

- 4) G. F. TISINAI, J. K. SANLEY & C. H. SAMANS: J. Metals, 6 (1954), p. 1259
- 5) C. HSIAO & E. J. DULIS: Trans. Amer. Soc. Metals, 49 (1957), p. 655
- 6) C. HSIAO & E. J. DULIS: Trans. Amer. Soc. Metals, 50 (1958), p. 773
- 7) R. FRANKS, W. O. BINDER & J. THOMPSON: Trans. Amer. Soc. Metals, 47 (1955), p. 231
- 8) W. G. RENSHAW & R. A. LUIA: Proc. A. S. T. M., 56 (1956), p. 903
- 9) W. O. BINDER, J. THOMPSON & C. R. BISHOP: Proc. A.S.T.M., 56 (1956) p. 923
- 10) H. KRÄINER: Arch. Eisenhüttenw., 28(1957), p. 81
- 11) K. J. IRVINE, D. T. LLEWELLYN, F. B. PICKERING: J. Iron & Steel Inst., (1959) July, p. 218
- 12) THIELMANN: Welding J., (1950) Dec. 581s.
- 13) 斎藤弥太郎: 日本金属学会講演概要49回(1961), p. 58

γ' 析出型耐熱合金の高温強度特性におよぼす 基質安定度と Ti/Al 比の影響*

(γ' 析出型耐熱合金の系統的研究—III)

加藤正一**

Influence of Structural Stability and Ti/Al Ratio on High-Temperature Properties of Gamma-Prime Precipitated Heat-Resisting Alloys.

(Systematic studies on gamma-prime precipitated heat-resisting alloys—III)

Shoichi KATOH

Synopsis:

In the previous report (Tetsu-to-Hagané, 47 (1969), p. 1697~1704), the author first dealt with high temperature load-carrying ability and structural stability of the various gamma-prime precipitated alloys of which the matrix compositions were varied from Ni-base alloys to Fe-base alloys.

In this investigation, the author studied the influence of structural stability and Ti/Al ratio of the various gamma-prime precipitated alloys containing Fe. The matrix composition of specimens were varied in Ni content with the alloys with 0% and 20% Co.

Ti+Al contents were determined to be constant at 4% and Ti/Al ratios were selected in the two series of 1/1 and 4/1.

The specimens used for age-hardening, short-time tensile and high-temperature creep-rupture tests and X-ray diffraction test were made from a hot-forged bar (16mm diam.) by a double-melting process consisting of vacuum-induction and vacuum-arc methods.

Regardless of the difference in the Ti/Al ratio, age-hardening and high-temperature strength properties were remarkably improved, as the Ni content in the matrix composition was increased.

However, age-hardenability and high-temperature strength properties of alloys with a ratio Ti/Al=4/1 were superior to those of alloys with a ratio of Ti/Al=1/1.

The deterioration of high-temperature characteristics in Fe-base alloys with ratios of Ti/Al=1/1 were principally caused by the precipitation of massive β -phases.

It was found that the Ti/Al ratio should be selected to 4/1 preventing the precipitation of massive β -phase in Fe-base alloys.

I. 緒 言

第1報¹⁾および第2報²⁾においては, Fe-Ni-Cr-Co

* 昭和37年4月本会講演大会にて発表

** 日本冶金工業株式会社, 川崎製造所

四元系のオーステナイト相内で Ni 基合金から Fe 基合金にいたるまで基質組成を大幅に変化させた γ' 析出型耐熱合金の高温特性と析出挙動に基づく組織変化および諸因子の相関性についての精細な検討結果を報告した。その際 Co 0~20% を含む Ni 基合金に Fe を多量に加え基質組成が Fe 基合金へと移ると、時効硬化および高温強度特性に害をおよぼす β 相³⁾ が析出することを知り、(Cr=17.5%一定) Fe-Ni-Co pseudo-ternary diagram 上に β 相の析出する基質組成範囲を決定した。

今回は上記理由を参考にして、 γ' 析出型耐熱合金としてもつとも経済的な基質組成を有する合金を求めるために、 β 相析出に対する過飽和度(爾後基質安定度と称する)を種々変化させた基質組成を選定し、これに Mo, W による固溶体強化と Ti, Al による析出硬化を複合させた場合の時効硬化特性と高温強度特性の関係を究明した。

II. 試料と実験方法

試料の化学組成は Table 1 に示す。すなわち Co 0% および 20% の 2 系列を選び、いずれも基質安定度を変化させるために Ni 含有量を 20% から 35% まで約 5% おきに变化させ Mo 3%, W 2% を固溶体強化⁴⁾ の目的で添加した計 5 種の合金につき Ti+Al=4% とし、Ti/Al=1/1 と Ti/Al=4/1 の 2 種を選び合計 10 種の合金組成を選定した。

試料の溶製は、いずれも純金属およびフェロアロイを用い、25kW 高周波真空誘導炉により炭素脱酸を行ない約 10kg 溶解し 40mm ϕ \times 7mm 丸棒に鍛造後、これを消耗電極として 2,000 アンペア真空アーク溶解炉にて約 1 μ Hg 下で 2 段溶解を行なった。得られた鋼塊は 16mm ϕ 丸棒にまで鍛伸し、各種試験の供試材とした。

時効硬化試験は 1180°C, 2h の固溶化処理を行なった試料につき、また高温引張試験およびクリープ・ラプ

テューア試験は、いずれも 1180°C, 2h+760°C, 20h 時効処理を行なった試料を用いて行なった。

III. 実験結果

1) 時効硬化特性

時効硬化試験は Ti/Al=1/1 と Ti/Al=4/1 の両系列試料とともに時効温度を 732 および 815°C の 2 種を選定し、時効処理時間を 1/2, 1, 2, 4, 8, 16, 32, 64, 128, 256, 512 および 1,024h まで累計的に変化させた場合の時効硬度をピツカス硬度計により測定した。Fig. 1 には Ti/Al=1/1 および Ti/Al=4/1 両系列の 732°C における時効硬化曲線を、また Fig. 2 には 815°C における時効硬化曲線を示した。

すなわち 732°C においては Ti/Al=1/1 および Ti/Al=4/1 の両系列とも約 1/2h の短時間で 250 V.H.N 前後にまで急激に硬化し、その後の硬度増加は徐々に進行し、10h から 100~200h でやや急激となり、その後 1,024h まで最高硬度を維持している。しかしその最高硬度は Ni 含有量の多いものほど高く、Ti/Al=1/1 系列では Co を含まぬ N25T2, N28T2 および N32T2, また Co 20% を含む N20CT2, N25CT2 の順に時効硬化性は大となる。なお Co を含まぬ試料の方が Co 20% を含む試料よりも時効硬化性は大きい。しかもこれらグループの中で最高硬度を示した N32T2 と最低硬度を示した N20CT2 との間には 140 V.H.N の大差を示しており、基質組成の差が時効硬化特性に大きく影響している。これにはんして Ti/Al=4/1 の系列試料は、いずれも時効硬化性いちじるしく、1,000h 後の時効硬度の差も少ない。いずれにしても Ti/Al=1/1 系列より Ti/Al=4/1 系列の方が時効硬化性は大きい。

815°C の時効硬化曲線は Fig. 2 に示すごとく、いずれの系列においても 1/2h で急激に硬化し、その後ほとんど変化なく、1,024h まで硬度を維持している。815°C の場合も 732°C の場合と同様 Ti/Al=1/1 および

Table 1. Chemical compositions of alloys studied. (%)

Alloys	C	Si	Mn	Cr	Ni	Co	Fe	Mo	W	Ti	Al
N25CT2	0.109	0.64	0.86	16.10	25.94	18.00	28.00	2.73	2.25	1.95	2.18
N20CT2	0.047	0.49	0.84	16.19	19.30	18.00	37.00	2.87	2.28	1.90	1.98
N32T2	0.047	0.63	1.03	15.96	32.16	—	41.00	2.75	2.14	2.20	2.33
N28T2	0.031	0.61	0.95	15.74	28.23	—	45.50	2.86	2.16	2.17	2.48
N25T2	0.057	0.47	0.79	16.10	24.23	—	49.80	2.76	1.94	1.83	2.00
N25CT3	0.125	0.58	0.99	15.79	25.81	17.63	30.00	2.81	1.96	3.30	0.75
N20CT3	0.113	0.51	1.75	15.84	22.35	17.50	36.80	2.88	1.80	3.75	1.02
N32T3	0.062	0.54	0.86	15.55	32.20	—	41.00	2.85	2.05	3.52	0.89
N28T3	0.090	0.57	1.28	15.93	28.39	—	46.05	2.62	1.77	2.91	1.09
N25T3	0.108	0.58	1.04	16.21	24.03	—	50.00	2.85	1.93	3.72	0.42

Ti/Al=4/1 の両系列とも Ni 含有量の多い順に大なる時効硬度を示し、また Co を含まぬ試料の方が Co 20%を含む試料より概して高い値が得られている。また各試料とも Ti/Al=4/1 系列の方が Ti/Al=1/1 系列試料よりも得られる時効硬化性は高い結果が得られている。このように、いずれの時効温度においても Ti/Al=4/1 系列の時効硬度が高い値を示したのは、後述する析出挙動の差異に帰因するものと考えられる。

2) 短時間高温引張強度特性

Fig. 3 には Ti/Al=1/1 および Ti/Al=4/1 系列試料の短時間高温引張試験結果を示した。これら試験は 1180°C, 2 h 水冷+760°C, 20 h 空冷の前処理を施した試片を用いて、試験温度を常温, 650, 732 および 815°C の 4 種を選び、試験片を 6mm ϕ \times 4/1 \bar{a} (標点距離) とし、いずれも各試験温度に 30mn 保持後 1mm/mn の引張速度で行なった。

Ti/Al=1/1 および Ti/Al=4/1 両系列とも温度の増加とともに引張強さは低下の傾向を示した。また Ti/Al=1/1 系列においては、いずれの試験温度においても Ni 含有量の多い順に引張強さは高い値が得られており、基質組成の差による引張強さの差はいちじるしい。また Co 20%を含む試料よりも Co を含まぬ試料の方が引張強度は高い値が得られている。しかし Ti/Al=4/1 系列試料においては、大略前者と同様 Ni 含有量の多い試料ほど、引張強さは高い値を示しているが、前者ほど顕著な傾向を傾向を示さず多少変動した値を示している。また各試料間の強度の差も前者より少なく、やや近い値を示している。また高温における引張強さの低下の割合も Ti/Al=4/1 系列の方が Ti/Al=1/1 系列試料よりも少ないように見受けられる。

破断後の伸びおよび絞り、引張強さとは逆の関係にあり、両系列試料とも引張強さの高い値を示したものは

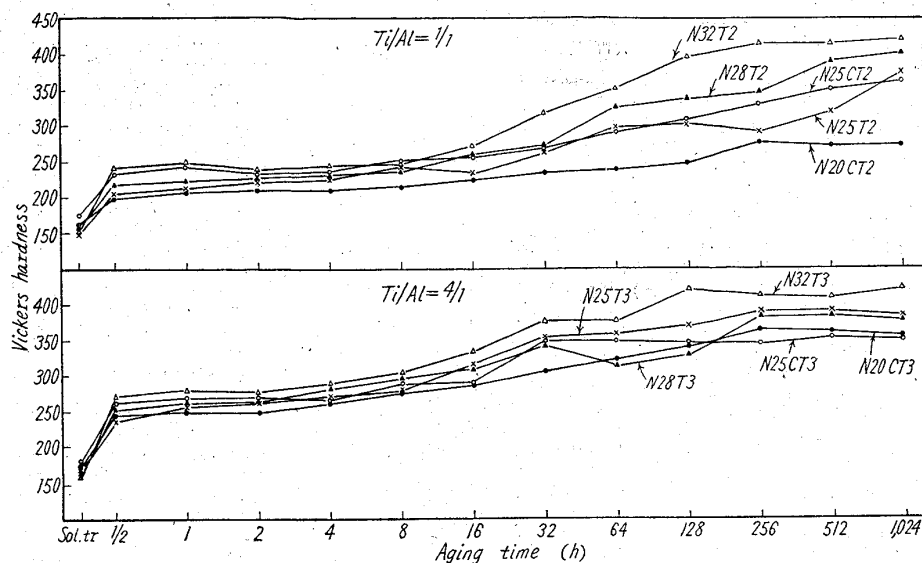


Fig. 1. Relations between hardness and aging time at 732°C.

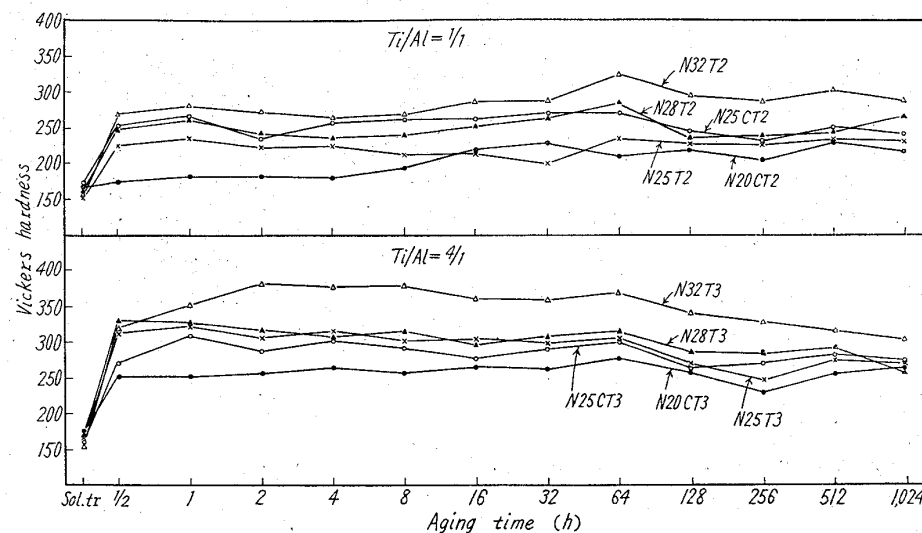


Fig. 2. Relations between hardness and aging time at 815°C.

いずれも低い値を示しており、また引張強さの低い値を示す試料ほど逆に伸びおよび絞りともに高い値を示している。また高温における引張強さの低下のいちじるしい Ti/Al=1/1 系列の方が伸びおよび絞りは高い値を示し、中でも引張強さの低い N20CT2 などは 815°C において伸びおよび絞りともに約 90% まで増加している。

このようないちじるしい強度特性の変化は、前述の時効硬化性とよい対応を示しており、過時効現象による顕著な組織変化に帰因することを示唆している。以上のごとく Mo, W による固溶体強化と γ' 相の析出硬化を複合せた γ' 析出型耐熱合金においては、Ni 含有量の少しの差による基質組成の差異が、後述する高温クリープ・ラプチュア強度特性に大きく左右するであろうことは論を待たないが、短時間高温引張強度特性においても、上記のごとく顕著な影響を示すことが明らかとなつ

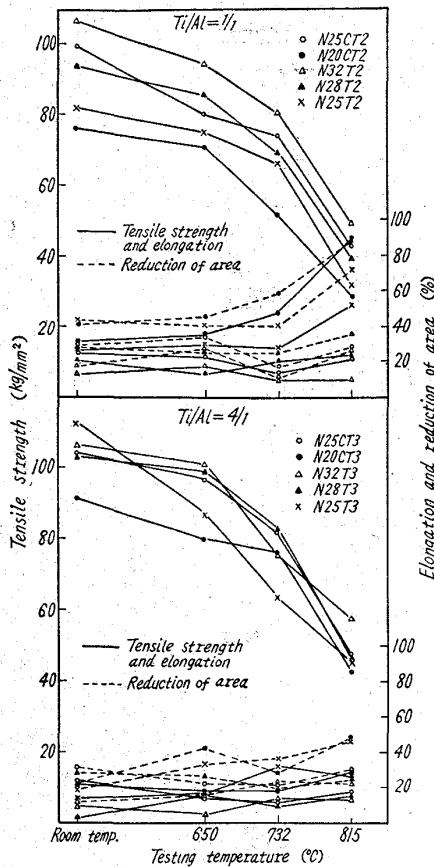


Fig. 3. Short-time tensile properties of the various alloys. (Heat treatment: 1180°C, 2h + 760°C 20h aging)

している。また Ni 含有量の少ない N25T2 などは 100 h 前後において破断曲線上に明らかな折点を示し、それ以後の長時間側で強度低下が顕著となる。また Ti/Al=1/1 系列では Co を含まぬ試料の方が破断強度は高い値が得られている。しかし Ti/Al=4/1 系列では Ti/Al=1/1 系列の結果とはやや異つた傾向を示した。すなわち Ni 含有量の高い試料ほど高い破断強度を示すことは Ti/Al=1/1 系列と同様であるが、試料間での強度差は前者より小さく長時間後の強度低下の割合も少ない。また各試料ともラプチュア強度は Ti/Al=1/1 系列より Ti/Al=4/1 系列試料の方が良好な結果を得た。これらの関係は後述のごとく、高温強度に害をおよぼすβ相またはσ相の析出挙動と深い関係があるものと考えられる。

本系合金は、いずれも MoW, による固溶体強化と Ti および Al による析出硬化との複合効果による高温強度の改善を企図したものであるが、図中に LCN-155 base 合金に Mo 3%, W 1% のみ加えたもの¹⁾と、Ti 2%, Al 2% のみ加えた試料²⁾のラプチュア強度を参考までに破線で示してある。これら値と比較すると Ti/Al=1/1 系列の中で LCN-base T2A2 試料より 100h 破断強度が 10 kg/mm² 以上改善されている N32T2 などもあるが、同じ基質組成を有する N20CT2 などは LCN-base T2A2 試料より長時間破断強度が低下の傾

た。

3) 高温クリープ・ラプチュア強度特性

Fig. 4 および Fig. 5 には Ti/Al=1/1 および Ti/Al=4/1 両系列試料の 732 および 815°C のクリープ破断曲線を示した。なお図中の破断曲線上に示した数値は破断後の伸び%を示したものである。

まず 732°C における試験結果より述べよう。Fig. 4 の Ti/Al=1/1 系列では Ni 含有量の高いものほど破断強度は高い値を示した。すなわち Co を含まぬ試料では N32T2, N28T2 および N25T2, また Co を含む試料では N25CT2, N20CT2 の順に強度低下を示している。破断後の伸びおよび絞りも破断強度の低いものほど高い値が得られている。また破断強度の高い値の得られた N32T2 試料と最低の値を示した N20CT2 試料との間の 100h 破断強度は 15 kg/mm² 以上の差異を示し、基質中の Ni 含有量の少しの差異によつても顕著な破断強度の低下を示

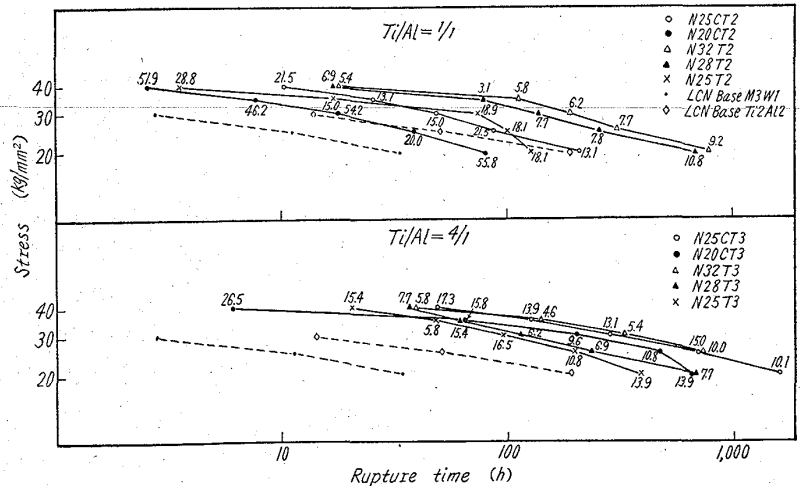


Fig. 4. Rupture-strength properties of various alloys at 732°C. (Heat treatment: 1180°C 2h + 760°C 20h aging)

向を示している。これは本基質組成に Mo 3, W 2, Ti 2 および Al 2% を加えることは過剰であり、強度面から見た組織の安定性を害する結果と考えられる。しかし Ti/Al=4/1 系列では、かような現象は認められず、N20CT3 の 100h 破断強度でも LCN-base T2A2 よ

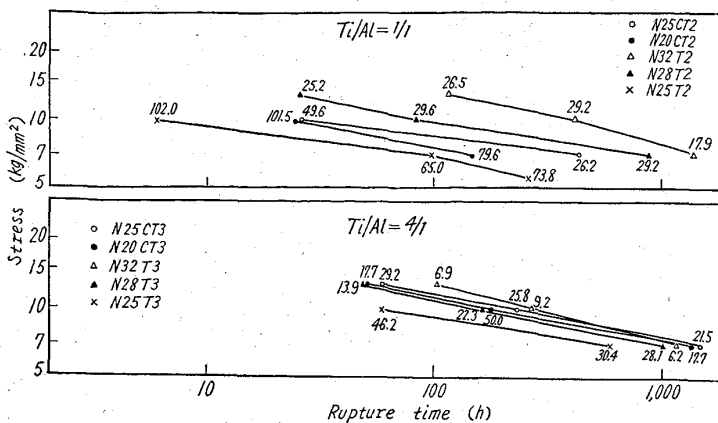


Fig. 5. Rupture-strength properties of various alloys at 815°C. (Heat treatment: 1180°C 2h+760°C 20h aging)

り 10 kg/mm² 以上のいちじるしい強度改善が得られている。しかしそれでも N20CT3 のごとく Ni 含有量の少ない試料は破断曲線上に折点を示し約 470 h 以後の強度低下が顕著となる。これら現象も基質組成に関連した析出挙動にもとづく組織変化が直接の原因と考えられる。

815°C においても 732°C の場合と同様 Ti/Al=1/1 および Ti/Al=4/1 両系列において、その破断強度は Ni 含有量に関係しており、Ni 含有量の高いものほど良好な値を示している。しかし Ti/Al=1/1 系列の方が Ti/Al=4/1 系列に比して Ni 含有量の低下による破断強度低下の割合が顕著となる。結局 732 および 815°C の両温度において Ti/Al=4/1 系列の方が Ti/Al=1/1 系列試料より高温クリープ破断強度特性は優り、高温強度におよぼす組織の安定性は大きいことが認められた。

高温強度特性におよぼす Co 添加の影響に関しては、Ti/Al=1/1 系列において Co 20% の添加は、前報^{1,2)} においても報告したごとく β 相の析出傾向を助長するため強度特性に害をおよぼすが、Ti/Al=4/1 系列ではやや異つた傾向を示した。すなわち 732°C における N25CT3 の破断曲線は N32T3 と同様の強度特性を示し、長時間後においてもいちじるしい強度低下の傾向を示さない。また 815°C においては Co を含まぬ N32T3 より長時間後の破断強度がやや優る結果が得られた。これら理由は後述する X 線回折結果より明らかであるが、N32T3 は 1,000 h 時効後に σ , L , η , γ' などの多くの析出相が認められるのに反し、N25CT3 では γ' と L 相のみ認められ高温強度に害をおよぼす析出相の出現が少なく比較的安定な組織を維持することが 1 つの原因ではないだろうかと考えられる。

以上のごとく高温クリープ破断強度のごとき struc-

ture-sensitive properties は、少しの基質組成の差異または硬化性元素の量比によつても微妙にかつ顕著に影響をおよぼすことを十分知ることができた。

4) X 線回折試験結果

Ti/Al=1/1 および Ti/Al=4/1 両系列試料の 1,024 h までの時効過程中的組織変化による析出挙動と高温強度特性とを関連させるために時効試片を電解抽出し、得られた残渣を用いて X 線回折を行なつて析出相の同定を行なつた。時効温度は 732 および 815°C の 2 種で時効時間は 16, 128 および、これら条件を組合せた試料について上記試験を行なつた。電解抽出および X 線回折方法は

前報^{1,2)}にて行なつた方法をそのまま適用した。Table 2 はこれら時効試料の析出相の同定結果を示した。

732°C の同定結果によると、Ti/Al=1/1 系列では時効初期の 16 h では 5 試料ともいずれも γ' 相のみ認められた。しかし 128 および 1,024 h と時効の進むにしたがつて N32T2 以外は $\gamma' + \beta + \sigma$ 相共存を示した。N32T2 は Ni 含有量が多いためか 1,024 h にいたつても β 相の析出は認められず、 $\gamma' + \sigma$ 2 相のみ認められた。

一方 Ti/Al=4/1 系列においては、いずれも 1,024 h までの時効過程中的に β 相の析出は認められず、時効初期の 16 h で γ' 相のみ、128 および 1,024 h 以後は $\gamma' + \sigma$ 2 相共存を示している。したがつて前述の短時間高温引張および長時間クリープ・ラプチュア-強度特性ともに Ti/Al=1/1 系列が Ti/Al=4/1 系列より劣つた理由は β 相の析出に帰因し、また基質中の Ni 含有量の低下とともに析出量は増大し、強度低下に大きく影響することが考えられる。

815°C においては 732°C の場合とはやや異なる析出挙動を示し、Ti/Al=1/1 系列においては Co 20% を含む N25CT2 および N20CT2、また Co を含まず Ni 含有量の少ない N25T2 は時効初期から β 相が認められ、Ni 含有量のやや高い N28T2 は 128 h 以後に β 相の析出が認められた。しかしこの場合でも Ni 含有量の多い N32T2 は 1,024 h 後まで β 相の析出は認められない。また 128 h 以後においては Co 20% を含む N25CT2 および N20CT2 は L 相の、また Co を含まぬ試料はすべて $\sigma + L$ 相の析出が加わる。732°C, 1024 h までの時効処理で β 相の析出を認めなかつた Ti/Al=4/1 系列でも 815°C においては、Ni 含有量の少ない N20CT3 および N25T3 などは、1,024 h 後に β 相の析出が認められた。また N25CT3 および N20CT3 は

Table 2. Phases identified in specimens after aging treatments at 732 and 815°C.

Specimens	Aging time (h)		16			128			1,024		
	Test temp. °C										
N25CT 2 N20CT 2 N32T 2 N28T 2 N25T 2	732		γ'			γ' β σ			γ' β σ		
N25CT 3 N20CT 3 N32T 3 N28T 3 N25T 3			γ'			γ' σ			γ' σ		
N25CT 2 N20CT 2 N32T 2 N28T 2 N25T 2			γ' β			γ' β L			γ' β L		
N25CT 3 N20CT 3 N32T 3 N28T 3 N25T 3			γ' σ			γ' σ L			γ' σ L		
			γ' β σ			γ' β σ L			γ' β σ L		
			γ' β			γ' β σ L			γ' β σ L		
			γ' σ			γ' σ L			γ' σ L		
			γ' σ			γ' σ L			γ' σ L		
			γ' σ			γ' σ L			γ' σ L		
			γ' σ			γ' σ L			γ' σ L		

128 h 以後に L 相を, また N32T3, N28T3 および N25T3 に $\sigma + L$ 相の析出をともなうことは Ti/Al=1/1 系列の場合と同様であるが, N32T3, N28T3 および N25T3 の 3 試料には, 1,024 h 後に η 相の析出が新たに加わる. また本系合金の中で Co 20% を含む試料では Ti/Al=1/1 および Ti/Al=4/1 系列ともに時効温度の高い 815°C では σ 相の析出を抑制し L 相の析出が助長されることを認めた. なお全試料を通じて, いずれの時効温度においても Table 2 に示した析出相以外には $M(C_N)$ および $M(N_C)$ などの炭化物も認められているが, これら析出物は高温強度に副次的に寄与するものであろうと考えられるので省略した.

以上のごとく本系合金の時効過程中に認められる析出相は複雑多岐にわたり多種析出相が認められ固溶体強化の目的で添加した Mo, W などの添加量が, やや過剰であつたためか σ あるいは L 相の析出を助長するような傾向を与えているのではないだろうかと考えられる. 概して Ti/Al=4/1 系列の方が高温強度に害をおよぼす β 相の析出がなく, しかも Co 20% を含む N25CT3 などは 815°C の高温においても安定な組織を示すようである.

もちろん Ti/Al=1/1 および Ti/Al=4/1 の両系列ともに Ni 含有量の高いものほど高温強度特性が優れていることは, これから系列試料にあらわれる多種析出相の量比および析出分布状態などが関係して来るものと思われる. また σ 相の析出は過時効状態において高温ラプテ

ュー曲線上に折点を生じ長時間後の破断強度をいちじるしく低下させるが, L 相は折点を生ぜず破断強度の低下を示さないとの報告⁶⁾をも考え合せると本系合金において高温強度に害をおよぼす主析出相は β 相および σ 相であろうと推論される.

結局本系合金のごとく Fe を多量に含む γ' 析出型耐熱合金においては, Ti+Al 含有量を一定にした場合に Ti に対する Al 比を下げた方が強度特性の改善が得られる. また基質組成中の Ni 含有量も高い方が好ましいと結論された. 以上の結果本系合金の中で γ' 析出型耐熱合金として適当な基質組成は Ti/Al=1/1 系列では N32T2, また Ti/Al=4/1 系列では N25CT3, N32T3 または N28T3 などであろうと結論された.

IV. 総 括

以上 Ni 含有量を異にする Fe-Ni-Cr-Co 四元系内の 5 種の基質組成を選定し, Mo, W 添加と Ti/Al 比を変化させた γ' 析出型耐熱合金について高温強度特性と時効による組織変化を追求しつぎの結論を得た.

(1) 本系合金の時効硬化, 短時間高温引張強度および高温クリープ・ラプテューア強度特性は Ti/Al=1/1 および Ti/Al=4/1 のいずれの系列においても Ni 含有量の多い試料ほど優る結果が得られた. また Ti/Al=1/1 (Ti 2%+Al 2%=4%) 系列よりも Ti/Al=4/1 (Ti 3.2%+Al 0.8%=4%) 系列試料の方が, 全体に上記諸特性は良好な結果を示した.

(2) Ti/Al=1/1 系列に比して Ti/Al=4/1 系列の方が高温強度の改善に効果的である理由は、Ti+Al 含有量の一定の場合、Ti に対する Al 含有量を下げただけで β 相の析出傾向を極端に抑えることができることを知った。結局本系合金のごとく Fe を多量に含む γ' 析出型耐熱合金においては、Ni 基合金の場合とは逆に Ti に対する Al 含有量を下げた配合比率が好ましいことを実験的に知った。これは鉄基合金中に析出する γ' 相中の Ti の固溶量が増加することに原因しているのではないかと考えられる。

(3) また β 相の析出を抑制した Ti/Al=4/1 系列においては、Co 20% を含む N25CT3 などのごとく基質中への Co の添加は、Ti/Al=1/1 系列の場合とは逆に高温強度に害をおよぼす他の析出相の析出を抑え組織の安定性を維持することが認められ強度改善に副次的効果を与えていることが認められた。

(4) Mo, W の添加による固溶体強化と Ti, Al による析出硬化を複合させることは、高温強度改善には効

果的であるが、高温強度に害をおよぼす析出相の認められぬ程度の基質組成を選定せねばならぬ。本系合金においては Ti/Al=4/1 系列試料においては複合添加による強度改善が十分得られてはいるが、高温強度特性と時効による析出挙動とを考え合すると Mo 3%, W 2% の添加はやや過剰添加であつたように考えられる。結局基合金組成が決定した場合に γ' 析出型耐熱合金としての特性を失なわず、しかも高温強度に害をおよぼすほどの顕著な組織変化を生じない範囲内で多種硬化性元素を加え固溶体強化と析出硬化との複合効果を狙うことが好ましいとの結論が得られた。(昭和37年4月寄稿)

文 献

- 1) 加藤：鉄と鋼，47 (1961)，p. 1697
- 2) 加藤：鉄と鋼，47 (1961)，p. 1473
- 3) 加藤：日本金属学会誌，投稿中
- 4) H. J. BEATTIE and F.L. VERSNYDER: Trans. Amer. Soc. Metals, 49 (1957) p. 883
- 5) 加藤：日本金属学会誌，25 (1961)，p. 663
- 6) 深瀬：学振第 123 委員会発表，11月 (1961)