

球状黒鉛鑄鉄の引け巣予測方法とアークプラズマ精錬によるその防止法について



榎木下製作所
技術士 木下 潔

1. 緒言

球状黒鉛鑄鉄は、その材質の持つ優位性とは逆に鑄造に際して、引け巣などの欠陥が発生し易くその防止が大きな課題である。

また、その対策が鑄造歩どまりの低下、鑄仕上げ工程の工数増につながり、製造上大きな障害になっている。

引け巣の発生要因としては次のような項目が挙げられる。

1) 鑄造方案

2) 溶湯性状

3) その他の要因 (成分、鑄型強度、鑄込温度など)

我々は30数年にわたる球状黒鉛鑄鉄の製造過程において、鑄造方案、C、Si等の成分、鑄型の強度などを同一にしたつもりでも引け巣の発生状況にバラツキが出ることを多く経験し、それが鑄物の信頼性、納期、コストに大きく影響していることを実感している。

これらの経験から引け巣の発生状況に、バラツキを与える要因は溶湯性状、つまり溶湯中の不純物の量にあると考え、不純物の除去 (引け巣の防止)、除去程度の判定 (引け巣予測) の方法を研究、開発してきた。

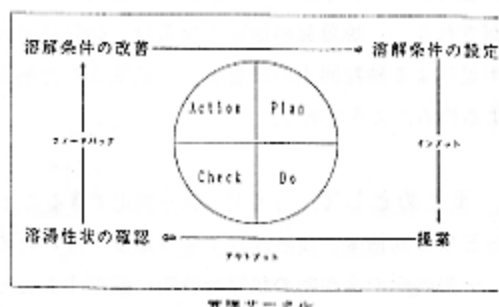
球状黒鉛鑄鉄の球状化阻害要因である硫黄、Si酸化物、微量元素の量は引け巣の要因と密接な関係にあると考え、その除去の方法として1965年にアークプラズマ精錬効果を利用した、KS式電気溶解炉を開発した。この炉の特徴は脱硫 ($S < 0.003\%$)、脱酸 ($O < 10\text{ PPM}$) にあり引け巣発生要因の大半な除去により球状化の良好な欠陥の少ない球状黒鉛鑄鉄が殆ど押し湯を使うことなく (平均歩どまり85%以上) 得られるようになった。

しかしながら、後述するように引け巣の発生は不

純物のPPM単位の量に影響を受けるため炉内状況の微細な変化による精錬度のバラツキが引け巣の発生状況の大きなバラツキとなって現われる。

この点を克服するため図1にあるように引け巣の発生状況 (溶湯の性状) をなるべく早く予測し、フィードバックしてやることによって操業方法を改善し炉内状況 (精錬度) を良好な状態に保ち、引け巣発生のバラツキを防止する方法を研究、開発した。

図1 欠陥予測方法の実施による溶解方法の改善



以下、その内容について記述する。

2. 引け巣の要因について

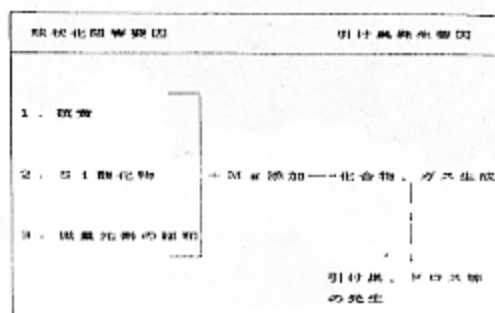
1) 球状化阻害要因と引け巣発生要因の関係

前述したように球状化の阻害要因と引け巣の発生要因は密接に関係していると考えられる。

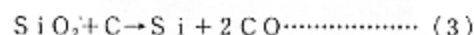
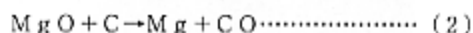
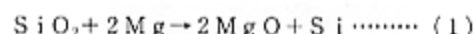
黒鉛の球状化は溶湯中に硫黄やSi酸化物がある程度存在してもMgを多量に使用すれば可能であるが、引け巣やドロスの発生などが多く鑄造性を著しく阻害する。我々の経験では、Mg使用量と引け巣の発生には相関関係があり、所用の球状化率においてMgの使用量が少ない程、引け巣が少ない。つまり、球状化阻害要因と引け巣発生要因の関係は、図2に示すような関係にあり、球状化阻害要因の存在と、それを除去するためのMgの添加が引け巣発生

の要因になっていると考えられる。

図2 球状黒鉛鑄鉄の球状化阻害要因と
引け巣発生要因の関係



そのメカニズムは次のように推測できる。



(1) 式の反応は球状化のために必要であるが SiO_2 や生成された MgO は最終凝固部に移動し、凝固直前に晶出した C (還元能が強い) により、凝固過程の特殊な状況下において、(2)、(3) 式の如く還元され Mg と CO ガスを生成し、引け巣の要因となる。 Mg の沸点は 1110°C であり溶湯の凝固温度より低いため、 Mg は気化して CO ガスと共に圧力が上昇し最終凝固部の溶湯を排除し空洞化するものと考えられる。これに関して、写真1に示すような引け巣(空洞部分)の内壁に写真2に示すように Mg の皮膜が観察され外壁部に近い正常部分に比べ数百倍の濃度の Mg が検出された。測定方法および装置は次の通りである。

電子線マイクロアナライザー (EPMA)

によるポイント分析

装置：島津製作所製 EPMA8705S型

2) 引け巣発生要因の考察 (ガス生成)

1. 引け巣発生機構 (ガス生成機構) に関する考察

引け巣発生の要因を Si 酸化物と添加 Mg の反応に限定して推論を行うと次のようになる。

Mg を多量に添加しなければ黒鉛が球状化しないような溶湯には球状化の阻害要素である Si 酸化物が相当存在しており、これが Mg と反応してガスを生成し、その気体の圧力により最終凝固部の溶湯が排除され、引け巣の要因となることが考えられる。

電子線マイクロアナライザー (EPMA) によるポイント分析

装置：島津製作所製 EPMA8705S型

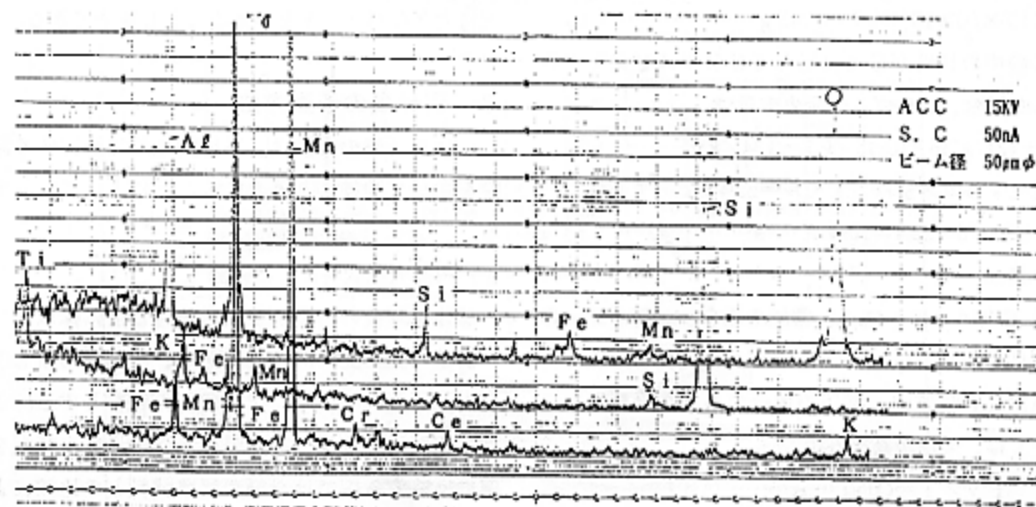


図3 ポイント分析測定結果

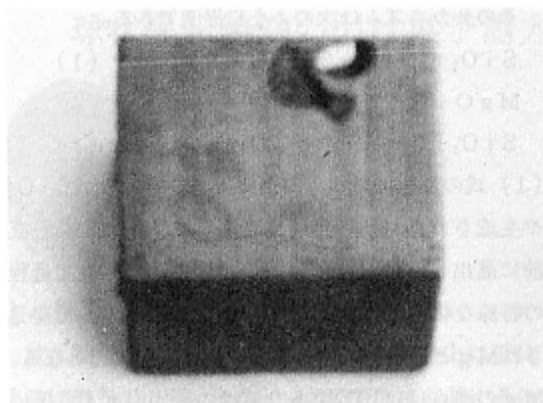


写真1 測定試料

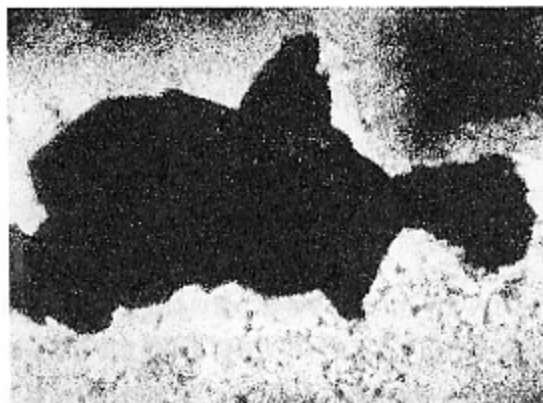


写真2 欠陥部X線写真

正常部 欠陥部 白色部Mg皮膜、黒色部Fe
 (黒色部は熔色反応調べのため削り落とした部分)
 (薄膜部分の測定深さは数 μ m)

2. 生成ガス量の試算

次に溶湯中の酸化物 (SiO_2) の還元による生成ガス量およびMgの還元による気化Mgの量を試算すると次のようになる。

a) SiO_2 の還元による生成ガス量の試算

一辺が10cmの立方体の溶湯中に50 PPMの酸素量が含まれており、その70%が化合物 (SiO_2) を生成していると仮定すると発生するCOガス量は次のように計算できる。

鉄の比重を7とすると立方体の重量は7kgとなり
 SiO_2 中に含まれる酸素量は

$$7 \times 10^3 \times 50 \times 10^{-6} \times 0.7 = 0.245 \text{ g} \dots\dots\dots (1)$$

この中の10%がCと反応してCOガスを発生する
 とした場合、COガスの発生重量は

$$(16+12) / 16 \times 0.245 \times 0.1 = 0.34 / 8 \text{ g} \dots\dots\dots (2)$$

発生するガス量は (1モル=22.4ℓとして)

$$28 : 0.34 / 8 = 22.4 \times 10^3 : X \dots\dots\dots (3)$$

$$X = 34 \text{ cm}^3$$

(3)の如くなり、常温、常圧の場合、一辺が10cmの立方体の溶湯中に34 cm^3 のCOガスを発生することになる。これは常温、常圧の場合であり高温高圧下においては、条件が異なるが

$$P V / T = \text{Const.} \dots\dots\dots (4)$$

(P: 圧力 V: 体積 T: 絶対温度)

より、1200℃、25気圧の場合

$$25 \times V / 273 + 1200 = 1 \times 34 / 273 + 20$$

$$V \approx 7 \text{ cm}^3$$

となり、一辺が10cmの立方体中に7ccの空洞ができることになる。

b) MgOの還元による気化Mg量の試算

溶湯中の残留Mgの量を0.02%、気化するMg量をその1/50 (4 PPM)、Mgの原子量を24.32として、上記と同様の条件 (1200℃、25気圧) で試算を行うと生成ガス量は、5 cm^3 となる。

この発生メカニズムの考察は推論の域をでないが SiO_2 、微量元素などが何等かのかたちでガスを生成すると考えれば前述したように、PPM単位の量が引け巣発生の要因となることは充分考えられる。また、PPM単位の量のバラツキが引け巣の発生状況に大きなバラツキを与えることも理解できる。

3. 引け巣の予測方法

引け巣予測の方法は、不純物の量に起因する諸現象を炉前試験により確認することによって行っている。

1) 内部欠陥試料による確認

球化処理後の溶湯を製品に鋳込む前に採取しフラン鋳型 (65×55×60) に鋳込み、冷却後切断して製品内部の欠陥 (引け) 発生状況の資料とする。これは、相対的評価法であり製品の引け巣発生状況を正確に反映する訳ではないが標準試料との比較により製品内部の欠陥状況を推測することが出来る。

2) 表面張力および「ぬれ性」による方法

内部欠陥試料の切断による方法の場合は、鑄込み後の確認に止まるため、鑄込前に予測する手段として溶湯の表面張力および「ぬれ性」と欠陥試料の切断結果との関連を研究し、予測の手段とした。

この方法は懸濁珪酸や、その他の介在物が多くなると溶湯の表面張力が下がり、引け巣が出やすくなる点を利用したものである。つまり溶滴が丸くなるほど(写真3)引け巣の発生が少ない。



写真3 溶湯性状の良好な場合の溶滴形状

3) チル(白銹化傾向)による方法

出銃口より滴下する溶湯を直接、生砂型のくさび試験片に流し、その破面のチル化の程度を欠陥の予測手段とする。

鑄鉄の場合、酸素によって組織および、その他の性質が大きく影響を受ける。¹⁾(表1)

表1に示される如く酸素が増加しても減少してもチル化が進行する。当社の溶湯ではチルは酸素の減少側に発生するため、チルの度合いを脱酸の指標とした。この方法が最も簡単で、鑄込み前に元湯性状を迅速に予測できる。この結果をフィードバックし

て操業に反映することにより操業方法が改善され、安定して引け巣発生が少ない溶湯を得ることが可能となった。

4. アークプラズマ精錬による引け巣防止

1) アーク炉溶解の問題点(溶解過程におけるSi酸化物の生成)

アーク炉は電極径に比較して炉容積が広いため装入材料の多くの部分はアークにより直接溶解されるのではなく、アークにより昇温された溶湯に装入材料が溶け込むことによって間接的に溶解される。その間、溶湯に沈着した塊状原料の周辺は広い範囲にわたってSi酸化の温度領域(低温)に長く停滞することになり(図4)、Si酸化物を多量に生成する。そのため、球状黒鉛鋳鉄の戻り材のような高Si材を多く配合した場合には特に引けが大きく発生し易いことを現象的に確認している。

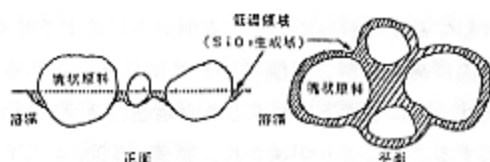


図4 アーク炉の溶解過程
(溶湯中に沈着した塊状原料)

表1 酸素含量と鋳鉄の諸特性との関係¹⁾

1	容 積 分 率												
	W'	V'	V	IV'	III'	II'	I	II	III	IV	V	VI	
2	W'	W _s	I, C	G	G	G	G	G	G	I, C	W _o	W _o	
3	W _s	W _s	I, C	G	G	G	G	G	G	I, C	W _o	W _o	
4	同 性	球状黒鉛 Fe, C及 球状黒鉛	球状黒鉛 Fe, C及 球状黒鉛	片状黒鉛 IV及内部 組織V	フェライ ト地に鉄 粒組織	共晶黒鉛 粒組織	ローズグ ラファイ ト組織	片状黒鉛 組織	ローズグ ラファイ ト組織	共晶黒鉛 粒組織	片状黒鉛 組織V	球状黒鉛 組織V	球状黒鉛 組織V
5	含有酸素量 FeO Fe ₂ O ₃	0.5%	各段階の酸素量の変化分 0.011% / g (平均値)									0.011%	
6	鋼 鉄 種 別	球状黒鉛鉄	球状黒鉛鉄	片状黒鉛鉄	共晶黒鉛鉄	ローズグ ラファイ ト組織鉄	片状黒鉛 組織鉄	ローズグ ラファイ ト組織鉄	共晶黒鉛 粒組織鉄	片状黒鉛 組織鉄	球状黒鉛 組織鉄	球状黒鉛 組織鉄	球状黒鉛 組織鉄
7	強 度	[強度の傾向を示すグラフ]											
8	剛 性	[剛性の傾向を示すグラフ]											
9	チル 効 果	[チル効果の傾向を示すグラフ]											
10	結 合 状 態	[結合状態の傾向を示すグラフ]											
11	基 本 組 成	[基本組成の傾向を示すグラフ]											

2) アークによる鉄鉄溶湯の精錬効果

我々は、数多くのアーク炉の操業実績からアーク直下の限定された範囲において溶解された溶湯には欠陥の発生が少なく、更に、アーク加熱を進めると球化剤をなしで黒鉛が球状化することを確認している。これは、アークプラズマの作用によってSi酸化物が還元、除去されるためと考えられる。アークによる直接溶解と、溶湯を熱媒体とする間接溶解との差、つまり溶解過程の差が重要な意味を持つことが理解できる。このようなことから、アークプラズマが鉄鉄溶湯、球状黒鉛鉄の性状向上に特殊な効果のあることに着目し、その溶解方法および装置を開発した。

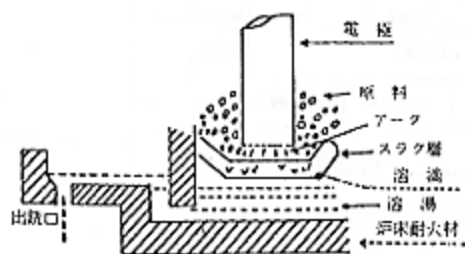
3) アークプラズマを利用したKS法の開発²⁾

1. 開発した方法の概略

KS炉における原料の溶解方法を図5に、溶解挙動を以下に示す。

鉄グライなどの小さな原料を精錬剤(CaO)と配合して電極に沿ってアーク雰囲気中に落下させると急速に高温溶解、脱酸(10PPM以下)される。溶滴は、更に電極下に形成された塩基性スラグ層を通過することにより炉過され、脱硫(0.003%以下)される。この場合、スラグ層は溶湯と未溶解原料との接触による溶湯の汚染を防止する役割も果たす。ここで重要な点は、原材料としてグライ粉を使用している点である。原材料が微細なグライ粉であるため、アークプラズマによる昇温が急速に進むと同時に、溶滴はアーク衝撃によりいっそう微細化され、反応の界面積が拡大され、脱酸、脱硫が進行する。

図5 KS炉の溶解部分の概略



このように溶解、精錬された溶滴は電極下の限定された炉床に集約し連続的に出鉄される。

つまりKS法の基本原理をまとめると表2のようになる。表2のように、冶金的にも物理的にも総て精錬作用に適した好条件が集積されており、この溶解部分が最も重要な点で、精錬過程を持たない溶解方法による溶湯性状と大きな相違になるものと考えられる。

表2 KS法の基本

1. 溶解原料に鉄グライ使用	反応界面積の拡大
2. アークプラズマによる 直接溶解	高温、還元性雰囲気 による脱酸 (O<0.10PPM)
3. 塩基性スラグ層による 炉過の促進	脱硫 (S<0.003%)
4. スラグ層による精錬溶湯 と未溶解原料との隔離	精錬溶湯の未溶解原料 による汚染、汚染防止

2. 装置の概略

装置は、溶解帯を電極下に限定、炉形を最小限に抑え、原料装入、集塵などを有効に行うため、3本の電極は直線上に配列してある。また、原料装入から出湯まで連続、自動化してある。³⁾

この場合の主要原単位は次の通りである。

電力消費量 580KW/t 電極消費量 2.5kg/t
補修炉材 ¥450.-/t 添加剤 ¥250.-/t

また、溶解中のSi損失はなく、灼熱減量(ignition loss)は0%である。従って操業中、「のろ」の生成はない。

3. 技術効果

アーク溶解が理想的に行われ、溶湯性状が向上するため次のような効果が得られた。

1) 残留Mgの量が0.02%以下(Fe-Si-3%Mgで0.7%添加)通常0.015%程度で球状化の良い黒鉛(球状化率80%以上)が得られる。従って、資材の節減と球状化処理作業が容易になる。また、戻り材は鉄鉄以上の評価がある。

2) 内部欠陥(特に、引け巣)が少ない。従って、多くの場合、無押湯方案が採用でき、鑄造歩どまり(85%以上)が高く、鑄仕上げ工程が節減できる。

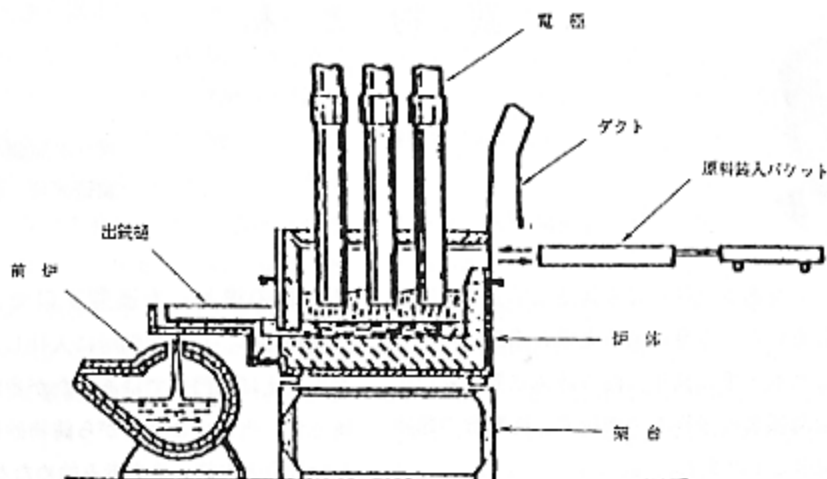


図6 装置の正面図

3) 表面張力が高く、鑄型面と濡れにくいいため鑄肌が良い。多くの場合、塗型が省略できるため作業が安全で工数が節減できる。

4) また、「日差し」が起きにくいいため、中子部分の後処理が容易になる。

5) CE値を高くしても(4.85程度)ドロスの発生がなく、「湯まわり」がよい。従って、引け巣防止に役立つ。

6) フェイディング現象が少ない。球状化処理後、30min. 経過しても球状化率はあまり変化しない。このため製品間における球状化率のバラツキが少ない。

7) 厚肉製品内部まで均一性が高いので、厚肉製品の製造に有利である。

8) 硫黄含有量が低いため、繰り返し加熱に対する耐疲労性が向上する。

9) 切削性が良く切削面が、ち密で光沢がある。

4. 経済効果

前述のように、鉄グライの有効利用、球化能や歩どまりの向上に伴う溶解費、球化剤の節減、無押湯方案の採用に伴う押湯切断工数、消耗工具などの節減により、製品トン当たり、¥20,000~30,000-の節減効果が見込まれる。

さらに、フラン鑄型の場合には、塗型工数、塗型剤などの節減効果も見込まれる。

5. まとめ

1) 球状黒鉛鑄鉄の製造初期においては普通鑄鉄では考えられない程の欠陥(引け巣、ドロス、ピンホールなど)が多発し困難を極めた。その過程で1965年、アークプラズマによる精錬方法を開発した。以来、本方法で生産を続け、その間、操業方法、装置の改良を積み重ね、操業の安定性と、装置の自動化、安全性を確保した。また、この溶解方法および装置は、国内、英、米、独、韓国にて特許が成立している。

2) 不良、クレームを低減し、鑄物の信頼性を高め更に、原価低減、納期の確保などを計るため、引け巣の予防方法について検討し、内部欠陥試料、表面張力、チルによる予測方法を開発した。

3) 引け巣の予測方法の実用化により、操業方法が一段と向上し、また適切な鑄造方案の採用もあって不良、クレームが減少した。また、防止方法、発生機構についても、更に検討が進んだ。

4) 引け巣の防止方法および発生機構については、未だ充分な検討を加えるに至っておらず、今後の検討課題と考えている。

参考文献

- 1) 岩瀬、他:特許公報(昭29.9.14) 鑄鉄の還元精錬法
- 2) 木下:特許公報(昭40.10) 鑄鉄の精錬法
- 3) 木下:特許公報(昭51.11) 金属溶解用電気弧光炉