HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	排ガス循環型酸素燃焼を用いた工業炉の熱力学特性および炉内に形成される火炎のすす特性に関する研究 [論文内容及び審査の要旨]
Author(s)	佐藤, 賢一
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(工学)
Dissertation Number	甲第13643号
Issue Date	2019-03-25
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/74130
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/
Type	doctoral thesis
File Information	Kenichi_Sato_review.pdf, 審査の要旨

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

学位論文審査の要旨

博士の専攻分野の名称　博士 (工学)　氏名　佐藤 賢一

審査担当者　主　査　教　授　藤田 修
副　査　教　授　永田 晴紀
副　査　教　授　小川 英之
副　査　准教授　橋本 望

学位論文題名

排ガス循環型酸素燃焼を用いた工業炉の熱力学特性および炉内に形成される火炎のすす特性に関する研究
(Studies on thermodynamical properties of the industrial furnaces with recirculating oxy-fuel combustion and the sooting characteristics of these flames)

近年、地球温暖化が世界的に大きな問題となり、各国で温暖化ガスの一つである二酸化炭素の排出削減に向けた様々な努力がなされている。二酸化炭素の最も大きな排出源の一つが加熱などに使われる工業炉であるが、その多くは規模的な面から電化による代替が不可能であり、燃焼式工業炉の高効率化による二酸化炭素の排出抑制が急務である。すでにリジェネ炉と呼ばれる熱循環型高性能工業炉が開発されており、30% 以上の省エネルギーと低 NOx 化を実現させている。その一方で、さらなる熱効率向上による省エネルギー達成のため、熱循環型だけでなく、酸素燃焼や酸素燃焼と熱循環を組み合わせた炉、すなわち排ガス循環型酸素燃焼炉の検討が始まっている。しかし、排ガス循環型酸素燃焼炉および熱循環型燃焼炉に対し、これまでその本質的な優劣について十分な比較検討はなされていなかった。

そこで本研究では、第 2 章において排ガス循環型酸素燃焼炉の熱力学的特性に関する検討を行い、その優劣を通常の空気燃焼炉および熱循環型燃焼炉との比較のもとに議論している。比較においては、高温燃焼ガス生成時のエンタルピーおよびエントロピーの変化を調べた。熱循環型高温空気燃焼炉と排ガス循環型酸素燃焼炉を比較すると、酸素製造電力原単位や熱循環型高温空気燃焼炉の排熱回収率により優劣が分かれる。排ガス温度がそれほど高温でない場合には、排熱回収率が高くなくても、熱循環型高温空気燃焼炉の方が排ガス循環型酸素燃焼炉よりも熱的に優位である。しかし、排ガス温度が高温の場合には、排ガス循環型酸素燃焼炉の方が熱循環型高温空気燃焼炉よりも熱的に優位である。熱循環型高温空気燃焼方式と排ガス循環型酸素燃焼方式の作動流体の比熱の違いを考慮した場合、すなわち炉の加熱能力を考慮した場合、排ガス循環型酸素燃焼炉が有利になる作動領域が増える。この結果、排ガス循環型酸素燃焼炉は、被加熱物が高温で工業炉からの排出ガス温度が高温の条件では熱循環型高温空気燃焼炉より熱力学的に十分に優位性を持つことが示されている。

第 3 章においては、排ガス循環型酸素燃焼炉内に形成される二酸化炭素・酸素混合気中の火炎のすす特性に関する研究を行っている。工業炉などの加熱炉においては、加熱性能を検討する上で火炎から被加熱物への輻射加熱が重要であり、その火炎輻射特性を検討するためには、工業炉で一般に使われている拡散火炎のすす生成特性の把握が重要となる。しかし、排ガス循環型酸素燃焼炉で

問題になる二酸化炭素と酸素で構成される雰囲気ガス中での火炎からのすすの生成特性および雰囲気ガス温度の影響は、ほとんど明らかにされていないためである。ここでは、雰囲気ガスが二酸化炭素と酸素の混合気に対し、酸素濃度が総すす量に及ぼす影響、雰囲気ガス温度がすす生成特性に及ぼす影響を実験的に調べている。このとき、火炎のすす生成特性と形成される火炎の断熱火炎温度との関連に着目している。その結果、雰囲気ガスの希釈ガスが二酸化炭素の場合、雰囲気ガス中の酸素濃度が増加するにつれ、総すす量は増加するが、酸素濃度が約 27% で最大となり、それ以上の酸素濃度ではわずかに減少する。希釈ガスが二酸化炭素の場合、酸素濃度を増加させると断熱火炎温度が上昇し、火炎下部ではすすの生成が促進されるが、火炎上部では酸素濃度の増加によるすすの酸化消滅が促進される。これにより、総すす量が最大になる酸素濃度が存在することになる。一方、雰囲気ガス温度を上昇させると、総すす量はいずれの酸素濃度においても増加する。総すす量の対数値はどの酸素濃度に対しても断熱火炎温度の逆数の減少に対して直線的に増加する。また、この直線の傾きは、どの酸素濃度に対してもほぼ同じであることから、酸素濃度が同じであれば、火炎内でのすす生成およびすす酸化による消滅過程が類似となり、その場合の、総すす量を支配する重要な因子は断熱火炎温度であるとしている。

第 4 章では、これらの結果を基にして、排ガス循環型酸素燃焼炉の工業炉としての特性および今後の工業加熱炉への展開について考察を行い、排ガス循環型酸素燃焼炉は、熱循環型高温空気燃焼炉より熱力学的性能に優れているだけでなく、将来の工業炉から排出される二酸化炭素の回収貯留 (CCS) の観点からも、熱循環型高温空気燃焼炉に比べて、高い優位性を持つことが述べられている。

第 5 章では、本研究の結論を述べている。

以上のように、本論文では、排ガス循環型酸素燃焼炉が工業炉の分野で温暖化ガス抑制技術の新たな選択肢になりうることを示している。また、その背景として、本燃焼方式が熱力学的に優位性を持つことを示し、また、そこで課題となる熱放射特性の確保に関する基礎的知見を与えている。これらの成果は熱工学および燃焼工学の発展に寄与するところ大なるものがあり、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。