

学 位 論 文 題 名

気流中に浮遊する微粉炭のレーザーによる着火と火炎伝播に関する研究

学位論文内容の要旨

近年の石炭火力発電所の増加につれ、炭種が増加するとともに、微粉炭バーナ及びボイラの設備や運用の高度化が図られてきている。このため、微粉炭ボイラの排出ガス特性や燃焼安定性に影響を及ぼす微粉炭の着火挙動の評価が、重要な研究課題となっている。

本論文では、実際の微粉炭バーナと同程度の高昇温速度で微粉炭を着火・燃焼させ、着火前後の微粉炭の挙動を観察する実験手法を示し、この手法を用いて微粉炭の着火、揮発分の放出、及び微粉炭粒子群の火炎伝播を評価することを目的とし、実験と解析を行った。以下に各章の要約を示す。

第1章「序論」では、まず微粉炭燃焼技術においてその着火挙動の研究の重要性を示した。次いで、微粉炭の着火機構、着火時の揮発分の放出挙動、及び微粉炭粒子群の着火と火炎伝播について、関連する研究状況を示した。微粉炭の着火挙動を論ずる上で、昇温速度は重要な因子であるが、一般的に用いられている電気炉による加熱では、実際の微粉炭バーナ（105～106K/s程度）よりも数オーダー低い昇温速度となる。これに対し、本論文のレーザーを用いた微粉炭着火実験では、微粉炭バーナと同程度の昇温速度が得られ、また、着火前後の微粉炭粒子、あるいは高濃度微粉炭粒子群の挙動を光学的にアクセスできる利点があることを示し、本研究の目的と意義を明らかにした。

第2章「微粉炭粒子の着火前後の熱挙動」では、上向き層流気流中に浮遊させた微粉炭にYAGレーザーをパルス状に照射する実験装置を製作し、微粉炭の着火・燃焼挙動を把握した。本研究のレーザー着火実験の昇温速度は約105～106 K/sのオーダーである。レーザーによる昇温後の着火、燃焼過程で、無煙炭（山西炭）及びカーボン粒子では、1つのブロードな発光輝度ピークが観察されるのに対し、高揮発分含有の歴青炭（Newlands 炭）では2つのブロードなピークが出現する。Newlands 炭で、最初のブロードな発光ピークが立ち上がるのは、レーザー照射開始から約2ms後である。高速度カメラによる粒子発光画像から、最初のブロードな発光ピークに対応して弱い気相燃焼、2つ目に対応して強い気相燃焼が観察される。これらの結果から、山西炭及びカーボン粒子はヘテロジニアス的に着火し、また、Newlands 炭は、レーザー照射終了直後には主として表面反応によるヘテロジニアス的な着火が生じ、引き続き揮発分の放出、気相燃焼が生じると推察された。そこで、種々の粒子径と主流ガスの酸素分圧について着火温度を求め、この着火温度で熱発生速度と熱損失がバランスしているとして、ヘテロジニアス着火理論に基づき反応速度パラメータを導出する手法を示した。

第3章「微粉炭粒子の着火前後の熱挙動」では、Newlands 炭の着火過程を検討した。粒子温度測定結果と着火前後での粒子内部の温度分布の解析結果とを比較し、レーザー照射後約1.5msでの粒子表面温度を着火温度とするのが妥当と評価した。着火確率（全実験回数に対

する着火回数の割合)が50%となる着火温度から算出される反応速度パラメータは、反応次数が酸素分圧に対して1次、活性化エネルギーが約50kJ/mol、頻度因子が約 $22\text{mol/m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{kPa}$ である。着火温度が大きいほど着火確率が増加するのは、微粉炭の反応速度パラメータが分布を持つことで説明できる。微粉炭の活性化エネルギーの分布が正規分布に従うと仮定し、頻度因子を固定して、着火温度から求めた活性化エネルギーから着火確率を推定した。推定値は実験値とよく一致し、本研究の方法で、微粉炭の供試量が微量であるにもかかわらず、反応速度パラメータを決定でき、また、着火確率の評価ができることを示した。

第4章「着火後の揮発分の放出挙動」では、レーザー照射により着火させたカーボン粒子及び微粉炭粒子を、発光輝度変化と高速度カメラにより観測し、揮発分の放出挙動を把握した。カーボン粒子及び無煙炭(山西炭)では、揮発分の放出は観測されない。Newlands 炭及び亜歴青炭(Skyline 炭)では、レーザーによる粒子の着火後、発光輝度は2つのブロードなピークを示すが、このピークに対応して揮発分の発光が観測される。2回目の揮発分の発光は、最初の発光よりも数倍強いが、見掛けの粒子温度には差がない。また、これらのピークの狭間では、揮発分の発光は見えない。Newlands 炭とSkyline 炭の揮発分の放出について、最初の放出ピークの主成分はタールであり、2回目の主成分は軽い炭化水素ガス、 H_2 及びCOの可燃ガスと推察された。粒子温度と発光輝度の変化から、複数成分反応モデルによりNewlands 炭の揮発分放出反応速度を導出した。揮発分を、成分A、Bの2つに分け、それぞれの放出速度に対して、活性化エネルギー及び頻度因子を得た。

第5章「微粉炭粒子群の火炎伝播」では、He-Neレーザーの散乱光と透過光の強度から着火位置での浮遊粒子濃度を計測する手法を示し、また、微粉炭粒子群にYAGレーザーを照射して着火、火炎伝播性能を検討した。本章では、Newlands 炭、半無煙炭(Collinsville 炭)、及び山西炭の3種類の微粉炭を供試した。これらは、燃料比は異なるが、いずれも粒子群の火炎伝播が観測された。同一の粒子濃度、照射レーザーエネルギー、酸素濃度の条件下で着火実験を繰り返し、レーザー加熱された粒子のみが着火する確率と、火炎伝播まで生じる確率をそれぞれ調べた。これから、粒径が小さいほど、粒子濃度が大きいほど、酸素濃度の大きいほど、火炎伝播確率が大きいことが示された。また、火炎伝播可能な下限粒子濃度が求められた。高速度カメラによる火炎画像から解析した火炎伝播速度は、粒子濃度が大きいほど増加するが、高粒子濃度では、増加傾向が緩やかになる。また、同じ粒径で比較したときの火炎伝播速度は、揮発分含有量の少ない微粉炭ほど小さいことを示した。

第6章「微粉炭バーナ設計への応用」では、本研究による微粉炭粒子群の火炎伝播に関する知見を、微粉炭バーナの設計に適用する場合について概説した。微粉炭粒子が火炎伝播可能な時の平均粒子間距離を火炎伝播距離と定義し、微粉炭バーナに供給する微粉炭の平均粒子間距離と比較して火炎伝播特性を評価した。Collinsville 炭(燃料比:4.6)は、Newlands 炭(燃料比:2.2)に比べて、同じ粒径では火炎伝播距離は約72%になり、また、同じ粒径分布で同じ火炎伝播確率を得るには、約2.6倍の濃度にする必要があると推察された。微粉炭バーナの出口流路を2重円筒で分割する構成について、微粉炭の供給条件と火炎伝播特性との関係を検討した。その結果、2重円筒の外周側に粒径の大きい微粉炭を分離して供給すると、内周円筒の火炎伝播特性を悪化させずに燃焼できると評価され、微粉炭バーナの着火と火炎伝播特性を向上できると推察された。

以上の研究成果から、従来不明確であった実際の微粉炭バーナと同程度の高昇温速度での微粉炭の着火と火炎伝播挙動が把握できた。また、本研究の知見を微粉炭バーナの設計に反映するための基礎技術を確立することができた。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 工 藤 一 彦

副 査 教 授 伊 藤 猷 一

副 査 教 授 菱 沼 孝 夫

副 査 教 授 石 井 邦 宜

学 位 論 文 題 名

気流中に浮遊する微粉炭のレーザーによる着火と火炎伝播に関する研究

近年の石炭火力発電所の増加につれ、炭種が増加するとともに、微粉炭バーナ及びボイラの設備や運用の高度化が図られてきている。このため、微粉炭ボイラの排出ガス特性や燃焼安定性に影響を及ぼす微粉炭の着火挙動の評価が、重要な研究課題となっている。

本論文では、レーザーにより実際の微粉炭バーナと同程度の高昇温速度で微粉炭を着火・燃焼させ、着火前後の微粉炭の挙動を観察する装置を新たに開発し、微粉炭の着火・火炎伝播特性の評価を目的とし、実験と解析を行っている。

本論文ではまず、レーザーによる昇温後の着火、燃焼過程で、無煙炭(山西炭)及びカーボン粒子では、1つのブロードな発光輝度ピークが観察されるのに対し、高揮発分含有の歴青炭(Newlands 炭)では2つのブロードなピークが出現することを明らかにすると共に、ヘテロジニアス着火理論に基づき反応速度パラメータを導出する手法を示している。またこのパラメータが分布を持つことで着火確率を推定できることを示している。

ついで、レーザー照射により着火させたカーボン粒子及び微粉炭粒子の揮発分の放出挙動を、発光輝度変化と高速度カメラにより観測し、複数成分反応モデルにより2つの揮発分成分の放出速度に対して、活性化エネルギー及び頻度因子を得ている。

また、微粉炭粒子群にレーザーを照射して着火、火炎伝播性能を検討し、これから、粒径が小さいほど、粒子濃度が大きいほど、酸素濃度の大きいほど、火炎伝播確率が大きいことが示されている。また、火炎伝播可能な下限粒子濃度が求められている。高速度カメラによる火炎画像から解析した火炎伝播速度は、粒子濃度が大きいほど増加するが、高粒子濃度では、増加傾向が緩やかになる。また、同じ粒径で比較したときの火炎伝播速度は、揮発分含有量の少ない微粉炭ほど小さいことが示されている。

最後に、本研究による微粉炭粒子群の火炎伝播に関する知見を、微粉炭バーナの設計に適用することを検討し、微粉炭バーナの着火と火炎伝播特性を向上できることを示している。

これを要するに、著者は、従来不明確であった高昇温速度での微粉炭の着火と火炎伝播挙動を把握し、これによって微粉炭バーナの着火・火炎伝播特性の向上をはかったものであり、燃焼工学および炉工学に貢献するところ大なるものがある。

よって著者は、北海道大学博士(工学)の学位を授与される資格あるものと認める。