

本邦可鍛鑄鐵の發達

理學博士 菊田多利男*

I. 總 說

可鍛鑄鐵の起原は可なりに古く、西曆 1722 年佛蘭西の物理學者 Réaumur 氏が白銑鑄物を微粉狀の赤鐵鏝にて包み、赤熱状態に於て數日間保持して、脆き鑄物を粘き軟い鑄物に變態せしめた實驗が濫傷となつて歐洲諸國に該工業の發展を見たのである。その後西曆 1826 年に至り亞米利加合衆國の Seth Boyden 氏が自國産の低硫黃の銑鐵を使用して、當時歐洲諸國にて製造しつゝありし可鍛鑄鐵よりも優秀なる可鍛鑄鐵を創造したのである。此の改善された可鍛鑄鐵はその破面黒心を呈して居る故これを黒心可鍛鑄鐵 (black heart malleable cast iron) と呼び、これに對し歐洲諸國にて實施されて居る可鍛鑄鐵はその破面白色金屬光澤を呈して居る爲め、これを白心可鍛鑄鐵 (white heart malleable cast iron) と稱して居る。

白心可鍛鑄鐵は主として脱炭作用を行ふて可鍛性を持たせるのであるから鑄物の周縁 1 mm 乃至 1.5 mm 位は脱炭出來てその部分だけ軟く粘くなるが、内部は脱炭されず硬い脆い性質を保持して材質均等でない。これに反して黒心可鍛鑄鐵は黒鉛化作用に依つて化合炭素を分解して鐵と遊離炭素とに分けて可鍛性を附與せしむるのであるから、此の作用は内部まで行き渡り、材質の様な可鍛性の鑄物が得らるのである。従つて白心可鍛鑄鐵の方は鑄物の厚さ 12 mm 位を限度とした薄物に適するが、鑄物の厚みが少し大となると可鍛性が著しく低下してしまふ。黒心可鍛鑄鐵の方は 3 乃至 50 mm 位までの可なり厚い鑄物までも内外殆ど一様な材質を得ることが出来る。此の點より米國は殆ど黒心可鍛鑄鐵の製造に變つたのであるが、主として白心可鍛鑄鐵を製造して居つた歐洲諸國でも次第に此の黒心の方に轉向せんとする傾向になつて居る。

以上の如く可鍛鑄鐵の製造法が脱炭作用より黒鉛化作用へと進歩したのであるが、當初は化學分析も幼稚で勿論金相學等もなかつたので黒鉛化に對する理論的研究と云ふものはやつてなかつた故種々の不可解の問題が數多くあつ

た。最近に至つて化學分析法も發達し且つ顯微鏡試験法が金屬の研究に一新機軸を現はす様になり、加ふるに高速度の鐵道、電氣鐵道並に自動車等の交通機關の發達は此可鍛鑄鐵の品質向上を促したので此工業に従事して居る主宰者はこれが研究に努力する様になつた。米國では Enrique Tonceda や H. A. Schwartz 等の技術者を出し相當の研究報告を出して居る。ために品質も非常に改善せられ其の利用の範圍も各方面に擴められたのである。

本邦にては此の種可鍛鑄鐵の生産高は少いのであるが、此の方面の研究は歐米のそれに比し少しの遜色もない、學理的研究に於ては澤村博士の「白銑の黒鉛化に對する各種元素の影響に就て」なる研究報告があつて、歐米に於ける研究の多くが凡て斷片的で餘り纏つて居らぬに對し、氏の研究は白銑に各種の元素を種々の分量含有せしめてその黒鉛化作用に對する各元素の影響を見た、此の種の研究があつたものゝ、尙ほ多少定性的に傾いて居り、實地工業に利用するには幾多の研究考察が必要であつた。澤村博士が此種の研究をなしつゝあつた頃、余等は實地工業の作業に關聯して可鍛鑄鐵製造理論及び實際につき研究をなして居た。此研究の結果、白銑より黒心可鍛鑄鐵になるまでの理論を確立し遂に二段焼鈍法を創成した。これを實地工業に適用し、益々國産可鍛鑄鐵の品質の向上を計り遂に其の製品を海外市場に向つて流出するに至つた。

II. 可鍛鑄鐵の製造原理

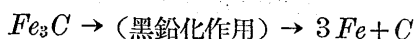
1. 概 說 前章で述べた様に可鍛鑄鐵には白心の可鍛鑄鐵と黒心の夫れと二種類あることが了知せらる、此の外最近製出さるゝ高張力可鍛鑄鐵がある、この特殊の可鍛鑄鐵については後章に於て簡単にその成生及び性質を述べることにする。白心にしろ黒心にしろ可鍛鑄鐵を作るには初め白銑鑄物を作る必要がある。此の白銑鑄物を焼鈍して可鍛鑄鐵を作るのであるがその原理の主要件は二者各々違ふので従つてその生成物は可なり異なるものである。

白銑鑄物を顯微鏡にて擴大して觀ると寫眞 (1) の如くパーライトの基地に遊離状態のセメントが顆粒狀に分

* 戶畑鑄物株式會社安來製鋼所

布せられて居り、その質硬く脆い、かゝる白銑鑄物を處理して粘りの強い性質を附與したいと云ふ希望から種々研究せられた結果此の鑄物を微粉狀の酸化鐵にて被覆して高溫度で長い時間保持して脱炭せしめて白心可鍛鑄鐵を得たのであるが、現今製造せられて居る此種可鍛鑄鐵にも 0.6~0.8% 位の Si を含有して居るのであるから、鑄物が高溫度に加熱せられて居る間に脱炭と共に後説する様な黒鉛化作用も伴ひ起るので、鑄物の内部には球形のテンパー・カーボンが存在して居る、けれども白心可鍛鑄鐵に靱性を與ふるものは酸化鐵の爲めに脱炭せられて生じたフェライト組織の部分であるから白心可鍛鑄鐵の製造原理と云ふものは脱炭作用に歸せらるべきもので黒鉛化作用は起つて居らんでもよい理である。それで白心可鍛鑄鐵の製造原理としては白銑の脱炭の機構及びその現象に就ての溫度、酸化鐵其他の影響を述べればよいと思はれる、白心可鍛鑄鐵は主として白銑鑄物を脱炭せしめて製造されるものであるが其の脱炭される量は自ら制限があつて現今歐洲にて製造せられて居る白心可鍛鑄鐵は表面から 1.0mm 乃至 2mm 位が脱炭されてフェライトとなり内部はパーライト組織の地に球形のテンパー・カーボンが分布されて居る次第であるから、3 乃至 4mm 位の肉の薄い鑄物は此の白心可鍛鑄鐵を以て作つても宜しいのであるが、少し肉が厚くなると表面は脱炭して柔軟な材質となるが、内部は硬くて脆い性質となり全體として不均一な品質の鑄物となるので一般には推奨さるべきものでない。

これに對して黒心可鍛鑄鐵は同じく白銑鑄物を焼鈍して製造せらるゝのであるが、その原理は主としてセメントタイトの黒鉛化作用により鑄物全體を一様なる品質にするのである、即ち



セメントタイトの黒鉛化と云ふ現象はその影響する條件が非常に多く簡単に片附けられぬものである。それで同じく白銑鑄物を高溫度で焼鈍するのであるが白心の方は脱炭作用が主となり化學成分の制限を受けること、黒鉛化作用を主として作らるゝ黒心可鍛鑄鐵に比し少ない。即ち白心可鍛鑄鐵は鑄物自體が普通肉の薄い小物が多く且つ黒鉛化作用は第二となつて居るのであるから珪素の量を少くし硫黄を高めることが出来る。これに對し黒心可鍛鑄鐵の方は相當肉厚の完全な白銑鑄物を作りそれを完全に黒鉛化せしめて柔軟な性質の鑄物とせんければならぬ、現今歐洲諸國で

製造されて居る白心可鍛鑄鐵の白銑時の化學成分は大體次の如くなつて居る。

第 1 表

C %	Si %	Mn %	S %	P %
28~33	0.60~0.80	0.4 以下	0.20 位	0.15 以下

これより見ると S が可なり多く含まれて居ることがわかる。この點が黒心可鍛鑄鐵の白銑と違ふ一つの點である。

次に優良なる黒心可鍛鑄鐵を作るにはその白銑鑄物の化學成分を次の如き範圍に制限せんければならぬ。

第 2 表

C %	Si %	Mn %	S %	P %
24~27	0.8~1.1	0.4 以下	0.05 以下	0.20 以下

これ等の元素がセメントタイトの黒鉛化に非常に影響するものであつて、白心可鍛鑄鐵の製造に於ては白銑鑄物の珪素含有量は第 1 表の範圍より多くても少くてもその結果に餘り影響せぬのであるが、黒心の場合になると Si が第 2 表に示されてゐる範圍より少く含む時はその焼鈍時間は著しく長くなり製産費が高む、又 Si 量が多過ぎる時は S の含有量が比較的少ない關係上白銑時に於て多少黒鉛を混ざる様になり、即ちモツトルが生ずる事となり、その後の焼鈍作業に於て如何に完全にその作用を行はせても強力なる良い鑄物が得られない、それで黒心可鍛鑄鐵を製造する工場は常に白銑時に於ける化學分析をなして第 2 表の範圍内の化學成分を有する白銑鑄物を作り完全に黒鉛化をなさしめる必要がある。

2. 白銑の脱炭 白心可鍛鑄鐵を作るには第 1 表に掲げた様な化學成分の白銑鑄物を焼鈍用ポットに装入し、それに酸化鐵を隙間もなく充填して焼鈍爐に整列せしめて 900° 乃至 1,000°C の高溫度にて 3~4 晝夜或はそれ以上も加熱して充分脱炭を行はしめて製造さるゝのであるが、此の脱炭の機構をよく調べて見ると酸化鐵の量は必ずしも焼鈍用ポットを充填せしむる程多量を要せぬのである。酸化鐵は熱傳導率が頗る悪いのであるから、斯る充填物を多量に使用する事はポット内部に熱を傳導せしめ難くなるのみならず酸化鐵を加熱するに餘分の熱量を要するので爐の熱効率を悪くするもので實際上面白くないのである。

今白銑の小片と酸化鐵適量とを密閉器中に納め、電氣抵抗爐の平等高溫度帯に置いて加熱して見ると此の密閉器中の瓦斯の量が時間の経過と共に次第に増加して行く事が知られる、茲に發生した瓦斯は CO 及び CO_2 の混合瓦斯であることが瓦斯分析に依つて知られ、色々研究した結果白銑

の脱炭は次の如き機構に依り行はれ行くものであることが確められた。即ち容器中にあつた酸素が先づ白銑中の炭素に作用して CO 瓦斯を發生させる、この瓦斯は次に酸化鐵中の酸素と化合して CO_2 となり、これが又白銑中の C と化合して 2 容積の CO となる、如斯作用が白銑の炭素と酸化鐵中の酸素との間に逐次行はれ白銑は脱炭せられ、一方酸化鐵は還元せられて行き容器内の瓦斯量は脱炭量に比例して次第に増加して行く。つまり酸化炭素が白銑と酸化鐵との間に一種の觸媒として働き脱炭還元をなすものである。而して脱炭される白銑棒は相當の厚みを有するものであるから、その表面が脱炭された後は内部より此の表面へ擴散して來る炭素を待たなければならぬ關係上脱炭の速度と云ふものはそう迅速なものではなく、従つて白銑鑄物と酸化鐵とはそれ等が密着して居つても又別々に離れて居つてもその脱炭の速度には餘り變りがないのである。

脱炭劑としてヘマタイト微粉を使用した場合に、著者の實驗に依ると $900^{\circ}C$ にて 10 時間加熱した間に脱炭した量を酸化鐵の使用量に對して曲線を畫いて見ると第 1 圖の如くなる、これより實際の作業の場合でも白銑鑄物の重量の 20% も使用すれば充分脱炭を行ふ事が出来ることが了知せられる、それ以上の酸化鐵の使用は徒らに熱量の吸收となり又爐壁よりポット内部への熱の傳導を妨ぐる等不經濟となる。

白銑の脱炭に對する温度の影響は普通の化學變化と同様で、温度高い程脱炭量は對數曲線的に増加して行く、第 2 圖は著者の實驗結果である。此の外白銑の化學成分もその脱炭に多少影響するものであるが後説する白銑の黒鉛化の場合の如き著しき影響はない。

白心可鍛鑄鐵となる白銑中には多量の炭素の外に相當量の Si も含んで居るので此の脱炭の外に黒鉛化が起る、けれども此の黒鉛化作用は白銑中に含まれて居る S に妨げられて初めは起り難いのであるから鑄物の表面は充分脱炭が進み、内部のみが黒鉛化せられ temper carbon が球状となり pearlite 基地中に點々と散在する様になる、白心可鍛鑄鐵にては S の含有量が多い關係上 pearlite は黒鉛化せぬ、且つ脱炭なる現象は鑄物の表面より生起し、内部よりの炭素の移動は極めて緩かなるものであるからその脱炭は鑄物の表面極く小範圍に限られる、従つて白心可鍛鑄鐵は餘り厚い鑄物には不適當のものであることが容易に想像される。

3. 白銑の黒鉛化作用 白銑鑄物に於ては炭素は凡て化合の状態即ち cementite として存在して居る故硬くて脆い性質を有して居る、この cementite を分解して鐵と遊離炭素となして黒心可鍛鑄鐵を生成するのであるが、この黒鉛化に伴ふ鑄物の體積は膨脹をなす、故に此の黒鉛化に伴ふ體積の膨脹を測定して白銑の黒鉛化の進行の状況を見ることが出来る。

直徑 7mm, 長さ 100mm の白銑棒を作り、これを熱膨脹測定装置に装置し、均一なる高温帶中にて加熱して行くと、試料は黒鉛化と共に次第に膨脹することが知らる、此際試料の化學成分は第 3 表の如くである。

第 3 表

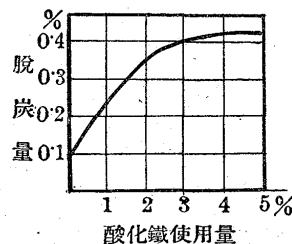
試料番號	C%	Si%	Mn%	S%	P%
No. 1	2.20	1.10	0.23	0.033	0.173

斯る白銑試料を加熱して $900^{\circ}C$ に達して後その温度に 25 分間保つて後爐中にて冷却した、その延びと温度との關係を示すと第 3 圖曲線 1 の如くなる、圖に於て横軸には温度、縦軸には延びに正比例する尺度上の読みをとつて居る。

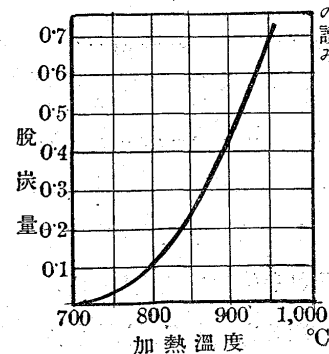
$900^{\circ}C$ に保持して居る間に少しく延びて居るがこれは遊離セメントイトが黒鉛化を始めた事を示すものであるから、その状況を見るために常温まで冷却してから顯微鏡寫眞を撮つて見ると寫眞(2) の如くなる、これに依つて明かなる如く黒鉛化した炭素の大部分は遊離セメントイト粒の周圍に現はれて居る。

$900^{\circ}C$ にて尚ほ長く保持して恰度遊離セメントイトの分

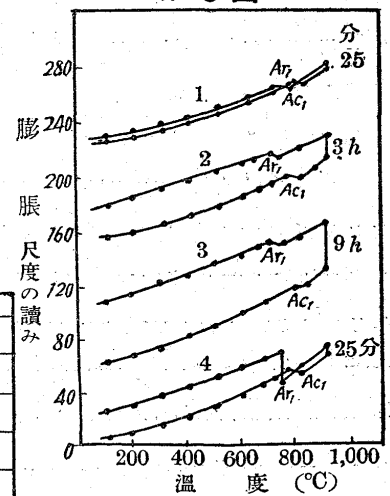
第 1 圖



第 2 圖



第 3 圖



(×100 を約 1/2 に縮寫)

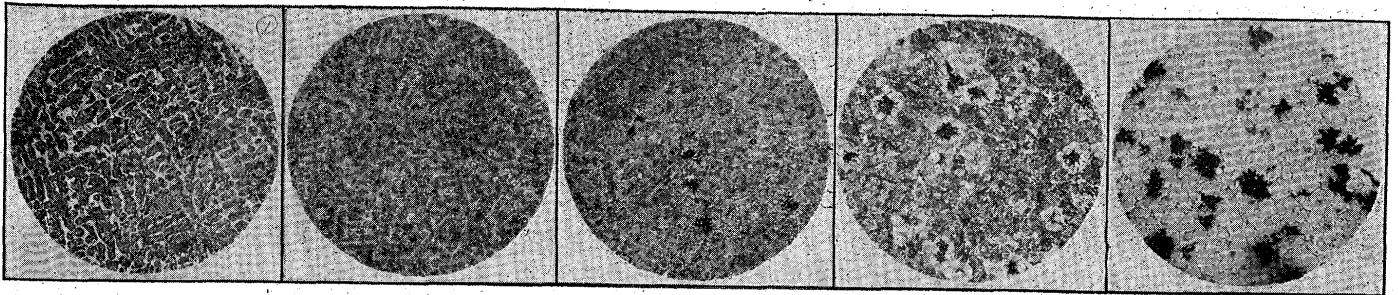
寫眞第 1 白銑鐵

寫眞第 2

寫眞第 3

寫眞第 4

寫眞第 5 黒心可鍛鑄鐵



解が半分程進みし時、即ち3時間にして爐中冷却すれば第3圖曲線2及び寫眞(3)を得、此の寫眞を見ると始めに黒鉛化せるCは互に凝集して粒は大となりなほ黒鉛化が盛に進みつゝあるが想像せらる。900°Cにて9時間保持する時は遊離セメントの黒鉛化は殆んど終りをつげ(第3圖曲線3)その顯微鏡組織を見ると〔寫眞(4)〕遊離セメントは全く影を留めぬ様になり地はパーライトとなり、その間に地鐵(Siを少量固溶體に含む所謂シリコフェライト)に圍繞された炭素粒の散在して居ることが知られる、此炭素粒を普通焼鈍炭素(外國では temper carbon と云ふ)と稱して居る、かくして得られたものはパーライトの残留するため未だ黒心可鍛鑄鐵とならず抗張力強大であるが延伸度少く可鍛性に乏しい材質である、所要の可鍛鑄鐵は此のパーライトの存在を許さぬ、このパーリチック・セメントをも黒鉛化せしめなければならぬ。Fe-C系の状態圖よりも知らるゝ如く900°Cの様な高温度にては初め白銑であつたものも、その温度に相當するだけのCを固溶體に含むオーステナイトの地に遊離セメントが分布せられて居るもので此の遊離セメントが黒鉛化した後は黒鉛化はそれ以上進むこと出來ず、温度を降下せしめるに従つてAcm線に沿ふてセメントが析出し間もなく黒鉛化して了ふ、温度が降つてAr₁點に至るとセメントは全部地鐵と共に析出してパーライトとなる、斯くの如き理由にて此のパーライトを分解するにはAr₁點以下の温度にて長時間加熱してその黒鉛化を進ませることが重要である。それで前述の如く900°Cで9時間保持して遊離セメントを全部黒鉛化せしめた頃Ar₁點まで冷却しその直下の温度即ち730°Cにて23.5時間保持して置くとパーライトも全く黒鉛化し終りて寫眞(5)に示す如く完全なる黒心可鍛鑄鐵となる。

以上述べ來りたる事より黒心可鍛鑄鐵となるべき白銑の黒鉛化は一定の温度で全部完了するものではなく主として

二段に起るものと考へられる、即ちA₁點以下の温度で起る遊離セメントの黒鉛化とA₁點以下で起るパーリチック・セメントの黒鉛化とに分けることが出来る。茲に於て前者を第一段黒鉛化と名づけ後者を第二段黒鉛化と稱し、白銑の二段焼鈍法が考案されたのである。

此等二段の黒鉛化作用は加熱温度、化學成分、鑄物の厚さ、熔湯の温度等に依り影響される所大で、これを詳説することは此處に於ては省略する。

III. 特殊可鍛鑄鐵

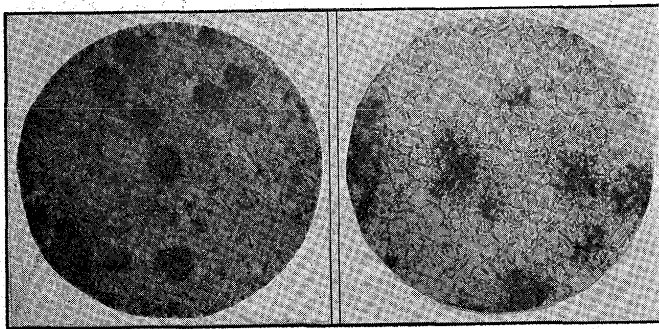
以上は歐洲諸國にて主として製造されて居る白心可鍛鑄鐵と米國及び我國にて主として製造されて居る黒心可鍛鑄鐵とに就て述べたのであるが、此種工業の進歩は新により抗張力の高き鑄鐵を要求し研究される様になつた。白心可鍛鑄鐵は前述の如く主として脱炭により鑄物に柔軟性を與へるのであるから肉厚のものには適せぬとは言ふまでもないことである、即ち普通の抗張試験片位の鑄物を適當に處理した場合の白心可鍛鑄鐵の抗張力は普通30~45 kg/mm²であつてその延伸率は3~6%あるに過ぎぬ。之に對し黒心可鍛鑄鐵は相當の肉厚の鑄物まで製作可能で適當に處理された黒心可鍛鑄鐵の抗張力は30~45 kg/mm²、延伸率は10~20%或はそれ以上に達するものもある。

最近發明された特殊可鍛鑄鐵として最も普遍性のあるものは普通の黒心可鍛鑄鐵を更に熱處理を施して抗張力を45~55 kg/mm²まで高めたものである、此の場合の延伸率は6~12%に低下するも實用上支障はない。又普通の黒心可鍛鑄鐵が130位のブリネル硬度を表はすのに對し此の可鍛鑄鐵の硬度は150~200に高まり従つてその磨耗率は少くなる。如何にして此種高力可鍛鑄鐵が得らるゝか簡単に述べて見ると、普通の黒心可鍛鑄鐵は前述の如くferriteの地に temper carbon が粒状をなして分布せられて居る、若しかゝる顯微鏡組織の材質の棒を引き切るとき

は ferrite の部分が延び黒鉛粒は延びることが出来ず切斷面はデクザク状となりその底部に黒鉛粒が存在するに至りその切斷面を上部より見るときは金屬面よりの反射光線は目に達すること能はず斷面は暗黒色に見ゆるのである。即ち黒心可鍛鑄鐵に於ては temper carbon 及びその周圍は延伸すること少ないのである、それで此の temper carbon の周圍のみを硬くするときは延伸性を餘り害することなしに抗張力を増すことが出来る、この點に着眼し黒心可鍛鑄鐵を加熱し A_1 點まで達しその溫度に適當の時間保持するときは temper carbon は一部 γ 鐵中に擴散し行く、此の保持する時間を鑄物の大きさに依り適當に採りて後冷却するときは一度 γ 鐵中に擴散した C は A_{r1} 變態を起し temper carbon の周圍に pearlite として殘留し鑄物の抗張力を高めることが出来る、而して此の carbon の擴散

寫眞第 6

寫眞第 7



白心可鍛鑄鐵の内部組織

高力可鍛鑄鐵

基地はパーライト、テンパー・

カーボンは球形

量を適度にするときは延伸性を餘り害することなしに希望の抗張力を得ることが出来るのである。(寫眞第7は此の高力可鍛鑄鐵の一例)。

以上述べた高力可鍛鑄鐵は基地は一部 ferrite 一部 pearlite より成立して居るが、第二の高力可鍛鑄鐵は基地全部を pearlite とし粘りをつける爲めに此の pearlite を球狀化するのである、此の pearlite を球狀化せしむるには A_1 點の下にて長時間保持するか、鑄物を焼入れて後 A_1 點よりやゝ低き溫度にて保持するか、二三の方法があるが實際工業にて施行され得る方法は前者の方法即ち A_{r1} 點以下の溫度にて長時間保持する方法である、普通の黒心可鍛鑄鐵は前述の如く A_{r1} 點以下の溫度にて長時間保持するときは A_1 變態に依り出來た pearlite は全部分解して了ふ、それで pearlite を黒鉛化することなしに長時間保持せしむるには第二段黒鉛化を妨ぐる元素を含ませしむることが必要である、茲に種々なる研究を経て Mn を 0.8~1.2% 含有せしめ上の目的を達したのである。かくして出來た可鍛鑄鐵の抗張力は $60\sim70\text{ kg/mm}^2$ となり延伸率は 6~10% となる、硬度は約 200 (ブリネル) に高まり磨耗に對する抗力も大となるのである。但し例令球狀化した Pearlite ではあるが、その粘りは到底 ferrite の基地を有する黒心可鍛鑄鐵には及ばず、衝擊抗力は黒心可鍛鑄鐵の場合の約 $1/2\sim1/3$ の間になつて居る。