

溶接容器型モデル熱過渡強度試験

第 4 報 供試体の材料強度

区 分 変 更	
変更後資料番号	PNC ZN9410 92-202
決裁年月日	平成 10 年 3 月 26 日

1992年5月

動力炉・核燃料開発事業団
大洗工学センター

この資料は、動燃事業団の開発業務を進めるため、特に限られた関係者だけに開示するものです。については複製、転載、引用等を行わないよう、また第三者への開示又は内容漏洩がないよう管理して下さい。また今回の開示目的以外のことには使用しないよう特に注意して下さい。

本資料についての問合せは下記に願います。

〒311-13 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002
動力炉・核燃料開発事業団
大洗工学センター
技術開発部・技術管理室

溶接容器型モデル熱過渡強度試験 第4報 供試体の材料強度

町田秀夫*、菊池政之*、渡士克巳**

要 旨

溶接容器型モデル構造材料の疲労およびクリープ強度を調べる目的で疲労およびクリープ試験を実施した。試験材料は、SUS304鋼および高速炉構造用SUS316鋼であり、これらは供試体製作時に素材から予め採取しておいたものである。試験結果を材料開発室が材料強度基準策定用にまとめた最適疲労破損式、クリープひずみ式、主クリープ破断関係式、および繰り返し応力-ひずみ関係式等と比較した結果、供試体材料は疲労強度、クリープ強度とともに従来材の平均的な強度を有することがわかった。また、繰り返し応力-ひずみ関係、クリープひずみ速度についても平均的挙動との大きな差異がないことがわかった。したがって、今後の供試体の非弾性解析およびクリープ疲労損傷評価は、基本的には材料開発室がまとめた最適傾向式を使用することにする。

* 大洗工学センター 機器構造開発部 構造工学室

** 大洗工学センター 機器構造開発部 材料開発室

Thermal Transient Strength Test of a Welded Vessel Model

No.4 Mechanical Properties of the Test Model Materials

H. Machida*, M. Kikuchi*, K. Watashi**

ABSTRACT

The fatigue and creep test were carried out for the Welded Vessel Model constructing materials to investigate the fatigue and creep strength of them. Test pieces were made of SUS304 and FBR grade SUS316, and these were cut out from model materials in advance. The observations were compared with calculations of fatigue equation, creep strain equation, creep rupture equation and dynamic stress strain equation which regulated in material strength standard.

The results shows the fatigue and creep strength of the model materials have average properties which calculated with equations of the material strength standard. There is no big difference between observation and calculation value of dynamic stress strain relation and creep rate. Hence, the equations regulated in material strength standard can be applied to elasto-plastic stress analysis and creep-fatigue strength evaluation of the model.

* Structural Engineering Section, OEC / PNC

** Material Development Section, OEC / PNC

目 次

1. 緒 言	1
2. 試験の概要	2
2.1 試験範囲	2
2.2 試験条件	2
2.3 試験結果の概要	2
3. 供試材の仕様	5
3.1 供試材の採取	5
3.2 供試材組成	5
4. 試験の方法	8
4.1 試験片の採取方法	8
4.2 試験片形状・寸法	8
4.3 試験方法	8
5. 試験結果	21
5.1 疲労試験	21
5.2 クリープ試験	21
6. 考 察	30
6.1 疲労特性	30
6.2 クリープ特性	30
6.3 動的応力ーひずみ関係	31
6.4 0.2%耐力	31
7. 結 言	47
8. 謝 辞	48
9. 参考文献	49

Table List

Table 2.2-1	Fatigue and creep test conditions	4
Table 3.2-1	Chemical composition of SUS304	6
Table 3.2-2	Chemical composition of FBR grade SUS316	6
Table 4.3-1	Test device of fatigue test	9
Table 4.3-2	Fatigue test device specifications	10
Table 5.1-1	Summary of fatigue test	22
Table 5.1-2	Details of fatigue test (1/4)	23
Table 5.1-3	Details of fatigue test (2/4)	24
Table 5.1-4	Details of fatigue test (3/4)	25
Table 5.1-5	Details of fatigue test (4/4)	26
Table 5.1-6	0.2% yield stress	27
Table 5.2-1	Summary of creep test	28
Table 5.2-2	Details of creep test	29

Figure List

Fig. 3.1-1	Test materials of SUS304	7
Fig. 3.1-2	Test materials of FBR grade SUS316	7
Fig. 4.1-1	Test piece taking portions of SUS304 (t=100mm)	11
Fig. 4.1-2	Test piece taking portions of SUS304 (t=25mm)	12
Fig. 4.1-3	Test piece taking portions of FBR grade SUS316	13
Fig. 4.2-1	Test piece for fatigue test	14
Fig. 4.2-2	Test piece for creep test	15
Fig. 4.3-1	Test device of fatigue test	16
Fig. 4.3-2	Extensometer for fatigue test	17
Fig. 4.3-3	Test device of creep test	19
Fig. 6.1-1	Observations plotted on design fatigue curves - SUS304, 100t	32
Fig. 6.1-2	Observations plotted on design fatigue curves - SUS304, 25t	33
Fig. 6.1-3	Observations plotted on design fatigue curves - FBR grade SUS316, $\epsilon = 0.1 \text{ %/sec}$	34
Fig. 6.1-4	Observations plotted on design fatigue curves - FBR grade SUS316, $\epsilon = 0.002 \text{ %/sec}$	35
Fig. 6.1-5	Observations plotted on best fit fatigue curve - 550 °C	36
Fig. 6.1-6	Observations plotted on best fit fatigue curves - 600 °C	37
Fig. 6.1-7	Comparison of Nf calculations with observations	38
Fig. 6.2-1	Observations plotted on creep rupture curves	39
Fig. 6.2-2	Comparison of creep rupture time calculations with observations - SUS304	40
Fig. 6.2-3	Comparison of creep rupture time calculations with observations - FBR grade SUS316	40
Fig. 6.2-4	Comparison of steady creep rate calculations with observations - SUS304	41
Fig. 6.2-5	Comparison of steady creep rate calculations with observations - FBR grade SUS316	41

Fig. 6.3-1 Observations plotted on dynamic stress-strain curve -

SUS304, 550 °C 42

Fig. 6.3-2 Observations plotted on dynamic stress-strain curve -

SUS304, 600 °C 43

Fig. 6.3-3 Observations plotted on dynamic stress-strain curve -

FBR grade SUS316, 550 °C 44

Fig. 6.3-4 Observations plotted on dynamic stress-strain curve -

FBR grade SUS316, 600 °C 45

Fig. 6.4-1 Observations plotted on 0.2% yield stress curves 46

1. 緒 言

溶接容器型モデルは、FBRコンポーネントの熱過渡強度データの取得を目的としており、原型炉の主冷却系構造材料として広く用いられたSUS304鋼、および大型炉等の将来炉への適用が計画されている高速炉構造用SUS316鋼を主要材料として用いて製作された¹⁾。現在、供試体は構造物強度確性試験施設(TTS)を用いた熱過渡強度試験に供されている。

この供試体の非弾性解析やクリープ疲労強度評価においては、従来より材料強度基準^{2),3),4)}に規定された材料特性を用いている。このため、使用材料が材料強度基準に規定された材料特性を大きく逸脱していないことを確認しておく必要がある。そこで、供試体素材から予め採取しておいた構造材料を用いて、疲労試験およびクリープ試験を実施した。試験結果は、材料強度基準に規定されたデータと比較され、供試体の非弾性解析やクリープ疲労強度評価への材料強度基準の適合性を確認した。

試験材は以下の3種類の母材を用いた。

- (1) 容器胴材 : SUS304, 100t
- (2) 中子胴材 : SUS304, 25t
- (3) 中子リング材 : 高速炉構造用SUS316, 25t

本試験によって得られる供試体構造材の基本特性データは、引き続き実施される熱過渡強度試験後の非弾性解析およびクリープ疲労強度評価に有力な情報を与える。

2. 試験の概要

2.1 試験範囲

本研究では、溶接容器型モデルの主要材料として用いられたSUS304鋼と高速炉構造用SUS316鋼の疲労試験およびクリープ試験を実施した。

2.2 試験条件

試験条件の概要をTable 2.2-1に示す。

2.2.1 疲労試験

疲労試験は、温度およびひずみ範囲をパラメータに試験条件を設定した。温度条件は、材料強度基準の策定における基本温度として試験データが豊富にある550°Cと熱過渡試験における最高温度600°Cとした。ひずみ範囲は、試験対象部の最大ひずみ範囲⁵⁾である0.7%前後となる条件を設定した。

2.2.2 クリープ試験

クリープ試験は、温度および応力をパラメータに試験条件を設定した。温度条件は、疲労試験と同様の550°Cと600°Cを選定した。また、応力は、クリープ破断時間が供試体の高温保持時間（2時間×1000サイクル）の総和である2000時間とその1/2である1000時間程度となるように設定した。

2.3 試験結果の概要

2.3.1 疲労試験

(1) SUS304鋼

破断繰り返し数は、最適疲労破損式に対して1.00～1.62の範囲にあり、今回の試験の範囲では、最適疲労破損式との適合性は良好であることがわかった。

(2) 高速炉構造用SUS316鋼

破断繰り返し数は、最適疲労破損式に対して0.78～1.84の範囲にあり、今回の試験の範囲では、最適疲労破損式との適合性は良好であることがわかった。また、低ひずみ速度領域において、SUS304鋼に比べて疲労強度が高い傾向にあることがわかった。

2.3.2 クリープ試験

(1) SUS304鋼

クリープ破断時間は、主クリープ破断関係式のばらつきを表す係数 (α_R) を用いて 0.57～1.13 の範囲にあり、今回の試験の範囲では、主クリープ破断関係式との適合性は 良好であることがわかった。

(2) 高速炉構造用SUS316鋼

クリープ破断時間は、主クリープ破断関係式のばらつきを表す係数 (α_R) を用いて 1.40～2.88 の範囲にあり、若干短めに偏っているが、今回の試験の範囲では、主クリープ破断関係式との適合性は概ね良好であることがわかった。クリープ強度は、SUS304 鋼に対して温度で50℃以上、破断時間で約2桁向上している。

Table 2.2-1 Fatigue and creep test conditions

材 料	試 験	温 度	試験条件		ひずみ速度 (%/sec)	目標破断試験 目標破断繰り返し数	試験片数
			ひずみ範囲 $\Delta \epsilon t$	応 力 σ (kg/mm ²)			
SUS304 (100t)	疲労試験	550	$\Delta \epsilon t=0.7$		0.1	Nf=5439	6 本
			$\Delta \epsilon t=0.8$		0.1	Nf=3709	
		600	$\Delta \epsilon t=0.6$		0.1	Nf=6984	
			$\Delta \epsilon t=0.7$		0.1	Nf=4357	
			$\Delta \epsilon t=0.8$		0.1	Nf=3012	
			$\Delta \epsilon t=0.9$		0.1	Nf=2227	
	クリーフ 試験	550	$\sigma=23$		—	t r=1944	4 本
			$\sigma=25$		—	t r=930	
		600	$\sigma=16.5$		—	t r=1929	
SUS304 (25t)	疲労試験	600	$\Delta \epsilon t=0.7$		0.1	Nf=4357	2 本
			$\Delta \epsilon t=0.8$		0.1	Nf=3021	
	クリーフ 試験	600	$\sigma=16.5$		—	t r=1929	2 本
			$\sigma=18$		—	t r=946	
高速炉構造用 SUS316	疲労試験	550	$\Delta \epsilon t=0.7$		0.1	Nf=5439	8 本
			$\Delta \epsilon t=0.8$		0.1	Nf=3709	
		600	$\Delta \epsilon t=0.6$		0.1	Nf=6982	
			$\Delta \epsilon t=0.7$		0.1	Nf=4357	
			$\Delta \epsilon t=0.7$		0.002	Nf=2003	
			$\Delta \epsilon t=0.8$		0.1	Nf=4357	
			$\Delta \epsilon t=0.8$		0.002	Nf=1448	
			$\Delta \epsilon t=0.9$		0.1	Nf=2227	
	クリーフ 試験	550	$\sigma=34$		—	t r=2082	4 本
			$\sigma=36$		—	t r=864	
		600	$\sigma=25$		—	t r=2313	
			$\sigma=27$		—	t r=873	

3. 供試材の仕様

3.1 供試材の採取

(1) SUS304鋼

容器胴材料として用いた板厚100mmの板材と中子胴材料として用いた板厚25mmの板材から供試材を採取した。Fig.3.1-1に供試材の寸法とその採取位置を示す。

(2) 高速炉構造用SUS316鋼

中子リング材料として用いた板厚25mmの板材から供試材を採取した。Fig.3.1-2に供試材の寸法とその採取位置を示す。

3.2 供試材組成

(1) SUS304鋼

SUS304鋼は、原型炉主冷却系の主要材料と同等の材料を用いた。化学成分をTable 3.2-1¹⁾にまとめる。

(2) 高速炉構造用SUS316鋼

高速炉構造用SUS316鋼は、大型炉等の将来炉において主要構造材料として期待されているSUS316FRを用いた。化学成分をTable 3.2-2¹⁾にまとめる。

Table 3.2-1 Chemical composition of SUS304

成 分	規定値 (Wt %)
C	0.040~0.060
Si	≤ 1.00
Mn	≤ 2.00
P	≤ 0.040
S	≤ 0.030
Ni	8.00~10.50
Cr	18.00~20.00
N	≤ 0.045

Table 3.2-2 Chemical composition of FBR grade SUS316

成 分	規定値 (Wt %)
C	≤ 0.020
Si	≤ 1.00
Mn	≤ 2.00
P	≤ 0.045
S	≤ 0.030
Ni	10.00~14.00
Cr	16.00~18.00
Mo	2.00~3.00
N	0.06~0.10

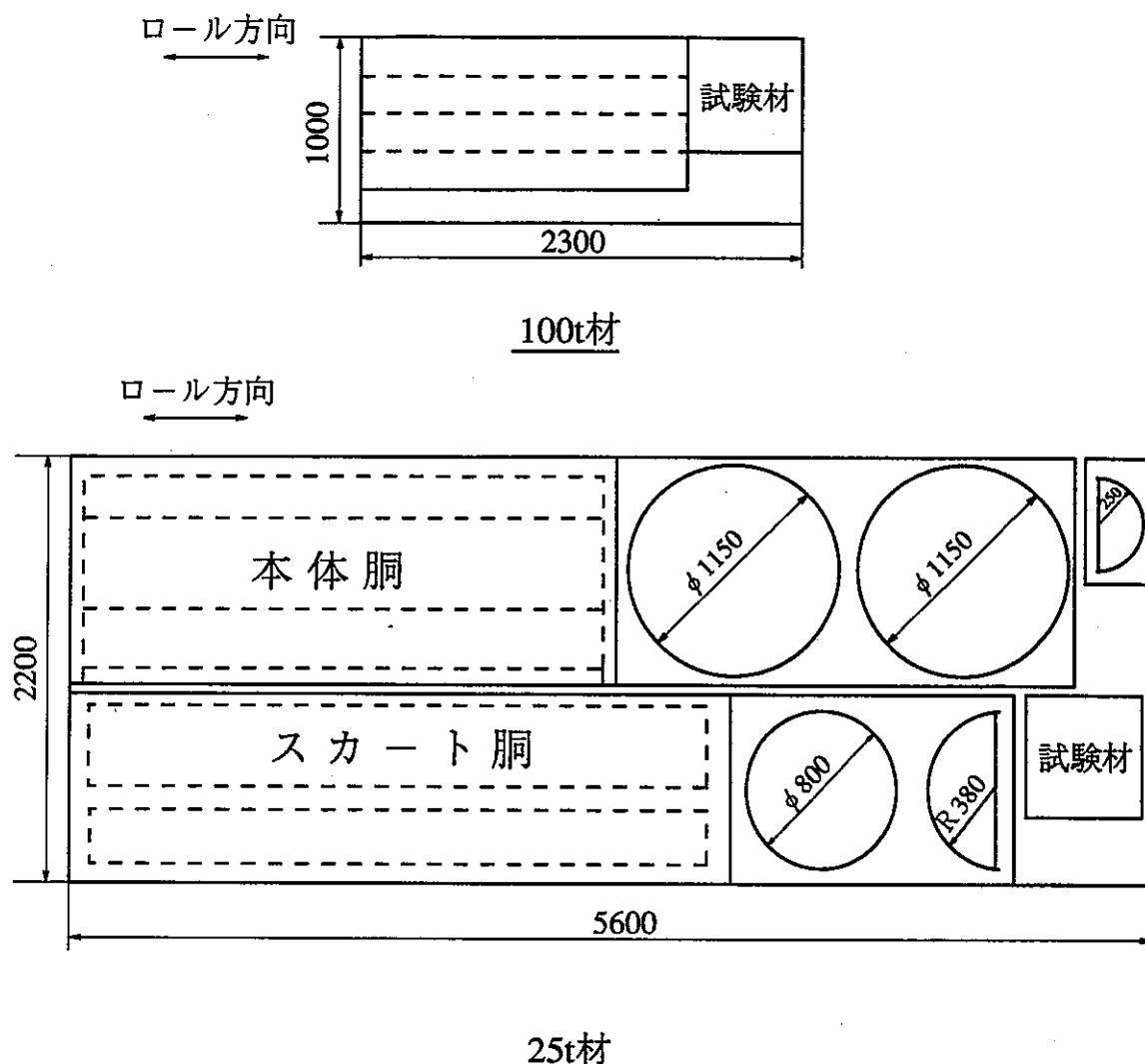


Fig. 3.1-1 Test materials of SUS304

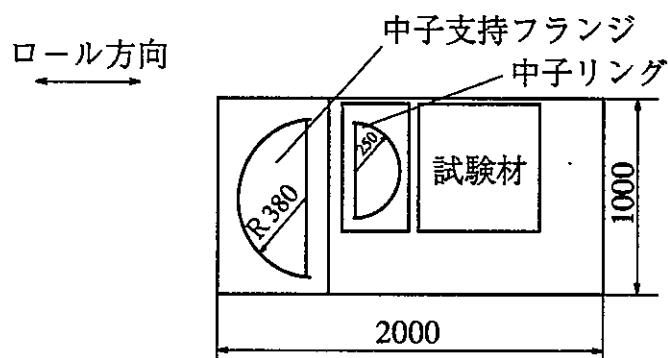


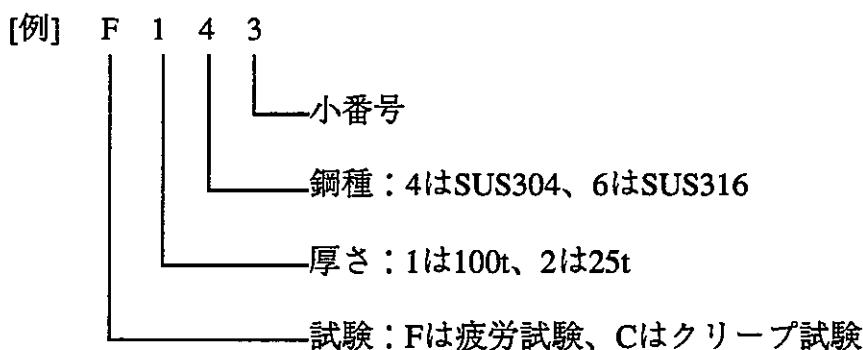
Fig. 3.1-2 Test materials of FBR grade SUS316

4. 試験の方法

4.1 試験片の採取方法

試験片の採取方法をFig.4.1-1～3に示す。図に示すように試験片の採取方向は供試材のロール方向と試験片の長手方向を合わせた。

試験片番号は、以下の要領で表示した。



4.2 試験片形状・寸法

疲労試験片形状はJIS Z 2273に準じ、Fig.4.2-1に示す形状・寸法とした。また、クリープ試験片はJIS Z 2271に準じ、Fig.4.2-2に示す形状・寸法とした。

4.3 試験方法

(1) 疲労試験

疲労試験方法は、ASTM-E606に準じて実施した。試験に使用した装置をTable 4.3-1およびFig.4.3-1に示す。疲労試験機の仕様をTable 4.3-2に示す。疲労試験に用いた伸び計の仕様をFig.4.3-2に示す。

(2) クリープ試験

クリープ試験方法は、JIS Z 2271に準じて実施した。試験に使用した装置の概略をFig.4.3-3に示す。

Table4.3-1 Test device of fatigue test

名 称	型 式	仕 样	メー カー	数 量
疲 労 試 験 機	810.21	油圧サー ボ (容量±10トン)	エムティエス ジャパン(株)	1
高周波加熱装置	T-10S	10kW.23KHz	島田理化工業(株)	1
X-Tレコーダー	3036-21	0.5mV/cm～5V/cm 250VDC入力	横河電気(株)	1
ペンレコーダー	VP6538A	1mv/FS～500v/FS	松下電器産業(株)	1
パソコン	PC9801RX	16 bit	日本電気(株)	1
分 周 器	—	×10, ×100, ×1000, ×10000	(株)神戸工業試験場	1

Table4.3-2 Fatigue test device specifications

項 目	仕 様
1. 最大荷重	±10トン（動的、 静的）
2. 最大ストローク	±75mm
3. 制御方式	電気油圧式クローズドループ方式
4. 制御モード	荷重、 変位、 歪
5. 操作レンジ	各制御モード4段切換 荷重±トン：10, 5, 2, 1 変位±mm : 100, 50, 20, 10 歪 ±mm : 0.84, 0.42, 0.21, 0.105
6. 発振波形	プログラム波
7. 制御精度	荷重±0.5% (各レンジフルスケールにつき) 変位±1.0% () 歪み±0.5% ()
8. CALIBRATION	荷重±トン：10, 5, 2, 1 変位±mm : 100, 50, 20, 10 歪 ±mm : 0.84, 0.42, 0.21, 0.105
9. 高周波	出力 10kW 発信周波数 23±3KHz

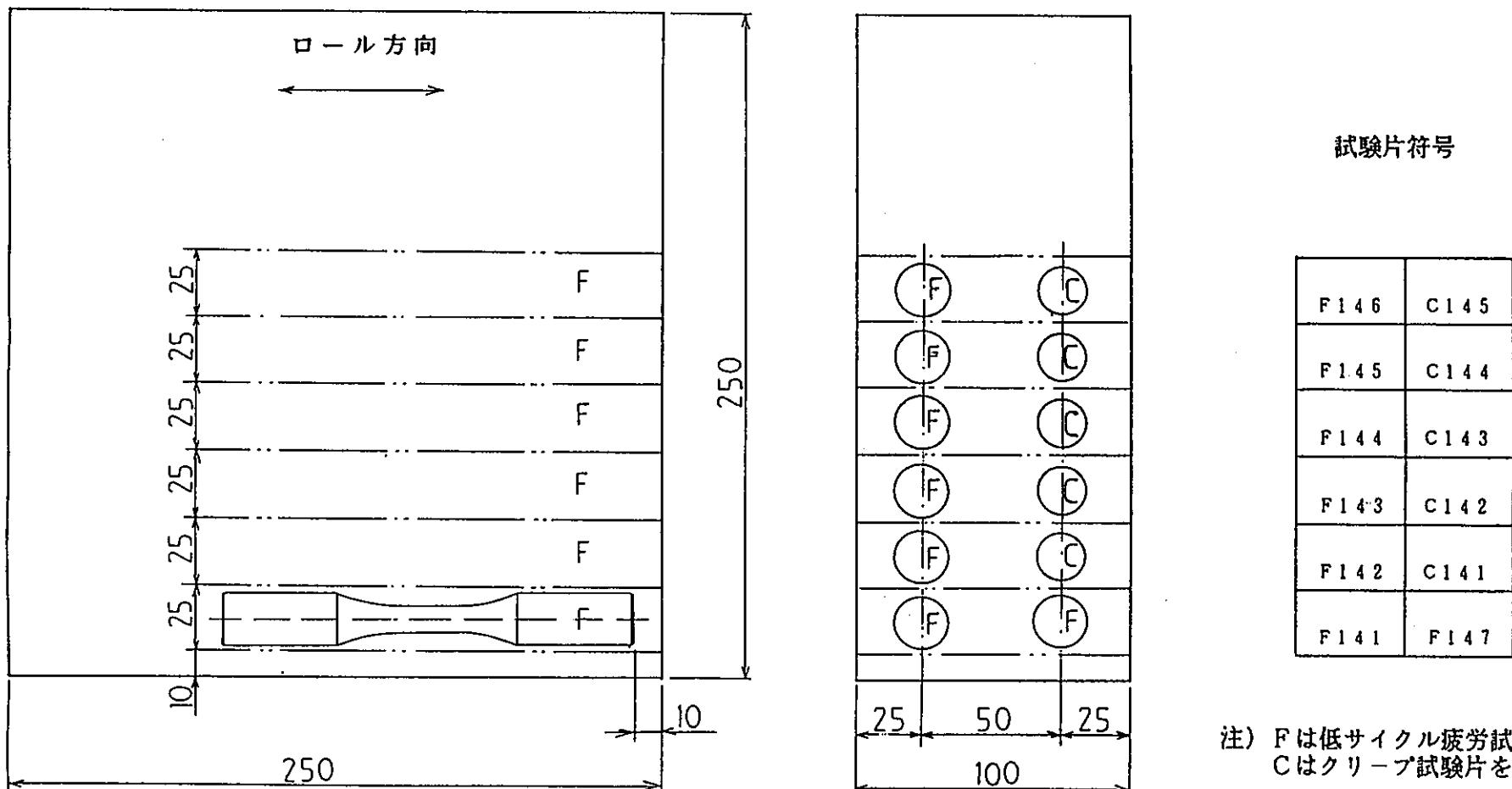
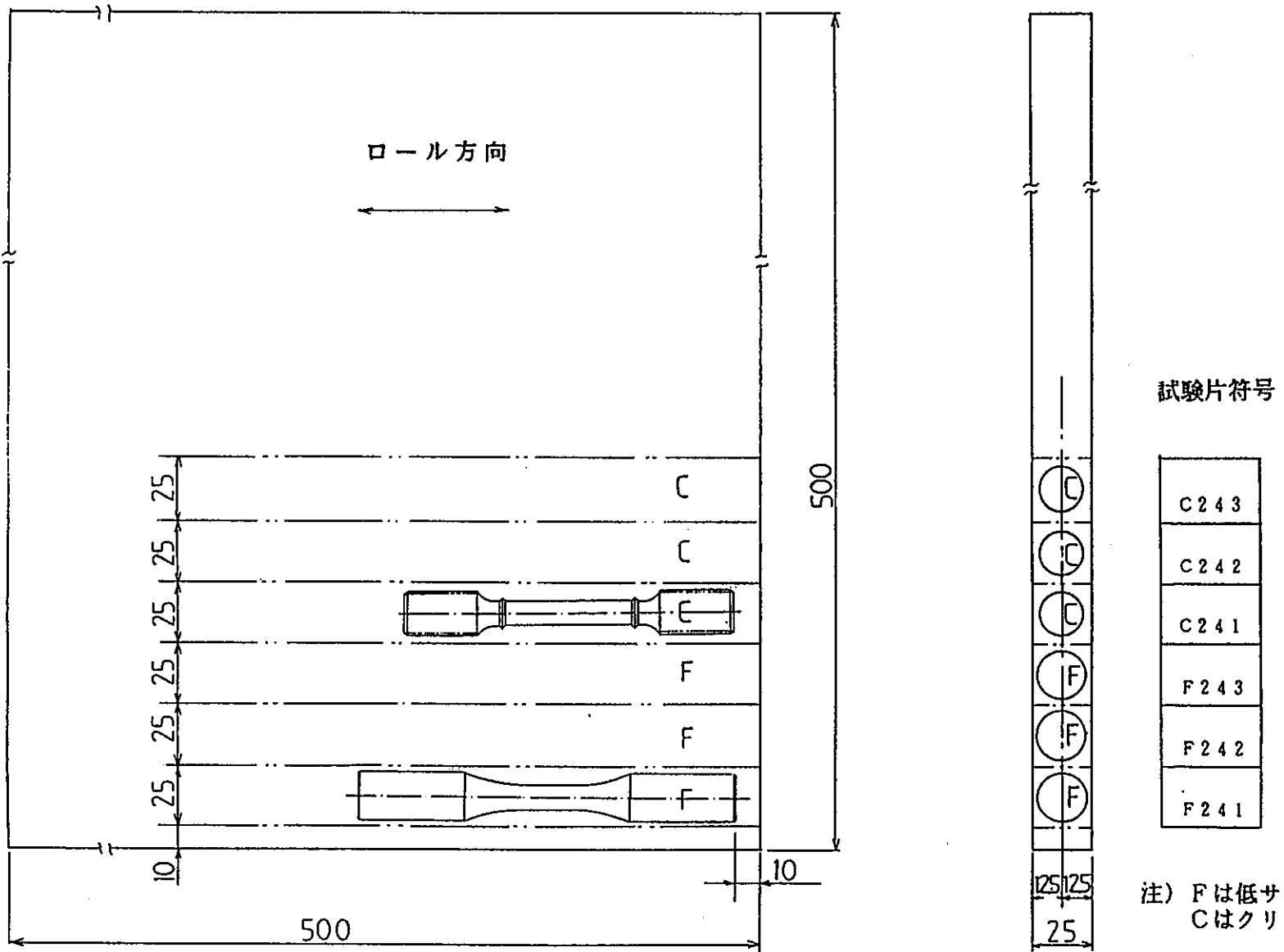


Fig. 4.1-1 Test piece taking portions of SUS304 ($t=100\text{mm}$)

Fig. 4.1-2 Test piece taking portions of SUS304 ($t=25\text{mm}$)

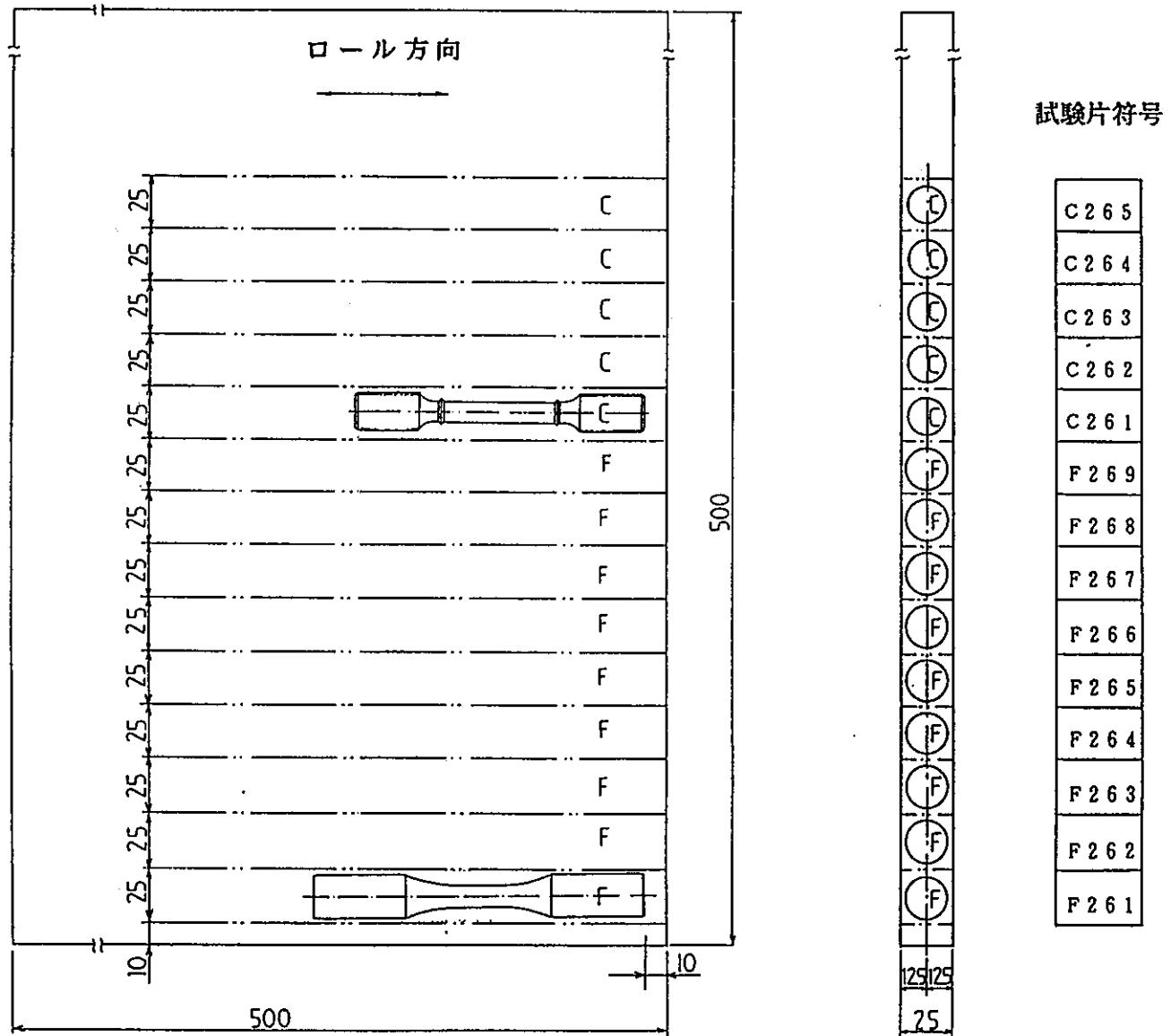


Fig. 4.1-3 Test piece taking portions of FBR grade SUS316

▽▽ (▽▽▽)

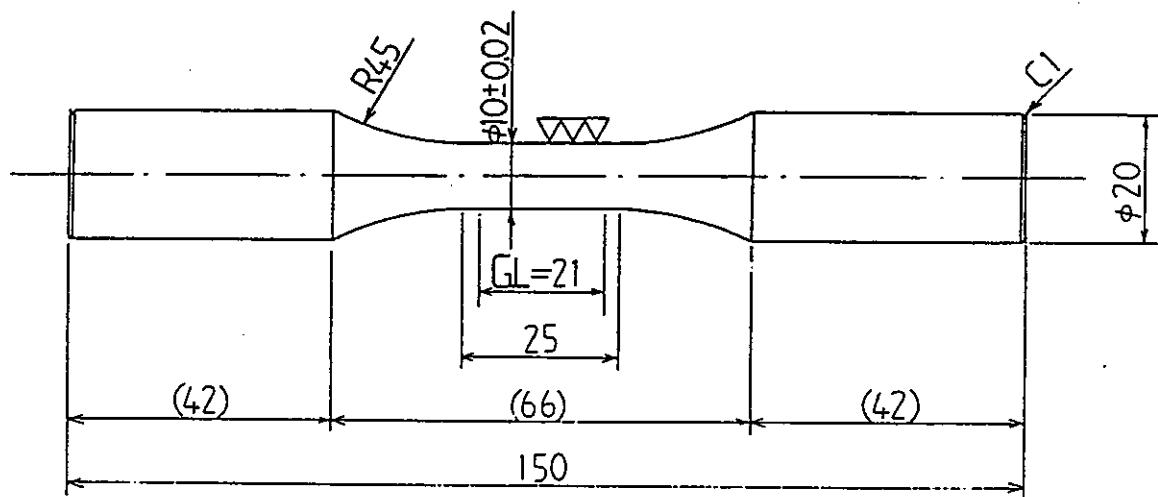


Fig. 4.2-1 Test piece for fatigue test

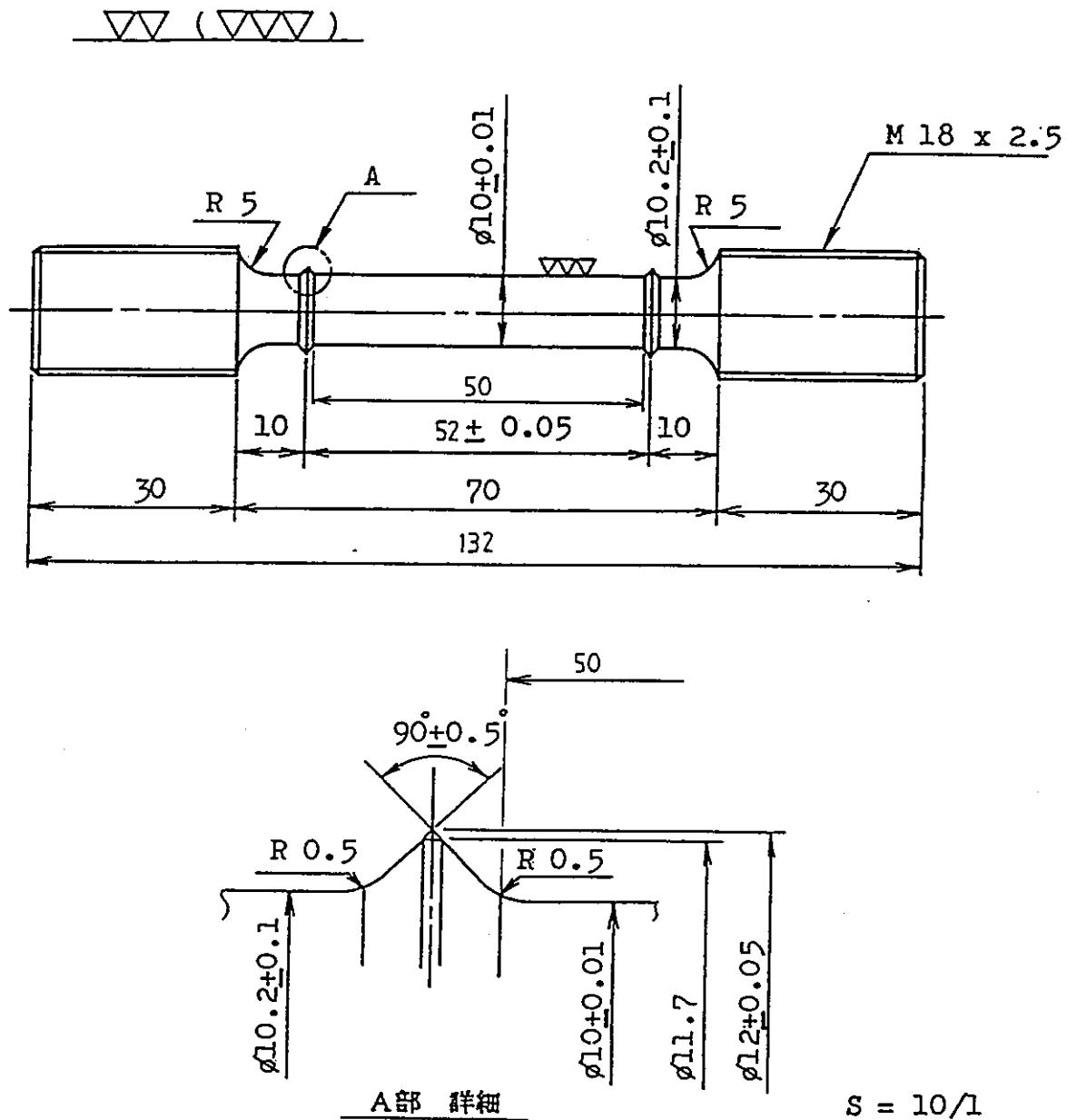
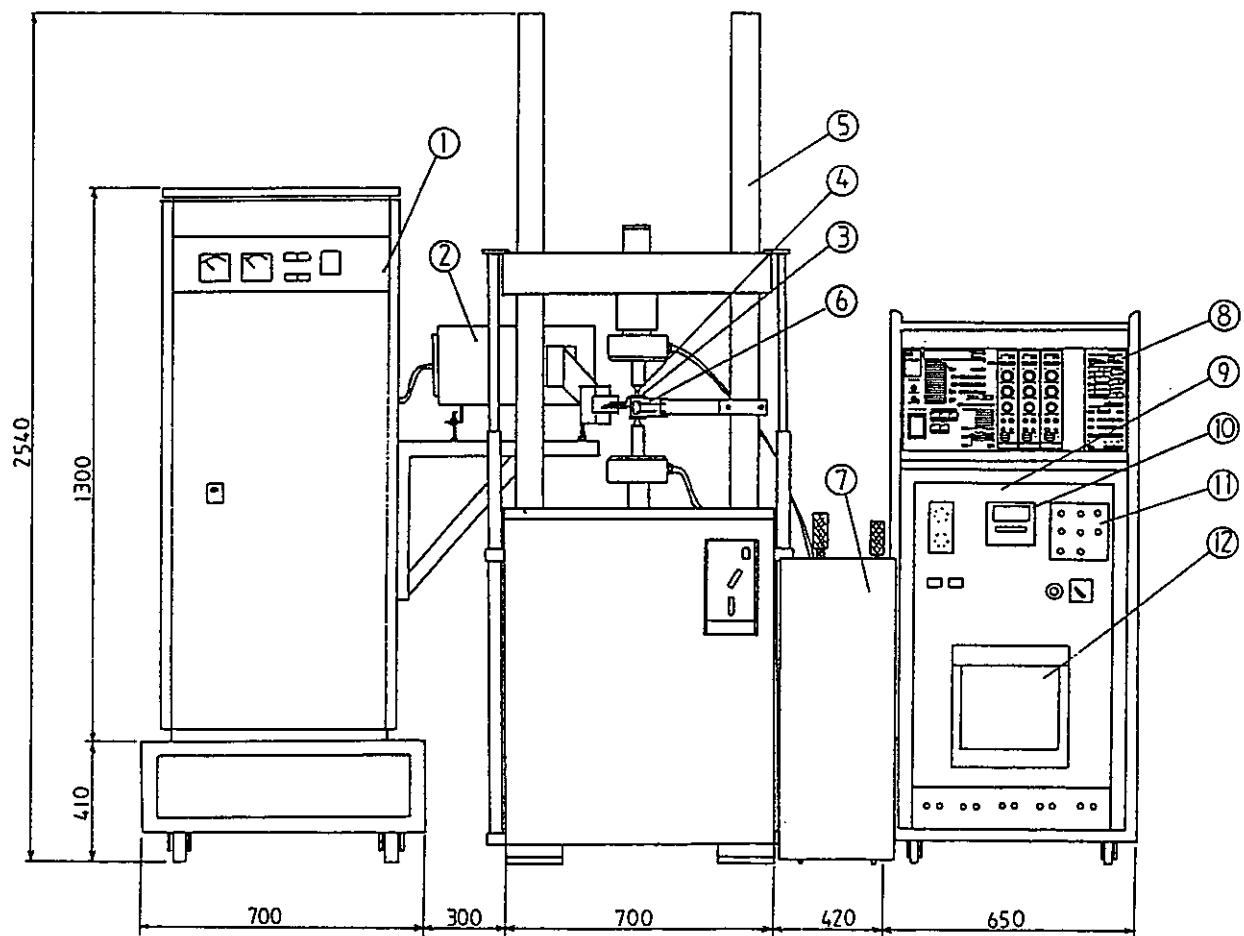
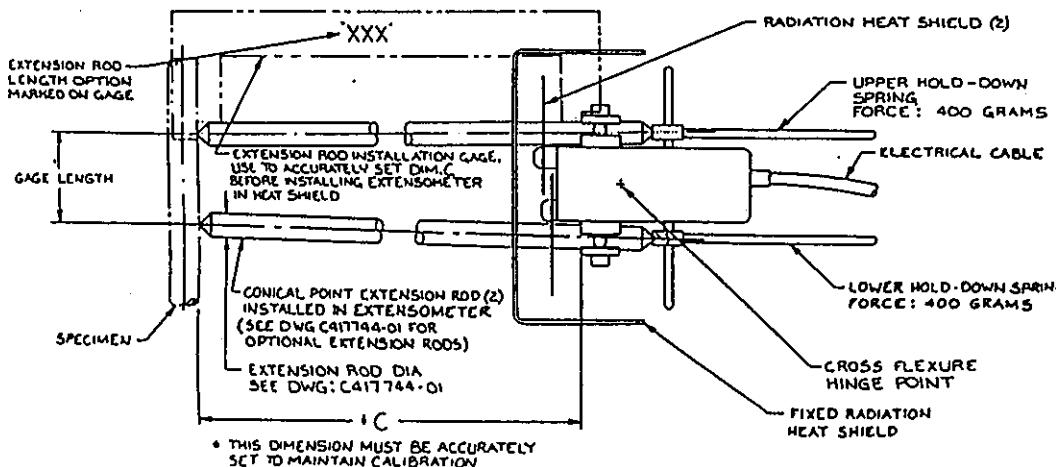
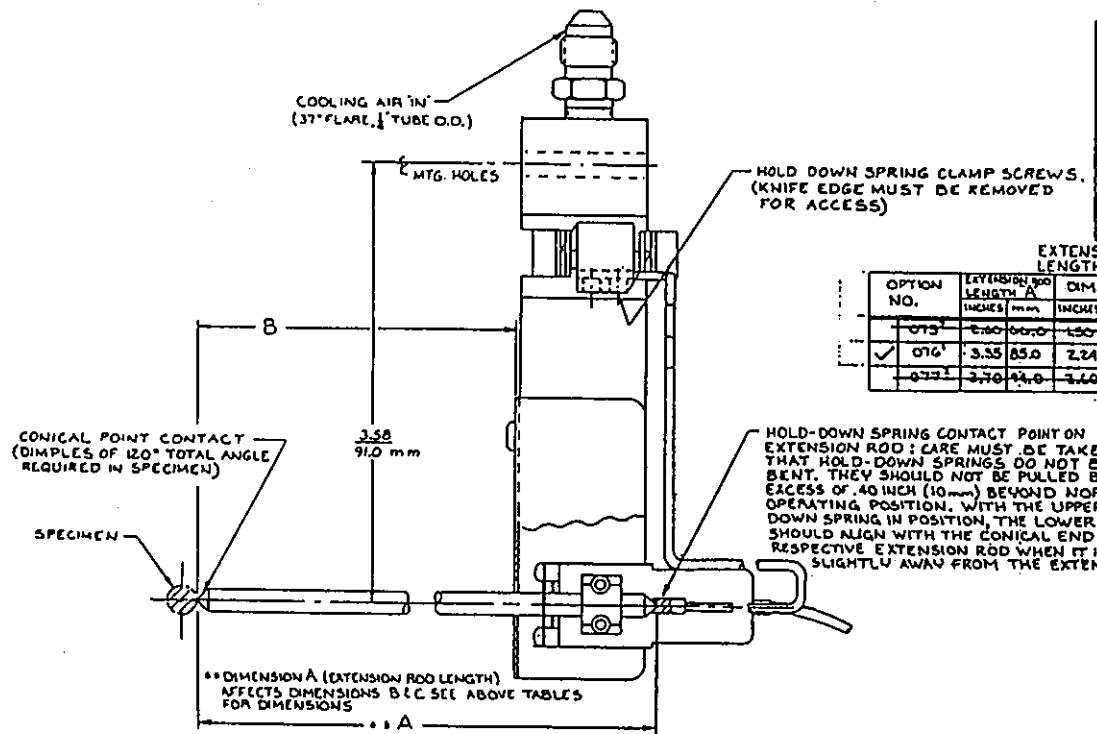


Fig. 4.2-2 Test piece for creep test



①	高周波加熱装置	⑦	油圧グリップコントローラー
②	変成器	⑧	疲労試験機制御盤
③	加熱コイル	⑨	高周波加熱装置制御盤
④	試験片	⑩	温度調整器
⑤	試験機本体	⑪	アラームインジケーター
⑥	伸び計	⑫	温度記録計

Fig. 4.3-1 Test device of fatigue test



SPECIFICATIONS FOR EXTENSOMETER MODEL NO. 632.SOC-05
✓ INDICATES SUPPLIED OPTIONS
SERIAL NO. 989

PART NO.	MODEL NO.	GAGE LENGTH	OPERATING RANGE	STRAIN RANGE	TRAVEL OPTION NUMBER
632T501-01	632.SOC-05	.000 INCH	- .000 INCH	+10%	20/10
702	632.SOC-05	.0400 mm	- 2.1 mm	+10%	20/10
703	632.SOC-05	.150 INCH	- .150 INCH	+10%	20/10
-01	632.SOC-05	.0000 mm	- .0000 INCH	+10%	20/10
-06	632.SOC-05	.000 INCH	- .000 INCH	+10%	10/10
-06	632.SOC-05	.21.00 mm	- 2.1 mm	+10%	10/10
			- 2.1 mm	+10%	

EXTENSION ROD LENGTH OPTIONS

OPTION NO.	EXTENSION ROD LENGTH A INCHES mm	DIM. B INCHES mm	DIM. C INCHES mm
073	2.00 50.0	1.50 38.0	0.47 12.00
✓ 074	3.55 85.0	2.24 57.0	0.75 19.00
075	3.70 93.0	2.40 61.0	0.60 15.00

EXTENSION ROD MATERIAL, DIAMETER, END CONFIGURATION & ACCESSORY INFORMATION
SEE DWG: C417744-01

TEMPERATURE LIMIT IN HOT ZONE:
QUARTZ EXTENSION RODS: 1800°F (1000°C).
CERAMIC EXTENSION RODS: 2200°F (1200°C).

OVERTRAVEL LIMIT STOPS: APPROX. 3% BEYOND STRAIN RANGE
AIR COOLING REQUIREMENTS: CLEAN DRY SHOP AIR
REGULATE PRESSURE AS REQ'D.

NOTES FOR ABOVE TABLES:

1. STANDARD EXTENSION ROD LENGTH.
2. OPTIONAL EXTENSION ROD LENGTHS
3. TRAVEL OPTION NUMBER CORRELATES DIRECTLY TO THE STRAIN RANGE.

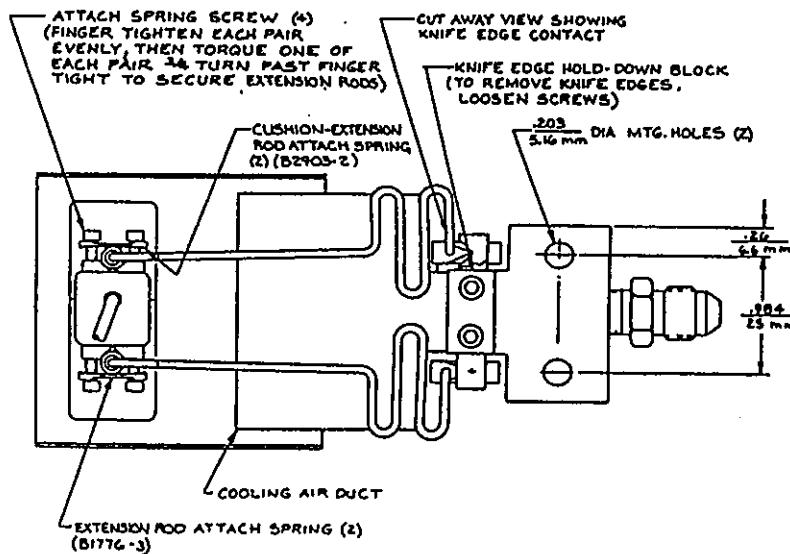


Fig. 4.3-2 Extensometer for fatigue test

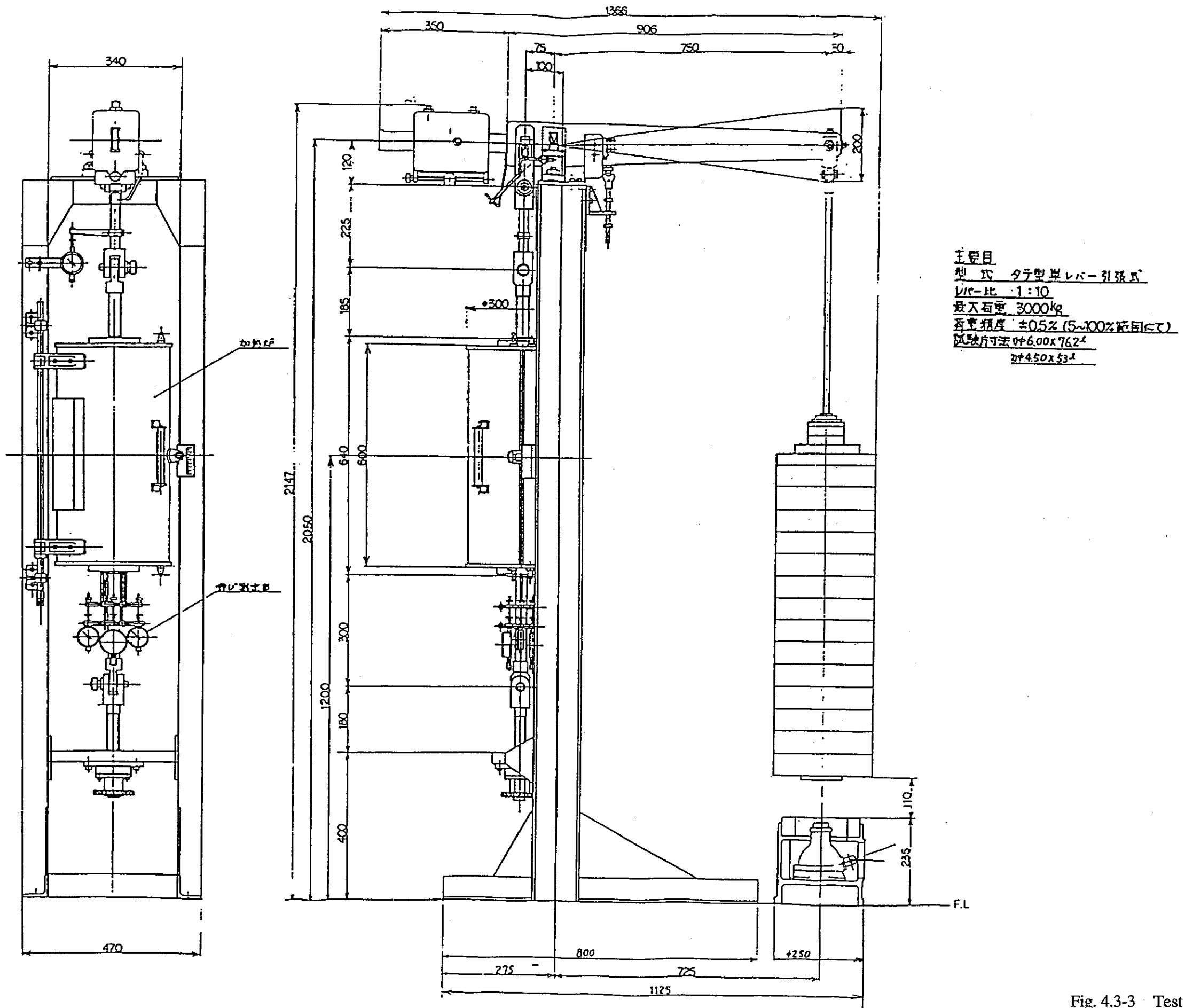


Fig. 4.3-3 Test device of creep test

5. 試験結果

5.1 疲労試験

疲労試験結果の概要をTable 5.1-1にまとめる。また、各試験の結果の詳細をTable 5.1-2～5にまとめる。Nfは引張側の応力が最大値の75%となった時点とした。

疲労試験の1サイクル目の応力-ひずみ関係のヒステリシスループを用いて求めた0.2%耐力をTable 5.1-6に示す。

5.2 クリープ試験

クリープ試験結果の概要をTable 5.2-1にまとめる。また、各試験の結果の詳細をTable 5.2-2にまとめる。

Table 5.1-1 Summary of fatigue test

材料	試験片符号	温 度 (°C)	ひずみ範囲 $\Delta \epsilon t$ (%)	ひずみ範囲 ϵ (1/sec)	破損繰返し数 計算値Nf1	破損繰返し数 実験値Nf2	破損繰返し数の比 Nf2/Nf1
SUS304 (100t)	F141	550	0.69	10^{-3}	5439	6000	1.10
	F142		0.79		3709	5730	1.54
	F143	600	0.60		6982	11298	1.62
	F144		0.70		4357	>5074*	1.16
	F147		0.79		3012	>3012*	1.00
	F146		0.89		2227	>3058*	1.37
SUS304 (25t)	F241	600	0.69	10^{-3}	4357	5808	1.33
	F242		0.80		3012	4892	1.62
高速炉構造用 SUS316 (25t)	F261	550	0.70	10^{-3}	5439	4240**	0.78
	F262		0.79		3709	3220	0.87
	F263	600	0.60	10^{-3}	6982	11196	1.60
	F264		0.70	10^{-3}	4357	5200	1.19
	F265		0.69	2×10^{-5}	2003	3676	1.84
	F266		0.79	10^{-3}	3012	2116	0.70
	F269		0.79	2×10^{-5}	1448	2040	1.41
	F268		0.89	10^{-3}	2227	1614	0.72

* 標点外破断

** 破断時に伸び計がズレたため、座屈した。

Table 5.1-2 Details of fatigue test(1/4)

試験片 符 号	試 験 温 度	試験片 直 径	歪速度 $\dot{\epsilon}$ (% / S)	Nf/2近傍のデータ						破 損 繰返数 Nf (回)	破 断 位 置	試 験 繰返数 N (回)
				全 歪 範 囲 $\triangle \epsilon_t$ (%)	塑性歪 範 围 $\triangle \epsilon_p$ (%)	彈性歪 範 围 $\triangle \epsilon_e$ (%)	引張側 応 力 σ_{max} (N/mm ²)	圧縮側 応 力 σ_{min} (N/mm ²)	応 力 範 围 $\triangle \sigma$ (N/mm ²)			
F141	550	10.01	0.1	0.69	0.37	0.32	239	-240	476	6000	A	6672
F142	〃	〃	〃	0.79	0.45	0.34	252	-257	509	5730	A	5980
F143	600	〃	〃	0.60	0.31	0.29	211	-214	425	11298	B	12032
F144	〃	〃	〃	0.70	0.38	0.32	231	-236	467	>5074	C	5075

備考 三角波 $\epsilon_{max}/\epsilon_{min} = -1$

Table5.1-3 Details of fatigue test(2/4)

試験片 符 号	試 験 温 度 (℃)	試験片 直 径 (mm)	歪 速 度 ϵ (%/S)	Nf/2近傍のデータ						破 損 繰返数 N (回)	破 断 位 置	試 験 繰返数 N (回)	
				全 歪 範 囲 $\triangle \epsilon_t$ (%)	塑性歪 範 围 $\triangle \epsilon_p$ (%)	彈性歪 範 围 $\triangle \epsilon_e$ (%)	引張側 応 力 σ_{max} (N/mm ²)	圧縮側 応 力 σ_{min} (N/mm ²)	応 力 範 围 $\triangle \sigma$ (N/mm ²)				
F146	600	10.02	0.1	0.89	0.54	0.35	257	-265	522	>3058	C	3136	
F147	〃	10.01	〃	0.79	0.48	0.31	241	-248	489	>3012	C	3012	
F241	〃	10.01	〃	0.69	0.39	0.30	232	-235	467	5808	B	5862	
F242	〃	10.00	〃	0.80	0.46	0.34	239	-245	484	4892	B	4892	
備考 三角波 $\epsilon_{max}/\epsilon_{min} = -1$													

Table5.1-4 Details of fatigue test(3/4)

試験片 符号	試験 温 度 (℃)	試験片 直 径 (mm)	歪速度 ϵ (%/S)	Nf/2近傍のデータ						破損 繰返数 Nf (回)	破断 位 置	試験 繰返数 N (回)
				全 歪 範 囲 $\Delta \epsilon_t$ (%)	塑性歪 範 囲 $\Delta \epsilon_p$ (%)	弾性歪 範 囲 $\Delta \epsilon_e$ (%)	引張側 応 力 σ_{\max} (N/mm ²)	圧縮側 応 力 σ_{\min} (N/mm ²)	応 力 範 囲 $\Delta \sigma$ (N/mm ²)			
*F261	550	10.01	0.1	0.70	0.36	0.34	256	-256	512	4240	A	4267
F262	〃	〃	〃	0.79	0.42	0.37	267	-271	538	3220	A	3437
F263	600	〃	〃	0.60	0.29	0.31	226	-229	455	11196	A	11315
F264	〃	〃	〃	0.70	0.37	0.33	240	-241	481	5200	A	5564
F265	〃	〃	2×10^{-3}	0.69	0.38	0.31	245	-245	490	3676	A	3724
備考 三角波 $\epsilon_{\max}/\epsilon_{\min} = -1$												
* 破断時に伸び計がズレたため、座屈した。												

Table 5.1-5 Details of fatigue test(4/4)

試験片 符 号	試 験 温 度 (℃)	試験片 直 径 (mm)	歪速度 $\dot{\epsilon}$ (% / s)	Nf/2近傍のデータ						破 損 繰返数 Nf (回)	破 断 位 置	試 験 繰返数 N (回)	
				全 歪 範 围	塑性歪 範 围	彈性歪 範 囗	引張側 応 力 σ_{\max} (N/mm ²)	圧縮側 応 力 σ_{\min} (N/mm ²)	応力 範 囿 $\Delta \sigma$ (N/mm ²)				
F266	600	10.01	0.1	0.79	0.44	0.35	265	-270	535	2116	A	2259	
F269	〃	9.99	2×10^{-3}	0.79	0.47	0.32	251	-248	499	2040	B	2334	
F268	〃	10.02	0.1	0.89	0.52	0.37	276	-282	558	1614	B	1629	
備考 三角波 $\epsilon_{\max}/\epsilon_{\min} = -1$													

Table 5.1-6 0.2% yield stress

材 料	温 度 (℃)	符 号	ひずみ速度 (%/sec)	0.2%耐力 (N/mm ²)	0.2%耐力 平均値
SUS304 (100t)	550	F141	0.1	116	118
		F142		120	
	600	F143	0.1	114	114
		F144		114	
		F146		114	
		F147		114	
SUS304 (25t)	600	F241	0.1	134	136
		F242		137	
高速炉構造用 SUS316 (25t)	550	F261	0.1	147	146
		F262		145	
	600	F263	0.1	144	144
		F264		145	
		F266		143	
		F268		144	
		F265	2×10^{-3}	150	150
		F269		149	

Table 5.2-1 Summary of creep test

材料	温度 (°C)	応力 σ (kgf/mm ²)	破断時間 計算値 t_{R1} (hr)	破断時間 実験値 t_{R2} (hr)	破断時間の比 α_R	クリープ歪の比 α_C	定常クリープ 速度の比 α
SUS304 (100t)	550	23.0	1944	3198.3	1.65	1.37	1.39
		25.0	930	1249.2	1.34	1.50	1.57
	600	16.5	1929	1492.1	0.77	3.48	4.20
		18.0	946	834.4	0.88	2.70	2.97
SUS304 (25t)	600	16.5	1729	3052.4	1.58	1.87	1.94
		18.0	946	1023.7	1.08	2.79	3.05
高速炉構造用 SUS316 (25t)	550	34.0	2198	1847.7	0.84	0.58	0.64
		36.5	866	634.8	0.73	0.48	0.60
	600	24.5	2168	1552.5	0.72	1.48	1.55
		26.5	896	311.6	0.35	2.70	2.56
		26.5	896	425.9	0.48	2.47	3.01

Table 5.2-2 Details of creep test

材質	温度 (℃)	符号	試験片寸法 直径(mm)	応力 (kgf/mm ²)	定常クリープ速度 $\times 10^5$ mm/mm/h	三次クリープ		破断時間 試験時間 (h)	伸び (%)	絞り (%)	破断 位置	荷 完了時歪 (%)
						開始時間(Hr)	開始時歪(%)					
SUS304 100t材	550	C141	10.00	23.0	4.17	1320.0	7.09	3198.3	39.8	42	A	5.70
		C142	10.00	25.0	10.87	648.0	7.87	1249.2	40.6	40	A	7.64
	600	C143	10.00	16.5	17.85	340.0	6.89	1492.1	73.1	70	B	2.37
		C144	10.00	18.0	28.30	240.0	7.90	834.4	71.7	69	A	3.50
SUS304 25t材	600	C241	10.00	16.5	8.24	1515.0	15.35	3052.4	60.7	58	A	1.42
		C242	10.00	18.0	29.17	516.0	16.50	1023.7	68.9	66	A	2.18
高速炉構造用 SUS316 25t材	550	C261	10.00	34.0	1.79	810.0	2.13	1847.7	26.4	35	A	11.61
		C262	10.00	36.5	4.67	235.0	1.68	634.8	37.2	47	B	16.85
	600	C263	10.00	24.5	6.72	428.0	3.60	1552.5	46.9	56	A	4.80
		C264	10.00	26.5	29.41	141.0	5.70	311.6	37.8	59	B	5.79
		C265	10.00	26.5	34.60	168.0	6.61	425.9	44.4	57	B	6.00

6. 考 察

6.1 疲労特性

今回の試験で得られた破損繰返し数(N_f)とひずみ範囲の関係を材料強度基準²⁾と比較した結果をFig.6.1-1～4に示す。Fig.6.1-1～3は(A)線図に対してひずみ速度が0.1%/secの試験結果をプロットしたものである。また、Fig.6.1-4は(B)線図に対してひずみ速度が0.002%/secの試験結果をプロットしたものである。いずれの試験結果も設計線図に対してひずみで約2倍繰り返し数で約20倍の裕度を有している。

最適疲労破損式から求めたひずみ範囲と破損繰返し数の関係に試験結果をプロットしたものをFig.6.1-5およびFig.6.1-6に示す。SUS304鋼は、素材の板厚の影響はほとんど見られない。試験データは、550℃、600℃のいずれにおいても、高寿命側に若干偏っているが、最適疲労破損式と試験結果は良く一致していることがわかる。高速炉構造用SUS316鋼も、最適疲労破損式と試験結果は概ね一致しているが、以下の傾向が見られる。

- ひずみ速度依存性が顕著でない。
- 高ひずみ側で最適疲労破損式に対して強度がやや低く、一方低ひずみ側では逆にやや高くなる。

これらの傾向は、従来、材料開発室が得ている知見と合致している。

6.2 クリープ特性

今回の試験で得られたクリープ破断時間と保持応力の関係をクリープ破断応力線図^{2),4)}上にプロットしたものをFig.6.2-1に示す。これらの図に示したクリープ破断応力線図は、設計線図に対して時間に関する裕度を除いた平均的な傾向を表したものである。これらより、SUS304鋼、高速炉構造用SUS316鋼とともに材料の平均的挙動と一致していることがわかる。また、高速炉構造用SUS316鋼のクリープ強度は、SUS304鋼に対して温度で50℃以上、破断時間で約2桁向上していることがわかる。

Fig.6.2-2およびFig.6.2-3にクリープ破断時間の計算値^{2),4)}と試験データの比較を示す。SUS304鋼の試験データのはらつきは、クリープ破断式の平均的傾向に対して、 α_R で0.57～1.29の範囲にある。また、SUS316鋼の試験データは、クリープ破断式の平均的傾向に対してやや低寿命側に偏っており、その最大値は α_R で2.88である。

Fig.6.2-4およびFig.6.2-5に定常クリープ速度の計算値^{2),4)}と試験データの比較を示す。

SUS304鋼の試験データのはらつきは、定常クリープ速度の平均的傾向に対してやや高速度側に偏っており、その最大値は α_c で4.20である。また、SUS316鋼の試験データのはらつきは、クリープ破断式の平均的傾向に対して α_c で0.60～3.01の範囲にある。

6.3 動的応力-ひずみ関係

材料強度基準²⁾にある動的応力-ひずみ曲線上に試験データをプロットした結果をFig.6.3-1～4に示す。SUS304鋼の550℃における試験データは、動的応力-ひずみ曲線と良く一致している。同鋼の600℃の試験データは、板厚に因らず動的応力-ひずみ曲線よりも応力側に若干大きめの値となる。高速炉構造用SUS316鋼の試験データは、温度、ひずみ速度に因らず動的応力-ひずみ曲線に対して低応力側の傾向にあり、SUS304鋼に比べて硬化が少ない傾向にあると考えられる。

6.4 0.2%耐力

疲労試験の1サイクル目の応力-ひずみ関係のヒステリシスを用いて求めた0.2%耐力と材料強度基準²⁾に示されたトレンド曲線から求めた0.2%耐力の比較をFig.6.4-1に示す。SUS304の100t材を除いて0.2%耐力は平均的傾向を示していることがわかる。100t材の0.2%耐力が25t材に比べて低めとなるのは、加工度が低いためであると考えられる。

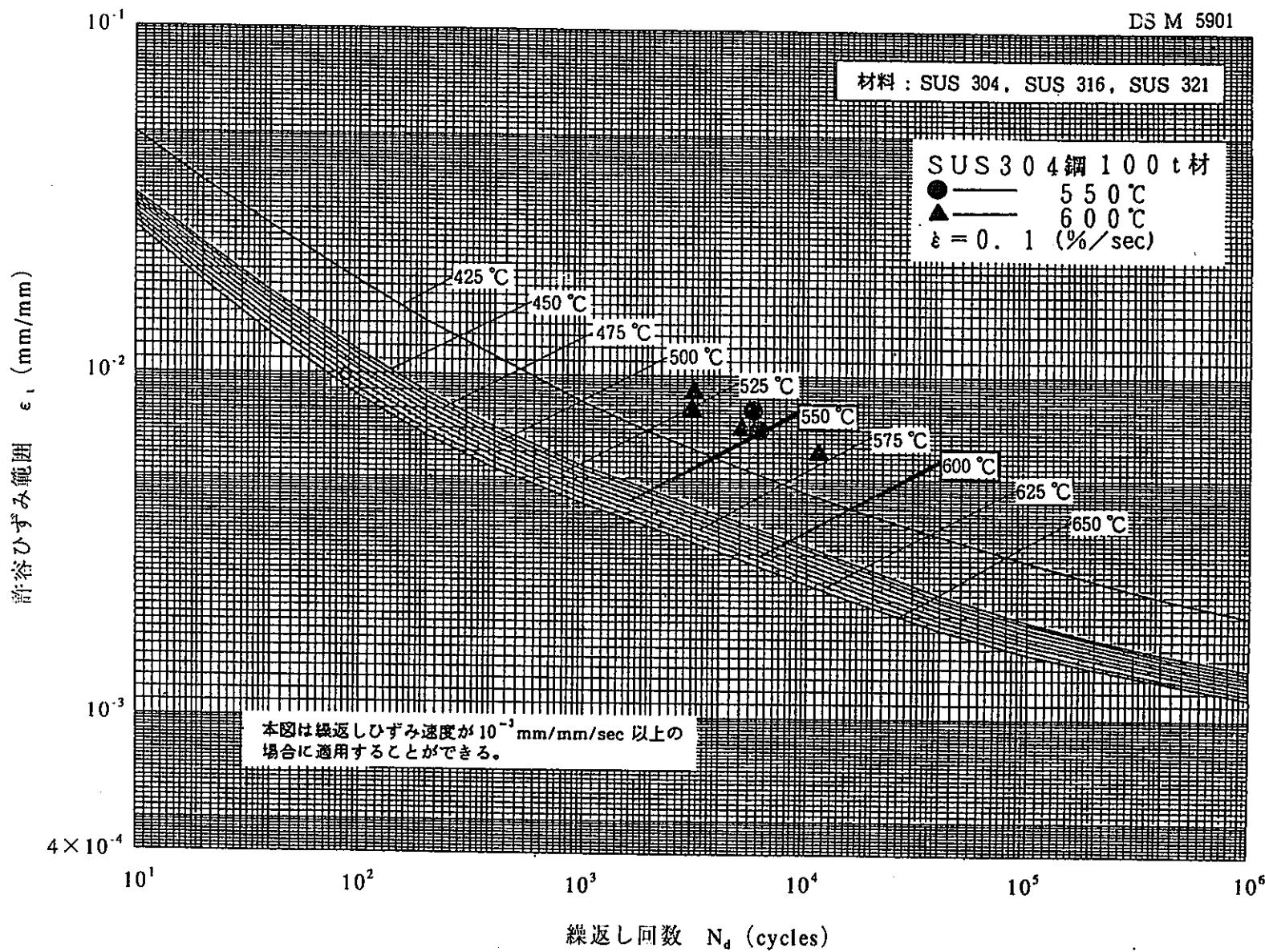


Fig. 6.1-1 Observations plotted on design fatigue curves - SUS304, 100t

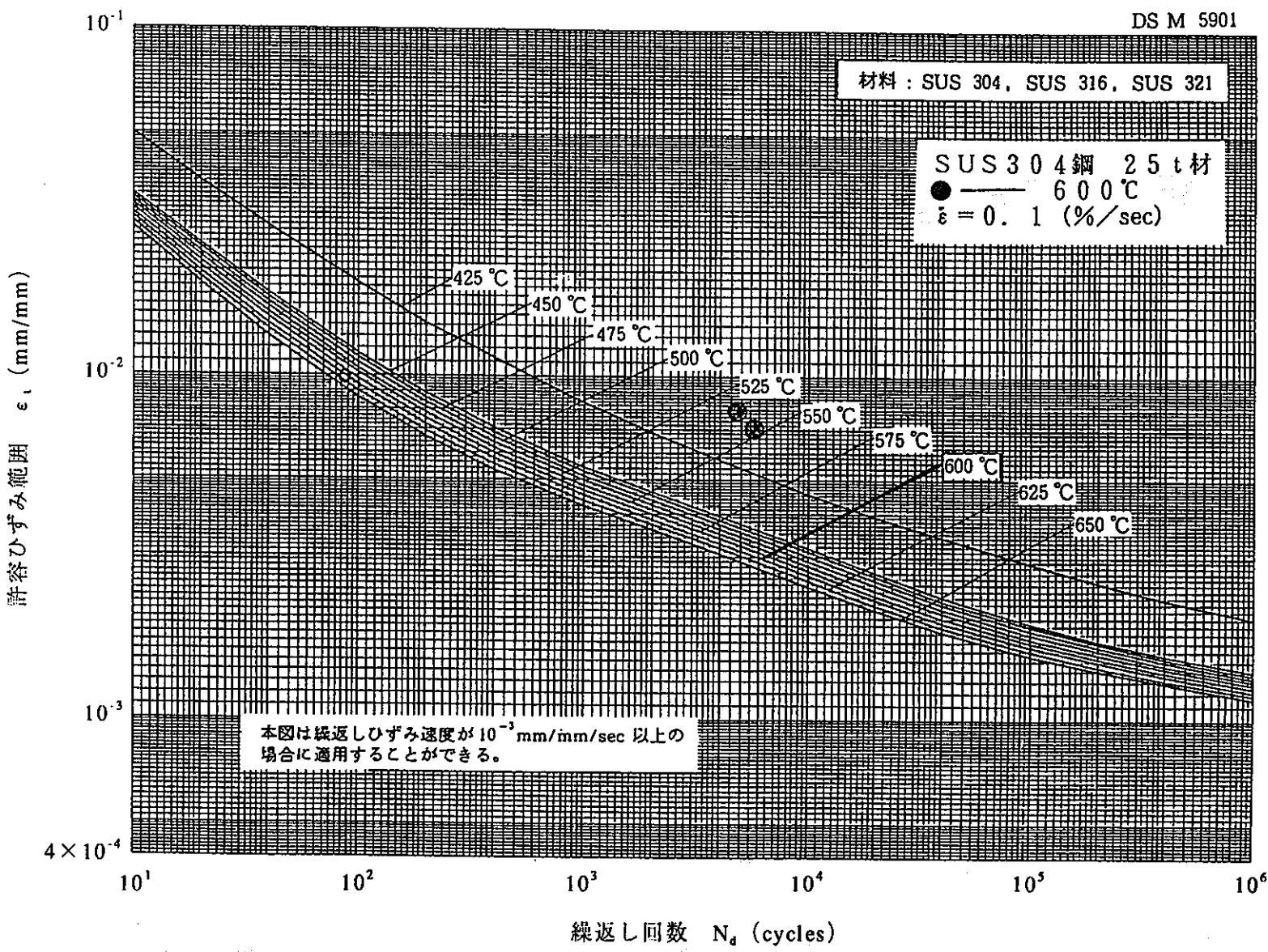


Fig. 6.1-2 Observations plotted on design fatigue curves - SUS304, 25t

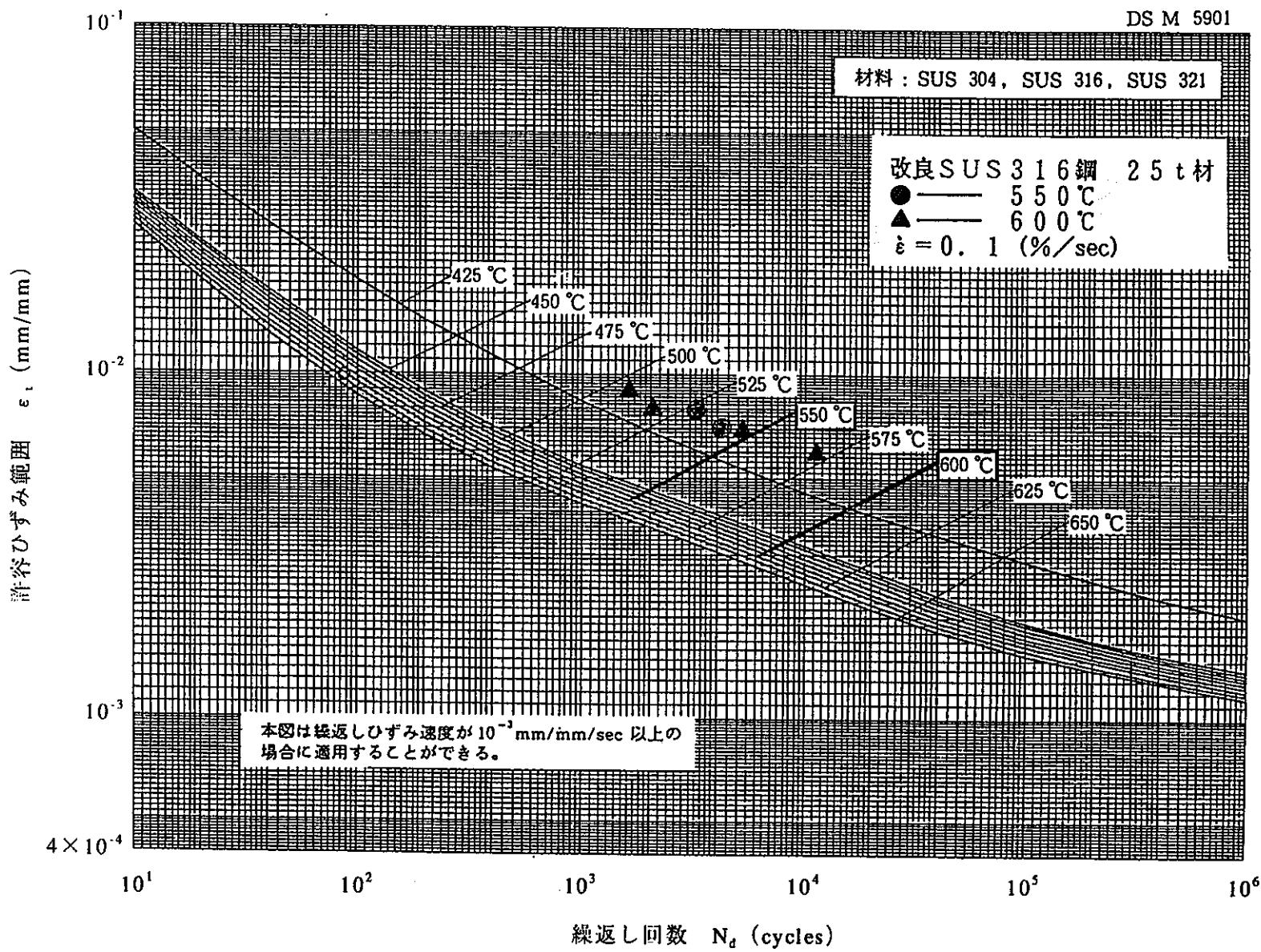


Fig. 6.1-3 Observations plotted on design fatigue curves - FBR grade SUS316, $\dot{\varepsilon} = 0.1 \%/\text{sec}$

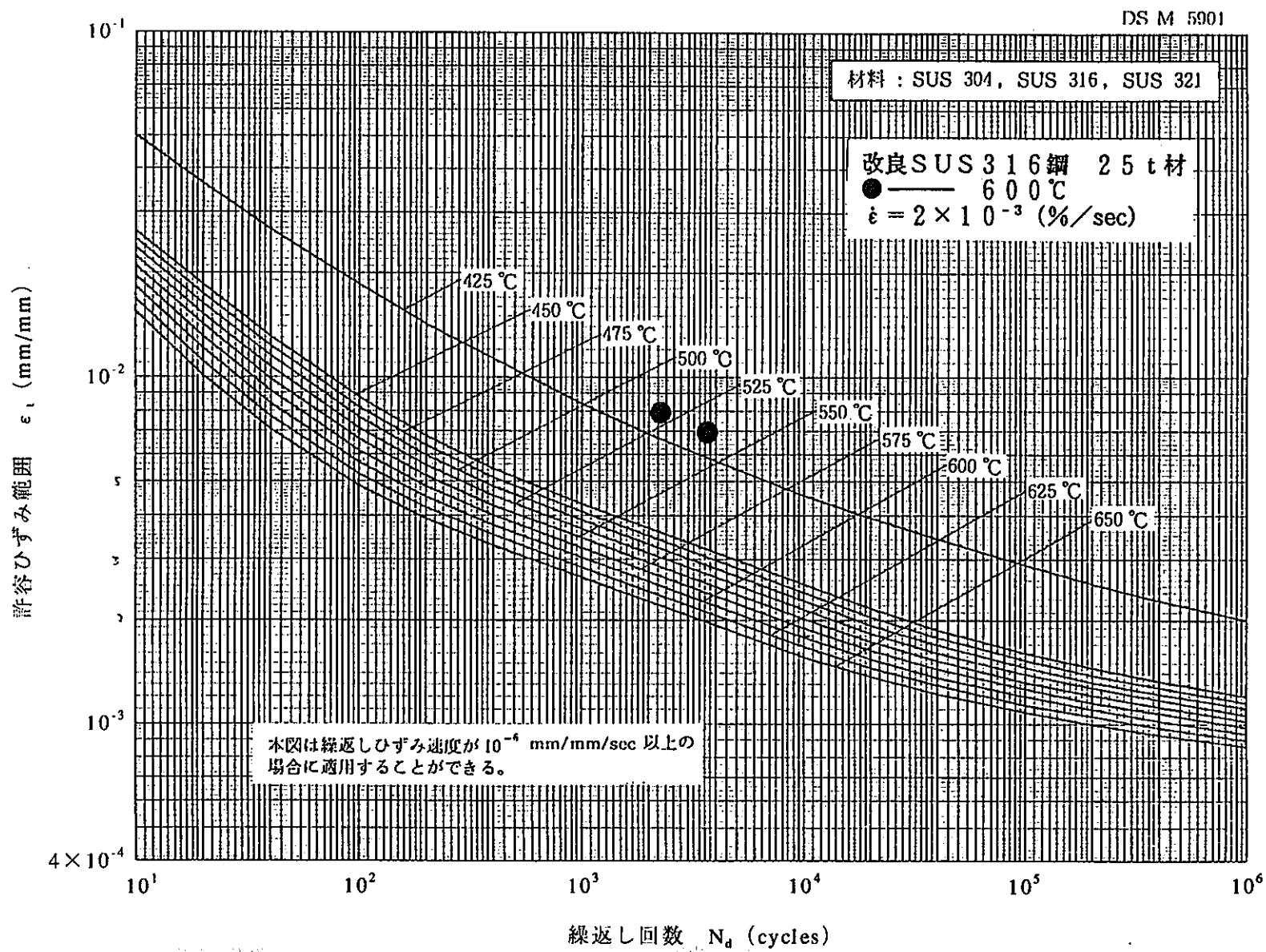


Fig. 6.1-4 Observations plotted on design fatigue curves - FBR grade SUS316, $\dot{\epsilon} = 0.002$ %/sec

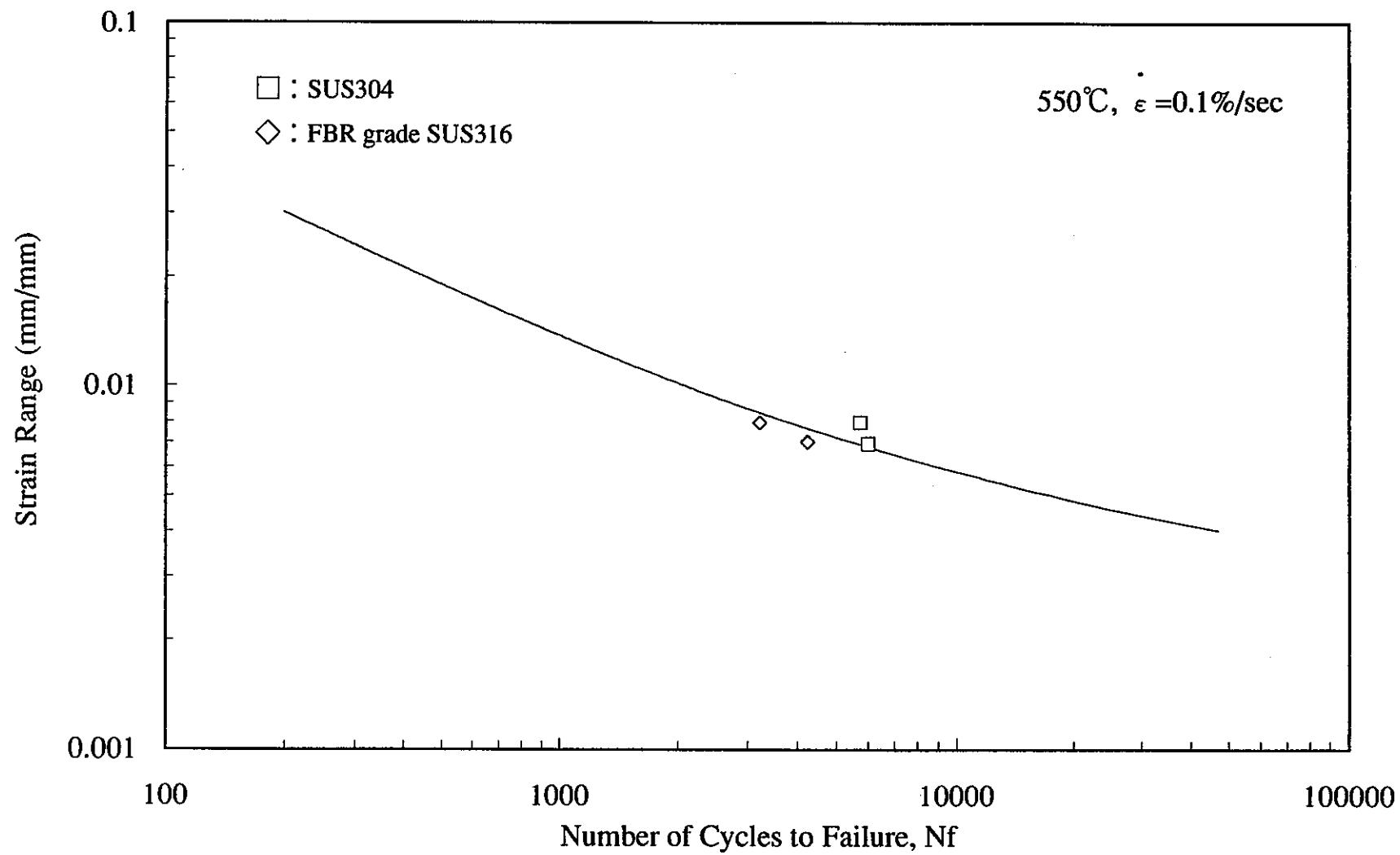


Fig. 6.1-5 Observations plotted on best fit fatigue curve - 550°C

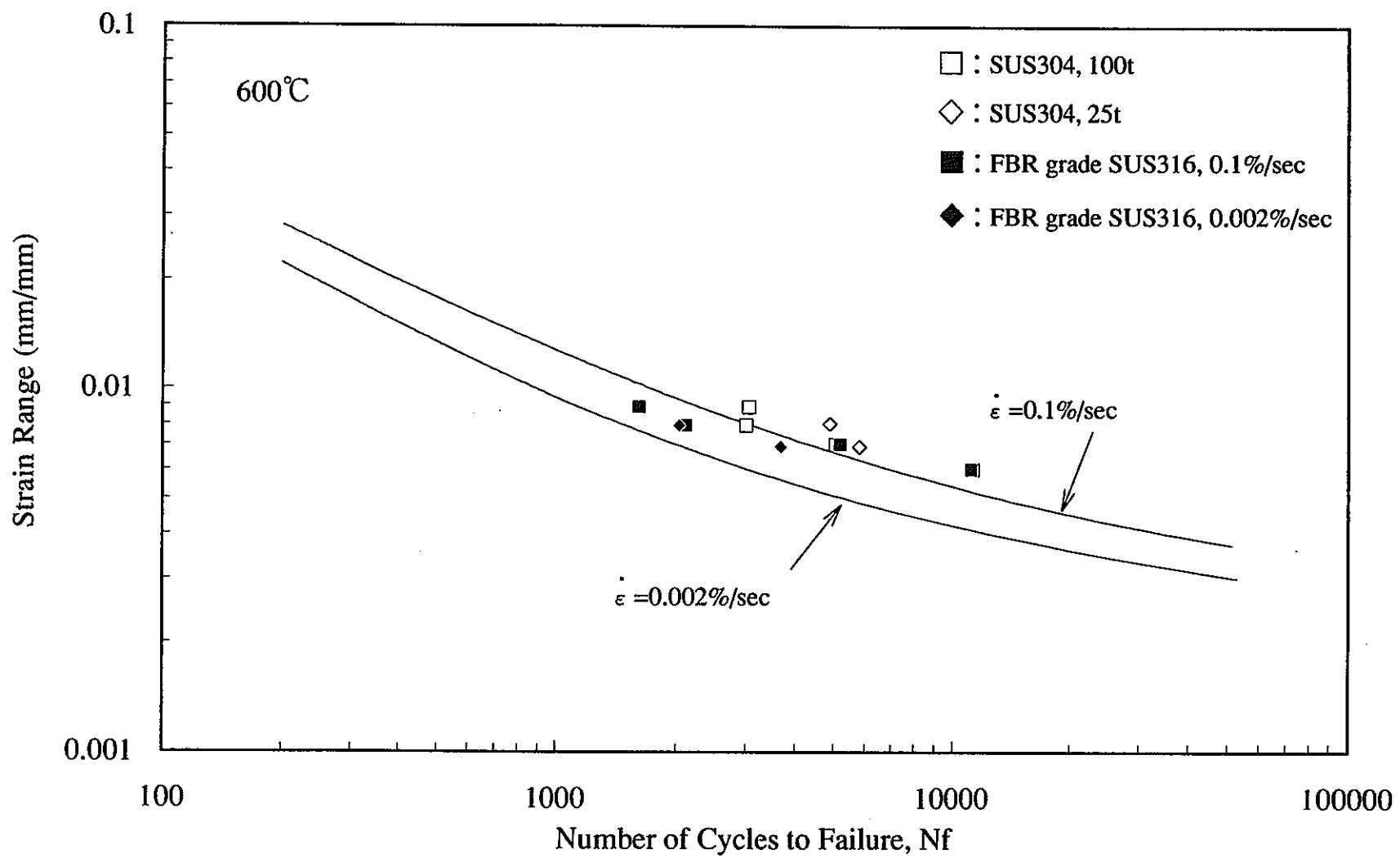


Fig. 6.1-6 Observations plotted on best fit fatigue curves - 600°C

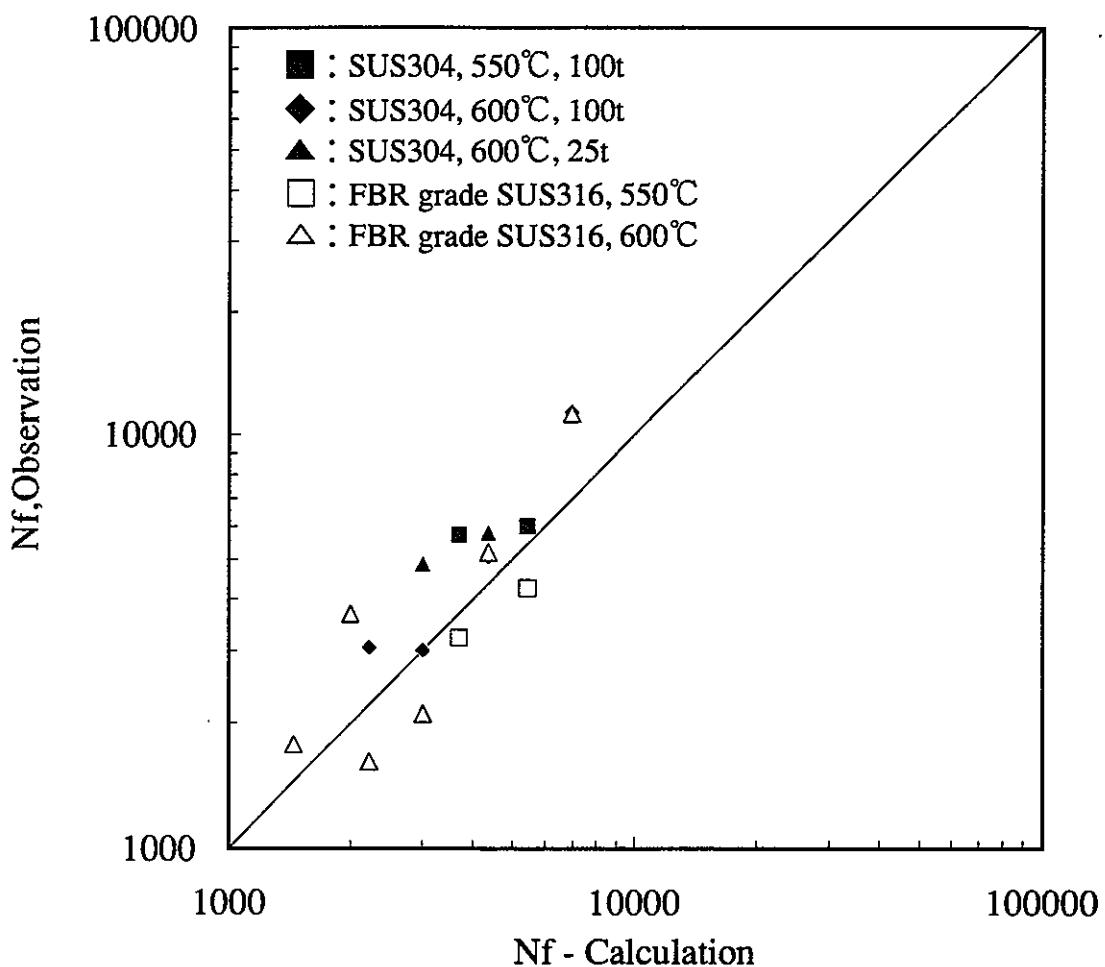


Fig. 6.1-7 Comparison of Nf calculations with observations

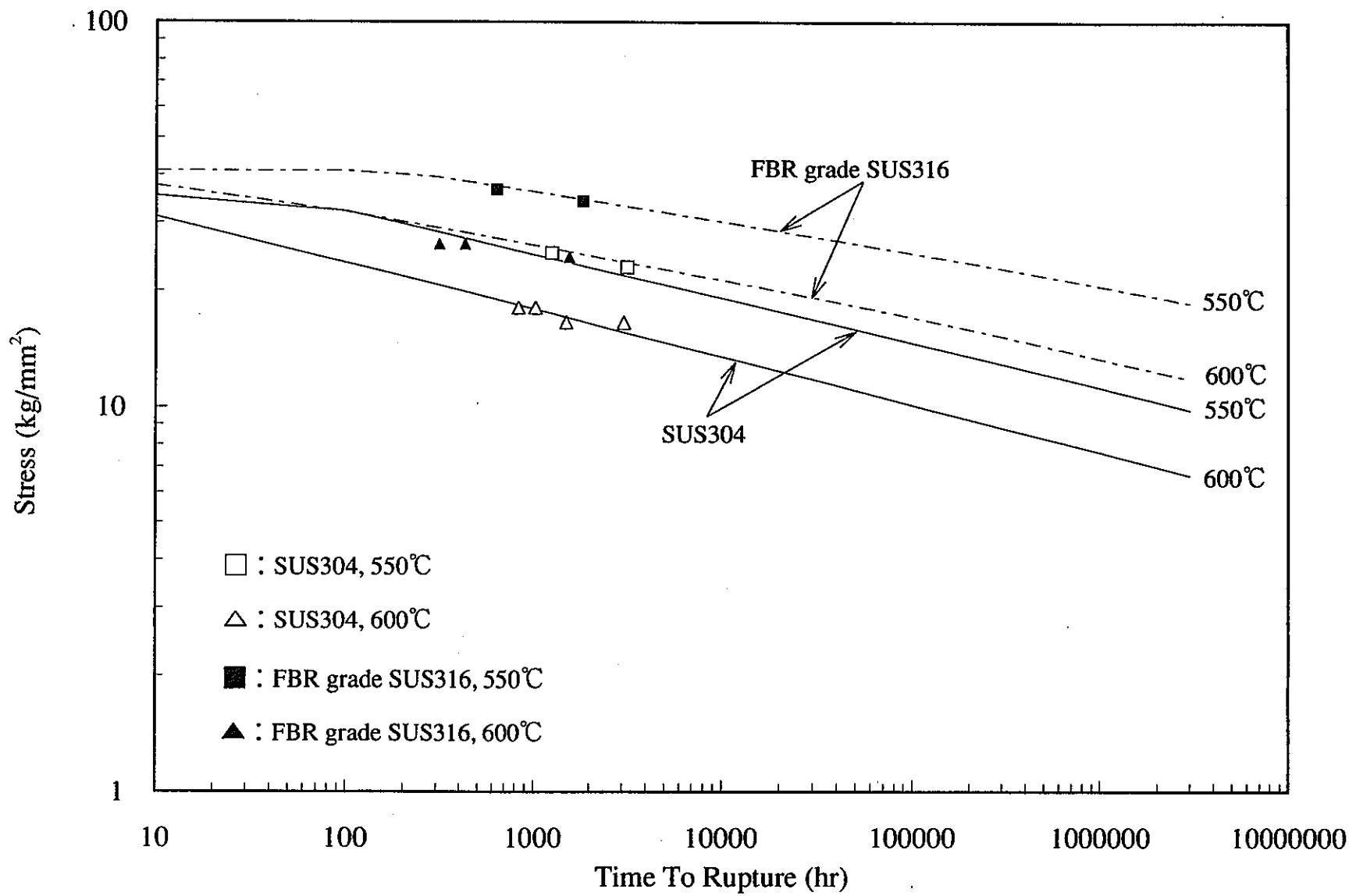


Fig. 6.2-1 Observations plotted on creep rupture curves

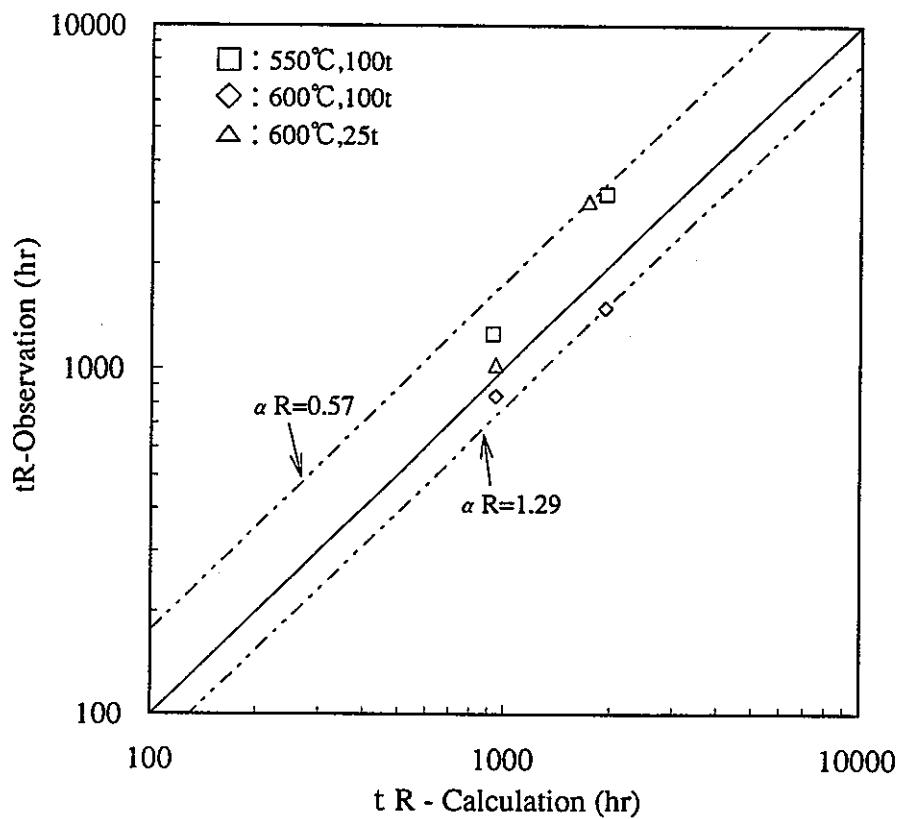


Fig. 6.2-2 Comparison of creep rupture time calculations with observations - SUS304

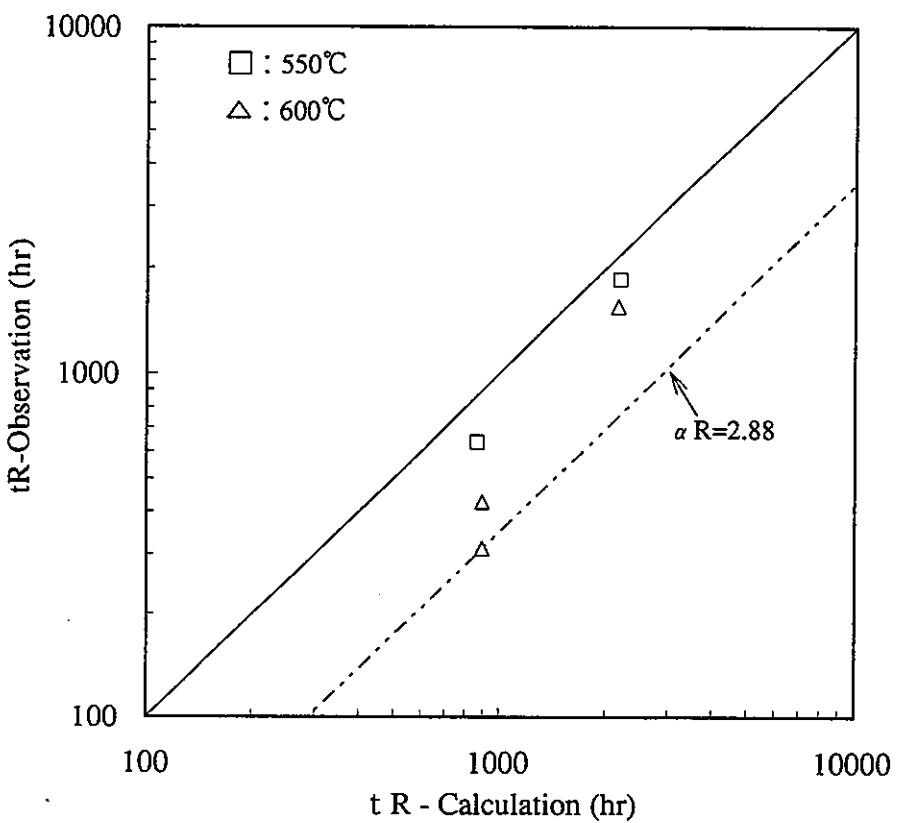


Fig. 6.2-3 Comparison of creep rupture time calculations with observations - FBR grade SUS316

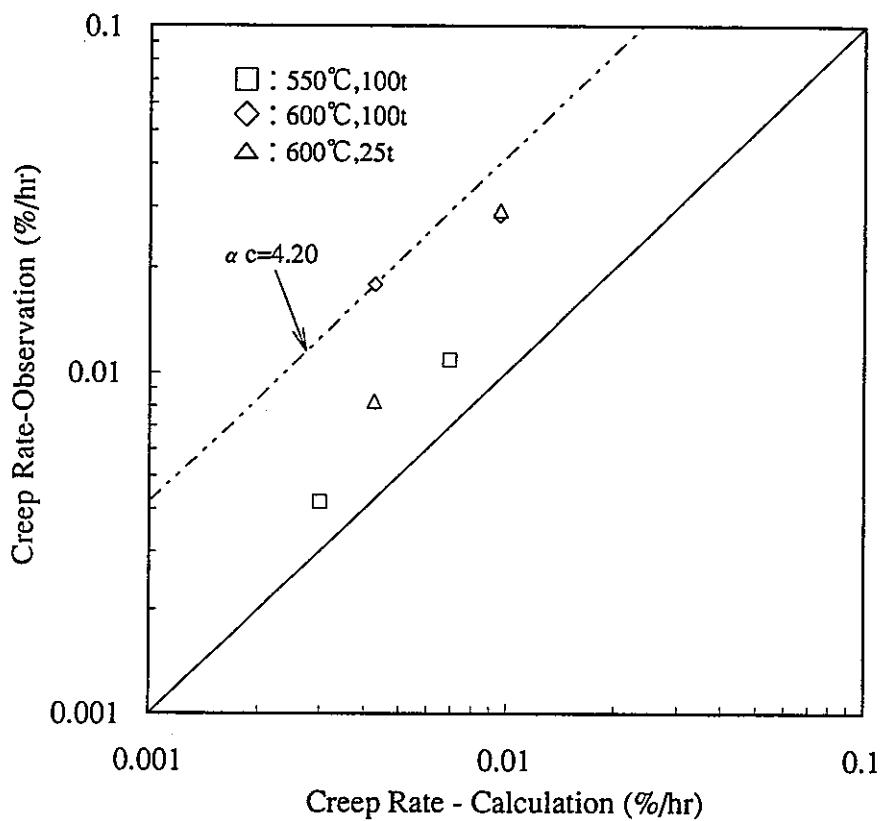


Fig. 6.2-4 Comparison of steady creep rate calculations with observations - SUS304

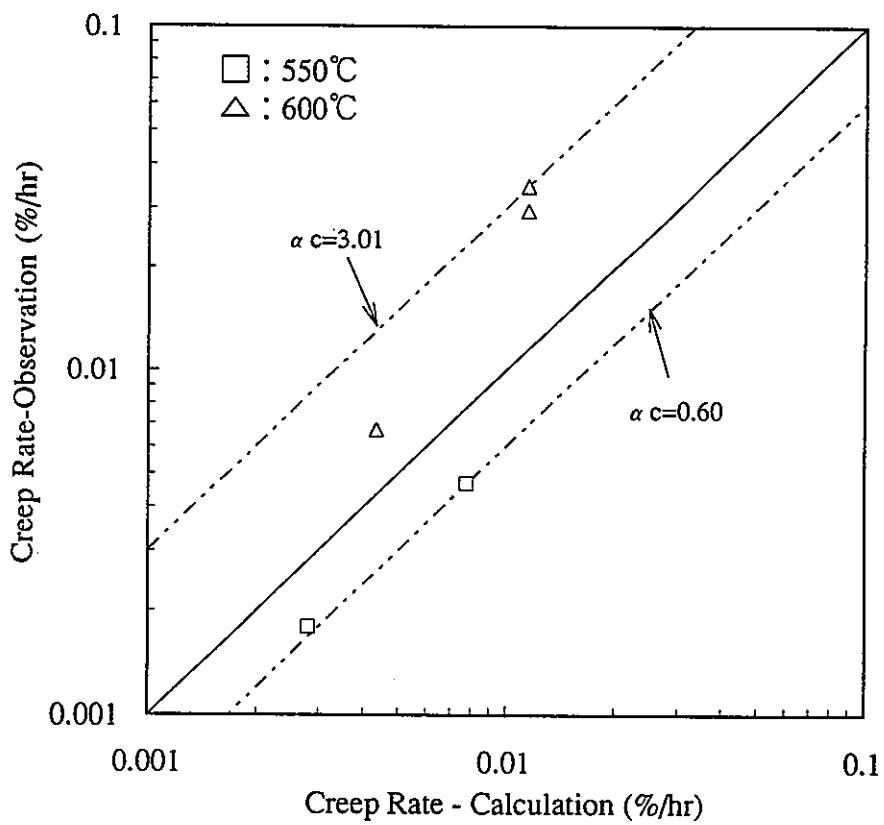


Fig. 6.2-5 Comparison of steady creep rate calculations with observations - FBR grade SUS316

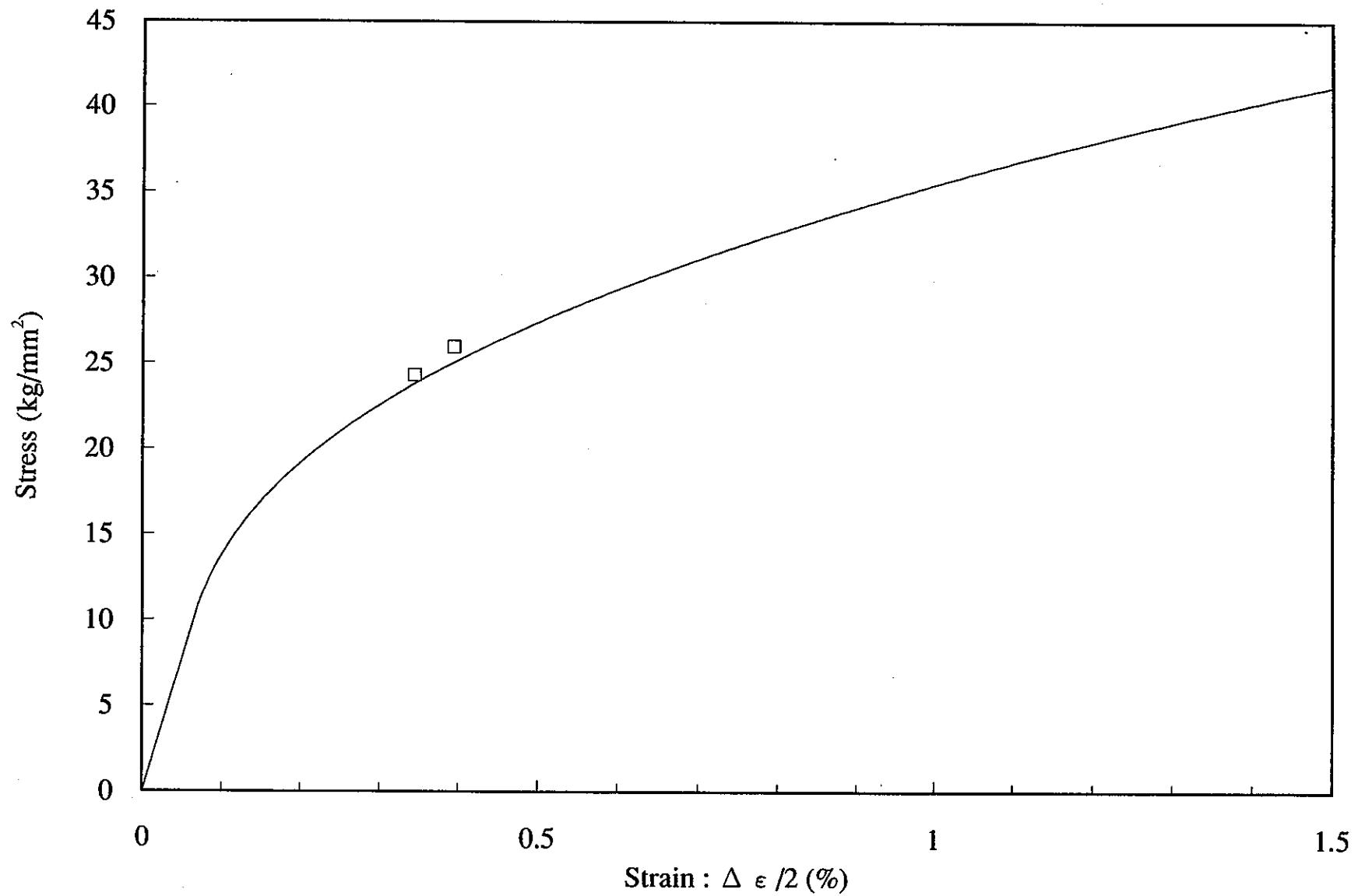


Fig. 6.3-1 Observations plotted on dynamic stress-strain curve - SUS304, 550°C

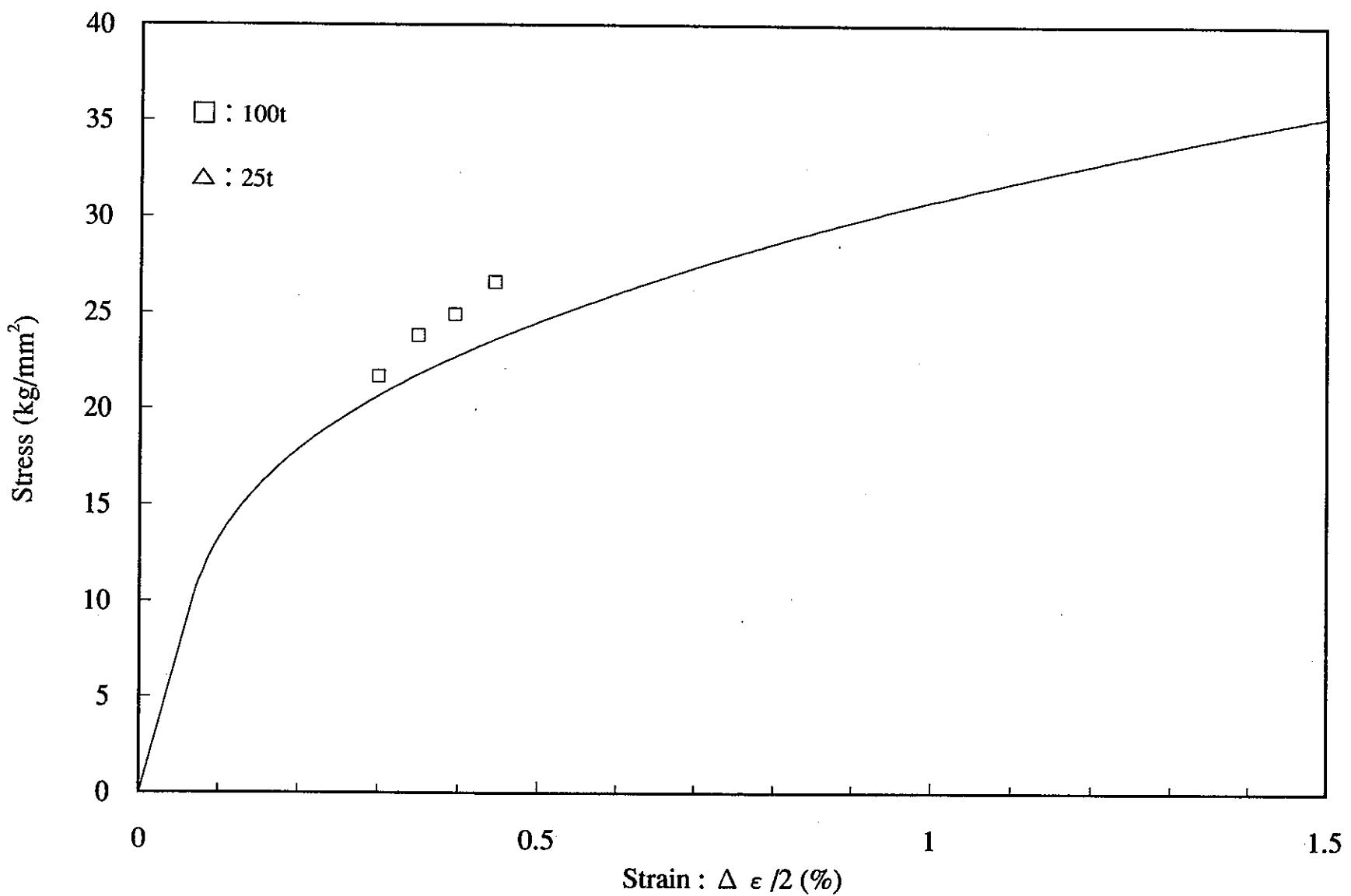


Fig.6.3-2 Observations plotted on dynamic stress-strain curve - SUS304, 600°C

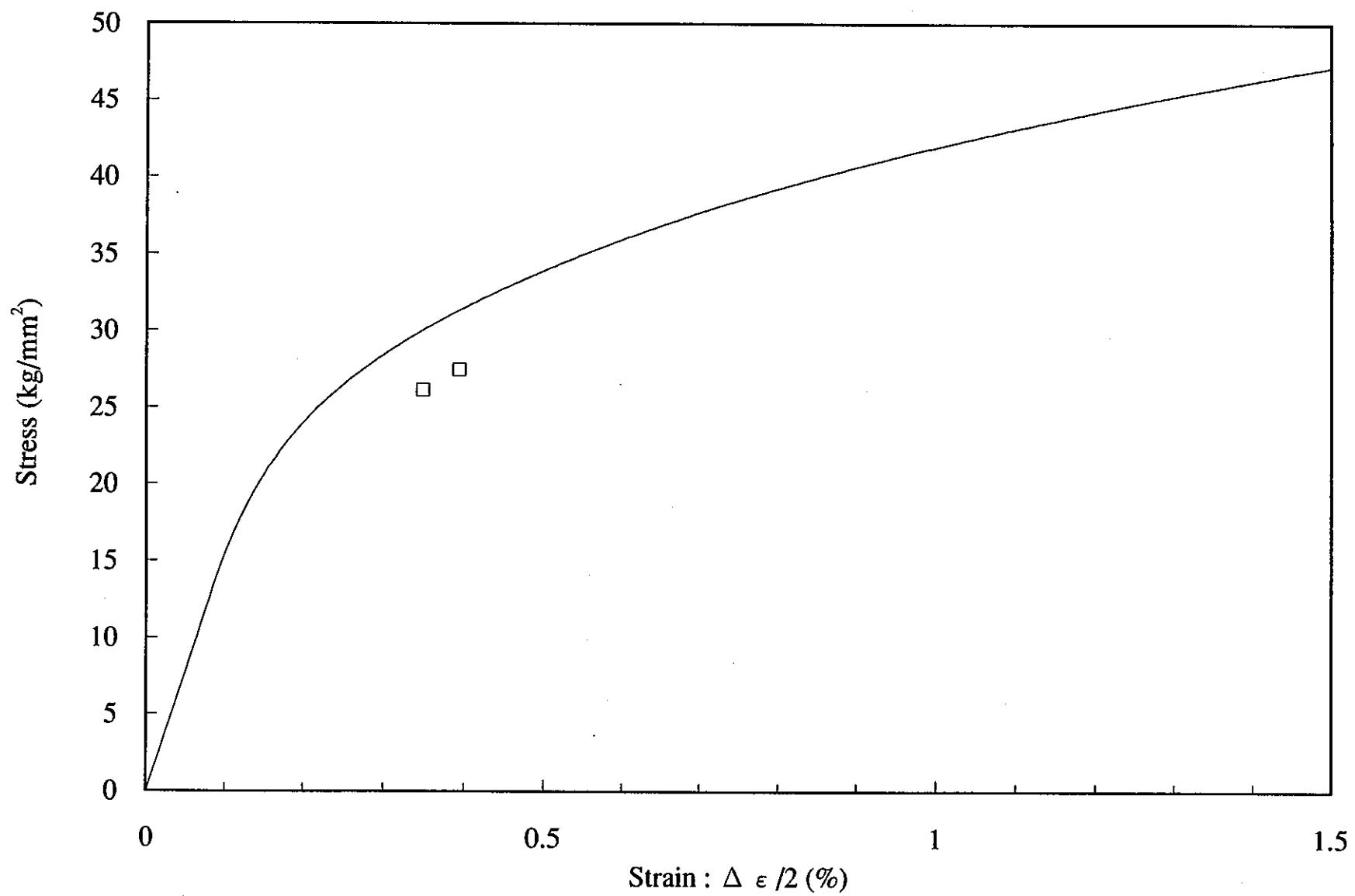


Fig. 6.3-3 Observations plotted on dynamic stress-strain curve - FBR grade SUS316, 550°C

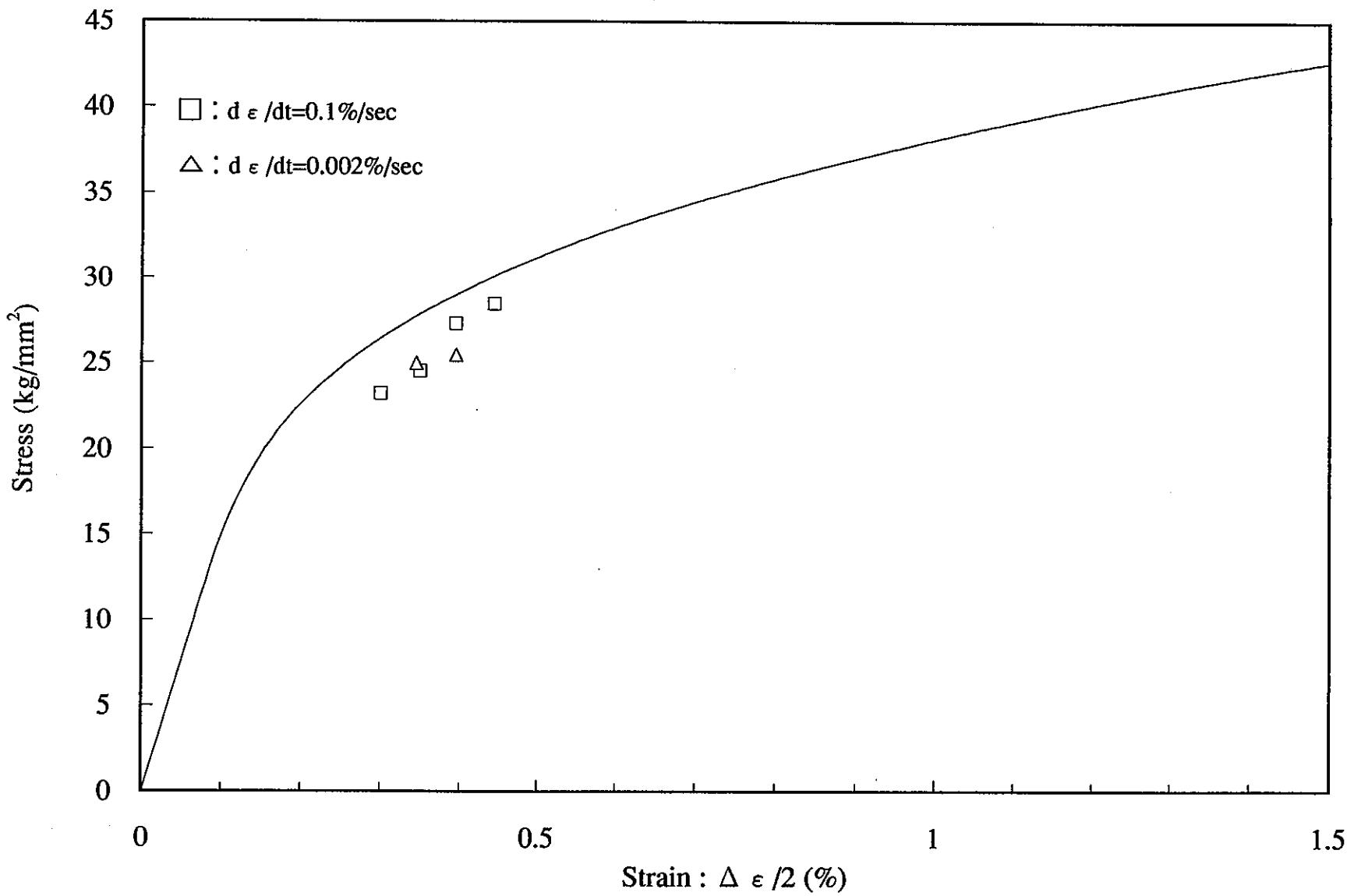


Fig. 6.3-4 Observations plotted on dynamic stress-strain curve - FBR grade SUS316, 600°C

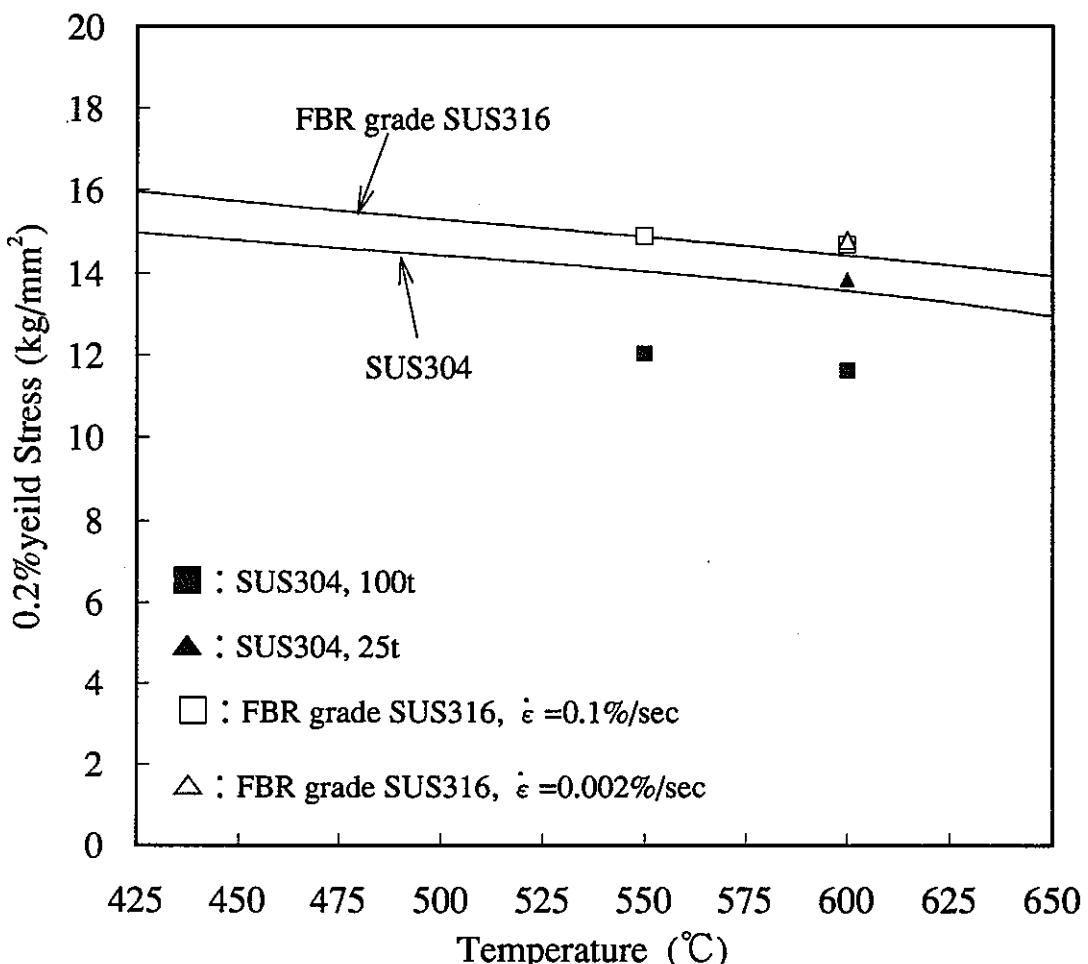


Fig. 6.4-1 Observations plotted on 0.2% yield stress curves

7. 結 言

溶接容器型モデルの熱過渡強度評価を実施する際に用いる基礎データを得るために、本供試体の製作に用いた材料から採取した試験片を用いた疲労試験およびクリープ試験を実施した。この試験結果を材料強度基準の最適疲労破損式、クリープひずみ式および主クリープ破断関係式等から求めた計算値と比較し、供試体材料に対するこれらの評価式の適合性を調査した。

主な結論は以下のとおりである。

(1) 疲労特性

- SUS304, 高速炉構造用SUS316鋼とともに、疲労強度は設計疲労線図に対してひずみで約2倍、繰返し数で約20倍の裕度を有している。
- SUS304, 高速炉構造用SUS316鋼とともに、疲労強度は材料強度基準の平均的な傾向に近い。
- 高速炉構造用SUS316鋼の疲労強度は、従来鋼に比べてひずみ速度依存性が顕著でない。

(2) クリープ特性

- クリープ破断時間は、SUS304, 高速炉構造用SUS316鋼とともに材料強度基準の平均的な傾向に近い。
- 高速炉構造用SUS316鋼のクリープ強度は、SUS304に対して温度で50°C以上、破断時間で約2桁向上している。

(3) 動的応力-ひずみ関係

- SUS304鋼の応力-ひずみ関係は、550°Cにおいて動的応力-ひずみ関係と良く一致する。660°Cにおいては硬化が大きい傾向にある。
- 高速炉構造用SUS316鋼の応力-ひずみ関係は、550°C、600°Cともに動的応力-ひずみ関係に対して低応力側となり、硬化が小さい傾向にある。

(4) 0.2%耐力

- 0.2%耐力は、SUS304鋼の100t材を除いて材料強度基準の平均的傾向を示す。

8. 謝　　辞

本書は、構造室における試験計画に基づいて、株式会社 神戸工業試験場に依頼した材料試験結果をまとめたものである。同社茨城営業所 佐久英司所長、東海技術センター試験室 南山二三男室長はじめ関係各位に感謝いたします。

9. 参考文献

- 1) 溶接容器型モデル熱過渡強度試験 第1報 供試体の設計・製作；
PNC SN9410 90-096
- 2) 動力炉・核燃料開発事業団「高速原型炉高温構造設計基準 材料強度基準等」
PNC N241 84-08(1) 昭和59-9
- 3) 高速炉構造用改良SUS316(低炭素-窒素添加)の高温強度特性
材料強度基準等(暫定値)の策定について; PNC SN9410 89-128
- 4) 高速炉構造用SUS316の設計クリープ破断応力強さ S_R
(90年度暫定基準)の策定; PNC SN9410 90-139
- 5) 溶接容器型モデル熱過渡強度試験 第2報 予備弾性解析と強度評価；
PNC SN9410 90-103