

## 水分が及ぼす固体低質燃料の燃焼への影響

青田, 峰朋 / AOTA, Takatomo

---

(発行年 / Year)

2006-03-24

(学位授与年月日 / Date of Granted)

2006-03-24

(学位名 / Degree Name)

修士(工学)

(学位授与機関 / Degree Grantor)

法政大学 (Hosei University)

2005 年度

修士論文

水分が及ぼす固体低質燃料の燃焼への影響

Effect of Moisture Content in Solid Waste Fuels  
on That Combustion Behavior

指導教官

法政大学工学部機械工学科      岡島 敏 教授

法政大学大学院工学研究科

機械工学専攻修士課程

アオタ    タカトモ

04R1101

青田 峰朋

# Effect of Moisture Content in Solid Waste Fuels on That Combustion Behavior

Takatomo AOTA

## Abstract

Recently in Japan the wastes produced from domestic and industrial field are 50 million ton in a year and 80% of these wastes are disposed by incinerator. From the viewpoint of environmental problem and effective utilization on combustion of solid waste fuels, it is very significant to elucidate the conditions for suitable combustion behavior of waste fuels as an energy source.

In the first step of the waste fuel combustion research, the experiment had carried out to examine the most fundamental combustion characteristics of solid waste fuels in high temperature atmosphere that requires stabilizing the flame development of solid waste fuels.

In the second step of the study, the experiment has been conducted to elucidate the combustion characteristics of solid waste fuels including moisture because the domestic and industrial wastes contain much moisture initially.

Thus, the present experiments have been performed to study to analyze on how the combustion process of solid waste fuels are affected by moisture content of solid waste

fuels in very high temperature atmosphere achieved in the electric furnace.

The experimental assembly is rectangular shape and size is  $900 \times 350 \times 900$ mm and contain a digital video camera, an air cylinder, an air tank, a temperature controller of electric furnace and a relay device. The size of electric furnace is  $350 \times 350 \times 350$ mm and the temperature profile inside the electric furnace is nearly uniform temperature around the axis and there are minor deviations near top and bottom surface.

The food of Nishiki-koi is used as standard model fuel (test fuel A) because its compositions and elements are very similar to those of domestic and industrial wastes. The test fuel formed in spherical shape of 3mm and 5mm in diameter is attached at tip of the fine quartz fiber of 0.4mm in diameter and it is shifted to the center position of electric furnace by the aid of air cylinder and air tank. The experimental conditions employed here are 873K to 1673K in temperature and 21% in oxygen concentration by volume and the range of moisture content 0 to 50%.

The ignition delay, flaming duration, char combustion and total burning time are examined in details by observing the burning behavior of solid waste fuels with digital video camera as parameters of ambient temperature and moisture content. Naturally these combustion characteristics are very important to evaluate the combustion rate of solid waste fuels.

The main results obtain in this study are as follows:

- (1) Even at the case where much moisture is contained in the solid waste fuel, the combustion phase can be classified by the gas phase ignition, luminous diffusion flame and char combustion.
- (2) The flaming duration and char combustion period do not be affected by moisture content of solid waste fuels even at 1673K of ambient temperature, though the ignition delay is markedly influenced by moisture content.
- (3) There is no chemical effect such as thermal decomposition of moisture on the combustion characteristics of solid waste fuels and the dominant effect of moisture in the solid waste fuels is only vaporization heat of moisture.
- (4) The heat flux by radiative heat transfer requested for the ignition of the solid waste fuels is increased by the increment of moisture content and it is not so different at any ambient temperature. The moisture containing in fuel sphere initially don't evaporate completely before ignition, though the residual moisture has little effect on the flaming duration.

## 目次

第 1 章 緒論	・ ・ ・ ・ ・	1
1-1 研究背景	・ ・ ・ ・ ・	1
1-2 研究目的	・ ・ ・ ・ ・	3
第 2 章 実験概要	・ ・ ・ ・ ・	4
2-1 実験装置	・ ・ ・ ・ ・	4
2-2 実験に用いられる試料について	・ ・ ・ ・ ・	5
2-3 実験条件	・ ・ ・ ・ ・	5
2-4 実験方法	・ ・ ・ ・ ・	6
2-5 水分添加率の定義	・ ・ ・ ・ ・	7
第 3 章 実験結果及び考察	・ ・ ・ ・ ・	8
3-1 燃焼挙動	・ ・ ・ ・ ・	8
3-2 燃焼直接写真	・ ・ ・ ・ ・	9
3-3 放射熱伝達	・ ・ ・ ・ ・	11
3-4 着火遅れ	・ ・ ・ ・ ・	13
3-5 有炎燃焼	・ ・ ・ ・ ・	13
3-6 チャ-燃焼	・ ・ ・ ・ ・	15
3-7 全燃焼時間	・ ・ ・ ・ ・	18
3-8 水分の蒸発潜熱が着火に及ぼす影響	・ ・ ・ ・ ・	19

第 4 章 結論	• • • • • 20
謝辞	• • • • • 21
発表論文	• • • • • 22
参考文献	• • • • • 24

# 第 1 章 緒論

本研究の行われた背景、研究を行うにあたっての目的は以下の通りである。

## 1-1 研究背景

近代文明において石油、石炭、天然ガスなどの化石燃料は必要不可欠なものとして、工業化社会の発展に寄与してきた。だが、化石燃料を燃焼させた際に排出されるガスの温室効果によって地球上の平均気温が自然の営みに基づく変動よりも早い速度で上昇し、人類が抱える地球規模の大きな問題となっている。地球温暖化を阻止するべく 1997 年 12 月に京都で開催された気候変動枠組条約第 3 回締約国際会議(COP3)で締結された京都議定書によって、我が国は 2008 年～2012 年において 1990 年対比で温室効果ガスの 6%削減を義務付けられた。そして 1998 年 9 月、「総合エネルギー対策推進閣僚会議」によって「長期エネルギー需給見通し」が正式に改定された。改定された見通しによると、これからの我が国のエネルギー供給構造において「新エネルギー」は京都議定書を達成する為に大きな期待をかけられている。この「新エネルギー」の中でも特に廃棄物発電は現状の 146 万 kW(2002 年度末)の発電規模に対して 2010 年度には 400 万 kW の設備規模目標が掲げられ、「新エネルギー」の柱とされている。

現在、日本国内における一般廃棄物の年間排出量は 1994 年に 5000 万 t を超えてから、約 5000 万 t で推移している。2003 年度の一般廃棄物排出量は 5161 万 t であり、これは日本国民が一日に約 1.1kg のごみを排出していることになる。同年度にはその約 78%の 4024 万 t が直接焼却によって処理されており、この水準

は欧米諸国と比べて非常に高い水準にあり、焼却の際に生じる熱をエネルギー源として有効利用する事は、我が国が京都議定書の基準を達成するうえでも必要不可欠である。

新エネルギーには太陽光発電や風力発電が含まれているが、廃棄物発電はそのなかでも昼夜を問わず安定して電力を供給できるという点、比較的設備投資が容易にできるという点が大きな期待をかけられる要因と考えられる。ただ、目標値を達成するにあたっては現状の技術のみでは不可能であり、新たな技術を用いる必要がある。新たな技術の方向性としては、現存の廃棄物処理施設の高効率化及び、廃棄物ガス化溶融技術が妥当なものとして考えられており、研究が進められ実際の処理施設への適応も進んでいる。

廃棄物処理施設の高効率化にあたっては、高温空気を用いた燃焼、空気中への酸素の混入や排ガス再循環等の手法が用いられているが、いずれの場合においても廃棄物の燃焼挙動を厳密に制御する事が重要である[1]。しかし、一般廃棄物は多成分、不均質及び多量の水分を含む物質であり、その燃焼挙動を解明することは難しく、当研究室では廃棄物の燃焼挙動を解明するべく、多くの事柄について研究を行っている。

ところが、一般廃棄物が水分を含んだ状態で焼却処理されるのに対し、水分が廃棄物の燃焼に及ぼす影響についての研究がほとんど行われていない。そこで本研究では廃棄物に含まれる水分に着目し、高温雰囲気環境においてその水分が廃棄物の燃焼挙動に及ぼす影響の把握を目的として実験を行ったものである。

## 1-2 研究目的

本研究では廃棄物に含有する水分がその燃焼に及ぼす影響を把握することを目的とし、一般廃棄物のモデルを用いて燃焼させてその挙動を観察、考察を行うものである。

水分が廃棄物の燃焼に及ぼす影響として、以下のような効果が考えられる。物理的效果としては水が蒸発する際に周囲の熱を奪う蒸発潜熱の作用、化学的效果としては水の熱分解による燃焼への作用の解明を目的とする。

解明にあたって、物理的及び化学的性質が一般廃棄物に極めて類似している錦鯉の餌を一般廃棄物のモデルとして用いる。錦鯉の餌によって作成された試料を電気炉にて作り出された高温雰囲気内で燃焼させ、その燃焼挙動の観察をデジタルビデオカメラによって行い、実験によって得られた映像を解析することとする。

## 第 2 章 実験概要

以下に本研究で行われる実験の概要、実験環境を作り出すための装置、実験に用いられる試料、実験方法、及び水分添加率の定義について示す。

### 2-1 実験装置

実験装置 ( Experimental assembly ) の概略図を Fig . 2-1、実験装置全体の写真を Fig . 2-2 に示す。実験装置は縦 900mm、横 350mm、高さ 950mm の直方体であり重さは約 40kg である。実験装置内には電気炉 ( Electric furnace )、電気炉の温度コントローラー ( Temperature controller of electric furnace )、デジタルビデオカメラ ( Digital video camera )、エアシリンダー ( Air cylinder ) 及び電磁弁 ( Electro-magnetic valve ) が含まれており、エアシリンダーと電磁弁は外部のエアタンク ( Air tank ) に溜めた空気によって作用する。エアタンク内に圧縮空気を溜め込む目的でコンプレッサー ( Compressor ) が用いられる。

電気炉は一辺が 300mm の直方体であり、発熱体にシリコニット ( 炭化珪素 : SiC ) を用い温度コントローラーによって、発熱体に流れる電流を調節し電気炉内雰囲気温度の制御を行う。電気炉の材料にはジュラルミンが用いられ、外壁には断熱材が設置されている。電気炉内の温度測定は、炉内に設置された R 型熱電対 ( R-type thermo couples ) によって測定される。温度コントローラーによって制御された電気炉内の温度分布は炉壁部分を除いてほぼ一様である。エアシリンダー及び電磁弁は試料を炉内に挿入する際に用いられる。

## 2-2 実験に用いられる試料について

実験に用いられる固体廃棄物燃料 (Solid waste fuel) として、その物理的性質及び化学成分が都市ごみに極めて類似している錦鯉の餌 (Food of Nishiki-Koi) が選定された[2]。これは日本環境衛生センターの廃棄物基本データ集に基づいて、実際に排出される都市ごみとその組成が極めて類似していることから、錦鯉の餌を研究に用いる運びとなった。錦鯉の餌は模擬ごみ A として廃棄物燃焼研究に用いられている。錦鯉の餌と都市ごみの化学成分を Table 2-1 及び Fig . 2-3 に示す。

## 2-3 実験条件

本実験の諸条件を Table 2-2 に示す。電気炉内酸素濃度及び炉内雰囲気圧力は通常大気酸素濃度及び通常大気圧下にて固定し、電気炉内雰囲気温度、試料への水分添加率及び試料直径をパラメータとして実験を行った。

## 2-4 実験方法

実験に際しては、一般廃棄物（都市ごみ）のモデルとしてその物理的性質と、化学成分が都市ごみにきわめて類似している錦鯉の餌を用いる。実験の準備として、錦鯉の餌を微細にすり潰した後、水分を含ませ治具を用いて球状に成型する。球状に整形した試料を直径 0.4mm のシリカ線（Quartz fiber）の先端に付着させ、12 時間以上乾燥させたものを実験に使用する。電気炉内雰囲気温度は温度コントローラーによって、予め実験目標値に設定される。エアタンクにはエアシリンダーを作用させるための圧縮空気（0.5MPa）を溜めておく。以上の準備が完了後、以下の手順において実験を行う。

乾燥後の試料の重さを計測する。

シリカ線と試料の重さからあらかじめ測定したシリカ線の重さを引き、試料球（Fuel sphere）のみの重さを算出する。試料球の重さを用いて、設定した水分添加率（Moisture content）に値する試料球の重さを算出する。

スポイトを用いて試料球に水分を添加し、その水分含有量を調節する。

試料の水分含有量が目標値に達すると同時に、試料は速やかにエアシリンダー先端に付着され、エアシリンダーの作用により電気炉内に挿入される。

試料の燃焼の様子を装置に搭載されたデジタルビデオカメラによって撮影する。

その後デジタルビデオカメラによって得られた試料の燃焼映像を用いて、燃焼挙動の解析を行った。

## 2-5 水分添加率の定義

本研究を行うにあたって試料への水分添加率を以下のように定義する。試料質量を  $M_f$  (g)、試料に含まれる水分質量を  $M_w$  (g) とし、試料に含有する質量を試料質量で除し、100 倍したものを水分添加率  $\varepsilon$  (%) とする。

$$\varepsilon = \frac{M_w}{M_f} \cdot 100 \quad (2.1)$$

水分を添加させた試料質量の測定については、 $10^{-4}$ g まで測定できる測定器を用い、任意の水分添加率に値する量を正確に測定し、水分の添加を行った。

## 第3章 実験結果及び考察

実験によって得られた燃焼挙動の様子を解析し、以下の点に着目し考察を行った。また考察にあたって幾つかの算出式についてもここで記述を行う。

### 3-1 燃焼挙動

本実験の範囲内においては廃棄物の燃焼過程 (Combustion process) は以下のようになる。

試料は速やかに電気炉内へ挿入されると同時に、炉内雰囲気からの熱を受け急激に加熱される。試料内に含まれる水分は急激な温度上昇によって直ちに蒸発が始まり、また試料表面からは可燃性ガス (Combustible gases) が突出し、さらに加熱されその可燃性ガスが自己着火温度に達すると試料は気相着火する。試料が電気炉内に挿入されてから気相着火するまでの時間を着火遅れ (Ignition delay) と定義する。

気相着火の後には激しく輝く拡散火炎 (Luminous diffusion flame) を伴った燃焼が続く。この拡散火炎を伴った期間を有炎燃焼時間 (Flaming duration) とする。火炎は自然対流 (Natural convection) の影響によって上方に持ち上げられながら燃焼し、雰囲気温度によってその形状には若干の変化が見られる。

有炎燃焼が終了した後、試料内部には残留している融点の高い固定炭素が残留周囲雰囲気中の酸素と反応し燃焼するチャー燃焼（Char combustion）へと移行する。チャー燃焼が続く期間をチャー燃焼時間とし、チャー燃焼が終了した段階で灰分（Ash）を残して燃焼は完結する。

### 3-2 燃焼直接写真

Fig . 3-1 から Fig . 3-5 に水分添加率 40%、試料直径 3 mm、雰囲気温度がそれぞれ、873K、1073K、1273K、1473K 及び 1673K における試料の燃焼挙動の直接写真を示す。Fig . 3-6 には雰囲気温度 1673K、水分添加率 0 及び試料直径 3mm における燃焼直接写真、Fig . 3-7 には初期試料直径を 5mm、雰囲気温度 1473K、水分添加率 40% に設定した際の燃焼直接写真を示す。試料は電気炉内に挿入されるとすぐに加熱され、気相着火に至る。それぞれの条件下において、試料の燃焼形態は前述の通り、気相着火、有炎燃焼、チャー燃焼という燃焼形態をとることがわかる。雰囲気温度が上昇するに従って、燃焼の完結に要する時間は減少する。

また雰囲気温度 1673K という非常に高い雰囲気温度では、試料直径 5mm においては有炎燃焼時に試料を支持するシリカ線が火炎からの熱により曲折してしまう為、有炎燃焼時間及びチャー燃焼時間を測定する事はできなかった。

火炎の着火の様子にも若干の違いが見られる。特に雰囲気温度 873K においては、着火の際に他の条件と比較して極めて強い光を放ち、その後有炎燃焼へと移

行している事がわかる。試料表面から放出された可燃性ガスは雰囲気温度が低い為、試料球表面から放出されてもすぐには自己着火温度に至らず、周囲に拡散した後自己着火温度に達し着火に至ると考えられる。また試料直径 3mm 及び雰囲気温度 1473K 以上においては、灰分は溶融して燃焼が完結する。水分添加率の上昇に伴い、同様の雰囲気温度では燃焼が完結する迄により多くの時間を費やすことになる。試料直径を変化させた場合も燃焼形態に対する大きな変化は見られないが、試料直径の増大に伴い燃焼完結に要する時間は増加する。

次に有炎燃焼時の火炎形状に着目してみる。Fig . 3-6、Fig . 3-7 及び Fig . 3-8 を比較してみると水分添加率の上昇によって火炎形状に大きな違いは見られない。ここで Fig 3-9 に水分添加率 0%、試料直径 5mm における雰囲気温度 1273K、1473K 及び 1673K における有炎燃焼時の燃焼直接写真を示す。ここに示された時間は、試料が気相着火し有炎燃焼に移行してからの時間である。これらの写真より、雰囲気温度の上昇に伴い火炎形状の違いを確認する事ができる。特に雰囲気温度が上昇するに伴い、火炎は上部だけでなく水平方向にも広がっていることが見てとれる。

### 3-3 放射熱伝達

- ・放射熱伝達の算出

試料が着火に至るまでの間、電気炉内雰囲気から試料への熱伝達は炉内雰囲気からの放射熱伝達によるものが支配的である [ 3 ]。そこで、試料への放射熱伝達量の算出を行い、着火に至るまでに受け取った熱量及び、水分添加率との関係の考察を行う。

固体の表面に熱放射によるエネルギーが入射した場合、試料への熱放射からのエネルギーは一部分を吸収し、残りは反射する。ここで入射したエネルギーの全てを吸収する物体を考える。その物体を黒体 ( Black body ) と呼び、黒体による放射エネルギーは温度が等しい場合において最大となる。単位時間、単位面積当たりに放射されるあらゆる波長 ( Wavelength ) を含む全放射エネルギー ( Total emissive power ) を全放射能  $E_b$  (  $W \cdot m^{-2}$  ) はステファン・ボルツマンの法則 ( Stefan-Boltzmann law ) により以下のように表す。

$$E_b = \sigma \cdot T^4 \quad ( 3 . 1 )$$

ここで、 $\sigma$  はステファン・ボルツマン定数 ( Stefan-Boltzmann constant )  $5.6687 \times 10^{-8}$  (  $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$  )、 $T$  は黒体の絶対温度である。物質の表面に放射される全熱放射エネルギーのうち物体が吸収するエネルギー  $E$  (  $W/m^2$  ) は黒体における放射エネルギー  $E_b$  を用いて次式の様に表す事ができる。

$$E = \quad \cdot E_b \quad (3.2)$$

ここで は固体物質の吸収率 (Absorptivity) を示し、本実験に用いられる錦鯉の餌においては吸収率を 0.85 とする [4]。以上の理論を用いて、着火に至る迄の間に試料に放射されるエネルギー  $Q$  (J) を以下の式で算出する。

$$Q = \quad \cdot \quad \cdot T^4 \cdot A \cdot t \quad (3.3)$$

$A$  は試料の表面積 ( $m^2$ )、 $t$  は着火遅れ (sec) を表す。試料が着火するまでに吸収した熱量 (Heat quantity) は黒体の全放射エネルギーに試料の吸収率、試料の表面積 (Surface area) 及び着火遅れを掛けたものとして表される。

#### ・着火に要する放射熱伝達

Fig. 3-10 には試料直径 3mm 及び 5mm において、縦軸に試料が着火に至るまでに炉内雰囲気から伝わった放射熱伝達量 (Heat quantity by radiative heat transfer) を、横軸に水分添加率をとったグラフを雰囲気温度をパラメータとして示す。試料への放射熱伝達量は前述の式を用いて算出を行う。このグラフより着火する迄に要する熱量は試料直径の増大によって大きく増加し、また雰囲気温度が異なっても試料の着火に要する熱量はほぼ一定である事がわかる。水分添加率が増大する事により着火に要する放射熱伝達は単調に増加するが、雰囲気温度に関わらずその値はほぼ一定である。

### 3-4 着火遅れ

Fig . 3-11、Fig . 3-12 は縦軸に着火遅れ、横軸に水分添加率をパラメータとして雰囲気温度をとったもので、試料直径はそれぞれ 3mm 及び 5mm である。試料直径 3mm 及び 5mm それぞれの場合において着火遅れは水分添加率の上昇に伴い比例的に上昇している事がわかる。これは前述の通り水分の蒸発潜熱の作用によるもので、含有水分量が大きい程着火遅れに及ぼす影響は大きくなる。ただし雰囲気温度の上昇により着火遅れの傾きが緩やかになっている事から、水分添加率の上昇に伴う着火遅れへの水の蒸発潜熱による作用は小さくなるものと考えられる。

### 3-5 有炎燃焼

有炎燃焼は激しく輝く拡散火炎を伴う状態である。Fig . 3-13、Fig . 3-14 には試料直径 3mm 及び 5mm それぞれの場合において、雰囲気温度をパラメータとして縦軸に有炎燃焼時間、横軸に水分添加率をとったグラフを示す。水分添加率の増加に伴い有炎燃焼は若干ながら増加しているが、着火遅れと比べるとその増加の割合は極めて小さいといえる。雰囲気温度 873K では Fig . 3-13 及び Fig . 3-14 においてわかる様に不規則な値をとっており、水分添加率の影響をほとんど受けていない。これは、燃焼直接写真でも見られるように着火の状態が他の雰囲気温度と比べ安定していない事によるものと考えられる。

Fig , 3-15 及び Fig . 3-16 には縦軸に水分添加率 0%における有炎燃焼時間を基準として任意の  $\varepsilon$  における有炎燃焼時間との比を表したもので、横軸には水分添加率、パラメータに雰囲気温度をとったものである。試料直径はそれぞれ 3mm 及び 5mm である。試料直径 3mm においては雰囲気温度の上昇に伴い、水分添加率の増大による有炎燃焼時間の傾きは小さくなっており、雰囲気温度 1673K においては、その傾きはほとんどないといえる。これは雰囲気温度の増加により、火炎からの熱エネルギーが増加し、試料に残留している水分の蒸発に掛かる時間が短くなる為と考えられる。試料直径 5mm においてはいずれの雰囲気温度においても若干の増加をみせているに過ぎないが、その増加は試料直径 3mm と比較して不規則である。これは、試料直径 5mm における燃焼直接写真 ( Fig . 3-9 ) において見られるように試料に含まれる試料表面の粗さが増大し火炎の形状が歪められる事が影響するものと考えられる。

### 3-6 チャー-燃焼

- ・ 表面反応律速及び拡散律速

チャー燃焼は試料に残留する固定炭素の反応であり、その反応は表面反応律速と拡散律速によって考えることができる [5][6]。表面反応の速度を考える時、通常は単位体積あたりの炭素の消費率  $\dot{m}_c$  (kg/(m<sup>2</sup>·s)) を用いて表される。酸素が試料周囲に充分存在している為、 $\dot{m}_c$  は

$$\dot{m}_c = k_s p_s (O_2) \quad (3.4)$$

と表される。ここで  $p_s$  は酸素分子の炭素表面での分圧 (Pa)、 $k_s$  は表面反応速度定数 (kg/(m<sup>2</sup>·s·Pa)) であり、次式によって表す。

$$k_s = F_s \exp \left( - \frac{E_s}{RT_s} \right) \quad (3.5)$$

$T_s$  は表面温度、 $R$  は一般ガス定数であり 8.314J/mol·K で表され、 $F_s$  は頻度因子、 $E_s$  は活性化エネルギーである。式 (3.4) に含まれる  $O_2$  の分圧は周囲空気中の酸素分圧  $p$  並びに反応速度と拡散速度の兼ね合いで定められ、それを考慮して  $p_s$  を消去すると次式が得られる。

$$\dot{m}_c = \frac{p(O_2)}{1/k_d + 1/k_s} \quad (3.6)$$

ここで、 $k_d$ は拡散速度定数と呼ばれ、次式

$$k_d = \frac{2M_c D}{dRT} \quad (3.7)$$

で与えられる。 $M_c$ は炭素の原子量、 $D$ は拡散係数 ( $\text{m}^2/\text{s}$ )、 $d$ は試料直径 ( $\text{m}$ )、 $T$ は雰囲気温度 ( $\text{K}$ )である。雰囲気温度が低い場合、式(3.7)の分母において、 $1/k_s$ は $1/k_d$ に比べて極めて大きい為、 $1/k_d$ を無視することができる。これを表面反応律速と呼ぶ。

しかし、式(3.5)より雰囲気温度の上昇に伴い $k_s$ は指数関数的に増加して行く事がわかる。 $k_s$ が指数関数的に増加するに対し、 $k_d$ は式(3.7)より $T^{0.75}$ に比例して増加するに過ぎない。従って、高温雰囲気になると $1/k_d$ が $1/k_s$ を追い越し、以下のような近似式が成り立つ。

$$\dot{m}_c = k_d p(O_2) \quad (3.8)$$

これにより、当初指数関数的に増加していた $\dot{m}_c$ の増加曲線は勾配が緩やかになり、1273Kを超えると表面反応律速から拡散律速へと移行する。

## ・チャー燃焼時間

有炎燃焼後に廃棄物燃焼は試料に残留した融点の高い固定炭素が雰囲気中の酸素と反応するチャー燃焼へと移行する。Fig . 3-17 及び Fig . 3-18 は縦軸にチャー燃焼時間、横軸に水分添加率をとったグラフであり、試料直径はそれぞれ 3mm 及び 5mm、雰囲気温度をパラメータとした。このグラフより水分添加率の増加によるチャー燃焼時間への影響は全く見られない。これは試料に含まれる初期水分は気相着火、有炎燃焼を経過する間に蒸発しきってしまう為だと考えられる。雰囲気温度の増大は、試料への酸素の拡散を助長させる為にチャー燃焼時間を著しく減少させる。また雰囲気温度 1473K と 1673K におけるチャー燃焼時間の差は他の雰囲気温度と比較して小さくなっている事が見て取れる。これは、前述の通り表面反応律速から拡散律速に変化した事により、チャー燃焼時間の変化の割合が緩やかになったと考えられる。

水分添加率 0% におけるチャー燃焼時間を基準として、任意の水分添加率におけるチャー燃焼時間との比を表したものを Fig . 3-19 及び Fig . 3-20 に示す。二つのグラフからは、水分添加率が増大しても着火遅れに及ぼす影響はほとんど見られない。これより、試料に初期から含まれる水分は気相着火、有炎燃焼という過程をとる間に蒸発し、チャー燃焼に移行する際には既に蒸発しきっているものと考えられる。

### 3-7 全燃焼時間

試料が電気炉内部に挿入されてから、燃焼が完結するまでの時間、即ち着火遅れ、有炎燃焼時間及びチャー燃焼時間を合計したものを全燃焼時間 ( Total burning time ) とし、Fig . 3-21 には水分添加率 20% 及び試料直径 3mm の条件において縦軸に全燃焼時間、横軸に雰囲気温度をとったものを示す。Fig . 3-22 には水分添加率の変化が及ぼす全燃焼時間への影響を把握する為に、横軸に水分添加率をとった。縦軸には全燃焼時間を取り、雰囲気温度は 1273K、試料直径は 5mm である。Fig . 3-21 より雰囲気温度の増大は全燃焼時間を著しく減少させ、着火遅れ及びチャー燃焼に大きな影響を与えている事がわかる。水分添加率の増加は着火遅れに対する影響が大きく、有炎燃焼及びチャー燃焼に及ぼす影響は少ないが若干ながら全燃焼時間を増大させる。

### 3-8 水分の蒸発潜熱が着火に及ぼす影響

- ・水分の蒸発潜熱について

水分の物理的な効果として蒸発する際に周囲の熱を奪う蒸発潜熱は廃棄物燃焼に大きな影響を与えるものと考えられる。試料に含まれる水分の蒸発潜熱 (J) は試料の含有水分量  $M_w$  に、水の沸点における蒸発潜熱 2256.9 (kJ/g) を掛けたものとして表す事ができる。

Fig . 3-23 には試料直径 5mm において縦軸に炉内雰囲気から試料へ入射する放射エネルギーのうち着火に至るまでに吸収された熱量を示し、また水分添加率 0% において着火に要するまでに試料が吸収した熱量の平均に、試料に含まれる水分の蒸発潜熱を合わせた熱量をとる。横軸には水分添加率を示し、雰囲気温度をパラメータとした。水分添加率 50% において試料の着火に要する熱量はいずれの雰囲気温度においても約 70J である。ここで、仮に水分が着火に至る迄の間に蒸発しきっているとすれば、約 100J の熱量を要することがわかる。しかし、実際に着火に至る迄に試料が吸収した熱量は約 70J である。これより、その差分だけ試料に含まれる水分が試料内部に残留しており、試料に含有している水分は蒸発しきらずに有炎燃焼が開始されることが考えられる。

## 第4章 結論

本研究は廃棄物の焼却において、予め廃棄物に含まれる水分がその燃焼に及ぼす効果を把握するべく実験を行ったものである。特に電気炉を用いた非常に高い雰囲気温度で試料を燃焼させ、水分の物理的及び化学的影響を確認する事を目的とした。

本実験によって得られた結果は以下の通りである。

本実験の範囲内では、即ち電気炉内雰囲気温度  $T$  が 874K ~ 1674K、水分添加率が 0% ~ 50%、試料直径  $d_0$  が 3mm 及び 5mm の実験条件において、試料の燃焼挙動は全ての条件下で気相着火 有炎燃焼 チャー燃焼という三つの形態をとり、各パラメータの変化は廃棄物燃焼が三つの燃焼過程を経る事について影響を及ぼさない。

水分添加率の増加はその蒸発潜熱の作用により、廃棄物燃焼の着火において大きな影響を及ぼし、着火遅れを大幅に増大させるが、有炎燃焼及びチャー燃焼に及ぼす影響は極めて小さい。

廃棄物燃焼に及ぼす水分の影響は着火遅れに対する水の蒸発潜熱による物理的作用が支配的であり、水の熱分解等の化学的作用は確認されなかった。

着火に要する炉内雰囲気からの放射熱伝達量は、試料に含まれる水分含有量に関わらずほぼ一定の値をとる。また試料に予め含まれる水分は着火に至る迄に蒸発しきらず、有炎燃焼時において残留水分は蒸発する。

## 謝辞

本研究を行うにあたって、大学在学中より終始一貫しての厳格な御指導、御鞭撻を頂きました岡島敏教授ならびに川上忠重教授に深く感謝の意を表し、厚く御礼申し上げます。また、実験装置の製作において中央工作室の島貫氏に重ねて深く感謝の意を表します。そして、多くの御助言を頂きました熱工学研究室の諸先輩方、院生、学部生の皆様に厚く御礼申し上げます。

平成 17 年 2 月

法政大学大学院工学研究科機械工学専攻 熱工学研究室

青田峰朋

## 発表論文

青田峰朋，林博明，岡島明子，岡島敏：非常に高い温度雰囲気中での固体低質燃料燃焼に及ぼす水分の影響について，日本機械学会関東支部 山梨講演会 講演論文集， pp . 61 - 62 ( 2004 年 10 月 )

棚網祐介，林博明，藤井直人，青田峰朋，岡島明子，岡島敏：高温空気中での廃棄物低質燃料の燃焼に及ぼす、水分・雰囲気圧力の影響について，第 42 回燃焼シンポジウム講演論文集， pp . 439 - 440 ( 2004 年 12 月 )

Takatomo Aota ,Hiroaki Hayashi ,Akiko Okajima & Satoshi Okajima : Combustion behavior of solid waste fuels containing moisture in very high temperature atmosphere , The Sixth KSME-JSME Thermal and Fluids Engineering Conference , CD-R ( March .2005 )

鈴木博敬，藤井直人，青田峰朋，岡島敏：高温空気中での廃棄物低質燃料の着火及び火炎構造の解明に関する研究，日本機械学会東北支部 第 41 期秋季講演会 講演論文集， pp . 165-166 ( 2005 年 9 月 )

藤井直人，青田峰朋，岡島明子，岡島敏：高温・高圧下での廃棄物燃料燃焼における火炎挙動に関する研究，第 43 回燃焼シンポジウム講演論文集， pp . 472 - 473 ( 2005 年 12 月 )

Takatomo Aota , Akiko Okajima , Takashi Sakuraya & Satoshi Okajima : Effect of moisture content in solid waste fuels on their combustion behavior , 14th ISME International Conference on Mechanical Engineering in Knowledge Age , pp . 714 - 719 ( Dec . 2005 )

## 参考文献

- 1) 鍋島淑朗, 森棟隆昭: ごみから電気をつくる, オーム社, 1999
- 2) HICOT 成果報告書: NEDO, pp.213-216, 2000
- 3) Okajima, A., Kazaoka, K. & Okajima, S.: Micro-gravity Observation on Combustion Behavior of Solid Waste Fuels in High Temperature and Low Oxygen Atmosphere, Bulletin of Faculty of Engineering, Hosei Univ., Vol.38, pp1-5. 2002
- 4) Kato, J. & Okajima, S.: Combustion Behavior of Solid Waste Fuels in High Temperature Environment under microgravity, Proceedings of The Third Asia-Pacific Conference on combustion, pp347-350. 2001
- 5) 新岡嵩, 河野通方, 佐藤順一: 燃焼現象の基礎, オーム社, 2004
- 6) 水谷幸夫: 燃焼工学, 森北出版, 2004
- 7) 斎藤彬夫, 岡田昌志, 一宮浩市: 伝熱工学, 産業図書, 2001

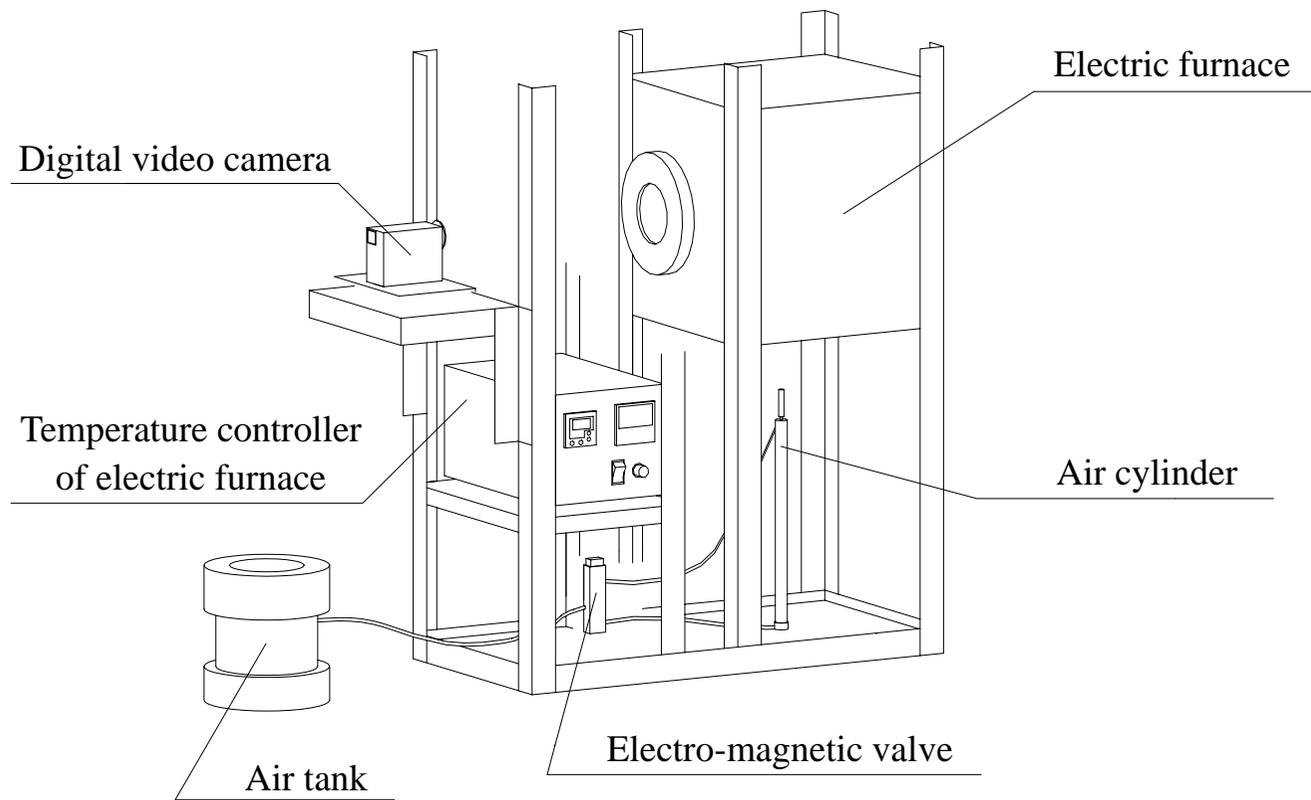


Fig . 2-1 Experimental assembly



Fig . 2-2 Experimental assembly

Table 2-1 Chemical composition

	O	C	H	N	S	Cl
Town wastes	29.8	45.5	7.0	1.0	0.0	0.6
Food of Nishiki-koi	32.16	45.51	6.43	6.80	0.42	0.43
unit	dry wt%					

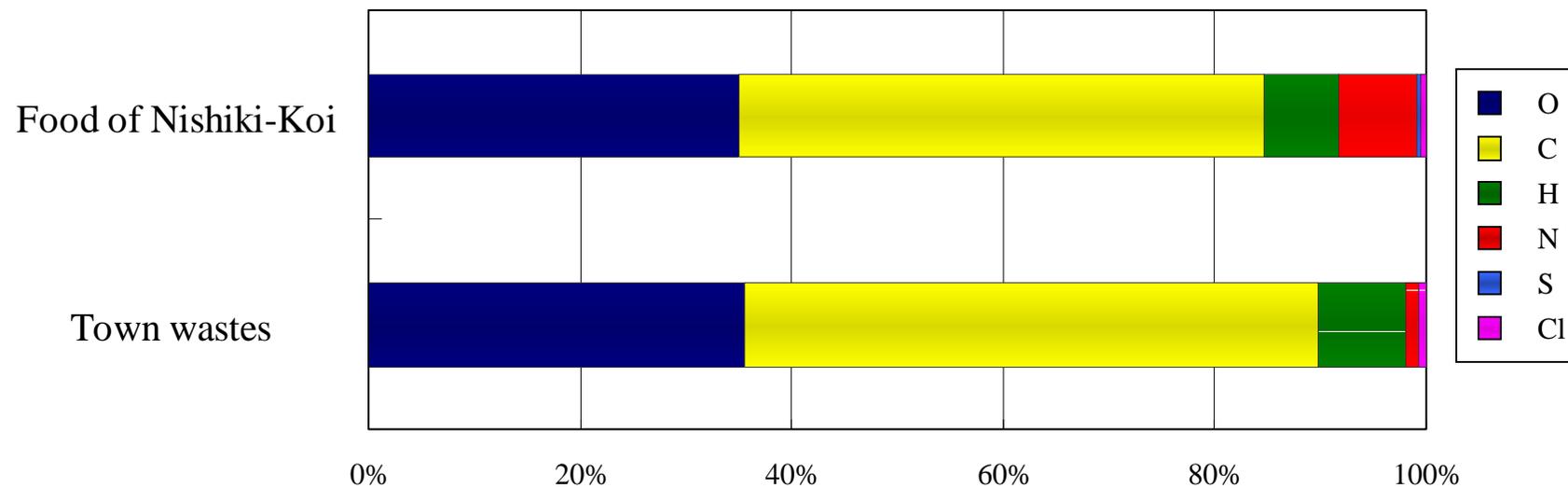


Fig . 2-3 Comparison of chemical elements

Table 2-2 Important features

Ambient temperature	$T$ [K]	873 ~ 1673
Moisture content	$\varepsilon$ [%]	0 ~ 50
Oxygen concentration	$O_2$ [vol%]	21
Ambient pressure	$P$ [MPa]	0.10
Test fuel		Food of Nishiki-Koi
Shape • Initial diameter	$d_0$ [ mm ]	Sphere • 3 , 5

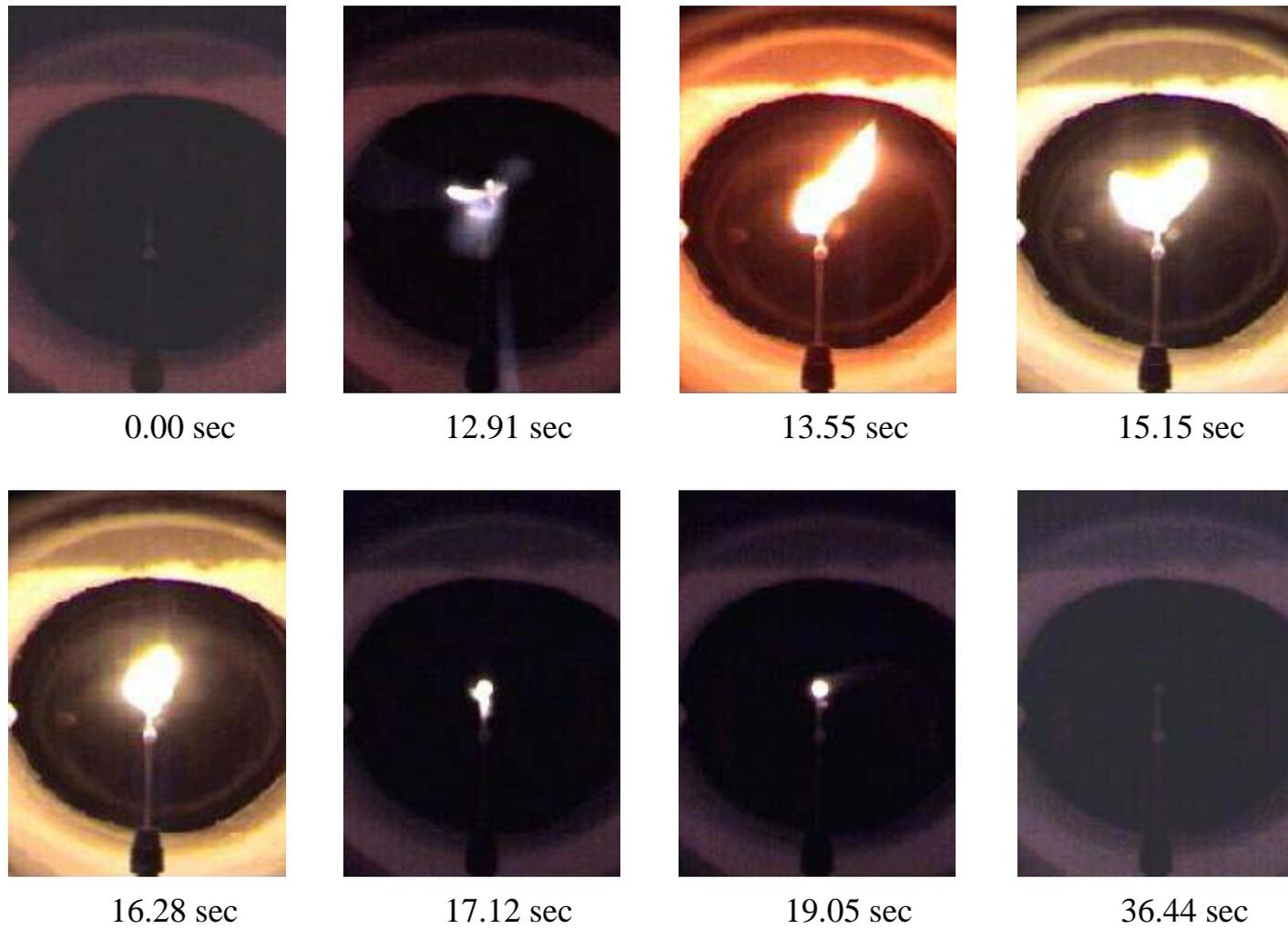


Fig . 3-1 Direct photographs on combustion of solid waste fuels (  $T=873\text{K}$  ,  $\varepsilon=20\%$  ,  $d_0=3\text{mm}$  )

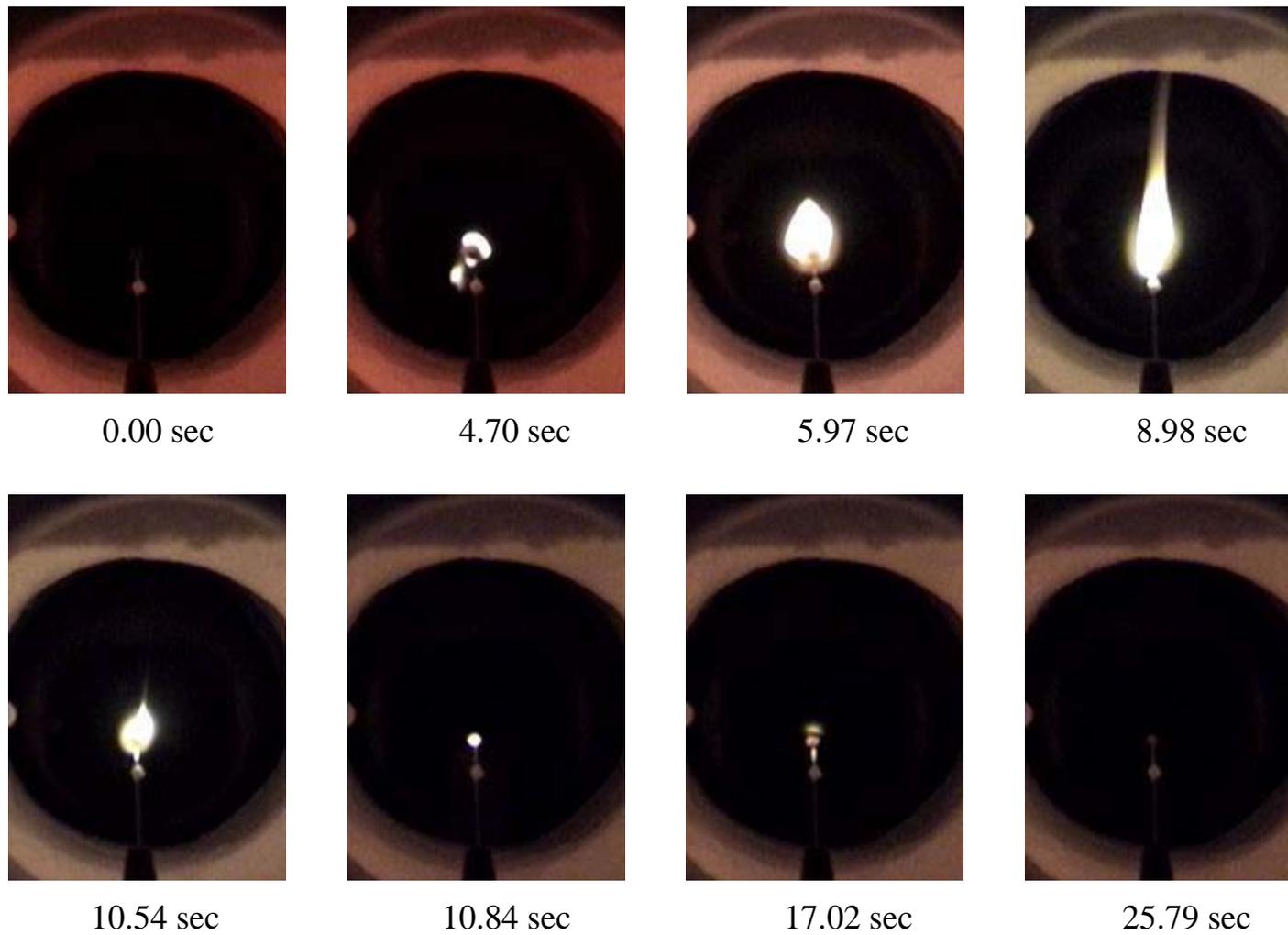


Fig . 3-2 Direct photographs on combustion of solid waste fuels (  $T=1073\text{K}$  ,  $\varepsilon=20\%$  ,  $d_0=3\text{mm}$  )

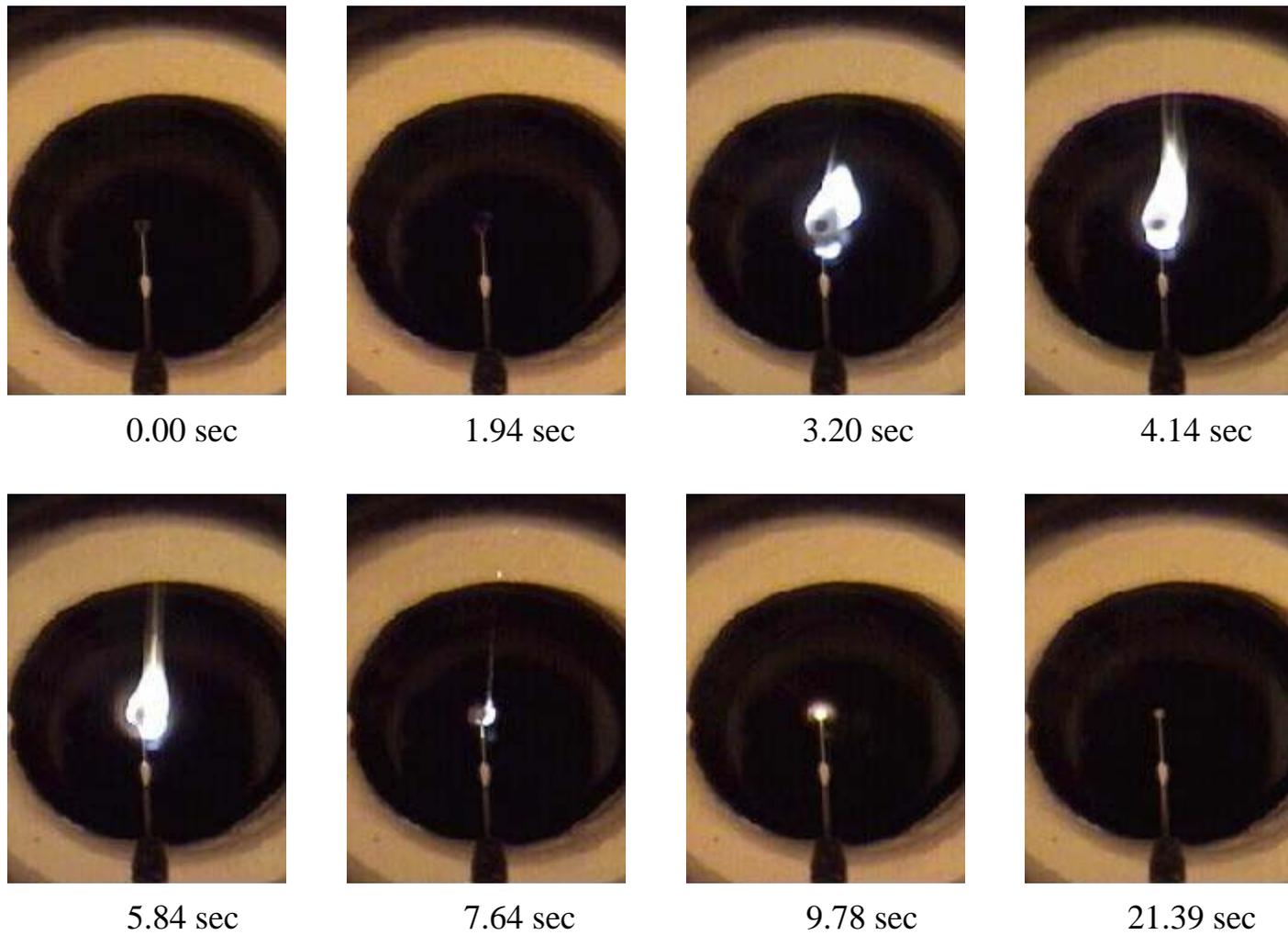


Fig . 3-3 Direct photographs on combustion of solid waste fuels (  $T=1273\text{K}$  ,  $\varepsilon=20\%$  ,  $d_0=3\text{mm}$  )

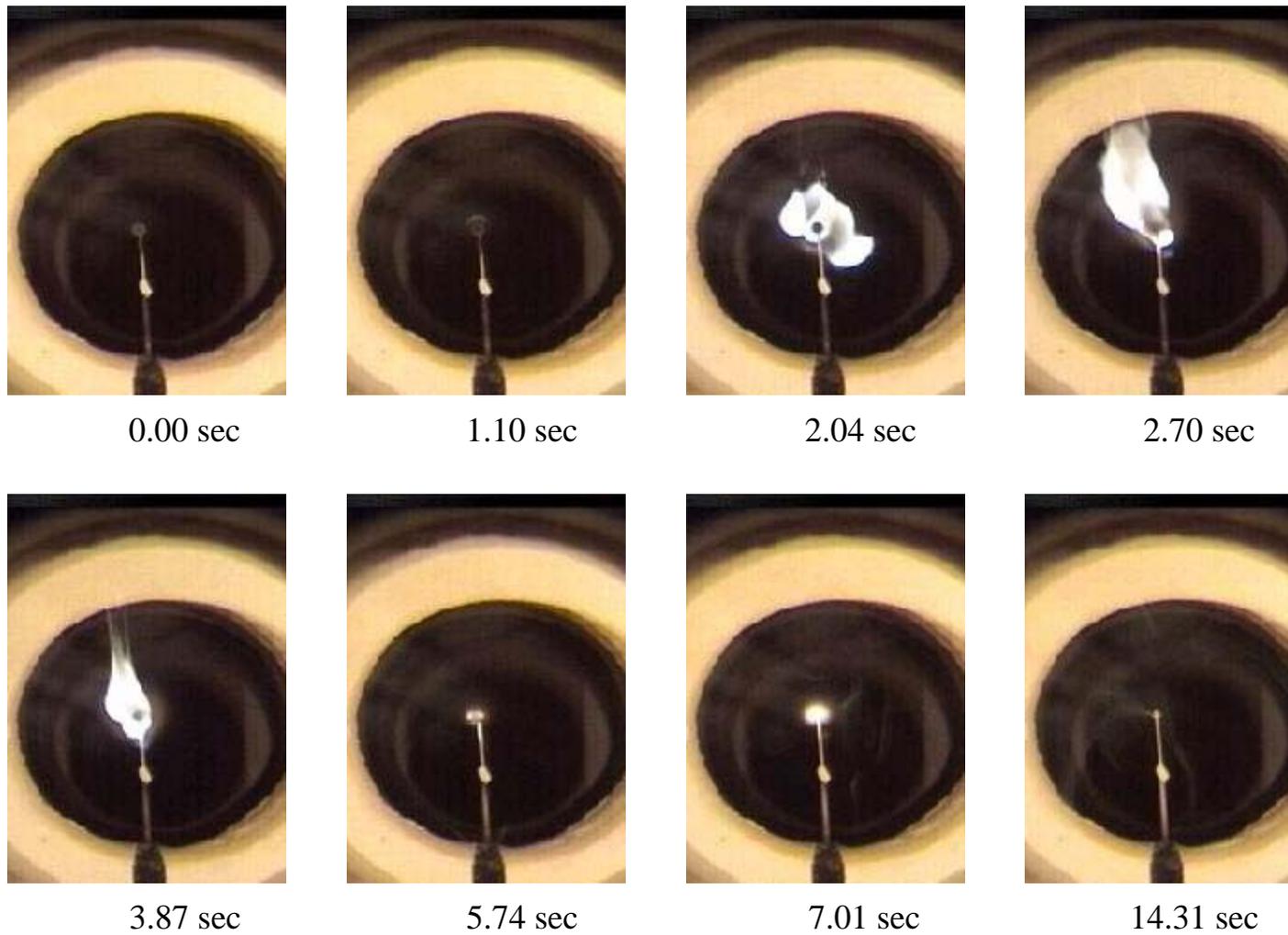


Fig . 3-4 Direct photographs on combustion of solid waste fuels (  $T=1473\text{K}$  ,  $\varepsilon=20\%$  ,  $d_0=3\text{mm}$  )

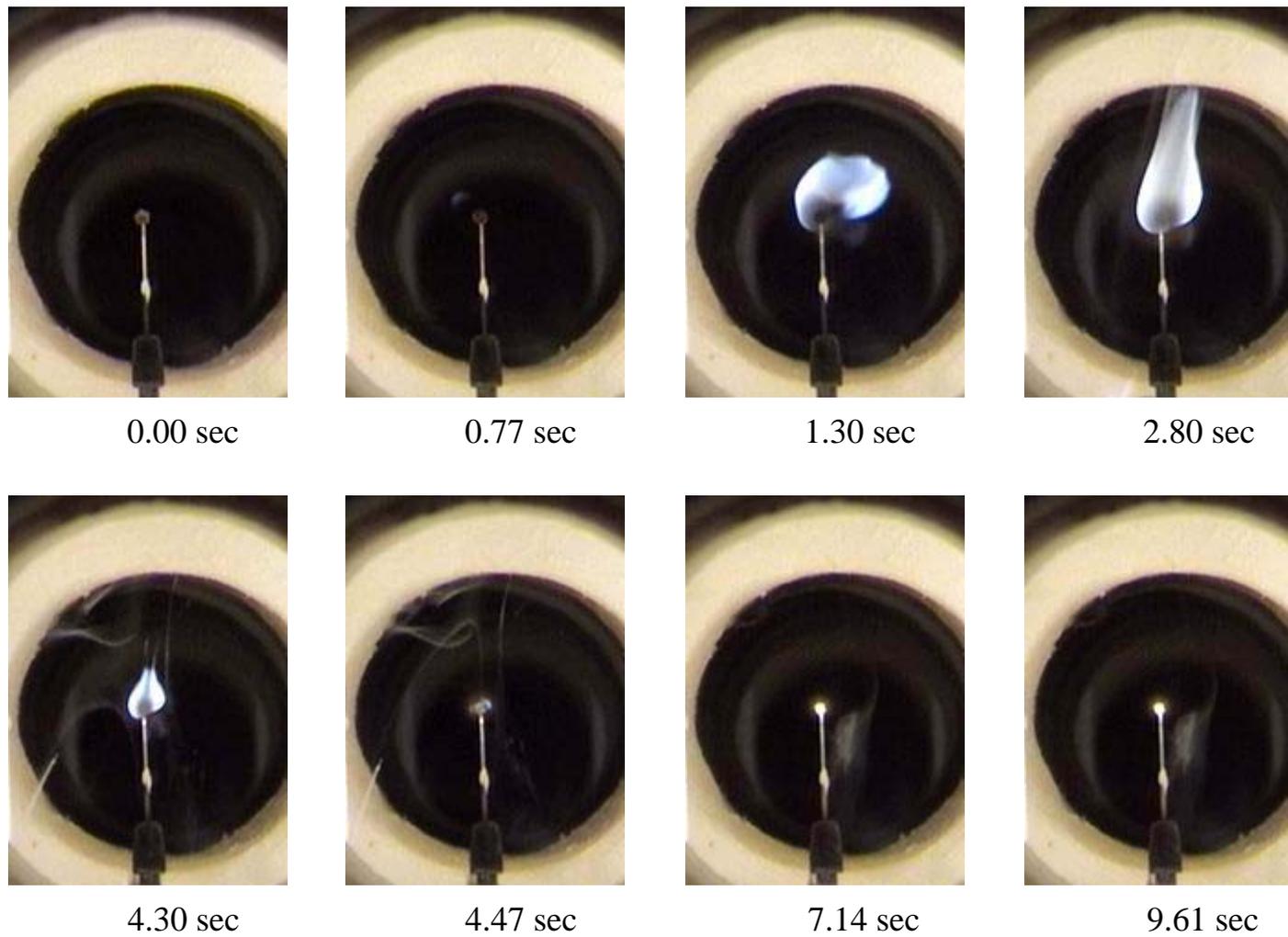


Fig . 3-5 Direct photographs on combustion of solid waste fuels (  $T=1673\text{K}$  ,  $\varepsilon=20\%$  ,  $d_0=3\text{mm}$  )

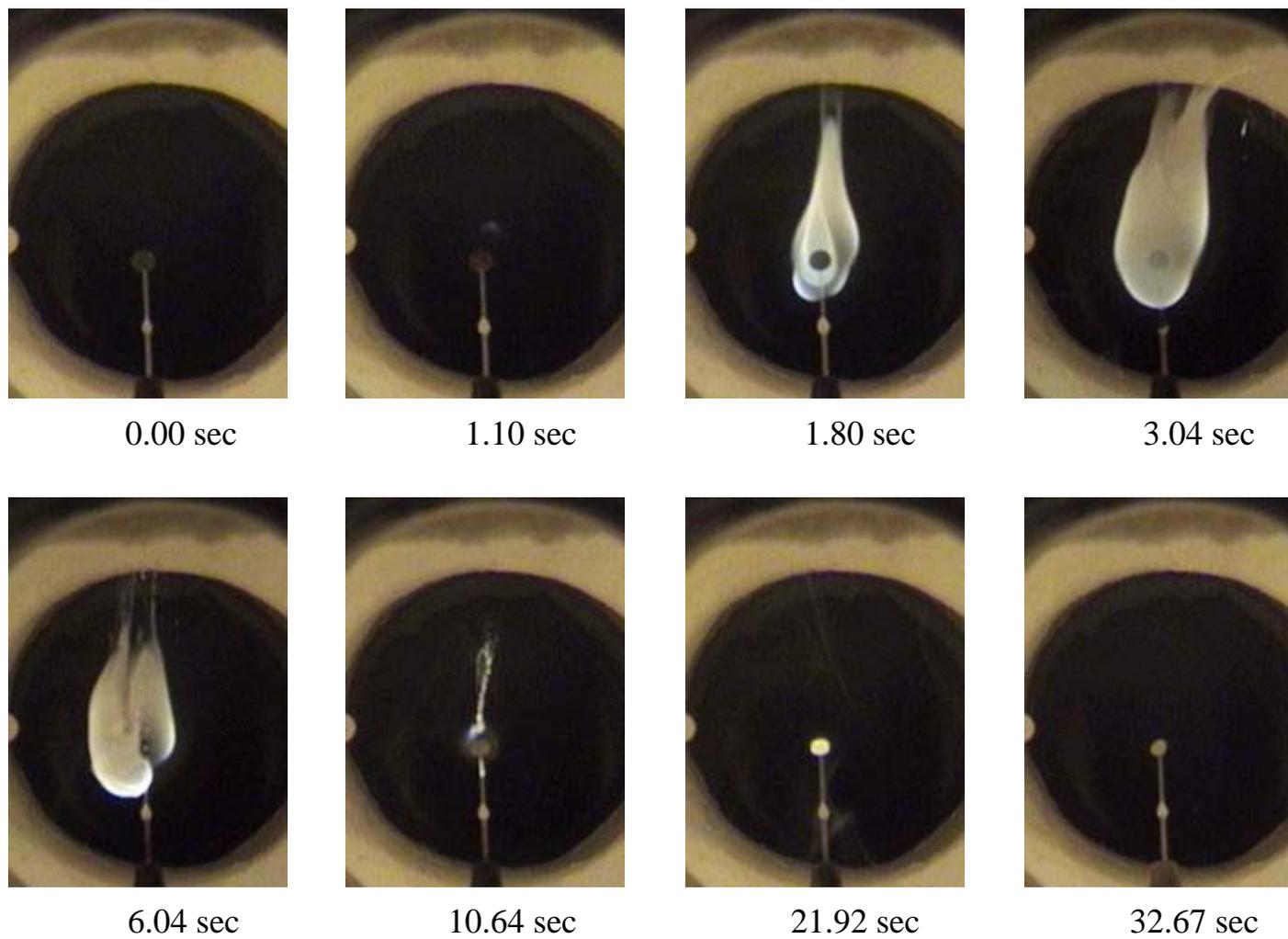


Fig . 3-6 Direct photographs on combustion of solid waste fuels (  $T=1473\text{K}$  ,  $\varepsilon=0\%$  ,  $d_0=5\text{mm}$  )

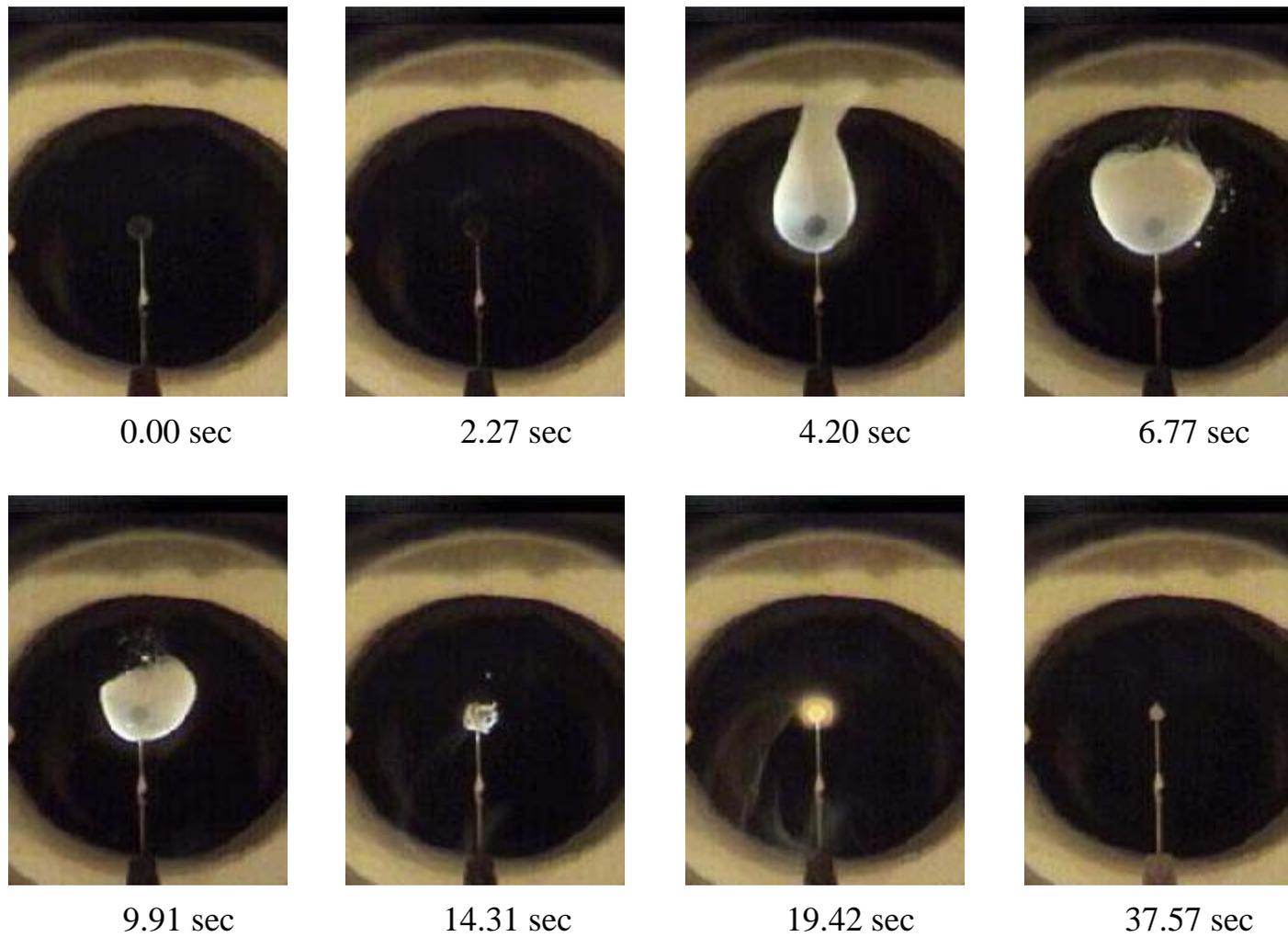


Fig . 3-7 Direct photographs on combustion of solid waste fuels (  $T=1473\text{K}$  ,  $\varepsilon=20\%$  ,  $d_0=5\text{mm}$  )

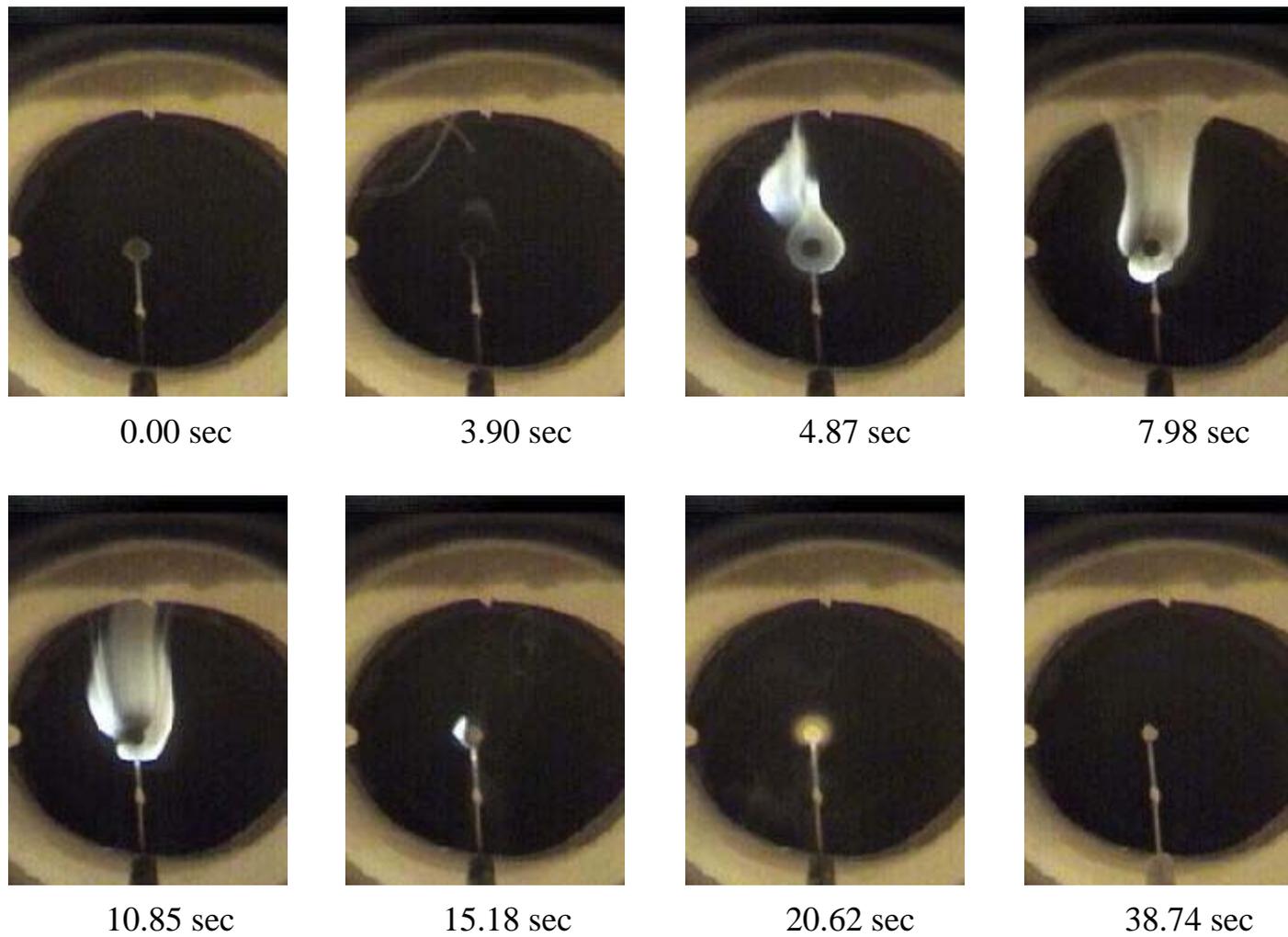


Fig . 3-8 Direct photographs on combustion of solid waste fuels (  $T=1473\text{K}$  ,  $\varepsilon=40\%$  ,  $d_0=5\text{mm}$  )

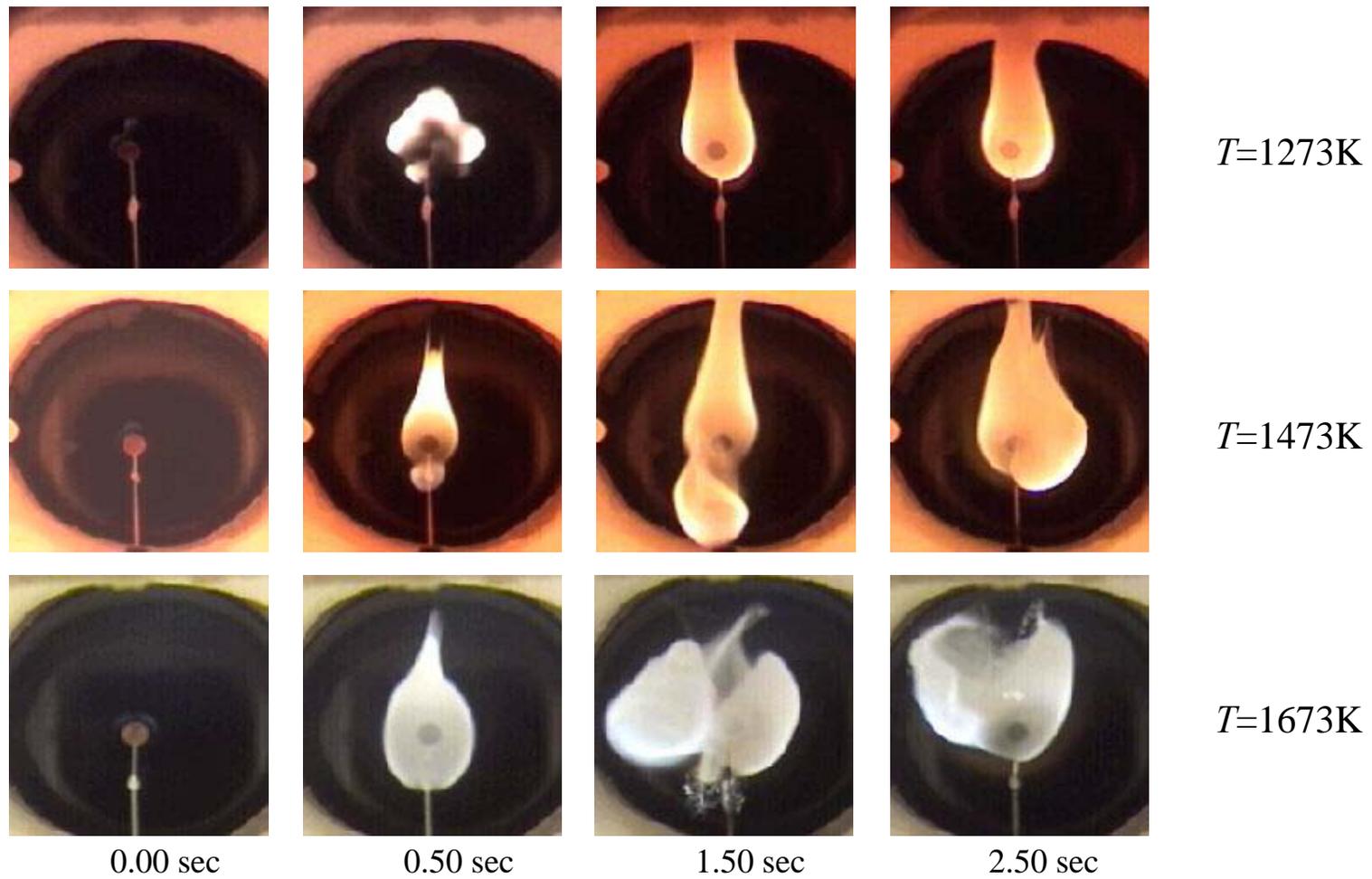


Fig .3-9 Direct photographs on combustion of solid waste fuels at flaming duration(  $\varepsilon=0\%$  ,  $d_0=5\text{mm}$  )

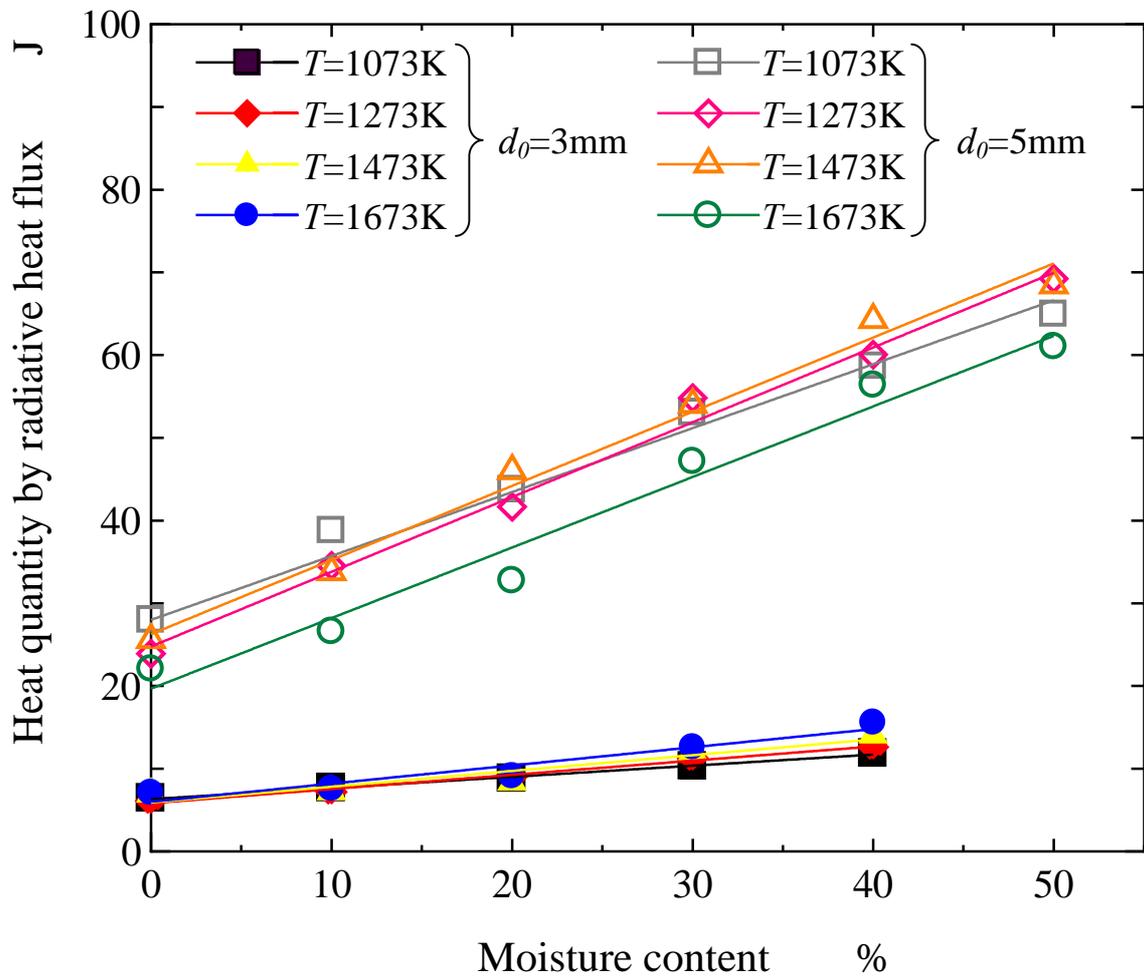


Fig . 3-10 Radiative heat transfer required for ignition

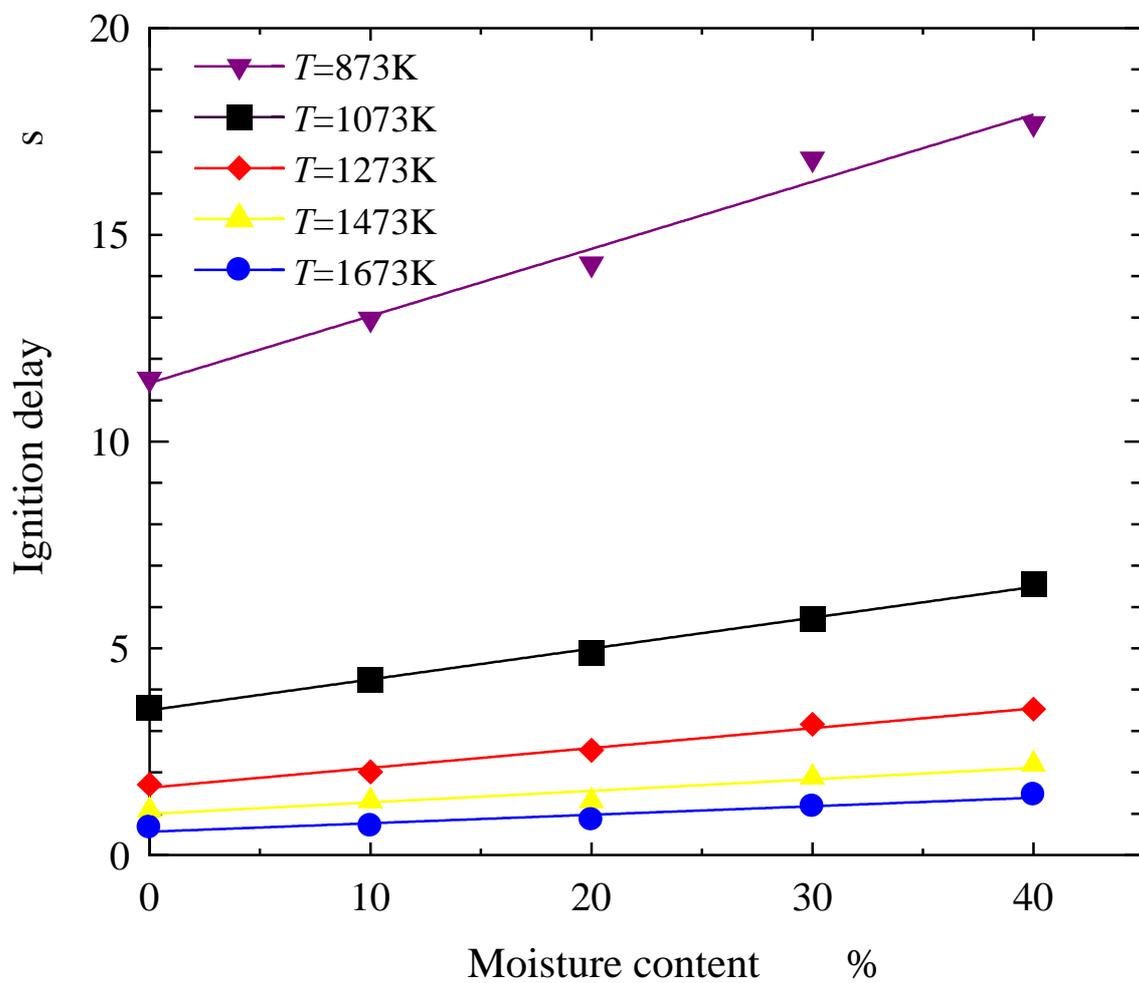


Fig . 3-11 Ignition delay ( $d_0=3\text{mm}$ )

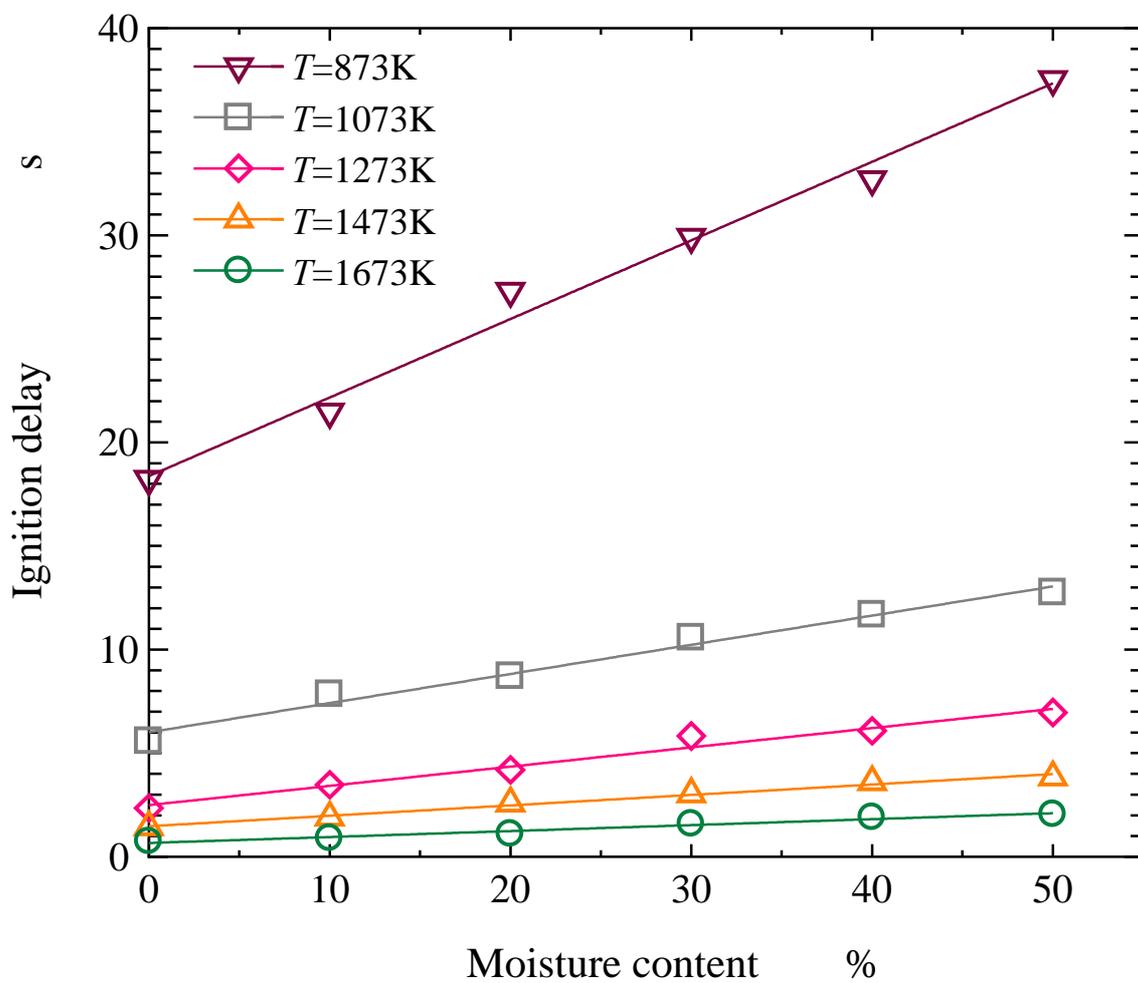


Fig . 3-12 Ignition delay ( $d_0=5\text{mm}$ )

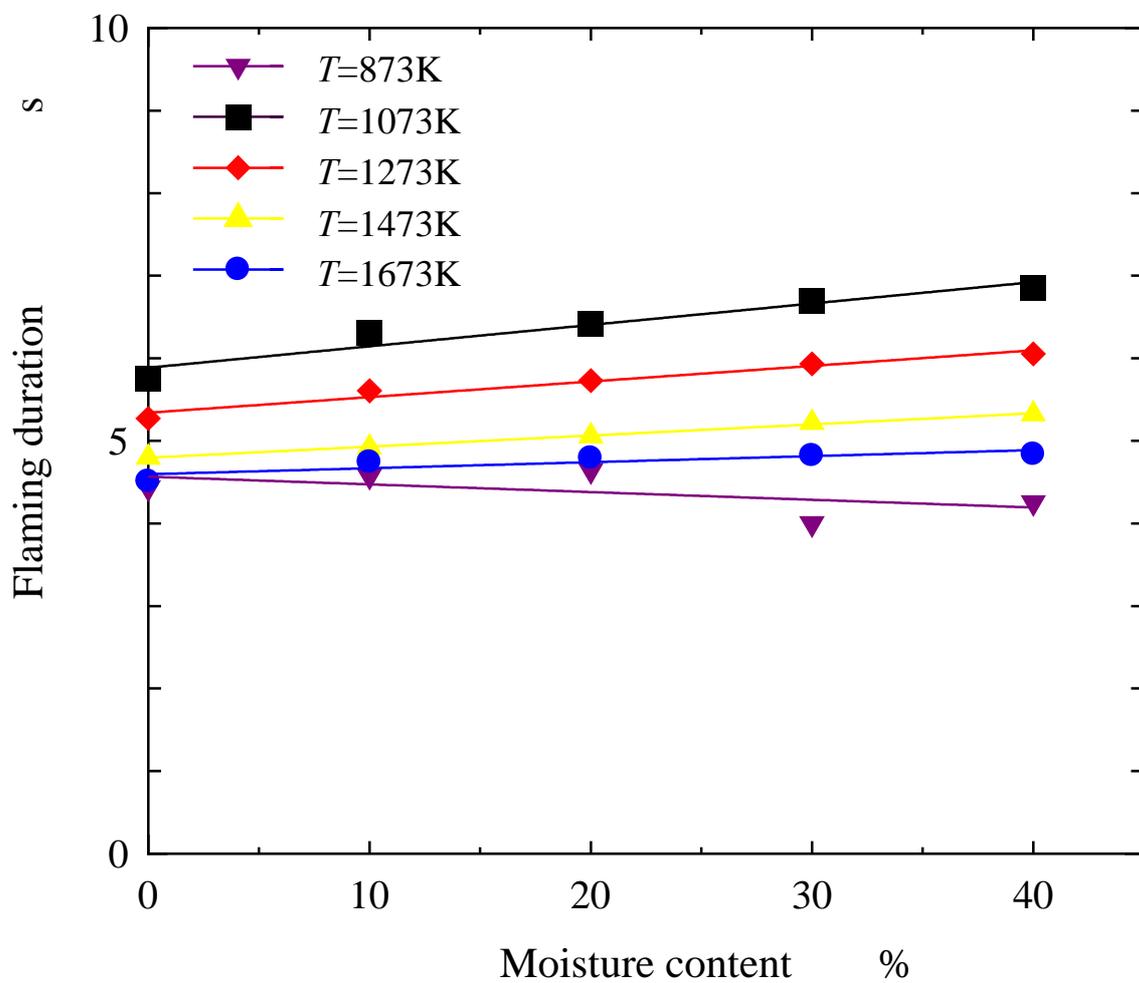


Fig . 3-13 Flaming duration (  $d_0=3\text{mm}$  )

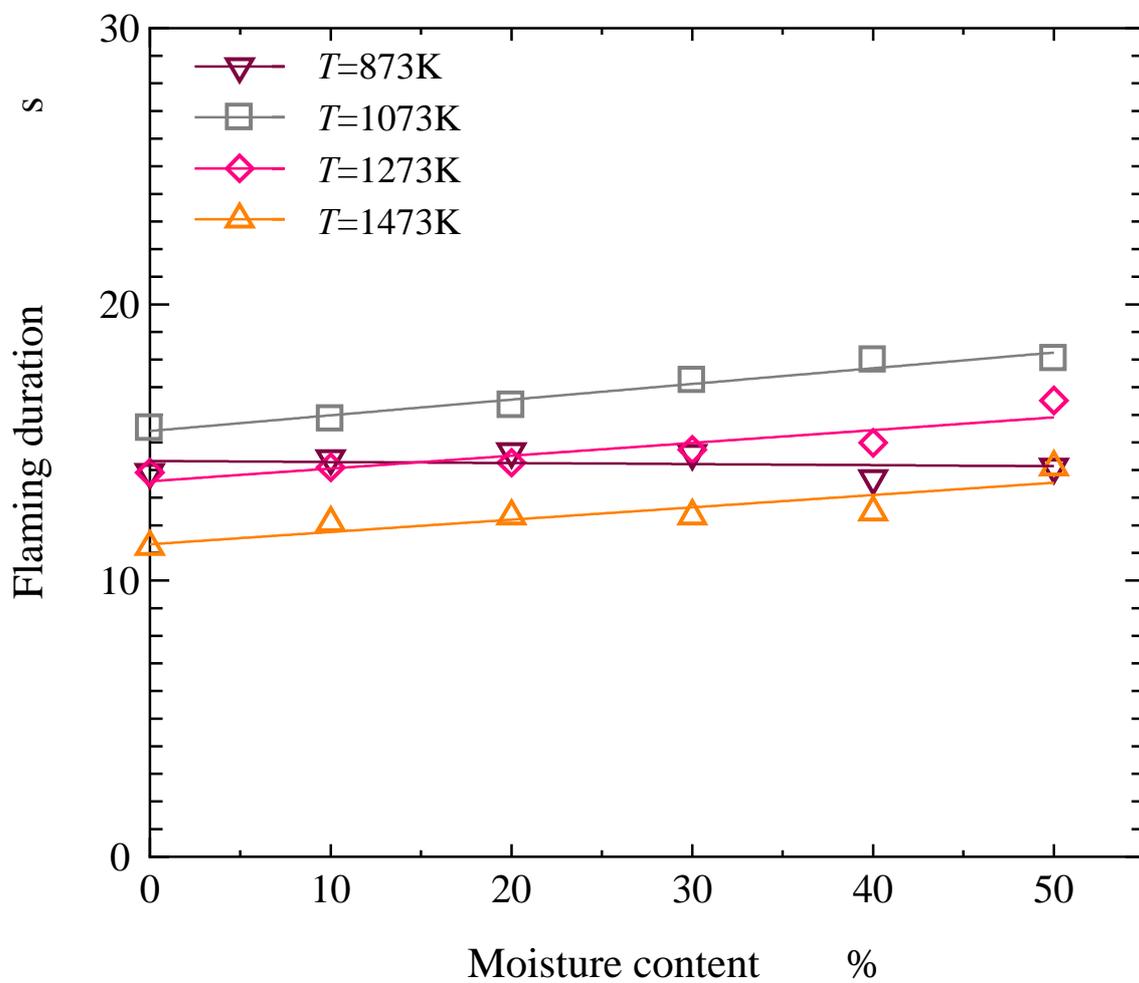


Fig . 3-14 Flaming duration (  $d_0=5\text{mm}$  )

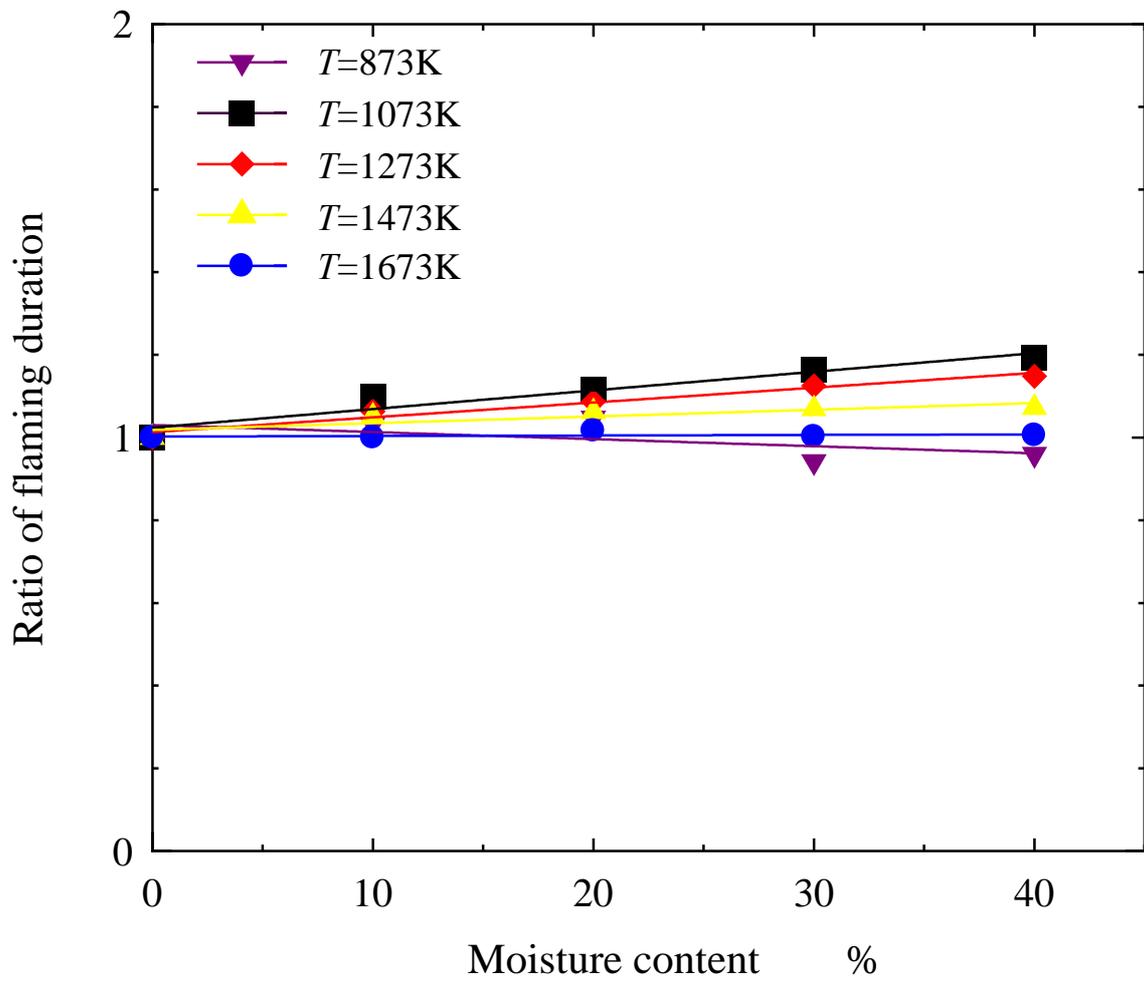


Fig . 3-15 Ratio of flaming duration (  $d_0=3\text{mm}$  )

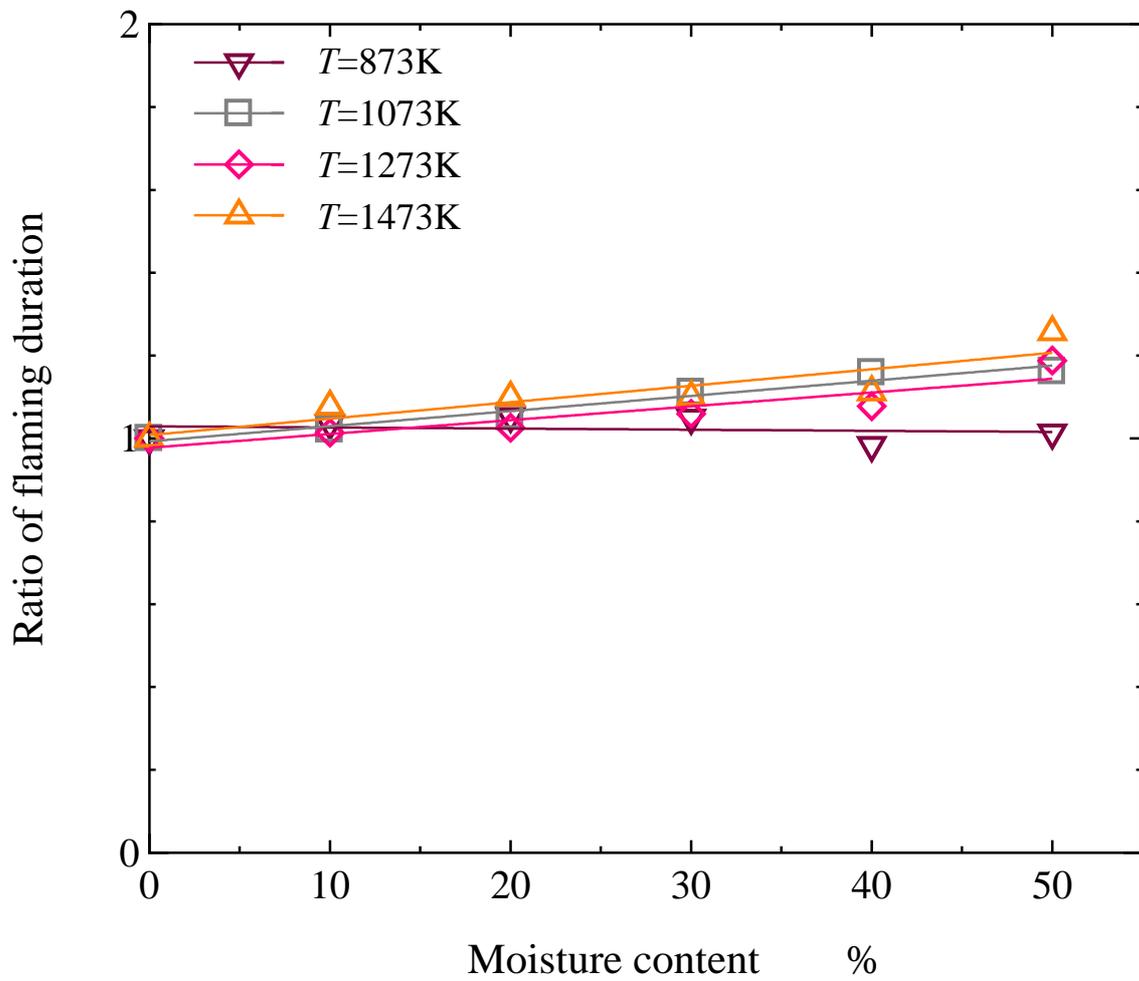


Fig . 3-16 Ratio of flaming duration (  $d_0=5\text{mm}$  )

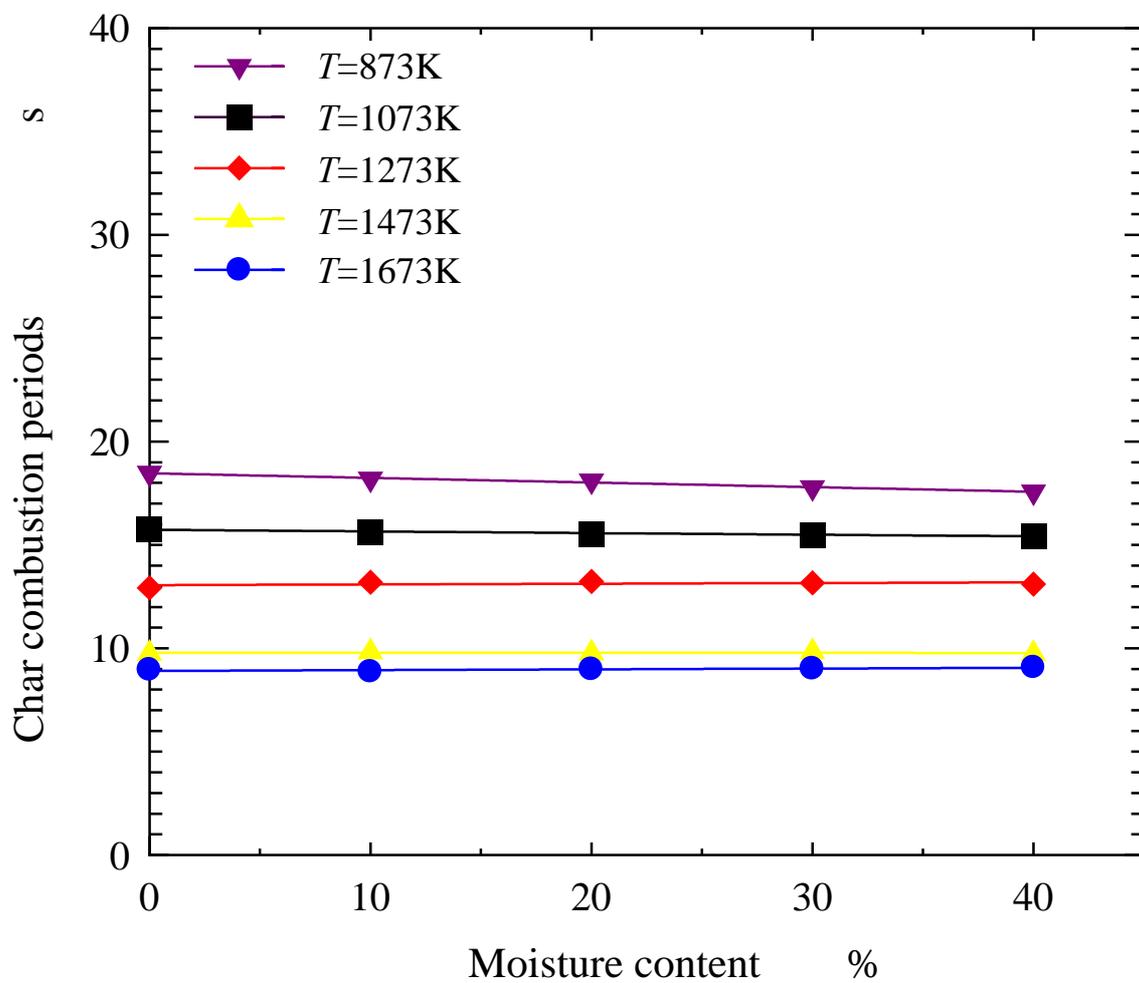


Fig . 3-17 Char combustion periods ( $d_0=3\text{mm}$ )

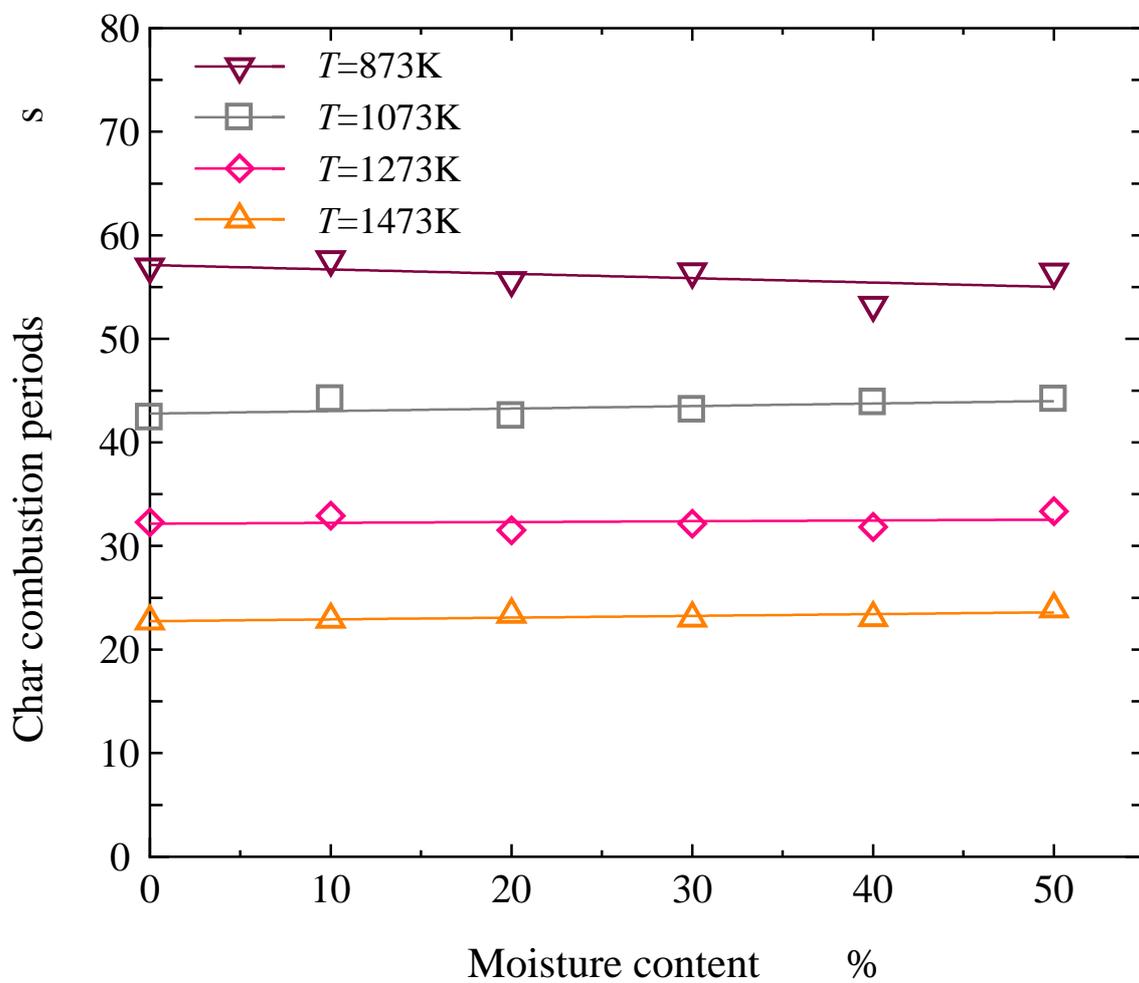


Fig . 3-18 Char combustion periods ( $d_0=5\text{mm}$ )

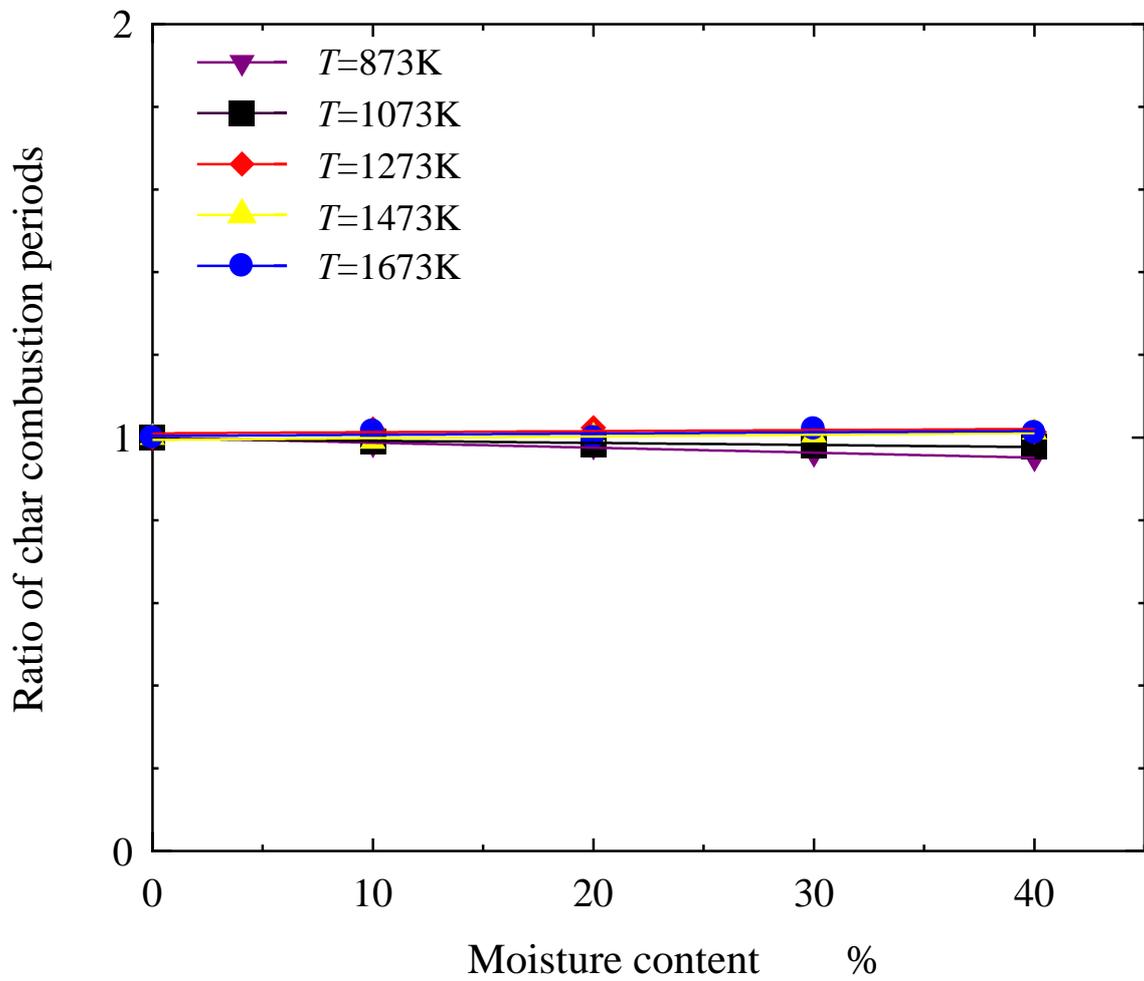


Fig . 3-19 Ratio of char combustion periods (  $d_0=3\text{mm}$  )

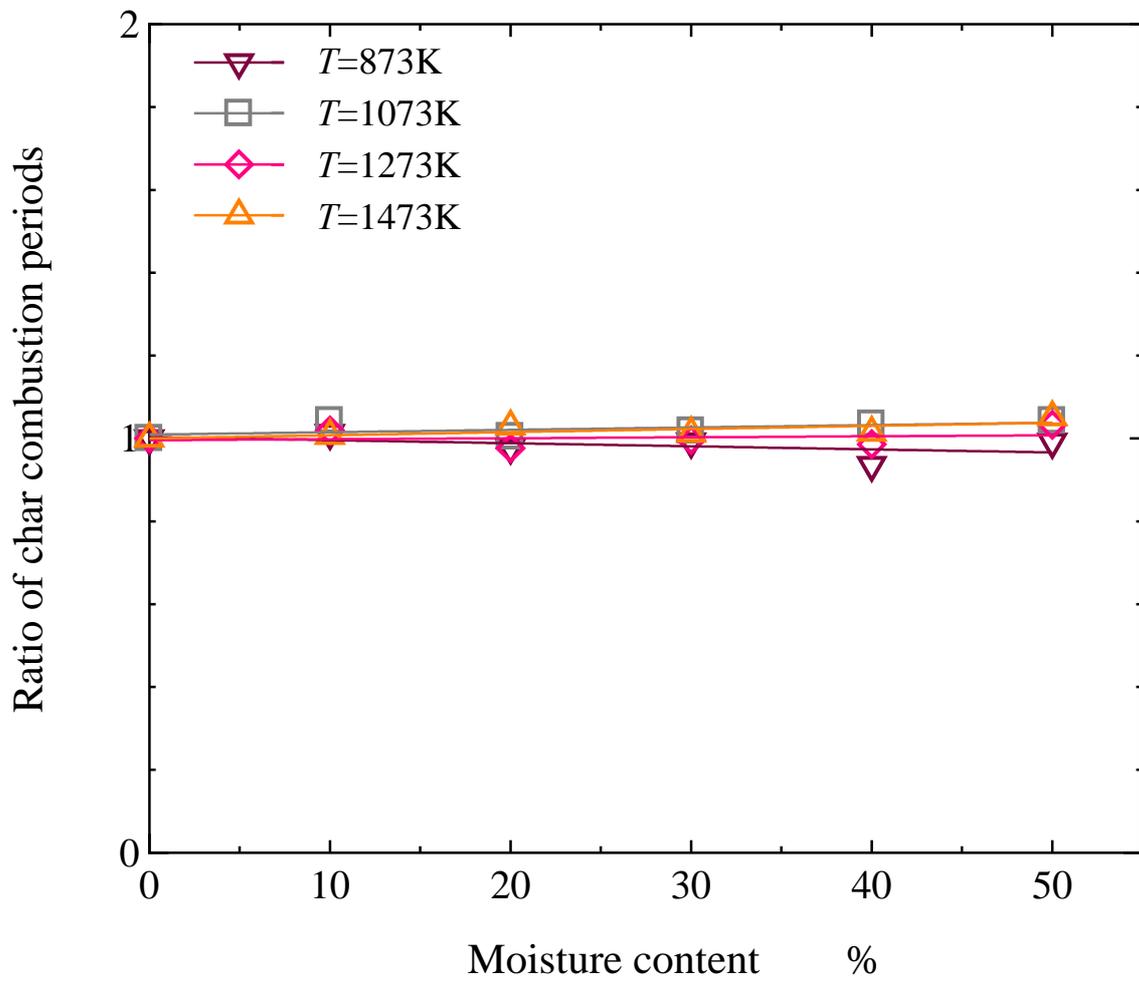


Fig . 3-20 Ratio of char combustion periods (  $d_0=5\text{mm}$  )

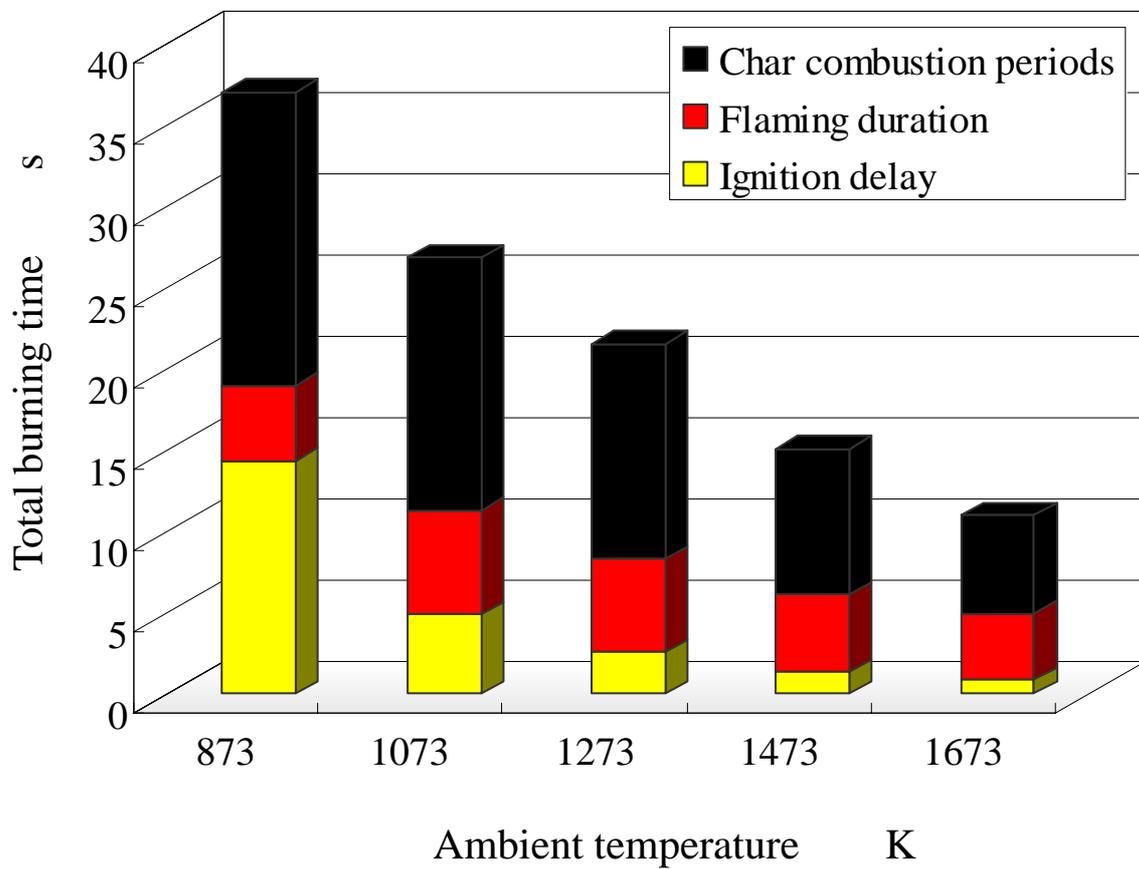


Fig . 3-21 Total burning time (  $\varepsilon=20\%$  ,  $d_0=3\text{mm}$  )

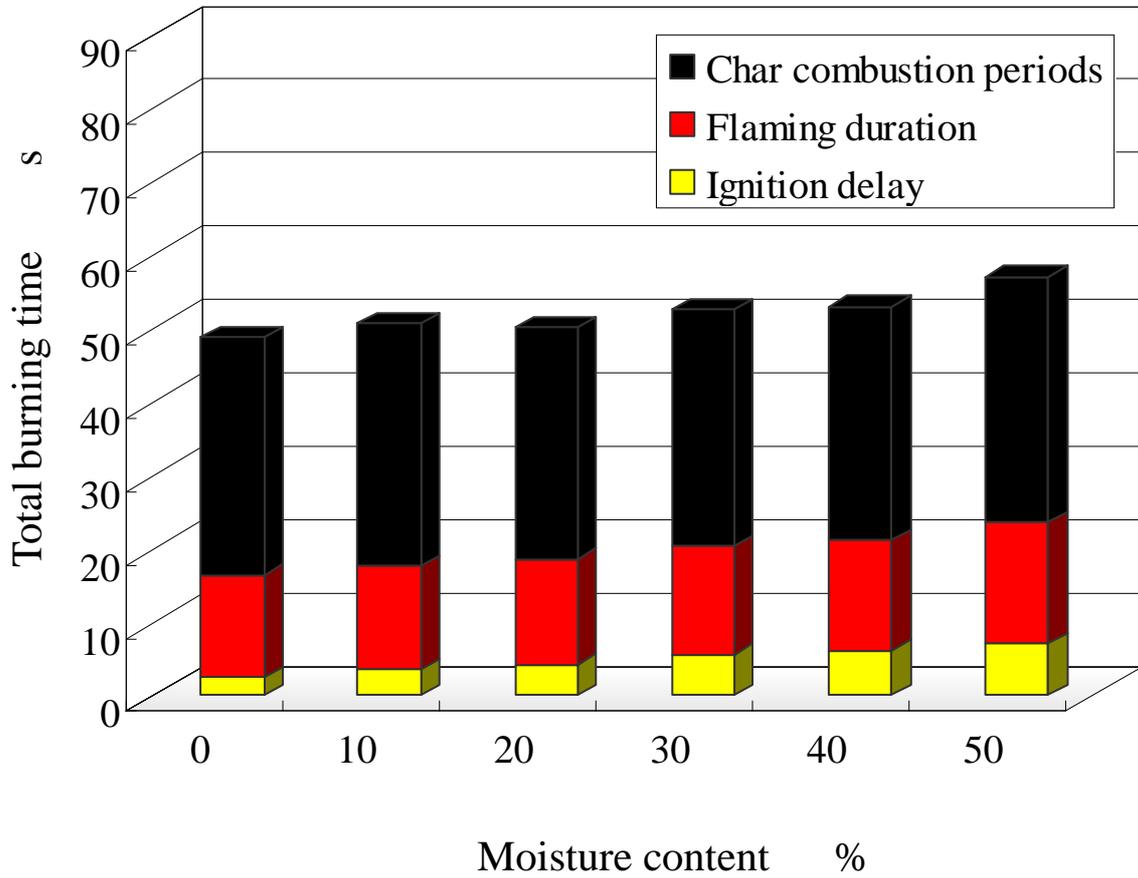


Fig . 3-22 Total burning time (  $T=1273K$  ,  $d_0=5mm$  )

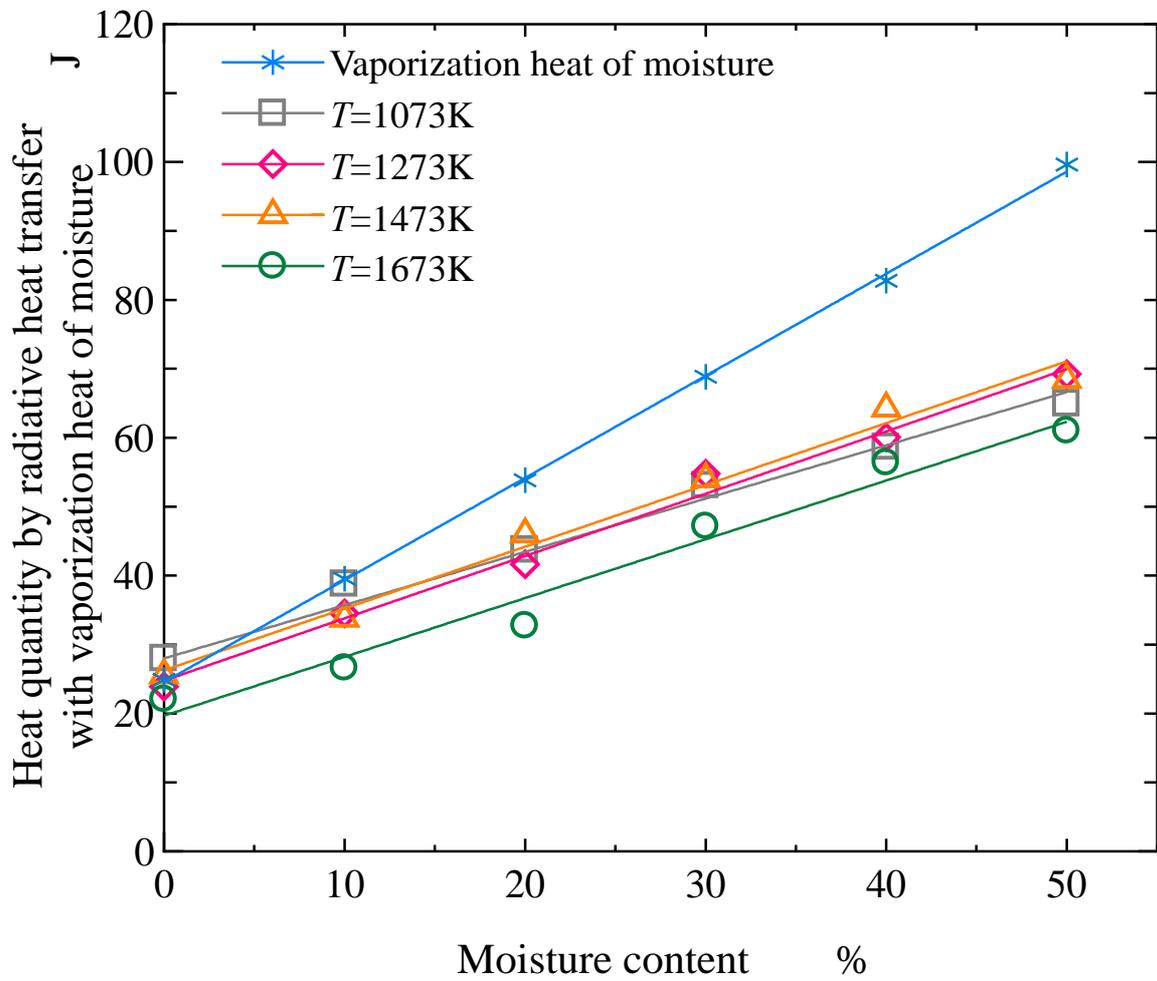


Fig . 3-23 Radiative heat transfer

with vaporization heat of moisture