

主論文の要約

論文題目 石炭火力発電における灰溶融プロセスの高度化に関する研究(Study on advanced processes of coal ash fusion in coal fired power generation plants)

氏名 石賀 琢也

論文内容の要約

石炭は、2014年における日本の1次エネルギー供給量の26.3%を占めており、石油に次ぐ主要なエネルギー源になっている。日本の石炭販売量は、2014年に180 Mt程度に達し、その99%以上を豪州、インドネシア、ロシア、カナダ、米国をはじめとする世界各国から輸入している。また、石炭販売量の約60%が発電用および産業用の石炭火力発電の燃料として用いられている。石炭火力発電用の石炭消費量は、2014年に110 Mtに達し、2001年以降で最も多くなっている。石炭火力発電で副産物として発生する石炭灰量も増加傾向にあり、2014年に12 Mtを超えている。石炭灰の処理状況については、約7割がセメント向けに、他には土木、建築および農林水産などに有効利用されている。その一方で、0.2~0.4 Mt/年程度の石炭灰が、管理型廃棄物として埋め立て処分されている。また、石炭を用いる場合の1 kWh当たりのCO₂排出量は、石油や天然ガスと比べて1.5~2倍多い。以上のことから、石炭の利用を継続するためには、性状の異なる様々な炭種に対応できる燃焼技術、石炭灰の用途拡大と有効利用の促進およびCO₂排出削減に繋がる高効率化によって環境負荷を低減することが不可欠となっている。そこで本研究では、石炭火力発電で発生する石炭灰を溶融スラグ化し、コンクリート骨材(天然砂や砂利の代替)や繊維材料(ロックウール代替)といった新たな用途への有効利用に繋げる灰溶融プロセスを構築し、このプロセスを実現するため灰溶融技術の開発を目的とした。

第1章では、日本への導入に適した灰溶融プロセスを選定した。現在の日本の石炭火力発電の大部分を占める微粉炭燃焼ボイラでは、ボイラから排出された石炭灰を溶融スラグ化するための石炭灰溶融炉を別個に設置する灰溶融プロセスを選定した。これは、ボイラ

本体の改造範囲が少ないこと、およびボイラ熱回収部のスラッシングや燃焼排ガス中のNOx上昇といった現行のボイラを運用継続する上でのリスクが低いことによる。このプロセスで用いる灰溶融方式には、灰溶融に必要な燃料コストが最も低い石炭焚きの巡回燃焼式を選定した。一方、現行の微粉炭燃焼ボイラよりも発電効率の向上が期待され、かつ、石炭灰を溶融スラグ化できるプロセスである IGCC(Integrated Coal Gasification Combined Cycle；石炭ガス化複合発電)も、日本に適する灰溶融プロセスとして選定した。IGCC は、1773~1973 K(1500~1700 °C)級のガスタービンと組み合わせた商用機的设计値として、CO₂排出量を現行の微粉炭燃焼ボイラよりも約 20 %の低減が可能と見積もられている。今後、IGCC を国内に普及させるためには、ボイラで用いられている灰溶流点の高い炭種も含め、幅広い炭種に対応できる石炭ガス化炉の開発が求められている。石炭ガス化炉には、筆者も開発に携わってきた一室二段の酸素吹きガス化方式を選定した。

まず、第 2 章および第 3 章では、微粉炭燃焼ボイラで発生する石炭灰のうちフライアッシュを溶融スラグ化する灰溶融プロセスを研究対象とした。ボイラと別個に設置する石炭灰溶融炉の灰処理量向上策および繊維化に適した溶融スラグ出滓技術を検討した。

第 2 章では、石炭灰溶融炉の灰処理コストの低減を目的として灰処理量の向上策を検討した。石炭焚きの巡回燃焼式石炭灰溶融炉において石炭灰(フライアッシュ)の処理量を高めた場合に回収した溶融スラグの内訳を調べたところ、骨材や繊維材料に適用可能な非晶質のガラス状スラグの含有率が低下することが分かった。この理由は、灰処理量を高めると溶融スラグ層の表面を流れる溶融スラグの移動速度が速くなり、炉内の加熱時間が不足しているためである。そこで、巡回燃焼式の石炭灰溶融炉の直下に、溶融スラグの加熱時間を確保するためのスラグベッド炉を設置する新たな石炭灰溶融炉を開発した。スラグベッド炉を流下する溶融スラグをバーナで加熱し、加熱時間を確保する観点でスラグベッド炉の長さを選定した。巡回燃焼式石炭灰溶融炉の直下にスラグベッド炉を設置した溶融炉を試作し、灰/石炭の重量比 4.6 でガラス状スラグの含有率 100 %を確保できることを灰溶融試験で確認した。この試験結果から溶融スラグの炉内滞留時間を推定し、灰処理量を目標値である灰/石炭の重量比 5 まで高めることが可能であると評価した。

第 3 章では、溶融スラグからロックウールなどの繊維材料を製造するための溶融スラグ出滓技術を検討した。繊維化には、粘度 1 Pa・s の溶融スラグを液柱状に出滓することが求められる。そこで、石炭灰溶融スラグの粘度に対する温度の相関を実測し、粘度 1 Pa・s となる溶融スラグの温度を既往の実験式を用いて推算した。これは、粘度 1 Pa・s となる溶融スラグの温度が測定上限の 1500~1600 °Cを超えるためである。次に、第 2 章で開発したスラグベッド炉先端のスラグ出滓部を改良し、繊維製造に適する炉の構造を新たに考案した。スラグ出滓部に溶融スラグを充填する窪み(スラグ溜まり部と呼ぶ)を設け、スラグ溜まり部の底面に円孔状の出滓孔を設ける。このスラグ溜まり部に流入する溶融スラグのヘッド圧で、底面の出滓孔より液柱状で出滓させるコンセプトである。このコンセプトを確認するために石炭燃焼量 40 kg/h の繊維化用石炭灰溶融炉を試作し、粘度 1 Pa・s に相

当する 1833 K に加熱した溶融スラグをスラグ出滓部に供給し、底面の出滓孔より液柱状で安定に出滓できることを灰溶融試験で実証した。

つぎに、第 4 章および第 5 章では、IGCC の中核機器の一つである石炭ガス化炉のスラグタップ開口部の加熱技術について検討した。溶融スラグの出滓口であるスラグタップ開口部の加熱技術の効果とその妥当性を、EAGLE (coal Energy Application for Gas, Liquid and Electricity ; 多目的石炭ガス製造試験設備) と呼ばれる石炭処理量 150 t/日のパイロット設備に設置されている石炭ガス化炉における試験で確認した。この技術は、国内の微粉炭燃焼ボイラで多く用いられている灰溶流点の高い炭種も含め、幅広い炭種に対応できる石炭ガス化炉に不可欠な技術と考えられる。

第 4 章では、融点降下剤や助燃燃料を用いることなく、石炭ガス化炉のスラグタップ開口部を加熱する技術とその設計手法を開発した。この加熱技術は、石炭のガス化によって生じ、スラグタップ開口部を下降する高温の生成ガス(主成分 CO 、 H_2)を、スラグタップ開口部の直下で燃焼させるものである。生成ガスの燃焼に必要な酸素を、スラグタップ開口部の直下に対向させて設置する 2 本の加熱ノズルより供給し、開口部の下面側を加熱する。この加熱技術を石炭処理量 150 t/日の石炭ガス化炉に導入するため、3 次元熱流動解析で加熱ノズルの設置高さや酸素の供給流量の適正值を選定した。スラグタップ開口部の加熱効果の監視手段として、スラグタップ開口部内のガス温度に代わり、スラグタップ直下ガス温度を用いる運用方法を考案した。この加熱技術を石炭処理量 150 t/日の石炭ガス化炉に適用し、溶融スラグの安定出滓に必要な条件として解析で選定した加熱ノズルの設置高さ、および酸素の供給流量の妥当性を石炭ガス化試験で検証した。また、スラグタップ直下ガス温度をスラグタップ加熱効果の監視に用いる運用方法の有効性も合わせて確認した。

第 5 章では、第 4 章で開発した石炭ガス化炉のスラグタップ開口部の加熱技術を用い、灰溶流点 1783 K と既往の石炭ガス化炉で適用実績の無い灰溶流点を持つ炭種について、融点降下剤や助燃剤を用いずに溶融スラグの安定流下が可能であることを石炭処理量 150 t/日の石炭ガス化炉で実証した。まず、灰溶流点の異なる他の炭種のガス化試験、および 3 次元熱流動解析で得た結果をもとにスラグタップ直下ガス温度の目標値を選定し、この目標温度を満足する加熱ノズルの酸素流量を解析で選定した。つぎに、灰溶流点 1783 K の炭種を用いた連続 264 時間のガス化試験において、上述の試験と解析で選定した加熱ノズルの酸素流量にてスラグタップ直下ガス温度を保持し、溶融スラグの安定流下が可能であることを確認した。この結果より、本研究で開発したスラグタップ開口部の加熱技術を用いることで、灰溶流点 1783 K の炭種を石炭ガス化炉に適用可能であることを実証した。

最後に、第 6 章では第 1 章から第 5 章の検討結果を総括した。

以上のように、石炭火力発電所で発生する石炭灰を溶融スラグ化し、骨材や繊維材料への有効利用に繋げるための灰溶融プロセスを実現するための灰溶融技術を開発した。今後、本技術の活用により石炭灰の有効利用の促進、および日本国内への IGCC の普及による石炭火力発電の高効率化の一助になることを期待する。