U. D. C. 669. 15. 26. 018. 45

12% Cr 系耐熱鋼の熱処理硬度および高温機械的性質におよぼす W, V, Ti および Mo+V+Nb の影響

The Effect of W, V, Ti and Mo+V+Nb on the Heat Treatment Hardness and Mechanical Properties at High Temperature of 12% Cr System Heat Resisting Steel

小 柴 定 雄* 九 重 常 男**

内 容 梗 概

フェライト系の代表的耐熱鋼英国の Jessop H 46 よりさらに強力な耐熱鋼を見出さんとしてまず 12% Cr 系耐熱鋼の熱処理硬度および高温機械的性質におよぼす W, V, Ti および Mo+V+Nb の影響について実験を行つた。W 0.36～1.74% の範囲では W の増加するにしたがつて熱処理硬度および高温抗張力は高く，また熱処理硬度より計算しうるクリープ歪は小さく好結果がえられる。V は 0.32～1.02% の範囲では単独に多量添加すれば悪影響をおよぼす。Ti は 0.21～0.65% の実験範囲内では Ti を増すほど悪い結果がえられる。Mo, V および Nb を同時に添加すればいちじるしい効果がえられる。さらに B および Ti を少量追加すれば一層効果的である。

〔I〕 緒 言

フェライト系耐熱鋼は材料費が廉価で熔解，熱間加工，機械加工などが容易な利点を有する。しかし 650°C 以上の高温においては急速にクリープ強度を低下するため英国以外の諸外国ではあまり研究されていなかつたが，近時ガスタービン機関の原価低減とその性能の点から車盤用，ラビリンスパッキング用などにフェライト系耐熱鋼が一部使用されるようになつた。そこで著者らは従来この種耐熱鋼のうちでもつとも優秀と称せられる英国の Jessop H 46 よりさらに強力な耐熱鋼を見出さんとしてまず 12% Cr 系耐熱鋼に W, V, Ti を単独に加えた場合の影響および Mo, V, Nb を同時に加えた場合の熱処理硬度および高温機械的性質におよぼす影響について実験を行つた。

〔II〕 実 験 結 果

(1) タングステンの影響

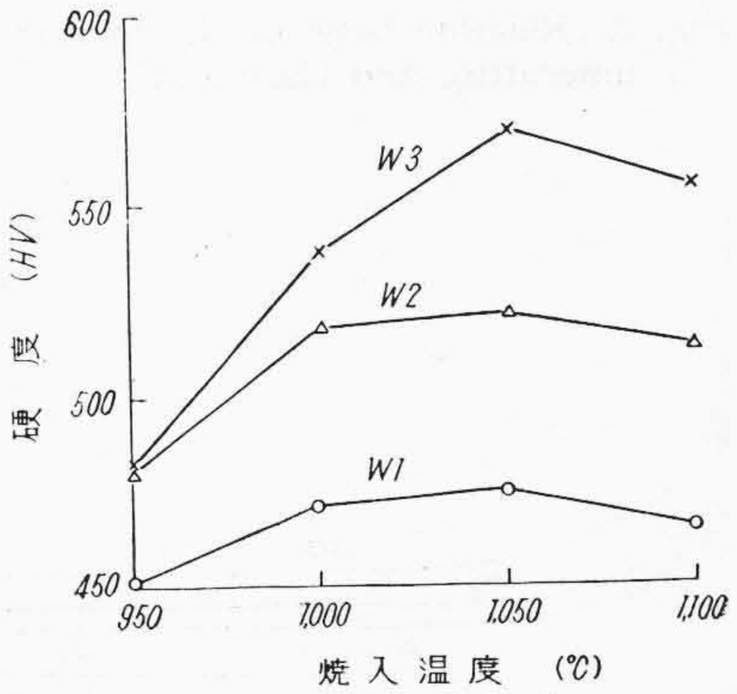
(A) 試料の化学成分

試料は 50 kg 高周波誘導電気炉にて 30 kg 鋼塊を吹製しこれを 15 mm 角に鍛伸して試料とした。試料の化学成分を第1表に示す。

(B) 焼入温度と硬度との関係

試料は 15×15×15 mm とし 950～1,100°C の焼入温度による硬度の変化をしらべた。その結果を第1図に示す。なお各焼入温度における保持時間は30分間とした。図に示すごとく各試料共焼入温度 1,050°C で最高硬度を示すが，W の高い試料ほど高い焼入硬度を示す。

(C) 焼戻温度と硬度との関係



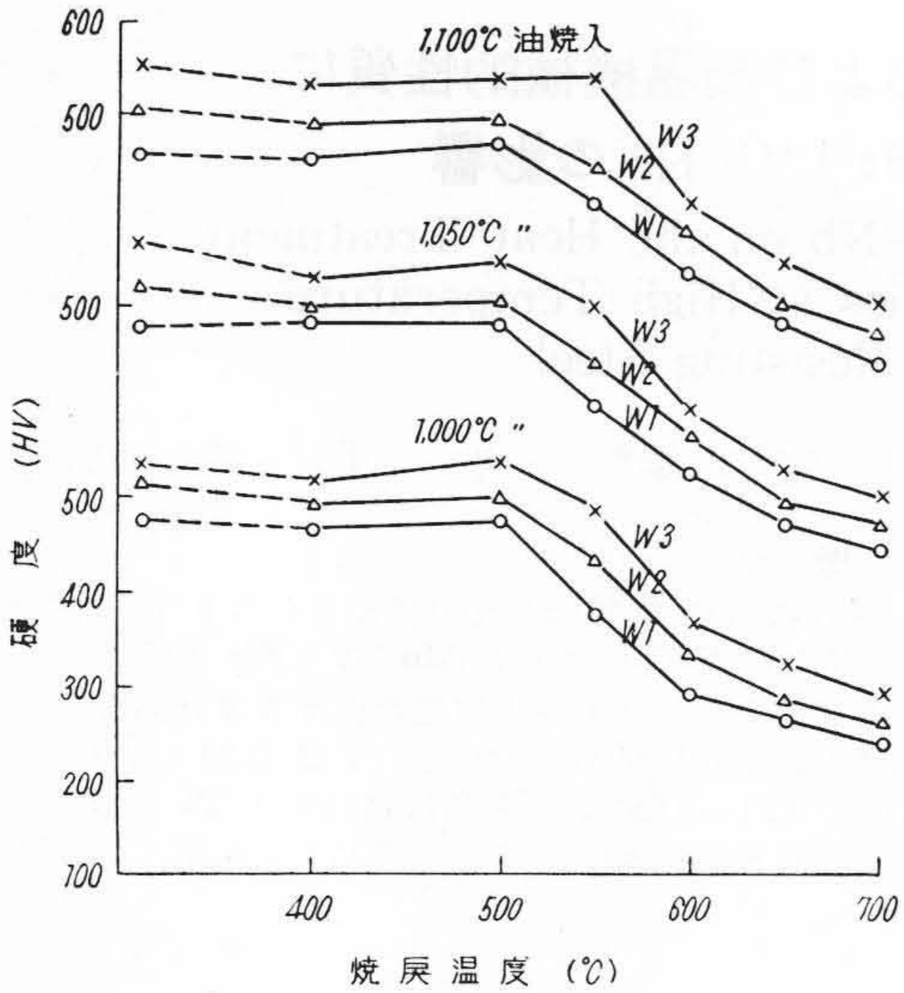
第1図 焼入温度と硬度との関係
Fig. 1. Relation between Quenching Temperature and Hardness

第1表 試料の化学成分
Table 1. Chemical Composition of Specimen

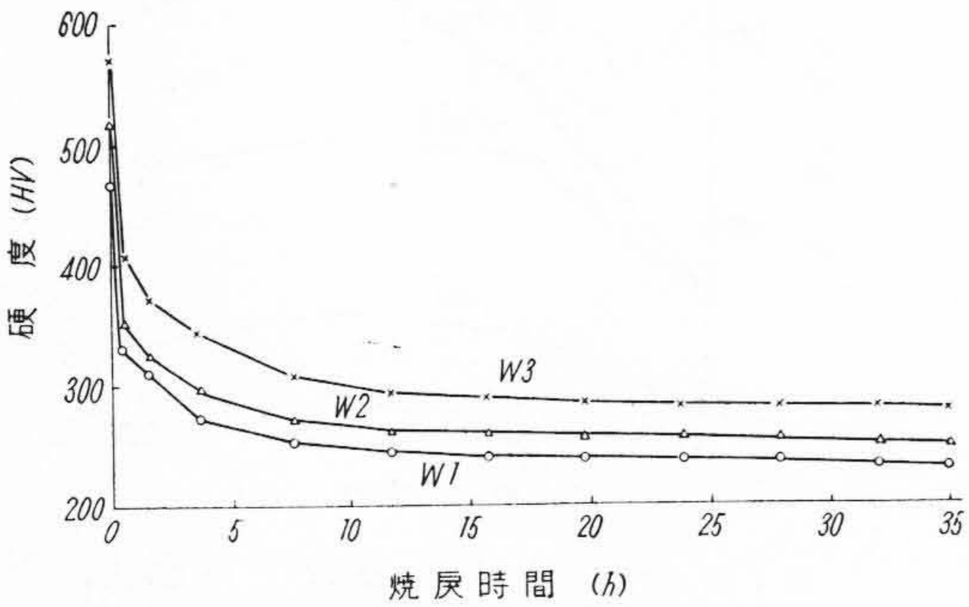
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	W
W1	0.16	0.40	0.50	0.022	0.014	0.19	11.58	0.36
W2	0.18	0.40	0.53	0.022	0.018	0.19	11.58	0.82
W3	0.20	0.50	0.56	0.023	0.017	0.18	11.52	1.72

試料は焼入の場合と同様 15×15×15 mm とし，焼入温度を 1,000, 1,050, 1,100°C の3種に変え 400°C より 700°C まで焼戻を行つて硬度を測定した。その結果を第2図に示す。なお各焼戻温度における保持時間は1時間とし後空冷を行つた。図に示すごとく 1,000°C 油焼入の場合は各試料とも焼戻温度 500°C で硬度はやゝ高くなるが，焼戻温度 550°C より硬度は急激に低下する。しかして各焼戻温度を通じ W の多い試料ほど高い焼戻硬度を示す。1,050°C 油焼入の場合は 1,000°C 油焼入の場合と

* 日立金属工業株式会社安来工場 工博
** 日立金属工業株式会社安来工場



第2図　焼戻温度と硬度との関係
Fig. 2. Relation between Tempering Temperature and Hardness

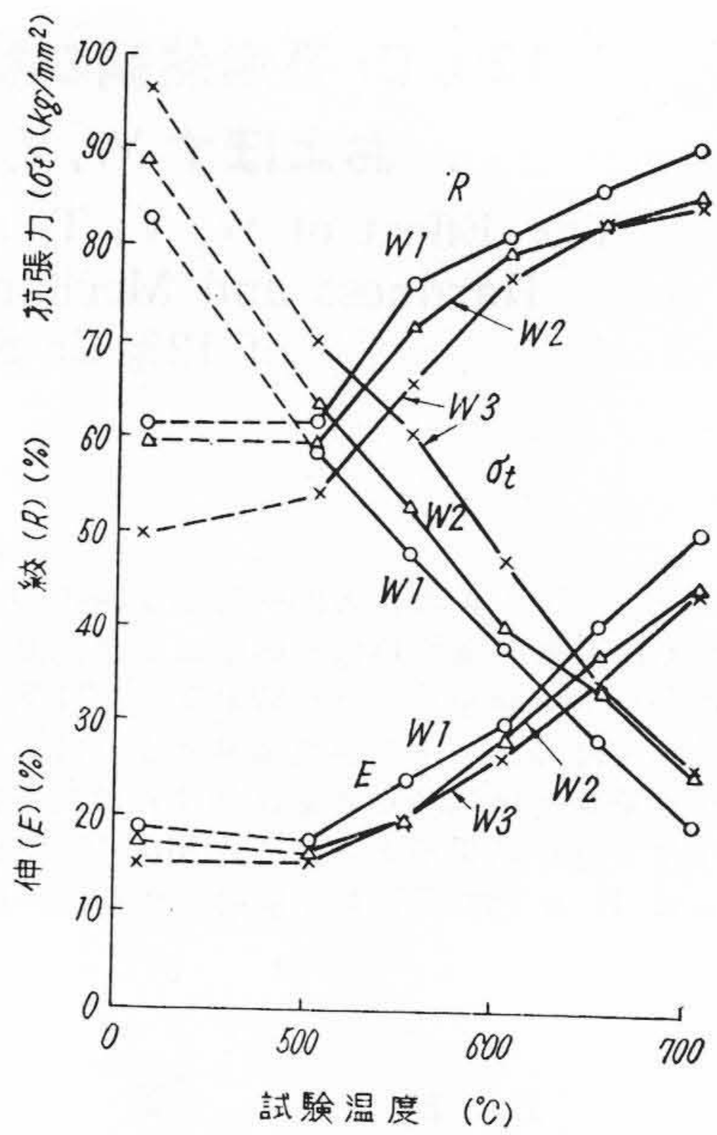


第3図　焼戻時間と硬度との関係
Fig. 3. Relation between Tempering Time and Hardness

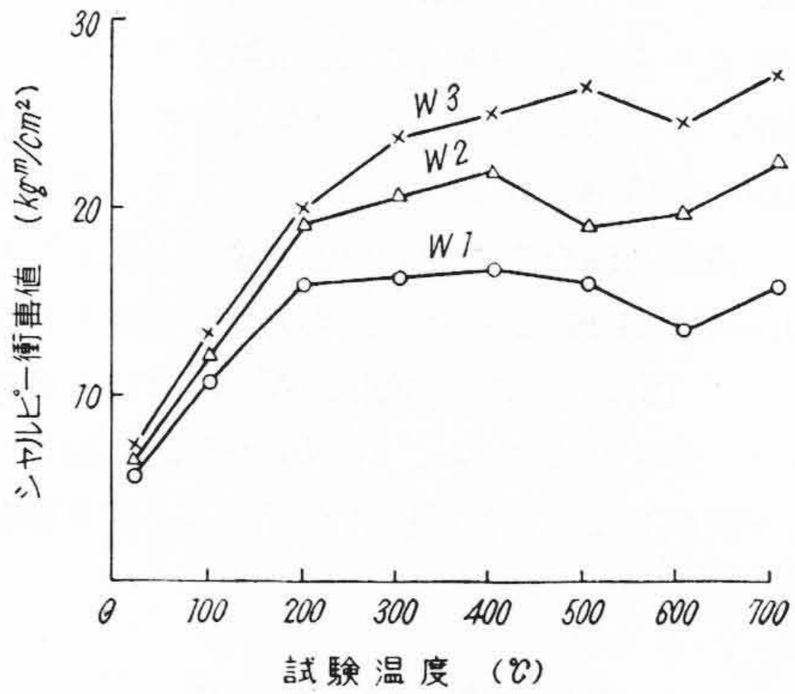
同様の傾向を示すが，各試料とも焼戻硬度は 1,000℃ 油焼入の場合より高い。1,100℃ 油焼入の場合 W1，W2 の両試料は 1,050℃ 油焼入の場合と同様の傾向を示すが，W3 は焼戻温度 550℃ まで硬度はやゝ高くなり，焼戻温度 600℃ より急激に硬度は低下する。しかして各試料とも 1,100℃ 油焼入の場合がもつとも高い焼戻硬度を示す。また W の多い試料ほど高い焼戻硬度を示す。

（D）　焼戻時間と硬度との関係

試料は 15×15×15 mm とし各試料を 1,050℃ に油焼入して後 600℃ に35時間まで焼戻して硬度の変化を調べた。その結果を第3図に示す。なお試料は同一試料で最初½時間，ついで1時間，つぎに4時間を7回繰返し最後に3½時間の焼戻をしてその都度硬度を測定した。図に示すごとく各試料とも焼戻時間7時間30分まで硬度は急激に低下するが，以後は焼戻時間が長くなつても硬度の低下は緩漫である。しかして各焼戻時間を通じ W3 がもつとも硬度高くついで W2，W1 の順となる。



第4図　試験温度と機械的性質との関係
Fig. 4. Relation between Testing Temperature and Mechanical Properties



第5図　試験温度と衝撃値との関係
Fig. 5. Relation between Testing Temperature and Impact Value

（E）　高温機械的性質

平行部 7 mm 丸の高温抗張試験片およびシャルピー衝撃試験片を製作し，1,050℃ に油焼入後 600℃ に1時間焼戻を行つた試料にて 500～700℃ における高温機械的性質を測定した。その結果を第4図および第5図に示す。なお抗張試験は30 t アムスラー万能引張試験機，衝撃試験はシャルピー衝撃試験機にて行つた。また各試験温度における保持時間は30分間とした。図に示すごとく抗張力は温度の上昇するにしたがつて低下するが，Wの

多い試料ほど高い抗張力を示す。伸および絞りは抗張力と逆に試験温度の上昇するにしたがつて増大し，Wの多い試料ほど小さい値を示す。衝撃値は各試料とも試験温度 500℃ まで温度の上昇にしたがつて増大するが，600℃ でやゝ減少し，700℃ でふたたび増大する。しかして各試験温度を通じWの多い試料ほど低い衝撃値を示す。

以上の実験結果よりWの影響を検討すれば焼戻硬度および高温抗張力はWの増加するにしたがつて高くなりWの増加につれ熱にたいする耐軟化性はよくなるものと考えられる。文献[1]によれば12% Cr 系耐熱鋼のクリープ歪は次式であらわされる。

$$\mu=\frac{H_b-H_a}{H_a-H_o}\times K$$

こゝに　μ はクリープ歪

H_b は試験前の硬度（または焼入焼戻後の硬度）

H_a は試験後の硬度（または試験温度に加熱後の硬度）

H_o は $\begin{cases}\text{A熱処理の場合} & 200\\ \text{B熱処理の場合} & 180\end{cases}$

K は恒数 $\begin{cases}\text{A熱処理の場合} & 200\\ \text{B熱処理の場合} & 400\end{cases}$

ただし　A熱処理　1,150℃×½hr→OQ,
680℃×1hr→A.C.

B熱処理　1,000℃×½hr→OQ,
680℃×1hr→A.C.

硬度はビッカース硬度数とする。

したがつて H_o および K は熱処理方法により定まる恒数となるので，H_b-H_a の小なるほどまた H_a の大なるほどクリープ歪は小さくなる。いま 1,050℃×½hr→O.Q., 680℃×1 hr→A.C. の熱処理をほどこした3試料の 600℃ における35時間後のクリープ歪を**第2図**および**第3図**より計算すれば，

W1 : $20K/(230-H_o)$　いま　W1 : 133

W2 : $30K/(250-H_o)$　$K=200, H_o=200$　W2 : 120

W3 : $30K/(280-H_o)$　とすれば　W3 : 75

となり W の増加するにしたがつてクリープ歪は小さくなることが知られる。

（2）バナヂウムの影響

（A）試料の化学成分

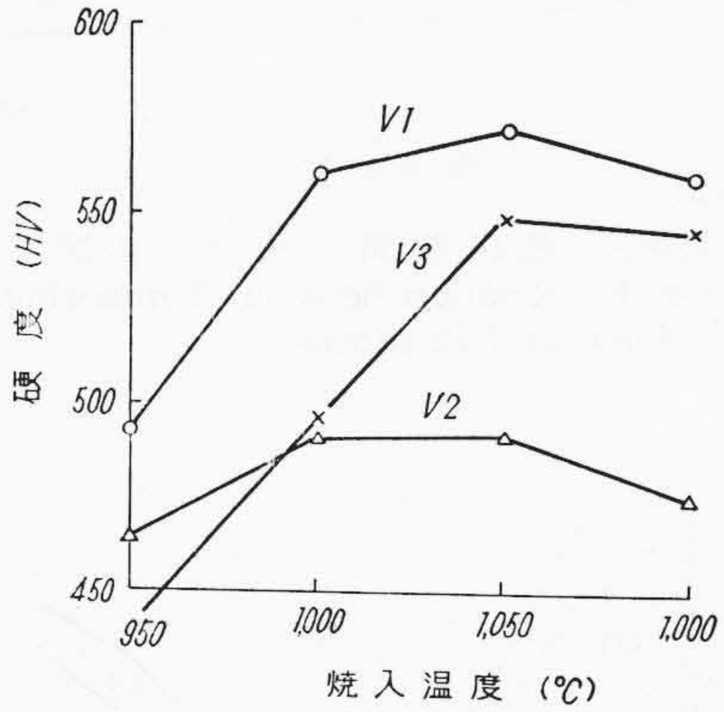
V 0.32～1.02% の影響をしらべるため**第2表**に示すごとき試料を調整した。

（B）焼入温度と硬度との関係

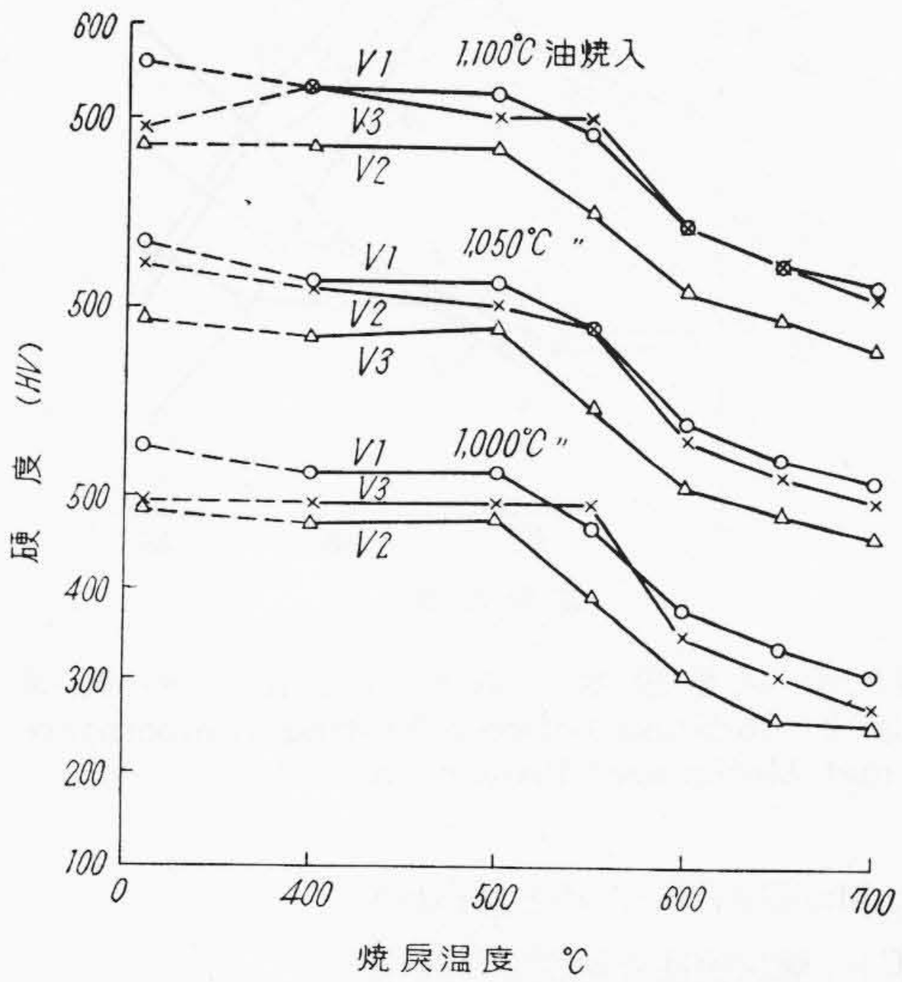
前述と同様 950～1.100℃ の焼入温度による硬度の変化をしらべた。その結果を**第6図**に示す。図に示すごとくV1は焼入温度 1,050℃ まで焼入温度の上昇するにしたがつて硬度は上昇し 1,050℃ で最高硬度を示す。V2はV1とほゞ同様の曲線の傾向を示す。V3は焼入温度 1,050℃ まで硬度はいちじるしく増大し 1,050℃ で最高硬度を示す。V3はほかの2試料に比し 1,100℃ の焼入温度における硬度低下がもつとも小さい。しかして焼入温度 1,000℃ 以上においてはV1がもつとも焼入硬度高く，ついでV3, V2の順となる。V2の焼入硬度の低い

第2表　試料の化学成分
Table 2. Chemical Composition of Specimen

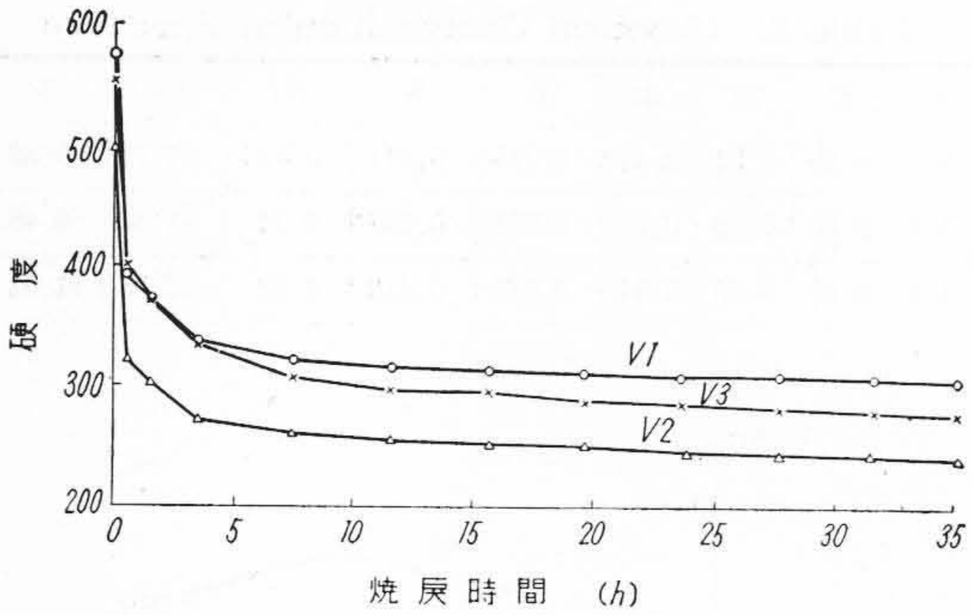
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	V
V1	0.20	0.33	0.43	0.025	0.014	0.42	11.92	0.32
V2	0.20	0.49	0.76	0.030	0.008	0.24	11.37	0.46
V3	0.20	0.43	0.54	0.028	0.012	0.42	12.03	1.02



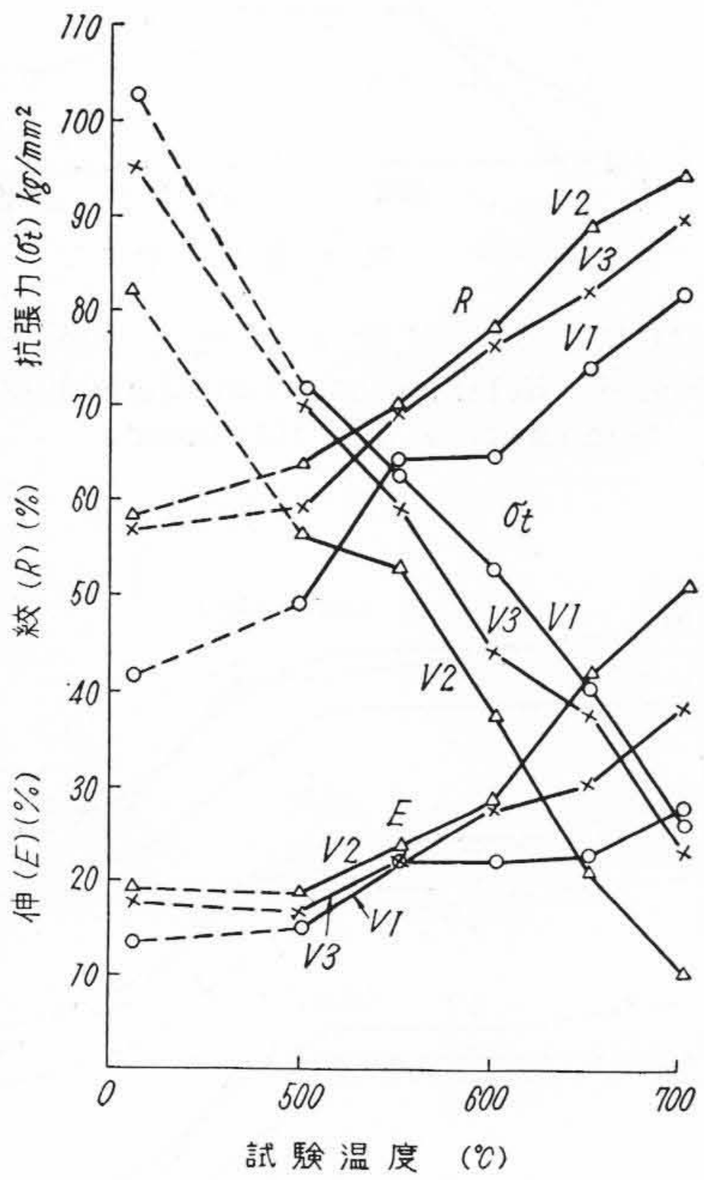
第6図　焼入温度と硬度との関係
Fig. 6. Relation between Quenching Temperature and Hardness



第7図　焼戻温度と硬度との関係
Fig. 7. Relation between Tempering Temperature and Hardness



第8図　焼戻時間と硬度との関係
Fig. 8. Relation between Tempering Time and Hardness

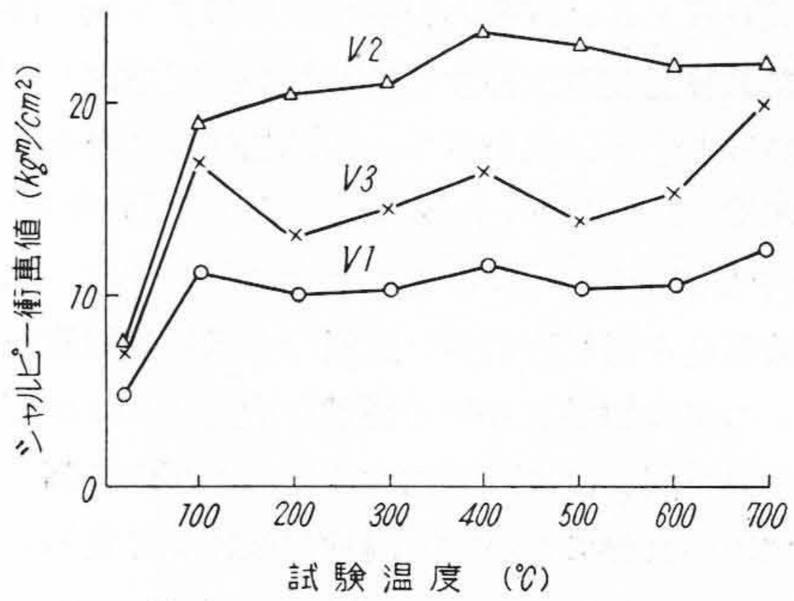


第9図　試験温度と機械的性質との関係
Fig. 9. Relation between Testing Temperature and Mechanical Properties

のは Mn 量の多いためと思われる。

(C)　焼戻温度と硬度との関係

前述と同様焼戻硬度を測定した。その結果を**第7図**に示す。1,000℃ 油焼入の場合V1は焼戻温度 500℃ まで硬度はほとんどかわらないが，550℃ よりやゝ急激に硬度を低下する。V2は V1と同様の傾向を示す。V3はほかの2試料に比し焼戻温度550℃における硬度低下がやゝ緩漫である。しかして各焼戻温度を通じV1がもつとも硬度高く，ついで V3，V2の順となる。1,050℃ 油焼入の場合は 1,000℃ 油焼入の場合と同様の傾向を示すが，各試料とも 1,000℃ 油焼入の場合に比し高い焼戻



第10図　試験温度と衝撃値との関係
Fig. 10. Relation between Testing Temperature and Impact Value

硬度を示す。1,100℃ 油焼入の場合 V1および V2は 1,050℃ 油焼入の場合と同様の傾向を示すが，V3は焼戻温度550℃まで硬度低下はほとんどなく，600℃ より急激に硬度を低下する。しかしてV3はV1とほゞ同じ焼戻硬度を示す。

(D)　焼戻時間と硬度との関係

前述と同様35時間までの焼戻時間による硬度の変化をしらべた。その結果を**第8図**に示す。図に示すごとく各試料とも焼戻時間7時間30分まで硬度はやゝ急速に低下するが，以後は焼戻時間が長くなつても硬度の低下はきわめて緩漫である。しかして各時間を通じV1がもつとも硬度高く，ついでV3，V2の順となる。

(E)　高温機械的性質

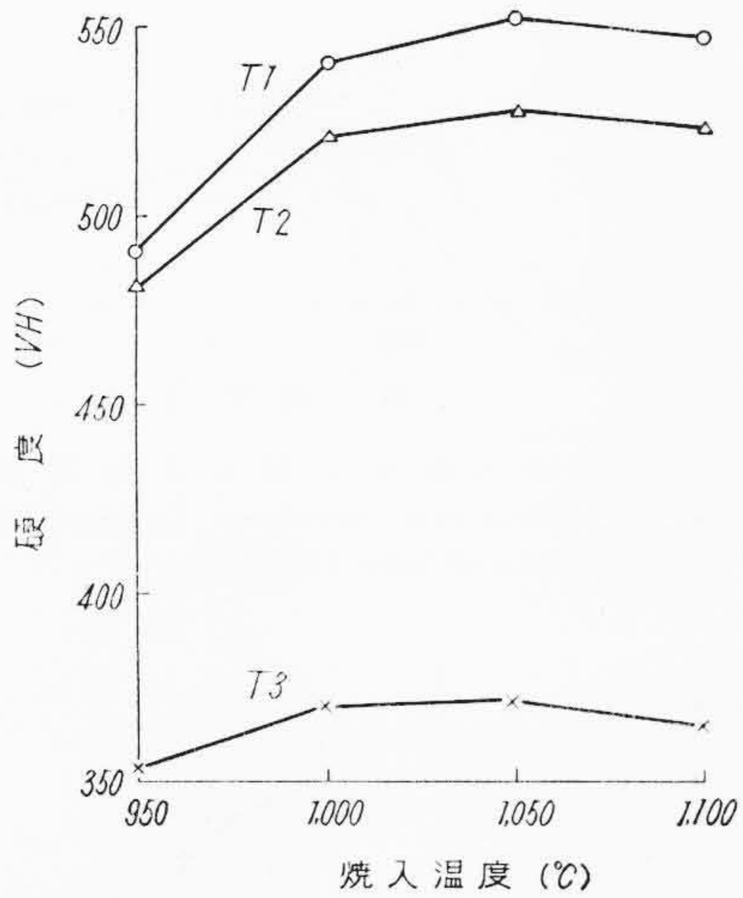
前述と同様 500～700℃ における高温機械的性質を測定した。なお各試料はいずれも1,050℃に油焼入し600℃に1時間焼戻を行つて試験に供した。その結果を**第9図**および**第10図**に示す。高温抗張力は各試料とも試験温度の上昇するにしたがつて，しだいに小さくなる。しかして各温度を通じV1がもつとも抗張力高く，ついでV3，V2となる。伸および絞りは抗張力とまつたく逆の傾向を示す。衝撃値は**第10図**に示すごとく V1は試験温度 200℃ でやゝ小さくなり，300℃ 以上 400℃ までは温度の上昇にともない衝撃値も増大する。500℃ でやゝ減少し，600℃ よりふたたび増大する。V2は400℃ まで試験温度の上昇するにしたがつて大きくなるが，500℃ より 600℃ までは逆に低下する。V3はV1とほゞ同様の傾向を示す。しかして各試験温度を通じV2がもつとも高い衝撃値を示し，ついでV3，V1の順となる。

以上の実験結果よりVの影響をみるに，Vは単独には多量添加しても，焼戻硬度および高温抗張力は高くならず，かえつて逆効果をもたらす。このことは前述のクリープ歪の計算を行つても判然とする。

(3)　チタニュームの影響

第 3 表　試　料　の　化　学　成　分
Table 3. Chemical Composition of Specimen

	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Ti
T1	0.15	0.44	0.62	0.021	0.015	0.21	11.79	0.21
T2	0.15	0.74	0.72	0.023	0.016	0.19	11.64	0.38
T3	0.16	0.38	0.66	0.015	0.019	0.18	11.85	0.65



第 11 図　焼入温度と硬度との関係
Fig. 11. Relation between Quenching Temperature and Hardness

(A)　試料の化学成分

Ti 0.21～0.65%の影響をしらべるため第 3 表に示すごとき試料を調整した。

(B)　焼入温度と硬度との関係

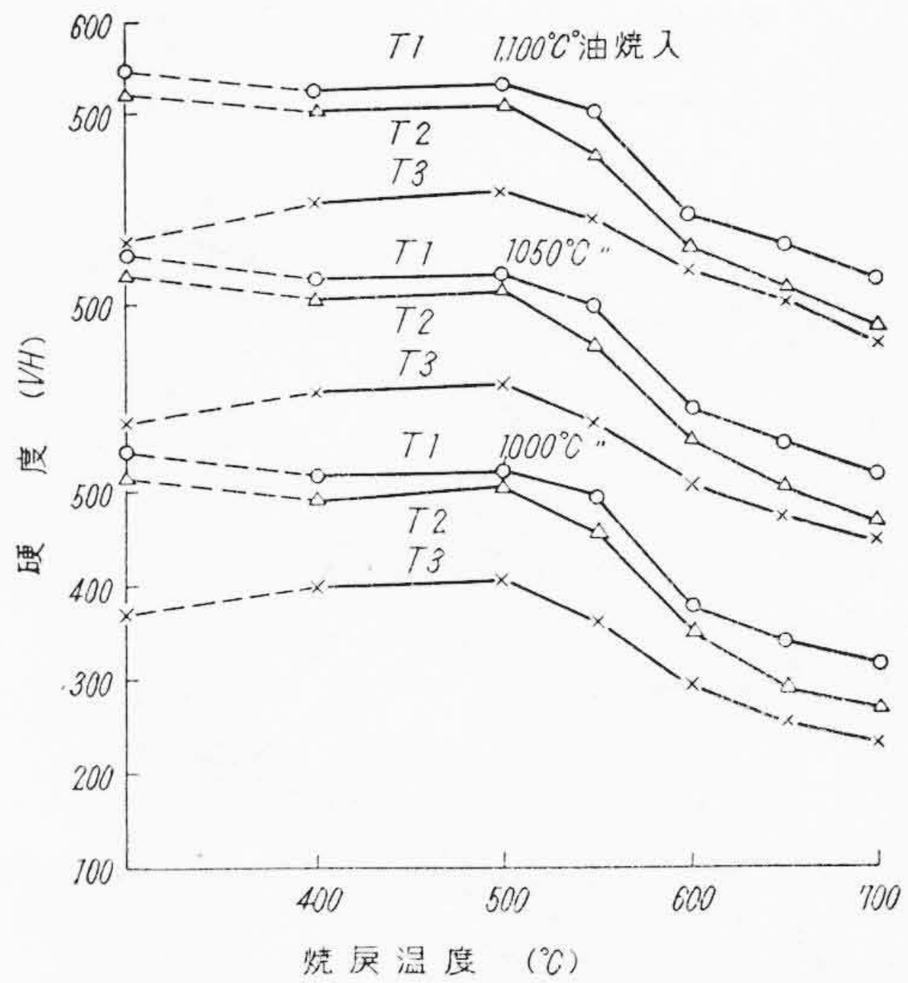
前述と同様焼入硬度をしらべた。その結果を第11図に示す。図に示すごとく各試料とも焼入温度 1,050℃ まで焼入温度の高くなるにしたがつて硬度はしだいに高くなり，1,100℃ ではやゝ低下する。しかして各焼入温度を通じＴ１がもつとも硬度高くついでＴ２，Ｔ３となるがＴ３はほかの試料に比し硬度はいちじるしく低い。これは Ti の増加によりフェライトがでるためと考えられる。

(C)　焼戻温度と硬度との関係

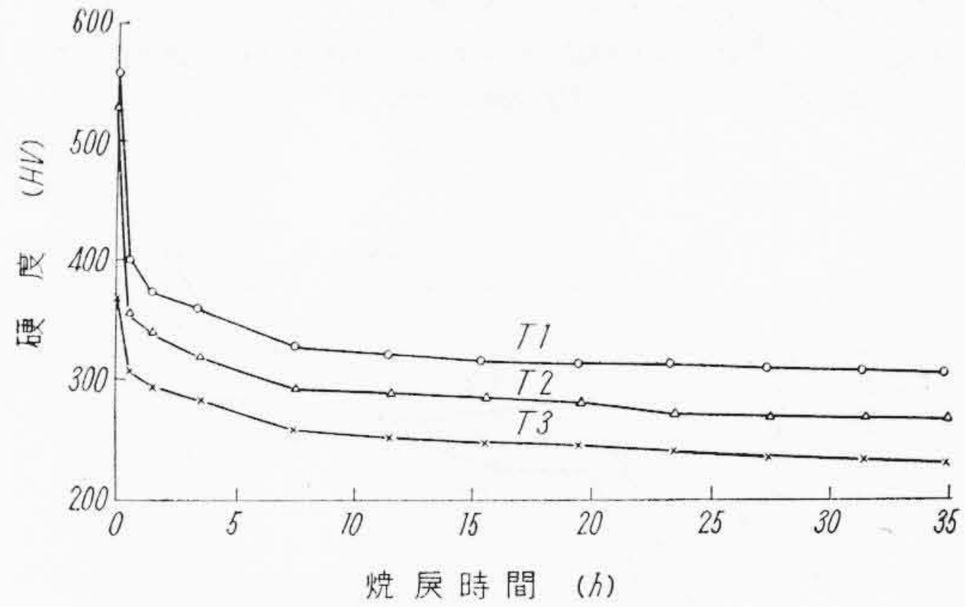
前述と同様焼戻硬度を測定した。その結果を第12図に示す。 1,000℃ 油焼入の場合は各試料とも焼戻温度 550 ℃ よりいちじるしく硬度を低下する。1,050, 1,100℃ と焼入温度が上昇しても同様の傾向を示すが，焼入温度の上昇するにしたがつてえられる焼戻硬度も高い。しかして各焼入，焼戻温度を通じＴ１がもつとも硬度高く，ついでＴ２，Ｔ３の順となる。

(D)　焼戻時間と硬度との関係

前述と同様焼戻時間による硬度の変化をしらべた。そ



第 12 図　焼戻温度と硬度との関係
Fig. 12. Relation between Tempering Temperature and Hardness

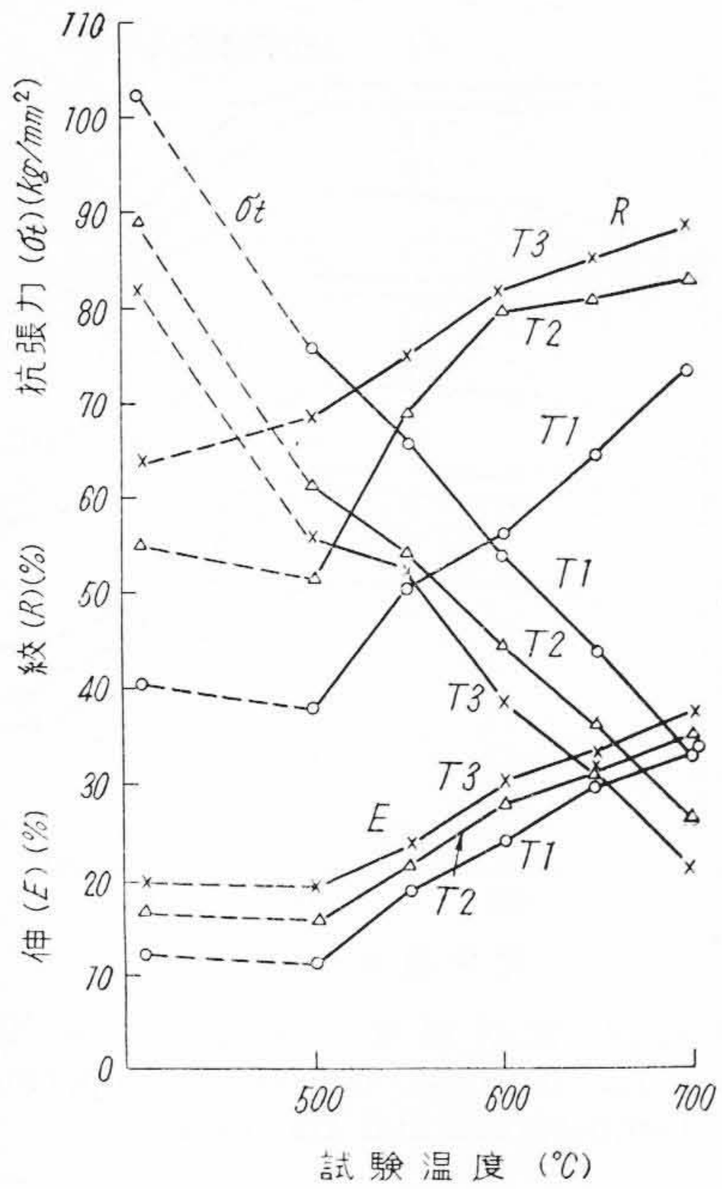


第 13 図　焼戻時間と硬度との関係
Fig. 13. Relation between Tempering Time and Hardness

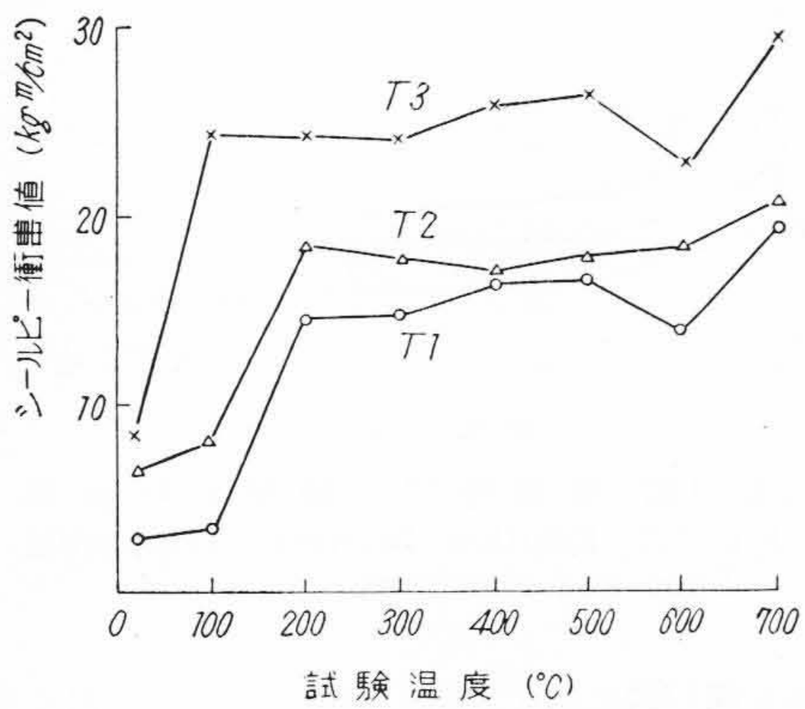
の結果を第13図に示す。図に示すごとく各試料とも焼戻時間７時間30分まで硬度をやゝ急激に低下するが，10時間以後硬度低下はきわめて緩漫である。しかして各焼戻時間を通じＴ１がもつとも硬度高くついでＴ２，Ｔ３の順となる。

(E)　高温機械的性質

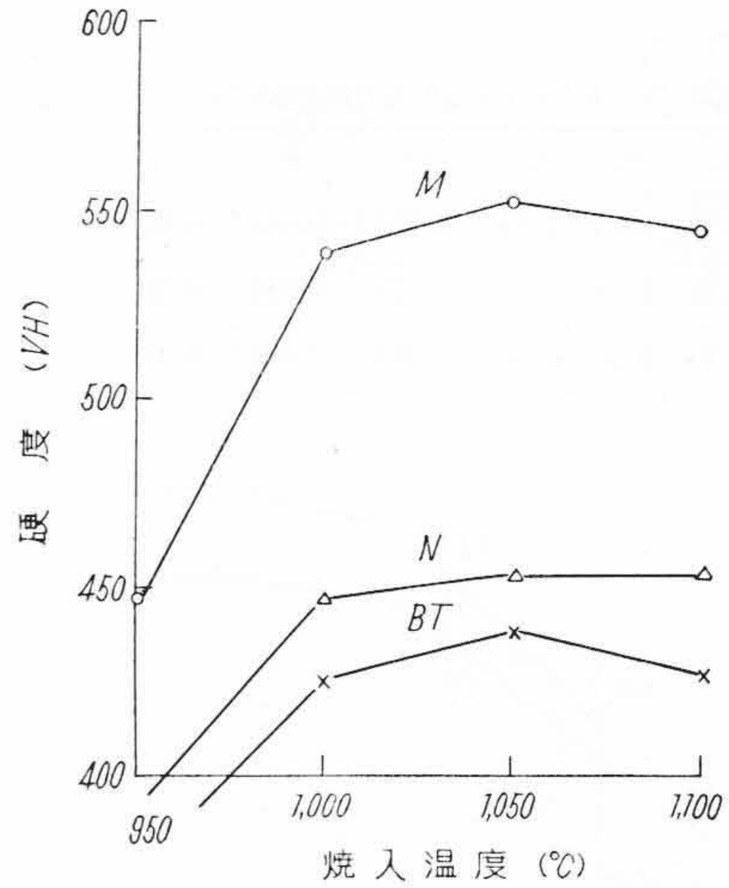
前述と同様 500～700℃ の試験温度における高温機械的性質を測定した。その結果を第14図，第15図に示す。なお各試料はいずれも 1,050℃ に油焼入し 600℃ に１時間焼戻を行つて試験に供した。図に示すごとく高温抗張力は温度の上昇するにしたがつて急激に低下する。しかして各試験温度を通じＴ１がもつとも抗張力高くついでＴ２，Ｔ３の順となる。伸おびよ絞りは抗張力とまつたく逆の傾向を示す。衝撃値は第15図に示すごとくＴ１は試験温度 200℃ 附近でいちじるしく増大し，500℃ まで温度



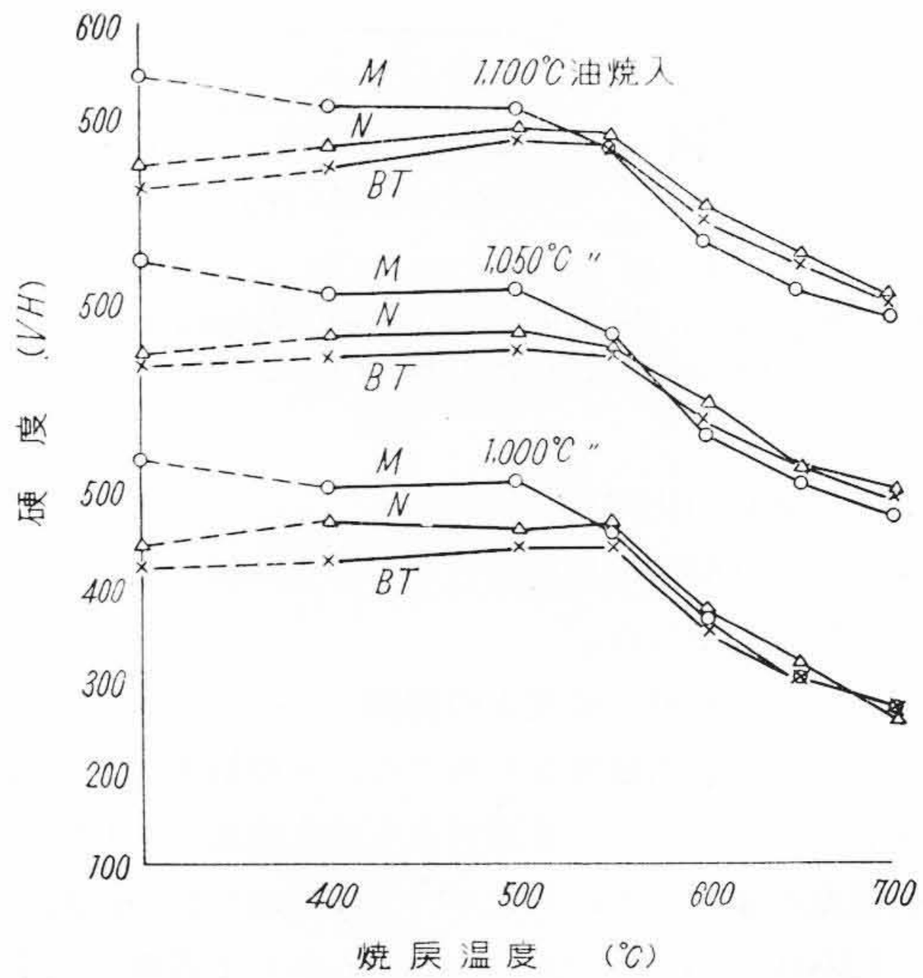
第14図　試験温度と機械的性質との関係
Fig. 14. Relation between Testing Temperature and Mechanical Properties



第15図　試験温度と衝撃値との関係
Fig. 15. Relation between Testing Temperature and Impact Value



第16図　焼入温度と硬度との関係
Fig. 16. Relation between Quenching Temperature and Hardness



第17図　焼戻温度と硬度との関係
Fig. 17. Relation between Tempering Temperature and Hardness

の上昇するにしたがつて，わずかながら大きくなる。600℃で一度減少し700℃でふたたび増大する。T 2は200℃までT 1と同様の傾向を示すが，300℃より400℃まで減少の傾向を示し，500℃より温度の上昇にともない増大する。T 3は100℃で急激に増大し，200～300℃では100℃の衝撃値と大差ない。400℃より500℃までやゝ増大し，600℃で一度減少して700℃でふたたび大きくなる。しかして各温度を通じT 3がもつとも衝撃値大きく，ついでT 2，T 1の順となる。

以上の実験結果より Ti の影響をみると，Ti を増加すれば焼戻硬度はいちじるしく低下し，また高温における抗張力も減少することより，Ti の多量添加は悪影響をおよぼすものと考えられる。これは前述のクリープ歪の計算よりも立証しうる。

(4)　モリブデン＋バナヂウム＋ニオビュームの影響

(A)　試料の化学成分

Mo＋V＋Nb の影響をしらべるため第4表に示すごとき試料を調整した。M は Mo を単独に，N は Mo＋V＋Nb, BT は N に B（ボロン）を 0.003%（計算量），Ti 0.09% 添加した試料であるが，N および BT は Cr が約1%低い。

(B)　焼入温度と硬度との関係

第 4 表　試　料　の　化　学　成　分
Table 4.　Chemical Composition of Specimen

	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	V	Nb	B	Ti
M	0.18	0.19	0.24	0.019	0.024	0.22	11.81	0.79	—	—	—	—
N	0.15	0.39	0.27	0.010	0.025	0.14	10.55	0.76	0.76	0.11	—	—
BT	0.14	0.34	0.26	0.009	0.023	0.16	10.67	0.80	0.74	0.13	0.003	0.0899

(計算量)

前述と同様焼入硬度をしらべた。その結果を第16図に示す。図のごとく各試料とも焼入温度 1,050℃ で最高硬度を示すが，M がもつとも硬度高くついで N, BT の順となる。

(C)　焼戻温度と硬度との関係

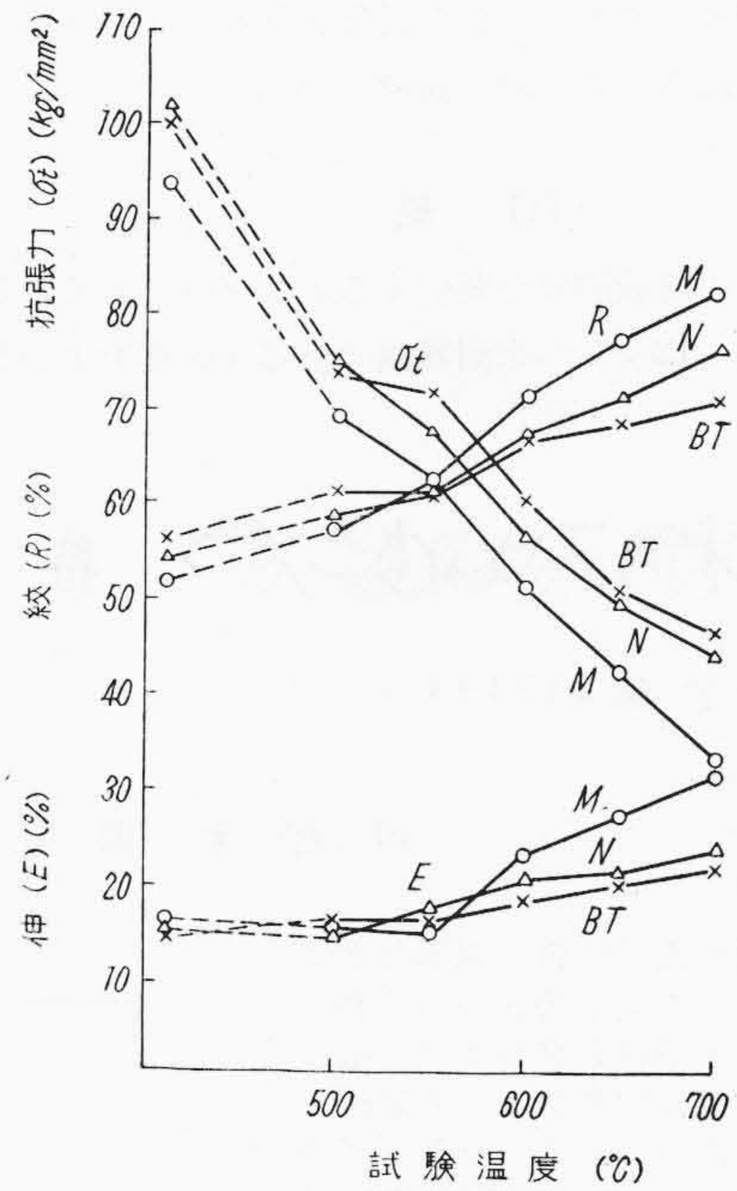
前述と同様 400～700℃ の焼戻による硬度の変化をしらべた。その結果を第17図に示す。1,000℃ 油焼入の場合は焼戻温度 500℃ まで M がもつとも高い硬度を示す。550℃ 以上の焼戻温度では 3 試料間に大差ないが N がやゝ高い硬度を示す。また M は焼戻温度 550℃ より急激に硬度を低下するが，N および BT は 550℃ まで大差なく，600℃ より硬度低下はいちじるしくなる。1,050℃ 油焼入の場合は 1,000℃ 油焼入の場合と同様の傾向を示す。1,100℃ 油焼入の場合 M は焼戻温度 550℃ より硬度低下がやゝいちじるしくなるが，1,050℃ 油焼入の場合と大差ない。N および BT は焼戻温度 500℃ まで硬度を増大し，550℃ ではわずかながら低くなる。600℃ よりやゝいちじるしく硬度は低下する。しかして各焼入温度とも 550℃ 以上の焼戻温度ではおゝむね M が最低の硬度を示す。N および BT 間にはほとんど差がみとめられないが，わずかながら N が高い硬度を示す。

(D)　焼戻時間と硬度との関係

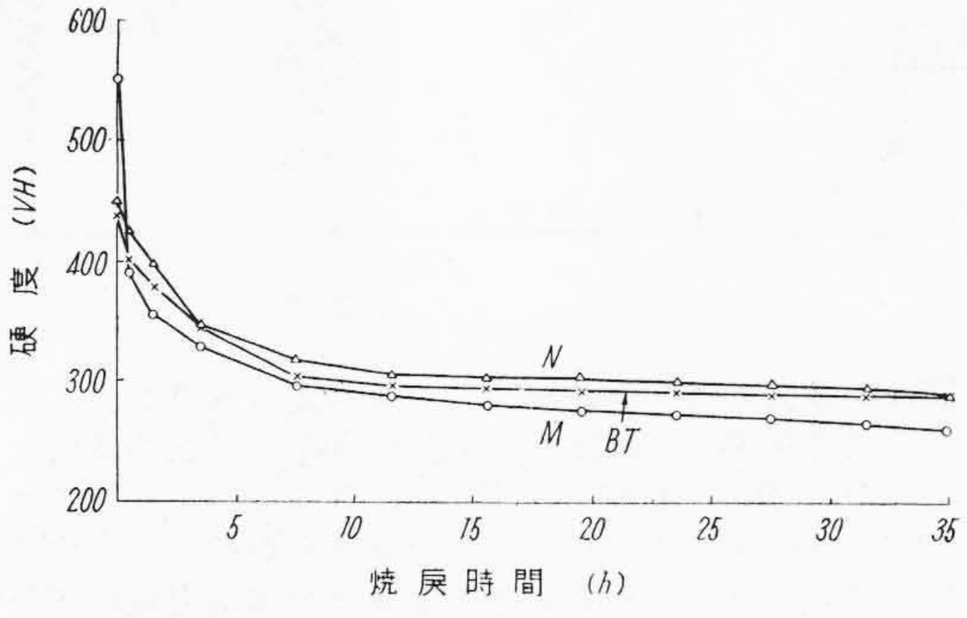
前述と同様焼戻時間による硬度の変化をしらべた。その結果を第18図に示す。図に示すごとく M の硬度低下はほかの 2 試料に比しやゝいちじるしい。BT は N に比し硬度はやゝ低いが時間による硬度低下はもつとも緩漫である。

(E)　高温機械的性質

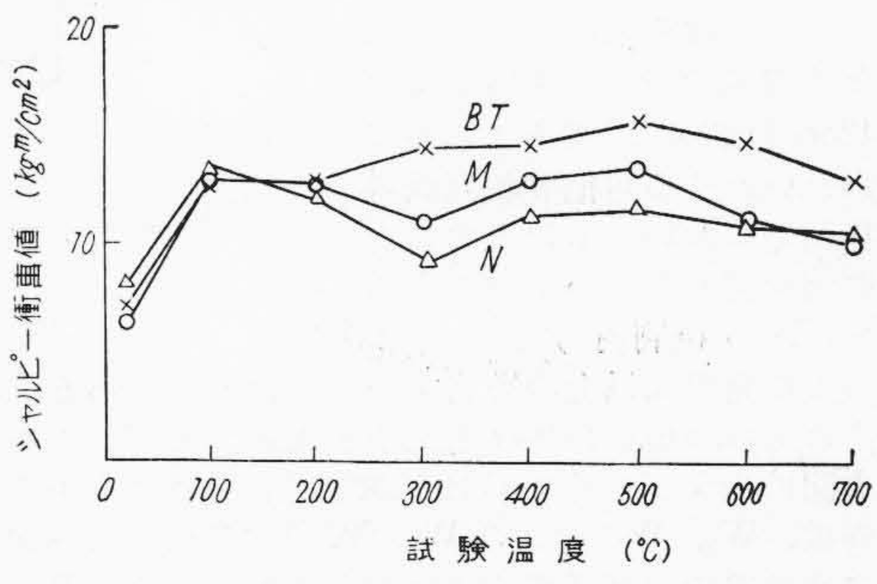
前述と同様500～700℃ における高温機械的性質をしらべた。その結果を第19図および第20図に示す。なお各試料はいずれも 1,050℃ に油焼入後 600℃ に 1 時間焼戻を行つて試験に供した。各試料とも抗張力は温度の上昇にともないいちじるしく減少する。しかして各温度を通じ BT がもつとも抗張力大きくついで N, M の順となる。Mo, V, Nb を同時に添加し



第 19 図　試験温度と機械的性質との関係
Fig. 19.　Relation between Testing Temperature and Mechanical Properties



第 18 図　焼戻時間と硬度との関係
Fig. 18.　Relation between Tempering Time and Hardness



第 20 図　試験温度と衝撃値との関係
Fig. 20.　Relation between Testing Temperature and Impact Value

たNおよびBTの両試料はW, Vおよび Tiを単独に加えたどの試料より高い抗張力を示す。伸および絞りは試験温度の上昇にしたがいしだいに大きくなる。しかして600℃以上の試験温度ではBTがもつとも小さくついでN, Mの順となる。衝撃値は**第20図**に示すごとくBTが各温度を通じもつとも大きくついでM, Nの順となる。

以上の実験結果を要約すればMo, V, Nbを同時に添加すれば焼戻硬度は高く，高温抗張力も大きい。またさらに少量のBおよびTiを添加すれば一層この傾向はいちじるしい。したがつてMo, V, Nbを同時に加えさらにBおよびTiを少量添加すればかなり大きいクリープ強度を有する耐熱鋼がえられるものと思われる。これは前述のクリープ歪の計算よりも立証しうる。これについてはさらに引続き研究中である。

〔III〕結　　言

以上の実験結果を要約するとつぎのごとくなる。

(1)　12% Cr 系耐熱鋼の熱処理硬度および高温機械的性質におよぼすW, V, Tiおよび Mo+V+Nb (+B+Ti) の影響について実験を行つた。

(2)　Wは本実験の範囲内では多量に加えるほど効果的である。

(3)　Vは単独に多量を加えればかえつて悪影響をおよぼす。

(4)　TiはVと同様単独に多量添加すれば悪影響をおよぼす。

(5)　Mo, Vおよび Nbを同時に添加すれば性能がいちじるしく改善される。さらにBおよびTiを少量追加添加すればさらに効果的である。

終りにのぞみ本実験遂行に当り終始熱心に従事された田中康平冶金研究所員および山根吉長君に深甚なる謝意を表す。

参　考　文　献

(1)　「耐熱材料の長時間クリープ試験の確立と無ニッケル耐熱鋼の研究」に関する実績説明書：三菱日本重工業株式会社横浜造船所　(30.3.31)

特　許　の　紹　介

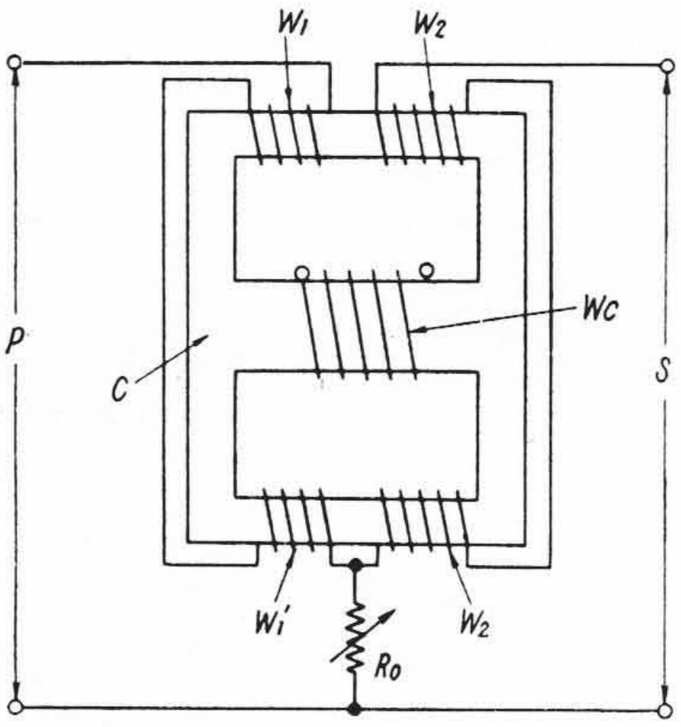
特許第219494号

小野田芳光

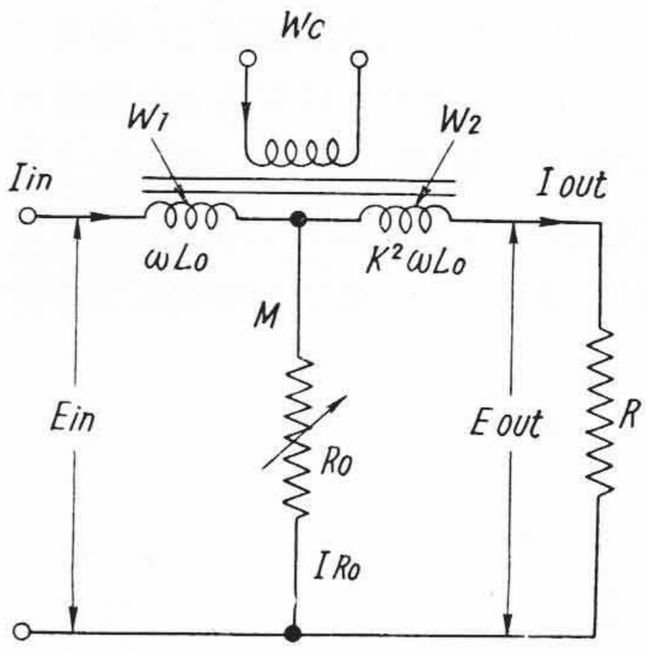
可飽和相互誘導型定電圧移相器

水銀整流器の格子制御などに用いられる従来公知の可飽和リアクトル型自動移相器は一般にいづれも移相角度（入力電圧と出力電圧の移相差）を変えてゆくにしたがつて出力電圧の電圧値がものによつてははなはだしいまでに変化し，位相制御を予定通り正しく行うことの妨害となつた。

この種の移相器の一つとしてさきに登録された実用新案第404288号によつてあきらかにされたいわゆる可飽和相互誘導型移相器においても以上のような弊害を免れえないものであることがその後判明するに至つた。この発明は以上の弊害を一掃したものである。移相器そのものの構成母体は上記の実用新案と同じであつて**第1図**に示すごとくでCは三脚鉄心，Wcは中央脚の制御巻線，W_1, W_1' および W_2, W_2' はそれぞれ一次および二次巻線で相互誘導的に外脚上に巻かれる。Pは一次入力端子，Sは二次出力端子で可調整抵抗Roは W_1' と W_2' の中点と入出力線の一つとの間に接続される。**第1図**は**第2図**のごとき結線図でおきかえられるが、この場合二次巻線 W_2 の巻数を一次巻線 W_1 の巻数の3倍となし，かつRoを加減してR/Roが8になるようにすれば理想的な結果がえられることをあきらかにしたものである。すなわち以上のごとき整定となせば出力電圧の移相角度のいかんにかかわらず電圧値を入力電圧値とひとしく常に一定となすことができる。（宮崎）



第1図



第2図