

.....
論 文

UDC 669.14.018.85 : 620.172.251.224

ボイラー用鋼の諸特性におよぼす各種細粒化元素の影響*

乙黒 靖男**・橋本 勝邦***・三井田 隆***・村木潤次郎****

The Effect of Various Grain Refining Elements on Properties of Steels for Boiler

Yasuo OTOGURO, Katsukuni HASHIMOTO,
 Noboru MIIDA, and Junjiro MURAKI

Synopsis:

The effects of various grain refining elements on creep rupture strength, strength at room temperature, and impact properties have been investigated for some boiler plate steels.

The results obtained are as follows.

1) The impact properties and yield strength at room temperature depend only upon the grain size. The transition temperature in Charpy impact test (2 mm V notch) drops and the yield strength increases in proportion to the reciprocal of the square root of the ferrite grain diameter, but the creep rupture strength decreases with the decrement of the content of active nitrogen caused by the combination with such nitride forming elements as Al, Ti, and Nb.

2) Test temperatures at which the creep rupture strength are influenced by active nitrogen change with the chemical composition of steels. The effect of active nitrogen on the creep rupture strength is significant at 450°C but is inconspicuous at 550°C for Si-Mn steels.

For steels containing Cr and /or Mo, the effect of active nitrogen is remarkable even at 550°C. This seems to be caused by the I. S. effect between Cr and /or Mo and nitrogen.

3) Even the addition of a small amount of Al as a deoxydizer lowers remarkably the creep rupture strength because Al is a very strong nitride former.

But in steels containing Mo or both Mo and Cr, a still more addition of Al turns to increase the creep rupture strength.

This is due to the increment of the amount of bainite with increasing Al content.

(Received Jan. 12, 1973)

1. 結 言

炭素鋼の高温強度は製造上の諸要因によつて大きく影響されることは従来よりよく知られており、その主因が脱酸法とくに Al 添加と関連していることが多くの報告^{1)~4)}によつて明らかにされている。

Al 脱酸による強度低下の理由についても、多くの研究者^{5)~7)}が鋼中の Al が AlN として N を固定し、固溶 N 量を減ずるためであることを指摘している。一方結晶粒度の影響も無視できないという報告^{8)~10)}もあり、一般的に粗粒の材料がクリープ強度が大きいといわれている。

しかしながら結晶粒度の影響もそれ自体単独で区別できるものではなく、熱処理、組織、細粒化元素の種類などの影響を包含したものとなる。

一方構造材に要求される切欠靱性については、細粒組織が好ましいことは周知のことであるが、このためには一般的に Al 添加が用いられている。しかるに Al は高温強度の面からは不利であるので、両者の兼ね合いから添加量が制限されている。

本研究においては細粒化元素として Al, Ti, Nb, Zr, Te などを取り上げ、切欠靱性と高温強度におよぼす影響を検討した。

* 昭和43年9月、44年10月、46年10月本会講演大会にて発表

昭和48年1月12日受付

** 新日本製鉄(株)製品技術研究所 工博

*** 新日本製鉄(株)製品技術研究所

**** 新日本製鉄(株)広畑製鉄所 工博

Table 1. Chemical compositions of steels.

	C	Si	Mn	Cr	Mo	Nb	Ti	Zr	Te	Ce	Al sol.	N _T
A-1	0.144	0.30	0.69								<0.005	0.0059
A-2	0.155	0.26	0.66								0.007	0.0050
A-3	0.159	0.32	0.72								0.022	0.0059
A-4	0.151	0.27	0.68								0.033	0.0053
A-5	0.158	0.30	0.70			0.013					<0.005	0.0055
A-6	0.170	0.29	0.69				0.03				<0.005	0.0053
A-7	0.154	0.31	0.69					0.02			<0.005	0.0060
A-8	0.165	0.30	0.71						0.01		<0.005	0.0058
A-9	0.152	0.30	0.70						0.02		<0.005	0.0057
A-10	0.155	0.32	0.72							0.02	0.005	0.0060
A-11	0.152	0.31	0.71							0.05	0.005	0.0060
A-12	0.152	0.31	0.72							0.09	<0.005	0.0060
A-13	0.153	0.29	0.67	0.22							<0.005	0.0058
A-14	0.153	0.30	0.65	0.36							<0.005	0.0054
A-15	0.155	0.30	0.69	0.57							<0.005	0.0064
A-16	0.157	0.30	0.70	0.62							0.022	0.0064
B-1	0.107	0.30	0.56	2.23	1.00						<0.005	0.0067
B-2	0.101	0.31	0.56	2.30	1.05						0.026	0.0073
B-3	0.095	0.31	0.55	2.27	1.00				0.02		<0.005	0.0064
B-4	0.103	0.31	0.55	2.33	0.98		0.034				<0.005	0.0058
B-5	0.109	0.29	0.55	2.26	0.97	0.027					<0.005	0.0065
C-1	0.142	0.33	0.69								<0.005	0.0051
C-2	0.139	0.32	0.72								0.025	0.0053
C-3	0.141	0.33	0.70								0.090	0.0053
C-4	0.140	0.31	0.71								0.17	0.0053
C-5	0.141	0.33	0.73								0.38	0.0058
C-6	0.145	0.30	1.37								0.006	0.0056
C-7	0.145	0.31	1.38								0.030	0.0061
C-8	0.146	0.30	1.38								0.16	0.0061
C-9	0.146	0.33	1.39								0.38	0.0059
C-10	0.137	0.30	0.66	0.81							<0.005	0.0054
C-11	0.141	0.29	0.69	0.84							0.025	0.0060
C-12	0.143	0.30	0.70	0.83							0.14	0.0062
C-13	0.142	0.32	0.73	0.83							0.37	0.0063
C-14	0.143	0.29	0.66		0.53						<0.005	0.0050
C-15	0.138	0.31	0.66		0.52						0.022	0.0053
C-16	0.143	0.29	0.69		0.53						0.12	0.0058
C-17	0.141	0.32	0.70		0.51						0.38	0.0053
C-18	0.139	0.29	1.29		0.50						<0.005	0.0050
C-19	0.143	0.31	1.33		0.53						0.028	0.0054
C-20	0.143	0.31	1.36		0.52						0.13	0.0058
C-21	0.144	0.34	1.38		0.53						0.36	0.0055
C-22	0.141	0.28	0.66	0.82	0.52						<0.005	0.0055
6-23	0.137	0.29	0.66	0.84	0.52						0.023	0.0054
C-24	0.139	0.29	0.67	0.82	0.52						0.13	0.0064
C-25	0.136	0.31	0.68	0.82	0.51						0.37	0.0061

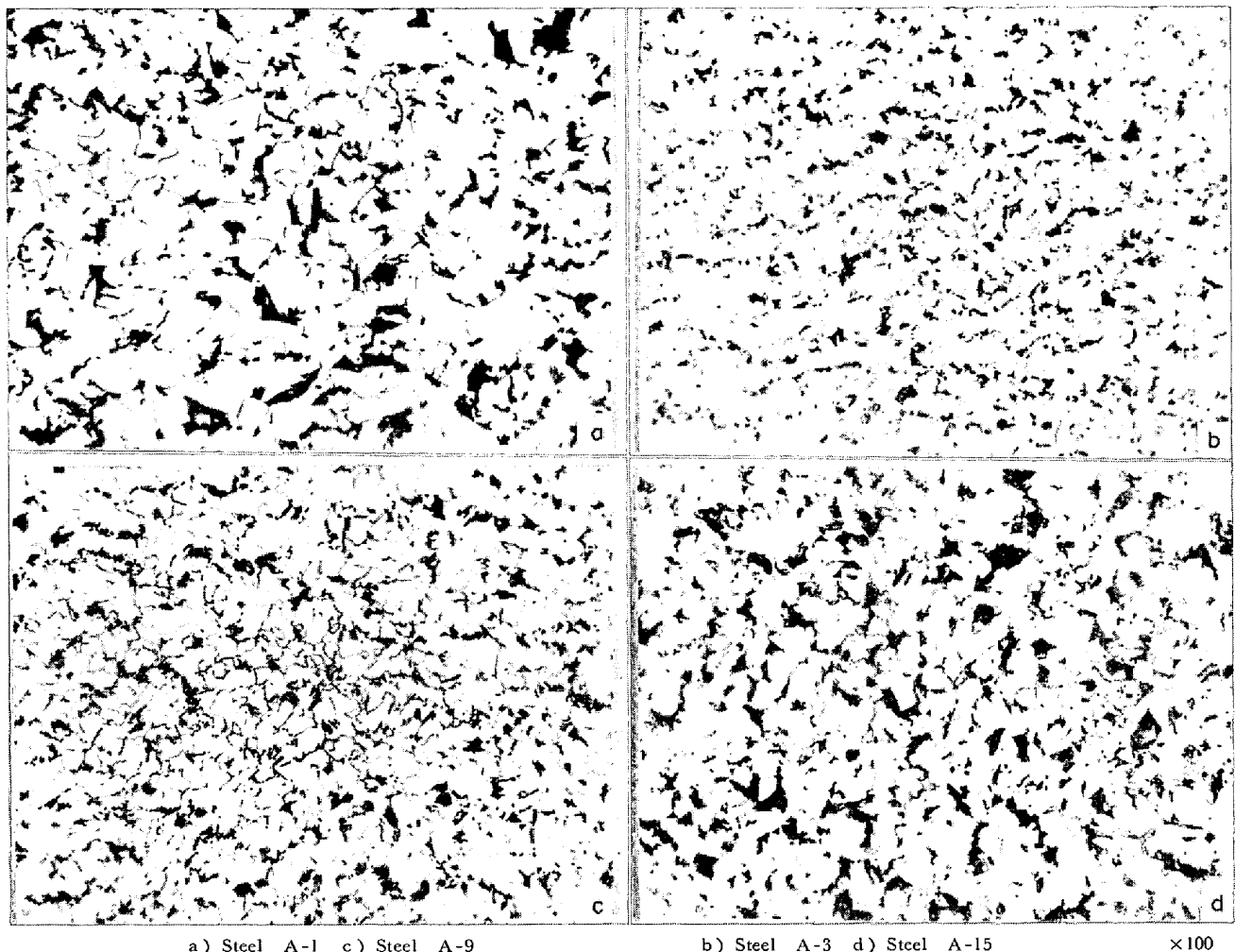
また上述の固溶Nの影響については試験温度、合金元素によつても大きく左右されることが認められたので、Mo鋼、Cr-Mo鋼についても同様に切欠靱性と高温強度におよぼす細粒化元素の影響を調査した。またAlについては脱酸剤としての添加量をこえて、各成分系における量的影響もあわせて調査した。

2. 供 試 鋼

供試鋼はSB42と $2\frac{1}{4}$ Cr-1Mo鋼を基本組成として種々の脱酸剤、細粒化元素を添加した鋼(A系、B系)とさらに0.7%Mn鋼、1.3%Mn鋼、0.8%Cr鋼、0.7%

Mn-0.5%Mo鋼、1.3%Mn-0.5%Mo鋼、0.8%Cr-0.5%Mo鋼の6成分系に種々の量のAlを添加した鋼(C系)を用いた。供試鋼の化学組成をTable 1に示す。

試験材は15KVAの高周波溶解炉で5.6kg溶製し、衝撃試験用として15mm角棒に引張試験およびクリープ破断試験用として18mmφにそれぞれ鍛伸した。熱処理条件は $2\frac{1}{4}$ Cr-1Mo鋼のみ焼鈍と焼準を行なつたが、他鋼種は焼準のみを施した。焼準温度はA系の鋼は880°C、B系の鋼は920°C、C系の鋼はC1~C13は880°C、C14~C25は900°Cとした。焼準の冷却速度は40mm板厚相当とするため、あらかじめ11mm板



a) Steel A-1 c) Steel A-9
b) Steel A-3 d) Steel A-15
Photo. 1. Microphotographs of steels normalized at 880°C (Aseries).
x100

厚の鉄箱の中に試料を入れて熱処理を行なった。このときの試料の 800°C から 400°C までの平均冷却速度は約 15°C/min である。B系の鋼の焼鈍条件は920°C炉冷である。

3. 実験結果および考察

3.1 SB42 鋼における細粒化元素の効果

3.1.1 顕微鏡組織

供試鋼の顕微鏡組織を Photo. 1 に示す。組織はすべてフェライト+パーライトである。結晶粒度は Al, Nb, Ti, Te の添加によって著しく微細化されるが Zr はほとんど効果がない。

Cr は添加量の増大につれてパーライト領域が増大している。Ce はわずかに細粒化されるがきわめて弱い。

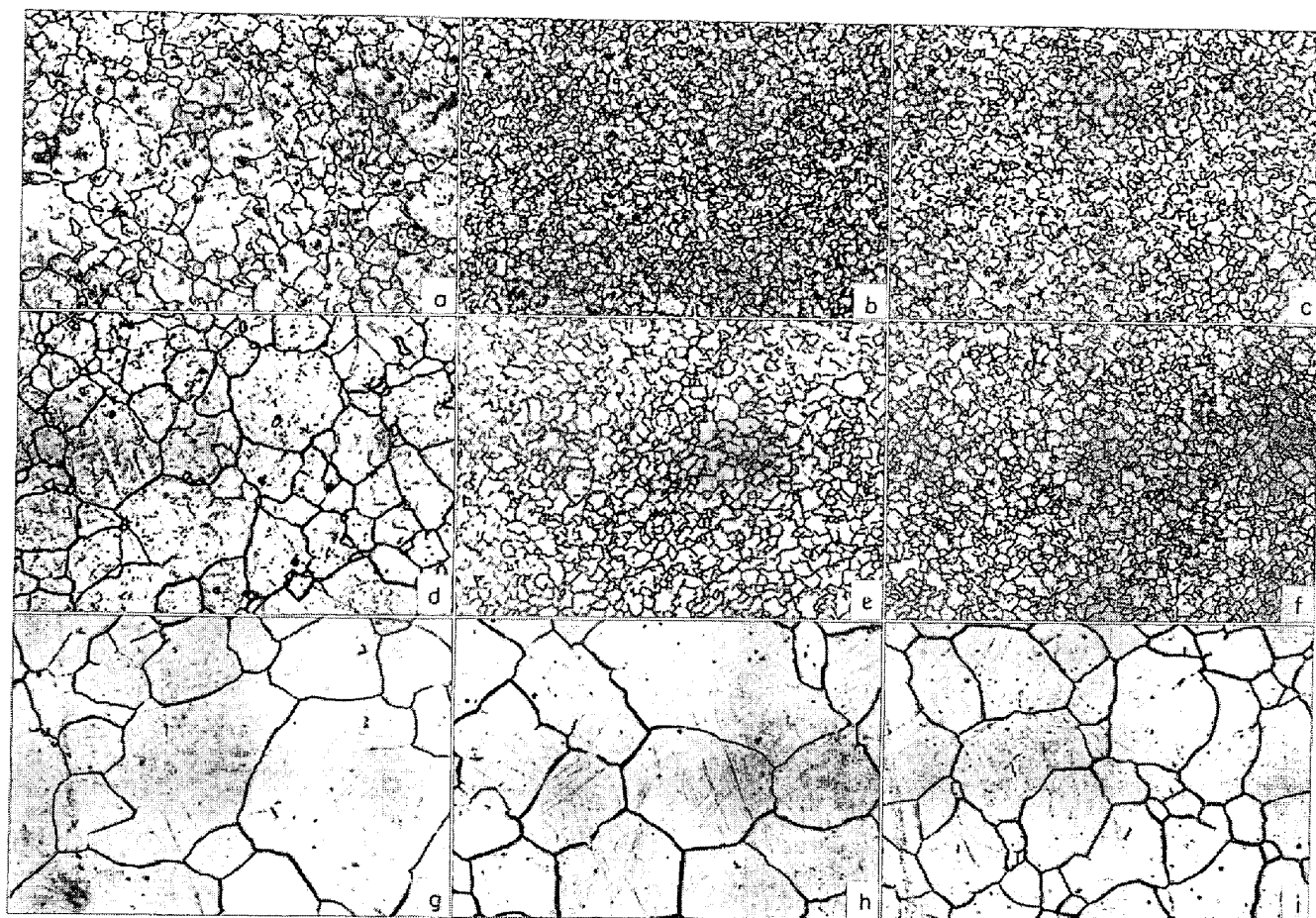
オーステナイト結晶粒度は瞬間酸化法により現出した一例を Photo. 2 に示すが、フェライト結晶粒度に対応して、Al, Nb, Ti, Teを添加した鋼は細粒であり、かつ粗大化温度も高い。

3.1.2 常温引張性質と衝撃特性

常温の引張試験は JIS 4号サブサイズ (10 mm φ, G.L. 35.4 mm) で行ない、切欠靱性については 2 mm Vノッチ・シャルピー試験片による衝撃試験を行なった。結果を Table 2 に示す。切欠靱性は vTr_{15} で判定しているが鋼種によって -30~-80°C の範囲で変動している。これは当然結晶粒度に依存しているのでフェライト粒径を自動粒径測定器によって 60 個測定し、その平均値を Table 2 の右端の欄に併記した。

機械的性質におよぼす各種添加元素の量的影響は Fig. 1 に示すとおりである。(ただし、Nb, Ti, Zr は添加量が一段階のみであるので省略した。)

一般に各元素とも引張強さに対してはほとんど影響を与えないが、降伏点に対しては添加量が増すにしたがってかなりの強度上昇を示した。とくに Al, Te などの細粒化元素の場合強化が著しい。なお、グラフには表示していないが Nb, Ti も同様の理由から降伏強さを上昇させる。



a) Steel A-1 900°C
d) Steel A-1 1000°C
g) Steel A-1 1100°C

b) Steel A-3 900°C
e) Steel A-3 1000°C
h) Steel A-3_1 100°C

×100 (2/3)
c) Steel A-9 900°C
f) Steel A-9 1000°C
i) Steel A-9 1100°C

Photo. 2. Austenite grain size of steels of A series. (holding time 30 min).

Table 2. Mechanical properties of steels of A series (at room temp.).

	Tensile properties at room temperature				$vTr\ 15$ (°C)	G. S. (μ)
	T. S. (kg/mm ²)	Y. S. (kg/mm ²)	El. (%)	δ (%)		
A-1	43.3	26.5	44.5	68.6	-28	25.6
A-2	43.3	30.5	44.3	70.2	-42	20.4
A-3	43.5	34.4	45.3	71.3	-52	13.7
A-4	43.3	33.8	45.0	71.0	-48	15.8
A-5	44.2	38.3	41.8	70.8	-41	12.8
A-6	42.6	33.5	45.6	71.0	-40	15.6
A-7	43.6	25.5	47.0	72.1	-36	24.3
A-8	43.3	35.8	45.9	69.9	-51	12.5
A-9	42.4	32.2	45.0	69.4	-50	12.6
A-10	43.2	28.2	44.5	68.6	-32	25.6
A-11	43.0	31.1	43.4	69.4	-40	24.2
A-12	42.8	—	46.5	69.8	-38	22.2
A-13	43.7	27.8	45.2	70.3	-48	22.9
A-14	44.8	27.8	48.7	72.7	-51	22.8
A-15	44.9	30.1	44.9	73.2	-70	21.3
A-16	46.3	33.9	45.1	75.5	-76	15.8

また切欠靱性におよぼす各種元素の影響を $vTr15$ によって調べた結果は Fig. 2 に示すとおりである。Al添加

については周知のとおり、遷移温度の著しい低下が見られ、基本組成の鋼は -28°C であるが、0.02% では -52°C に低下しそれ以上の添加ではほとんど変化しない。また Te, Ce の場合も添加量の増加にともなつて $vTr15$ は低下するが、Ce は Te, Al にくらべて低下の度合は小さく、0.05% 以上ではほぼ一定である。Te は Al 同様に著しく遷移温度を低下させた。

Cr の場合は多量に添加すると切欠靱性に有害であるというのが従来の説¹¹⁾¹²⁾であつたが、これは Cr 量の増加によつてベイナイトの混在組織となるような組織変化を生ずる場合におこる劣化で、フェライト+パーライト組織の場合にはむしろ Ni より遷移温度を低下させるという報告¹³⁾もある。著者らの実験結果も全くこれと同じ傾向を示し、0.5% 付近までの添加によつて急激な低下が認められた。

また Nb, Ti, Zr においても細粒化効果により $vTr15$ で $10\sim 30^{\circ}\text{C}$ の低下が認められたが、このうち Zr 添加材はフェライト結晶粒が微細化されにくいので最も効果

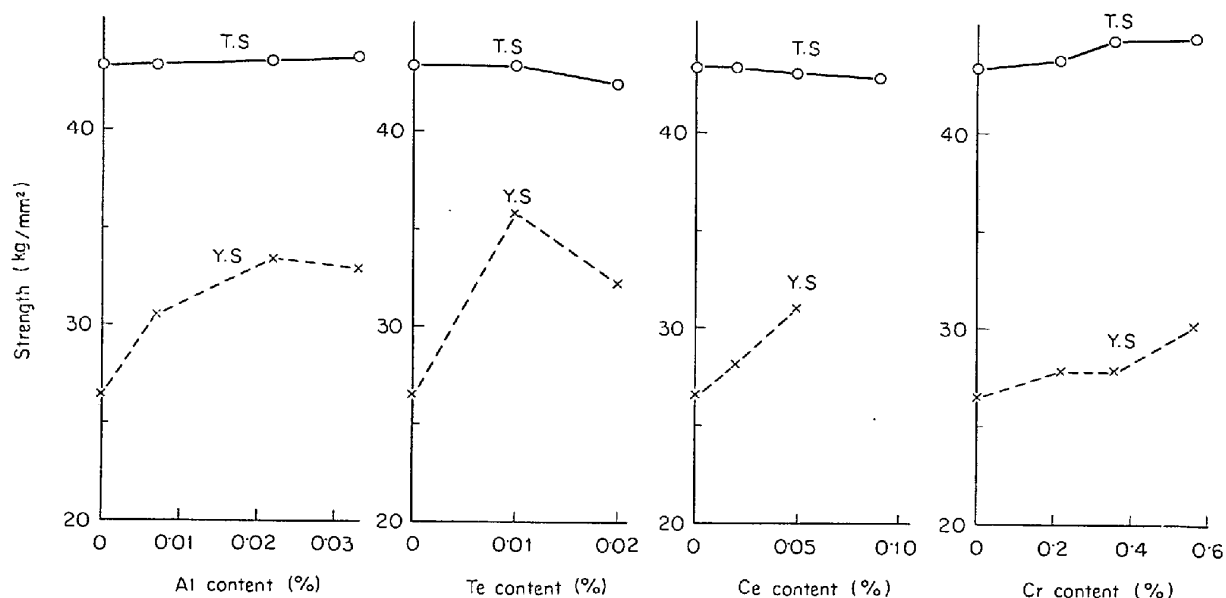


Fig. 1. Effect of content of alloying elements on tensile strength and yield strength (A series).

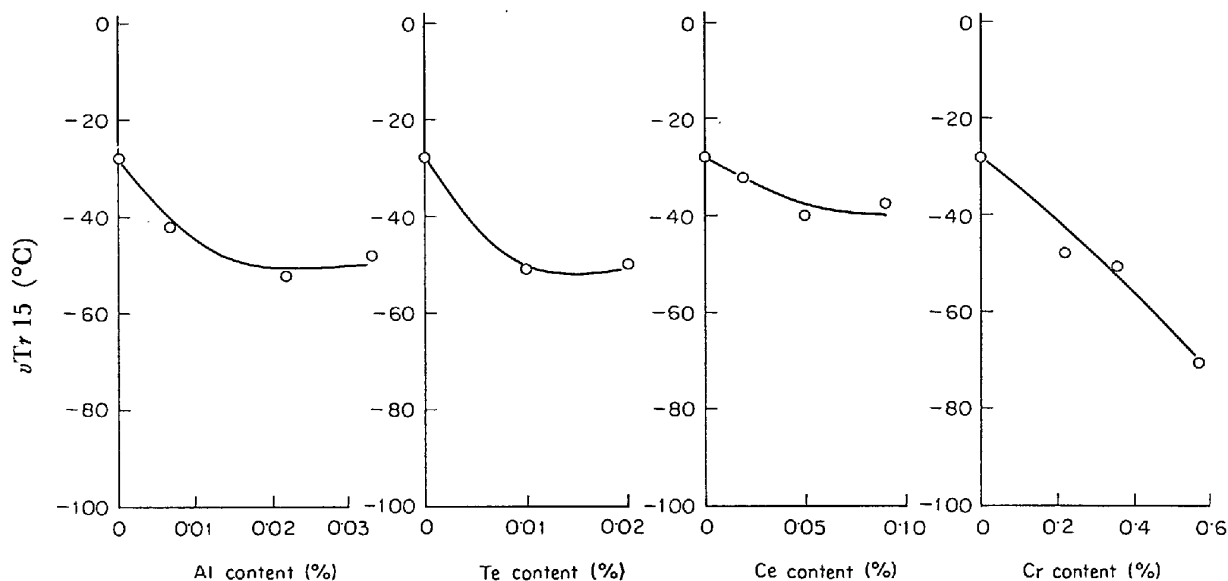


Fig. 2. Effect of content of alloying elements on transition temperature in Charpy impact test (A series).

が弱い。

結晶粒径との関連で降伏強さ、 vTr_{15} を PETCH の関係式で整理すると Fig. 3, Fig. 4 に示すとおりとなる。

細粒化に伴って降伏強さは上昇する傾向にあるが、単純な直線関係にはならない。標準として Al 添加の場合を直線で結ぶと、Ce, Nb, Cr など直線関係からはずれる点は、細粒化以外の強化作用、すなわち Nb は分散硬化、Ce, Cr は固溶体硬化などの作用が働いていると考えられる。

また結晶粒径と vTr_{15} の関係も、降伏強さと同様単純な直線関係にのらないものが多い。たとえば高温側に

はずれている Nb は細粒化のほかに Nb(CN) の存在による分散硬化が加わるために劣化すると考えられる。一方 Ce, Cr はあまり細粒化に貢献しないが、N の固定作用および Ce の場合は硫化物の形状変化(MnS→CeS)によつて靱性が改善されるために低温側にはずれると推定される。

3.1.3 クリープ破断特性

クリープ破断試験は 1.5 t シングル型試験機を用いて 450°C, 20 kg/mm², 23 kg/mm², 550°C, 5 kg/mm², 8 kg/mm² の 2 温度, 4 応力水準について行ない、1000 hr 付近の破断時間で相互の差を見い出そうとした。ク

リープ破断試験結果は Table 4 に示すとおりである。
このうちクリープ破断時間、最小クリープ速度におよぼ

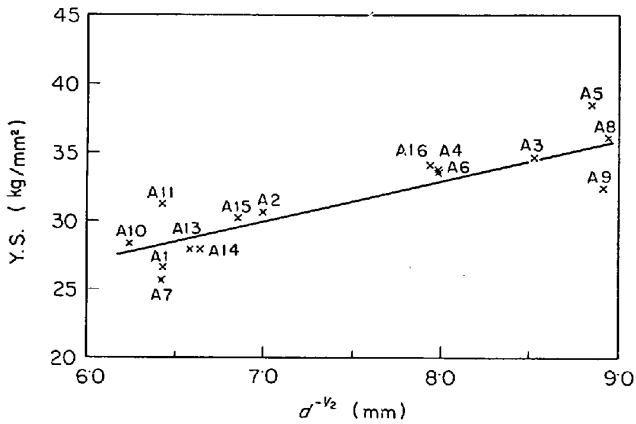


Fig. 3. Relation between yield strength and ferrite grain size for steels of A series.
(Number in the figure : Kind of steels)

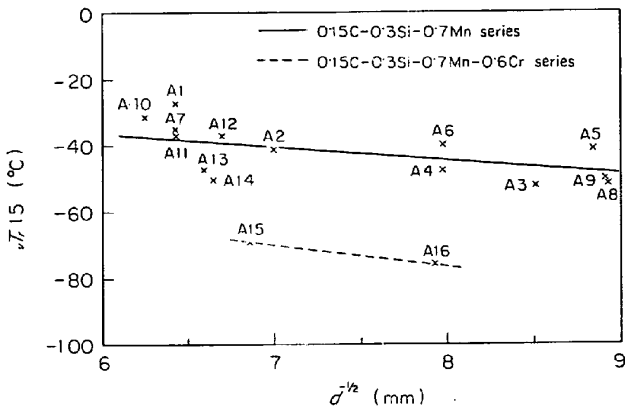


Fig. 4. Relation between transition temperature in charpy impact test and ferrite grain size.
(Number in the figure : Kind of steels)

す Al, Te, Ce, Cr の影響を図示するとそれぞれ Fig. 5~8 のとおりである。

Al 添加の場合はいずれの温度でも sol. Al 0.01% までは最小クリープ速度が急激に上昇し、それに対応して破断時間も低下する。しかしそれ以上増加するとその変化の割合は若干ゆるやかになるが、いずれにしてもクリープ特性の上で著しい弊害があり、ボイラー用鋼材の脱酸剤あるいは粒度調整剤として Al の使用を避ける従来の考え方を裏付けるものである。また 450°C にくらべ 550°C では Al 添加によるクリープ破断強さの劣化の割合が著しく小さく、固溶 N の効果は高温になるほど弱いことがわかる。クリープ破断強さにくらべ、最小クリープ速度は 550°C でも固溶 N の依存性が強い。

Te 添加の場合も僅かにクリープ特性は劣化するが、Al 添加にくらべ劣化の程度は著しく小さいので、切欠韌性を重視する場合は 0.02% 程度までの Te を添加することが適当である。

Ce は 0.05% 程度まではクリープ破断強さの向上に寄与するが、それ以上の添加ではかえって強度は低下する。

Cr は 0.2% 程度の添加でクリープ特性の著しい改善が認められる。クリープ破断時間は Cr 量とともにほぼ直線的に増大しているが、最小クリープ速度はかえって 0.2% 以上ではやや増加する傾向が認められる。この両者の違いは第 3 期クリープの現われ方の相違によるものと考えられる。

Ti (0.03%), Zr (0.02%) を含有する鋼 A6, A7 は sol. Al 0.02% 含有する鋼 A3 と同程度の劣化が認めら

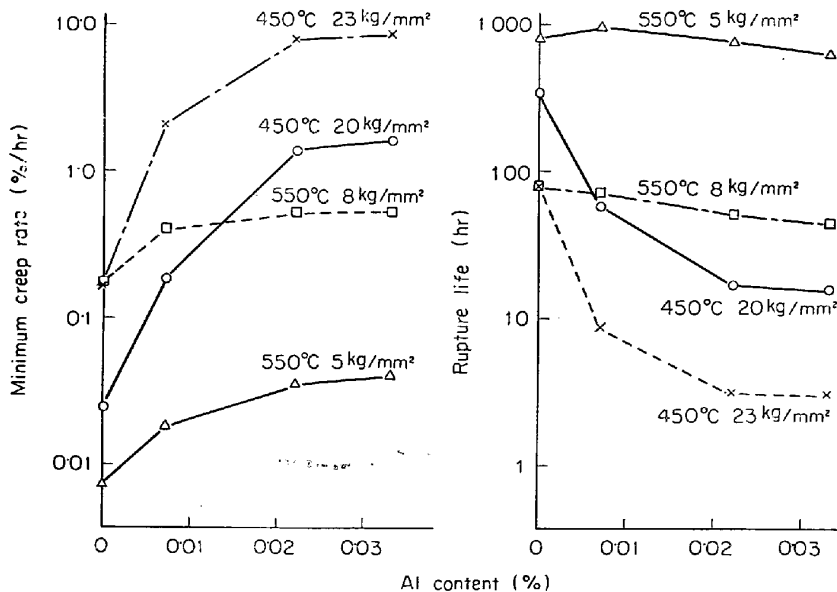


Fig. 5. Effect of Al content on creep rupture properties.

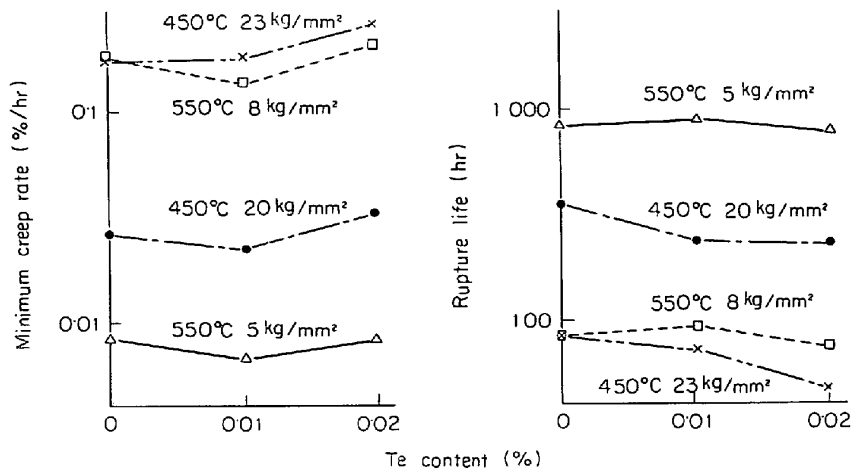


Fig. 6. Effect of Te content on creep rupture properties.

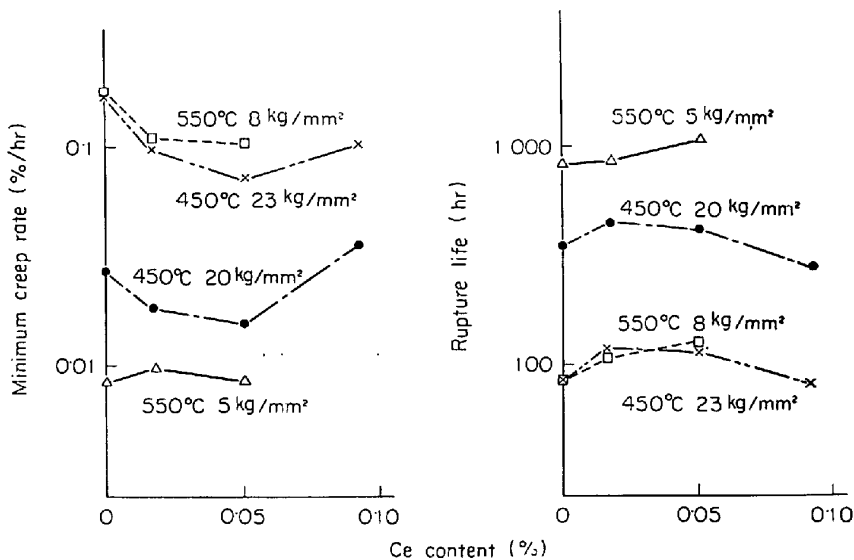


Fig. 7. Effect of Ce content on creep rupture properties.

れるが、Nb (0.013%) を含有した鋼 A5 は試験温度 450°C では A3 とほぼ同程度の劣化が認められるのに対し 550°C では逆に基本組成の鋼 A1 より強化されている。これは 450°C でのクリープ破断強度が固溶 N に支配されるのに対し、550°C では固溶 N の効果が小さく Nb(C, N) の分散硬化作用が大きく働いたためであろう。

以上のようにクリープ特性について鋼中の固溶 N がきわめて重要な影響を持つことは従来からいわれていることであるが、これは同時に切欠靱性にも関連したことでクリープ特性を損わず、しかも切欠靱性を向上させるような脱酸剤あるいは添加元素を考える場合に鋼中の固溶 N の存在を確認しておくことは不可欠の問題である。

たとえば Al の添加量考えた場合 AlN の生成による細粒化で切欠靱性を向上させる反面、N の固定でクリープ破断強度の低下の程度を知るのに固溶 N の定量が必

要となる。このため内部摩擦による固溶 N の測定を行なった。

試料は板厚 1 mm の冷間圧延板を平面研削盤で 0.8 mm 厚に仕上げた後、幅 1 mm × 長さ 150 mm にダイヤモンドカッターにより切り出した。熱処理は歪取りとともに実際にクリープ試験を行なった場合に近い条件にするため、880°C 焼準 (冷却速度も同一条件) 後 450°C、20hr 再加熱し、急冷した。

内部摩擦の測定法は共振周波数 1.5 cps を用いる逆つり方式によるもので、snoek ピークの高さおよび半価幅などの測定結果から固溶 N 量を推定した。この場合試料が実用鋼の組成のため Mn 量が多く、また Cr その他の合金元素の影響も明らかでないため、固溶 N の絶対値を測定したわけではなく、試料相互間の相対的な固溶 N 量の変化を snoek ピークの高さによつて比較するに止め

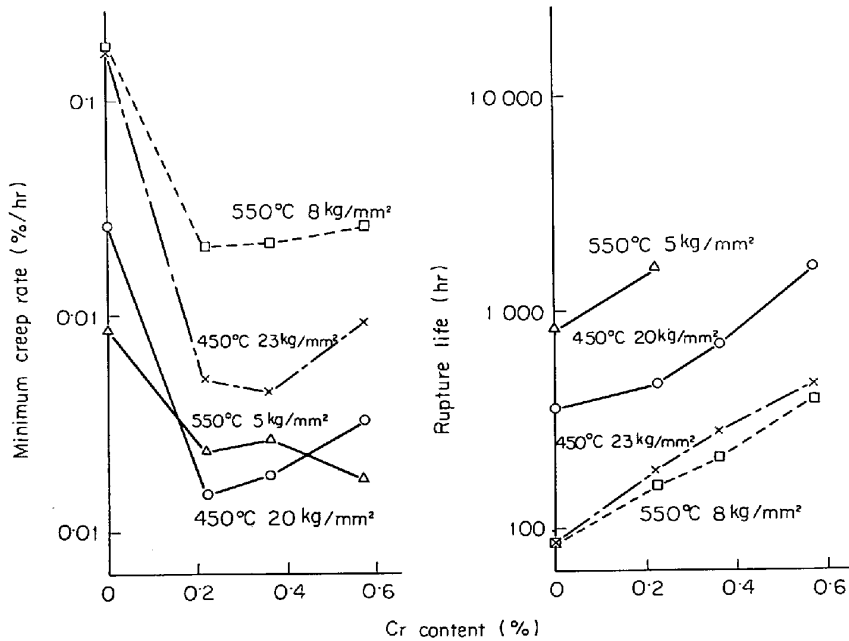


Fig. 8. Effect of Cr content on creep rupture properties.

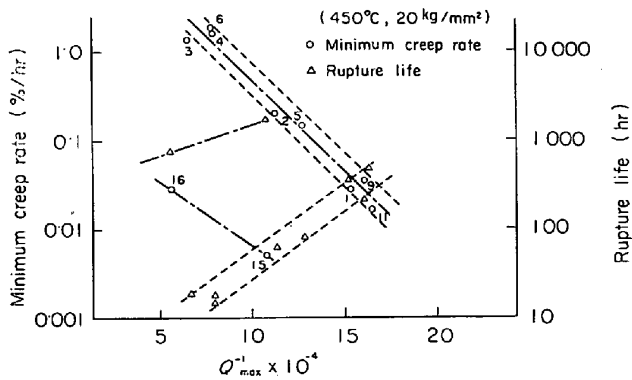


Fig. 9. Relation between minimum creep rate, rupture life and snook peak height.

た。

snoek ピークの高さと最小クリープ速度、クリープ破断時間の関係を試験温度 450°C、応力 20 kg/mm² に対し、それぞれ Fig. 9 に示す。基本組成の鋼 A1 はピークの高さが最も高く、Al あるいは Nb, Ti, Zr などを加えることによつてその高さが減じ snoek ピークの高さと最小クリープ速度あるいは破断時間とはほぼ直線関係が成り立つことが明らかに示されている。しかし Cr の場合は確かに Cr による N の固定により、snoek ピークの高さの減少が認められるが、同時に Cr による地鉄の強化によつてクリープ特性は向上しているので前記の直線関係からはずれている。また Cr を含有した鋼に Al を添加しても snoek ピークの高さの減少と最小クリープ速度の増加を生ずるが先に述べたように Cr の強化作用があるので、他元素に対する直線と平行な直線関係を示す

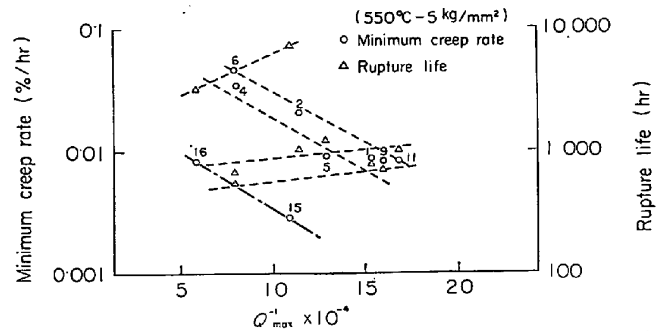


Fig. 10. Relation between minimum creep rate, rupture life and snook peak height.

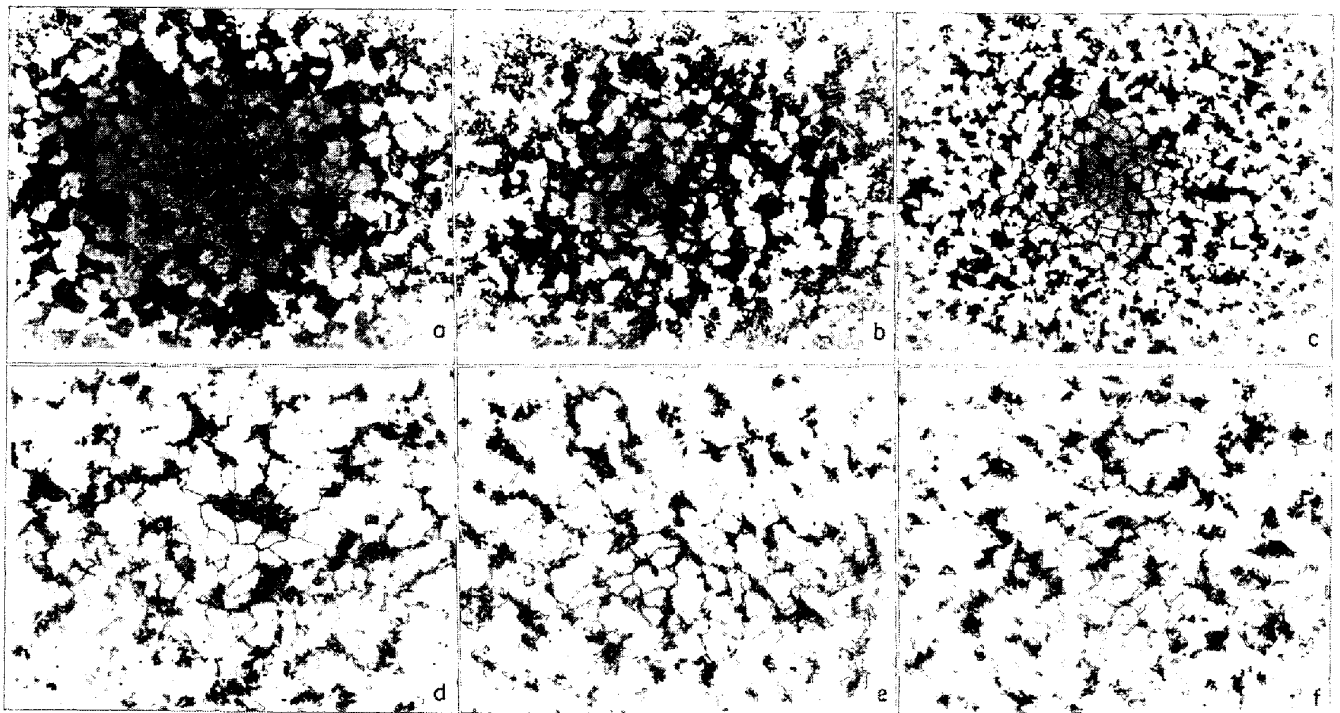
ことになる。応力を 23 kg/mm² に上げた場合もその傾向は全く同様である。

一方試験温度 550°C の場合は Fig. 10 に見られるように snoek ピークの高さに対するクリープ破断時間の関係がきわめて傾斜のゆるい直線関係を示している。すなわち 550°C においてはクリープ破断強さの固溶 N に対する依存性が非常に弱いことを示している。しかしながら 0.6%Cr 鋼 (No 15, No 16) については勾配がかなり大きいことから、固溶 N の依存性が残っている。すなわち固溶 N の効果は合金元素を含有することによつて高温まで持続するといえる。

3.2 2¹/₄Cr-1Mo 鋼における細粒化元素の効果

3.2.1 顕微鏡組織

供試鋼の顕微鏡組織を Photo. 3 に示す。焼準材の組織はフェライト+上部ベイナイトであり、焼鈍材はフェライト+パーライト(一部マルテン、下部ベイナイト)で



a) Steel B-1 920°C Normalizing
 b) Steel B-2 920°C Normalizing
 c) Steel B-3 920°C Normalizing
 d) Steel B-1 920°C Annealing
 e) Steel B-2 920°C Annealing
 f) Steel B-3 920°C Annealing
 ×100 (2/3)

Photo. 3. Microphotographs of steels of B series.

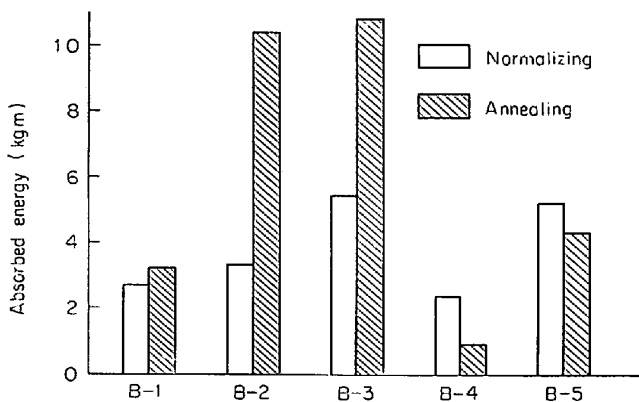


Fig. 11. Effect of additional elements on Charpy impact value for steels of B series. (2 mm V notch)

ある。結晶粒度は Al, Te, Ti, Nb の添加によりかなり細粒化されるとともに、焼準材ではベイナイト量がかなり減少している。焼鈍材は焼準材にくらべると冷却速度が遅いためフェライトが大部分を占め、ベイナイト量が著しく少ない。また細粒化元素の添加による結晶粒の微細化の程度は焼準材にくらべかなり小さい。

3.2.2 切欠靱性

Fig. 11 に各鋼種について焼準および焼鈍材の vEo を棒グラフで示す。ベース材は焼準、焼鈍材ともに 2~3 kgm 程度の吸収エネルギーしか示さないが、焼鈍材では Al または Te の添加によつて、約 10 kgm 焼準材で

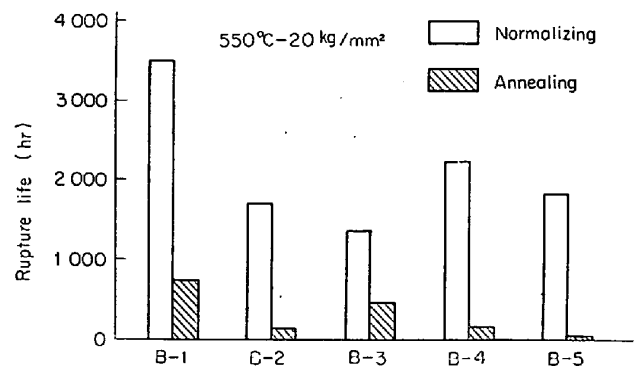


Fig. 12. Effect of additional elements on creep rupture life for steels of B series.

は Te または Nb の添加によつて約 5 kgm と著しく靱性が向上している。焼鈍材では Al, Te は細粒化の効果が大きく、また Ti 添加材(B-4)で vEo が低いのはこのような冷却条件では比較的粗粒で TiC, TiN の分散が靱性に有害に働くためと考えられる。焼準材では Nb, Te 添加材は Photo. 3 に示すようにベイナイト領域が減少するためと細粒化によつて靱性が向上する。

3.2.2 クリープ破断特性

クリープ破断試験は 550°C で応力 25 および 20 kg/mm² で行なつた。クリープ破断試験結果を棒グラフで Fig. 12 に示すが焼鈍材は焼準材にくらべ破断時間が著しく短い。これはベイナイト量が少ないことと N の固

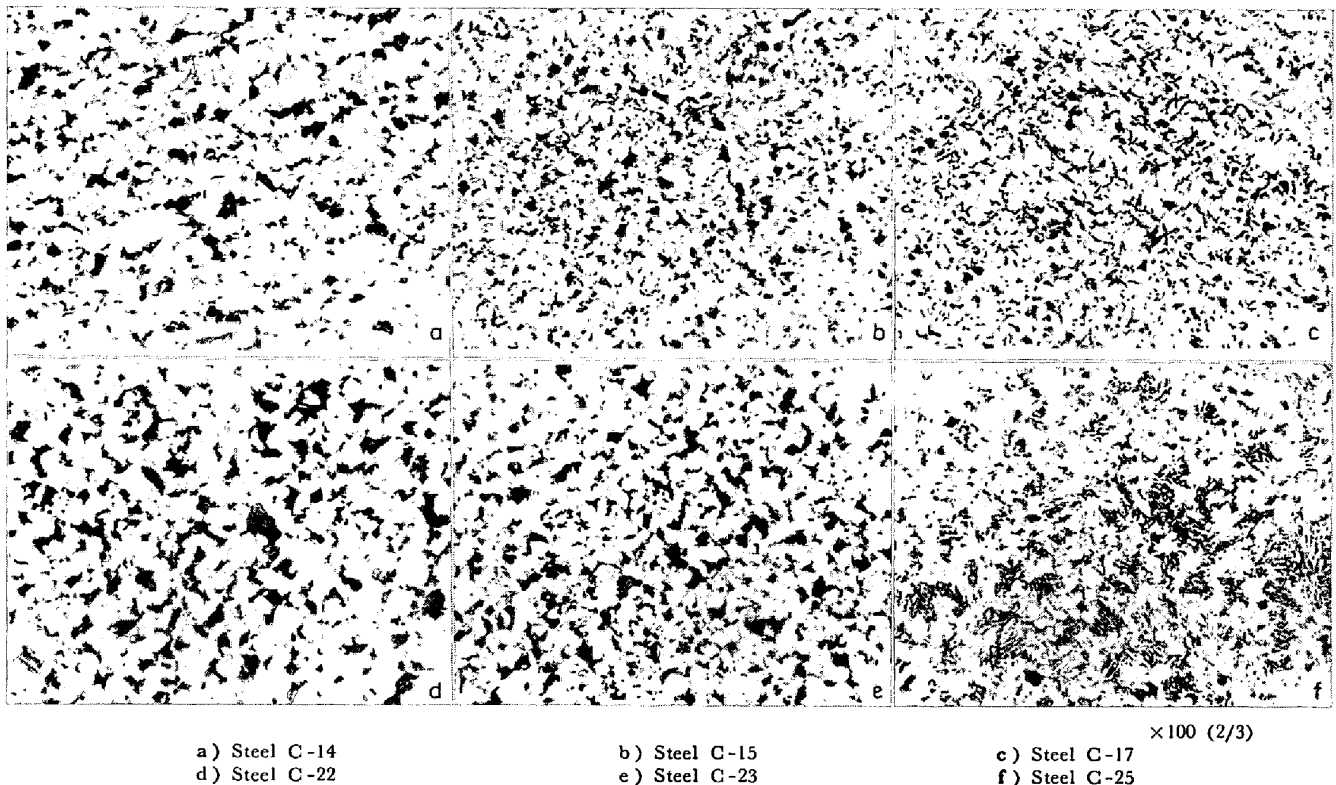


Photo. 5. Microphotographs of steels normalized at 900°C (C series).

Cr-Mo 鋼である。

前者の代表的顕微鏡写真を Photo. 4 に、後者については Photo. 5 に示す。

前者の鋼は Al を添加することにより結晶粒がいく分細くなる以外は顕著な変化は認められない。ただし、0.8%Cr 鋼では Al 量の多い場合若干ベイナイトが現出する。後者の Mo を含む鋼においては、C14, C17 の低 Mn-Mo 鋼ではベイナイト量が比較的少ないが、高 Mn-Mo 鋼、Cr-Mo 鋼ではベイナイト領域がかなり拡がってくる。しかも同一成分系の中では Al の添加量が増すほどベイナイト量が増大している。

3.3.2 切欠靱性

切欠靱性は 2 mm V ノッチ衝撃試験片を用いて、 $vTrs$ と $vTr15$ を遷移曲線から比較評価した。各成分系について衝撃特性におよぼす Al 量の影響を Fig. 14, 15 に示す。粒度を除いて組織的变化を伴わない 0.7%Mn 鋼、1.35%Mn 鋼、0.7%Mn-0.8%Cr 鋼では傾向は同一であり、sol. Al 0.02% 程度で $vTrs$ は急激に低下しそれ以上含有されてもゆるやかに減少するか、ほぼ変化がない。 vEo は約 0.02% で著しく増大するがそれ以上ではゆるやかに減少する。これは Al 添加による細粒化と固溶 N の減少と関連している。

つぎに 0.7%Mn-0.5%Mo 鋼、1.35%Mn-0.5%Mo 鋼、0.8%Cr-0.5%Mo 鋼については Al 量約 0.02% で $vTrs$

は低温側に移行するが、その上 Al 含有量が増大すると $vTrs$ は再び高温側に移る。この傾向は 0.7%Mn-0.5%Mo 鋼においてきわめて顕著である。 vEo は $vTrs$ と対照的に Al 量約 0.02% で最大となり、以後大幅に減少する。これは Al 添加による細粒化と Al 量の増加に伴うベイナイト量の増大にもとづくものである。これは 0.7%Mn-0.5%Mo 鋼 (C14~17) にくらべ 1.35%Mn-0.5%Mo 鋼 (C18~21)、0.8%Cr-0.5%Mo 鋼 (C22~25) はベイナイト量が多いため、衝撃特性が低下することからも裏付けられる。また合金成分量が増えてベイナイトがかなりの面積を占める場合 (1.35%Mn-0.5%Mo 鋼、0.8%Cr-0.5%Mo 鋼) には衝撃特性におよぼす Al 添加による細粒の効果がきわめて弱い。

3.3.3 クリープ破断特性

クリープ破断試験は 1.5 t シングル型試験機を用いてフェライト+パーライト組織の C1~C13 については 450°C で、フェライト+ベイナイト組織の C14~C25 については 550°C で、それぞれ 100hr, 1000hr の破断応力を求めた。

試験結果を C1~C13 について Fig. 16 に、C14~C25 については Fig. 17 に示す。

フェライト+パーライト組織の鋼においては脱酸剤としての添加量程度すなわち約 0.02% でクリープ破断強度は無添加材に比べ急激に低下するが、0.1% 以上の

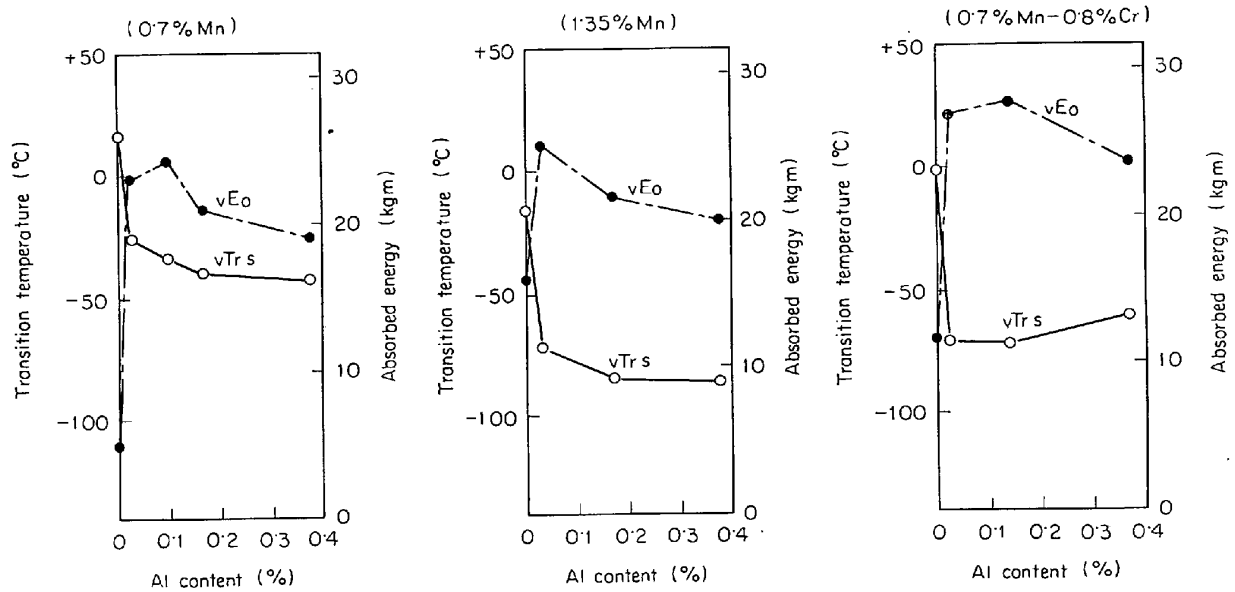


Fig. 14. Effect of Al content on Charpy impact properties for steels with structure of ferrite and pearlite. (C series)

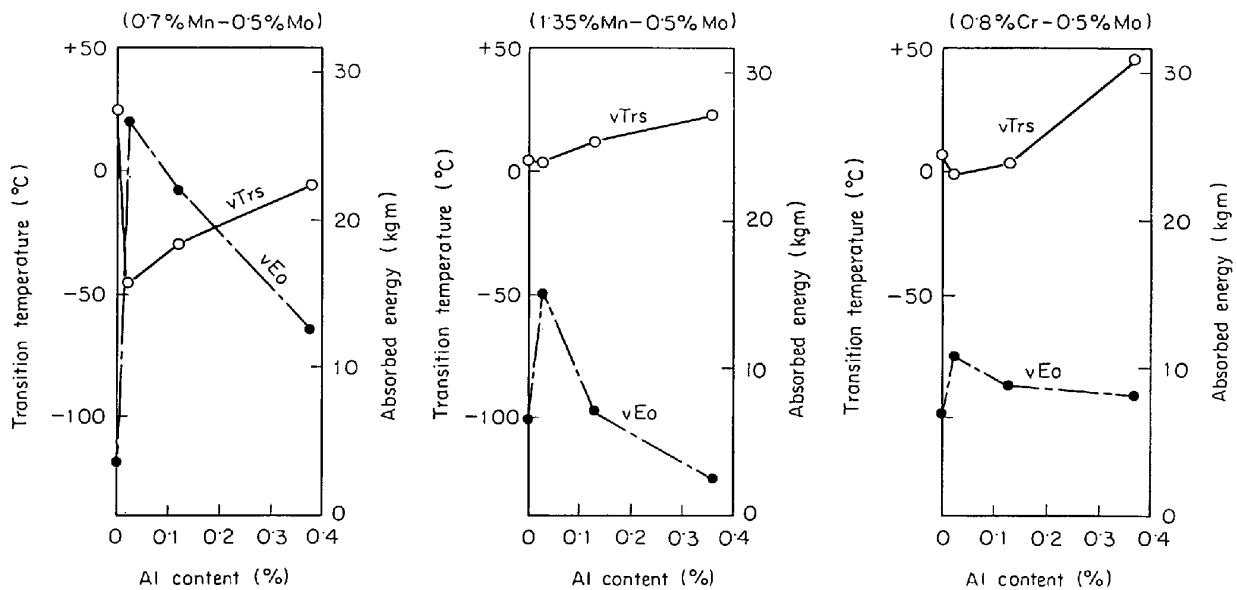


Fig. 15. Effect of Al content on Charpy impact properties for steels with structure of ferrite, pearlite and bainite. (C series)

添加によつて再び破断強度は増大してくる。初めの急激な低下は Al による N の固定すなわち固溶 N の減少に起因するものであり、その後の上昇は Al の固溶強化、パーライト組織の微細化および一部ベイナイトの生成にもとづくものである。とくに 0.8% Cr 系の鋼 C10~13 について Al 量に伴う破断強度の増加がかなり顕著なことはベイナイトの生成に負う所が大きいと考えられる。

つぎに Mo を含有する鋼 (C14~25) については Fig. 17 に見られるように 0.02% Al 付近で破断強度の最低値を示すが、その後は Al 量とともに破断強度は増大する。Al 量約 0.15% 付近でベース材と同程度の強度と

なる。

Al 量 0.02% 付近での 1000hr 破断強度の低下は成分系に関係なく、ほぼ 3~4 kg/mm² であり、AlN の生成による固溶 N 減少の効果はかなり大きい。また 0.7% Mn-0.5% Mo 系と 1.35% Mo 系を比較すると 100hr 破断強度は後者が 3 kg/mm² 程度高いのに対し、1000hr 破断強度はほぼ等しくなることから Mn は短時間側では効果があるが、長時間側では効果が失われてくる。すなわち Mn による強化は 500°C においては期待できないが、Fig. 16 の 0.7% Mn 系と 1.35% Mn 系との比較から 450°C においてはその効果が認められる。Mo の

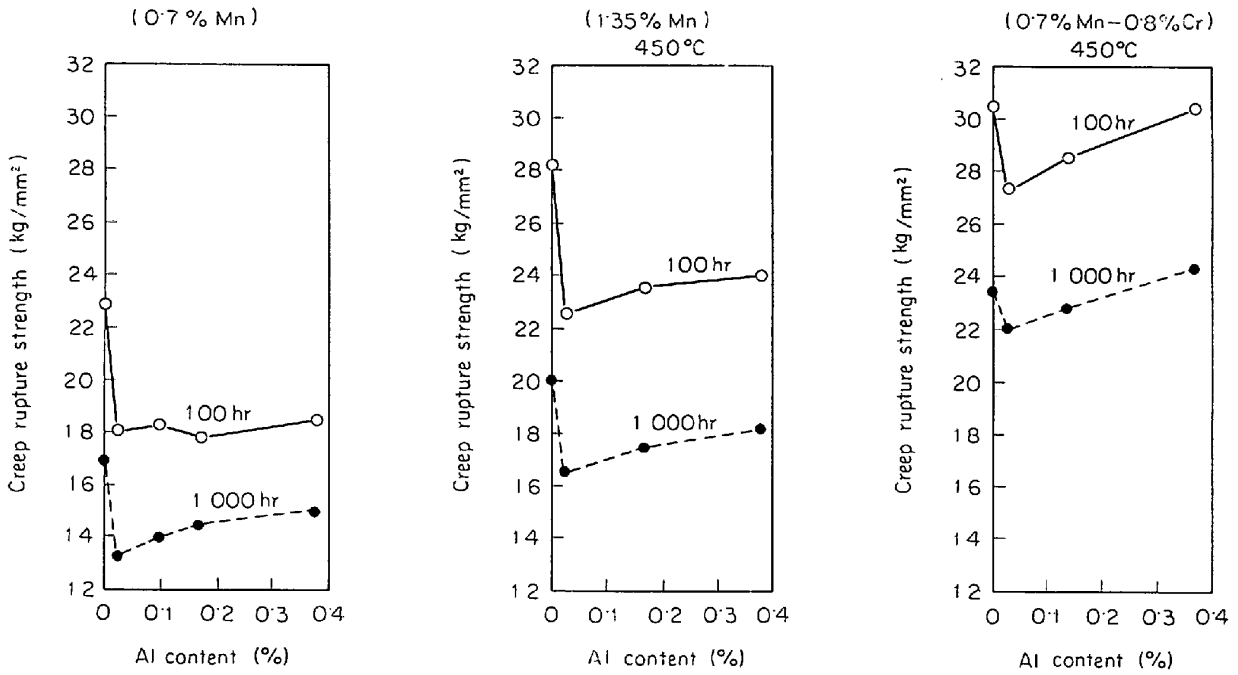


Fig. 16. Effect of Al content on creep rupture strength for steels with structure of ferrite and pearlite. (C series)

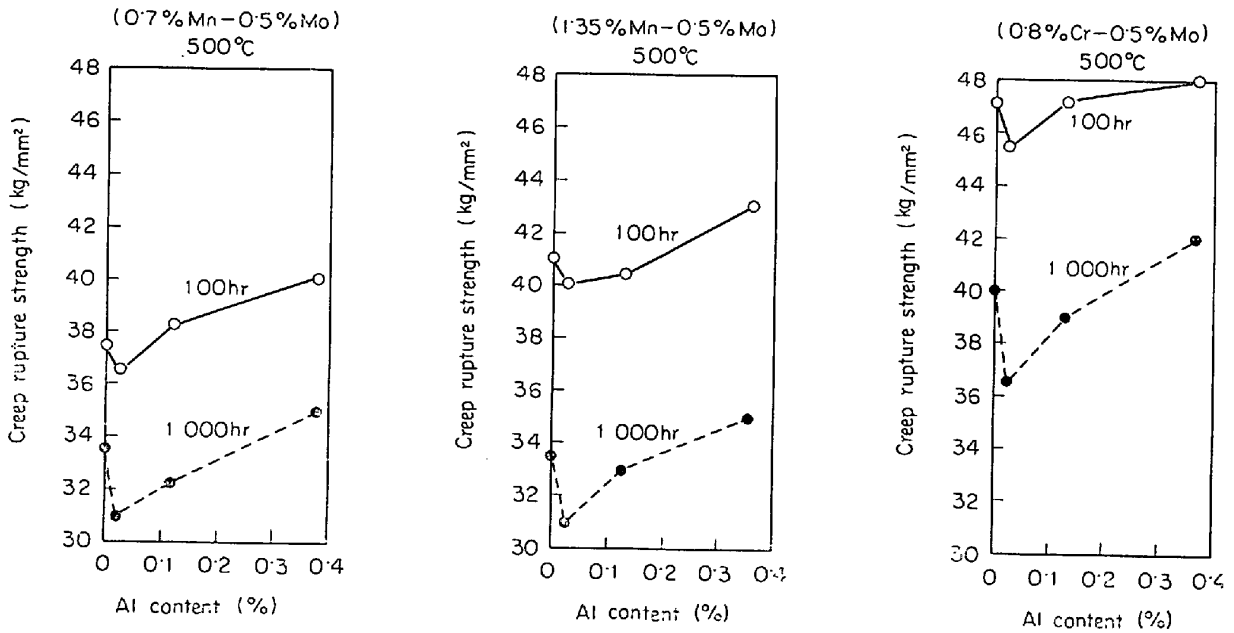


Fig. 17. Effect of Al content on creep rupture strength for steels with structure of ferrite, pearlite and bainite. (C series)

効果は Fig. 16 と Fig. 17 を比較するときわめて大きく 0.5% の添加で無添加材の 450°C の破断応力より、500°C での破断応力は著しく高い。これらのことから Mn と N による I.S. 効果より Mo と N の効果はより高温側まで継続するといえる。

4. 結 論

高温で使用される各種ボイラー用鋼材について、クリ

ープ破断強度、常温強度、靱性、結晶粒度の相互の関連性を種々の細粒化元素を用いて調査し、以下のごとき結論を得た。

(1) 靱性、降伏強さは結晶粒径に依存し、Petch の関係式で整理されるが、クリープ破断強さは固溶 N 量に依存するので細粒化元素の中で N との親和力の強い元素は有害である。

(2) SB42 のような Si-Mn 系の鋼ではクリープ破

断強度におよぼす固溶Nの効果は試験温度 450°C においては顕著であり、クリープ破断強度と内部摩擦法による snoek ピークの高さは比例するが、550°C においてはほとんど影響がなくなる。しかし Cr を 0.6% 程度含有している鋼においては550°C においても固溶Nの影響は残っており、Nの効果の温度依存性は第三元素の存在によつて変化する。

靱性とクリープ破断強度の兼ね合いから好ましい元素は Te および Cr である。

(3) $2\frac{1}{4}$ Cr-1Mo 鋼における場合は Cr, Mo を多量に含有するため、550°C においてもクリープ破断強度におよぼす固溶Nの影響は顕著である。この場合焼鈍材においてその影響はより顕著であり、焼準材ではその効果が弱まるがこれは細粒化元素の添加により組織がかなり変化するためである。

(4) 固溶N量を左右する Al の影響を4種の系において広範囲に調べた結果 Si-Mn 鋼, Cr 鋼は sol. Al 0.02% で衝撃遷移温度は急激に低下し、それ以上ではほとんど変化しないが、クリープ破断強度は 0.02% で急激に低下した後 0.1% 以上で再び増大してくる。

Mo 鋼, Cr-Mo 鋼では sol. Al 0.02% で $vTrs$ は急激に低温側に移行するが、それ以上添加すると再び高温側に移る。

クリープ破断強度は sol. Al 0.02% で最低となり、0.15% で無添加材と同程度にまで回復する。

終わりに臨み本研究の発表を許可された製品技術研究所渡辺省三前所長ならびに池野輝夫所長に謝意を表します。

文 献

- 1) H. C. CROSS, et al.: Proc. ASTM, 44 (1944), p. 161
- 2) J. GLEN: JISI, 155(1947), p. 501
- 3) C.H.M. JENKINS, et al.: JISI, 171(1952), p. 359
- 4) W. E. BARDGETT: JISI, 179(1955), p. 211
- 5) J. GLEN: JISI, 182(1956), p. 191
- 6) W. E. BAROGETT: 'Behaviour of Metals at Elevated Temperatures', Lecture to the Institution of Metallurgists, 1957
- 7) J. D. MURRAY: 'Precipitation Processes in Steels', ISI Spec. Rep. (1959) No 64, p. 285
- 8) J. W. MARTIN and G. C. SMITH: J. Inst. Metals, 83(1954~55), p. 417
- 9) H. C. CROSS and J. G. LOWTHER: Proc, ASTM, 40(1940), p. 125
- 10) 行俊, 西田: 鉄と鋼, 57(1971) 4, S 174
- 11) 鈴木, 田村: 鉄と鋼, 44(1958), p. 129
- 12) 木原, ほか: 熔接学会誌, 25(1956), p. 688
- 13) 吉松, ほか: 鉄と鋼, 51(1965), p. 1075
- 14) 門間, ほか: 日本金属学会誌, 29(1965), p. 191
- 15) 門間, 須藤: 日本金属学会誌, 30(1966), p. 558