

## 鐵 と 鋼 第二十四年 第七號

昭和十三年七月二十五日發行

## 論 說

## Ni鋼及び Ni·Cr鋼の加熱變態開始溫度に就て

(日本鐵鋼協會第 19 回講演大會講演 昭和 13 年 4 月)

永 澤 清\*

ON THE BEGINNING TEMPERATURE OF THE  $A_{c1}$  TRANSFORMATION OF  
NICKEL AND NICKEL-CHROMIUM STEELS.

Kiyoshi Nagasawa

**SYNOPSIS:**—In nickel or nickel-chromium steels, the  $A_{c1}$  transformation occurs under a certain temperature range, beginning at a temperature considerably lower than that usually designated as  $A_{c1}$  point. In nickel steels, the beginning point of the  $A_{c1}$  change is lowered by  $20^\circ$  for each 1 per cent of nickel up to 5 per cent.

The addition of 0.75 and 1.50 per cent of chromium to nickel steels raises the beginning point by  $20^\circ$  and  $40^\circ$  respectively. Tungsten and molybdenum have no effect on the beginning point of the  $A_{c1}$  change of nickel-chromium steels.

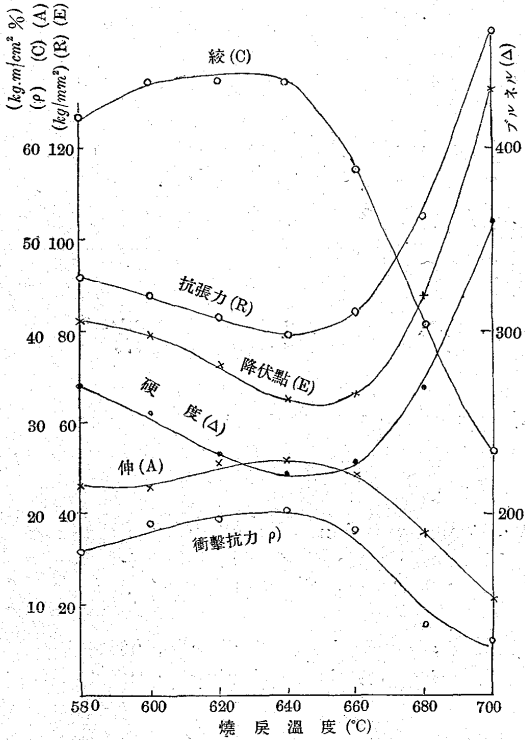
**序 言** 構造用 Ni 鋼又は Ni·Cr 鋼は焼入焼戻して使用され、又其の軟化も普通變態點下での低温焼鈍即ち焼戻による。此等の焼戻操作に於ては焼戻溫度が加熱變態にかゝる迄は溫度の上昇と共に鋼材は軟化の一途を辿るべきものである。然るに焼戻による硬度變化を實測して見ると從來變態點とされてゐる溫度までは軟化が續かず、それより相當低溫度で硬度の極小値に達し、更に溫度が昇れば鋼材は次第に硬化し始めるのである。尙此れを衝擊値に就て言へば硬度の極小値に相當して極大値を示し以後は漸次減少に轉するのである。以上は總て焼戻後急冷却した試料に就ての事實である。第 1 圖は Ni·Cr 鋼を各溫度に 10 時間焼戻した場合の例で本鋼の加熱變態溫度は  $680\sim 700^\circ\text{C}$  (觀測者に依り多少の相違はあるが、大部分此の範圍にあり)とされてゐるに拘らず機械的性質の極大極小値は  $640^\circ\text{C}$  に顯はれる。以後此の溫度を變向點と呼ぶことにする。此の變向點は焼戻時間と共に次第に低下し、3 時間以上では略一定の溫度に到達する。扱て此の變向點は加熱變態の開始に基くものと考えれば問題はないのであるが、その溫度が普通に考へられてゐる變態點よりも餘りに低溫度であ

る爲め一應其の眞否を調べる必要がある。依て本研究に於ては第一に此れが加熱變態の開始に基くものなることを論證し、第二に各種 Ni 鋼及び Ni·Cr 鋼に就て其の窮極的溫度を決定して見たのである。

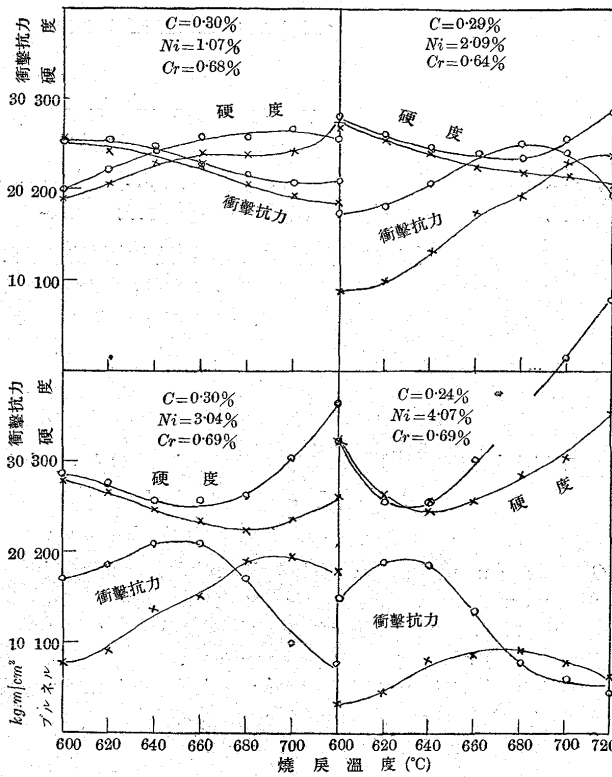
1. 變向點は炭化物の溶解度増加に基因せず 鋼材を變態點以下で焼戻し、之を急冷する場合に起る硬化の原因を加熱變態の開始以外に求むるとすれば其の最も有力に考へられるのは變態點下でのフェライトに對する炭化物の溶解度増加である。焼入鋼を次第に加熱して焼戻すれば一度過飽和固溶態マルテンサイトから析出した炭化物は約  $500^\circ\text{C}$  附近からフェライトに對する溶解度が増加し始める、此の結果游離状態で残留する炭化物量は次第に減すると同時にソルバイト粒は次第に凝集成長する、此の結果焼戻鋼は(焼戻後急冷却する場合)焼戻溫度の上昇と共に硬度は減じ、衝擊抗力は増す。然るに今若しフェライトに固溶される炭化物量が或る程度以上に増加したとすれば其のマルテンサイトの特性が著しくなり、當然鋼材の硬化並びに脆化の原因となるであらう。而して此の影響が上述の軟化靱化の原因を凌駕する様なれば鋼材の硬度は極小値を経て増加に轉し、衝擊抗力は極大値を経て減少に轉する様に

\* 日本特殊鋼株式會社

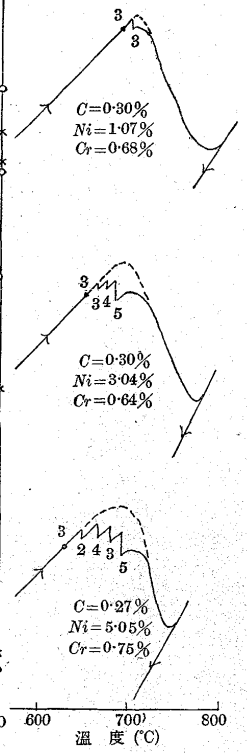
第1圖 焼戻鋼の機械的性質  
Ni・Cr鋼  
(C=0.24, Ni=4.07 Cr=0.69)



第2圖 Ni・Cr鋼の焼戻による硬  
度と衝撃抗力の變化



第3圖 階段的加熱に依る  
Ni・Cr鋼の Ac<sub>1</sub> 變態  
(數字は保熱時間)



なるであらう。斯くして鋼材は或る焼戻温度に於て變向點を示すべきことが考へられる。然し乍ら此の想定は以下に述べる二つの實驗的事實から否定されるのである。

(A) 第2圖は Ni 量を異にする4種の Ni・Cr 鋼を焼戻後水中急冷したもの(○印)と爐中緩冷したもの(×印)とに就ての硬度及び衝撃抗力の變化を示したものである。今此等の中、硬度曲線だけに就て考へるに若し變向現象が變態點下での炭化物の溶解度増加によるものとすれば緩冷試料に於ては變向現象は見られぬ筈である。何となれば溶解炭化物は冷却の途中 500~550°C までに大部分析出され且つ此の結果硬度上昇は起らぬ事が知られてゐるからである。然るに Ni 量が 3% 以上の鋼に於ては緩冷曲線上にも顯著に變向點が見られる。依て此の事實は炭化物の溶解度増加では説明されない。然るに之れを變態開始とすれば容易に了解出来る。即ち鋼材の一部が變態して生じたオーステナイトが其の冷却變態を低温度で起し (Ar'') マルテンサイト~トルスタイトに變ずる爲めの硬化と見ればよいのである。尙 Ni 量が 3% 以下の場合には、冷却變態は高温度で起り (Ar') パーライトを生ずるから硬化せず従て變向點は顯はれないことになる。

(B) 全熱膨脹曲線上に於て Ni・Cr 鋼の Ac<sub>1</sub> 變態を觀

測するに Ni 量 3% 以上の鋼を次第に加熱すると其の極大點に近くに従ひ直線的膨脹から曲線的膨脹に變り鋼材が既に收縮しつつあることを示す。而して此れは明かに機械的性質の變向現象に伴ふものであることが知られる。今 3 種の Ni・Cr 鋼に就て加熱の途中極大點以下の種々の温度に長時間保熱し各温度で收縮出来る寸收縮させる様な階段的加熱を行つて見た。第3圖は其の結果である。

何れも極大點以下の各温度で一定量の收縮を起すことが知られ、その量は極大點に近づく程大きくなる。此の收縮は低 Ni の場合には殆ど見られないが 3% 以上に於ては顯著になる。さて此の收縮量は頗る大きいので炭化物がフェライトへ溶解する爲めに起るものとは考へられない。然し乍ら加熱變態開始に伴ふ α→γ 變態による收縮と見れば何等の不思議もない。

以上述べた所により焼戻鋼の機械的性質曲線上の變向點は加熱變態の開始に基くものと考へて間違ひはない。

2. 實驗試料 從來 Ni 鋼及び Ni・Cr 鋼の加熱變態點として記されてゐるものは其の多くが變態速度最大の温度であるが實際焼戻作業に當て重要な寧ろ其の開始温度であると言へる、而して前節述べた所により變向點は加熱變態の開始温度を示すものであるから以下最も實用的な

範圍に屬する Ni 鋼及び Ni·Cr 鋼に就て出来る丈精密にその變向點を觀測して變態開始溫度を決定して見ることとした。第 1 表は試料の化學的組成を示したもので炭素量はすべて 0.3% に一定し Ni 鋼はその Ni 量を 1~5% とし Ni·Cr 鋼は上記 Ni 鋼に Cr 量 0.75% 及び 1.50% を加へたもの又 Ni·Cr·W 鋼及び Ni·Cr·Mo 鋼は Cr 量 0.75% の Ni·Cr 鋼に W 又は Mo を夫々 1% 加へたるものである。

第 1 表 實驗試料の化學的組成

試料 番號	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	W	Mo
C 鋼	0	0.28	0.19	0.39	0.020	0.028	0.19	—	—
Ni 鋼	1	0.28	0.14	0.36	0.019	0.028	1.00	—	—
	2	0.29	0.16	0.15	0.017	0.028	2.03	—	—
	3	0.28	0.18	0.38	0.019	0.028	3.08	—	—
	4	0.26	0.13	0.36	0.018	0.024	4.05	—	—
	5	0.25	0.19	0.38	0.015	0.017	5.10	—	—
Ni·Cr (低)鋼	6	0.30	0.16	0.40	0.019	0.021	1.07	0.68	—
	7	0.29	0.15	0.35	0.019	0.020	2.09	0.64	—
	8	0.30	0.16	0.37	0.019	0.012	3.04	0.69	—
	9	0.24	0.14	0.37	0.0	0.020	4.07	0.69	—
Ni·Cr (高)鋼	10	0.27	0.17	0.43	0.030	0.018	5.05	0.75	—
	11	0.29	0.15	0.35	0.019	0.028	1.09	1.44	—
	12	0.32	0.20	0.35	0.020	0.024	2.06	1.49	—
	13	0.29	0.16	0.35	0.020	0.021	3.09	1.41	—
	14	0.27	0.14	0.36	0.017	0.020	4.11	1.44	—
	15	0.25	0.41	0.37	0.017	0.020	5.11	1.44	—
Ni·Cr· W 鋼	16	0.29	0.12	0.35	0.020	0.022	1.07	0.68	1.06
	17	0.34	0.20	0.35	0.021	0.014	2.07	0.71	1.03
	18	0.32	0.21	0.38	0.014	0.011	3.04	0.70	1.01
	19	0.32	0.19	0.35	0.020	0.013	4.01	0.65	1.01
	20	0.30	0.19	0.43	0.014	0.019	5.17	0.71	1.11
Ni·Cr· Mo 鋼	21	0.28	0.15	0.33	0.023	0.012	1.04	0.75	— 0.99
	22	0.32	0.14	0.38	0.023	0.012	2.03	0.73	— 0.97
	23	0.30	0.14	0.35	0.022	0.010	2.99	0.68	— 0.94
	24	0.3	0.20	0.38	0.018	0.013	4.04	0.70	— 0.93
	25	0.28	0.16	0.42	0.015	0.017	5.15	0.76	— 1.02

3. 熱膨脹曲線上に於ける加熱變態開始溫度

先づ普通の全熱膨脹曲線上に觀測される加熱變態開始溫度を調べて見た。第 4 圖は 5 種の Ni 鋼 (試料番號 0~5) に就ての全熱膨脹曲線で今此等曲線の極大點を探れば他研究者による在來の變態溫度と略一致し Scott, Sauveur 等の言へる如く Ni 量 1% 毎に約 10°C づゝ低下してゐる。然し乍ら此等曲線を仔細に檢すれば Ni 量約 3% 以上の鋼に於ては此の極大點以下に於て熱膨脹は直線的でなくなり幾分下向きの曲りを持つ曲線となり、且つ Ni 量の増加と共に曲り初めの溫度が低くなる。此の曲りは既に變態が進行しつつあることを示すもの故、變態開始溫度としては曲り初めの溫度を探らなければならぬ。依て此等の曲線に就て其の溫度を求むると極大點より相當低くはなるが既に述べた機械的性質曲線の變向點に較べると著しく高い、此れは實驗精度が不足の爲め曲線上で彎曲開始の點を看取することが不確實であるのによる。依て次に其の感度が約 10

倍する示差熱膨脹計を用ひて此の彎曲開始の溫度を精密に觀測して見た。第 4 圖の左側の曲線は夫れである。此等曲線上に於ける變態開始溫度は前の場合よりも一層低く顯れた。其の値は夫々曲線上に記入して置いた。

第 2 表の第 1 列、第 2 列は全熱膨脹法及び示差熱膨脹法によつて決定した變態開始溫度である。此れを從來の値に較べると低 Ni の場合は略一致するが高 Ni になると著しく低い。

尙此の曲線圖で注意すべき事は低 Ni 鋼に於ては變態速度 (溫度上昇に伴ふ變態量) は早いが高 Ni のもの程緩慢になる。従て曲線上彎曲開始點の讀取りが困難になり、觀測裝置の精度の高いことが必要となる。示差熱膨脹法による値が全熱膨脹法による値より低いのは此のためである。

第 2 表 Ni 鋼及び Ni·Cr 鋼の變態開始溫度

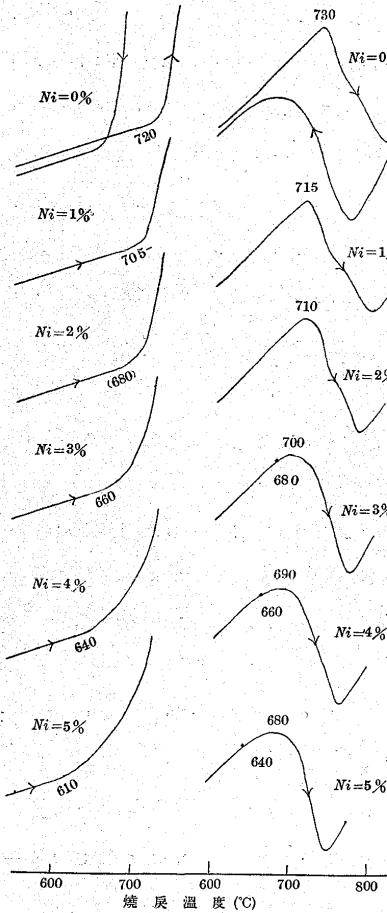
試料 番號	全熱膨脹法		示差熱膨脹法		機械的性質	
	溫度	溫度	溫度	溫度	強度	延伸
C 鋼	0	730 -30	720 -20	700	—	—
Ni 鋼	1	715 -35	705 -25	680	—	—
	2	710 -50	680 -20	660	—	—
	3	700 -60	660 -20	640	—	—
	4	690 -70	640 -20	620	—	—
	5	680 -80	610 -10	600	—	—
Ni·Cr 鋼 Cr=0.75	6	735 -35	725 -25	700	—	—
	7	730 -50	705 -25	680	—	—
	8	715 -55	675 -15	660	—	—
	9	705 -65	650 -20	640	—	—
	10	690 -90	610 -10	600	—	—
Ni·Cr 鋼 Cr=1.50	11	750 -30	745 -25	720	—	—
	12	745 -45	720 -20	700	—	—
	13	730 -60	690 -20	670	—	—
	14	715 -65	675 -15	650	—	—
	15	700 -80	620 -0	620	—	—
Ni·Cr·W 鋼 Cr=0.75 W=1.00	16	750 -70	—	—	680	—
	17	735 -55	—	—	630	—
	18	720 -60	—	—	660	—
	19	710 -70	—	—	640	—
	20	700 -80	—	—	620	—
Ni·Cr·Mo 鋼 Cr=0.75 Mo=1.00	21	750 -70	—	—	680	—
	22	740 -60	—	—	680	—
	23	720 -60	—	—	660	—
	24	715 -75	—	—	640	—
	25	700 -80	—	—	620	—

4. 機械的性質曲線の變向點から決定した加熱變態開始溫度

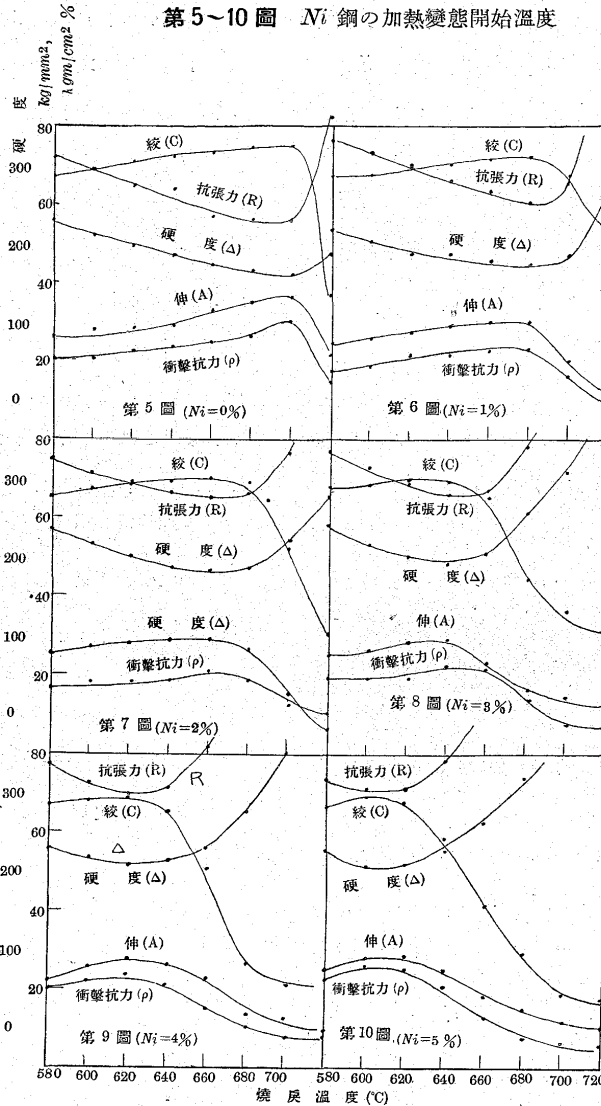
第 2 圖を見るに機械的性質曲線の變向溫度は第 2 表第 2 列の示差熱膨脹實驗から決定した變態開始溫度よりも更に低いことが知られる。換言すれば變態開始を指示する感度に於て前者は後者に優ることを示す。而して機械的性質の變向點は燒戻時間が長くなる程低下し遂に一定の窮極的溫度に達するものであることを知たから、本實驗に於ては燒戻時間を 10 時間として此の溫度を決定して見た。第 5~10 圖は Ni 鋼に就ての結果を例示したのである。

曲線圖を見るに 絞 伸 衝撃抗力の極大値は 抗張力 降伏點 硬度の極小値より稍低溫度で顯はれ變態開始を

第4圖 Ni鋼の熱膨脹 (示差膨脹) (全膨脹)



第5~10圖 Ni鋼の加熱變態開始溫度



態開始溫度である。此の溫度は全熱膨脹法による値よりも 30~80°C 低く示差熱膨脹法による値よりも 20°C 内外低溫度である。参考の爲め同表中に其の溫度差を記入して置いた。尙且此の溫度は從來の文獻に記されてゐるものよりも全般的に低溫度である。

第12圖は第2表第3列の變態開始溫度を鋼種別に圖示したもので Ni鋼に就ては從來 Ni 1% 増す毎に其の加熱變態點は約 10°C 低下すると言はれてゐるが本研究の結果によればそれが 20°C である、又 Ni鋼に 0.75% の Cr が添加されると開始溫度が約 20°C 昇り、1.50% 添加されると約 20~40°C 昇る。更に又 Ni-Cr 鋼に W 又は Mo を 1% 添加しても其の

鋭敏に指示する。就中衝擊抗力の極大値は最も低溫度に表はれる、依て多くの場合此の溫度を以て變態開始溫度とした。第11圖は Ni·Cr·W 鋼及び Ni·Cr·Mo 鋼に就ての衝擊抗力曲線を示したものである。

開始溫度は殆ど變らない。

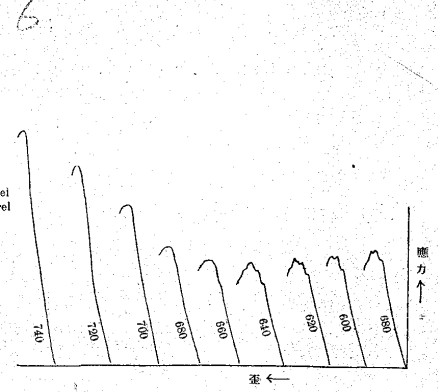
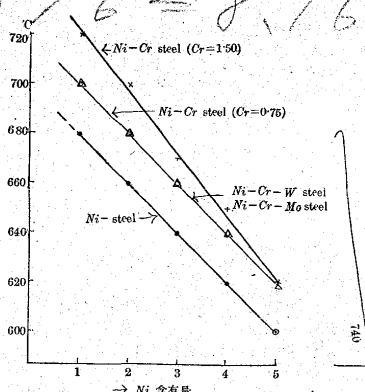
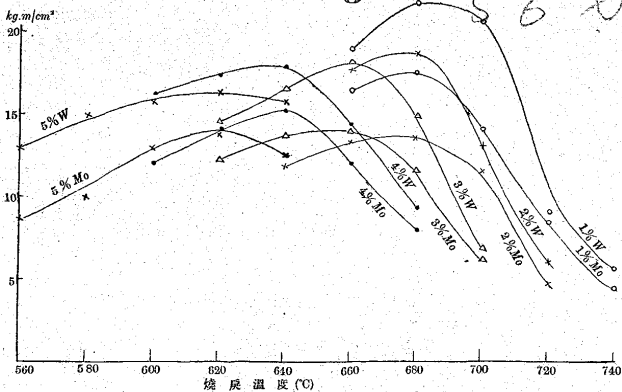
尙第5~10圖の曲線を見るに Ni が増すにつれて變向點以上での機械的性質の變化が緩慢となり、且つ廣溫度範圍に亘ることが見られる。此の事は既に熱膨脹曲線上に於ても認められた事である。

第2表第3列は衝擊値曲線の變向點から決定した加熱變

第11圖 Ni·Cr·W 鋼及び Ni·Cr·Mo 鋼の加熱變態開始溫度

第12圖 加熱變態開始溫度

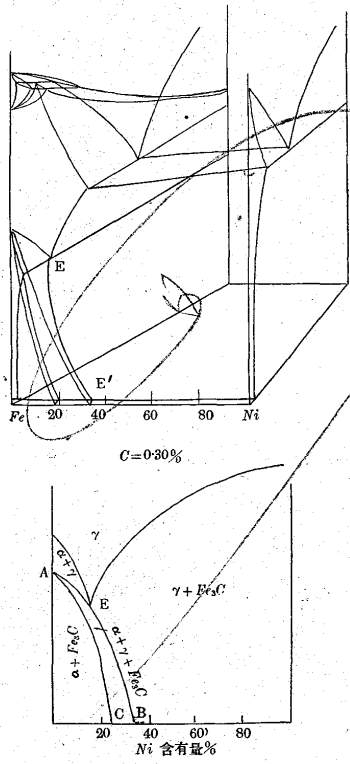
第13圖 焼戻溫度と Stress-Strain curve C=0.27 Ni=4.11 Cr=1.44



5. 加熱變態開始と降伏點 前節、抗張試験に於て得た Stress-Strain 曲線を見るに其の降伏點は焼戻溫度が變向點以下である場合には明瞭に顯はれてゐるが變向點以上になると次第に不明瞭となり遂に判別し難くなる。第 13 圖は Ni·Cr 鋼 (試料番號 14) に就ての一例である。此の原因は部分的に變態を起した試料を急冷する結果組織中にマルテンサイトを混入するからである。マルテンサイトが降伏現象を示さない事はよく知られてゐる事實である

6. 理論的考察 Ni 鋼~Ni·Cr 鋼に於て  $A_{c1}$  變態と言はるゝものは一定溫度で行はるゝ不變系反應ではなくて或る溫度範圍に亘る一變系反應である。例へば Ni 鋼に就て之を見るに加瀬博士に依て構成された其の狀態圖は第 14 圖に示す如くで所謂  $A_1$  變態は溫度降下に伴ふ E'E' なる二元共析反應である。今炭素量約 0.3% の切斷面を考ふれば同圖下部に示す如くで曲線 AC は加熱變態の開始溫度を 曲線 AB は其の終結溫度を示すことゝなり  $A_{c1}$  變態は一定の溫度範圍を持つことが解る。而して Ni 量が高い程その溫度範圍は廣がり、從て變態速度は遅くなる。換言すれば溫度上昇に伴ふ變態量が少くなる。本研究

第 14 圖 Ni 鋼の狀態圖 (加瀬氏)



中第 3 圖の熱膨脹曲線上で Ni·Cr 鋼の  $A_{c1}$  變態は或る溫度範圍を有し且つ一定溫度では其の變態量が一定してゐること又第 4 圖の示差熱膨脹及び第 5~10 圖の機械的性質の變化が Ni 量と共に廣溫度範圍に亘ると同時に變化が緩慢になる等の事は此の狀態圖の考察から

容易に理解されるのである。

次に Ni 鋼又は Ni·Cr 鋼で比較的 Ni 含有量の多いものに就て從來觀測された變態點が本研究で決定した値に較べて著しく高いのは變態の初まりに於ては變態量が極めて少い爲め、熱分析 熱膨脹等にも感じにくい爲めである。而して本研究に於て機械的性質の變化が此等物理的性質の變化よりもより敏感に變態開始を示した理由は次の如く考へられる。即ち變態は先づ結晶粒境界附近で開始されるから假令その結果生じたマルテンサイトの量は僅少でも結晶粒境界の狀況は著しい變化を受けることになる。而して結晶粒境界の狀況變化は機械的性質に及ぼす影響が大きいため、抗張衝擊試験等に於て敏感に其の變化が反映されるのであらう。

7. 總括 本研究の結果を要約すれば次の如くである。

- 1) Ni 鋼又は Ni·Cr 鋼を焼戻後急冷却する時は從來示されてゐる變態點下の或る溫度で硬度の極小値を示し夫以上再び次第に硬化に轉するが此れは加熱變態の開始に基因する。
- 2) 加熱變態の開始は機械的性質特に衝擊抗力の變化によつて最も敏感に指示される。
- 3) Ni 鋼, Ni·Cr 鋼, Ni·Cr·W 鋼, Ni·Cr·Mo 鋼に就て加熱變態開始溫度を決定した。其の結果は全般的に從來の値より低いが Ni 量の高いものは特に著しい。
- 4) Ni 鋼に於ては Ni 1% 毎に其の變態開始溫度は約 20°C 低下する、從來それは約 10°C と言はれてゐた。
- 5) Ni 鋼に Cr 0.75% 及び 1.50% 添加する時は其の加熱變態開始溫度は夫々 20°C 及び 20~40°C 上昇する。又 Ni·Cr 鋼に W 又は Mo を加へても其の變態開始溫度は殆ど變らない。
- 6) 加熱變態にかゝつた焼戻鋼は其の Stress-Strain 曲線上の降伏點が次第に不明瞭になる。