

黒心可鍛鑄鐵の熱特性に就て

(日本鐵鋼協會第7回 講演大會講演)

菊田多利男

THE THERMAL CHARACTERISTICS OF BLACK HEART MALLEABLE CAST IRON

by Taro Kikuta.

SYNOPSIS:- If the black-heart malleable cast iron completely annealed is thermally treated as in the case of galvanizing, the casting becomes very brittle at the room temperature; its fracture shows white and metallic luster. Leslie H. Marshall studied this problem and later published it. The writer, also, has studied it about at the same time.

Marshall's investigation consists of only impact test on the specimens of black-heart malleable cast iron quenched at various high temperatures. He found that if the casting is cooled in water at temperatures ranging from 300° to 550°, it causes the casting to become brittle and, also, he discovered that it is favorable method to cool quickly the casting from 650° before galvanizing it in order to prevent from becoming brittle.

In the course of the writer's research, he got the same result identical with Marshall's, but continued on further study until he found an ideal annealing method to produce superior malleable cast iron from white iron castings. This malleable iron castings produced by the writer's method never cause the brittleness from the heat treatment as in the case of galvanizing although any heat treatment at 650° is not given as recommended by Marshall.

The writer afterward did the impact testing at various temperatures on the specimens treated and untreated thermally, did, also, the microscopic test on the same specimens, and took measure of an electric property during the period of heating and cooling.

From these facts the theory for the embrittlement of black-heart malleable cast iron was built up.

目 次

1. 緒 論
2. 黒心可鍛鑄鐵の衝撃抗力に對する熱處理の影響
 - イ、可鍛鑄物を種々の溫度より水中冷却したときの溫度と衝撃抗力の關係
 - ロ、可鍛鑄物を種々の溫度より空氣中冷却をなした時の溫度と衝撃抗力の關係
 - ハ、可鍛鑄鐵の熱處理によるエンブリットルメントの除去法と冷却速度
3. 黒鉛化完了後鑄物を急冷し初むる溫度と可鍛鑄鐵の熱處理によるエンブリットルメントの

關係

4. 黒心可鍛鑄鐵の種々の溫度に於ける衝撃試験
5. 熱處理を施した可鍛鑄物に對する顯微鏡試験、硬度試験及び電氣抵抗測定
6. 可鍛鑄鐵の熱處理に依るエンブリットルメントに對する理論

1. 緒 論

良く焼鈍された黒心可鍛鑄鐵に濕式亜鉛鍍金を施す場合の如き、熱處理、即ち 450~500°C より比較的速かに冷却するときは、この鑄物は常溫に於て著しく脆くなる。この性質は黒心可鍛鑄鐵の如

くフュライトと微小の黒鉛粒より成る材質に於て顯著に現はれ、且つ熱處理に依り種々影響さるゝものである故に、これを黒心可鍛鑄鐵の熱特性と稱したのである。この問題は可なり早くより知られマレーブル、カスト、アイオンのエンブリットメントと稱し一種の不可思議現象の如く思はれ、製造業者及びその需用家を可なり苦しめたものであるが、アメリカ合衆國の Leslie H. Marshall 氏により、その一部が研究せられ、僅かにその防止法が考へられたに過ぎない、けれどもなほその正體を確かめる迄には進んで居らなかつた。著者は此問題に對しては可なり長い間研究をなし聊かその實體を捉へることが出来たが種々の都合でその發表の時機が遅れたのである。

L. H. Marshall 氏の研究は黒心可鍛鑄鐵の試料を種々の高温度より水中冷却をなしそれについて衝撃試験を行ひ、この熱處理によりてその衝撃抗力が如何に影響さるゝかを見た、氏はこの研究により熱處理に依り脆弱となる温度範圍は 300°C 乃至 550°C であると云ふ事を分明し、亜鉛鍍金に依り脆弱となることを防ぐ爲めには一度焼鈍した鑄物を再び 650°C まで加熱しその温度より水中冷却をすればよいと結論した。

著者の研究は Marshall 氏の夫れより遙かに廣い範圍に亘つて行はれ Marshall 氏が行ふものもその一部分として包含されて居るのである。此研究に基いて優良なる黒心可鍛鑄鐵の新製造法が案出され、これによりて製造せられた可鍛鑄鐵は Marshall 氏が推奨して居る熱處理法を施さずとも亜鉛鍍金により脆弱となることはない、著者は又種々の温度に於

ける黒心可鍛鑄鐵の衝撃抗力を測定した、最後に脆性を呈せる可鍛鑄物及び焼鈍せるまゝの鑄物に就いて硬度及び電氣抵抗を測定し、黒心可鍛鑄鐵の亜鉛鍍金を施す場合の如き熱處理により脆性となる理由に就き一説を作つた。

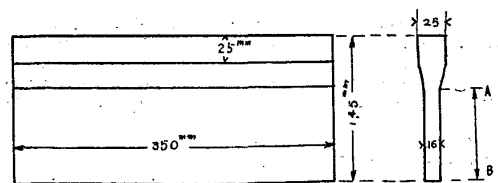
本試験に使用した試料の化學成分は試料をして可成均一なる丈夫な鑄物たらしむる爲めその炭素量を多少高めた、その他の成分は大體普通の黒心可鍛鑄鐵と同様である、化學成分を擧げると第 1 表の如し。

第 1 表

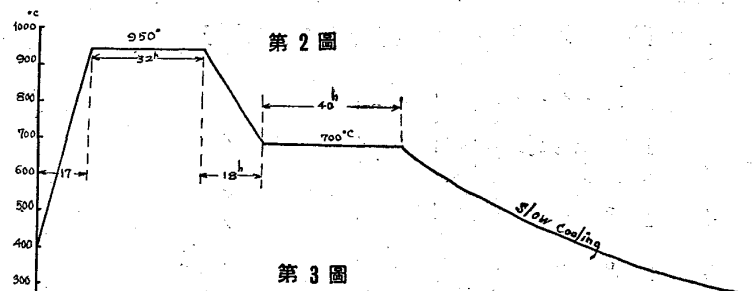
試料番號	C(%)	Si(%)	Mn(%)	S(%)	P(%)
A	2.86	0.92	0.33	0.045	0.146
B	2.86	1.01	0.27	0.048	0.154

以上の如き化學成分を有する熔湯にて厚さ 16 mm、幅 145 mm、長さ 350 mm の比較的大きな、第 1 圖の如き形状の白銑鑄物を作り、その約數十個を電氣燒鈍爐に入れ、第 2 圖の如き加熱冷却曲線により示さるゝ燒鈍をなしたる後衝撃試験片を採取した。

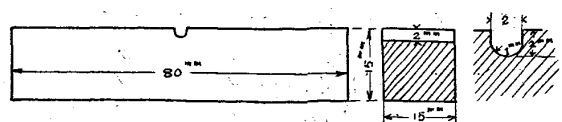
第 1 圖



A B の部分より衝撃試験片を採つた。



第 3 圖



此種の試験に於ては焼鈍の不完、鑄物としてよくある内部鑄縮による疵等は極力防止せんければならぬ、その爲めに第一段及び第二段黒鉛化時間は充分にこれを取り完全なる試料を得ることに勉めた、衝撃試験片は普通のシャープ試験機に用ふるものより大きくし、第3圖に示す如きものを用ゐた、それは黒心可鍛鑄鐵は衝撃抗力の大なる鑄物ではあるが、これを軟鋼の如きものに比するときはその價仲々比肩出來ないのである、且つ此處に用ゐた試験機は 30 kgr.m のシャープ式のものである故、なるべく試料の大きさを大にし大きな數値を出して比較の便なる様努めたのである。

2. 黒心可鍛鑄鐵の衝撃抗力に対する熱處理の影響

イ、可鍛鑄鐵を種々の溫度より水中冷却をなしたときの溫度と衝撃抗力との關係

試料を種々の高溫度に於て 20 分間加熱した後水中冷却をなし、常溫(9°)にて衝撃試験をなした、その結果は第2表及び第4圖に示されて居る、圖に於て横軸は加熱した溫度を表はし、縦軸は衝撃抗力の値を表したものである。

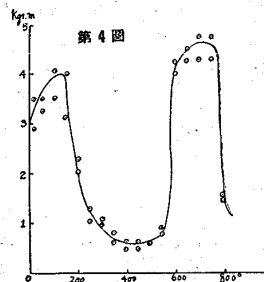
第 2 表

試料番號	熱處理法	衝撃抗力 (kgr.m)	破面狀態
1	熱處理を施さぬもの	{ 2861 3503	黒暗色にして良好
2	50°より水中冷却	{ 3223 3503	" "
3	100°より水中冷却	{ 3503 4086	" "
4	150° "	{ 3168 3947	" "
5	200° "	{ 2005 2264	白色の混じたる黒色
6	250° "	{ 1073 1276	白色にして脆し
7	300° "	{ 0904 1046	" "
8	350° "	{ 0598 0741	" "

9	400°より水中冷却	{ 0415 0586	" "
10	450° "	{ 0361 0598	" "
11	500° "	{ 0598 0586	" "
12	550° "	{ 0841 0904	少しく黒斑を混じた白色
13	600° "	{ 3986 4185	黒暗色にして良好
14	650° "	{ 4347 4531	" "
15	700° "	{ 4387 4738	" "
16	750° "	{ 4286 4697	" "
17	800° "	{ 1166 1347	白色

以上の結果より熱處理により脆性となる溫度範圍

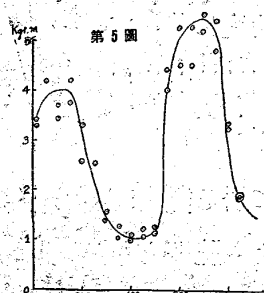
は 250°C から 550°C の間にあるとがわかつた、而してガルバナイズングは鑄物を亞鉛のバスの中に浸したる後、アンモニウム、クロライドにより



その表面を洗ふた後温水中に入れ冷却するものであるから、かゝる鑄物をガルバナイズするときには脆性を帯ぶるものである、此の結果は Marshall 氏の夫と殆ど一致して居ることで、又同氏の實驗はこれで終つたのである。800°C より水中冷却をなした鑄物の脆くなるのは普通鋼の場合の如く焼が入り組織がマルテンサイトとなる爲めである。

ロ、可鍛鑄物を種々の溫度より空氣中冷却をなした時の、溫度と衝撃抗力の關係

此場合は前節の實驗に於て水中冷却をなした代



はり空氣中にて冷却したものであつてその冷却速度が幾分緩かとなつて居る、その結果は第3表及び第5圖に示さる如くである。圖の兩軸の示す數

値は前と同様。

第 3 表

試料 番號	熱處理法	衝擊抗力 (kgr.m)	破面状態
18	熱處理せぬもの	{3.408 3.316	黒暗色
19	50°より空気 中冷却	{4.185 2.430	黒暗色、但少し疵あり
20	100° "	{3.694 3.408	黒暗色
21	150° "	{4.186 3.790	"
22	200° "	{3.315 2.600	"
23	250° "	{2.600 1.139	半白 白色
24	300° "	{1.563 1.417	"
25	350° "	{1.276 1.073	"
26	400° "	{1.073 1.006	"
27	450° "	{1.207 1.073	"
28	500° "	{1.207 1.139	"
29	550° "	{4.387 3.936	黒暗色
30	600° "	{5.335 4.489	"
31	650° "	{5.335 4.489	"
32	700° "	{5.886 5.226	"
33	750° "	{5.663 4.801	"
34	800° "	{3.315 3.223	白色斑らの黒色
35	850° "	{1.864 1.864	白色金屬光澤

以上の如く前述の如き危険区域より空气中冷却された黒心可鍛鑄物は水中冷却の場合と同様脆性を呈するものである、但し此場合には冷却速度が

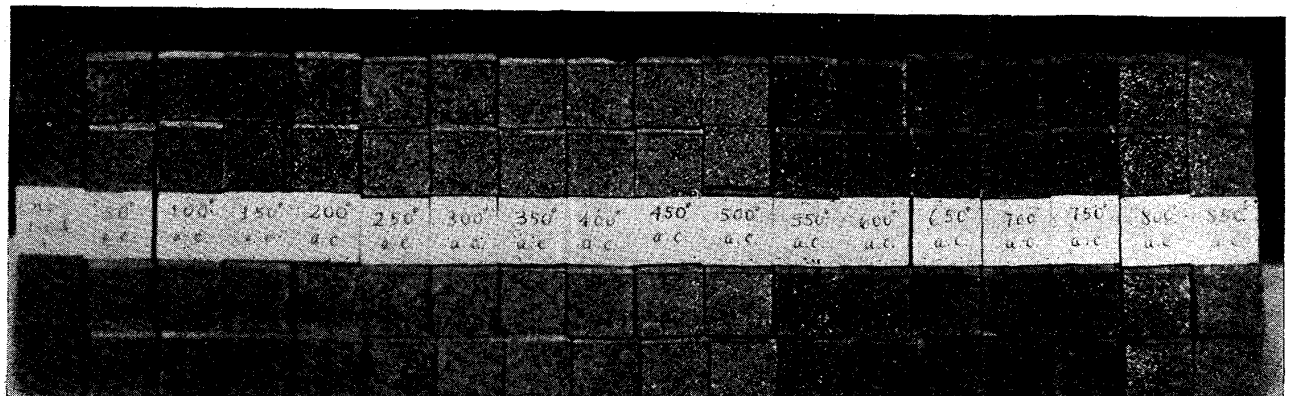
急激でないだけその影響の割合は水中冷却の時より多少緩和されて居る、これと同様に良く焼鈍された黒心可鍛鑄鐵を温水又は沸騰水中にて冷却する場合にも同様の現象が起ると云ふことが想像するに難くない。寫眞は此場合の衝擊試験片の試験後の破面を示すもので表及び圖の曲線とよく一致することがわかる。

ハ、黒心可鍛鑄鐵の熱處理に依る衝擊脆性の除去法並びに冷却速度の影響

入念に焼鈍して切角優良な可鍛鑄鐵が得られても、前述せる如き危険なる範圍の溫度よりその鑄物を水中又は空氣中にて冷却するか又は亞鉛鍍金をなすときは常溫に於て脆弱なる材質のものに變つて了ふ、これは誠に困つた事で、如何にかしてこれを防止せんければならぬ、又一度熱處理により脆弱になつた可鍛鑄物を、元の優良な粘り材質のものにしたいと云ふので次に種々の熱處理を施して見た。

(i) 黒心可鍛鑄鐵を 100°C 以上の種々の溫度より水中にて冷却をなしそれを再び 450°C に加熱してその溫度より水中冷却し、常溫にて衝擊試験を行ふた。

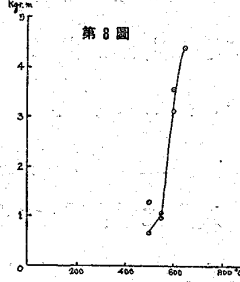
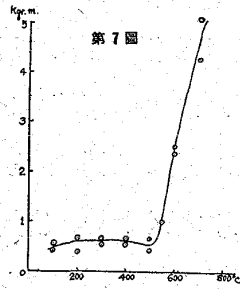
此實驗はつまり亞鉛鍍金をなす如き熱處理を施す前、豫め適當な熱處理をなし、その後の熱處理により影響されぬ材質が得られぬか、實驗したの



である。

此實驗結果を示すと第 4 表及び第 7 圖の如くなる、圖の横軸は初めに熱處理するときの溫度を表はし、縦軸は前同様衝擊抗力の値である。

此結果より 550°C より低い溫度から水中冷却した可鍛鑄物は、熱處理を施さぬときと同様熱處理による衝



第 4 表

試料番號	熱處理法	衝擊抗力 (kg-m)	破面狀態
36	100°から水中冷却をなし更に 450°に加熱しその溫度より水中冷却す	{0.593	白色
		{0.372	
37	200°から水中冷却したる後前同様 450°より水中冷却	{0.753	"
		{0.361	
38	300°から水中冷却したる後 450°より水中冷却	{0.633	"
		{0.610	
39	400° "	{0.620	"
		{0.574	
40	450° "	{0.633	"
		{0.393	
41	500° "	{1.059	"
		{1.032	
42	600° "	{2.548	黑色
		{2.380	
43	700° "	{5.179	"
		{4.347	

撃脆性を受けるが、600°乃至 700°C の間の高温より水中冷却せるものは 450°C に於ける熱處理又はガルバナイズの影響を受けず、優良なる性質を持続する、此實驗は數回繰返して行ふたのであるが常に同じ結果を得て居る。

(ii)、亞鉛鍍金の如き熱處理のために脆弱となつた、可鍛鑄物を處理して脆弱性を除去する方法。

450°C より水中冷却したために脆弱となつた可

鍛鑄鐵はこれを 450°C 以下の溫度より色々の處理をしても何等の變化を認めない、けれども 450°C より高い溫度に加熱して後急冷するときは如何になるか、大體豫想のつくことではあるが實驗して見ると第 5 表及び第 8 圖の如くなる。

第 5 表

試料番號	熱處理法	衝擊抗力 (kg-m)	破面狀態
44	450°より急冷した試料を、更に 500°より水中冷却す	{0.693	白色
		{1.276	
45	" 550°より水中冷却	{0.942	"
		{1.031	
46	" 600° "	{3.076	黒暗色
		{3.541	
47	" 650° "	{3.790	"
		{4.759	

これにより亞鉛鍍金の如き熱處理を施したため脆弱となつた可鍛鑄鐵もこれをもう一度加熱して 600°C 乃至 700°C の間の溫度より冷却することにより脆弱性を消失せしめ優良なる材質に戻すことが出来る事が知られる。

(iii)、650°C に加熱した後急冷した可鍛鑄鐵は危険範圍の溫度にて充分長く加熱することにより脆弱なる材質となるや否や。

黒心可鍛鑄鐵を 300°乃至 550°C の溫度範圍にて長時間加熱する如きことは稀れであるが、セラダイジングをなすが如く數時間加熱することもある、それで此實驗を行ふて見た、結果は第 6 表に示してある。

第 6 表

試料番號	熱處理法	衝擊抗力 (kg-m)	破面狀態
55	650°より水中冷却せる試料を更に 500°に 5 時間加熱しをき後空中冷却	{4.801	黒暗色
		{4.801	
56	650°より水中冷却せし試料を更に 500°に 10 時間加熱し後空中冷却	{4.592	"
		{4.085	
57	650°より水中冷却せし試料を更に 450°に 5 時間加熱し後空中冷却	{3.986	"
		{3.888	
58	650°より水中冷却せし試料を更に 450°に 10 時間加熱し後空中冷却	{4.185	"
		{4.695	

即ち一度 650°C より急冷した可鍛鑄物は危険範

圍の溫度に 10 時間も加熱しても何等の影響も受けぬ。

以上述べて來た事柄は凡てある溫度より水中又は空氣中にて冷却した場合に於ける溫度と衝擊杭力との關係であつた、けれども實際の場合に於ては鑄物の大きさが大きくなり、又作業上衝擊試験片を焼入するが如き急冷を行はしむることが不便となつて來る、従つて空氣冷却の場合よりも緩かなる冷却速度で上述の熱處理を行はしめて、脆性となる影響を防げると實地應用上至極便利となつて來る、それで次ぎには熱處理による脆性と種々の溫度より冷却するときの冷却速度との關係を述べる。

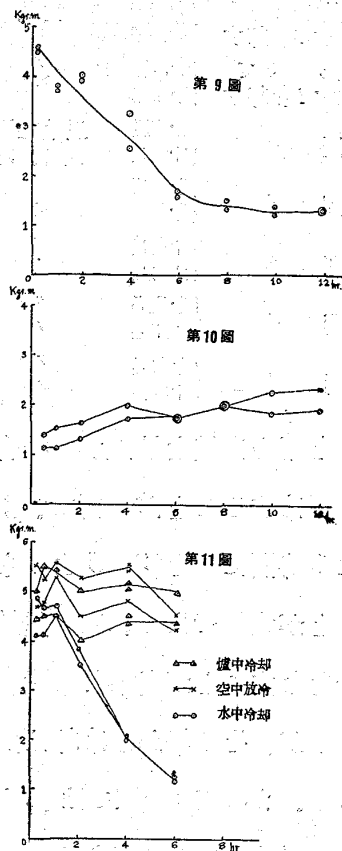
(iv)、650°C より種々の冷却速度を以つて冷却せしめた、可鍛鑄物を再び 450°C に加熱した後水中冷却す。

結果を示すと第 7 表及び第 9 圖の如くなる。

圖の横軸は 650°C より冷却する時間を表はす

第 7 表

試料番號	熱處理法	衝擊杭力 (kgr.m)	破面狀態
59	650° より水中冷却をなした後 450° より水中冷却	{4.740 4.801	黒暗色
60	650° より 100° までを 30 分間かかつて冷却をなし後 450° より水中冷却	{3.750 3.690	"
61	650° より 100° まで 2 時間かかつて冷却した後 450° より水中冷却	{3.846 3.986	"
62	650° より 100° まで 4 時間かかつて冷却した後 450° より水中冷却	{2.500 3.223	白色斑點の黒地
63	650° より 100° まで 6 時間かかつて冷却した後 450° より水中冷却	{1.563 1.276	白色
64	650° より 100° まで 8 時間かかつて冷却した後 450° より水中冷却	{1.666 1.417	"
65	650° より 100° まで 10 時間かかつて冷却した後 450° より水中冷却	{1.139 1.347	"
66	650° より 100° まで 12 時間かかつて冷却した後 450° より水中冷却	{1.276 1.276	"



これより 650°C より 100°C まで 4 時間位かかつて冷却するとき、その可鍛鑄鐵は 450°C よりの急冷又はガールバナイズに依つて脆性を増すものである、鐵の變態點以下の溫度より熱處理する必要のある可鍛鑄物は一度これを 600°乃至 700°C の溫度に加熱した後 100°C

まで 2 時間以内に冷却することが大切である。

(v)、良く焼鈍された黒心可鍛鑄鐵を 450°C に加熱した後水中にて急冷するとき、その材質は非常に脆弱となるのであるが、パツキング材料を使用する場合の如く鑄物を常溫まで極く緩かに冷却するときには、此材質は脆弱とはならぬ。それであるが 450°C からの冷却を適當に緩かにすれば此の脆弱性を附與せぬことが出来る、即ちある臨界の冷却速度があることが豫想することが出来る。

今試料を 450°C に加熱し其溫度に 20 分間保持した後 100°C まで種々の冷却速度で冷却し、常溫にて衝擊試験を行ふた、その結果は第 8 表及び第 10 圖に示されてある、圖の横軸は 450°C より 100°C まで冷却する時間を表はす。

第 8 表

試料番號	熱處理法	衝擊杭力 (kgr.m)	破面狀態
67	450° で 20 分間加熱した後 100°C まで水中冷却	{1.139 1.417	白色

68	450°で20分間加熱した後1時間かゝりて100°まで冷却す	{1.139 1.336	白色 "
69	" 2時間かゝりて100°まで冷却す	{1.346 1.636	" "
70	" 4時間 "	{1.711 2.021	黒色斑點 の白地
71	" 6時間 "	{1.785 1.785	" "
72	" 8時間 "	{2.021 2.021	" "
73	" 10時間 "	{1.785 2.264	" "
74	" 12時間 "	{1.864 2.346	" "

89	650°より450°まで2時間て冷却した後450°より空气中冷却	{4.488 5.119	黒暗色 "
90	" " 4時間 " " "	{5.443 5.553	" "
91	" " 6時間 " " "	{4.185 4.592	" "
92	650°より450°まで爐中にて冷却した後450°より爐中冷却	{4.387 5.012	" "
93	650°より450°まで30分間にて冷却した後 " " "	{4.438 5.663	" "
94	" " 1時間 " " "	{4.592 5.553	" "
95	" " 2時間 " " "	{3.986 5.012	" "
96	" " 4時間 " " "	{4.488 5.119	" "
97	" " 6時間 " " "	{4.387 5.012	" "

これより充填物質等を用ゐる白銑を焼鈍する場合には200°Cまでは極く緩冷することが必要で、上の曲線より豫想するに1時間につき30°Cよりも遅い割合で冷却することが大切である、又亜鉛鍍金後以上の様な極緩冷をなすことが出来れば脆い材質とはならぬのであるが、そう緩かな冷却は實際の場合に不可能である、かゝる場合には豫め650°Cより空氣冷却して置けばよいのである。

(vi)、650°より450°Cまで種々の冷却速度で冷却した後、その温度より(イ)水中冷却(ロ)空气中冷却(ハ)爐中冷却をなしたものにつき衝撃試験をなす、その結果を掲げると第9表及び第11圖の如くなる。

第 9 表

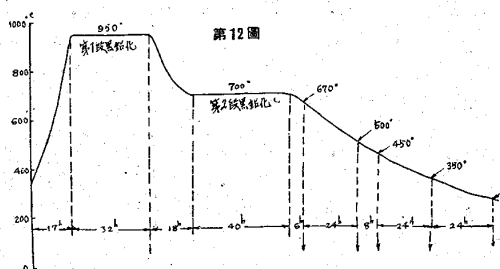
試料番號	熱處理法	衝擊抗力 (kgr.m)	破面狀態
80	650°から450°まで爐中冷却した後450°にて水中冷却	{4.085 4.906	黒暗色 "
81	650°より450°まで30分にて冷却した後450°より水中冷却	{4.085 4.592	" "
82	" " 1時間 " " "	{4.592 4.696	" "
83	" " 2時間 " " "	{3.503 3.798	" "
84	" " 4時間 " " "	{2.021 2.101	白色斑點 を混じり黒地
85	" " 6時間 " " "	{1.207 1.276	白 色
86	650°より450°まで爐中冷却後450°より空气中冷却	{4.696 5.663	黒暗色 "
87	650°より450°まで30分間て冷却した後450°より空气中冷却	{4.696 5.226	" "
88	" " 1時間 " " "	{5.443 5.553	" "

これより、650°Cより1時間100°Cの割合よりも速い冷却速度にて冷やされた可鍛鑄物は、450°Cより水中冷却の如き急激な冷却をしても脆くなることがない、空气中冷却又は爐中冷却の如き緩かなる處理にてはなほその影響が少ない事が知られる。

以上の實驗は凡て一度普通焼鈍をなした優良な黒心可鍛鑄鐵に就て行つたものである、次ぎには焼鈍作業中に種々の冷却をなしそれについて熱處理による影響を述べんとするのである。

3. 黒鉛化完了後その鑄物を急冷し初むる温度と可鍛鑄鐵の熱處理による脆性との關係

焼鈍に依る白銑の黒鉛化作用を全く完了してから、その冷却途中種々の温度に於て爐中より鑄物を取り出し空气中冷却をなした、此の時の鑄物の大きさは第1圖に示したものと同じく、その熱處理の曲線は第12圖に示してある通りである。かくの如く處理した可鍛鑄物より衝撃試験片を採取し、前述の諸實驗の場合の如く種々の温度に加熱した後水中又は空气中にて冷却をなし常温にて衝撃試験を行ふた。



(i)、黒鉛化完了後の冷却途中 670°C に於て爐中より取出して空気中放冷せる可鍛鑄物に就て。

此場合の結果は第 10 表及び第 13 圖に示した通りである。圖の兩軸の指示する數値は前項のものと同様。

第 10 表

試料番號	熱處理法	衝擊抗力 (kgr.m)	破面狀態
101	熱處理を施さず	{4.286 4.387	黒暗色
102	100° に加熱し空気中冷却	{3.790 3.790	//
103	200°	{3.888 3.986	//
104	300°	{4.185 4.185	//
105	400°	{4.185 4.185	//
106	500°	{3.694 4.185	//
107	600°	{3.986 4.592	//
108	700°	{4.387 4.592	//
109	750°	{3.790 4.185	//
110	800°	{3.131 3.986	//
111	100° に加熱し後水中冷却	{3.790 3.790	//
112	200°	{3.986 3.888	//
113	300°	{4.185 4.185	//
114	400°	{4.185 4.387	//
115	500°	{4.387 5.012	//
116	600°	{4.185 4.185	//
117	700°	{3.790 4.185	//
118	750°	{3.790 4.236	//
119	800°	{1.417 1.417	白色

此結果より黒鉛化完了後 Ar_1 變態點下 670°C 位より空氣中にて放冷するが如く處理せられた可鍛鑄物は、常溫近くまで緩冷せらるゝ普通の方法によるものゝ如く亜鉛鍍金の如き熱處理により脆弱となることはなく、前節記載の危險範圍の溫度より水中冷却するも材質的に何等の變化も認めない。

普通充填物質を使用して燒鈍をなす方法に於ては、比較的熱容量の大なる充填物質の存在のため急加熱、急冷等をなすことが困難である、それ故かゝる方法を採用する場合には多少の時間を犠牲にしても黒鉛化完了後の冷却は極緩かにすること必要にして 200°C 以下の溫度に至りて初めて爐中より取出すを要すのである、然るに上述の實驗をよく考察して充填物質を省略して適當の爐設備にて燒鈍法を行ふ時は時間に於て普通の場合の約半分にて燒鈍が完成せられ且つ材質的には優秀なるものが得らるゝのである。

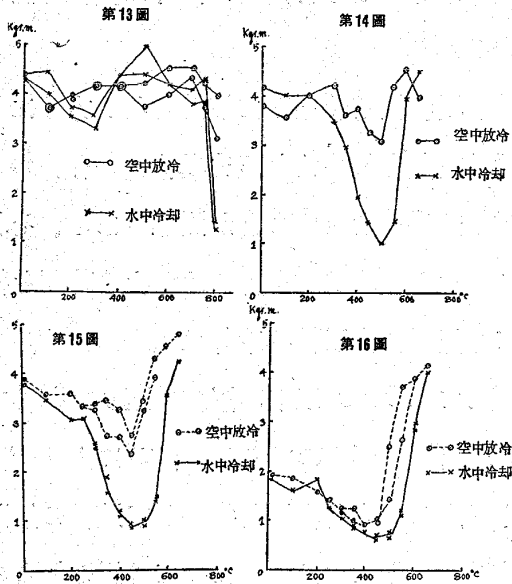
(ii)、黒鉛化完了後の冷却途中 500°C に於て爐中より取出して空気中放冷をなしたる可鍛鑄物につきて、結果は第 11 表及び第 14 圖に示せる如し。

第 11 表

試料番號	熱處理法	衝擊抗力 (kgr.m)	破面狀態
120	熱處理を施さぬもの	{3.694 4.185	黒暗色
121	100° に加熱し後空気中冷却	3.503	//
122	200°	3.986	//
123	300°	4.185	//
124	350°	3.598	//
125	400°	3.790	//
126	450°	{3.888 3.223	//
127	500°	3.082	//
128	550°	4.185	//
129	600°	4.592	//
130	650°	3.888	//
131	100° に加熱し後水中冷却	3.986	//
132	200°	3.986	//

133	300°に加熱し後水中冷却	3.408	黒褐色
134	350°	2.951	白色斑點を混じたる黒色地
135	400°	1.942	〃
136	450°	1.417	白色
137	500°	{1.006 0.942	〃
138	550°	1.417	〃
139	600°	3.888	黒暗色
140	650°	4.594	〃

147	400°	〃	{2.686 3.223	白色斑點の黒色地
148	450°	〃	{2.343 2.686	〃
149	500°	〃	{3.223 3.408	黒暗色
150	550°	〃	{3.887 4.284	〃
151	600°	〃	4.592	〃
152	650°	〃	4.801	〃
153	100°に加熱し後水中冷却	3.442	〃	
154	200°	2.950	〃	
155	250°	3.130	〃	
156	300°	〃	{2.514 2.514	白色斑點の黒色地
157	350°	〃	{1.563 1.864	〃
158	400°	〃	{1.136 1.206	白色
159	450°	〃	{0.878 0.878	〃
160	500°	〃	{1.006 0.878	〃
161	550°	〃	{1.417 1.417	〃
162	600°	〃	3.598	黒暗色
163	650°	〃	4.282	〃



此場合には450°Cの如き危険範囲の温度より空气中にて冷却するときには何等脆性を伴はぬが、これを水中にて冷却するときは脆性を帯ぶる様になる、けれどもその脆性となる温度範囲は普通焼鈍の可鍛鑄物の場合よりも遙かに狭いのである。

(iii)、黒鉛化完了後の冷却途中 450°C に於て爐中より取出して空气中放冷をなしたる可鍛鑄物について、結果を掲げると第 12 表及び第 15 圖の如くなる。

第 12 表

試料番號	熱處理法	衝擊抗力 (kgr.m)	破面状態
141	熱處理を施さぬもの	{3.790 3.888	黒暗色
142	100°に加熱し後空气中冷却	3.598	〃
143	200°	3.598	〃
144	250°	3.314	〃
145	300°	{3.223 3.314	〃
146	350°	{2.182 3.408	白色斑點の黒色地

これを前項の500°Cより空中放冷したものと比較するときには空气中冷却の場合にも多少の脆性を表はし水中冷却の場合にはその脆弱となる危険範囲は前の場合よりも廣くなつて來た、けれどもこれを普通の焼鈍せる可鍛鑄物に比較するときには尙ほ幾分狭いのである。

(iv)、黒鉛化完了後の冷却途中 350° に於て爐中より取出して空气中放冷をなしたる可鍛鑄物に就て。

結果をあげると第 13 表及び第 16 圖の如くなる。

第 13 表

試料番號	熱處理法	衝擊抗力 (kgr.m)	破面状態
164	熱處理を施さぬもの	{1.943 1.943	黒斑點を混じたる白色
165	100°に加熱し後空气中冷却	1.864	〃
166	200°	1.563	白色
167	300°	{1.417 1.139	〃
168	350°	{1.003 1.276	〃
170	400°	{0.814 0.878	〃

試料番号	熱処理法	衝撃抗力 (kgf.m)	破面状態
171	450° に加熱し後空中冷却	{1.006 1.070	白 色
172	500°	{1.471 2.514	" "
173	550°	{2.686 3.790	黒 暗 色
174	600°	3.925	" "
175	650°	4.185	" "
176	100° に加熱し後水中冷却	1.638	白 色
177	200°	1.864	" "
178	250°	1.276	" "
179	300°	{1.139 1.139	" "
180	350°	{0.878 0.940	" "
181	400°	{0.753 0.814	" "
182	450°	{0.633 0.693	" "
183	500°	{0.693 0.870	" "
184	550°	{1.276 1.207	" "
185	600°	{2.861 3.040	黒 暗 色
186	650°	4.085	" "

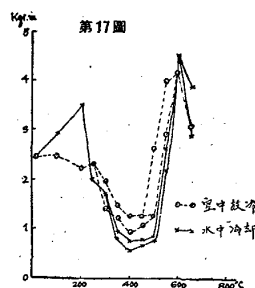
此場合には、別に450°Cの如き危険範囲の温度より急冷する等の熱処理を施さぬ前に既に幾分の脆性がある、その断面の状態を見ても白色の斑点のある、黒心可鍛鑄鐵としては脆性を帯ぶる鑄物となつて居る。かゝる鑄物は白銑の黒鉛化の不完全に依るものではなくこれはやはり前述せし如き熱処理に依つて生ずる脆性と同種のものとして認めなければならぬ。かゝる材質の鑄物は實際の場合に於て、製品の取出を急ぐ様な場合に時として経験する事柄である、けれども此れの救済は前節以來の實驗結果を基礎とせる此種脆性の理論的説明より容易に出来るもので、各項順を追ふて此等實驗の結果を對稱して見るとその間にある連鎖があることを感ずるのである。

(v)、黒鉛化完了後の冷却途中250°Cに於て爐中より取出して空中放冷をなしたる可鍛鑄鐵に就て。

第14表及第17圖は此等の結果を示すものである。

第 14 表

試料番号	熱処理法	衝撃抗力 (kgf.m)	破面状態
187	熱処理を施さぬもの	{1.864 2.430	黒斑点の混 ぜる白色地
188	100° に加熱し後空气中冷却	2.430	" "
189	200°	2.182	" "
190	250°	2.346	" "
191	300°	{1.417 1.943	白 色
192	350°	{1.206 1.490	" "
193	400°	{0.914 1.276	" "
194	450°	{1.139 1.276	" "
195	500°	{1.346 2.686	黒斑点を混 ぜる白色地
196	550°	{3.986 3.986	黒 暗 色
197	600°	3.095	" "
198	650°	3.887	" "
199	100° に加熱し後水中冷却	2.959	{白色 斑点を 混じた黒色地
200	200°	2.182	" "
201	250°	2.346	" "
202	300°	{1.417 1.711	白 色
203	350°	{0.878 0.940	" "
204	400°	{0.576 0.756	" "
205	450°	{0.653 0.815	" "
206	500°	{0.815 0.815	" "
207	550°	{2.186 2.686	白色斑点を 混ぜる黒色
208	600°	{4.185 4.592	黒 暗 色
209	650°	2.861	" "



此場合に於ては、焼鈍後熱処理をせぬ鑄物の衝撃抗力は、前項即ち焼鈍後爐中冷却の途中300°Cより空中放冷したものに比し幾分高くなつて居る

が、熱処理による影響は普通焼鈍の可鍛鑄物と同様に起る。けれどもその脆弱となる危険範囲は幾分狭い。

以上の實驗より優良なる黒心可鍛鑄鐵を製造せ

んとする場合には、白鉄鑄物のセメントイトを充分黒鉛化せしめた後 650°C 乃至 A_{r1} 點の間の溫度よりなるべく急に冷却せしむることが必要であると云ふ事がわかる、この爲めには從來可鍛鑄物工業に於て使用せられて居る燒鈍爐を模様換へして此の熱處理を行はしむるに便利な装置にせんければならぬ、從來使用せられて居る相當大なる爐を使用し充填物を入れて燒鈍する場合には製品たる鑄物、それを入るゝポット及び充填物質の大なる熱容量のために希望する様な冷却速度を以て冷却することは可なり不便な事柄で、却つて失敗を招ぐ原因となることさいある、かゝる場合には充分黒鉛化する位の時間をかけて燒鈍した後 200°C 位までは緩冷する必要がある、此の溫度に至れば漸く取出しに餘り苦痛を感じぬ様になる、若し又充分黒鉛化をなさしめたにも拘らず常溫にて脆弱な鑄物が得られた時には、これを 650° 乃至 700°C 位までもう一度加熱し水中か空中かで適宜急冷すれば充分我々の意に滿つる優良な材質の黒心可鍛鑄鐵が得らるゝのである。

以上の性質は特に黒心可鍛鑄鐵に於て顯著に現はるゝものであるが、又普通の鉄鑄物、白鉄鑄物にても多少此の傾向があるもので又鑄鋼の場合にもあるものであることが想像される、唯成分の多少により此の性質が可成りに左右さるゝものであるから普通認められて居らぬのであるが、以上の實驗を参考として行へば鑄鋼に於てもその影響が認められることと思ふ。

4. 黒心可鍛鑄鐵の種々の溫度に於ける 衝擊試験

前章までは、著者は熱的に種々に處理せられた可鍛鑄鐵に就いて、常溫に於て試験した衝擊抗力

について述べた、本章に於ては -190 より $+900^{\circ}\text{C}$ までの種々の溫度に於て、種々熱處理した可鍛鑄鐵について衝擊試験をなした結果について述べんとす、通常可鍛鑄物製造工業に於ては白鉄鑄物を燒鈍するに高溫度に於て長時間加熱して結合状態の炭素を黒鉛化せしむるのであるが、此の黒鉛化のために鑄物は必然的に多少の膨脹を伴ふものである、且つ此燒鈍作業中高溫度に於て各鑄物は上部よりの重味又は自己の重味がかかるのである、此等兩者による歪力又は壓力のために鑄物は幾分の歪をなし原形よりは多少違つた形となる、それ故に燒鈍後は歪直ほし作業により規定通りの形にすることが必要となる、小さな、薄い鑄物なれば常溫に於てこれをなすも何等の支障もないが、形が大となり又は厚さが厚くなると常溫に於けるよりも少しく温めた方が良い結果を與へて居る、そのため各溫度に於ける衝擊試験をなしその衝擊抗力を知つてをくことは大切なことである、又、可鍛鑄物も普通の鋼の如く低溫になると幾分脆くなる傾がある故、特に衝動を受くる處に使用さるゝ可鍛鑄物に就いて、零度以下の低溫にてその衝擊抗力を知つて置くことも又重要な事である。

此實驗を行ふに當つて衝擊試料を加熱又は冷却するに、 100°C 以上の高溫には小さな電氣抵抗爐を用ゐ、 0° と 100°C の間の溫度に加熱するには水槽を用ゐ、 0° と -20°C の低溫に冷却せしむるには氷と鹽とによる槽を、 -20°C 以下 -190°C に冷却するには液體空氣を用ゐた、是等電氣抵抗爐や浴槽より試料をとり出しこれをシャーピー式衝擊試験機の臺上に載せハンマーにてこれを打つ瞬間までには多少の溫度の降下がある、これに對しては衝擊試験前に豫め此の操作を行ふために生

する温度降下とその操作に要する時間との関係を測定し置き實際の試験に於ては單に試料を電気抵抗爐よりとり出し試験機臺にて衝撃さるゝまでの時間を測りそれにより温度の補正を行ふた。

試験に供された試料は普通焼鈍せるものゝ外、450°Cにて水中に處理したものと、第二段黒鉛化後670°Cより空氣中放冷せるものとである。

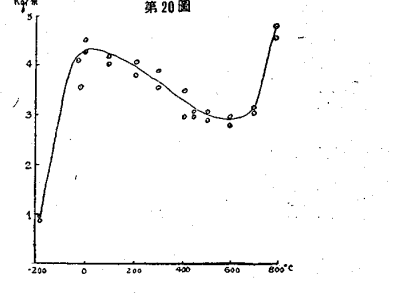
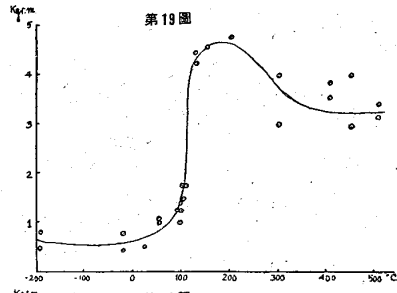
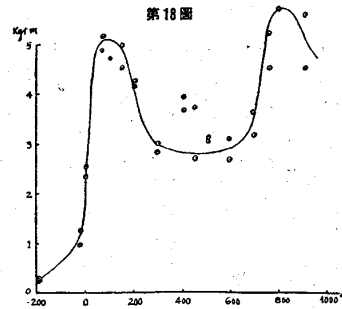
(i)、普通焼鈍の黒心可鍛鑄鐵

結果を示すと第15表及び第18圖の如くなる。

圖の縦軸は衝撃値を表はし、横軸は試験温度を表す。

第 15 表

試料番號	試験温度	衝撃抗力 (kgr.m)	破面状態
210	-189°	{0.297 0.297	白
211	{-19° -17°	{1.006 1.267	//
212	0°	{2.346 2.600	黒色斑點の混ざる白地
213	23°	{3.694 4.084	黒 暗 色
214	61°	{4.906 5.226	//
215	99°	{4.185 4.728	//
216	148°	{4.592 5.012	//
217	132°	{4.185 5.225	//
218	198°	{4.185 4.286	//
219	297°	2.861	{これより温度高くなる と薄い酸化膜のため破 面状態判然せぬ
220	412°	{3.694 3.986	
221	446°	{2.686 3.790	
222	510°	{3.040 3.332	
223	595°	{2.686 3.132	
224	690°	{3.694 3.223	
225	742°	{4.592 5.226	
226	790°	{5.775 6.338	
227	900°	{4.592 5.663	



第18圖に於て衝撃抗力に二つの最大値と一つの最小値とがある、而して0°C以下の低温に於ては黒心可鍛鑄鐵も普通の鐵鋼と同じく非常に脆弱となる、けれども常溫より少しく高まると急に衝撃抗力を増し200°C

位までは衝撃に對し充分な抗力を持つて居るが、200°C以上600°C位の温度範圍にては多少衝撃抗力が劣つて來る、それで焼鈍後可鍛鑄物の歪直ほしをやる時は常溫にても宜しいが100°C~200°Cの間が最も適當した温度となる、200°C乃至600°Cの間に於て衝撃抗力の小となるのは地鐵をなして居るフェライトの性質によるもので、可謂青色脆性に類似のものと思考せらる、600°Cを超すと材質は再びこの衝撃抗力を増して750°Cに於て最大値に達する、750°C以上温度を高むるときはA1變態が起り焼鈍炭素がオーステナイト地鐵に擴散して行き、衝撃抗力を低くする様になる。

(ii)、普通に焼鈍せられた黒心可鍛鑄鐵を、450°Cに加熱した後水中冷却せる試料

此結果を擧げると第16表及び第19圖に示す如くなる、圖に於ける兩軸の表示する數値は前項と

同様。

第 16 表

試料 番號	試験 溫度	衝擊抗力 (<i>kg.r.m.</i>)	破 面 状 態
223	-186°	{0.350 0.350	白 色
229	-19°	{0.350 0.753	"
230	23°	{0.516 0.516	ク
231	50°	{1.006 1.006	"
232	55°	{0.940 1.006	"
233	79°	{1.276 1.006	"
234	91°	{1.276 1.346	"
235	99°	{1.742 1.417	"
236	109°	{1.711 1.711	"
237	132°	{4.185 4.387	黒暗色、良
233	143°	{4.592 4.592	"
239	198°	{4.801 5.119	"
240	297°	{3.006 3.936	"
241	411°	{3.540 3.540	"
242	448°	{2.950 3.986	此溫度以上になると酸化膜に依り破面色判然せず
243	510°	{3.130 3.403	"

以上の結果より 450°C より急に冷却さるゝか又はガルバナイズさるゝ可鍛鑄鐵の衝擊抗力對溫度の曲線は、普通に焼鈍せられた可鍛鑄鐵の夫れと類似の形をとるが、その衝擊脆性の範圍が廣く、約 100°C 程高溫側に及ぶ。如斯常溫に於て脆き可鍛鑄物を 130°C まで加熱するときは脆性を失ひ優良なる可鍛鑄物と同様の衝擊抗力を與ふるのである、けれどもこれを再び溫度を下げて常溫まで冷却し、その溫度にて衝擊試験を行へば又元の脆性の材質に戻ることを忘れてはならぬ、かかる實驗は數回繰返し行はれたもので凡て同様の結果を與へて居る、300°C 以上の溫度に於ける試

驗結果は前項と同様に説明することが出来る。

(iii)、黒鉛化終了後 650°C より空氣中にて比較的速急に冷却せられたる黒心可鍛鑄鐵

第 17 表及び第 20 圖は此等の試料につき試験せられた結果を示すものである。

第 17 表

試料 番號	試験 溫度	衝擊抗力 (<i>kg.r.m.</i>)	破 面 状 態
244	-188°	{0.815 0.938	白色、不良
245	-19°	{3.598 4.035	黒暗色、良
246	0°	{4.245 4.245	"
247	20°	{4.387 4.286	"
243	99°	{3.986 4.085	"
249	218°	{3.790 4.085	"
250	297°	{3.598 3.888	"
251	412°	{2.951 3.508	此溫度以上は酸化膜のため破面状態判然せず
252	446°	{2.951 3.040	"
253	510°	{2.861 3.040	"
254	595°	{2.973 2.951	"
255	688°	{3.040 3.132	"
256	790°	{4.952 4.801	"

此場合には、液體空氣の溫度の如き極冷溫度を除けば衝擊抗力は常に高く、青色脆性による衝擊抗力の低下も割合少くなる、これより考ふるに、優良なる黒心可鍛鑄鐵を得るには黒鉛化完了後 Ar1 點と 600°C の間の溫度より水中又は空氣中にて急速に冷却せし方がよいこととなり、一方作業の速急が得られ一舉兩得となる、但しかゝる作業を実施するには適當なる設備と、深甚の注意とを以つてそれに當らなければならぬ。

5. 熱處理を施した可鍛鑄鐵の顯微鏡的觀察及び硬度試験。加熱冷却間の電氣抵抗の測定

一般にある金屬材料に組織的のある變化が起る

ときには必ずその物理的性質に變化を來すものである、例へば 0.3% の炭素を含む鋼を A1 變態點以上の溫度に加熱した後急冷をするときは非常なる硬度及び抗張力の増加を來し、同時にその靱性及び衝擊抗力を著しく低下せしめる、これは一種の組織的變化に依るものにして即ちパーライトの組織がマルテンサイト組織に變化したために外ならない。然るに此可鍛鑄鐵のエンブリットメントなる現象を生ぜしめる熱處理は 300°乃至 550°C の危險區域の溫度まで加熱し然る後水中又は空氣中にて急冷するとき起るものにして、その急冷し始むる溫度が Ar1 點より遙かに低いのであるから、其處に組織的變化の起るものと考へることが出來ない、著者は前述の實驗結果に加へて、熱處理せる可鍛鑄鐵及び熱處理を施さぬものにつき常溫に於て顯微鏡組織並びに硬度試験を行ひ且つ加熱冷却間に於ける電氣抵抗を測定してこのエンブリットメントなる現象を説明せんと試みた。

下記の如き 3 種の熱處理を施した可鍛鑄物についてその研磨及び腐蝕の度合を出来る限り同様にして、顯微鏡的觀測をなした。

- (1) 黒鉛化完了後極めて緩かに冷却す。
- (2) (i) の熱處理せるものを 450°C に加熱した後、水中冷却、
- (3) (1) の熱處理せるものを 650°C に加熱した後、水中にて冷却、

けれども顯微鏡の倍率 100 倍の視野にて此等各種の組織を比較したのであるが、倍率低く過ぎたる爲めか殆んど差異を認める事が出來なかつた。

次に種々の溫度から水中冷却した可鍛鑄物の硬度を測定した、その結果を挙げると第 18 表の如くなる。

第 18 表

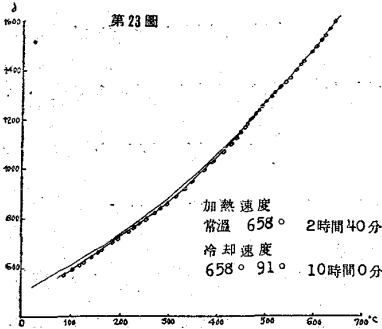
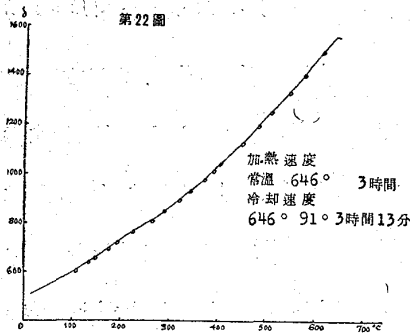
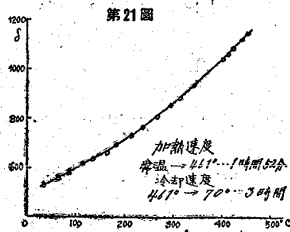
試料 番號	熱 處 理	ブリネル 硬 度	破面状態
1	熱處理せぬもの	105	黒 暗 色
2	50°より水中冷却	107	〃
3	100°	103	〃
4	150°	107	〃
5	200°	109	{白色部を少し混 じた黒色
6	250°	107	白 色
7	300°	116	〃
8	350°	105	〃
9	400°	116	〃
10	450°	107	〃
11	500°	107	〃
12	550°	112	黒 暗 色
13	600°	114	〃
14	650°	110	〃
15	700°	131	〃
16	750°	166	〃

上の試験にて破面状態は試験後これを打折りて檢した結果でそれにより大體の衝擊に對する抗力の大小が豫想さるゝものである、此結果より見るときは 700°C 以上に加熱した時に僅かの硬度の増加あるのみでそれ以下の溫度にては餘り著しき變化は認められぬ、これより 450°C 位から水中冷却したからとてその材料の組織に何等の變化を來すものと認めることが出來ない、けれども前述の如く 300°乃至 500°C の間の危險區域から急冷をなすことによつて衝擊抗力に著しき影響を及すのである、又此處には述べて居らぬが抗張試験も行つて見たが多少はその抗張力に影響はある、けれども衝擊抗力程著しくはない。

次に、650°C から水中にて急冷した可鍛鑄鐵と、焼鈍したまゝのものに就いて、加熱及び冷却しつつその電氣抵抗を測つて見た、これに用ゐられた試料は、直徑 5mm、長さ 200mm の圓棒で、測定の方法は此圓棒の 2 點 100mm 離れた處に於ける電位降下をポテンシヨメーターで測定した、溫度は此の圓棒の中央部に 2mm の穴を穿ちそれに白金、白金ロジュームの熱電對を挿入して測定した、

圓棒に流るゝ電流は3アンペアに一定に保つた。

實測の結果を挙げると第21圖乃至23圖の如くなる。圖に於て縦軸は尺度望遠鏡の讀みで、電氣抵抗に比例する數、横軸は試料の溫度を表はして居る、第21圖は燒鈍したまゝの可鍛鑄鐵について450°Cまでの電氣抵抗と溫度との關係を表はして居るが、此の加熱曲線は冷却曲線と全く一致して居る、第22圖及第23圖は650°Cから水中冷却をなした可鍛鑄物の試料につき同様な關係を示して居る、以上の三つの場合に於てはその加熱速度は凡て同様になつて居るが冷却速度は別々になつて居る、第22圖の場合には此冷却速度は加熱速度と殆んど等しくなつて居る故加熱冷却の兩曲線は互に一致して居ることが分かる、第23圖に於ける冷却速度はその加熱速度よりも著しく緩かになつて居る、而して此場合には加熱冷却兩曲線は全く一致しては居らぬ、冷却の際に於ける電氣抵抗は450°C位までは殆んど加熱の際の夫れと一致して居るけれども此溫度以下に於ては冷却曲線の方が僅かに加熱曲線の下に



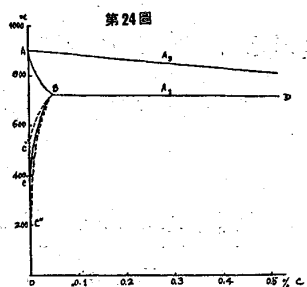
なつて居る、此等の結果から推するに、650°Cより急冷した可鍛鑄物の電氣抵抗は常溫まで緩かに冷却した鑄鐵の夫れに比し僅かに大であることが知らるゝ。

一般に、ある合金が他の元素と固溶體を作る場合には、その電氣抵抗はこの元素が固溶體とならず一種の機械的混合の状態にある場合に比し増加するものである、此事實より上述の電氣抵抗の減少は此可鍛鑄鐵に極く僅かに溶け込んで居つた炭素がその結晶の境界面に分離して來るに依るものなる事が豫想せらる。これについては次章にて述べる事とする。

6. 可鍛鑄鐵の熱處理に依るエンブリットメントに對する理論

可鍛鑄鐵のエンブリットメントに關しては二三の報告はあるが、その成因の理由については何等の説明も與へて居らぬ、此現象はニツゲルクロム鋼の燒戻脆性¹⁾に似たもので、兩方とも650°Cより極緩冷却に依つて生ずるものである、それ故に上記燒戻脆性と同様な理論が此可鍛鑄物のエンブリットメントにも當筋るのであるが、既述の如くその現象が燒戻脆性の場合よりも可なりに複雑であるので此の場合には二三の假定を設けることが必要となる、此理論の主要點は要するに、可鍛鑄鐵の地鐵に含まれて居る極く少量の炭化物が地鐵から析出して來てフェライトの結晶境界に沈澱し、これがその材質の脆弱性の原因となるのである、此事實を明瞭ならしむる爲めに第24圖に示さるゝ如く鐵-炭素系狀態圖の鐵側を參考とすれば便利である、此圖に於て縦軸は溫度を横軸に炭素量を示して居る、此圖に於てBD線はA1點

¹⁾ 本多、山田、東北帝大理化報告 16 (1927) 307



を表はして居り、BC線はフェライトに対する炭化物の溶解線を意味し、その縦軸に対する傾斜の度合は材質の化学成分に依り定まるものと思

ふ、若し可鍛鑄鐵を Ar1 點下より緩かに冷却するときは、フェライト中に極く少量ではあるが(Bにて示さる炭素量)溶解して鐵と一種の固溶體を作つて居つた炭素はそのフェライトの結晶粒の境界に沿ふて炭化物として折出して來る。

既述の實驗の結果から想像するに此の固溶體を作つて居る炭素が地鐵より析出してフェライトの結晶境界に沿ふて炭化物を形成するには相當の時間を要するものである、而して又此の結晶粒の境界に沈澱した炭化物の性質については次の様な推定をなすことが出来る。

- (1)、此炭化物は若しもそれを 300°乃至500°Cの間の溫度より急冷をなすときは、常溫に於て極めて脆弱となるものである。
- (2)、(1)の如く危険區域の溫度より急冷せられ、常溫に於て非常に脆弱となつた炭化物は 130°C 以上の溫度に於ては脆性を失ふ。
- (3)、可鍛鑄鐵を Ar1 點下より常溫まで極く緩冷をなすときは、此炭化物は常溫に於て決して脆いものではない。

如斯脆性の炭化物が若しもその鑄物の表面に於

ける結晶粒の境界に沈澱する時は、その効果は恰もその表面に一種の弱點即ち非常に鋭き切目様のものが入つた結果となる、故に普通に焼鈍せられた可鍛鑄物を 450°C より水中又は空中にて冷却するときはその材質は常溫に於て脆性となるのである、けれどもかかる熱處理により脆性となつた材質も 130°C 以上の溫度に加熱すると脆性を失ひ、優良なる可鍛鑄物と差異がなくなる。

若し BC 線より高い溫度例へば 650°C より急冷せられた可鍛鑄鐵はその地鐵の結晶粒の境界面に炭化物の如きものなく何等の弱點が生ぜぬ故、例へそれを危険區域の溫度まで再び加熱して急冷せられても何等の脆性を表はさぬのである。

一般にある變態の起るためには多少の時間を要するものであるから加熱の場合に起る變態點は冷却の場合に起る夫れよりも高い、而してその溫度の差は加熱及び冷却の速度に關するものであるが、又その材質の化學的成分に依りても左右さるゝものである、それであるから、可鍛鑄鐵の場合に於てフェライトに対する炭化物の溶解線 BC (第 24 圖)の位置はその加熱及び冷却の速度に關するもので加熱の場合には BC'、冷却の場合には BC'' の如き位置をとる。

以上の理論に依つて、前述來の種々なる實驗の結果及び實地作業上に於て起る事柄を説明することが出来る。

終りに臨み、此論文の公表を許された戸畑鑄物株式會社專務取締役村上正輔氏に謝意を表す。