

改良 9 Cr - 1 Mo鋼の超高温強度特性

(研究報告書)

2000年3月

核燃料サイクル開発機構
大洗工学センター

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)
2000

改良 9 Cr-1 Mo 鋼の超高温強度特性
(研究報告書)

加藤 章一*、吉田 英一*、青砥 紀身*

要 旨

FBR 蒸気発生器の伝熱管破損に起因する隣接伝熱管への破損メカニズムのひとつとして、ナトリウム-水反応により急速に伝熱管壁が加熱され破断に至るいわゆる高温ラプチャ現象が考えられる。本研究では、改良 9Cr-1Mo 鋼に関する高温ラプチャ評価の基礎データとして反映するため、超高温領域における引張及びクリープ試験を実施した。引張試験におけるひずみ速度は 10%/min~10%/sec、クリープ破断時間は最長 277sec である。また、試験温度は 700°C~1300°C である。

本試験において得られた結果を要約すると、以下のとおりである。

- (1) 改良 9Cr-1Mo 鋼について、ひずみ速度と引張強度との関係及び数分以内の極短時間のクリープ破断強度に関する評価データを取得した。
- (2) 上記取得データに基づき、Mod. 9Cr-1Mo 鋼伝熱管の構造健全性評価に必要なクリープ破断式を提案した。
- (3) 改良 9Cr-1Mo 鋼の超高温域における引張強度及びクリープ強度は、「もんじゅ」伝熱管材料の 2·1/4Cr-1Mo 鋼よりも高い値を示し、優れた強度特性を有していることがわかった。

* 大洗工学センター ナトリウム・安全工学試験部 機器・構造安全工学グループ

Ultra-High Temperature Strength Properties on Mod.9Cr-1Mo steel

Shoichi KATO *, Eiichi YOSHIDA *, Kazumi AOTO *

Abstract

A sodium-water reaction drove from the single tube break in steam generator of FBR might overheat labor tubes rapidly under internal pressure loadings. If the temperature of tube wall becomes too high, it has to be evaluated that the stress of tube does not exceed the material strength limit to prevent the propagation of tube rupture. This study clarified the tensile and creep properties of Mod.9Cr-1Mo steel at ultra-high temperature which will be used in evaluation of the tube burst by sodium-water reaction. The strain rates for tensile test are from 10%/min to 10%/sec, and creep-rupture time is maximum 277sec. The range of test temperature is 700°C to 1300°C.

The main results obtained were as follows ;

- (1) The evaluation data on the relationship between tensile strength and strain rate and creep-rupture strength in shorter time on Mod.9Cr-1Mo steel were acquired.
- (2) Short-term mechanical properties of Mod.9Cr-1Mo steel were evaluated based on the results of tensile and creep-rupture tests up to 1300°C. As a result of the evaluation, recommended equation of creep-rupture strength in the short-term was proposed.
- (3) Tensile and creep-rupture strength of Mod.9Cr-1Mo steel tube showed the value which was higher than the 2·1/4Cr-1Mo steel, and it was proven to have the superior properties.

* Sodium and Safety Engineering Division, Structure Safety Engineering Group, OEC

目 次

1. 緒 言	1
2. 試験方法	2
2.1 供試材	2
2.2 試験片形状	2
2.3 引張試験方法	2
2.4 クリープ試験方法	3
2.5 試験片の材料分析方法	3
3. 試験結果	4
3.1 超高温引張特性	4
3.2 超高温短時間クリープ特性	5
3.3 試験後のミクロ組織と破面形態	6
4. 改良 9Cr-1Mo 鋼の超高温強度特性評価	7
4.1 強度特性の定式化	7
4.2 改良 9Cr-1Mo 鋼と 2·1/4Cr-1Mo 鋼との強度特性の比較	8
5. おわりに	9
謝 辞	10
参考文献	11
付 錄	67

表リスト

表 2.1-1	供試材の仕様	12
表 4.1-1	超高温域における改良 9Cr-1Mo 鋼のクリープ破断式	13

図リスト

図 2.2-1	引張・クリープ試験片形状	14
図 3.1-1	改良 9Cr-1Mo 鋼（伝熱管材）の 0.2%耐力	15
図 3.1-2	改良 9Cr-1Mo 鋼（伝熱管材）の引張強さ	15
図 3.1-3	改良 9Cr-1Mo 鋼の熱膨張率	16
図 3.1-4	改良 9Cr-1Mo 鋼の比熱	16
図 3.1-5	改良 9Cr-1Mo 鋼（伝熱管材）の破断伸び	17
図 3.1-6	改良 9Cr-1Mo 鋼（伝熱管材）の絞り	17
図 3.2-1	改良 9Cr-1Mo 鋼（伝熱管材）のクリープ破断強さ	18
図 3.2-2	改良 9Cr-1Mo 鋼（伝熱管材）のクリープ破断伸び	18
図 3.2-3	改良 9Cr-1Mo 鋼（伝熱管材）のクリープ破断絞り	19
図 3.2-4	改良 9Cr-1Mo 鋼（伝熱管材）の定常クリープ速度	19
図 3.3-1	高速引張試験後の断面ミクロ組織 (700°C)	21
図 3.3-2	高速引張試験後の断面ミクロ組織 (800°C)	23
図 3.3-3	高速引張試験後の断面ミクロ組織 (900°C)	25
図 3.3-4	高速引張試験後の断面ミクロ組織 (950°C)	27
図 3.3-5	高速引張試験後の断面ミクロ組織 (1000°C)	29
図 3.3-6	高速引張試験後の断面ミクロ組織 (1100°C)	31
図 3.3-7	高速引張試験後の断面ミクロ組織 (1200°C)	33
図 3.3-8	高速引張試験後の断面ミクロ組織 (1200°C、Ar ガス中)	35
図 3.3-9	高速引張試験後の断面ミクロ組織 (1300°C、Ar ガス中)	37
図 3.3-10	高速引張試験後の破面 (700°C)	39
図 3.3-11	高速引張試験後の破面 (800°C)	41
図 3.3-12	高速引張試験後の破面 (900°C)	43
図 3.3-13	高速引張試験後の破面 (950°C)	45
図 3.3-14	高速引張試験後の破面 (1000°C)	47
図 3.3-15	高速引張試験後の破面 (1100°C)	49
図 3.3-16	高速引張試験後の破面 (1200°C)	51
図 3.3-17	高速引張試験後の破面 (1200°C、Ar ガス中)	53
図 3.3-18	高速引張試験後の破面 (1300°C、Ar ガス中)	55

図 4.1-1	試験データと解析結果の比較 (950°C)	57
図 4.1-2	試験データと解析結果の比較 (1000°C)	57
図 4.1-3	試験データと解析結果の比較 (1100°C)	58
図 4.1-4	試験データと解析結果の比較 (1200°C)	58
図 4.1-5	試験データと解析結果の比較 (1300°C)	59
図 4.1-6	試験データと解析結果の比較 (800~900°C)	59
図 4.1-7	試験データと解析結果の比較 (700°C)	60
図 4.1-8	試験データと解析結果の比較 (750°C)	60
図 4.1-9	クリープ試験片 (1100°C) の断面ミクロ組織	61
図 4.1-10	定ひずみ速度と定応力における破断時間の比較	63
図 4.2-1	改良 9Cr-1Mo 鋼と 2·1/4Cr-1Mo 鋼の引張強さの比較	64
図 4.2-2	改良 9Cr-1Mo 鋼と 2·1/4Cr-1Mo 鋼のクリープ破断強さの比較	65

付録リスト

付録 1	引張試験装置の主要仕様	69
付録 2	クリープ試験装置の主要仕様	69
付録 3	改良 9Cr-1Mo 鋼の超高温引張試験結果	70
付録 4	改良 9Cr-1Mo 鋼の超高温クリープ試験結果	71
付録 5-1	引張試験後の試験片外観写真 (P1 ヒート、大気中、室温~550°C、10%/min) . . .	73
付録 5-2	引張試験後の試験片外観写真 (P1 ヒート、大気中、700~1200°C、10%/min) . . .	73
付録 5-3	引張試験後の試験片外観写真 (P1 ヒート、大気中、700~1200°C、1%/sec) . . .	75
付録 5-4	引張試験後の試験片外観写真 (P1 ヒート、大気中、700~1200°C、10%/sec) . . .	75
付録 5-5	引張試験後の試験片外観写真 (P1 ヒート、Ar ガス中、1200~1300°C、10%/min) . .	77
付録 5-6	引張試験後の試験片外観写真 (P1 ヒート、Ar ガス中、1200~1300°C、1%/sec) . .	77
付録 5-7	引張試験後の試験片外観写真 (P1 ヒート、Ar ガス中、1200~1300°C、10%/sec) . .	79
付録 5-8	引張試験後の試験片外観写真 (P2 ヒート、大気中、700~1200°C、10%/min) . . .	79
付録 5-9	引張試験後の試験片外観写真 (P2 ヒート、大気中、700~1200°C、10%/sec) . . .	81
付録 5-10	引張試験後の試験片外観写真 (P2 ヒート、Ar ガス中、1200~1300°C、10%/min) . .	81
付録 5-11	引張試験後の試験片外観写真 (P2 ヒート、Ar ガス中、1200~1300°C、10%/sec) . .	83
付録 6-1	クリープ試験後の試験片外観写真 (P1 ヒート、大気中、700~850°C)	85
付録 6-2	クリープ試験後の試験片外観写真 (P1 ヒート、大気中、900~950°C)	85
付録 6-3	クリープ試験後の試験片外観写真 (P1 ヒート、大気中、1000°C)	87
付録 6-4	クリープ試験後の試験片外観写真 (P1 ヒート、大気中、1100°C)	87
付録 6-5	クリープ試験後の試験片外観写真 (P1 ヒート、Ar ガス中、1200~1300°C)	89
付録 6-6	クリープ試験後の試験片外観写真 (P2 ヒート、大気中、700~1000°C)	89

付録 6-7	クリープ試験後の試験片外観写真(P2 ヒート、大気中、1100°C)	91
付録 6-8	クリープ試験後の試験片外観写真(P2 ヒート、Ar ガス中、1200~1300°C)	91
付録 7-1	公称応力-公称ひずみ曲線(P1 ヒート、10%/min)	93
付録 7-2	公称応力-公称ひずみ曲線(P2 ヒート、10%/min)	95
付録 7-3	公称応力-公称ひずみ曲線(P1 ヒート、1%/sec)	97
付録 7-4	公称応力-公称ひずみ曲線(P1 ヒート、10%/sec)	99
付録 7-5	公称応力-公称ひずみ曲線(P2 ヒート、10%/sec)	101
付録 8-1	クリープひずみ曲線(700°C)	103
付録 8-2	クリープひずみ曲線(750°C)	104
付録 8-3	クリープひずみ曲線(800°C)	105
付録 8-4	クリープひずみ曲線(850°C)	106
付録 8-5	クリープひずみ曲線(900°C)	107
付録 8-6	クリープひずみ曲線(950°C)	108
付録 8-7	クリープひずみ曲線(1000°C)	109
付録 8-8	クリープひずみ曲線(1100°C)	110
付録 8-9	クリープひずみ曲線(1200°C)	111
付録 8-10	クリープひずみ曲線(1300°C)	112

1. 緒 言

FBR蒸気発生器の伝熱管破損に起因する隣接伝熱管への破損メカニズムのひとつとして、ナトリウムー水反応による高温ラブチャ現象が考えられる。「もんじゅ」の段階では、一連のナトリウムー水反応試験に基づいて高温ラブチャが生じないことを示してきた¹⁾。その後の実証炉開発に向けては、解析による汎用で普遍的な健全性評価手法の研究が改良9Cr-1Mo鋼を対象に進められてきている。

「もんじゅ」伝熱管材料である2・1/4Cr-1Mo鋼については、伝熱管材料の時間依存の強度を調べるための短時間クリープ試験データ及び延性破断限界の強度を調べるための高速引張試験データ（JISの規定よりも2桁近く速い10%/secのひずみ速度による引張試験）を取得し、実際の破損モードを踏まえた構造健全性評価法の検討がなされた^{2)、3)}。

本試験は、改良9Cr-1Mo鋼について同様な材料強度データを取得し、ナトリウムー水反応時における伝熱管の構造健全性の評価に資するものである。

2. 試験方法

2.1 供試材

本試験に用いる供試材の仕様を表 2.1-1 に示す。材質は改良 9Cr-1Mo 鋼であり、大洗工学センターのプラント安全工学グループにおいて今後実施予定の伝熱管破損模擬試験（TRUST-2 試験）及び蒸気発生器安全性総合試験（SWAT-3 試験）に供される伝熱管材と同一ヒートである。本試験では、TRUST-2 試験材を「P1 ヒート」、SWAT-3 試験材を「P2 ヒート」と称している。なお、両ヒートとも溶接後応力除去焼鈍（S R 処理）に相当する熱処理等は加えられていない。

2.2 試験片形状

本試験に用いた試験片の形状を図 2.2-1 に示す。試験片形状は、各種試験装置の試験片つかみ部や伸び計の構造上の制限から 2 タイプを用いた。A タイプの試験片は、大気中における 1200°C 以下の引張及びクリープ試験に、B タイプはアルゴン (Ar) ガス中における 1200、1300°C の同試験に用いたものである。試験片平行部の形状は、JIS Z 2201 の「金属材料引張試験片」及び JIS Z 2271 の「金属材料の引張クリープ試験方法」に準拠した。試験片は、伝熱管引き抜き方向と試験片軸方向が平行になるように採取した。また、試験片平行部の加工には、A タイプがワイヤーカット法を、B タイプが NC 加工法をそれぞれ用いており、両者とも加工時の熱影響は非常に小さいものと考えられる。なお、ワイヤーカット法の場合、加工後の酸化物を取り除くためにカット面をサンドペーパにて軽く磨いている。

2.3 引張試験方法

引張試験は、JIS G 0567 「鉄鋼材料及び耐熱合金の高温引張試験方法」及び FBR 金属材料試験実施要領書⁴⁾に準拠して行った。

引張試験は、P1 ヒートを主体に実施した。試験温度は室温～1300°C (制御精度 ± 3 °C 以内)、試験雰囲気は室温～1100°C が大気中、1300°C が著しい酸化を防止するため Ar ガス中とした。1200°C については、試験雰囲気による差異をみるために、大気中と Ar ガス中のそれぞれで実施した。試験温度の制御精度は、大気中が ± 3 °C 以内、Ar ガス中が ± 6 °C 以内である。Ar ガス中での引張試験は、昇温前に真空引き→Ar ガス (純度 99.99%) 充填を 3 回繰返し、雰囲気調整を行った。なお、均熱時間は材料に及ぼす熱時効の影響を小さくするために、試験温度到達後 10～30 分とした⁵⁾。

負荷速度は、高温によるクリープの影響を考慮し、JIS 上限の 10%/min、引張延性破断限界を見極めるための 1%/sec と 10%/sec の計 3 条件とし、いずれも一定速度とした。

負荷速度の制御は、10%/min が試験片標点間制御（但し、伸び計の計測限界に達した時点からはクロスヘッド制御）、1%/sec、10%/sec がクロスヘッド制御とした。

なお、引張試験に用いた試験装置の主要仕様については付録 1 に示している。

2.4 クリープ試験方法

クリープ試験は、瞬時軸荷重負荷型クリープ試験とし、JIS Z 2271 の「金属材料の引張クリープ試験方法」及び FBR 金属材料試験実施要領書⁴⁾を参考にして行った。

クリープ試験についても引張試験と同様に P1 ヒートを主体に実施した。試験温度は、700～1300°C であり、試験雰囲気は 700～1100°C が大気中、1200°C と 1300°C が Ar ガス中である。なお、試験温度の制御精度及び均熱時間は、引張試験と同じである。負荷応力は、TRUST-2 試験で予想される破損時間（10～100sec）とほぼ同じになるように設定した。また、クリープ試験装置の主要仕様については付録 2 を参照されたい。

2.5 試験片の材料分析方法

代表的な試験片についてミクロ組織観察及び破面観察を実施した。ミクロ組織観察は、試験片の破断部近傍に着目し、光学顕微鏡により 10 倍、100 倍、400 倍の倍率にて実施した。また、走査型電子顕微鏡（SEM）を用いて、試験片の破面についても観察を実施した。観察倍率は 150 倍、1000 倍である。

3. 試験結果

3.1 超高温引張特性

室温～1300°Cの温度範囲において計51点の試験データを取得した。詳細な引張試験結果については付録3に、また試験後の試験片外観については付録5-1～付録5-11に示している。

(1) 0.2%耐力及び引張強さ

P1及びP2ヒートの0.2%耐力と温度との関係を図3.1-1に示す。0.2%耐力は、試験温度が高くなるほど低下する傾向を示しているが、850°C以上ではその低下傾向が緩やかになっていた。P1とP2ヒートの0.2%耐力を比較した場合ほぼ同等であり、ヒート間の差はみられない。また、ひずみ速度が10%/min、1%/sec、10%/secと速くなるほど0.2%耐力は高くなる傾向を示し、ひずみ速度効果が認められた。なお、1200°Cでは大気中、Arガス中のそれぞれで引張試験を実施している。大気中の0.2%耐力は同ひずみ速度のArガス中よりも低下しており、これは試験片表面での酸化被膜の形成（母相断面積の減少）による影響と考えられる。本試験では大気中雰囲気を主体にデータを取得しており、評価上は保守側に与えるものと考えられる。

同様に引張強さについて、図3.1-2に示す。0.2%耐力と同様に、引張強さに対するヒート間の有意差は認められなかった。両ヒートの引張強さは高温側ほど低い値を示す傾向にあるが、850°Cと900°Cでは同じひずみ速度の引張強さを比較した場合ほぼ同等であった。また、ひずみ速度効果や1200°Cでの酸化の影響は、0.2%耐力よりも顕著にみられた。1000°C以上での10%/secの引張強さは、10%/minよりも2倍程度高い値を示した。なお、0.2%耐力と引張強さは、引張試験により得られた公称応力一公称ひずみ曲線からもとめたものであり、その曲線を付録7-1～付録7-5に示す。

改良9Cr-1Mo鋼は、温度の影響により相変態^{6), 7)}が生じ、その温度域において材料特性が変化する。無負荷状態の同鋼に対する熱膨張率（線膨張率：加熱後伸び量／初期長さ）及び比熱の測定結果⁷⁾に基づき作成したのが図3.1-3及び図3.1-4である。熱膨張率は、約840～880°Cの温度範囲において低下が認められ、比熱は約850°Cでピークが生じている。木村ら⁷⁾によれば、 α 相→ $\alpha + \gamma$ 相→ γ 相への相変態によるものとしている。なお、750°C近傍で比熱に小さなピークが生じるのは、強磁性から常磁性に磁気変態を起こすためと考えられる⁷⁾。このことから、850°Cを境に0.2%耐力の低下傾向が緩やかになったこと、850°Cと900°Cの引張強さが同等であったことの要因としては、相変態が関与しているものと考えられる。

(2) 破断伸び及び絞り

破断伸びと温度との関係を図 3.1-5 に示す。P1 ヒート及び P2 ヒートとともに、破断伸びは 850~950°C で最も高くなる傾向を示しており、特に P1 ヒートの 850~950°C の破断伸びは 70~120% と著しく増大した。これらの温度域における破断伸びの増大は、相変態が関与しているものと推察される。また、1000°C 以下ではひずみ速度が遅いほど高い延性を示したのに対し、1000°C 以上では明瞭なひずみ速度依存性は認められなかった。なお、P2 ヒートの破断延性は P1 ヒートのばらつき範囲内であり、材料ヒート間の差はみられなかった。

絞りについては、図 3.1-6 に示すように高温ではいずれも 90~100% の範囲であり、温度や速度の依存性及び材料ヒート間の有意差は認められなかった。

3.2 超高温短時間クリープ特性

700°C~1300°C の温度範囲において計 37 点の試験データを取得した。詳細なクリープ試験結果については付録 4 を、また試験後の試験片外観については付録 6-1~付録 6-8 を参照されたい。

(1) クリープ破断強さ

改良 9Cr-1Mo 鋼のクリープ破断強さを図 3.2-1 に示す。700~1300°C において 6~277sec の破断データを取得した。当然ながら、試験温度が高くなるほどクリープ破断強さは低下しているが、800~900°C の温度範囲では相変態が起因しているものと考えられる影響が認められ、クリープ破断強さの有意な差がなかった。また、P1 ヒートと P2 ヒートのクリープ破断強さは同等であり、材料ヒート間の差はみられなかった。

(2) クリープ破断伸び及び絞り

クリープ試験による破断伸びと破断時間との関係を図 3.2-2 に示す。700°C での破断延性値が最も低く、約 30~50% であった。750°C 以上では、約 50~140% の値を示したが、ばらつきが大きく温度や破断時間の依存性、材料ヒート間の差異は確認できなかった。

絞りと破断時間との関係を図 3.2-3 に示す。絞りは、引張試験の結果と同様な傾向を示しており、温度や破断時間による依存性及び材料ヒート間の差異は認められなかった。

(3) 定常クリープ速度

クリープひずみ曲線からもとめられた定常クリープ速度と破断時間との関係は、図 3.2-4 に示すように、800°C 以下では温度依存性がみられ、温度が低くなるほど速度が遅くなる傾向にある。一方、850°C~1300°C では顕著な温度依存性は確認できなかった。また、いずれの温度においても材料ヒート間の差はなかった。なお、各試

験条件におけるクリープひずみ曲線については、付録 8-1～付録 8-10 に示している。

3.3 試験後のミクロ組織と破面形態

系統的な試験を実施した P1 ヒート材の 10%/sec 引張試験後の断面ミクロ組織を図 3.3-1～図 3.3-9 に示す。700～900°Cまではフェライト+ベイナイト組織、950～1100°C ではベイナイト+一部フェライト組織が観察された。1200°C以上になるとベイナイト組織のみが観察され、試験温度に準じた組織変化になっている。1000°C以上では結晶粒が粗大化する傾向が認められた。また、1100、1200°Cの大気中試験片の表面には著しい酸化被膜が確認された。

10%/sec 引張試験片の破面は図 3.3-10～図 3.3-18 に示すように、いずれもディンプル破壊の様相を呈していた。但し、1200°Cの大気中試験片になると、破面に酸化被膜が覆っており明瞭でなかった。

なお、断面ミクロ組織や破面形態について以下の点を比較したが、明瞭な差異は認められなかった。

- ・材料ヒート（同温度、同ひずみ速度での P2 ヒートとの比較）
- ・ひずみ速度（同温度、同ヒートでの 10%/min、1%/sec 引張試験材との比較）
- ・試験種別（同温度、同ヒートでのほぼ同試験時間のクリープ試験材との比較）

4. 改良 9Cr-1Mo 鋼の超高温強度特性評価

4.1 強度特性の定式化

蒸気発生器の運転温度域における伝熱管の破損防止は、1 時間以内の短期についてはひずみ速度 5~10%/min の JIS 高温引張試験により得られる引張強さ(延性破断強度)に基づくのが通常である。長期についてはクリープ効果により強度が低下するためにクリープ破断強さ(時間依存の強度)が適用される。それは、引張強さを上回る応力を静的に負荷すれば速やかに破断するためである。また、引張強さは JIS 高温引張試験を外れる遅いひずみ速度にならないとクリープ効果で大きく低下することもない。第 3.1 項の超高温引張特性において示したように、引張強度に対する明瞭なひずみ速度依存性が認められ、1000°C以上では 10%/sec の強度が 10%/min の約 2 倍となっていた。この強度差の要因としては、クリープの効果によるものと考えられる。このことから、10%/min のひずみ速度には当然ながら標準引張試験としての意味はなくなっている。

以上の点を考慮し、材料強度基準値の策定に必要な強度特性式の検討を行った。

(1) 時間依存の強度

本試験において得られたクリープ破断データを用いて、時間依存の強度(応力と破断時間の関係)を定式化した。この結果を表 4.1-1 に示す。表中の式-1 は、変態温度域を超える温度($900^{\circ}\text{C} < T \leq 1300^{\circ}\text{C}$)でのクリープ破断強さを表すためのものであり、試験温度 1100°C を除く 900~1300°C のクリープ破断データを用いて Larson-Miller パラメータ法により定式化した。式-1 から求めた曲線(時間係数 α_R は平均傾向を示す 1.0 を使用)と試験結果を比較して図 4.1-1~図 4.1-5 に示す。1100°C を除く温度では良好に対応しているのがわかる。定式化に際して 1100°C の破断データを除いたのは、図 4.1-3 に示すようにクリープ破断強さが平均傾向よりも著しく低下していたためである。大気中試験で最も高い温度条件の 1100°C クリープ試験片の断面ミクロ組織(破断部から 10mm 離れた位置)を図 4.1-9 に示す。試験片表面の酸化が著しく、これが強度低下の要因になったものと推察される。なお、1000°C以下の試験片においても酸化が認められるもののその程度は僅かなものであった。図 4.1-1~図 4.1-5 には 10%/sec の高速引張試験で得られた引張強さを併せて示している。高速引張試験での引張強さは、10sec でのクリープ破断強さと同等か僅かに上回っている。なお、10sec 以下の応力を一定とした理由については、第 4.1(2) 項に示している。

変態温度近傍($800^{\circ}\text{C} \leq T \leq 900^{\circ}\text{C}$)でのクリープ破断強さを表す式-2(表 4.1-1)の場合、試験結果に温度依存性が認められないことから、式-1 の 900°C の平均線を

800～900°Cに共通して適用した。この結果を図4.1-6に示す。

変態温度域よりも低い温度 ($700^{\circ}\text{C} \leq T < 800^{\circ}\text{C}$) については、評価上十分な強度があり問題のない領域であることを考慮して、データ拡充による破断式の記述性向上を求めて、式-3(表4.1-1)のように、式-1の温度を100°C高くすることとした。なお、式-3の「+100°C」は、式-2の適用温度範囲に相当する。この結果、図4.1-7、図4.1-8に示すように、安全側に裕度を持つものとなった。

(2) 延性破断強度

2・1/4Cr-1Mo鋼^{2), 3)}では、引張強さに対するひずみ速度依存性が認められ、引張試験装置の性能限界に近いひずみ速度10%/secの引張試験でさえもクリープの影響を受けていた。本鋼の引張試験での引張強さを破断するまでの時間と対応させ、クリープ破断特性に重ね合わせて比較すると、図4.1-10に示すように、概ね同様な傾向になることがわかる。このことから、本鋼についても10%/min～10%/secの引張強さはクリープ効果を受けているものと考えられる。10sec未満の極短時間の破断に対して、時間依存のクリープ破断強さを適用するのは煩雑である。このため、引張延性破断の防止に相当する概念として2・1/4Cr-1Mo鋼^{2), 3)}と同様に10secのクリープ破断強さを導入した。この考え方により、極短時間のクリープ破断強さが10secのクリープ破断強さを超えないように制限することで、数秒程度の事象を簡易に評価できる。

4.2 改良9Cr-1Mo鋼と2・1/4Cr-1Mo鋼との強度特性の比較

2・1/4Cr-1Mo鋼は耐応力腐食割れ(SCC)性や伝熱特性等が優れていることから、「もんじゅ」の蒸気発生器伝熱管材料に採用されている。一方、改良9Cr-1Mo鋼はCr量を8.0～9.5wt.%とし、析出強化(もしくは微細分散強化)のための微量のV(0.18～0.25wt.%)及びNb(0.06～0.10wt.%)を添加すること等で高温強度をさらに向上させた材料である。

改良9Cr-1Mo鋼と2・1/4Cr-1Mo鋼(伝熱管材)²⁾のひずみ速度10%/secにおける引張強さを比較して、図4.2-1に示す。いずれの温度域においても改良9Cr-1Mo鋼の引張強さの方が2・1/4Cr-1Mo鋼よりも900～1200°Cで約1.2～1.3倍、700～850°Cで約1.3～1.5倍高い値を示した。また、両鋼のクリープ破断強さを比較したのが図4.2-2である。同じ応力での破断時間を比較した場合、改良9Cr-1Mo鋼の方が2・1/4Cr-1Mo鋼よりも750°C以下で10倍以上、800～900°Cで約10倍長寿命である。950°C以上では徐々に寿命差が小さくなり、1100°Cでは約2～3倍になっていた。また、1200、1300°Cについては2・1/4Cr-1Mo鋼(伝熱管)に関する試験データがなく比較はできなかった。

5. おわりに

本研究では、改良 9Cr-1Mo 鋼伝熱管に対する高温ラプチャ評価法の検討に資することを目的に、同鋼の最高 1300°Cまでの超高温領域における引張及びクリープ試験を実施した。得られた成果は以下のとおりである。

- (1) 改良 9Cr-1Mo 鋼について、ひずみ速度が 10%/min～10%/sec の引張試験及び数分以内の極短時間のクリープ試験を実施し、引張強度及びクリープ強度に関する評価データを取得した。
- (2) 上記取得データに基づき、Mod. 9Cr-1Mo 鋼伝熱管の構造健全性評価に必要なクリープ破断式を提案した。
- (3) 改良 9Cr-1Mo 鋼の超高温域における引張強度及びクリープ強度は、超高温域においても「もんじゅ」伝熱管材料の 2·1/4Cr-1Mo 鋼よりも高い値を示し、優れた強度特性を有していることがわかった。

謝 辞

本研究を実施するに当たっては、ナトリウム・安全工学試験部プラント安全工学グループの浜田広次副主任研究員、栗原成計研究員には、研究計画作成の協力を得た。また、一連の材料試験実施は、当グループの業務に協力していただいている常陽産業株式会社の鈴木高一氏、黒子耕一氏の尽力によるものである。ここに深謝の意を表します。

参考文献

1. 田辺裕美、他、「高速増殖炉用蒸気発生器の安全性試験研究の現状と今後の展開」、
動燃技報No.56 (1985)
2. 小峰龍司、和田雄作、「急速加熱による円筒の内圧破断に関する構造健全性評価手法
の研究」、PNC TN9410 98-086 (1998)
3. 小峰龍司、和田雄作、他、「2・1/4Cr-1Mo 鋼の変態温度を超える異常高温時の強度特性
に関する研究」日本材料学会 第37回高温強度シンポジウム前刷集、p81 (1999)
4. 高速増殖炉開発本部構造材料グループ、「FBR 金属材料試験実施要領書」、
PNC TN241 77-03 (1977)
5. 青木昌典、吉田英一、他、「Mod. 9Cr-1Mo 鋼、2・1/4Cr-1Mo 鋼および SUS321 の超高温
引張特性 (I)」、PNC TN9410 94-262 (1994)
6. S. J. Sanderson, "Mechanical properties and metallurgy of 9%Cr-1%Mo steel." ,
Ferritic steels for high-temperature applications, American Society for Metals,
p85 (1983)
7. 木村英隆、菅谷全、他、「FBR 構造材料の物性値測定」、PNC TN9410 90-094 (1990)

表2.1-1 供試材の仕様

製品形状と化学成分

材質	認識 No.	ヒート No.	製品 形状	寸法 (mm)	化学成分(wt.%)レードル値													
					C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Ti	N	V	T.A.L	Nb	
Mod.9Cr-1Mo	P1	10254	管	31.8o/d*3.9t	0.08	0.25	0.39	0.011	0.002	0.07	8.37	0.94	0.002	0.047	0.23	0.01	0.07	
	P2	F818167	管	31.8o/d*3.5t	0.10	0.27	0.43	0.014	0.002	0.10	8.23	0.91	-	0.046	0.19	0.02	0.069	

-12-

熱処理条件

材質	認識 No.	ヒート No.	製品 形状	寸法 (mm)	熱処理条件	
					焼きならし一焼もどし (NT)	応力除去焼 鈍 (SR)
Mod.9Cr-1Mo	P1	10254	管	31.8o/d*3.9t	1050°C~780°C AC	なし
	P2	F818167	管	31.8o/d*3.5t	1045°C~780°C AC	なし

表4.1-1 超高温域における改良9Cr-1Mo鋼のクリープ破断式

式-1

$$T_k (\log \alpha_R \cdot t_R + C) = A_0 - A_1 \log \sigma$$

適用範囲 : $1173K < T_k \leq 1573K$ 式-2

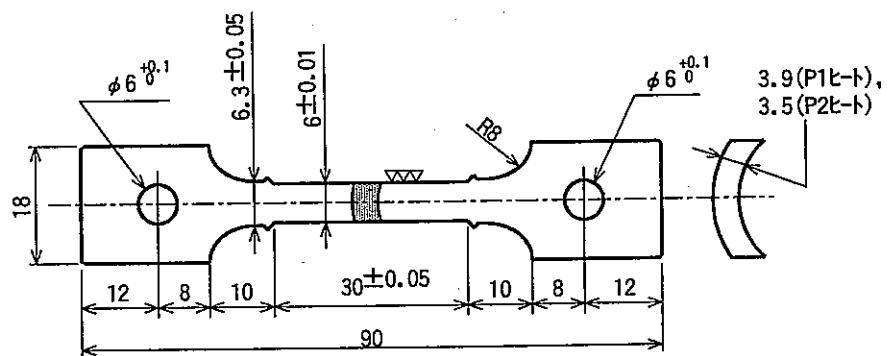
$$1173 (\log \alpha_R \cdot t_R + C) = A_0 - A_1 \log \sigma$$

適用範囲 : $1073K \leq T_k \leq 1173K$ 式-3

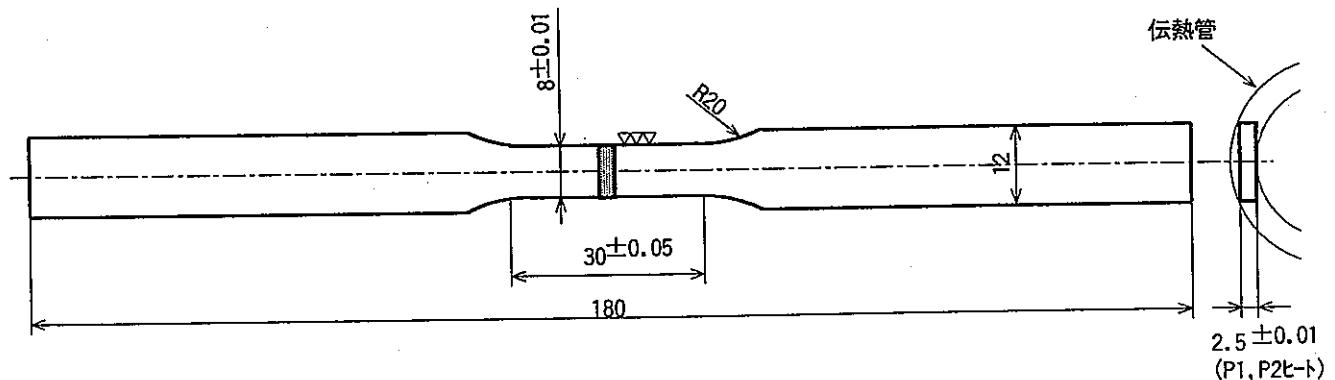
$$(T_k + 100) (\log \alpha_R \cdot t_R + C) = A_0 - A_1 \log \sigma$$

適用範囲 : $973K \leq T_k < 1073K$

T_k	適用温度 (K)
σ	応力 (kg/mm^2)
t_R	破断時間 (sec)
C	14.02
A_0	27473
A_1	8555
α_R	時間係数 (平均傾向を表す場合は1.0)



Aタイプ



Bタイプ

図2.2-1 引張・クリープ試験片形状

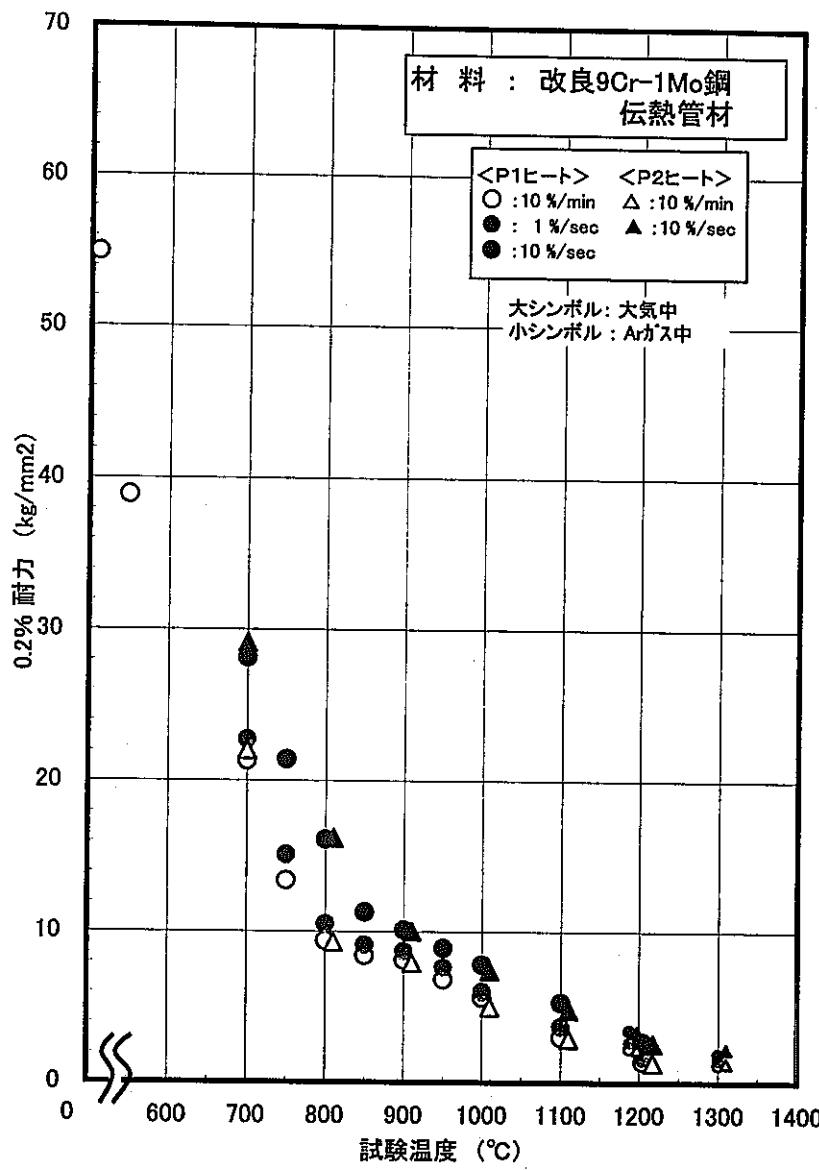


図3.1-1 改良9Cr-1Mo鋼(伝熱管材)の0.2%耐力

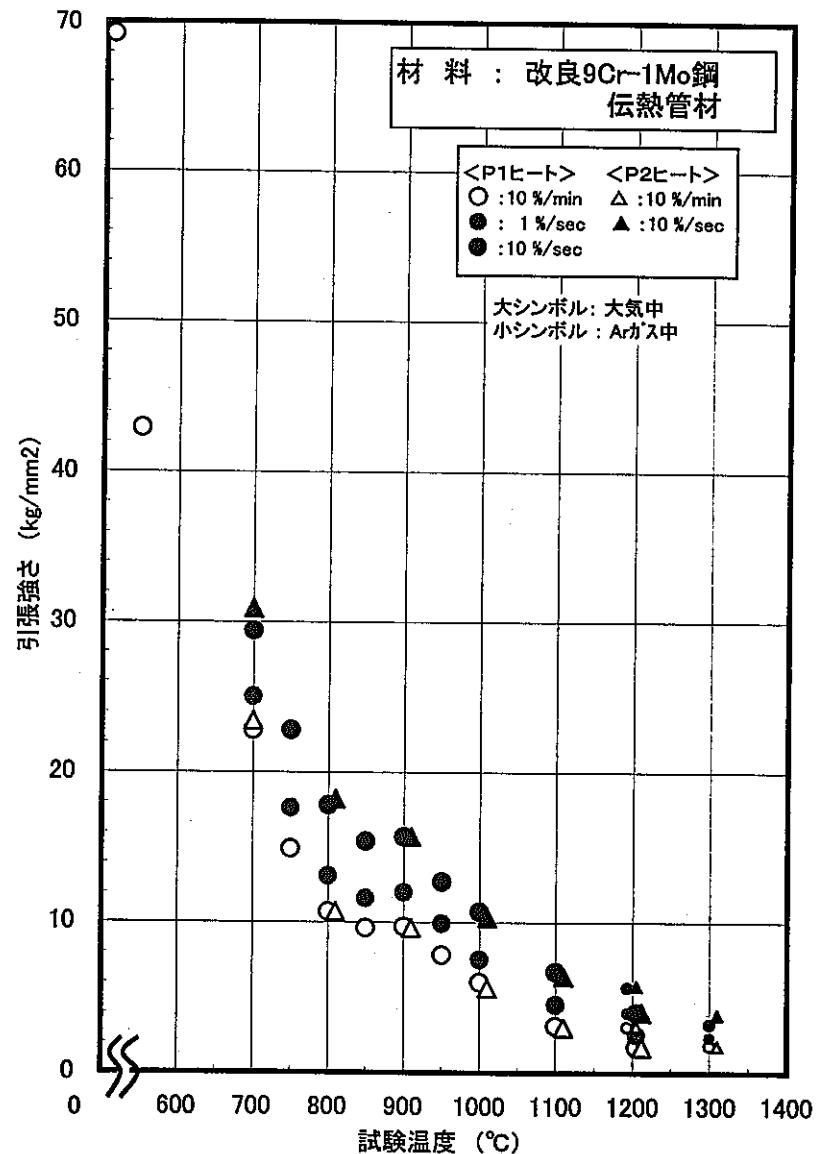


図3.1-2 改良9Cr-1Mo鋼(伝熱管材)の引張強さ

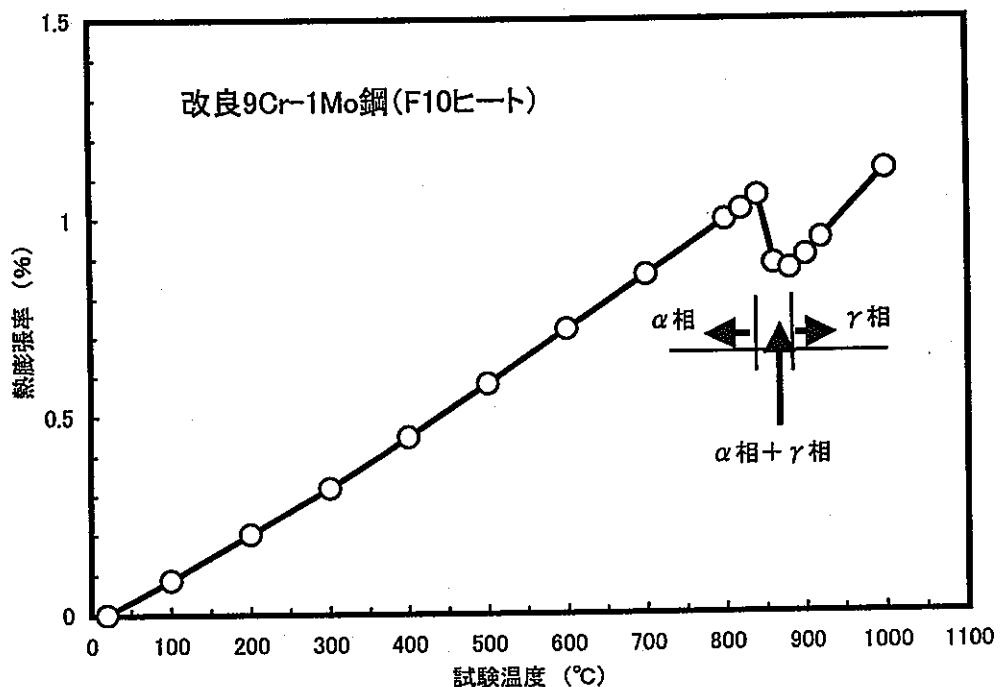


図3.1-3 改良9Cr-1Mo鋼の熱膨張率

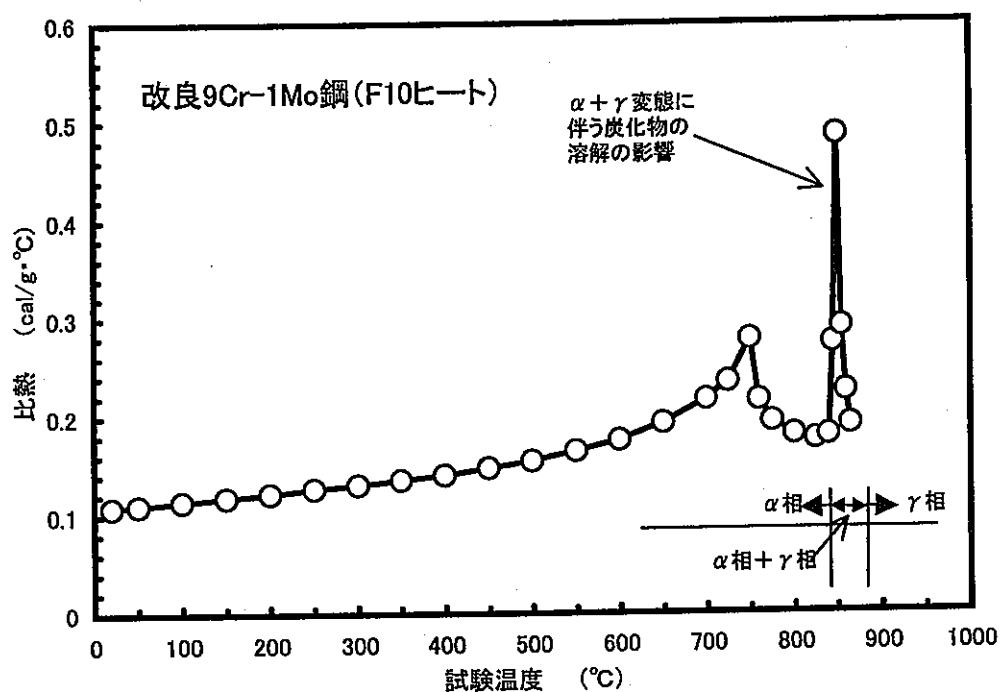


図3.1-4 改良9Cr-1Mo鋼の比熱

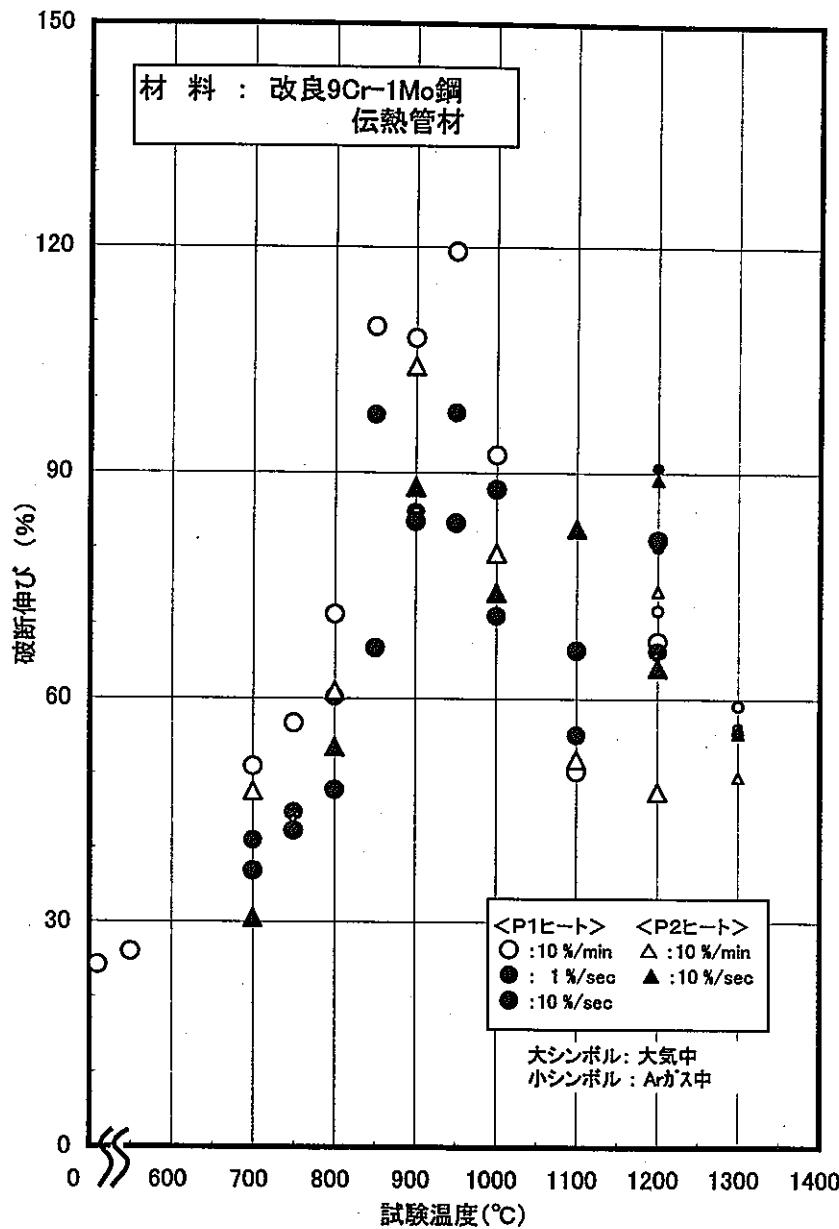


図3.1-5 改良9Cr-1Mo鋼(伝熱管材)の破断伸び

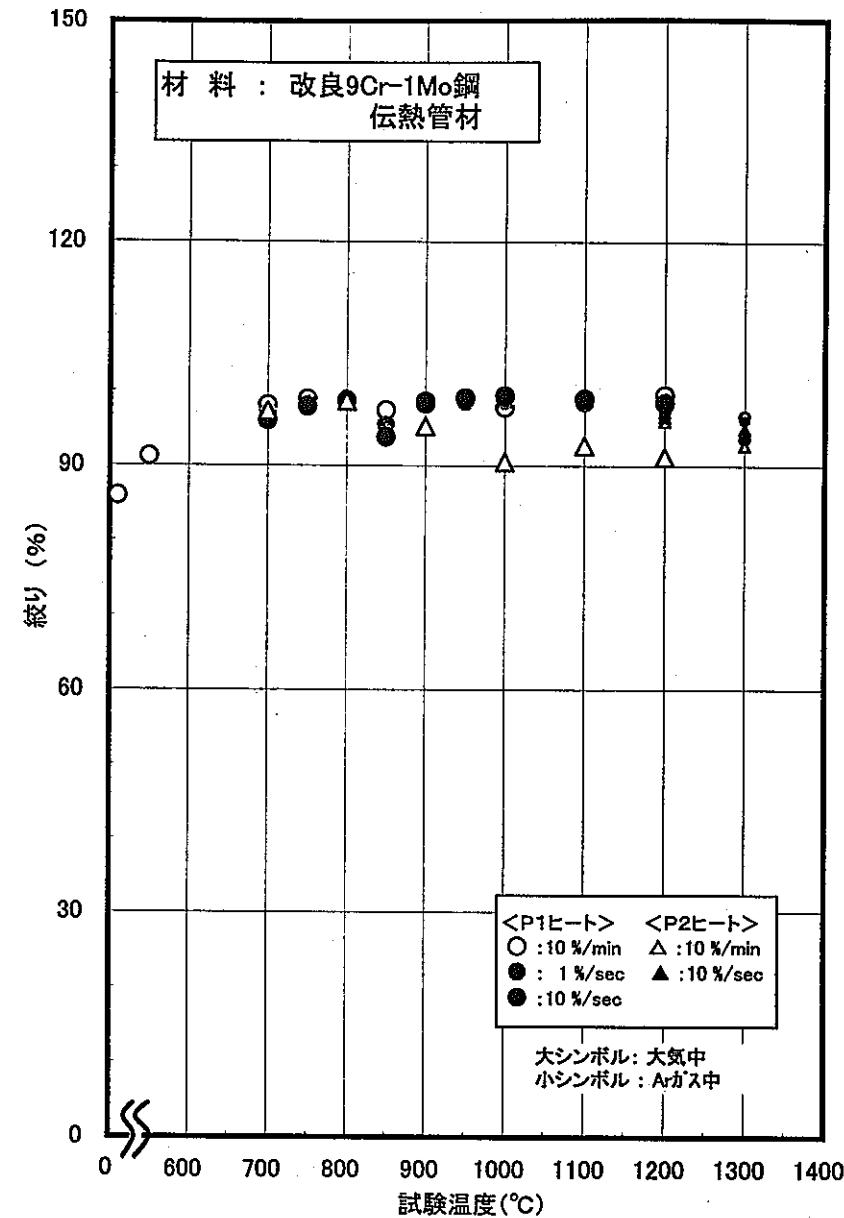


図3.1-6 改良9Cr-1Mo鋼(伝熱管材)の絞り

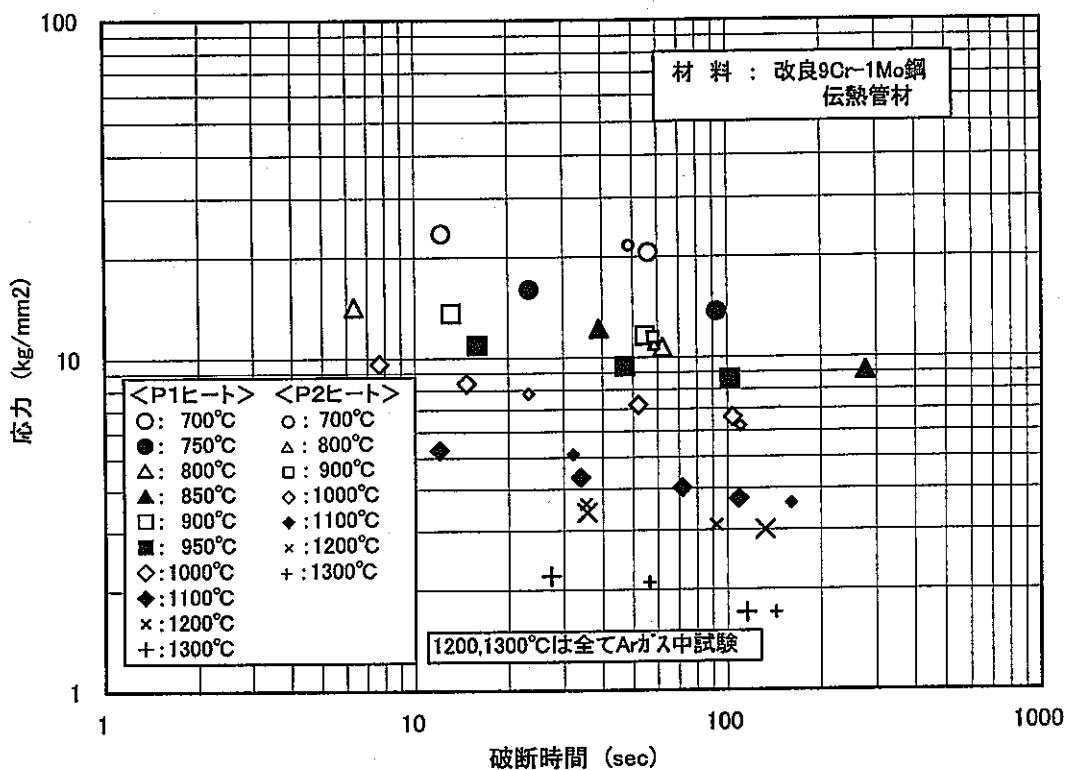


図3.2-1 改良9Cr-1Mo鋼(伝熱管材)のクリープ破断強さ

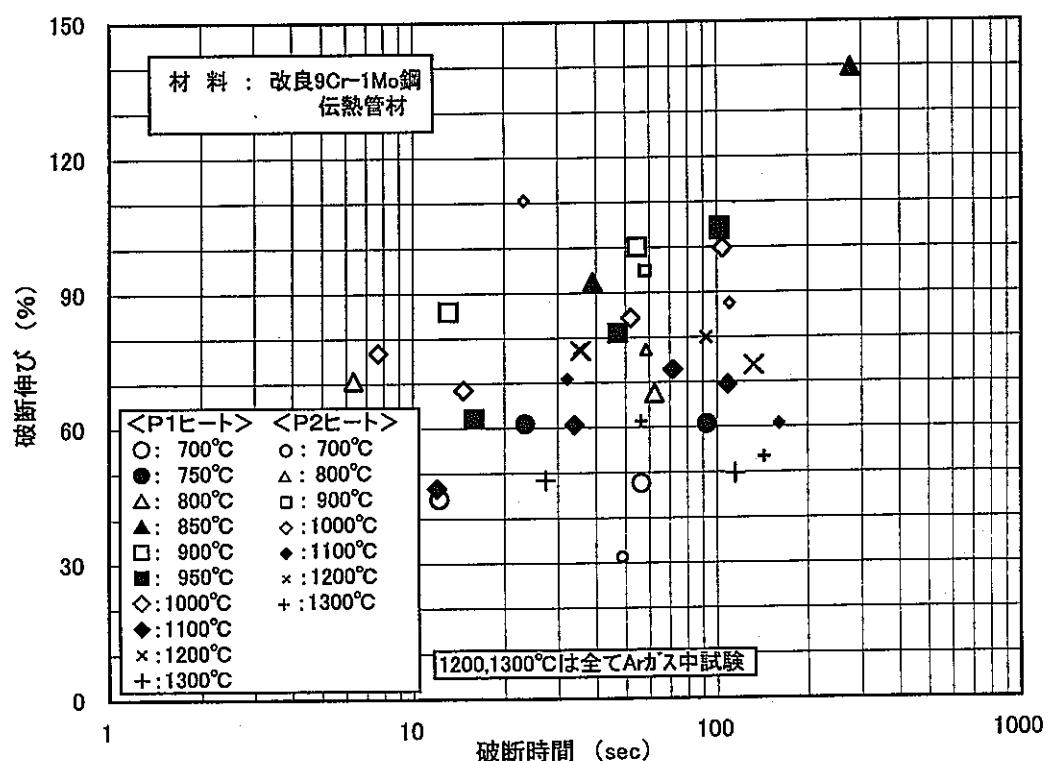


図3.2-2 改良9Cr-1Mo鋼(伝熱管材)のクリープ破断伸び

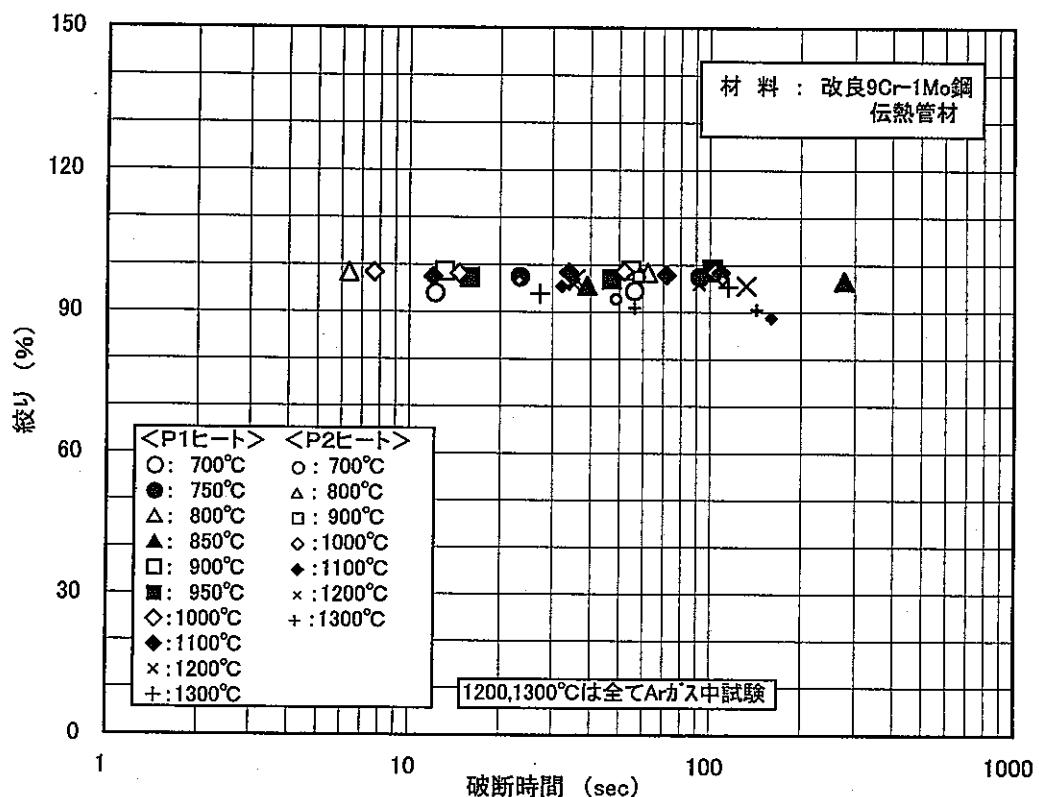


図3.2-3 改良9Cr-1Mo鋼(伝熱管材)のクリープ破断絞り

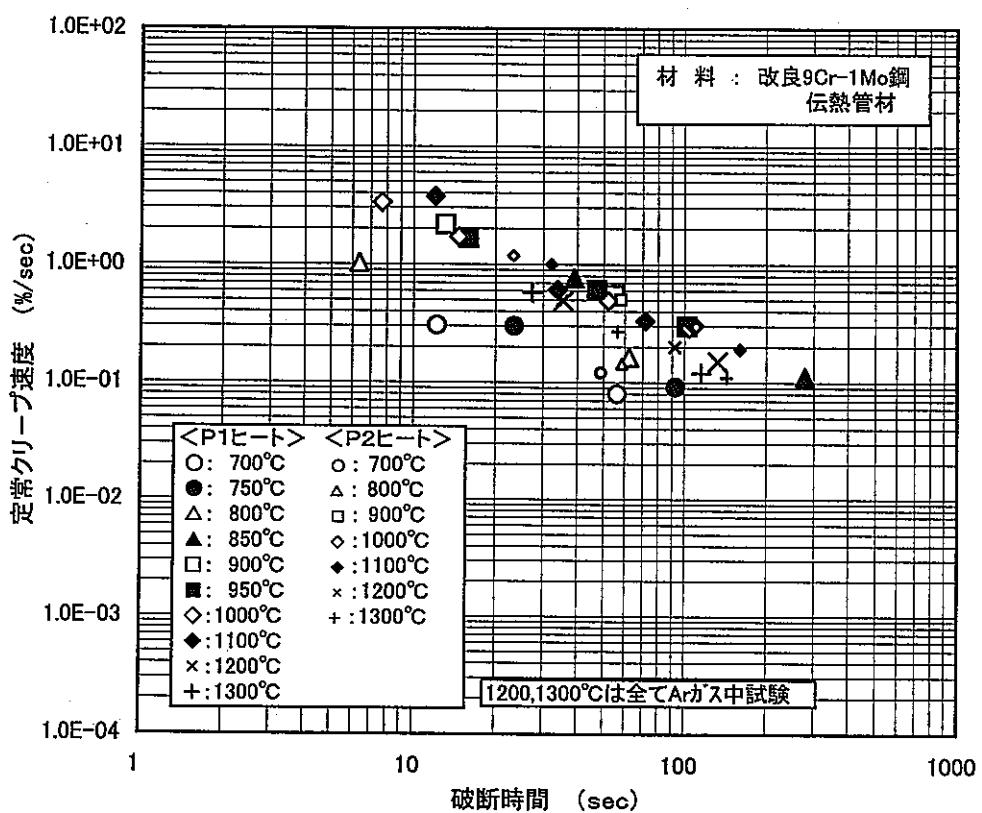
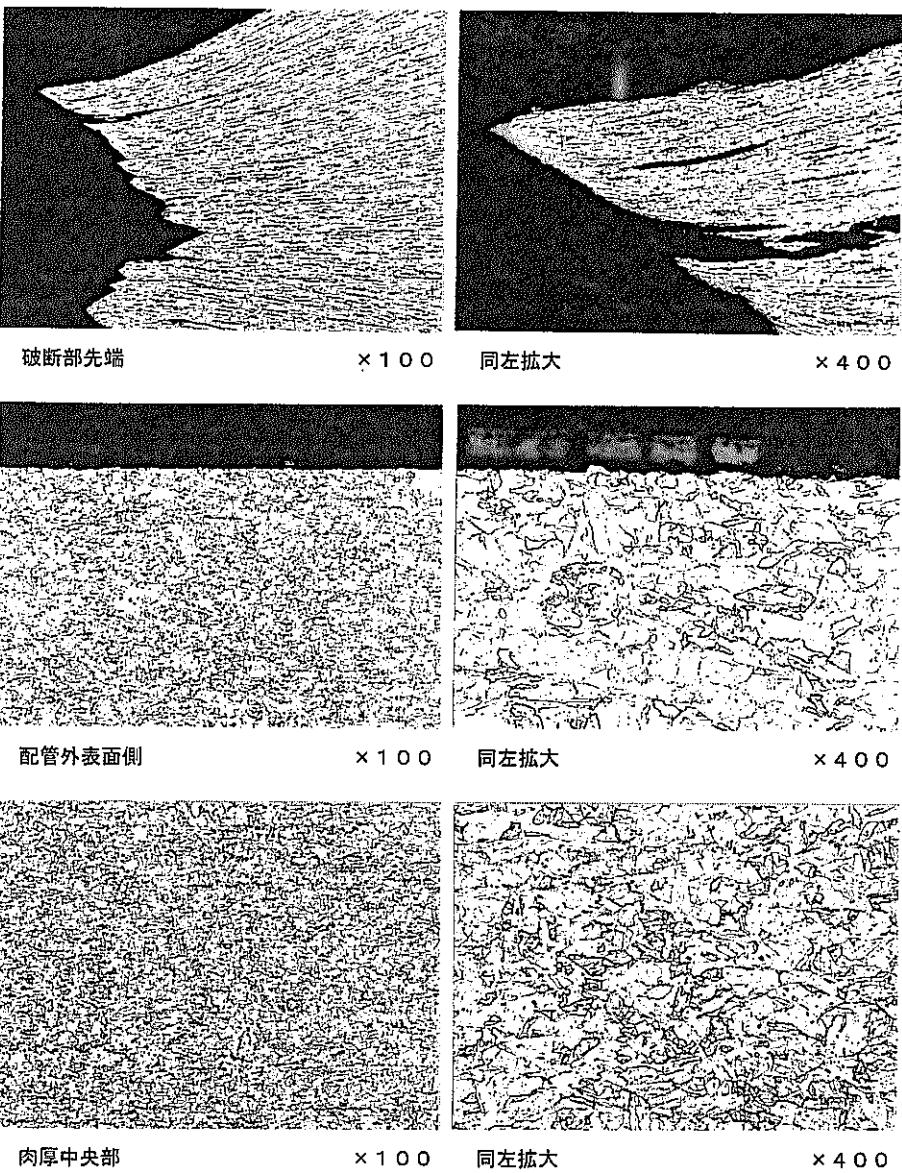
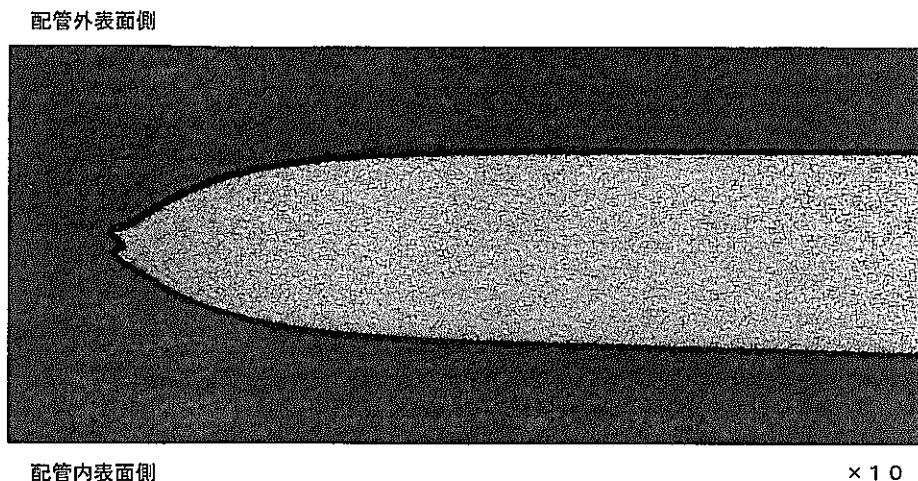
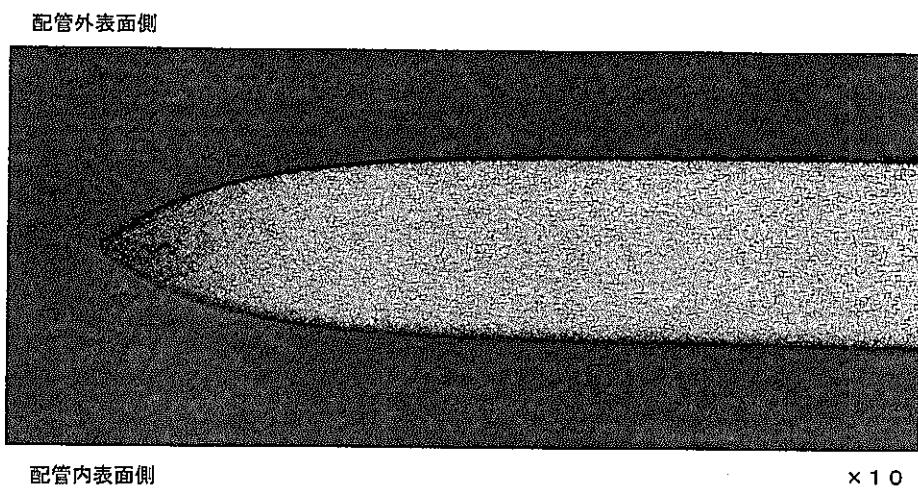


図3.2-4 改良9Cr-1Mo鋼(伝熱管材)の定常クリープ速度



試験片No.	:	P1-01
材料ヒート	:	P1
試験雰囲気	:	大気中
試験温度	:	700°C
ひずみ速度	:	10%/sec

図3.3-1 高速引張試験後の断面ミクロ組織 (700°C)



試験片No. : P1-03
 材料ヒート : P1
 試験雰囲気 : 大気中
 試験温度 : 800°C
 ひずみ速度 : 10%/sec

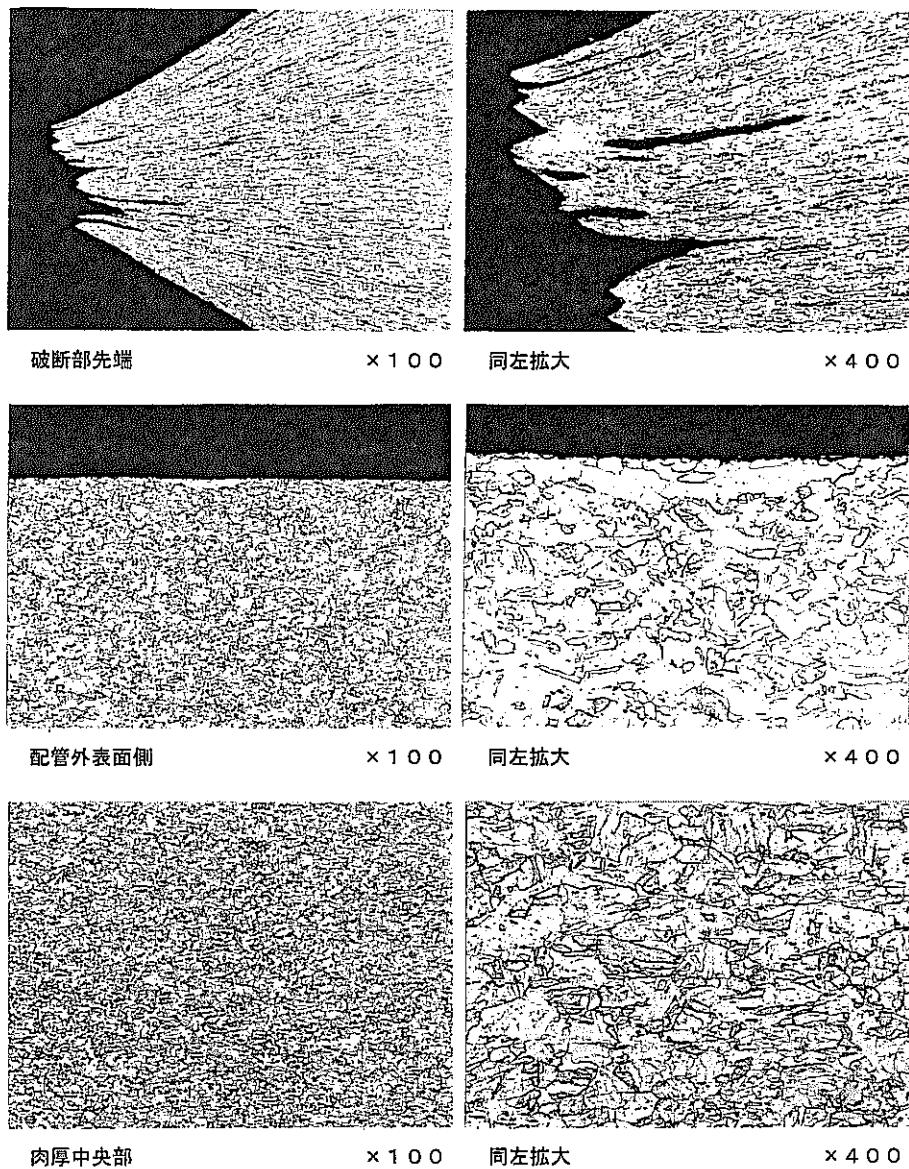
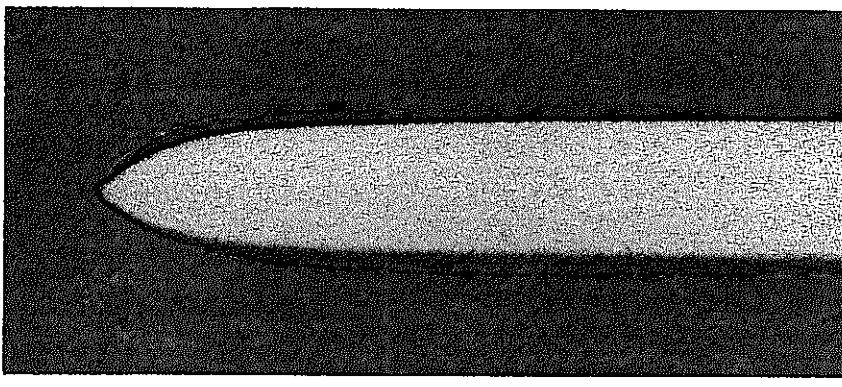
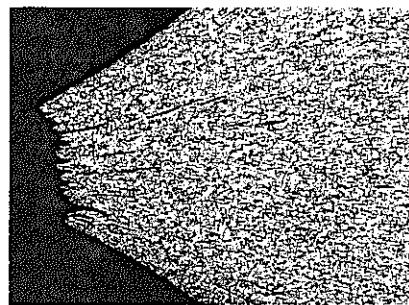


図3.3-2 高速引張試験後の断面ミクロ組織 (800°C)

配管外表面側



×10

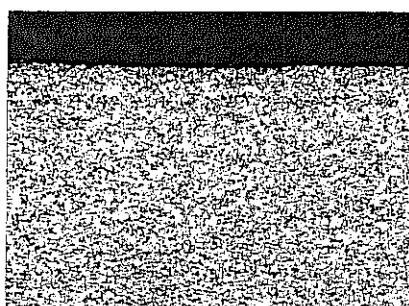


破断部先端

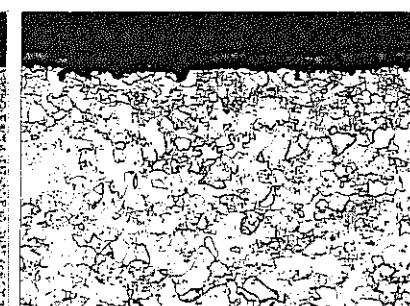


同左拡大

×400

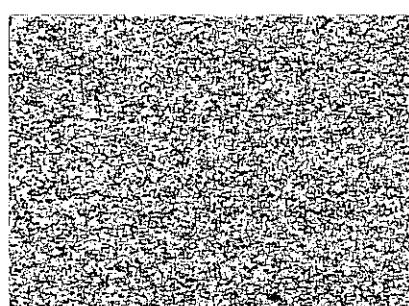


配管外表面側

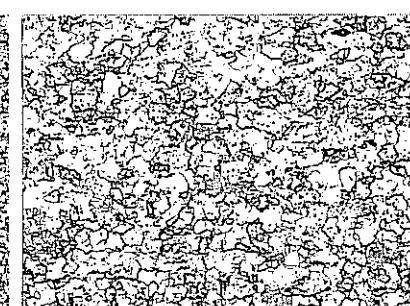


同左拡大

×400



肉厚中央部



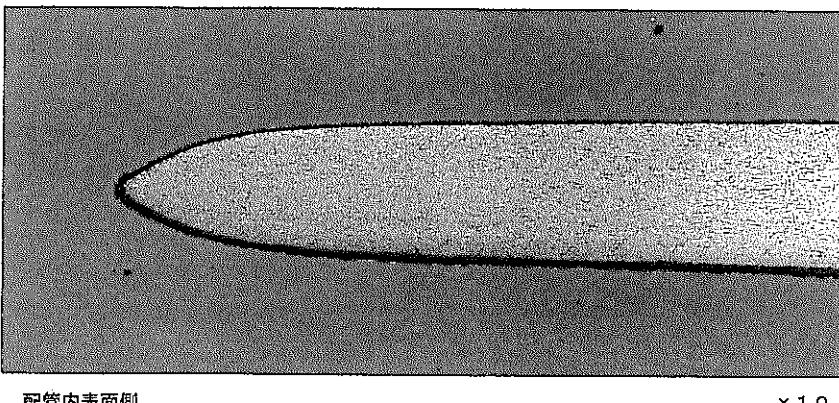
同左拡大

×400

試験片No. : P1-27
材料ヒート : P1
試験雰囲気 : 大気中
試験温度 : 900°C
ひずみ速度 : 10%/sec

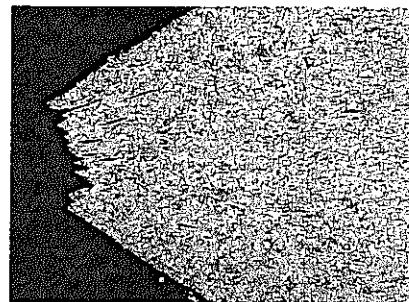
図3.3-3 高速引張試験後の断面ミクロ組織 (900°C)

配管外表面側



配管内表面側

× 10



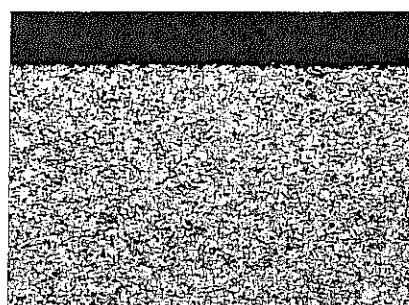
破断部先端

× 100



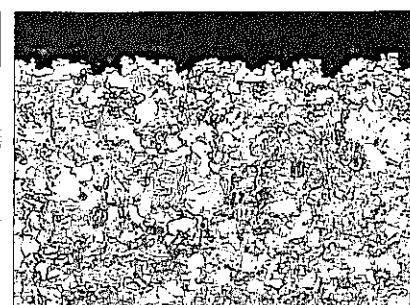
同左拡大

× 400



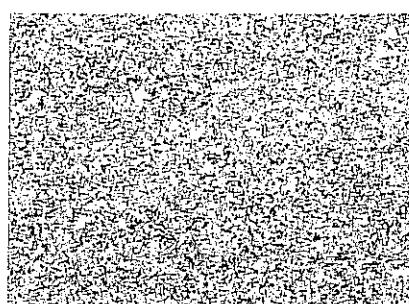
配管外表面側

× 100



同左拡大

× 400



肉厚中央部

× 100

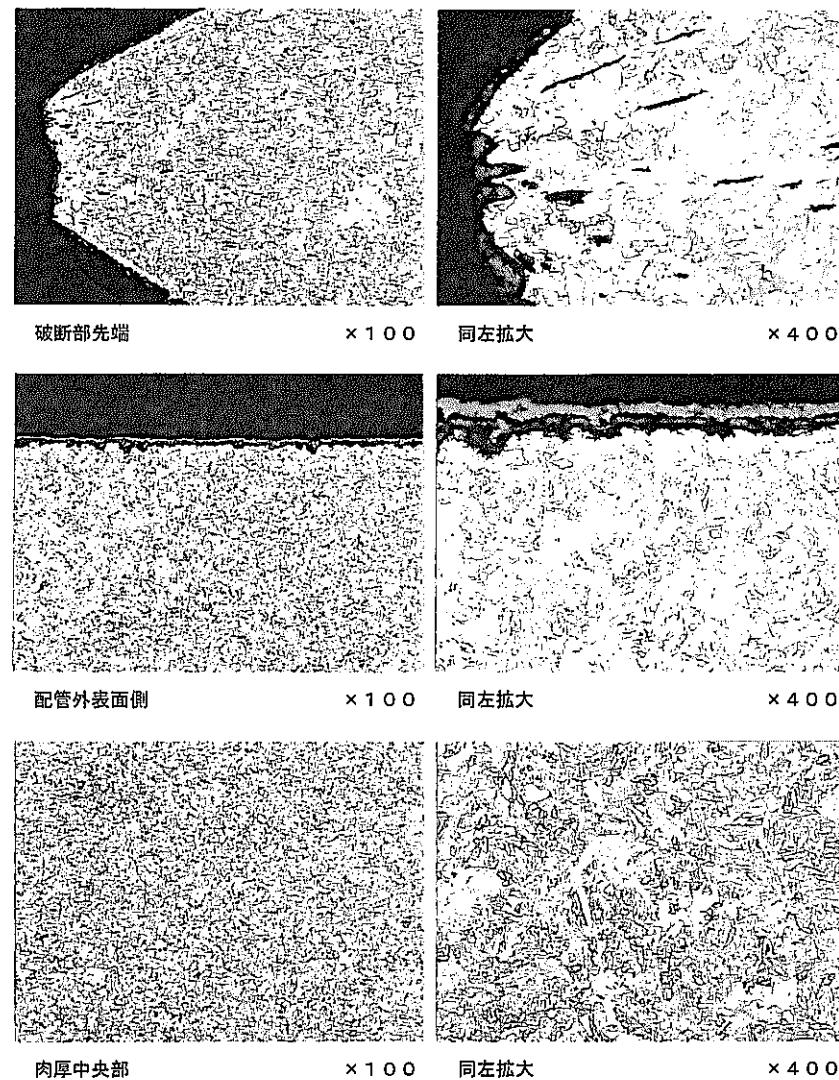
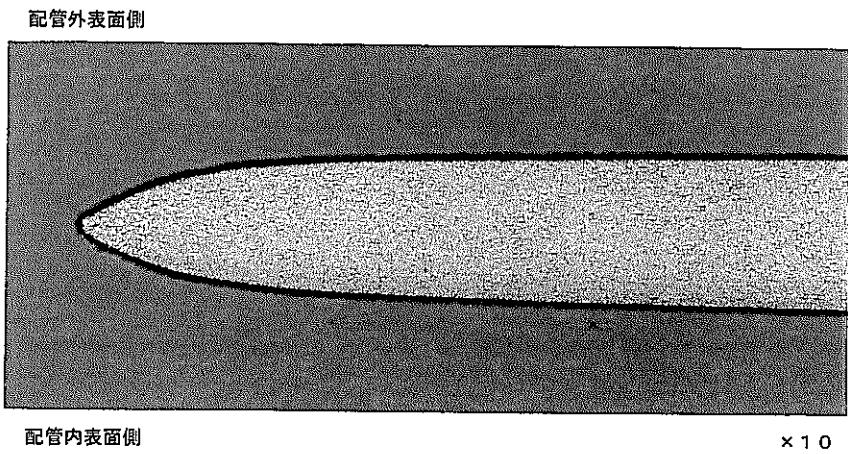


同左拡大

× 400

試験片No. : P1-28
材料ヒート : P1
試験雰囲気 : 大気中
試験温度 : 950°C
ひずみ速度 : 10%/sec

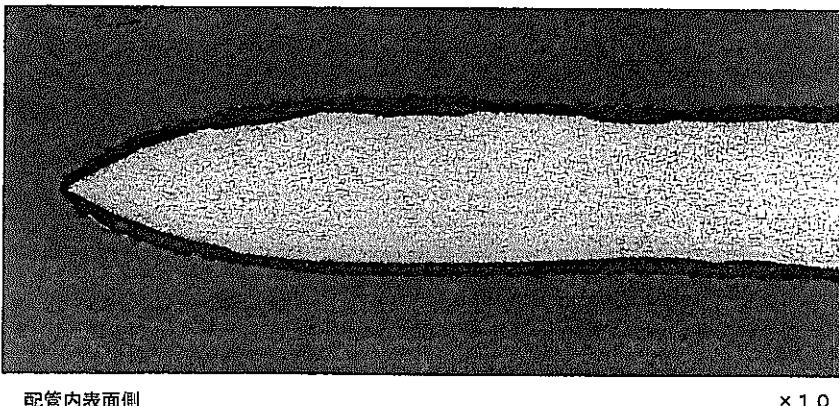
図3.3-4 高速引張試験後の断面ミクロ組織 (950°C)



試験片No. : P1-29
材料ヒート : P1
試験雰囲気 : 大気中
試験温度 : 1000°C
ひずみ速度 : 10%/sec

図3.3-5 高速引張試験後の断面ミクロ組織 (1000°C)

配管外表面側



配管内表面側

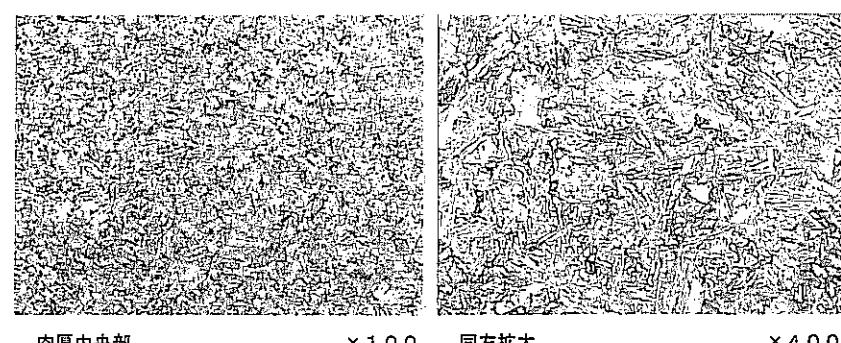


x 400



x 100 同左拡大 x 400

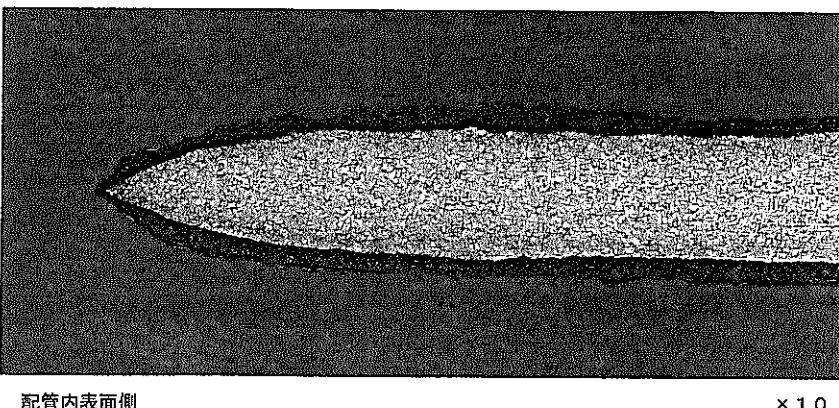
試験片No. : P1-30
材料ヒート : P1
試験雰囲気 : 大気中
試験温度 : 1100°C
ひずみ速度 : 10%/sec



x 100 同左拡大 x 400

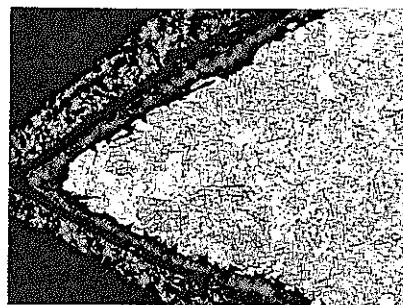
図3.3-6 高速引張試験後の断面ミクロ組織 (1100°C)

配管外表面側



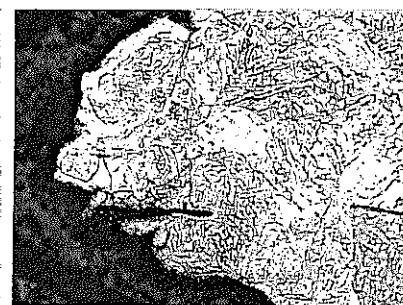
配管内表面側

×10



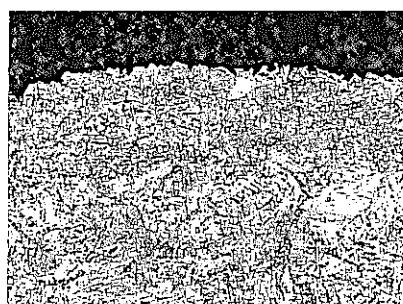
破断部先端

×100



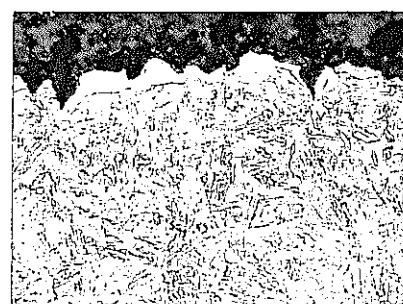
同左拡大

×400



配管外表面側

×100



同左拡大

×400



肉厚中央部

×100

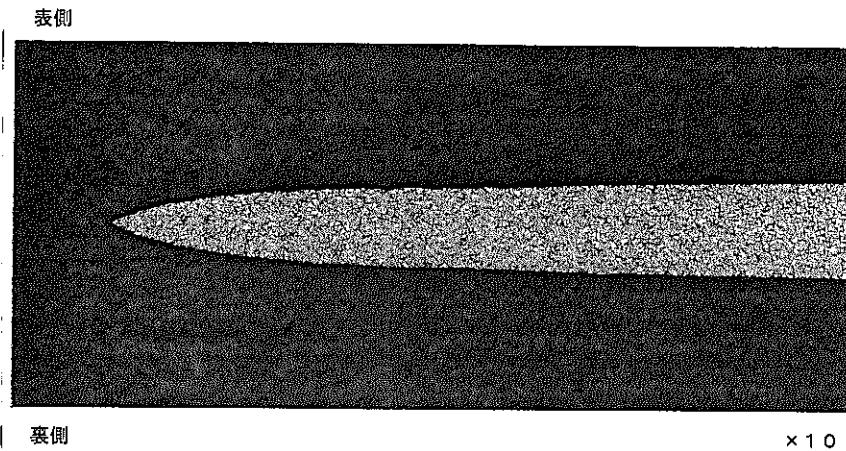


同左拡大

×400

試験片No. : P1-31
 材料ヒート : P1
 試験雰囲気 : 大気中
 試験温度 : 1200°C
 ひずみ速度 : 10%/sec

図3.3-7 高速引張試験後の断面ミクロ組織 (1200°C)



試験片No. : P1-7AR
 材料ヒート : P1
 試験雰囲気 : Arガス中
 試験温度 : 1200°C
 ひずみ速度 : 10%/sec

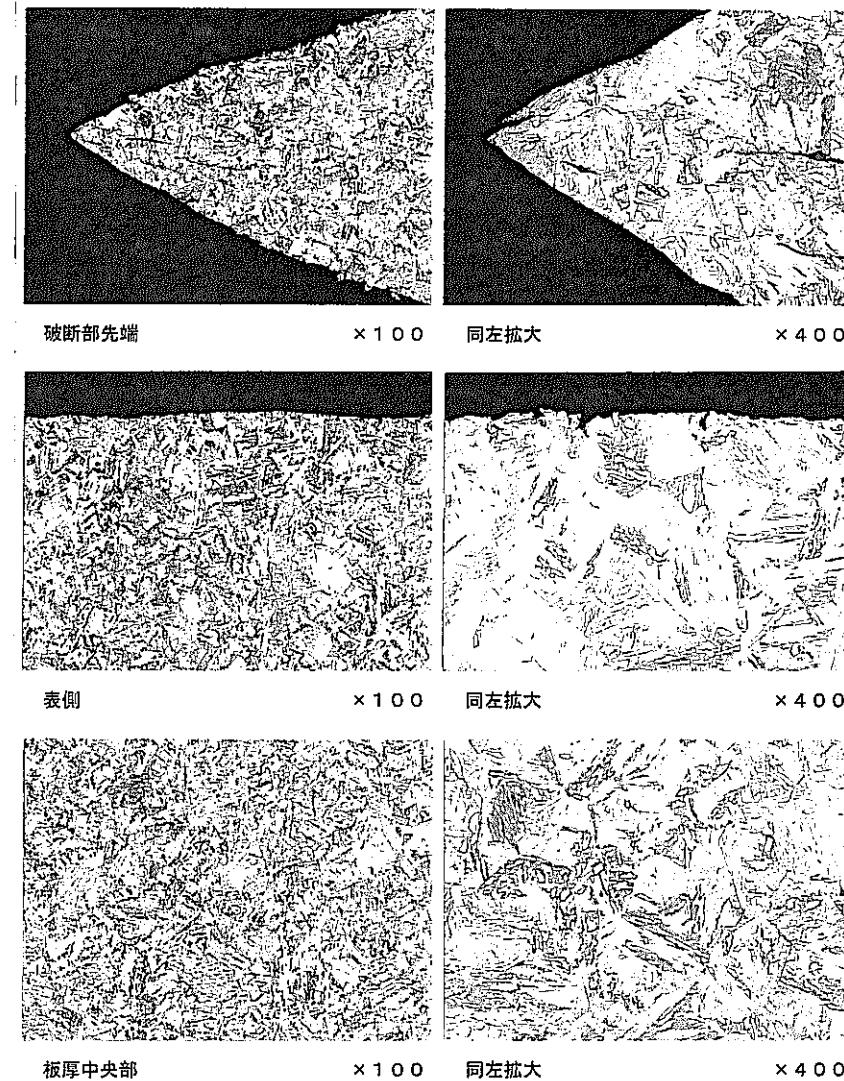
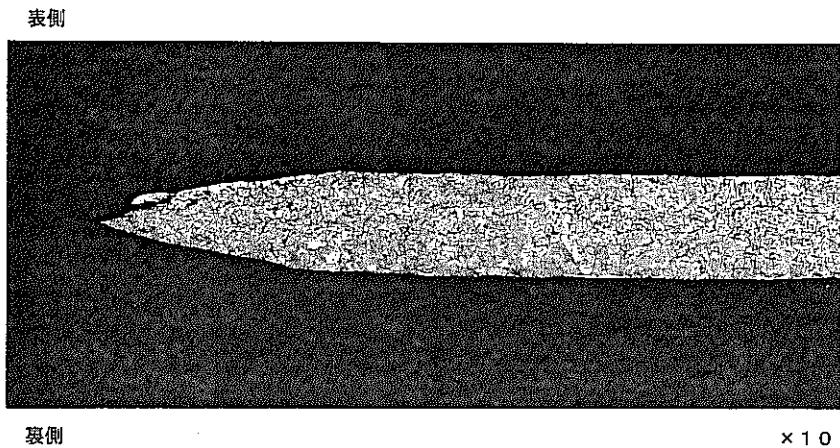


図3.3-8 高速引張試験後の断面ミクロ組織 (1200°C、Arガス中)



試験片No. : P1-8AR
 材料ヒート : P1
 試験雰囲気 : Arガス中
 試験温度 : 1300°C
 ひずみ速度 : 10%/sec

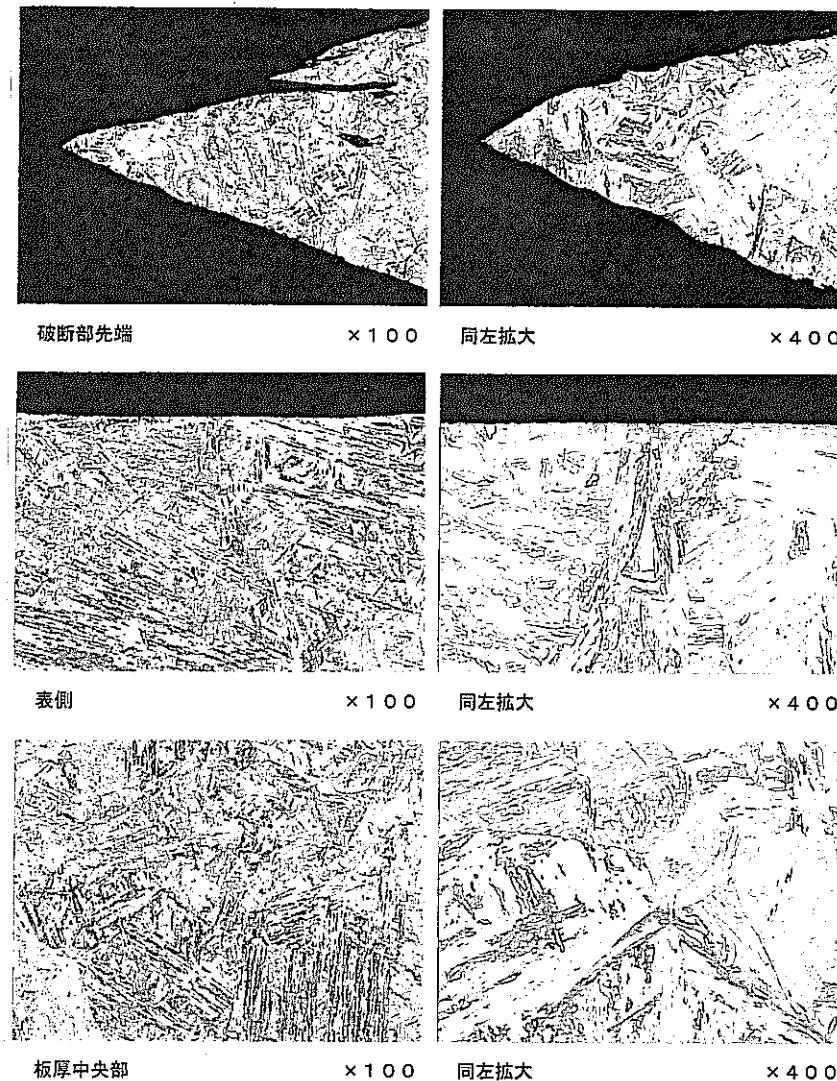
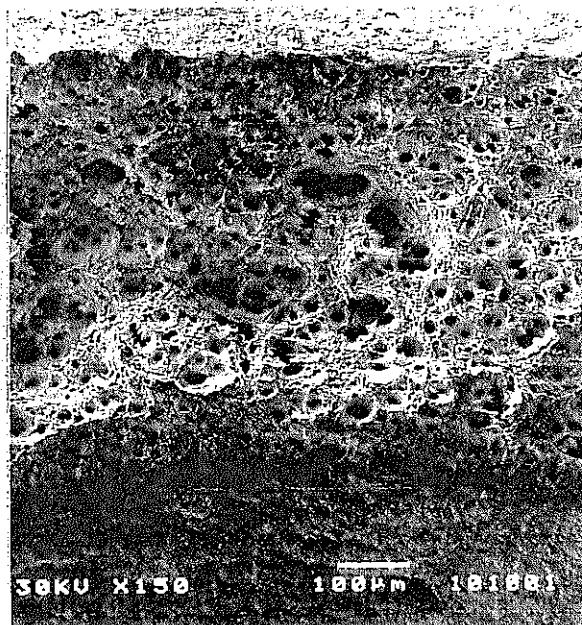


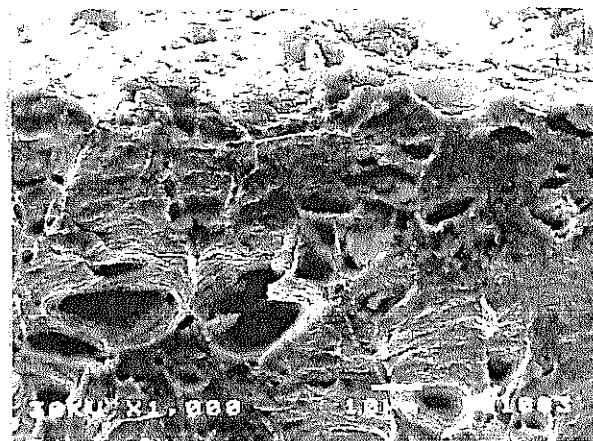
図3.3-9 高速引張試験後の断面ミクロ組織 (1300°C、Arガス中)

試験片No. : P1-01
材料ヒート : P1
試験雰囲気 : 大気中
試験温度 : 700°C
ひずみ速度 : 10%/sec

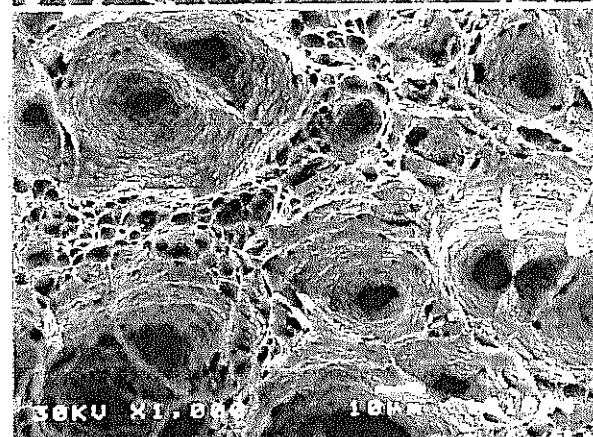
配管外表面側



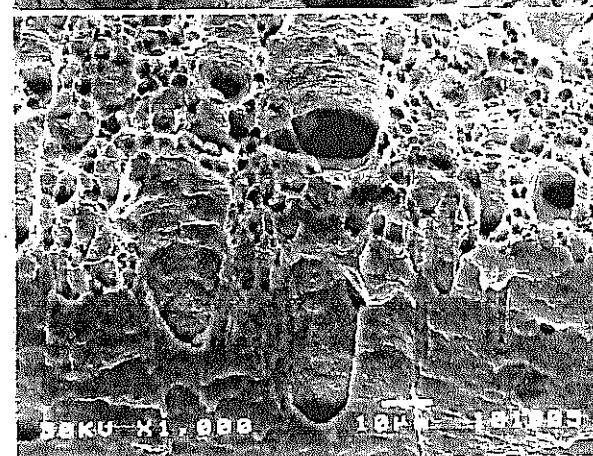
配管内表面側



同左拡大：配管外表面側



同左拡大：肉厚中央部

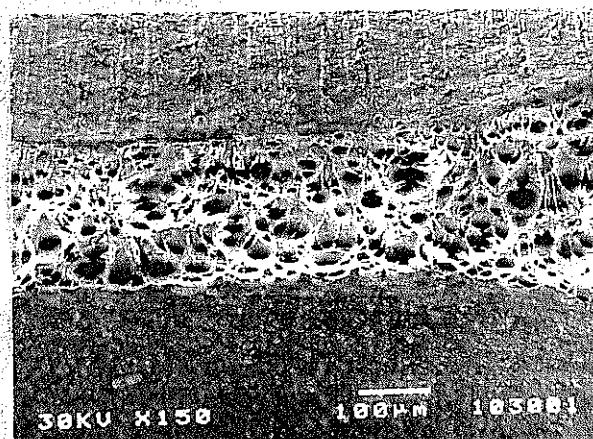


同左拡大：配管内表面側

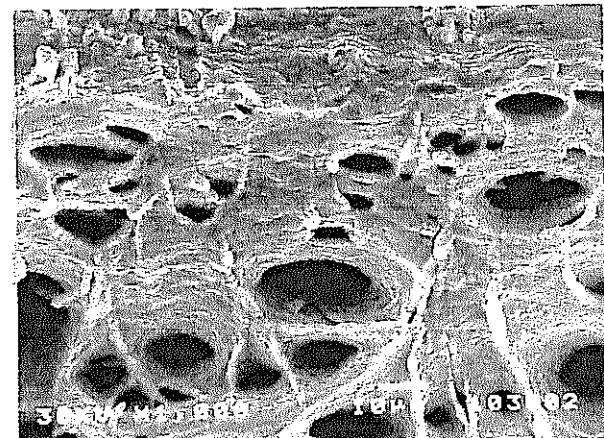
図3.3-10 高速引張試験後の破面
(700°C)

試験片No. : P1-03
材料ヒート : P1
試験雰囲気 : 大気中
試験温度 : 800°C
ひずみ速度 : 10%/sec

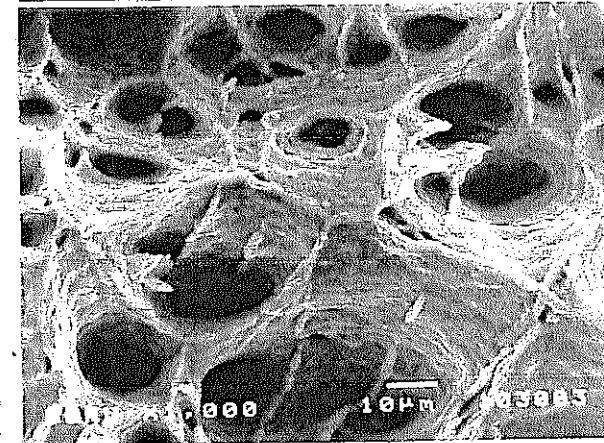
配管外表面側



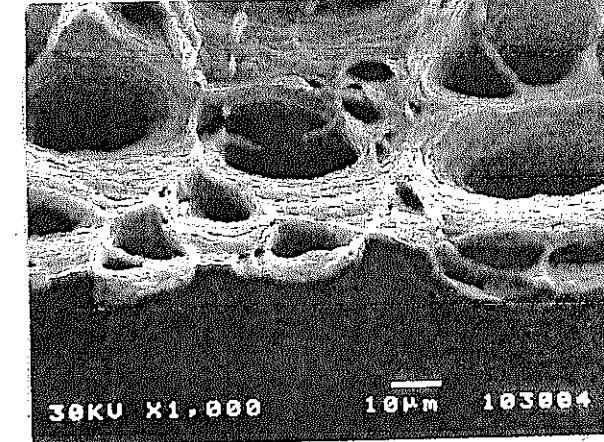
配管内表面側



同左拡大：配管外表面側



同左拡大：肉厚中央部

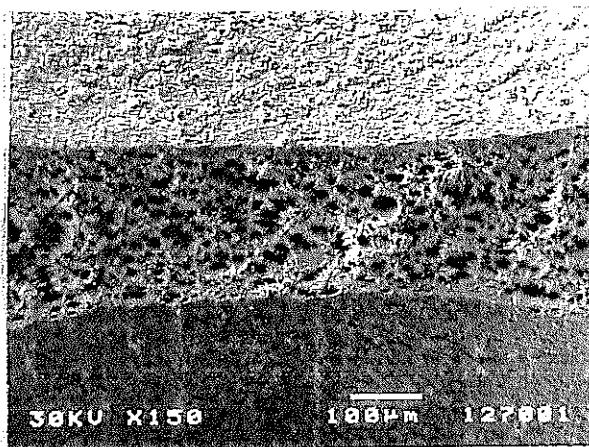


同左拡大：配管内表面側

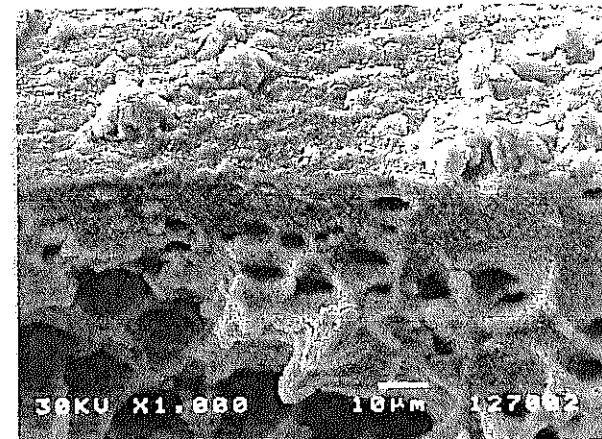
図3.3-11 高速引張試験後の破面
(800°C)

試験片No. : P1-27
材料ヒート : P1
試験雰囲気 : 大気中
試験温度 : 900°C
ひずみ速度 : 10%/sec

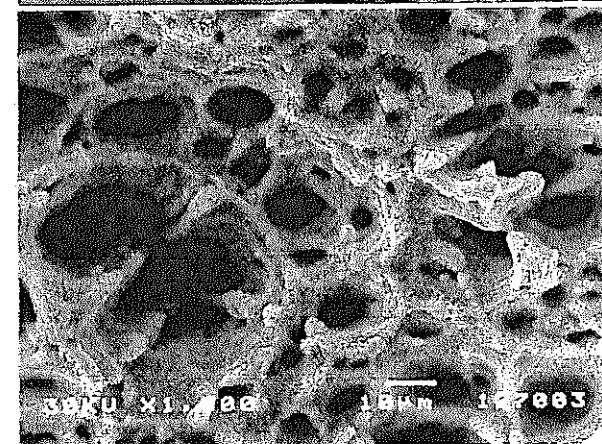
記管外表面側



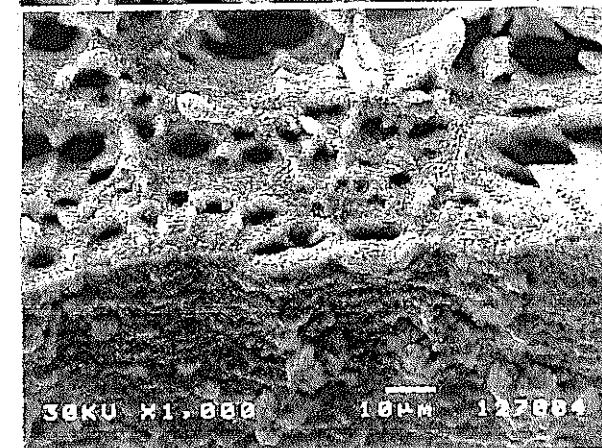
配管内表面側



同左拡大：配管外表面側



同左拡大：肉厚中央部

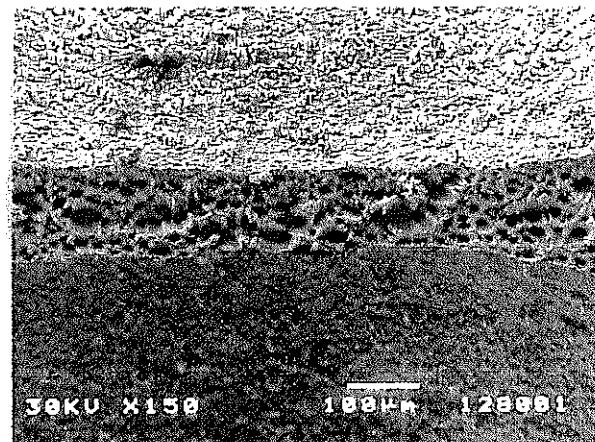


同左拡大：配管内表面側

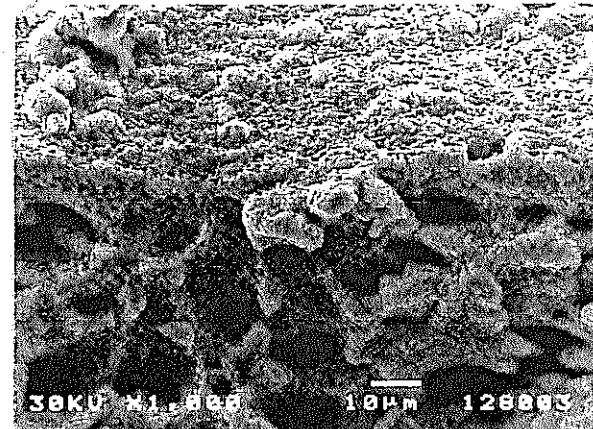
図3.3-12 高速引張試験後の破面
(900°C)

試験片No. : P1-28
材料ヒート : P1
試験雰囲気 : 大気中
試験温度 : 950°C
ひずみ速度 : 10%/sec

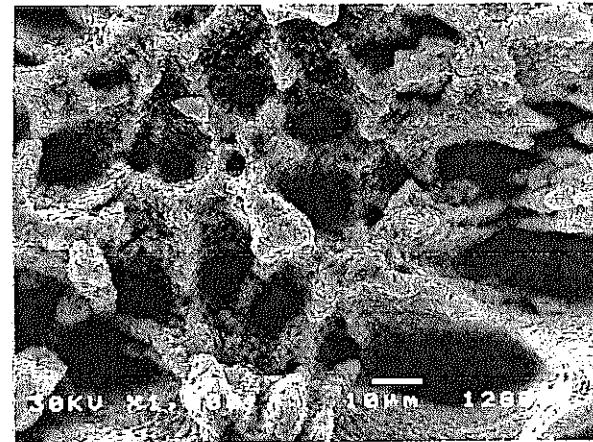
配管外表面側



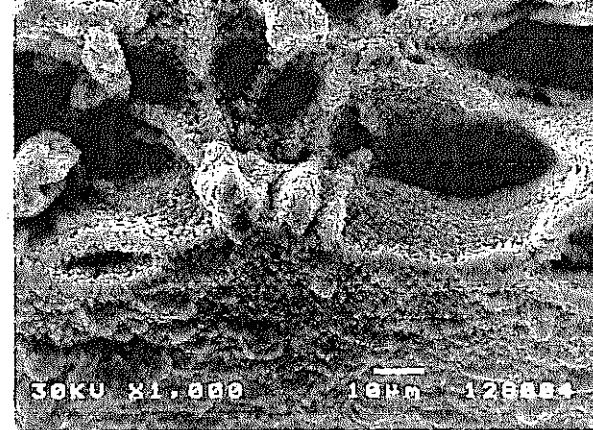
配管内表面側



同左拡大：配管外表面側



同左拡大：肉厚中央部

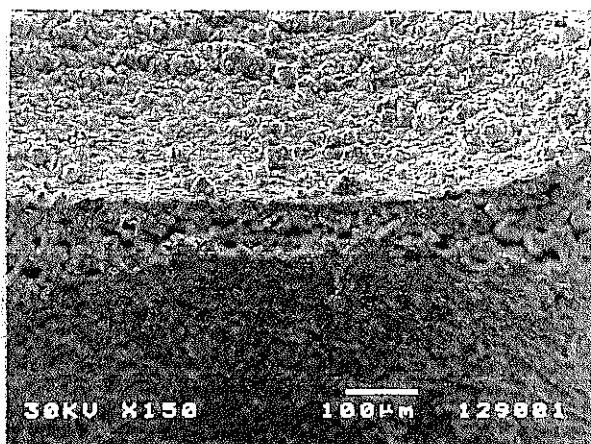


同左拡大：配管内表面側

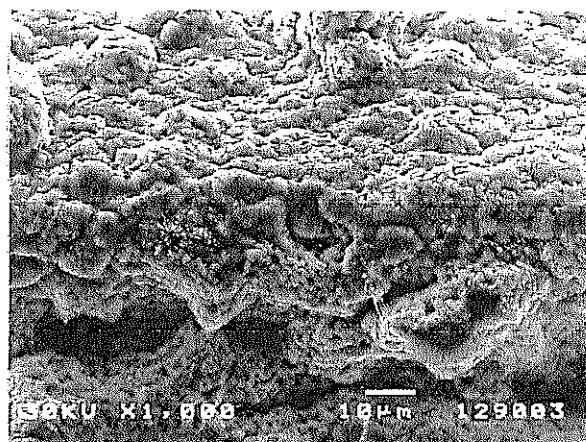
図3.3-13 高速引張試験後の破面
(950°C)

試験片No. : P1-29
材料ヒート : P1
試験雰囲気 : 大気中
試験温度 : 1000°C
ひずみ速度 : 10%/sec

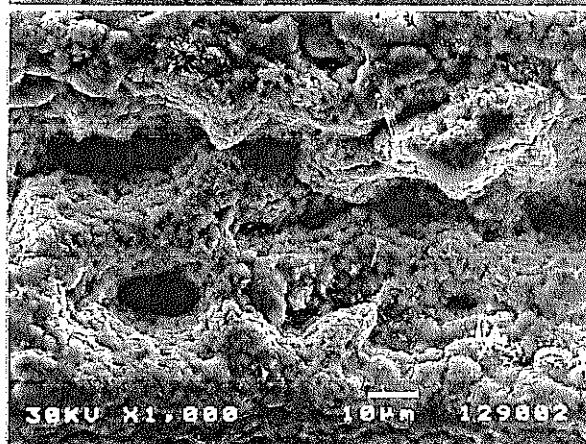
配管外表面側



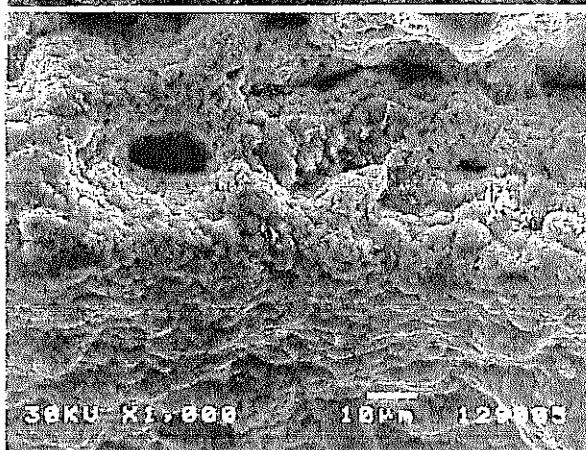
配管内表面側



同左拡大：配管外表面側



同左拡大：肉厚中央部

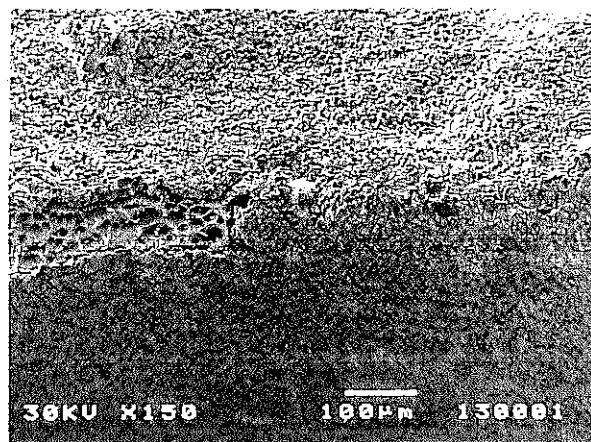


同左拡大：配管内表面側

図3.3-14 高速引張試験後の破面
(1000°C)

試験片No. : P1-30
材料ヒート : P1
試験雰囲気 : 大気中
試験温度 : 1100°C
ひずみ速度 : 10%/sec

配管外表面側



配管内表面側

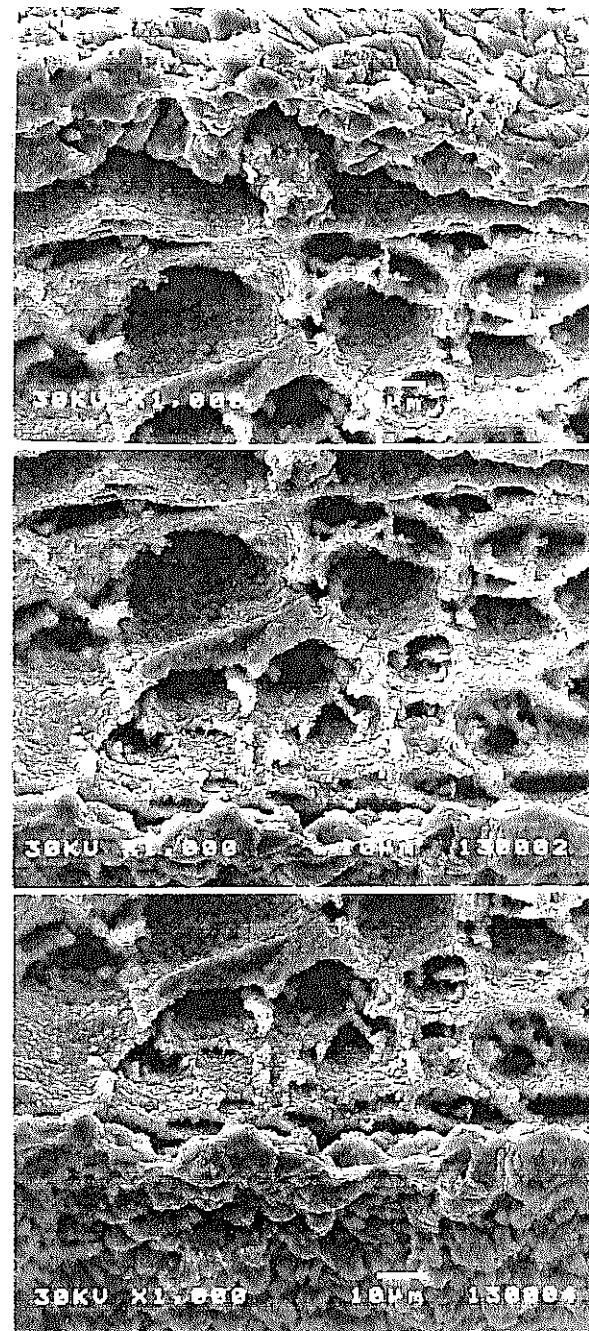
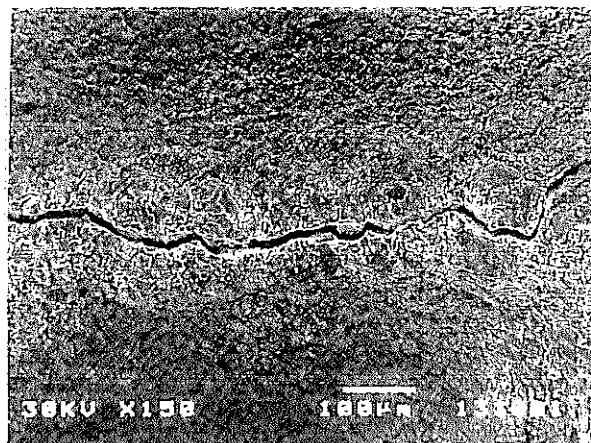


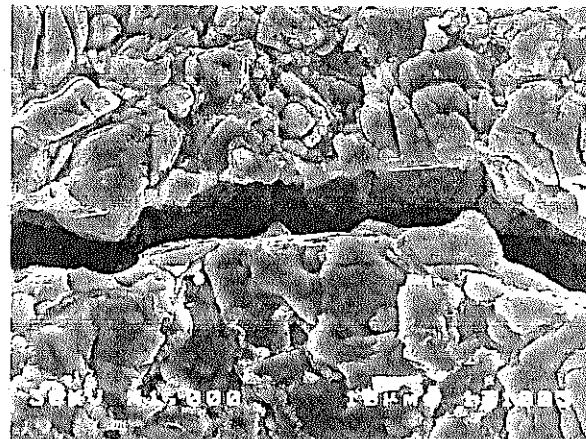
図3.3-15 高速引張試験後の破面
(1100°C)

試験片No. : P1-31
材料ヒート : P1
試験雰囲気 : 大気中
試験温度 : 1200°C
ひずみ速度 : 10%/sec

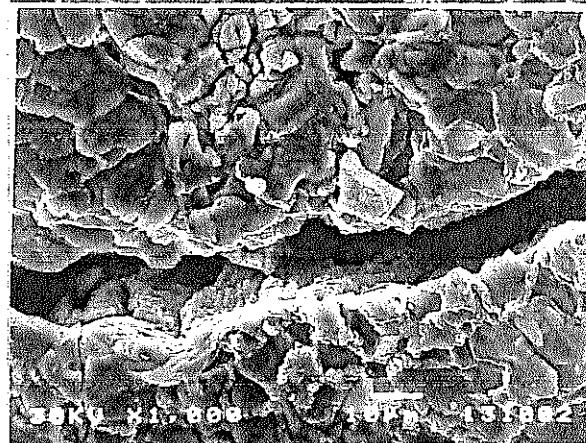
配管外表面側



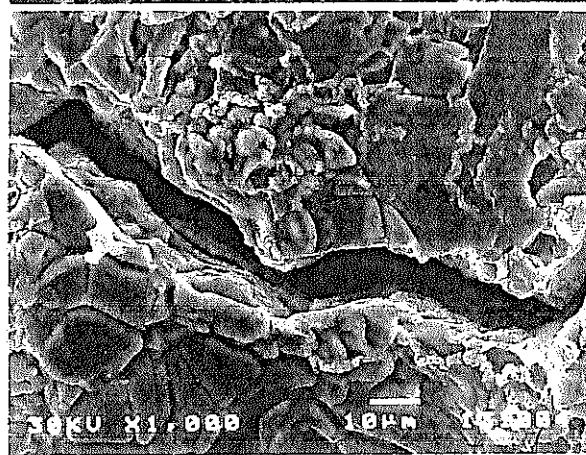
配管内表面側



同左拡大：左侧



同左拡大：中央部

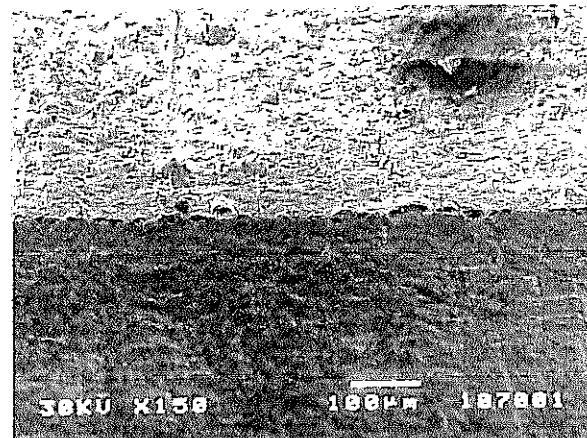


同左拡大：右側

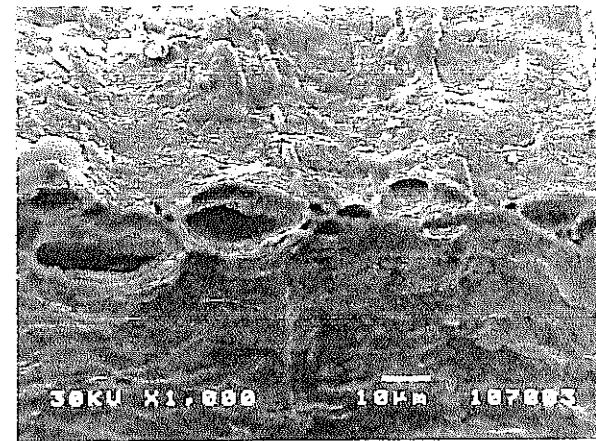
図3.3-16 高速引張試験後の破面
(1200°C)

試験片No. : P1-7AR
材料ヒート : P1
試験雰囲気 : Arガス中
試験温度 : 1200°C
ひずみ速度 : 10%/sec

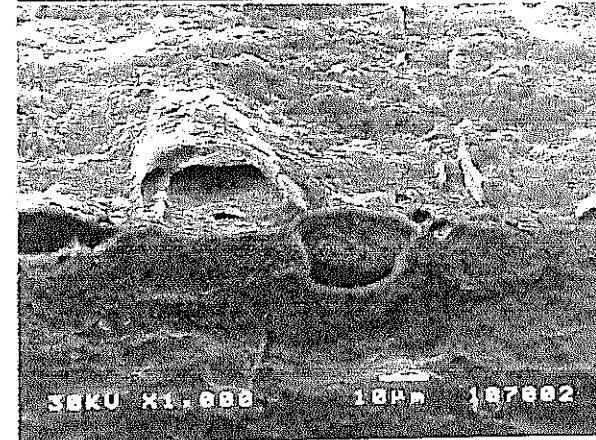
表 側



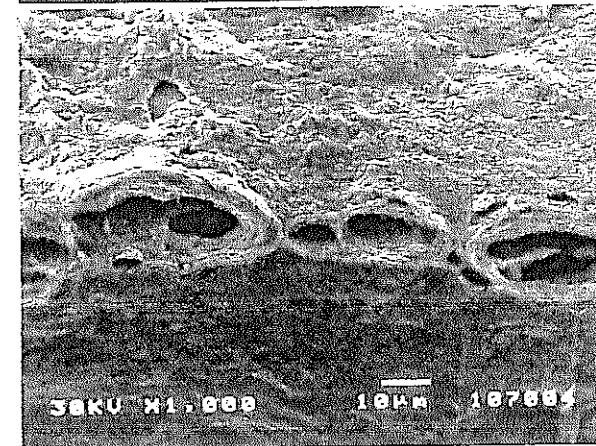
裏 側



同左拡大：左側



同左拡大：中央部

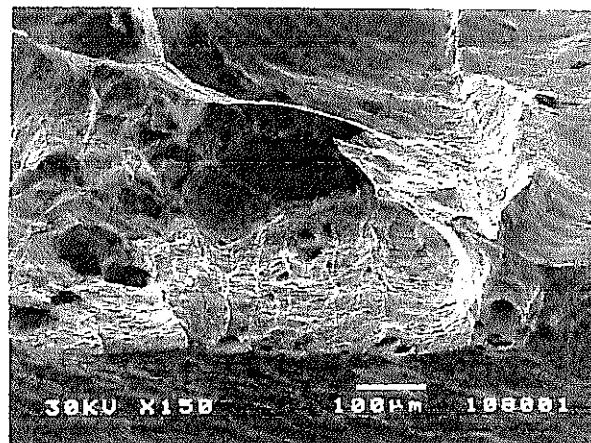


同左拡大：右側

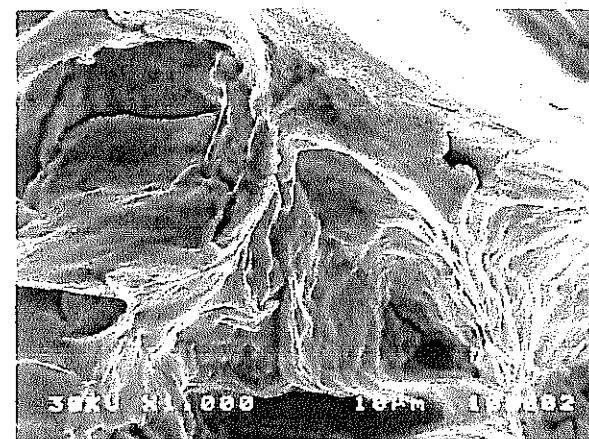
図3.3-17 高速引張試験後の破面
(1200°C、Arガス中)

試験片No. : P1-8AR
 材料ヒート : P1
 試験雰囲気 : Arガス中
 試験温度 : 1300°C
 ひずみ速度 : 10%/sec

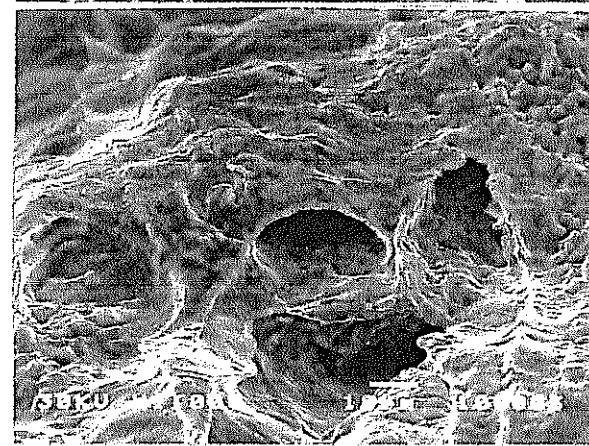
表 側



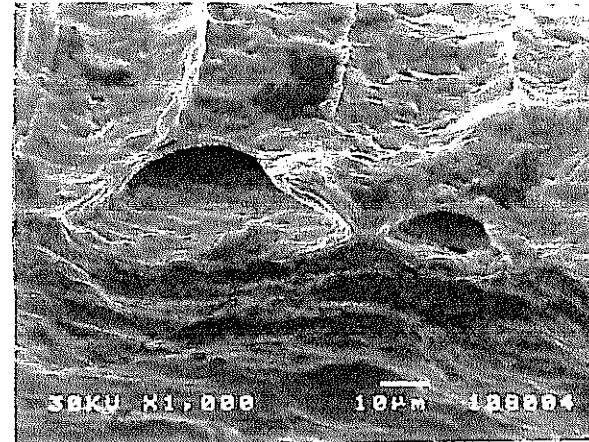
裏 側



同左拡大：表 側



同左拡大：板厚中央部



同左拡大：裏 側

図3.3-18 高速引張試験後の破面
 (1300°C、Arガス中)

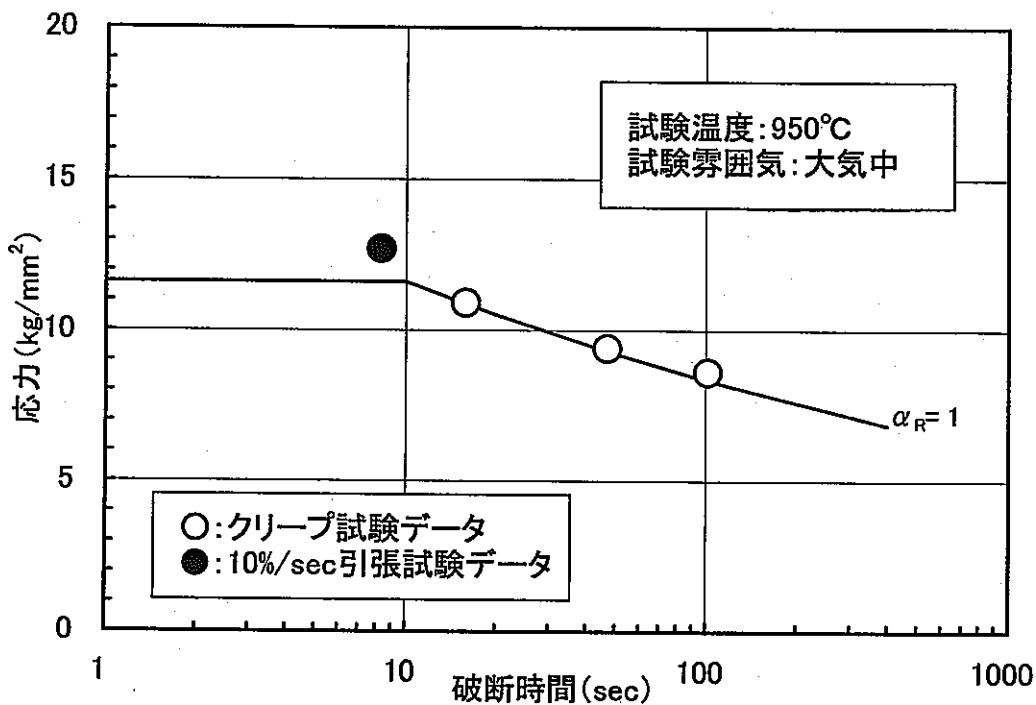


図4.1-1 試験データと解析結果の比較(950°C)

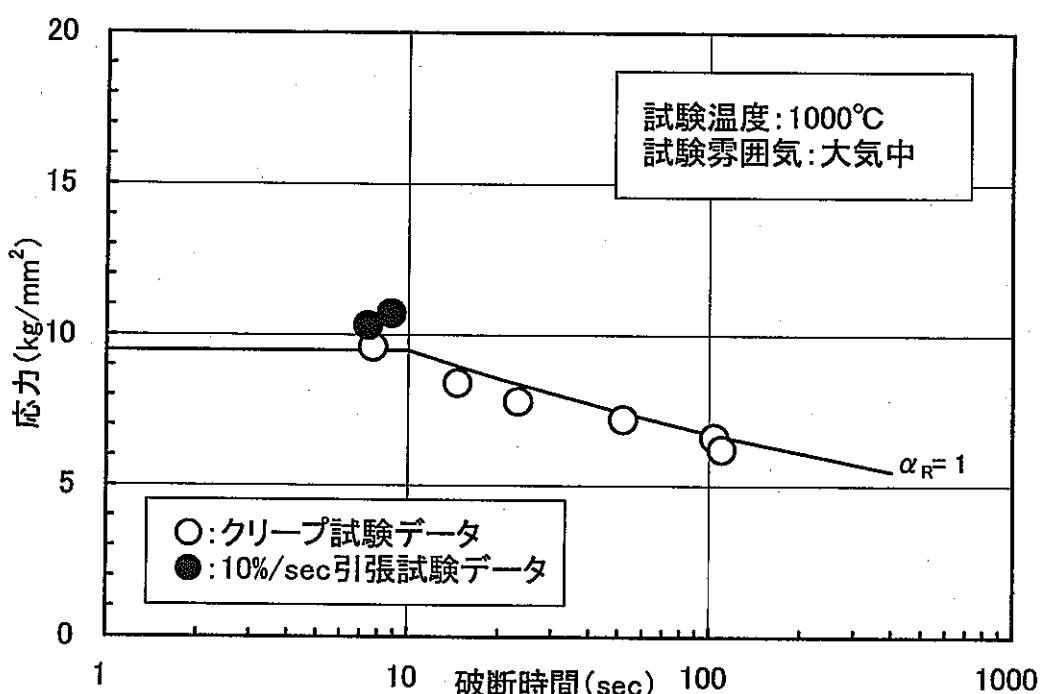


図4.1-2 試験データと解析結果の比較(1000°C)

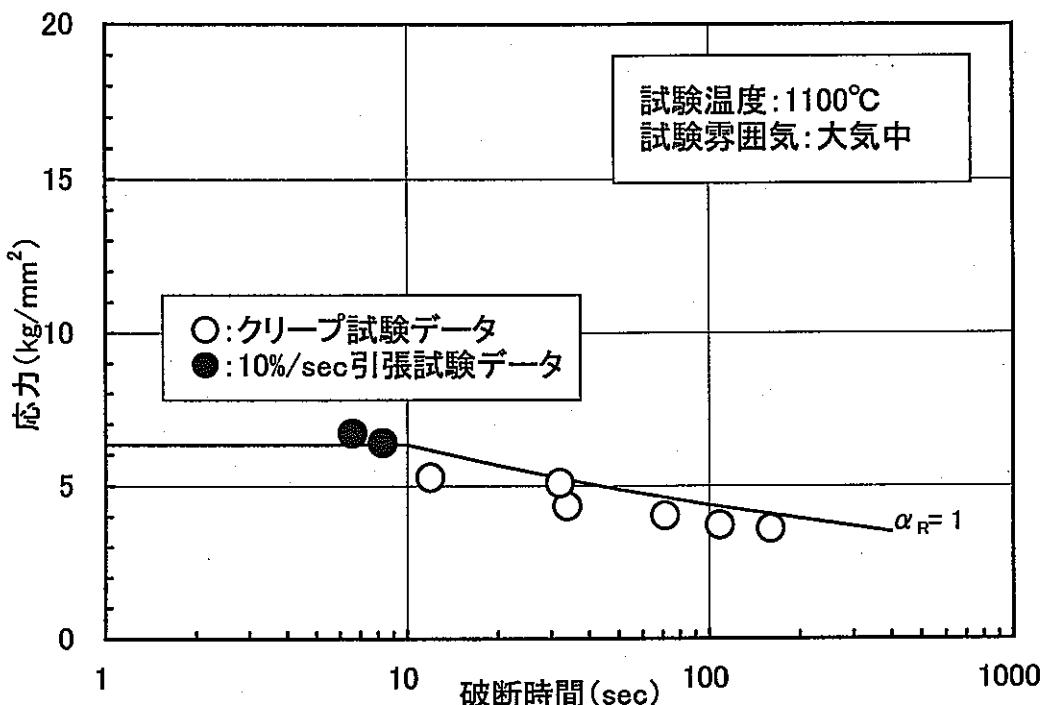


図4.1-3 試験データと解析結果の比較(1100°C)

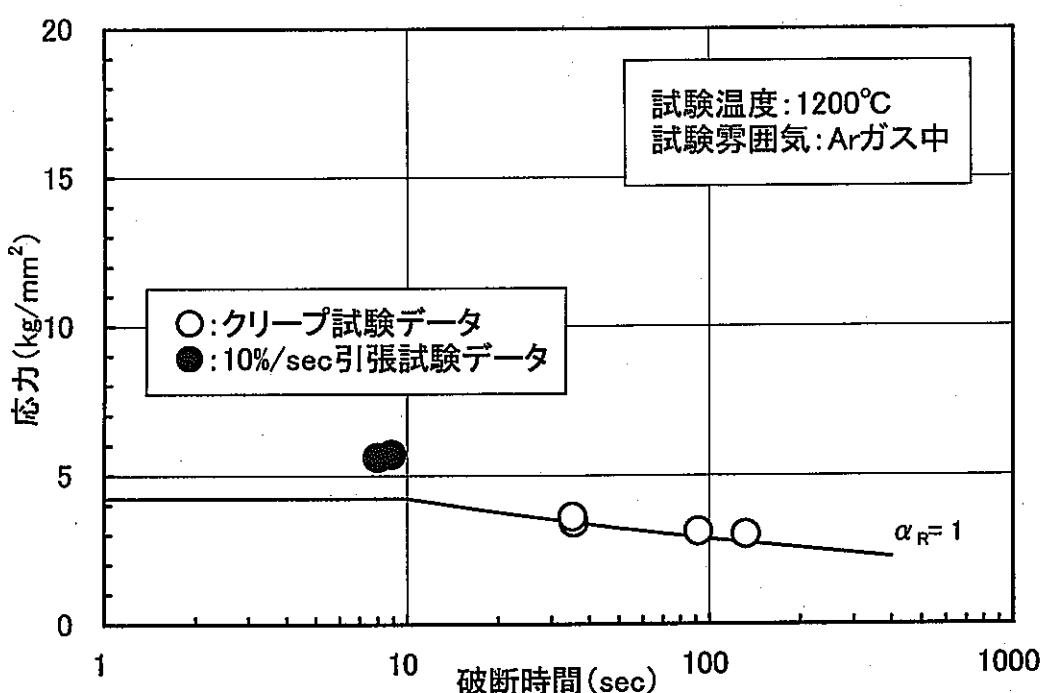


図4.1-4 試験データと解析結果の比較(1200°C)

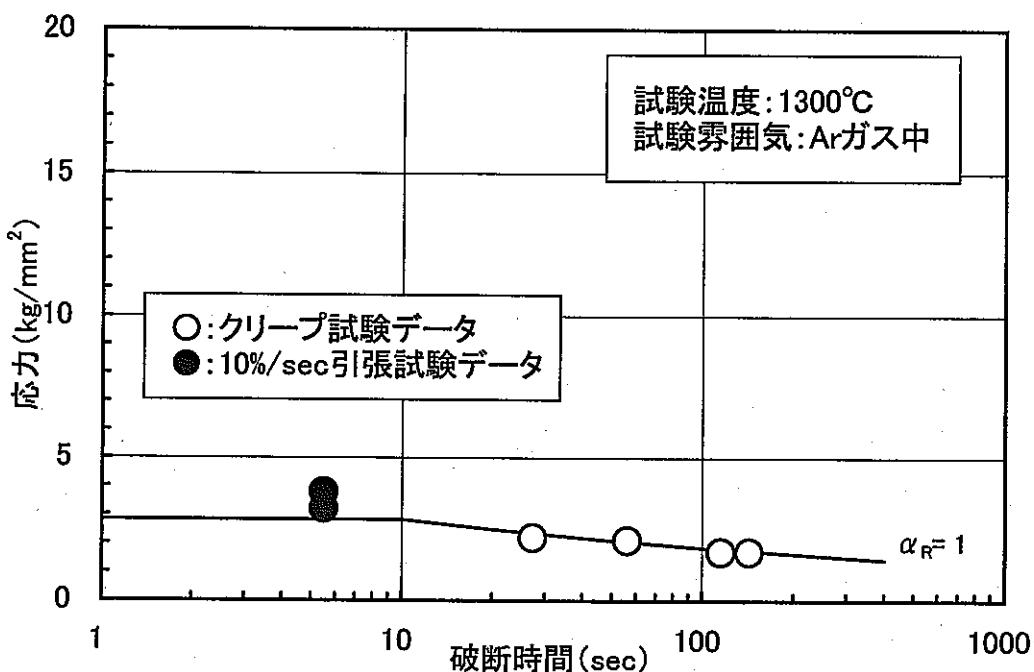


図4.1-5 試験データと解析結果の比較(1300°C)

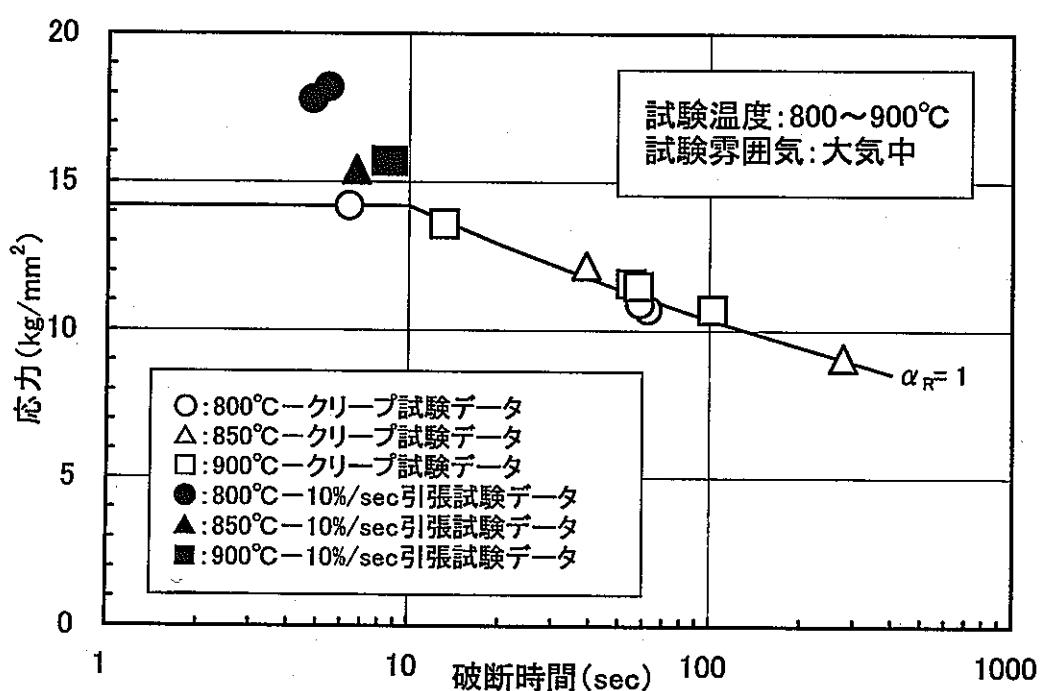


図4.1-6 試験データと解析結果の比較(800~900°C)

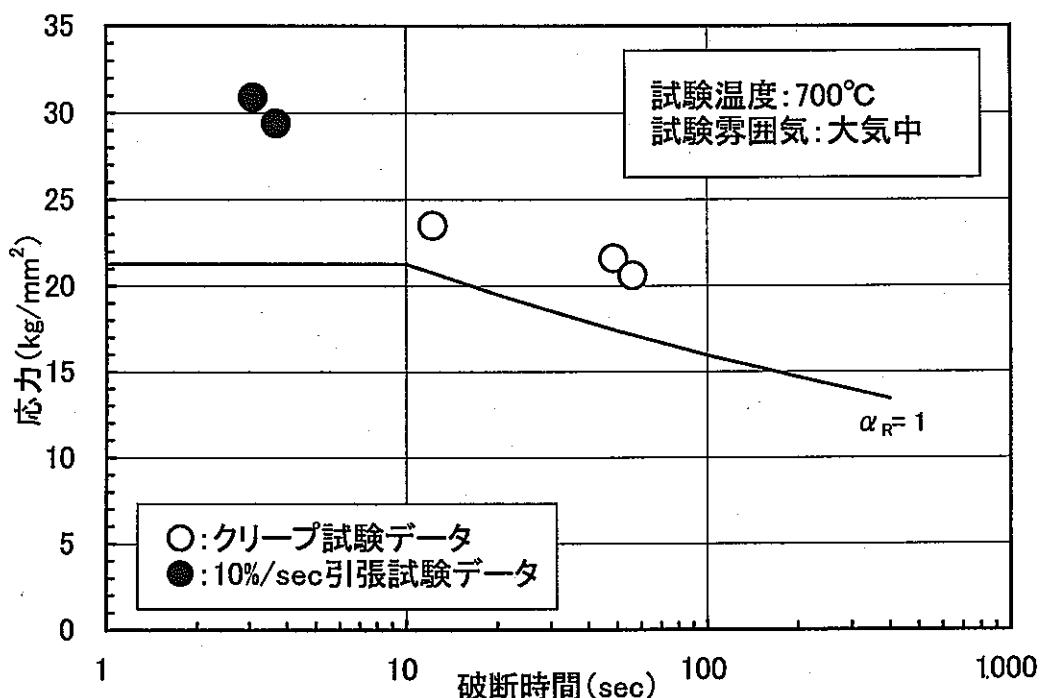


図4.1-7 試験データと解析結果の比較(700°C)

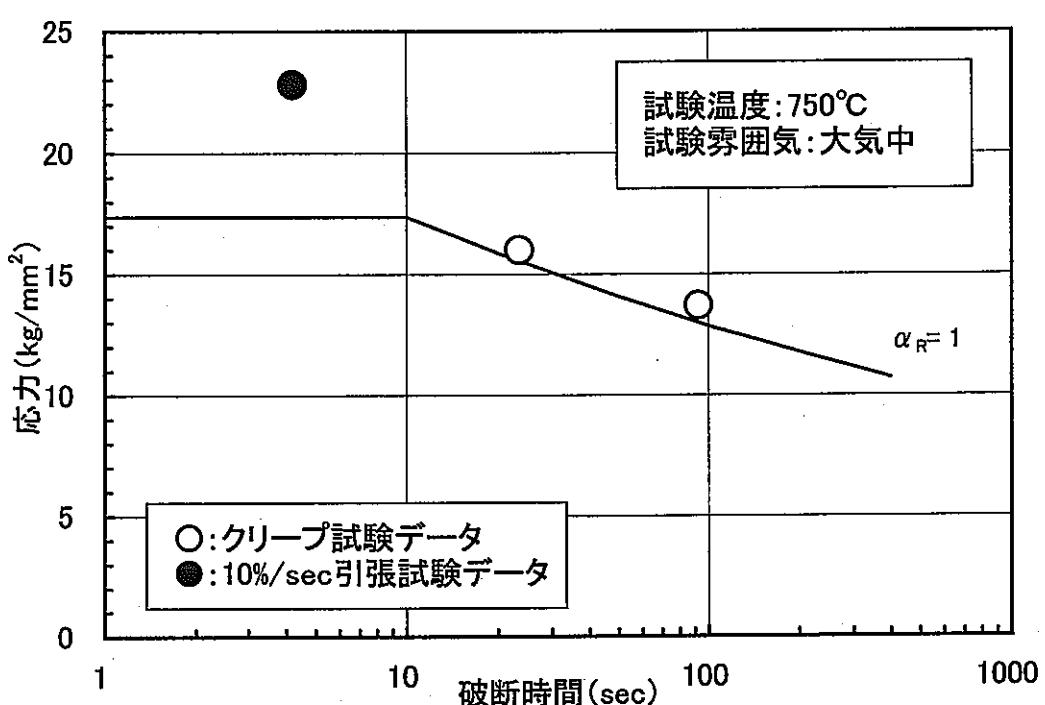
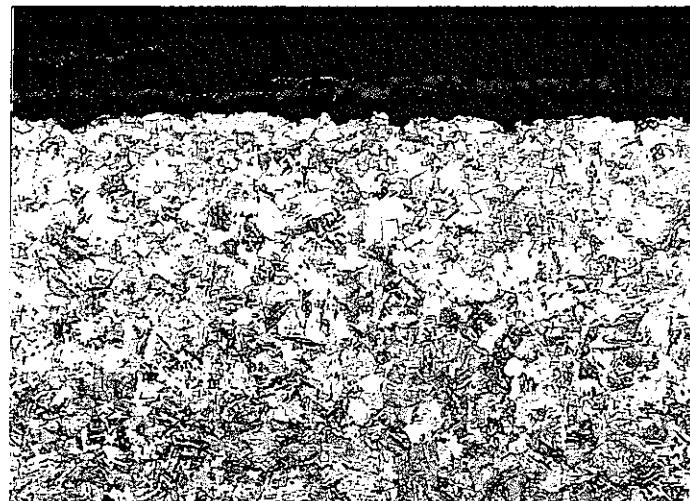
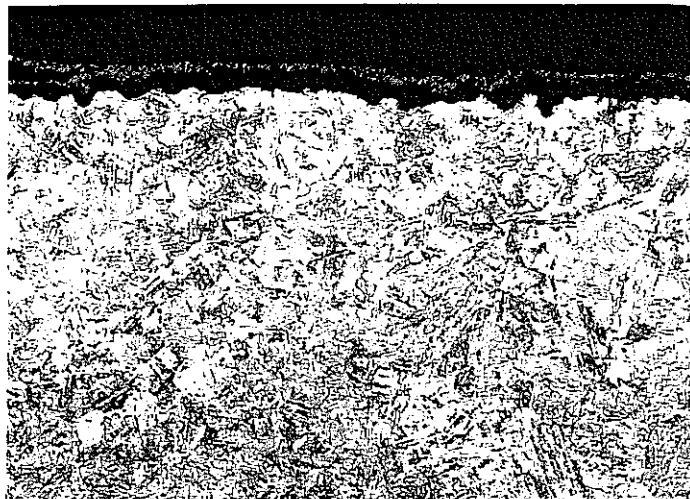


図4.1-8 試験データと解析結果の比較(750°C)



×100

試験片No. : P1-68
材料ヒート : P1
試験雰囲気 : 大気中
試験温度 : 1100°C
破断時間 : 71.7sec



×100

試験片No. : P2-29
材料ヒート : P2
試験雰囲気 : 大気中
試験温度 : 1100°C
破断時間 : 32.2sec

図4.1-9 クリープ試験片 (1100°C) の断面ミクロ組織

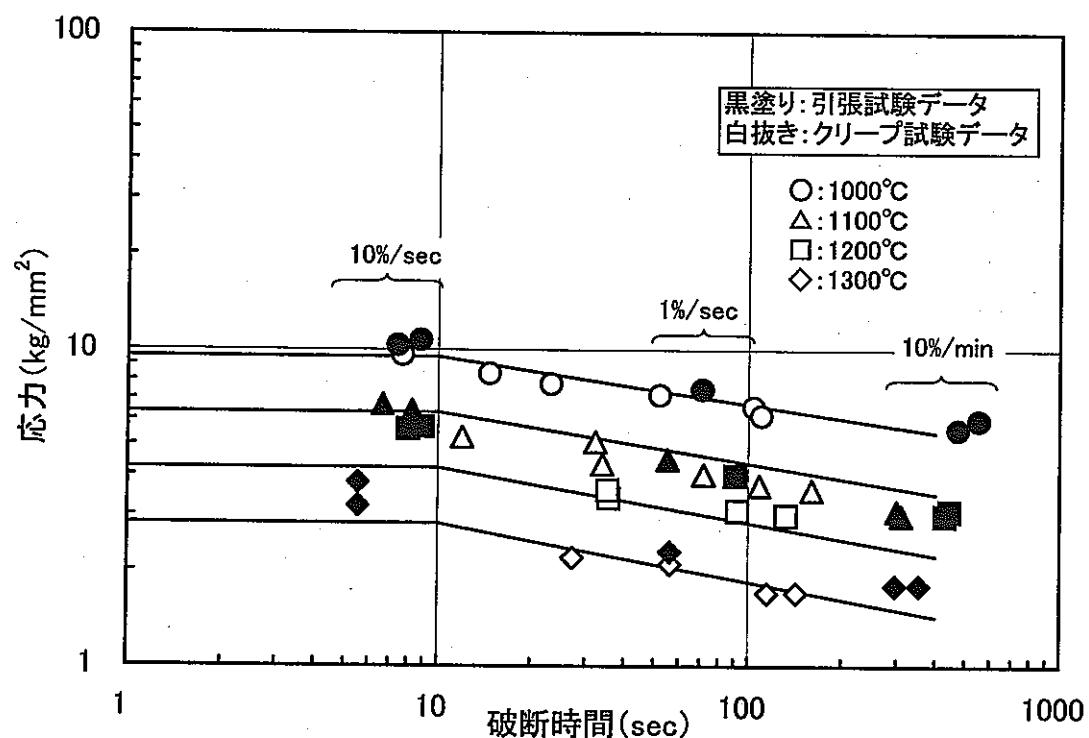


図4.1-10 定ひずみ速度と定応力における破断時間の比較

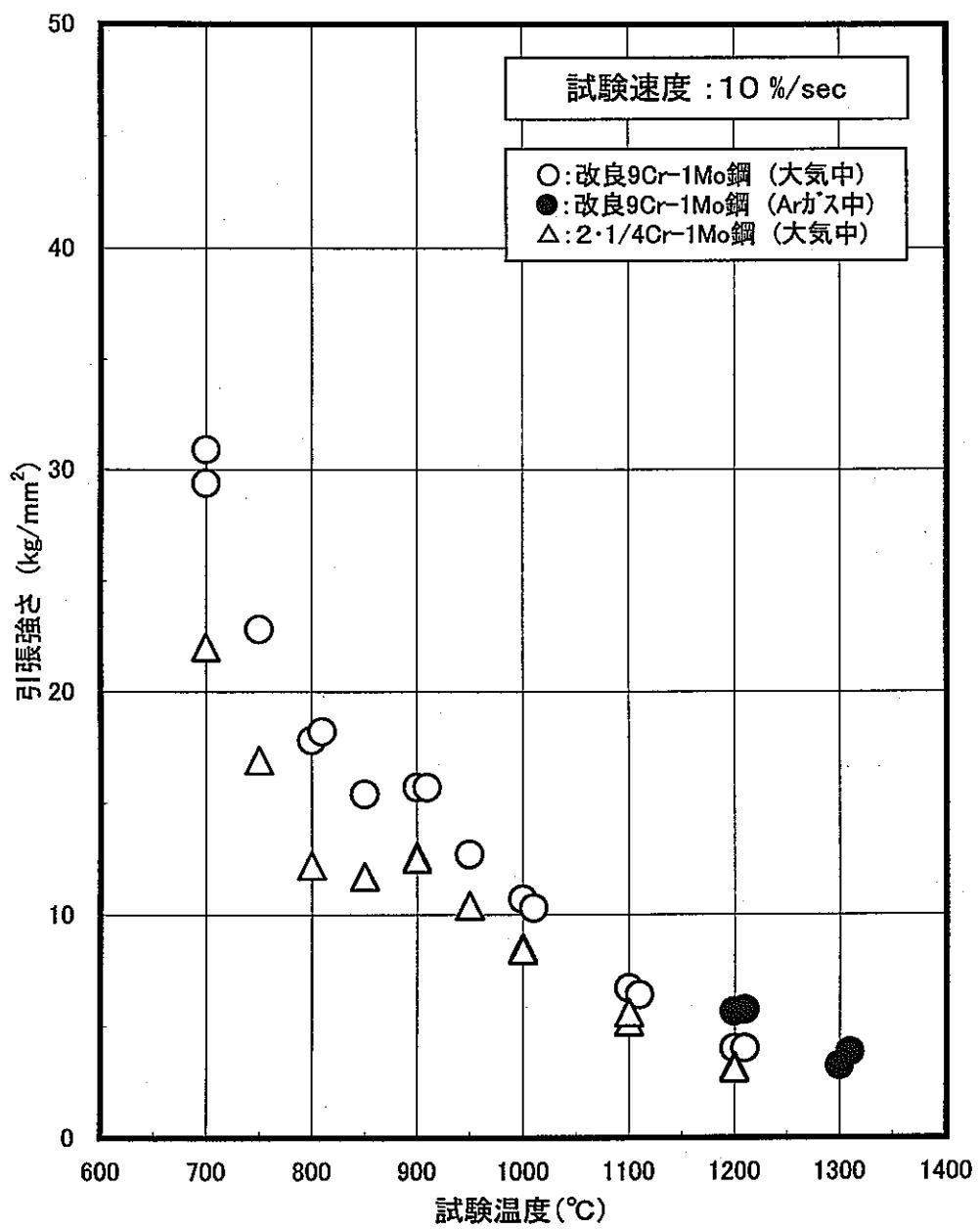


図4.2-1 改良9Cr-1Mo鋼と2·1/4Cr-1Mo鋼の引張強さの比較

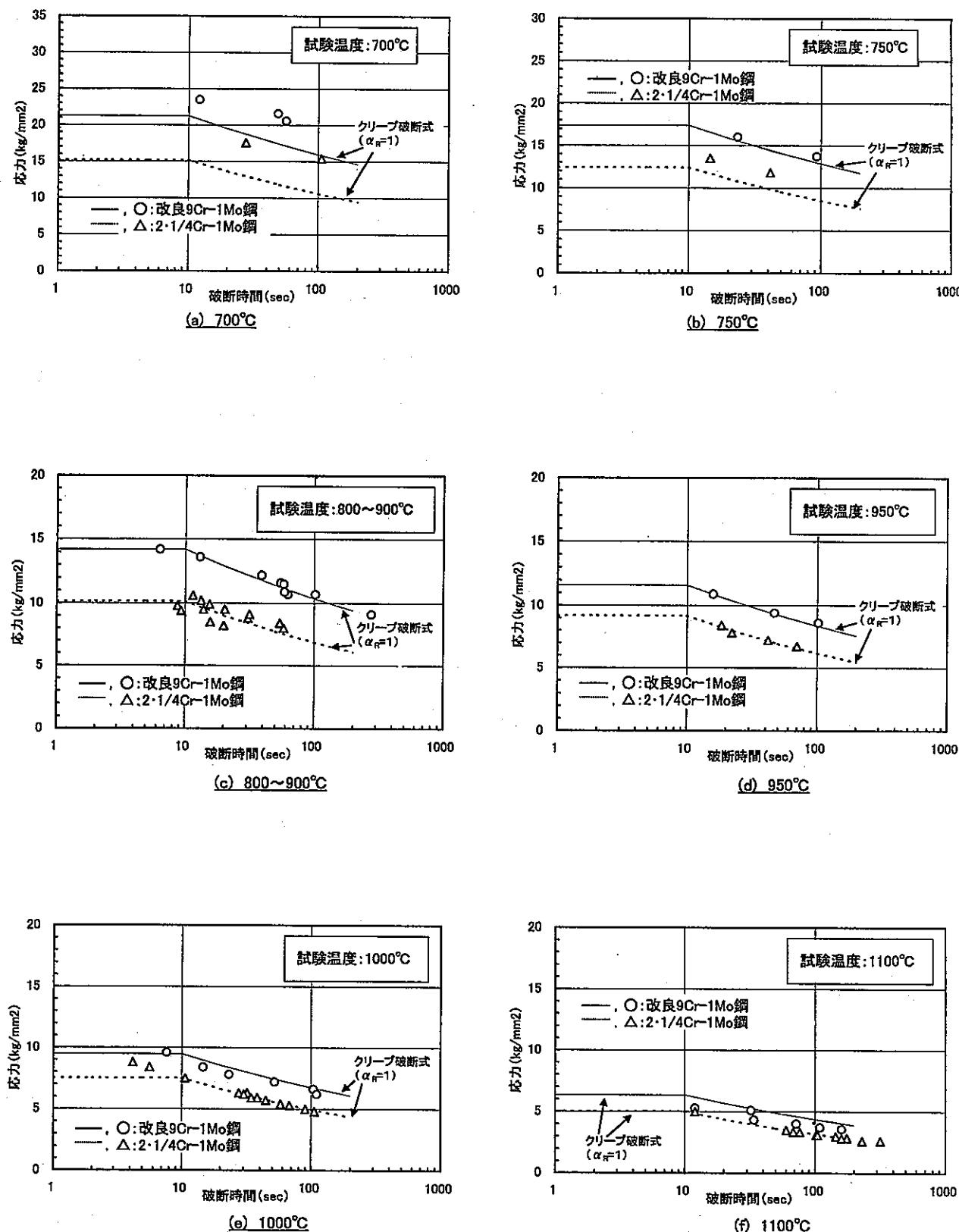


図4.2-2 改良9Cr-1Mo鋼と2・1/4Cr-1Mo鋼のクリープ破断強さの比較

付 錄

付録 1 弓引長試験装置の主要仕様

試験雰囲気		大気中	アルゴンガス中	
試験温度		室温～1200°C	1200、1300°C	
試験機本体	製作メーカー	島津製作所	MTS	
	型式	DSS-25T型 (電気サーボモータ式)	810型 (油圧サーボ式)	
	秤量	MAX 25ton	MAX ±10ton	
	ロードセル測定精度	±0.5%/FS	±0.5%/FS	
	ストローク	1250mm	±75mm	
	変位速度	0.005～500 mm/min 21段切換	—	
	クロスヘッド速度精度	全速度に対して±0.1%	±1.0%	
伸び測定	形式	試験片ツバ間変位測定式	試験片平行部押し当て式	
	検出器	マグネスケール	ひずみゲージ	
	測定範囲	0～50mm (GL50mm)	±2.5mm (GL25mm)	
	測定精度	±0.5%/FS	±0.5%/FS	
加熱炉	高温用	形式 温度範囲 熱電対 制御方式	縦割り型管状炉 300～900°C R PID多点同時制御方式	— — — —
	超高温用	形式 温度範囲 熱電対 制御方式	縦割り型管状炉 800～1600°C B PID制御方式	真空槽 300～2300°C C PID制御方式

付録 2 クリープ試験装置の主要仕様

試験雰囲気		大気中	大気中	アルゴンガス中
試験温度		700～1000°C	1100°C	1200、1300°C
試験機本体	製作メーカー	東伸工業	コベルコ科研	付録1のMTS製試験機を用いて荷重制御モードの試験を実施した。
	形式	縦型単元荷重式	縦型直荷重式	
	最大負荷量	750kg	150kg	
	レバーヒーク	1:10	1:1	
	初荷重	0kg	0kg	
	負荷精度	±0.5%/FS	±0.1%/FS	
伸び計	形式	ツバ間変位測定式	ツバ間変位測定式	
	検出器	リニアゲージ	CDP-25 変位計	
	測定範囲	0～50mm	0～25mm	
	測定精度	±0.5%/FS	1/1000mm	
加熱炉	形式	縦筒型管状開閉式	縦筒型管状開閉式	
	温度範囲	300～1000°C	100～1100°C	
	熱電対	R	R	
	制御方式	SCR比例制御方式	SCR比例制御方式	

付録3 改良9Cr-1Mo鋼の超高温引張試験結果

試験条件	試験片No.	試験温度 [°C]	試験雰囲気	0.2%耐力 [kg/mm ²]	引張強さ [kg/mm ²]	破断伸び [%]	破断絞り [%]	破断位置	一様伸び [%]
P 1ヒート JIS高速引張 (10%/min)	P1-21	20	大気中	54.8	69.3	24.2	85.9	A	8.7
	P1-22	550	大気中	38.7	42.9	26.0	91.2	A	1.8
	P1-23	700	大気中	21.3	22.8	50.9	98.1	A	0.7
	P1-24	750	大気中	13.4	14.9	56.7	98.9	A	0.8
	P1-26	800	大気中	9.4	10.7	71.2	98.9	A	1.8
	P1-10	850	大気中	8.4	9.6	109.4	97.4	B	10.0
	P1-05	900	大気中	8.1	9.7	107.9	98.3	A	10.5
	P1-06	950	大気中	6.8	7.8	119.4	98.7	A	8.7
	P1-07	1000	大気中	5.6	6.0	92.4	97.8	A	7.3
	P1-08	1100	大気中	3.0	3.1	50.2	98.6	A	0.7
	P1-09	1200	大気中	1.4	1.7	67.6	99.5	A	10.8
	P1-2AR	1200	Arガス中	2.3	3.0	71.7	97.2	A	14.0
	P1-4AR	1300	Arガス中	1.2	1.8	59.1	96.7	A	11.3
P 1ヒート 超高速引張 (1%/sec)	P1-32	700	大気中	22.7	25.0	40.9	97.1	A	1.2
	P1-33	750	大気中	15.1	17.6	44.7	98.3	A	1.6
	P1-34	800	大気中	10.5	13.1	60.2	98.9	A	2.6
	P1-35	850	大気中	9.1	11.6	97.7	95.4	A	11.6
	P1-36	900	大気中	8.7	12.0	84.7	98.6	A	13.4
	P1-37	950	大気中	7.6	9.9	98.0	98.6	A	11.5
	P1-38	1000	大気中	6.0	7.5	71.0	98.7	A	8.1
	P1-39	1100	大気中	3.7	4.5	55.2	98.7	A	5.6
	P1-40	1200	大気中	1.7	2.5	66.3	98.7	A	17.8
	P1-5AR	1200	Arガス中	2.7	4.0	90.6	97.6	A	16.1
	P1-6AR	1300	Arガス中	1.5	2.3	56.2	96.1	A	14.6
	P1-01	700	大気中	28.1	29.4	36.8	96.0	A	1.1
	P1-02	750	大気中	21.4	22.8	42.2	97.9	A	0.9
P 1ヒート 超高速引張 (10%/sec)	P1-03	800	大気中	16.1	17.8	47.7	98.6	A	1.2
	P1-04	850	大気中	11.3	15.4	66.7	93.8	B	14.6
	P1-27	900	大気中	10.1	15.7	83.5	98.6	A	17.2
	P1-28	950	大気中	8.9	12.7	83.3	99.1	A	15.3
	P1-29	1000	大気中	7.8	10.7	87.8	99.4	A	15.1
	P1-30	1100	大気中	5.3	6.7	66.4	99.0	A	12.4
	P1-31	1200	大気中	2.7	4.0	81.1	98.4	A	18.7
	P1-7	1200	Arガス中	3.4	5.6	80.1	96.6	A	17.1
	P1-8	1300	Arガス中	1.9	3.2	55.5	93.7	A	17.1
	P2-04	700	大気中	22.0	23.4	47.5	97.3	A	0.7
	P2-05	800	大気中	9.3	10.7	61.0	98.6	A	3.9
P 2ヒート JIS高速引張 (10%/min)	P2-02	900	大気中	7.9	9.6	104.2	95.3	A	10.0
	P2-03	1000	大気中	5.0	5.6	79.3	90.5	A	6.5
	P2-01	1100	大気中	2.9	3.0	51.9	92.7	A	0.9
	P2-06	1200	大気中	1.3	1.7	47.5	91.2	A	14.0
	P2-1AR	1200	Arガス中	2.2	3.1	74.3	96.0	A	13.2
	P2-2AR	1300	Arガス中	1.3	1.8	49.5	92.7	A	9.6
	P2-07	700	大気中	29.1	30.9	30.5	94.8	B	1.0
	P2-08	800	大気中	16.2	18.2	53.5	98.8	A	1.3
P 2ヒート 超高速引張 (10%/sec)	P2-10	900	大気中	10.0	15.7	88.1	98.1	A	17.6
	P2-11	1000	大気中	7.4	10.3	74.1	98.7	A	13.6
	P2-12	1100	大気中	4.8	6.4	82.6	98.8	A	13.5
	P2-18	1200	大気中	2.6	4.0	64.1	97.9	A	18.8
	P2-3AR	1200	Arガス中	3.4	5.7	89.1	96.5	A	18.6
	P2-4AR	1300	Arガス中	2.2	3.8	55.4	94.9	A	17.0

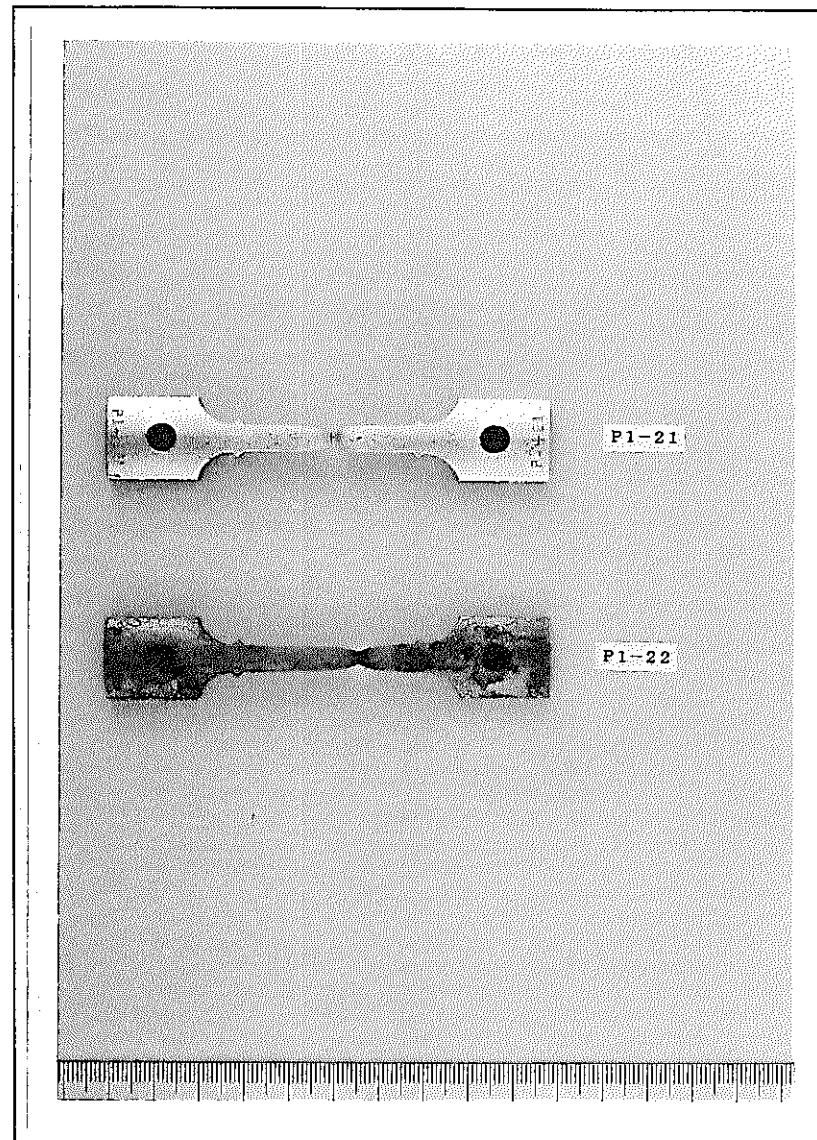
付録4 改良9Cr-1Mo鋼の超高温クリープ試験結果

P1ヒート

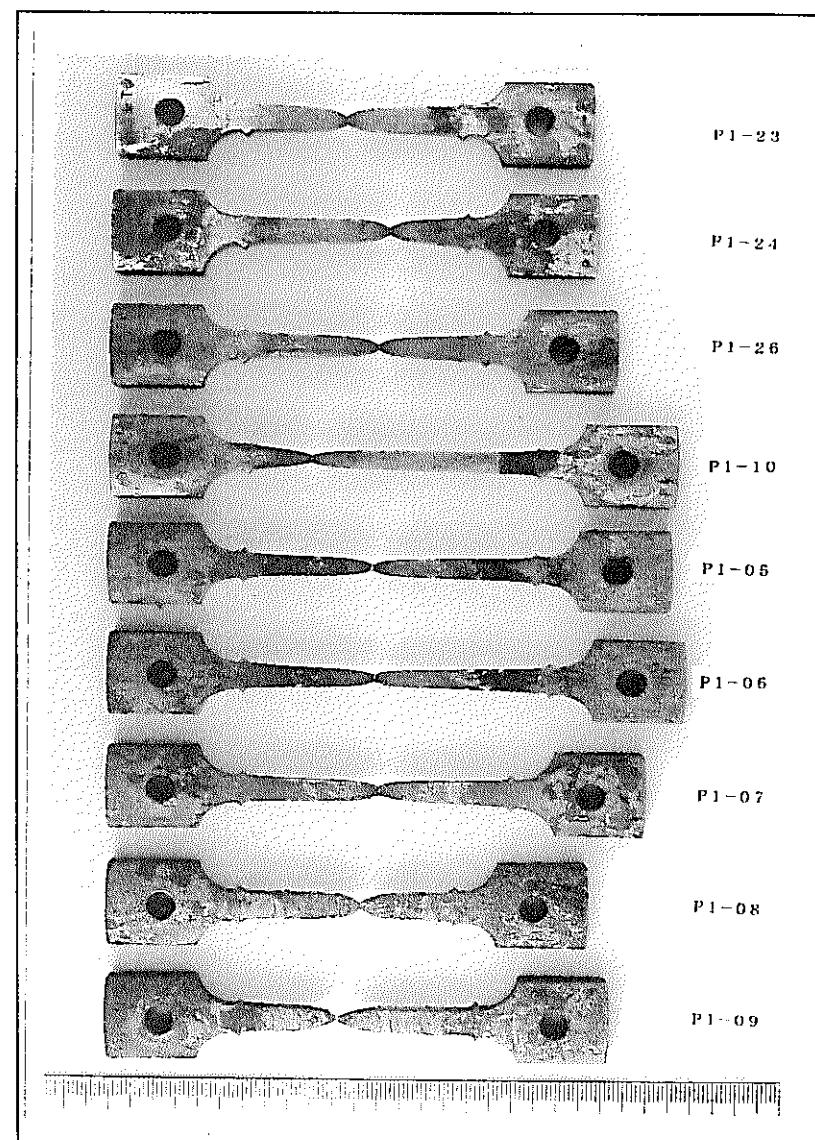
試験片No.	試験温度 [°C]	雰囲気	設定応力 [kg/mm ²]	試験応力 [kg/mm ²]	破断時間 [sec]	破断伸び [%]	破断絞り [%]	瞬間ひずみ [%]	定常クリープ速度 [%/sec]	破断位置
P1-18	700	大気中	0.8σ _u	23.50	12.23	44.3	93.9	0.422	3.00E-01	A
P1-11	700	大気中	0.7σ _u	20.60	56.37	47.7	94.4	0.236	8.00E-02	A
P1-12	750	大気中	0.7σ _u	16.00	23.47	60.9	97.4	0.249	3.00E-01	A
P1-19	750	大気中	0.6σ _u	13.70	92.83	60.7	97.4	0.128	9.00E-02	A
P1-13	800	大気中	0.8σ _u	14.20	6.35	70.6	98.3	0.761	1.02E+00	A
P1-20	800	大気中	0.6σ _u	10.70	62.32	67.5	98.4	0.338	1.60E-01	A
P1-41	850	大気中	0.8σ _u	12.20	39.00	92.4	95.6	2.328	7.70E-01	A
P1-14	850	大気中	0.6σ _u	9.10	277.40	139.6	96.6	1.184	1.10E-01	A
P1-45	900	大気中	1.4σ _u	13.60	13.10	86.0	98.6	4.392	2.16E+00	A
P1-15	900	大気中	1.2σ _u	11.60	54.70	100.1	98.8	3.049	5.50E-01	A
P1-42	900	大気中	1.1σ _u	10.70	102.10	103.8	98.6	1.097	3.00E-01	A
P1-47	950	大気中	1.4σ _u	10.90	15.88	62.1	97.3	2.193	1.67E+00	B
P1-16	950	大気中	1.2σ _u	9.40	47.11	81.1	97.0	1.264	6.10E-01	A
P1-43	950	大気中	1.1σ _u	8.60	101.90	104.5	99.1	0.634	3.00E-01	A
P1-44	1000	大気中	1.6σ _u	9.60	7.68	76.8	98.3	3.293	3.30E+00	A
P1-17	1000	大気中	1.4σ _u	8.40	14.68	68.4	98.1	1.690	1.70E+00	A
P1-46	1000	大気中	1.2σ _u	7.20	52.00	84.4	98.6	1.268	4.90E-01	A
P1-48	1000	大気中	1.1σ _u	6.60	104.15	99.7	98.5	0.422	2.90E-01	A
P1-66	1100	大気中	1.7σ _u	5.27	12.00	46.7	97.4	0.946	3.71E+00	B
P1-65	1100	大気中	1.4σ _u	4.34	34.00	60.6	98.4	0.495	6.10E-01	A
P1-68	1100	大気中	1.3σ _u	4.03	71.70	72.8	97.9	0.562	3.31E-01	A
P1-67	1100	大気中	1.2σ _u	3.72	108.70	69.4	98.3	0.196	3.03E-01	A
P1-35AR	1200	Arガス中	1.1σ _u	3.40	35.60	77.1	97.0	0.67	4.9E-01	A
P1-24AR	1200	Arガス中	1.0σ _u	3.00	132.30	73.7	95.6	0.29	1.5E-01	A
P1-36AR	1300	Arガス中	1.2σ _u	2.20	27.30	48.4	93.9	1.00	5.8E-01	A
P1-32AR	1300	Arガス中	1.0σ _u	1.70	115.10	49.7	95.4	0.39	1.2E-01	A

P2ヒート

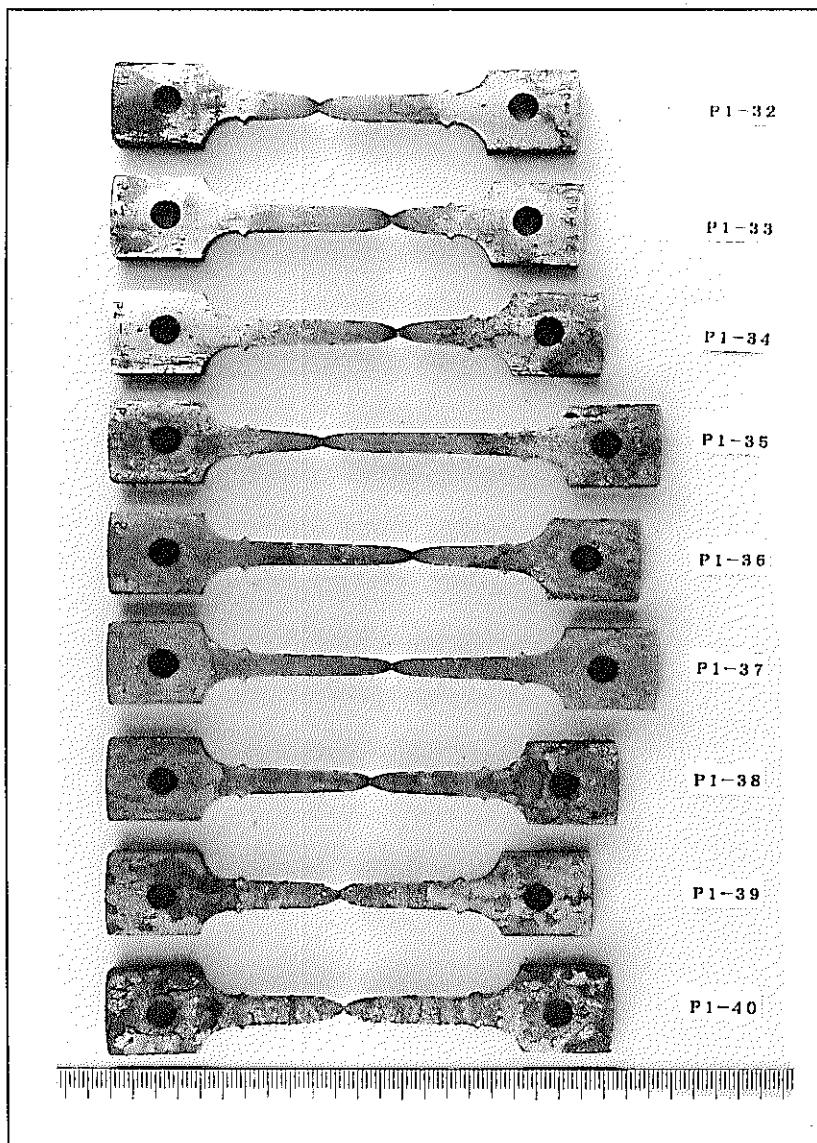
試験片No.	試験温度 [°C]	雰囲気	設定応力 [kg/mm ²]	試験応力 [kg/mm ²]	破断時間 [sec]	破断伸び [%]	破断絞り [%]	瞬間ひずみ [%]	定常クリープ速度 [%/sec]	破断位置
P2-13	700	大気中	0.7σ _u	21.60	48.81	31.3	92.7	0.084	1.20E-01	B
P2-14	800	大気中	0.6σ _u	10.90	58.57	77.3	98.5	0.169	1.40E-01	A
P2-15	900	大気中	1.2σ _u	11.50	57.95	94.8	97.5	1.519	5.10E-01	B
P2-16	1000	大気中	1.4σ _u	7.80	23.25	110.5	96.6	1.097	1.18E+00	B
P2-17	1000	大気中	1.1σ _u	6.20	110.20	87.5	96.9	0.169	3.00E-01	A
P2-29	1100	大気中	1.7σ _u	5.10	32.20	70.8	95.4	0.289	1.00E+00	A
P2-28	1100	大気中	1.2σ _u	3.60	160.20	60.7	88.8	0.608	1.90E-01	A
P2-18AR	1200	Arガス中	1.2σ _u	3.60	35.30	77.5	95.9	0.93	5.0E-01	A
P2-8AR	1200	Arガス中	1.0σ _u	3.10	92.20	80.0	96.0	0.46	2.0E-01	A
P2-19AR	1300	Arガス中	1.2σ _u	2.10	56.30	61.3	90.9	0.65	2.7E-01	A
P2-12AR	1300	Arガス中	1.0σ _u	1.70	142.90	53.3	90.6	0.31	1.1E-01	A



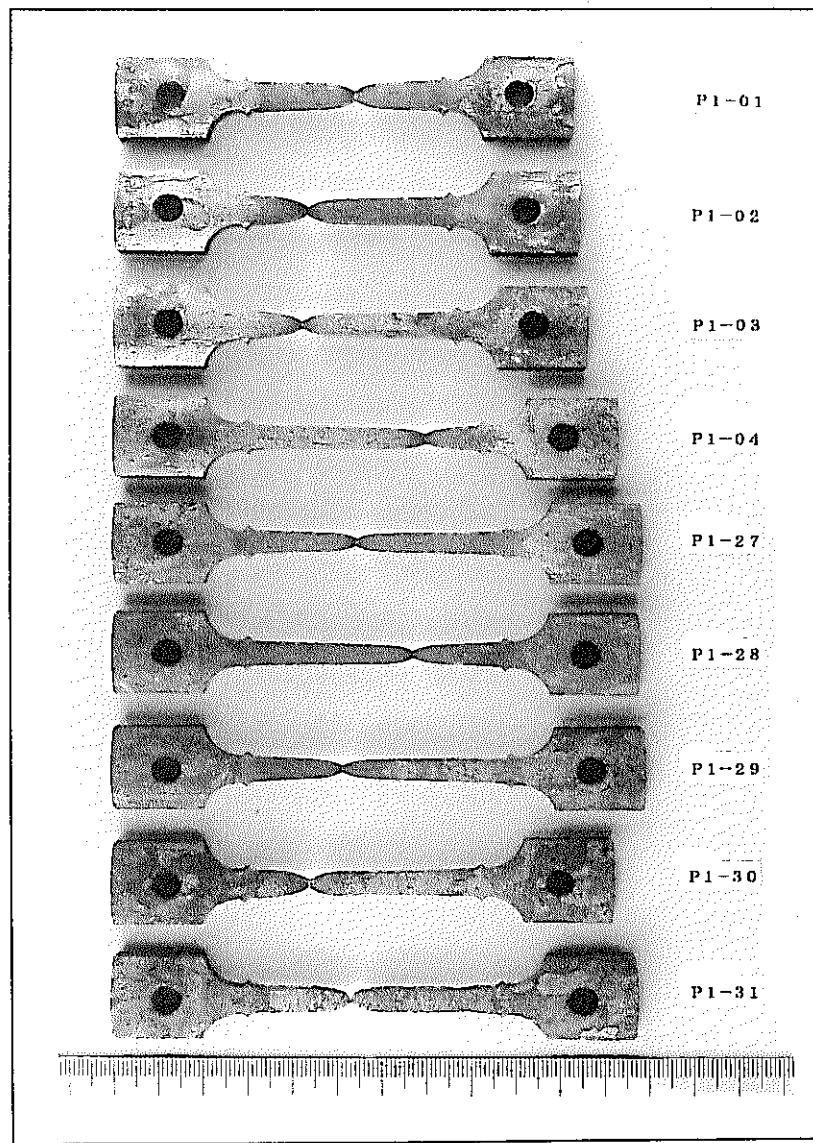
付録5-1 引張試験後の試験片外観写真
(P1ヒート、大気中、室温～550°C、10%/min)



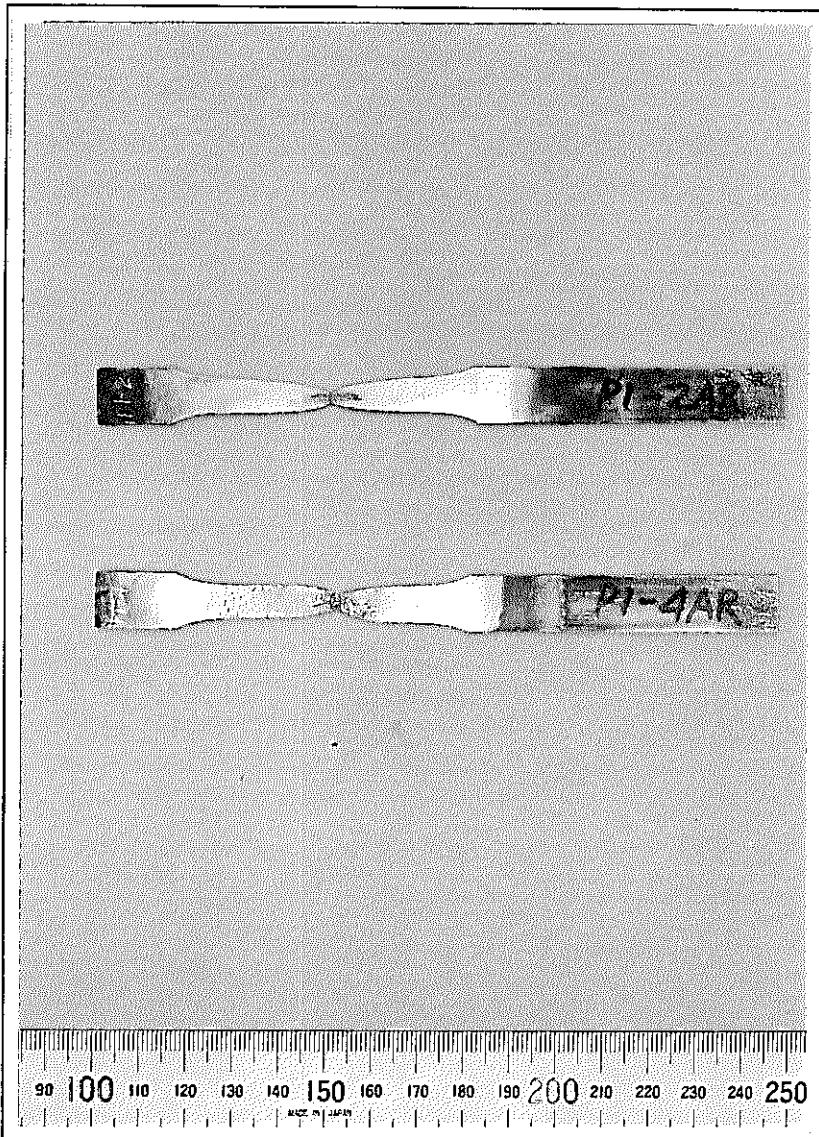
付録5-2 引張試験後の試験片外観写真
(P1ヒート、大気中、700～1200°C、10%/min)



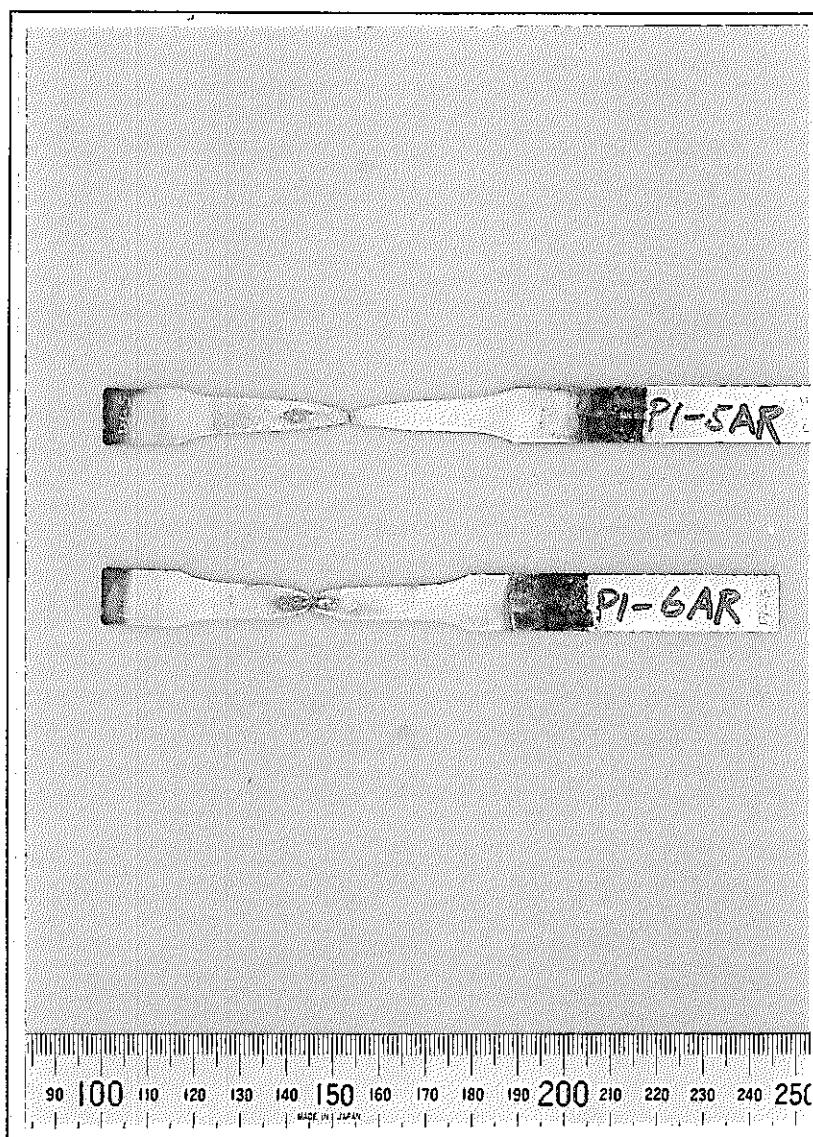
付録5-3 引張試験後の試験片外観写真
(P1ヒート、大気中、700~1200°C、1%/sec)



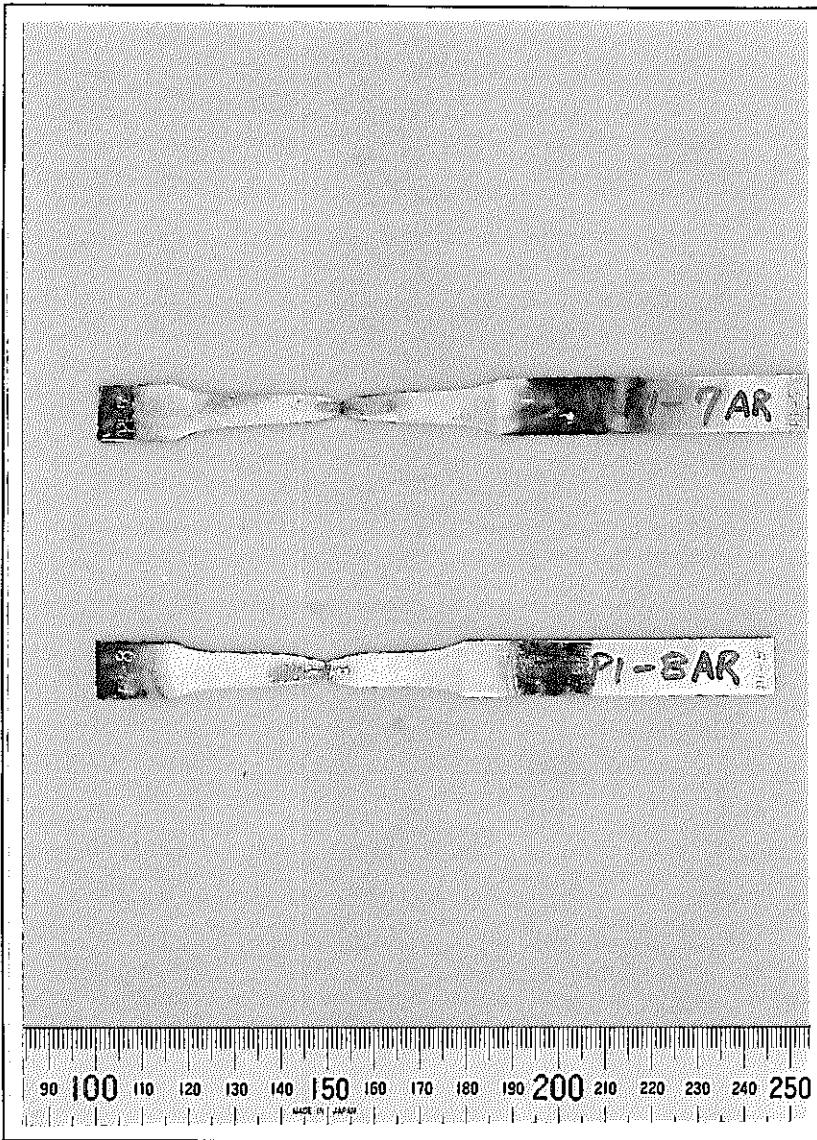
付録5-4 引張試験後の試験片外観写真
(P1ヒート、大気中、700~1200°C、10%/sec)



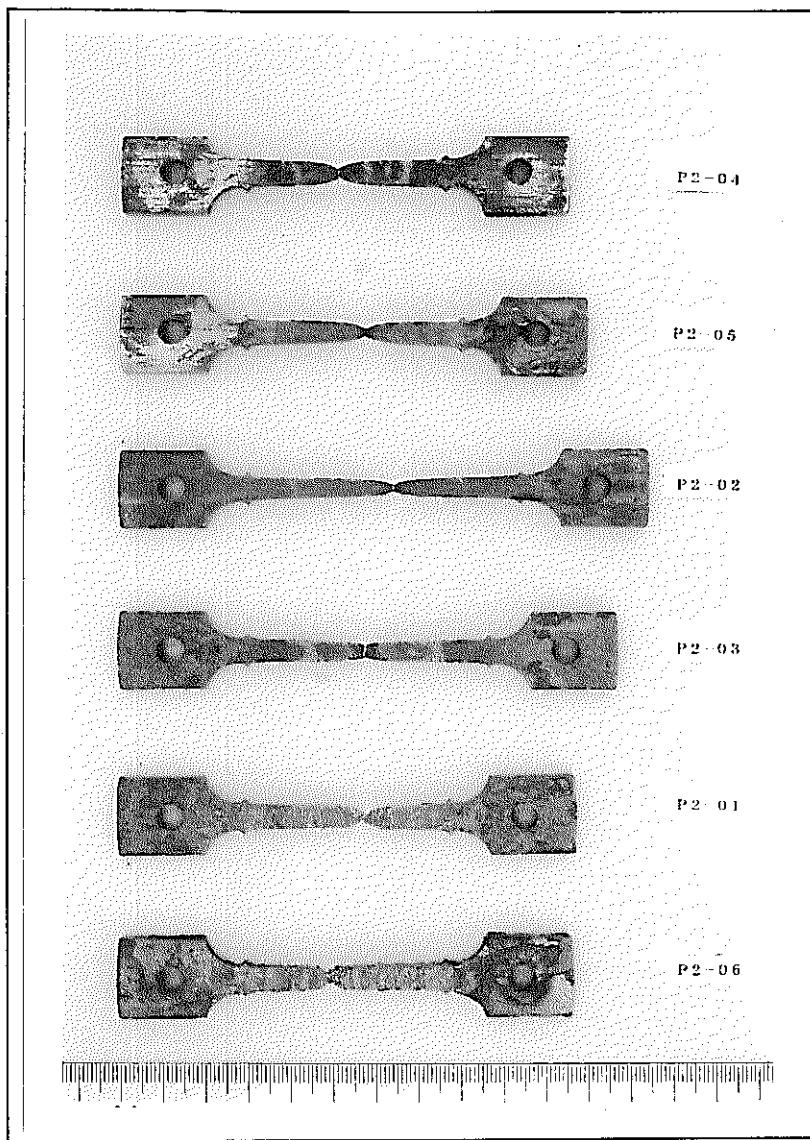
付録5-5 引張試験後の試験片外観写真
(P1ヒート、Arガス中、1200~1300°C、10%/min)



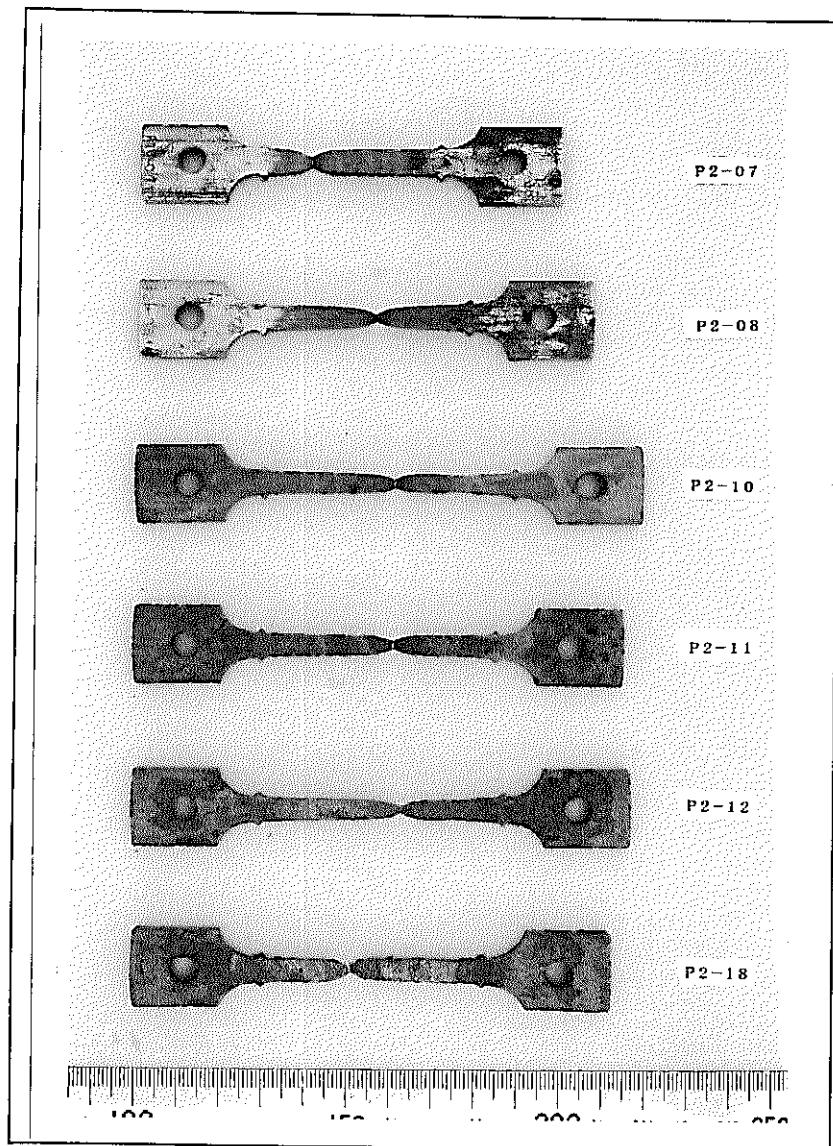
付録5-6 引張試験後の試験片外観写真
(P1ヒート、Arガス中、1200~1300°C、1%/sec)



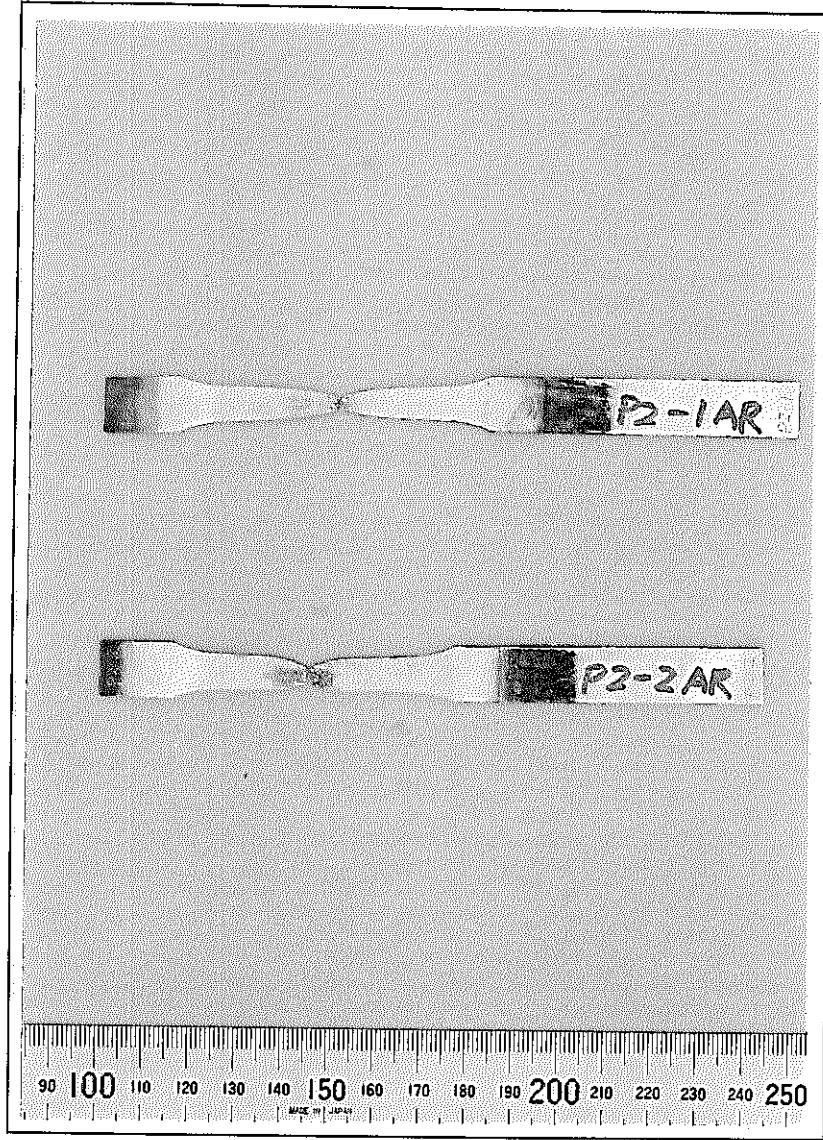
付録5-7 引張試験後の試験片外観写真
(P1ヒート、Arガス中、1200~1300°C、10%/sec)



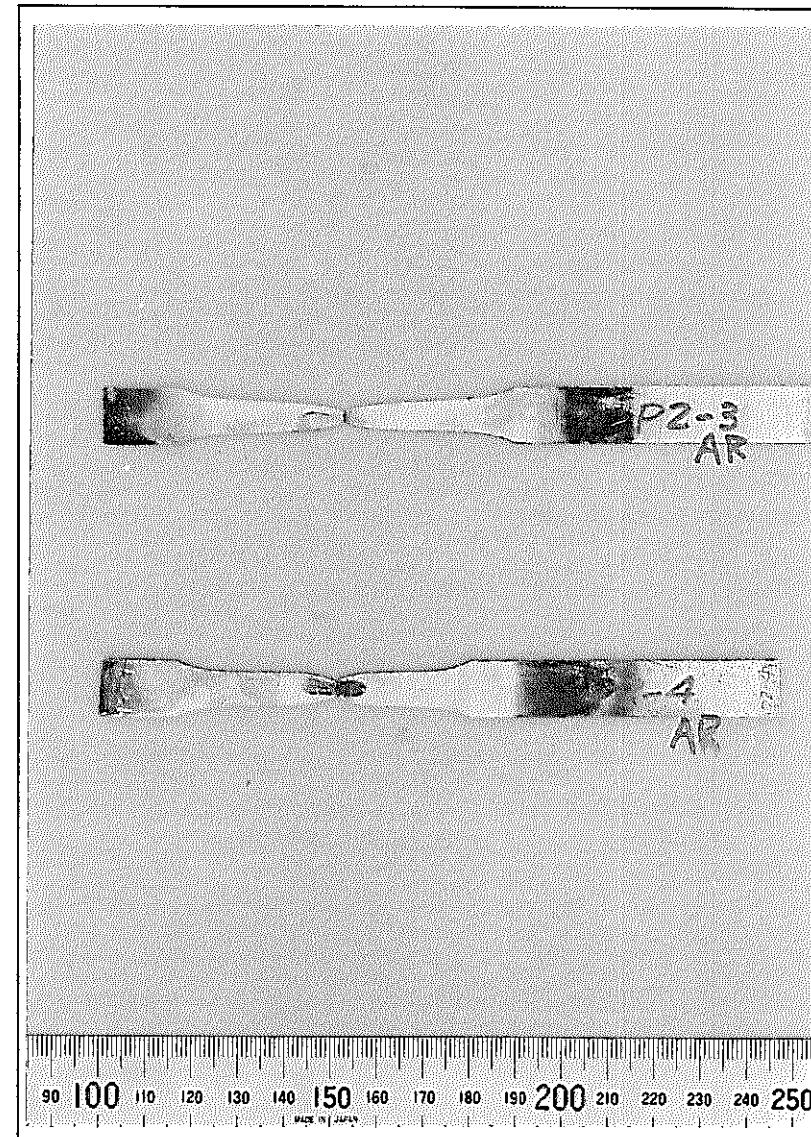
付録5-8 引張試験後の試験片外観写真
(P2ヒート、大気中、700~1200°C、10%/min)



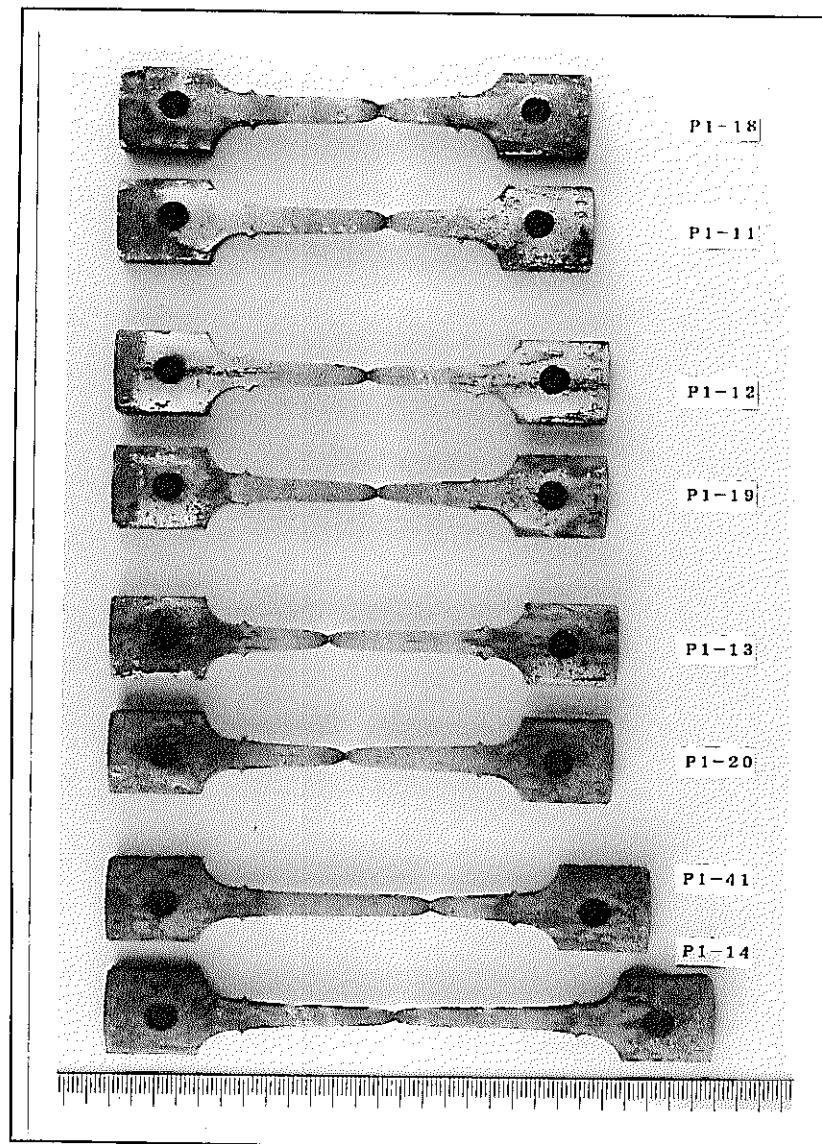
付録5-9 引張試験後の試験片外観写真
(P2ヒート、大気中、700~1200°C、10%/sec)



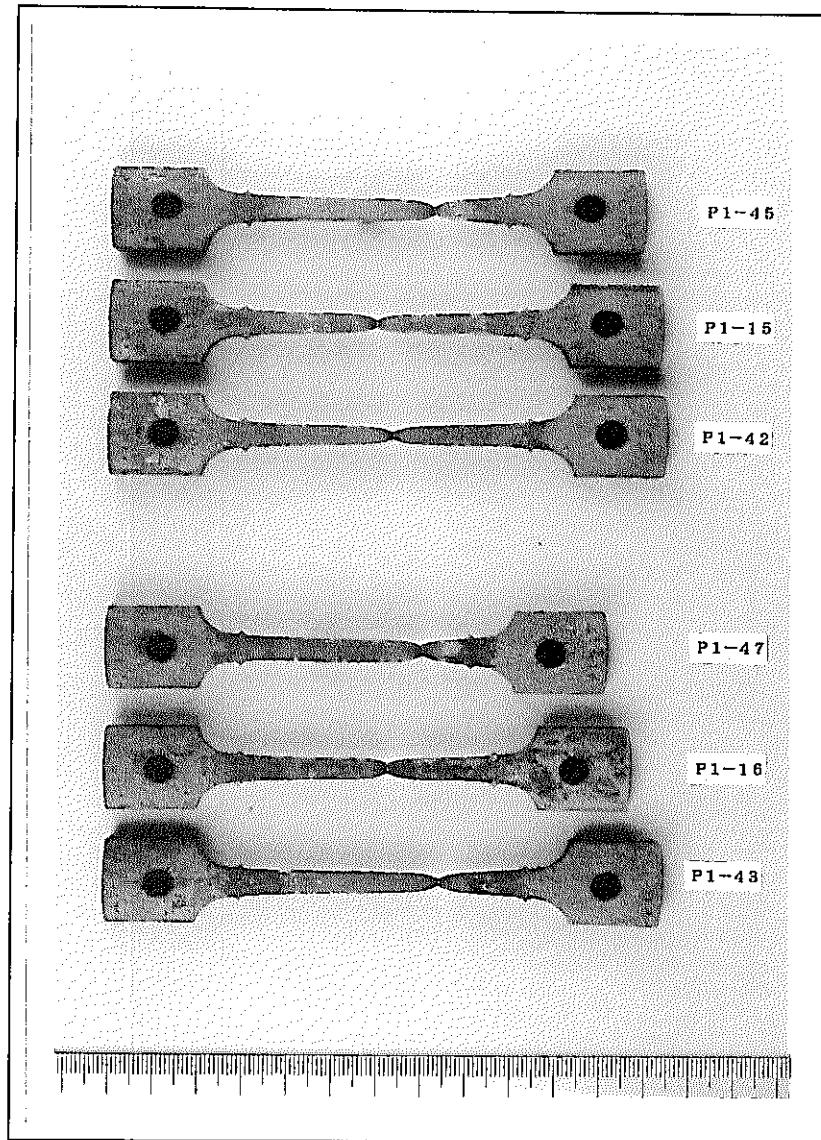
付録5-10 引張試験後の試験片外観写真
(P2ヒート、Arガス中、1200~1300°C、10%/min)



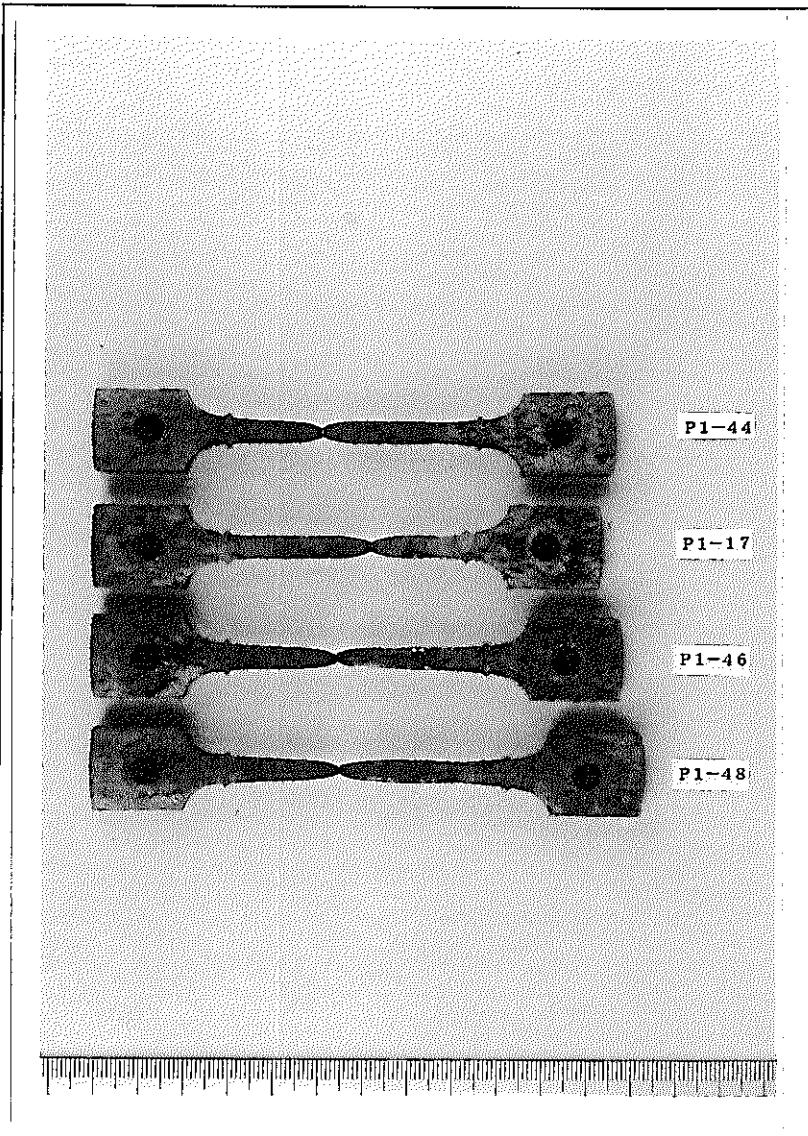
付録5-11 引張試験後の試験片外観写真
(P2ヒート、Arガス中、1200～1300°C、10%/sec)



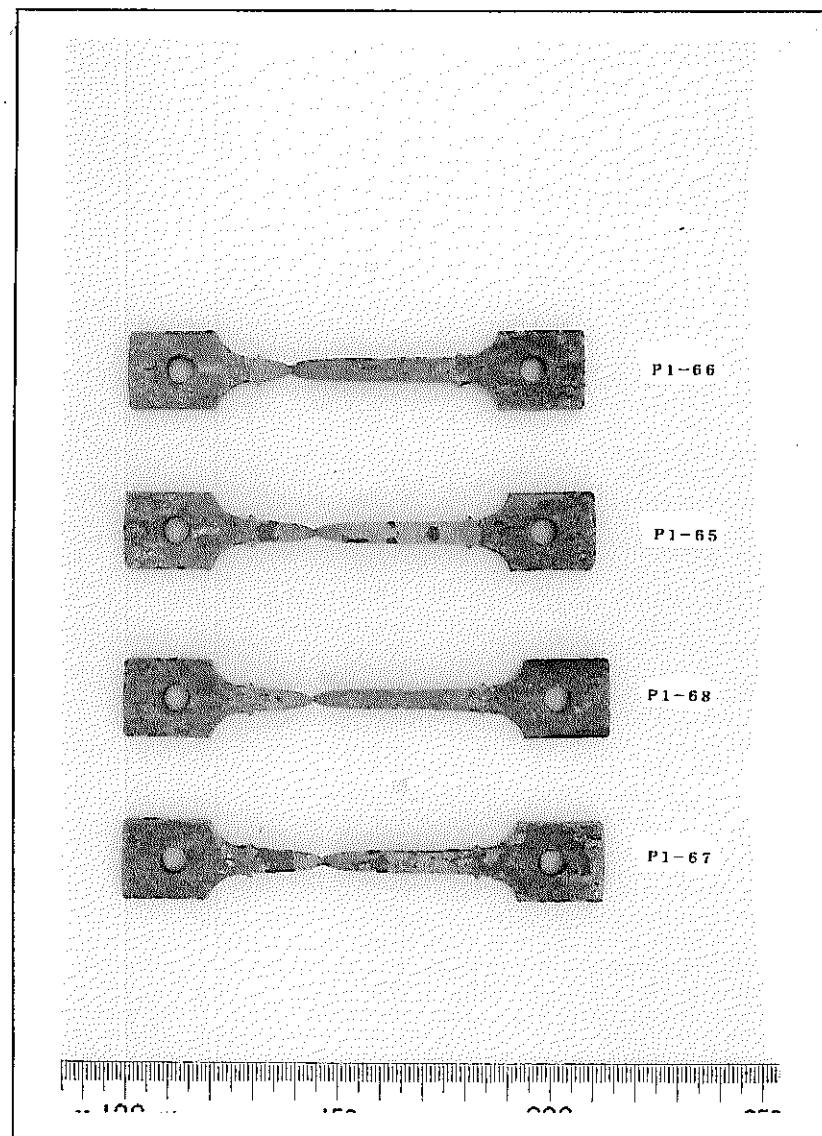
付録6-1 クリープ試験後の試験片外観写真
(P1ヒート、大気中、700~850°C)



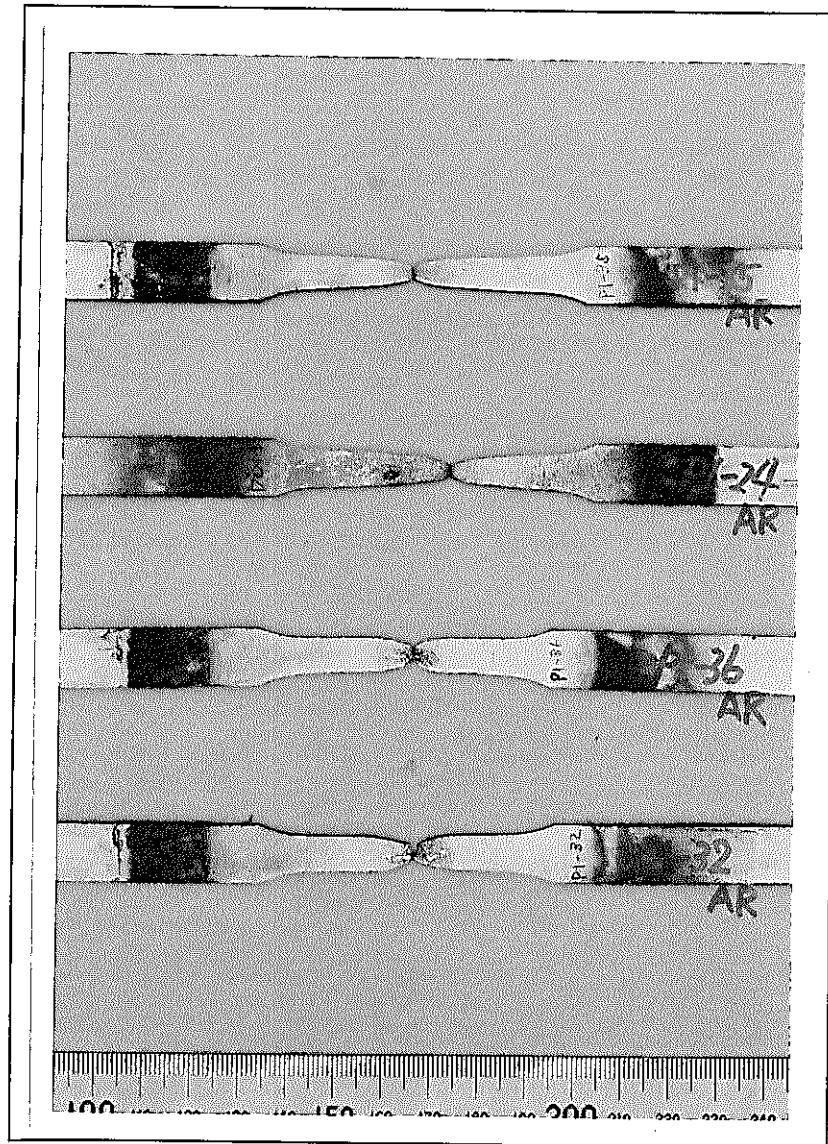
付録6-2 クリープ試験後の試験片外観写真
(P1ヒート、大気中、900~950°C)



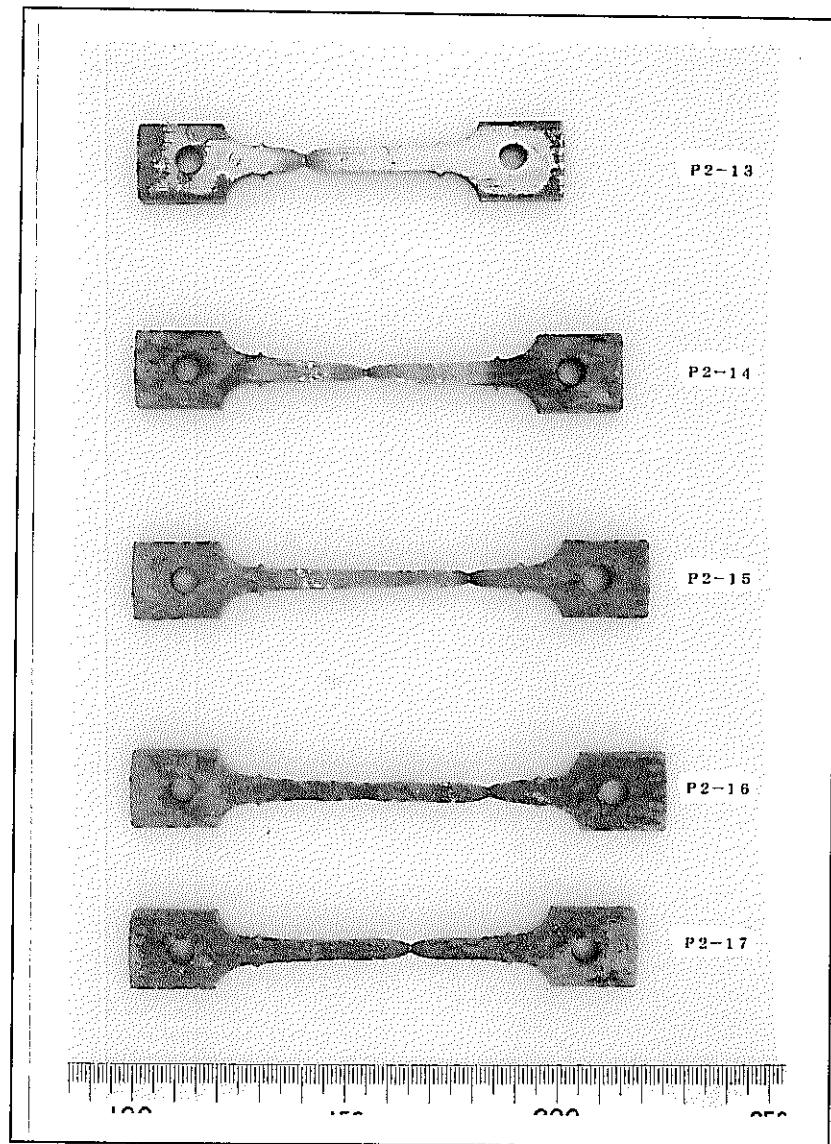
付録6-3 クリープ試験後の試験片外観写真
(P1ヒート、大気中、1000°C)



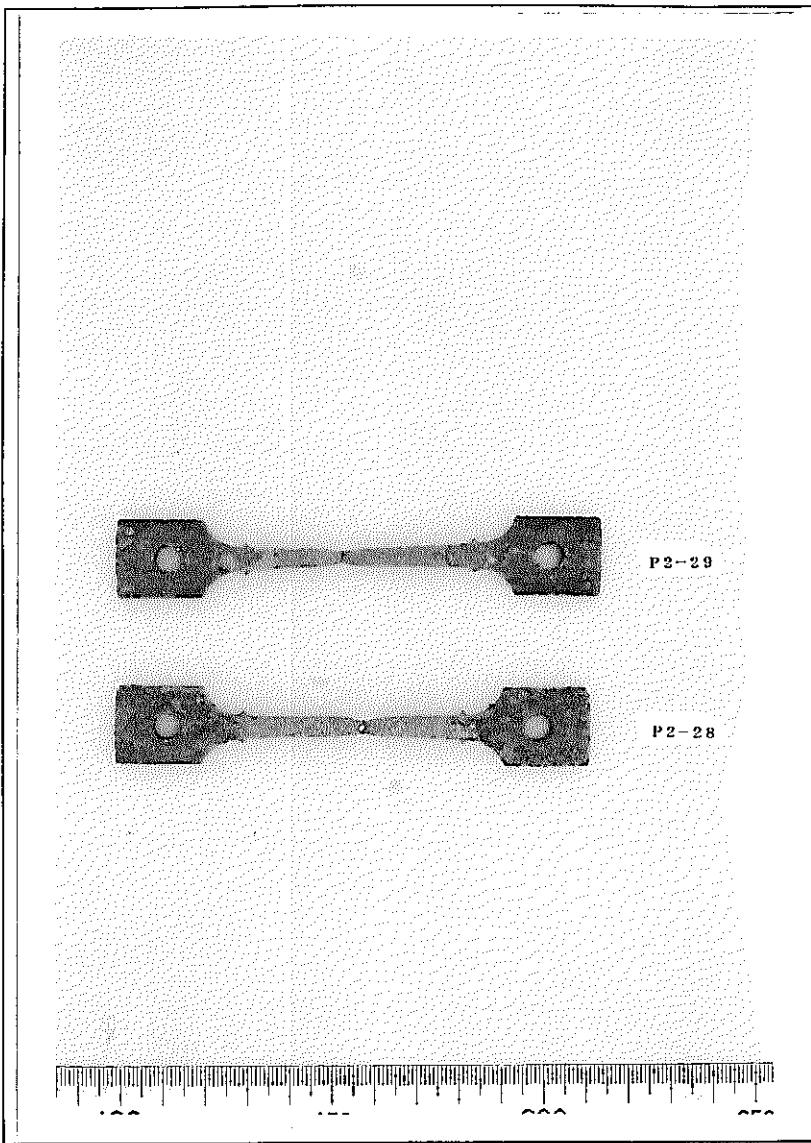
付録6-4 クリープ試験後の試験片外観写真
(P1ヒート、大気中、1100°C)



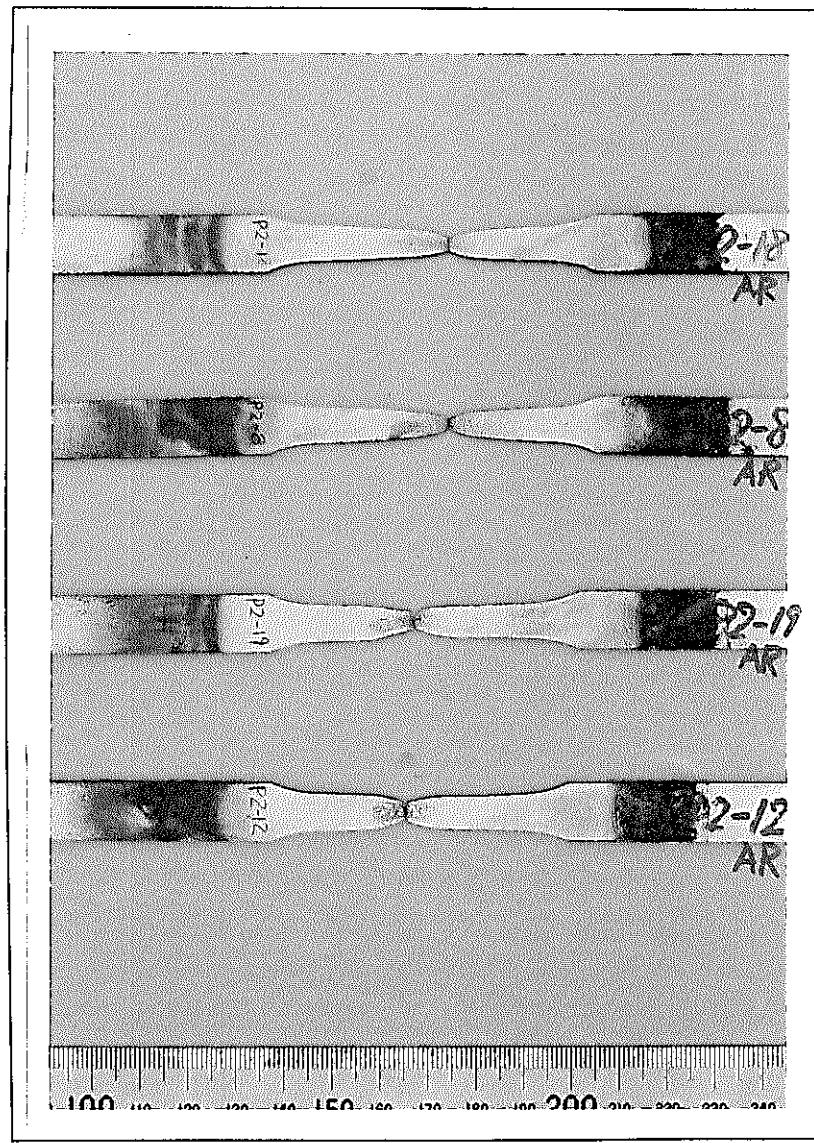
付録6-5 クリープ試験後の試験片外観写真
(P1ヒート、Arガス中、1200~1300°C)



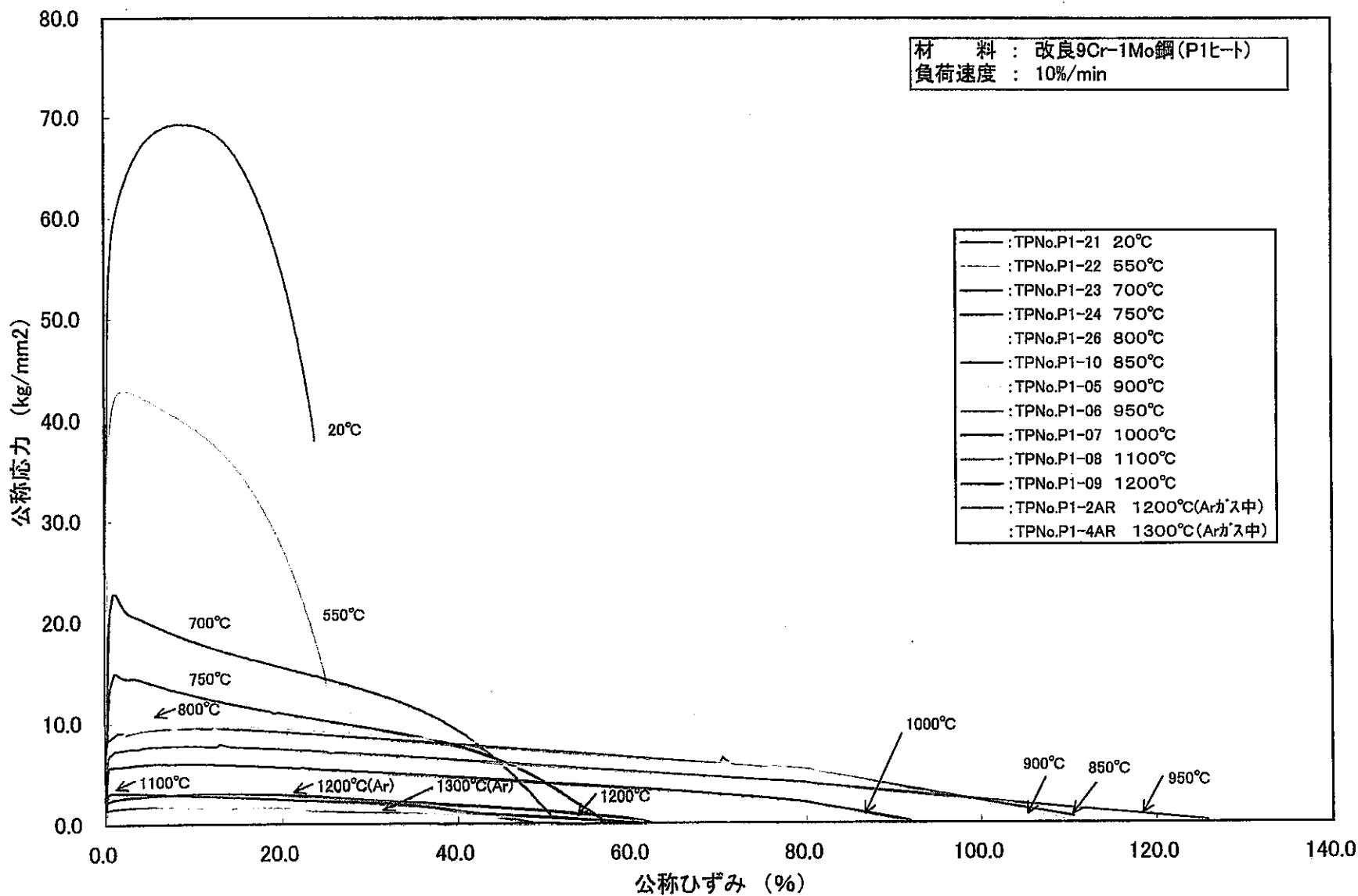
付録6-6 クリープ試験後の試験片外観写真
(P2ヒート、大気中、700~1000°C)



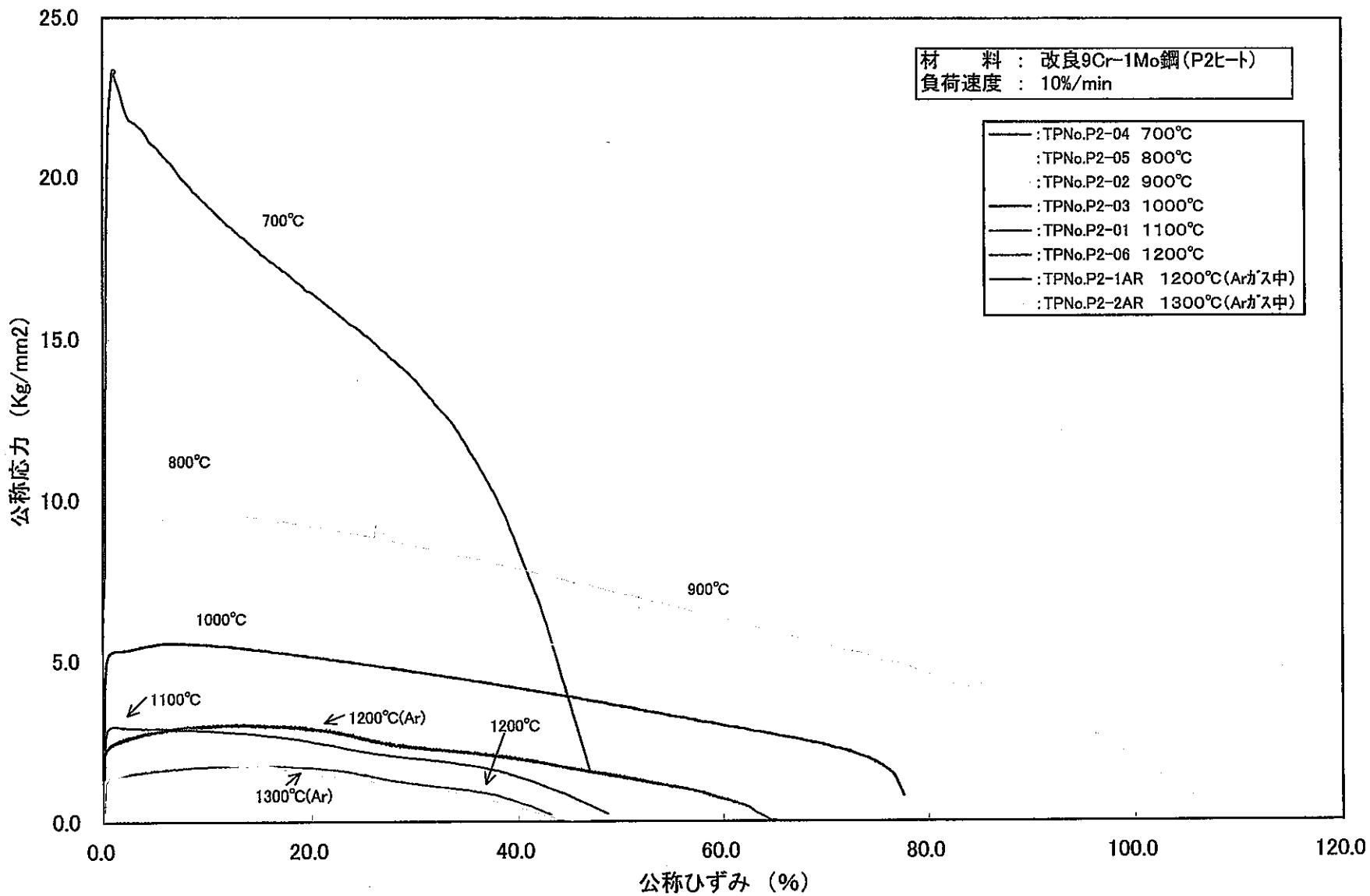
付録6-7 クリープ試験後の試験片外観写真
(P2ヒート、大気中、1100°C)



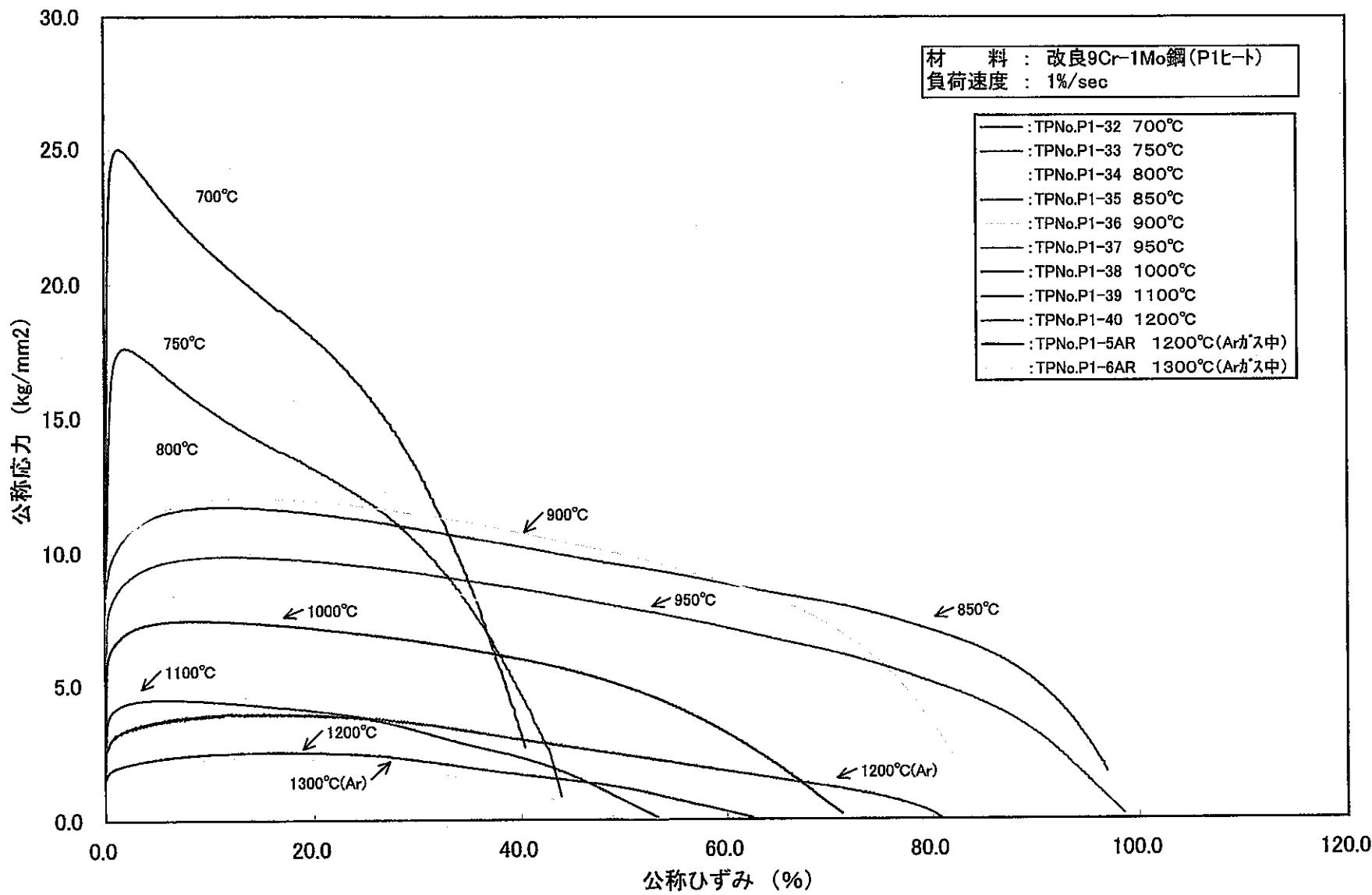
付録6-8 クリープ試験後の試験片外観写真
(P2ヒート、Arガス中、1200~1300°C)



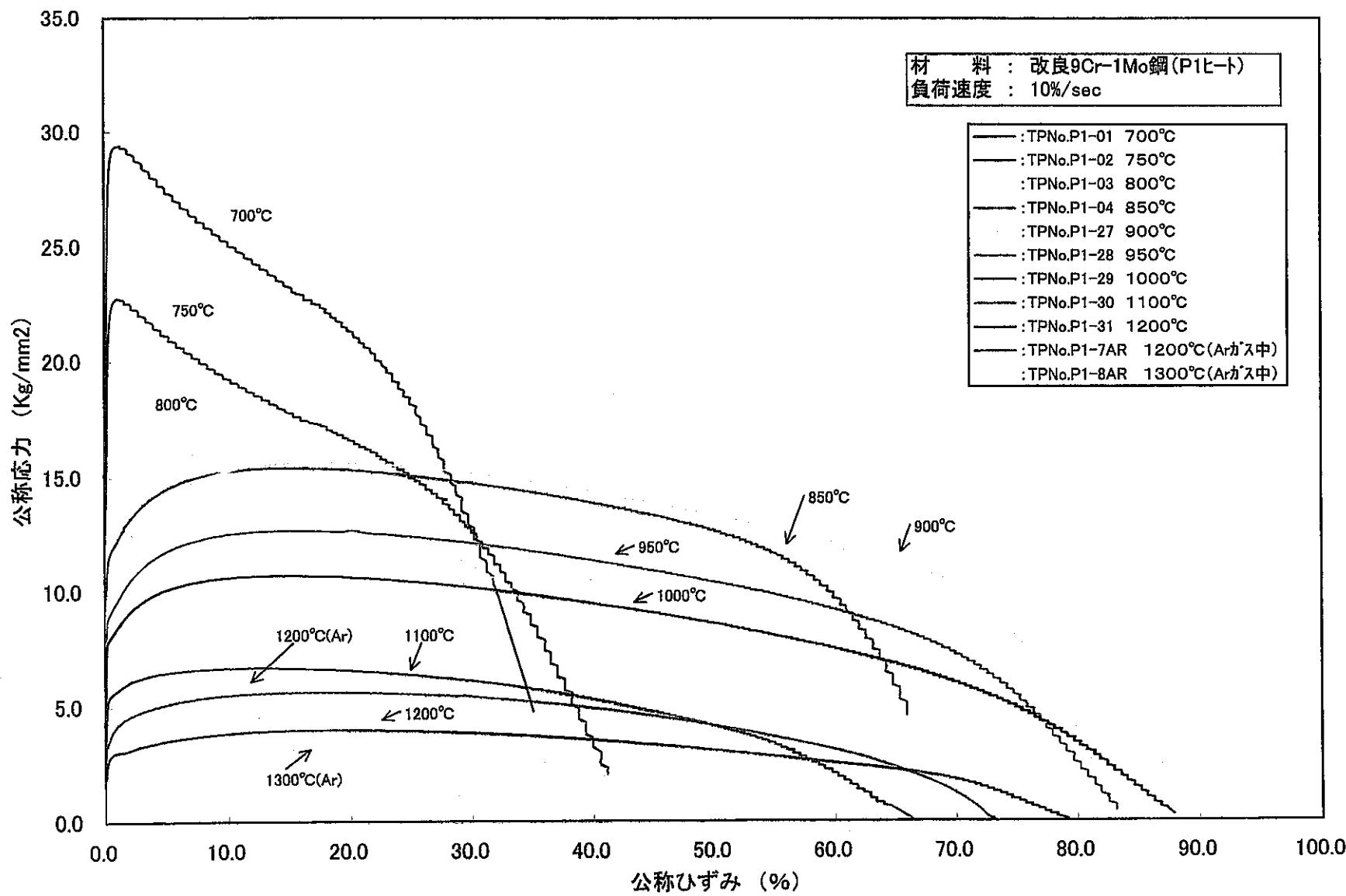
付録7-1 公称応力ー公称ひずみ曲線(P1ヒート、10%/min)



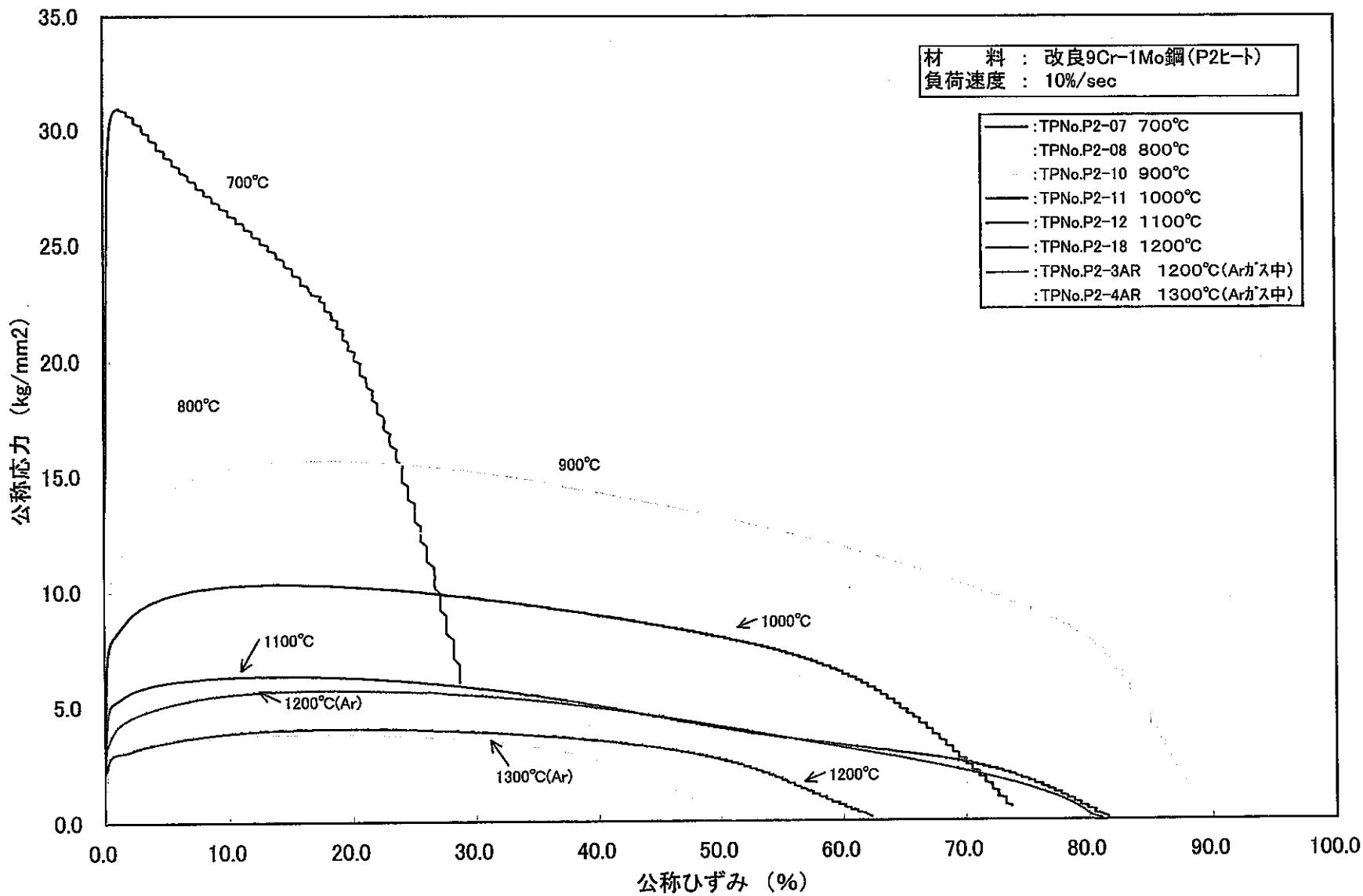
付録7-2 公称応力-公称ひずみ曲線(P2ヒート、10%/min)



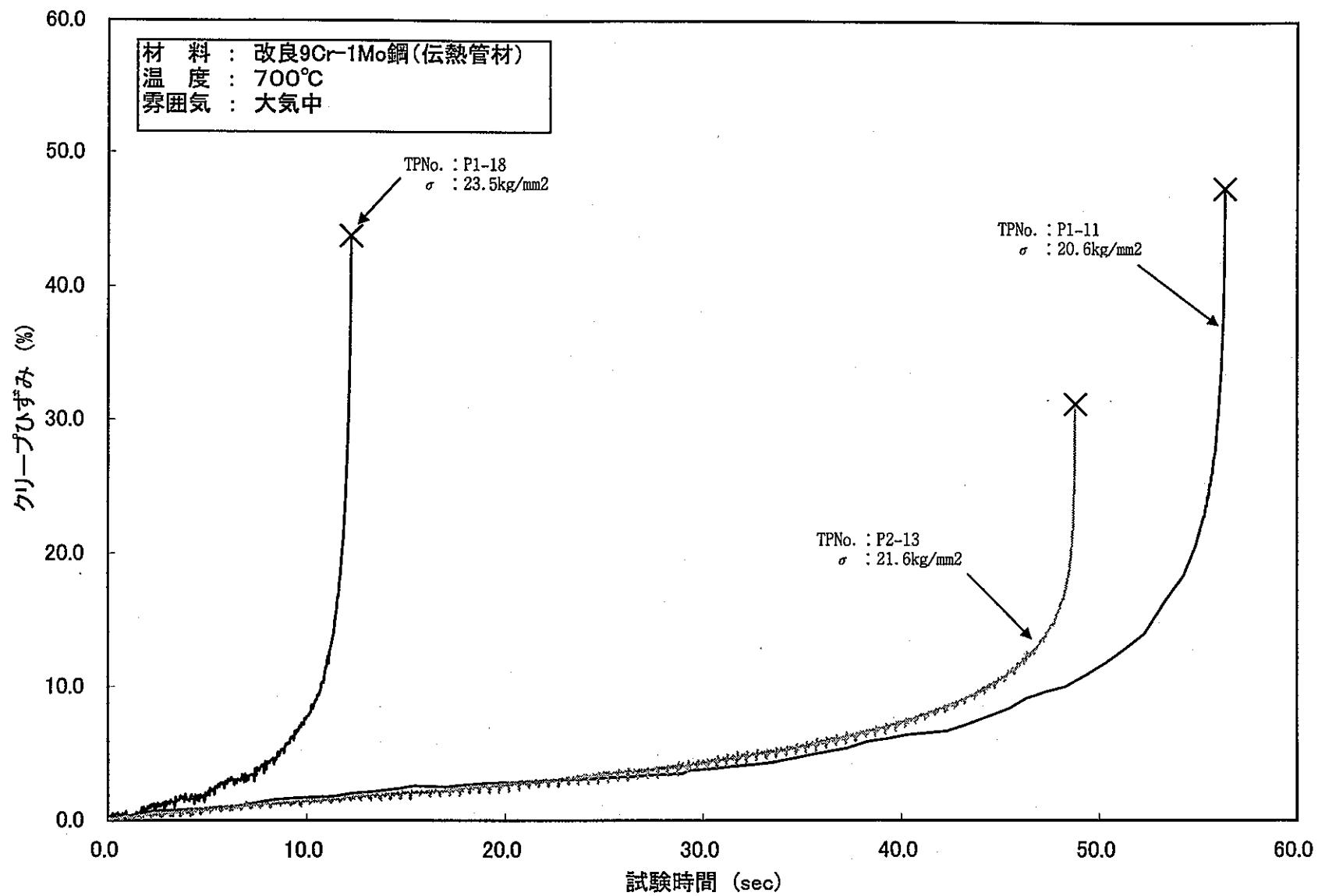
付録7-3 公称応力一公称ひずみ曲線(P1ヒート、1%/sec)



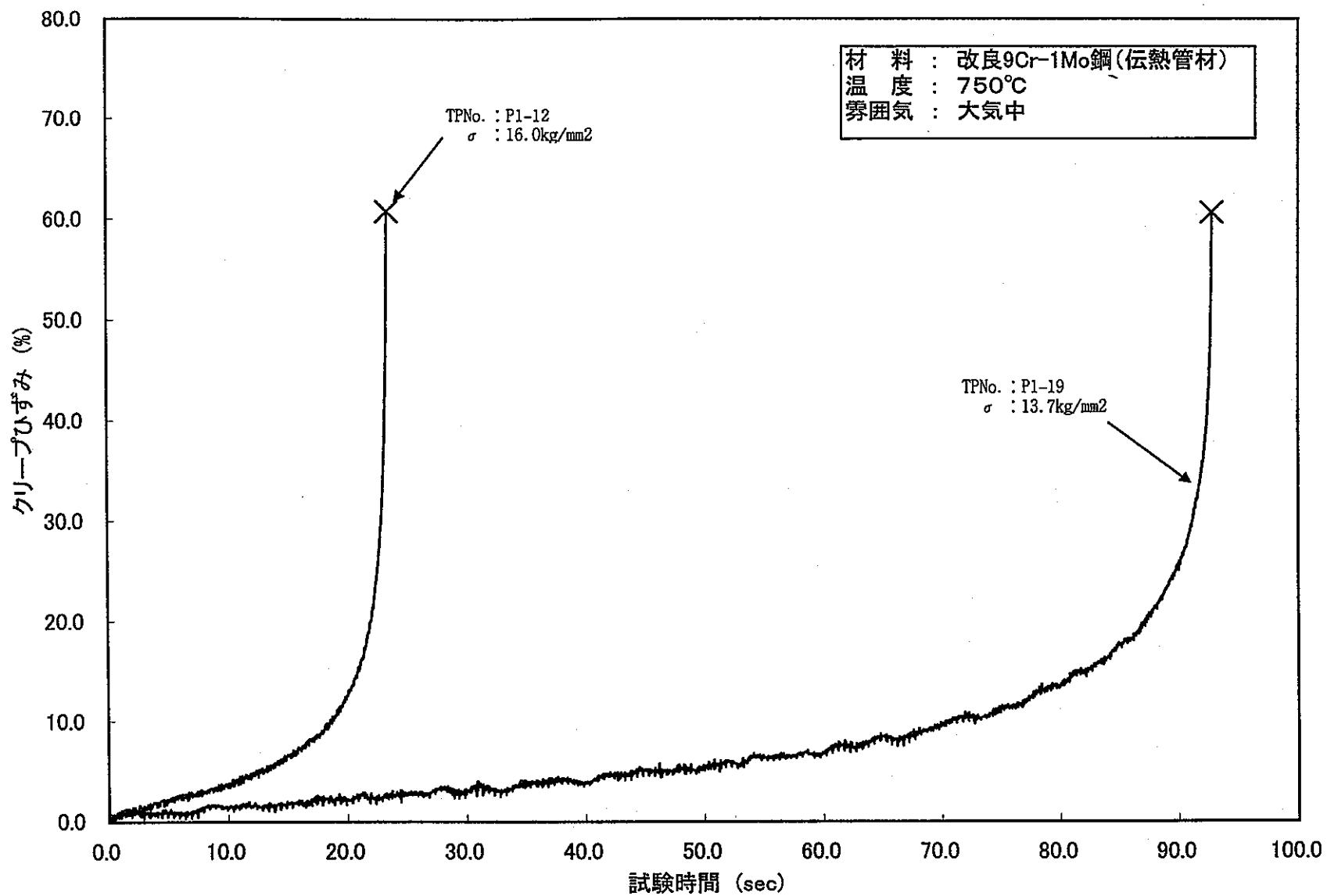
付録7-4 公称応力一公称ひずみ曲線(P1ヒート、10%/sec)



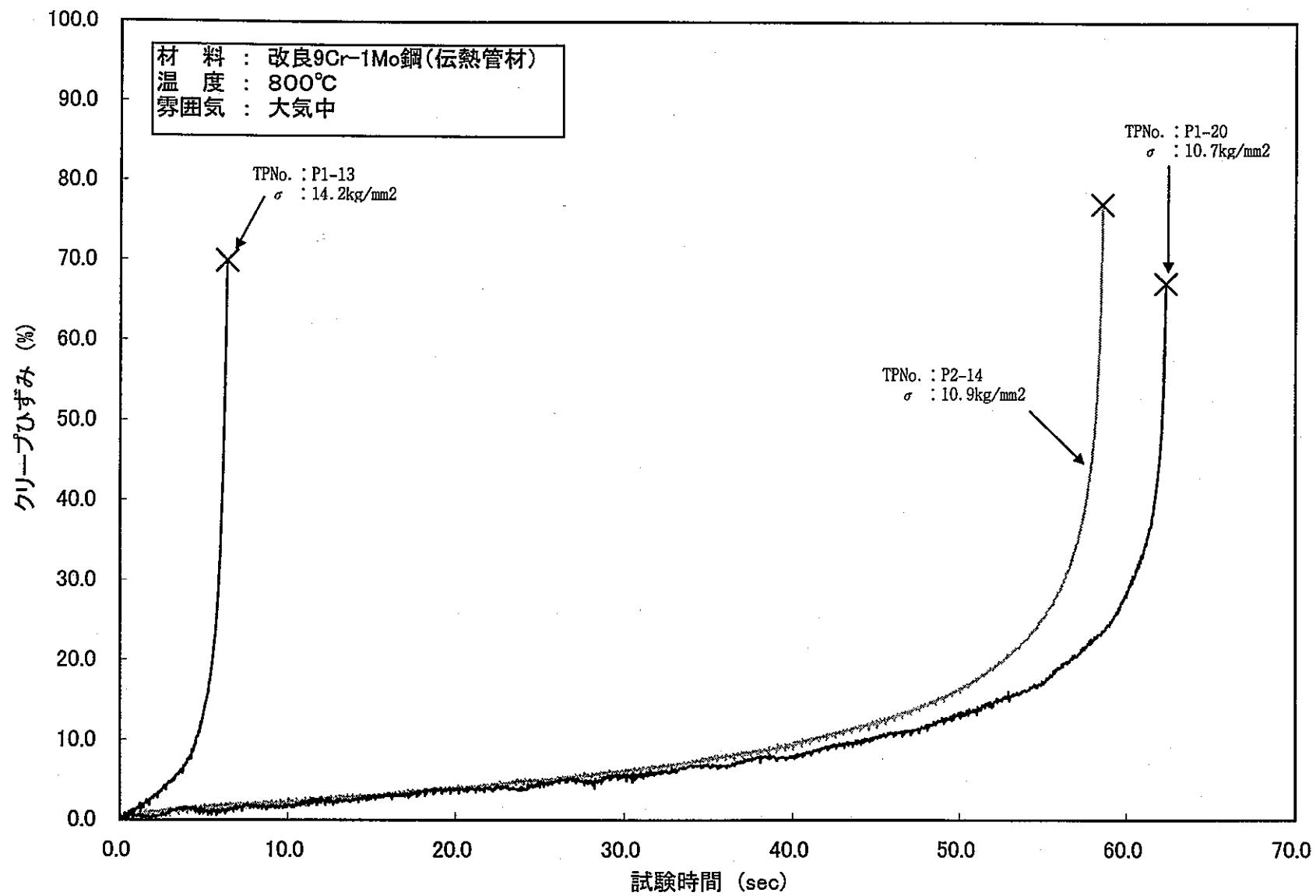
付録7-5 公称応力-公称ひずみ曲線(P2ヒート、10%/sec)



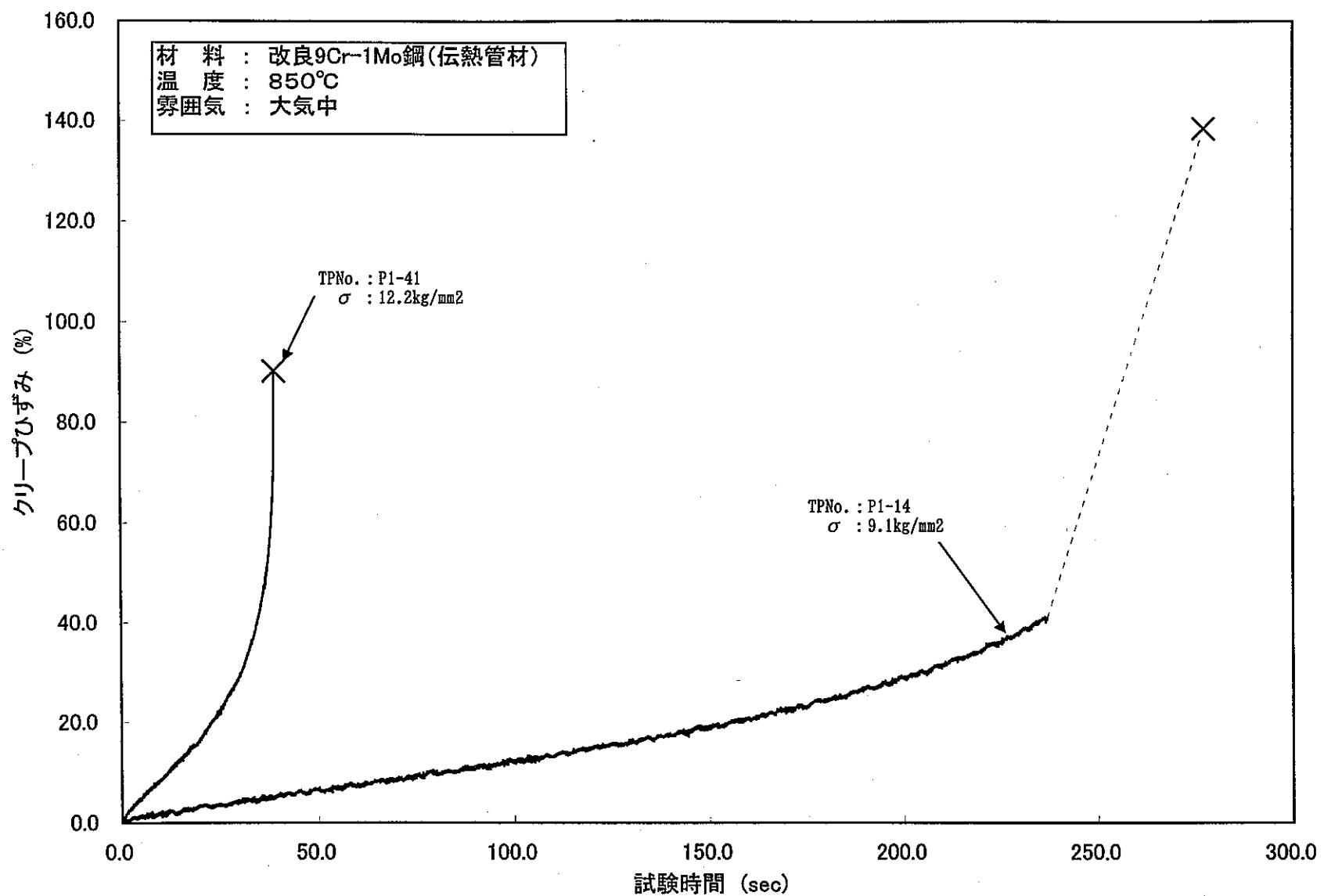
付録8-1 クリープひずみ曲線(700°C)



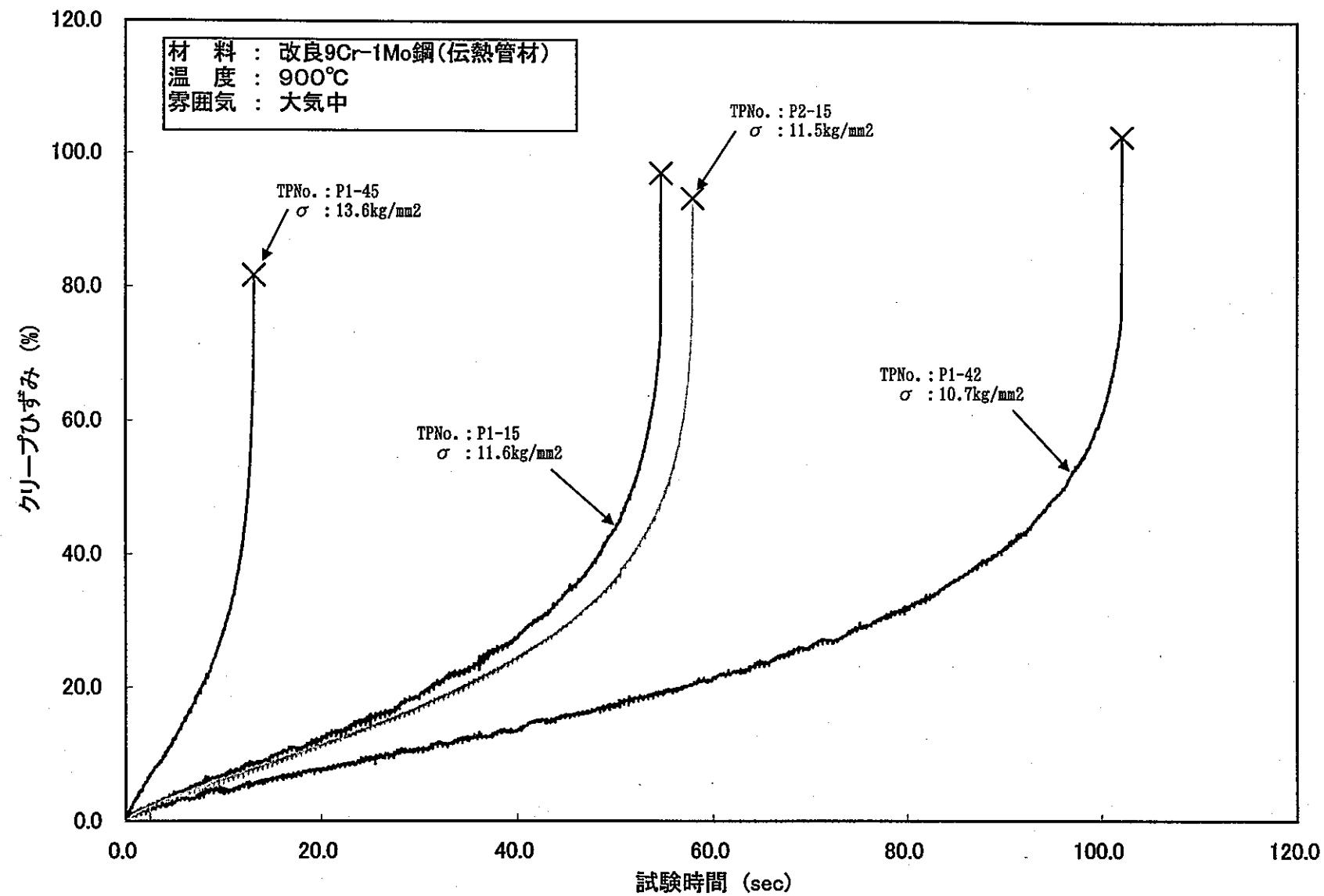
付録8-2 クリープひずみ曲線(750°C)



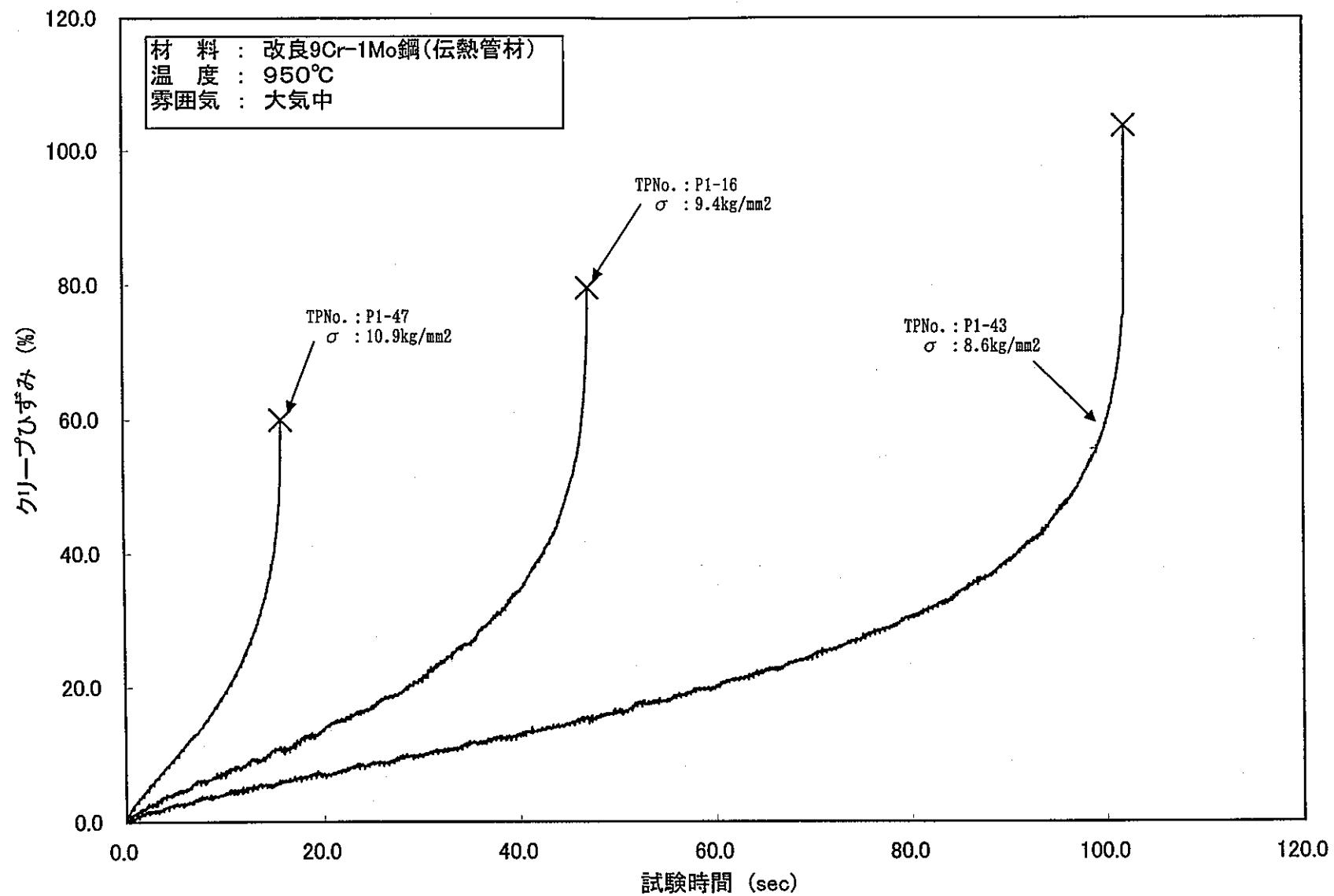
付録8-3 クリープひずみ曲線(800°C)



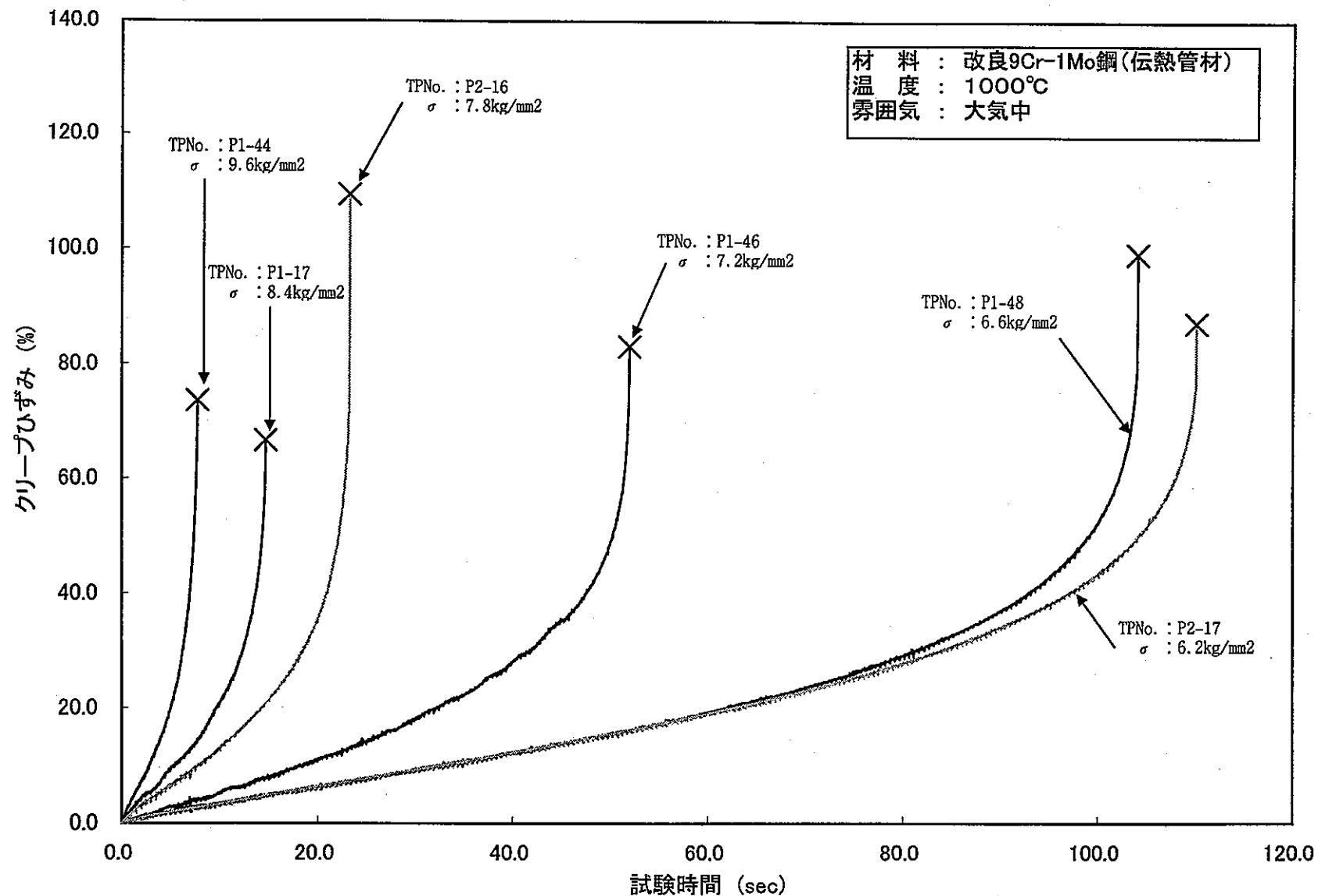
付録8-4 クリープひずみ曲線(850°C)



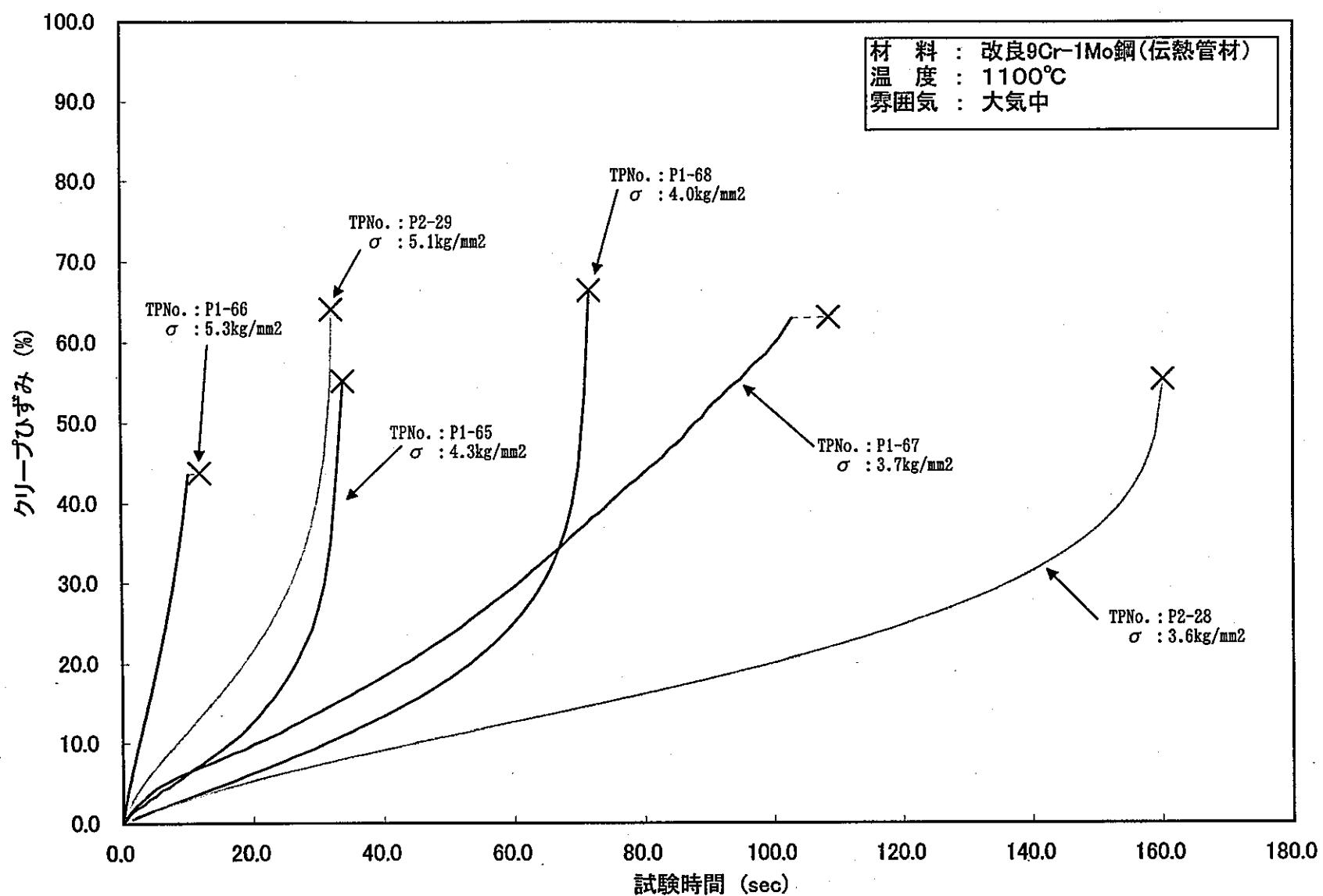
付録8-5 クリープひずみ曲線(900°C)



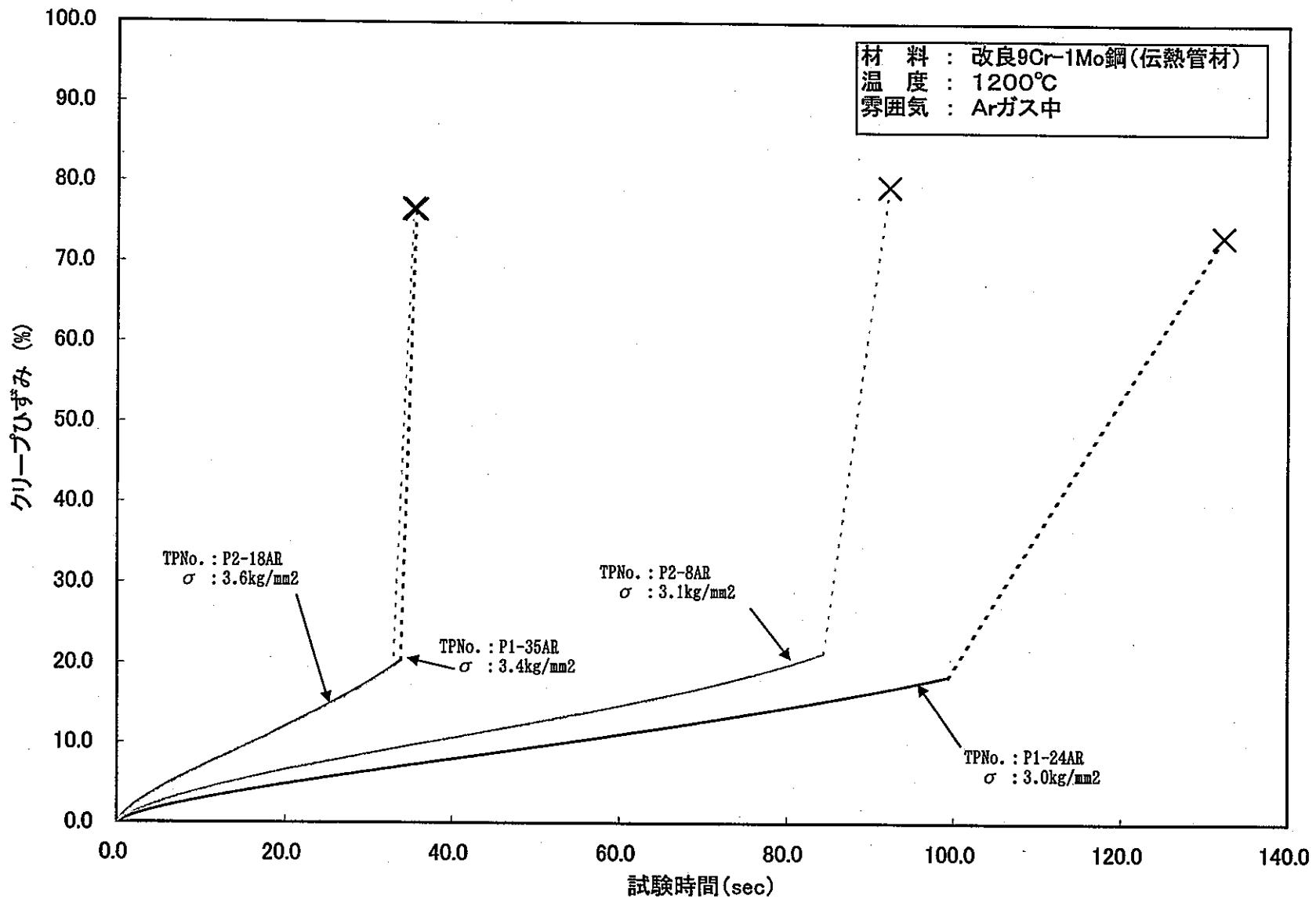
付録8-6 クリープひずみ曲線(950°C)



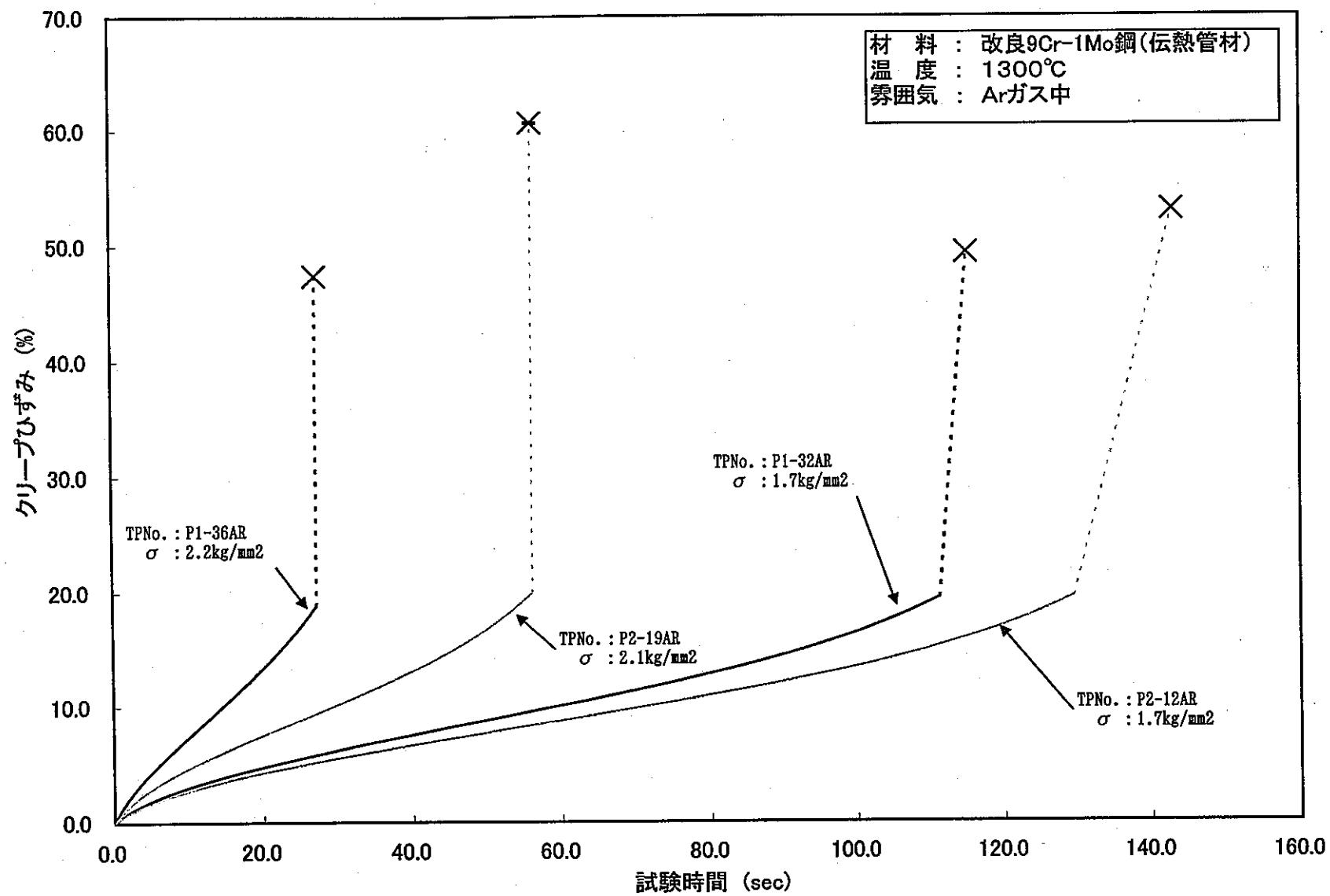
付録8-7 クリープひずみ曲線(1000°C)



付録8-8 クリープひずみ曲線(1100°C)



付録8-9 クリープひずみ曲線(1200°C)



付録8-10 クリープひずみ曲線(1300°C)