

高温空気燃焼における廃棄物燃料内温度測定 による燃焼特性の解明について

石坂, 陽一 / ISHIZAKA, Yoichi

(発行年 / Year)

2005-03-24

(学位授与年月日 / Date of Granted)

2005-03-24

(学位名 / Degree Name)

修士(工学)

(学位授与機関 / Degree Grantor)

法政大学 (Hosei University)

2004 年度

高温空気燃焼における廃棄物燃料内温度測定による
燃焼特性の解明について

Experimental study on combustion characteristics of solid waste fuel
using temperature measurement technique

指導教授：岡島 敏

法政大学 大学院 工学研究科
機械工学専攻修士課程

03R1102 石坂 陽一

Yoichi ISHIZAKA

Experimental study on combustion characteristics of solid waste fuel using temperature measurement technique

By

Yoichi Ishizaka

Abstract

Experiments have been carried out to examine the combustion stabilization and flame development of solid waste fuels burning in high temperature and low oxygen environments. Especially, the combustion behavior of solid waste fuels containing moisture is also studied in these conditions. The results obtained here are as follows:

- (1) The boundary between luminous flame and char combustion shows an inverse relationship between ambient temperature and oxygen concentration.
- (2) The increase of moisture content in solid waste fuels leads to increase the ambient temperature, which is, established the luminous flame.
- (3) The decrease of ambient temperature leads to increase the life time of char combustion and its surface temperature is markedly decreased corresponding the decrease of ambient temperature.

目次

第一章 緒論	
4	

第二章 実験装置及び方法	6
--------------	---

第三章 実験結果及び考察	10
--------------	----

第四章 結論	14
--------	----

参考文献	
------	--

発表論文	
------	--

謝辞	
----	--

第一章 緒論

近年、ごみをはじめとする環境問題や化石燃料の枯渇によるエネルギーの需要構造の改善の観点から、ごみを燃料としてその有効利用を図ることが求められている。ここで一般廃棄物に関する現状を述べると、日本における一般廃棄物の排出量は平成14年度では、平成13年度の5210万トンより減少した5161万トンとなった。しかし一般廃棄物の排出量はここ数年横ばいの傾向が続いている。一方、市町村による再資源化量と住民の資源回収量をあわせた再生利用量は、13年度の825万トンより増加した864万トンとなり、リサイクル率も13年度の15.0%から15.9%に増加した。リサイクル率はこの10年間毎年1%程度ずつ着実に増加しており、14年度もこの傾向が継続したといえる。

またリサイクル率の増加を受け、最終的処分量も13年度の995万トンからやや減少した903トンとなったが、一般廃棄物最終処分場の残余容量総計が1億4,477万立方メートル、残余年数が13.1年であることを考えると、依然として厳しい状況である。

そこですでに高性能工業炉で用いられ、燃焼効率の大幅向上、CO₂やNO_xの大幅削減、低騒音性、ダウンサイジング等の有効性が証明されている、高温空気燃焼制御技術を廃棄物焼却施設へ適応させることが求められている。ここで更に焼却炉内におけるダイオキシンの生成メカニズムを考えてみる。すると大きく2種類に大別出来る。一つ目は、廃棄物の燃焼過程で生成されたダイオキシンの前駆体であるクロロベンゼン及びクロロフェノールが、250～400℃の温度条件下でフライアッシュ表面において、Cuなどの触媒反応により生成されるケースである。二つ目は、フライアッシュ中に残留する未燃カーボンが、250～350℃の温度条件

下で無機塩素と反応して生成するケースである。いずれの場合もその生成に適した温度が、高温空気燃焼の領域から外れているだけでなく、ダイオキシンそのものも 800℃以上の高温で熱分解してしまうため、その生成を大きく抑制することが出来ると考えられる。

以上のように排ガス再循環方式の高温空気燃焼制御技術を廃棄物焼却炉に適用する事は、多くの利点が得られると考えられている。この実現にあたって様々な基礎データが必要となるが、重要なキーワードとして「廃棄物の安定燃焼」を挙げることが出来る。しかしごみ燃料は多成分であり、また各成分は不均質分布ありと同時に沸点の高い物から低い物まで広範囲にわたる。また、その燃焼性は微小爆発や可燃性ガスの突出などをともなう極めて複雑なものである。そこで本研究は、ごみ燃料の燃焼過程におけるその表面近傍温度の時間的变化を調べて、その基本的な燃焼特性に及ぼす雰囲気温度、酸素濃度あるいは水分等の影響を解明し、その燃焼形態を詳細に把握することを目的として行われたものである

第二章 実験装置及び方法

実験装置

本実験で用いた実験装置の概略を Fig. 1 に示す。実験装置の外寸は 850 mm×380 mm×800 mm であり、その総重量は約 150 Kg である。実験装置は主に直径 380 mm、長さ 300 mm の円筒型密閉容器とその中に収められている電気炉、電気炉内雰囲気温度調節用コントローラ、試料駆動用エアシリンダ及びエアタンク、電磁弁、撮影用 8 mm ビデオカメラによって構成されている。また、試料内部温度測定にはシース熱電対を使用した。本実験で用いた実験装置は燃料駆動部品、酸素濃度設定用部品、燃料内部温度測定用部品の三つから構成されている。以下にそれぞれについての詳細を示す。

まず、燃料駆動用部品はエアシリンダ、エアタンク、電磁弁等で構成されている。エアシリンダの先端には燃料のついたシリカ線、燃料内部温度測定時には熱電対が取り付けられ、スイッチを入れると電気炉の中心まで移動するようになっている。

酸素濃度設定用部品は圧力計、真空ポンプ等で構成されている。酸素濃度は、まず密閉容器内の空気を抜き、その後酸素及び、窒素を各酸素濃度になるように注入することによって変えることができる。

燃料内部温度測定用部品は、R - 型微小熱電対、デジタル計等によって構成される。燃料内部温度は Fig.2 のように熱電対の先端に燃料球を取り付けることにより測定され、デジタル計で温度表示される。このとき 8 - mmビデオカメラによって撮影されるが、画面の端にタイミングランプが映るように設置されている。これは燃焼挙動撮影用の 8 - mmビデオカメラの場合も同様で、これらのランプを同時に消灯することにより二つの 8 - mmビデオカメラの時間合わせを行っている。

燃料の選定

本実験では試料として「錦鯉の餌」が用いられる。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選定が行われた結果、錦鯉の餌と都市ごみ等の一般廃棄物の化学的組成が類似しているためである。ここで Fig.3 に錦鯉の餌と都市ごみにおける元素分析及び工業分析の表を示す。

実験手順

- 1 微細にすりつぶした錦鯉の餌に少量の水を混ぜて練り、冶具を用いて直径 5 mm の球状に形成されシリカ線、もしくは熱電対の先端に固定される。その後 12 時間以上乾燥させたものを燃料として用いる。これは、燃料は 12 時間以上乾燥させると、その後の質量の変化がほとんど見られないためである
- 2 燃料が取り付けられたシリカ線、もしくは熱電対の重さ、直径を測定し、エアシリンダの先端に取り付け、圧力容器を密閉する。
- 3 酸素濃度を変化させるときには、圧力容器内の空気を真空ポンプで 0.1 Mpa まで抜き、酸素及び窒素を注入し、酸素濃度をセッティングする。

- 4 電気炉のスイッチを入れ、1 時間置いて電気炉内雰囲気温度を一様な設定温度にする。
- 5 エアタンクに圧縮空気を入れ、実験観察用カメラを作動させる。
- 6 エアシリンダのスイッチを入れ、実験を開始する。
- 7 燃焼の完了を確認した後、灰分のついたシリカ線、もしくは熱電対を回収し、重さを計測する。
- 8 データ解析を行う。

また燃料球の水分添加率を変化させて実験を行う場合、手順 2 は実験直前に行われる。これは燃料球の水分添加率を一定に保つためである。

試料の水分添加率

燃料球の水分添加率は、実験直前に試料を水に浸けることによって変化させる。
この時の水分添加率は次式によって表される。

$$\varepsilon = (M_w / M_f) \times 100$$

ε : 水分添加率(%), M_w : 添加水分質量(g), M_f : 燃料球質量(g)

実験条件

本実験で用いた実験装置では雰囲気温度 3 0 0 °C から 1 1 0 0 °C、酸素濃度は 3 % から 2 1 % の範囲での実験が可能である。また、水分添加率については 0 % から 4 5 % の範囲で実験を行った。

第三章 実験結果及び考察

燃焼写真

Fig.4及びFig. 5は燃料球の燃焼の直接写真である。Fig.4は雰囲気温度750℃、酸素濃度15%の条件での燃焼写真である。この実験では燃料球がエアシリンダの作用で電気炉中心まで移動させられて、着火遅れの後気相着火し、有炎燃焼、チャー燃焼へと移行し灰分を残して燃焼を完了する。また、Fig. 5は雰囲気温度500℃、酸素濃度9%の条件での実験結果である。この実験では有炎燃焼は存在せず、固相着火し、チャー燃焼を経て燃焼を完了する。¹⁾ ここで Fig.4 のように燃料球が着火遅れ、有炎燃焼、チャー燃焼という三つの燃焼過程を経て燃焼が完結する実験条件のことを有炎燃焼領域 (Phase I)、Fig. 5 のように基本的に有炎燃焼の存在しない実験条件のことをチャー燃焼領域 (Phase II)、そして燃料球が電気炉中心部に移動しても燃焼が起こらない領域のことを非燃焼領域 (Phase III) と定義する。

燃焼領域の境界の決定

Fig.6 は廃棄物燃料の三つの燃焼領域の境界の決定の仕方を示した図である。この図は酸素濃度 21 %、水分添加率 0 %において雰囲気温度を変化させて実験を行ったときの有炎燃焼時間、チャー燃焼時間示した図である。この図から、有炎燃焼時間はある雰囲気温度以下になると急激に短くなることがわかる。この温度を基にグラフに示されるように有炎燃焼領域とチャー燃焼領域の境界となる温度を決定する。また、チャー燃焼領域と非燃焼領域の境界はチャー燃焼時間の有無で決定する。

2)

Fig.7 は Fig.6 にもとづいて作られた図である。実験条件は、酸素濃度 21 %、水分添加率 4.5 %である。横軸に雰囲気温度、縦軸に有炎燃焼時間を示す。また Fig.8 は酸素濃度 21%において、横軸に水分添加率、縦軸に雰囲気温度をとった時の有炎燃焼領域とチャー燃焼領域との境界を示したグラフである。このグラフより燃料球の水分添加率の増加は、境界となる雰囲気温度を上昇させることが分かる。これは水の蒸発潜熱が雰囲気温度に及ぼす影響であると考えられる。

Fig.9 は水分添加率 0 %において、酸素濃度と雰囲気温度に対して有炎燃焼領域、チャー燃焼領域、非燃焼領域のそれぞれの境界を示したグラフである。このグラフよりそれぞれの境界は、雰囲気温度と酸素濃度に対して反比例的な関係にある事が分かる。すなわちこのことは、有炎燃焼領域であれば、酸素濃度を減少させて燃焼を行ったとしても、雰囲気温度を上げることで、燃焼の安定性を求めることが出来る。これは実機に対応させたときに、従来よりも低い空気比での燃焼が可能であると考えられる。

燃料球内部温度計測

Fig.10 は、酸素濃度 21 %、水分添加率 $\varepsilon = 0\%$ の場合での燃料表面近傍の温度の時間的变化を、雰囲気温度をパラメータとして示した図である。横軸は時間、縦軸は燃料表面近傍の温度を示す。ここで雰囲気温度 550 °C から 800 °C は有炎燃焼領域、500 °C 及び、450 °C はチャー燃焼領域、そして 400 °C は非燃焼領域である。この図より、どの雰囲気温度においても燃料表面近傍の温度は、燃料球が炉内に突入してから急激に上昇をはじめますが、雰囲気温度の低下に従い燃料表面近傍の温度の上昇が鈍くなっていることが分かる。そして、有炎燃焼領域においては着火・有炎燃焼期間中も上昇し続け、有炎燃焼が終了し表面燃焼に移行する。その後、燃焼の終了とともに燃料表面近傍の温度は雰囲気温度まで低下する。また表面燃焼時間も雰囲気温度の低下と共に長くなっている。また、チャー燃焼領域、非燃焼領域での実験では有炎燃焼時間が存在しないため、燃料表面近傍温度が約 150 °C になると、温度上昇が鈍くなっていることが分かる。これは、可燃性ガスが発生し始める温度とほぼ一致するため (Fig.11)、^{4),5)} 燃料球に与えられた熱が熱分解等に使われたためと考えられる。有炎燃焼領域においてこのような現象が見られないのは、火炎によって燃料球に与えられる熱が非常に大きいためと考えられる。³⁾

Fig.12 は、雰囲気温度が 800 °C、水分添加率 $\varepsilon = 0\%$ の場合での燃料表面近傍の温度の時間的变化を、酸素濃度をパラメータとして示した図である。横軸は時間、縦軸は燃料表面近傍の温度を示しています。ここで表面燃焼時における燃料表面近傍の温度は酸素濃度の低下とともに低下するが、これと同時に表面燃焼期間は酸素濃度の減少に伴って著しく増加することが分かる。これは、先ほどの図と比較すると雰囲気温度よりも酸素濃度により大きな影響を受けている事が分かる。

次に、雰囲気温度を600℃、酸素濃度を21%に保ち、水分添加率を変化させて実験を行ったときの試料中心の温度変化の推移を表した図を Fig. 13 に示す。横軸が時間、縦軸に試料中心の温度を示しています。着火までの試料中心の温度上昇は水分添加率が増加するにしたがい緩やかになっていることが分かる。これは試料に添加された水分がその温度上昇や蒸発潜熱として熱を吸収するため、⁶⁾試料そのものの温度上昇を妨げているためと考えられる。この図から、着火後の試料中心温度分布は、水分添加率にかかわらず、同じような傾向を示す事が分かる。これは着火遅れの間に添加された水分のほとんどが蒸発しているためと考えられる。

第四章 結論

本研究は、高温空気燃焼制御技術をごみ焼却炉に適応するために必要と考えられる基礎データを収得するために行われたものである。その中で多成分・不均質な固体低質燃料である廃棄物の安定燃焼領域を模索するため、雰囲気温度、酸素濃度、試料の水分添加率を変化させ、その燃焼挙動の観察や試料の内部温度の変化などを調べた。以下に本研究で得られた実験結果を示す。

- 1) 有炎燃焼領域とチャー燃焼領域の境界は酸素濃度と雰囲気温度に対して反比例的な関係である。
- 2) 有炎燃焼領域と表面燃焼領域の境界の雰囲気温度は、試料の水分添加率の増大によって上昇する。
- 3) 雰囲気温度の低下に伴いチャー燃焼時間は増大し、それと同時に燃料表面近傍温度も低くなる。

参考文献

- 1)Okajima A., Seyama K. and Okajima S.: Microgravity observation on combustion behavior of solid waste fuels in high temperature and low oxygen atmosphere, Bulletin of Faculty of Engineering, Hosei University, Vol.38, pp1-5 (2002).
- 2).Seyama, and S.Okajima: 5th China-Japan Workshop on Microgravity Science A-3-4 P63 (2002-12)
- 3) Y.Takayma: 18th National Conference on IC Engine and combustion (India), pp.495-500(2003-12)
- 4)HiCOT(高温空気燃焼制御技術基盤研究プロジェクト) , 2001 年度, 2002 年度成果報告書
- 5)新岡嵩・河野通方・佐藤順一, 燃焼現象の基礎, オーム社出版局
- 6)水谷幸夫, 燃焼工学第2版, 森北出版株式会社

発表論文

- ① Masashi Watanabe, Akiko Okajima, Yoichi Ishizaka and Satoshi Okajima:
Experimental Investigation on Combustion Stability of Solid Waste Fuels
in High Temperature and Low Oxygen Environments, XVIII National Conference
on IC Engines and Combustion, pp.487-494(2003-12).

- ② 石坂陽一、棚網祐介、渡邊雅志、岡島敏：温度計測による固体低質燃料の燃焼
特性の解明に関する研究、日本機化学会関西支部、第 79 期総会講演会、講演論
文集、No.044-1、pp.5-3,4 (2004-3).

- ③ 石坂陽一、渡邊雅志、岡島敏：高温雰囲気中での自己着火燃焼における廃棄物
低質燃料の燃料内部温度計測による燃焼特性の一考察、日本機化学会山梨講演
会、講演論文集、pp.59-60(2003-10).

- ④ 和田陽司、石坂陽一、岡島敏：密閉容器内 DME 燃料燃焼における消炎距離の測
定に関する研究、日本機化学会山梨講演会、講演論文集、pp.57-58(2004-10).

謝辞

本実験を行うにあたり、終始御指導頂きました岡島敏教授、中村嘉宏教授及び、川上忠重教授に深く感謝し御礼申し上げます。また実験進めるにあたり、多くの御協力を賜った中央工作室の島貫氏、ならびに石井氏、また熱工学研究室の院生の皆様に深く感謝します。

2005 年 2 月

法政大学大学院 工学研究科 機械工学専攻

石坂 陽一

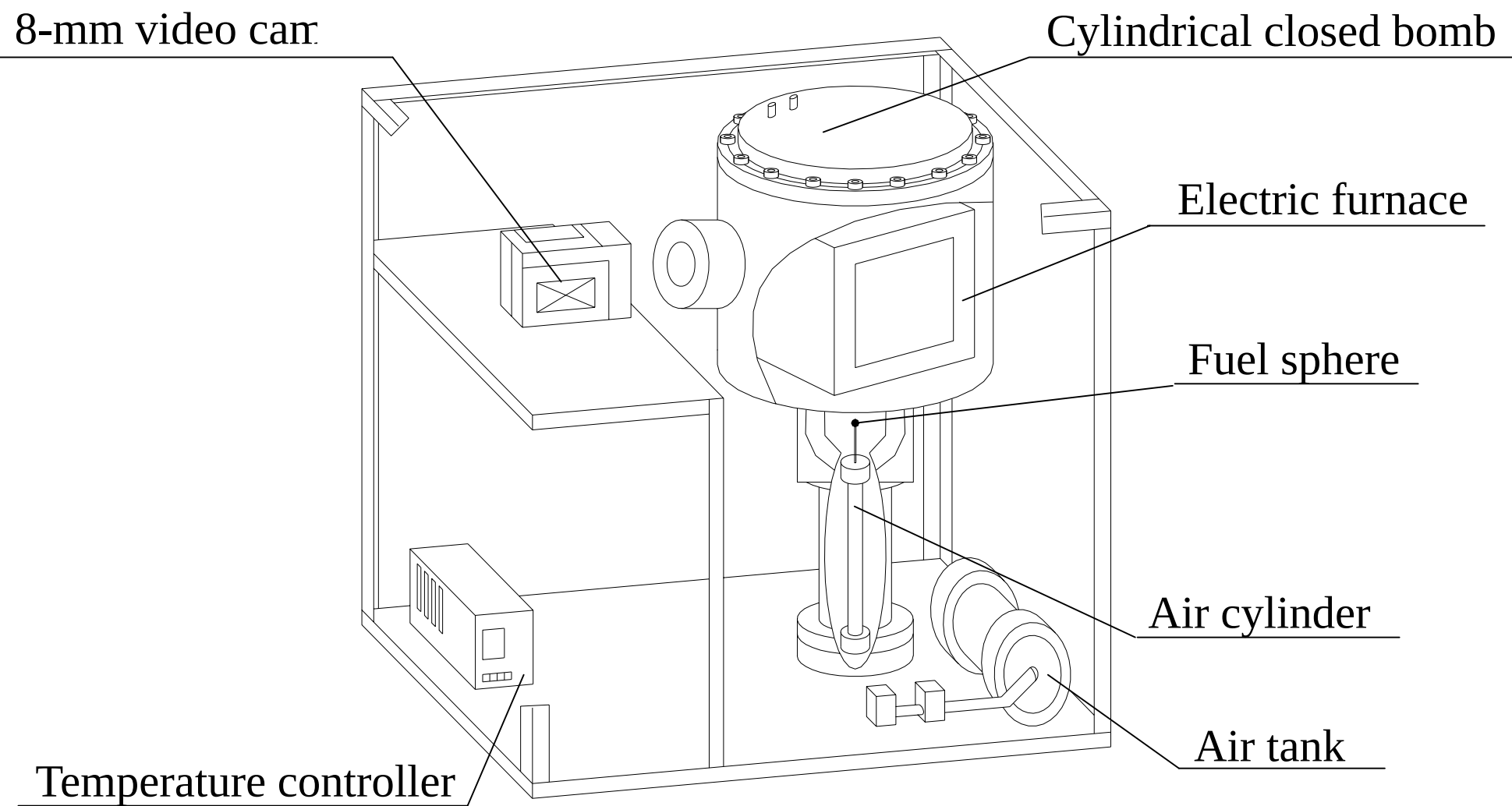


Fig.1 Experimental apparatus

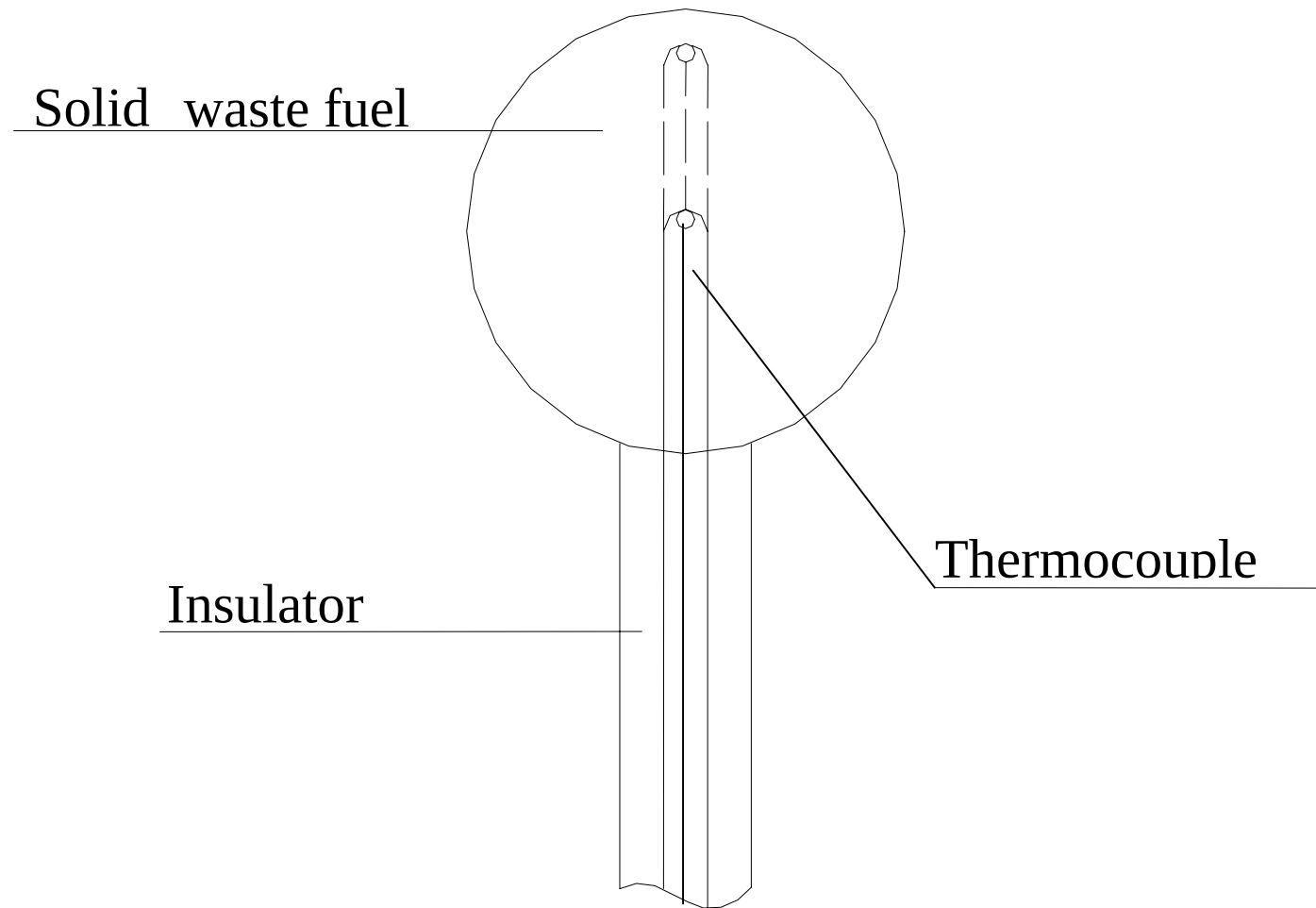


Fig.2 Position of thermocouple in fuel sphere

	項目	都市ごみ	錦鯉の餌	単位
工業分析	水分	49.5	7.1	%
	灰分	13.9	8.4	Dry wt%
	可燃分	86.1	91.7	Dry wt%
	揮発分		76.1	Dry wt%
	固定炭素		15.5	Dry wt%
元素分析	C	47.8	45.5	Dry wt%
	H	7	6.4	Dry wt%
	N	0.9	6.8	Dry wt%
	S	0	0.4	Dry wt%
	Cl	0.6	0.4	Dry wt%
	O	29.8	32.2	Dry wt%
	低位発熱量	19.9	18.1	MJ/kg-dry
	C/H	0.57	0.59	
	O/C	0.47	0.53	

Fig.3 Composition of solid waste fuel

【(株) 神戸製鋼所】



Fig.4 Direct photographs on behavior of fuel sphere at 750°C
of ambient temperature and 15% oxygen concentration(vol)

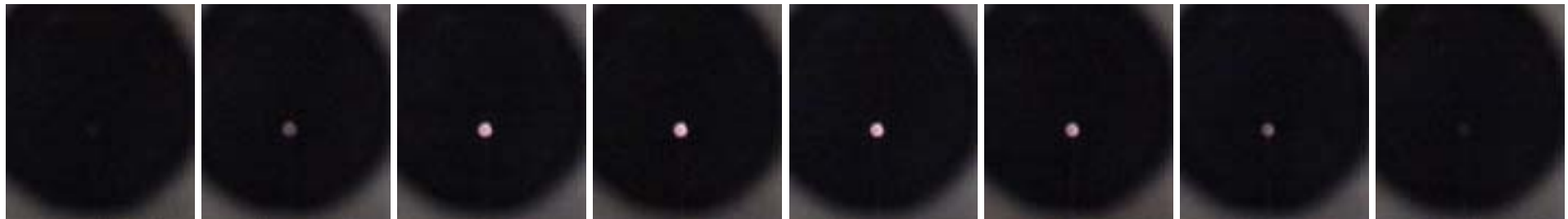


Fig.5 Direct photographs on behavior of fuel sphere at 500°C
of ambient temperature and 9% oxygen concentration(vol)

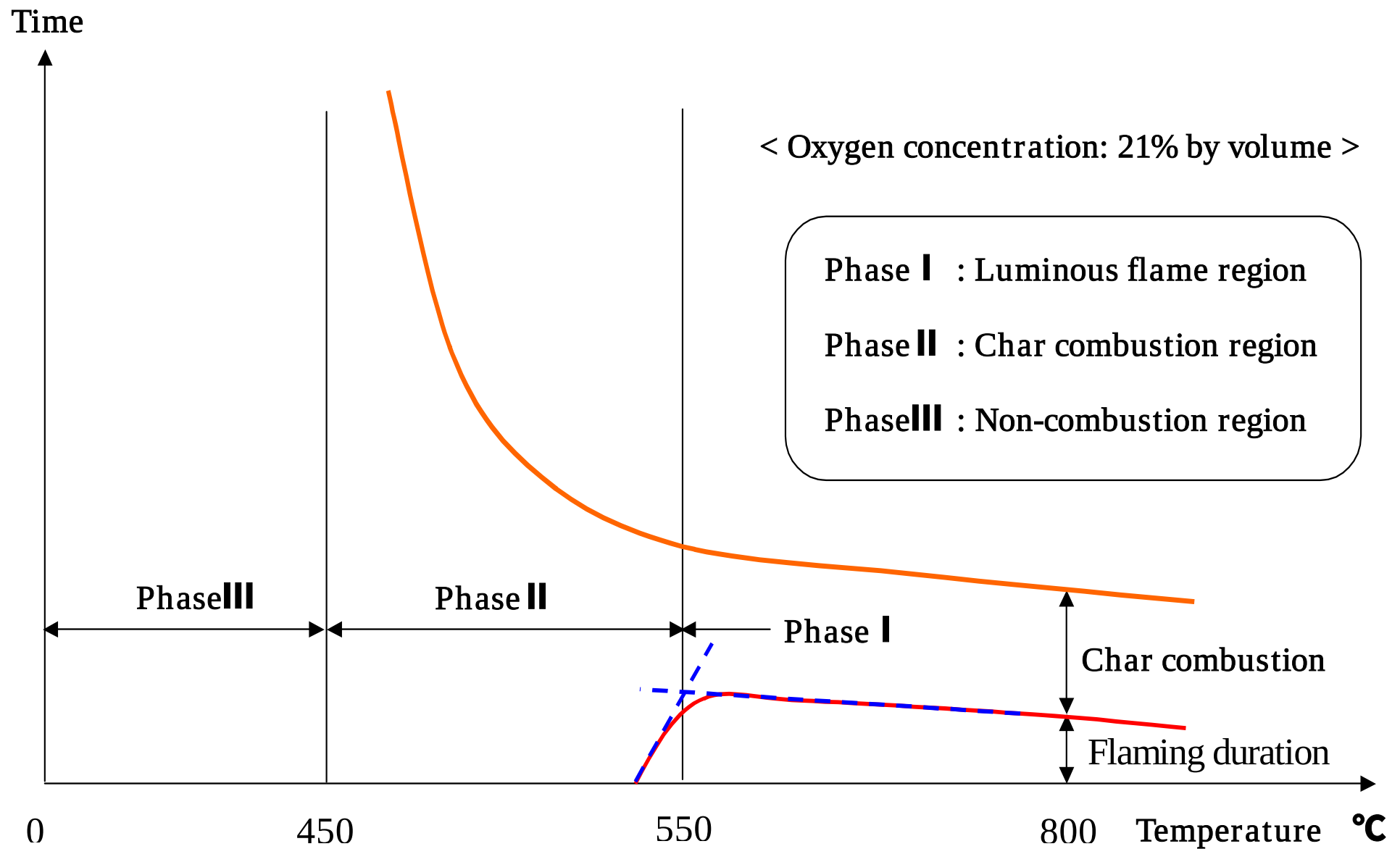


Fig.6 Determination of combustion phase

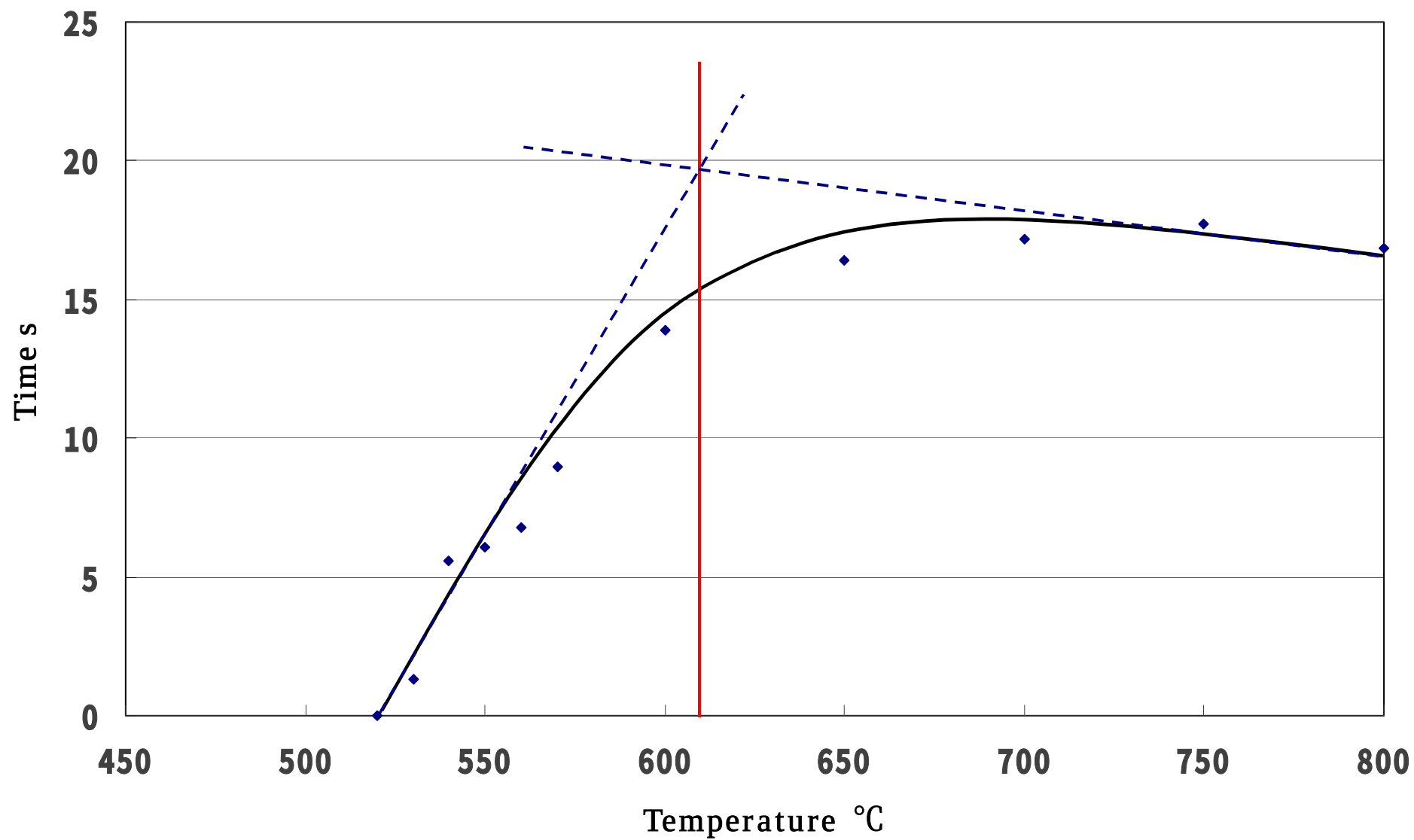


Fig.7 Determination of boundary ambient temperature

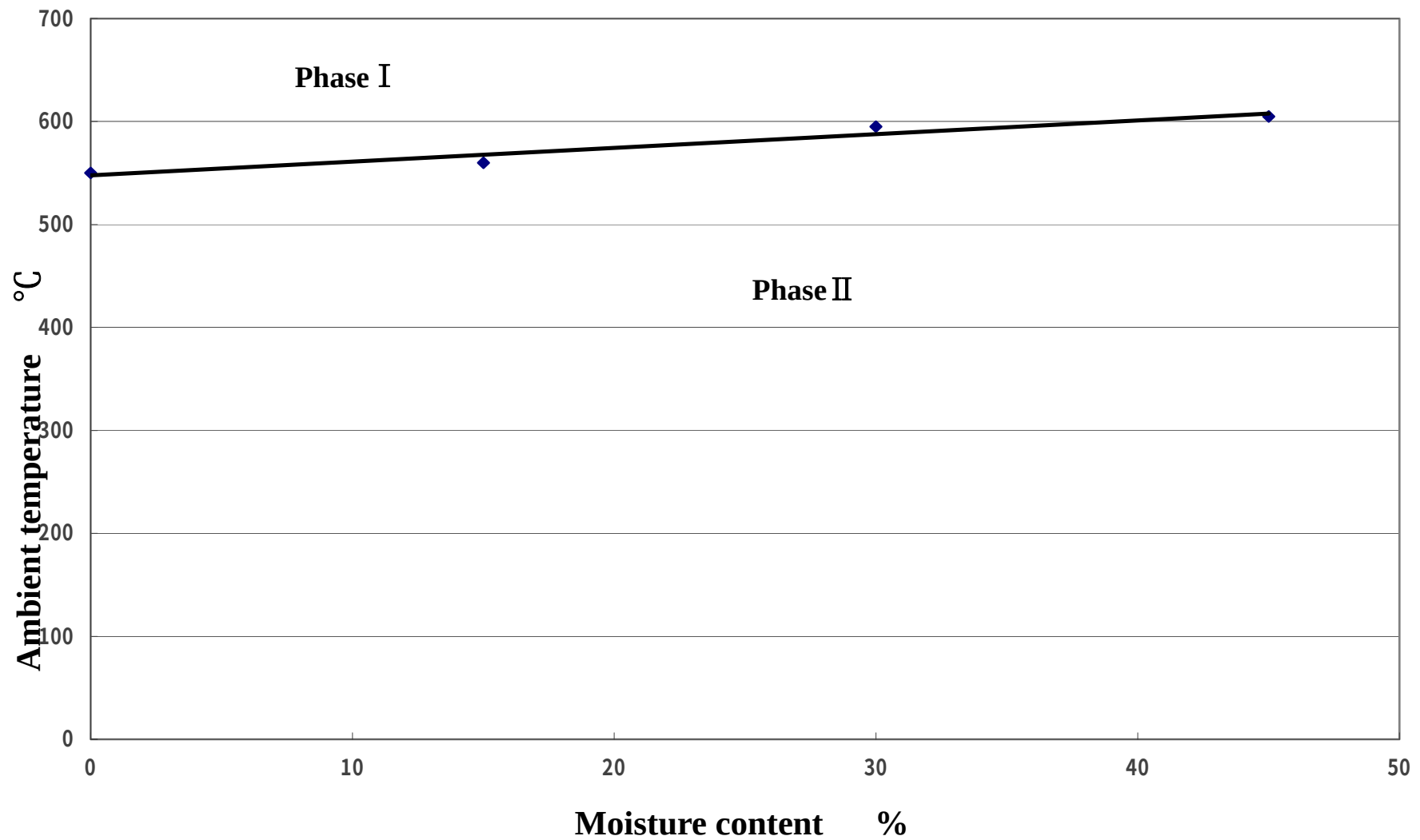


Fig.8 Boundary between luminous flame and char combustion
(Parameter: moisture content)

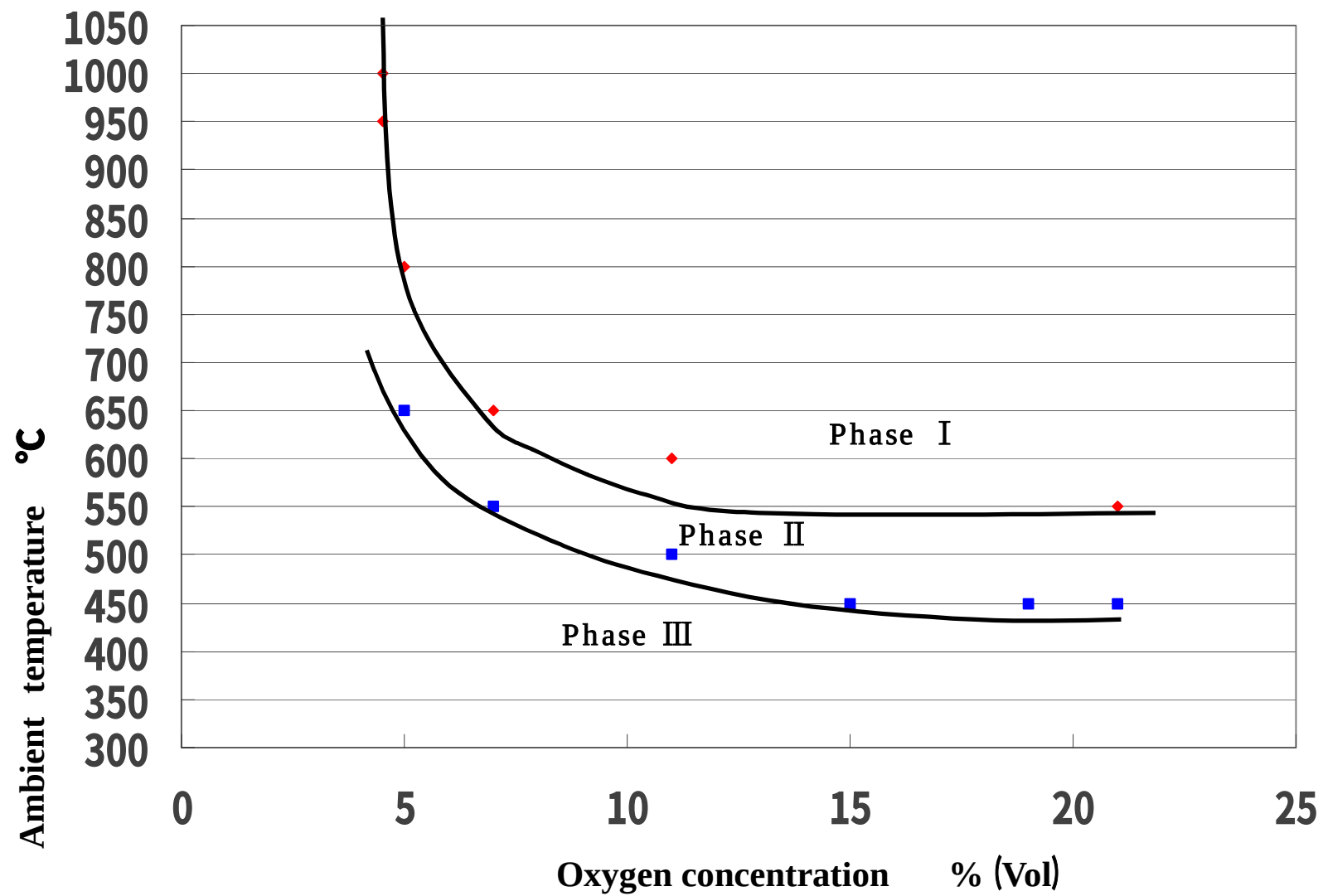


Fig.9 Combustion stabilization

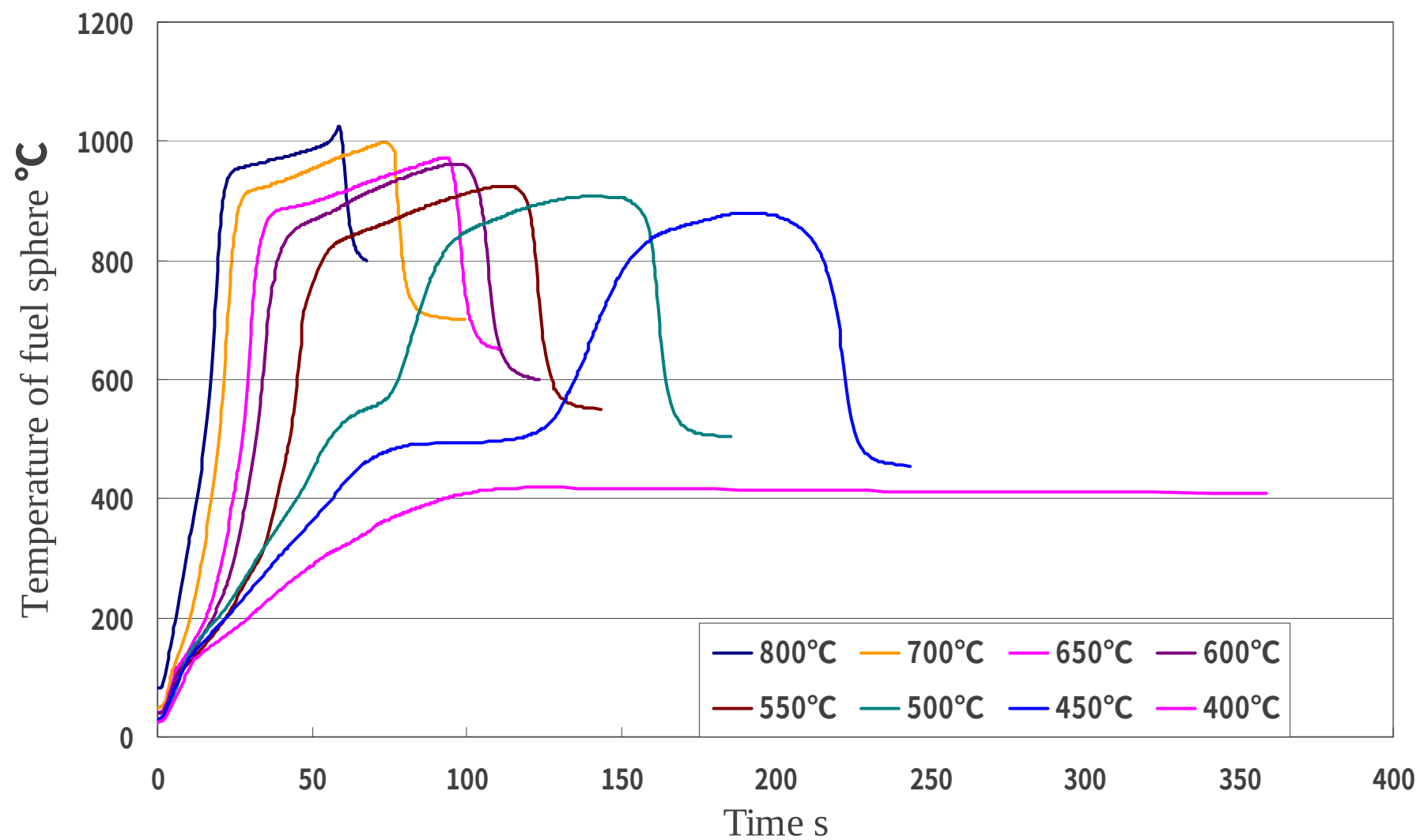


Fig.10 Temperature distribution
(Parameter: ambient temperature)

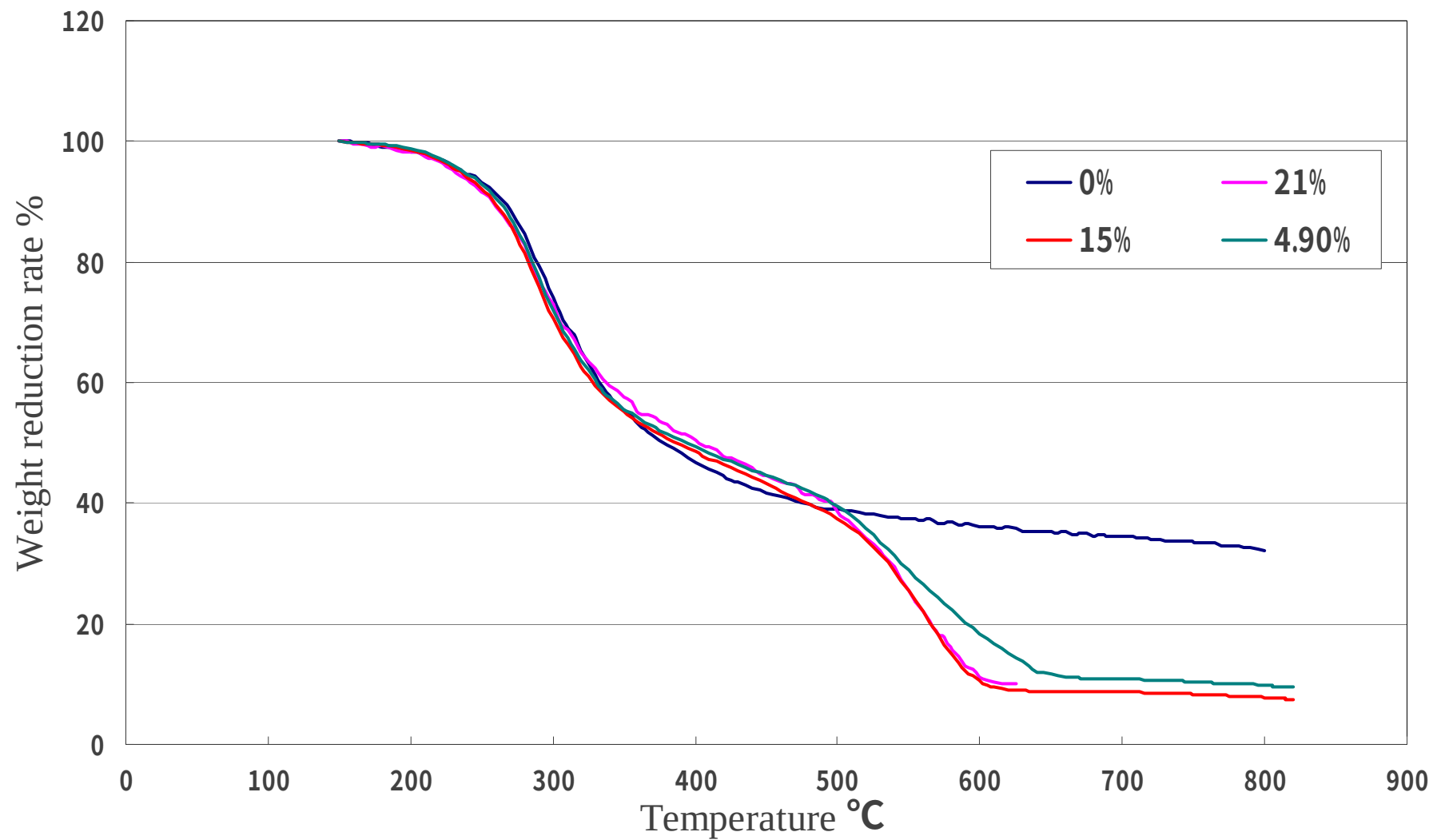


Fig.11 Thermal analysis on solid waste fuel

【(株) 神戸製鋼所】

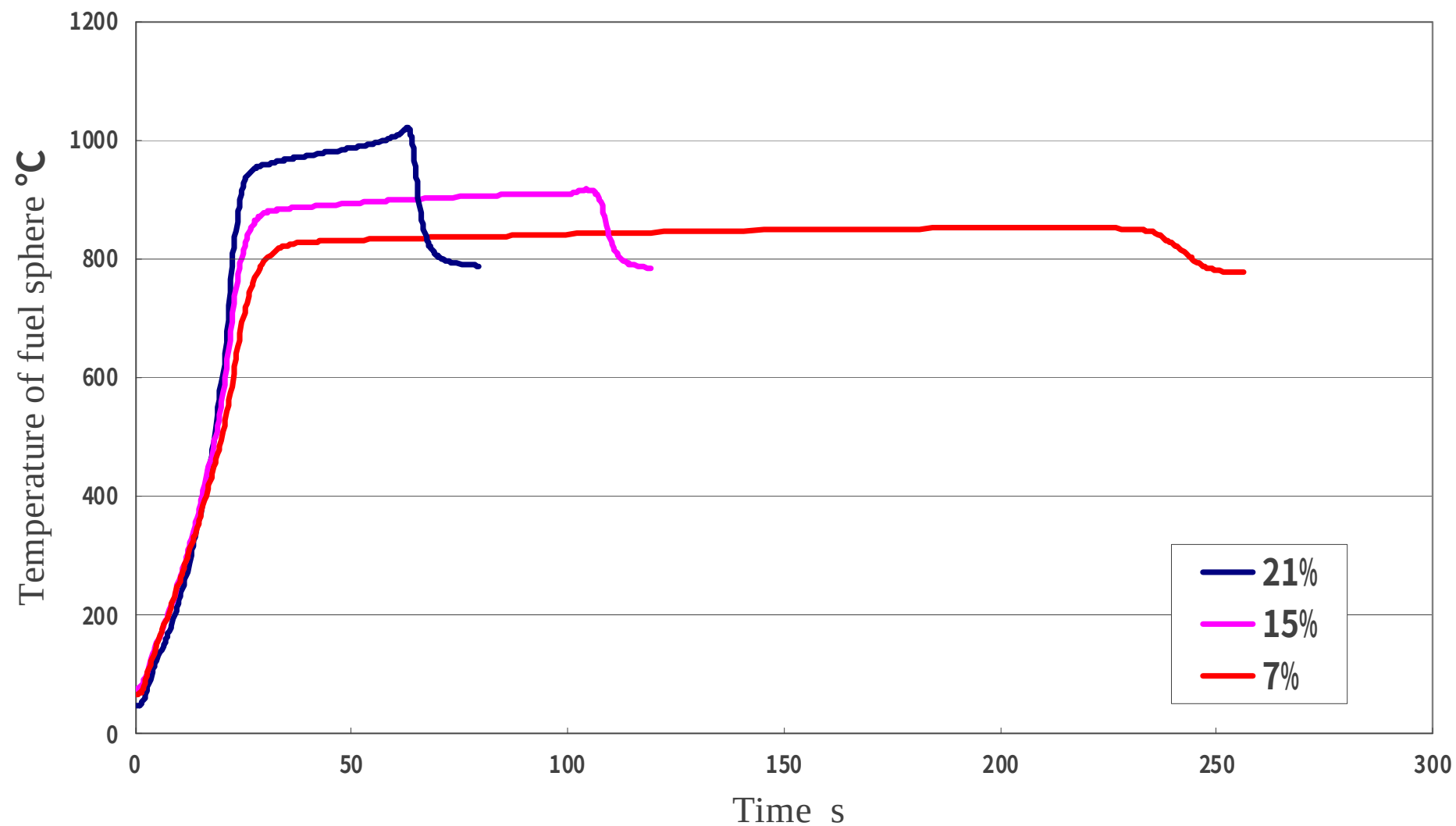


Fig.12 Temperature distribution
(Parameter: Oxygen concentration)

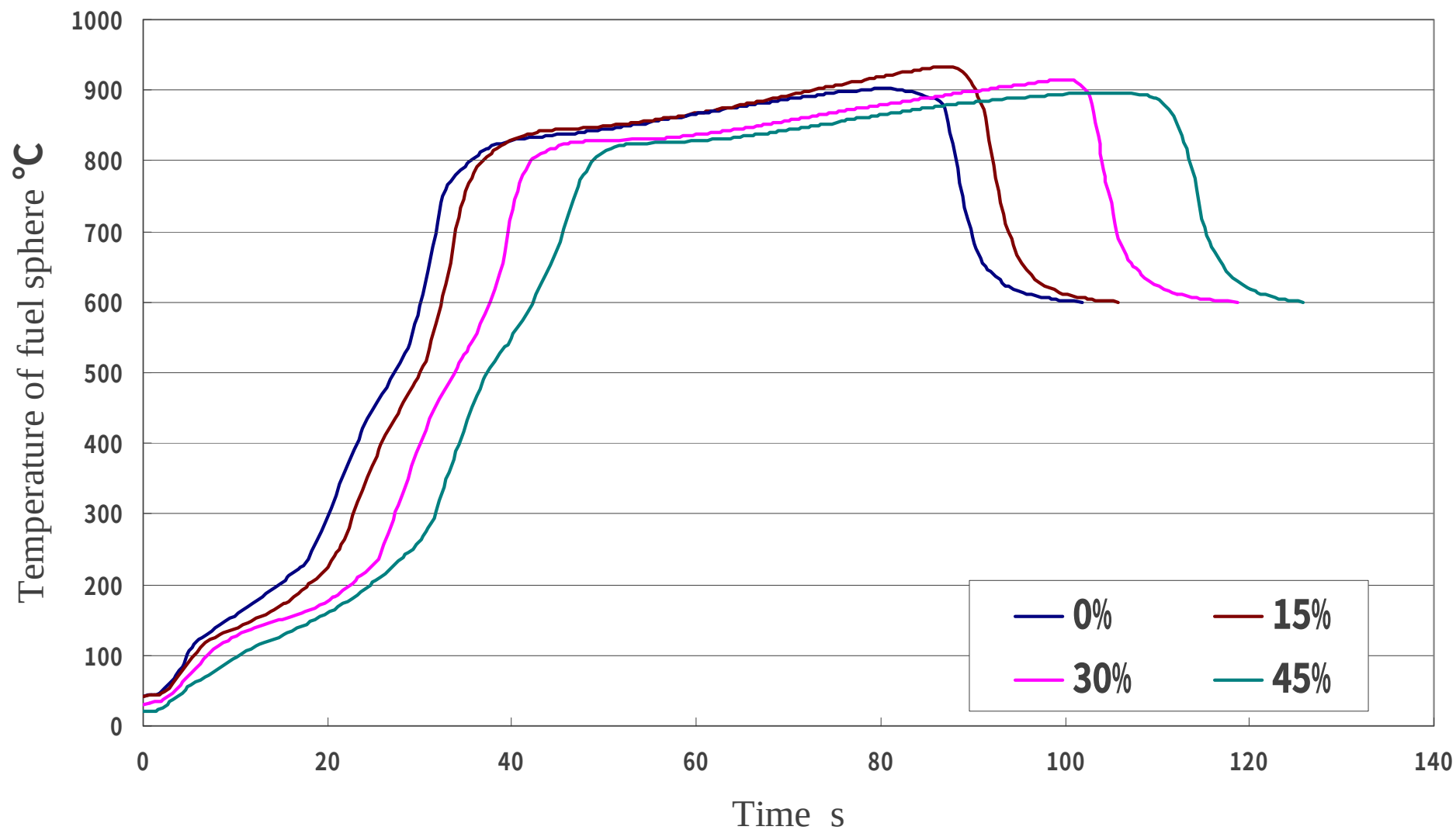


Fig.13 Temperature distribution
(Parameter: moisture content)