

氏 名	やま おか ひで ゆき 山 岡 秀 行
授 与 学 位	工 学 博 士
学位授与年月日	平成 2 年 2 月 14 日
学位授与の根拠法規	学位規則第 5 条第 2 項
最 終 学 歴	昭 和 48 年 3 月 東京大学大学院工学系研究科原子力工学専攻 修士課程修了
学 位 論 文 題 目	酸素製鉄法に関する理論および実験的研究
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 大森 康男 東北大学教授 菊池 淳 東北大学教授 八木順一郎

## 論 文 内 容 要 旨

### 緒 言

戦後我が国で高炉法が長足の進歩を遂げた背景として、良質の原料を選択的に輸入し得た地理的環境および生産量の増加を普遍的な目標に設定しかつ潤沢な設備投資を可能とし得た経済環境を挙げることができる。しかし、重油価格の高騰や粘結炭、良質塊鉱石の不足等、原料事情が悪化しかつ生産量の追求から生産変動への弾力的対応へと経済環境が変貌する中で戦後建設された設備の更新時期を迎え、来るべき21世紀に備えようとする現在、良質の原料と多額の設備投資を必須とする高炉法は存続の是非が問われる時期に立ち至ったとしても過言ではなく、高炉法の更なる発展の可能性追求とともに新しい製鉄法の探索は製鉄関係者の回避し得ぬ技術課題である。

このような背景の下、酸素高炉（低シャフト炉）の思想を継承、発展させた酸素製鉄法、すなわち、高炉における還元と溶解の機能をシャフト炉式の還元炉とキューボラ式（又は、コークス充填層式）の溶解炉に分離し、溶解炉で微粉炭の多量吹込みを併用した酸素送風を行うことにより高炉法と比較して生産性の倍増とコークス消費の抜本的な削減を図るべき酸素製鉄法の開発を試みた。Fig. 1 にその構成を示す。シャフト式還元炉の S とキューボラ式溶解炉の C を取り、本酸素製鉄法を S C 法と称する。

本研究は、S C 法が製鉄法として機能し得る可能性をパイロットプラント操業により実証するとともに数学モデルを開発して実用炉の操業諸元を予測し、高炉法に対抗し得るか否かについて考察することを目的とした。

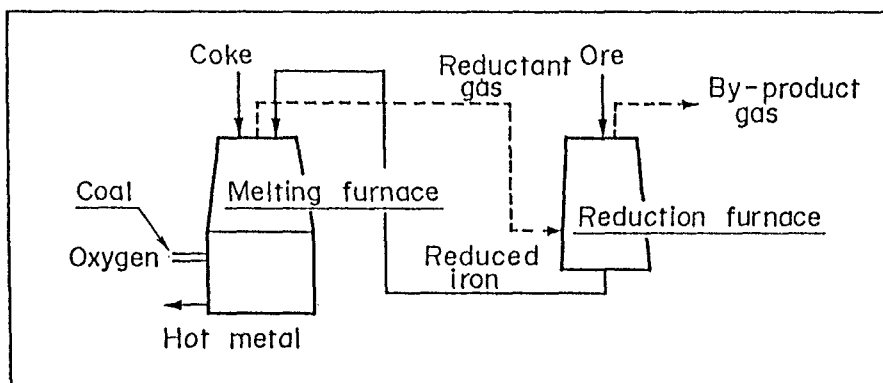


Fig. 1 Configuration of the new ironmaking process named SC process.

以下に本論文の内容を要約する。

## 第1章 緒 論

新しい製鉄法に関する従来の研究を概説し、本研究の目的と内容を述べた。

## 第2章 酸素製鉄法の構想

SC法は酸素高炉を継承、発展させたものである。本章では高炉1次元数学モデルを活用して酸素高炉の思想と問題点について論述し、SC法の構想を展開した。

高炉1次元数学モデルによれば、高炉において送風中酸素濃度を増加させると生産性は増加するが、燃料比に関しては適正な酸素濃度が存在し、限界を超えて酸素濃度を増加させると所謂シャフト部熱不足の状態となって燃料比は増加する。SC法が溶解炉で微粉炭の多量吸込みを併用した酸素送風を行う目的は、微粉炭多量吸込みの併用によりシャフト部熱不足を回避して燃料比の上昇を抑制し、加えて、コークス比の抜本的な削減を図る点にある。ただし、コークス比の削減と共に炉内における鉱石の空間占有比率が増加し、融着層が肥大して安定操作が阻害されるため、原料品質に課せられる制約条件が厳しくなるが、その対策として還元と溶解の機能を分離する、すなわち、還元機能を分離して炉高を低下させ、原料に加わる機械衝撃を軽減させることにより原料品質制約の緩和を図る。以上、微粉炭の多量吸込みを併用した酸素送風と還元機能の分離により、従来高炉と比較してエネルギー消費を増加させることなく生産性を倍増し、コークス消費を半減することが可能になる。

## 第3章 シャフト式還元炉に関する基礎検討

SC法におけるシャフト式還元炉では溶解炉で製造される高CO濃度の還元ガスを使用するが、COガスの還元能力はH<sub>2</sub>ガスに劣り、炭素析出反応も問題となる。一方、製造した還元鉄は溶解炉に直送されるため、還元鉄の粉化が問題となる。本章ではシャフト式還元炉における鉱石の還元

特性および粉化特性について検討した。

還元実験を行ない各種塊成鉱のガス還元反応速度および炭素析出反応速度を定量化し、シャフト炉1次元数学モデルを作成した。本数学モデルにより還元特性を検討し、高CO濃度の還元ガスを使用しても高還元率は達成可能であり、また、COガス還元は発熱反応であり原料の昇温が促進されるため高H<sub>2</sub>濃度の還元ガスと比較して炭素析出や鉱石の還元粉化に対して有利との結果を得た。

次に、回転還元試験により焼結鉱、焼成ペレットおよびコールドボンドペレットの還元過程における粉化特性を調査し、最も粉化しやすい塊成鉱は焼結鉱であり、その使用の可否はS C法の原料制約条件を見極める1つのポイントになることを示した。

## 第4章 8トンプラントによる酸素製鉄法の機能実証

事前検討では予知されない潜在的な問題点を明らかにし、製鉄法として機能し得るかを検証するため、本章では公称生産能力日産8トンのパイロットプラントにより機能実証試験を行なった。

溶解炉機能に関しては酸素による微粉炭燃焼試験を実施し、酸素送風の場合、圧力1.5kg/cm<sup>2</sup>の条件で酸素1Nm<sup>3</sup>あたり微粉炭を1.2kgまでは燃焼し得ることを確認した。また、燃焼生成ガス量を900Nm<sup>3</sup>/h、理論燃焼温度を2300℃に設定して還元鉄溶解試験を実施し、燃料中微粉炭比率が65%までの条件で還元ガスを副生しつつ還元鉄を問題なく溶解精練できることを確認した。

次に、溶解炉で製造した高CO濃度の還元ガスを直接使用して還元試験を実施し、ペレットはもとより焼結鉱の場合でも粉化の問題なく還元鉄を製造し得ることを確認した。ただし、ダストを含む還元ガスを使用した場合、棚吊りが発生するため、ダスト濃度の低下または荷下がり速度の増加が必要であることを見出した。

以上の結果をもとに、溶解炉と還元炉の連結操作を実施し、Fig. 2に示すように、燃料比が681kg/t、出鉄比4.6t/d/m<sup>3</sup>の成績を得、S C法が製鉄法として機能し得ることを確認した。

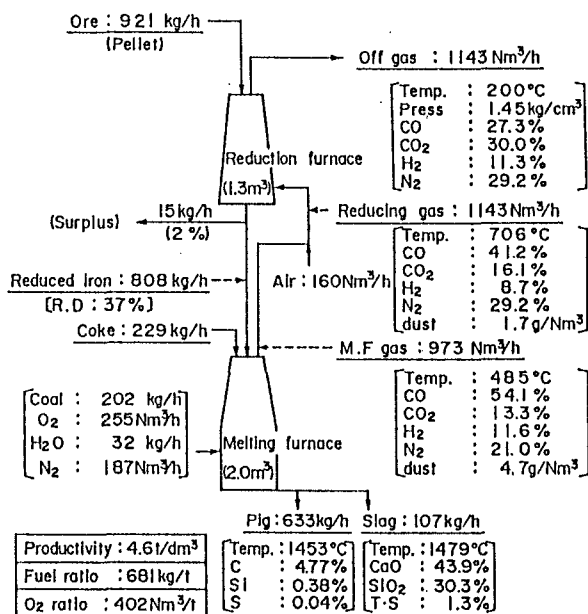


Fig. 2 A result of the connection operation of SC pilot plant.

## 第5章 シャフト式還元炉の

### ダストに起因する棚吊り機構

前章のパイロットプラント試験において還元ガス中のダストに起因すると推定される棚吊り現象が

問題となったため、本章では実験および理論的な考察を加えた。

平板模型実験を行ない、パイロットプラント (Fig. 3) と同様、荷下がり速度が遅くダスト濃度が高いほど棚吊りが発生しやすいこと、また、棚吊りの原因はダストが原料に付着して通気を阻害するためであることを確認した。

次に、ガス流れ、ダスト流れ、ダストの原料への付着とはく離および荷下がりを考慮して炉内における充填層空隙のダストによる閉塞と圧力損失を予測する2次元数学モデルを作成し、Fig. 4に示すように、圧力損失と原料荷重の比で定義される圧損レベル (PL) が炉断面全域で限界値 (図では0.8) を越えると棚吊りが発生すること、対策としてはダストが付着する羽口近傍の荷下がり促進が効果的であることを示した。

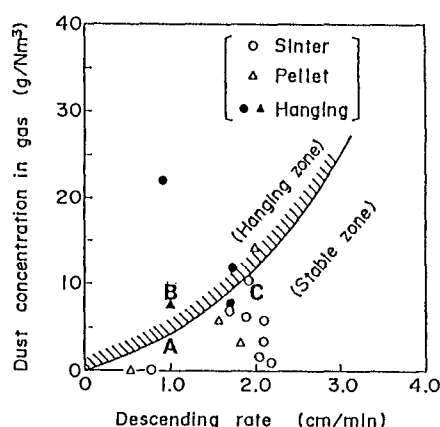


Fig. 3 Stable condition against hanging at the reduction furnace pilot plant.

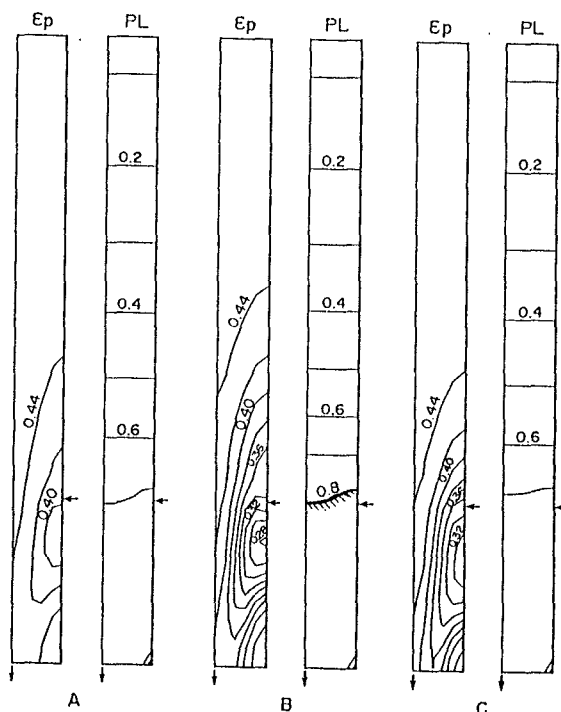


Fig. 4 Dust blockade zone and PL ( $\Delta P / W_{\text{burden}}$ ) for each operation, calculated by dust and gas two phase flow model.

## 第6章 3次元数学モデルによる大型炉諸元の予測

本章では半径方向および円周方向偏差を考慮した3次元数学モデルを作成して実用規模のプラントの操業諸元を予測し、高炉法と比較してSC法の得失を取り纏めた。

3次元数学モデルでは気相、固相 (コークスおよび鉱石) および液相を考慮し、気相の運動 (ガス流れ) にはErgun式、固相の運動 (荷下がり) にはKinematicモデルを用いて記述し、液体は垂直に滴下すると仮定した。化学反応としては鉱石のガス還元と溶融還元およびコークスのガス化

反応，伝熱に関しては気相と固相，固相と液相の熱交換および原料内と耐火物内の熱伝導を考慮した。

パイロットプラント操業との対比により本数学モデルの妥当性を検討し，還元炉では粉の炉壁側への偏在を考慮する必要があり，溶解炉では炉下部におけるガスとコークスおよび溶銑滓とコークスの熱伝達係数をRanzの式の約1／10に修正する必要があったが，これらの修正を行なえば，計算は概ね実績と一致することを確認した。

次に，本数式モデルを大型炉諸元検討に適用し，大型化とともに溶解炉では溶解帯の逆V形状が強化され，中心で吹き抜けやすくなるが，2400トン規模のプラントにおいて出銑比5 t／dm<sup>3</sup>は達成可能であり，Fig. 5に示すように，燃料比525kg／t，微粉炭比346kg／tとの予測結果を得た。また，上記のS C法諸元を高炉法諸元と比較し，Table 1に示すように，エネルギー消費の増加を招くことなく生産性，石炭消費の両面において高炉法を凌駕できることを確認した。

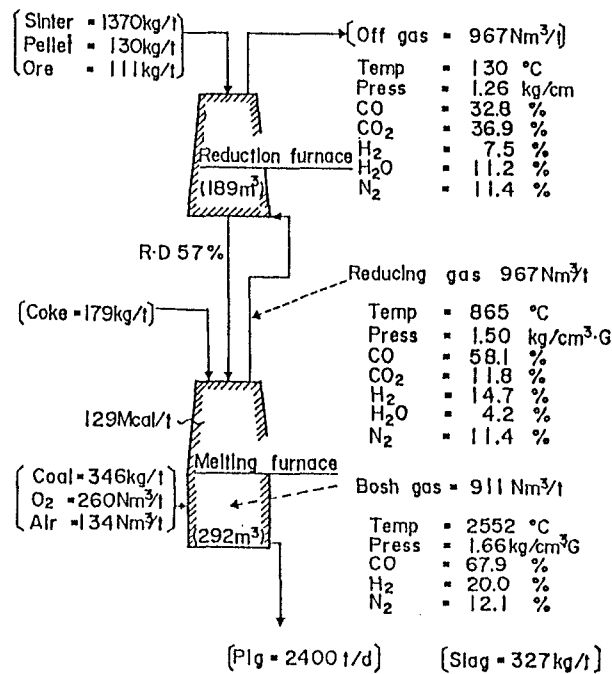


Fig. 5 Operational indices of a large scale SC process predicted by 3-dimensional SC process simulation model.

Table 1 Features of SC process in comparison with blast furnace predicted by 3-dimensional SC process simulation model.

	Blast furnace	SC process	Feature of SC process
Productivity	2.2 t/dm³	5.0 t/dm³	2.3 times as much as BF.
Energy consumption	3.79 Gcal	3.84 Gcal	Competitive to BF.
Coal consumption	641 kg	591 kg	Remarkable reduction of coking coal consumption.
Coiking coal ratio	90 %	37 %	

第 7 章 結 論

本研究の結果を総括した。

## 審 査 結 果 の 要 旨

高炉製鉄法は、戦後から80年代にかけて安価で良質な原料の選択的輸入と潤沢な設備投資に支えられ、我国製鉄法の主流として大きく発展してきたが、次世代に向けて、原料制約緩和と生産弾力性に優れた新しい製鉄法の開発が強く要望されている。本論文は、高炉における還元機能と溶解機能を分離した形式の新製鉄法を提案し、上記目標を達成し得ることを理論ならびに実験研究により明らかにした成果をまとめたもので全編7章よりなる。

第1章は緒論である。

第2章では、従来の高炉の機能をシャフト炉式の還元炉とコークス充填層式の溶解炉に分離し、微粉炭の多量吹き込みを併用した酸素送風を行う溶解炉とその排出ガスを還元炉に吹き込むという新製鉄法（以下S C法と略称）の構想とその特徴を述べている。

第3章では、S C法の溶解炉で製造される高CO濃度の還元ガスによる鉄鉱石類の還元特性ならびに粉化特性を実験室規模の試験炉で調べた結果を述べている。

第4章では、日産8 tonプラントによるS C法の機能実証操業の結果を述べている。溶解炉機能については、 $1.5 \text{ kg/cm}^2$ の加圧酸素送風により、微粉炭の燃焼性の向上が顕著であること、一方、シャフト炉機能ではダストを含む還元ガスを使用した場合でも鉄鉱石の荷下がり速度増大により、棚吊り発生を防止できることを見出し、溶解炉と還元炉の連結操業で燃料比は溶鉄1 ton 当り681kg、出鉄比は $4.6 \text{ ton/m}^3/\text{day}$ の良い成績を得ている。微粉炭の多量吹き込みと溶鉄1 ton 当りの生産性の向上を同時に達成することを実証したことは注目に値する。

第5章では、平板模型を用いた実験により、シャフト炉式還元炉のダストに起因する棚吊り機構を解明し、炉内における充填層空隙のダストによる閉塞と圧力損失を予測する2次元数学モデルを開発した結果を述べている。その結果、還元ガス吹き込み羽口近傍の荷下り促進が効果的であることを明らかにしている。

第6章では、第4、5章の結果をふまえて、2400 ton/day規模の実機プラントの基本設計を行い、半径方向および円周方向の分布偏差をも考慮した3次元数学モデルを用いて、プラントの操業成績を予測した結果、出鉄比は $5.0 \text{ ton/m}^3/\text{day}$ 、燃料比と微粉炭比はそれぞれ溶鉄1 ton 当り525 kg、346 kgの達成が可能であり、高炉法と比較して製鉄の生産性の倍増と原料としての石炭のうち粘結炭の大幅削減が可能となることを述べている。

第7章は結論である。

以上要するに本論文は、原料制約緩和と高生産性を期待し得る新しい製鉄法を提案し、その基礎実験および実機シミュレーションを行って、実操業規模のプラントにおいての成績が高炉に比し優位性を期待できることを明らかにしたものであり、金属工学に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。