studied. Driving pressures of coal constituents were measured, that of bright coal is higher than of dull coal, the former distribute in wide range, while the later concentrate in narrow range.

U. D. C. 621. 745. 34

キューボラの酸素富化操業に関する研究

—昭和28年9月23日受理—

池貝鉄工川口工場 吉 岡 順

要旨 著者はキューボラ送風気中に酸素を添加して操業した場合につき、230kg/hr の熔解能力のキューボラで一定コークス比の下に送風気中の酸素濃度 20.4~24% の間で実験を行い、その結果を米国における同様の実験の結果と比較検討した。その結果酸素添加により出湯温度と熔解速度は著しく増加するが、炉頂ガス温度はやや上昇し酸素添加 2.8% で 300°C に達する程度であり、炉頂ガス成分の変化もほとんど認められなかった。またこの条件下では地金は酸化されていないことが認められ、鑄鉄中の C および Si は酸素添加により増加している。コークス比を下げて酸素添加を行うと地金の酸化の度れがあるが、コークス比が充分に維持されれば出湯温度の点などより非常に良好な結果が得られると結論できる。

I 緒 言

戦後日本の燃料事情が著しく悪化して鑄物用コークスの生産量が少なく、しかもその質の低下はなほなほだしくいかんともし難い状態に追い込まれ、キューボラに電極屑、薪、マグネシウムなどを投入して操業する研究さえ行われた。灰分8%を保証する鑄物用コークスが多量に生産されている今日からみると嘘のような話である。このころに酸素を送風中に添加してキューボラを操業する方法が採り上げられて、これに関する研究発表も二、三行われている。しかしこれらはいずれも熔解速度、出湯温度など熱に関する問題のみを採り上げ、酸素添加が鑄鉄の性質に及ぼす影響を及ぼすかは論じられていない。米国においては、製鉄鋼方面で酸素添加が行われるようになって以来再び送風中に酸素添加する研究が盛んとなり、1948年以降の学術雑誌に数多くの研究結果が発表されている。これらの中には化学成分の変化、熔解損耗の変化に触れているものがあるが、直接酸化還元の問題には触れていない。また古くは Piwowarsky がその著書の中で酸素富化操業を紹介し、送風の酸素富化を行うと高温の熔温が得られ35~36kg/mm²の高抗張力鑄鉄が得られると述べている。彼の理論に従えば、高温熔解のために顕微鏡的に析出した黒鉛の形状が微細になるために高抗張力を示すのであろう。しかしこれも鑄鉄の酸化の

影響には触れていない。酸素添加によつて熱効率がよくなることは明らかであるが、はたしてこれが鑄鉄に悪影響を及ぼさないかどうかが問題である。あるいは酸素添加して良質の鑄鉄を得ようとする場合、燃料の経済になるかどうかが問題である。このような観点に立つて筆者の行つた実験結果と、米国で行われた二、三の研究結果を参考として、この問題を考察してみよう。

II 試 験

1. 供試材料

A. 鉄鉄：1 t エール式酸性電気炉により再製した鉄鉄を用い、大きさと成分を一定とした。大きさおよび化学成分は、第1図および第1表に示すとおりである。

第 1 図

(単位 mm)

第 1 表

C	Si	Mn	S	P
2.82%	1.52%	0.48%	0.04%	0.12%

B. コークス：市販の一号コークスを用い、大きさ

第 2 表

落下強度				眞 比 重	見 掛 比 重	気 孔 率	工業分析 %					発熱量 cal
50 mm 以上	40 mm 以上	25 mm 以上	15 mm 以上				固定炭素	灰分	揮発分	硫黄	水分	
77.7%	86.9%	96.0%	98.3%	1.73	1.10	36.04	82.61	14.93	1.91	0.78	0.55	6,830

一辺の長さ30~50mmに定めた。使用コークスの強度、気孔率、工業分析値、発熱量は第2表のとおりである。

2 試験装置

試験装置は第2図に示すとおりであるが、Aは吐出口径 6 in の送風機、Bは内径 150mm風管、Cはオリフィス型風量計、Dは水柱風量計、Eは熔銑炉本体である。Fなる酸素ボンベ数本をつき合せ、その圧力を一定にするために、留槽G、流量計Hを通して噴口Iより風管中に酸素を添加するようにした。炉の諸元は第3表のとおりである。

第 3 表

熔解能力	羽口面内径	有効高さ	羽口比
230kg/hr	370mm	1,300mm	17

3 試験方法

床込みコークスの高さは羽口上600mm (重量40kg) とし、追い込みのコークス比を27%、1回の地金装入量を 15kg とした。追い込みコークス比は1回の装入コークスの層の高さが50mmとなるようにその重量を定めて算出した。

送風量および送風圧は、上述の条件で酸素を添加せずに予備試験を行い、最も好い成績の得られる数値を求めて毎分6m³、風圧水柱 110 mm とし一定に保った。また石灰石の使用量は地金の約3%と定めた。

最初は酸素を添加せずに1時間、爾後約45分ずつ酸素の添加量を1%~3.6%まで約1%ずつ逐次増加して熔解試験を行った。添加酸素量の測定は、第2図のH流量計によって行い、さらに酸素量の変ることに炉に入れる直前の位置Tでガス分析を行ってその量を確めた。分析結果は第4表のとおりである。

第 4 表

計画添加量	送風中O ₂ 量分析値	添加O ₂ 量	条 件
0%	20.4%	0%	気圧762mmHg
1%	21.4%	1.0%	湿度 38%
2%	22.2%	1.8%	(4.31g/m ³)
3%	23.2%	2.8%	
4%	24.0%	3.6%	

出湯温度の測定は光学高温計により行い、炉頂温度は、投入口の縁の位置で装入した直後火焰の止つた時に、アルメルクロメル熱電対によって測定した。

ガス分析は酸素添加量の変ることに2回ずつ行い、その平均をとつた。

熔解能力は各装入時刻を測定して曲線を求め、なお酸素添加量を変える直前に全部出湯してこれを秤量して曲線と比較し、毎時熔解量を決定した。酸素添加後は炉況は著しく良好で羽口は非常に奇麗なのでほとん

第2図 試験装置

と羽口を突く必要がなかった。

地金の酸化が起るかどうが確めるため、楔形試片の破面、湯面模様、顕微鏡組織を調べ、熔滓の分析を行って参考とした。

Ⅲ 試験結果

1. 出湯温度および溶解速度

試験結果は第3図に示すとおりであつて、出湯温度は酸素添加せざる場合は1,380°Cであつたが、酸素の増加とともに上昇し、1.8%で急に上昇1,470°Cを示し、3.6%で最高1,510°Cを示した。小型熔鉄炉で1,500°Cの出湯温度は普通なかなかえられない温度である。出湯温度とともに溶解速度も酸素増加量に伴い著しく増加し、計画能力毎時230kg、酸素添加せざる場合には毎時180kgであつたものが、酸素添加により次第に増加し、3.6%の場合は毎時307kgを示している。

第3図 酸素添加量と出湯温度溶解速度および炉頂温度との関係

2. 炉頂温度および炉頂ガス成分

炉頂温度は第3図に示すとおり不安定であるが、酸素添加量1.8%までは約200°C、2.8%添加により約300°Cとなり、その後は大体一定している。

ガス分析結果は、分析の誤差は多少あるが大体において良好な結果を示しており、酸素添加量増加による著しい変化は認められなかった。第5表参照。

第5表

酸素添加量 %	炉頂瓦斯		
	CO ₂ %	O ₂ %	CO%
0	12.2	0.4	16.6
1	14.4	1.5	10.1
2	14.3	0.5	11.9
3	14.1	0.6	12.3
4	14.6	0.8	10.8

3. 過熱帯の煉瓦の侵蝕状態

侵蝕状態は第4図に示すとおりで、普通は山形に侵

第4図

蝕すへきてあるが、羽口上350mmのところより羽口真上まで平均に侵蝕している。

4. 熔滓の分析結果

熔滓の分析結果は、第6表に示すとおりであるが、No. 1は酸素添加1.8%の作業中に採取したものであり、No. 2は同様に2.8%のとき、No. 3は3.6%の時に採取したものである。

第6表 熔滓分析表(%)

試料番号	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	FeO	S	合計
No. 1	8.10	49.47	26.47	1.65	0.94	0.43	86.88
No. 2	12.50	45.36	30.40	2.37	1.23	0.46	92.32
No. 3	10.20	43.82	34.23	2.43	1.42	0.34	92.44

その時間は、第3図中に印(×)を附して示したFeOのみをみると少し増加しているが、合計額も増加しているから、著しい変化はないとみてよい。

5. 湯面模様および楔試験片

湯面模様は第5図に示すようである。添加酸素量の増加に伴い、次第に細い亀甲模様になつて酸素2.8%以上では大差は認められない。1,500°C附近で出湯した電気炉の湯の湯面模様に非常によく似てくる。酸素量3.6%添加程度では一般にいわれるような酸化による湯面模様の消失は認められなかった。

楔試験片の破面は第6図に示すようであるが、著しい変化は認められず、先端部のチル逆チルなど酸化の影響と考えられる現象が現われていない。

この二つの試験によつては地金は酸化されていないと認めることかできる。

6. 地金の化学成分の変化

鑄鉄の成分中CおよびSiについて酸素添加量の影響を調査した結果は第7表および第7図に示すとおりで、両成分とも増加している。

第5図 湯面模様

第6図

第7表

酸素添加量	0%	0%	1.0%	1.8%	2.8%	3.6%
投入地金	No-D	No-1	No-2	No-3	No-4	No-5
試片番号	No-D	No-1	No-2	No-3	No-4	No-5
O ₂	添加せず	1%	2%	3%	4%	
C	2.82%	2.96%	2.98%	3.12%	3.31%	3.16%
Si	1.52%	1.57%	1.13%	1.90%	1.92%	1.94%

7. 顕微鏡試験

検鏡の結果は第8図に示すとおりで、酸素添加を行わぬ場合と、酸素2.8%および3.6%添加したものと比較すると、酸素添加量の多いものほど黒鉛の量が増加するとともに黒鉛が太く延びている。

いずれの場合も基質はパーライトでフェライトは認

第7図 酸素添加量と地金成分の関係

第8図

められなかった。

8. 機械的性質

第8表および第9図は、酸素添加量と機械的性質の関係を示すもので、酸素添加量の増加に伴い抗張力およびブリネル硬度は減少している。

抗折力および撓みには大きな変化はみとめられない。

第8表

酸素添加量	0%	1.0%	1.8%	2.8%	3.6%
試片番号	No-1	No-2	No-3	No-4	No-5
抗張力kg/mm	28.3	28.7	26.2	25.7	26.3
抗折力kg	1,550	1,750	1,625	1,675	1,740
撓みmm	3.5	3.15	3.35	3.75	3.75
BHN	225	199	199	201	212

IV 試験結果の考察

1. 出湯温度および熔解速度と送風量および添加酸素量との関係

第10図中(A)は Piwowarsky の著書に掲げられている図で、コークス比を9%で一定とし、風量を増加した場合の出湯温度と熔解温度の変化を表わしたもの

第9図 酸素添加量と機械的性質との関係

である。(B)はW C Wick⁽¹⁾氏の研究結果のなかから選り出して コークス比12.5%で一定とし、24m³/minの風量の風を送りこれに酸素 5%, 15%添加した場合の出湯温度および、溶解速度の変化を図に表わしてみたものである。(C)は著者の研究結果である。もちろん炉の容量はそれぞれ異なり、(A)は不詳であるが、(B)は内径483mm, (C)は前述のとおり370mmである。

これらの図を溶解速度を縦軸に風量を横軸にとり、たまた出湯温度のみ各側の右側にとつてまとめたのが第10図である。

第10図

(A)の下部にある数値は、増加した風量中の酸素の量を示し、(B)(C)の場合は、実際の O₂ 添加量を示し、それぞれ横軸の送風量と相対せしめた。

まず(A)図について考えてみよう。ある量まで風量を増加すれば、溶解速度も出湯温度ともに増加するか、それ以上では増加を示さない。これは燃焼に必要な酸素が増加するとともにそれ以上に、窒素が増加して、炉中の熱をもつてにける量が増加するからであろう。

この操業の場合、溶解速度のみを考えれば風量は60 m³/min が最良だといえるし、出湯温度のみを考えれば、45m³/minの風量を用いれはよかつたことになる。かりに平常 35m³/min の風量で操業していたのを、45~60m³/min の風量に改めたとすると、窒素の影響を考えなければ、図に示すように 35m³/min の送風に6~15% の酸素を添加した場合に相当する。したかつてこの操業でかりに酸素添加を行うとすれば、45m³/minの送風量にしておいて添加し始めれば 35m³/minの送風量で添加するよりも酸素を6%だけ節約できる計算になる。したかつて酸素添加を経済的に効果的に行うには、その炉について最適のコークス比、最良の送風量を確かめてから、酸素添加を行わなければならない。今日までに発表せられている酸素添加に関する研究結果をみると、この点が明瞭にされていない憾がある。著者の試験の場合も同様であつて、酸素添加前の操業条件の適否を明確にする予備実験を行っていないのは残念であるが、とにかくこのような小型炉で、酸素をすかに3.6%添加して 1,500°C 以上の熔湯がえられ、溶解速度において70%の増加をみせていることは、酸素添加操業がいかに熱的に有利であるかを証明している。

(B)図においては(A)図とせんせん趣を異にし24 m³/min の送風に酸素を5~15%添加すると、溶解速度も出湯温度ともに直線的に増加している。この傾向は著者の試験結果と全く同様であつて、これは酸素添加操業法の大きな特徴である。

すなわち、ある炉について最適のコークス比および送風量を明確にし、これに酸素を添加して、酸素量と出湯温度、溶解速度の関係を二、三実験的に定めれば、これらは直線によつて示される関係にあるから、任意の出湯温度および溶解速度に対する酸素添加量をほぼ求めることかてきる。

2 熔湯の酸化還元の問題

著者の試験結果によれば、前述したように湯面模様、楔試験片の破面などより判断すれば、酸化の現象は

認められず、かえって化学分析結果によれば C, Si とともに増加して還元傾向を示し、顕微鏡試験、機械的性質ともにこれを裏付けている。本田、斎藤両氏によれば簡単な金型試験片から判断しているのであるが、酸素を添加すると C が増し、Si が減少するとのべている。また A. K. Higgins によれば条件によつて、C, Si とともに著しく増加したり、減少すると報告しており、W. C. Wick によれば直接酸化還元にふれていないが、その試験結果をみると酸素添加量を増すにしたがい、熔解損耗が減少している。その関係は第11図に示すとおりである。

第 11 図

条件 炉径 483mm
風量 約 24m³/min
ただし O₂ 13.8 のみ 25.2m³/min
コークス比 12.5% に一定

熔解損耗が酸化損耗であるとするならば、これは還元したことになる。

このように酸素添加によつて、酸化したり還元したり相反した結果を生ずるのは何に原因があるか、この問題について考察してみよう。

A. K. Higgins は、内径36in. (915mm) の炉を用い、酸素添加を行わない場合、酸素添加をした場合、酸素添加をしてベットコークスの高さおよび追い込みコークス比を著しく下げた場合と、3つの場合の地金の化学成分の変化について試験している。第9表は酸素添加を行わない場合の結果であつて、操業条件は床込めコークスの高さ1,650mm(重量1,089kg)、追い込み

コークス比 26.3%, 送風量 120m³/min である。

第9表 酸素を添加しない標準操業の場合の成分変化

(床込めコークス1,600mm, コークス比26%)

出湯順序	1	2	3	4	5	6	7	8	予定
T.C %	3.40	3.44	3.30	3.28	3.65	3.58	3.51	3.31	3.04
Si %	0.38	0.42	0.36	0.37	0.40	0.40	0.35	0.36	0.32
Mn %	-	-	-	-	0.43	-	-	-	-

第10表は上述の場合と全く条件を同一にして、最初の1時間だけ平均4.5%の酸素を添加し、その後添加を止めた場合の成分変化を表わしたものである。

第10表 酸素添加操業の場合の成分変化

(床込めコークス1,600mm, コークス比26%)

出湯順序	1	2	3	4	5	予定
T.C %	3.73	3.47	3.41	3.86	3.47	3.04
Si %	0.86	0.92	0.65	0.40	0.41	0.32
Mn %	-	-	0.55	-	-	-

この報告には出湯時間の記録がないので、酸素を添加した初めの1時間に出湯した回数が明らかでないが、第1回の出湯は吹き立て後39minで行つたと記録されているから、酸素添加の影響を直接うけたのは3回目の出湯くらいまでと想像できる。いずれにしても酸素を添加しない場合は、装入時計算した Si 量 0.32% よりわずかしちか増しておらず、またその値もほとんど一定している。しかし酸素を45%添加した場合は0.92%におよび、0.6%増加している。炭素についてははなはだしい変化はないが、総じて添加しない場合に比べ増加の傾向を示している。

次に床込めコークスの高さを1,300mmに下げ、追い込みコークス比も16.6%に下げて吹き立て後5分して5%酸素を添加し、12分休んでまた16分添加、17分休んで20分添加するというような酸素の間歇添加を行つた場合の成分変化は第11表のようである。

第11表 酸素を間歇添加した場合の成分変化

(床込めコークス1,300mm, コークス比16.6%)

出湯順序	1	2	3	4	5	6	予定
T.C	3.74	2.62	3.13	3.13	2.43	1.23	3.04
Si	0.74	0.32	0.34	0.19	0.28	0.25	0.32
Mn	0.54	0.82	-	-	-	-	-

この結果をみると C も Si も著しく減少を示している。

以上3つの場合を比較してみれば明らかのように、第10表の場合には C, Si とともに増加して還元傾向を示し、第11表の場合には酸化が行われた形跡が明確である。このように酸化還元の相反した結果を生ずる主な原因は、床込めコークスが、操業中高く維持される

か低く維持されるかにあるので、ある%以上酸素を添加すれば酸化し、ある%以下ならば酸化しないという酸素量だけの限界を定めることはできないように考える。

操業中の床込めコークスの高さ、すなわち初込みコークスの高さとの追込みコークス比が少ないか多いかによつて、熔湯が酸化の傾向を帯びたり、還元傾向を示したりすることは、日常普通の操業の場合でも経験されることである。

ただ第11表の場合のようなはげしい酸化は普通の操業では起りえない。なぜなればそれほど床込めコークスが下れば炉況が悪化し、棚吊りその他のために操業不能に陥つてしまうはずである。このようなはなはだしい酸化を起しながら、ある程度の出湯温度を保ち、熔解速度を著しく速めたのは酸素を添加したためである。換言すれば従来考えられていたようにコークス節約を考えに入れて酸素添加操業を行うことは、熔湯を酸化する危険を伴うから注意を要する。

次に風量および酸素添加量が一定の場合、床込めコークスの高低によつて、還元あるいは酸化の現象を生ずる理由を考察してみよう。床込めコークスが高く維持されていても、羽口から CO_2 が最大となる位置までの、いわゆる酸化帯の高さは、床込めコークスが比較的低い場合とそう大差はないはずである。ところが酸化帯より上部の還元帯の高さは、床込めコークスの高いほど高くなる。換言すれば地金の熔滴が、還元帯をとる道程が長くなる。また床込めコークスが高ければ熔解速度はおそくなるが単位時間に炉中に送り込む風量あるいは全酸素量は一定であるから、単位重量の熔滴が炉中でふれる炉気の量は、床込めコークスの高さが高く、熔解速度の遅いほど多いことになる。

従つて床込めコークスが高いほど還元傾向になり床込めコークスが低くなつてある限度を越えると酸化に傾くことになる。

次にコークス比が充分でかつ一定の場合、ある風量で操業した時と、その風量に酸素を添加した時とを比較し炉況がどう変るかを考察してみよう。

酸素を添加しその量を増すに従い、コークスの燃焼は速くなるから、羽口から CO_2 量が最高となる点(最高温度に達する点)までの高さ、すなわち酸化帯の巾は減少する。また燃焼が完全になるから、最高温度は著しく上昇する。

従つて上部の還元帯の巾は、酸化帯の巾がへるだけ増し、温度も著しく上昇する。

いい換えれば、比較的還元性炉況でしかもコークス

の温度が著しく上昇するのであるから、当然加炭および SiO_2 のコーコスによる還元が著しくなり C および Si が増加するはずである。

これらの考察を証明するものは、炉壁の侵蝕である。著者の実験では一操業で次第に酸素を添加したので比較ができないが、第4図にみるように一様に深く侵蝕し、還元帯が巾広く高温であつたと想像することができる。

第12図は Higgus 氏の研究結果で、コークス比および風量を一定とし、これに酸素を添加した場合としない場合との炉壁の侵蝕状態を示したもので、酸素を添加した時の方が最高に達した点がわずかに下つており、侵蝕度は著しく巾広く一様に食われている。すなわちこの場合も還元帯全般に温度が非常に高かつたと判断できる。

炉壁の侵蝕が炉内の温度と正比例すると仮定すれば、コークス比一定の時、酸素を添加しても、還元帯、酸化帯の巾はほとんど変らないが、還元帯全般に著しく温度が昇つたことになり、上述の考察とほぼ一致する。

第 12 図

V 結 論

- (1) 酸素量以外の諸条件を一定にした場合、熔解速度および出湯温度は酸素添加量の増加とともに直線的に増加し、熱効率は著しく増加する。
- (2) 熱効率がよいからといってコークス比を下げると、出湯温度が高くて操業中にベットコークスが低くなり、地金が著しく酸化して鋳物に欠陥を生ずるようになるから注意せねばならぬ。
- (3) 酸素添加量を増せば熔湯が酸化するように考え

られているが、操業中適当な高さにベツトコークスを維持するように初込みコークスの高さおよび追い込みコークス比を増せば、かえつて還元傾向を示し健全な鑄物が得られる。

- (4) 3 t以上の炉の場合には、ポンペを非常に沢山用意せねばならないから、實際上酸素富化操業はほとんど不可能である。従つて、酸素発生装置を持ち配管によつて酸素を送風管に導入できる事情にある工場か、あるいは米国のように液体酸素として運搬しエバポレータによつて気化して送風中に導入する方法をとるか、いずれかでなければ実現性は少ないとみるべきであらう。
- (5) 実際の場合には米国においては15%も添加している例もあるが、わが国においては3%程度が適当な添加量ではないかと考えられる。

(6) 添加方法としては連続添加法より間歇添加法をとる方が實際的である。

(7) (2)の項に述べたようにコークス量の節約は鑄鉄の酸化という点から期待できないが、低質コークスを用い高温でしかも健全な鑄鉄を得ることができ

参 考 文 献

- W.C. Wick, *Iron Age*, May 20 (1948).
 A. K. Higgus, *Iron Age*, April 22 (1948).
Iron Age, March 31 (1949).
 E.N. Harrison, *Iron Age*, May (1949).
 A. W. Greggs, *Foundry*, Jan. (1948).
 本田, 斎藤, 鑄物協会誌, 第21巻, 4号。

Cupola Operation with Oxygen Enriched Air.

By Sunao Yoshioka

(Ikegai Iron Works)

SYNOPSIS:— An experiment on the effect of added oxygen in cupola blast was made. Melting capacity of the cupola was 230 kg/hr and coke ratio was maintained constant during the experiment. When the oxygen concentration in the blast was increased from 20.4% to 24.0%, the tapping temperature and the melting speed were remarkably increased, but the waste gas was not increased. In case of decreasing the coke ratio, the charged metal would be oxidised and degrade the quality of cast iron. But when the height of bed cokes is maintained constant oxidation of metal do not occur and the cast iron of good quality is obtained.

会費払い込みについての御願い

御承知のとおり、本会の運営は会費に依存しておりますが、未納会費が相当額にのぼり、事務上困難をきたしております。本年度も終りに近づきましたので、至急お払い込み下さるようお願い申し上げます。

特別会員 (一口年額) 昭和25年度 2,000円 昭和26年度 2,500円

昭和27, 28年度 3,500円

正 会 員 (年 額) 昭和25年度 300円 昭和26, 27年度 500円

昭和28年度 700円