

学位論文題名

微粉炭ボイラ火炉における燃焼と伝熱の予測に関する研究

学位論文内容の要旨

微粉炭焚きボイラから排出される窒素酸化物(NO_x)は、この30年にわたり注目されてきた。1970年代の初めには、微粉炭焚きボイラからは約600ppmの NO_x を含む排ガスが排出されており、 NO_x による大気汚染の原因になっていた。1973年と1979年における二度のオイルショックのために石油から石炭への燃料転換が必要となり、石炭の利用拡大には低公害で燃焼する技術が必要となった。

石炭の燃焼により生成する NO_x には二種類ある。1つめは、燃料中のN分が酸化して生じるフューエル NO_x である。もう一つは、高温状態で空気中の窒素が酸化して生じるサーマル NO_x である。石炭焚きボイラから生じる NO_x の大部分がフューエル NO_x といわれており、フューエル NO_x を低減する方法が数多く研究された。これらの研究から、バーナ部で空気不足で燃焼した後、不足空気を混ぜて完全燃焼する二段燃焼法が開発された。二段燃焼法により30%程度 NO_x を低減した。

しかし、1987年までに環境規制が強化されると、二段燃焼法だけでは NO_x の環境規制値を満足できなくなり、ボイラに脱硝装置を設ける必要があった。そこで、低 NO_x バーナの使用、リバーニングなどの新しい方法が開発されてきた。

京都で開催された第三回気候変動枠組条約締結国会議(通称COP3)以降、 NO_x だけではなく燃焼排ガス中の CO_2 の削減も注目されている。石炭は、含まれる炭素の割合が他の燃料に比べて高いために CO_2 の発生量も多いが、石炭の産地は世界中に分布しており、エネルギーの安定供給の観点から石炭の使用は必要である。石炭の燃焼による CO_2 の発生量を低減するために、効率の高い燃焼方法や、効率の高い発電方法の開発が必要である。

微粉炭焚きボイラでは、実機が大型であるために、同じ規模の装置を用いた試験が困難である。そのために、従来は要素試験を積み重ねて性能を予測してボイラを設計していた。ボイラの効率向上のためにも、また設計時間短縮のためにも数値解析による性能予測技術が求められている。

微粉炭焚きボイラの燃焼、伝熱特性を予測するために多くの基礎実験やモデル開発が行われている。従来の研究では、石炭中のチャーの酸化反応とガス化反応速度は別々に測定されていた。また、ガス化反応速度は、チャーと窒素に CO_2 や H_2O を混合させたガスを用いて測定していた。しかし、酸素が共存する燃焼場で測定した反応速度と、窒素雰囲気中で測定した反応速度は異なることが報告されており、ガス化反応についても酸素が共存する場で測定する必要があった。

また、 NO_x の反応についても多くの研究がなされている。一般には、揮発分燃焼過程においてはFenimoreらの提案した NO_x の反応モデルが受け入れられている。このモデルでは、揮発分燃焼過程でシアンやアンモニアが生じ、この一部分が酸化して NO_x になる。しかし、炭化水素ラジカルが NO_x の反応に重要であるとの報告があり、炭化水素ラジカルを考慮した反応モデルの構築が必要であった。

石炭燃焼モデルや NO_x 反応モデルを組込んだ火炉の乱流燃焼解析プログラムが、多くの研究機関などで開発されている。これらのプログラムには、石炭燃焼モデル、ガス燃焼モデル、乱流モデル、輻射・対流伝熱モデルなどを組込んでいる。しかし、従来の解析プログラムで CO_2 、 O_2 、 NO_x などのガス濃度を予測できるものは少なかった。さらに、 CO や HCN などの中間生成物を予測できるプログラムはなかった。また、ガス濃度だけではなく燃焼率やガス温度も精度よく解析する必要があるが、検

証が十分ではなかった。本研究では、精度の高い石炭燃焼モデルと NOx 反応モデルを開発し、ボイラの設計に使用する乱流燃焼解析プログラムを開発することを目的とする。

第1章では、石炭燃焼を取り巻く社会的な情勢、ボイラに要求される性能、ボイラ火炉の数値計算の必要性について説明する。

第2章では、燃焼温度、空気比、石炭種を変えた実験データを基に、表面積の評価方法、ガス化反応の影響度合い、酸化反応とガス化反応の酸素の共存する雰囲気での反応速度について検討し、微粉炭焚きボイラ火炉の解析に適した燃焼モデルを提案した。微粉炭焚きボイラの運用条件では、石炭の約10%がガス化反応により燃焼することを示した。

第3章では、高温の燃料過剰領域において、チャーのガス化反応により生成する炭化水素ラジカルによる NOx 還元反応をモデル化することで、低 NOx 燃焼に重要である空気比の低い条件での予測精度を高めた NOx 反応モデルを提案した。本モデルは、約100種類の異なる条件で、平均誤差17%以下で NOx 濃度を予測できることを示した。

第4章では、第2章と第3章で提案した石炭燃焼モデルと NOx 反応モデルを組み込んだ、乱流燃焼解析プログラムを開発し、小型乱流燃焼炉で測定したガス濃度と解析によるガス濃度を比較することで、本プログラムは、 O_2 、 CO_2 、NOx などの主要なガス濃度だけではなく、CO や HCN などの中間生成物も定性的に予測可能であることを確認した。さらに、ガス化反応のモデルを入れた場合と入れない場合の計算結果を比較することで、低 NOx 燃焼の解析にはガス化反応のモデルが必要であることを示した。

第5章では、開発した乱流燃焼解析プログラムを、ボイラ形状、ボイラ負荷、石炭種の異なる23の実機運用条件で検証し、高い精度で実機の性能を予測できることを確認した。火炉出口 NOx 濃度の予測誤差は $\pm 15\%$ 以下であった。火炉出口ガス温度の予測誤差は $\pm 30^\circ\text{C}$ 以下であった。

第6章では、本研究で得られた成果をまとめて示す。

これらの研究により、従来予測できなかった NOx や火炉出口ガス温度などを予測可能であり、実機ボイラの設計に使用可能な乱流燃焼解析プログラムが完成した。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 工 藤 一 彦
副 査 教 授 藤 川 重 雄
副 査 教 授 池 川 昌 弘
副 査 教 授 藤 田 修

学 位 論 文 題 名

微粉炭ボイラ火炉における燃焼と伝熱の予測に関する研究

微粉炭焚きボイラから排出される窒素酸化物(NO_x)は、この30年にわたり注目されてきた。また1973年と1979年における二度のオイルショックのために石油から石炭への燃料転換が必要となり、石炭の利用拡大には低公害で燃焼する技術が必要となった。

燃焼により生成する NO_x にはフューエル NO_x とサーマル NO_x があるが、石炭焚きボイラから生じる NO_x の大部分がフューエル NO_x といわれており、フューエル NO_x を低減する方法が数多く研究された。これらの研究から、二段燃焼法が開発30%程度 NO_x が低減された。しかし、1987年までに環境規制が強化されると、二段燃焼法だけでは NO_x の環境規制値を満足できなくなり、低 NO_x バーナの使用、リバーニングなどの新しい方法が開発されてきた。

京都で開催された第三回気候変動枠組条約締結国会議(通称COP3)以降、 NO_x だけではなく燃焼排ガス中の CO_2 の削減も注目されており、石炭の効率の高い燃焼方法の開発が必要である。

微粉炭焚きボイラでは、実機が大型であるために、同じ規模の装置を用いた試験が困難であり、数値解析による性能予測技術が求められている。微粉炭焚きボイラの燃焼、伝熱特性予測に関する従来の研究では、石炭中のチャーの酸化反応とガス化反応速度は別々に測定されていた。また、ガス化反応速度は、チャーと窒素に CO_2 や H_2O を混合させたガスを用いて測定していた。しかし、酸素が共存する燃焼場で測定した反応速度と、窒素雰囲気中で測定した反応速度は異なることが報告されており、ガス化反応についても酸素が共存する場で測定する必要があることがあった。

また、 NO_x の反応については、一般には、揮発分燃焼過程においてはFenimoreらの提案した NO_x の反応モデルが受け入れられている。このモデルでは、揮発分燃焼過程でシアンやアンモニアが生じ、この一部分が酸化して NO_x になる。しかし、炭化水素ラジカルが NO_x の反応に重要であるとの報告があり、炭化水素ラジカルを考慮した反応モデルの構築が必要であった。

石炭燃焼モデルや NO_x 反応モデルを組込んだ火炉の乱流燃焼解析プログラムが、多くの研究機関などで開発されている。しかし、従来の解析プログラムで CO_2 、 O_2 、 NO_x などのガス濃度を予測できるものは少なかった。さらに、 CO や HCN などの中間生成物を予測できるプログラムはなかった。また、ガス濃度だけではなく燃焼率やガス温度も精度よく解析する必要があるが、検証が十分ではなかった。本研究では、精度の高い石炭燃焼モデルと NO_x 反応モデルを開発し、ボイラの設計に使用する乱流燃焼解析プログラムを開発することを目的としている。

第1章では、石炭燃焼を取り巻く社会的な情勢、ボイラに要求される性能、ボイラ火炉の数値計算の必要性について説明している。

第2章では、燃焼温度、空気比、石炭種を変えた実験データを基に、表面積の評価方法、ガス化反応の影響度合い、酸化反応とガス化反応の酸素の共存する雰囲気での反応速度について検討し、微粉炭焚きボイラ火炉の解析に適した燃焼モデルを提案している。微粉炭焚きボイラの運用条件では、石炭の約10%がガス化反応により燃焼することを示している。

第3章では、高温の燃料過剰領域において、チャーのガス化反応により生成する炭化水素ラジカルによるNO_x還元反応をモデル化することで、低NO_x燃焼に重要である空気比の低い条件での予測精度を高めたNO_x反応モデルを提案している。本モデルは、約100種類の異なる条件で、平均誤差17%以下でNO_x濃度を予測できることを示している。

第4章では、第2章と第3章で提案した石炭燃焼モデルとNO_x反応モデルを組込んだ、乱流燃焼解析プログラムを開発し、小型乱流燃焼炉で測定したガス濃度と解析によるガス濃度を比較することで、本プログラムは、O₂、CO₂、NO_xなどの主要なガス濃度だけではなく、COやHCNなどの中間生成物も定性的に予測可能であることを確認している。さらに、ガス化反応のモデルを入れた場合と入れない場合の計算結果を比較することで、低NO_x燃焼の解析にはガス化反応のモデルが必要であることを示している。

第5章では、開発した乱流燃焼解析プログラムを、ボイラ形状、ボイラ負荷、石炭種の異なる23の実機運用条件で検証し、高い精度で実機の性能を予測できることを確認している。火炉出口NO_x濃度の予測誤差は±15%以下であった。火炉出口ガス温度の予測誤差は±30℃以下であった。

第6章では、本研究で得られた成果をまとめている。

これを要するに著者は、石炭焚きボイラ火炉におけるNO_xや火炉出口ガス温度などを従来より高い精度で予測可能な解析手法を開発し、実機ボイラの設計に使用可能な乱流燃焼解析プログラムとして完成させており、熱・環境工学上有益な多くの新知見を得たものであり、熱・環境工学の進歩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。