

ワナヂウム窒化鋼の二次焼戻脆性に就て

(日本鐵鋼協會 第 27 回講演大會講演 昭 17. 4 東京)

渡 利 彦 四 郎*

UEBER DIE ZWEITE ANLASSPRÖDIGKEIT VON DER VANADINHALTIGE NITRIERSTAHL.

Hikosirō Watari.

ZUSAMMENFASSUNG:— Der Nitrierstahl FKM 54, (Flieg. 1470) hergestellt von der Fried. Krupp A. G., Essen, hat etwa die folgende chemische Zusammensetzung: 0.3% C, 2.5% Cr, 0.3% Mo, 0.3% V, ohne Aluminium-Gehalt.

Eine der wesentlichsten Eigenschaften ist die hohe Zugfestigkeit, die beim Anlassen bis zu 600 °C erhalten bleibt und die, in Verbindung mit der sehr harten Nitrierschicht, dem Stahl besondere Eignung gibt für hochbeanspruchte nitrierte Teile, wie zum Beispiele Kurbelwellen, Kolbenbolzen usw. Ohne den Vanadinzusatz kann der Stahl aber auch als Vergütungsstahl für hoher beanspruchte Teile in weitem Masse verwendet werden. Er enthält kein Nickel und daher gerade in diesen Jahre ein wichtiger Ersatzstahl zur Ersparung von Nickel.

Wir haben die folgenden Untersuchungen an dem Stahl durchgeführt.

(1) Über die Veränderung der Zähigkeit (Kerbschlagprobe nach Charpy) und der Härte von Proben, die von 920°C in Öl abgelöscht und zwischen 500°C und 725°C angelassen wurden, wonach ein zweites Anlassen bei 500°C von 100 Stunden Dauer erfolgte.

(2) Ueber die Veränderung von Zugfestigkeit und Härte von abgelöschten und bei 575°C bis 700°C angelassenen Proben bei einem Wiederanlassen von zwischen 10 und 100 Stunden Dauer bei 500°C.

(3) Ueber die Veränderung von Zähigkeit und Härte beim Anlassen zwischen 100 und 600°C und Abkühlen in Wasser, Öl und Luft.

Auf Grund der Untersuchungen haben wir die folgenden Ergebnisse erhalten:

1. Bei einem Anlassen zwischen 620 und 660°C und Wiederanlassen bei 500°C für 100 Stunden steigt die Sprödigkeit sehr.

2. In diesem Temperaturbereich nimmt die Sprödigkeit mit der Dauer des zweiten Anlassens bei 500°C an.

3. Die grösste Zähigkeit wird erreicht durch Anlassen bei 200°C, es tritt jedoch ein plötzliches Absinken der Zähigkeitswerte nach einem Anlassen bei 300°C ein.

4. Die Ursache der Sprödigkeit nach einem Anlassen zwischen 620 und 660°C und Wiederanlassen bei 500°C für 100 Stunden ist die Karbidabscheidung an den Kristallgrenzen während des zweiten Anlassens.

5. Die Menge des abgeschiedenen Karbids nach dem zweiten, 100-stündigen Anlassen bei 500°C ist am grössten, wenn beim ersten Mal bei 650°C angelassen wurde. Durch eine Abkürzung der zweiten Anlasszeit auf 40 Stunden wird diese Menge vermindert.

6. Der Grund dafür, dass die Zähigkeit nach einem Anlassen bei 200°C am grössten ist, liegt in der Umwandlung des α -Martensits zum β -Martensit und im Erlöschen des inneren thermischen Drucks. Die Ursache der schnellen Abnahme der Zähigkeit nach einem Anlassen bei 300°C ist der Zerfall des Martensits und Residualaustenits.

7. Wenn auch die Anlasstemperatur von 550 bis 600°C etwas hoch war; so tritt der Zerfall des Martensits doch nicht so schnell.

8. Nach dem zweiten 100 stündigen Anlassen bei 500°C konnten wir das zwischen den Kristallen abgelagerte Karbid eben wahrnehmen.

目 次

I 緒 言

II 研究の方法

III 実験第 1. 500°C にて 100 h 再焼戻による脆性化

IV 実験第 2. 500°C に保持する時間を 100 h 迄更へた場合の脆化現象

V 実験第 3. 600°C 迄単焼戻による第 1 脆性の吟味

VI 実験第 4. 深腐蝕に依る顯微鏡組織の検討

VII 実験結果の理論的考察

1. 再焼戻脆性についての考察

2. 実験第 1 に對する考察

3. 実験第 2 に對する考察

4. 実験第 3 に對する考察

5. 実験第 4 に對する考察

6. 焼戻脆性防止に對する考察

VIII 実験結果の實際的考察

1. 窒化曲軸の心部脆性について

2. 強靱窒化齒車の製作について

3. 耐衝撃高彈性鋼について

IX 總 括

* 川崎航空機工業株式會社

I. 緒 言

窒化鋼として一般に知られてゐるものは、陸海航空機材料規格にある Cr-Al-Mo 鋼 (イ-111)* である。

然しこのものは抗張力が約 90 kg/mm² 程度で、クランク軸** (以後工場用語に随つて曲軸と稱す) の如き 120 kg/mm² 乃至それ以上の抗張力を要するものには不適當で、獨逸の Fried, Krupp 會社では強靱窒化鋼として FKM 54 鋼 (最近の獨逸航空機材料規格にて Flieg. 1470 となつてゐる) を製作して居る。この化學的成分及機械的性質は第 1 表の如し。

第 1 表 FKM 54 鋼の成分及機械的性質

A. 化學的成分										
記號	熔解番號	C%	Si%	Mn%	P%	S%	Cr%	Mo%	V%	
1~8	8G 9354	0.28	0.31	0.62	0.015	0.01	2.63	0.29	0.32	
9~16	" 9374	0.34	0.35	0.65	0.01	"	2.46	0.25	0.29	
17~22	" 9377	0.33	0.24	0.66	"	"	"	0.27	0.31	
23~25	" 9378	0.30	0.28	0.67	"	"	2.60	0.28	"	

B. 機械的性質						
素材	降伏點	抗張力	伸 絞	衝擊値	繰返	繰返
番號	kg/mm ²	kg/mm ²	L=10×d %	kgm/cm ²	打撃	打撃
					回數	回數
1	117	128.6	10.3	51	9.8	19 8400
8	110	121.0	"	50	10.0	11 5150
9	117	127.3	9.3	"	9.4	10 4975
16	119	131.8	"	48	8.0	20 0750
17	112	123.4	"	54	10.3	8 5675
22	110	122.0	8.9	51	10.8	10 4600
23	117	129.2	9.4	52	10.5	10 0150
25	116	128.6	"	53	11.8	14 4850

繰返屈撓疲勞抗力平均 60 kg/mm²

備考

- (1) 上記試料全部に互り次の熱處理を施す
焼入 910°C 油冷, 焼戻 580°C 爐冷
- (2) 衝擊試験片の寸度 30×30×160 mm 衝擊試験機は Charpy 型 150 mkg
- (3) 繰返打撃試験機は Krupp 型で錘の重量 4.18 kg 落墜の高さ 30 mm
- (4) 試験片平行部直徑 d=14 mm

曲軸 1 本の素材寸度は直徑 270 mm, 長さ 1300 mm で。試験片はチャージ毎に 60×60×200 mm のものを素材に附着せしめた。本材は Al を含まないことが特徴で、Cr 量稍多く且 V を含んでゐる。これ迄 Krupp で製造した各種の窒化鋼に比し、約 600°C で焼戻した状態に於て最も優れた機械的性質を有し、強靱窒化鋼として最も適當なるものである。

さて我社に於て本鋼材を用ひて窒化曲軸を製造せること

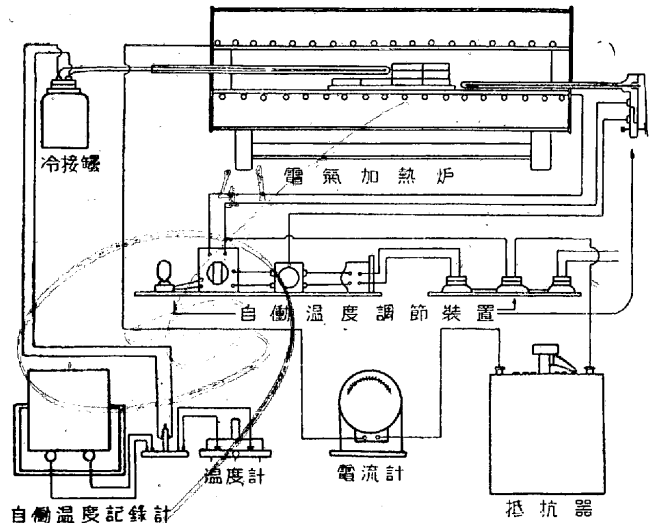
に關しては既に一部報告^{1) 2)}せる所なるも、其後約 300 h の耐久試験を了し、ケルメツト軸承に對し耐磨耗性其他の點に於て優秀なる成績を納めた。

本研究に於ては、本材が窒化中其心部が如何に脆化するや、又各焼戻温度との關係如何、又第 1 脆性及第 2 脆性との關係如何等について研究せるものである。然して窒化の如き再焼戻による脆性を從來のものと區別するために標題の如く二次焼戻脆性と稱した。

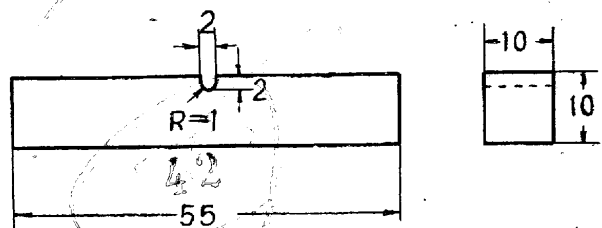
因に本材は Ni を含有せず、近時ニツケル節減の聲喧しき時、一般強靱鋼としても廣く使用し得るもので一入有意義なるものと信ずる。既に數次のニツケル節減會議に於て、本材は強靱窒化鋼 (イ 112) 並に強靱鋼 (イ 225) として規格化せられた。

II. 研究の方法

窒化に於てはアムモニアガスを通すも、これは心部の性質には關係無きを以て、本實驗に於てはアムモニアを通さず、單に 500°C にて加熱するに止めた。實驗装置は第 1 圖の如き自動温度調節装置を用ひ、温度の誤差を ±2°C の



第 1 圖 研究装置の略圖



第 2 圖 シャルピー型衝擊試験片寸度

1) 渡利 日本航空學會誌 3 (1936) 607

2) 渡利 鐵と鋼 23 (1937) 748

* メナーゼ (Mesnerger) 型試験片

* 陸海航空機材料規格略號

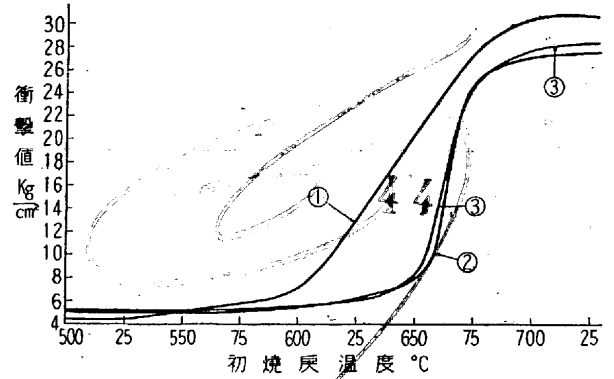
** 製鐵用語集 (日本鐵鋼協會, 昭和 11 年)

範囲に止めた。試験片は素材を鍛伸し、普通規格のシャルピー衝撃試験片に荒削し、これを熱処理せる後、正規の寸度に仕上げ、衝撃試験を行つた。試験片の寸度は第2圖の如く、衝撃試験機は 30 kgm 容量の Charpy 型のものを用ゐた。

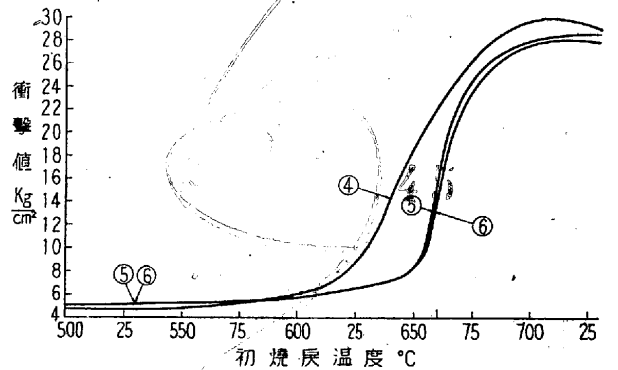
III. 実験第 1. 500°C にて 100h 再焼戻による脆性化

先づ 180 本の試験片を一様に 920°C に 2h 保持後油中焼入を爲す。其中半数の 90 本を 500~725°C に 25°C 間隔に夫々焼戻を爲し、油中冷却を行ふ。又残りの半数 90 本は同じく 500~725°C の範囲に 25°C 置きに焼戻を行ひ、爐中冷却を行つた。次に前半 90 本の中 30 本は焼入焼戻のまま衝撃試験を行ひ、更に 30 本を 500°C にて 100h 保持空冷後衝撃試験を行ひ、更に 30 本は 500°C にて 100h 保持後爐中冷却を爲し衝撃試験を行つた。次に後半の 90 本の中 30 本は焼入焼戻のまま衝撃試験を行ひ、更に 30 本は 500°C にて 100h 保持後空冷を爲し、残りの 30 本は 500°C にて 100h 保持後爐中冷却をなし衝撃試験を行つた。

又以上の試験片は總て硬度を測定した。以上の実験値は第2表に納めた。実験は各焼戻温度につき 3 個宛行ひたるも表にはこの平均値を記載した。この表を解り易くする爲に曲線にて示したものが第3圖である。本実験に依れば、何れの場合に於ても、初めの焼戻 620~660°C の範囲のものは、500°C に 100h 保持することによりて、かなり脆性を惹起してゐることを知る。焼戻 650°C のものは最大の脆性を示してゐる。而して初めの焼戻冷却を油中で行つたものに比し、爐中冷却を行つたものは、それ自體として脆化してゐることは、從來の焼戻脆性の研究結果と同様である。又 500°C にて 100h 保持する時は、何れの焼戻温度

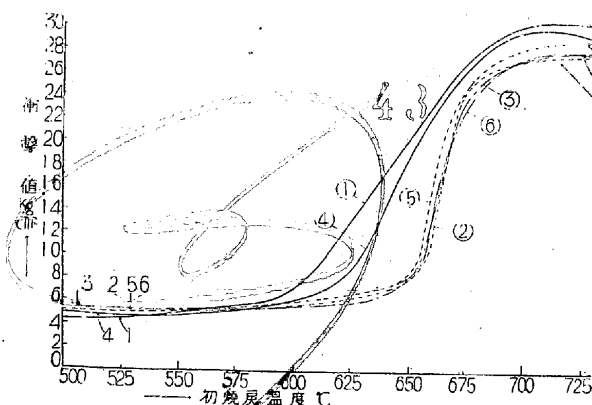


第3圖の参考圖 1 曲線 ① ② ③

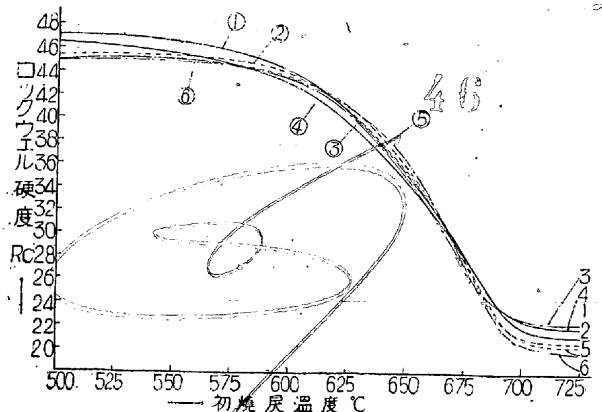


第3圖の参考圖 2 曲線 ④ ⑤ ⑥

の場合に於ても其脆化の度を一にしてゐることは注目せられる。之は 500°C にて長時間加熱中、析出し得る丈の炭化物が全部析出してしまつたものと考へ得よう。尙初めの焼戻 580°C 以下のものに於ては、500°C にて 100h 保持した結果、極めて微量ではあるが、却つて靱性を増してゐることは、マルテンサイトが徐々にトルースタイト及びソルバイト化せられた結果と考へ得られる。或はマルテンサイトは既に無く、トルースタイトが徐々にソルバイトに變化しつゝあるものとも考へらる。これは第4圖の硬度曲線に於て、この範囲に於て、硬度が低下してゐることによつても知り得る。尙先の脆性化の甚しかりし焼戻温度範囲に



第3圖 再焼戻に依る脆化曲線 (第2表参照)



第4圖 再焼戻に依る硬度變化曲線 (第2表参照)

第2表

500°Cにて100h再加熱せる場合の脆性化試験

試料 番 號	燒戻溫度 及冷却方 法	再燒戻溫 度、時間、 冷却方法	ロツクウ エル硬度 Cスケー ル平均値	衝擊値 シヤル ビイ平 均値	第3圖及 第4圖記 載曲線番 號
1	2	3	725°C	21.3	30.16
4	5	6	700	22.0	28.63
7	8	9	675 油	28.6	27.30
10	11	12	650	35.6	19.50
13	14	15	625	39.3	14.83
16	17	18	600 冷	44.6	6.80
19	20	21	575	45.3	6.26
22	23	24	550	45.6	5.43
25	26	27	525	47.3	5.10
28	29	30	500	46.6	5.33
31	32	33	725°C	21.6	27.23
34	35	36	700	21.0	27.00
37	38	39	675	27.3	24.46
40	41	42	650 油	37.3	7.60
43	44	45	625	38.6	6.50
46	47	48	600	44.6	5.40
49	50	51	575 冷	45.0	6.03
52	53	54	550	45.0	4.96
55	56	57	525	44.0	5.63
58	59	60	500	44.0	5.03
61	62	63	725°C	23.0	28.03
64	65	66	700	22.6	27.53
67	68	69	675 油	27.0	24.56
70	71	72	650	36.3	8.26
73	74	75	625	39.0	6.46
76	77	78	600 冷	44.0	5.43
79	80	81	575	44.3	5.30
82	83	84	550	44.3	5.53
85	86	87	525	45.3	5.50
88	89	90	500	45.0	5.93
91	92	93	725°C	22.3	29.00
94	95	96	700	22.6	30.07
97	98	99	675 爐	28.3	26.14
100	101	102	650	35.0	18.49
103	104	105	625	39.3	8.76
106	107	108	600 冷	43.0	6.15
109	110	111	575	44.0	5.45
112	113	114	550	44.6	4.96
115	116	117	525	46.3	4.73
118	119	120	500	46.6	5.15
121	122	123	725°C	20.6	28.34
124	125	126	700	21.6	28.12
127	128	129	675	28.3	24.32
130	131	132	650 爐	35.3	8.22
133	134	135	625	39.0	7.11
136	137	138	600 冷	43.3	5.64
139	140	141	575	44.0	5.64
142	143	144	550 爐	44.6	5.23
145	146	147	525	44.3	5.62
148	149	150	500	45.0	5.25
151	152	153	725°C	20.0	27.84
154	155	156	700	20.3	27.59
157	158	159	675 爐	28.0	23.41
160	161	162	650	35.6	8.06
163	164	165	625	39.0	6.72
166	167	168	600 冷	44.0	6.53
169	170	171	575	44.3	5.23
172	173	174	550	45.6	5.76
175	176	177	525	45.3	5.06
178	179	180	500	45.0	5.73

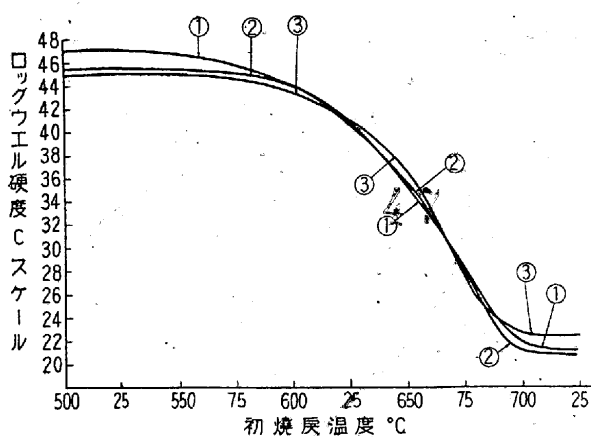
備考: (1) 全試料焼入 920°C 2h 加熱油冷を行ふ
 (2) 全試料焼戻各温度につき 2h 加熱す

第3表

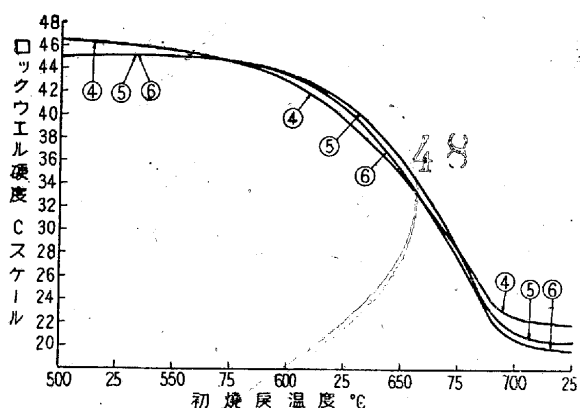
500°Cに保持する時間を100h迄變へた場合の脆性化試験

試料 番 號	燒戻溫度 及冷 却法	再燒戻の 溫度時間 冷却法	ロツクウ エル硬度 Cスケー ル平均値	シヤル ビイ衝 撃値 m kg/cm ²	第5圖及 第6圖記 載曲線番 號
235	236	237	575°C	44.90	6.50
238	239	240	600 油	43.80	9.76
241	242	243	625	42.90	16.90
244	245	246	650 冷	34.66	23.23
247	248	249	675	28.90	26.70
250	251	252	700	22.56	29.80
253	254	255	575°C	43.33	7.03
256	257	258	600 油	42.20	8.10
259	260	261	625	37.80	10.76
262	263	264	650 冷	33.70	21.36
265	266	267	675	28.23	25.50
268	269	270	700	21.66	30.13
271	272	273	575°C	43.76	6.76
274	275	276	600 油	43.56	8.16
277	278	279	625	38.90	8.73
280	281	282	650 冷	32.56	18.40
283	284	285	675	28.36	24.86
286	287	288	700	20.43	28.66
289	290	291	575°C	45.23	6.33
292	293	294	600 油	44.00	6.76
295	296	297	625	39.85	8.2
298	299	300	650 冷	34.76	17.76
301	302	303	675	27.66	24.20
304	305	306	700	21.10	27.46
307	308	309	575°C	41.43	6.50
310	311	312	600 油	42.76	6.06
313	314	315	625	39.10	8.33
316	317	318	650 冷	35.23	18.56
316	320	321	675	28.43	23.93
322	323	324	700	23.10	28.76
325	326	327	575°C	44.10	4.86
328	329	330	600 油	42.90	6.26
331	332	333	625	40.56	7.26
334	335	336	650 冷	35.76	11.80
337	338	339	675	29.00	22.63
340	341	342	700	22.80	25.63
343	344	345	575°C	45.10	6.03
346	347	348	600 油	44.10	5.40
349	350	351	625	40.00	7.26
352	353	354	650 冷	35.23	10.20
355	356	357	675	30.90	22.93
358	359	360	700	23.90	27.50
361	362	363	575°C	45.33	5.40
364	365	366	600 油	43.86	6.66
367	368	369	625	40.23	7.03
370	371	372	650 冷	36.66	9.10
373	374	375	675	30.86	21.26
376	377	378	700	23.56	26.36
379	380	381	575°C	44.66	5.56
382	383	384	600 油	43.66	6.43
385	386	387	625	40.90	8.36
388	389	390	650 冷	37.53	10.50
391	392	393	675	31.80	21.86
394	395	396	700	23.43	27.30
397	398	399	575°C	44.76	5.90
400	401	402	600 油	44.10	6.80
403	404	405	625	40.90	7.16
406	407	408	650 冷	37.73	10.63
409	410	411	675	30.93	19.36
412	413	414	700	22.56	28.20
415	416	417	575°C	45.40	5.76
418	419	420	600 油	44.16	6.63
421	422	423	625	41.23	7.16
424	425	426	650 冷	37.33	9.13
427	428	429	675	31.90	17.73
430	431	432	700	22.90	27.16

備考: (1) 全試料焼入 920°C 2h 油冷
 (2) 全試料焼戻各温度 2h



第4圖の参考圖1 曲線①②③



第4圖の参考圖1 曲線④⑤⑥

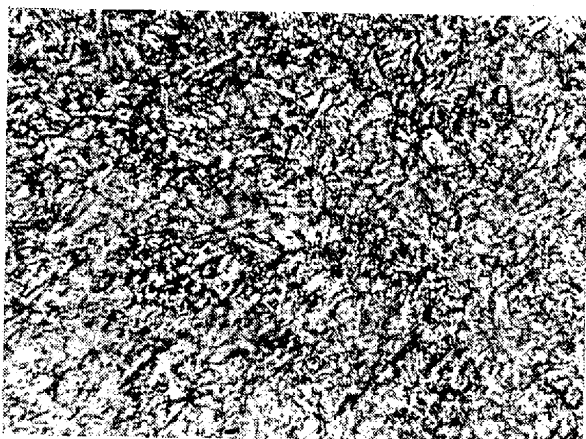
於て、硬度に何等の變化を及ぼさざりしは、從來の我々の觀念と一致してゐることである。

次に以上の實驗試料につき顯微鏡組織を検し其代表的のものを寫眞第1輯(寫眞1~12)に示した。腐蝕液は2%硝酸アルコール溶液を用ゐた。衝撃試験片の破面は寫眞第2輯(寫眞13~24)に示した。顯微鏡撮影箇所は衝撃破面と反對側の端部を採つた。

從來焼戻脆性の現象は多くの學者によつて研究せられ、

寫眞第1輯 (寫眞第1~12)

500°Cにて100時間再焼戻せるもの、顯微鏡組織



寫眞第1 焼入 920°C 油中冷却 ×700
焼戻 600°C 油中冷却



寫眞第2 焼入 920°C 油中 ×700
焼戻 600°C 油中
再焼戻 500°Cにて100h保持後空冷

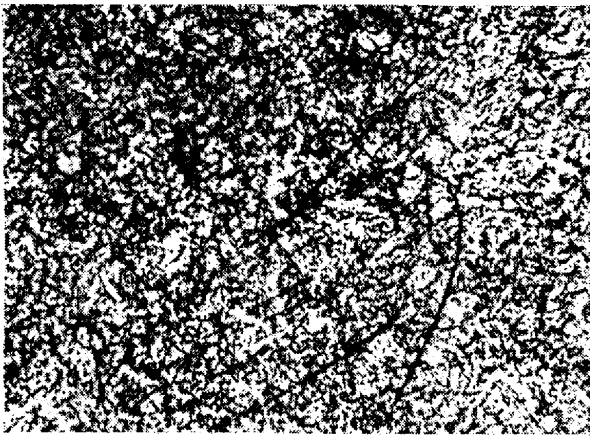


寫眞第3 焼入 920°C 油冷 ×700
焼戻 600°C 油冷
再焼戻 500°C, 100h 爐冷

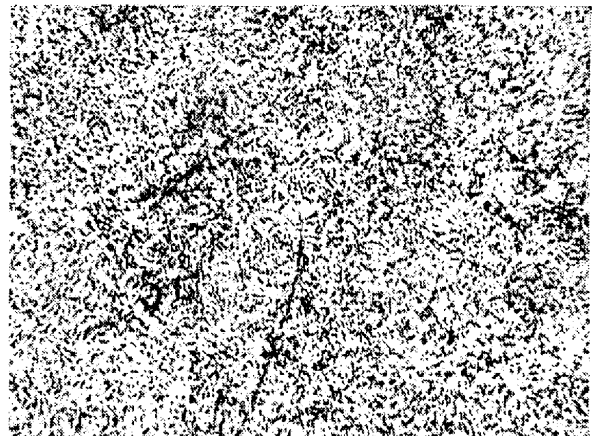


寫眞第4 焼入 920°C 油冷 /100
焼戻 600°C 爐冷

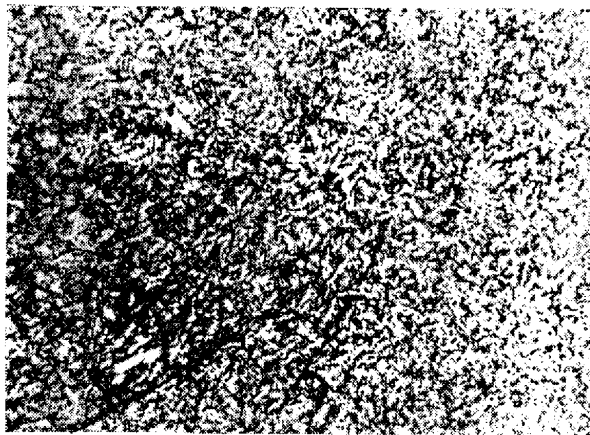
結論として一度溶解してをつた Cr 其他の炭化物が、溶解度の變化に従つて析出し、それが結晶粒界に集積する結果生ずる現象なりとせられたるも、これを顯微鏡下に顯現することは極めて困難とせられたのである。然して本實驗によつてみるに 500°Cにて100h再焼戻せるものは、組織



寫眞第 5 焼入 920°C 油冷
焼戻 600°C 爐冷
再焼戻 500°C, 100 h 空冷



寫眞第 8 焼入 920°C 油冷 ×700
焼戻 650°C 油冷
再焼戻 500°C, 100 h 空冷



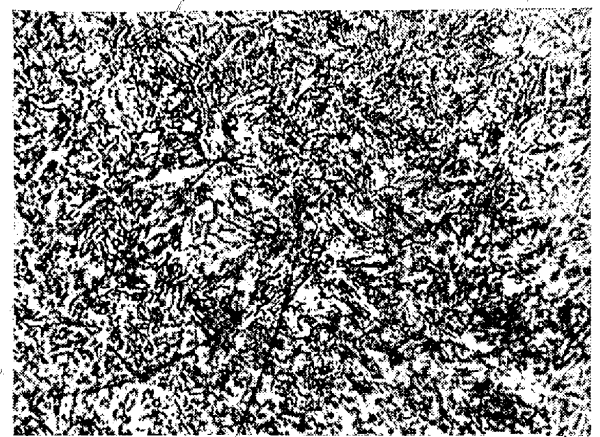
寫眞第 6 焼入 920°C 油冷
焼戻 600°C 爐冷
再焼戻 500°C, 100 h 爐冷



寫眞第 9 焼入 920°C 油冷 ×700
焼戻 650°C 油冷
再焼戻 500°C, 100 時間, 爐冷



寫眞第 7 焼入 920°C 油冷 ×700
焼戻 650°C 油冷



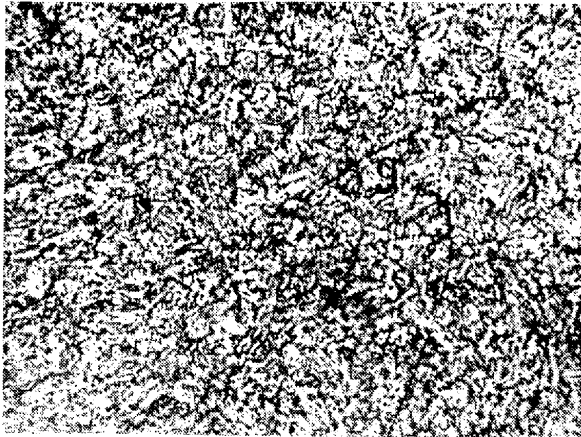
寫眞第 10 焼入 920°C 油冷 ×700
焼戻 650°C 空冷

が一般に微細化されてゐる。これ固溶炭化物が析出したものと見るべく、随つて結晶粒界にも炭化物が多く析出せられてゐると考へられる。

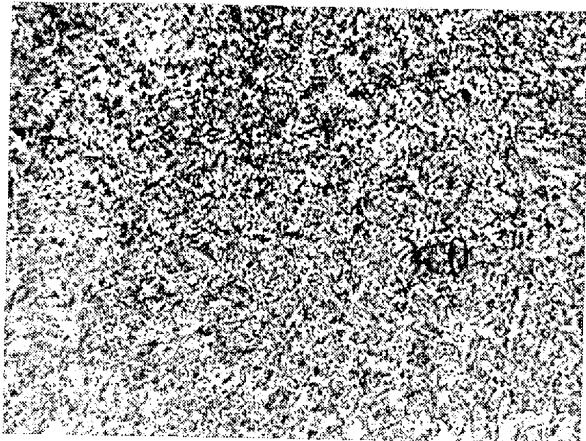
IV. 實驗第 2 500°C に保持する時間を 100 h 迄更へた場合の脆化現象

焼戻脆性は其温度に保持する時間の長い程甚しいことはこれ迄も諸家によつて研究せられた。即ち長く保てば析出する炭化物も多くなるからである。又再焼戻の場合に於ける時間の影響についても諸家によつて研究せられてゐる。

然し當時にあつては窒化が未だ實用にされてゐない時代だつたので、實驗せられた保持時間も略 10h 迄で稀に 30h



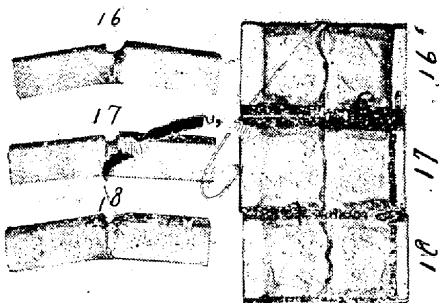
寫眞第 11 焼入 920°C 油冷 ×700
焼戻 650°C 空冷
再焼戻 500°C, 100 h 空冷



寫眞第 12 焼入 920°C 油冷 ×700
焼戻 650°C 空冷
再焼戻 500°C, 100 h 爐冷

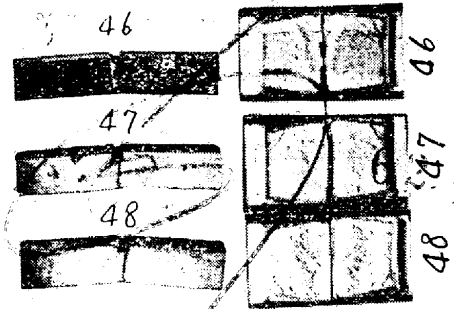
寫眞第 2 輯 (寫眞第 13~24)

500°C にて 100 h 再焼戻せる場合の衝撃試験片の破面

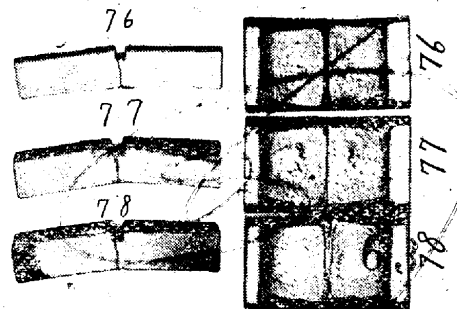


寫眞第 13 焼入 920°C 油冷
焼戻 600°C 油冷
試料 16, 17, 18

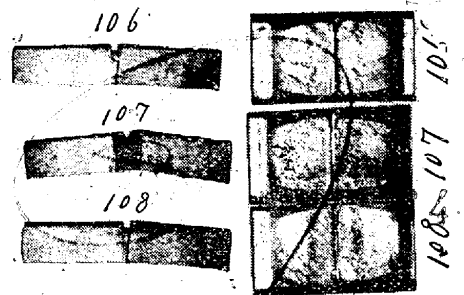
迄研究せられてゐる。實驗第 1 に於て比較的脆化の大なりし焼戻温度範圍に於て、500°C に保持する時間の影響を究めるため實驗をなした。即ち 198 本の衝撃試験片を 920°C に 2h 保持後油中焼入を行ひ、夫を 18 個宛 11 群に分ち、夫々 575~700°C の範圍に於て 25°C 置きに 2h 宛保つて油中焼戻を爲した。而して第 1 群は窒化處理を行はず、其



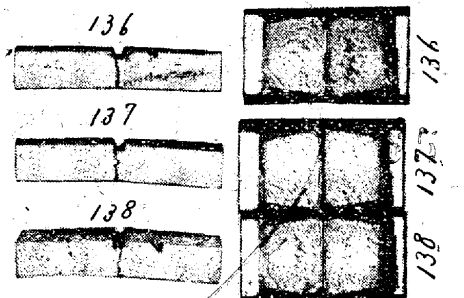
寫眞第 14 焼入 920°C 油冷
焼戻 600°C 油冷
再焼戻 500°C にて 100 h 保持後空冷
試料 46, 47, 48



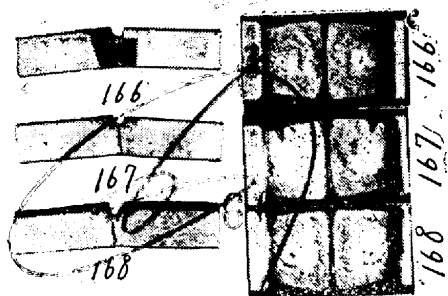
寫眞第 15 焼入 920°C 油冷
焼戻 600°C 油冷
再焼戻 500°C, 100 h 爐冷
試料 76, 77, 78



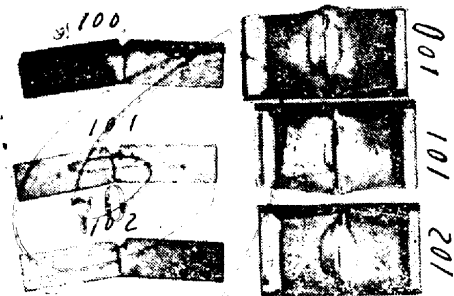
寫眞第 16 焼入 920°C 油冷
焼戻 600°C 爐冷
試料 106, 107, 108



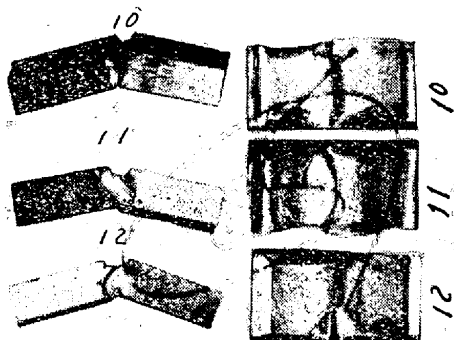
寫眞第 17 焼入 920°C 油冷
焼戻 600°C 爐冷
再焼戻 500°C, 100 h 空冷
試料 136, 137, 138



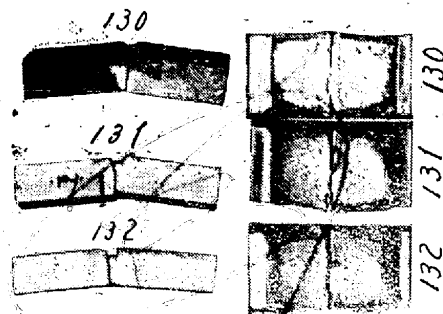
寫眞第 18 焼入 920°C 油冷
焼戻 600°C 爐冷
再焼戻 500°C, 100 h 爐冷
試料 166, 167, 168



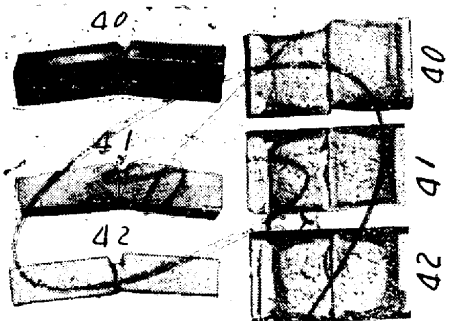
寫眞第 22 焼入 920°C 油冷
焼戻 650°C 爐冷
試料 100, 101, 102



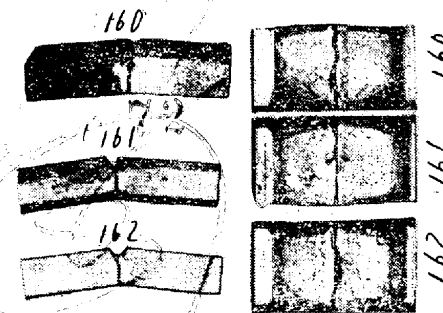
寫眞第 19 焼入 920°C 油冷
焼戻 650°C 油冷
試料 10, 11, 12



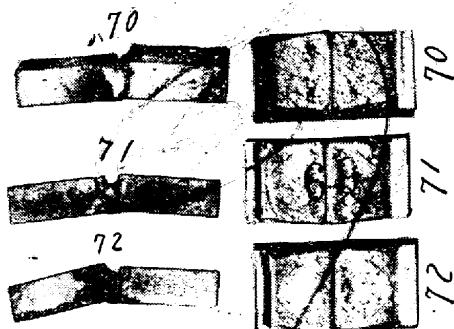
寫眞第 23 焼入 920°C 油冷
焼戻 650°C 爐冷
再焼戻 500°C, 100 h 空冷
試料 130, 131, 132



寫眞第 20 焼入 920°C 油冷
焼戻 650°C 油冷
再焼戻 500°C, 100 h 空冷
試料 40, 41, 42



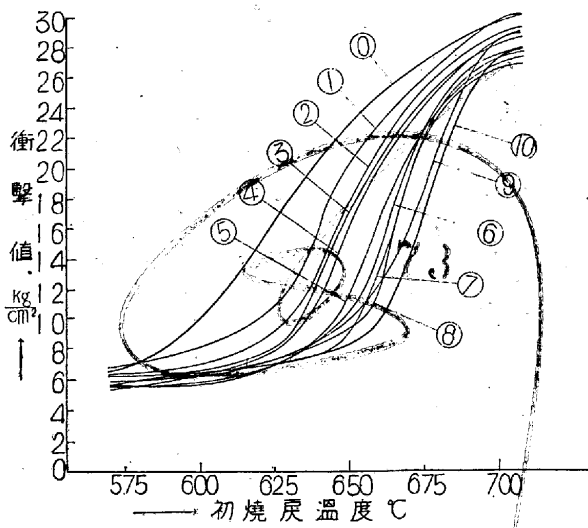
寫眞第 24 焼入 920°C 油冷
焼戻 650°C 爐冷
再焼戻 500°C, 100 h 爐冷
試料 160, 161, 162



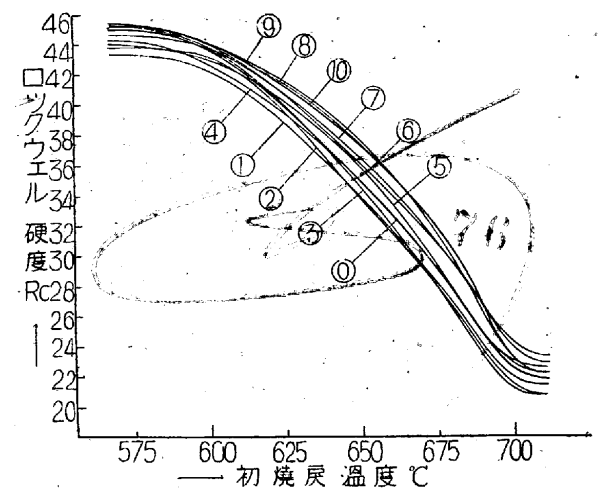
寫眞第 21 焼入 920°C 油冷
焼戻 650°C 油冷
再焼戻 500°C, 100 h 爐冷
試料 70, 71, 72

儘衝擊試験を行ひ、第2群以後のものを夫々 500°C に保持する時間を 10h 宛増して 100h 迄保持して油中冷却を爲し衝擊試験を行つた。又各試料についてロツクウェル硬度も測定した。これ等の實驗値は第3表に示した。實驗値は試料3個の平均値を記載した。又これ等の関係を明瞭に表はすために曲線に示せば第5圖及第6圖に示す如し。

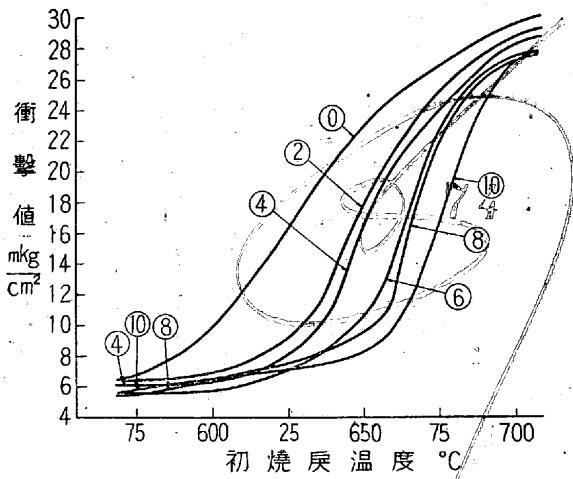
本實驗によれば、脆化は 500°C に保持する時間の長くなるにつれて増加してゐることを知る。而して脆化の割合は、初めの焼戻温度 650°C 附近のものが最も甚しく、575°, 600°C, 又は 675°C, 700°C 焼戻のものは時間に對する脆化の割合が少ない。本實驗によつても、500°C に長く保持時は、500°C の溶解度に相當するものよりも餘分の過飽和



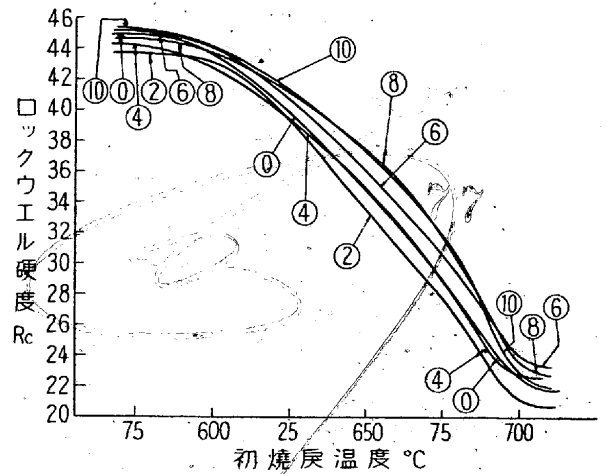
第5圖 再焼戻時間に依る脆化曲線(第3表参照)



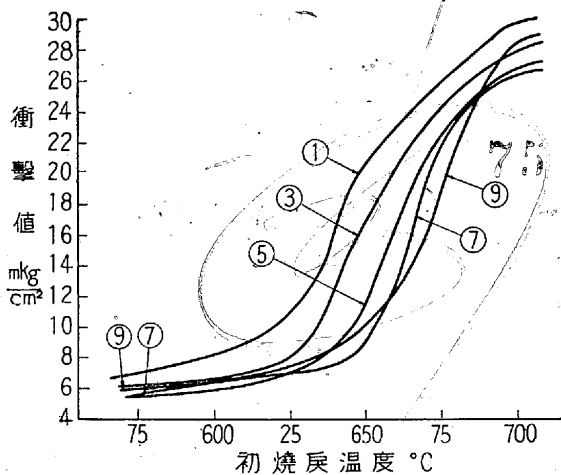
第6圖 再焼戻時間に依る硬度曲線(第3表参照)



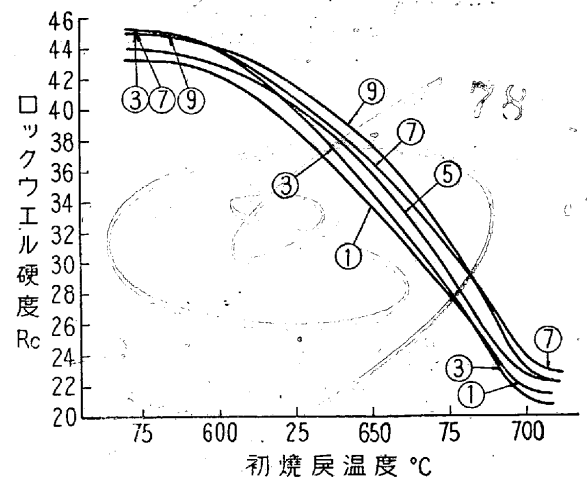
第5圖の参考圖1 曲線 ① ② ④ ⑥ ⑧ ⑩



第6圖の参考圖1 曲線 ① ② ④ ⑥ ⑧ ⑩



第5圖の参考圖2 曲線 ① ③ ⑤ ⑦ ⑨



第6圖の参考圖2 曲線 ① ③ ⑤ ⑦ ⑨

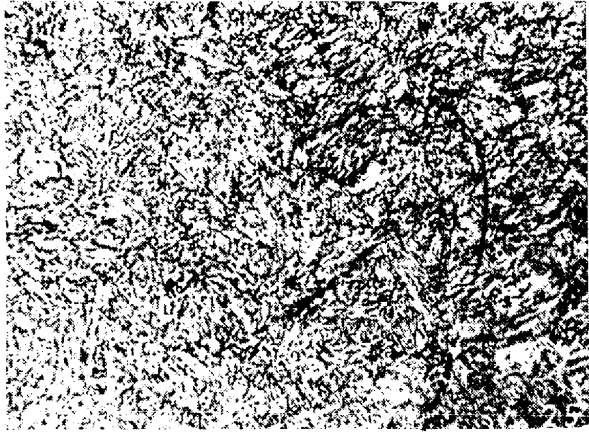
炭化物が次第に結晶粒間に析出するために、焼戻時間の長い程衝撃値が低下するといふ従來の説をよく證明してゐると思はれる。

硬度は保持時間の長い程幾分増してゐる。これは過飽和炭化物析出による時効硬化現象と見られる。650°C 焼戻に

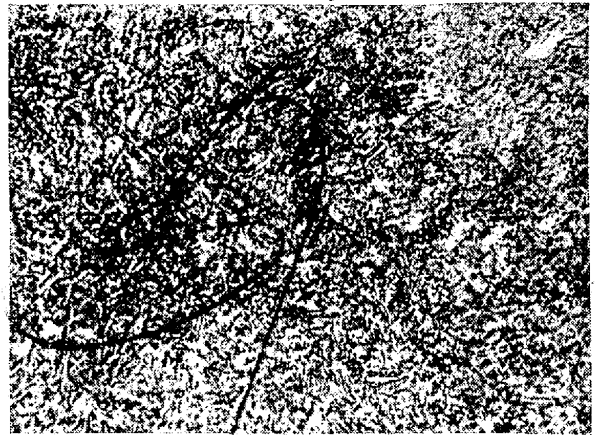
つき、500°C に 20, 40, 60, 80, 100 h 保持せるものの組織の變化を寫眞第3輯(寫眞 25~29)に、衝撃試験片の破面の模様を寫眞第4輯(寫眞 30~34)に示した。組織は時間の増すに随つて微細化されてゐるのは過飽和炭化物が析出したためと考へらる。

寫眞第3輯 (寫眞第25~29)

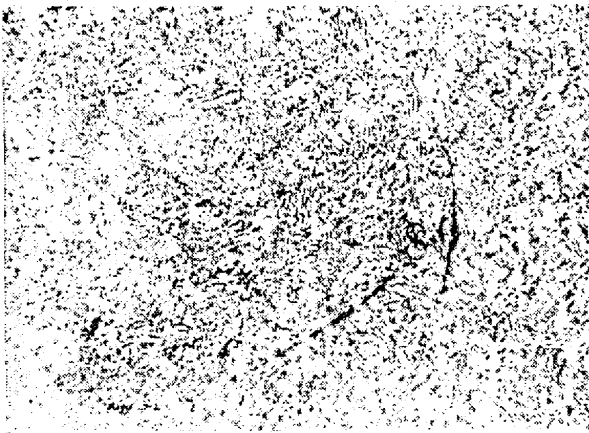
500°Cにて再焼戻する時間を更へた場合の顯微鏡組織



寫眞第25 焼入 920°C 油冷
焼戻 650°C 油冷
再焼戻 500°C, 20 h, 油冷



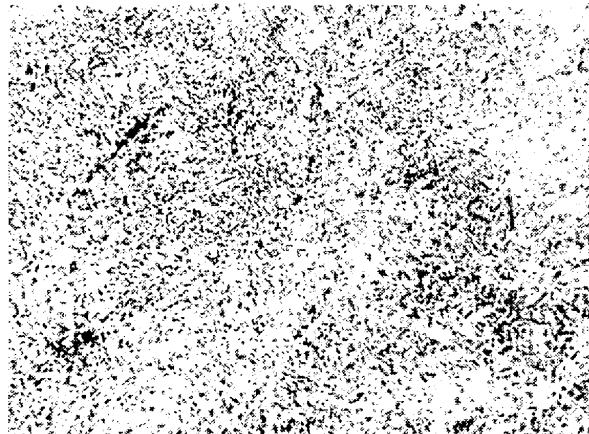
寫眞第28 焼入 920°C 油冷
焼戻 650°C 油冷
再焼戻 500°C, 80 h, 油冷



寫眞第26 焼入 920°C 油冷
焼戻 650°C 油冷
再焼戻 500°C, 40 h, 油冷



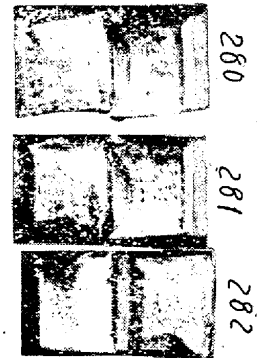
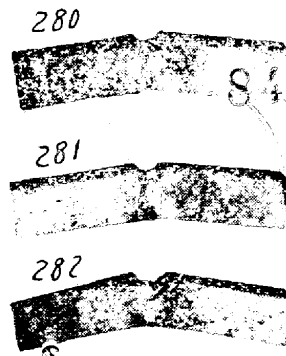
寫眞第29 焼入 920°C 油冷
焼戻 650°C 油冷
再焼戻 500°C, 100 h, 油冷



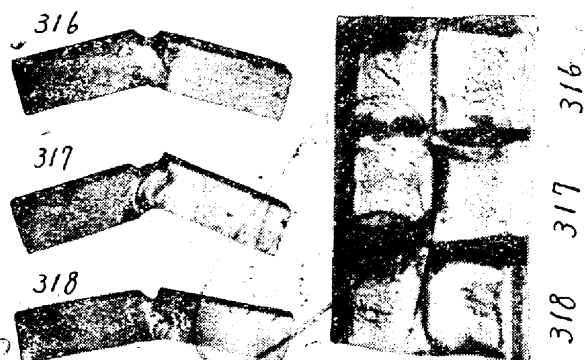
寫眞第27 焼入 920°C 油冷
焼戻 650°C 油冷
再焼戻 500°C, 60 h, 油冷

寫眞第4輯 (寫眞第30~34)

500°Cにて再焼戻する時間を更へた場合の衝撃試験片の破面



寫眞第30 焼入 920°C 油冷
焼戻 650°C 油冷
再焼戻 500°C, 20 h, 油冷
試料 280, 281, 282



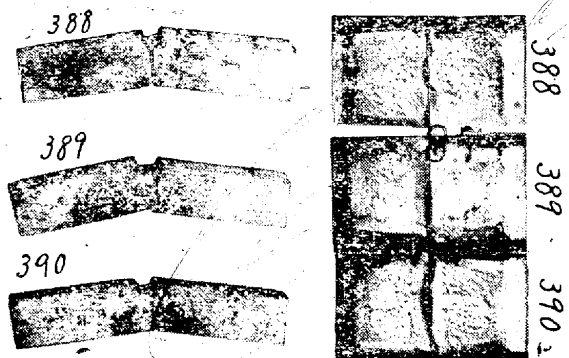
寫眞第 31 焼入 920°C 油冷
焼戻 650°C 油冷
再焼戻 500°C, 40 h, 油冷
試料 316, 317, 318



寫眞第 34 焼入 920°C 油冷
焼戻 650°C 油冷
再焼戻 500°C, 100 h, 油冷
試料 424, 425, 426



寫眞第 32 焼入 920°C 油冷
焼戻 650°C 油冷
再焼戻 500°C, 60 h, 油冷
試料 352, 353, 354



寫眞第 33 焼入 920°C 油冷
焼戻 650°C 油冷
再焼戻 500°C, 80 h, 油冷
試料 388, 389, 390

V. 實驗第 3 600°C 迄單焼戻による第 1 脆性の吟味

焼戻温度 450°C 附近に於て起る脆性を第 1 脆性, 550°C 附近に於て起る脆性を第 2 脆性と稱することは, 永澤博士³⁾ に依て提唱せられた. 而して焼戻脆性を最も惹起し易き Cr

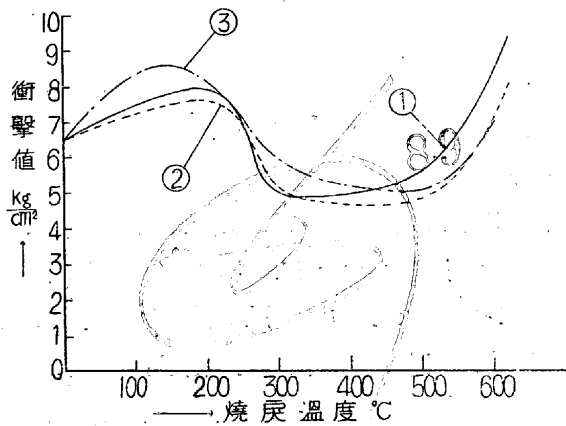
鋼, Ni-Cr 鋼, Cr-Mn 鋼等に於ては, 第 1 脆性はマルテンサイトより炭化物が析出するため冷却速度に關せず, 第 2 脆性はソルバイトより炭化物が, 溶解度の變化に依て析出し, 其炭化物が結晶粒界に凝集する結果起るものなれば冷却速度に關すと云はれた. 第 2 脆性の説明については既に多くの學者によりて説明せられたもので論議する必要なしと思はるゝも, 第 1 脆性については尙論議すべき餘地あるものと思はる. 永澤博士は普通焼戻脆性を起し易き Cr 鋼, Ni-Cr 鋼等に對して第 1 脆性について以上の説明を與へられたことは容易に首肯し得る所なるも, 但一般に焼戻脆性を起し難き, Mo 又は V 鋼に於て起る第 1 脆性に對しては, 残留オーステナイトがマルテンサイト化するためなりと云はれたこと (この場合の脆性は焼戻の冷却速度に依るものでなく總體的に衝擊値の低下する現象を云ふ.) 即ちこれ等 Ni-Cr 鋼及び Mo, V 鋼に起る第 1 脆性の説明に對しては尙研究すべき餘地ある如く思ふ. 本研究に使用した材料は, Cr も多く, Mo 及 V を含み且つ Ni を含有せず, 第 1 脆性を研究するには好都合と思ひ研究することとした. 即ち 54 本の衝擊試験片を作り, 920°C に 2h 保持後油中焼入を行ひ, 初の 18 本を 3 本宛, 100~600°C の範圍に 100°C 宛焼戻温度を高め, 2h 宛保持後水中冷却を行ひ, 更に 18 本は同様焼戻後油中冷却, 更に 18 本は爐中冷却を行つた. これ等の試料につき衝擊試験並に硬度試験を行ひ其結果の實驗値は第 4 表に又衝擊値曲線は第 7 圖, 硬度曲線は第 8 圖に示した. 又油中焼戻のものにつき各焼戻のものにつき各焼戻温度毎に顯微鏡組織を示せば寫眞第 5 輯 (寫眞 35~40) の如し. 又寫眞第 6 輯 (寫眞 41~43) には水中, 油中, 爐中各焼戻による衝擊試験の破面狀況を示した. 以上の實驗によれば, 何れの焼戻冷却の場

³⁾ 永澤; 鐵と鋼 19 (1933) 174

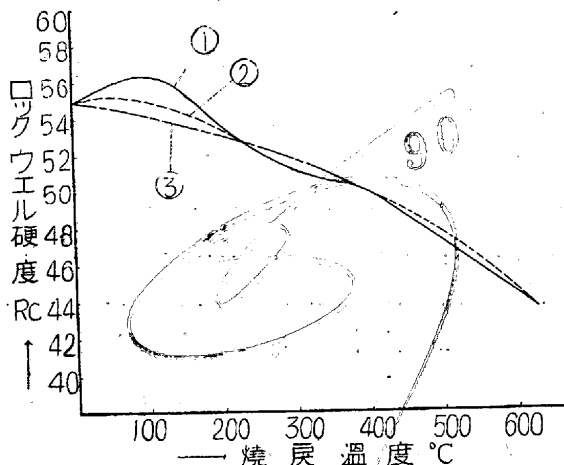
第4表 600°C迄単焼戻せる場合の衝撃實驗

試料番 番 號	燒戻 溫度 °C	燒戻 後の 冷却 法	ロック ウェ ル硬 度 C スケ ール 平均 値	シャル ピ エ衝 撃値 kgm/cm ² 平均 値	第7圖及 第8圖所 載曲線番 號
181	182	183	100	56.33	7.23
184	185	186	200	53.56	8.13
187	188	189	300	50.70	5.13
190	191	192	400	50.20	5.10
193	194	195	500	47.00	5.36
196	197	198	600	44.33	8.16
199	200	201	100	54.66	7.03
202	203	204	200	53.33	7.53
205	206	207	300	51.03	5.13
208	209	210	400	49.33	4.60
211	212	213	500	47.56	4.70
214	215	216	600	44.66	7.33
217	218	219	100	53.23	8.36
220	221	222	200	53.66	7.43
223	224	225	300	51.13	5.66
226	227	228	400	49.33	5.06
229	230	231	500	47.16	4.93
232	233	234	600	44.13	7.13

備考 (1) 全試料焼入 920°C 2h 油冷
(2) 全試料焼戻溫度 2h



第7圖 燒戻衝擊値曲線(第4表参照)



第8圖 燒戻硬度曲線(第4表参照)

寫眞第5輯 (寫眞第35~40)

600°C迄單燒戻せる場合の顯微鏡組織



寫眞第35 燒入 920°C 油冷
燒戻 100°C 油冷
試料 199 ×700

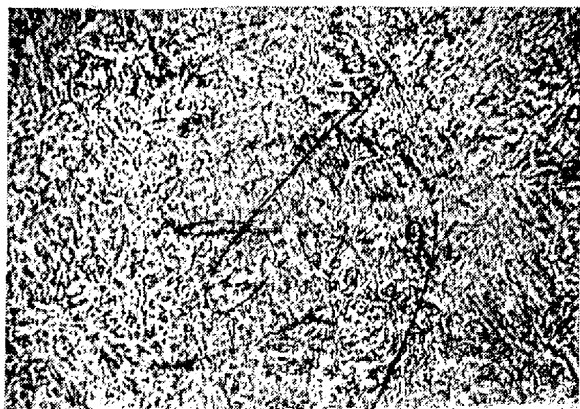


寫眞第36 燒入 920°C 油冷
燒戻 200°C 油冷
試料 202 ×700

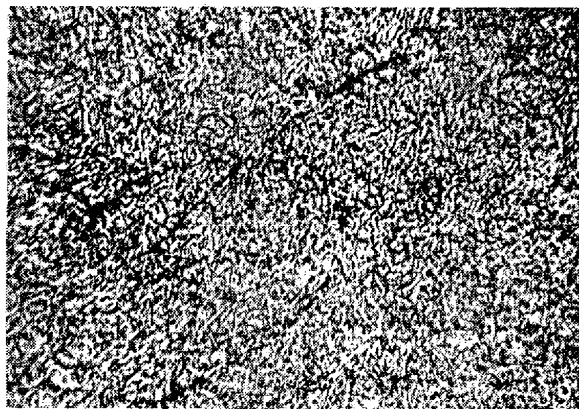


寫眞第37 燒入 920°C 油冷
燒戻 300°C 油冷
試料 205 ×700

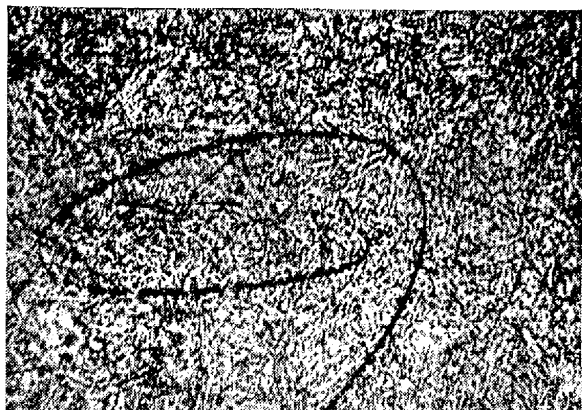
合に於ても、300~500°Cの燒戻範圍に於て脆性を示してゐる。而して脆性を示したものに於ても、硬度は一般に燒戻溫度の上昇に従ひ低下してゐるからこの場合の脆化はマルテンサイトよりトルースタイトへの變化の爲と思はれる。即ちNi-Cr鋼と同じく説明すべきものと思ふ。而して300°C



寫眞第 38 焼入 920°C 油冷 ×700
 焼戻 400°C 油冷
 試料 210

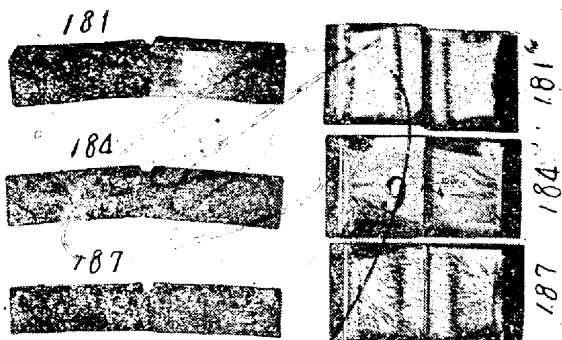


寫眞第 39 焼入 920°C 油冷 ×700
 焼戻 500°C 油冷
 試料 213

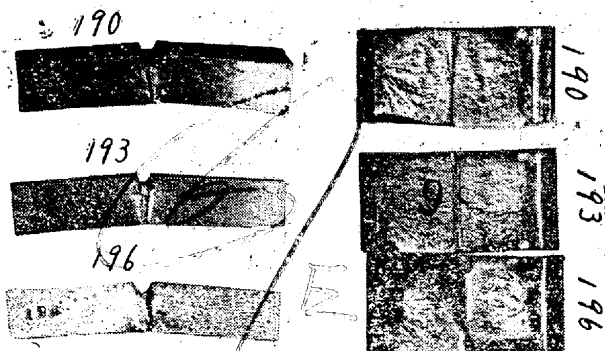


寫眞第 40 焼入 920°C 油冷 ×700
 焼戻 600°C 油冷
 試料 214

寫眞第 6 輯 (寫眞第 41~42)
 600°C 迄單焼戻せる場合の衝擊試験片の破面

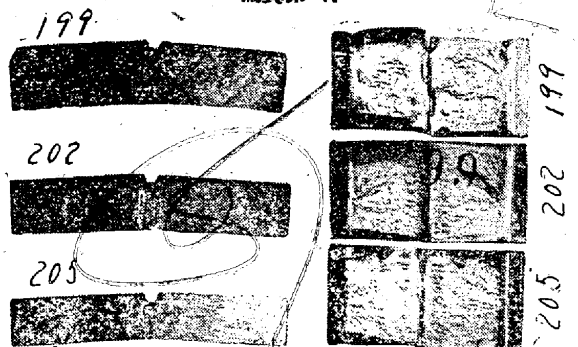


試料	181	焼入 920°C	油冷
"	184	焼戻 100°C	水冷
"	187	" 200°C	水冷
		" 300°C	水冷

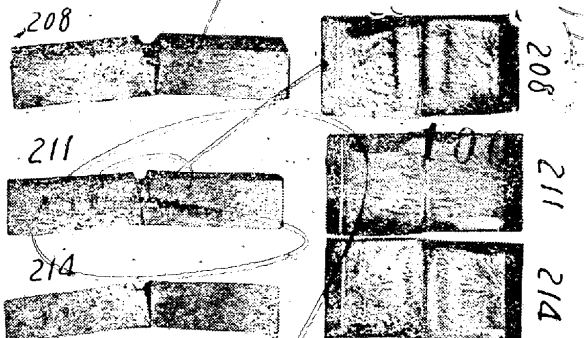


試料	190	焼入 920°C	油冷
"	193	焼戻 400°C	水冷
"	196	" 500°C	水冷
		" 600°C	水冷

寫眞第 41

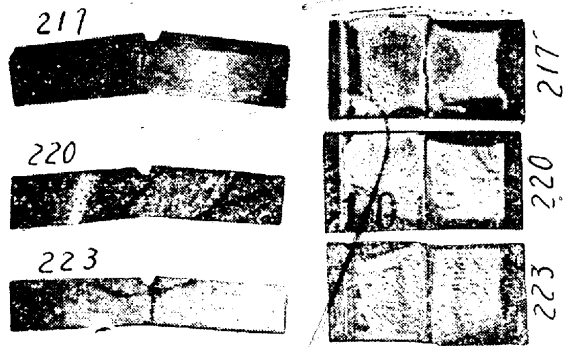


試料	199	焼入 920°C	油冷
"	202	焼戻 100°C	油冷
"	205	" 200°C	油冷
		" 300°C	油冷

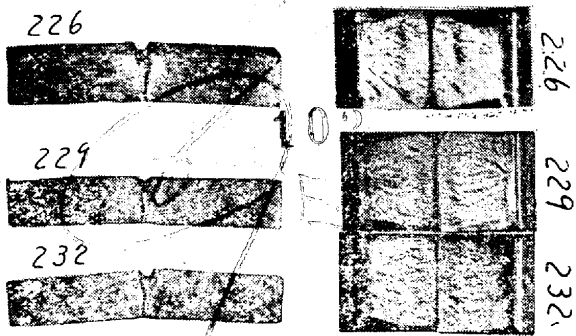


試料	208	焼入 920°C	油冷
"	211	焼戻 400°C	油冷
"	214	" 500°C	油冷
		" 600°C	油冷

寫眞第 42



焼入 920°C 油冷
 試料 217 焼戻 100°C 爐冷
 " 220 " 200°C 爐冷
 " 300 " 300°C 爐冷



焼入 920°C 油冷
 試料 226 焼戻 400°C 爐冷
 " 229 " 500°C 爐冷
 " 232 " 600°C 爐冷

寫眞第 43

附近の急激なる衝撃値の低下はマルテンサイトより炭化物の析出が多く粒界に起るによると考へられる。顯微鏡組織に於てもその如くに觀察せられる。

VI. 實驗第 4 深腐蝕に依る顯微鏡組織の檢計

焼戻脆性を起さざる試料第 11 と、最も脆性を惹起せる試料第 72 について、錦織博士にならひ、Vilella & Bain 氏腐蝕液 (1 gr ピクリン酸+5 cc 濃鹽酸+95 cc アルコホル) によつて、深く腐蝕し檢鏡せるものが寫眞第 7 輯 (寫眞 44~47) に示す如くである。上記腐蝕液で 10s 腐蝕したが、この儘にては腐蝕が深過ぎて檢鏡が出来ないので、バフ研磨を極めて軽く 3 分間行つたものについて檢鏡した。これによつても析出炭化物を明瞭にすることは不可能の如く思はれる。但し倍率 800 で檢鏡せるものについては、脆性を惹起したものが、結晶粒界を稍明瞭に示してゐる。

又鋼中のガスが焼戻脆性に影響あるや否やを調べる爲にガス分析* を爲した。分析結果は次の如し。

* ガス分析實績は川崎重工業會社製鋼工場に依頼して得られたものである。

O ₂ %	N ₂ %	H ₂ %	SiO ₂ %
0.0033	0.0114	0.00009	0.0108

焼戻脆性の原因についてガス説には古來酸素説及⁴⁾ 5) 酸

寫眞第 7 輯 (寫眞第 44~47)
 深腐蝕法に依る析出炭化物の鏡檢



寫眞第 44 焼入 920°C 油冷 ×1066(油浸)
 焼戻 650°C 油冷
 腐蝕液 Vilella & Bain
 試料 11



寫眞第 45 焼入 920°C 油冷 ×711
 焼戻 650°C 油冷
 腐蝕液 Vilella & Bain
 試料 11



寫眞第 46 焼入 920°C 油冷 ×1066(油浸)
 焼戻 650°C 油冷
 再焼戻 500°C, 100 h, 爐冷
 腐蝕液 Vilella & Bain
 試料 72

⁴⁾ E. W. Ehn; J. Iron & Steel Inst. 1, (1922) 183

⁵⁾ E. C. Bain; Trans. Amer. Soc. Steel. Treat. Vol. XX. No. 385



寫眞第 47 焼入 920°C 油冷 ×711
 焼戻 650°C 油冷
 再焼戻 500°C, 100 h, 爐冷
 腐蝕液 Vilella & Bain
 試料 72

化物説, 窒素及窒化物説等があるが, 上記分析結果が焼戻脆性に如何なる關係を有するやは今後の問題としたい。

VII. 實驗結果の理論的考察

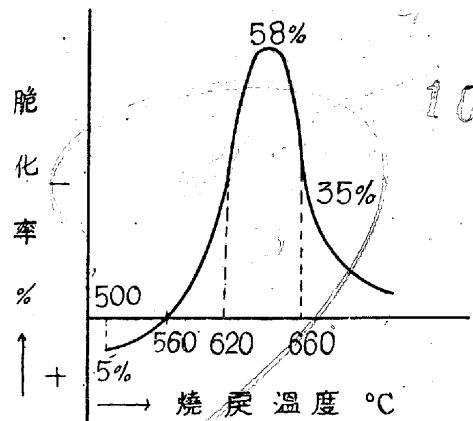
1) 再焼戻脆性について 焼戻脆性については古來幾多の研究がある。然して其原因についての説も色々あるけれど、實驗的研究によつて最も有力なのは炭化物析出説^{6) 7)}である。今本論に最も深い關係を有する。再焼戻脆性に関する研究について考へてみよう。窒化の如きものは、最も明かな再焼戻の例であるけれど、窒化が未だ實用化されざりし古より、別な目的で 500°C 附近の再焼戻脆性の研究が行はれてゐるのは頗る面白く思ふ。先づ本多, 山田兩博士⁸⁾は一度焼戻せるものを再焼戻する場合には、時間の長い程且つ温度の低い程衝擊抵抗の差が甚しいと云はれた。即ち 600°C より 500°C の方が脆性を惹起すると云はれてゐる。又横山博士^{9) 10)}は Cr 鋼及び Ni-Cr 鋼について、初め 670°C に焼戻せるものについて、更に 450~670°C に再焼戻し、其結果 550°C に再焼戻せるものは、10h 保持迄漸次著しく脆性を惹起することを示された。永澤博士は³⁾ Cr 鋼, Ni-Cr 鋼等について一旦 650°C にて 10h 保持後水中焼戻せるものについて、これを更に 400~650°C の範圍に再焼戻をなし且つ其時間の變化による衝擊値の影響を研究し、Cr 鋼, Ni-Cr 鋼は特に時間と共に、特に 550°C 附近に於て著しく脆性を示すことを明にされた、再焼

戻時間は 10h 迄研究せられてゐる。又 Mo 半硬鋼 (C 0.31~0.35%, Mo 0.56-1.58%) について同様再焼戻實驗をされた結果、このものは殆ど再焼戻脆性を示さざることを明かにせられたが、この際 450~550°C 附近の甚しき彎曲は眞の第 1 脆性に非ずして、残留オーステナイトのマルテンサイト化なりと説明された。又 V 半硬鋼 (C 0.36~0.38%, V 0.5~1.44%) についても同様のことを示された。^{11) 12)} 關口學士は特に Ni-Cr 及 Ni-Cr-Mn 兩強靱鋼について、850°C 油中焼入、600°C 3h 保持後油中焼戻したものについて、これを 400~600°C の範圍に於て 50°C 置きに 3h 宛再焼戻をなし、水、油、空、爐中冷却の上衝擊試験を行ひ、550°C 附近に於て著しく脆性を惹起するが、Mo 0.2% のものは 0.15% のものに比し著しく脆性を防止することを示された。

以上の如く再焼戻についての研究はあるが、窒化等の實施せられない時代なりしたため時間も 10h 位迄である。

本研究に於ては窒化と云ふ目的のために 100h 迄再焼戻脆性を研究したのである。又以上の研究者の初焼戻の温度 600 又は 650°C の如く一定し、再焼戻温度を種々更へられたに對し、本研究に於ては、窒化と云ふ特殊の目的の爲に、500°C の如く再焼戻温度を限定した點も諸氏の研究と異なる所である。如上の研究結果に於ては 550°C 再焼戻温度のものが、最も甚しき脆性化を示してゐる點より推して若し窒化温度を 550°C にした場合には、一層脆性を惹起せしむるであらうことが想像される。

2) 實驗第 1 に對する考察 縦軸に衝擊値低下率をとり横軸に焼戻温度をとれば、略第 9 圖に示す曲線の如くなる。この場合衝擊値低下率は單に油焼入油焼戻せるものに比し、500°C にて 100h 保持せるために低下した割合を



第 9 圖 再焼戻に依る脆化曲線

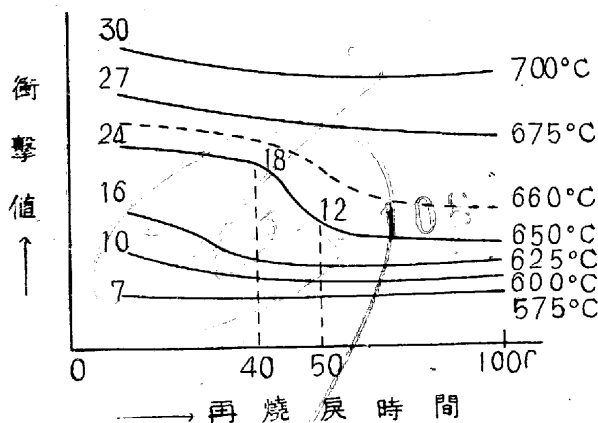
⁶⁾ F. J. Rogers; Iron & Steel Inst. 2, (1919) 325
⁷⁾ J. H. Andrew & H. A. Dicke; J. Iron & Steel Inst. 2 (1926) 359
⁸⁾ 本多, 山田: 金屬の研究 4 (1927) 93
⁹⁾ 横山: 日本金屬學會誌 1 (1937) 43
¹⁰⁾ 横山: 日本金屬學會誌 1 (1937) 92
¹¹⁾ 永澤. 前出

¹¹⁾ 關口: 電氣製鋼 12 (1936) 581
¹²⁾ 關口: 電氣製鋼 13 (1937) 14

%にて示せるものである。

初焼戻 620~660°C の範囲のものは最も大なる脆化率を示してゐる。これはこの焼戻範囲のものは、500°C 100h 保持により粒界に未析出炭化物が析出するためと考へらる。550~620°C 焼戻に於てはマルテンサイト状の複雑なる組織を有す。次に初焼戻温度 560°C 以下のものは、500°C 100h 保持によつて、却て微量乍ら衝撃値の増加を示してゐる。これはマルテンサイト状トルースタイトの組織よりソルバイトへの變化が、徐々に起つたものと思はれる。550~600°C の焼戻範囲に於ては普通の炭素鋼ではマルテンサイトは消失するが、本鋼の如く焼戻抵抗の大なるものでは、猶マルテンサイト状の組織を有してゐる。檢鏡上マルテンサイト状であるが炭化物は固溶せるものと考ふる要なし。Cr 量の多いものは、焼戻に對して抵抗が強く、容易にマルテンサイト組織が崩壊し難く、600°C の焼戻に於ても尙 120 kg/mm² 以上の抗張力を保ち得るのである。500~600°C 焼戻範囲のものが、500°C にて 100°C h 保持することにより、衝撃値が微量増加し、硬度が幾分低下してゐることは、主として析出炭化物の凝集即トルースタイトよりソルバイトへの變化によるものであらう。

3) 實驗第 2 に對する考察 縦軸に衝撃値、横軸に 500°C 保持時間をとれば、各焼戻温度に對する衝撃値の變化は第 10 圖に示す如くである。これに於ても初焼戻温度範囲 620~660°C のものが、500°C 保持時間の長くなるにつれ



第 10 圖 再焼戻時間-衝撃値曲線

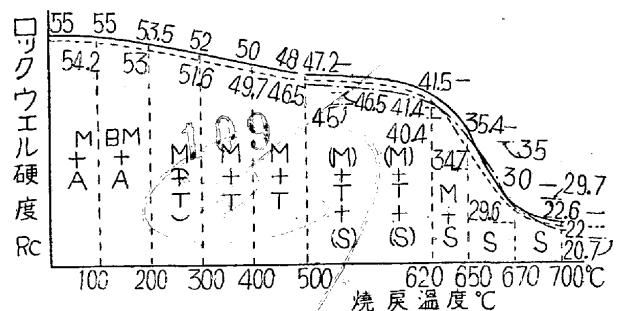
て著しく脆化を示すことを知る。500°C の溶解度に相當するよりも餘分の過飽和炭化物が次第に結晶粒間に析出するため、時間の長い程脆化するといふ古來の炭化物説をよく證明してゐる如く思はれる。620°C 焼戻のものは 20h 迄急激に落ち、これ以後は殆ど低下せず、650°C 焼戻のものは初め 20h で稍低下し、40h では急激に低下してゐる。

4) 實驗第 3 に對する考察 焼戻温度範囲 300~500

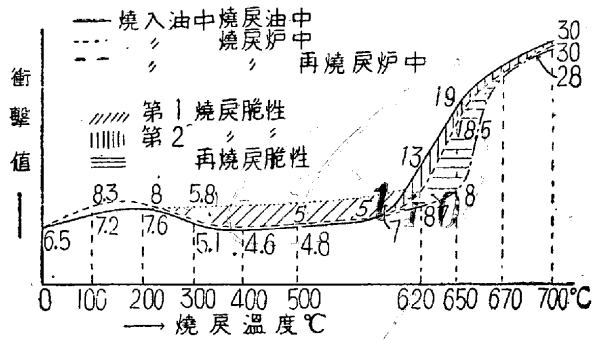
°C に於て第 1 脆性、600~660°C に於て第 2 脆性を示してゐる。300~500°C 間の衝撃値の低下は、硬度の低下を伴つてゐる點よりみて、マルテンサイトよりトルースタイトへの變化と思はる。随つて焼戻後の冷却法如何に關せず殆んど一樣の低下を示す。(第 7 圖参照) 第 2 脆性は古來稱せられたる焼戻脆性で、焼戻後の冷却速度によりて變化するものである。200°C 焼戻に於て幾分衝撃値の増加を示すが、本鋼のみならず Ni-Cr-Mo 鋼、Cr-Mo 鋼等何れも 200°C 附近に於て衝撃値が最大となり、300~500°C 附近に於て低下する現象は極めて顯著なるもので、これに關しては朝倉氏¹³⁾の研究がある。一方残留オーステナイトのために極大點を生ずるとの説によれば、200~300°C の低下は、残留オーステナイトのマルテンサイト化とも考へられるけれども、硬度上昇せず降下せる點は矛盾してゐる この邊も尙研究の餘地ありと思はる。朝倉氏の研究によれば Cr-Mn-Mo 鋼、Ni-Cr-Mo 鋼等について研究せられた結果、焼戻 180°C 前後に於ける衝撃値の上昇は α マルテンサイトが β マルテンサイトに變化する安定化と、加熱による一部内部歪の除去によるもの、又焼戻 325°C 前後に現れる甚しい脆化は、固溶體たるマルテンサイト及残留オーステナイトの分解に關聯する、従つてこの脆化は焼入鋼として免れざる現象である、而して低温焼戻鋼の衝撃的破壊は主として元のオーステナイト結晶粒界に起るやうであるから、この場合の激しい脆化は粒界炭化物に起因するものと考へられるとの見解を述べられた。

本研究に於て第 7 圖に見る如く、150°C 附近に焼戻して爐中冷却せるものが、一層大なる衝撃値を示せるは、以上の説をよく證明せるものと云ふことが出来る。爐中冷却のものが水中冷却のものよりも衝撃値が増してゐるのは、β マルテンサイトのことは兎も角としても、内部歪が減少せられたことの良き證明と考へられる。

以上實驗第 1, 第 2, 第 3 について、第 1 焼戻脆性、第 2 焼戻脆性及第 2 再焼戻脆性と硬度、組織との關係は第



¹³⁾ 朝倉: 鐵と鋼 25 (1939) 208



第11圖 第1及第2焼戻脆性及再焼戻脆性と硬度及組織との関係

11 圖に示した。

5) 実験第4に対する考察 焼戻脆性現象は衝撃試験には明瞭に認められ、且つ実験的には其原因も明瞭にせられてゐるに係らず、顕微鏡的に表現出来ないことは、問題が結晶粒界に屬し、この結晶粒界は二元以上の特殊鋼のソルバイト組織中に見出すことが極めて困難なるためである。然るに窒化の如き 500°C で 100h 間再焼戻すると云ふことは、可成徹底した焼戻実験であつて、実験第1による 180個の試料の中、代表的なもの 90 個について、詳細検鏡せる結果、比較的低温の初焼戻のものについては、明かに結晶粒界が見出される。又比較的高温焼戻のもの即ち 650°C 以上にて初焼戻せるものについても、仔細に観察すれば、結晶粒界が見られるのである。永澤博士は一旦焼戻せるものを、それ以下の温度にて再焼戻しても、結晶粒に變化せず、単に炭化物の析出のみと云はれてゐる。この際の結晶性とは、其大きさ又は數と解釋せらる。本実験に於ても、500°C にて 100h 保持せるため結晶粒の大きさ又は數は變化ないものと考へ、500°C に 100h 保持せるため、結晶粒界が幾分にて明瞭になれば、それは炭化物の析出した結果と判定して差支ないと考へられる。近年錦織博士¹⁴⁾¹⁵⁾は Ni-Cr 鋼につき、Vilella & Bain 氏腐蝕液を用ひて深く腐蝕し、1200 倍に擴大して炭化物析出狀況を研究せられた。本研究に於ても同液にて腐蝕し検鏡し所載の如き組織を得たが、靱性のもとの其差を認めることが極めて困難であつた。却つて 800 倍にて鏡檢せるものゝ方が幾分粒界が明確に認められた。再び前に戻つて、比較的低温焼戻(500~625°C)のものでは、500°C 100h 保持によつてマルテンサイト系よりトラスタイトへの變化が徐々に起るのであるから、炭化物の析出狀況が見易いに反し、650°C 以上初焼戻のもの

は、既に多量の炭化物が析出せるため更に 500°C に 100h 加熱して析出した微量の炭化物を顕微鏡下に見難いのは當然である。焼戻脆性に對する説明は炭化物説が最も首肯し得るものであるが、一方鋼中に含有される窒素、マンガ、磷、又は酸素、酸化物等も補助的に意義を有する如く説く學者もある。²¹⁾⁴⁾ 因て本鋼についても参考のため酸素、窒素、水素、珪酸の分析を行つた。尙これに關しガス吸収説¹⁸⁾の如きものもある。又析出炭化物の種類については、最も興味あるものであるが、これについては村上博士¹⁶⁾の、Fe₃C(Cr を固溶)又は Fe, Cr の複炭化物説あるのみで他に文獻が見當らぬやうである。焼戻脆性は専ら Fe₃C 又は Cr の複炭化物が溶解度の變化に従つて結晶粒界に析出するためと説明せられてゐるが溶解度曲線は炭素鋼に於ける Fe₃C の溶解度¹⁹⁾が究明されただけで、未だ Ni-Cr 鋼其他の特殊鋼に就ては決定されてゐない。又炭化物析出説の證明として石原博士²⁰⁾は磁氣の強さ、電氣抵抗等を研究された。然し近年は焼戻脆性の物理的實驗研究は極めて少ないやうに思ふ。

6) 焼戻脆性防止に對する考察 焼戻脆性の防止については以前より研究せられてゐる。而して Mo が焼戻脆性を除去する理由は (1) A₁ 點以下の炭化物の溶解度を著しく減少せしむるか(2) 温度による溶解度の變化を無くするためと云はれた⁸⁾。又 Greaves & Jones の研究によれば V は焼戻脆性に作用せず、Mo は著しく脆性を減ずると云はれた。Greaves & Jones²¹⁾は Ni-Cr 鋼の焼戻脆性は 0.3% Mo の添加によつて完全に防止し得たと報告してゐる。永澤博士³⁾は Mo 0.56%, 1.20%, 1.58% の單一 Mo 半硬鋼につき、一旦 650°C にて 10h 焼戻せるものにつき、これを更に 400~600°C の範圍に於て再焼戻實驗の結果、全然焼戻脆性の惹起せざることを報告せられ。又 W 0.53%, 1.07%, 1.63% の單一 W 半硬鋼につきても同様の結果を得られた。又焼戻脆性の一般的豫防法の研究の結果、Ni-Mn-Mo 鋼(C 0.36%, Mn 1.62%, Ni 3.04%, Mo 0.5%),

¹⁶⁾ 村上: 東北理科報告 7 (1918) 217

¹⁷⁾ R. H. Greaves & J. A. Jones: J. Iron & Steel Inst. 2 (1920) 171

¹⁸⁾ W. T. Griffith; J. Iron & d Steel Inst. (1925) 257

⁴⁾ W. E. Ehn; 前出

⁵⁾ E. C. Bain; 前出

¹⁹⁾ 山田(勇): 金屬の研究 3 (1926) 294

²⁰⁾ 石原(富): 東北理化報告 13 (1924) 79

²¹⁾ R. H. Greaves & J. A. Jones: J. Iron & Steel Inst. 2 (1920) 171

¹⁴⁾ 錦織: 電氣製鋼 13 (1937) 413

¹⁵⁾ 錦織: 電氣製鋼 13 (1937) 419

⁸⁾ 本多, 山田: 前出

⁹⁾ 永澤: 前出

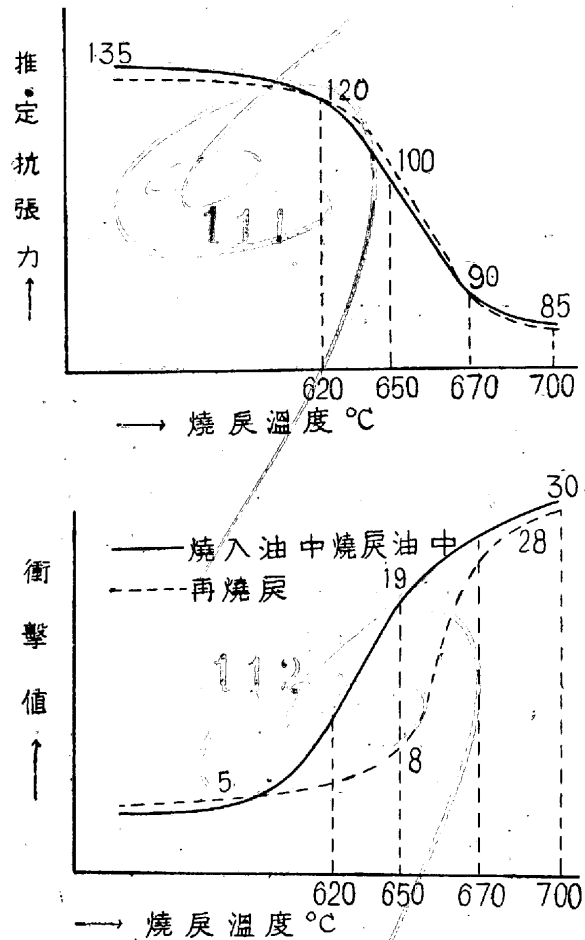
Ni-Mo 鋼 (C 0.39%, Ni 3.04%, Mo 0.48%), Ni-Cr-W 鋼 (C 0.38%, Cr 1.34%, Ni 3.0%, W 1.45%) 及び Ni-Mn-W 鋼 (C 0.35%, Mn 1.5%, Ni 3.0%, W 1.47%) の數鋼は焼戻脆性を惹起せざることを報告せられた。關口學士¹¹⁾¹²⁾はNi-Cr 強靱鋼 (C 0.33~0.38, Ni 3.10~3.40%, Cr 0.76~0.87%) 及び Ni-Cr-Mo 鋼 (C 0.32~0.38%, Ni 3.61~3.78%, Cr 0.87~1.01%, Mo 0.15~0.20%) につき一旦 600°C にて 3 h 焼戻油冷せるものを、400~600°C 範圍に再焼戻し衝撃試験を行つた結果、Mo 0.2% のものを除いては、何れも 550°C 附近に於て著しき最大の脆化現象のあることを報告された。これ等の實驗にて明かなる如く、550°C は最も大なる再焼戻脆性を惹起する温度で、Greaves¹⁷⁾ が既に古くこれを臨界點 (Critical Point) と稱したのは故ありと思はれる。これによれば Mo 0.2% は可成脆性を防止し得ることを知る。以上の結果やりして、Mo, V, W の諸元素は何れも焼戻脆性を防止し得る性質を有し、其含有量を 1.5% 程度に増す時は一層其性能を發揮することを知らるのである。

VIII. 實驗結果の實際的考察

1) 窒化曲軸の心部脆性について 實驗第1に於て、初焼戻温度 620~660°C の範圍のものが、500°C 100h 保持によりて、最も脆性を惹起することを知つた。然し航空發動機用クランク軸の如き、抗張力 120 kg/mm² 以上を必要とするものに於ては、初焼戻温度は 570~580°C ならば、500°C 100h 保持による脆化の度極めて微弱にして何等心配するに當らざることが知られる。耐久試験の結果が良くこれを證明してゐる。

2) 強靱窒化齒車の製作について 又齒輪の如き 80~90 kg/mm² の抗張力にて可なるものは、初焼戻温度が 660°C 以上にて可なるを以てこれ亦 500°C 100h 保持による脆化の度極めて微弱にして憂ふるに足らざることが知られる。併し茲に一考すべき問題は、現在迄用ひられた、アルミニウム窒化鋼化 (イ-111) の規格抗張力は 85 kg/mm² 以上なるに對し、一般滲炭齒輪用材料 Ni-Cr 鋼 (例イ 104) 又は Ni-Cr-Mo 鋼 (例イ 105) では、抗張力は何れも 100~110 kg/mm² 以上なることである。即ち將來に於ては窒化齒輪も従來の 80~90 kg/mm² に満足せず、100~110 kg/mm²

のものを使用することあるべきを信ず。然るにこの抗張力を與へるべき初焼戻温度範圍は、500°C 100h 保持による脆化の最も甚しきものである。(第12圖参照)窒化曲軸の



第12圖 再焼戻に依る脆化と推定抗張力との關係

如く 120 kg/mm² 程度に熱處理すれば脆性は起きないわけであるが、現在の齒切カッターでは切削極めて困難であらう。依て差當つて 100 kg/mm² 程度の窒化齒輪を考慮すべきものと思はる。現在の滲炭齒輪の如く、焼鈍状態で齒切するものに於てさへカッターの消耗が問題となつてゐるのであるから、高力窒化齒輪には先づ優良なるカッターを用意することが必要である。窒化齒車に於ても、滲炭齒車と同様先づ焼鈍状態に於て荒齒切を行ひ、調質後仕上齒切出来れば高力窒化齒車の製作も可能と思はれる。今假に最も脆化の甚しい 100 kg/mm² の窒化齒車を作つたとし、其爲に衝撃値が 20 kg/cm² より 8 kg/cm² に低下したとしても、120 kg/mm² の場合の衝撃値 5 kg/cm² に比し、優位にあるのであるから、實用上差支なければ使用可能のものである。650°C 焼戻に於ける脆化を防止出来るか、又 580°C 焼戻即ち 120 kg/mm² 位の窒化齒車が出来れば最も好都合なわけである。

次に實驗第2に於て見るに、窒化時間を 40h とする時

¹⁷⁾ R. H. Greaves; J. Iron & Steel Inst. 2 (1919) 327

¹¹⁾ 關口: 前出

¹²⁾ 關口: 前出

は、最も脆化の甚しい 650°C 初焼戻のものに於ても、尙其脆化度を半分に止め得る。アルミニウム窒化鋼 (イ 111) による窒化歯輪は普通 50h 窒化を行つてゐるが、バナジウム窒化鋼 (イ 112) を用ひた場合は窒化時間が 40h ですめば好都合であるが、このためには後者の窒化深度が大でなければならぬ。実験第 1 に於て脆化度大なる 620~660°C 焼戻範囲に於ては、実験第 2 によつて、500°C に保持する時間の長短による衝撃値低下の度も大である。然し既述の如く或時間迄は左程大なる低下を示さざるを以て、物により窒化時間を加減し實用上の適用を誤らざるやうに注意すればよいわけである。

3) 耐衝撃高弾性鋼について 次に実験第 3 によつてみるに、本実験は主として 500°C 以下の焼戻状態に於ける硬度並に衝撃値の関係なれば、窒化の如き問題には関係せず。唯本鋼を 150 kg/mm² 以上の抗張力を有する弾性鋼として使用する場合に、300~500°C 焼戻に於ける第 1 脆性的衝撃値の低下に注意するを要す。朝倉氏¹³⁾はこの範囲の焼戻を避けて 200°C 附近の焼戻を使用すべきことを強調せられてゐることは注目に値す。尙本研究に於ては 150°C 附近にて焼戻する際、爐中冷却せるものが油中及水中冷却よりも幾分靱性が増してゐる結果を得てゐる。

IX. 總 括

以上の研究を總括すれば次の如くなる。

1) 獨逸國クルツプ會社製強靱窒化鋼 (FKM 54 Flieg. 1470) について 焼戻脆性についての研究を行ひ、單に焼入焼戻を行つた場合の脆性即ち 1 次焼戻脆性と、これを更に 500°C にて 100h 保持した場合の衝撃値の低下即ち 2 次焼戻脆性ととの状況を比較し且つ 500°C に保持する時間の變化に依る 2 次焼戻脆性の進行状況を調べた。又焼入せるものを 100°C から 600°C 迄焼戻を行ひ、第 1 脆性の状況を併せ觀察した、其結果を従來の焼戻脆性に關する炭化物析出説に依て説明した。

2) 本鋼は 500°C に 100h 保持することにより、初焼戻温度 620~660°C の範囲に於て著しく脆化を生ずるが、それ以外の焼戻温度のものは殆ど脆性を生ぜず、570°C 以下で焼戻せるものでは却て幾分靱性を増す。其脆化を起す原因は、620~660°C にては炭化物析出の過渡期状態にあるため、500°C にて 100h 保持することにより、其粒界析出を促進すると考へらる。本鋼が有するマルテンサイト

状の組織のものは、500°C 程度の温度にては容易に残存固溶炭化物が粒界に析出し難く又 670°C 以上焼戻の如く完全にソルバイト組織になれるものに於ては、500°C 再焼戻によつて炭化物が粒界に析出する量極めて微量にして脆化しないものと考へらる。

3) 500°C に 100h 加熱する時は、初焼戻の冷却方法並に 500°C 再焼戻後の冷却方法の如何に關せず、殆ど脆化の状況が同一である。それは析出し得る炭化物は全部析出し、500°C より冷却過程に於て析出する炭化物殆ど皆無なるによると考へらる。

4) 620~660°C 焼戻範囲のものは、500°C に保持する時間を増すに従ひ脆化の度を増すが、40h 位迄は左程脆化を生じない。それは 500°C に於て析出し盡す時間は、大體 50h 位で、50h 以後は脆化の度微小となるによる。

5) 焼入鋼を焼戻するときは焼戻温度 300~500°C に於て脆化を起す、それはマルテンサイトよりトルースタイトへの變化及残留オーステナイトのマルテンサイト化のためと考へらる。

6) 本実験結果を實際上に應用して次の事實が明かとなつた。(1) 本鋼を 920°C 油焼入し、これを 570~580°C にて焼戻し、抗張力を 120~130 kg/mm² とし、曲軸及活塞軸等に用ふる場合、500°C にて 100h 窒化を行ふも、材質心部に脆性を惹起すること極めて少ない。

(2) これを 700°C 以上に焼戻して 90 kg/mm² 附近の抗張力として齒車に用ふる場合にも同様 500°C 100h 窒化によりて材質心部の脆化せらるゝこと極めて少ない。

(3) 630~650°C に焼戻して 100~110 kg/mm² 程度の高力窒化齒車を作る場合、500°C にて 100h 窒化すれば大なる脆化を生ずるも、40h 迄窒化すれば心部に脆化を伴ふこと少ない。

(4) 180 kg/mm² 以上の高弾性鋼として使用する場合、150~200°C に戻して爐中冷却すれば、水中又は油中冷却の場合よりも衝撃値は大きい。

(5) 300°C 附近焼戻は衝撃値が急激に低下するを以て、この附近の焼戻はなるべく避ける方がよろしい。

本研究は會社の多大の援助に依るもので茲に厚く謝意をする。又実験は技手定松喜市郎君の助力に負ふ所大で厚く感謝の意を表す。

本論文は東北帝國大學教授金屬材料研究所々長理學博士村上武次郎先生の御校閲を賜つたもので茲に衷心より感謝の意を表す。

¹³⁾ 朝倉：前出