

氏 名	すずき とみお 鈴 木 富 雄
授 与 学 位	工 学 博 士
学位授与年月日	昭和 61 年 6 月 11 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 50 年 3 月 群馬大学大学院工学研究科機械工学専攻 修士課程修了
学位論文題目	鉄鋼用工業炉における微粉炭燃焼に関する研究
論文審査委員	東北大学教授 大谷 茂盛      東北大学教授 斎藤正三郎 東北大学教授 只木 楨力      東北大学教授 永井 伸樹

## 論 文 内 容 要 旨

エネルギー資源を海外からの輸入石油に依存している日本にとって、石炭の利用拡大は技術的、経済的および政治的にも最優先課題である。とりわけ、鉄鋼業はエネルギー多消費産業の典型であり、製鉄所での石油から石炭への燃料転換は重要な位置付けにある。そこで、本研究では鉄鋼用工業炉を対象として、微粉炭の燃焼特性を解明すると共にガスや重油の燃焼特性と比較し、燃料転換時の問題点とその対策を明らかにした。また、公害対策、省エネルギーおよび品質向上の面から微粉炭の最適燃焼技術について検討を加えた。

これらの研究成果を活用して、国内製鉄所では初めて高効率、低公害の微粉炭燃焼技術を開発し、ペレットキルンおよび高炉で相次いで実用化した。

本研究の要旨は以下の通りである。

第 1 章は緒論であり、本研究の背景、従来の研究概要、本研究の目的と概要について述べた。

これまでの微粉炭燃焼に関する研究は、ほとんどボイラを対象としたものである。ボイラと鉄鋼用工業炉では燃焼装置およびその燃焼条件が本質的に異なるため、ボイラを対象として得られ研究成果をそのまま鉄鋼用工業炉へ応用することは多くの困難を伴うことを説明した。

また、鉄鋼用工業炉での微粉炭燃焼の中心的研究課題は、ボイラと同じように NO<sub>x</sub> 生成挙動とその低減技術に加えて、新たに燃焼性や炉内伝熱特性などの解明が重要であることを述べた。

したがって、鉄鋼用工業炉で微粉炭燃焼を実施するに当たっては、公害対策、省エネルギーおよび品質向上の面から、従来よりはるかに高度な燃焼技術が要求され、これらの条件を満足させる最適な燃焼法を確立するためには系統的な燃焼特性の研究が必要であることを指摘した。

第2章では、微粉炭の燃焼特性を理論的に検討するための1次元燃焼シミュレーションモデルについて説明した。とりわけ、今まで手がけられていなかった火炎温度が高く、滞留時間が短く、かつ加熱速度が速い典型的な微粉炭の高強度燃焼を精度良く解析できることを示した。

燃焼炉内の流動状態、微粉炭と燃焼空気との混合などの多次元的な挙動をいかに1次元化するかを示した。また、微粉炭の特徴である粒度分布は、実際の粒度分布に近似させて階段状に分割した。それぞれの粒子は可燃分、灰分および水分からなり、周囲から熱を受けて揮発化とチャーの生成が起こると仮定した。高強度燃焼では、相対的に低温域における揮発化過程が燃焼反応を律速していることが明らかとなった。この揮発化過程を、石炭の工業分析値（主として揮発分）または元素分析値（主として炭素分、水素分）で決定される揮発化係数で正確に評価することにより予測精度が向上することを示した。

本モデルを、鉄鋼工業炉の中で高強度燃焼が行なわれている高炉の微粉炭吹込み燃焼実験へ適用した。更に、国際火炎研究所（IFRF）およびOhio州立大学で実施した高強度燃焼にも適用し、燃焼率へ及ぼす各種の燃焼条件の影響を予測し、実験結果と比較検討した。これらの結果より、本モデルは微粉炭の燃焼装置、石炭種類および燃焼条件が大幅に異なっても、燃焼特性を簡便かつ精度良く予測できることを確認した。

第3章では、本研究で使用した実験装置および方法について説明した。実験装置は、第4章および第5章の加熱炉などの一般炉を対象とした研究で使用したものと、第6章の鉄鋼用工業炉の中で最も高温高速な燃焼条件にある高炉を対象とした研究で使用したものとに大別される。

また、燃焼特性を解明するに当たり、燃焼性の定量的評価法や高温炉での火炎輻射率測定法が十分に確立されていないことがわかり検討した。

微粉炭の燃焼率は、従来から石炭中に含まれる灰分が燃焼しないことに着目したトレーサ法で求められていた。しかし、最近の研究で高温火炎中で灰分が蒸発したり、冷却水への灰の溶解が原因で、大きな誤差を生ずることが指摘された。本研究では、従来の灰分トレーサ法に加えて高温でも安定物質であるチタンをトレーサとして求めるチタントレーサ法と乾式サンプリング法を採用して測定精度を向上させた。また、トレーサ法を適用できない重油、COMの燃焼性と微粉炭の燃焼性とを比較するために、酸素の消費量から求める酸化率と二酸化炭素の発生量から求める燃焼率をそれぞれ定義し、これらの相互関係を詳細に考察して有効性を確認した。

火炎輻射率の測定法には、Schmidt法が広く採用されている。この方法では炉壁に高温部と水冷部を設ける必要があり、また測定に時間がかかる問題があった。そこで、本研究では特別に水冷部を必要とせず、炉壁の温度を精度良く測定することにより、鉄鋼用工業炉などで実用的に有効な火炎輻射率の計算法を確立した。

第4章では、加熱炉などの一般炉およびペレットキルンを対象として微粉炭の燃焼特性を明らかにし、ガス、重油から微粉炭への燃料転換時の諸問題と対策について考察した。

鉄鋼用工業炉のNO<sub>x</sub>生成特性は、燃焼条件の相違により従来のボイラにおけるNO<sub>x</sub>生成特性とは異なることを明らかにした。具体的にペレットキルンを対象としたNO<sub>x</sub>生成挙動とその低減条件について検討し、微粉炭をバーナ中心から単孔で噴射し、コークス炉ガスをその周囲から分割して噴射する低NO<sub>x</sub>燃焼法を開発した。この燃焼法は、実炉にも活用され、コークス炉ガスのThermal NO<sub>x</sub>および微粉炭のFuel NO<sub>x</sub>の発生がそれぞれ十分に抑制され、火炎放射量が高くなる最適燃焼法であることが確認された。

また、燃焼炉内の燃焼ガス濃度分布および温度分布から微粉炭の燃焼過程を考察すると、着火遅れが発生し、燃焼は粒子表面での反応および灰分層の拡散が律速となるので燃焼帯の酸素が高くとも急速に進行しないことが明らかとなった。このため、鉄鋼用工業炉でガス、油から微粉炭へ燃料転換する場合には、微粉炭の着火遅れを改善することが重要となる。燃焼空気の高温度化、保炎域の形成、微粉炭吹込み位置の上流側への移動は着火遅れ対策に有効であることが認められた。燃焼の促進効果は、燃焼空気流速を高くすると高温ガスを巻き込み、強い乱流と剪断応力場を発生するため顕著となることが明らかとなった。

微粉炭の火炎放射量は、一般には着火遅れのためバーナ近傍で低く最高火炎温度域で高くなり、他燃料に比較して高低差の大きい分布を示した。燃焼空気流速を高めると、外部循環域の燃焼ガスを巻き込むために火炎輝度が低下し、温度分布および火炎放射量分布が平坦となった。最適燃焼法では、火炎放射量が高くなりNO<sub>x</sub>が低減される。火炎放射率は、通常燃焼では0.3～0.7の範囲にあるのに対して最適燃焼法では0.5～0.95まで高くなり、炉内伝熱特性も優れていることが確認できた。

第5章では、微粉炭と重油との中間的な燃料であるCOM燃料の燃焼性を明らかにして、鉄鋼用工業炉におけるCOMの利用可能性について考察した。

COM燃料の燃焼は、その炭材種類と濃度により大幅に変化することが明らかとなった。石炭COM 30 wt.%の場合はほとんど重油と同じ燃焼特性を示すが、石炭COM 50 wt.%以上および石油コークスCOMの場合には、燃焼初期はC重油と炭材中の揮発分が燃焼して輝炎を形成し、その下流では固体炭素、チャーの燃焼が起こり特徴的な火炎となった。

COM濃度の上限は、燃料の定量供給および安定燃焼の点から60 wt.%程度となり、熱量比換算するとほぼ重油：石炭＝1：1に相当し、燃料単価はC重油と石炭の中間となることが明らかになった。

COM燃料のNO<sub>x</sub>生成特性は、最高火炎温度とCOM濃度で整理できることが明らかとなった。COM濃度を高めると、Fuel NO<sub>x</sub>は増加するが、火炎温度が低下してThermal NO<sub>x</sub>が減少した。COM濃度が等しい場合には、炭材中の揮発分／炭素分の比、Fuel N分が高くなるほどNO<sub>x</sub>は高くなった。

火炎温度は揮発分／炭素分比が小さい炭材のCOMほど、COM濃度が高いほどおよび空気比が高

いほどそれぞれ高温域が狭くなり、かつ最高温度が低下することが明らかとなった。火炎輻射量は、火炎温度の影響を強く受け、主燃焼域における火炎輻射量はC重油、石炭COM、石油コークスCOMの順に低下し、火炎温度の順位と一致した。

また、COMの火炎輻射率は、もともと高い火炎輻射率を示すC重油に炭材を混合しているため高くなり、火炎輻射率は火炎中のコーク粒子、すす、微粉炭粒子などの粒子径と粒子空間密度の影響を強く受けていることが明らかとなった。主燃焼帯での火炎輻射率はC重油、石炭COM、石油コークスCOMの順に低下し、石炭COMの火炎輻射率は、COM濃度30wt.%よりも50wt.%のほうが高くなった。

COMの最適燃焼法として、燃焼空気を旋回流とし、かつバーナの噴霧特性を良好にすれば、低NO<sub>x</sub>および炉内伝熱促進を達成できることが判明した。

第6章では、鉄鋼用工業炉の中で最も高温高速な燃焼条件にある高炉を対象として、微粉炭と重油の燃焼性を明らかにし、重油から微粉炭への燃料転換時の問題点と対策を検討した。微粉炭の燃焼性評価法としてトレーサ法とガス分析法を併用し、燃料種類、微粉炭吹込み位置、微粉炭吹込み量および燃焼空気温度の燃焼率へ及ぼす影響を実験的に検討し、最適な高炉への微粉炭吹込み法について考察した。

微粉炭の燃焼過程は、燃焼率の大きな変化勾配を示す揮発化による急速燃焼と小さい変化勾配を示すチャーの燃焼が起こっている緩慢燃焼とに大別されることが明らかとなった。高炉のレースウェイにおける燃焼は揮発化過程の影響を強く受け、微粉炭の完全燃焼はチャーの燃え尽きで決定された。微粉炭を急速加熱( $1.0 \times 10^6 \sim 1.5 \times 10^6 \text{ K/sec}$ )し、高温および強い乱れ場で燃焼させると、燃焼時間が10ミリ秒以下でも従来に比較して燃焼率が大幅に上昇することを示した。

高炉の平均的な燃料吹込み条件で重油と微粉炭の燃焼性を比較すると、重油吹込みの場合には羽口内で大部分が燃焼してレースウェイ深さに相当する羽口から0.8 m以内で完全燃焼した。一方、微粉炭吹込みでは揮発分の影響を強く受け、羽口から0.8 mの位置でCO<sub>2</sub>変換率から求めた燃焼率は高揮発分炭A（揮発分39.8%）で93%、中揮発分炭B（揮発分33.2%）で77%、低揮発分炭C（揮発分20.2%）で59%という値をそれぞれ示し、重油に比較して燃焼性が悪いことが明らかとなった。

そこで、微粉炭吹込み位置を上流側へ移動させることにより燃焼時間を長くすると、ブローパイプ内の灰付着を発生せず高い燃焼率が得られ、従来吹込み位置に比較して羽口から0.8 mの位置で燃焼率が5～15%向上した。特に、中揮発分炭Bでは従来より25%多量に吹込むことが可能となり、顕著な燃焼性の改善になることが確認された。また、微粉炭の燃焼性へ及ぼす燃焼空気温度の影響は、微粉炭の揮発化過程に強く影響を及ぼし、揮発分の高い石炭ほどその影響が顕著となることが明らかとなった。燃焼空気温度が1050～1100℃の範囲で着火遅れが改善され、羽口先端近傍の燃焼率が大幅に向上するが、燃焼空気温度の上昇はチャーの燃焼促進には効果が少ないことがわかった。

## 審査結果の要旨

従来、微粉炭燃焼に関する研究は、ほとんどがボイラを対象としたものであり、鉄鋼用工業炉での微粉炭燃焼特性はほとんど解明されておらず、製鉄所における石油から石炭への燃料転換の大きな障害となっていた。著者は鉄鋼用工業炉の燃焼条件を加熱炉などの一般条件と高炉などの高温高速条件とに分類し、微粉炭の極めて複雑な燃焼特性を実験的に詳細に解明し、それぞれについて最適燃焼法を確立した。また、微粉炭燃焼の特徴を巧みに反映した計算シミュレーションモデルを導出することに成功した。本論文はそれらの研究成果をまとめたもので、全編7章より成る。

第1章は緒論である。

第2章では微粉炭の燃焼特性を理論的に検討するための1次元燃焼シミュレーションモデルを提案している。このモデルは、微粉炭の可燃分、灰分、水分、元素成分や粒度分布を考慮し、燃焼炉内の流動状態、混合などの多次元的な挙動を巧みに1次元化している。また、原炭の工業分析値または元素分析値より決定される揮発化係数で微粉炭の揮発化燃焼過程を評価する斬新な手法を提案している。本モデルは石炭種類、燃焼装置および燃焼条件が大幅に異なっても燃焼特性を比較的精度良く、かつ簡便に予測できることを示している。これは貴重な成果である。

第3章では実験装置および実験方法について説明している。また、燃焼性の定量的評価法や高温炉での火炎放射率測定法について述べている。

第4章では一般条件を対象とした微粉炭の燃焼特性を明らかにし、ガス、重油から微粉炭への燃料転換時の諸問題と対策について述べている。微粉炭燃焼では、着火遅れとNO<sub>x</sub>発生について注意を要することを指摘し、最適燃焼法を提案している。

第5章では一般条件を対象とした微粉炭と重油との中間的な燃料であるCOM燃料の燃焼特性を明らかにして、鉄鋼用工業炉におけるCOM燃料利用の可能性について考察している。

第6章は高温高速条件での微粉炭の燃焼性を明らかにし、高炉での最適燃焼法を提案していると同時に、これまで全く不明であった燃焼時間が10ミリ秒以下の微粉炭の燃焼過程を詳細に検討しており、貴重な知見を得ている。

第7章は総括である。

以上要するに本論文は、鉄鋼用工業炉における微粉炭の燃焼特性をはじめ定量的に解明し、最適燃焼法を確立し、石炭種類、燃焼装置および燃焼条件が大幅に異なっても、微粉炭の燃焼特性を簡便かつ精度良く予測できるシミュレーションモデルを導出することに成功したものであり、鉄鋼業ならびに化学工学の発展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。