

塊成鉱のガス還元速度論(その3) 塊成鉱のガス還元モデルの高炉解析への適用

内藤 誠章*・村山 武昭*²・碓井 建夫*³

Kinetic Analysis on Gaseous Reduction of Agglomerates, Part 3,
Application of Gaseous Reduction Models for Agglomerates to Blast Furnace Analysis

Masaaki NAITO, Takeaki MURAYAMA and Tateo USUI

Key words: ironmaking; gaseous reduction; sinter; iron oxide; agglomerate; kinetic analysis; reaction model; blast furnace; pulverized coal; iron ore injection.

1. はじめに

高炉のプロセス解析として、移動速度論^{1)~3)}が導入されてから、約30年が経過する。この間、充填層内におけるガス流れの研究⁴⁾が飛躍的に進展し、かつ半導体技術の進歩に伴うコンピュータの性能向上もあり、高炉モデルは、一次元²⁾³⁾⁵⁾から疑似二次元^{6)~10)}さらには二次元モデル^{11)~17)}へと発展し、三次元化¹⁸⁾¹⁹⁾への展開もなされつつある。

このように、多次元化することにより、ガス流れ・熱移動に伴う現象の把握は進歩した。

一方、高炉モデルの構成要素として重要な塊成鉱の還元モデルに関しては、碓井²⁰⁾の解説にあるように、種々のモデルが提案されているが、高炉解析には、解析が容易な一界面²¹⁾あるいは多界面²²⁾の未反応核モデルの適用例が多い。直近では、未反応核モデルではなく、塊成鉱の還元挙動をより忠実に表現しようと反応帯モデル²³⁾²⁴⁾を用いた高炉解析が試みられつつある。

この間、モデル自体の改良に加え、村山²⁵⁾が解説しているように、速度パラメータの整備も並行して進められてきた。

また、高炉内での還元挙動を定量化する場合に重要と考えられる還元粉化の定量化^{26)~28)}や融着帯近傍に於ける高温域の軟化・融着過程での還元挙動の定量化^{29)~33)}に関する検討も行われてきた。

栗田³⁴⁾、武田³⁵⁾は岩永²⁶⁾の還元粉化モデルをそれぞれ高炉二次元モデル¹¹⁾、一次元モデル⁵⁾に導入し、内藤¹⁷⁾は多段反応帯モデル²³⁾²⁴⁾に加え、還元粉化モデル²⁸⁾、高温性状評価モデル³²⁾を高炉二次元モデル¹³⁾に導入して、還元過程で

の塊成鉱の粒度変化の影響を定量化した。このように、高炉内における塊成鉱の還元速度を、より精度良く定量化しようとする試みが、現在もなされつつある。

ここでは、塊成鉱のガス還元モデルを未反応核モデルと反応帯モデルとに大別して、各モデルによる高炉解析への適用例を解説し、今後の課題について述べる。なお、高炉の数学モデルの発展については、八木³⁶⁾の解説を参照されたい。

2. 未反応核モデルの高炉解析への適用例

未反応核モデルは、酸化鉄の反応過程を一段と仮定した一界面未反応核モデルとヘマタイトからマグネタイト、ウスタイト、鉄への各反応過程を考慮した多界面未反応核モデルに大別される。

2・1 一界面未反応核モデルの適用例

一界面未反応核モデルを塊成鉱のガス還元モデルとして高炉解析に適用した例として、八木³⁾、久保⁵⁾、桑原⁷⁾⁸⁾¹⁶⁾、田村¹⁰⁾、大塚¹⁴⁾の研究がある。本モデルは高炉モデルの開発初期に採用され、高炉一次元モデル³⁾⁵⁾、高炉疑似二次元モデル⁷⁾⁸⁾¹⁰⁾の採用例が多い。高炉二次元モデル¹⁴⁾¹⁶⁾への適用例として、桑原¹⁶⁾の解析例をFig.1に示す。

一界面未反応核モデルを使用する場合、解析は容易である反面、速度パラメータはウスタイトから鉄への反応段階の値を使用するため、高炉内の低温域で進行するヘマタイトからマグネタイト、マグネタイトからウスタイトの還元速度の解析には無理がある。また、速度パラメータについては、村山²⁵⁾の指摘にあるように、塊成鉱の気孔率や性状

平成5年10月1日受付 平成5年12月3日受理 (Received on Oct. 1, 1993; Accepted on Dec. 3, 1993) (依頼解説)

* 新日本製鉄(株)プロセス技術研究所 (Process Technology Research Laboratories, Nippon Steel Corp., 20-1 Shintomi Futtsu 299-12)

* 2 九州大学工学部 (Faculty of Engineering, Kyushu University)

* 3 大阪大学工学部 (Faculty of Engineering, Osaka University)

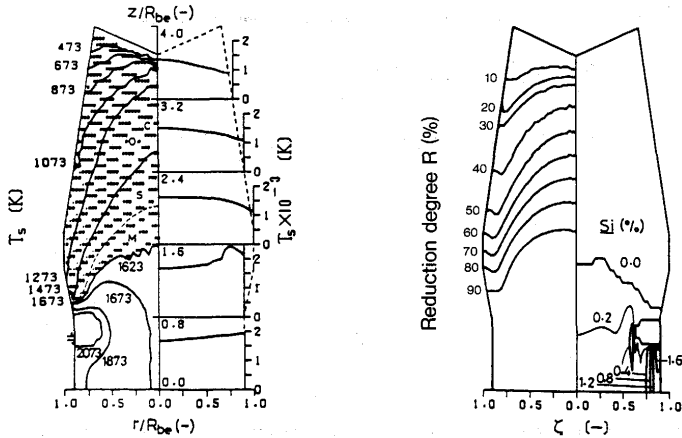


Fig. 1. Prediction of reduction behavior by one interface unreacted core model¹⁶⁾. (Two-dimensional mathematical model of blast furnace)

が異なれば、有効拡散係数だけでなく化学反応速度定数の値も異なるため、他の研究者の値を使用する時には注意が必要である。

一界面未反応核モデルを高炉解析に適用した上記各研究者は、鞭ら²⁾か³⁾Edstrom³⁷⁾、笠岡ら³⁸⁾の実験データをもとに整理した速度パラメータ式を適用しているため、炉内還元率分布などの解析精度については問題が残る。本モデルを採用する場合、例えば村山ら³⁹⁾、碓井ら⁴⁰⁾⁴¹⁾が行ったように、段階毎の還元実験で得られた速度パラメータを使用するのが望ましい。

2・2 多界面未反応核モデルの適用例

多界面の未反応核モデルを塊成鉱のガス還元モデルとして高炉解析に適用した例としては、Lahiriら⁶⁾、全ら⁹⁾、羽田野ら¹¹⁾が使用した二界面の未反応核モデルと杉山ら¹³⁾⁴²⁾、Burkeら¹⁵⁾、山岡ら⁴³⁾が使用した三界面の未反応核モデルがある。

三界面の未反応核モデルはヘマタイトからマグネタイト、ウスタイト、鉄への各反応を考慮している点で、高炉解析には妥当なモデルと考えられるが、二界面の未反応核モデルはヘマタイトからウスタイトまでを一段の反応と仮定した簡易モデルである。

2・2・1 二界面未反応核モデルの適用例

二界面の未反応核モデルを採用した高炉モデルには、Lahiriら⁶⁾の高炉一次元モデル、全ら⁹⁾の高炉疑似二次元モデル、羽田野ら¹¹⁾の高炉二次元モデルがある。

全ら⁹⁾はコークス性状の影響や天然ガス吹込みの効果を検討し、H₂系の速度パラメータについては、鳴村ら⁴⁴⁾が焼結鉱のH₂還元に対し一界面モデルで解析した式を、二界面モデルの各段階に便宜的に適用した。また、焼結鉱のCO系速度パラメータについては、適当な温度依存式がなかったと推定され、高炉内試料データあるいはゾンデデータと対比して、各解析毎にパラメータフィッティングする方法を採用した。解析例をFig.2に示す。速度パラメータについては

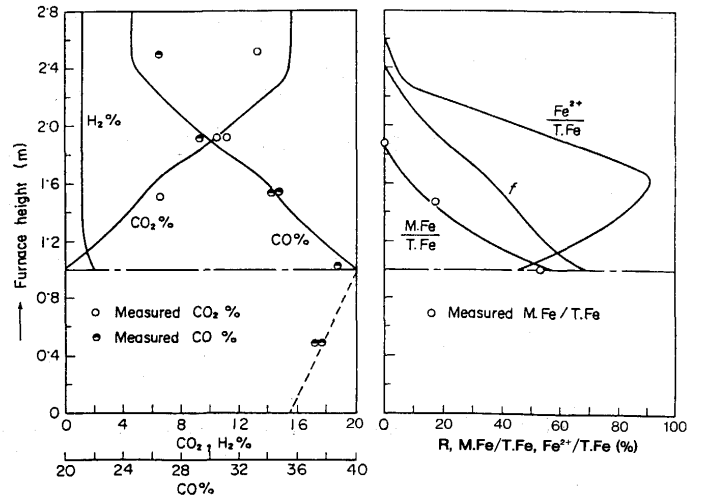


Fig. 2. Prediction of reduction behavior by two interface unreacted core model⁹⁾. (Quasi-two-dimensional mathematical model of blast furnace)

解析条件によって異なり、その原因を装入物分布の不均一度によるものと推測しているが、種々の要因を含む実炉データとの対比から速度パラメータを求める方法については、精度上問題が残る。

羽田野ら¹¹⁾は、高炉二次元モデルを最初に作成し、ガス流れ、伝熱挙動に関し解析精度の向上を図ったが、還元モデルとして二界面の未反応核モデルを使用し、全ら⁹⁾の速度パラメータを使用した。上記の如く、速度パラメータに関しては、検討の余地がある。

また、栗田ら³⁴⁾は羽田野ら¹¹⁾の高炉二次元モデルに還元粉化モデル、コークス性状モデルを導入し、原燃料品質の高炉操業に及ぼす影響を検討した。

Fig.3³⁴⁾には焼結鉱RDI値が異なる時の炉壁部での炉高さ方向の焼結鉱粒度、還元率分布が示されている。この例では、RDI値が高い場合、焼結鉱粒径低下による被還元性向上のため、Ore/Cokeを高めることができ、高炉シャフト上部の温度低下は熱流比上昇の結果と解釈された。還元粉化による細粒化は塊成鉱の被還元性を向上させるとしているが、焼結鉱の場合、Fig.4³³⁾に見られるように、細粒化に伴い、マクロ気孔が減少し、気孔率が低下するため、場合によっては、還元速度が低下する可能性がある。後で示すが、高炉シャフト上部に低温熱保存帯が生成するようなケースでは注意が必要である。

還元粉化を考慮する場合、粒径に応じて気孔率変化を推定し、速度パラメータの値を適宜変化させる必要がある。

2・2・2 三界面未反応核モデルの適用例

高炉内のように、ヘマタイト、マグネタイト、ウスタイト、鉄が存在する条件では、三界面未反応核モデルによる解析が妥当と考えられるが、三界面未反応核モデルを高炉モデルに採用した例は意外に少なく、山岡ら⁴³⁾の高炉一次元モデル、杉山ら¹³⁾⁴²⁾の高炉二次元モデルが代表例である。

山岡ら⁴³⁾は一次元モデルではあるが、高炉操業に及ぼす酸

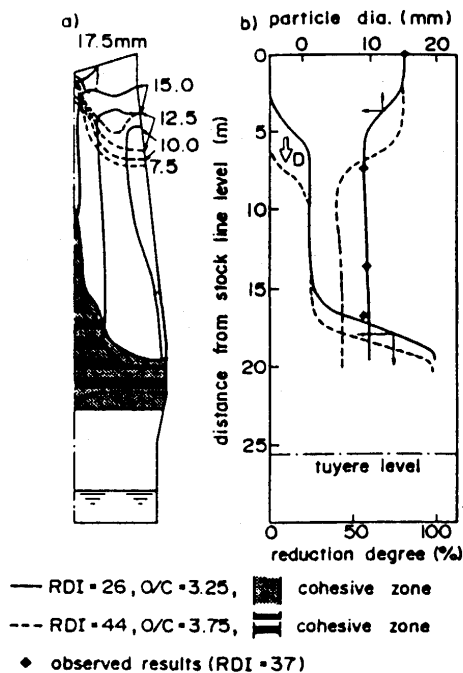


Fig. 3. Effect of RDI on the degradation of sinter in the blast furnace by two interface unreacted core model and reduction degradation model³⁴⁾. (Two-dimensional mathematical model of blast furnace)

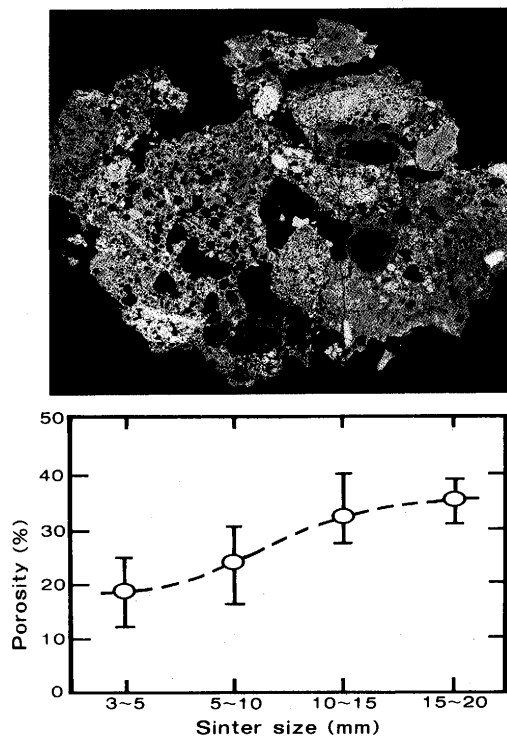


Fig. 4. Relationship between particle size and porosity of sinter³³⁾.

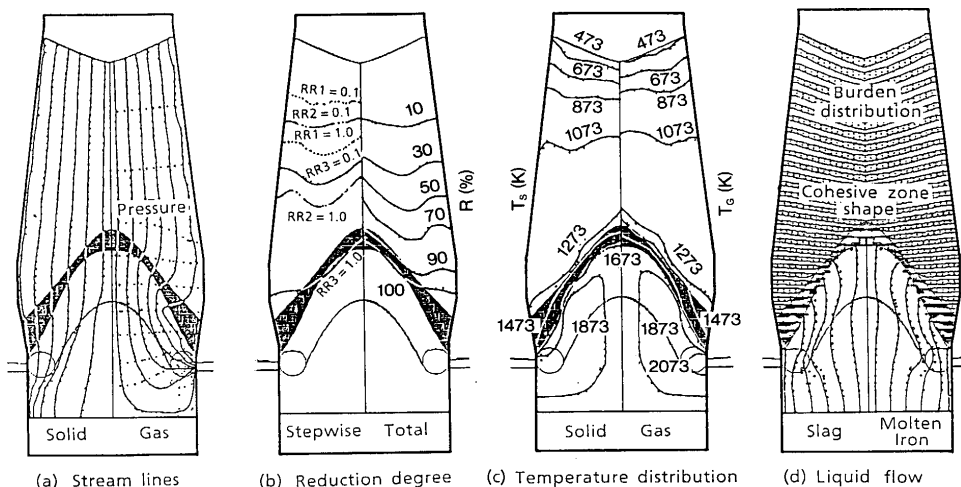


Fig. 5. Prediction of reduction behavior by three interface unreacted core model⁴²⁾. (Two-dimensional mathematical model of blast furnace)

素送風の影響を解析する際、速度パラメータとして村山ら²⁵⁾⁴⁵⁾の式を適用し、モデルの精度が良好なことを報告している。

杉山ら⁴²⁾は H_2 、 CO 還元各速度パラメータ式として、それぞれ原ら⁴⁶⁾⁴⁷⁾、村山ら³⁹⁾の式を適用し、碓井ら⁴⁰⁾⁴¹⁾の式を参考にした。Fig.5に解析例を示すが、炉内 CO ガス利用率 η_{CO} の値が実測値と最も良く合致する有効拡散係数の値は、各研究者が定式化した値の約1/5程度と報告している。

杉山らの高炉モデルは未反応核モデルを用いた解析の中では、最も進んだモデルであり、速度パラメータについても信頼性のある式を用いているが、現状ではオフライン実験で得られた速度パラメータ式が、そのまま適用できない。還元モデルの解析精度の問題、焼結鉄品質・気孔率の違い

による影響などが考えられている。

2・3 未反応核モデル使用上の問題点と課題

未反応核モデルの場合、村山ら²⁵⁾によって指摘されているように、塊成鉄の化学組成や気孔率さらには還元条件などによって、有効拡散係数だけでなく化学反応速度定数の値が異なる。これは、化学反応速度定数が反応表面積の影響を含むみかけの値であるからである。現時点では、広い温度範囲に亘って、気孔率変化時に適用できる化学反応速度定数ならびに有効拡散係数の温度・気孔率依存式は定式化されていないため、装入物分布や還元粉化による粒径変化時の気孔率の変化や融液生成過程での気孔率の変化による影響を解析に取込むことはできない。

未反応核モデルを高炉モデルに適用している研究者が多いため、還元速度の解析精度を高めるためにも、速度パラメータの整備が望まれる。

3. 反応帯モデルの高炉解析への適用例

未反応核モデルは気孔率の低い塊成鉱の還元解析には適しているが、焼結鉱のように多孔質な塊成鉱の還元解析には厳密には不向きである。そのため、多孔質な塊成鉱の還元速度をより定量的に解析しようと、反応帯を考慮したモデルの開発が進められてきた。

反応帯を考慮したモデルには、一段の反応を取り扱った中間モデル⁴⁸⁾、グレインモデル⁴⁹⁾と多段の反応を取り扱った非トポケミカルモデル⁵⁰⁾、多段反応帯モデル²³⁾²⁴⁾があるが、高炉解析に適用された例は、内藤ら¹⁷⁾³³⁾⁵¹⁾⁵²⁾が³⁾高炉二次元モデル¹³⁾に多段反応帯モデルを導入した解析例のみである。

3・1 多段反応帯モデルの適用例

多段反応帯モデルの高炉解析への適用例は、高炉二次元モデルによる解析例のみで、内藤ら⁵¹⁾によって検討された。多段反応帯モデルは、三界面未反応核モデルに比べ、モデル構成が複雑であり、プログラミングや解析時間の面で考慮すべき点はあるが、炉内還元挙動の推定面では推定精度が高い。

Fig.6はモデルの推定精度を検証するため、大分2高炉の各種ゾンデ⁵³⁾データと炉内推定結果とを比較した例である。熱保存帯部位(900~1000°C)や融着帯近傍の温度分布さらには焼結鉱還元率など、推定値とゾンデデータとの対応は良好と判断された。

内藤らの解析³³⁾⁵¹⁾⁵⁴⁾によると、速度パラメータは脚注^{†,†2)}のように整理された。この結果、Fig.7に示すような高炉炉頂部半径方向での装入物粒度構成の違いや還元粉化過程での気孔率変化の影響さらには高温域における融液生成過程での気孔率低下の影響が解析可能となった。内藤ら¹⁷⁾⁵²⁾は、

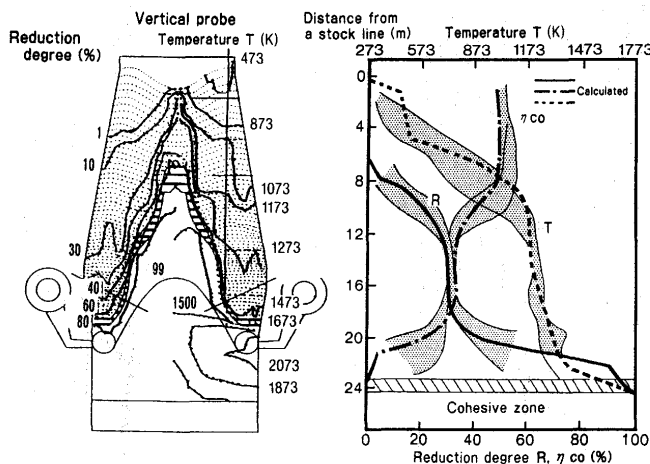


Fig. 6. Prediction of reduction behavior by multi-stage zone reaction model¹⁷⁾. (Two-dimensional mathematical model of blast furnace)

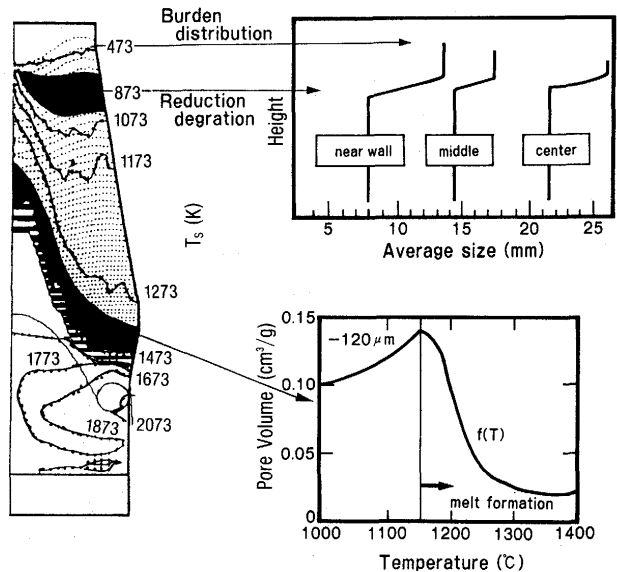


Fig. 7. Factors needed for analysis of sinter reduction behavior in blast furnace³³⁾.

高炉二次元モデルのさらなる高精度化を求め、還元粉化モデル²⁸⁾、高温性状評価モデル³²⁾を導入し、焼結鉱品質の影響を解析した。その際、塊成鉱の品質変化の影響については、相対値 C_K ¹²⁾で評価し、初期気孔率とJIS-RI値の両測定値から推定する簡易法を提示した。

Fig.8は相対値 C_K は一定で、焼結鉱気孔率を変化させた時の炉内還元挙動の解析例である。

ベース焼結鉱の気孔率を40.7%とすると、低気孔率(35%)の場合には、周辺部の融着帯が下がり、融着開始時の焼結鉱還元率は低レベルにあるが、高気孔率(46%)の場合には、融着時の焼結鉱還元率は周辺~中間部において高レベルとなり、反応効率は良好となることが示唆される。また、Fig.9は焼結鉱気孔率ならびに構成鉱物の還元挙動に及ぼす影響を、炉壁1m部位の垂直方向の高温還元挙動と比較した例である。

焼結鉱気孔率の増大に伴い、高温還元速度は上昇している。また、気孔率46%、相対値 $C_K=0.8$ の焼結鉱と気孔率35%、 $C_K=1.2$ の焼結鉱とは、JIS-RI値は同程度であるが、還元率曲線を比較すると、気孔率の高い焼結鉱のほうが、高温還元速度は大きい。この傾向は高炉内反応シミュレータ

† 各反応層の有効拡散係数の推定法

有効拡散係数 De は、気孔率・温度の依存式として、(1)式で表示でき、各反応層の有効拡散係数は、還元前の気孔率とマグネタイト、ウスタイト、鉄段階の理論気孔率から、(1)式で評価できる。

$$De = \{1.2 + 0.3 \times 2^{(T-1073)/100}\} \cdot \epsilon^{3.59} \cdot D \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 D : 分子拡散係数 (m^2/s)
 T : 温度 (K)
 ϵ : 気孔率 (-)

†2 各反応段階の化学反応速度定数の推定法

化学反応速度定数は、ベース焼結鉱のCO、 H_2 還元で求めた各反応段階の温度依存式³³⁾に、塊成鉱品質の差を示す相対値 C_K を乗じて評価する。 C_K はJIS-RI値、気孔率の関数式として(2)式で表示される。

$$C_K = -0.032572 \cdot \epsilon_T + 0.0721959 \cdot (JIS-RI) - 2.42924 \dots \dots \dots (2)$$

ここで、 ϵ_T : 粒径20mmの真空パック気孔率

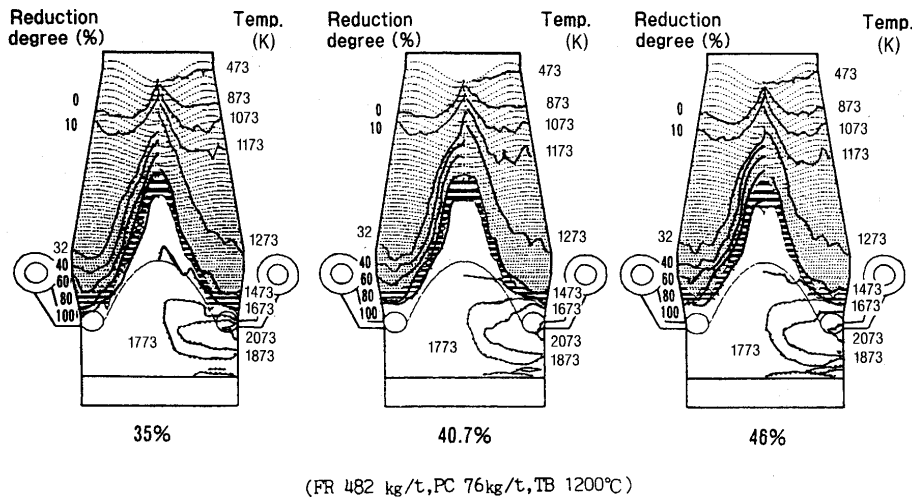


Fig. 8. Changes in reduction behavior with sinter porosity³³⁾.

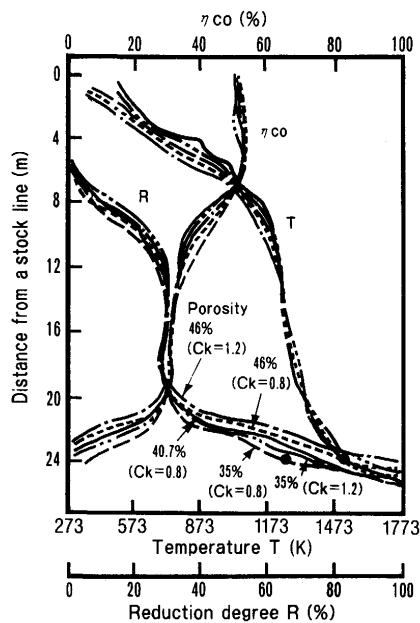


Fig. 9. Effects of sinter porosity and component minerals on reduction behavior³³⁾.

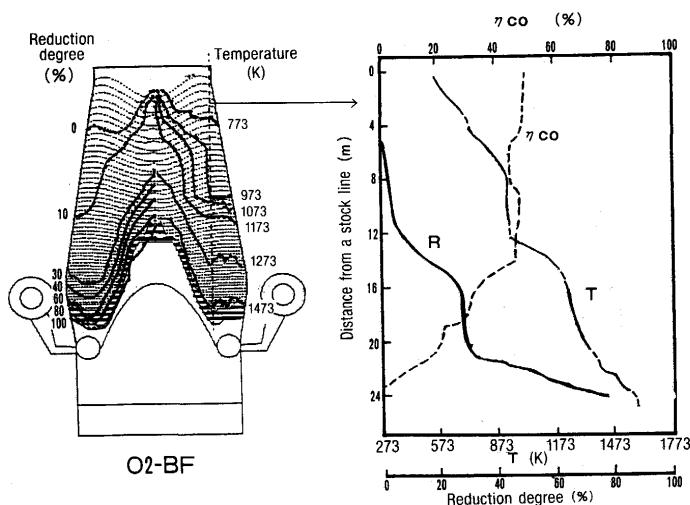


Fig. 10. Prediction of reduction behavior in the low temperature thermal reserve zone by multi-stage zone reaction model³³⁾.

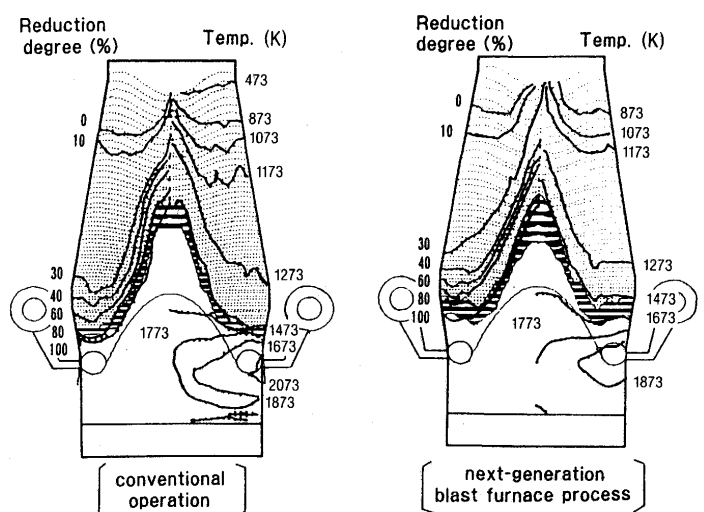


Fig. 11. Prediction of reduction behavior in next-generation blast furnace process⁵⁷⁾.

一 (BIS) による実験結果⁵⁵⁾とも合致しており、焼結鉄品質変化の影響は定量的に推定可能な域に達している。

焼結鉄製造法としては、気孔率を向上させる技術開発が重要であることが³⁾、数学モデルからも示唆された。

Fig.10は還元粉化が顕著に生じ、高炉操業では問題とされる低温熱保存帯生成時の炉内解析例である。この解析例は還元粉化に伴う粒径低下により、焼結鉄の気孔率が低下する影響を取込んでいる。炉壁部分に存在する低温熱保存帯生成部位は、マグネタイト主体の組織であり、還元率は5~10%と推定された。この還元率はBIS実験結果⁵⁶⁾とも対応することから、任意の炉内温度条件下においても、推定精度が良好と判断された。

3・2 次世代高炉の解析事例

次世代高炉プロセスの炉内挙動を推定した例として、多段反応帯モデルを用いた高炉解析が³⁾、内藤ら⁵²⁾⁵⁷⁾によってなされている。

内藤らは環境問題などを考慮し、コークス比低減を極力志向した操業例として、設備上の最高送風温度(1573K)、脱湿送風、高反応性コークス使用下で、コークス比228kg/

t, 羽口から微粉炭比200kg/t, 予備還元率90%の粉鉱石98 kg/t吹込み時の操業状態を解析した。Fig.11はベース条件と比較した解析例である。周辺部の融着帯下端レベルは通常操業時と同等レベルにあり, 操業は可能と推定されている。

本章では, 多段反応帯モデルを導入した高炉二次元モデルの特徴ならびに解析例を紹介したが, 直近では超高压高炉の解析⁵⁸⁾などにも適用され, 普及が期待される。

4. おわりに

塊成鉱のガス還元モデルの高炉モデルへの適用例を紹介し, 高炉解析に適用する際に考慮すべき項目ならびに特徴, 問題点などを指摘した。

塊成鉱の還元速度に関する定量的研究については, 還元モデルの改良, 解析法の提案など精力的に研究がなされているが, 例えば未反応核モデルに対する速度パラメータの整備など, 高炉モデルの解析精度をあげるためにも, 早急に対処すべき課題である。

現状では, 著者らの解説をもとに, 解析対象となる塊成鉱品質を考慮した上で, 還元モデルや速度パラメータを選択していただければ幸いである。

なお, 還元モデル関係の今後の課題については, 速度パラメータ値の整備に加え, 焼結鉱ではカルシウムフェライトの還元速度⁵⁹⁾を考慮するモデルの開発が必要となろう。また, 塊成鉱の成分変化や構成鉱物比の違いを, より精度良く速度パラメータに反映させる工夫などが望まれる。

本報告は著者らの日本学術振興会製鉄54委員会 還元反応検討WGへの提出資料を基に, WGでの討議内容を踏まえて纏めたものであり, 著者らの考え方が参考になれば幸いと思います。

おわりに, 本解説を纏めるに当り, 有益なご意見をいただいた還元反応検討WGの委員各位に御礼申し上げます。

文 献

- 1) V.Koump, R.H.Tien, R.G.Olsson and T.F.Perzak: Mathematical Simulation of the Blast Furnace in "Process Simulation and Control in Iron and Steelmaking" ed. by J.M.Uys and H.L.Bishop, (1964), p.125 [Gordon and Breach Science Pub., London]
- 2) 鞭 巖, 八木順一郎, 田村健二, 森山 昭: 日本金属学会誌, **30** (1966), p.826
- 3) J.Yagi and I.Muchi: Trans. ISIJ, **10** (1970), p.392
- 4) J.Radestock and R.Jeschke: Stahl Eisen, **90** (1970), p.1249
- 5) 久保秀徳, 西山哲司, 田口整司: 川崎製鉄技報, (1982), p.134
- 6) A.K.Lahiri and V.Seshadri: JISI, **207** (1969), p.293
- 7) 桑原 守, 鞭 巖: 鉄と鋼, **61** (1975), p.301
- 8) 桑原 守, 鞭 巖: 鉄と鋼, **61** (1975), p.787
- 9) 全 明, 館 充: 鉄と鋼, **61** (1975), p.948
- 10) 田村健二, 林 洋一, 松井正昭, 彼島秀雄, 山本崇夫: 鉄と鋼, **68** (1982), p.2287
- 11) 羽田野道春, 栗田興一: 鉄と鋼, **66** (1980), p.1898
- 12) 八木順一郎, 武田幹治, 大森康男: 鉄と鋼, **66** (1980), p.1888
- 13) 杉山 喬, 須賀田正泰, 下村泰人, 吉田光男: 鉄と鋼, **69** (1983), S862, 杉山 喬, 須賀田正泰: 製鉄研究, (1987), p.34
- 14) 大塚喜久, 田村繁彦, 小西正躬, 小野玲児, 堀 隆一: 鉄と鋼, **71** (1985), S886
- 15) P.D.Burke and J.M.Burgess: Proc. 48th Ironmaking Conf., ISS-AIME, (1989), p.773
- 16) 桑原 守, 高根慎司, 関戸邦雄, 鞭 巖: 鉄と鋼, **77** (1991), p.1593
- 17) 内藤誠章, 杉山 喬, 藤原 豊, 圃中朝夫, 芦村敏克: 材料とプロセス, **4** (1991), p.166
- 18) 大野陽太郎, 近藤国弘: 鉄と鋼, **73** (1987), p.2028
- 19) 高谷幸司, 宇治澤優: 材料とプロセス, **5** (1992), p.1144
- 20) 碓井建夫, 内藤誠章, 村山武昭, 森田善一郎: 鉄と鋼, **80** (1994), p.431
- 21) 森山 昭, 八木順一郎, 鞭 巖: 日本金属学会, **29** (1965), p.528
- 22) R.H.Spitzer, F.S.Manning and W.O.Philbrook: Trans. Metall. Soc. AIME, **236** (1966), p.1715
- 23) 近江宗一, 内藤誠章, 碓井建夫: 鉄と鋼, **68** (1982), p.592
- 24) 近江宗一, 内藤誠章, 碓井建夫: 鉄と鋼, **69** (1983), p.363
- 25) 村山武昭, 碓井建夫, 内藤誠章, 小野陽一: 鉄と鋼, **80** (1994), p.493
- 26) 岩永祐治: 鉄と鋼, **68** (1982), p.740
- 27) 中島龍一, 炭筆隆志, 脇元一政, 長野誠規, 川田 仁, 桜井雅昭: 鉄と鋼, **73** (1987), A191
- 28) 高田 司, 相馬英明, 杉崎与一, 内藤誠章, 山口一良, 林 洋一: 材料とプロセス, **1** (1988), p.49
- 29) 岩永祐治: 鉄と鋼, **68** (1982), p.2223
- 30) 井上勝彦, 池田 孜, 上仲俊行: 鉄と鋼, **68** (1982), p.2431
- 31) 高谷幸司, 岩永祐治: 鉄と鋼, **73** (1987), p.980
- 32) 葛西直樹, 内藤誠章, 山口一良, 林 洋一: 材料とプロセス, **1** (1988), p.52
- 33) 内藤誠章: 学振54委, 還元反応検討WG提出資料, 還元WG-25 (平成3年11月)
- 34) 栗田興一, 岩永祐治, 元重正洋, 網永洋一: 鉄と鋼, **73** (1987), p.2060
- 35) 武田幹治, 田口整司, 福武 剛, 山崎 信: 鉄と鋼, **70** (1984), S99
- 36) 八木順一郎: 鉄と鋼, **69** (1983), p.1242
- 37) J.O.Edstrom: J.Iron Steel Inst., **175** (1953), p.289
- 38) 笠岡成光, 阪田祐作: 工業化学雑誌, **68** (1965), p.75
- 39) 村山武昭, 小野陽一, 川合保治: 鉄と鋼, **63** (1977), p.1099
- 40) T.Usui, M.Ohmi, S.Hirashima and Y.Oshima: Proc. 6th Process Tech. Conf., Vol.6 (Fifth Int. Iron Steel Cong., Washington, DC, 6-9, April, 1986, Book 3), (1986), p.545 [Iron Steel Soc. of AIME]
- 41) 大森康男, 碓井建夫, 近江宗一, 平嶋成晃, 北川伸和, 大島 祐: 学振54委-No. 1838 (昭和62年11月)
- 42) 森田善一郎, 碓井建夫, 川端弘俊, 近江宗一, 北川伸和, 金田真司: 学振54委-No. 1900 (平成2年2月)
- 43) 杉山 喬, 須賀田正泰, 下村泰人, 鈴木信邦: 鉄と鋼, **71** (1985), S884
- 44) 山岡秀行, 亀井康夫: 鉄と鋼, **77** (1991), p.1601
- 45) 嶋村鉄郎, 照井敏勝, 大森康男, 三本木貢治: 東北大学選鉱製錬研究所彙報, **27** (1971), p.91
- 46) 村山武昭, 小野陽一, 川合保治: 鉄と鋼, **57** (1971), p.1099
- 47) 原 行明, 坂輪光弘, 近藤真一: 鉄と鋼, **62** (1976), p.315
- 48) 原 行明, 土屋 勝, 近藤真一: 鉄と鋼, **60** (1974), p.1261
- 49) M.Ishida and C.Y.Wen: AICHE J., **14** (1968), p.311
- 50) J.Szekely and J.W.Evans: Metall. Trans., **2** (1971), p.1691
- 51) S.P.Trushenski, K.Li and W.O.Philbrook: Metall. Trans., **5** (1974), p.1149
- 52) 内藤誠章, 山口一良, 林 洋一: 材料とプロセス, **1** (1988), p.48
- 53) M.Naito, K.Yamaguchi, T.Sugiyama and Y.Inoue: 10th PTD Conference Proc. (AIME), (1992), p.55
- 54) M.Higuchi, Y.Miyabe, T.Hirata, S.Wakuri and K.Kanamori: ISIJ Int., **24** (1984), p.76
- 55) 近江宗一, 内藤誠章, 碓井建夫: 鉄と鋼, **68** (1982), p.1503
- 56) 内藤誠章, 岡本 晃, 山口一良, 斧 勝也, 林 洋一: 学振54委-No. 1802 (昭和61年11月)
- 57) 岡本 晃, 内藤誠章, 斧 勝也, 林 洋一, 井上義弘: 鉄と鋼, **72** (1986), p.1529
- 58) 山口一良, 内藤誠章, 上野浩光, 寺田雄一, 川鍋正雄: 材料とプロセス, **4** (1991), p.1016
- 59) 魅力ある製鉄技術を求めて(日本鉄鋼協会編), (1993), p.193
- 60) 前田敬之, 小野陽一: 鉄と鋼, **77** (1991), p.1569