第３章　新材料の強度基準及び強度評価法

第３章　新材料の強度基準及び材料挙動特性

高速増殖炉用新材料である改良９Ｃｒ－１Ｍｏ鋼及び３１６ＦＲ鋼を高温構造設計に用いる場合には設計用材料強度基準等が必要になる。また，高温で用いられる構造材料特性として重要なクリープ疲労並びに溶接部に関しても材料の特長を考慮した，高温強度の評価法が必要となる。

本章では，改良９Ｃｒ－１Ｍｏ鋼及び３１６ＦＲ鋼の国内データに基づき策定した材料強度基準等及び高温特有のクリープ疲労に係わる母材及び溶接部の強度評価法についての検討結果を示す。

3.1 節には，新材料としての材料仕様を，3.2 節には 3.1 節に示す材料仕様で製作された材料による国内データ（注１）に基づき策定した材料強度基準等を，3.3 節には材料強度基準等策定のベースとなる国内材料データから統計処理にて策定した材料挙動を示す関係式を，また 3.4 節には材料挙動関係式と材料データとの関係を示す。

3.5 節にはクリープ疲労強度評価法について，また 3.6 節には溶接部の強度評価方法について示す。

注１：電共研データ

核燃料サイクル開発機構（旧　動力炉・核燃料開発事業団）データ

電力中央研究所データ

金属材料技術研究所データ

（なお，各機関のデータ量及び出典は後述の 4.1.2(1)及び 4.2.2(1)に示す。）

3.1　材料仕様

新材料である改良９Ｃｒ－1Ｍｏ鋼及び３１６ＦＲ鋼板材の材料仕様を表 3.1-1 及び表 3.1-2 に示す

表 3.1-1　改良９Ｃｒ－１Ｍｏ鋼板の材料仕様

適用規格　１）ＡＳＴＭ　Ａ３８７　Ｇｒ．９１

２）通産省告示第５０１号「発電用原子力設備に関する技術基準」

化学成分（ｗｔ％）

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo
0.08 ～ 0.12	0.02 ～ 0.50	0.30 ～ 0.60	≦0.020	≦0.010	≦0.40	8.00 ～ 9.50	0.85 ～ 1.05

V	Nb	Al	N
0.18 ～ 0.25	0.060 ～ 0.10	≦0.04	0.030 ～ 0.070

熱処理：焼ならし，焼もどし処理

焼ならし温度：１０４０℃～１０９５℃

焼もどし温度：７３０℃以上

機械的性質

引張特性			
温度 (℃)	引張強さ (N/mm^2)	0.2%耐力 (N/mm^2)	伸び (%)
室温	５８５ ～ 760	≧４１５	≧18

表 3.1-2　３１６ＦＲ鋼板の材料仕様

適用規格　１）ＪＩＳ　Ｇ　４３０４（１９８７）「熱間圧延ステンレス鋼板」（注 1）

２）通産省告示第５０１号「発電用原子力設備に関する技術基準」（注 2）

化学成分（ｗｔ％）

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Al	N
≦0.020	≦1.00	≦2.00	0.020 ～ 0.045	≦0.030	10.00 ～ 14.00	16.00 ～ 18.00	2.00 ～ 3.00	≦0.05	0.06 ～ 0.12

熱処理：固溶化熱処理

加熱温度：１０１０℃～１１５０℃

冷却方法：水冷

機械的性質

引張特性				硬さ	
温度 (℃)	引張強さ (N/mm^2)	0.2%耐力 (N/mm^2)	伸び (%)	ＨＢ	ＨＲＢ
室温	≧５２０	≧２０５	≧４０	≦１８７	≦９０

（注 1）：化学成分については本表記載の値を適用。

（注 2）：告示のＳＵＳ３１６を準用する。

3.2 強度基準値

新材料改良9Ｃｒ－1Ｍｏ鋼及び３１６ＦＲ鋼を対象とした，「高速増殖実証炉高温構造設計方針・材料強度基準等（案）」を以下に示す。本案は高速増殖実証炉を対象として平成10年度に策定されたものである。なお、「高速増殖実証炉高温構造設計方針（案）」は以後ＤＤＳ（案）と表記する。

高速増殖実証炉高温構造設計方針
材料強度基準等（案）

H３．3.30	初版
H５．6.30	訂１
H11．3.31	訂２

まえがき

(1) 次の材料については「高速原型炉高温構造設計指針材料強度基準等」を適用することができる。

・ＳＵＳ３０４鋼

・ＳＵＳ３１６鋼

・ＳＵＳ３２１鋼

・ＳＵＳ３２１鋼伝熱管

・２．２５Ｃｒ－１Ｍｏ鋼（ＮＴ）板

・２．２５Ｃｒ－１Ｍｏ鋼（ＮＴ）伝熱管

なお，上記材料の適用に際しては，下記により工学系単位からＳＩ単位への換算を行う。

$kgf/mm^2 \rightarrow N/mm^2$に換算

9.80665を乗じ，小数点２桁目を四捨五入し１桁に丸める。

また，上記材料の弾塑性応力－ひずみ関係式及びクリープひずみ式については，「高速原型炉高温構造設計指針材料強度基準等」の等時応力－ひずみ線図を弾塑性応力－ひずみ関係式及びクリープひずみ式に替えて用いることができる。

(2) 本書は３１６ＦＲ鋼（高速炉構造用ＳＵＳ３１６鋼）及び改良９Ｃｒ－１Ｍｏ鋼（ＮＴ＋ＳＲ）の材料強度基準等を示すものである。

(3) ３１６ＦＲ鋼伝熱管及び改良９Ｃｒ－１Ｍｏ鋼（ＮＴ＋ＳＲ）伝熱管の各基準値は本書に記載の３１６ＦＲ鋼及び改良９Ｃｒ－１Ｍｏ鋼（ＮＴ＋ＳＲ）の値を用いることができる。

目　次

別　表　1　　材料強度基準等……　1

別　図　1　　材料強度基準等……２５

付録　……４５

別表１　材料強度基準等

別表1.1　最大許容応力強さ　　S_0

３１６ＦＲ鋼…… 1

改良9Ｃｒ－1Ｍｏ鋼（ＮＴ＋ＳＲ）…… 1

別表1.2　設計応力強さ　　S_m

３１６ＦＲ鋼…… 2

改良9Ｃｒ－1Ｍｏ鋼（ＮＴ＋ＳＲ）…… 2

別表1.3　設計応力強さ　　S_t

３１６ＦＲ鋼…… 3

改良9Ｃｒ－1Ｍｏ鋼（ＮＴ＋ＳＲ）…… 3

別表1.4　設計降伏点　　S_y

３１６ＦＲ鋼…… 4

改良9Ｃｒ－1Ｍｏ鋼（ＮＴ＋ＳＲ）…… 4

別表1.5　設計クリープ破断応力強さ　S_R

３１６ＦＲ鋼…… 5

改良9Ｃｒ－1Ｍｏ鋼（ＮＴ＋ＳＲ）…… 5

別表1.6　設計引張強さ　　S_u

３１６ＦＲ鋼…… 6

改良9Ｃｒ－1Ｍｏ鋼（ＮＴ＋ＳＲ）…… 6

別表1.7　設計緩和強さ　　S_r

３１６ＦＲ鋼 …… 7

改良9Ｃｒ－1Ｍｏ鋼（ＮＴ＋ＳＲ）…… 7

別表1.8　縦弾性係数　　E

３１６ＦＲ鋼…… 8

改良9Ｃｒ－1Ｍｏ鋼（ＮＴ＋ＳＲ）…… 8

別表1.9　ポアソン比　　ν

３１６ＦＲ鋼…… 9

改良9Ｃｒ－1Ｍｏ鋼（ＮＴ＋ＳＲ）…… 9

別表1.10 熱膨張係数　　α

３１６ＦＲ鋼……１０

改良9Ｃｒ－1Ｍｏ鋼（ＮＴ＋ＳＲ）……１０

別表1.11 許容ひずみ範囲（Ａ）　ε_t

３１６ＦＲ鋼……１１

改良9Ｃｒ－1Ｍｏ鋼（ＮＴ＋ＳＲ）……１２

別表1.12 許容ひずみ範囲（Ｂ）　ε_t

３１６ＦＲ鋼……１３

改良9Ｃｒ－1Ｍｏ鋼（ＮＴ＋ＳＲ）……１４

別表1.13 許容ひずみ範囲（Ｃ）　ε_t

３１６ＦＲ鋼……１５

改良9Ｃｒ－1Ｍｏ鋼（ＮＴ＋ＳＲ）……１６

別表1.14 材料特性式

３１６ＦＲ鋼……１８

改良9Ｃｒ－1Ｍｏ鋼（ＮＴ＋ＳＲ）……２２

別図１　材料強度基準等

別図1.1　最大許容応力強さ　　S_0

３１６ＦＲ鋼……２５

改良9Ｃｒ－1Ｍｏ（ＮＴ＋ＳＲ）鋼……２６

別図1.2　設計応力強さ　　S_m

３１６ＦＲ鋼……２７

改良9Ｃｒ－1Ｍｏ鋼（ＮＴ＋ＳＲ）……２８

別図1.3　設計応力強さ　　S_t

３１６ＦＲ鋼……２９

改良9Ｃｒ－1Ｍｏ鋼（ＮＴ＋ＳＲ）……３０

別図1.4　設計降伏点　　S_y

３１６ＦＲ鋼……３１

改良9Ｃｒ－1Ｍｏ鋼（ＮＴ＋ＳＲ）……３２

別図1.5　設計クリープ破断応力強さ　S_R

３１６ＦＲ鋼……３３

改良9Ｃｒ－1Ｍｏ鋼（ＮＴ＋ＳＲ）……３４

別図1.6　設計引張強さ　S_u

３１６ＦＲ鋼……３５

改良9Ｃｒ－1Ｍｏ鋼（ＮＴ＋ＳＲ）……３６

別図1.7　設計緩和強さ　S_r

３１６ＦＲ鋼……３７

改良9Ｃｒ－1Ｍｏ鋼（ＮＴ＋ＳＲ）……３８

別図1.8　許容ひずみ範囲（Ａ）　ε_t

３１６ＦＲ鋼……３９

改良9Ｃｒ－1Ｍｏ鋼（ＮＴ＋ＳＲ）……４０

別図1.9　許容ひずみ範囲（Ｂ）　ε_t

３１６ＦＲ鋼……４１

改良9Ｃｒ－1Ｍｏ鋼（ＮＴ＋ＳＲ）……４２

別図1.10 許容ひずみ範囲（Ｃ）　ε_t

３１６ＦＲ鋼……４３

改良9Ｃｒ－1Ｍｏ鋼（ＮＴ＋ＳＲ）……４４

付　録

付録　ＭＡ　環境効果……４５

付録　ＭＢ　設計応力強さS_t，設計クリープ破断応力強さS_R及び
設計応力緩和強さS_rの外挿値……４９

付録　ＭＣ　大型鍛鋼品の設計引張強さS_u……５３

付録　ＭＤ　大型鍛鋼品の材料強度基準……５４

別表1.1　最大許容応力強さ　S_0　（N/mm²）

温　度　(℃)	３１６ＦＲ鋼	改良9Cr-1Mo鋼 (NT+SR)
−30〜40	129	147
75	129	144
100	129	142
150	127	139
200	127	134
225	125	132
250	125	131
275	123	128
300	119	126
325	117	125
350	115	124
375	112	122
400	111	120
425	110	118
450	99	116
475	98	107
500	96	99
525	95	93
550	95	87
575	93	73
600	92	55
625	74	−
650	57	−

（備考）　改良9Cr-1Mo鋼(NT+SR)は600℃以下に適用。

別表1.2　設計応力強さ　S_m　（N/mm²）

温　度　(℃)	３１６ＦＲ鋼	改良9Cr-1Mo鋼 (NT+SR)
−30～40	137	195
75	137	192
100	137	189
150	137	185
200	132	178
225	129	176
250	126	174
275	122	171
300	119	167
325	117	166
350	114	165
375	112	163
400	110	160
425	109	157
450	99	154
475	98	143
500	96	132
525	95	124
550	95	116
575	95	109
600	94	102
625	94	−
650	93	−

（備考）　改良9Cr-1Mo鋼(NT+SR)は600℃以下に適用。

別表1.3　３１６ＦＲ鋼の設計応力強さ　S_t　（N/mm²）

時間 hr / 温度℃	1	10	30	10^2	3×10^2	10^3	3×10^3	10^4	3×10^4	10^5	3×10^5
425	149	149	149	149	149	149	149	149	149	149	149
450	145	145	145	145	145	145	145	145	145	145	145
475	144	144	144	144	144	144	144	144	144	143	143
500	142	142	142	142	142	142	141	141	141	140	139
525	140	140	140	140	140	140	139	138	137	134	131
550	139	139	139	138	138	136	135	132	128	123	110
575	139	138	137	136	134	131	127	120	112	99	88
600	137	135	133	130	125	118	110	101	91	79	69
625	135	129	125	118	110	99	89	79	70	61	53
650	130	118	110	99	89	77	67	57	49	42	35

（備考）　許容時間（hr）を定めるべき応力値（N/mm²）が当該温度（℃）における表中の応力値よりも小さい場合は付録ＭＢを用いて定めることができる。

別表1.3　改良9Cr-1Mo鋼（NT+SR）の設計応力強さ　S_t　（N/mm²）

時間 hr / 温度℃	1	10	30	10^2	3×10^2	10^3	3×10^3	10^4	3×10^4	10^5	3×10^5
375	325	325	325	325	325	325	325	325	325	312	297
400	320	320	320	320	320	320	314	297	283	268	254
425	314	314	314	314	302	286	271	256	242	228	215
450	309	309	294	277	262	246	232	218	205	192	180
475	286	270	255	239	225	210	198	184	172	160	149
500	263	234	220	205	192	178	166	154	143	131	122
525	231	201	188	174	162	149	138	127	117	106	97
550	199	171	159	146	135	123	113	102	93	83	75
575	170	144	133	121	111	100	90	81	72	63	56
600	144	120	109	98	89	79	70	61	54	45	38

（備考）　許容時間（hr）を定めるべき応力値（N/mm²）が当該温度（℃）における表中の応力値よりも小さい場合は付録ＭＢを用いて定めることができる。

別表1.4　設計降伏点　S_y　（N/mm²）

温　度　(℃)	３１６ＦＲ鋼	改良9Cr-1Mo鋼 (NT+SR)
−30〜40	205	414
75	187	407
100	176	400
150	161	400
200	149	383
225	144	383
250	139	383
275	135	377
300	131	370
325	128	370
350	127	370
375	125	365
400	123	358
425	122	351
450	110	345
475	109	327
500	107	310
525	106	298
550	105	287
575	105	260
600	104	233
625	104	−
650	103	−

（備考）　改良9Cr-1Mo鋼(NT+SR)は600℃以下に適用。

別表1.5　３１６ＦＲ鋼の設計クリープ破断応力強さ　S_R　（N/mm²）

時間 hr / 温度℃	1	10	30	10^2	3×10^2	10^3	3×10^3	10^4	3×10^4	10^5	3×10^5
425	405	405	405	405	405	405	405	405	405	405	405
450	401	401	401	401	401	401	401	401	401	393	363
475	400	400	400	400	400	400	400	393	362	329	302
500	398	398	398	398	398	398	365	331	303	274	249
525	388	388	388	388	372	337	307	277	251	225	203
550	378	378	378	347	316	284	257	230	207	184	164
575	372	362	329	295	266	237	213	189	169	148	131
600	366	310	279	248	223	197	175	154	136	118	103
625	329	263	236	208	185	162	143	124	108	92	80
650	282	222	197	172	152	131	115	98	84	71	60

（備考）　許容時間（hr）を定めるべき応力値（N/mm²）が当該温度（℃）における表中の応力値よりも小さい場合は付録ＭＢを用いて定めることができる。

別表1.5　改良9Cr-1Mo鋼（NT+SR）の設計クリープ破断応力強さ　S_R　（N/mm²）

時間 hr / 温度℃	1	10	30	10^2	3×10^2	10^3	3×10^3	10^4	3×10^4	10^5	3×10^5
375	488	488	488	488	488	488	488	488	488	468	446
400	480	480	480	480	480	480	471	446	424	401	381
425	471	471	471	471	454	429	407	384	363	342	323
450	463	463	440	415	393	369	349	327	308	288	270
475	429	405	382	358	337	316	296	276	259	240	224
500	395	351	329	307	288	267	249	231	214	197	182
525	346	301	281	261	243	224	207	190	175	159	145
550	298	257	238	219	202	185	169	153	140	125	113
575	255	216	199	181	166	150	136	121	108	95	84
600	216	180	164	148	133	118	105	92	80	68	57

（備考）　許容時間（hr）を定めるべき応力値（N/mm²）が当該温度（℃）における表中の応力値よりも小さい場合は付録ＭＢを用いて定めることができる。

別表1.6　設計引張強さ　S_u　(N/mm²)

温　度　(℃)	３１６ＦＲ鋼	改良9Cr-1Mo鋼 (NT+SR)
−30～40	520	586
75	489	576
100	476	566
150	442	555
200	440	534
225	436	528
250	432	523
275	430	512
300	427	502
325	427	499
350	427	496
375	427	488
400	427	480
425	427	471
450	401	463
475	400	429
500	398	395
525	388	371
550	378	348
575	372	327
600	366	307
625	347	−
650	328	−

(備考)　改良9Cr-1Mo鋼(NT+SR)は600℃以下に適用。

別表1.7　３１６ＦＲ鋼の設計緩和強さ　S_r　（N/mm²）

時間 hr / 温度℃	1	10	30	10^2	3×10^2	10^3	3×10^3	10^4	3×10^4	10^5	3×10^5
425	163	163	163	163	163	163	163	163	163	163	162
450	148	148	148	148	148	148	148	148	148	146	143
475	147	147	147	147	147	147	146	144	141	134	127
500	144	144	144	144	144	142	138	130	122	113	108
525	143	143	142	141	138	130	120	108	100	93	86
550	142	140	137	131	120	107	95	85	78	71	62
575	141	133	123	109	96	83	73	65	58	50	42
600	135	114	99	84	72	61	53	46	40	33	25
625	120	89	75	62	51	43	36	30	25	18	13
650	97	66	54	43	34	27	22	17	12	7	—

（備考）　許容時間（hr）を定めるべき応力値（N/mm²）が当該温度（℃）における表中の応力値よりも小さい場合は付録ＭＢを用いて定めることができる。

別表1.7　改良9Cr-1Mo鋼（NT+SR）の設計緩和強さ　S_r　（N/mm²）

時間 hr / 温度℃	1	10	30	10^2	3×10^2	10^3	3×10^3	10^4	3×10^4	10^5	3×10^5
375	244	244	244	244	244	243	241	238	235	234	234
400	240	240	240	239	237	232	228	225	225	225	224
425	235	234	232	227	220	215	214	213	213	210	205
450	230	224	216	206	201	201	200	197	192	182	171
475	211	195	185	178	176	175	172	166	156	145	134
500	187	164	156	152	151	148	142	132	122	110	100
525	161	137	132	130	127	121	112	100	90	79	70
550	132	112	109	107	101	92	82	71	61	51	43
575	105	90	88	83	75	65	55	44	34	23	—
600	80	69	66	59	50	39	28	9	—	—	—

（備考）　許容時間（hr）を定めるべき応力値（N/mm²）が当該温度（℃）における表中の応力値よりも小さい場合は付録ＭＢを用いて定めることができる。

別表1.8　縦弾性係数　E　(N/mm²)

温　度　(℃)	３１６ＦＲ鋼	改良9Cr-1Mo鋼 (NT+SR)
375	171000	193000
400	169000	191000
425	167000	189000
450	164000	186000
475	161000	183000
500	159000	181000
525	156000	178000
550	154000	175000
575	151000	172000
600	149000	169000
625	146000	—
650	144000	—

(備考)　改良9Cr-1Mo鋼(NT+SR)は600℃以下に適用。

別表1.9　ポアソン比　ν

温　度　(℃)	３１６ＦＲ鋼	改良9Cr-1Mo鋼 (NT+SR)
375	0.300	0.300
400	0.300	0.300
425	0.300	0.300
450	0.300	0.300
475	0.301	0.301
500	0.302	0.302
525	0.304	0.304
550	0.306	0.306
575	0.308	0.308
600	0.310	0.310
625	0.312	—
650	0.314	—

（備考）　改良9Cr-1Mo鋼(NT+SR)は600℃以下に適用。

別表1.10　熱膨張係数　α　(10^{-6}mm/mm/℃)

温　度	３１６ＦＲ鋼		改良9Cr-1Mo鋼　(NT+SR)	
(℃)	A	B	A	B
20	15.15	—	10.47	—
50	15.65	15.45	10.72	10.60
75	16.07	15.63	10.92	10.70
100	16.48	15.82	11.12	10.80
125	16.86	16.00	11.31	10.90
150	17.22	16.18	11.50	11.00
175	17.55	16.37	11.68	11.09
200	17.85	16.54	11.86	11.19
225	18.12	16.72	12.03	11.28
250	18.36	16.88	12.20	11.37
275	18.58	17.04	12.37	11.46
300	18.79	17.20	12.58	11.55
325	18.99	17.34	12.68	11.64
350	19.19	17.47	12.83	11.72
375	19.38	17.58	12.98	11.80
400	19.57	17.69	13.12	11.89
425	19.75	17.78	13.25	11.97
450	19.93	17.89	13.38	12.05
475	20.11	18.00	13.51	12.12
500	20.28	18.12	13.63	12.20
525	20.45	18.23	13.74	12.27
550	20.60	18.33	13.86	12.35
575	20.75	18.44	13.96	12.42
600	20.87	18.54	14.07	12.49
625	20.99	18.64	—	—
650	21.09	18.74	—	—

（備考）　改良9Cr-1Mo鋼(NT+SR)は600℃以下に適用。
Ａは瞬時熱膨張係数
Ｂは室温からその温度までの平均熱膨張係数

別表1．11　316FR鋼の許容ひずみ範囲（A）　ε_t(mm/mm)

温度 ℃ / 繰返し回数 Nd	425*	450	475	500	525	550	575	600	625	650
10	0.0338	0.0331	0.0324	0.0316	0.0308	0.0300	0.0291	0.0282	0.0274	0.0265
20	0.0244	0.0237	0.0232	0.0225	0.0219	0.0212	0.0205	0.0198	0.0191	0.0184
40	0.0177	0.0173	0.0168	0.0163	0.0157	0.0152	0.0147	0.0141	0.0136	0.0130
10^2	0.0120	0.0116	0.0113	0.0109	0.0105	0.0102	0.00979	0.00939	0.00902	0.00864
2×10^2	0.00918	0.00890	0.00864	0.00835	0.00807	0.00779	0.00749	0.00721	0.00693	0.00664
4×10^2	0.00726	0.00704	0.00684	0.00662	0.00641	0.00619	0.00596	0.00576	0.00554	0.00533
10^3	0.00558	0.00544	0.00528	0.00514	0.00498	0.00483	0.00467	0.00451	0.00437	0.00421
2×10^3	0.00473	0.00461	0.00448	0.00436	0.00423	0.00411	0.00398	0.00385	0.00372	0.00358
4×10^3	0.00403	0.00393	0.00382	0.00372	0.00360	0.00350	0.00339	0.00328	0.00317	0.00305
10^4	0.00326	0.00318	0.00309	0.00301	0.00292	0.00283	0.00274	0.00265	0.00256	0.00247
2×10^4	0.00278	0.00271	0.00263	0.00256	0.00248	0.00241	0.00233	0.00226	0.00218	0.00210
4×10^4	0.00237	0.00231	0.00225	0.00219	0.00213	0.00207	0.00200	0.00195	0.00188	0.00182
10^5	0.00198	0.00193	0.00188	0.00184	0.00179	0.00175	0.00170	0.00165	0.00160	0.00156
2×10^5	0.00176	0.00172	0.00168	0.00165	0.00161	0.00157	0.00153	0.00149	0.00145	0.00140
4×10^5	0.00160	0.00156	0.00153	0.00149	0.00146	0.00143	0.00139	0.00136	0.00132	0.00129
10^6	0.00142	0.00140	0.00137	0.00134	0.00131	0.00129	0.00125	0.00123	0.00119	0.00117

（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。

＊ 425℃<T<450℃の補完に使用

別表1.11　改良9Cr-1Mo鋼（NT+SR）の許容ひずみ範囲（A）　ε_t（mm/mm）

温度 ℃ / 繰返し回数N_d	>375	400	425	450	475	500	525	550	575	600
10	0.0465	0.0459	0.0453	0.0447	0.0440	0.0433	0.0425	0.0416	0.0407	0.0397
2×10	0.0285	0.0280	0.0274	0.0269	0.0263	0.0256	0.0249	0.0242	0.0234	0.0225
4×10	0.0184	0.0180	0.0175	0.0170	0.0165	0.0160	0.0155	0.0149	0.0143	0.0137
10^2	0.0114	0.0112	0.0108	0.0105	0.0102	0.00983	0.00946	0.00909	0.00870	0.00830
2×10^2	0.00868	0.00845	0.00821	0.00797	0.00771	0.00744	0.00716	0.00688	0.00659	0.00630
4×10^2	0.00695	0.00677	0.00658	0.00638	0.00618	0.00597	0.00575	0.00553	0.00530	0.00508
10^3	0.00551	0.00537	0.00522	0.00507	0.00491	0.00475	0.00459	0.00442	0.00425	0.00407
2×10^3	0.00469	0.00457	0.00445	0.00432	0.00419	0.00405	0.00391	0.00376	0.00362	0.00347
4×10^3	0.00400	0.00389	0.00379	0.00368	0.00356	0.00345	0.00333	0.00320	0.00308	0.00295
10^4	0.00323	0.00315	0.00307	0.00298	0.00288	0.00279	0.00269	0.00259	0.00249	0.00239
2×10^4	0.00275	0.00268	0.00261	0.00254	0.00246	0.00238	0.00229	0.00221	0.00212	0.00204
4×10^4	0.00239	0.00233	0.00227	0.00220	0.00214	0.00207	0.00200	0.00193	0.00185	0.00178
10^5	0.00205	0.00200	0.00195	0.00189	0.00184	0.00178	0.00172	0.00166	0.00160	0.00154
2×10^5	0.00186	0.00181	0.00177	0.00172	0.00167	0.00162	0.00157	0.00151	0.00146	0.00140
4×10^5	0.00170	0.00166	0.00162	0.00158	0.00154	0.00149	0.00144	0.00139	0.00135	0.00130
10^6	0.00154	0.00151	0.00147	0.00143	0.00139	0.00135	0.00131	0.00127	0.00123	0.00118

（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。

別表1．12　316FR鋼の許容ひずみ範囲 (B)　ε_t(mm/mm)

温度 ℃ / 繰返し回数 Nd	425*	450	475	500	525	550	575	600	625	650
10	0.0279	0.0265	0.0252	0.0238	0.0224	0.0210	0.0196	0.0182	0.0168	0.0155
20	0.0195	0.0185	0.0174	0.0163	0.0152	0.0141	0.0131	0.0121	0.0111	0.0101
40	0.0139	0.0131	0.0123	0.0115	0.0107	0.00987	0.00911	0.00838	0.00769	0.00704
10^2	0.00931	0.00875	0.00819	0.00765	0.00711	0.00661	0.00613	0.00567	0.00525	0.00485
2×10^2	0.00718	0.00676	0.00634	0.00594	0.00556	0.00519	0.00484	0.00451	0.00419	0.00391
4×10^2	0.00576	0.00545	0.00513	0.00483	0.00454	0.00426	0.00399	0.00374	0.00351	0.00329
10^3	0.00455	0.00432	0.00409	0.00386	0.00364	0.00343	0.00322	0.00302	0.00284	0.00266
2×10^3	0.00387	0.00368	0.00348	0.00329	0.00310	0.00292	0.00274	0.00257	0.00242	0.00226
4×10^3	0.00330	0.00313	0.00297	0.00280	0.00264	0.00249	0.00234	0.00219	0.00206	0.00193
10^4	0.00267	0.00253	0.00240	0.00227	0.00214	0.00201	0.00189	0.00177	0.00167	0.00156
2×10^4	0.00227	0.00216	0.00205	0.00194	0.00183	0.00173	0.00163	0.00154	0.00145	0.00137
4×10^4	0.00196	0.00187	0.00177	0.00169	0.00160	0.00152	0.00144	0.00136	0.00129	0.00122
10^5	0.00167	0.00160	0.00153	0.00146	0.00139	0.00132	0.00125	0.00119	0.00114	0.00108
2×10^5	0.00151	0.00145	0.00139	0.00132	0.00126	0.00121	0.00115	0.00110	0.00105	0.00100
4×10^5	0.00138	0.00132	0.00127	0.00122	0.00117	0.00112	0.00107	0.00102	0.000975	0.000931
10^6	0.00125	0.00120	0.00116	0.00111	0.00107	0.00103	0.000982	0.000938	0.000898	0.000862

(備考)　本表は繰返しひずみ速度が 10^{-6} mm/mm/sec 以上の場合に適用することができる。

＊ 425℃<T<450℃の補完に使用

別表1.12　改良9Cr-1Mo鋼（NT+SR）の許容ひずみ範囲（B）　ε_t（mm/mm）

温度 ℃ / 繰返し回数N_d	>375	400	425	450	475	500	525	550	575	600
10	0.0378	0.0372	0.0366	0.0358	0.0351	0.0342	0.0333	0.0324	0.0314	0.0303
2×10	0.0219	0.0214	0.0208	0.0202	0.0196	0.0190	0.0183	0.0175	0.0168	0.0159
4×10	0.0137	0.0133	0.0129	0.0125	0.0120	0.0116	0.0111	0.0106	0.0101	0.00958
10^2	0.00855	0.00831	0.00805	0.00779	0.00751	0.00722	0.00693	0.00663	0.00632	0.00601
2×10^2	0.00658	0.00639	0.00620	0.00600	0.00580	0.00558	0.00536	0.00514	0.00491	0.00468
4×10^2	0.00535	0.00520	0.00505	0.00489	0.00473	0.00456	0.00439	0.00422	0.00404	0.00386
10^3	0.00432	0.00420	0.00408	0.00395	0.00382	0.00369	0.00355	0.00341	0.00327	0.00312
2×10^3	0.00367	0.00358	0.00347	0.00336	0.00325	0.00314	0.00302	0.00290	0.00278	0.00266
4×10^3	0.00313	0.00304	0.00295	0.00286	0.00277	0.00267	0.00257	0.00247	0.00237	0.00226
10^4	0.00252	0.00246	0.00239	0.00231	0.00224	0.00216	0.00208	0.00200	0.00191	0.00183
2×10^4	0.00216	0.00210	0.00205	0.00198	0.00192	0.00186	0.00179	0.00172	0.00165	0.00158
4×10^4	0.00190	0.00185	0.00180	0.00175	0.00169	0.00164	0.00158	0.00152	0.00146	0.00141
10^5	0.00164	0.00160	0.00156	0.00152	0.00147	0.00143	0.00138	0.00133	0.00128	0.00123
2×10^5	0.00150	0.00147	0.00143	0.00139	0.00135	0.00131	0.00127	0.00122	0.00118	0.00113
4×10^5	0.00139	0.00136	0.00132	0.00129	0.00125	0.00121	0.00117	0.00114	0.00110	0.00105
10^6	0.00127	0.00124	0.00121	0.00118	0.00115	0.00111	0.00108	0.00104	0.00101	0.000970

（備考）　本表は繰返しひずみ速度が10^{-6}mm/mm/sec以上の場合に適用することができる。

別表1．13　316FR鋼の許容ひずみ範囲 (C)　ε_t(mm/mm)

温度 ℃ / 繰返し回数 Nd	425*	450	475	500	525	550	575	600	625	650
10	0.0243	0.0227	0.0210	0.0194	0.0178	0.0162	0.0146	0.0131	0.0117	0.0104
20	0.0167	0.0155	0.0142	0.0130	0.0118	0.0106	0.00957	0.00856	0.00763	0.00679
40	0.0118	0.0109	0.00994	0.00907	0.00823	0.00743	0.00670	0.00604	0.00543	0.00488
10^2	0.00791	0.00730	0.00669	0.00614	0.00560	0.00512	0.00467	0.00425	0.00388	0.00353
2×10^2	0.00617	0.00571	0.00527	0.00486	0.00447	0.00412	0.00378	0.00348	0.00320	0.00295
4×10^2	0.00501	0.00467	0.00434	0.00402	0.00373	0.00346	0.00319	0.00296	0.00272	0.00251
10^3	0.00401	0.00375	0.00350	0.00325	0.00301	0.00280	0.00258	0.00239	0.00220	0.00203
2×10^3	0.00341	0.00319	0.00298	0.00277	0.00257	0.00238	0.00220	0.00204	0.00188	0.00173
4×10^3	0.00291	0.00272	0.00254	0.00236	0.00219	0.00203	0.00187	0.00173	0.00160	0.00147
10^4	0.00235	0.00220	0.00205	0.00191	0.00177	0.00165	0.00153	0.00141	0.00131	0.00122
2×10^4	0.00201	0.00188	0.00176	0.00165	0.00154	0.00144	0.00134	0.00125	0.00117	0.00109
4×10^4	0.00176	0.00165	0.00155	0.00146	0.00137	0.00128	0.00120	0.00112	0.00105	0.000989
10^5	0.00151	0.00143	0.00135	0.00127	0.00120	0.00113	0.00106	0.00100	0.000941	0.000887
2×10^5	0.00137	0.00130	0.00124	0.00117	0.00111	0.00105	0.000987	0.000931	0.000879	0.000828
4×10^5	0.00127	0.00121	0.00114	0.00108	0.00103	0.000974	0.000921	0.000871	0.000823	0.000778
10^6	0.00116	0.00110	0.00105	0.000994	0.000944	0.000898	0.000854	0.000811	0.000770	0.000730

(備考)　本表は繰返しひずみ速度が 10^{-8} mm/mm/sec 以上の場合に適用することができる。

＊ 425℃<T<450℃の補完に使用

別表1.13　改良9Cr-1Mo鋼（NT+SR）の許容ひずみ範囲（C）　ε_t（mm/mm）

温度 ℃ / 繰返し回数N_d	>375	400	425	450	475	500	525	550	575	600
10	0.0196	0.0190	0.0183	0.0177	0.0169	0.0162	0.0154	0.0146	0.0137	0.0128
2×10	0.0103	0.00992	0.00955	0.00917	0.00877	0.00836	0.00795	0.00752	0.00709	0.00666
4×10	0.00658	0.00637	0.00615	0.00592	0.00568	0.00544	0.00519	0.00495	0.00470	0.00445
10^2	0.00446	0.00433	0.00419	0.00405	0.00390	0.00375	0.00360	0.00345	0.00329	0.00314
2×10^2	0.00361	0.00351	0.00341	0.00330	0.00319	0.00307	0.00296	0.00284	0.00272	0.00260
4×10^2	0.00306	0.00298	0.00290	0.00281	0.00272	0.00262	0.00252	0.00242	0.00232	0.00222
10^3	0.00249	0.00242	0.00235	0.00227	0.00220	0.00212	0.00204	0.00196	0.00187	0.00179
2×10^3	0.00212	0.00206	0.00200	0.00194	0.00187	0.00180	0.00174	0.00167	0.00160	0.00153
4×10^3	0.00181	0.00176	0.00170	0.00165	0.00159	0.00154	0.00148	0.00142	0.00136	0.00130
10^4	0.00146	0.00143	0.00139	0.00135	0.00130	0.00126	0.00121	0.00117	0.00112	0.00108
2×10^4	0.00129	0.00126	0.00123	0.00119	0.00115	0.00112	0.00108	0.00104	0.00100	0.000962
4×10^4	0.00116	0.00114	0.00111	0.00108	0.00104	0.00101	0.000978	0.000944	0.000910	0.000875
10^5	0.00104	0.00101	0.000987	0.000960	0.000933	0.000905	0.000877	0.000847	0.000818	0.000788
2×10^5	0.000962	0.000940	0.000917	0.000893	0.000869	0.000843	0.000817	0.000791	0.000764	0.000736
4×10^5	0.000902	0.000881	0.000860	0.000838	0.000816	0.000792	0.000768	0.000744	0.000719	0.000694
10^6	0.000836	0.000818	0.000799	0.000779	0.000758	0.000737	0.000715	0.000693	0.000670	0.000647

（備考）　本表は(Ｂ)の適用限界以下の場合に使用することができる。

別表1.14　材料特性式

・主クリープ破断関係式

・クリープひずみ式

・弾塑性応力－ひずみ関係式

・動的応力－ひずみ関係式

３１６ＦＲ鋼の主クリープ破断関係式

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

使用単位

Ｔ　：　温度（℃）　　425＜Ｔ≦650

σ　：　応力（N/mm²）　　78.8≦σ

t_R　：　破断時間（hr）

C	2.39623×10
A_0	3.07082×10^{4}
A_1	2.91411×10^{3}
A_2	-2.46583×10^{3}
α_R	平　均　値　：　1 設計最小値　：　10

ただし，σは当該温度における引張強さを超えてはならない。

３１６ＦＲ鋼のクリープひずみ式

$$\varepsilon_C = C_1\{1-\exp(-r_1 t)\} + C_2\{1-\exp(-r_2 t)\} + \dot{\varepsilon}_m t$$

使用単位

T ： 温度 (℃)

σ ： 応力 (N/mm²)

t_R ： 破断時間 (hr)

$\dot{\varepsilon}_m$ ： 定常クリープひずみ速度 (mm/mm/hr)

t ： 時間 (hr)

t_R	$(T + 273.15)\{\log_{10}(\alpha_c \cdot t_R) + 2.39623\times10\}$ $= 3.07082\times10^4 + 2.91411\times10^3 \log_{10}\sigma - 2.46583\times10^3 (\log_{10}\sigma)^2$
$\dot{\varepsilon}_m$	$2.62247\times10^2 \exp\{-4.92390\times10^4/8.31441(T+273.15)\} t_R^{-1.13512}$
C_1	$1.2692 \dot{\varepsilon}_m^{0.74491}/r_1$
C_2	$0.48449 \dot{\varepsilon}_m^{0.81155}/r_2$
r_1	$103.37 t_R^{-0.72607}$
r_2	$17.255 t_R^{-0.86775}$
α_C	平 均 値 ： 1 設計最小値 ： 3

３１６ＦＲ鋼の弾塑性応力－ひずみ関係式

(1)　$\sigma \leqq \sigma_p$のとき

$$\varepsilon_e = \frac{\sigma}{E}$$

$$\varepsilon_p = 0$$

(2)　$\sigma > \sigma_p$のとき

$$\varepsilon_e = \frac{\sigma}{E}$$

$$\varepsilon_p = \left(\frac{\sigma - \sigma_p}{K}\right)^{\frac{1}{m}}$$

使用単位

T　：　温度（℃）　　$315 < T \leqq 650$

ε_e　：　弾性ひずみ（mm/mm）

ε_p　：　塑性ひずみ（mm/mm）

最大ひずみ　$(\varepsilon_e + \varepsilon_p)_{max} \leqq 0.03$（mm/mm）

σ　：　応力（N/mm^2）

E（N/mm^2）	別表 1.8 縦弾性係数 E による
σ_p（N/mm^2）	$\sigma_p = \sigma_y - K\ (0.002)^m$
σ_y（N/mm^2）	平均曲線：$-9.08682\times10^{-7}T^3 + 1.38828\times10^{-3}T^2$ $-7.40603\times10^{-1}T + 2.73364\times10^{2}$ 最小曲線：別表 1.4 設計降伏点 S_y による
K（N/mm^2）	$-5.80824\times10^{-2}T + 3.99777\times10^{2}$
m	$1.38879\times10^{-4}T + 2.05730\times10^{-1}$

３１６ＦＲ鋼の動的応力－ひずみ関係式

（１）　$\Delta\sigma/2 > \sigma_p$の時

$$\log_{10}(\Delta\sigma - 2\sigma_p) = A_0 + A_1 \log_{10}(\Delta\varepsilon_t - \Delta\sigma/E)$$

（２）　$\Delta\sigma/2 \leqq \sigma_p$の時

$$\Delta\sigma = E\Delta\varepsilon_t$$

使用単位

Ｔ　：　温度（℃）　　$425 \leqq T \leqq 650$

$\Delta\sigma$　：　応力範囲（N/mm²）

$\Delta\varepsilon_t$　：　全ひずみ範囲（mm/mm）

Ｅ　：縦弾性係数（N/mm²）

σ_p　：比例限（N/mm²）

A_0	$5.131076 - 0.4434273\times10^{-2}\times T + 0.1354228\times10^{-5}\times T^2 + 0.1593061\times10^{-8}\times T^3$
A_1	$2.171727 - 0.7045263\times10^{-2}\times T + 0.7832692\times10^{-5}\times T^2 - 0.2083600\times10^{-8}\times T^3$
E	別表 1.8 縦弾性係数 E による
σ_P	$2.62890\times10^{2} - 4.94792\times10^{-1}\times T + 7.88358\times10^{-4}\times T^2 - 5.01396\times10^{-7}\times T^3$ $- (3.93157\times10^{2} - 9.51235\times10^{-2}\times T) \times (0.002)^{0.326245 + 6.13276\times10^{-5}\times T}$

改良 9Cr-1Mo 鋼(NT+SR)の主クリープ破断関係式

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

使用単位

T ： 温度 (℃)　　$375 < T \leqq 600$

σ ： 応力 (N/mm^2)　　$19.3 \leqq \sigma$

t_R ： 破断時間 (hr)

C	3.31803×10
A_0	2.67947×10^4
A_1	1.40580×10^4
A_2	-5.46172×10^3
α_R	平 均 値 ： 1 設計最小値 ： 10

ただし，σは当該温度における引張強さを超えてはならない。

改良 9Cr-1Mo 鋼(NT+SR)のクリープひずみ式

$$\varepsilon_C = C_1\{1-\exp(-r_1 t)\} + C_2\{1-\exp(-r_2 t)\} + \dot{\varepsilon}_m t$$

使用単位

T ： 温度 (℃)　　$375 < T \leqq 600$

σ ： 応力 (N/mm^2)　　$19.3 \leqq \sigma$

t_R ： 破断時間 (hr)

$\dot{\varepsilon}_m$ ： 定常クリープひずみ速度 (mm/mm/hr)

t ： 時間 (hr)

t_R	$(T + 273.15)\{\log_{10}(\alpha_c \cdot t_R) + 3.31803\times10\}$ $= 2.67947\times10^4 + 1.40580\times10^4 \log_{10}\sigma - 5.46172\times10^3 (\log_{10}\sigma)^2$
$\dot{\varepsilon}_m$	$2.04156\ \exp\{-2.01968\times10^4/8.31441\ (T+273.15)\}\ t_R^{-1.15483}$
C_1	$2.13822\ \dot{\varepsilon}_m^{0.59235}/r_1$
C_2	$0.927675\ \dot{\varepsilon}_m^{0.81657}/r_2$
r_1	$317.0902\ t_R^{-0.56858}$
r_2	$14.3245\ t_R^{-0.82278}$
α_C	平 均 値 ： 1 設計最小値 ： 3

改良 9Cr-1Mo 鋼(NT+SR)の弾塑性応力－ひずみ関係式

(1)　$\sigma \leqq \sigma_p$のとき

$$\varepsilon_e = \frac{\sigma}{E}$$

$$\varepsilon_p = 0$$

(2)　$\sigma > \sigma_p$のとき

$$\varepsilon_e = \frac{\sigma}{E}$$

$$\varepsilon_p = \left(\frac{\sigma - \sigma_p}{K}\right)^{\frac{1}{m}}$$

使用単位

T ： 温度 (℃)　　$375 < T \leqq 600$

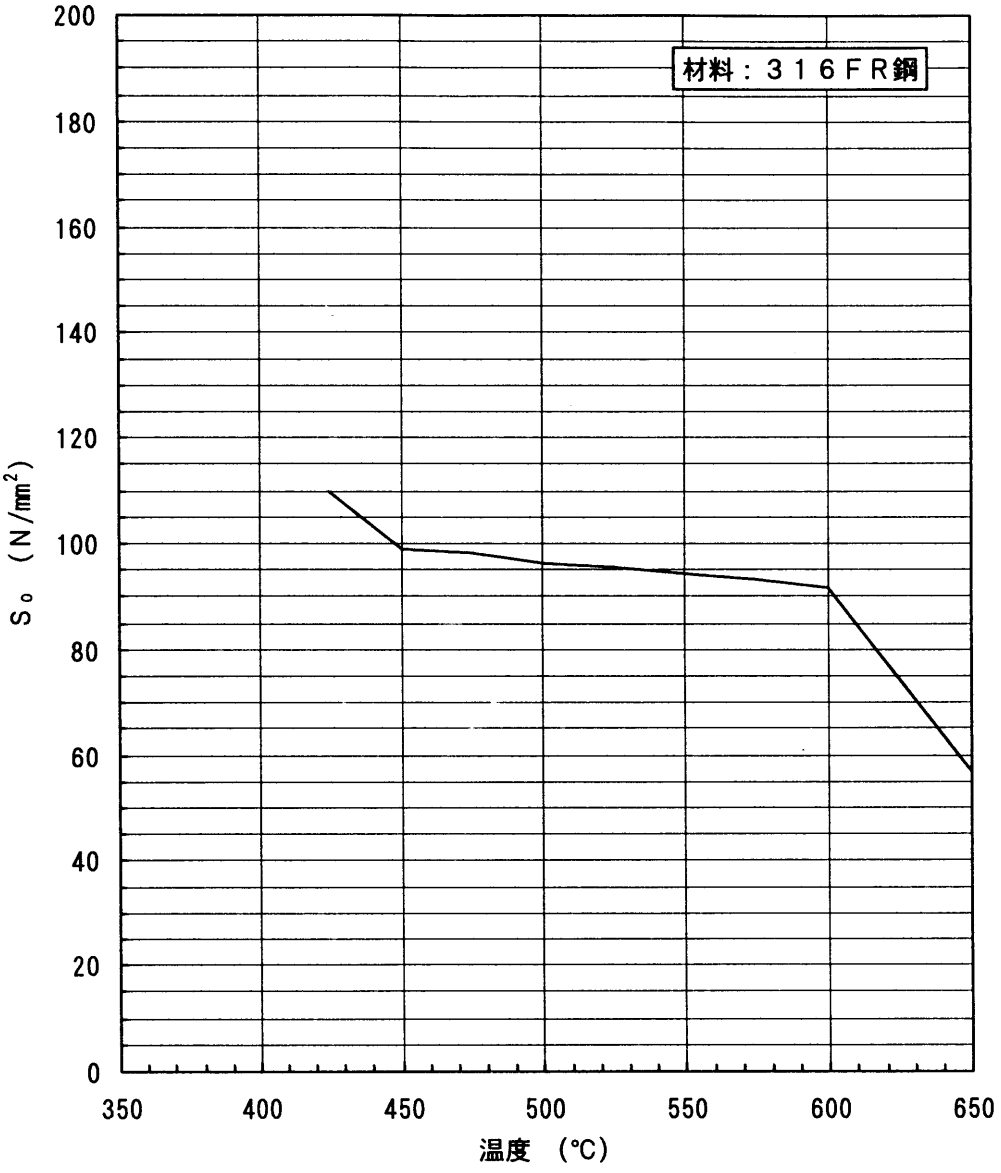
ε_e ： 弾性ひずみ (mm/mm)

ε_p ： 塑性ひずみ (mm/mm)

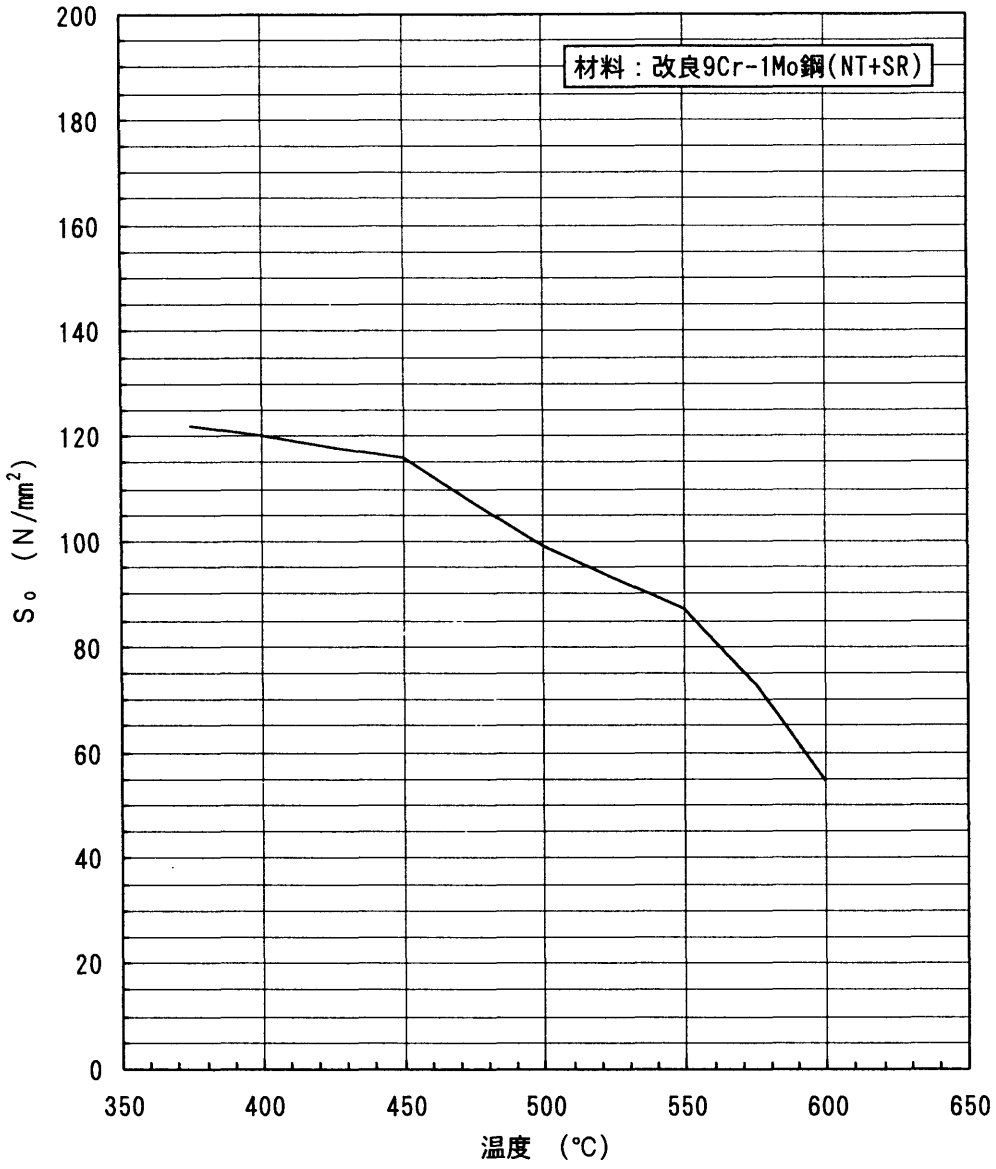
最大ひずみ $(\varepsilon_e + \varepsilon_p)_{max} \leqq 0.03$ (mm/mm)

σ ： 応力 (N/mm^2)

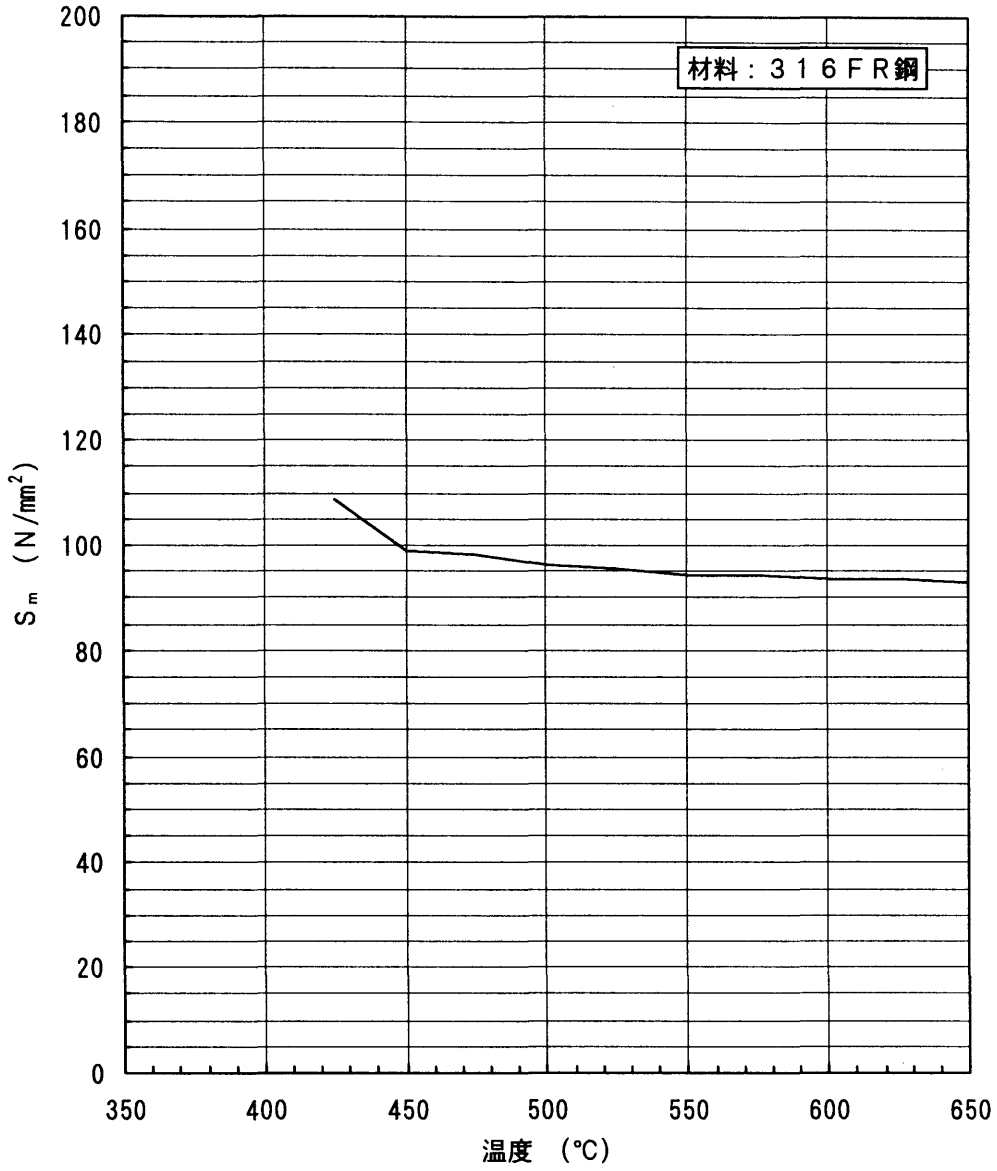
E (N/mm^2)	別表 1.8 縦弾性係数 E による
σ_p (N/mm^2)	$\sigma_p = \sigma_y - K\ (0.002)^m$
σ_y (N/mm^2)	最大曲線：1.1×(平均曲線) 平均曲線：$-3.08878\times10^{-6}T^3 + 2.25543\times10^{-3}T^2$ $-6.28569\times10^{-1}T + 5.04801\times10^{2}$ 最小曲線：別表 1.4 設計降伏点 S_y による
K (N/mm^2)	$-1.78480\,T + 1.34718\times10^{3}$
m	$-8.37514\times10^{-4}T + 5.56244\times10^{-1}$



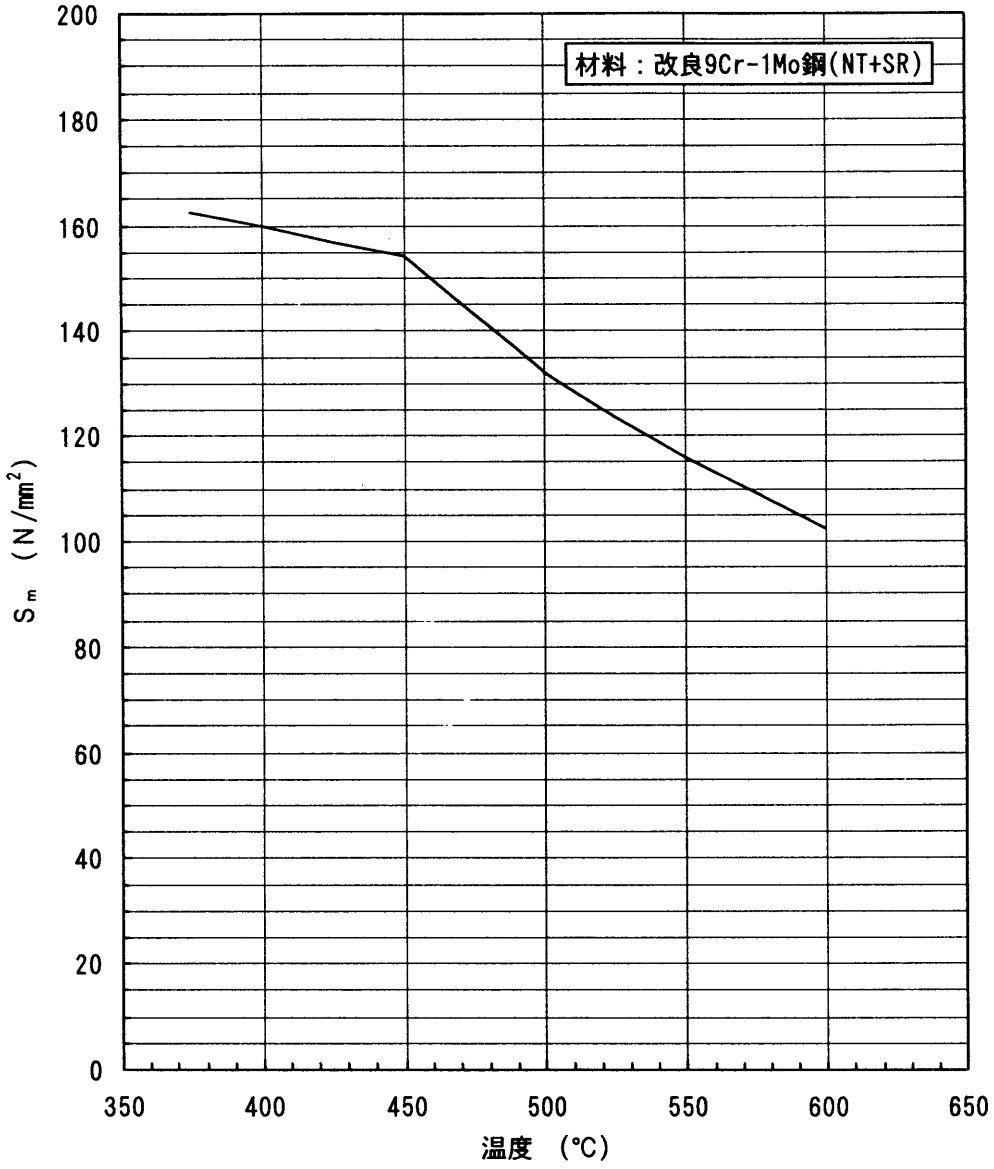
別図1.1　３１６ＦＲ鋼の最大許容応力強さ　S_0　(N/mm²)



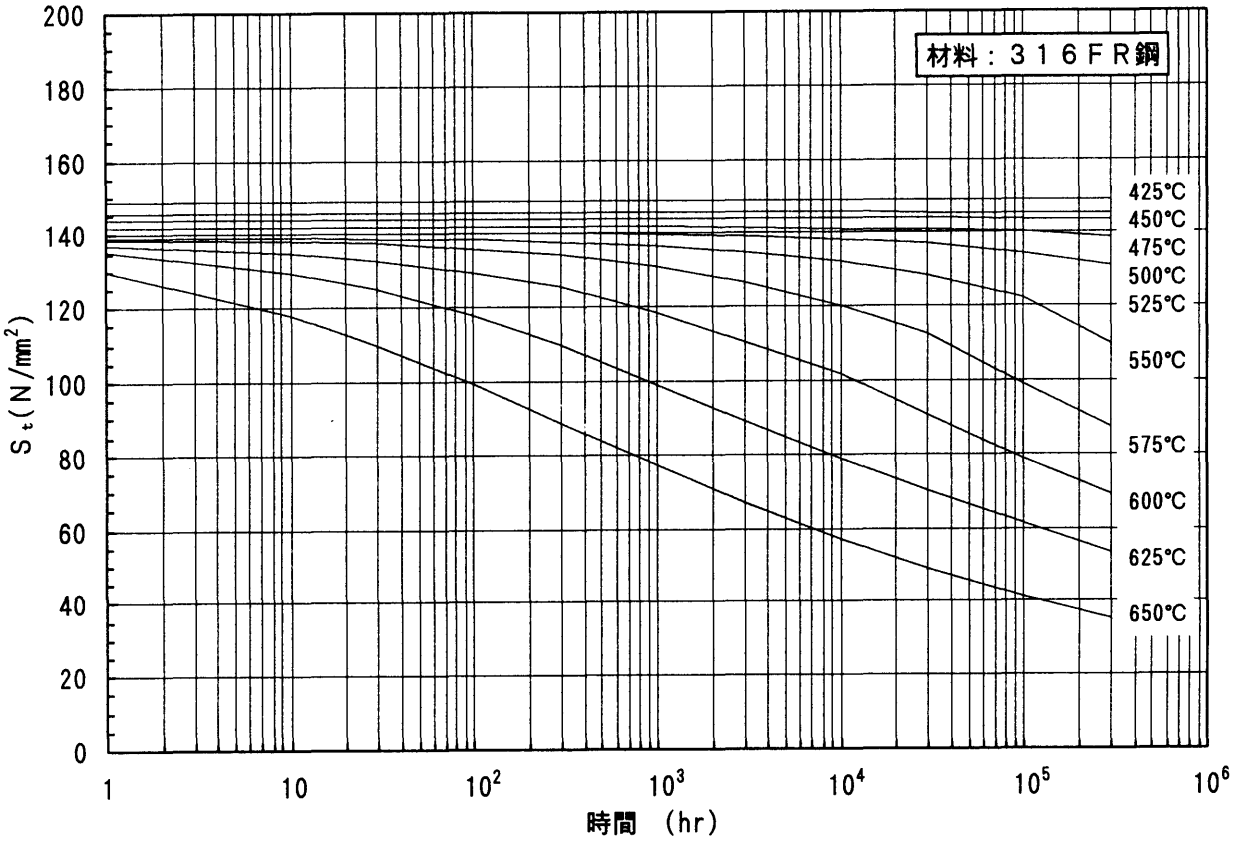
別図1.1 改良9Cr-1Mo鋼（NT+SR）の最大許容応力強さ S_o （N/mm^2）



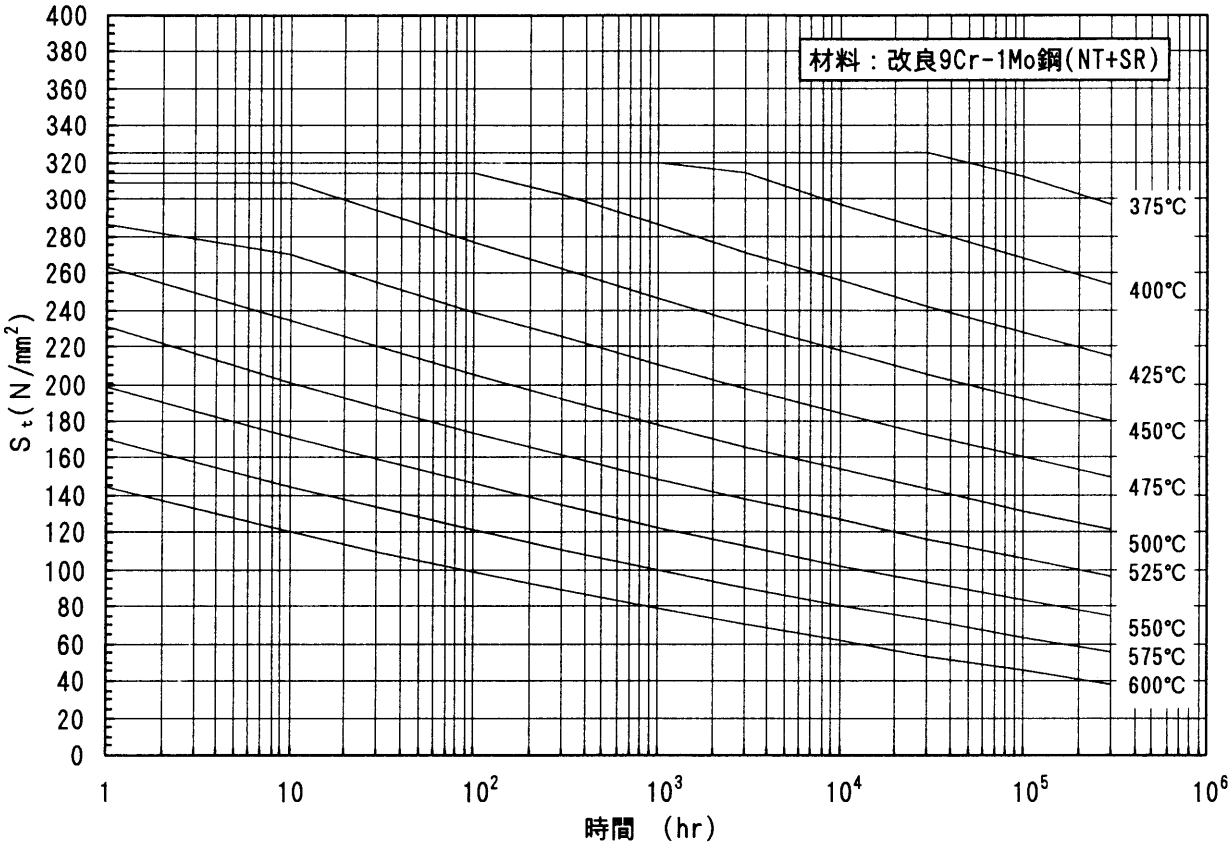
別図1.2　３１６ＦＲ鋼の設計応力強さ　S_m　（N/mm²）



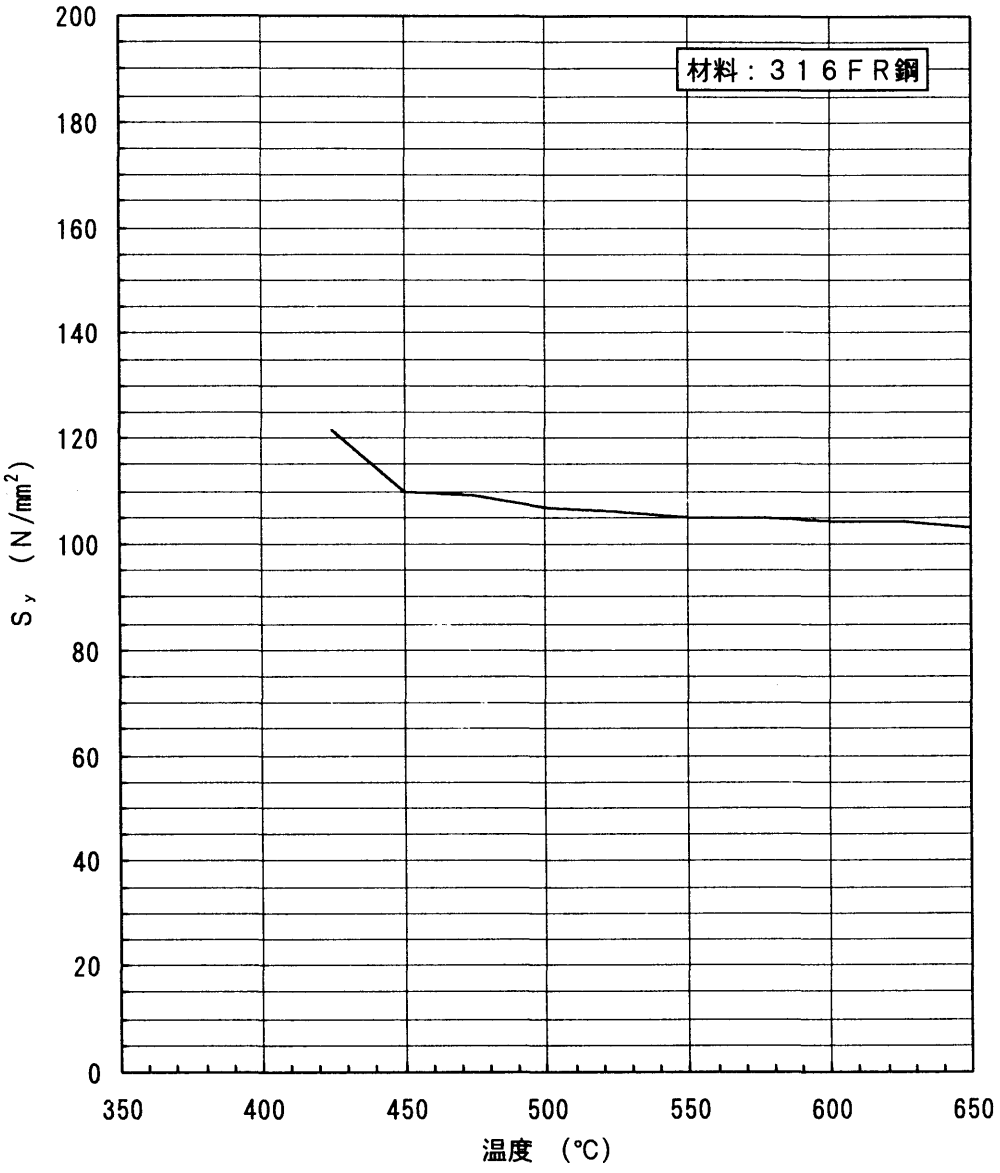
別図1.2　改良9Cr-1Mo鋼（NT+SR）の設計応力強さ　S_m　(N/mm²)



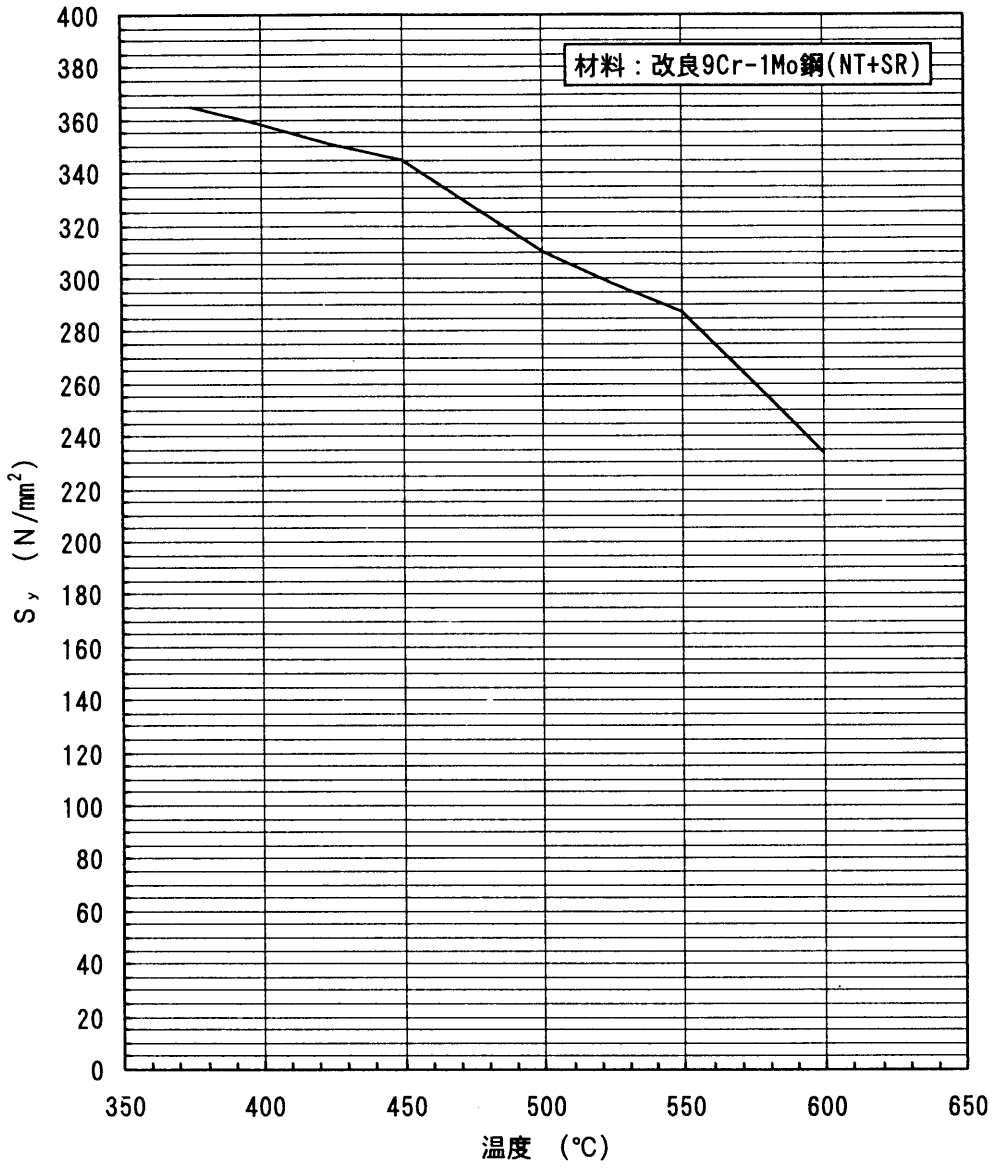
別図1.3　３１６ＦＲ鋼の設計応力強さ　S_t　(N/mm²)



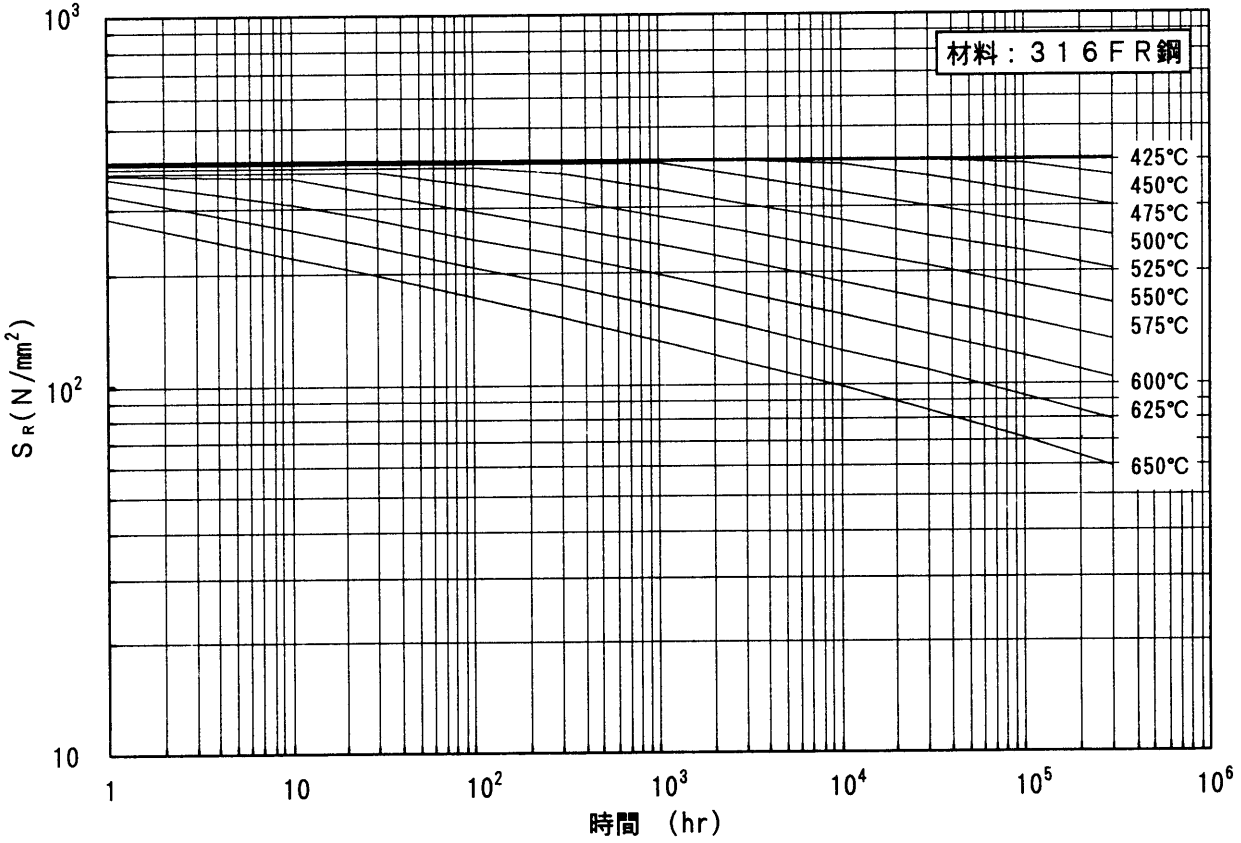
別図1.3 改良9Cr-1Mo鋼（NT+SR）の設計応力強さ S_t （N/mm^2）



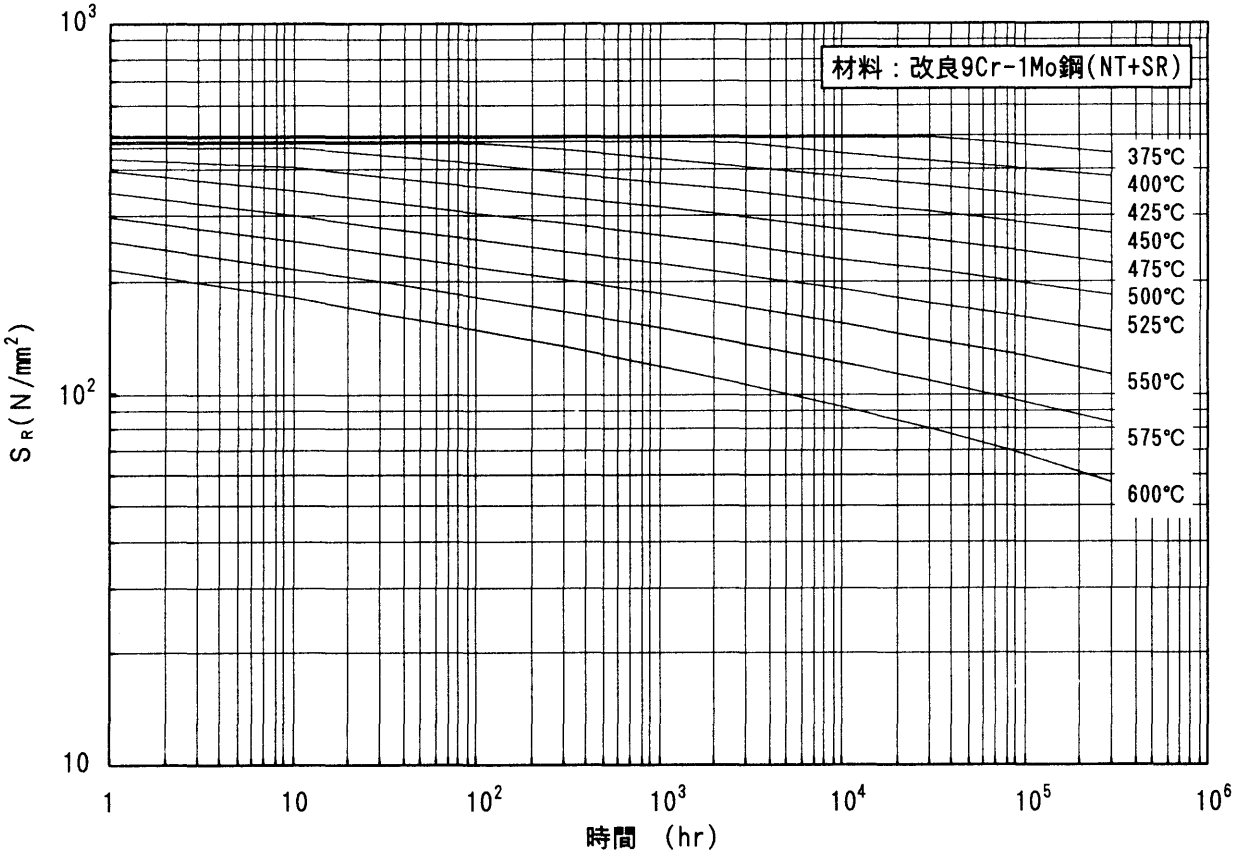
別図1.4　３１６ＦＲ鋼の設計降伏点　S_y （N/mm²）



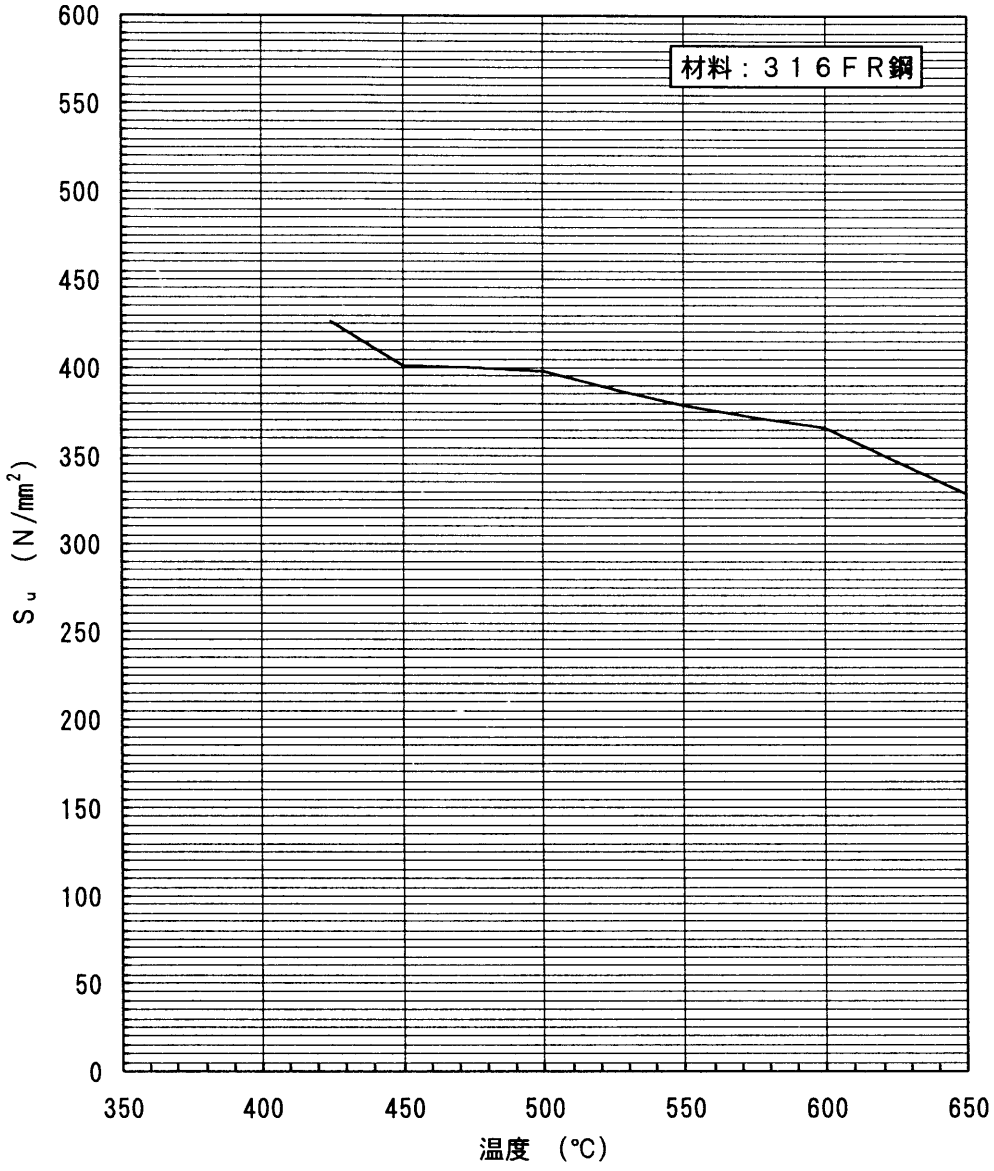
別図1.4 改良9Cr-1Mo鋼（NT+SR）の設計降伏点 S_y （N/mm²）



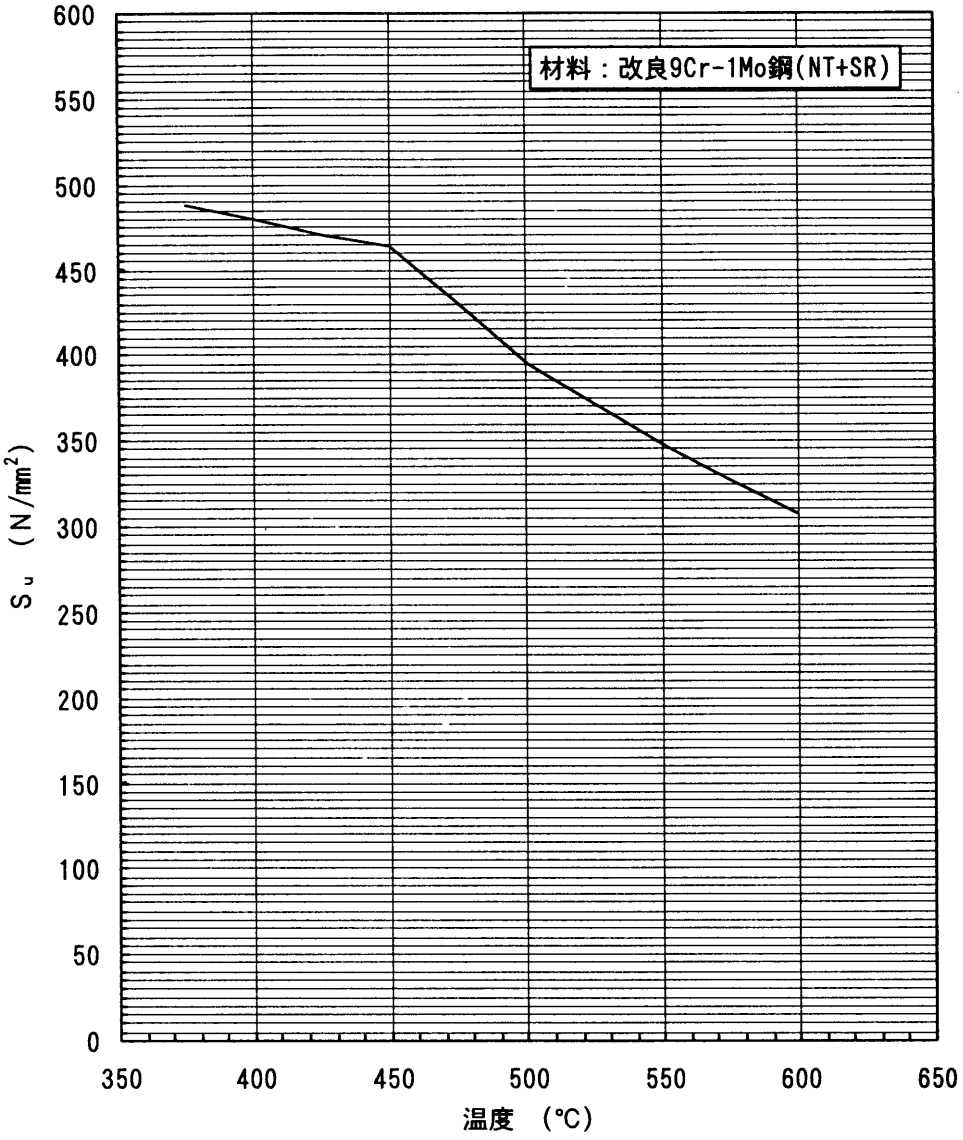
別図1.5　３１６ＦＲ鋼の設計クリープ破断応力強さ　S_R　(N/mm^2)



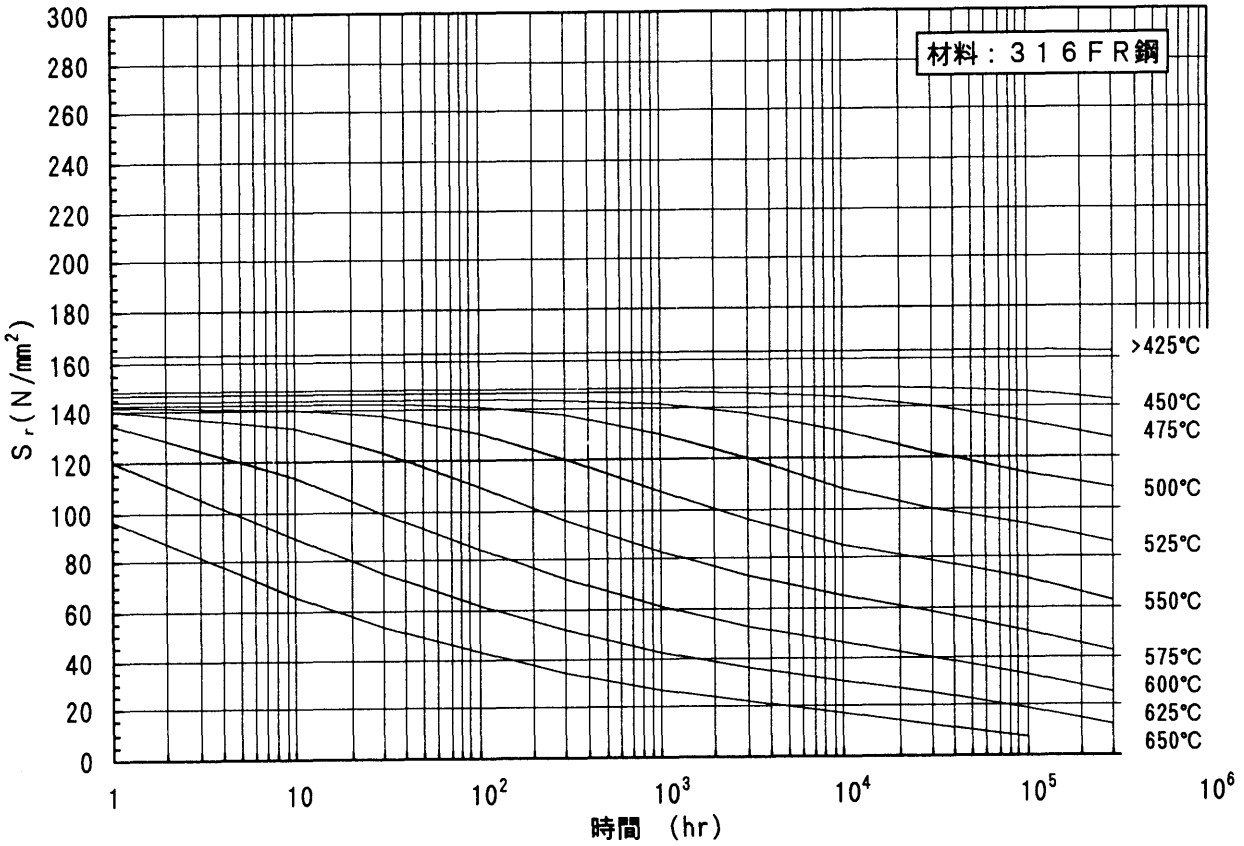
別図1.5 改良9Cr-1Mo鋼（NT+SR）の設計クリープ破断応力強さ S_R （N/mm^2）



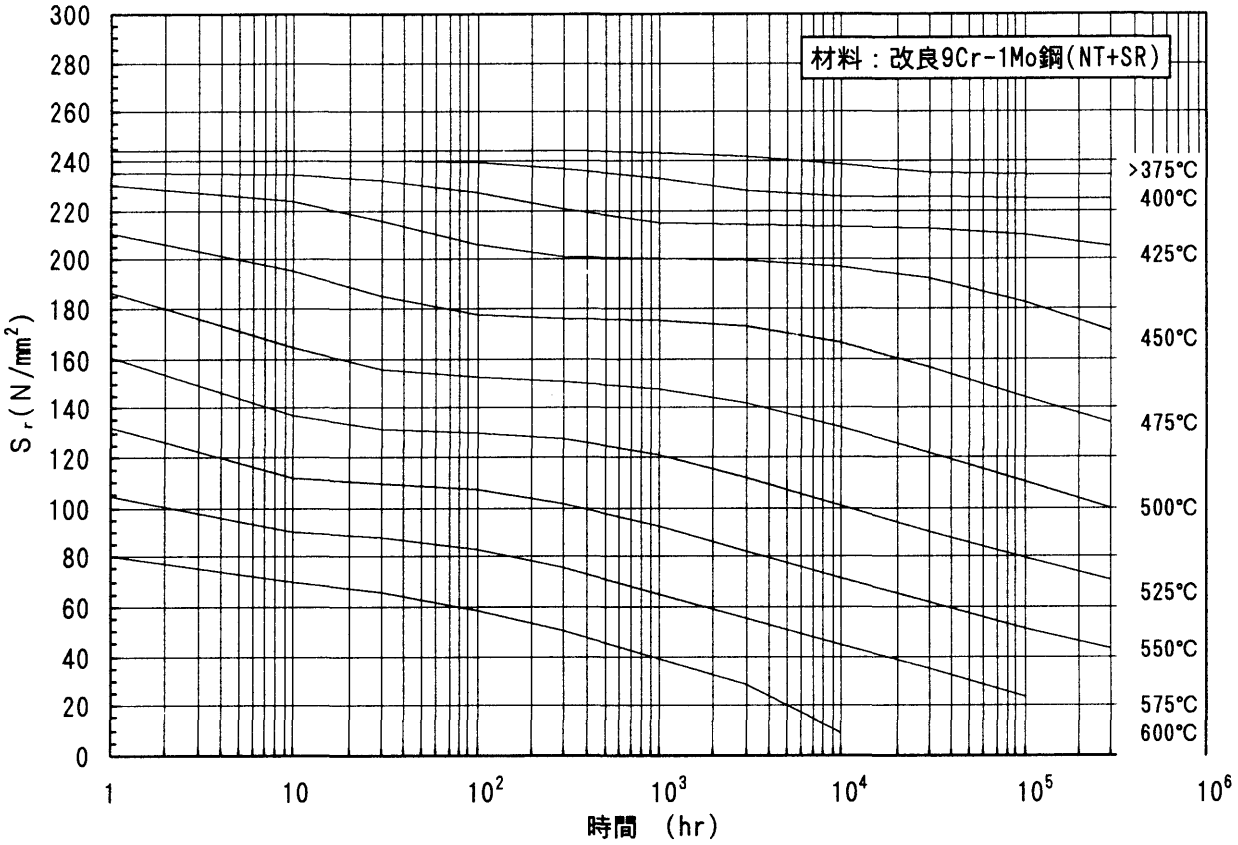
別図1.6　３１６ＦＲ鋼の設計引張強さ　S_u　（N/mm²）



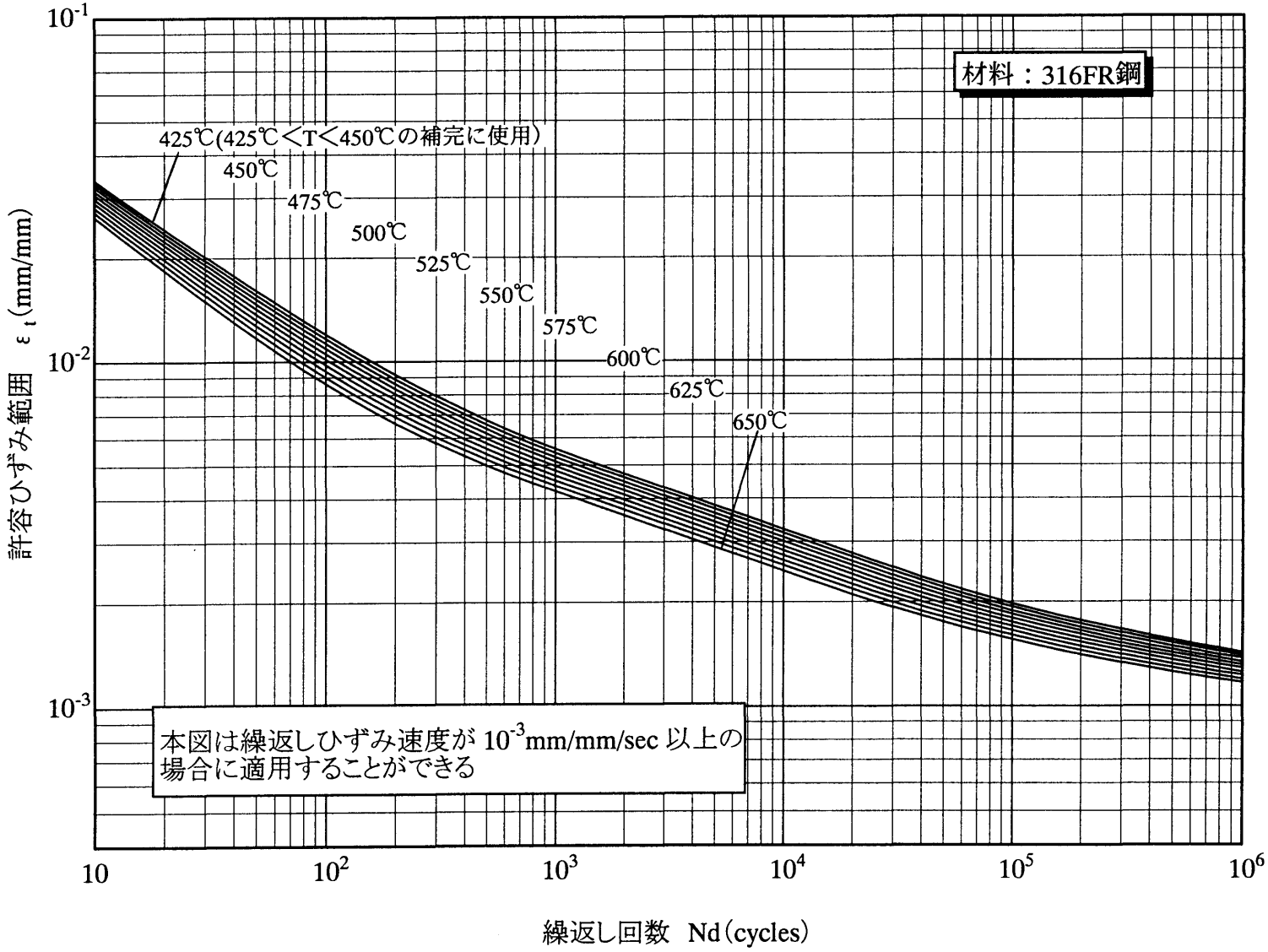
別図1.6 改良9Cr-1Mo鋼（NT+SR）の設計引張強さ S_u （N/mm²）



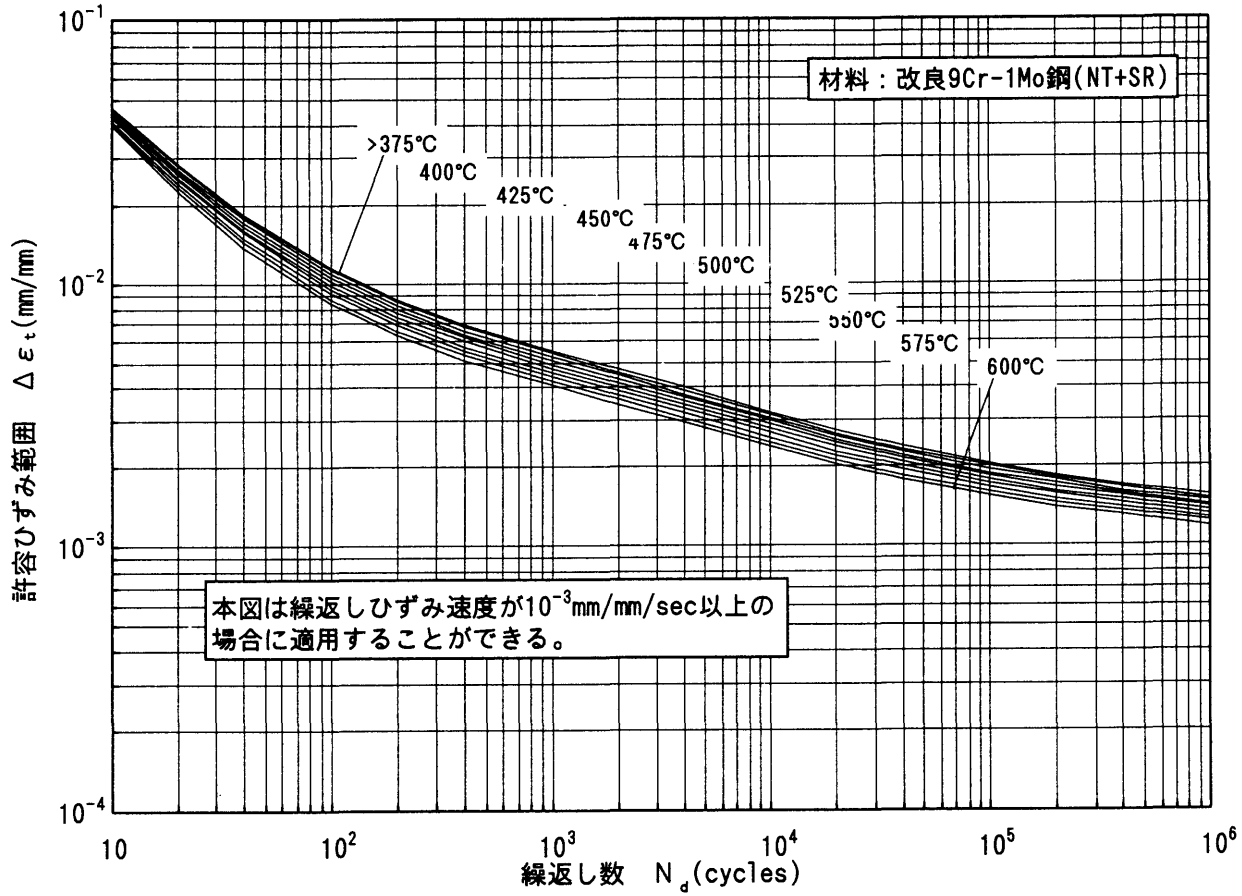
別図1.7　３１６ＦＲ鋼の設計緩和強さ　S_r　(N/mm^2)



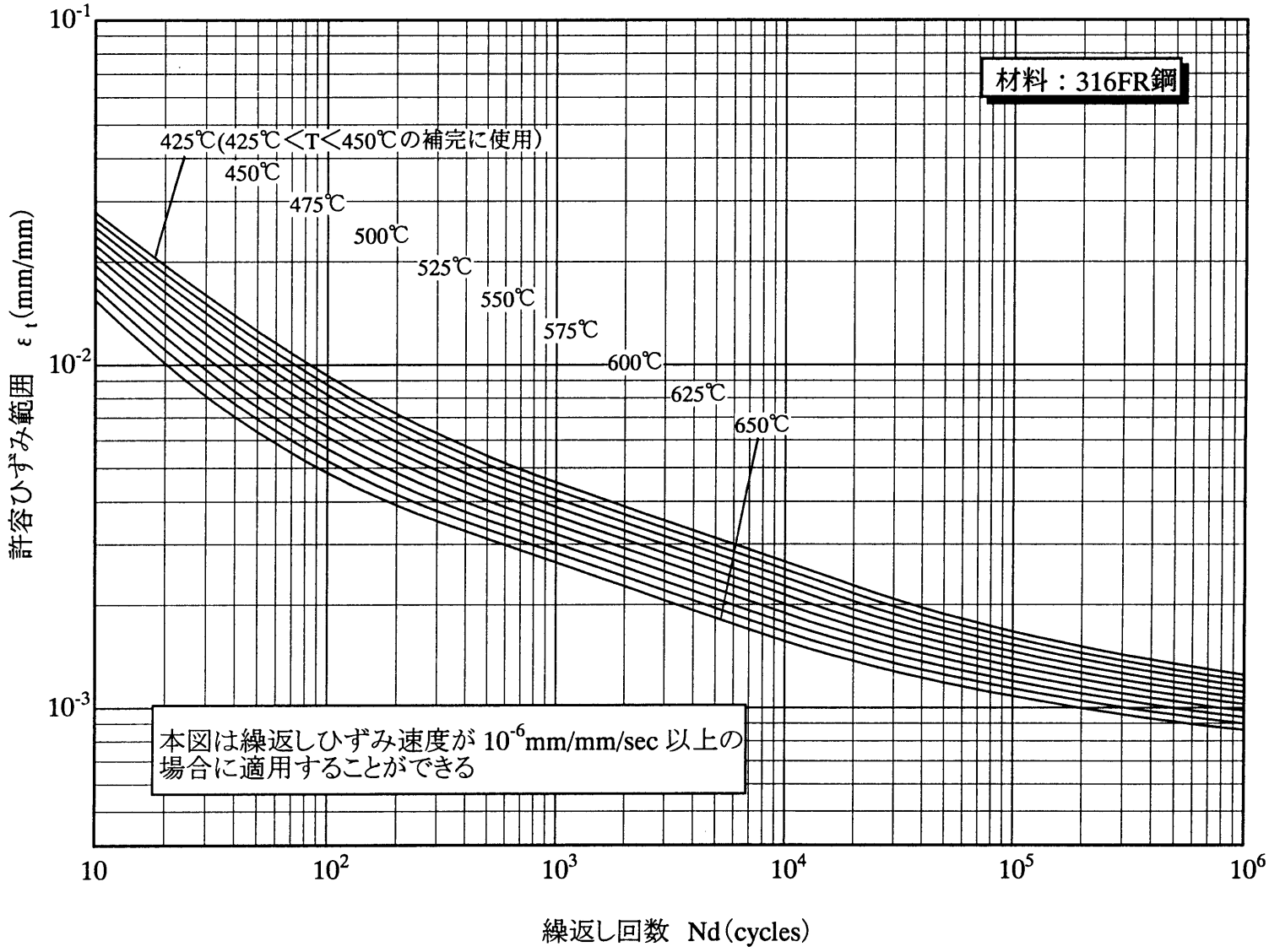
別図1.7　改良9Cr-1Mo鋼（NT+SR）の設計緩和強さ　S_r　（N/mm²）



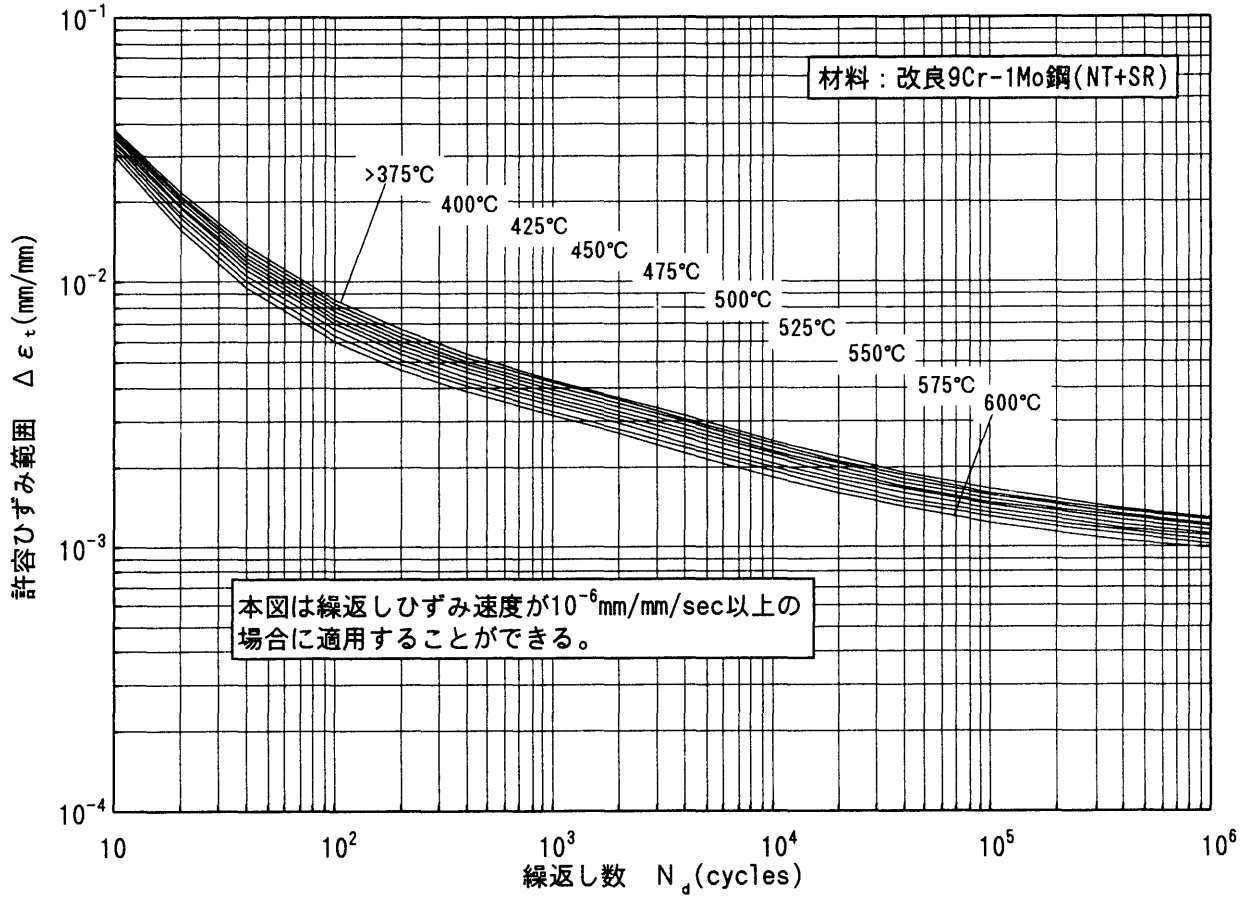
別図1.8　316FR鋼の許容ひずみ範囲（A）　ε_t(mm/mm)



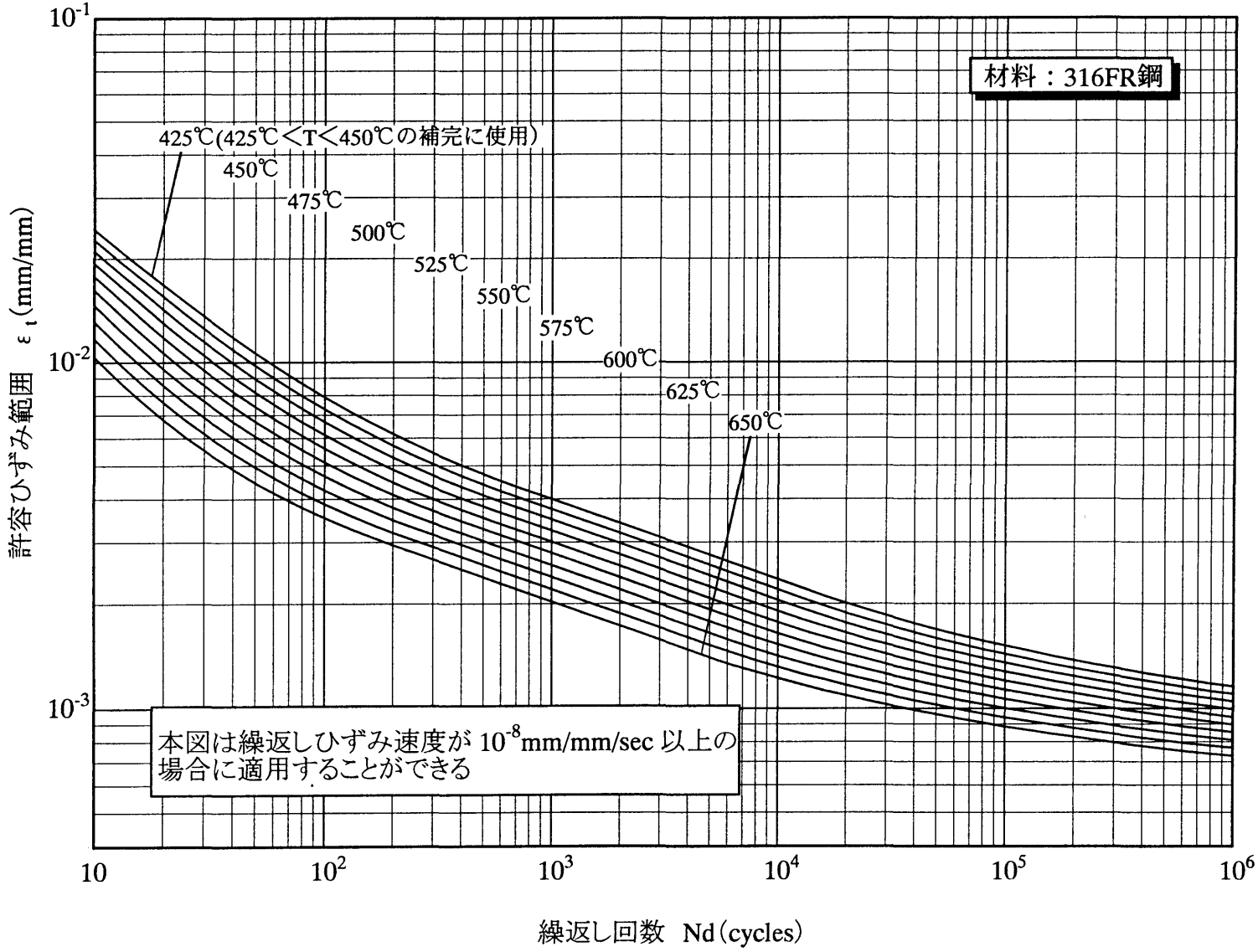
別図1.8　改良9Cr-1Mo鋼(NT+SR)の許容ひずみ範囲（A）　ε_t (mm/mm)



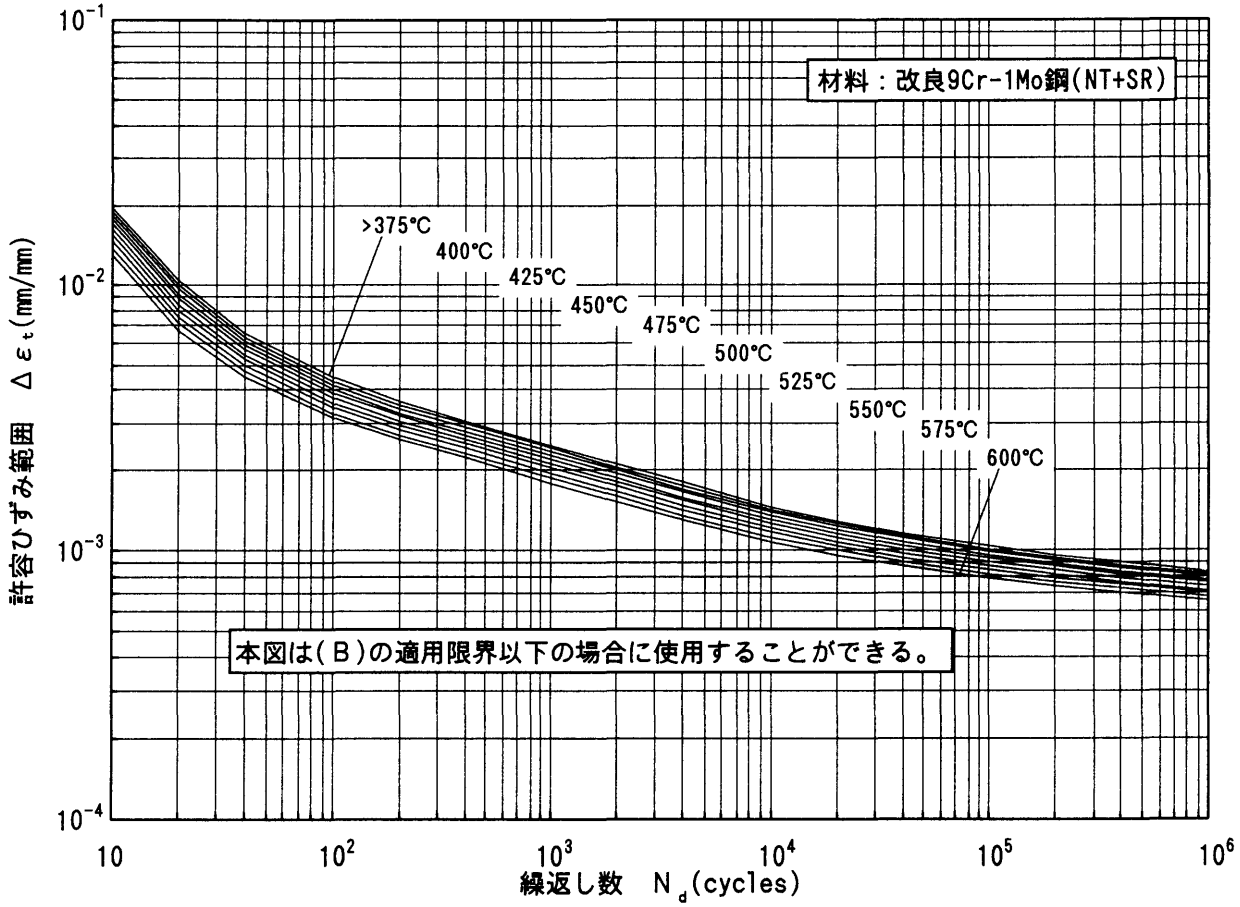
別図1．9　316FR鋼の許容ひずみ範囲（B）　ε_t(mm/mm)



別図1.9 改良9Cr-1Mo鋼(NT+SR)の許容ひずみ範囲（B） ε_t (mm/mm)



別図1．10　316FR鋼の許容ひずみ範囲（C）　ε_t(mm/mm)



別図1.10　改良9Cr-1Mo鋼(NT+SR)の許容ひずみ範囲（Ｃ）　ε_t (mm/mm)

付録MA　環境効果

MA.1　ナトリウム環境効果

MA.1.1　液体ナトリウム接液面のくされ代

(1)　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くされ代 a (mm)をとるものとする。

$$a = NR_D + \sum_i \frac{n_i}{8760} R_i \qquad (MA.1)$$

N：総使用時間（year）

R_D：最高使用酸素濃度C_{0D}及び最高使用温度に対して定める腐食速度（mm/year）

N_i：温度T_iにおいてC_{0D}を超える酸素濃度C_{0i}である状態の持続時間（hr）

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

R_0及びR_iは次の計算式により定めるものとする。

$$\log_{10}R = 0.85 + 1.5\log_{10}C_0 - 3.9\times10^3/(T+273) \qquad (MA.2)$$

R：腐食速度（mm/year）

C_0：酸素濃度（ppm）

T：温度（℃）

ただし，(MA.2)式の適用範囲及び適用材料は次のとおりである。

C_0：5～25ppm

T：400～650℃

適用材料：SUS304，SUS316，316FR，SUS321 及び 2¼Cr-1Mo 鋼，改良 9Cr-1Mo 鋼

(2)　(MA.2)式の適用範囲の加減を下回る環境条件に対しては，下限値によりくされ代を算定するものとする。

(3)　ベローズ等の極薄肉の特殊部材にあっては，(MA.1)式によらず，別途くされ代を定めるものとする。

MA.1.2　強度補正係数

(1)　液体ナトリウムに接液する2¼Cr-1Mo鋼部材にあっては，接液部分の材料強度基準として，別表1（別図1)に定める材料強度基準S_0，S_m，S_t，S_y，S_R，S_u及びS_rの値に次の計算式により定める強度補正係数f_{DC}を乗じた値を用いるものとする。

$$\begin{cases} f_{DC} = 1 - \sum_i 4.8 \times 10^4 K_i \sqrt{t_i} / h_{eq} & (MA.3) \\ \log_{10} K_i = 0.15 - 6.10 \times 10^3 / (T_i + 273) & (MA.4) \end{cases}$$

ここに，

T_i：状態iにおける最高金属温度

T_i：状態iの累積持続時間(hr)。$\sum_i t_i$は総使用時間を下回ってはならない。

h_{eq}：等価厚さ（mm）

ただし，(MA.4)式は焼ならし焼戻し(NT)材またはこれと同等以上の脱炭抑止特性を有する2¼Cr-1Mo鋼に適用するものとする。等価厚さh_{eq}は次のa.およびb.に準拠して定めるものとする。

a.　厚さt（mm）の平板が片面または両面において液体ナトリウムに接液している場合は，それぞれ

$$h_{eq} = t \quad \text{または} \quad h_{eq} = t/2 \qquad (MA.5)$$

とする。

b.　外半径がr_0（mm)，内半径がr_i（mm)の管が外表面または内表面において液体ナトリウムに接液している場合は，それぞれ，

$$h_{eq} = \frac{r_0^2 - r_i^2}{2r_0} \quad \text{または} \quad h_{eq} = \frac{r_0^2 - r_i^2}{2ri} \qquad (MA.6)$$

(2) 次のa.またはb.を満足する場合はf_{DC}=1.0とすることができる。

a. $h_{eq} \geqq 10$ (mm)の場合

b. (MA.3)式により算定したf_{DC}が0.99を上回る場合。

MA.2 中性子照射効果

MA.2.1 中性子照射効果の評価

(1) 材料がSUS304あるいは316FRであり，最高使用温度が575℃以下であり，累積中性子照射量が1×10^{21}n/cm²（E＞0.1MeV）を超えない場合：ひずみの制限および材料強度基準を補正なく適用。

(2) 告示の温度範囲を超える金属温度で使用し，「クリープ効果が顕著でない場合」に該当しない：クリープ強度に及ぼす熱中性子照射の効果をMA.2.2により評価。

(3) 告示の適用温度範囲内の金属温度で使用するか，または「クリープ効果が顕著でない場合」に該当するもので，累積中性子照射量：別表MA.1に定める値を超えない場合：本方針のひずみの制限および別表1（別図1）の材料強度基準等を補正なく適用。

(4) 上記のいずれにも相当しない場合：運転状態を考慮して中性子照射効果を適切に評価する。

別表MA.1 累積中性子照射量の限界値

n/cm²（E＞0.1MeV）

温度（℃）	SUS304[1)]	SUS304溶接部
350	4×10^{21}	1.5×10^{21}
400	5×10^{21}	2×10^{21}
450	5×10^{21}	2×10^{21}
500	6×10^{21}	2×10^{21}
550	4×10^{21}	1.2×10^{21}
600	1×10^{21}	−

1) 溶接部を除く

MA.2.2　クリープ強度に及ぼす熱中性子照射効果の評価

(1)　別表1（別図1）のS_0に対しては，参照する温度Tが500℃を超える場合には，次式により定めるΔTを加えて補正した温度を適用する。

$\Delta T=(T+273)\cdot\log_{10} f_t/23$

(2)　別表1（別図1）のS_tおよびS_Rに対しては，参照する時間をf_t倍して補正した時間を適用する。

(3)　高速増殖実証炉高温構造設計方針（案）II編の1.3(2)に定める高温使用時間を下回らない時間をf_t倍および読みとり値をg_t倍に補正して適用する。

ここに，f_tおよびg_tは，それぞれ次の計算式により定めることができる。

$\phi_{th} \leqq \phi_{th1}$　　：$f_t = g_t = 1$

$\phi_{th1} < \phi_{th} \leqq \phi_{th2}$：$f_t = f_{t0}^n$

$g_t = g_{t0}^n$

$\phi_{th2} < \phi_{th}$　　：$f_t = f_{t0}$

$g_t = g_{t0}$

$$n = \frac{\log(f_{th} / f_{th1})}{\log(f_{th2} / f_{th1})}$$

ϕ_{th}　　：累積熱中性子照射量（n/cm^2）

f_{t0}，g_{t0}，ϕ_{th1}，ϕ_{th2}：次表に定めるところによる。

f_{t0}	3
g_{t0}	1.5
ϕ_{th1} (n/cm^2)	1×10^{15}
ϕ_{th2} (n/cm^2)	1×10^{18}

付録MB

MB.1　設計応力強さS_tの外挿値

MB.2　設計クリープ破断応力強さS_Rの外挿値

MB.3　設計応力緩和強さS_rの外挿値

別表MB.1　３１６ＦＲ鋼の設計応力強さ

（外挿値）　S_t　（N/mm²）

時間 hr / 温度℃	10^6	3×10^6	10^7
425	149	149	149
450	145	145	145
475	143	142	140
500	137	135	121
525	121	108	96
550	97	86	75
575	76	67	58
600	59	51	43
625	45	38	31
650	29	24	19

別表MB.1　改良9Cr-1Mo鋼（NT+SR）の設計応力強さ

（外挿値）　S_t　（N/mm²）

時間 hr / 温度℃	10^6	3×10^6	10^7
375	282	268	254
400	240	227	214
425	202	190	178
450	168	157	146
475	138	128	118
500	111	102	93
525	87	79	71
550	66	59	51
575	48	41	33
600	30	23	—

別表MB.2　３１６ＦＲ鋼の設計クリープ破断応力強さ

（外挿値）　S_R　（N/mm²）

温度℃ ＼ 時間 hr	10^6	3×10^6	10^7
425	398	368	337
450	331	305	277
475	274	250	225
500	224	203	181
525	181	163	144
550	145	129	113
575	114	100	86
600	89	76	64
625	67	57	47
650	49	40	32

別表MB.2　改良9Cr-1Mo鋼（NT+SR）の設計クリープ破断応力強さ

（外挿値）　S_R　（N/mm²）

温度℃ ＼ 時間 hr	10^6	3×10^6	10^7
375	423	403	381
400	360	341	321
425	303	285	267
450	252	236	219
475	207	192	177
500	167	153	139
525	131	119	106
550	100	88	76
575	72	61	50
600	46	34	－

別表MB.3　３１６ＦＲ鋼の設計緩和強さ

（外挿値）　S_r　（N/mm²）

温度℃ ＼ 時間 hr	10^6	3×10^6	10^7
425	160	156	153
450	138	134	130
475	122	117	108
500	101	91	79
525	75	65	55
550	52	43	35
575	33	26	19
600	18	13	7
625	7	—	—
650	—	—	—

別表MB.3　改良9Cr-1Mo鋼（NT+SR）の設計緩和強さ

（外挿値）　S_r　（N/mm²）

温度℃ ＼ 時間 hr	10^6	3×10^6	10^7
375	234	234	233
400	223	219	212
425	196	186	175
450	160	150	142
475	123	115	109
500	91	84	79
525	62	56	53
550	35	30	26
575	—	—	—
600	—	—	—

付録　ＭＣ

別表MC.1　大型鍛鋼品の設計引張強さ　S_u　（N/mm²）

温　度　(℃)	３１６ＦＲ鋼	改良9Cr-1Mo鋼 (NT+SR)
−30～40	480	556
75	438	554
100	437	537
150	430	527
200	421	507
225	420	502
250	420	497
275	420	486
300	420	476
325	420	474
350	420	471
375	420	464
400	417	456
425	415	448
450	370	440
475	369	419
500	368	398
525	358	373
550	349	348
575	343	320
600	338	291
625	320	−
650	303	−

（備考）　改良9Cr-1Mo鋼(NT+SR)は600℃以下に適用。

付録　MD　大型鍛鋼品の材料強度基準

MD.1　大型鍛鋼品の最大許容応力強さ　S_0

MD.2　大型鍛鋼品の設計応力強さ　S_m

MD.3　大型鍛鋼品の設計応力強さ　S_t

MD.4　大型鍛鋼品の設計クリープ破断応力強さ　S_R

MD.5　大型鍛鋼品の設計緩和強さ　S_r

別表MD.1　大型鍛鋼品の最大許容応力強さ　S_0　(N/mm²)

温　度　(℃)	３１６ＦＲ鋼	改良9Cr-1Mo鋼 (NT+SR)
−30～40	121	139
75	121	139
100	121	134
150	118	132
200	116	127
225	116	126
250	116	124
275	116	122
300	116	119
325	116	119
350	115	118
375	112	116
400	111	114
425	110	112
450	93	110
475	92	105
500	92	100
525	90	93
550	87	87
575	86	73
600	84	55
625	74	−
650	57	−

（備考）　改良9Cr-1Mo鋼(NT+SR)は600℃以下に適用。

別表MD.2　大型鍛鋼品の設計応力強さ　S_m　(N/mm²)

温　度　(℃)	改良9Cr-1Mo鋼 (NT+SR)
−30～40	185
75	185
100	179
150	176
200	169
225	167
250	166
275	162
300	159
325	158
350	157
375	155
400	152
425	149
450	147
475	140
500	133
525	124
550	116
575	107
600	97
625	−
650	−

（備考）　改良9Cr-1Mo鋼(NT+SR)は600℃以下に適用。
３１６ＦＲ鋼は別表1.2に記載された値を適用することができる。

別表MD.3　３１６ＦＲ鋼大型鍛鋼品の設計応力強さ　S_t　（N/mm²）

別表1.3に記載された値を適用することができる。

別表MD.3　改良9Cr-1Mo鋼（NT+SR）大型鍛鋼品の設計応力強さ　S_t　（N/mm²）

時間 hr / 温度℃	1	10	30	10^2	3×10^2	10^3	3×10^3	10^4	3×10^4	10^5	3×10^5
375	309	309	309	309	309	309	309	309	309	309	297
400	304	304	304	304	304	304	304	297	283	268	254
425	299	299	299	299	299	286	271	256	242	228	215
450	293	293	293	277	262	246	232	218	205	192	180
475	279	270	255	239	225	210	198	184	172	160	149
500	265	234	220	205	192	178	166	154	143	131	122
525	231	201	188	174	162	149	138	127	117	106	97
550	199	171	159	146	135	123	113	102	93	83	75
575	170	144	133	121	111	100	90	81	72	63	56
600	144	120	109	98	89	79	70	61	54	45	38

別表MD.4　３１６ＦＲ鋼大型鍛鋼品の設計クリープ破断応力強さ　S_R　(N/mm²)

時間 hr / 温度℃	1	10	30	10^2	3×10^2	10^3	3×10^3	10^4	3×10^4	10^5	3×10^5
425	374	374	374	374	374	374	374	374	374	374	374
450	370	370	370	370	370	370	370	370	370	370	363
475	369	369	369	369	369	369	369	369	362	329	302
500	368	368	368	368	368	368	365	331	303	274	249
525	358	358	358	358	358	337	307	277	251	225	203
550	349	349	349	347	316	284	257	230	207	184	164
575	343	343	329	295	266	237	213	189	169	148	131
600	338	310	279	248	223	197	175	154	136	118	103
625	320	263	236	208	185	162	143	124	108	92	80
650	282	222	197	172	152	131	115	98	84	71	60

別表MD.4　改良9Cr-1Mo鋼（NT+SR）大型鍛鋼品の設計クリープ破断応力強さ　S_R　(N/mm²)

時間 hr / 温度℃	1	10	30	10^2	3×10^2	10^3	3×10^3	10^4	3×10^4	10^5	3×10^5
375	464	464	464	464	464	464	464	464	464	464	446
400	456	456	456	456	456	456	456	446	424	401	381
425	448	448	448	448	448	429	407	384	363	342	323
450	440	440	440	415	393	369	349	327	308	288	270
475	419	405	382	358	337	316	296	276	259	240	224
500	398	351	329	307	288	267	249	231	214	197	182
525	346	301	281	261	243	224	207	190	175	159	145
550	298	257	238	219	202	185	169	153	140	125	113
575	255	216	199	181	166	150	136	121	108	95	84
600	216	180	164	148	133	118	105	92	80	68	57

別表MD.5　３１６ＦＲ鋼大型鍛鋼品の設計緩和強さ　S_r　（N/mm²）

別表1.7に記載された値を適用することができる。

別表MD.5　改良9Cr-1Mo鋼（NT+SR）大型鍛鋼品の設計緩和強さ　S_r　（N/mm²）

時間 hr / 温度℃	1	10	30	10^2	3×10^2	10^3	3×10^3	10^4	3×10^4	10^5	3×10^5
375	232	232	232	232	232	231	231	228	225	223	223
400	228	228	228	227	226	223	219	215	215	214	214
425	224	223	222	219	213	207	204	204	204	202	199
450	219	215	209	200	193	192	191	190	186	179	169
475	206	193	182	175	173	172	170	164	155	144	133
500	188	165	156	153	152	149	143	132	122	110	100
525	161	137	132	130	127	121	112	100	90	79	70
550	132	112	109	107	101	92	82	71	61	51	43
575	104	89	86	82	75	65	55	44	34	23	—
600	78	66	63	57	49	39	28	—	—	—	—

3.3 挙動関係式

ＤＤＳ（案）に用いた新材料改良9Ｃｒ－1Ｍｏ鋼及び３１６ＦＲ鋼の平均的材料挙動を示す関係式を示す。

関係式は，４章で示す材料データを用いて，それぞれ下記手法にて策定した。

(1) 主クリープ破断関係式

：Larson-Miller パラメータ法の２次回帰式

(2) 第３期クリープ開始時間関係式

：0.2%Offset 法による第３期開始時間と破断時間の両対数線形近似

(3) 定常クリープ速度関係式

：Monkman-Grant 式

(4) クリープひずみ式

：Blackburn 式

(5) 最適疲労破損式

：Diercks の汎用回帰解析法

(6) 弾塑性応力－ひずみ式

：Ludwik 式

(7) 動的応力－ひずみ式（３１６ＦＲ鋼のみ）

：Ludwik 式

表 3.3.1-1　改良 9Cr-1Mo 鋼(NT+SR)の主クリープ破断関係式

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

使用単位

T　：　温度（℃）　　$375 < T \leqq 600$

σ　：　応力（N/mm^2）　　$19.3 \leqq \sigma$

t_R　：　破断時間（hr）

C	3.31803×10
A_0	2.67947×10^4
A_1	1.40580×10^4
A_2	-5.46172×10^3
α_R	平　均　値　：　1 設計最小値　：　10

ただし、σ は当該温度における引張強さを超えてはならない。

表 3.3.1-2　改良 9Cr-1Mo 鋼(NT+SR)の第３期クリープ開始時間関係式

$t_3 = \alpha_3 \cdot t_R$

使用単位

t_3：第 3 期開始時間（hr）

t_R：破断時間（hr）

α_3	0.63722

表 3.3.1-3　改良 9Cr-1Mo 鋼(NT+SR)の定常クリープ速度関係式

$$\dot{\varepsilon}_m = F \exp\{-Q/R(T+273.15)\} t_R^{-\lambda}$$

使用単位

T　：温度（℃）

$\dot{\varepsilon}_m$：定常クリープ速度（mm／mm／hr）

t_R：破断時間（hr）

F	2.04156	R	8.31441
Q	2.01968×10^4	λ	1.15483

表 3.3.1-4　改良 9Cr-1Mo 鋼(NT+SR)のクリープひずみ式

$$\varepsilon_C = C_1\{1-\exp(-r_1 t)\} + C_2\{1-\exp(-r_2 t)\} + \dot{\varepsilon}_m t$$

使用単位

T　：　温度（℃）　　$375 < T \leqq 600$

σ　：　応力（N/mm^2）　　$19.3 \leqq \sigma$

t_R　：　破断時間（hr）

$\dot{\varepsilon}_m$　：　定常クリープひずみ速度（mm/mm/hr）

t　：　時間（hr）

t_R	$(T + 273.15)\{\log_{10}(\alpha_c \cdot t_R) + 3.31803\times10\}$ $= 2.67947\times10^4 + 1.40580\times10^4 \log_{10}\sigma - 5.46172\times10^3 (\log_{10}\sigma)^2$
$\dot{\varepsilon}_m$	$2.04156\ \exp\{-2.01968\times10^4/8.31441(T+273.15)\}\ t_R^{-1.15483}$
C_1	$0.30546\ \dot{\varepsilon}_m^{0.59235}/(r_1/7.0)$
C_2	$3.5\times0.26505\ \dot{\varepsilon}_m^{0.81657}/r_2$
r_1	$7.0\times45.2986\ t_R^{-0.56858}$
r_2	$14.3245\ t_R^{-0.82278}$
α_C	平　均　値　：　1 設計最小値　：　3

表 3.3.1-5　改良 9Cr-1Mo 鋼(NT+SR)の最適疲労破損式

$$(\log_{10}Nf)^{-1/2}=A_0+A_1\cdot\log_{10}\Delta\varepsilon_t+A_2\cdot(\log_{10}\Delta\varepsilon_t)^2+A_3\cdot(\log_{10}\Delta\varepsilon_t)^4$$

使用単位

T　：　温度（℃）　　$375\leqq T\leqq 600$

$\dot{\varepsilon}$　：　ひずみ速度（mm/mm/sec）

$\Delta\varepsilon_t$：　全ひずみ範囲（mm/mm）

N_f：　破損繰返し数

A_0	$1.142078-3.720100\times10^{-15}\times T^4\times R$
A_1	$5.799126\times10^{-1}-9.783423\times10^{-6}\times R^4$
A_2	$1.776488\times10^{-1}+2.758978\times10^{-8}\times T^2$
A_3	-1.068372×10^{-2}

ただし、$R=\log_{10}\dot{\varepsilon}$ である。

表 3.3.1-6　改良 9Cr-1Mo 鋼(NT+SR)の弾塑性応力－ひずみ式

(1)　$\sigma \leqq \sigma_p$のとき

$$\varepsilon_e = \frac{\sigma}{E}$$

$$\varepsilon_p = 0$$

(2)　$\sigma > \sigma_p$のとき

$$\varepsilon_e = \frac{\sigma}{E}$$

$$\varepsilon_p = \left(\frac{\sigma - \sigma_p}{K}\right)^{\frac{1}{m}}$$

使用単位

T　：　温度（℃）　　$375 < T \leqq 600$

ε_e　：　弾性ひずみ（mm/mm）

ε_p　：　塑性ひずみ（mm/mm）

最大ひずみ　$(\varepsilon_e + \varepsilon_p)_{max} \leqq 0.03$（mm/mm）

σ　：　応力（N/mm^2）

E（N/mm^2）	別表 1.8 縦弾性係数 E による
σ_p（N/mm^2）	$\sigma_p = \sigma_y - K\ (0.002)^m$
σ_y（N/mm^2）	最大曲線：1.1×(平均曲線) 平均曲線：$-3.08878\times10^{-6}T^3 + 2.25543\times10^{-3}T^2$ $-6.28569\times10^{-1}T + 5.04801\times10^2$ 最小曲線：別表 1.4 設計降伏点 S_y による
K（N/mm^2）	$-1.78480\ T + 1.34718\times10^3$
m	$-8.37514\times10^{-4}T + 5.56244\times10^{-1}$

表 3.3.2-1　３１６ＦＲ鋼の主クリープ破断関係式

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

使用単位

T　：　温度（℃）　　425＜T≦650

σ　：　応力（N/mm^2）　　78.8≦σ

t_R　：　破断時間（hr）

C	2.39623×10
A_0	3.07082×10^4
A_1	2.91411×10^3
A_2	−2.46583×10^3
α_R	平　均　値　：　1 設計最小値　：　10

ただし、σは当該温度における引張強さを超えてはならない。

表 3.3.2-2　３１６ＦＲ鋼の第３期クリープ開始時間関係式

$$t_3 = \alpha_3 \cdot t_R$$

使用単位

t_3；第 3 期開始時間（hr）

t_R；破断時間（hr）

α_3	0.40775

表3.3.2-3　３１６ＦＲ鋼の定常クリープ速度関係式

$$\dot{\varepsilon}_m = F \exp\{-Q/R(T+273.15)\} t_R^{-\lambda}$$

使用単位

T　：温度（℃）

$\dot{\varepsilon}_m$：定常クリープ速度（mm／mm／hr）

t_R：破断時間（hr）

F	2.62247×10^{2}	R	8.31441
Q	4.92390×10^{4}	λ	1.13512

表3.3.2-4　３１６ＦＲ鋼のクリープひずみ式

$$\varepsilon_C = C_1\{1-\exp(-r_1 t)\} + C_2\{1-\exp(-r_2 t)\} + \dot{\varepsilon}_m t \quad \cdot$$

使用単位

T　：　温度（℃）

σ　：　応力（N/mm^2）

t_R　：　破断時間（hr）

$\dot{\varepsilon}_m$　：　定常クリープひずみ速度（mm/mm/hr）

t　：　時間（hr）

t_R	$(T + 273.15)\{\log_{10}(\alpha_c \cdot t_R) + 2.39623\times10\}$ $= 3.07082\times10^4 + 2.91411\times10^3 \log_{10}\sigma - 2.46583\times10^3 (\log_{10}\sigma)^2$
$\dot{\varepsilon}_m$	$2.62247\times10^2 \exp\{-4.92390\times10^4/8.31441(T+273.15)\} t_R^{-1.13512}$
C_1	$1.2692\ \dot{\varepsilon}_m^{0.74491}/r_1$
C_2	$0.48449\ \dot{\varepsilon}_m^{0.81155}/r_2$
r_1	$103.37\ t_R^{-0.72607}$
r_2	$17.255\ t_R^{-0.86775}$
α_C	平　均　値　：　1 設計最小値　：　3

表 3.3.2-5　３１６ＦＲ鋼の最適疲労破損式

$$(\log_{10}Nf)^{-1/2}=A_0+A_1\cdot\log_{10}\Delta\varepsilon_t+A_2\cdot(\log_{10}\Delta\varepsilon_t)^2+A_3\cdot(\log_{10}\Delta\varepsilon_t)^4$$

使用単位

T　：　温度（℃）　　$425\leqq T\leqq 650$

$\dot{\varepsilon}$　：　ひずみ速度（mm/mm/sec）

$\Delta\varepsilon_t$：　全ひずみ範囲（mm/mm）

N_f：　破損繰返し数

A_0	$1.621827-4.567850\times10^{-8}\times T^2\times R$
A_1	$1.131346+8.665061\times10^{-9}\times T^2$
A_2	3.439663×10^{-1}
A_3	$-1.374387\times10^{-2}+4.910723\times10^{-5}\times R$

ただし、$R=\log_{10}\dot{\varepsilon}$ である。

表 3.3.2-6　３１６ＦＲ鋼の弾塑性応力－ひずみ式

（1）　$\sigma \leqq \sigma_p$のとき

$$\varepsilon_e = \frac{\sigma}{E}$$

$$\varepsilon_p = 0$$

（2）　$\sigma > \sigma_p$のとき

$$\varepsilon_e = \frac{\sigma}{E}$$

$$\varepsilon_p = \left(\frac{\sigma - \sigma_p}{K}\right)^{\frac{1}{m}}$$

使用単位

T　：　温度（℃）　　$315 < T \leqq 650$

ε_e　：　弾性ひずみ（mm/mm）

ε_p　：　塑性ひずみ（mm/mm）

最大ひずみ　$(\varepsilon_e + \varepsilon_p)_{max} \leqq 0.03$（mm/mm）

σ　：　応力（N/mm^2）

E（N/mm^2）	別表 1.8 縦弾性係数 E による
σ_p（N/mm^2）	$\sigma_p = \sigma_y - K\ (0.002)^m$
σ_y（N/mm^2）	平均曲線：$-9.08682\times10^{-7}T^3 + 1.38828\times10^{-3}T^2 - 7.40603\times10^{-1}T + 2.73364\times10^{2}$ 最小曲線：別表 1.4 設計降伏点 S_y による
K（N/mm^2）	$-5.80824\times10^{-2}T + 3.99777\times10^{2}$
m	$1.38879\times10^{-4}T + 2.05730\times10^{-1}$

表 3.3.2-7　３１６ＦＲ鋼の動的応力－ひずみ式

（1）　$\Delta\sigma/2 > \sigma_p$の時

$$\log_{10}(\Delta\sigma - 2\sigma_p) = A_0 + A_1 \log_{10}(\Delta\varepsilon_t - \Delta\sigma/E)$$

（2）　$\Delta\sigma/2 \leqq \sigma_p$の時

$$\Delta\sigma = E\Delta\varepsilon_t$$

使用単位

T　：　温度（℃）　　$425 \leqq T \leqq 650$

$\Delta\sigma$　：　応力範囲（N/mm^2）

$\Delta\varepsilon_t$　：　全ひずみ範囲（mm/mm）

E　：縦弾性係数（N/mm^2）

σ_p　：比例限（N/mm^2）

A_0	$5.131076 - 0.4434273\times10^{-2}\times T + 0.1354228\times10^{-5}\times T^2 + 0.1593061\times10^{-8}\times T^3$
A_1	$2.171727 - 0.7045263\times10^{-2}\times T + 0.7832692\times10^{-5}\times T^2 - 0.2083600\times10^{-8}\times T^3$
E	$2.06171\times10^5 - 95.3103\times T$
σ_P	$2.62890\times10^2 - 4.94792\times10^{-1}\times T + 7.88358\times10^{-4}\times T^2 - 5.01396\times10^{-7}\times T^3$ $- (3.93157\times10^2 - 9.51235\times10^{-2}\times T) \times (0.002)^{0.326245 + 6.13276\times10^{-5}\times T}$

3.4　挙動関係式とデータの関係

3.3 に示した挙動関係式に対する実験データとの関係を示す。図 3.4.1-1～図 3.4.1-12 は改良 9Ｃｒ－1Ｍｏ鋼の関係を，図 3.4.2-1～図 3.4.2-15 は３１６ＦＲ鋼の関係を示す。

(1)　ＬＭＰと応力の関係（図 3.4.1-1，図 3.4.2-1）

図中実線は主クリープ破断関係式を示す。

関係式は実験値を精度良く表示している。

(2)　クリープ破断時間と応力の関係（図 3.4.1-2，図 3.4.2-2）

図中実線は主クリープ破断関係式を示す。

関係式は実験値を精度良く表示している。

(3)　第３期クリープ開始時間と破断時間の関係（図 3.4.1-3，図 3.4.2-3）

図中実線は第３期クリープ開始時間関係式を示す。

関係式は実験値を精度良く表示している。

(4)　定常クリープ速度と破断時間の関係（図 3.4.1-4，図 3.4.2-4）

図中実線は定常クリープ速度関係式を示す。

関係式は実験値を精度良く表示している。

(5)　クリープひずみの実測値と予測値の関係（図 3.4.1-5～7，図 3.4.2-5～7）

図中予測値はクリープひずみ式において $\alpha c = 1.0$ とし，実際の破断時間を用いて算出したものである。また，図中実験範囲の最大値応力及び最小値応力に対して $\alpha c = 3$ と $1/3$ としてクリープひずみ式より算出した値を破線で示している。

ほとんどのデータは $\alpha c = 3$，$1/3$ の中に収まっている。

(6)　ひずみ保持中の応力緩和挙動（図 3.4.1-8～9，図 3.4.2-8～9）

図中実線はクリープひずみ式とひずみ硬化則から算出した結果を示す。

時間係数 αc をパラメータとして試算しているが，比較的初期の段階を除けば $\alpha c = 3$ である程度の精度が確保できることが伺える。今後，さらに精度の良い応力緩和挙動予測法の確立が望まれる。

(7)　ひずみ範囲と破損繰返し数の関係（図 3.4.1-10～11，図 3.4.2-10～11）

図中実線は最適疲労破損式を示す。

関係式は実験値を精度良く表示している。

(8) 弾塑性応力－ひずみ関係式（図 3.4.1-12，図 3.4.2-12～13）

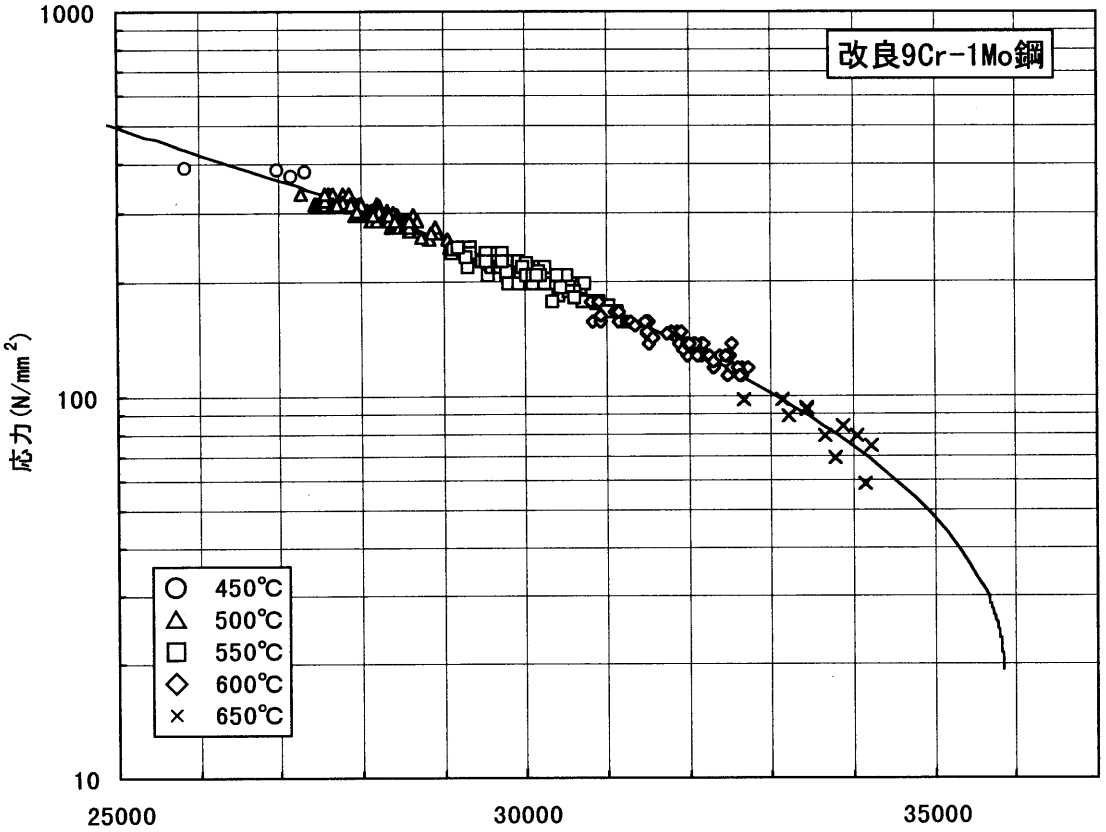
図中実線は弾塑性応力－ひずみ関係式を示す。

関係式は実験値を精度良く表示している。

(9) 動的応力－ひずみ関係式（図 3.4.2-14～15）

図中実線は動的応力－ひずみ関係式を示す。

関係式は低ひずみ速度の実験結果も含めすべてのデータを包含しており，関係式は動的ひずみ時効をも十分に考慮されたものであることを示している。



L. M. P (C=3.31803×10)

図 3.4.1-1　L．M．Pと応力の関係

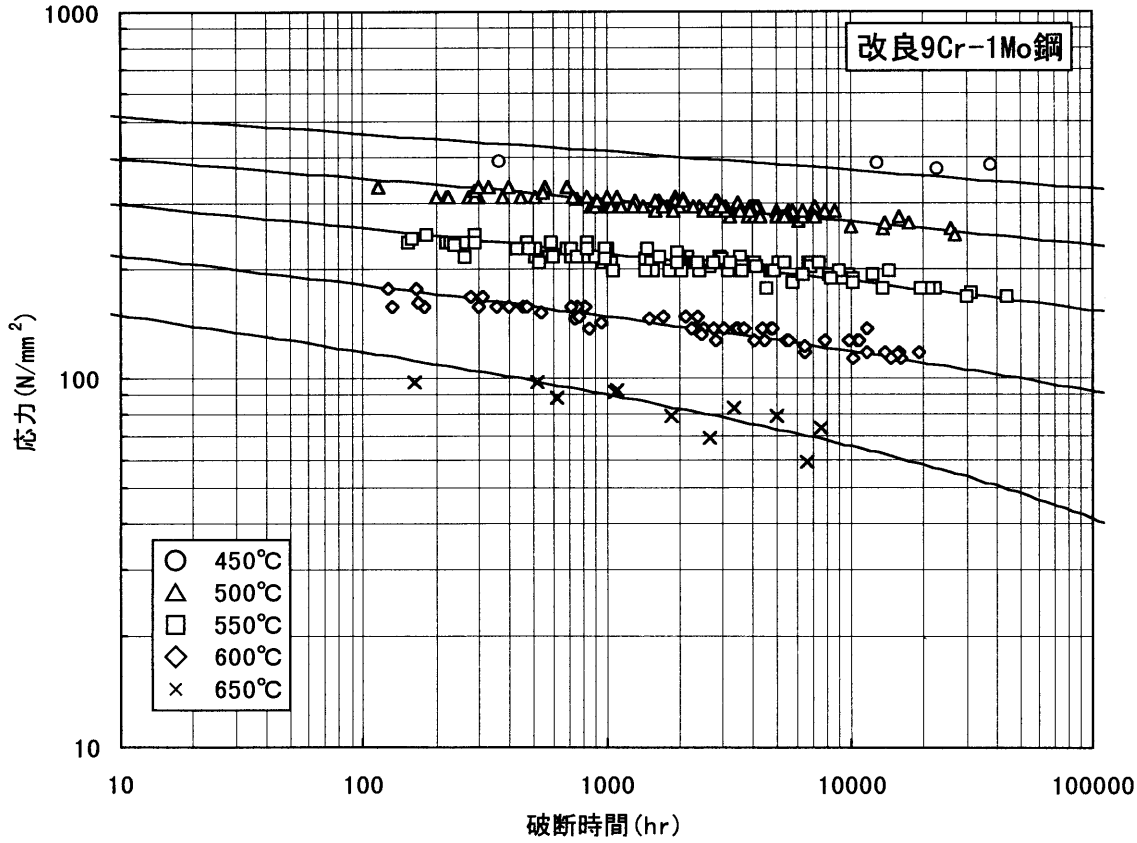


図 3.4.1-2　クリープ破断時間と応力の関係（検討に用いた母材データ）

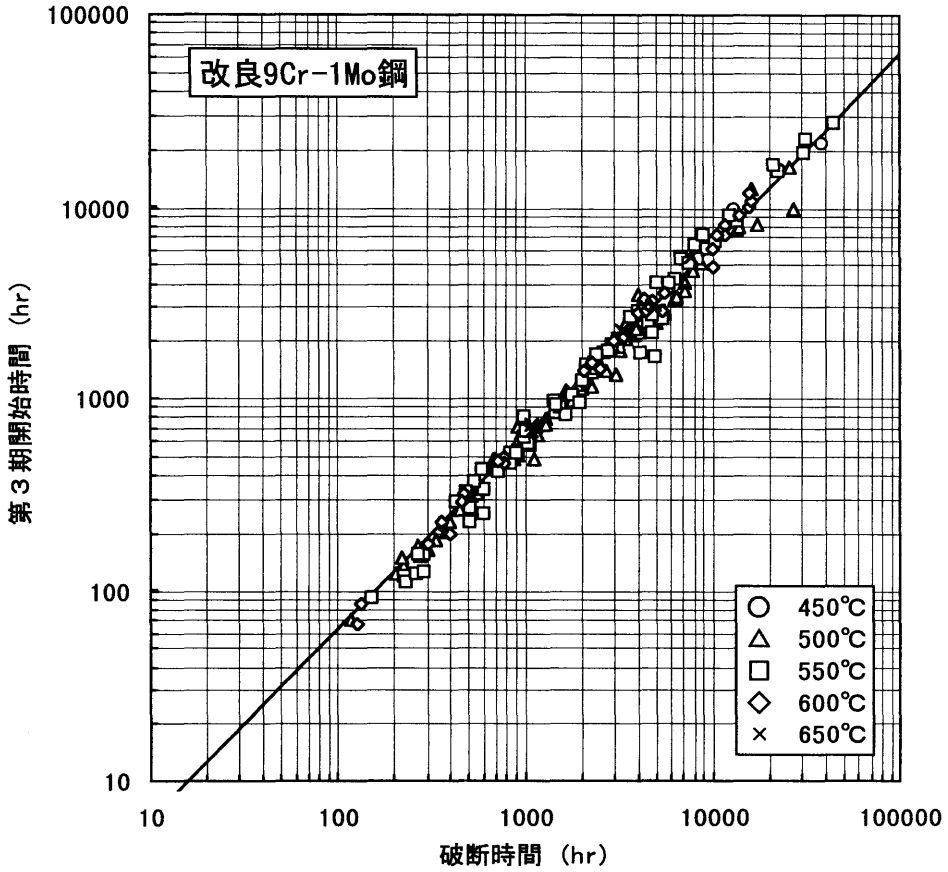


図 3.4.1-3　第３期クリープ開始時間と破断時間の関係（検討に用いた母材データ）

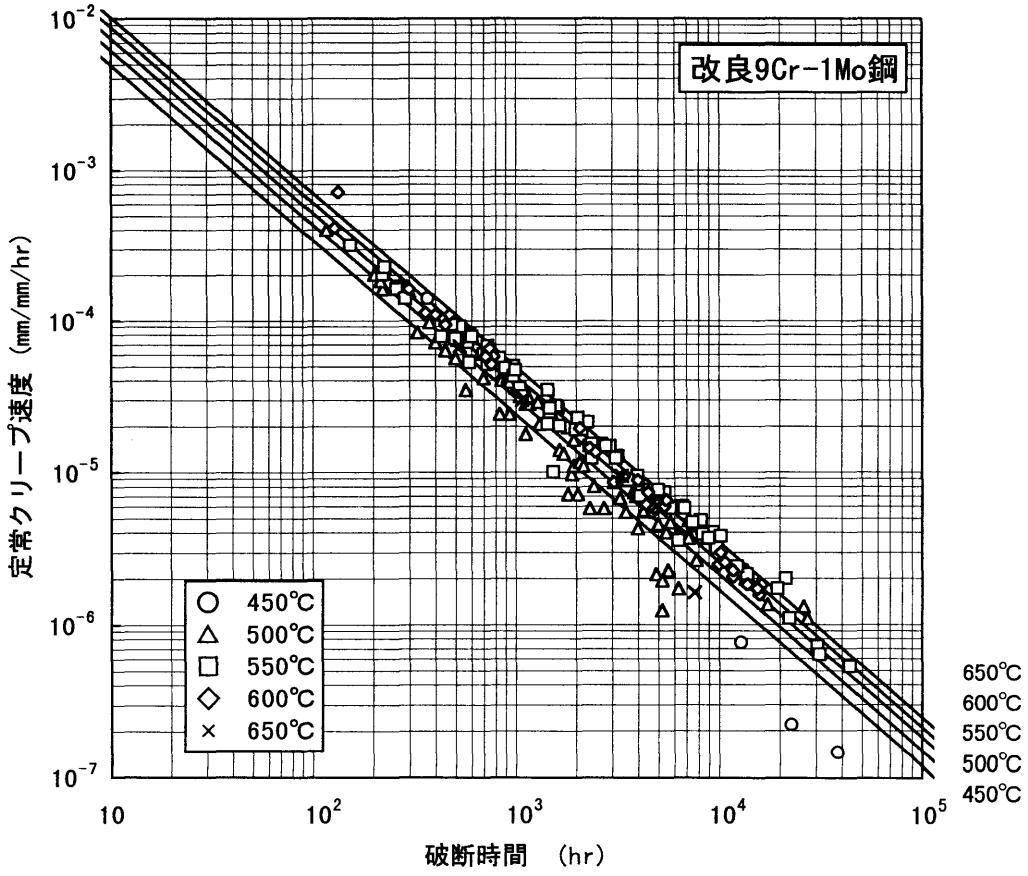


図 3.4.1-4　定常クリープ速度と破断時間の関係（検討に用いた母材データ）

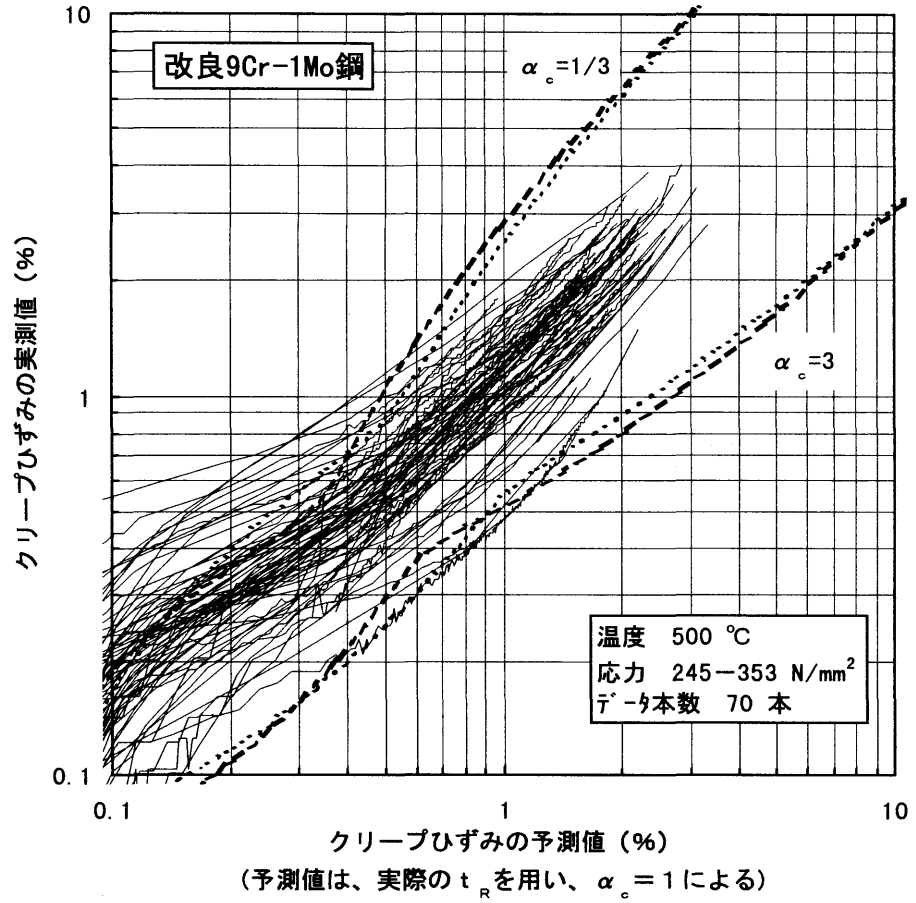


図 3.4.1-5　クリープひずみの実測値と予測値の相関関係（500℃）

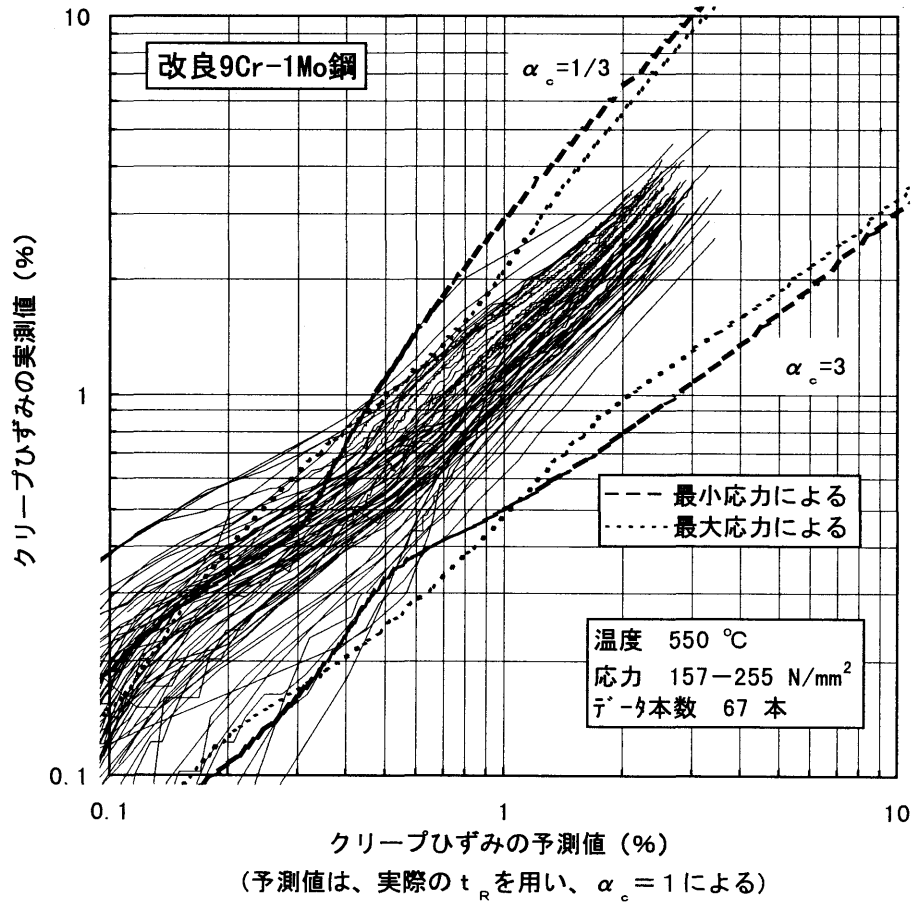


図 3.4.1-6　クリープひずみの実測値と予測値の相関関係（550℃）

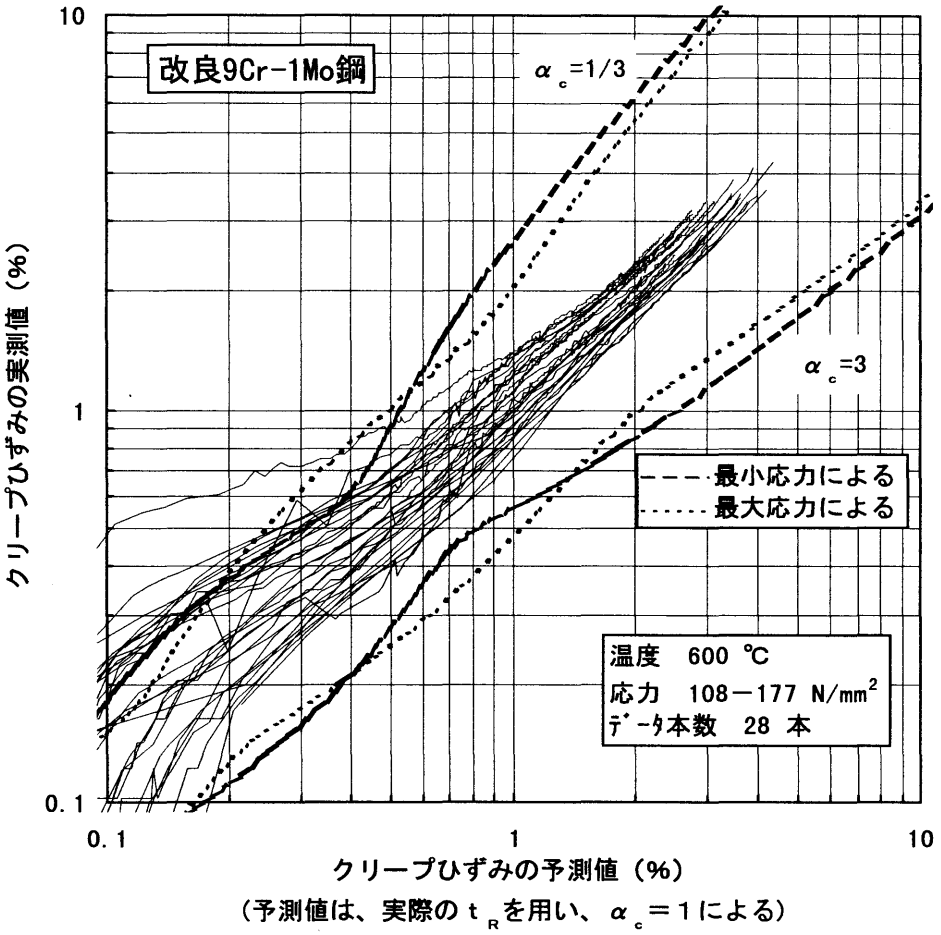


図 3.4.1-7　クリープひずみの実測値と予測値の相関関係（600℃）

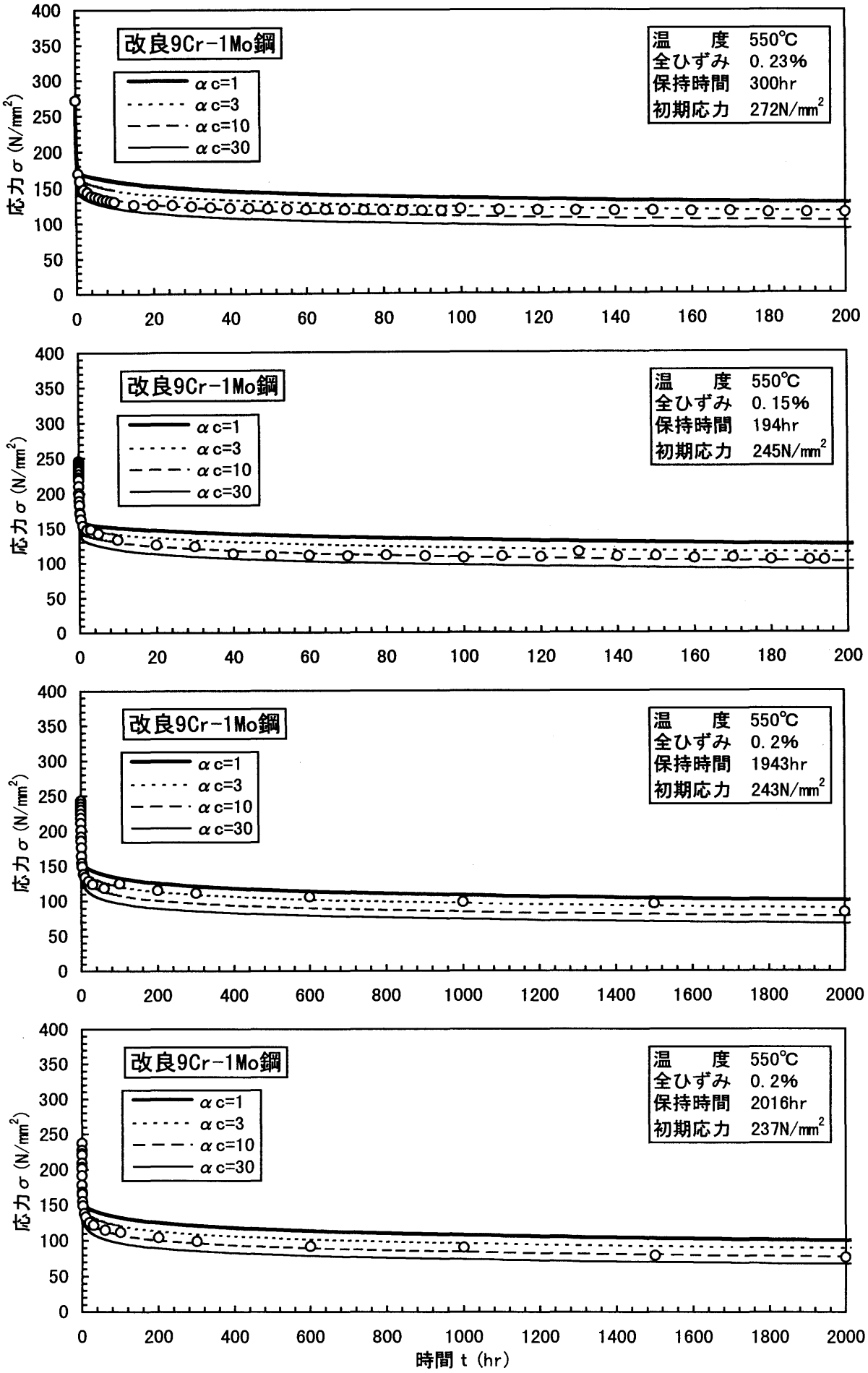


図3.4.1-8　ひずみ保持中の応力緩和挙動

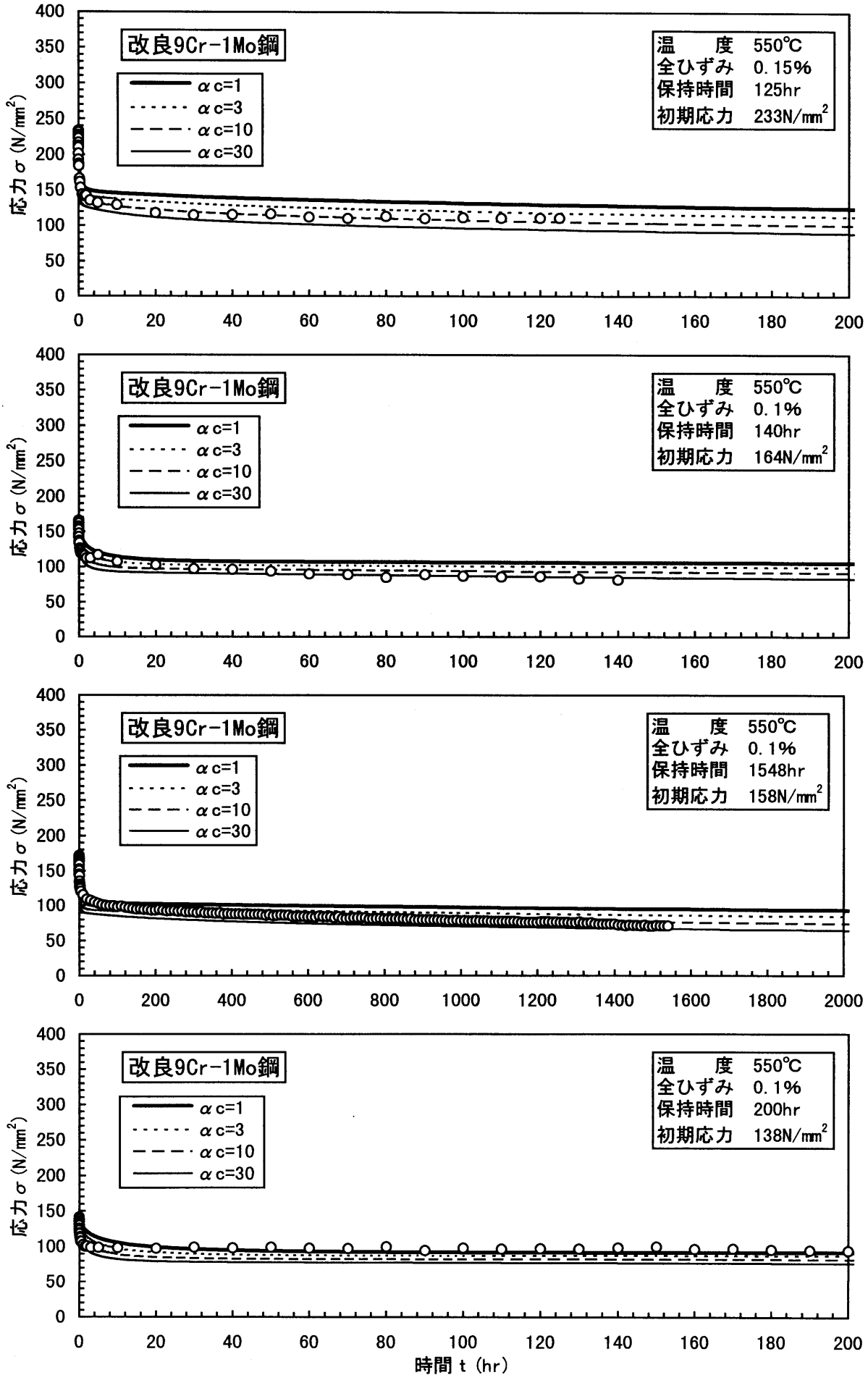


図3.4.1-9　ひずみ保持中の応力緩和挙動

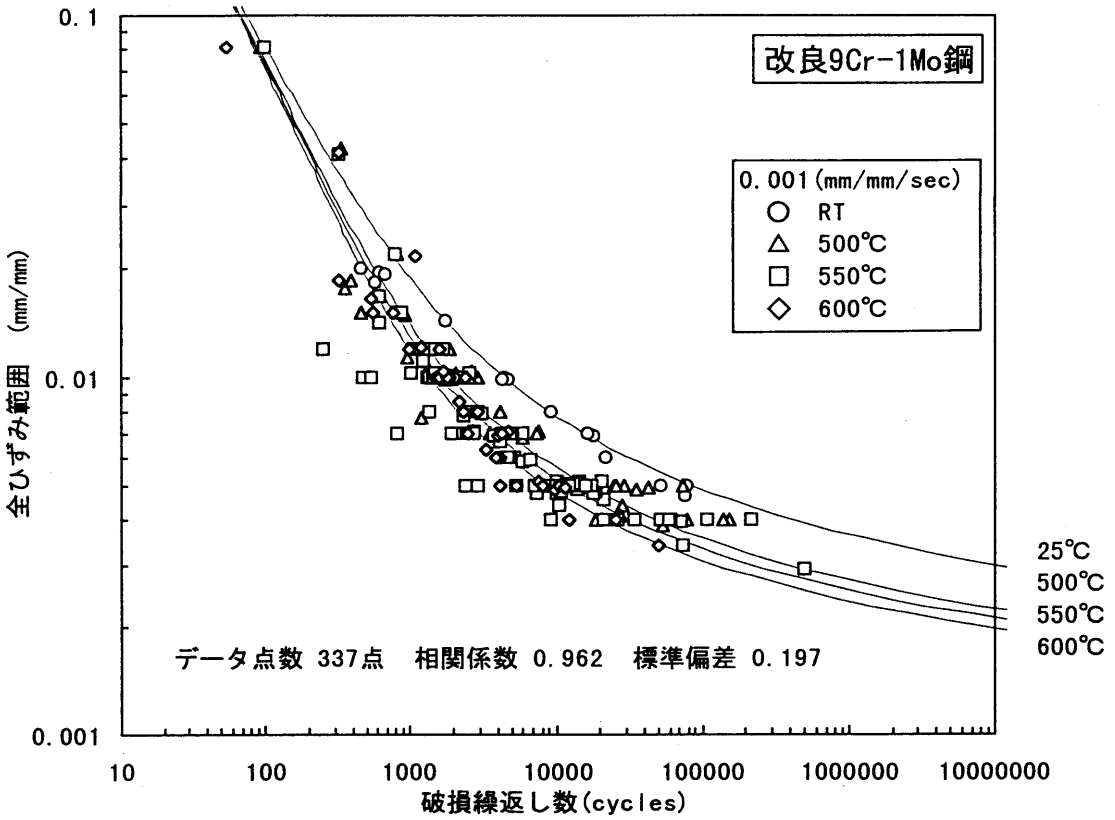


図 3.4.1-10　ひずみ範囲と破損繰返し数の関係（温度パラメータ）

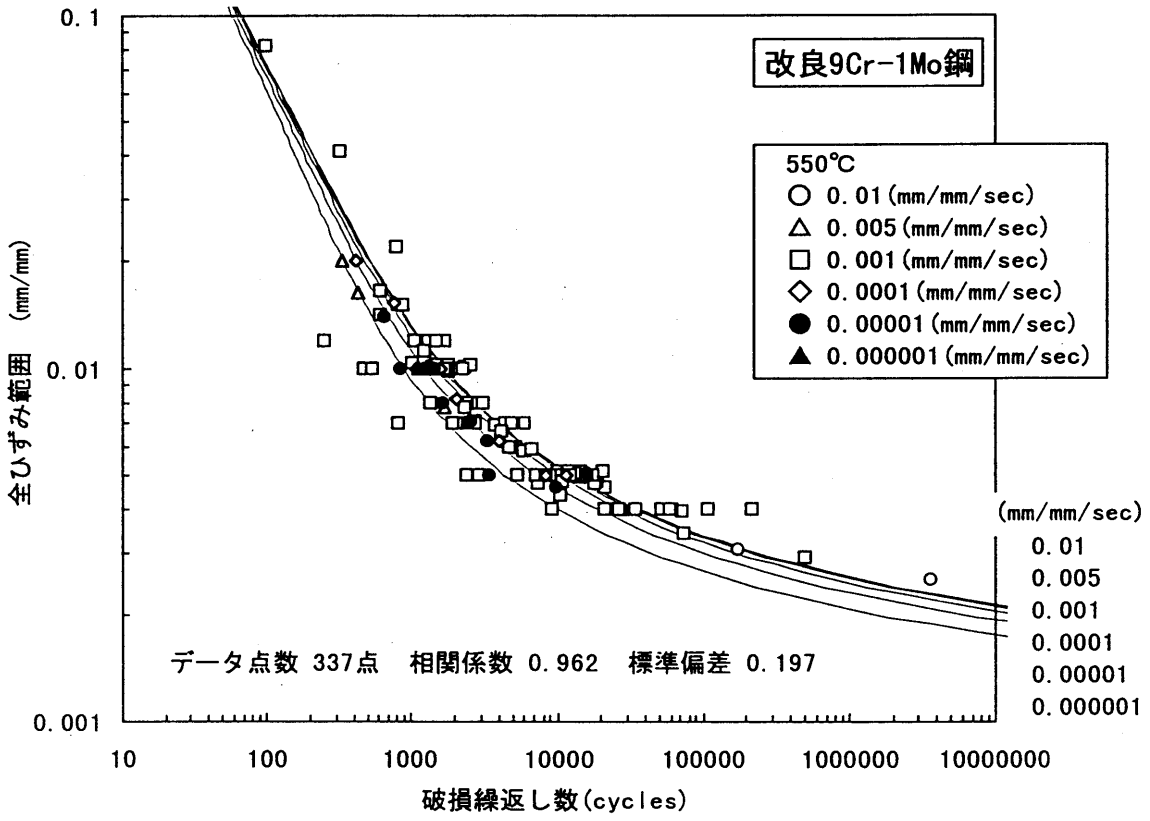


図 3.4.1-11　ひずみ範囲と破損繰返し数の関係（ひずみ速度パラメータ）

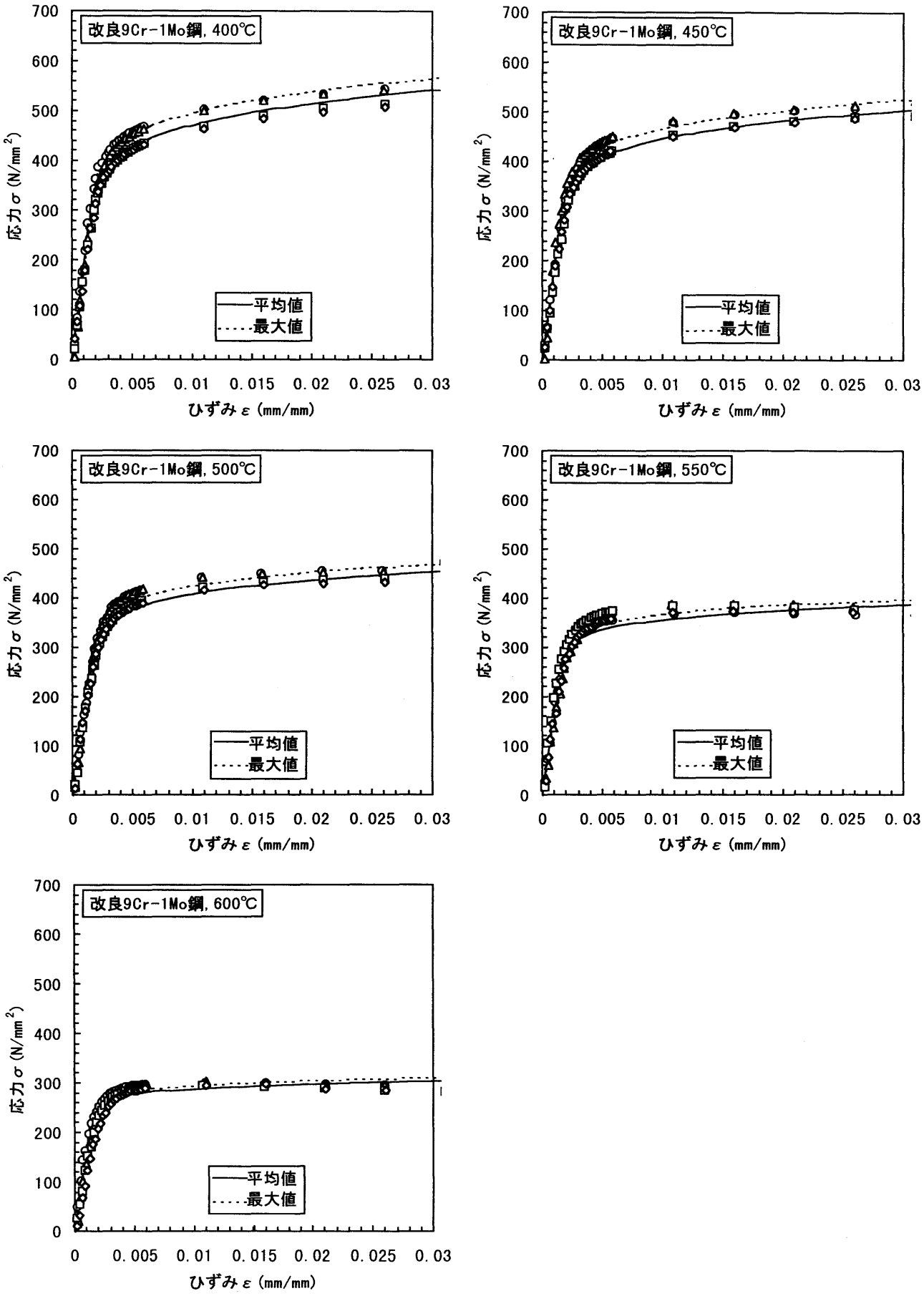


図 3.4.1-12　改良 9Cr-1Mo 鋼の弾塑性応力－ひずみ線図（平均値：γ＝1.0、最大値：γ＝1.1）

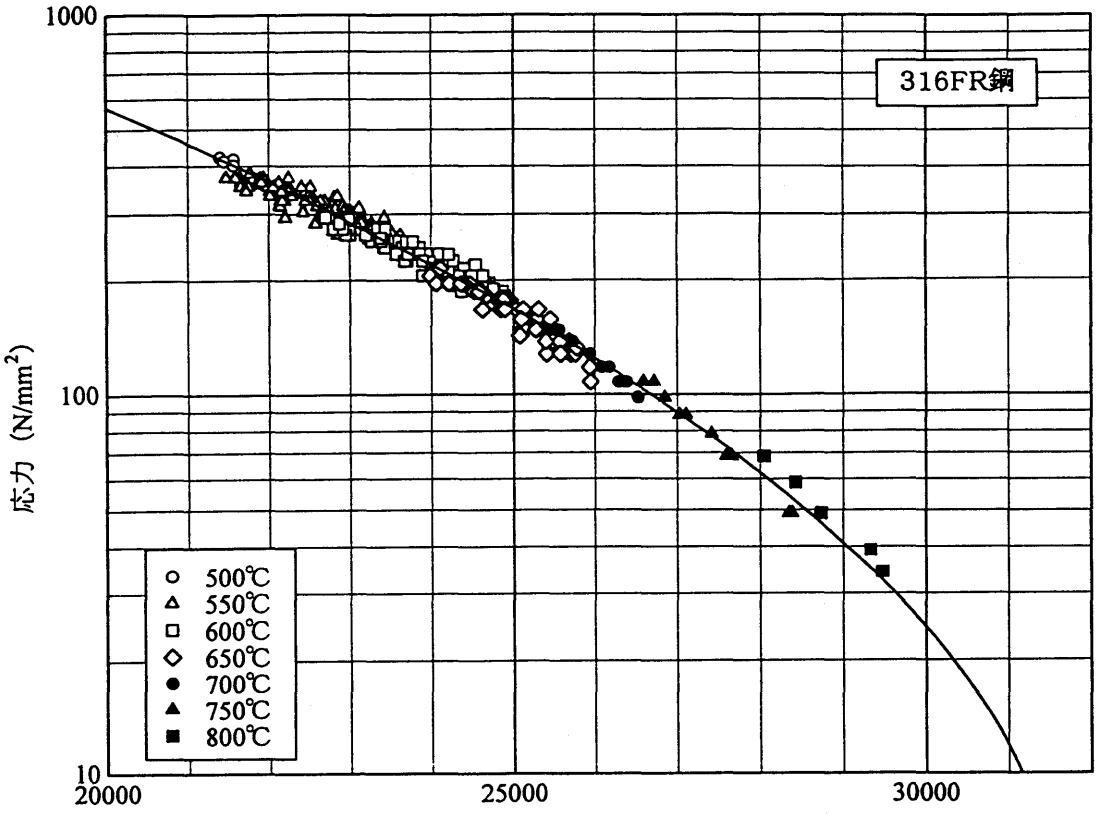


図 3.4.2-1　L．M．Pと応力の関係

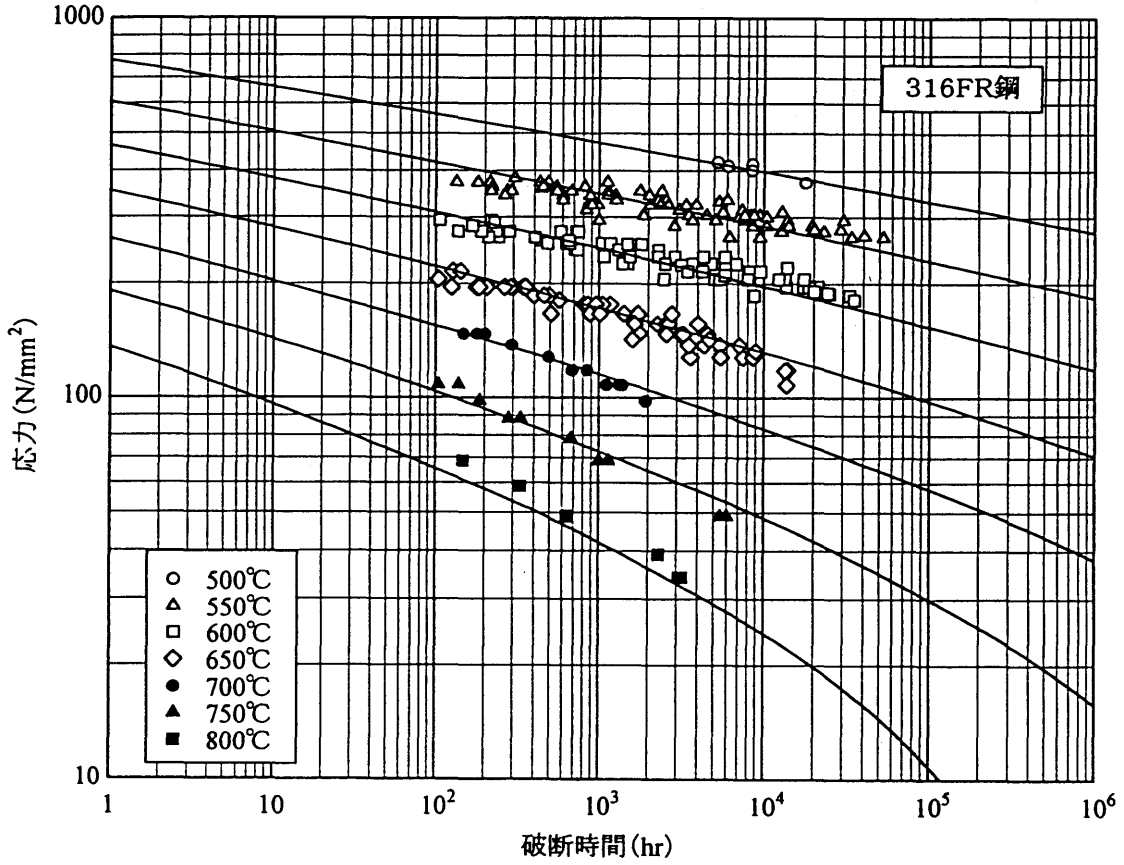


図 3.4.2-2　クリープ破断時間と応力の関係（検討に用いた母材データ）

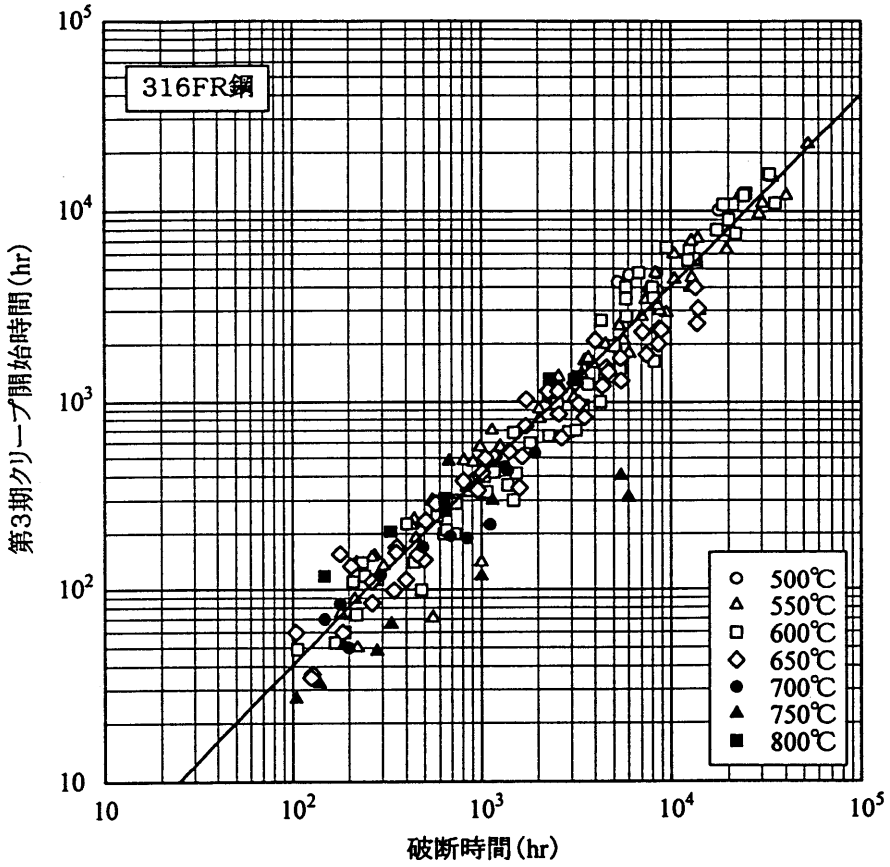


図 3.4.2-3　第３期クリープ開始時間と破断時間の関係（検討に用いた母材データ）

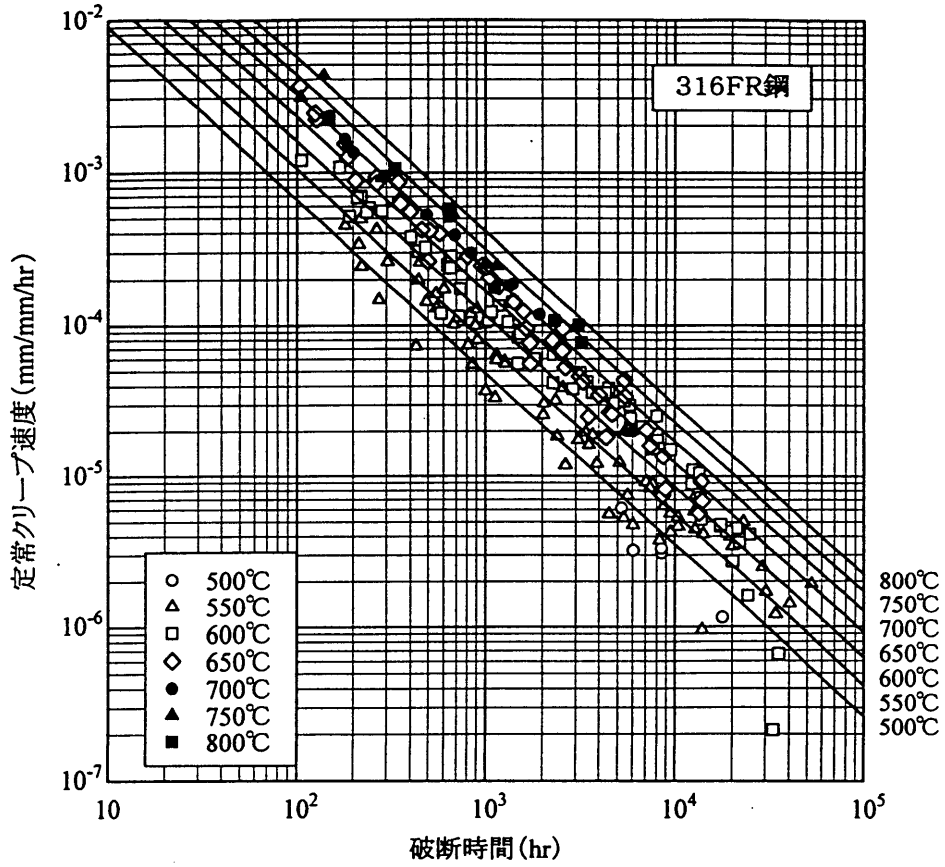
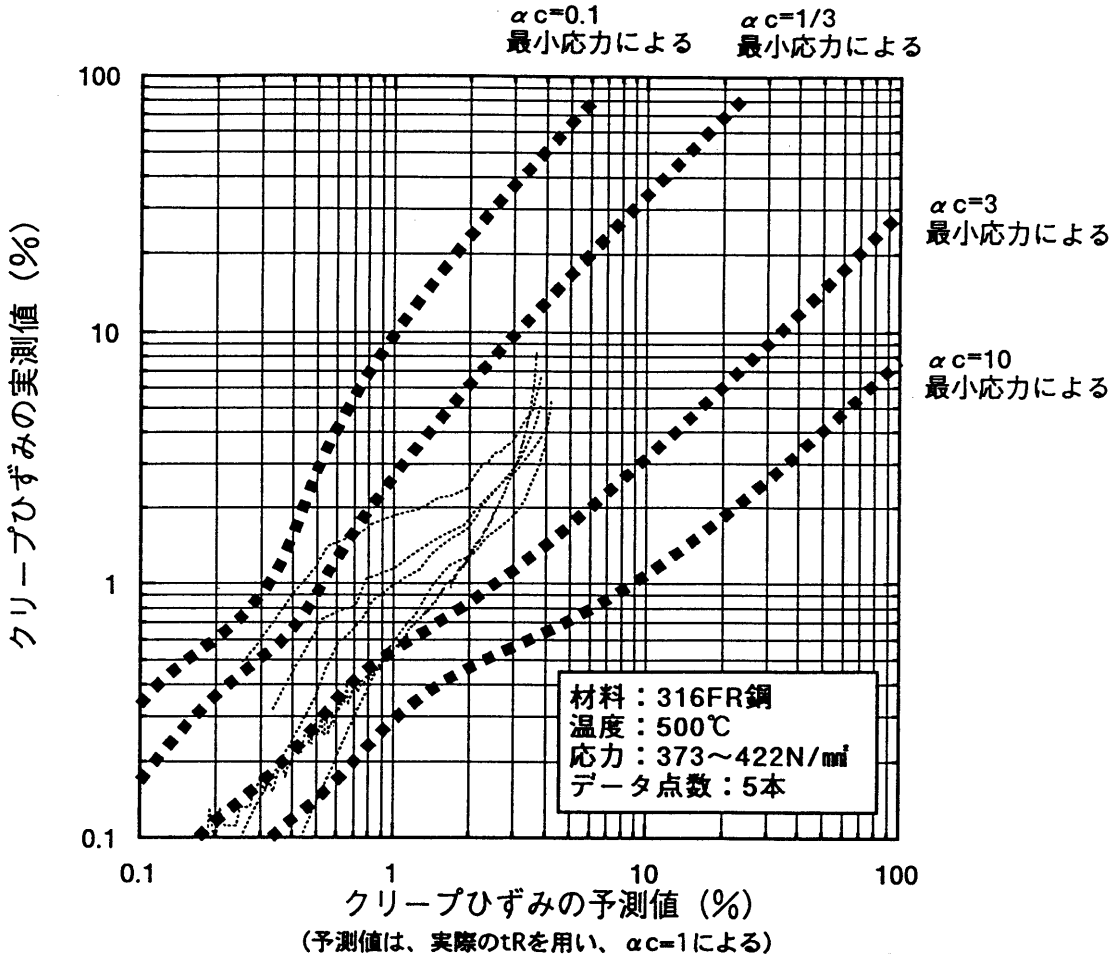
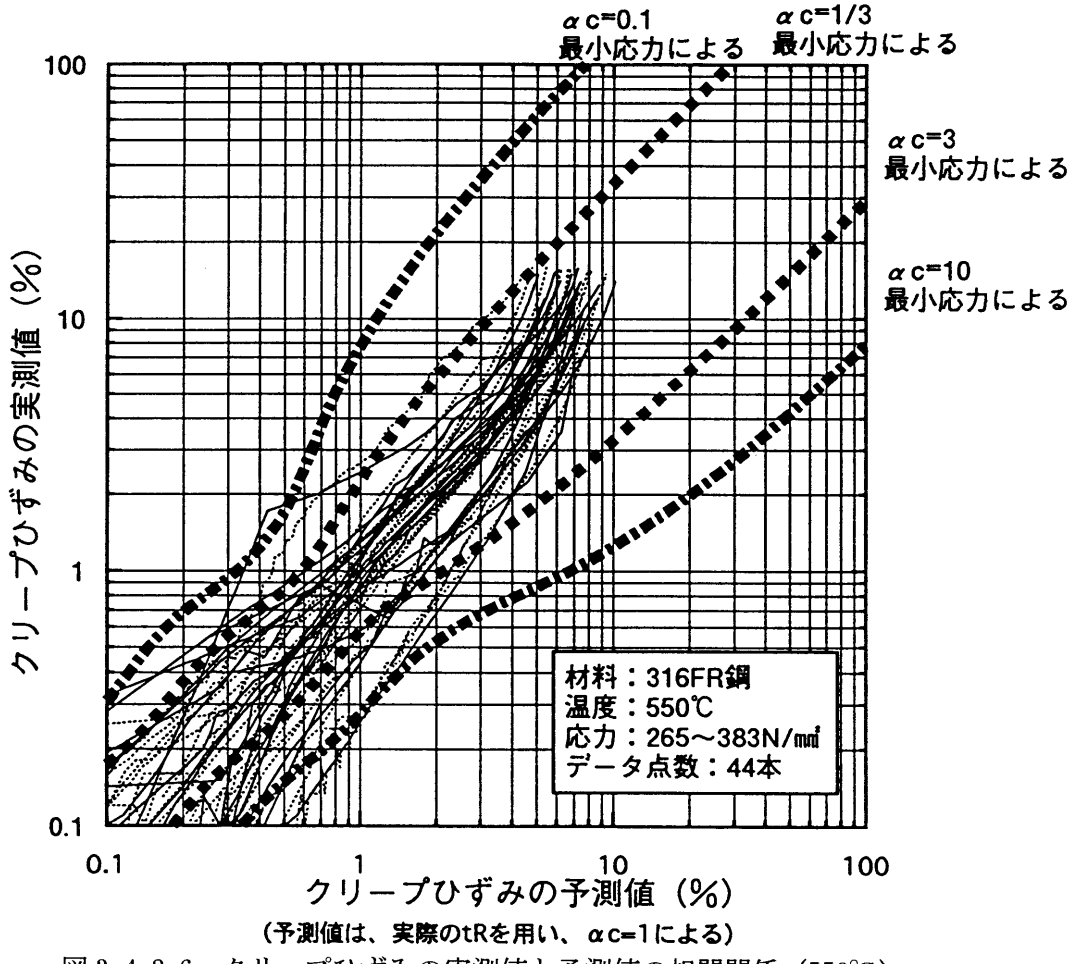


図 3.4.2-4　定常クリープ速度と破断時間の関係（検討に用いた母材データ）



（予測値は、実際のtRを用い、αc=1による）

図 3.4.2-5　クリープひずみの実測値と予測値の相関関係（500℃）



（予測値は、実際のtRを用い、αc=1による）

図 3.4.2-6　クリープひずみの実測値と予測値の相関関係（550℃）

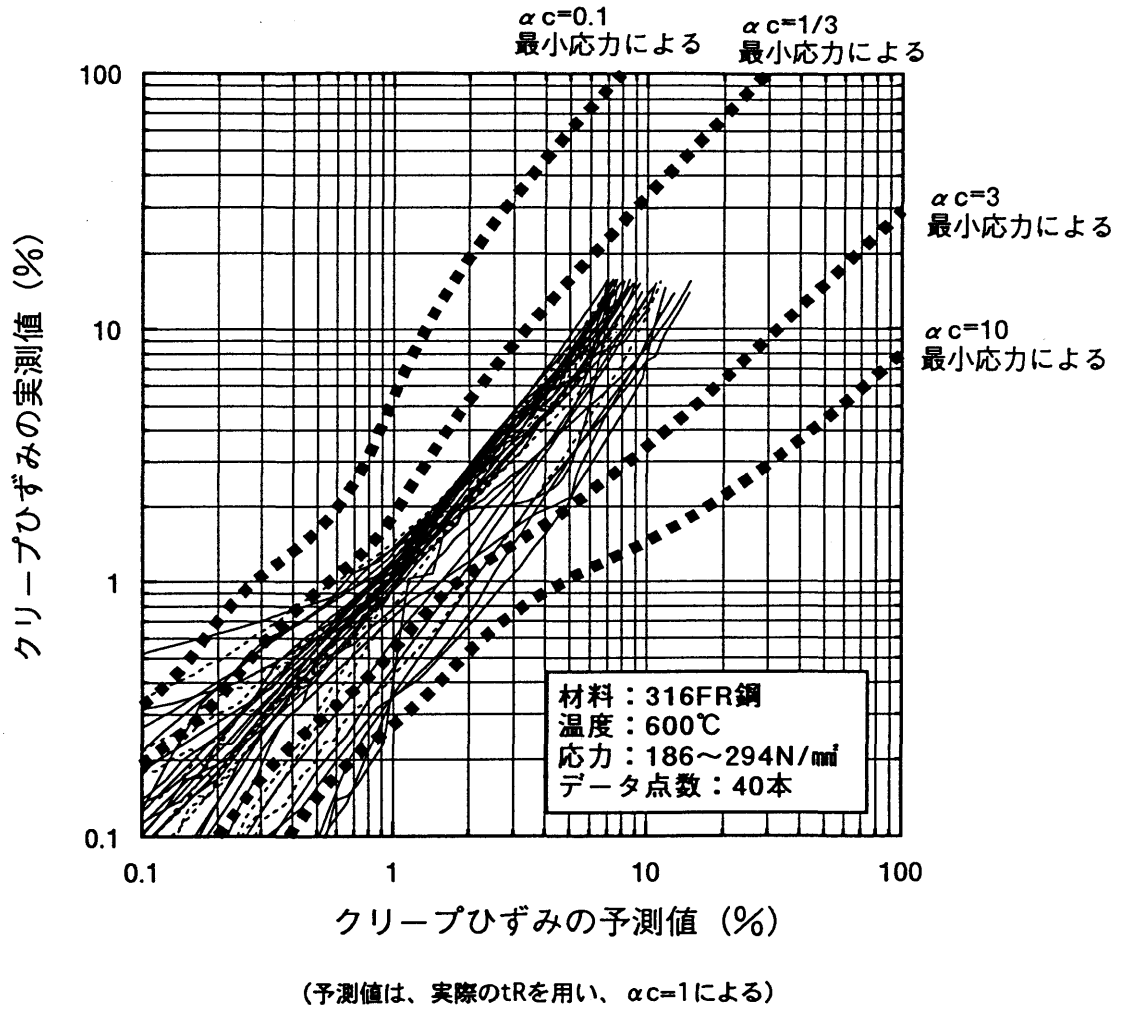


図 3.4.2-7　クリープひずみの実測値と予測値の相関関係（600℃）

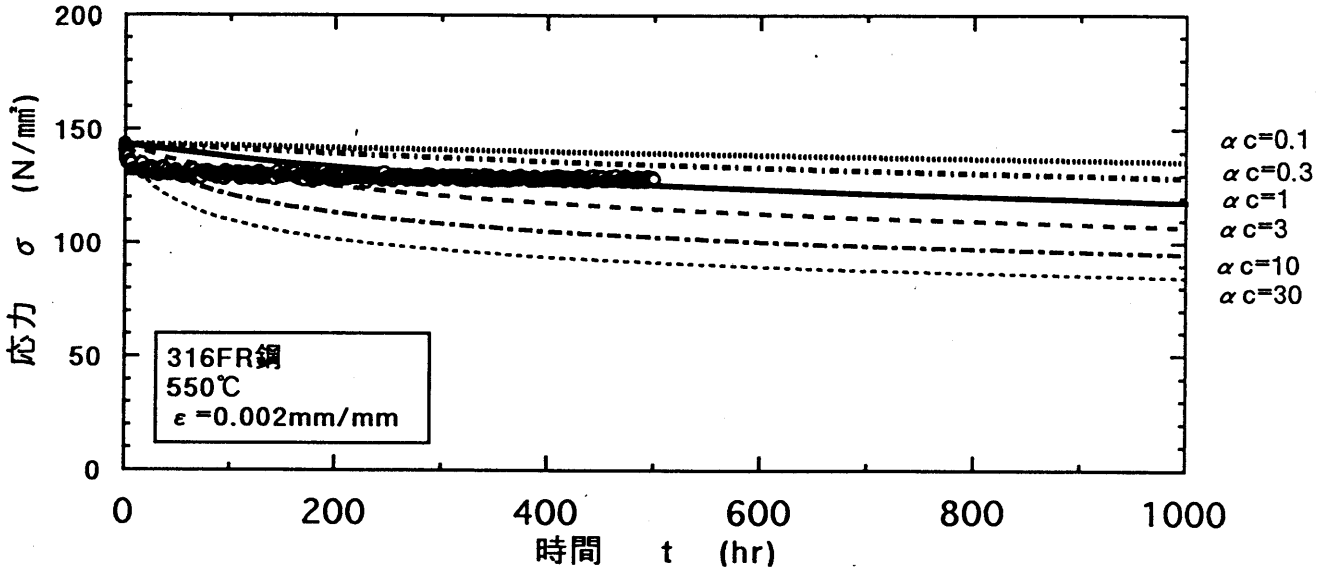


図 3.4.2-8　ひずみ保持中の応力緩和挙動
(550℃、 ε =0.002mm/mm 保持)

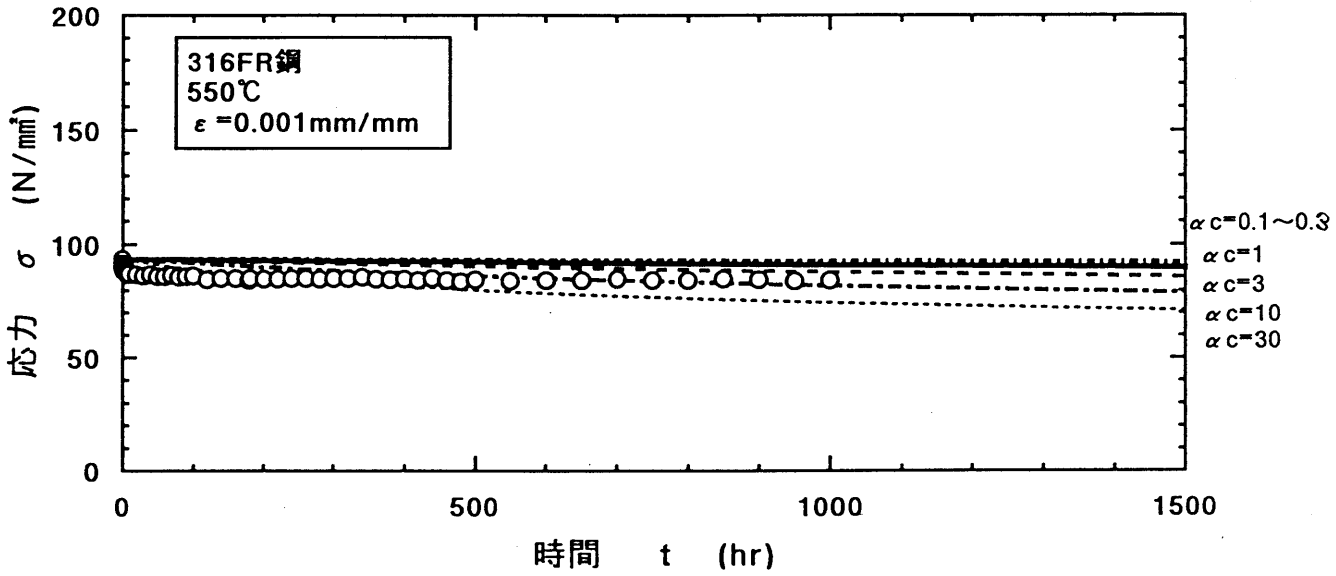


図 3.4.2-9　ひずみ保持中の応力緩和挙動
(550℃、 ε =0.001mm/mm 保持)

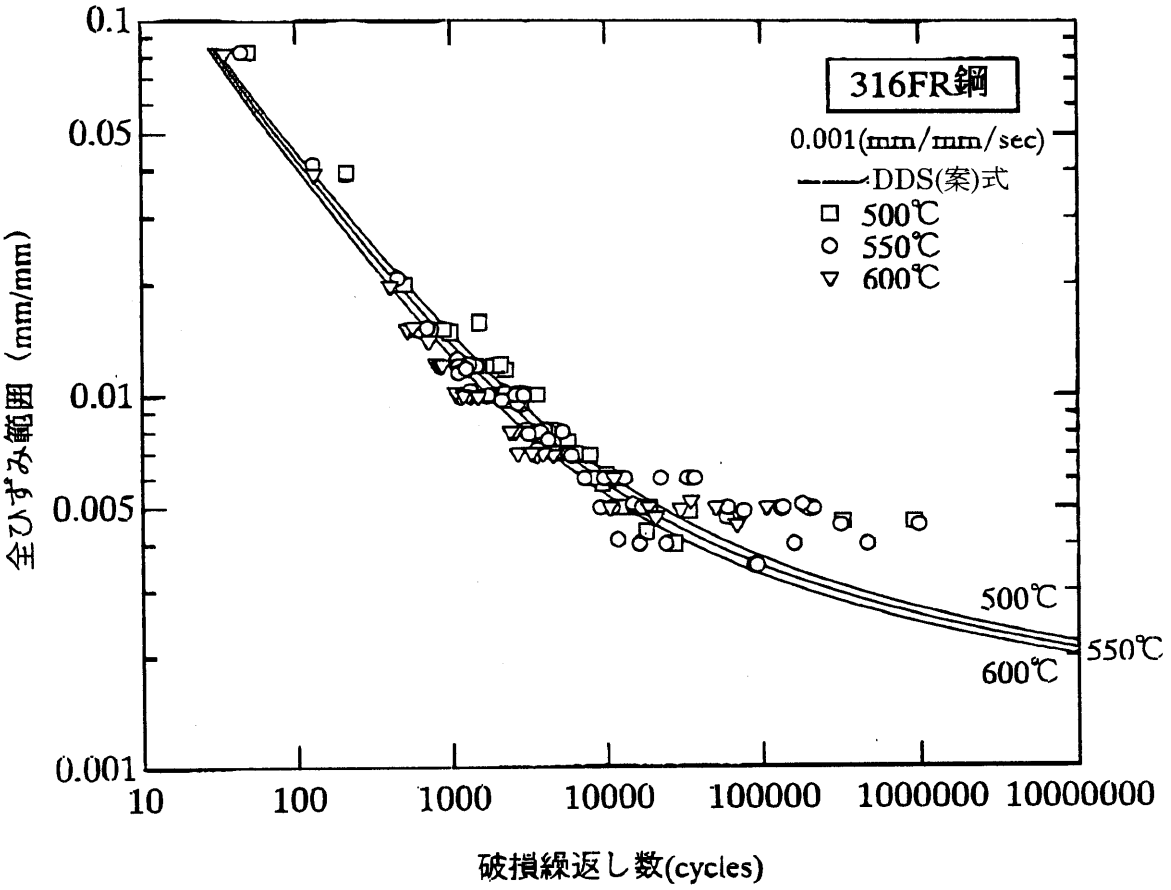


図 3.4.2-10　ひずみ範囲と破損繰返し数の関係（温度パラメータ）

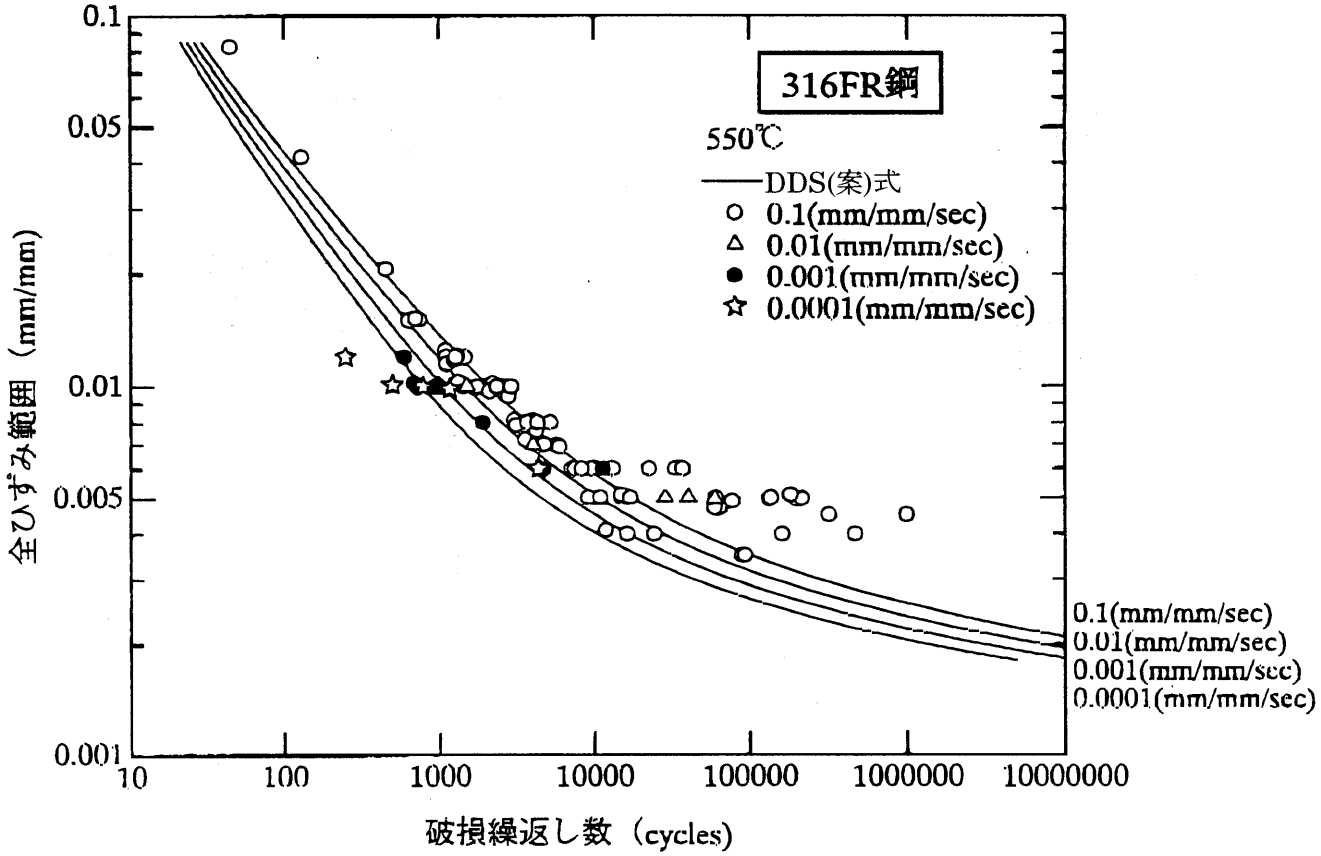


図 3.4.2-11　ひずみ範囲と破損繰返し数の関係（ひずみ速度パラメータ）

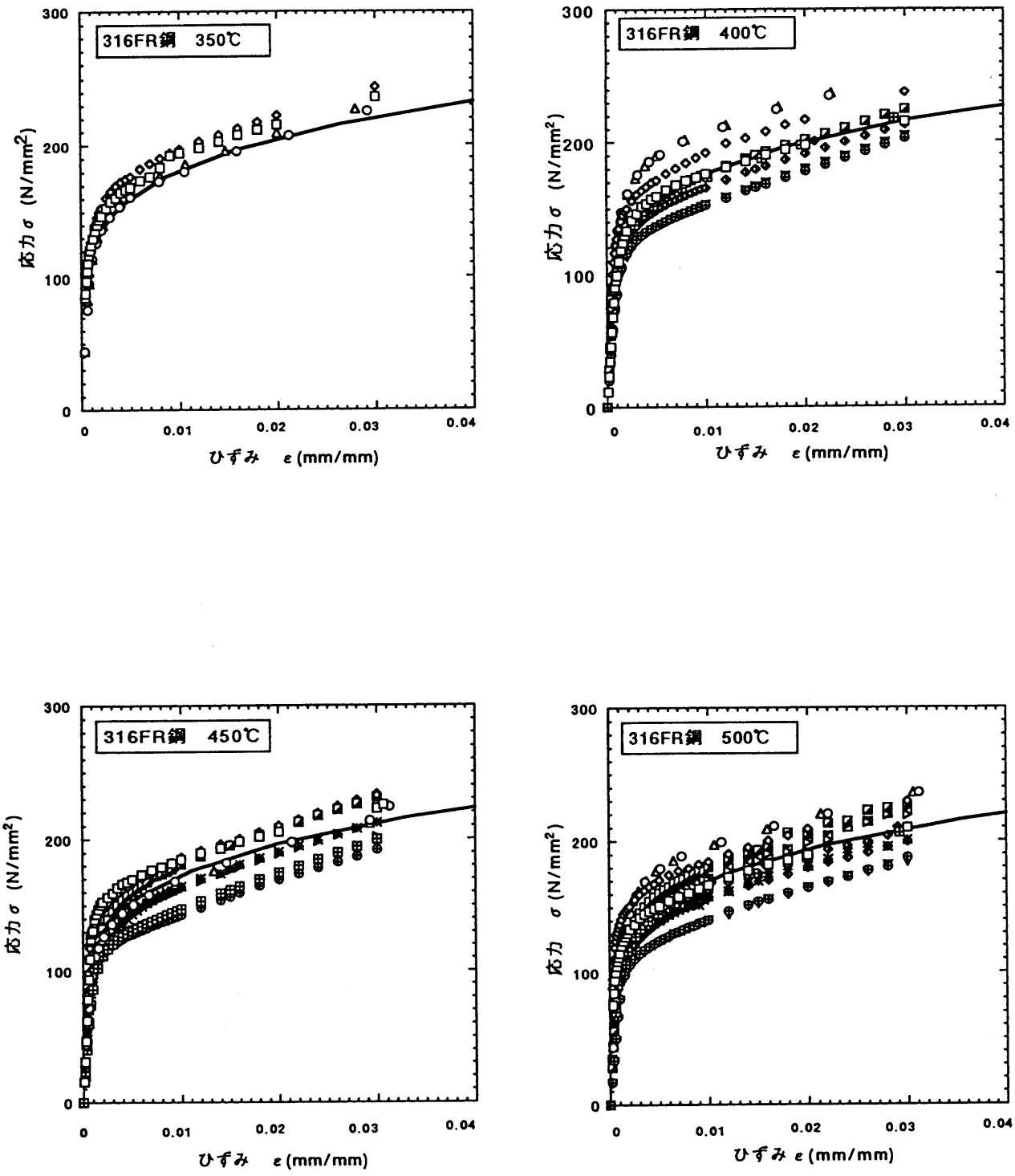
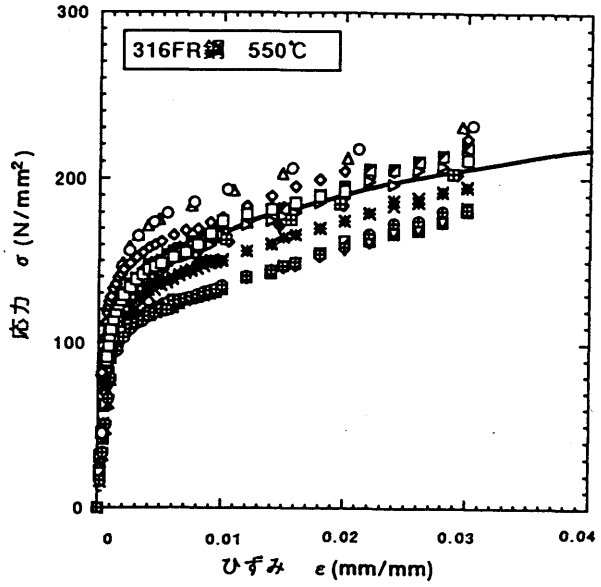
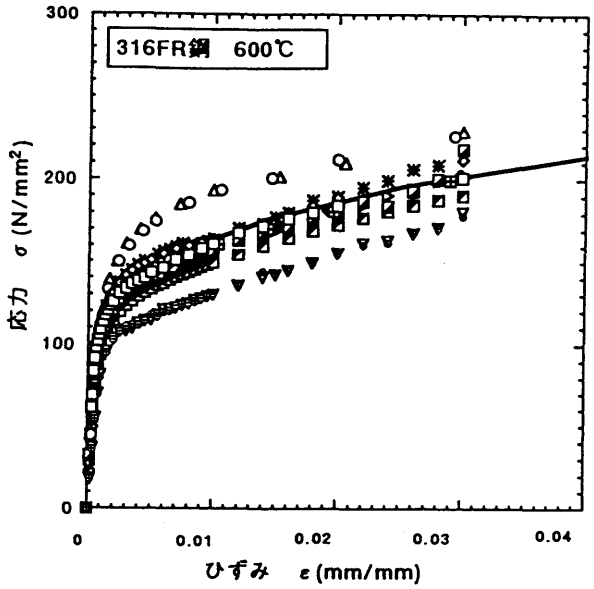


図 3.4.2-12　３１６ＦＲ鋼の弾塑性応力－ひずみ線図





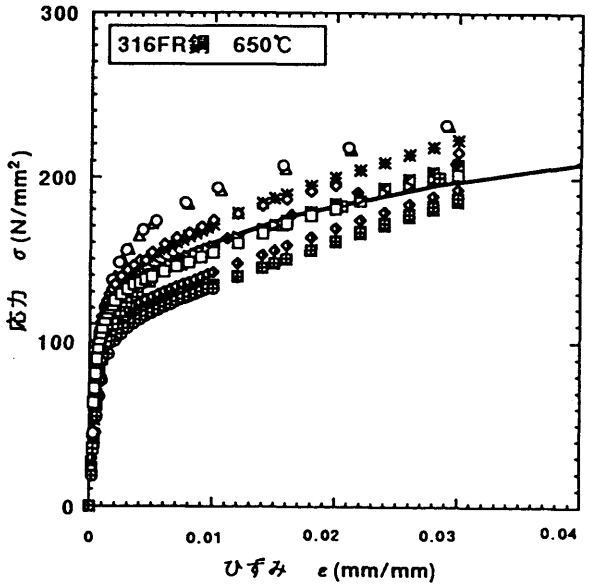
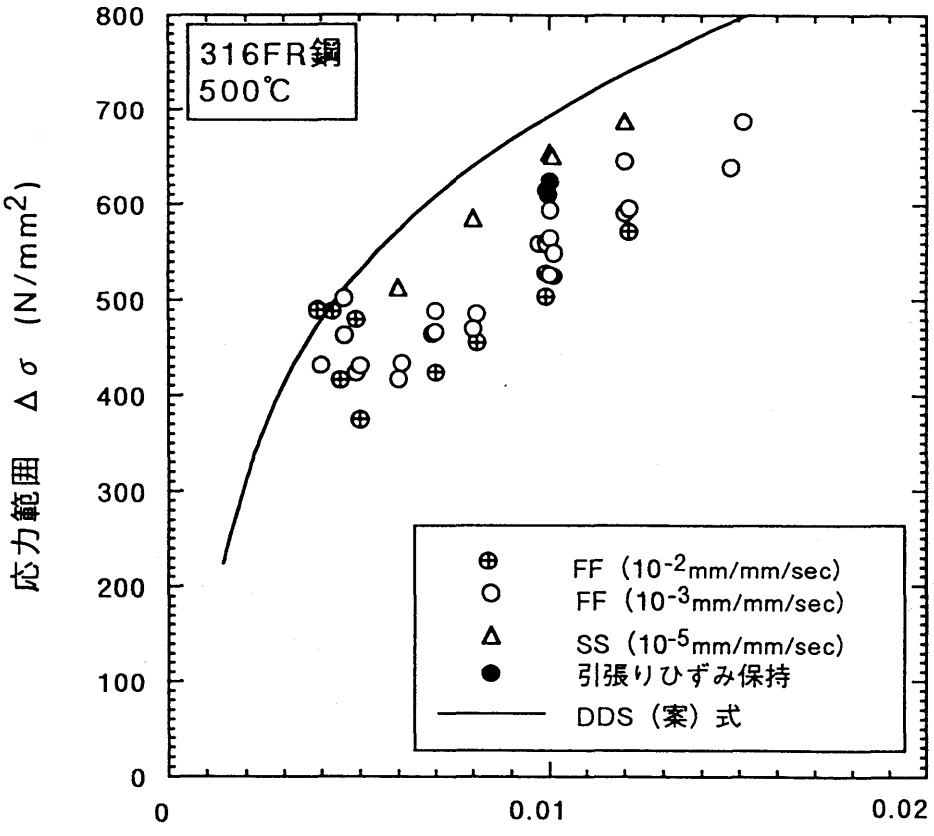
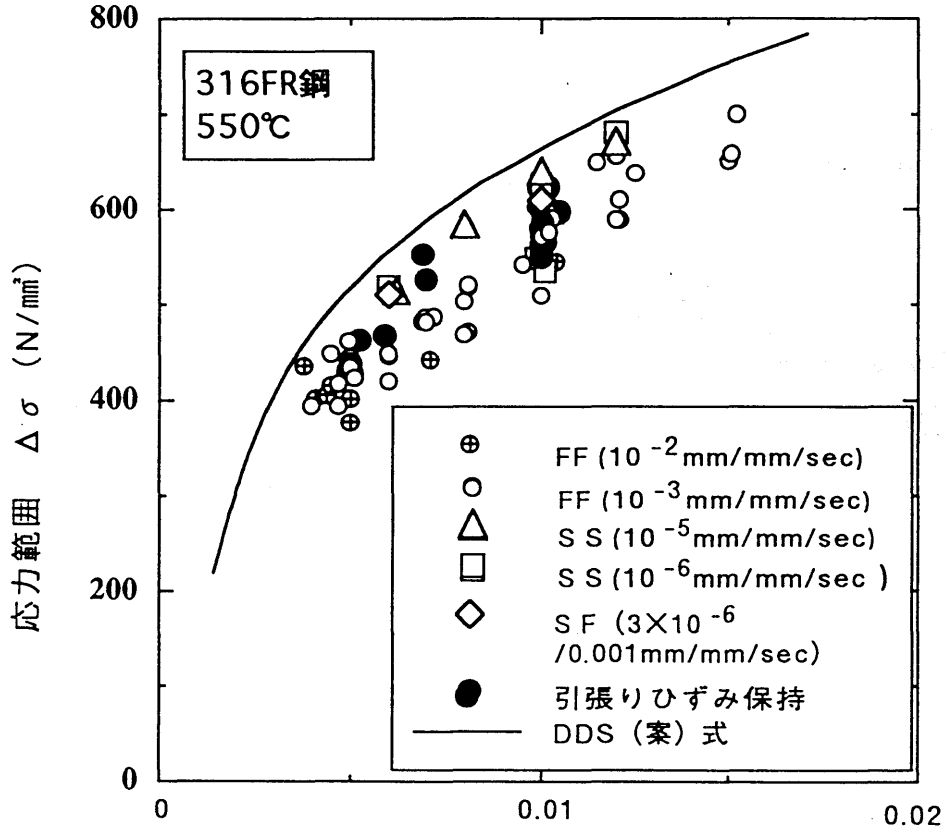


図 3.4.2-13　３１６ＦＲ鋼の弾塑性応力－ひずみ線図



(1) ５００℃



(2) ５５０℃

図 3.4.2-14　３１６ＦＲ鋼の動的応力－ひずみ線図

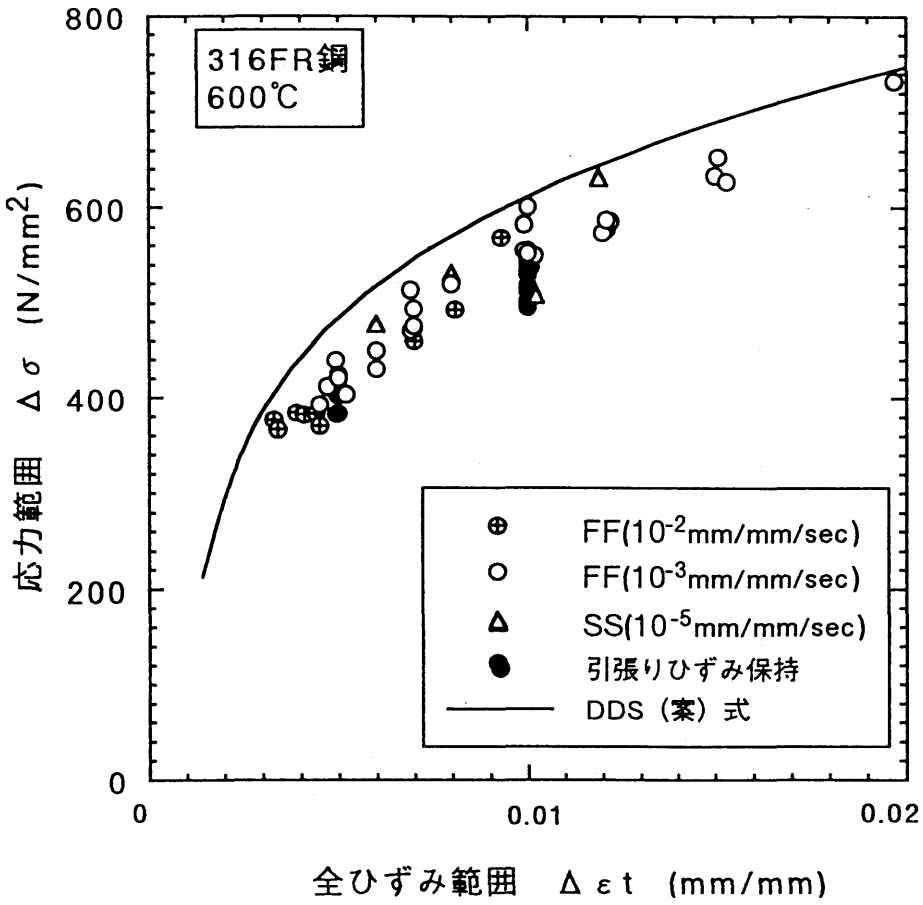


図3.4.2-15　３１６ＦＲ鋼の動的応力－ひずみ線図

3.5 クリープ疲労評価法

高速増殖実証炉の高温構造設計方針(以下，DDS；Demonstration Reactor Design Standardと略す)案で規定されている評価の流れを図3.5-1に示す。DDS（案）の中では，「ひずみの制限」と「クリープ疲労損傷の制限」が大きな部分を占めている。DDS（案）では基本的に弾性解析に基づく評価手順が示されており，弾性解析結果から評価部位の材料非弾性挙動を簡易的に予測する手順，非弾性挙動から損傷を予測するクライテリオンならびにそれらの予測に必要な材料強度データより構成されている。図3.5-1中には，各評価項目の中で使われている材料強度データと安全係数についてもまとめている。

疲労損傷はひずみ範囲に対して計算される。弾性解析結果から簡易的に材料の非弾性挙動を考慮し，非弾性ひずみ範囲を計算する手順の概念を図3.5-2に示す。本手法は公称ひずみε_0については弾性追従概念を，ひずみ集中についてはノイバー則を採用している。弾性解析より求まる(一次+二次)応力強さSnに対しポイント1が決まり，ポイント1から弾性追従線に沿ってポイント2が決定され，ポイント2からはノイバー則に従いポイント3，4，5が求められる。ポイント5が材料の非弾性挙動を考慮したひずみ範囲εとなり，このひずみ範囲を用いて疲労損傷が計算される。疲労損傷は，ある発生ひずみ範囲εiに対する許容繰返し数Nfとそのひずみの発生回数nの比$(n/Nf)i$を，全運転事象に対して計算されるひずみ範囲について累積和$\Sigma(n/Nf)i$をとることにより計算される。許容繰返し数Nfを予測するのに用いられる設計疲労線図は，3.2で述べたように各温度における疲労試験データを回帰し，図3.5-3に示すようにひずみ範囲で2倍，寿命で20倍の安全裕度を考慮したものである。さらにDDS（案）では疲労寿命におけるひずみ速度依存性を考慮し，A線図，B線図，C線図の3種類の設計疲労曲線を用意している。

クリープ損傷は図3.5-4に示すように，ノイバー則の線と弾完全塑性モデルの交点として求められるひずみ範囲ε(ポイント5)に対応する繰返し応力－ひずみ関係との交点(ポイント5')を初期応力とし，ピーク弾性追従係数qcに沿って応力緩和挙動が計算される。ここでは，クリープ強度に対して10倍の安全率を見ていることから(α_R=10)，その中で最もクリープ速度の遅い場合(ファクター1/3)を想定してクリープひずみに対するファクターはαc=3($\fallingdotseq 10\times 1/3$)としている。DDS（案）で考慮している応力緩和挙動の概念を図3.5-5に示す。クリープ損傷は基底応力Sgに対して計算されるD_{CN}と残留応力の緩和に伴うクリープ損傷D_{CR} ($=D_0^*+\Sigma n_k(D^*)$)の総和として計算される。クリ

ープ損傷の算出に用いられるクリープ破断強さの線図では図3.5-6に示すようにα_R=10の安全係数が考慮され，さらに追加安全係数として2.0の係数がかけられている。

クリープ疲労損傷は，疲労損傷 Df とクリープ損傷 Dc の線形和として計算され，図3.5-7に示す許容値の範囲内にあれば，設計を満足していると判断される。

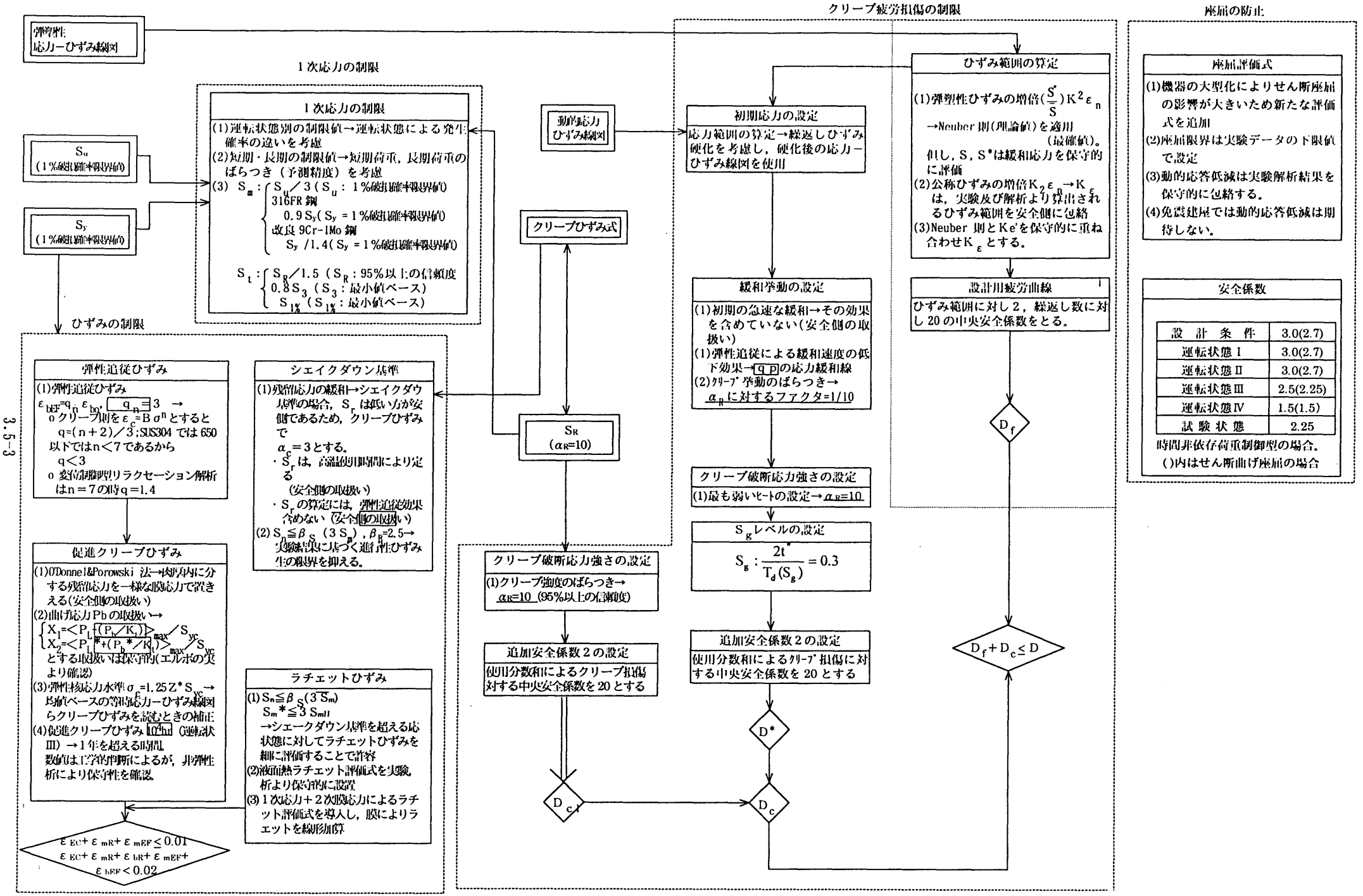


図3.5-1　H10年度版ＤＤＳ(案)における評価手法と安全裕度の総覧

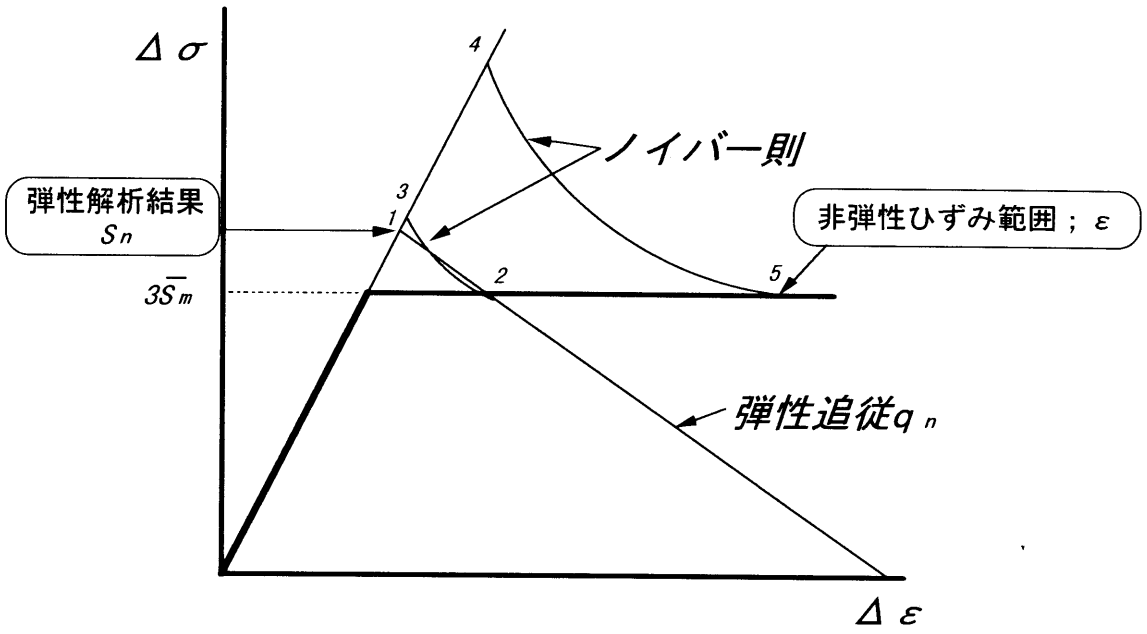
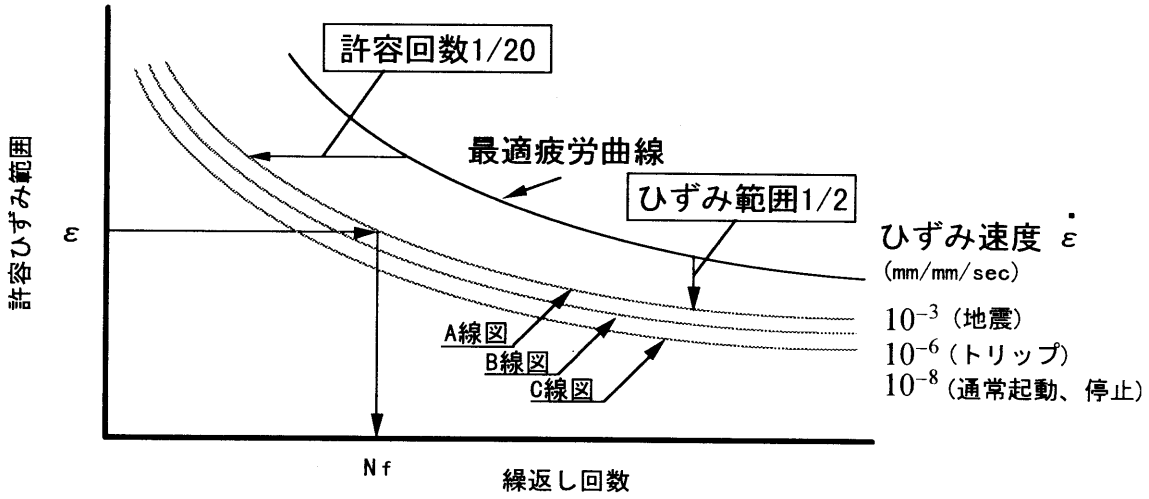


図 3.5-2　ひずみ範囲の算定手順



$D_f = \Sigma\ (n/N_f)$

n；想定される繰返し数
N_f；許容繰返し回数

図 3.5-3　累積疲労損傷の算定手順

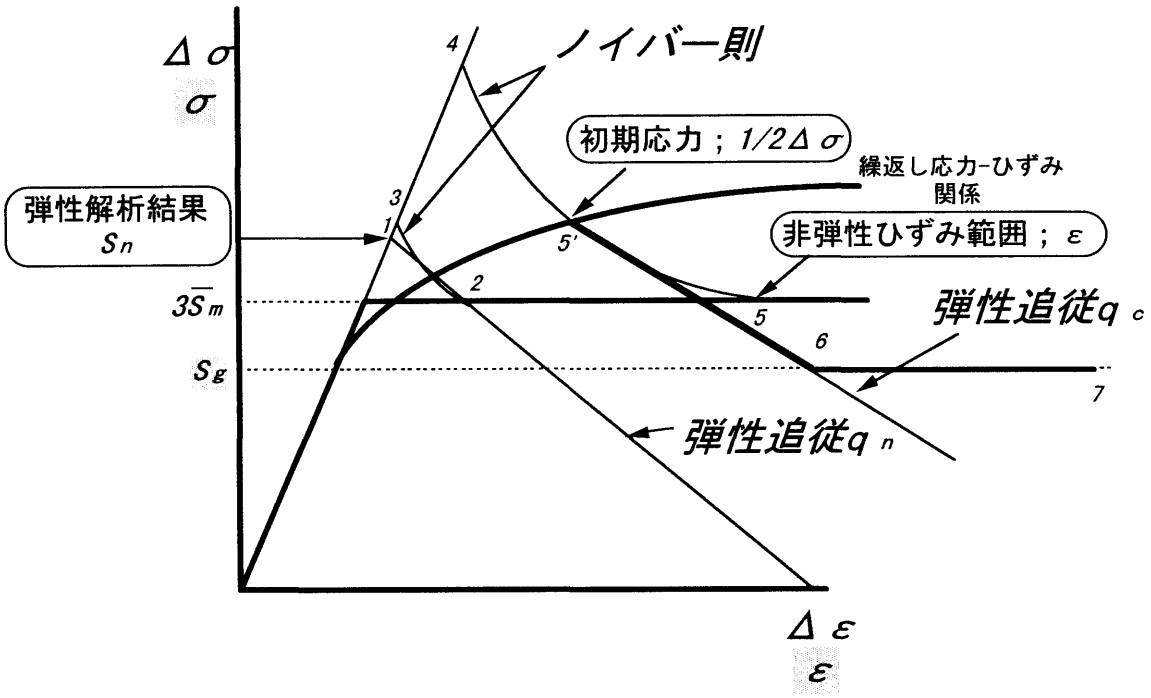


図 3.5-4　初期応力と緩和過程の算定手順

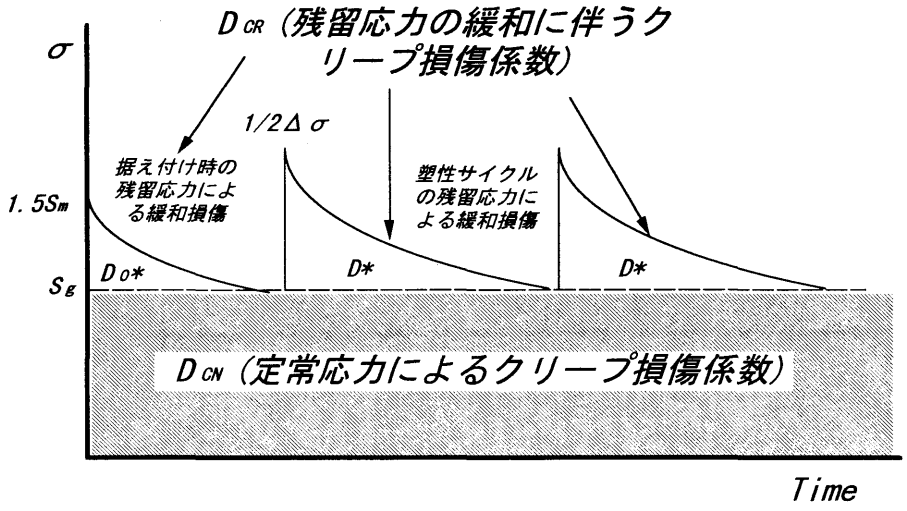
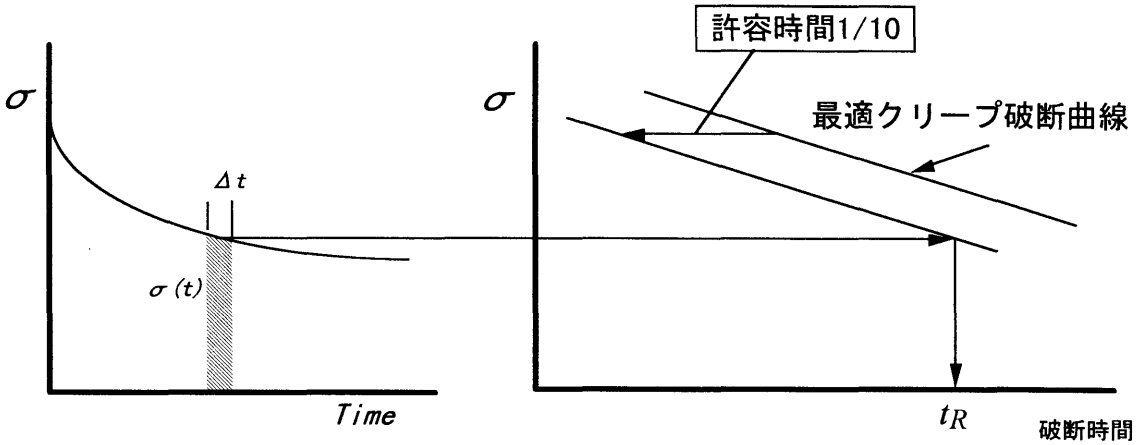


図 3.5-5　緩和過程とクリープ損傷



$$D_C = 2\int_0^{t_H} \frac{dt}{t_R\left(\sigma(t)\right)}$$

図 3.5-6　クリープ破断応力強さとクリープ損傷の算定手順

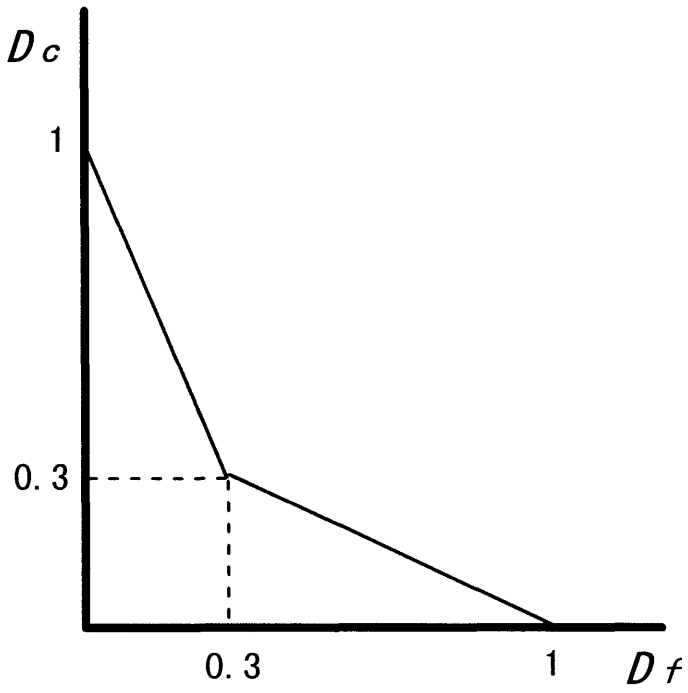


図 3.5-7　累積クリープ疲労損傷係数の制限値D

3.6　溶接継手強度評価法

DDS（案）で採用されている溶接継手強度評価法は，ＳＵＳ３０４鋼，３１６ＦＲ鋼ならびに改良９Ｃｒ－１Ｍｏ鋼に対して規定されている。

評価法は，母材のクリープ疲労評価をベースとし，図 3.6-1 に示す溶接金属の材料挙動を考慮し，修正を行ったものである。評価法は，これらの材料データをもとに構造物における溶接部の挙動を有限要素解析により求め策定されたものである。解析結果と評価法の考え方を表 3.6-1 にまとめてある。

3.6.1　３１６ＦＲ鋼に対する溶接継手強度評価法

３１６ＦＲ鋼については，実験結果に基づき実施された有限要素解析結果に基づき以下の評価法を策定した。

・溶接金属部は硬いため，溶接金属へのひずみ集中は生じない。また，近傍母材でのひずみ集中もわずかである。

但し，溶接金属の疲労寿命が母材に比べて短いため，疲労に関し強度低減係数 Kf＝1.4 を考慮することとする。

・溶接金属部は硬いため，クリープ緩和損傷評価の際，初期応力を 1.2 倍に割り増して評価する。

・溶接金属のクリープ速度は母材に比べて遅いため，クリープ緩和損傷を割り増して評価する。解析では特性の差を強調するため溶接金属のクリープ速度を母材の 1/10 に設定したが，実験結果の平均的傾向で約 1/3 である。評価では，解析・手続きを簡略化するためクリープ速度を変化させた解析は実施せず，D*を 3 倍することで対応する。

・解析にて，若干のひずみ集中，弾性追従の増加が見られるが，寿命評価に大きな影響を与えるほどではなく，弾性解析による評価の裕度の中で吸収できる程度である。

3.6.2　改良９Ｃｒ－１Ｍｏ鋼に対する溶接継手強度評価法

改良９Ｃｒ－１Ｍｏ鋼についても，実験結果に基づき実施された有限要素解析結果に基づき以下の評価法を策定した。

・溶接金属部は硬いため，溶接金属へのひずみ集中は生じない。また，近傍母材でのひずみ集中もわずかである。

但し，溶接金属の疲労寿命が母材に比べて短いため，疲労に関し強度低減係数 Kf=

1.3 を考慮する。

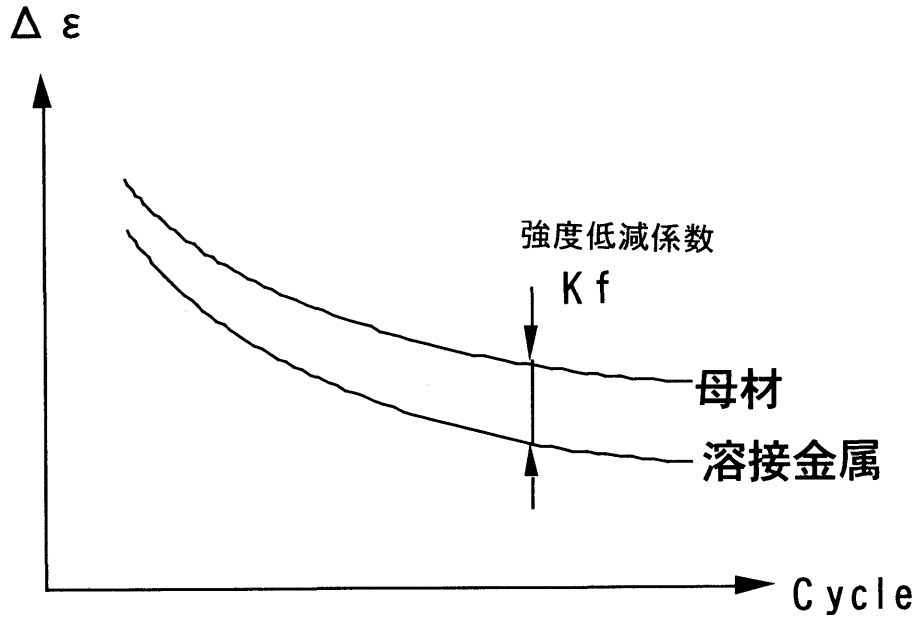
・溶接金属部は硬いため，クリープ緩和損傷評価の際，初期応力を 1.2 倍に割り増して評価する。

・解析にて，若干のひずみ集中，弾性追従の増加が見られるが，寿命評価に大きな影響を与えるほどではなく，弾性解析による評価の裕度の中で吸収できる程度である。

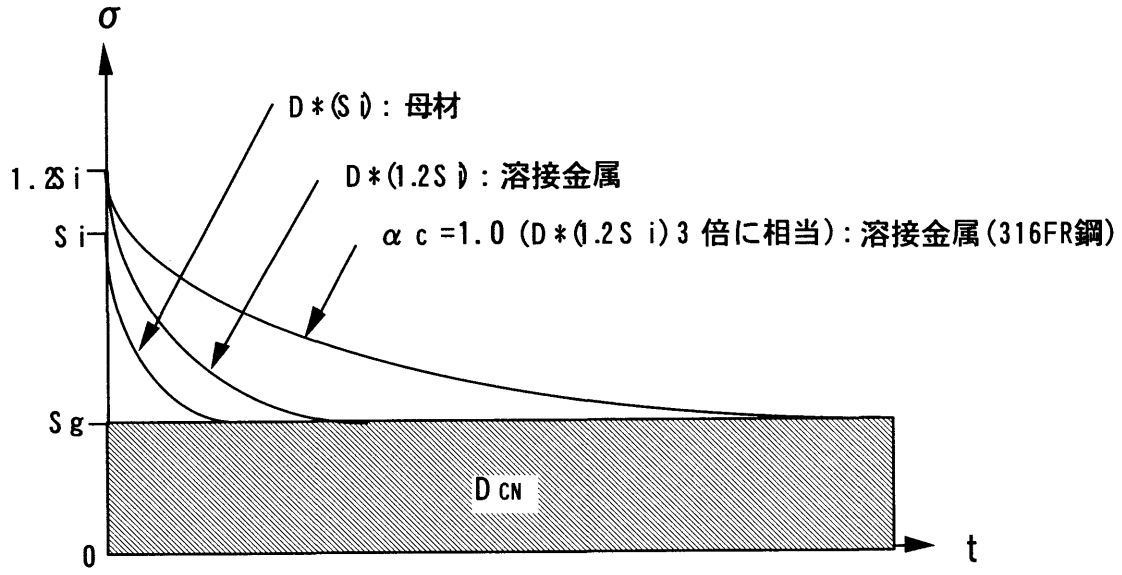
表 3.6－1　溶接部強度評価法の概要と解析に基づくひずみ挙動

材料	部位	評価法	解析結果
316FR 鋼	母材部	保守的な弾性追従係数の使用を前提とし、ひずみ集中、弾性追従の割増を陽に考慮しない(注)	ひずみの増加は高々5% 最大 10%程度弾性追従が増加
	溶接金属 母材硬化部	疲労：強度低減係数 Kf=1.4 クリープ：初期応力を 1.2 倍 D*を 3 倍	ひずみ集中、弾性追従の増加は無い クリープ緩和速度の低下により時間消耗則による損傷が増加
改良 9Cr－1Mo 鋼	母材	保守的な弾性追従係数の使用を前提とし、ひずみ集中、弾性追従の割増を陽に考慮しない(注)	ひずみの集中は殆ど無い
	溶接金属	疲労：強度低減係数 Kf=1.3 クリープ：初期応力を 1.2 倍	ひずみの集中は殆ど無い 最大 20%程度弾性追従が増加

(注)非弾性解析による評価を行う場合は、注意を要する。



(a)溶接継手の疲労損傷評価



(b)溶接継手の疲労損傷評価

図 3.6-1　溶接継手強度評価法の考え方