

副孔を有するラバールノズルを用いたRH精錬

平岡 照祥*・大貫 一雄*²・藤井 博務*³・福田 和久*³・星島 洋介*⁴

RH Treatment by Laval Nozzle Lance with Sub-hole

Teruyoshi HIRAOKA, Kazuo OHNUKI, Hiromu FUJII, Kazuhisa FUKUDA and Yousuke HOSHIIJIMA

Synopsis : The purposes of combustion by multi function burner lance are skull-less operation of vacuum vessel, increasing the temperature of molten steel, and improving the decarburizing rate. In this paper the decarburizing rate is investigated in case of oxygen blowing and burning with excess oxygen.

Oxygen blowing can improve the decarburizing rate with the RH multi function burner lance even if carbon content in molten steel is high before RH-treatment.

Neither pollution nor the decrease in the quality was seen from the composition change of molten steel in RH treatment and the quality investigation of the product in operation with RH multi function burner lance.

Key words: secondary steelmaking; decarburizing; pollution.

1. 緒言

これまでRHで用いるランス多機能化技術（多機能バーナー：RH-MFB）を念頭に、LNG-酸素混合ガスの燃焼速度の圧力依存性¹⁾、副孔を有するラバールノズル内の流れ²⁾、RH操作におけるLNG-酸素混合ガス燃焼の効果³⁾を検討してきた。

末広がり部の途中に副孔を有するラバールノズルでは酸素単独のみの吹付けも可能であり、副孔からLNGを主孔から酸素を流し、その混合ガスによる燃焼で溶鋼を加熱することも可能であり、真空脱炭促進と溶鋼温度補償との両立が期待される。これまで、脱炭反応促進に関して、多くの研究がなされて現在に至っている⁴⁻⁶⁾。しかしながら、可燃性ガスも純酸素ガスと同時に吹付けて脱炭と温度補償とを両立させる知見は皆無である。

本論文は、上記の検討によって開発された副孔を有するラバールノズルを用いて真空槽内へ酸素単独のガスを吹き込んだ場合の脱炭現象ならびにアルミ昇熱、LNGと酸素との混合ガスを吹き込んだ場合の脱炭現象と溶鋼温度変化さらには処理後の溶鋼の清浄性に関する実験的研究を100t規模の実機を用いて行った結果について報告する。

2. 実験方法

2.1 RH真空脱炭中の酸素吹付け

実験装置をFig. 1に示す。100t規模の実機の実機RH真空設

備を用いて、脱ガス処理中にRH-MFBから純酸素ガスのみを溶鋼面に吹付けて、脱炭反応を促進させる操作を行った。この時、真空槽から溶鋼が排出される下降管近傍において、処理途中の溶鋼を取鍋内からサンプリングすることで溶鋼中Cの経時変化を測定し、併せて、同じ個所において溶鋼中自由酸素濃度を酸素濃淡電池センサーにて測定した。

使用したラバールノズルの形状は前報³⁾と同様である。主な実験条件をTable 1に示す。

2.2 RH真空脱炭中のLNG-酸素混合ガス吹付け

前項と同様な実験装置を用いて、溶鋼の真空脱炭中に副孔を有するラバールノズルから理論燃料比のLNG-酸素混合ガスを吹付けて、加熱ならびに脱炭処理を行った。主な実験条件をTable 2に示す。

2.3 RH真空処理中の酸素ガス吹付けによるアルミ昇熱

前項と同様な実験装置を用いて、溶鋼の真空処理中に副孔を有するラバールノズルから酸素ガスを吹き出すと共に、溶鋼へ真空槽上方からアルミ粒を添加し、その酸化発熱を利用した溶鋼加熱を行った。溶鋼1tあたりアルミ1kgと酸素0.62Nm³とが酸化発熱した場合、理想的には溶鋼は約35K温度上昇することを念頭に添加量を適宜変更した。主な実験条件をTable 3に示す。

この実験では、溶鋼中のアルミナが変化すること、すなわち溶鋼の清浄性が変化することが予想されたため、成品である薄鋼板の内部欠陥ならびに表面欠陥を調査した。

内部欠陥 (Internal defect) とは、鋼材の表面には現れない

平成13年12月27日受付 平成14年11月19日受理 (Received on Dec. 27, 2001; Accepted on Nov. 19, 2002)

* 黒崎播磨 (株) (Krosaki Harima Corp.)

*² 新日本製鐵 (株) 広畑技術研究部 (Hirohata R&D Lab., Nippon Steel Corp., 1 Fuji-cho Hirohata-ku Himeji 671-1188)

*³ 新日本製鐵 (株) 広畑製鐵所 (Hirohata Works, Nippon Steel Corp.)

*⁴ 広鋳技建 (株) (Hiroko-Giken Corp.)

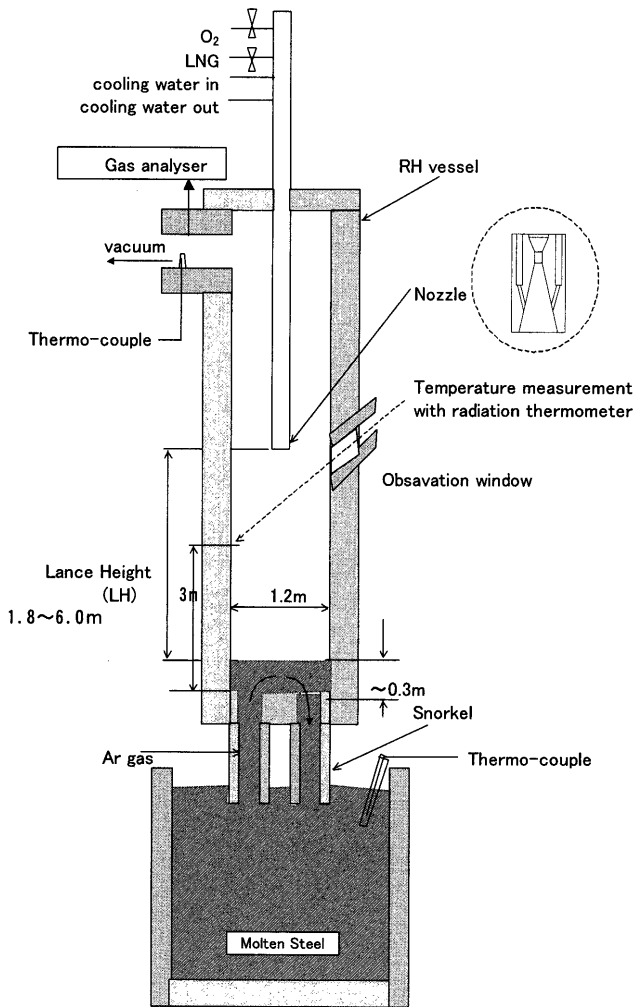


Fig. 1. Experimental apparatus.

Table 1. Experimental conditions of decarburization.

molten steel	100 t
temperature	1580~1620°C
circulation rate	34 t/min
pressure	666~2000 Pa
oxygen flow rate	1200 Nm ³ /h
lance height	1.8 m

Table 2. Experimental conditions of decarburization and LNG burning.

case	O ₂ -blowing for decarburization			LNG-burning			
	O ₂ (Nm ³ /h)	time(min) start	time(min) end	LNG (Nm ³ /h)	O ₂ (Nm ³ /h)	time(min) start	time(min) end
(a)	1200	6.4	7.8	-	-	-	-
(b)	1200	6.2	7.0	84	194	8.8	13.0
(c)	1200	5.5	8.1	200	460	11.6	17.2

が、内部に存在している金属酸化物による欠陥である。この調査は、磁粉探傷法と呼ばれる方法で検査した。この方法では、製品コイルを約1mの長さに切断し、欠陥発生鋼板の発生率で表現される。

表面欠陥の内、ヘゲ (skin inclusion) は、前述した内部欠

Table 3. Experimental conditions of Al-reheating and LNG burning.

molten steel	100 t	Al killed steel
temperature	1580~1620°C	
circulation rate	34 t/min	
pressure	666~2000 Pa	
LNG flow rate	228 Nm ³ /h	
oxygen flow rate	510 Nm ³ /h	
lance height	6.0 m	

陥と同じような形態の金属酸化物で、それが鋼材表面に現れたものである。したがって、その形状は塊状であり、圧延によって形状変化は無く、それが幅方向、長さ方向共に、ランダムに発生する。スリバー (sliver) は、鋼材中に存在していたアルミナクラスターが、圧延方向に細長く伸ばされたものである。いずれの欠陥も、アルミナが主体で、その存在状態と形状によって呼び名が違っている。これら表面欠陥も、磁粉探傷法と同様に、コイルを1mの長さに切断し、1枚ずつ目視で検査され、一コイル全体の欠陥発生枚数比で表現した。

2・4 LNG-酸素混合ガス吹付け時の溶鋼中成分変化

前項と同様な実験装置を用いて、脱酸後の溶鋼を真空処理中に副孔を有するラバールノズルからLNG-酸素混合ガスを吹付けて、溶鋼加熱を行った。主な実験条件をTable 3に示す。この場合、燃焼後の廃ガス成分であるCO₂やH₂Oが、溶鋼面に吹付けられる。溶鋼中には、既に、アルミニウム、チタン、シリコンなどの合金成分が添加されており、これらの元素と廃ガス成分であるCO₂やH₂Oとが反応して、溶鋼中へCやHがピックアップされることが懸念された。

また、同時に、溶鋼中に非金属介在物を生成して、鋼材の品質を劣化させる危険性が懸念された。そこで、バーナー加熱を行った場合と、バーナー加熱を全く行わない場合に分けて、真空脱ガス処理中の溶鋼を、取鍋からサンプルリングし、[C]ならびに[H]を測定した。

3. 実験結果および考察

3・1 RH真空脱炭中の酸素吹付け脱炭挙動

Fig. 2は、真空処理時間の経過と共に変化する[C]の様子を示している。図中、点線で示された推移が、純酸素ガス吹きの無い、従来の操業の様子を示したものである。処理前の[C]は260 ppmであり、処理前の[O]は490 ppmである。この場合は、[O]は過剰な状態であり、最終到達[C]は16 ppmであった。[C]、[O]は、共にばらつきはあるが、従来の操業はほぼこの近傍で行われていた。

さらに、図中実線で示されたのが、真空処理の初期に純酸素ガス吹きを行った場合の、RH-MFB操業の様子を示したものである。図中、O₂-blowingと示された時間帯が酸素

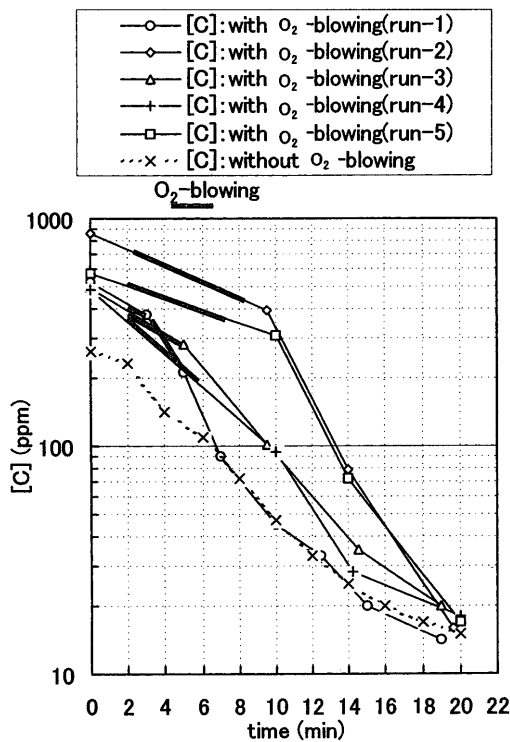


Fig. 2. Change of [C] of molten steel with treatment time.

ガス吹きを行った期間である。酸素吹き中の脱炭速度が小さく、酸素吹き後に脱炭速度が増大している。これは、酸素吹き前後に[O]の変化があり、その影響があると想定されるため、[C]と[O]の相対的な変化をFig. 3で比較した。図中実線で示されたのが、Fig. 2と同様に真空処理の初期に純酸素ガス吹きを行った場合のものである。この酸素ガス吹きにより、[O]は300~400 ppm程度に上昇し、その後、脱炭反応の進行と共に減少する。したがって、酸素吹き条件の場合、酸素吹き直後が最も[O]が高い。また、酸素ガス吹き時は真空槽内溶鋼はガスの動圧を受けて、局所的には表面の圧力が雰囲気圧力よりも高くなると推察される。

すなわち、[O]が高い場合には、溶鋼中の P_{CO} が高くなり、溶鋼中からCO気泡が発生しやすくなり、また、 P_{CO} が一定でも雰囲気圧力が低下すれば、同様にCO気泡が発生しやすくなる。真空槽内の溶鋼表面以外の溶鋼内部からCO気泡が発生すると、スプラッシュを発生させて、見かけの脱炭反応界面積が増大する可能性が考えられる。これが脱炭速度を大きくした原因と考えられる。

そこで、Fig. 4は、12ヒートの測定結果について、式(1)で示される見かけの脱炭速度定数 k_c を、各測定時間における[C]の測定値を用いて計算した値と、同時に測定された[O]との関係を示したものである。

$$C = C_i \cdot \exp(-k_c \cdot t) \dots \dots \dots (1)$$

ここで、C: 到達[C], C_i : 脱炭処理開始時の初期[C], k_c : 見かけの脱炭速度定数, t : 脱炭時間である。

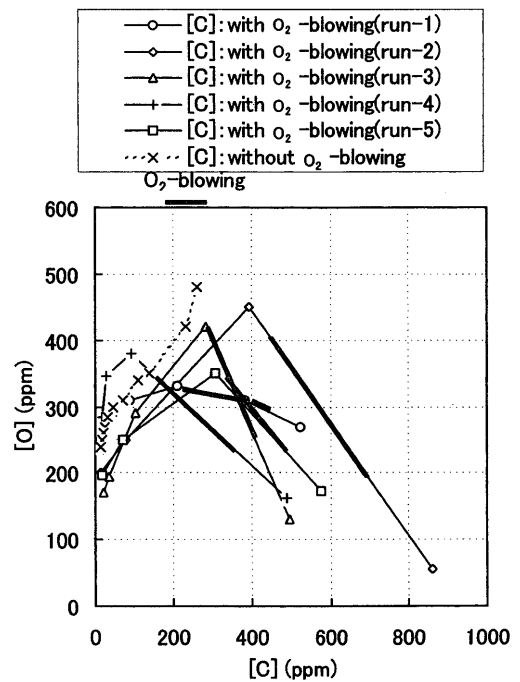


Fig. 3. Change of [C] and [O] of molten steel during decarburization.

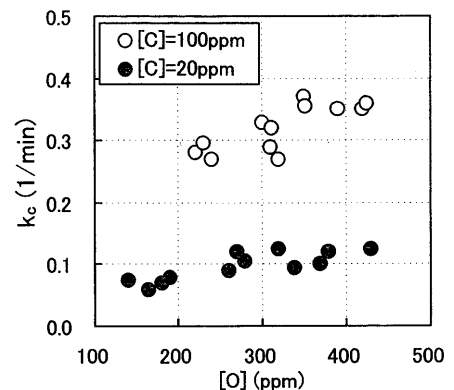


Fig. 4. Effect of free oxygen on decarburization rate constant k_c .

k_c は、Fig. 2に示したような時間と[C]との関係図において、[C]=100 ppmおよび20 ppmの点をよぎる実測2点間の勾配から求めた値である。

[C]に対して1次の反応速度式を仮定して求めた k_c の値は、本来、[C]には依存しない、一定値を示すはずであるが、Fig. 4に示すとおり、[C]のレベルによって変化し、 k_c の値は[C]が高いほど大きく、また、[O]が高くなると、 k_c も高くなる傾向を示す。

特に、[C]が100 ppm程度では、 k_c は酸素濃度依存性が高い。しかし、[C]が20 ppmという処理末期になると、 k_c の酸素濃度依存性は低くなる。

[C]が高い場合、およびまたは[O]が高い場合には、その濃度積である溶鋼中の P_{CO} が高くなり、前述のように溶鋼中からCO気泡が発生しやすくなり、見かけの脱炭反応界面積が増大することが想定される。

RH真空脱炭中のLNG-酸素混合ガス吹付けによる脱炭挙動ならびに溶鋼加熱挙動

Fig. 5~7に実験結果を示す。Fig. 5が従来の酸素単独吹パターン(a)である。図中、太線の時間帯において酸素を吹付けた。

脱炭反応進行中にLNG-酸素混合ガスを278Nm³/h流した場合(b), Fig. 7は、同じく660Nm³/h流した場合(c)の時間経過に伴う[C]変化と真空槽中の圧力変化

をそれぞれ示している。図中、LNGと示した太線の時間帯においてLNG-酸素混合ガスによる燃焼加熱を行った。

なお、Fig. 5, 6ではFig. 2に見られるような酸素吹き中とその後の脱炭速度の大きな変化は認められていない。これは、処理前の[O]が300~350ppmと高いため、酸素吹き時間が短く、酸素吹き以前の脱炭速度が大きかったためと考えられる。

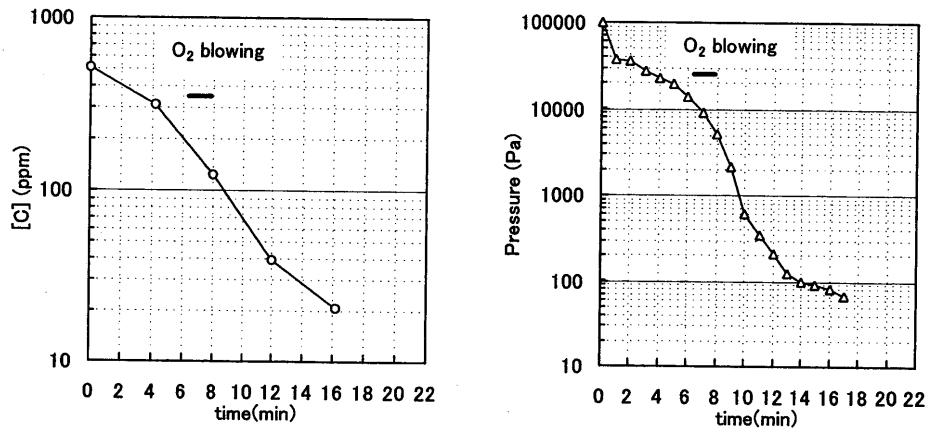


Fig. 5. Change of C content in molten steel and pressure in RH vessel during degassing with and without heating by LNG. (a) Standard operation pattern (without burner heating).

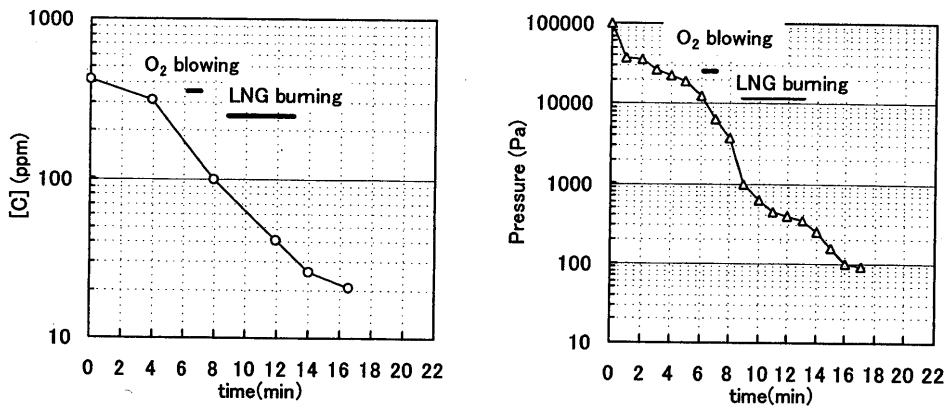


Fig. 6. Change of C content in molten steel and pressure in RH vessel during degassing with and without heating by LNG. (b) Burner heating during decarburization (LNG 84 Nm³/h).

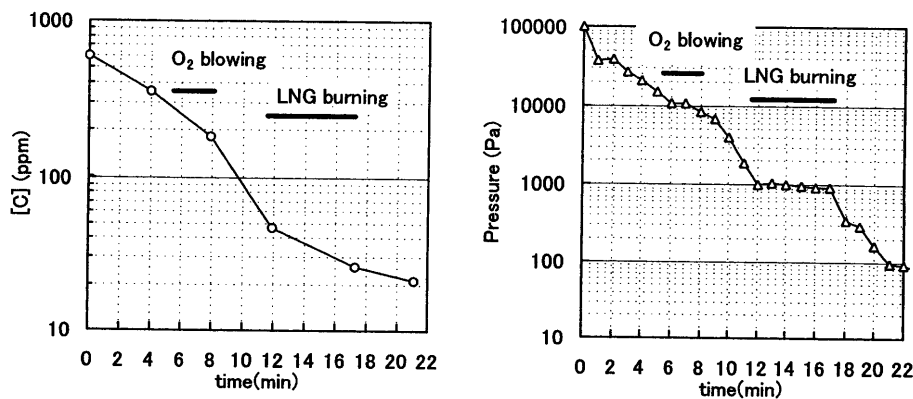


Fig. 7. Change of C content in molten steel and pressure in RH vessel during degassing with and without heating by LNG. (c) Burner heating during decarburization (LNG 200 Nm³/h).

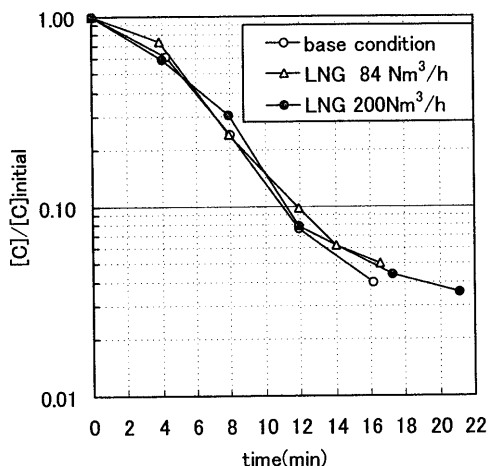


Fig. 8. Change of C content in molten steel and pressure in RH-vessel during degassing with and without heating by LNG.

Fig. 7に示されるように、LNG-酸素混合ガスを660 Nm³/h流した場合には、このガス量によって真空槽内の圧力が下らず1000 Pa (8torr)程度で止まっているにも関わらず、脱炭反応は進行し、20 ppmまで下がっている。この場合、燃焼加熱によって約7°Cの温度低下が防止されている。

脱炭処理前の[C]で規格化した[C]の経時変化をFig. 8に示す。本研究で提案した脱炭処理中のLNG-酸素混合ガスによる燃焼加熱を行っても、脱炭速度は変化していない。

この理由は、①加熱によって真空槽内の溶鋼表面の温度が上昇して脱炭速度を促進させた効果、②ガス吹付けに伴い真空槽内溶鋼の攪拌が向上し脱炭速度が増加した効果、ならびに、③加熱排ガスによって真空槽内の真空度が低下し脱炭速度を抑制させた影響、という3つの影響因子が相殺したためと考えられる。

脱炭処理中の溶鋼温度低下速度をFig. 9に示す。脱炭処理中のLNG-酸素混合ガスによる燃焼加熱によって、LNG流量が200 Nm³/hの場合、約0.5°C/minの温度補償が達成された。これはLNG発熱量とLNG燃焼時間とから算出される入熱量と温度補償量とを比較して求められる熱効率が約50%となり、前報³⁾の結果と同等である。

3.3 RH真空処理中の酸素ガス吹付けによるアルミ昇熱時の溶鋼の清浄性

アルミ昇熱を行うと、溶鋼中にアルミナを生成する。したがって、溶鋼の清浄性確認のためにアルミ昇熱を行った場合の製品品質調査結果をFig. 10に示した。

内部欠陥の指標 (index) は、日常的に製造される製品の内部、アルミ昇熱もバーナー加熱も行わなかったものの平均値を1.0としている。そして、アルミ昇熱やバーナー加熱を行った場合の製品欠陥発生枚数を、日常品の平均欠陥発生枚数で割った値に指標化して示している。表面欠陥についても、指標については同じ手法で計算した。

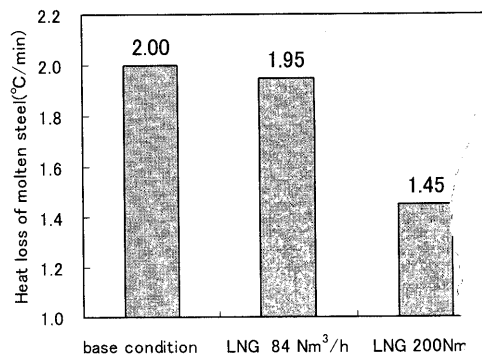


Fig. 9. Heat loss of molten steel during degassing without heating by LNG.

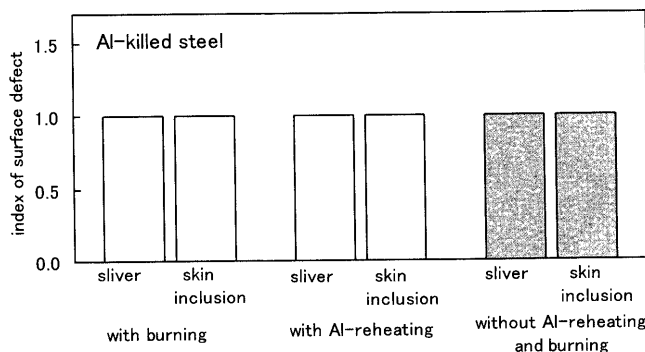
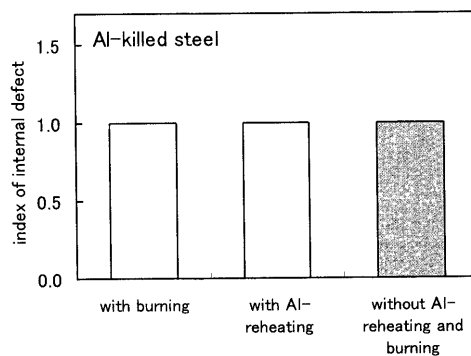


Fig. 10. Internal defects and surface defects of product.

Fig. 10に示すように、アルミ昇熱やバーナー加熱を行っても、製品品質には悪影響を及ぼさないことが確認できた。

3.4 LNG-酸素混合ガス吹付け時の溶鋼中成分変化

LNG-酸素混合ガスの燃焼によって生成するガス成分はCO₂, H₂Oが主となるため、変化を想定した溶鋼中の化学成分はCとHである。Fig. 11は、横軸に経過時間を、縦軸に[C]ピックアップおよび[H]ピックアップをとって、LNG-酸素混合ガス燃焼時の成分挙動を示したものである。この図からわかるように、バーナー加熱によって、溶鋼中化学成分が影響を受けることは無いことが実証された。

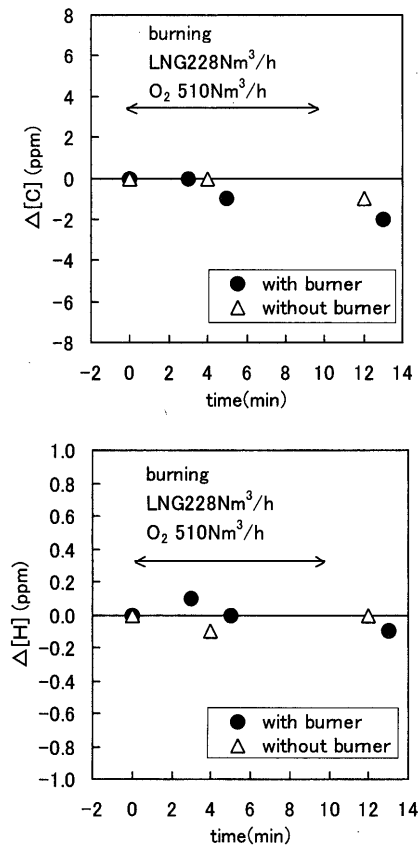


Fig. 11. [C] and [H] pick-up of molten steel.

4. 結言

RH装置の真空槽内へLNG-酸素混合ガスを吹込み、こ

れを真空槽内で燃焼させることによって、熱補償することのできる副孔を有するラバールノズルを用いたRH精錬操作を行い、以下の知見が得られた。

(1) 副孔を有するラバールノズルによって純酸素吹きを行うことにより、処理前の[C]を、500~600 ppmに高めても、最終到達[C]は、従来法と処理時間内に、同じ15 ppm程度が得られた。

(2) 見かけの脱炭反応速度定数が[O]によって大きくなる。

(3) 脱炭中にLNG-酸素の混合ガスを吹付けることによって、真空度は悪化しても脱炭反応は変化しない。

(4) 本実験条件の範囲内では、アルミ昇熱を行っても溶鋼の清浄性は変化しない。

(5) LNG-酸素混合ガスを吹付け真空槽内で燃焼することによる溶鋼のC汚染やH汚染は無視できる。

文 献

- 1) T.Hiraoka, K.Ohnuki, H.Fujii, K.Fukuda and Y.Hoshijima: *Steel Res.*, submitted.
- 2) T.Hiraoka, K.Ohnuki, H.Fujii, K.Fukuda and Y.Hoshijima: *Tetsu-to-Hagané*, **89** (2003), 244.
- 3) T.Hiraoka, K.Ohnuki, H.Fujii, K.Fukuda and Y.Hoshijima: *Steel Res.*, submitted.
- 4) H.Watanabe, K.Asano and T.Saeki: *Tetsu-to-Hagané*, **54** (1968), 1372.
- 5) N.Sumida, T.Fujii, I.Oguchi, T.Emi, S.Tachibana, K.Yoshimura and F.Sudo: *Kawasaki Steel Giho*, **15** (1983), 152.
- 6) H.Watanabe, K.Umezawa, T.Kuwabara and K.Mori: *Trans. Iron Steel Inst. Jpn.*, **28** (1988), 305.