

主 論 文 の 要 約

論文題目 微粉炭焚きボイラにおける灰生成および灰
付着の成長・脱落の挙動に関する研究

氏 名 佐藤 直樹

論 文 内 容 の 要 約

石炭は重要なエネルギー源の一つであり、主に火力発電所のエネルギー源の一つとして国内外で広く利用されている。近年、シェールガス採掘技術の革新により天然ガスの消費量が増加してはいるものの、石炭は長期的に廉価でありかつ埋蔵地に遍在性がないことから、安定供給エネルギー源として火力発電の重要な資源になり得るものと今後も判断できる。これまで利用されてきた石炭は主に瀝青炭であり、この瀝青炭は一般に高発熱量、高灰融点、低灰含有量等という特徴を有している。一方、近年は、瀝青炭よりも埋蔵量が多くかつ安価である亜瀝青炭や褐炭という低品位炭が注目されている。この低品位炭は、一般的に低発熱量、低灰融点、高灰含有量等という特徴を有しているため、ボイラ内での灰付着量の増加による伝熱阻害や流路の閉塞等、利用するに際し様々な問題が懸念されている。しかし、将来、多様な炭種に対応したボイラ設計や長期安定運転を遂行するためには、低品位炭利用時のこのような灰付着問題への対応や灰付着の予測技術の開発等が必要不可欠になる。加えて、CO₂の排出量をさらに抑制するためには、灰付着を抑制しボイラ効率をより向上させることが急務であり、これは最終的に地球環境保全や省エネルギー等に貢献しうるものである。

ボイラ内のガスやボイラチューブの表面温度、燃焼ガスや灰粒子の流れを直接かつ正確に計測することは困難であるため、通常、数値流体力学によるボイラ内部の数値シミュレーションが行われている。これは灰付着を予測する技術として有力な一つのツールではあるものの、ボイラ内の灰の挙動や付着現象は未だ正確に解明されておらず、したがって、微粉炭燃焼過程における灰生成挙動、灰付着・成長・脱落挙動の定量的解明とそれらのモデル化が必要となる。このような背景に鑑み、本研究では、微粉炭燃焼過程における灰生成挙動、灰付着・成長・脱落メカニズムの解明を主目的とし、灰生成挙動の解明に関して

は、基礎的な微粉炭燃焼実験により灰生成挙動に及ぼす炭種の影響を実験的に検討し、定量的かつ動力学的な灰生成モデルを提案する。つぎに、灰付着・成長・脱落現象に関しては、ボイラ雰囲気を模擬したラボ燃焼炉にて微粉炭を実際に燃焼させて灰付着実験を行い、伝熱管表面に付着した灰の断面分析による灰付着層の構造解析や灰組成の分析等から、灰の付着・成長・脱落メカニズムと灰の脱落現象の評価手法を提案する。

微粉炭燃焼過程における灰生成挙動の解明研究については、まず、石炭中の灰成分を炭素質に内包されている **Included Mineral (IM)** と単体で存在する **Excluded Mineral (EM)** とに分類する。つぎに、電気加熱式ドロップチューブ燃焼炉 (**DTF**) を用いて、炭種の異なる石炭を燃焼させ、燃焼率の異なるチャー粒子を採取する。採取した各チャー粒子は、樹脂で固化、断面を切断さらに断面研磨を行い、粒子断面の **Computer Controlled Scanning Electron Microscope (CCSEM)** 分析を行う。この分析により、燃焼過程における **IM** と **EM** の粒子数変化を計測する。結果として、燃焼過程中、**IM** は炭素質内で凝集、あるいは、炭素質から脱離して **EM** になるため、燃焼の進行とともに **IM** の個数は徐々に減少した。一方、**EM** の個数は、**IM** の脱離の効果のみならず熱衝撃による **EM** 自身の分裂によって増加した。また、この **IM** および **EM** の減少・増加傾向は炭種とりわけチャー粒子の構造に依存し、例えば、内側から膨らむバルーン状のチャー構造を有する石炭の場合は低灰融点炭ほど **IM** が凝集し易いこと、網目状のチャー構造を形成する石炭の場合は **IM** がチャー内部に取り込まれて脱離が起りにくくなるため **IM** の個数減少は緩やかでかつ脱離による **EM** の増加も緩やかになること等の傾向を得た。以上により、灰生成挙動における炭種の影響としてチャー構造の差異が重要なパラメータであることを明らかにした。

微粉炭燃焼過程における灰生成挙動は **IM** と **EM** それぞれの挙動が複雑に影響しているため、定量的な灰生成モデルを提案するためには、**EM** の分裂、**IM** の凝集・脱離の各速度を定量的に求める必要がある。そこで、微粉炭燃焼過程における灰粒子の分裂・脱離・凝集の各速度を定量的に評価するため模擬石炭を用いて先述と同様な実験を行った。本実験では、灰粒子としてカオリナイト粉末ならびに可燃成分にポリカーボネートを用い、**DTF** にて、カオリナイト粉末 (模擬 **EM**) の急速加熱実験ならびに模擬石炭の燃焼実験をそれぞれ行った。結果として、カオリナイト粉末の急速加熱実験より熱衝撃による **EM** の分裂速度を算出し、また、模擬石炭の燃焼実験より **IM** の凝集速度と炭素質からの脱離速度をそれぞれ算出した。また、**IM** と **EM** の粒子数変化を定量的に評価できる動力学モデルも提案した。さらに、このモデルを実際の微粉炭による燃焼結果に適用し、フィッティングからチャー構造の差異によって分裂速度、凝集速度および脱離速度が異なることも明らかにした。

つぎに、微粉炭焚きボイラにおける灰付着・生成・脱落挙動の解明を試みた。灰が付着しその付着層が成長して最終的に脱落するという現象は、灰粒子層の破壊が関係していると考えられる。そのため、灰粒子層の強度に関連する内部構造や灰組成の特徴を明らかにすることが重要となる。本実験では、まず、代表的な瀝青炭 1 種類に対して、実機ボイラの炉内温度とボイラチューブの温度条件を模擬した横型微粉炭燃焼炉で石炭の燃

焼実験を行い、その炉内へ模擬伝熱管を挿入することにより灰付着実験を行った。実験では、伝熱管表面温度の連続計測と灰付着層の成長・脱離挙動のビデオ撮影、さらには灰付着層の CCSEM による断面構造観察や組成分析を行った。結果として、伝熱管の表面温度は灰付着による熱抵抗の増加によって徐々に低下し、また、灰の脱落とともに急激に上昇した。採取した付着灰の断面観察によって灰層内の粒子充填率 (Particle packing fraction, PPF) を計測したところ、灰付着層は伝熱管近傍で粉体層を形成し、灰の成長に伴って灰粒子は溶融・凝集した焼結層を形成していた。さらに、灰の脱落は PPF が小さく、かつ、低灰融点を誘発する Fe 成分が相対的に少ない粉体層内で発生していることも明らかにした。

灰付着層の成長・脱落挙動に及ぼす炭種の影響を考察するため、瀝青炭、亜瀝青炭および褐炭の 5 種類の石炭に対し、先述したものと同様な実験を行った。結果として、高灰融点の石炭ほど灰の脱落の周期は短く、かつ、灰が脱落后の伝熱管表面の残存灰の厚さも厚くなっていた。高灰融点炭の場合、この厚い残存灰の熱抵抗によって、元の伝熱管表面温度まで回復はしなかった。一方、低灰融点炭の場合は、残存層は比較的薄いため、灰が脱落すれば元の伝熱管表面温度相当まで回復できた。灰付着層の内部構造は、高灰融点炭の場合は、厚い粉体層を形成し、逆に低灰融点炭の場合は薄い粉体層を形成した。粉体層の PPF は小さく相対的に強度が弱くなっているため、粉体層の厚さの差異が残存層の形成に影響しているといえる。特に、褐炭においては、灰融点を低下させて灰粒子同士の付着を強固にする Fe および Ca 成分の減少位置と灰の脱落する界面の位置とがよく一致しており、Fe および Ca 成分の減少による粒子同士の付着力の低下の相乗効果により灰の脱落が発生する可能性を示唆した。以上の結果に基づいて、炭種の差異による灰の成長と脱落メカニズムも提案した。

上述したように、灰の脱落は灰層の破壊によって発生すると考えることができるので、灰粒子層内に働く応力が灰の脱落に影響していると仮定し、灰層とボイラチューブの界面に働く引張応力とせん断応力の分布を弾性力学に基づいて構造解析した。灰は脆性材料であるため、最大主応力説に従った破壊の挙動を仮定すると、灰が脱落する時の最大主応力が破壊応力に相当する。破壊応力は低融点灰の石炭ほど大きくなり、灰粒子の溶融によって粒子同士の付着が強固になっている可能性を示した。また、灰粒子層の破壊が発生する位置は、灰層内の主応力が最大となる位置として推定でき、その灰の破壊はせん断応力または引張応力のどちらかが支配的として発生するものと推定できる。引張応力が支配的となる付着灰では灰層の剥離による剥がれの痕が確認され、一方、せん断応力が支配的となる灰の場合は剥がれの痕は確認できず灰の脱落挙動とよく一致した。これらの結果から、灰粒子層の構造解析は灰の脱落挙動の評価方法として有用な方法の一つであると考えられる。

本研究で得られた結果を以下に総括する。微粉炭焚きボイラにおける灰生成、灰付着・成長・脱落メカニズムを実験的に解明した。灰生成においては、EM と IM それぞれの挙動を考慮した動力学モデルを提案した。このモデルにより、EM と IM の挙動と炭種の影響を解明した。灰の付着・成長・脱落においては、層内の灰構造と灰組成の変化が灰の付着・

成長・脱落に関連することを明らかにし、炭種の差異による灰の付着・成長・脱落のメカニズムを提案した。さらに、灰の脱落挙動は灰層内に働く応力分布と関連があることを確認し、灰層の構造解析が灰の脱落挙動の有用な評価方法の一つであることを示唆した。今後、ボイラにおける燃料の多様化やさらなる高効率化のためには灰付着現象を正確に把握することが求められており、得られた本成果はそのためのボイラ設計や灰付着予測に貢献できるものである。