

論 文

コールドモデルによる底吹きガスの吹き抜け
臨界条件の検討甲斐 幹*・大河平和男*²・樋口 満雄*・平居 正純*Cold Model Study to Evaluate the Critical Condition for
Channelling Phenomena in Bottom Blowing

Tsuayoshi KAI, Kazuo OKOHIRA, Mitsuo HIGUCHI, and Masazumi HIRAI

Synopsis :

Cold model experiments have been made to clarify critical conditions for the occurrence of channelling in bottom blowing. Also, factors controlling the quantity of spitting have been examined by using water and ethyl alcohol as cold bath. Critical bath depth (H_C) at which channelling took place was determined by a weight measuring technique as H_C^{Mes} and visual observation as H_C^{Obs} .

Statistical analysis of these data indicates that the critical bath depth [normalized by inner dia. of nozzle (D)] and the quantity of spitting (W_g) are expressed, respectively, by ;

$$H_C^{Mes}/D = 5.07(F'_{rD})^{1/3},$$

$$W_g = 10^{15.07}(F'_{rD})^{3.83}(L_0/D)^{-6.95}(\Delta H/D)^{-6.43}We^{-0.308},$$

where $F'_{rD} = (\rho_g v^2)/(\rho_1 \cdot D \cdot g)$, v : average velocity of gas injected into bath (cm/s), g : acceleration of gravity (cm/s^2), ρ_g : density of gas, ρ_1 : density of bath (g/cm^3), L_0 : bath depth (cm), ΔH : distance between the static surface of bath and sponge (cm), $We = \rho_g D \cdot v^2 / \sigma$, and σ is the surface tension of bath (dyn/cm). On the basis of these results, bottom blowing condition suited for an LD converter with bottom blowing is discussed.

1. 緒 言

2. 実 験 方 法

上底吹き転炉において、底吹きを実施するに際し、上吹き酸素ジェットにより形成されるキャビティーと底吹き用ノズルとの位置関係によつては、吹き抜け現象が起こる可能性も考えられる。吹き抜けは炉口への地金附着の増大や、上吹きランスの各種トラブルの原因ともなるので、吹き抜け抑制条件の十分なる吟味が必要である。

しかるに底吹きノズルでの吹き抜け臨界条件については、加藤¹⁾が理論的考察と、これを実炉での観察結果で修正した式を提出している以外、ほとんど報告されていない。関連ある研究として、浴中にガスを吹き込んだ際の気泡の挙動に関し、SZEKELY²⁾や石橋³⁾により横吹き法での気泡到達距離について、また FLINN et al.⁴⁾や瀬川⁵⁾らにより上吹きジェットにより形成されるキャビティー深さについての研究が報告されている。

本報告では、水浴とエチルアルコール浴を用いて、スピitting量を実測することにより、吹き抜けの臨界条件を明らかにするとともに、従来の研究結果と対比させて考察し、実操業領域について言及した。

実験装置の模式図を Fig. 1 にまた試験条件を Table 1 に示した。実験に使用した容器径は 300 mm ϕ であり浴には水とエチルアルコールを、また吹き込むガスには圧縮空気を用いた。実験は水滴吸収用上方より吊り下げられた海綿と静止浴面との距離 (ΔH) を一定に保持し、条件ごとに浴深 (L_0) と 15 s の底吹きで、海綿に捕捉されたスピitting量 (W_g) との関係を測定し、 L_0 と W_g との関係より、スピittingが捕捉され始める臨界浴深 H_C^{Mes} と目視観察により明らかに吹き抜けたと観察された臨界浴深 H_C^{Obs} を測定し、操作条件との関係を検討した。なお H_C^{Obs} に相当する条件では吹き込みガスの音響にも変化が認められた。

さらにスピitting量 (W_g) を支配する要因について統計的な解析により、回帰式を求めスピitting量に関係する要因を明らかにした。

3. 実 験 結 果

3.1 吹き抜けの臨界条件

水とエチルアルコール浴を用いて、内径 4, 7, 11 mm ϕ

昭和 55 年 10 月本会講演大会にて発表 昭和 56 年 7 月 10 日受付 (Received July 10, 1981)

* 新日本製鉄(株)八幡製鉄所 (Yawata Works, Nippon Steel Corp.)

*² 新日本製鉄(株)八幡製鉄所 Dr. Ing (Yawata Works, Nippon Steel Corp., 1-1-1 Edamitsu Yawatahigashi-ku Kitakyushu 805)

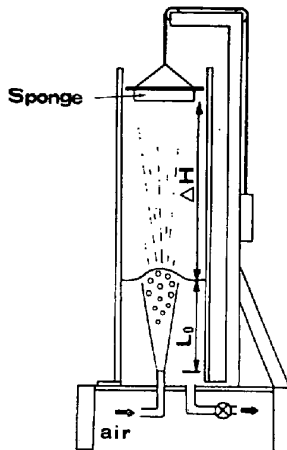


Fig. 1. Experimental apparatus for measurement of critical bath depth where channelling occurs.

の3種類のノズルについて、2章で説明した方法で各ガス流量ごとに浴深 (L_0) とスピitting量 (W_g) との関係求めた。前に定義した H_0^{Mes} と H_0^{Obs} に対応する浴深を確認するために、漸次浴深 L_0 を 20 mm ずつ浅くして測定と観察を繰り返した。

浴深が浅くなるにしたがつて、底吹きガスの吹き込みにより、浴の上面が泡立つ状態から、浴面の揺動が大きくなり、一部が液滴として分離する状態、さらに液滴の発生が増加していき、やがて激しく液を吹き上げるとともに浴面の泡立ちや揺動も小さくなり、音響も若干変化する状態へと推移する。音響が若干変化する時点での浴深が H_0^{Obs} であり、これに対し H_0^{Mes} は、 H_0^{Obs} に到る以前に、液滴の発生が増加し、スピittingが捕捉され始まる臨界浴深に相当する。

実験に先立ち、静止浴面と海綿間の距離 (ΔH) を 600, 800, 1000 mm の3通りに変化させ、 L_0 - W_g との関係求めた例を Fig. 2 に示した。 H_0^{Mes} と H_0^{Obs} とを図中に示したが、 L_0 - W_g との関係から見て、 H_0^{Obs} を境にして W_g が急激に変化することはなかった。

ガス流量が大きい際には、 $\Delta H=600$ mm では浴面の揺動により発生する水滴をも捕捉し、 W_g の値が著しく大きくなった。 ΔH を 800~1000 mm に取れば、Fig. 2 にも示したごとく、 H_0^{Mes} はほぼ同じと評価できたが、肉眼で観察し、底吹きガスにより発生する飛沫だけを捕捉する条件として、 $\Delta H=1000$ mm を選定して、 H_0^{Obs} を評価した。

したがって $\Delta H=1000$ mm には、特に実用転炉との相似を考える上での意味はない。

実験結果は H_0^{Obs} と H_0^{Mes} をノズル内径 D で無次元化した H_0^{Obs}/D ならびに H_0^{Mes}/D とウェーバー数 $We =$

Table 1. Test conditions.

Dia. of Nozzle (mm)	4, 7, 11	
Gas flow rate (Nm ³ /Hr)	20 ~ 60	
Liquid	H ₂ O	C ₂ H ₅ OH
Density of bath	1	0.79
Surface tension (dyne/cm)	72.8	22.3
Viscosity (cp)	1.002	1.19

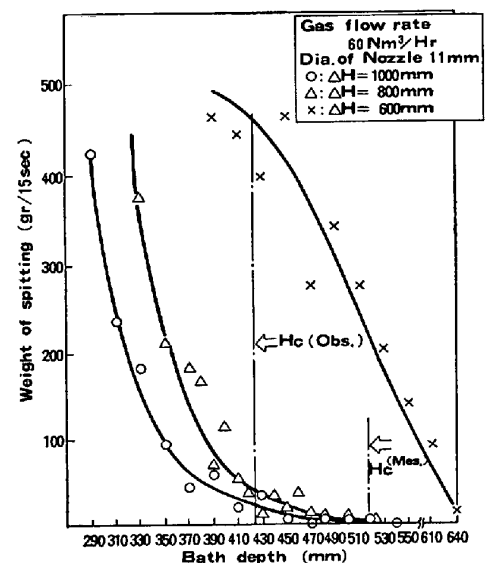


Fig. 2. Influence of distance between sponge and bath level on spitting.

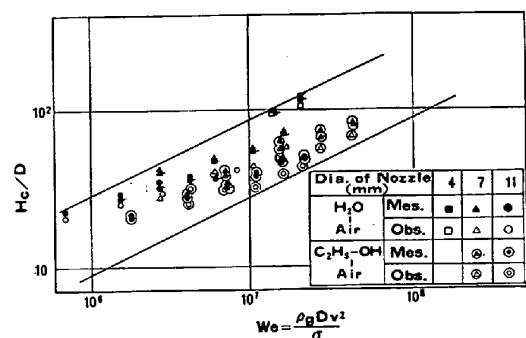


Fig. 3. Relationship between critical bath depth for channelling, normalized by nozzle inner diameter and Weber's number.

$\rho_g D v^2 / \sigma$ あるいは、修正フルード数 $F'_{rd} = \rho_g v^2 / (\rho_l \cdot D \cdot g)$ との関係として整理し、Fig. 3, 4 に示した。

水浴とエチルアルコール浴での実験結果は F'_{rd} で、よりよく整理でき、いずれの特性値も F'_{rd} の 1/3 乗に比例することが明らかになった。

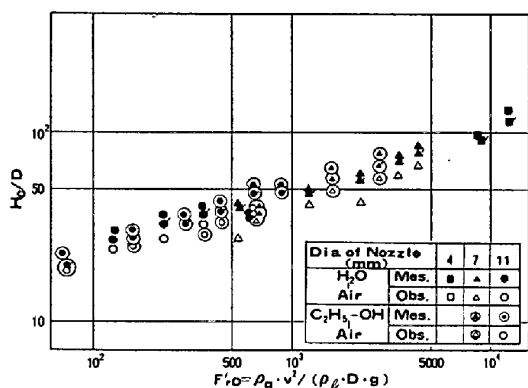


Fig. 4. Relationship between critical bath depth for channeling, normalized by nozzle inner diameter, and modified Froude's number.

3.2 スピットング量を支配する要因

H_0^{Me} を求めるために使用した $\Delta H=1000$ mm のデータの他に、ガス流量の少ない条件下では、浴の揺動に起因する飛沫を捕捉しない範囲で $\Delta H=800, 600$ mm のデータも新たに加えて解析した。スピットング量 W_g と、それを支配するフルード数、ウェーバー数、レイノルズ数、浴深、液面からの距離 (ΔH) 等の要因を組み合わせ、7通りの重回帰分析を、特性値、要因ともに対数に換算して実施した。

その結果を Table 2 に示した。Table 2 中の丸内の番号は、ステップワイズ法で有意性が高いと判断された要因の順位を示し、枠内の数字は各要因の回帰係数を示している。

7通りの解析の内、1番目の要因の組み合わせは、加

藤ら⁶⁾ が、底吹き転炉の水モデルで、スピットング量を支配する要因として取り上げている、 ΔH , F'_{rL_0} , ノズル本数の3要因の内、本実験でのノズル本数が1本に限定されていることを考慮して、 ΔH と F'_{rL_0} の2要因のみを取り上げ、解析した結果であるが、重相関係数 (r) は 0.311 と極めて低く、満足すべき回帰式は得られなかった。2番目の組み合わせは要因として、浴深 L_0 を追加したものであり、3番目は F'_{rL_0} を F'_{rD} におきかえたものであり、4番目は2番目の要因に、ウェーバー数 We を新たな要因として加えたものであるが、いずれも重相関係数は 0.5 以下と低かった。

これに対し、5, 6, 7 番目の解析では、いずれも L_0 , ΔH の代わりに L_0/D , $\Delta H/D$ を要因とすることにより、重相関係数 (r) は 0.866 と大幅に向上した。解析5の要因の内、レイノルズ数 Re を削除しても、重相関係数は 0.866 と変わらなかった。

本実験は、ノズル径 (D) とガス流量すなわちガス流速 (v) を一定にして、浴深 L_0 を変化させた実験なので、全要因とも長さの代表値としてノズルの内径 D を取つた6番目の要因の組み合わせで回帰式を求めると、(1)式のようなになる。

(1)式からわかるように、回帰式に (L_0/D) のべき乗の項が入っているので、6番目と7番目の解析結果には、本質的な差はなく、 (L_0/D) の項の指数が、 F'_{rD} の項の指数に相当する 3.83 相当だけ変化するにすぎない。

Table 2. Statistical analysis of factors controlling weights of spitting.

Factors Analysis No.	L_0	ΔH	F'_{rD}	F'_{rL_0}	We	Re	L_0/D	$\Delta H/D$	Intercept	Multiple correlation coef.	F value
1		-2.238 (2)		0.672 (1)					5.930	0.311	12.070
2	-1.379 (2)	-3.430 (3)		0.966 (1)					12.416	0.443	18.268
3	-1.594 (1)	-2.279 (3)	0.555 (2)						9.244	0.338	9.645
4	-1.950 (2)	-4.156 (3)		0.547 (1)	0.513 (4)				12.932	0.468	15.684
5			3.881 (5)		-0.314 (3)	-0.045 (1)	-6.990 (2)	-6.506 (4)	15.516	0.866	133.700
6			3.830 (2)		-0.308 (4)		-6.984 (1)	-6.431 (3)	15.067	0.866	167.830
7				3.833 (1)	-0.309 (4)		-3.156 (2)	-6.436 (3)	15.081	0.866	168.236

$$\text{where } F'_{rD} = \frac{\rho_g v^2}{\rho_l Dg} \quad (D: \text{Dia. of nozzle})$$

$$F'_{rL_0} = \frac{\rho_g v^2}{\rho_l L_0 g} \quad (L_0: \text{Bath depth})$$

$$We = \frac{\rho_g D v^2}{\sigma} \quad (\sigma: \text{Surface tension})$$

$$Re = \frac{\rho_g D v}{\mu} \quad (\mu: \text{Viscosity})$$

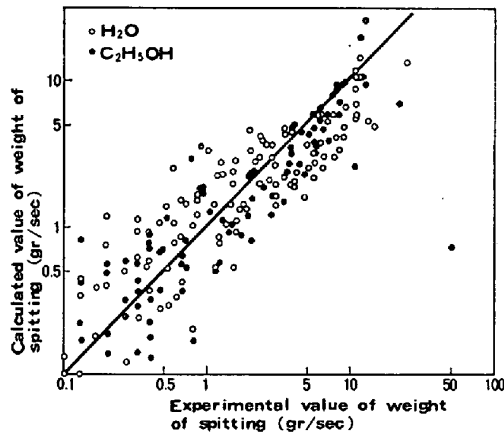


Fig. 5. Comparison of experimental value with calculated value of weight of spitting.

この回帰式によるスピitting量の計算値と実測値との関係を Fig. 5 に示した。

実績では、同一操作条件下では水浴に比較して、エチルアルコール浴の方が、スピitting量が多くなるが、密度の関与する F'_{rd} と表面張力の関与する We を要因として入れ、 ΔH と L_0 とをノズル内径 D で割って、無次元化することにより、水浴とエチルアルコール浴の結果を包括して、(1)式でよく推定できることが明らかになった。

$$W_g(\text{g/s}) = 10^{15.07} (F'_{rd})^{3.83} \cdot (L_0/D)^{-6.95} \cdot (\Delta H/D)^{-6.43} \cdot We^{-0.308} \dots \dots \dots (1)$$

$$(\gamma = 0.866)$$

4. 考 察

底吹きガスの吹き抜けの臨界浴深をノズルの内径で除した値は、修正フルード数の $1/3$ 乗に比例する関係式で整理できることを示した。次にこの関係が横吹き法、上吹き法の特値値に対しても成立することを示すとともに、吹き抜けを考慮した操業条件につき検討した。

4.1 吹き抜けの臨界条件

加藤ら¹⁾は、底吹きノズルでの吹き抜けの臨界条件として、Fig. 6 に示した関係より、水浴について(2)式を、さらに実炉における観察に基づきこれを補正した関係式として(3)式を提出している。

$$H_c = 1.5 [\rho_g v^2 (6.2D)^2 / (\rho_1 \cdot g)]^{1/3} \dots \dots \dots (2)$$

$$H_c = 0.247 [\rho_g Q^2 / (\rho_1 N^2 D^2)]^{1/3} \dots \dots \dots (3)$$

これらの式はおのの整理すると

$$H_c = 1.5 \times (6.2)^{2/3} D \left(\frac{\rho_g v^2}{\rho_1 \cdot D \cdot g} \right)^{1/3}$$

$$= 5.07 D \cdot (F'_{rd})^{1/3} \dots \dots \dots (2')$$

$$H_c = 0.247 \left(\frac{\pi^2}{16} \right)^{1/3} \cdot D \times (980)^{1/3}$$

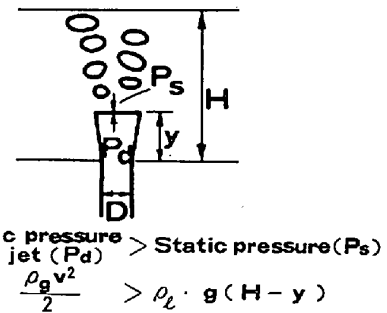


Fig. 6. Theoretical model for channeling in bottom blowing¹⁾.

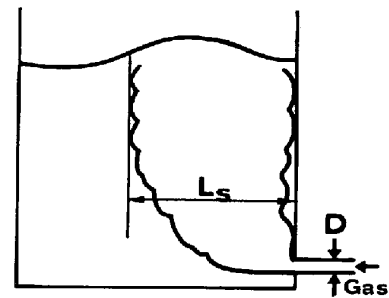


Fig. 7. Definition of penetration distance of bubble in side-blowing³⁾.

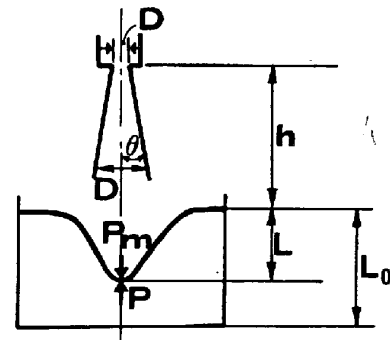


Fig. 8. Schematic model of cavity formation in top blowing⁵⁾.

$$\times \left(\frac{\rho_g}{\rho_1} \cdot \frac{v^2}{N^2 D g} \right)^{1/3}$$

$$= 2.08 N^{-2/3} \cdot D (F'_{rd})^{1/3} \dots \dots \dots (3')$$

となり、 H_c/D は $(F'_{rd})^{1/3}$ 乗に比例することになり、定性的には本実験結果と等しくなる。

さらに石橋ら³⁾は Fig. 7 に示すごとく定義した横吹き時の気泡到達距離 L_s が(4)式で表されることを実験的に確認している。

$$L_s/D = 3.7 (F'_{rd})^{1/3} \dots \dots \dots (4)$$

上吹きについては、瀬川ら⁵⁾は、Fig. 8 に示すごとく浴のキャビティ深さ(L)を与える式として(5)を与えている。

$$D \cdot v = 4.74 \sqrt{\rho_1 / \rho_g} (L + h) \sqrt{L} \dots \dots \dots (5)$$

この式で $h=0$, つまり上吹きランスを静止浴面まで下げて, 上吹きした際のキャビティー深さ L は (6) 式で与えられ, この式から (6') 式が導かれる.

$$D \cdot v = 4.74 \sqrt{\rho_1 / \rho_g} L^{3/2} \dots \dots \dots (6)$$

$$L^3 = \frac{1}{4.74^2} \frac{\rho_g}{\rho_1} D^2 \cdot v^2$$

$$= \frac{g}{4.74^2} \cdot D^3 \frac{\rho_g v^2}{\rho_1 \cdot g D} \dots \dots \dots (6')$$

$$L/D = 3.51 (F'_{rD})^{1/3} \dots \dots \dots (6'')$$

さらに実際の上吹き転炉に適用できる式として, 報告されている (7) 式⁶⁾を, 同様に変形すれば (7') 式を得る.

$$D \cdot v = 23.08 (L + h) \sqrt{L} \dots \dots \dots (7)$$

$$L/D = 4.47 (F'_{rD})^{1/3} \dots \dots \dots (7')$$

加藤ら¹⁾は, 水モデル実験の結果を整理して, 底吹き時のガスホールドアップの高さ方向の分布曲線の変曲点から, 吹き抜けの臨界浴深に相当するガスジェットコアの長さ H_c を推定し, H_c/D と F'_{rD} との関係を図示しているが, これを著者が式化したものが (8) 式である.

$$H_c/D = -4.4 + 9.8 \log F'_{rD} \dots \dots \dots (8)$$

以上の関係式をまとめて, Fig. 9 に示した. (8) 式の関係を示す図中の曲線 2 以外は, 底吹きの吹き抜け臨界浴深, 横吹きでの気泡到達距離, 上吹きのキャビティー深さなどのいずれの特性値も, F'_{rD} の $1/3$ 乗に比例する関係で示されることが明らかになった.

本実験結果の内, H_c^{Obs} は加藤ら¹⁾が理論的に求めた

関係式 (2') 式とよく一致するが, H_c^{Obs} は石橋ら⁹⁾が横吹きに関する水モデル実験で観測した関係式 (4) 式に近くなる.

しかし, 水モデルで得られた実験式と, 溶鋼についての経験式とを比較してみると, 底吹きでの結果と上吹きでの結果では, その大小関係が逆になつていことがわかる. この違いにも着目して, 上底吹き転炉操作においては, 地金の炉口よりの飛び出しの他に, 上吹きランスへの地金つきなどのトラブルの原因にもなる底吹きガスの吹き抜けの臨界条件式に関して, 若干考察する.

すなわち, 底吹きの場合には (2') 式と (3') 式とで示すように, 同じ F'_{rD} に対する吹き抜けの臨界浴深は溶鋼の方が, かなり小さくなるのに対して, 上吹きの関係式では, 逆に溶鋼に対するキャビティー深さを表す (7') 式が水モデルでの (6') 式より大きな値を与えることになつており, 大小関係が逆転している.

この原因は, 底吹きにおけるガス吹き抜けの臨界浴深と上吹きでのキャビティー深さという, 2つの特性値の評価方法に差があること, ならびに吹き込まれるガスと浴との化学反応のあるなし, あるいはその影響などの点で, 底吹きと上吹きに差があるためと考える.

底吹きの場合の溶鋼での関係式 (3) 式は, 加藤らが 5 t Q-Bop での観察結果にもとづき, (2) 式の係数を修正したものであるが, 吹き抜けの判断基準の詳細は不明である.

本研究結果の吹き抜けの臨界浴深 (H_c^{Obs}) が, 同じ

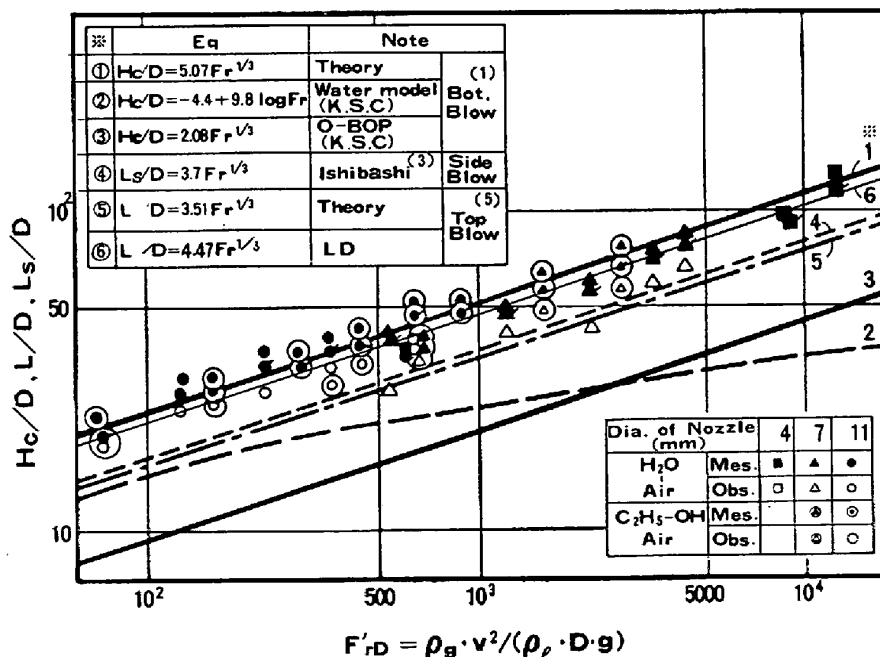


Fig. 9. Critical bath depth for channeling, normalized by nozzle inner diameter, vs modified Froude's number.

F'_{rD} に対して溶鋼での臨界浴深より大きくなる理由としては次の2点が考えられる。

1) 溶鋼について(3)式を求めた際の吹き抜けに対する判断基準が、炉口からの溶鋼の吹き上げの観察をもつてなされたと考えれば、水モデルでの H_0^{bs} あるいは、さらに激しい吹き抜け状態に相当する。

2) 溶鋼に酸素を吹き込む際には、最終的には、吹き込まれた酸素は高温の ($\text{CO} + \text{CO}_2$) ガスになる。しかし酸素ジェットが溶鋼に衝突する時点では、大半の酸素は一度酸化鉄となり急激に体積が減少すると考えられる。これに対して、水モデル実験では吹き込みガスの衝突面における体積減少はない。したがって、溶鋼中に酸素を吹き込む際には、ジェットの衝突面における運動のエネルギーの減衰が、水浴の場合より大きくなり、吹き抜けも起りにくくなる。

このように考えると、アルゴンや窒素などのような反応性に乏しいガスを溶鋼に吹き込む際には、溶鋼中に酸素を吹き込む場合より、衝突面での運動のエネルギーの減衰は、はるかに少ないはずなので、臨界浴深も深くなると考えられる。

底吹き機能を有する実用炉では、酸素のみでなく、アルゴンや窒素も使用されることがあることを考慮すれば、底吹きガスの吹き抜けに対する臨界浴深は(2')式で推定するのが安全であろう。

これに対し、上吹きの場合には、実炉でのキャビティが相対的に深く評価されている。これは、炉底耐火物のキャビティ相当位置が、倒炉して観察した際に赤熱されている状態をもつて、キャビティが炉底に到達したと判断している⁷⁾ ことにも一因がある。

すなわち、いわゆる火点部の温度は 2000°C 以上と鋼浴の平均温度に比較して著しく高いため、キャビティが実際に炉底に到達していなくとも、相当位置が赤熱され、したがってキャビティを深く見積もる傾向になるものと考えられるからである。

4.2 実炉での操業条件

実操業で底吹きノズルから安定して吹き込めるガス流量は、ノズル径と浴深に応じ、その上限は上述の吹き抜け臨界条件により、またその下限はノズル内への溶鋼の侵入を防止する条件により規定されるものと考え、実炉での操業条件について検討した。

炉底部にノズルを有する転炉では、傾動する際に一時的に吹き抜け現象を呈するのは避けられないが、上底吹き併用転炉では、上吹きによるキャビティの位置と底吹きノズルとの位置関係によつては、炉が正立している状態でも完全に吹き抜ける事態も考えられる。

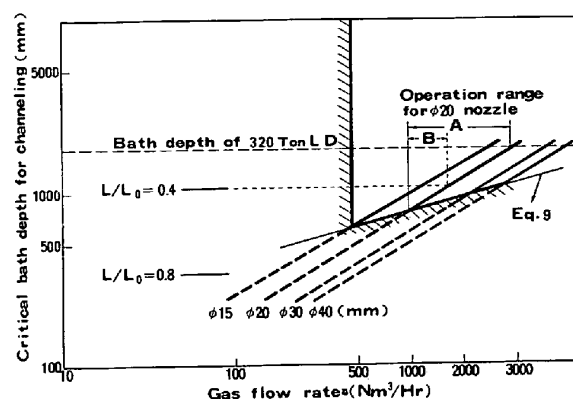


Fig. 10. Relationship between critical bath depth for channeling and gas flow rate, where nozzle inner diameter is varied as a parameter.

吹き抜けの臨界条件としては(2'')式を、さらに必要最低ガス流量として、丸川⁸⁾らのいう、ノズル出口見かけの流速が、音速 (v_s) に等しくなる(9)式で与えられるガス流量を取り上げ、1800 m/m の浴深を有する 300 t/Heat 級の大型転炉での操業条件を考えてみる。Fig. 10 にはノズル径ごとに(2'')式による H_c と Q の関係を示すと同時に、(9)式により最低ガス流量を求めた。

$$H_c = 5.07 D (F'_{rD})^{1/3} \dots\dots\dots (2')$$

$$= 5.07 D \left(\frac{\rho_g}{\rho_l} \cdot \frac{16 Q^2}{\pi^2 g \cdot D^5} \right)^{1/3} \dots\dots\dots (2'')$$

$$Q = \frac{\pi}{4} D^2 v_s \dots\dots\dots (9)$$

20 mm ϕ のノズルを採用する際を例に取れば、底吹きを実施する際の操業可能な流量域はAの範囲であるのに対し、上吹き併用法で、上吹きのキャビティと底吹きのノズルの位置が一致する際には、上吹き条件がいわゆるハードブローで例えば $L/L_0 \geq 0.8$ の操業をすれば、完全に吹き抜け、操業が不可能になるおそれがあるが、 $L/L_0 = 0.4$ とソフトブローの条件を選べばBの流量域で操業が十分に可能であると考えられる。しかし厳密に言えば、底吹きガスの吹き抜けに対する、ガスと鋼浴間の化学反応や熱の影響、底吹きノズル相互間の干渉効果、上吹きジェットの影響等さらに詳細な検討が必要である。

5. 結 言

スピitting量を実測する方法により底吹きガスの吹き抜けの臨界条件を検討し以下の結論を得た。

1. 吹き抜けの臨界浴深は、修正フルード数 (F'_{rD}) の $1/3$ 乗に比例する。
2. この関係は、横吹きでの気泡到達距離、上吹きでのキャビティ深さと F'_{rD} の間でも成立していること

を確認した。これはいずれの現象も、吹き込みガスの動圧と浴の静圧のバランスに支配される現象であるためと考えられる。

3. スピットング量は、 F'_{rD} のほかに浴の物性により大きく左右される。

4. これらの関係を前提にして、実操業での操業可能条件を、底吹き法と上底吹き法について明らかにした。

記 号

D : ノズル内径 (cm)
 F'_{rD} : 代表長さに管径を取った修正フルード数
 F'_{rL} : 代表長さに浴深を取った修正フルード数
 g : 重力の加速度 (cm/s²)
 h : ランス高さ (cm)
 ΔH : 海綿と静止浴面との距離 (cm)
 H_g^{0s} : $W_g > 0$ になる吹き抜け臨界浴深 (cm)
 H_o^{0s} : 目視による吹き抜け臨界浴深 (cm)
 L : キャピティー深さ (cm)
 L_o : 浴深 (cm)
 L_s : 横吹き時の気泡到達距離 (cm)
 N : ノズル個数
 Q : 流量 (cm³/s)
 v : 平均流速 (cm/s)
 v_s : 標準状態下での音速 (cm/s)

Re : レイノズル数
 W_g : スピットング量 (g)
 We : ウェーバー数
 σ : 表面張力 (dyn/cm)
 μ : 粘性 (cp)
 ρ_g : 気体密度 (g/cm³)
 ρ_l : 流体密度 (g/cm³)

文 献

- 1) 加藤嘉英, 野崎 努, 鈴木健一郎, 中西恭二, 永井 潤: 鉄と鋼, 65 (1979), A137
- 2) N. J. THEMELIS, P. TARASSOFF, and J. SZEKELY: Trans. Met. Soc. AIME, 241 (1969), p. 2425
- 3) 石橋政衛, 白石惟光, 山本里見, 島田道彦: 鉄と鋼, 61 (1975) 4, S111
- 4) R. A. FLINN, R. D. PEHLKE, D. G. GLASO, and P. O. HAYS: Trans. Met. Soc. AIME, 239 (1967), p. 1776
- 5) 瀬川 清: 鉄冶金反応工学 (1977), p. 90 [日刊工業新聞社]
- 6) 加藤嘉英, 野崎 努, 中西恭二: 学振 19 委-No. 10143 (昭和52年9月)
- 7) 瀬川 清, 前原 繁, 島田道彦, 石橋政衛: 鉄と鋼, 44 (1956), p. 1056
- 8) 丸川雄浄, 姉川正治, 戸川泰之, 広木伸好: 鉄と鋼, 65 (1979) 4, S154