

© 1990 ISIJ

 ///////////////
 論文
 ///////////////

モデル実験による底吹き羽口におけるバックアタック現象の解消方法の検討

青木 健 郎*

Elimination of the Back-attack Phenomenon on a Bottom Blowing Tuyere Investigated in Model Experiments

Takeo AOKI

Synopsis:

Elimination of the back-attack phenomenon in the submerged gas jet, that is expected to decrease the erosion of bottom blowing tuyeres, was investigated in the water model and in the hot iron model. And the following results were obtained.

- 1) The back-attack phenomenon causes concave erosion in tuyere refractory.
- 2) The sum of impact pressure by the back-attack of a circular tuyere decreased beyond 19.6 bar (20 kg/cm²), and the frequency of that in a slit-shaped tuyere disappeared when the circumference ratio was greater than 3 in the water model.
- 3) The back-attack of a circular tuyere was observed in the hot iron model, and it was confirmed that the slit-shaped tuyere with the circumference ratio larger than 5 could eliminate the phenomenon completely.

Key words: back-attack phenomenon; tuyere; refractory erosion; bottom blowing; steelmaking; submerged gas jet; water model; hot model; mach number; static pressure; slit-shaped tuyere.

1. 緒 言

高速液中ガスジェットにはその特性として、ジェットが羽口前面に断続的に吹き戻される現象—バックアタック現象—がある¹⁾。

その発生のメカニズムについては前報²⁾に詳述した。その要点は、

- (1) 羽口先端におけるキャビティーの形成。
- (2) キャビティー界面における気泡化と気泡の液中への分離。
- (3) キャビティーの膨張と、キャビティーのくびれおよび破断。
- (4) キャビティーのくびれが生ずるとジェットはその前面に突然液の壁ができるので吹きもどされる。これがサイクリックに繰り返されるのがバックアタック現象である。

このキャビティーのくびれ破断が生ずるのは、液中ジェットのコア一部における静圧分布の負圧部にその近傍のガスのみならず液までも吸引されるためである。

この現象は底吹き転炉の羽口耐火物を溶損させる原因の一つになっており^{2)~7)}、したがってこのバックアタック現象の消滅ないしは軽減が可能になれば羽口耐火物の寿命延長に対して効果があるものと考えられる。

そこで水モデル実験および溶鉄実験を行って、バックアタック現象を解消する方法の検討を行い、それを完全に解決する方法を発見したのでその概要を報告する。

2. バックアタック現象の解消方法の検討

バックアタック現象を解消する方法として高圧吹込み法と羽口形状の変更の2方法について検討した。

2.1 高圧吹込み実験

バックアタック現象をなくす方法の一つとして高圧吹込み法について検討した。高圧吹込みによりキャビティーと液の界面における気泡化が促進され、吹込み流量と気泡生成量がバランスすればバックアタック現象は無くなると考えた。

1 m の深さを有する透明アクリル製の水槽側壁底部に内径 1.7 mm の羽口を取り付け、窒素ガスを吹き込んだ。

平成2年3月6日受付 (Received Mar. 6, 1990)

* 住友金属工業(株)鉄鋼技術研究所 (Iron & Steel Research Laboratory, Sumitomo Metal Industries, Ltd., 16 Oaza-Sunayama Hasakimachi Kashima-gun Ibaraki pref. 314-02)

バックアタックの頻度および衝撃力を測定するため、羽口先端にストレングージを貼った板バネを組み込んだバックアタック測定器を取り付けた。これらの実験装置の詳細は前報²⁾を参照せられたい。

バックアタックの頻度および衝撃力の測定値から次式によって累積衝撃度を求めた。

$$\text{累積衝撃度} = \sum \left(\frac{\text{衝撃力}}{\text{羽口断面積}} \times \text{頻度} \right) \quad (\text{N} \cdot \text{Time} / \text{cm}^2 \cdot \text{min})$$

Photo. 1 は圧力を 9.81 bar (10 jgf/cm²) から 78.5 bar (80 kgf/cm²) まで変化させた場合の結果を示している。吹込み圧力が増加するに従ってジェットは遠くへ伸び、バックアタックの頻度は減少している。

Fig. 1 はこれを定量的に示したものである。累積衝撃度は吹込み圧力が 14.7 bar (15 kgf/cm²) までは増加し、14.7 bar 以上になると暫時減少する。しかし 78.5 bar の高圧でもなお皆無にすることはできなかった。

14.7 bar (15 kgf/cm²) くらいの吹込み圧力での操業が最もよくないことがわかる。

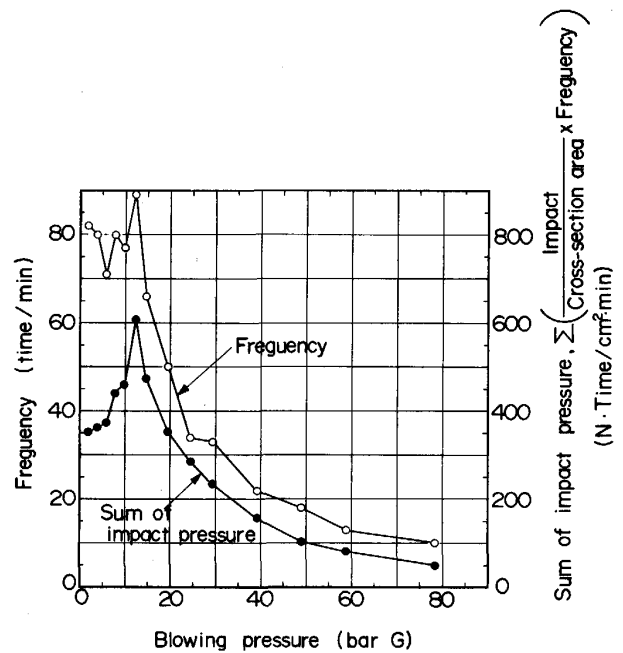
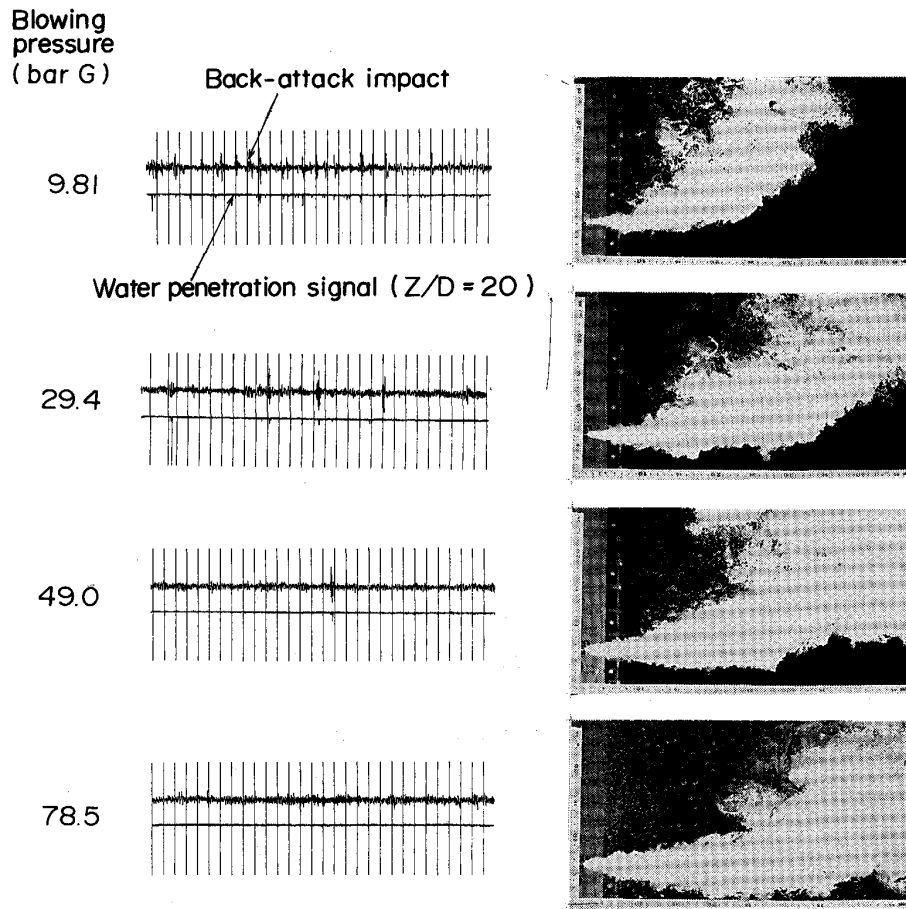


Fig. 1. Effect of blowing pressure on frequency and sum of impact pressure circular tuyere, inner diameter = 1.7 mm Nitrogen gas blown in water.



Circular tuyere, inner diameter = 1.7 mm
Nitrogen gas

Photo. 1. Oscillograph charts and photographs of high-pressure blowing of a submerged jet.

2.2 耐火物溶損模型実験

底吹き炉においては羽口耐火物がすり鉢状に溶損される問題があり、これが炉修のタイミングを早くし、上吹き炉に対して炉体寿命が劣る原因になっていた。そこで耐火物溶損のメカニズムを調べるために模型実験を試みた。

Fig. 2 に実験装置を示す。耐火物として石膏を、溶鋼として希塩酸を、またガスとしては圧縮空気または窒素ガスを使用した。図の上は 90 t AOD 炉の 1/10 縮尺の

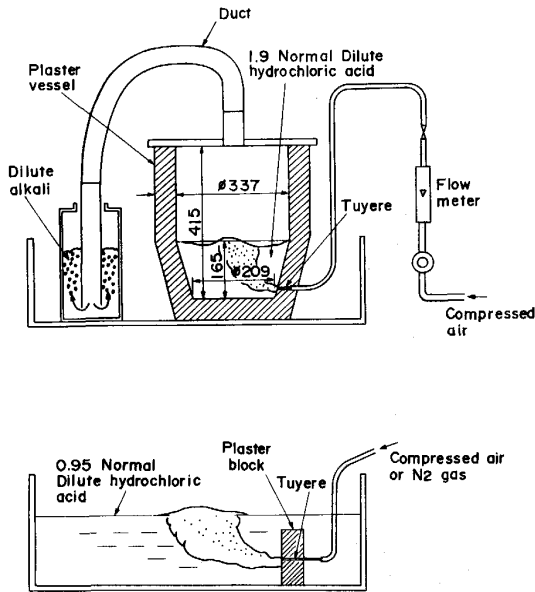


Fig. 2. Schematic diagram of refractory erosion model experiment.

模型で、羽口の内径は 1.7 mm である。下はブロック状の石膏に内径 1.7 mm の羽口をつけたもので、特に羽口近傍の溶損を見るようにしたものである。使用した希塩酸の濃度は図中にそれぞれ示している。

Photo. 2 に実験結果を示す。吹込み圧力が 3.92 bar (4 kgf/cm²) の場合と 49.0 bar (50 kgf/cm²) の場合を示している。上は炉体の溶損を、下はブロックの場合である。写真の右側には羽口中心線 AB にそった溶損量の測定結果を示す。

49.0 bar の高圧吹込みでは 3.92 bar の低圧吹込みにくらべ羽口耐火物の溶損は相当減少させることができる。

低圧吹込みの場合羽口まわりが特徴的なすり鉢形に溶損されることがわかる。この溶損状況は実炉の場合とよく一致している。

このように羽口耐火物がすり鉢状に溶損される原因の一つは前報に述べたバックアタック現象によるジェット吹もどしの作用であると考えられる。

最近 180 t 上底吹き転炉で 42.2 bar (43 kgf/cm²) の高圧吹込み操作を行った結果、羽口の損耗は少ないという報告がある⁸⁾。

2.3 羽口形状の検討

高圧吹込みによりバックアタックは減少させることができるが、これを実炉に適用するとなると高圧の酸素や Ar ガスの設備が必要であり問題が多く容易でない。そこで現在行われている現場の供給圧力である 19.6 bar (20 kgf/cm²) 以下の低圧吹込みでもバックアタックを

High pressure blowing (single)	Low-pressure blowing (single)
Pressure 49.0 barG Flow rate 48 Nl /min	Pressure 3.92 barG Flow rate 48 Nl /min

Photo. 2. Experimental results of refractory erosion model.

Circumference ratio $L/\pi De$	Flatness B/H	Configuration
1		
2	10.47	
3	26.24	
4	48.23	
5	76.57	

Fig. 3. Flattened tuyere used in water model.

Table 1. Tuyeres size used in the water model.

Circumference ratio $L/\pi De$	Flatness B/H	Thickness H (mm)	Width B (mm)
1.00		$\phi 2.65$ (Circular section)	
1.06	1.7	1.800	3.135
1.71	7.7	0.503	3.875
2.31	15.4	0.260	4.014
2.76	22.6	0.180	4.060
3.12	29.2	0.140	4.083
3.67	41.1	0.100	4.106
3.91	46.7	0.088	4.112
4.32	57.2	0.072	4.122

減少できる可能性について研究を続けた。

羽口を Fig. 3 に示すような扁平形にすることにより羽口の内周長が同一断面積の円形断面羽口にくらべ大きくなる。この扁平形羽口を用いて水モデル実験を行ったところ、低圧吹込みでもバックアタック現象が完全に解決することがわかった。

その形を示すパラメーターとして単なる扁平度、
扁平度 = B/H , B = 羽口の内幅, H = 羽口の内厚
と羽口の内周長の増加に着目する周比、

周比 = $L/\pi De$, L = 羽口の内周長, De = その羽口と同じ内断面積を有する等価円の直径
の二つの表しかたが考えられる。Fig. 3 に羽口断面形状とそれらの値の関係を示した。

Table 1 に実験に使用した羽口の寸法を示す。Fig. 4 はその実験結果である。吹込み圧力を 1.96 bar (2 kgf/cm²) から 29.4 bar (30 kgf/cm²) まで変えているが、周比 3, 扁平度 25 以上の範囲でバックアタックの発生頻度が 0 になる。

Photo. 3 は扁平羽口による水中へのガス (圧縮空気) 吹込み状況を 4 こま/s で撮影した連続写真の一部である。羽口の周比 $L/\pi De = 4.4$, 等価円直径 $De = 7.0$ で、吹込み条件は圧力 3.63 bar G である。このように扁平羽口の周比を大きくすることによりバックアタックは完全に消滅させることができる。

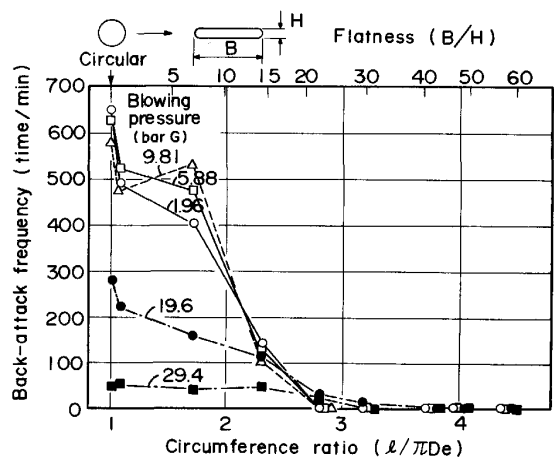
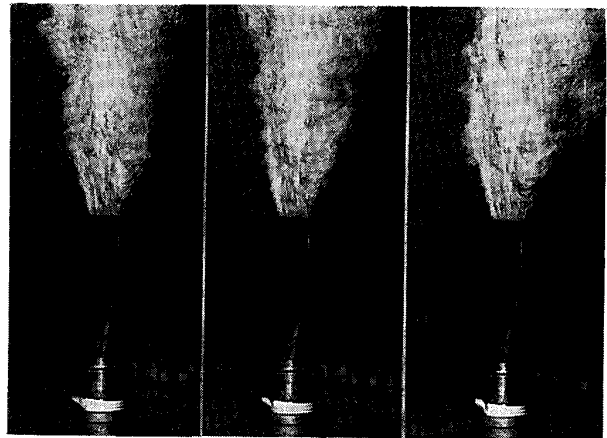


Fig. 4. Effects of circumference ratio on back-attack frequency.



Blowing pressure 3.63 bar G
Equivalent diameter $De = 7.0$
Circumference ratio $L/\pi De = 4.4$

Photo. 3. Sequence photographs of the flattened nozzle blowing in water, taken at 4 frames/s.

3. 石英ガラスを用いた溶鉄観察実験

水モデルから得られた結果を溶鉄に適用する場合に水モデルと溶鉄とを結びつける相似則が必要であるがまだ明らかではない。そこで石英ガラスを用いた溶鉄中のバックアタック観察実験を行った。

Fig. 5 に実験装置の概略を示す。60 kg 試験転炉の炉底に 5 mm 厚さの石英ガラスを 2 枚重ねて装着し、石英ガラスの中心に羽口を取り付けた。Photo. 4 に石英ガラスと羽口を炉底に取り付けた状況を示す。

実験に使用した羽口の寸法を Table 2 に示す。この他に円形断面の 2 重管羽口も実験した。

溶銑を炉に装入して羽口からアルゴンガスを吹き込んで、バックアタックの発生状況を肉眼で直接観察すると

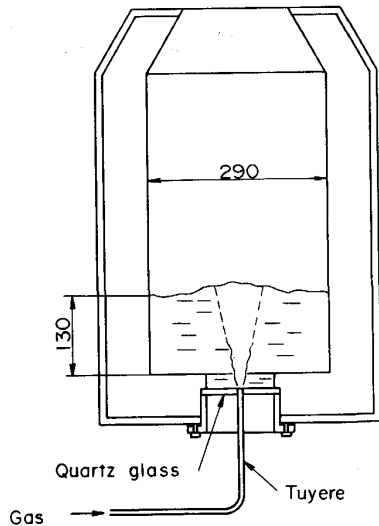


Fig. 5. Schematic diagram of vessel for observation of "back-attack" phenomenon in molten iron.

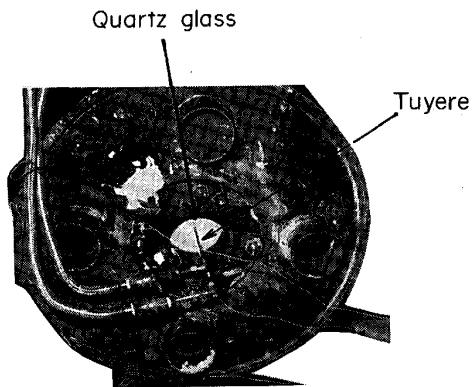


Photo. 4. Bottom view of vessel with quartz glass and tuyere.

Table 2. Tuyeres size used in the hot model.

Circumference ratio $L/\pi De$	Flatness B/H	Thickness H (mm)	Width B (mm)
1.00	$\phi 2.00$ (Circular section)		
1.94	10.5	0.548	5.735
2.97	26.2	0.346	9.079
3.98	48.3	0.255	12.311
4.97	76.4	0.203	15.505

同時に 16 mm 高速度カメラ, 8 mm カメラで撮影した。またバックアタック発生時には羽口がガスで覆われることを利用して電磁オシロにより電氣的にバックアタック発生頻度を捕らえることを試みた。

バックアタックの発生に伴って炉中から特徴的な音響が発生するのでこの実験では音響測定も実施した。

Photo. 5 に円形断面羽口のバックアタック発生状況を示す。バックアタックの発生と同時に Photo. 5 のように瞬間的に同心円状にガスがひろがるのが見られた。



Photo. 5. "Back-attack" on the circular tuyere in molten iron, observed through quartz glass.

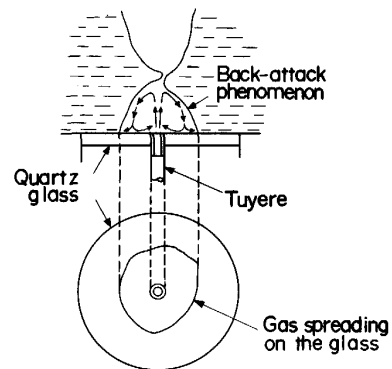


Fig. 6. Schematic presentation of gas spreading on glass and "back-attack" (Presumed).

石英ガラス上のガスのひろがりバックアタック現象の対応は Fig. 6 のようになっていると考えられる。

扁平羽口では Table 2 に示した円形から周比 4 (扁平度 48.3) まではバックアタックの発生が見られたが、周比 5 (扁平度 76.4) の羽口では完全に解消することが目視および 8 mm 映画により認められた。水モデルの場合にはこの条件では周比 3 (扁平度 26.2) でバックアタックが解消されているので、バックアタックが解消される周比は溶湯の場合には水の場合よりも大きい方にずれている。

円形断面 2 重管羽口で内管に酸素, 外管に Ar を吹き込んだ場合もバックアタックが発生することが確認された。

Ar ガスのみの吹き込みでは 7 min くらいの観察ができるのが酸素ガスを吹込むと石英ガラスがたちまち曇るため 1 min くらいしか観察できない。また酸素ガスを吹き込んだ場合は石英ガラスがすり鉢状に溶損されていた。

羽口を電極とするバックアタックの頻度測定もでき

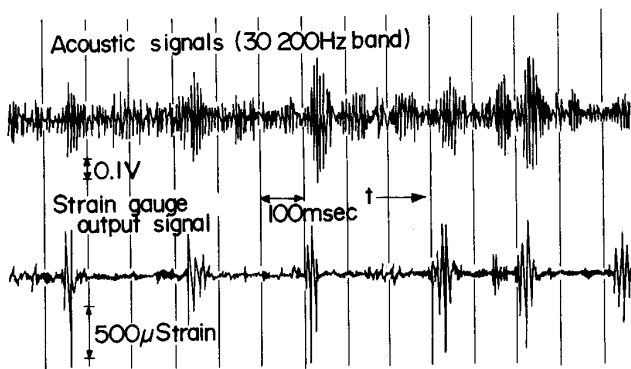


Fig. 7. An example of time change relationship between measurements by microphone and those by strain gauge.

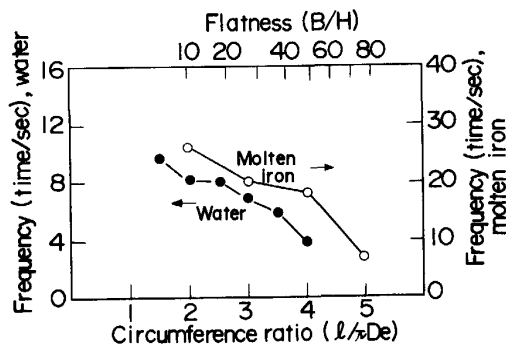


Fig. 8. Effect of circumference ratio on "back-attack" measured by acoustic method.

た。この方法は現場の羽口のバックアタックの測定にも応用できると考えられる。

音響測定の結果を Fig. 7, 8 に示す。Fig. 7 は水モデル実験において音響測定法と別報に示したストレングージ受圧板法を同時に適用してバックアタックを測定した結果である。両者の波形の間には非常に一致がみられる。Fig. 8 は水モデルと溶鉄実験の音響法で測定したバックアタックの発生頻度を羽口の周比を横軸として示したもので、溶鉄中でも水中と同様に周比の増大とともに発生頻度が減少するが、バックアタックの頻度は溶鉄では水の場合の約 2.9 倍の値になっている。

4. バックアタックの解消についての考察

考察 1 :

バックアタック現象は吹き込まれたガスにより液中に形成されたキャビティーの成長と崩壊に関する不安定現象によって生ずる。従ってキャビティーの成長速度が遅ければ崩壊の周期も長くなりバックアタックの頻度は減少すると考えられる。

キャビティーの成長速度はキャビティーの界面におけ

る気泡化の速度と関係しており、気泡化の速度が大きいほどキャビティーの成長速度は遅くなる。

一方吹込みガス圧を増大させると、吹込みガスジェットの流れが増大し、キャビティーの長さおよび径が増大してキャビティー界面積が増大する。かつ流速の増大によって、羽口の出口付近では界面の乱れも増大するのでキャビティー界面の気泡化の速度も増大すると考えられる。従って吹込み圧の増大によりバックアタックが減少すると結論される。これは 2・1 節で述べた事実を説明している。

また扁平羽口において周比を増大すると、円形断面羽口にくらべて当然単位の吹込みガス流量当たりの界面積が増大し、従ってキャビティー界面の気泡化の速度も増大するため 2・3 節の事実が得られると考えられる。

溶鉄の場合は 3 章で述べたように水の場合よりもバックアタックの頻度が大きい。これは溶鉄の表面張力が水よりも大きいことため気泡化の速度が遅くなるためと考えられる。

考察 2 :

バックアタック現象は液中ジェットのコア部の負圧部に周囲のガスおよび液が吹き込まれ、界面までも吸い込まれてキャビティーのくびれが生ずることを発端として起こる。従ってもし吸い込まれるものがガスのみであってキャビティーと浴の界面にまで影響を与えないならば、バックアタック現象は起きないはずである。

Fig. 9 に示すように円形断面羽口においてはキャビティーのくびれが円周にそって同時に起こるが、扁平羽口においてはこの吸引が場所的、時間的に同時でないため、その隣からガスの供給を受けることができる。従ってその界面をこえて液体まで吸い込む事態が避けられることによりバックアタックが解消すると考えられる。

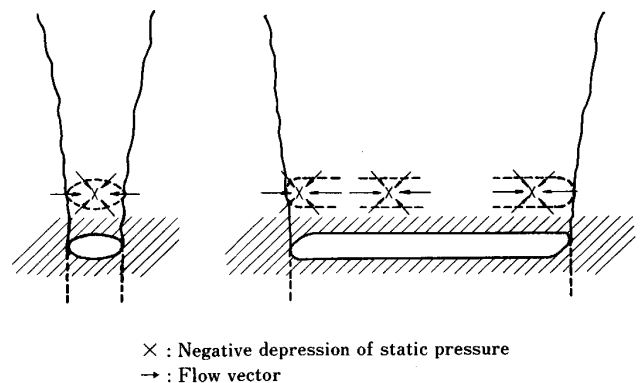


Fig. 9. Conceptual illustration of the suction flow vector induced by the negative depression of static pressure in circular tuyere and flatten tuyere.

5. 結 言

底吹き羽口耐火物の溶損原因の一つであるバックアタック現象を消滅ないしは軽減する方法を検討するため、水モデル実験および溶鉄観察実験を行い、以下の結果を得た。

1)バックアタック現象により羽口耐火物がすり鉢状に溶損される。

2)水モデル実験において、バックアタック現象は円形断面羽口では吹込み圧力を 19.6 bar (20 kg/cm²) 以上に増大することにより減少させられ、スリット形の扁平羽口ではその周比を 3 以上にすることにより完全に解消できることが判明した。

3)溶鉄実験において円形断面羽口のバックアタック

現象の存在を認め、周比 5 の扁平羽口によりそれが完全に解消されることを確認した。

文 献

- 1) 青木健郎, 増田誠一, 鳩野哲男, 多賀雅之: 鉄と鋼, **65** (1980), S 822
- 2) 青木健郎: 鉄と鋼, **76** (1990), p. 1996
- 3) 石橋政衛, 白石惟光, 山本里見, 島田道彦: 鉄と鋼, **61** (1975), S 111
- 4) 島田道彦, 石橋政衛, 白石惟光, 森瀬兵治: 鉄と鋼, **61** (1975), S 447
- 5) 坂口庄一, 石橋政衛, 吉井正孝, 山本里見, 梶岡博幸: 鉄と鋼, **63** (1977), S 534
- 6) J. K. BRIMACOMBE, S. E. MEREDITH and R. G. H. LEE: Metall. Trans. B, **15** (1984), p. 243
- 7) 森 一美, 佐野正道: 鉄と鋼, **67** (1981), p. 672
- 8) 橋 林三, 高紫信元, 桑山道弘, 山根 明, 前田瑞夫, 小山内寿: 川崎製鉄技報, **17** (1985), p. 357