

氏 名	清 水 正 賢
授 与 学 位	工 学 博 士
学位授与年月日	昭和 63 年 2 月 10 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 46 年 3 月 新潟大学工学部化学工学科卒業
学位論文題目	高炉内における装入物の運動とガス通気性に関する 研究
論文審査委員	東北大学教授 八木順一郎 東北大学教授 萬谷 志郎 東北大学教授 大森 康男

論 文 内 容 要 旨

緒 言

高炉は、上昇気相と下降する固相、液相との間の向流反応を基礎とする化学反応炉である。これら三相間の反応を高効率で、しかも長期にわたって安定的に行わせることによって、高炉の高い生産性を得ることができる。このためには、向流移動層としての効率を決定づける炉内でのガスや固体の流れを、炉内で展開される物理的・化学的・熱的なプロセスに照らして、最適な条件に調整することが最も重要である。

高炉は、基本的に、装入原料の物理・化学的性状と装入条件および衝風条件によって制御される。これまで、装入原料の塊成化処理や整粒、篩分け、装入物分布制御、衝風制御などに関する膨大な研究開発が行われ、多くの革新的な技術開発や操業改善によって高炉の生産性と経済性は飛躍的に向上した。

近年、高炉の大型化によってその生産効率はさらに高められようとしているが、炉容の拡大にともない従来見られなかった問題が生じている。その大きな問題として、径方向における装入原料の粒度偏析や鉱石とコークスの堆積層厚の差が著しくなり、ガス流分布や装入物降下の不均一性が助長される方向にある。また、炉下部中心領域に形成される炉芯コークス層（動きが緩慢な死領域）が拡大し、炉芯内部へのガス流入量が減少する傾向にある。

こうした大型高炉の直面する問題を解決し、より高度で柔軟性ある高炉操業を行っていくには、

炉口部における装入物の堆積挙動に加えて堆積層の円滑な降下という動力学的挙動の解明が不可欠であり、装入物の運動特性やガス流れとの力学的相互作用を考慮した炉況制御が必要といえる。

このような観点から、本研究は、過去、高炉研究の中で特に解明の遅れていた炉内での装入物の運動特性について、特に、炉口部での装入物の堆積挙動と降下速度分布、炉内応力条件と装入物降下、降下時における堆積層の充填構造変化とガス通気性、炉芯コークス層の形状と充填機構を明らかにし、装入物の運動力学的特性に基づいた炉況制御指針を提示することを目的に行ったものである。

以下は、本論文で記述した研究結果の概要である。

第1章 緒 論

高炉内でのガスと固体の流れに関する従来の研究および実操業におけるガス流制御の現状と課題について述べ、本研究の目的と意義を明らかにした。また、本論文の構成を記した。

第2章 高炉炉口部におけるガス流分布と装入物の堆積挙動

高炉内現象の総合的な指標としての性格を持つ炉口ガス温度分布と炉況との関連性、ならびに炉内ガス流分布の基本的な支配因子である装入物の堆積挙動、炉口部での堆積層の降下状態について過去実施してきた研究結果をまとめて示した。

(1) 炉口ガス温度分布と炉内現象との関係

高炉を安定に操業するためには、炉口ガス温度分布が中心部の狭い領域だけで高温度を示し、中心部を除く他の領域では均一な温度分布がよい。炉口ガス温度分布は炉況、特に、溶銑温度と密接に関係しており、炉熱制御の有効な指標となる。また、炉口部には径方向で降下速度分布が存在しており、炉熱制御の有効な指標となる。また、炉口部には径方向で降下速度分布が存在し、周辺部の降下速度が中心部より大きい場合には中心部の O/C （鉍石重量/コークス重量）が低下して中心ガス流が発達する。

(2) 炉口部での装入物の堆積挙動

装入物の堆積傾斜角は一定ではなく、装入量や装入条件によって変化する。特に、鉍石装入の場合には、堆積時のひずみ速度効果が強く作用し、無次元装入量（炉口半径 R に対する堆積層厚 H の比： H/R ） $0.11 \sim 0.13$ の範囲で最小値を示す。

ガス流存在下では、鉍石装入時に炉内ガス流が炉中心部に集中する。この効果によって中心部のガス流速がコークスの流動化開始速度より大きくなった場合には、コークスが流動化して中心部にコークスの単味層が形成される。炉口部での局所的な中心ガス流の発達、このコークス単味層の形成に起因している。コークス単味層の大きさは、炉口ガス流量、鉍石とコークスの通気抵抗比、装入鉍石の層厚から推定できる。

第3章 高炉内装入物の降下挙動に関する力学的検討

高炉内での装入物の基本的なフローパターンや降下時における充填構造変化、固体運動を支配す

る炉内応力分布，また炉芯コークス層の形状について模型実験に基づく土質力学的検討を行い，次のことを明らかにした。

高炉炉口部から炉腹部までの装入物降下は，巨視的にはピストンフローであるが，降下時にはシャフト断面積の増大により層内の粒子配列構造が変化する。また，炉壁部には局所的な混合層が形成され，その大きさはシャフト角度 83° で最小値を示す。混合層の形成に対するシャフト角度の影響については，炉壁近傍での応力条件および堆積層の降下速度と剪断速度との関係によって説明できる。炉腹部から羽口部までの装入物降下はファンネルフローを呈し，レースウェイへの流入は羽口先端直上部から行われる。

炉内の応力場は，シャフト部で主働状態，炉下部で受働状態，その遷移域である炉腹部では壁面に著しい集中応力が働く。炉腹部より下方では応力場の変化に伴う水平応力の増大により，炉周辺部に装入物の滞留域が形成される。炉下部中心領域に形成される炉芯コークス層の形状は，炉下部の応力条件を受働状態とした滑り線解析により理論的に推定できる。

第4章 高炉の円周方向不均一条件下における固体流れ

高炉円周バランスの偏りの原因と考えられる装入物の不均一降下に着目し，高炉3次元模型を用いて，羽口衝風バランス，炉壁付着物，炉壁侵食の影響について調べた。

炉壁侵食や付着物の形成は，その下方に炉壁混合層を形成させる。炉壁侵食によって冷却板の突起部が露出した場合には，混合層は著しく拡大する。特に，シャフト上端から約 $0.4D$ （ D ：炉口径）の範囲内での炉壁侵食は，直上の炉口降下速度を増大させ，装入物分布の不均一化をもたらす。

炉壁付着物がシャフト上部に形成された場合には，付着物上方の炉口降下速度が低下するが，シャフト中段に形成された場合には逆に増大する。また，羽口閉鎖等によって羽口衝風バランスに偏りが生じた場合には，羽口風量の少ない方位の炉口降下速度が増大する。このように，炉壁付着物や羽口衝風バランスの偏りに起因する装入物の降下挙動は，炉上部と下部で相反する挙動を示すことが明らかになった。

送風羽口を局所的に閉鎖すると，その上方に炉壁不動層が形成される。炉壁不動層の形状は炉下部領域での周応力（ σ_θ ）と垂直応力（ σ_v ）との関係によって決定されており，周方向断面の応力場を主働状態（ $\sigma_\theta < \sigma_v$ ）と仮定することにより推定できる。

第5章 充填構造変化をもとなう向流移動層のガス通気性

第3章，第4章で明らかにした，降下時における堆積層の薄層化や炉壁近傍での混合層の形成，また，炉下部ファンネルフロー領域など，充填構造変化をともなう移動層のガス通気特性について調べ，次の結果を得た。

充填構造変化を伴う移動層の通気抵抗は固定層に比べ約20%低下する。これは，粒子配列の変化にともなう空隙率の増大に起因している。

鉍石とコークスを混合充填した場合，移動層の通気抵抗は固定層より低下するが，その低下率は鉍石の混合割合に依存し，混合割合が約20%付近で最大値を示す。一方，層状装入された鉍石とコ

ークスが降下時に混合層を形成した場合には、鉾石の混合割合が20%以下の範囲では通気抵抗は変化しない。混合割合が20%以上になると通気抵抗は急激に増大し、約50%付近で最大値を示す。この結果は、従来の固定層での特性と大きく異なる。

ファンネルフローを呈する移動層の空隙率は固定層に比べ約20%増大する。また、空隙率は降下速度に関係なく、ほぼ一定に維持されることが判明した。

第6章 コークス中心装入による軟化融着帯形状と炉芯充填構造の制御

高炉の安定性を左右する中心ガス流を的確に制御する方法として、少量のコークスを炉口の中心部に装入する「コークス中心装入法」が考えられる。また、第3章、第4章で把握した炉内での固体の流線から、中心部に装入されたコークスは炉芯の更新にも大きく寄与することが推察された。本章では、中心ガス流の安定維持ならびに軟化融着帯形状や炉芯充填構造の的確な制御を目的とした「コークス中心装入法」の有効性を高炉模型実験および実炉試験によって検討し、以下の成果を得た。

高炉中心部へのコークス装入は、中心ガス流の安定確保だけでなく、安定した逆V型の融着帯を形成させる。特に軟化融着帯の形状は、O/C分布に強く依存し、中心部のO/Cによって、そのマクロ形状がほぼ決定される。また、逆V型の融着帯は、高炉の庄力損失や風圧変動、荷下がり異常等を低減させる。

炉芯内のコークスは、炉口中心部の無次元半径約0.15の領域に装入されたコークスによって更新される。コークス中心装入によって炉中心部のO/Cを低く抑えることにより、中心部でのコークスの反応劣化が抑制され、炉芯内でのコークス粉の蓄積量が減少する。

また、炉芯内でのコークス粉率の減少は、炉芯内部へのガス流入量の増大と炉床中央部での溶銑滓の滴下および溶銑流れを活発化させる。

コークス中心装入法は、中心ガス流の安定維持や軟化融着帯形状の適正化に加え、従来制御不可能とされた炉芯充填構造の制御をも可能にした画期的な高炉操業法であることを実炉試験によって実証した。

第7章 結 言

本研究で明かにした結果を総括するとともに、研究結果の実炉への適用状況と今後の課題について述べた。

審 査 結 果 の 要 旨

高炉内現象は、操業中の実高炉から得られる検出端情報、休止後の解体調査結果あるいは数学的モデルなどにより解明されてきたが、現段階においても経験的知識にたよらざるを得ない点が多く残されている。本研究は高炉を向流式の反応器としてとらえ、その基本特性である装入物の運動特性ならびにガスの通気性を模型実験により総合的に検討し、得られた知見に基づき、高炉の新しい操業技術を提案したものであり、全編7章よりなる。

第1章は緒論であり、高炉内現象の解明と操業技術の発展について概括し、本研究の目的と意義を述べている。

第2章では、装入時における装入物の推積層の降下速度分布およびガス流速分布との関係を示すとともに炉口ガス温度分布と炉況との関連性に基づき、高炉の安定操業のための実用的な指数を提案している。

第3章では、炉口部から羽口部に至る装入物の基本的な降下挙動、炉壁混合層の形成挙動ならびに炉芯コークス層の形状を炉内の応力解析により明らかにし、炉下部で安定した装入物降下を得る条件を提示している。

第4章では、装入物の円周方向における不均一降下に着目し、3次元模型により、送風の不均一性、炉壁付着物、炉壁侵食等の影響を調べ、従来、2次元場で得られていた結果とは異なる新しい知見を示し、円周バランスの改善のための指針を示した。これは実用上有効な指針である。

第5章では、第3、4章で示した充填構造変化を伴う移動層内のガス通気特性を検討し、移動層の通気抵抗は固定層に比べ低下すること、また、鉱石とコークスから成る大小二種類の粒子を混合すると、小粒子の体積比が20%以下の範囲で、小粒子の混合による移動層の空隙率低下は固定層にくらべ小さく、対応する通気抵抗はほとんど変化しないことを見い出している。

第6章では、少量のコークスを炉中心部に装入するコークス中心装入法を模型実験の知見に基づき提案し、実高炉試験を実施し、本手法が中心ガス流の安定的確保や軟化融着層形状の制御に極めて有効であることを確認している。さらに、この方法は炉芯充填構造の制御を可能にし、高炉操業の高効率化に寄与することを明らかにしている。

第7章は結論である。

以上要するに本論文は、模型実験ならびに力学的解析により高炉装入物の運動特性と通気性を明らかにし、得られた知見に基づき、円周方向における不均一性の改善ならびにコークス中心装入法による炉芯充填構造の制御法を考案するとともに実炉試験に成功したものであり、金属工学の発展に寄与するところ少なくない。

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。