

分置

本資料は 年 月 日付で登録区分、
変更する。

01.11.30

[技術情報誌]

高速炉用燃料被覆管のクリープ試験

(第6次クリープ試験)

昭和53年1月

動力炉・核燃料開発事業団
FBR核燃料・材料合同専門委員会
クリープサブグループ
(主査 田 中 千 秋)

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

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)

(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)
	行 俊 照 夫	(住 友 金 属 工 業)
	吉 川 州 彦	(住 友 金 属 工 業)
	岡 本 隆 義	(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)
	石 山 勇	(神 戸 製 鋼 所)
	藤 原 優 行	(神 戸 製 鋼 所)
	内 田 博 幸	(神 戸 製 鋼 所)
	藤 江 秀 夫	(日 立 製 作 所)
	原 照 雄	(日 立 製 作 所)
	森 山 岳 洋	(日 立 製 作 所)
	岩 永 寛	(動 燃 事 業 団)
	三 浦 信	(動 燃 事 業 団)
	神 谷 和 明	(動 燃 事 業 団)
(取 ま と め 担 当)	鈴 木 和 久	(動 燃 事 業 団)
(")	小 山 真 弘	(動 燃 事 業 団)
(")	新 谷 聖 法	(動 燃 事 業 団)

目 次

1. ま え が き	1
2. 供 試 材	2
3. 試 験 方 法	4
4. 試 験 結 果	5
5. 試 験 結 果 の 整 理	8
6. ま と め	11
7. 参 考 文 献	12

1. ま え が き

動力炉・核燃料開発事業団では、高速実験炉「常陽」および高速原型炉「もんじゅ」用の燃料被覆管の高温における強度特性を明らかにし、設計等に資するために、これまで5回に渡って試験を行ってきた^{1)~5)}。

本第6次試験では、安全性および信頼性の向上に寄与するため、さらにデータの蓄積をはかる目的で、49年度に試作されたもんじゅ用被覆管および常陽照射炉心用被覆管について内圧クリーブ破断試験および単軸クリーブ試験を行った。

そして本試験においては、次のことを重点検討項目としてとりあげた。すなわち、いままで行ってきた5回の試験結果および太田ら^{1)~5)}、近藤ら^{6)~8)}の研究結果より、SUS316被覆管のクリーブ破断強度は微量なBとP、結晶粒度および冷間加工度に影響されることが示唆されたので、ここでは結晶粒度(ASTM No. 7.5~9.5)及びB含有量(1~10PPM)の影響について検討を加えた。

なおこの試験は金属材料技術研究所、日立製作所、神戸製作所、住友金属工業および動燃事業団の5機関で実施されたもので、各機関における試験結果はすでに報告されている。^{10)~14)}

本報告は上記5機関の試験結果をまとめ、検討を加えたものである。

2. 供 試 材

試験に用いた材料はK社およびS社にて昭和49年度に試作されたSUS 316オーステナイトステンレス鋼もんじゅ用被覆管(MK1, MK3, MS1, MS3)および常陽照射炉心用被覆管(以下常陽MK-II被覆管と呼ぶ)(JK2, JK3, JS1)であり, それぞれの公称寸法をつぎに示す。

	もんじゅ用被覆管	常陽MK-II用被覆管
外 径	6.50 mm	5.50 mm
内 径	5.60 mm	4.80 mm
肉 厚	0.45	0.35 mm
長 さ	3000 mm	1500 mm

ミルシートに記入されたもんじゅ用被覆管MK1, MK3, MS1およびMS3のヒートナンバー, ミルシートナンバ, ロットナンバ, 被覆管番号, 溶体化処理条件, 冷間加工度および化学成分をTable 1に示す。常陽MK-II被覆管JK2, JK3およびJS1のそれらもTable 2に示す。またもんじゅ用被覆管および常陽MK-II用被覆管の結晶粒度と硬さをTable 3¹⁴⁾, Table 4¹⁴⁾に示す。もんじゅ用被覆管においてMK1材の結晶粒度はASTM No. 7.5でありMK3材はASTM No. 9.5であるので, MK3材の方がMK1材より細粒である。MS1およびMS3材の結晶粒度はそれぞれASTM No. 7.5と8.0であり, MK1材の結晶粒度とほぼ同じである。MS1材のB量は0.0001%である。MK1およびMK3材のB量はそれぞれ0.0008%, 0.0007%であって, MS3材のB量に近い値であった。P量はMK1; 0.010%, MK3; 0.004%, MS1; 0.019%, MS3; 0.018%である。

常陽MK-II被覆管においてJK2材の結晶粒度はASTM No. 8.0であり, JK3材の結晶粒度はASTM No. 10.0である。またJS1材の結晶粒度はASTM No. 8.0であり, JK2材の結晶粒度と同じである。JS1材のB量は0.0001%であり, JK2およびJK3材のB量はそれぞれ0.0004%および0.0007%である。またP量はJK2材; 0.011%, JK3材; 0.005%, JS1材; 0.019%である。以上の被覆管の結晶粒度およびB量, P量を比較するともんじゅ用被覆管MK1材, MK3材, MS1材はそれぞれ常陽MK-II用被覆管JK2材, JK3材, JS1材に相当する。

もんじゅ用被覆管の室温及び高温引張試験結果をTable 5とFig. 1^{12), 14)}に示す。各引張試験

温度とも、結晶粒の最も微細なMK 3材の引張強さおよび耐力が最も高く、続いてMK 1材となり、MS 1材とMS 3材の引張強さおよび耐力はほとんど同じで、最も低い値を示す。伸びは引張強さと反対の傾向を示し、MK 3材が最も小さい値を示した。常陽MK - II用被覆管の高温引張試験結果をTable 6^{13),14)}、Fig.2に示す。結晶粒の最も微細なJK 3材の引張強さおよび耐力が最も高く、伸びは最も低い。またJK 2材とJS 1材の引張性質はほとんど一致していることがわかった。

もんじゅ用被覆管の高温バースト試験結果をTable 7¹⁴⁾およびFig. 3に、常陽用被覆管の高温バースト試験結果をTable 8¹⁴⁾およびFig.4に示す。各々の被覆管の破裂圧を比較すると、各々の被覆管の引張強さの大小関係と類似の傾向を示していることがわかった。

3. クリープ試験方法

1) 試験片形状寸法

もんじゅ用および常陽MK-II用被覆管内圧クリープ破断試験片および単軸引張クリープ試験片の形状をFig.5に示す。

2) 使用試験機

各試験機関が使用した試験機は各試験機関の第6次クリープ試験報告書^{10~14)}に記述されている。

3) 試験条件

もんじゅ用被覆管および常陽用MK-II用被覆管のクリープおよびクリープ破断試験条件をTable 9に示す。内圧クリープ破断試験は650°, 700°, 750°および800°Cに行なった。ただし、もんじゅ用被覆管MS1は700°Cでのみ内圧クリープ破断試験を行なった。単軸引張クリープ試験ではもんじゅ被覆管は700°C, 常陽MK-II被覆管は650°Cで行なった。

4. 試験結果

4.1 内圧クリーブ破断試験結果

金属材料技術研究所 (NRIM), 神戸製鋼所 (KOBEL) および動燃事業団 (PNC) の3試験機関で求めたもんじゅ用被覆管 (MK1, MK3, MS1 および MS3) の650°, 700°, 750° および800°C (ただしMS1は700°Cのみ) の試験温度における内圧クリーブ破断試験結果をTable 10 (MK1), Table 11 (MK3), Table 12 (MS1) およびTable 13 (MS3) に示す。また各試験温度におけるこれらの被覆管の試験圧力を平均径の式を用いて hoop stress に置きかえ, その hoop stress と破断時間との関係をFig. 6 (MK1材), Fig. 7 (MK3材) およびFig. 8 (MS3材) に示す。もんじゅ用被覆管としてクリーブ破断試験を行なったMK1, MK3, MS1 およびMS3材の破断試験結果をまとめてFig. 9に示す。これによると, 結晶粒度の異なるMK1 およびMK3材において, 各試験温度とも結晶粒径の大きいMK1材の破断強度の方が大きい。B含有量の異なるMS1 およびMS3材ではB量の多いMS3材の方が破断強度は大きい。結晶粒径の大きさおよびB含有量がほぼ同程度のMK1, MS3材は各試験温度とも溶体化処理温度の高いMK1材の方がやや破断強度が大きい。

つぎに日立製作所 (HITACHI), 住友金属工業 (SUMITOMO) および動燃事業団 (PNC) の3試験機関で求めた常陽MK-II用被覆管 (JK2, JK3 および JS1) の650, 700, 750 および800°Cの試験温度における内圧クリーブ破断試験結果をTable 14 (JK2), Table 15 (JK3) およびTable 16 (JS1) に示す。また各試験温度における被覆管の試験圧力から平均径の式を用いて計算した hoop stress と破断時間との関係をFig. 10 (JK2材), Fig. 11 (JK3材) およびFig. 12 (JS1材) に示す。また常陽MK-II用被覆管としてクリーブ破断試験を行ったJK2, JK3 およびJS1材の結果をまとめてFig. 13に示す。結晶粒度の異なるJK2 およびJK3材では結晶粒径の大きさおよびB含有量がほぼ同程度のJK2, JS1材は各試験温度とも溶体化処理温度の高いJK2材の方が破断強度が大きい。結晶粒径の大きさおよびB含有量がほぼ同程度のJK2, JS1材は各試験温度とも溶体化処理温度の高いJK2材の方が破断強度が大きい。JK3材 (結晶粒度: ASTM No. 10.0, P含有量: 0.0005%, B含有量: 0.0007%, 溶体化処理条件: 1090°C × 3min) とJS1材 (結晶粒度: ASTM No. 8.0, P含有量: 0.019%, B含有量: 0.0001%, 溶体

化処理条件：1020℃×1.5 min) は結晶粒度，P および B 含有量および溶体化処理条件が異なっても，ほぼ同程度の破断強度を有していた。

4.2 内圧クリーブ破断試験後の試験片の外観

内圧クリーブ破断試験後の試験片の外観の1例としてFig. 14¹¹⁾に常陽MK-II用被覆管JK2の650℃における破断後外観写真を示す。圧力380 kgf/cm²の短時間(195.7時間)で破断した被覆管はOpen-door型の割れ形状を示し，圧力300，240および200 kgf/cm²で破断した被覆管はhair-crack状の割れとなり，破断時間が長くなるにしたがって一般に割れの開口量が小さくなり，き裂の数は多くなる傾向が見られた。なお240 kgf/cm²の加圧試験片はワイヤーで補強した溶接熱影響部(溶接ビードから約3 mm離れたところ)から破断した。

つぎに内圧クリーブ破断後の試験片の寸法変化の例としてFig. 15¹³⁾に常陽MK-II用被覆管JK2，JK3およびJS1の700，750および800℃における内圧クリーブ破断後の非開口部最大円周伸びと称する割れ開口端より約5 mm離れた部分の円周伸びを示す。再結晶によると思われる伸びの急激な上昇は，JK2材では750℃で約2500時間JK3およびJS1材では750℃で約1000時間で生じている。これらの結果はFig. 16¹³⁾に示したようにLarson-Millerパラメーターによりよく整理される。またFig. 13およびFig. 16から破断強度の顕著に大きいJK2材では伸びは最も小さく，他方破断強度が小さくその値がほぼ同じであるJK3およびJS1の伸びは大きく，その差は認められないことがわかった。

4.3 内圧クリーブ破断後の光学顕微鏡観察と硬さ測定

クリーブ破断試験後の試料の光学顕微鏡組織の一例としてFig. 17¹³⁾に常陽MK-II用被覆管JK2，JK3およびJS1の700℃でのクリーブ破断部と反対側の縦断面の光学顕微鏡組織を示す。破断時間はそれぞれ731.0，688.8および802.1 hrである。クリーブ破断強度の大きいJK2材に比較しクリーブ破断強度の小さいJK3およびJS1材の方がσ相の析出量が多いことがわかった。

Table 19¹¹⁾に650℃でクリーブ破断試験を行なった常陽MK-II用被覆管JK2，JK3およびJS3の破断部近傍における横断面および縦断面のピッカース硬さの平均値と試験前の硬さ値を示した。クリーブ破断時間が最も長いJK2材(3372.3時間)

前後の硬さ低下率が最も小さく、JK3とJS1材ではクリーブ破断時間の長いJS1材（2256.1時間）のクリーブ破断試験前後の硬さ低下率の方が大きい。

4.4 単軸クリーブ試験結果

もんじゅ用被覆管MK1, MK3およびMS3の700℃における単軸クリーブ試験結果をTable 17に示す。また常陽MK-II用被覆管JK2, JK3およびJS1の650℃における単軸クリーブ試験結果をTable 18に示す。Table 18にはつば間を標点距離としてダイヤルゲージにより試験期間中測定した最小クリーブ速度と、参考値としてコンパレータにより絞り部内側に付したピッカース圧痕間距離を試験開始時および試験終了後に測定することによって推定した最小クリーブ速度も示した（両測定法による試験終了時の伸びの比が試験中にも保たれていると仮定した）。両測定法による伸び値を比較すると、後者の方が小さく、前者の場合は試験片絞り部、および溶接熱影響部における変形が誤差となっていると考えられる。Fig.18にダイヤルゲージ測定による常陽MK-II用被覆管JK2, JK3およびJS1のクリーブ曲線を示した。

Fig.19は常陽MK-II用被覆管JK2, JK3, JS1, およびもんじゅ用被覆管JK1, JK3, JS3の試験応力と最小クリーブ速度の関係を示す。常陽MK-II用被覆管において、応力 $4 \text{ kgf}/\text{mm}^2$ 以上ではJK3, JS1材の最小クリーブ速度は同応力でほぼ等しく、それらにくらべてJK2材の最小クリーブ速度は小さい。もんじゅ用被覆管においても常陽MK-II用被覆管の場合と同様な傾向で、MK3とMS3はほぼ等しく、MK1は小さい。

常陽用MK-II被覆管JK2, JK3, JS1およびもんじゅ用被覆管MK1, MK3, MS3の同一温度、同一応力下での対数最小クリーブ速度と対数破断時間との関係をFig. 20に示す。ただし最小クリーブ速度はTable 17, 18に示す単軸引張応力下のものであり、破断時間は、後述のように内圧クリーブ破断時間とhoop-stressの関係を整理したLarson-Millerパラメーターを用いて単軸クリーブ試験のとき加えた応力と等しいHoop stressのときの時間との間には多少のバラツキはあるが、直線関係が成り立っている。

5. 試験結果の整理

5.1. 内圧クリーブ破断

5.1.1. 圧力-Larson-Millerパラメータ

第1～5次クリーブ試験で行ったと同様に長時間データを推定するために圧力と破断時間との関係をLarson-Millerパラメータ〔 $LMP=T(C+\log t_R)$ 〕で整理した。ここで、 T は絶対温度(試験温度)、 C はパラメータ定数および t_R は破断時間である。そして対数hoop stressと対数破断時間の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つた。なお、パラメータ定数 C の値は実測値と推定値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%)および関与率より選択した。

Hoop stressとLMPの関係に対して選択された回帰次数およ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Fig.21(もんじゅ用被覆管MK1材)、Fig.22(もんじゅ用被覆管MK3)、Fig.23(もんじゅ用被覆管MS3)、Fig.24(常陽MK-II用被覆管JK2)、Fig.25(常陽MK-II用被覆管JK3)およびFig.26(常陽MK-II用被覆管JS1)に示す。得られたHoop stressと破断時間との関係のLarson-Millerパラメータはつぎのようである。

もんじゅ用被覆管

$$\text{MK1材: } T(14.74+\log t_R)\times 10^{-3}=21.324-3.715(\log \sigma_H)$$

$$\text{MK3材: } T(14.59+\log t_R)\times 10^{-3}=20.808-3.583(\log \sigma_H)$$

$$\text{MS3材: } T(14.02+\log t_R)\times 10^{-3}=19.376-1.586(\log \sigma_H)-0.962(\log \sigma_H)^2$$

常陽MK-II用被覆管

$$\text{JK2材: } T(13.67+\log t_R)\times 10^{-3}=18.028+0.178(\log \sigma_H)-1.698(\log \sigma_H)^2$$

$$\text{JK3材: } T(15.11+\log t_R)\times 10^{-3}=21.002-3.447(\log \sigma_H)$$

$$\text{JS1材: } T(12.75+\log t_R)\times 10^{-3}=18.055-2.844(\log \sigma_H)$$

これらの式を用いて計算したもんじゅにおける被覆管炉心の設計炉内滞在時間と温度(675℃×17,760時間)、および常陽MK-IIの被覆管の設計炉内滞在時間と温度(650℃×7,560時間)でのクリーブ破断強度をTable20に示す。またこれらの結果とそれぞれの被覆管の溶体化処理条件、結晶粒度、B含有量、P

含有量の関係を Fig.27 に示す。Table20 および Fig.27 より、最も破断強度が大きいのはもんじゅ用被覆管 MK 1 であり、続いてもんじゅ用被覆管 MS 3、常陽 MK-II 用被覆管 JK 2 であり、その次がもんじゅ用被覆管 MK 3、常陽 MK-II 用被覆管 JK 3 となり、最も破断強度が小さいのは常陽 MK-II 用被覆管 JS 1 となる。

5.1.2. 第1次から第6次クリーブ試験で得られたデータの比較

第1次より第6次までのクリーブ破断試験結果は Larson - Miller パラメータを用いてつぎのように整理される。ただし第6次試験結果は被覆管製造会社別で最も強度の大きかったもんじゅ用被覆管 MK 1 および MS 3 に対して整理を行った。

(1) 第1次試験¹⁾

$$K \text{ 材} : T(17.01 + \log t_R) \times 10^{-3} = 12.355 + 11.682 \log P - 3.813 (\log P)^2$$

$$S \text{ 材} : T(13.12 + \log t_R) \times 10^{-3} = 57.262 - 53.333 \log P + 24.565 (\log P)^2 - 4.073 (\log P)^3$$

(2) 第2次試験²⁾

$$K \text{ 材} : T(19.35 + \log t_R) \times 10^{-3} = 68.071 - 67.592 \log P + 34.579 (\log P)^2 - 6.122 (\log P)^3$$

$$S \text{ 材} : T(13.60 + \log t_R) \times 10^{-3} = 48.206 - 45.289 \log P + 23.045 (\log P)^2 - 4.169 (\log P)^3$$

(3) 第3次試験³⁾

$$K \text{ 材} : T(20.51 + \log t_R) \times 10^{-3} = 17.818 + 9.844 \log P - 3.482 (\log P)^2$$

$$S \text{ 材} : T(15.99 + \log t_R) \times 10^{-3} = 17.630 + 4.045 \log P - 1.857 (\log P)^2$$

(4) 第4次試験⁴⁾

$$K \text{ 材} : T(10.78 + \log t_R) \times 10^{-3} = 18.768 - 2.623 (\log P)$$

$$S \text{ 材} : T(10.61 + \log t_R) \times 10^{-3} = 18.699 - 2.733 (\log P)$$

(5) 第5次試験⁵⁾

$$K \text{ 材} : T(10.65 + \log t_R) \times 10^{-3} = 15.639 - 2.749 (\log \sigma)$$

$$S \text{ 材} : T(13.35 + \log t_R) \times 10^{-3} = 18.062 - 0.291 (\log \sigma) - 1.583 (\log \sigma)^2$$

(6) 第6次試験

$$MK 1 \text{ 材} : T(14.74 + \log t_R) \times 10^{-3} = 21.324 - 3.715 (\log \sigma)$$

$$MS 3 \text{ 材} : T(14.02 + \log t_R) \times 10^{-3} = 19.376 - 1.586 (\log \sigma) - 0.926 (\log \sigma)^2$$

これらの式を用いて計算したもんじゅにおける被覆管の炉心の設計炉内滞在時間と温度(675°C×17.760時間)および常陽 MK-II の被覆管の設計炉内滞在時間

と温度(650°C×7,560時間)でのクリーブ破断強度をTable 21に示す。またこれらの結果とそれぞれの被覆管の溶体化処理条件, 冷間加工度, 結晶粒度, B含有量, P含有量の関係をFig. 28に示す。Table 21およびFig. 28より, 最もクリーブ破断強度が大きいのは常陽型試作材として昭和43年度最初に製造されたK材である。この昭和43年度試作K材は現在行われていない通電加熱の溶体化処理で, 結晶粒度はASTM No. 9と細粒であり, 冷間加工度は12.7%と常陽型被覆管としては高い方である。P含有量は他の被覆管にくらべ最も高い。またB含有量については詳細な報告がなく, 再度の分析が望まれる。この昭和43年度試作K材の結晶粒度をASTM No. 7.5程度に大きくすればさらに破断強度が上昇するものと思われる。第3次クリーブ試験における46年度製造S材のクリーブ破断強度が低いのは結晶粒度が微細(ASTM No. 9)であるためと思われる。冷間加工度が約20%のもんじゅおよび常陽MK-II用被覆管(第4~6次クリーブ試験)は一般に約10%冷間加工の常陽被覆管(第1~3次クリーブ試験)に比較し, 長時間側で破断強度が小さい。第1~6次クリーブ試験のうち, 第4次クリーブ試験結果が最も小さい破断強度を示している。

5.2. 単軸引張クリーブ

5.2.1. 応力-最小クリーブ速度に関するLarson-Millerパラメータ

前述のようにクリーブ試験結果に大きく影響する結晶粒度およびB, P含有量をくらべると, もんじゅ用被覆管MK1, MK3はそれぞれ常陽MK-II用被覆管JK2, JK3に相当し, クリーブ試験結果もほぼ一致している。したがってもんじゅ用被覆管MK1と常陽MK-II用被覆管JK3の応力-最小クリーブ速度の結果をまとめてLarson-Millerパラメータで整理した。また同一製造メーカーであるもんじゅ用被覆管MS3と常陽MK-II用被覆管JS1の応力-最小クリーブ速度の結果もまとめてLarson-Millerパラメータで整理した。対数応力と最小クリーブ速度に関する〔 $LMP-T(C-\log \dot{\epsilon}_{min})$ 〕との関係に対して採用された回帰の次数およ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それぞれFig. 29(もんじゅ用被覆管MK1と常陽MK-II用被覆管JK2), Fig. 30(もんじゅ用被覆管MK3と常陽MK-II用被覆管JK3)およびFig. 31(もんじゅ用被覆管MS3と常陽MK-II用被覆管JS1)に示す。

6. ま と め

高速原型炉「もんじゅ」および高速実験炉「常陽MK-II」用炉心燃料被覆管の高温強度特性を検討するために、K社及びS社において昭和49年度に製造された結晶粒度およびB含有量の異なる試作材について、引張試験、バースト試験、内在クリーブ破断試験および単軸クリーブ試験を行った。本試験結果を総括するとつぎの通りである。

- (1) 得られた試験結果を統計的に解析し、もんじゅおよび常陽MK-II用被覆管の高温強度特性の基礎的資料を得た。
- (2) クリーブ破断試験に用いられたもんじゅおよび常陽MK-II用被覆管の高温短時間強度（引張およびバースト）試験より、微細な結晶粒の被覆管は結晶粒の大きな被覆管より強度は大きく、延性は小さいことがわかった。
- (3) K社製もんじゅおよび常陽MK-II用被覆管の内圧クリーブ破断試験において、各試験温度とも結晶粒径の大きい被覆管の方が大きなクリーブ破断強度を示した。

結晶粒度がほぼ同程度で、B含有量の異なるもんじゅ用被覆管MS1およびMS3では、B含有量の多いS3材の方がクリーブ破断強度は大きい。

結晶粒度の大きさおよびB含有量がほぼ同程度のKおよびS社製もんじゅ用被覆管(MK1, MS3)および常陽MK-II用被覆管(JK2, JS1)において、各試験温度とも、それぞれ、K材の方が優れたクリーブ破断寿命を示した。

クリーブ破断後の試験片の延性、組織変化および硬さ変化はクリーブ破断強度に対応していることがわかった。

- (4) もんじゅおよび常陽MK-II用被覆管の単軸クリーブ試験より、結晶粒度の異なるK材において、同一応力での最小クリーブ速度を比較したところ結晶粒度¹³の大きな被覆管の方が最小クリーブ速度は小さかった。また結晶粒度の大きさおよびB含有量がほぼ同程度のKおよびS材の同応力での最小クリーブ速度を比較すると、K材の方が小さかった。
- (5) 第1次から今回の第6次クリーブ破断試験結果までを常陽MK-IIおよびもんじゅ用炉心燃料被覆管の設計条件で、比較、検討した結果、最初に製造された昭和43年度試作K材がもっともクリーブ破断強度が大きいことがわかった。

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)”, SN241 71-55, 動力炉・核燃料開発事業団, 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, 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)”, SN241 72-43, 動力炉・核燃料開発事業団, 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, 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)”, SN241 74-22, 動力炉・核燃料開発事業団, FBR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)”, SN241 75-10, 動力炉・核燃料開発事業団, FBR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次クリープ試験)”, 動力炉・核燃料開発事業団, FBR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) 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”, 昭和51年日本原子力学会年会, P25。
- 7) 太田, 藤原, 内田, “18-8M₀ 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, №3, 昭和49年12月。
- 8) 太田, 藤原, 内田, “18-8M₀ 鋼燃料被覆管の高温特性におよ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, №1, 昭和48年3月。
- 9) Y.Kondo et al., “The effects of metallurgical variables on creep of Type316 stainless steels”, Proceedings of the international conference on radiation effects in breeder reactor structural materials, Scottsdale, Arisona, June 19-23, 1977.
- 10) 吉村, 田中, 八木, “高速炉燃料被覆管のクリープ試験(第6次)”, SJ255 77-01, 金属材料技術研究所, 昭和51年12月。

- 11) 藤江, 原, 森山, “高速増殖炉用燃料被覆管のクリープ試験(第6次)”, SJ202 76-11, 日立製作所, 1976年12月。
- 12) 太田, 石山, 藤原, 内田, “高速炉燃料被覆管のクリープ試験(第6次)”, SJ216 77-01, 神戸製鋼所, 1977年1月。
- 13) 行俊, 吉川, 岡本, 上野, “高速炉燃料被覆管のクリープ試験(M)”, SJ204 77-01, 住友金属工業, 昭和52年1月31日。
- 14) 三浦, 大森, 神谷, 小原, “高速炉燃料被覆管のクリープ試験(第6次)”, SN841-77-46, 動力炉・核燃料開発事業団, 昭和52年8月。

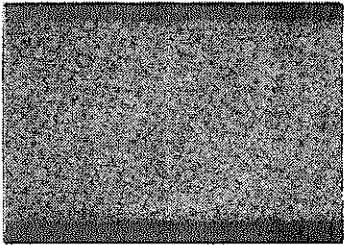
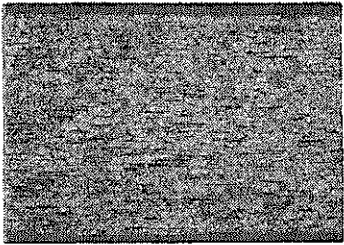
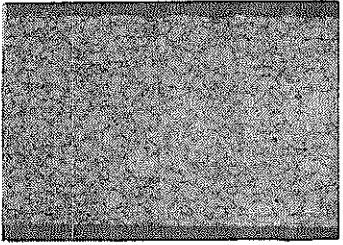
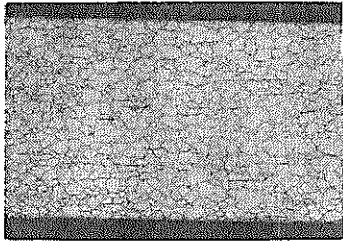
Table 1 Fabrication conditions of Monju claddings

Symbol of cladding	MK1	MK3	MS1	MS3	
Heat No.	L0788	L0961	V2092	V2106	
Millsheet No.	S-75-4	S-75-4	MS-RD-0007	MS-RD-0007	
Lot No.	1	3	1	3	
Cladding No.	4001~4057	4066~4500	5001~5089	5184~5288	
Solution treatment (Temp×Time)	1125℃×3min	1085℃×3min	1020℃×2min	1020℃×1.5min	
Cold work	20%	20%	20%	20%	
Chemical composition(wt%)	C (0.035 ~0.064)	0.056	0.058	0.046	0.046
	Si (≤0.75)	0.49	0.48	0.50	0.56
	Mn (1.50 ~2.00)	1.56	1.79	1.52	1.57
	P (≤0.03)	0.010	0.004	0.019	0.018
	S (≤0.02)	0.006	0.005	0.008	0.008
	Ni (12.00 ~14.00)	13.68	13.81	13.07	13.07
	Cr (16.00 ~18.00)	16.78	16.88	17.55	17.55
	Mo (2.00 ~3.00)	2.49	2.41	2.48	2.47
	Co (≤0.10)	0.08	0.02	0.01	0.01
	B (≤0.0005)	0.0008	0.0007	0.0001	0.0010
	N (≤0.010)	0.0064	0.0047	0.0080	0.0074
	Al (≤0.05)	0.005	0.015	0.0110	0.0180
	As (≤0.03)	0.002	0.002	0.002	0.002
	Cu (≤0.20)	0.028	0.022	0.0800	0.0800
	Nb Ta (≤0.05)	0.01	0.01	0.002	0.002
	Ti (≤0.1)	0.005	0.024	0.002	0.002
	V (≤0.2)	0.027	0.005	0.002	0.005
O (Report)	0.0019	0.0016	0.0015	0.0011	

Table 2 Fabrication conditions of Joyo MK-II claddings

Symbol of cladding	JK2	JK3	JS1	
Heat No.	L0788	L0961	V2092	
Millsheet No.	S-75-6	S-75-6	JS-RD-0003	
Lot No.	2	3	1	
Cladding No.	1091~1200	1201~1400	1001~1400	
Solution treatment (Temp×Time)	1120℃×3min	1090℃×3min	1020℃×1.5min	
Cold work	21%	20%	21%	
Chemical composition (wt%)	C ($\begin{smallmatrix} 0.035 \\ \sim 0.064 \end{smallmatrix}$)	0.062	0.057	0.050
	Si (≤ 0.75)	0.48	0.47	0.49
	Mn ($\begin{smallmatrix} 1.50 \\ \sim 2.00 \end{smallmatrix}$)	1.51	1.73	1.53
	P (≤ 0.03)	0.011	0.005	0.019
	S (≤ 0.02)	0.006	0.006	0.007
	Ni ($\begin{smallmatrix} 12.00 \\ \sim 14.00 \end{smallmatrix}$)	13.55	13.88	13.08
	Cr ($\begin{smallmatrix} 16.00 \\ \sim 18.00 \end{smallmatrix}$)	16.85	16.75	17.60
	Mo ($\begin{smallmatrix} 2.00 \\ \sim 3.00 \end{smallmatrix}$)	2.48	2.35	2.42
	Co (≤ 0.10)	0.07	0.01	0.01
	B (≤ 0.0005)	0.0004	0.0007	0.0001
	N (≤ 0.010)	0.0074	0.0051	0.0080
	Al (≤ 0.05)	0.004	0.020	0.0100
	As (≤ 0.03)	0.002	0.002	0.002
	Cu (≤ 0.20)	0.027	0.020	0.080
	$\frac{Nb}{Ta}$ (≤ 0.05)	0.010	0.005	0.002
	Ti (≤ 0.1)	0.005	0.026	0.002
	V (≤ 0.2)	0.026	0.006	0.002
O (Report)	0.0017	0.0013	0.0020	

Table 3 Grain size and hardness of Monju Claddings

		MK 1	MK 3	MS 1	MS 3
Grain size	ASTM 1/2	7.5	9.5	7.5	8.0
	Micrograph(Longitudinal)				
Hardness (Hv;500F)	Long.	275	289	268	272
	Trans	276	281	273	269

65
~~X100~~

65
~~X100~~

65
~~X100~~

65
~~X100~~

Table 4 Grain size and hardness of Joyo MK-II claddings

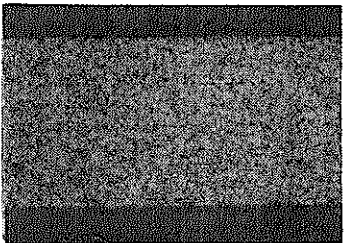
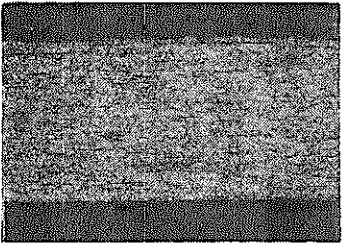
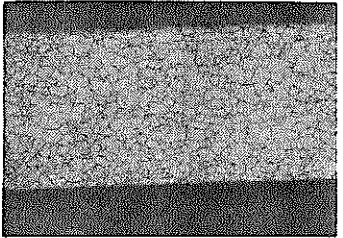
		JK 2	JK 3	JS 1
Grain size	ASTM #6	8.0	10.0	8.0
	Micrograph(Longitudinal)	 65 X100	 65 X100	 65 X100
Hardness (Hv:500 ϕ)	Long.	269	288	288
	Trans.	270	286	282

Table 5 Tensile properties of Monju claddings

Symbol of cladding	M K 1				M K 3			
	Test temp. (°C)	Specimen No	Tensile Strength (Kgf/mm ²)	0.2% proof Stress (Kgf/mm ²)	Elongation (%)	Specimen No	Tensile strength (Kgf/mm ²)	0.2% proof stress (Kgf/mm ²)
R.T	K4022-14	83.5	71.1	16.9	K4073-13	88.0	74.6	14.8
	K4028-16	83.9	72.5	17.4	K4084-13	87.8	75.5	14.9
400	K4015-10	69.2	60.9	5.7	K4083-15	70.8	59.6	5.4
	K4022-12	69.1	60.5	5.8	K4073-8	72.8	64.9	5.7
	K4015-1	71.5	68.5	4.0	K4069-1	72.8	69.1	4.0
500	K4017-13	65.2	55.6	—	K4084-15	67.9	61.6	4.7
	K4004-9	64.4	56.4	—	K4073-14	69.0	61.3	4.5
	K4004-1	69.0	62.7	6.0	K4073-1	72.1	65.0	6.0
600	K4015-11	58.6	48.5	9.3	K4088-15	61.9	49.0	9.2
	K4022-15	59.1	51.0	9.0	K4084-7	62.4	52.7	9.3
	K4017-1	59.1	54.5	5.0	K4084-1	64.1	56.8	—
650	K4057-3	50.9	40.6	12.0	K4073-10	52.7	41.6	13.4
	K4004-10	—	—	—	K4083-13	53.0	42.2	13.8
700	K4017-9	41.2	32.7	23.5	K4069-10	44.1	33.0	26.7
	K4028-14	42.7	33.8	24.0	K4083-11	43.1	31.5	31.6
	K4022-1	42.7	39.6	15.0	K4083-1	45.2	39.5	16.0
750	K4004-8	35.0	26.7	39.0	K4084-12	37.3	27.0	34.0
	K4015-7	35.2	27.1	40.3	K4069-13	36.3	27.0	36.1
	K4028-2	37.0	32.8	25.0	K4088-2	37.0	32.8	25.0
800	K4004-13	29.0	21.3	45.4	K4083-12	29.4	20.4	47.9
	K4015-12	29.1	20.9	45.4	K4088-13	30.4	21.7	40.3
	K4028-1	29.4	26.3	32.0	K4088-1	29.9	26.3	34.0

Table 5 Continued

Symbol of cladding	M S 1				M S 3			
	Test temp (°C)	Specimen No.	Tensile Strength (Kgf/mm ²)	0.2% proof Stress (Kgf/mm ²)	Elongation (%)	Specimen No.	Tensile strength (Kgf/mm ²)	0.2% proof stress (Kgf/mm ²)
R.T	S5023-12	81.5	72.6	19.4	S5199-7	80.4	69.2	20.8
	S5025-16	82.1	71.1	21.0	S5216-14	80.0	66.9	22.7
400	S5023-11	65.9	58.1	4.8	S5218-14	64.4	54.9	4.3
	S5025-3	65.3	59.1	5.2	S5199-8	65.3	57.6	5.7
500	S5023-19	63.3	58.3	5.2	S5216-1	65.4	58.5	6.0
	S5025-17	63.6	57.6	4.7	S5194-7	61.7	54.1	4.2
600	S5023-17	54.7	48.0	9.6	S5216-11	61.9	55.0	—
	S5025-14	55.6	48.5	9.8	S5218-2	63.2	57.4	—
650	S5023-17	54.7	48.0	9.6	S5216-15	54.3	46.9	12.9
	S5025-14	55.6	48.5	9.8	S5215-8	54.3	46.1	12.3
700	S5023-10	46.6	39.0	17.2	S5199-1	56.6	51.5	—
	S5025-13	46.7	37.5	16.2	S5218-13	47.0	38.1	16.7
750	S5023-6	38.9	29.8	27.3	S5199-9	46.7	36.4	16.4
	S5025-6	38.7	29.4	29.5	S5216-8	38.3	28.7	31.4
800	S5023-3	32.3	23.5	37.1	S5194-15	38.2	29.4	33.4
	S5025-11	32.7	23.8	40.2	S5215-1	41.3	36.9	14.0
800	S5023-7	26.6	18.3	48.8	S5215-15	31.5	22.3	38.7
	S5025-18	26.5	18.3	59.1	S5199-12	32.3	23.7	40.5
					S5218-1	32.0	28.5	26.0
					S5216-10	26.5	18.5	46.1
					S5194-12	26.7	17.8	47.8
					S5194-1	27.8	24.2	30.0

Table 6 Tensile properties of Joyo MK-II claddings

Symbol of cladding	J K 2				J K 3				J S 1				
	Test temp (°C)	Specimen No	Tensile Strength (Kgf/mm ²)	0.2% proof Stress (Kgf/mm ²)	Elongation (%)	Specimen No	Tensile strength (Kgf/mm ²)	0.2% proof stress (Kgf/mm ²)	Elongation (%)	Specimen No	Tensile strength (Kgf/mm ²)	0.2% proof stress (Kgf/mm ²)	Elongation (%)
R.T		K1123-5	80.4	69.1	20.6	K1217-4	84.6	73.7	17.1	S1037-9	83.3	68.9	19.7
		K1126-9	81.9	69.7	16.6	K1255-5	82.5	71.7	19.5	S1046-7	83.9	70.1	16.1
400		K1118-9	66.7	58.3	6.7	K1206-6	68.0	60.8	6.9	S1046-5	66.8	56.6	—
		K1123-8	66.2	57.0	7.5	K1217-5	68.6	60.5	6.7	S1084-7	66.6	57.5	5.0
		K1173-1	69.2	60.2	6.2	K1296-1	70.5	60.2	7.8	S1110-1	68.4	60.1	4.6
500		K1123-7	63.0	55.0	4.8	K1233-4	67.5	60.6	5.0	S1037-3	64.8	55.4	4.3
		K1131-6	64.2	54.9	6.9	K1233-9	68.0	61.0	5.5	S1052-5	62.6	57.3	5.7
		K1199-1	65.4	54.1	6.6								
600		K1126-8	55.1	47.4	9.7	K1240-9	58.9	50.9	9.8	S1033-6	54.9	47.1	9.4
		K1131-7	56.0	46.5	10.6	K1243-7	58.1	50.8	10.0	S1037-4	56.0	44.5	8.5
		K1165-1	58.1	—	11.6	K1268-1	60.6	52.7	9.6	S1096-1	57.6	50.4	11.0
650		K1120-3	48.8	37.3	14.9	K1217-9	49.2	38.7	15.9	S1049-8	46.3	33.5	15.2
		K1156-4	47.2	37.4	16.7	K1255-3	47.7	37.7	18.8	S1067-6	44.7	33.2	19.1
700		K1126-3	38.7	29.6	36.3	K1206-3	39.9	30.0	29.9	S1046-6	39.5	28.7	—
		K1131-9	40.2	31.0	36.2	K1206-5	40.2	29.5	26.3	S1084-6	39.3	29.4	24.2
		K1188-1	40.8	31.1	23.0	K1265-1	31.6	42.6	21.0	S1095-1	40.1	29.7	22.2
750		K1118-3	32.7	24.3	42.8	K1222-4	34.6	24.3	39.8	S1049-4	31.8	22.4	44.3
		K1118-8	32.5	24.0	39.7	K1240-8	37.8	23.5	40.9	S1049-9	31.9	22.1	39.6
		K1196-1	32.9	22.8	36.2	K1334-1	22.8	34.1	24.2	S1146-1	33.7	21.7	26.4
800		K1126-5	26.3	18.2	51.3	K1233-6	27.3	18.8	41.7	S1033-4	26.3	17.1	49.2
		K1154-7	26.8	18.7	48.3	K1255-6	26.7	18.0	40.3	S1084-9	26.5	17.5	49.9
		K1186-1	27.7	18.4	37.8	K1320-1	26.1	16.1	38.6	S1140-1	25.3	14.0	35.0

Table 7 Burst properties of Monju claddings.

Test temp (°C)	MK 1					MK 3				
	Specimen No.	Burst pressure (Kgf/cm ²)	0.2% proof pressure (Kgf/cm ²)	Burst hoop stress (Kgf/mm ²)	Pressuriz- ing speed (Kgf/cm ² /min)	Specimen No.	Burst pressure (Kgf/cm ²)	0.2% proof pressure (Kgf/cm ²)	Burst hoop stress (Kgf/mm ²)	Pressurizi- ng speed (Kgf/cm ² /min)
R.T	K4004-7	1500	1410	101.0	164	K4069-7	1560	1470	105.0	164
	K4015-8	1521	1419	102.4	160	K4073-7	1599	1499	109.2	178
400	K4017-8	1178	—	79.3	176	K4083-7	1266	—	85.2	176
	K4022-13	1199	—	80.7	174	K4084-8	1278	—	86.0	176
500	K4017-14	1134	—	76.3	175	K4069-9	1200	—	80.8	176
	K4028-13	1145	—	77.1	176	K4088-14	1206	—	81.2	175
600	K4015-14	1017	—	68.4	176	K4073-9	1065	—	71.7	175
	K4017-10	965	—	64.9	175	K4084-14	1062	—	71.5	175
650	K4022-10	858	—	57.7	176	K4084-9	933	—	62.8	175
	K4028-15	864	—	58.1	175	K4088-16	927	—	62.4	176
700	K4017-15	756	—	50.9	175	K4069-11	789	—	53.1	175
	K4057-2	746	—	50.2	175	K4073-11	795	—	53.5	175
750	K4022-9	653	—	43.9	175	K4083-14	666	—	44.8	174
	K4057-4	653	—	43.9	175	K4073-15	651	—	43.8	175
800	K4004-15	563	—	37.9	175	K4069-14	558	—	37.6	175
	K4017-12	563	—	37.9	178	K4084-11	551	—	37.1	176

* Burst hoop stress, being calculated by the mean diameter formula.

Table 7 Continued.

Test temp (°C)	M S 1					M S 3				
	Specimen No	Burst pressure (Kgf/cm ²)	0.2% proof pressure (Kgf/cm ²)	Burst hoop stress* (Kgf/mm ²)	Pressuriz- ing rate (Kgf/cm ² min ⁻¹)	Specimen No	Burst pressure (Kgf/cm ²)	0.2% proof pressure (Kgf/cm ²)	Burst hoop stress* (Kgf/mm ²)	Pressuriz- ing rate (Kgf/cm ² min ⁻¹)
R. T	S5023-2	1440	1325	96.9	180	S5194-8	1448	1370	97.5	177
	S5025-1	1427	1320	96.0	180	S5199-10	1446	1338	97.3	181
400	S5023-4	1143	—	76.9	176	S5215-7	1146	—	77.1	177
	S5025-2	1140	—	76.7	176	S5216-7	1145	—	77.1	175
500	S5023-5	1086	—	73.1	175	S5194-9	1092	—	73.5	176
	S5025-4	1092	—	73.5	176	S5218-15	1098	—	73.9	175
600	S5023-8	927	—	62.4	176	S5199-11	935	—	62.9	176
	S5025-7	929	—	62.5	177	S5215-10	923	—	62.1	176
650	S5023-9	800	—	53.8	174	S5216-12	807	—	54.3	177
	S5025-10	801	—	53.9	176	S5218-16	816	—	54.9	175
700	S5023-13	698	—	47.0	174	S5194-10	720	—	48.5	176
	S5025-12	699	—	47.0	173	S5199-13	725	—	48.8	176
750	S5023-15	600	—	40.4	175	S5215-11	615	—	41.4	175
	S5025-15	603	—	40.6	176	S5216-13	612	—	41.2	175
800	S5023-16	504	—	33.9	175	S5194-14	525	—	35.3	176
	S5025-19	495	—	33.3	176	S5199-15	513	—	54.5	176

* Burst hoop stress, being calculated by the mean diameter formula.

Table 8 Burst properties of Joyo MK-II claddings.

Test temp (°C)	J K 2					J K 3				
	Specimen No.	Burst pressure (Kgf/cm ²)	0.2% proof pressure (Kgf/cm ²)	Burst hoop stress* (Kgf/mm ²)	Pressuriz- ing rate (Kgf/cm ² min ⁻¹)	Specimen No.	Burst pressure (Kgf/cm ²)	0.2% proof pressure (Kgf/cm ²)	Burst hoop stress* (Kgf/mm ²)	Pressuriz- ing rate (Kgf/cm ² min ⁻¹)
R.T	K1118-4	1345	1230	99.0	195	K1206-4	1417	1281	104.3	175
	K1120-6	1376	1230	101.3	173	K1217-3	1418	1295	104.4	174
400	K1123-4	1097	—	80.7	176	K1222-3	1163	—	85.6	181
	K1126-4	1100	—	81.0	177	K1233-3	1163	—	85.6	179
500	K1131-4	1046	—	77.0	177	K1240-3	1056	—	77.7	176
	K1154-5	1051	—	77.4	177	K1243-6	1044	—	76.8	176
600	K1118-5	925	—	68.1	175	K1206-7	923	—	67.9	176
	K1156-3	916	—	67.4	175	K1255-4	901	—	66.3	174
650	K1120-7	823	—	60.6	176	K1217-8	853	—	62.7	176
	K1123-6	806	—	59.3	177	K1222-8	845	—	62.2	175
700	K1126-6	712	—	52.4	175	K1233-7	746	—	54.9	176
	K1131-5	724	—	53.3	175	K1240-6	728	—	53.6	176
750	K1154-8	650	—	47.8	184	K1240-7	646	—	47.5	175
	K1156-6	635	—	46.7	176	K1255-7	622	—	45.8	176
800	K1120-9	539	—	39.7	176	K1206-8	526	—	38.7	176
	K1156-8	538	—	39.6	174	K1222-9	521	—	38.3	177

* Burst hoop stress, being calculated by the mean diameter formula.

Table 8 Continued.

J S 1					
Test temp (°C)	Specimen No.	Burst pressure (Kgf/cm ²)	0.2% proof pressure (Kgf/cm ²)	Burst hoop stress* (Kgf/mm ²)	Pressuriz- ing rate (Kgf/cm ² min ⁻¹)
R. T	S1033-3	1376	1231	101.3	174
	S1037-5	1396	1292	102.7	176
400	S1046-3	1136	—	83.6	175
	S1049-5	1100	—	81.0	179
500	S1052-7	1054	—	77.6	176
	S1067-4	1082	—	79.6	176
600	S1033-7	905	—	66.6	176
	S1084-3	878	—	64.6	176
650	S1037-6	805	—	59.2	176
	S1046-9	806	—	59.3	176
700	S1049-6	700	—	51.5	176
	S1052-9	682	—	50.2	174
750	S1067-8	605	—	44.5	178
	S1084-5	595	—	43.8	174
800	S1033-9	503	—	37.0	177
	S1037-8	512	—	37.7	176

* Burst hoop stress, being calculated by the mean diameter formula

Table 9 Creep and creep rupture test conditions.

Internal pressure creep rupture test					
Monju cladding			Joyo MK-II cladding		
Temperature (°C)	Symbol of cladding	Pressure	Temperature (°C)	Symbol of cladding	Pressure
650	MK1, MK3, MS3	Creep rupture 4~5 levels	650	JK2, JK3, JS1	Creep rupture 4~5 levels
700	MK1, MK3, MS3, MS1		700	JK2, JK3, JS1	
750	MK1, MK3, MS3		750	JK2, JK3, JS1	
800	MK1, MK3, MS3		800	JK2, JK3, JS1	
Uniaxial tension creep test					
Monju cladding			Joyo MK-II cladding		
Temperature (°C)	Symbol of cladding	Stress	Temperature (°C)	Symbol of cladding	Stress
700	MK1, MK3, MS3	4 levels	650	JK2, JK3, JS1	4 levels

Table 10 Results of creep rupture tests under internal pressure for Monju cladding MK1

Temperature (°C)	Pressure (kg ^f /cm ²)	Hoop stress* (kg ^f /mm ²)	Time to rupture (h)	Symbol of specimen	Institute
650	480	32.3	73.5	K4015-6	NRIM
	380	25.5	629.1	K4017-2	"
	330	22.2	1,100.2	K4004-2	PNC
	300	20.2	1,706.7	K4028-3	NRIM
	280	18.8	1,985.6	K4022-4	PNC
	240	16.1	3,384.5	K4004-3	NRIM
700	300	20.2	135	K4022-5	KOBE
	250	16.8	324	K4028-7	"
	200	13.4	823	K4017-3	"
	155	10.4	1,846	K4004-5	"
	120	8.1	3,430	K4015-5	"
750	200	13.4	106	K4004-4	KOBE
	150	10.1	380	K4022-6	"
	110	7.4	1,071	K4028-5	"
	90	6.0	2,568.1	K4028-4	PNC
800	110	7.4	175.7	K4028-6	NRIM
	90	6.1	212.9	K4022-2	"
	55	3.7	1,375.5	K4015-2	PNC
	50	3.4	1,149.8	K4017-6	NRIM
	40	2.7	4,780.7	K4022-3	PNC

* Hoop stress, being calculated by the mean diameter formula.

Table 11 Results of creep rupture tests under internal pressure for Monju cladding MK3

Temperature (°C)	Pressure (kg ^f /cm ²)	Hoop stress* (kg ^f /mm ²)	Time to rupture (h)	Symbol of specimen	Institute
650	440	29.6	90.1	K4083-6	NRIM
	370	24.9	312.9	K4073-5	"
	330	22.2	1,100.2	K4004-2	PNC
	330	22.2	724.4	K4069-2	"
	280	18.8	1,631.5	K4088-5	NRIM
	250	16.8	1,843.0	K4083-4	PNC
	170	11.4	4,215.9	K4084-2	"
700	250	16.8	199	K4083-2	KOBE
	200	13.4	500	K4084-4	"
	160	10.8	1,062	K4069-5	"
	80	5.4	6,639	K4084-5	"
750	200	13.4	49	K4069-3	KOBE
	130	8.7	389	K4069-4	"
	80	5.4	1,171	K4088-4	"
	50	3.4	5,480	K4088-7	"
800	80	5.4	142.3	K4084-3	NRIM
	55	3.7	702.3	K4073-6	PNC
	40	2.7	2,483.4	K4069-6	NRIM
	40	2.7	3,315.1	K4088-6	PNC
	30	2.0	11,153.0	K4083-3	"

* Hoop stress, being calculated by the mean diameter formula.

Table 12 Results of creep rupture tests under internal pressure for Monju cladding MS1

Temperature (°C)	Pressure (kg ^f /cm ²)	Hoop stress [*] (kg ^f /mm ²)	Time to rupture (h)	Symbol of specimen	Institute
700	300	20.4	81	S5024-1	KOBE
	250	16.8	185	S5024-6	"
	180	12.1	774	S5024-8	"
	180	12.1	778.7	S5024-4	PNC

* Hoop stress, being calculated by the mean diameter formula.

Table 13 Results of creep rupture tests under internal pressure for Monju cladding MS3

Temperature (°C)	Pressure (kg ^f /cm ²)	Hoop stress* (kg ^f /mm ²)	Time to rupture (h)	Symbol of specimen	Institute
650	420	28.3	121.5	S5194-3	PNC
	350	23.6	478.0	S5194-4	"
	300	20.2	1,524.5	S5215-6	"
	250	16.8	2,607.3	S5218-6	"
700	300	20.2	91	S5216-5	KOBE
	245	16.5	307	S5215-3	"
	200	13.4	850	S5215-2	"
	155	10.4	1,468	S5216-3	"
	120	8.1	2,258	S5199-4	"
750	200	13.4	82	S5199-2	KOBE
	150	10.1	309	S5199-5	"
	110	7.4	715	S5216-2	"
	75	5.0	1,800	S5194-2	"
800	120	8.1	87.8	S5194-6	PNC
	90	6.1	216.9	S5199-3	"
	50	3.4	1,364.1	S5218-4	"
	30	2.0	3,127.9	S5218-5	"

* Hoop stress, being calculated by the mean diameter formula

Table 14 Results of creep rupture tests under internal pressure for Joyo MK-II cladding JK2

Temperature (°C)	Pressure (kg ^f /cm ²)	Hoop stress* (kg ^f /mm ²)	Time to rupture (h)	Symbol of specimen	Institute
650	380	28.0	195.7	K1118-2	HITACHI
	300	22.1	809.8	K1120-1	"
	240	17.7	1,616.4*	K1156-2	"
	220	16.2	3,575.8	K1186-2	"
	200	14.7	3,372.3	K1154-1	"
	135	9.9	(15,994.0) ^{***}	K1123-1	PNC
700	290	21.3	56.8	K1120-1	SUMITOMO
	240	17.7	226.6	K1156-1	"
	180	13.2	737.0	K1131-1	"
	140	10.3	1,806.0	K1186-3	"
750	180	13.2	164.8	K1118-1	SUMITOMO
	150	11.0	289.3	K1165-2	"
	100	7.4	721.8	K1154-2	"
	60	4.4	2,622.2	K1126-1	"
800	90	6.6	126.2	K1199-3	SUMITOMO
	70	5.1	221.9	K1173-3	"
	50	3.7	612.1	K1196-2	"
	30	2.2	Discontinued (6,934.0)	K1123-2	"

* Hoop stress, being calculated by the mean diameter formula.

** Ruptured at heat affected zone.

*** Not used in data analysis.

Table 15 Results of creep rupture tests under internal pressure for Joyo MK-II cladding JK3

Temperature (°C)	Pressure (kg ^f /cm ²)	Hoop stress* (kg ^f /mm ²)	Time to rupture (h)	Symbol of specimen	Institute
650	380	28.0	117.8	K1206-2	HITACHI
	300	22.1	440.9	K1222-1	"
	240	17.7	1,326.2	K1268-2	"
	220	16.2	2,333.1	K1334-2	"
	200	14.7	1,902.9	K1240-1	"
	135	9.9	7,426.0	K1268-3	PNC
700	240	17.7	117.4	K1233-2	SUMITOMO
	200	14.7	232.3	K1320-2	"
	140	10.3	688.8	K1243-2	"
	80	5.9	3,235.0	K1206-1	"
750	150	11.0	128.8	K1334-3	SUMITOMO
	100	7.4	297.0	K1265-2	"
	60	4.4	922.0	K1243-1	"
	35	2.6	Discontinued (6,257.0)	K1296-3	"
800	70	5.1	101.3	K1344-3	SUMITOMO
	50	3.7	320.5	K1265-3	"
	30	2.2	6,309.0	K1217-1	"
	25	1.8	Discontinued (2,605.2)	K1255-2	"

* Hoop stress, being calculated by the mean diameter formula.

Table 16 Results of creep rupture tests under internal pressure for Joyo MK-II cladding JSI

Temperature (°C)	Pressure (kg ^f /cm ²)	Hoop stress* (kg ^f /mm ²)	Time to rupture (h)	Symbol of specimen	Institute
650	380	28.0	91.3	S1037-2	HITACHI
	300	22.1	489.1	S1046-2	"
	240	17.7	1,290.7	S1049-2	"
	220	16.2	2,627.3	S1052-2	"
	200	14.7	2,256.1	S1049-1	"
	200	14.7	1,785.3	S1110-2	PNC
	150	11.0	4,534.0	S1140-3	"
700	240	17.7	129.2	S1146-2	SUMITOMO
	200	14.7	219.5	S1095-3	"
	140	10.3	802.4	S1033-1	"
	80	5.9	2,279.0	S1110-3	"
750	150	11.0	97.8	S1084-1	SUMITOMO
	100	7.4	290.8	S1096-3	"
	60	4.4	687.0	S1037-1	"
	35	2.6	3,211.7	S1084-2	"
800	120	8.8	51.8	S1033-2	PNC
	90	6.6	58.7	S1046-1	"
	40	2.9	525.2	S1147-2	"
	35	2.6	3,039.4	S1052-1	"
	25	1.8	2,605.2	S1067-2	SUMITOMO

* Hoop stress, being calculated by the mean diameter formula.

Table 17 Results of creep tests under uniaxial tension
for Monju claddings

Symbol of cladding	Temperature (°C)	Stress (kg ^f /mm ²)	Minimum creep rate (%/h)	Specimen number	Tested time (h)
MK 1	700	12.0	1.1×10^{-3}	K4028-8	1,270.3 Ruptured
		7.0	1.8×10^{-4}	K4028-9	2,022 Discontinued
		4.0	5.5×10^{-5}	K4028-10	2,035 Discontinued
		2.0	1.4×10^{-5}	K4028-11	2,196 Discontinued
MK 3	700	12.0	1.7×10^{-3}	K4088-8	853 Ruptured
		7.0	2.6×10^{-4}	K4088-9	2,020 Discontinued
		4.0	1.1×10^{-4}	K4088-10	2,028 Discontinued
		2.0	1.8×10^{-5}	K4088-11	1,857 Discontinued
MS 3	700	12.0	1.6×10^{-3}	S5218-8	773.3 Ruptured
		7.0	2.5×10^{-4}	S5218-9	2,019 Discontinued
		4.0	1.3×10^{-4}	S5218-10	2,003 Discontinued
		2.0	1.2×10^{-5}	S5218-11	2,027 Discontinued

Table 18 Results of creep tests under uniaxial tension
for Joyo MK-II claddings

Symbol of cladding	Temperature (°C)	Stress (kg ^f /mm ²)	Minimum creep rate (%/h)		Specimen number	Tested time (h)
			By dialgauge	By comparater		
JK 2	650	12.0	1.4×10^{-4}	7.3×10^{-5}	K1196-4	1,008.0
		7.0	4.8×10^{-5}	4.1×10^{-5}	K1186-4	1,008.0
		4.0	2.8×10^{-5}	5.2×10^{-6}	K1173-4	1,008.0
		2.0	5.6×10^{-6}	—	K1165-4	1,008.0
JK 3	650	12.0	3.2×10^{-4}	2.1×10^{-4}	K1268-4	1,008.0
		7.0	1.2×10^{-4}	7.0×10^{-5}	K1265-4	1,008.0
		4.0	5.0×10^{-5}	—	K1334-4	1,008.0
		4.0	1.4×10^{-5}	5.5×10^{-6}	K1296-4	1,008.0
		2.0	—	—	K1320-4	1,008.0
JS 1	650	12.0	4.4×10^{-4}	2.0×10^{-4}	S1110-4	1,008.0
		7.0	1.1×10^{-4}	4.5×10^{-5}	S1146-4	1,008.0
		4.0	4.5×10^{-5}	9.7×10^{-6}	S1095-4	1,008.0
		2.0	4.4×10^{-6}	—	S1096-4	1,008.0

Table 19 Hardness of Joyo MK-II claddings before and after creep rupture tests at 650 °C

		As-received Hardness (Hv)	Ruptured		Hardness decrease
			Time (h)	Hardness (Hr)	
JK 2	Transverse	269	3,372.2	243	9.7%
	Longitudinal	280		244	12.9%
JK 3	Transverse	282	1,902.9	238	15.6%
	Longitudinal	294		248	15.7%
JS 1	Transverse	281	2,256.1	210	25.3%
	Longitudinal	287		237	17.4%

Table 20 Creep rupture strengths of Monju and Joyo MK-II claddings under the service conditions in Monju and Joyo MK-II core, conducted as sixth creep test program

		Hoop stress to rupture (kg^f/mm^2)	
		650°C 7,560h	675°C 17,760h
Monju	MK 1	13.0	7.8
	MK 3	11.2	6.6
	MS 3	12.2	7.1
Joyo MK-II	JK 2	12.3	6.8
	JK 3	10.2	5.9
	JS 1	8.9	4.8

Table 21 Creep rupture strengths of claddings under the service conditions in Monju and Joyo MK-II core, conducted as first to sixth creep test programs

Creep Program	Cladding maker	Hoop stress to rupture (kg^f/mm^2)	
		$650^\circ\text{C} \times 7,560\text{h}$	$675^\circ\text{C} \times 17,760\text{h}$
1st	K	15.4	10.2
	S	11.9	7.6
2nd	K	14.2	9.5
	S	10.6	5.9
3rd	K	14.1	9.0
	S	8.2	4.0
4th	K	6.6	3.5
	S	5.9	3.3
5th	K	6.5	3.3
	S	12.0	7.0
6th	K	13.0	7.8
	S	12.2	7.1

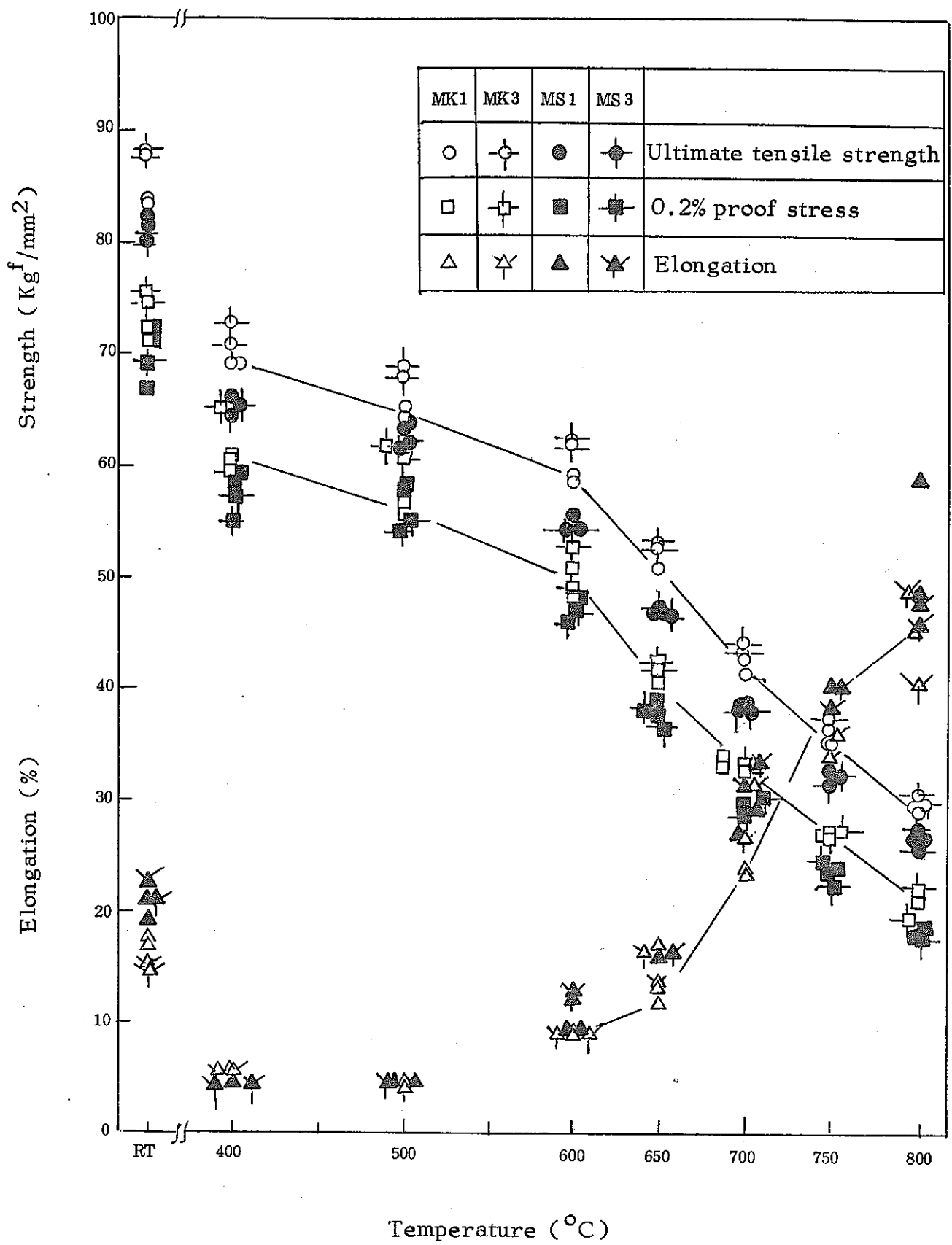


Fig. 1 Tensile properties of Monju claddings

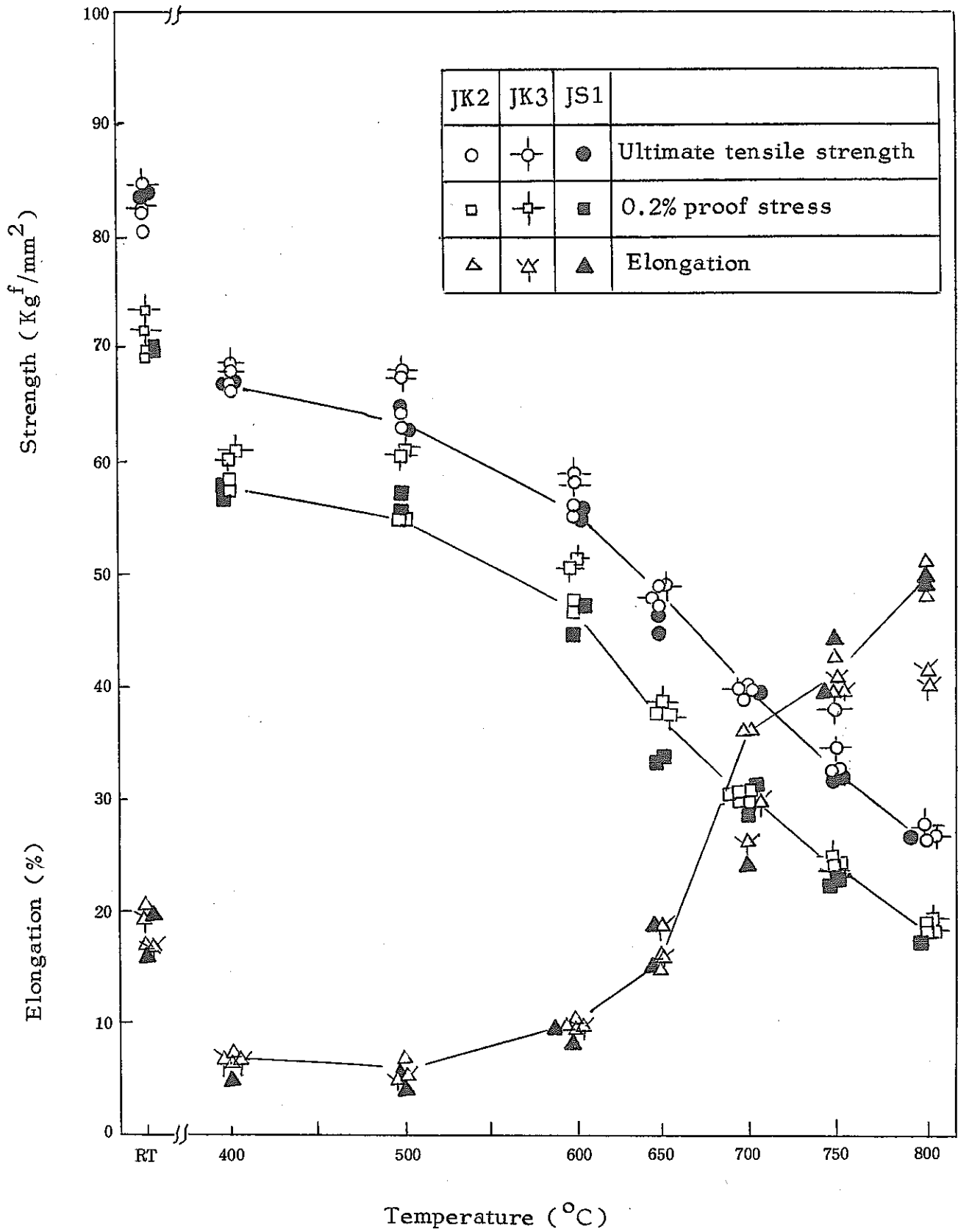


Fig. 2 Tensile properties of Joyo MK-II claddings

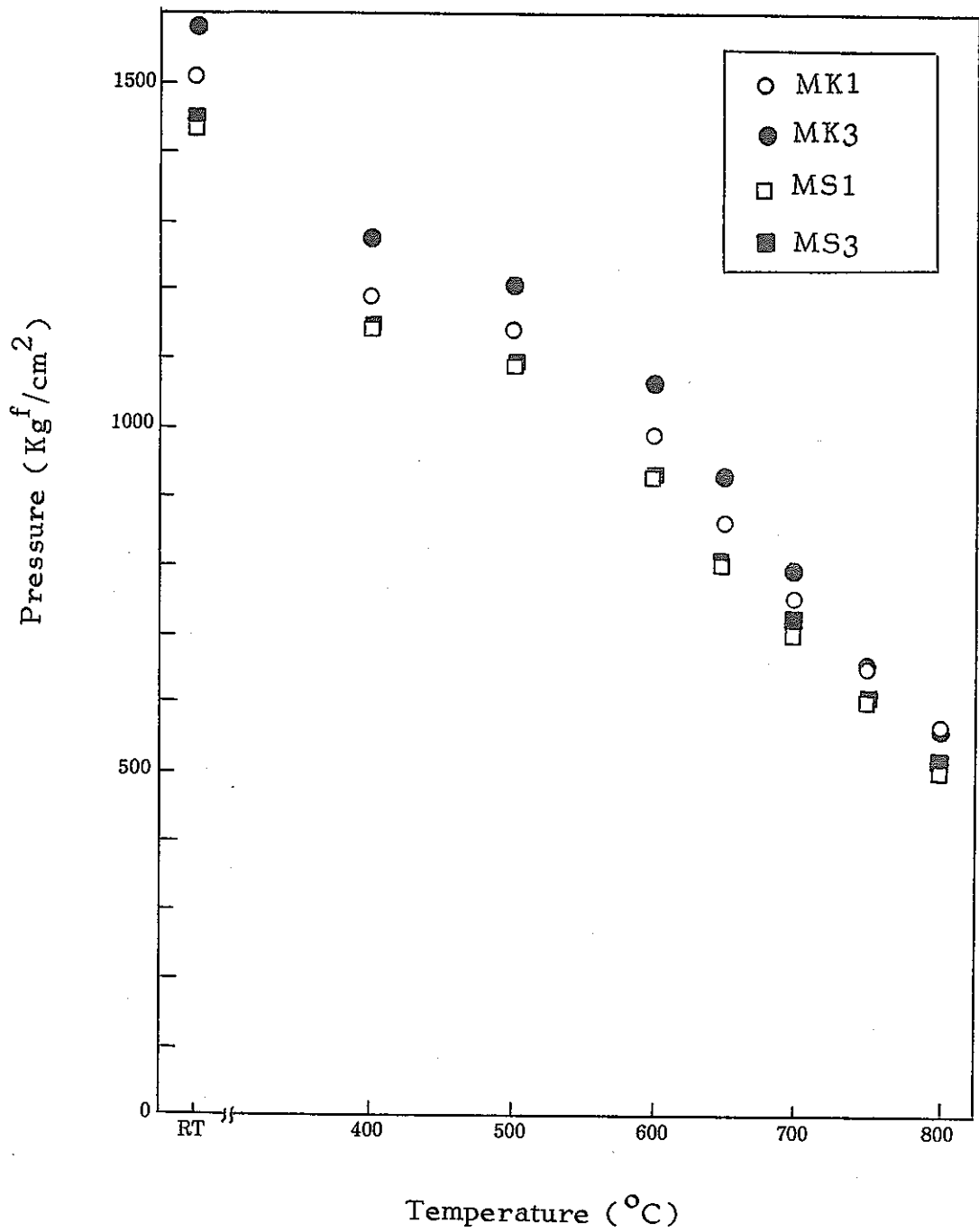


Fig. 3 Burst pressure of Monju claddings

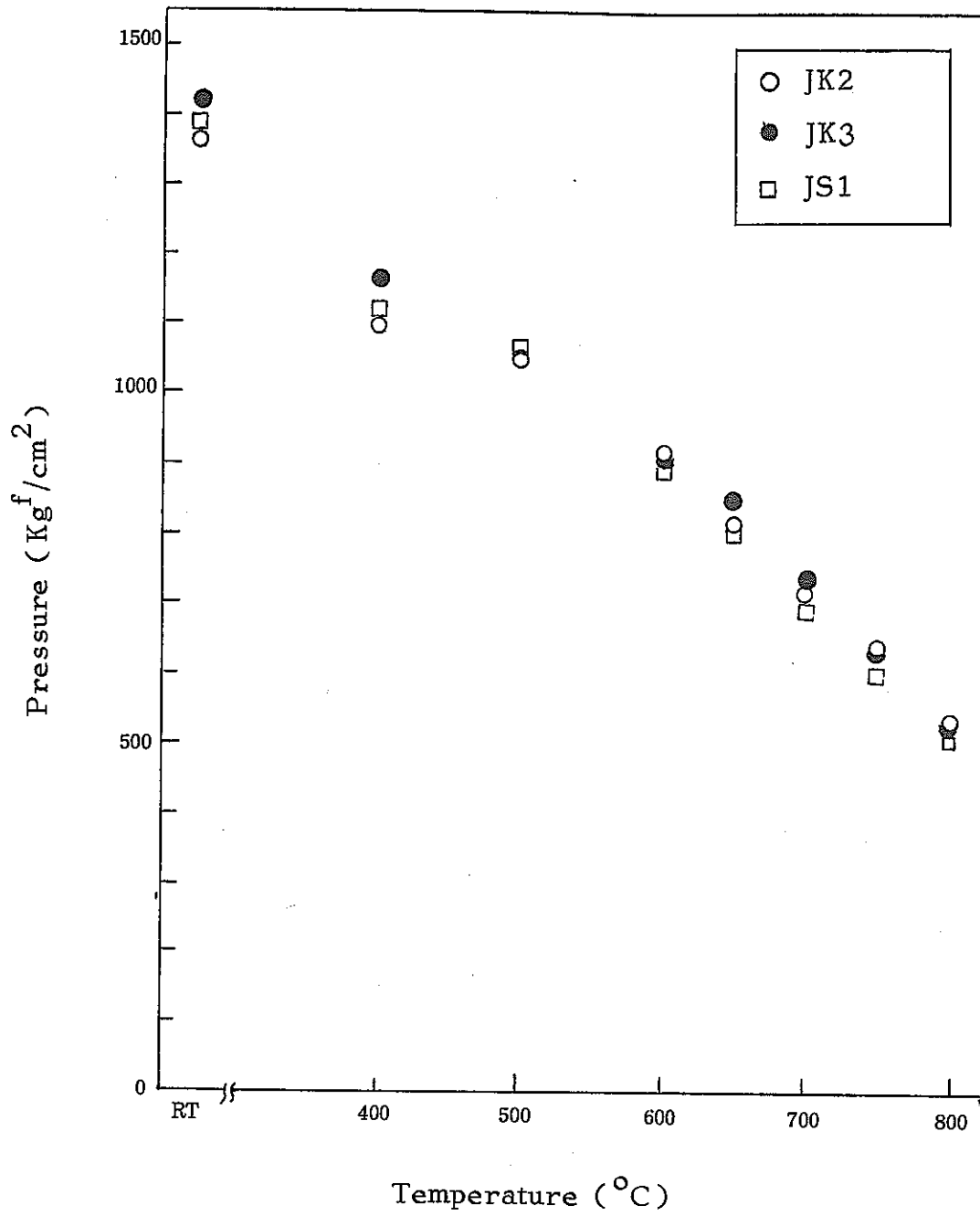
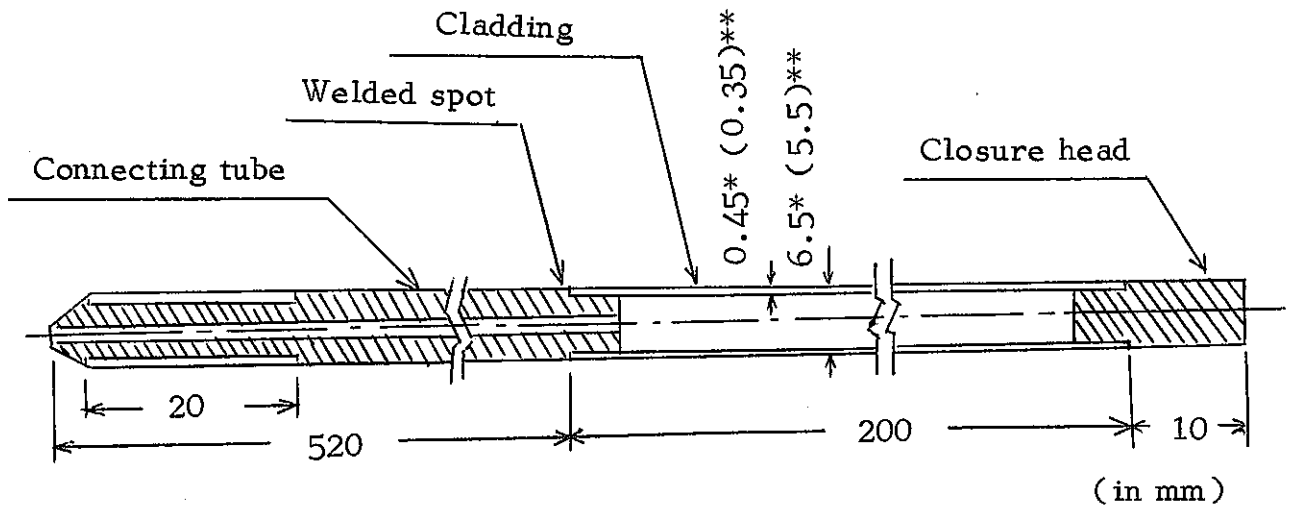
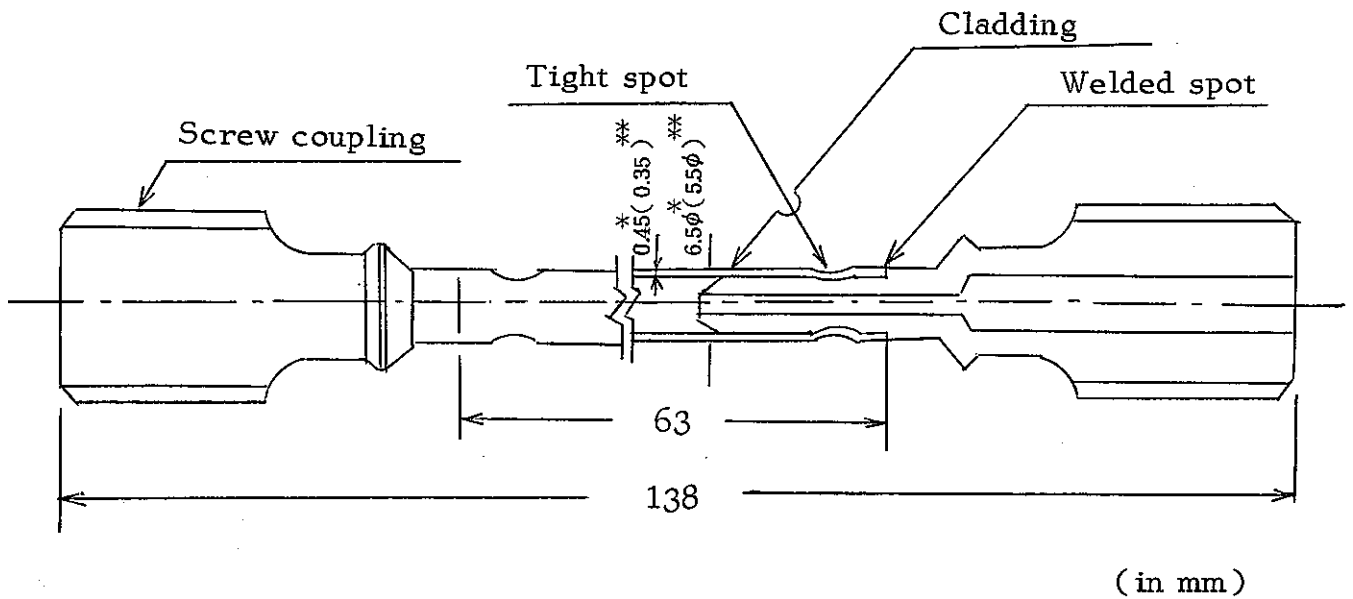


Fig. 4 Burst pressure of Joyo MK-II claddings



(1) Tubular creep-rupture specimen under internal pressure



(2) Tubular creep specimen under uniaxial tension

Fig. 5 Assembly of Specimens

(* Monju cladding
** Joyo MK-II cladding)

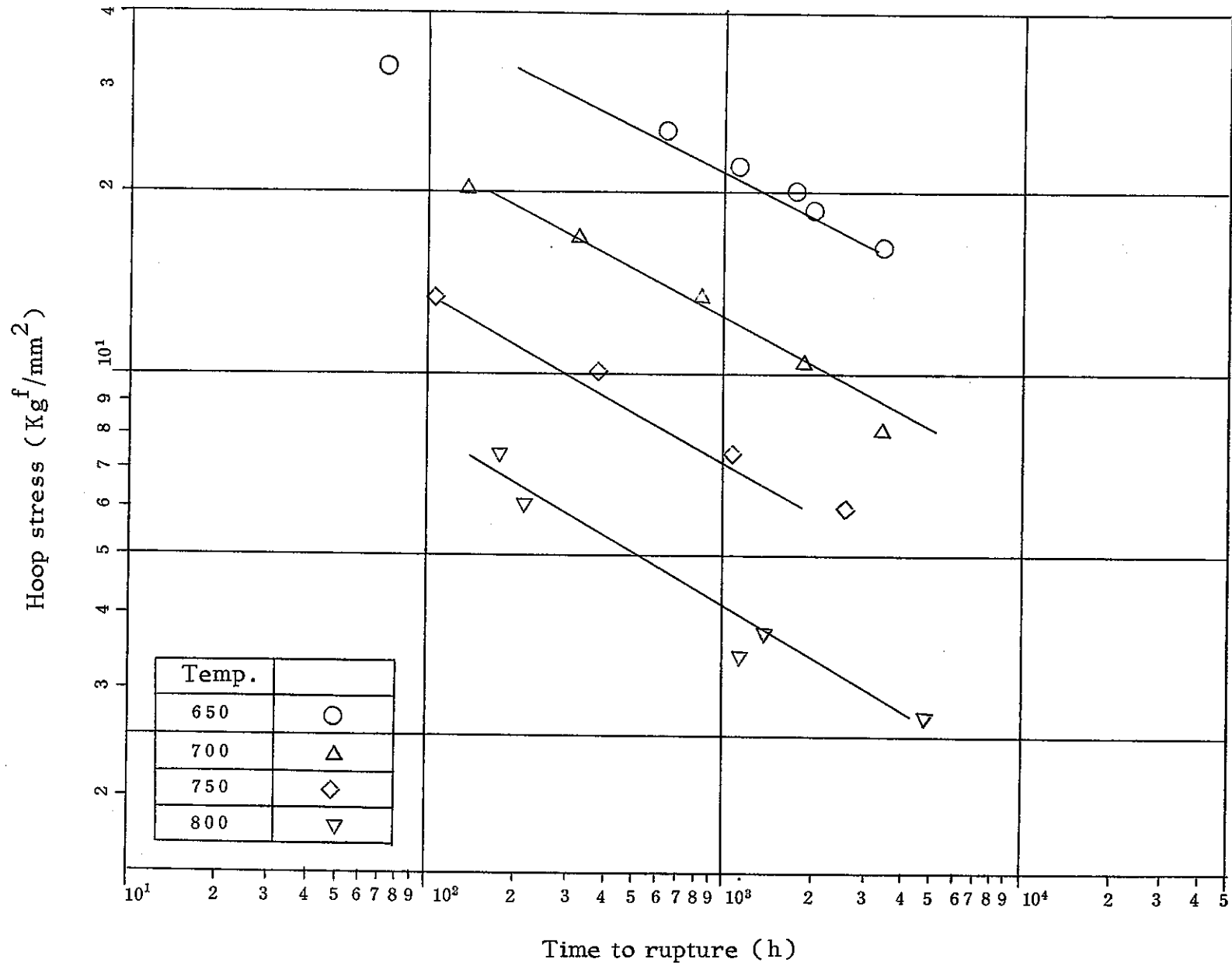


Fig. 6 Creep rupture curves under internal pressure for Monju cladding MKI

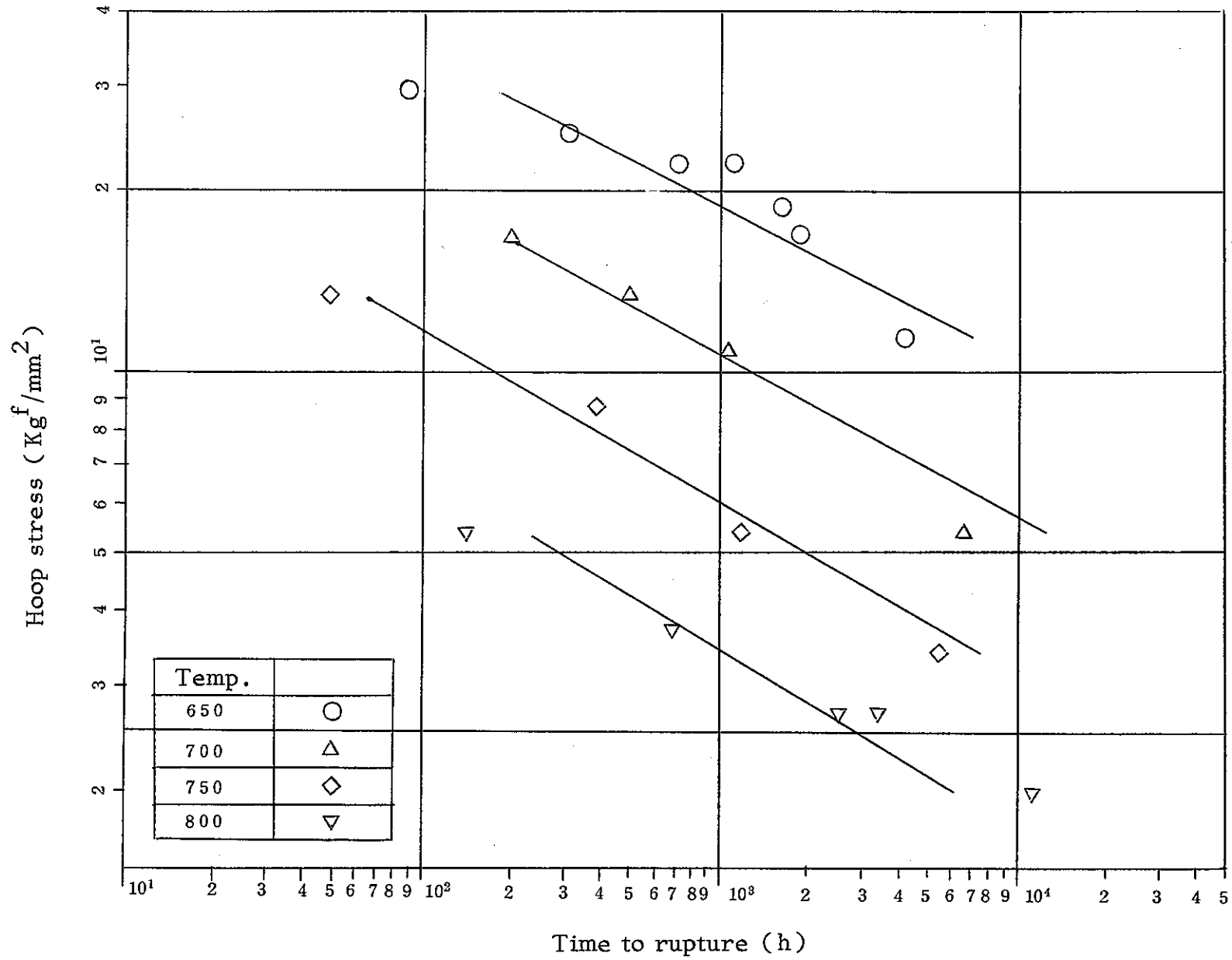


Fig. 7 Creep rupture curves under internal pressure for Monju cladding MK3.

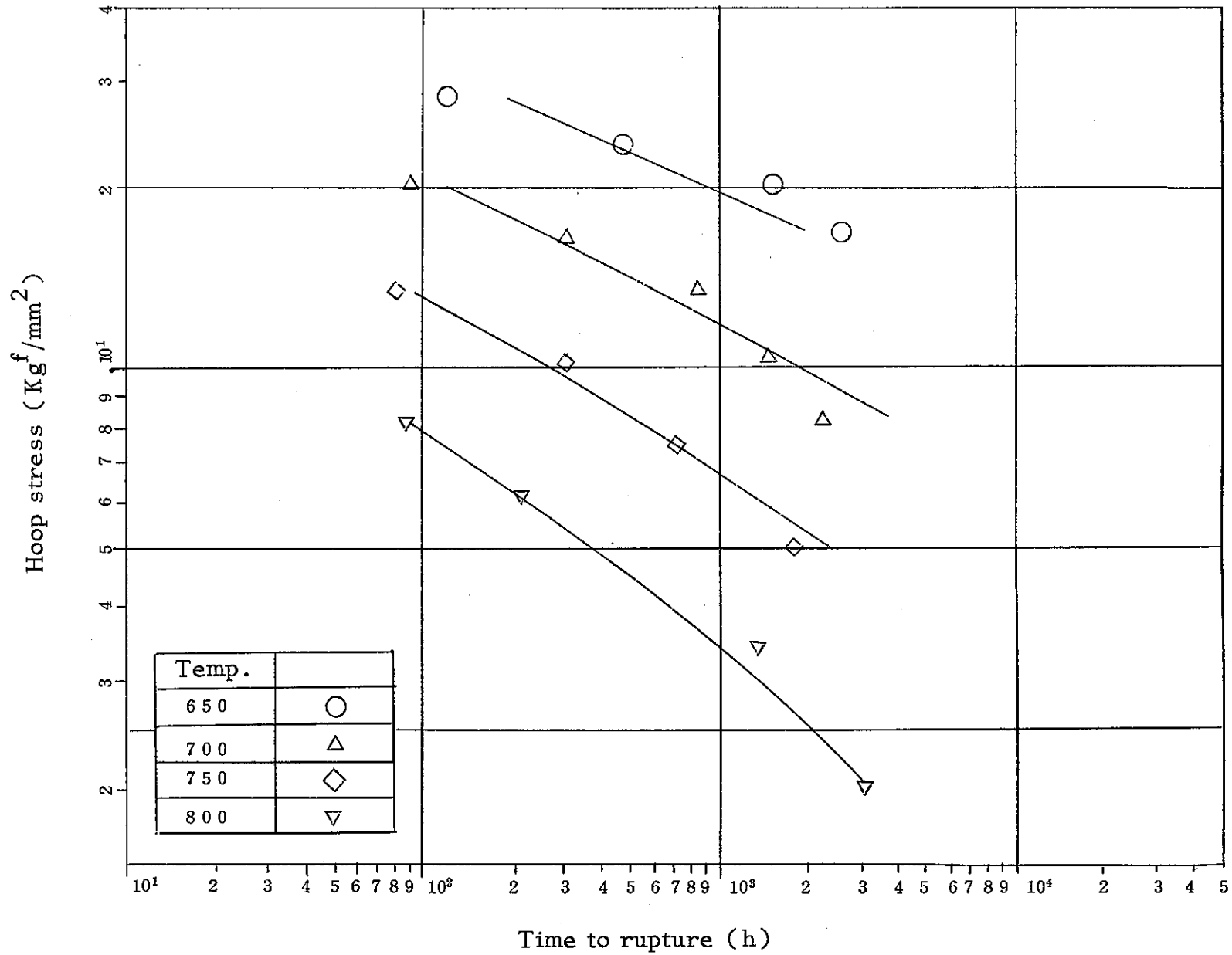


Fig. 8 Creep rupture curves under internal pressure for Monju cladding MS3.

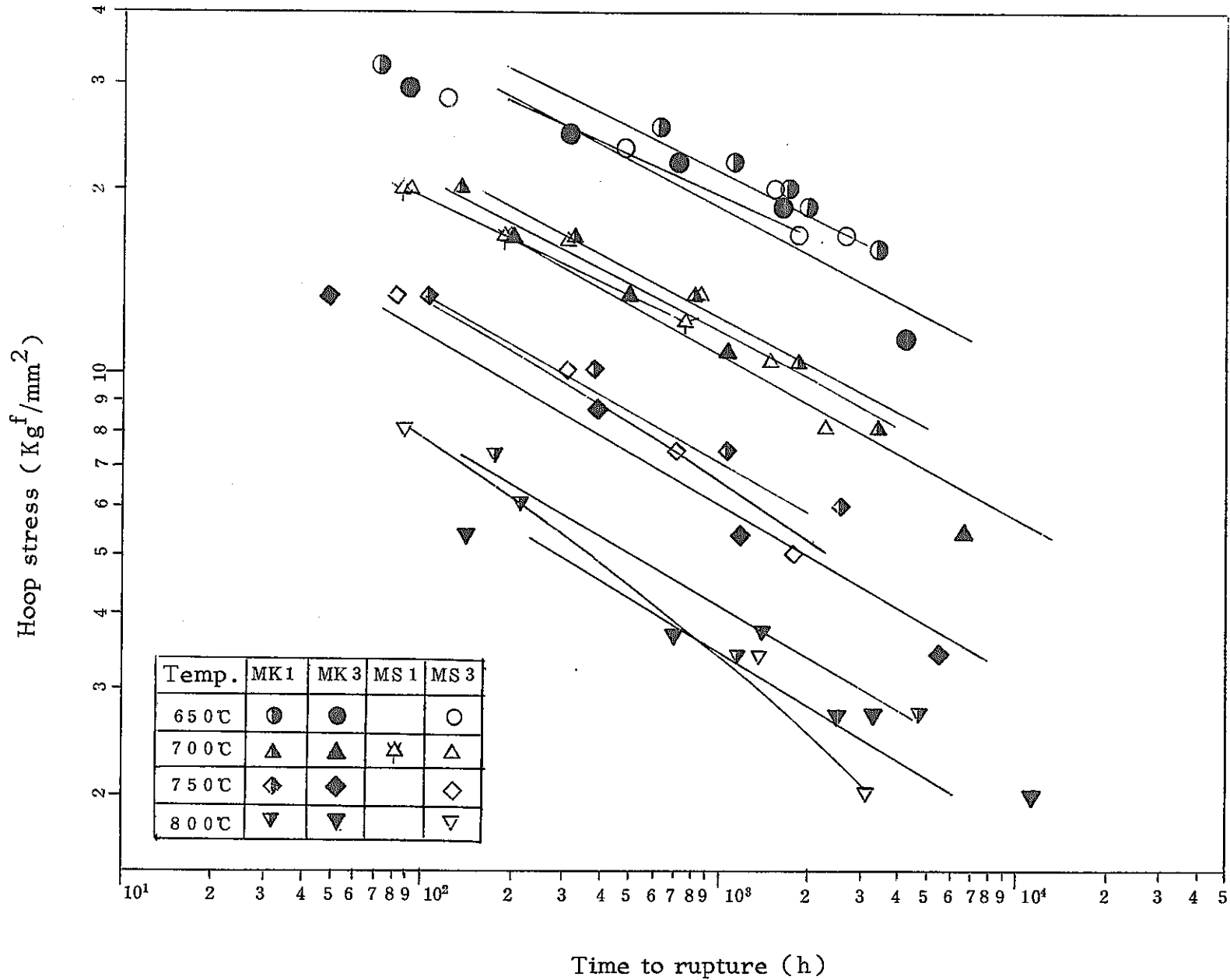


Fig. 9 Creep rupture curves under internal pressure for Monju claddings

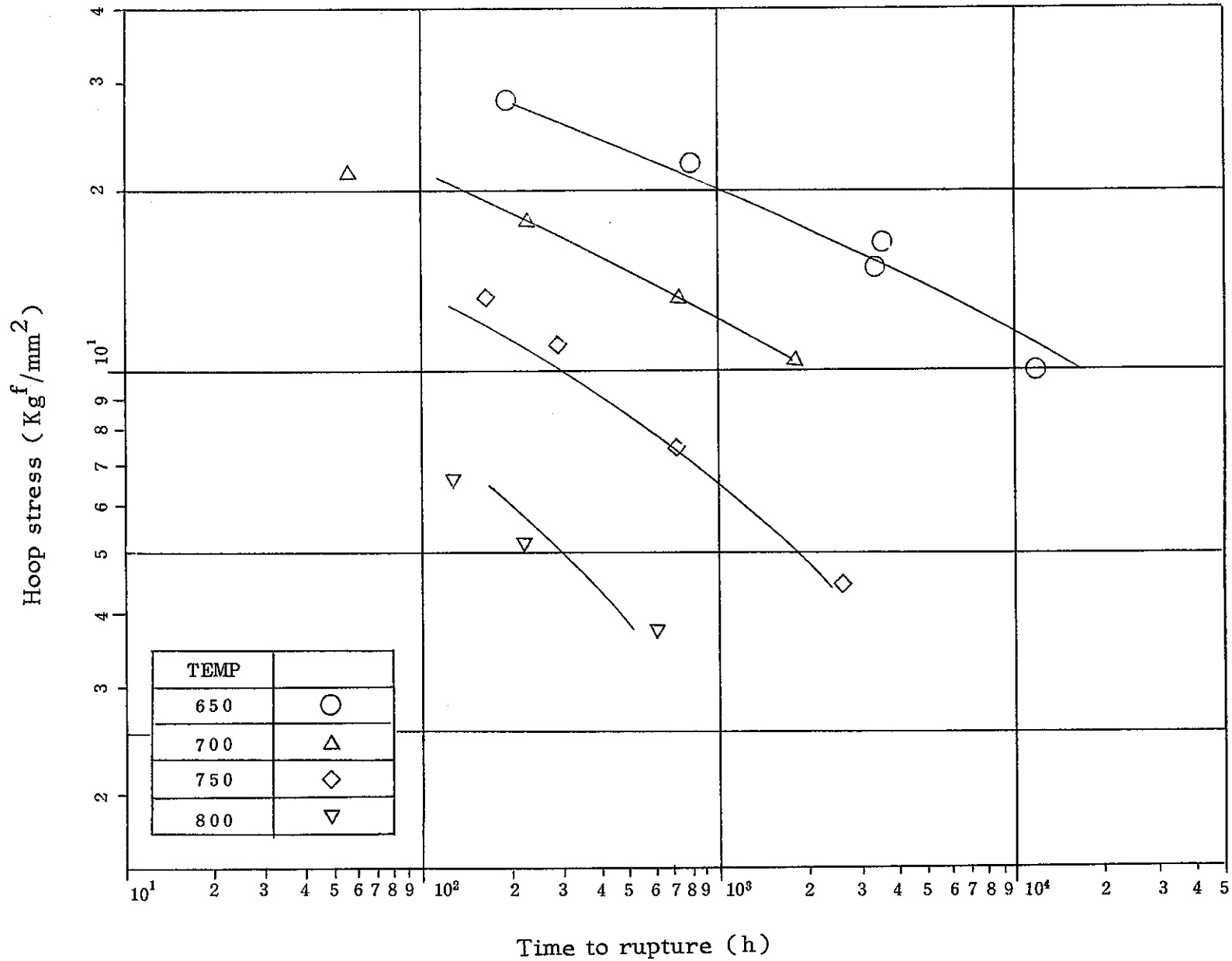


Fig. 10 Creep rupture curves under internal pressure for Joyo MK-II cladding JK2

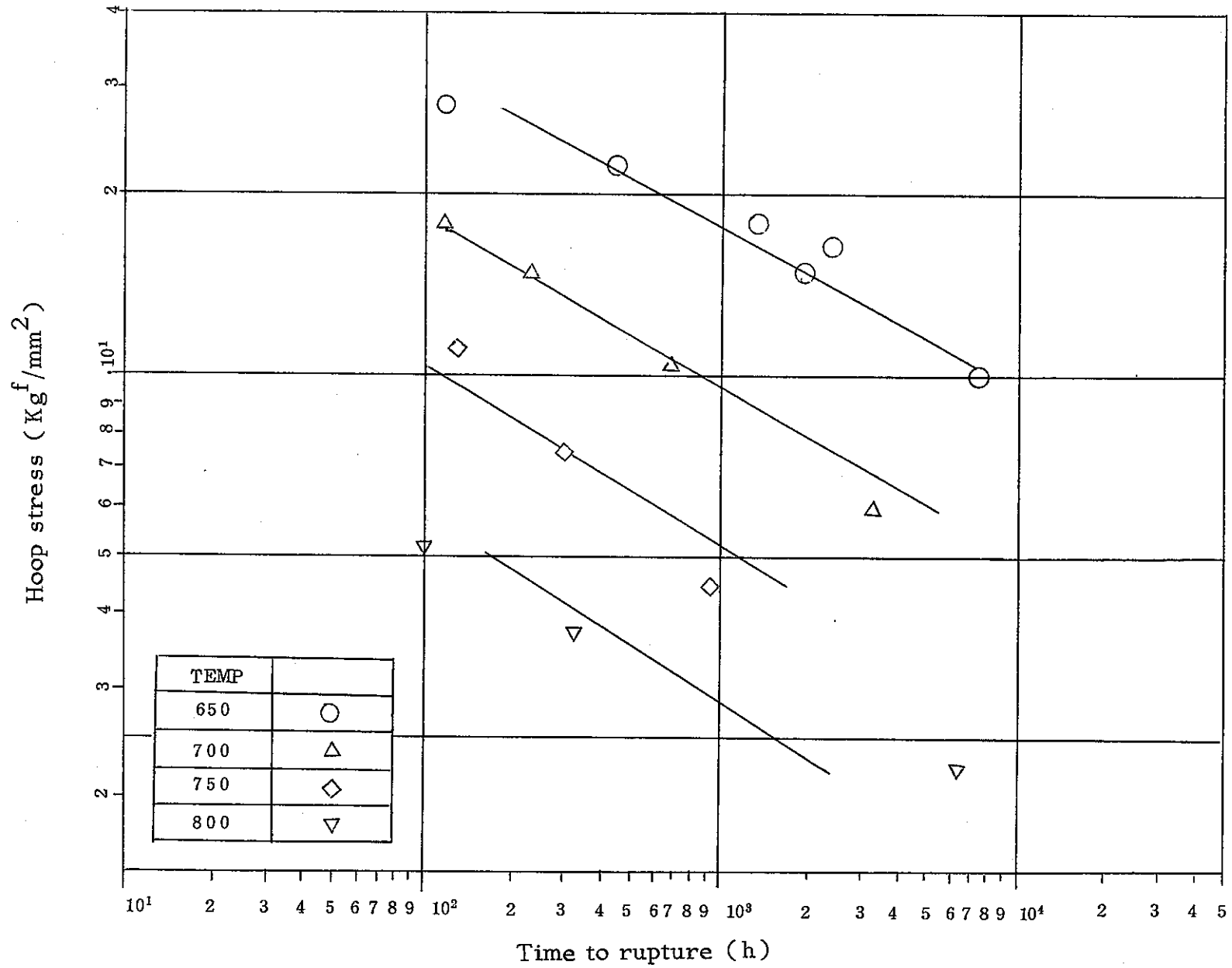


Fig. 11 Creep rupture curves under internal pressure for Joyo MK-II cladding JK3

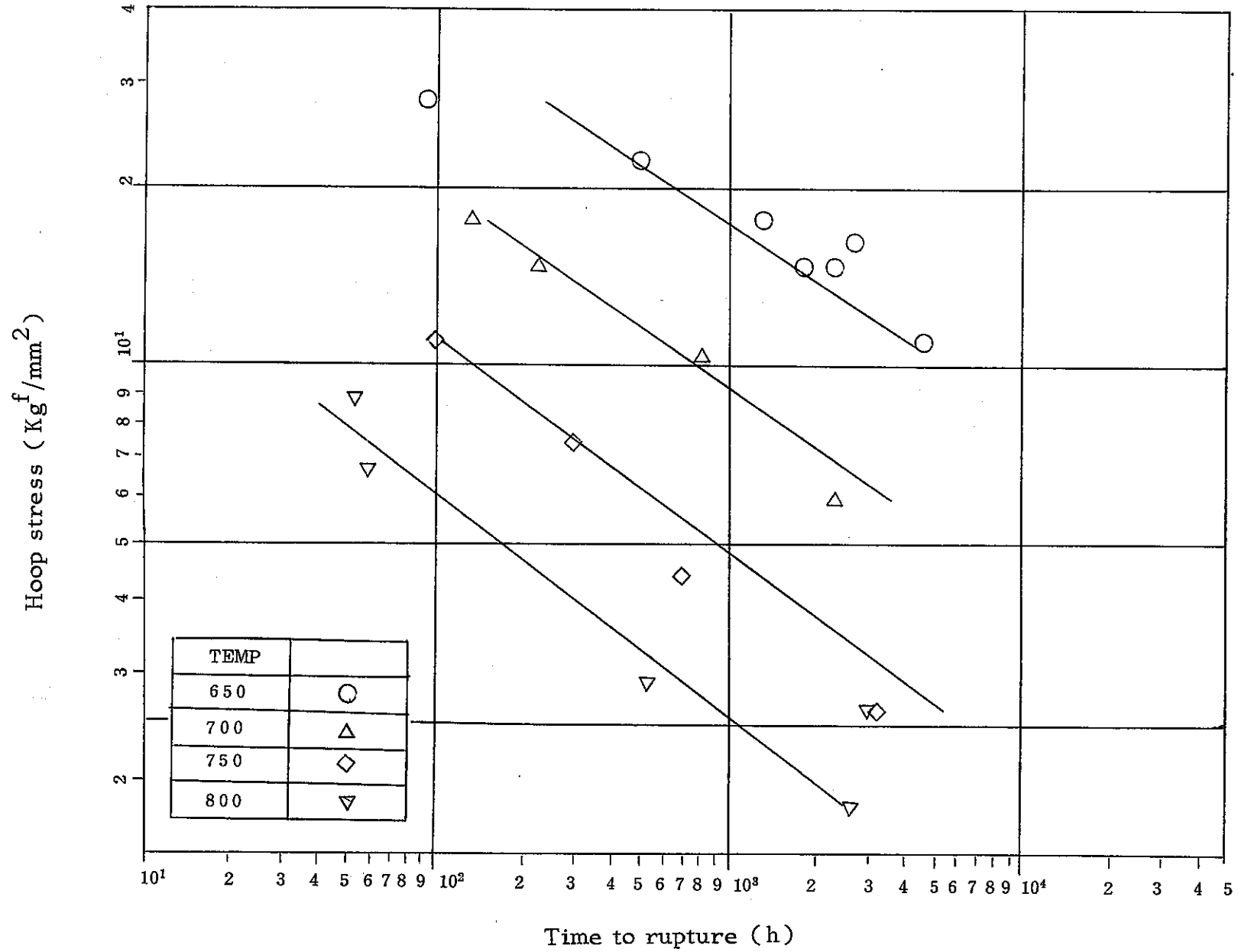


Fig. 12 Creep rupture curves under internal pressure for Joyo MK-II cladding JS1

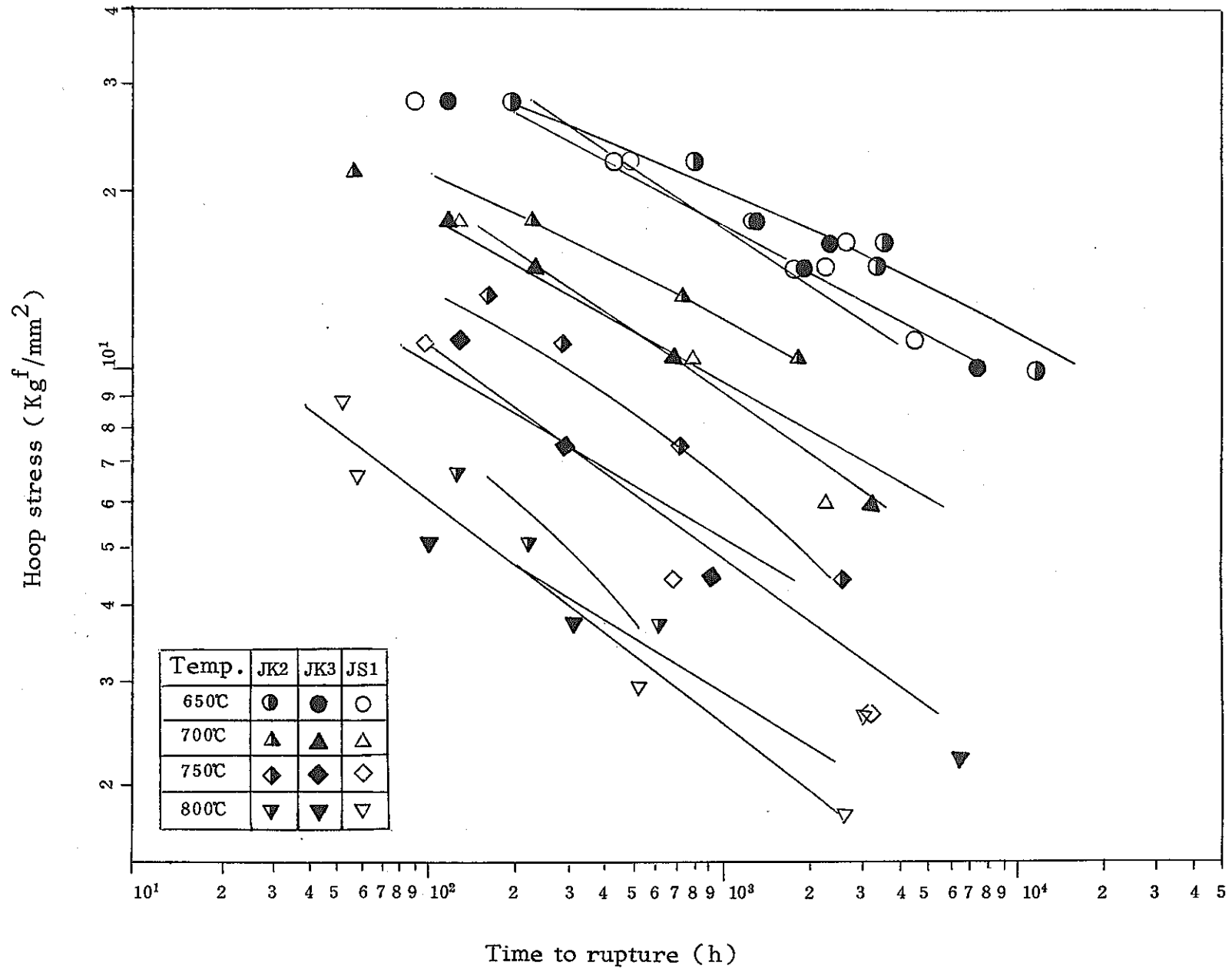
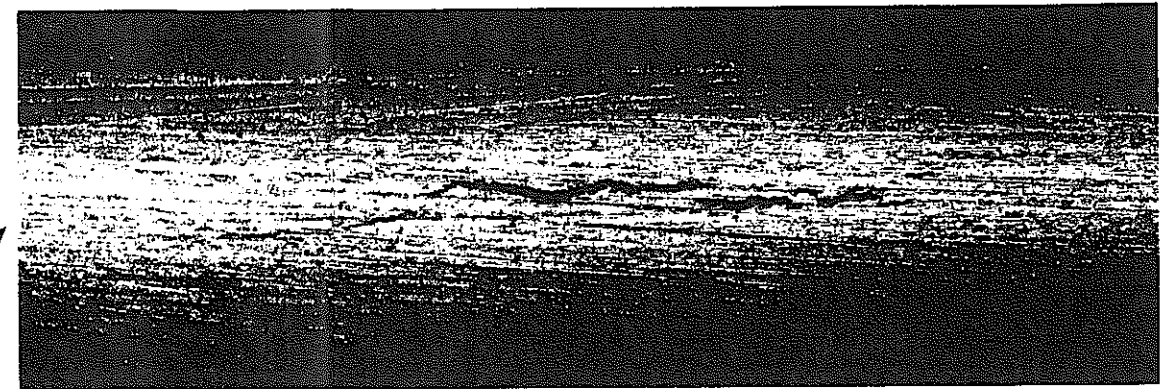
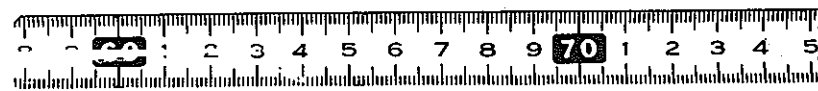
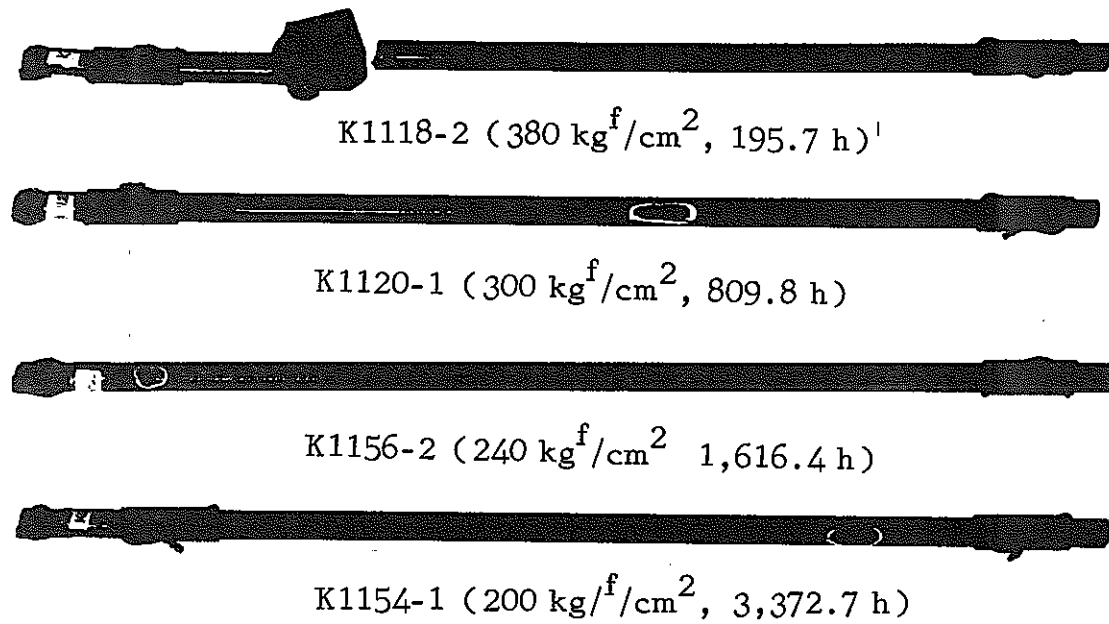
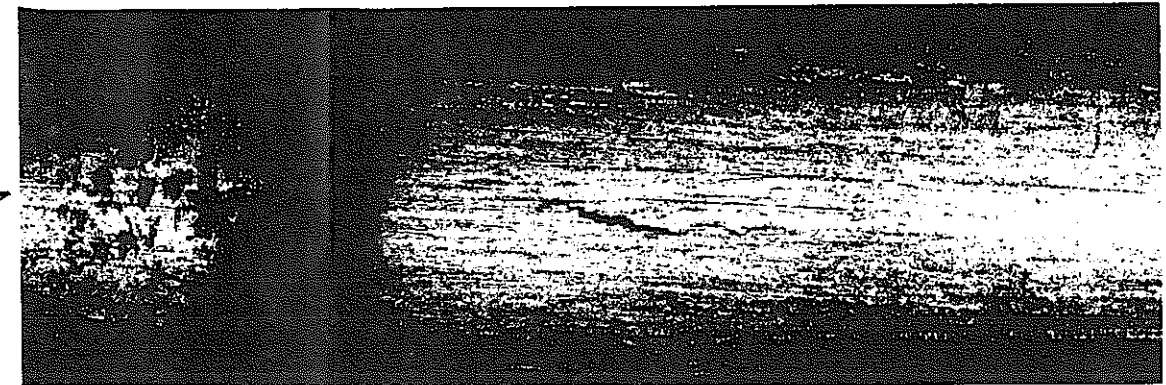


Fig. 13 Creep rupture curves under internal pressure for Joyo MK-II claddings

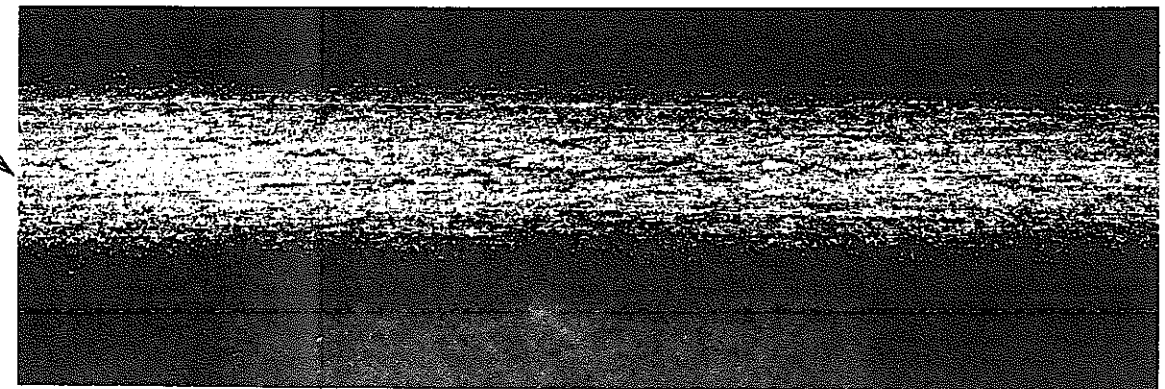


Specimen: K1120-1 ($300 \text{ kg}^f/\text{cm}^2$, 809.8 h)



Plug | Bead | Tube

Specimen: K1156-2 ($240 \text{ kg}^f/\text{cm}^2$, 1,616.4 h)



Specimen: K1154-1 ($200 \text{ kg}^f/\text{cm}^2$, 3,372.3 h)

(Enlarged, x 20)

Fig. 14 Appearance of ruptured Joyo MK-II cladding JK2

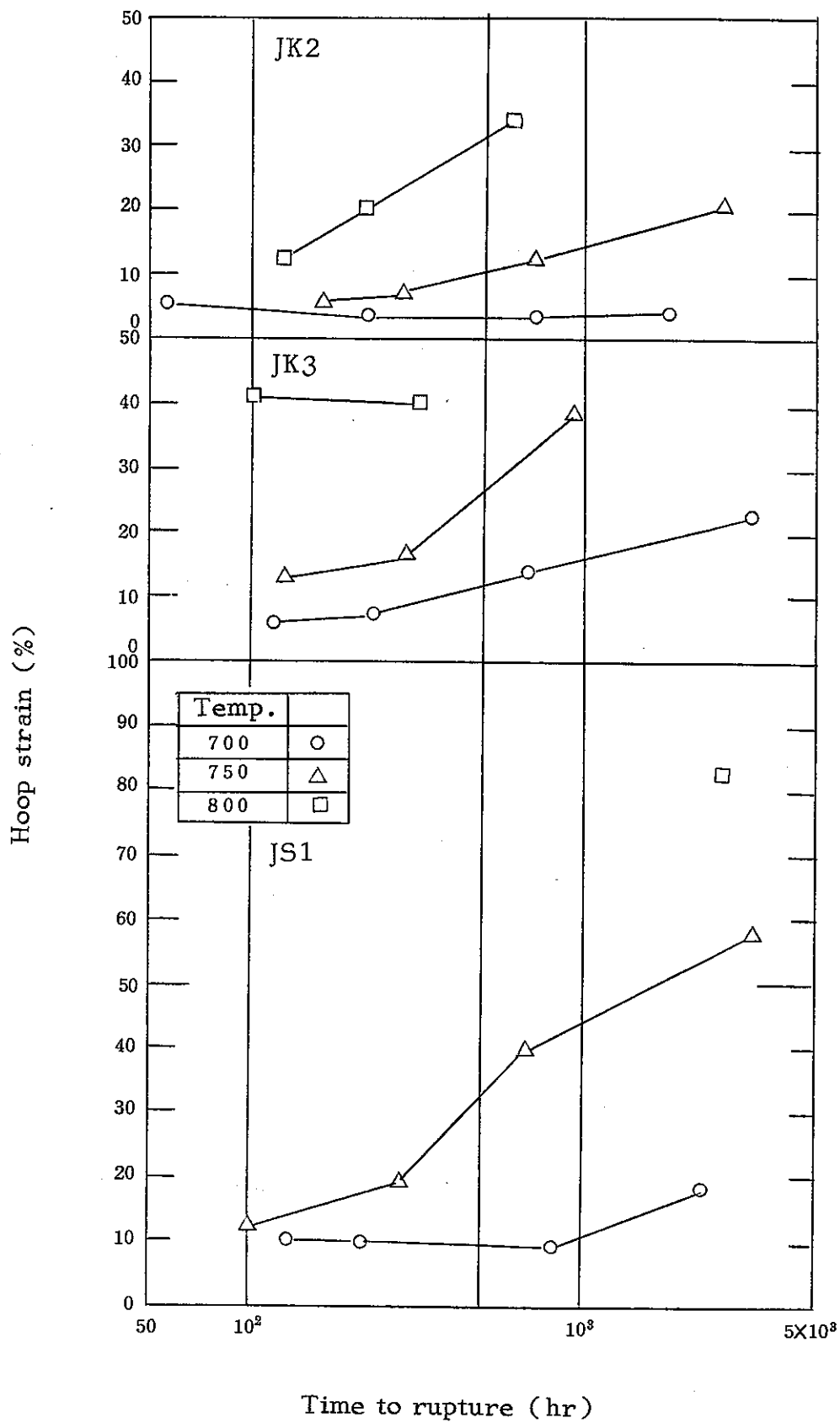


Fig. 15 Maximum hoop strain of Joyo MK-II claddings at about 5mm away from ruptured portion

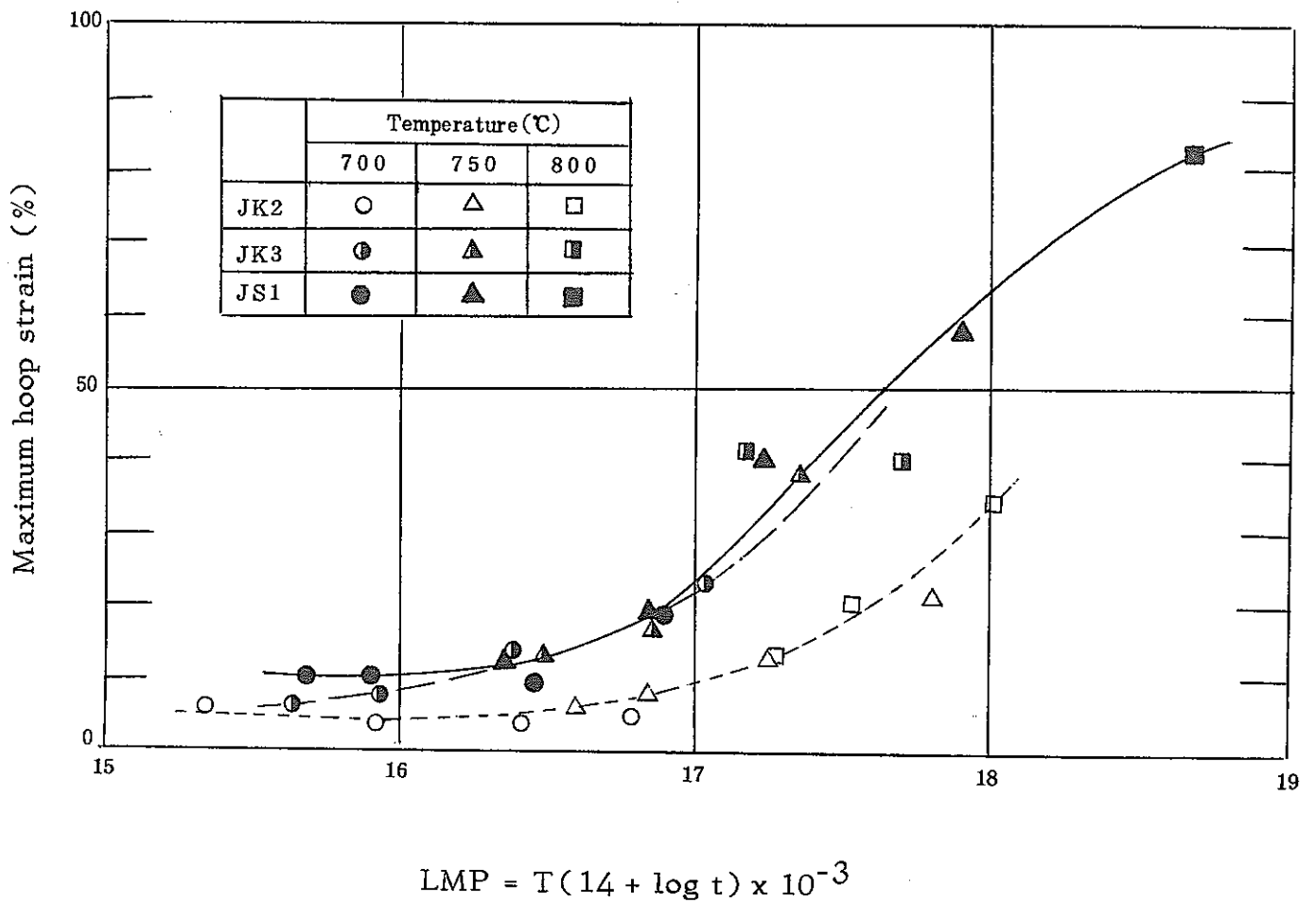


Fig. 16 Arrange of maximum hoop strain of Joyo MK-II claddings at about 5mm away from ruptured portion using Larson-Miller parameter

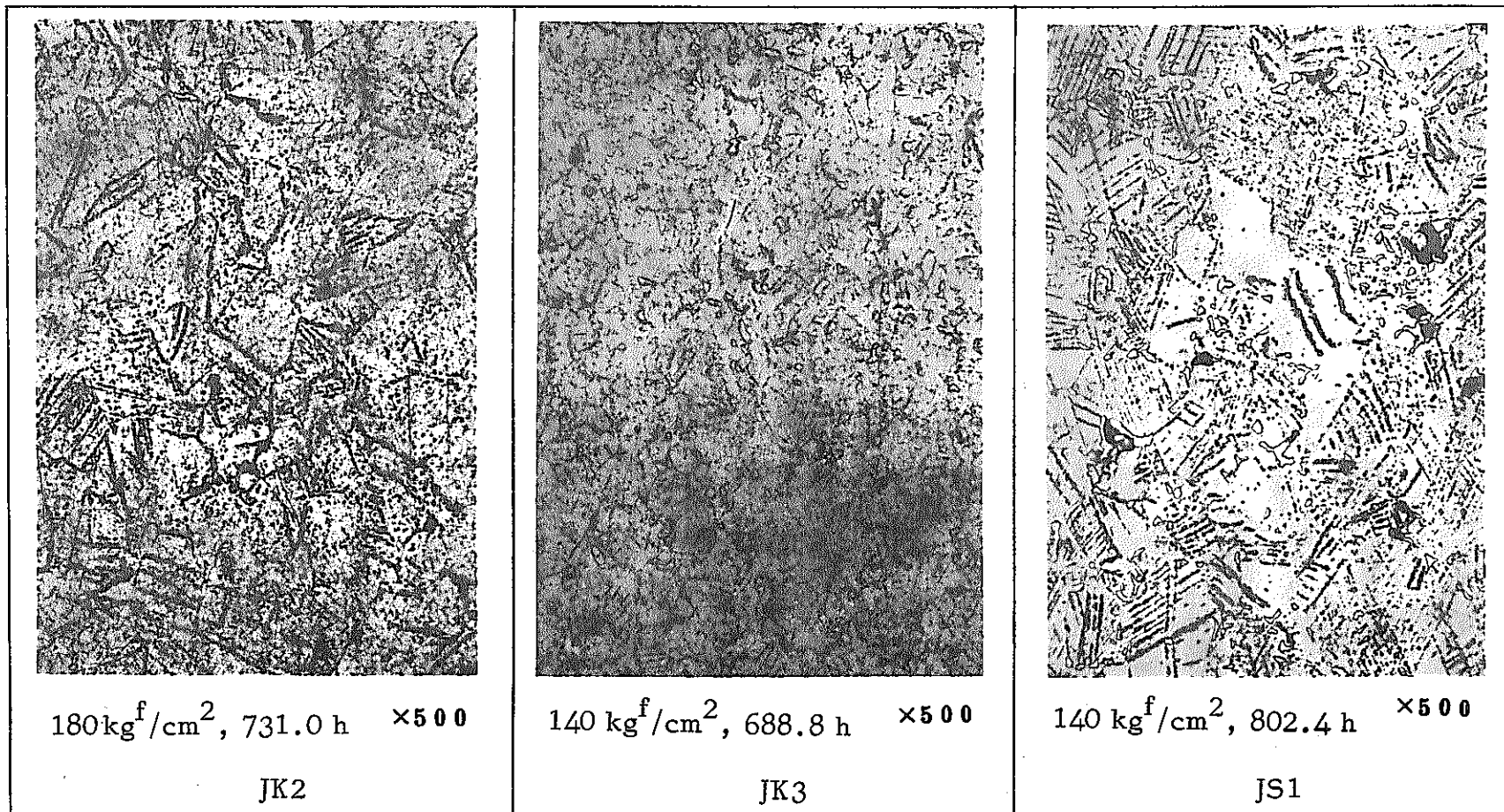


Fig. 17 Photomicrostructures of creep ruptured Joyo MK-II claddings at 700 °C (x500)

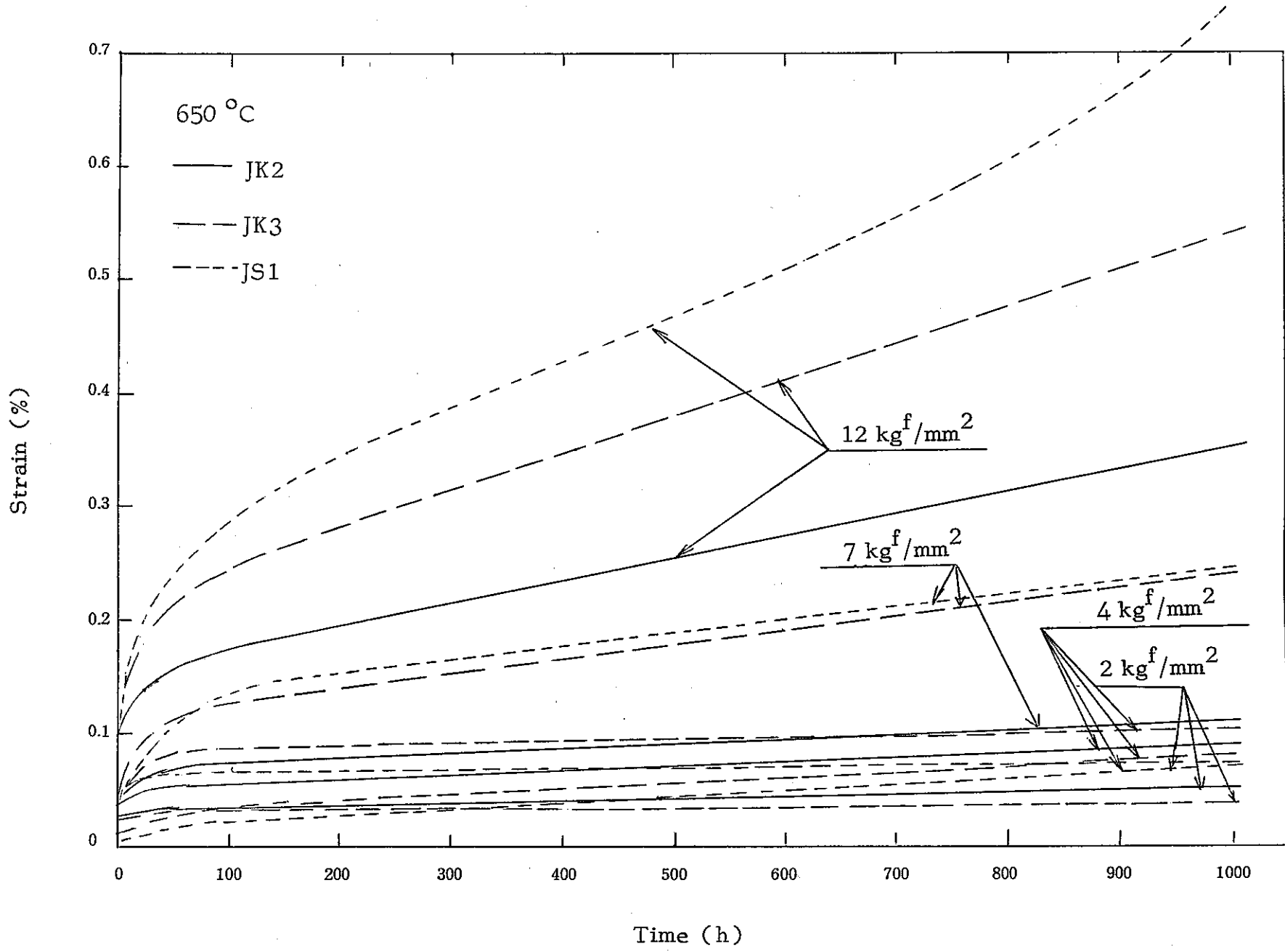


Fig. 18 Creep curves under uniaxial tension for Joyo MK-II claddings

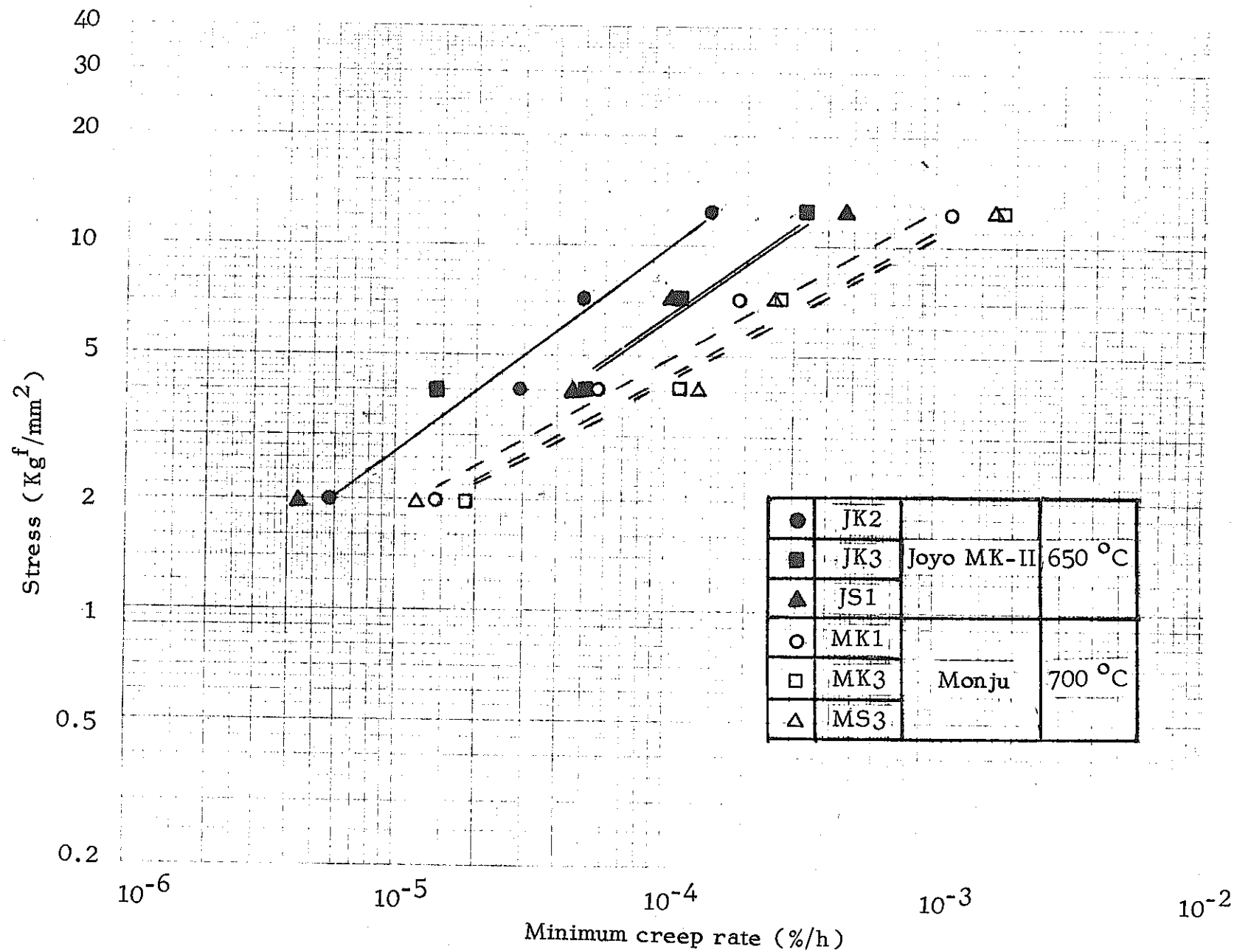


Fig. 19 Relations of stress versus minimum creep rate under uniaxial tension for Monju and Joyo MK-II claddings

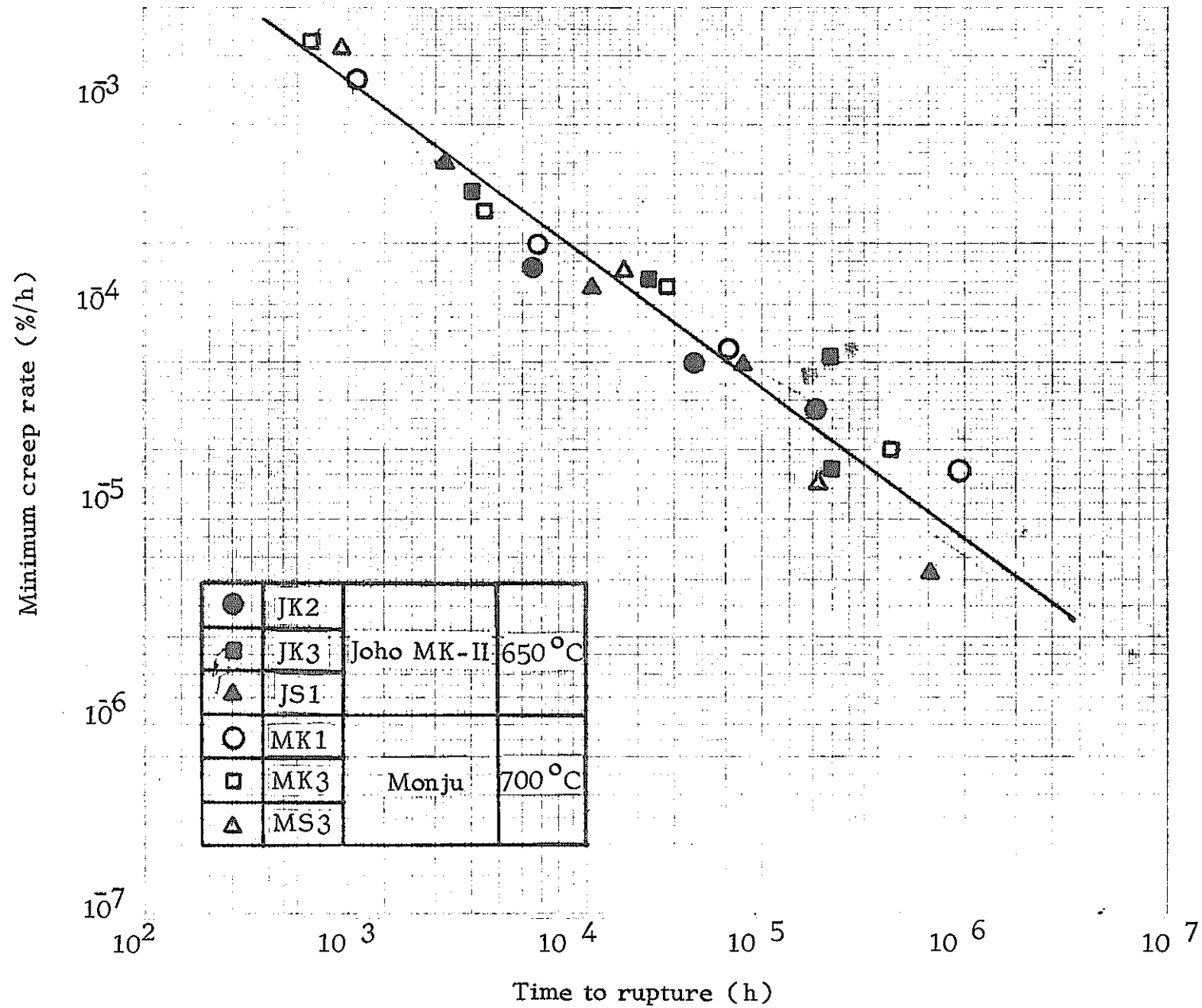


Fig. 20 Relations of minimum creep rate under uniaxial tension versus ruptured time under internal pressure at 650 and 700 °C for Joyo MK-II and Monju claddings

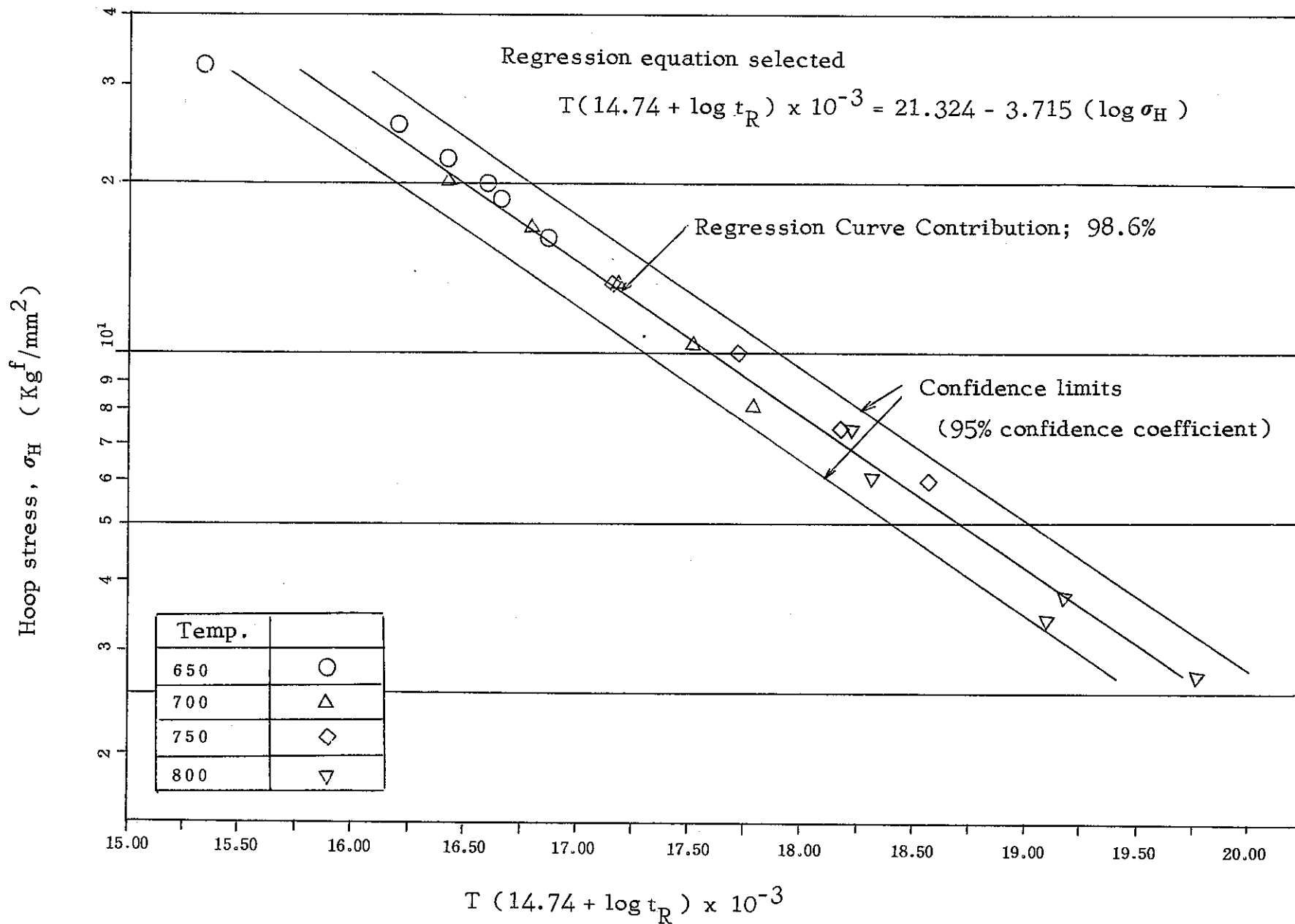


Fig. 21 Regression curve and confidence interval on master rupture data under internal pressure for Monju cladding MK1.

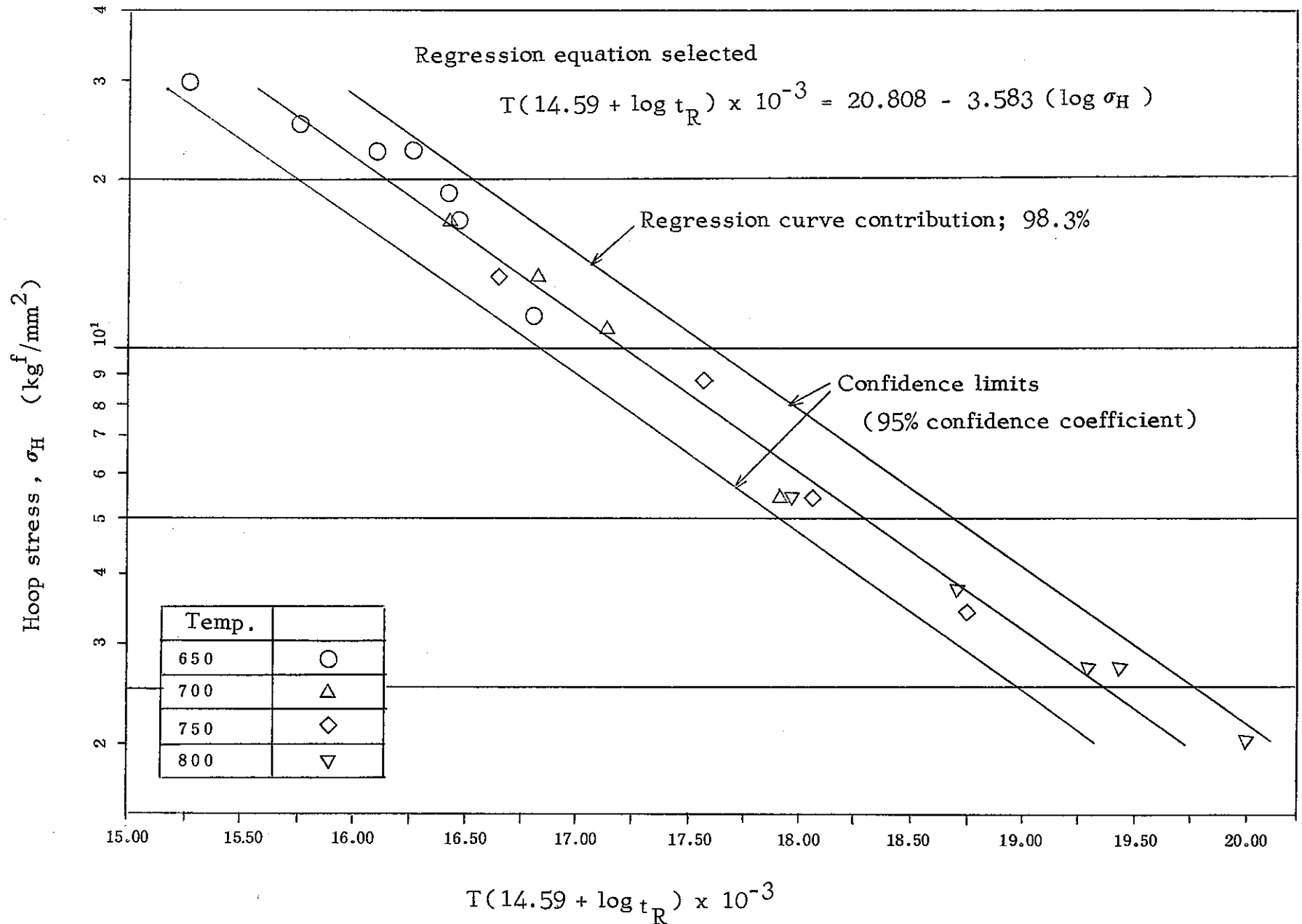


Fig. 22 Regression curve and confidence interval on master rupture data under internal pressure for Monju cladding MK3

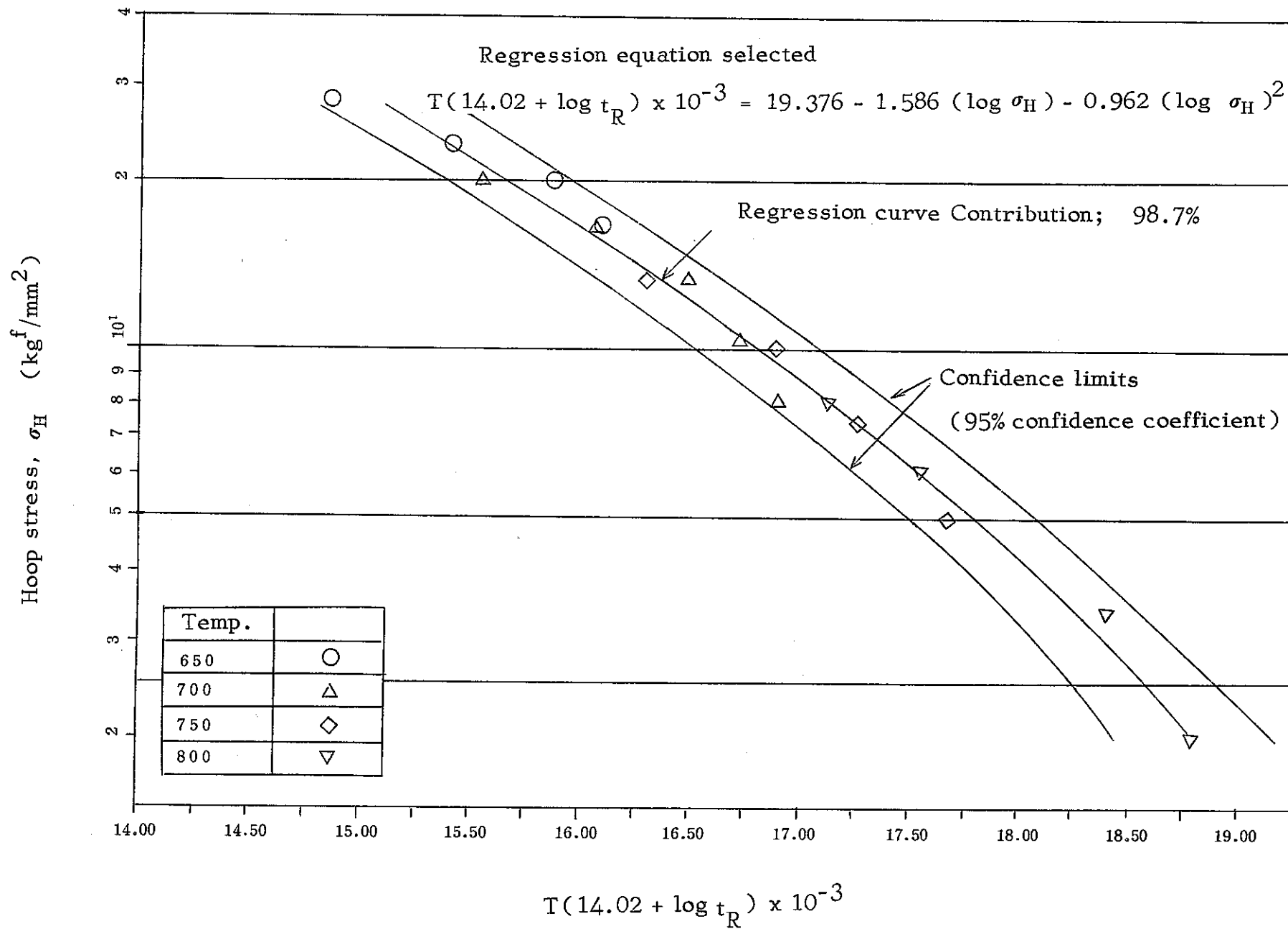


Fig. 23 Regression curve and confidence interval on master rupture data under internal pressure for Monju cladding MS3

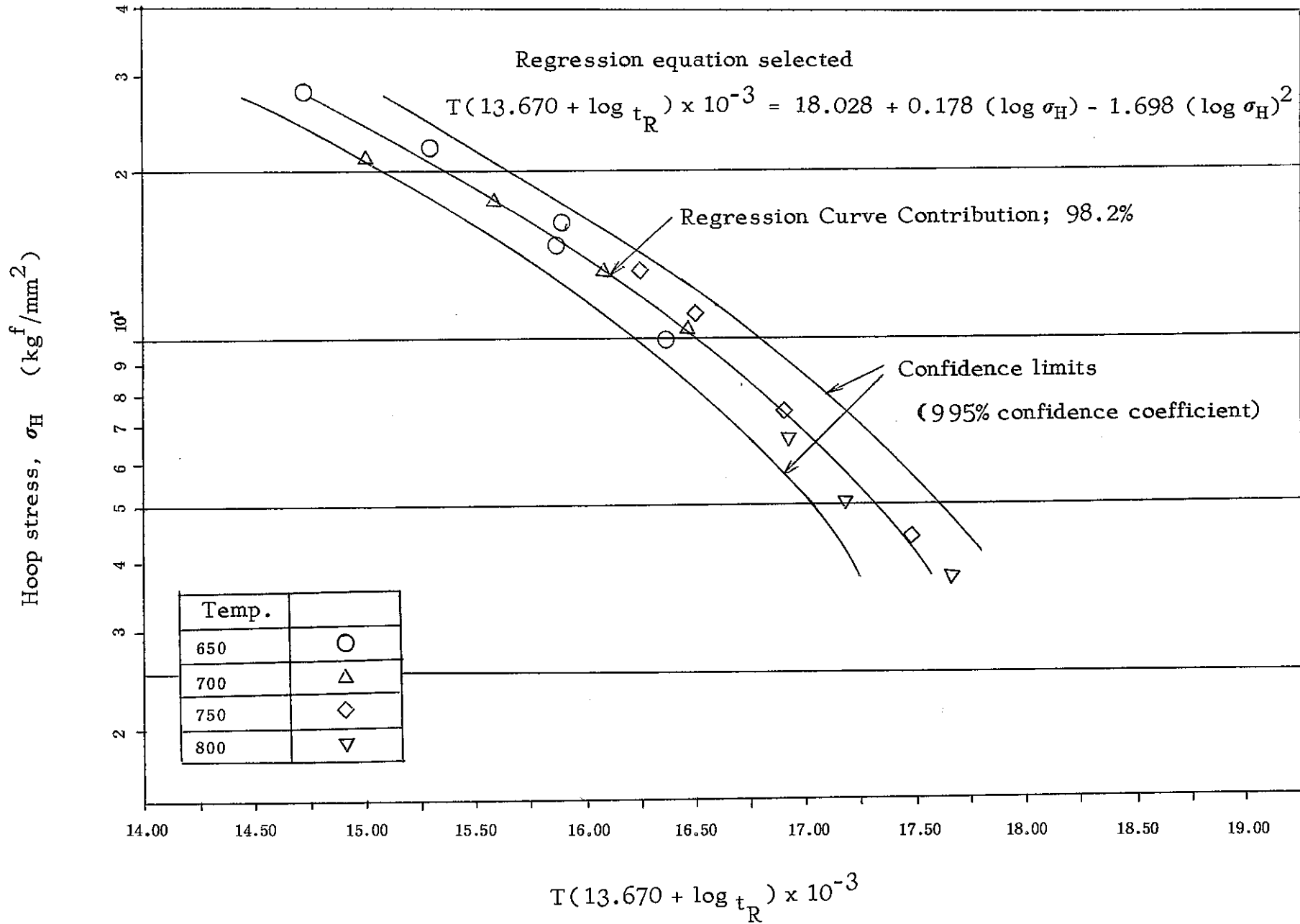


Fig. 24 Regression curve and confidence interval on master rupture data under internal pressure for Joyo MK-II cladding JK2

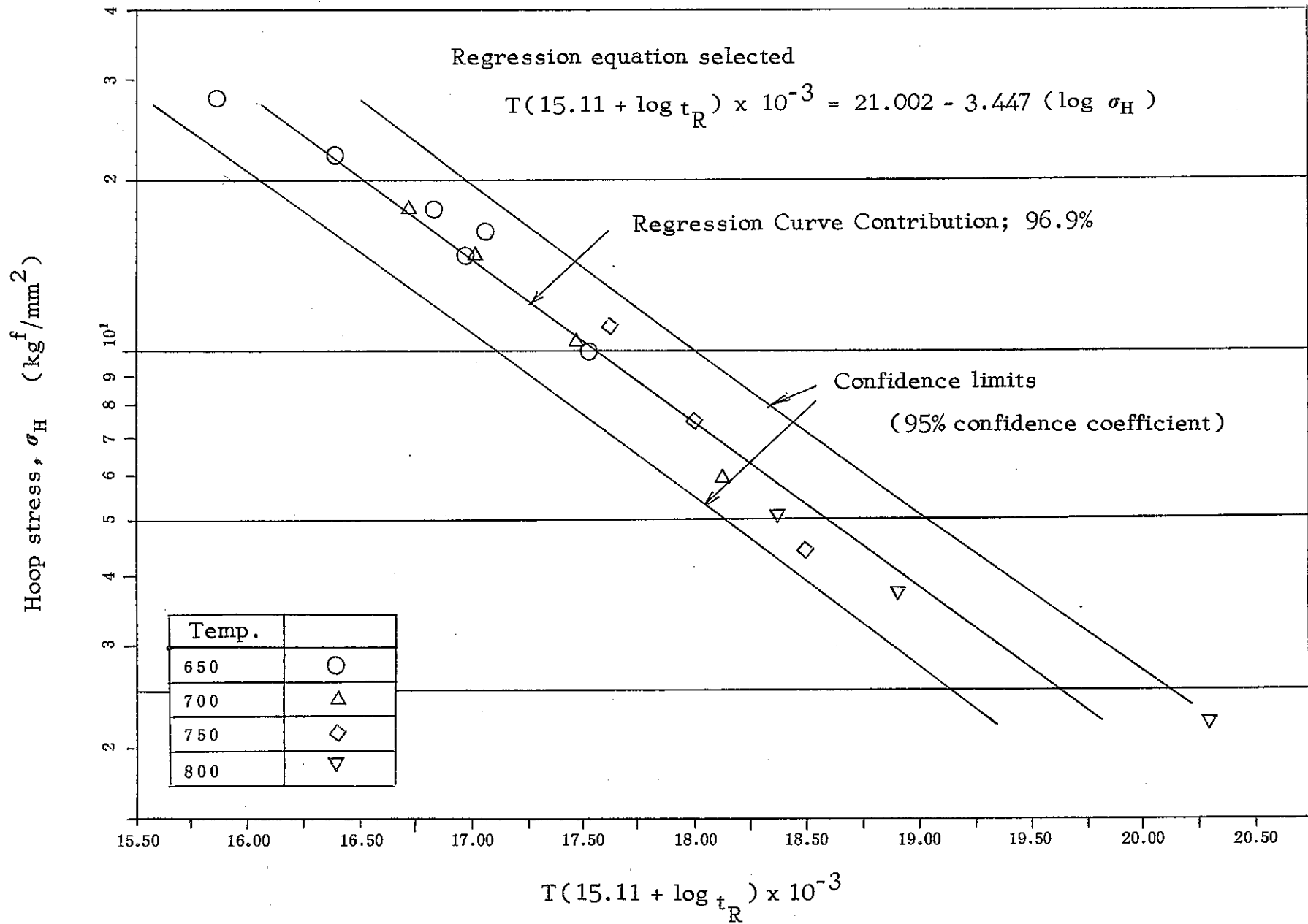


Fig. 25 Regression curve and confidence interval on master rupture data under internal pressure for Joyo MK-II cladding JK3

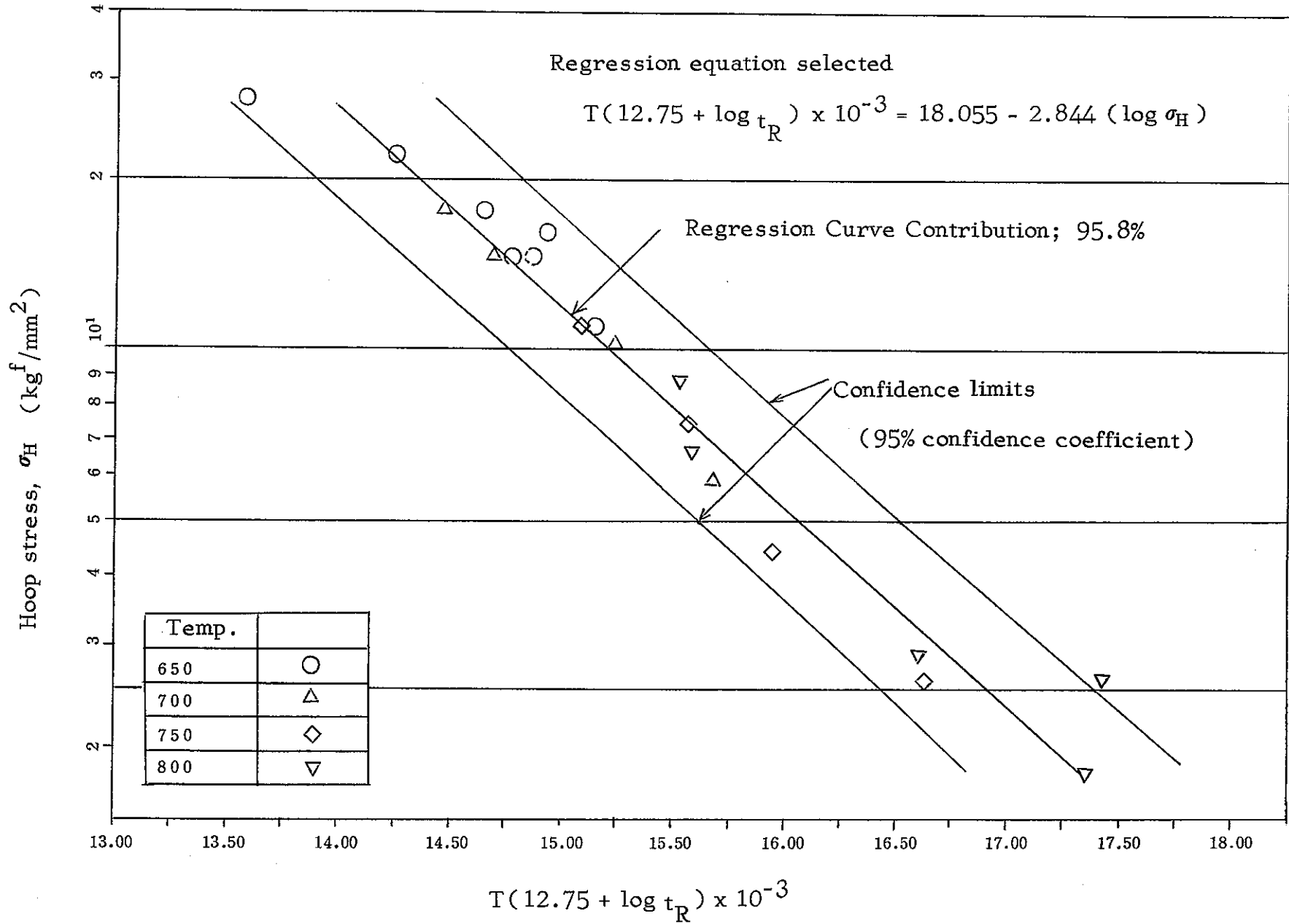


Fig. 26 Regression curve and confidence interval on master rupture data under internal pressure for Joyo MK-II cladding JS1

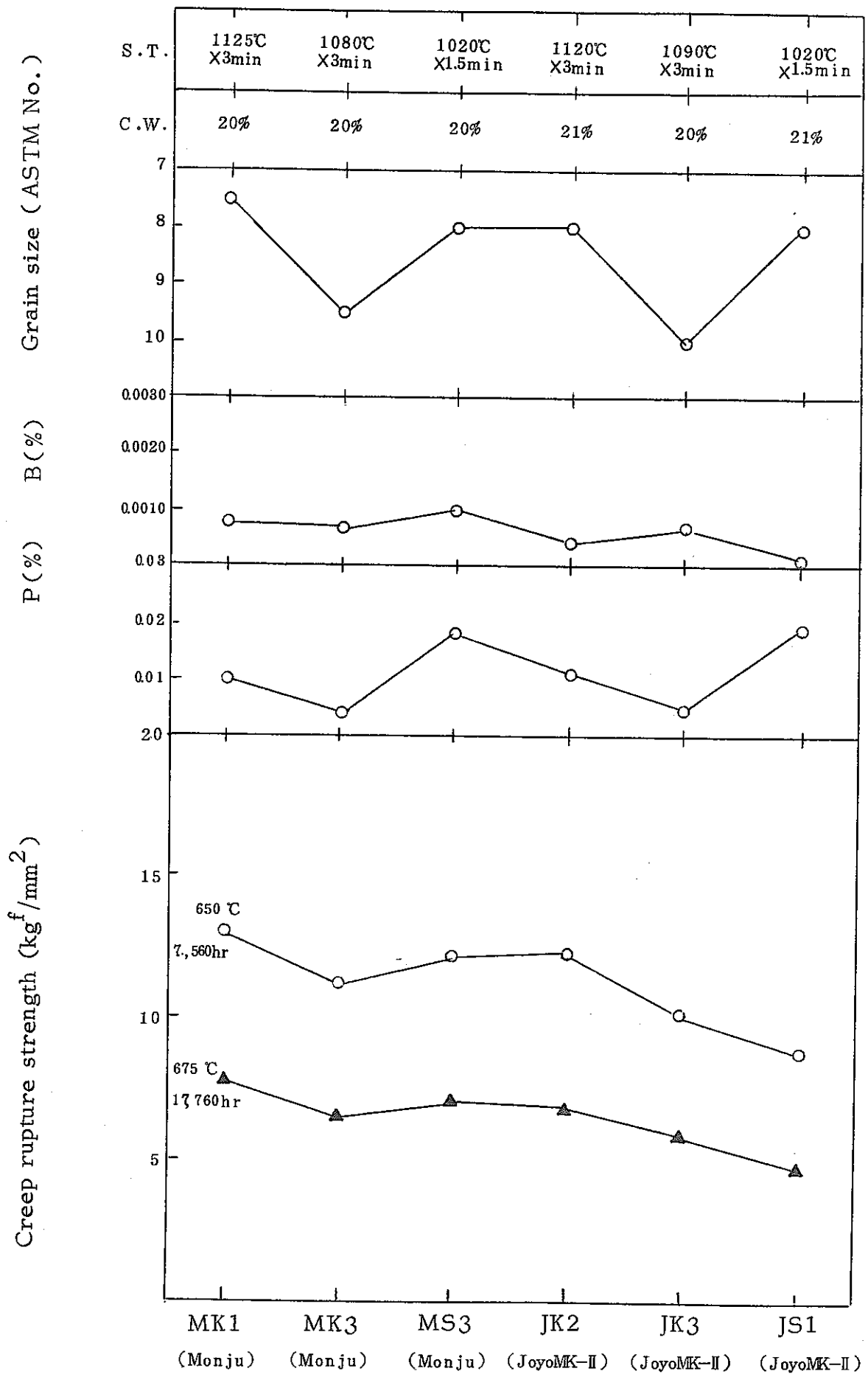


Fig. 27 Creep rupture strength and metallurgical conditions of Monju and Joyo MK-II claddings under the service conditions in Monju and Joyo MK-II core, conducted as sixth creep test program

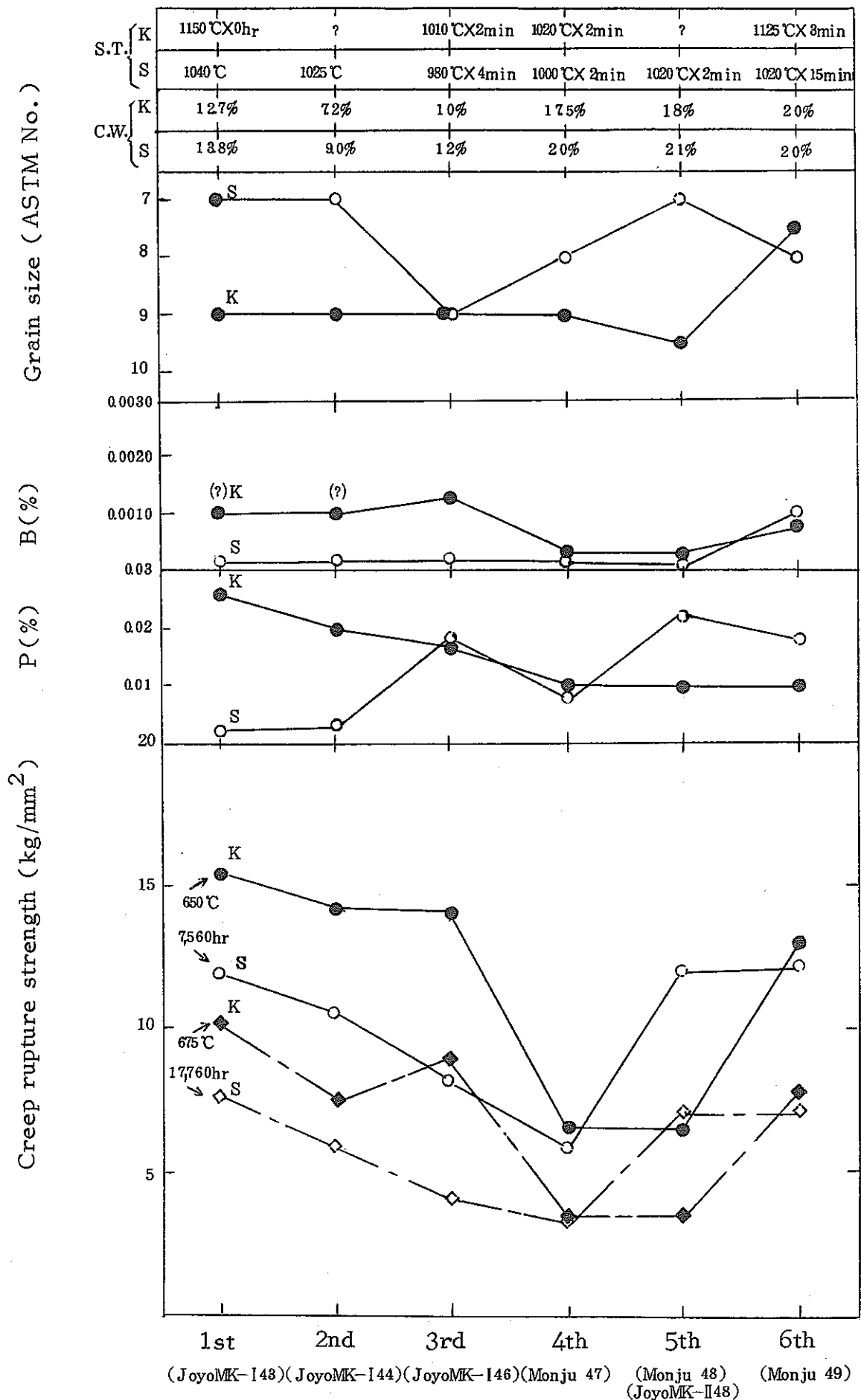


Fig. 28 Creep rupture strength and metallurgical conditions of claddings under the service conditions in Monju and Joyo MK-II core, conducted as first to sixth creep test programs

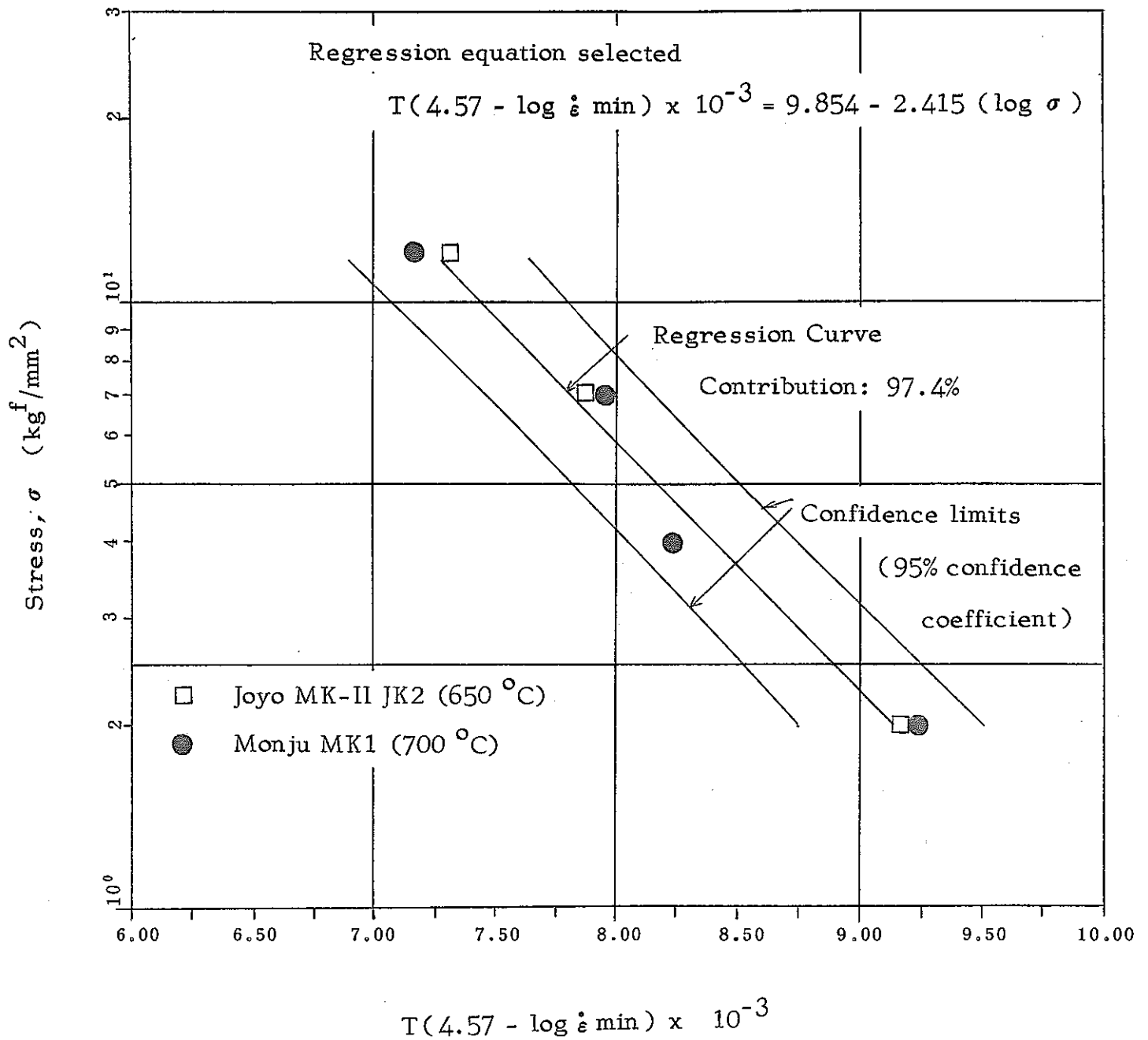


Fig. 29 Regression curve and confidence interval on master minimum creep rate data under uniaxial tension for Monju MK1 and Joyo MK-II JK2 claddings

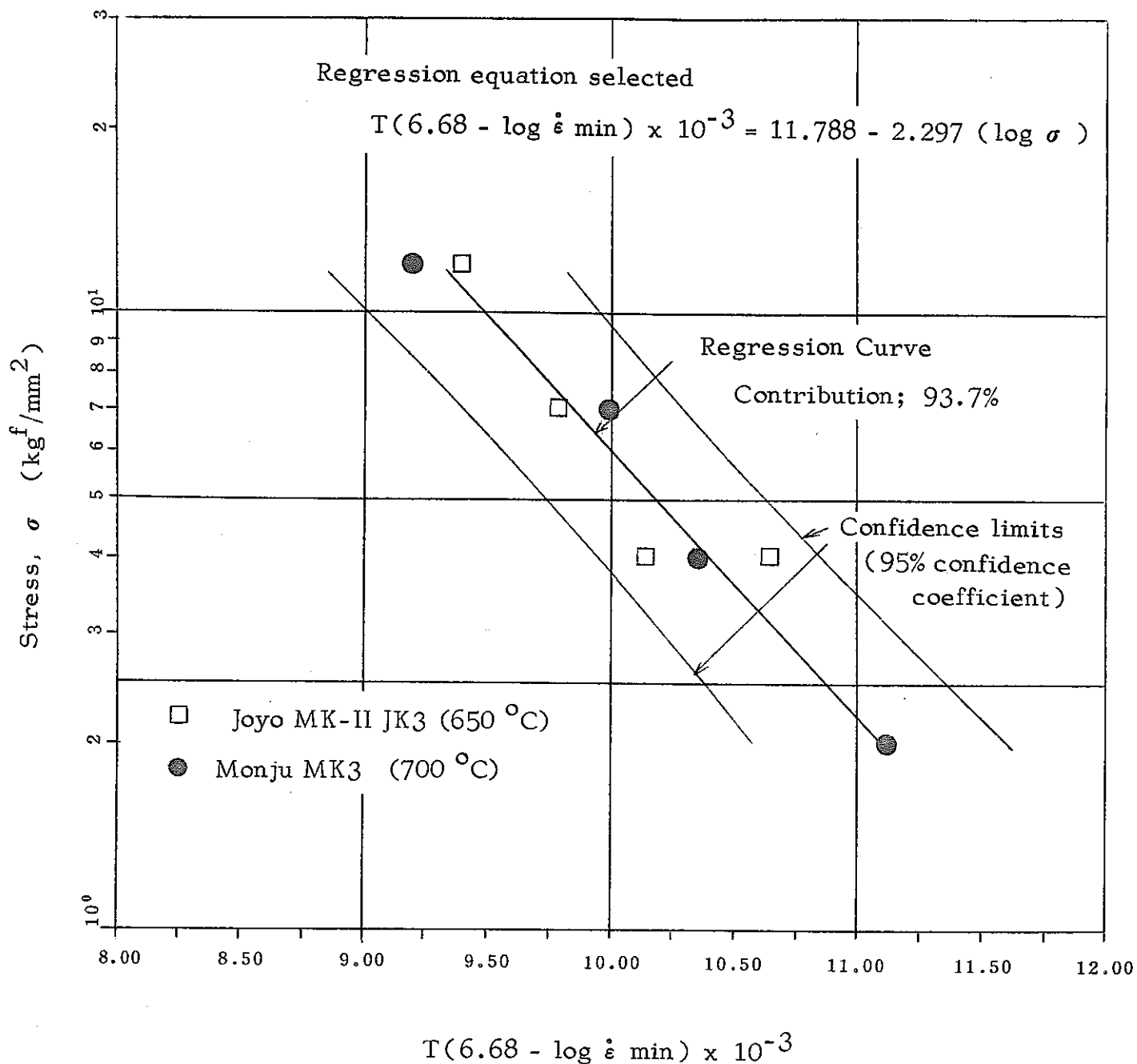


Fig. 30 Regression curve and confidence interval on master minimum creep rate data under uniaxial tension for Monju MK3 and Joyo MK-II JK3 claddings

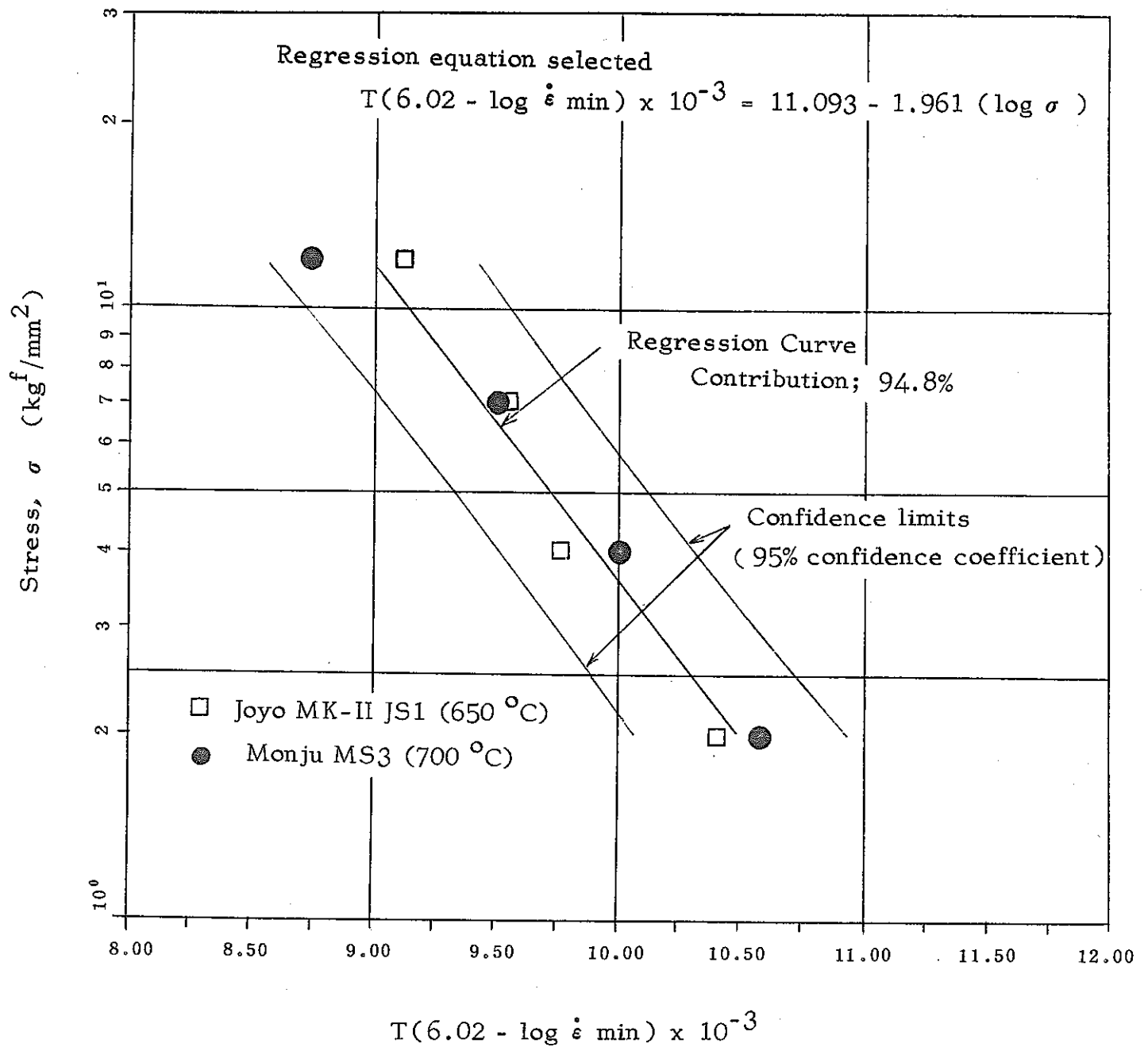


Fig. 31 Regression curve and confidence interval on master minimum creep rate data under uniaxial tension for Monju MS3 and Joyo MK-II JS1 claddings