

氏名（本籍）	坂田太郎（広島県）
学位の種類	博士（工学）
学位授与番号	甲第 301 号
学位授与日付	平成 18 年 3 月 25 日
専攻	環境エネルギーシステム専攻
学位論文題目	加圧流動層燃焼ボイラの伝熱特性評価に関する研究 (Studies on heat transfer characteristics in pressurized fluidized bed combustion boiler)
学位論文審査委員	(主査) 教授 守 富 寛 (副査) 教授 熊 田 雅 彌 教授 安 里 勝 雄 助教授 神 原 信 志

論文内容の要旨

加圧流動層燃焼ボイラ(PFBCボイラ)は、近年石炭火力の需要増加にともない、高効率、低公害性なプラントとして開発されてきた。PFBCボイラでは90%以上の伝熱面積が層内に配置されており、層内の伝熱特性を精度良く予測できる手法の確立が設計上極めて重要である。また、流動層内の伝熱管は流動媒体により局所的に摩耗するため、摩耗の可能性のある箇所には伝熱管に保護カバーを設置したり、密に設置した伝熱管の熱吸収調整のためにカバーを設置したりしている。そのため、これらカバー付伝熱管の伝熱特性についても精度良く予測することがプラントの伝熱設計する上で不可欠となっている。さらに、PFBCボイラでは部分負荷運転に対しては流動層高を下げ、伝熱管群の上部を層外に露出させて伝熱量を抑制した運転が行われるが、この層上部での伝熱がガスタービン入口温度と出力特性に強く影響することから、層外管熱伝達率の精度良い予測も極めて重要な課題となっている。しかしながら、加圧条件にあるPFBCボイラの伝熱特性、特に実機規模の設計に適用できる有用な予測式はないのが実情であり、本研究では、以下の3項目について検討し、実機のPFBCボイラの設計手法の確立を図った。

- (1) 加圧流動層層内管での管外熱伝達率
- (2) 加圧流動層カバー付伝熱管の伝熱特性
- (3) 加圧流動層層外管の管外伝熱率

(1)に関しては、管外熱伝達率の予測式を確立するために、4MWth PFBC試験設備にて伝熱特性の実測データを解析して管外熱伝達率の実測値を得るとともに、15MWth PFBCや70MWeのPFBCデータについても解析対象とした。さらに最終的な管外熱伝達率の予測式の適用範囲を拡張するために常圧流動層である350MWの常圧FBCボイラの実測データも対象とした。以上の各種規模の実測データに基づく管外熱伝達率を予測する式としては、基本的な伝熱メカニズムからモデル化を図った。本研究では加圧下での粒子から伝熱管への熱移動に対し、Martinの提案している式を基礎としたが、この式そのままでは上述の試験設備および実機プラントのボイラの管外熱伝達率を十分に説明することはできない。また、管外熱伝達率の実測値を運転圧力について

整理すると、各種試験設備の流動層の空塔速度に強く依存しているが、取り上げた基礎式では、空塔速度の影響は直接的に含まれてはならず、空塔速度の予測式への組み込みを検討した。その結果、Martinの式の粒子対流熱伝達率の項を無次元化した空塔速度の平方根で補正した予測式により、各種実測値を矛盾なく説明でき、実機の設計に適用した。

(2)に関しては、カバー付伝熱管の伝熱特性を、2MWthの試験設備の試験結果から検討し、各総括熱伝達率と管内熱伝達率、管壁の熱伝達率の計算値からカバーと伝熱管のギャップ内粒子層有効熱伝導度を求め、素管ループと各カバー付管の特性を比較評価するとともに、理論式による粒子層有効熱伝導度の推算式を検討した。充填層の有効熱伝導度の理論式としては、Kunii and Smithの式における形状係数を試験結果から補正係数として与え、カバー付伝熱管におけるギャップ部粒子層有効熱伝導度の予測式とし、実測データを矛盾なく説明できることを確認した。

(3)については、15MWth PFBC試験設備での低負荷運転における層上スプラッシュゾーンのガス温度分布データを用いて、層上スプラッシュゾーンでの管外熱伝達率を解析・評価した。一方、ここでの伝熱特性の基礎式としては、Byamらの予測式を補正して実測データと比較した。その結果、この予測式により流動層高さ方向のスプラッシュゾーンガス温度プロファイルを良好に再現できることを明らかにした。さらに、250MWe PFBCボイラの運転データにも適用し、15MWth PFBCと同様にスプラッシュゾーンガス温度プロファイルが精度良く再現されていることを確認した。

論文審査結果の要旨

加圧流動層燃焼ボイラ(PFBCボイラ)は、近年石炭火力の需要増加に伴い、高効率、低公害性なプラントとして開発されてきている。PFBCボイラの伝熱面設計では、伝熱面積が過剰となる場合も、不足する場合と同様に、性能低下となることから、精度のよい設計が求められている。また、流動層内の伝熱管は流動媒体により局所的に摩耗するため、摩耗の可能性のある箇所には伝熱管に保護カバーを設置している。また、摩耗対策上、密に設置した伝熱管の熱吸収調整のためにカバーを設置する場合がある。そのため、これらカバー付伝熱管の伝熱特性を精度良く予測する推算式がプラントの伝熱設計する上で不可欠である。さらに、PFBCボイラでは部分負荷運転時には、流動層高を下げ、伝熱管群の上部を層外に露出させて、熱交換量を抑制するが、このときの層外管熱伝達率がガスタービン入口温度と出力特性を支配することからの精度良い予測式が不可欠となる。しかしながら、加圧条件にあるPFBCボイラの伝熱特性については、特に実機規模の設計に有用な予測式がないのが実情である。

本論文は、PFBCボイラの伝熱性能に影響する層内管外熱伝達率、カバー付伝熱管の伝熱特性、および層外スプラッシュゾーン管の管外伝熱率に関する予測式を確立するために、各種PFBC試験設備にて伝熱特性のデータを取得し、これを解析して管外熱伝達率の実測結果を得ている。層内伝熱管での管外熱伝達率予測式としては、加圧下での粒子から伝熱管への熱移動に対し、基本的な伝熱メカニズムに基づく既往の式を基礎とし、粒子対流熱伝達率の項を無次元化した空塔速度の平方根で補正した予測式を提案している。この式により、各種試験設備およびプラントのボイラの管外熱伝達率実績値を矛盾なく説明することができ、実機に適用できる工学的価値の高い予測式を得ている。

また、カバー付伝熱管の伝熱特性については2MWthの試験設備の試験結果から検討し、各総括熱伝達率と管内熱伝達率、管壁の熱伝達率の計算値からカバーと伝熱管のギャップ内粒子層有効熱伝導度を求め、素管ループと各カバー付管の特性を比較評価するとともに、理論的な粒子層有効熱伝導度の予測式を提案し、実測データを矛盾なく説明できることを確認している。さらに、15MWth PFBC試験設備での低負荷運転における層上スプラッシュゾーンのガス温度分布データからスプラッシュゾーンの管外熱伝達率を解析し、実測データに適用可能な予測式を提案するとともに、流動層高さ方向のスプラッシュゾーンガス温度プロファイルを良好に再現できること、さらに250MWe PFBCボイラの運転データに対してもスプラッシュゾーンガス温度プロファイルを精度良く再現できることを確認している。

最終試験結果の要旨

本論文の研究対象とする加圧流動層(PFBC)ボイラの概要として、流動層ボイラの2つの型式、バブリング型と循環型の流動層ボイラの特徴、商用PFBCのシステムの一例として、中国電力大崎発電所の250MWe PFBCシステムの特徴の説明がなされた。発表では論文を構成する次の3つのテーマのうち(1)、(2)のテーマを中心に説明がなされたが、質疑応答では(3)についても行われた。

- (1) 加圧流動層層内管での管外熱伝達率
- (2) 加圧流動層カバー付伝熱管の伝熱特性
- (3) 加圧流動層層外管の管外伝熱率

本論文の内容は、スケールの異なる種々のPFBCボイラの運転データ解析・評価し、既往のPFBC伝熱特性予測手法を検証して、その問題点を指摘した上で、精度の高い新しい予測モデルを提案している。これだけ多くの試験設備に基づくPFBCの伝熱モデルはこれまで無く、この論文の意義は非常に大きい。

これまでの研究業績および論文内容を中心とした事項について口頭試験を行った結果、合格と認められた。