

分 置

高速炉構造用316の材料強度基準等 (案)

1993年6月

動力炉・核燃料開発事業団
大洗工学センター

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせください。

〒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 システム開発推進部・技術管理室

Enquires about copyright and reproduction should be addressed to: Technology Management Section O-arai Engineering Center, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation 4002 Narita-cho, O-arai-machi, Higashi-Ibaraki, Ibaraki-ken, 311-13, Japan

動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation)

高速炉構造用 3 1 6 の材料強度基準等

(案)

渡士克己*, 青砥紀身*, 青木昌典*,
小峰龍司*, 伊藤卓志*, 長谷部真一*,
加藤章一*, 小井 衛*, 和田雄作*

概 要

「高速炉構造用 3 1 6」(略称316FR)は、クリープ疲労強度の向上を目指して、従来高速炉に用いられてきたSUS316の化学成分をベースに開発した高速炉の構造材料である。本報は、これまでに実施してきた研究開発結果を、316FRの材料強度基準(案)並びに特性の説明として取りまとめたものである。

本報に示す材料強度基準(案)は、「高速原型炉高温構造設計指針材料強度基準等」に規定された全項目を含むとともに、書式についても整合性を有している。また、「高速原型炉第1種機器の高温構造設計指針」に規定される項目のうち、鋼種毎に定められる「1次及び2次応力に関する緩和クリープ損傷係数」並びに「ピーク応力に関する緩和クリープ損傷係数」も、本材料強度基準等(案)に含まれる。

Material Strength Standard of FBR Grade Type 316 Stainless Steel

—Draft —

Watashi, K.* , Aoto, K.* , Aoki, M.* ,
Komine, R.* , Ito, T.* , Hasebe, S.* ,
Kato, S.* , Koi, M.* and Wada, Y.*

Abstract

Much progress has been made in improving established creep properties of Type 316 stainless steel and to develop a new structural material named "FBR Grade Type 316 Stainless Steel", 316FR, with superior creep properties. This report includes a draft of Material Strength Standard of 316FR and its interpretation on the basis of the major result of research and development conducted so far.

The draft includes identical items described in the "Standards for the Strength of Materials" for Monju, and was carefully prepared to have an identical style for convenience in design evaluation. Creep damage evaluation diagrams, which are depicted in the "Structural Design Guide for Class 1 Components of Prototype Fast Breeder Reactor for Elevated Temperature Service" (ETSDG) for individual materials, are also included in this report.

* Material Development Section

目 次

1. 高速炉構造用316 の概要	1
2. 高速炉構造用316 の材料強度基準等の策定方法	2
3. 高速炉構造用316 の材料強度基準等	4
(1)表	5
(2)図	19
4. 高速炉構造用316 の特性	50
(1)一般特性	50
①比 重 γ	50
②比 熱 C_p	50
③熱伝導率 κ	51
④熱膨張率 α	51
⑤縦弾性係数 E	52
⑥ポアソン比 ν	52
(2)クリープ特性	53
①設計クリープ破断強度 S_R	53
②クリープひずみ式	55
③弾塑性応力ひずみ関係式	56
④動的応力ひずみ関係	56
⑤最大許容応力強さ S_0	57
⑥設計応力強さ S_t	57
⑦設計緩和強さ S_r	58
⑧等時応力ひずみ線図	58
⑨クリープ損傷の評価法 D^* および D^{**}	59
(3)その他の材料強度基準等	63
①設計応力強さ S_a	63
②設計降伏点 S_y	63
③設計引張強さ S_u	64
④設計疲労線図	64
⑤許容引張応力 S^*	65
⑥厚肉鍛鋼品49kg/mm ² の許容引張応力 S_u	65
⑦ナトリウム環境効果	65
図表集等	
(1) 化学成分と機械的特性	
(2) 弾塑性真応力対数ひずみ線図とSUS316基準値	
(3) クリープ特性追補	
(4) クリープ疲労破損データによる線型累積損傷則の検証	
(5) 疲労特性追補図	
(6) 緩和クリープ損傷係数 D^* , D^{**} に関する検討	
(7) 中性子照射効果	
(8) 溶接金属と溶接継手の特性	
(9) き裂進展特性	
(10) 316FRのナトリウム環境効果評価	
(11) 316FRの使用実績	
(12) 316L(N) と316FR	

1. 高速炉構造用316 の概要

一般にSUS304やSUS316などのオーステナイト系ステンレス鋼は、高温強度、延性、耐食性などに優れているので高速炉の一次系構成材料として適しており、「常陽」における長年の良好な使用実績および「もんじゅ」での製造実績を積んできた。一方、高速炉の実用化に向けて、経済性向上の観点からプラントの高温化あるいは機器の構造簡素化などを実現するためには、SUS304やSUS316の優れた性質を基本として更に高温強度に優れた材料へと改良を図っていくことが必要である。

高速炉構造用316（略称 316FR）は、高速炉で防止すべき主要な破損モードであるクリープ疲労に対してより優れた特性を有する材料である。316FR は、従来高速炉で用いられているオーステナイト系ステンレス鋼の化学成分系を、J I Sの規格内で改良することによって開発された。

すなわち、一般にクリープ破断強度とクリープ延性に富んでいる材料のクリープ疲労強度は高いが、粒界への炭化物の析出・粗大化を抑制すればこれらのクリープ特性を向上させることができる。従来のSUS304やSUS316では強度確保の観点から炭素量に下限値0.04%を設けていたが、316FR では炭素と同様の強化機構（固溶強化と析出強化）を有する窒素で強度確保を達成し、炭化物の析出・粗大化を抑制するために炭素含有量を0.02%以下と低く規定した。

J I SのSUS316鋼板規格と比較して、316FR の化学成分を下表に示す。

化学成分（重量パーセント）

材 料	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	N
316FR	≤ 0.02	≤ 1.00	≤ 2.00	0.015 -0.045	≤ 0.030	10.00 -14.00	16.00 -18.00	2.00 -3.00	—	0.06 -0.12
JIS SUS316	≤ 0.08	≤ 1.00	≤ 2.00	≤ 0.045	≤ 0.030	10.00 -14.00	16.00 -18.00	2.00 -3.00	—	—

2. 高速炉構造用316 の材料強度基準策定方法

現在の技術基準体系における高速炉の構造設計は、クリープ温度以下では科技庁局長通達「ナトリウム冷却型高速増殖炉発電所の原子炉施設に関する構造等の技術基準」（以下技術基準と略す）、クリープ温度域では同「高速原型炉第1種機器の高温構造設計方針」（以下構造設計方針と略す）によって評価され、関係する材料強度基準等も当該温度域毎に整合性をもって規定されている。

技術基準ではJISを引用しているが、316FR はJIS規格品の化学成分系の範囲内であり、クリープ温度域以下の材料強度基準等として技術基準に定められる別表および別図の値を引用することとした。

クリープ温度域においては、クリープ特性に関する材料強度基準値を構造設計方針付録の「高速原型炉高温構造設計方針材料強度基準等」（以下材料強度基準等と略す）の別表・別図の定め方に準じて策定した。クリープ特性に関係しない材料強度基準等については、疲労強度のように高サイクル側でSUS316よりも長寿命側となる場合もあるが、4章に示すように同等と取り扱うことが工学的に適切であるので構造設計指針に定めるSUS316の基準値を用いることとした。

316FR について策定した図表と、技術基準および材料強度基準等記載の別表・別図との対応を次頁に示す。

適用温度領域 材料基準 表 題		クリープ温度域以下 対応する技術基準の別表・別図	クリープ温度域	
			対応する材料強度基準等の別表・別図	316FR用の材料強度基準等の策定方法
1. 最大許容応力強さ	S_o	別表第 6	別表1.1 別図1.1	別表1.1 を準用
2. 設計応力強さ	S_m	別表第 2	別表1.2 別図1.2	別表1.2 を準用
3. 設計応力強さ	S_t	*	別表1.3 別図1.3	新規策定 (表-3)
4. 設計降伏点	S_y	別表第 9	別表1.4 別図1.4	別表1.4 を準用
5. 設計クリープ破断応力強さ	S_R	*	別表1.5 別図1.5	新規策定 (表-5)
6. 設計引張強さ	S_u	別表第10	別表1.6 別図1.6	新規策定 (表-6)
7. 設計緩和強さ	S_r	*	別表1.7 別図1.7	新規策定 (表-7)
8. 縦弾性係数	E	別表第11	別表1.8	別表1.8 を準用
9. ポアソン比	ν	*	別表1.9	別表1.9 を準用
10. 熱膨張係数	α	別表第12	別表1.10	別表1.10を準用
11. 許容ひずみ範囲 (A)	ϵ_t	別図第 1 又は第 2	別表1.11 別図1.8	別表1.11を準用
12. 許容ひずみ範囲 (B)	ϵ_t		別表1.12 別図1.9	別表1.12を準用
13. 許容ひずみ範囲 (C)	ϵ_t		別表1.13 別図1.10	別表1.13を準用
14. 等時応力ひずみ線図		*	別図1.11	新規策定 (図-11)
15. 許容引張応力	S^*	別表第 6	別表1.14 別図1.12	別表1.14を準用
16. 1次および2次応力に伴う 緩和クリープ損傷係数 D^*		*	付録 E 図E.1	新規策定 (図-13)
17. ピーク応力に伴う 緩和クリープ損傷係数 D^{**}		*	付録 F 図F.1	新規策定 (図-14)
18. 液体ナトリウム接液面のくされ代		*	付録 MA	付録 MAを準用
19. S_t 、 S_R 、および S_r の外挿値		*	付録 MB 別表MB.1	新規策定 (表-15)
20. 大型鍛鋼品49 kg/mm ² 級の基準		*	付録 MC 別表MC.1-4	新規策定 (表-16)

*は対応する図表のないことを示す。

3. 高速炉構造用316 の材料強度基準等

(1) 最大許容応力強さ S_o	表 1	図 1
(2) 設計応力強さ S_d	表 2	図 2
(3) 設計応力強さ S_t	表 3	図 3
(4) 設計降伏点 S_y	表 4	図 4
(5) 設計クリープ破断応力強さ S_R	表 5	図 5
(6) 設計引張強さ S_u	表 6	図 6
(7) 設計緩和強さ S_r	表 7	図 7
(8) 縦弾性係数 E	表 8	—
(9) ポアソン比 ν	表 9	—
(10) 熱膨張係数 α	表 10	—
(11) 許容ひずみ範囲 (A) ϵ_t	表 11	図 8
(12) 許容ひずみ範囲 (B) ϵ_t	表 12	図 9
(13) 許容ひずみ範囲 (C) ϵ_t	表 13	図 10
(14) 等時応力ひずみ線図	—	図 11
(15) 許容引張応力 S^*	表 14	図 12
(16) 1次および2次応力に伴う緩和クリープ損傷係数 D^*	—	図 13
(17) ピーク応力に伴う緩和クリープ損傷係数 D^{**}	—	図 14
(18) 液体ナトリウム接液面のくされ代	—	—
(19) S_t 、 S_R 、および S_r の外挿値	表 15	—
(20) 大型鍛鋼品49 kg/mm ² 級の基準	表 16	—

(1) 最大許容応力強さ

表 1 最大許容応力強さ S_o (kg/mm^2)

温度 $^{\circ}\text{C}$	316FR
-30 ~40	13.2
75	13.2
100	13.2
150	12.9
200	12.9
225	12.7
250	12.7
275	12.5
300	12.1
325	11.9
350	11.7
375	11.4
400	11.3
425	11.2
450	11.1
475	10.9
500	10.9
525	10.9
550	10.5
575	9.7
600	9.0
625	8.2
650	6.4

(2) 設計応力強さ

表 2 設計応力強さ S_m (kg/mm^2)

温度 $^{\circ}\text{C}$	316FR
-30 ~40	14.0
75	14.0
100	14.0
150	14.0
200	13.5
225	13.2
250	12.8
275	12.4
300	12.1
325	11.9
350	11.6
375	11.4
400	11.2
425	11.1
450	10.9
475	10.7
500	10.6
525	10.4
550	10.3
575	10.2
600	10.0
625	9.8
650	9.6

備考：425℃まで告示 501号と同一、650℃まで
構造設計指針と同一。

(3) 設計応力強さ

表 3 設計応力強さ S_t (kg/mm^2)

時間hr 温度℃	1	10	30	100	300	1,000	3,000	10,000	30,000	100,000	300,000
425	15.2	15.2	15.2	15.2	15.2	15.2	15.2	15.2	15.2	15.2	15.2
450	14.9	14.9	14.9	14.9	14.9	14.9	14.9	14.9	14.9	14.9	14.9
475	14.7	14.7	14.7	14.7	14.7	14.7	14.7	14.7	14.7	14.7	14.7
500	14.5	14.5	14.5	14.5	14.5	14.5	14.5	14.5	14.4	14.4	14.4
525	14.3	14.3	14.3	14.3	14.3	14.3	14.3	14.2	14.1	14.0	13.8
550	14.1	14.1	14.1	14.1	14.0	14.0	13.9	13.8	13.5	13.1	12.3
575	13.9	13.9	13.8	13.7	13.5	13.5	13.3	12.8	12.3	11.1	9.9
600	13.7	13.6	13.3	13.1	12.6	12.6	12.0	11.2	10.1	8.9	7.9
625	13.5	13.1	12.5	11.9	10.9	10.9	10.0	8.9	7.8	6.7	5.8
650	13.0	12.3	10.9	9.9	8.6	8.6	7.4	6.2	5.2	4.3	3.5

備考：許容時間(hr)を定めるべき応力値 (kg/mm^2) が当該温度 (℃) における表中の応力値よりも小さい場合は、表15を用いて設計応力強さを定めることができる。

(4) 設計降伏点

表 4 設計降伏点 S_y (kg/mm^2)

温度 $^{\circ}\text{C}$	316FR
-30 ~40	21.0
75	19.1
100	17.9
150	16.4
200	15.2
225	14.7
250	14.2
275	13.8
300	13.4
325	13.1
350	12.9
375	12.7
400	12.5
425	12.4
450	12.1
475	11.9
500	11.8
525	11.6
550	11.4
575	11.3
600	11.1
625	10.9
650	10.7

備考：構造設計指針と同一。

(5) 設計クリープ破断応力強さ

表5 設計クリープ破断応力強さ S_R (kg/mm^2)

時間hr 温度℃	1	10	30	100	300	1,000	3,000	10,000	30,000	100,000	300,000
425	43.5	43.5	43.5	43.5	43.5	43.5	43.5	43.5	43.5	43.5	43.5
450	42.5	42.5	42.5	42.5	42.5	42.5	42.5	42.5	42.5	41.9	39.0
475	41.4	41.4	41.4	41.4	41.4	41.4	41.4	41.4	38.5	35.5	32.9
500	40.4	40.4	40.4	40.4	40.4	40.4	38.4	35.3	32.6	29.8	27.4
525	39.3	39.3	39.3	39.3	38.8	35.5	32.7	29.8	27.4	24.9	22.7
550	38.3	38.3	38.3	36.1	33.2	30.2	27.6	25.0	22.8	20.5	18.5
575	37.2	37.1	34.0	30.9	28.2	25.5	23.1	20.8	18.7	16.7	14.9
600	35.8	32.0	29.1	26.2	23.8	21.3	19.2	17.0	15.2	13.3	11.8
625	33.4	27.3	24.7	22.1	19.9	17.6	15.7	13.7	12.1	10.4	9.0
650	28.8	23.2	20.8	18.4	16.4	14.3	12.6	10.9	9.4	7.9	6.7

備考：許容時間(hr)を定めるべき応力値 (kg/mm^2) が当該温度 (°C) における表中の応力値よりも小さい場合は、表15を用いて設計応力強さを定めることができる。

(6) 設計引張強さ

表 6 設計引張強さ S_u (kg/mm^2)

温度 $^{\circ}\text{C}$	316FR
-30 ~40	53.0
75	49.9
100	48.5
150	45.1
200	44.9
225	44.5
250	44.1
275	43.8
300	43.5
325	43.5
350	43.5
375	43.5
400	43.5
425	43.5
450	42.5
475	41.4
500	40.4
525	39.3
550	38.3
575	37.2
600	35.8
625	34.2
650	32.1

(7) 設計緩和応力強さ

表 7 設計緩和応力強さ S_r (kg/mm^2)

時間hr 温度℃	1	10	30	100	300	1,000	3,000	10,000	30,000	100,000	300,000
425	16.6	16.6	16.6	16.6	16.6	16.6	16.6	16.6	16.6	16.6	16.6
450	16.4	16.4	16.3	16.3	16.3	16.3	16.3	16.3	16.3	16.2	15.9
475	16.0	16.0	16.0	16.0	16.0	16.0	16.0	15.9	15.6	15.0	14.2
500	15.9	15.9	15.9	15.9	15.8	15.7	15.4	14.7	13.8	12.8	12.0
525	15.6	15.6	15.6	15.5	15.2	14.5	13.5	12.3	11.2	10.4	9.7
550	15.4	15.3	15.1	14.5	13.6	12.2	10.9	9.6	8.8	8.0	7.2
575	15.2	14.6	13.7	12.3	10.9	9.4	8.2	7.2	6.4	5.6	4.8
600	14.6	12.7	11.2	9.6	8.2	6.8	5.8	5.0	4.3	3.5	——
625	13.1	10.0	8.5	7.0	5.7	4.6	3.7	3.0	——	——	——
650	10.7	7.4	6.0	4.7	3.6	——	——	——	——	——	——

(8) 縦弾性係数

表 8 縦弾性係数 E (kg/mm^2)

温 度 $^{\circ}\text{C}$	316FR
375	17400
400	17200
425	17000
450	16700
475	16400
500	16200
525	15900
550	15700
575	15400
600	15200
625	14900
650	14700

備考：425℃まで告示と同一。650℃まで構造設計指針と同一。

(9) ポアソン比

表 9 ポアソン比 ν

温 度 $^{\circ}\text{C}$	316FR
375	0.300
400	0.300
425	0.300
450	0.300
475	0.301
500	0.302
525	0.304
550	0.306
575	0.308
600	0.310
625	0.312
650	0.314

備考：650℃まで構造設計指針と同一。

(10) 熱膨張係数

表10 熱膨張係数 α (10^{-6} mm/mm/°C)

温度 °C	瞬時熱膨張係数 α_A	平均熱膨張係数 α_B
20	15.15	—————
50	15.65	15.45
75	16.07	15.63
100	16.48	15.82
125	16.86	16.00
150	17.22	16.18
175	17.55	16.37
200	17.85	16.54
225	18.12	16.72
250	18.36	16.88
275	18.58	17.04
300	18.79	17.20
325	18.99	17.34
350	19.19	17.47
375	19.38	17.58
400	19.57	17.69
425	19.75	17.78
450	19.93	17.89
475	20.11	18.00
500	20.28	18.12
525	20.45	18.23
550	20.60	18.33
575	20.74	18.44
600	20.87	18.54
625	20.99	18.64
650	21.09	18.74

α_A : 瞬時熱膨張係数、 α_B : 室温からその温度までの平均熱膨張係数
備考 : 650°Cまで構造設計指針と同一。

(11) 許容ひずみ範囲 (A)

表11 許容ひずみ範囲 (A) ε_t (mm/mm)

温度℃ 繰返し回数	425	450	475	500	525	550	575	600	625	650
10	0.0500	0.0331	0.0323	0.0316	0.0308	0.0300	0.0291	0.0283	0.0274	0.0265
2×10	0.0362	0.0238	0.0232	0.0225	0.0219	0.0212	0.0205	0.0198	0.0191	0.0184
4×10	0.0268	0.0173	0.0168	0.0163	0.0158	0.0152	0.0147	0.0141	0.0136	0.0130
10 ²	0.0185	0.0116	0.0113	0.0109	0.0105	0.0102	0.00978	0.00940	0.00902	0.00864
2×10 ²	0.0142	0.00891	0.00864	0.00836	0.00807	0.00709	0.00750	0.00721	0.00693	0.00665
4×10 ²	0.0113	0.00705	0.00684	0.00662	0.00641	0.00619	0.00597	0.00576	0.00554	0.00533
10 ³	0.00838	0.00544	0.00529	0.00513	0.00498	0.00482	0.00467	0.00452	0.00436	0.00421
2×10 ³	0.00685	0.00462	0.00450	0.00437	0.00424	0.00411	0.00398	0.00385	0.00372	0.00359
4×10 ³	0.00571	0.00394	0.00383	0.00372	0.00361	0.00350	0.00339	0.00328	0.00317	0.00306
10 ⁴	0.00454	0.00318	0.00310	0.00301	0.00294	0.00283	0.00274	0.00265	0.00256	0.00247
2×10 ⁴	0.00392	0.00271	0.00264	0.00254	0.00249	0.00241	0.00233	0.00226	0.00218	0.00211
4×10 ⁴	0.00342	0.00231	0.00225	0.00219	0.00213	0.00207	0.00200	0.00194	0.00188	0.00182
10 ⁵	0.00288	0.00193	0.00189	0.00184	0.00179	0.00174	0.00170	0.00165	0.00160	0.00155
2×10 ⁵	0.00254	0.00172	0.00169	0.00165	0.00161	0.00157	0.00153	0.00149	0.00144	0.00141
4×10 ⁵	0.00277	0.00156	0.00153	0.00150	0.00146	0.00143	0.00139	0.00136	0.00132	0.00129
10 ⁶	0.00200	0.00140	0.00137	0.00134	0.00131	0.00128	0.00125	0.00122	0.00119	0.00116

備考：本表は繰返しひずみ速度が 10^{-3} mm/mm/sec 以上の場合に適用することができる。

650℃まで構造設計指針と同一。

(12) 許容ひずみ範囲 (B)

表12 許容ひずみ範囲 (B) ε_t (mm/mm)

温度℃ 繰返し回数	425	450	475	500	525	550	575	600	625	650
10	0.0500	0.0265	0.0252	0.0238	0.0224	0.0210	0.0196	0.0182	0.0168	0.0155
2×10	0.0362	0.0185	0.0174	0.0163	0.0152	0.0142	0.0131	0.0121	0.0111	0.0101
4×10	0.0268	0.0131	0.0123	0.0115	0.0107	0.00987	0.00911	0.00838	0.00769	0.00704
10 ²	0.0185	0.00875	0.00819	0.00765	0.00712	0.00662	0.00613	0.00568	0.00525	0.00485
2×10 ²	0.0142	0.00676	0.00635	0.00595	0.00556	0.00519	0.00484	0.00451	0.00420	0.00391
4×10 ²	0.0113	0.00544	0.00513	0.00483	0.00454	0.00426	0.00399	0.00374	0.00351	0.00328
10 ³	0.00838	0.00431	0.00409	0.00387	0.00366	0.00344	0.00323	0.00303	0.00284	0.00266
2×10 ³	0.00685	0.00367	0.00348	0.00330	0.00311	0.00293	0.00275	0.00258	0.00242	0.00226
4×10 ³	0.00571	0.00313	0.00297	0.00281	0.00265	0.00249	0.00234	0.00219	0.00206	0.00193
10 ⁴	0.00454	0.00253	0.00240	0.00227	0.00214	0.00201	0.00189	0.00178	0.00167	0.00156
2×10 ⁴	0.00392	0.00216	0.00204	0.00193	0.00183	0.00173	0.00163	0.00154	0.00145	0.00137
4×10 ⁴	0.00342	0.00187	0.00178	0.00169	0.00160	0.00152	0.00144	0.00136	0.00129	0.00122
10 ⁵	0.00288	0.00160	0.00153	0.00146	0.00139	0.00132	0.00126	0.00120	0.00113	0.00108
2×10 ⁵	0.00254	0.00145	0.00138	0.00132	0.00127	0.00121	0.00115	0.00110	0.00105	0.000996
4×10 ⁵	0.00277	0.00133	0.00127	0.00122	0.00117	0.00112	0.00107	0.00102	0.000974	0.000929
10 ⁶	0.00200	0.00120	0.00115	0.00111	0.00106	0.00102	0.000978	0.000937	0.000897	0.000858

備考：本表は繰返しひずみ速度が 10^{-3} mm/mm/sec 以上の場合に適用することができる。

650℃まで構造設計指針と同一。

(13) 許容ひずみ範囲 (C)

表13 許容ひずみ範囲 (C) ε_t (mm/mm)

温度℃ 繰返し回数	425	450	475	500	525	550	575	600	625	650
10	0.0500	0.0227	0.0210	0.0194	0.0178	0.0162	0.0146	0.0131	0.0117	0.0104
2×10	0.0362	0.0155	0.0142	0.0130	0.0118	0.0107	0.00958	0.00857	0.00767	0.00679
4×10	0.0268	0.0109	0.00995	0.00907	0.00823	0.00744	0.00671	0.00604	0.00543	0.00488
10 ²	0.0185	0.00730	0.00670	0.00614	0.00561	0.00512	0.00467	0.00425	0.00388	0.00354
2×10 ²	0.0142	0.00571	0.00527	0.00486	0.00448	0.00412	0.00379	0.00348	0.00320	0.00295
4×10 ²	0.0113	0.00467	0.00434	0.00402	0.00373	0.00345	0.00320	0.00296	0.00273	0.00251
10 ³	0.00838	0.00377	0.00350	0.00325	0.00302	0.00280	0.00259	0.00240	0.00221	0.00203
2×10 ³	0.00685	0.00321	0.00298	0.00277	0.00257	0.00238	0.00221	0.00204	0.00188	0.00173
4×10 ³	0.00571	0.00273	0.00254	0.00236	0.00219	0.00203	0.00188	0.00174	0.00160	0.00147
10 ⁴	0.00454	0.00220	0.00205	0.00191	0.00177	0.00164	0.00152	0.00141	0.00131	0.00122
2×10 ⁴	0.00392	0.00188	0.00176	0.00165	0.00154	0.00144	0.00134	0.00125	0.00117	0.00109
4×10 ⁴	0.00342	0.00165	0.00155	0.00146	0.00137	0.00128	0.00120	0.00113	0.00105	0.000987
10 ⁵	0.00288	0.00143	0.00135	0.00127	0.00120	0.00113	0.00106	0.00100	0.000942	0.000887
2×10 ⁵	0.00254	0.00130	0.00123	0.00117	0.00110	0.00104	0.000985	0.000930	0.000877	0.000828
4×10 ⁵	0.00277	0.00120	0.00114	0.00108	0.00103	0.000972	0.000920	0.000871	0.000823	0.000779
10 ⁶	0.00200	0.00110	0.00105	0.000994	0.000944	0.000897	0.000851	0.000807	0.000765	0.000726

650℃まで構造設計指針と同一。

(14) 許容引張応力

表14 許容引張応力 S^* (kg/mm²)

温度 ℃	316FR 鋼
-30 ~40	13.2
75	13.2
100	13.2
150	12.9
200	12.9
225	12.7
250	12.7
275	12.5
300	12.1
325	11.9
350	11.7
375	11.4
400	11.3
425	11.2
450	10.6
475	10.4
500	10.1
525	9.8
550	9.6
575	9.3
600	9.0
625	8.6
650	8.0

備考：550℃まで告示と同一。

(15) 1次および2次応力に関する緩和クリープ損傷係数 D^*

1次および2次応力に関する緩和クリープ損傷係数 D_0^* および D^* は、以下により定めることができる。

$$D_0^* = D^*$$

D^* は、温度 T (°C)、時間 t^* (hr) およびクリープ損傷係数 D_{C1} に対して、図13に定める値。

(16) ピーク応力に関する緩和クリープ損傷係数 D^{**}

ピーク応力に関する緩和クリープ損傷係数 D^{**} は、次の(イ)又は(ロ)により定めることができる。

(イ) 構造設計指針に定めるひずみ ϵ_t が次式を満足する場合は $D^{**} = 0$ とする。

$$\epsilon_t \leq \max \left[3\bar{S}_m/E, 2S_g/E \right]$$

ここで、

$3\bar{S}_m$: クリープ温度域におけるシェイクダウン基準であって、構造設計指針に定めるところによる。

S_g : クリープ損傷 D_{C1} を定める応力水準であって、構造設計指針に定めるところによる。

E : 表 8 に定める縦弾性係数。

(ロ) ϵ_t が上式を満たさない場合は、次により定める。

温度 T 、時間 t^* 、およびクリープ損傷係数 D_{C1} に対して図14に定める値。

ここで、

T : 考えている評価点の金属履歴温度に基づき定める温度 (°C) であって、構造設計指針に定めるところによる。

t^* : 高温使用時間 (hr) であって、構造設計指針に定めるところによる。

D_{C1} : クリープ損傷係数であって、構造設計指針に定めるところによる。

(17) 液体ナトリウム接液面の腐れ代

液体ナトリウムに接液する部材にあっては、接液面に次の計算式により定める腐れ代 a (mm) をとるものとする。

$$a = NR_D + \sum_i \frac{n_i}{8760} R_i$$

N : 総使用時間 (yr)

R_D : 最高使用酸素濃度 C_{00} および最高使用温度に対して定める腐食速度 (mm/yr)

n_i : 温度 T_i において C_{00} を越える酸素濃度 C_{0i} である状態の持続時間 (hr)

R_i : 酸素濃度 C_{0i} および温度 T_i に対して定める腐食速度 (mm/yr)

R_D および R_i は次の計算式により定める。

$$\log_{10} R = 0.85 + 1.5 \log_{10} C_0 - \frac{3.9 \times 10^3}{T + 273.15}$$

R : 腐食速度 (mm/yr)

C_0 : 酸素濃度 (ppm)

T : 温度 (°C)

上式の適用範囲を次とする。適用下限を下回る条件に対しては、下限値により腐れ代を算定する。

C_0 : 5 ppm ~ 25 ppm

T : 400°C ~ 650°C

(18) 設計応力強さ S_t 、設計クリープ破断応力強さ S_R 、および設計緩和強さ S_r の外挿値表-15 設計応力強さ S_t 、設計クリープ破断応力強さ S_R 、および設計緩和強さ S_r の外挿値

応力強さ 時間 温度	設計応力強さ S_t (kg/mm ²)			設計クリープ破断応力強さ S_R (kg/mm ²)			設計緩和強さ S_r (kg/mm ²)		
	1000000 (hr)	3000000 (hr)	10000000 (hr)	1000000 (hr)	3000000 (hr)	10000000 (hr)	1000000 (hr)	3000000 (hr)	10000000 (hr)
425 °C	15.2	15.2	15.2	42.7	39.9	37.0	16.5	16.3	16.0
450	14.9	14.9	14.9	36.0	33.5	30.8	15.4	14.9	14.5
475	14.6	14.6	14.5	30.1	27.8	25.4	13.5	13.0	12.3
500	14.3	14.1	13.8	25.0	22.9	20.7	11.4	10.6	9.3
525	13.5	12.4	11.1	20.5	18.6	16.6	8.7	7.6	6.4
550	11.0	9.9	8.7	16.5	14.8	13.1	6.1	5.0	3.9
575	8.7	7.7	6.7	13.1	11.6	10.1	3.7	—	—
600	6.8	5.9	5.0	10.2	8.8	7.5	—	—	—
625	4.9	4.1	3.3	7.7	6.5	5.3	—	—	—
650	—	—	—	5.5	4.5	3.4	—	—	—

(19) 大型鍛鋼品の規格引張強さ49 kg/mm² 級の材料強度基準

板厚 130mm以上の鍛鋼品および板に関して、表16-1～表16-4に記載される値を適用することができる。

表16-1 大型鍛鋼品の規格引張強さ
49 kg/mm² 級の最大許容応力強さ
S₀ (kg/mm²)

温度 °C	316FR
-30 ～40	12.3
75	11.5
100	11.2
150	10.4
200	10.4
225	10.3
250	10.2
275	10.1
300	10.0
325	10.0
350	10.0
375	10.0
400	10.0
425	10.0
450	9.8
475	9.6
500	9.4
525	9.1
550	8.8
575	8.6
600	8.3
625	7.9
650	6.3

表16-2 大型鍛鋼品の規格引張強さ
49 kg/mm² 級の設計応力強さ
S_m (kg/mm²)

温度 °C	316FR
-30 ～40	14.0
75	14.0
100	14.0
150	14.0
200	13.5
225	13.2
250	12.8
275	12.4
300	12.1
325	11.9
350	11.6
375	11.4
400	11.2
425	11.1
450	10.9
475	10.7
500	10.6
525	10.4
550	10.3
575	10.2
600	10.0
625	9.8
650	9.6

表16-3 大型鍛鋼品の規格引張強さ
49 kg/mm² 級の設計引張強さ
S_u (kg/mm²)

温度 °C	316FR
-30 ～40	49.0
75	46.1
100	44.8
150	41.7
200	41.5
225	41.1
250	40.8
275	40.5
300	40.2
325	40.2
350	40.2
375	40.2
400	40.2
425	40.2
450	39.3
475	38.3
500	37.4
525	36.3
550	35.4
575	34.4
600	33.1
625	31.6
650	29.7

表16-4 大型鍛鋼品の規格引張強さ49 kg/mm² 級の設計クリープ破断応力強さ S_R (kg/mm²)

時間hr 温度℃	1	10	30	100	300	1,000	3,000	10,000	30,000	100,000	300,000
425	40.2	40.2	40.2	40.2	40.2	40.2	40.2	40.2	40.2	40.2	40.2
450	39.3	39.3	39.3	39.3	39.3	39.3	39.3	39.3	39.3	39.3	39.0
475	38.3	38.3	38.3	38.3	38.3	38.3	38.3	38.3	38.3	35.5	32.9
500	37.4	37.4	37.4	37.4	37.4	37.4	37.4	35.3	32.6	29.8	27.4
525	36.3	36.3	36.3	36.3	36.3	35.5	32.7	29.8	27.4	24.9	22.7
550	35.4	35.4	35.4	35.4	33.2	30.2	27.6	25.0	22.8	20.5	18.5
575	34.4	34.4	34.0	30.9	28.2	25.5	23.1	20.8	18.7	16.7	14.9
600	33.1	32.0	29.1	26.2	23.8	21.3	19.2	17.0	15.2	13.3	11.8
625	31.6	27.3	24.7	22.1	19.9	17.6	15.7	13.7	12.1	10.4	9.0
650	28.8	23.2	20.8	18.4	16.4	14.3	12.6	10.9	9.4	7.9	6.7

備考：許容時間(hr)を定めるべき応力値 (kg/mm²) が当該温度 (°C) における表中の応力値よりも小さい場合は、表15を用いて設計応力強さを定めることができる。

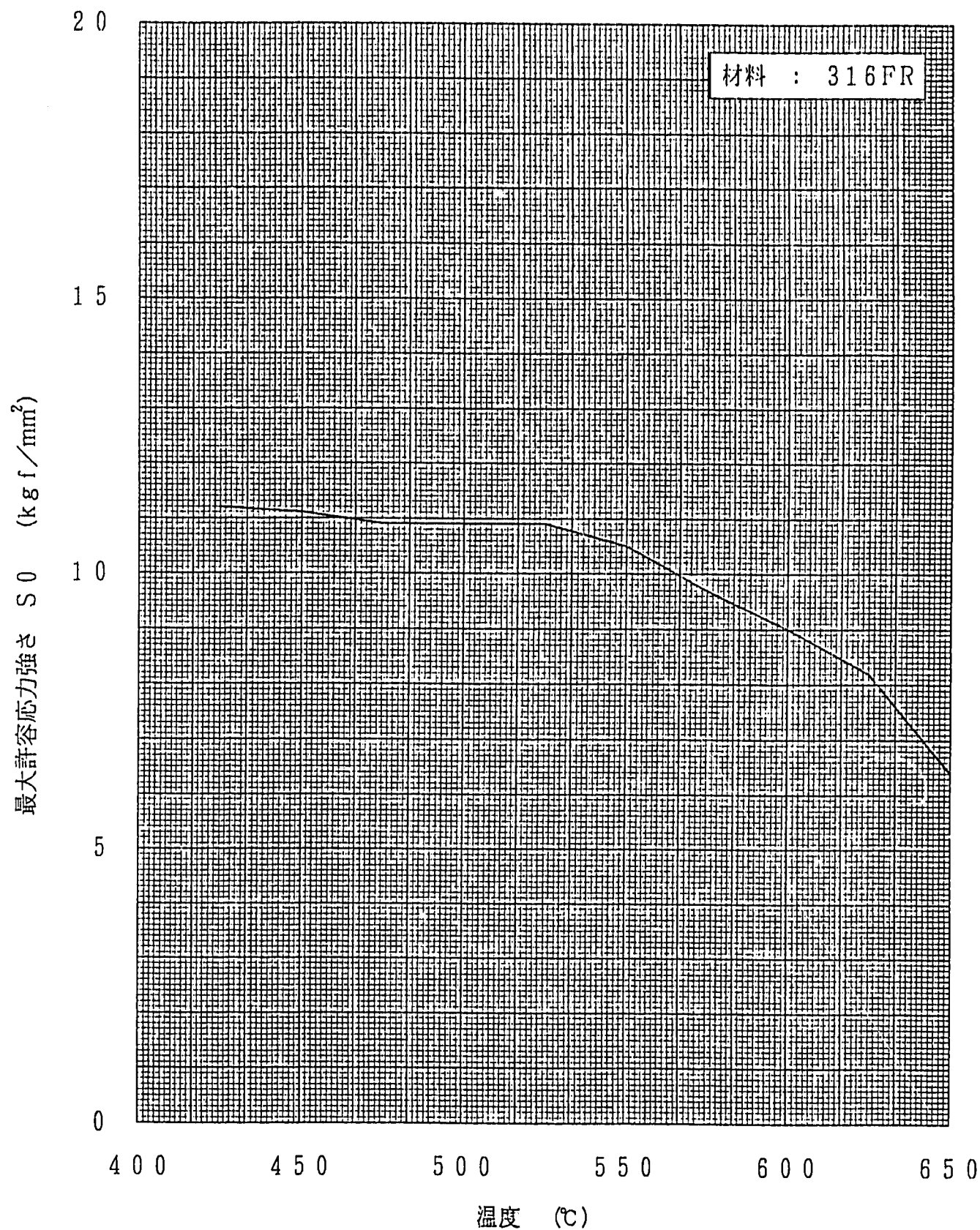


図 / 316FRの最大許容応力強さ S_0 (kg/mm²)

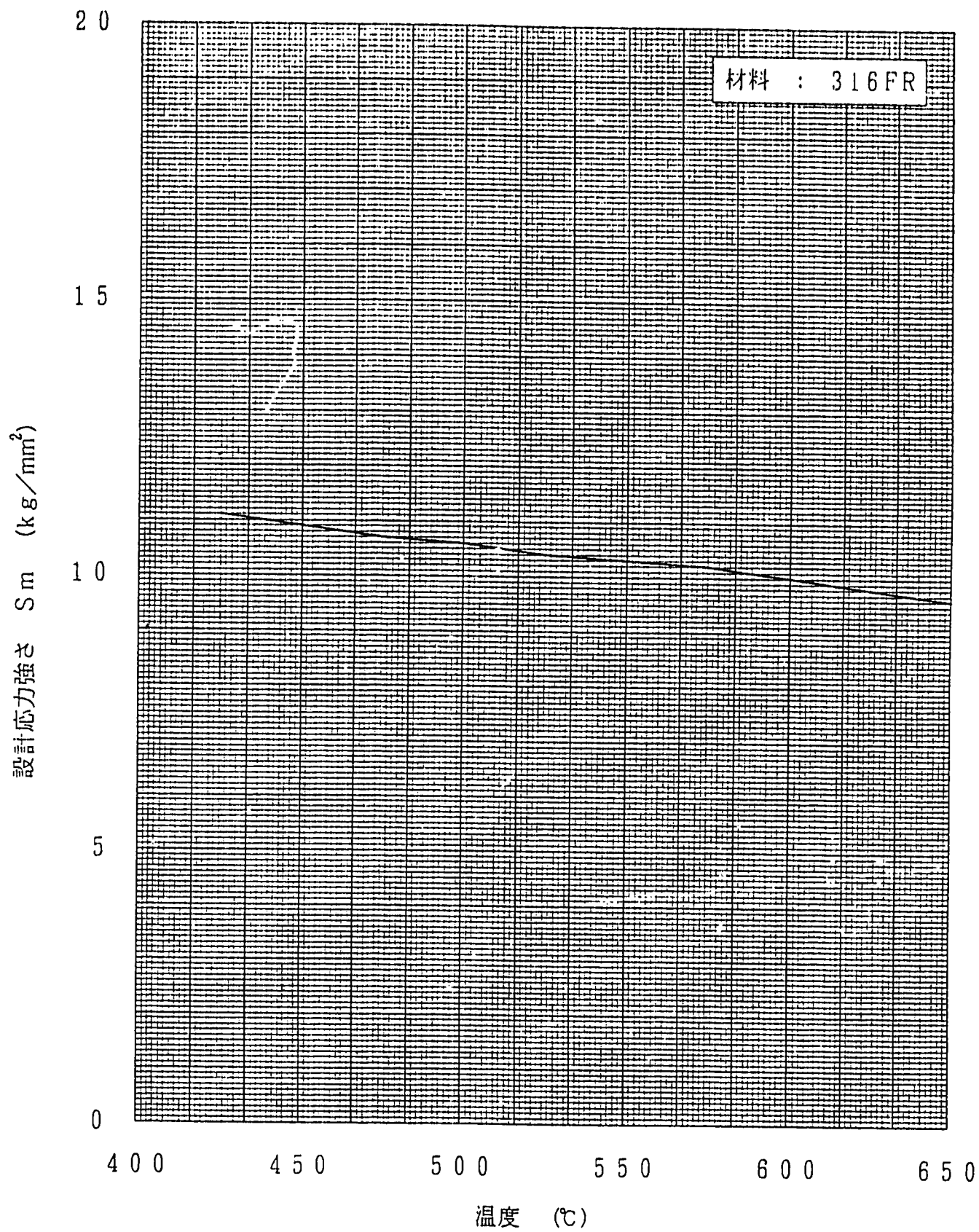


図 2 316FRの設計応力強さ S_m (kg/mm²)

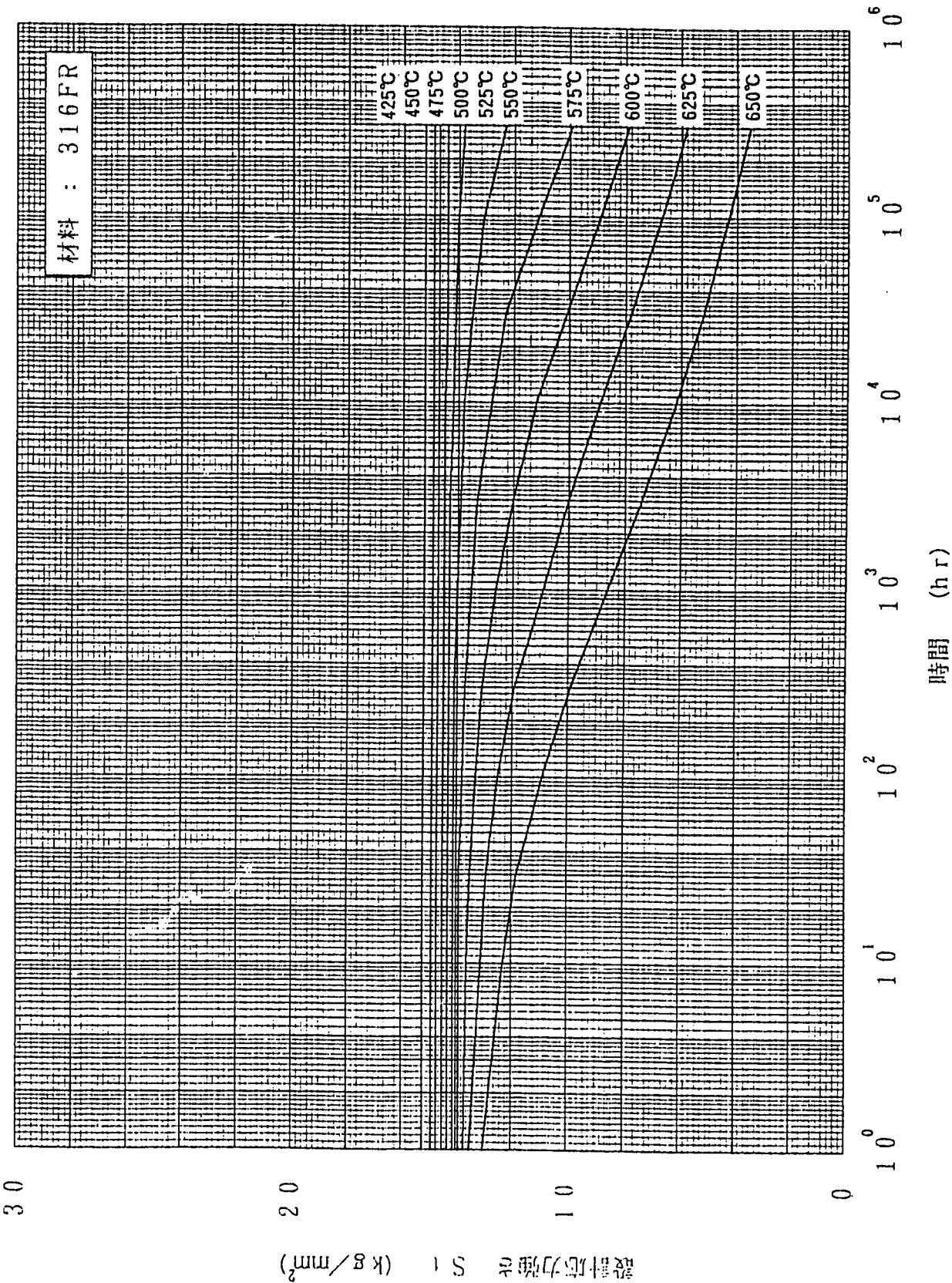


図 3 316FR の設計応力強さ S_1 (kg/mm^2)

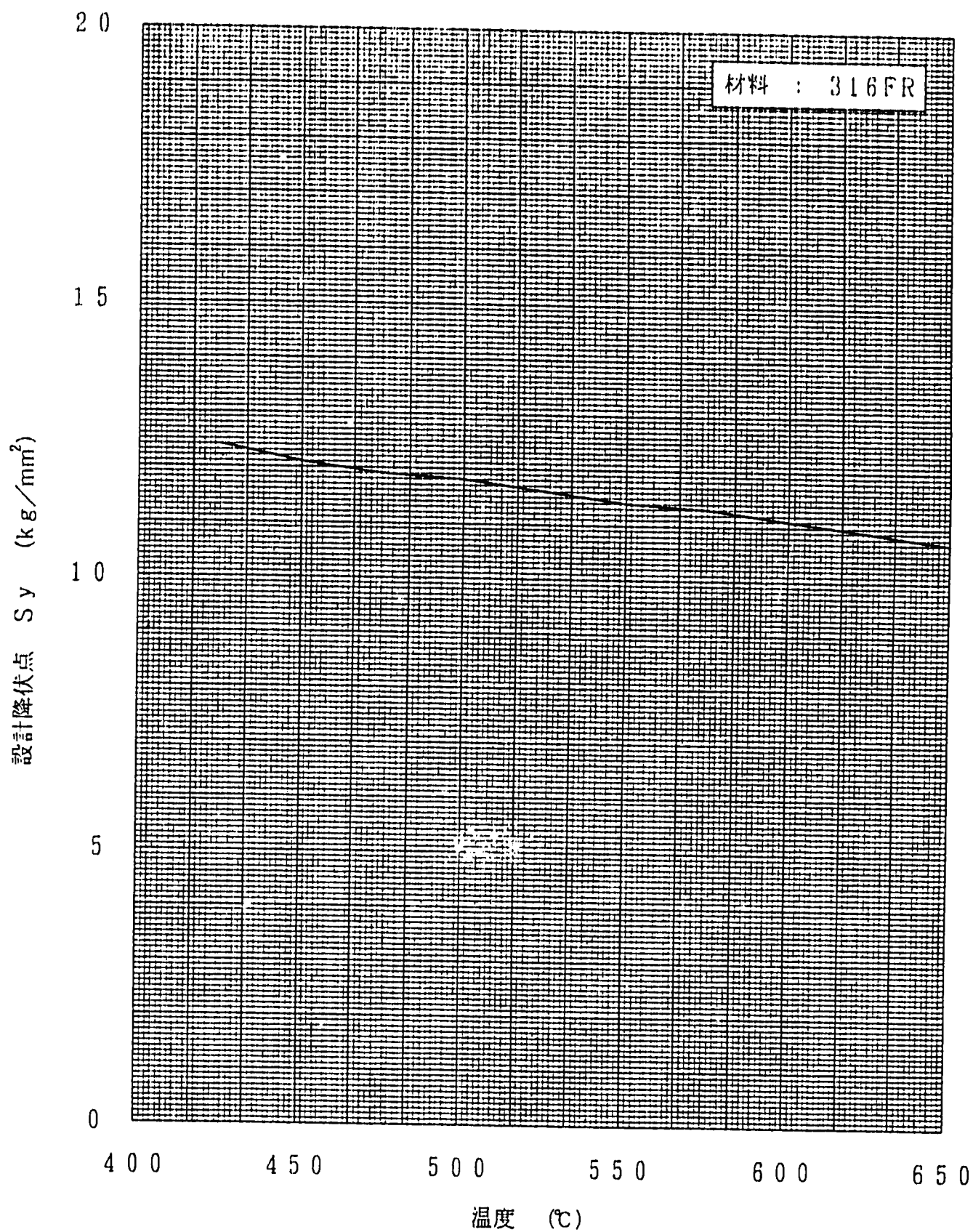


図 4 316FRの設計降伏点 S_y (kg/mm²)

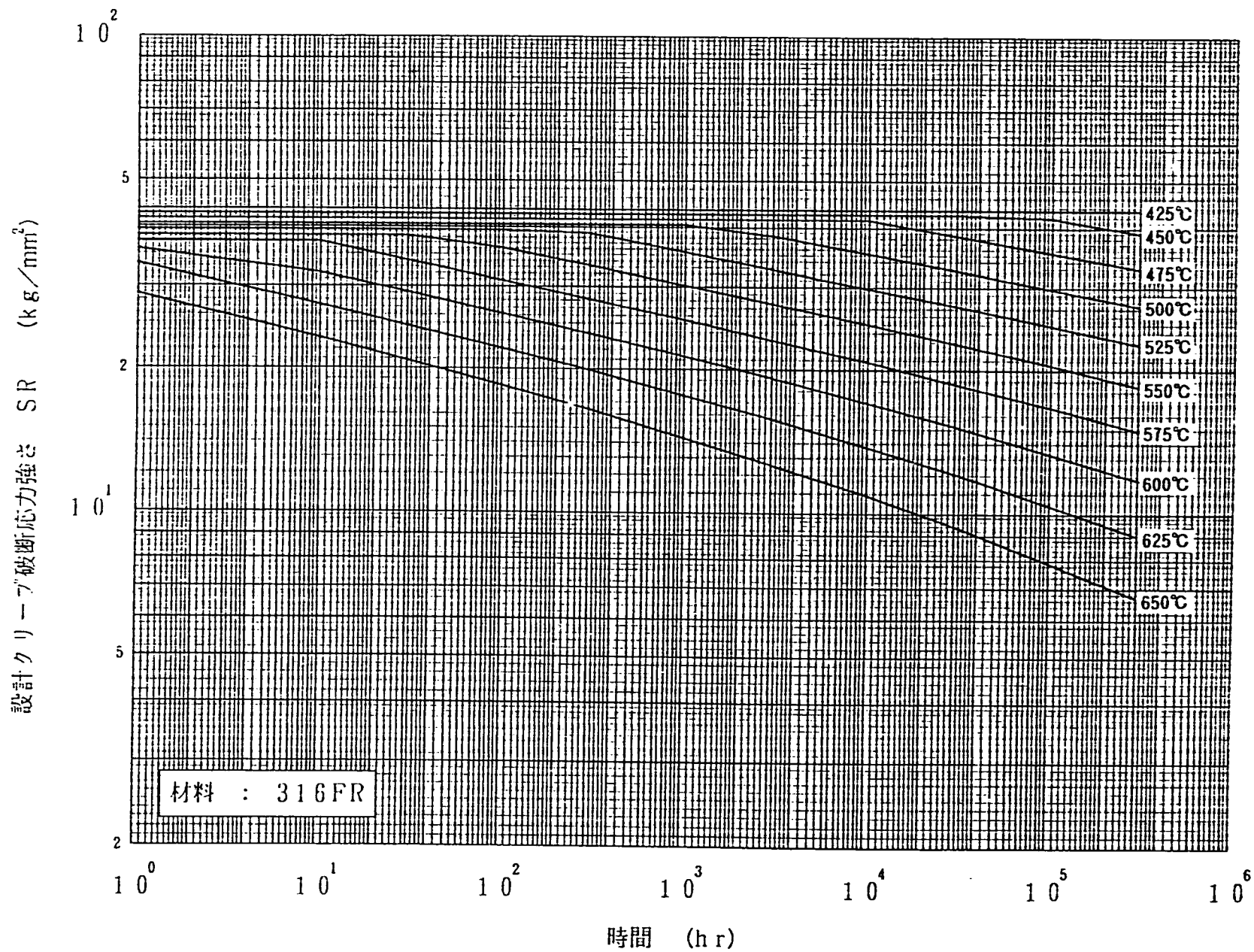
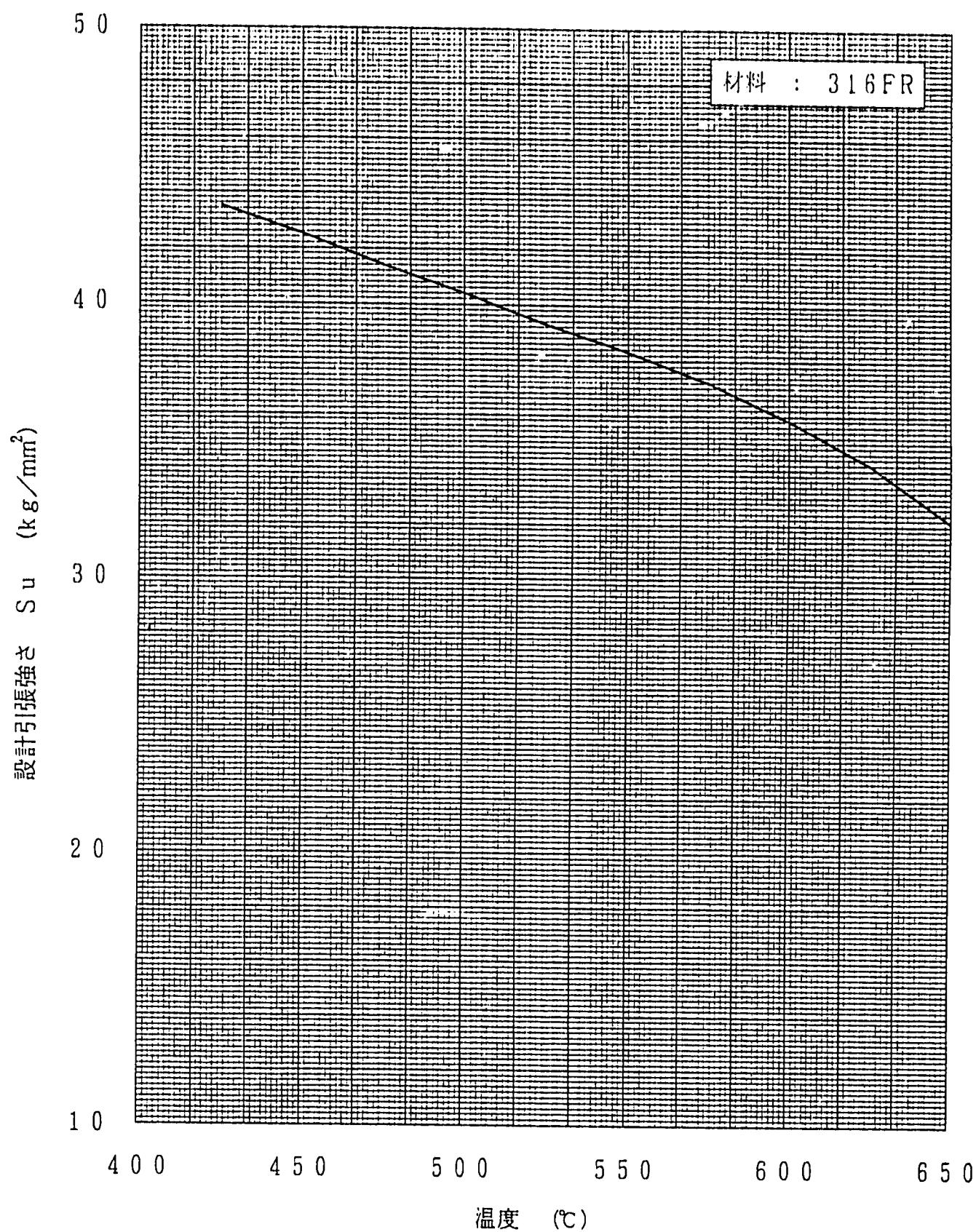


図 5 316FRの設計クリープ破断応力強さ S_R (kg/mm^2)

図 6 316FRの設計引張強さ S_u (kg/mm²)

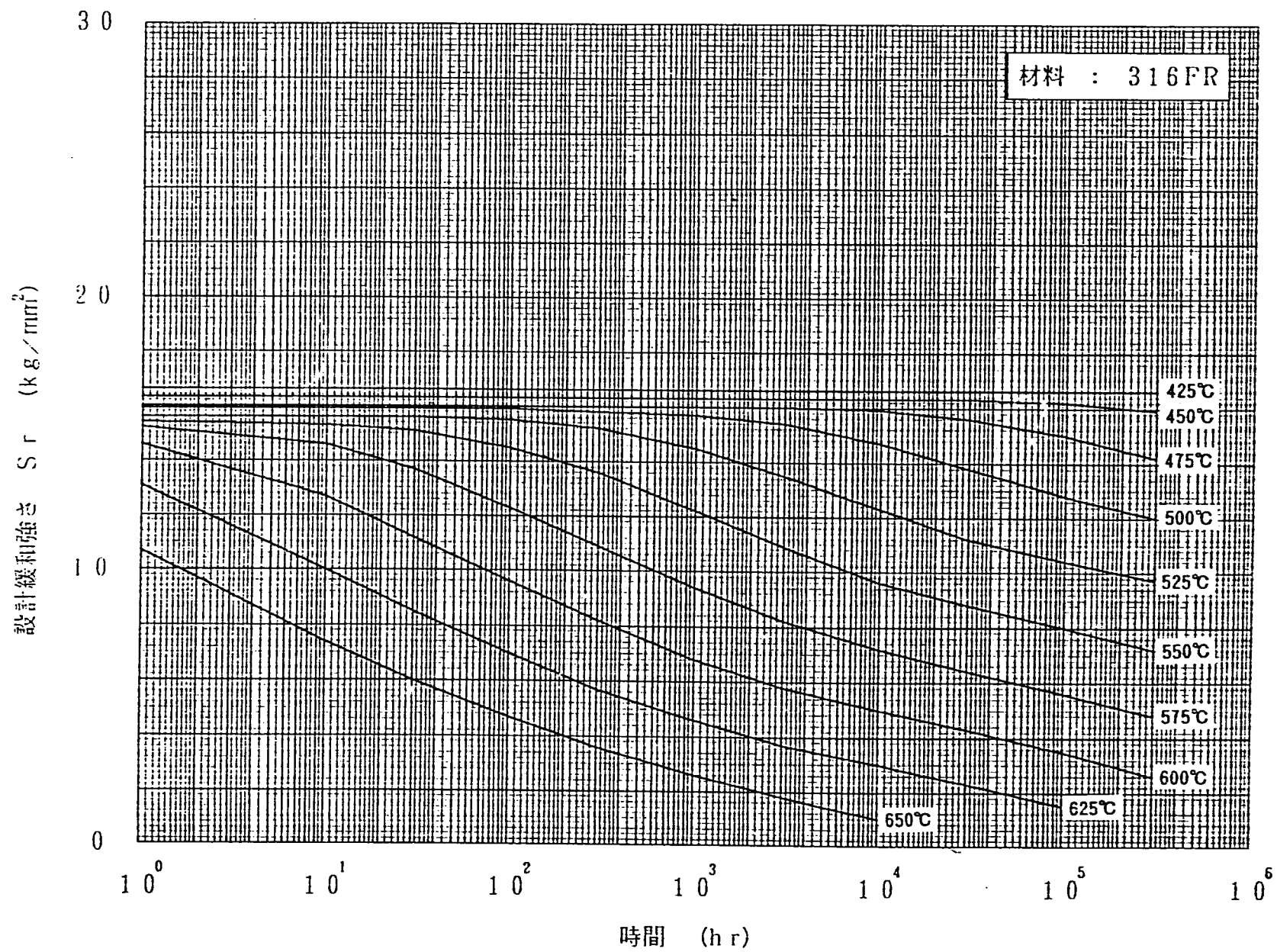


図 7 316FRの設計緩和強さ S_r (kg/mm^2)

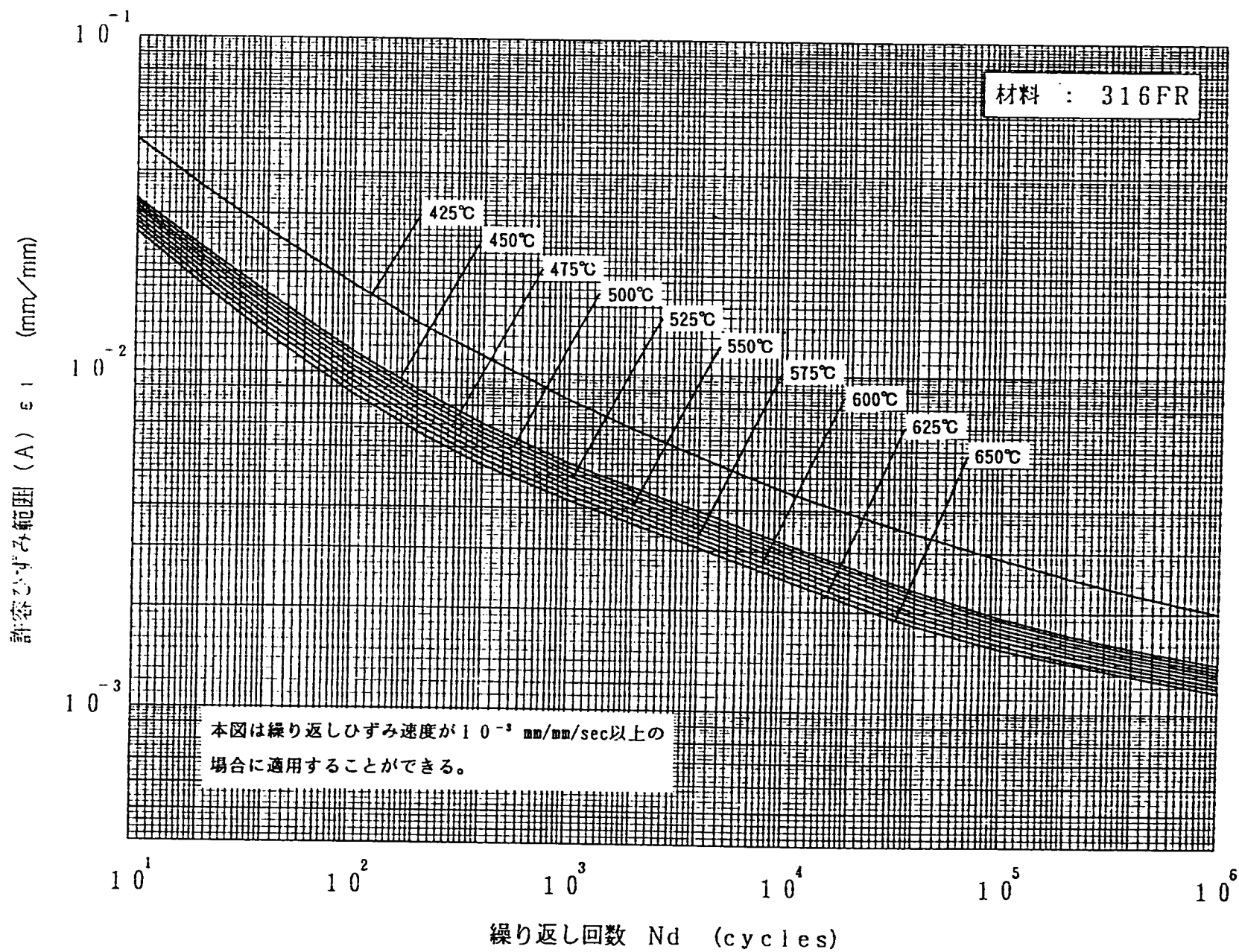


図 8 316FRの許容ひずみ範囲 (A) ε , (mm/mm)

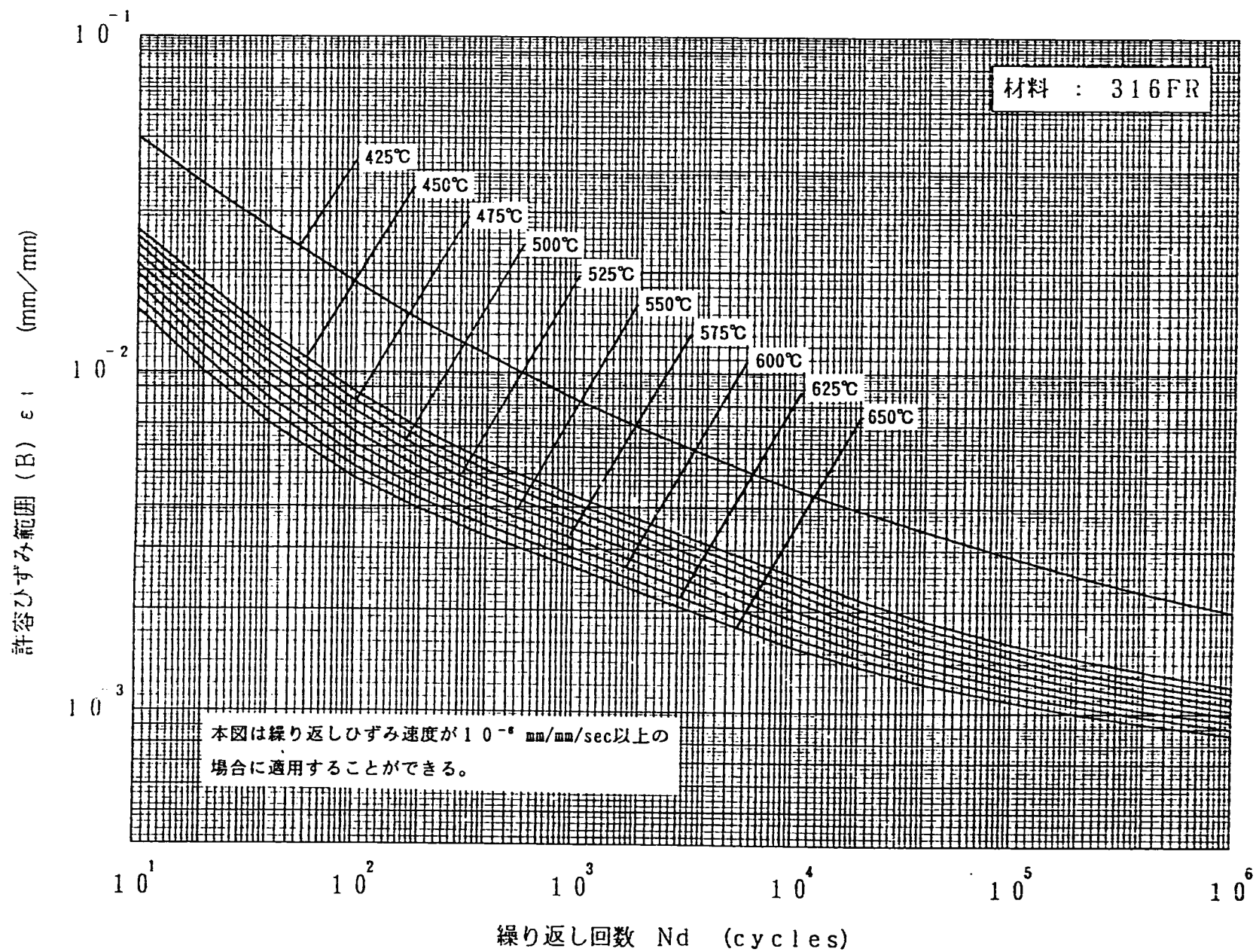


図 9 316FRの許容ひずみ範囲 (B) ε_1 (mm/mm)

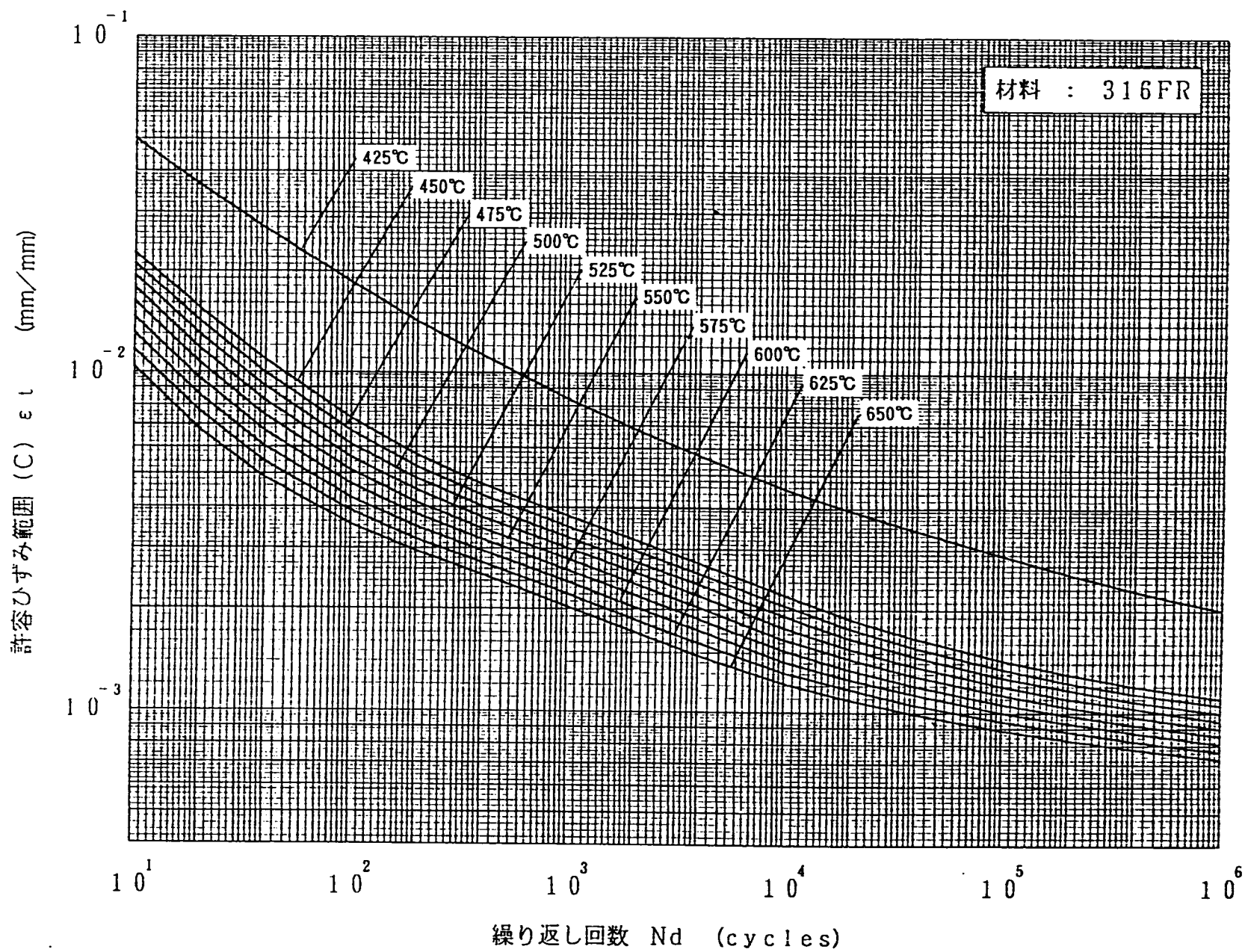


図 10 316FRの許容ひずみ範囲 (C) ε_r (mm/mm)

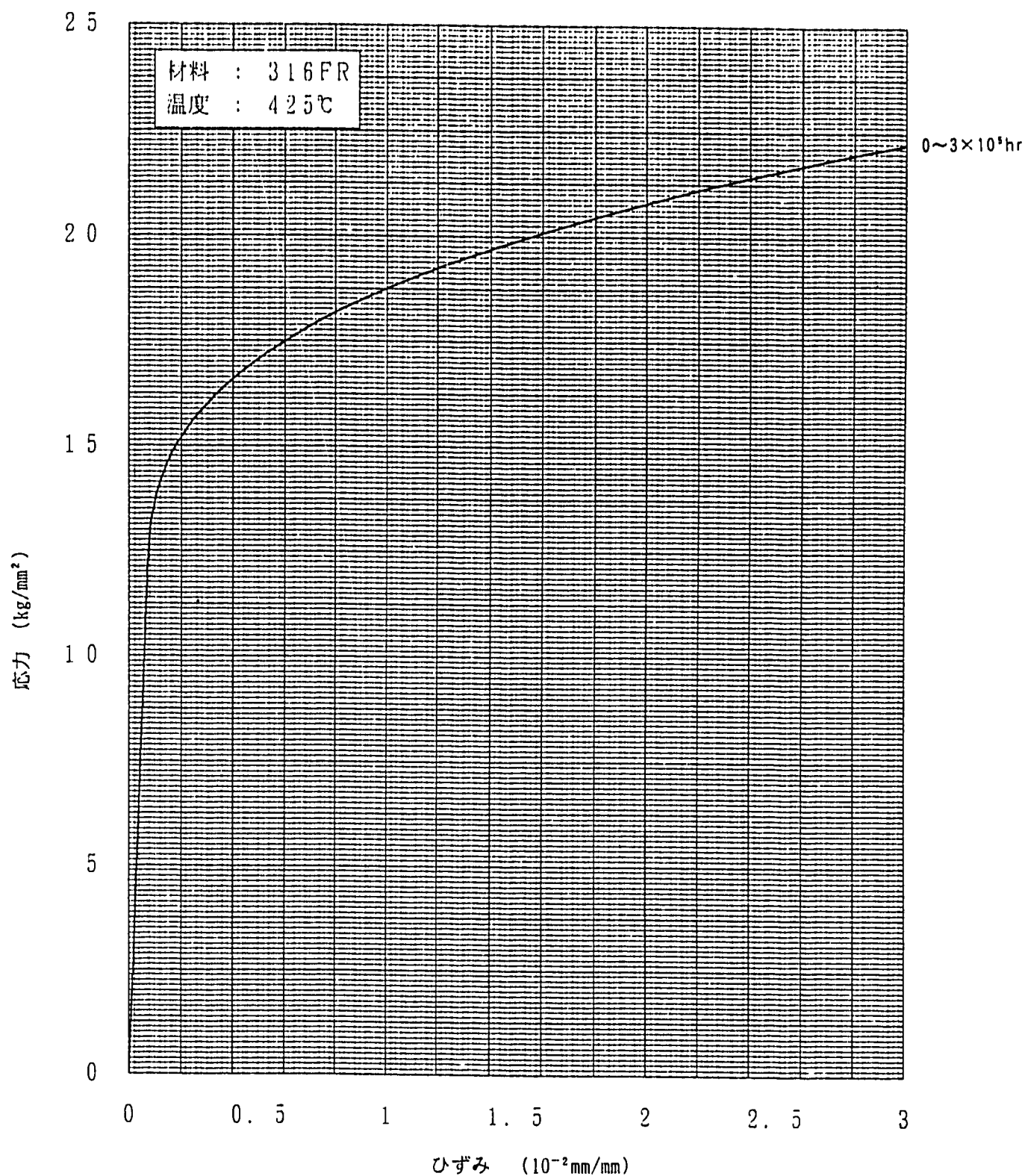


図 11.1 316FRの等時応力ひずみ線図

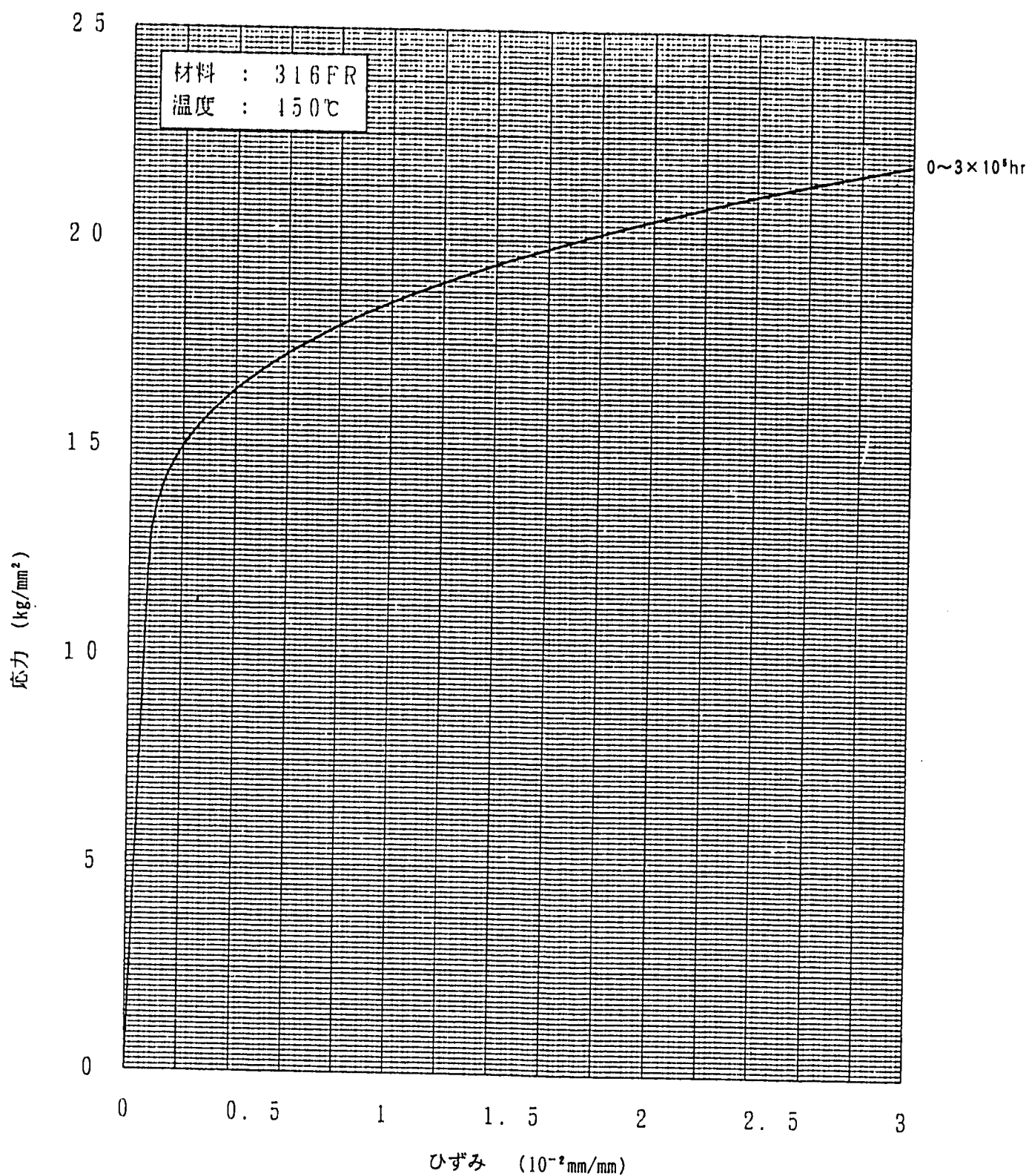


図 11.2 316FRの等時応力ひずみ線図

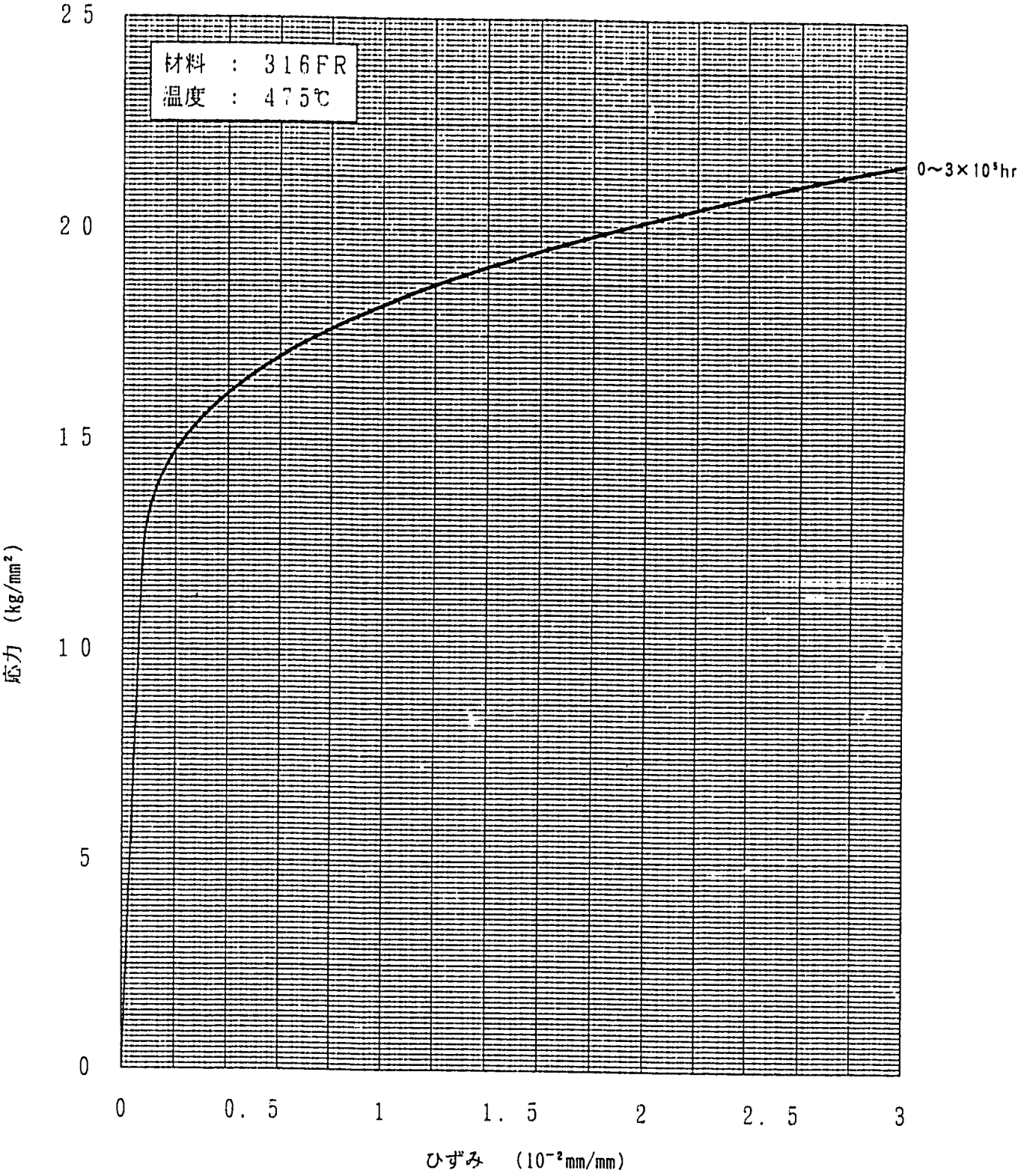


図 11.3 316FRの等時応力ひずみ線図

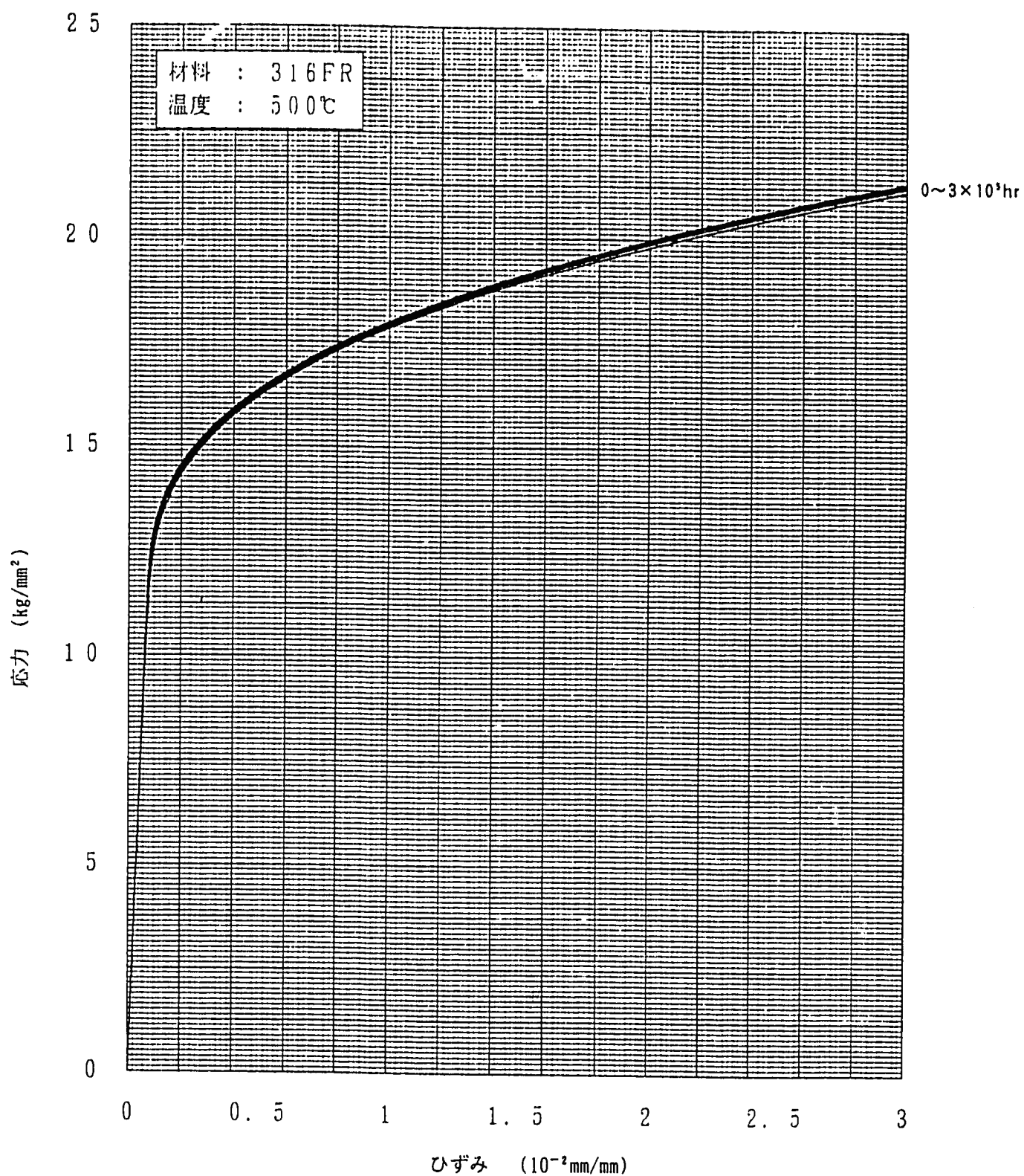


図 11.4 316FRの等時応力ひずみ線図

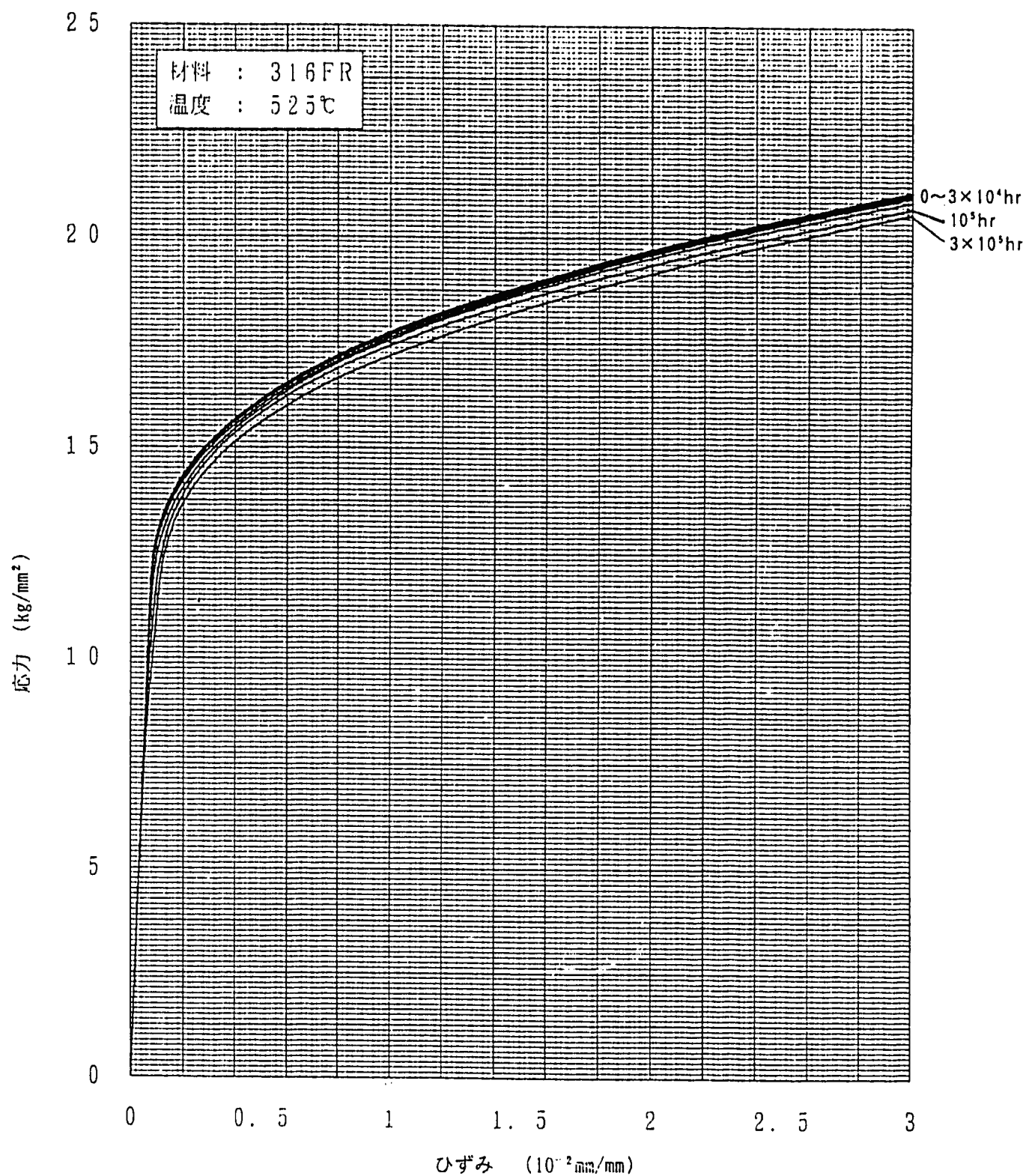


図 11.5 316FRの等時応力ひずみ線図

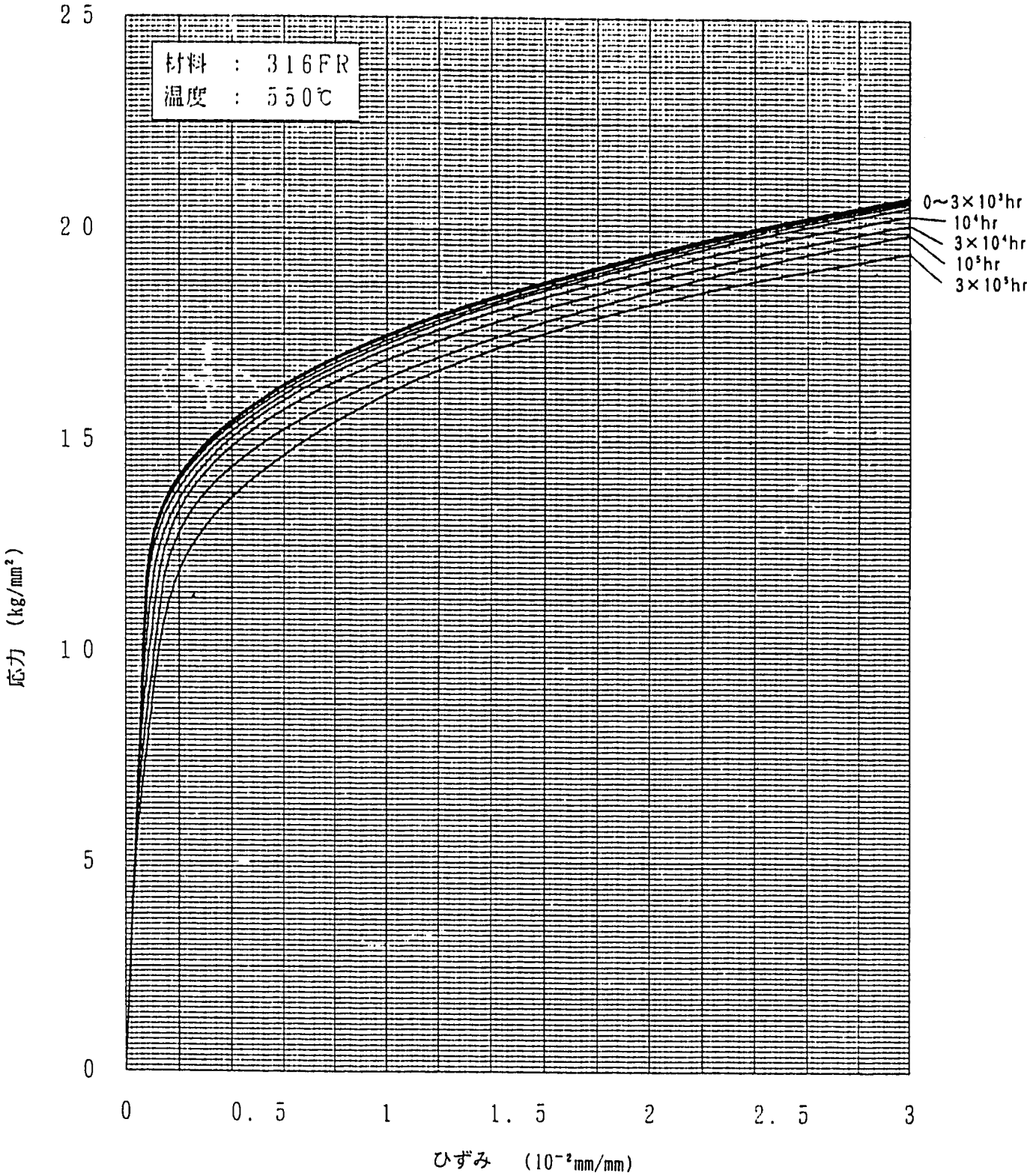


図 11.6 316FRの等時応力ひずみ線図

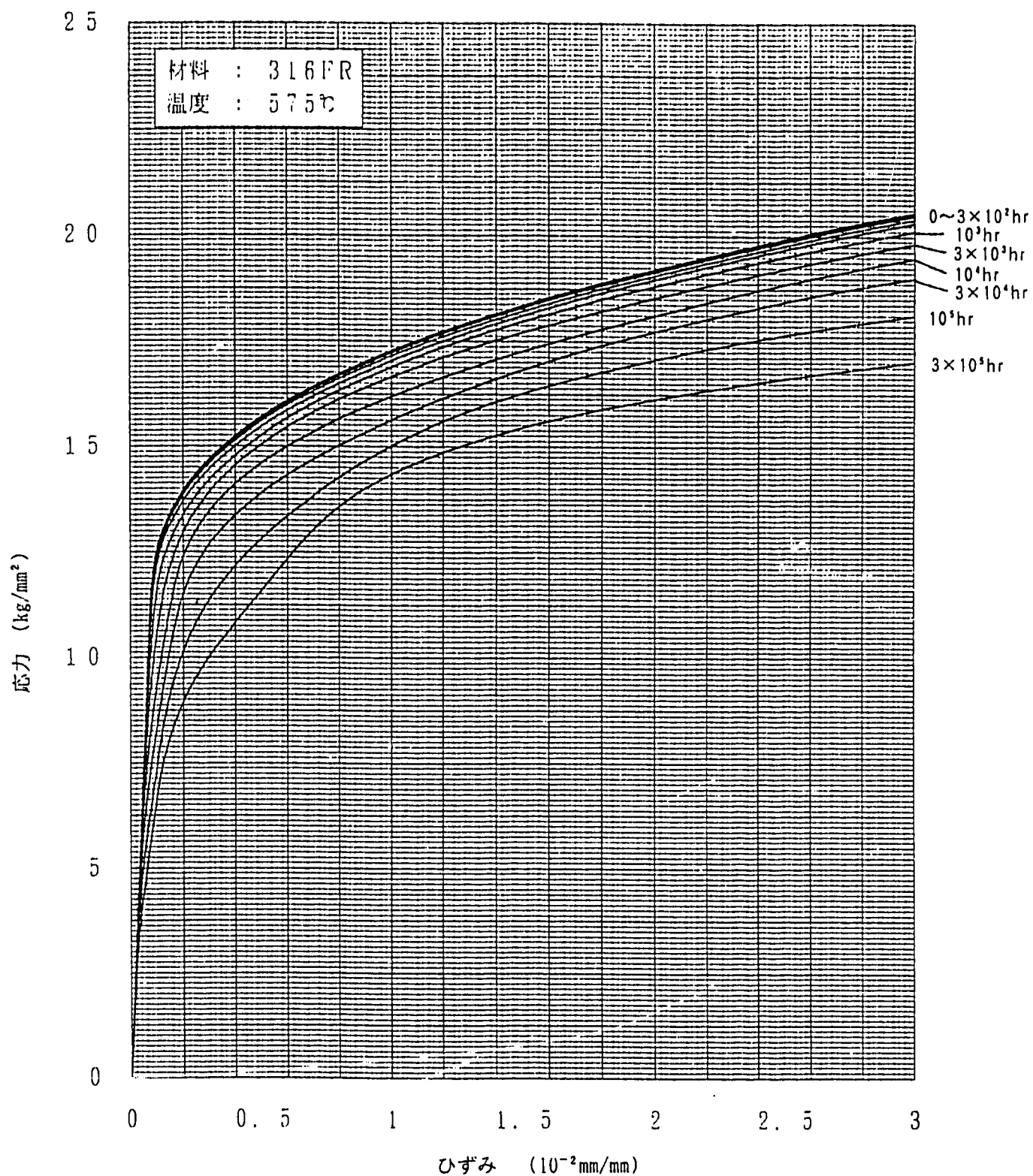


図 11.7 316FRの等時応力ひずみ線図

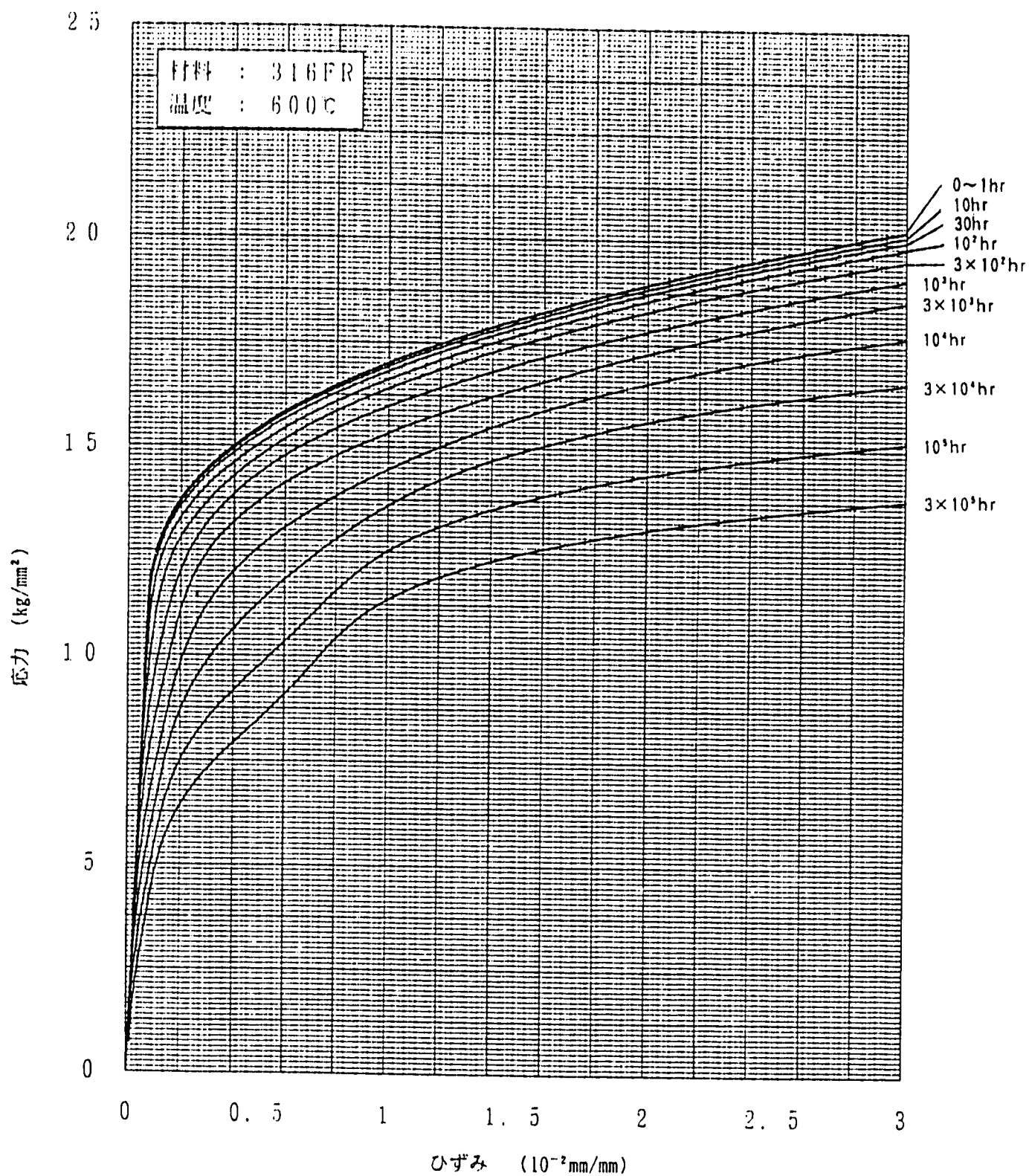


図 11.8 316FRの等時応力ひずみ線図

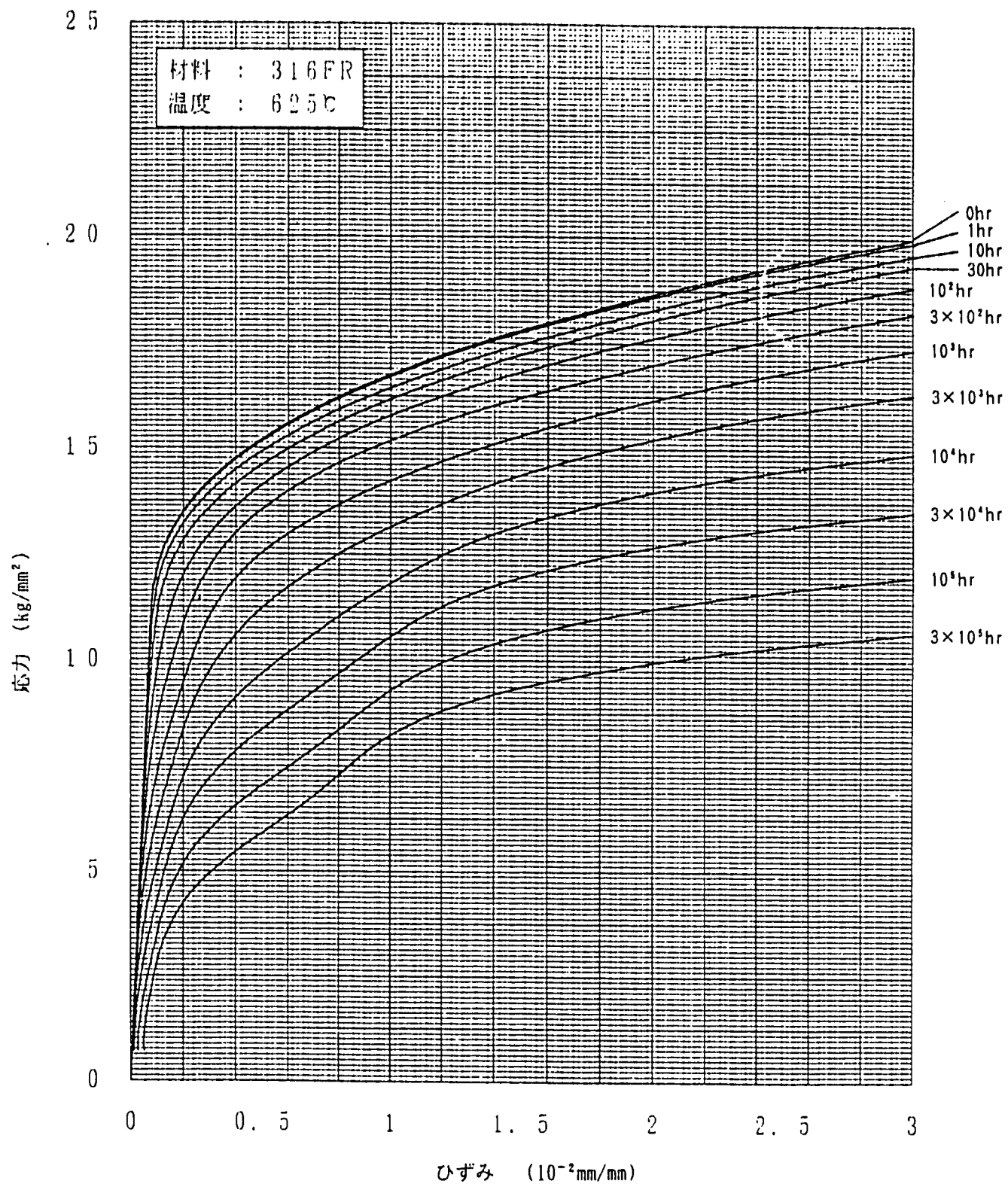


図 11.9 316FRの等時応力ひずみ線図

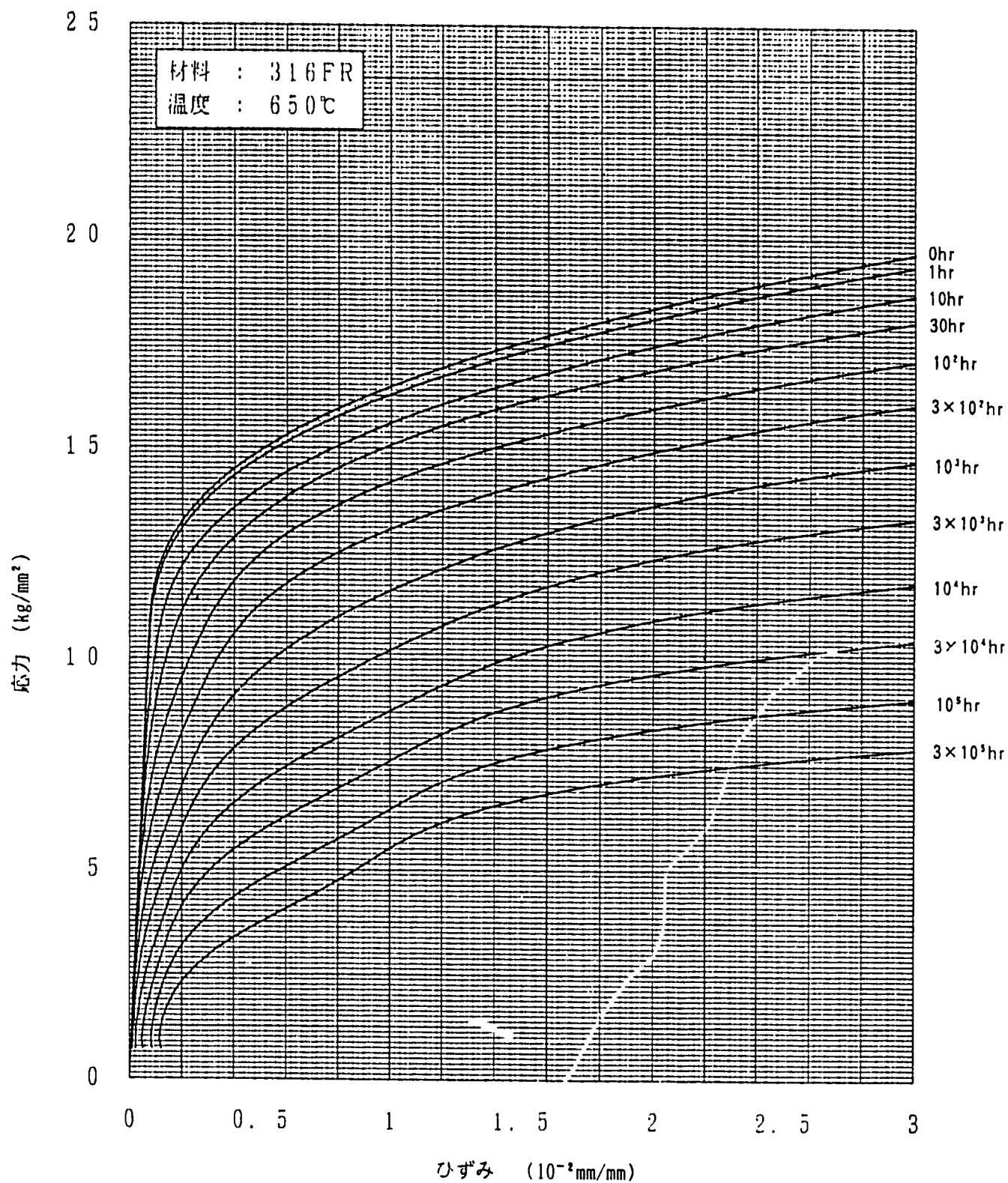


図 11.10 316FRの等時応力ひずみ線図

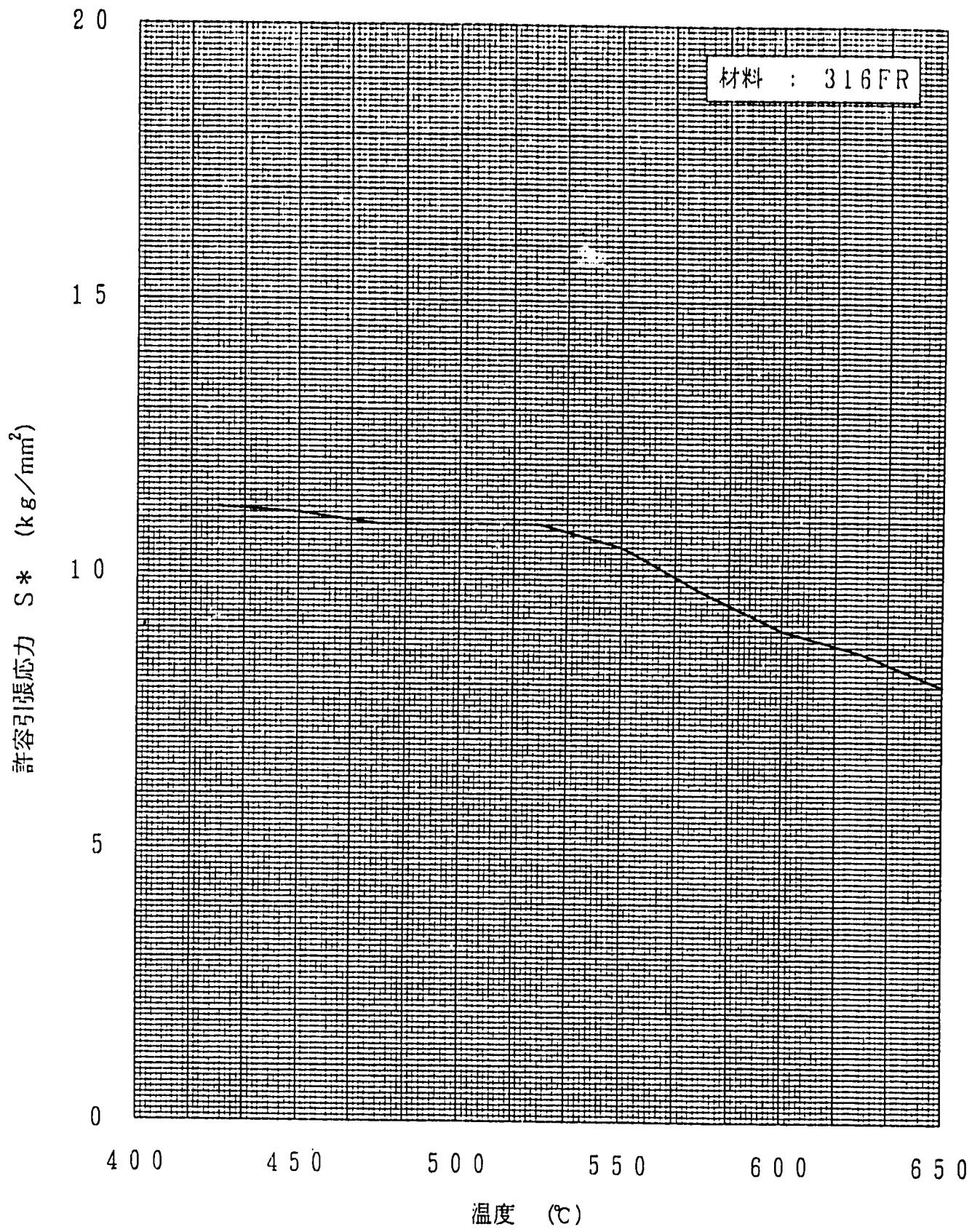


図12 許容引張応力 S^*

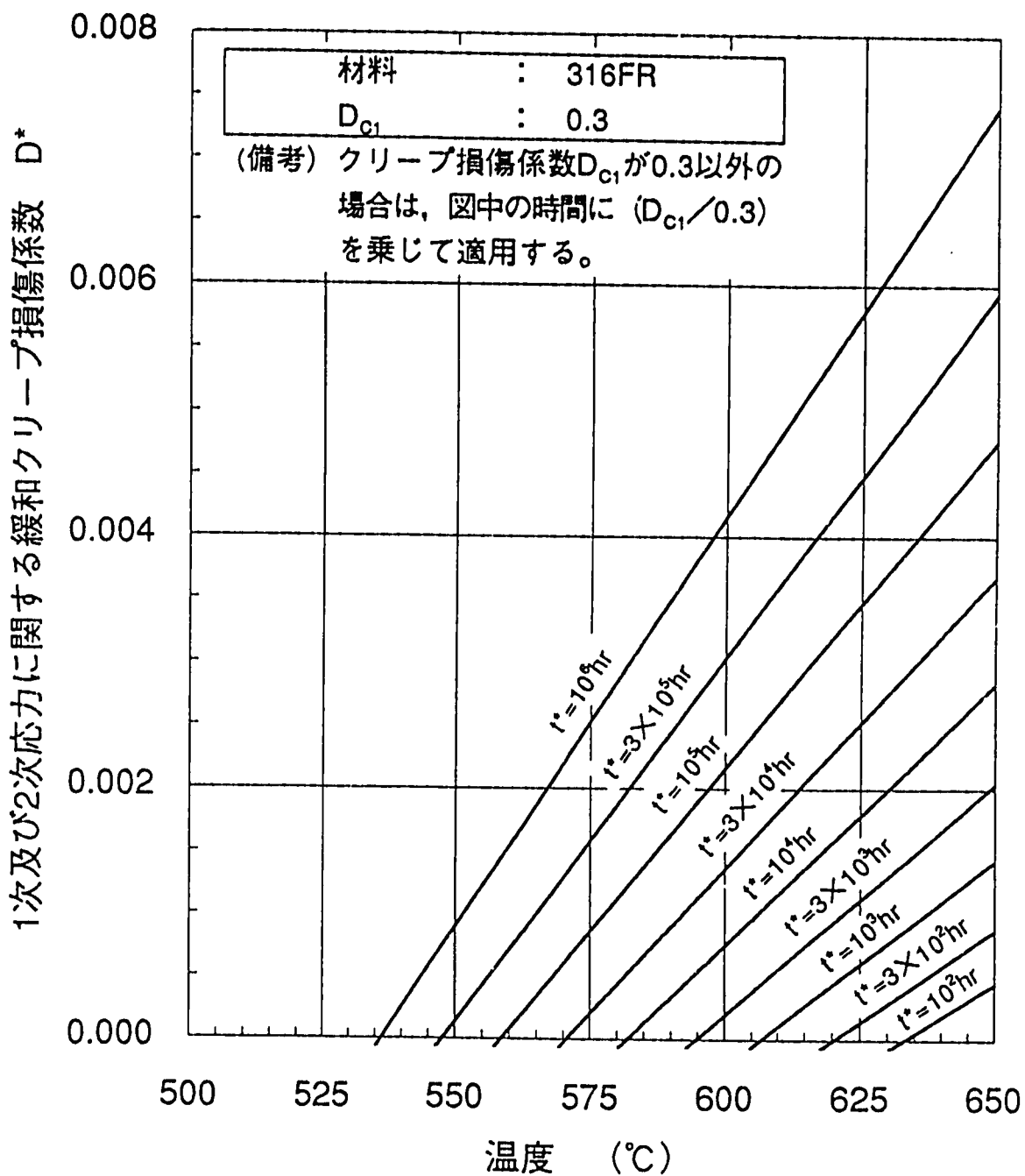


図 13 316FRの1次及び2次応力に関する緩和クリープ損傷係数 D^*

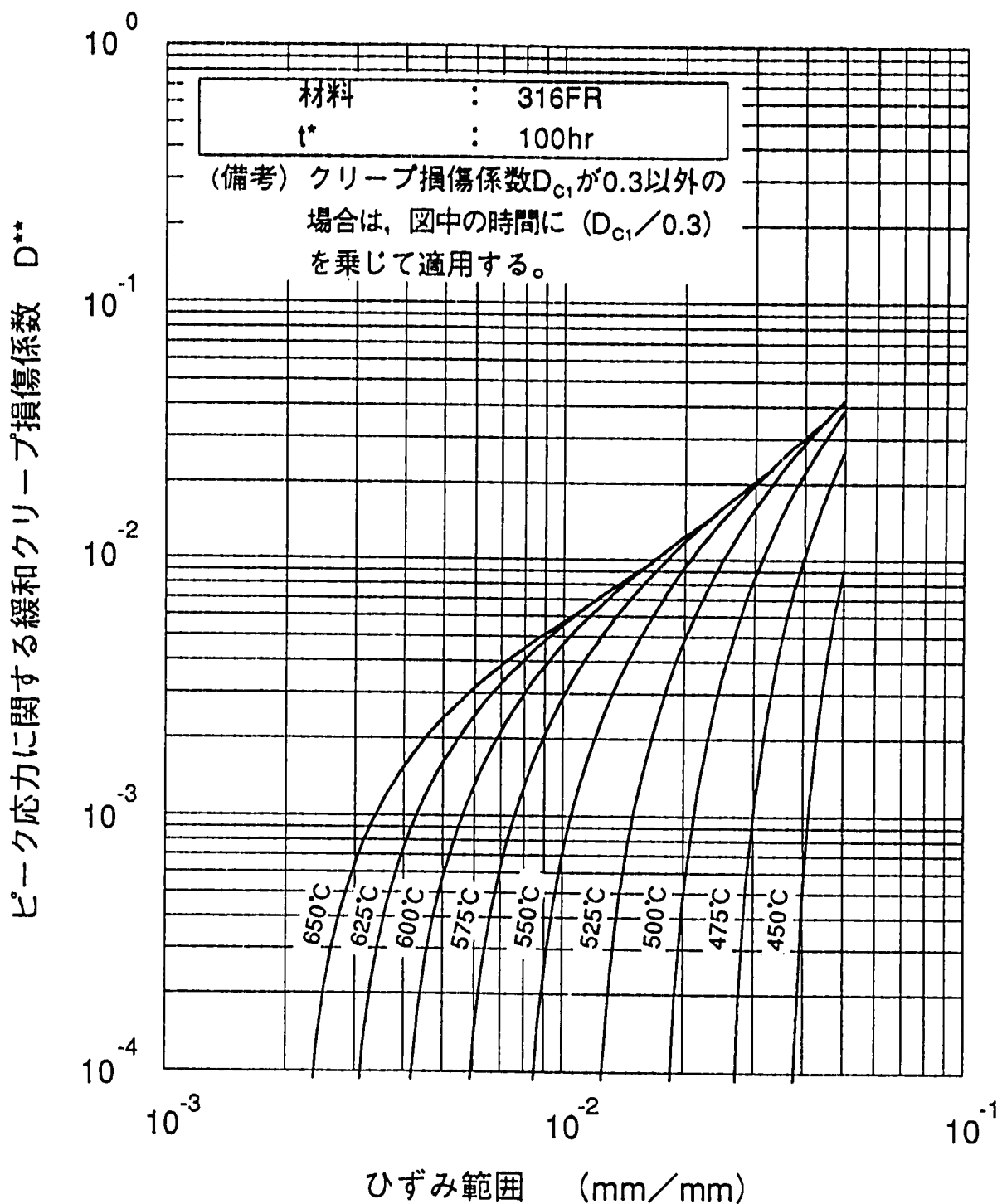


図 14.1 316FRのピーク応力に関する緩和クリープ損傷係数 D^{**}

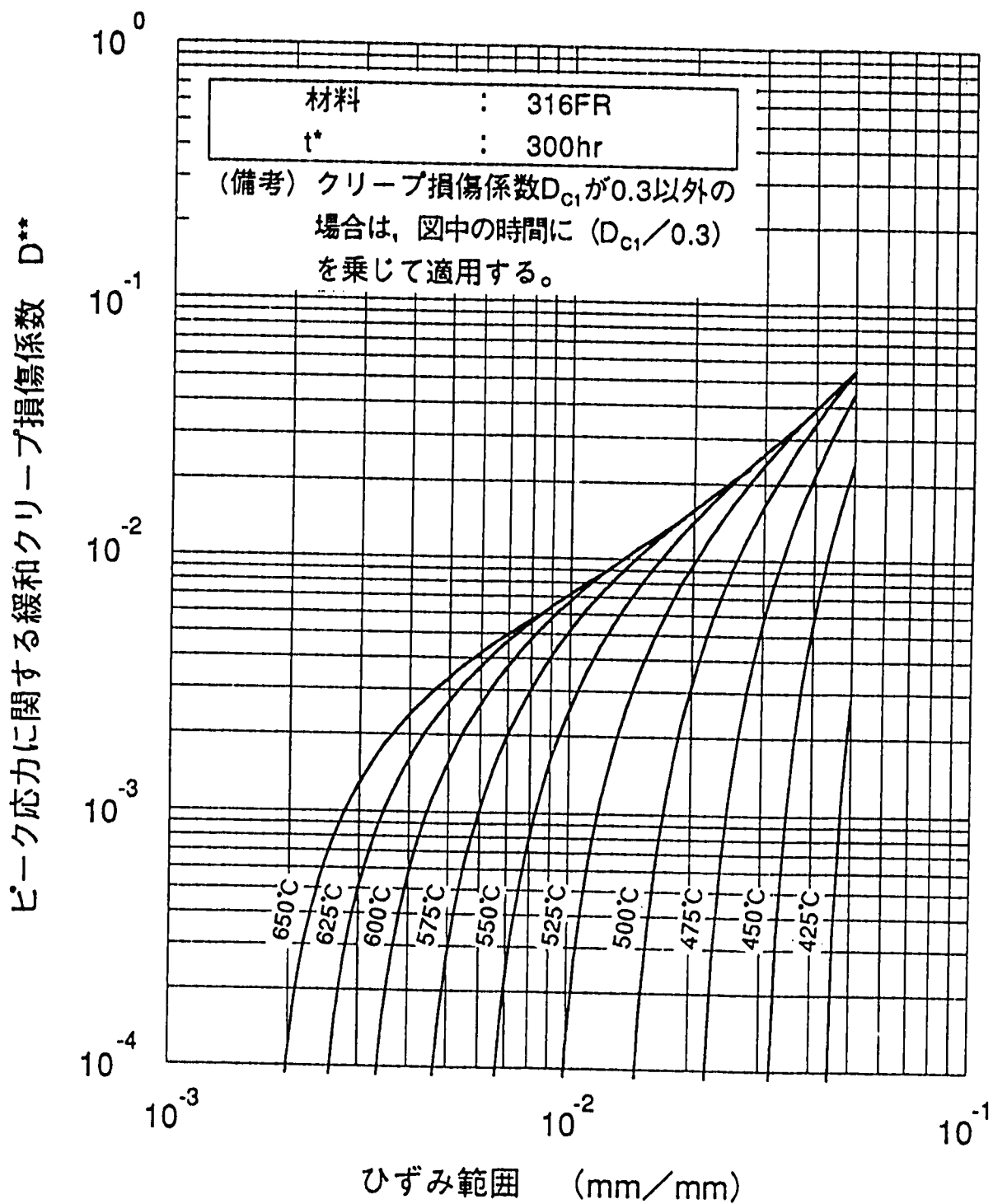


図 14.2 316FRのピーク応力に関する緩和クリープ損傷係数 D^{**}

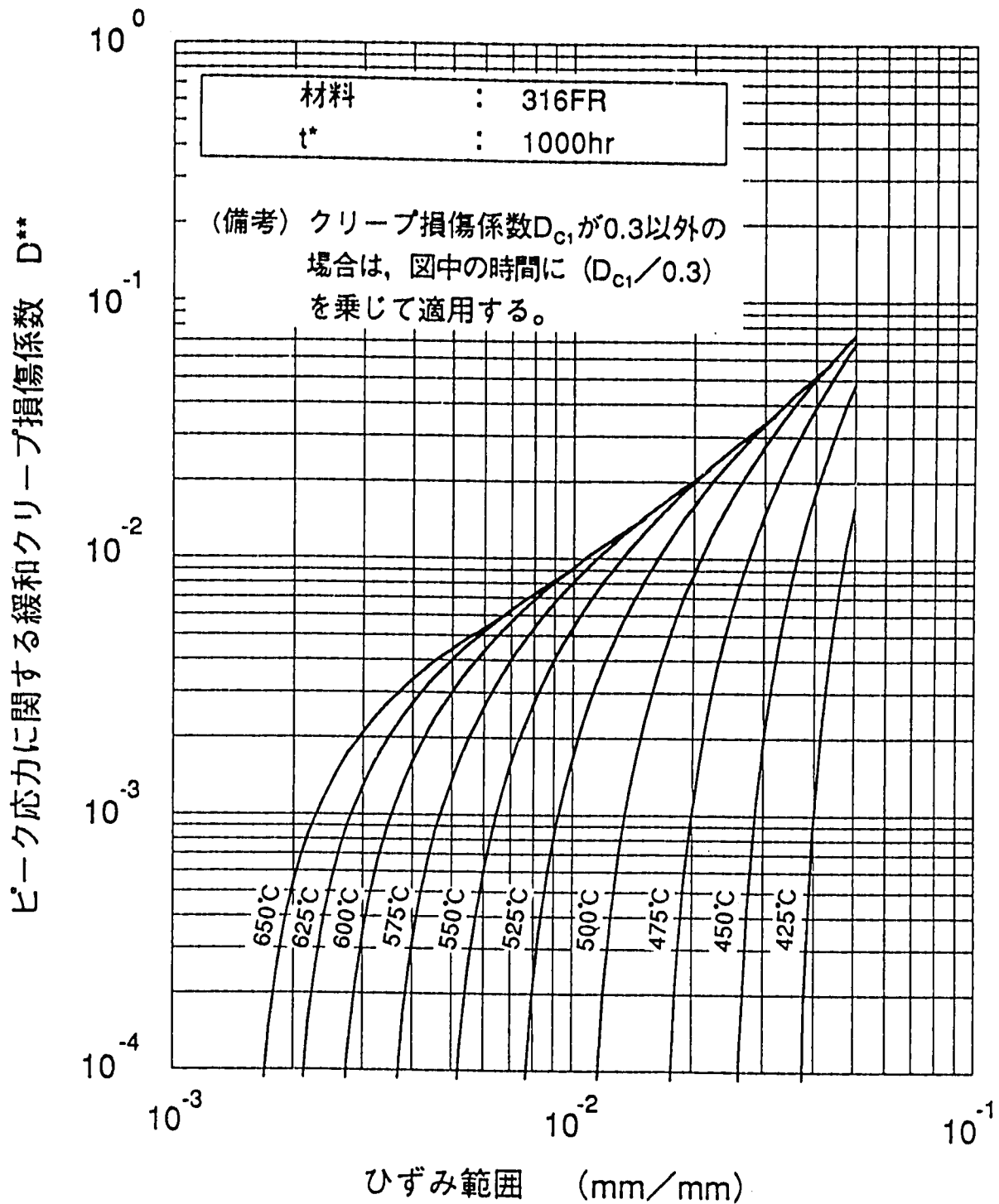


図14.3 316FRのピーク応力に関する緩和クリープ損傷係数 D^{**}

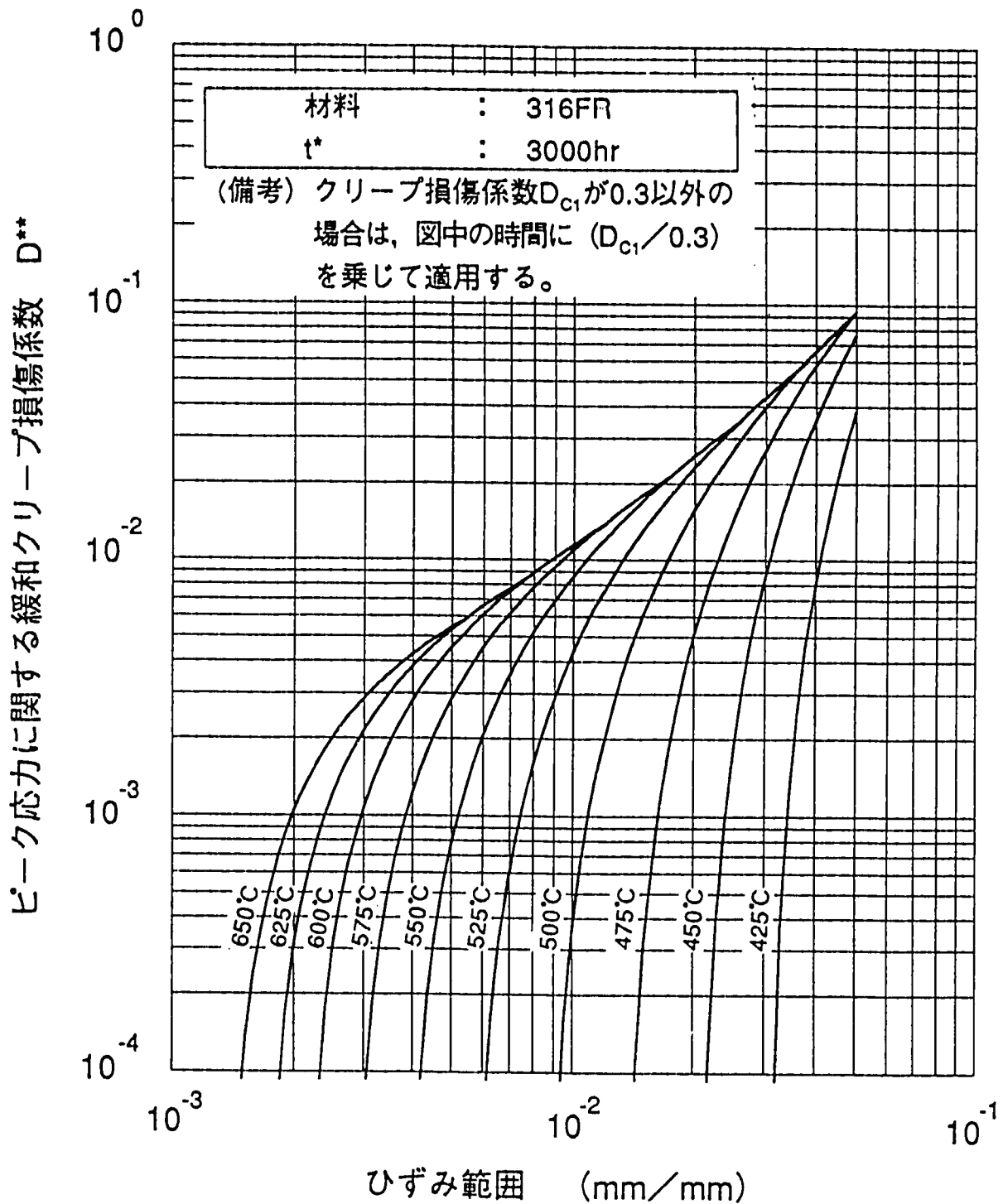


図 14.4. 316FR のピーク応力に関する緩和クリープ損傷係数 D^{**}

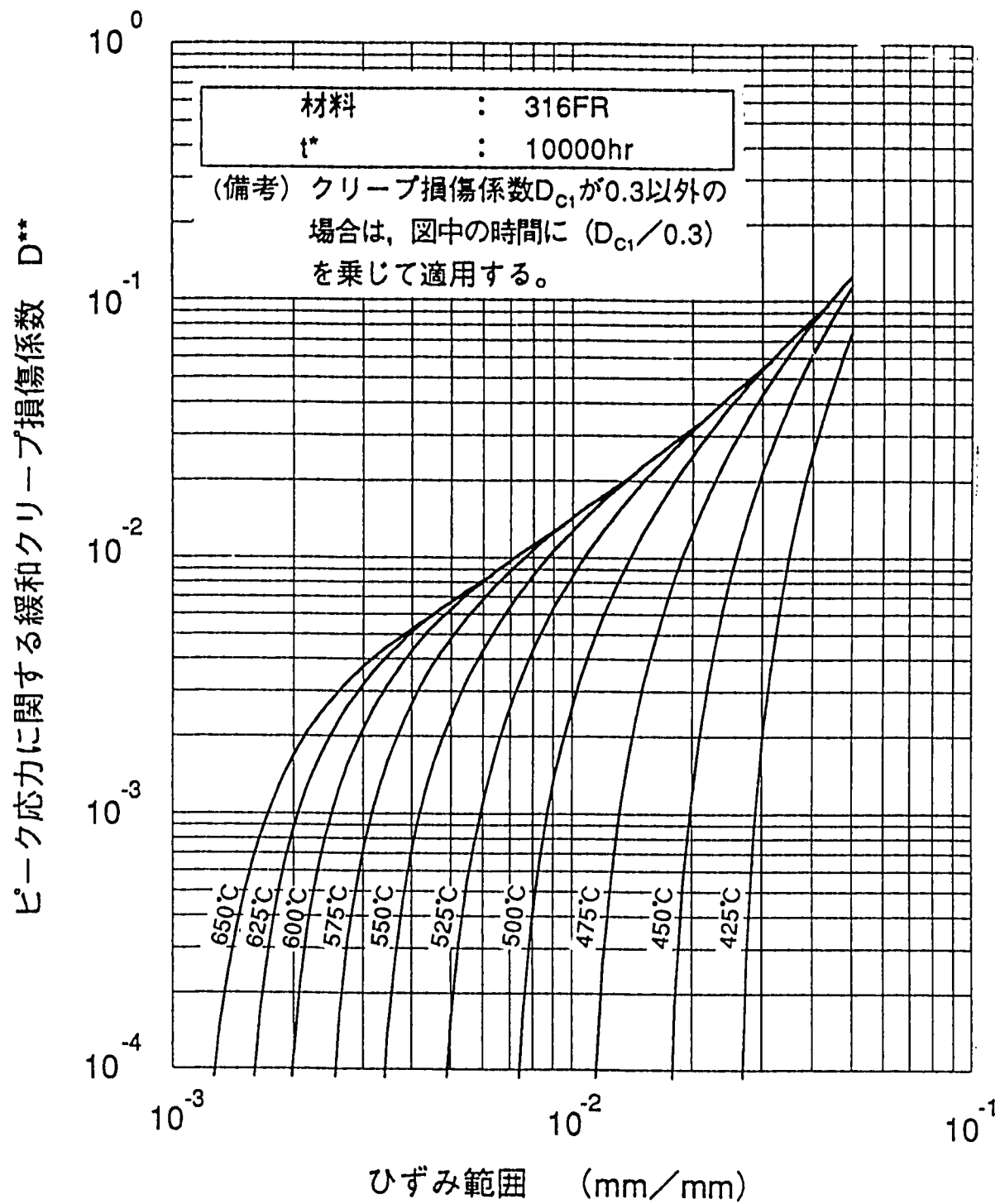


図 14.5 316FRのピーク応力に関する緩和クリープ損傷係数 D^{**}

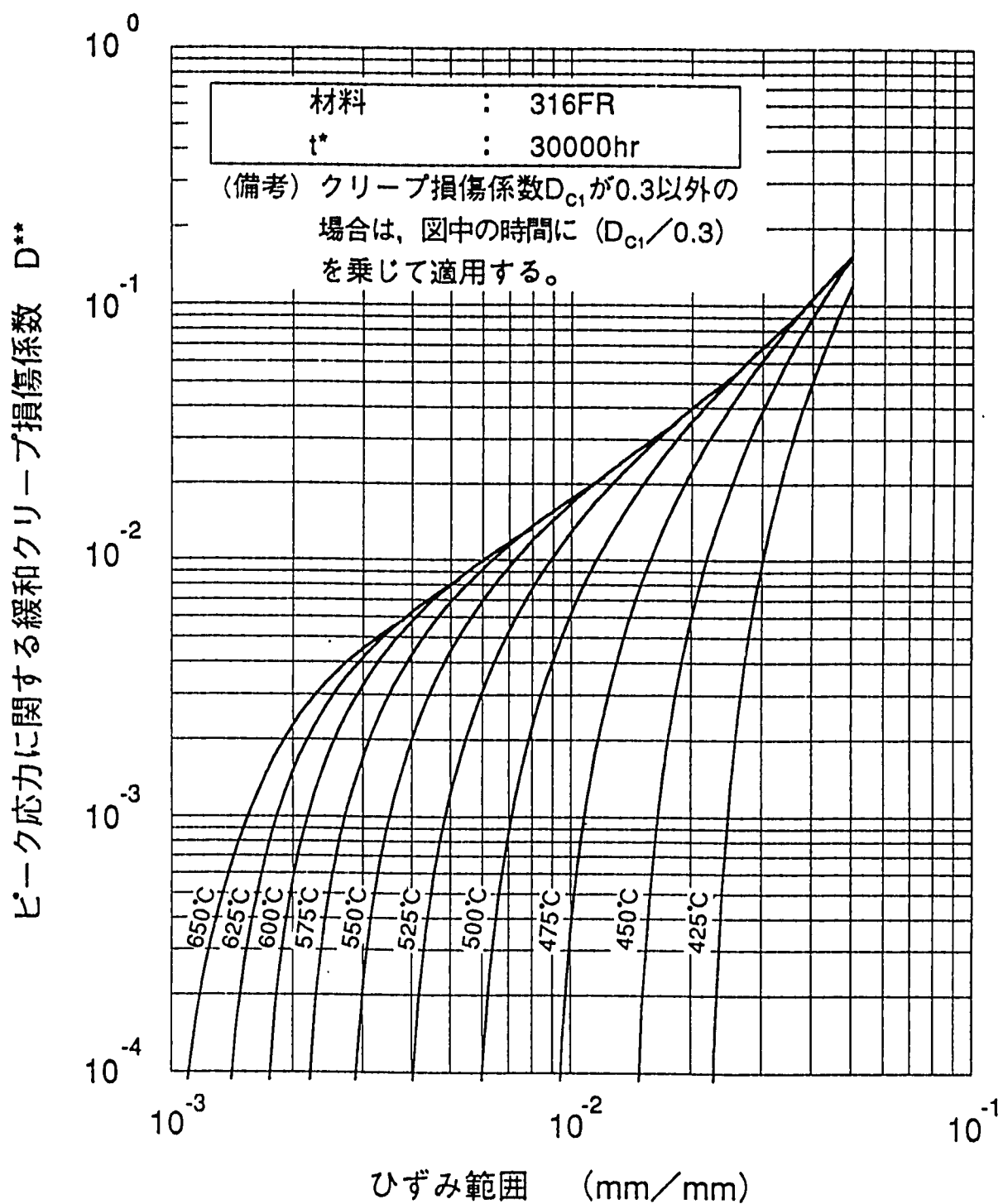


図 14.6 316FRのピーク応力に関する緩和クリープ損傷係数 D^{**}

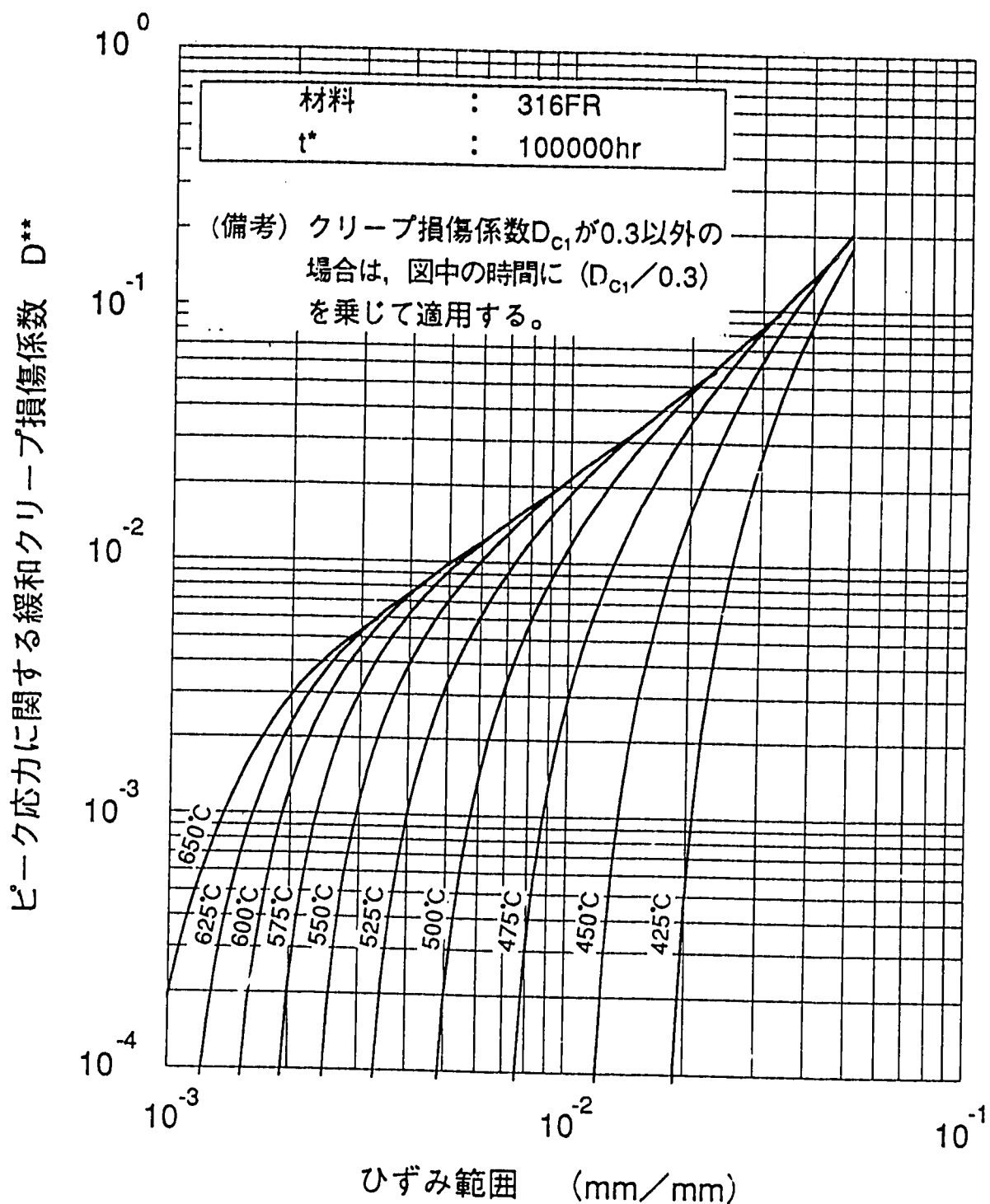
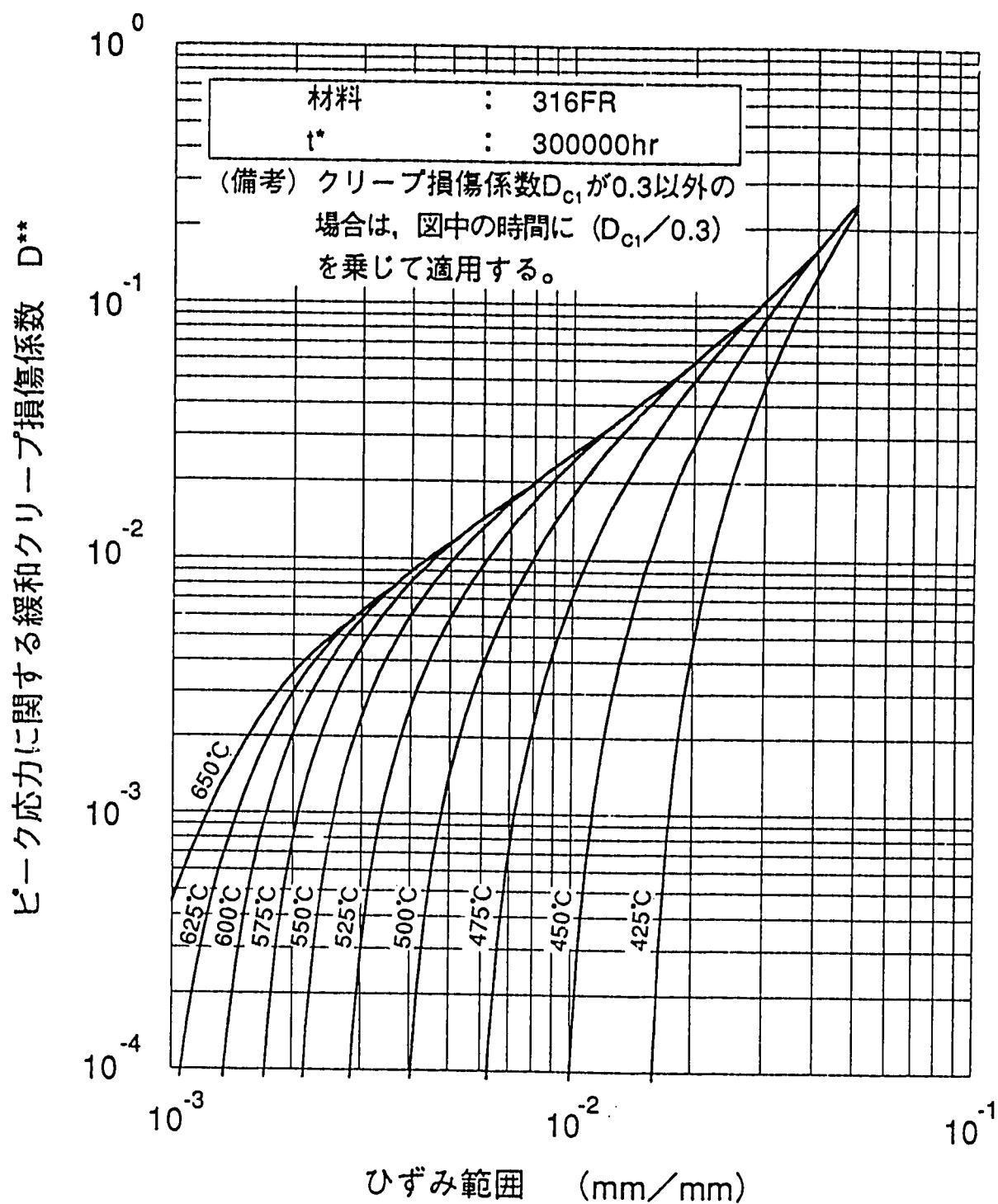


図 14.7 316FRのピーク応力に関する緩和クリープ損傷係数 D^{**}

図14.8 316FRのピーク応力に関する緩和クリープ損傷係数 D^{**}

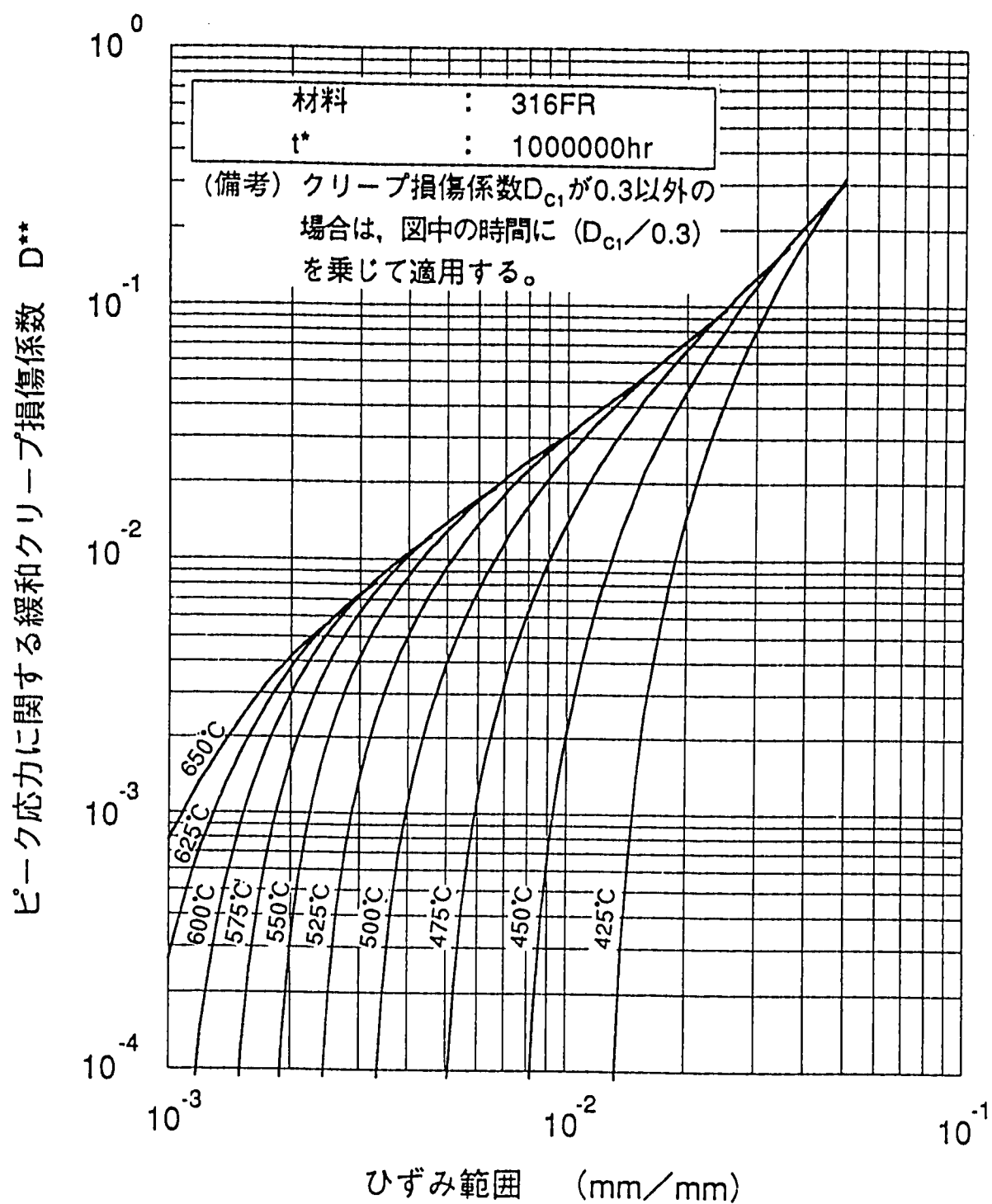


図 14.9 316FRのピーク応力に関する緩和クリープ損傷係数 D^{**}

4. 高速炉構造用316 の高温特性

高速炉構造用316 (316FR) は、クリープ強度の向上を目指してJISの範囲内で炭素、窒素を調整して高速炉用に開発された材料であり、クリープ特性を除いてほぼSUS316と同等の特性を有する。ここでは、3.に記した材料強度基準等について、316FRの材料試験結果を用いて、(1)一般特性がSUS316と同等であること、(2)クリープ特性と材料強度基準策定、および(3)その他の材料強度基準等についてSUS316と同等であること、を示す。

(1)一般特性

①比 重

316FRの室温における比重の計測点、および熱膨張係数から換算した比重の温度依存性を図4.1.1に示す。室温における計測値7.97はステンレス鋼便覧に記載されるSUS316の比重8.03と同等である。

②比 熱

316FRの比熱は、図4.1.2に示すように、日本機械学会・非弾性解析法実用化分科会EPICデータに示されるSUS316の比熱の平均傾向線図と同等である。

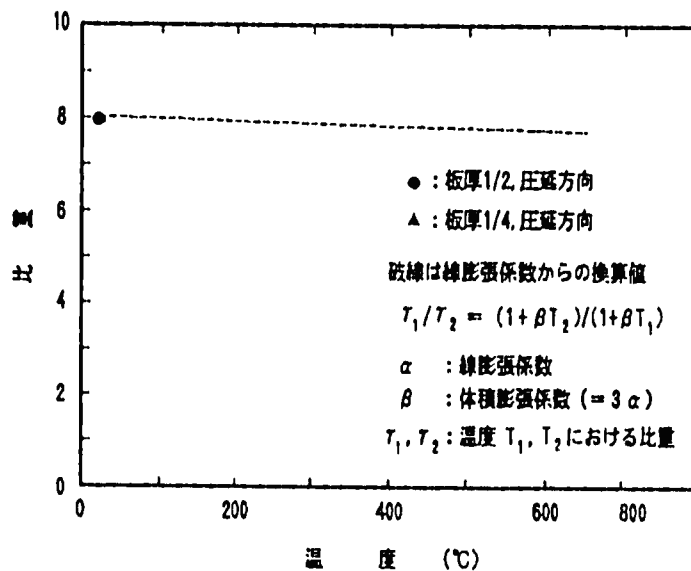


図 4.1.1 比重

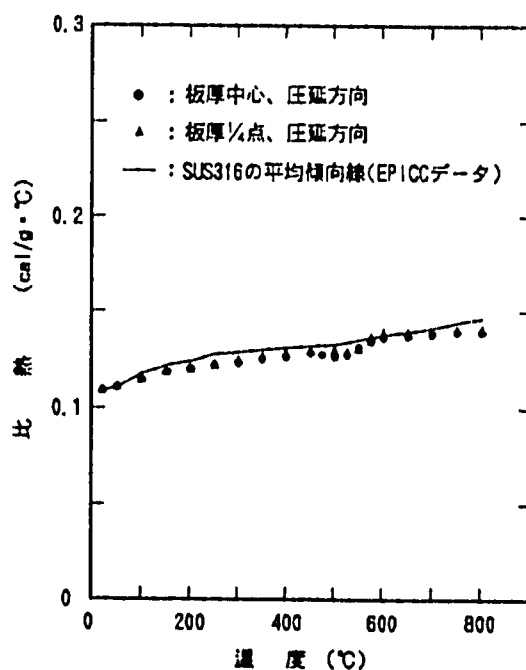


図 4.1.2 比熱

③ 熱伝導率

316FR の熱伝導率は、図 4.1.3に示すように日本機械学会・非弾性解析法実用化分科会 EPICCデータ* に示されるSUS316の平均的傾向線とほぼ等しい。

*山田ほか：「非弾性構造解析法の実用化に関する研究（Ⅱ）」、日本機械学会非弾性構造解析法実用化研究分科会（1979年6月）

④ 熱膨張係数

316FR の平均熱膨張係数は、図 4.1.4に示すように材料強度基準等に定められるSUS316の平均熱膨張係数はほぼ等しく、構造設計方針の値を準用した。

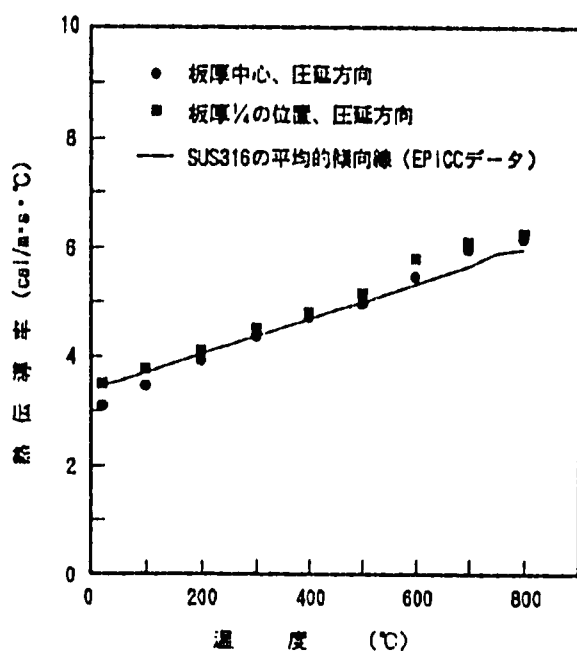


図 4.1.3 熱伝導率

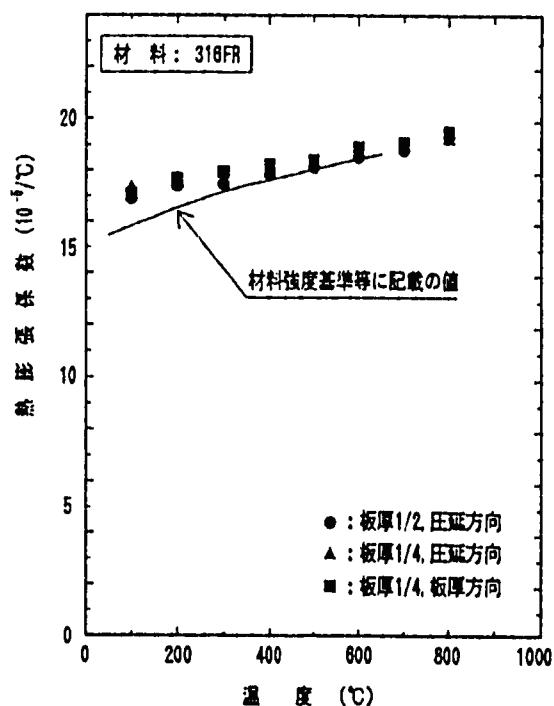


図 4.1.4 平均熱膨張係数

⑤ 縦弾性係数

316FR の縦弾性係数は、図 4.1.5に示すように材料強度基準等に定めるSUS316の縦弾性係数と同等であり、材料強度基準等の値を準用した。

⑥ ポアソン比

316FR のポアソン比は、図 4.1.6に示すように、材料強度基準等に定めるSUS316のポアソン比策定の際に参照した日本機械学会・非弾性解析法実用化分科会 EPICCデータ* と室温において同等であり、材料強度基準等の値を準用した。構造設計方針においては、ポアソン比が 0.3を下回る場合には 0.3としている。

*山田ほか：「非弾性構造解析法の実用化に関する研究（Ⅱ）」、日本機械学会非弾性構造解析法実用化研究分科会（1979年6月）

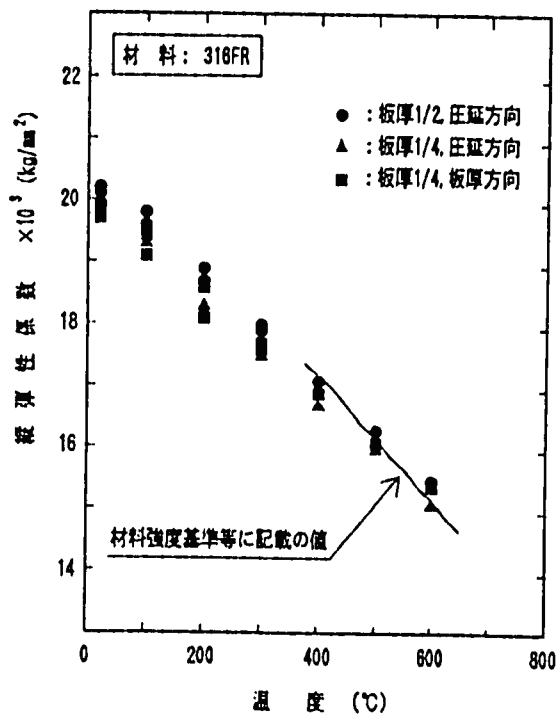


図 4.1.5 縦弾性係数

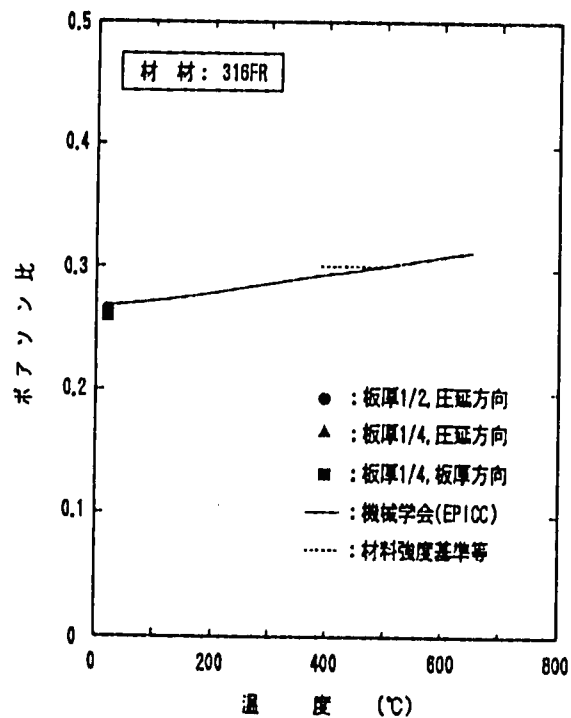


図 4.1.6 ポアソン比

(2)クリープ特性

従来のSUS316のクリープ破断時間が高温長時間側で低下するのは、結晶粒界における脆い炭化物の析出に原因がある。316FR では炭化物生成の原因となる炭素含有量を0.02%以下に規定することによって、図4.2.1に示すようにクリープ破断特性を改善している。クリープ特性に関連する材料強度基準値は、設計クリープ破断応力強さ S_R 、設計応力強さ S_t 、設計緩和強さ S_r 、等時応力ひずみ線図、最大許容応力強さ S_0 、1次及び2次応力に関する緩和クリープ損傷係数 D^* 、およびピーク応力に関する緩和クリープ損傷係数 D^{**} である。

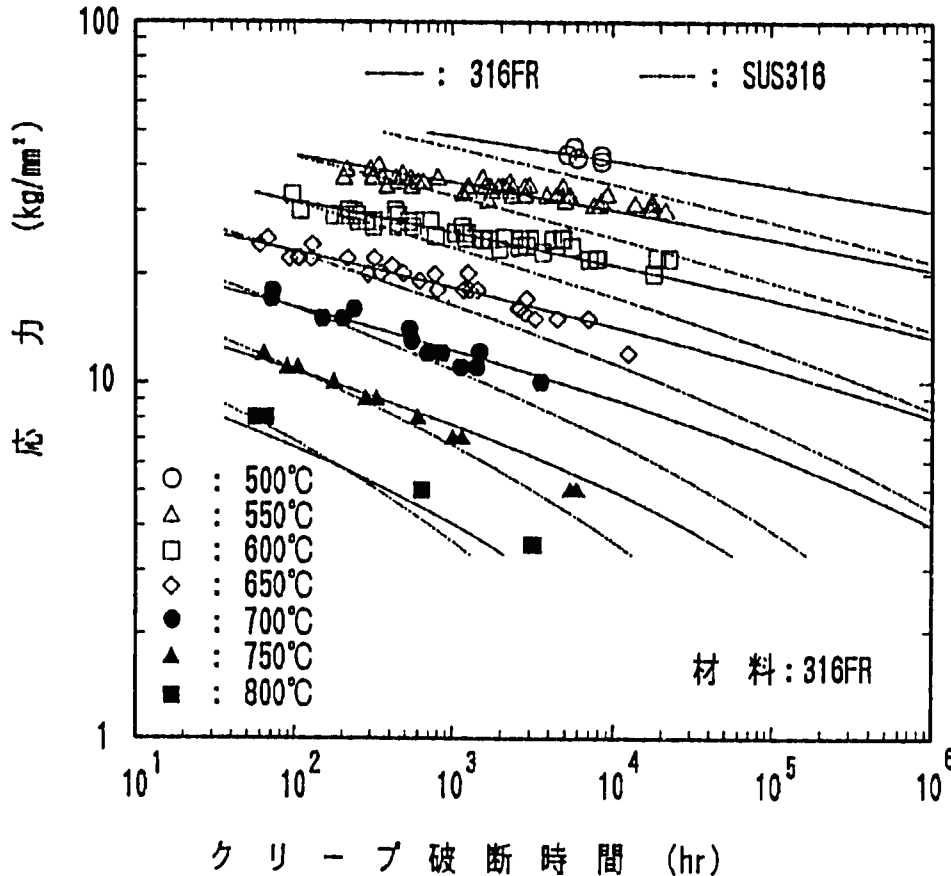


図 4.2.1 316FR のクリープ破断データとクリープ破断曲線、およびSUS316のクリープ破断曲線

① 設計クリープ破断応力強さ S_R

316FR のクリープ破断強度は、図 4.2.2に示すように、SUS316やSUS304と同じようにLarson-Millerパラメーターを用いて応力の対数 $\log(\sigma)$ の2次式で表現できる。

$$(T + 273.15)\{\log_{10}(\alpha_R \cdot t_R) + C\} = A_0 + A_1 \log_{10} \sigma + A_2 (\log_{10} \sigma)^2$$

定数の値		使用単位	
C	$= 25.82042$	T	: 温度 °C
A_0	$= 32232.27$	σ	: 応力 kg/mm²
A_1	$= -39.74271$	t_R	: 破断時間 hr
A_2	$= -3481.803$		
α_R	$= \begin{cases} 1 & \text{: 平均値} \\ 10 & \text{: 設計クリープ破断強度} \end{cases}$		

設計クリープ破断応力強さ S_R は、構造設計方針におけるSUS316の設計クリープ破断強度の定め方と同一の方法を用いて定めた。すなわち、クリープ破断の式において時間係数 α_R を10としたクリープ破断強度と、当該温度における設計引張強さ S_u のうち小さい方として設計クリープ破断強度を定めた。上式による計算値は、図 4.2.1に示すように実験結果の平均的傾向を示すものであるが、500°C～600°Cにおいてクリープ破断強度を長時間側でやや過少評価する傾向がある。

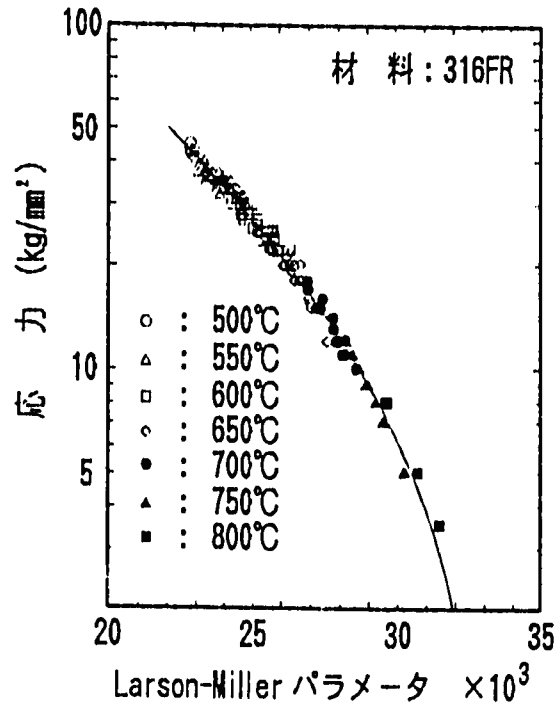


図 4.2.2 Larson-Millerパラメータによるあてはめ

時間係数 $\alpha_R=10$ として算定した設計クリープ破断時間と実測したクリープ破断時間の間には、図 4.2.3に示すようにはほぼ 1 対 1 の直線関係が成り立ち、前述の式はクリープ破断時間を良く表現している。また、時間係数 $\alpha_R=10$ の線は全データを包含している。

クリープ破断式によって計算したクリープ破断時間に対するクリープ破断時間の実験値の比を、対数正規確率紙上にプロットして図 4.2.4に示す。データはほぼ直線上に並んでおり、この比は概ね対数正規分布によって記述できる。図中の直線は対数正規分布に従うものとして算出した最適直線であり、時間係数 $\alpha_R=10$ に相当する破損確率は 1 % より大幅に小さい値となる。

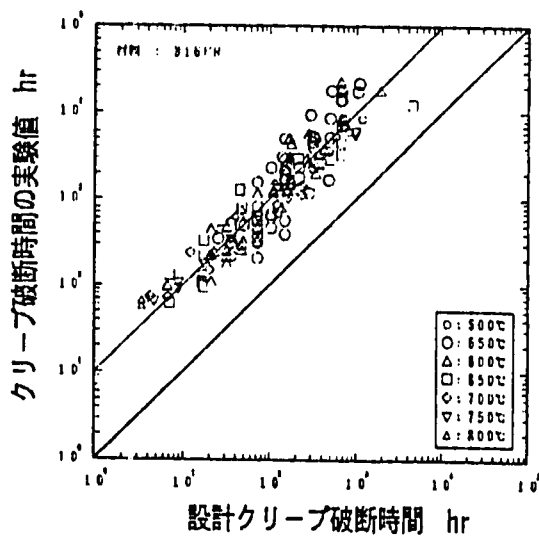


図 4.2.3 設計クリープ破断時間とクリープ破断時間の実験値の関係

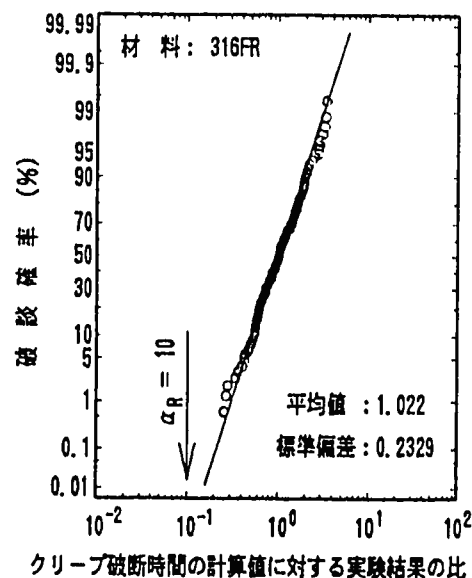


図 4.2.4 クリープ破断時間の確率評価

② クリープひずみ式

定常クリープひずみ速度を、構造設計方針のSUS316に倣って、Monkman-Grantの式によって次のように定式化した。

$$\epsilon_m = f_0 \exp\left(\frac{-Q}{RT}\right) t_R^{-r}$$

$$\begin{cases} f_0 & : \text{定数 } 241.33 \\ r & : \text{定数 } 1.1032 \\ Q & : \text{活性化エネルギー } 51222 \text{ (J/mol)} \\ R & : \text{気体定数 } 8.31 \text{ (J/mol} \cdot \text{K)} \\ T & : \text{温度 (K)} \\ t_R & : \text{クリープ破断時間 (hr)} \end{cases}$$

上式の当てはめ性は、550℃について図 4.2.5に示すように、良好である。

遷移クリープ変形挙動については、一般に定常クリープひずみよりも定式化が難しいが、構造設計指針においてはオーステナイト系ステンレス鋼の多数の遷移クリープデータの記述性から指数型2項を用いる式を採用した定式化を行っている。316FRについては、バラツキの比較的大きな遷移クリープひずみについて 316FR独自の遷移クリープ挙動の定式化を行うのではなく、既存のSUS316の遷移クリープひずみ式を316FRのデータでチェックした後、準用するものとした。

従って、316FRの遷移および定常クリープひずみは、下記の式となる。

$$\epsilon_c = C_1\{1 - \exp(-r_1 t)\} + C_2\{1 - \exp(-r_2 t)\} + \epsilon_m t$$

ここで、

$$\begin{aligned} C_1 &= 1.2692 \epsilon_m^{0.74491} / r_1 \\ C_2 &= 0.48449 \epsilon_m^{0.81155} / r_2 \\ r_1 &= 103.37 t_R^{-0.72607} \\ r_2 &= 17.255 t_R^{-0.86775} \\ \epsilon_m &= 241.33 \exp\left\{-\frac{51222}{8.31(T + 273.15)}\right\} t_R^{-1.1032} \\ \log_{10}(\alpha_c \cdot t_R) &= -C + \frac{A_0 + A_1 \log_{10} \sigma + A_2 (\log_{10} \sigma)^2}{T + 273.15} \end{aligned}$$

	使用単位	適用範囲
T	: 温度 °C	$425 \leq T \leq 650$
σ	: 応力 kg/mm ²	$0.7 \leq \sigma$
t_R	: 破断時間 hr	
ϵ_m	: 定常クリープ速度 hr ⁻¹	
t	: 時間 hr	

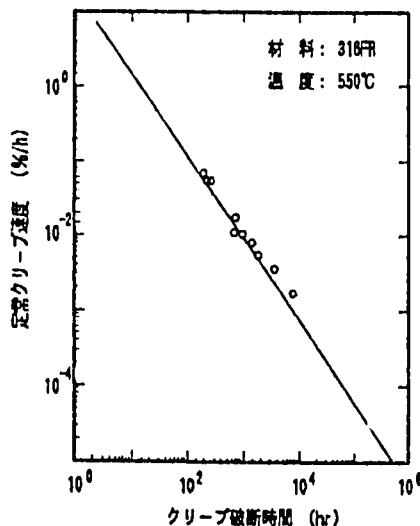


図 4.2.5 定常クリープ速度の定式化

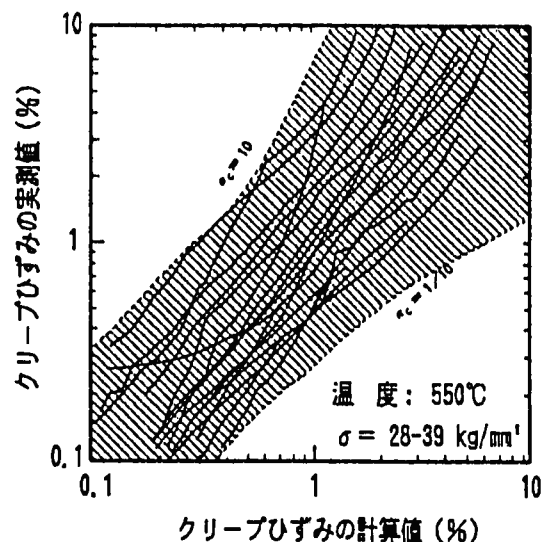


図 4.2.6 クリープひずみの計算値と実測値

図 4.2.6 にクリープひずみの計測値とクリープひずみ式の対応を示す。図中のバラツキの幅は、構造設計方針における SUS316 と同様に、クリープひずみ式における時間係数 α_{t10} および $1/10$ を適用して計算した。図 4.2.6 で示した試験データのバラツキは、構造設計方針における SUS316 や SUS304 と同程度である。

③ 弾塑性応力ひずみ関係式

316FR の弾塑性応力ひずみ関係式は、等時応力ひずみ線図と 1 次及び 2 次応力に関する緩和クリープ損傷係数を定める際の初期応力算出に必要となるものである。構造設計方針において SUS316 に対して定めた平均曲線は下式である。図 4.2.7 に示すように実験曲線は平均曲線を下回っており、1 次及び 2 次応力の緩和に関するクリープ損傷係数は平均曲線を用いると大きめに評価することになるので、316FR について平均曲線を用いることとした。

$$\sigma \leq \sigma_p \text{ のとき } \begin{cases} \epsilon_e = \sigma/E \\ \epsilon_p = 0 \end{cases}$$

$$\sigma > \sigma_p \text{ のとき } \begin{cases} \epsilon_e = \sigma/E \\ \epsilon_p = \left(\frac{\sigma - \sigma_p}{K} \right)^{1/m}, \quad \sigma_p = \sigma_y - K(0.002)^m \end{cases}$$

使用単位: ϵ_e mm/mm ϵ_p mm/mm σ kg/mm² T °C
適用限界: 弾塑性ひずみ ≤ 0.03 mm/mm

ここで、 E は縦弾性係数、 σ_y は平均降伏点、 m と K は温度の関数として定まる定数である。

$$E = \begin{cases} 2.040 \times 10^4 - 8.000T & 315 \leq T < 400 \\ 2.126 \times 10^4 - 10.125T & 400 \leq T \leq 650 \end{cases}$$

$$\sigma_y = \begin{cases} 26.8073 - 5.04547 \times 10^{-2}T + 8.03901 \times 10^{-5}T^2 - 5.11282 \times 10^{-8}T^3 & \text{平均曲線} \\ \text{表 4 に示す設計降伏点 } S_y & \text{最小曲線} \end{cases}$$

$$K = 40.0909 - 9.69990 \times 10^{-3}T$$

$$m = 0.326245 + 6.13276 \times 10^{-5}T$$

④ 動的応力ひずみ関係

316FR の応力振幅とひずみ振幅の関係（動的応力ひずみ関係）は、クリープ損傷を計算する際に緩和開始初期応力を定めるのに用いられ、動的応力ひずみ曲線において応力が高いとクリープ損傷が大きめに評価される。316FR の動的応力ひずみ関係は、図 4.2.8 に示すように SUS316 と SUS304 の中間にあり、ピーク応力の緩和に関するクリープ損傷を安全側に評価するという観点から、SUS316 の曲線を準用することとした。

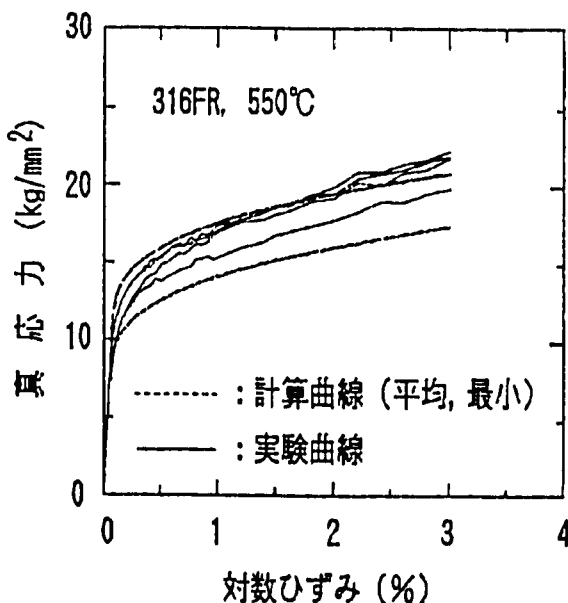


図 4.2.7 316FR の弾塑性応力ひずみ関係

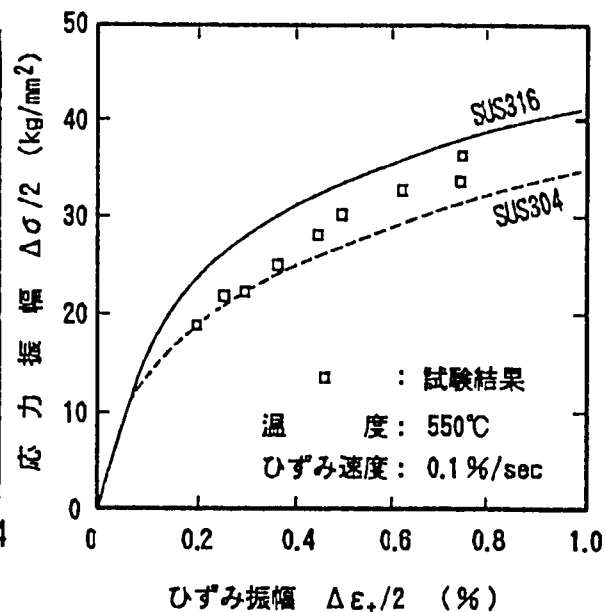


図 4.2.8 動的応力ひずみ関係

なお、SUS316の平均的応力ひずみ曲線は下式で与えられる。

$$\begin{cases} \log_{10}(\Delta\sigma - 2\sigma_p) = A_0 + A_1 \log_{10}(\Delta\epsilon_t - \Delta\sigma/E) & (\Delta\sigma/2 > \sigma_p \text{ のとき}) \\ \Delta\sigma = E\Delta\epsilon_t & (\Delta\sigma/2 \leq \sigma_p \text{ のとき}) \end{cases}$$

使用単位

T	:	温度 (°C)	$425^\circ\text{C} \leq T \leq 650^\circ\text{C}$
$\Delta\sigma$	:	応力範囲 (kg/mm ²)	
$\Delta\epsilon_t$	:	全ひずみ範囲 (%)	
E	:	縦弾性係数 (kg/mm ²)	
σ_p	:	比例限 (kg/mm ²)	

$$\begin{aligned} A_0 &= 4.139556 - 0.4434273 \times 10^{-2}T + 0.1354228 \times 10^{-5}T^2 + 0.1593061 \times 10^{-8}T^3 \\ A_1 &= 2.171727 - 0.7045263 \times 10^{-2}T + 0.7832692 \times 10^{-5}T^2 - 0.2083600 \times 10^{-8}T^3 \\ E &= 2.10236 \times 10^4 - 9.71895T \\ \sigma_p &= 26.8073 - 5.04547 \times 10^{-2}T + 8.03901 \times 10^{-5}T^2 - 5.11282 \times 10^{-8}T^3 \\ &\quad - (40.0909 - 9.69990 \times 10^{-3}T) \times (0.002)^{0.326245 + 6.13276 \times 10^{-5}T} \end{aligned}$$

⑤ 最大許容応力強さ S_0

316FRに係わる最大許容応力強さ S_0 を、構造設計方針の方法に倣い、次の通り定めた。

(イ) 温度 $\leq 425^\circ\text{C}$

通産省告示第 501号の別表第 6 に定めるSUS316の許容引張応力を S_0 とした。

(ロ) $425^\circ\text{C} \leq \text{温度} \leq 650^\circ\text{C}$

次に掲げる値のうち最小のものを S_0 と定めた。

- ① SUS316の室温での規格引張強さの0.25倍の値
- ② 316FR の各温度での設計引張強さの0.25倍の値
- ③ SUS316の室温での規格降伏点の 0.625倍の値
- ④ 316FR の各温度での設計降伏点の 0.9倍の値
- ⑤ 10^3 時間に0.01%のクリープを生じる応力の平均値
316FR のクリープひずみ式において最小クリープひずみ速度 $\dot{\epsilon}_m$ が0.01%/10³hrとなる応力
- ⑥ 10^5 時間でクリープ破断を生じる応力の最小値の 0.8倍の値
316FR の設計クリープ破断式 $S_R(t, T)$ において、時間 10⁵hrとして温度の関数として定まる 0.8倍の値
- ⑦ 10^5 時間でクリープ破断を生じる応力の平均値の 0.6倍の値
316FR の平均クリープ破断式 $S_R(t, T)$ において、時間 10⁵hrとして温度の関数として定まる 0.6倍の値。

⑥ 設計応力強さ S_t

温度 T 、時間 t における設計応力強さ S_t を、構造設計方針策定手法に倣い、次に掲げる値のうち最小のものとして定めた。

(イ) 設計クリープ破断応力強さ S_R の 2/3倍の値

(ロ) 第 3 期クリープ開始応力の最小値の 0.8倍の値

316FR のクリープ破断式 $S_R(t, T)$ において、次式で算定される応力

$$S_3^{\min}(t, T) \text{ の } 0.8 \text{ 倍の値}$$

- ① $S_3^{\min}(t, T)$: $\alpha_c = 1/\alpha_3$ として算出される設計クリープ破断応力。

$$S_3^{\min}(t, T) = S_R(t/\alpha_3, T)$$

④ α_3

第3期クリープ開始時間 t_3 とクリープ破断時間 t_R の比の平均値であり、構造設計指針ではSUS316について $\alpha_3 = 0.563$ としている。316FRについては図4.2.9に示すように、 α_3 の値はSUS316と同等であるので、SUS316と同じ値0.563とした。

$$\log_{10} t_3 = \log_{10} t_R + \log_{10} \alpha_3$$

$$\alpha_3 = 0.563$$

(イ) 各温度、各時間での1.0%の全ひずみを生じる応力の最小値 $S_{1\%}^{min}$

$S_{1\%}^{min}$ は、弾塑性応力ひずみ関係式において σ_y に設計降伏点 S_y を代入して求まる弾塑性ひずみ、およびクリープひずみ式において時間係数 $\alpha_c = 10$ として求まるクリープひずみとの和が、当該温度において当該時間を経過した時点で1%となる応力とした。

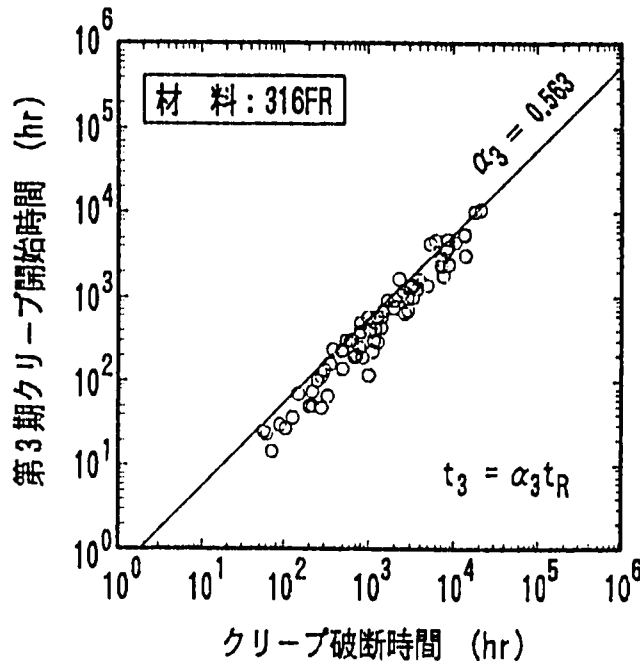


図 4.2.9 第3期クリープ開始時間とクリープ破断時間の関係

⑦ 設計緩和強さ S_r

温度 T 、時間 t の設計緩和強さ S_r を次の方法によって定めた。

(イ) 定ひずみ条件のもとで、初期応力 $1.5S_m$ としてクリープひずみ式とひずみ硬化則を用いて単軸応力緩和計算にて定めた応力とした。

$1.5S_m$ はSUS316の設計応力強さ S_m から算出した。ただし、低応力側のデータがないことから、 S_r 設定の下限値を 3 kg/mm^2 とした。

⑧ 等時応力ひずみ線図

等時応力ひずみ線図は、材料が弾塑性クリープ挙動として平均的挙動を示すものとして、下記の方法によって定めた。

(イ) 0 hrの等時応力ひずみ線図は、弾塑性応力-ひずみ関係式において平均降伏点を用いて、与えられた応力に対するひずみを算出することによった。

(ロ) 1時間から30万時間の等時応力ひずみ線図は次の方法によって作成した。

①与えられた応力および時間について、平均値を与える時間係数 $\alpha_c = 1$ としたクリープひずみ式によってクリープひずみを算出した。

②与えられた応力について、平均降伏点を用いた弾塑性応力ひずみ関係式によって、弾塑性ひずみを算出した。

③弾塑性ひずみとクリープひずみの和として全ひずみを算出した。

⑨ クリープ損傷の評価法

クリープ疲労破損は、疲労損傷とクリープ損傷の和を図4.2.10に示す定数D（構造設計方針に定める値）に制限することによって防止することができるが、構造設計方針で規定される「弾性解析による場合」で用いられる1次及び2次応力に関する緩和クリープ損傷係数およびピーク応力に関する緩和クリープ損傷係数は、設計クリープ破断時間に対する高温使用時間の積分値であるため、材料のクリープ特性に依存する。構造設計指針における「クリープ疲労損傷の制限」の規定の概要を図4.2.11に示す。

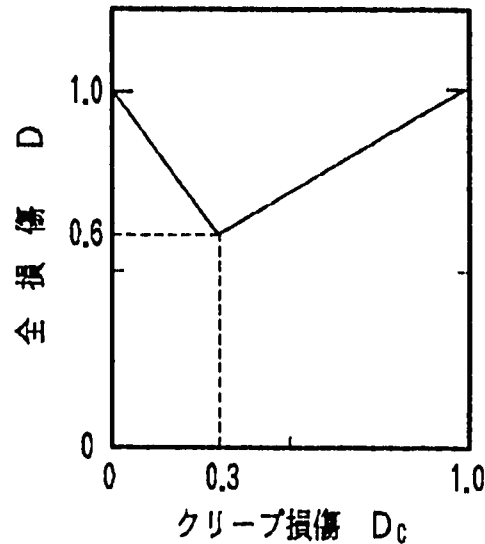


図4.2.10 累積クリープ疲労損傷係数の制限値

$D_f + D_c < D$	
	D_f : 疲労損傷 D_c : クリープ損傷
◆一般規定	
$D_c = 2 \int_0^{t^*} \frac{dt}{t_d}$	t_d : 設計クリープ破断時間 t^* : 高温使用時間
◆弾性解析による場合	
・一般規定	$D_c = D_{CN} + D_{CP}$ $= \sum_k (D_{CN})_k + \sum_k (n_k D_k^{**})$
D_{CN} :	1次及び2次応力に関する緩和クリープ損傷
D_{CP} :	ピーク応力に関する緩和クリープ損傷
D_k^{**} :	ピーク応力に関する緩和クリープ損傷係数
・長期1次応力が低い場合	$D_c = D_{CN} + D_{CP}$ $= D_{C1} + D_{C2} + D_{CP}$ $= 2 \sum_i \frac{t_i}{t_{di}(S_g)} + D_0 + \sum_j D_j^* + \sum_k (n_k D_k^{**})$
第1項：一定応力によるクリープ損傷	
第2項：1次及び2次応力に関する緩和クリープ損傷係数であって、運転開始によるクリープ損傷	
第3項：1次及び2次応力に関する緩和クリープ損傷係数であって、シェイクダウン基準を満たさない荷重サイクル毎のクリープ損傷	
第4項：ピーク応力による緩和クリープ損傷	

図 4.2.11 「クリープ疲労損傷の制限」におけるクリープ損傷評価の概要

④-1 1次及び2次応力に関する緩和クリープ損傷係数 D^*

1次及び2次応力に関する緩和クリープ損傷係数は、図4.2.12に示すように高温機器が経験する荷重制御型と変位制御型の中間の応力緩和状態に対して定めたものである。すなわち、 D^* の算出方法は図4.2.13に示すように、

- ・「長期1次応力が低い場合」の規定を上回る一定応力 S_g によるクリープ損傷 D_{C1} と、応力緩和挙動によるクリープ損傷 D^* に分離して損傷を算出した。
- ・1次及び2次応力の緩和挙動として弾性追従挙動を考慮した。
- ・設計基準値として用いるクリープ損傷係数は、最小クリープ破断時間 $\alpha_R=10$ に基づいた。
- ・応力緩和挙動計算において用いるクリープひずみ式では、クリープひずみのバラツキを $\alpha_c = 3$ として考慮した。
- ・1次及び2次応力強さ S_n は原則としてシェイクダウン基準内に制限されるので、緩和開始応力を弾塑性応力ひずみ曲線から求めた。
- ・長期2次応力に区分できる熱膨張応力の上限規定0.5%に対応する弾性追従ひずみと1次応力に相当する緩和開始応力を用いた。
- ・初期応力の算出に平均弾塑性応力ひずみ曲線を用いることから、クリープ損傷係数に追加の安全係数2を採用する。

すなわち、 D^* の詳細計算は次式によった。

$$D^* = 2 \left[\int_0^{t_1} \frac{dt}{t_R(\sigma(t), \alpha_R = 10)} - \frac{t_1}{t_R(S_g, \alpha_R = 10)} \right]$$

材料強度基準では、評価に便利のように、次の簡易式による線図を与えている。

$$D^* = \begin{cases} 0 & T \leq T_n \\ D_0(T - T_n) & T > T_n \end{cases}$$

ここで、

$$D_0 = D_{n0}(2t^*/D_{C1})^{m_n}$$

$$T_n = \frac{1}{C_{n1} \log(2t^*/D_{C1}) + C_{n2}} - 273.15$$

$$\begin{cases} D_{n0} = 1.4 \times 10^{-5} \\ D_{C1} = 0.3 \\ m_n = 9.8 \times 10^{-2} \\ C_{n1} = 3.3 \times 10^{-5} \\ C_{n2} = 1.01 \times 10^{-3} \end{cases}$$

簡易式は図4.2.14に示すように、詳細計算結果を大きめに包絡している。

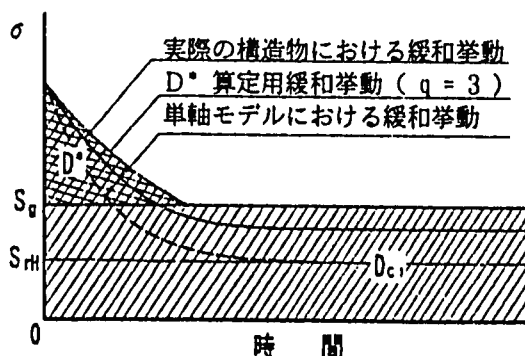


図4.2.12 D^* の算出における応力緩和挙動の仮定

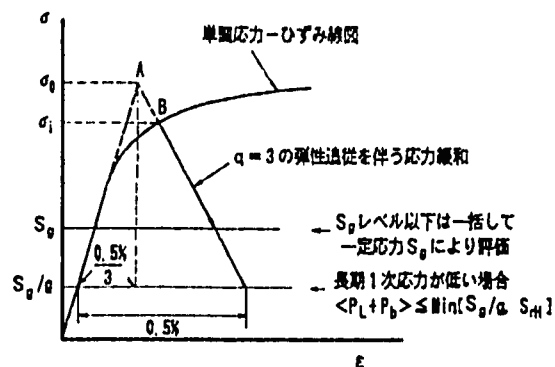
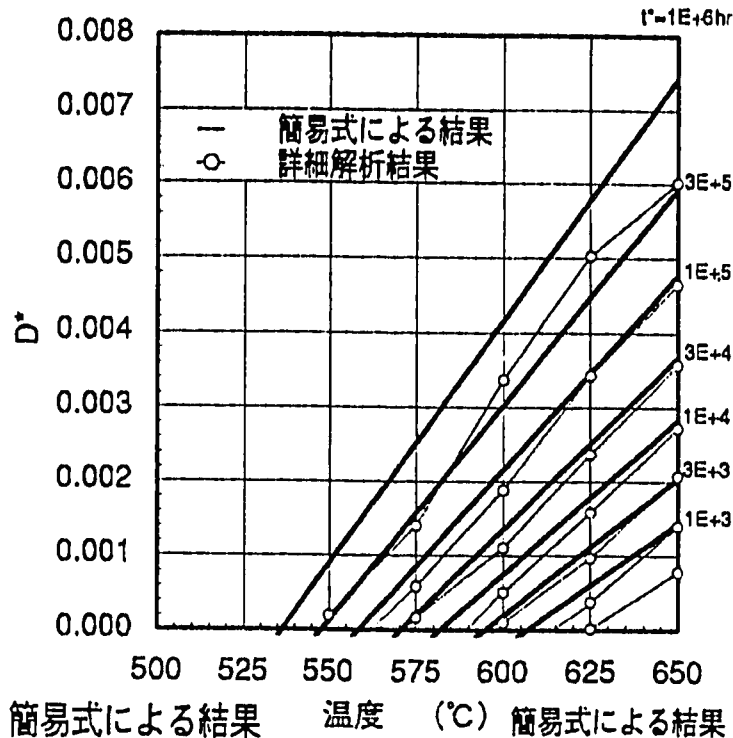


図4.2.13 D^* の算出方法

図4.2.14 D^* の詳細計算結果と簡易式の対応⑨-2 ピーク応力に関する緩和クリープ損傷係数 D^{**}

D^{**} は、図4.2.15に示すように、ピーク応力の緩和に伴うクリープ損傷から、1次及び2次応力の緩和クリープ損傷係数で用いた一定応力レベル S_g に対応する緩和クリープ損傷 D_{c1} を除いたクリープ損傷である。

$$D^{**} = \int_0^{t_1} \frac{dt}{t_r(\sigma(t), \alpha_R = 10)} - \frac{t_1}{t_r(S_g, \alpha_R = 10)}$$

t_1 : 緩和応力が S_g に到達するまでの時間 (hr)

D^{**} を計算するための緩和開始応力は、動的応力ひずみ曲線において全ひずみ範囲の2分の1 ($\epsilon_t/2$) に相当する応力とした。ひずみ保持時間中の応力緩和挙動は、クリープひずみ式とクリープひずみに関するひずみ硬化則とによって定め、弾性追従を伴わない ($q = 1$) ひずみ一定型の単純緩和とした (図4.2.16)。

クリープ損傷を計算するクリープ破断時間は、時間係数 $\alpha_R=10$ の最小クリープ破断時間を用いた。クリープひずみ式における時間係数 α_c として、最も弱い材料である $\alpha_c=10$ に対して、クリープ挙動のバラツキを安全側に評価することおよび繰返しひずみ硬化を考慮して $\alpha_c=1$ とした。

また、設計評価に便利のように次の簡易式を定め、 D^{**} の評価線図として材料強度基準に定めた。

$$D^{**} = \begin{cases} 10^{-4} & D^{**} \leq 10^{-4} \\ D_{p0}(S_i - S_g)^{n_p} & D^{**} > 10^{-4} \end{cases}$$

ここで、 $D_{p0} = 1.05 \times 10^{-4}$

$$n_p = \frac{2450}{T + 273.15} - 1.09$$

D^{**} の詳細計算結果と簡易式による結果との比較を 550°C について図4.2.17に示す。簡易式による D^{**} の値は、高温使用時間によらず D^{**} の詳細計算結果を上回っている。

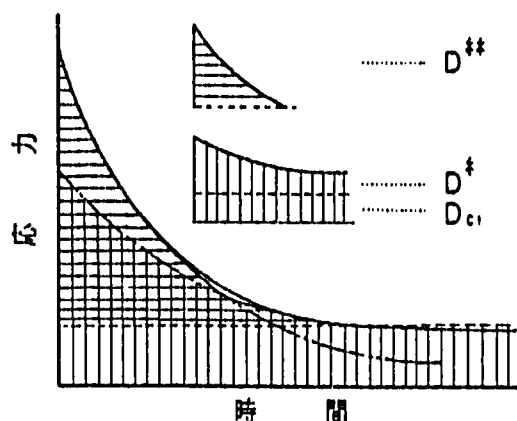


図4.2.15 D^{**} の応力緩和挙動と D^*

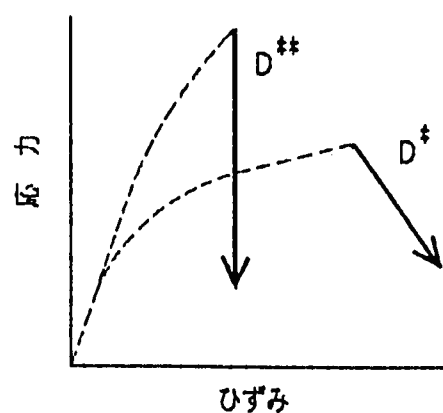


図4.2.16 D^{**} の応力緩和経路と D^*

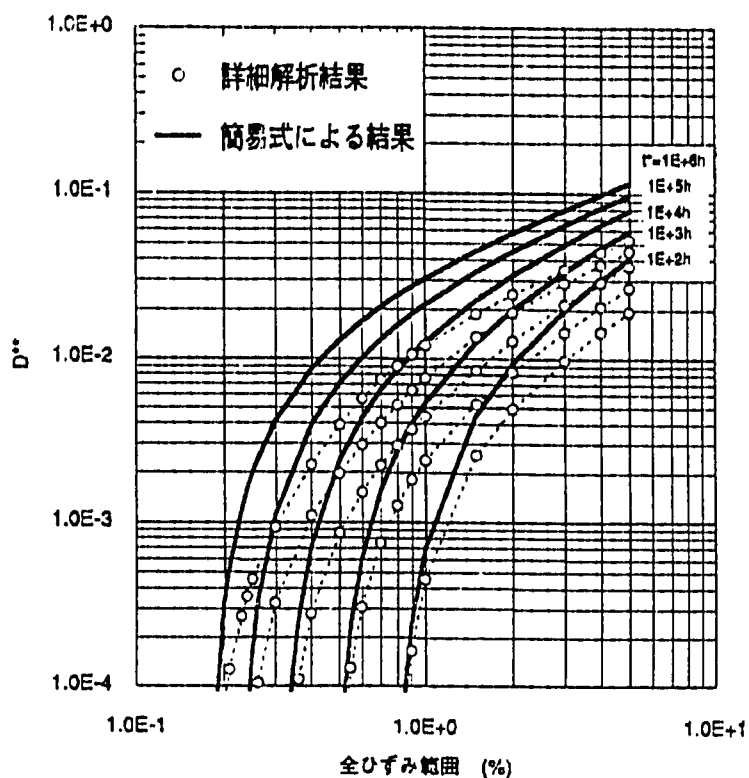


図4.2.17 簡易式と詳細計算による D^{**} の比較

⑩ 厚肉鍛鋼品49kg/mm²級のクリープ特性

設計クリープ破断応力強さ S_R は、当該温度における設計引張強さ S_u を越えないものとして定められるので、高応力側で53kg/mm²の設計クリープ破断応力強さよりも低下させている。

(3) その他の材料強度基準等

① 設計応力強さ S_m (イ) 温度 $T \leq 425^\circ\text{C}$ 告示の別表第2に定めるSUS316の設計応力強さ S_m とした。(ロ) $425^\circ\text{C} \leq T \leq 650^\circ\text{C}$ 構造設計方針においてはSUS316について、次に掲げる値のうち最小のものを S_m としている。

① 室温での設計引張強さの 1/3倍の値

② 各温度での設計引張強さの 1/3倍の値

③ 室温での設計降伏点の 2/3倍の値

④ 各温度での設計降伏点の 2/3倍の値

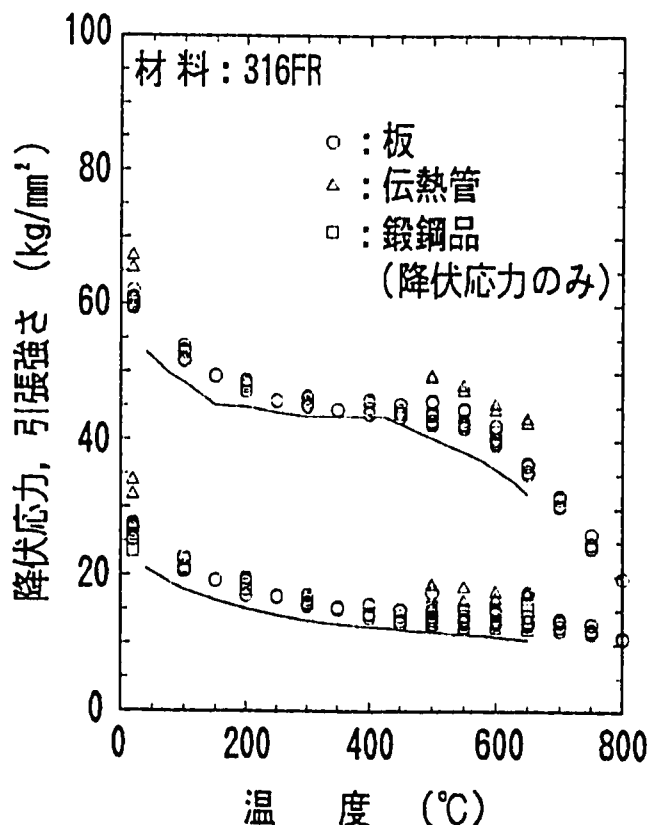
316FR について S_m は①および④によって決まるが、後述のように316FR の設計降伏点はSUS316の設計降伏点と同一としたので、 S_m として構造設計方針のSUS316の値を準用した。② 設計降伏点 S_y (イ) 温度 $T \leq 425^\circ\text{C}$ 告示の別表第9に定めるSUS316の設計降伏点 S_y とした。(ロ) $425^\circ\text{C} \leq T \leq 650^\circ\text{C}$ 構造設計指針におけるSUS316の S_y は、図 4.3.1に示すように316FR の降伏応力を低めに表現しているので、SUS316の S_y を準用した。構造設計方針における S_y の策定は下式による。

$$S_y(T) = \sigma_{y, RT} \times r_y(T) / \alpha_y$$

ここで、

 $S_y(T)$: 温度 T における設計降伏点 $\sigma_{y, RT}$: 室温での平均降伏点 25.9 kg/mm^2 α_y : 平均降伏点/設計降伏点 $r_y(T)$: 室温降伏点に対する高温降伏点の比を温度の関数として与えるトレンド曲線

$$r_y(T) = 1.035 - 1.948 \times 10^{-3} T + 3.104 \times 10^{-6} T^2 - 1.698 \times 10^{-9} T^3$$



伝熱管および鍛鋼品の特性は
下記文献による。
植田ほか: 316FR の機械的強度
1993年機械学会材料力学講演会

図 4.3.1 設計降伏点および設計引張強さと引張試験結果

③ 設計引張強さ S_u (イ) 温度 $T \leq 425^\circ\text{C}$ 告示の別表第10に定めるSUS316の設計引張強さ S_u とした。(ロ) $425^\circ\text{C} \leq T \leq 650^\circ\text{C}$

収集したデータの回帰分析および統計解析を行い、通産省告示 501号の設計引張強さ策定において用いられた99%信頼下限値によって316FRの設計引張強さを定める方法によった。

設計引張強さと試験結果の対応は、図 4.3.1に示したように、良好である。

④ 設計疲労線図

構造設計指針において策定したSUS316の平均疲労破損式は、図 4.3.2に示すように、低寿命領域で316FRの疲労試験結果の傾向をよく表しており、高寿命領域では約1桁近く安全側の低寿命を予測する。316FRの設計疲労線図は、保守的にSUS316の設計疲労線図を準用することとした。なおSUS316の設計疲労線図は下記によって定めている。

(イ) SUS316の平均疲労破損式

$$(\log_{10} N_f)^{1/2} = A_0 + A_1 \log_{10} \Delta \epsilon_t + A_2 (\log_{10} \Delta \epsilon_t)^2 + A_3 (\log_{10} \Delta \epsilon_t)^4$$

ここで、

$$A_0 = 1.621827 - 0.4567850 \times 10^{-7} \times T^2 \times R$$

$$A_1 = 1.131346 + 0.8665061 \times 10^{-8} \times T^2$$

$$A_2 = 0.3439663$$

$$A_3 = -1.374387 \times 10^{-2} + 0.4910723 \times 10^{-4} \times R$$

$$R = \log_{10} \epsilon$$

使用単位

 T : 温度 $^\circ\text{C}$ ϵ : ひずみ速度 mm/mm/sec $\Delta \epsilon_t$: 全ひずみ範囲 mm/mm N_f : 破損繰返し数

(ロ) 得られた平均疲労破損曲線に対してひずみ範囲で 1/2、繰返し数で1/20の係数を乗じた値のうち、いずれか小さいほうの値を許容ひずみ範囲とした。ただし、曲率の不連続部に対しては、滑らかな連続曲線となるように低寿命側にフェアリングを実施した。

設計用疲労寿命は、図 4.3.3に示すように、疲労寿命の実験結果の約1/20以下となっている。

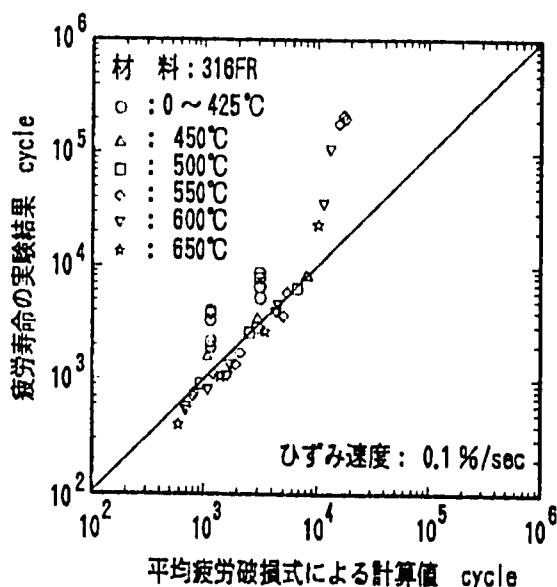


図 4.3.2 平均疲労破損式の寿命予測性

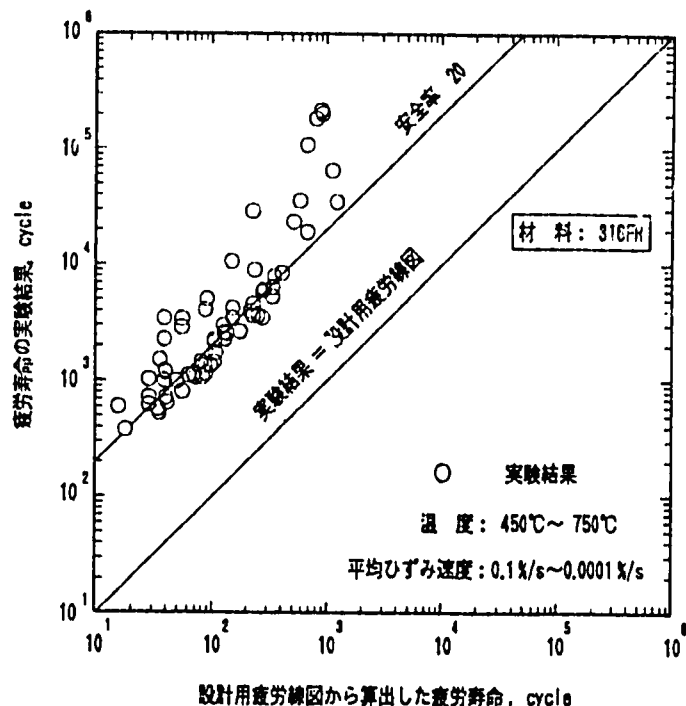


図 4.3.3 設計用疲労線図と疲労寿命の実験結果

⑤ 許容引張応力 S^* (イ) 温度 $T \leq 425^\circ\text{C}$

告示別表第 6 に定める SUS316 の値と同一とした。

(ロ) $425^\circ\text{C} \leq T \leq 650^\circ\text{C}$

次に掲げる値のうち最小のもの

① 室温での規格引張強さの 0.25 倍の値

② 各温度での設計引張強さの 0.25 倍の値

③ 室温での規格降伏点の 0.625 倍の値

④ 各温度での設計降伏点の 0.9 倍の値

⑥ 厚肉鍛鋼品 $49\text{kg}/\text{mm}^2$ 級の許容引張応力

板厚 130 mm を越える大型鍛鋼品に関しては、規格引張強さ $49\text{kg}/\text{mm}^2$ 級の設計引張強さとした。高温の引張強さは、規格引張強さ $53\text{kg}/\text{mm}^2$ 級のトレンド曲線を用いた。厚肉鍛鋼品の試験結果と設計引張強さの関係を図 4.3.4 に示す。

⑦ ナトリウム環境効果

316FR のナトリウムによる腐食について、図 4.3.5 に酸素濃度 1 ppm で $5,000$ 時間の同一条件で SUS304、SUS316 および 316FR をナトリウム中で浸漬した結果を示すが、316FR のナトリウム腐食は SUS316 と同等である。腐食形態は、全面腐食型となり、局部腐食は生じない。構造設計方針においては、 5 ppm 以下の酸素濃度では下限値 5 ppm として腐食量を算出するものと定めており、構造設計方針の規定は安全側である。

5 ppm 以上の酸素濃度に対しては、構造設計方針において SUS316 や SUS304 の腐食量が酸素濃度に比例する実験結果に基づいて、材料強度基準等に定めた設計腐食代評価式を与えている。316FR においても、この評価式を準用した。

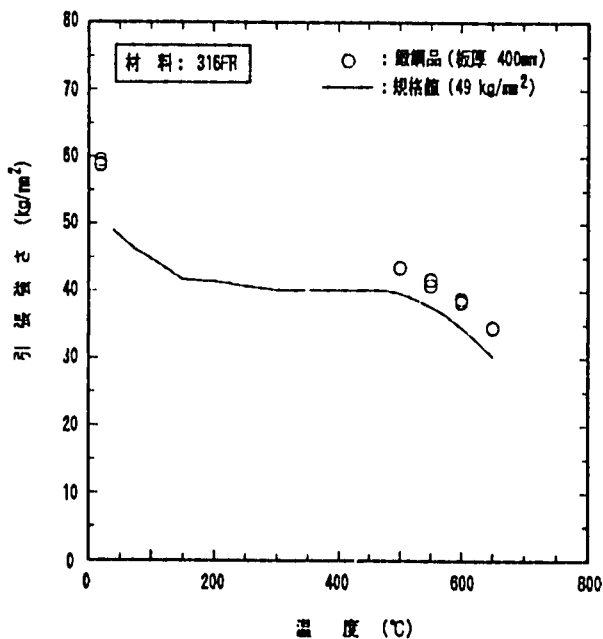


図 4.3.4 厚肉鍛鋼品 $49\text{kg}/\text{mm}^2$ 級の許容引張応力と実験結果
 鍛鋼品のデータは下記文献による。
 { 植田ほか：316FR の機械的強度、1993年機械学会
 材料力学講演会 }

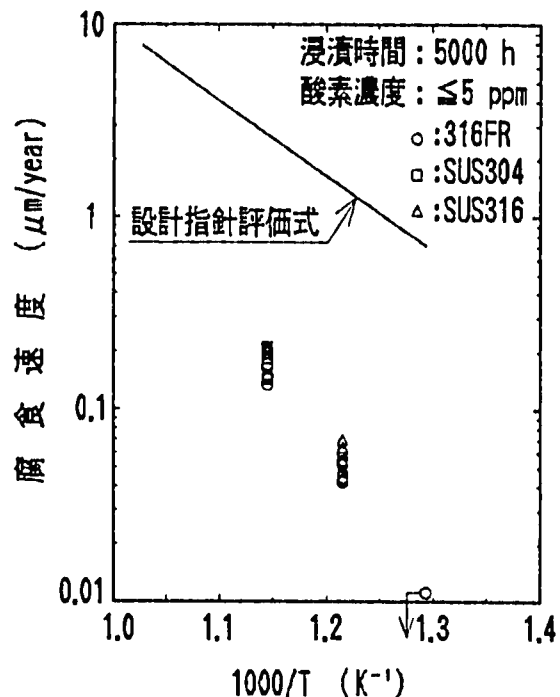


図 4.3.5 ナトリウム中での 316FR の腐食

図表集等

- (1) 化学成分と機械的特性
- (2) 弾塑性真応力対数ひずみ線図とSUS316基準値
- (3) クリープ特性追補
- (4) クリープ疲労破損データによる線型累積損傷則の検証
- (5) 疲労特性追補図
- (6) 緩和クリープ損傷係数 D^* ， D^{**} に関する検討
- (7) 中性子照射効果
- (8) 溶接金属と溶接継手の特性
- (9) き裂進展特性
- (10) 316FRのナトリウム環境効果評価
- (11) 316FRの使用実績
- (12) 316L(N) と316FR

図表集等(1) 化学成分と機械的特性

316FRの化学成分と機械的性質を下に示す。数値は、316FRのこれまでの研究開発結果および最新版の J I S (J I Sハンドブック 鉄鋼 1992)から決めた。

化学成分 (重量パーセント)

材 料	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	N
板 材 鍛鋼品 伝熱管 配 管 棒	≤ 0.02	≤ 1.00	≤ 2.00	0.015 -0.045	≤ 0.030	10.00 -14.00	16.00 -18.00	2.00 -3.00	—	0.06 -0.12

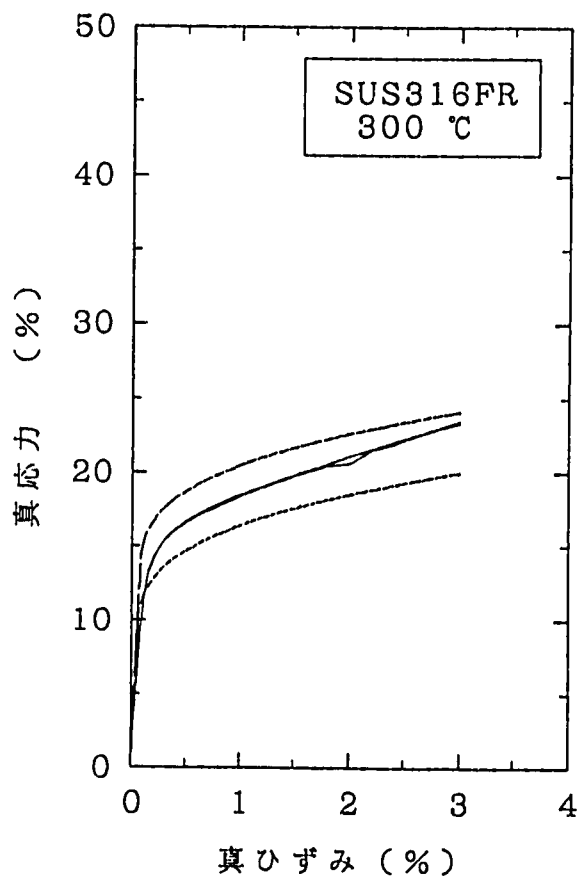
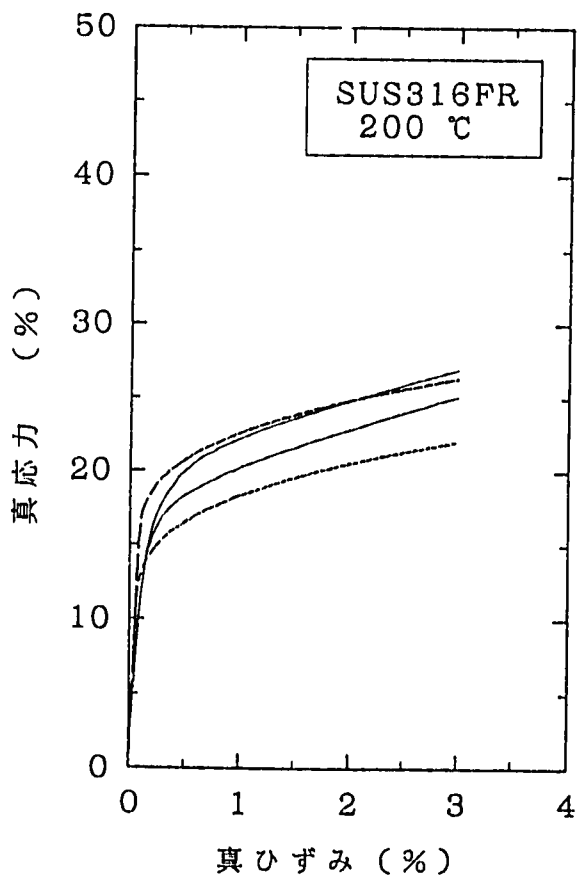
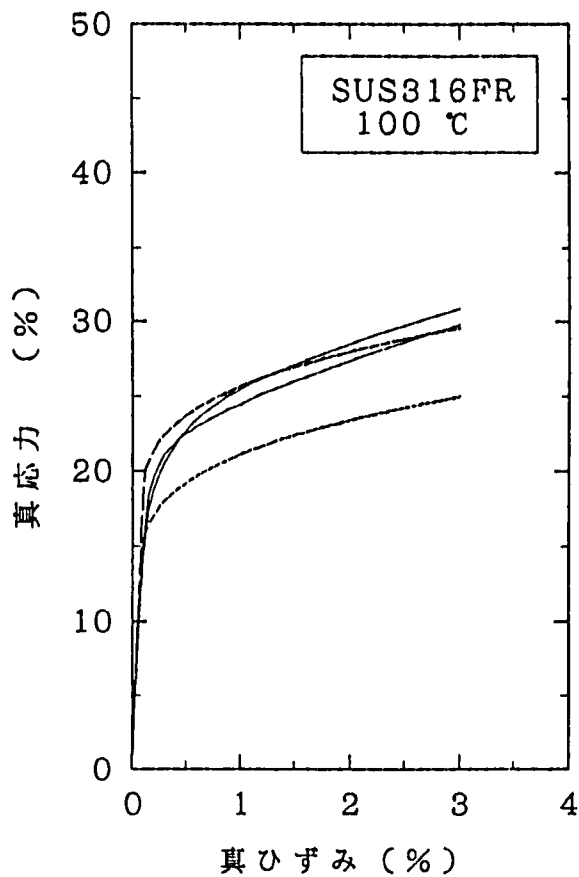
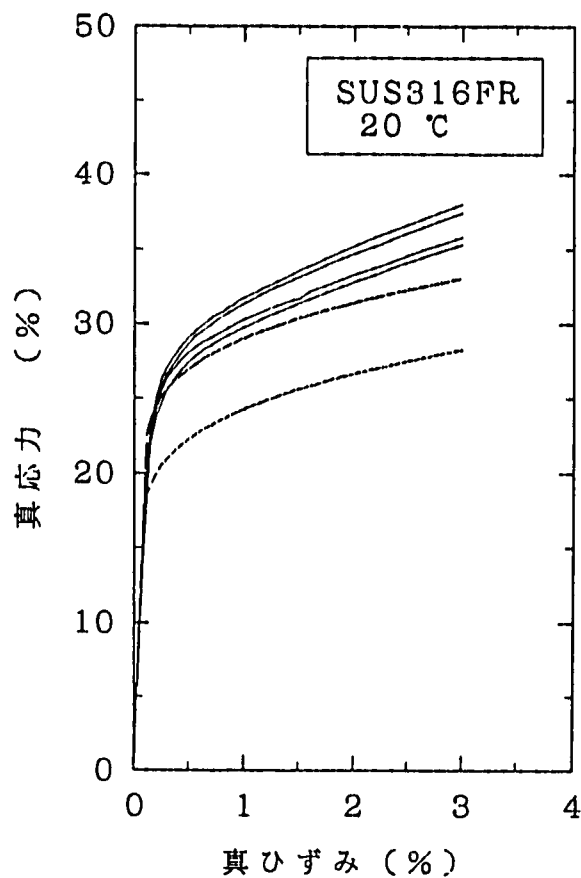
機械的性質

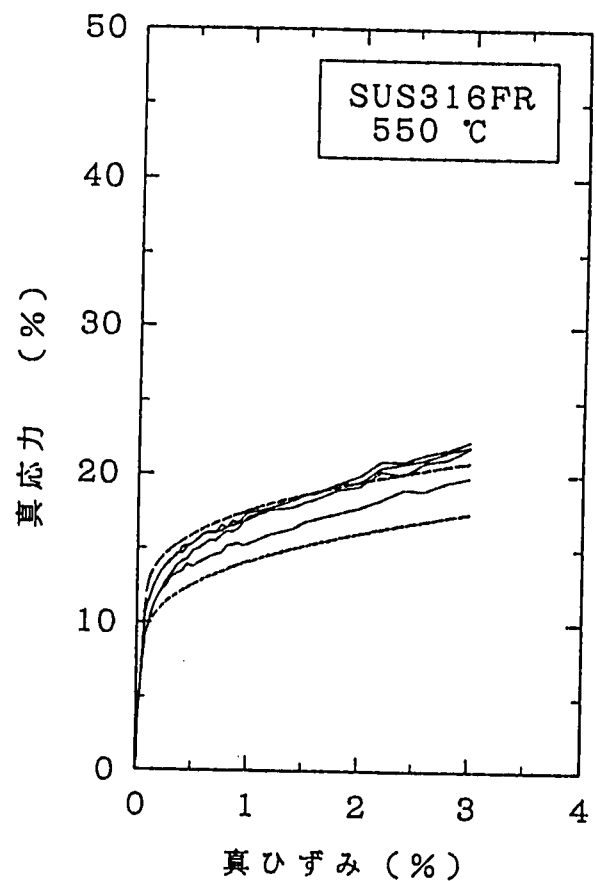
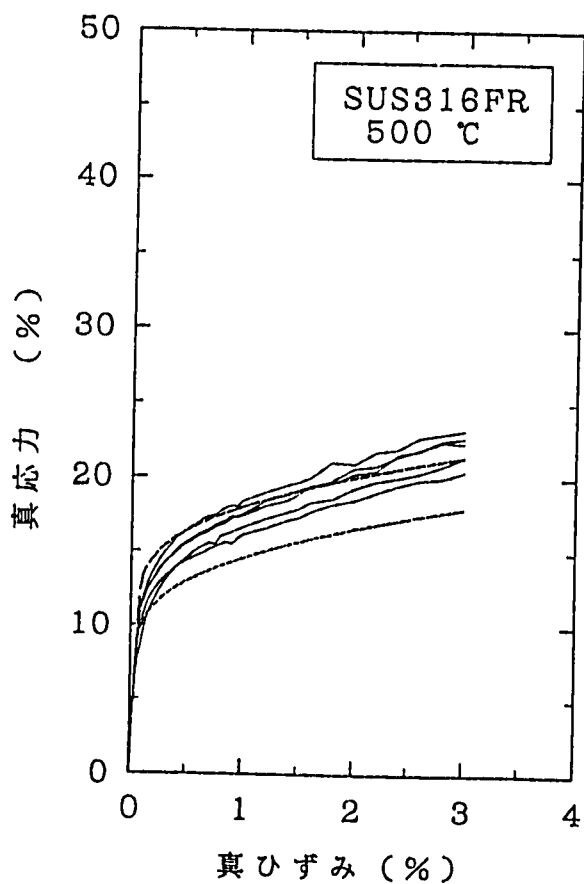
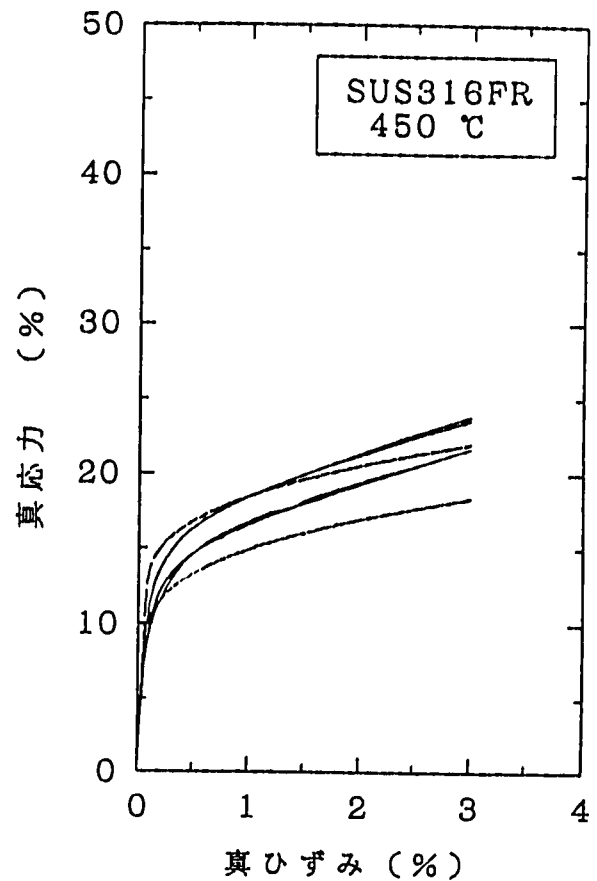
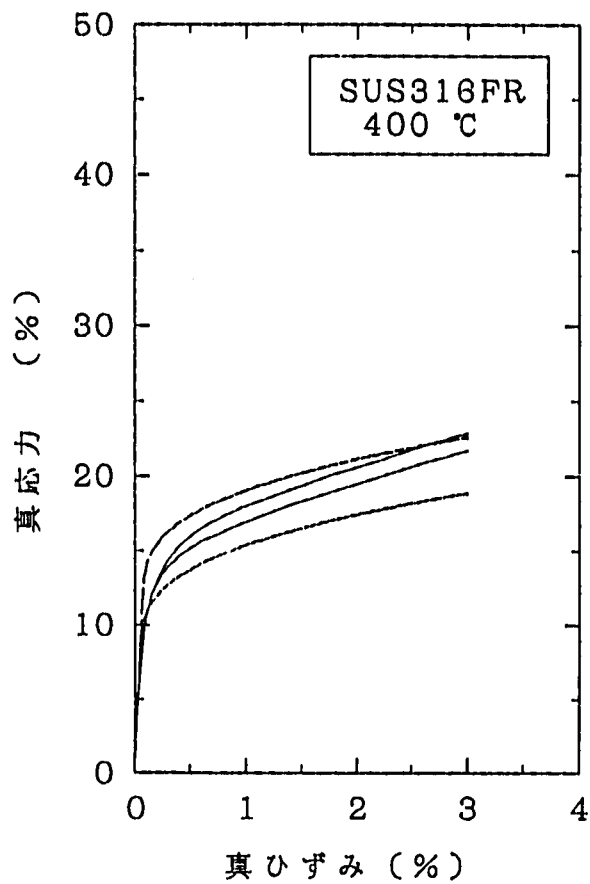
材 料	引張試験				硬さ試験
	耐力 kg/mm ²	引張強さ kg/mm ²	伸び%	絞り%	HB
板 材	21 以上	53 以上	40以上	——	187 以下
鍛鋼品 厚さ130mm 未満 厚さ130mm 以上	21 以上	53 以上	43以上	50以上	187 以下
	21 以上	49 以上	29以上	45以上	187 以下
伝熱管	21 以上	53 以上	30以上	40以上	——
配 管	21 以上	53 以上	35以上	——	——
棒	21 以上	53 以上	40以上	60以上	187 以下

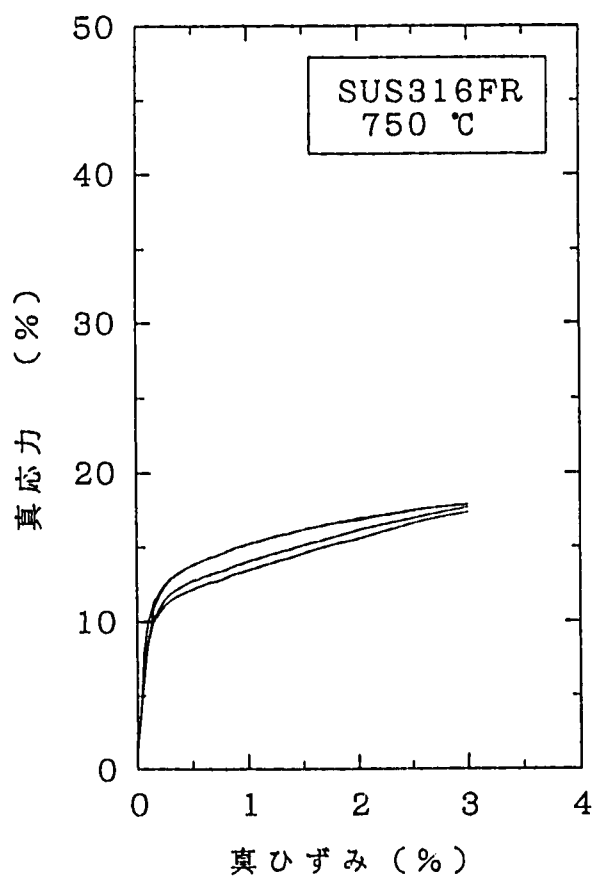
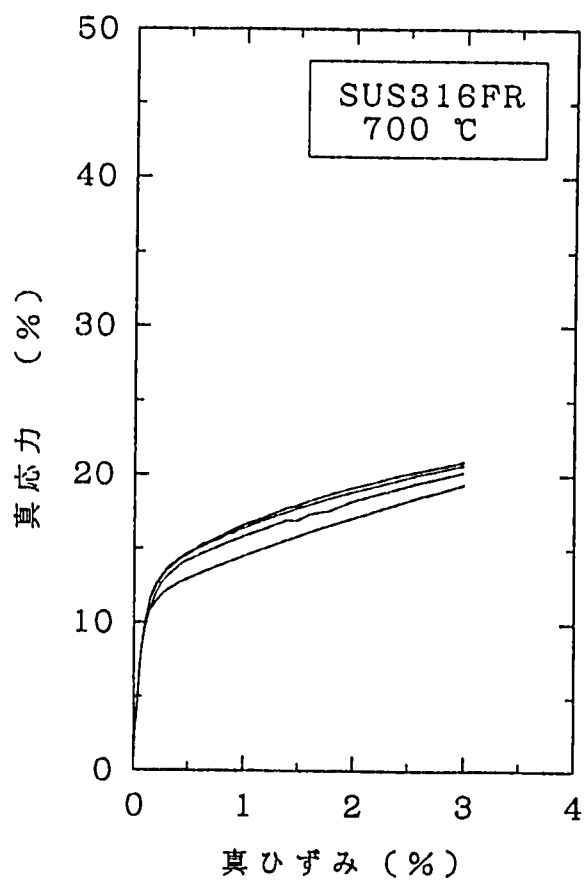
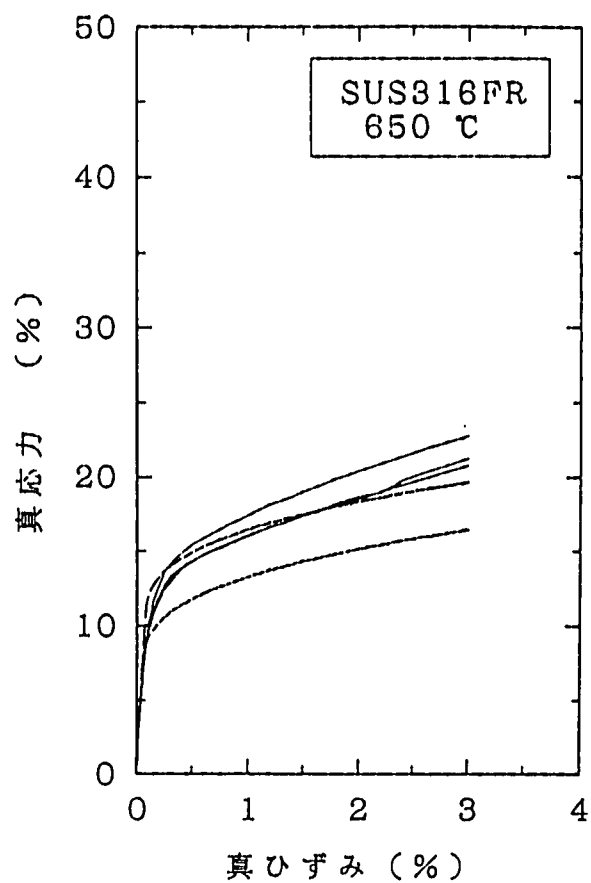
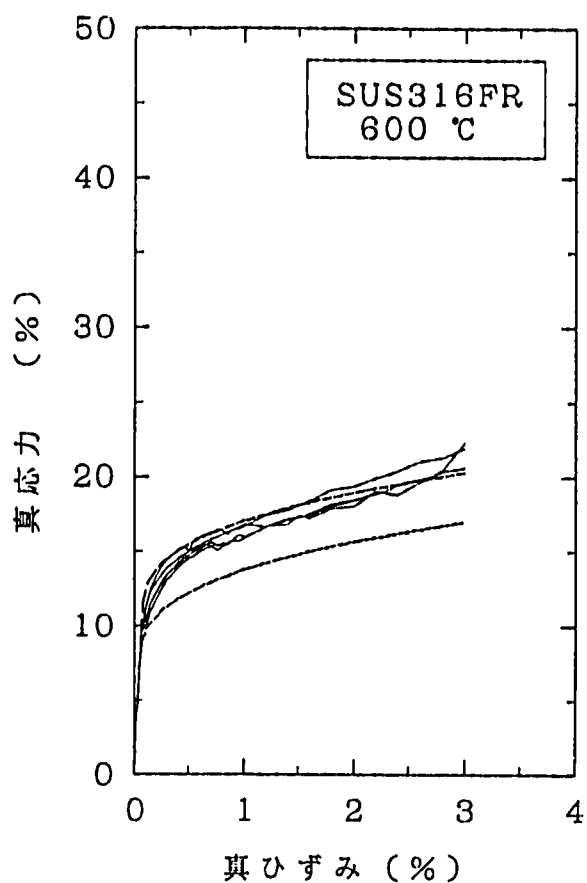
図表集等(2) 弾塑性真応力対数ひずみ線図とSUS316基準値

————— : 316FRの試験結果

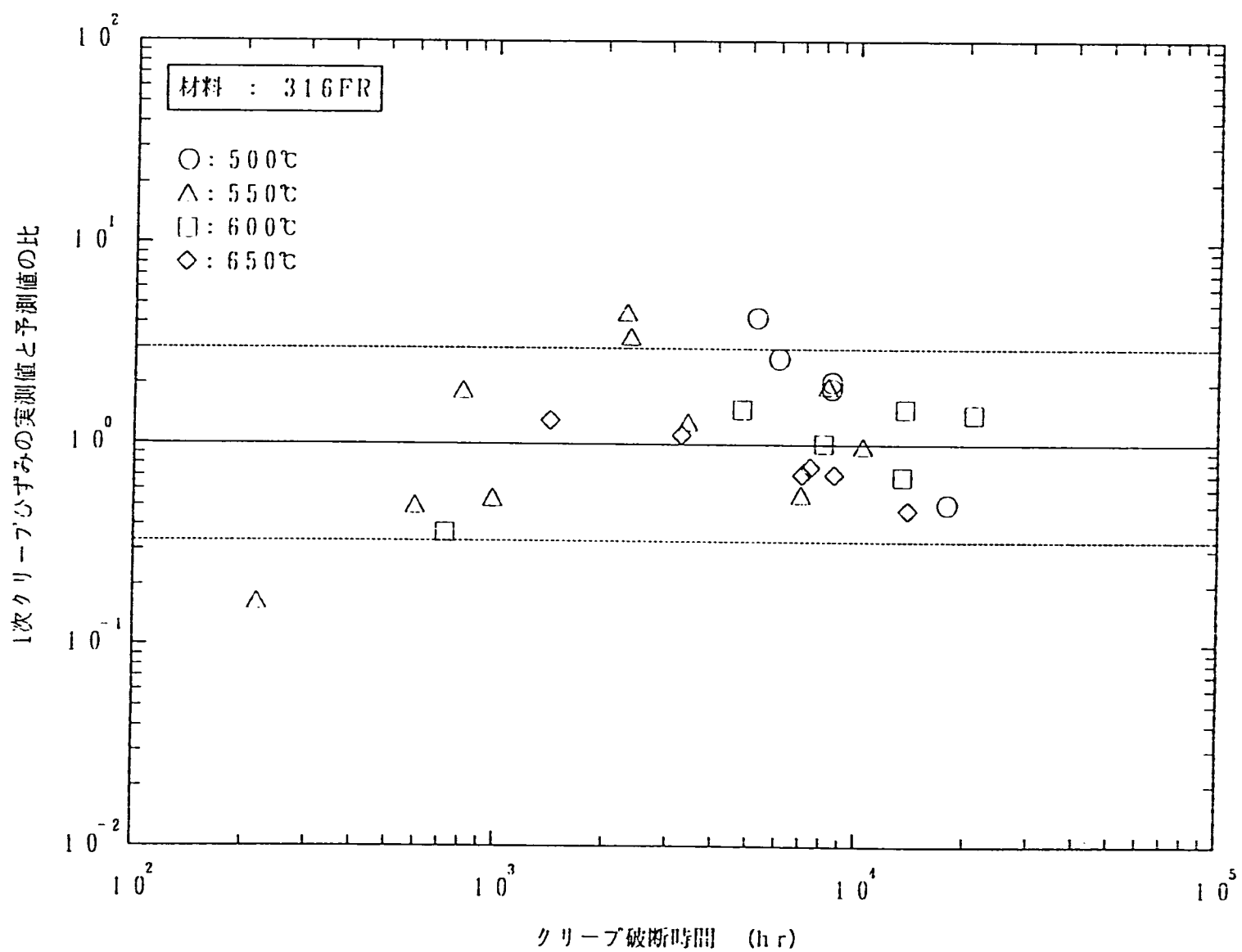
..... : 設計線図 (平均曲線、最小曲線)

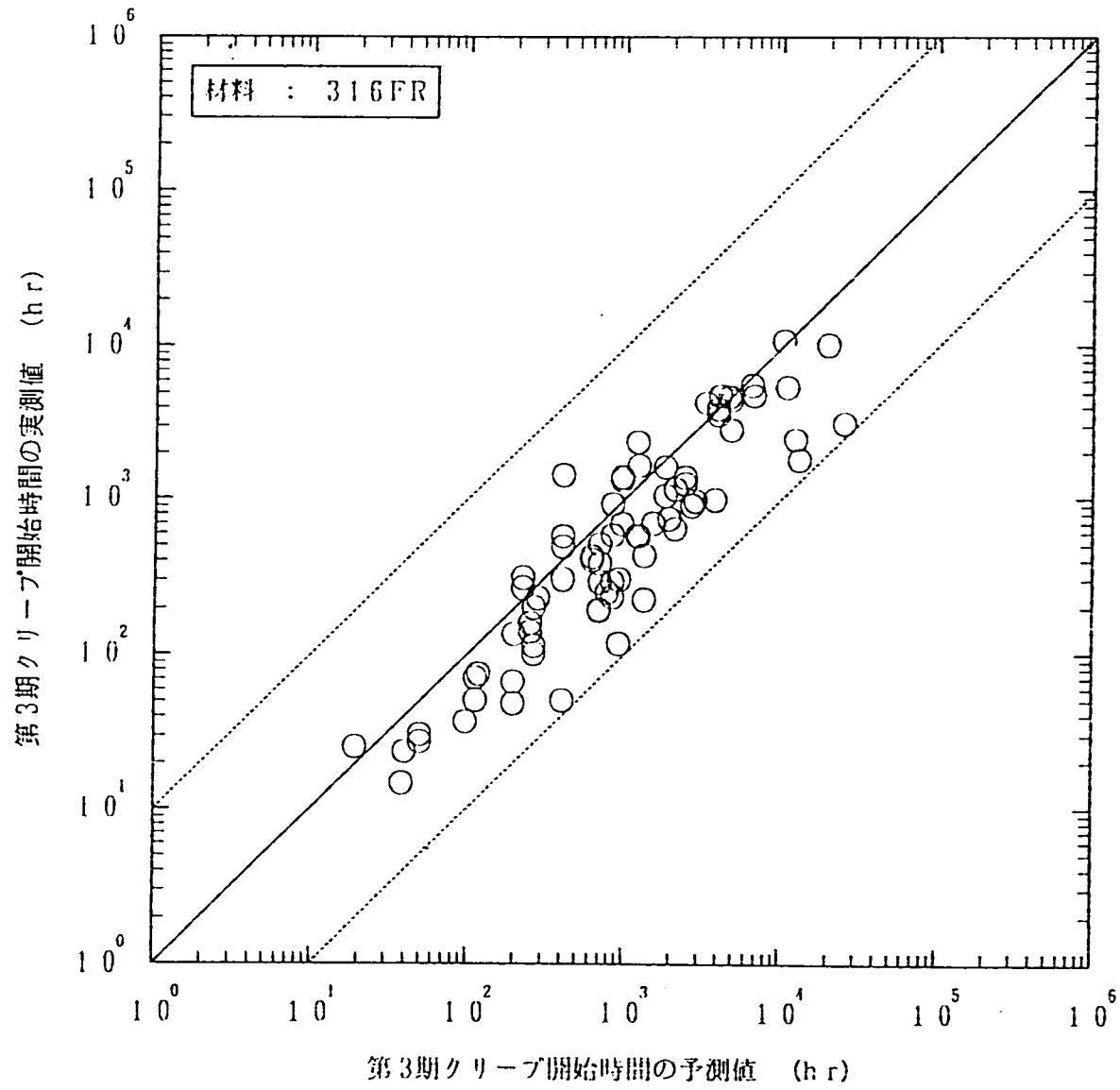




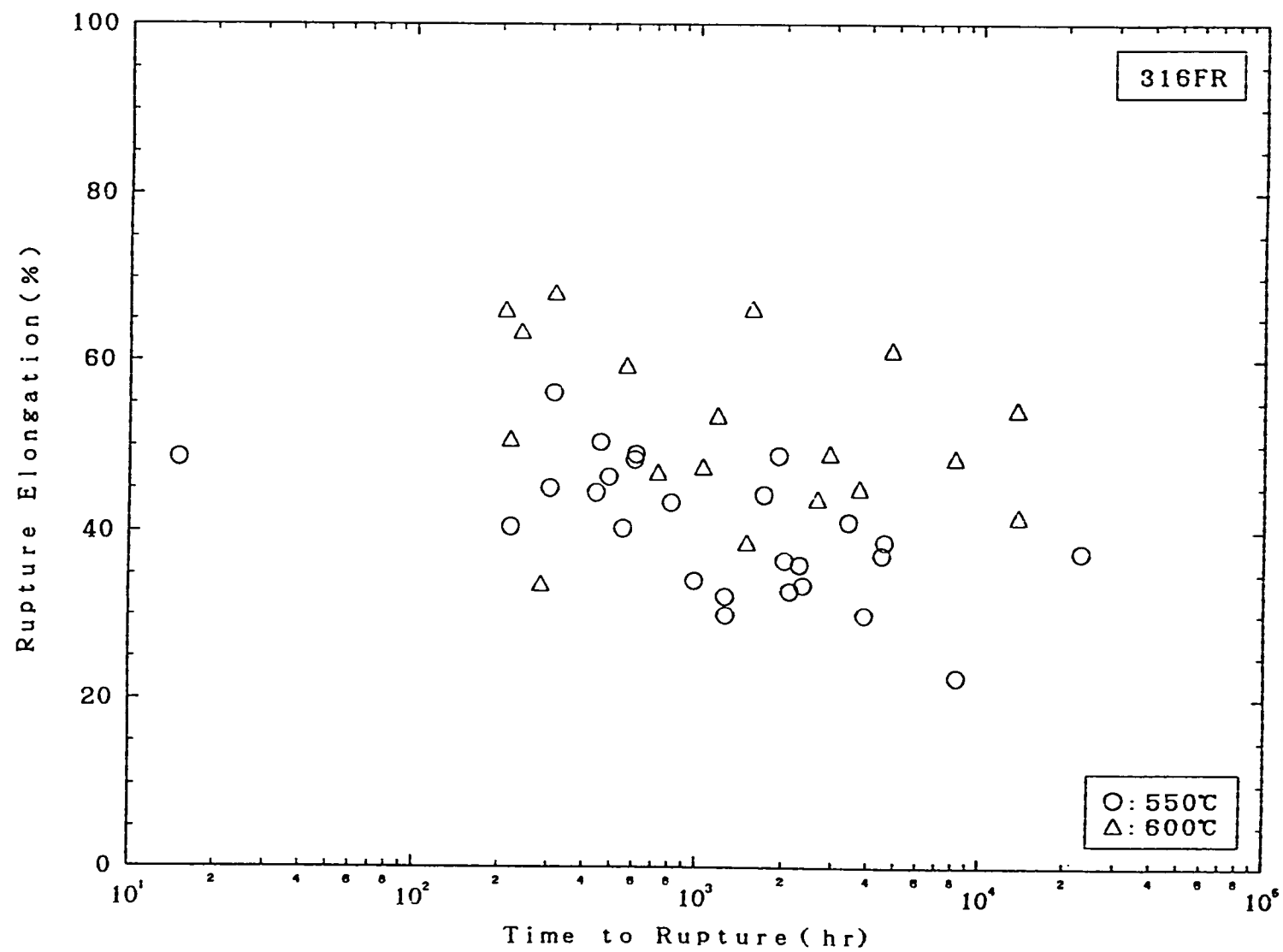


図表集等(3) クリープ特性追補

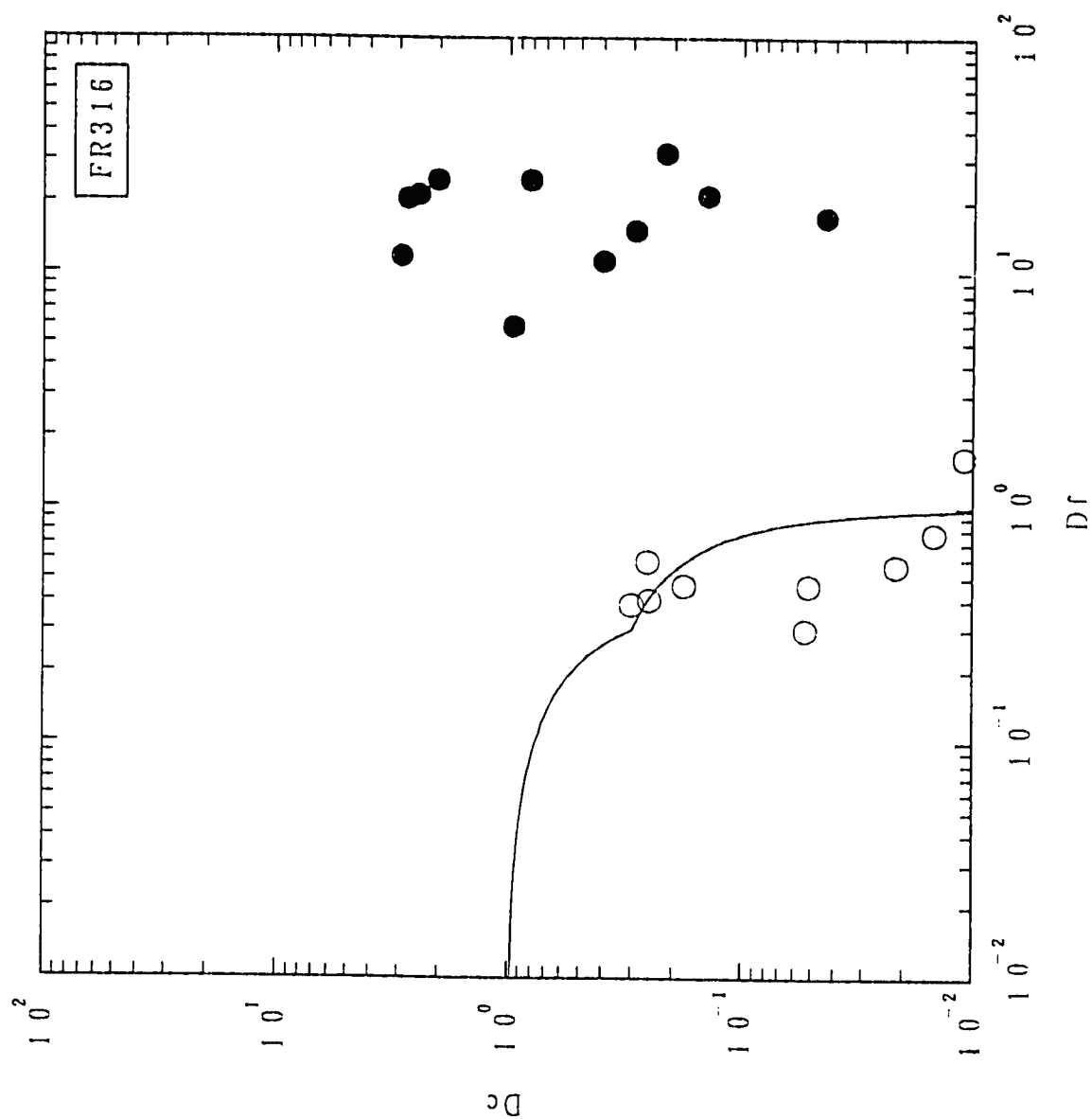




1993



図表集等(4) クリープ疲労破壊データによる線型累積損傷則の検証



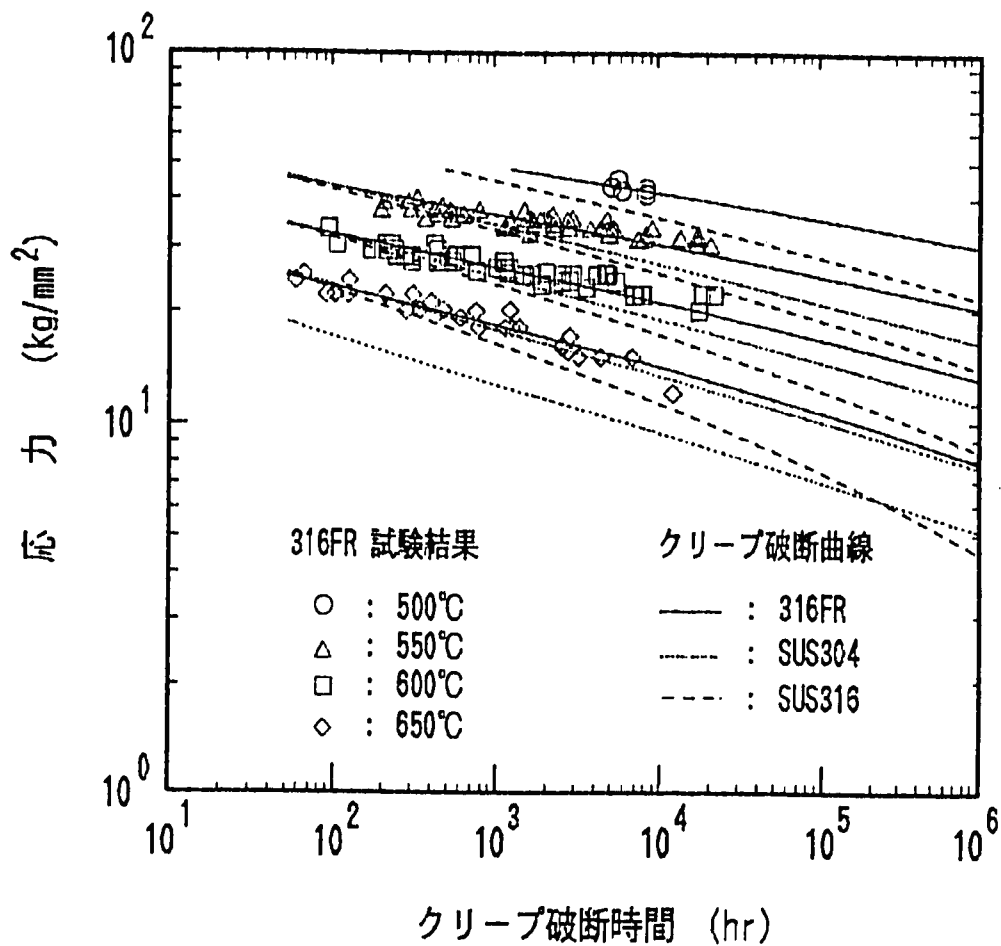


図1 316FRのクリープ破断強度

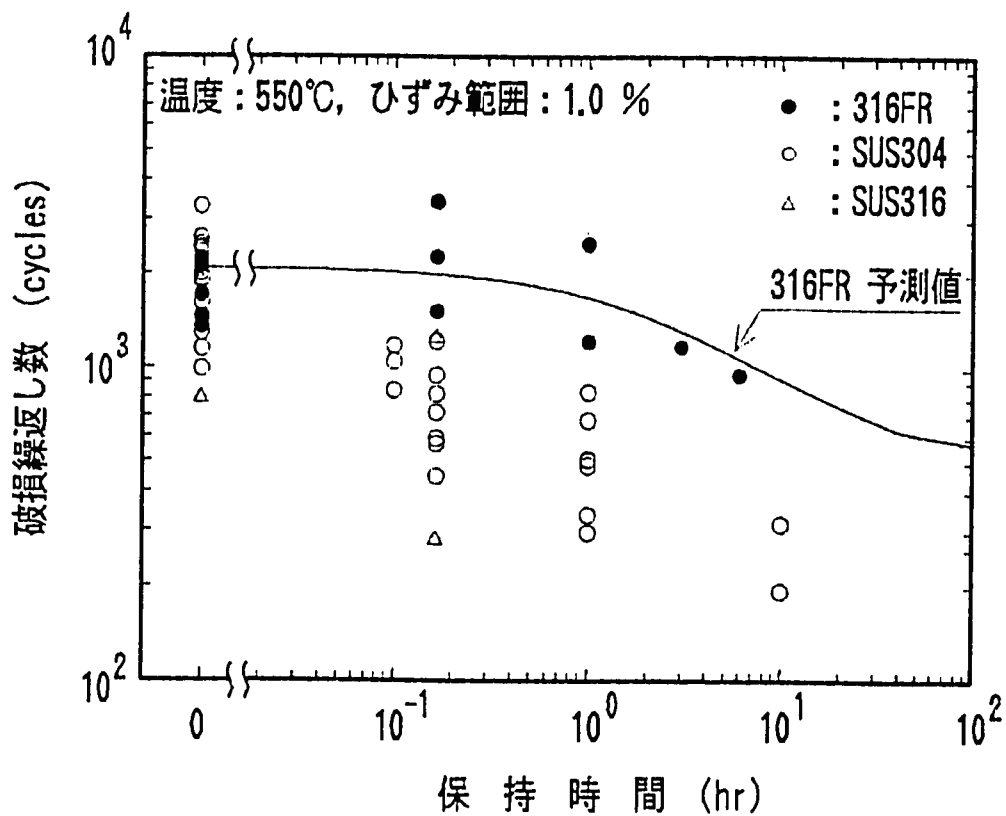
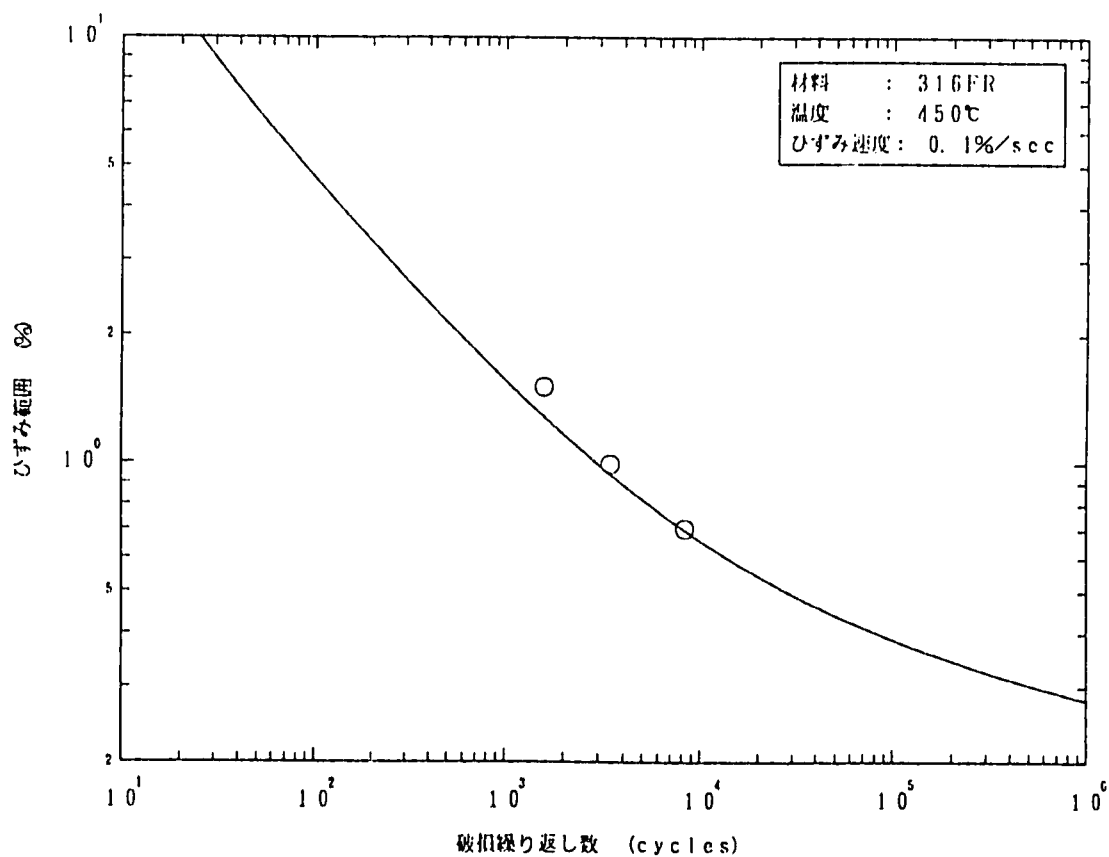
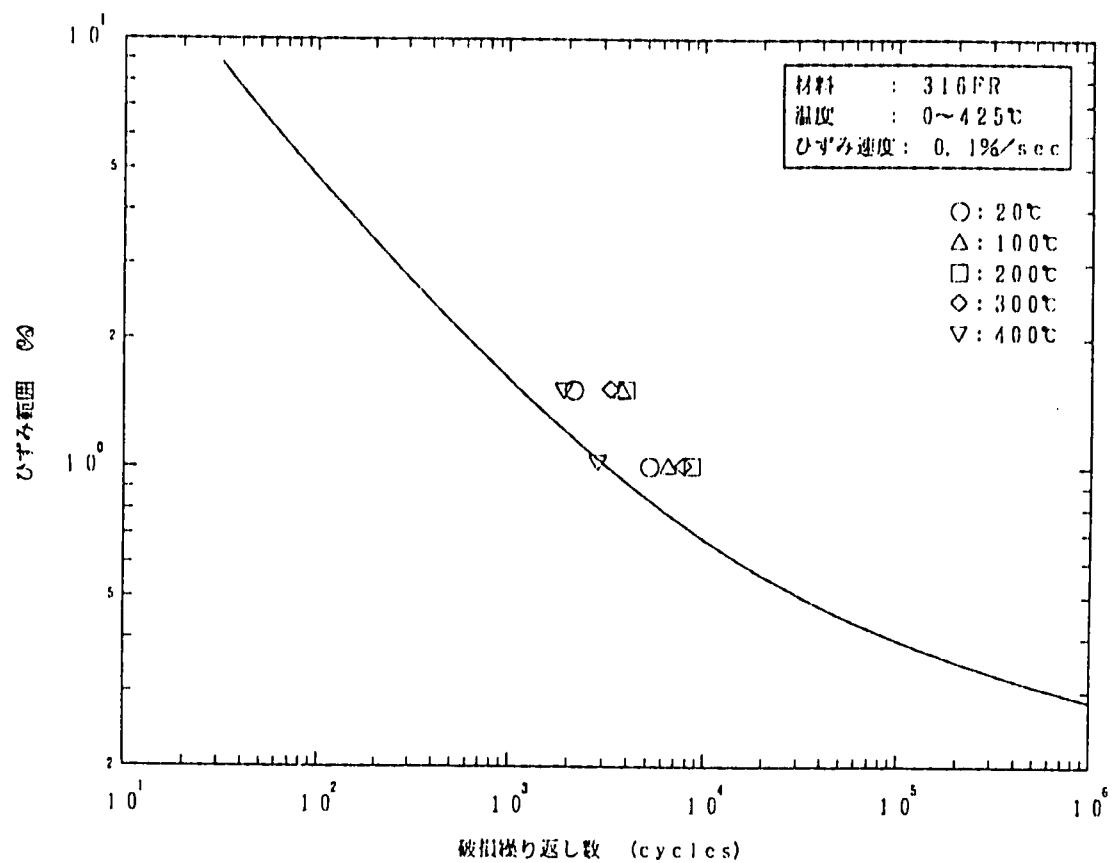
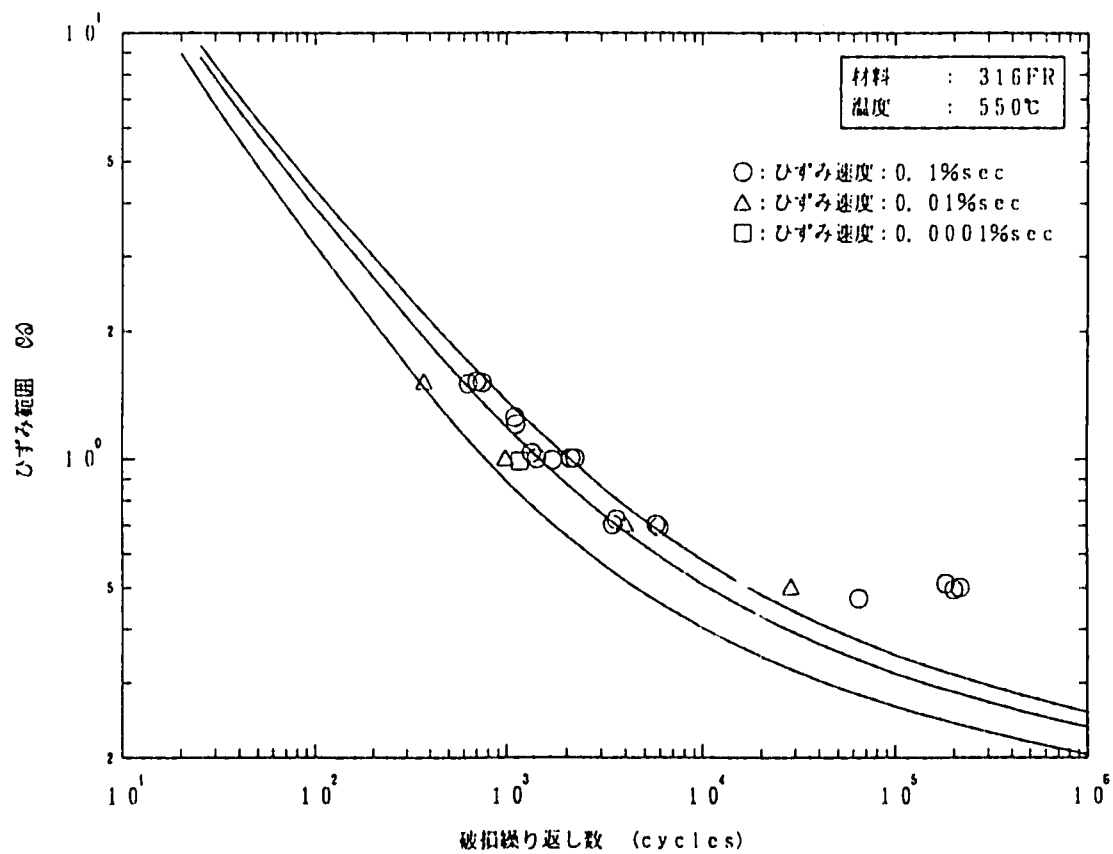
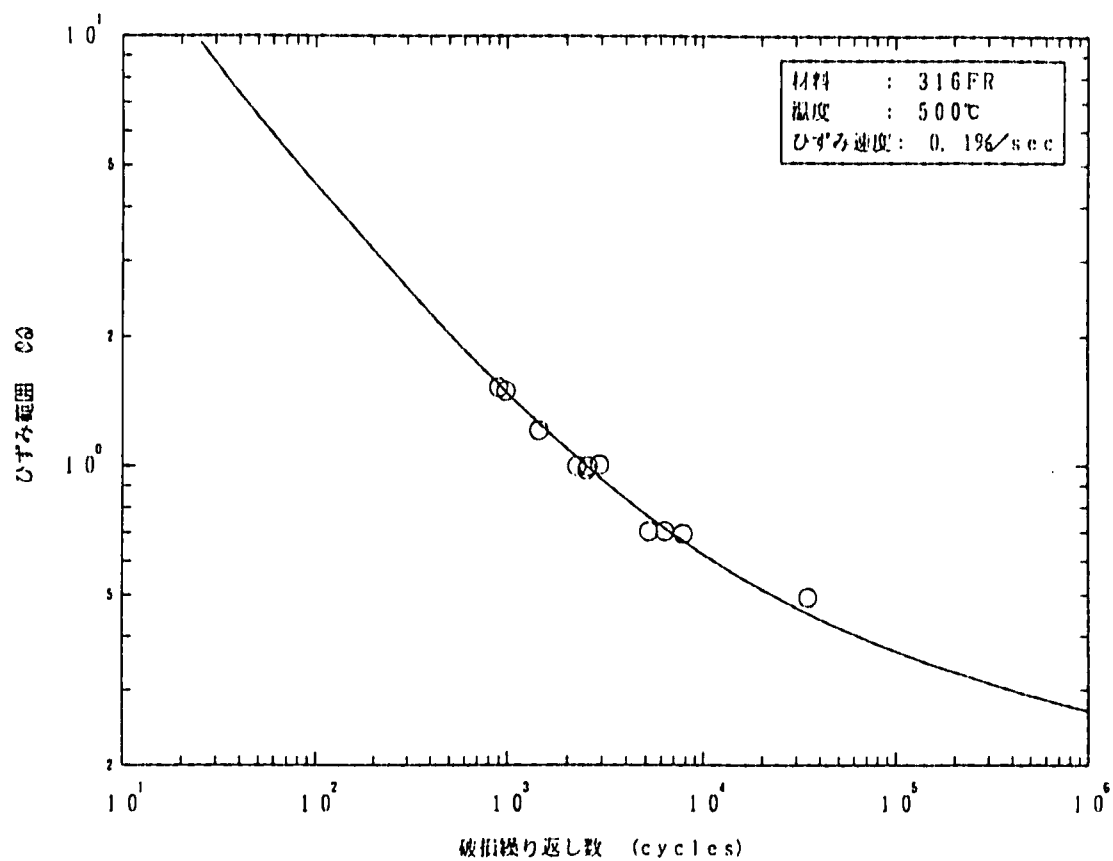
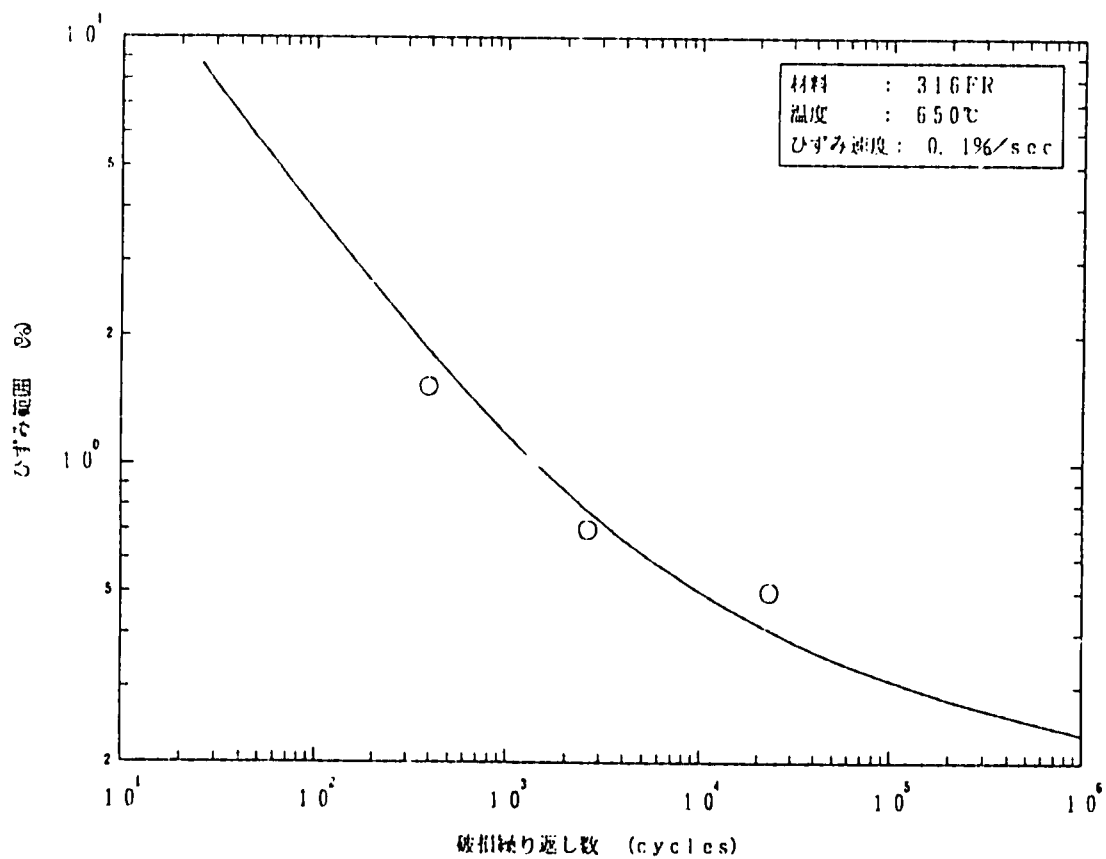
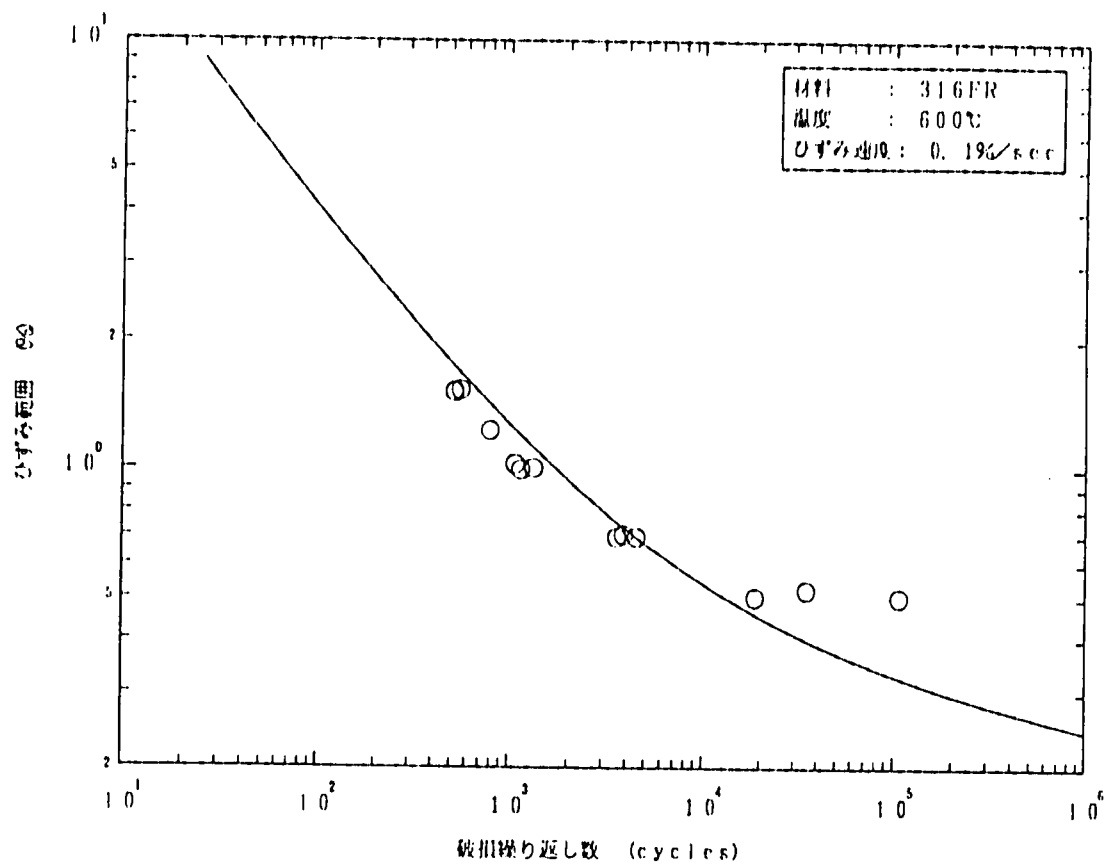


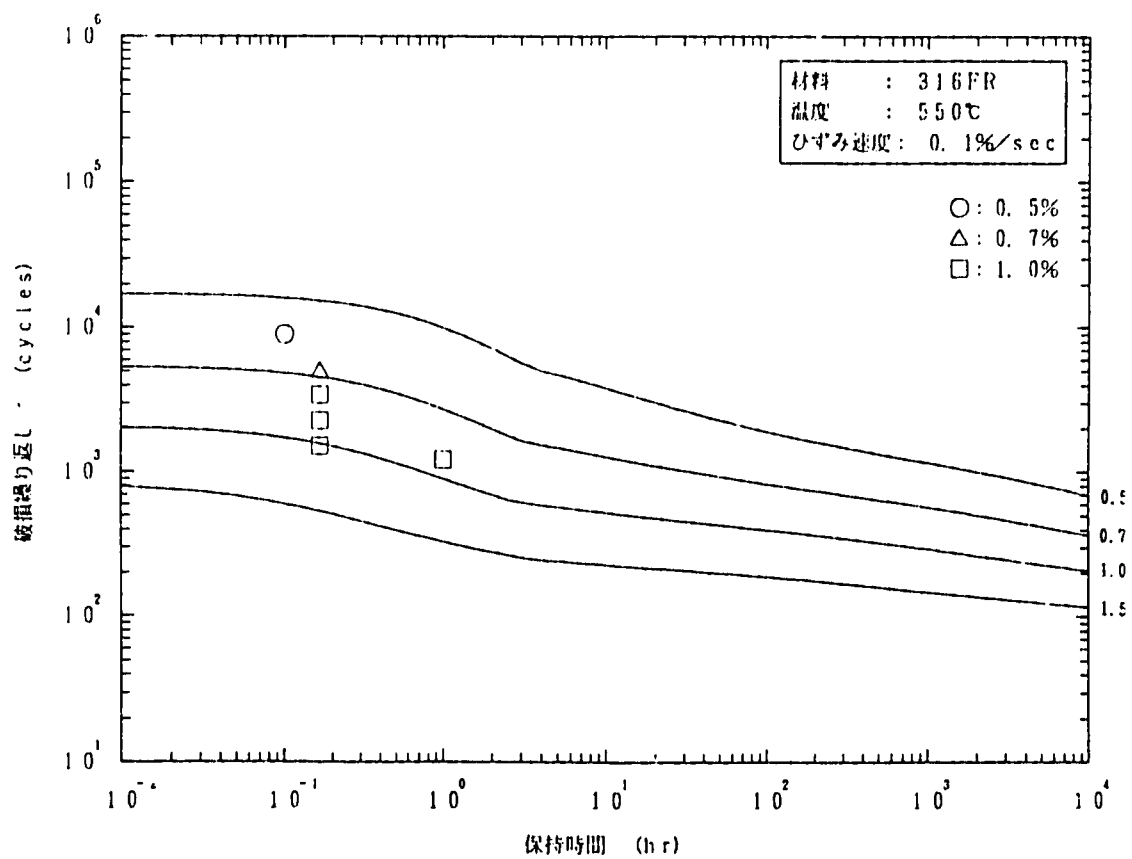
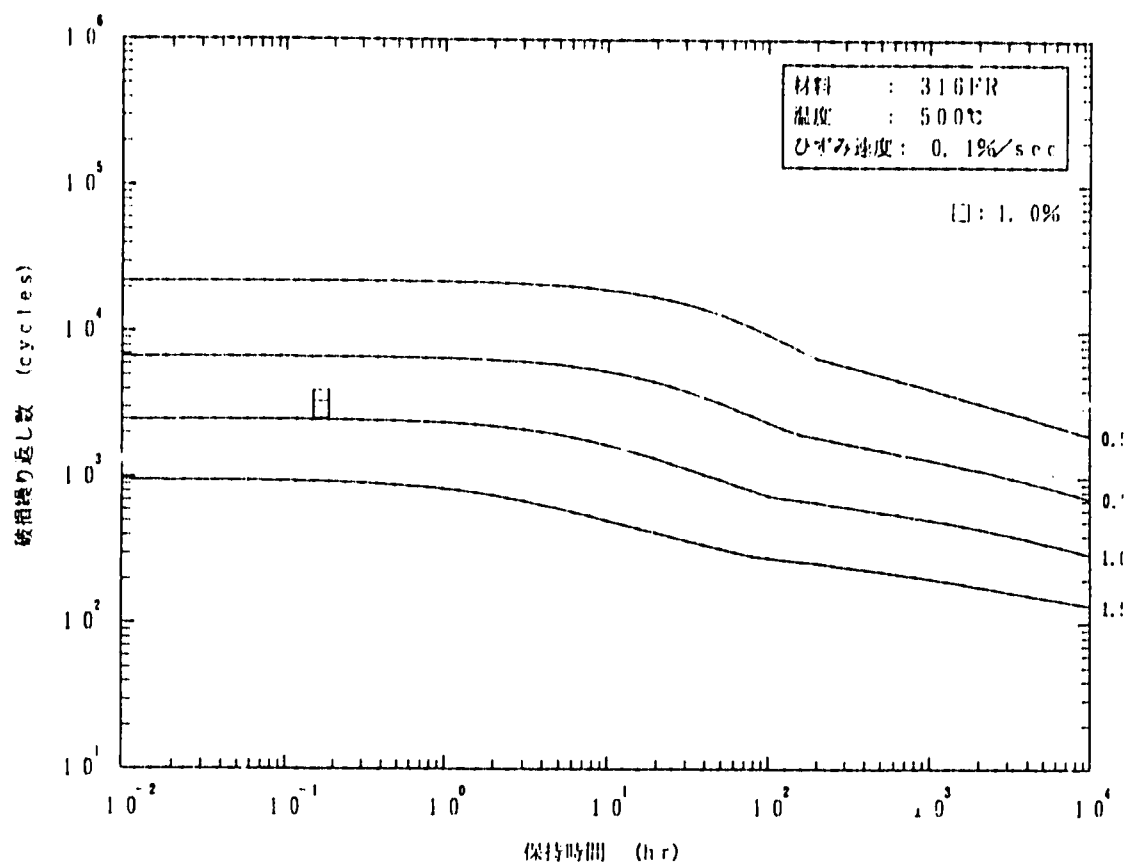
図2 316FRのクリープ疲労強度

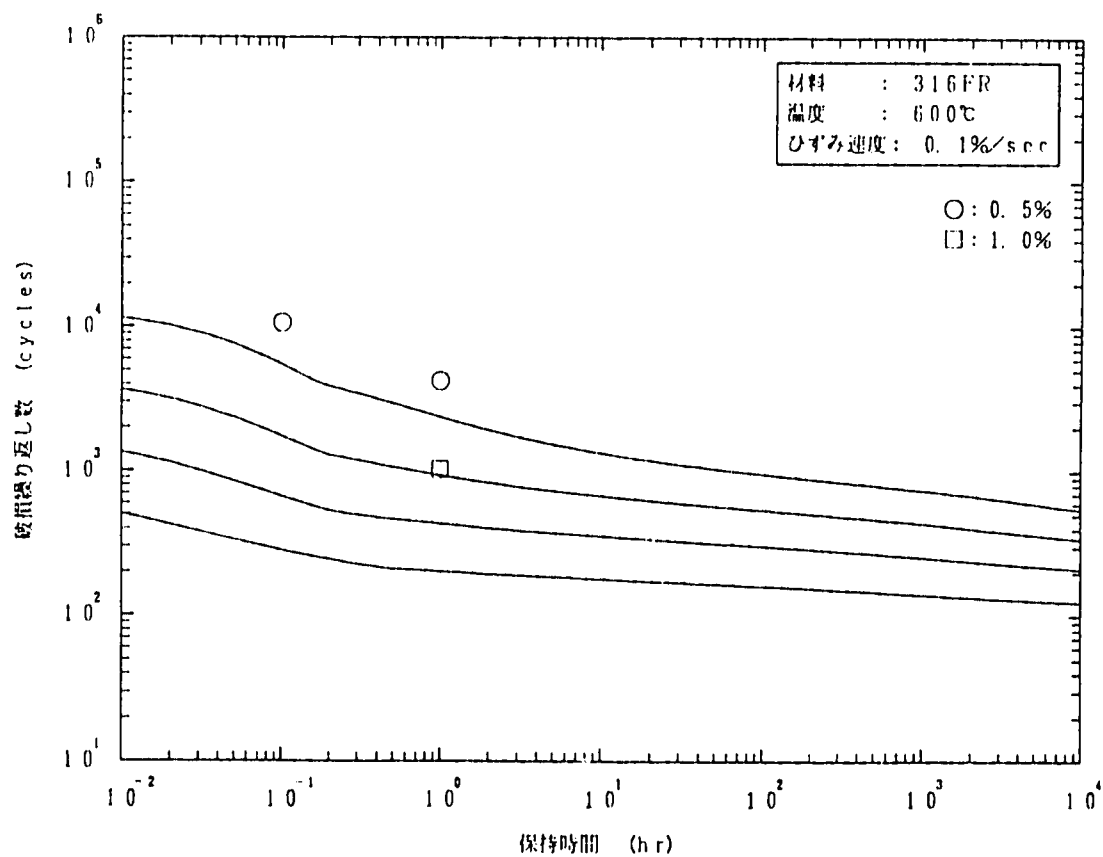
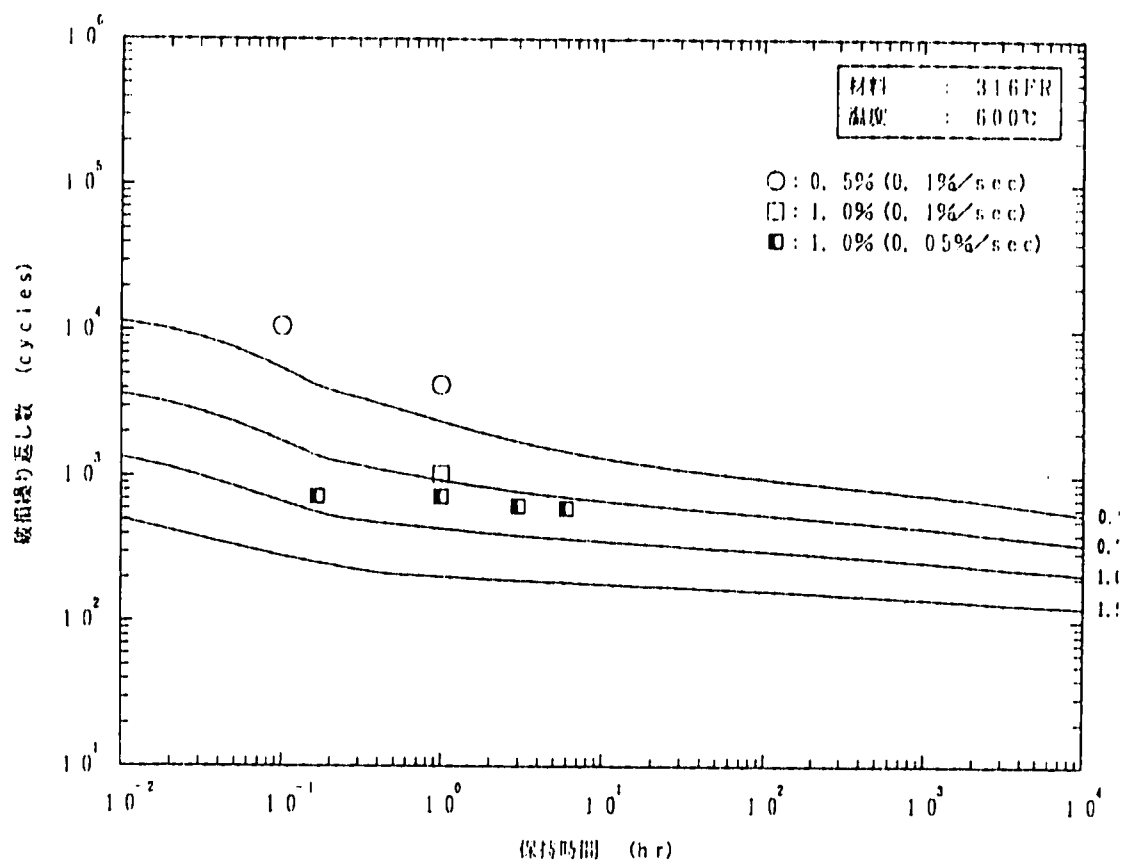
図表集等(5) 疲労特性追補図











図表集等(6) 緩和クリープ損傷係数 D^* 、 D^{**} に関する検討1. 1次及び2次応力に関する緩和クリープ損傷係数 D^*

緩和クリープ損傷係数 D^* の詳細計算については、解説「高速原型炉第1種機器の高温構造設計方針」¹⁾に定めるSUS316の詳細計算方法にならい、算出した。今回の詳細計算結果は89年度暫定版²⁾で得られた結果と同じものである。

D^* の簡易計算についてはかなり保守的な計算結果となっていたため、今回新たに算出した。簡易式の形式はSUS316と同様の式の形とし、定数のみを変更し、温度425～650℃において、 $t^*=1\times 10^3, 3\times 10^3, 1\times 10^4, 3\times 10^4, 1\times 10^5, 3\times 10^5, 1\times 10^6$ に対する詳細計算値を包絡できる直線として算出した。簡易式を次式に示す。

$$\begin{aligned} T \leq T_n &: D^* = 0 \\ T > T_n &: D^* = D_0 (T - T_n) \\ D_0 &= D_{n0} (2t^* / D_{c1})^{m_n} \\ T_n &= 1 / \{ C_{n1} \log(2t^* / D_{c1}) + C_{n2} \} - 273.15 \\ D_{c1} &= 0.3 \\ D_{n0} &= 1.4 \times 10^{-5} & m_n &= 9.8 \times 10^{-2} \\ C_{n1} &= 3.3 \times 10^{-5} & C_{n2} &= 1.01 \times 10^{-3} \end{aligned}$$

図1に今回算出した D^* 簡易計算値と89年度暫定版 D^* 簡易計算値²⁾の比較を示す。今回の簡易式により充分合理化できたことがわかる。

図2ならびに図3に今回算出した316FRの D^* (簡易計算値)をSUS304とSUS316の $D^{*1)}$ と比較した結果を示す。供用時間 $t^*=10^2, 10^3, 10^4, 10^5, 10^6$ についてプロットした。今回算出した316FRの D^* 簡易計算結果は他鋼種の結果に比べ小さな値を示すことがわかる。

2. ピーク応力に関する緩和クリープ係数 D^{**}

緩和クリープ損傷係数 D^{**} の詳細計算については解説¹⁾に定めるSUS316の詳細計算方法にならい、算出した。詳細計算は90年度暫定版³⁾で改定された式を用い、動的応力-ひずみ曲線についても同様に保守的な評価となるSUS316の関係式をそのまま用いた。

この90年度暫定版 D^{**} を基にした簡易計算はこれまで策定されておらず、今回新たに簡易計算式の策定を実施した。簡易式の作成は解説¹⁾のSUS316の計算手法にならい、次式の定数のみを変更した。ただし、SUS316では $S_1 - S_s = 1 \text{ kg/mm}^2$

での D^{**} 値 (D_{p0}) を定めるにあたり、500°C以上では 10^{-4} とし、500°C未満では包絡できる温度の関数としているが、今回の簡易式の策定にあたってはSUS304と同様に、425~650°C(25°C毎)の詳細計算結果を全て温度に依存せず、包絡できる一定値を D_{p0} とした。

$$D^{**} = \text{Max} [D_{p0} \{ (S_1 - S_R) / C_0 \}^{n_{p0}}, 10^{-4}]$$

$$S_1 = \frac{1}{2} \Delta \sigma_R (\varepsilon_t) \quad D_{c1} = 0.3 \text{ として計算}$$

$$D_{p0} = 1.05 \times 10^{-4}$$

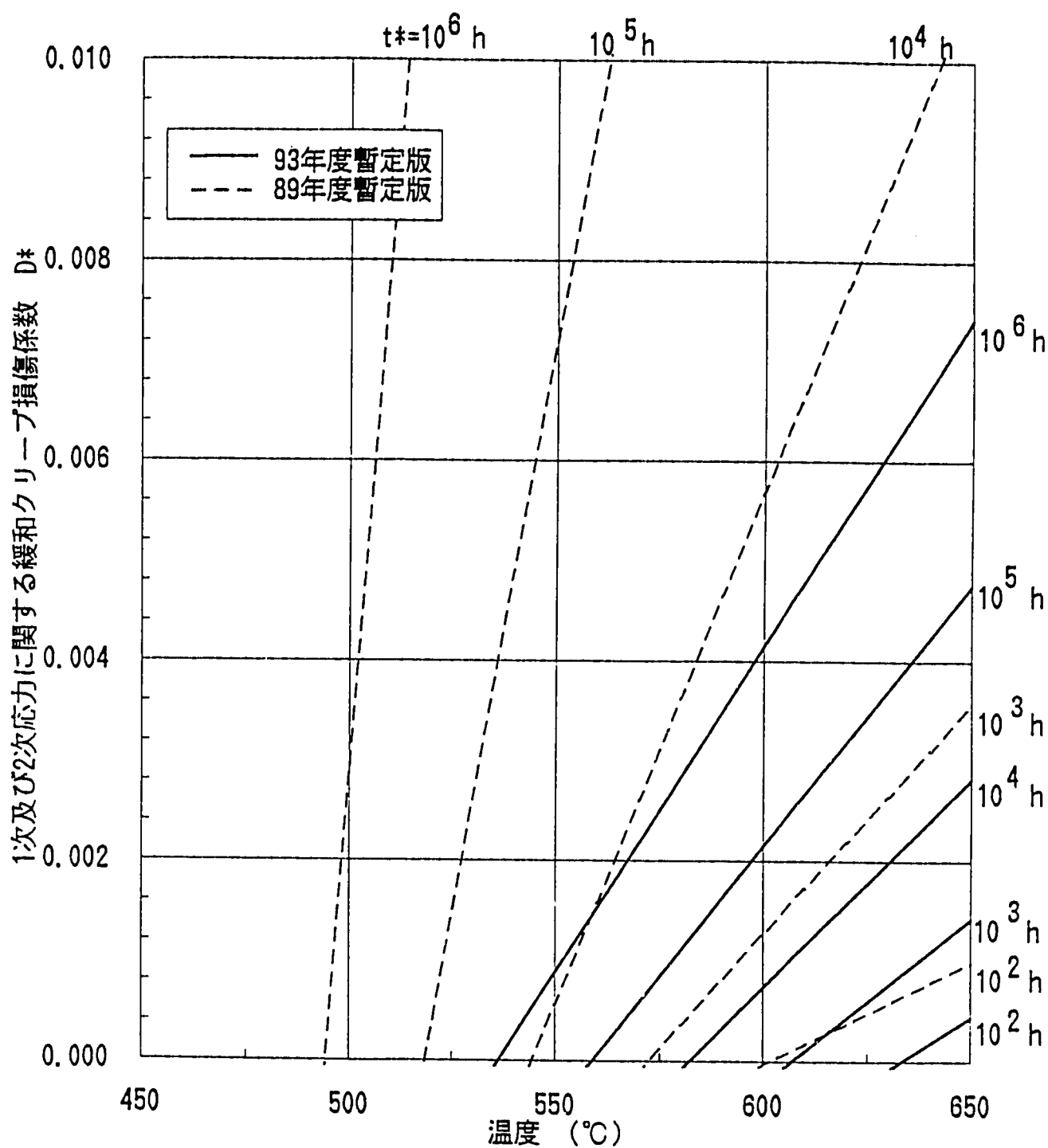
$$n_{p0} = 2450 / (T + 273.15) - 1.09$$

$$C_0 = 1.0$$

図4、図5に316FRの D^{**} 簡易計算結果及びSUS304、SUS316の計算結果¹⁾の比較を示す。代表例として供用時間 $t^* = 300000\text{h}$ について、温度は425~650°Cの区間を25°C刻みでプロットした。いずれの温度域においても316FRの簡易計算値が他鋼種に比べ低い計算結果を得た。

参考文献

- 1) 解説 高速原型炉第1種機器の高温構造設計方針, PNC SN241 84-14, 1984
- 2) 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, 1989
- 3) 高速炉構造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, 1990

図1 316FRの D^* (簡易計算値)の比較

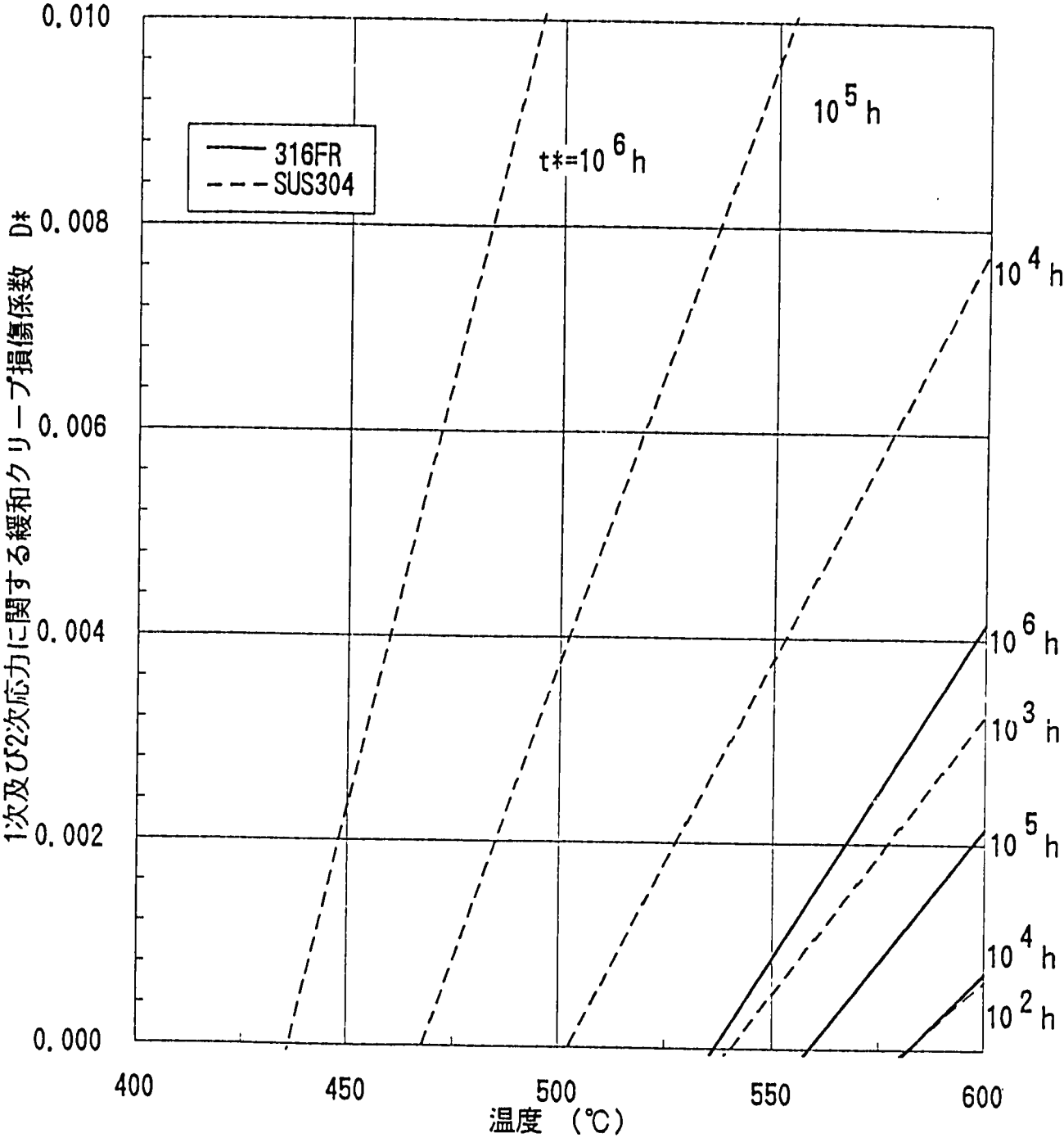


図2 316FRとSUS304の D^* (簡易計算値)の比較

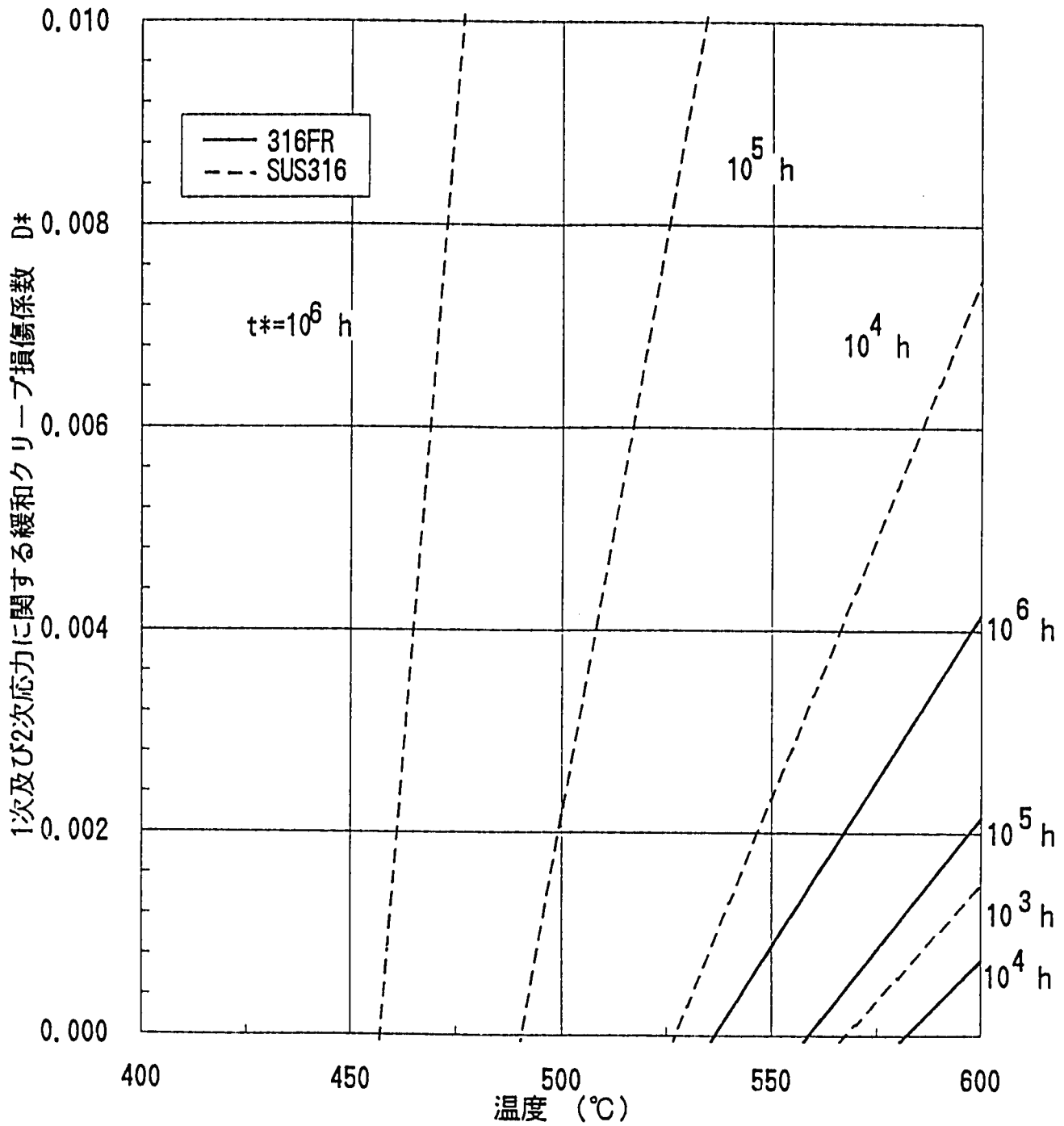


図3 316FRとSUS316の D^* (簡易計算値)の比較

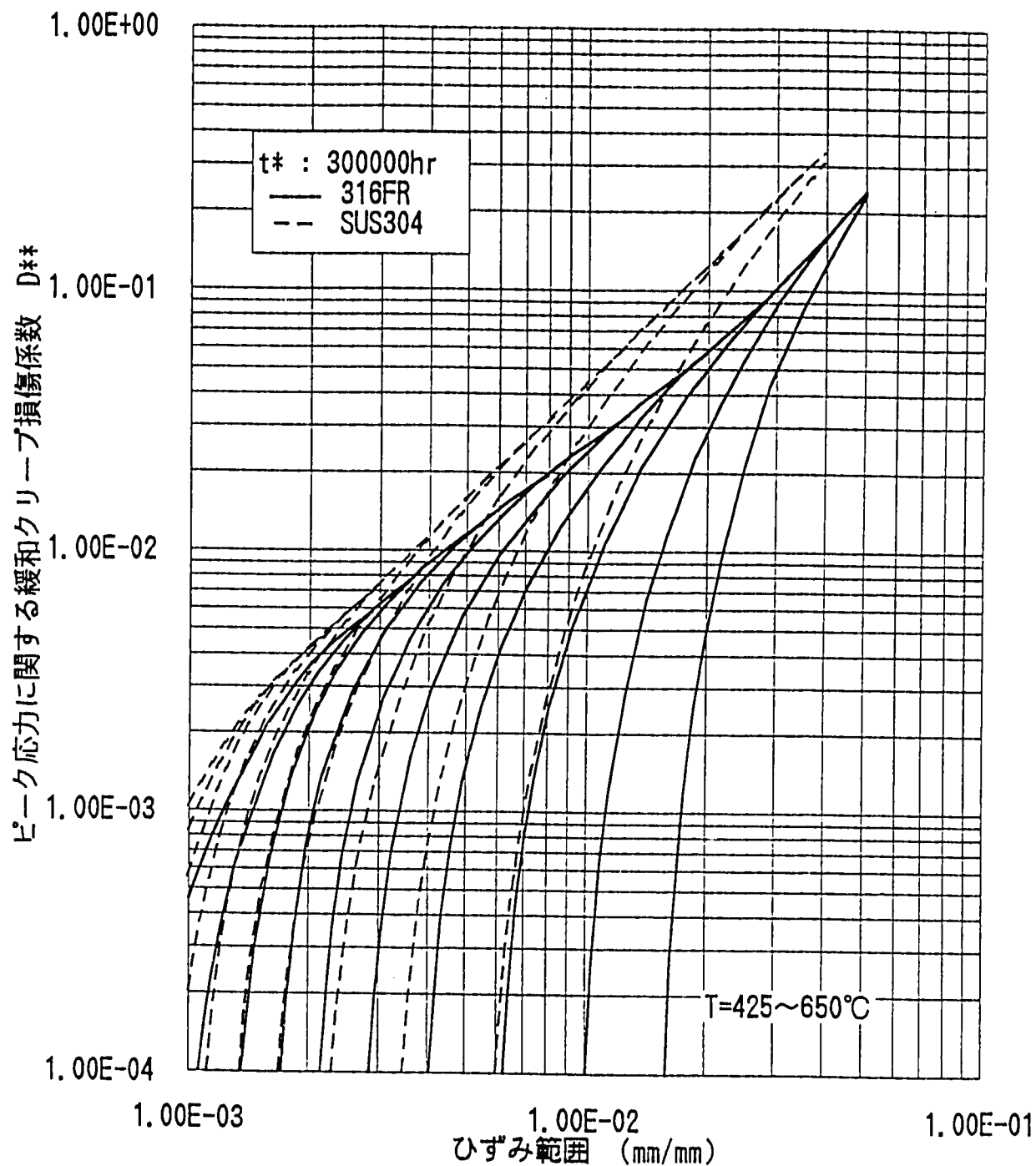
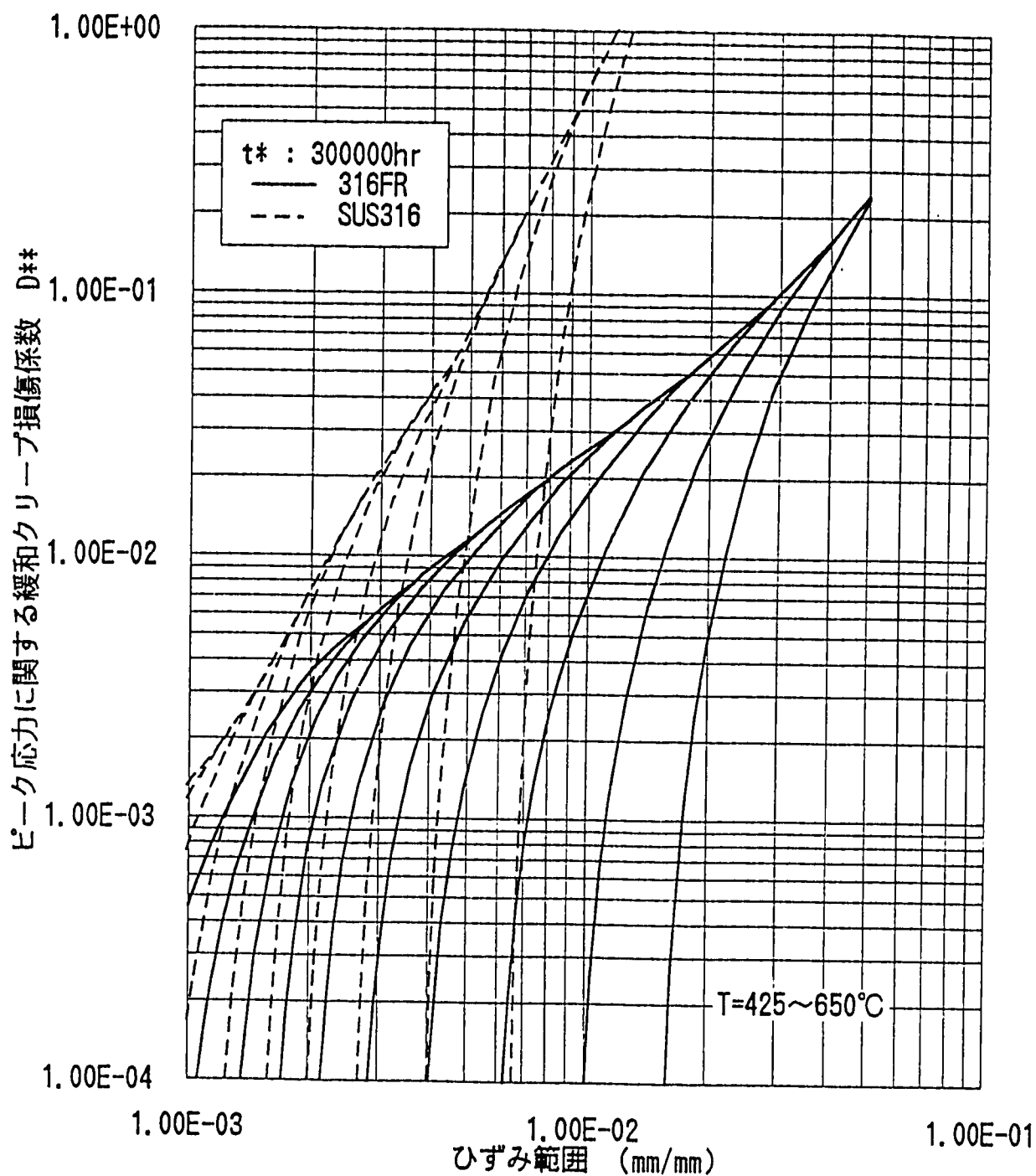


図4 316FRとSUS304の D^{**} (簡易計算値)の比較

図5 316FRとSUS316の D^{**} (簡易計算値)の比較

図表集等(7) 中性子照射効果

(本図は平成4年度第7回環境効果検討会(主査:和田材料室長)におけるMMSメモ04-II-35より引用した。)

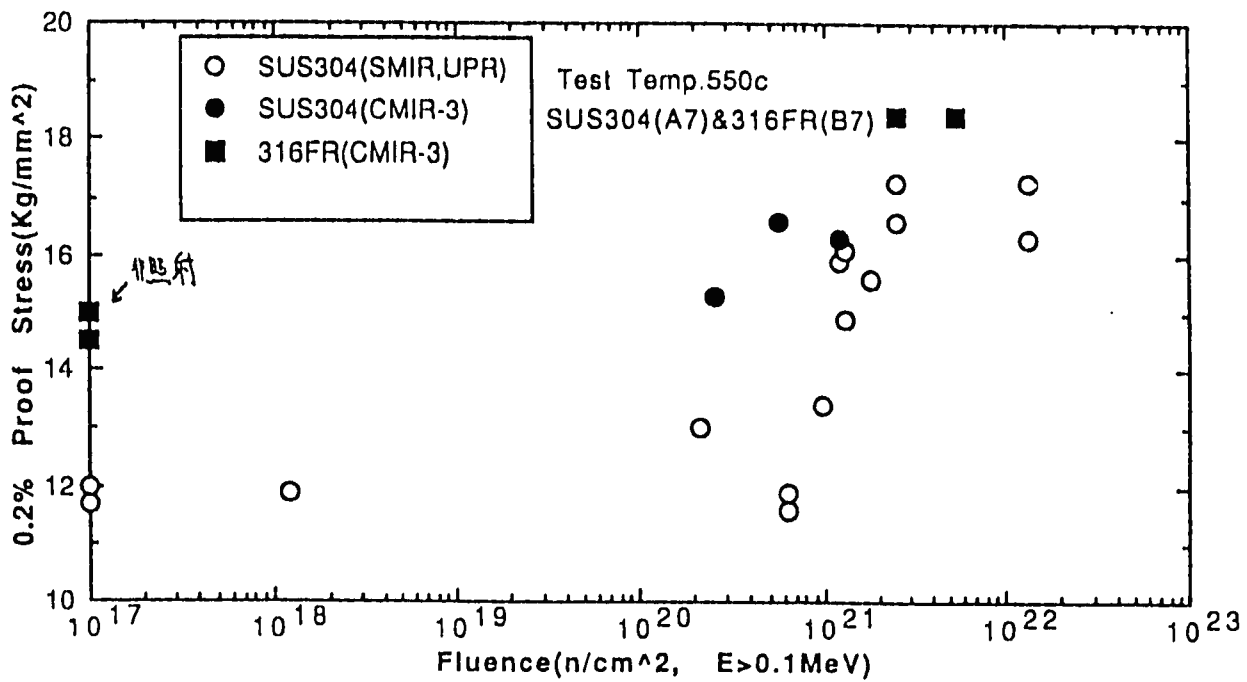


図1 照射量と0.2%耐力との関係

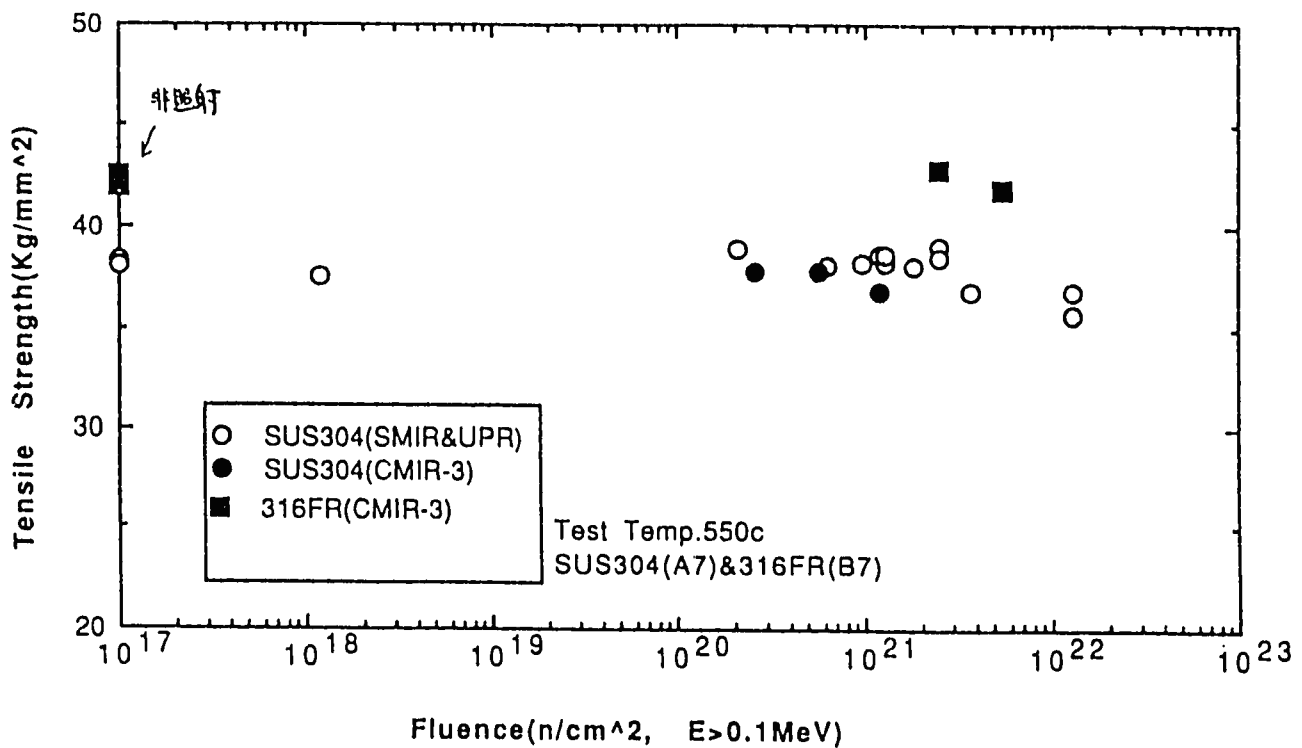


図2 照射量と引張強さの関係

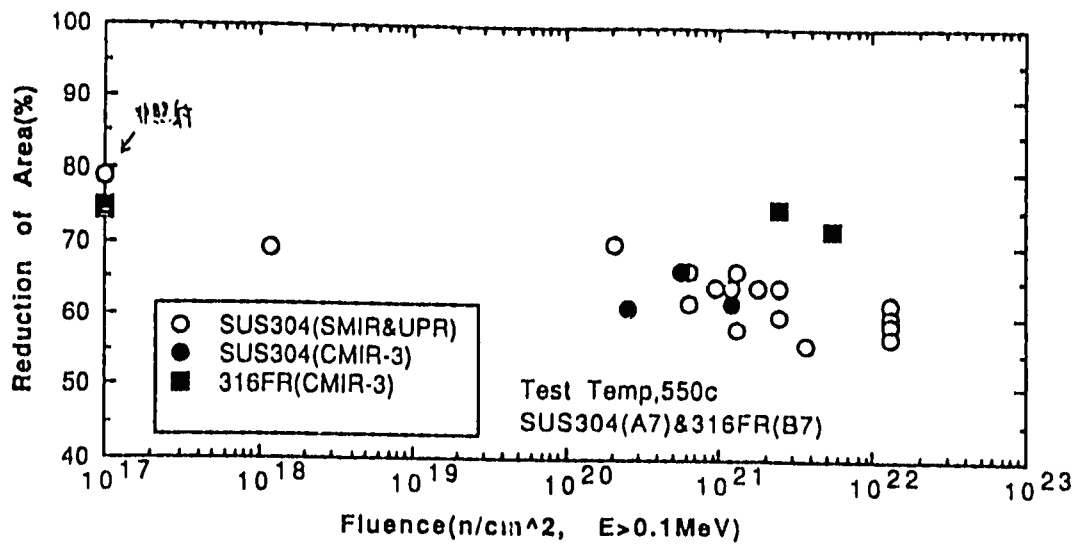


図5 照射量と破断絞りの関係

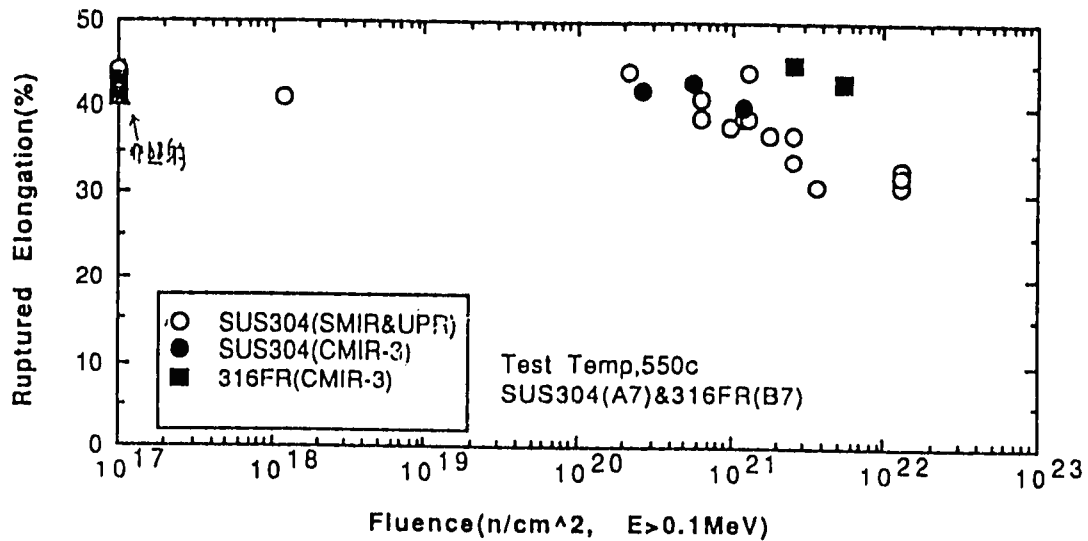


図4 照射量と破断伸びの関係

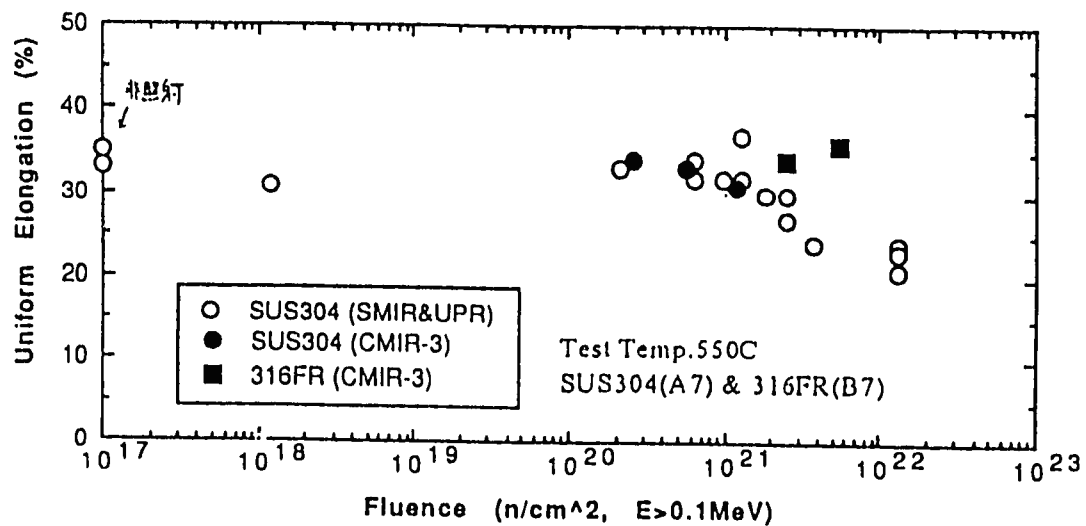


図3 照射量と一様伸びの関係

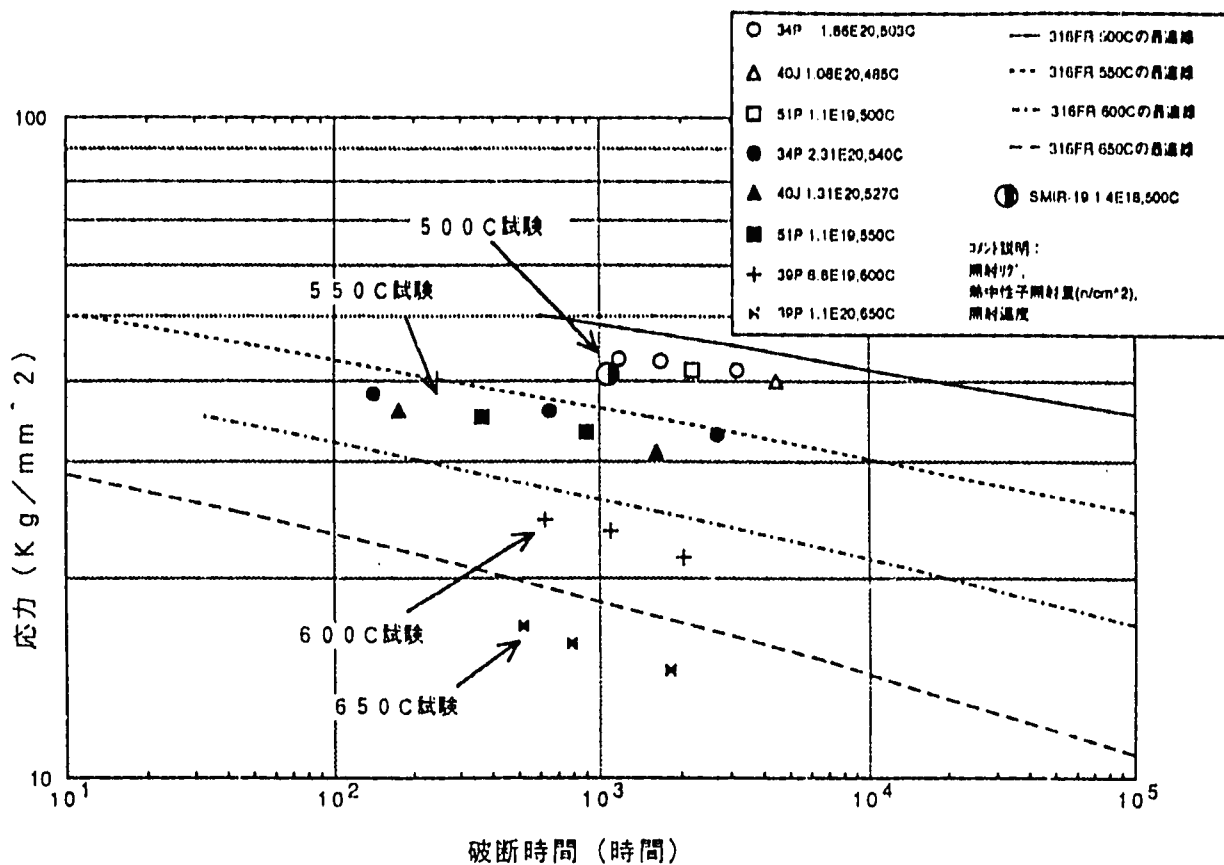


図1 照射した316FR鋼のクリープ破断強度

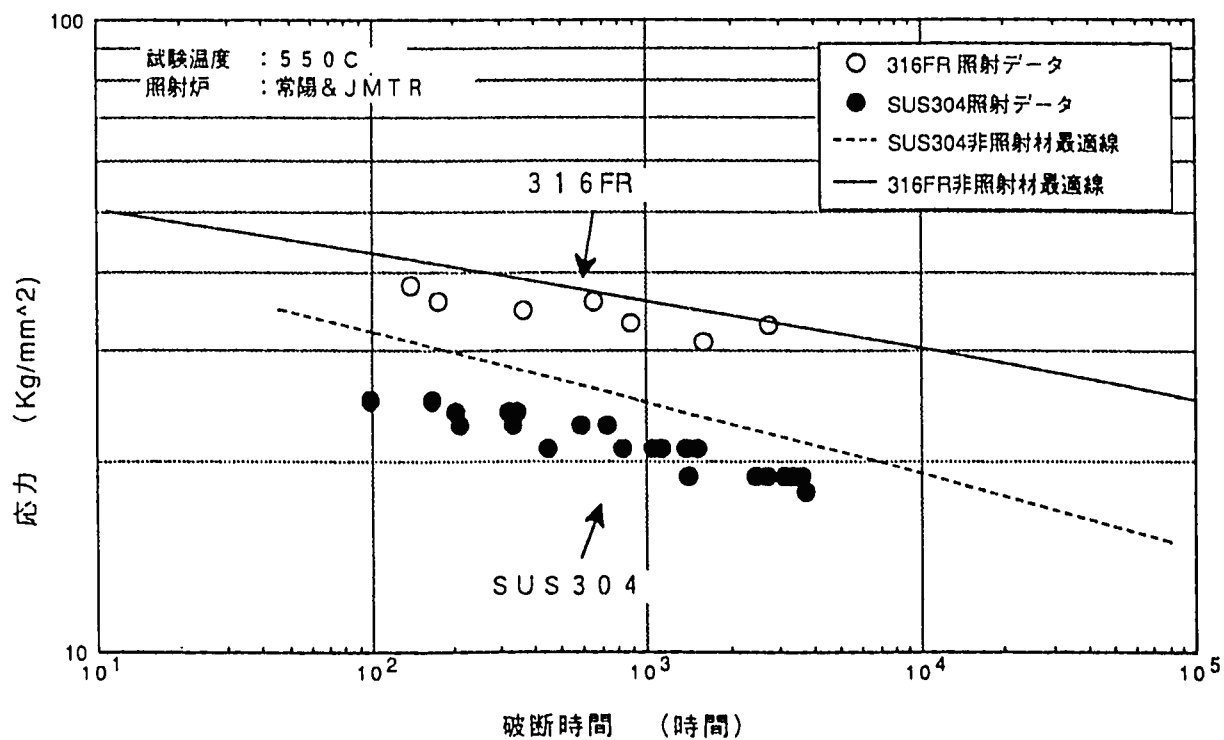


図2 照射した316FR鋼とSUS304鋼のクリープ破断強度

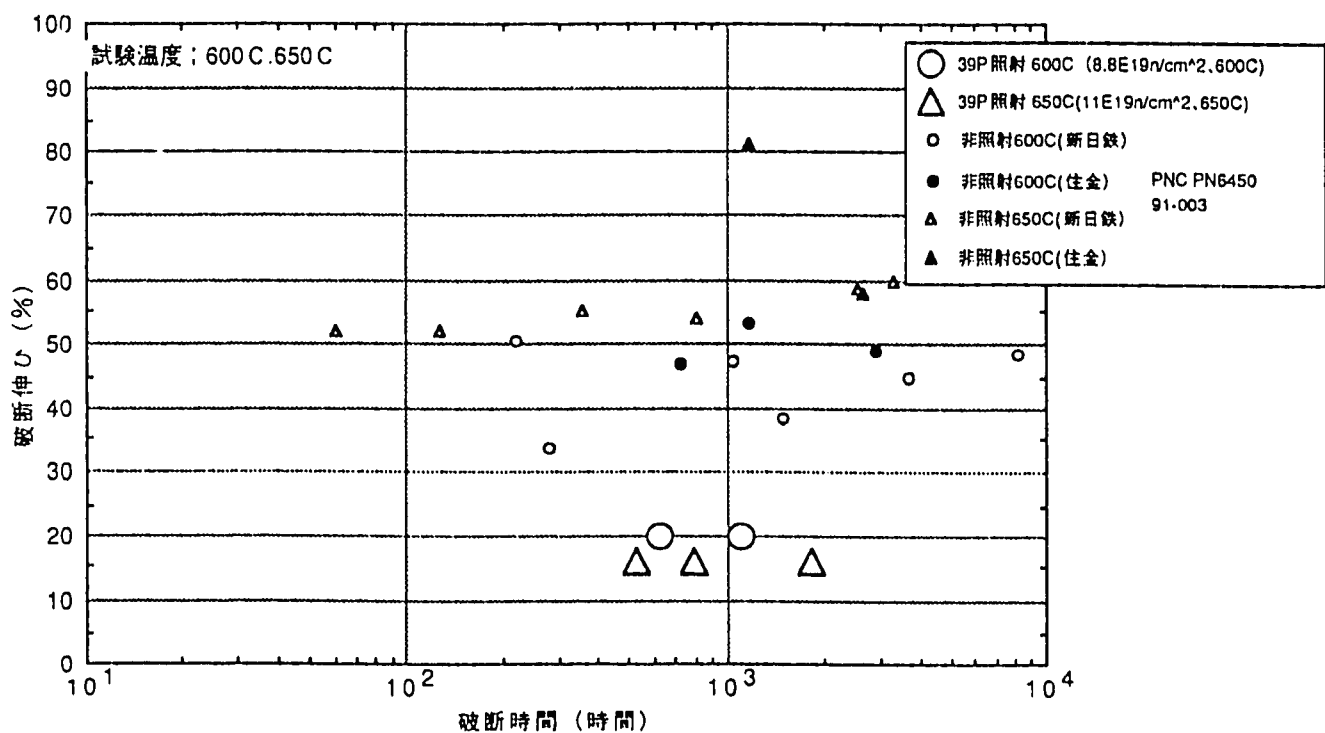
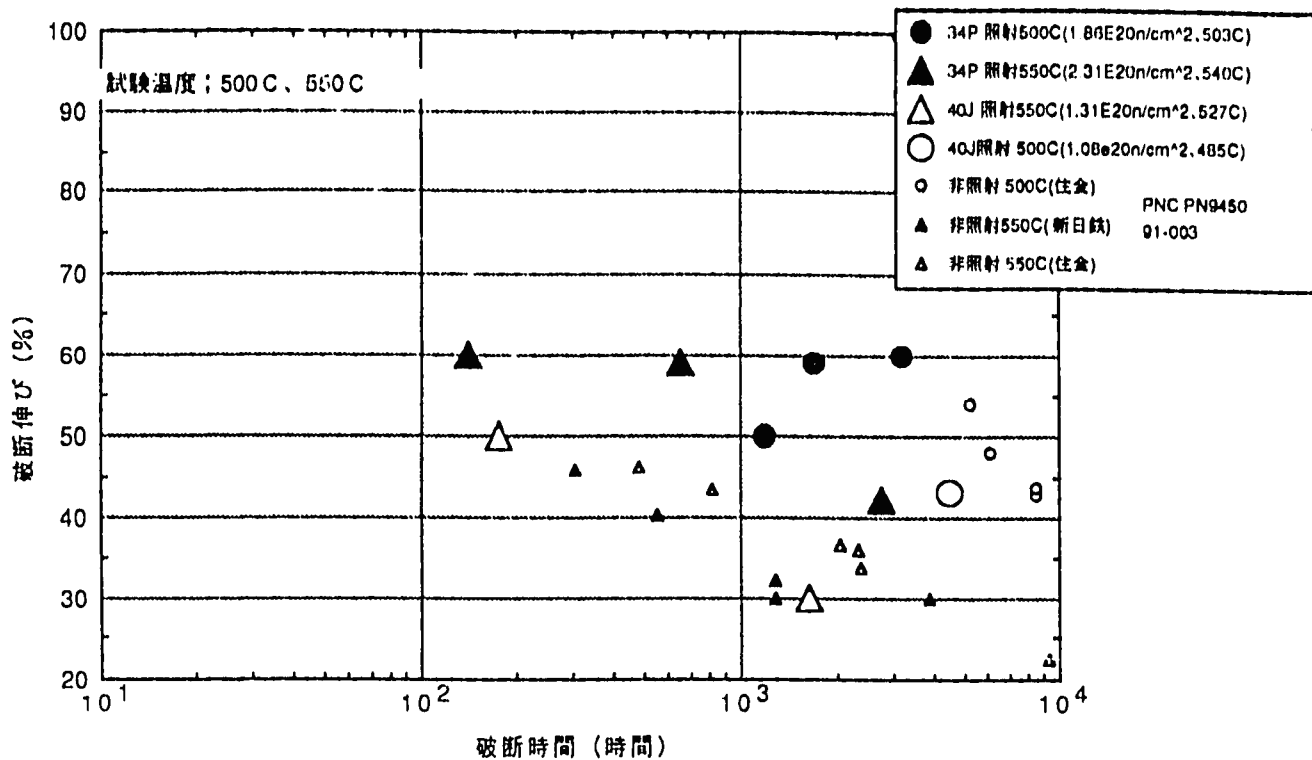


図 3 照射した316FR鋼の破断伸び(89M-39P、87M-34P、89M-40J)

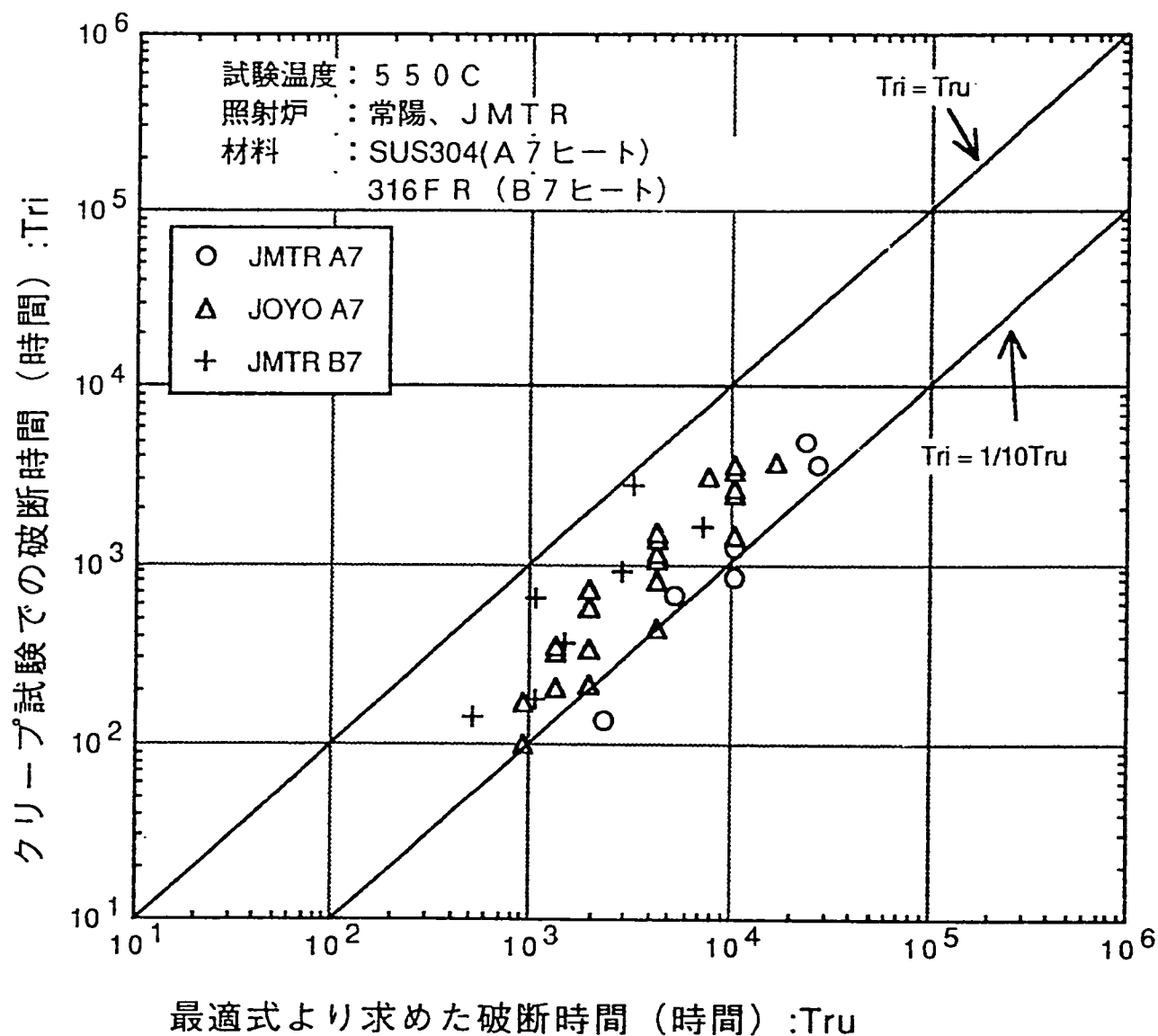


図5. SUS304 及び 316FR鋼のクリープ破断時間と
 破断式より求めた破断時間の比較

316FRTiG溶接材料・溶接金属の化学成分

	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	N	W	Nb	V	Ti	FN	特 徴	母材/溶材/施工	レ-ト No
共 金 系	0.009	0.30	1.76	0.006	0.003	11.49	18.95	2.15	0.105					4.5	低C・中N	日銀/神鋼/神鋼	WA
	0.007	0.40	1.41	0.012	0.004	11.25	18.24	2.13	0.075					6			
	0.013	0.39	2.26	0.012	0.006	12.04	19.40	2.20	0.07					7	低C・中N	日銀/ウエル/ウエル	WB
	0.01	0.41	1.49	0.014	0.009	11.09	18.76	2.21	0.077			0.02		9.2			
	0.012	0.40	1.18	0.030	0.005	12.00	19.10	2.16	0.107		0.002	0.004	0.002	4.7	低C・高N	日銀/溶工/溶工	WC
	0.009	0.44	1.08	0.028	0.004	11.55	18.40	2.16	0.090			0.022	0.002	4.7			
	0.012	0.45	1.54	0.022	0.001	11.6	19.6	2.12	0.157					3	低C・高N	日銀/溶工/三菱	WD
	0.01	0.41	1.32	0.022	0.003	11.27	18.68	2.12	0.089					6.5			
16 8 2系	0.015	0.30	1.17	0.020	0.005	8.01	15.37	1.88	0.12	0.99	0.005	0.009	0.002	0	W添加	日銀/神鋼/神鋼	XA
	0.015	0.29	1.16	0.019	0.005	7.88	15.11	1.87	0.092	0.95	<0.005	0.007	0.005	1.0			
	0.013	0.31	1.18	0.019	0.005	8.00	16.04	1.87	0.12	0.1	0.075	0.009	0.002	約 2	Nb添加	日銀/神鋼/神鋼	XB
	0.017	0.29	1.18	0.019	0.005	7.83	15.80	1.86	0.093	<0.01	0.071	0.007	0.005	3.0			
	0.011	0.31	1.19	0.020	0.005	8.02	15.81	1.89	0.11	0.1	0.005	0.17	0.002	約 2	V添加	日銀/神鋼/神鋼	XC
	0.018	0.30	1.19	0.019	0.005	7.93	15.64	1.89	0.093	<0.01	<0.005	0.16	0.005	2.5			
	0.016	0.34	1.18	0.005	0.004	7.26	15.65	2.48	0.154		<0.005	0.009		1.6	高Mo	日銀/神鋼/神鋼	XD
	0.014	0.41	1.16	0.012	0.003	8.91	16.38	2.53	0.103		<0.005	0.022	0.004	4.5			

※表中上段は溶接材料（ワイヤ）の化学成分、下段は溶接（溶着）金属の化学成分を示す。

3 1 6 F R T I G 溶接金属及び継手の特性比較

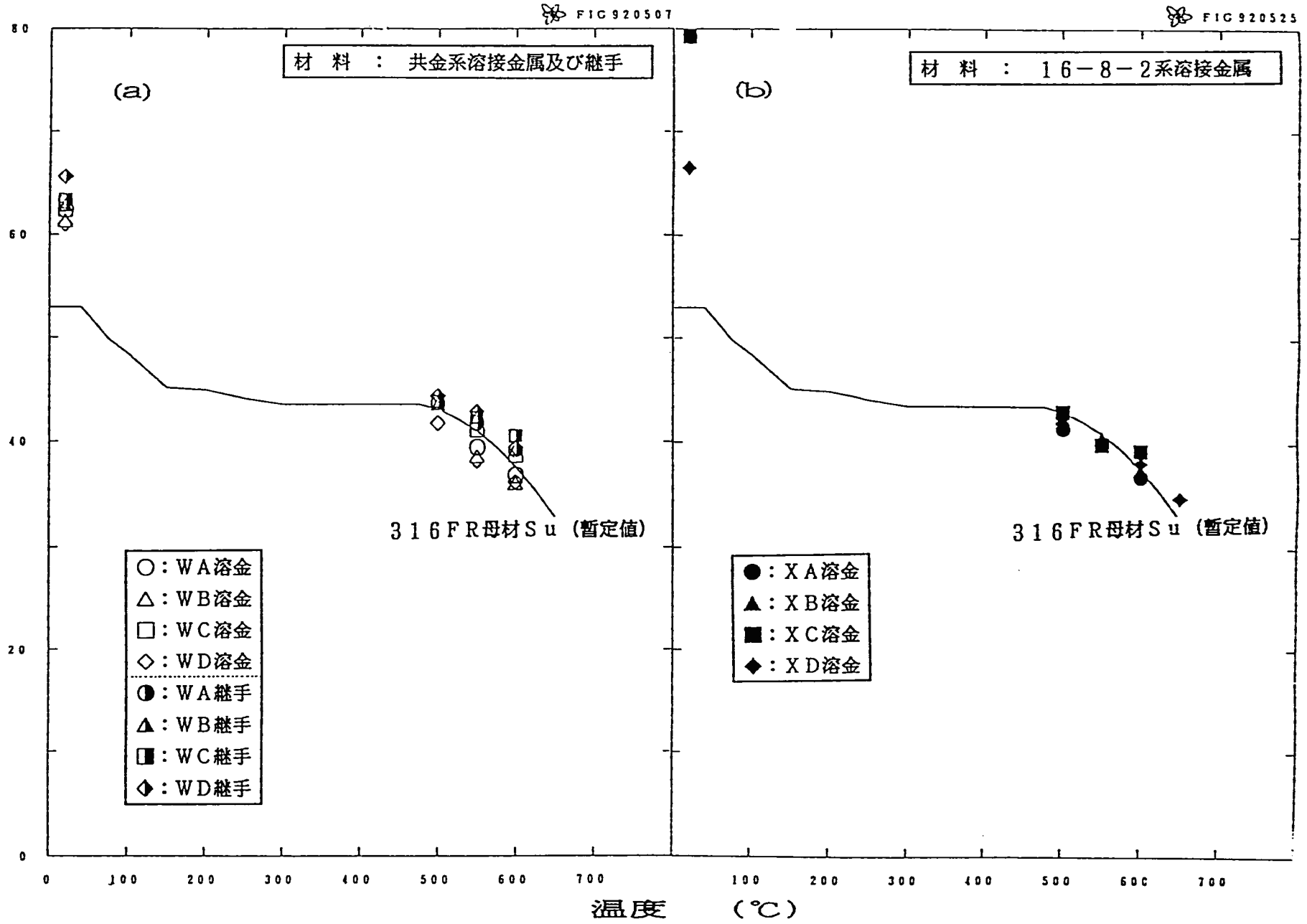
PNC TN9410 93-142

						高温引張		クリープ		疲 労		クリープ疲労*1		時効後靱性		備 考
						強度	延性	強度	延性	1.0%	0.5%	1.0%	0.5%	室温	550C	
共 金 系	WA	低	中	—	6.0	溶金	○	○	△	◎						溶金のクリープ強度は1万時間を超えるあたりから低下する傾向
						継手	◎		○		○	○	×	△		
	WB	低	中	—	9.23	溶金	△	○	△	◎				○	◎	溶金のクリープ強度は1万時間を超えるあたりから低下する傾向 室温の時効後靱性はAWと時効後の中間
						継手	◎		○		○	△	△	○		
	WC	低	高	—	4.7	溶金	◎	○	○	◎						溶金のクリープ強度は長時間側で母材に漸近する傾向
						継手	◎		◎		○	○	○	△		
	WD	低	高	—	6.5	溶金	△	△	○	◎	◎	◎	○	○		溶金のクリープ強度は長時間側で母材に漸近する傾向
						継手	◎		◎		○	○	○	○		
16 — 8 — 2 系	XA	低	高	W	1.0	溶金	○	△	○	◎						
	XB	低	高	Nb	3.0	溶金	○	△	◎	◎						
	XC	低	高	V	2.5	溶金	○	△	◎	◎						
	XD	低	高	Mo	4.5	溶金	○	○	×	◎						

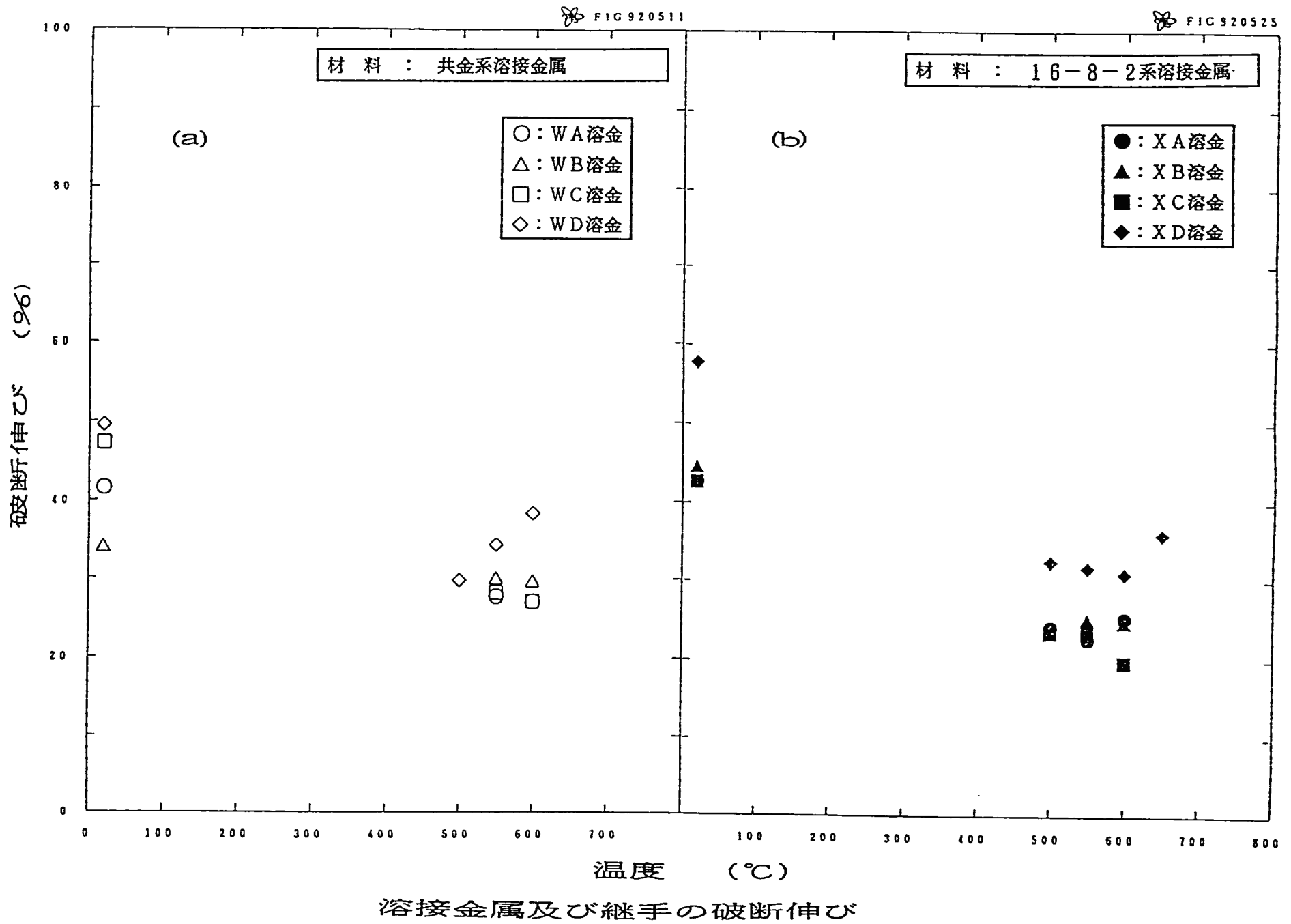
表中のマークは {

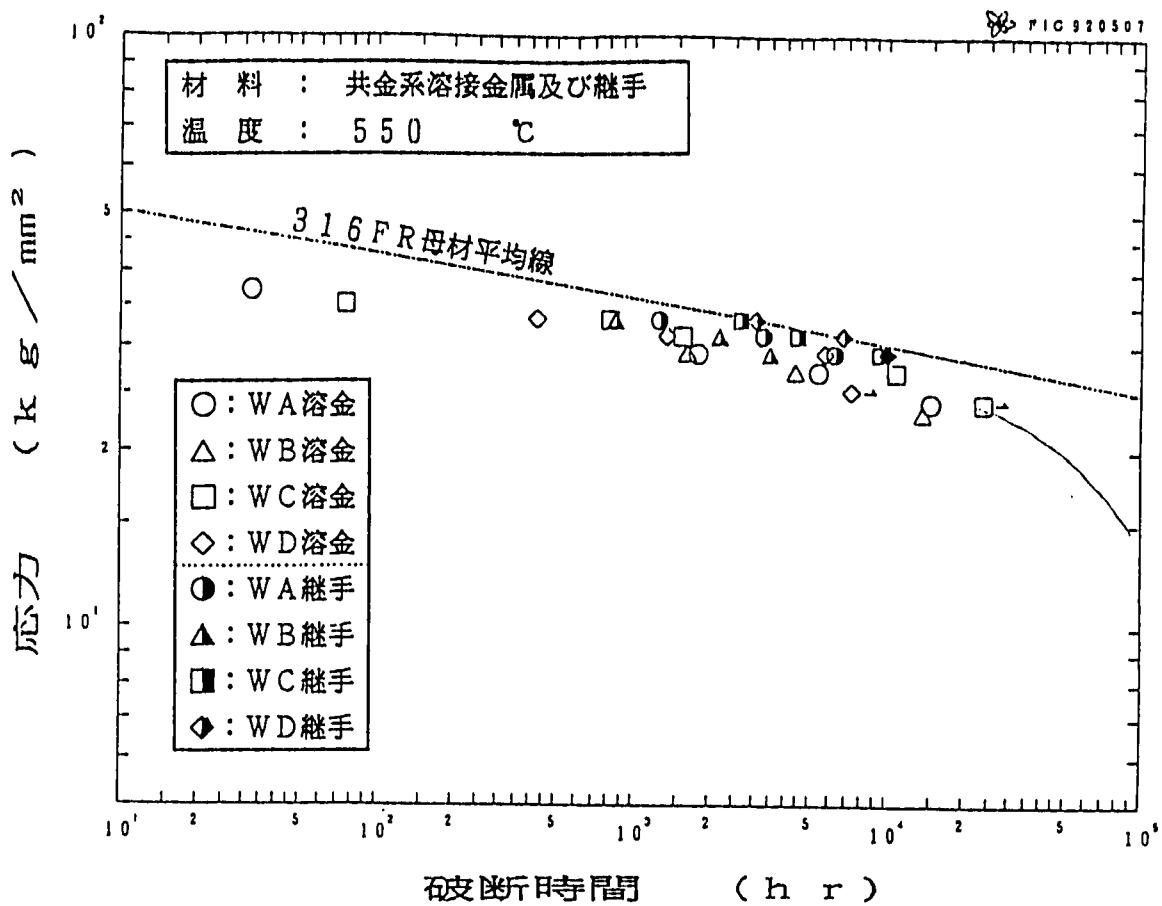
- ◎：母材もしくは従来SUS316の特性並以上
- ：相対的に良好
- △：相対的にやや劣る
- ×：相対的に劣る

注) * 1：ひずみ保持時間1.0 時間の強度を比較

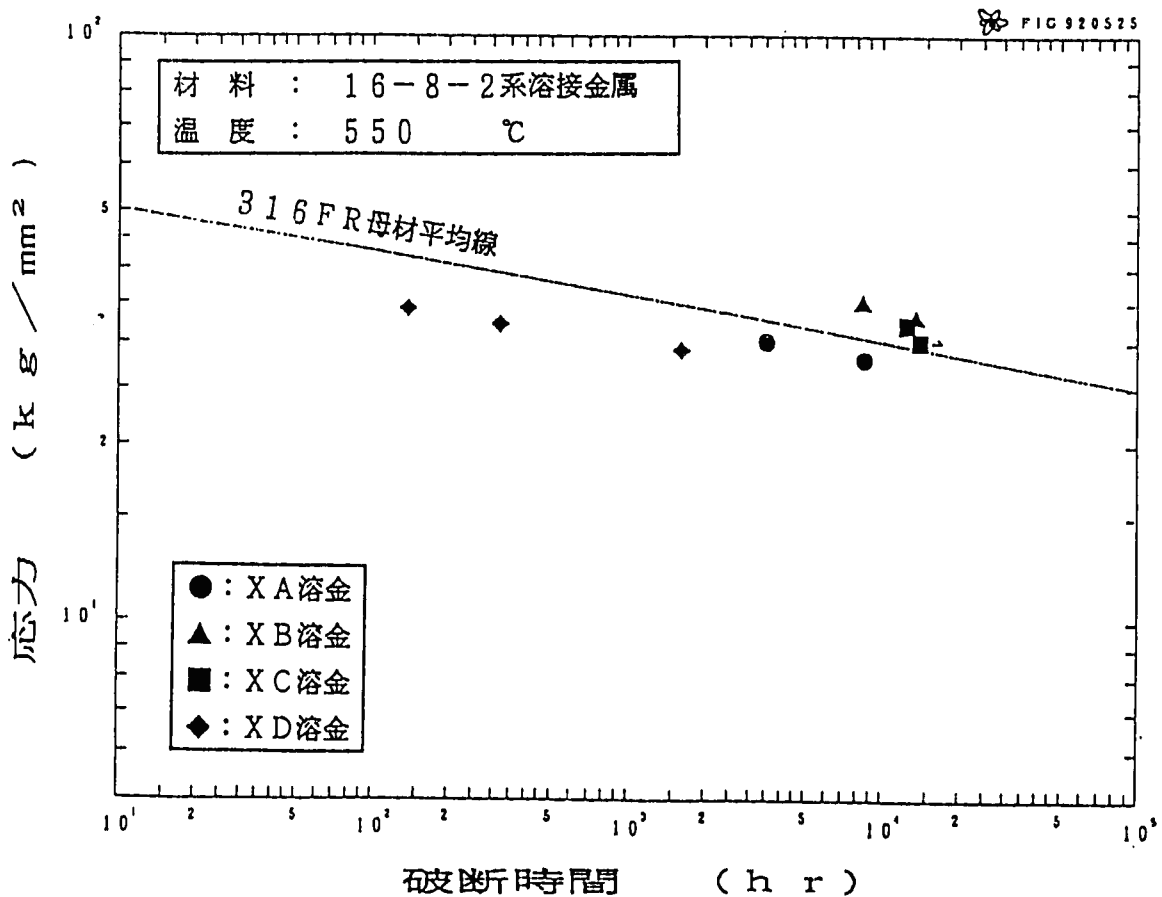


溶接金属及び継手の引張強さ

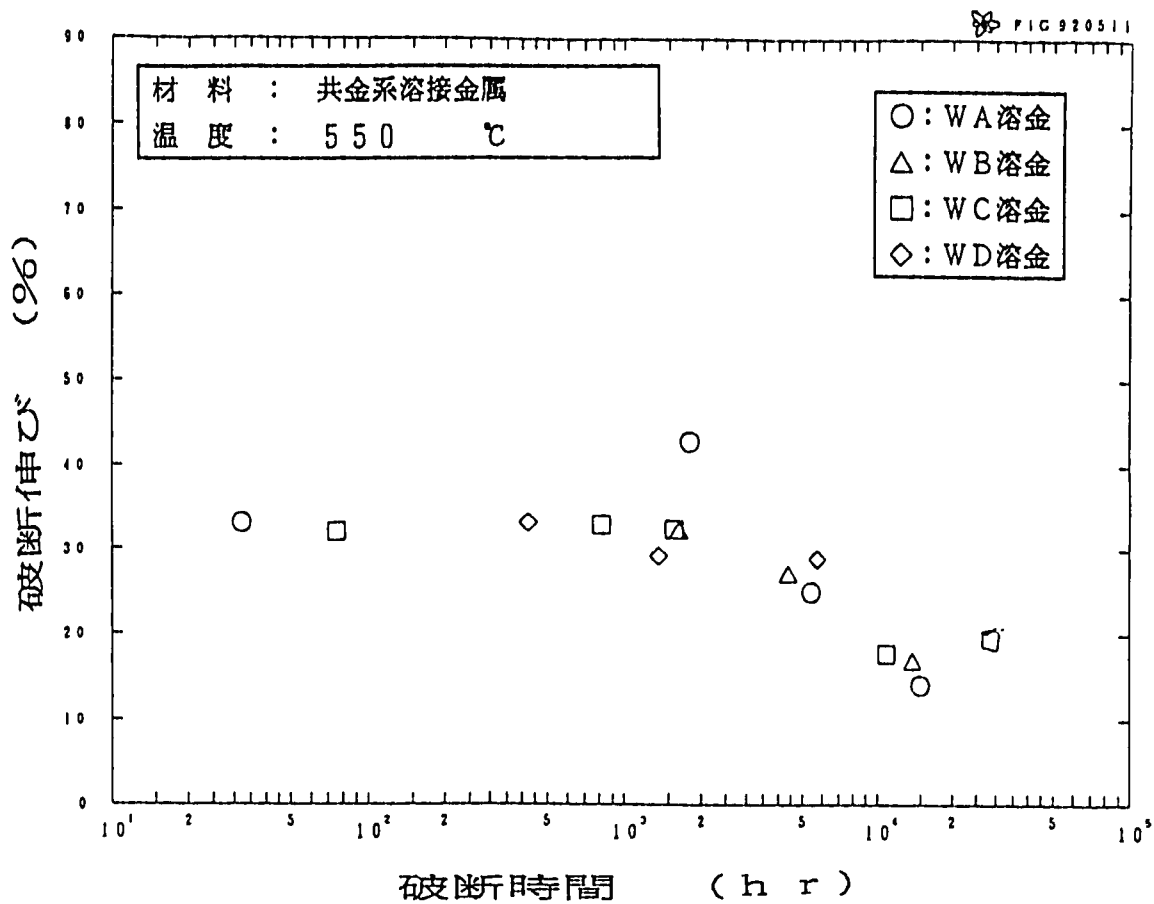




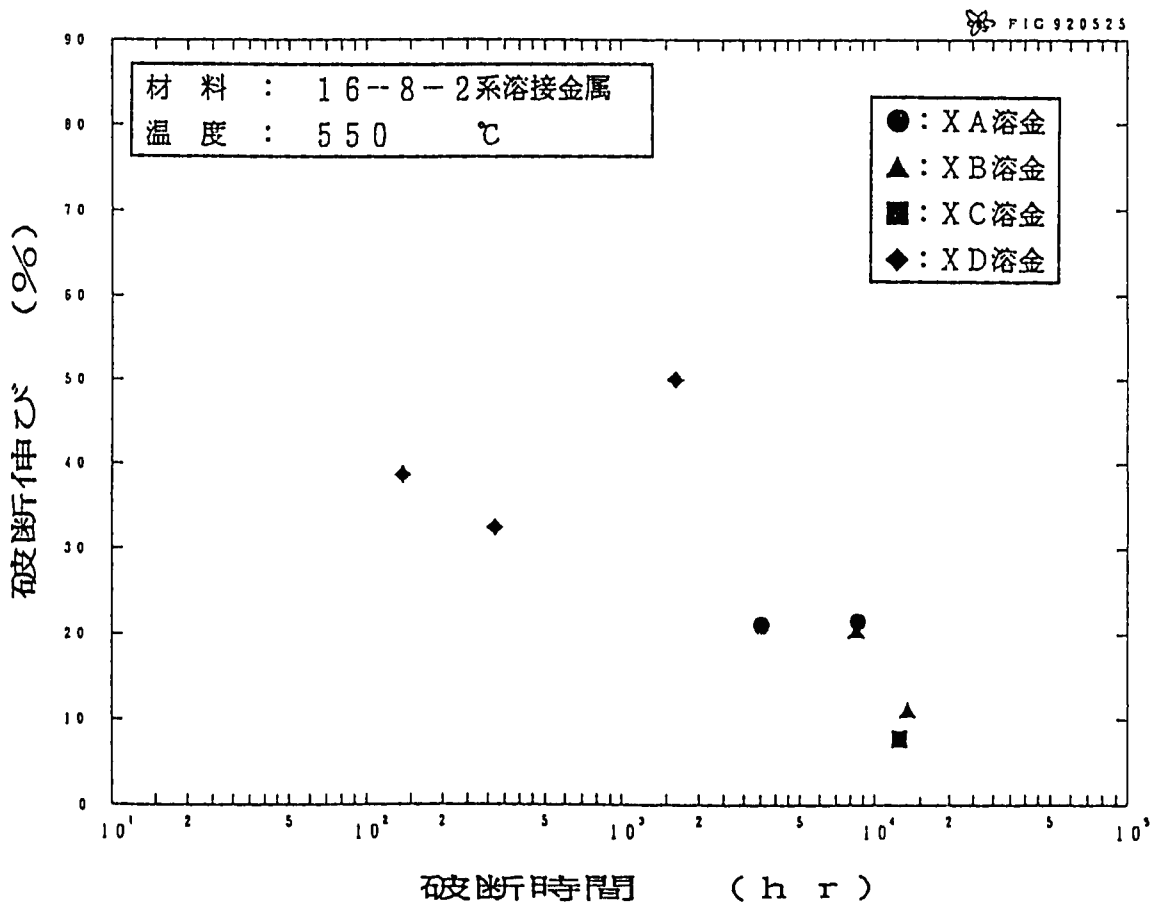
共金系溶接金属及び継手のクリープ破断強度



16-8-2系溶接金属のクリープ破断強度



共金系溶接金属及び継手のクリープ破断伸び



16-8-2系溶接金属のクリープ破断伸び

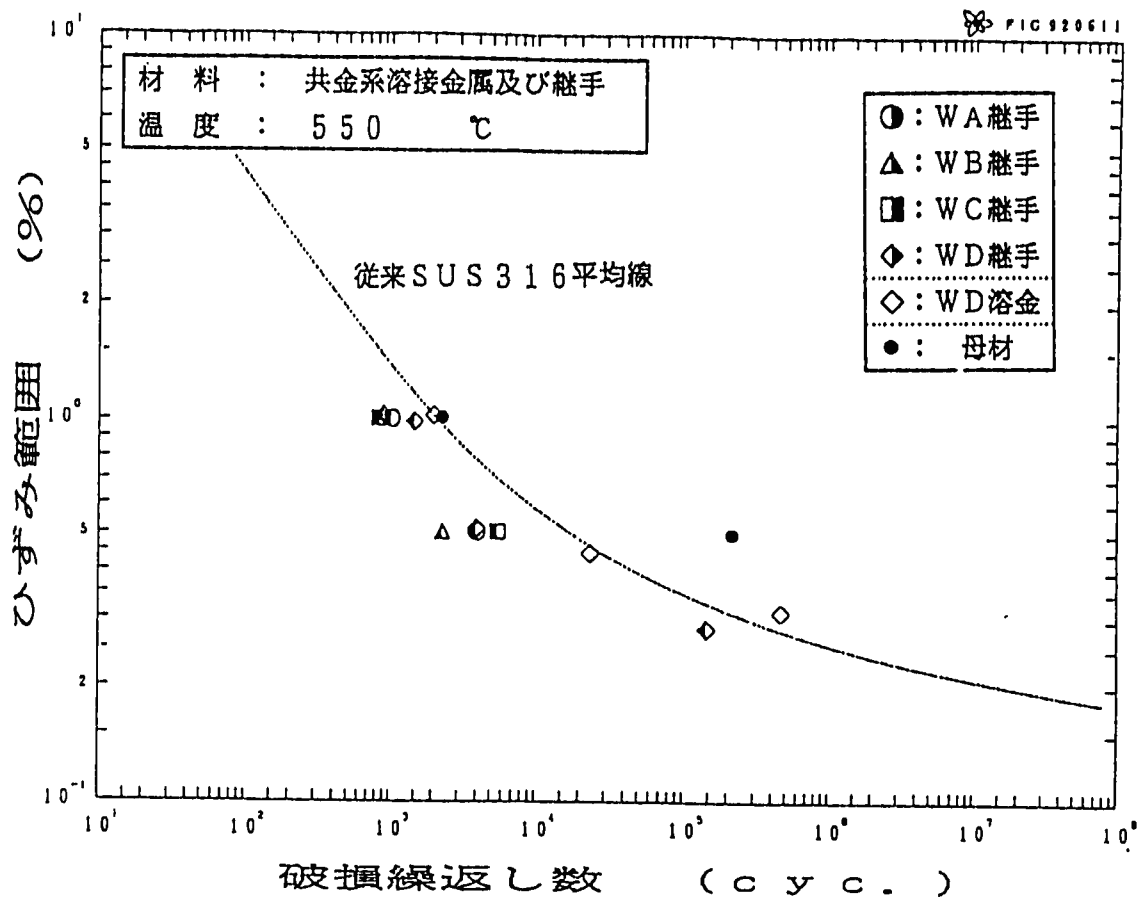
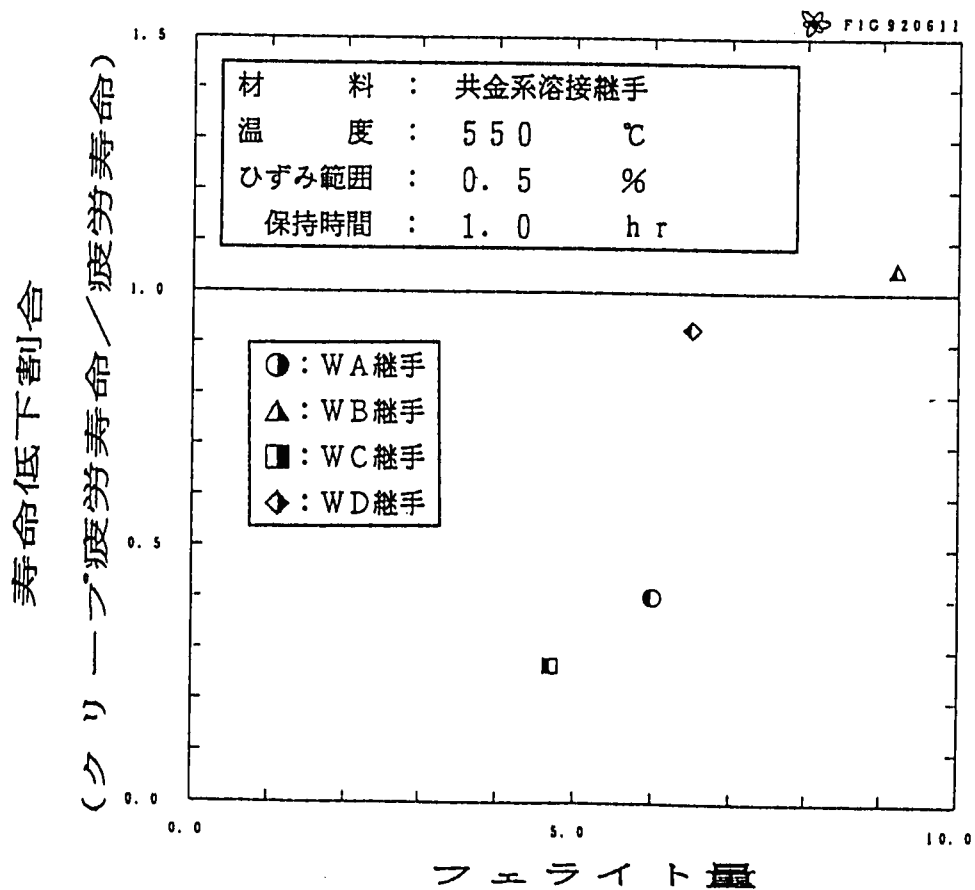
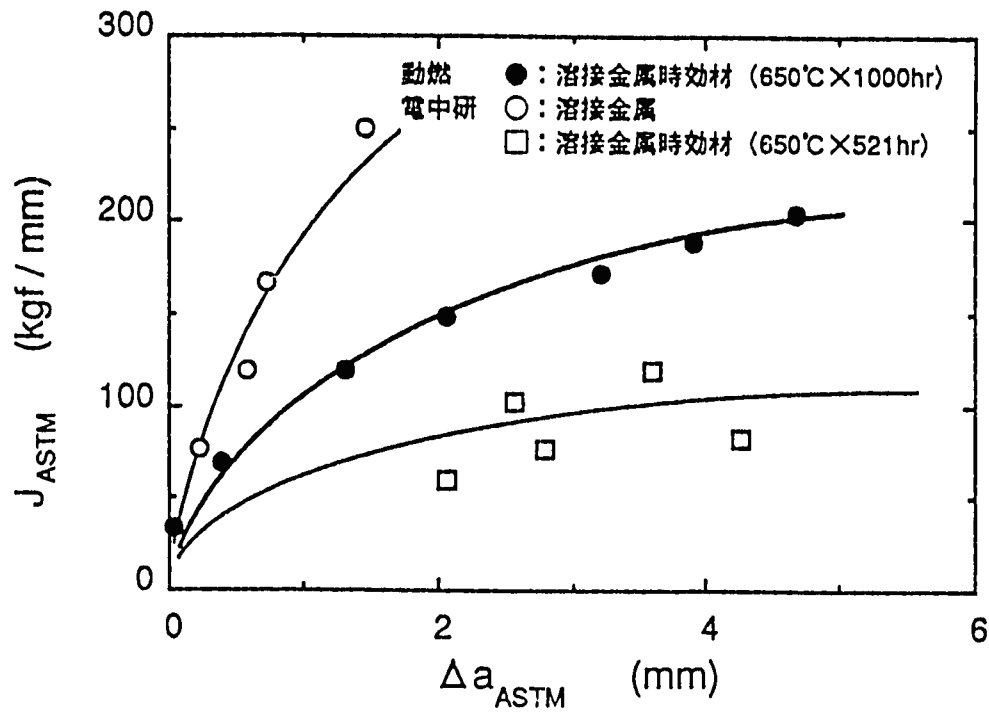


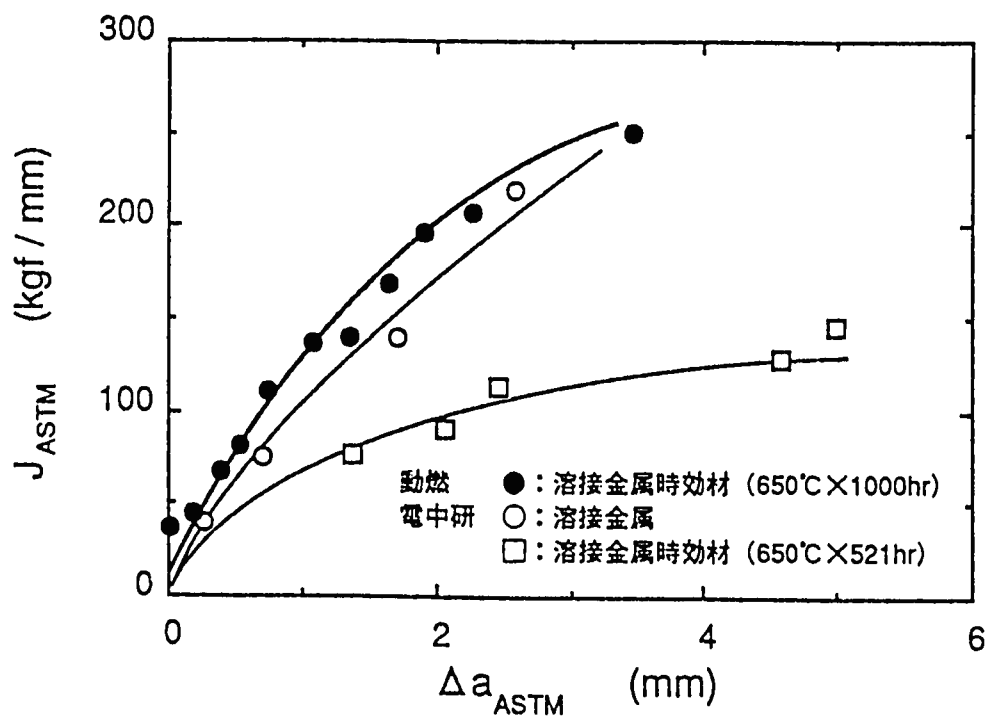
図 5. 共金系溶接金属及び継手の低サイクル疲労寿命



共金系溶接継手のひずみ保持による疲労寿命の低下



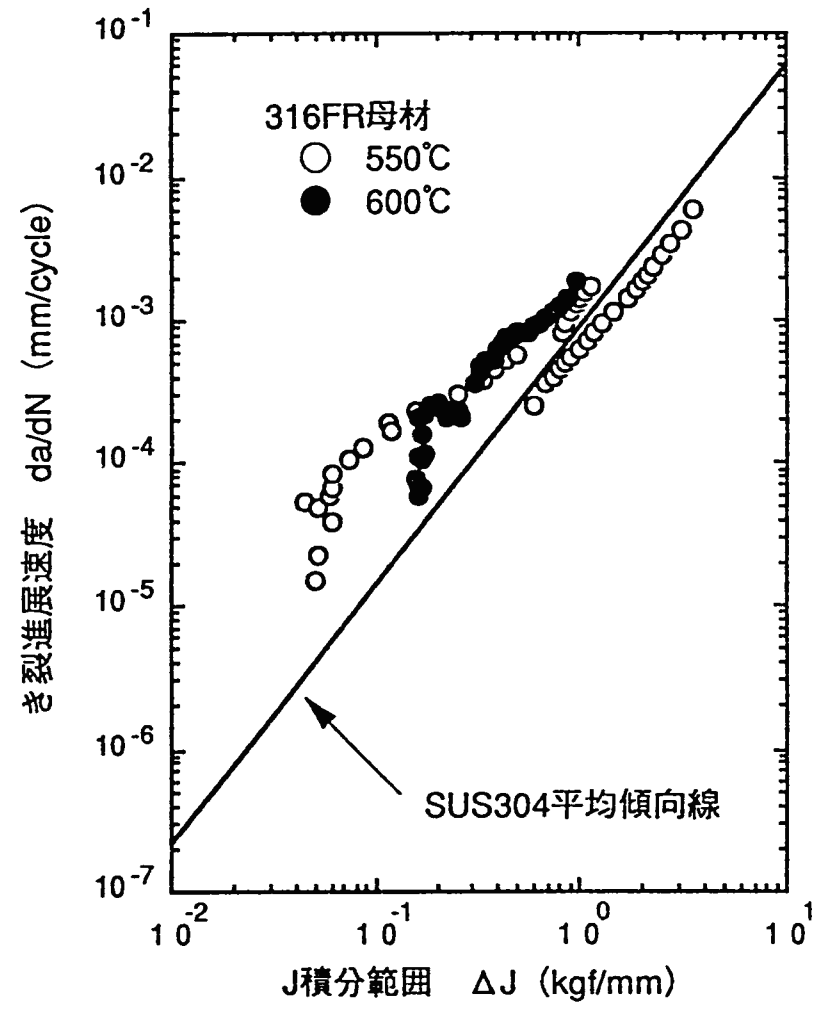
(a) 室温



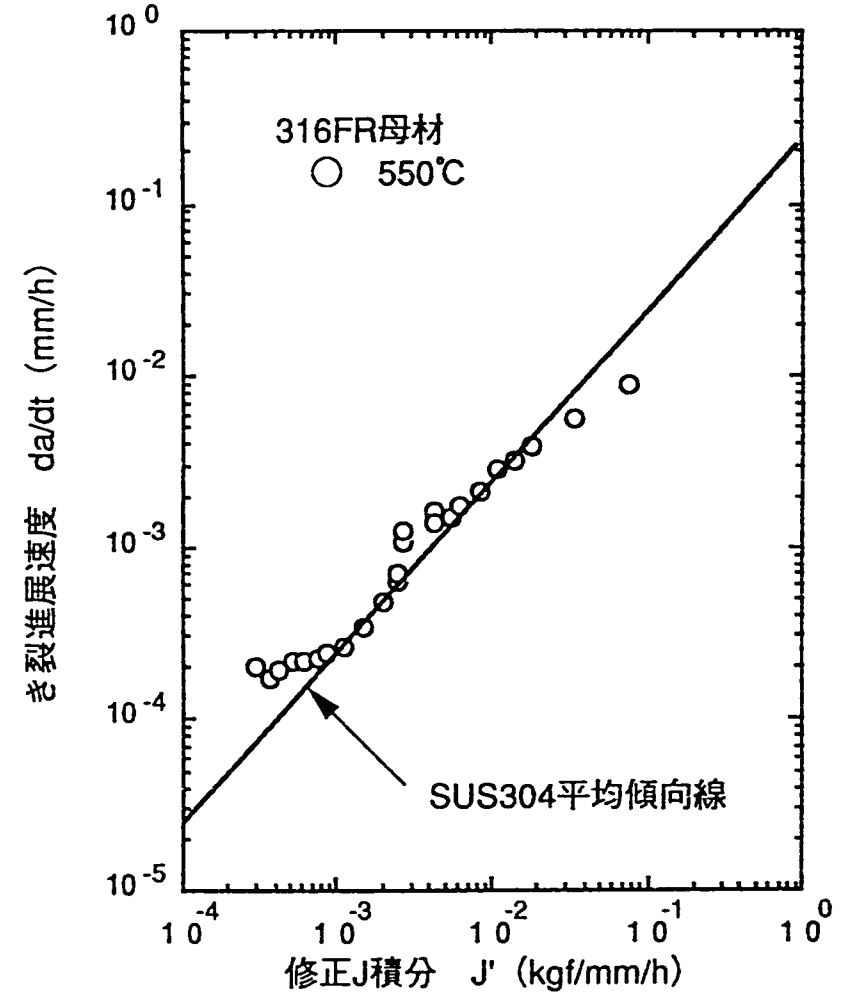
(b) 550°C

316FR鋼溶接金属と溶接金属時効材の
CT試験によって得られたJ-R曲線

図表集等(9) き裂進展特性



316FR母材の疲労き裂進展特性



316FR母材のクリープき裂進展特性

図表集等(10) 316FRのナトリウム環境効果評価

316FRのナトリウム環境効果評価として、ナトリウム中腐食および高温強度試験を実施している。ナトリウム中における試験条件および点数を表1に示す。

表1 316FRのナトリウム中試験条件および点数

試験項目	試験条件	素材	試験点数			備考
			500℃	550℃	600℃	
腐食試験	500, 550, 600℃、5000時間浸漬	50 ^t 板	6	6	6	浸炭・脱窒
引張試験	500, 550, 600℃、5000時間浸漬	50 ^t 板	2 (2)	2 (2)	2 (2)	()熱時効
クリープ試験	ナトリウム中、ナトリウム浸漬後大気中	50 ^t 板	—	14	10	
	550, 600℃、～30000時間 (目標)	伝熱管	—	3	—	25.4 ^φ ×1 ^t mm
疲労試験	600℃、ひずみ範囲1.0, 0.7, 0.5%	50 ^t 板	—	—	3	

これまで得られている試験結果を基に、316FRのナトリウム中における腐食挙動と高温強度特性について以下に述べる。

1. ナトリウム中腐食特性

316FRとSUS316の500℃～600℃に約5000時間浸漬後の表面形態および断面の金属組織をPhoto 1および2に示す。316FRの表面形態はSUS316と同様に全面腐食の様相を呈し、孔食や粒界腐食等の局部的な腐食は認められない。このため、これまでのオーステナイト系ステンレス鋼と同様に、均一な鋼材の減肉効果として取り扱えるものと考え、316FRの550℃と600℃における腐食速度と温度との関係をFig. 1に示す。図中には高温構造設計指針材料強度基準で与えられる腐食評価線を併せて示す。316FRの腐食速度は、SUS304やSUS316と同様にアレニウスタイプの温度依存性を示し、600℃における腐食速度は約1.0 μm/yearであり、これはSUS304やSUS316と同程度であった。また、現行の腐食評価線は316FRの実験データを包含しており、十分保守的に評価できることがわかる。

なお、現行の腐食評価式にはナトリウム酸素濃度をパラメータとして与えている。これまでのオーステナイト系ステンレス鋼を主体とした研究結果では、定常腐食過程が酸化物生成反応に支配されることからナトリウム中酸素濃度の影響を受け、腐食速度は酸素濃度にほぼ比例し増大する結果が得られている¹⁾。このことは、Feをベースとする316FRも同様の挙動を示すものと考え、SUS304やSUS316の腐食速度と酸素濃度との関係をそのまま準用した。

2. 炭素および窒素移行挙動

2.1 炭素移行挙動

316FRの500℃～600℃に5000時間浸漬後の炭素濃度分布をFig. 2に示す。316FRはいずれの温度においても浸炭挙動を示し、脱炭は生じていない。316FRの浸炭深さは500℃～600℃の温度範囲で20 μm程度であり、SUS316に比べ浅いものとなっている。また、鋼の表面炭素濃度は最大0.047wt%であり、SUS316(0.37wt%)に比べ浸炭に伴う濃度増加が小さい。このような傾向は、鋼中の初期窒素量を変化させた低炭素－窒素添加改良SUS316鋼のナトリウム中試験においても認められ、初期窒素量の増加に伴い浸炭が抑制されることがわかっている²⁾。

このため、316FRは高速炉のナトリウム環境下(600℃以下)において浸炭挙動を示すものの、浸炭量はSUS304やSUS316に比べ少なく、浸炭が高温強度特性に及ぼす影響は小さいものと考えられる。

2.2 窒素移行挙動

(現在、316FRの5000時間浸漬材の窒素分析を実施中)

なお、低炭素－窒素添加改良SUS316鋼のナトリウム中試験より、脱窒量は初期窒素量に依存し

増大するが、316FRの初期窒素量(0.08~0.10wt%)では脱窒は僅かであることがわかっている。

3. ナトリウム中高温強度特性

3.1 ナトリウム浸漬材の短時間強度特性

(現在、316FRの5000時間浸漬材と熟時効材の高温引張試験を実施中)

3.2 ナトリウム中クリープ破断特性

316FR鋼板および伝熱管の550℃と600℃のナトリウム中および5000時間浸漬後の大気中クリープ破断強度と破断伸びを大気中データと比較しFig. 6~9に示す。316FR鋼板のナトリウム中クリープ破断強度は、高応力-短時間側(1000時間以下)において大気中に比べ若干低下する傾向が認められるが、低応力-長時間側(約10000時間)では大気中と同等の強度を有している。また、いずれの温度においても316FRの設計クリープ破断評価線(S_R)を満足しており、ナトリウム環境による強度低下を考慮する必要がないものとする。さらに、破断伸びについても大気中と同等であり、延性の低下は認められない。

3.3 ナトリウム中疲労特性

600℃における316FRの大気中試験およびナトリウム中試験における繰返し荷重の変化をFig. 10に示す。ひずみ範囲1.0および0.7%では急速な繰返し硬化を示し定常状態に達した後、若干の硬化傾向が認められる。

316FRの600℃におけるナトリウム中疲労寿命を大気中と比較しFig. 11に示す。ナトリウム中の疲労寿命の方が大気中より大きく、この傾向はSUS304やSUS316と同様である³⁾。

4. 316FRのナトリウム環境効果評価

これまでのナトリウム中試験結果を基に、316FRのナトリウム環境効果を評価すると、

- ① ナトリウム中における腐食速度はSUS304やSUS316と同じであり、現行の高温構造設計方針材料強度基準で与えられるナトリウム腐食評価式で保守的に評価できる。
- ② ナトリウム中における高温強度特性は、
 - ・316FRは高速炉の使用条件下(600℃以下)では浸炭雰囲気となり、脱炭は生じない。
 - ・窒素のナトリウム中への溶出は僅かであり、脱窒が高温強度特性に及ぼす影響は小さい。
 - ・ナトリウム中におけるクリープ破断強度は大気中と同等であり、延性の低下も生じていない。
 さらに、ナトリウム中疲労寿命は大気中より大きい。

以上の結果より、316FRのナトリウム中における高温強度特性を判断すると、現在のところ明かな強度低下を示すデータが認められていないことから、強度補正係数を導入する必要はないと考えられる。

【参考文献】

- 1) 丸山他 高温ナトリウム中におけるオーステナイト系ステンレス鋼の腐食評価式
日本原子力学会誌 Vol. 26 (1984)
- 2) 伊藤他 低炭素-窒素添加改良SUS316鋼のナトリウム中脱窒および浸炭挙動
材料学会 第28回高温強度シンポジウム講演論文前刷集 21 (1990)
- 3) 加藤他 SUS304鋼の高温流動ナトリウム中における低サイクル疲労特性
原子力学会誌 Vol. 37 No. 414 p328~333 (MAR. 1988)

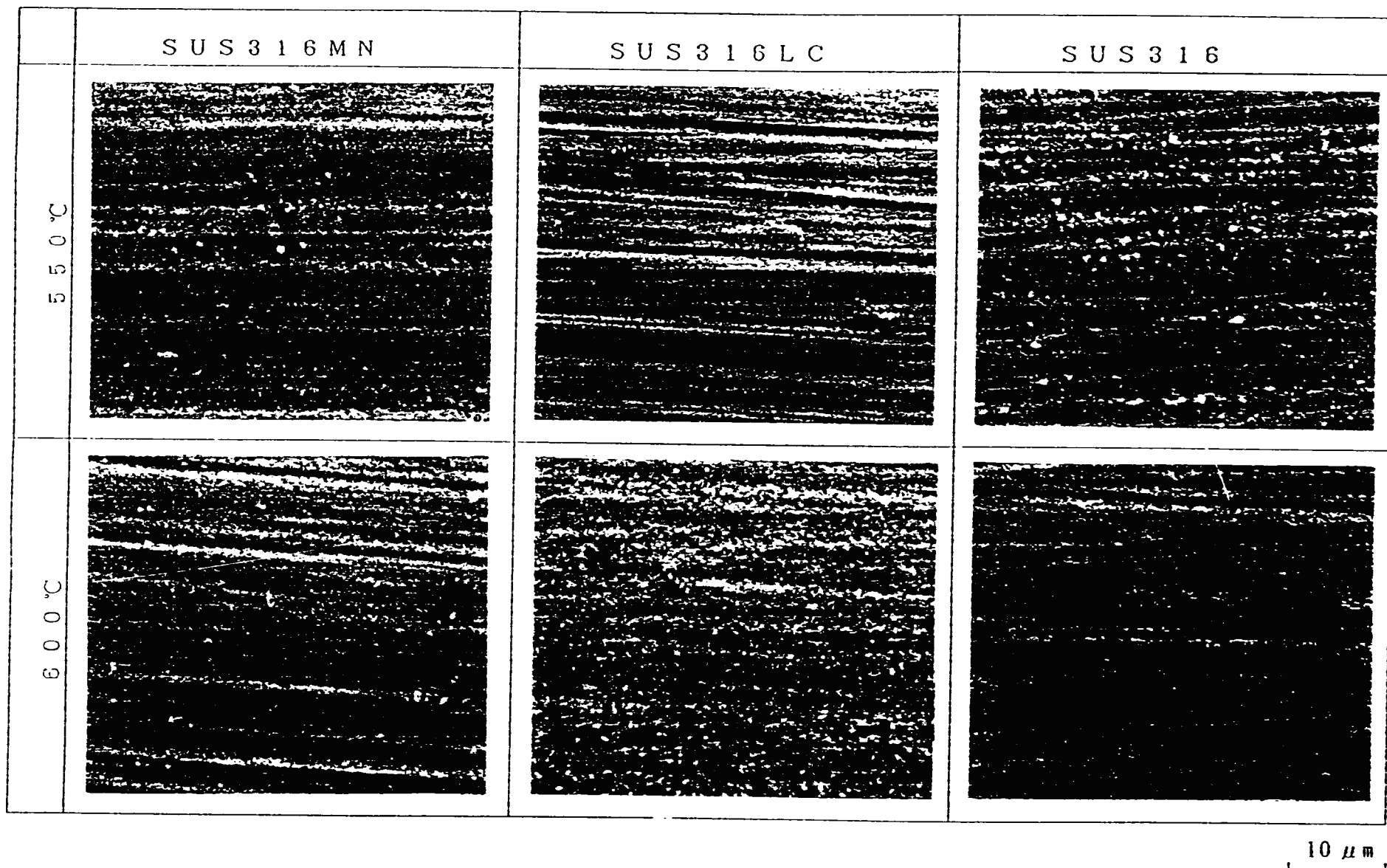


Photo. 1 Scanning electron micrographs on sodium exposed surface of 316FR and SUS316 at 550°C and 600°C for 5000 hours.

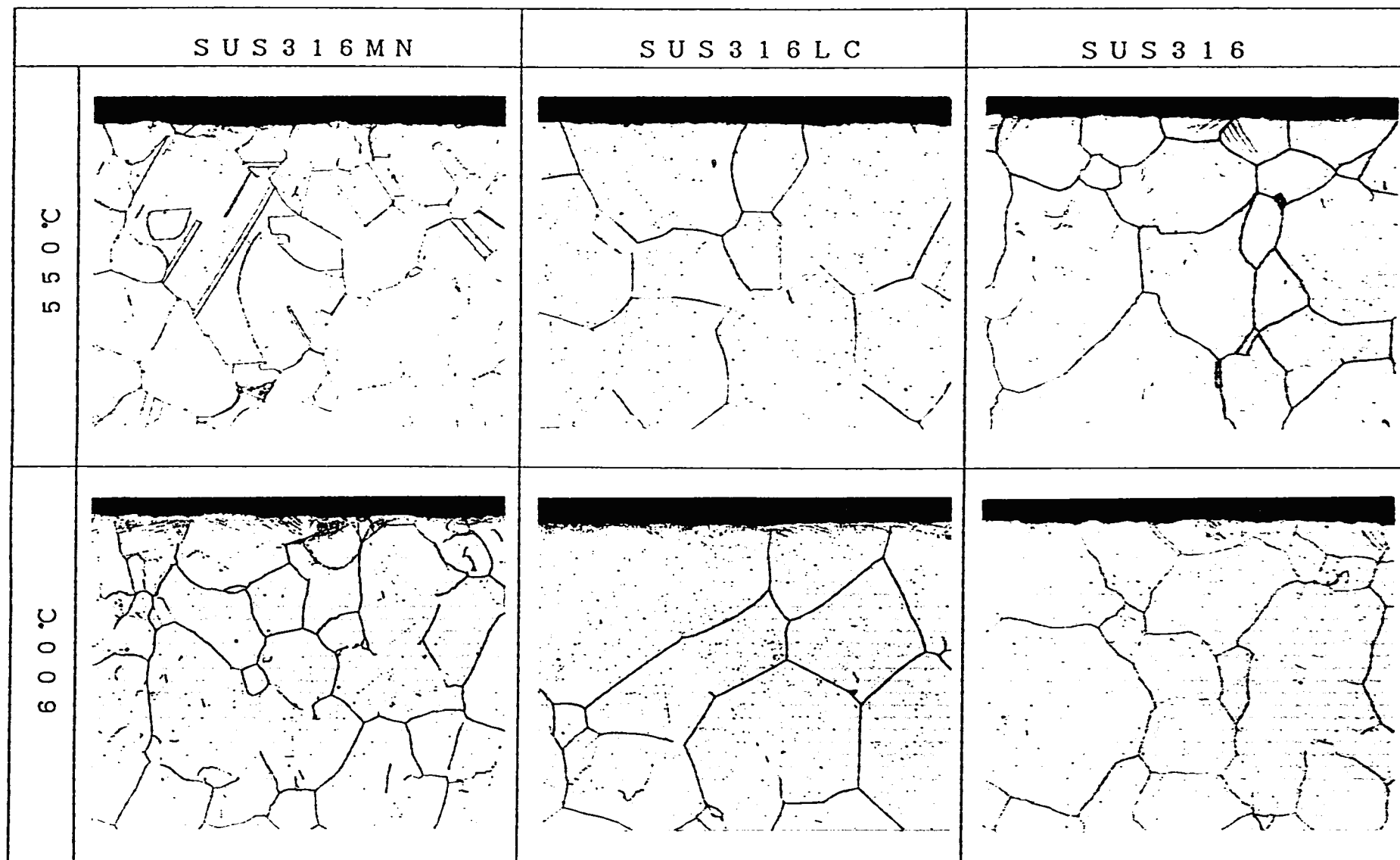


Photo. 2 Cross-sectional microstructures of 316FR and SUS316 exposed in flowing sodium 550°C and 600°C for 5000 hours.

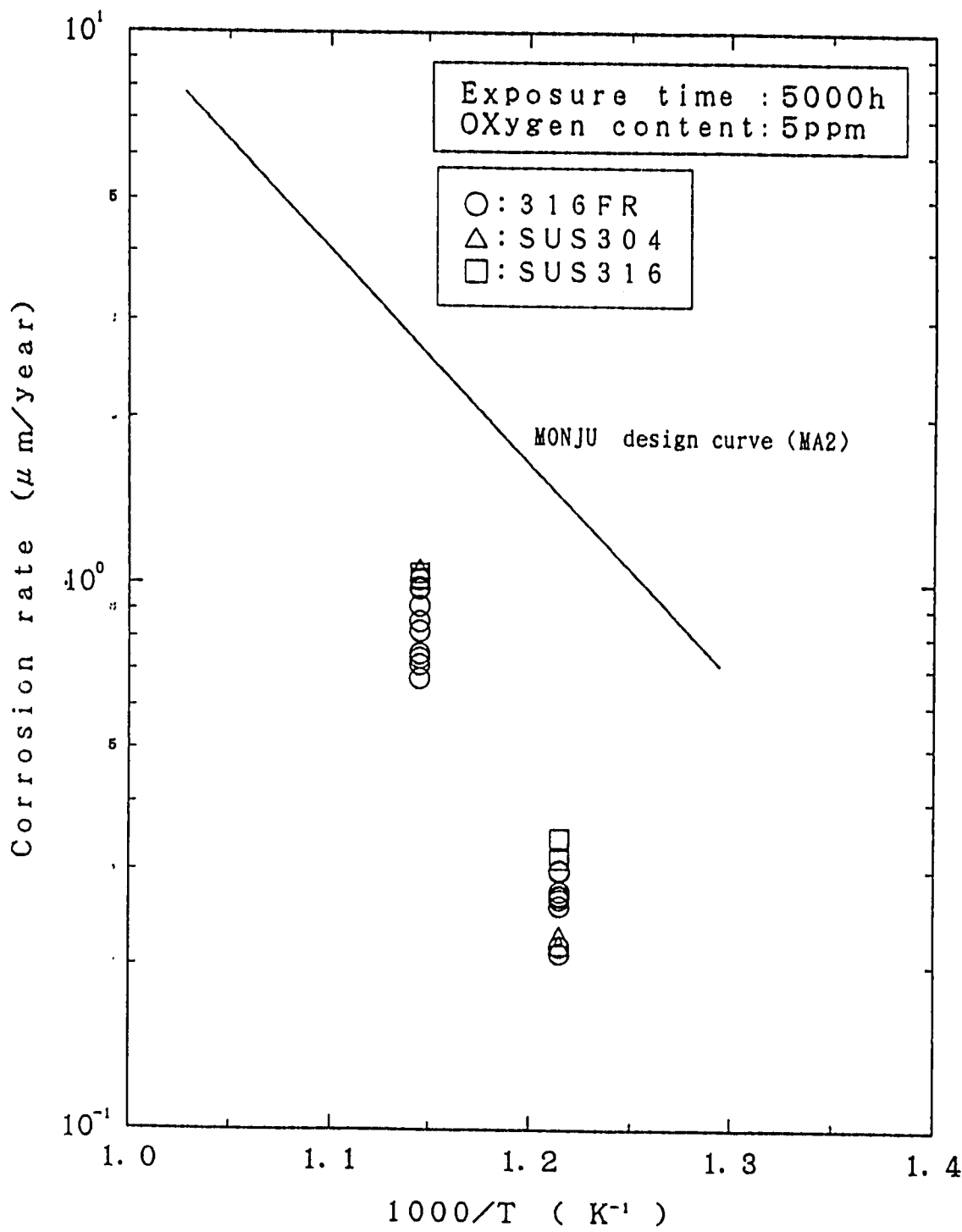


Fig. 1 Corrosion rare of 316FR compared with SUS304 snd SUS316 in flowing sodium.

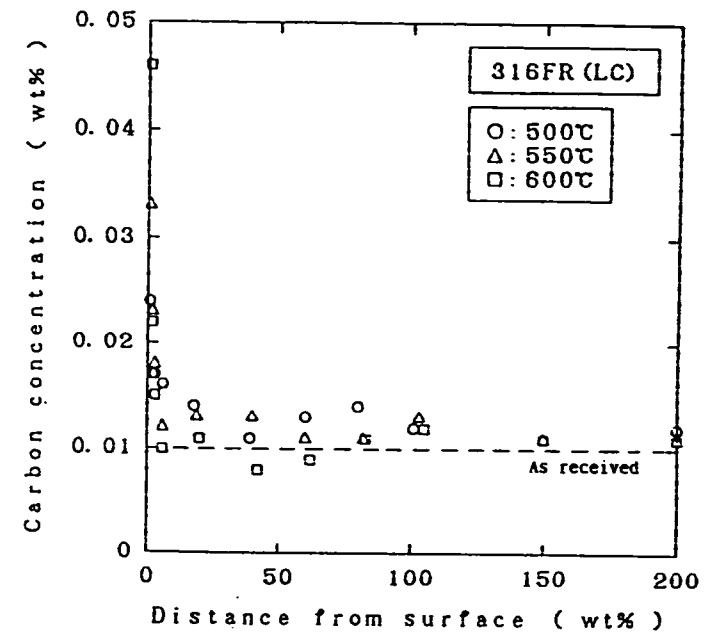
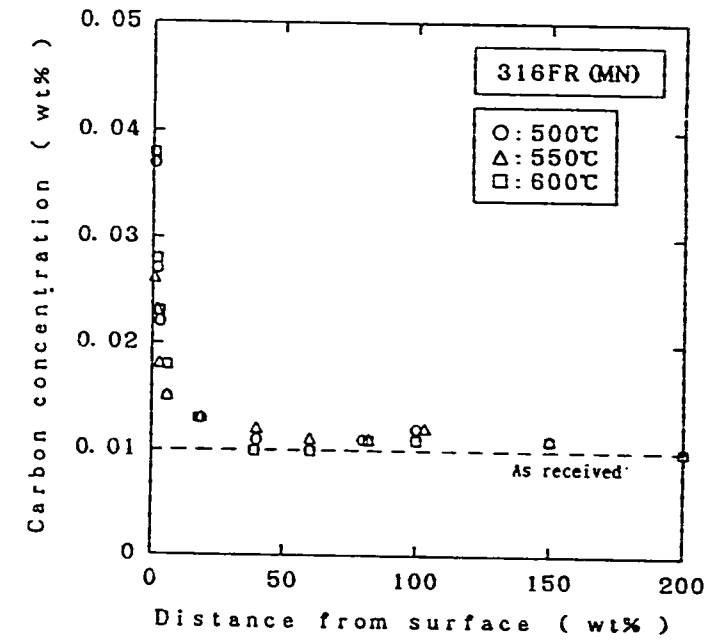
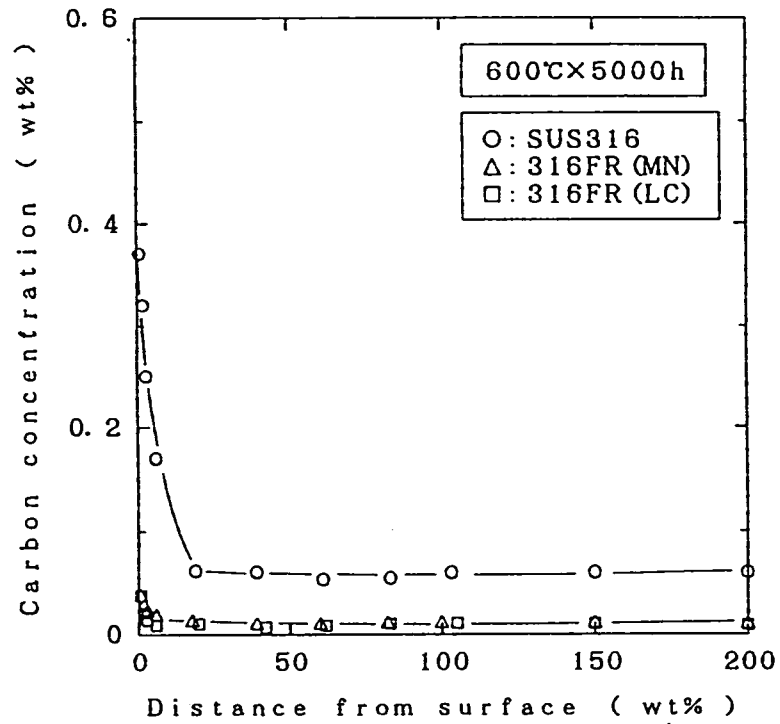


Fig. 2 Carbon profiles of 316FR and SUS316 exposed in flowing sodium for 5000 hours.

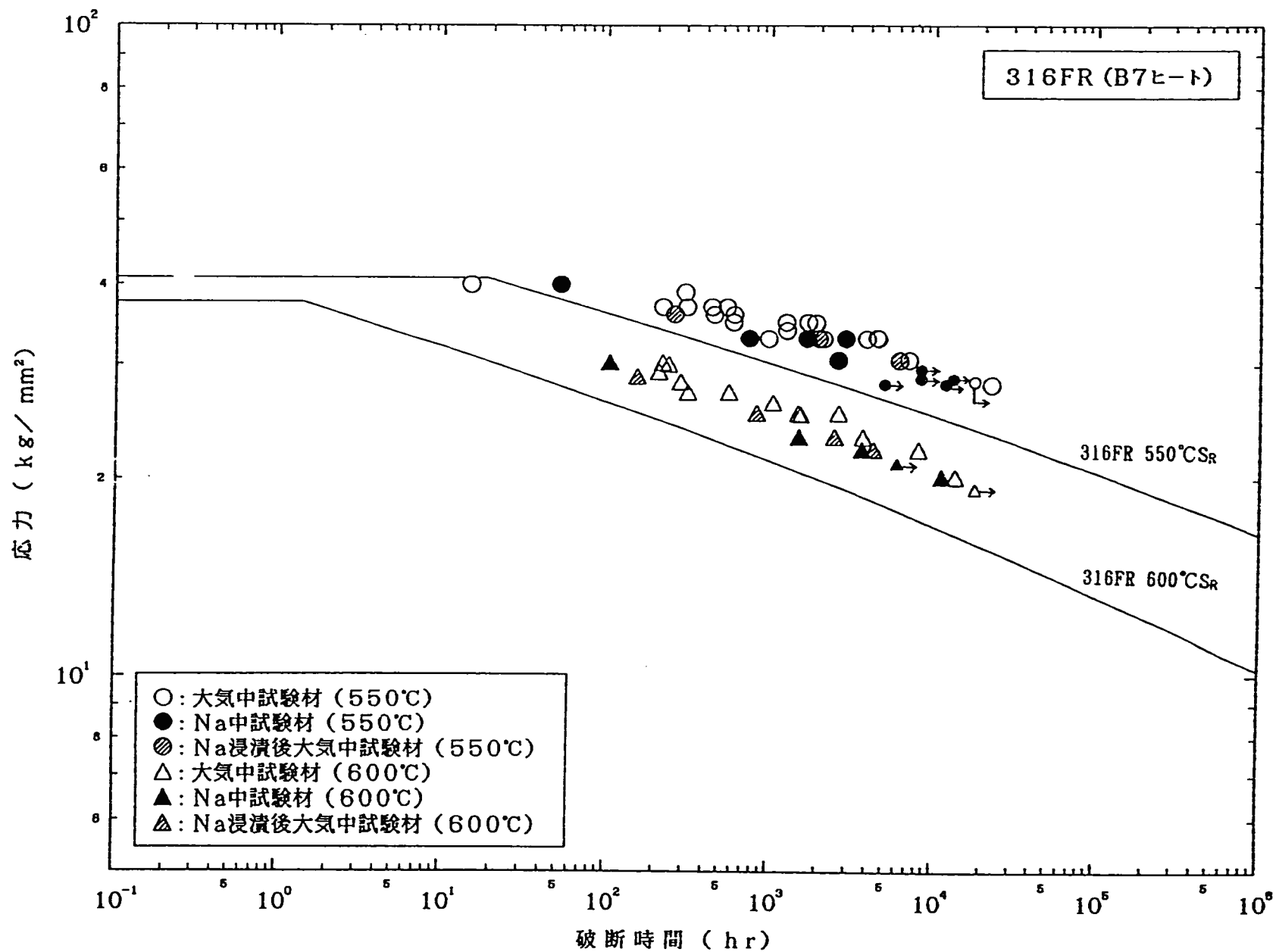


Fig. 6 Creep rupture properties of 316FR in sodium and air.

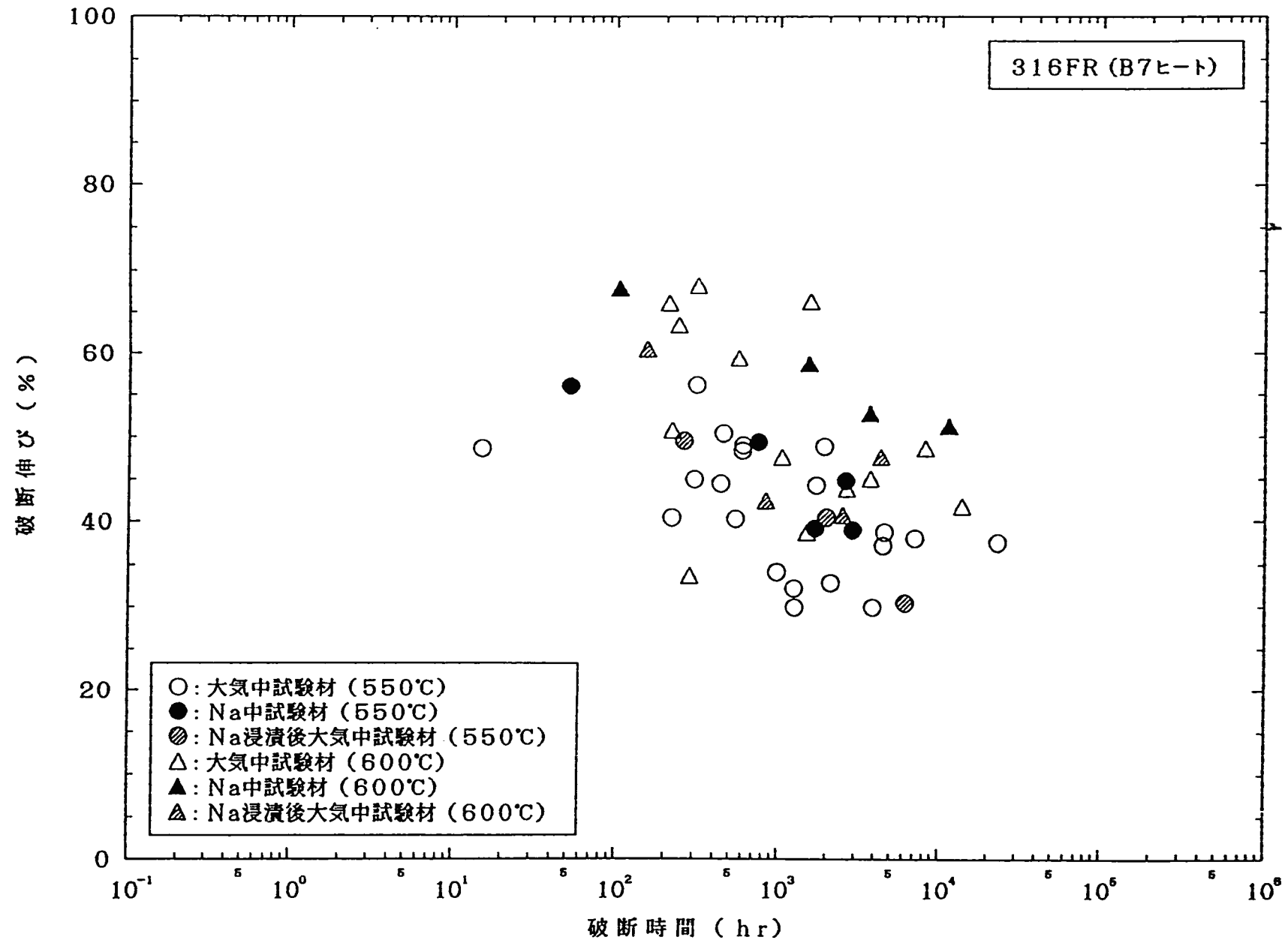


Fig. 7 Creep rupture elongation of 316FR in sodium and air.

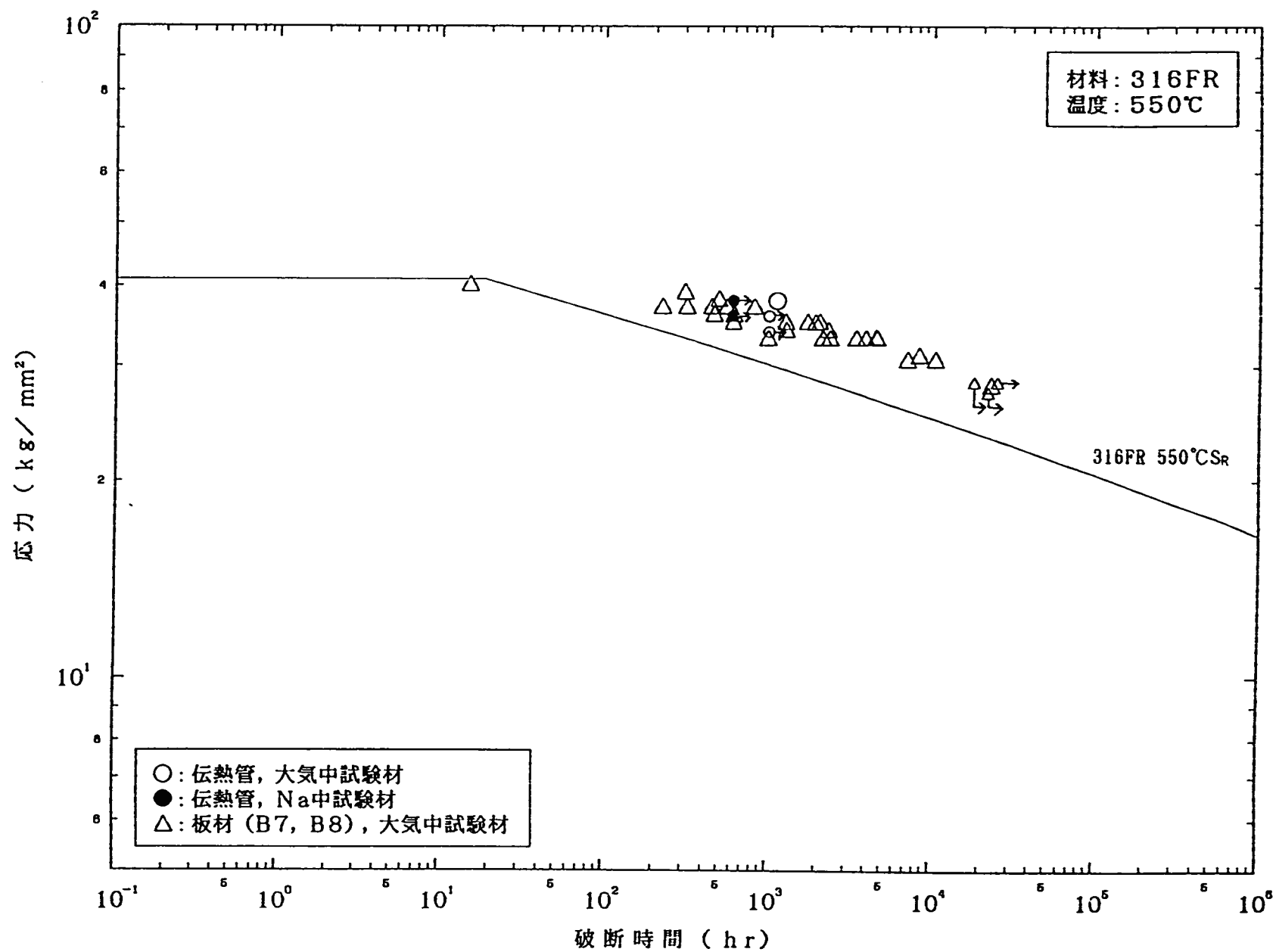


Fig. 8 Creep rupture properties of 316FR heat transfer tube in sodium and air.

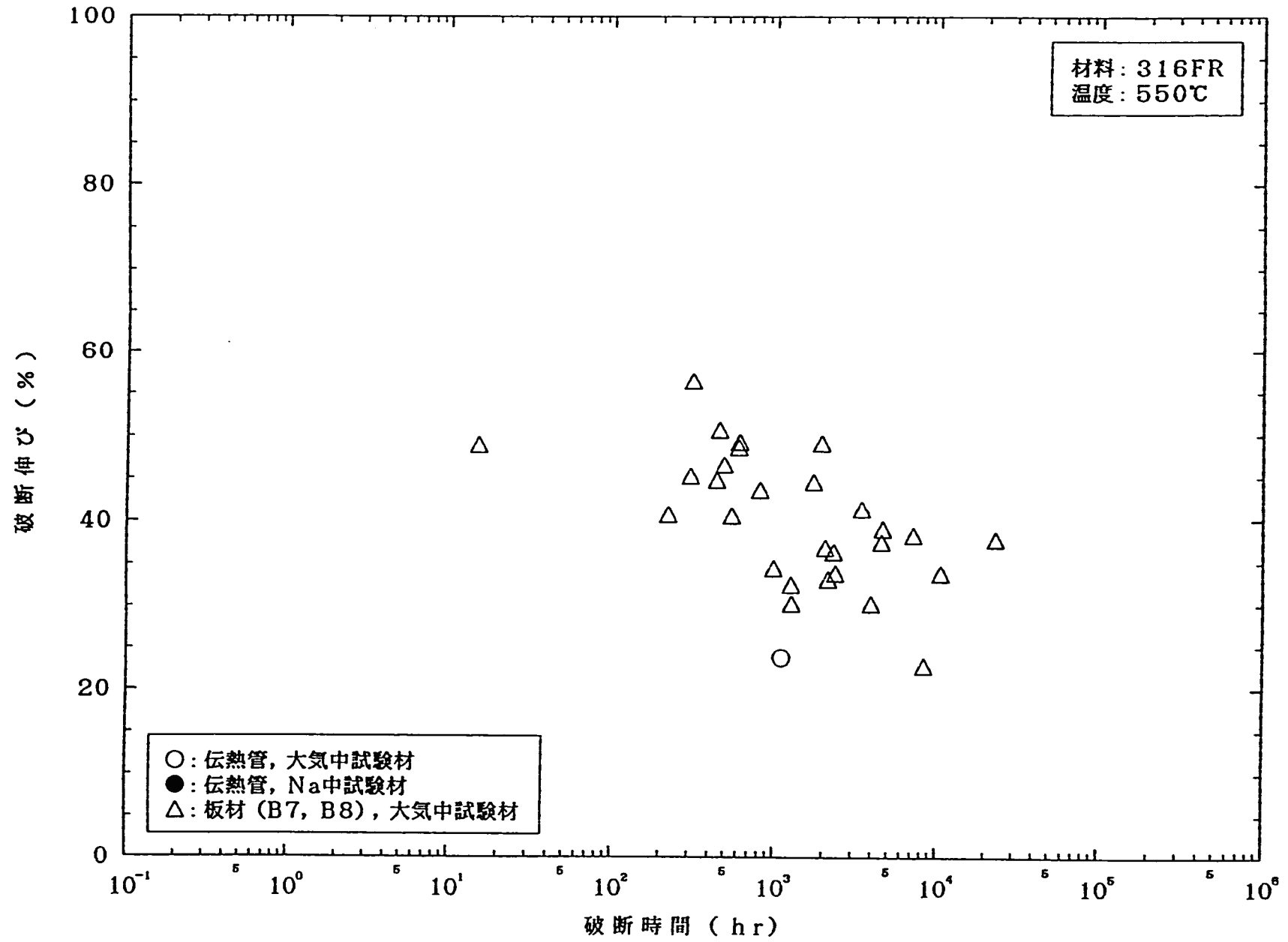


Fig. 9 Creep rupture elongation of 316FR heat transfer tube in sodium and air.

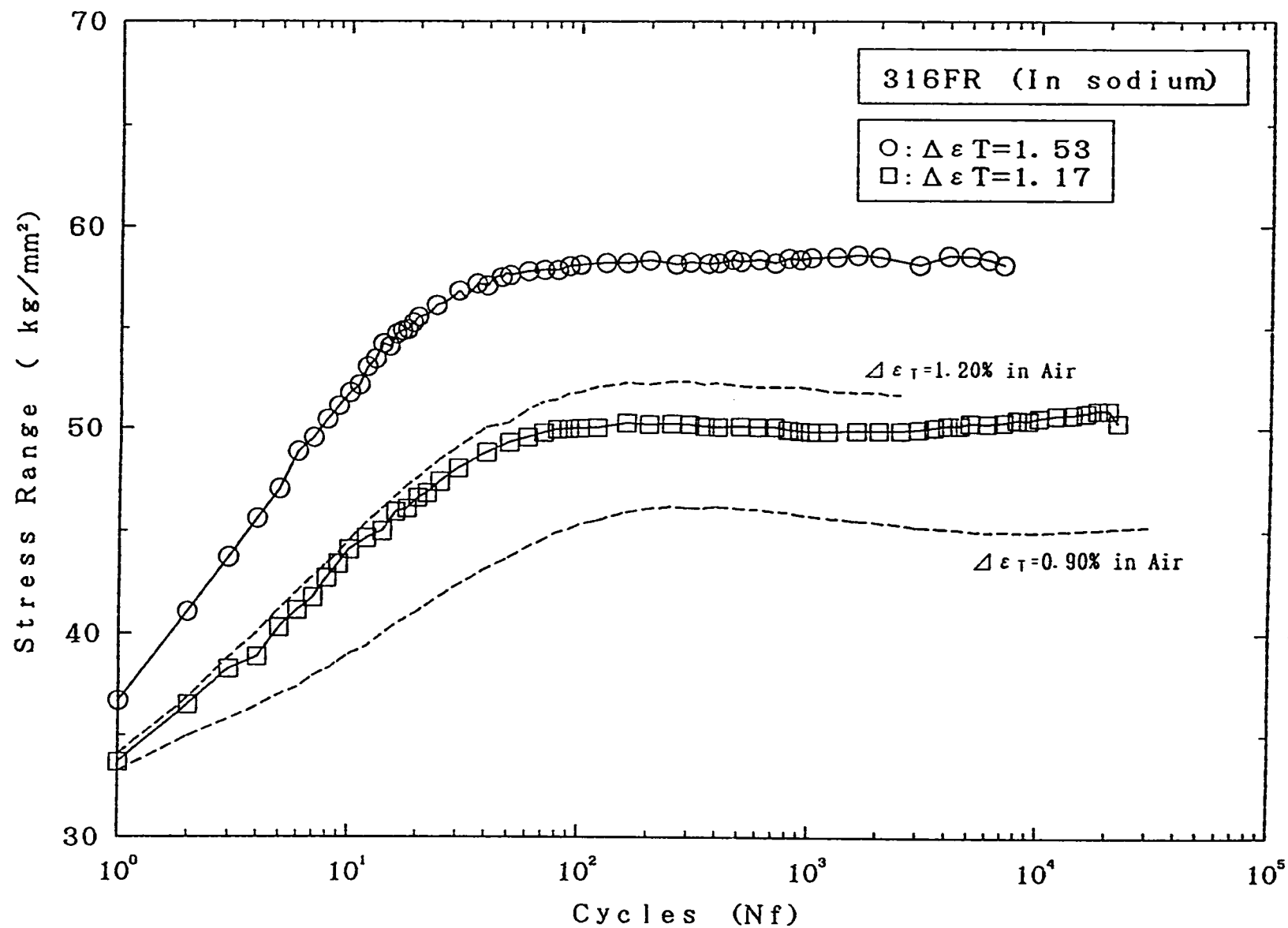


Fig.10 Cyclic stress range responded of 316FR at 600°C in sodium.

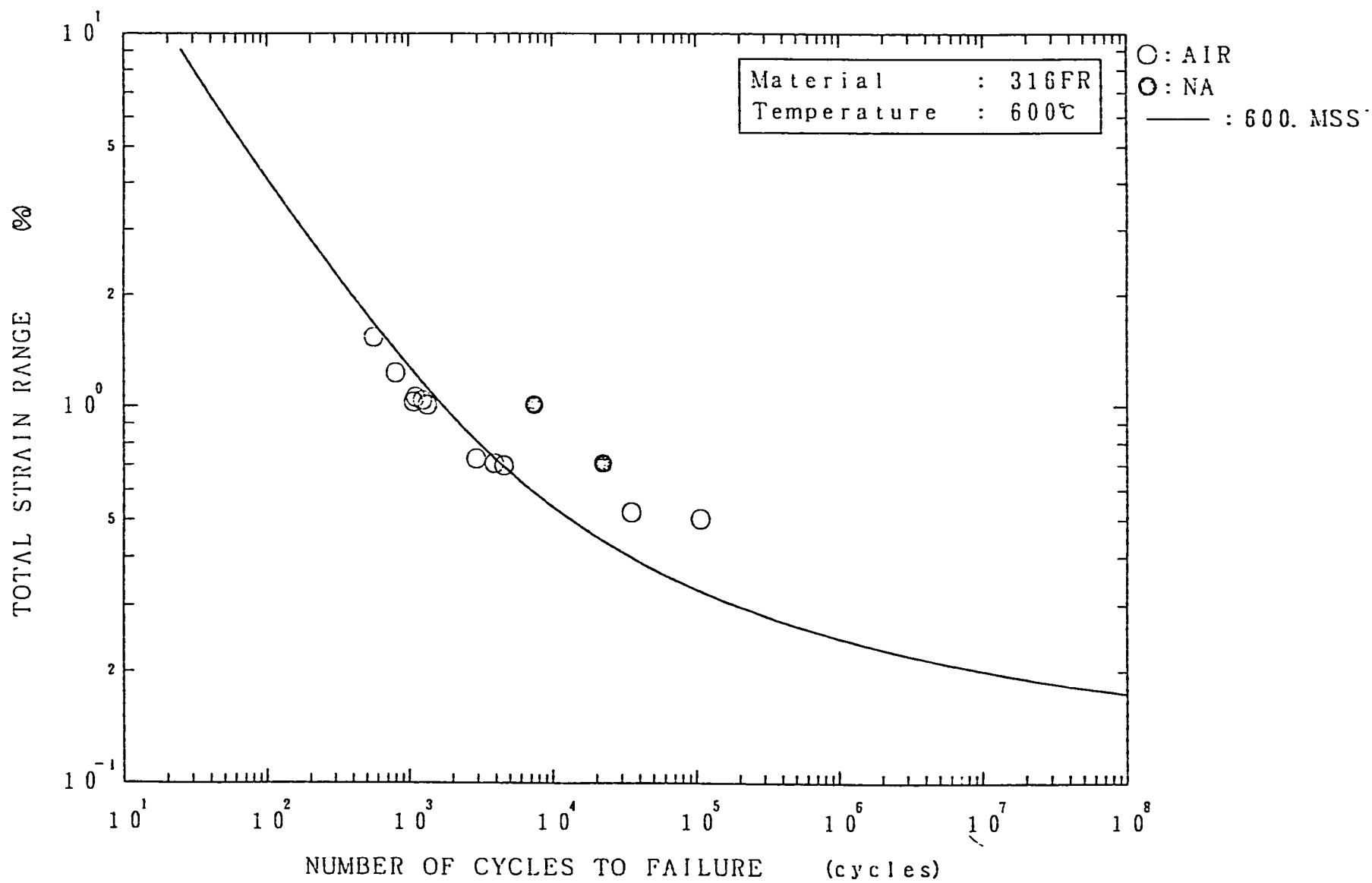


Fig.11 Comparison of low-cycle fatigue life for 316FR in sodium and air at 600°C.

図表集等(II) 316FRの使用実績

316FRの使用実績について

1. はじめに

316FR そのものの高速炉における使用実績はないが、下図および下表に示すように316FR とよく似た成分を有する316L(N)(欧州統一呼称、フランスにおける愛称は316L SPH) がスーパー・フェニックスにおいて使用されている¹⁾。

2. 使用実績

(1) 316L(N) はスーパー・フェニックスの主要構造材料であり、炉心および1次系が内蔵される主容器、中間熱交換器、蒸気発生器本体等に用いられており³⁾、316L(N) に起因する故障等は報告されていない。

(2) 316FR の高速炉における使用実績はないが、大洗工学センターのナトリウム・ループ用5m タンクの材料として用いられているほか、容器や配管の強度を調べる試験体としてナトリウム中で使用されている。

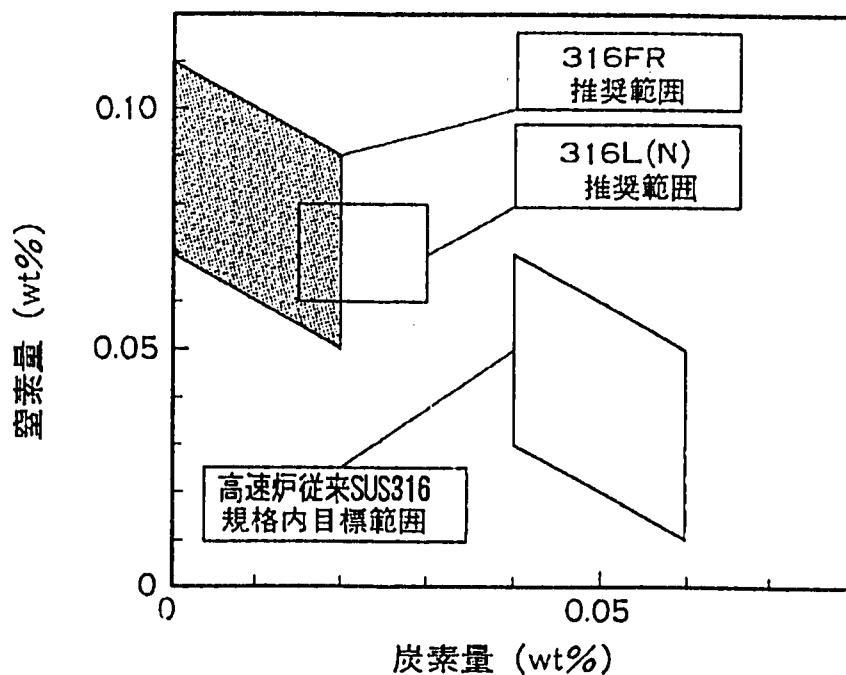
表1 化学成分 (重量パーセント)

材 料	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	N
316L(N) ²⁾	≦0.03	≦0.50	1.60 2.00	≦ 0.025	0.005 0.01	12.00 12.50	17.00 18.00	2.30 2.70	0.060 0.080
316FR	≦0.02	≦1.00	≦2.00	0.015 0.045	≦ 0.030	10.00 14.00	16.00 18.00	2.00 3.00	0.06 0.12

1) 和田：高速炉用構造新材料とその評価，原子力分野における新材料の開発と接合・加工技術に関する国内シンポジウム資料集、溶接協会第12回シンポジウム(1992)113-154

2) Aubert, M.: EFR Structural Materials - Highlight and Progress, FR' 91(1991)7.1-1/7.1-11

3) Villeneuve, J. et al.: The Superphénix Nuclear Steam Supply System, Nuclear Europe, Vol. V No. 11(1985)24-34

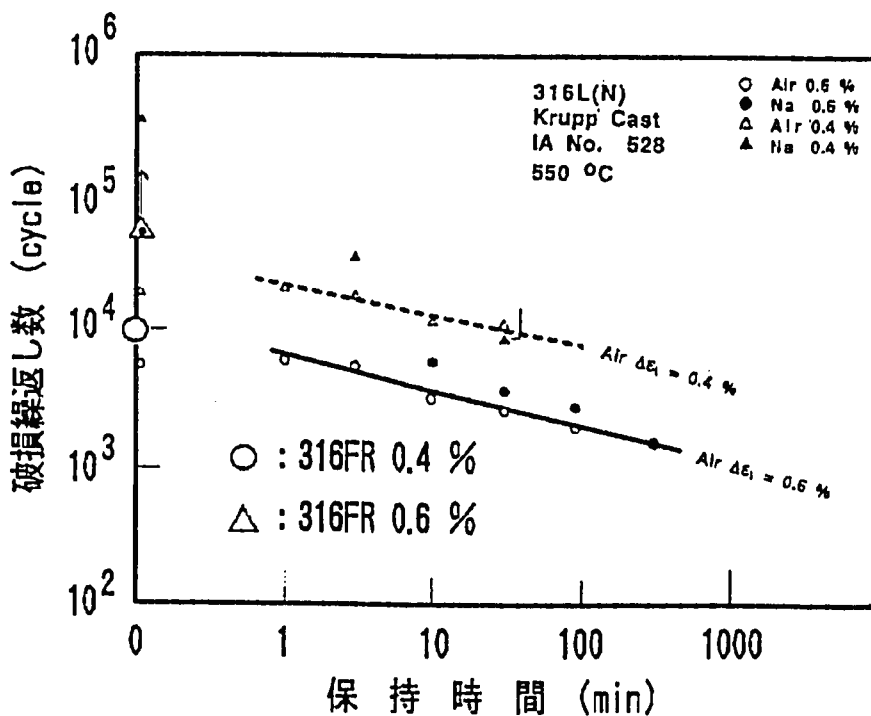
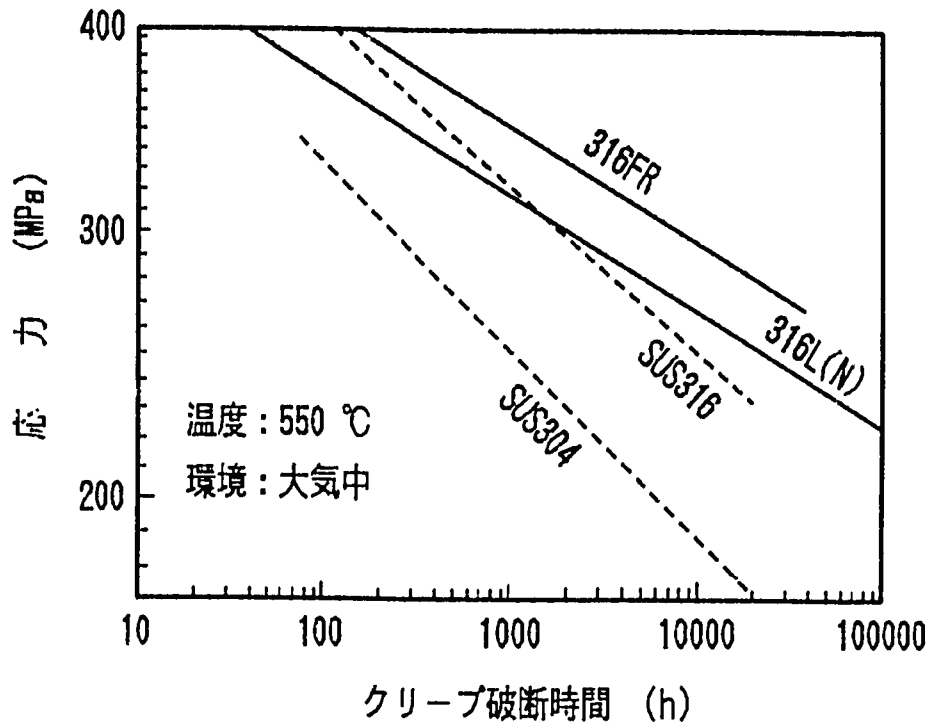


図表集等(12) 316L(N) と 316FR

高温疲労については両者殆ど同一であり、クリープ疲労についても同等と思われる。

クリープ強度については、データの得られている3万時間程度までは、316FR は316LN の3倍、SUS304の10倍程度のクリープ疲労破断時間を有する。

重要な長時間側については曲線の勾配が大切である。SUS316とSUS304は勾配急。一方、316LN と316FR は勾配が殆ど同一であって、緩やか。



316L(N) の試験結果は下記文献による。

Huthman, H. et al.: Comparison of creep rupture properties of Type 316L(N) steel in air and flowing sodium, Liquid Metal Systems II (1993)