

水冷転炉試験について(その2)*

(強制冷却による永久炉壁式炉の研究—IV)

佐藤良蔵**・瀬谷 修**・田畑農夫**

Operation of the Water-Cooled Converter (Part 2).

(Study on a permanent-wall-type furnace with compulsory cooling—IV)

Ryozo Sato, Osamu Seya and Nofu Tabata

Synopsis:

In previous report (Vol. 45, 1959, p. 699) the authors reported the results of experiments on a small converter with water-cooled tuyeres and jackets. In this report, they reported the water-cooled converter practice to estimate the application of this method and following results were obtained.

By application of a side-blown converter process, low P steel was made while the C was still high by the choice of refining operation. One of the objectives of the experiment was the production of low Cr steel from pig iron that contained medium Cr. The result showed that this process had a strong ability to eliminate Cr completely in refining stage of the heat.

In general, it was important to investigate the characteristics of the refractory materials for patching. This was examined by microstructure-test. Another test was made with a baby water-cooled converter which was designed as 5 kg capacity. From the results it was found that the refractory lining in a converter was eroded by dynamic streams of metal, slag and blast, and especially the action of slag must be emphasized.

I. 緒 言

報告者は強制冷却法による耐火壁の永久壁化を試み、既報¹⁾で転炉への応用に関する考察と、その基礎試験の結果を述べた。すなわち横吹き転炉に水冷羽口を設置する時、羽口の維持および同部に永久耐火壁の形成が確認され、同時に水冷法を採用しても操業経過はほとんど普通転炉のそれと異ならず、むしろ調整がより容易な傾向さへ得られた。

そこで、酸素製鋼様式の発展に合せて本型式転炉の実用範囲の拡大のため、吹精操作および炉況の詳細なデータを求める意味も含めて、前記の結果にもとづいて水冷転炉＝同熔銑炉の組合せによる熔解、各種吹精試験を行ない、吹精方法に対する耐火壁の永久炉壁化の機構、水冷効果と使用耐火材の性質との関係、あるいはその吹精過程におよぼす影響などを調査した。

各項目別の詳細な報告は別報で取上げ、本報告にはその主要なものについての概要と成果を述べる。

II. 試験炉および供試材料

水冷熔銑炉(内径260mm)および転炉(容量50kg)は前報で示したもので、耐火壁は張替することなくそのまま継続使用した。ただ転炉は側壁の水冷ポートおよび

水套をさらに前面に引出し、この部分の耐火壁の厚さを20mmまで減じた。

試験内容から使用耐火物はS社製クロームマグネシア質のみに限定し、炉頂部のみは他の材料を使用した。耐火物の試料は吹精終了後羽口水準面を基準に採取し、浸蝕熔損状況ならびに残留耐火層の詳細な調査にあてた。炉況の考察上炉形変化に関する諸因子中、吹精時間、装入熔銑の成分、温度変化あるいは添加造滓剤などの影響を取上げ、一方水量＝水温変化の関係から炉壁の維持や浸蝕・熔損機構を追究した。

吹精用酸素は市販品で97.5%以上の純度のもの。ボムベを連結装置で組合せ、調整器を経て炉内に送入される。熔銑は水冷熔銑炉で鑄物銑または製鋼用銑に、吹精鋼を所定の割合で配合したものを再熔解したもので、必要に応じFe-Mn, Fe-Siなどを添加した。また脱クローム試験用含クローム銑は所要クローム含有率を1%として高炭素フェロクロームを添加した。造滓剤には石灰石を使用した。

以上のように転炉吹精条件からすれば不利な諸条件の選択になるが、これを酸素吹精することにより、その異

* 昭和33年10月本会講演会にて発表

** 秋田大学鉱山学部

常に対しての水冷法の適応性あるいは炉壁構成の確認を便ならしめる参考資料を求めた。後述の成果から、かかる操作を考慮すると、容量の拡大に対しても充分対応して行けるものと確信している。

また内容 5 kg の全面水冷型超小型転炉を試作し、これで吹精経過の詳細の追究、炉内形状の変化、あるいは浸蝕・熔損機構の細目を調査した。小型のため、裏張りは水套上部に煉瓦 (1/4 大) を使用した以外はすべてモルタルを使用し、酸素は 3~5 mm 径の銅管を羽口代りにしてある。

III. 実験とその結果

操作の概要は前報とほとんど同じで、装入熔銑が鋼屑配合なので低珪素、低マンガンとなり、逆に塩基性のため熔銑の加炭が目立つ。したがって所要成分はこれにフェロシリコンやフェロマンガンを追加した。熔銑温度は出湯時で平均 1,250~1,300°C、転炉への装入温度はさ

らに 20~30°C 低下する。装入造滓剤は数回を除いて石灰石を使用し、その添加は所要量を炉の予熱時に行なつた。予熱は都市ガスを使用した温度は 500~700°C 範囲で、石灰石の分解は望み得なかつた。ただ連続的に吹精試験を行なう場合は、炉壁は吹精時の保有熱で水套部を除き 600°C 前後となっており、この区別から吹精経過におよぼすその影響や冷却水の温度変化の比較ができた。

前報に述べたように通常操業では、その経過や操作は本型式転炉でも一般転炉となんら異ならないことを確認したので、本実験ではさらに今日問題視されている特殊の目的に応じた吹精操作が本炉に採用し得るか否かに注目した。すなわち、採用の可否とその適用に対する本炉の特徴を調査する意味で脱炭、脱クロームあるいは温度調節を目的とした冷却効果の加減などを包含させた。試験吹精の内容を示す例として、各結果を整理し、実験群毎に操業結果を抜記すれば Table 1 のごとくなる。

Table 1. Summary of experimental data.

Heat No.		B-63	B-64	B-65	C-61	C-01	C-63	C-44	E-11	E-49	E-54
Metal charged	Weight kg	40	45	40	30	30	30	35	30	35	25
	Temp. °C	1,250	—	—	—	1,300	—	—	—	—	—
Type of addition kg		CaCO ₃ 3	CaCO ₃ 3	CaCO ₃ 1	CaCO ₃ 2	CaCO ₃ 1	CaCO ₃ 3	—	CaCO ₃ 3	CaCO ₃ 2	CaCO ₃ 3
Duration of blow mn		15	18	22	15	10	10	15	5	11	13
Oxygen	Pressure: kg/cm ²	6~8.0	6~8.0	8.0	5~6.0	5~6.0	6~7.0	7~7.5	7.5	7.0	7.5
	Volume: m ³	3.2	5.2	4.8	1.8	1.8	1.8	2.2	1.3	2.0	2.1
Analyses of metal charged %	C	3.81	3.46	3.45	2.90	3.63	2.99	3.51	3.09	4.00	3.60
	Si	0.76	1.64	1.40	1.01	0.66	0.60	0.48	1.17	0.98	1.18
	Mn	0.57	0.35	0.36	0.57	0.50	0.67	0.46	0.79	0.62	0.52
	P	0.376	0.25	0.208	0.140	0.38	0.136	0.333	0.65	0.67	0.70
	S	0.110	0.087	0.112	0.110	0.120	0.242	0.106	0.093	0.122	0.090
	Cr	—	—	—	0.72	0.31	0.73	0.60	0.197	0.097	—
Analyses of blown metal %	C	1.86	0.70	0.05	1.13	2.90	0.29	0.07	1.94	0.10	0.03
	Si	tr	tr	tr	tr	0.17	tr	tr	0.07	tr	tr
	P	0.044	0.088	0.159	0.096	0.144	0.086	0.244	0.25	0.43	0.061
	S	0.035	0.064	0.070	0.060	0.065	0.062	0.072	0.068	0.063	0.034
	Cr	—	—	—	0.30	0.134	tr	tr	—	—	0.19
	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Analyses of slag %	SiO ₂	21.39	27.95	31.47	33.10	22.83	19.74	21.05	35.33	30.77	15.26
	Al ₂ O ₃	2.68	7.10	5.45	16.49	2.88	3.69	3.47	1.25	2.40	3.35
	CaO+MgO	33.08	24.99	14.08	12.83	20.35	30.09	17.05	20.67	23.20	32.71
	ΣFe	33.12	34.29	34.07	24.83	22.80	24.09	37.17	24.44	16.51	35.04
	P	0.410	0.638	0.361	0.83	0.78	—	—	—	—	2.74
	Cr	—	—	—	0.93	—	0.70	—	—	—	—
Cooling water	Volume l/mn	10	10	10	10	10	10	10	7	7	7
	Temp. °C inlet outlet	15.5 17.2	16.0 18.6	15.0 17.2	— —	17.2 18.3	11.2 11.8	11.0 12.5	10.5 13.5	16.5 22.0	17.5 23.5

A: 脱磷吹精

酸素吹精, 特に上吹き操作における脱磷が脱炭反応に先行させ得る特徴あることが報告され²³⁾, 原料の制限からこの問題に注目し本試験にも取上げた. 一般に反応の進行状況は他に熔銑の装入温度, 組成あるいは送入酸素などに依存するが, 本炉では温度の影響が目立ち, 低温では反応が活発に進行するまでかなりの時間を要し, 石灰石の添加時はさらに明白になる. かかる時は熔鉄は局部的に過酸化され, 水冷面に接する石灰石の反応は停滞し, このため石灰の滓化がおくれる傾向が認められる.

一方石灰石の添加量に応じて脱磷反応の進行が促される. 各成分の変化を吹精操作毎に時間経過に応じて示すと Fig. 1 のごとくなる. 各成分の変化は酸素の送入方法によつて左右され, Si, Mn に比較し, C および P の反応進行がいちじるしく影響されている. とくに純酸素吹精では上記のように局部的過酸化状態を呈するだけに, 鋼滓生成は迅速であるが酸化反応と滓化反応の進行度には差があり, 高圧低位置の酸素送入では浴温の上昇が目立ち, 脱磷の進行より脱炭反応が大きく進むが, 低圧高位置で酸素吹精を行なうと酸素は鉄との反応に多く消費されて酸化鉄滓になり, これが石灰を滓化して行く. 本実験結果から, 羽口位置の適当な選択でやや soft blow を行なうと脱炭反応と脱磷反応が並行し, 熔鉄中の磷は始めから減少し, 吹精途中で高炭素ながら磷が相当低下するのが認められた. だた小型炉の制約から多量の石灰石投入が無理なため, 熔滓中の CaO の調整はある程度しか行ない得なかつたが, 各鋼滓の分析値を整理すると, 一応塩基度の範囲の拡大に伴つて脱磷反応が定性的ではあれ脱炭反応に先行している. またこの場合冷却を過度にしたり, あるいは送入酸素条件を極度に soft blow にすると鉄の酸化のみ目立ち, 脱炭反応の進行が停滞して炉況はきわめて不安定に陥ることが多かつた. したがって水冷効果を反応進行の調節に応用する場合は熔滓の性状を考慮することが大切である.

Si および Mn の変化は図で明らかなように, この程度の吹精条件の変化に対しては差異を示さず, 通常操作における経過がそのまま適用される.

また前報に述べたように, 脱硫反応はいずれの場合も最終時では 60~70% の脱硫を示し, 石灰石の添加効果は吹精時間経過からすれば後半の変化に示されている. 各成分の酸化減少の傾向を吹精時間に対応して見ると Fig. 2 のごとくである.

B: 脱クローム吹精

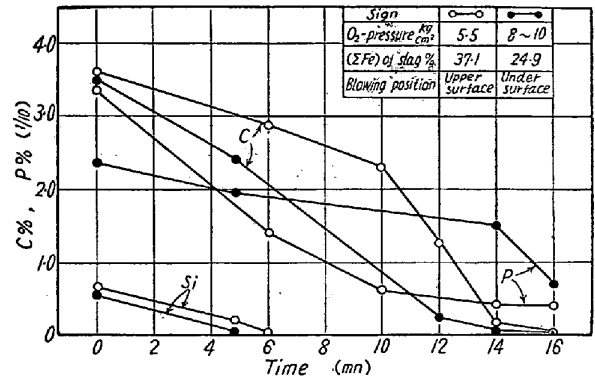


Fig. 1. Changes of carbon, silicon, and phosphorus in molten metal during blow with pure oxygen.

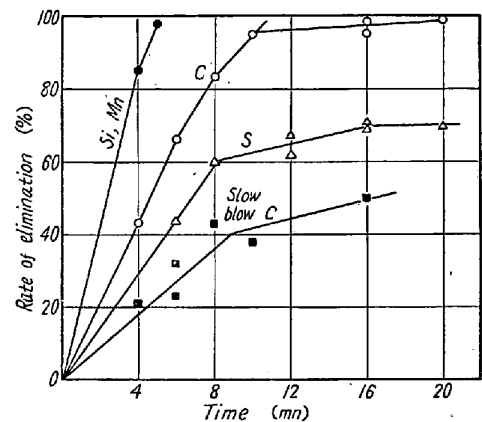


Fig. 2. Relationship between rate of elimination and blowing time.

磷問題に類似して資源利用の際提起されるものに脱クロームがあり, 本試験でもこれを取上げた. 脱クローム処理に関する基礎的実験結果²⁴⁾ およびクローム鉄熔解試験²⁵⁾ の成果から, 転炉による脱クローム処理が最も適当と考えられ, とくに水冷転炉の場合, 操業経過およびその冷却効果の調節いかんで充分操作上有利となることが推測される. すなわち, 比較的鉄酸化物の含有率の高い鋼滓下では, 低温において脱クローム反応が有利に進行し, しかもその進行度を見ると温度よりも含有鉄酸化物の影響が大きいことを示しているが, これはそのまま本炉の吹精条件に合致する訳である.

吹精試験結果の一部を整理すると Table 2. に示すごとくで, 脱クローム反応は有効に進行し, ほとんど完全な脱クロームをも行なうことが出来た. その変化過程は表からも知り得るように, 吹精初期程脱クローム率の増加が目立ち, 脱炭経過を温度変化の目安とすれば高温に到つてその変化は小さくなっている. 本問題を取上げる際は脱クローム量からする見方や最終クローム含有率からの見方がある訳で, これには鋼滓量, 吹精開始時の熔銑成分, 温度などについての詳細をも調査する必要がある.

る訳で、これらは別の機会で詳しく報告する予定である。また本試験の場合鋼滓組成の脱クローム反応に与える影響をも求めたが、前記の理由から成分調整が困難だったので明瞭な結果は得られなかつたが、表からしてもこの程度の塩基度でも充分クロームが除去され、 SiO_2 のある程度の存在が有効であるように思われる。

Table 2. Relation between the rate of chromium-elimination and slag composition and carbon in metal.

Rate of Cr elimination %	Carbon in metal %	Iron content of slag %	$\frac{(\text{CaO}) + (\text{MgO})}{(\text{SiO}_2) + (\text{Al}_2\text{O}_3)}$
50.0	2.90	22.80	0.80
66.7	2.32	35.59	0.73
45.0	1.94	24.44	1.38
88.0	0.99	33.16	0.92
87.5	0.59	37.17	1.25
88.5	0.45	41.95	1.06
99.0	0.29	44.09	1.29
100.0	0.09	48.87	0.71
100.0	0.05	46.01	1.69

C: 内張耐火壁の変化

使用耐火材の熔損試験の結果は既報で熔銑炉によるものについて報告したが、熔損に対する抵抗はシヤモット質に比較してクロームマグネシヤ質が大きく示される。しかし後者の時間経過毎の熔損率の増加も認められることを指摘した。すなわち、程度の差異のみの比較を主とする限り、熔損防止の対策は不能なのである。特に精錬温度の上昇と複雑な反応経過を考慮する場合、耐火物の材質のみにこの熔損防止の責務を与えることはかえつて精錬の本旨から外れる可能性をも生む訳で、強制冷却法の採用もこの点も考慮してのものである。

そこで前記熔銑炉試験をさらに詳細に検討したが、本冷却法によつて形成される永久壁化後の残存層は 3~5 mm 厚を示し、水量の変化に応じてこの厚さが変化している。しかしながら、この被覆保護層として維持させる水量を固定して操業すれば、全鋼屑配合熔解の場合でも充分維持され、一方水套の形式や保護層維持限界の検討を行なう試験では、排水温度をほとんど 100°C に上昇させても層の維持には変りのないことを確認した。これは冷却に作用する構造物（鑄鉄、銅あるいは鋼などの金属）の熱伝導率に比較し、耐火材料のそれが $1/20 \sim 1/30$ 位しかない点からも残存層の維持が可能なが理解されよう。また熔銑におよぼす冷却効果も、かかる大きな断熱作用を果す耐火層の保護を受けることを考慮すれば実際精錬上の問題を惹起する程度もきわめて僅少なものとなるのである。したがって使用される水套材料と耐火

材との組合せの差異に応じ得る手段のみを確認すれば、本法採用上生ずる問題はほとんどないともいえる。その例をあげると、銅板製の水套面にクロームマグネシヤ質の耐火材被覆を行なつた場合、銅板表面の傷みが目立ち、熔接部や隅角部にスケール状の錆が生成してこの粗い酸化膜を媒介として固着している。したがって水套表面にある種の凹凸を与えて壁の保持に役立てる手段を採用する場合には、このスケール層生成をも併考する必要が生ずる。

転炉の羽口部もこれと全く同様で、羽口の維持は完全であり、連続吹精にはなんらの支障も起さない。また石灰石の相当量添加による鋼滓量の増加にともなう熔損・浸蝕率の変化も、結果的には上記と同様で、耐火層の残存には関係しない。また両側面の水套も作動させたが、別段の変化はなく、操作上からも考慮すべき点を見出せなかつた。

つぎに冷却にともなう熱損失、冷却装置の施行範囲や、その構造に関する検討資料の一つとして水量一水温一残存層厚の関係を求めて見た。Fig. 3 にそれらの関係を図示したが、送水量および受熱面積による水温の変化は明瞭に現われ、同一構造の場合には水量の調節によつて炉況をある程度管理し得ることが理解される。一方かかる水温を変化させた場合の残存耐火層厚の変化は実験範囲内ではほとんど吹精終了時では一定となり、したがって耐火層厚の変化からの鋼滓量変化もほとんど無視できる訳で、転炉精錬行程の理論的管理の可能性も予測できる。

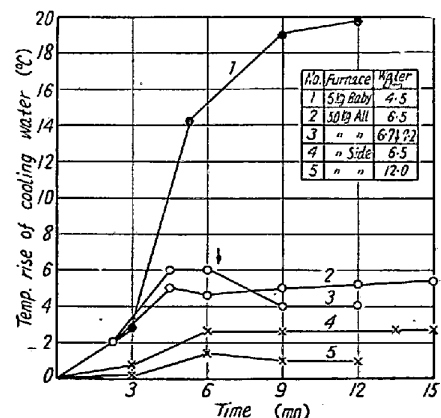
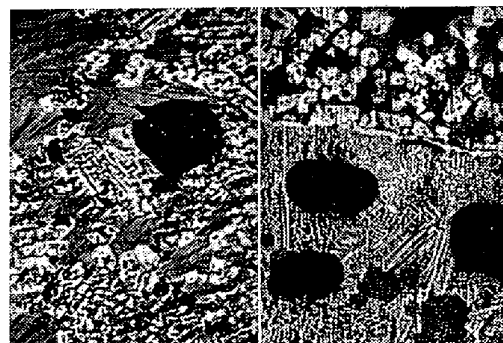


Fig. 3. Effect of the amount of water on the rise of cooling water temperature.

生成鋼滓はその組成に応じて冷却感度に差異があり、一般に石灰石の添加量の増加とともにより敏感となり、水量に応じた残存耐火層厚の変化率は前報より大きい。残存層のマクロ組織からすれば、クロームマグネシヤ系耐火物を使用した場合は滓化部と変質部とがほとんど区

別できず、わずかにその結晶の成長状態で判定し得る程度の差である。ただ質が割に緻密で層の生成、付着状態から相当明確な境界を示す部分が目立ち、酸性操作の場合よりも壁の形成により時間を要することが考えられる。これに対し、水套との接触部には鉄酸化物がスケール状に形成されるため、付着状態は酸性耐火材の使用時に比較するとややおとる。とくに吹精終了後各面に大きく亀裂が入り、これに衝撃を与えると剝離する。亀裂は相当深く、煉瓦とモルタルの差は認められない。また冷却効果を利用して熔滓の融着を試行したが、亀裂は再生し、深奥部における耐火層と鋼滓とは明白に分離した組織を呈している。これに対してタールマグネシヤスタムプを羽口水準面付近まで施行した場合はこの亀裂はまったく生ぜず、湯溜部の剝離現象も認められない。

かく永久壁化現象に使用耐火物の特質が影響するためその過程をより詳細に検討する必要がある。そこで吹精毎に残存耐火層の組織変化を反射顕微鏡で調べて見た。結果を要約すると、永久壁化までは使用耐火物の特質が大きく影響するが、永久壁化後は生成鋼滓のみの変化となり、組織は鋼滓の組成に応じた冷却効果を示している。Fig. 4 にシャモット質耐火物を使用した場合の生成永久耐火壁の組織を示したが、始めの耐火物と吹精による生成壁とはそれらのマトリックスに組成に応じた差異が明白に現われ、オリビンを主としたものがメルビナイトの発達したものになり、吹精回数に応じてそれぞれの方向性がくずれている。また中間部に冷却効果の大き



(a) coated slag (b) previous lining

Fig. 4. Microstructures of the refractory layer remained.

い場合に認められる酸化鉄の細かいデンドライトの数多い発達と、各側の生成壁の組織からこの中間層が再熔融していることを知ることができる。また組織の差異が層状面を境界としていることから冷却効果が組成に関係することも同時に認められる。またこれらの部分に多数の空孔が存在することから、吹精末期の冷却方法にも充分考慮を払うべきことが示されている。

D: 超小型転炉試験

横吹き吹精操作を安定させるためには吹精過程の詳細を知ることが肝要だが、上記の規模では操作上から微細な点の調整が困難なため、容量 5 kg の転炉を作製し、諸種の吹精条件の下でそれらの影響を調べると同時に、炉況に応じた炉壁の浸蝕・熔損状態の把握をも企図した。吹精実験例を表示すれば Table 3 のごとくである。すなわち、本炉のようにきわめて小型でかつ水冷効

Table 3. Experimental data of a baby water-cooled converter.

Heat No.			B—5	B—12	B—18	E—4	F—2
Metal charged	Weight Temp.	kg °C	5.0 1,310	7.0 1,400	7.0 1,400	2.5 1,320	2.2 —
Duration of blow mn			3.5	5.0	11.0	7.5	8.0
Analyses of metal charged %	C		3.41	3.92	3.20	3.39	3.51
	Si		1.87	1.90	2.18	1.44	1.07
	Mn		0.52	—	—	0.45	0.30
	S		0.06	0.18	0.11	0.154	0.20
Analyses of blown metal %	C		2.9	2.3	1.8	0.13	0.78
	Si		0.04	tr	tr	tr	tr
	S		0.06	0.04	0.04	0.04	0.04
Analyses of slag %	SiO ₂ +Al ₂ O ₃		22.79	51.50	57.04	12.01	19.70
	CaO+MgO		1.0	3.7	2.9	3.0	9.5
	FeO		60.15	40.80	41.02	63.44	57.32
Cooling water	Volume	l/mn	4.3	4.5	4.5	10.0	6.0
	Temp. of inlet	°C	12	11	4.5	12.0	13.5
	Temp. of outlet	"	15	26	24.5	14.1	16.0
	Rise of temp.	"	3	15	20	2.1	2.5

果もいちじるしい炉でも、純酸素吹精により精錬操作を行なうことができ、吹精経過も大略普通転炉に近似している。だが初期の酸素効率の不良および所要熱量の確保のための鉄損失の増加はこの場合避けられない。しかし一応その過程が普通操業と同一と見做せるため、転炉内の各物質の動きは実際の転炉におけると同様の動きをする訳で、各吹精終了時の炉壁の変化を測定した結果を示すと Fig. 5 のごとくなる。

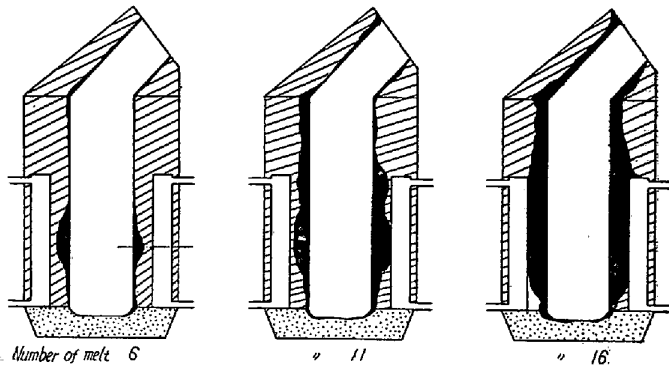


Fig. 5. Change of burnt profiles through the lining of a baby water-cooled converter.

すなわち、前報で述べた吹精経過に応じた炉況の観察結果を裏付けるように吹精面付近にまず浸蝕部が形成され、吹精回数を増加するにつれて次第にこの浸蝕・熔損部が拡大し、特に熔滓と接触した部分が目立ち、またその進行度は羽口部が拡大しながら深く現われ、熔鉄の存在範囲はその変化が割合少ない。また高压送風で吹精操作を行なう時は羽口部のやや上方に第二の割合深い浸蝕・熔損部が現われる。かかる炉形の変化図から転炉内における熔滓の運動が炉壁の浸蝕・熔損に関する最も主要な因子であることは明白で、その運動は M. P. Newby⁶⁾の模型試験から得た結果によく合致している。とくに上吹き法の発達にともなつて、転炉における反応の進行経過にこの熔滓の運動が大きく影響することが明らかにされつつあるが、これらの事実から炉の浸蝕・熔損に対して耐火物の追究のみでは転炉操業をより合理的にすることには無理があるとも考えられる。転炉内の反応の進行速度が他方法に比較しきわめて大きいのであるから、短時間内の反応進行を管理するためには、できるだけ関与する諸因子を固定する方向に進めることが望ましい。この見地からしても本型式を転炉に採用すれば転炉の合理的操業を確立する緒口とも考えられる。

IV. 総 括

以上水冷式横吹き小型転炉を使用して各種の吹精試験

を行なつて得た成果を要約すると、つぎの事項を指摘することができる。

1. 横吹き転炉で羽口位置を表面より離し soft blowを行なえば脱炭反応に並行させた脱磷反応も進行させることができ、冷却効果で石灰石の多量使用にもかかわらず炉壁の浸蝕・熔損を制約し、炉形の変化による影響を受けない。

2. 脱クローム処理は転炉によるのが最も有利なことが明らかとなり、水冷転炉の使用によりその含有率の低減、脱クローム量が合理的に調節でき、含クローム鉄からほとんど全部のクロームを除去し得る。

3. 転炉における脱硫は熔滓成分の影響は後半の変化で酸性と塩基性との差が認められ、脱クロームにはある程度の SiO_2 が存在する熔滓形成が有効である。

4. 水冷転炉の冷却装置と使用耐火物との関係から、耐火物の特質を充分考慮すべきことがわかり、永久壁化現象を顕微鏡試験によつて調査した。

5. 冷却水量および受熱面積が水温変化と明白な関係を示し、これから水温変化の状況による炉況の管理の可能性も推測される。

6. 超小型転炉による吹精試験から炉壁の浸蝕・熔損経過を知ることができたが、これは Newby の模型試験の成果とよく合致し、熔滓の運動が最も重要な因子であることが示された。

本稿を結ぶに当り終始御援助を下さつた富士鉄、室蘭製鉄所研究所、八幡製鉄本社、井川鉄工所、岩手鑄機工業および実験に参加された本教室の学生諸兄に深謝致します。

また経費の一部に文部省の科学試験研究費を役立てたことを付記する。(昭和 34 年 7 月寄稿)

文 献

- 1) 佐藤良蔵, 田畑農夫: 鉄と鋼, 45 (1959) 699
- 2) H. Kosmider, H. Neuhaus, H. Schenck: Stahl und Eisen 77 (1957) 1277
- 3) B. Trentini, M. Allard: Journal of Metals (1958) 466
H. Rellenmayer, T. Kootz: Stahl und Eisen 74 (1954) 381
F. W. Luerssen, J. W. Halley, M. Tenenbaum: Journal of Metals (1957) 1533
- 4) 佐藤良蔵: 秋大地下資源研究所報告 12(1954) 11
- 5) 佐藤良蔵: 鑄物, 28 (1956) 815
- 6) M. P. Newby: Journal of The Iron and Steel Inst. 162 (1949) 452