

JAERI-M  
5 2 6 9

高速炉用ステンレス鋼厚板(SUS 316HP)  
のクリープ試験  
(金材研-原研共同研究報告)

1973年5月

横井 信\*・門馬 義雄\*・藤村 理人・古平 恒夫

この報告書は、日本原子力研究所が JAERI-M レポートとして、不定期に刊行している研究報告書です。入手、複製などのお問い合わせは、日本原子力研究所技術情報部（茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしてください。

JAERI-M reports, issued irregularly, describe the results of research works carried out in JAERI. Inquiries about the availability of reports and their reproduction should be addressed to Division of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, Japan.

高速炉用ステンレス鋼厚板 (SUS 316HP) のクリープ試験

( 金材研 - 原研共同研究報告 )

日本原子力研究所東海研究所

横井 信<sup>\*</sup>, 門馬義雄<sup>\*</sup>, 藤村理人

古平恒夫

( 1973年4月24日受理 )

高速炉用厚板 (SUS 316) ステンレス鋼のクリープおよびクリープ破断試験を行ない、つぎの結果を得た。

- (1) 2チャージの母材について行なったクリープ試験において、その一つのチャージ材は  $500^{\circ}$ ,  $550^{\circ}$  でやや早い最小クリープ速度を示すが、 $600^{\circ}\text{C}$  ではこの傾向は逆となる。
- (2) SUS 316 に N および Nb を添加する場合  $600^{\circ}\text{C} - 10^4\text{hr}$  強さが母材より約  $2\text{ kg/mm}^2$  程度クリープ破断強さが増加する。
- (3) 溶接金属の破断時間は  $600^{\circ}\text{C}$  で母材より約ファクター1程度低くなる。
- (4) 供試試験材はすべてクリープ破断時に良好な伸びを示した。
- (5) 試験した母材および溶接金属は、諸外国のデータと比べてやや小さなクリープ破断強さを示したが、 $600^{\circ}\text{C}$  以下では現用の規定設計応力 (ASME, Sec. VIII) をほぼ満足しているものと考えられる。

なお、本報告は金属材料技術研究所との共同研究報告書 (JAERI-memo 4097 公開) に引き続き行なった試験の結果を加えてまとめたものである。

Creep and Creep-Rupture Tests of Domestic SUS 316 Stainless Steel as a Structural Material of the Fast Breeding Reactor

Shin YOKOI\*, Yoshio MONMA\*, Tadato FUJIMURA  
and Tsuneo KODAIRA

Tokai Research Establishment, JAERI  
( Received April 24, 1973 )

Creep and creep-rupture tests were carried out on domestic SUS 316 stainless steel jointly by National Research Institute for Metals and Japan Atomic Energy Research Institute, in association with the design of Fast Breeding Reactor.

Creep tests were made at 500<sup>o</sup>, 550<sup>o</sup> and 600<sup>o</sup>C on the specimens taken from heavy thickness plates (t=30mm), and creep-rupture tests on the specimens from several kinds of SUS 316 stainless steels and their weld metals at 500<sup>o</sup> and 600<sup>o</sup>C.

The following were concluded.

- (1) In the creep tests of two different charges, the minimum creep rate was higher for one than the other at 500<sup>o</sup> and 550<sup>o</sup>C, but this tendency was reversed at 600<sup>o</sup>C.
- (2) Adding nitrogen and niobium to plain 316 stainless steel as alloying elements is effective in increasing the creep-rupture strength.
- (3) The rupture time of weld-metal specimens is about one order lower than the base metals at 600<sup>o</sup>C for the same stress level.
- (4) All materials tested exhibit good ductility in a rupture.
- (5) Creep properties of all the materials meet the criteria of ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section VIII.

---

\* National Research Institute for Metals.

## 目 次

1. 序 言 .....	1
2. 供試材 .....	2
3. クリープ試験 .....	9
3.1. 試験方法および試験条件 .....	9
3.2. クリープ試験結果 .....	9
4. クリープ破断試験 .....	16
4.1 試験方法および試験条件 .....	16
4.2 クリープ破断試験結果 .....	16
4.3 解 析 .....	23
4.4 クリープ破断後の組織観察 .....	23
4.5 クリープ破断試験後のかたさ .....	24
5. 考 察 .....	32
5.1 試験材の強度レベル .....	32
5.2 許容応力との比較 .....	32
6. 結 言 .....	35
7. 文 献 .....	35

## 1. 序 言

高速増殖炉の研究開発は動力炉・核燃料開発事業団の手によって進められているが、この高速炉用ステンレス鋼厚板のクリープ試験は、動燃事業団の発足前において、原研が高速実験炉の概念設計を進めていた時点で計画したものであり、当時炉容器、配管系などの主構造材料にはステンレス鋼 SUS 316 を採用することを考察していた。このためステンレス鋼 SUS 316 とその溶接金属の設計温度、設計応力水準におけるクリープ特性は必ずしも十分なデータがないことから、国産材の炉容器対象板厚のクリープ試験は構造設計上大きな意義を有している。

しかしながら、高速実験炉（じょうりゅう）の詳細設計が動燃団の手に移ってから、炉容器はステンレス鋼 SUS 304 で製作することになった。このような経過で SUS 316 のクリープ試験は実験炉の構造設計、構造健全評価に役立たなくなったが、将来、原型炉または実用炉においては構造材料としてステンレス鋼 SUS 316 が採用される見通しは大きい。この時点において、本試験成果がきわめて有意義になるであろう。

本試験は以上の経過をもとにして、原研と金材技研の共同研究が進展したのであるが、クリープ試験は時日と多大な試験機を使用するので、試験計画は周到でなければならぬ。本試験は次の担当者によって、計画および実施されたものである。

金属材料技術研究所クリープ試験部クリープ第1試験室

横井 信， 門馬 義雄

日本原子力研究所東海研究所構造強度研究室

藤村 理人， 古平 恒夫

## 2. 供 試 材

表1に供試材4種(A, B, CおよびD試験材)の化学成分および製造履歴を示す。A(日本ステンレス(株)製)およびB(八幡製鉄(株)製)試験材は一般のSUS 316(AISI 316タイプ)ステンレス鋼であり、両者を比べた場合A試験材の方がB試験材より若干C, Cr量が多く, Ni, Mn量が少い。C(八幡製鉄(株)製)試験材およびD(八幡製鉄(株)製)試験材はNおよびNbをそれぞれ0.13%および0.68%添加したSUS 316改良型ステンレス鋼である。

表2はE試験材の溶接施工記録を示す。母材はSUS 316, ワイヤも共金を用い, アーク電圧30V, 溶接電流400A, 溶接速度25cm/minの条件でサブマージ・アーク溶接を行なっている。

図1~4はA, B, C, DおよびE試験材のクリープおよびクリープ破断試験片採取要領を示したものである。

表3は供試材(A, B, CおよびD試験材)の機械的性質を示したものである。AおよびB試験材を比べた場合, A試験材の方が0.2%耐力, 引張強さが若干高い傾向を示すが, これは表1より明らかのように合金元素含有量の相違によるものと思われる。またSUS 316にNを添加したC試験材およびNbを添加したD試験材は, 一般のSUS 316に比べ0.2%耐力, 引張強さともに高い傾向が認められる一方, 伸び, 絞りは若干少くなる傾向を示す。

表1 供試材の製造履歴および化学成分 (ミルシートによる)

試験材	チャージ番号	化学成分 (wt%)										製造履歴		
		C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	N		B	Nb
A	52879	0.07	0.70	1.48	0.028	0.007	17.36	12.22	2.35	-	-	-	-	1. 1050kg平型鋼塊皮製品 2. 鍛造 (80×1050×700mm) 3. 3段圧延 (30×1080×3460mm) 4. ブラズマ切断 (30×1080×1100mm) 5. 固溶化処理 (1090°C×1hr. W.Q.) 6. ブラズマ切断 (30×900×1000mm) 7. 酸洗
	1732 -01*	0.05	0.52	1.72	0.027	0.013	16.7	13.6	2.75	-	-	-	-	1. エル一式塩基性弧光炉溶製, 溶量 30ton/チャージ 鋼塊重量 8ton 2. 分塊圧延機により熱間圧延 (鋼片厚み 165mm) 3. 鋼片表面をグライダ-により疵取り 4. 四重逆転式圧延機により熱間圧延 5. 溶体化処理 (コークス炉ガス) 6. 表面仕上げ
C (316N)	R487	0.07	0.53	1.70	0.018	0.007	16.67	13.74	2.20	-	0.1298	0.0005	-	1. エル一式塩基性弧光炉 (250kg/チャージ) 2. スラブ寸法 (60×230×Lmm) 3. 鋼板寸法 (12×400×1000mm) 4. 熱処理 1100°C×30min W.Q
	R488	0.074	0.69	1.86	0.015	0.007	16.84	14.08	2.20	-	0.0438	0.0005	0.68	1. エル一式塩基性弧光炉 (250kg/チャージ) 2. スラブ寸法 (60×230×Lmm) 3. 鋼板寸法 (12×400×1000mm) 4. 熱処理 1100°C×30min W.C

\* 溶接試験片用 \*\* 母材試験片用

表2 溶接施工記録 (E試験材)

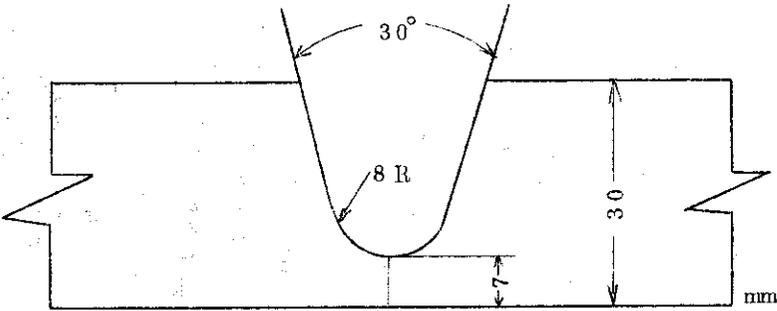
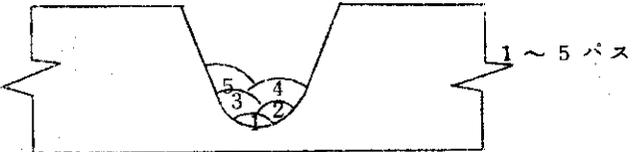
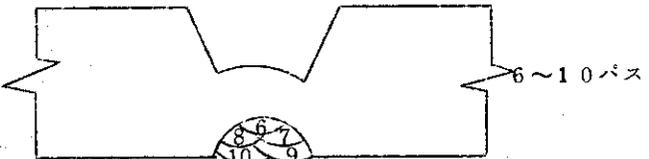
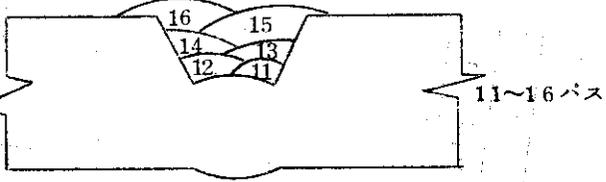
<p>1. 母材</p>	<p>SUS 316 (八幡製鉄製) [製造番号 1732-01] 30mm t × 250 × 1000 8枚 4組</p>
<p>2. 溶接材料</p>	<p>ワイヤ: Y-316 試 4.0φ 八幡溶接棒製 フラックス: YF-200 48 × 250 //</p>
<p>3. 開先形状</p>	
<p>4. 溶接方法</p>	<p>溶接法: サブマージ・アーク溶接 予熱: なし 層間温度: 200℃以下 電流: AC 400A 電圧: 30V 速度: 25 cm/min 層数:</p> <p>1) 表側溶接  1~5パス</p> <p>2) 裏はつり後 裏側溶接  6~10パス</p> <p>3) 表側上層溶接  11~16パス</p>
<p>5. 溶接機</p>	<p>SW-23型 ユニオンメルト自動溶接機 (大阪変圧器製)</p>
<p>6. 溶接後熱処理</p>	<p>なし</p>
<p>7. 溶接場所および日時</p>	<p>富士電機製造株式会社 川崎工場 昭和43年8月6日~10日</p>

表 3 供試材の機械的性質 (ミルシートによる)

試験片	方向	引 張 試 験			衝 撃 値 20°C Kg·m/cm <sup>2</sup>	曲 げ 試 験 常 温	硬 度 HB	結 晶 粒 度 結 晶 粒 度	腐 食 試 験 g/m <sup>2</sup> /hr
		0.2%耐力 Kg/mm <sup>2</sup>	引張り強さ Kg/mm <sup>2</sup>	のび% 絞 り %					
A	L	27.3	57.6	63.2	74.3	143		3.68	
	L*	21.4	54.7	61	75	119	2.5		
	C*	21.6	55.4	62	69	181			
B	L**	21.4	54.7	61	75	119	2.5	3.7	
	C**	21.6	55.4	62	69	181			

試験片	試験温度 °C	0.2%耐力 Kg/mm <sup>2</sup>			引張り強さ Kg/mm <sup>2</sup>			の び %			絞 り %			硬 度 Hv (10Kg)
		L	C		L	C		L	C		L	C		
C	R. T	29.0	31.2		63.7	63.6		57.7	56.1		72.5	70.2		162
	500	14.5	15.4		49.3	48.6		46.3	48.0		65.8	64.2		
	600	13.8	13.0		45.1	45.0		44.2	44.0		62.9	64.4		
D	700	13.6	13.4		39.5	39.2		42.0	46.0		65.9	65.1		170
	R. T	30.1	30.4		62.9	62.8		52.3	51.3		65.2	62.0		
	500	19.4	19.9		47.0	47.2		37.6	37.8		58.7	53.5		
(316Nb)	600	17.6	19.9		44.8	45.3		41.2	38.0		56.9	54.4		
	700	18.8	18.7		40.1	40.8		38.3	38.4		61.1	57.1		

\* 1732-01 (溶接試験片用)      \*\* 1082-01 (母材試験片用)

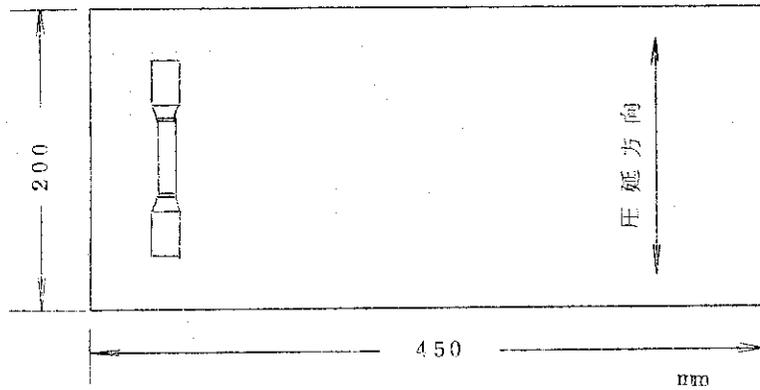


図1 クリープ試験片採取要領 (A試験材)

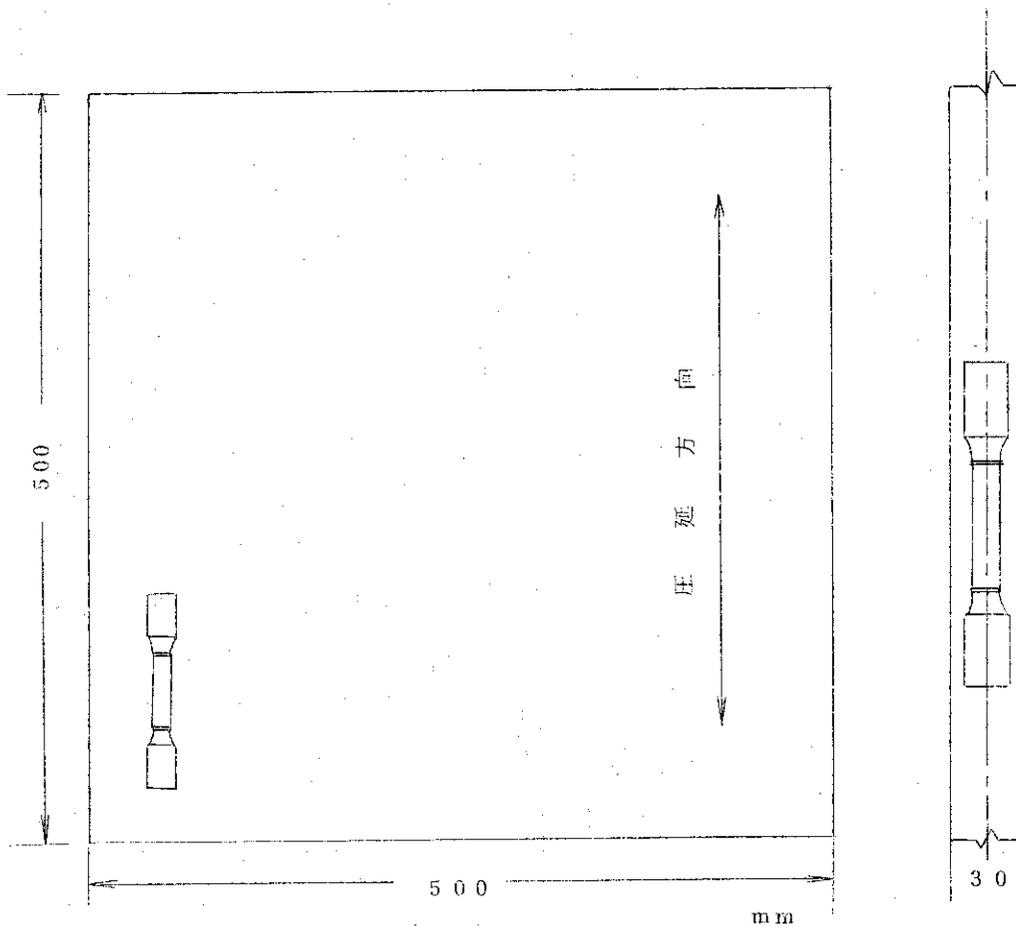


図2 クリープおよびクリープ破断試験片採取要領 (B試験材)

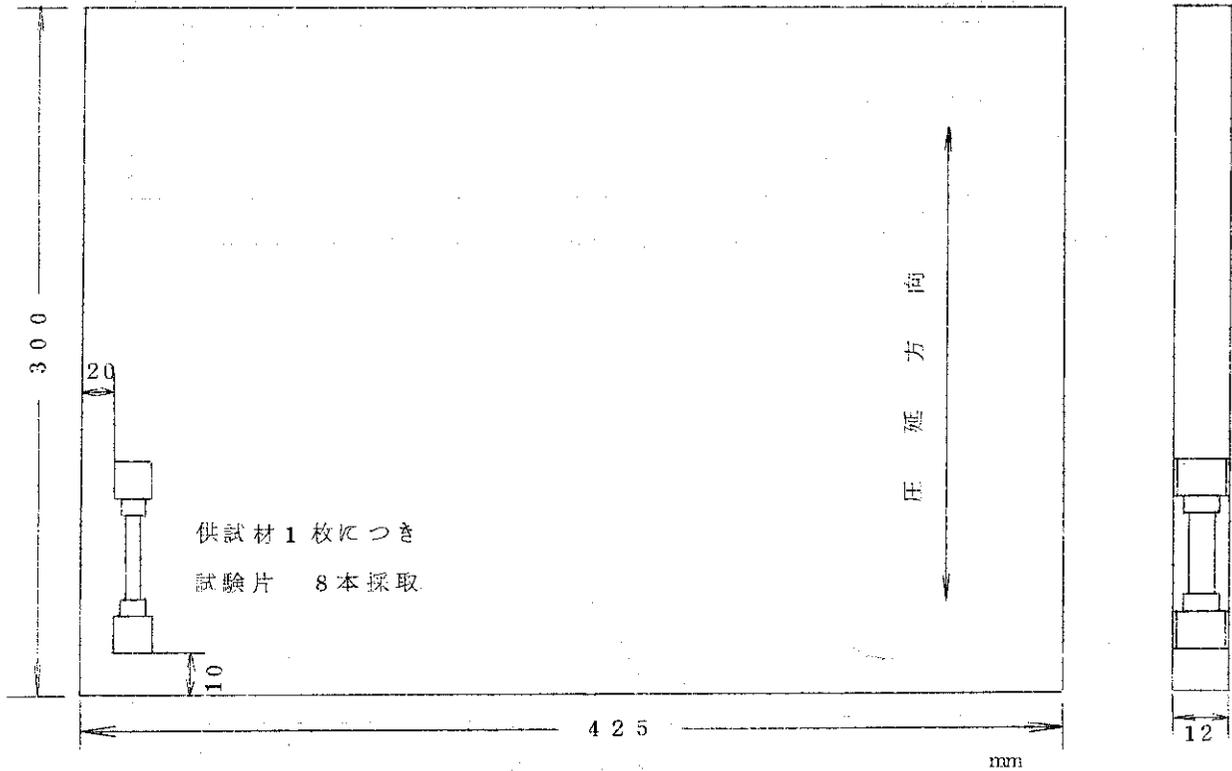


図 3 クリープ破断試験片採取要領 (C, D 試験材)

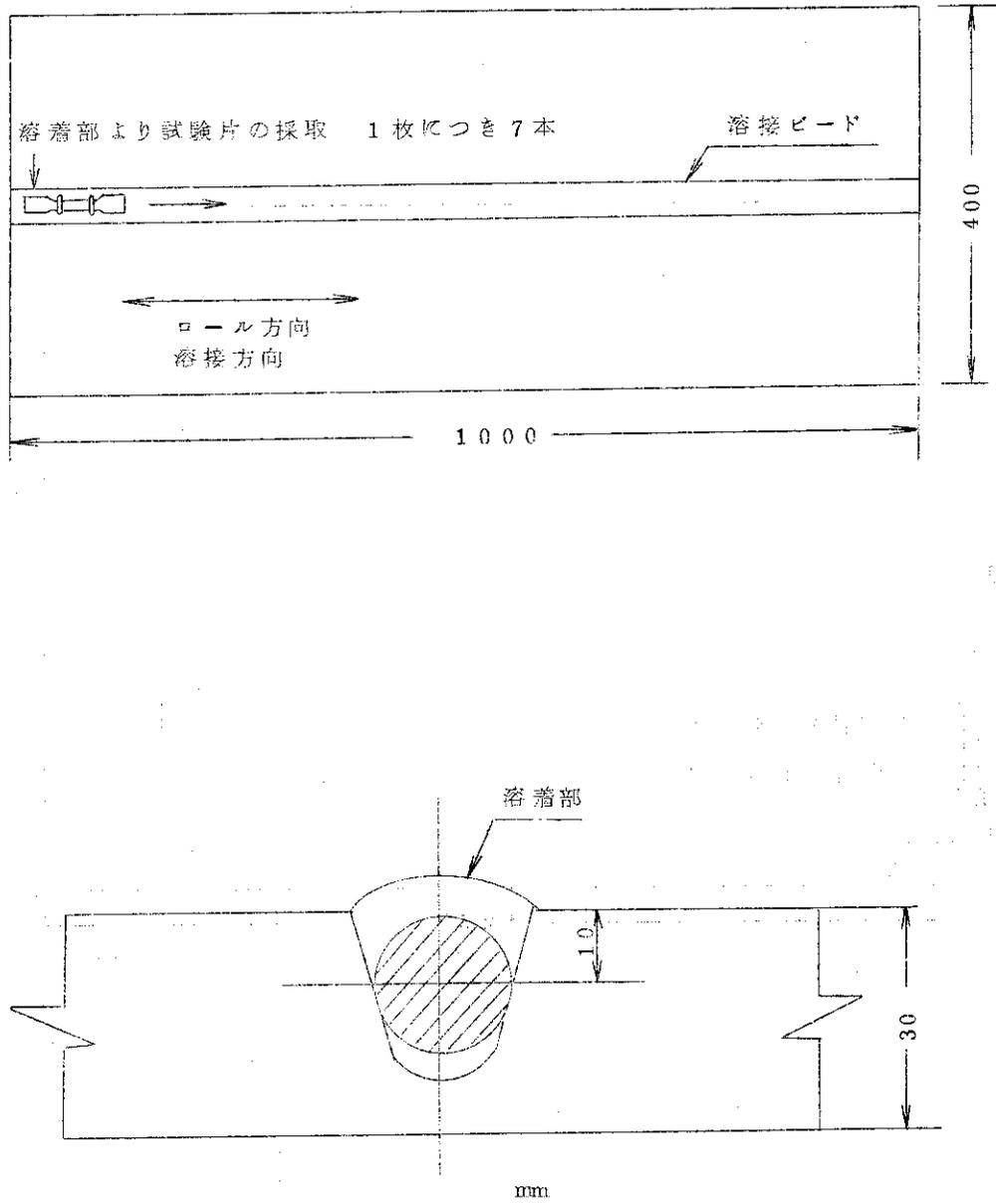


図4 クリープ破断試験片採取要領 (E試験材)

### 3. クリープ試験

#### 3.1 試験方法および試験条件

母材（A試験材およびB試験材）に関するクリープ試験はJIS Z 2271「金属材料の引張試験方法」に準拠し、一定荷重下でのクリープひずみを連続的に測定した。使用したクリープ試験片の寸法を図5に示す。

荷重容量 1.5 ton および 3 ton の単式クリープ試験機（テコ比 1:10, 荷重精度  $\pm 0.5\%$  以内）にストローク 5 mm, 最小 1/1000 mm 目盛のダイヤルゲージによる伸び計を試験片とともにとりつけ、1日1回伸びを測定した。試験温度および応力水準は表4に示すとおりである。

これらの各条件下で約  $10^4$  時間目標, 2繰返数のクリープ試験を行なった。ただし, A試験材については同表の応力水準 I のみについて試験した。これらの試験温度および応力水準については高速炉設計における設計温度および設計応力を考慮して選んだ。

#### 3.2 クリープ試験結果

表5, 6にそれぞれA試験材およびB試験材のクリープ試験結果を示す。

応力水準 I（表4参照）におけるクリープ曲線を図6~8に示す。すべてのクリープ試験は約 22,000 hr 経過後中止したが、一般にこの応力水準でのクリープ変形は非常に微小で、特にB試験材の  $500^\circ\text{C}$ ,  $15.0\text{ kg/mm}^2$  の試験では明らかなクリープ変形は観測されず、クリープ曲線から最小クリープ速度を算出することは不可能であった。また、変形が微小なためクリープ曲線には炉温や室温の変動によるゆらぎが重なって、多くのうねりが認められる。

応力水準 I の結果によると、一般にA試験材はB試験材と比較して、 $500^\circ$  および  $550^\circ\text{C}$  ではやや大きな最小クリープ速度となっているが、 $600^\circ\text{C}$  では逆にB試験材の方がやや大きな最小クリープ速度を示している。

後述のクリープ破断試験の結果も含めてA, BおよびE試験材の最小クリープ速度と応力の関係を図9に示す。 $500^\circ$  および  $550^\circ\text{C}$  での最小クリープ速度への応力依存性は特に低応力側でバラツキが大きく明らかでない。

表4 ステンレス鋼(SUS 316)母材のクリープ試験条件

試験温度℃	500	550	600
応力水準 I (Kg/mm <sup>2</sup> )	15.0	13.0	10.0
II	23.0	19.0	15.0

表5 クリープ試験結果 (A試験材)

試験片 記号	温度 ℃	応力 Kg/mm <sup>2</sup>	E <sub>Y</sub> ×10 <sup>8</sup> Kg/mm <sup>2</sup>	ε <sub>0</sub> %	ε <sub>min</sub> %/hr	t hr	δ %	φ %	備考
NB 1	500	15.0	17.0	0.30	1.08 × 10 <sup>-6</sup>	22200	0.35	0.3	
NB 3	500	15.0	15.0	0.42	2.50 × 10 <sup>-6</sup>	"	0.48	0.3	
NB 2	550	13.0	14.2	0.43	5.25 × 10 <sup>-6</sup>	"	0.61	0.8	
NB 4	550	13.0	15.3	0.17	3.10 × 10 <sup>-6</sup>	"	0.32	0.3	
NB 6	600	10.0	17.1	0.11	1.50 × 10 <sup>-6</sup>	"	0.38	0.5	
NB 8	600	10.0	15.0	0.07	1.77 × 10 <sup>-6</sup>	"	0.27	0.1	

注) E<sub>Y</sub> : ヤング率 (段階負荷時の荷重-伸び線図の傾きから求めたもの)

ε<sub>0</sub> : 瞬間伸び, ε<sub>min</sub> : 最小クリープ速度

t<sub>(R)</sub> : 試験時間 (破断時間), δ<sub>(R)</sub> : 伸び (破断伸び)

φ<sub>(R)</sub> : 絞り (破断絞り)

クリープ試験はすべて1/1000mmダイヤルゲージを使用した。

表6 クリープ試験結果 (B試験材)

試験片	温度	応力	E <sub>Y</sub>	ε <sub>0</sub>	ε <sub>min</sub>	t	δ	φ	備考
YB 8	500	23.0	14.9	5.01	6.56 × 10 <sup>-6</sup>	21000	5.56	5.2	
YB12	500	23.0	22.7	5.24	6.67 × 10 <sup>-6</sup>	"	5.51	5.0	
YB 6	500	15.0	20.2	0.70	?	22000	0.73	0.7	
YB14	500	15.0	12.5	0.73	?	"	0.70	0.7	
YB 2	550	19.0	12.7	2.59	3.60 × 10 <sup>-5</sup>	22300	4.12	3.9	
YB 7	550	19.0	23.2	2.30	3.25 × 10 <sup>-5</sup>	"	3.59	3.8	
YB10	550	13.0	13.2	0.29	1.71 × 10 <sup>-6</sup>	22000	0.40	0.5	
YB13	550	13.0	14.1	0.29	9.0 × 10 <sup>-7</sup>	"	0.38	0.5	
YB 1	600	15.0	10.3	1.01	1.77 × 10 <sup>-4</sup>	R 18279	33.9	42.8	
YB11	600	15.0	15.6	0.97	1.63 × 10 <sup>-4</sup>	R 18372	31.2	43.1	
YB 4	600	10.0	18.9	0.10	7.67 × 10 <sup>-6</sup>	R 22200	0.46	1.1	
YB15	600	10.0	11.7	0.16	7.75 × 10 <sup>-6</sup>	"	0.63	0.6	

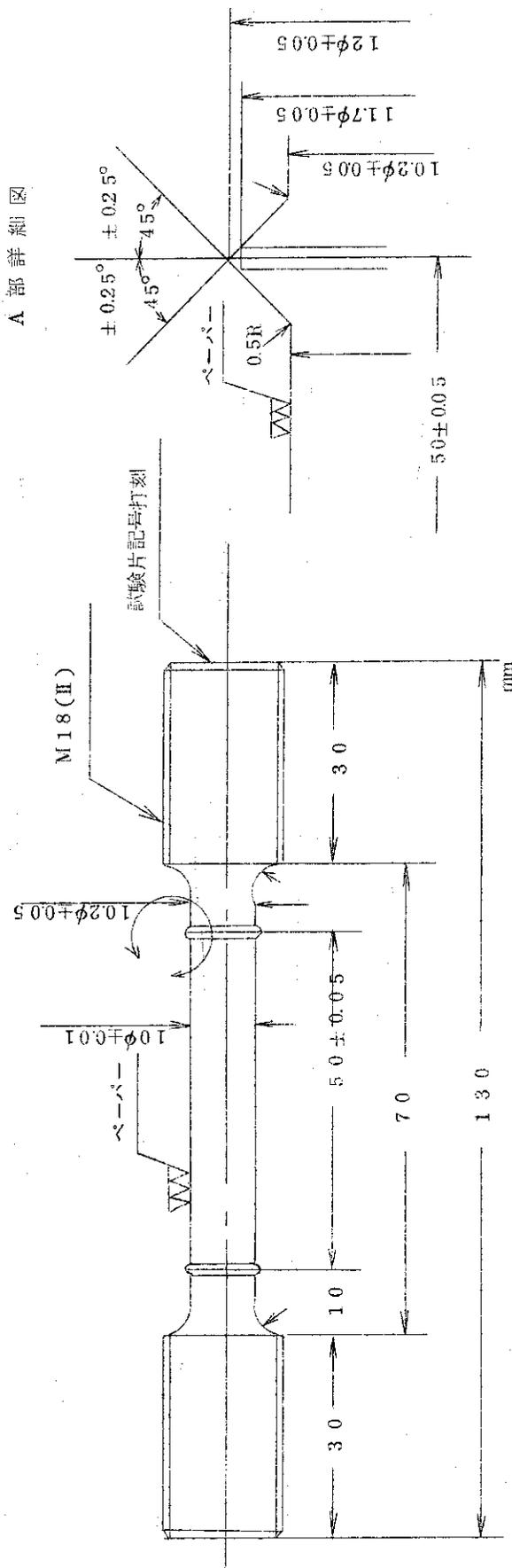


図5 クリーブ試験片の形状

SUS 316 HP  
500°C  
15.0Kg/mm<sup>2</sup>

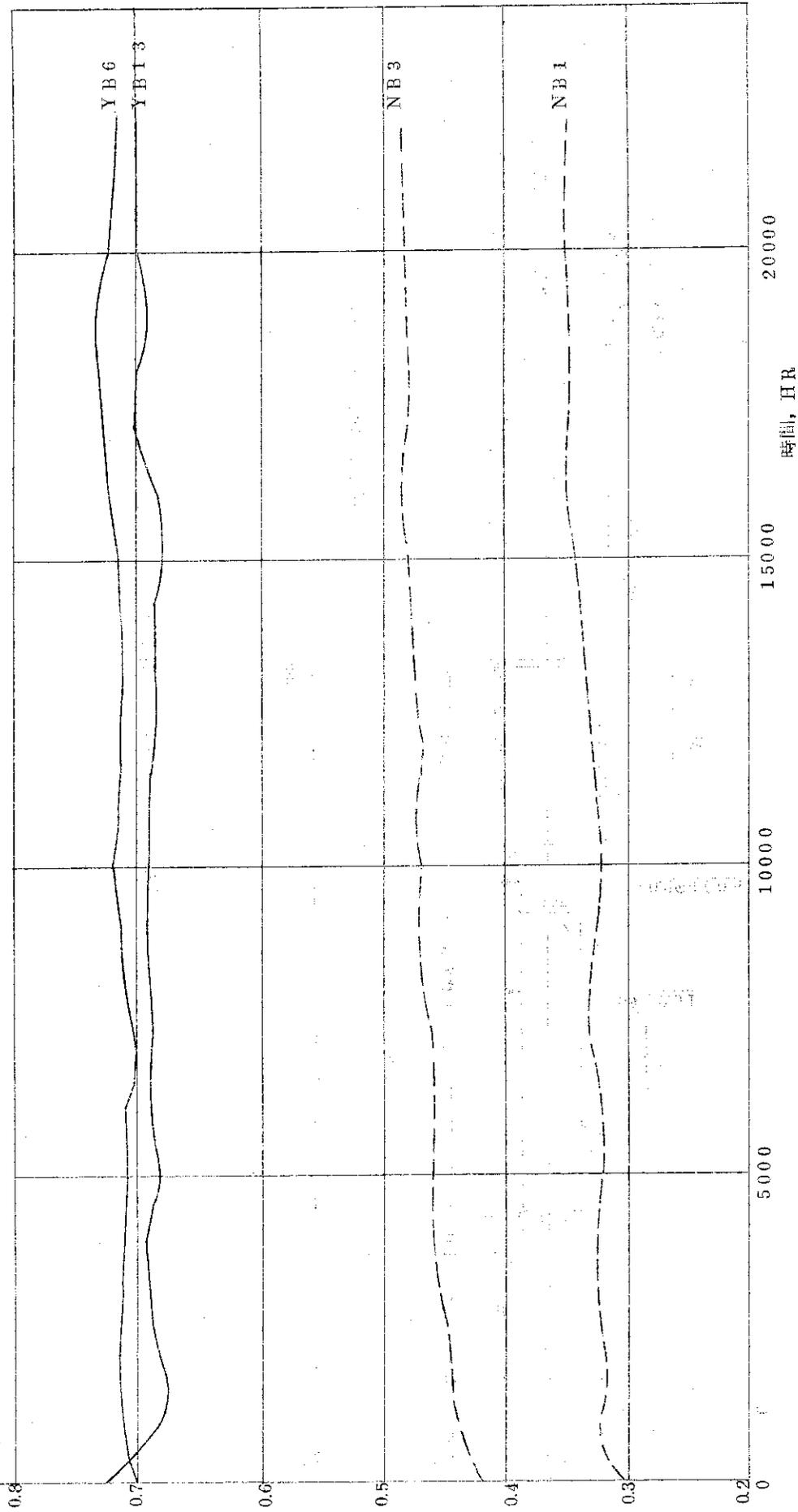


図 6. クリープ試験結果 (500°C, 15.0Kg/mm<sup>2</sup>)

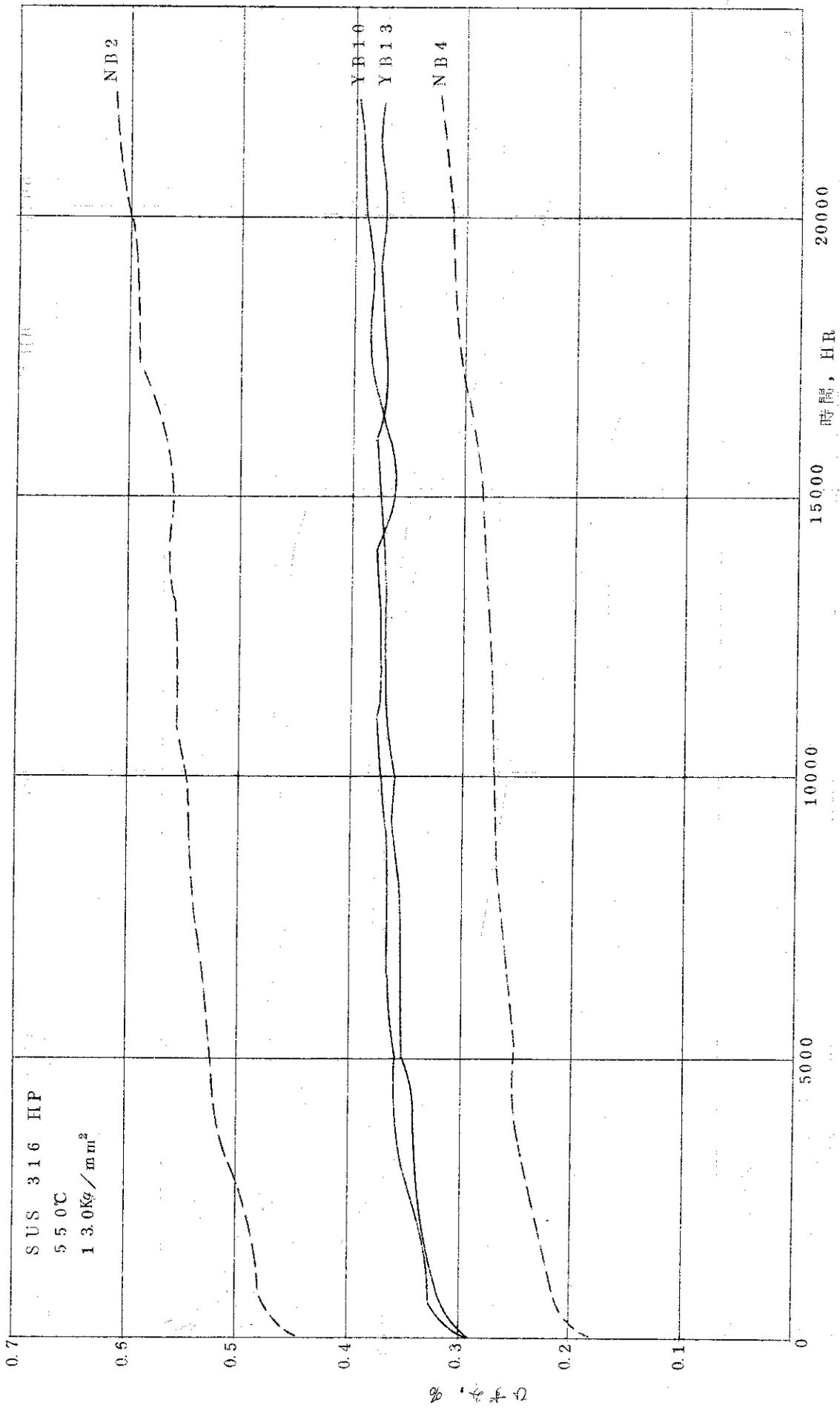


図7 クリープ試験結果 (550°C, 13.0Kg/mm<sup>2</sup>)

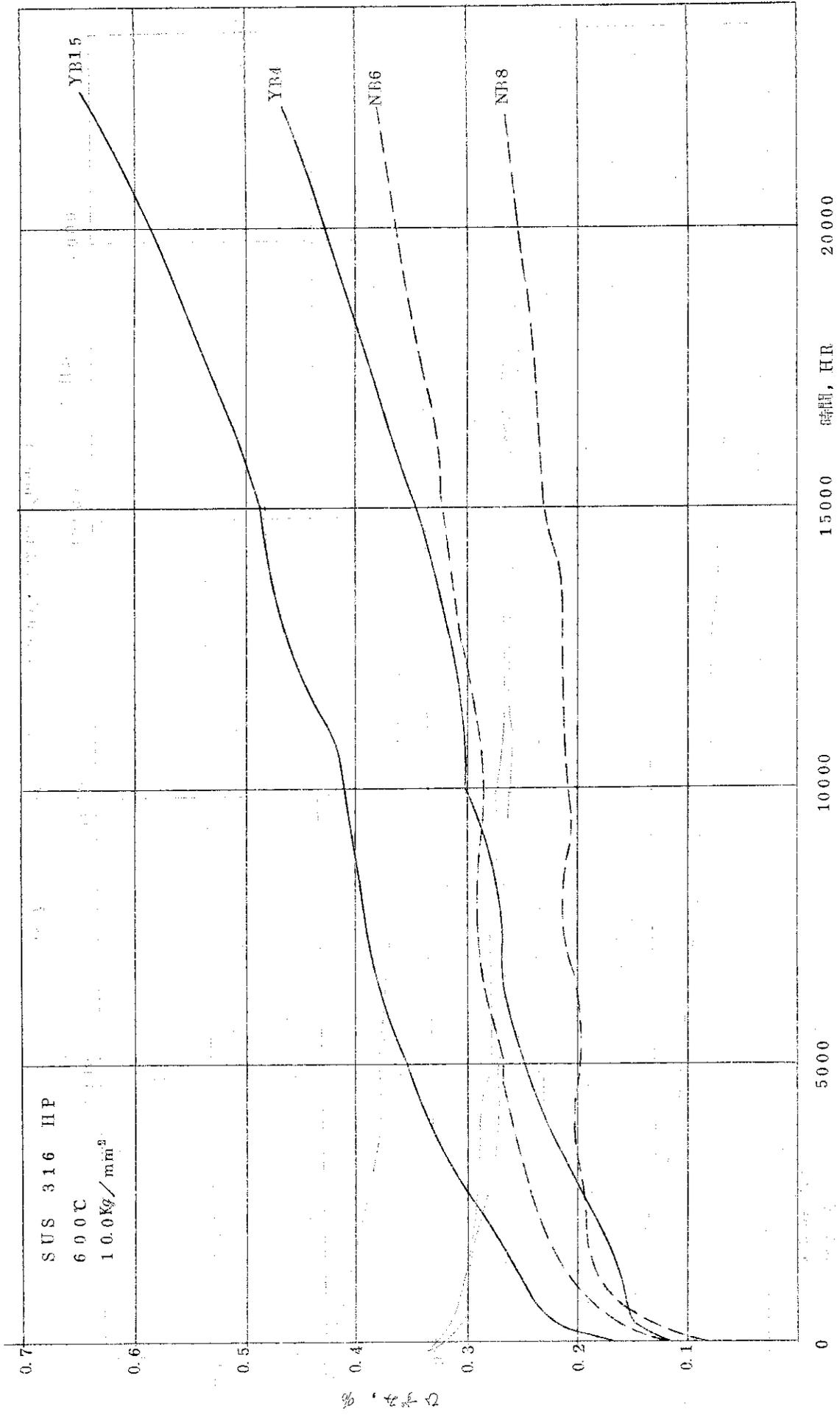


図 8 クリープ試験結果 (600°C, 1.00Kg/mm<sup>2</sup>)

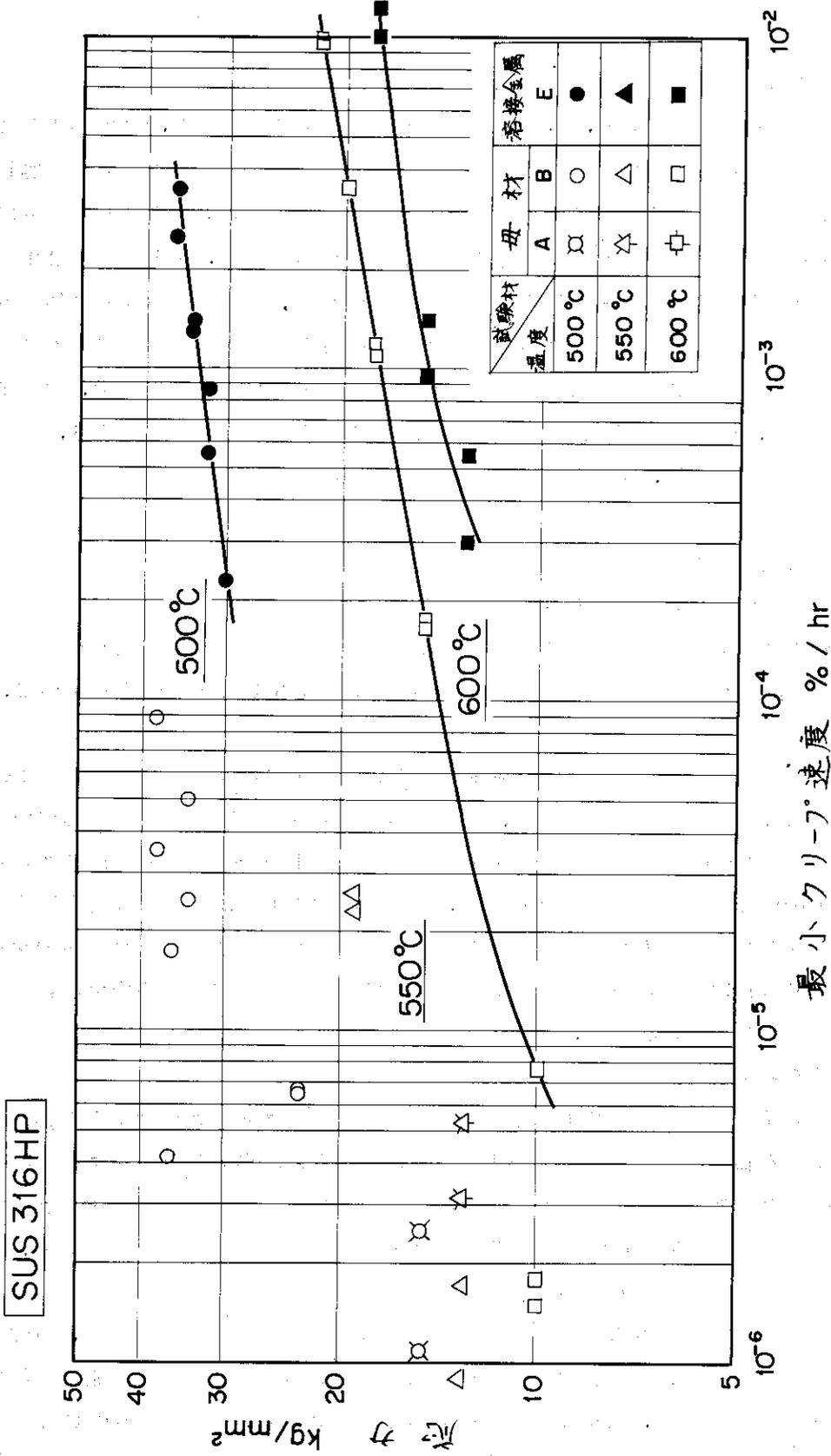


図9 応力-最小クリープ速度曲線

## 4. クリープ破断試験

### 4.1 試験方法および試験条件

前述のクリープ試験と並行して、B, C, D およびE試験材について約5,000時間をこえるクリープ破断試験をJIS Z 2272「金属材料の引張クリープ破断試験方法」に準拠して行なった。使用した試験機はクリープ試験の場合と同種のものである。BおよびE試験材については、10mm $\phi$ ×50mmGLのツバ付試験片(図5)を使用したため、ストローク20mm、最小目盛1/100mmのダイヤルゲージによる伸び計を使用して、試験中のクリープ伸びも測定した。一方、CおよびD試験材は図10のような6mm $\phi$ ×30mmGL試験片によるクリープ破断試験とした。原則としてBおよびE試験材は500°Cおよび600°Cの2温度で、CおよびD試験材は600°Cで、それぞれ試験した。各試験とも約5応力水準で破断時間が5,000時間をこえるように応力を設定し、原則として2繰返数とした。

### 4.2 クリープ破断試験結果

表7および表8にそれぞれBおよびE試験材のクリープ破断試験結果を示す。また表9および表10はそれぞれCおよびD試験結果である。また表11はこれらの試験結果を比較のためまとめたものである。これらの中でD試験材のNB8(500°C, 38.0kg/mm<sup>2</sup>)を除いて、試験はすべて終了あるいは中止した。

応力と破断時間の関係を両対数目盛でプロットすると、図11に示すようにB試験材(母材)では、500°C, 600°Cともに湾曲しており、長時間側でクリープ破断強さが低下している。これに対してD(316Nb)およびE試験材(溶接金属)ではlog $\sigma$ —log tRのプロットは、破断時間が10000時間をこえるあたりまで、ほぼ直線的である。316Nb処理鋼(C試験材)および316Nb添加鋼(D試験材)は316一般鋼(B試験材)よりかなり高い強度水準にあり、とくに316Nb添加鋼は短時間側では非常に強力であるが長時間側では、この両者は一致する傾向を示している。なお、これらの材料では母材や溶接金属と比べて、破断時の伸びが若干小さくなっている。

図12は試験材B(母材)およびE(溶接金属)に対する設計クリープ線図である。この図中のひずみはいずれも瞬間ひずみを含んだ全伸びで表わしてある。得られたデータの範囲内では、溶接金属の一定ひずみ量に対する応力—時間の両対数関係はほぼ直線とみなすことができ、しかも、応力—クリープ破断時間の両対数関係とほぼ平行になっている。これに対して、母材では長時間側で直線よりややはずれている。

図13はA, BおよびE試験材の応力と瞬間ひずみとの関係を示す。このように、瞬間ひずみ量は試験温度にかかわらず、試験応力にのみ依存している。溶接金属は高温引張試験結果(表12)からもわかるように、母材に比べて耐力が非常に大きく、とくに500°Cではクリープ試験における瞬間ひずみ量もかなり小さくなっているが、600°Cの低応力側では両者は一致する傾向を示している。

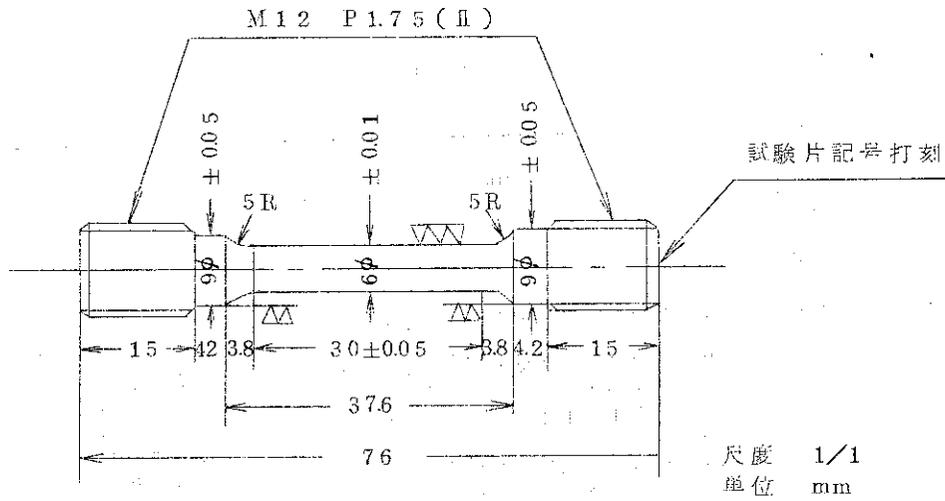


図 10 クリープ破断試験片形状

表 7 クリープ破断試験結果 (B 試験材, 母材)

試験片	温度	応力	$E_y$	$\epsilon_0$	$\epsilon_{min}$	$t_R$	$\delta_R$	$\varphi_R$	備 考
YB	500	42.0							
		42.0							
YB28	500	38.0	10.7	18.45	$3.4 \times 10^{-5}$	7.065.9	21.6	25.4	
YB34	〃	38.0	18.2	16.93	$8.3 \times 10^{-6}$	7.299.2	20.8	19.3	
YB18	〃	36.0	15.9	17.07	$1.8 \times 10^{-5}$	9.381.8	19.6	23.3	
YB24	〃	36.0	15.9	16.94	$4.2 \times 10^{-6}$	9.819.5	21.7	26.7	
YB30	〃	34.0	?	?	$2.5 \times 10^{-5}$	11.125.6	18.2	27.5	
YB36	〃	34.0	12.3	12.62	$5.0 \times 10^{-5}$	10.505.0	17.2	40.1	
YB17	600	27.0	12.3	8.90	$1.0 \times 10^{-1}$	10.5.4	25.3	25.3	
YB27	〃	27.0	14.6	8.35	$8.7 \times 10^{-2}$	13.9.4	33.7	26.8	
YB19	〃	24.0	16.0	6.52	$2.1 \times 10^{-2}$	4.92.6	46.3	52.4	
YB35	〃	24.0	19.1	5.38	$2.1 \times 10^{-2}$	5.26.2	37.4	33.8	
YB25	〃	22.0	14.2	5.07	$1.0 \times 10^{-2}$	1.228.9	52.1	54.6	
YB33	〃	22.0	13.6	4.47	$9.5 \times 10^{-3}$	1.246.8	47.5	53.4	
YB23	〃	20.0	9.9	3.80	$4.1 \times 10^{-3}$	2.314.8	29.2	41.6	
YB37	〃	20.0	13.8	4.13	$3.5 \times 10^{-3}$	2.890.0	40.5	49.4	
YB21	600	18.0	11.7	2.60	-	837.2	65.6	65.7	170deg up 失 敗
YB29	600	18.0	15.9	2.42	$1.2 \times 10^{-3}$	5.958.1	59.7	41.3	
YB31	600	18.0	15.4	2.43	$1.1 \times 10^{-3}$	6.165.7	38.1	42.6	

表 8 クリープ破断試験結果 (E 試験材, 溶接金属)

試験片	温度	応力	$E_Y$	$\epsilon_0$	$\epsilon_{min}$	$t_R$	$\delta$	$\varphi$	備考
W	500	42.0							
		38.0							
W 1	500	36.0	15.7	0.94	$2.5 \times 10^{-3}$	1,684.3	32.8	55.7	
W 23	500	36.0	11.2	1.36	$3.5 \times 10^{-3}$	1,409.1	33.2	56.2	
W 11	500	34.0	15.0	0.51	$1.4 \times 10^{-3}$	3,050.4	48.6	56.9	
W 19	500	34.0	13.4	0.54	$1.3 \times 10^{-3}$	2,867.2	31.2	49.6	
W 14	500	32.0	11.5	0.35	$5.6 \times 10^{-4}$	5,063.8	39.3	59.5	
W 28	500	32.0							280deg up 失敗中止
W 22	500	32.0	13.6	0.32	$8.6 \times 10^{-4}$	4,885.0	25.8	44.4	
W 15	500	30.0	12.1	0.28	$2.3 \times 10^{-4}$	13,622.7	35.5	52.9	
W 2	600	22.0	13.7	0.20	$4.1 \times 10^{-2}$	1,448	52.4	61.0	
W 27	600	22.0	12.7	0.24	$5.9 \times 10^{-2}$	1,264	58.5	64.8	
W 13	600	20.0	11.6	0.19	$1.6 \times 10^{-2}$	4,247	56.8	59.1	
W 16	600	20.0	11.0	0.20	$2.2 \times 10^{-2}$	3,723	54.5	61.2	
W 7	600	18.0	11.5	0.17	$1.2 \times 10^{-2}$	8,212	54.1	60.4	
W 24	600	18.0	7.6	0.21	$1.0 \times 10^{-2}$	780.4	55.0	61.3	
W 4	600	15.0	11.0	0.14	$9.6 \times 10^{-4}$	3,666.0	46.3	55.0	
W 21	600	15.0	11.6	0.15	$1.4 \times 10^{-3}$	3,173.8	49.0	49.5	
W 10	600	13.0	13.5	0.09	$5.5 \times 10^{-4}$	8,868.9	43.3	56.2	
W 18	600	13.0	11.8	0.12	$3.0 \times 10^{-4}$	9,512.9	40.6	43.7	

クリープ破断試験の中で10φ試験片のもの(YBおよびW)にはすべて1/100mmダイヤルースを用いて伸び測定も行った。

表 9 クリープ破断試験結果 (C 試験材, N処理)

試験片 記号	温度 ℃	応力 Kg/mm <sup>2</sup>	瞬間伸び %	最小クリープ速度 %/hr	破断時間 hr	破断伸び %	破断絞り %
N 2	500	38.0	—	—	6,603.0	22.7	20.6
N 8	600	24.0	—	—	7,280		
N 4	600	22.0	—	—	4,066.9	17.6	17.6
N 7	600	22.0	—	—	3,475.7	15.0	22.3
N 3	600	20.0	—	—	8,115.3	32.3	33.6
N 5	600	20.0	—	—	8,291.4	27.4	25.9

( ) ; 破断せず

表 10 クリープ破断試験結果 ( D 試験材, Nb 処理 )

試験片	温度	応力	E <sub>Y</sub>	ε <sub>0</sub>	ε <sub>min</sub>	t <sub>R</sub>	δ	φ	備考
NB8	500	38.0	-	-	-	(22000)			試験中
NB5	600	27.0	-	-	-	1467.2	15.4	21.3	
NB6	600	24.0	-	-	-	2993.0	14.0	21.9	
NB3	600	22.0	-	-	-	5058.9	12.4	14.1	
NB2	600	22.0	-	-	-	4937.5	11.3	16.2	
NB1	600	20.0	-	-	-	8593.3	9.2	13.0	
NB7	600	20.0	-	-	-	9317.8	16.1	19.8	

表 11 高速炉用 SUS 316 厚板のクリープ破断強さの比較

温度 ℃	時間 hr	試 験 材				ISO* (316)
		B (316母材)	C (316+N)	D (316+Nb)	E (316溶接金属)	
500	3,000	-	-	-	23.8	-
	5,000	(42.0)	-	-	32.2	-
	10,000	35.2	-	-	30.4	-
	30,000	(30.6)	-	-	(28.1)	-
	100,000	(28.0)	-	-	(25.6)	-
550	1,000	(30.0)	-	-	(26.0)	-
	3,000	(27.4)	-	-	(23.8)	-
	5,000	(26.3)	-	-	(22.8)	-
	10,000	(24.8)	-	-	(21.6)	26.0
	30,000	(22.5)	-	-	(20.0)	24.3
	100,000	(19.7)	-	-	(16.7)	19.6
600	1,000	22.2	23.8	28.8	17.6	-
	3,000	19.5	22.5	24.0	15.2	-
	5,000	18.3	21.4	22.0	14.1	-
	10,000	16.6	19.0	19.7	12.8	17.9
	30,000	(13.7)	(16.0)	(16.4)	(11.1)	15.5
	100,000	(11.0)	-	-	(9.3)	11.8

\*) ISO/TC17/WG10/ETP-SG, MG/QF/301/71

表 12 SUS 316 ステンレス鋼の引張試験結果

試験材	試験片 記号	方向	温 度 ℃	0.2%耐 力 Kg/mm <sup>2</sup>	引張強さ Kg/mm <sup>2</sup>	伸 び %	絞 り %	衝 撃 値 Kg·m/mm <sup>2</sup>	硬 さ	
	—	L	R T	27.3	57.6	63	74	—	HB143	ミルシートによる
	—	L	RTT	21.4	54.7	61	75	31.4	HB119	—
	—	C	R T	21.6	55.4	62	69	18.1	—	—
	YB22	L	450	14.5	46.3	49	67	—	—	金材技研による
	YB32	L	500	13.7	45.4	46	67	—	—	—
	YB39	L	550	12.5	43.8	47	66	—	—	—
	YB20	L	600	11.9	40.7	48	68	—	—	—
	YB26	L	650	13.2	35.7	49	72	—	—	—
	—	L	R T	29.0	63.7	58	72	—	HV162	ミルシートによる
	—	C	R T	31.2	63.6	56	70	—	—	—
	—	L	500	14.5	49.3	46	66	—	—	—
	—	C	500	15.4	48.6	48	64	—	—	—
	—	L	600	13.8	45.1	44	63	—	—	—
	—	C	600	13.0	45.0	44	64	—	—	—
	—	L	700	13.6	39.5	42	66	—	—	—
	—	C	700	13.4	39.2	46	65	—	—	—
	—	L	R T	30.1	62.9	52	65	—	HV170	ミルシートによる
	—	C	R T	30.4	62.7	51	62	—	—	—
	—	L	500	19.4	47.0	38	59	—	—	—
	—	C	500	19.9	47.2	38	54	—	—	—
	—	L	600	17.6	44.8	41	57	—	—	—
	—	C	600	19.9	45.3	38	54	—	—	—
	—	L	700	18.8	40.1	38	61	—	—	—
	—	C	700	18.7	40.8	38	57	—	—	—
	W 9	*	R T	44.4	58.8	44	59	—	—	金材技研による
	W 5	〃	450	35.8	45.8	25	52	—	—	—
	W 26	〃	500	32.6	43.6	29	47	—	—	—
	W 20	〃	550	32.2	41.3	26	53	—	—	—
	W 8	〃	600	28.6	37.3	29	54	—	—	—
	W 3	〃	650	23.7	31.7	35	63	—	—	—

\*) 溶接方向より採取

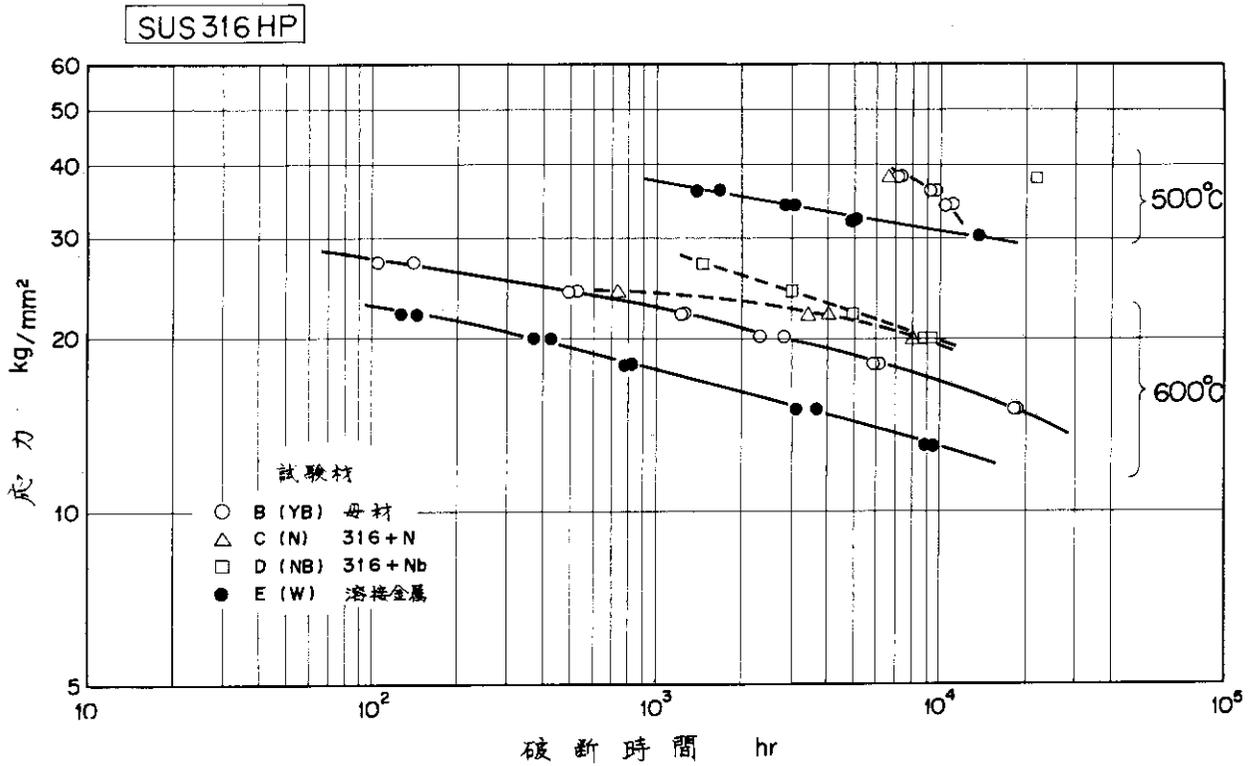


図11 クリープ破断試験結果

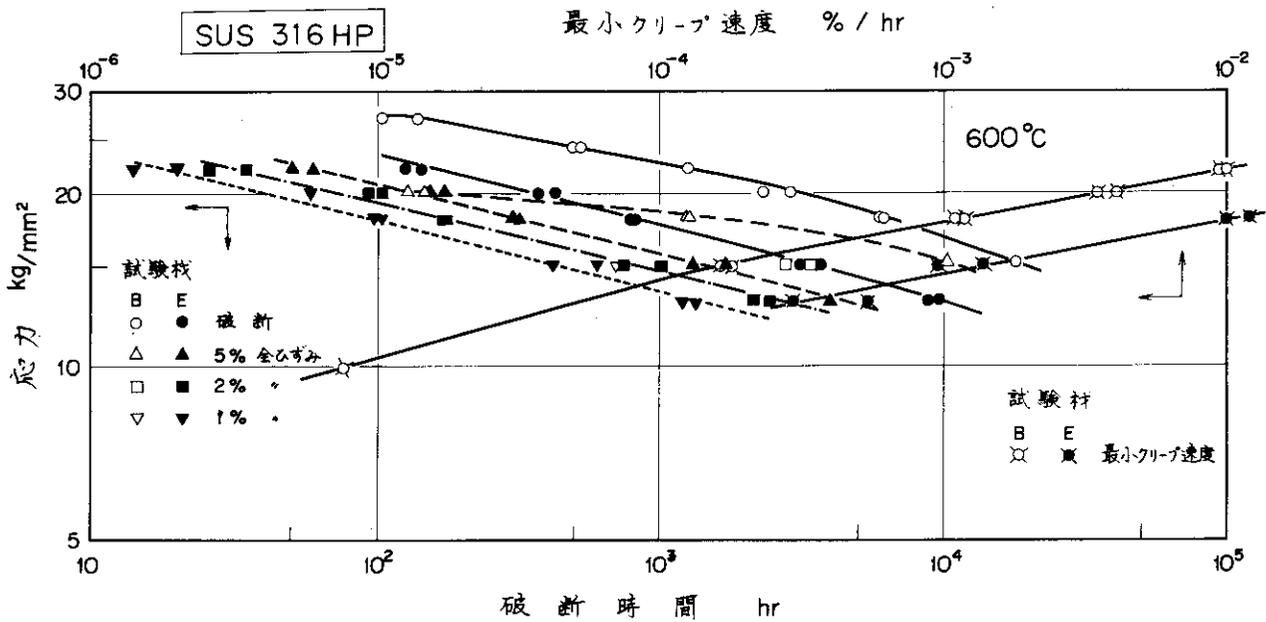


図12 設計クリープ線図 (600°C, BおよびE試験材)

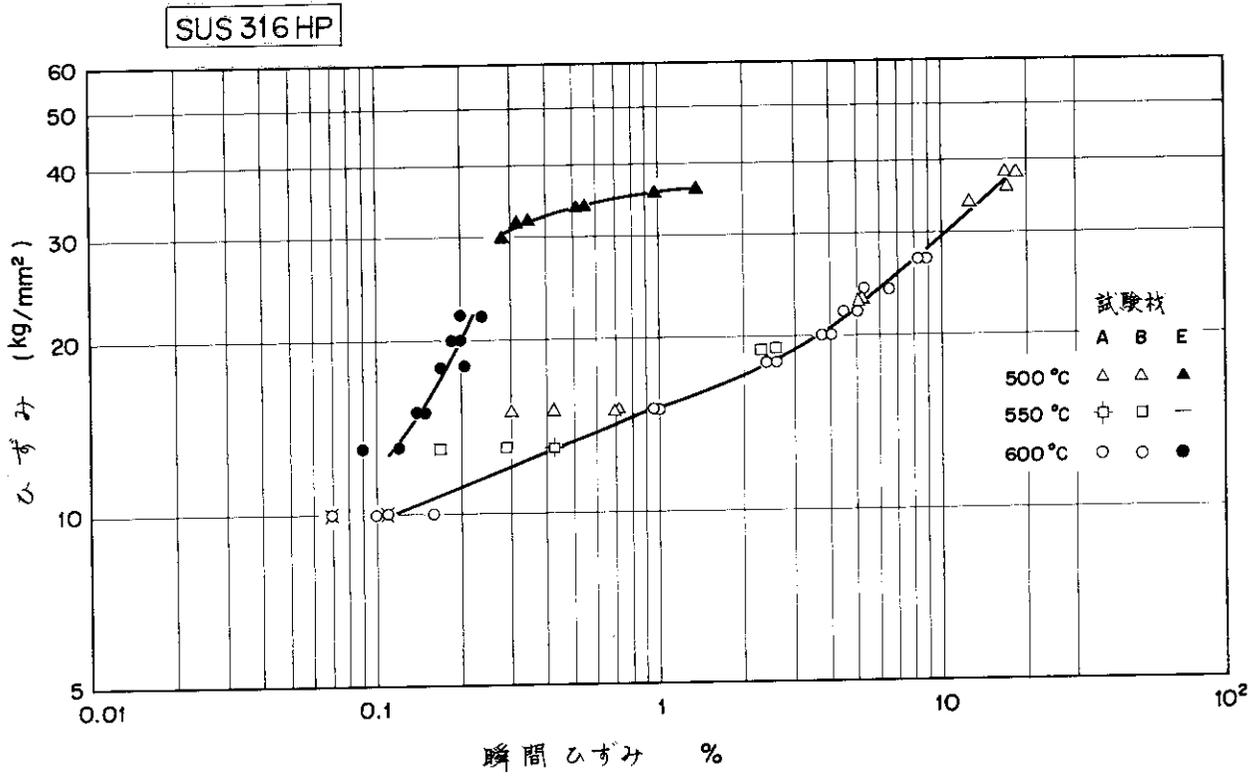


図13 負荷応力と瞬間ひずみとの関係 (A,BおよびE試験材)

クリープ破断時間と最小クリープ速度との関係を図14に示す。  
通常、この関係は両対数プロットに対して、直線とみなされるが、この場合は $10^{-2}\%/hr$ 付近で明らかに折れ曲がっている。

クリープ破断後の伸びは図15に示すように、母材、溶接金属ともに良好で、600℃で約10,000時間までは、じん性の急激な低下は認められない。316N処理鋼(○試験材)および316Nb添加鋼の破断伸びは、母材や溶接金属と比べて若干小さくなっているがいずれも10%以上である。

### 4.3 解 析

BおよびE試験材については、Larson-Miller およびDorn の両パラメータ法を用いてクリープ破断データをそれぞれ整理し、パラメータ定数を最適化して、4次の最良回帰式を求めた。計算された最適パラメータ定数と標準偏差は表13のようになるが、両パラメータ法の間の差異はほとんどなかったため図16にはLarson-Miller法による回帰線を採用した。

なお、この図中には550°での内挿による回帰線も加えてある。

表13 4次回帰式による最適パラメータ定数と標準偏差

試 験 材	B試験材〔YB〕		E試験材〔W〕	
	L. M	Dorn	L. M	Dorn
パラメータの種類				
定 数	C=2 1.9 6	$\Delta H=9 2.4 1 0$	C=2 6.7 8	$\Delta H=1 1 1.1 0 0$
標 準 偏 差	0.0 3 9 1	0.0 3 7 9	0.0 3 9 1	0.0 3 9 6

上記のようにして整理されたデータを内外挿して、500°、550°および600℃における時間強度を比較したものが表11である。

### 4.4 クリープ破断試験後の組織観察

#### 4.4.1 試験片の外観

クリープ破断試験後の試験片の外観を肉眼で観察し、次の結果が得られた。

- 1) 一般に母材では平行部の全域にわたって、ほぼ均一に変形しているが、溶接金属は非常に不規則に変形しており、ほとんどの試験片で二段絞りが認められた。
- 2) 500℃で破断した母材の全試験片および600℃で24.0kg/mm<sup>2</sup>以上の応力で破断した母材試験片にはツバ部(図5A部参照)の根本にリング状にクラックが走っており、500℃での破断はほとんどこのツバの根本で起っている。
- 3) 600℃で比較的短時間で破断した母材試験片では破断部近傍に多数のサブクラックが認められた。一方、溶接金属では一般にこのようなサブクラックは少なかったが、大部分の試験片で特定のパスにそってクラックが集中的に認められた。

#### 4.4.1 光学顕微鏡による組織観察

クリープ破断試験後の試験片の中から、各応力レベル毎に一本ずつ選んで、縦方向に中心にそって切出し、研磨、腐食して破断部付近の組織を観察した。試験前の組織をPhoto. 1に、クリープ破断試験後の組織をPhoto. 2および3に示す。

- 1) 500°Cで破断した母材には中心部に大きな開口をもったW型の粒界クラックが認められ、一般に破壊は粒界にそって進行している。600°Cで24kg/mm<sup>2</sup>以上の応力で比較的短時間で破断した母材では主にせん断型の粒内破壊となっているが、応力が下がるW型の粒界クラックをともなった粒界破壊へモードが移行するが、多くの場合はこの両者の混合型である。
- 2) 溶接金属では一般に、試験片平行部で3~4パス程度に相当し、各パス間で変形の様子が異なっている。フェライトが細くでているパスでは比較的多くのクラックが集中している。600°Cで長時間で破断した試験片ではフェライト部はかなり退化し、M<sub>23</sub>O<sub>6</sub>型の炭化物が析出しているようである。  
なお、500°C、32kg/mm<sup>2</sup>で試験したW22は試験片採取位置が左右いずれかにずれたため、平行部の一部がHAZにかかっており、このHAZ部分には特にクラックが集中しており、この試験片の伸びをより絞り値もやや小さい。しかし、破断寿命には明らかな影響は認められない。
- 3) 母材、溶接金属共に一般に大きなクリープ変形を示し、600°C、10<sup>4</sup>時間程度までは延性を害するσ相の析出は全く認められない。

#### 4.5 クリープ破断試験後のかたさ

組織観察に先立って、ピッカースかたさH<sub>v</sub>(10)を測定した。試験前のかたさ(5点平均)は母材でH<sub>v</sub>(10)131、溶接金属ではH<sub>v</sub>(10)218であった。なお、溶接金属部の最高かたさはH<sub>v</sub>(10)227であった。

500°Cおよび600°Cクリープ破断試験後のかたさをそれぞれ、図17および図18に示す。母材、溶接金属のいずれにおいても試験片つかみ部よりも破断部付近の方が加工硬化によって硬くなっている。

一般に破断時間に対するかたさの依存性は一定の傾向を示していないが、600°Cで破断した母材のつかみ部では破断時間と共にかたさのゆるやかな上昇が認められ、これは炭化物の析出に対応するものと思われる。同じ理由で、溶接金属では逆にかたさは破断時間とともに減少している。

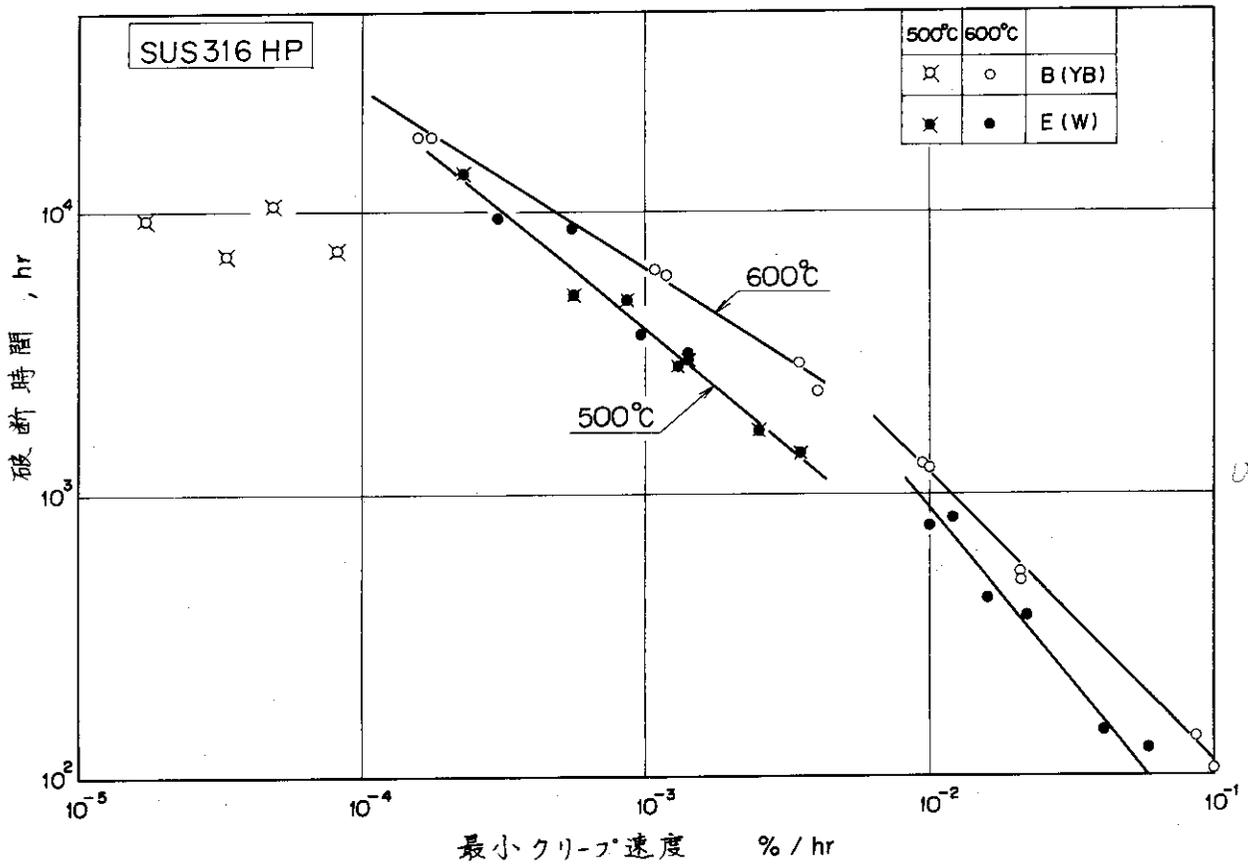


図14 最小クリープ速度と破断時間との関係 (BおよびE試験材)

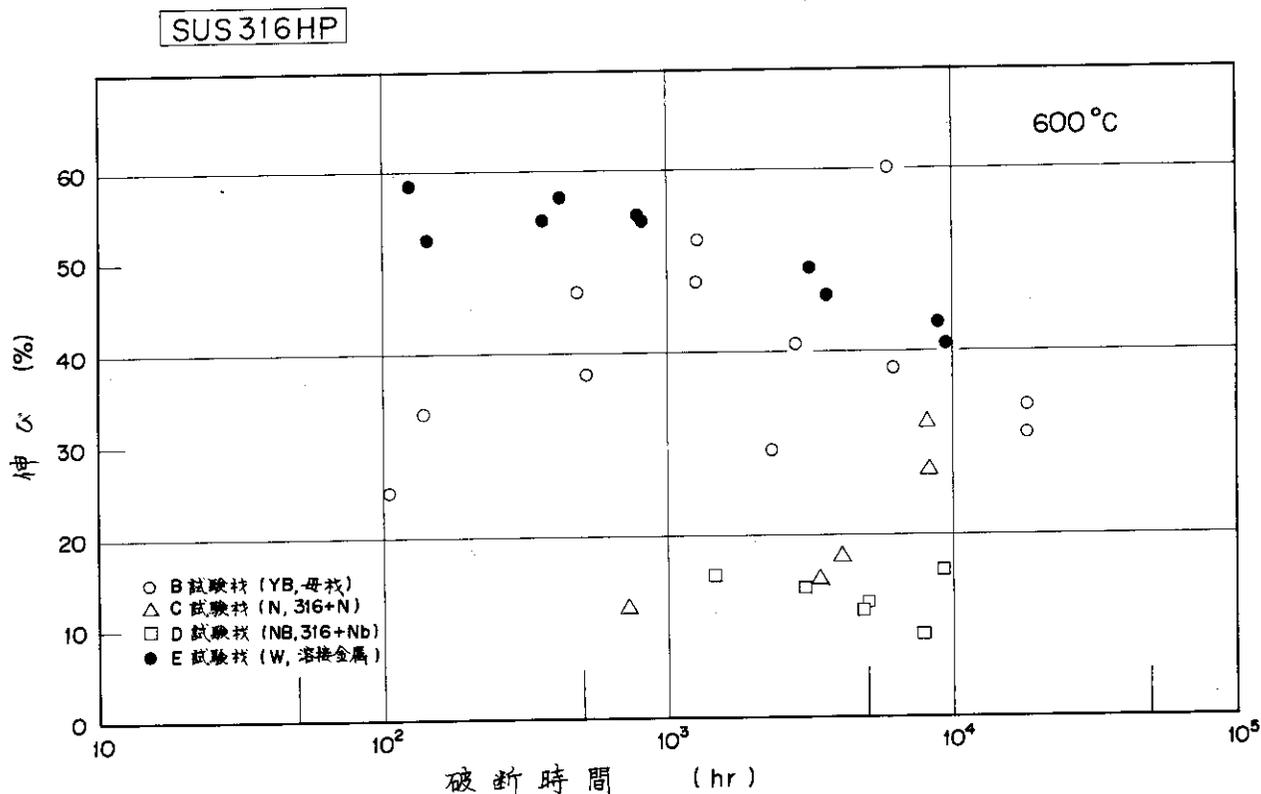


図15 破断時間とのびとの関係 (BおよびE試験材)

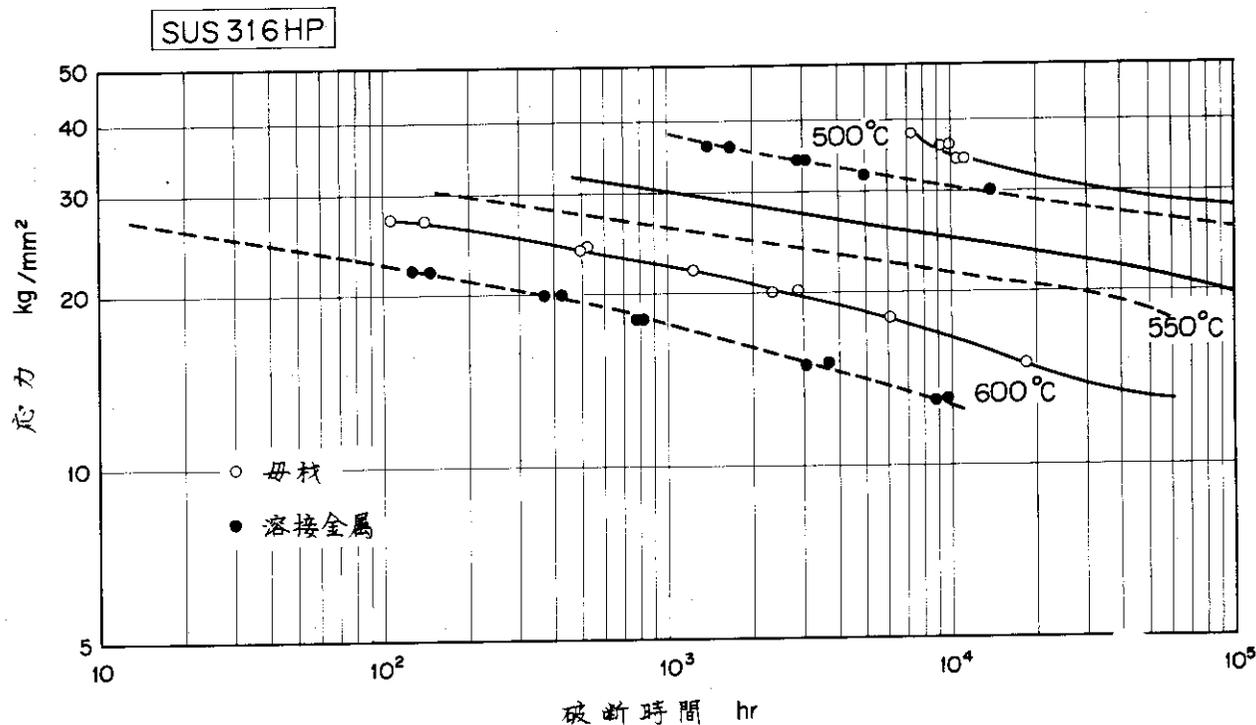


図16 Larson-Miller パラメータによる、4次の回帰曲線 (BおよびE試験材)

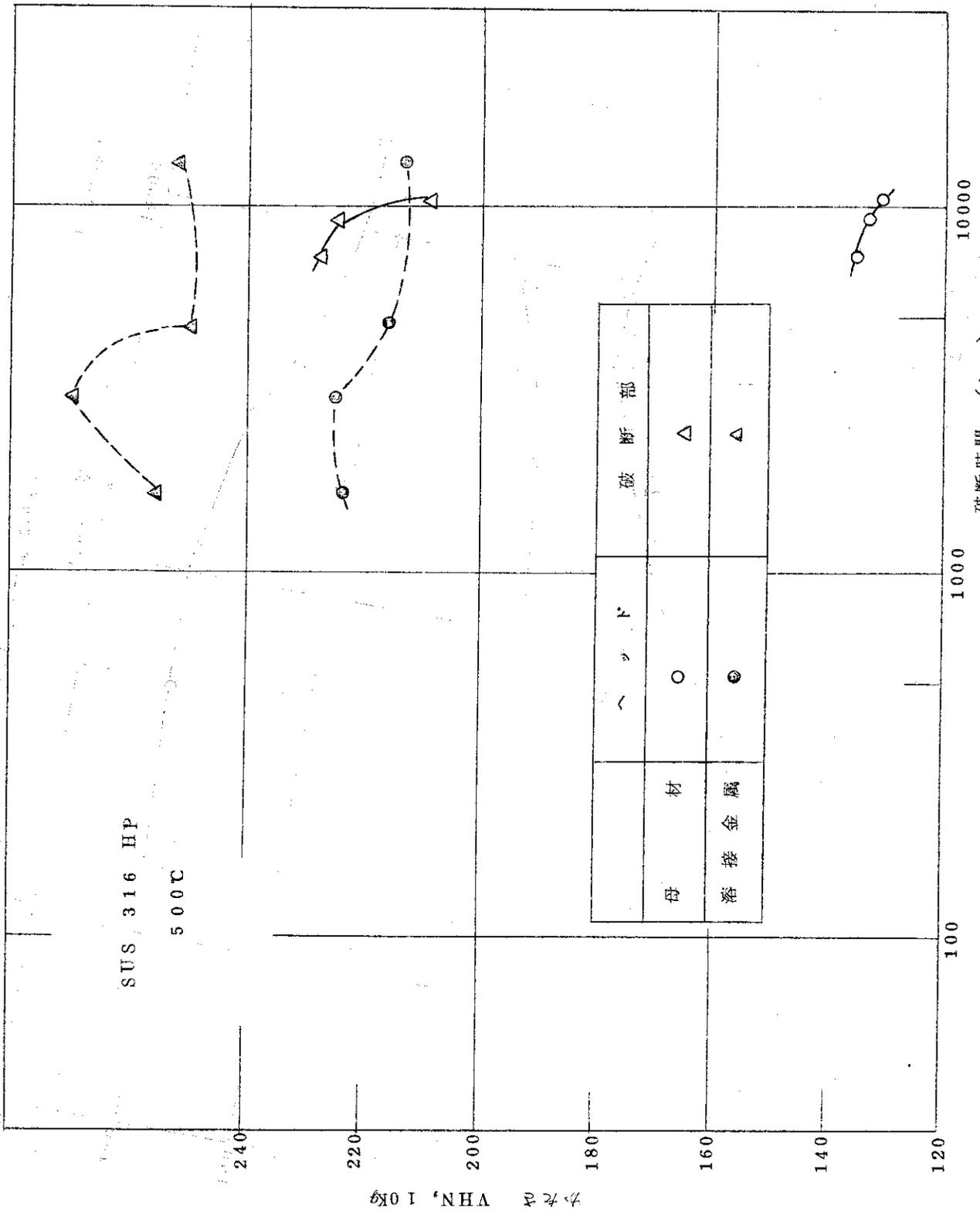


図17 500°Cクリープ破断試験後のかたさ (BおよびE試験材) 破断時間, (hr)

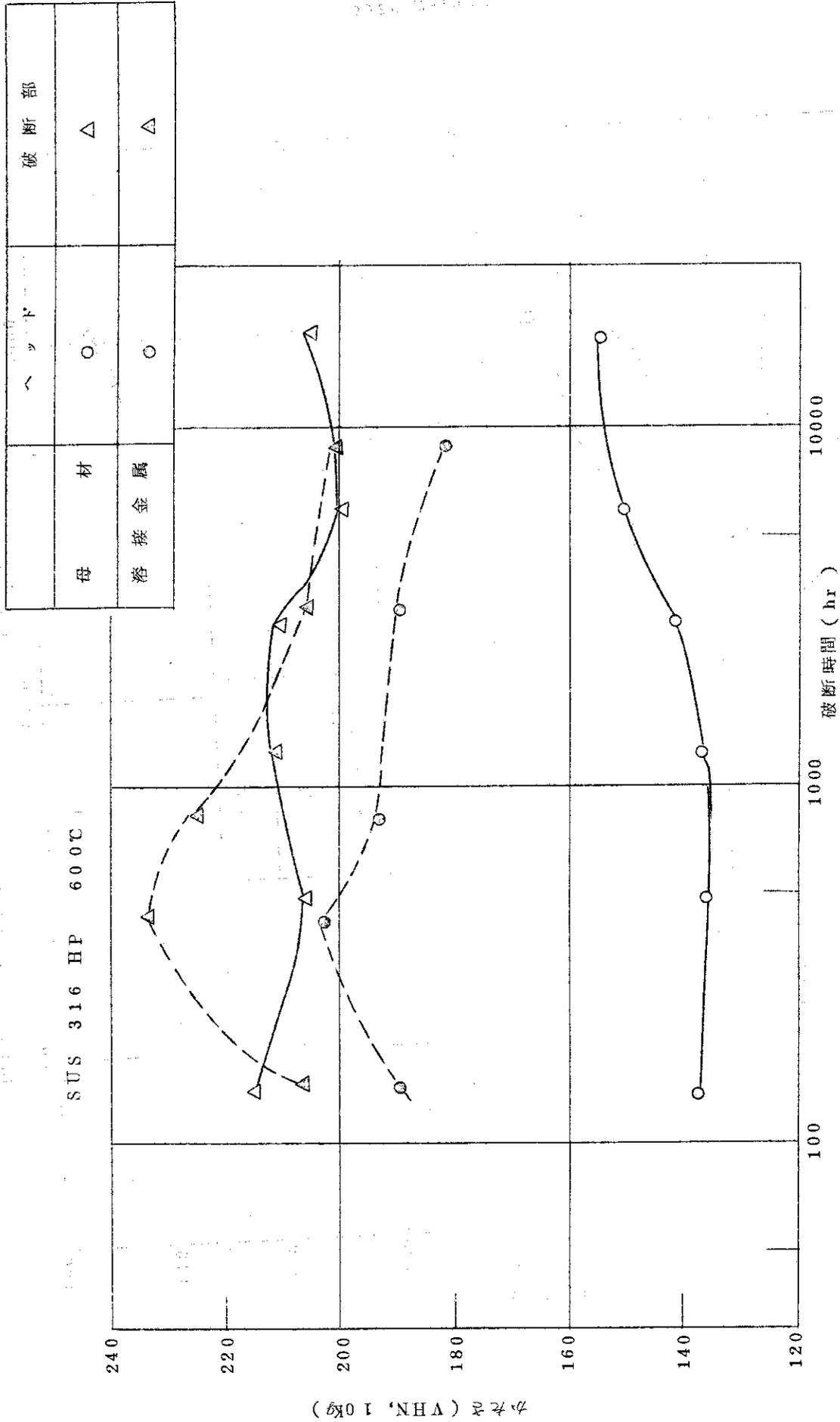
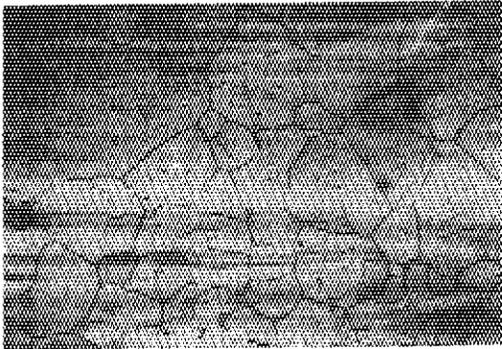


図18 600°Cクリープ破断試験後のかたさ (BおよびE試験材)

母材 ( B 試験材, YB )

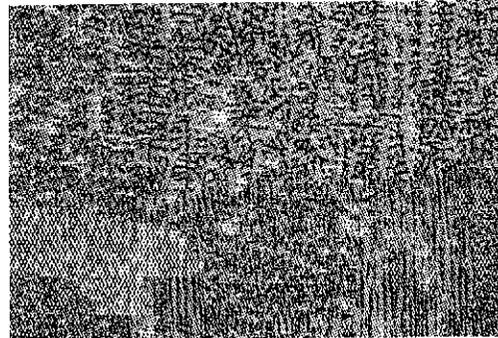
腐食液 ;  $\text{HNO}_3$  電解



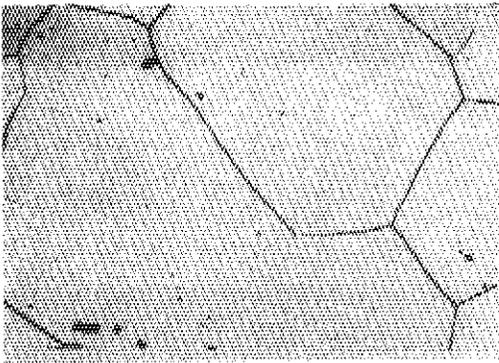
YB ; 受入れのまま (  $\times 100$  )

溶接金属 ( E 試験材, W )

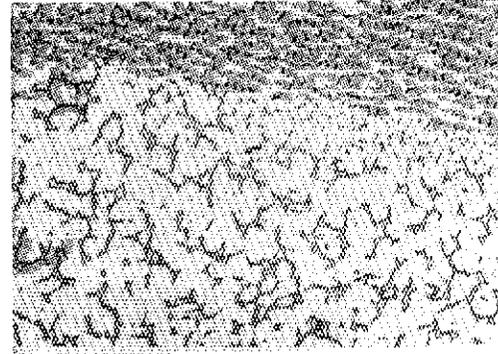
腐食液 ; シュウ酸電解



W ; 溶接のまま (  $\times 100$  )



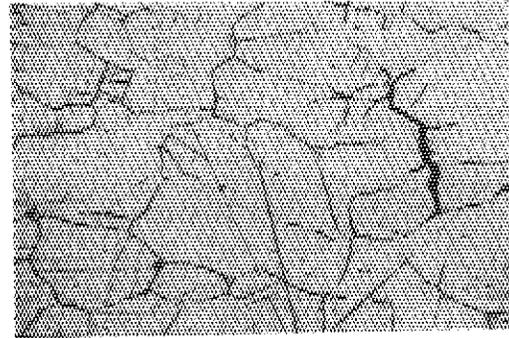
YB ; 受入れのまま (  $\times 400$  )



W ; 溶接のまま (  $\times 400$  )

Photo.1 クリーブ試験前の金属組織

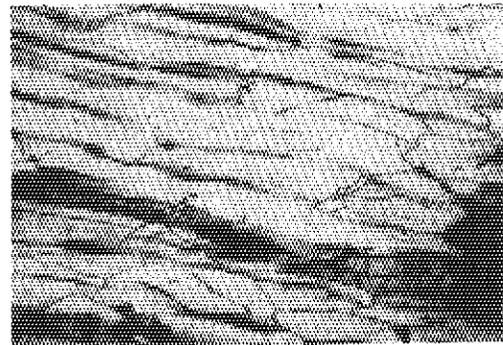
母材



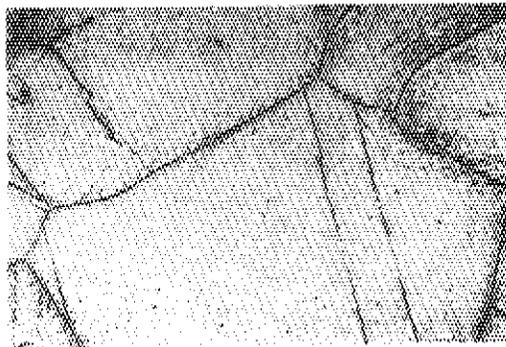
YB36 ; 500℃, 34 kg/mm<sup>2</sup>  
 $t_R = 10505.0 \text{ h}$  ( $\times 400$ )



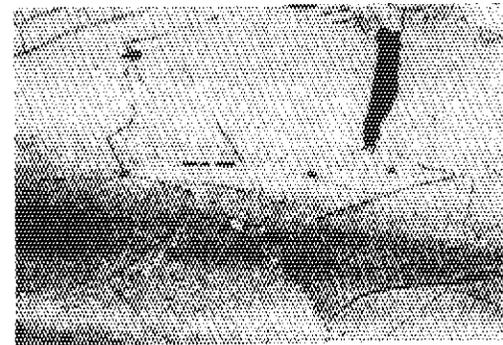
YB19 ; 600℃, 24 kg/mm<sup>2</sup>  
 $t_R = 492.6 \text{ h}$  ( $\times 400$ )



YB37 ; 600℃, 20 kg/mm<sup>2</sup>  
 $t_R = 2890.0 \text{ h}$  ( $\times 100$ )



YB29 ; 600℃, 18 kg/mm<sup>2</sup>  
 $t_R = 5958.1 \text{ h}$  ( $\times 400$ )



YB29 ; 600℃, 18 kg/mm<sup>2</sup>  
 $t_R = 5958.1 \text{ h}$  ( $\times 400$ )

Photo. 2 クリープ試験後の金属組織(1)

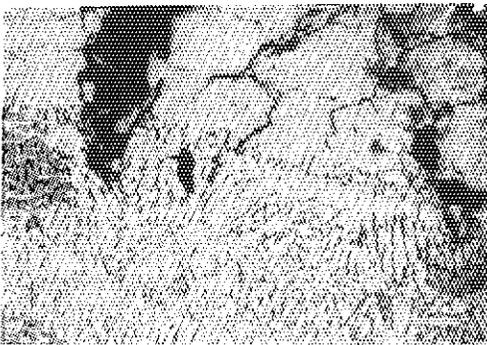
溶接金属



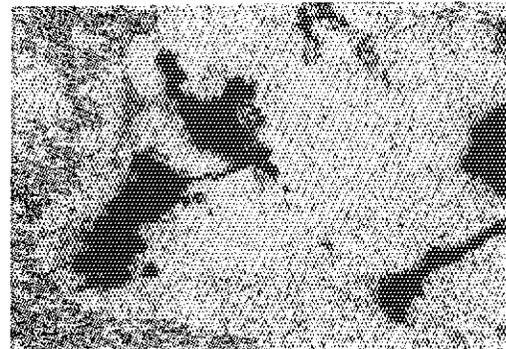
W1 ; 500℃, 36 kg/mm<sup>2</sup>  
 $t_R = 16843 \text{ h } (\times 100)$



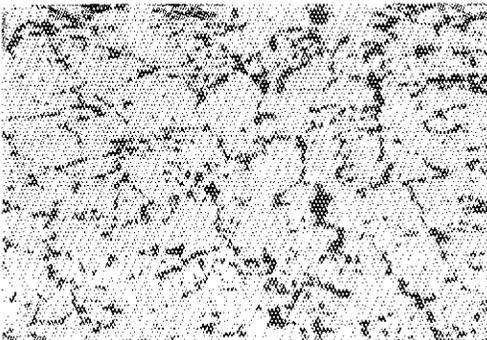
W15 ; 500℃, 30 kg/mm<sup>2</sup>  
 $t_R = 136227 \text{ h } (\times 400)$



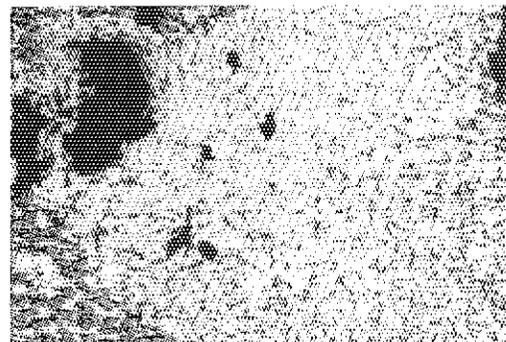
W22 ; 500℃, 32 kg/mm<sup>2</sup>  
 $t_R = 4855.0 \text{ h } (\times 100)$



21 ; 600℃, 15 kg/mm<sup>2</sup>  
 $t_R = 3666.0 \text{ h } (\times 100)$



W10 ; 600℃, 13 kg/mm<sup>2</sup>  
 $t_R = 8868.9 \text{ h } (\times 400)$



W10 ; 600℃, 13 kg/mm<sup>2</sup>  
 $t_R = 8868.9 \text{ h } (\times 100)$

Photo. 3 クリーブ試験後の金属組織

## 5. 考 察

### 5.1 試験材の強度レベル

応力水準 I におけるクリープ試験の結果、 $500^{\circ}\text{C}$  および  $550^{\circ}\text{C}$  では A 試験材が B 試験材よりクリープ変形抵抗が大きく、 $600^{\circ}\text{C}$  では逆にになっているのは含有炭素量から解釈できる。すなわち、A 試験材 (0.07% C) は B 試験材 (0.05% C) と比べて  $500^{\circ}\text{C}$  での瞬間伸びは小さいが、 $600^{\circ}\text{C}$  では炭化物析出による強化のためより小さなクリープ速度を示している。

このように B 試験材は溶接性を考慮して炭素量をやや低目におさえてあるため、諸外国のデータと比較してクリープ破断強さはやや小さくなっているものと思われる。

SUS 316 に 0.13% N を添加した 316 N 鋼 (C 試験材) および 0.68% Nb を添加した 316 Nb 鋼 (D 試験材) はいずれも無添加鋼に比べて  $600^{\circ}\text{C}-10^4\text{hr}$  強さで約  $2\text{kg}/\text{mm}^2$  程度上昇している。D 試験材 (316 Nb 鋼) のデータはドイツで発表されている同鋼種 (X8CrNiMoNb 16,13) のデータ<sup>2)</sup>と比較的よく一致している。

### 5.2 許容応力との比較

ASME Boiler & Pressure Vessel Code の Section VIII Div.1, 1971 の Appendix P によれば、許容応力の設定には次の基準が採用されている。

非クリープ域では、鉄鋼材料に対して、

- E(1) 室温における規定引張強さの下限値の 1/4
- E(2) 当該温度における引張強さの 1/4
- E(3) 室温における規定耐力の下限値の 5/8
- E(4) 当該温度における耐力の 2/3

クリープ域では、

- C(1) 当該温度において、1000時間当り 0.01% のクリープ速度を生ずる平均応力の 100%
- C(2) 100,000 時間後に破断する平均応力の 67%
- C(3) 100,000 時間後に破断する応力の最小値の 80%

これらいずれかの中で最低値を許容引張応力とする。

母材 (B 試験材) および溶接金属 (E 試験材) について、今回の試験結果を上記の各基準についてまとめたものが表 14 であり、図 19 に示す。長時間の外挿値は表 11 を用いた。また 1000時間当り 0.01% のクリープ速度を生ずる応力としては、図 9 の結果を内外挿して最小クリープ速度が  $10^{-5}\%/hr$  となる応力を採用した。

表 1.4 許容応力との比較, kg/mm<sup>2</sup>

試 験 材	温 度 ℃	弾性域での基準				クリープ域での基準			許容応力* 〔ASME〕
		E (1)	E (2)	E (3)	E (4)	C (1)	C (2)	C (3)	
B 〔母 材〕	RT	13.0	13.6	13.1	14.3	—	—	—	13.1**
	450	—	11.6	—	9.7	—	—	—	7.7
	500	—	11.3	—	9.1	26.0	18.8	—	7.5
	550	—	10.9	—	8.3	16.3	13.2	—	7.4
	600	—	10.1	—	7.9	10.5	7.4	—	7.0
	650	—	8.9	—	8.8	—	—	—	5.2
E 〔溶接金属〕	RT	—	14.7	—	29.5	—	—	—	—
	450	—	11.4	—	23.8	—	—	—	—
	500	—	10.9	—	21.8	—	17.2	—	—
	550	—	10.3	—	21.4	—	11.2	—	—
	600	—	9.3	—	19.1	8.2	6.2	—	—
	650	—	7.9	—	15.8	—	—	—	—

\* ) ASME Boiler & Pressure Vessel Code, Sec. VIII Div. 1, Table UHA 23

\*\* ) 0.04%以上の炭素を含有する板で変形を許さない場合

これらの基準に対して、得られたデータは必ずしも十分ではないが、今回試験した母材および溶接金属については現用のASME規定設計応力をほぼ満足しているものと思われる。ただし、600°C以上のクリープ域ではクリープ破断強さの低下が著しく、必ずしも規定の許容応力を満足していないようである。

今回試験したSUS 32 HP 母材および溶接金属では弾性域からクリープ域への遷移は、それぞれ600°Cおよび560°C付近にある。

母材については当該温度における耐力（基準E(4)）および10<sup>5</sup>hrクリープ破断強さ（基準C(2)）が許容応力決定に対して支配的であり、溶接金属については当該温度における引張強さ（基準E(2)）および10<sup>5</sup>hrクリープ破断強さ（基準C(2)）が支配的である。

000 033

(V notice) sbml

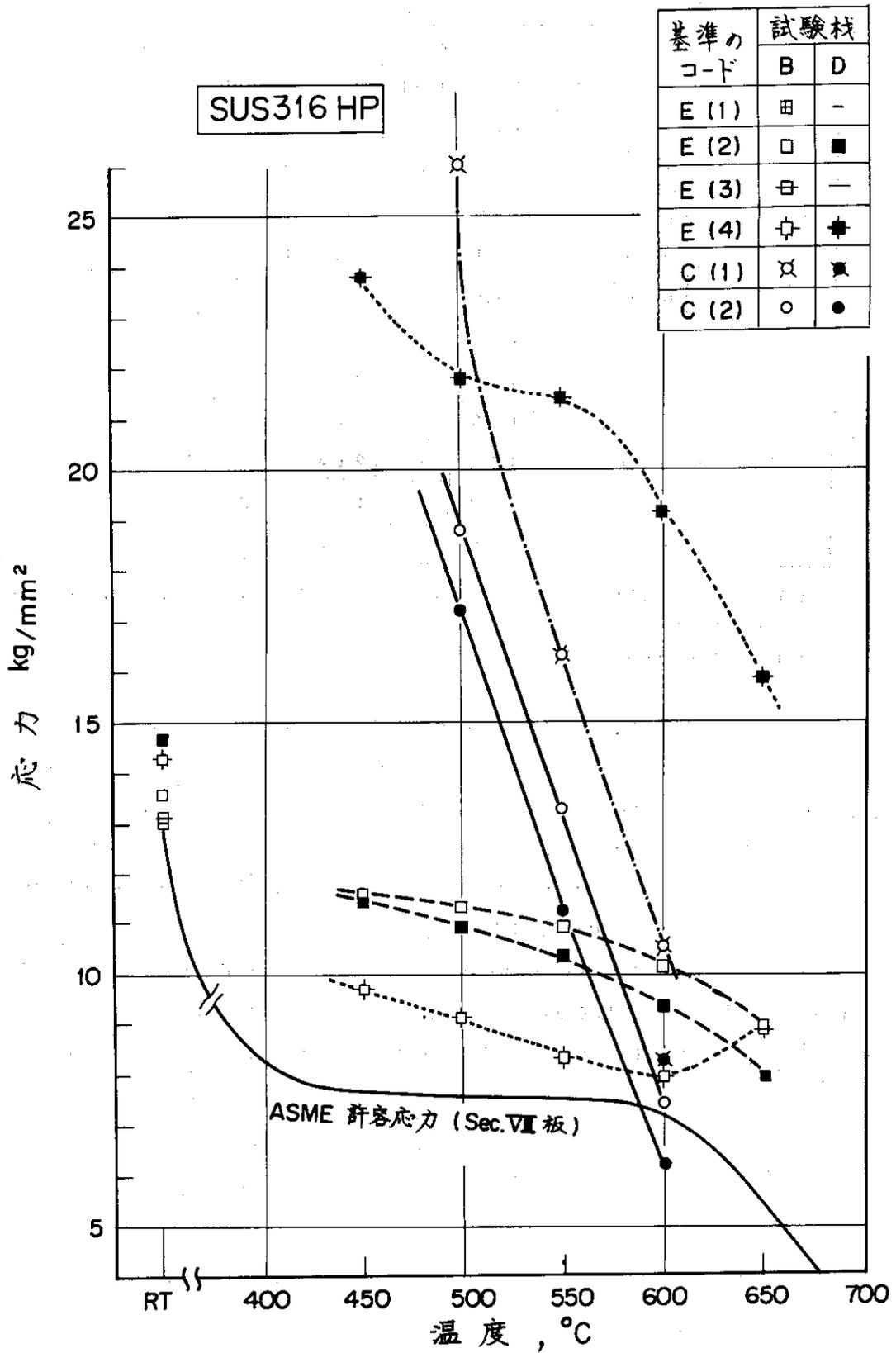


図19 ASME Boiler and Pressure Vessel Code Section VII  
の許容応力との比較

## 6. 結 言

高速炉用ステンレス鋼厚板 (SUS 316HP, 3.0mmt) の母材, サブマージ溶接金属, 316N および 316Nb 鋼について, 500°C および 600°C で最長約  $2 \times 10^4$  時間までのクリープおよびクリープ破断試験を行ない, ASME Sec. VIII の許容応力と比較した。得られた結果を要約すると

- 1) 製造者の異なる母材 2 溶鋼について行なった低応力クリープ試験では, 一方が 500°C および 550°C でやや早い最小クリープ速度を示すが, 600°C ではこの傾向は逆となる。一般に 550°C 以下では最小クリープ速度の応力依存性はバラツキが大きく明らかでない。
- 2) 316 に 0.13%N あるいは 0.68%Nb を添加した鋼では 600°C- $10^4$  hr 強さが母材より約  $2 \text{ kg/mm}^2$  程度上昇する。
- 3) 600°C では母材と溶接金属のクリープ破断曲線は平行的で  $10^4$  hr 強さは母材が約  $17 \text{ kg/mm}^2$ , 溶接金属が約  $13 \text{ kg/mm}^2$  であった。
- 4) 供試試験材はすべてクリープ破断時の延性 (伸び, 絞り) が良好であった。
- 5) 試験した母材および溶接金属は, 諸外国のデータと比べてやや小さなクリープ破断強さを示したが, 600°C 以下では現用の規定許容応力をほぼ満足しているものと考えられる。

## 7. 文 献

- 1) ISO/TC17/WG10/ETP-SG, MG/QF/301/71
- 2) Ergebnisse deutscher Zeitstandversuche langer Dauer, VDEh, 1969

## 6. 結 言

高速炉用ステンレス鋼厚板 (SUS 316HP, 30mmt) の母材, サブマージ溶接金属, 316N および 316Nb 鋼について, 500°C および 600°C で最長約  $2 \times 10^4$  時間までのクリープおよびクリープ破断試験を行ない, ASME Sec. VIII の許容応力と比較した。得られた結果を要約すると

- 1) 製造者の異なる母材 2 溶鋼について行なった低応力クリープ試験では, 一方が 500°C および 550°C でやや早い最小クリープ速度を示すが, 600°C ではこの傾向は逆となる。一般に 550°C 以下では最小クリープ速度の応力依存性はバラツキが大きく明らかでない。
- 2) 316 に 0.13%N あるいは 0.68%Nb を添加した鋼では 600°C -  $10^4$  hr 強さが母材より約  $2 \text{ kg/mm}^2$  程度上昇する。
- 3) 600°C では母材と溶接金属のクリープ破断曲線は平行的で  $10^4$  hr 強さは母材が約  $17 \text{ kg/mm}^2$ , 溶接金属が約  $13 \text{ kg/mm}^2$  であった。
- 4) 供試試験材はすべてクリープ破断時の延性 (伸び, 絞り) が良好であった。
- 5) 試験した母材および溶接金属は, 諸外国のデータと比べてやや小さなクリープ破断強さを示したが, 600°C 以下では現用の規定許容応力をほぼ満足しているものと考えられる。

## 7. 文 献

- 1) ISO/TC17/WG10/ETP-SG, MG/QF/301/71
- 2) Ergebnisse deutscher Zeitstandversuche langer Dauer, VDEh, 1969