

# 真空排気過程におけるCO気泡発生時の溶鋼の脱炭速度

原島 和海\*・清瀬 明人\*・井本 健夫\*<sup>2</sup>・矢野 正孝\*<sup>2</sup>・宮沢 憲一\*

Kinetics of Decarburization Reaction of Molten Steel with CO Bubble Evolution in Pressure Decreasing Stage

Kazuumi HARASHIMA, Akihito KIYOSE, Takeo INOMOTO, Masataka YANO and Ken-ichi MIYAZAWA

**Synopsis :** The dominant factors of the carbon removal reaction from a molten steel with an Ar injection stirring under the pressure decreasing stage have been studied using a vacuum tank degassing furnace containing 7 ton melt.

- 1) The decarburization rate constant,  $k_c'$ , increased with the increase in the pressure decreasing rate and with the increase in an oxygen content.
- 2) The vigorous CO bubble evolution in the molten steel was observed in the pressure decreasing stage. So, the CO bubble evolution rate constant,  $k_{ch}$ , and the super-saturation pressure,  $P_{co}^*$ , for the CO bubble evolution were taken into consideration in a decarburization reaction model. The decarburization behaviors were simulated successfully by the reaction model.
- 3) The value of  $k_{ch}$  increased with the increase in the Ar injection flow rate, and the value of  $P_{co}^*$  was estimated to be 22.5~25.0 mmHg.
- 4) In the pressure decreasing stage, the decarburization reaction was divided into three types, namely, a) an evacuating control, b) a stirring control and c) a mixed control of evacuating and stirring. In order to increase the decarburization rate, it is essential to keep a high oxygen content, to evacuate fast and to supply enough stirring to a molten steel according to the evacuating rate.

**Key words :** kinetics ; decarburization ; molten steel ; evacuating stage ; CO bubble evolution ; secondary steelmaking.

## 1. 緒言

実機脱ガス処理において、真空排気過程における脱炭反応促進技術の確立は全処理時間の短縮につながる重要な開発課題であり、CO気泡発生区間の脱炭反応解明のための検討結果が実験室規模<sup>1)~3)</sup>、および、RH<sup>4)~9)</sup>処理を対象に多数報告されている。

実験室規模実験では、脱炭反応の容量係数 $k_c'$ の値がCO気泡発生時に大きく、極低炭領域でかつCO気泡発生停止区間では小さい事<sup>1)2)</sup>、減圧速度が大きい時に大きい事<sup>2)</sup>が現象論的に示されている。しかし、CO気泡発生時の速度論的な検討はほとんどない。一方、RHでの溶鋼環流速度と $k_c'$ との関係を表す概念が住田<sup>4)</sup>によって提示されたが、 $k_c'$ に対する雰囲気圧力変化と酸素濃度 $[O]$ の影響に関する記述はない。これに対して、T.Kuwabara<sup>5)</sup>、興梠<sup>9)</sup>はRHでの脱炭反応の解析に関して、雰囲気圧力の影響を考慮し、炭素濃度 $[C]$ の経時変化を説明しているが、速度定数項の支配因子に関しては未検討のままに残されている。すなわち、排気過程では雰囲気圧力と $[O]$ が大きく変動する領域であるにもかかわらず、排気速度を意図的に変更した知見<sup>5)6)8)</sup>は

極めて少なく、脱炭速度に対する減圧速度の影響や、 $[O]$ の影響<sup>7)10)</sup>に関しては必ずしも明らかではない。そこで、実機での脱炭反応促進策提示の一助とするため、排気過程の脱炭反応の特徴と脱炭速度の支配因子を解明する事を目的として基礎試験を実施した。

## 2. 実験設備と実験条件

実験は溶鋼量が7トンの真空誘導炉を用いて実施した。実験設備の概要をFig. 1に示す。真空容器内に設置した坩堝(耐火物材質はマグネシア・クロマイト)の内径は110cmであり、溶鋼深さは静止浴換算で約105cmとなる。坩堝底部内径の1/4に相当する部位にはAr吹込み用のマグネシア質系のポラス・プラグを設置した。反応速度に対する溶鋼攪拌強度の影響を調査するために、溶鋼へのAr吹込み流量 $F_{Ar}$ を最大20 Nl/minの範囲内で変更し、一部の実験では誘導攪拌電力も変更した。反応速度に対する雰囲気圧力の影響を調査する目的で、真空排気弁の開度を調整し減圧速度を変化させた。

脱炭試験中は、各実験間の気相の物質移動抵抗の変動を極力防止する目的で溶鋼面上100cmの高さから、口径14

平成5年12月13日受付 平成6年4月8日受理 (Received on Dec. 13, 1993; Accepted on Apr. 8, 1994)

\* 新日本製鉄(株)君津技術研究部 (Kimitsu R&D Lab., Nippon Steel Corp., 1 Kimitsu Kimitsu 299-11)

\* 2新日本製鉄(株)プロセス技術研究所 (Process Technology Research Laboratories, Nippon Steel Corp.)

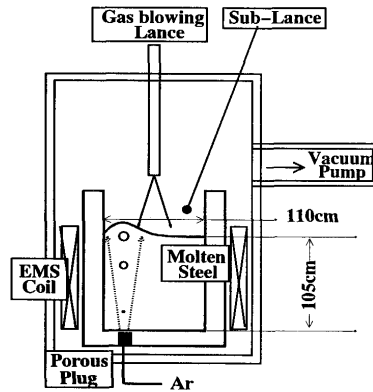


Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus.

Table 1. Experimental conditions.

Molten steel	Weight	7000 kg		Temperature : 1550~1610 °C		
	Composition	[C]	[O]	[S]	[Si]	[Mn]
	mass %	≤0.020	0.023~0.057	0.010~0.005	≤0.01	≤0.1
Pressure : 760 → ≤ 1.0 mmHg, (evacuating rate controlled)						
Ar injection	Porous plug : 98mm φ Injection rate : 1.0~20.0 Nl/min					
Ar blowing	1000 Nl/min, Nozzle dia. : 14mm φ, Lance height : 100 cm					

mmφのストレート形状のノズルを有するランスからArを1000 Nl/minの流量で溶鋼表面に吹き付けた。実験条件の概要をTable 1にまとめて示した。実験前の[C]は0.02mass%以下とし、[O]は目的に応じて0.023~0.057mass%の範囲で変更した。硫黄濃度[S]は0.005mass%~0.010mass%の範囲である。

### 3. 実験結果

#### 3.1 真空排気過程の脱炭挙動の代表例

Fig. 2-aに真空排気過程の[C]と[O]の経時変化の代表例を示す。排気開始後、約5min頃から[C]が減少し始め、[C]が0.0030mass%以下の領域では、脱炭速度が減少している。Fig. 2-bに、この時の雰囲気圧力 $P_{total}$  (○印)と溶鋼のCO分圧 $P_{CO}$  ( $=K \cdot [C] \cdot [O]$ ; ◇印, K:平衡定数<sup>11)</sup>)の経時変化を示した。図中には、溶鋼内部から激しい気泡の発生が開始した時点と、気泡発生がほぼ停止した時点を↓印で各々付記した。気泡が活発に発生する期間 (I期)では脱炭速度が大きく、気泡発生が停止している期間 (0, II期)で脱炭速度が小さい。他成分の変化がほとんど認められないことから、この気泡はCO気泡と判断できる。

Fig. 2-cに大貫<sup>12)</sup>により測定されたCO気泡発生限界圧力 $P_{total}^*$ と、その時の溶鋼のCO分圧 $P_{CO}^0$ との関係を再整理して示した。本実験設備を用いて同様な測定を実施した時の関係も併示した。図中の実線はこれらの実験点の回帰直線であり、実線よりも下部の領域が『CO気泡不発生領域』、上部が『CO気泡発生領域』である。Fig. 2-bに示した $P_{total}$ と $P_{CO}$ との関係の変化を経時順に◇印でFig. 2-cに併記した。

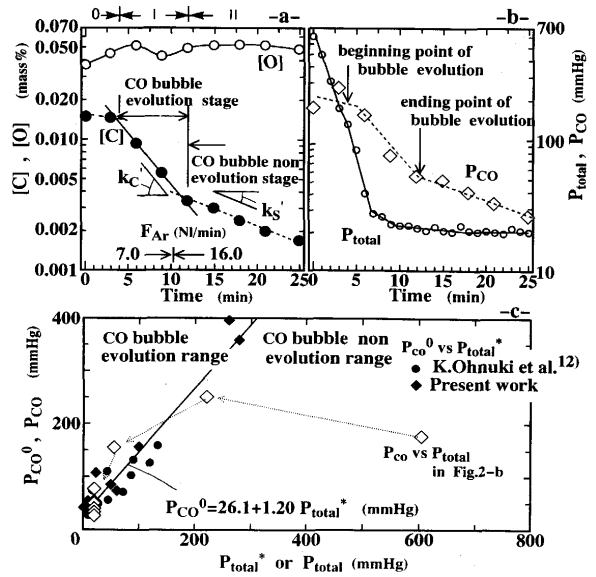


Fig. 2. Typical changes in [C], [O],  $P_{total}$  and  $P_{CO}^0$ , and relation between  $P_{CO}^0$  and  $P_{total}^*$ .

この溶鋼組成では、脱炭速度の小さな0期とII期は『CO気泡不発生領域』に、脱炭速度が大きいI期は『CO気泡発生領域』にあり、真空排気過程の脱炭速度は主に『CO気泡発生』の有無と密接に関係している。以下、真空排気過程でのCO気泡発生時の $k_c'$ に対する減圧速度と $F_{Ar}$ の影響について述べる。

#### 3.2 容量係数 $k_c'$ におよぼす減圧速度と吹込みAr流量の影響

Fig. 3に、 $F_{Ar}$ を一定(15Nl/min)として、減圧速度を大きく変更した時の脱炭挙動を各々比較して示す。減圧速度の大きい方が(●印)、小さい場合(□印)に比較して脱炭速度が大きい。ここで、脱炭速度と雰囲気圧力減少速度を各々(1)式と(2)式で近似し、 $k_c'$ と $F_{Ar}$ および減圧速度定数

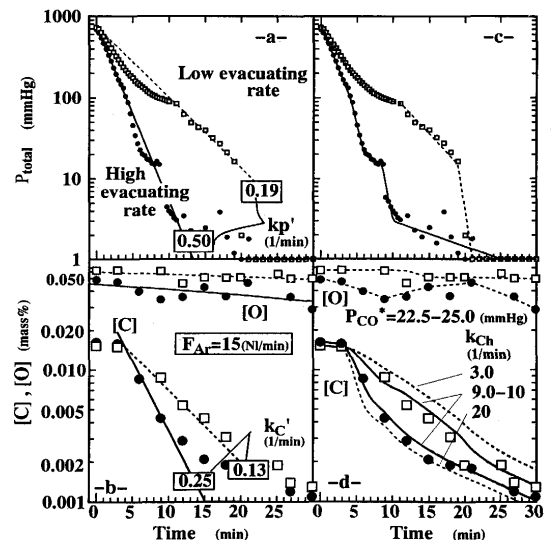


Fig. 3. Influence of evacuating rate on decarburization reaction.

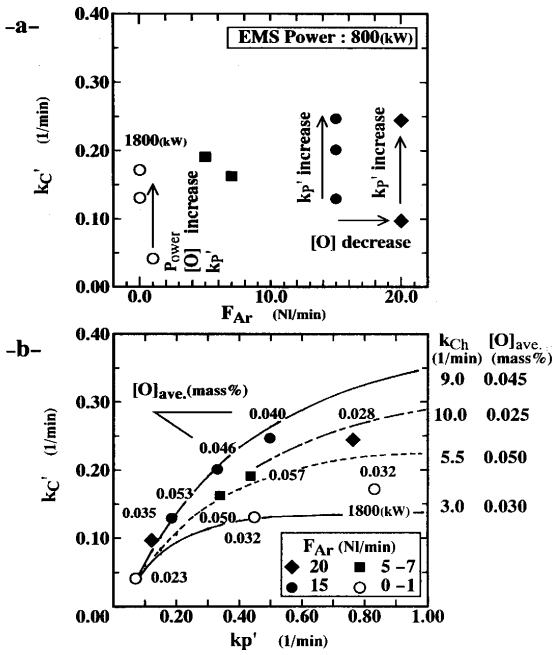


Fig. 4. Influences of  $F_{Ar}$  and  $k_P'$  on  $k_C'$ .

$k_P'$  ( $k_P'$ ,  $k_C'$ はFig. 3 -a, 3 -bの各直線の勾配) との関係を整る。ただし,  $k_C'$ はCO気泡発生期間における近似値である。Fig. 3 -cとFig. 3 -dの説明は4・1で述べる。

$$-\frac{d[C]}{dt} = k_C' \cdot [C] \quad (\text{mass\%/min}) \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$-\frac{dP_{total}}{dt} = k_P' \cdot P_{total} \quad (\text{mmHg/min}) \quad \dots\dots\dots (2)$$

Fig. 4 -aに, すべての実験で得た $k_C'$ と $F_{Ar}$ との関係を示す。矢印の意味は各因子を矢印の方向に変化させた事を表す。 $k_C'$ は $F_{Ar}$ の増加で大きくなる傾向はあるが, かなりばらついている。そこで, Fig. 4 -bに $k_C'$ と $k_P'$ との関係を示した。実験点に付記した数字は各実験での平均酸素濃度  $[O]_{ave.}$  である。 $k_C'$ は $k_P'$ の増加で大きくなる。ただし,  $[O]_{ave.}$ が約0.05mass%前後の実測値と比較すると,  $F_{Ar}$ の大きな場合(●印)の方が,  $F_{Ar}$ が小さい時(■印)よりも,  $k_C'$ は大きい。一方,  $F_{Ar}$ が最も大きく(20NI/min:◆印),  $[O]$ が比較的低濃度(0.03mass%前後)の時の $k_C'$ は $F_{Ar}=15$ NI/minの時と同程度である。つまり, CO気泡発生時の脱炭速度は, ①  $F_{Ar}$ , ②  $k_P'$ , ③  $[O]$  に強く依存するといえる。Fig. 4 -bに併記した曲線と $k_{Ch}$ の値については4・3で述べる。

### 4. 考察

#### 4・1 CO気泡発生容量係数 $k_{Ch}$ の導入と脱炭挙動のシミュレーション

排気過程における脱炭は, 吹込みAr気泡へのCO吸収反応(気泡脱炭)と自由表面でのCO生成反応(表面脱炭), および, 『CO気泡発生』反応(内部脱炭)の総和として進行する。ただし, 前述したように,  $[C]$ の減少開始時期と溶鋼内か

ら激しい気泡発生が観察される時期とがほぼ一致する事から, 実験室規模実験での観察結果と同じく<sup>1)-3)</sup>, この区間の脱炭速度は主に『CO気泡発生反応』に強く依存しているように考えられる。

発生CO気泡のCO分圧を $P_{CO}^b$ とし, 気泡発生の過飽和圧力<sup>12)13)</sup> $P_{CO}^*$ を考慮すると, CO気泡発生時の圧力関係は(3)式で, CO気泡発生時の気泡/溶鋼界面炭素濃度 $[C]_i$ は(4)式で各々示される。

$$P_{CO}^b \geq P_{total} + P_{CO}^* + \alpha \cdot \rho \cdot g \cdot h \quad (\text{mmHg}) \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$[C]_i = \frac{P_{total} + P_{CO}^* + \alpha \cdot \rho \cdot g \cdot h}{K \cdot [O]} \quad (\text{mass\%}) \quad \dots\dots\dots (4)$$

本実験のような取鍋タイプの精錬炉で, 溶鋼成分濃度が均一であると仮定すると, T.Kuwabaraら<sup>5)</sup>が提示した反応領域モデルに準じれば, CO気泡発生反応による脱炭速度は(5)式で記述できる。ただし,  $h$ はCO気泡発生深さ,  $h_{CO}$ はCO気泡発生限界深さである。

$$-\frac{d[C]}{dt} = \frac{\rho \cdot A \cdot k_{Ch}}{Wm} \cdot \int_0^{h_{CO}} ([C] - \frac{P_{total} + P_{CO}^* + \alpha \cdot \rho \cdot g \cdot h}{K \cdot [O]}) \cdot dh \quad (\text{mass\%/min}) \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$h_{CO} = \frac{K \cdot [O] \cdot [C] - (P_{total} + P_{CO}^*)}{\alpha \cdot \rho \cdot g} \quad (\text{cm})$$

ここで,  $k_{Ch}$ はCO気泡発生に基づく脱炭速度の容量係数であり, CO核生成反応の速度を含むCの物質移動と, CO気泡離脱に伴う界面擾乱による気・液界面でのCO生成反応のCの物質移動の各容量係数の和として意味付けられる。

一方, Ar吹込みに基づく気・液界面反応(自由表面+吹込みAr気泡表面)の容量係数 $k_S'$ の値は, 既に報告した値<sup>14)</sup>と, 同一設備を用いたCO気泡不発生領域において測定して得た $[C]$ の経時変化から, (6)式に基づいて決定した値を用いる。 $k_S'$ を $P_{total}$ と $F_{Ar}$ とで重回帰分析した結果をFig. 5に示す。 $k_S'$ は $F_{Ar}$ と $P_{total}$ の関数として(7)式で近似できる。

$$-\frac{d[C]}{dt} = k_S' \cdot [C] \quad (\text{mass\%/min}) \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$k_S' = f(F_{Ar}, P_{total}) = 0.0331 \cdot F_{Ar}^{0.53} \cdot P_{total}^{-0.40} \quad (\text{l/min}) \quad \dots\dots\dots (7)$$

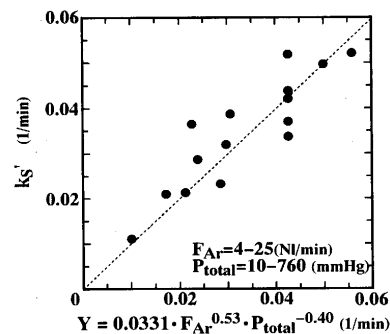


Fig. 5. Relation between  $k_S'$  and  $Y$ .

ただし、 $P_{total} < 10\text{mmHg}$ での $k_s'$ は、 $P_{total} \approx 10\text{mmHg}$ での $k_s'$ と同程度であった。そこで、 $P_{total} < 10\text{mmHg}$ では $P_{total} = 10\text{mmHg}$ での $k_s'$ の値を用いた。したがって、総反応速度は(8)式で記述できる。

$$-\frac{d[C]}{dt} = \frac{\rho \cdot A \cdot k_{Ch}}{W_m} \int_0^{h_{CO}} \left( [C] - \frac{P_{total} + P_{CO^*} + \rho \cdot g \cdot h}{K \cdot [O]} \right) \cdot dh + 0.0331 \cdot F_{Ar}^{0.53} \cdot P_{total}^{-0.40} \cdot [C] \dots\dots\dots (8)$$

ここで、本実験で得た[C]の経時変化に基づき $k_{Ch}$ を求め、 $k_{Ch}$ の支配因子について検討する。

(8)式の解析解は得られないので、差分に基づく手法で、[C]の経時変化を最も良く記述できる $k_{Ch}$ と $P_{CO^*}$ を試行錯誤で求める。つまり、 $k_{Ch}$ と $P_{CO^*}$ はフィッティング・パラメータである。ただし、フィッティングに当り、(8)式右辺第1項の濃度差が“負”の場合には、逆反応による加炭反応は進行しないとした。

Fig. 6-aに、本実験条件の内では $F_{Ar}$ が最も大きく(20Nl/min)、最も $k_p'$ が大きい(0.85 l/min)実験での[C]の経時変化についての計算値(曲線)と実測値(○印)との対比を示す。この場合には、 $P_{CO^*} = 22.5\text{mmHg}$ <sup>†</sup>、 $k_{Ch} = 8.0 \sim 10.0 \text{ l/min}$ の値を採用すると、実測[C]の経時変化が良く説明できる。ただし、 $P_{total}$ と[O]の値は、図中破線で示すように、各実測値を、適当な区間を区切って近似して(8)式に代入した。

Fig. 6-bにこの時の $h_{CO}$ の経時変化を示した。 $h_{CO}$ の値は $k_{Ch}$ に結果的に依存する。しかし、[O]が比較的低濃度([O] ave.  $\approx 0.028\text{mass\%}$ )であることにもより、 $h_{CO}$ の最大値はおおよそ10cm程度である。

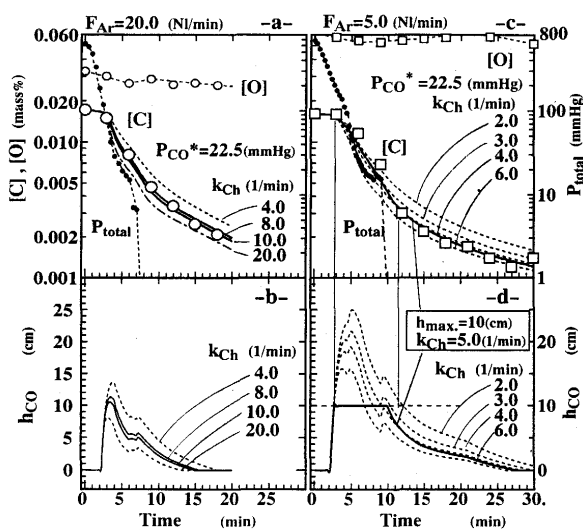


Fig. 6. Comparison of the observed value of change in [C] with the calculated ones.

<sup>†</sup>  $P_{CO^*}$ の大小は、主にII期の脱炭遅滞現象が始まる[C]の値を左右する。 $P_{CO^*} = 20\text{mmHg}$ の時、 $P_{CO^*} = \pm 5\text{mmHg}$ の相違は、I期とII期の遷移領域で[C]の経時変化に有意な差を与える。

次に、 $F_{Ar}$ が比較的小さく(5.0Nl/min)、[O]が最も高濃度([O] ave.  $\approx 0.057\text{mass\%}$ )で、 $k_p'$ の値も大きい時の、実測[C]の経時変化と計算値(破線)との対比をFig. 6-cに示した。この場合は、一組の $k_{Ch}$ と $P_{CO^*}$ の値では全体の[C]の経時変化が説明できない。つまり、計算値は実測値に対して初期4~10minでの脱炭量が多い。Fig. 6-dに $h_{CO}$ の経時変化を示した。 $h_{CO}$ の値は、初期2.5~10min程度までは10cm以上の値になる。すなわち、初期には反応領域が深く、結果として脱炭速度が大きく算定される。そこで、CO気泡の発生が可能な深さの積分区間に関してだけ制限を与えて実測[C]の経時変化を説明する。

Fig. 6-aに示した実験では、 $h_{CO}$ の最大値 $h_{max}$ は約10cmであった。そこで、 $h_{max} = 10\text{cm}$ として $k_{Ch}$ をパラメータに[C]の経時変化を再計算した。 $h_{max} = 10\text{cm}$ を設定すると、 $k_{Ch} = 5.0 \text{ l/min}$ 、 $P_{CO^*} = 22.5\text{mmHg}$ の選定で[C]の経時変化がほぼ説明できた(Fig. 6-cの太実線)。他の実験結果に対して同様の解析をすると、 $h_{CO}$ の値が10cmを大きく越えるケースは数例あった。しかし、いずれの場合にも $h_{max} = 10\text{cm}$ を設定することで、実測した[C]の経時変化が一組の $k_{Ch}$ と $P_{CO^*}$ の選定で説明可能であった。

本実験で、 $h_{max} = 10\text{cm}$ である理由は明確ではない。ただし、内部脱炭の最盛期はCO気泡発生量が極めて多く、CO気泡浮上による溶鋼流動は強い上向き流れになると推定される。この上向き流れが、吹込みArによる溶鋼循環作用を阻害し反応領域への溶鋼供給速度を減少させ、見掛け上、CO気泡発生可能領域深さを減少させたとも考えられる。詳細は今後の検討課題である。

Fig. 3-dに、Fig. 3-bに示した $F_{Ar}$ が同じである脱炭処理での実測[C]の経時変化と、本提示モデルによる計算曲線を対比して示した。 $P_{total}$ と[O]の変化は、Fig. 3-c、3-d中の破線で示すように近似した。減圧速度と[O]が各々異なるにもかかわらず、 $k_{Ch}$ として9.0~10.0 l/minと、ほぼ同じ値を選定することで両者の[C]の経時変化が記述できる。すなわち、 $k_{Ch}$ は減圧速度と[O]には依存しない特性値であると云える。

本実験条件下での過飽和圧 $P_{CO^*}$ の値は、22.5~25mmHg程度であった。この値の妥当性については今後の検討にまつことにする(これまで、 $P_{CO^*} \approx 7.6^{13)}$ 、 $20^{12)}$ 、 $40^{2)}$ mmHgの値が報告されている)。

#### 4・2 $k_{Ch}$ とAr吹込み流量 $F_{Ar}$ との関係

$k_{Ch}$ はCO核生成速度を含んだCの物質移動と、CO気泡離脱時の界面擾乱による気・液界面でのCの物質移動の各容量係数の和と意味付けた。物質移動係数、あるいは、溶鋼環流速度は $F_{Ar}$ の増加と共に大きくなるのが良く知られている<sup>15)16)</sup>。そこで、各実験での実測値とのフィッティングによって決定した $k_{Ch}$ と $F_{Ar}$ の関係をFig. 7に示した。 $k_{Ch}$ は $F_{Ar}$ の増加と共に大きくなり、従来の知見と合致する。また、攪拌電力の増加も $k_{Ch}$ を大きくする効果が認められる。Fig. 4

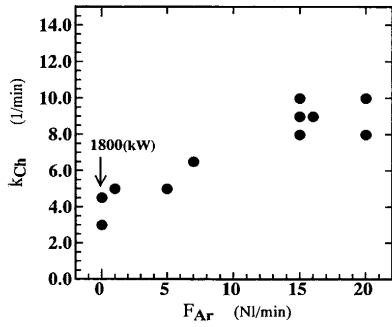


Fig. 7. Relation between  $k_{Ch}$  and  $F_{Ar}$ .

-aに示したように、 $k_c'$ と $F_{Ar}$ の関係が不明瞭である理由は、 $k_c'$ が $[O]$ と減圧速度の影響を強く受けるためである。

4・3  $k_c'$ におよぼす $k_{Ch}$ ,  $[O]$ および $k_p'$ の影響

脱炭速度を(1)式で近似した時の $k_c'$ の大小は、設備の脱炭特性を評価する上で実用上有益な指標である。しかし、 $k_c'$ は $k_p'$ と $k_{Ch}$ および $[O]$ に依存する事を念頭に置く必要がある。ここでは、 $k_c'$ におよぼす $k_{Ch}$ ,  $[O]$ および $k_p'$ の影響について整理する。

実測した $k_c'$ と、モデルによって算定した $k_c'$ との対比をFig. 4-bに示した。曲線は $k_c'$ の計算値であり、各 $F_{Ar}$ に対応する $k_{Ch}$ の値と、各グループの代表的な $[O]_{ave}$ を用い(8)式によって算定した $[C]$ の経時変化から近似した値である。(8)式中の $P_{total}$ は(9)式で近似した。計算曲線は、実測した $k_c'$ の $[O]_{ave}$ と $k_p'$ に対する依存性を良く説明している。

$$P_{total} = P_{total}^i \cdot \exp(-k_p' \cdot t) \dots\dots\dots (9)$$

以下、本モデル計算によって、真空排気過程でのCO気泡発生時の脱炭挙動について総括する。

Fig. 8-a, 8-bに、 $k_{Ch}$ の値を一定(8.0 l/min)とし、①減圧速度が一定( $k_p' = const.$ )で $[O]$ の値を変更した場合と、② $[O]$ が一定で減圧速度を変更した場合に得られるであろう $[C]$ の経時変化を、(8)式によって算定した結果を各々示した。 $P_{total}$ は(9)式で表し(8)式に代入した。 $[O]$ および $k_p'$ を大きくすることで、以下に示す3つの効果が期待できる。

①脱炭反応が早期から速やかに進行する。②直線の勾配である $k_c'$ の値も大きくなる。③脱炭反応が遅滞する $[C]$ をより低濃度側にシフトできる。Fig. 8-cに、 $k_c'$ におよぼす $k_p'$ と $[O]$ の影響の算定結果を示した。 $k_c'$ の値は、初期 $[C] = 0.025\text{mass}\%$ とした時にモデルから求まる $[C]$ の経時変化をベースとし、 $[C]$ が $0.007 \sim 0.015\text{mass}\%$ の範囲での近似値である。 $k_c'$ は $k_p'$ と $[O]$ の増加と共に増加する。しかし、 $[O] \geq 0.06\text{mass}\%$ では $k_c'$ の増加割合は小さい。 $[O]$ が一定の時、 $k_c'$ は $k_{Ch}$ と $k_p'$ で決まる。そこで、 $[O] = 0.040\text{mass}\%$ と一定にした時の $k_c'$ におよぼす $k_{Ch}$ と $k_p'$ との関係を同様な方法で算定して整理し、Fig. 8-dに示した。排気過程におけるCO気泡発生時の脱炭反応は以下に示す3つの領域

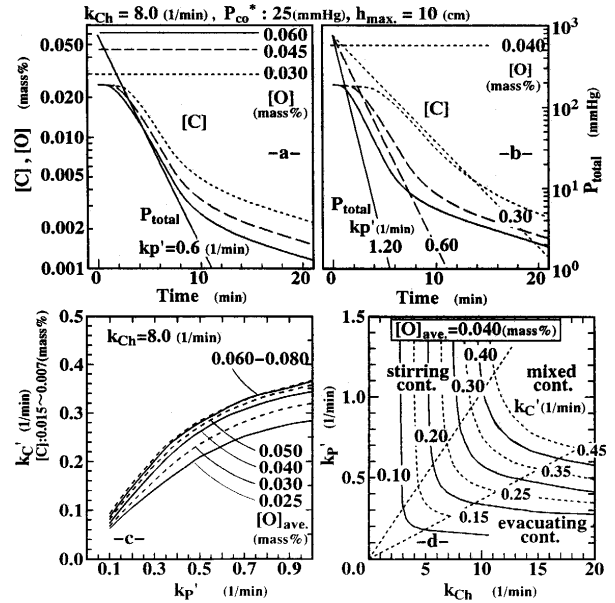


Fig. 8. Effects of  $[O]$ ,  $k_{Ch}$  and  $k_p'$  on  $k_c'$  (calculated results).

に区分できる。

- ① 減圧速度支配領域： $k_{Ch}$ が大きく、 $k_c'$ がほぼ $k_p'$ だけに強く依存する領域。
- ② 攪拌強度支配領域： $k_p'$ が大きく、 $k_c'$ が $k_{Ch}$ だけに依存する領域。
- ③ 減圧速度・攪拌強度支配領域： $k_c'$ が $k_{Ch}$ と $k_p'$ の両方に強く依存する領域。

効率的な脱炭処理のためには $[O]$ を高濃度にして減圧速度を大きくし、かつ、減圧速度に見合う溶鋼攪拌強度付与を実現することが有効である。住田ら<sup>4)</sup>は、RHでの $k_c'$ におよぼす溶鋼環流速度と容量係数 $ak$ の関係を示した。しかし、彼等の解析方法では $k_p'$ と $[O]$ の影響が $ak$ の中に隠れており、 $k_c'$ に対する雰囲気圧力の変化の影響と $[O]$ の影響を読み取ることはできない。RHへの本概念の適用結果は別途報告したい。

5. 結言

7トンの溶鋼の排気過程でのCO気泡発生時の脱炭速度の支配因子と反応促進策を検討し、以下の知見を得た。

- 1) CO気泡発生時の脱炭速度の容量係数 $k_c'$ の値は、減圧速度が大きく酸素が高濃度である時に大きい。
- 2) 脱炭速度式に雰囲気圧力と酸素濃度の各変化を取り込み、CO気泡発生反応容量係数 $k_{Ch}$ とCO気泡発生のための過飽和圧力 $P_{co}^*$ を導入したモデルで、真空排気過程での $[C]$ の経時変化がよく説明できる。
- 3)  $k_{Ch}$ は吹込みAr流量の増加で大きくなり、 $P_{co}^*$ はおよそ22.5~25.0mmHg程度と見積もられる。
- 4) 脱炭反応は、①減圧支配領域、②攪拌支配領域、③減

圧・攪拌支配領域に区分される。

脱炭処理の効率化のためには、①[O]を可能な限り高濃度に保持し、②減圧速度を大きくし、③減圧速度に見あう溶鋼への攪拌を付与することが重要である。

終わりに、本論文を纏めるにあたり有益なご助言を頂きました元東京大学工学部教授中村 泰理学博士に感謝致します。

記 号

- A : 反応面積 = 静止溶鋼表面積 (cm<sup>2</sup>)
- F<sub>Ar</sub> : Ar吹込み流量 (Nl/min)
- K :  $\frac{C+O}{CO}$ 反応の平衡定数 (mmHg/mass%)<sup>2</sup>)
- P<sub>CO</sub> : K · [C] · [O] (mmHg)
- P<sub>CO</sub><sup>0</sup> : CO気泡発生時のK · [C] · [O] (mmHg)
- P<sub>CO</sub><sup>\*</sup> : CO気泡発生時の過飽和CO圧力 (mmHg)
- P<sub>CO</sub><sup>b</sup> : 発生CO気泡のCO分圧 (mmHg)
- P<sub>total</sub> : 雰囲気圧力 (mmHg)
- P<sub>total</sub><sup>1</sup> : 排気開始時の圧力 (760mmHg)
- P<sub>total</sub><sup>\*</sup> : CO気泡発生時の雰囲気圧力 (mmHg)
- W<sub>m</sub> : 溶鋼重量 (g)
- g : 重力の加速度 980 (cm/s<sup>2</sup>)
- h : CO気泡発生深さ (cm)
- h<sub>CO</sub> : CO気泡発生限界深さ (cm)
- h<sub>max.</sub> : 最大CO気泡発生限界深さ (cm)
- k<sub>C'</sub> : CO気泡発生時の脱炭反応の容量係数 (1/min)
- k<sub>Ch</sub> : CO気泡発生容量係数 = CO核生成反応の速度を含む炭素の物質移動容量係数と、CO気泡離脱に伴う界面

擾乱による気・液界面での炭素の物質移動の容量係数の和 (1/min)

- k<sub>S'</sub> : 吹込みArによる気・液界面反応の容量係数 (1/min)
- k<sub>P'</sub> : 減圧速度定数 (1/min)
- [O]<sub>ave.</sub> : P<sub>total</sub> ≥ 5 mmHgでの [O] の平均値 (mass%)
- [C]<sub>i</sub> : CO気泡/溶鋼界面炭素濃度 (mass%)
- α : 圧力換算定数 7.503 × 10<sup>-4</sup> (mmHg · cm · s<sup>2</sup>/g)
- ρ : 溶鋼密度 7 (g/cm<sup>3</sup>)

文 献

- 1) 岸本康夫, 山口公治, 桜谷敏和, 藤井徹也: 鉄と鋼, 78 (1992), p.886
- 2) 堤 直人, 水上義正: 材料とプロセス, 5 (1992), p.261
- 3) 井上 茂, 村上勝彦: 材料とプロセス, 5 (1989), p.1275
- 4) 住田則夫, 藤井徹也, 小口征男, 森下 仁, 吉村啓助, 数土文夫: 川崎製鉄技報, 15 (1983), p.152
- 5) T.Kuwabara, K.Umezawa, K.Mori and H.Watanabe: Trans. ISIJ, 28 (1988), p.305
- 6) 興昌昌平, 城田良康, 尾花友之, 田中雅章: 材料とプロセス, 2 (1989), p.232
- 7) 樋口善彦, 城田良康, 池永 寛: 材料とプロセス, 5(1992), p.258
- 8) 井上 茂, 碓井 努, 古野好克, 福味純一: 材料とプロセス, 3 (1990), p.164
- 9) 興昌昌平, 城田良康, 池永 寛, 青木伸秀: 材料とプロセス, 3 (1990), p.180
- 10) K.Yamaguchi, Y.Kishimoto, T.Sakuraya, T.Fujii, M.Aratani and H.Nishikawa: ISIJ Inter., 32 (1992), p.126
- 11) 製鋼反応の推奨平衡値 (日本学術振興会第19委員会編), (1984)
- 12) 大貫一雄, 原島和海, 有馬良士: 材料とプロセス, 1 (1988), p.1293
- 13) T.Kraus: Trans. Vacuum Metallurgy, Conf. AVS, ed. by R.F. Bunshah, (1963), p.73 [Ame. Soc., Boston]
- 14) 原島和海, 井本健夫, 矢野正孝: 材料とプロセス, 5 (1992), p.272, p.1276
- 15) 森 一美, 佐野正道: 鉄と鋼, 67 (1981), p.672
- 16) 佐野正道, 森 一美: 鉄と鋼, 68 (1982), p.2451