

ニッケル・クロム鋼の變態速度に就て¹⁾

(日本鐵鋼協會第 18 回講演大會講演 昭和 12 年 10 月)

村上武次郎*

湯原精一*

THE TRANSFORMATION VELOCITIES OF NICKEL-CHROMIUM STEELS.

Takejiro Murakami and Seiiti Yuhara.

SYNOPSIS:— The transformation velocity of steel changes according to its composition and maximum heating temperature. The present work was undertaken to determine the transformation velocities of 27 nickel-chromium steels containing different quantity of nickel, chromium and carbon by dilatometric measurement, since the velocity is of practical importance in the heat treatment of steel. Each specimen was cooled with different velocities, and the relation between the cooling velocity and the amounts of the normal (Ar') and lowered (Ar'') transformations was plotted, from which the critical cooling velocity, i.e. the minimum velocity which the Ar' transformation to be completed, or the Ar'' transformation begins to appear as the cooling rate further increases, was determined.

It is found that as the maximum heating temperature rises, the transformation velocity of the Ar' change is delayed, and as the carbon content increases up to a certain amount (0.2~0.3%) the velocity of the Ar' change is delayed and then hastened with further addition of carbon, and also that as the nickel or chromium content increases the transformation velocity is retarded; the effect is larger by chromium than by nickel. In series of specimens with 1.7% Ni, 0.85% Cr and 3.2% Ni, 0.85% Cr (with both different in carbon content) the transformation velocity is fairly rapid, while in those with 4.7% Ni, 1.7% Cr the velocity is very slow, requiring 4~8 hours in cooling through the range 700 to 500°C from 850°C for completion of the Ar' change. The microstructure of specimens used in the dilatometric measurement was also examined, and the relation between the structure and the transformation point in the dilatometric cooling curve was clarified.

I 緒 言

鋼を高温度より冷却するとき其速度充分遅い時は A_3 , A_2 及 A_1 變態は正常温度(700°C附近)に於て完結するけれども, 其速度を増すときは正常變態の進行は一部分に止まり殘餘は降下變態 Ar'' を起す, 即二段變態となる. 而して更に冷却速度を増すときは正常變態は其量を減じて降下變態の量を増し, 遂に降下變態のみとなることは既によく知られた所である.

特殊鋼の白點²⁾はオーステナイト鋼の如き變態の存在せないものには起らない. 又 Ni, Cr, Mo の如き正常變態速度を遅緩ならしめる元素を含むものに起り易いこと, 又冷却速度早く降下變態の現はれる様な條件の下に冷却するときは容易に白點が現はれる等の事實を考ふるときは降下

變態と白點とは或關係がある様に考へられる. 即變態の降下が起らない様な充分に遅い冷却速度を以て冷却するならば白點の生成を減小又は防止することが出来るであらう. 故に白點を防止するためには正常變態の完結すべき變態速度を知る必要がある.

又鋼の熱處理操業に於て充分に軟化焼鈍するためには正常變態が完全に起るべき速度を以て冷却することが必要であるから, 之に要する時間を知ることが必要である. 之に反して焼入はオーステナイトの高温度より正常變態を起さない程度の急冷を必要とするので, 充分に焼入するためには正常變態が全部降下すべき冷却速度を知る必要がある.

本研究は此等の目的を以て種々の Ni・Cr 鋼に就て其正常變態の速度を求め, 之が組成及冷却條件による影響を知らんと企てたものである.

II 試料の調製

試料調製の原料としては種々の炭素量を有する瑞典鋼, 低炭素フェロクロム及モンドニッケルを用ひ, 之を所要の割合に配合し約 2kg をアルミナを内面に塗た黒鉛坩堝に入れ高周波誘導電氣爐に依て熔融し徑 2cm の角形鐵型に

* 東北帝國大學金屬材料研究所

1) 本論文は著者の一人(村上)が日本學術振興會第 19 小委員會に報告せしもの一部である.

2) 特殊鋼の白點に關する文献は日本學術振興會第 19 小委員會の編輯にかゝる「特殊鋼材の缺點に關する文献」(昭和 10 年)に網羅せられて居る.

鑄造した。次に之を鍛錬して所要の試片を製作し實驗に供した。第1表は此等試料の分析結果を示す。

第 1 表

試料 番號	組 成			試料 番號	組 成		
	C(%)	Ni(%)	Cr(%)		C(%)	Ni(%)	Cr(%)
1	0.17	1.71	0.88	15	0.99	3.19	0.83
2	0.25	1.74	0.84	16	0.12	4.70	1.76
3	0.33	1.73	0.90	17	0.22	4.63	1.78
4	0.48	1.69	0.87	18	0.34	4.63	1.72
5	0.56	1.72	0.87	19	0.44	4.67	1.71
6	0.74	1.71	0.85	20	0.52	4.71	1.74
7	1.09	1.71	0.83	21	0.69	4.55	1.72
8	0.10	3.27	0.87	22	1.07	4.68	1.79
9	0.13	3.22	0.85	23	0.32	0	0.86
10	0.26	3.22	0.89	24	0.30	4.38	0.75
11	0.30	3.24	0.86	25	0.29	3.05	0
12	0.37	3.44	0.87	26	0.33	3.08	0.51
13	0.54	3.22	0.87	27	0.38	2.89	1.37
14	0.75	3.20	0.84				

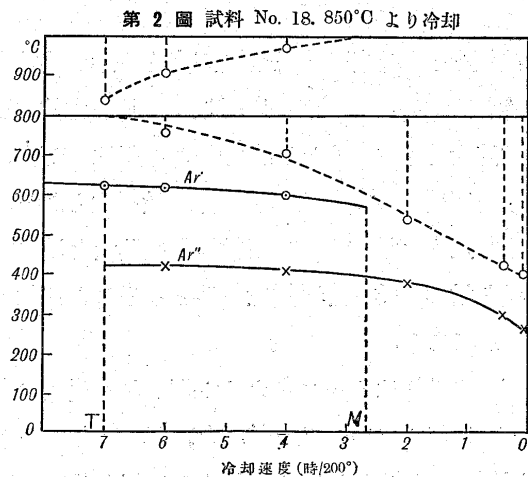
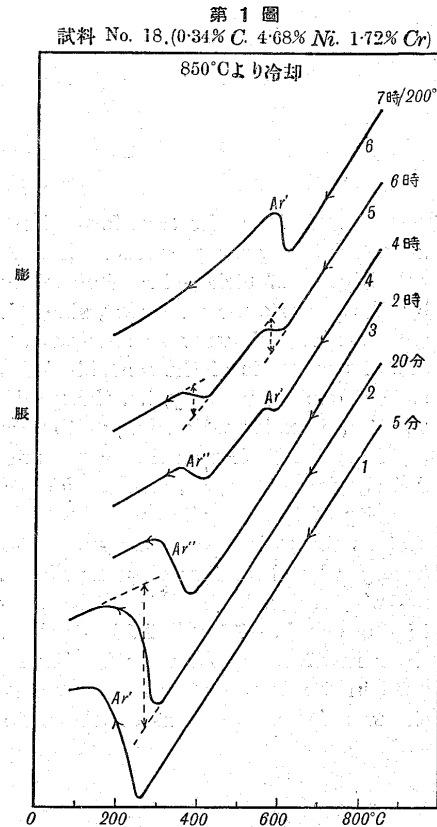
III 變態速度の決定

變態速度の決定は冷却に際して起る膨脹の變化に依た。膨脹の測定は當大學に於て常用する全膨脹測定装置により試片は長さ 150mm 徑 5mm の圓棒を用ひ、種々の高温度より種々の冷却速度を以て冷却し其間に起る Ar' 及 Ar'' 變態の温度及量を測定し之に依て正常變態が完全に起るに要する時間を決定した。加熱温度は 850, 950 及 1,050°C の 3 種となし、冷却速度は試料に依て種々の冷却方法を採用した。即先づ爐中冷却に依る冷却曲線を求め之に依て Ar'' 變態の現はるゝものは全部正常變態を起さしめるには更に冷却速度の遅いことを要するので爐に通ずる電流を加減して冷却速度を遅くし、遂に Ar'' 變態が消失して全部 Ar' 變態のみとなる速度を求めた。又爐中冷却に依て Ar'' の現はれないものは空中放冷を行ひ其變化を觀測した。

此の如くにして冷却速度と變態温度及變態量の關係を圖示するときには之に依て Ar' 變態の完了するに要する冷却速度(即 變態速度)及正常變態が全部降下して Ar'' 變態のみとなる冷却速度を知ることが出来る。

第1圖は試料 No.18 (0.34% C, 4.68% Ni, 1.72% Cr) を 850°C より種々の冷却速度を以て冷却したる場合の冷却曲線で縦軸は長さの變化を表はし標軸は温度を示す。又各曲線に附記せるは冷却速度で700~500°C を冷却するに要する時間を示す。曲線(1)は空中放冷(2)は爐中冷却(3)~(6)は冷却の際爐に通ずる電流を調整して次第に冷却速度を遅くしたる場合の冷却曲線である。曲線(2)に示す如く此試料は爐中冷却に依ても變態點が全部降下し Ar' 變態を示さないに因て更に遅い種々の冷却速度に依る冷却曲

線を求めたのである。之に依て見れば冷却速度 2h/200°C 以下なるときは Ar'' 變態のみを示すが更に冷却速度が遅くなるときは次第に Ar'' 變態の量を減じて Ar' が變態の量を増し、冷却速度 7h/200°C 以上となるときは Ar''



變態消失し全部 Ar' 變態のみとなる。此際 Ar' 變態のみとなる最小速度は次の如くにして決定した。先づ徐冷曲線(第1圖曲線(4)及(5))に於て Ar' 變態の温度を定め、其變態の起り初むる温度より 20~30°C 高い温度に達した時 5 分間放置して長さの變化なければ更に 10°C 降下して 5 分間放置し其間に長さの變化なければ更に温度を降下する。此際若し少しでも膨脹があれば猶長く其温度に放置し長さの變化なきに至りたる後更に

10°C 溫度を降下する。此の如くにして 10°C づゝ降下し各溫度に於て長さの變化なきまで停止して其溫度に於ける長さを決定し各溫度による膨脹變化を求めたのである。

第2圖は此等の曲線に基き冷却速度と變態點及變態量の關係を圖示したものである。縦軸に變態溫度及變態量を探り横軸に冷却速度を探た。點線で縦軸に平行に描ける線の長さは變態量に比例した量を表はしたもので上方に描けるは Ar' 變態の量を示し下方に描いたものは Ar'' 變態の量を示す。此等の變態は或溫度範圍に互て進行するものであるから變態點としては何れも其起り始むる溫度を探り變態量は第1圖に示すが如く變態溫度の中央に於て變態前後に於ける長さの差を以て表はした。

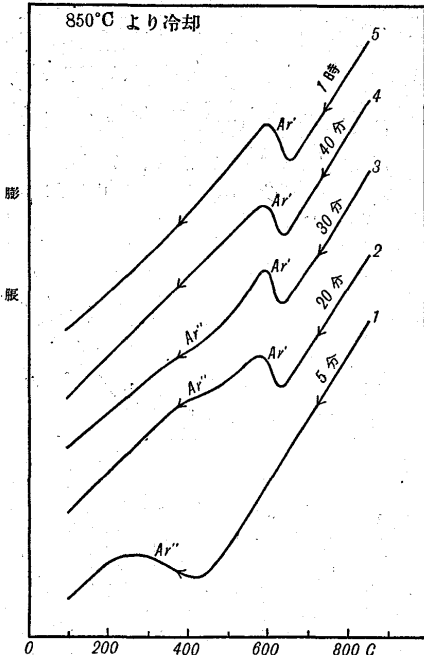
第2圖に於て T 點は Ar'' 變態量の 0 となる點で之よりも冷却速度が遅ければ正常變態又は Ar' 變態が完結し顯微鏡組織に於てト

ルースタイト乃至パーライトのみとなる所の臨界冷却速度であり、M 點は Ar' 變態量の 0 となる點で之よりも冷却速度が遅ければ Ar'' 變態のみとなり顯微鏡組織に於てはマルテンサイトのみとなる所の臨界冷却速度である。

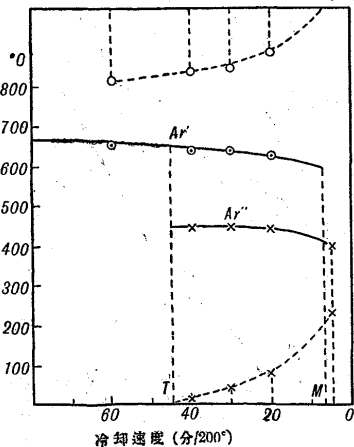
第3圖は試料 No.11(0.30% C, 3.24% Ni, 0.86% Cr) を 850°C より種々の冷却速度を以て冷却したる場合の冷却曲線で第4圖は之に依て描いた冷却速度と變態溫度及變態量との關係を示す。此の場合に於ては第1圖の場合よりも Ni 及 Cr 含量が低いために遙に變態速度が速く空中冷却に依ては第3圖曲線(1)に示すが如く Ar' 變態は現はれず Ar'' 變態のみとなるが爐中冷却に於ては曲線(2)の如く大部分 Ar' で變態で少しく Ar'' 變態が現はれるに過ぎない。故に全部變態點の降下する最小速度(第4圖 M)は爐

第3圖

試料 No. 11. (0.30% C, 3.24% Ni, 0.86% Cr)

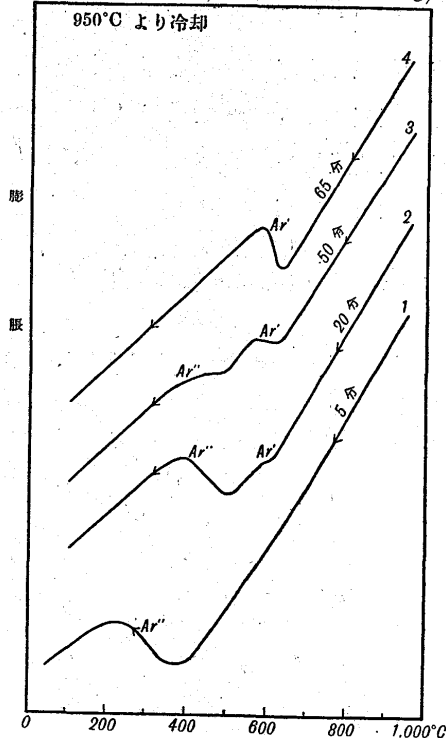


第4圖 試料 No. 11. 850°C より冷却

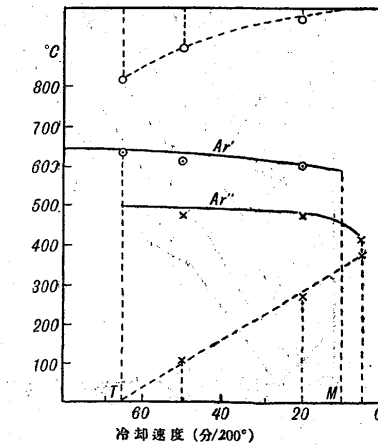


第5圖

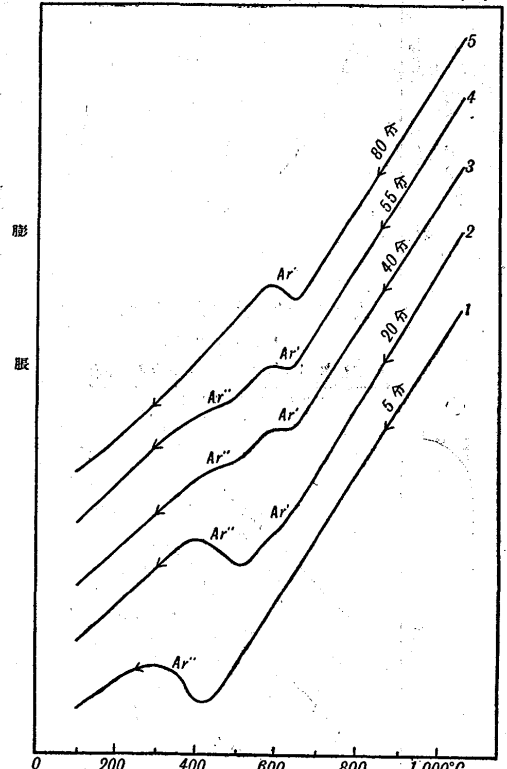
試料 No. 11. (0.30% C, 3.24% Ni, 0.86% Cr)



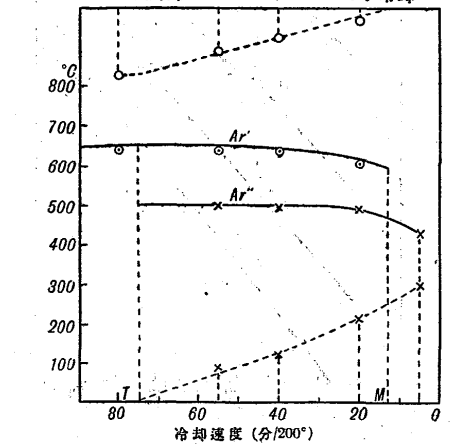
第6圖 試料 No. 11. 950°C より冷却



第7圖 試料 No. 11. 1,050°C より冷却



第8圖 試料 No. 11. 1,050°C より冷却



中冷却と空中冷却との中間に存在するのである。

又更に Ni 含量低き試料 No.3 (0.33% C, 1.73% Ni, 0.9% Cr) は之を 850°C より空中冷却したが全部 Ar' 變態となり Ar'' 變態は現はれない。因て此種の試料は一層急冷せなければ臨界冷却速度 (T 及 M) を求めることは出来ない。因て燒入膨脹自記装置を用ひねばならぬ。因て其結果は後日報告する豫定である。

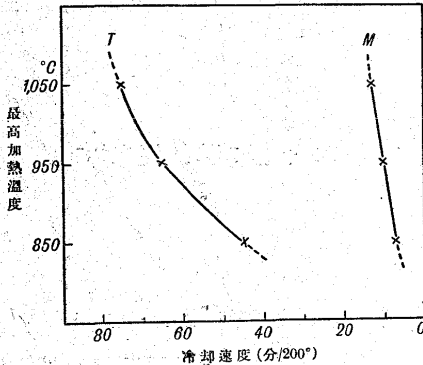
此の如くにして第1表に掲げた各試料に就て種々の温度より種々の冷却速度を以て冷却し其の變態點及變態量を求め之と冷却速度との關係を求めた。

IV 最高加熱温度による變態速度の變化

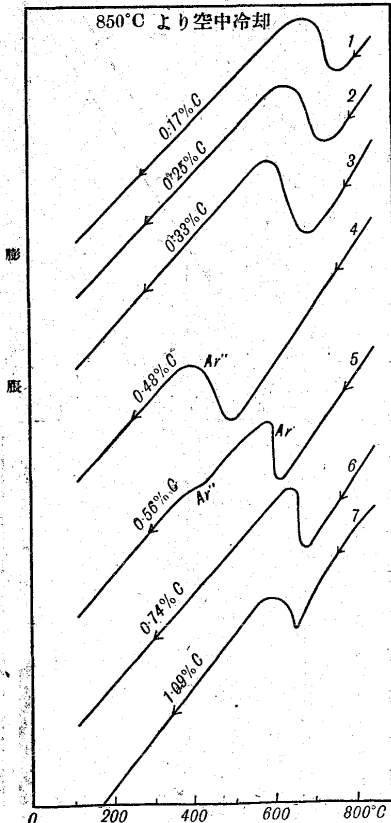
最高加熱温度による變態速度の變化を研究するため試料

No. 11 に就て更に 950 及 1,050 °C より種々の冷却速度を以て冷却し冷却速度による變態點及變態量の變化を求めた。第

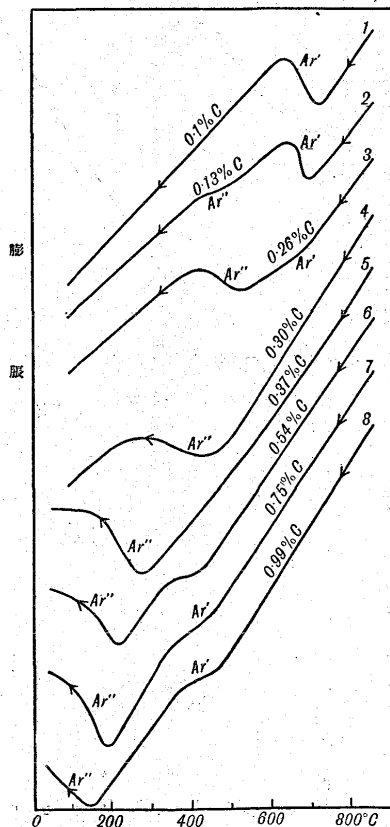
第 9 圖 試料 No. 11. 最高加熱温度の影響



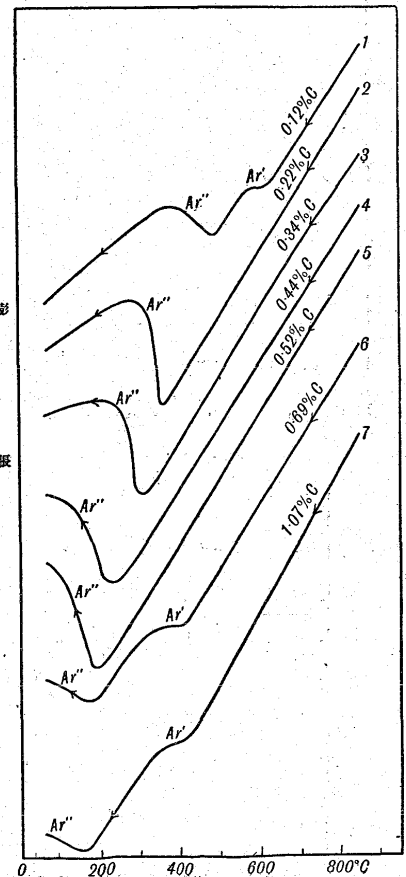
第 10 圖 1.7% Ni, 0.85% Cr. C 變化



第 11 圖 3.2% Ni, 0.85% Cr, C 變化 850°C より空中冷却



第 12 圖 4.7% Ni, 1.7% Cr, C 變化 850°C より爐中冷却



5 圖及第7圖は其冷却曲線で第6圖及第8圖は 冷却速度-變態點曲線 である、又第9圖は第4, 6 及 8 圖より臨界冷却速度 T 點及 M 點を求め此2點の加熱温度に依て變化する關係を示す。之に依て見るときは加熱温度が上昇するに従ひ臨界冷却速度 T 點及 M 點は何れも冷却速度の遅い方に移動する。即變態速度は遅くなる。而して其移動する程度は M 點よりも T 點の方が著しいことが知られる。

V 炭素量による變態速度の變化

炭素量による變態速度の變化を知るため Ni 及 Cr 含量約一定で炭素量異なる各種の試料を850°Cより種々の冷却速度を以て冷却して其變態點及變態量を求め冷却速度による變化を研究した。第2表は其850°Cより空中冷却及爐中冷却の場合に於ける變態温度を示し第10~12圖は3種の試料に就て850°Cより爐中冷却又は空中冷却曲線を示す。

第2表に依て見れば 1.7% Ni, 0.8% Cr 系の試料は爐中冷却の場合に於ては炭素量の如何に拘はらずすべて Ar' 變態が起り Ar'' 變態を見ないが、空中冷却に於ては試料 No. 4 (0.48% C) 及 No. 5 (0.56% C) に於て變態の降下を見る。(第10圖) 又 3.2% Ni, 0.8% Cr 系の試料は

第 2 表 變態溫度

料試 No.	組 成(%)			850°C より空中冷却		850°C より爐中冷却	
	C	Ni	Cr	Ar'(°C)	Ar''(°C)	Ar'(°C)	Ar''(°C)
1	0.17	1.71	0.88	780	—	780	—
2	0.25	1.74	0.84	740	—	740	—
3	0.33	1.73	0.90	700	—	720	—
4	0.48	1.69	0.87	—	480	680	—
5	0.56	1.72	0.87	610	440(少量)	690	—
6	0.74	1.71	0.85	680	—	690	—
7	1.09	1.71	0.83	660	—	690	—
8	0.10	3.27	0.87	730	—	730	—
9	0.13	3.22	0.85	690	500(少量)	690	—
10	0.26	3.22	0.89	670(少量)	500	670	—
11	0.30	3.24	0.86	—	420	620	500(少量)
12	0.37	3.44	0.87	—	280	—	480
13	0.54	3.22	0.87	410(少量)	220	620	—
14	0.75	3.20	0.84	440	190	620	—
15	0.99	3.19	0.83	440	150	620	—
16	0.12	4.70	1.76	—	470	630	490
17	0.22	4.63	1.78	—	310	—	360
18	0.34	4.68	1.72	—	260	—	300
19	0.44	4.67	1.71	—	170	—	240
20	0.52	4.71	1.74	—	150	—	210
21	0.69	4.55	1.72	—	150	420	190
22	1.07	4.68	1.79	—	150	420	160

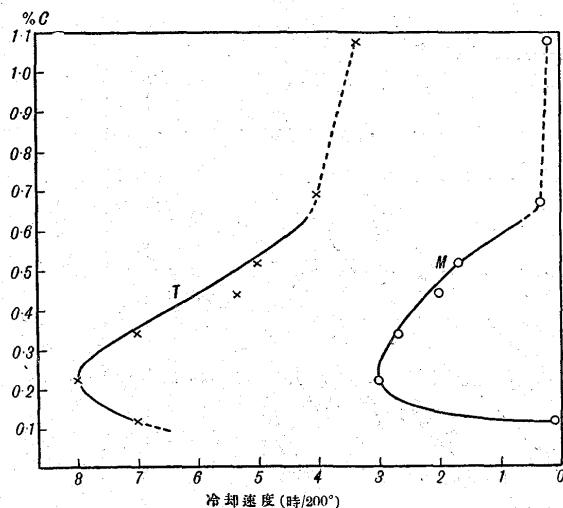
爐中冷却に於ては炭素量少きもの及多きもの(0.54%以上)は Ar' 變態のみであるが中位炭素量のものには二段變態を起す。又空中冷却に於ては第 11 圖に示すが如く試料 No.8 (0.1% C) は Ar' 變態のみであるが試料 No.9 (0.13% C) 及 No.10 (0.26% C) は二段變態となり No.11 (0.30% C) 及 No.12 (0.37% C) は Ar'' 變態のみとなる。更に炭素量を増すときは Ar' 變態が起り易くなり二段變態となる。又 4.7% Ni, 1.7% Cr 系の試料は一層變態速度遅く爐中冷却に於ても試料 No.16 (0.12% C) No.21 (0.69% C) 及 No.22(1.07% C) に於て Ar' 變態が一部分起るのみで其中間炭素量ものは Ar' 變態を起さない。(第 12 圖)空中冷却に於ては何れの試料も全く Ar' 變態を起さず Ar'' 變態のみを示す。

此の如く 3 種の鋼何れの場合に於ても或程度までは炭素量を増すに従て正常變態 (Ar') の速度が遅くなるが更に炭素を増すときは Ar' 變態の一部が起り易くなることが知られる。

第 13 圖は 4.7% Ni, 1.7% Cr 系試料を 850°C より種々の冷却速度を以て冷却し臨界冷却速度 M 點と

M 點とを求め之と炭素量との關係を圖示したもので兩臨界冷却速度は或中位炭素量(約 0.25%)に於て最も遅くそ

第 13 圖 4.7% Ni 1.7% Cr, C の影響

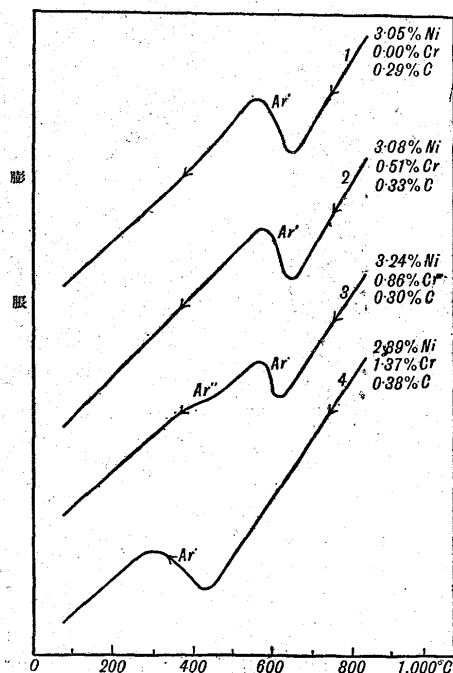


れよりも炭素量を増しても又減しても臨界冷却速度が早くなるということが知られる。

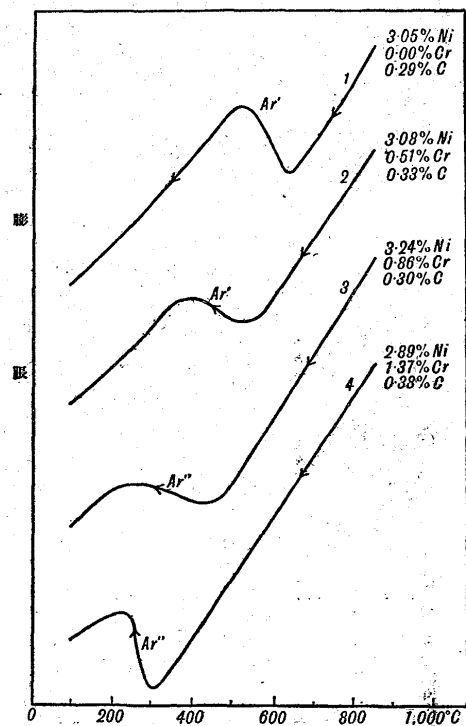
VI Cr 量及 Ni 量による變態速度の變化

第 14~17 圖は Cr 量及 Ni 量の變化による變態點の變化を示す。第 14 及 15 圖は Ni (約 3%) 及 C (約 0.3%) 含量一定で Cr 含量異なる 4 個の試料を 850°C より爐中冷却した場合及空中冷却した場合に於ける變態點の變化を

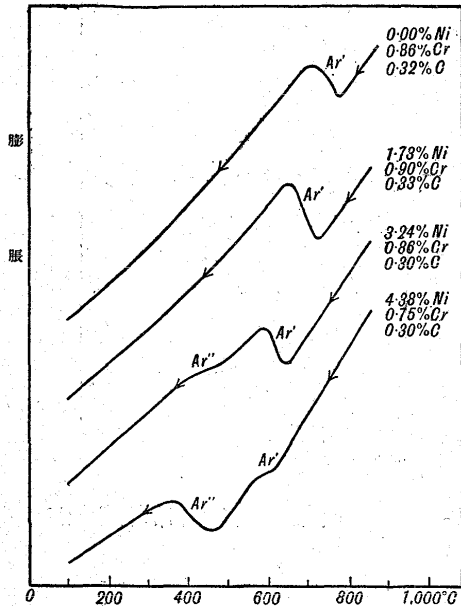
第 14 圖 3.0% Ni, 0.3% C, Cr 變化 850°C より爐中冷却



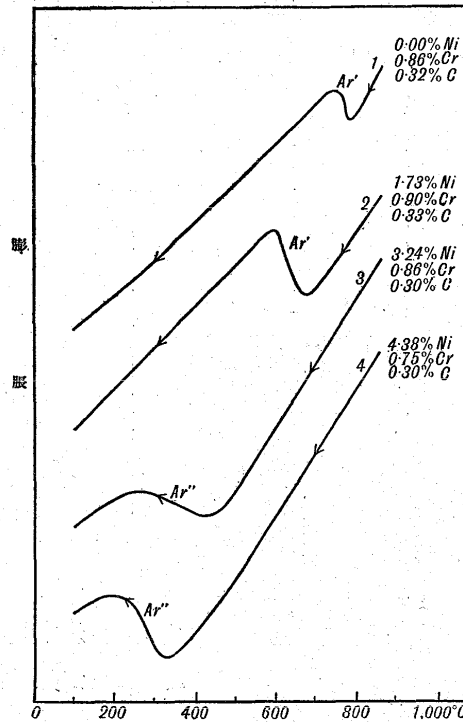
第 15 圖 3.0% Ni, 0.3% C, Cr 變化 850°C より空中冷却



第 16 圖 0.85% Cr 0.30% C Ni 變化
850°C より爐中冷却



第 17 圖 0.85% Cr 0.30% C Ni 變化
850°C より空中冷却



示すもので爐中冷却の場合に於ても Cr 量 0.51% 以下のものは Ar' 變態のみを示すが 0.86% 以上のものには Ar'' 變態が現はれ Cr 量 1.37% のものは Ar'' 變態のみとな

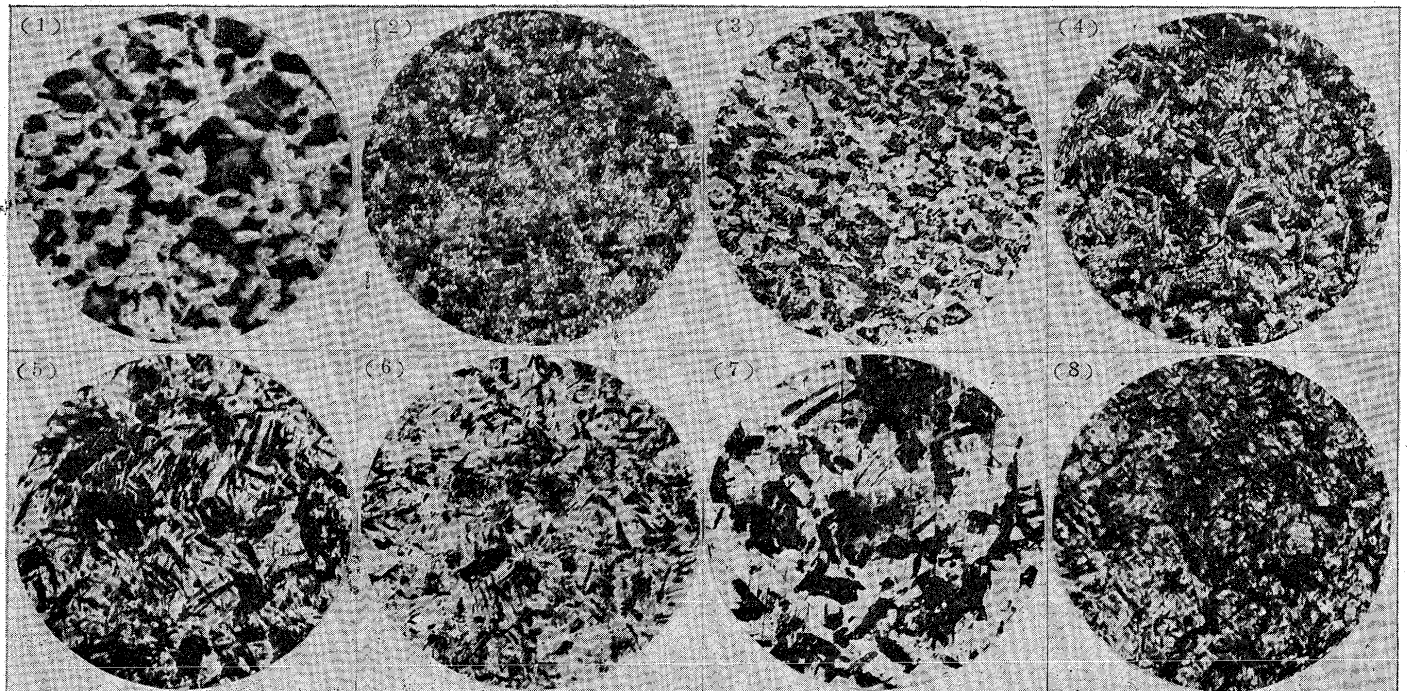
る。又空中冷却の場合には Cr 量 0.86% 以上に於て Ar' 變態が消失し Ar'' 變態のみとなる。即何れの場合に於ても Cr 量を増すに従て正常變態速度が遅くなり冷却速度一定ならば正常變態が起り難くなり降下變態が現はれ易くなることが知られる。

又第 16 及 17 圖は Cr (約 0.85%) 及 C (約 0.3%) 含量一定で Ni 含量異なる 4 個の試料を 850°C より爐中冷却したる場合及空中冷却したる場合に於ける變態點の變化を示すもので何れの場合に於ても Ni 量 1.73% 以下では Ar' 變態のみであるが 3.24% 以上になると Ar'' 變態が現はれ爐中冷却の場合には二段

顯 微 鏡 寫 眞

850°C より空中冷却

(× 400 を縮寫す)



寫眞 1 試料 No. 2 (0.25% C 1.74% Ni 0.84% Cr)
 " 2 " No. 7 (1.09% C 1.71% Ni 0.83% Cr)
 " 3 " No. 9 (0.13% C 3.22% Ni 0.85% Cr)
 " 4 " No. 10 (0.26% C 3.22% Ni 0.89% Cr)

寫眞 5 試料 No. 11 (0.30% C 3.24% Ni 0.86% Cr)
 " 6 " No. 12 (0.37% C 3.44% Ni 0.87% Cr)
 " 7 " No. 13 (0.54% C 3.22% Ni 0.87% Cr)
 " 8 " No. 14 (0.75% C 3.20% Ni 0.84% Cr)

又其變態降下の量を比較するときは Ni は 0 より 4.38% に増加したるものと Cr は 0 より 1.37% に増加したるものと殆ど相等しく正常變態速度を遅くする作用又は變態點を降下せしむる作用は Cr は Ni よりも遙に大なることが知られる。

VII 顯微鏡的試験

上記測定に用いた試料は實驗後其組織を檢鏡した。其結果によると Ar' 變態を有するものは粒狀フェライト又はパーライト (乃至トルースタイト) を有し Ar'' 變態を有するものは針狀フェライト又はマルテンサイトの組織を有す寫眞 No. 1~8 は其代表的のものを示す。

寫眞 No.1 及 2 は試料 No.2 及 7 を 850°C より空中冷却したもので、第 10 圖曲線 (2) 及 (7) に相當するものである。何れも正常變態 Ar' のみを示すが前者はフェライト及トルースタイトより成り、後者は炭化物及トルースタイトより成る。

寫眞 No.3~8 は試料 No.9~14 を 850°C より空中冷却したもので第 11 圖曲線 (2)~(7) に相當するものである。此等の寫眞と曲線とを對照するときはよく組織と變態點の關係を知ることが出来る。即曲線 (2) の如く大部分 Ar' 變態で少量の Ar'' 變態を示すものは寫眞 No.3 の如く大部分フェライト及トルースタイトより成り其間に少量のマルテンサイトが存在する。又曲線 (3) の如く少量の Ar' 變態と多量の Ar'' 變態を起したものは寫眞 No.4 の如く少量の粒狀フェライト及トルースタイトと多量のマルテンサイトより成り、曲線 (4) 及 (5) の如く全部 Ar'' 變態のみを示すものは寫眞 No.5 及 6 の如く全部マルテンサイトより成る。而して炭素量を増すに従て Ar'' 變態の溫度が降下するが Ar'' 變態溫度の高いものはマルテンサイトが酸に依て腐蝕せられ易い。是れ Ar'' 變態溫度の高いものは冷却の途中變化したるマルテンサイトの一部焼戻されることが大なるためと考へられる。更に炭素量を増すときは曲線 (6) 及 (7) に示すが如く Ar' 及 Ar'' の兩變態が現はれるが之に相當する試料の顯微鏡組織は寫眞 No. 7 及 8 に示すが如くトルースタイトとマルテンサイトが現はれ

る。併し此の如く 500°C 以下に於て Ar' 變態が起るときは 600°C 附近で起る場合の如くトルースタイトが結節狀に現はれ難く腐蝕せられ易い板狀に現はれる。トルースタイトの結節狀に現はれるのはオーステナイトより變化するときオーステナイトの結晶粒界より發達するためであるが此の如く變態溫度が降下すると結晶粒界よりも劈開面に沿うて變化し易いため板狀に現はれるのであると考へられる但し寫眞 No.8 の如く高炭素鋼になると Ar' 變態點に達するまでにオーステナイトの結晶粒界に析出せる炭化物が存在せるため其炭化物の周圍よりトルースタイトの發達せるを見る。

此等の事實より考ふるときは低炭素及高炭素のものは Ar' 變態が起り易く中位炭素のものは Ar' 變態が起り難いのは高溫度より冷却するとき Ar' 變態點に達する前低炭素鋼に於てはフェライトが析出 (高炭素鋼に於ては炭化物が析出せるため之が核作用をなして Ar' 變態が起り易いのであると考へられる。

VIII 總 括

Ni , Cr 及 C の組成異なる $Ni \cdot Cr$ 鋼 27 個を種々の冷却條件の下に冷却し熱膨脹の測定に依て冷却速度と變態點及變態量の關係を求め之に依て臨界冷却速度を定め正常變態の完了すべき速度を決定し次の事實を明にした。

- 1) 最高加熱溫度が上昇するときは正常變態の速度は遅くなる。
- 2) 炭素量の影響は或程度 (0.2~0.3%) までは炭素量を増すに従て正常變態の速度を減するが更に炭素量を増すときは變態速度を増し Ar' 變態が起り易くなる。
- 3) Ni 又は Cr を増すときは變態速度を遅くする。其影響は Ni よりも Cr の方が著しい。
- 4) 1.7% Ni , 0.85% Cr 系及 3.2% Ni , 0.85% Cr 系の鋼は變態速度早く容易に變態完了するが 4.7% Ni , 1.7% Cr 系の鋼は變態速度遅く 850°C より冷却しても變態完了には 700~500°C 間 4~8 時間を要す。
- 5) 顯微鏡組織を檢鏡し變態點と組織との關係を明にした。