



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
Citation	北海道大学. 博士(工学) 甲第13643号
Issue Date	2019-03-25
Doc URL	http://hdl.handle.net/2115/74130
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/
Type	theses (doctoral - abstract and summary of review)
Additional Information	There are other files related to this item in HUSCAP. Check the above URL.
File Information	Kenichi_Sato_abstract.pdf (論文内容の要旨)



[Instructions for use](#)

学 位 論 文 内 容 の 要 旨

博士の専攻分野の名称 博士（工学） 氏名 佐藤 賢一

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大気中への放出削減に向けた様々な努力がなされている。我が国は、2015年のパリでのCOP21をふまえ、2030年度に二酸化炭素の排出を2013年度に比べて26%削減する中期目標を定め、さらに長期的目標として2050年までに80%の二酸化炭素の削減を目指すことを目標としている。日本の二酸化炭素排出の33%は産業部門からの排出であり、その内の約20%が加熱などに使われる工業炉からの排出である。鉄鋼業に用いられる加熱炉に代表されるような高温場が必要な工業炉においては、電化による加熱が規模的に不可能であり、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必要である。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NO_x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、熱力学的検討による比較検討が統一的になされているとは言い難い。

そこで本研究では、第2章で排ガス循環型酸素燃焼炉の熱力学特性に関する研究を行った。ここでは、加熱炉を想定して排ガス循環型酸素燃焼炉の高効率燃焼技術としての可能性を熱力学的観点から検討した。比較においては、通常空気燃焼炉、熱循環型高温空気燃焼炉および排ガス循環型酸素燃焼炉の燃焼過程における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えた場合、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ともわかった。この研究の結果、排ガス循環型酸素燃焼炉は、非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優れていることがわかった。

一方、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。また、各種燃焼器から排出されるすすは大気汚染物質の一つであるので、この点においてもすすの生成特性を明らかにすることは重要である。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、ほとんど明らかになっていない。

第3章で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た。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た。また比較のため、雰囲気ガスとして窒素と酸素21%の混合気で、雰囲気ガス温度を変化させた場合のすす生成特性も調べ、二酸化炭素と酸素混合気雰囲気の場合と比較した。さらに、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比較を行い、すす生成に及ぼす雰囲気ガス温度および雰囲気ガス組成の影響をそれぞれ検討した。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。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。希釈ガスが窒素の場合でも二酸化炭素の場合でも、雰囲気ガス温度の上昇は断熱火炎温度を増加させ、それがすすの生成を促進し、結果的に総すす量を増加させる。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し、その値は酸素濃度が約27%である。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。このことは、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同一となり、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ことを示している。

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した。その結果、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、はるかに優れていることが、本研究の結果により示された。また、設計的な検討を行い、排ガス循環型酸素燃焼炉の実現性は高いことがわかった。さらに本研究の結果から、排ガス循環型酸素燃焼炉の雰囲気ガス、すなわち二酸化炭素と酸素混合気中の酸素濃度を27%程度とすることで、加熱炉としての加熱特性に問題がないことが示された。

本研究の結果、2050年の二酸化炭素排出を80%削減する目標に対して、排ガス循環型酸素燃焼炉は実現性が高く、重要な二酸化炭素排出抑制技術となることが明らかになった。