

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 6 日現在

機関番号：16101

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560234

研究課題名(和文) 油水急速混合機構を用いた高負荷燃焼による難燃性燃料バーナ燃焼のCO<sub>2</sub>低減研究課題名(英文) High Load and Less CO<sub>2</sub> Burner Combustion of Incombustible Fuels Applying an Injector on the Concept of Fuel-water Rapid Mixing

研究代表者

木戸口 善行 (KIDOGUCHI, Yoshiyuki)

徳島大学・ソシオテクノサイエンス研究部・教授

研究者番号：70294717

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円、(間接経費) 1,170,000円

研究成果の概要(和文)：重質油や廃油，バイオマス燃料などの難燃性燃料に対して，低汚染バーナ燃焼を確立することを目的に，油水急速混合機構を適用してバーナ燃焼場に水を導入することを試みた．このために，油水急速混合噴霧ノズルを製作して燃料の微粒化および空気との混合を促進させた．この油水急速混合噴霧ノズルによるバーナ燃焼実験を行って，難燃性燃料の油水急速混合燃焼によって窒素酸化物および微粒子がともに低減する排気低減効果を明らかにした．また，低排気の高負荷燃焼を実現すれば，ボイラーに適用時は排気損失の低減による高効率化が望めることを示した．

研究成果の概要(英文)：This study tried to use incombustibility fuel in burner combustion. The key technology is introducing water in combustion field. An injector based on the concept of fuel-water internally rapid mixing has been developed. The injector promotes rapid mixing of fuel with water with support of pressurized air. Experiment of the burner combustion reveals that fuel-water rapid mixing is effective on reduction of exhaust emissions, such as nitrogen oxides and particulate matters. Moreover, lower pollutant combustion at high load has a possibility to improve thermal efficiency in boiler system by means of reduction of thermal loss of exhaust gas.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・熱工学

キーワード：燃焼

1. 研究開始当初の背景

大気汚染防止の観点から、ボイラの重質油燃焼に対して排気ガス規制が強化されてきており、ボイラ、乾燥炉、焼却炉などの燃焼設備を有する施設は環境対策の問題を抱えている。また、産業、運輸部門から排出される廃油、あるいは民生部門から排出される食用廃油等は、多くが焼却処分されているが、今後はこれらを再燃料化したりバイオマス資源を燃料化したりして燃焼させ、熱エネルギーを取り出すことが望まれる。このとき、重質油や廃油、バイオマス燃料は粘性が高く難燃性であり、燃焼したときに煤塵や窒素酸化物 NO<sub>x</sub> の排出が避けられず、環境対策が求められる。このような難燃性燃料の燃焼を最適化して、高効率に熱エネルギーを利用することが必要である。

2. 研究の目的

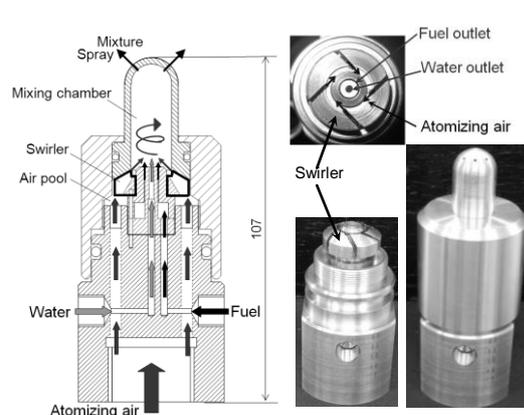
本研究は、バーナ燃焼において、難燃性燃料による低汚染バーナ燃焼を確立することを目的とした。これは、安価な燃料の利用を可能にすることで燃料費の低減を図ること、および、低汚染の高負荷燃焼を実現して、高負荷運転にともなう加熱空気量の低減でボイラ効率を向上させ、燃料消費量および CO<sub>2</sub> 排出量の抑制を図ることを最終的に目指している。

3. 研究の方法

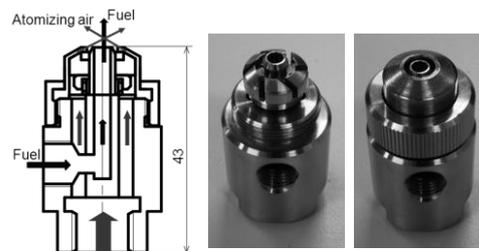
研究では、バーナ燃焼場において水を利用して燃料の微粒化および空気との混合を促進させて燃焼させることとし、このために油水噴射弁を試作して油水急速混合機構を適用した。この油水急速混合噴射弁によるバーナ燃焼実験を行って、燃焼場における水による排気低減効果を明らかにした。

図1は試作した油水急速混合噴霧ノズルを従来型の外部混合噴霧ノズルと比較して示す。油水急速混合噴霧ノズルでは、燃料と水を別々にノズル内に導入し、微粒化用空気とともに容量 3.9cc の混合室内で急速混合した後、図1(a)上部にある直径 1mm の8つの噴孔から保炎器内の燃焼場に噴霧させる。微粒化用空気は4本の連絡孔からなるスワローに沿って混合室内に導入される構造になっている。このため、混合室内では強い旋回流が形成され、燃料、水、空気の三流体混合が促進される。

図2には、燃焼試験装置の全体図を示す。噴霧バーナでは、安定な火炎を形成する保炎器下部に配置した噴霧ノズルから三流体を噴霧させて燃焼させる。噴霧ノズルには燃料、水、微粒化用空気供給系が接続され、また、保炎器外周には二次空気も供給され、保炎器内および保炎器下流でバーナ火炎に対して空気が導入される。このとき、保炎器内への二次空気導入は保炎器下部に設けられた空気導入孔より行われる。燃焼の手順は、まず LPG により点火して安定なバーナ火炎を形成した後、LPG の供給を止めて油水噴射弁に



(a) 油水急速混合噴霧ノズル



(b) 従来型噴霧ノズル

図1 噴霧ノズルの構造

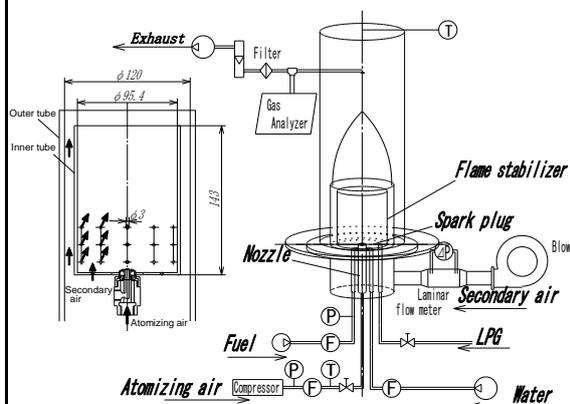


図2 燃焼実験装置

よる燃料供給のみで燃焼を行う。

燃焼計測では、噴霧ノズルから 600mm 下流において水冷サンプリングプローブで吸引した排気ガスをガス分析計に導入して、NO<sub>x</sub>、CO、CO<sub>2</sub>、O<sub>2</sub> 濃度を計測した。また、テフロンフィルタにより排気ガス中の微粒子 PM を捕集して重量測定を行い、PM 中の固形炭素成分 SOLID と可溶有機成分 SOF の分離計測も行った。また、噴霧ノズルから 700mm 下流では排気ガス温度 T<sub>ex</sub> も計測した。

燃焼評価においては、難燃性燃料として大豆油を使用した。噴霧特性に関わる燃料性状では、動粘性係数 (@40°C) が大豆油では、35mm<sup>2</sup>/s で 2.6mm<sup>2</sup>/s の軽油に対して約 13.5 倍の高粘性である。また、大豆油は蒸発特性にも劣る。このため、大豆油の燃焼には微粒化が欠かせない。

燃焼試験では、燃料流量と空気流量により燃焼における当量比を変化させ、また、燃料

に対する水導入割合（水流量），全空気量に対する微粒化用空気割合も実験変数とした．なお，油水混合による水導入の効果を比較評価するため，従来型噴霧ノズルで水エマルジョン化燃料による燃焼も行った．

#### 4. 研究成果

##### (1) 油水急速混合噴霧ノズルの効果

はじめに，油水急速混合噴霧の効果調べた．図3は図1の2種類の噴霧で当量比 $\phi$ を変化させて燃焼させたときの排気性能を示す．燃料に対する水導入割合は50vol%とし，従来型噴霧ノズルでは，水エマルジョン燃料とした．2つの噴霧ノズルでNOx濃度は同等であることから，NOx排出量は水割合に依存し，ノズルの種類あるいは水エマルジョンの有無によらないといえる．PM排出をみると，油水急速混合噴霧では， $\phi > 0.8$ の高負荷でも微粒子PMはほとんど排出されず，高負荷燃焼に有効であることが示された．

図4は軽油（GO）および軽油に水50vol%加えて（従来型噴霧ノズルでは水エマルジョン化して）高負荷燃焼させたときの火炎写真を示す．輝炎は火炎内に生成したすすの発光によるものであり，明るい輝炎はすす生成が多いことに起因している．図4(a)の油水急速混合噴霧ノズルでは，GOのみでは輝炎がみ

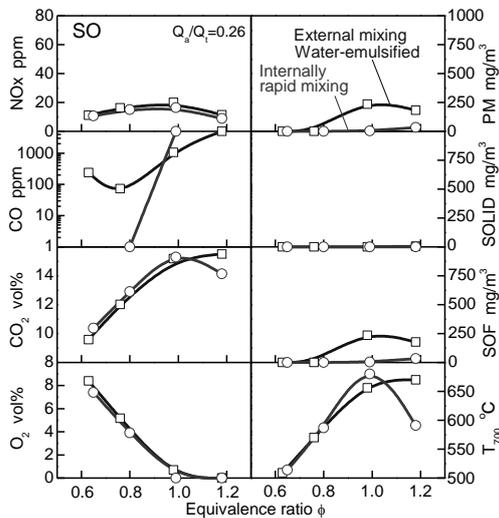
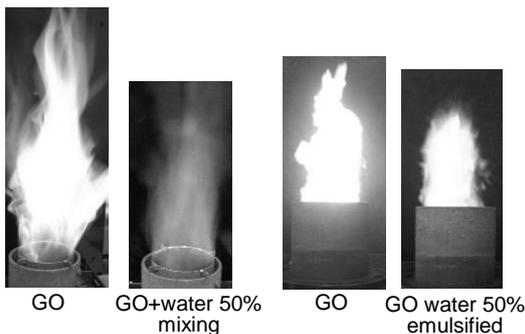


図3 噴霧ノズルによる排気性能の比較  
(燃料：大豆油，水割合：50vol%)



(a)油水急速混合 (b)従来型(水エマルジョン)

図4 バーナ火炎の比較(高負荷燃焼 $\phi=1$ )

られるが，水を導入すると輝炎がほとんどみられない無煙燃焼となる．図4(b)の従来型噴霧ノズルでも水エマルジョン化により輝炎が低減するが，火炎の輝度からも油水急速混合噴霧ノズルのほうがさすが低減できるといえる．

##### (2) 油水急速混合による排気性能

つぎに，実験変数を変化させて油水急速混合噴霧ノズルによる排気性能を調べた．

図5は，全空気流量一定 $Q_t$ のもとで燃料流量 $Q_f$ を変化させて負荷条件（当量比 $\phi$ ）を変えると同時に，燃料流量に対する水流量割合（水割合0vol%：W0，30vol%：W30，50vol%：W50），および全空気流量 $Q_t$ に対する微粒化用空気流量 $Q_a$ の割合（微粒化用空気割合 $Q_a/Q_t$ ）を変化させたときのNOx，PM排出量を示す．図よりNOx濃度は $Q_a/Q_t$ によらない． $Q_a/Q_t$ を増加させると燃料の微粒化特性が向上するため，火炎温度は増加する．一方で， $Q_a/Q_t$ の増加にともない二次空気量（ $Q_t - Q_a$ ）が減少することで火炎長は短くなって滞留時間は短くなる．この結果， $Q_a/Q_t$ によらずNOx濃度は一定となったと考えられる．PM排出量は，水を導入しないW0において， $\phi=1.2$ の高負荷燃焼で $Q_a/Q_t$ の増加により低減されている．また，水導入割合の増加によりPMの排出量は大きく低下する．W0からW50まで水導入割合を増やすことにより，例えば $Q_a/Q_t=0.26$ の場合， $\phi=1.2$ でのPM排出量は $508\text{mg/m}^3$ から $33.3\text{mg/m}^3$ まで低下する．W50では水導入の効果により $Q_a/Q_t$ によらず高負荷燃焼でもPMはほとんど排出されない．すなわち，本研究で対象とした水導入割合と微粒化用空気流量の範囲では，PM排出量の低減に対して水の導入が効果的といえる．これは，水による二次微粒化で微粒化特性が向上したことによると考えられる．

図6は燃料流量 $Q_f$ ，水流量 $Q_w$ を変化させて油水急速混合噴霧ノズルによるバーナ燃焼性能を評価した結果をNOxおよびPM排出量の排気マップで示したものである．図より， $\phi > 1$ の高負荷燃焼領域において， $Q_w$ が少なく水割合が小さい場合にはPMの排出が多く，高負荷燃焼が制限される．しかし，本ノズルで油水噴射して $Q_w$ を増加させればPMが低

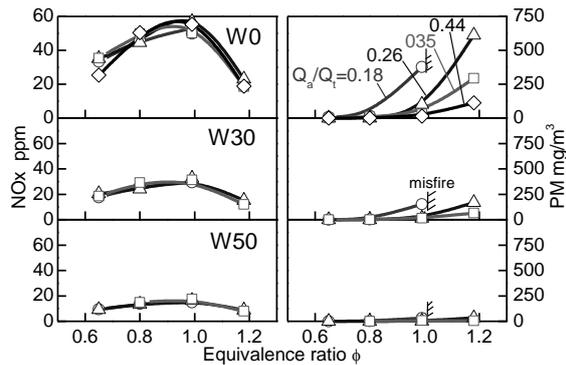
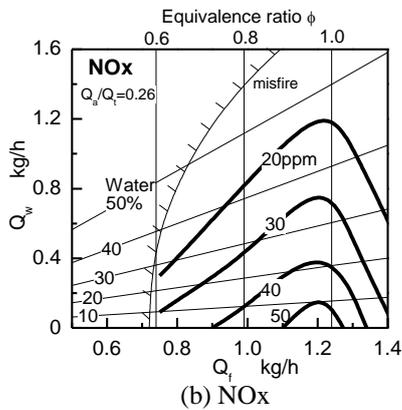
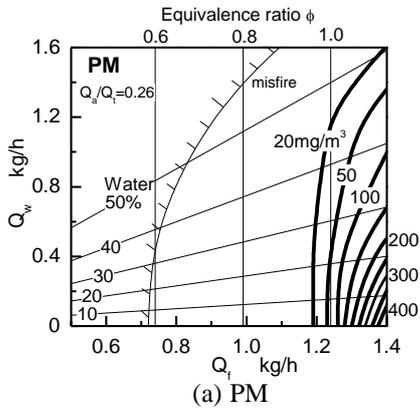


図5 水割合と微粒化用空気割合の変化による排気性能の変動



(b) NOx



(a) PM

図6 油水急速混合噴霧ノズルの排気性能図

減するとともに NOx も低下し、例えば水割合を 50vol% にすれば、 $\phi=1.4$  近くまで高負荷燃焼範囲を拡大することができる。水管ボイラーにおける高負荷燃焼が実現すれば、同一量の燃料を少ない空気量で燃焼させることになる。これは高温の排出ガス量を減らして排気損失を低減することにつながり、ボイラー効率向上に有効となる。

(3) 排気特性の支配因子

前節で調べた排気性能に対して、PM および NOx 生成の支配因子を調べた。

図7は、燃料を大豆油 SO および軽油 GO とし、それぞれで水割合を変化させたときの PM の排出傾向を示している。PM の排出量は導入燃料量に対する排出指標 EIPM であらわしている。当量比  $\phi_a$  は、保炎器内に微粒化用空気のみが導入されると仮定したときの当量比である。空気流量一定であるため、当量比  $\phi_a$  が同じであればノズルからの流体の噴流速度  $V_a$  は同一となる。図より、EIPM は  $\phi_a$  および  $V_a$  に対して線形に変化しており、 $V_a$  が小さいほど PM 排出量は低くなることがわかる。これは、保炎器内の燃焼初期において  $\phi_a$  および  $V_a$  が PM 生成に影響を及ぼすことをあらわしており、ノズルからの噴流速度が燃料の微粒化に大きな影響を及ぼすことが示唆される。

図8は水割合に対する PM の排出傾向を示している。図より燃焼場への水導入割合が増加すると PM が低減する。とくに、大豆油 SO のほうが軽油 GO よりも水導入による PM 低減効果が大きい。油水急速混合噴霧は、とく

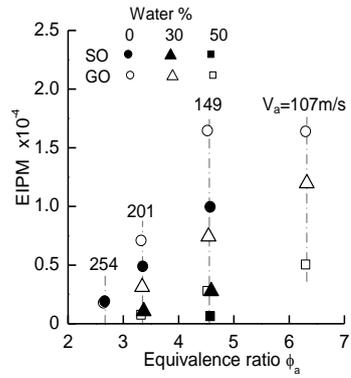


図7 保炎器内当量比と PM

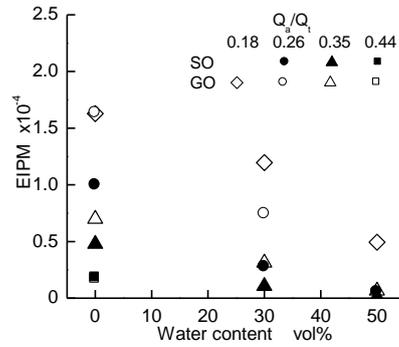


図8 水割合と PM

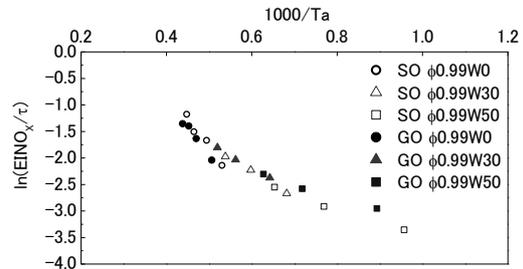


図9 NOx 排出特性の整理

に難燃性燃料の PM 低減に有効といえる。

図9は、NOx 生成の支配因子を調べたものである。ここでは、NOx 排出量に対して時間・温度スケールを行った。まず EIPM と同様に NOx 濃度と燃料量から EINOx を求め、滞留時間  $\tau$  を火炎長  $L_f$  と微粒化用空気の噴流速度  $V_a$  から、 $\tau=L_f/V_a$  として求めた。これより、 $EINOx/\tau$  は反応速度となる。また、保炎器内の燃焼が NOx 生成に強い影響を与えたと考え、保炎器内で蒸発した燃料と微粒化用空気が均一混合して完全燃焼した場合を仮定した断熱火炎温度  $T_a$  を求めた。図9では  $T_a$  と  $EINOx/\tau$  をアレニウスプロットした。ここでは、当量比  $\phi=0.99$ 、 $L_f=0.6m$  で評価している。燃料種に関わらず、 $EINOx$  と  $T_a$  の関係は、一本の直線であらわされる。したがって、保炎器内の温度は NOx 生成に強い影響を及ぼすといえる。

(4) 熱交換特性

つぎに、バーナ燃焼における熱交換特性に対する水導入の影響を調べた。この評価に用いた燃焼炉を図10に示す。燃焼炉は高さ

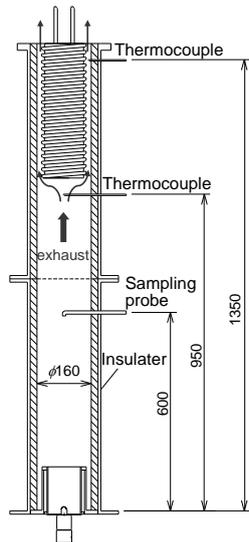


図 10 熱交換特性の評価装置

ノズル直上  $h=1400\text{mm}$ , 内径  $160\text{mm}$  で, 内部には厚さ  $20\text{mm}$  の断熱材を設置した. 熱交換器は水冷却管を 20 巻にした構造で火炎に直接加熱されないように燃焼炉上部に配置した. 排気ガスは熱交換器の外周を流れて冷却管との間で熱交換を行う. 計測では熱交換器入口, 出口の冷却水温度差, 冷却水流量から冷却水による回収熱量を求めた. また, 熱交換器前後の排気ガス温度から排気ガス損失を求めた. 熱収支において, 入熱量  $Q_i$  は投入燃料の発熱量より算出できる. この入熱が熱交換器での回収熱量  $Q_{o1}$ , 排気ガス損失  $Q_{o2}$ , 壁面からの熱損失  $Q_{o3}$  になると考えた. 熱回収量  $Q_{o1}$  には, 熱交換器で冷却水が回収する熱量に水冷管表面における排気ガス中の水分の凝縮による熱量, 火炎の輻射などその他による熱量が加わっているとした.

図 11 は, 以上の推定から熱収支を求めたものである. ここでは, 大豆油, 軽油と大豆油・水エマルジョン燃料とで熱収支を比較している. 図で実際の熱回収量は,  $Q_{o1}$  から凝縮熱を差し引き, 排気ガスからの熱交換とその他出力の合計と考える.

まず大豆油 SO-W0 と軽油 GO-W0 で熱交換量に燃料種による大きな違いはない. 水エマルジョン燃料化して燃焼場に水を導入すると (SO-W50), ガス温度が低下するため壁面からの熱損失が小さくなる. ただし, 熱交換

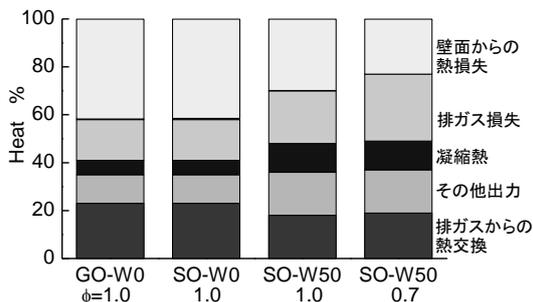


図 11 熱収支の推定

量は低下し, その結果排ガス損失も SO-W0 より大きくなる. これは燃料中に水が含まれるために排ガス中にも水分が多くなり, 水による凝縮により熱交換器での伝熱特性が悪化することが要因の一つと考えられる. このため, 熱交換器内の冷却水温度を高め, 凝縮の影響を排除して評価することが必要と思われる. この点に計測上の課題はあるものの, SO-W0 と SO-W50 の比較より, 熱交換量とその他出力の合計による熱回収量は, 水を導入しても大きく変化しないといえる.

さらに, SO-W50 で当量比 1.0 と 0.7 における熱収支を比較すると, 当量比の高い高負荷燃焼では排気ガス温度が高くなるために, 壁面からの熱損失割合は大きくなるが, 排気ガス流量が低減できる効果により排ガス損失割合は低くなる. したがって, 排ガス損失の増加を抑えながら壁面熱損失を改善すれば, 高負荷燃焼でさらに熱交換効率を高められる可能性がある.

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者, 研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 1 件)

- ① T. Yatsufusa, Y. Kidoguchi, D. Nakagawa, Improvement of Emissions and Burning Limits in Burner Combustion using an Injector on the Concept of Fuel-water Internally Rapid Mixing, Journal of Energy and Power Engineering, Vol.8, No.1, pp.11-19, 2014. (査読有)

[学会発表] (計 4 件)

- ① 中松 将太, 小野田 勝希, 名田 譲, 石動 更, 木戸口 善行, 内部急速混合型油水噴射ノズルを用いたバイオマス燃料の排気特性に関する研究, 第 50 回燃焼シンポジウム, 2012 年 12 月 7 日, ウィンクあいち (愛知県).
- ② 内原 健太郎, 中松 将太, 三浦 更, 名田 譲, 木戸口 善行, 内部急速混合型油水噴射ノズルを用いたバイオ燃料の燃焼特性, 第 49 回燃焼シンポジウム, 2011 年 12 月 7 日, 慶応義塾大学 (神奈川県).
- ③ 内原 健太郎, 中川 大輔, 名田 譲, 木戸口 善行, 内部急速混合型油水噴射ノズルを用いたバイオ燃料のバーナ燃焼特性に関する研究, 日本機械学会 2011 年度年次大会, 2011 年 9 月 14 日, 東京工業大学 (東京都).

- ④ Y. Kidoguchi, T. Yatsufusa, D. Nakagawa, Improvement of Emissions and Burning Limits in Burner Combustion using an Injector on the Concept of Fuel-water Internally Rapid Mixing, The Fifth European

Combustion Meeting ECM2011, 2011.6.29,  
Cardiff University (Cardiff, UK).

6. 研究組織

(1) 研究代表者

木戸口 善行 (KIDOGUCHI, Yoshiyuki)  
徳島大学・大学院ソシオテクノサイエンス  
研究部・教授  
研究者番号： 7 0 2 9 4 7 1 7

(2) 研究分担者

名田 譲 (NADA, Yuzuru)  
徳島大学・大学院ソシオテクノサイエンス  
研究部・講師  
研究者番号： 5 0 3 8 3 4 8 5