

学位論文題名

# 噴流層の粒子流動特性と石炭ガス化装置への応用

## 学位論文内容の要旨

噴流層は、固体粒子を充填した容器底部より流体を噴出させて、上向き的高速流体束により、粒子を噴流化して規則的な循環運動をさせるものである。流動層では安定な流動状態が得られ難い粗粒子も、安定に流動化できる特徴を有する。噴流層は、穀類、スラリー状物質の乾燥、肥料の造粒、粒状物質のコーティングなどに使用されているが、種々の物質が対象になっており、噴流層内の粒子流動特性は、測定法も確立されていないので、未だ完全には把握されていない。本研究は、噴流層における粒子流動特性を詳細に検討してモデル化すると同時に、その特性に基づいて噴流層を応用した高効率の石炭ガス化装置を開発し、同装置に関するシミュレーションを行った一連の研究を纏めたものである。

本論文は6章より構成されている。

第1章では、噴流層に関して、これまでの研究の概要と、石炭ガス化装置に応用するために、石炭ガス化の基礎と、ガス化装置の開発状況を概説した。噴流層は、1950年代から粒子の噴流化条件など多くの研究がなされてきた。しかし、噴流層の粒子流動の特性は、測定が困難であるので、未だ明らかでない点が多々あることを述べた。

石炭ガス化装置については、その歴史を概説し、現在、石炭ガス化複合発電が、エネルギーの有効利用の点から有望視され、研究されていることを述べ、本研究の位置づけと目的を記した。

第2章では、噴流層の粒子流動についての実験結果を記述した。光プローブを利用して粒子流動を精密に測定し、噴流層のアニュラス(環状部)からスパウト(噴流部)への粒子流入は、噴流層底部の形状に関係なく、層上下全域で流入するが、層の下部ほど多く流入することを明らかにした。また、噴流層を反応装置に応用する場合には、ガス流速の大きいジェット噴流層の粒子流動特性が必要となる。著者は、新たに開発した圧電プローブを用いて、粒子流動を測定した結果、ジェット噴流層スパウト頂部のファウンテンにおける粒子速度分布は、軸を中心とするガウス分布となること、中心部は、上昇する粒子により粒子密度が高く、落下する粒子は、半径方向に均一に分散することを明らかにした。さらに、ジェット噴流層の粒子循環量は、ガス流速に比例し、アニュラスからスパウトへの流入は、層上部の方が多いこと、ガス流速が大きいほど完全混合に近づくことを実測により明らかにした。

第3章では、噴流層における粒子流動を考察するために、層がアニュラスとスパウトから構成されると考え、両部分における粒子、ガスの質量保存式と運動方程式に基づいたモ

デルを構築した。数値計算の結果、モデルにより軸方向の圧力分布を非常に良く予測できた。また、圧力分布に基づいて、粒子速度や粒子流量も、このモデルによる計算から予測可能であることを見出した。

第4章では、噴流層を応用した石炭ガス化装置の開発について述べた。噴流層と流動層を組み合わせた2段ガス化装置と、噴流層2つを直列に連結した2段噴流層ガス化装置を開発した。開発した2つの装置の概要と運転結果について記述した。

まず、噴流層と流動層を組み合わせた2段ガス化装置は、石炭処理量が5 kg/hで、酸素と水蒸気をガス化剤とする連続式ガス化装置である。ガス化反応は、主に下段の噴流層で起こり、噴流層に酸素を供給すると、1000 °C以上の高温運転が可能であった。その結果、最高11 MJ/Nm<sup>3</sup>の中カロリーガスが得られ、小型装置であるが、冷ガス効率も最高で0.77と好成績を達成した。しかし、上段流動層の温度は低く、ここではガス化が起こらないので、炭素転化率は最高で0.82であった。

つぎに、炭素転化率を上げるために、2段目も噴流層とする2段石炭ガス化装置を開発した。この装置では、上段にバップルを設置してチャーの流出を抑えた結果、粒子滞留量が増加して、ガス化成績が向上した。バップルは非常に効果的であり、スパウトのガス流速がジェット噴流層のように高速でも、粒子の飛び出しを抑制するだけでなく、融着性チャーがバップルに衝突して破壊され、クリンカーの生成も防止できることが認められた。本ガス化装置の上段噴流層は、最高1050°Cで運転でき、8kg/h連続運転が可能であった。小型実験装置であるにもかかわらず、最高性能として、炭素転化率0.95、冷ガス効率0.78の成績を得た。これは他の方式の大型装置に匹敵する値であり、噴流層の技術が高効率のガス化装置として有望であることを確認した。

第5章では、本研究で開発した噴流層ガス化装置の数値モデル化を試みた。まず、実験に使用した太平洋炭の熱分解とガス化速度を精密に測定して、これに基づいた反応速度式を導出した。ついで、この速度式と噴流層・流動層2段ガス化装置内の熱および物質収支の式に基づいて数値解析を行い、下段の噴流層のガス化特性をシミュレートした。計算結果は、完全混合モデルによって、ガス化反応をシミュレートでき、層内温度や、冷ガス効率、ガス組成などガス化特性の酸素供給量、水蒸気供給量などの操作因子に対する依存性を、十分予測できることを明らかにした。2段の噴流層からなるガス化装置に対しては、2個の直列の完全混合槽と考えるモデル化を試みた。計算結果は、操作因子に対するガス化反応の傾向をシミュレートできることを示した。

第6章は、本研究の総括である。

# 学位論文審査の要旨

主 査 教 授 伊 藤 博 徳  
副 査 教 授 竹 澤 暢 恒  
副 査 教 授 千 葉 忠 俊  
副 査 教 授 篠 原 邦 夫  
副 査 助 教 授 上 牧 修

学 位 論 文 題 名

## 噴流層の粒子流動特性と石炭ガス化装置への応用

噴流層は、固体粒子を充填した容器底部から流体を噴出させて、上向き的高速流体束により粒子を噴流化して、規則的に粒子を循環運動させるものである。流動層では安定な流動状態が得られ難い粗粒子でも、安定に流動化できる特徴を有する。噴流層は、穀類、スラリー状物質の乾燥、肥料の造粒、粒状物質のコーティングなどに使用されているが、種々の物質を対象にしており、層内の粒子流動特性は、粒子運動の測定法も確立されていないために、完全には把握されていない。

本研究は、噴流層における粒子流動特性を詳細に明らかにしてモデル化すると同時に、その特性に基づいて噴流層石炭ガス化装置を開発し、同装置に関するシミュレーションを行った一連の研究を纏めたもので、その主要な成果は次の点に要約される。

- ① 噴流層の環状部アニュラスから中心部スパウトへの粒子流入は、噴流層底部の形状に関係なく、噴流層上下全域で起こるが下部ほど多い。
- ② ガス流速の大きいジェット噴流層では、スパウト頂部のファウンテンにおける粒子速度分布は軸を中心とするガウス分布を示し、中心部は上昇する粒子により粒子密度が高く、落下する粒子は半径方向に均一に分散する。また、ジェット噴流層の粒子循環量は、ガス流速に比例し、アニュラスからスパウトへの粒子流入は層上部で多くなり、ガス流速が大きいほど完全混合に近づく。
- ③ 噴流層における粒子流動を、アニュラス部の粒子層に作用する力のバランス、スパウト内粒子の質量、運動量の保存式を基礎としてモデル化して数値計算した結果、軸方向の圧力分布、粒子の速度および流量を予測できた。
- ④ 噴流層と流動層を組み合わせた2段ガス化装置は、石炭処理量が 5 kg/h、ガス化剤として酸素と水蒸気を用いる連続ガス化装置であり、ガス化反応は、主に下段の噴流層で起こり、1000 °C以上の高温操作が可能になり、最高 11 MJ/Nm<sup>3</sup> の中カロリーガスが得られ、冷ガス効率も 0.77 と好成績を達成した。上段の流動層は温度が低く、ガス化が起こらないために、炭素転化率は最高 0.82 であった。

⑤ 噴流層上下2段の石炭ガス化装置では、上段にバッフルを設置することによって、チャーの滞留量が増加し、クリンカーの生成が抑制されて、ガス化成績が向上した。最高1050℃の操作で、石炭処理量8kg/hの連続運転により、炭素転化率0.95、冷ガス効率0.78を達成した。

⑥ 噴流層・流動層2段ガス化装置について、太平洋炭の熱分解とガス化成績の精密測定による反応速度式と、ガス化装置内の熱収支および物質収支式とを連立した数値解析により、下段の噴流層のガス化特性をシミュレートした。計算結果から、完全混合モデルで十分ガス化反応がシミュレートでき、酸素供給量、水蒸気供給量などの操作因子に対する層内温度、冷ガス効率、ガス組成などの依存性を予測できた。噴流層2段ガス化装置に対しては、2個の直列の完全混合槽とするモデル化によって、操作因子に対するガス化反応の成績の傾向をシミュレートできた。

これを要するに、著者は噴流層の粒子流動特性、およびその特性に基づく高効率の石炭ガス化装置についての新知見を得たものであり、化学工学、燃料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者と認める。