uniaxial tension for Tube B.

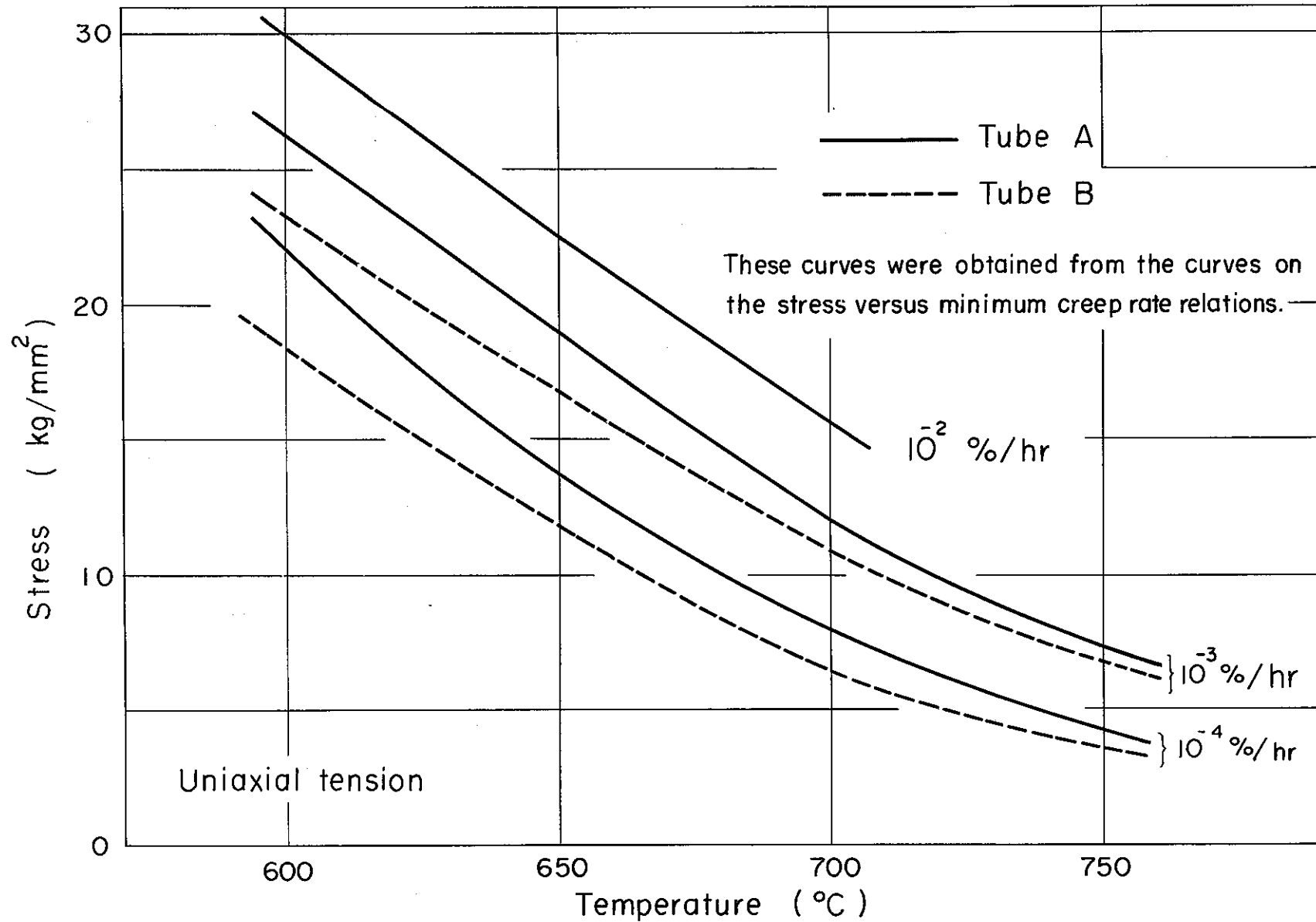


Fig.31 Relations of temperature versus stress at each minimum creep rate under uniaxial tension for Tubes A and B.

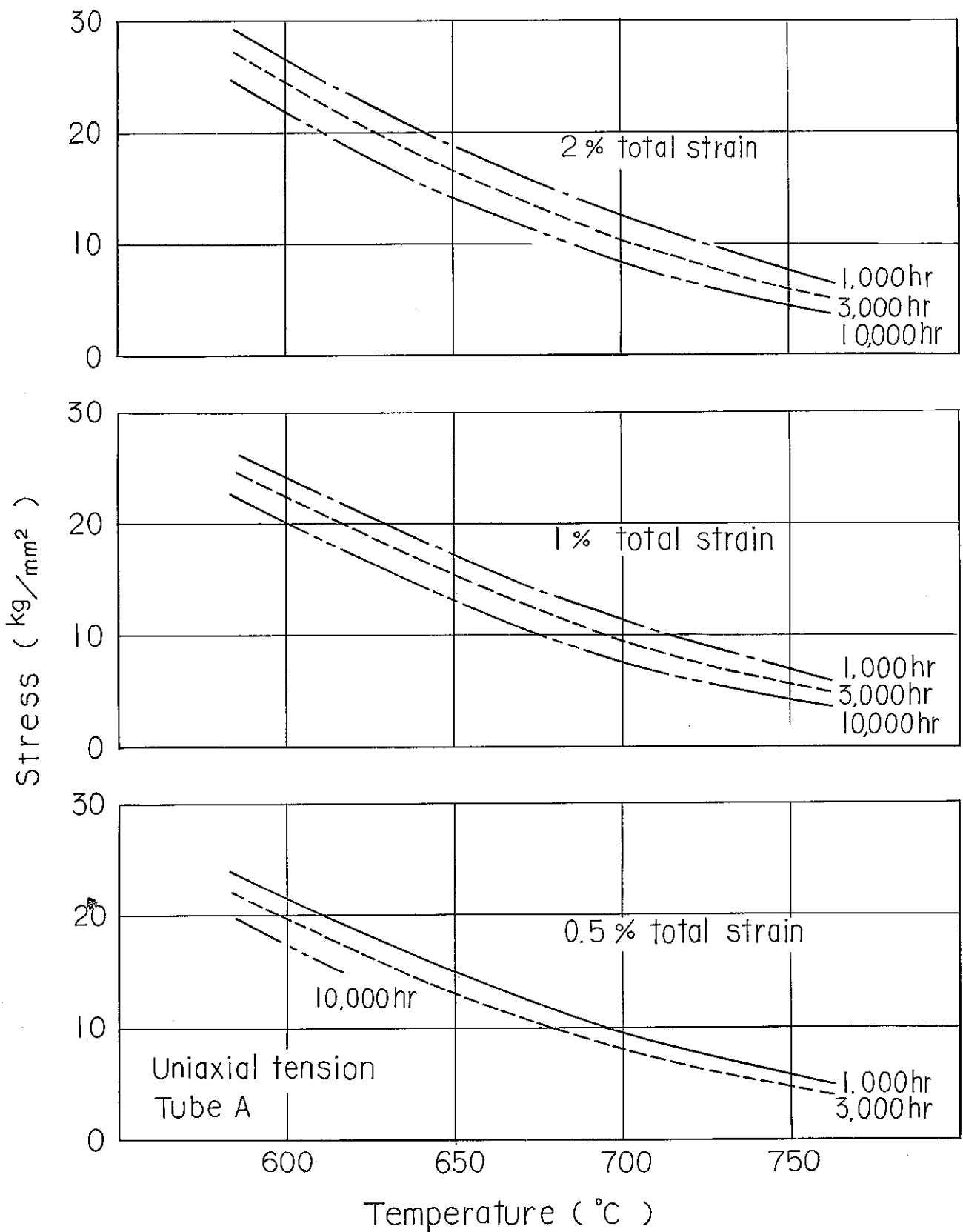


Fig.32 Relations of temperature versus stress at each time for total strain of 0.5 %, 1% and 2% under uniaxial tension for Tube A .

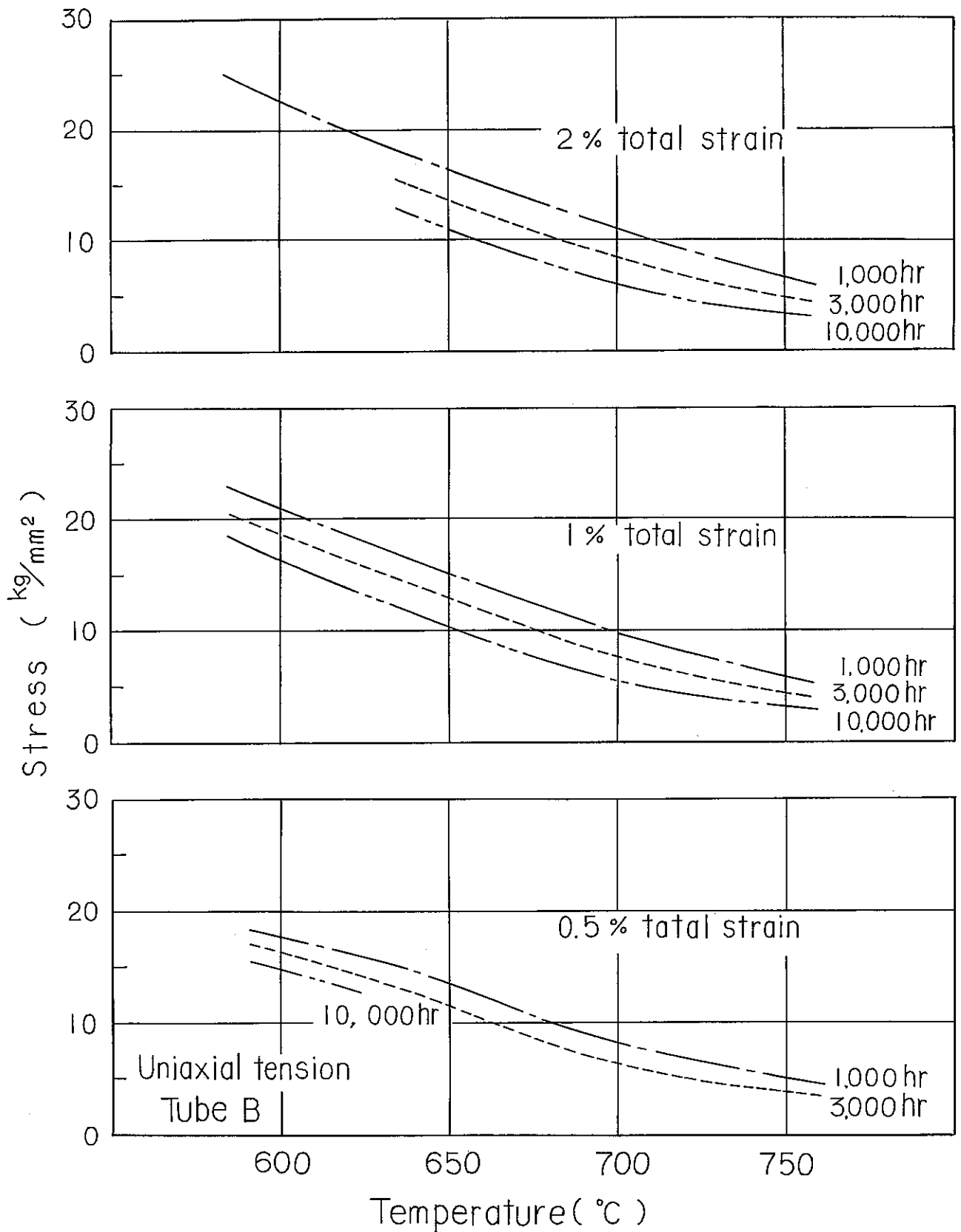


Fig. 33 Relations of temperature versus stress at each time for total strain of 0.5%, 1% and 2% under uniaxial tension for Tube B.

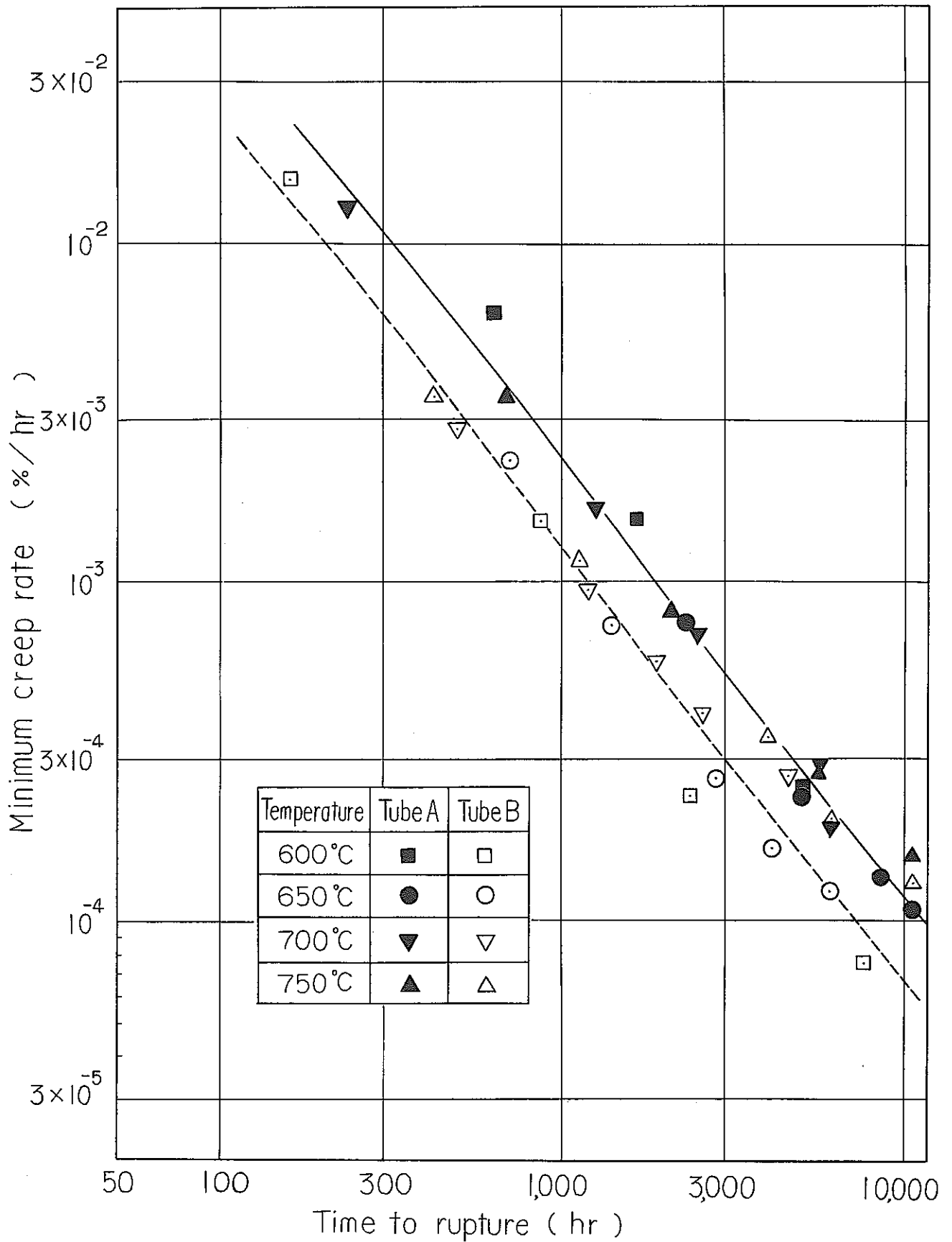


Fig.34 Relations of time to rupture versus minimum creep rate under uniaxial tension for Tubes A and B .

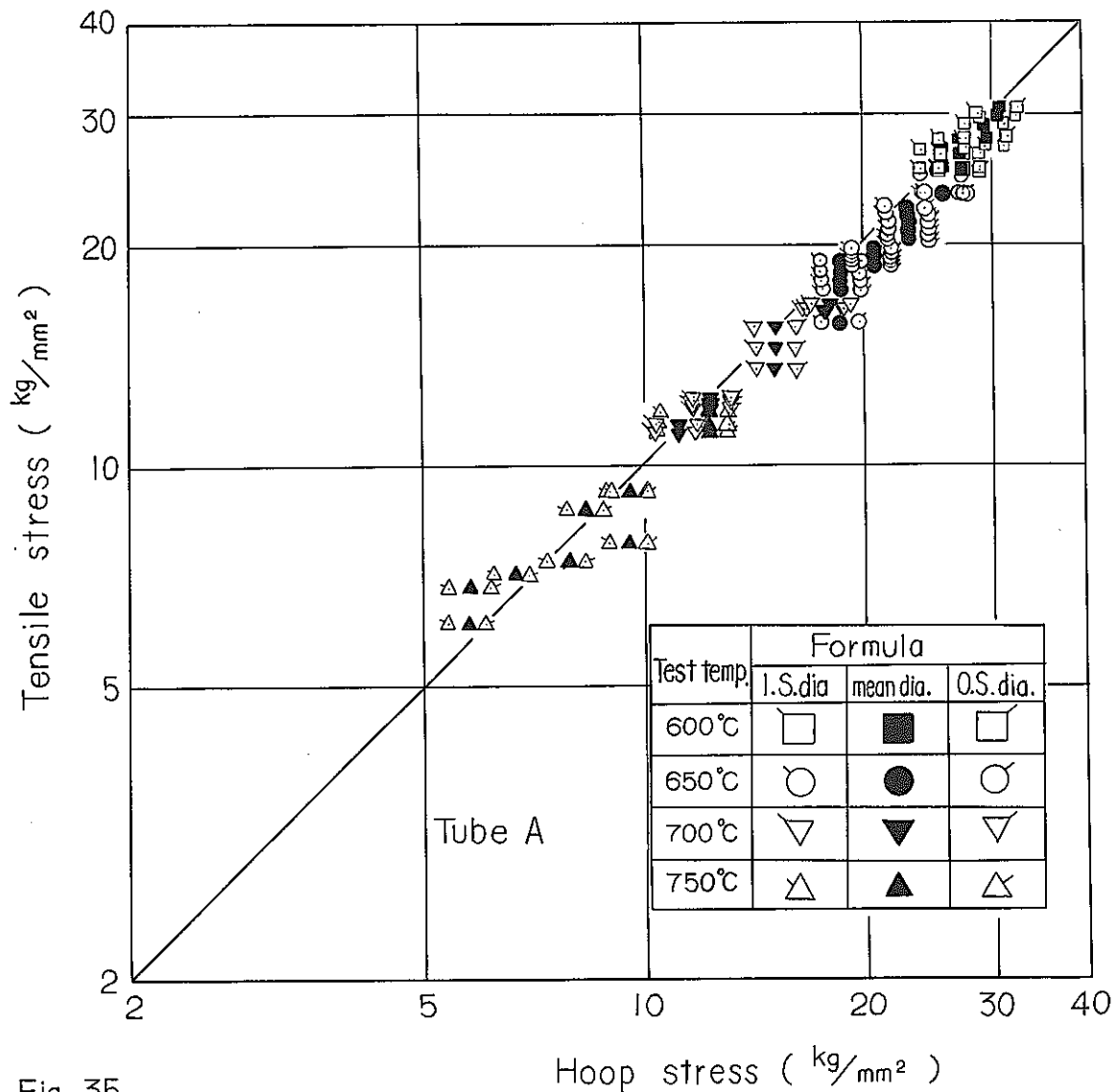


Fig. 35

Correlation between the tensile stress and hoop stress for the same rupture-time and at the same temperature, which were obtained by the uniaxial tension tests and by the internal pressure tests for Tube A, respectively. The hoop stresses were calculated by the inside diameter formula, mean diameter formula and outside diameter formula.

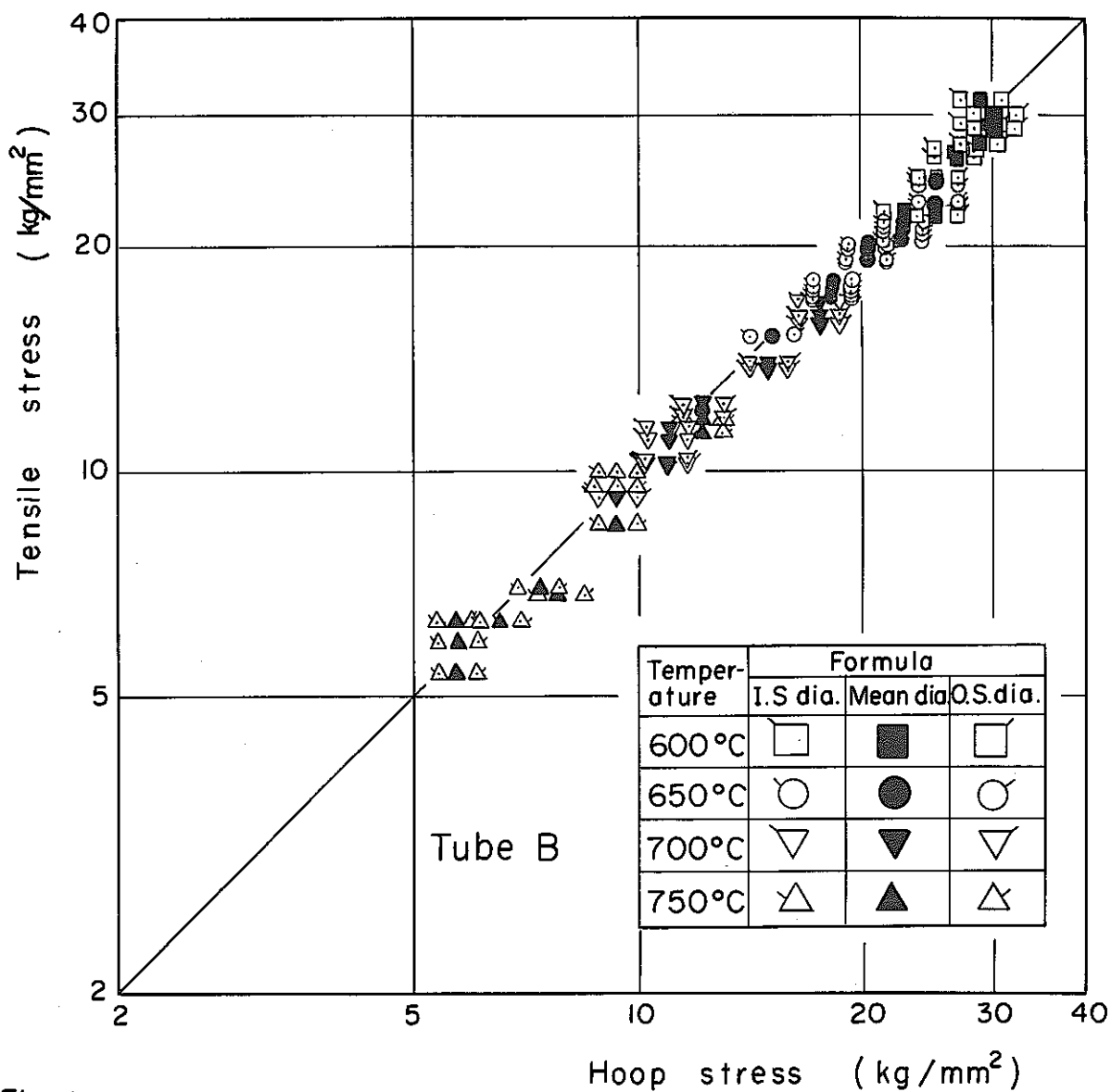


Fig. 36

Correlation between the tensile stress and hoop stress for the same rupture-time and at the same temperature, which were obtained by the uniaxial tension tests and by the internal pressure test for Tube B, respectively. The hoop stresses were calculated by the inside diameter formula, mean diameter formula and outside diameter formula.

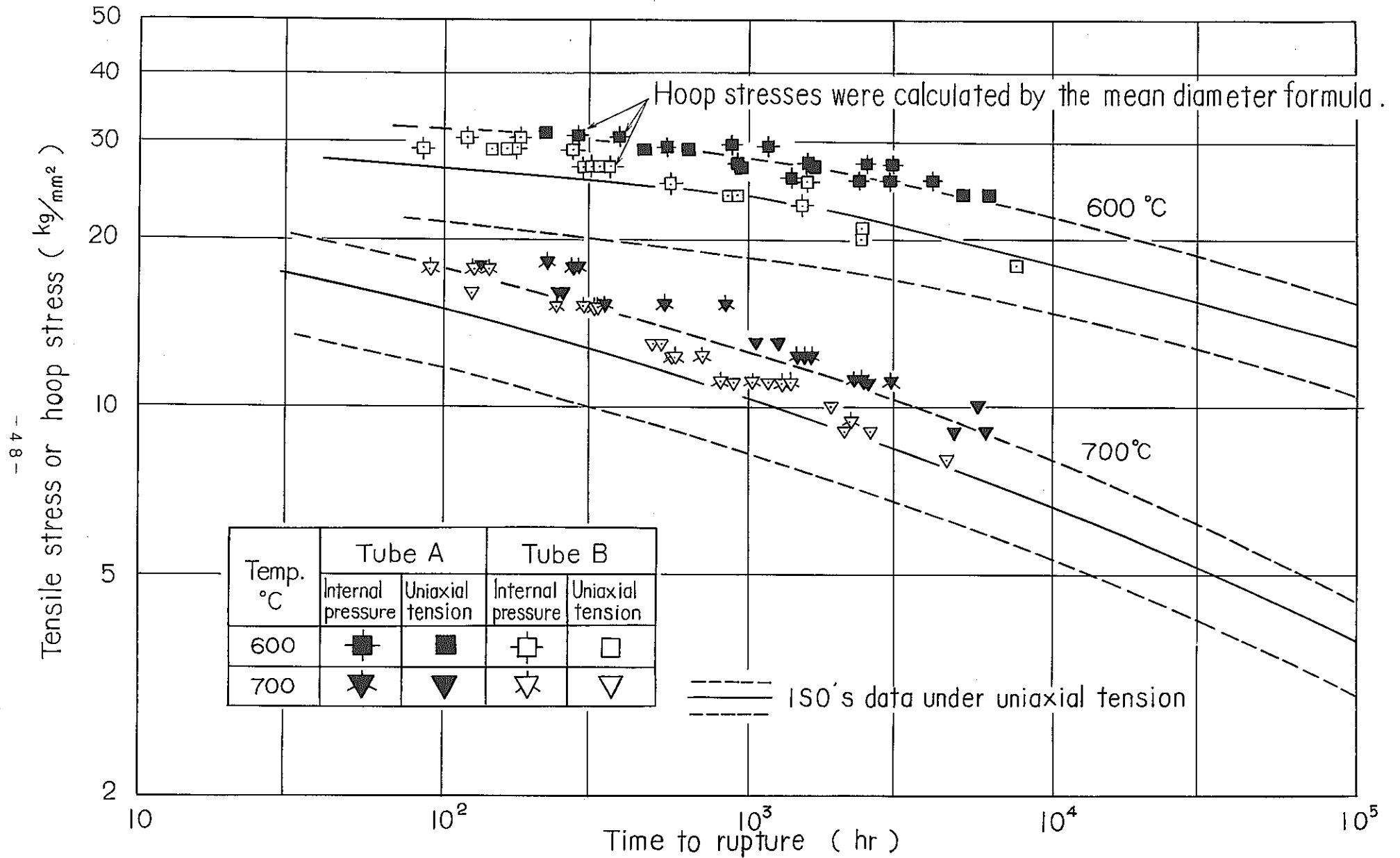


Fig 37 Comparison of the present data and ISO's data at 600°C and 700°C.

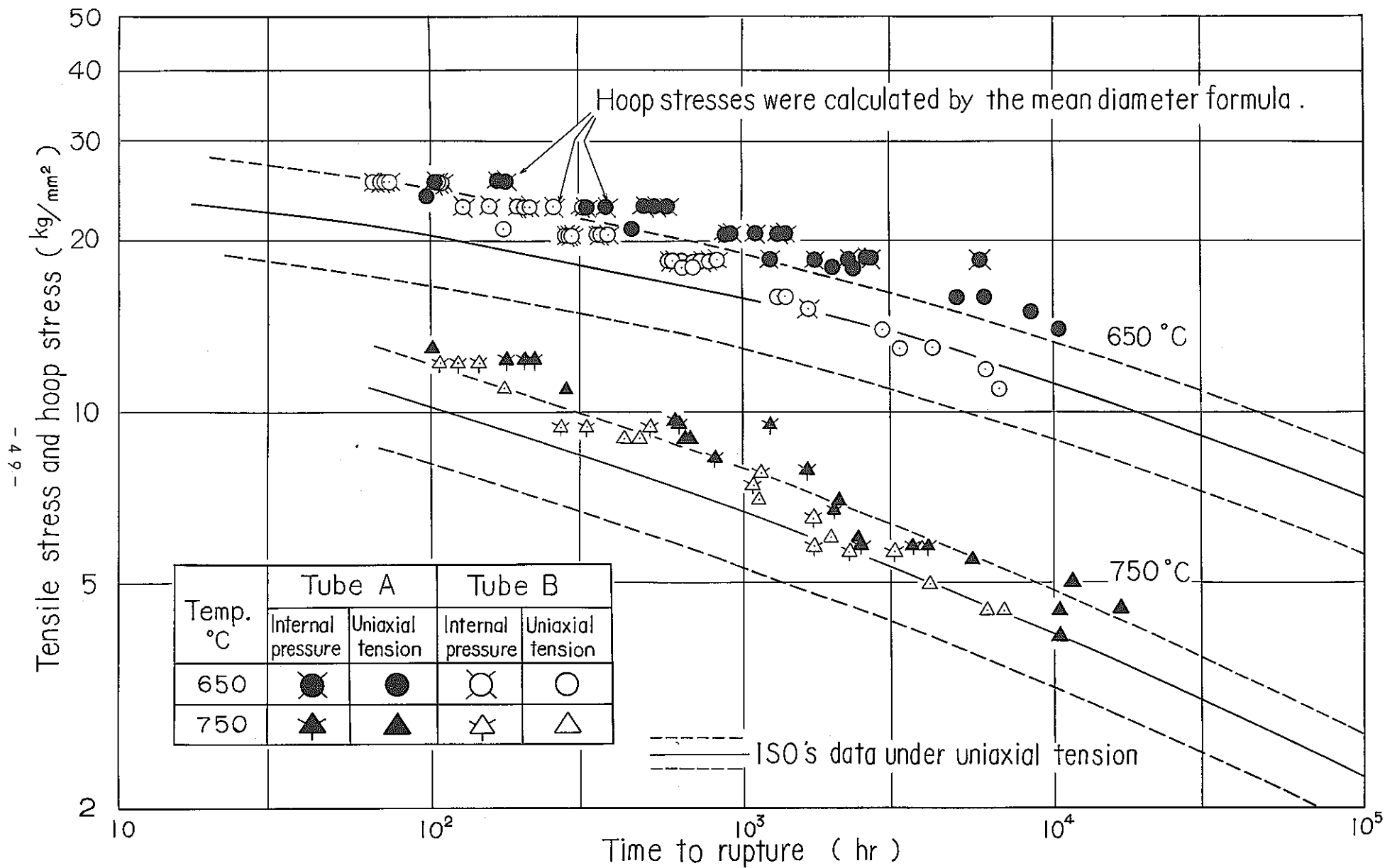


Fig.38 Comparison of the present data and ISO's data at 650 °C and 750 °C

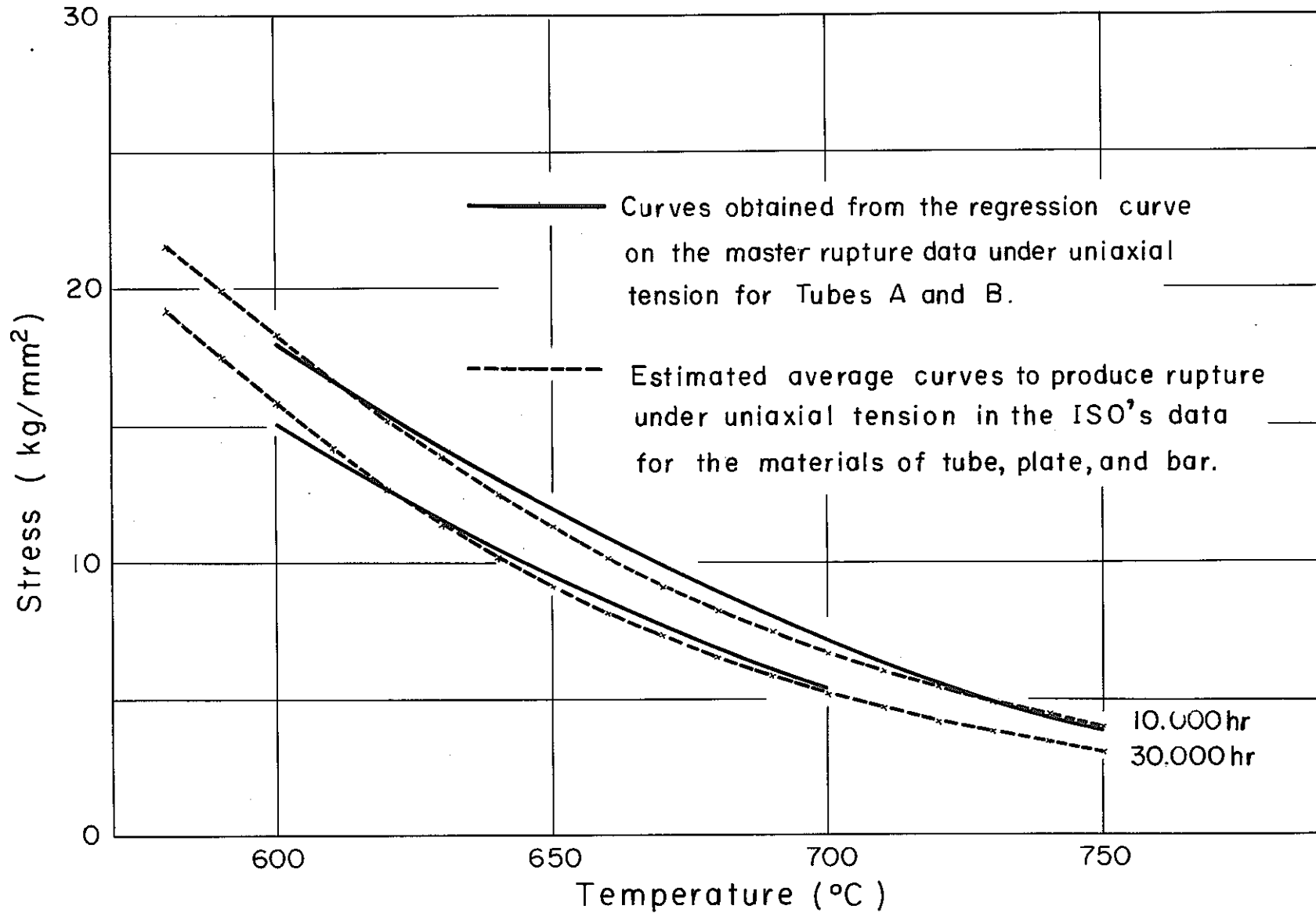


Fig.39 Comparison of the present data and ISO's data under uniaxial tension with regard to the rupture strength for 10,000 hr and 30,000 hr at each temperature.

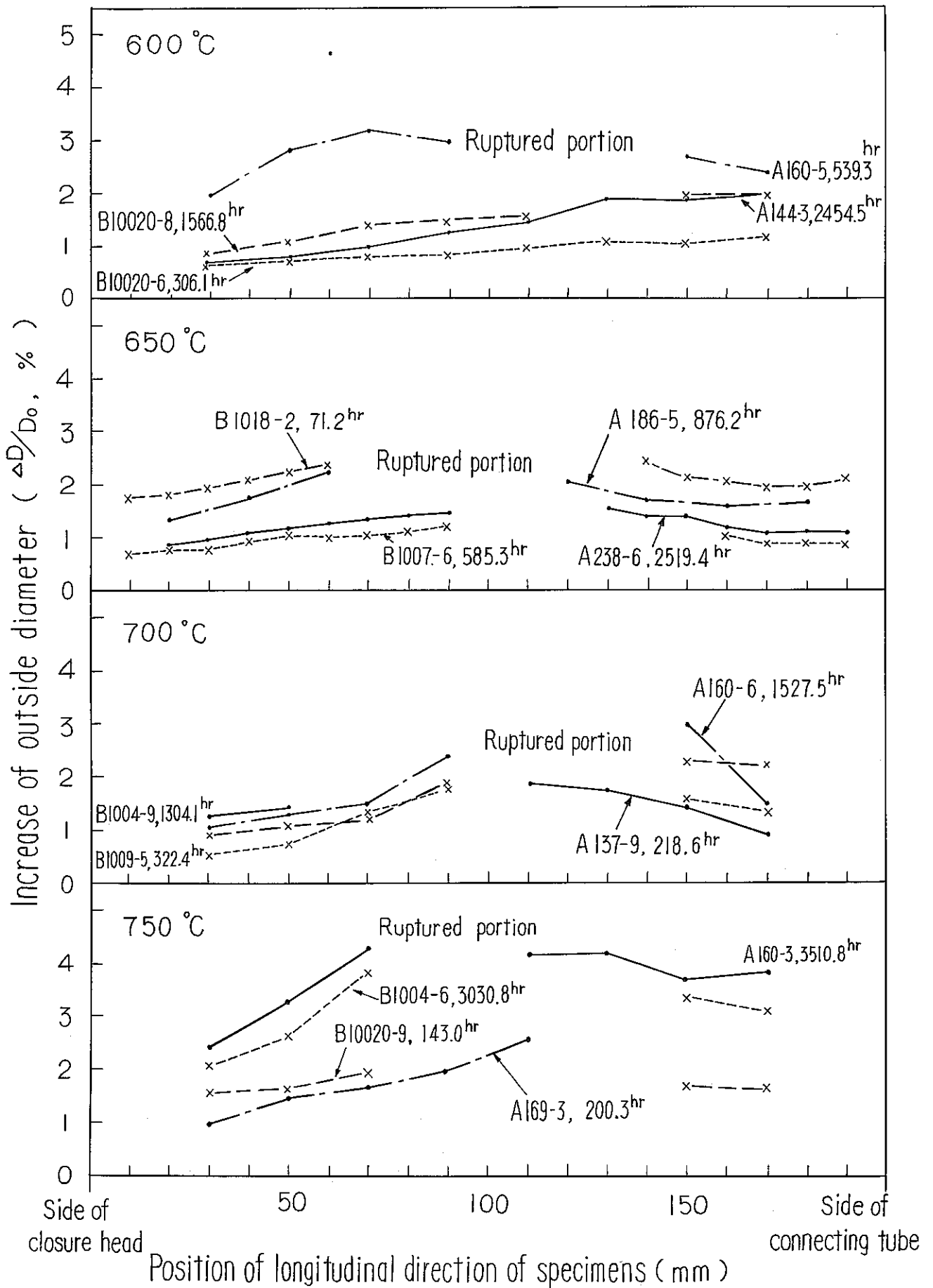


Fig. 40 Increase of outside diameter versus position of longitudinal direction of specimens ruptured under internal pressure.

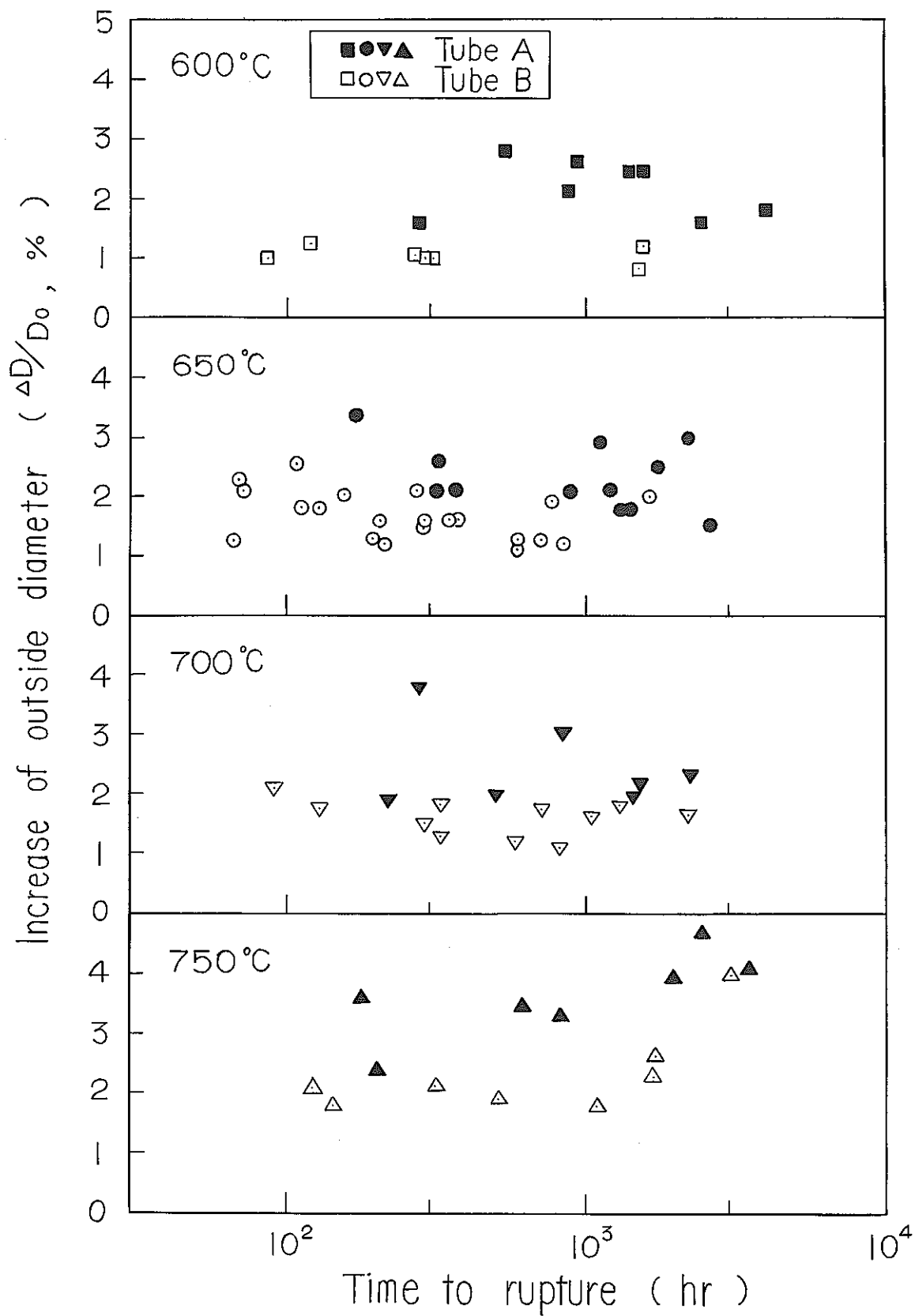


Fig. 41 Increase of outside diameter of specimens ruptured under internal pressure versus time to rupture.

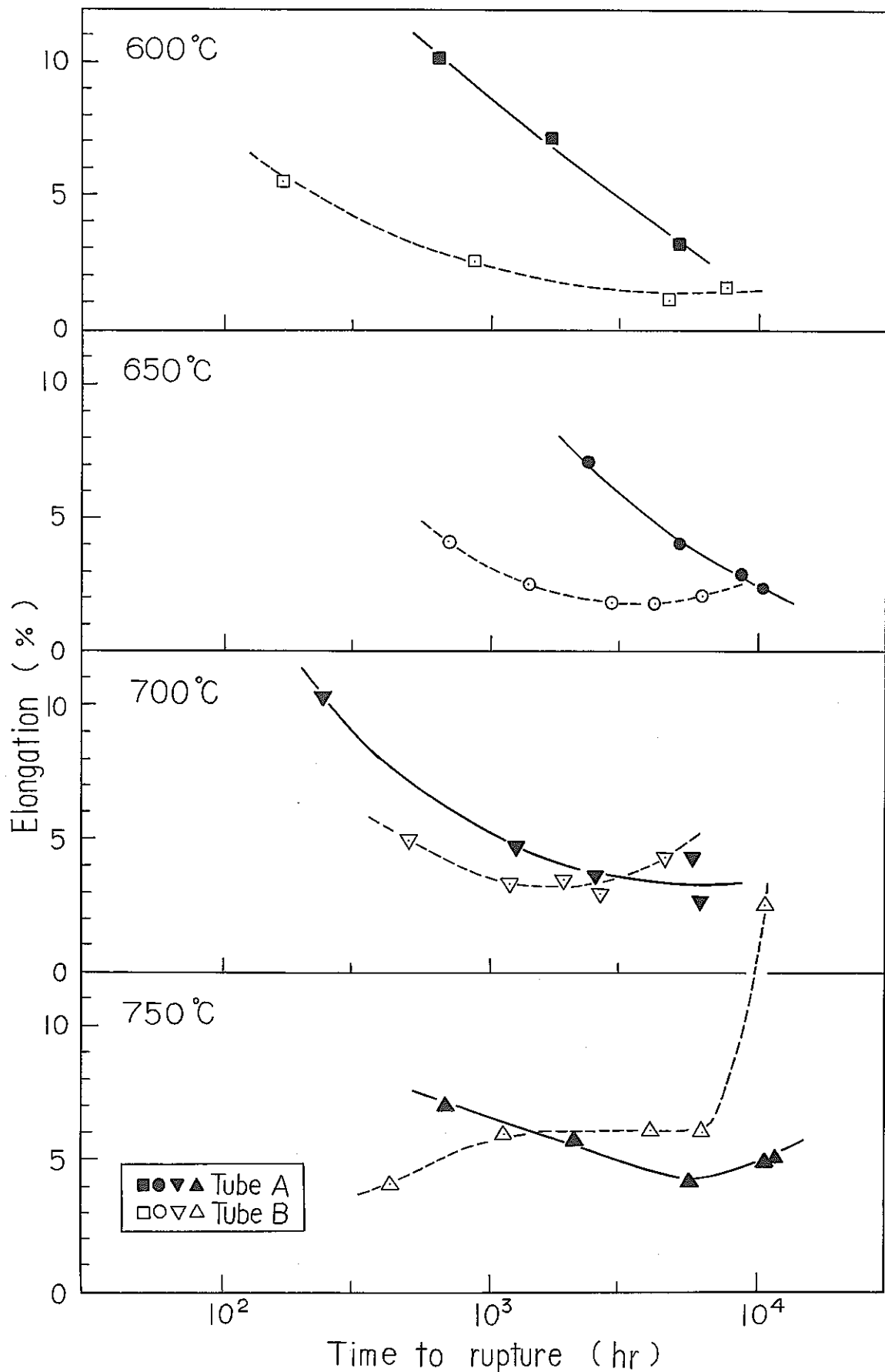


Fig.42 Elongation of specimens ruptured under uniaxial tension versus time to rupture.

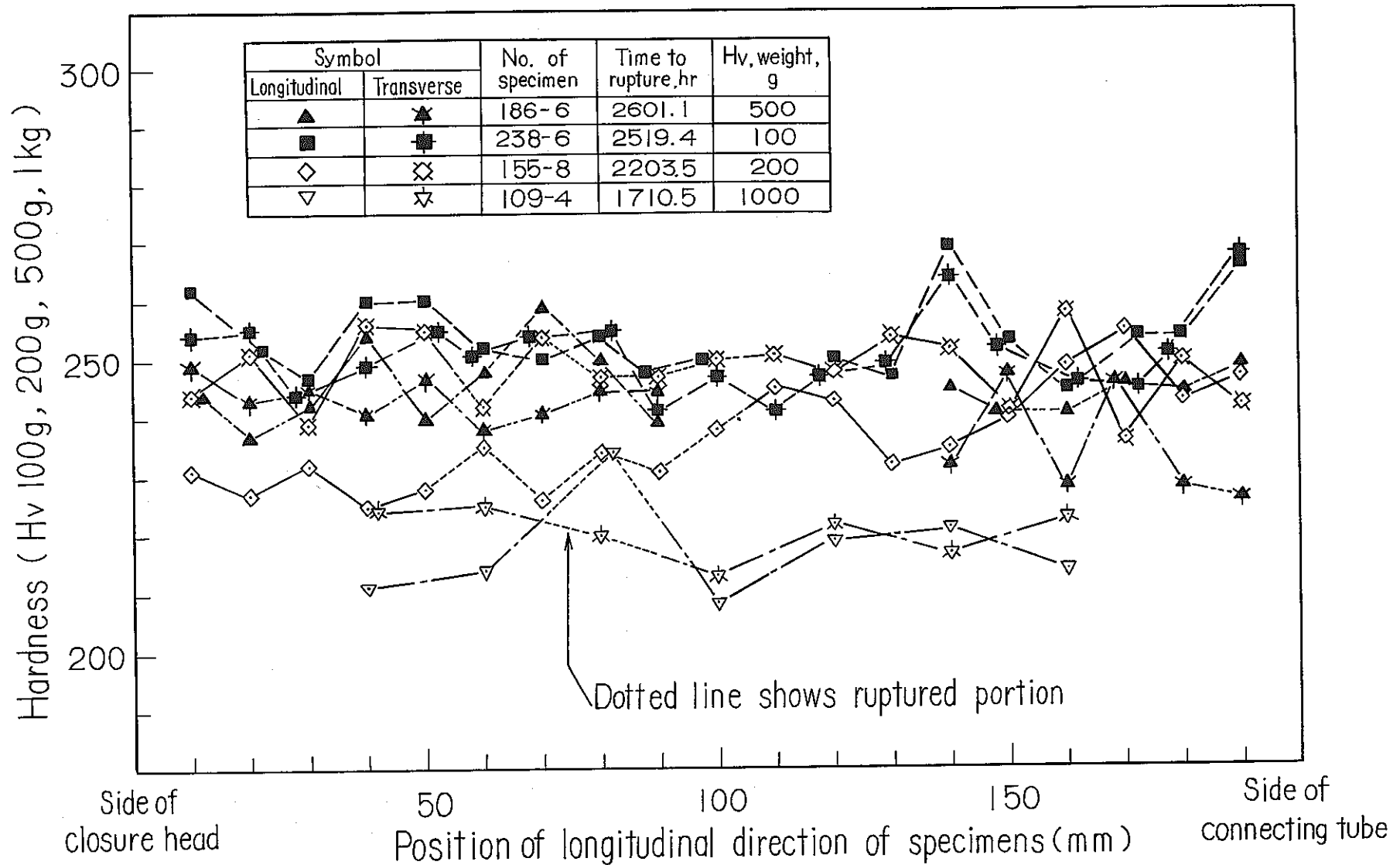


Fig. 43 Hardness versus position of longitudinal direction of specimens ruptured under internal pressure for Tube A at 650°C.

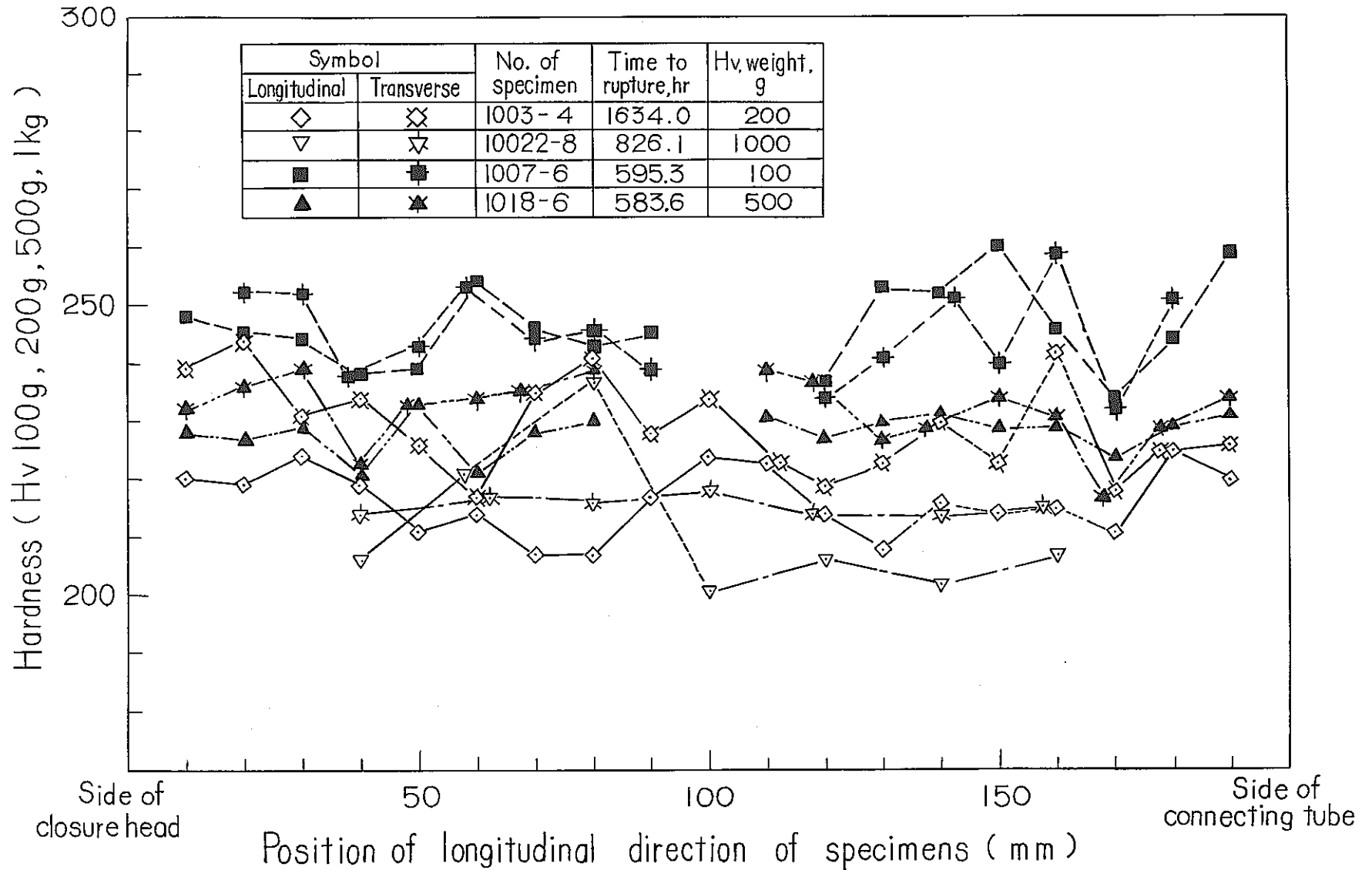


Fig. 44 Hardness versus position of longitudinal direction of specimens ruptured under internal pressure for Tube B at 650°C.

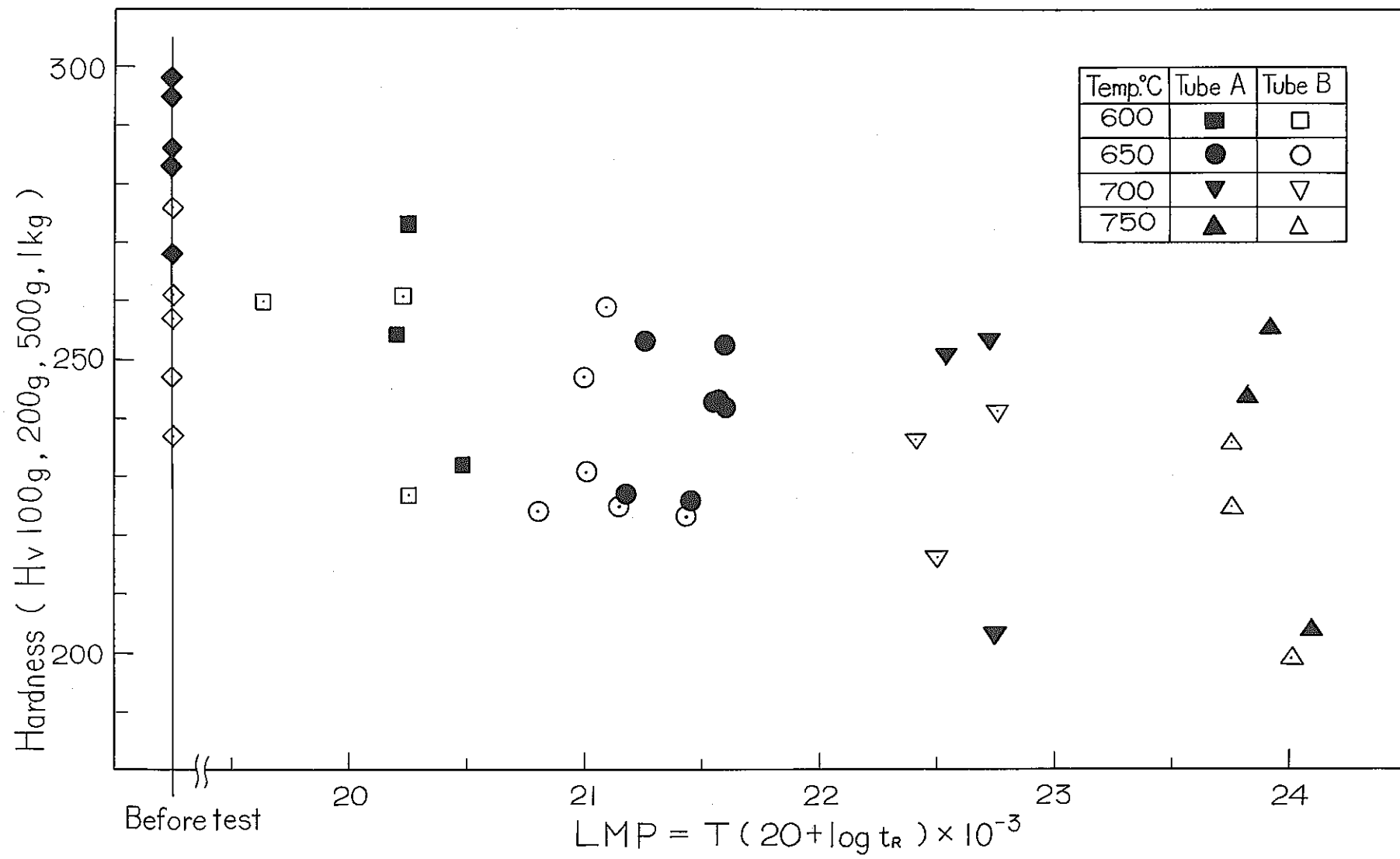


Fig. 45 Hardness of specimens ruptured under internal pressure versus Larson - Miller parameter.

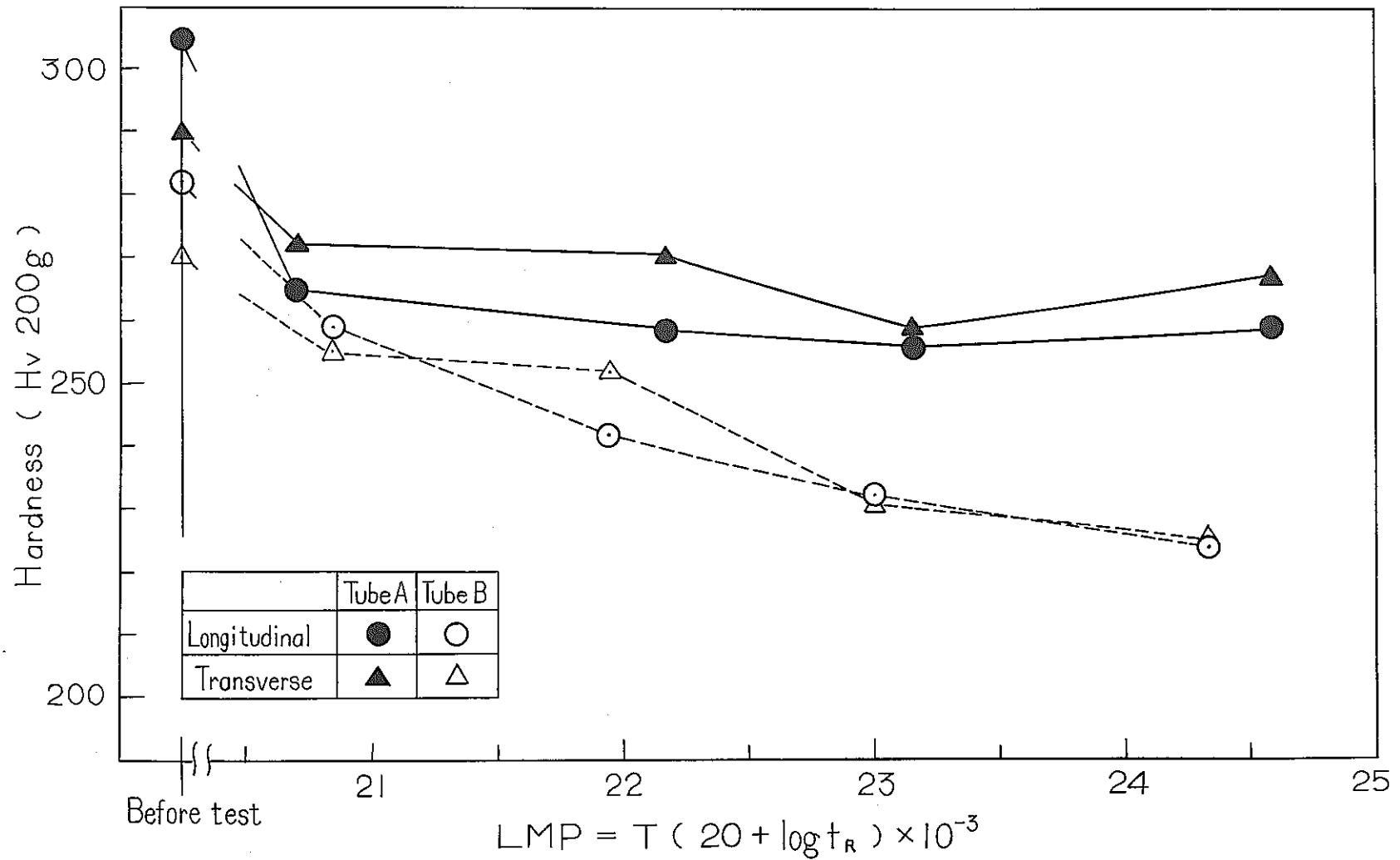


Fig. 46 Hardness of specimens ruptured under uniaxial tension versus Larson-Miller parameter.

(Rep. No) SN 241-71-55

(題名) 高速実験炉用燃料被覆管のクリープ試験(一次試験)

昭和46年11月

(発表) FBR材料専門委員会, 構造設計委員会, クリープワークショップ(主席吉田 進)

Table 1. Chemical composition of tubes の Tube A の二次の値に訂正致します。

		Composition, wt %											
		Fe	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Co	B	N
Tube A	Ladle	Bal.	0.071	0.56	1.56	0.010	0.015	12.01	16.20	2.42	0.02	0.001	0.022
	Check	Bal.	0.061	0.58	1.56	0.026	0.012	12.06	16.58	2.43	0.03	0.001	0.022
			0.061	0.56	1.51	0.026	0.012	12.11	16.14	2.45	0.03	0.001	0.020

大洗図書 殿

当本部所管の上記 R & D 結果報告書に誤りの発見されましたので
上記の表の如く訂正致します。御手数ですが本表に切り取って貼付して下さい。

動力炉・核燃料開発事業団

高炉材料部 材料課

Table 1. Chemical composition of tubes

		Composition, wt %											
		Fe	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Co	B	N
Tube A	Ladle	Bal.	0.072	0.58	1.67	0.014	0.013	12.47	17.13	2.54	0.04		
	Check	Bal.	0.066	0.62	1.65	0.017	0.013	12.43	16.70	2.48	0.043	0.001	0.034
			0.067	0.62	1.69	0.020	0.015	12.40	16.72	2.45	0.043	0.001	0.035
Tube B	Ladle	Bal.	0.079	0.60	1.60	0.003	0.016	13.25	16.75	2.45	0.03	0.0003	0.0162
	Check	Bal.	0.079	0.60	1.60	0.002	0.011	13.23	16.80	2.58	0.01	0.0002	0.0164
			0.077	0.60	1.61	0.002	0.012	13.19	16.75	2.60	0.01	0.0002	0.0172

Table 2. Grain size, microstructure, hardness and surface roughness of tubes.

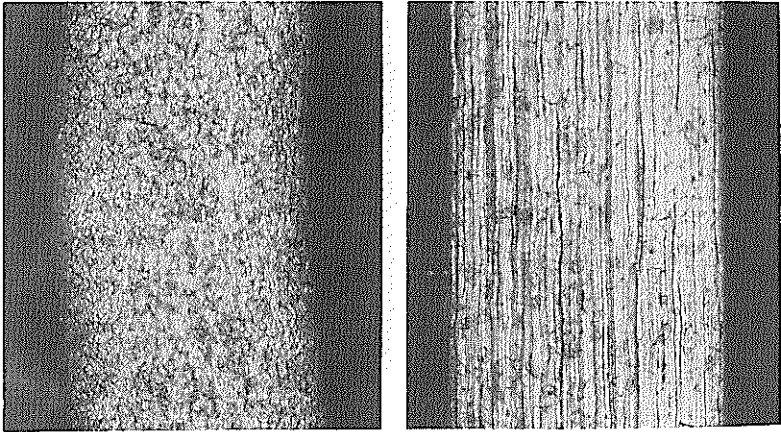
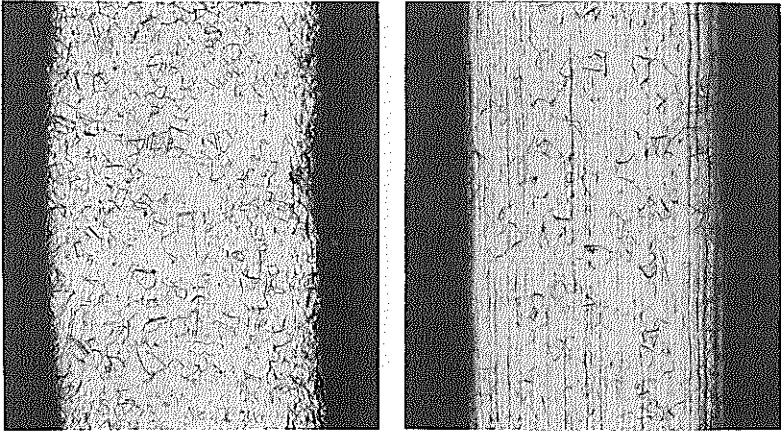
	Photomicrograph	Grain size (ASTM No.)	Surface roughness	Hardness (Hv)
Tube A	 <p>Transverse 0.1 mm Longitudinal</p>	9.0	Inside surface 1.0 S Outside surface 1.6 S	Longitudinal Transverse 283
Tube B	 <p>Transverse 0.1 mm Longitudinal</p>	7.0	Inside surface 0.8 S Outside surface 1.5 S	Longitudinal 260 Transverse 254

Table 3-1 List of internal pressure creep testing apparatus

Institute	No. of apparatus	No. of specimen per apparatus	max. Pressure (kg/cm ²)	max. Temperature (°C)	Pressurizing medium	Atmosphere
NRIM	5	2	500	800	Ar	Air
HITACHI	1	2	500	800	"	Ar
KŌBE	5	3	500	800	"	Air
SUMITOMO	5	1	500	800	"	Ar
PNC	10	1	500	750	"	Air

Table 3-2 List of tensile creep testing machine

Institute	No. of apparatus	No. of specimen per apparatus	max. Load (kg)	max. Temperature (°C)	Atmosphere
NRIM	28	1	750 ~ 1,500	800	Air

Table 4 Test Condition

Test	Temperature (°C)	Pressure or Stress Level (Rupture Time or Testing Time)
Internal Pressure Creep-Rupture	600, 650 700, 750	4 Level (100 , 300, 1000 , 3000 hr)
Uniaxial Tension Creep-Rupture and Creep	600, 650 700, 750	Creep - Rupture ; 4 Level (100, 300, 1000, 3000 hr) Creep ; 5 Level (max. 10,000 hr)

Table 5 Results of creep-rupture tests under internal pressure for Tube A.

Institute		NRIM		KŌBE		HITACHI		PNC		SUMITOMO	
Temp. °C	Pressure kg/cm ²	No. of speci.	Time to rupture hr	No. of speci.	Time to rupture hr	No. of speci.	Time to rupture hr	No. of speci.	Time to rupture hr	No. of speci.	Time to rupture hr
600	370	190-7	277.7 [•]	109-8	(140.8)	—	—	146-3	371.5 [•]	—	—
	355	190-4	876.4 [•]	160-5	539.3 [•]	—	—	146-8	1159. [•]	—	—
	330	155-7 160-9	939.0 [•] 1571.2 [•]	144-3	2454.5 [•]	—	—	146-6	2965.3 [•]	—	—
	310	190-6 160-4	1394.1 [•] 4038.8 [•]	109-5	2914.1 [•]	—	—	126-8	2308. [•]	—	—
650	310	190-3	168.4 [•]	144-2	(103.8)	186-3	103.7 [•]	146-9	172. [•]	238-9 238-8	(66.1) (72.3)
	280	186-9	316.6 [•]	109-2 169-2	311.4 [•] 364.8 [•]	186-4	526.0 [•]	146-5	578. [•]	238-5	483.1 [•]
	250	155-5	1100.1 [•]	169-8 169-4	1300.0 [•] 1389.0 [•]	186-5	876.2 [•]	146-7	916.5 [•]	238-7	(901.0)
	225	155-8	2203.5 [•]	109-7 109-4	1218.5 [•] 1710.5 [•]	186-6	2601.1 [•]	126-4	5858.3 [•]	238-6	2519.4 [•]
700	220	—	—	137-9	218.6 [•]	—	—	—	—	—	—
	215	155-2	276.5 [•]	—	—	—	—	146-4	269.5 [•]	—	—
	185	160-8	840.1 [•]	169-7	523.0 [•]	—	—	146-2	337. [•]	—	—
	150	160-2	1449.7 [•]	160-6	1527.5 [•]	—	—	126-7	1618. [•]	—	—
	135	190-2	2243.4 [•]	109-9	2369.8 [•]	—	—	248-4	2902.5 [•]	—	—
750	150	190-9	176.6 [•]	169-3	200.3 [•]	—	—	144-8	214. [•]	—	—
	115	190-8	612.0 [•]	137-7	630.1 [•]	—	—	126-2	1220.5 [•]	—	—
	100	—	—	169-9	812.5 [•]	—	—	—	—	—	—
	95	—	—	—	—	—	—	137-5	1604. [•]	—	—
	80	190-5	1969.1 [•]	—	—	—	—	—	—	—	—
	70	155-4	2419.6 [•]	160-3	3510.8 [•]	—	—	126-5	3980.2 [•]	—	—

Parentheses show the reference values of specimen ruptured at welded spot.

Marks (•, °) show the values applied to statistical analysis of the relation between pressure and time to rupture.

Mark (•) shows the values applied to statistical analysis of the relation between pressure and Larson-Miller parameter.

Table 6 Results of creep-rupture tests under internal pressure for Tube B.

Institute		NRIM		KŌBE		HITACHI		PNC		SUMITOMO	
Temp. °C	Pressure kg/cm ²	No. of speci.	Time to rupture hr	No. of speci.	Time to rupture hr	No. of speci.	Time to rupture hr	No. of speci.	Time to rupture hr	No. of speci.	Time to rupture hr
600	370	1012-5	119.2 [°]	—	—	—	—	1036-1	177.5 [°]	—	—
	355	1018-9	266.2 [°]	10020-2	85.0 [°]	—	—	1010-7	173. [°]	—	—
	330	1004-1	288.6 [°]	10020-6	306.1 [°]	—	—	1036-8	351. [°]	—	—
	310	1012-4 1004-3	(302.7) (309.0)	10020-8	1566.8 [°]	—	—	1029-4	556. [°]	—	—
	280	1012-7	1499.4 [°]	—	—	—	—	—	—	—	—
650	310	1012-3	107.7 [°]	10020-4 1009-1	65.7 [°] 110.1 [°]	1018-2	71.2 [°]	1010-2	73. [°]	1007-4	68.8 [°]
	280	1012-8	154.5 [°]	1004-8 1009-4	201.3 [°] 209.4 [°]	1018-3	192.2 [°]	1036-2	251. [°]	1007-1	127.0 [°]
	250	1003-2	368.9 [°]	10022-1 10022-2	269.5 [°] 286.6 [°]	1018-4 1018-5	286.7 [°] 346.2 [°]	1036-9	348. [°]	1007-8	(322.0)
	225	1012-9	699.7 [°]	1004-7 10022-8	770.1 [°] 826.1 [°]	1018-6	583.6 [°]	1011-9	739. [°]	1007-6	595.3 [°]
	185	1003-4	1634.0 [°]	—	—	—	—	—	—	—	—
700	215	1012-2	127.8 [°]	10022-7 1009-3	(91.0) (130.0)	—	—	1036-7	141. [°]	1007-3	89.9 [°]
	185	1003-5	323.8 [°]	1009-5	322.4 [°]	—	—	1011-2	231.3 [°]	1001-1	288.3 [°]
	155	—	—	1009-2	(477.5)	—	—	—	—	—	—
	150	1012-1	703.8 [°]	—	—	—	—	1022-4	572. [°]	1007-9	576.6 [°]
	135	1004-2	1038.8 [°]	1004-9	1304.1 [°]	—	—	1011-8	1378. [°]	1007-7	815.0 [°]
	115	1004-5	2181.0 [°]	—	—	—	—	—	—	—	—
750	150	1003-3	122.1 [°]	10020-9	143.0 [°]	—	—	1036-5	107.5 [°]	—	—
	115	1003-1	317.3 [°]	10022-6	509.3 [°]	—	—	1029-9	261.5 [°]	—	—
	95	—	—	—	—	—	—	1036-4	1142. [°]	—	—
	90	—	—	10022-9	1095.3 [°]	—	—	—	—	—	—
	80	1003-7	1669.5 [°]	—	—	—	—	—	—	—	—
	70	1004-4	1692.9 [°]	1004-6	3030.8 [°]	—	—	1029-5	2201.5 [°]	—	—

Table 7 Results of creep and rupture tests under uniaxial tension for Tube A.

Temp. °C	Stress kg/mm ²	No. of specimen	Instan- taneous strain %	Time for total strain, hr			Minimum creep rate %/hr	Time to rupture hr	Elong- ation %
				0.5 %	1.0 %	2.0 %			
600	31.0	127-5	—	—	—	—	—	216.2 [•]	—
	29.0	156-4	—	—	—	—	—	452.4 [•]	—
		220-8	0.35 _o	5.0	57.5	210.0	6.2 _o × 10 ⁻³	630.6 [•]	10.2
	27.0	153-1	—	—	—	—	—	946.7 [•]	—
		220-2	0.30 _o	8.0	114.0	689.0	1.54 × 10 ⁻³	1644.0 [•]	7.1
	24.0	110-4	—	—	—	—	—	6083.8 [•]	—
		247-5	0.21 ₄	54.0	973.0	3842	2.4 _o × 10 ⁻⁴	5018.3 [•]	3.3
	22.0	220-4	0.19 _o	1070	4280	—	8.5 _o × 10 ⁻⁵	discontinue [7150.0]	—
18.0	247-3	0.16 ₄	5020	—	—	2.0 _o × 10 ⁻⁵	discontinue [6313.0]	—	
650	24.0	127-2	—	—	—	—	—	96.8 [•]	—
	21.0	117-5	—	—	—	—	—	441.8 [•]	—
	18.0	117-3	—	—	—	—	—	1914.6 [•]	—
		247-15	0.16 ₃	82.0	655.0	1373	7.6 ₄ × 10 ⁻⁴	2290.4 [•]	7.1
	16.0	117-4	—	—	—	—	—	6024.7 [•]	—
		247-11	0.15 ₂	672.0	2335	3945	2.3 ₄ × 10 ⁻⁴	4971.9 [•]	4.0
	15.0	247-4	0.13 _o	1045	4330	7632	1.3 ₇ × 10 ⁻⁴	8528.3 [•]	2.8
	14.0	247-8	0.12 _o	2047	6215	10085	1.0 ₉ × 10 ⁻⁴	10535.3 [•]	2.4
13.0	220-6	0.12 ₉	2207	6580	9705	9.8 ₃ × 10 ⁻⁵	discontinue [10007.0]	—	
700	18.0	110-6	—	—	—	—	—	132.0 [•]	—
	16.0	127-6	—	—	—	—	—	243.0 [•]	—
		247-9	0.16 ₁	14.8	539	109.6	1.2 ₈ × 10 ⁻²	234.9 [•]	10.3
	13.0	110-2	—	—	—	—	—	1060.7 [•]	—
		220-3	0.13 ₁	101.5	398.0	816.0	1.6 ₄ × 10 ⁻³	1248.5 [•]	4.7
	11.0	153-3	—	—	—	—	—	2490.9 [•]	—
		220-5	0.09 ₇	381.0	1086	1923	6.9 ₉ × 10 ⁻⁴	2457.6 [•]	3.6
	10.0	247-16	0.09 ₈	840.0	2373	4109	2.9 ₁ × 10 ⁻⁴	5608.9 [•]	4.3
9.0	110-3	—	—	—	—	—	4733.8 [•]	—	
	247-12	0.08 ₃	1132	3422	5543	1.9 _o × 10 ⁻⁴	6028.2 [•]	2.6	
750	13.0	112-6	—	—	—	—	—	102.0 [•]	—
	11.0	156-5	—	—	—	—	—	271.6 [•]	—
	9.0	153-4	—	—	—	—	—	658.3 [•]	—
		220-7	0.10 _o	79.0	210.8	377.0	3.4 ₉ × 10 ⁻³	674.5 [•]	7.0
	7.0	247-10	0.07 ₁	370.0	874.0	1431	8.1 _o × 10 ⁻⁴	2049.5 [•]	5.7
	6.0	156-2	—	—	—	—	—	2362.2 [•]	—
	5.5	247-13	0.05 ₁	1073	2327	3814	2.7 ₃ × 10 ⁻⁴	5503.8 [•]	4.2
	5.0	247-7	0.04 ₁	2110	4630	7912	1.5 _o × 10 ⁻⁴	11625.9 [•]	5.1
4.5	117-2	—	—	—	—	—	16518.8 [•]	—	
	247-14	0.03 ₂	2225	4047	6078	1.5 ₇ × 10 ⁻⁴	10539.4 [•]	4.9	

Marks (•, o) show the values applied to statistical analysis of the relation between stress and time to rupture.

Mark (•) shows the values applied to statistical analysis of the relation between stress and Larson-Miller parameter.

Table 8 Results of creep and rupture tests under uniaxial tension for Tube B.

Temp. °C	Stress kg/mm ²	No. of specimen	Instan- taneous strain %	Time for total strain, hr			Minimum creep rate %/hr	Time to rupture hr	Elon- gation %
				0.5 %	1.0 %	2.0 %			
600	29.0	1049-1	—	—	—	—	—	143.2	—
		1005-1	0.31 ₁	5.2	36.9	91.0	$1.5_3 \times 10^{-2}$	160.3	5.6
	27.0	1015-4	—	—	—	—	—	321.9	—
	24.0	1015-2	—	—	—	—	—	919.0	—
		1051-5	0.22 ₈	35.6	284.0	740.5	$1.5_1 \times 10^{-3}$	856.5	2.6
	21.0	1050-3	—	—	—	—	—	2372.0	—
	20.0	1051-3	0.17 ₄	201.0	2049	—	$2.3_3 \times 10^{-4}$	2324.5	1.2
	18.0	1005-5	0.16 ₉	716.0	5443	—	$7.6_0 \times 10^{-5}$	7578.0	1.7
16.0	1051-13	0.10 ₆	4679	—	—	$3.7_6 \times 10^{-5}$	discontinue [6313.0]	—	
650	21.0	1048-3	—	—	—	—	—	170.5	—
	18.0	1042-2	—	—	—	—	—	639.8	—
		1005-9	0.16 ₆	52.0	257.0	517.0	$2.2_8 \times 10^{-3}$	691.2	4.1
	16.0	1050-1	—	—	—	—	—	1298.8	—
		1005-3	0.14 ₅	167.0	758.0	1274	$7.5_0 \times 10^{-4}$	1387.8	2.5
	14.0	1051-15	0.12 ₇	817.0	1979	—	$2.6_4 \times 10^{-4}$	2853.0	1.9
	13.0	1049-2	—	—	—	—	—	3215.2	—
		1051-12	0.11 ₁	1510	3148	—	$1.6_3 \times 10^{-4}$	4091.7	1.8
12.0	1005-12	0.08 ₅	2231	4343	5983	$1.2_2 \times 10^{-4}$	6080.6	2.2	
11.0	1049-3	—	—	—	—	—	6736.3	—	
700	16.0	1049-5	—	—	—	—	—	123.9	—
	13.0	1042-5	—	—	—	—	—	518.4	—
		1005-13	0.12 ₆	85.6	238.5	367.0	$2.8_1 \times 10^{-3}$	483.8	5.0
	11.0	1048-1	—	—	—	—	—	890.1	—
		1051-11	0.09 ₄	283.2	655.0	1002	$9.4_4 \times 10^{-4}$	1177.2	3.4
	10.0	1005-2	0.08 ₅	479.0	1030	1567	$5.8_1 \times 10^{-4}$	1878.9	3.4
	9.0	1048-4	—	—	—	—	—	2069.5	—
		1051-9	0.07 ₉	652.5	1427	2206	$4.1_5 \times 10^{-4}$	2552.5	2.9
8.0	1005-4	0.07 ₄	1096	2329	3618	$2.7_0 \times 10^{-4}$	4504.3	4.3	
750	11.0	1015-3	—	—	—	—	—	171.8	—
	9.0	1042-1	—	—	—	—	—	465.4	—
		1051-4	0.08 ₈	83.0	196.5	316.5	$3.5_5 \times 10^{-3}$	415.0	4.0
	7.0	1051-14	0.08 ₁	262.0	533.8	824.5	$1.1_6 \times 10^{-3}$	1112.4	6.0
	6.0	1015-5	—	—	—	—	—	1911.5	—
	5.0	1051-2	0.05 ₅	944.0	1711	2597	$3.5_0 \times 10^{-4}$	3982.5	6.1
	4.5	1042-3	—	—	—	—	—	6950.5	—
		1051-1	0.03 ₆	1646	3072	4378	$2.0_4 \times 10^{-4}$	6091.1	6.1
4.0	1005-6	0.03 ₉	2747	4276	5677	$1.3_0 \times 10^{-4}$	10541.7	14.5	

Table 9 Regression analysis of the creep-rupture data under internal pressure represented by the relation between pressure and time to rupture.

Tube	Temp. °C	Degree of Polynomial	FO(RES)	F(0.05)	r^2	SD(RES)
			$\frac{\sum\{\hat{Y}_{ik}-\hat{Y}_{i(k-1)}\}^2}{\frac{\sum(Y_i-\hat{Y}_{ik})^2}{n-1-k}}$		$\frac{\sum(\hat{Y}_{ik}-\bar{Y})^2}{\sum(Y_i-\bar{Y})^2}$	$\sqrt{\frac{\sum(Y_i-\hat{Y}_{ik})^2}{n}}$
A	600	①	18.409525	5.120	0.671647	0.190100
		2	3.947942	5.320	0.780144	0.155554
	650	①	187.035767	4.410	0.916681	0.117061
		2	4.141062	4.450	0.933812	0.104335
	700	①	160.859848	4.960	0.947015	0.087363
		2	0.045676	5.120	0.947316	0.087114
750	①	258.422784	5.120	0.969973	0.078020	
	2	3.269992	5.320	0.979533	0.064412	
B	600	①	35.989340	4.960	0.799953	0.173013
		2	0.001982	5.120	0.800002	0.172992
	650	①	413.696265	4.260	0.947332	0.087047
		2	2.556391	4.280	0.952815	0.082392
	700	①	288.986303	4.670	0.960131	0.080685
		2	0.549646	4.750	0.962028	0.078742
750	①	219.838639	4.840	0.956491	0.104213	
	2	1.252361	4.960	0.961806	0.097641	
AandB	600	①	13.095035	4.350	0.395680	0.348477
		2	1.258507	4.380	0.433222	0.337479
	650	②	4.692817	4.070	0.741418	0.225564
		3	0.000201	4.080	0.741420	0.225563
	700	①	93.043755	4.280	0.801799	0.180369
		2	0.958416	4.300	0.810073	0.176564
750	①	271.475126	4.350	0.931384	0.125946	
	2	2.040303	4.380	0.938037	0.119683	

Y_i ; logarithms of observed value, \bar{Y} ; mean of logarithms of observed value, \hat{Y}_{ik} ; logarithms of estimated value at k-th degree of regression equation, n; number of observed value, F(0.05); value in the F-Table at significance level of 5%, r^2 ; contribution, SD; standard deviation, Round mark; significant degree of regression equation.

Table 10 Regression analysis of the creep-rupture data under internal pressure represented by the relation between pressure and the Larson - Miller parameter .

Tube	Degree of Polynomial	FO(RES)	F(0.05)	r^2	SD(RES)
		$\frac{\sum\{\hat{Y}_{ik}-\hat{Y}_{i(k-1)}\}^2}{\frac{\sum(Y_i-\hat{Y}_{ik})^2}{n-1-k}}$		$\frac{\sum(\hat{Y}_{ik}-\bar{Y})^2}{\sum(Y_i-\bar{Y})^2}$	$\sqrt{\frac{\sum(Y_i-\hat{Y}_{ik})^2}{n}}$
A	②	49.250843	4.045	0.89227	0.130528
	3	1.318635	4.050	0.89564	0.128470
B	③	5.380995	4.008	0.93512	0.111418
	4	3.721488	4.012	0.93901	0.108024
Aand B	②	21.040552	3.929	0.72752	0.235072
	3	1.528844	3.928	0.73162	0.233299

Y_i ; values of LMP calculated from observed value, \bar{Y} ; mean value of LMP calculated from observed value, \hat{Y}_{ik} ; estimated values of LMP at k-th degree of regression equation, n ; number of observed value, F(0.05) ; value in the F - Table at significance level of 5% , r^2 ; contribution , SD ; standard deviation, Round mark ; significant degree of regression equation .

Table I Regression analysis of the creep-rupture data under uniaxial tension represented by the relation between stress and time to rupture.

Tube	Temp. °C	Degree of Polynomial	F0(RES)	F(0.05)	r^2	SD(RES)
			$\frac{\sum\{\hat{Y}_{ik}-\hat{Y}_{i(k-1)}\}^2}{\frac{\sum(Y_i-\hat{Y}_{ik})^2}{n-1-k}}$			
A	600	①	193.718773	5.990	0.974839	0.078696
		2	0.007570	6.610	0.974886	0.078621
	650	②	33.648239	6.610	0.997075	0.035549
		3	1.657270	7.710	0.997932	0.029891
	700	②	6.921388	5.990	0.985387	0.070419
		3	2.627653	6.610	0.989838	0.058724
	750	①	412.794942	5.990	0.985673	0.075233
		2	1.229049	6.610	0.988500	0.067404
B	600	①	405.502286	5.990	0.985419	0.068760
		2	1.155055	6.610	0.988155	0.061974
	650	②	11.925234	5.990	0.992047	0.040902
		3	3.692956	6.610	0.995425	0.031020
	700	①	275.310581	5.320	0.975205	0.069943
		2	3.507173	5.590	0.984352	0.055564
	750	①	2030.687664	5.590	0.997054	0.030116
		2	0.058811	5.990	0.997088	0.029942
A and B	600	①	22.561091	4.670	0.634432	0.327239
		2	1.529417	4.750	0.675757	0.308188
	650	②	5.302229	4.600	0.794952	0.256965
		3	0.624808	4.670	0.804355	0.251004
	700	①	103.969833	4.450	0.859469	0.196119
		2	1.768944	4.490	0.873459	0.186101
	750	①	387.130395	4.600	0.965099	0.110934
		2	0.626055	4.670	0.966702	0.108355

Y_i ; logarithms of observed value, \bar{Y} ; mean of logarithms of observed value, \hat{Y}_{ik} ; logarithms of estimated value at k-th degree of regression equation, n; number of observed value, F(0.05); value in the F-Table at significance level of 5%, r^2 : contribution, SD: standard deviation, Round mark; significant degree of regression equation.

Table 12 Regression analysis of the creep-rupture data under uniaxial tension represented by the relation between stress and the Larson-Miller parameter .

Tube	Degree of Polynomial	FO(RES)	F(0.05)	r^2	SD(RES)
		$\frac{\sum(\hat{Y}_{ik} - \hat{Y}_{i(k-1)})^2}{\frac{\sum(Y_i - \hat{Y}_{ik})^2}{n-1-k}}$		$\frac{\sum(\hat{Y}_{ik} - \bar{Y})^2}{\sum(Y_i - \bar{Y})^2}$	$\sqrt{\frac{\sum(Y_i - \hat{Y}_{ik})^2}{n}}$
A	②	85.414593	4.225	0.96832	0.102436
	3	0.011957	4.240	0.96837	0.102359
B	③	6.684070	4.200	0.98547	0.059412
	4	0.056541	4.215	0.98553	0.059281
Aand B	②	12.174625	4.008	0.78895	0.245291
	3	0.541474	4.012	0.79116	0.244004

Y_i ; values of LMP calculated from observed value, \bar{Y} ; mean value of LMP calculated from observed value, \hat{Y}_{ik} ; estimated values of LMP at k-th degree of regression equation, n; number of observed value, F(0.05); value in the F-Table at significance level of 5%, r^2 ; contribution, SD; standard deviation, Round mark; significant degree of regression equation..

Table 13 Estimated values of stress obtained. (kg/mm²)

Temperature	Rupture tests								Creep tests under uniaxial tension	
	Internal pressure ^{*1}				Uniaxial tension ^{*2}					
	10.000 hr		15.000 hr		10.000 hr		15.000 hr		Minimum creep rate of 10 ⁻⁴ %/hr ^{*5}	1% total strain in 10.000 hr ^{*5}
	*3	*4	*3	*4	*3	*4	*3	*4		
600°C	19.1	15.5	17.9	14.5	18.0	14.8	17.0	13.9	18.3	16.4
650°C	12.7	9.7	11.6	8.6	11.8	9.2	11.0	8.5	11.8	10.4
700°C	7.5	4.8	6.3	3.9	7.2	5.0	6.6	4.5	6.4	5.6
750°C	—	—	—	—	3.8	2.0	—	—	3.6	3.0

*1 : The hoop stresses, being calculated by the mean diameter formula taking the dimension of the fuel cladding tubes as 6.3 mm in outside diameter and 0.35mm in wall-thickness, were obtained from the relations of temperature versus pressure for Tubes A and B (Fig.17).

*2 : The tensile stresses were obtained from the relations of temperature versus stress for Tubes A and B (Fig.26).

*3 : The values were obtained from the regression curves.

*4 : The values were obtained from the curves of the lower confidence limit at the confidence coefficient of 95%.

*5 : The estimated mean values were obtained for Tube B, the values of which were smaller than those of Tube A.

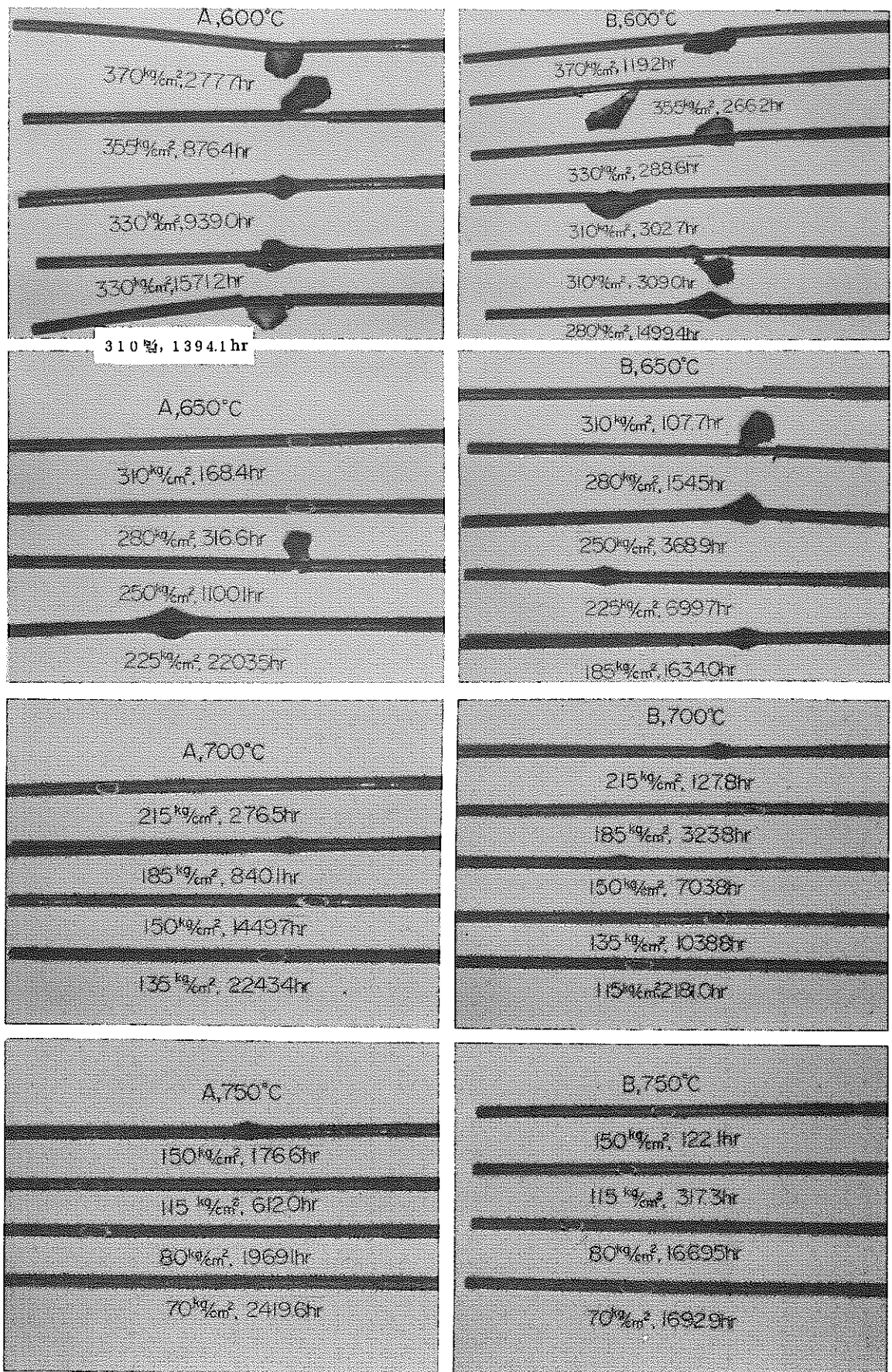


Photo. 1 Appearances of specimens after creep-rupture tests by internal pressure creep testing apparatuses of the same institute.

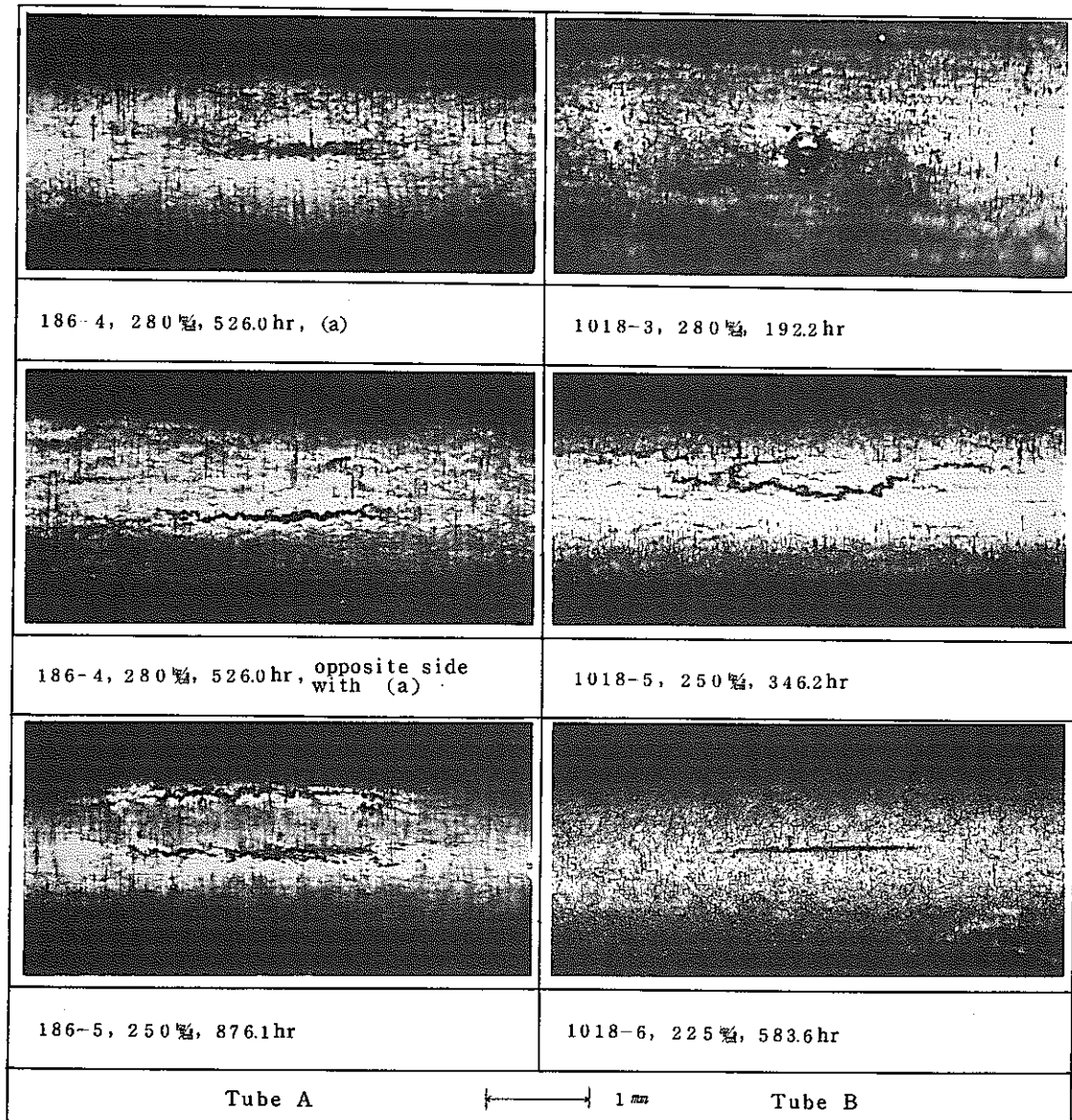


Photo. 2 Some examples of superficial cracks of specimens ruptured under internal pressure at 650°C.

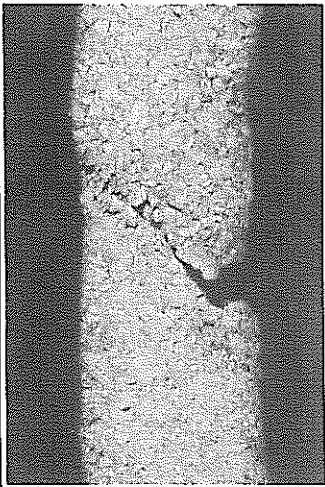
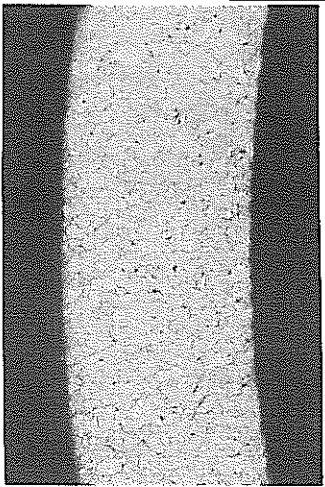
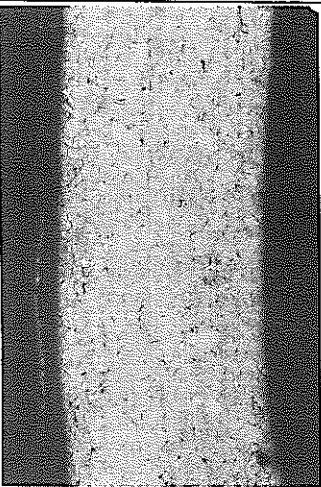
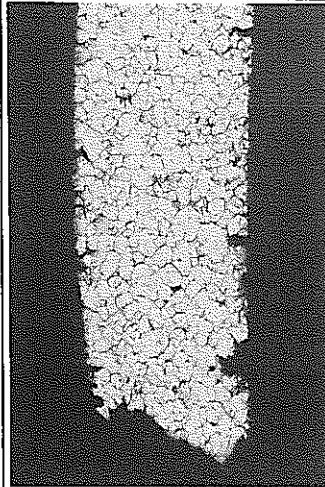
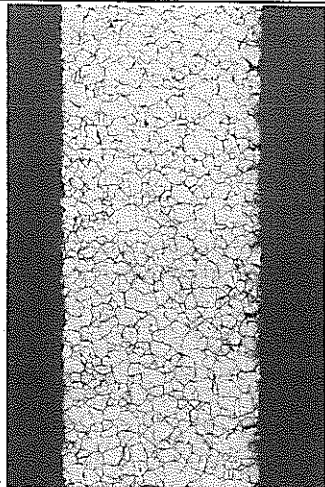
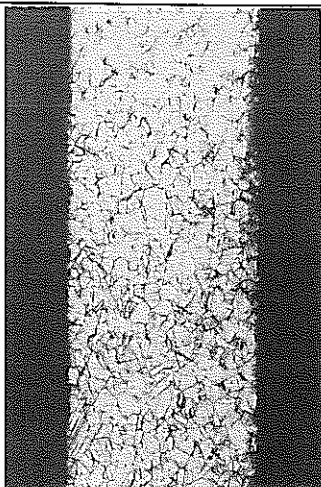
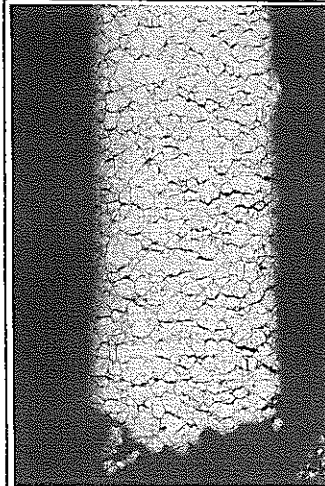
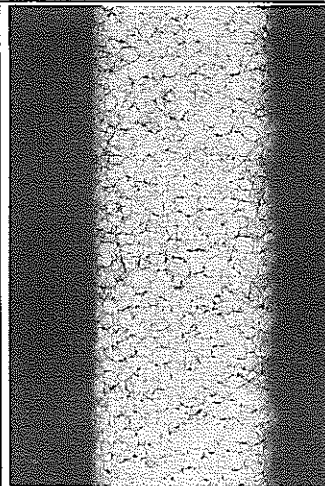
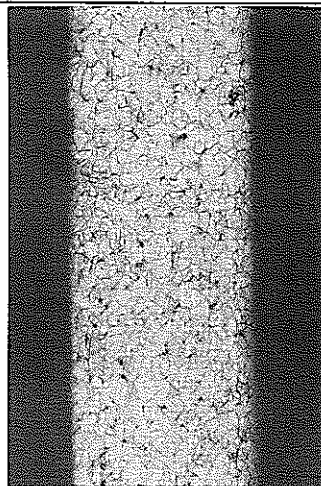
Fractured portion, Transverse	Vicinity of fractured portion	
	Transverse	Longitudinal
		
Tube A, 650°C, 238-6, 225%, 2519.4 hr		
		
Tube B, 650°C, 1007-1, 280%, 127.0 hr		
		
Tube B, 700°C, 1007-7, 135%, 815.0 hr		

Photo. 3 Some examples of photomicrographs of specimens ruptured under internal pressure.

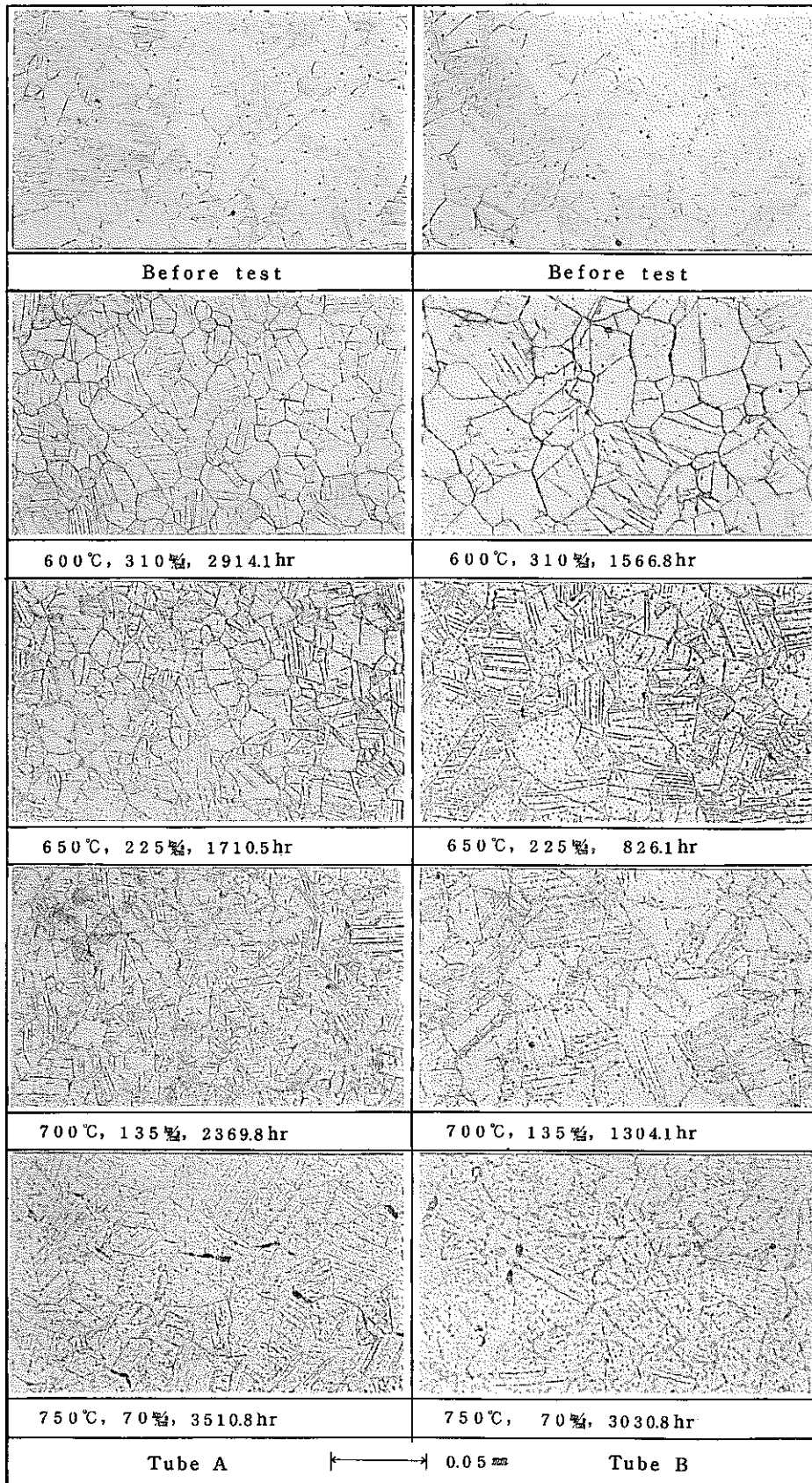


Photo. 4 Photomicrographs of specimens of long-term rupture at each temperature tested under internal pressure (transverse).

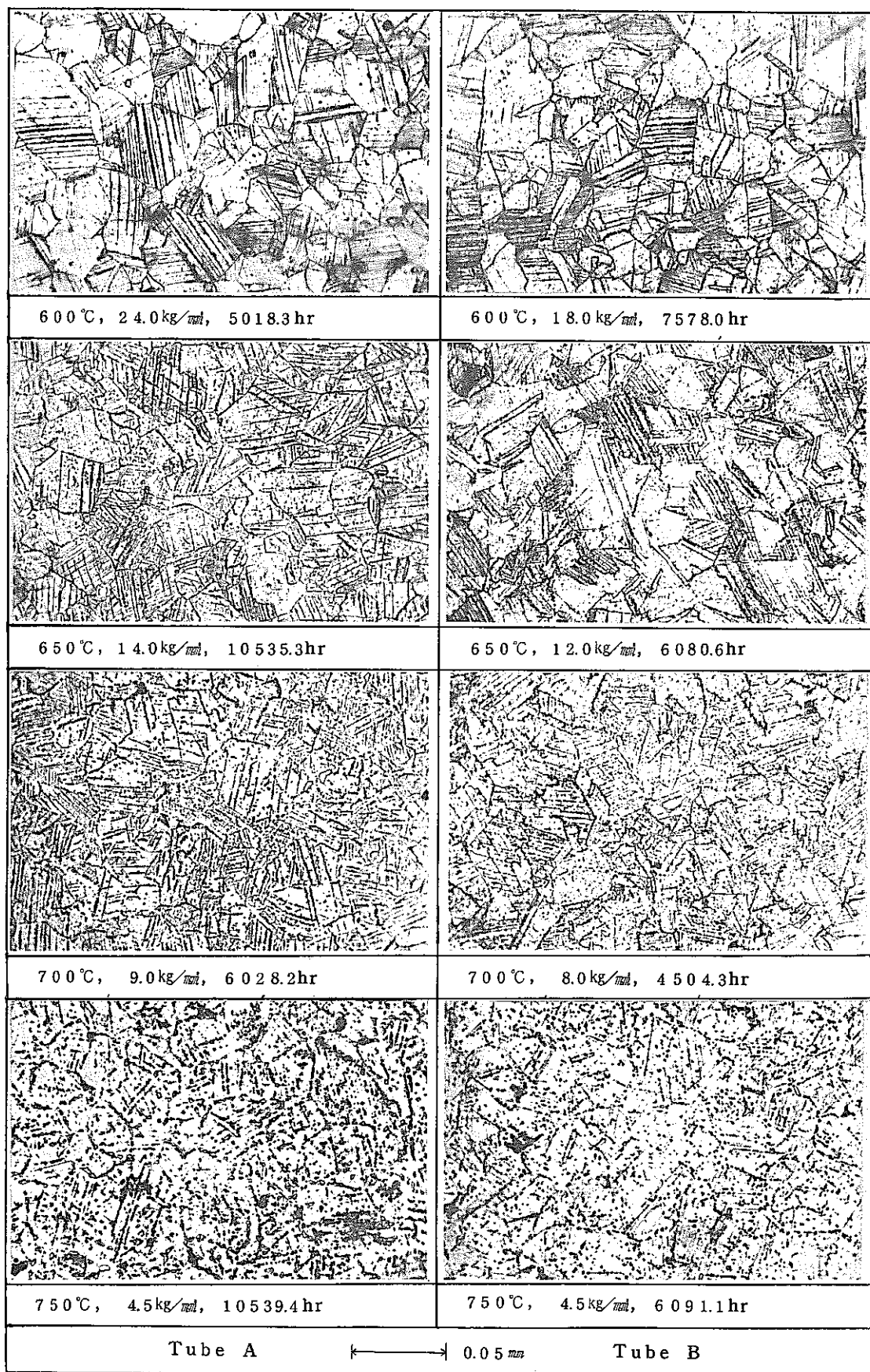


Photo. 5 Photomicrographs of specimens of long-term rupture at each temperature tested under uniaxial tension (longitudinal).

(付 録)

高速実験炉燃料被覆管仕様書

昭和43年11月28日

動力炉・核燃料開発事業団

目 次

1. 適用範囲	1
2. 参考規格	1
3. 製 造	1
3.1 溶 解	1
3.2 熱処理および冷間加工度	1
4. 化学成分	1
4.1 ヒートの定義	2
5. 機械的性質	2
6. 金属組織	2
6.1 結晶粒度	2
6.2 介在物	2
7. 寸法精度	3
7.1 真直度	3
7.2 真円度	3
7.3 寸法公差	3
8. 表面仕上	3
9. 洗 浄	3
10. 試験・検査	3
10.1 機械強度試験	3
10.1.1 偏平試験	3
10.1.2 フレアー試験	3
10.1.3 硬さ試験	4
10.1.4 水圧試験	4
10.1.5 水圧破壊試験	4
10.2 探傷検査	4
10.2.1 浸透試験	4
10.2.2 超音波探傷検査	4
10.3 腐蝕試験	4
10.3.1 粒界腐蝕	4
10.3.2 耐食性	4
11. 抜取法および抜取率	4
12. 取扱い、梱包および輸送	5
13. 提出書類	5

1. 適用範囲

本仕様書は高速実験炉用燃料被覆管に使用されるAISI#316継目無しステンレス鋼管について規定するものである。

本仕様書に基づく製品は特に指定する場合を除いて、ASTM A-450の条項に合致しなくてはならない。

2. 参考規格

ASTM A-450 General Requirement for Alloy Steel Tubes
E-165 Liquid Penetrant Inspection
A-370 Mechanical Testing of Steel Products
E-112 Estimating the Average Grain Size of Metals
E-45 Determining Inclusion Content of Steel
A-262 Intergranular Attack in Stainless Steel

3. 製造

3.1 溶解

素材は真空溶解したものでなければならない。

3.2 熱処理および冷間加工度

製品は溶体化処理後8%~15%の冷間加工を施さなければならない。また製品は必要に応じて応力除去焼鈍を行なうものとする。

4. 化学成分

製品の化学成分は表1の仕様に合致しなくてはならない。

表1 化学成分

元素名	重量パーセント
炭素	0.06~0.08
マンガン(最大値)	2.00
リン(#)	0.03
硫黄(#)	0.03
珪素(#)	0.75
ニッケル	11.00~14.00
クロム	16.00~18.00
モリブデン	2.00~3.00
コバルト(最大値)	0.10
ボロン(#)	0.001
窒素(#)	0.035
鉄	バランス

供給者は各ヒートについて分析を行ない、仕様を満足していることを確認し、その結果を購入者に報告しなくてはならない。製品についても購入者の指示する採取法および採取率に従って各ロットについて分析を行ない、その結果を購入者に報告しなくてはならない。

4.1 ヒートの定義

ヒートは単一の均一な溶解と定義される。

ロットは同一ヒートより連続的に製造され、同一焼鈍バッチで焼鈍された同一寸法および肉厚の製品でしかも連続的に検査されたものをいう。

5. 機械的性質

製品は表2に示す機械的性質を満足するものでなければならない。試験片の採取法および採取率は購入者が指定するものとする。

表2 機械的性質

A. 室温における機械的性質(最小値)

抗張力 (kg/mm^2)	0.2%耐力 (kg/mm^2)	伸び-50mm (%)
60	40	25

B. 650℃における機械的性質(最小値)

抗張力 (kg/mm^2)	0.2%耐力 (kg/mm^2)	伸び-50mm (%)
30	20	15

6. 組 織

6.1 結 晶 粒 度

ASTM E-112に示されている方法および購入者の指示する採取法および採取率によつて試験を行ない、最大結晶粒度がASTM #16.6以下でなければならない。

6.2 介 在 物

素材および最終製品における介在物をASTM E-45の規定に従つて検査しなければならない。

採取法、採取率および判定基準は購入者が指示するものとする。

7. 寸法精度

7.1 真直度

製品には折れ、ねじれがあつてはならない。曲りは $1,000\text{ mm}$ につき 0.75 mm 以下でなければならない。検査は製品全数について行なわなければならない。

7.2 真円度

真円度は内径の最大値と最小値の差として定義される。製品全数について真円度は 0.05 mm 以下でなければならない。

7.3 寸法公差

内径、外径および肉厚の公差は下記の限界をこえてはならない。検査は製品全数について行なうものとする。

内 径 (mm)	± 0.025
外 径 (mm)	± 0.030
肉 厚 (mm)	± 0.030
長 さ (mm)	$+1.0$ -0

8. 表面仕上

製品の内外表面には酸化物等の有害な附着物があつてはならない。表面粗さは J I S 3 S 以下でなければならない。

9. 洗 浄

洗浄において塩素を含む洗剤の使用は望ましくない。供給者が塩素を含む洗剤を使用する場合は、本仕様書による引合時に購入者にその旨報告し、検査報告書において製品の表面における残留塩素が表面 10 cm^2 あたり 0.0008 mg 以下であることを示さなければならない。検査の方法は購入者の承認をうけなくてはならない。

10. 試験・検査

10.1 機械強度試験

10.1.1 偏平試験

A S T M A-450 の試験法および購入者の指示する採取法によつて試験しなければならない。

10.1.2 フレアー試験

A S T M A-450 に示されている試験法および購入者の指示する採取法および採取率によつて試験しなければならない。

10.1.3 硬さ試験

購入者の指示する抜取法および抜取率にもとづいて試験を行わなければならない。

10.1.4 水圧試験

製品は全数について下式で与えられる圧力で常温における水圧試験を行わなければならない。保持時間は30秒以上でなければならない。

$$P = \frac{2 S t}{D}$$

P 圧力

S 表2に示す0.2%耐力の $\frac{1}{2}$

t 公称肉厚

D 公称外径

10.1.5 水圧破壊試験

購入者の指示する抜取法および抜取率にもとづいて水圧破壊試験を行ない、破壊圧力が 800 kg/cm^2 、降伏圧力が 650 kg/cm^2 以上でなければならない。

10.2 探傷試験

10.2.1 浸透試験

製品は全数についてASTM E-165に規定する方法にもとづいて管外表面の浸透試験を行ない、肉眼で識別しうる欠陥があつてはならない。

10.2.2 超音波探傷検査

製品は全数、適当な装置によつて超音波探傷を行ない、標準試片における信号と同等以上の欠陥信号を示すものは不合格とする。標準試片は深さ 0.025 mm 、長さ 0.75 mm の横方向および縦方向の人工欠陥を有するものとする。

10.3 腐蝕試験

10.3.1 粒界腐蝕

購入者の指示する抜取法および抜取率による試片について断面の顕微鏡観察をエッチング無しで100倍の倍率で行ない、粒界腐蝕があつてはならない。

10.3.2 耐食性

製品はASTM A-262にもとづいて耐食試験を行わなければならない。試験においては炭化クロム析出物とシグマ相析出物に伴う粒界腐蝕のいずれをも試験しなければならない。合格基準は購入者で指示するものとする。

11. 抜取法および抜取率

抜取法および抜取率は購入者の定める品質管理方案の条項に合致しなくてはならない。

1.2. 取扱い、梱包および輸送

製品は表面を損傷しないよう注意して取扱い、梱包および輸送しなくてはならない。

製品は一本ずつ紙またはポリエチレンで包装し、輸送中の曲りおよび損傷の恐れのない輸送容器で輸送しなくてはならない。

輸送容器には下記の項目について明確に表示しなくてはならない。

- 1) 注文番号
- 2) 供給者名
- 3) 等級
- 4) 寸法
- 5) ロットおよびヒートまたはインゴット番号

1.3. 提出書類

供給者は下記の書類および試料を定められた時期に購入者に提出し、その承認を得なくてはならない。

項目	提出部数	提出時期
製造要領書		先行試験前
品質管理方案		//
製造設備説明書		//
製造および品質管理書式		//
製造予定		//
先行試料		//
試験検査成績書	3	試験検査後30日以内
ロット記録	3	製造後(ロット)30日以内