

氏 名	平 井 哲 郎
授 与 学 位	博 士 (工 学)
学位授与年月日	平成 6 年 3 月 16 日
学位授与の根拠法規	学位規則第 5 条第 2 項
最 終 学 歴	昭 和 48 年 3 月 東北大学大学院工学研究科精密工学専攻 修士課程修了
学 位 論 文 題 目	工業用燃焼装置における高負荷・低公害噴霧燃焼に 関する研究
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 永井 伸樹 東北大学教授 斎藤 武雄 東北大学教授 新岡 嵩 東北大学助教授 稲村 隆夫

論 文 内 容 要 旨

産業用ボイラなどの工業用噴霧燃焼装置では、排出 NO_x 濃度の低減を目的とした各種の燃焼法が提唱され実用に供されているが、低減対策を講じることによって、一般に火炎長が増大し燃焼室熱負荷率が低下する傾向がみられる。

燃焼室熱負荷率は単位時間あたりの燃焼発熱量を燃焼炉容積で除した値で定義され、熱負荷率を高く採って必要熱量をより小形の燃焼炉で供給できれば、燃焼炉の軽量化、設備費用の削減等の利点が生じる。燃焼室熱負荷率は同時に燃焼ガスの炉内平均滞留時間の指標でもあり、熱負荷率を高く設定した高負荷燃焼を行うためには、燃料噴霧の蒸発や空気との混合を促進して燃焼を短時間に終了させる必要がある。

しかし実炉における噴霧燃焼は、旋回や再循環を伴う三次元の乱流場で、燃料の微粒化、蒸発、着火、火炎伝播などの過程が相互に影響を及ぼしながら同時進行する複雑な現象であり、現状では燃焼装置の設計に利用できるほどの十分な理解は得られていない。特に、広範囲の燃焼条件で良好な保炎性を確保し、併せて短火炎の高負荷噴霧燃焼を実現するためには、空気導入法の工夫とともに空気流動に適合する噴霧を与えて燃焼場を制御できるよう、燃料噴霧ノズルの噴霧生成方式や噴射条件を選定する必要があるにもかかわらず、このような噴霧ノズルの設計指針はほとんど見当たらない。

一方、このような急速燃焼を酸素過剰条件で行うと、高温火炎内に酸素が偏りなく分散するため、

燃焼が不完全なために生じる一酸化炭素やばいじんなどの低減は可能であっても、サーマル NO_x とともに、重質残渣油や石炭に多く含まれる窒素成分を起源とするフューエル NO_x が多量に生成する。

NO_x 生成に関する基礎研究結果に基づくと、フューエル NO_x の排出低減には二分割空気的一方を用いて燃料を空気不足条件で燃焼させ、下流部に燃料過剰領域を形成してここで燃料中の窒素分から生じた含窒素中間生成物によって NO を N₂ にまで還元を進め、その後、未燃ガスを二次空気と混合させて燃焼を終了する低 NO_x 二段燃焼法が有効である。従って、NO_x 低減を緩慢な燃焼によって実現するのではなく、一次燃焼と二次燃焼をともに高負荷燃焼条件を維持して急速に行えば、酸素過濃の燃焼領域を短縮して高温の NO 還元領域を広くとる燃焼制御が容易になるため、燃焼室熱負荷率の高い燃焼でも NO_x の有効な低減が可能と考えられる。さらに、高負荷燃焼から高負荷燃焼条件を維持しながら熱負荷を徐々に低下する方向をたどれば、比較的高負荷でも NO_x 濃度を実用上の許容値以下に低減できるものとみられる。

かかる観点から、本研究では高負荷かつ低 NO_x の相反する要求を同時に満たす窒素含有燃料の噴霧燃焼条件を実験的に調べ、工業用燃焼炉のうち主として産業用ボイラに視点をおいて、高負荷低公害の噴霧燃焼方式とその条件をまとめることを目的とする。

本論文は全 7 章からなる。

第 1 章では本研究の背景と目的を述べ、研究の特徴と計画および本論文の構成について示す。

第 2 章では、本論文全体に関連する噴霧燃焼過程や高負荷燃焼の概念および低 NO_x 燃焼法の現状をまとめた結果から、本研究で指向する燃焼方式について論じるとともに、本研究を遂行するために採用した計測法についても述べる。

第 3 章では、燃料噴霧の生成方式が異なる 3 種類の燃料噴霧ノズルを設計試作し、燃焼室熱負荷率を産業用重油燃焼ボイラの標準値と同じ 0.9MW/m³ に設定して設計試作した円筒型水冷炉を用いて白灯油の噴霧燃焼実験を行い、導入空気の旋回強度とともに、燃料噴霧の生成方式や噴射条件の違いに起因する噴霧性状の差異が、非燃焼の流動特性および燃焼場における噴霧燃焼過程や保炎特性などに及ぼす影響を調べることで、低空気比条件まで安定な高負荷燃焼を実現するための導入空気や噴霧生成の条件を検討した。

燃料噴霧ノズルには、慣用の一流体式スワールノズルや多孔二流体ノズルとともに、環状スリット噴出型の二流体ノズルを考案し設計試作して用いた。本ノズルはノズル内部で微粒化用空気と混合した燃料をノズル先端の環状スリットから噴出させることでホローコーン状噴霧を生成させるもので、噴霧角を自由に設定できるとともに、噴霧流の周囲ガスを巻き込む能力が大きいことを利用して燃焼促進を意図したものである。なお噴霧のザウタ平均粒径は実験範囲内で 30~100 μm であり、各ノズルとも比較的微細な噴霧生成となっている。

実験結果によると、噴霧の流動は噴霧の周囲気体との流体力学的な相互作用の大きさに強く依存し、一流体式スワール噴霧、多孔二流体噴霧、スリット式二流体噴霧の順で、貫通力は小さくなるが周囲気体を巻き込んで噴霧と周囲気体との混合が急速になることがわかる。この結果、スリット式噴霧を用いると、導入空気の旋回強度が大きい条件では、炉中心軸上を再循環する高温燃焼ガス

を急速に巻き込んで噴霧の蒸発が促進されるとともに、空気との混合も良好であるため高負荷燃焼となりやすいが、再循環流動が不十分な場合には、噴霧の蒸発が不活発になって火炎長の増大や保炎不良となる傾向がみられた。しかし噴霧角を大きく設定したスリット式噴霧では、噴霧流がホローコーン噴霧内側のガスを巻き込んで再循環流動を誘引するため、空気流動条件の影響を受けにくい保炎の良好な急速燃焼が実現できることが判明した。

第4章では、燃焼室熱負荷率を最高 $30\text{MW}/\text{m}^3$ となるように現状の工業用燃焼炉と比べて高く設定し、第3章で得られた知見に基づいて、強旋回空気流と広噴霧角のスリット式二流体微細噴霧を組み合わせた円筒型空冷燃焼器を設計試作し、空気比が1近傍でも火炎が器外に伸長しない高負荷燃焼が行われることを確認した上で、白灯油に窒素化合物（ピリジン）を添加した模擬燃料を用いて、高負荷燃焼条件における NO_x の生成機構や排出特性を調べた。

この結果、高負荷燃焼では火炎内に酸素が偏りなく分散する傾向が強いため、空気比が1以上の燃焼では、サーマル NO_x の増加とともに、燃焼中の窒素分の大部分（約80%）が火炎内でフェーエル NO_x に変換されるため、排出 NO_x 濃度は高い値となる。しかし空気比が1以下では、排出 NO_x 濃度は空気比の減少とともに燃料の窒素含有濃度が大きい場合ほど急激に減少することがわかった。

第5章では第4章で示した燃焼法に低 NO_x 二段燃焼方式を組み込み、強旋回一次空気と広噴霧角微細噴霧を組み合わせた急速一次燃焼を空気比1以下で行うとともに、二次空気を燃焼室出口部より挿入した空気導入管先端から半径方向外側へ噴出させて二次燃焼も促進させる燃焼方式を採用し、燃焼室熱負荷率を最大 $20\text{MW}/\text{m}^3$ に設定して、高負荷燃焼条件における NO_x 低減機構や低減効果に及ぼす一次空気比や二次空気導入位置、熱負荷率などの影響を検討した。

図1は一次空気比 λ_1 及び二次空気導入位置 Z_s が排出 NO_x の低減効果に及ぼす影響を示した例である。二次空気を上流部で導入すると、二次空気が一次燃焼領域に供給されて一次、二次の燃焼領域の分離が悪化するため、 NO_x 低減が不十分になるが、導入位置を一次燃焼領域から離れた下流部にとるほど、還元性の一次燃焼ガスの滞留時間を長く確保できるため、 NO_x 低減効果が大きくなる。このとき排出 NO_x 濃度は λ_1 の減少とともに始めは低下するが、その後は逆に上昇する。これは λ_1 を極端に小さくすると、図2(b)のように NO 還元領域における窒素含有中間生成物の N_2 への変換が不活発のままこれが二次燃焼で NO に変換され、 $\lambda_1 = 0.8$ の(a)と比べて燃焼室出口部における NO_x が高くなるためである。

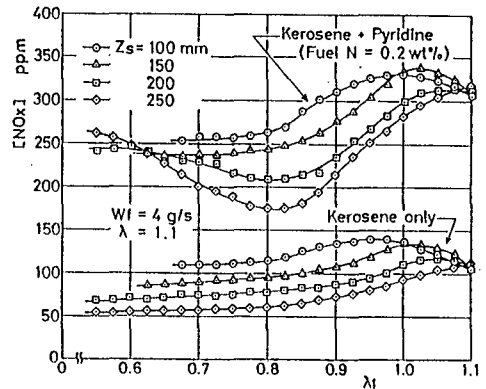


図1 二段燃焼による NO_x 低減効果の例
(燃焼室熱負荷率 $= 19.4\text{MW}/\text{m}^3$)

このように、高負荷燃焼条件を維持しながら二段燃焼を行うと、酸素過剰の燃焼領域と燃料過濃

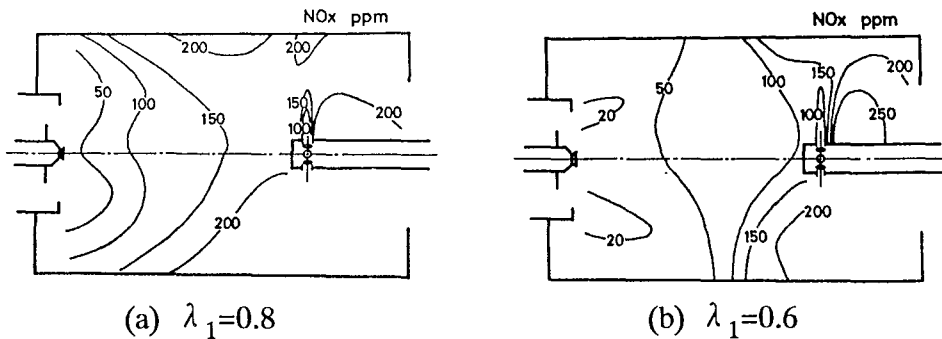


図2 NO_x濃度分布の一次空気比による変化
 (含有窒素濃度=0.2wt%, 二次空気導入位置 Z_s=200mm)

のNO還元領域が明確に分離されてNO_xの生成と削減の機構が明瞭に現れるとともに、酸素過剰の燃焼領域を短縮してNO還元領域を広くとる燃焼制御が容易になるため、比較的熱負荷率の高い燃焼においてもNO_xの有効な低減が可能であることが判明した。

さらに本章では、流動や噴霧の条件を変えないで熱負荷率を低下させると、一次燃焼ガスがNO還元雰囲気中に長時間滞留できるため、NO_x濃度がさらに低下することを確認した上で、本燃焼法を窒素分を含有する低質残渣油の燃焼に適用して、高負荷二段燃焼方式によるNO低減を本実験よりもさらに徹底して行うための工夫について、熱および流動の観点から検討するとともに、燃焼室熱負荷率を低下させてNO_x低減をはかるための燃焼条件について考察している。

第6章では、実在の低質燃料として石炭・水スラリー（CWM）を取り上げ、第5章で得られた高負荷・低NO_x燃焼法に関する知見をもとに、CWM用噴霧ノズルおよび円筒型燃焼炉を設計試作して保炎特性や燃焼効率とともにNO_x低減効果を実験により調べることで、本燃焼方式の有用性を検証した。燃焼炉は燃焼室熱負荷率を現状の低NO_x重油燃焼ボイラと同程度の0.6MW/m²となるように設計し、また燃料ノズルには、噴霧の再循環高温燃焼ガスの巻き込みによる噴霧滴の加熱を優先して促進させるため、噴霧角を灯油の実験より小さく設定した環状スリット噴出型二流体ノズルを設計試作して、燃焼特性を慣用の多孔式二流体ノズルによるものと比較した。

実験結果によると、導入空気の旋回が弱い場合には、低温の空気が炉中心部を下流に向かって流動するため、CWM噴霧はノズル近傍では着火できず、バーナタイル部や炉壁まで貫通してここで揮発成分を放出して燃焼する。しかし、空気の旋回強度を増大させ炉中心部に再循環流動が生じる条件では、貫通力が多孔噴霧よりも小さいスリット噴出型噴霧は高温燃焼ガスの再循環流領域に巻き込まれ、生成した揮発成分が燃焼しながら保炎板まで逆流するため、保炎板に付着したガス状炎が噴霧を包み込んで加熱を促進する安定な燃焼となる。このような保炎の良好な急速燃焼では、固定炭素の燃焼も促進されるため燃焼効率が高くなるとともに、二段燃焼におけるNO還元領域を広くとれるため、NO_x低減にも有効であることが明確になった。

第7章では本論文全体を総括して結論を示すとともに、本研究結果を実用燃焼装置に適用する場

合のスケールアップの方法について述べている。

本研究で得られた結論を以下に示す。

(1) 高負荷燃焼条件

低空気比条件まで安定な噴霧の急速燃焼を得るためには、導入空気に強い旋回運動を与えて中心軸近傍に生じる高温燃焼ガスの再循環流動を促進させるとともに、環状スリット噴出型二流体噴霧のような噴霧流周囲のガスとの流体力学的相互作用の大きな広噴霧角微細噴霧を採用することで、再循環高温燃焼ガスの巻き込みによる噴霧液滴の加熱や空気との混合を促進させる方法が有効である。

(2) 低 NO_x 燃焼条件

熱負荷率を高く設定したまま NO_x 低減を図るためには、二段燃焼法を採用して一次燃焼、二次燃焼をともに上述の高負荷燃焼条件を維持して急速に行い、燃焼炉内の領域制御を容易にすることで NO 還元領域を広く確保する方法が有効である。このとき、一次燃焼は空気比 0.6~0.8 の空気不足条件で行うとともに、二次空気導入を一次燃焼のほぼ終了した位置より下流で行って、燃料過濃の一次燃焼ガスを高温状態に長時間保持する方法が効果的である。

審 査 結 果 の 要 旨

産業用ボイラーなどの噴霧燃焼装置では、排出 NO_x 濃度の低減を目的とした燃焼対策を講じることによって一般に燃焼室熱負荷率が大幅に低下する結果になり、省エネルギー、燃焼制御、燃焼炉の小型化、設備費用の削減などの面で不利な状況を招いている。本論文は、燃焼負荷率の向上を図る立場から、高負荷燃焼炉における燃焼過程と排出 NO_x 濃度の関連を調べ、NO_x の低減条件を求める一連の研究を行った成果をまとめたもので、全編7章よりなる。

第1章は序論である。

第2章では、高負荷燃焼の概念と NO_x 低減の現状をまとめ、本研究で指向する燃焼方式と採用した計測法について述べている。

第3章では、燃焼室熱負荷率を重油ボイラーの通常値に設定した水冷燃焼炉について、燃料噴射ノズルや空気旋回度が着火や燃焼過程に及ぼす影響を調べた結果、考案したスリット形広角二流体噴射ノズルと強い空気旋回流の組み合わせによって噴霧と空気の混合が促進され、空気流動に影響されないう急速燃焼が実現できることなどを明らかにして、高負荷燃焼の主要条件をまとめている。

第4章では、白灯油に窒素化合物を添加した重質油模擬燃料の高負荷燃焼を行い、NO 生成過程と添加量の関係を考察し、空気比が1以下ではN分を多くしても排出 NO_x はあまり増大しないことを述べて、燃料過濃な NO 還元域の存在効果を端的に示している。

第5章では、高負荷燃焼条件で NO 還元を実現するために二段燃焼方式を採用し、排出 NO_x に及ぼす一次空気比と二次空気導入位置の影響を調べ、サーマル NO 生成に対する一次空気比の影響は小さいが、フューエル NO は大きく変化して最小値が存在すること、還元域が長いほど低減効果が大きいことなどを明らかにしている。また高負荷燃焼条件を維持したまま負荷率を低下させると、NO_x は効果的に顕著に低減することを示し、実用の重質油燃焼でも現状より高い負荷率で同等な排出値が得られるとしている。これは重要な知見である。

第6章では、高負荷・低 NO_x 燃焼法を石炭・水スラリー燃料の噴霧燃焼に応用し、急速燃焼によって噴霧粒中水分の蒸発、揮発分の着火・保炎および固定炭素の燃焼を促進させ、さらに最適条件の二段燃焼によって排出 NO_x 濃度を低減させるなど、本燃焼方式の有用性を検証している。

第7章は総括と結論である。

以上要するに本論文は、工業炉における燃焼室熱負荷率の向上と排出 NO_x の低減に役立つ高負荷噴霧燃焼方式を提唱し、多くの知見と基礎資料を提供し、実用燃焼装置の設計に有用な指針を与えたものであり、機械工学並びに燃焼工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。