

特殊アーク炉による球状黒鉛鋳鉄の 原価低減と引け巣防止について

木下 定*
木下 潔**

1. はじめに

球状黒鉛鋳鉄は、その材質の持つ優位性とは逆に鋳造に際して、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、その対策が鋳造歩留りの低下、鋳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。

球状黒鉛鋳鉄の製造に当っては、球状化の阻害要素である硫黄、Si酸化物の除去が必要である。また、その除去方法は、欠陥発生と密接な関連があるため重要な技術課題となる。

これを解決する一つの方法は、Mgを多量に使用して強制的に硫黄、Si酸化物の除去を行う方法で、この場合には欠陥の発生が大きい傾向にある。ここでは、もう一つの方法としてこの強制的な方法ではなく、溶解過程において硫黄、Si酸化物を精錬除去する方法、及びそれがもたらす技術的、経済的効果について説明する。

先に、第一の方法である強制的な方法について簡単に考えてみると、溶湯中の脱硫は比較的容易に行われるが、Si酸化物の還元脱酸は非常に困難である。既に原料中に蓄積されているものは勿論、溶解中の生成

を抑制することも難しく、再溶解するたびに原料中に蓄積され材質の劣化が進行する。そのため、一般的には強制的な方法に依存することになる。

黒鉛の球状化は溶湯中に硫黄やSi酸化物が或る程度存在しても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鋳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、所要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。残留Mgが0.015%で球状化率80%以上を得られるような溶湯（後述（4.2）するような理由から）を使用する場合には押湯なしでも鋳物に引け巣は殆ど発生しない。この場合のCE値は4.75～4.85、鋳込温度は1330～1400°Cの範囲である。

従って、球状化処理以前に硫黄の除去やSi酸化物の還元除去によって、Mgの使用量を下げることが、基本的な手段と考えられる。

そこで、我々は高温下におけるCの還元能に着目し、アークプラズマを利用してSi酸化物の還元脱酸を行う方法を採用した。

2. 溶解方法及び溶解装置

2.1 アークプラズマによる精錬方法の開発

1) 従来のアーク炉溶解の問題点

*株式会社木下製作所代表取締役・技術士

**同社・技術士

アーク炉は電極径に比較して炉容積が広いために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、溶湯に沈澱した塊状原料の周辺は、広い範囲にわたってSi酸化の温度領域に長く停滞することになり、Si酸化物を大量に生成する、そのため球状黒鉛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する。

2) アークによる鉄鉱溶湯の精錬効果

我々は、数多くのアークが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(Arc Plasma)が鉄鉱溶湯、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、その溶解方法及び装置を開発した。

2.2 アークプラズマを利用したKS炉の開発

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1に、溶解挙動を以下に示す：

a) 鉄ダ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キング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沪過され、脱硫(0.001%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。

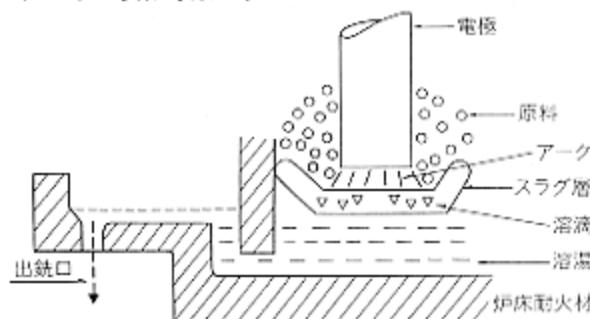


図1 溶解部分の概略(説明図)

b) 電極周辺に装入された原料は大電流による強磁場の影響を受け懸垂状態にあるが、徐々に昇温しA₁変態点に近付くと磁性を失い、電極下に順次、落下し溶解される。

2) 溶解部分の考察

溶解過程でのスラグ、メタル反応挙動を更に以下のように詳細に要因の解析を行った：

a) 電極先端付近は、アークプラズマによる超高温であり、また、その空間を構成する分子、原子などは電離状態になっていると考えられる。この特殊な雰囲気が溶湯性状の改善に、大きく寄与するものと考えられる。また、

b) 電極直下には強い還元能と適正な「ぬれ性」を有するエレクトロスラグ層が形成されており、溶滴はアーキ衝撃により、スラグと共に激しい搅拌作用を受け、細分化される。実際に、溶解終了後のスラグ層の中には、0.1mmφ以下の溶滴の微粒子が多く存在する。ここで、一定量の溶湯を細分化した場合の総表面積をES、直径をdとすれば、 $ES = 1/d \cdot K$ (K:比例常数)の関係があり、反応界面積はdに反比例して増加することになりdを零に近づければ、ESは無限大に近づくことになり反応界面積は非常に拡大されることになる。

しかも、

c) 溶解はスラグ層上で行われるため溶滴は、必然的にスラグ層を通過することになり、スラグとの接触機会が高く、脱硫や脱酸が効率よく行われる。この場合、原料中の硫黄含有量にあまり関係なく、脱硫が行われる。例えば、硫黄含有量が0.16%と高い可鍛鉄ダライを溶解してS=0.006%の溶湯が連続して得られた操業実績がある。このように効率よく硫黄分を吸収するため溶解終了後の電極下のスラグ層は硫黄特有の黄色を呈しており、大部分がCaC₂, CaSで形成されている。

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續的に出銑される。

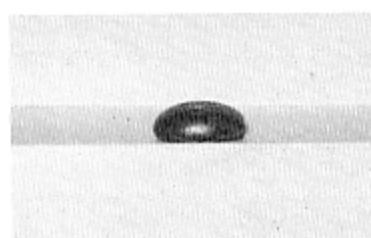
以上のように、冶金的にも物理的にも総て精錬作用に適した好条件が集積されており、この溶解部分が最も重要な点で、精錬過程をもたない溶解方法による溶湯性状と大きな相違になるものと考えられる。

上記のような条件により溶解された溶湯は球状化処理以前に一部の黒煙は球状化状態にあり、表面張力が高く、溶滴は写真1に示すように丸くなる。鉄肌が滑らかで、多くの場合、塗型が省略(フラン鉄型)できるなど、

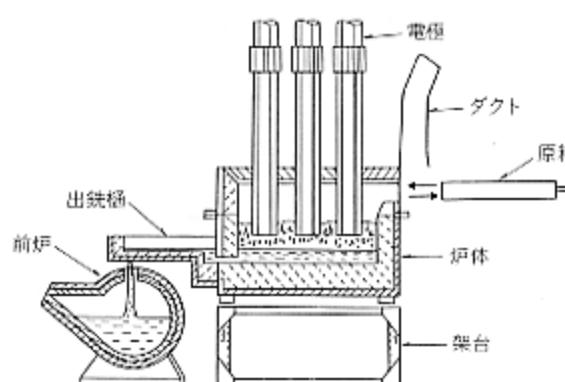
後述するような大きな技術効果がある。

3) KS 炉の装置概要

アーチプラズマによる精錬を実現させる方法として KS 式アーチ炉を開発した。図 2 にその概要、図 3 に原料ヤードから出銑までの経路を示す。この装置は次のような部分から構成されている。



- a) 溶解装置：上炉、下炉、電極界降装置
- b) 原料供給装置：原料タンク、原料選別、定量装置
- c) 添加剤供給装置



置：精錬剤、加炭剤定量切出装置

- d) 原料装入装置
- e) 集塵装置
- f) 電力供給関係：変圧器、導電体
- g) 溶解電力制御装置
- h) 動力自動制御装置

電極は直線上に配列しており、溶解帯が電極下近傍に限定されていることが特徴である。

この方法の利点は次の通りである。

- a) 原料の自動装入に都合が良い。
- b) 3 極の電極先端が原料中に平均的に埋没し易い。
- c) 溶解帯の雰囲気を維持し、アーチが安定し易い。
- d) 溶湯の質を高め、更には電流の自動制御を容易に行うことができる。

e) 炉体は原料装入孔以外は密閉しており、炉内発生ガス及び粉塵は、バグフィルターにより集塵、浄化される。

より通電、及び原料配合、装入、出湯までの操作は連続し、自動化している。

g) 操業電圧は低く（約70 V）、水冷部分は電極ホルダー部のみで操業は安全である。

2.3 操業方法

1) 操炉法の要点

KS炉は、1965年に初期の方法が開発された。

本方法においては、すべての原料が、好ましい溶解過程を通過するようにする事が重要である。

そのためには3極の電極の関係位置を並行して、図1に示すような状態に定着することが必要である。しかし、一般機械のように、作業者の操作どおりに直接的にコントロールできるような単純なものではなく、周囲のいろいろな条件を整えることによって間接的に操作を行う性質のものである。この間接的な条件の組合せが操炉法の一つのポイントとなる。

2) ノウハウの蓄積

開発初期においては、電極位置を定着する間接的な諸条件を設定するノウハウが不足していたた

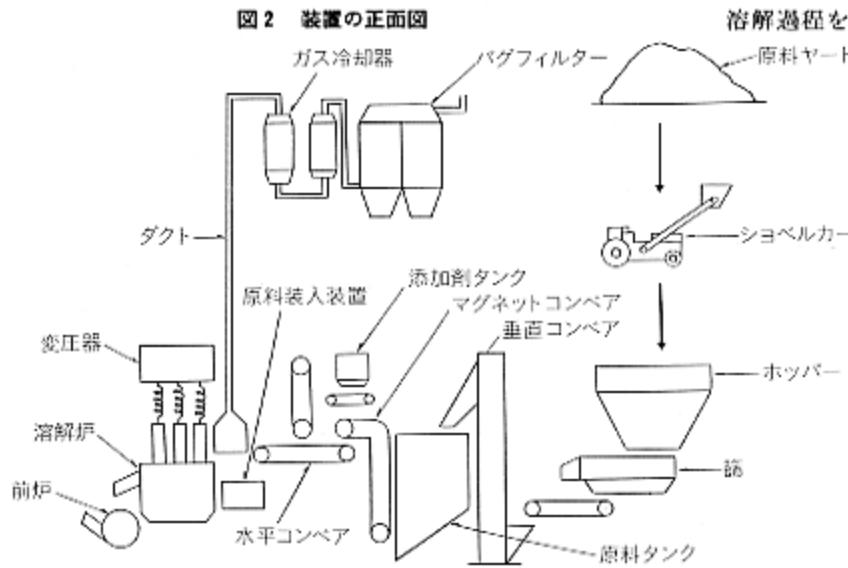


図3 溶解装置の配置図

め、例えば電圧、電流の適正な設定、及びその相関関係など、安定操業の点で苦労があったが、その後操業実験を重ね、継続的な改良を加えた結果、良質の溶湯を安定して得られる方法が確立された。

装置についても、この炉の特殊性(電極直列方式)

から電極間隔が重要な要素であって、適正な設定値を得るまでに相当な期間を要した。

溶解に関する方法、装置の改良には相当な困難とリスクを伴うもので、簡単に結論が得られるような性質のものではない。例えば、装置(方法)の改造→操業実験→操業性(温度調整など)→溶湯性状の確認→鉄造性→材質結果→製品結果→内部欠陥の確認→再現性の確保など総合的な結果を得るまでには相当な手順と期間を要した。また常に良好な結果が得られる保証もない。幾度となく、このような手順を繰り返して、ノウハウの蓄積がなされた。

一般に溶解方法の改革はなかなか進展しにくい。

従ってこの方法についても、一つづつ改良を加え、永年にわたって操業実績を重ね、多くのノウハウを蓄積し生産操業において図1に示したような理想的な溶解過程を実現するための手法を確立し、操業の質と弾力性を高めた。

3) 操業例

溶解過程での操業状況を以下に示した:

a) 電力変動

初期の湯溜を作るまでは約40分間手動で送電し元湯の温度が充分上昇したところで、連続操業に移行する。電圧は一定で、電流は自動制御により一定幅を保ち続けるため、電力の変動は殆ど起こらない。また、電力効率が高く、力率は約93%である。

電極は原料中に埋没しており、原料は溶解すれば電極

表1 溶解中の成分及びその変動

時間 (分)	成 分 %					
	C	Si	Mn	S	Cu	Cr
0	3.59	1.81	0.66	0.003	0.57	0.19
8	3.64	1.83	0.68	0.002	0.62	0.20
16	3.57	1.80	0.68	—	0.61	—
24	3.53	1.76	0.67	—	0.59	—
32	3.49	1.80	0.68	—	0.60	—
40	3.51	1.79	0.67	—	0.61	—
48	3.38	1.74	—	—	0.58	—
56	3.42	1.73	0.68	—	0.57	—
64	3.47	1.77	—	0.001	—	0.18
72	3.57	1.78	—	—	0.59	—
80	3.64	1.82	—	—	0.54	0.17
88	3.60	1.72	—	—	—	—

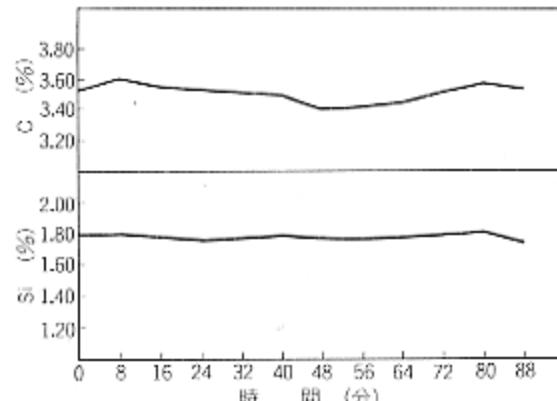


図4 溶解中の成分及びその変動

に沿って継続して落下し出銑され、殆ど同じ条件が継続して行われる。一定の電圧、電流に対して、溶解した量だけの原料を装入する溶解方式であるため、溶解量の調整は電圧、電流の変更とそれに応じた原料の投入量で調整する。

b) 酸化損失

酸化損失は皆無である。炉内は還元性雰囲気であり電極下端付近は更に強力な還元作用があるので原料の酸化損失はない。従って「のろ」も生じない。毎時、1.5tの溶解炉において、12時間の連続溶解終了後、つまり、18tの溶解量において電極下に約10~20mm位の精錬用のスラグ層が残在するのみで「のろ」は全く存在しない。

c) 成分変動

表1は、90分間の連続出湯中に8分毎に出湯桶口にて試料採取した溶湯の成分及びその変動を調査した結果を示す。成分変動は比較的少なく、安定した操業状態を示している。

3. 技術効果¹⁾

アーケ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、通常0.015%位で、球状化の良い(球状化率80%以上)黒鉛が得られる。従って資材の節減と球化処理作業が容易になる。

また、戻り材は質において銑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、鋳造歩留り（90%以上）が高く、鋳仕上げ工程が節減できる。

3) 表面張力が高く、鋳型面と濡れにくいため鋳肌が良い。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、「目差し」が起きにくいため、中子部分の後処理が容易になる。

5) CE値が高くて（4.85程度）ドロスの発生がなく、「湯まわり」がよい。

6) フェイディング現象が少ない。球状化処理後、30分経過しても球状化率はあまり変化しない。

7) 厚肉製品内部まで均質性が高いので、厚肉製品の製造に有利である。

8) 硫黄含有量が低いため、被削性、繰り返し加熱に対する、耐疲労性、などが向上する。

4. 引け巣防止

球状黒鉛鉄の原価低減に最も大きな影響を持つ引け巣防止について考察する。我々の数多くの操業実績から引け巣の発生原因と、球状化の阻害要因とが同質であることを現象的に確認している。そこで、先に球状化の阻害要因から考えてみる。

4.1 球状化阻害要素

球状化の阻害要因として次のような報告がある。

a) 銑鉄評価法の有効な手段として、球状化能による判定方法が採用されている。その中で阻害要素として微量元素の総和と硫黄と更に懸濁けい酸（Silica gel）の影響の大きいことが実証されている²⁾。

b) また、Si酸化物の黒鉛形態に及ぼす影響について、Ni-C合金の黒鉛組織を調べ、溶湯が還元性でその中にSiO₂を含まないときは黒鉛は球状形態をとるがSiO₂が存在するとその周辺は完全に片状形態にくずれてしまうことを実験的に認めている³⁾。

いずれもSi酸化物が黒鉛の球状化を阻害するとしている。従って、黒鉛の球状化にはSi酸化物の除去が必

要である。この除去の方法が前述の如く引け巣発生と密接な関係がある。以下その現象について考察する。

4.2 引け巣発生現象の考察

アーキプラズマによる精錬過程を経過した溶湯では脱硫、脱酸が充分に行われているため、押し湯を使わずに、残留Mg 0.015%で球状化率80%以上の引け巣のない鉄物ができる。この点についての理論的な確たる理由は現在のところ証明できていないが、現象的な観点からは引け巣発生の主なる理由として、次の三つのことが挙げられる。

一つは、凝固膨張と収縮のバランスに関するものであり、他の一つは溶湯内に生成するガス圧によって溶湯が排除される現象と考えられる。また、三つ目の要因としては微量元素の影響を考慮する必要があると考えられる。

1) 一つ目の理由としている凝固膨張と収縮の関係について分析する。

球状黒鉛鉄のCE値は、一般に4.5前後が採用されている。これはCE値が4.5以上では、ドロスが生じ易いため⁴⁾とされている。

アーキ精錬した溶湯の場合には、Fe-C系の平衡状態図に近い状態で黒鉛の晶出が始まる。例えば、CE値が4.95のとき温度が1300°C位で溶湯表面に遊離黒鉛が少し浮遊する。また、CE値が4.75の場合、1250°C位で溶湯表面に遊離黒鉛が観察され、ほぼ状態図に近い結果となる。この溶湯の場合、CE値を4.75~4.85と高く設定し、鉄込温度もドロスが発生しない範囲で低く（1330~1400°C）設定している。

このCE値の差を容積比に換算する。つまり、鉄及び黒鉛の比重をそれぞれ、7.8, 2.2としCE値の差がすべて黒鉛として晶出するものとすれば、4.8-4.5=0.3%（重量比×7.8/2.2=1%（容積比）となる。つまり一辺が10cmの立方体のうち1cm³のもの10個分に相当する凝固膨張の差がでることになる。

また、CE値を4.5以上にするとドロスが発生するような溶湯では、鉄込温度を高目にする必要があり、引け巣を助長する要因にもなっている。また、このようなCE値が4.5以下の溶湯ではFCD600などのようなバーライト基地の多い場合、特に引け巣が出易い。

CE値を高くとれる溶湯では、基地組織によって鋳造性が影響されることが少なく、比較的低温で鉄込ができるため引け巣の抑制には有利となる。

以上のことから、CE値が高いほど引き巣の発生が少ないとと思われる。しかし、条件によっては後述するようにCE値が高いほど引き巣の発生が著しい場合もある。

2) 次に、二つ目の要因としているガス圧による溶湯の排除について考えてみる。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、Mgと反応して生成する気体の圧力により最終凝固部の溶湯が排除され空洞を生ずるものと考えられる。

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は肉厚中心部に移動し、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、引き巣の要因となる。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を形成するものと考えられる。これらに関して、

写真3に示すような引き巣(空洞部分)の内壁に、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。測定方法及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

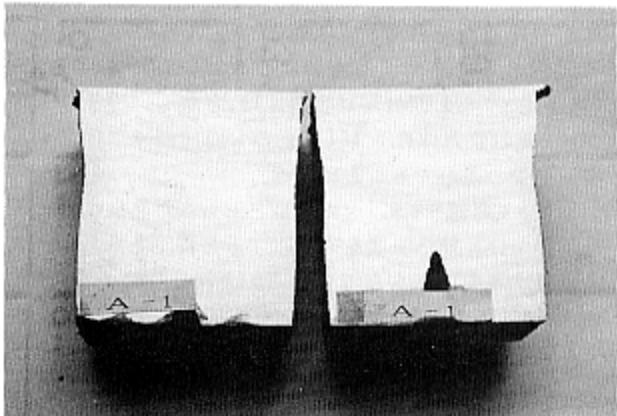


写真2 内部欠陥なし Mg=0.016%, CE値=4.8, 球状化率=85%

装置：島津製作所製 EPMA8705S型

また、これを裏付けるような幾つかの現象がある。

a)引き巣(空洞)の発生する状況

*Si酸化物が少なく、少量のMgで黒鉛が球状化するような溶湯では引き巣は発生し難く、Si酸化物が多く、黒鉛球状化のため多量のMgを必要とするような溶湯には引き巣が発生し易い。

*精錬された引き巣の少ない溶湯に普通鉄鉄の切削ダイヤモンドを5~10%も添加すると、元湯の精錬度にもよるが引き巣が発生する。この場合、CE値や硫黄含有量に大きな変動はないはずである。これは切削ダイヤモンドが溶湯に溶け込む際に生成するSi酸化物、及び既に切削ダイヤモンド中に蓄積されているSi酸化物のためと考えられる。この場合、精錬された引き巣の少ないダイヤモンドの添加では引き巣は少ない。

*鋸びたダイヤモンド粉(5~10%)を使用した場合は、引き巣の発生が大きい。つまり、Si酸化物を増加させると引き巣は大きくなる。

*Mgを添加しない場合には、Si酸化物が存在しても引き巣は発生しない。つまり、Si酸化物単独では引き巣は発生しない。

引き巣はMgとSi酸化物がそれぞれ単独に存在する場合には現れず、両者が共存することによって発生する。このような現象からMgとSi酸化物の存在が引き巣の発生に根本的な関わりを持ち、その影響が極めて大きいことが実証される。

b)引き巣の状態

代表的な引き巣の状態を写真3に示す。写真は内部欠

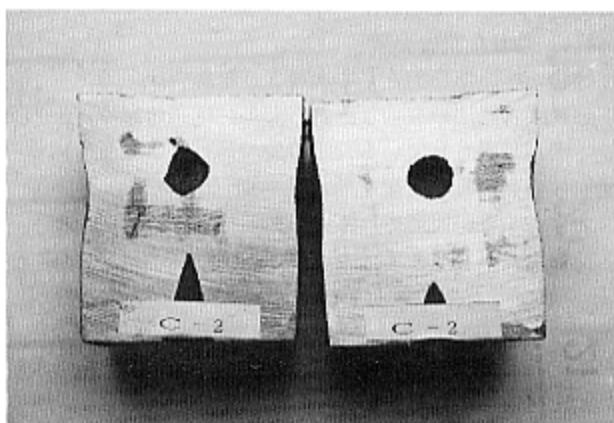


写真3 空洞巣発生 写真2の溶湯に鋸びダイヤモード 6 %添加

陥調査のための試料 ($65 \times 55 \times 60^{\text{H}}$) である。

*空洞化しており内面が滑らかであり減圧状態で生成したとは考えられず内圧によるものと考えられる。

*大きい場合は液体収縮とは考えにくいほど大きな空洞となる。

*発生個所が上面に近い。

c) CE 値

CE 値は (4.2-1)) で説明したように、4.75~4.85 と高く、凝固膨張や収縮の観点からは引け巣は発生しないはずである。

上記のような引け巣の発生する諸現象 a) 及び引け巣の状態 b) や成分的な点 c) からしても、引け巣（空洞）の発生は液体収縮や鉄型の変形などの影響だけとは考え難く、ガス圧によって溶湯が排除される影響が大きいものと考えられる。更に、(2), (3)式を裏付けるような現象として、前述1)の説明とは逆に、Si 酸化物が多く存在する場合には CE 値が高いほど引け巣が大きく現れる現象がある。これは、CE 値が低い溶湯に較べて高い場合は、より高い温度で C の晶出が始まり、しかも濃度が高いため(2), (3)式の反応が右側に移行しやすいためと考えられる。これに関して、CE 値が高い試料に引け巣が大きく現れる実験結果が報告¹⁾されている。

3) 三つ目の要因としている、微量元素の影響については現在のところ確かな実証は得られていないが高度に精練された溶湯において、CE 値、脱硫、脱酸、球状化処理、鉄込条件などがほとんど変わらない状況の中で引け巣状況に僅かな変化が認められることがある。その点について銑鉄評価法²⁾（前述）における微量元素 (Cu, Ti, Ni, Cr, Sb, V, As, Sn, Pb, Zn etc.) の集合が黒鉛の球状化に与える影響と同様に、引け巣の発生においても、なんらかの関与があるものと考えられる。これは、銑鉄つまり鉄鉱石より継承された微量元素についての資料であるが、リサイクル過程において侵入してくる可能性のある微量元素、例えば、Zn, Al, Ti, P, Cu, V, Cr などによる鉄源汚染³⁾が指摘されている。微量元素は酸素等と結合して化合物を形成している場合が多いと考えられ C と反応して CO ガスを発生することが考えられる。また、化合物自体が鉄鉄の凝固形態に何らかの影響を与えることも考えられる。これらの点についての確証はないが前述の分析結果において、引け巣部分に Mg 以外に、Mn, Al, O, Si などが強く検出されており、その可能性も否定できない。

4.3 引け巣防止まとめ

1) 引け巣要因まとめ

以上のような現象を勘案すると、引け巣の主なる要因としては、Mg と Si 酸化物の存在が第一義的な意味を持ち、CE 値による凝固膨張と収縮の差は第二義的な影響と考えられる。また、微量元素の影響も考慮の必要があると考えられる。ここで、Mg と Si 酸化物と黒鉛による反応 ((2), (3)式) 及び微量元素の挙動については推論の域をでない。CE 値の影響などのように理論的に裏付けられた現象とは異なって不明な点が多い。この点について今後の検討課題と考えている。

2) 引け巣防止の基本条件

前述のように、引け巣防止には球状化処理以前に硫黄や特に Si 酸化物を還元除去することによって高い CE 値の採用と、Mg の使用量を極力下げる事が欠陥抑制の基本的な手段と考えられる。

微量元素については原料の選択によるが、アーキプラズマ精練された溶湯には引け巣が出にくい。これは前述の要因以外に、溶湯中に化合物として存在する微量元素がアーキプラズマによる高温と、電離現象により分離除去されることが考えられる。

3) 溶解方法の考察

Si 酸化物の除去（還元脱酸）は、溶湯中では不可能に近いので、溶解過程で行うことが基本と考えられる。この方法に基づく球状黒鉛鉄の製造に関する幾つかの精練方法が開発されている：

a) 還元純度を使用し、溶解過程において脱酸脱硫する方法⁴⁾。

b) 高 C, 低 Si の配合組成で溶解を行い、溶解過程における Si 酸化物の発生を少なくして Fe-Si の添加のみで球状黒鉛を得る方法⁵⁾。など

いずれも溶解過程において、Si 酸化物の発生を少なくする方法である。しかし、既に原料中に蓄積されている Si 酸化物の除去は非常に困難である。この Si 酸化物の除去に関する方法として、

c) KS 法⁶⁾が開発されている。これは、本文において詳述してあるようにアーキ現象を利用した方法である。この場合、微量元素の気化、飛散などの効果も期待できる。

4) 欠陥（引け巣）の予測について

界面活性化阻害要素が、引け巣発生の要因と一致すると考えられることから、溶湯の表面張力を測定して、引

表2 原料費原価試算 (単位:千円/t)

	銑ダライ	スクラップ価格	銑ダライ価格	原価低減
a	自社発生 自社消費	—	「灼熱減量 前処理費」	3.0
b	自社発生 ダライ外販	(購入) 23.0 (外販) 13.0	13.0	10.0
c	全購入	23.0	17.0	6.0

け巢の予測資料とすることが考えられる。その方法¹⁾としては下記のような方法がある。

*溶滴の(写真1):径と厚みとの比率(D/H)

*溶滴のねれ性:床面との接触角、凝固面の状態、溶滴の凝固面が滑かで光沢のあるような元湯(出銑口にて採取)の場合、欠陥テスト試料(銑込製品の溶湯)に引け巣は出ない。凝固面が粗く、スケール化したような元湯の場合は、欠陥テスト試料に引け巣が出る。

*溶湯表面の皮膜形成までの所要時間(湯ざめ)など実状に適合した比較基準を作成することで溶湯性状の良否を判定する目安とする。

また、溶滴を通常の溶接機でカーボン電極を使用しアーケ加熱すると、昇温とは別に表面張力が改善されることが分かる。このことからしても引け巣の防止にはアーケ現象における特殊雰囲気の応用利用が有効な手段であることが簡単に確認できる。

5. 経済効果

球状化率、鉄造歩留り向上に伴う製造原価低減効果を、原料費、直接費(溶解)、間接費(後処理)に分けて試算すると、表2~7のように示される。

1) 原料費

原価構成(原料評価、購入価格など)は各社の事情により異なるはずであるが、ここでは一例として概算数値を設定して原価低減効果を試算する。

例えば、a)のように自社発生の銑ダライを自社内で使用している場合は酸化損失、前処理費などの節減効果は(3,000円/t)のみであるが、b)のように、自社発生の銑

表3 溶解費、球化剤の原価低減

	溶解法	誘導炉		KS炉		低減	
溶解費	電力/t	650 kWh	0.02	13.0	580 kWh	0.02	11.6
球化剤	Fe-Si-Mg	2%	20.0	4.0	0.7%	20.0	1.4
小計				17.0			13.0
歩留				0.65 (0.60)			0.85
計				26.1 (28.3)			15.3 (13.0)

* 単位:t、千円、球化剤 3%Fe-Si-Mg

表4 鋳仕上、塗型工数、資材の節減(単位:千円/t)

造型方法		節減工数	単価/日	節減経費/t
	鋳仕上工数	0.5~1.0	30.0	0.7×30.0=21.0
	消耗工具類	(押湯切断用砥石他)		2.0
生型	計			23.0
	鋳仕上工数	0.3~0.5	30.0	0.4×30.0=12.0
	消耗工具類	(押湯切断用砥石他)		1.5
フラン鉄型	塗型工数	0.4~0.6	30.0	0.5×30.0=15.0
	塗型費/t			3.0
	計			31.5

ダライを外販し、スクラップを購入しているケースでは(10,000円/t)程度の低減効果が見込まれる。

2) 直接費(溶湯)

電力消費量は、一般的な誘導炉の650 kWh/tに対し、KS炉は580 kWh/tである。ここで電力料金を、20円/kWhとすれば1,400円/tの低減が見込まれる。また球化剤については添加量が3%Fe-Si-Mgが0.7%と少ないため、約2,600円/tの低減が見込まれる。これに歩留りを考慮すれば、製品t当たり、10,000円~13,000円の原価低減が見込まれる。

3) 間接費

鉄造歩留り向上、押湯軽減に伴う押湯切断、後仕上などの節減工数は、表5に示す算定基準によると、生型の場合、0.7工数であり、一工数30,000円/日とすると21,000円/t、消耗工具類、2,000円を加えて、23,000円/t、フラン鉄型の場合、鋳仕上工数に加えて塗型工数、消耗材、合わせて31,500円/tそれぞれ節減となる。

4) 節減工数の算定基準

a) 鋳仕上工数の算定

無押湯方案を採用可能にした場合、押湯切断に要する節減工数は、生型の場合に単重20 kgとし、一個当たりの、

表5 鋳仕上工数の算定

	単重 kg	個数 /t	押湯切断 工数 分	所要時間 分/t	節減工数 (t 当り)
生型	20	50	5~10	250~500	0.5~1.0
フラン	200	5	30~50	150~250	0.3~0.5

切断時間を5~10分とすると、表5に示す如く一工数、8時間で換算して、t当たり0.5~1.0工数、フラン鋳型の場合0.3~0.5工数となる。

b)塗型工数の算定(フラン)

塗型に要する時間を20~30分/m²、製品単重200kg、表面積(上、下型)を2m²とすると表6に示す如く無塗型の場合、t当たり0.4~0.6工数の節減となる。

5.1 総合原価低減例試算

銑ダライの有効利用、球状化能や歩留りの向上、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加えて、フラン鋳型の場合、塗型工数、塗料などの節減効果を総合すると、表7に示す如く38,000円/t~50,000円/tと大きな経済効果が得られる。月間生産量300tの生産工場では年間一億数千万円の原価低減が期待できる。

6. ま と め

著者らによって開発されたKS炉を用いて、永年にわたって培ってきた操業手法の高度化により球状黒鉛鋳鉄の製造が容易になり、経済的にも大きな効果が出ている。開発初期(1975)より本方法によって球状黒鉛鋳鉄を製造しており、その間に溶解方法や装置について研究を重ね、操業の安定性と共に、溶湯性状も一段と向上し、多くの製造実績を得ている。今後、この装置を他社で活用して戴くことによって、我々の長年の研究成果を役立たせねばと考えている。

現在は、銑ダライを原料としているが、これを更に進めて溶湯(流)、塊状原料の溶解、精錬を可能にすれば、その応用範囲は大きく拡がり、技術的にも経済的にも大きく貢献できるものと考える。

表6 塗型工数の算定(フラン鋳型)

単重 kg	個数 /t	表面積 (上下) m ²	所要時間		節減工数 (t 当り)
			分/m ²	分/t	
200	5	2×5=10	20~30	200~300	0.4~0.6

表7 総合原価低減試算例

分類	原料費 低減/t	直接費 低減/t	間接費 低減/t	低減費 計/t	生産量 t/月	年間原価低減額
a	3.0	12.0	23.0 (31.5)	38.0 (46.5)	×300	136,800,000円 (162,740,000円)
b	10.0	12.0	23.0 (31.5)	43.0 (53.5)	×300	162,000,000円 (192,600,000円)
c	6.0	12.0	23.0 (31.5)	41.0 (49.5)	×300	144,000,000円 (178,200,000円)
c'				41.0 (49.5)	×150 ×150	162,900,000円

注) 1. () 内、フラン鋳型

2. c' 生産150t/月、フラン鋳型150t/月の場合

参考文献

- 木下、木下: JACT NEWS NO. 465 (1995. 9)
- 谷村、他: 製鉄研究 (1963, 8)
- 丸山: フェロアロイ Vol. 14 No. 2
- 草川、他: (昭、40. 1) 球状黒鉛鋳鉄の欠陥発生機構とその対策 早稲田大学鉄物研究所
- 佐藤: 今後の鉄鋼事情と鉄物用銑鉄の役割 (H. 3. 7) 草野産業報
- 岩瀬、他: 特許公報 (昭、29. 9. 14)
- 音谷、丸山、他: 特許公報 (昭、37. 5. 9)
- 木下: 特許公報 (昭、51. 11) 金属溶解用電気弧光炉