

氏名（本籍）	宋 春風 (Chunfeng SONG)（中華人民共和国）		
学位の種類	博 士 (生物工学)		
学位記番号	博 甲 第6686号		
学位授与年月日	平成25年7月25日		
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当		
審査研究科	生命環境科学研究科		
学位論文題目	A Novel Cryogenic CO <sub>2</sub> Capture Technology Based on Free Piston Stirling Coolers (FPSCs) (スターリングクーラーシステムによる二酸化炭素の冷凍回収)		
主査	筑波大学 教授	博士(農学)	北村 豊
副査	筑波大学 教授	博士(農学)	張 振亜
副査	筑波大学 准教授	博士(農学)	野口 良造
副査	筑波大学 准教授	博士(理学)	内海 真生

## 論 文 の 要 旨

温室効果ガスによって引き起こされる世界的な気候変動が懸念されている。温室効果ガスの中で、大気中に占める割合が高い二酸化炭素は主に化石燃料の燃焼に伴い発生し、温室効果の6割に寄与しているとされる。風力や太陽光、バイオマスなど新しい再生可能エネルギーが開発されているものの、世界は今後10年間化石燃料に依存せざるを得ない。よって二酸化炭素の固定は温室効果ガスの制御に極めて有効かつ世界的な優先事項であることは明らかである。これに対してIPCCにより二酸化炭素の回収・貯留（CCS）が温室効果ガス緩和の持続的技術として提唱されている。近年、多くの研究者らは二酸化炭素の回収効率向上と回収プロセスのコスト削減に努めてきた。これにより、二酸化炭素の回収技術として吸収・吸着、冷凍、膜分離といった物理化学的方法が開発されており、特に化学溶剤による吸収法が最も実用的であるとされている。しかし本法は高価であるとともに、吸収後の溶液からの二酸化炭素分離や再生利用が困難であり、その適用が限られている。

そこで第1章では新しい二酸化炭素の分離回収技術確立の必要性を本研究の背景を通じて紹介した。はじめに、二酸化炭素の大きな排出源となっている産業を列挙するとともに、現在、研究・実用化が進められている二酸化炭素の回収技術である吸収・吸着、冷凍、膜分離などの物理化学的方法を説明した。さらに、これらの技術についての環境汚染やコスト高といった問題点についても明らかにした。

第2章では、スターリングクーラー(SC)より構成される新しい二酸化炭素の冷凍回収システムの概要を紹介した。小型で効率的かつ低コスト熱機関の一つであるSC3基から構成される冷凍分離方式の二酸化炭素回収システムを構築し、模擬ガスを用いた二酸化炭素の回収特性を予備的に検討した。本システムにおける冷凍分離では、まず供試ガスが二酸化炭素の昇華点以上の温度に達するまでの前冷凍処理が第1スターリングクーラー(SC-1)により行われ、続く主冷凍塔において、そのガス流は二相の混合物に分離される。すなわちSC-2における熱交換部上で二酸化炭素は固体状のドライアイスに氷結し、回転式羽根によりかきとられ、SC-3によって保冷の可能な温度にまで冷却された貯蔵タンクに落下する。一方、二酸化炭素以外の残留ガスはガス出口を通じ大気中に放出される。

第3章ではSCの特徴、すなわち1)冷凍回収プロセスの中で化学溶剤を使用していないこと、2)冷凍速度が速いこと、3)装置が小型で移動が容易であること、4)冷媒式の冷凍機よりも熱効率が低いこと、などを明らかにした。

第4章ではSCの冷却原理を分析し、温度、流量、予冷凍時間、真空度などのシステム制御・操作のパラメーターがエネルギー消費および二酸化炭素の回収率に与える影響を実験的かつ理論的に明らかにした。すなわちH<sub>2</sub>O 5%、CO<sub>2</sub> 13%、N<sub>2</sub> 82%の模擬燃焼ガスを対象とした実験において、構築したシステムにおける最適なガス流量、SC-1 温度、SC-2 温度、SC-3 温度、予冷凍運転時間はそれぞれ 5 L/min、-30°C、-120°C、-120°C、240 min であり、その時の二酸化炭素回収率は95%であった。またこの時の冷凍分離が最も低いエネルギー消費 0.55 MJ/kg-CO<sub>2</sub>で行われることが明らかにされた。

第5章では冷凍回収されたドライアイスの密度および厚さなどの変化を明らかにして、二酸化炭素固体化のプロセスを解析するとともに、第6章においてシステムのエネルギー消費特性を熱収支モデル法により分析し、予冷凍塔、主冷凍塔と貯蔵塔のエネルギー消費量をシミュレーションした。

最後に第7章では、本研究で開発された冷凍分離システムの研究成果を総括した上で、二酸化炭素の回収技術における研究課題および将来研究の展望を述べた。

## 審 査 の 要 旨

温室効果ガスである二酸化炭素の分離回収は、主に化学的吸収と膜分離による研究が主流となっているが、環境汚染やコスト高が問題となっている。これに対して、小型・高効率の熱機関スターリングクーラーを活用した新たな冷凍分離システムを構築して、燃焼ガスからの二酸化炭素の分離回収とその有効利用の可能性を見出した本研究は、技術的に新規性が高く、社会の持続的発展に寄与する学術的なものと評価された。また冷凍分離システムの特長解析を実験的かつ理論的に行い、エネルギーの消費量や二酸化炭素の回収率、ドライアイスの純度等を最適化する制御方法を確立した点は、二酸化炭素の分離回収研究を先導する有用な成果であるとともに、生命産業科学の工学的研究の進展に貢献する研究として認められた。

平成25年6月5日、学位論文審査委員会において、審査委員全員出席のもとに論文の審査及び最終試験を行い、本論文について著者に説明を求め、関連事項について質疑応答を行った。その結果、審査委員全員によって合格と判定された。

よって、著者は博士(生物工学)の学位を受けるのに十分な資格を有するものとして認める。