

キュポラ操業に就いて

== キュポラの特性と操業に関する新考察 ==

養 田 実

On the Cupola Operation

(The New Investigation on the Properties of the Cupola and its Operation)

Minoru YOHDA

The author considered fundamentally about the following problems: viz. the relation between the combustion of cokes and the blast; the relation between the charging materials and supplemental cokes; the falling condition of the charges; the physical meaning of the bed cokes, etc. And the author urge the consideration for the other point of view on the coke ratio, and the chemical reaction of the furnace in order to operate the cupola reasonably.

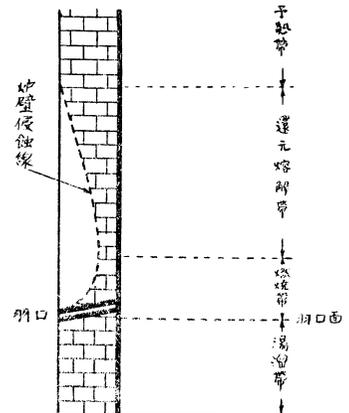
Ⅰ 緒 言

金属の熔解精錬に用いる炉としては一般的に鍋型 (Pan) と筒型 (Cylinder) とに大別出来る。茲で取り挙げるキュポラは筒型の代表的なもので、材料と共に燃料であるコークス更には造滓剤と一緒に投入して製錬するところに特色がある。即ち燃料と材料の直接接触と云うことであり、それが重力による自然降下の中に反応を起す訳であつて、電気炉が反応平衡を問題とし、キュポラが反応速度を問題とすると云われる所以も茲にある。このキュポラの特性を本質的に考究して、操業に関する従来の一般的考え方に対して多少の批判考察を加えたいと思う。

Ⅱ キュポラ操業に於ける諸要件の意義

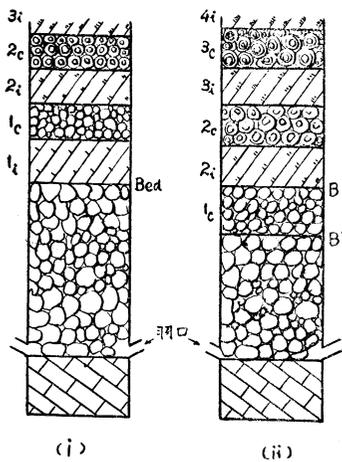
(1) 床込めコークス

コークス比に従つたコークスの層の上に単に鉄地金を置いただけでは鉄は熔けない。そこに床込めコークスの意味がある訳で、キュポラ内で炉底より熔解帯の上端迄は常にコークスで充たされている必要がある。筒の中に充鎮されたコークスの柱で、その途中に送風羽口があつて燃焼送風を行うことになる。換言すればキュポラ内に於て地金を適当な位置に支持するためのコークスが床込めであつて操業中の腰の強さをこれが担当する。床込めコークスを考究するに当つては、先ず結果から見て操業終了後の炉壁侵蝕線を基準にして炉内反応の区分を検討する方が便利である。茲では最も妥当と考えられる(図一 I) を掲げることとする。この図で見られる通り炉内に充鎮するコークス柱即ち床込めに対して、羽口からの送風によつてこの附近が燃焼する。その燃焼の最も激しい部分即ち CO_2 発生最大の部分が最高温帯で又炉壁侵蝕の最も甚しい所である。これより上部は充鎮コークスと CO_2 の接触によつて CO を発生し還元作用の行われる所である。そこで上部から降下して来た地金が溶解をするのは此の最高温帯即ち燃焼帯の上部で



図一 I

あるかと言うとそうではなくてそれより更に上方である。つまり炉壁侵蝕の開始される位置迄が還元帯であり熔解帯でもある。大部分の熔解はこの帯の下方部分であるとされるが、侵蝕開始線からこの帯の中間迄を熔解帯とし、それ以下最大侵蝕部を通り過ぎて羽口面迄を燃焼帯とする考えもある。とも角侵蝕最上位置が熔解開始線とも見做されるであろう。床込めコークスは熔解帯の頂上線を保持することによつて意味がある。従つて一般には侵蝕開始線の位置を床込めの高さとしてい



図一Ⅱ

を動かさないようにすることが要訣とされている。ところで次々に装入される追込めコークスと地金の関係はどういうことになるか。(図一Ⅱ)で示される通り床込めの上に装入された地金はコークスの燃焼熱に伴つて熔解し滴下してゆく。それと同時に床込めのレベルもコークスの焼焔に従つて降下してくる。図に於て(i)のBedの位置が(ii)のB'に下る。又(i)の1cに示される地金が熔融滴下して第1回装入の追込めコークス1cがBedの位置即ち(ii)のB-B'に納まる。斯くして1cが床込めと同じ作用をなして、地金2cが熔解し更に2cがBの位置に降下する。斯様に漸次装入物が降下し地金の熔解精錬が継続されるが、床込の位置Bは常に保持される。又保持されるように操業を注意する必要がある。かくして初めに装入された床込めコークスは漸次消耗し追込めコークスが羽口面に達した時に焼焔されたことになる。それ以後は追込めコークスが床込めの働きをする。但し羽口面以下の湯溜部分はコークスの燃焼がないので当初装入された床込めのまま変らない。つまり床込めコークスの筒柱の中で、羽口部以上は追込めと交替するが湯溜部分は変わらず又燃焼焼焔することもない。従つて床込めコークスと称する中で湯溜とその上部とは明かに相違がある訳である。そこでもし床込のレベルが熔解帯の上限より以下の低いものであれば図によつてlayer by layerのコークスや地金の秩序が崩れることが考えられる。而して完全に熔解し切らない地金が熔解帯内に降りて来て熔解帯の温度を下げ湯の温度も低下する。従つて床込コークスのレベルは少くとも熔解帯の上限を保持すべきであることが判る。ところで床込のレベルが熔解帯より上部にあつた場合にはどうか。この時には最初の第1回装入地金を熔解する迄に余分のコークスを燃焼させねばならないのでそれだけコークスが無駄であり時間もかかることになる。従つて床込を無闇に高くすることは考えものである。地金がSteel Scrapである場合相当思い切つて床込レベルを高くするがそれ程意味はない。これは追込め其他の変動によつて床込が甚しく低下することを懸念しているのと、更に斯くすれば炭素の吸収が増大するであろうと言う考えからであるが実際には考慮の余地がある。問題は熔解帯よりどの程度床込を高くすればガス還元或はガス滲炭によつて地金の熔融点が降下するかと言うことと、コークスの燃焼による温度がその熔融点に合致するかと言う事である。それによつて熔解帯の上限が上昇し且つ床込のレベル上昇と合致すれば良い事になる。其際熔融点を限度とすべきか或は半熔融状態になる位置を限界とすべきかと言う問題も考えられる。従つて何処に熔解帯の上限をもつてゆくかと言う事を考究する必要がある。それによつて床込の高さも決つてくる訳である。つまりSteelの熔解を行う場合には床込めコークスの装入に際して只機械的に又習慣的或は大體の見当で投入する事なく上述の問題を検討する事が重要であると思われる。而して是れの決定解決には尚理論的実験的考察が必要であると考えられる。

(2) 送風量と追込めコークス量の関係(地金比の問題)

一般に1回に装入するコークス量は、炉内に投入した時の層の高さにして150mm程度を標準とし

て炉の大小に応じて多少変化させている。而してその高さの時の重量の10倍を以て地金1回の装入量としている。これは一般にコークス比が10%程度であると言う事と、コークス層の高さが此の位で燃焼に都合が良いと言う事から行われている便利な方法である。然し理論的に考えればコークスの量を決定するには Blower から送り込まれる送風量とコークスの燃焼の関係から決めてかかるべきであると思う。希望する焼燃状況になるように送風量とコークス量の間関係を定めて追込装入をすることによって、操業の正常と床込位置の保持が出来ることになる。従つて追込コークスの量は送風量を見逃して決定することは出来ない。もし追込を炉の大小其他の条件に応じて決定したり或は一般通例のコークス層 150mm 前後の量と云うことで行うとすれば其に依る送風量を加減して、コークスの燃焼状況が希望条件に合致するようにし又コークスの焼燃時間が追込装入の時間間隔と合うように考慮すべきであるとする。送風量とコークスの燃焼に関しては(表-I)に示す。

表-I

燃焼 状況	ガ ス 成 分			炭素1kg 当り 重量 (kg)		必要空気量 (m ³)	
	初期	後 期		O ₂	空 気	15°	1atm
	CO ₂	CO ₂	CO			炭素1kg 当り (%)	コークス(c80) 1kg当り
A	100	100	0	2.66	11.5	9.42	7.54
B	95	90	10	2.53	10.9	8.92	7.14
C	90	80	20	2.39	10.4	8.49	6.79
D	85	70	30	2.26	9.8	7.99	6.39
E	80	60	40	2.13	9.2	7.55	6.04
F	75	50	50	2.00	8.7	7.05	5.64
G	70	40	60	1.86	8.1	6.61	5.29
H	65	30	70	1.73	7.5	6.18	4.94
I	60	20	80	1.60	6.9	5.68	4.54
J	55	10	90	1.46	6.3	5.18	4.14
K	50	0	100	1.33	5.8	4.74	3.79

これは理論計算に基いた値である。キューボラ内のコークス燃焼状況をどこに置くかと言う事は一つの問題である。これによつて炉内の酸化気及び還元気に影響を受けるし又炉内温度の昇降にも関係する。装入する原材料の種類によつても考慮すべきであると思われる。要するに炉の状況と同時に風量の間関係を考慮してコークス量を決定すべきであつて、一般に用いられている『コークス比』の他に『地金比』と云うものを新たに考えたかどうかと思われる。コークス比は地金の装入量に対するコークスの量である。キューボラの操業

に於ては一般にそれで湯を何屯降ろすとか1時間にどれ程の湯を出そうとか云う事がさし当りの目標になるので、先ず地金の装入量を考えそれに対してコークスを何程投入すると言う事を問題にする。そこでコークス比と云う言葉も出来る訳であるが、反対に送風量に依るコークス装入量を決めるとすれば其のコークス量に相応した地金量を後から決めると云うことになる。従つて出銑量を主にした操業の面から考えればコークス比と云う事になり、炉内反応の面からすれば地金比と云う考えが出て来ると思う。従つて実際の操業には此の両面を併せて考慮する必要があるのではなからうか。従つて又一般の data に見られる風量とコークス比だけでは、その時刻に於ける風量値を示しているにすぎず、又コークス量の間関係が判りしないから、充分に操業の内容を尽しているとは言えないと考えられる。

(3) 炭素の吸収に関して

装入地金が出銑される迄の間に銑鉄の最も重要成分である C% が変化する。それは鍋炉と違つて直接原料と燃料が混合されて製錬するキューボラの特長でもある。燃料効率から見れば最も良好な条件であり、材料が燃料の影響を受ける点から云えば最も甚しい方法である。この特性を如何に生かすかと言う所に操業法の問題がある。先ず炭素の吸収がいつどこで行われるかと言う事であるが、これに就いてはガス還元、ガス滲炭、直接コークス接触などが考えられる。又場所的には予熱帯、還元帯、熔解帯、湯溜帯の各部に於て考えられる。ガス還元、ガス滲炭が有効であるとすれば予熱

帯、還元帯の層を長くし、炉内を還元気にして充分ガスによる吸炭を計れば炭素の増大には有効である。逆に一般の Low Carbon の銑鉄を得るには逆にこの作用を僅少にさせるように計れば良い。炉内高温に於ける熔滴の炭素接触吸収が有効だとすれば極力炉内を高温になるようにし熔解帯、燃焼帯を長くするように計るべきである。又湯溜に於ける沈積湯がコークスによつて吸炭する量が多いとすれば湯溜帯を深くして而もこの温度の低下せぬように注意すべきである。而して以上の各項目は何れも実験的に夫々認められているところである。唯その有効度の大小に関しては諸説必ずしも一定していない。此等を簡単に片付けて了えば要するにコークス量を増大すれば炭素の吸収は大となり Steel Scrap の熔解や High Carbon の湯を得るためには好都合であると云える。然し無闇にコークス量を増したのでは不経済であるばかりでなく床込の位置が高くなるので前述のレベル保持の上からも工合が悪い。実際には操業透視図を作製して常にこのレベルの正常化を計るべきである。このように簡単に片付けられない細い問題が交絡しているが、前項の諸件の中で前者のガス吸炭を力説する考え方によれば炉内を極力還元気にして還元反応を有効に進める必要がある。又後者の考え方に従えばコークスによつて出来るだけ炉内を高温にして還元気でも酸化気でも大して問題にせず専ら高温吸炭を目指すと言う行き方になる。炉内を高温にするにはコークスを可能な範囲で多量に而も良質のものを用い、送風も熱風温度を高くする方が有効である。筆者が行つた従来の実験試料に基いて重相関 (Multiple correlation) により影響度を検討した結果は、炭素の吸収に対しては風圧、風量及び熱風温度の順に大となつている。これは一応炉内温度が大きな影響力を持っていると云う事に解釈されると思うが尚今後も検討を続ける予定である。他に炭素吸収に関する factor としては Slag の塩基度の問題がある。又コークスの粒度の問題、特に炉の構造、中でも羽口比及び有効高さの問題などが考えられる。此等に就いても諸説必ずしも一致している訳ではないが前述の後者の項目を主体と考えれば比較的に重要性は軽減されるように思われる。

(4) 材料の種類に就いて (Le-Chaterie の法則)

材料の種類によつても相当の相違が認められる。形状の点に就いてみれば旋盤屑や薄片などは予熱帯に於て酸化し酸化鉄を作る事が多い。これが結局多量の Slag を作る事になる。又大塊材料では熔解帯、燃焼帯に入つても熔解し切れないことにもなる。此等を混合すれば薄い小形材料は銑鉄、コークスなどの荒い大塊の間をくぐり抜けて降下し易いから配合装入順が乱れてくる。従つて材料の形状は適当で予熱帯で充分予熱され還元熔解帯で全く熔解されることが望ましい。そのためには熔解帯の温度が充分上昇している必要がある。これはコークスの燃焼の面から考えれば燃焼帯で燃焼して CO_2 を盛に発生した後還元帯に入つてコークスに接して CO になる。この際甚しい吸熱作用を起すから還元帯で一挙に CO になる反応を起させるのは良くない。然しこの帯で熔解が充分行われればその熔解に熱が消費されるから CO への還元反応は阻止される傾向になる。一種の Le-Chaterie の法則に相当する。^① Steel Scrap の場合には寧ろ還元気を好ましいと思われるから CO_2 が多く酸化気に過ぎる事も考えものである。この辺の調節が熔解操業の一つの要点にもなると考えられる。

熔解帯から燃焼帯を降下した湯滴は温度が低い程羽口からの送風に接触して高温となる。これも一種の Le-Chaterie の法則で考えられる。さればと云つて湯滴の温度が無闇に低いのも考えものである。送風に湯滴が接して発熱するのは主として湯滴中の珪素が酸化反応を起すためである。マンガも勿論関係する量は少い。これは即ち Bessemerization であるが、燃焼帯が高くて高温部が上位にある程羽口迄降下する湯滴の温度が低下し、逆に Bessemerization によつて Le-Chaterie の法則に従い高温の湯が得られると云う結果になる。然し乍ら Bessemerization によつて生ずる熱などを問題にせず炉内高温を専らコークスによつて達成せしめようと言う考え方も生ずる。この方が大乗的な行き方であろう。これで考えられる事は熱風送風であり更に酸素添加も有力であると推

測する。

熱風送風で行えば燃焼帯は一般に低くなり当然 Bessemerization の効果は減少するが斯るものを期待するよりも直接コークスの燃焼温度の上昇により 高温の湯を得る事を目標とするものである。Steel Scrap 等は効率の良い送風予熱装置を考へて相当高温の送風を行う事が寧ろ常道であらう。

吸炭に関して材料の成分に就いてみても同様の事が考へられる。即ち原材料中の含有炭素量の少い程吸炭の量が多く出銑中の C%は多いと云うことである。此の点に就いては或る程度實際実験的にも確められており、適度の形状大きさを有し炭素含有量の少いものは吸炭は良いようである。然しこれも大乗的と云うか直接的な方法を構ずる事によつて別の途が行い得ると思はれる。

又 C と S_i の関係に就いても同様である。C と S_i は共に銑鉄の重要成分であるが其両者が適量含まれねば目的に合致した性質のものを得る事が出来ない。その何れが少くても白銑になる事は Maurer の組織図からでも明瞭である。ところでその何れもが少い原料を用いて両者を吸収させようとする一方が先に相当充満すると他は入り難いと云う傾向がある。實際のキューボラに於てはコークスを燃料とする点からも 炉内温度の点からも先ず炭素の吸収が行われる。従つて其の程度によつて珪素の吸収が問題になる。筆者の従来行つた実験資料によつて其の影響度を相関分析で調べた結果からも、S_i に対する影響力は C%が第 1 でそれに次いで熱風温度、風圧と云う事になつている。風量に就ては data 不足で調べられなかつたが、とも角 C%の影響が大きい事は認められる。操業に際しては此等の諸問題を充分考へて対処すべきであると思はれる。

(5) 其他の要件

以上の他に操業に対する諸問題として考へられる事柄には石灰石即ち Slag の塩基度の問題がある。これは一般キューボラとしては酸性を通例とする。近年 Nodular 銑鉄が現われてからそれに呼応する塩基性操業が取り挙げられているがこれもまだ経費其他の面で一般的と云う訳ではない。唯ここで問題としたいのは吸炭或は吸珪素にどの程度の影響があるかと云う点である。(3) に述べた後の項目の考へ方からすれば Basicity の如何は余り関係ない事になるがそれでも此の重要性を説いている説もあるので尚一考を要する点であるかも知れない。其他炉の構造、熱風温度の具体的関係、コークスの性質並に形状大きさなどが考へる対照として挙げられると思ふが後者即ちコークスの粒度に就いては C%ばかりでなくその他各種の製品成分に対して余り関係がないと云う発表がある。²⁾ 前者の炉構造に対しては羽口の問題など相当検討の余地がある。

Ⅲ 結 言

Steel Scrap を原料とする時には吸炭が問題となり、Meehanite や Semi-Steel を作る時には排炭と云うか如何にして炭素の吸収を防ぎ調節するかと云う事が問題になる。同じ吸炭でも C3% のものを作る場合と C4% のものを作る場合とでは相当各種の点で相違が甚しいと思はれる。と云う事は 3% 程度の吸収は比較的容易であるが 4% 程度迄もつてゆくのは困難だと云う事でもある。コークス比の点に於ても相当違つてくると思はれる。然しその場合でも飽く迄コークスを基準にして地金を変化すべきであつて、地金を基準にしてコークスを変化すべきではないと思ふ。即ちコークス比と云うより寧ろ地金比に就いて考へるべきである。コークス比が大ならば溶解速度は遅く小ならば速いと云う事になつているが地金比と言う観点からすればコークス量は基準既定値であるから甚しい相違は無くなるであらう。要するに溶解速度が遅いと云う事は同一材料である限りコークスの使用量が多いと云う事にある為めである。而して床込位置は其結果上昇する。以上のような面に就いては従来余り取扱われていないようであるが、然し案外根本的な要件であるように思はれるので一応考へていた事の一部を取りあげてみた。此等の諸点に就いては尚今後の実験によつて實際的にも検討を続けてみたいと考へている。

【註】

- ① 齊藤弥平：鉄鑄物の特色と熔解技術（日本金属学会金属材料講義）
- ② 石川潔：（日本鑄物協会誌，昭和29年7月）