

## 技 術 資 料

### 鋼のクリープとその試験法

芥 川 武\*

#### CREEP AND CREEP TESTING OF STEELS

*Takeshi Akutagawa Dr. Eng.*

##### Synopsis:

The author reviewed the present situation of the creep testing and the knowledge about creep characteristics of steels. At first, the author stated that among the so-called the first, the second, and the third stages of creep, the second one or the steady state creep would show an inflection period from the transient creep to the accelerating period. Several long term creep test results showed this idea to be true. In the past days, short time creep testing had been mostly carried out in Japan, there were, however, many reasons to prefer the long term test, and the Japan Society for the Mechanical Engineers and the Japan Society of Testing Materials are now going to specify the procedures for conducting the long period, high sensitivity creep test and creep rupture test. Several precautions in regard to testing machines, loading apparatus, selection of the extensometer and the temperature control equipment were resumed.

Applications of the creep data for the engineering design had been introduced by several authors, among the so-called mechanical equation of state advocated by Hollomon and Lubahn, the master rupture curve of Larson and Miller and their related literatures were introduced in some details. In conclusion, the author cited important problems to be solved theoretically or experimentally in relation to the creep of steels.

#### I. クリープ曲線

金属（又は或種の非金属）を高温度で引張ると、室温の引張試験を行つた場合に比べて著しいちがいが認められる。それは加える荷重が一定であつても伸びが時間の経過と共に変化すること、引張り速度が十分に小さい場合は結晶粒界に沿つてぜい性破断を生じ、伸びが少いこと等である。Fig. 1. は典型的な例で、横軸に荷重を開始してから時間の経過、縦軸にその時間までに生じた塑性伸びを示す。（弾性伸びは除外してある。）この様に変形量が時間の函数である現象、即ちクリープを起す最低温度は金属によつてそれぞれ異なつてゐる。大よその見当としては融点（絶対温度）の1/3 附近の温度がこれに当る。例えば鉛は約  $-70^{\circ}\text{C}$ 、アルミニウムは  $40^{\circ}\text{C}$ 、銅は  $180^{\circ}\text{C}$ 、鉄は  $330^{\circ}\text{C}$  を超えるとクリープ現象がその機械的性質を論ずるのに重要な問題となるのである。

さて Fig. 1. のクリープ曲線について通例荷重開始から破断までの全過程が次の4段階に分けられる。即ち

1. 荷重開始直後の伸び。これはクリープ伸びばか

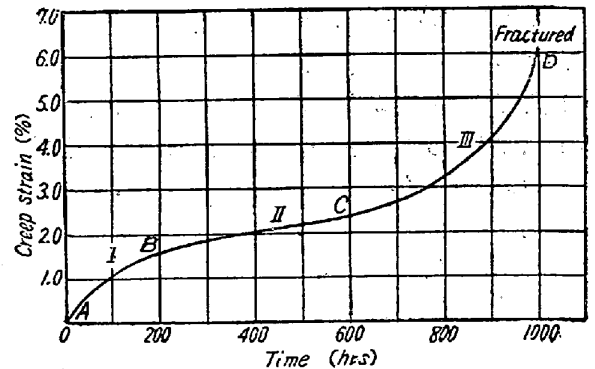


Fig. 1. Typical creep curve of steel

りではなく弾性伸び、塑性伸びが加わり、荷重を加える速さによつても変化する。しかし材料を高温度で使用するとき、例えばガスタービン、蒸気タービン等に於いて一定時間後の全伸びを云々する場合にはこの初期変形量が可成り問題となることもある。又後に述べるクリープ曲線の解析に当つても少からぬ意義をもつものである。

\* 東京大学工学部教授、工博

2. 時間の経過と共にクリープ速度が減少する時期即ち図のAB. 之をクリープの第1期又は遷移期 (transient state) と呼ぶ。

3. クリープ速度が略々一定となる時期 BC で、全期間を通じてクリープ速度は最小である。これをクリープの第2期又は定常期 (steady state) と呼ぶ。

4. クリープ速度は第3期に於いて再び増加し、時間と共に加速され、遂にDに於いて破断する。

クリープの第1期 (イギリスではこれを第2期と呼んでいる) に対し Bailey<sup>1)</sup> は荷重による歪み硬化作用と温度の高いことによる軟化作用 (結晶の回復現象と再結晶) の釣合ひによるもので、後者に比し前者が大きいため時間の経過につれてクリープ速さが低下すると定性的な説明をしてる。又 Gillet<sup>2)</sup> は多結晶体に於いて最初各結晶間の応力分布が不均一であつたものが、変形の進むにつれて均一に分配されるためであるとしている。Bailey の見解によれば歪み硬化作用と焼鈍軟化作用が釣合えばクリープの第2期即ち定常クリープ状態となる。この定常クリープは工業的には設計のため極めて重要視されており、後に示すように ASTM の規定でもクリープ試験の結果をまとめるのに、応力と最小クリープ速度の関係を両対数座標上に描いて直線で結ぶ方法を採用している。しかし Tapsell<sup>3)</sup> も指摘している様にクリープが定常状態となるのは単に見掛上であつて、実際は第1期から第3期に移る彎曲点附近が直線的に見えるに過ぎないと思われ。

Fig. 2. は Timken 16-25-6 合金についての長時間クリープ試験の結果<sup>4)</sup> であるが、従来 2000 時間程度でクリープ速度が一定となる様に思われていたにも拘らず実験の精度 (温度の調節及び伸びの測定) が向上するとますます定常クリープ状態の存在がはつきりしなくなるのである。この意味からも定常クリープ速度という語で

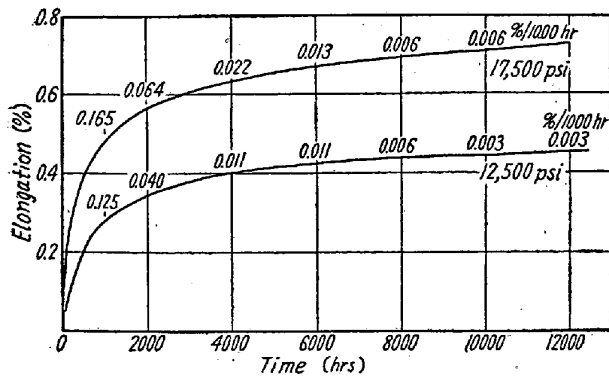


Fig. 2. Time-Elongation Curves for Creep Tests on 16-25-6 Alloy (Water Quenched) at 1200°F (650°C)

はなく、最小クリープ速度と呼べば、誤りを冒す惧れない。

Tapsell は更にこの彎曲点を過ぎると試験片の一部に necking が生じ、その後は短時間引張試験と同様断面収縮と伸びが加速度的に進行して遂に破断すると述べているが、Kanter<sup>5)</sup> は断面収縮によるクリープ速度の増加 (計算値) よりも実際の速さがずっと大であると述べており、Hanson<sup>6)</sup> 等は第3期のクリープが内部亀裂の生長を伴っていることを確めている。

以上クリープの進行過程は結晶塑性学に於いても重要な問題であり、転位論の発展につれて新しい知見も加えられているが、本文の主な目的とするところは試験法にあるので Kauzmann, Orowan, Mott, Dashman, 横堀その他の諸説については特に触れないこととする。

一定温度で試験片に加える荷重を変えてクリープ試験を行うと、Fig. 3. の如き1群の伸び-時間曲線が得られる。即ち荷重が小さければ小さい程最小クリープ速度になるのに長時間を要し、反対に荷重が大きくなるとクリープの第2期と見做される時期は極めて短かく、第1期から第3期に移行する単なる彎曲点として認められるに過ぎない。

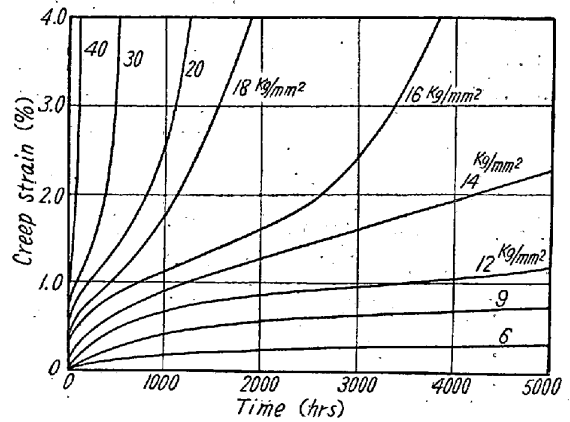


Fig. 3. Creep Curves for Various Loads at Constant Temperature.

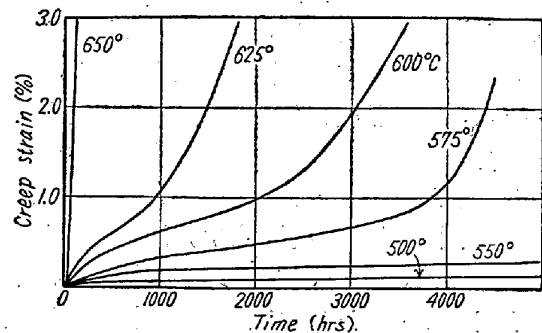


Fig. 4. Creep Curves for Different Temperatures at Constant Stress.

Table 1. Definitions of Creep Strength for Short-Time Creep Testing.

Country of Origin	Test	Time Period (hrs)	Mean Creep Rate (% per hr)	Maximum Creep		Total Time (hr)	Remarks
				(%)	at time (hr)		
Germany	KWI (1)	3~6	$50 \times 10^{-4}$	—	—	6	"Dauerstandfestigkeit"
	" (2)	5~10	$30 \times 10^{-4}$	—	—	10	
	" (3)	25~35	$15 \times 10^{-4}$	—	—	35	
	DVM. (DINA-17)	25~35	$10 \times 10^{-4}$	0.2	45	45	
Gt. Britain	Hatfield	24~72	$1 \times 10^{-4}$	0.5	24	72	"Time-yield"
France	Bureau Veritas	25~35	$5 \times 10^{-4}$	—	—	35	
Switzerland	E.M.P.A.	24~48	$10 \times 10^{-4}$	—	—	48	
	Brown Boveri	16~33	$10 \times 10^{-4}$	—	—	33	
Italy	Musatti Reggiori	80~100	$10 \times 10^{-4}$	—	—	100	
Japan	Kojima-Masui	3~6	$50 \times 10^{-4}$	—	—	6	

又一定荷重の下で温度を変えた場合は Fig. 4. の如く荷重を変えたときと同様のことがいわれる。

これらの図で明らかな様にクリープによる材料の破断はある温度又は荷重附近においてはそれらの変化に極めて敏感である。従つて高温の機械装置の設計には使用する材料のクリープ特性を知つておくことが非常に大切なことが判るであろう。

### II. 各種のクリープ試験法

クリープ試験にはいわゆる短時間法と長時間法があり又クリープ破断試験がある。短時間法はクリープ研究の初期に行われた方法で、100hr 以内の比較的短時間の測定で、或る定められた時間における平均クリープ速度を示す。応力を以てその材料のクリープ強さを定義している。Table. 1. は各種のクリープ強さの定義を一括したもので、何れも任意に定められた値であり、物理的意義はない。

同一種類の材料を一定の熱処理で、一定温度、一定荷重の下で、クリープの難易を判定するにはこの短時間法も或る程度利用出来るが、材料によつては長い時間に亘つて徐々に析出その他組織の変化を起すものが（特に今日の耐熱鋼は代表的である。）あること、初期のクリープと長時間後のクリープとは機構的にも変化があること、クリープ初期には精密に測定すれば伸びが滑らかな曲線に沿つて増加するのではないこと、既に述べた様に加える応力又は温度乃至は材料の特性によつてある条件では比較的短時間に急激な変形を行い、速かに最小クリープ速度に達するが、他の条件では最初から徐々に伸びが増加し、最小クリープ速度に達するのに極めて長時間を要する。Fig. 5. はHykro V-80 (C 0.2, Cr 3, Mo 0.6 V 0.8, W 0.6%) その他同系統のフェライト系低合金

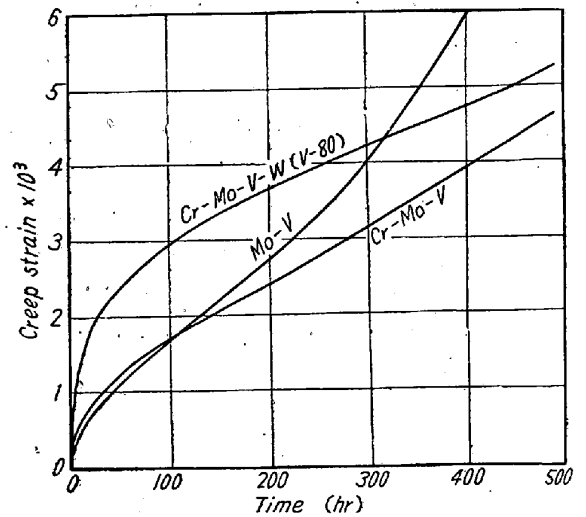


Fig. 5. Comparative creep curves on Cr-Mo-V-W (V80), Mo-V and Cr-Mo-V Steel at 600°C and 12 tons/sq.in.

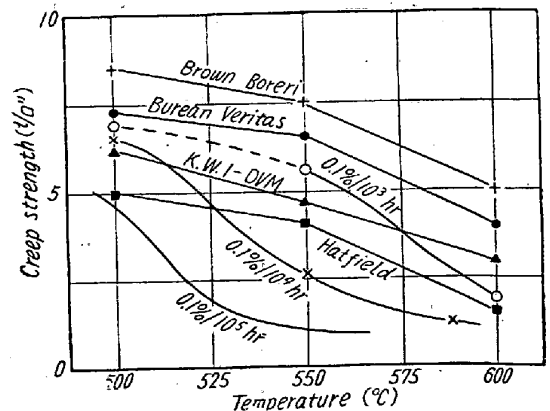


Fig. 6. Comparison of Creep Strength with Various Methods. (Molybdenum Steel 0.08 %C, 0.52% Mo)

耐熱鋼の 600°C, 12ton/□'' (約 19 kg/mm<sup>2</sup>) に対す

るクリープ曲線<sup>7)</sup>であつて、最初の数十時間のクリープ曲線の傾向で数百時間後のクリープ伸びの大小を比較判定すると危険なことが多い事実を物語っている。又 Fig. 6. は Table 1 に掲げたいくつかの短時間法によるクリープ強さと長時間試験結果とを対照したもの<sup>9)</sup>で短時間法同志ではある程度比例的関係を認め得るけれども、長時間の結果の推定にあまり役立つことを明らかにしている。

次に長時間法としては果して何時間クリープ試験を行えば良いかという点について、ASTM ではその材料に期待せられる寿命の 10% 程度の試験を行うことが望ましく、予期寿命に対し 1% 以下の試験時間の結果から外挿してはいけなと述べている。例えば 10 年の寿命が要求される場合は約 1 年(8600)時間の試験をし、その結果に基づいて設計をすれば良いということである。

尙長時間法ではクリープ強さをいうには必ず温度と共に対応するクリープ速度を示さねばならない。

次にクリープ破断試験 (Creep rupture test) は航空用ジェットエンジン材料の如く比較的耐久寿命の短い場合に主としてとられる方法で、通常のクリープ試験におけるよりも高い一定荷重の下で試験片が破断するまでの時間を求めるのである。尙これに附随して簡単な伸びの測定を行い、或る定められた全伸び量 (例えば 0.1%, 0.2%, 0.5%, 1%, 2% 及び破断時の伸び) となる時間及び第 3 期クリープに転ずる時間を測定していることが多い。数十時間乃至千時間の間で数個の実験を行つている。つまりクリープ試験が或る定められた伸びの値に対してどれ程の荷重を加えても差支えないかを判定するのに対し、クリープ破断試験はクリープ試験のときよりも大きな荷重を与え、その荷重に何時間耐えるかを知らうとするものである。

クリープ試験法として外国で採用されている特殊の方法に Barr-Bardget 法がある。これは一定温度で荷重を加えた状態で試験片の標点間を固定しておきクリープ伸びによつて生ずる応力の減り方を適当な方法で測定する。即ちクリープ弛緩の測定を行うものである。正確なクリープ試験を行う予備的な簡便法としての意味をもつ他高温ボイラー、ガスタービンなどに使用するボルト材の試験としては実際使用状態に最も近い方法であつて、材質の適当を直ちに判定することが出来る。

Table. 2. 及び Table. 3. は英米におけるクリープ試験法の規準を一覧表にまとめたもので、最近わが国においても工業技術院の委託で機械学会が材料試験協会の協力を得てクリープ試験及びクリープ破断試験規格案を

練つている。最後の欄に示したものがその案である。英国規格 (BS) には高感度試験 (BS.1686) と中感度試験 (BS.1687) およびクリープ破断試験の 3 種があり、米国規格 (A.S.T.M. Designation) にはクリープ試験 (E 22-41) クリープ破断試験 (E 85-50 T) がある。クリープ試験を行うにはこれらの規格が標準となるばかりでなく又詳細な文献もあり、内外の試験機メーカーではそれぞれ特徴のあるクリープ試験機を製作し、そのカタログを出しているからこれらを参照すれば良い。以下ごく簡単に試験機の選択と試験の実施に当つて注意すべき点を述べることにする。

(1) クリープ試験機とクリープ破断試験機とは本来の趣旨は似ているが、前者が伸びの測定を精密に行うのに対し、後者ではせいぜいある定められた伸び (例えば 0.1, 0.2, 0.5, 1, 2, 及び 5%) に達する時間及び第 2 期から第 3 期に移行する時間が半明する程度の伸び測定が行われる。

クリープ試験は材料の合格か否かを定める受入試験としてはあまりにも長時間を要するので適当でないため、受入試験としては短時間のクリープ破断試験の行われることが多い。その際は規定された荷重で規定された時間内で破断するか否かを検するため数本の試験片を縦につないで、1 度に引張ることも行われている。

(2) クリープ試験に於いて最も問題となるのは (i) 引張り荷重を正しく試験片の中心軸方向に加えること (ii) 標点間の伸びを正確に測定すること (iii) 加熱炉の温度調節を精密に行うと共に、試験片の上下の温度差を少なくすることの 3 点であろう。

(3) 引張り荷重を正しく軸方向に加えるには槓桿が水平であるべきことはいふまでもないが、試験片をその掴み(チャック)にねち込む方式では特にねちの仕上精度が大切である。常温では大体軸方向に荷重が加わつていても温度が上昇するとねちの当る位置が変化することが多い。

(4) 伸びの測定には (a) マルテンス型伸び計 (光挺子法) (b) ダイアルゲージ法又は電氣的 (容量又はインダクタンスブリッジ方式) 伸び計法 (c) マルテンス型と同様炉外へ伸びの変化を延長し、電氣的接点を介して電動機を回転せしめ、回転計の目盛によつて伸びを表わすもの (d) 標点を直接望遠顕微鏡で観測する方法 (e) 標点の移動を金具を介し、金具に刻んだ目盛で (d) と同様にして測定する方法などがある。伸びの測定は  $1\mu$  以内の精度を得ることは仲々容易でない。誤差の原因となる主なものは炉外へ延長した部分が左右常に同一温度で

Table 2. Abstracts of Specifications for Long Term Creep Test.

Specification		BS 1686	BS 1687	ASTM Desig. E22-41 (Recommended Practice)	Nihon Kikai Gakkai (Japan Soc. Mech. Engrs)
Scope of the tests		Long term, high sensitivity Test periods up to 10,000hr Total strains down to 0.1%	Long term, medium sensitivity Test period up to 10,000hr Total strains down to 1.0%	Long time tension tests. Not less than 1%, and extending to 10% of the expected life, if possible	Long time 1 to 10% of the expected life
Test Specimens	Standard Sections	Circular	Circular	Circular	Circular
	Standard Dimensions	D=0.564" or 0.357" (at least D $\geq$ 0.178") G.L. $\geq$ 2" (not less than 1")		D=0.505" 0.357" or 0.252" G.L. $\geq$ 2"	D=12mm, 10mm or 6mm (not less than 5mm) G.L. $\geq$ 5D
	Uniformity throughout the G.L.	within 0.001" (dia.)	within 0.001" (dia.) " 2.0% (cross section)	$\pm$ 0.5% (sect. area)	within 0.025mm (uniformity of dia.)
Accuracy of loading		within $\pm$ 0.5% over the working range	within $\pm$ 1.5%	1%	$\pm$ 0.5%
Accuracy of extensometer		within 1% of the total creep strain	$\pm$ 0.01% of the G.L.	*	1 micron
Measurement of the temperature	Mean temp.	Mean of the 3 positions between gauge length		Average of at least 50 observations	
	Accuracy	$\pm$ 0.3°C	$\pm$ 0.5°C	*	$\pm$ 0.3°C
Temperature control	Max. variation along the gauge length	not more than 2°C		upto 650°C...within $\pm$ 1.7°C 650~870°C....., $\pm$ 2.8°C above 870°C....., $\pm$ 4.6°C	$\leq$ 2°C
	Max. fluctuation	up to 600°C..... $\pm$ 1°C 600°C~1000°C..... $\pm$ 2°C above 1000°C..... $\pm$ 4°C		*	up to 600°C... $\pm$ 1°C 600~1000°C... $\pm$ 2°C above 1000°C... $\pm$ 4°C
Max. departure from the original calibration of the thermocouple		upto 600°C..... $\pm$ 1°C 600~1000°C..... $\pm$ 2°C above 1000°C..... $\pm$ 4°C		*	up to 600°C... $\pm$ 1°C 600~1000°C... $\pm$ 2°C above 1000°C... $\pm$ 4°C
Heating-up periods		4~6 hr (up to 98% of the test temp.)		*	4~6hr
Soaking periods		20 $\pm$ 4 hr (not over 102% of the test temp)		*	20 $\pm$ 4hr

Remarks: An asterisk means to control as accurately as possible.

ないと室温変化の影響を受けること、直接標点を観測せず金具を介する場合は金具との接触にガタのないことが必要である。伸びは試片の両側で読み取りその平均をとると大体正しい値が得られるのに対し、測定を片側のみ行うものは試験片の曲りをチェックすることができない。

(5) クリープは非常に温度に敏感である。温度が $\pm 10\%$ 変化したために同一クリープ速度に対応するクリープ強さが3~5倍又は $1/3\sim 1/5$ になることも珍しくない。それ故数千時間の長時間に亘つて温度制御を如何に精密にするかが重要な問題となる。温度調節については (i) 温度測定の精度を上げること (ii) 温度の時間的变化

を抑えること (iii) 温度の位置的变化即ち試片上下の温度差を少なくすることの3点である。(i) については600°C以上の高温でくりかえしクリープ試験用に供するには白金、白金ロヂウム熱電対しか用いることはできない。アルメル、クロメル熱電対は650°C以下なら用いても良いが同一品を繰り返し使用するべきではない。白金、白金ロヂウム熱電対も毎回使用後に標準熱電対との比較検定をするか又は純金属(錫、亜鉛、アンチモン、銀など)で凝固点測定をして補正しなければならぬ。補正には精密級ガルバと電位差計を使用する。上下の温度差を少なくするにはニクロム線を巻くピッチを両端に密に、中央部で粗にするのが良いが、一度で正しい結果を得る

Table. 3. Abstracts of Specifications for Creep Rupture Test.

Specification	B.S. 1688	A.S.T.M. Desig E85-50T. (Tentative Recommended Practice)	Japan Soc. for Test Materials	
Test Specimen	Dimension	1. Circular: G.L. $\geq 4 \times \sqrt{\text{Sec. Area}}$ 2. Rectangular: G.L. $\geq 4 \times (\text{width})$	Circular: $D \geq 0.505''$ (Std. $0.505''$ ) G.L. $\geq 2''$	1. Circular: $D = 14 \text{ mm}$ G.L. $\geq 50 \text{ mm}$ 2. Rectangular: G.L. $\geq 50 \text{ mm}$ No.1 Test Piece for Tension Test
	Uniformity of Cross Section	1. Circular: $< 0.002''$ or $< D/100$ 2. Rectangular: Width $< 1\%$ Thickness $< 0.001''$	$\pm 0.5\%$	1. Circular: $< 0.05 \text{ mm}$ 2. Rectangular: width $< 1\%$ Thickness $< 0.025 \text{ mm}$
Accuracy of the Loading	$\pm 1.5\%$	$< 1\%$	$\pm 1.5\%$	
Accuracy of the temp. measurement	$\pm 1^\circ\text{C}$	As accurate as possible	$\pm 1^\circ\text{C}$	
Temperature Control	max. variation throughout the G.L.	$< 650^\circ\text{C}$ $\pm 2.8^\circ\text{C}$ $> 650^\circ\text{C}$ $\pm 4.6^\circ\text{C}$	$< 5^\circ\text{C}$	
	Max. fluctuation from the nominal test temperature	400~600°C $\pm 4^\circ\text{C}$ 600~800°C $\pm 5^\circ\text{C}$ > 800°C $\pm 8^\circ\text{C}$	$< 650^\circ\text{C}$ $\pm 2.8^\circ\text{C}$ $> 650^\circ\text{C}$ $\pm 4.6^\circ\text{C}$	400~600°C $\pm 4^\circ\text{C}$ 600~800°C $\pm 5^\circ\text{C}$ > 800°C $\pm 8^\circ\text{C}$
Heating-up Periods	4~6hrs (up to 98% of test temp)	2~4hrs	4~6hrs	
Soakchg Periods	20±4hrs (not over 104% of test temp)	20hrs	20±4hrs	

のはむしろ稀れである。それよりは巻線を上中下に三区  
分し(上下はそれぞれ長さとして中の1/2以下),それら  
に流れる電流を別個に挿入した並列抵抗で加減する方が  
便利である。又試験片の周囲を不銹鋼のブロックで囲む  
ことも有効である。温度の時間的変化を抑えること、い  
わゆる温度の自動調節については多数の方式がある。即  
ち温度変化を敏感に感受する検出部としては (a) 熱電  
対 (b) 白金その他の抵抗体、(c) 金属棒(又は筒)があり  
これを電氣的、磁氣的又は機械的に増巾してリレー又は  
水銀スイッチを開閉するのであるが、クリープ試験にお  
いては精度が大であることの必要性はいうまでもないこ  
とながら、単に精度だけではなく数千時間の連続使用に  
際して安定で信頼度の高いことも必要である。たとえば  
制御電流が大きいとリレー又はスイッチの寿命が短くな  
るのでこれを 1~2 Amp 程度に止めたとすると電源電  
圧の変化に依り得なくなる。したがって我が国のような  
電力事情の悪い条件下では炉及び制御器に入る電源の電  
圧を他の方法で予め制御することも考えなければならな  
い。

### III. クリープ設計曲線 (Design Curve) と 合理的短時間法

材料のクリープ試験又はクリープ破断試験に基づいて  
高温で使用される機器の設計をするにはその材料に要

求せられる寿命と、許容せられる最大の変形量を先ず設  
定しなければならぬ。材料がその温度、その応力で破断  
しないことは当然である。

或る特定の材料(成分、溶解法、加工法、熱処理など  
一定として)のクリープ特性を定める因子は温度、時間  
応力、伸び及び伸び速度である。一定温度で応力とク  
リープ破断時間を半対数軸にとつてプロットすると経験的  
に両者は直線的関係を示すものが多い。又応力と一定ク  
リープ伸び量に達する時間との関係についても同様であ  
る。Fig. 7. は低炭素 N-155 についての(温度650°C)  
実験結果を上方式でまとめた線図である<sup>9)</sup>。この図に  
よつて任意の応力に対する全伸び量と時間の関係又は  
応力と破断時間の関係が内挿又は外挿法によつて求めら  
れるのでジェットエンジンなどの設計上極めて有用であ  
るからこれを設計線図 (Design Curve) という。但し  
この直線的関係が常に成り立つとは限らない。Fig. 8. は  
Disalloy の 650°C に対する設計線図<sup>10)</sup> である。最  
小クリープ速度と応力の関係は高温、高応力の場合両  
対数座標で直線的に示されることが多い。Fig. 9 は  
Timken 16-25-6 鋼についての例である<sup>11)</sup>。このこと  
は最小クリープ速度  $\epsilon_m$  と応力  $\sigma$  とが次の関係で  
(温度一定) 結ばれることを意味している。

$$\epsilon_m = A \sigma^m$$

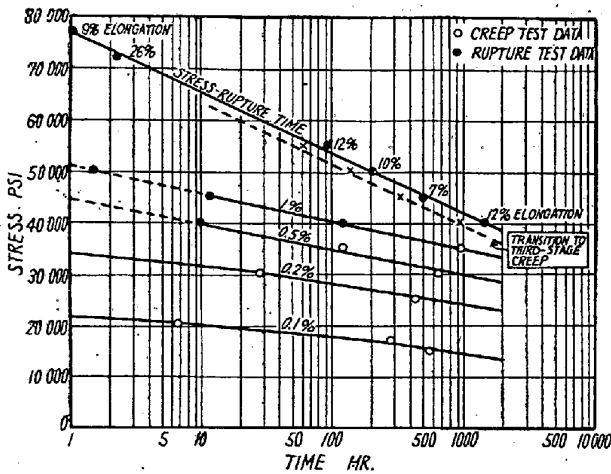


Fig. 7. Design Curves (relation between stress and time for various specified total creep strains as well as for beginning of third-stage creep and for rupture) of Low-carbon N-155 Alloy (20Cr, 20Ni, 20Co, 4Mo, 2.5W, 1Cb and 0.1%N) at 1200°F.

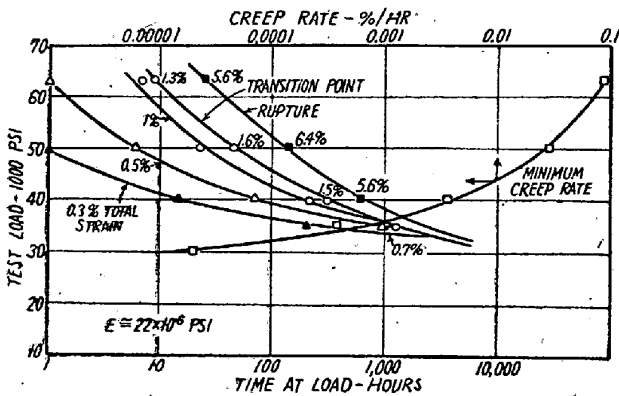


Fig. 8. Design Curves for Discalloy (13 Cr, 25 Ni, 3 Mo, 1.8 Ti, 0.2 Al, balance Fe) at 650°C

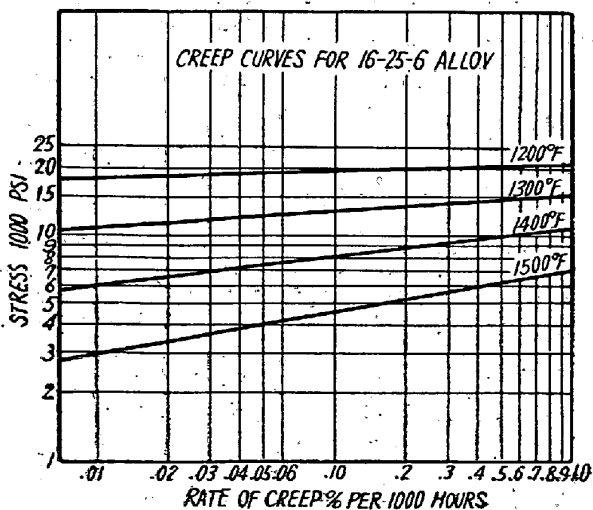


Fig. 9. Creep Curves of Alloy 16(Cr)-25(Ni)-6(Mo) at 650°C to 815°C (1200° to 1500°F)

(A 及び m は常数) しかし応力又は温度の低い場合を含めて考えるとこの関係よりも次の関係式の方が実験に合致することを Nadai<sup>12)</sup> は主張している。

$$\dot{\epsilon} = A \sin h \frac{\sigma}{\sigma_1}$$

Nadai の式は反応速度論的に導かれた Eyring-Kauzmann の理論からも得られる。

英国規格 (BS. A-23) では一定温度で応力を変えてクリープ試験した場合応力と特定の伸び量を両対数グラフにプロットして所期の使用時間に対する設計応力を定めることを指示し、又 A.S.T.M. (E 22-41) では応力とクリープ速度の両対数線図を描く様指示している。内挿は差支えないが1桁以上の外挿は危険なことも少くない。又ドイツ (DIN 50118) ではクリープ破断試験結果は半対数グラフ ( $\sigma$  vs.  $\log t$ ) で表わすことを規定している等尚確定的な図示方式はないといった方が良い。

尚クリープ速度の表わし方としては %/hr. 又は cm/cm/hr で表わすのが正しい。時として 10000hr に 0.1% とか、100,000hr に 1% という表わし方をすることもあるがこれはクリープ速度をいうのではなくその時間に生ずる伸び量を示す場合に限定されるべきで、この伸びと時間を指定したクリープ強さを制限クリープ強さ (limiting creep stress) という。材料のクリープ特性は正確には一々実験を行つて見なければ判らない。しかしそれには時間、設備、労力の犠牲が大きいので何とか短時間に行い得る実験から長時間の結果を推定する方法を見出し度いと考えるのは当然である。わが国のような電力事情、経済事情の悪い国では特にこの念願をもつ人が多い。この問題の完全な解答は未だ得られていないけれども重要な二、三の方法について説明する。

(1) Hollomon & Lubahn<sup>13)</sup> の Mechanical Equation of State.

一定温度で一定の歪み速度を以て金属材料を引張ると、歪みの増加に伴つて加工硬化が起り伸びの増加量に対応する荷重の増加する割合は減少する。したがつて応力と伸びの関係は軟鋼のような降伏現象を示すものを除けば局部的な断面収縮がはじまるまでは応力  $\sigma$  と伸び  $\epsilon$  との関係が一般に次の実験式で表わされる。

$$\sigma(\dot{\epsilon}, T) = B_1 \dot{\epsilon}^m \dots \dots \dots (1)$$

$B_1, m$  は歪み速度及び温度によつて変化する直である。

又同一温度で同一の変形量を与えるときの応力と変形速度 ( $\dot{\epsilon}$ ) との関係については少数の実験結果しかないが、次の実験式に従うものと考えて差支えない

$$\sigma(\epsilon, T) = C_1 \dot{\epsilon}^n \quad \dots\dots\dots (2)$$

$C_1$  及び  $n$  は一定温度，一定歪み量では常数である。

(1) 式と (2) 式を組み合わせ一定温度における応力と歪み及び歪み速度の一般関係式を導くと

$$\sigma(T) = (\dot{\epsilon}/\dot{\epsilon}_1) C_1 \epsilon (D_1 + E_1 \ln \dot{\epsilon}/\dot{\epsilon}_1) \quad \dots\dots\dots (3)$$

$C_1, D_1, E_1$  及び  $\dot{\epsilon}_1$  は温度のみによつて定まる常数である。

一方歪み速度と温度の関係については Zener と Hollomon が速度論に基いて次の式が成り立つことを与えている。

$$\dot{\epsilon}(\sigma, T) = \dot{\epsilon}_2 e^{-Q/RT} \quad \dots\dots\dots (4)$$

或は 
$$-T \ln \dot{\epsilon}/\dot{\epsilon}_2 = \frac{Q}{R} \quad \dots\dots\dots (4a)$$

$Q$  即ち歪みの活性化エネルギーは応力及び歪みの函数であり， $\dot{\epsilon}_2$  は歪み量のみによつて定まる常数である。

(3) 式と (4a) 式を組み合わせると次の (5) 式の形になる。

$$\sigma = CGT (\dot{\epsilon}/\dot{\epsilon}_0)^{DT} e^{(E-FT) \ln \dot{\epsilon}/\dot{\epsilon}_0} \quad \dots\dots\dots (5)$$

$C, D, E, F, G$  及び  $\dot{\epsilon}_0$  は温度，応力，歪み及び歪み速度に無関係な材料によつて定まる常数である。

この (5) 式はあたかも気体の温度，圧力及び体積が状態式で一義的に表されるのと同様に，材料のクリープ特性即ち温度，応力，伸び及び伸び速度の関係がこれらに関するその材料の過去の経歴とは無関係にその瞬間，瞬間における各々の値で定まることを示すものでこれを Mechanical Equation of State と呼んでいる。しかし実際には変形の過程で析出その他相の変化を伴うこともあるからその様な場合には変形の経歴が影響することは当然で，従つて上の状態式をそのまま適用し得ない。

(2) O.D. Sherby 等の Temperature Compensated time

O.D. Sherby と J.E. Dorn<sup>14)</sup> は Hollomon-Zener の式 (前に掲げた (4) 式) を利用し，応力一定ならば一定の伸びを生ずるに要する時間  $t$  は各時間においてはクリープ速度  $\dot{\epsilon}$  の逆数であるから平均速度と時間も亦反比例すると仮定すれば

$$\theta = te^{-Q/RT} = \text{const}$$

となる。従つて或る温度  $T_1$  で応力  $\sigma$  を加えたときのクリープ  $e$  を生ずる時間  $t_1$  を求めるにはそれより高い温度  $T_2$  で同じ歪  $e$  を生ずる時間  $t_2$  (いうまでもなく  $t_2 < t_1$ ) を求めれば

$$t_1 = \frac{t_2 e^{-Q/RT_2}}{e^{-Q/RT_1}}$$

によつて算出できる。即ちあらかじめ適当な温度で実

験して活性化エネルギー  $Q$  を求めておけば低温度長時間の試験を行わなくても高温度短時間試験でその結果を推定することができる。 $\theta$  を temperature compensated time と呼ぶ。

O.D. Sherby 等はアルミニウム合金について  $\log \theta$  と  $\log \dot{\epsilon}$  を両軸にとると一定の応力では温度の如何に拘らず同一の曲線上にのることを示している。

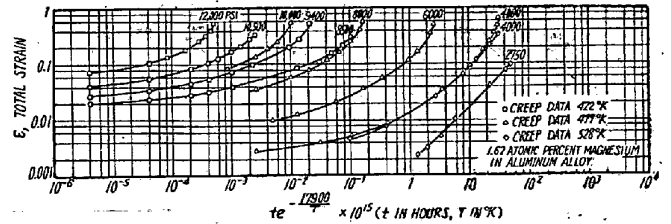


Fig. 10. Correlation of Creep Strain-time Data of a Solid Solution Alloys of aluminum by the equation  $\epsilon \equiv \epsilon (te^{-17,900/T})$

(3) Larson & Miller の Master Rupture Curve

Larson と Miller<sup>15)</sup> は上にのべたのと同様な速度論的見地から初応力一定の場合のクリープ破断時間  $t$  と絶対温度  $T$  の間に

$$T(C + \log t) = \text{const.}$$

なる関係が成り立つべきことを述べ，低炭素鋼からフェライト系耐熱鋼，オーステナイト系耐熱鋼，ニッケル基及びコバルト基耐熱合金ならびにチタニウム合金にいたるまで平均値として  $C=20$  とすればそれぞれの材料についてパラメータ  $T(20 + \log t)$  と初応力 (対数) の関係曲線が同一の直線又は曲線上に乗ることを明らかにし

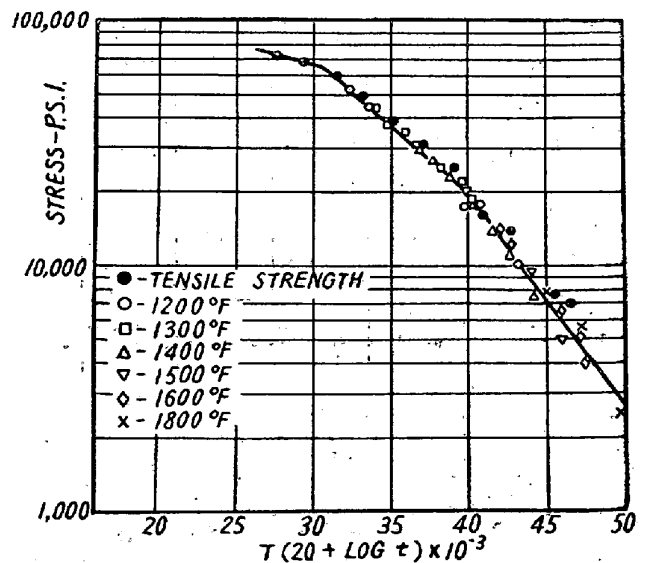


Fig. 11. Parametric Plot of Rupture Data and Master Rupture Curve for 18-8 Mo Stainless Steel.



た. Fig. 11. はその結果をまとめて記してある. この線をその材料の Master Rupture Curve という. Nisbet-Hibbard<sup>16)</sup> は Fe-Co-Cr-Ni 系耐熱合金について広汎な研究を行つたが, その結果の整理にこれを用いている. 但し  $C=11$  と訂正した. 同様な関係は Hollomon-Jaffe<sup>17)</sup> が鋼の焼戻硬度と温度及び時間の関係についてさきに導いている. Larson-Miller の式によれば例えば 650°C で 100<sup>hr</sup> のクリープ破断時間を示すものは 700°C では 66hr, 750°C では 5.6hr で破断することになるから試験時間の短縮には大きな貢献をする. 尚最小クリープ速度についてのパラメータとしては  $T(20-\log \dot{\gamma})$  ( $\dot{\gamma}$  は最小クリープ速度) を用いれば良い. この方法は理論的にはあまり厳密なものではないが実用上は極めて効果が大いなので急速に普及しつつある.

(4) Manson および Brown<sup>18)</sup> の式

Larson-Miller のパラメータ表示法は外挿するときには大きな誤差を生じるおそれがある. そこで Manson 等は  $T(\log t + C)$  なるパラメータの代り  $T - Ta / \log t - \log ta$  なるパラメータを提案した.  $\log ta, Ta$  は共に材料による常数である. これによれば  $\log t$  と  $T$  が直線関係となり, 種々の応力に対し  $[Ta, \log ta)$  なる点に直線が収斂する. 応力  $\sigma$  を含めた実験式として

$$(T - Ta) (\log t - \log ta)^\alpha = A (\log \sigma - \log \sigma_a)^\beta$$

を与えた. 多くの場合  $\alpha = -1$ . Fig. 12 に示す例のように応力の低い場合を除いては可成よく実験と一致する.

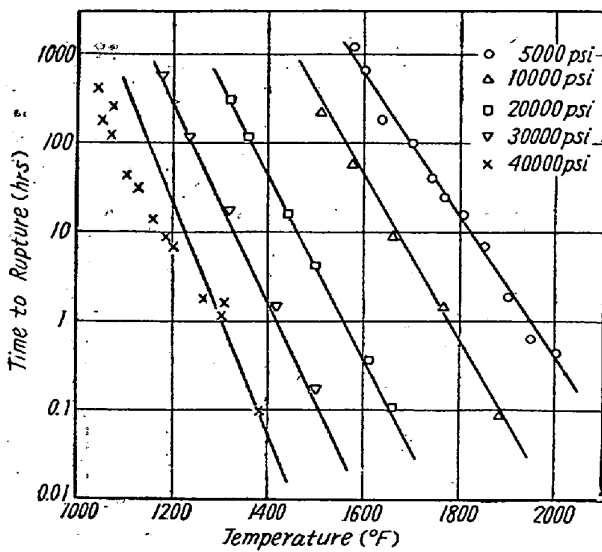


Fig. 12. Temperature vs. Rupture Time Plots According to Manson and Brown. (Cr-Ni-Mo steel 0.11% C, 16.8% Cr, 11.66% Ni, 2.18% Mo, water quenched from 2000°F)

(5) Hazlett および Parker の式その他

一定温度で一定応力 (荷重ではない) の下に金属材料を引張つた場合クリープ伸び又はクリープ伸び速度と時間の関係については古く Audrade<sup>19)</sup> が次の式を提出している.

$$l = l_0 (1 + Bt^{1/3}) e^{Kt}$$

$l$  は  $t$  時間後の試験片の長さ,  $l_0$  は荷重直後の長さ,  $B$  及び  $K$  は係数で,  $(1 + Bt^{1/3})$  の項は時間の経過と共に減少する型の flow を表わすものでこれを遷移クリープ (transient creep) と呼び,  $e^{Kt}$  は粘性流体的に進行する flow である. 前者 ( $B$ -flow) は荷重を加えた後応力が再分布せられるときに結晶の回転を生じるためにおこるものである.

後にこの式は Orowan<sup>20)</sup> によつて単結晶の場合の理論的裏付けがなされた. その他遷移クリープに対する理論式が Smith<sup>21)</sup> 及び Mott-Nabarro<sup>22)</sup> によつて導か転位論の一題目として発展の途上にある. しかし現在の段階では未だ転位論がクリープの複雑な現象に完全な解答を与えるに至っていないので詳細な説明を省くこととする.

クリープ曲線の実験式的な解析としては次の如きものが挙げられる.

(1) McVetty<sup>23)</sup> の式

$$\frac{d\epsilon}{dt} = A + B e^{-kt}$$

あるいは

$$\epsilon = \epsilon_0 + At - \frac{B}{k} e^{-kt}$$

(2) Bailey<sup>24)</sup> の方法

温度  $B$  及び応力を変えて実験を行い, 同一のクリープ伸びを生ずるに要する時間 ( $t$ ) を求める. 応力をパラメータとして温度と  $\log t$  の線図を描く.

(3) Metropolitan Vickers 会社の方法

$$\frac{d\epsilon}{dt} = \frac{A\sigma^n}{\epsilon^n}$$

この式を積分し  $\epsilon = \text{const}$  とおけば

$$t\sigma^n = \text{const.}$$

即ち応力と  $\epsilon$  なる伸びを生ずる時間  $t$  を両対数グラフに描けば直線が得られ, その傾斜が常数  $n$  である. 又応力一定として歪み  $\epsilon$  と時間  $t$  の両対数グラフを描くとその傾斜は  $(1/p+1)$  である. 従つて常数  $p$  が求められる.

(4) Weaver<sup>25)</sup> の式

$$\frac{d\epsilon}{dt} = \frac{A}{t} + B$$

(5) Soderberg<sup>26)</sup> の式

$$\epsilon = f(\sigma)F(t)$$

$$f(\sigma) = A \left( \exp \frac{\sigma}{\sigma_1} - 1 \right)$$

$$F(t) = t + t_0 \left\{ 1 - \exp \left( - \frac{t}{t_1} \right) \right\}$$

$A, \sigma_1, t_0, t_1$  は常数

(6) 奥田<sup>27)</sup> の式

奥田はクリープの第一期では

$$\Sigma = Ct^m$$

となり、第二期では

$$v = \frac{d\epsilon}{dt} = \text{const.} (= v_c)$$

となるものとした。第二期即ち定常クリープに入る時間  $t_c$  が判れば短時間の測定結果から長時間後の伸びを知ることができる。

$$\text{すなわち } \epsilon = v_c \left\{ t + t_c \left( \frac{1}{m-1} \right) \right\}$$

(7) Lubahn の式

応力一定の場合でも長時間試験でクリープ速度がなかなか一定にならないことは既に述べたとおりである。昔の実験で定常クリープと認められた部分も時間軸の目盛を拡大し又は測定（伸び測定及び温度制御）の精度を上げるとクリープ速度が変化していると思ふべきである。そこで Lubahn<sup>28)</sup> はクリープ速度がたえず減少するものとして奥田と同じ式を提示した。ただ異つている点は  $d\epsilon/dt = \text{const.}$  となることを認めない点である。

$$\epsilon = At^n$$

(8) Parker-Hazlett<sup>29)</sup> の式

奥田又は Lubahn の式でかなり実際の結果と合致する場合もあるが、一般には時間軸の最初の方が直線から彎曲することが多い。これを修正するために Hazlett と Parker は次の形に改めた。

$$\epsilon - \epsilon_0 = At^n$$

$\epsilon_0$  は全荷重をかけ終つたときの歪であるが実際には  $\epsilon - \epsilon_0$  と  $t$  の関係が両対数グラフで直線となるように cut and try で定めている。尚 Parker-Hazlett は常数  $A$  は温度の指数函数として

$$\epsilon - \epsilon_0 = Bt^n e^{-Q/RT}$$

の式を提案している。 $Q$  は実験式的な活性化エネルギーである。合金元素の影響を種々のニッケル合金について実験した結果<sup>30)</sup> (i)  $A$  は合金元素量の増加と共に指数函数的に減少すること。 $A = A_0 e^{-a_r}$  ( $r$  は合金元素の添加量, 原子%) (ii)  $n$  は合金元素量に比例して増大すること。 $n = n_0 + cr$  (iii)  $\epsilon_0$  は合金元素量と共に減少す

ること  $\epsilon_0 = (\epsilon_0)_0 - fr$  を述べている。応力の影響については何も触れていない。

#### IV. 結 言

以上金属材料のクリープ現象ならびに耐熱材料のクリープ試験法について述べたのであるが、将来高温度で使用される材料が益々多くなると予想せられるに拘らず、現在クリープ現象について明確な知識の得られていない点が少ない。今後解決を要すべき重要な問題として挙げられるものは

(1) 単結晶体だけでなく多結晶体についてのクリープ理論を転位論及び速度論的に明らかにすること、特に耐熱材料は組成、組織が単純でなく時効現象の過程において使用せられる場合が多いので時効とクリープの関係についても理論的裏付けが望まれる。

(2) 本文には触れなかつたけれども耐熱材料は使用中クリープによる変形と破壊の他、疲労破壊を起すことも少なからずある。

材料の高温度における疲労およびそのクリープとの関係については未だ充分な実験、理論的研究がなされていないから今後開拓すべき分野である。

(3) 耐熱合金については非常に多数の種類が発表されているが、成分の影響を実験的ならびに理論的に究明すると共に、単に経験的ではなく合理的に耐熱材料の組成や熱処理が使用目的に応じて決められることを期待したい。現在はとかく必要以上に高価な元素を配合して、耐熱合金の需要の発展を阻害している傾向すら認められる。

(4) 差し当つて我が国では長時間クリープ試験及びグリップ破断試験法が普及し、高温度で使用せられる材料の特性を設計者が十分に認識して安全係数（実は不安全係数）の小さい高性能の蒸気タービン、ガスタービンの生産されることを最も強く念願するものである。

#### 文 献

- 1) Bailey: Jour. Inst. of Metals. Vol. 35 (1926) p. 27
- 2) Gillet: Trans. Ame. Inst. Min. Met. Engrs. Iron & Steel Div. Vol. 135 (1939) p. 15.
- 3) J.H. Tapsell: "Creep of Metals" New York 1931.
- 4) C. L. Clark, M. Fleischmann & J. W. Freeman: Trans. Ame. Soc. for Metals. Vol. 44 (1952) p. 89.
- 5) Kanter: Trans. Ame. Soc. for Metals. Vol.

- 24 (1936) p 870.
- 6) D. Hanson & M.A. Wheeler: Jour. Inst. of Metals. Vol. 45 ((1951) p. 229.
- 7) H.H. Burton, J.E. Russell & D. V. Walker: "Symposium on High-Temperature Steels and Alloys for Gas Turbines" Iron & Steel Inst. July. (1952) p. 125.
- 8) A. E. Johnson & H. J. Tapsell: Proc. Inst. Mech. Engrs. Vol. 159 (1948) p. 165.
- 9) J. W. Freeman, E. E. Reynolds & A.E. White: "Symposium on Materials for Gas Turbines" A.S.T.M. (1946) p. 52.
- 10) H. Scott and R.B. Gordon: Trans. Am. Soc. Mech. Engrs. Vol 69 (1947) p. 593.
- 11) M. Fleischmann, Iron Age, Vol. 157 (1946) p. 44~50.
- 12) A. Nadai: "S. Timoshenko 60th Anniversary Volume" MacMillan, N. Y. (1938) p. 155.
- 13) Hollomon & Lubahn: G. E. Review. Feb. 1947 p. 28, Apr. (1947) p. 44.
- 14) O. D. Sherby & J. E. Dorn: Jour. of Metals Sept. (1952) p. 959; Feb. 1953.
- 15) F. R. Larson & J. Miller: Trans. Ame. Soc. Mech. Engrs. July (1952) p. 765.
- 16) J. D. Nisbet & W. R. Hibbard: Jour. of Metals, (Transactions Section) Sept. (1953) p 1149.
- 17) J. H. Hollomon & L. D. Jaffe: Trans. Ame. Inst. Min. Met. Engrs. Vol. 162 (1945) p. 223.
- 18) S. S. Manson & W. F. Brown: Jour. Proc. Ame. Soc. Test. Mat. Vol. 53 (1953) p. 693.
- 19) E. N. da C. Andrade. "Rep't. Conf. on Strength of Solids, Proc. Physical Soc"., London. p. 20 (1948).
- 20) E. Orowan: J. West of Scotland Iron and Steel Inst: Session 1946~47, p. 46.
- 21) C. L. Smith: Proc. Physical Soc. Vol. 61 (1948) p. 201.
- 22) N. F. Mott & F.R. Nabarro: "Rep't. Conf on Strength of Solids": Proc. Physical. Soc., London p. 1 (1948).
- 23) P. G. McVetty: Trans. A.S.M.E. Vol. 55 (1933) p. 99.
- 24) R.W. Bailey: Proc. Inst. Mech. Engrs. Vol. 131 (1935) p. 131.
- 25) S. H. Weaver: Trans. A.S.M.E. Vol. 58 (1936) p. 745.
- 26) C.R. Soderberg: idid. p. 733.
- 27) 奥田克己: 機械学会論文集 9 卷—35 (昭 18), I—152.
- 28) J. D. Lubahn: "Symposium on Cold Working of Metals" Ame. Soc. for Metals(1949)p. 223.
- 29) T. H. Hazlett & E. R. Parker: Jour. of Metals, Feb (1953) p. 318.
- 30) T.H. Hazlett & E.R. Parker: Trans. A.S. M. Preprint No. 38 1953.

### 別刷について

別刷御入用の方は御寄稿の際原稿の最初頁に所要部数を赤インキで御記載置き願います。本協会では紙型を取りませんので発行後のお申込みは受け兼ねます。尚、別刷は実費を頂戴致します。