

ボイラ用鋼管材料の高温強度

住友金属工業株式会社中央技術研究所 行 俊 照 夫

I 緒 言

耐熱金属材料の中、炭素鋼、低合金鋼および18-8系ステンレス鋼はジェットエンジン用などに使用されるFe基、Ni基およびCo基合金と比べると比較的低温であるが、使用時間が非常に長いという特徴をもっている。その使用分野はタービン、ボイラ、原子力、化学工業プラントなど極めて多岐にわたっており、とくにエネルギー発生装置にはこれらの高温材料は必須のものである。

本稿では、われわれの生活に密接な関係を持ち、歴史も長く、実績も多い火力発電用ボイラ鋼管材を取り上げ、とくに、その設計の基礎となる材料の高温強度を中心に問題点を検討してみる。

II ボイラ用鋼管材料

図1に火力発電用ボイラの系統図を、表1にボイラ用鋼管材の成分規格を示す。ボイラ用材は大別して、炭素鋼、低合金鋼およびオーステナイトステンレス鋼とに分けられ、使用部位の温度および圧力に応じてきめ細かい使い分けがなされている。炭素鋼は主に400℃以下で使われ、それ以上では耐酸化性および高温強度向上をはかったCr、Mo添加の低合金鋼が、さらに600℃以上の高温ではフェライトからオーステナイトへとマトリックスを強化し、耐酸化性の良好な18-8系オーステナイトステンレス鋼が使用されるようになる。

図2にわが国におけるボイラの使用条件の変遷を示す。工業生産の発展に伴う使用電力の増大により、ボイラの使用条件は高温、高圧化し、亜臨界圧から超臨界圧へと進み、使用条件がますます苛酷となるとともに、大容量の発電所が次々と建設されるようになってきた。これ

に伴って使用材料も高張力化し、高級な材質が使用されるようになった。(表2)これを量的に表わした一例が図3で、亜臨界圧ボイラでは炭素鋼が60~70%を占めていたのが超臨界圧ボイラでは炭素鋼比率は僅か10~30%となり、逆に合金鋼が60~80%と材料の高級化が目立ってきている。

III ボイラ用材に要求される性質

III-1 ボイラ用材の必要条件

ボイラ用材は高温高圧下で長時間使用されるが、上述のようにその使用条件はますます苛酷になってきている。したがって、材料としての要求も下記のように厳しい。

- (1) 高温強度が高く、延性および靱性が大きいこと。
- (2) 高温疲労、熱衝撃に強く、切欠感受性が小さいこと。
- (3) 耐酸化性、耐食性が良好であること。
- (4) 長時間の使用に対して組織的に安定であること。
- (5) 比重および熱膨脹係数が小さく、熱伝導率が大きいこと。
- (6) 溶解、鋳造、鍛圧、曲げ加工および溶接が容易であること。
- (7) 経済的であること。

これらの中で高温強度は設計に必要な許容引張り応力を決定する因子でもっとも重要な性質である。

III-2 許容引張り応力

ボイラ用鋼管の設計は次式により行われ、材料の許容引張り応力が分れば管寸法が決められ、逆に管寸法から必要な許容引張り応力が算出されそれを満足する材質の選定を行うことができる。

$$t = \frac{P d}{200 S + P} + 0.005 d$$

昭和
(年)

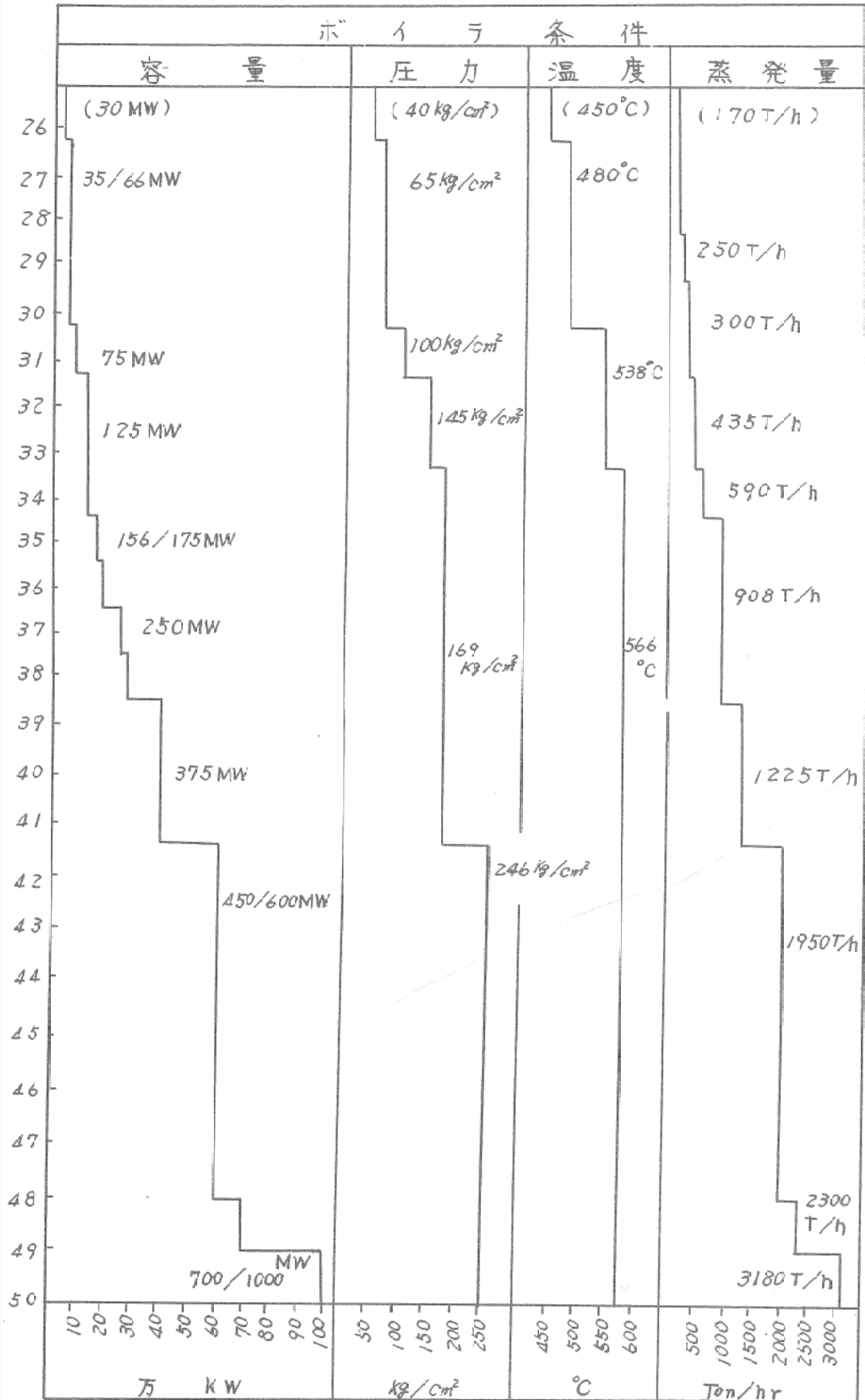


図1 火力発電用ボイラの使用条件の変遷

表1 ボイラ用鋼管材料の規格

JIS	ASTM	BS	DIN	化 学 成 分 (%)								
				C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	その他
STB30				≤ 0.2	≤ 0.35	0.25 ~0.60	≤ 0.040	≤ 0.040	-	-	-	-
STB33	A33	BS3059/1.2 3.4		0.08 ~0.18	≤ 0.35	0.25 ~0.60	≤ 0.035	≤ 0.035	-	-	-	-
STB35	A192		St35-8	0.08 ~0.18	0.10 ~0.35	0.25 ~0.60	≤ 0.035	≤ 0.035	-	-	-	-
STB42	A210	BS3059/5,6	St45-8	≤ 0.32	0.10 ~0.35	0.30 ~0.80	≤ 0.035	≤ 0.035	-	-	-	-
STBA11			15Mo3	0.10 ~0.20	0.10 ~0.50	0.30 ~0.80	≤ 0.035	≤ 0.035	-	-	0.11 ~0.20	-
STBA12	T1	BS3059/7,8		0.10 ~0.20	0.10 ~0.50	0.30 ~0.80	≤ 0.035	≤ 0.025	-	-	0.45 ~0.65	-
	T2			0.10 ~0.20	0.10 ~0.35	0.30 ~0.61	≤ 0.045	≤ 0.045	-	0.50 ~0.81	0.44 ~0.65	-
STBA21	-			0.10 ~0.20	≤ 0.50	0.30 ~0.50	≤ 0.035	≤ 0.035	-	0.30 ~1.25	0.20 ~0.45	-
		BS3604/66C		≤ 0.15	0.10/ 0.35	0.40 ~0.70	≤ 0.040	≤ 0.040	-	0.25 ~0.50	0.50 ~0.70	V0.02 ~0.25
STBA23	T12	BS3059/ BS3604/62C	13CrMo44	≤ 0.15	≤ 0.50	0.30 ~0.60	≤ 0.035	≤ 0.035	-	0.80 ~1.25	0.45 ~0.55	-
STBA23	T11	BS3604/621		≤ 0.15	0.50 ~1.00	0.30 ~0.60	≤ 0.030	≤ 0.030	-	1.00 ~1.50	0.45 ~0.65	-
STBA24	T22	BS3059/11,12 ES3604/622	10CrMo910	≤ 0.15	≤ 0.50	0.30 ~0.60	≤ 0.030	≤ 0.030	-	1.90 ~2.60	0.87 ~1.13	-
STBA25	T5	ES3604/625		≤ 0.15	≤ 0.50	0.30 ~0.60	≤ 0.030	≤ 0.030	-	4.00 ~6.00	0.45 ~0.65	-
	T7				0.50 ~1.00	0.30 ~0.60	≤ 0.030	≤ 0.030	-	6.00 ~8.00	0.45 ~0.65	-
STBA26	T9			≤ 0.15	0.25 ~1.00	0.30 ~0.60	≤ 0.030	≤ 0.030	-	8.00 ~10.00	0.90 ~1.10	-
SUS21TB	TP410			≤ 0.15	≤ 0.75	≤ 1.00	≤ 0.040	≤ 0.030	≤ 0.60	12.00 ~14.00	-	-
SUS24TB	TP430			≤ 0.12	≤ 0.75	≤ 1.00	≤ 0.040	≤ 0.030	≤ 0.60	16.00 ~18.00	-	-
SUS27TB	TP304H			≤ 0.08	≤ 1.00	≤ 2.00	≤ 0.040	≤ 0.030	8.00 ~11.00	18.00 ~20.00	-	-
SUS28TB	TP304L			≤ 0.03	≤ 1.00	≤ 2.00	≤ 0.040	≤ 0.030	9.00 ~13.00	18.00 ~20.00	-	-
SUS29TB	TP321H			≤ 0.08	≤ 1.00	≤ 2.00	≤ 0.040	≤ 0.030	9.00 ~13.00	17.00 ~20.00	-	Ti5×C ~0.50
SUS32TB	TP316H			≤ 0.08	≤ 1.00	≤ 2.00	≤ 0.040	≤ 0.030	10.00 ~14.00	16.00 ~18.00	2.00 ~3.00	-
SUS33TB	TP316L			≤ 0.03	≤ 1.00	≤ 2.00	≤ 0.040	≤ 0.030	12.00 ~16.00	16.00 ~18.00	-	-
SUS41TB	TP309			≤ 0.15	≤ 1.00	≤ 2.00	≤ 0.040	≤ 0.030	12.00 ~15.00	22.00 ~24.00	-	-
SUS42TB	TP310			≤ 0.15	≤ 1.50	≤ 2.00	≤ 0.040	≤ 0.030	19.00 ~22.00	24.00 ~26.00	-	-
SUS43TB	TP347H			≤ 0.08	≤ 1.00	≤ 2.00	≤ 0.040	≤ 0.030	9.00 ~13.00	17.00 ~20.00	-	Na+Ta 10×C ~1.00

表2 ボイラ用鋼管の用途別使用材質の変遷

容量 用途 圧力/温度	30MW級	60MW級	125MW級	250MW級	500~1,000MW級
節炭器管	STB35	STB35	STB35 STB42	STB42	STB42 HCS
蒸発管	STB35	STB35	STB35 STB42	STB42	T2 STB23
過熱器管 (再熱器管)	STBA11 STBA12	STBA11 STBA21	STBA12 STBA21 STBA22 STBA23 STBA24	STBA24 STBA26 sus27TB sus29TB sus32TB sus43TB	sus27HTB sus29HTB sus32HTB sus43HTB w-Mo鋼
再熱蒸気管 主蒸気管	STPT35 STPA11	STPA21 STPA22	STPA22 STPA23 STPA24	STPA24	STPA24
給水管	STPT35	STPT35	STPT38	STPT49	STPT49

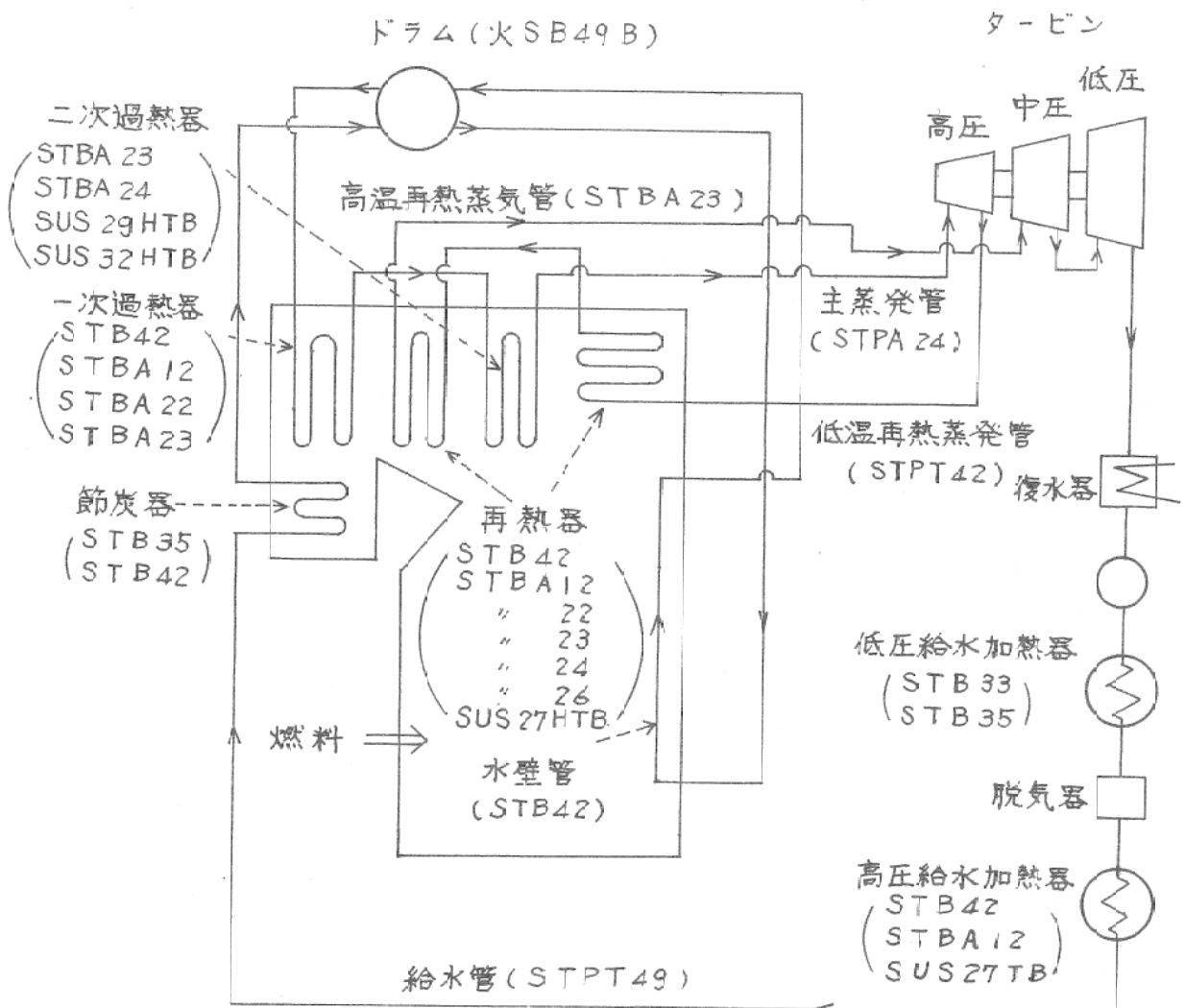


図2 火力発電用ボイラ系統図

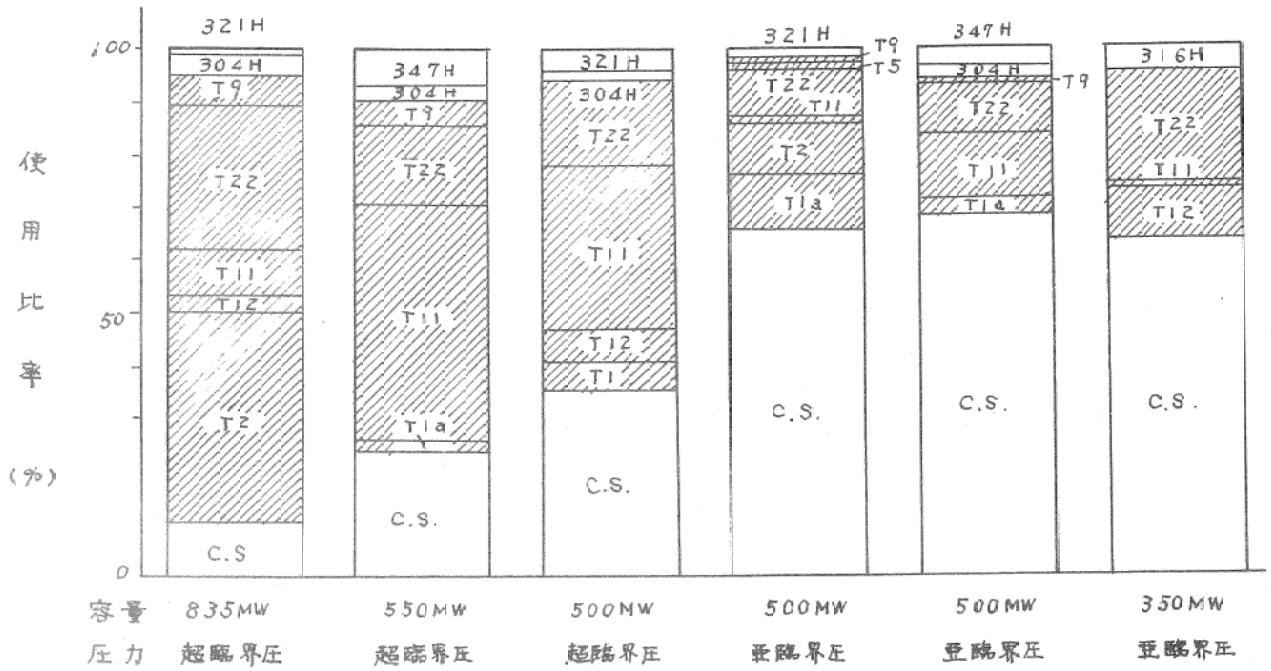


図3 ボイラ用鋼管材質別使用比率 (一例)

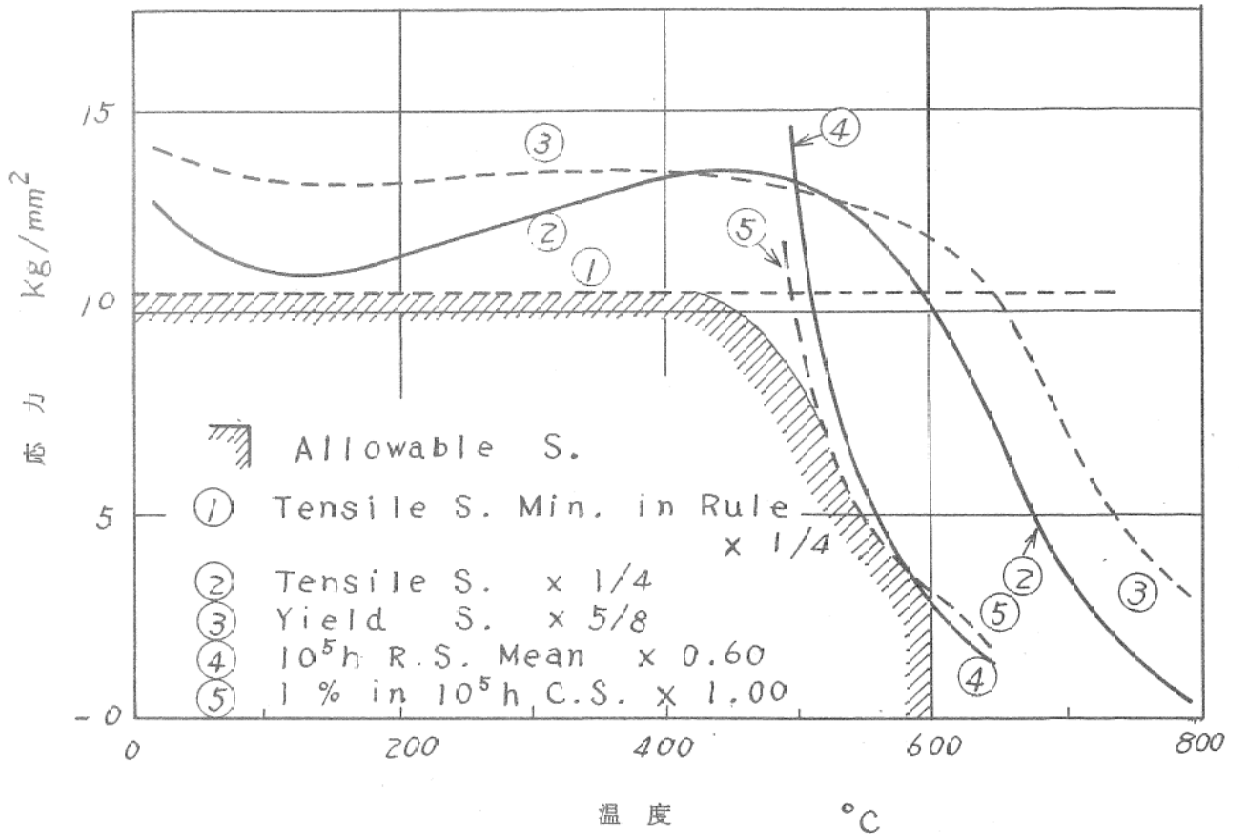


図3 高温許容応力の決め方の例 (2 1/4 Cr - Mo鋼)

但し

t : 管の計算上必要な厚さ (mm)

d : 管の外径 (mm)

P : 最高使用圧力 (kg/cm²)

S : 材料の許容引張応力 (kg/cm²)

表3に許容引張り応力の算出方法を示す。国により係数に多少の差はあるが、考え方の基本は同様で、いずれも短時間高温引張り試験から

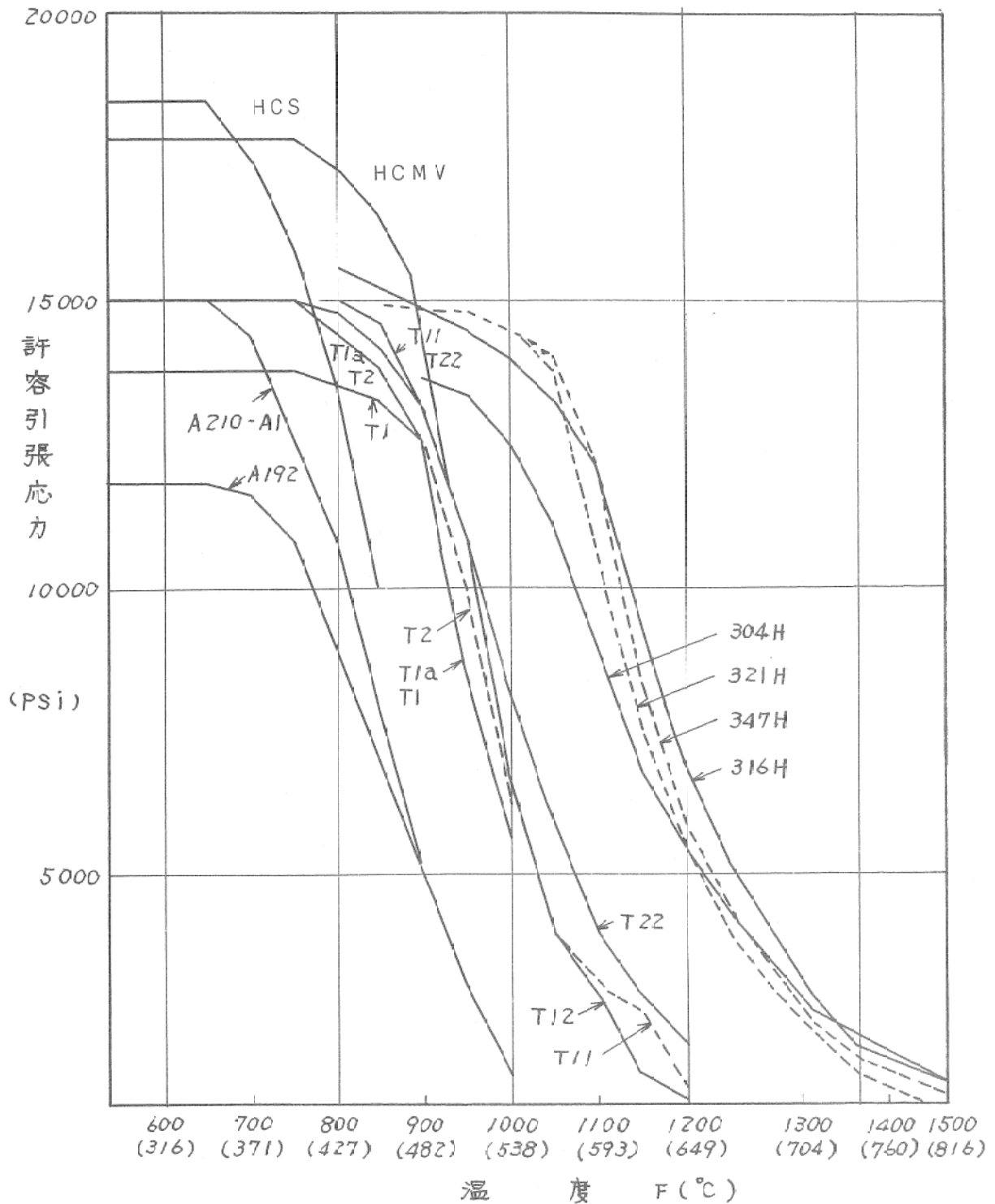


図4 ボイラ用鋼管材料の許容引張応力 (ASME)

得られる降伏強さ (耐力) の最少値、 $1\%/10^5\text{h}$ の平均クリープ強度および 10^5h における平均または最少のクリープ破断強度が基礎になっている。ただ、米国とそれに準じている日本とではさらに引張り強さがこれに加味されている。これらの関係を図式的に求めた例が図3で、これから許容応力値は低温側では短時間引張り性質

によって規定され、高温側ではクリープ性質が基礎になっていることが分る。

図4にボイラ用鋼管材料の許容引張応力を示す。これらの値は必ずしも固定したものではなく、かなり流動的で、高温強度データの集積やデータの整理方法の変更に伴って変更されてきている。(図5) また、1969年にはASMEの

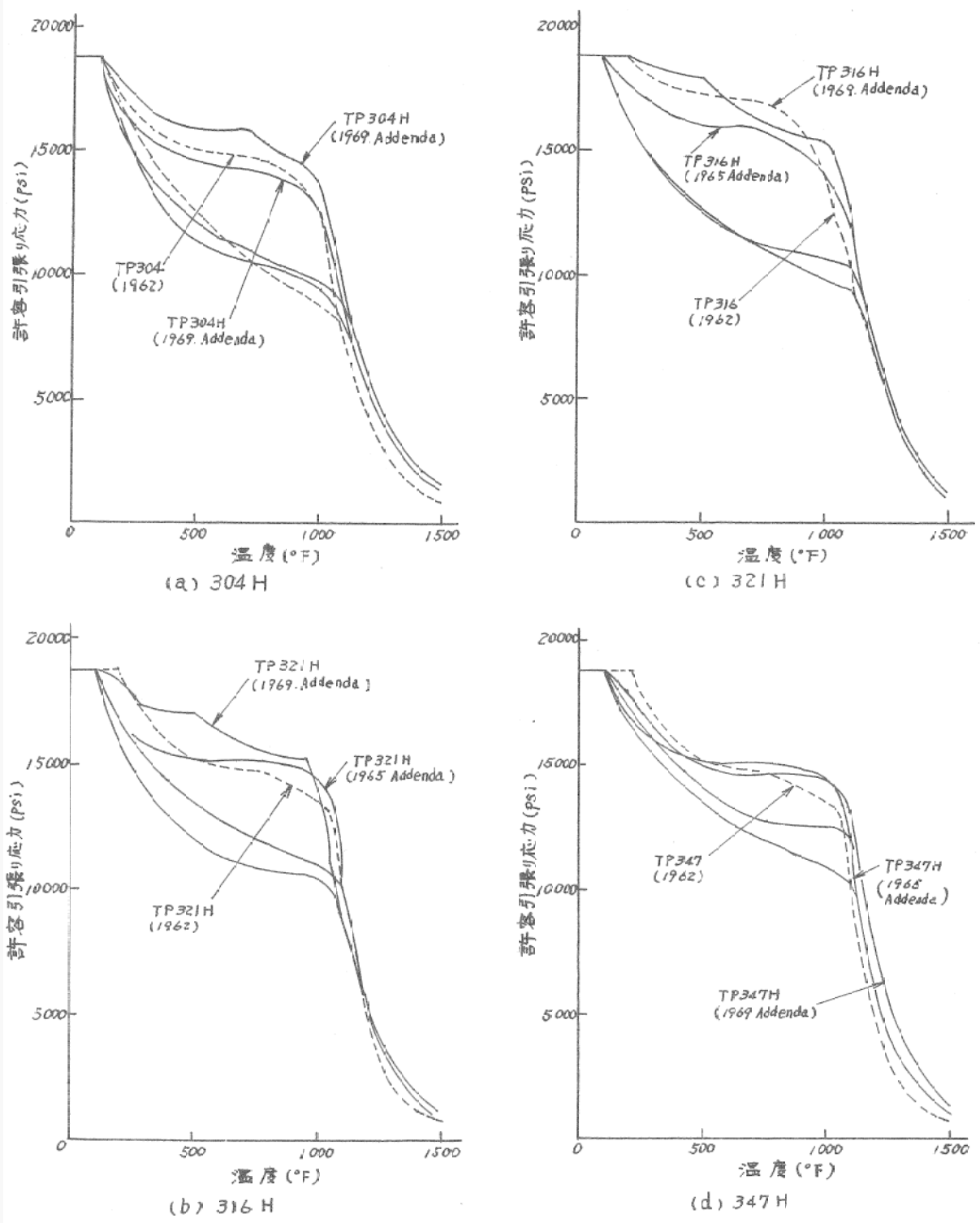


図5 ASME許容引張り応力の変遷

表3 引張り許容応力基準の比較

項目	ASME Sec I	ASME Sec. VIII (unfired)	BSI Recommendation ⁽⁴⁾	DIN 2413 ③ III	発電火力技術基準 (1)
室温の規格引張り強さ	1 / 4	1 / 4	1 / 2.7		1 / 4
当該温度の引張り強さ	1 / 4	1 / 4			1 / 4
当該温度の耐力 (0.22%)	62.5% (ステンレス90%)	62.5% (左に同じ)	1 / 1.6	1 / 1.6	62.5%=1/1.6 (ステンレス90%)
クリープ破断強度 10万時間	平均値の60% 最小値の80%	平均値の60%	平均値の1/1.6※	平均値の1/1.6	平均値の60% 最小値の80%
ク リ ー プ	1,000 h に 0.1% のクリープ速度を生ずる応力の控え目の平均値	左に同じ	※※	100,000 h に 1% のクリープを生ずる応力	1,000h に 0.01% クリープを生ずる応力の平均値

※ Scatter Band +20%以上の時、最小値×1/1.6×1.25

※※ 変形が制限される場所では全クリープが考慮されるべきでたとえ100,000 h に 1% のクリープを生ずる平均応力の100%を根拠として採用する。

③ DIN では更に+86°Cにおける10万時間破断強度がこれらの値を超えないことが要求される。(一般にはおは15°C)

Sec.I (Power Boiler) とSec.VIII (Pressure Vessels)で算定基準が異なるのはまずいということでクリープ破断強度の平均値×60%の基準を67%に両者統一して改定された。しかし、わが国の火力発電基準は現在のところ、従来通り60%の係数をとっている。

IV 高温強度

以上のように設計に必要な許容引張り応力は高温強度をベースにしている。したがって、正確な許容応力値の設定および製造した材料が規定の許容応力値を充分保証し得るか否かの確認のため、数多くの高温強度の試験がなされてきている。しかし、実際に高温強度を正確に求めることはそう簡単ではない。10⁵h クリープ破断強度を求めるには長時間の莫大な試験を要することは勿論であるが、図6に示すように高温強度には種々の因子が影響を与えるので、各鋼種について信頼される強度を出すことは極めて難しい問題である。材質的因子については従来から多くの研究が報告されており、これらについては別の機会に譲るが、ここでは主に工学的因子について述べることにする。

IV-1 高温強度データ集

各国においては早くから、各会社、各研究機関が独自で、また協同研究の形で精力的にデー

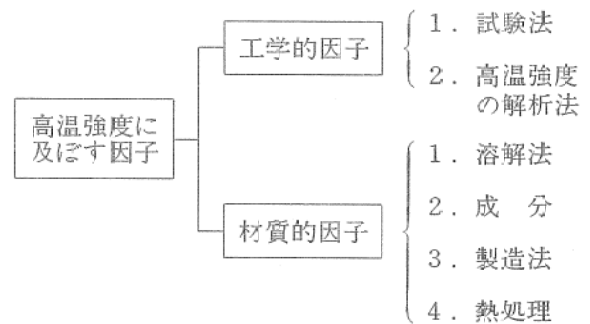


図6 高温強度に及ぼす影響

タ集積を行ない。すでに一部は10⁵h以上のクリープ破断データが得られている。主なデータ集を参考までに文献としてまとめたが⁽²⁻¹¹⁾、各国の中では英国のクリープ委員会およびドイツでまとめられたデータが量的には他に比して圧倒的に多い。前者の試験には18,000本の短時間高温引張り試験と28,147,000h (3183年)にも及ぶクリープ破断試験が実施されたということである。さらに、ISOが国際的な規模でのデータの収集を行い、順次それが出版されつつある。これには日本、英国、米国、ドイツ、スウェーデン、チェコなど11カ国が参加している。その中の数種の鋼の高温強度の代表例を図7～図8に示す。

わが国では日本鉄鋼協会クリープ委員会などから各機関のデータを集積したデータ集が出さ

表4 各鋼種のクリープ破断試験状況

鋼種	データ	試験温度 (°C)	最長試験時間 (hr)	10 ⁴ h以上の試験点数	鋼種	データ	試験温度 (°C)	最長試験時間 (hr)	10 ⁴ h以上の試験点数
炭素鋼	0.4% 0.9Mn	400	43500	32(3)	1Cr— $\frac{1}{2}$ Mo	I S O	450	19400	7(1)
		450	29500	29(4)			500	53000	70(3)
	500	28100	26(3)	550		100000	58(3)		
炭素鋼	0.9% 1.15Mn	400	36500	24(4)	A S T M (S T P No. 151)	I S O	600	20700	10
		450	30500	17(4)			482 (900F)	1402	—
		500	27000	18(3)			592 (1000F)	395	—
炭素鋼	0.12% 0.17C	454 (850F)	8605	—	クリープ委員会 (低合金鋼)	A S T M (S T P No. 151)	649 (1200F)	964	—
		510 (950)	6650	—			500	32957	8(1)
		454 (850F)	27224	2			550	15833	10(3)
炭素鋼	0.18% 0.24C	510 (950F)	27961	1	I S O	クリープ委員会 (低合金鋼)	600	7180	—
		500	37259	16(3)			500	9400	—
		550	58000	57(3)			600	34828	52
2 $\frac{1}{4}$ Cr—1Mo	I S O	600	64000	39(1)	I S O	I S O	700	33289	29
		650	9946	—			800	3300	—
		482 (900F)	4850	—			566 (1050F)	1598	—
2 $\frac{1}{4}$ Cr—1Mo	A S T M (S T P No. 151)	538 (1000F)	9240	—	16—13—Mo (sus 316)	A S T M (D S 5—S 1)	649 (1200F)	25297	9
		593 (1100F)	29286	2			732 (1350F)	13913	2
		500	18222	5(4)			600	6195	—
2 $\frac{1}{4}$ Cr—1Mo	クリープ委員会 (低合金鋼)	550	86891	10(1)	学振第 129委 (ステンレス鋼)	学振第 129委 (ステンレス鋼)	650	7511	—
		600	15770	2			700	3761	—

表 5 高温引張試験方法の比較

規格名 項目	ASTM	DIN	ISO	BS	POCT	JIS
荷重精度	±1%		±1%	±0.5%	±1%	±1%
試験温度の 許容範囲	≤1800 F ±5 F >1800 F ±10 F 位置 ≤1800 F ±3 F >1800 F ±5 F 時間	±2 C	±3 C	≤800 C ±5 C >800 C 協定	≤600 C ±3 C 600 ~ 900 C ±4 C 900 ~ 1200 C ±6 C	300 ~ 600 C ±3 C 600 ~ 800 C ±4 C 800 ~ 1000 C ±6 C <300 協定 >1000
伸び測定 精度	弾性係数 A 0.001 % B-1 0.01 % 耐力 B-2 0.02 %	0.2%耐力0.01 mm	GL ≥30 mm 0.01 mm	±0.01 % 弾性係数 ±0.002 %	伸び計目盛 0.02 mm以下	0.01 mmの変化が読みとれるもの
ひずみ速度 (負荷速度)	降伏点まで 0.5または5%/min 降伏点以上 5または10%/min	毎秒5 kg/mm以下	耐力 0.1~0.3%/min	耐力 0.1~0.3%/min	可動クランプ移動速度 がGLの 0.04~0.1に 相当するmm/min	耐力近傍 ≤0.3%/min 耐力以上 7.5 ±2.5%/min

表6 引張クリープ試験方法規格およびクリープ破断試験方法規格の概要

規 格		J I S Z 2 2 7 1—1 9 6 8	J I S Z 2 2 7 2—1 9 6 8
適 用 範 囲		引 張 ク リ ー プ 試 験 法	ク リ ー プ 破 断 試 験 法 連続, 断続試験を含む
試 験 片	断 面	原 則 と し て 円 形	原 則 と し て 円 形
	寸 法	D=10mm(6, 8, 10mmでもよい)	D=6mm(4, 10, 12mmでもよい)
	直径の不同	0.02mm以下	0.02mm以下
荷 重 精 度		±0.5 %以内	±1 % 以内
伸 び 測 定 精 度		原則として試験片両側の伸びを測定しうるもので, 0.01mmの変化を読みとりうるもの.	
試 験 片 温 度	測 定 個 所	標点距離内で3個所, その平均温度を試験片温度とする. GL 50mmの場合は中央の熱電対を省略しうる. 試験片の温度変化が以下の許容範囲にあることをあらかじめ確認できる場合は熱電対の本数をさらにへらすことができる.	
	変化の許容範囲	300℃をこえ 600℃以下	±3℃
		600℃をこえ 800℃以下	±4℃
		800℃をこえ 1000℃以下	±6℃

れている。また、金属材料技術研究所では国産高温用材料のクリープデータシート作成のための試験研究を昭和41年より開始し、現在までに30数種類の材料を選択して、クリープおよび高温引張試験を実施し、その結果を発表している¹⁰⁾。筆者らのまとめた「高温用鋼管材の高温強度特性¹¹⁾」は製造時期の異なる鋼管成品の多数チャージについて長時間のクリープ試験を含む高温強度特性を求め、さらにクリープ中の組織変化を詳細に調べた点で非常にユニークなデータ集である。

次に現在なされているクリープ破断試験の規模を示すため、代表的鋼種について長時間データの比較を行ったものを表4に示す。現在なされているすべてのデータが集録されているとは限らないが、これにより世界におけるクリープ試験規模の大略を知ることができる。

IV-2 高温強度の試験法

高温強度の正確なデータを求めるため各国において試験法が規格化されている。わが国ではクリープ試験法はすでに昭和31年に作成されたが、昭和42年に改称され、一方、高温引張試験法は昭和41年に初めて制定された。表5に各国の高温引張試験法の比較を、表6にクリープ試

験の主な内容を示す。試験機の標準化および試験法の検討については昭和36年以来、クリープ試験研究組合および日本鉄鋼協会クリープ委員会において精力的に行われた結果、それ以後統一的なデータがでるようになってきた。これらの試験においては試験温度のコントロールがもっとも重要な因子であるが、データの信頼性を客観的に評価する方法としてはスペシメンバンク材による検定や同一材による共同試験結果の比較などが実施されている。

現在、国際間でクリープ試験のばらつきの要因を検討するため国際共通クリープ試験が実施されている。これには英国、オーストリア、ベルギー、チェコスロバキヤ、西独、オランダ、スウェーデン、スイスおよび日本が参加している。日本では日本鉄鋼協会クリープ委員会を中心に本試験を行っている。共通試料としてCr-Mo-Vおよび18-8-Mo鋼を用い、最高30,000hrまでの試験を実施している。1974年のSheffieldでの会議で最終結論が出されることになっており、その成果が期待されている。

IV-3 高温強度の解析法

前述のように多数チャージによる高温強度データは規定の試験法で行っても一般に大きくば

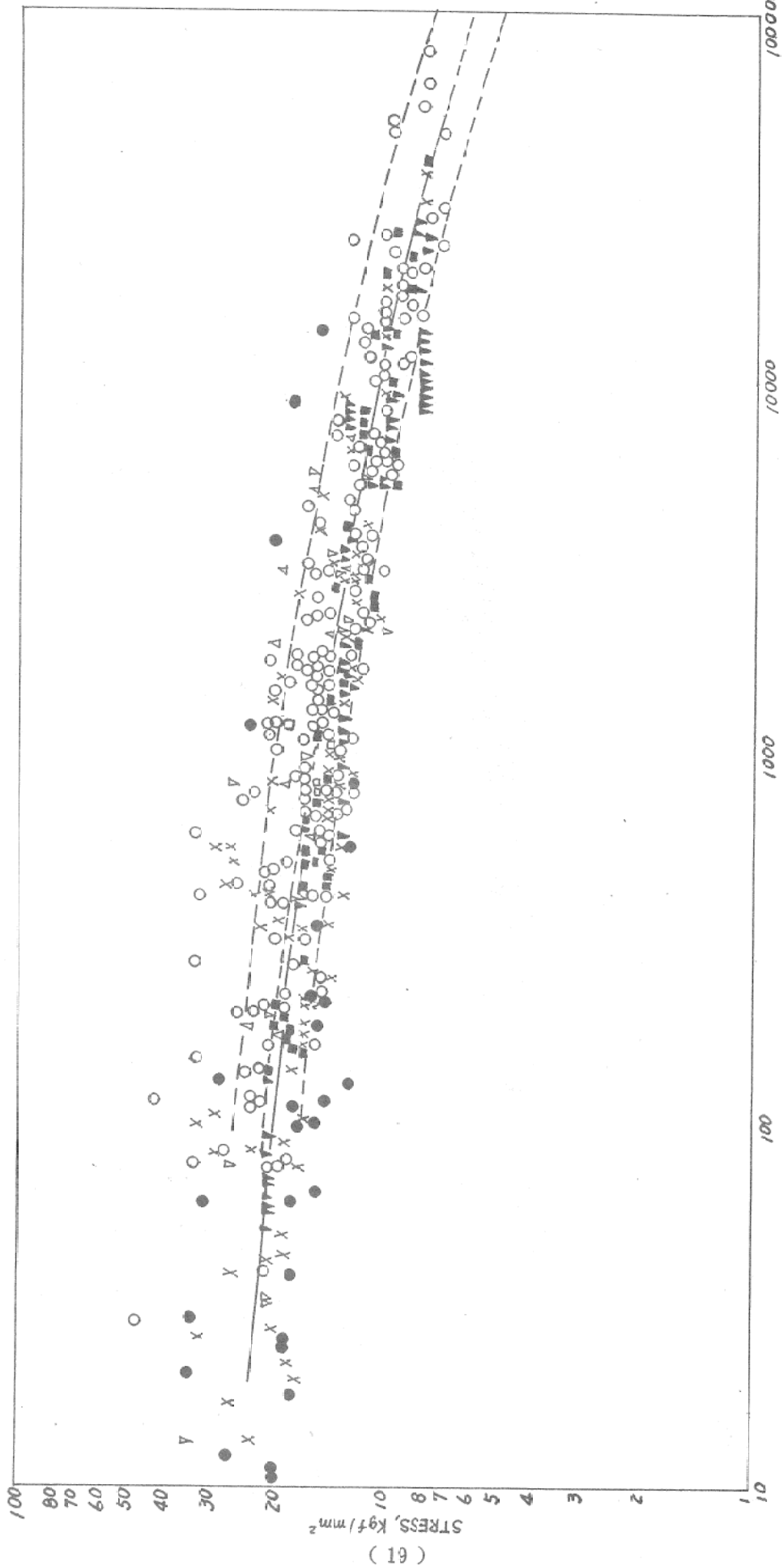


図7 2 1/4Cr-1Mo鋼のクリープ破断データ (550°C: ISO)

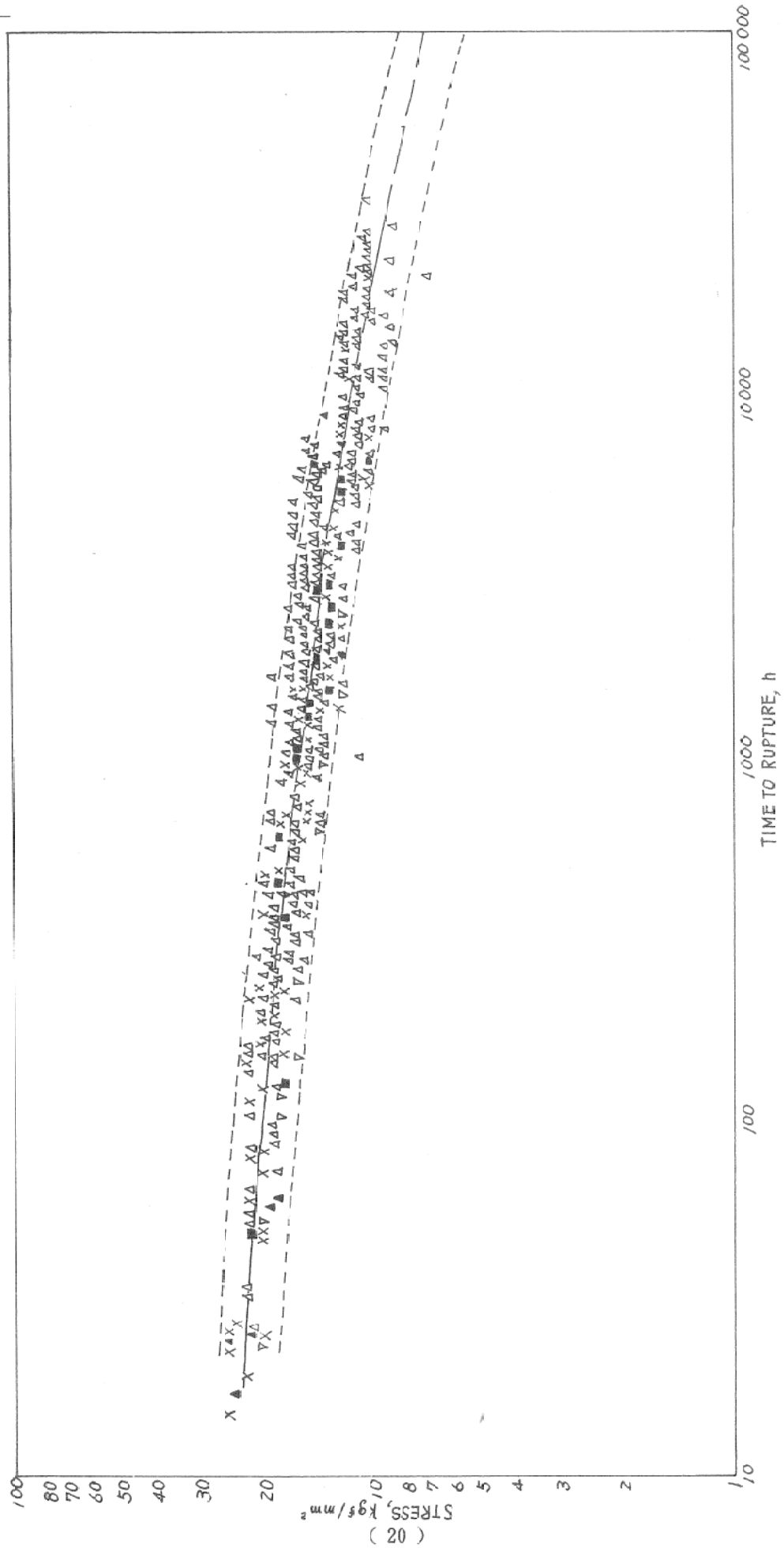


図8 16-13-Mo鋼のクリープ破断データ (650°C: ISO)

らつくが、この平均強度や強度巾を統計的手法によって客観的に算出する方法が考えられるようになってきた。しかし、いずれもまだ強度推定式に材質的な要因が充分導入されているとはいえず、単なる統計的な取り扱いのものが多い。これは材料的な見地からは不満ではあるが、エンジニアリングの面からはいずれの方法にせよ客観的に設計に必要な高温強度の算出法を確立することが強く要望されている。

クリープ破断強度を求める場合について述べるとその基本的なものは「応力-破断時間」曲線である。多く経験的手法により目のこで適当な線を引いて求めているが、その求め方に2通りの方法がある。一つは各チャージ毎にクリープ破断強度を求め、それを図9に示すように各温度に対してプロットし、そのスムーズ曲線か

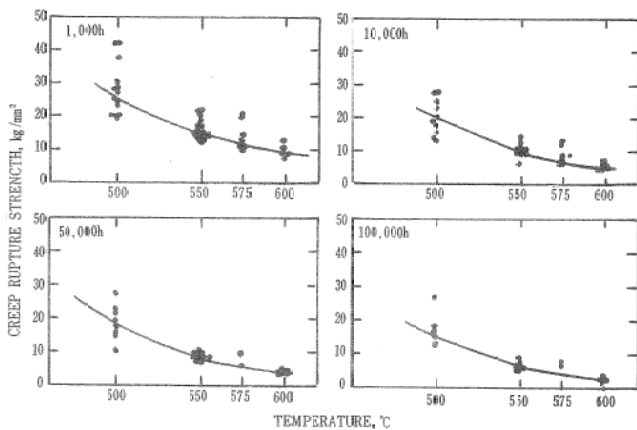


図9 2 $\frac{1}{4}$ Cr-1Mo 鋼のクリープ破断強度 (各チャージ毎の平均)

ら各温度における平均値および最少値を求める方法である。ASTMもこれに統計的な検討を加え、その結果から許容引張応力の変更を行った。今一つの方法は全データを一つのばらつきの母集団と見做してクリープ破断強度を求める方法である。(図10)後者の場合、目のこに代って最小二乗法を用いて図帰曲線を求める試みもいくつかなされているが、「応力-破断時間」線図が直線性を示す場合以外はかなりデータがない限り、その外挿値の算出には問題がある。

以上の「応力-破断時間」線図からの解析法では試験温度以外の温度におけるクリープ破断強度の算出は難しく、また短時間データからの

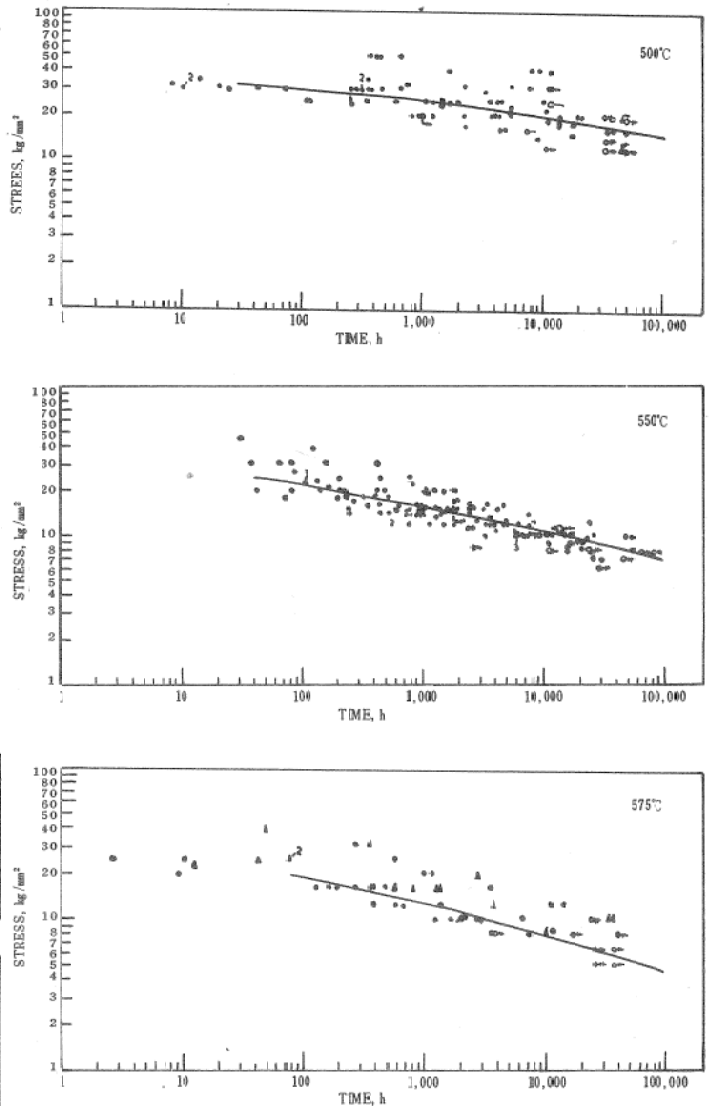


図10 2 $\frac{1}{4}$ Cr-1Mo 鋼の応力-クリープ破断時間線図 (一母集団)

外挿には大きな誤差を生ずる欠点がある。これを補う方法としてパラメータ法がある。これは「応力-破断時間」線図において高温短時間の値は低温長時間の値と同等であるという仮定のもとに試験温度、時間を含む一つのパラメータで曲線を整理する方法で実用的な外挿法として用いられている。主なパラメータ法として次のものがある。

- (1) Larson-Miller法

$$P = T(C + \log t)$$

- (2) Manson-Haferd法

$$\phi = \frac{T - T_a}{\log t - \log t_a}$$

- (3) Sherby-Dorn法

$$\phi = \log t - B/T$$

(4) Murry法

$$F(\sigma) = \frac{\log t + P\sigma}{1/T - n}$$

但し T : 試験温度 (°K)

t : 破断時間 (hr)

他は常数

いずれも絶体的なものではないが、常数値はデータにもっともフィットする値として電子計算機などを使って与えられ、その値は鋼種により異なる。

次にISOのデータ整理に適用されたパラメータ法の実施要領を示す。

(1) 各試験温度についてすべてのデータを「応力-破断時間」線図としてプロットする。

(2) 「応力-破断時間」線図から平均曲線を次式の回帰二次曲線として計算する。

$$\log t = a + b \log \sigma + c (\log \sigma)^2$$

これは応力および破断時間をそれぞれ独立変数とした場合について計算する。

(3) 実際データとの適合性から判断してもっとも適当と考えられる線図を得る。(図11)

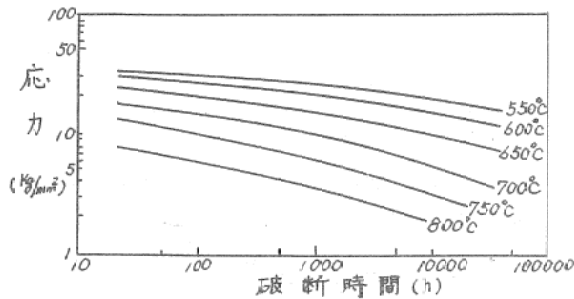


図11 TP 321鋼の平均応力-破断時間曲線

この図から表7に示す数値を読みとり、これを用いてパラメータ法の常数項およびマスター曲線を作成する。

(4) 常数項の最適値を得るためパラメータ値を応力の直交多項式として表わす。

$$P(\sigma) = \frac{\log t - \log t_a}{(T - T_a)}$$

$$= U_1 Q_1(\log) + U_2 Q_2(\log \sigma) + \dots$$

$$\dots + U_{m+1} Q_{m+1}(\log \sigma)$$

σ : 応力

U_1, U_2, \dots : 係数

m : 最高次数

表7 平均「応力-破断時間」線図から求めたクリープ破断強度

温度 (°C)	破断時間 (h)	応力 (kg/mm)
566	20	34.2
	40	33.0
	100	31.5
	400	28.2
	1,000	25.6
	4,000	22.0
	10,000	19.5
600	20	31.0
	40	29.5
	100	27.5
	400	24.0
	1,000	21.6
	4,000	17.7
	10,000	15.2
650	20	25.4
	40	23.6
	100	21.3
	400	17.7
	1,000	15.4
	4,000	12.1
	10,000	10.0
700	20	18.0
	40	16.6
	100	14.6
	400	11.5
	1,000	9.6
	4,000	6.9
	10,000	5.3
750	20	13.5
	100	10.0
	400	7.6
	1,000	6.1
	4,000	4.2
	10,000	3.2
	800	20
40		7.2
100		6.1
400		4.6
1,000		3.7
4,000		2.4
10,000		1.7

常数項の最適値は曲線の平方和が最小になるようにして得られるが、実際の計算には試行錯誤法によりすべての組合せを電子計算機により走査して求める。図のTP 321鋼の場合にはマスター曲線として次のものが得られている。

$$P(\sigma) = \frac{\log t - 85.99}{(T - 100)^{7-0.2}}$$

V 結 言

ボイラ用材料の変遷とその設計の基礎データである高温強度について述べた。今後は長時間データが多数とられるのに相俟って、国際的に

統一された試験法の確立および解析法の確立がなされることにより、精度の高い高温強度が設定され、より合理的で安全性の高いボイラが設計されるようになるものと期待される。

文 献

- 1) 住友金属：「鋼管20年の歩み」(S.46.11)
- 2) ASTM:Special Technical Publication No.180(1955)
- 3) ASTM:Special Technical Publication No.124(1952)
- 4) Smith, G. V:ASTM Data Series DS5S2(1969)
- 5) Smith, G. V:ASTM Data Series DS11S 1(1970)
- 6) BSCC:High Temperature Data(1972-1973)
(The Iron and Steel Institute)
- 7) Burton, Detal:Eigenschaften Warmfester Stahle(1972)
- 8) 日本学術振興会 129 委員会第 3 分科会：金属材料高温強度データ集(低合金鋼、1964：ステンレス鋼、1968)
- 9) 日本鉄鋼協会クリープ委員会：金属材料高温強度データ集(第1編 低合金鋼編)
- 10) NRIM:Creep Data Sheet No.1~6(1972)
- 11) 住友金属：高温用鋼管材料の高温強度特性(1972)