

RH, DH の大型化に伴う脱ガス反応の促進効果

中里 英樹*・田尻 浩之*²・碓井 建夫*・田中 敏宏*・丸川 雄浄*³

Rate Enhancement of the Degassing Reaction by the Enlargement of RH and DH Reactors

Hideki ONO-NAKAZATO, Hiroyuki TAJIRI, Tateo USUI, Toshihiro TANAKA and Katsukiyo MARUKAWA

Synopsis : Many techniques have been developed on the vacuum degassing of molten steel. The RH and DH reactors, which are suitable to the high productivity of converter, have occupied the mainstream. The DH process had constantly been installed until the latter half in 1970's, but has not been set up since 1980's. On the other hand, the RH process has continually been installed up to the present. The reason why RH has occupied the mainstream and has been developed further is examined from the viewpoint of the rate enhancement of the degassing reaction by the enlargement of RH and DH reactors. With the enlargement of the RH and DH reactors, the ratio of the upper surface area of steel in vacuum vessel to total reaction area decreases. On the other hand, the surface area of bubbles by Ar injection increases. Accordingly, the contribution of bubbles to the A/V (reaction area/metal volume) value becomes larger than that of the upper surface of steel in vacuum vessel. Although the argon gas can be also injected in the DH process, it is rather difficult to conduct the Ar injection in comparison with the RH process. It is not possible to sufficiently demonstrate the rate enhancement effect of the bubbles on the degassing reaction in DH reactor. Accordingly, from the viewpoint of the A/V value, the enlargement of the reactor is more advantageous to RH reactor. On the other hand, the circulation mass flow rate of steel similarly increases with increasing the heat size in both RH and DH reactors. It can be concluded that, with the enlargement of the RH and DH reactors, the Ar injection plays more important role on the rate enhancement of degassing reaction. In RH reactor, the molten steel is continuously circulated by the Ar injection. On the other hand, in DH reactor, the vacuum vessel repeats the periodic (uncontinuous) up and down. In this respect, the RH process is superior to the DH process. It can be considered that this is one of the reasons why the RH process has been more developed.

Key words: RH; DH; degassing; secondary refining; reaction area; circulation flow rate; steelmaking.

1. 緒言

溶鋼の真空脱ガス法は多種の方式が開発されているが、その中でもRHおよびDH真空精錬法は転炉の高生産性に適合しているために、主流を占めるに至った。溶鋼を真空脱ガス処理することによって、脱水素、脱炭、脱酸が進行、非金属介在物の減少、成分微調整による品質の安定化、添加合金歩留向上への効果が著しい等、その進歩の過程について多くの報告がある¹⁻⁴⁾。RH法は、2本の浸漬管の一方にArガスを吹き込んで溶鋼を取鍋から真空槽内に吸い上げ、他方から取鍋内へ排出する連続処理である。一方、DH法は取鍋又は真空槽を上下させて、1本の吸い上げ管を通じて溶鋼を真空槽内へ出入りさせる。日本では、DH法は1959年に八幡製鉄(株)(現 新日本製鐵(株))により、またRH法は1961年に富士製鉄(株)(現 新日本製鐵(株))により技術導入されて以来、転炉とともに大型化して多数建設されてきた。日本でのRH, DH設置数および溶鋼処理量の推移^{2,4)}をFig. 1に示す。DH設備は1970年代後半までは順調に設置されてきたが、1980年代からは新設は見られない。一方RH設備は1980年以降も継続して設置

されている。元来、真空槽寿命、環流能力、成分の中率等においてDHの方がRHよりも優れているとされてきたが、DH, RH法が導入後約20年間の開発を経て機能的に大きな差がなくなり、溶鋼の環流に関して周期的なDH法よりも連続的なRH法の方が選択されている、またDHの槽昇降

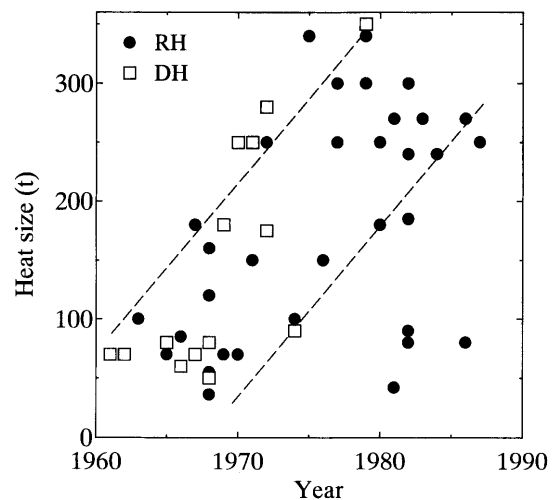


Fig. 1. The transition on the heat size of RH and DH reactors installed in Japan.

平成15年6月2日受付 平成15年8月19日受理 (Received on June 2, 2003; Accepted on Aug. 19, 2003)

* 大阪大学大学院工学研究科 (Graduate School of Engineering, Osaka University, 2-1 Yamadaoka Suita 565-0871)

*² 大阪大学大学院生 (Graduate Student, Osaka University)

*³ 大阪大学先端科学技術共同研究センター (Collaborative Research Center for Advanced Science and Technology, Osaka University)

法においては、酸素吹込みでは槽内溶鋼面が変化し、パウダー吹込みでは鍋内までパウダーが循環しないなど2次製錬設備の一元化の点で不利があるとの指摘⁴⁾がある。本研究では、RHが主流を占め、さらに発展するに至った点について、RH、DHの大型化に伴って生じる脱ガス反応の促進効果に着目して考察する。一般に、脱ガス速度は反応界面積や溶鋼の環流速度の寄与が大きいと考えられる。これら二つの因子に着目し、DHおよびRH真空脱ガス装置の大型化の効果を検討した。

2. 反応装置寸法

本研究で考察したRH、DH装置の外観および寸法をそれぞれFig. 2、Table 1に示す。本研究では、50tから300tへの大型化を想定し、RHおよびDHそれぞれに対して50tの処理設備⁴⁻⁶⁾をベースにして、寸法を比例的に大きくして装置寸法を定めた。このとき50tから300tに溶鋼処理質量が6倍になるため、一辺の寸法倍率は $r=1.82$ ($r^3=6$)となる。

3. 反応界面積

脱ガス反応の促進効果について、大型化に伴う反応界面積の変化に着目する。脱C反応を例にとると、その反応速度式は一般に、以下の通り表される。

$$\frac{d[\%C]}{dt} = -\frac{A}{V} \cdot k \cdot ([\%C] - [\%C]_i) \dots\dots\dots(1)$$

ここで、 A は反応界面積(m^2)、 $[\%C]$ 、 $[\%C]_i$ はそれぞれメタル中、反応界面における炭素濃度(mass%)、 k は速度定数(m/s)、 V は溶鋼体積(m^3)を表す。(1)式より、 A/V の値が大きい方が脱ガス反応速度は大きくなる。DHおよびRH真空脱ガス装置における反応界面積 A をそれぞれ以下のように定義し、それぞれの項の寄与について検討する。

DH: $A_{DH} = (A_V: \text{真空槽上面の溶鋼表面積})$
 RH: $A_{RH} = (A_V: \text{真空槽上面の溶鋼表面積})$
 $+ k_1 \times (A_B: \text{気泡表面積})$
 $+ k_2 \times (A_S: \text{スプラッシュによる溶鋼滴表面積})$

ここで、 k_1, k_2 : 補正の係数(後述)。

3.1 真空槽上面の溶鋼表面積

真空槽上面の溶鋼表面積 A_V は寸法倍率 r の2乗に比例し、一方溶鋼体積 V は寸法倍率 r の3乗に比例する。したがって A_V/V は r に反比例し、以下の式で表される。

$$\frac{A_V}{V} = \frac{c}{r} \quad (c: \text{定数}) \dots\dots\dots(2)$$

Table 1に50tの場合の装置寸法を定め、300tの場合の各値

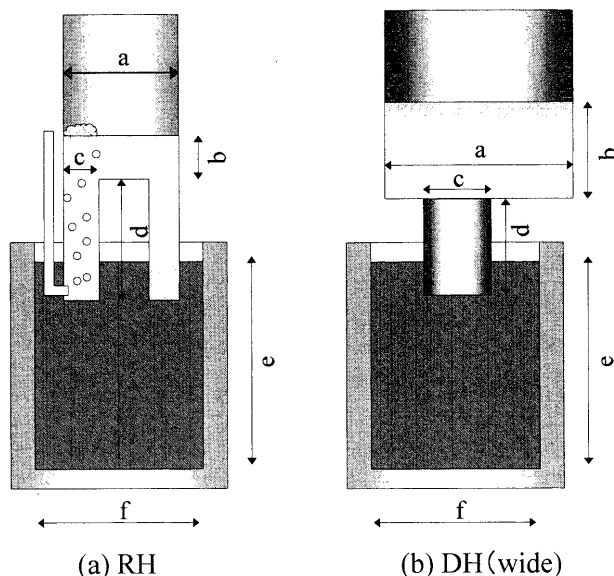


Fig. 2. Schematic cross section of the RH and wide DH reactors.

Table 1. Dimensions of the RH and wide DH reactors in Fig. 2 and the estimated circulation mass flow rates.

		50 t, $r=1.0$		300 t, $r=1.82$	
		RH	DH	RH	RH
Size (cm)	a	132	202	240	368
	b	22	18	40	32
	c	27.7	61.6	50.3	112
	d	60.5	70	110	128
	e	176	176	320	320
	f	220	220	400	400
Ar flow rate Q_b (m^3/min (s.t.p.))		0.154		0.517	
Inner diameter of immersed tube D (m)		0.277		0.503	
Depth of injection nozzle H (m)		0.605		1.1	
Up and down cycle N (s)			15		27
Mass of steel sucked into vacuum vessel (t)			5.43		32.6
Circulation mass flow rate W (t/min)		14.8 ⁽¹²⁾ 19.7 ⁽¹⁴⁾	21.7	60.1 ⁽¹²⁾ 67.8 ⁽¹⁴⁾	71.7

r : Magnification ratio of one length

を例示したが、 A_V/V 値の溶鋼処理質量に対する変化をFig. 3に示す。大型化に伴って A_V/V 値は小さくなり、また、DHの方が真空槽内径が大きいいため A_V/V 値は大きい。

3.2 気泡の表面積

真空槽の表面積は装置の大きさで決まるが、ガス吹込みによる生成気泡表面積 A_B あるいはスプラッシュによる溶鋼滴表面積 A_S を正確に知ることは難しい。ここでは、生成する気泡がすべて単一気泡であると仮定して、(3)式に基づき、気泡表面積 A_B (m^2)を計算した。

$$A_B = 4\pi(d_B/2)^2 \times N \dots\dots\dots(3)$$

ここで、 d_B は生成気泡平均直径(m)、 N は浸漬管の気泡数を

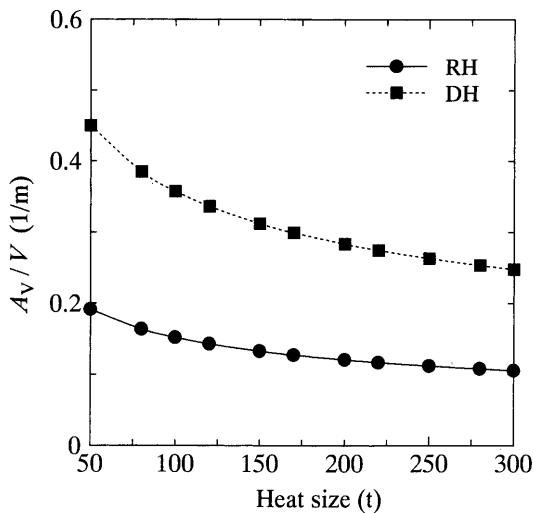


Fig. 3. The variation of A_V/V value with heat size for the upper surface area of steel in vacuum vessel.

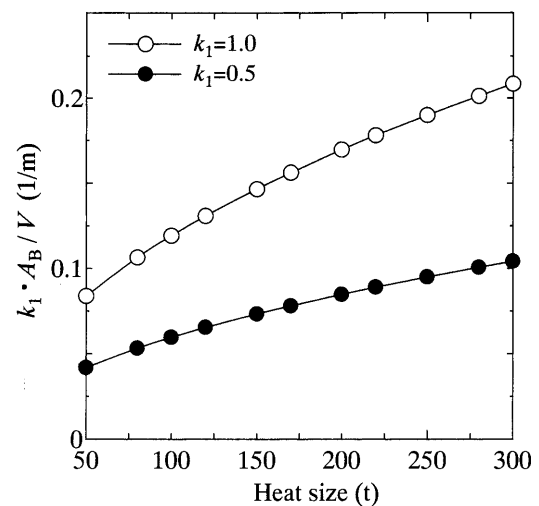


Fig. 4. The variation of $k_1 \cdot A_B/V$ value with heat size for the surface area of the forming bubbles.

表す。ガス吹込みによる生成気泡平均直径の推算式はいくつか報告されている^{7,8)}。本計算のガス流量で適用できる(4)式⁸⁾を用いて、生成気泡径 d_b を求めた。

$$d_b = 0.091(\sigma/\rho_L)^{1/2} v_s^{0.44} \dots \dots \dots (4)$$

ここで、 v_s はガス空塔速度(m/s)、 σ は溶鋼の表面張力(N/m)、 ρ_L は溶鋼の密度(kg/m³)である。また、ノズル1本あたりの気泡数 N' は(5)式で表される。

$$N' = f \times H / u_G \dots \dots \dots (5)$$

ここで、 f ($\equiv 6Q_b' / (\pi d_b^3)$)は生成気泡頻度(1/s)、 H はArガス吹込深さ(m)、 u_G は気泡上昇速度(m/s)を表す。気泡上昇速度 u_G は液上昇速度 u_L およびスリップ速度 u_s を用いて、(6)式で表される⁹⁻¹¹⁾。

$$u_G = u_L + u_s \dots \dots \dots (6)$$

$$u_L = 1.17(Q_m \cdot g \cdot H / A_p)^{0.346} \dots \dots \dots (7)$$

$$A_p = \pi \cdot (0.37H)^2 / 4 \dots \dots \dots (8)$$

$$u_s = u_{B0} / (1 - V_s / u_{B0}) \dots \dots \dots (9)$$

$$u_{B0} = \sqrt{0.5d_B g} \dots \dots \dots (10)$$

ここで、 A_p は気泡上昇領域の断面積(m²)、 g は重力加速度(m/s²)、 Q_b はArガス流量(m³/min STP)、 Q_b' ($=Q_b/n$, n :ノズル本数)はノズル1本あたりのArガス流量(m³/min STP)、 Q_m はノズル1本あたりのガス吹込位置での圧力と雰囲気圧力から求められる対数平均圧力におけるガスの流量(m³/s)、 u_{B0} は単一気泡の上昇速度(m/s)を表す。50t, 300tそれぞれに対して、Ar吹込量は最大環流量の90%を得るのに必要な Q_b ¹²⁾として0.154, 0.52 m³/min STP、ノズル本数はそれぞれ10, 35本とした¹³⁾。(3)~(10)式を用いて求めた、RH真空脱ガス法における生成気泡表面積 A_B をFig. 4に示す。気

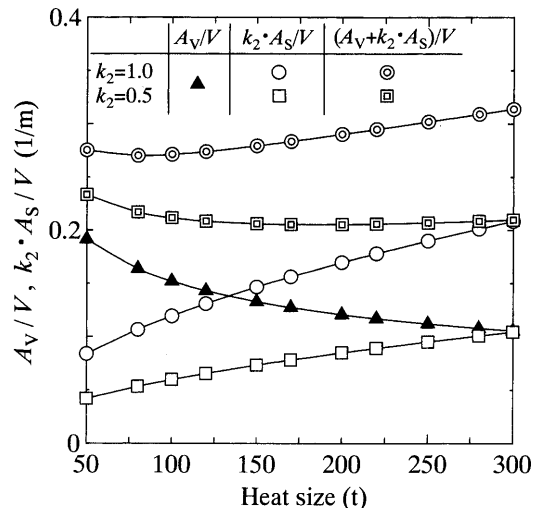


Fig. 5. The variation of $k_2 \cdot A_S/V$ value with heat size for the surface area of the steel drops.

泡表面は真空槽上面に比べて、物質移動は活発であるが、反応の駆動力は小さくなると考えられ、単位面積あたりの脱ガスへの寄与が変化する可能性がある。そこで係数 k_1 をかけて $k_1 \cdot A_B/V$ で評価し、Fig. 4では $k_1=0.5, 1$ の場合を示している。Fig. 4より溶鋼質量の増加に伴って、溶鋼単位体積あたりの気泡表面積 A_B/V は上昇する傾向がある。すなわち、装置の大型化により気泡による表面積の寄与が大きくなるのがわかる。これは上昇管内において気泡の上昇速度が小さくなり、それに伴いガスホールドアップが増加するためである。

3.3 溶鋼滴の表面積

スプラッシュによる溶鋼滴表面積 A_S は生成気泡の体積分が溶鋼滴になると仮定し、気泡の表面積と同様に評価した。したがって、Fig. 5に示す溶鋼滴表面積 A_S の溶鋼質量依存性は気泡の場合と同じである。真空槽内反応面積として真空槽上面の溶鋼表面積と合わせて評価すると、質量増

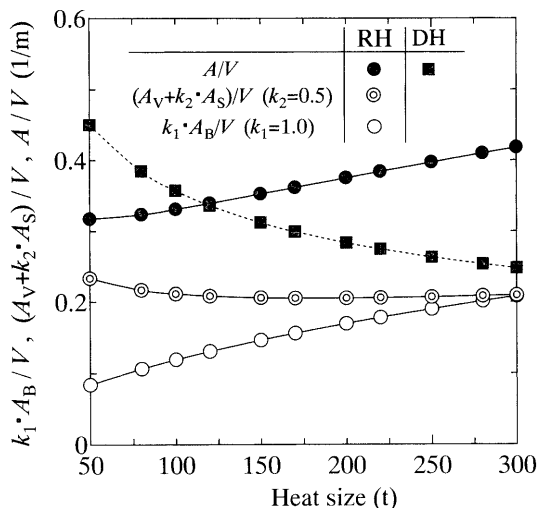


Fig. 6. The variation of A/V value with heat size for the total surface area.

加に伴い真空槽上面の溶鋼表面積に基づく A_v/V 値が減少するのを補う効果があり、係数 $k_2=0.5$ の場合、 $(A_v+k_2 \cdot A_s)/V$ は溶鋼質量に依存せずほぼ一定の値をとる。

3.4 DHおよびRH真空脱ガス装置のA/V値

これまでの検討に基づき、DHおよびRH真空脱ガス装置のA/V値に及ぼす処理質量の影響をFig. 6に示す。ここで溶鋼滴表面積の寄与は、気泡の表面積に比べて小さいと考え、 $k_1=1, k_2=0.5$ として計算した。真空槽と気泡による表面積を合わせて評価することにより、装置の大型化に伴い、RHの方がDHに比べて有利になる傾向があることがわかる。すなわち、大型化に伴って、気泡表面積の寄与が相対的に大きくなるため、ガス吹込みの効果が大きくなることわかる。実際にはDHにおいても、RHのArガス吹込みを基にしたDH吸上管からのArガス吹込みで、脱Cに効果をあげている。

4. 溶鋼環流量

溶鋼の環流量は溶鋼の脱ガス反応を促進する重要な因子である。環流量が増大するほど、その反応効率が大きくなるため、これまでに、RH真空脱ガス法の環流量特性に関するいくつかの研究が行われてきた^{12,14}。既往の研究に基づき、DHおよびRH真空脱ガス時の質量環流量 W (t/min) を以下のように推算した。

(1) DH真空脱ガス法

昇降周期 M (s/回)、真空槽容積 V (m³)、溶鉄の密度 ρ_L (kg/m³) から、DH真空脱ガス法における質量環流量 W (t/min) を(11)式より求めた。ここで昇降サイクル M (s/回) は、吸上速度一定と仮定し寸法倍率 r に比例させ ($V \propto r^3$, 浸漬管断面積 $\propto r^2$)、50tの場合 $M=15$ 、300tの場合 $M=27$ として計算した。

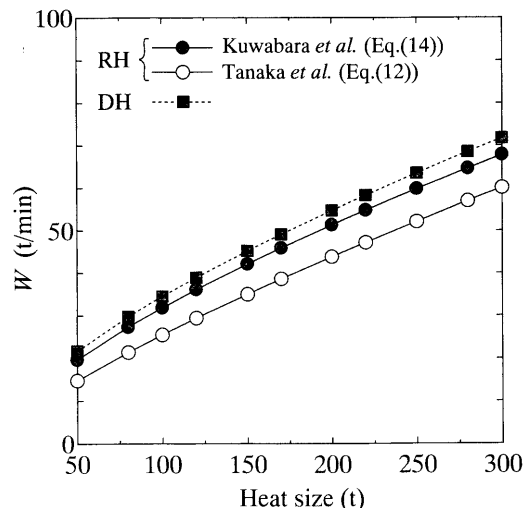


Fig. 7. The variations of the circulation mass flow rate of steel in RH and DH reactors with heat size.

$$W = \frac{6 \times 10^{-2}}{M} \times \rho_L V \dots\dots\dots(11)$$

(2) RH真空脱ガス法

田中ら¹²は駆動力モデルに基づき上昇管と下降管のガス吹込み位置での圧力差を考え、水モデル実験から、溶鋼の質量環流量を表す(12)式を導出した。

$$W = 150(H \cdot Q_b^{5/6} \cdot D^2)^{1/2} \dots\dots\dots(12)$$

ここで、 D は浸漬管内径(m)、 H はArガス吹込深さ(m)、 Q_b はArガス吹込量(m³/min STP)を表す。また、(13)式から求められる最大質量環流量の90%を得るのに必要な流量をArガス吹込量 $Q_{b(90)}$ [m³/min(s.t.p.)]とした¹²。

$$Q_{b(90)} = 2.34 \cdot 10^{-2} \cdot 0.83 \cdot (10D)^{2.03} \dots\dots\dots(13)$$

Kuwabara *et al.*¹⁴は気泡の浮力によるエネルギーと摩擦損失により失われるエネルギーのバランスに基づき、実機測定データから、(14)式を導出した。

$$W = 11.4 \times 10^{-3} \cdot Q_b^{1/3} \cdot D^{4/3} \cdot \{\ln(P_1/P_2)\}^{1/3} \dots\dots\dots(14)$$

ここで、 P_1, P_2 はそれぞれガス吹込み位置および真空槽内の圧力(Pa)を表す。(12)、(14)式より、質量環流量増大には浸漬管径を大きくした方が環流ガス流量を増すよりも効果的であることがわかる。(11)、(12)、(14)式を用いて計算した、DH、RH装置の質量環流量に及ぼす溶鋼質量の影響をFig. 7に示す。Fig. 7から、RHに対して(12)、(14)式を用いた場合、質量環流量に若干の差は見られるが、質量環流量に及ぼす溶鋼質量の影響の定性的な傾向は同様であり、溶鋼質量増大に伴い溶鋼質量環流量は大きくなることわかる。また、本計算条件においてはDHの方がRHに比べて質量環流量は若干大きいことがわかるが、DHは真空に触れている時間が出入りのため1/2しかないため必ずしも

DHが有利とはいえない。

5. DHの大型化

DHを大型化することは、鍋の大きさとDH槽の大きさとの関係から吸い上げ量に制限が出て、従来通りの溶鋼質量循環流量では循環能力が大幅に減少し十分な脱ガス能を発揮できず不利である。実際DHの大型化に際し、槽の昇降速度の高速化や槽の形状を縦長型にして槽の外径を取鍋の内径よりも小さくし槽を取鍋内に挿入可能とし、槽の昇降ストロークを大きくして、一回の吸上量を増大させる手法が取り入れられている⁴⁾。その観点から大型化に関する寸法を定め直し、同様の計算を行った。その円筒型DHの反応装置外観および寸法をそれぞれFig. 8, Table 2に示す。円筒型DHの A/V 値、溶鋼質量循環流量に及ぼす処理質量の影響をこれまでの結果と合わせてそれぞれFig. 9, 10に示す。ここで、円筒型DHに対する溶鋼質量循環流量について、大型化しても昇降周期 M は小さくならず、 $M=15\text{s}/\text{回}$ (一定)として計算した。Fig. 9において、円筒型DHの A/V 値は小さい。実際には、DHにおいても吸上管からのArガス吹込みが行われている。したがって、DHの場合も、

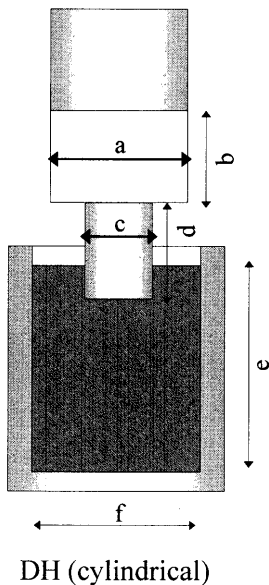


Fig. 8. Schematic cross section of the cylindrical DH reactor.

Table 2. Dimensions of the cylindrical DH reactor in Fig. 8.

Size	(cm)	
	50 t	300 t
a	160	291
b	17.6	032
c	70	127
d	50	91
e	176	320
f	220	400

これら気泡や溶鋼滴の影響を考慮すると大型化に伴う A/V 値の減少はなくなり、RHと同様な傾向になることが期待される。しかしながら、周期的 (非連続) な槽昇降にArガス吹込みを併用すると吸上管を通過する溶鋼流動に遅れが生じる。この点について、さらに槽の上昇時にはArガスを低圧で少量とし溶鋼の吐出にガスが抵抗にならないようにして槽の下降時はArガスを高圧で多量として槽内に入る溶鋼のスプラッシュ発生を増加させ、脱ガスがいつそう進行するような工夫も施されているが⁴⁾、循環流のRHに比べると気泡の効果を十分に引き出すのは難しいと想定でき、 A/V 値による比較ではRHの方が有利になると思われる。Fig.10に示す質量循環流量に関しては、大型化に際し上述のようにDHの機能を極限まで高めることによって、RHを上回ることが可能である。

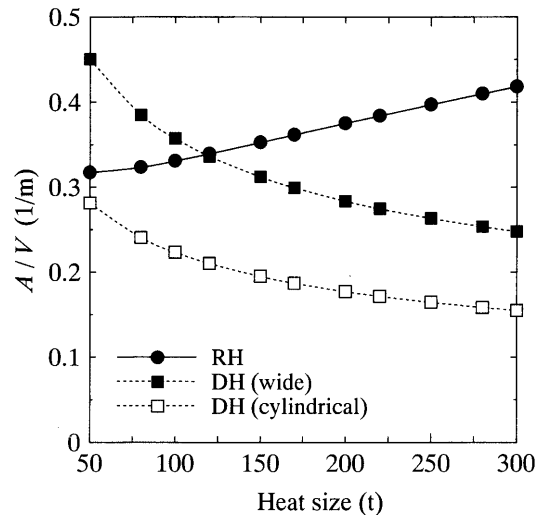


Fig. 9. The variation of A/V value with heat size for the total surface area of RH and two kinds of DH.

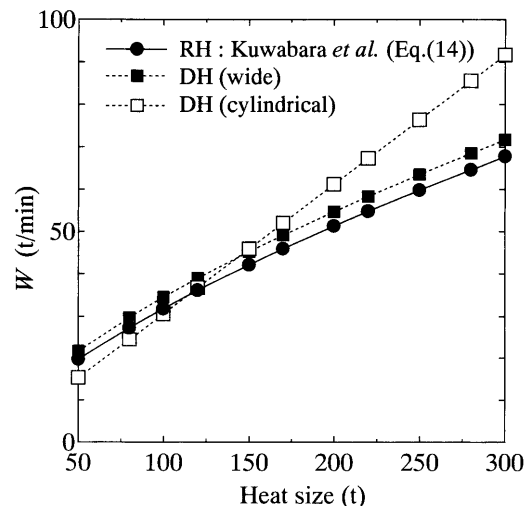


Fig. 10. The variations of the circulation mass flow rate of steel in RH and two kinds of DH reactors with heat size.

6. 実測値との比較

本研究では脱ガス反応の促進効果について、大型化に伴う反応界面積の変化に着目した。その妥当性について検討するため脱C反応を例にとり、実測値^{4,15-18)}との比較を行った。実測値に対して、以下の反応速度式を用いて見かけの脱C容量係数を求めた。

$$\frac{d[\%C]}{dt} = -K([\%C] - [\%C]_e) \dots\dots\dots(15)$$

ここでKは見かけの脱C容量係数(1/s)であり、A/V値に比例する(K=(A/V)·k)。得られた見かけの脱C容量係数に及ぼす溶鋼処理質量の影響をFig.11に示す。Fig.11より溶鋼処理質量の増加に伴い、見かけの脱C容量係数は、RHの場合増加傾向にあり、DHの場合減少傾向にあることがわかる。この傾向は、Fig. 9に示したDHおよびRH真空脱ガス装置のA/V値に及ぼす溶鋼処理質量の影響と同様であり、反応界面積の変化に着目した本検討が妥当であることを示唆している。

大型化に伴う脱ガス反応の促進効果をTable 3に要約する。大型化により、A/V値は真空槽上面の寄与が小さくなる

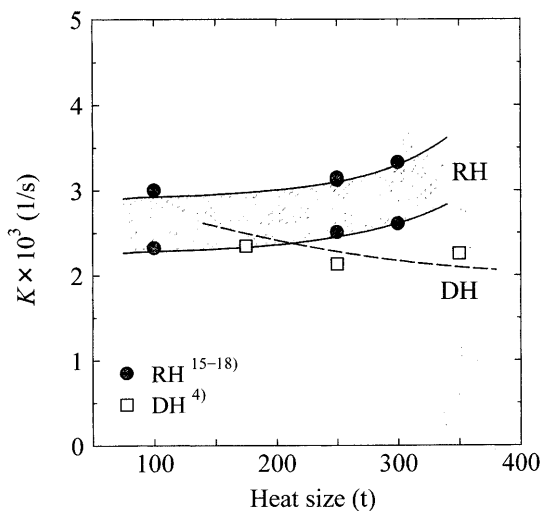


Fig. 11. Dependence of the apparent volumetric coefficient of the decarburization on heat size for RH and DH reactors.

り、気泡の効果が大きくなる。DHの場合は循環流のRHに比べると気泡の効果を十分に引き出すのは難しいと想定でき、A/V値による比較ではRHの方が有利になると思われる。溶鋼質量環流量は、RH、DHともに大型化に伴い上昇し、同様の傾向を示す。以上より、大型化に伴って、脱ガス反応の促進効果に関して、特に反応界面積に及ぼす気泡(Arガス吹込み)の効果が重要な役割を占めるようになり、その点で周期的(非連続)な槽昇降のDHよりもArガス吹込みが溶鋼を連続的に環流させる役割も果たしているRHの方が適合しており、より発展するに至った理由の一つであると考えられる。

7. 結論

RHおよびDH真空脱ガス装置に関して、RHが主流を占め、さらに発展するに至った点について、RH、DHの大型化に伴って生じる脱ガス反応の促進効果に着目して考察を行い、以下の結論を得た。

(1) 大型化により、溶鋼単位体積あたりの反応界面積A/V値は真空槽上面の寄与が小さくなり、気泡の効果が大きくなる。DHの場合は循環流のRHに比べると気泡の効果を十分に引き出すのは難しいと想定でき、A/V値による比較ではRHの方が有利になると考えられる。

(2) 溶鋼質量環流量は、RH、DHともに大型化に伴い上昇し、同様の傾向を示す。また、槽の昇降速度の高速化や1回の吸上量を増大させるなど機能を極限まで高めた円筒型DHでは、溶鋼質量環流量についてRHを上回ることが可能である。

(3) 大型化に伴い、脱ガス反応の促進に関してArガス吹込みの効果が重要な役割を占めるようになる。その点で周期的(非連続)な槽昇降のDHよりもArガス吹込みが溶鋼を連続的に環流させる役割も果たしているRHの方が適合しており、より発展するに至ったと推察される。

文 献

1) H.Matsunaga, T.Tominaga, M.Ohji and F.Tanaka: *Tetsu-to-Hagané*, 63 (1977), 1945.

Table 3. The effect of the enlargement of RH and DH reactors on the rate enhancement of the degassing reaction.

		RH	DH (Wide)	DH (Cylindrical)	RH		DH (Wide)		DH (Cylindrical)	
					50 t	300 t	50 t	300 t	50 t	300 t
					A_v/V	$\propto r^{-1}$	$\propto r^{-1}$	$\propto r^{-1}$	0.19	0.11
A/V (1/m)	$k_1 \cdot A_B/V$	$\propto r^{1.5}$	-	-	0.08	0.21	-	-	-	-
	$k_2 \cdot A_S/V$	$\propto r^{1.5}$	-	-	0.04	0.10	-	-	-	-
	Total	-	-	-	0.31	0.42	0.45	0.25	-	-
Circulation mass flow rate W (t/min)		$\propto r^2$	$\propto r^2$	$\propto r^3$	17	64	22	72	15	92

* $k_1 = 1$, $k_2 = 0.5$, r : Magnification ratio of one length

- 2) T.Kuwabara: *Tetsu-to-Hagané*, **73** (1987), 2157.
- 3) R.Tsujino, M.Kojima, K.Endo, M.Okimori, J.Ogura and J.Nakashima: *Tetsu-to-Hagané*, **76** (1990), 1948.
- 4) M.Okimori: *Tetsu-to-Hagané*, **79** (1993), 1.
- 5) J.Nakashima, R.Tsujino, M.Hirai and M.Uchimura: *Tetsu-to-Hagané*, **73** (1987), S178.
- 6) Handbook of Iron and Steel, 4th ed., Vol. 2, ed. by N. Sano *et al.*, ISIJ, Tokyo, (2002), 13·1·1. (CD-ROM).
- 7) M.Sano, K.Mori and T.Sato: *Tetsu-to-Hagané*, **63** (1977), 2308.
- 8) M.Sano, K.Mori and Y.Fujita: *Tetsu-to-Hagané*, **65** (1979), 1140.
- 9) M.Sano and K.Mori: *Tetsu-to-Hagané*, **64** (1978), 1714.
- 10) M.Sano and K.Mori: *Tetsu-to-Hagané*, **68** (1982), 2451.
- 11) Y.Higuchi and Y.Shirota: *Tetsu-to-Hagané*, **86** (2000), 748.
- 12) H.Tanaka, M.Sakakibara and J.Hayashi: *Seitetsu Kenkyu*, **293** (1978), 12427.
- 13) T.Saeki: Private communication.
- 14) T.Kuwabara, K.Umezawa, K.Mori and H.Watanabe: *Trans. Iron Steel Inst. Jpn.*, **28** (1988), 305.
- 15) M.Ikeda, Y.Miyawaki, M.Hanmyo, T.Anzai, H.Tanabe and T.Usui: *Tetsu-to-Hagané*, **69** (1983), S880.
- 16) Y.Kato, T.Fujii, S.Suetsugu, S.Ohmiya and K.Aizawa: *Tetsu-to-Hagané*, **79** (1993), 1248.
- 17) H.Matsuno, T.Murai, T.Ishii, E.Sakurai, H.Kawashima and K.Murakami: *Tetsu-to-Hagané*, **85** (1999), 216.
- 18) T.Hiraoka, K.Ohnuki, H.Fujii, K.Fukuda and Y.Hoshijima: *Tetsu-to-Hagané*, **89** (2003), 252.