

空気旋回流を利用する廃棄もみ殻・石油混合燃焼器の排ガス基礎評価

Preliminary monitoring for exhaust gases from a hybrid air vortex current combustor using waste rice husk and fossil composite fuel

王 青躍^{1*}、前薊 拓矢¹、アパル パタル¹、陳 啓宇¹、オウ イビン¹、
藤原 逸平²、土門 正幸²、山口 哲央²

Qingyue WANG¹, Takuya MAEZONO¹, Pataru APARU¹, Qiyu CHEN¹, Yimin WANG¹,
Ippei FUJIWARA², Masayuki DOMON² and Norio YAMAGUCHI²

¹ 埼玉大学 理工学研究科 環境システム工学科

Department of Environmental Science and Technology,
Graduate School of Science and Engineering, Saitama University

² 金子農機株式会社

Kaneko agricultural machinery Co., Ltd

Abstract

In this study, we investigated if fossil fuel can be substituted by rice husk on a new combustor in the air vortex current. Because, suspended particulate matter in exhaust gases not only influence the global environment when released in the atmosphere but also influence on human health. Harmful substances emits from the rice husk combustion were evaluated by measuring the suspended particulate matter composition on the exhaust, and the reduction possibility of these harmful substances by controlling the combustion conditions was examined. Experimental show that the particulate concentrations can be reduced substantially by highly effective combustion with an improved combustor compared with an original combustor.

Key Words: Rice husk, Air vortex current, Suspended particulate matter, Exhaust gases, Harmful substances, Highly effective combustion

1. 目的

現在、多くの異常気象の発生から地球温暖化がますます顕在化しており、その原因が化石燃料の燃焼によることが懸念されている。しかし、化石燃料を主体としたエネルギー消費傾向は、今後とも途上国を中心とする経済発展と人口増加により大幅に増加することが予想されている¹⁾。その対策の1つとして、人間活動から環境への排出を可能な限りゼロに近づけ、かつ生産活動を持続するために、業種を越えた産業ネットワークによる物質循環を実現しようとするゼロエミッションの試みが活発化しており、

未利用バイオマスの資源化はゼロエミッションネットワークの要となる場合が多い²⁾。

我が国において農作物非食部や林地残材などの未利用バイオマスの一部は、有効利用はなされているもののバイオマスの収集・運搬・集約の全面において費用がかかり、それをエネルギー利用事業者のみが負担するという問題が生じているため未利用バイオマスの多くは有効利用されず焼却処理されているのが現状である³⁾。さらに、不法な焼却は大気汚染の原因となるため、早急な対応が求められる^{4,5)}。

代表的な未利用バイオマスの1つとして挙げられる籾殻は、日本国内において米の副生成物として年間300万トンもの量が排出されている。また、世界においても米を主食・常食とする国は総人口の半数に近く、籾殻の有効利用は地球温暖化対策として大いに成果が見込まれる。

*埼玉大学大学院 理工学研究科 准教授

〒338-8570 さいたま市桜区下大久保 255

電話：048-858-3733 FAX：048-858-9542

Corresponding author email: seiyo@mail.saitama-u.ac.jp

近年においては、化石燃料の価格高騰から冬季における施設園芸ハウスの加温に重油や灯油に代わり、未利用バイオマスを利用した燃焼器の需要が拡大している。一般的に加温に用いられるこれらの燃焼器の規模は小型なものとなるため⁶⁾、多くは大気汚染防止法や廃棄物の処理及び清掃に関する法律の規制適用外となる。今までの小型燃焼器は、構造が簡易的であり、比較的公害問題の発生源にならず、さらに価格が安価であることが大きな特徴であった。しかし、規制適用外である小型燃焼器であっても、安定した燃焼性能を確保し、少なくとも目に見える黒煙を排出しないものが望まれる。そのため今後、このような小型燃焼器は、大型の都市ごみ連続焼却器のように燃焼温度変化が少なく安定な燃焼状態を確保する自動制御を組み込んだものとなり、助熱源の重油や灯油等の低減を考慮したものが主流を占めることが予想されている。

本プロジェクトで金子農機株式会社と共同で研究を行っている「バイオマス燃焼装置」は、旋回流を利用した新しい原理の装置であり、この装置が完成すると未利用バイオマスが入手可能な地域では、現在稼働している石油を使用している乾燥機や暖房機の機器と交換が可能であるため、石油の消費量を大幅に抑えることができる。具体的に表すと、この装置は石油燃料の依存率を 10%とし、石油燃料の消費量を 90%削減することが可能である。

そのため、本プロジェクトの目的として、使用する未利用バイオマス燃料である籾殻の熱分解や燃焼特性を評価するため成分分析および TG-DTA により燃焼特性の評価を行い、燃焼条件による排気ガス中の有害物質の低減可能性⁵⁾を調査することを目的とした。

2. 実験方法

2.1. 燃焼装置

空気旋回流を利用した新規燃焼装置を図 1 に示す。直径 20 cm の耐熱円筒管を燃焼炉とし、上部に助熱源である石油燃焼器、下部にバイオマス供給部を設けた。燃焼炉の中心に空気の噴気孔を設け、高温の燃焼ガスを外周部に吹き付け旋回流温度を上昇させる。燃焼開始時の低温燃焼による不完全燃焼を低減するために、石油ヒーターにより燃焼炉壁の温度を 480 °C まで加熱した。炉壁温度が 480 °C に達した時に籾殻を供給し、炉壁温度が 550 °C に達した後、石油バーナーによる加熱を停止させた。籾殻のみの燃焼であっても燃焼炉内の温度を安定さ

せることができることから、新規小型燃焼装置において籾殻は石油代替燃料として利用可能であることが評価できる。

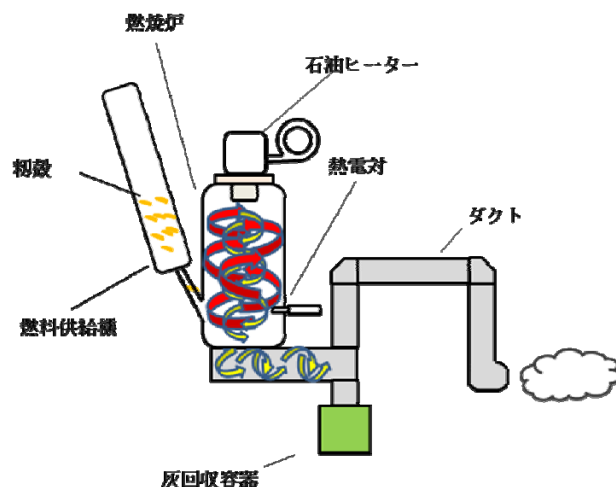


図 1 燃焼装置図

2.2. 籾殻試料

供試した試料として日本各地域から収集した籾殻を用いた。

籾殻の燃焼装置内での燃焼挙動を評価するために、日本工業規格 JISM 8812 に則り工業分析および CHN コーダーにより元素分析を行った。以下に分析方法を示す。

・水分測定(工業分析)

試料を質量既知の乾燥容器に約 1 g 量り採り、107±2 °C に保たれた乾燥機内へ装入した。1 時間加熱後、デシケータに移し、20 分以内に質量を量り、その減量から水分含有率を求めた。

・灰分測定(工業分析)

試料をあらかじめ恒量にしてある灰化容器に約 1 g 量り採り、薄く広げ、室温のマッフル炉へ装入した。そして、約 60 分かけて 500 °C まで昇温し、その後 30-60 分かけて 815 °C までさらに昇温して、815±10 °C で 1 時間保持した。灰化後、冷たい金属板上で 10 分間、次にデシケータ中で 15-20 分間冷却し、質量を量り、その減量から灰分含有率を求めた。

・揮発分測定(工業分析)

試料をあらかじめ恒量にしてあるふた付きのつばに約 1 g 量り採り、900 °C に加熱しておいたマッフル炉へ挿入し、空気との接触を避けながら 7 分間加熱した。加熱後、冷たい金属板上で 10 分間、次にデシケータ中で 20 分間冷却し、質量を量り、その減量から揮発分を求めた。

・固定炭素測定(工業分析)

気乾試料を 100 % とし、そこから水分・灰分・

揮発分含有率(いづれも気乾ベース)の気乾試料に対する百分率を差し引いて、残りを固定炭素の百分率とした。

・炭素 C・水素 H・窒素 N 測定(元素分析)

初殻の炭素(C)、水素(H)、窒素(N)の含有量を CHN コーダー(MT-5 型、株式会社ヤナコ製)により測定した。測定方法は、まず試料をあらかじめバーナーで有機物を除去したセラミックボードに約 2.0-2.5 mg 精秤した。このボードを試料導入棒の上にのせ、燃焼管手前の位置において数秒間ヘリウムで置換後、燃焼管内部へ挿入した。燃焼後、装置内では、試料中の C は CO_2 に、H は H_2O に、N は N_2 に酸化還元し、熱伝導度検出器 (T.C.D.) によりそれぞれの信号値をプリンターに打ち出した。標準試料により、あらかじめ質量に対する信号値を計算しておき、その値により炭素(C)、水素(H)、窒素(N)の含有量を求めた。

2.3. 初殻の燃焼特性の評価

初殻の燃焼特性を図 2 に示した TG-DTA 同時測定装置により評価した。測定条件を試料量：約 1 mg、昇温速度：初期 $5^\circ\text{C}/\text{min}$ 、Air 流量：250 ml/min とした。初殻を粉砕機と篩い振盪機を用いて粉砕・画分して、粒径を 0.25 mm 以下にして、実験室の室温雰囲気中に約 1 時間曝露させ、気乾試料として調製した。

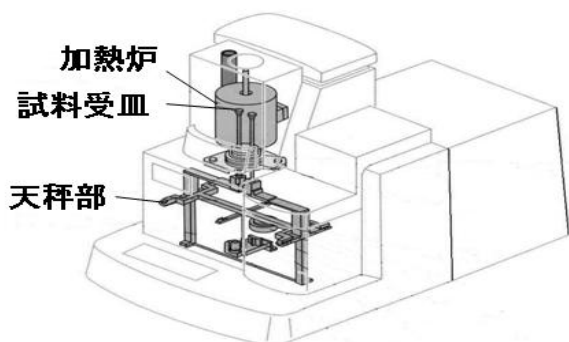


図 2 示差熱・熱重量 (TG-DTA) 同時測定装置

2.4. 初殻の燃焼条件

初殻燃焼条件により排出される大気浮遊粒子状物質の低減可能性を調査するため、初殻の供給量を 10 分間当たりで 2.40、2.49、2.57 g と変化させた場合の 1 kg 当たりの初殻燃焼により生成する $\text{PM}_{2.5}$ の大気浮遊粒子状物質の濃度を評価した。これらの初殻供給量の条件は、石油を使用せず初殻のみの燃焼でも、長時間の使用が可能である供給量であり、実際に燃焼器として使用する場合の初殻供給量範囲である。そ

のため、上述の燃焼条件により新規燃焼装置の最適燃焼条件を評価した。

2.5. 初殻燃焼からの排ガスサンプリング方法

大気の拡散や冷却などを考慮してより適切な初殻燃焼により排出排ガス濃度を評価するため、図 3 に示すような希釈管を設置した。初殻燃焼からの排ガスは、灰回収機通過後ダクトより排出される。そのため、ダクトに 10 mm 程度の穴を開け、排ガスを 11.0 L/min の流量で、希釈用大気を活性炭、HEPA フィルター通気後希釈管内に 22.4 L/min の吸引流量で導入し、排ガスを 3.04 倍希釈して捕集を行った。希釈後排ガス温度を排ガス用温度計により測定し、マニホールドから $\text{PM}_{2.5}$ サイクロンサンプラー(株式会社 東京ダイレック製)により大気浮遊粒子状物質を捕集した。 $\text{PM}_{2.5}$ サイクロンサンプラーは、2 台同時に使用し、一方には、炭素成分分析用として石英フィルターを、もう一方にはイオン、金属分析用としてテフロンフィルターを使用した。捕集時間は 10 分、吸引流量は 33.4 L/min の条件で行った。排ガス中の CO 、 CO_2 、 O_2 、 NO 、 SO_2 濃度はポータブルガスアナライザー(PG-250 型、株式会社 堀場製作所製)により測定した。

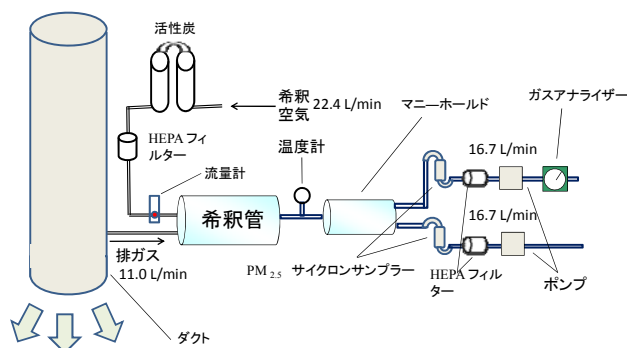


図 3 希釈管設置概念図

2.6. 燃焼灰成分や燃焼排ガス炭素成分測定

燃焼に用いた初殻と燃焼後灰回収機によって回収された燃焼灰は、日本工業規格 JISM 8812 に則り工業分析を行った。また、CHN コーダーにより燃焼前の C、H、N 成分と燃焼後の C、H、N 成分の測定結果から初殻の燃焼状態の評価を行った。

また、炭素性成分は、地球環境や健康影響を与える微小粒子の主要な構成成分である。それらは、有機炭素 (OC, Organic carbon) と元素炭素 (EC, Elemental Carbon) に分類することができる。粒径がおよそ $2\ \mu\text{m}$ 以上の粗大粒子

は、主に鼻・喉・咽頭領域に沈着した後、体外に排出されるが、粒径 2 μm 以下の微小粒子は肺胞の深部まで容易に到達することが報告されている。そのため、籾殻燃焼により生成する炭素性成分の組成を把握する必要がある。本サンプリングでは、近年健康影響が懸念されたことから規制が設けられた、PM_{2.5} の大気浮遊粒子状物質の評価を行うため、PM_{2.5} サイクロンサンプラー（株式会社 東京ダイレック製）を用いて排ガス中の大気浮遊粒子状物質を捕集した。

PM_{2.5} サイクロンサンプラーにより捕集された排ガス中の大気浮遊粒子状物質は、熱光学式炭素分析計（Model 2001, Thermal/Optical Carbon Analyzer Desert Research Institute）により、表 1 に示した IMPROVE 方式（Interagency Monitoring of Protected Visual Environment）に基づき、高純度ヘリウム雰囲気で 120 $^{\circ}\text{C}$ 、240 $^{\circ}\text{C}$ 、450 $^{\circ}\text{C}$ 、550 $^{\circ}\text{C}$ に昇温させて発生する二酸化炭素をメタン化させ、水素炎イオン化検出器（FID）で検出し、それぞれ OC1、OC2、OC3、OC4 とした。同様に、He/2 % O₂ 中で 550 $^{\circ}\text{C}$ 、700 $^{\circ}\text{C}$ 、800 $^{\circ}\text{C}$ で生成する炭素分を酸化触媒で二酸化炭素にし、さらに、還元してメタン化し、FID で検出し、それぞれ EC1、EC2、EC3 とした。

表 1 IMPROVE 方式

炭素成分	雰囲気ガス	熱分離温度 ($^{\circ}\text{C}$)
OC1	100 % He	~120
OC2		120~240
OC3		250~450
OC4		450~550
EC1	98 % He	~550
EC2	2 % O ₂	550~700
EC3		700~800

3. 実験結果

3.1. 異なる産地・品種間による籾殻試料の成分分析

籾殻試料の成分分析結果を表 2 に示す。結果より、6 品種とも国内で生産された籾殻であるが、産地による違いで多少の灰分含有率に差がみられたものの、その他の成分では大きな成分の差は確認されなかった。また、各地域の籾殻で揮発分含有率が 60%前後と高く、どの地域においても安定して有機性ガスを燃料として使用できると考えられる。

しかし、灰分含有率の割合が約 20%近い値

であることからバイオマス燃料の中では、石油代替性能はあまり高くないことが評価された。

表 2 もみ殻の成分分析

	灰分 (wt%)	水分 (wt%)	揮発分 (wt%)	固定炭素 (wt%)	炭素 (%)	水素 (%)	窒素 (%)
コシヒカリ宮崎	14.3	9.9	61.3	14.6	38.7	5.1	0.4
キラリ宮崎	13.3	10.0	61.9	14.8	39.0	5.1	0.3
新潟	18.9	8.4	58.2	14.5	37.4	4.7	0.3
北海道	16.7	9.7	60.9	12.7	39.2	5.1	0.5
供試サンプル	18.4	6.70	60.0	14.9	38.8	5.1	0.4
北海道ほしのゆめ	19.2	7.6	59.2	14.0	37.9	5.1	0.5

3.2. 異なる産地・品種間による籾殻試料の燃焼特性

示差熱・熱重量（TG-DTA）同時測定装置による結果から、コシヒカリ宮崎では 320 $^{\circ}\text{C}$ および 400 $^{\circ}\text{C}$ 程度で DTA のピークが確認できた。これは 320 $^{\circ}\text{C}$ で熱分解がピークに達し、さらに、400 $^{\circ}\text{C}$ 以上で着火したためだと考えられる。

このような挙動はコシヒカリ宮崎以外の 3 種のもみ殻でも同様の傾向が確認された（図 2）。しかし、それぞれ 20-50 $^{\circ}\text{C}$ 程度それぞれのピークにずれがあり、新潟で 450 $^{\circ}\text{C}$ に到達しないと、着火しなかった。

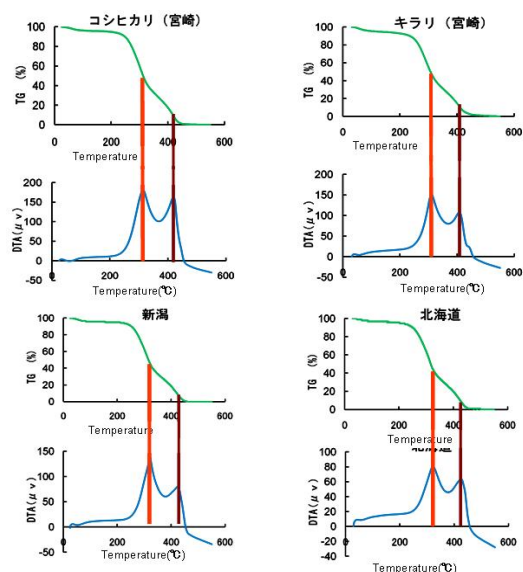


図4 TG-DTAによる籾殻の燃焼挙動評価

3.3. 燃焼条件試験に用いた籾殻と燃焼灰の成分分析

表 3、表 4 に燃焼条件試験に用いた籾殻と燃焼後に灰回収機により回収された籾殻燃焼灰の成分分析結果を示した。前述したように籾殻の灰分含有率の値から籾殻は燃料としての燃焼性能は高くないことが示唆される。また、燃

焼後の揮発分含有率、C含有率の値から多くの炭素性成分が装置内で燃焼されたことが評価できる。

表3 籾殻と籾殻燃焼灰の工業分析

	水分 (wt%)	揮発分 (wt%)	灰分 (wt%)	固定炭素 (wt%)
籾殻	8.00	60.2	28.7	3.10
燃焼後	1.00	4.60	90.0	4.40

表4 籾殻と籾殻燃焼灰の元素分析

	C (wt%)	H (wt%)	N (wt%)
籾殻	34.1	4.67	0.43
燃焼後	9.22	0.44	0.12

3.4. 燃焼排気ガス中のガスと大気浮遊粒子状

物質の捕集と炭素成分濃度低減

図4に籾殻供給量を2.40、2.49、2.57 kgと変化した場合による、籾殻燃焼1 kg当たりのPM_{2.5}の大気浮遊粒子状物質の生成量を示した。結果より、供給量の最も多い2.57 kgでは、1 kg当たりの大気浮遊粒子状物質の生成量が8.31 µgと最も高く、供給量を徐々に減らしていくに連れて生成量は減少していき、2.40 kgの供給量では、1 kg当たり排出量が4.27 µgと大幅に低減可能である。健康影響が懸念されるPM_{2.5}の大気浮遊粒子状物質は、新規燃焼装置を用いた場合1 kgの籾殻を燃焼するに当たり数µg / m³生成されている。本サンプリング結果から、新規燃焼装置の最適燃焼条件として、籾殻のみで燃焼温度維持が可能である10分間当たりの籾殻供給量2.40 kgが大気浮遊粒子状物質低減効果として最も良い燃焼条件である。

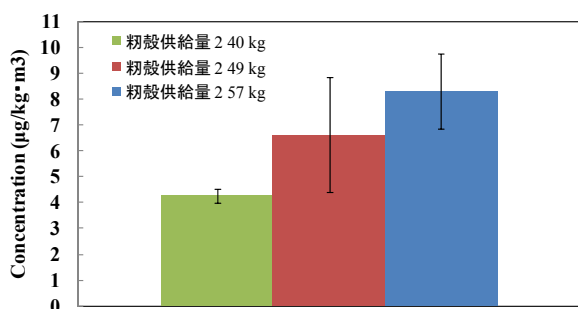


図5 燃焼条件による大気浮遊粒子状物質中の炭素成分濃度低減

図6に、大気浮遊粒子状物質中の炭素成分の成分割合を示した。全ての燃焼条件においてsoot-EC (EC 2 + EC 3) が主要炭素構成成分となっていることがわかる。このことは、燃焼装置

内の燃焼温度がディーゼル燃焼のように比較的高温で燃焼されていることが予想され、特に、籾殻供給量2.57 kgの条件では、EC 3が約80%の割合を占めていることから、籾殻供給量の増加に伴い、燃焼装置内の温度が上昇し、より不完全燃焼を起こしやすい結果となっていることが考察された。OC成分は籾殻供給量の異なる3つの燃焼条件において主要成分が異なっており、籾殻供給量が減少していくに従って熱分解温度の高いOC 3やOC 4へとシフトしていくことがわかる。特にバイオマス燃焼におけるOC成分は多くの水溶性有機炭素 (WSOC) が存在するため、今後WSOC分析を行いその割合を調査することを検討している。

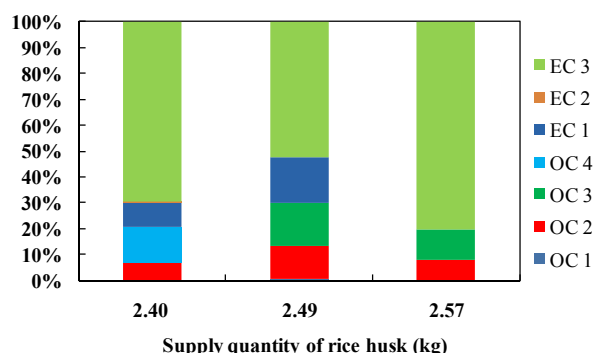


図6 燃焼条件による大気浮遊粒子状物質中の炭素成分割合

3.5. 燃焼条件による排ガス成分の濃度変化

表4に、異なる籾殻供給量による籾殻1 kg当たりの排ガス濃度を示した。籾殻供給量を減少させていくに従ってNO濃度が低減されることから、籾殻供給量の減少に伴い燃焼装置内の温度が減少し、thermal-NOx が生成されにくい温度範囲 (1100 °C) となっていることが考えられる。化石燃料と比較してS含有量が少ないのがバイオマス燃料の特徴である。そのため、籾殻においても全ての籾殻供給量の条件でSO₂の排出濃度は0ppmとなった。CO、CO₂濃度の結果から、より籾殻供給量が多い方が燃焼装置内の温度が高温となるため排ガス中の酸化反応が促進され、CO濃度は籾殻供給量2.40 kgの場合において最大となり、CO₂濃度は籾殻供給量2.57 kgにおいて最大となることが考えられる。O₂濃度はいずれの籾殻供給量も約15%近い値であることから排ガス中の酸素含有率は十分高い値を示している。このことから、空気供給量は現状の酸素濃度の値からも問題のないことがいえる。

表 4 異なる燃焼条件による籾殻 1 kg 当たりの排ガス濃度

	NO (ppm) / kg	SO ₂ (ppm) / kg	CO (ppm) / kg	CO ₂ (vol%) / kg	O ₂ (vol%) / kg
籾殻供給量 2.40 kg	57.8	0	180	2.89	14.6
籾殻供給量 2.49 kg	64.2	0	166	3.27	15.3
籾殻供給量 2.57 kg	67.6	0	131	3.36	15.6

4. まとめ

地球温暖化防止のための取り組みは世界各国共通の課題として認識しており、農水の分野においても籾の乾燥調製施設における農業廃棄バイオマス成分の籾殻の熱利用を検討している。

各種の籾殻の熱分解・燃焼特性の差異は小さく、また、健康影響が懸念される PM_{2.5} の大気浮遊粒子状物質は、本燃焼装置を用いた場合 1 kg の籾殻を燃焼するに当たり数 $\mu\text{g} / \text{m}^3$ 生成され、籾殻供給量を制御し、燃焼条件を適正化することで、大気浮遊粒子状物質の排出低減が可能であるが、最適条件についてはさらなる調査は必要である。

現状の技術レベルで提案されているシステムはコストが高く具体的な方策は見出されていないのが実態である。

現在開発中の燃焼器が完成して普及する段階になれば大幅なコスト低減が可能になり具体的な提案として受け入れられる可能性があり早期の商品化が待たれる。

本年度は、燃焼器の基本的な特性を明確にすることが目標であり、石油燃焼による加熱から農業廃棄バイオマス成分の燃焼に移行するための条件の明確化など、ほぼ期待通りの成果が得られた。今後、籾殻以外のおがくずなどの未利用農・林業バイオマスの燃料を使用した場合の燃焼性能と最適条件を調査し、多種未利用バイオマスの化石代替燃料への有効利用を最大目標としている。

[参考文献]

- 1) A. D. Simonov, T. I. Mishenko, N. A. Yazykov and V. N. Parmon, Combustion and processing of rice husk in the vibrofluidized bed of catalyst or inert material, *Chemical for sustainable development*, **11**, 277-283, (2003)
- 2) Li Dong, Shiqiu Gao, Guangwen Xu., No reduction over Biomass Char in the Combustion Process., *Energy Fuels*, **24**, 446-450, (2010)
- 3) Lone A. Hansen, Hanne, P. Nielsen, Flemming J. Frandsen, Kim Dam-Johansen, Steffen Horlyck, Asger Karlsson., Influence of deposit formation on corrosion at a straw-fired boiler., *Fuel Processing Technology*, **64**, 189-209, (2000)
- 4) E.F. Iliopoulou, E.V. Antonakou, S.A.Karakoulia, I.A. Vasalos, A.A.Lappas, K.S. Triantafyllidis., Catalytic conversion of biomass pyrolysis products by mesoporous materials: Effect of steam stability and acidity of Al-MCM-41 catalysts., *Chemical Engineering Journal*, **134**, 51-57, (2007)
- 5) L. S. Johansson, C. Tullin, B. Leckner, P. Sjobvall., Particle emissions from biomass combustion in small combustors, *Biomass and Bioenergy*, **25**, 435-446, (2003)
- 6) M.Oser, T.Nussbaumer, B. Schweizer, M.Mohr, R.Figi, Influences on aerosol formation in an automatic wood furnace, *Aerosols from Biomass Combustion*, , 59-64, (2001)