

技 術 資 料

球 状 黒 鉛 鑄 鐵 の 概 要

岡 本 正 三*

OUTLINE OF THE SPHEROIDAL GRAPHITE CAST IRON

Masazō Okamoto

Synopsis :

Data published so far and some results obtained in the author's laboratory are outlined. Spheroidization of graphite in iron can be achieved in the wide range of composition: C 2.4~4.2%, Si 0.8~6.0%, Mn 0~1.0%, P<1.0%, S<0.2%, although Mn<0.4%, P<0.05% and Si 2.0~3.5% are needed for the high ductility of the iron as cast. The total carbon content must be 3.5% plus in order to avoid the high shrinkage in casting, but C 4.0% plus sometimes causes the flotation of graphite in massive castings. The less the sulphur content is, the easier the spheroidization becomes.

In irons treated with magnesium, it is probably adsorbed on the surface of the graphite nodules precipitated from melt, but the binding condition of Mg atoms in irons obtained by tempering the white irons of the same melt differs from that in nodular irons as cast.

The chemical, physical and mechanical properties are varied in the wide range by the chemical composition and the microstructure of the ground mass embedded with the spheroidal graphite. The irons are stronger and tougher than the ordinary gray iron, and have generally both marked shock resistance and heat resistance.

I. は し が き

1864年英國の Sorby が金屬の組織を見ることに初めて顯微鏡を用いたのを契機として材質の組織的研究が開始され、20世紀に入るとともに金相學の發達は目ざましいものがあつたのであるが、而も尙今日より僅かに3年ばかり前まで鼠鑄鐵に見られる黒鉛は常に片狀 (Flake) に出るものであるとする考えは異論なしに受け入れられて來た。もつとも今度の大戦前に出た獨乙の文献¹⁾には鑄造したまゝの鑄鐵中に粒狀の黒鉛の出現を見たことが寫眞によつて示されているが、鑄鐵中の黒鉛を熔融狀態から意識的に粒狀にすることは成功していなかつたし又そのような試みもなかつたようである。換言すれば、今より3年ばかり前までは熔融した鑄鐵から分解する黒鉛は片狀に出るものとするのは殆ど常識となつていたのである。従つて又片狀黒鉛の機械的性質に及ぼす切欠効果からして“鑄鐵は脆いものである”とするの

も當然のように考えられていた。然るに1947年このかた鑄鐵中の黒鉛を熔融狀態から球狀に出現させることに成功して、從來の鑄鐵に對する考へ方は大きな修正を餘儀なくされるに至つた。鑄鐵に關心をもつ學者、技術者、及び使用者が異常の興味をもつてその發展の動向を注視する球狀黒鉛鑄鐵とは如何なるものであるか、以下その概要を述べてみたい。

II. 鑄鐵發達の展望

鑄鐵が鋼と異るところは化學組成の上では主としてCとSiとが前者に於て多いことであり、顯微鏡組織の上では鑄鐵には鋼に現われない黒鉛なる軟かくて且脆弱な相が含まれていること、又素地は大體鋼の場合と似ているがSi含量が幾分高くなつてゐること等である。従つて今日までの鑄鐵の機械的性質を改良せんとする試みは鑄鐵組織の素地と黒鉛との兩面に於て鑄鐵を検討すること

* 東京工業大學、工博。

あつた。元より素地と黒鉛とを全く切り離して取扱ふことの出来ないのは言を俟たないところであるが、今日までの鑄鐵材料の發達を素地の検討と黒鉛の調整の二方面に分けて考へてみることは甚だ好都合である。

先づ素地に就てみるに、鼠鑄鐵の地を ferrite にすることは鑄物を弱くするから地を pearlite にすることが考へられた。所謂パーライト鑄鐵がそれである。鑄鐵の素地は本質的には鋼の組織と選ぶところがないから熱處理によつて素地を改良せんとする試みも行われた。焼入れを行つて素地を martensite にするときは黒鉛の共存するために一層材質を脆化して鑄物に強度を與へることには餘り役立たないことが知られた。併し焼入した鼠鑄鐵を焼戻することによつて素地を troostite とし或は sorbite とするときは鑄鐵の種類によつては單に鑄込みのまゝの材料よりも遙かに強い材料が得られた。これに關連して焼きの侵透性、質量効果が検討されて Ni-Cr 鑄鐵などの合金鑄鐵が發達した。鑄鐵を非磁性にしたり、耐酸性や酸化抵抗性をもたせたり或は脆性を減少させる目的からして合金元素を多量添加して素地を austenite にすることも行われた。更に又鑄鐵の素地を bainite にした acicular cast iron なるものも出現した⁴⁾。普通の可鍛鑄鐵は熱處理することによつて素地を ferrite にして粘靱性を附與したものである。

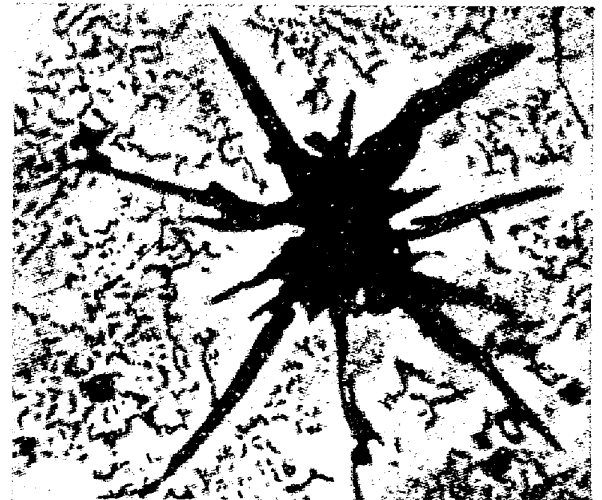
次に黒鉛に就てみるに、黒鉛の大小、形状及びその分布を調整することが行われて來た。軟鑄鐵に見るような片狀の大きな黒鉛(第1圖)を避けてよく彎曲した餘り大きくない黒鉛を均等に分布させること、黒鉛を少くすること等に努力が拂われた。そのために熔銑爐に於ける鋼屑の使用が提唱されたり熔銑の過熱が強調された。所謂高力鑄鐵を熔製することに對する Emmel, Piwowarsky, Hanemann, わが國では石川登喜治博士等の功績は特筆すべきであらう。併し、高力鑄鐵といへども抗張力として 30kg/mm^2 を越すものを得ることは容易でなかつた。そのあまり強力ならざる主な原因は黒鉛が片狀を成しているためであつた。片狀の形をとつた黒鉛はその占める容積に對して比較的大きな表面積をもち且その片(flake)の先端は一般に鋭く尖つている。これが材料を弱く且脆くしている所以である。即ち、片狀黒鉛は何等機械的強度に寄與するものでなく、逆に金屬素地の連續性を破壊し、更に片の鋭い先端によつて金屬素地中に應力集中の切缺(notch)を提供するのである。従つて例へば金屬素地が抗張力 95kg/mm^2 で高い粘靱性と弾性とをもつ場合でも、片狀黒鉛の存在するときは屢々抗張力を 15kg/mm^2 程度にまで減少させるし、衝撃抗



第1圖 (× 150)

力と粘靱性とを殆ど測定出來ないぐらいの数値にまで低下させる。

一體鑄鐵に現われる黒鉛の形状には、飯高一郎博士が指摘された如く、塊狀と片狀との二つがあり、その集合の様式によつて種々の黒鉛組織を生ずる。第2圖はその一例を示したものである。この組織も亦大部分が大小の片狀黒鉛より成つていて塊狀とみなされる部分は放射狀に發達した黒鉛の中心ぐらいのものである。實に1947年以前に於て熔融狀態の鑄鐵より分離する黒鉛を人為的に塊狀にすることは全く出來なかつたのである。併し、一方強く粘り鑄鐵が白銑の黒鉛化によつて得られてい



第2圖 (× 600)

た。即ち、1826年 Boyden が白銑の燒鈍によつて黒心可鍛鑄鐵の製造に成功したのである。この鑄鐵中の黒鉛は第3圖に示す如く凡て塊狀を呈しているから鑄鐵の機械的性質は一段と改良されたわけである。かくして、今日所謂 American malleable iron の強度は抗張力 $42\sim 50\text{kg/mm}^2$ で延伸率 $3\sim 1\%$ 、或は抗張力 $32\sim 38\text{kg/}$

mm² の場合は延伸率 18~8% を示すに至っている。黒心可鍛鑄鐵は今日広く實用されるとは云へ、その製造には一旦白銑をつくり之に長時間の焼鈍処理を施さねばならぬ缺點をもっている。従つて、鑄込んだまゝで可鍛鑄鐵のような粘い鼠鑄鐵が出来ないものであらうかと云ふ



第3圖 (× 800)

ことは鑄鐵の技術に携る凡ての人の久しい間の念願であつたのである。この待望の鑄鐵が今日では夢でなく、遂にこゝに述べようとする球状黒鉛鑄鐵 (Nodular graphite cast iron, Ductile cast iron, Spheroidal graphite cast iron Spherulitic graphite cast iron 等とよぶ) として實現された。實に鑄鐵の工業的性質は存在する黒鉛が球状をなすときに最高度に發揮されるのである。この種の鑄鐵の製造に成功したのが 1947 年のことであるからまだ生れたばかりの材料である。

III. 球状黒鉛鑄鐵の沿革

今度の第二次大戦中に英國鑄鐵研究協會 (B.C.I.R.A.) の Morrogh を中心とする研究者達は鑄鐵中黒鉛の生成に關する基礎研究に於て長足の進歩を遂げた。1947 年 Morrogh は Ni-C, Ni-Fe-C, Co-C の諸合金中の黒鉛の形狀を自由に調整出来ると云ふ興味ある論文⁵⁾ を提出した。即ち、Morrogh 等は鑄造時分離する黒鉛を片状にも球状にも意のままに出現させることを示し、球状にするにはそれら合金中の S と強い親和力をもつ Ca-Si, Ca-Mg 等の添加物を加へればよいとした。續いて Morrogh 等はこれらの合金と鑄鐵との極めて似通つた點のあることから鑄鐵に於ても黒鉛を球状に出すことが可能であるに相違ないとなし遂に Ce 處理によつて鑄鐵中に球状黒鉛組織を出現させることに成功した。一方その頃既に米國に於ては Mg 處理によつて鑄鐵中の黒鉛を球状化することが知られていたやうで、London に於ける

Morrogh 等の Ce 處理に關する論文⁶⁾ の中で Mg 處理法の發展⁷⁾ が引合いに出されている。Mechanite Metal Corp の Smalley と B.C.I.R.A. の Morrogh との間の通信⁸⁾ の交換をみると球状黒鉛鑄鐵の最初の發見者が誰であるかあまり判つきりしないが、何れにしても之等の人たちの黒鉛球状化に對する功績は特筆すべきものがある。

米國の International Nickel Co. や Mond Nickel Co. は Mg 處理法を早くより研究して居り⁹⁾¹⁰⁾¹¹⁾ 米國特許として International Nickel Co. のものが二つ出ている。その一つは No. 2, 485, 760 で 0.4% 以下の Mg を含む球状黒鉛鑄鐵、他は No. 2, 485, 761 で 2.5~4% C, 1.5~4.5% Si, 0.01~2.5% Mn, 0.02~0.04% Mg を含む性質の改良された鼠鑄鐵となつている。Braidwood 等によれば Mg 處理法が實際の鑄物工場の規模で繰返し試験されてその實用性が確信をもつて認められたのは 1948 年 5 月 5 日のことであると記されている。

さて Ce 處理法では處理後鑄鐵中に 0.02% 以上の Ce が残留することを必要とするがこの Ce が高價であるのと燃え易いため Fe-Ce 合金を使用するのが便利である。しかしこの方法は Ce なる金屬が甚だ高價であることの外之を添加する鑄鐵の化學組成が過共晶の炭素量即ち C を $4.3-1/3 (Si+p)$ 以上含有すべきこと、 $P < 0.1\%$, $S < 0.02\%$ の如く極めて純度の高いものを必要とすること等の制限があるために、Mg 處理法が紹介されて後は Mg 法ほどには注目されぬやうになつている。これに對して Mg 處理法では Mg なる安價な金屬を用ふる上に鑄鐵の化學組成に Ce 處理ほどのきびしい制限がないから海外からもこれに關して多數の報告¹¹⁾¹²⁾¹³⁾ が紹介され、わが國でも主としてこの處理法の研究と工業化に注意が向けられている。尙、わが國は占領下の關係でこの種の鑄鐵が外國文献によつて一部の人たちに初めて紹介されたのは 1949 年春頃のことである。

IV. 球状黒鉛鑄鐵の製造

恐らく今日の段階は球状化の諸方法が今後發展して最後に到達する結果に言及するには餘りに時期尙早の感があるが前にも少しく觸れたやうに現在では Mg による處理は價格の點、その適用性、處理の信頼性等の關係から Ce 處理法に比べて可成り有利であると考へられるから、以下 Mg 處理による球状黒鉛鑄鐵の問題のみをとりあげて述べることにする。

第4圖は Ni-Mg 合金を使用して Mg を添加した鑄鐵の鑄込んだまゝの組織を例示したものである。原料鑄

鐵が適當であり且、Mg 處理が適當に行われるときはこの寫眞に見るようにその黒鉛は、可鍛鑄鐵の燒鈍黒鉛に見る不規則の塊状とも違つて美しい球状を成して出現するのである。

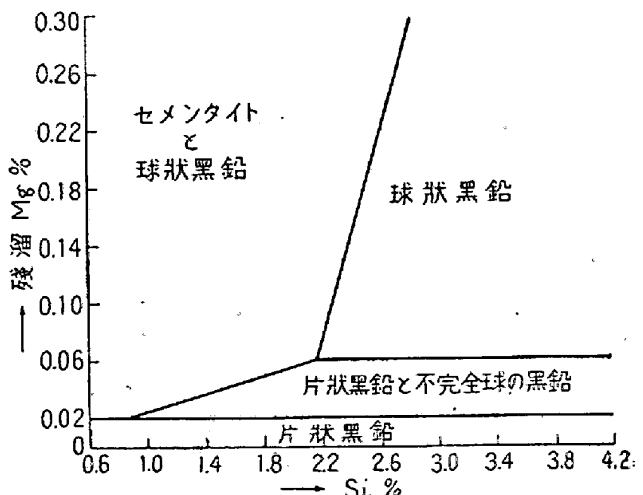


第4圖 (× 300)

(a) 鑄鐵の化學組成

鑄鐵の素材として如何なる化學組成のものが適當であるかは研究者によつて區々であるが單に黒鉛の球状化を完成することのみから化學組成を見るときは、筆者の今日までの結果では C 2.4~4.2%, Si 0.8~6.0% Mn 0~1.0%, P < 1.0%, S < 0.2% の廣い範圍で可能である。併し、鑄鐵としては P や S は少なければ少いほど好都合であるし、鑄込んだまゝで鼠銹を得て而もその機械的性質のよいものを得るためには C 3.2~4.0% Si 1.8~3.5% がよいようである。個々の元素についてみるに C が球状を呈するときは C の量が少しぐらい多くなつても鑄鐵の諸性質を害する程度は小である。このことは鑄物の可銹性の點から極めて好都合のことであり、一般に 3.5% 或はそれ以上がよいとされる。Si は Fe 中に固溶して Silico-ferrite をつくり、この固溶體中の Si 含量が 4% を越すときはこの相自身が延性を失つて來るから Si 含量を多くすることは黒鉛が球状化されても鑄物の延性は期待出來なくなる。又 Mg が鑄鐵に合金するときは鑄物は白銹になり易いから、もし鑄鐵中に Si 含量が少な過ぎるときは鑄込んだまゝで延性のある鑄物は得られなくなる。適當な Si 含量は C 含量や P 含量とも關係があるが大體に於て 2.5% 前後である。次に Mn について見るに普通の鼠鑄鐵ではこの元素の存在は S の惡影響を除去するために必要とされるが Mg 處理の鑄鐵では Mg が合金化する前に先づ強い脱硫作用が行われて鑄鐵中の S 含量は 0.05% 以下になるから、この種鑄鐵に於て Mn の存在はさほど意味はな

くつて來る。Mn が存在しても特に球状化に困難することもないが、衝擊抵抗、伸び及び絞りに於て高い値を示す ferrite 型の ductile iron を得んとすれば Mn 含量は約 0.25% に止めたい。Mn は pearlite を幾分安定化する。耐摩耗性のよい強力な pearlite 型の ductile iron を得ようとすれば 0.5~0.7% Mn の合金化した方がよいが、この場合は ferrite 型のものに比べて衝擊抗力も伸びも共に小さくなる。P は 0.05% 程度の少量であつても或は 1.0% に及ぶ多量になつても球状黒鉛の生成を妨げるものではない。併し、P はやゝ脆い Phospho-ferrite をつくる外に脆い磷化鐵として現われるからその含量がほと 0.1% 以下でなければ nodular iron は出來ても眞の ductile iron とはならない。處理すべき鑄鐵中の S は 0.2% の多量であつても、熔湯の溫度を降下させないように加熱しながら Mg を多量に添加するときは黒鉛をよく球状化することが出来る。鑄鐵中 S の存在は添加する Mg を脱硫の方に消費させてその合金化を妨げるから鑄鐵中の S は少いほど Mg の効果を大ならしめることになる。Mg によつて球状化が完成されるときは鑄鐵中の S は 0.05% 以下になる。球状黒鉛が出る場合の鑄鐵中に殘留する Mg 量については谷村博士¹⁵⁾の研究や米海軍研究所の Myskowski 等¹⁷⁾の研究があつて何れも約 0.06% Mg の殘存を認めている。第5圖は Myskowski-Dunphy の結果であつて黒鉛の形狀に及ぼす殘存 Mg と Si の影響を示している。尙之は鑄鐵中の C が 2~3.7% で適用されると云ふ。



第5圖 (Myskowski-Dunphy)

(b) Mg の添加について

Mg は脱酸、脱硫及び脱窒に作用するが黒鉛の球状化は單に之等の作用のみによつて起るものではなく、球状黒鉛が得られるときには Mg が微量ながら合金しているこ

とは前述の通りである。熔銑に純 Mg を添加するのは、Mg の沸點が 1110° 又添加される熔銑の溫度が $1300\sim 1450^{\circ}$ であるから、Mg は容易に氣化し爆發的に燃焼して熔湯を四散させる。そのため熔銑への添加が作業者に危険であるばかりでなく熔銑中 Mg の歩留りは甚だ低く僅かに數%を出ない。この缺點を除くために Mg の濃度を低めた種々の合金が用ひられる。

Mg_2Si の形で¹⁶⁾添加することは添加時活潑な作用があつて感心しないし、Mg を含む Al 合金も同様である。一體 Mg 合金として具備せねばならない條件は (1) 黒鉛の球狀化が確實に行われるものであること、(2) 添加時の作用が激しくないこと、(3) 合金の製造が容易であつて、均一な一定の化學組成をもつものが出来ること、(4) 合金が有害な gas を含んでいたり、保存中に風化崩壊したりせぬこと、(5) 多量の返り材を考慮すれば鑄鐵中に合金元素の蓄積を來たさぬこと等である。従來 Mg 50% 以下の Cu-Mg, Ni-Mg 等の合金が好んで用ひられるが、何れも Mg 含量が 30% 以下にならぬと添加時の作用は靜かにならない。20% Mg-Cu 合金と 20% Mg-Ni 合金との作用を比較¹⁶⁾するに、前者は後者よりも爆發作用が少いにも拘らず前者の方が黒鉛の球狀化に對して信頼度が少い。この理由は恐らく、Mg-Cu 合金では Mg も Cu も Fe に對して合金性が悪く且 Mg と Cu との間では Cu_2Mg , $CuMg_2$ 等の、Fe によつて分解され難いところの化合物が生ずるためであらう。又 Mg-Ni 合金では Ni が Fe と甚だ合金性のよい元素であるために $MgNi_2$, Mg_2Ni 等の化合物は容易に分解し、従つて熔銑中の作用が激しくなるが、同時に Ni の急速な合金化に伴つて Mg も亦鑄鐵によく作用する結果球狀化作用の確實性が高まるものと考へられる。前記の Myskowski 等は作用が緩慢で且確實な Mg 8% の Fe-Si-Mg 合金を用もっているがこの合金は比較的熔製が困難である。合金としては Fe 含量の高いものが合金元素の累積を來たさぬことから望しいが、Fe に富む Mg 合金の熔製は簡單にはゆかない。又 Ni 含量の高いものは cost の點で問題がある。更に Mg の添加と同時に Si が多量に鑄鐵中に持ち來たされるような合金は特殊の鑄鐵を除いては歡迎されない。尙又、合金としては比重の大きなことや黒鉛化を妨げるような元素を含まないことも望ましい。筆者は製造の容易な且黒鉛球狀化の効果の大きな合金として Mg-Fe-Si-Ni-Cu 合金や更に之に Al を少量加へた多元合金の使用を提唱した。¹⁷⁾ 近着の外國雜誌を見ると Desy¹⁴⁾ も亦同様 Mg-Fe-Si-Ni 合金を使用している。尙鑄研の草川氏等は Ca-Si-Mg 合金を用ひてよい結果

を得ている。

Mg の鑄鐵中の歩留りは使用する鑄鐵の種類によつても異なるが一般に Mg 合金中の Mg 含量の少いほど歩留りは向上する。又添加する際の熔銑の溫度が低いほど合金化し易く 20~30% の歩留りを得ることは困難でない。¹⁸⁾ 併し、特殊の場合を除いて Mg 處理によつて熔銑の溫度は 100° 近くも降下するから實際作業で Mg 處理に成功するには Mg 添加前の熔銑の溫度が 1400° 附近にあることが肝要である。

Mg の添加量は Mg として鑄鐵に 0.5~1% 添加するように秤つて加へる。Mg の添加量が少な過ぎれば、大きな片狀黒鉛が小さな所謂 compacted flake graphite になるのみで尙球狀黒鉛の出現に至らない。それでもこの状態は脱硫が進み且片狀黒鉛が球に近づいた小片となつてくるからその機械的性質は Mg 處理を行わないものに比べて可成り改良される。逆に Mg の添加量が多過ぎるときは球狀黒鉛は出ても素地が白銑になり易い。

Mg の添加法には二つある。一つは Mg 合金を豆粒大に碎いて之を、滓を除去した熔銑の表面に添加することである。この操作に於ては使用する Mg 合金としては作用の穩かな確實性の高いものを特に選んで使用する必要がある。他は Mg 合金を熔銑内に押し込む方法で、この場合は挿入と同時に熔銑を入れた取鍋の上に蓋ができるようにするのが作業を安全にして好都合である。表面添加は小規模に行うときによいが、如何なる Mg 合金を使用する場合でも添加と同時に Mg が少なからず燃焼して失われるのを免れることは出来ない。之に對して熔銑内に押し込む方法では Mg が浮き上つて燃焼する程度が少く、よい合金は一層効果が現われるし、純 Mg を使用しても球狀化の目的を達することが出来る。

Mg 處理が終ると直ちに Ferro-silicon 又は Si を用ひて所謂 inoculation (接種) をする。接種には Si として 0.4%~0.6% を細粒にして用ふる。その作用は黒鉛の出現を容易にさせるためである。Si の添加時期のみを變へて、鑄鐵の化學組成、處理條件等を凡て一定にした球狀黒鉛鑄鐵の組織を見ると、接種を行わなかつた方は、黒鉛が少しく大きくてその數が少く ferrite の發達程度も小さいが、之に對して inoculate した方は黒鉛が數多くて小さく又 ferrite もよく發達していた。得られる鑄鐵中の Si 濃度を一定にして inoculate する Si の濃度を變化してみるに、Si 添加量が約 0.4% より多くなつても黒鉛化を助長する形跡は認められなかつた。處理せんとする鑄鐵中に Si が多いか或は Mg 合金中に Si が多く含まれているときは特に inoculation を行ふ

必要はなくなる。

(c) Mg の黒鉛化に及ぼす作用

O 2.5~3% 程度で Si 0.5~1.5% 附近の鑄鐵の湯に Mg 処理を施す研究は目下筆者の研究に於て進行中であつてその詳細は他日發表の機会をもちたいが、目下得られている興味ある現象は Mg 処理を施さない可鍛鑄物用の熔鉄が鑄造時白鉄として凝固するとき、Mg 処理を少しく行つてから鑄込めば片状黒鉛をもつ鼠鉄になり、Mg 処理が更に進めば再び白鉄となることである。之は少しの Mg 処理によつて脱硫や脱酸が進む上に Mg 合金の方から黒鉛化を助長する元素が合金して、そのために片状黒鉛が出現するのであり充分の Mg 処理によつては Mg の合金化が黒鉛化を妨げる方向に作用するから白鉄となるのである。0.8%Mg を入れるような Mg 合金の添加で 2.66%C, 1.52%Si, 0.43%Mn, 0.145%P, 0.050%S, 0.01%Cr なる白鉄の地に球状黒鉛の出現したものを得た。この鑄鐵で径が 40mm 以上もの砂型鑄物になると中央部分は周囲と違つて幾分 mottle な破面をもつてくるを認めた。併し、この中央部の mottle は徐冷されたために球状黒鉛が多量に出た部分であつた。

Mg 処理をした球状黒鉛中に残存する ledeburite や Pearlite が短時間の焼鈍によつて容易に分解するのは主として使用された鑄鐵が C% 高く又 Si% もきほど低くないことに起因している。

又それは Mg 処理によつて S が 0.04% 程度にまで減少しているためである。Mg が果して固態に於て黒鉛化を助長するか否かは、鑄鐵に含まれる Mg 含量以外の成分が凡て同一の濃度であるような鑄鐵を用ひて比較検討せねばならぬのであつて、今直ちにこれについて決定的ことは云へない。

(d) 鑄造性について

Mg 処理を行ふときは熔鉄の表面に比較的硬い滓を生ずるが之を除去しき下の鑄鐵の流動性は普通の鑄鐵と殆ど變らない。注意すべきは Mg の添加によつて熔鉄の温度が、鑄物が出来ないぐらいに降下し易いことであつて處理温度としては 1450~1400° を選ぶべきである。又、凝固の際の收縮度が著しいから押湯を大きくとらねばならない。その鑄造方案は可鍛鑄鐵や鑄鋼に準じてたてるべきであらう。Pin hole が鑄物の外周に近く出易い¹¹⁾がこれを除去をするのに Mg 合金を豫熱してから使用して好結果を得た例がある。

(e) 鑄物の肉厚の影響

概して、鑄物の肉厚の影響は普通鑄鐵の場合よりは著しく小さい。Donoho¹²⁾ の實驗結果は第 1 表に示す如く

で、肉厚の増加による抗張力、硬度、彈性率の減少は比較的少である。尙この場合の實驗に供した試料の分析値

第 1 表 肉厚の影響

試料の直径 (mm)	抗張力 kg/mm ²	ブリネル硬度	彈性率 10 ⁶ kg/cm ²
15.2	70.0	254	0.58
22.2	64.7	235	0.53
30.4	56.6	229	0.48
50.8	54.5	201	0.42
76.2	53.8	201	0.42

は 3.08%C, 3.26%Si, 0.019%S, 0.44%Mn, 0.02%P で、50-50 の Ni-Mg 合金を Mg として 0.56% 添加し 0.40%Si で inoculate している。他方 Desy¹⁴⁾ は化學組成が 3.6%C, 1.4%Si, 0.3%Mn, 0.05~0.07%S, 0.07%P なる Cupola 鉄を 4ton 取鍋にとつて、60%Si, 0%Mg, 10%Ni, 10%Fe なる合金を 2% 添加して質量の影響をしらべている。この場合鑄鐵中に残留する Mg 量は 0.06~0.10% であり径が 90mm 以上の肉厚になると充分に黒鉛が球状化しているのみでなく 90% が ferrite となつていた。第 2 表は氏の結果を引用したものである。之を見ると黒鉛の大きさは肉厚が増すと共に次第に大きくなることが知られる。而して肉厚が大きくなるときは球状黒鉛が鑄物全體に均等に分布するのでなく、諸所に群をなして集つてくる傾向が著しくなる。又 Desy の超共晶組成 (3%Si の鑄鐵, 0.6%Si の接種) での實

第 2 表 肉厚と黒鉛の大きさ

肉厚, mm	黒鉛球の大きさ, μ
30	50
80	55
150	90
250	120
350	130

第 3 表 肉厚鑄物の機械的性質

鑄物に於ける位置	抗張力 kg mm ²	延伸率 %	ブリネル硬度
150mm cylinder 中心部	49.6	8.4	187
250mm cylinder 中心部	49.1	6.0	184
150mm 肉厚の實體	51.0	5.5	180

驗結果を見ると重量の大きな鑄物の頭部には薄い層を成して黒鉛の偏析集合するのが認められている。Kuniansky¹⁰⁾ も實地の作業で黒鉛の浮上に困難な問題があることを述べて居り、4.0~4.2%C を含む鑄鐵を使用するときの方が 3.5~3.6%C のものを取扱ふ場合よりも黒鉛浮上の點で遙かに問題を起しがちであるとしている。

第3表¹⁴⁾は肉厚が著しく大きくなつた場合の機械的性質の變化を例示したものである。

(f) 再熔解について

次に再熔解の場合の組織についてみるに、1350° 以下の低温度で酸化を防止しながら再熔解するときは再び球状黒鉛組織が得られる²⁰⁾が普通の再熔解では黒鉛の形状は片状に戻る。再熔解でなくても Mg 添加の処理後はなるべく早く型に鑄込むべきで、鑄込みが遅れるときは時間の経過と共に黒鉛の形状が悪くなり約 20 分以上で Mg の効果は消失して片状黒鉛となる¹⁶⁾。熔接は再熔解を伴うが電弧熔接で熔接部がやはり球状黒鉛組織を示した例がある。¹⁶⁾

V. 球状黒鉛の生成過程

如何なる理由によつて黒鉛が球状化されたかと云う根本問題の解明は現在のところ至難と云ふべく、徒らに data のない推論の廻轉に墮する恐れなしとしないからこの問題はしばらくをくとして、球状黒鉛鑄鐵に於ける黒鉛の生成過程と Mg が如何なる作用を及ぼしているかに就て少しく述べよう。

黒鉛を球状に出させる鑄鐵の化學組成はかなり広い範囲をもつているから黒鉛の晶出過程が種々あることは容易に推測されよう。筆者の研究室に於て目下判明していることは黒鉛が Kish としてどの固相よりも先に現れる場合が最も多いこと、Cu が2~3% 含まれる或種のものでは黒鉛は初晶の如く發達する austenite の中心部分に出現するのみでなく、最後に凝固したとみられる Cu に富む赤黄色粒を含む ledeburite 中のこの赤黄色粒の内部或はこの粒に接する小粒として現われること、等である。その詳細は他日に譲るとして最も屢々見られる樹枝状 austenite 中の球状黒鉛 (第6圖; 3.9% C, 0.6% Si



第6圖 (× 110)

凝固中急冷) については筆者は次の如く考へている。熔銑は Mg 處理によつて先づ C に対する溶解度を減少して球状黒鉛を分離し、その結果生じた C に飽和した融液はその後、黒鉛と austenite とを共晶出するがその場合晶出する黒鉛は既出の黒鉛に合一するものもあるし獨立した黒鉛粒となるものもある。之等の黒鉛は片状に成長することが出来ないからこれを取圍んで共晶の一成分たる austenite が恰も初晶のように發達しても不思議ではあるまい。而して黒鉛化が如何に急速に起るかは、鑄込みのまゝで固態に於ける Bull's eye 組織の發達からも容易に推測されることであつて、高温度で晶出した austenite は温度が降ると共に次々と黒鉛を既出の黒鉛上に沈澱させる。かくして所謂安定系の平衡をもつて凝固を終るときは ledeburite が現われないが、最後の殘存融液が黒鉛との接觸なくして過冷する場合には ledeburite を現わすものとする。低 C, 低 Si 鑄鐵を Mg 處理して一度白銑となし之を後の燒鈍で黒鉛化する場合の黒鉛は普通の可鍛鑄鐵中の黒鉛よりは遙かに球状に近づいた形をとつてくる。しかし之は一般の球状黒鉛鑄鐵の黒鉛の生成過程ではない。

Mg の合金化が黒鉛の球状化と關係があることは論を俟たない。飯高博士²¹⁾は球状化の原因は黒鉛の表面張力の變化にあると考へ Mg が黒鉛表面に吸着をされていることを述べている。Mg が黒鉛の球状化と直接的な因果關係をもつことに相違はない。筆者の研究室では Mg 處理を施さぬ鑄鐵から Mg の添加量を順次高めた鑄鐵までの試料について黒鉛の球状化と Sulphur print の關係をしらべているが、印畫紙上の黄褐色印畫は Mg 處理を施さぬもので濃い Mg の處理と共にその色は褪せ、更に Mg の添加量が増して球状黒鉛組織が現われるときに赤褐色の着色をすることを認めた。Mg 處理前の印畫はまさに Sulphur print であるが球状化後のものゝ印畫は脱硫後の Mg の存在に起因した特殊の print である。Novák²²⁾ は C と Mg の間に Mg_2C_3 や MgC_2 が生成せられ之が水によつて Acetylene 等の炭化水素を發生して分解することを述べているが、このような現象が球状黒鉛鑄鐵に見られることは處理後の鑄鐵より發する臭氣から推測される (不純な C_2H_2 ならば臭氣がある) ことで、印畫紙上の印畫は酸によつて分解した炭化水素の作用によつて生じたものとする。然るに同一化學組成のもので徐冷して球状黒鉛組織を示すものを急冷して白銑組織に近づけるときは印畫の色は著しく褪せる而して、同一の融液より一つは徐冷して ferrite と graphite とにしたものと、他は一度白銑にして後燒鈍によ

つて ferrite と graphite との共存組織となしたものと
の print は、前者に於て濃い赤褐色の印畫を興へ後者
に於ては殆ど着色を見ない。これより推測するに、同一
の Mg 處理を施した鑄鐵でも融液からの球状黒鉛の出
現の場合と固態に於ける球状に近い黒鉛の出現の場合と
では Mg 存在状態即ち鑄鐵中の Mg 原子の結合状態に
著しい相違があるであらう。之等の點については研究室
の依田君の協力を得て更に明確な結論を得るよう努力
中である。

Von Keil²³⁾²⁴⁾ 等によつて提唱されたところの片状黒
鉛發達の核をなすものが主として Silicate であるとす
る説は球状黒鉛發達の問題を考へるときに一應の考慮が
必要であらう。強力な脱酸力をもつ Mg が Silicate の
存在をどの程度許しているであらうか疑問である。

VI. 球状黒鉛鑄鐵の性質と用途

黒鉛の形状は Mg 處理が充分でないときは Compacted flake になるが Mg 處理が充分に効けば球状となることは前述した通りで、その形状が機械的性質に及ぼす影響は第4表¹⁰⁾に例示する如くである。又片状黒鉛鑄鐵ならば Hook の法則に従はないがこの種の鑄鐵となれば鋼の舉動に近づき、かなり大きな應力まで應力と歪線圖は直線となる。

第4表 黒鉛の形状と機械的性質

黒鉛の形状	抗張力 kg/mm ²	降伏點 kg/mm ²	延伸率 %	ブリネル硬度
Flake	32	—	0	230
Compacted flake	55	—	—	260
球 状	71	52	3	275

鑄鐵の化學組成を變化することによつて、或は鑄造時の冷却速度を變化したり更に熱處理を施すことによつて種々の球状黒鉛鑄鐵が得られる。近着の外國雜誌によれば實に ductile iron family には6つの基本的な型があるとされている²⁵⁾。その詳細は不明であるがその型とは之を要するに球状黒鉛組織の素地の種類に歸すると考へる。即ち、僅かの黒鉛を含みその素地をなして austenite (低温で分解する) と ledeburite とが存在する白鉄型、又素地の種類に應じて pearlite 型, ferrite 型, bainite 型, austenite 型等があるのであらう。筆者は現在、之等の型の球状黒鉛鑄鐵が將來詳細に論議されるであろうことを豫則するのであるが、現在判つてのことだけでも豫想される如く各方面の用途に優秀な成績を得

ている⁹⁾¹⁰⁾ 球状黒鉛鑄鐵にも種類が多いからその諸性質が相當に幅廣く變化出来ることは間違いないところである。従つてこの新材料は交通機械、工作機械、農業機械、紡機等に廣く使用されることになるらう。

鑄鐵は鑄込んだまゝで熱處理を施さないで使用することに最大の關心があるとすれば、この場合に最も多く使用される鑄鐵は ferrite 型と pearlite 型とになるのであらう。而して、この場合 ferrite 型と云つても多少の pearlite を混じえるのが普通であらう。之等の鑄鐵は延伸率 1~18%、抗張力 70~40kg/mm²、降伏點高く疲勞強度は片状黒鉛鑄鐵より遙かに高い。又耐衝擊性は普通鑄鐵の 5~10 倍である¹¹⁾。ferrite 型は延性に富むが耐磨耗性が低く軟質である。之に對して pearlite 型は延びは少いが耐磨耗性がよくて強力である。機械切削性は普通鑄鐵よりも更に良好である。又減衰能は普通の鼠鑄鐵に劣るが鋼の減衰能よりは遙かに鼠鑄鐵に近いと云える¹⁰⁾。Lynchburg Foundry Co.¹⁹⁾ では熱處理しない鑄造状態のまゝで抗張力 56kg/mm² 以上、延伸率 4% 以上、ブリネル硬度 240 以下を狙つてこの種の鑄鐵を製造しているが、斯様に適度の延性と強度をもち而も機械切削が可能なところを選ぶときは鑄物の大部分は ferrite の素地をもつたものとせねばならない。Lynchburg Foundry Co. の Kuniansky は使用する Mg 合金中の Ni 含量が少いほど得られる鑄鐵の延性が改善されると述べているのは尙検討を要すると思ふ。

球状黒鉛鑄鐵の破面が鋼の破面に似ているのは黒鉛が表面積の最小な形をとつていたためと必ずしも黒鉛の存在する位置で破壊が進行しなくなるからである。球状黒鉛の場合は片状黒鉛の鑄鐵と異り、酸化性瓦斯が片状黒鉛に沿うて鑄鐵中へ侵入する様な現象は起らないから、繰返し加熱するときも、所謂鑄鐵の growth は起り難くなる¹⁰⁾。従つて耐熱鑄鐵としての利用も期待される。尙又、水壓鑄物としても好適であると傳えられる¹⁰⁾

International Nickel Co.²⁵⁾ ではこの材料について種々の耐蝕試験が行われつゝあつて、どの種の ductile iron が最も耐蝕性がよいか検討中の由である。

Mg 處理したものは白鉄となり易いから、この處理を可鍛鑄物用の熔銑に施すことによつて單に脱硫に基づく黒鉛化速度の増大や質の向上のみでなく肉厚 25mm 以上の鑄物の製造も可能とならう。又 pearlite 型の球状黒鉛鑄鐵に軽い焼鈍を施して之を容易に ferrite 型の鑄鐵にすることが出来ることは、延性と耐衝擊性とを必要とする部品に廣い用途を見出すであらう。併し前にも述べた如く特に延性と耐衝擊性とを期待するには鑄鐵中の

合磷量が 0.1% 以下であるようにせねばならない。

熔解爐としては高周波電氣爐、アーク爐は勿論好都合であるが經濟的な Cupola で之を行うことが出来る。而して鹽基性の Cupola を使用することは蓋し高 C, 低 S の銑をつくるに好都合であろう。その場合は熔銑の溫度を充分高めるように心がけねばならない。

可鍛鑄鐵や鑄鋼の從來使用された分野にこの材料が侵入することが必至であろうが、今日迄 U. S. A. で特許の實施權を得た會社は 50 社にのぼりそれら鑄造工場は何れも月産 100ton に近いこの種の鑄鐵を製造しつゝある。又英國に於ても既に 4 社がその實施權を得て居り、近い將來續々と實施權の讓渡を申し出るものがあるかと云われる。

以上よりこの新材料が既に實驗室の試験段階より工業化の段階に急速に移りつゝあることが知られる。わが國に於ける實施が特許の問題でどの様に發展するものか不明であるが一日も早く之が工業化されることが望しい。International Nickel Co. の Reese はこの新材料を Young Giant と評し、1950 年の生産は莫大な量にのぼるのであると述べている。工業化について解明せねばならぬ問題は山積されている。鋼に於て問題となる凡ての問題がこゝに取上げられねばならない。現に焼きの滲透性に関する Jominy 試験、表面硬化の目的の高周波焼入試験等が活潑に行われだした。この新材料の活用は 20 世紀後半の金屬界に與えられた歴史的課題と云つて過言でないであろう。(昭和 25 年 3 月寄稿)

文 献

- 1) Hanemann, H., Schrader, A.; Atlas Metall-
ographicus 2 (1936), Section 5, Sheet 37,
Berlin;
- 2) Nipper, H., Giesserei, 22 (1936), 27
- 3) Grober, H., Hanemann, H., Archiv f. Eis-
enhüttenwes., 11 (1937), 199
- 4) Braidwood, W. W.; Foundry Trade J., 87
(1949) No. 1735~1737, 649, 685, 717,
- 5) Morrogh, H., Williams, W. J.; J. Iron and
Steel Inst., 155 (1947), 321
- 6) Morrogh, H., Williams, W. J.; J. Iron and
Steel Inst., 158 (1948), 306
- 7) Foundry Trade Journal, 84 (1948), 463
- 8) Iron Age, 1949, May 19, 100
- 9) Gagnebin, A. P., Millis, K. D., Pilling, N.B.;
Iron Age, 163 (1949), Feb. 17, 77
- 10) Braidwood, W. W., Busby, A. D., Foundry
Trade J., 1949, Sept. 15, 327
- 11) Everest, A. B.; Metallurgia, 41 (1949), No.
242, 84
- 12) Donoho, C. K.; Iron Age, 161 (1949) Feb.
24, 97
- 13) Myskowski, E. T., Dunphy, R. P., Iron
Age, 164 (1949) Sept, 8, 78; The Foundry,
77 (1949) No. 10, 72
- 14) Desy, A.; Metal Progress, 1950, Jan., 79
- 15) 谷村熙; 日本鐵鋼協會 1949 年 10 月講演大會
- 16) Iron Age, 1949, April 28, 82
- 17) 岡本; 日本金屬學會 1950 年 4 月大會鑄鐵分科
會講演
- 18) Iron Age; 1949, Sept. 29, 65
- 19) Kuniarsky, M.; The Foundry, 1950, Jan.
62
- 19) Kuniarsky, M.; The Foundry, 1950, Jan.,
62
- 20) 谷村, 松田; 日本鐵鋼協會. 昭和 24 年秋季
講演會の發表による.
- 21) 飯高一郎; 鑄物, 22 (1950) No.2, 1.
- 22) Novák, J.; Z. Physik. Chem., 73 (1910),
513
- 23) Von Keil, O., Legat, A.; Giesserei, 20 (19
33), 214
- 24) Von Keil O., Mitsche, R., Legat, A., Tren-
kler, H.; Arch. Eisenhütt, 7 (1934), 579
- 25) Reese, D. J.; The Foundry 1950, Jan., 58