

学位論文審査結果の概要

| | |
|--|---|
| 氏名 | 趙 忠凱（チョウ チュウガイ） |
| 学位論文審査委員氏名 | 主査 官 国清 |
| | 副査 阿布 里提 |
| | 副査 吉田 曉弘 |
| | 副査 笹川 和彦 |
| | 副査 于 涛 |
| 論文題目 | Novel Reactor and System Design/Simulation for Carbon-based Energy Conversions（炭素ベースのエネルギー変換のための新しい反応器及びシステムの設計とシミュレーション） |
| 審査結果の概要（2,000字以内） | |
| <p>エネルギーは人間の生存と社会の発展の重要な基盤であり、世界のエネルギー需要は年々増加している。また、炭素ベースのエネルギーは世界の主要なエネルギー源であり、将来的にも炭素ベースのエネルギーを完全に置き換えることは難しいと考えられる。熱化学変換は、炭素ベースエネルギー源中のSO_xやNO_xなどの有害な物質を除去でき、様々な活用しやすいエネルギーに変換するための最良の方法と考えられている。しかし、高温条件での燃料ガス精製技術はまだ成熟しておらず、生成ガスの精製前に冷却を行うことが一般的であるため、冷却および精製プロセスで大量のエクセルギーが失われる。したがって、完全な炭素エネルギー変換と高効率のエクセルギー回収を備えたプロセス設計は、炭素ベースエネルギー利用システムに関する重要な課題である。本博士論文では、多段階ガス化システムの最適化のために、新規ガス化装置の設計方法を検討するとともに、高度な小規模バイオマス発電システムと高効率のメタン乾式改質によるCO₂利用システムが提案された。本論文は英語で書かれており全部で6章から構成されている。</p> <p>まずは、粒状流の運動論を組み込んだオイラー-オイラーモデルを採用して、通常のダウナー式熱分解炉の下に置く高密度ダウナー式反応器における気固流動挙動をシミュレーションした。三塔式複合循環流動床（TBCFB）石炭ガス化システムへの高密度ダウナー式反応器の設置を想定した場合、その中の高粒子濃度領域での粒子ホールドアップは、熱伝達を強化して石炭を完全に熱分解するだけでなく、重質タールも分解し、石炭の熱分解生成物がチャーのガス化に及ぼす悪影響を回避することができた。また、流体力学的挙動に対する高密度ダウナー式反応器の最適な構造パラメータ（直径、円錐角および固体粒子の質量流束）と動作条件を詳細に調査した結果、高密度ダウナー反応器は粒子ホールドアップを増加させることができるが、最大の粒子ホールドアップは、最終的な環境収容力を有するために約0.4に制限されていることを明らかにした。さらに、高密度の動作状態では、多くの粒子が中心に集中するのに対し、壁の近くの環状領域にピークの粒子ホールドアップがあることを明らかにし、反応器に高速気固流動によって引き起こされる激しい衝突と乱流は、凝集体生成を阻害することになり、熱伝達を促進することが分かった。</p> <p>次に、エネルギー/エクセルギー回収を組み合わせ、分離型バイオマスガス化プロセスを備えた小規</p> | |

模で高効率の新規熱電併給システムを提案した。ここで、バイオマス熱分解、チャー燃焼、タール改質、触媒再生のプロセスの空間的細分化は、各変換ステップの最適化を実現し、システム全体のパフォーマンスを向上させる。また、最大の発電効率を得るために、システム内のエネルギーフローとエクセルギーフローが詳細に分析され、ガス化システムの動作条件が最適化された。この結果として、タール改質装置の比較的低い温度と低い水蒸気/炭素比がエネルギー効率とエクセルギー効率の改善につながる可能性が示唆された。最適な運転条件では、バイオマス投入量 548.86 kW（高位発熱量）に対して 263.65 kW の電力を生成し、総エネルギー効率とエクセルギー効率はそれぞれ 37.9% と 43.2% であった。この他に、153.44kW のエネルギーを回収することができ、ガスタービンの排気から得られる 136.56kW のエネルギーを空気・水蒸気によるガス化プロセスに移行することで、全体の発電効率が高まることを明らかにした。

最後に、循環流動層とエクセルギー再生を備えた新しい分離型自己熱利用のメタン乾式改質（ATDRM）システムを提案し、シミュレーションを行った。ここでは、循環流動層によるメタン部分酸化と組み合わせたメタン乾式改質を検討した。乾式改質および部分酸化プロセスの空間的細分化は、メタンの乾式改質（DRM）反応に対するメタン部分酸化の生成物からの悪影響を排除し、二酸化炭素の変換効率をさらに向上させることが可能になった。その結果、約 1055.7kW のエクセルギーは粗合成ガスの冷却プロセスから回収され、CO₂、O₂、および CH₄ を予熱に再利用することで、従来の ATDRM システムと比べて、分離型 ATDRM システムのエクセルギーは約 0.1% 減少したが、CO₂ の変換効率は約 11.3% と大幅に増加したことを明らかにした。

以上を要約すると、本論文では数値シミュレーションによって炭素ベース新規エネルギー反応器とシステム設計の提案を行い、得られた知見は熱電併給のための熱分解装置の効率の大幅な改善と高効率な小規模バイオマスガス化システムの開発、およびそれに関連したメタンの乾式改質による二酸化炭素の有効利用に大きく寄与するものと考えられる。

本研究の成果は、学位論文の基準を満たす内容を有するものとして、合格に相当すると認められる。

学位論文の基礎となる参考論文

1. **Zhongkai Zhao**, Yohanes Andre Situmorang, Ping An, Jingxuan Yang, Xiaogang Hao, Jenny Rizkiana, Abuliti Abudula, and Guoqing Guan, “A biomass-based small-scale power generation system with energy/exergy recuperation（エネルギー/エクセルギー回収を備えたバイオマスベースの小規模発電システム）,” *Energy Conversion and Management*, 227(2020) 113623.
2. **Zhongkai Zhao**, Yohanes Andre Situmorang, Chihiro Fushimi, Atsushi Tsutsumi, Jingxuan Yang, Xiaogang Hao, Akihiro Yoshida, Abuliti Abudula and Guoqing Guan, “Numerical simulation of hydrodynamic behaviors in a gas-solids dense downer reactor（高密度の気固ダウンナー反応器における流体力学的な挙動の数値シミュレーション）,” *Advanced Powder Technology*, 31(2020)3028-3037.
3. **Zhongkai Zhao**, Yohanes Andre Situmorang, Ping An, Nichaboon Chaihad, Xiaogang Hao, Guangwen Xu, Abuliti Abudula and Guoqing Guan, “Hydrogen production from catalytic steam reforming of bio-oils: a critical review（バイオオイルの接触水蒸気改質からの水素製造：批判的なレビュー）,” *Chemical Engineering & Technology*, 43(2020)625-640.