

本資料は 年 月 日付けで登録区分、  
変更する。

01.11.30

[技術情報室]

# 高速炉用燃料被覆管のクリープ試験 (第5次クリープ試験)

昭和52年8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 吉田 進)

この資料は動燃事業団の開発業務を進めるため限られた関係者だけに配布するものです。したがってその取扱いには充分注意を払って下さい。なお、この資料の供覧、複製、転載、引用等には事業団の承認が必要です。

## 担 当 者

主 査	吉 田 進	(金属材料技術研究所)
	田 中 千 秋	(金属材料技術研究所)
	八 木 晃 一	(金属材料技術研究所)
	大 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)
	行 俊 照 夫	(住 友 金 属 工 業)
	吉 川 州 彦	(住 友 金 属 工 業)
	上 野 憲市郎	(住 友 金 属 工 業)
	牧 英 夫	(日 立 製 作 所)
	原 照 雄	(日 立 製 作 所)
	森 山 岳 洋	(日 立 製 作 所)
	小 玉 強	(動 燃 事 業 団)
	三 浦 信	(動 燃 事 業 団)
	小 原 勝 昭	(動 燃 事 業 団)
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	.....	1
3. 試 験 方 法	.....	2
4. 試 験 結 果	.....	2
5. 試 験 結 果 の 整 理	.....	4
6. ま と め	.....	7

## 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強度を把握するため、これまで4回にわたる試験を行ってきた（報告書 SN241 71-55, SN241 72-43, SN241 74-22, SN241 75-10 参照）。

引続いて第5次クリープ試験として、昭和48年度国内2社で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を用いて内圧クリープ破断試験および単軸クリープ試験を行った。

この試験は金属材料技術研究所、日立製作所、神戸製鋼所、住友金属工業、動燃事業団の5機関で実施し、前記4機関の担当分の試験結果は夫々 SJ255 75-02, SJ202 75-13, SJ216 75-01, SJ207 75-01 で報告済みである。本報告は上記5機関の試験結果をまとめたものである。

## 2. 供試材

供試材は、神戸製鋼所および住友金属工業にて昭和48年度に試作された SUS316 オーステナイトステンレス鋼もんじゅ用被覆管および常陽照射炉心用被覆管（以下常陽 Mk-II 用被覆管と呼ぶ）であり、それぞれの公称寸法を次に示す。

	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 mm	0.35 mm
長 さ	3.000 mm	1.500 mm

ミルシートより摘出したロット番号、溶体化処理条件、冷間加工度、化学組成、機械的性質、結晶粒度および硬さを Table 1（もんじゅ用被覆管）および Table 2（常陽 Mk-II 用被覆管）に示す。

もんじゅ用被覆管の光学顕微鏡組織、結晶粒度および硬さを Table 3 に、高温引張試験結果を Table 4 および Fig. 1 に示す。

K材の結晶粒度は ASTM No. 9.5 であるが、S<sub>1</sub> および S<sub>2</sub> の結晶粒度は ASTM No. 7.0 である。K材、S材の引張強さおよび0.2%耐力は低温側ではK材が高いが、高温側では差がない。また伸びはほとんど差はない。また常陽 Mk-II 用被覆管の光学顕微鏡組織、結晶粒度およびかたさを Table 5 に、高温引張試験結果を Table 6 および Fig. 2 に示す。

K材の結晶粒度はASTM No. 9.5であり、S<sub>1</sub>およびS<sub>2</sub>の結晶粒度はASTM No. 7である。引張強さ、耐力はK材、S<sub>1</sub>材とも比較的一致した値を示している。伸びはK材の方がやや高い値を示している。

なお各機関毎の前記報告書では供試材の符号として、もんじゅ用常陽Mk-II用のいずれでもK、S<sub>1</sub>、S<sub>2</sub>に対し夫々A、B、Cの記号を用いた。

### 3. 試験方法

#### 1) 試験片形状寸法

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. 3に示す。なお単軸引張クリープ試験片の全長は138mmと190mmの2通りあった。これは第1次より第4次クリープ試験までは単軸引張クリープ試験は金属材料技術研究所で行なわれていたが、第5次クリープ試験では都合により神戸製鋼所および住友金属工業で行なうことになり、電気炉の均熱部の関係から第4次までの試験片寸法190mmから138mmに変更した。今回190mm試験片をもんじゅ用被覆管および常陽Mk-II被覆管にておのおの金属材料技術研究所にて2本ずつ試験を行なったのは、試験片寸法が異なることにより最小クリープ速度に差が出るかどうかを調べるためであった。

#### 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5次クリープ試験報告書に記述されている。

#### 3) 試験条件

もんじゅ用被覆管および常陽用Mk-II被覆管の試験条件をTable 7に示す。

### 4. 試験結果

#### 4.1 内圧クリープ破断試験結果

金属材料技術研究所(NRIM)、神戸製鋼所(KOBE)住友金属工業(SUMITOMO)、日立製作所(HITACHI)動燃事業団(PNC)の5試験機関で求めた、もんじゅ用被覆管(K、S<sub>1</sub>およびS<sub>2</sub>材)の650℃、750℃および800℃の試験温度における内圧クリープの破断試験結果をTable 8(K材) Table 9(S<sub>1</sub>材)およびTable 10(S<sub>2</sub>材)に示す。また各試験温度における試験圧力と破断時間との関係をFig. 4に示す。Fig. 4より明らかにK材とS<sub>1</sub>およびS<sub>2</sub>材とでは差があることがわかり、K材の650℃、700℃、750℃

での圧力一破断時間の曲線はそれぞれ  $S_1$  および  $S_2$  材の  $700^\circ\text{C}$ ,  $750^\circ\text{C}$ ,  $800^\circ\text{C}$  での圧力一破断時間に相当する。また N 量が異なる  $S_1$  ( $0.0076\%$  N) と  $S_2$  ( $0.0118\%$  N) の圧力一破断時間には差異は認められないようである。

つぎに常陽 Mk-II 用被覆管 (K,  $S_1$  および  $S_2$ ) の  $600^\circ\text{C}$ ,  $650^\circ\text{C}$ ,  $700^\circ\text{C}$ ,  $750^\circ\text{C}$  および  $800^\circ\text{C}$  における内圧クリープ破断試験結果を Table 11 (K 材), Table 12 ( $S_1$  材) および Table 13 ( $S_2$  材) に示す。また各試験温度における試験圧力と破断時間との関係を Fig. 5 に示す。常陽 Mk-II 用被覆管ももんじゅ用被覆管と同様,  $S_1$  および  $S_2$  材は K 材よりかなりクリープ破断強度が高い。また N 量が異なる  $S_1$  ( $0.0090\%$  N) と  $S_2$  ( $0.0128\%$ ) ではクリープ破断強度に差異は認められなかった。

つぎに、外径および肉厚の異なるもんじゅ用被覆管と常陽 Mk-II 用被覆管の強度を比較するために内圧を平均径の式を用いて Hoop stress に置きかえクリープ破断時間との関係を Fig. 6 (K 材) および Fig. 7 ( $S_1$  および  $S_2$  材) に示す。Fig. 6 (K 材) において  $650$ ,  $700$  および  $750^\circ\text{C}$  ではもんじゅ用被覆管と常陽 Mk-II 用被覆管の間には差異は認められないが、 $800^\circ\text{C}$  では差が見られる。この差の原因は明らかでないが、試験機関の違い (もんじゅ用被覆管は金材技研, 常陽 Mk-II は動燃) によるものかもしれない。Fig. 7 (S 材) において、 $650$ ,  $750$  および  $800^\circ\text{C}$  ではもんじゅ用被覆管と常陽 Mk-II 用被覆管には差異が認められないが、 $700^\circ\text{C}$  の長時間側では、常陽 Mk-II 用被覆管の強度はもんじゅ用被覆管の強度より低下している。この原因は常陽 Mk-II 用被覆管が約  $1000$  時間以上で再結晶が起ったものと思われる。

なお、もんじゅ被覆管および常陽 Mk-II 被覆管とも S 材が K 材に比較してクリープ破断強度が高いのは結晶粒度のちがいによるものと思われ、また P 含量もある程度影響しているものと思われる。

#### 4.2 単軸クリープ試験結果

もんじゅ用被覆管 K 材および  $S_1$  材について、 $700^\circ\text{C}$  における単軸クリープ試験結果を Table 14 に示す。また常陽用被覆管 K 材および  $S_1$  材の  $650^\circ\text{C}$  における単軸クリープ試験結果を Table 15 に示す。Table 14 および Table 15 より、もんじゅ用被覆管および常陽用被覆管の K 材,  $S_1$  材の試験応力と最小クリープ速度の関係を Fig. 8 に示す。試験機関によるデータの差異は、ばらつきの範囲内に入り、差はないといってよいであろう。また K 材と  $S_1$  材を比較すると同じ最小クリープ速度を示す応力は  $S_1$  材の方が大きい。しかしながら低応力になるにしたがって、K 材と  $S_1$  材の対数クリープ速度の差は小さくなる

ことがわかる。また Fig. 9 に常陽 Mk-II 被覆管の時間一伸び曲線の一部を K 材および S<sub>1</sub> 材について比較して示した。

## 5. 試験結果の整理

### 5.1 内圧クリープ破断

#### 5.1.1 圧力-Larson-Miller パラメータ

第1~4次クリープ試験で行な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。そして対数圧力 (および対数 hoop stress) と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なった。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。

圧力と 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. 10 (もんじゅ用被覆管 K 材), Fig. 11 (もんじゅ用被覆管 S<sub>1</sub> および S<sub>2</sub> 材), Fig. 12 (常陽 Mk-II 用被覆管 K 材) および, Fig. 13 (常陽 Mk-II 用被覆管 S<sub>1</sub> および S<sub>2</sub>) に示す。回帰次数は K 材ではもんじゅ用被覆管, 常陽 Mk-II 用被覆管ともに 1 次であったが, S 材ではもんじゅ用被覆管は 3 次, 常陽 Mk-II 用被覆管は 2 次であった。また Fig. 6 および Fig. 7 に示すように内圧を平均径の式により hoop stress に置きかえて, hoop stress とクリープ破断時間の関係をプロットすると, 同一メーカーのもんじゅ用被覆管と常陽 Mk-II 用被覆管のクリープ破断強度はほとんど同じであることがわかったので, もんじゅ用被覆管と常陽 Mk-II 用被覆管の hoop stress と LMP の関係に対して前述と同じ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. 14 (K 材) および Fig. 15 (S<sub>1</sub> および S<sub>2</sub>) に示す。採用されたパラメータ定数 C の値は, K 材については 10.65, S<sub>1</sub> および S<sub>2</sub> の場合は 13.35 であった。回帰次数は K 材では 1 次であったが, S<sub>1</sub> および S<sub>2</sub> 材では 2 次であった。



## 5.2 単軸引張クリープ

### 5.2.1 応力-最小クリープ速度に関する Larson-Miller パラメータ

対数応力と最小クリープ速度に関する  $LMP = T(C - \log \epsilon_{min})$  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 Fig. 16 (K 材) および Fig. 17 (S<sub>1</sub> 材) に示す。選択された回帰式の次数は、K 材、S<sub>1</sub> 材ともに 1 次である。

### 5.3 設計曲線

K 材および S 材の LMP のマスター曲線 (Fig. 14, Fig. 15) から求めた 600°C, 650°C および 700°C における設計曲線をそれぞれ Fig. 18, Fig. 19 および Fig. 20 に示す。推定値の曲線および信頼度 95% における信頼区間の下限値の曲線を示し、同時に実測値も記入している。Fig. 18 において実測値と推定値の曲線との間に差があることが明らかである。

Table 17 は常陽およびもんじゅの燃料被覆管の中性子照射量温度および保持時間を示している。常陽用 Mk-II 被覆管では 650°C, 7,560 時間、もんじゅ用被覆管ではさしあたり 675°C, 11,808 時間のデータが設計の時必要となってくる。7,560 時間および 11,808 時間のクリープ破断試験は可能な時間なので次回からのクリープ試験は再考を要するものと思われる。

### 5.4 得られたデータ (第 5 次試験) と第 1 次から第 4 次試験のデータとの比較

第 1 次より第 5 次までのクリープ破断試験結果 (圧力あるいは応力と破断時間との関係) を Larson-Miller パラメータでつぎのように整理している。

#### (1) 第 1 次試験

##### (a) K 材

$$T(17.01 + \log t_R) \times 10^{-3} = 12.355 + 1.1682 \log P - 3.813 (\log P)^2$$

##### (b) S 材

$$T(13.12 + \log t_R) \times 10^{-3} = 5.7263 - 5.3333 \log P - 2.4565 (\log P)^2 - 4.073 (\log P)^3$$

#### (2) 第 2 次試験

##### (a) K 材

$$T(19.35 + \log t_R) \times 10^{-3} = 6.8071 - 6.7592 \log P - 3.4579 (\log P)^2 - 6.122 (\log P)^3$$

(b) S 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

(a) K 材

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

(b) S 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

(a) K 材

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

(b) S 材

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

(5) 第5次試験

(a) K 材

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

(b) S 材

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

ここでTは絶対温度で表わした試験温度、 $t_R$ は破断時間、Pは負荷圧力、 $\sigma$ は負荷圧力を平均径の式を用いて換算した hoop stress である。

これらの式より、550°C、600°C、650°Cおよび700°Cにおける1,000h、3,000h、6,000h、10,000h、15,000h、20,000hおよび30,000hでの破断強さをTable16に示す。またFig. 21に、10,000hの場合のみを図示した。第1次試験より第4次試験ではいずれの試験温度でもK材のクリーブ破断強さはS材のものより高いが、第5次試験ではそれが逆転している。またK材の第1次試験供試材のクリーブ破断強さが最も高く、第4次試験のK材、S材および第5次試験のK材のクリーブ破断強さが最も低い。これはおもにFig. 21に示した冷間加工度、結晶粒度<sup>\*</sup>、P含有量、B含有量の差によるものと思われる。

\* 結晶粒度が大となれば超音波探傷時のノイズが発生しやすくなるので超音波探傷性を考慮し細粒を目標にしたものと思われる。

## 5.5 試験後の試験片の光学顕微鏡組織およびかたさ測定結果

Photo. 1に常陽Mk-II被覆管K材およびS材の650℃、750℃におけるクリープ破断後の試験片の光学顕微鏡組織を示す。650℃における試験後の組織は炭化物以外に $\sigma$ 相と思われる金属間化合物が析出している。650℃におけるK材とS<sub>1</sub>材の光学顕微鏡組織を比較すると加熱時間は異なるが、S<sub>1</sub>材がK材よりも $\sigma$ 相の析出量は少く、より安定な組織を示しているようである。750℃における組織はK材、S材とも $\sigma$ 相が大量に析出しており、K材とS材の組織に大差ない。

Fjg. 22にPhoto. 1に示した試験片の長さ方向のかたさ分布を示す。

## 6. まとめ

高速増殖炉の原型炉「もんじゅ」用燃料被覆管および実験炉「常陽」Mk-II用燃料被覆管の高温強度特性を検討するために、K社およびS社で、昭和48年度製造された試作材について、内圧クリープ破断試験と単軸クリープ破断試験を行なった。本試験の結果を総括すると次の通りである。

- (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用燃料被覆管の高温強度特性の基礎的資料を得た。
- (2) もんじゅおよび常陽Mk-II用燃料被覆管とも、S材がK材よりクリープ破断強さは大きく、同じ最少クリープ速度を示す応力も大きいことがわかった。これは主として結晶粒度の違いによるものと考えられる。
- (3) S社で製造されたもんじゅおよび常陽Mk-II用燃料被覆管の窒素含量の差によるクリープ破断強度への影響はなかった。
- (4) もんじゅおよび常陽Mk-II用燃料被覆管の内圧クリープ破断強度を被覆管製造会社ごとに hoop stress で整理したところ、K材の800℃およびS材の700℃での試験以外はよく一致している。
- (5) 単軸クリープ試験は3試験機関で行なわれて、試験片長さが異なるにもかかわらず、試験機関によるデータの偏りは見られなかった。
- (6) 第1次クリープ試験結果から、今回の第5次クリープ試験結果までを比較、検討した。

Table 1 Some properties of cladding K, S<sub>1</sub> and S<sub>2</sub> for Monju.

		K				S <sub>1</sub>				S <sub>2</sub>					
		Heat No. LO308 Mill sheet NoS-74-9				Heat No. 380884 Mill sheet MS-RD-0003				Heat No. 380700 Mill sheet NoMS-RD-0003					
Lot No. (Cladding No.)		Lot 1 (3101~3350)				Lot 2(3224~3342)				Lot 1(3001~3223)					
Solution treatment						1020C×2min				1020C×2min					
Cold work		18%				20%				21%					
		Ladle		Check		Ladle		Check		Ladle		Check			
Chemical composition (wt.%)	C (0.035 ~0.064)	0.043		0.048		0.045		0.044		0.052		0.050			
		0.045		0.051		0.046		0.043		0.053		0.047			
	Si (≤0.75)	0.65		0.67		0.51		0.51		0.52		0.50			
		0.66		0.67		0.51		0.52		0.50		0.51			
	Mn (1.50~2.00)	1.64		1.66		1.75		1.82		1.79		1.86			
		1.67		1.65		1.75		1.82		1.79		1.84			
	P (≤0.03)	0.010		0.011		0.022		0.021		0.021		0.022			
		0.011		0.011		0.022		0.022		0.022		0.022			
	S (≤0.02)	0.005		0.005		0.005		0.006		0.008		0.008			
		0.005		0.005		0.006		0.006		0.009		0.008			
	Ni (1200~1400)	13.69		13.90		12.86		13.04		12.81		12.82			
		13.81		13.87		12.93		12.96		12.80		12.79			
Cr (1600~1800)	17.50		17.44		16.80		16.90		17.20		16.75				
	17.44		17.48		16.80		17.05		17.05		16.75				
Mo (2.00~3.00)	2.27		2.30		2.44		2.51		2.50		2.50				
	2.28		2.25		2.46		2.52		2.50		2.52				
Co (≤0.10)	0.04		0.04		0.02		0.01		0.01		0.01				
	0.04		0.04		0.02		0.01		0.01		0.01				
B (≤0.0008)	0.0003		0.0003		0.0001		0.0001		0.0001		0.0001				
	0.0003		0.0003		0.0001		0.0001		0.0001		0.0001				
N (≤0.010)	0.005		0.0071		0.0070		0.0076		0.0102		0.0118				
	0.006		0.0070		0.0072		0.0076		0.0105		0.0118				
Tensile properties	Room temp	$\sigma_B$ (Kg/mm <sup>2</sup> ) (≥75)		85.6	85.7	85.5	85.0	83.1	82.0	81.9	81.8	82.9	84.6	85.4	84.7
		$\sigma_{0.2}$ (Kg/mm <sup>2</sup> ) (≥60)		76.3	76.0	73.3	72.7	71.1	71.6	71.0	72.0	68.0	71.2	72.2	71.7
		$\epsilon$ (%) (≥10)		16	19	18	18	24	22	22	24	22	21	21	20
	650C	$\sigma_B$ (Kg/mm <sup>2</sup> ) (≥40)		48.0	47.7	48.2	48.1	45.0	45.5	45.6	45.8	46.5	48.0	47.4	47.7
		$\sigma_{0.2}$ (Kg/mm <sup>2</sup> ) (≥30)		45.8	45.3	46.	45.8	39.8	41.0	40.6	40.2	41.3	41.2	42.4	41.4
		$\epsilon$ (%) (≥7)		12	14	13	14	25	20	21	22	18	16	13	20
Burst Properties	$P_B$ (Kg/cm <sup>2</sup> ) (≥1000)		1480	1460	1460	1470	1460	1470	1470	1430	1480	1510	1520	1530	
	P (Kg/cm <sup>2</sup> ) (≥900)		1330	1320	1320	1320	1355	1370	1380	1340	1390	1400	1420	1440	
Grain size (≥6.0)		9.5		9.5		7.5				7.5					
Hardness (HV)		270		268		271		261		276		273			

Table 2 Some properties of cladding K, S<sub>1</sub> and S<sub>2</sub> for Joyo Mk-II.

		K				S <sub>1</sub>				S <sub>2</sub>					
		No. LO308				No. 380885				No. 380705					
		No. S-74-5				No. JS-RD-0002				No. JS-RD-0001					
Lot No. (cladding No.)		Lot 1 (0001~0250)				Lot 3 (0431~0750)				Lot 1 (0001~0264)					
Solution Treatment						1020°C×2min				1020°C×2min					
Cold work		17%				20.0~21.0%				21.0~21.2%					
		Ladle		Check		Ladle		Check		Ladle		Check			
Chemical composition (wt.%)	C <sub>1</sub> (0.035 ~0.064)	0.04		0.05		0.049		0.048		0.052		0.053			
		0.05		0.05		0.054		0.049		0.051		0.051			
	Si (≤0.75)	0.65		0.70		0.52		0.51		0.50		0.53			
		0.66		0.70		0.52		0.50		0.51		0.53			
	Mn (1.50 ~2.00)	1.64		1.67		1.73		1.51		1.84		1.78			
		1.67		1.63		1.73		1.53		1.83		1.77			
	P (≤0.03)	0.010		0.011		0.022		0.020		0.021		0.022			
		0.011		0.011		0.022		0.020		0.021		0.021			
	S (≤0.02)	0.005		0.005		0.007		0.009		0.007		0.007			
		0.005		0.005		0.007		0.009		0.007		0.008			
	Ni (1.200 ~1.400)	13.69		13.66		12.82		12.90		12.88		12.92			
		13.81		13.71		12.84		12.94		12.92		12.92			
Cr (1.600 ~1.800)	17.50		17.54		16.85		17.05		17.50		17.20				
	17.44		17.46		16.75		17.00		17.10		17.10				
Mo (2.00 ~3.00)	2.27		2.26		2.42		2.50		2.50		2.48				
	2.28		2.27		2.42		2.56		2.50		2.50				
Co (≤0.10)	0.04		0.04		0.02		0.01		0.01		0.01				
	0.04		0.04		0.02		0.01		0.01		0.01				
B (≤0.0005)	0.0003		0.0002		0.0001		0.0001		0.0001		0.0001				
	0.0003		0.0003		0.0001		0.0001		0.0001		0.0001				
N (≤0.010)	0.005		0.0075		0.0072		0.0090		0.0100		0.0128				
	0.006		0.0071		0.0074		0.0086		0.0104		0.0128				
Tensile properties	Room temp	$\sigma_B$ (Kg/mm <sup>2</sup> ) (≥75)		82.5	81.5	81.7	82.8	82.0	82.6	81.5	83.2	85.7	85.4	84.8	84.0
		$\sigma_{0.2}$ (Kg/mm <sup>2</sup> ) (≥60)		73.0	71.2	71.3	73.0	69.8	70.3	69.2	70.4	76.2	75.7	70.7	697
		$\epsilon$ (%) (≥10)		24	24	22	22	19	19	18	20	17	17	19	20
	650°C	$\sigma_B$ (Kg/mm <sup>2</sup> ) (≥40)		48.6	47.4	54.0	55.9	47.3	48.6	49.7	49.9	49.5	49.6	50.4	50.2
		$\sigma_{0.2}$ (Kg/mm <sup>2</sup> ) (≥30)		39.1	41.8	44.6	45.7	42.6	43.3	42.9	43.3	44.2	44.9	43.5	43.3
		$\epsilon$ (%) (27)		19	12	14	13	17	15	15	13	15	17	16	14
Burst properties	$P_B$ (Kg/cm <sup>2</sup> ) (≥1000)		1210	1220	1220	1220	1450	1470	1420	1420	1490	1480	1520	1480	
	P (Kg/cm <sup>2</sup> ) (≥700)		1050	1060	1060	1050	1360	1370	1340	1340	1400	1400	1430	1400	
Grain size (≥6.0)		9.5 9.5				7.0 7.5				7.5 7.5					
Hardness (HV)		265 255				268 268				290 284					

Table 3 Microstructure, grain size and hardness of Monju Claddings.




	micrograph ( Longitudinal ) x 400	Grainsize ( ASTM $\frac{1}{2}$ )	Hardness ( Hv, 500 $\phi$ )	
			Longitudinal	Transverse
Tube K		9.5	269	283
Tube S <sub>1</sub>		7.0	281	273
Tube S <sub>2</sub>		7.0	287	281

Table 4 Tensile properties of cladding K, S<sub>1</sub> and S<sub>2</sub> for Monju.

Cladding Maker	K O B E ( K )				S U M I T O M O ( S <sub>1</sub> )				S U M I T O M O ( S <sub>2</sub> )			
	Temperature (°C)	Specimen No.	Tensile Strength (Kg/mm <sup>2</sup> )	0.2% proof strength (Kg/mm <sup>2</sup> )	Elongation (%)	Specimen No.	Tensile Strength (Kg/mm <sup>2</sup> )	0.2% proof stress (Kg/mm <sup>2</sup> )	Elongation (%)	Specimen No.	Tensile Strength (Kg/mm <sup>2</sup> )	0.2% proof Strength (Kg/mm <sup>2</sup> )
Room temp.	K3101	85.6	76.3	16	S3224	83.1	71.1	24	S3001	82.9	68.0	22
	~K3350	85.5	73.3	18	~S3342	81.9	71.0	22	~S3223	84.6	71.2	21
400	K3119-1	67.9	60.3	6.2	S3250-1	64.4	56.8	4.1	S3007-4	68.1	59.1	3.0
500	K3111-1	64.5	56.8	5.2	S3239-1	61.8	55.7	6.2	S3007-6	65.3	55.0	4.0
600	K3120-1	56.8	50.3	6.2	S3258-1	55.6	50.3	8.2	S3008-2	57.6	48.6	8.0
650	K3101	48.0	45.8	14	S3224	45.0	39.8	25	S3001	46.5	41.3	18
	~K3350	48.2	46.1	13	~S3342	45.6	40.6	21	~S3223	48.0	41.2	16
700	K3106-1	42.5	32.5	21.2	S3240-1	42.3	33.0	17.5	S3008-4	39.9	31.6	16.0
750	K3124-1	35.1	26.8	27.0	S3205-1	33.5	24.5	25.0	S3007-2	34.3	27.1	26.0
800	K3101-1	27.0	17.6	31.2	S3254-1	27.8	20.5	26.0	S3008-1	26.7	17.0	42.5

Table 5 Microstructure, grain size and hardness of Joyo Mk-II claddings.

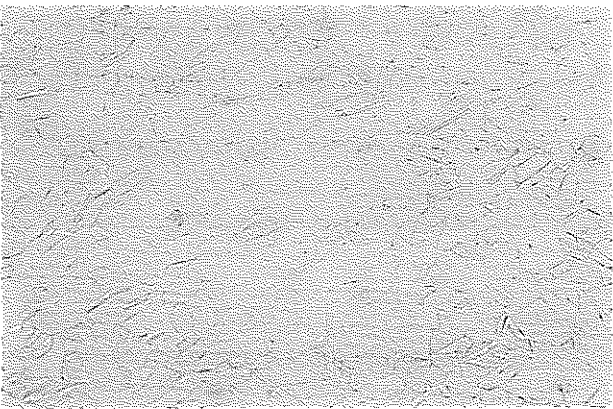
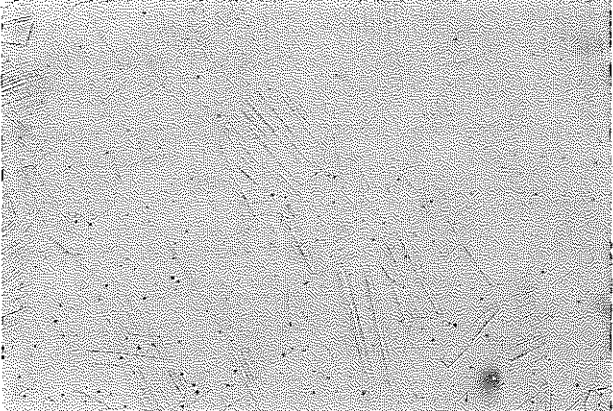

	Micrograph ( Longitudinal ) x400	Grainsize (ASTM%)	Hardness ( Hv:500g )	
			Longitudinal	Transverse
Tube K		9.5	285	282
Tube S <sub>1</sub>		7.0	270	281
Tube S <sub>2</sub>		7.0	287	281



Table 6 Tensile properties of cladding K, S<sub>1</sub> and S<sub>2</sub> for JOYOMk-II.

Cladding Maker	K O B E ( K )				SUMITOMO ( S <sub>1</sub> )				SUMITOMO ( S <sub>2</sub> )			
	Temperature ( °C )	Specimen No.	Tensile strength ( Kg/mm <sup>2</sup> )	0.2%proof strength ( Kg/mm <sup>2</sup> )	Elongation ( % )	Specimen No.	Tensile strength ( Kg/mm <sup>2</sup> )	0.2%proof stress ( Kg/mm <sup>2</sup> )	Elongation ( % )	Specimen No.	Tensile strength ( Kg/mm <sup>2</sup> )	0.2%proof strength ( Kg/mm <sup>2</sup> )
Room temp.	K0001	82.5	73.0	24	S0431	82.5	69.8	19	S0001	85.7	76.2	17
	~K0250	81.7	71.3	22	~S0750	81.5	69.2	18	~S0264	85.4	75.7	17
400	K0002-11				S0576-11	66.9	57.3	3.4	S0014-2	70.2	59.8	6.8
		S0583-11	67.2	57.0	4.4							
500	K0031-11	61.7	54.2	7.2	S0476-11				S0017-2	65.2	57.2	6.2
	K0104-11	62.2	56.0	6.4								
600	K0034-11	54.0	47.0	9.0	S0483-11	54.9	**	5.4	S0019-2	56.8	49.1	7.4
650	K0001	48.6	39.1	19	S0431	47.3	42.6	17	S0001	49.5	44.2	15
	~K0250	54.0	44.6	14	~S0750	49.7	42.9	15	~S0264	49.6	44.9	17
700	K0038-11	40.4	32.1	17.6	S0495-11	40.1	32.1	12.4	S0016-2	40.8	34.6	17.6
750	K0070-11	31.4	24.4	25.0	S0529-11	32.4	25.8	18.6	S0013-2	32.9	26.5	38.0
800	K0079-11	25.4	19.5	23.6	S0564-11	27.0	20.9	20.2	S0018-2	27.4	20.9	41.0

Table 7 Creep and creep rupture test conditions.

Internal pressure creep rupture tests			
Monju cladding		Joyo Mk-II cladding	
Temperature (°C)	Pressure (Rupture-time)	Temperature (°C)	Pressure (Rupture-time)
—	creep rupture : 3~4 levels	600	creep rupture : 3~4 levels
650	} maximum : 3000 h	650	} maximum : 3000 h
700		700	
750		750	
800	} maximum : 1000 h	800	} maximum : 1000 h
Uniaxial tension creep tests			
Monju cladding		Joyo Mk-II cladding	
Temperature (°C)	Stress	Temperature (°C)	Stress
700	4 levels	650	4 levels

Table 8 Results of creep rupture tests under internal pressure for Monju cladding K.

Temperature (°C)	Pressure (kg/cm <sup>2</sup> )	Hoop stress (kg/mm <sup>2</sup> )	Time to rupture (hour)	Number of Specimen	Institute
650	400	26.9	74.0	K3119-3	PNC NRIM
	320	21.5	200.5	K3105-4	
	280	18.8	495.0	K3106-4	
	240	16.1	782.2	K3104-4	
	190	12.8	1,372.2	K3124-3	
700	250	16.8	101.7	K3101-2	PNC
	210	14.1	166.1	K3106-3	
	180	12.1	378.0	K3101-5	
	180	12.1	231.3	K3120-4	
	150	10.1	419.5	K3120-5	
	120	8.1	610.8	K3120-3	
	90	6.0	1,438.5	K3124-2	
	70	4.7	2,588.8	K3106-2	
750	180	12.1	38.4	K3119-2	HITACHI
	120	8.1	136.8	K3104-2	
	90	6.0	317.0	K3111-2	
	50	3.4	904.5	K3105-3	
	35	2.4	3,354.4	K3101-4	
800	75	5.0	95.5	K3124-5	NRIM
	50	3.4	494.7	K3119-5	
	45	3.0	613.2	K3105-5	
	40	2.7	499.8	K3106-5	

Table 9 Results of creep rupture tests under internal pressure for Monju cladding S<sub>1</sub>.

Temperature (°C)	Pressure (kg/cm <sup>2</sup> )	Hoop stress (kg/mm <sup>2</sup> )	Time to rupture (hour)	Number of specimen	Institute
650	360	24.2	157.3	S3239-2	NRIM
	350	23.5	269.1	S3242-2	PNC
	320	21.5	528.7	S3239-3	NRIM
	280	18.8	1,195.7	S3250-4	
	210	14.1	4,359.9	S3255-3	
700	280	18.8	152.3	S3258-3	PNC
	250	16.8	254.1	S3261-2	
	230	15.5	121.5*	S3240-3	
	210	14.1	754.6	S3242-3	
	210	14.1	851.1	S3255-5	
	180	12.1	2,118.8	S3250-2	
	180	12.1	1,409.8	S3250-5	
	150	10.1	2,799.5	S3255-4	
750	180	12.1	126.1	S3261-4	HITACHI
	150	10.1	192.8	S3242-4	
	120	8.1	612.0	S3240-5	
	90	6.0	1,117.6	S3242-5	
	60	4.0	3,834.6	S3254-2	
800	75	5.0	190.0	S3211-3	NRIM
	60	4.0	404.3	S3239-5	
	40	2.7	1,131.6	S3258-2	

\* Ruptured on weld

Table 10 Results of creep rupture tests under internal pressure for Monju cladding S<sub>2</sub>.

Temperature (°C)	Pressure (kg/cm <sup>2</sup> )	Hoop stress (kg/mm <sup>2</sup> )	Time to rupture (hour)	Number of specimen	Institute
650	350	23.5	386.4	S3014-4	PNC
700	230	15.5	517.5	S3014-1	PNC
750	200	13.4	60	S3019-1	KOBE
	160	10.8	304	S3014-3	
	100	6.7	1,066	S3019-4	
	70	4.7	1,720	S3014-2	
800	130	8.7	70.5	S3018-3	PNC
	100	6.7	134.8	S3018-4	
	90	6.0	354.2	S3018-1	
	50	3.4	893.8	S3019-3	
	50	3.4	1,780.8	S3022-1	

Table 11 Results of creep rupture tests under internal Pressure for Joyo Mk-II cladding K.

Temperature (°C)	Pressure (kg/cm <sup>2</sup> )	Hoop stress (kg/mm <sup>2</sup> )	Time to rupture (hour)	Number of specimen	Institute
600	480	35.3	1570	K0194-4	PNC
	450	33.2	129.2	K0205-2	
	420	30.9	172.0	K0117-3	
	400	29.4	326.9	K0227-4	
	380	28.0	1670*	K0194-3	
	370	27.2	1,252.0	K0121-1	
	320	23.5	2,967.7	K0129-4	
650	380	28.0	121	K0205-4	KOBE
	360	26.5	93.0	K0117-4	PNC
	330	24.3	151	K0121-4	KOBE
	260	19.1	470	K0208-3	
	210	15.4	803	K0205-3	
	165	12.1	2,126	K0129-3	
700	300	22.1	21.5	K0247-3	SUMITOMO
	230	16.9	92.7	K0117-2	PNC
	130	9.6	281.7	K0117-1	SUMITOMO
	90	6.6	976.4	K0194-2	
	65	4.8	1,943.6	K0129-2	
750	160	11.8	55	K0208-2	KOBE
	130	9.6	97	K0121-2	
	90	6.6	210	K0205-1	
	60	4.4	501	K0227-1	
	45	3.3	2,120	K0197-4	
800	80	5.9	102.5	K0197-1	PNC
	60	4.4	324.7	K0121-3	
	60	4.4	256.5	K0197-3	
	50	3.7	577.3	K0247-2	
	35	2.6	4121.1	K0208-1	

\* Ruptured on weld.

Table 12 Results of creep rupture tests under internal pressure for Joyo Mk-II cladding S<sub>1</sub>.

Temperature (°C)	Pressure (kg/cm <sup>2</sup> )	Hoop stress (kg/mm <sup>2</sup> )	Time to rupture (hour)	Number of specimen	Institute
600	500	36.8	127.7	S0609-2	PNC
	450	33.2	403.2	S0664-2	
	430	31.6	776.7	S0701-3	
	430	31.6	1,203.3	S0617-4	
	400	29.4	813.2	S0736-4	
	400	29.4	1,260.0	S0633-1	
	370	27.2	2,737.3	S0705-2	
650	380	28.0	105	S0736-2	KOBE
	350	25.7	191.2	S0617-2	PNC
	330	24.3	220	S0701-4	} KOBE
	260	19.1	1,540	S0736-3	
	200	14.7	4,012	S0742-2	
700	300	22.1	48.5	S0730-3	SUMITOMO
	230	16.9	272.7	S0701-2	PNC
	200	14.7	369.3	S0705-2	SUMITOMO
	160	11.8	1,443.2	S0705-3	PNC
	130	9.6	1,156.0	S0742-4	SUMITOMO
	90	6.6	3,311.0	S0617-1	"
750	160	11.8	150	S0742-1	} KOBE
	130	9.6	264	S0730-2	
	100	7.4	1,002	S0664-4	
	70	5.1	1,840	S0742-3	
800	130	9.6	61.8	S0705-4	} PNC
	80	5.9	299.5	S0730-4	
	50	3.7	700.0	S0609-1	
	50	3.7	637.8	S0705-1	
	50	3.7	794.8	S0736-1	

Table 13 Results of creep rupture tests under internal pressure for Joyo Mk-II cladding S<sub>2</sub>.

Temperature (°C)	Pressure (kg/cm <sup>2</sup> )	Hoop stress (kg/mm <sup>2</sup> )	Time to rupture (hour)	Number of specimen	Institute
650	320	23.5	328.0	S0026-1	PNC
700	300	22.0	58.8	S0029-1	SUMITOMO
	210	15.4	601.8	S0014-1	PNC
	200	14.7	451.2	S0107-1	SUMITOMO
	130	9.6	1231.0	S0026-2	
	90	6.6	3479.0	S0117-3	
750	200	14.7	40	S0129-1	KOBE
	160	11.8	190	S0146-1	
	100	7.4	898	S0107-2	
	70	5.1	1630	S0117-1	
800	150	11.0	38.5	S0151-1	PNC
	100	7.4	196.8	S0117-2	
	80	5.9	672.8	S0146-1	
	80	5.9	348.0	S0114-2	
	50	3.7	892.3	S0026-3	
	50	3.7	700.0	S0151-2	



Table 14 Results of creep tests under uniaxial tension for Monju claddings.

Cladding maker	Temperature (°C)	Stress (kg/mm <sup>2</sup> )	Minimum creep rate (%/h)	Number of specimen	Institute	Time to rupture (h)
K	700°C	12.0	$9.3 \times 10^{-3}$	K3106-12	KOBE	226.5
		7.0	$1.1 \times 10^{-3}$	K3104-12	"	860.0
		7.0	$9.90 \times 10^{-4}$	K3121-12	NRIM	discontinued (940)
		7.0	$1.20 \times 10^{-3}$	K3120-12	"	discontinued (824)
		4.0	$3.6 \times 10^{-4}$	K3105-12	KOBE	3562.0
		2.0	$1.0 \times 10^{-4}$	K3111-12	"	discontinued (2636.0)
Si	700°C	12.0	$1.6 \times 10^{-3}$	S3250-12	KOBE	835.5
		7.0	$4.8 \times 10^{-4}$	S3240-12	"	discontinued (2668.0)
		4.0	$1.4 \times 10^{-4}$	S3242-12	"	discontinued (3211.0)
		2.0	$1.0 \times 10^{-4}$	S3239-12	"	discontinued (2814.0)

Table 15 Results of creep tests under uniaxial tension for Joyo Mk-II claddings.

Cladding maker	Temperature (°C)	Stress (kg/mm <sup>2</sup> )	Minimum creep rate (%/h)	Number of specimen	Institute	
K	650	12.0	$5.6 \times 10^{-4}$	K0129-9	SUMITOMO	discontinued (1010.0)
		7.0	$6.2 \times 10^{-5}$	K0197-9	"	discontinued (1010.0)
		7.0	$1.44 \times 10^{-4}$	K0121-9-1	NRIM	discontinued (1007.)
		4.0	$7.4 \times 10^{-5}$	K0194-9	SUMITOMO	discontinued (1010.0)
		3.63	$4.83 \times 10^{-5}$	K0117-9-1-1	NRIM	discontinued (1271.)
		2.0	$3.6 \times 10^{-5}$	K0117-9	SUMITOMO	discontinued (1010.0)
S <sub>1</sub>	650	12.0	$1.9 \times 10^{-4}$	S0701-9	SUMITOMO	discontinued (1010.0)
		7.0	$5.1 \times 10^{-5}$	S0664-9	"	discontinued (1010.0)
		4.0	$4.1 \times 10^{-5}$	S0617-9	"	discontinued (1010.0)
		7.0	$3.5 \times 10^{-5}$	S0705-9	"	discontinued (1010.0)

Table 16 Estimated values of stress obtained by first to fifth creep program.

(a) Rupture in 1,000 h

1,000 h		1 st	2 nd	3 rd	4 th	5 th
550°C	K	38.6	34.4	39.0	45.5	40.0
	S	31.9	28.5	33.3	37.2	41.3
600°C	K	29.1	27.1	28.0	24.8	22.6
	S	24.6	22.3	22.0	20.9	28.7
650°C	K	21.0	17.8	19.1	13.6	12.7
	S	17.8	16.2	13.5	11.8	19.1
700°C	K	14.3	12.0	12.0	7.4	7.2
	S	11.9	10.5	7.4	6.7	11.9

(b) Rupture in 3,000 h

3,000 h		1 st	2 nd	3 rd	4 th	5 th
550°C	K	34.7	31.8	35.1	32.2	28.7
	S	28.3	25.5	28.2	26.7	34.8
600°C	K	25.6	24.4	24.6	17.2	15.9
	S	21.0	17.2	17.7	14.7	23.4
650°C	K	17.9	16.8	16.3	9.2	8.8
	S	14.4	13.1	10.5	8.1	15.0
700°C	K	11.5	8.6	9.6	4.9	4.9
	S	9.1	7.5	5.1	4.5	8.8

(c) Rupture in 6,000 h

6,000 h		1 st	2 nd	3 rd	4 th	5 th
550°C	K	32.3	30.2	32.7	25.9	23.4
	S	26.1	23.7	25.3	21.7	31.1
600°C	K	23.5	22.7	22.7	13.7	12.8
	S	18.8	17.3	15.7	11.8	20.5
650°C	K	16.0	14.8	14.6	7.2	7.0
	S	12.5	11.2	8.7	6.4	12.7
700°C	K	9.8	6.6	8.2	3.8	3.8
	S	7.7	5.9	3.8	3.5	7.0

(d) Rupture in 10,000 h

10,000 h		1 st	2 nd	3 rd	4 th	5 th
550°C	K	30.7	29.0	31.1	22.1	20.0
	S	24.5	22.3	23.3	12.6	28.6
600°C	K	22.0	21.4	21.2	11.5	10.9
	S	17.3	15.9	14.1	10.0	18.5
650°C	K	14.7	13.4	13.4	6.0	5.9
	S	11.1	9.8	7.6	5.4	11.2
700°C	K	8.6	5.4	7.2	3.2	3.2
	S	6.8	5.0	3.0	2.9	6.0

(e) Rupture in 15,000 h

15,000 h		1 st	2 nd	3 rd	4 th	5 th
550°C	K	29.4	28.1	29.8	19.4	17.8
	S	23.2	21.2	21.8	16.4	26.7
600°C	K	20.8	20.4	20.2	10.1	9.5
	S	16.1	14.8	13.0	8.8	17.0
650°C	K	13.7	12.2	12.5	5.2	5.1
	S	10.1	8.8	6.7	4.7	10.1
700°C	K	7.7	4.7	6.4	2.7	2.8
	S	6.2	4.4	2.3	2.5	5.1

(f) Rupture in 20,000 h

20,000 h		1 st	2 nd	3 rd	4 th	5 th
550°C	K	28.5	27.4	28.9	17.8	16.3
	S	22.3	20.5	20.7	15.0	25.4
600°C	K	20.0	19.6	19.4	9.2	8.7
	S	15.3	14.1	12.2	8.0	16.0
650°C	K	13.0	11.4	11.9	4.7	4.7
	S	9.5	8.1	6.1	4.3	9.3
700°C	K	7.0	4.3	5.9	2.4	2.5
	S	5.8	4.0	1.7	2.3	4.6

(g) Rupture in 30,000 h

30,000 h		1 st	2 nd	3 rd	4 th	5 th
550°C	K	27.2	26.5	27.7	15.6	14.4
	S	21.1	19.4	19.3	13.3	23.6
600°C	K	18.9	18.6	18.4	8.0	7.7
	S	14.1	13.0	11.1	7.1	14.7
650°C	K	12.1	10.2	11.0	4.1	4.1
	S	8.6	7.1	5.4	3.7	8.3
700°C	K	6.0	3.8	5.0	2.1	2.2
	S	5.3	3.5	—	—	3.8

Table 17 Conditions of claddings in Joyo and Monju.

		Fluence ( $E > 0.1 \text{ Mev}$ ) ( $n/cm^2$ )	nominal	Temperature ( $^{\circ}\text{C}$ )		core residence time		
				hot spot		days/ cycle	cycle	Time (hr)
				nominal	over power			
Joyo	50M	$1.9 \times 10^{22}$ ( $3.5 \times 10^{22}$ )	500.4 (Internal)	541.5 (Internal)	-	45	3 (5)	3,240 (5,400)
	75M	$6.9 \times 10^{22}$	558 (center)	620 (center)	638 (center)	45	6(+3)	6,480 (9,720)
	Mk-II	$8.5 \times 10^{22}$	603 (center)	650 (center)	673 (center)	45	7	7,560
Monju	First	$17.0 \times 10^{22}$	$\sim 620$	675 (center)	-	123	4	11,808
	Final	$26.0 \times 10^{22}$	$\sim 620$	675 (center)	-	148	5	17,760

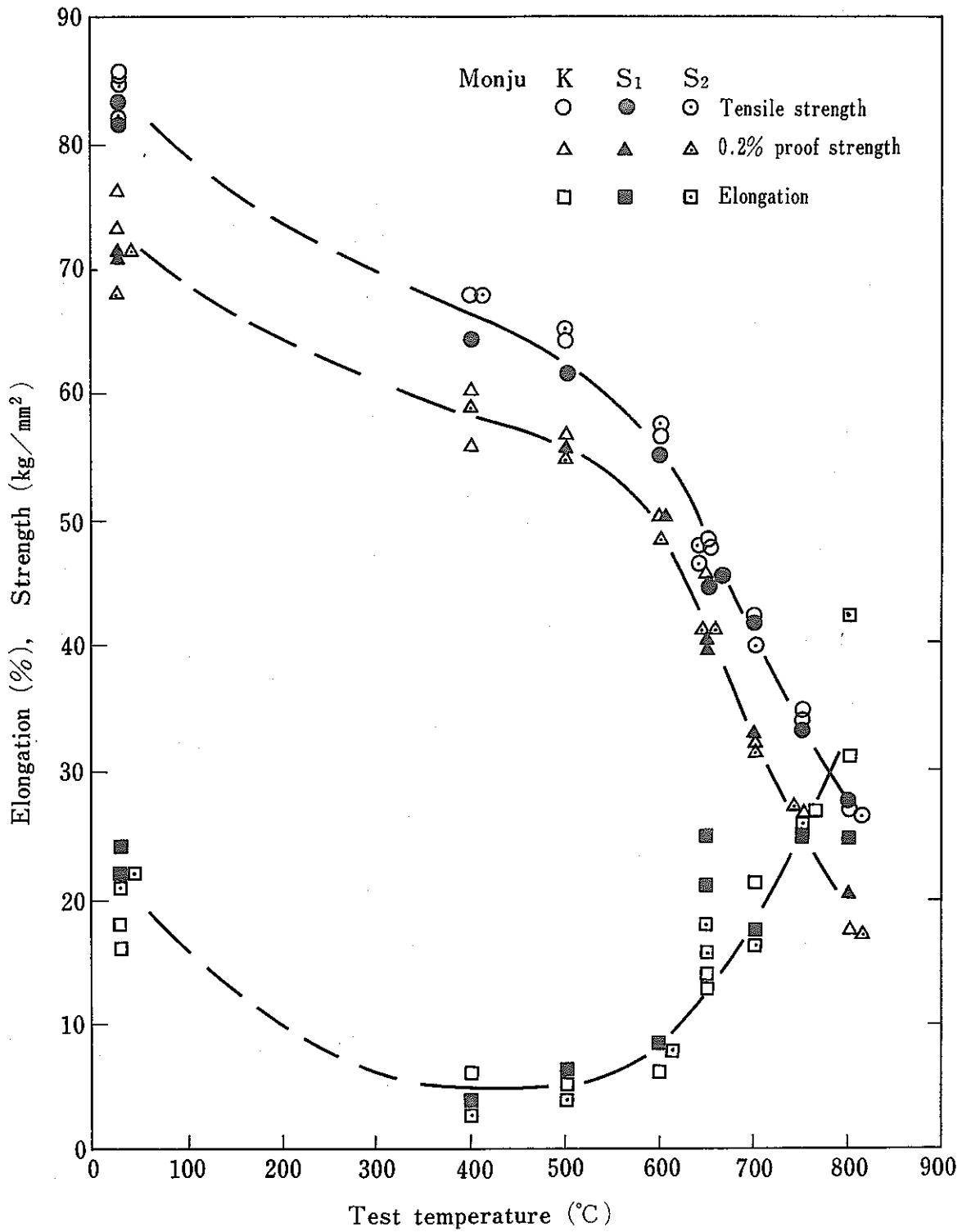


Fig.1 Tensile properties for Monju claddings.

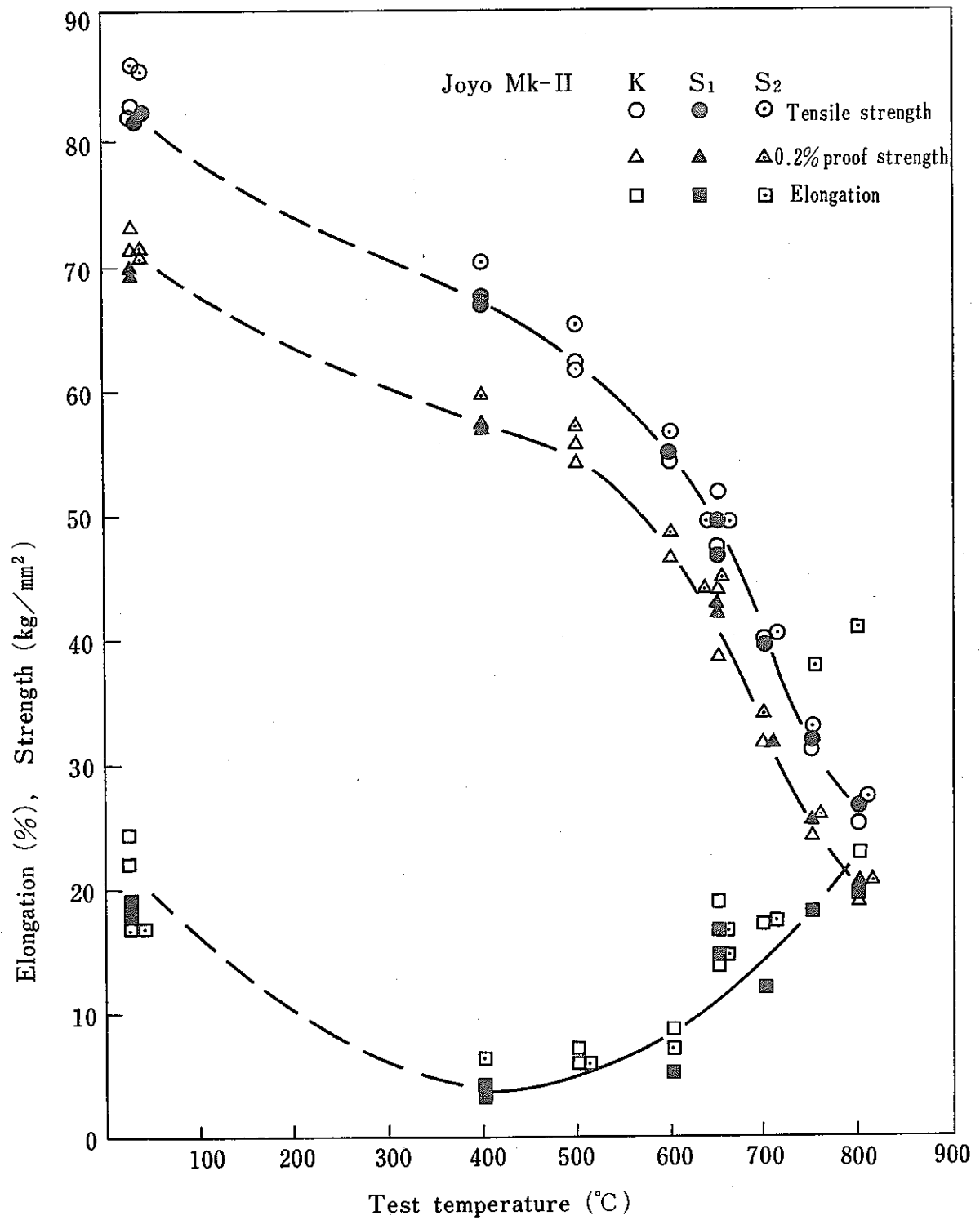
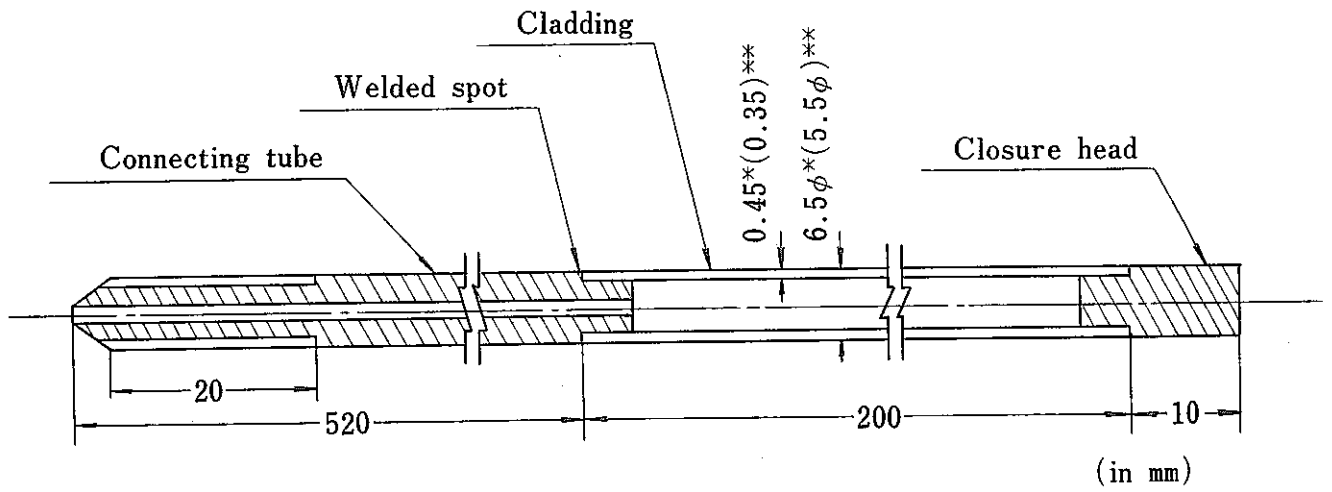
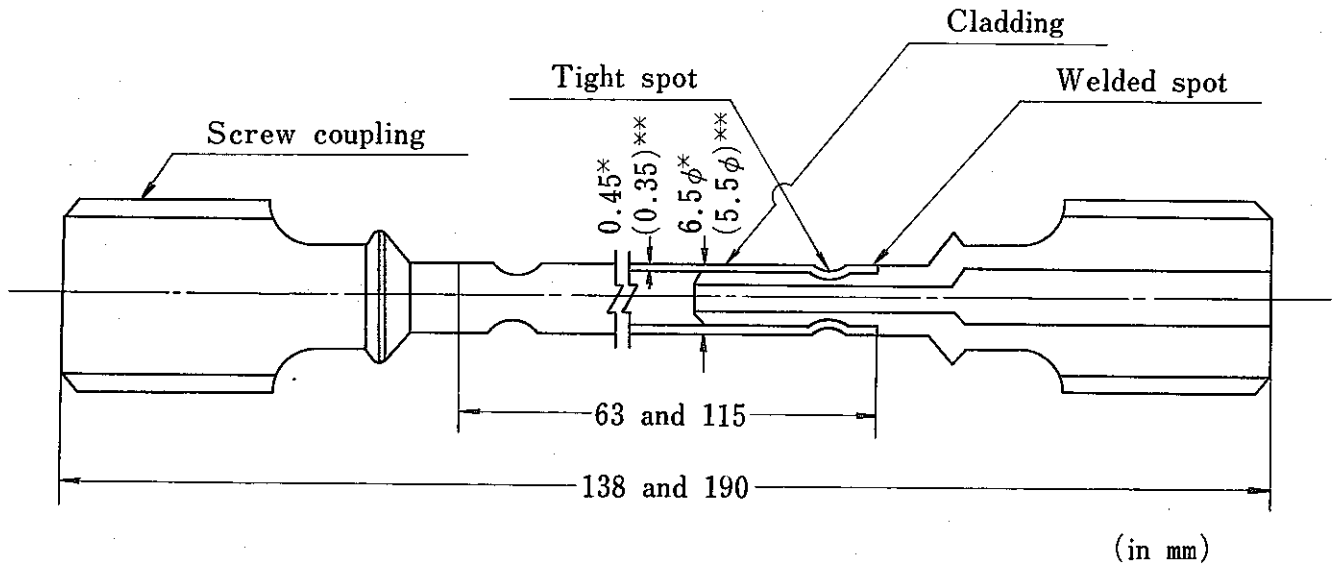


Fig.2 Tensile properties for Joyo Mk-II Claddings.



(1) Tubular creep-rupture specimen under internal pressure



(2) Tubular creep specimen under uniaxial tension

Fig. 3 Assembly of Specimens

(\* Monju cladding)  
 (\*\* Joyo Mk-II cladding)

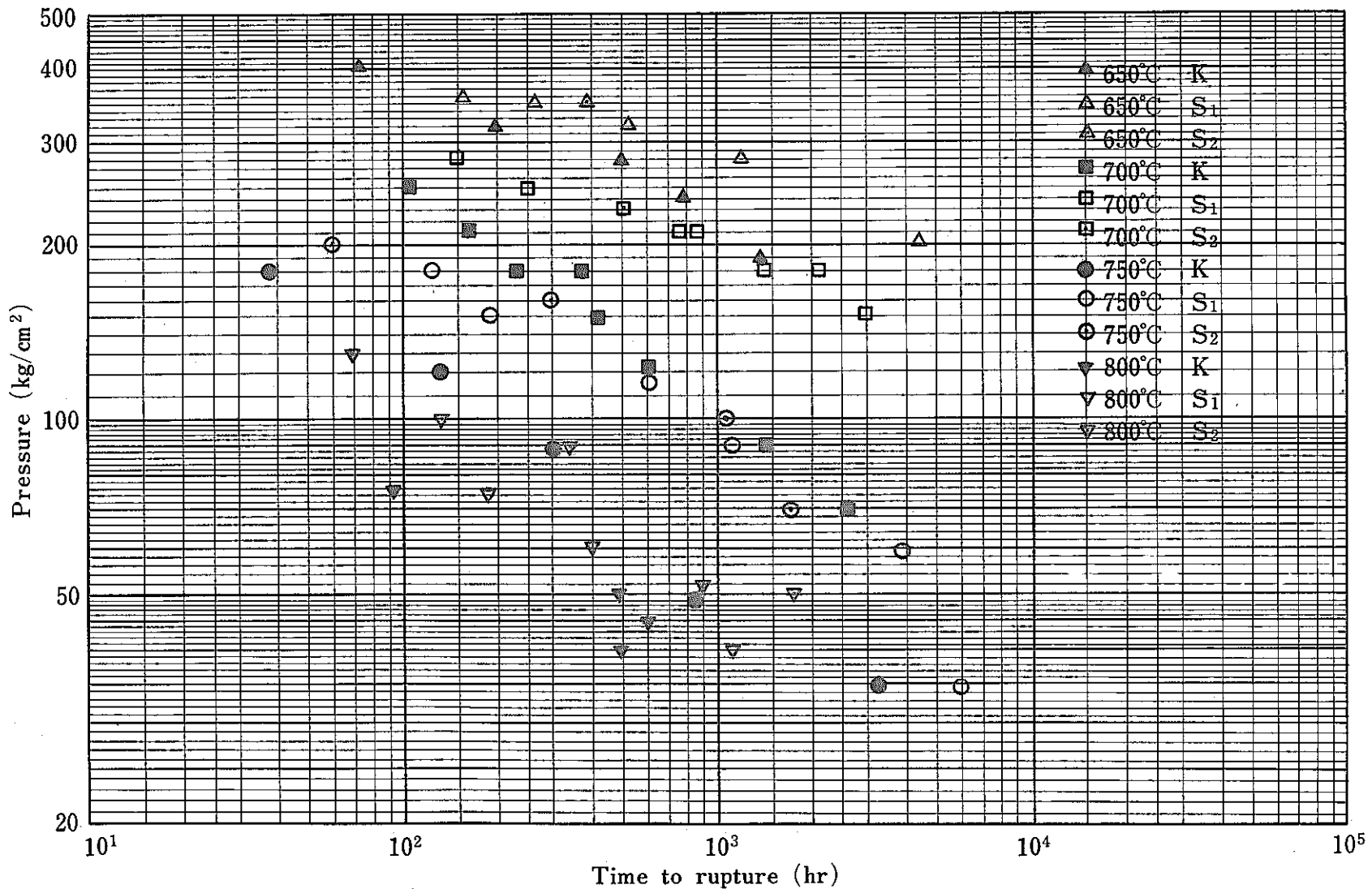


Fig. 4 Creep rupture data under internal pressure for Monju claddings.



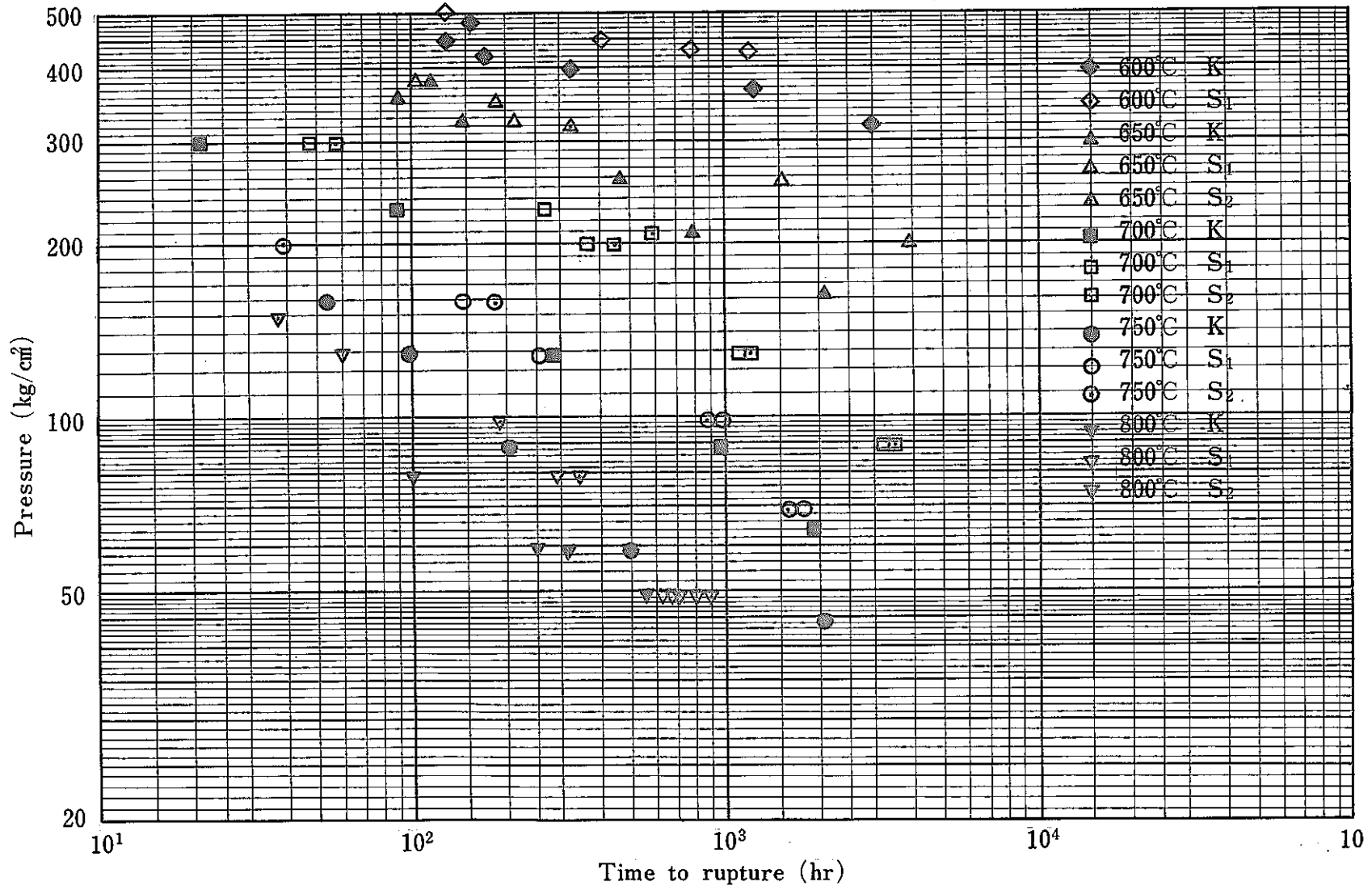


Fig. 5 Creep rupture data under internal pressure for Joyo Mk-II claddings.

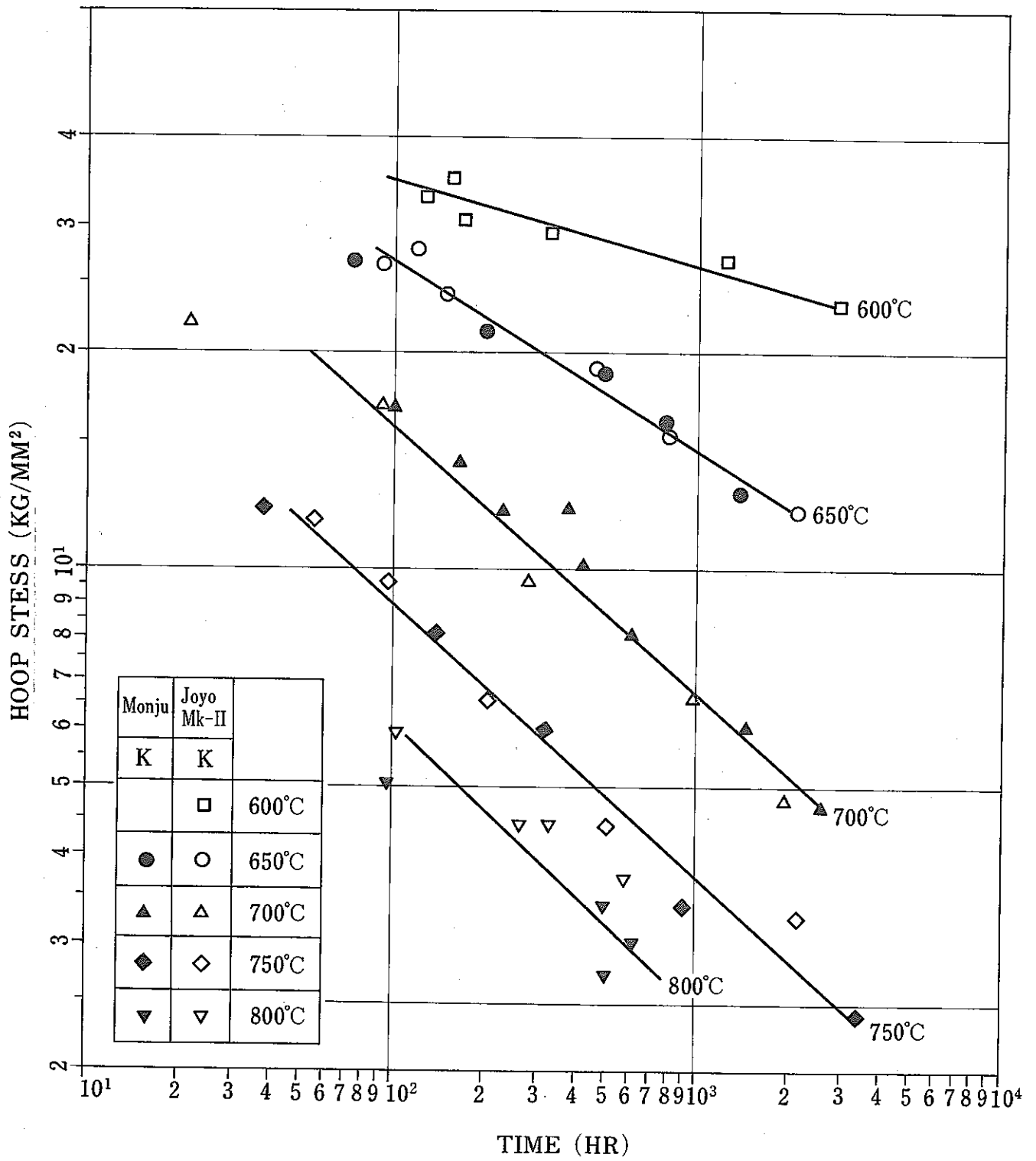


Fig. 6 Creep rupture data under internal pressure for Monju and Joyo Mk-II cladding K.

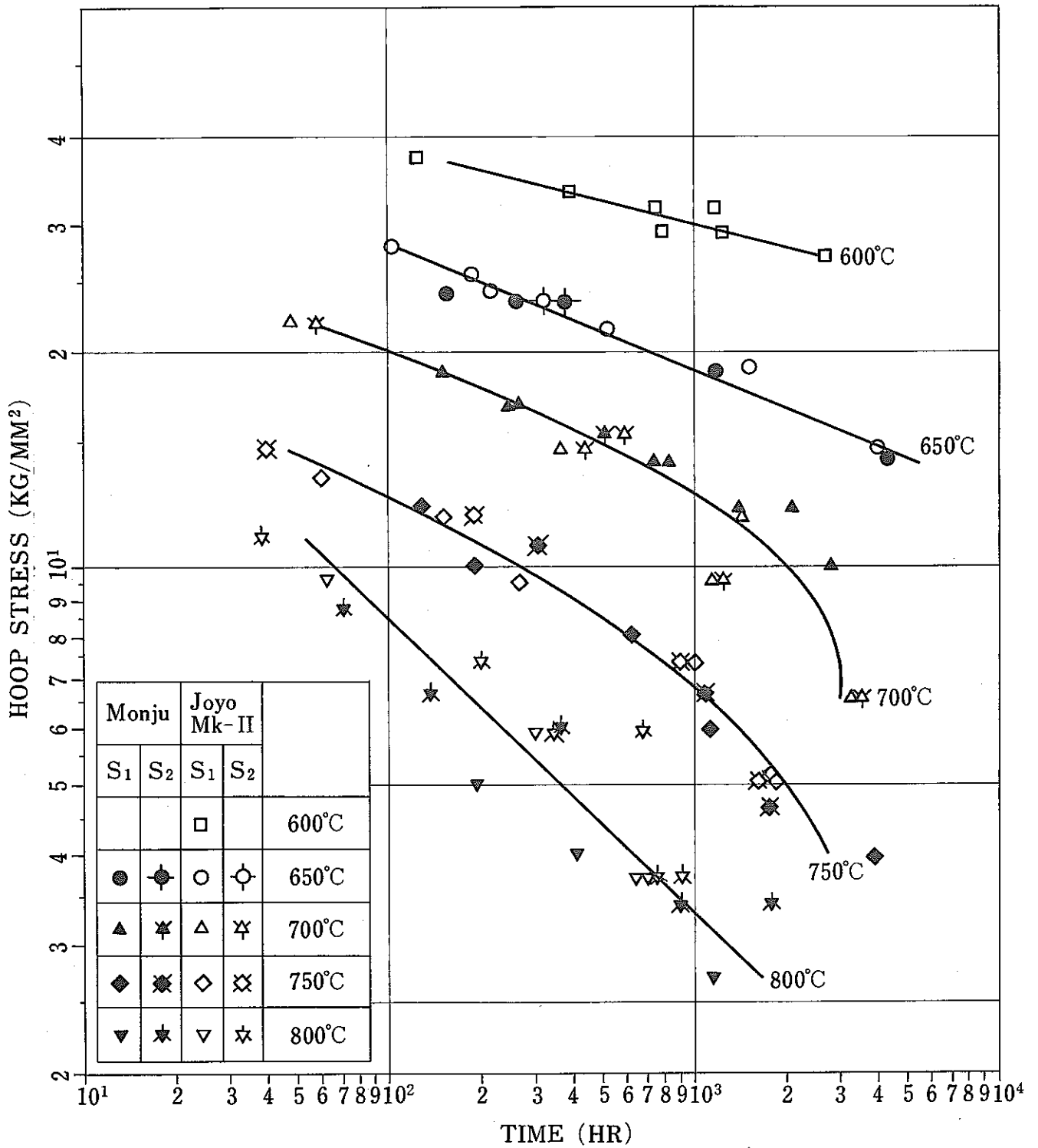


Fig. 7 Creep rupture data under internal pressure for Monju and Joyo Mk-II cladding S<sub>1</sub> and S<sub>2</sub>.

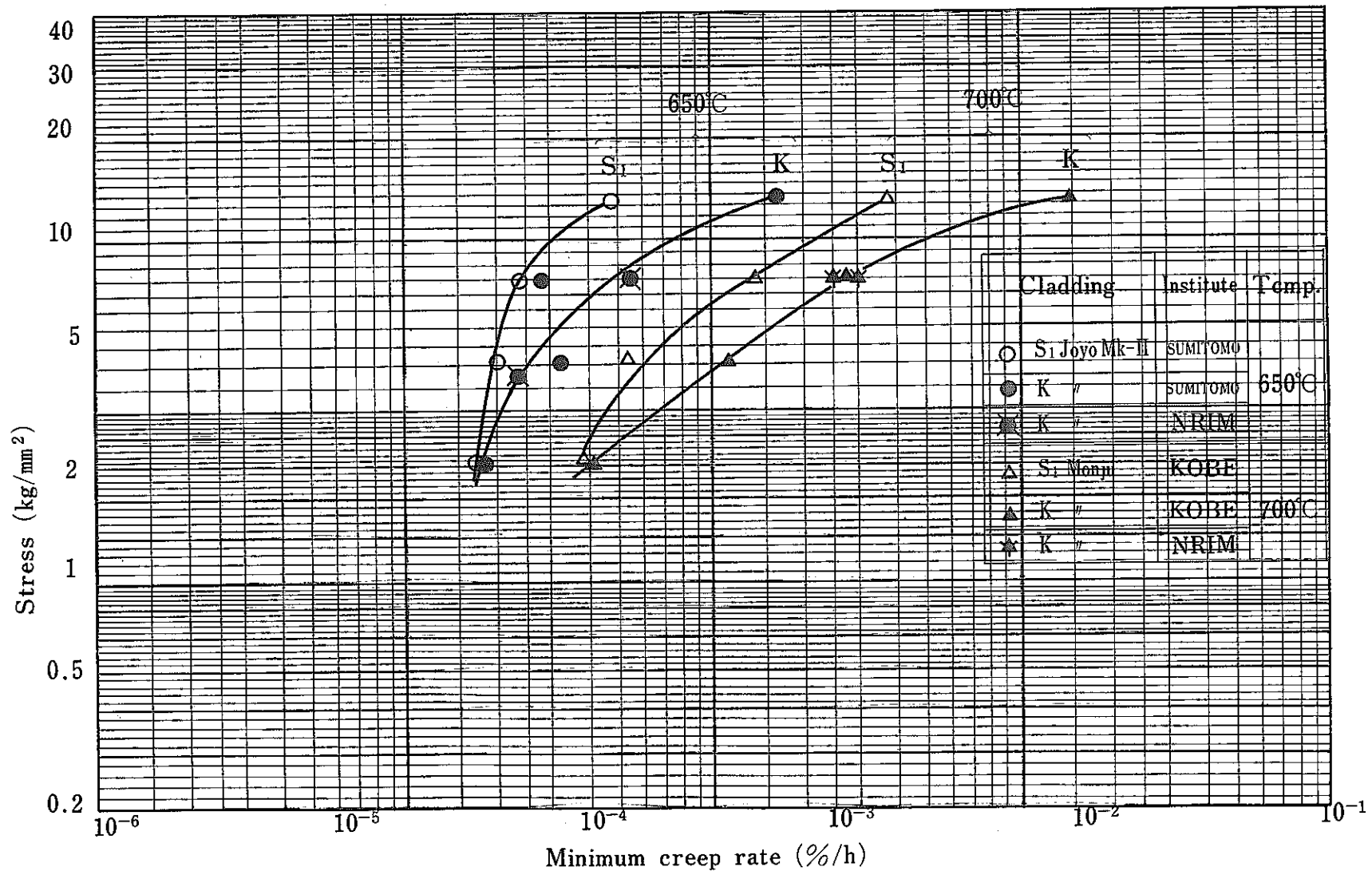


Fig. 8 Relations of stress versus minimum creep rate under uniaxial tension for cladding K and cladding S<sub>1</sub>.

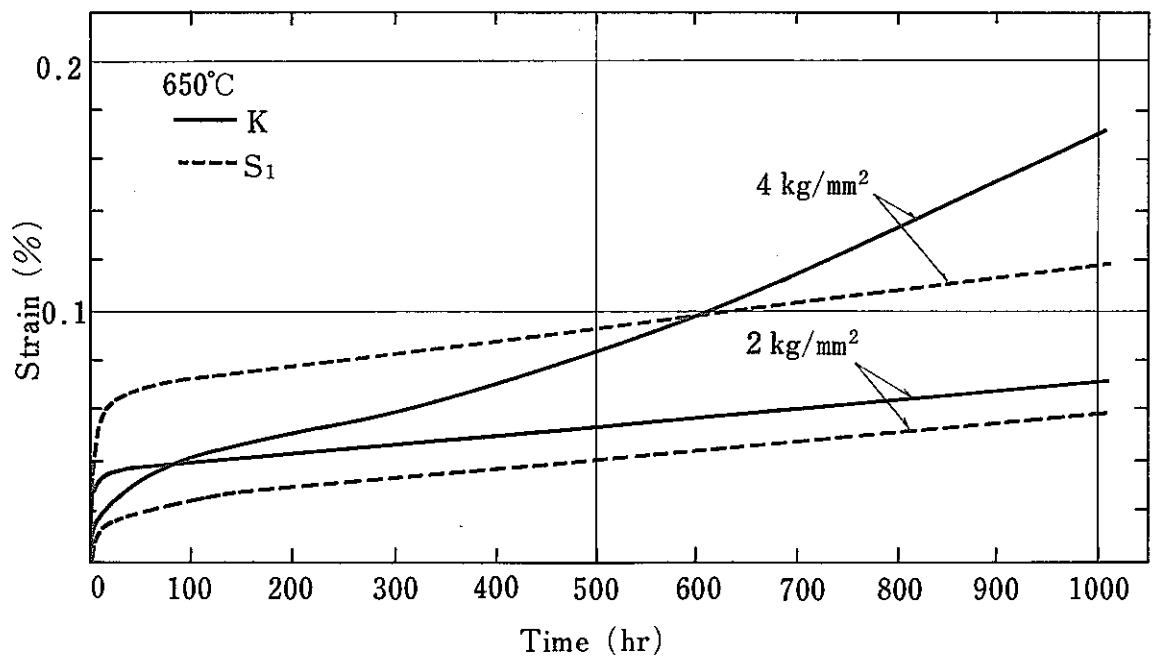
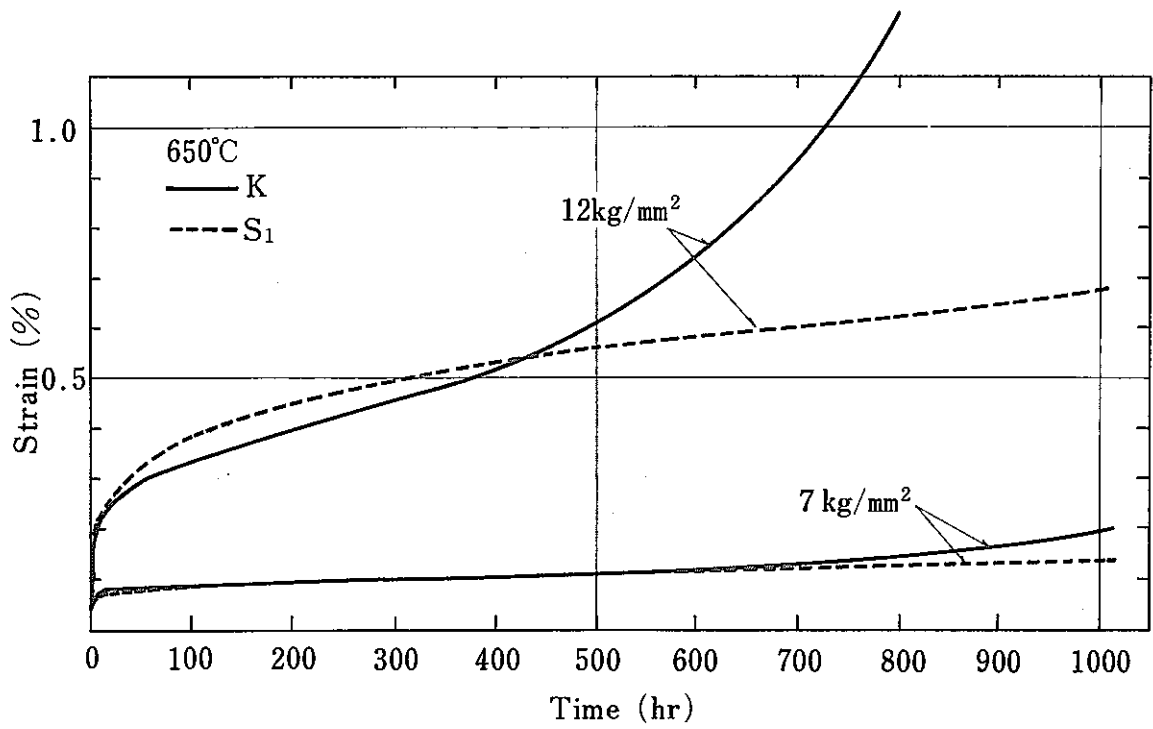


Fig. 9 Creep curves under uniaxial tension for Joyo Mk-II claddings.

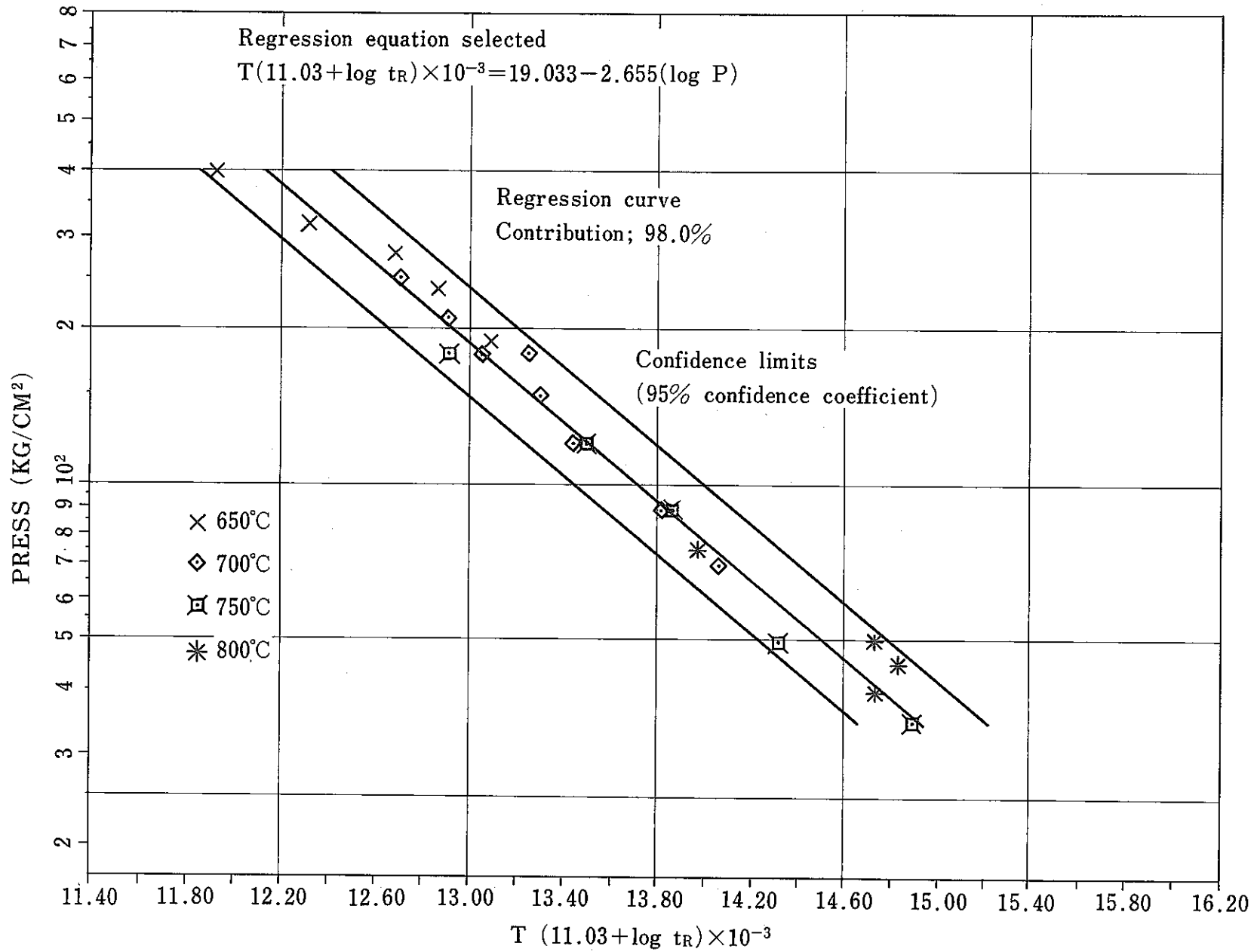


Fig.10 Regression curve and confidence interval on master rupture data under internal pressure for Monju cladding K.

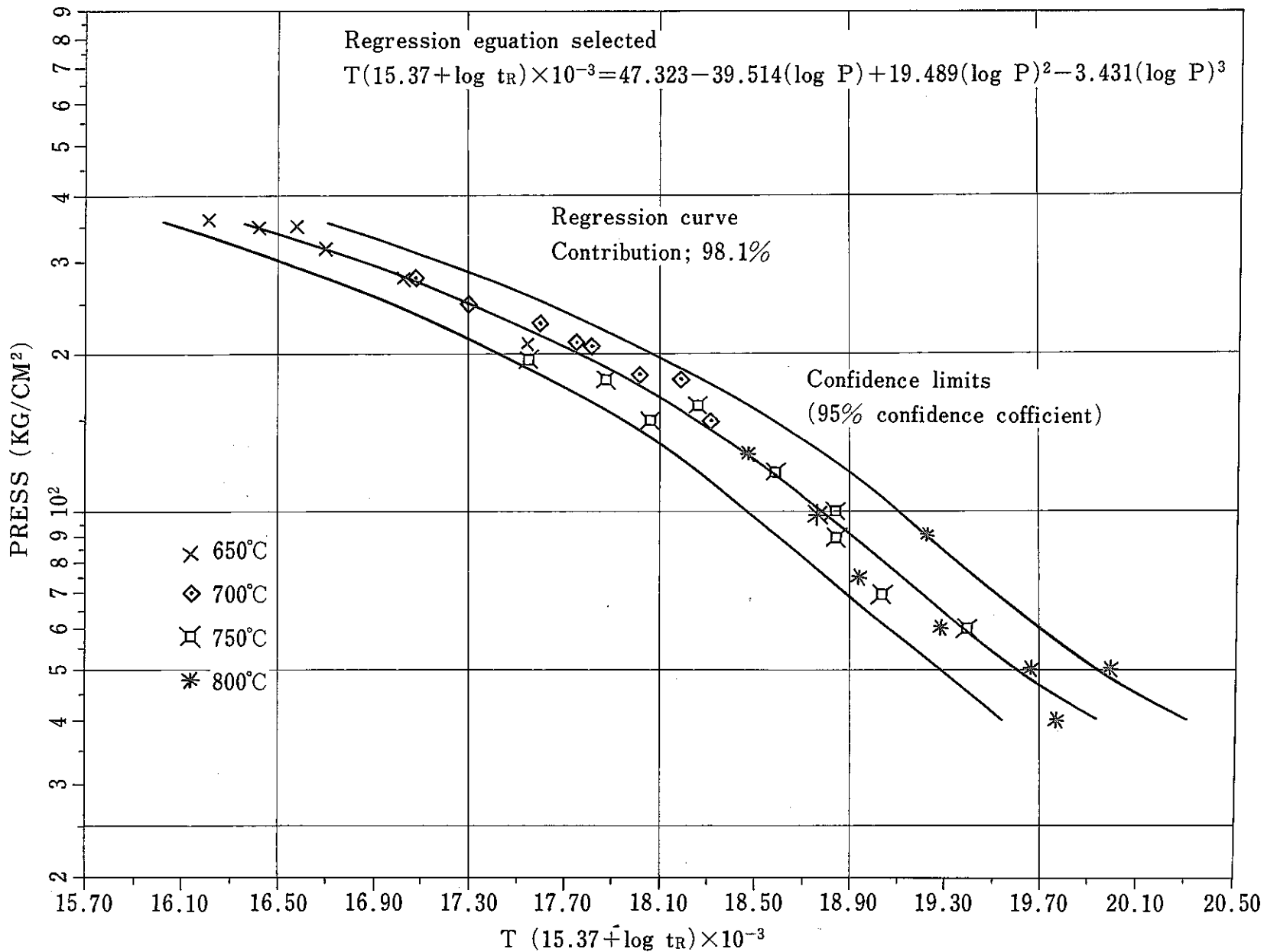


Fig. 11 Regression curve and confidence interval on master rupture data under internal pressure for Monju cladding S<sub>1</sub> and S<sub>2</sub>.

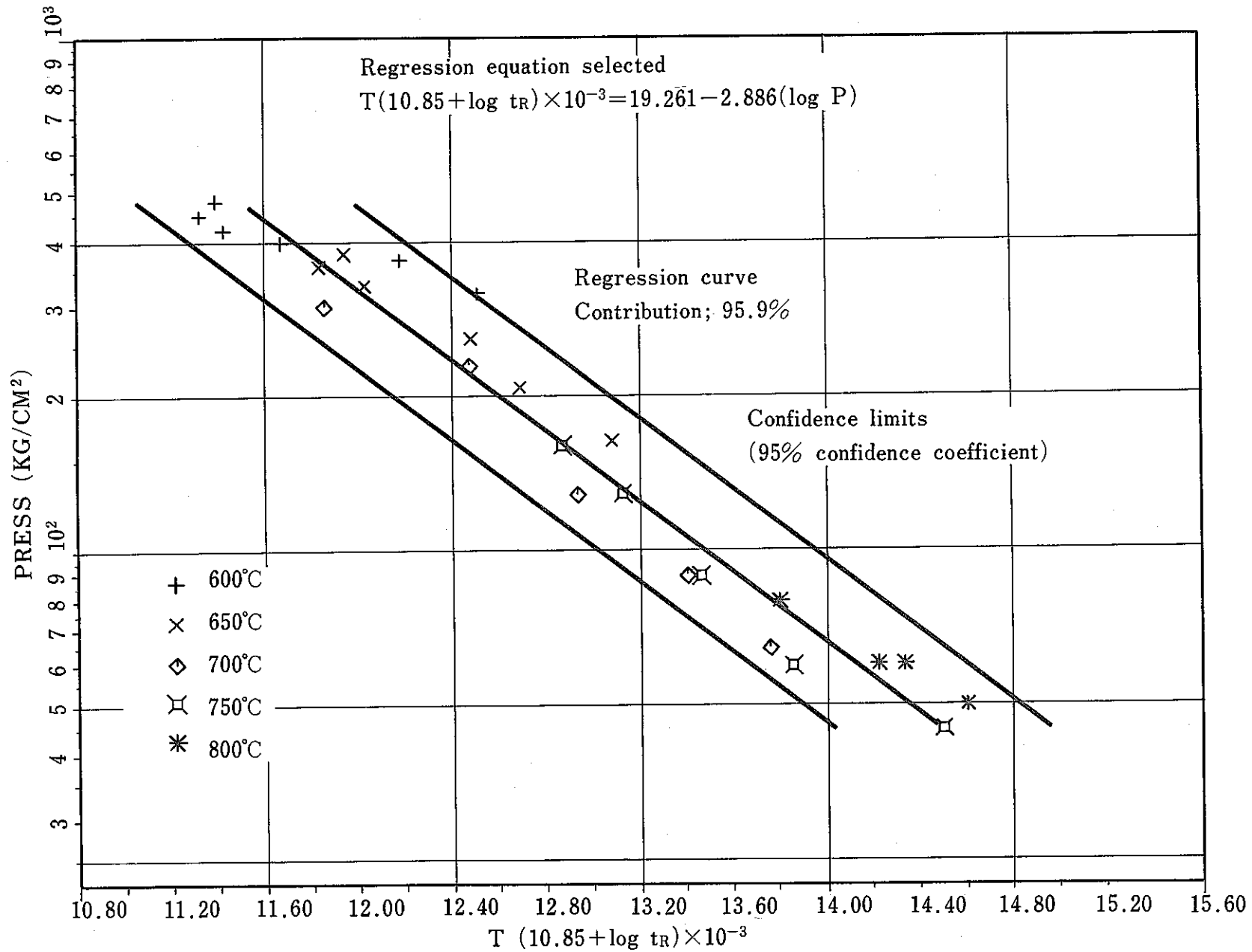


Fig. 12 Regression curve and confidence interval on master rupture data under internal pressure for Joyo Mk-II cladding K.



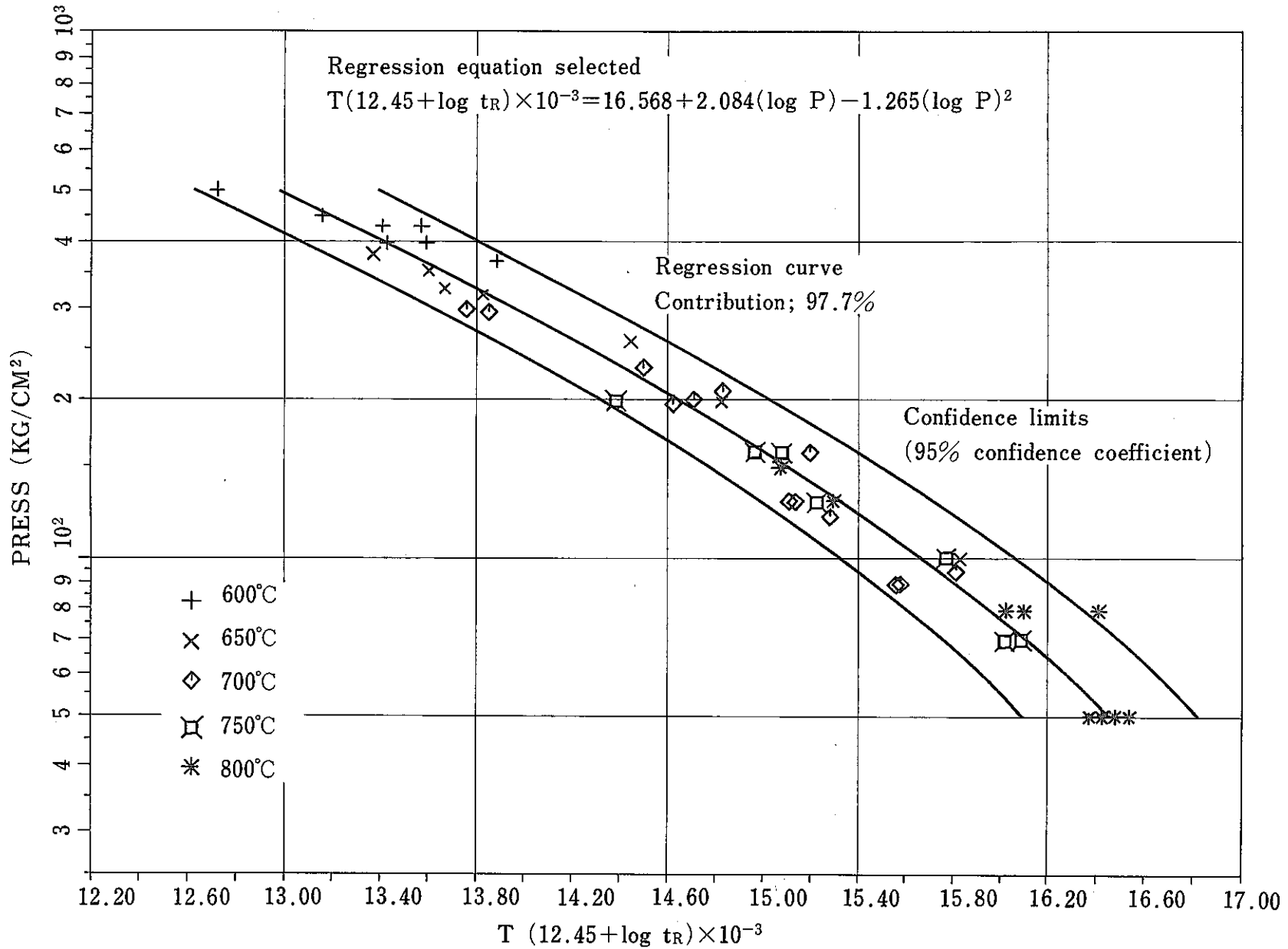


Fig.13 Regression curve and confidence interval on master rupture data under internal pressure for Joyo Mk-II cladding S<sub>1</sub> and S<sub>2</sub>.

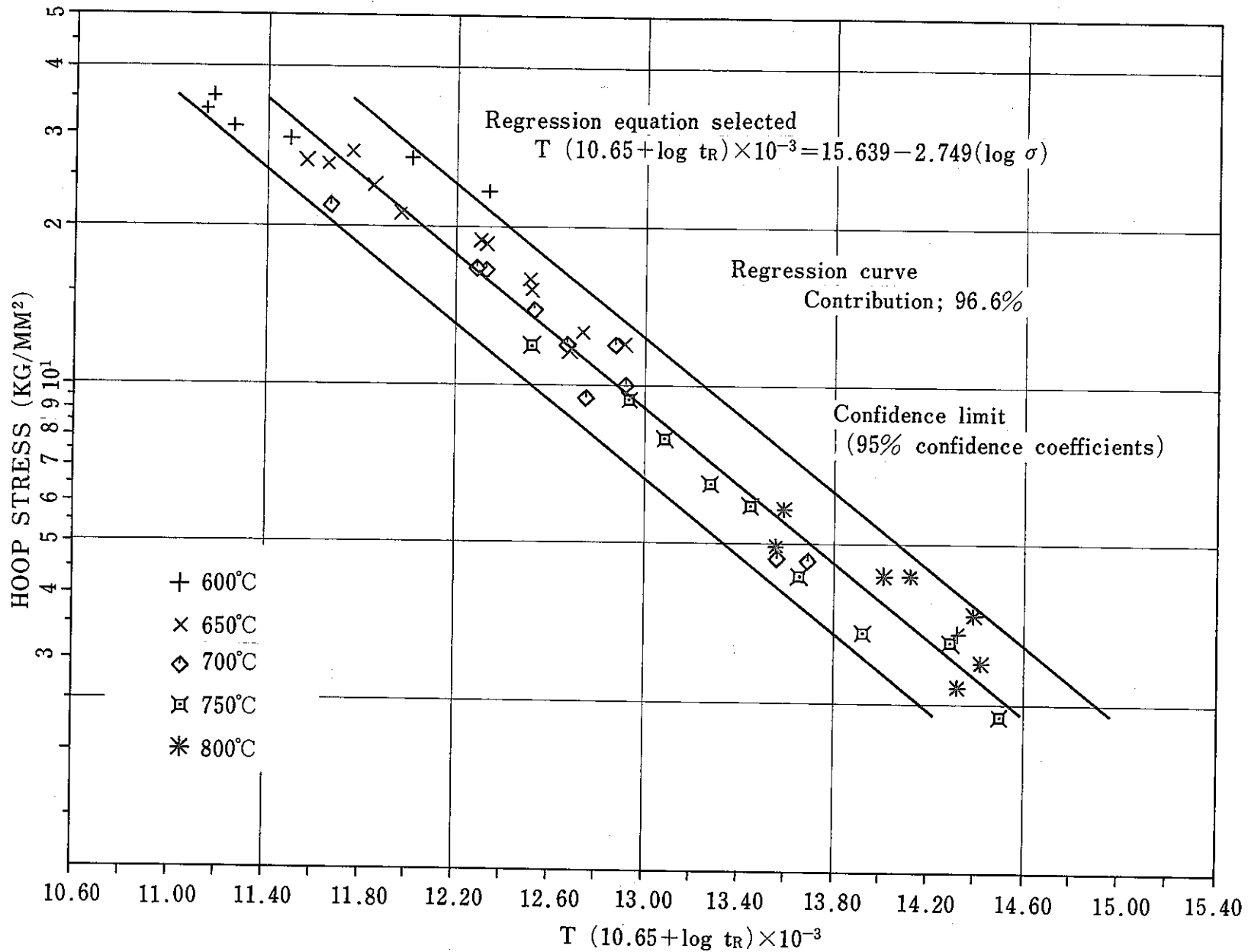


Fig.14 Regression curve and confidence interval on master rupture data under internal pressure for Monju and Joyo Mk-II claddings K.

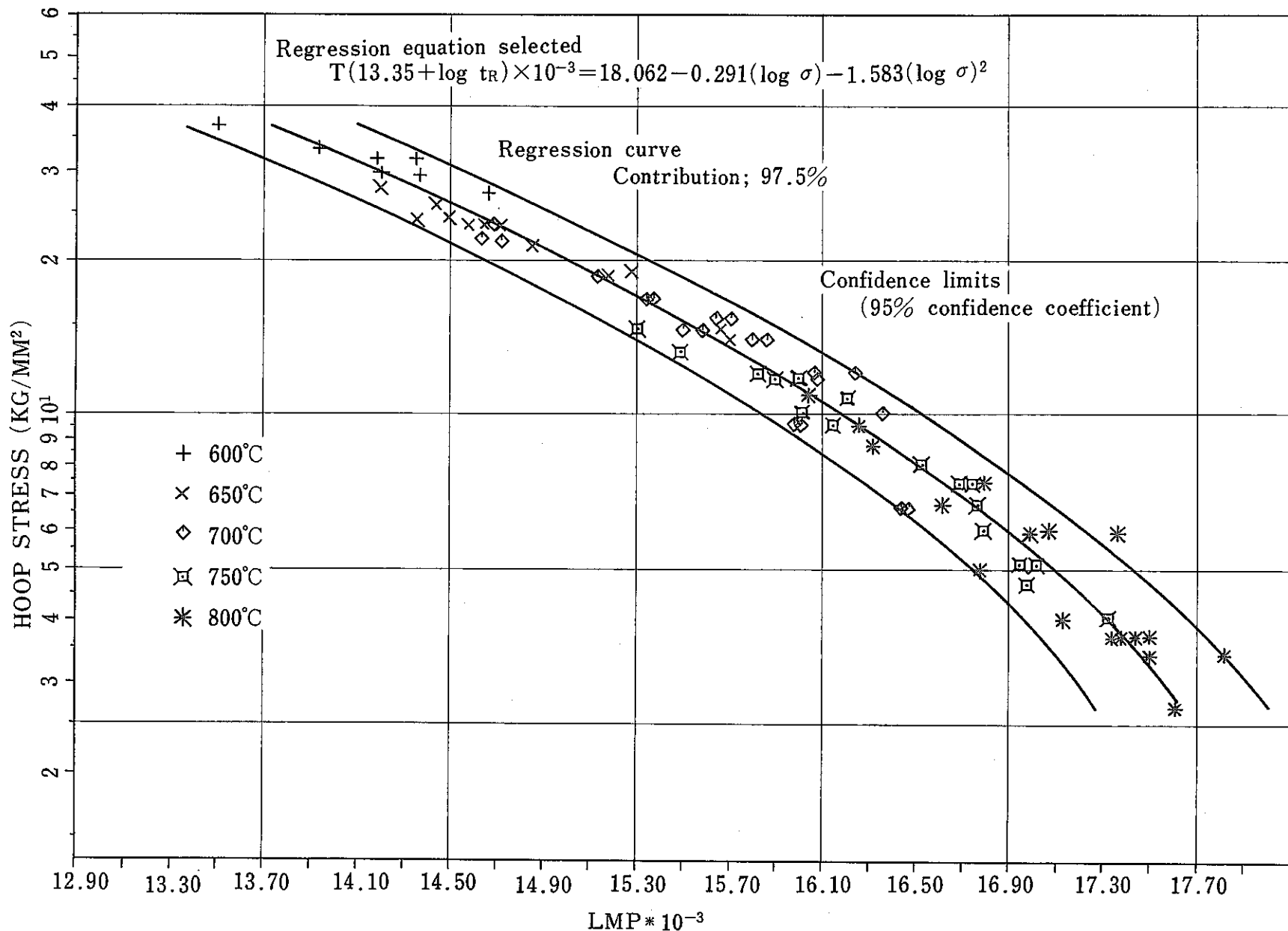


Fig. 15 Regression curve and confidence interval on master rupture data under internal pressure for Monju and Joyo Mk-II cladding S<sub>1</sub> and S<sub>2</sub>.

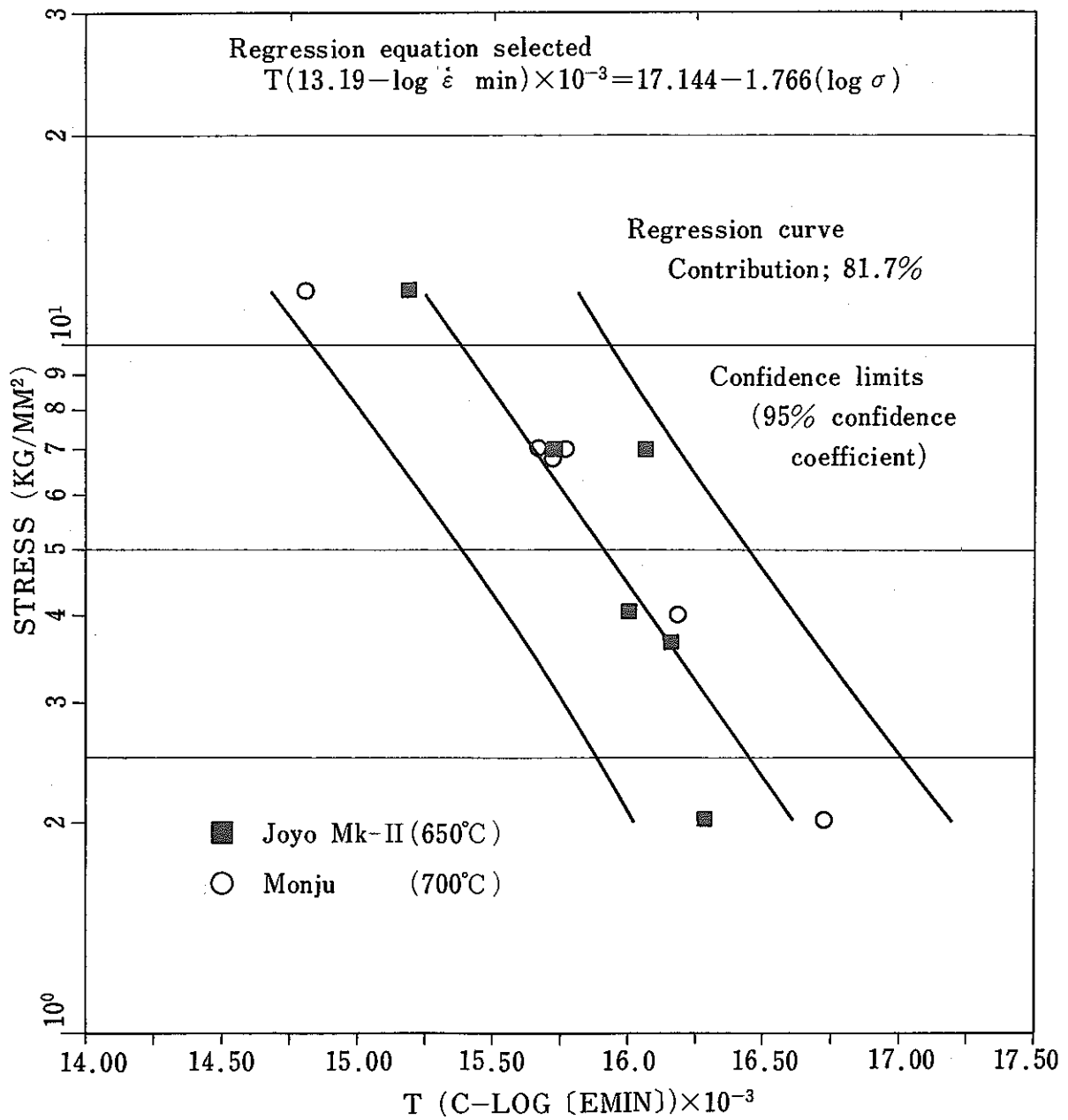


Fig. 16 Regression curve and confidence interval on master minimum creep rate data under uniaxial tension for Monju and Joyo Mk-II claddings K.

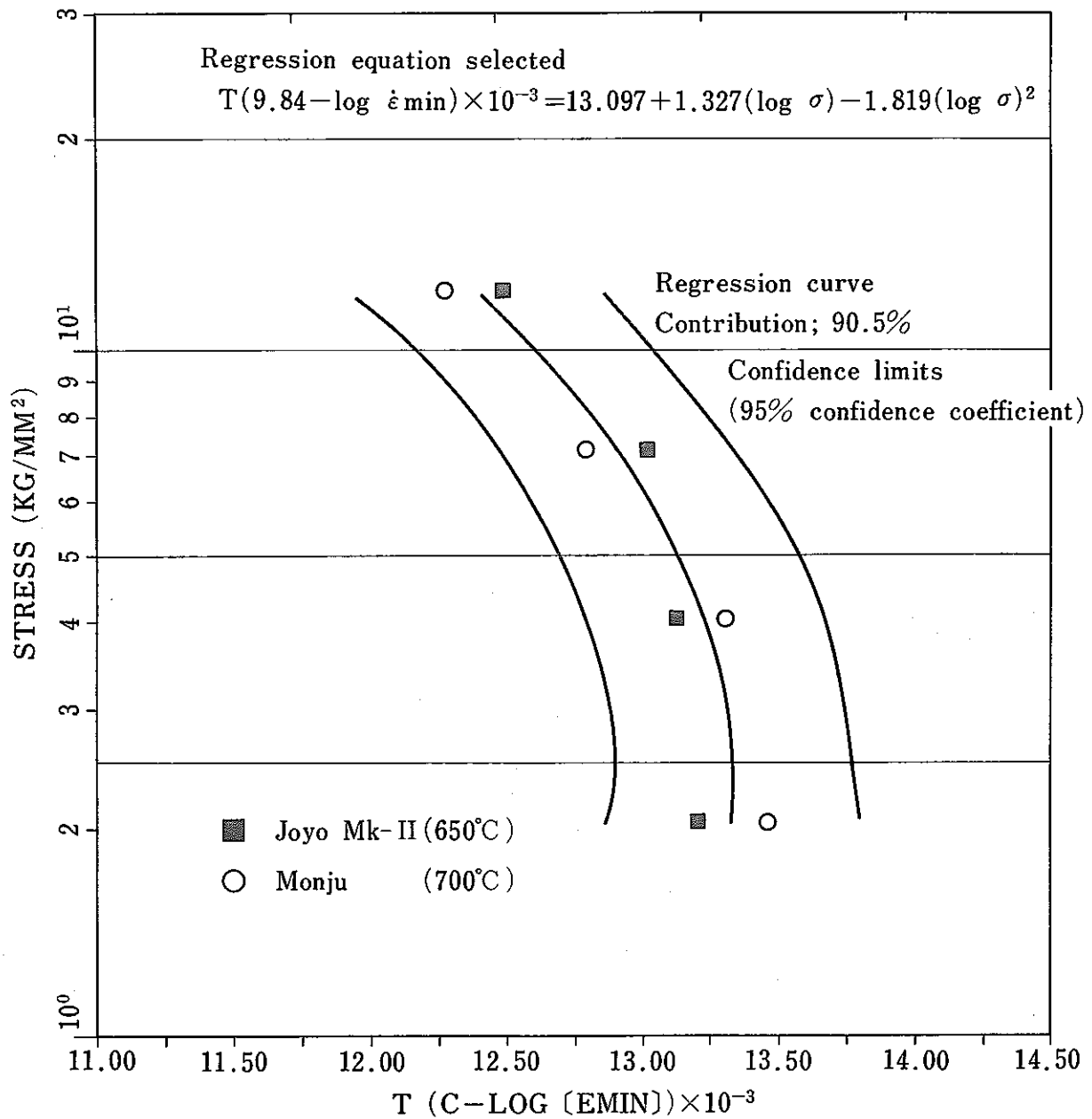


Fig. 17 Regression curve and confidence interval on master minimum creep rate data under uniaxial tension for Monju and Joyo Mk-II claddings S<sub>1</sub>.

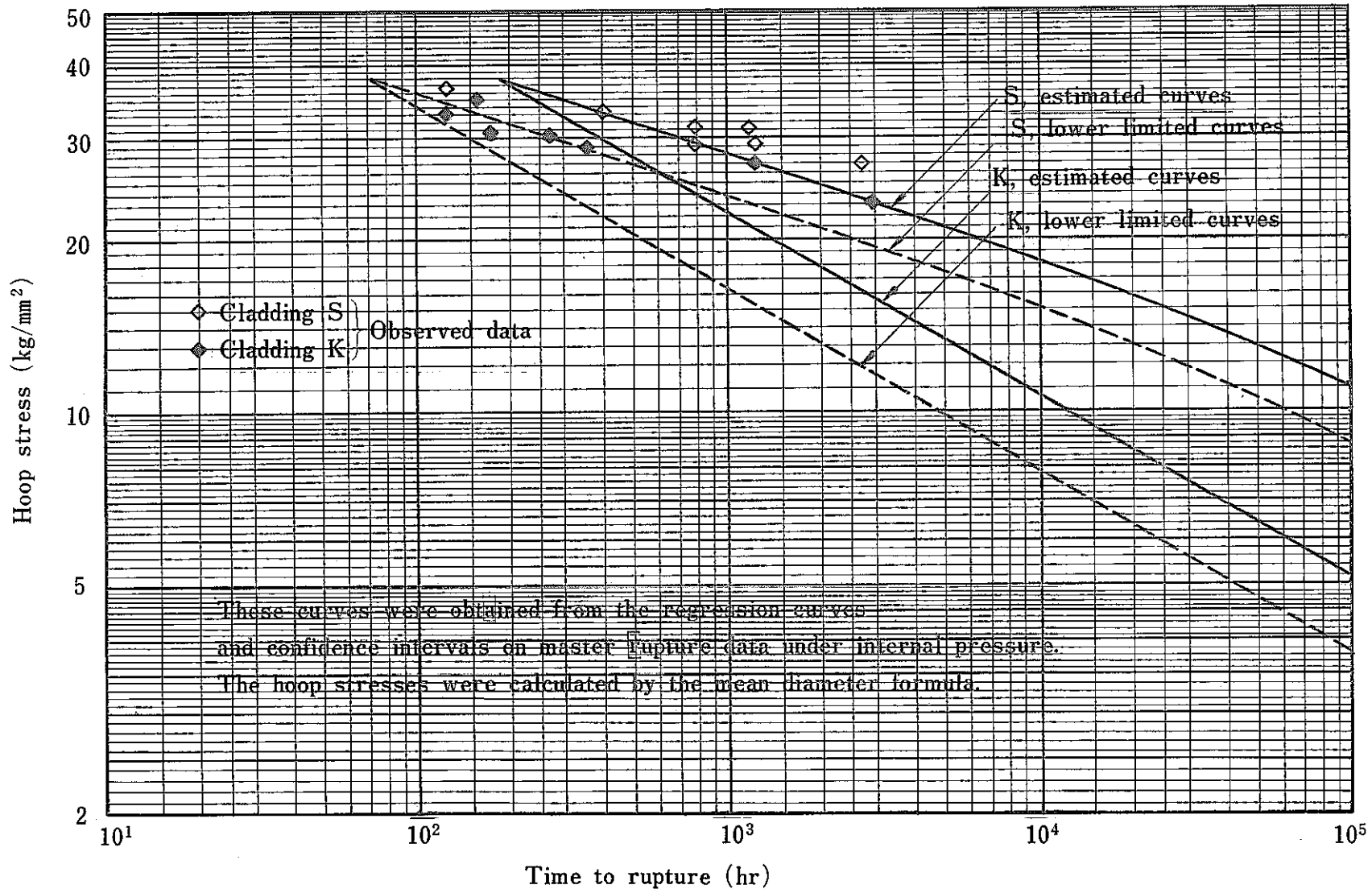


Fig. 18 Estimated creep rupture curves for claddings K and S at 600°C.

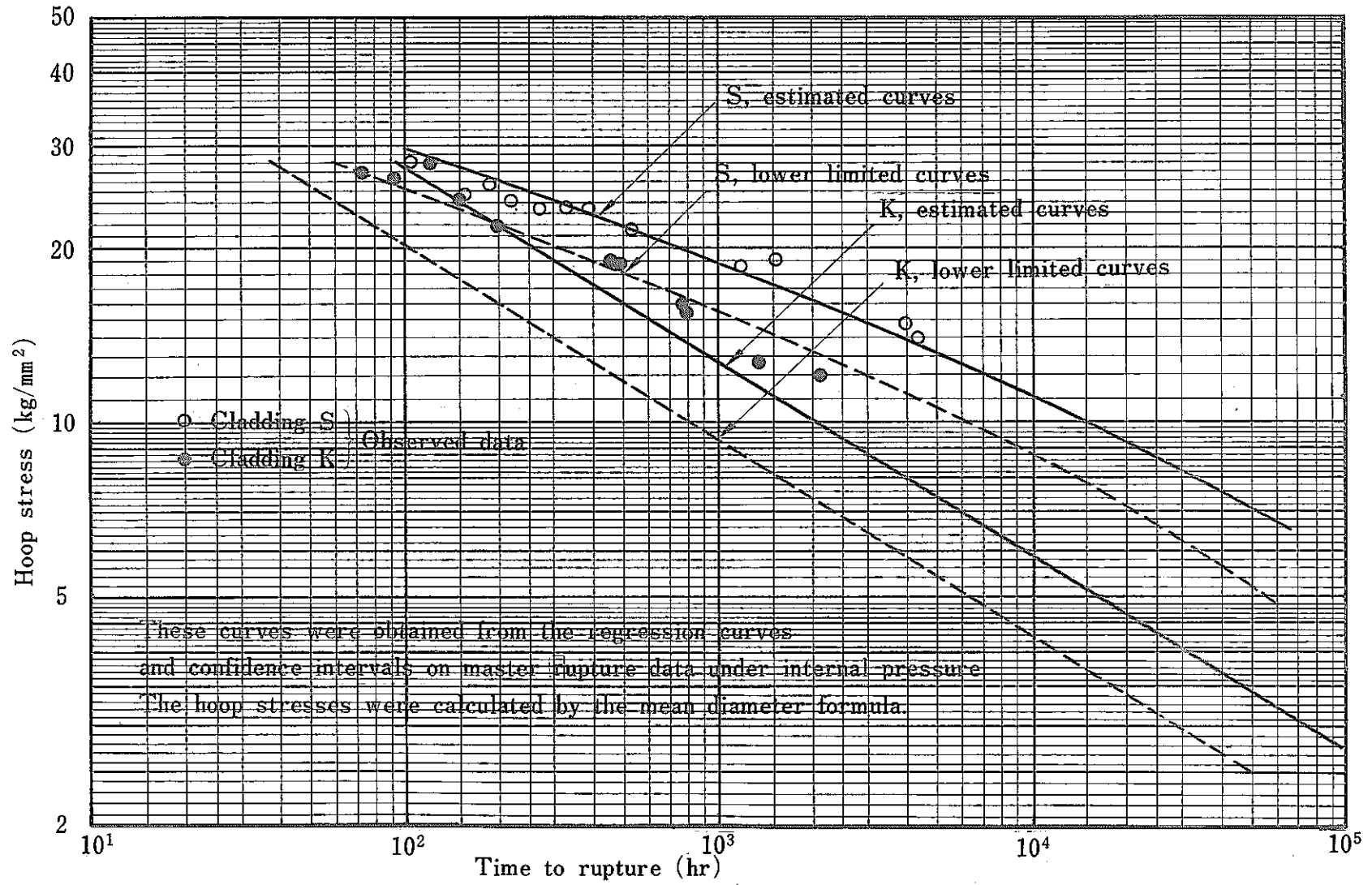


Fig.19 Estimated creep rupture curves for claddings K and S at 650°C.

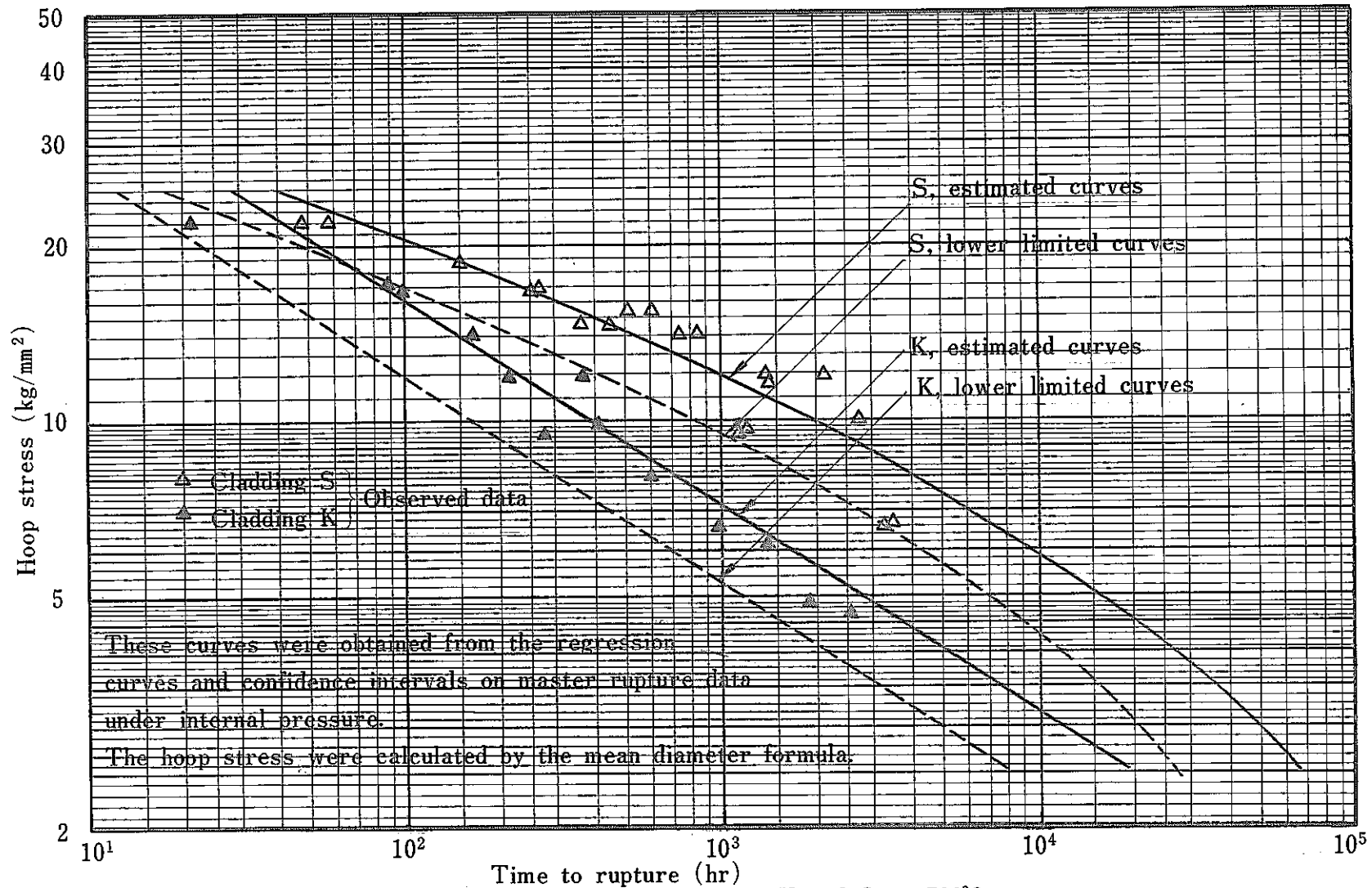


Fig. 20 Estimated creep rupture curves for claddings K and S at 700°C.



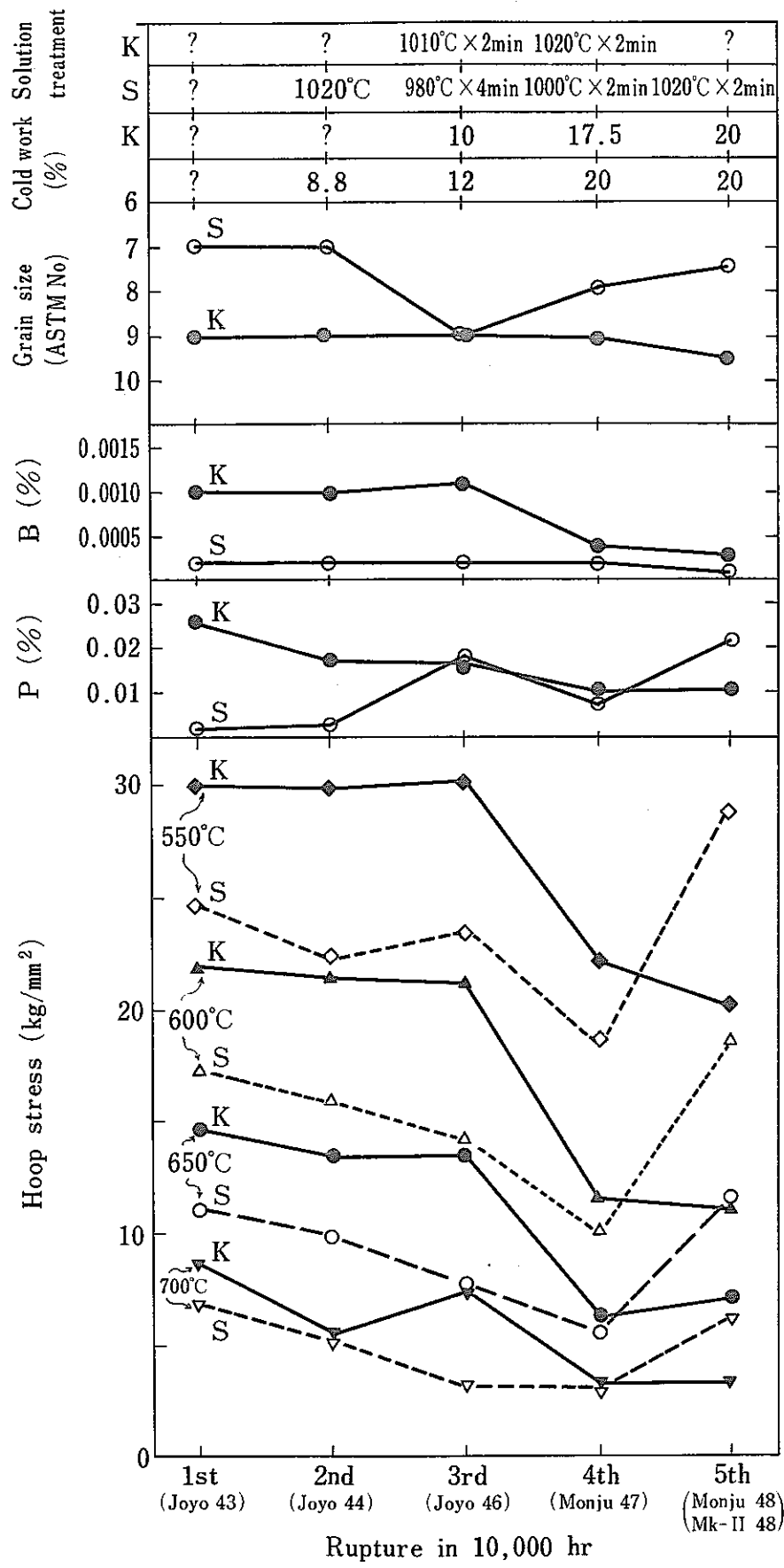
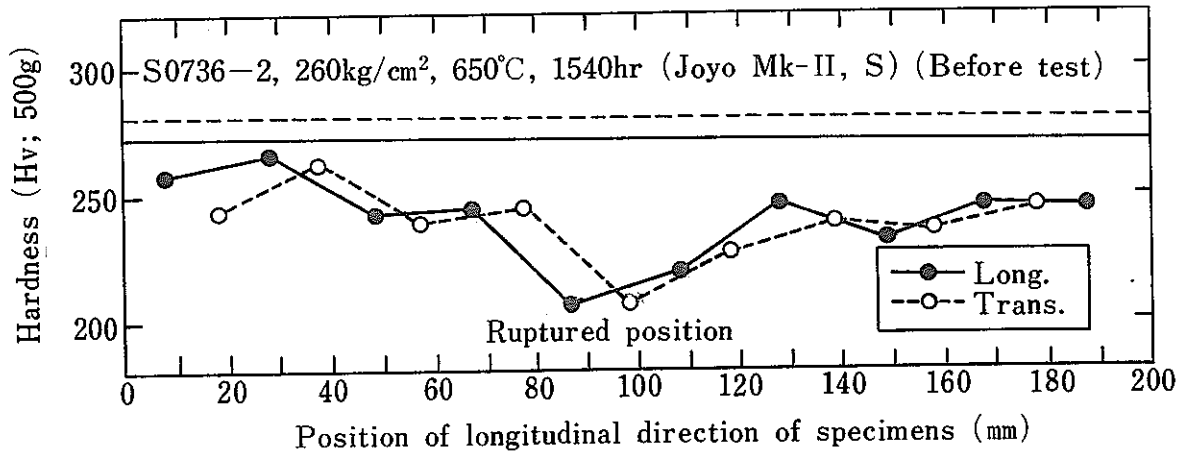
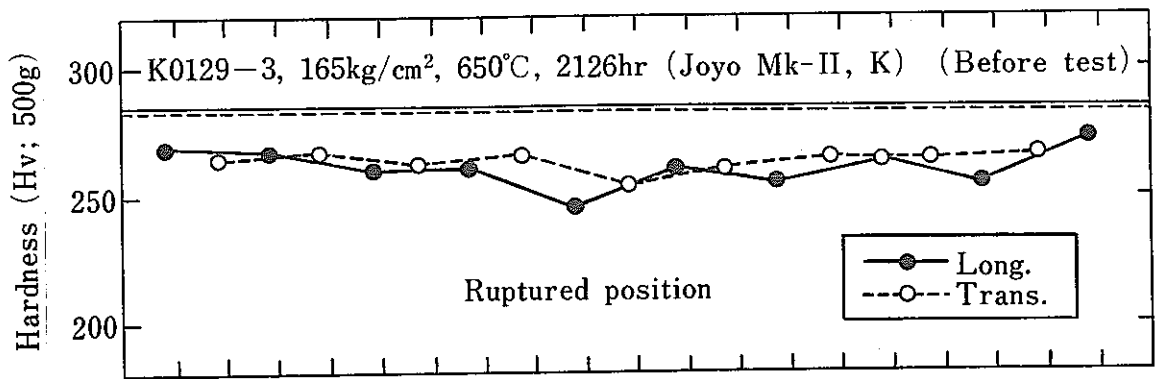
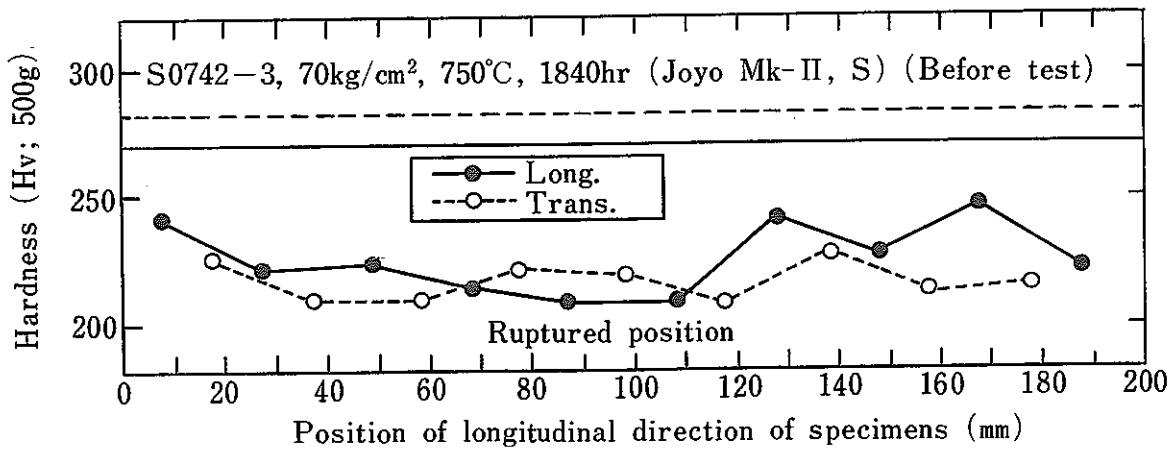
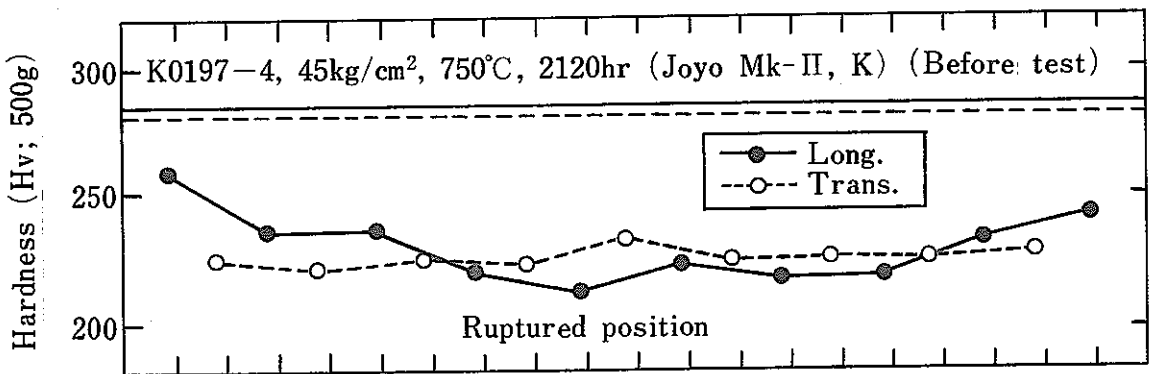


Fig. 21 Creep rupture strength in 10,000 hours of claddings used first to fifth program creep test.

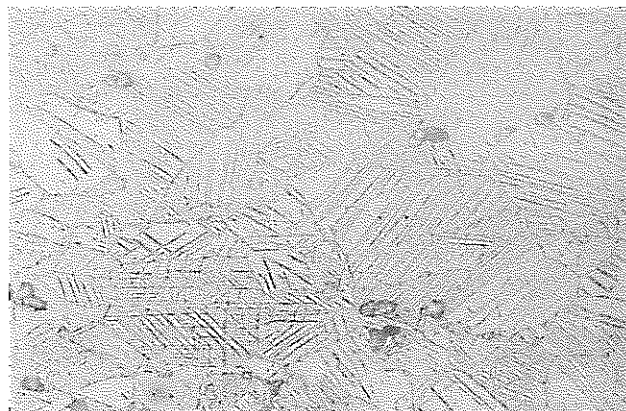
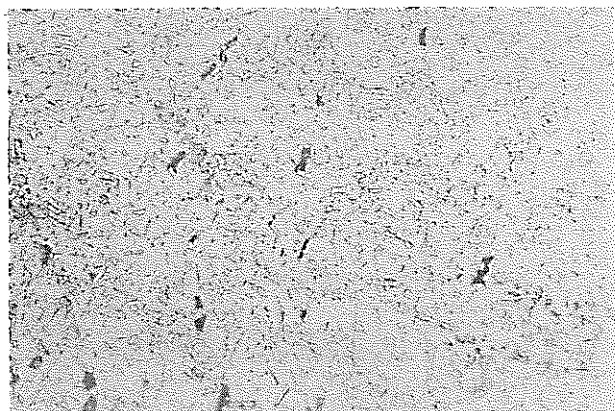


(a) Tested at 650°C



(b) Tested at 750°C

Fig. 22 Hardness versus position of longitudinal direction of specimens ruptured under internal pressure for Joyo Mk-II cladding at 650°C and 750°C.



K, Internal pressure ; 165 Kg/cm<sup>2</sup>  
Ruptured time ; 2126h

S<sub>1</sub>, Internal pressure ; 260 Kg/cm<sup>2</sup>  
Ruptured time ; 1540 h

(a) 650 °C



K, Internal pressure ; 45 Kg/cm<sup>2</sup>  
Ruptured time ; 2120 h

S<sub>1</sub>, Internal pressure ; 70 Kg/cm<sup>2</sup>  
Ruptured time ; 1840 h

(b) 750 °C

Photo. 1 Microstructure of creep ruptured Joyo Mk-II claddings  
at 650 °C and 750 °C ( X400 )

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(SN<sup>241</sup>-77-23)・付録 —

昭和52年 8 月

動力炉・核燃料開発事業団

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。

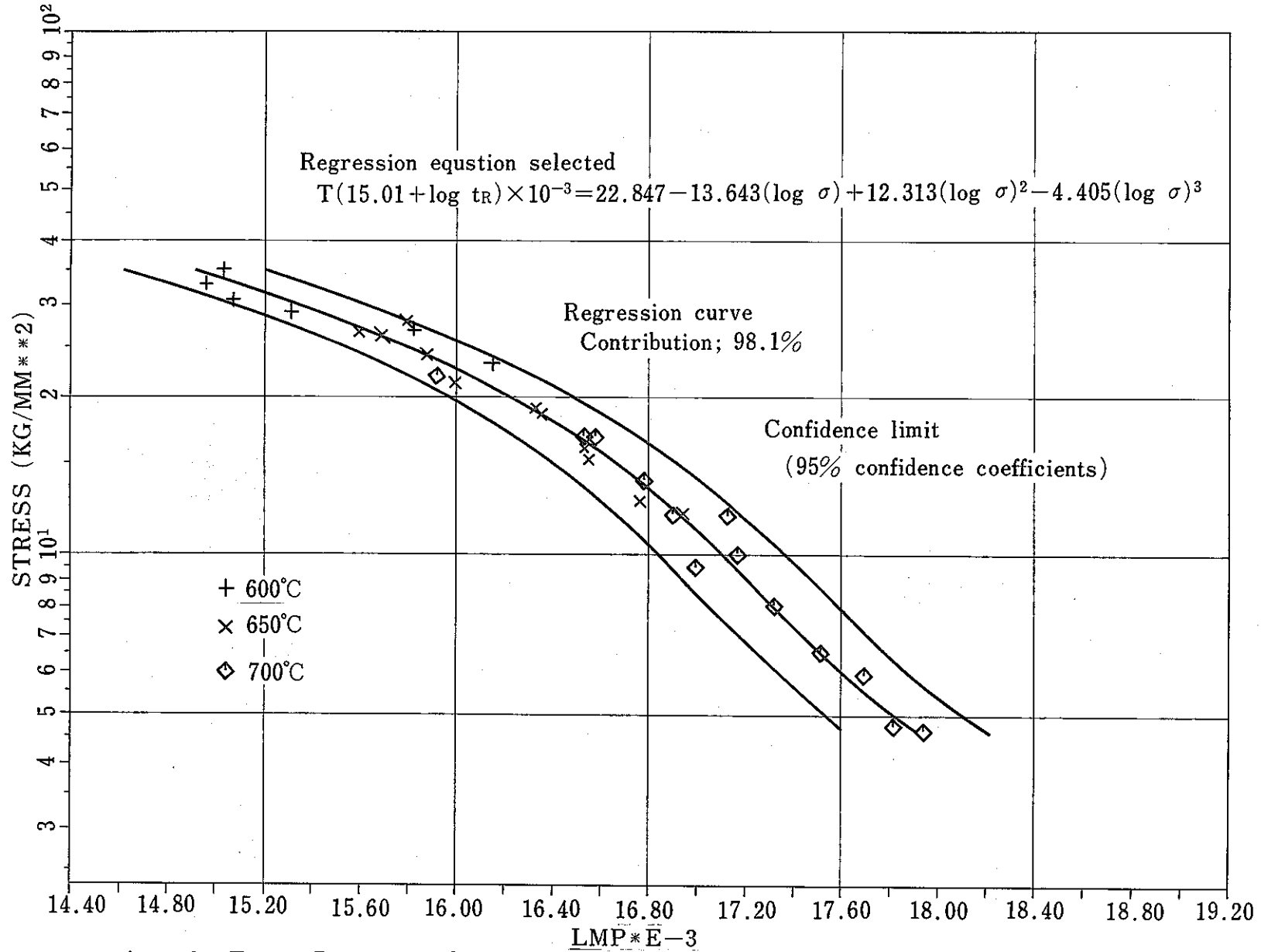
〒319-1184 茨城県那珂郡東海村大字村松4番地49  
核燃料サイクル開発機構  
技術展開部 技術協力課

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

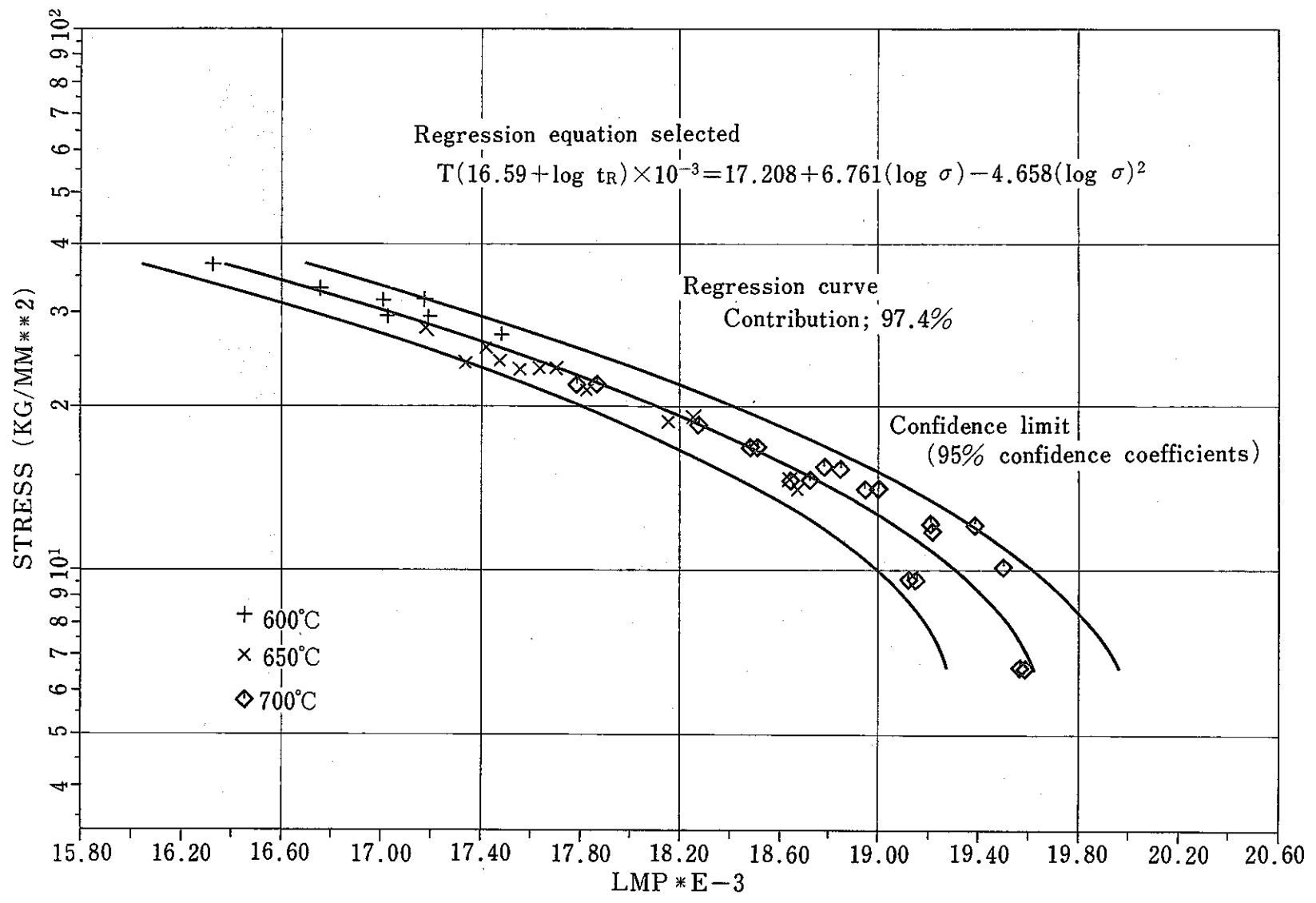
© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)

## 付 録 ( PNC 設計用 )

参考のためもんじゅ用被覆管と常陽Mk-II用被覆管の600, 650および700℃の rupture hoop stressとLMPの関係をAppendix Fig.1 (K材) および Appendix Fig.2 (S材)に示す( Appendix Fig.1 および Appendix Fig.2 は600, 650, 700, 750 および800℃までの rupture hoop stress データを含んでいるFig.14 およびFig.15 に対応する)。またAppendix Fig.1 および Appendix Fig.2 のLMP のマスター曲線から求めた600, 650 および700℃における設計曲線をそれぞれAppendix Fig.3, Appendix Fig.4 および Appendix Fig.5に示す(これらはそれぞれFig.18, Fig.19 および Fig.20 に対応する)。600 および650℃における設計曲線Fig.18, Fig.19 より Appendix Fig.3, Appendix Fig.4 の方が実測値と推定値の曲線の差が小さい。Fig.18 および Fig.19 において実測値と推定値の曲線との間に差があるということは長時間側の推定に20%冷間加工被覆管の再結晶が起る高温でのクリーブ破断強度のデータを使用したためであり、クリーブ試験中に再結晶など大きな組織変化を示す材料の長時間データを推定するのに Larson-Miller パラメータを用いるには適しているとはいえないことを示している。

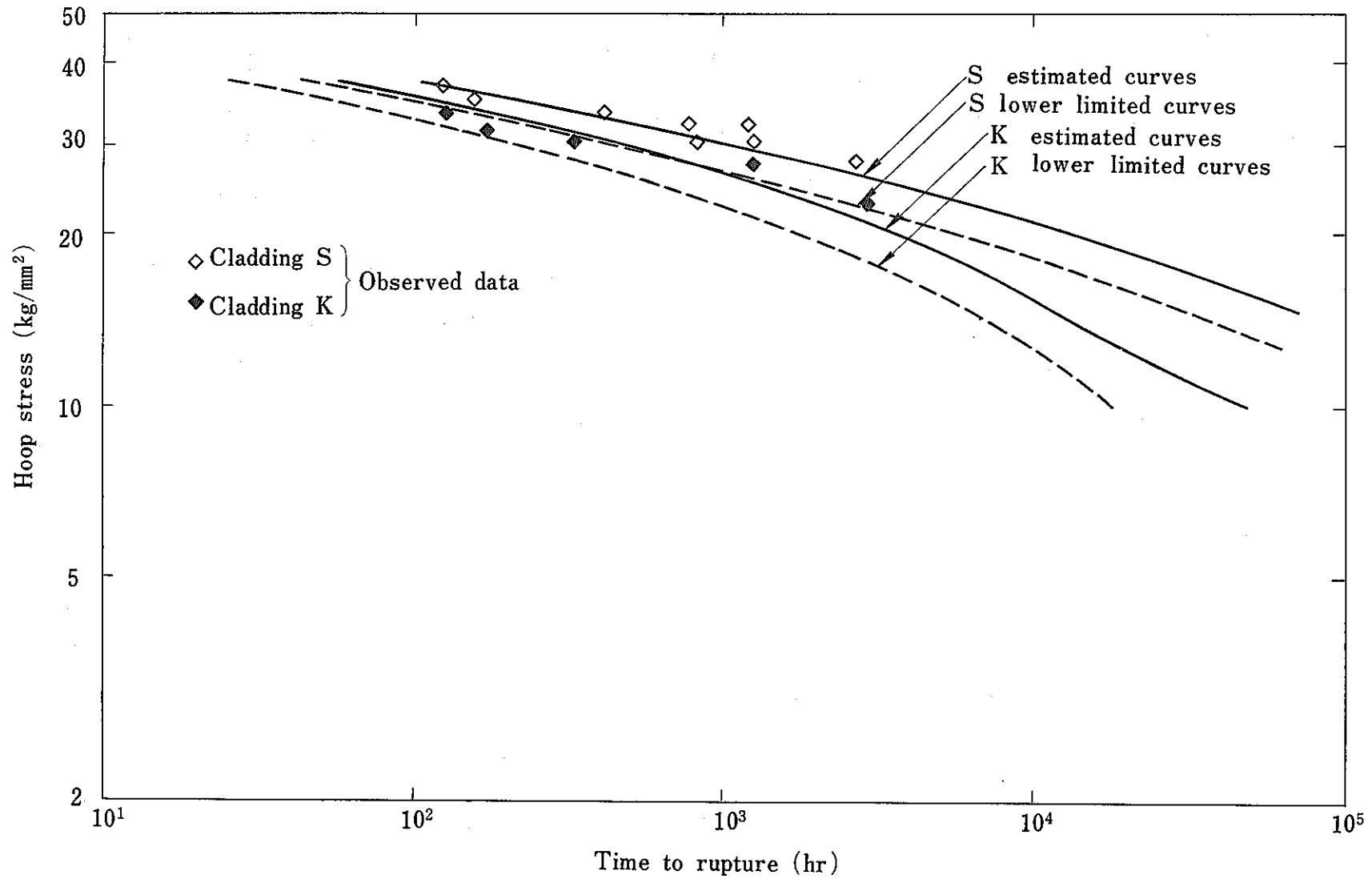


Appendix Fig.1 Regression Curve and confidence interval on master rupture data up to 700°C under internal pressure for Monju and Joyo Mk-II claddings K.

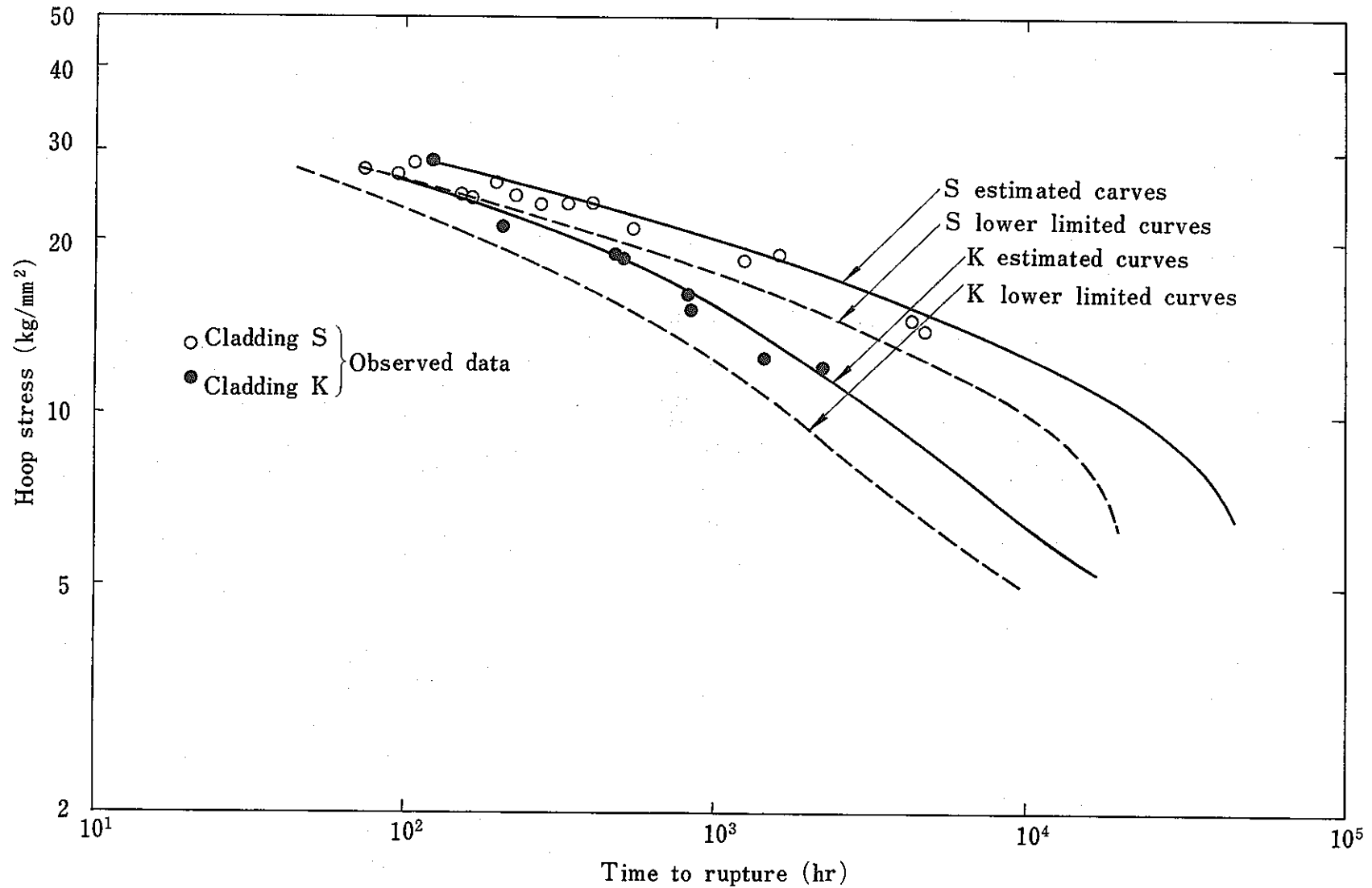


Appendix Fig. 2 Regression curve and confidence interval on master rupture data up to 700°C under internal pressure for Monju and Joyo Mk-II claddings S.

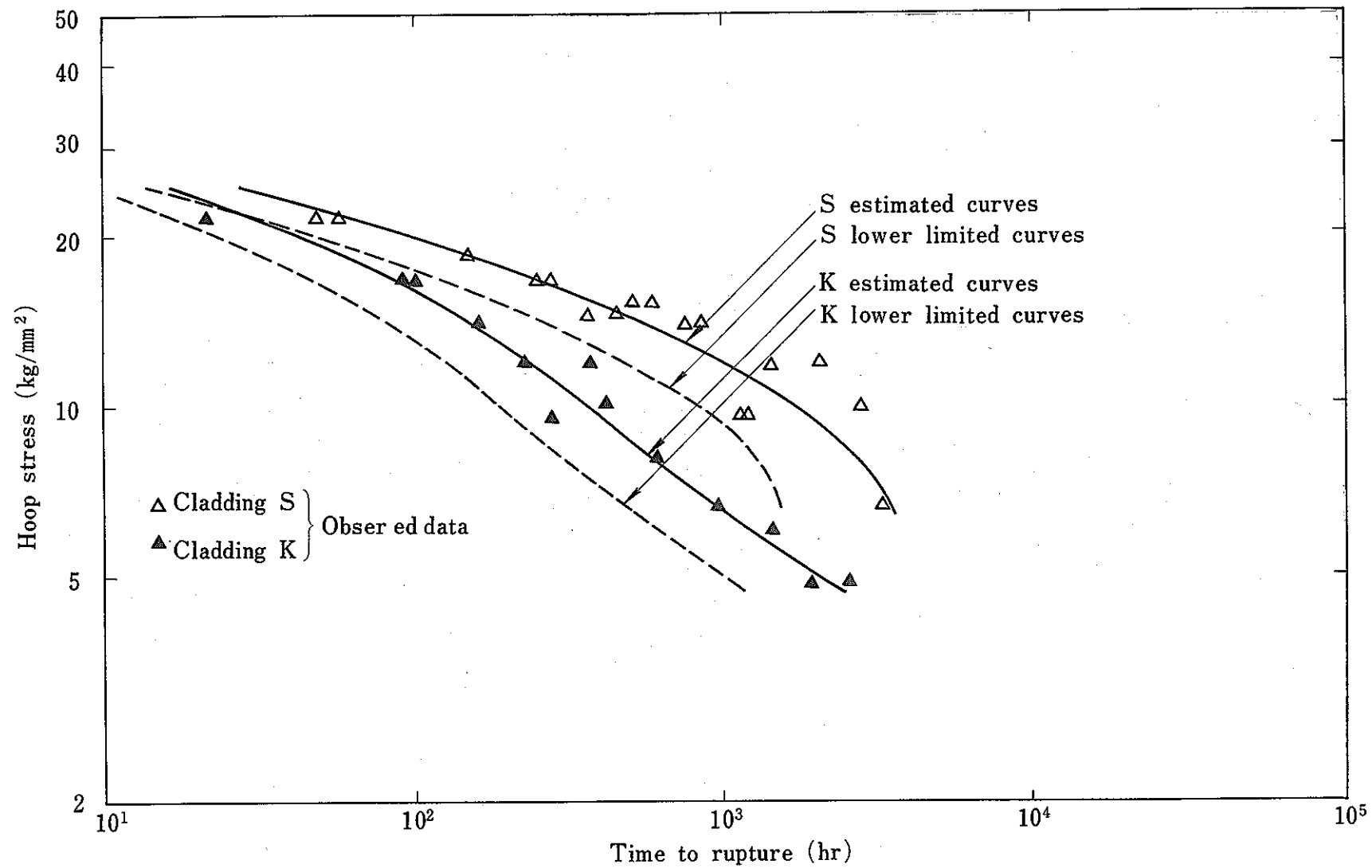




Appendix Fig. 3 Estimated creep rupture curves for claddings K and S at 600°C



Appendix Fig. 4 Estimated creep rupture curves for claddings K and S at 650°C



Appendix Fig. 5 Estimated creep rupture curves for claddings K and S at 700°C