

## 解 説

UDC 539.434 : 620.172.251.2

# 金属材料技術研究所におけるクリープデータ シート作成の現状\*

横 井 信\*\*・池 田 定 雄\*\*  
伊 藤 弘\*\*・馬 場 栄 次\*\*

## Current Status of NRI Creep Data Sheet Project

Shin YOKOI, Sadao IKEDA, Hiroshi ITO, and Eiji BABA

### 1. はじめに

わが国で製造されている各種の高温用金属材料を対象に、高温短時間引張り、クリープ、およびクリープ破断試験などの材料試験を、中立的な立場で行い、機械的性質に関する基準的データを求め、かつ広く公表することによつて、これら材料の適正な使用と高温機器の安全性の確保に寄与することを目的に、金属材料技術研究所(以下、金材技研と略す)が、国産高温用金属材料のクリープデータシート作成に着手してから15年になる。この間、クリープデータシート作成業務は、日本鉄鋼協会・クリープ委員会〔委員長：田村今男(京大教授)〕および同委員会に属する金材技研クリープデータシート連絡分科会〔主査：田中良平(東工大教授)〕の積極的な支援のもとに進められており、後述のように、数多くの試験材料をサンプリングし、データシートも版を重ねるまでに至つた。

金材技研におけるクリープデータシートについては、既に紹介されているが<sup>1,2)</sup>、最近、数万時間のクリープ破断データを含む増補改訂版も10種類を数え、また溶接継手に関する試験にも着手したので、クリープデータシートの幅広い利用と内容への批判を仰ぎたく、現状を報告する。

### 2. 試験の種類と方法

クリープデータシート作成のために、化学分析、結晶粒度、硬さ、顕微鏡組織、室温および高温引張、ならびにクリープおよびクリープ破断などの各試験を行つている。これらの試験方法およびそのための温度管理、ならびにクリープ破断試験の手順について、以下簡単に述べる。

#### 2.1 化学分析

クリープデータシートの化学分析表には、原則として、各材料製造者から提出されたミルシートに記載されている製品分析値を転記している。同一仕様材で分析値に欠測値のある元素などに関しては、金材技研で行つた化学分析結果を記載している。

金材技研においては、各試験材料について、まず分光分析により微量成分の定性分析を行い、不純物元素の有無とおおよその量を確認したのち、高温性質に影響を及ぼすと思われる元素について定量分析を実施している。

#### 2.2 結晶粒度

結晶粒度測定方法は、鋼のオーステナイト結晶粒度試験方法(JIS G 0551)に基づいて実施している。結晶粒度現出方法は、オーステナイト系試験材料は固溶化熱処理法、フェライト系試験材料は酸化法で行い、温度、保持時間は試験材料のミルシートに記載された熱処理履歴に基づき決定している。

各視野の粒度判定には、接眼レンズに粒度板を使用し、視野数は最低20視野とし、各視野の判定結果から平均粒度番号を算出している。

#### 2.3 硬 さ

硬さの測定方法は、ロックウェル硬さ試験方法(JIS Z 2245)により実施している。ロックウェルCおよびB硬さのいずれを用いるかは、試験材料の種類や熱処理履歴などを考慮して決定している。硬さ測定用試料は、原則としてクリープ試験片の平行部に相当する部分から採取し、測定面は試験荷重方向に垂直な面である。測定回数は、試料1個につき5点とし、その平均値を表示している。

#### 2.4 顕微鏡組織

各試験材料の組織観察は、材料受入れ時に光学顕微鏡により実施している。試料の採取位置などは硬さの場合

\* 昭和54年7月2日受付(Received July 2, 1979)(依頼解説)

\*\* 金属材料技術研究所(National Research Institute for Metals, 2-3-12 Nakameguro Meguro-ku 153)

と同様で、検鏡面は試験荷重方向に平行な面である。

写真撮影は、100, 200, および 400 倍で行っている。データシートには、増補改訂版から、原則として1種類の試験材料につき、製造者ごとに1チャージを選び、100 および 400 倍の組織写真を掲載している。

2.5 室温および高温引張試験

鉄鋼材料の高温引張試験方法 (JIS G 0567) に基づいて試験を実施している。試験片は、後述のクリープ試験片と同一形状寸法の試験片群のなかから無作為に抽出している。標点間のひずみ速度は、室温、高温とも、約1%の伸びを生ずるまで 0.3%/min, その後破断に至るまでは 7.5%/min である。

試験温度範囲は、室温からクリープ破断試験の最高温度、またはそれより 50°C 高い温度までで、温度間隔はクリープ破断試験温度範囲は 50°C, その他は 100°C である。

2.6 クリープおよびクリープ破断試験

金属材料の引張クリープ試験方法 (JIS Z 2271) および金属材料の引張クリープ破断試験方法 (JIS Z 2272) に基づいて試験を実施している。試験片の寸法は、平行部直径 6 または 10 mm で、標点距離は直径の 5 倍である。

表 1 クリープデータシート作成に使用しているクリープ試験機の機種と台数

形式	荷重容量 (kgf)	最高温度 (°C)	台数	試験片本数
単式	5 000	800	9	9
	3 000	800	134	134
	3 000	1 000	26	26
	1 500	800	176	176
	1 500	1 050	33	33
	750	800	48	48
	750	1 050	18	18
	300	1 100	69	69
単式小計			513	513
複式 18本吊	1 500	800	124	2 232
合計			637	2 745

表 2 クリープ試験温度制御範囲の目標値

試験温度 (°C)	温度制御範囲の目標値		JIS 許容範囲 (°C)
	(μV)	(°C)	
450 以下 451~600	±15 ±16	±1.4 ±1.4	±3
601~640 641~800	±22 ±24	±1.9 ±2.0	±4
801~870 871~1 070 1 071 以上	±36 ±39 ±42	±2.9 ±2.9 ±3.1	±6 ただし 1 000°C 以下

平行部表面はペーパー仕上げで、その粗さはおおよそ  $H_{max}=0.4\sim0.5\ \mu m$ ,  $H_{rms}=0.08\sim0.12\ \mu m$  である。試験片はその軸方向が、板、棒、管については圧延方向または軸方向と、ロータやディスクにおいては半径方向と一致するように採取している。

使用しているクリープ試験機の機種と台数は、特殊なものを除き、表 1 に示すとおりであり、荷重精度は  $\pm 0.5\%$  以内である。

試験片の温度変動は、自動制御と温度設定目盛の修正により表 2 に示す温度制御範囲の目標値、すなわち、JIS の規定値の 1/2 に抑えている。

クリープ伸びの測定には、つば付試験片を用い、それに取付けた伸び計でダイヤルゲージ (JIS 合格品) の指示値を読み取る方式である。目標試験時間が 3 万時間以内の場合は最小目盛 0.01 mm のダイヤルゲージを、それ以上の長時間試験には 0.001 mm のものを使用している。

2.7 温度管理

2.7.1 標準のトレーサビリティ (traceability)

クリープ試験温度の管理に使用する標準白金熱電対 (PR10, PR13) のトレーサビリティは、図 1 に示す経路を経て国家標準につながっている。

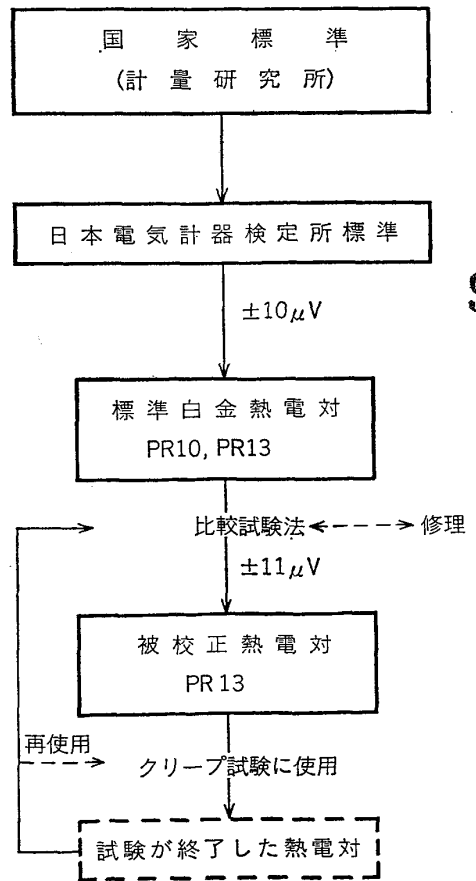


図 1. 標準のトレーサビリティ

93

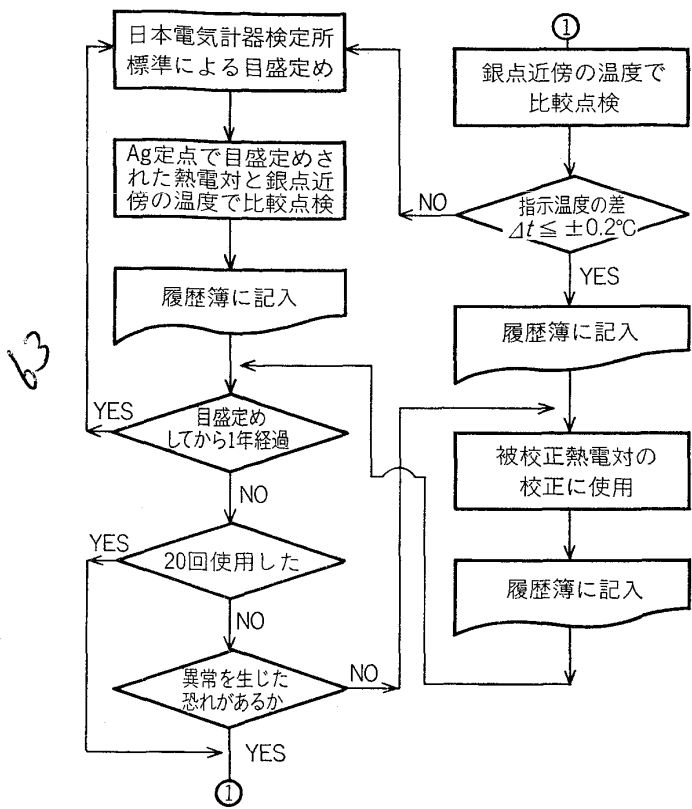


図 2. 標準熱電対の管理図

2.7.2 標準熱電対の管理

標準熱電対は図 2<sup>3)</sup> に示すような管理図に基づいて管理している。

2.7.3 熱電対の性能

標準の熱電対 (PR10, PR13) およびクリープ試験に使用する熱電対 (PR13, 以下使用熱電対と略す) の品質および特性は、1968 年国際実用温度目盛<sup>4)</sup> (以下 IPTS-68 と略す) および JIS<sup>5)</sup> を十分に満足し、使用熱電対においては、熱起電力の許容差を JIS<sup>5)</sup> の約 1/2 に押えている。

2.7.4 校正装置およびクリープ試験温度の測定装置

校正装置は、単式クリープ試験機の加熱炉と同一形式の比較校正炉と JIS<sup>6)</sup> A 級測定方式に規定された測定機器により構成されている。

クリープ試験温度は、1日2回、クリープ試験温度監視装置により、測定、記録し、それ以外は常時温度記録計で記録している。

これら装置の結線方式と測定機器の公称精度を図 3 に示す。

2.7.5 校正方法

適当な前処理を施した熱電対を、日本電気計器検定所に依頼し、 $\pm 10 \mu V$  の精度で  $100^\circ C$  から  $50^\circ C$  さまに  $1100^\circ C$  まで目盛りづけたものを標準とし、ほぼ  $\pm 1^\circ C$  の精度で比較法により、 $0.05^\circ C/2 \text{ min}$  の安定した状態で、使用熱電対の校正を行つている。標準および測

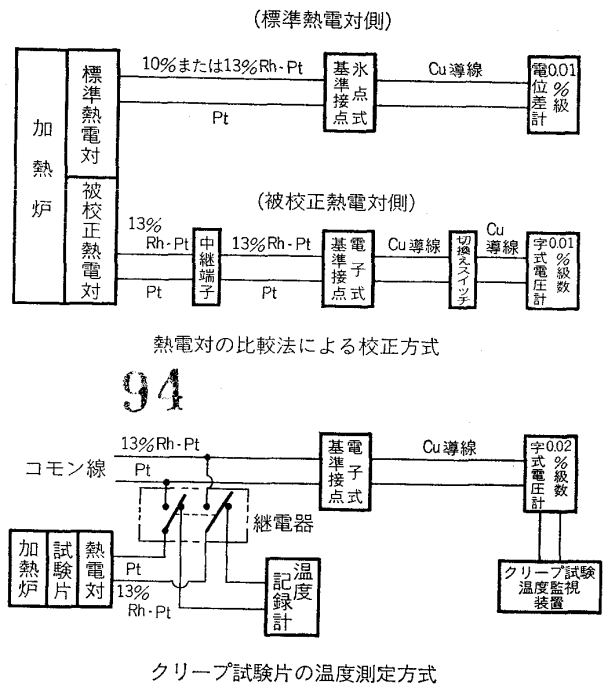


図 3. 校正および測定装置

表 3 標準および測定機器の校正周期とその精度

	測定範囲	校正周期	校正精度
標準熱電対	$0 \sim 1100^\circ C$	1年または経時変化が $0.2^\circ C$ を超えたとき	$\pm 10 \mu V$
標準電池 (エアバス入り)	1.01817V (約 $30^\circ C$ )	1年	$\pm 10 \mu V$
電位差計	10mV	1年	$\pm 2 \mu V$
数字式電圧計	10mV	1年	$\pm 1.2 \mu V$ 以内
数字式電圧計	10mV	1年	$\pm 1.6 \mu V$ 以内

[備考] 標準熱電対、標準電池、電位差計の校正は日本電気計器検定所に、数字式電圧計は各製造者に依頼している。

定機器の校正周期とその精度を表 3 に示す。

なお、現在有効な温度目盛は IPTS-68 であるが、この目盛りに改訂される前に試験に着手した試験材料の試験に使用する熱電対については、IPTS-48 (60 年修正版) 目盛りを使用し、トレーサビリティに一貫性をもたせている。

2.8 クリープ破断試験の手順

クリープデータシートを作成するための試験の手順などについては、英国規格<sup>7)</sup> を参考に、前記の金材技研クリープデータシート連絡分科会で検討し、クリープ委員会で承認されたクリープデータシート作成作業暫定方案に準拠している。

最長試験時間は、米国機械学会 (ASME) のボイラ・圧力容器コードに規定されている許容応力値の算出根拠<sup>8)</sup> に基づいて、火力や原子力発電設備に関係する材料

は 10 万時間を目標としたが、化学工業やガスタービン関係は 3 万時間を超えるデータを得ることを一応の目標とした。そして当初は、前記暫定方案に基づき、1 種類の材料について各製造者からそれぞれ 3 チャージずつサンプリングした試験材料に対し、100, 300, 1000, および 3000 時間目標の試験をそれぞれ行つた後、同一製造者の 3 チャージのうちの 2 チャージについて 1 万および 3 万時間目標の試験を行い、次にそのうちの 1 チャージについて 5~10 万時間目標の試験を行うことにしていた。しかし、クリープ破断性質はばらつきが大きく、しかも 1 万時間を超えるあたりから特徴的な挙動を示す

場合もあるので、実際には、原則として、すべての試験材料について各最長目標時間までの試験を行つている。

クリープ伸びの測定は、単式試験機による 3000 時間以上を目標とした試験のときに行つている。さらに、10 万時間で 1% のクリープひずみを生ずる応力を求めるために、数種の材料について、1 種類につき 1 チャージを選択して行つている。

なお、クリープおよびクリープ破断試験の温度は、試験材料が実際に使用される場合に、最も問題になると思われる温度を含む範囲で、50°C または 100°C 間隔に 3 から 5 水準としている。

表 4 試験材料

材 料 名	主 要 成 分	用 途	製造者数	チャージ数	採取年度
板 材					
SB49	0.25~0.30C	ボイラ・圧力容器	3	8	41
SBV1B	1.3Mn-0.5Mo	ボイラ・圧力容器	2	5	41
SPV50	(60キロ級高張力鋼)	圧力容器	6	21	44~46
SCMV 2-NT	1Cr-0.5Mo	圧力容器・反応容器	5	8	47~49
SCMV 3-NT	1.25Cr-0.5Mo-Si	圧力容器・反応容器	5	14	44~46
SCMV 4-NT	2.25Cr-1Mo	圧力容器・反応容器	3	7	42
ASTM A542	2.25Cr-1Mo	圧力容器・反応容器	4	9	47, 48
SUS 304-HP	18Cr-8Ni	原子炉構造材	2	7	49, 50, 53
SUS 316-HP	18Cr-12Ni-Mo	反応容器	1	2	42
管 材					
STB 42	0.2C	ボイラ・熱交換器	3	9	41
STBA 12	0.5Mo	ボイラ・熱交換器	4	12	42
STBA 20	0.5Cr-0.5Mo	ボイラ・熱交換器	3	9	44
STBA 22	1Cr-0.5Mo	ボイラ・熱交換器	4	11	41
STBA 23	1.25Cr-0.5Mo-Si	ボイラ・熱交換器	4	10	41
STBA 24	2.25Cr-1Mo	ボイラ・熱交換器	4	12	41
STBA 25	5Cr-0.5Mo	ボイラ・熱交換器	3	9	42
STBA 26	9Cr-1Mo	ボイラ・熱交換器	4	11	43
SUS 304 HTB	18Cr-8Ni	ボイラ・熱交換器	3	9	41
SUS 321 HTB	18Cr-12Ni-Ti	ボイラ・熱交換器	3	9	41
SUS 316 HTB	18Cr-12Ni-Mo	ボイラ・熱交換器	3	9	41
SUS 347 HTB	18Cr-12Ni-Nb	ボイラ・熱交換器	3	9	46
鍛 圧 材					
ASTM A470-8	1Cr-1Mo-0.25V	タービンロータ	4	11	41
SUS 403-B	12Cr-0.1C-low Si	タービンプレード	3	9	42
SUH 616	12Cr-1Mo-1W-0.3V	タービンプレード	3	9	41
SUS 316-B	18Cr-12Ni-Mo	高温用棒	3	6	42
鑄 造 品					
ASTM A447 II (HH)	25Cr-12Ni	高温用鑄鋼品	5	5	47~49
SCH 22-CF (HK40)	25Cr-20Ni-0.4C	石油化学工業用遠鑄管	7	14	42
ACI HP	25Cr-35Ni	化学工業用鑄鋼管	6	7	47~49
ASTM A356-9	1Cr-1Mo-0.25V	タービンケーシング	3	9	44, 45
耐熱合金					
A286	15Cr-26Ni-Mo-Ti-Al-V-bal Fe	ガスタービン用ディスク	3	3	43
NCF 2TB (Incoloy 800)	21Cr-32Ni-Ti-Al-bal Fe	化学工業用管	2	6	44
NCF 2P (Incoloy 800)	21Cr-32Ni-Ti-Al-bal Fe	化学工業用板	2	6	44, 45
S 590	20Cr-20Ni-20Co-Mo-W-Nb-bal Fe	ガスタービン用ブレード	3	3	43
N155 (鍛造)	21Cr-20Ni-20Co-Mo-W-Nb-bal Fe	ガスタービン用ブレード	3	3	46
N155 (精鑄)	21Cr-20Ni-20Co-Mo-W-Nb-bal Fe	ガスタービン用ブレード	3	6	46
Inconel 700	15Cr-29Co-Mo-Ti-Al-bal Ni	ガスタービン用ブレード	2	2	43
Inconel 713C	12Cr-Mo-Nb-Ti-Al-Zr-B-bal Ni	ガスタービン用ブレード	4	8	43
U500	18Cr-17Co-4Mo-Ti-Al-Fe-B-bal Ni	ガスタービン用ブレード	3	3	46
U500 (鍛造)	18Cr-17Co-4Mo-Ti-Al-Fe-B-bal Ni	ガスタービン用ブレード	3	6	46
X45 (精鑄)	25Cr-10Ni-8W-Fe-bal Co	ガスタービン用ブレード	2	4	43
溶接継手					
SUS 304HP	18Cr-8Ni	原子炉構造材	5*	17**	50, 53
計 (41種類)			141	337	

\* 溶接施工者数, \*\* 溶接条件

### 3. 試 験 材 料

#### 3.1 試験材料のサンプリング

クリープデータシート作成のために、表4に示す41種類、337チャージの試験材料を、延べ141社の材料製造者からサンプリングして、試験を行つている。これらの試験材料は、表5および6に示すような選択基準および手続きによりサンプリングした。なお、これらの試験材料の製造者および溶接施工者は表7に示すとおりである。

#### 3.2 溶接継手

溶接構造物においては、溶接継手の高温機械的性質が重要であることはいままでもない。しかし溶接継手のクリープ破断強さは、図4<sup>9)</sup>に示すように、溶接施工条件によつて大きく影響される。したがつて、少なくとも標準的な溶接施工方法が確立されていけばよいが、現状ではそのようなものがないので、基準的で普遍性のあるデータを求めるデータシートに、溶接継手を取入れにくかつた。しかし最近、IIW (International Institute of Welding) でも溶接継手のクリープ(破断)性質を問題にしており<sup>10)</sup>、また高速増殖炉や高温ガス炉、あるいは

表 5 試験材料の選択基準

1. 国産材料であること
2. 原則として市販材のこと
3. 2社以上で製造されていること (特定の特許材でないこと)
4. 製造実績のあること
5. 事業用火力発電, 原子力発電, 化学工業, 石油化学工業, ガスタービンなどの高温装置・機器用材料として, 一般に使用されている標準的な材料(規格材)のこと
6. 近い将来使用され, かつ重要と思われる材料であること (開発途中の材料は除く)

表 6 試験材料のサンプリングの手続き

クリープ委員会・金材技研クリープデータシート連絡分科会において

1. 新たに試験すべき材料の検討
  2. アンケートなどによる調査
  3. 材料製造者と使用者を交えた審議
  4. 試験候補材料(試験条件, 材料製造者, 材料仕様なども含む)の希望決定
  5. 金材技研に対し新しい試験材料の要望
- 金材技研において,
6. 試験材料の検討・決定
  7. 試験材料の仕様決定  
(この間, 上記分科会, 材料製造者と打合せ)
  8. 発注
  9. サンプリング(試験材料の購入)

表 7 試験材料の製造者および溶接施工者

石川島播磨重工業(株)	川崎重工業(株)
川崎製鉄(株)	久保田鉄工(株)
(株)栗本鉄工所	(株)神戸製鋼所
(株)小松製作所	新日本製鉄(株)
住友金属工業(株)	大同製鋼(株)*
太平金属工業(株)	大平洋金属(株)
特殊製鋼(株)*	日本金属工業(株)
日本鋼管(株)	日本高級金属(株)
日本ステンレス(株)	(株)日本製鋼所
日本特殊鋼(株)*	日本冶金工業(株)
日立金属(株)	(株)日立製作所
富士製鉄(株)**	三菱金属(株)
三菱重工業(株)	三菱製鋼(株)
八幡製鉄(株)**	

\* 現 大同特殊鋼(株)  
\*\* 現 新日本製鉄(株)

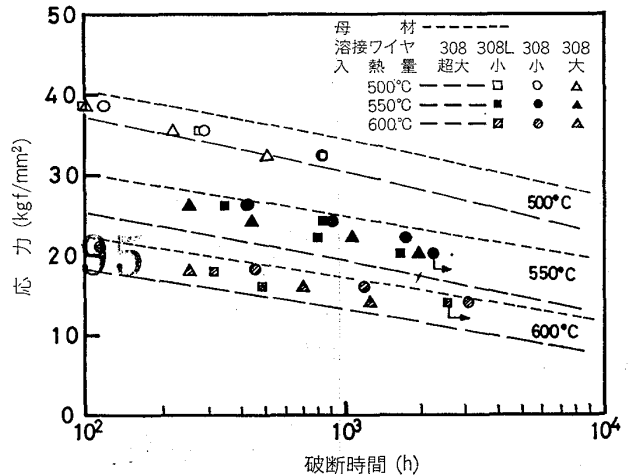


図 4. SUS 304 溶接継手のクリープ破断強さ

石炭の液化やガス化<sup>11)</sup>などの将来を考えたとき、溶接継手は重要な位置を占めると思われるので、最も標準的な材料ということで、SUS 304 HP を母材とする溶接継手の試験に、1975年から着手した。この試験計画(溶接条件)は表8に示すとおりである。

#### 3.3 試験材料の種類と JIS 材料規格との関係

今までにサンプリングした試験材料を JIS に規定されている高温用材料との対比で見ると、発電用火力技術基準や圧力容器の構造 (JIS B 8243) の設計許容引張応力表に記載されクリープ領域のデータが必要な材料は、28 規格, 152 種類に対し、該当する本試験材料は 22 種類, すなわち 14.5% にしかすぎない。

### 4. 試験の進行状況

#### 4.1 試験材料

クリープ破断試験の進行状況を表9に示す。試験の進行に差があるのは、試験材料をサンプリングした年度、

表 8 SUS 304 鋼のサブマージアーク溶接条件

計画 画	母材	施工会社	溶接材料		溶接条件		
			ワイヤ フラックス	径 (mm) 粒度 (メッシュ)	開先形状	パス数	入熱量 (kJ/cm)
第 1 期	0.07% C 19% Cr 9% Ni 原板寸法 (mm) 厚さ: 25 長さ: 3000 幅: 1524	4 社	Y 308 系 高塩基性溶融型	(4.0) (48×250)	U	16	28.2
			Y 308 塩基性焼結型	(4.0) (12×65)		15	25.1
						14	26.0
第 2 期	0.05% C 19% Cr 9% Ni 原板寸法 (mm) 厚さ: 23 長さ: 6730 幅: 2000	1 社	Y 308 系 塩基性焼結型	(4.0) (12×65)	U	11 10 10	20.2 26.4 33.1
					X	13 10 9	20.2 26.4 33.3
			Y 308 系 高塩基性焼結型	(4.0) (12×100)	U	13 10 8	20.2 26.4 33.3
					X	15 11 9	20.2 26.4 33.2
			Y 308 塩基性焼結型	(4.0) (12×65)	U	10	26.4

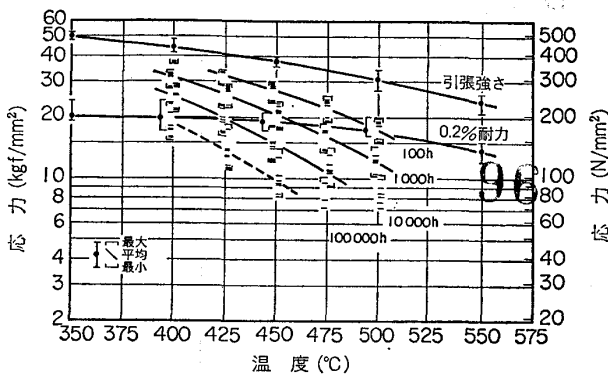


図 5. STB 42 の 0.2% 耐力, 引張強さ, および Orr-Sherby-Dorn パラメータ法で求めたクリープ破断強さ

長時間試験応力の設定の難易さ, 使用可能な試験機 (試験温度と荷重容量) の数による制約などのためである。

10 万時間破断目標の試験に初めて着手したのは管材 6 鋼種 (STBA 22, 23, 24, および SUS 304, 321, 316 HTB) を対象に, 金材技研創立 13 周年記念日の 1969 年 7 月 1 日であり, 既に 10 年 (87 648 h) を経過する。これらの試験材料のうち, 一部のチャージについては, 7~8 万時間で破断したものも多い。予測が大きはずれたものについては, 長時間試験応力を適宜に見直して, 試験の追加や中止をしている。

なお, 試験材料についての製品分析, 硬さ, オーステ

ナイト結晶粒度, および引張試験は, 一部を除いてすべて完了している。受入材に対する光学顕微鏡による組織検査は一応済んでいるが, 電子顕微鏡による組織観察は, クリープ破断後の試験片に対する系統的な調査も含め, 今後データシートの一部として発表していく予定である。

#### 4.2 溶接継手

SUS 304 HP を母材とする溶接継手に関する試験のうち, 第 1 期計画については, すでに 1 万時間目標の試験に着手している。第 2 期計画は, 所定の溶接施工を完了し, これから試験片の切出しと加工を行う段階である。

### 5. 試験データ

#### 5.1 金材技研クリープデータシートの内容と送付先

サンプリングした各試験材料について行つた試験の結果は, 材料の種類ごとに表と図にまとめ, 金材技研クリープデータシート (英文) として随時発表している。その共通的な内容は, 表 1 に試験材料の製造履歴の詳細 (溶解炉, 鋼塊重量, 脱酸条件, 製品形状, 寸法, 製造法と熱処理履歴, オーステナイト結晶粒度, および硬さ), 表 2 に化学分析値, 表 3 と図 1 に引張性質を見開きで, 表 4 にクリープ破断性質, 図 2 に破断時間と応力, 図 3 に破断時間と伸びおよび絞りの関係をそれぞれ示している。なお, 増補改訂版 (材料の種類の違いを示す各巻番

表 9 クリープ破断試験進行状況

材 料 名	試 験 温 度 (°C)	試料準備	100~	10,000~	50,000~	データシート発刊 No. (年)
			10,000 h	50,000 h	100,000 h	
板材						
SB49	400 450	○	○	△	△	17(1975)
SBV 1B	450 500	○	○	○	△	18(1975)
SPV 50	400 450 500	○	○	△	—	25(1978)
SCMV 2-NT	450 500 550 600	○	△	—	—	
SCMV 3-NT	500 550 600	○	○	△	△	21(1976)
SCMV 4-NT 450	500 550 600	○	○	○	△	11(1974)
ASTM A542	450 500 550 600	○	△	—	—	
SUS 304-HP	450 500 550 600 650	○	△	—	—	
SUS 316-HP	600 700 750 800	○	○	△	—	14(1974)
管材						
STB 42	400 450	○	○	○	△	7A(1979)
STBA 12	450 500	○	○	○	△	8A(1979)
STBA 20	450 500 550	○	○	△	△	20(1976)
STBA 22	500 550 600	○	○	○	△	1A(1976)
STBA 23	500 550 600	○	○	○	△	2A(1976)
STBA 24	500 550 600	○	○	○	△	3A(1976)
STBA 25	500 550 600	○	○	○	△	12(1974)
STBA 26	550 600 650	○	○	△	△	19(1975)
SUS 304 HTB	600 650 700	○	○	○	△	4A(1978)
SUS 321 HTB	600 650 700	○	○	○	△	5A(1978)
SUS 316 HTB	600 650 700	○	○	○	△	6A(1978)
SUS 347 HTB	600 650 700	○	○	△	△	28(1979予定)
鍛圧材						
ASTM A470-8	500 550 600	○	○	○	△	9A(1979)
SUS 403-B	450 500 550	○	○	○	△	13A(1980予定)
SUH 616	500 550 600	○	○	○	△	10A(1979)
SUS 316-B	600 700 750 800	○	○	△	—	15(1974)
鑄造品						
ASTM A447 II (HH)	700 800 900	○	△	—	—	
SCH 22-CF (HK40)	800 900 1,000	○	○	○	—	16A(1980予定)
ACI HP	900 1,000 1,100	○	△	—	—	
ASTM A356-9	450 500 550	○	○	△	△	
耐熱合金						
A286	550 600 650	○	○	△	—	22(1977)
NCF 2TB(Incoloy 800)	600 700 800 900 1,000	○	△	△	△	26(1978)
NCF 2P (Incoloy 800)	600 700 800 900 1,000	○	△	△	△	27(1978)
S 590	650 700 750	○	○	△	—	23(1977)
N155 (鍛造)	550 650 750	○	△	—	—	
N155 (精鑄)	550 650 750	○	△	—	—	
Inconel 700	700 750 800	○	○	△	—	24(1977)
Inconel 713C	850 900 950	○	○	△	—	29(1979予定)
U500 (鍛造)	700 800 900	○	△	—	—	
U500 (精鑄)	700 800 900	○	△	—	—	
X45	750 800 850 900	○	△	△	—	30(1979予定)
溶接継手						
SUS 304-HP	450 500 550 600 650	○, △	△	—	—	

注：○完了，△進行中

号の数字のあとに、第1回改訂版にはAを付けている。)では、表5に10万時間破断応力の推定値、図4に耐力、引張強さ、および100、1000、10000、100000時間の破断強さを応力と温度の関係で示すとともに、図5に100および400倍の光学顕微鏡組織写真を掲載している。

これらのデータシートは、金属材料の高温特性に関する情報との交換を原則的な条件に、国内約160ヶ所、国外約180ヶ所(32ヶ国)の大学、研究機関、および関連企業などに送付している。

## 5.2 試験データ

データシートとして既に発表した27種類の材料に関するデータの数量を表10に示す。引張りとクリープ破断試験片の合計は6288本、延破断時間は3570年間になる。特に、3万~7万時間のデータを含む増補改訂版のNo.1A~No.10Aは、長時間データの多いことを反映して1本当たりの平均破断時間は10894時間である。

クリープデータシートとして発表したこれら試験材料のクリープ破断性質などについては、既に依田によつて紹介されている<sup>12)</sup>ので、ここでは増補改訂を行つた10種類の材料についてのデータの一例を示すに止める。増

表 10 クリープデータシートに記載されている試験片本数と試験時間

データシート No.	材 料 名	チャージ数	高温引張試験		クリープ破断試験		
			温度水準	試験片本数 (本)	温度水準	試験片本数 (本)	延試験時間 (×10 <sup>3</sup> h)
1A	1Cr-0.5Mo (T)	11	10	110	4	213	1,912
2A	1.25Cr-0.5Mo-Si (T)	10	10	100	4	197	1,476
3A	2.25Cr-1Mo (T)	12	10	120	4	217	1,946
4A	18Cr-8Ni (T)	9	11	99	4	192	2,543
5A	18Cr-8Ni-Ti (T)	9	11	99	4	193	2,235
6A	18Cr-12Ni-Mo (T)	9	11	99	4	208	2,704
7A	0.2C (T)	9	9	81	3	143	1,580
8A	0.5Mo (T)	12	9	108	3	182	2,067
9A	1Cr-1Mo-0.25V (F)	9	10	90	4	182	2,217
10A	12Cr-1Mo-1W-0.3V (B)	9	10	90	4	215	2,476
11	2.25Cr-1Mo (P)	6	10	60	4	106	675
12	5Cr-0.5Mo (T)	9	11	99	4	159	975
13	12Cr (B)	9	9	81	4	170	930
14	18Cr-12Ni-Mo (P)	2	10	20	4	36	192
15	18Cr-12Ni-Mo (B)	6	10	60	4	111	510
16	25Cr-20Ni-0.4C (CT)	14	6	84	5	194	751
17	0.3C (P)	8	9	72	3	90	581
18	1.3Mn-0.5Mo (P)	5	10	50	3	61	265
19	9Cr-1Mo (T)	11	10	110	4	227	1,035
20	0.5Cr-0.5Mo (T)	9	9	81	4	147	623
21	1.25Cr-0.5Mo-Si (P)	13	10	130	4	214	1,002
22	A 286 (D)	2	11	22	4	45	256
23	S 590 (B)	3	12	36	4	65	336
24	Inconel 700 (B)	2	12	24	4	41	152
25	60キロ級高張力鋼 (P)	21	10	210	4	279	1,449
26	Incoloy 800 (T)	6	11	66	4	68	165
27	Incoloy 800 (P)	6	11	66	3	66	234
計		231	—	2,267	—	4,021	31,287 (3,570年間)

注: T: 管, F: 鍛造品, B: 棒, P: 板, D: ディスク, CT: 製造管

補改訂版では先に述べたように、10万時間を含む各時間における破断強さの推定\* を行っている。それを結果の一例として図5~14に示す。これらの図から、炭素鋼、Mo鋼、Cr-Mo鋼、Cr-Mo-V鋼、12Cr系鋼、18-8系鋼と材料が変わるに従い、温度に対する各時間強さはもちろん、曲線の形状や温度依存性などが、耐力や引張強さとの関連も含め、微妙に変わっていくことがわかる。

さらに、推定した10万時間破断強さと規定の許容応力値とを比較すると、図15および16に示すように、これらの試験材料が、現行の安全率(10万時間クリープ破断強さの平均値に対し1.67, 最小値に対し1.25)を満足しない場合のあることがわかる。

また近く増補改訂を予定しているHK40についての

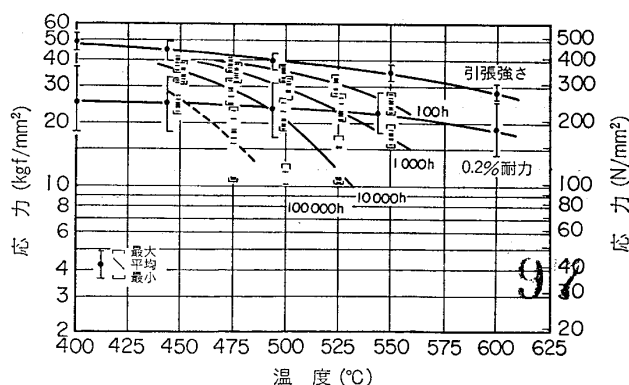


図 6. STBA 12 の 0.2% 耐力, 引張強さ, および Manson-Haferd パラメータ法で求めたクリープ破断強さ

Larson-Miller 法による整理結果を図 17 に示す。この図から高温長時間側で、ESTRUCH ら<sup>13)</sup> は実際よりも強めを推定していたことがわかる。

## 6. 金材技研クリープデータシートの利用と問題点

### 6.1 熱処理条件

試験材料は、耐熱合金の精密鑄造材などを除き、すべ

\* 推定に用いた外挿法の各式および回帰式は、次のとおりである(詳細は文献 24)~26) を参照されたい)。

$$\begin{aligned} \text{Larson-Miller} &: P = (T + 273.15) (C + \log t) \\ \text{Orr-Sherby-Dorn} &: P = \log t - Q / 2.303R (T + 273.15) \\ \text{Manson-Haferd} &: P = (\log t - \log t_a) / \{(T + 273.15) - T_a\} \\ \text{Manson-Brown} &: P = (\log t - \log t_a) / \{(T + 273.15) - T_a\}^r \\ \text{回帰式} &: P = b_0 + b_1 \log \sigma + b_2 \log \sigma^2 + \dots + b_k \log \sigma^k \end{aligned}$$

ここに、  
t: 破断時間 (h), T: 温度 (°C),  $\sigma$ : 応力 (kgf/mm<sup>2</sup>),  
C, Q,  $t_a$ ,  $T_a$ , r: 最適パラメータ定数, R: ガス定数,  
 $b_0, b_1, b_2, \dots, b_k$ : 回帰係数, k: 回帰次数。



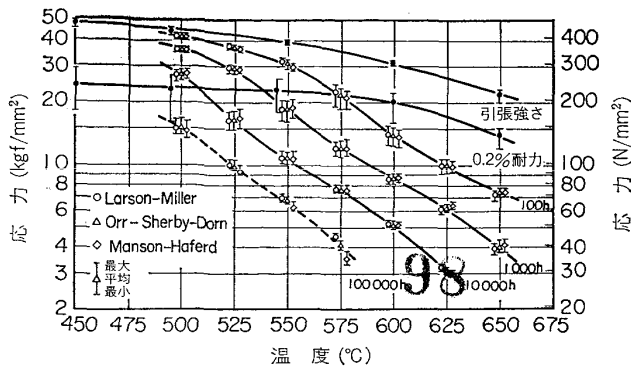


図 7. STBA 22 の 0.2% 耐力, 引張強さ, および各パラメータ法で求めたクリープ破断強さ

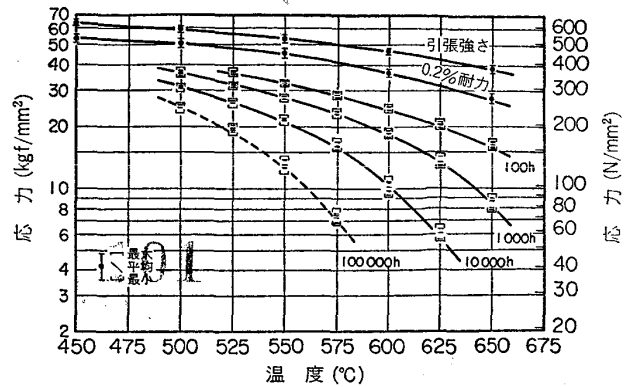


図 10. 1Cr-1Mo-0.25V 鋼 (タービンロータ材) の 0.2% 耐力, 引張強さ, および Manson-Haferd パラメータ法で求めたクリープ破断強さ

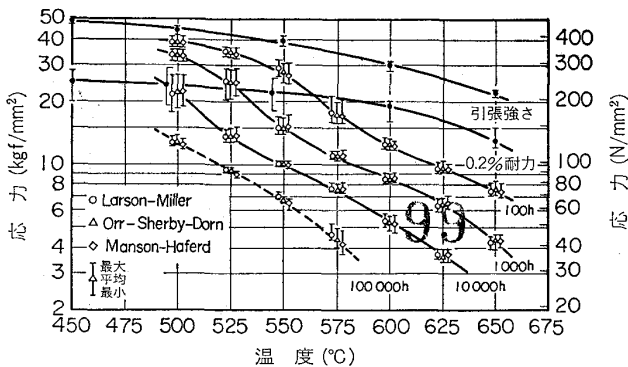


図 8. STBA 23 の 0.2% 耐力, 引張強さ, および各パラメータ法で求めたクリープ破断強さ

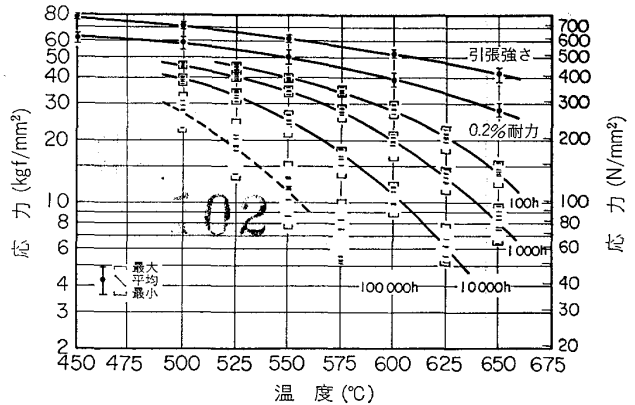


図 11. 12Cr-1Mo-1W-0.3V 鋼 の 0.2% 耐力, 引張強さ, および Manson-Brown パラメータ法で求めたクリープ破断強さ

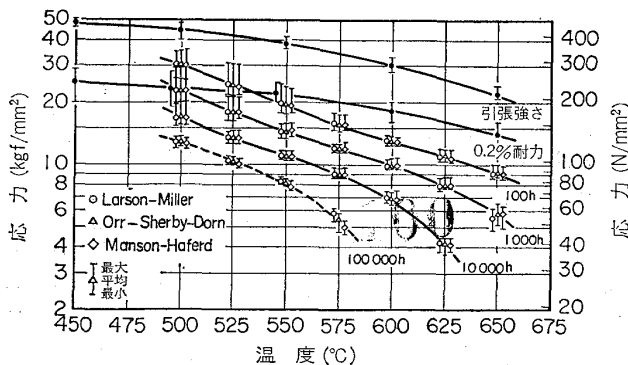


図 9. STBA 24 の 0.2% 耐力, 引張強さ, および各パラメータ法で求めたクリープ破断強さ

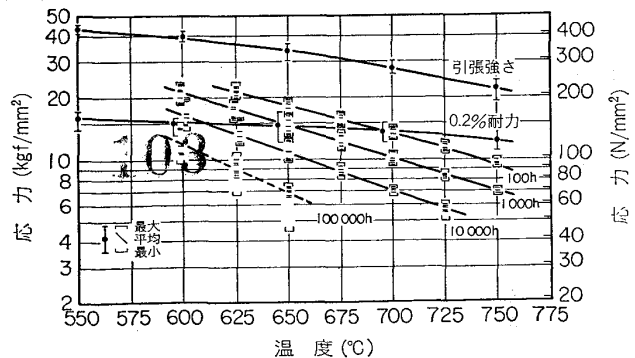


図 12. SUS 304 HTB の 0.2% 耐力, 引張強さ, および Manson-Brown パラメータ法で求めたクリープ破断強さ

て実機に使用予定の管, 板, 棒などの中から無作為に抽出, またはロータやディスクなどの実体から切り出すことを原則としているので, 各試験で求めたデータは, 実機で使用されている材料の性質を代表するものと確信している. したがって, これらの試験データから, 設計に必要な許容応力値を算出, または見直すことは極めて有意なことであり, このクリープデータシート作成の最大の目的の一つがそこにあることはいうまでもない. しかし, これらの試験データを, 製造履歴との関連で調べる場合, 特に熱処理条件との関係を求める場合, 問題を生ずる. というのは, 数値的に表示された熱処理条件

は, ミルシートに記載された製造工程上の管理目標値のようなものが多く, 実験的に管理され, かつ測定されたものでないからである. そのことは, 熱処理条件と結晶粒度や硬さなどの関係における矛盾からも推察される.

6.2 不純物の影響

クリープ性質は, 周知のように組織敏感な性質である

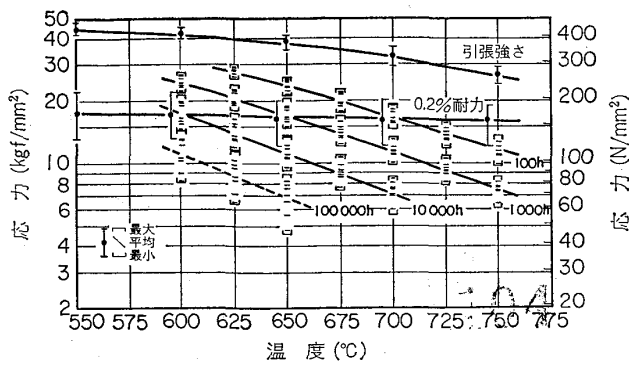


図 13. SUS 321 HTB の 0.2% 耐力, 引張強さ, および Manson-Brown パラメータ法で求めたクリープ破断強さ

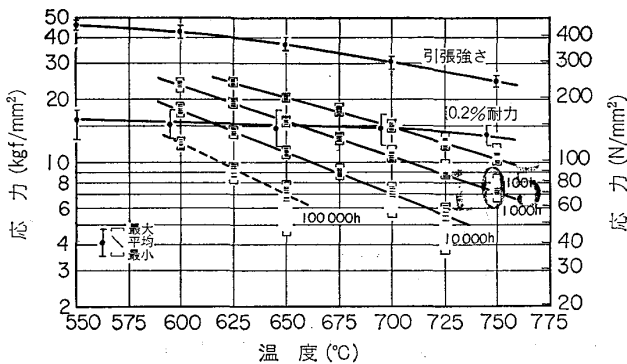


図 14. SUS 316 HTB の 0.2% 耐力, 引張強さ, および Manson-Brown パラメータ法で求めたクリープ破断強さ

から, 熱処理や成分に大きく影響される. しかし, 材料規格 (JIS) において, 不純物の制限規定は皆無に等しい. そのためか, 本試験材料の場合も, 同一規格材と称しながら, 微量元素の有無やその含有量が大きく異なっているものがあつた. そのため, 試験データもチャージ間で大きなばらつきを示していた. したがつて, これらの試験データを使つて, 各材料のクリープ破断強さを評価する場合には, 熱処理条件はもちろんのこと, 脱酸条件や不純物 (例えば, 炭素鋼における Mo や 18-8 鋼における Ti, Nb, および B など) の区分をして評価する必要がある.

一方, 最近の設計思想の特徴は, 強さ制限のみでなく, ひずみ制限を考慮するようになったことである. その意味からは, 延性を評価する上に必要な情報として, 今後は, As, Ce, Sn, Sb, Te, Tl, Pb, Bi および O などの微量元素<sup>7)14)15)</sup> の分析値も必要かもしれない.

### 6.3 強さの評価方法

耐力や引張強さについては, 材料にもよるが, 室温はもちろんのこと, 高温のデータもクリープに比べればはるかに多い. これらの評価方法を大別すると, (1) 室温の強さで基準化した傾向曲線による方法<sup>16)17)</sup>, (2) 温度の関数として回帰により求める方法, (3) 温度ごとに

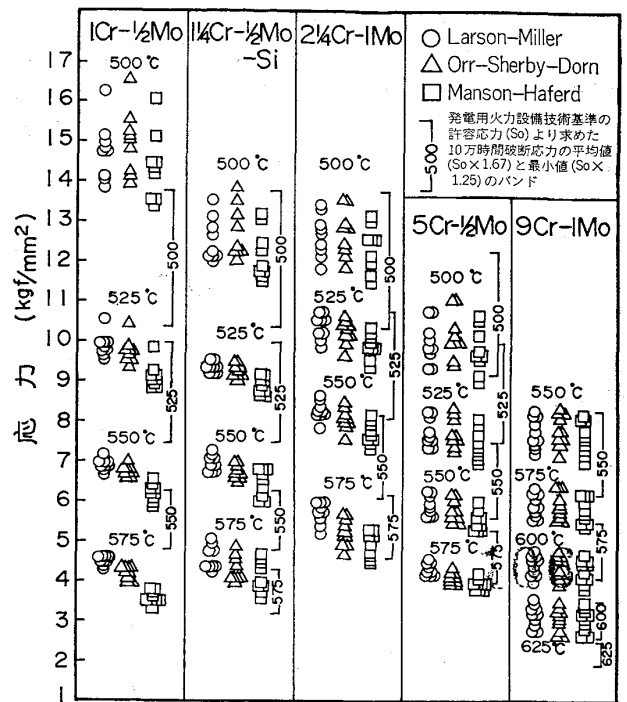


図 15. Cr-Mo 鋼の各パラメータ法で求めた 10 万時間破断応力と許容応力との比較

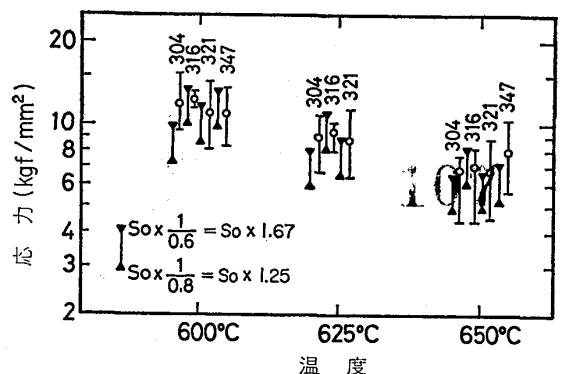


図 16. 18-8 系鋼の 10 万時間破断応力の推定値 (最大, 平均, 最小値) と許容応力 ( $S_0$ ) との比較

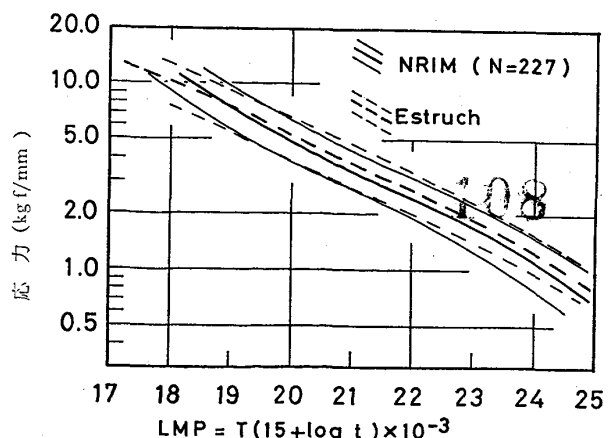


図 17. HK 40 のクリープ破断強さ

室温の強さの関数として回帰により求める方法<sup>17)18)</sup>となる。そして具体的な数値も規定<sup>19)</sup>、または提案<sup>20)</sup>され、解説<sup>21)</sup>もあり、国際的比較<sup>22)</sup>もなされている。わが国でも、降伏強さ値“ $S_y$ ”と引張強さ値“ $S_u$ ”の数値を発電用原子力技術基準<sup>23)</sup>に規定するために、本データシートをはじめとする国内データの整理解析をもとに日本鉄鋼協会とステンレス協会からそれぞれ提出された原案について、日本電気協会ならびに通商産業省で検討が進められているとのことである。

なお、データシートに記載した引張データのうち、室温の規定値をわずかにはずれているものもあるが、これは、室温の引張試験を高温の試験方法に準拠して行ったことと、試験片の採取位置や形状によるため、納入時の素材に対する試験データは、すべて規格値を満足しているものである。

さて一方、クリープ強さやクリープ破断強さについては、有効な長時間データが少なく、かつそれぞれの時間に対する強さは、試験データからなんらかの方法で推定しなければ求まらない数値である。金材技研クリープデータシートでは、前述のように各時間強さの推定を、既に報告<sup>24)~26)</sup>した手順に基づいて、Larson-Miller<sup>27)</sup>、Orr-Sherby-Dorn<sup>28)</sup>、Manson-Hafner<sup>29)</sup>、およびManson-Brown<sup>30)</sup>の各パラメータ法で行っており、データの区分けや重み付けなどの処理は施していない。一つのチャージについての同一試験データでも、外挿の方法や計算の方法で違った推定値を与えるが、何を基準にして、どの数値を採用するかは、利用者の判断に委ねている。

材料の強さとしては、現状では同一の規格に属するデータの量や質の異なるチャージを一つの母集団として評価しなければならず、チャージ数やデータ数の少ない上に、ばらつきが比較的大きいので評価上問題も多いと思う。しかし、ISO (International Organization for Standardization) では、既に各国からそれぞれ1万および10万時間の平均破断強さ値が提案され、ISO規格に取り入れるべく審議<sup>17)31)</sup>が進められている段階である。この基礎になる試験データとしては、アメリカはMPC (Metal Properties Council)<sup>32)</sup>、イギリスはBSCC (British Steelmakers Creep Committee)<sup>33)</sup>、西ドイツはVDEh (Verein Deutscher Eisenhüttenleute)<sup>34)</sup>、フランスはIRSID (Institut de Recherches de la Sidérurgie Française)<sup>35)</sup>からそれぞれ出されているデータ集が、大きく寄与しているものと思う。わが国としても、これらの動きに積極的に、組織的に対処していく必要がある。

## 7. おわりに

クリープデータシートの作成業務に関連して、データの整理法<sup>24)~26)</sup>、破断性質のばらつき要因<sup>36)~38)</sup>、クリープ試験前後の硬さや組織変化<sup>39)~41)</sup>、およびクリープ損傷<sup>42)</sup>などの研究も進めているが、ここでは最も主要な

研究試験業務であるクリープデータシート作成に絞って現状を報告した。

このプロジェクトのために、1964年から1968年にかけて、約14億円の国家予算が建物などの施設や試験設備として投入され、以降、若干の変動があつたが、現在、直接経費として、年間約1700万円の試験費と約500万kWhの電力を使用し、日々、約30名の室員が従事している。これらのことを考えると、このクリープデータシートが可能な限り最大限に活用されることを願わずにはいられない。多くの利用者にとできるだけ役立つデータを取得し、提供していく心積もりである。

おわりに、このクリープデータシート作成業務に対し、常に、ご支援、ご指導いただいているクリープ委員会金材技研クリープデータシート連絡分科会の田中良平主査ならびに各委員に厚くお礼申し上げるとともに、この報告の機会を与您とくださった編集委員会に深く感謝いたします。

## 文 献

- 1) T. KAWADA: Proc. of the 1971 International Conf. on Mechanical Behavior of Materials, III (1972), p. 142
- 2) 横井 信: 材料, 22 (1973) 234, p. 188
- 3) 横井 信: 計量管理, 22 (1973) 1, p. 14
- 4) 計量研究所監修: 1968年国際実用温度目盛, (1971), [コロナ社]
- 5) JIS C 1 602: 熱電対
- 6) JIS Z 8 704: 温度の電氣的測定方法
- 7) British Standard: Procedures for Obtaining Properties of Steel at Elevated Temperatures, B. S. 3228, Part 2 and 3, (1960)
- 8) ASME: Boiler and Pressure Vessel Code, Sec. I, (1977), p. 195
- 9) 金属材料技術研究所, 動力炉・核燃料開発事業団: 高速実験炉構造材料のクリープ試験に関する研究, N241, 72-44 (1972)
- 10) IIW, Commission IX-Working Group "Creep": DOC IX-Creep-79/78, (1978)
- 11) WELDING RESEARCH COUNCIL: Bulletin 241, (1978), p. 30
- 12) 依田連平: 鉄と鋼, 65 (1979) 7, p. 725
- 13) B. ESTRUCH and C. LYTH: Materials Technology in Steam Reforming Processes, ed. by C. EDELEANU, (1966), p. 29 [Pergamon Press]
- 14) H. R. TIPLER: Conf. on Residuals, Additives, and Materials Properties, by Royal Society, National Physical Laboratory, and Metals Society, (1978)
- 15) G. B. THOMAS and T. B. GIBBONS: Metals Technol., 6 (1979) 3, p. 95
- 16) G. V. SMITH: Reports of Current Work on Behavior of Materials at Elevated

- Temperatures, ed. by A. O. SCHAEFER, Publication G 87, (1974), p. 157 [ASME]
- 17)-1 International Standard: ISO 2605/ I and II-1976 (E).
- 17)-2 ISO/TC 17/SC 18: 181 E (1977)
- 18) R. F. JOHNSON, J. GLEN, M. J. MAY, H. G. THURSTON, and B. H. ROSE: High-Temperature Properties of Steels, ISI P 97 (1967), p. 62
- 19) ASME: Boiler and Pressure Vessel Code, Sec. III, Div. 1, Appendix I, (1977), p. 35 and p. 53
- 20) ISO/TC 17/SC 4: N808 E (1979)
- 21) 横井 信: 圧力技術, 15 (1977) 5, p. 232
- 22)-1 V. K. SIKKA and M. K. BOOKER: J. Pressure Vessel Technol., Trans. ASME, 99 (1977), p. 298
- 22)-2 C. R. BRINKMAN, V. K. SIKKA, and R. T. KING: Nuclear Technol., 33 (1977), p. 76
- 23) 通商産業省: 発電用原子力設備に関する構造等の技術基準を定める告示, 告示第 501 号, (1970)
- 24) 河田和美, 横井 信, 田中千秋, 門馬義雄, 新谷紀雄: 鉄と鋼, 56 (1970), p. 1034
- 25) 門馬義雄, 池田定雄, 馬場栄次, 宮崎昭光, 森下弘, 横井 信: 学振耐熱金属材料第 123 委研究報告, 18 (1977) 2, p. 149
- 26) 横井 信, 門馬義雄: 鉄と鋼, 65 (1979) 7, p. 831
- 27) F. R. LARSON and J. MILLER: Trans. ASME, 74 (1952), p. 765
- 28) R. L. ORR, O. D. SHERBY, and J. E. DORN: Trans. ASM, 46 (1954), p. 113
- 29) S. S. MANSON and A. M. HAFERD: NACA, TN 2890, (1953)
- 30) S. S. MANSON and W. F. BROWN, Jr.: Proc. ASTM, 53 (1953), p. 693
- 31) ISO/DATA 1-1978 (E), Summary of Average Stress Rupture Properties of Wrought Steels for Boilers and Pressure Vessels, (1978)
- 32) ASTM Data Series, 例えば DS5, DS6 など
- 33) BSCC High-Temperature Data, (1973), [Iron and Steel Institute]
- 34) Ergebnisse deutscher Zeitstandversuche Langer Dauer, (1969), [VDEh]
- 35) 文献 22)-1 より, Results of High-Temperature Creep Tests in French Steels, (1972), [IRSID]
- 36) 横井 信, 新谷紀雄, 郡 宗幸, 田中秀雄: 材料, 25, (1976) 270, p. 249
- 37) 横井 信, 新谷紀雄, 郡 宗幸: 材料, 26 (1977) 282, p. 241
- 38) 横井 信, 新谷紀雄, 田中秀雄: 学振耐熱金属材料第 123 委研究報告, 15 (1974) 2. p. 113
- 39) 横井 信, 田中千秋, 門馬義雄, 伊藤 弘: 鉄と鋼, 53 (1967) 11, p. 1245
- 40) N. SHIN-YA, S. YOKOI, and Y. MONMA: Proc. of the 1971 International Conf. on Mechanical Behavior of Materials, III (1972), p. 87
- 41) Y. MONMA, S. YOKOI, and N. SHIN-YA: Proc. of the 1971 International Conf. on Mechanical Behavior of Materials, III (1972), p. 105
- 42) N. SHIN-YA and S. R. KEOWN: Metal Sci., 13 (1979) 2, p. 89