

© 1987 ISIJ

Nb を含有する溶銑中の Si, Nb, Mn の
優先除去

技術報告

佐藤 彰*・荒金 吾郎*²・笠原 章*²
郡 宗幸*²・吉松 史朗*

Preferential Removal of Si, Nb and Mn from Pig Iron Containing Nb

Akira SATO, Goro ARAGANE, Akira KASAHARA,
Muneyuki KORI and Shiro YOSHIMATSU

Synopsis:

The recovery of Nb and Mn for mineral resources, P for a fertilizer, and the production of iron and steel of good quality from a pig iron containing Nb in China have been studied. This report describes the first preferential removal of Si over Nb, and the preferential removal of Nb over Mn, or, the preferential removal of Mn over Nb from the pig iron after desiliconization, bearing in mind a multi-stage continuous refining process, in order to increase the content of an aimed element in the slag recovered. The oxidation rates of elements in pig iron of 1 kg in a graphite crucible were measured by adding Fe_2O_3 , CaO, Na_2CO_3 , and B_2O_3 onto the bath. The effects of temperature, oxygen feeding rate (Fe_2O_3 g/5 min), and weight of those reagents upon the oxidation rates were discussed. The results obtained are as follows;

- (1) The preferential removal of Si over Nb was accomplished with an optimum amount of Fe_2O_3 at high temperatures. In this case, the reduction of Nb_2O_5 in slag formed by C in molten pig iron was important.
- (2) The preferential removal of Nb over Mn from the pig iron after desiliconization was achieved with a basic flux, CaO or Na_2CO_3 .
- (3) The preferential removal of Mn over Nb from the pig iron after desiliconization was realized with an acid flux, B_2O_3 .

1. 緒 言

中国の内蒙古で産出される鉄鉍石は希土類元素と Nb を含有する¹⁾. この鉍石から製錬される包頭鉄の組成を Table 1 に示す¹⁾²⁾. この鉄は日本で使用されている製鋼用鉄に比べて Nb を含有し, Mn と P の濃度が著しく高い. この鉄から Nb と Mn を鉍物資源として回収し, P を肥料として除去して高品質な鉄鋼を製造する技術開発が日中共同研究として 1981 年から行われている. 中国において鉄中 Nb の回分法による回収法が研究されている^{3)~11)}. 平炉, 上吹き, 横吹き, 底吹き転炉による実験結果より, スラグの P 含有率が最も少ないという理由から底吹き転炉を選択している. 得られたスラグ中の Nb_2O_5 濃度は 2.7 wt % であった⁴⁾.

金属材料技術研究所では, 以前研究した連続製鋼技術¹²⁾を基本とし, 各元素をスラグとして逐次酸化回収す

Table 1. Chemical composition of pig irons in Baotou (wt%).

	C	Si	Mn	P	S	Nb
B-1	4	0.6	1.5	0.5	0.03	0.08
B-2	4	0.9	1.3	0.7	0.03	0.12
B-3	4	0.7	1.0	2.9	0.03	0.25

B-1; Pig iron sent to NRIM from China

B-2; Pig iron from concentrate

B-3; Pig iron from iron ore without dressing

る技術開発を行つている. 多段連続法では吹錬過程の任意の時間に排滓することが容易なため, スラグの逐次回収が可能となり, 得られるスラグ中の目標元素濃度を上昇できる. この考えに基づき, 第 1 段炉で溶銑から Si を酸化除去 (以下脱珪と呼ぶ) し, 第 2 段炉で溶銑から Nb を酸化除去 (以下脱ニオブ) することにより, スラグ中 Nb_2O_5 濃度を 5.5~6.5 wt % にすることができた¹³⁾.

ここでは, 多段連続法を念頭に置き, 包頭溶銑から最

昭和 58 年 4 月・60 年 4 月本会講演大会にて発表 Trans. ISIJ, 26 (1986) 11 に掲載

昭和 61 年 2 月 7 日受付 (Received Feb. 7, 1986)

* 金属材料技術研究所工博 (National Research Institute for Metals, 2-3-12 Nakameguro Meguro-ku, Tokyo 153)

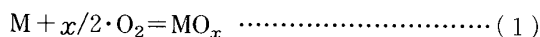
*2 金属材料技術研究所 (National Research Institute for Metals)

初に脱珪し、次に脱ニオブまたは溶銑から Mn を酸化除去（以下脱マンガン）することにより、これらの元素を回収する方法を検討した。脱珪では Nb に優先して Si を酸化除去する条件を求めた。脱ニオブでは Mn と P に優先して Nb を酸化除去する条件、また、脱マンガンでは Nb と P に優先して Mn を酸化除去する条件を求めた。

2. 選 択 酸 化

Table 1 の包頭銑 (B-1) の Fe 以外の諸元素をすべて酸化してスラグとしたときのスラグ組成は、22.4 % SiO_2 -33.7 % MnO -39.9 % P_2O_5 -3.99 % Nb_2O_5 である。したがって、目標元素濃度の高いスラグを得るには、選択酸化により逐次酸化除去回収する必要がある。

選択酸化は平衡論および速度論から検討する必要がある。張ら¹⁴⁾は溶銑中の元素の酸化反応を以下のように記している。



$$R = \bar{k} \cdot A \cdot F / V \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$1/\bar{k} = 1/k_m + 1/k_s \cdot L \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで、Mは溶銑中の元素、 x はMが酸化物になるのに必要な酸素モル数、 R は反応速度、 $\bar{k}$ は反応速度係数、 F は反応の駆動力、 A は反応界面積、 V は溶銑体積、 k_m と k_s はメタルとスラグにおける物質移動係数、 L は分配比である。化学反応は十分に速くて物質移動律速で、スラグ-メタル界面では平衡が成立し、二重境膜説で説明した。分配比は次式で表される。

$$\log L \left(= \frac{(\% \text{MO}_x)}{[\% \text{M}]} \right) = \frac{-\Delta G^\circ}{4.575 T} + \frac{x}{2} \log (P_{\text{O}_2}) - \log \frac{\gamma_{\text{MO}_x}}{f_{\text{M}}} \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 ΔG° は(1)式の自由エネルギー変化、 (P_{O_2}) はスラグ-メタル界面における酸素ポテンシャル、 γ_{MO_x} と f_{M} はスラグ中の MO_x とメタル中のMの活量係数を示す。

元素Bに対する元素Aの選択酸化は、元素Aの分配比が元素Bの分配比より大きく、かつ、元素Aの物質移動係数が元素Bの物質移動係数より大きければ容易に達成される。

Fig. 1 は酸化物生成自由エネルギー変化 ΔG° と温度の関係を示す¹⁵⁾。・印は反応元素または生成酸化物の変態点を示す。この図は純元素が純酸化物を生成する場合の ΔG° を示すもので、溶銑中の元素が酸化物となり、スラグに溶解する場合の ΔG° を示すものではない。しかし、この図から Si の ΔG° は Mn, Nb, Fe より非常

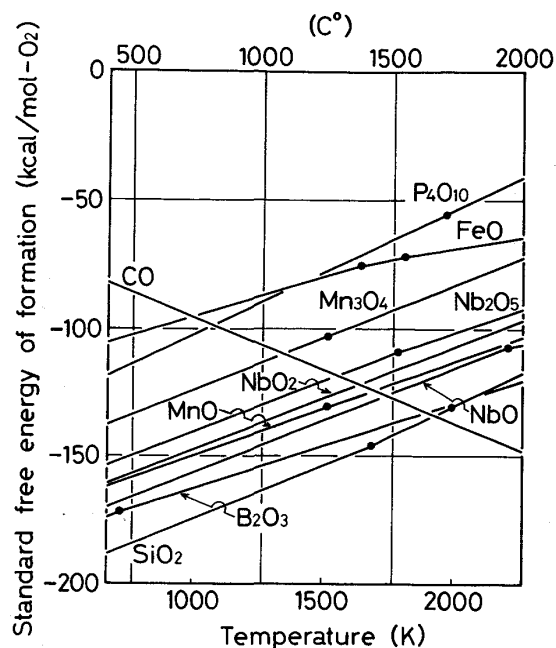


Fig. 1. Standard free energy of formation of oxides and temperature.

に低く、酸化が容易なこと、Nbの ΔG° と Mn の ΔG° は近似しており、温度制御により酸化除去率を調整することは困難なことが予想できる。

スラグ中 MO_x の活量係数 γ_{MO_x} はフラックスにより変化させることができる。酸化物の塩基性の指標の一つとしてイオン-酸素間引力 I がある¹⁶⁾¹⁷⁾。 I 値から γ_{SiO_2} と $\gamma_{\text{Nb}_2\text{O}_5}$ は塩基性フラックス、 γ_{MnO} は酸性フラックスにより低下させることができると考えられる。

メタル中Mの活量係数 f_{M} は相互作用助係数 $e_2^{(3)}$ で表せるから、 $e_2^{(3)}$ の大きい元素を添加することにより f_{M} を上昇させることができる。しかし、例えば、 f_{Si} を上昇させ、 f_{Nb} を低下させ、Si が酸化反応中に酸化しない元素を見出すことができなかった。

本報では、Si, Nb, Mn の選択酸化におよぼす温度、酸素供給速度、フラックスの影響を検討した。

3. 実 験 方 法

電解鉄、電極黒鉛屑、Fe-Nb合金 (62 %Nb) を用いて炭素飽和鉄と Fe-Csat-1 %Nb 合金を溶製した。両合金と電解鉄から所定濃度とした Fe-C-Nb 合金 1kg を内径 55 mm、深さ 190 mm の黒鉛またはアルミナるつぼにて高周波炉で溶解した。溶解後、Fe-Si (77 %Si)、Fe-P (23 %P) 合金、電解マンガンを添加して成分調整した。実験温度に約10 min 保持した後、浴を攪拌して石英管で分析試料を採取した。所定量の Fe_2O_3 粉 (1

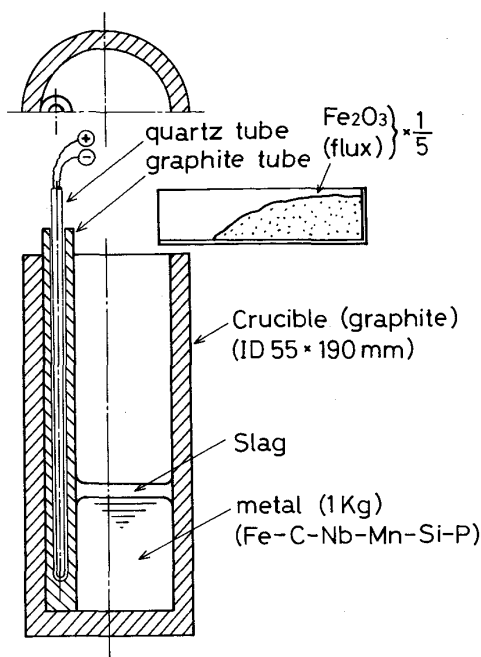


Fig. 2. Experimental apparatus.

級試薬) を 5 min で添加し酸化反応を行わせた。フラックスはあらかじめ Fe_2O_3 粉に混合した。比較のために Fe_3O_4 (1 級相当試薬), FeO (1 級試薬を還元, 93.8 % FeO) を使用した。1 級または 1 級相当の CaO , CaF_2 , Na_2CO_3 , B_2O_3 , Nb_2O_5 試薬をフラックスとして用いた。 Fe_2O_3 添加開始から 3 min ごとに 21 min まで分析試料を採取した。実験温度は主に 1300, 1400, 1500 °C であり, 黒鉛と石英の二重管, またはアルミナ管で保護した Pt-13 % Rh 熱電対を用いて連続測定した。Fig. 2 は実験装置の概要を示す。

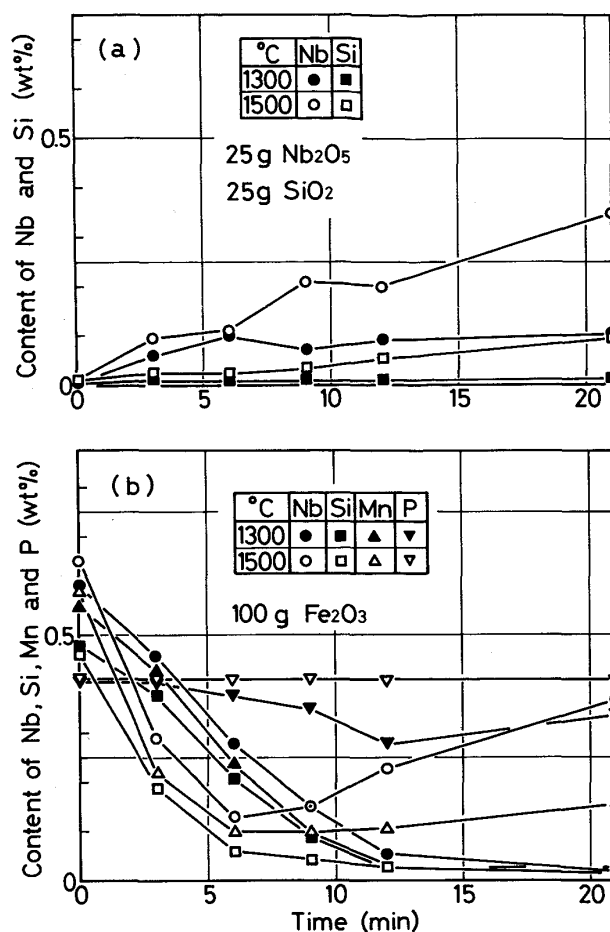
4. 実験結果および考察

4.1 ニオブに対するシリコンの優先除去

溶銑組成は主に $\text{Fe-C sat-0.5 \%}$ (Nb, Si, Mn, P) とし, Fe_2O_3 添加量は主に 100 g とした。

4.1.1 温度

Fig. 3 は炭素飽和溶銑中の諸元素の (a) 還元速度および (b) 酸化速度に及ぼす温度の影響を示す。 Nb_2O_5 , SiO_2 を浴上に添加して還元速度を測定した。1300 °C では SiO_2 はほとんど還元されず, Nb_2O_5 はわずかに還元された。1500 °C では SiO_2 もわずかに還元され, Nb_2O_5 は容易に還元された。 Fe_2O_3 添加による酸化反応は, 1300 °C では遅く, 1500 °C では速い。高温では, Fe_2O_3 添加終了後の早い時期からスラグ中の酸化物が還元されることが観察される。Nb, Si, Mn の酸化速度

Fig. 3. (a) reduction of Nb_2O_5 and SiO_2 and (b) oxidation of elements in pig iron at different temperatures.

には, 温度が同じとき差はほとんど認められない。さらに, 高温では P の酸化はほとんどなく, 生成するスラグ中の P_2O_5 濃度が低いことが分かる。

4.1.2 Fe_2O_3 量

Fig. 4 は 1500 °C 炭素飽和溶銑中の諸元素の酸化速度に及ぼす Fe_2O_3 添加量の影響を示す。添加時間は 5 min と一定であるから, 添加量の変化は酸素供給速度の変化である。 Fe_2O_3 添加量が少量のとき, 諸元素の酸化割合が小さいことは当然であるが, 溶銑中に Si が存在する場合には実験の後期において Nb と Mn の濃度が上昇しているのに Si の濃度は依然として減少している。スラグ中 Nb_2O_5 は溶銑中の C により還元されることは, Fig. 3 (a) から明らかである。また, 50 g Fe_2O_3 添加のときの 9 および 21 min の濃度から計算した場合, 溶銑中 Si は還元された Nb_2O_5 の 62% の割合を占めるが, 残りの 38 % は溶銑中の C によることが確認される。しかし, 溶銑中の Si 濃度が高い 25g Fe_2O_3 添加のときは, Nb_2O_5 の還元に必要な以上の溶銑中の Si が酸化される

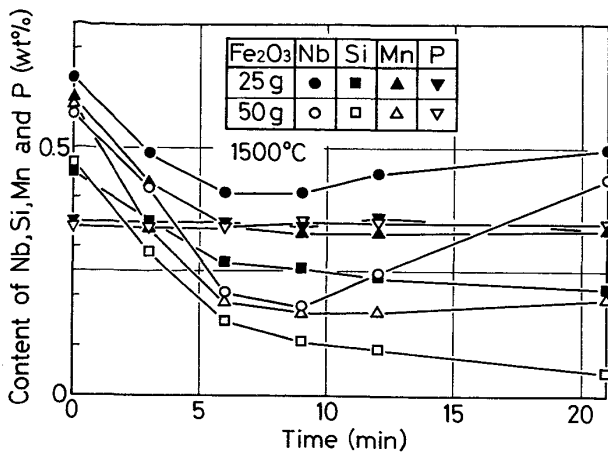


Fig. 4. Oxidation of elements in molten pig iron with different amounts of Fe_2O_3 .

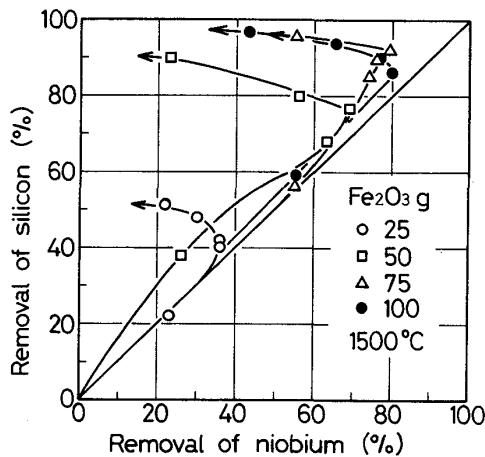


Fig. 5. Relation of the removal of Nb and Si with various amounts of Fe_2O_3 .

ことがわかった。この図から、Nb に対する Si の優先除去のためには、溶銑中の Si 濃度に最適値があることが予想される。

なお、溶銑中の諸元素の酸化反応に及ぼす酸化鉄の種類の影響は、酸素供給量が同じ場合にはほとんど認められなかった。

Fig. 5 は 1500 °C 炭素飽和溶銑からの脱珪率と脱ニオブ率の関係に及ぼす Fe_2O_3 添加量の影響を示す。矢印は実験時間の経過を示す。この図から Fe_2O_3 が酸素を供給する実験初期には脱珪率および脱ニオブ率共にほぼ同じ 45° 線近傍を通るが、 Fe_2O_3 添加終了後には脱ニオブ率が低下し、脱珪率は少し上昇することが分かる。高い脱珪率で低い脱ニオブ率のときに達成される、Nb に対する Si の優先除去のためには、スラグ中 Nb_2O_5 を還元する過程が重要であると推察される。このためには、スラグ中 Nb_2O_5 の還元の際に高温にすること、お

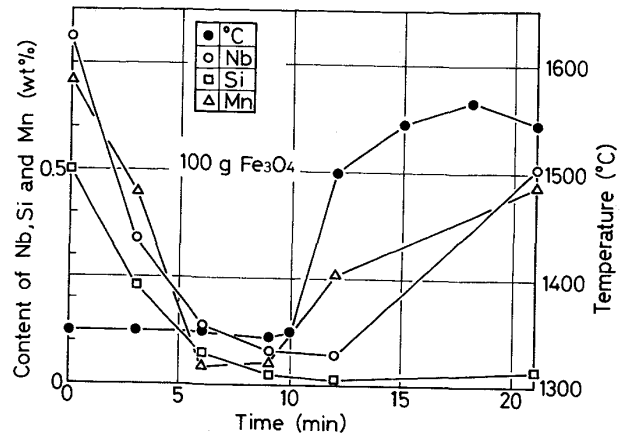


Fig. 6. Oxidation of elements at 1350 °C and the recovery at higher temperatures.

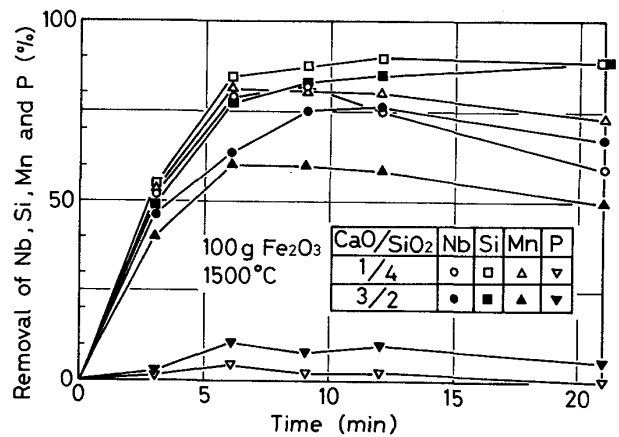


Fig. 7. Oxidation of elements in molten pig iron with slags of different CaO/SiO_2 ratios.

よびスラグ-メタル界面を攪拌することが有効と考えられる。スラグ-メタル反応において、スラグ中 MnO の還元は CO ガス発生速度、すなわち、攪拌に依存する²²⁾。スラグ中の Nb_2O_5 はスラグ中 MnO と同様な挙動を示すと考えられる。高周波炉を用いた小型実験では攪拌の影響を明確にすることは困難であるため、高温にする効果を試験した。

Fig. 6 は Fe_2O_3 添加時は低温 (1350 °C)、添加終了後は高温 (1550 °C) にすることにより、Nb に優先して Si を酸化除去できることを示す。この方法は回分法では困難であるが、連続法では容易に実現できる。

4.1.3 スラグの CaO/SiO_2

Fig. 7 は 1500 °C 炭素飽和溶銑中の諸元素の酸化挙動に及ぼすスラグの CaO/SiO_2 の影響を示す。脱珪率を 100 % とし CaO 添加量により C/S を調整した。したがって、 CaO/SiO_2 が高いほど CaO 添加量が多くな

り、生成するスラグ量は増加する。脱珪率に及ぼす影響は認められない。脱ニオブ率は CaO/SiO_2 が高いほど高い。脱マンガン率は CaO/SiO_2 が高いほど低く、脱りん率は高温では 10 % 以下であり、 CaO/SiO_2 が高いときにわずかに高い。

4.1.4 溶銑組成

溶銑組成が変化すると、酸化除去率、生成するスラグの量と組成が変化する。Nb に対する Si の優先除去の達成のためには、初期溶銑の Nb 濃度が低く、Si 濃度が高いほど有利と考えられる。

初期 Nb 濃度が 0.5 % から 0.1 % に低下すると、脱珪率におよぼす影響はほとんど認められないが、脱ニオブ速度 (wt %/s) が低下した。さらに、脱マンガン率も低下し、Nb に対する Si の優先除去に有利であることを確認した。

Fig. 8 は初期 Si 濃度が 0.2 % および 0.75 % のときの 1500 °C 炭素飽和溶銑中の諸元素の酸化挙動を示す。Si 濃度が 0.75 % から 0.2 % に低下したとき、諸元素の酸化速度はほとんど不変であるが、実験の後期には脱ニオブ率と脱マンガン率が著しく低下した。Si 濃度が高いときには、生成する SiO_2 量が多くなるため、スラグ中の Nb_2O_5 濃度が低下して脱ニオブ率が低下しないと考えられる。

C 濃度を变化させる目的で Al_2O_3 りつばを用いた実験では、CO ガス発生による泡立ちにより、生成するスラグが りつば壁に付着することが観察され、良好なデータが得られなかった。

4.2 マンガンに対するニオブの優先除去

脱珪率を高く、脱ニオブ率を低くするには最適酸素供

給速度があり、最適脱珪率と脱ニオブ率が得られるのは溶銑中に約 0.1 % Si を残す場合であることが 4.1 および連続法の実験¹³⁾ で確認された。そこで、溶銑組成は脱珪処理後の溶銑を想定して、主に $\text{Fe-Csat-0.1 \% Si-0.5 \% (Nb, Mn, P)}$ とした。Si 濃度が低いので Fe_2O_3 添加量は主に 75 g とした。Fig. 1 から Nb と Mn の酸化反応の自由エネルギー変化は極めて近い位置にあり、温度による選択酸化は非常に困難と考えられる。イオン-酸素間引力, I , から Nb_2O_5 は酸性、 MnO は塩基性酸化物と予測されるので、塩基性フラックス (Na_2CO_3 , CaO) を用いて Mn に優先して Nb を酸化除去することを検討した。

4.2.1 温度

Fig. 9 は 10 g CaO 添加の際の炭素飽和溶銑中諸元素の酸化挙動に及ぼす温度の影響を示す。1300 °C では P を含む全元素が酸化除去された。これに対して、1500 °C では脱マンガン率と脱りん率が低く、脱ニオブ率と脱珪率が高いことが確認された。したがって、Mn と P に優先して Nb を酸化除去することが可能と分かった。

4.2.2 塩基性フラックス

Fig. 10 は脱ニオブ率と脱マンガンおよび脱りん率の関係に及ぼす (a) CaO (+ CaF_2), (b) Na_2CO_3 添加の影響を示す。 CaO を用いる場合は高温の 1500 °C において、脱ニオブ率 85 %, 脱マンガン率 10 % を達成した。 Na_2CO_3 添加では、スラグが低融点で強塩性となるため、1300 °C でも脱ニオブ率 80 %, 脱マンガン率 10 % を達成した。

4.2.3 脱りん率

塩基性フラックスを用いて溶銑中の Nb をスラグとし

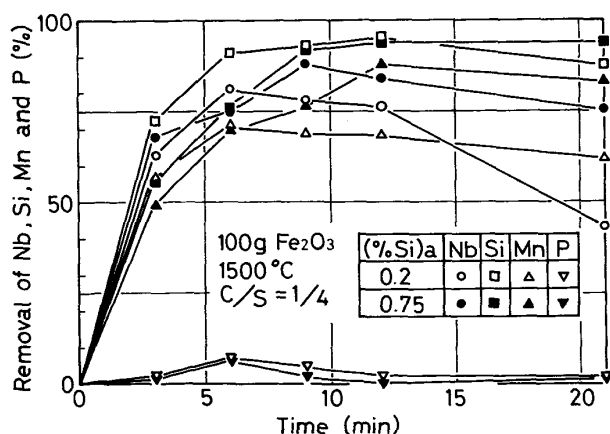


Fig. 8. Oxidation of elements in molten pig iron with different initial Si contents.

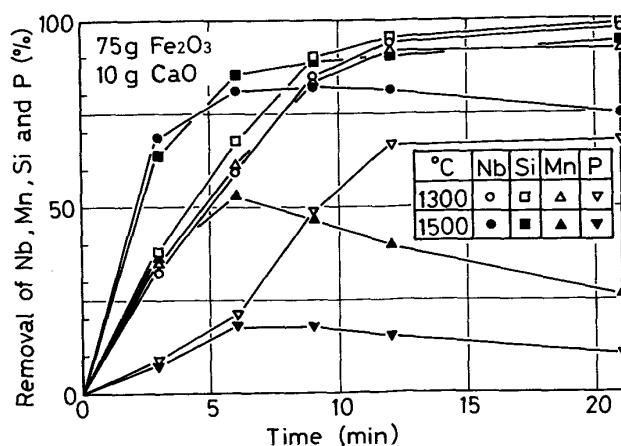


Fig. 9. Oxidation of elements in molten pig iron with CaO at different temperatures.

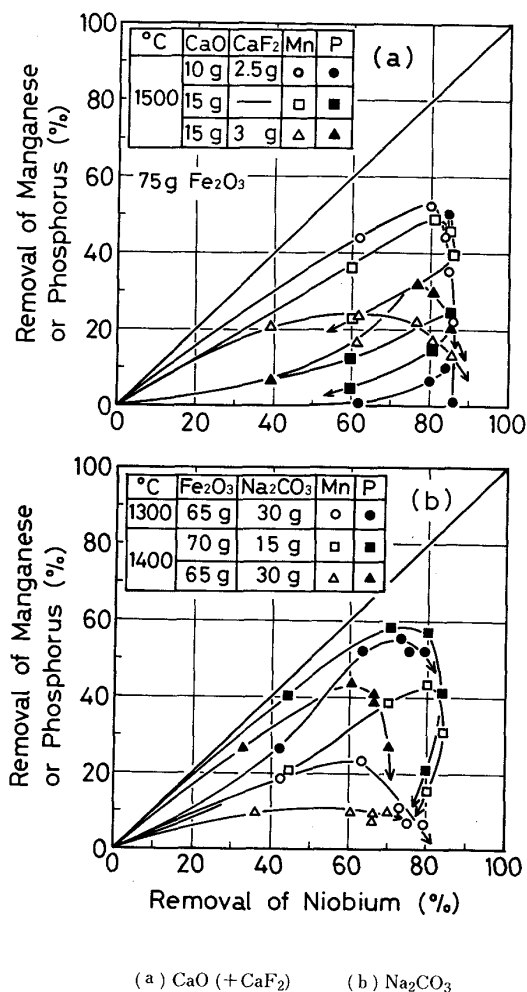
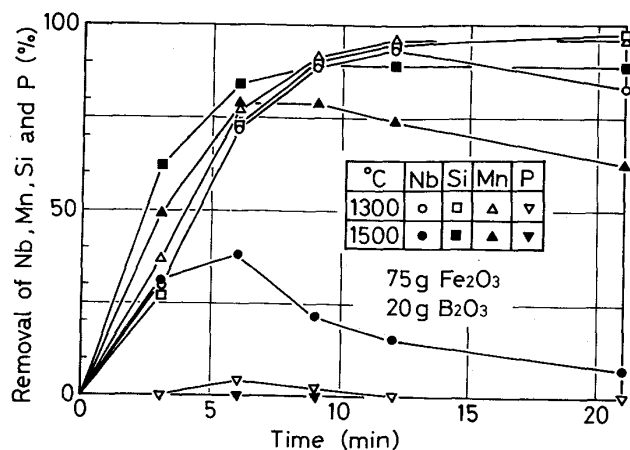
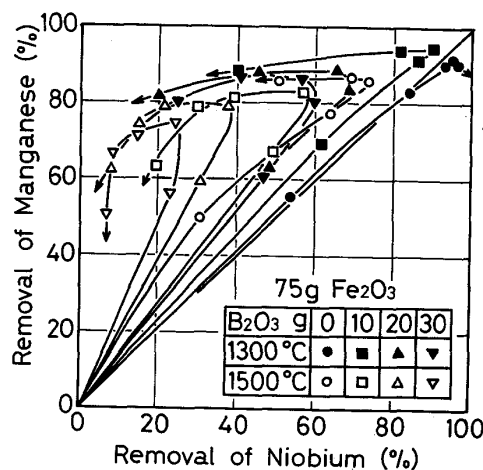


Fig. 10. Relation of the removal of Nb and Mn or P.

て回収する場合、溶銑中のPもスラグに含有されやすくなる。このスラグをニオブ資源として利用するとき、スラグ中のPは有害である。CaOを用いるときは高温にすることにより脱りん率を低くすることが可能である。Fig. 10(a)から、脱ニオブ率85%、脱マンガン率10%、脱珪率90%、脱りん率0%とすると、得られるスラグ中のNb₂O₅濃度は約30%になる。Na₂CO₃を用いるときは低温にして脱りん率を上昇させ、得られたスラグを湿式処理することによりNa₂OとP₂O₅を除去できると考えられる^{19)~21)}。Fig. 10(b)から、CaOの場合と同様に計算すると、湿式処理後の残渣中のNb₂O₅濃度は約70%になる。

4.3 ニオブに対するマンガンの優先除去

Mnに対するNbの優先除去の場合と同様、脱珪処理後の溶銑を想定し、溶銑組成は主にFe-Csat-0.1% Si-0.5% (Nb, Mn, P)とした。MnOは塩基性酸化物であるから低融点の酸性フラックスとしてB₂O₃を用いた。

Fig. 11. Oxidation of elements in molten pig iron with B₂O₃ at different temperatures.Fig. 12. Relation of the removal of Nb and Mn with various amounts of B₂O₃.

4.3.1 温度

Fig. 11は20 g B₂O₃添加の際の炭素飽和溶銑中諸元素の酸化挙動に及ぼす温度の影響を示す。1300℃ではPを除く諸元素とも酸化除去され、脱ニオブ率は21 minで減少した。フラックスが酸性なため低温でも脱りんは起こらない。1500℃では脱ニオブ率は低く、脱マンガン率は高いことが確認された。

4.3.2 酸性フラックス

Fig. 12は75 g Fe₂O₃添加の際の脱ニオブ率と脱マンガンの関係に及ぼすB₂O₃添加量と温度の影響を示す。B₂O₃添加量が増加するにしたがつて、脱ニオブ率が脱マンガン率より低くなることが分かった。実験の後期において、脱マンガン率も少し低下するが、脱ニオブ率が大きく低下する傾向が確認された。1500℃では、30 g B₂O₃添加の場合、脱ニオブ率の低下だけでなく脱

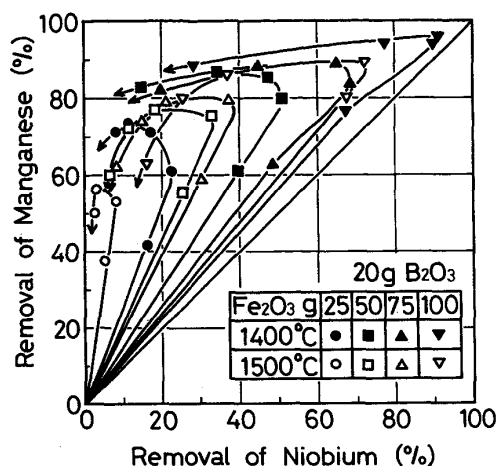


Fig. 13. Relation of the removal of Nb and Mn with 20g B_2O_3 and various amounts of Fe_2O_3 .

マンガン率も著しく低下することが観察された。したがって、高い脱マンガン率で低い脱ニオブ率となる Nb に優先する Mn の酸化除去を達成するためには、温度、 B_2O_3 添加量、 Fe_2O_3 添加量を適切に選定しなければならない。

4.3.3 Fe_2O_3 添加量

Fig. 13 は 20 g B_2O_3 添加の際の脱ニオブ率と脱マンガン率の関係に及ぼす Fe_2O_3 添加量と温度の影響を示す。 Fe_2O_3 添加量が増加するにしたがつて、脱ニオブ率と脱マンガン率は同じになる傾向にあり、45°の線に近づき、脱ニオブ率および脱マンガン率は上昇した。 Fe_2O_3 添加量が少ないとき、脱ニオブ率は低いが脱マンガン率も低い。この図から、1400℃、50 g Fe_2O_3 、20 g B_2O_3 の条件により、脱ニオブ率 15%、脱マンガン率 85% が達成できることが分かった。

4.3.4 溶鉄組成

溶鉄中の Si 濃度が 0.1 から 0.5% に上昇すると、生成される SiO_2 量が増加し、スラグの酸性は上昇するが、融点、粘性、スラグ量も上昇する。この結果、脱ニオブ率の低下が小さいことがわかった。 B_2O_3 添加による Nb に対する Mn の優先除去のためには、溶鉄中の Si 濃度は低い方がよい。

Fig. 14 は 1400℃、1.5% Mn、0.2% Nb 溶鉄の脱ニオブ率と脱マンガン率の関係に及ぼす Fe_2O_3 と B_2O_3 添加量の影響を示す。50 g Fe_2O_3 、30 g B_2O_3 添加により、脱ニオブ率約 10%、脱マンガン率約 85% を達成した。Nb に対する Mn の優先除去後の溶鉄は、0.18% Nb、0.005% Si、0.23% Mn、0.5% P および 0.05% B であった。

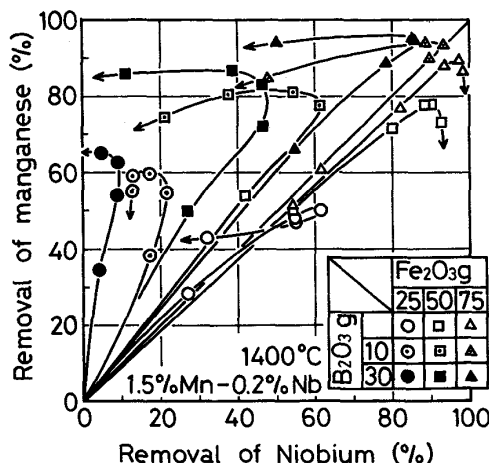


Fig. 14. Relation of the removal of Nb and Mn from the pig iron containing 1.5%Mn-0.2%Nb with various amounts of B_2O_3 and Fe_2O_3 .

5. 結 言

中国で製錬された Nb を含有する鉄から Nb と Mn を鉱物資源、P を肥料として回収し、高品質な鉄鋼を製造する研究において、多段連続法を念頭に置いた優先酸化除去法を検討した。逐次回収されるスラグ中の Nb または Mn 濃度を上昇させるために、最初に Si を酸化除去し、次に Nb または Mn を酸化除去することを試験した。得られた結果は以下のである。

(1) 酸化反応の自由エネルギー変化から、溶鉄中 Si を最初に酸化除去することにした。この場合 Nb に優先して Si を酸化除去することは高温で適量の Fe_2O_3 添加によつて達成することができた。 Fe_2O_3 消費後におけるスラグ中 Nb_2O_5 の還元反応が重要であつた。

(2) Nb に優先して Si を酸化除去した後の溶鉄から、塩基性フラックスを用いることにより、Mn に優先して Nb を酸化除去することができた。CaO の使用では高温、適量の Fe_2O_3 添加により、Mn と P に優先して Nb を酸化除去することができた。Na₂CO₃ の使用では Mn に優先して Nb と P を低温で酸化除去することも検討した。

(3) Nb に優先して Si を酸化除去した後の溶鉄から、酸性フラックスとして B_2O_3 を用いることにより、Nb に優先して Mn を酸化除去することができた。この場合、温度、 B_2O_3 添加量、 Fe_2O_3 添加量を適切に選定することが重要であつた。

文 献

- 1) J. YU: International Conf. at Amsterdam (1979年9月)
- 2) 第3版鉄鋼便覧第Ⅱ巻製鉄・製鋼(日本鉄鋼協会編)(1979), p. 315 [丸善]
- 3) Y. XIA: Iron and Steel (In Chinese), **15** (1980) 11, p. 6
- 4) X. SHAO: Sino-Japanese Symposium on Iron and Steel, 1st Symposium on Steelmaking (1981), p. 183
- 5) Y. CHEN, K. DENG and G. QIAN: Iron and Steel (In Chinese), **16** (1981) 5, p. 10
- 6) X. SHAO: Iron and Steel (In Chinese), **17** (1982) 2, p. 23
- 7) Q. ZHANG: Iron and Steel (In Chinese), **15** (1980) 11, p. 13
- 8) Z. LIN and R. ZHOU: Sino-Japanese Symposium on Iron and Steel, 1st Symposium on Steelmaking (1981), p. 203
- 9) Z. LIN, R. ZHOU, C. HONG, H. LI, Y. HUANG and Y. WANG: Iron and Steel (In Chinese), **16** (1981) 5, p. 6
- 10) Q. HAN, J. DENG and S. HUANG: Iron and Steel (In Chinese), **17** (1982) 12, p. 13
- 11) Z. LIN and R. ZHOU: Iron and Steel (In Chinese), **17** (1982) 2, p. 31
- 12) 中川龍一, 吉松史朗, 上田卓弥, 三井達郎, 福沢 章, 佐藤 彰, 尾崎 太: 鉄と鋼, **59** (1973) p. 414
- 13) A. FUKUZAWA, R. NAKAGAWA, S. YOSHIMATSU, Z. LIN and R. ZHOU: The 2nd Japan-China Symposium on Science and Technology of Iron and Steel (1983), p. 264
- 14) 張 柏汀, 大谷正康, 徳田昌則, 井上博文: 学振 54 委-No. 1623 (昭和57年11月)
- 15) 第3版鉄鋼便覧第Ⅰ巻基礎(日本鉄鋼協会編)(1981), p. 3 [丸善]
- 16) 松下幸雄, 盛 利貞, 不破 祐, 館 充, 森 一美, 瀬川 清: 冶金物理化学 (1970), p. 29 [丸善]
- 17) 大谷正康: 鉄冶金熱力学 (1981), p. 140 [日刊工業新聞社]
- 18) E. T. TURKDOGAN: Physical Chemistry of High Temperature Technology (1980), p. 5 [Academic Press]
- 19) 丸川雄浄, 城田良康, 姉崎正治, 平原弘章: 鉄と鋼, **67** (1981), p. 323
- 20) 堀尾公一, 丸川雄浄, 小林昭彦, 橋本孝夫: 住友金属, **35** (1983), p. 169
- 21) 加藤達雄, 田島一夫, 山下 申, 小倉英彦, 判明正之: 鉄と鋼, **69** (1983), p. 1878
- 22) 川合保治, 森 克巳: 鉄と鋼, **58** (1972), p. 932