消防研究技術資料第78号

RDF爆発・火災に関する研究報告書
（その２）

平成19年9月

消防庁 消防大学校 消防研究センター

目次

研究参加者

1章　はじめに …… 1

2章　不活性気体による消火実験 …… 5
2-1　不活性気体の流量の影響 …… 7
2-2　不活性気体の注入位置の影響 …… 15

3章　RDFサイロ屋根の飛翔 …… 21

4章　RDFの熱分解特性に関する一考察 …… 33

5章　おわりに …… 51

参考 …… 55

1章　はじめに

1章　はじめに

本報告は、独立行政法人消防研究所で行われた研究「RDF爆発・火災に関する研究」の平成17年度の研究内容をまとめたものである。

平成17年度では、平成16年度に引き続き、RDFの消火実験を行った。平成16年度の消火実験では、水を使用したが、平成17年度の消火実験では、不活性気体を使用することとした。それにより、燃焼中のRDFの山を不活性気体で消火するための条件を検討した。さらに、火災原因調査の一部として、サイロの屋根の飛翔について解析を行った。サイロが爆発し、屋根が飛翔するまでの経過については全ての情報が得られているわけではないが、得られた情報を元に屋根が飛翔する条件を推定した。

また、三重県内のRDF製造施設からRDFを入手し、分析を行った。過去の測定結果とあわせて紹介した。

２章　不活性気体による消火実験

2章　不活性気体による消火実験

2-1　不活性気体の流量の影響

1. まえがき

ごみ固形化燃料(RDF)は本来燃料として使用するために製造されたものなので、RDFの炉内燃焼については、これまで多くの研究が行われてきており、その結果は総説[1]にもまとめられている。しかし、RDFは計画では大量に製造し、運搬し、貯蔵することになっているにもかかわらず、その火災時の対策、消火法については、参考となる資料が少ない[2-5]。窒素ガスを使用した小規模な消火実験を行った結果を報告する。

2. 実験装置および実験方法

実験方法は過去に報告した内容4)とほぼ同じである。実験内容をTable 1に、実験装置をFig.1に示す。金属製のトレイ上にRDFを山状に盛った。Test 2を除き、各実験にはRDF20 kgを使用した。Test 2では、RDF約10 kgを使用した。金属製のトレイをロードセル上に置き、燃焼中の重量変化を測定した。実験の様子を、通常のビデオカメラに加え赤外線イメージカメラ(NEC SANEI TH7102)で撮影した。着火には、以下の2通りの方法を用いた。

1)山の表面にヘプタンを散布し、ヘプタンに着火する。ヘプタンは数分で消費されるが、RDFは有炎燃焼を継続する。

2)山の底部に棒状の電気ヒーター(直径6.2 mm、長さ50 mm、出力300 W)を設置し、ヒーターに通電する。通電から4分以内にヒーターが破損し、加熱が停止するが、ヒーターの周囲のRDFはくん焼を継続する。

消火には、以下の2通りの方法を用いた。

1)横浜市消防局が使用している2流体ノズルを使用し、水噴霧を作用させた。この際、なるべく少量の水でRDFの山を覆う火を消炎させるようにした。

2)外径10 mmのステンレス管4本を、山の中心軸を取り囲むように設置した。ボンベから窒素ガスをステンレス管を通して、山の内部に供給した。

比較のため、Test 1では、水噴霧を使用した。Test 2では、消火を行わなかった。Test 3では、着火せずに、窒素ガスの注入のみを行った。Test 4から7では、窒素ガスを注入した。窒素ガスの合計の供給量は、Test 3、5、7では50 dm^3/minとし、Test 4と6では、10から40 dm^3/minまで10 dm^3/minずつ増加させた。

3. 結果および考察

Fig.2に重量の時間変化を示す。Fig.3に、重量減少速度を示す。Fig.2に示した曲線を、折れ線で近似し、直線部分の勾配を求め、重量減少速度とした。さらに、完全燃焼していると仮定し、重量減少から発熱速度を求め、燃焼に必要な空気量を計算した。Test 1では、有炎燃焼している山に水噴霧を作用させ、消炎させた。山の内部ではくん焼が継続したため、重量減少と発煙が観察された。Test 2では、山の内部でくん焼状態となり、発煙と重量減少が観察された。点火から60分以上経過してから山の内部を割っ

たところ、ヒーターの周囲でくん焼していた。有炎燃焼したTest 1では、燃焼に必要な空気量は1000 dm^3/min程度であり、くん焼したTest 2では、燃焼に必要な空気量は10 dm^3/min程度であった。Test 2のように、内部にヒーターを設置し、その周囲でくん焼させた場合のみ、燃焼に必要とされる空気を窒素ガスで置き換えることができると予想される。図4に、完全燃焼を仮定した際の発熱速度を示す。図5に窒素ガスが、その熱容量により持ち去ることができる熱量を示す。図4が示すように、有炎燃焼したTest 1では発熱速度は0.1 MW程度で、くん焼したTest 2では発熱速度は1 kW程度であった。図5が示すように窒素が持ち去ることができる熱量は0.1 kW程度である。このように、窒素による冷却は期待できないことがわかる。

Fig.6からFig.8に、赤外線イメージカメラで撮影した熱画像を示す。RDFは水分を含んでおり、ボンベから供給される乾燥した窒素ガスに触れると、水分を失い、冷却される。Test 3では、赤外線イメージカメラで温度の低下を可視化することにより、窒素ガスが山の内部をどのように移動したかを可視化した。Fig.6のように、窒素ガスは中心軸の周囲に広がり、山裾には届いていないのがわかる。Test 5では有炎燃焼している山の内部に窒素ガスを注入したところ、くん焼状態となった。Fig.7のように、窒素ガスが供給される中心軸の周囲は酸素濃度の低下により燃焼が抑制され、温度が低下している。山裾では、窒素ガスが届かないので、温度が低下しない。Fig.2が示すように重量減少が継続したことからも、燃焼が継続したことがわかる。Test 4でも、同様な結果が観察された。Fig.8のように、Test 7では、内部にヒーターを設置し、くん焼させると、発生した高温のガスが上昇し、山頂付近から外部に出るので山頂付近の温度が上昇するのが観察される。窒素ガスの供給を続けると、くん焼が抑制され、山頂付近に高温の部分が見えなくなる。山を割って、断面を観察すると、40℃程度まで温度が低下しており、燃焼が停止したことがわかる。Fig.2が示すように、点火から80分経過すると、重量減少が見られなくなったことからも燃焼が停止したことがわかる。Test 6でも同様な結果が観察された。

山の内部に電気ヒーターを設置し、山の内部でくん焼させた場合、以下の条件がそろったときは、燃焼を停止させることができた。1)くん焼を継続するのに必要とされる空気の量と、ほぼ同等の量の窒素ガスを供給した。2)熱源である電気ヒーターの周囲でくん焼となった。3)くん焼状態となっている場所が特定できていた。4)くん焼状態となっている場所を取り囲むように窒素ガスを供給できた。

4. まとめ

RDFの火災時の対策について検討するための資料とするため、窒素ガスを使用したRDFの消火実験を行った。RDFを山状に盛り、着火した。着火の方法により、有炎燃焼している山と、山の内部で局所的にくん焼している山をつくった。

有炎燃焼している山の内部に窒素ガスを注入したところ、くん焼状態となったが燃焼を継続した。

内部で局所的にくん焼している山の内部に窒素ガスを注入したところ、条件によっては燃焼を停止させることができた。

5. 参考文献

1. 佐藤健二:RDFの燃焼, 燃焼研究, 104, pp. 29-52, 1996.
2. 四日市市消防本部:RDF(ごみ固形化燃料)燃焼・消火実験報告書の概要, 月刊消防, 26(5), pp. 26-31, 2004.
3. 八島正明:RDF堆積層内の燃え拡がり, 第37回安全工学研究発表会講演予稿集, pp. 189-192, 2004.
4. T. SUZUKI et al., A Study on Extinction of RDF (Refuse Derived Fuel) Pile, Fire Safety Science - Proc.8th Int. Sym., 2006, pp.789-800.
5. 総務省消防庁:ゴミ固形燃料等関係施設の安全対策調査検討報告書, 2003.

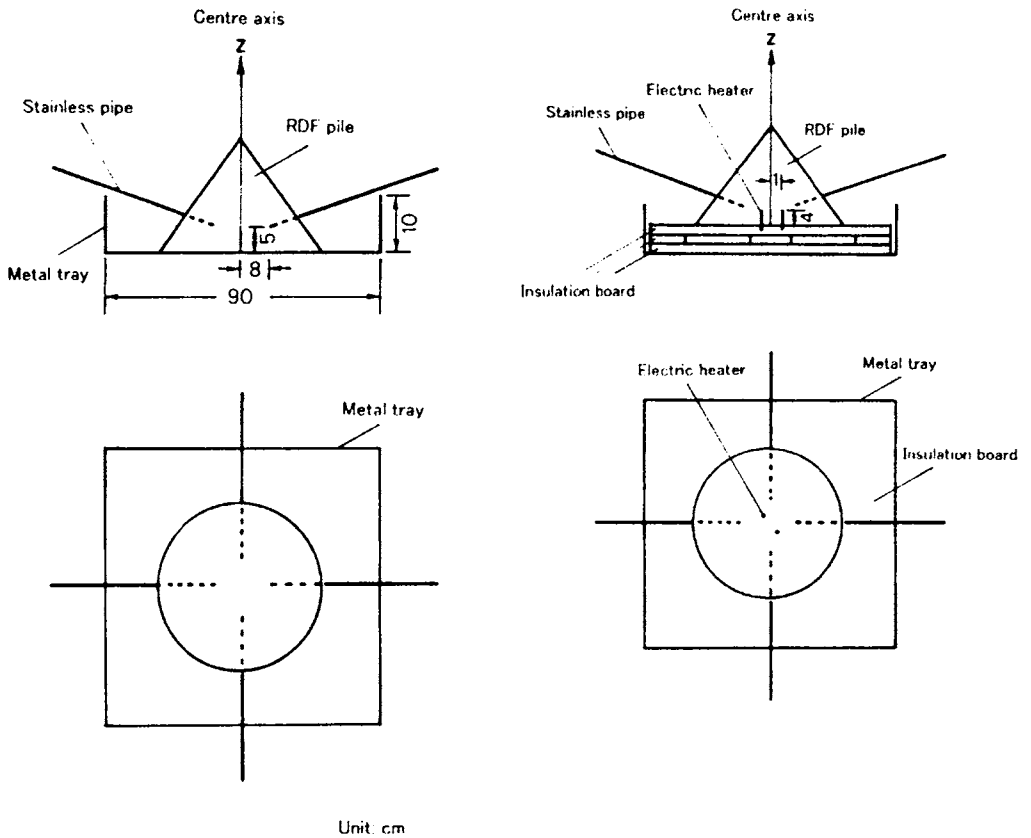
Table 1 Experimental condition

Test	W_0	Pile geometry	Method of ignition	Water application	V
Test 1	20	15 cm(h), 70 cm(dia)	heptane (3 dm^3)	mist at t=30	no
Test 2	9.5	12 cm(h), 50 cm(dia)	Electric heater	no	no
Test 3	20	15 cm(h), 70 cm(dia)	no	no	50 (0<t<50)
Test 4	20	15 cm(h), 70 cm(dia)	heptane (3 dm^3)	no	10 (30<t<50) 20 (50<t<70) 30 (70<t<90) 40 (90<t<110)
Test 5	20	15 cm(h), 70 cm(dia)	heptane (3 dm^3)	no	50 (30<t<90)
Test 6	20	15 cm(h), 70 cm(dia)	Electric heater	no	10 (30<t<50) 20 (50<t<70) 30 (70<t<90) 40 (90<t<110)
Test 7	20	15 cm(h), 70 cm(dia)	Electric heater	no	50 (30<t<90)

W_0:initial weight of RDF pile [kg]

t:time after ignition [min]

V:supply rate of nitrogen [dm^3/min]



(a) (b)

Fig.1. Outline of Experimental setup. Not to scale. Unit:cm.

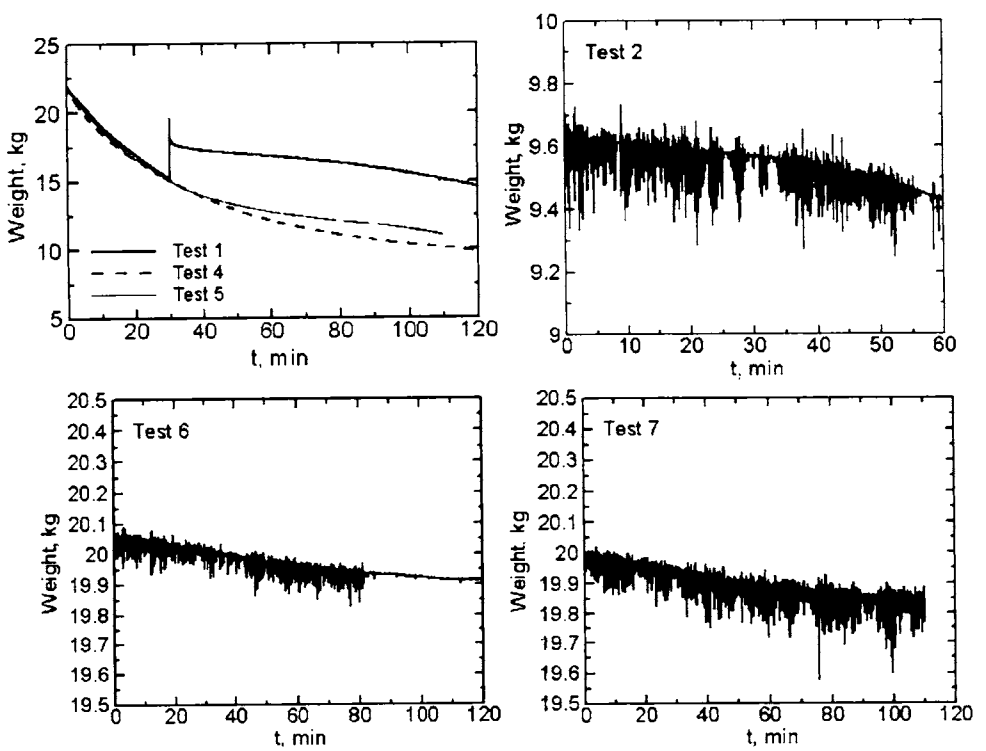


Fig. 2. Variation of weight with time.

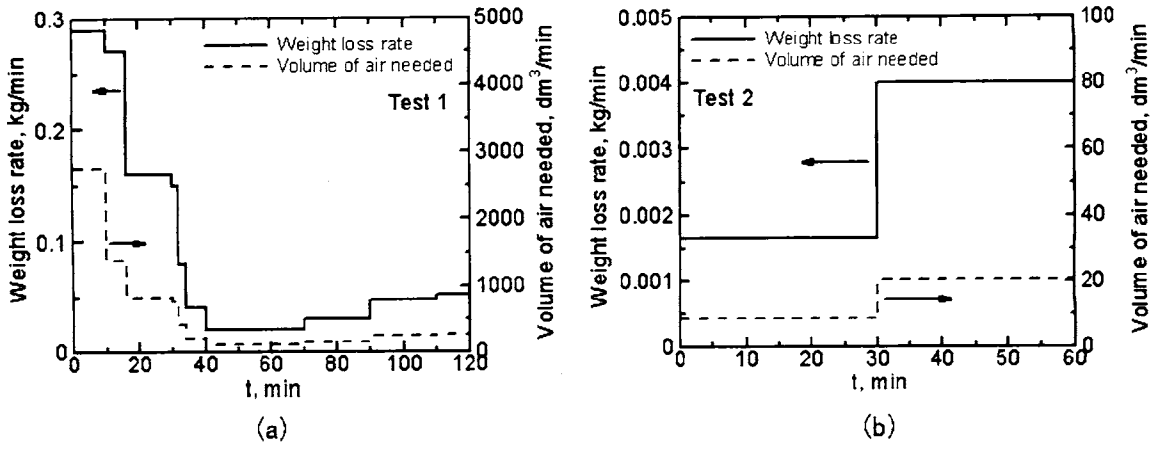


Fig. 3. Variation of weight loss rate and volume of air needed for complete combustion with time.

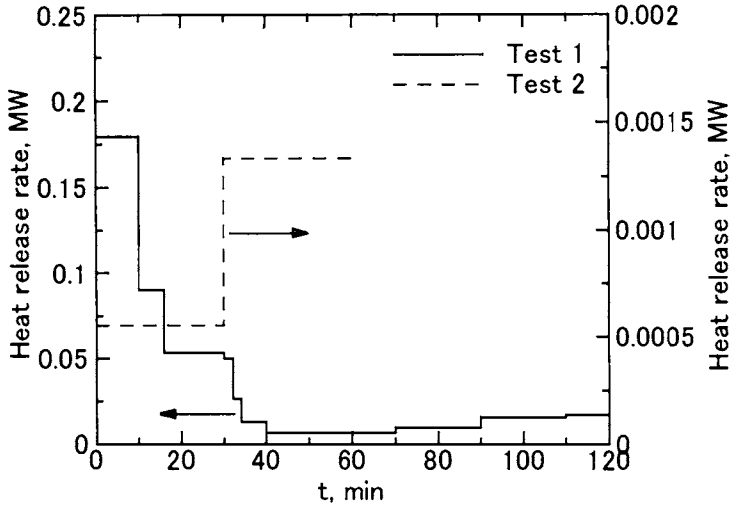


Fig. 4. Variation of heat release rate with time

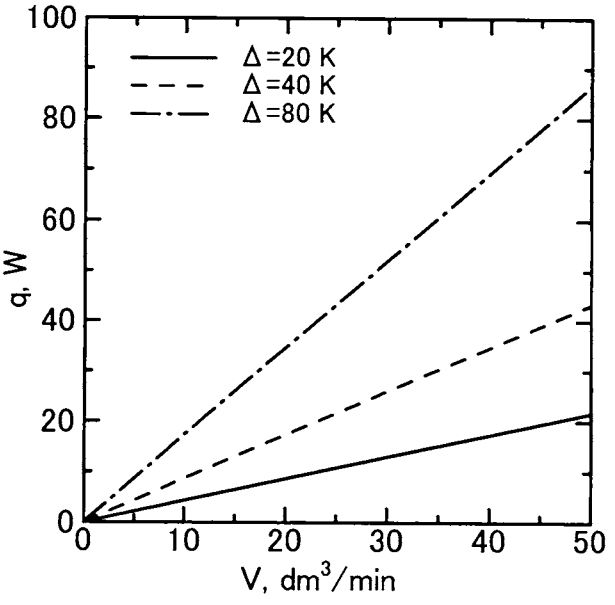


Fig. 5. Variation of heat which nitrogen gas carries with time.

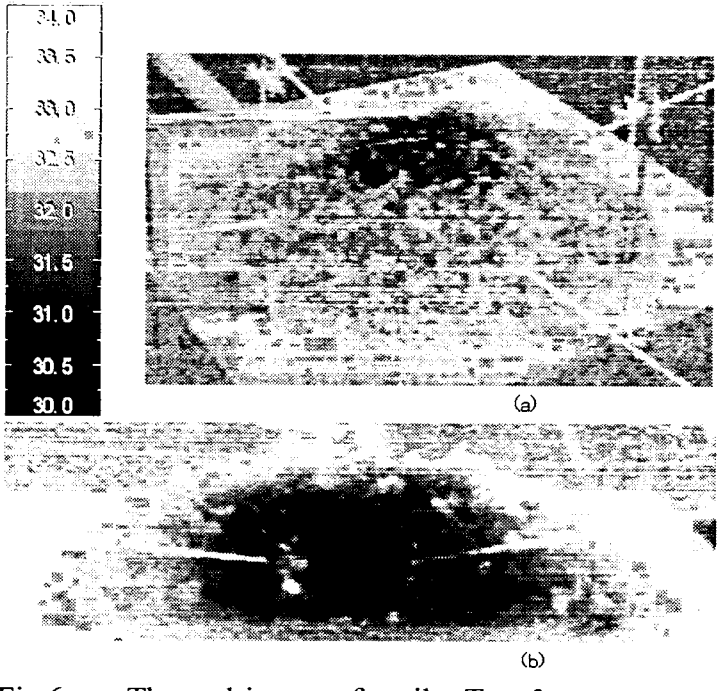


Fig.6. Thermal image of a pile. Test 3.
(a)External appearance at 15 min after start of nitrogen injection
(b)Cross sectional area revealed by cutting the pile open

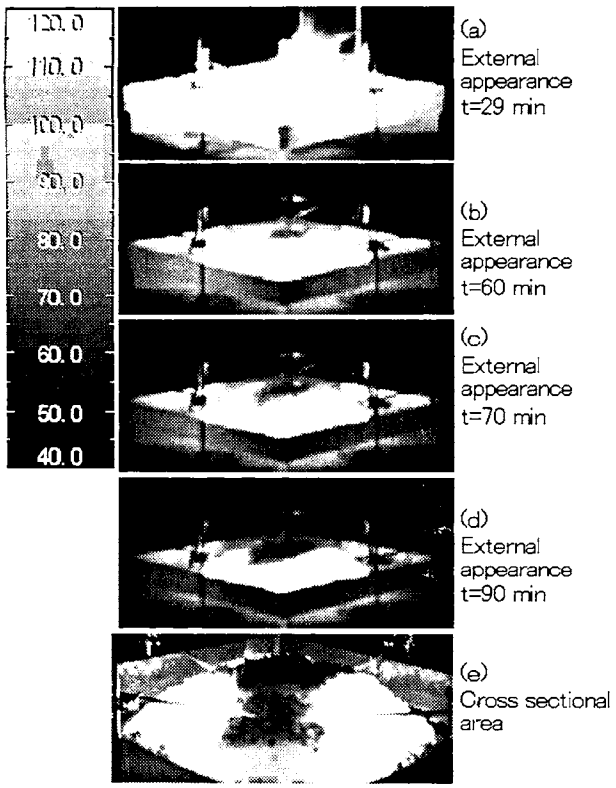


Fig. 7. Thermal images of a pile. Test 5.

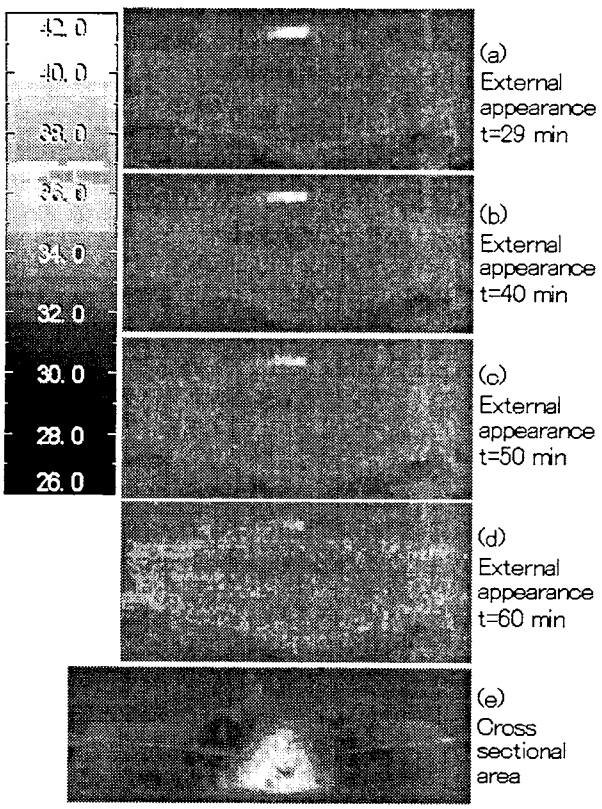


Fig. 8. Thermal images of a pile. Test 7.

2-2　不活性気体の注入位置の影響

1. まえがき

ごみ固形化燃料(RDF, Refuse Derived Fuel)は本来燃料として使用するために製造されたものなので、RDFの炉内燃焼については、これまで多くの研究が行われてきており、その結果は総説[1]にもまとめられている。しかし、RDFは計画では大量に製造し、運搬し、貯蔵することになっているにもかかわらず、その火災時の対策、消火法については、参考となる資料が少ない[2-5]。RDFがサイロやピット内で貯蔵されている際に、何らかの原因でRDFが燃焼を開始し火災となった場合を考える。この場合、未燃焼のRDFがさらに投入されたり、あるいは、サイロやピットから内容物を取り出そうとしたために内部が攪拌された結果、燃焼中のRDFの上に未燃焼のRDFが積載される状態も想定されうる。そのような状態で、火災の消火または抑制のために不活性気体を注入した場合の効果について検討するために小規模な火災実験を行った。

RDFの山を有炎燃焼させ、それを未燃焼のRDFで覆うことにより、内部でくん焼しているRDFの山をつくる。金属製のパイプを通して山の内部に不活性気体として窒素ガスを注入する。パイプの出口と、くん焼している部分の位置関係によっては、窒素ガスがくん焼している部分に有効に作用しないことも考えられる。パイプの出口と、くん焼している部分の位置関係を変化させながら、内部に窒素ガスを注入し、窒素ガスの効果を調べた。

2. 実験装置および方法

実験方法は過去に報告した内容[6]とほぼ同じである。実験条件をTable 1に示す。三重県内で製造されたRDF 5 kgを角形の金属製トレイ(内寸:90 cm x 90 cm x 10 cm)に山状に盛る。模式図をFig.1に示す。山の底面の半径は約20 cm、山の高さは約12 cmである。ヘプタン 1.5 dm^3を表面にふりかけ、着火する。ヘプタンは10分以内に消費され、その後、RDFは有炎燃焼を継続する。着火から20分後に、新しいRDF 15 kgで表面をまんべんなく覆うことにより有炎燃焼からくん焼状態になる。新しいRDFで覆うことにより、山の底面の半径は約38 cm、山の高さは20から25 cmになる。Test Aでは、比較のため、窒素ガスを注入しなかった。Test B、Test CおよびTest Dでは、窒素ガス注入のための外径10 mmのステンレスパイプ1本を設置した。ステンレスパイプの出口のおおよその位置は、それぞれ、Fig. 1の①、②、③にあたる。Test Bでは、最初の山の内部にステンレスパイプの出口を設置した。Test Cでは、最初の山の外側で、最初の山の中腹の斜面付近に設置した。新しいRDFで覆うと、その中に埋まる。Test Dでは、最初の山の山頂付近に設置した。新しいRDFで覆うと、その中に埋まる。30分経過したところで、窒素ガスを10 dm^3/minで注入した。50分経過したところで窒素ガスを20 dm^3/minに増やした。70分経過したところで、窒素注入を停止した。燃焼の様子を観察するために、通常のビデオカメラおよび、サーマルイメージカメラ(NEC三栄TH7102、温度範囲0～250℃)を使用した。

3. 結果および考察

最初の山の斜面では、覆われる前は有炎燃焼していたが、覆った後はくん焼状態となる。過去の知見から、注入した窒素ガスは、内部での燃焼により発生した高温の気流と共に上昇することが予想される。Test Bのように Fig.1における①の位置から供給すると、最初の山の斜面を通過して、新しい山の山頂の近くから山の外へ流れていくと予想される。Test CのようにFig. 1における②の位置から供給すると、新しい山の斜面に向かって上昇し、山の外へ流れていくと予想される。Test DのようにFig. 1における③の位置から供給すると、新しい山の山頂に向かって上昇し、山の外へ流れていくと予想される。Test Bに比べると、Test CとTest Dでは、窒素ガスの火災抑制効果は小さいと考えられる。

重量の時間変化および重量減少速度をFig.2に示す。重量の時間変化の曲線を折れ線で近似し、その勾配を重量減少速度とした。Test Aでは、着火から80分後まで計測を継続した。Test B、Test CおよびTest Dでは、着火から100分後まで計測を継続した。Test B、Test C、Test Dにおける重量減少速度をみると、窒素ガス注入中であっても、重量減少速度は大きくなっている。しかし、Test Bにおける重量減少速度は、Test CおよびTest Dの場合に比べ小さくなっている。Test Aにおける重量減少速度を、Test CおよびTest Dの場合に比べると大きな差はない。

計測終了後、山を分割し、断面を露出させ、内部を観察した。断面の熱画像をFig. 3に示す。Test Aの熱画像とTest Bの熱画像と比較すると、Test Bの熱画像では、全体的に、高温の部分が占める割合が減っている。Test Cの熱画像をみると、高温の部分が全体的に拡がっている。Test Dの熱画像をみると、Fig.1における③の位置から新しい山の山頂にかけての部分の温度が周囲より低くなっている。しかし、それ以外の部分には、高温の部分が拡がっている。

重量変化と断面の熱画像からみると、内部でくん焼している部分を、窒素ガスが通過するように、窒素ガスを供給した場合に、火災が抑制されている。

4. まとめ

燃焼中のRDFの上に未燃焼のRDFが積載されるなどして、大量に積まれた状態の内部でくん焼している場合を想定する。火災の消火または抑制のために不活性気体を内部に注入した場合の効果について検討するために、小規模な火災実験を行った。内部でくん焼している部分を、窒素ガスが通過するように、窒素ガスを供給した場合に、火災が抑制された。

5. 参考文献

1. 佐藤健二, 燃焼研究, 104: 29-52 (1996)
2. 四日市市消防本部, 月刊消防, 26(5): 26-31(2004)
3. 八島正明, 第37回安全工学研究発表会講演予稿集, pp. 189-192 (2004)
4. 鈴木健 他, 平成17年度日本火災学会研究発表会概要集, pp. 52-55 (2005)
5. 鈴木健 他, 平成18年度日本火災学会研究発表会概要集, pp. 392-395 (2006)
6. 鈴木健 他, 第43回燃焼シンポジウム講演論文集, pp. 318-319 (2005)

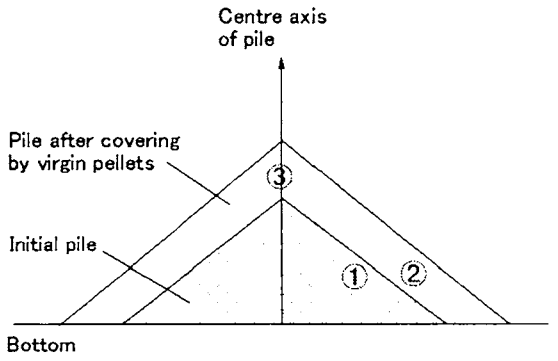
Table 1 Condition of experiments.

	Test A	Test B	Test C	Test D
Initial weight, kg	5	5	5	5
Weight of virgin pellets used for covering, kg	15	15	15	15
Location of exit of pipe	-	h=8 cm r=7.5 cm	h=9 cm r=14 cm	h=14 cm r=0
Supply rate of nitrogen gas, dm^3/min	-	10(30<t<50) 20(50<t<70)	10(30<t<50) 20(50<t<70)	10(30<t<50) 20(50<t<70)

h: height from the bottom

r: distance from the centre axis of the pile

t: time after ignition



①: location of exit of pipe for Test B

②: location of exit of pipe for Test C

③: location of exit of pipe for Test D

Fig. 1 Schematics of the pile.

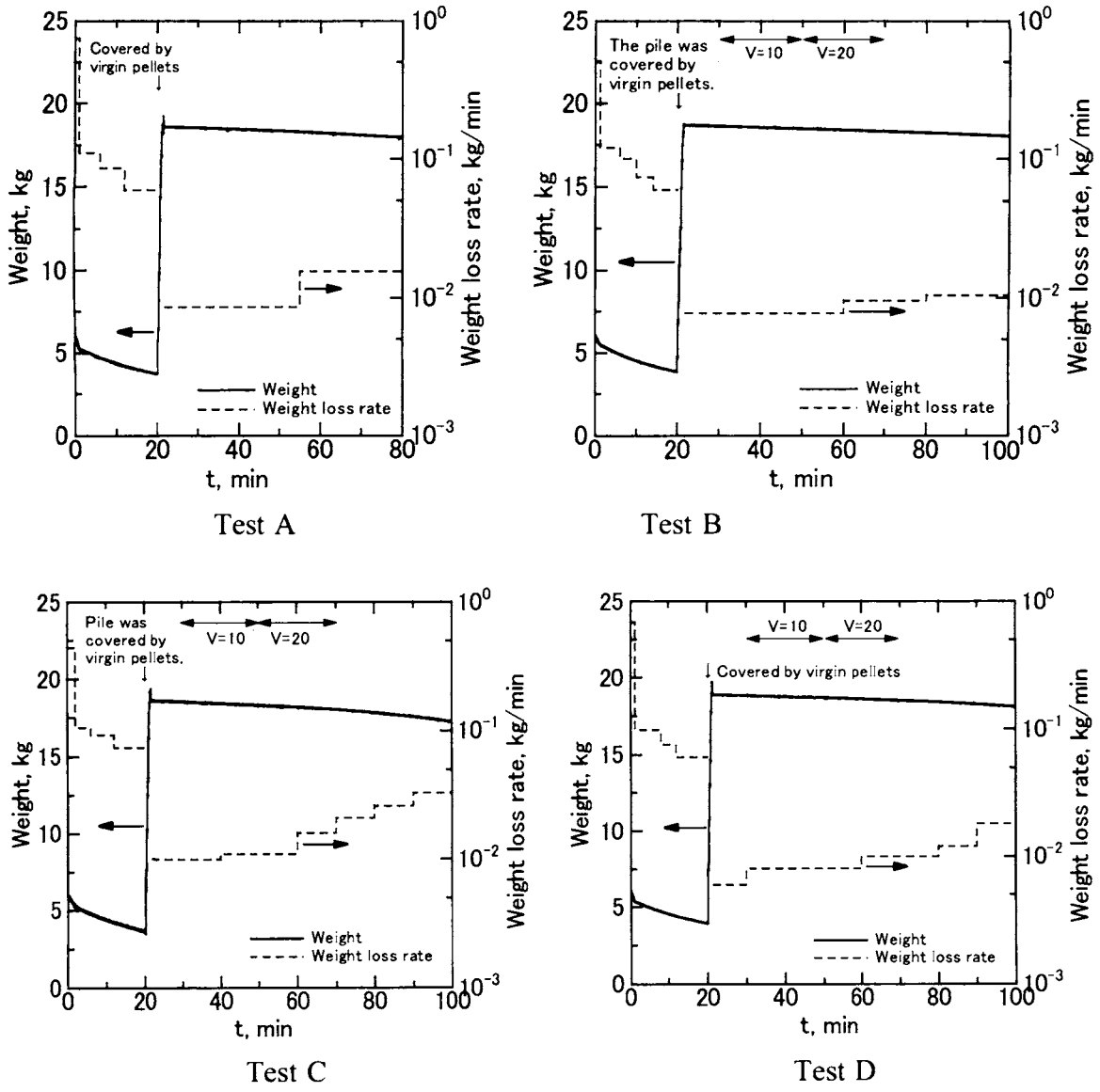


Fig. 2 Variation of weight and weight loss rate.

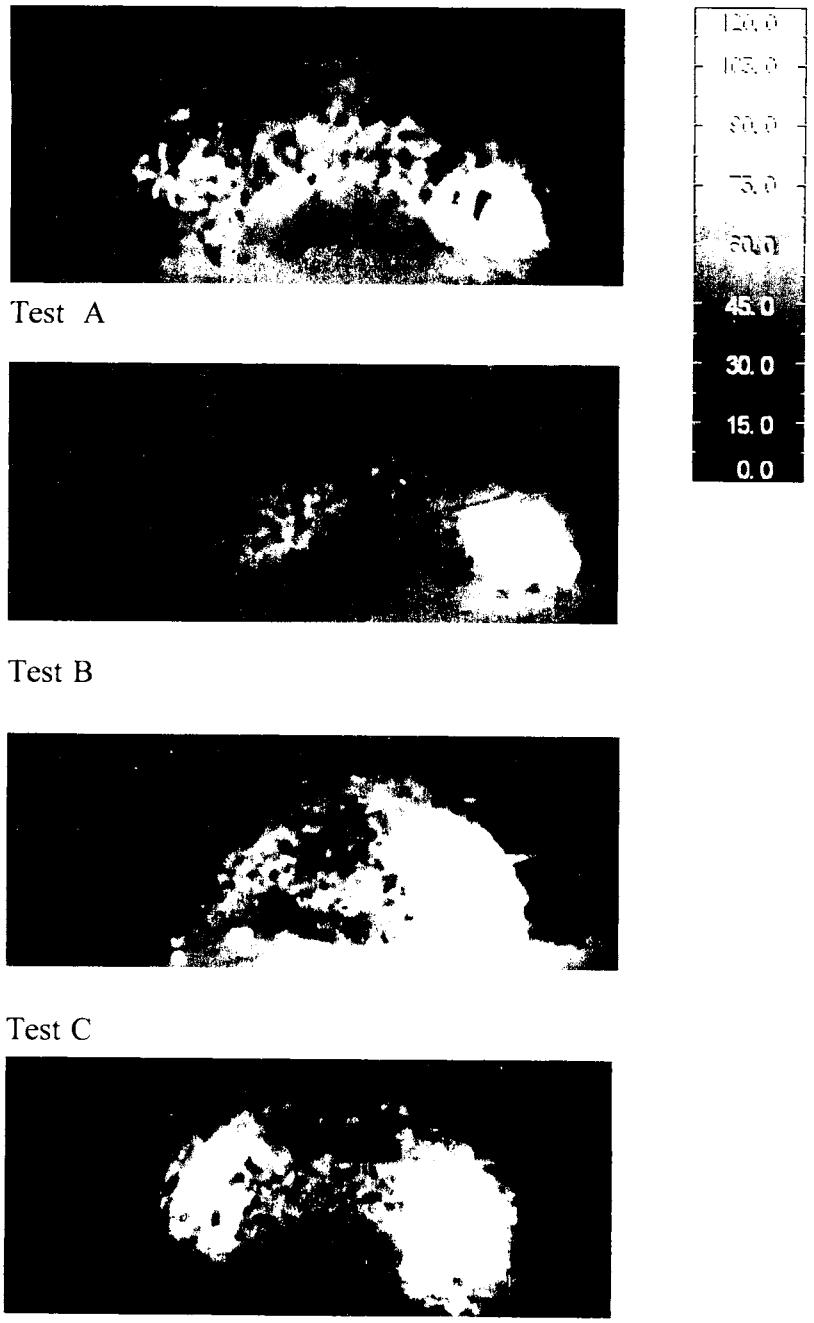


Fig. 3 Thermal images inside the pile.

3章　RDFサイロ屋根の飛翔

3章　RDFサイロ屋根の飛翔

1. まえがき

サイロは、様々な粒状や粉状の物質を高い密度で集積、移送する目的で使用されている。効率的な運転を目的として移送作業を自動化した大規模なサイロが建設されている。

このような大規模サイロの中にはFig.1に示すように廃棄物から製造した燃料であるRDF(Refuse Deried Fuel)を貯蔵するものもある。ところが、平成15年8月19日には直径15．4 mのサイロが爆発を起こし、2名の消防職員が殉職している[1]。この爆発事故では、サイロの屋根が約190 m離れた位置までひとかたまりで吹き飛ばされている。吹き飛ばされた屋根は、Fig.2に示すように送電線の近くに、ひとかたまりで落下している。

このようにサイロの爆発災害により屋根が飛散する場合の周辺への被害を予測するためには、屋根の想定飛翔距離を評価することが必要になる。

過去に熱交換器爆発事故調査結果から破片の飛翔距離や平均速度が報告されている[2]。具体的な破片の平均速度計算方法は、明示されていない。爆発災害で回収された破片を落下塔から自由落下させ、空気抵抗係数を実測し、最大飛翔仰角で飛翔したとして初速度を計算した報告が出されている[3]。しかし、空気抵抗が実測可能な大きさと重量であり形状も塊状で方向による空気抵抗が一定とみなせる破片に限られる。

ところが直径15．4 mのサイロの屋根は、円錐台形の巨大なかたまりとなって飛翔している。このことからサイロの屋根に作用した力は、小さな破片を生成するほどには大きくなかったことが分かる。

国内で発生した石油類貯蔵タンクの爆発火災[4]では、内径5．8 mのタンク屋根が約15 m飛翔した事例、直径17．5 mタンク屋根が約20 m飛翔した事例がある。従来のタンク屋根の飛翔と比べると今回の飛翔距離は、大きくなっている。

サイロ火災による屋根の飛翔は、数多く報告されている[1]。報告された事例と比較しても今回の飛翔距離は、長くなっている。

このように空気抵抗が実測できない大きさの屋根が一体で長距離飛散した事例の飛翔距離の評価を行った。

屋根の初速度は、多くの破片の飛散状況から推定する手法が利用できなかった。そのため、被災したサイロの破壊状況から推定された圧力上昇から見積もる必要があった。内部圧力変化と屋根の加速運動を連立させて解析する手法も考慮したが多くの仮定を導入する必要が生じる。ここでは、単純化した加速モデルを用い推定した。

空気抵抗については、過去の事例の実測値を用いることができない。さらに屋根の直径が15．4 mであるため、想定される飛翔速度から空気抵抗の特性に影響を与えるレイノルズ数が大きくなる。そのため、実験可能な模型を制作してもレイノルズ数を合わせると流れの速度を大きくし、音速近傍とする必要があり圧縮性の影響を受け、模型実験を行うことが困難である。

2. サイロ爆発事故の概要

RDFサイロは、コンクリート基礎の上に建設されている。サイロの基部には、払い出し

用の三条のベルトコンベアーが設けられている。サイロ基部中心部には、ベルトコンベアー駆動部を収納する円錐部が設けられている。サイロの基部外周には、底部掃引機構収納部が設けられている。

サイロの側面板は、直径15．4 m、高さ22 mである。円錐台形の屋根の高さは5 mである。爆発発生当時RDFは、底部から8 mの位置まで積み上げられていた。

事故後の周囲の被害調査とサイロの構造から見積もられた破壊時のサイロ内部圧力上昇は60 kPaであった。屋根の質量、Mは、1．0 x 10^4 kgであった。屋根の水平面への投影断面積、Sは、186 m^2であった。屋根の自重によって生じる圧力は569 Paであり、破壊圧力のおよそ1％である。屋根は、管理棟の上を飛翔し、190 m離れた丘に落下した。

3. 解析

飛翔物の挙動については、爆発現象の解析の中ですでに詳しく議論されている[5]。今回対象とするサイロは、内部空間容積が著しく大きく、飛翔物の肉厚は、高圧ガス容器に比べると薄い。

内部の圧力上昇も高圧ガス容器などの破壊圧力に比べ著しく低い。そのため従来の手法[5]で破壊直前の容器内圧力と飛翔物の初期速度のグラフを外挿し、飛翔物の初期速度を評価すると音速程度に達する。しかしながら屋根の飛翔状況が大きく異なるので単純な外挿が可能な検討が必要である。また、このような高速度で飛翔した場合、長時間の飛翔となり、空気抵抗の影響が現れる。

3．1．屋根破壊直後の加速[6]

屋根に上方向に作用した力、Fは(1)式で表せる。事故の概要で述べたように屋根破壊時の圧力上昇に比べ重力の作用による圧力は、およそ1％であるので、屋根破壊直後の内部圧力の高い時期を考慮する(1)式では重力の影響を無視できる。

$$F = S\,(Pi-Po) \qquad (1)$$

Sは、屋根の水平面への投影断面積である。Piは、RDFサイロ内部圧力、Poは、外部圧力である。屋根が、側板から分離し、しばらくは圧力差により上方向に加速度、 dU/dtが作用する。

$$F = M\,(dU/dt) \qquad (2)$$

M は、屋根の質量である。屋根破壊後の内部の圧力変化を与えれば(2)式を積分し速度変化を知ることができる。多くの因子を仮定すれば圧力変化を計算できるが、仮定した因子の妥当性を検証する必要が生じる。文献6で用いられた手法を用い、簡単な近似によって圧力変化を与える。この方法では、内部の圧力変化を時間に対して一次と仮定する。(2)式を U dt = dlの関係を用い書き換える。

$$MU(dU/dl)=S(Pi-Po) \qquad (3)$$

(3) 式をU = 0 at Pi = Pi,maxの条件で積分する。

$$U=\{2(S/M)\cdot\int_0^L (Pi-Po)dl\}^{1/2} \qquad (4)$$

ここで、屋根が側板から分離後高さ、Lまで直線的に上昇する間に、内部圧力が外部圧力にまで低下すると仮定する[5]。

$$\int (Pi-Po)dl=(Pi,max-Po)L/2 \qquad (5)$$

(4)、(5) 式から屋根の側板分離後の最大速度Umax が (6) 式で求められる。

$$Umax=\{S(Pi,max-Po)L/M\}^{1/2} \qquad (6)$$

S、(Pi,max-Po)、Mを与えるとUmaxは、Lの関数として与えられる。

$$Umax = 33.4\ L^{1/2} \qquad (7)$$

(7)式から加速される距離、Lが、1 mの場合にUmaxは、33.4 m/s、4 mの場合には、66.8 m/sに達する。

3. 2. 屋根の最小飛翔速度

屋根の飛翔距離から屋根の最小飛翔速度を計算する。屋根は、鋼板であり空気に比べ密度が大きいので浮力の効果は無視した。

屋根の詳細な空気力学的な特性は不明であるが、屋根に作用する空気力学的な力は抗力であり、揚力は作用しないとして計算を試みた。抗力係数は、検討した速度範囲では一定値で、主として形状抵抗によって決まると仮定した。また屋根の姿勢も飛翔方向に対して一定で、中心軸に平行であると考え、重心に抗力が作用すると仮定した。

屋根は、側板からの分離する段階で作用する周囲構造物との干渉により鉛直方向ではなく傾斜方向に飛散している。ここでは、飛散方向の変化の影響が水平方向と鉛直方向の速度成分の変化として生じるとして解析を行った。

水平方向の速度成分をV、初期加速完了後の時間をT、飛翔距離をXとする。同様に鉛直方向の速度成分をW、高さをYとする。

抗力係数をCd、空気の密度をρ_gとする。水平方向の初期速度をV_0、鉛直方向の初期速度をW_0、水平方向の初期飛翔距離を0、初期高さを0とする。

$$X = \int Vdt \qquad (8)$$

積分区間{t=0、t=T}

$$V = V_0 - \int Cd\,\rho_g S V^2/M\,dt \qquad (9)$$

積分区間{t＝0、t＝T}

$$Y = \int W\,dt \qquad (10)$$

積分区間{t＝0、t＝T}

$$W = W0 - \int (G + W/|W| Cd\,\rho_g S W^2/M)dt \qquad (11)$$

積分区間{t＝0、t＝T}

数値積分を様々な初期速度に対して行い、着地時の飛翔距離が190 mとなる最小初期速度Uを計算した[8]。抗力係数は、0から1.0まで変化させた。抗力係数と最小初期速度をFig.3に示す。

$$U = (V_0^2 + W_0^2)^{1/2} \qquad (12)$$

抗力係数が0から0.6までの範囲では、最小初期速度は緩やかに増加している。円柱の抗力係数1.15、60度円錐0.5などの類似形状物体の抗力係数から円錐台形の屋根の抗力係数を見積もると0.5程度である7)。この条件では、最小初期速度は、70 m/s程度となる。

Fig.4に屋根の飛翔軌跡を示す。この図では、抗力係数、Cdを0から1．0まで0.1毎に描いてある。空気抵抗の無い条件(Cd=0)では、軌跡の最高高さが最小となっている。空気抵抗の増加に伴い最高高さが増加し、最高高さとなる飛翔距離も増加する傾向が見える。Cdが0.5程度以下の場合、最高高さはおよそ50 mとなっている。

屋根の最小初期速度70 m/sの時のレイノルズ数、Reを計算する。

$$Re = D\,U/\nu$$
$$= 15.4 \times 70 / 1.5 \times 10^{-5}$$
$$= 7.18 \times 10^{7} \qquad (13)$$

この結果から屋根の流れは、2×10^5から4×10^5の範囲にある抗力の急減の起こる臨界レイノルズ数に比べ、レイノルズ数の極めて大きい流れであることが分かる。このことから抗力係数を一定値で検討できることが分かる。

屋根の最小初期速度70 m/sで屋根の移動距離4 m程度で加速完了し、この期間で平均的な加速度Gmで加速したとする。加速に要した期間τは、次式で与えられる。

$$Gm\,\tau = 70 \qquad (14)$$
$$Gm\,\tau^2/2 = 4 \qquad (15)$$
$$Gm = 613 \qquad (16)$$
$$\tau = 0.11 \qquad (17)$$

この結果から平均的な加速を受けた場合でも、重力加速度の60倍以上の大きな加速

度となる。

70m/sは、時速に換算すると252 km/hである。屋根の重量10トンを考慮すると大型トラックが高速道路上で最大速度で衝突した以上の衝撃を受けることになる。そのため直撃を受けた場合には、大きな建物も大きな被害を免れない。

4.考察

(6)式からサイロの破壊圧力、(Pi、max-Po) を低下させ、単位面積あたりの屋根重量、M/Sを増加させることにより到達速度を低下させることができる。また、屋根が分離してから内部の圧力が外気圧まで低下するまでの屋根の移動距離、Lを小さくすることも到達速度を低下させる。

サイロは円筒形であり、側板を切り裂く方法と屋根を脱落させる方法が考えられる。ロケットの機体のように無人の空間での破壊には、側板を切り裂く方法が用いられている。サイロやタンクのように周囲に作業員がいる場合には、次善の策として屋根全体を脱落させる設計となる。そのため、屋根の移動距離、Lの短縮は困難と考えられる。

屋根の単位面積あたりの重量を増加させると屋根の飛翔距離は短縮できるが、着地時の衝撃による被害は大きくなると考えられる。

サイロの破壊圧力は、台風などの強風に対して十分な強度を持たせる必要がある。許容最大風速、Vwを40 m/sとした場合の動圧、Pwを計算する。

$$Pw=1/2\ \rho_g V_w^2 \quad = \quad 0.5 \times 1.29 \times 40^2 \quad = \quad 1.03 \times 10^3 \quad (18)$$

P_wは、見積もられたサイロ内部圧力上昇60 kPaに対して2%程度である。サイロの破壊圧力を下げる放爆装置を設置するなどの余地はあると考えられる。

サイロの最小初期速度と抗力係数、Cdの関係を見ると屋根の形状を円柱に近づけCdを大きくすることにより同一距離を飛翔するための最小初期速度が著しく増加することがわかる。円錐状の屋根や半球状の屋根では、円柱に比べると抗力係数が小さくなり、遠方まで屋根が飛翔することが分かる。屋根の直径が大きくなるとわずかな速度で臨界レイノルズ数を超える。爆発が発生した場合、屋根がなるべく小さな破片となってレイノルズ数が小さくなるような配慮が必要である。これに加え、飛散した破片の終端速度が小さくなるように配慮することも重要である。また、サイロ周囲に作用する圧力波や破片によってガラスなどの破片が生成しないような建物の見直しも必要である。

5. あとがき

サイロ屋根の飛翔挙動を災害現場で得られた計測結果を基に推定した。サイロ屋根の到達速度を決める因子として、サイロの破壊圧力、単位面積あたりの屋根重量、加速をうける距離がある。サイロの最大飛翔距離を決める因子として抗力があった。爆薬類による飛散物の評価では、小さな破片の飛翔特性を考慮することになり物質量とそのTNT換算量が問題となるが、ここで検討したように大きな破片の飛翔特性を考慮する場合には前に述べたような因子を考慮する必要がある。

6. 参考文献

1. 総務省消防庁:“ごみ固形化燃料等関係施設の安全対策調査検討報告書”、pp.2-23(2003)

2. 浄法寺朝美:”防爆壁の設計”、安全工学17－2、pp。69－76(1978)

3. 長谷川和俊:”ダイセル化学工業(株)堺工場爆発火災事故についての爆発威力に関する解析”、安全工学24－1、pp.44－52(1985)

4. 長谷川和俊:”1987年に発生した石油類貯蔵タンクの爆発火災3例”、安全工学28－3、pp.167-175(1989)

5. 平野敏右:“ガス爆発予防技術”、pp.132-142、海文堂(1983)

6. Z.M.Jin:“ Interior Ballistics of Hypervelocity Propulsion”, China Defense Industry Publishing, Peking(2001)

7. 牧野光雄:“流体抵抗と流線型”、pp.1-24、産業図書(1991)

8. Chuen-Yen Chow:"An Introduction to Computational Fluid Mechanics", JOHN WILEY & SONS, New York(1979)

Nomenclature Listing

Cd	drag coefficient
D	diameter of silo (m)
F	force acting (N)
G	gravitational acceleration (m/s^2)
Gm	mean acceleration of roof section (m/s^2)
L	elevation (m)
l	length (m)
M	weight of silo (kg)
Pi	internal pressure (Pa)
Po	external pressure (Pa)
Re	the Reynolds number
S	cross sectional area (m^2)
t	time (s)
U	velocity (m/s)
V	horizontal velocity component (m/s)
W	vertical velocity component (m/s)
X	flight length (m)
Y	flight height (m)

Greek

ρ	density (kg/m^3)
γ	specific heat ratio
τ	time need to travel L (s)
ν	kinematic coefficient of viscosity (m^2/s)

subscripts

max	maximum
g	gas
w	wind

Fig.1 Large diameter silo for RDF storage

Fig.2 Landed roof section near a power line

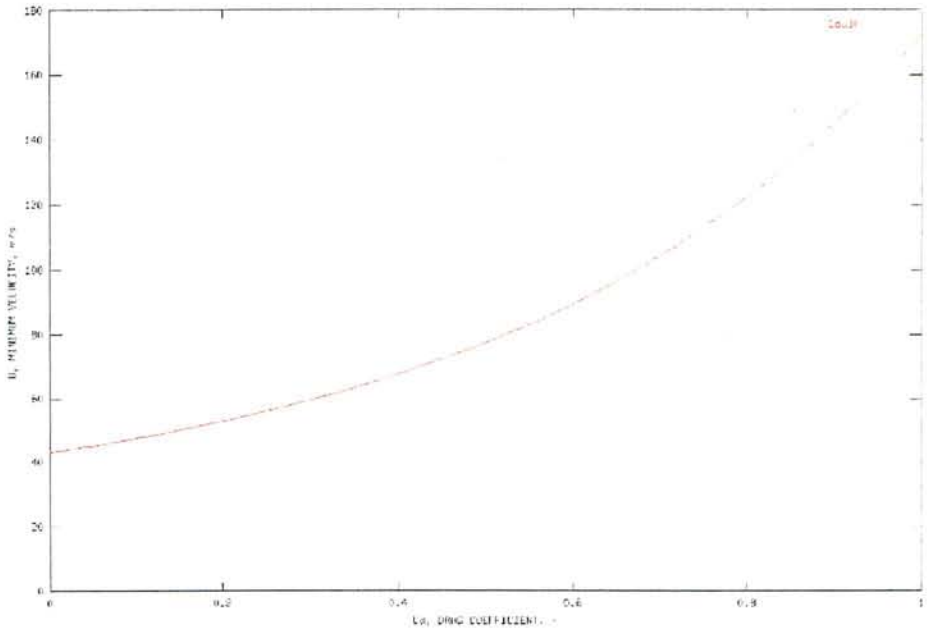


Fig.3 Minimum velocity with drag coefficient

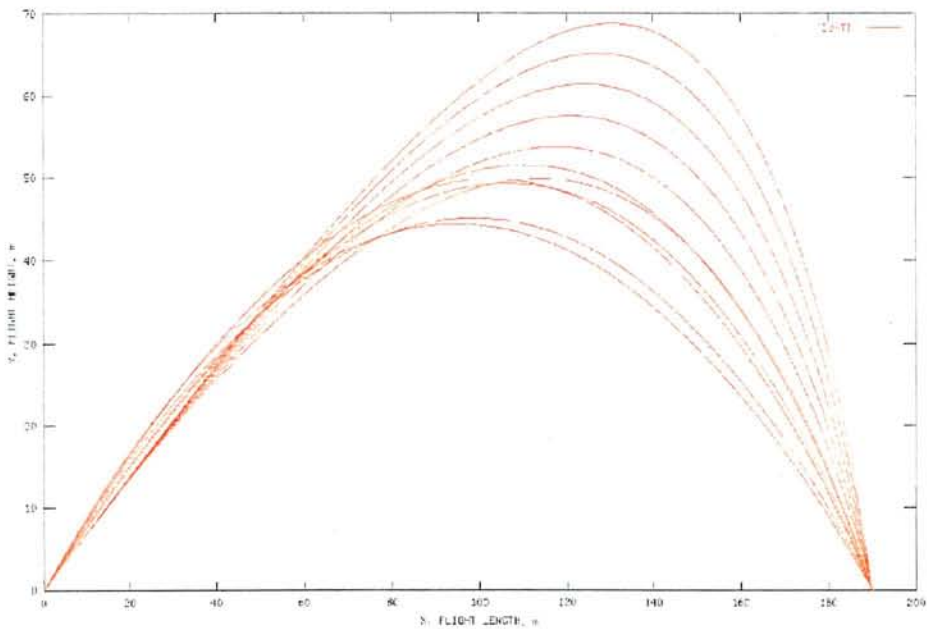


Fig.4 Flight height with flight length

４章　RDF の熱分解特性に関する一考察

4章　RDFの熱分解特性

1. まえがき

三重ゴミ固形燃料発電所のRDF貯蔵槽で平成15年8月14日に作業員4名が負傷する事故が発生した。8月19日には貯蔵槽が爆発する事故が発生し、消防隊員2名が死亡、作業員1名が負傷した[1]。この事故の後、関係した機関によりRDFについて調査が行われてきた。消防研究所でも調査を行い、その結果の一部として、RDFの加熱実験[2]、RDFの消火実験[3]、熱発火の理論計算[4-6]についてすでに報告した。実験、計算を行うだけでなく、RDFの物性と熱分解特性に関する分析を行った。今後の研究の資料とするために、分析結果について報告する。

RDFはもともと燃料として使用されることが想定されており、ガス化溶融炉内で熱分解させ、ガスのかたちで燃焼させることも考えられていた[7-10]。そのため、事故発生以前からも熱分解については調べられていた[7-10]。その結果も併せて紹介する。

2. 消防研究所でおこなわれた分析

2.1 試料

三重県内で製造されたRDFを試料として使用した。試料の一覧をTable　1に示す。試料Aは、事故の発生した貯蔵槽から取り出したものであるので、製造された場所は不明である。その他の試料は製造された場所で2003年から2005年に採取されたものである。

2.2 分析項目

分析項目および測定法をTable　2.1に示す。項目1から15については、過去の文献を参考にしながら燃料の分析項目として一般的なものを選んだ。熱発火に関する解析を行うために必要となるので、項目16から18の分析を行った。熱分析の結果を基に、小沢法[11]により活性化エネルギーを求めた。平成15年9月に福岡県大牟田リサイクル発電所で火災が発生した際にはRDF貯蔵サイロに窒素を注入した。平成15年10月に石川県石川北部RDFセンターのRDF貯蔵サイロで異常な温度上昇が確認された際には、温度上昇を止めるために窒素が注入された[1]。低酸素濃度下での燃焼抑制、熱発火について検討するための資料とするために、試料Dについては、酸素濃度が5%と10%の場合の活性化エネルギーも求めた。RDFがいわゆる「くすぶり」状態になった際にどのような気体が発生するかを考えるための情報を得るために、熱分解時に発生する気体の分析を熱分解ガスクロマトグラフ/質量分析装置で行った。分析の条件をTable　2.2に示す。試料6　mgをパイロライザーに設置し、発生気体分析(EGA)法[12]により、試料の昇温時における発生ガス量の変化を確認した。その結果から、試料の加熱温度を所定の温度(385℃、550℃)に設定した。試料0.4から0.6　mgをパイロライザーに設置し、加熱した。発生したガスをガスクロマトグラフ/質量分析装置に導入し、分析した。熱分解時に発生する気体の分析は、試料A、試料B、試料Cについて行った。

なお、分析は(株)東レテクノに依頼した。

2.3 主要な分析結果

項目1から16の結果をTable 3.1に示す。TG曲線の代表例として、温度上昇速度10℃/minにおける試料BのTG曲線をFig.1に示す。TGの結果を見ると、各試料ともほぼ4段階(100℃付近、300℃付近、400～500℃、660℃付近)の加熱減量が認められた。このうち、第1段目の減量は脱水によるもの、第2から第4段目の減量は試料の熱分解によるものと考えられる。減量率が最も大きな第2段目の加熱減量に着目して小沢法による熱分解時の活性化エネルギーの算出を行った。試料Dについては、酸素濃度を変化させながら熱分析を行った。酸素濃度が高いほど主分解である第2段目の減量率は大きく、DTGピーク温度は低くなり、熱酸化分解は速く進行した。異なった方法で測定した熱伝導率と比熱をTable 3.2とTable 3.3に示す。活性化エネルギー、比熱、熱伝導率の測定結果は熱発火の計算に利用された[4,5]。

熱分解時に発生する気体の分析結果をTable 3.4に示す。試料Bのクロマトグラムを Fig.2.1、Fig.2.2に示す。385℃で加熱した結果を見ると、いずれの試料からも脂肪酸、含酸素脂環化合物、含OCH化合物を主体とする有機化合物が顕著に検出された。保持時間10から25分の間にある小さなピークの大部分は含酸素化合物であった。これらの合計もTable 3.4に示した。試料Aにおける含酸素化合物は、試料Bと試料Cに比べやや多かったが、組成上大差はなかった。550℃で加熱した結果を見ると、スチレンダイマー、スチレントリマー、及び、規則的な不飽和炭化水素のピークが見られることから、試料中にポリスチレン及びポリエチレンが含まれていることがわかる。このように、多様な化合物が熱分解時に発生した気体から検出された。

2.4 古積らによる研究

古積らは、四日市市内の倉庫に一時貯蔵されていたRDFを採取し実験を行った[13, 14]。分析項目は、熱分析試験(TG-DTA)、自然発火試験(SIT)、自己発熱性試験(ワイヤーバスケット試験)、熱量計による熱量測定(C80、MS80、TAM)、蓄熱貯蔵試験(1リットル球形Dewar瓶)である。古積らは以下のことを明らかにした。①RDFは大量貯蔵等の条件によっては酸化発熱を起こす可能性がある。②RDFは水を添加すると同時に温度上昇が見られたことから、大量貯蔵中に、水が存在した場合には、発熱によって温度が上昇して発熱発火の引き金になる可能性がある。③発熱は、発酵と化学反応の両者が寄与している可能性がある。

3. 事故の発生以前に調べられた熱分解特性

RDFはもともと燃料として使用されることを想定されており、ガス化溶融炉内で熱分解させ、ガスのかたちで燃焼させることも考えられていた。そのため、事故発生以前からも熱分解については調べられていた。その中から、熱分析装置を使用した研究、小規模な装置により発生ガスを測定した研究の結果の一部を紹介し、簡単な比較を行った。

3.1 熱分析

成川ら[15]の測定条件と結果の概要をTable 4.1に示す。成川らによると、590Kと730KにDTAのピークが現れ、それによる急激な重量減少も見られる。このことから、RDFは低温域で燃焼する成分と高温域で燃焼する成分からなると述べた。RDFの熱分

析を行ったとしても、組成も測定条件も同じではないので、単純な比較はできない。消防研究所の結果と、成川らの結果の間には極端な違いはない。

3.2 熱分解ガス

Yangら[16]は管状の炉の中にRDFのペレットを設置し、窒素雰囲気で加熱した。発生した気体をタール分などを除去した後、ガスクロマトグラフで分析した。測定条件と結果の概要をTable 4.2に示す。Yangらによると、発生した気体の重量の揮発分の重量に対する割合は、温度が上昇するにつれて、大きくなった。発生した気体の組成は温度によって変化した。主な炭化水素はメタンとエチレンであったが、温度が上昇すると、水素とメタンの割合が増加した。発生した気体の発熱量のRDFの発熱量に対する割合は、温度が上昇するにつれて、大きくなった。

宮腰ら[17]は、キルン方式を想定した管状炉の中に、粉砕したRDFを設置し、窒素雰囲気で加熱した。発生した気体をタール分などを除去した後、ガスクロマトグラフで分析した。測定条件と結果の概要をTable 4.3に示す。宮腰らによると、熱分解温度を高くするほど、熱分解ガスの発生量が増え、その発熱量も大きくなった。熱分解温度が高いほど、生成した残渣の燃料比が大きくなり、着火温度も高くなった。

Yangら及び宮腰らによる分析と、2節で示した分析では、方法が異なった。RDFは廃棄物が原料であるので、化学組成や元素組成は安定しない。このことがそのまま結果の違いとなって現れた。

4. あとがき

RDFの原料は廃棄物であり、その内容物、組成は地域、季節により異なる。熱分解特性もそれに応じて変化することもあり得る。ここで紹介した分析結果は、あくまで、分析に供した試料の分析結果である。

5. 参考文献

1. 総務省消防庁:ゴミ固形化燃料等関係施設の安全対策調査検討報告書(2003)
2. 鈴木健、鶴田俊、廖赤虹、尾川義雄、佐宗祐子、高黎静: RDFの加熱実験について, 消防研究所報告, 98, 91(2004)
3. 鈴木健、鶴田俊、尾川義雄、高黎静: RDFの消火に関する実験的研究-水噴霧による消火-, 平成17年度日本火災学会研究発表会概要集, 52(2005)
4. 高黎静, 鶴田俊: RDFの性状が自然発火に及ぼす影響, 平成16年度日本火災学会研究発表会概要集, 90(2004)
5. 高黎静, 鈴木健, 鶴田俊, 平野敏右: RDFの火災危険性に関する一解析, 第42回燃焼シンポジウム講演論文集, 429(2004)
6. 鶴田俊: RDF蓄熱発火挙動の数値模擬計算, 第42回燃焼シンポジウム予稿集, 431(2004)
7. 佐藤健二: RDFの燃焼 I. 発電用燃料としてのRDFの適合性, 燃焼研究, 104, 29(1996)
8. 森滋勝: RDFの燃焼, 燃焼研究, 105, 17(1996)

9. 中島健: RDFの燃焼, 燃焼研究, 106, 27(1996)
10. 池田英人: RDFの燃焼, 燃焼研究, 107, 23(1997)
11. 小澤丈夫, 吉田博久: 最新熱分析, p. 88, 講談社(2005)
12. 小澤丈夫, 吉田博久: 最新熱分析, p. 32, 講談社(2005)
13. 鈴木康弘, 傳智敏, 出井渉, 古積博:ゴミ固化燃料(RDF)の熱的特性, 火薬学会2004年度年会講演要旨集, 47(2004)
14. Zhi-Min Fu, Xin-Rui Li, Hiroshi Koseki: Heat Generation of Refuse Derived Fuel with Water, Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 18, 27(2005)
15. 成川公史, 後藤秀徳, 陳勇, 山崎量平, 森滋勝: RDFの燃焼特性に関する研究, 化学工学論文集, 22, 560(1996)
16. Xuemin Yang, Yoshinori Itaya, Shigenobu Hatano, Ryohei Yamazaki, Shigekatsu Mori: Pyrolysis Behavior of Refuse Derived Fuel, J. Chem. Eng. Japan, 34, 91(2001)
17. 宮腰和忠, 三浦崇, 小松俊哉, 姫野修司, 桃井清至: 一般廃棄物のガス化溶融処理における熱分解条件の評価, 廃棄物学会論文誌, 13, 161(2002)

Table 1 Samples

Sample	Origin
A	Taken from the silo
B	Manufactured in Minamimuro
C	Manufactured in Isenagashima
D	Manufactured in Kuwana
E	Manufactured in Ueno
F	Manufactured in Ueno

Table 2.1 Properties analyzed.

Properties		Method
1. Size		Measured by vernier calipers
Proximate analysis	2. Water	JIS M 8812
	3. Ash	JIS M 8812
	4. Volatile matter	JIS M 8812
	5. Fixed carbon	JIS M 8812
	6. Fuel ratio	Ratio of fixed carbon to volatile matter
7. Higher heating value		JIS Z 7302.2
8. Lower heating value		JIS Z 7302.2
Ultimate analysis	9. C	CHN coder method
	10. H	CHN coder method
	11. N	CHN coder method
	12. S	JIS M 8813
	13. Cl	JIS Z 7302.6
	14. Ca	JIS K0102 ICP emission spectrometry
15. Igntion temperature		Beginning of temperature rise by DTA Beginning of temperature rise by DSC
16. Thermal analysis		TG
17. Thermal conductivity		Needle probe method Laser flash method
18. Specific heat		Needle probe method Laser flash method
19. Gas emitted in pyrolysis		Py-GC/MS

Table 2.2 Condition of measurement of Py-GC/MS

Gas chromatograph	6890 Series (Hewlett Packard)
Column	Equity-5 (Col: 18766-02A) 30 m x 0.32 mm, F.T. 0.25 μ m
Pyrolyzer	Double-shot pyrolyzer PY-2020D (Frontier Lab)
Pyrolyzer temp.	385, 550 ℃
Injection	Port A Injection temp. 300 ℃
Column oven temp.	-10 ℃ (5 min) → 320 ℃ (10 min) / 10 ℃/min
Mass spectrometer	JMS-AMSUN200 (JEOL)
Ionization/polarity	EI+
Ionaization voltage	70 eV
Ion source temp.	220 ℃
Interface temp.	240 ℃
Applied voltage	10 kV
Scan range	m/z 10-400
Cycle time	200 ms

Table 3.1 Main results.

	Sample A	Sample B	Sample C
1. diameter (mm) length (mm)	17.04 38.34	15.24 35.66	15.09 34.06
2. (%)	26.8	2.9	7.3
3. (%)	12.9	11.4	11.7
4. (%)	72.6	76.3	74.7
5. (%)	14.5	12.3	13.6
6. (-)	0.20	0.16	0.18
7. (J/g)	22840	22940	21440
8. (J/g)	21220	21340	19960
9. (%)	51.8	47.6	46.2
10. (%)	7.11	7.04	6.60
11. (%)	1.11	1.12	1.30
12. (%)	0.54	0.59	0.48
13. (%)	0.80	0.90	0.53
14. (%)	2.2	2.1	2.7
15. (℃)	204 a) 256 b)	236 a) 251 b)	237 a) 254 b)
16.	in nitrogen at 10 ℃/min Temperature (℃) / Mass loss (%) RT to 150 / 3.0 RT to 400 / 44.9 RT to 550 / 72.8 RT to 800 / 77.5 RT to 1000 / 78.9 Peak temperature by DTG (℃) : 82, 354, 486, 709 in air at 10 ℃/min Temperature (℃) / Mass loss (%) RT to 150 / 3.0 RT to 350 / 50.5 RT to 550 / 87.6 RT to 800 / 90.4 RT to 1000 / 90.5 Peak temperature by DTG (℃) :79, 304, 419, 677 Activation energy c) : in nitrogen 149.0 kJ/mol in air 101.9 kJ/mol	in nitrogen at 10 ℃/min Temperature (℃) / Mass loss (%) RT to 150 / 2.4 RT to 400 / 45.5 RT to 550 / 70.8 RT to 800 / 74.4 RT to 1000 / 76.3 Peak temperature by DTG (℃) : 78, 342, 485, 670 in air at 10 ℃/min Temperature (℃) / Mass loss (%) RT to 150 / 2.8 RT to 350 / 55.4 RT to 550 / 88.6 RT to 800 / 90.9 RT to 1000 / 91.4 Peak temperature by DTG (℃) :78, 302, 419, 667 Activation energy c) : in nitrogen 144.4 kJ/mol in air 96.6 kJ/mol	in nitrogen at 10 ℃/min Temperature (℃) / Mass loss (%) RT to 150 / 2.8 RT to 400 / 54.6 RT to 550 / 72.8 RT to 800 / 77.2 RT to 1000 / 79.3 Peak temperature by DTG (℃) : 79, 334, 481, 663 in air at 10 ℃/min Temperature (℃) / Mass loss (%) RT to 150 / 2.9 RT to 350 / 54.3 RT to 550 / 84.7 RT to 800 / 87.0 RT to 1000 / 86.6 Peak temperature by DTG (℃) :82, 299, 483, 680 Activation energy c) : in nitrogen 103.8 kJ/mol in air 109.6 kJ/mol

RT: Room temperature

a) Beginning of temperature rise measured by DTA

b) Beginning of temperature rise measured by DSC

c) Calculated from TG results in the temperature range between 150 and 400 ℃.

	Sample D	Sample E	Sample F
1. diameter (mm) length (mm)	15.43 37.44	16.24 32.10	16.27 33.45
2. (%)	5.7	4.2	5.2
3. (%)	11.2	11.7	11.7
4. (%)	77.0	75.4	75.6
5. (%)	11.8	12.9	12.7
6. (-)	0.15	0.17	0.17
7. (J/g)	21500	22000	22500
8. (J/g)	20000	20500	21000
9. (%)	47.4	48.1	47.6
10. (%)	6.77	7.23	7.18
11. (%)	1.35	1.04	1.29
12. (%)	0.27	0.35	0.29
13. (%)	0.41	0.86	0.79
14. (%)	2.9	2.8	2.9
15. (℃)	261 b)	258 b)	261 b)
16.	in nitrogen at 10 ℃/min Temperature (℃) / Mass loss (%) RT to 150 / 2.5 RT to 400 / 49.2 RT to 550 / 70.6 RT to 800 / 76.0 RT to 1000 / 77.0 Peak temperature by DTG (℃) : 75, 346, 485, 694 in air at 10 ℃/min Temperature (℃) / Mass loss (%) RT to 150 / 2.4 RT to 400 / 61.4 RT to 550 / 84.4 RT to 800 / 87.7 RT to 1000 / 88.2 Peak temperature by DTG (℃) :76, 313, 461, 668 in 5% O_2 / 95% N_2 at 10 ℃/min Temperature (℃) / Mass loss (%) RT to 150 / 1.1 RT to 400 / 54.9 RT to 550 / 82.9 RT to 800 / 87.3 RT to 1000 / 87.5 Peak temperature by DTG (℃) :80, 333, 393, 475, 659 in 10% O_2 / 90% N_2 at 10 ℃/min Temperature (℃) / Mass loss (%) RT to 150 / 2.0	in nitrogen at 10 ℃/min Temperature (℃) / Mass loss (%) RT to 150 / 3.2 RT to 400 / 48.7 RT to 550 / 72.0 RT to 800 / 76.0 RT to 1000 / 77.1 Peak temperature by DTG (℃) : 80, 347, 486, 670 in air at 10 ℃/min Temperature (℃) / Mass loss (%) RT to 150 / 2.3 RT to 400 / 63.6 RT to 550 / 85.3 RT to 800 / 87.9 RT to 1000 / 88.4 Peak temperature by DTG (℃) :83, 309, 478, 659 Activation energy c) : in nitrogen 153.2 kJ/mol in air 104.1 kJ/mol	in nitrogen at 10 ℃/min Temperature (℃) / Mass loss (%) RT to 150 / 1.8 RT to 400 / 45.5 RT to 550 / 71.0 RT to 800 / 74.5 RT to 1000 / 75.6 Peak temperature by DTG (℃) : 81, 342, 483, 659 in air at 10 ℃/min Temperature (℃) / Mass loss (%) RT to 150 / 2.2 RT to 400 / 61.4 RT to 550 / 84.4 RT to 800 / 87.5 RT to 1000 / 88.1 Peak temperature by DTG (℃) :76, 302, 480, 669 Activation energy c) : in nitrogen 153.5 kJ/mol in air 115.1 kJ/mol

	RT to 400 61.1 RT to 550 87.0 RT to 800 90.5 RT to 1000 90.6 Peak temperature by DTG (℃) :85, 322, 451, 675 Activation energy c) : in nitrogen 125.2 kJ/mol in air 116.0 kJ/mol in 5% O_2 / 95% N_2 116.6 kJ/mol in 10 % O_2 / 90% N_2 117.6 kJ/mol		

Table 3.2 Thermal properties measured by needle probe method.

		Sample A	Sample B	Sample C	Sample D	Sample E	Sample F
Temperature	(℃)	25	25	25	25	25	25
Bulk density	(kg/m^3)	421	473	483	405	384	372
17. Thermal conductivity	(W/m/K)	0.0587	0.0646	0.0578	0.0753	0.0588	0.0573
18. Specific heat	(J/kg/K)	1423	1411	1410	1436	1440	1449

Table 3.3 Thermal properties measured by laser flash method.

		Sample A	Sample B	Sample C	Sample D	Sample E	Sample F
Temperature	(℃)	25	25	25	25	25	25
Bulk density	(kg/m^3)	988	947	948	1050	1010	1020
17. Thermal conductivity	(W/m/K)	0.170	0.149	0.122	0.153	0.165	0.139
18. Specific heat	(J/kg/K)	1420	1410	1410	1440	1440	1450

Table 3.4 Mass fraction of components in gases emitted in pyrolysis.

		385 ℃			550 ℃		
Chemical species	RT (min:s)	Sample A	Sample B	Sample C	Sample A	Sample B	Sample C
(1) C_6H_{12}	4:05	0.00	0.00	0.00	406.53	788.18	1193.42
(2) Aliphatic cyclic compounds containing oxygen	10:45	652.42	1061.82	708.82	0.00	0.00	0.00
(3) Toluene	10:20	35.08	38.90	37.85	1086.93	645.90	1330.42
(4) C_9H_{18}	12:05	42.78	47.00	40.09	1212.53	2542.14	840.01
(5) Styrene	12:50	1622.68	604.58	1099.55	13477.12	2641.42	4448.66
(6) $C_{10}H_{20}$	14:45	0.00	0.00	0.00	304.50	610.14	918.74
(7) Compounds containing -OCH	15:00	1791.85	3139.07	3031.08	0.00	0.00	0.00
(8) $C_{11}H_{22}$	16:24	0.00	0.00	0.00	231.73	455.74	694.16
(9) CH compounds	17:15	2256.64	1097.11	1109.91	0.00	0.00	0.00
(10) Aliphatic cyclic compounds containing oxygen	17:45	522.37	688.88	619.09	0.00	0.00	0.00
(11) $C_6H_6O_3$	18:10	1037.52	947.65	436.75	0.00	0.00	0.00
(12) ε -caprolactam	18:35	1798.90	644.56	542.34	269.34	0.00	0.00
(13) Compounds containing -OCH	19:20	505.88	1011.81	331.78	0.00	0.00	0.00
(14) $C_9H_{10}O_2$	19:30	246.33	216.27	428.78	0.00	0.00	0.00
(15) Aliphatic acid	22:45	12704.72	11826.40	4866.72	0.00	0.00	0.00
(16) Compounds containing -OCH	23:35	1844.23	346.03	639.95	0.00	0.00	0.00
(17) Styrene dimer	24:40	819.27	272.05	722.13	692.81	130.62	224.28
(18) Palmitic acid	27:10	2332.67	975.11	2772.78	0.00	0.00	0.00
(19) CH compounds (mw:264)	28:45	3182.52	1322.99	2957.22	0.00	0.00	0.00
(20) Stearic acid	29:00	1004.72	298.14	895.97	0.00	0.00	0.00
(21) Styrene trimer	31:25	3609.12	1336.37	2570.92	2404.21	458.11	790.57
(22) Phthalic ester	32:10	816.76	1130.98	1702.38	0.00	0.00	0.00
Compounds containing oxygen							
specifed from (1) to (22)		25258.36	22286.72	16976.43			
others	10:00-25:00	54513.07	43217.47	36836.04			
total		79771.43	65504.20	53812.47			

Unit: mg/kg

RT: Retention time
mw:molecular weight

Table 4.1 Outline of the thermal analysis results by Narukawa et al. 12)

sample	powder produced by grinding RDF made from MSW higher heating value: 16.45 MJ/kg proximate analysis [wt%] moisture:8.2, ash:20.2, volatile matter:66.9, fixed carbon:4.6
method	TG, DTA
main results	in nitrogen, 10 ℃/min

mass loss [wt%]	temperature [K]
1	300 to 500
24	300 to 600
40	300 to 700
47	300 to 800
55	300 to 900

in air, 10 ℃/min

mass loss [wt%]	temperature [K]
4	300 to 500
38	300 to 600
49	300 to 700
60	300 to 800
64	300 to 900

peak temperature by DTA : 587 K, 730 K
initiation temperature of heat release by DTA: 504 K

Reaction	1st stage	2nd stage
E [kJ/mol]	79	239
A [1/s]	7.7×10^{4}	8.1×10^{14}

Table 4.2 Outline of pyrolysis gas analysis by Yang et al. 13)

sample	pellet made from MSW diameter: 14 mm, length: 10 to 25 mm high heating value: 20.64 MJ/kg proximate analysis [wt%] moisture:2.7, ash:11.4, volatile matter:75.3, fixed carbon:10.6
furnace	electric heating reactor (50 mm in diameter and 2,000 mm in height) temperature range: 773 to 1173 K
method	Pellets were placed in reactor and temperature was increased rapidly to each set temperature. Nitrogen gas was supplied. Released gas composition and accumulative gas volume in a pyrolysis process were measured. Tar, moisure, and other condensable products are filtered before concentration analysis.
main results	yield of released gas

temperature [℃]	α	β
500	12	12
600	29	27
700	47	32
800	53	34
900	51	36

α : ratio of heating value of released gas to heating value of RDF
β : ratio of released gas wight to volatile matter weight

composition of released gas

	temperature [℃]				
	500	600	700	800	900
CO2	30	24	16	12	11
CO	20	20	18	17	16
H2	9	14	13	18	24
CH4	21	21	29	32	37
C2H6	5.5	6	5.5	2	1
C2H4	8	9	13	16	11
C3H6	6.5	6	5.5	3	0

Table 4.3 Outline of pyrolysis gas analysis by Miyakoshi et al. 14)

sample	pieces (7 mm in size) made by breaking RDF using hand lower heating value: 19 MJ/kg proximate analysis [wt%] moisture:3.6, ash:10.2, volatile matter:76.7, fixed carbon:9.6
furnace	tubular pyrolysis furnace (ϕ 75OD x ϕ 68ID x 1,000 mm) temperature 300 - 600 ℃
method	Furnace was heated to set temperature. Sample (10 g) was placed in furnace in set temperature and for set time. Nitrogen gas was supplied. Gas, tar, residue formed by pyrolysis were collected and analysed.
main results	Ratio of generation product and amount of accumulation gas

pyrolysis temperature [℃]	pyrolysis time [min]	ratio of generation product [wt% (dry-base)]				amount of accumulation gas [ml/g-dry-sample]					
		char	tar	gas	loss	H2	CO	CH4	CO2	C2H4	C2H6
350	60	39	26	7	28						
400	45	35	22	10	33						
	60	36	21	7	36	3	15	7	25	0.5	2
	90	34	31	7	28	4	16	9	26	0.5	2
450	30	32	28	11	29						
500	45	31	17	21	31						
	60	27	29	12	32	24	25	20	33	5	5
	90	31	25	13	31	28	26	21	34	5	5
600	45	28	15	23	34						
	60	27	24	24	25	69	75	69	42	27	15
	90	25	14	31	30	78	78	69	45	30	15

Heating value of char and gas, fuel ratio and ignition temperature of char

pyrolysis temperature [℃]	pyrolysis time [min]	ratio of lower heating value of char to that of RDF [-]	ratio of lower heating value of pyrolysis gas to that of RDF [-]	fuel ratio of cahr [-]	ignition temperature of char [℃]
350	60	0.29	0.022	1.1	236
400	45	0.24	0.033	1.5	238
	60	0.24	0.037	1.6	243
	90	0.22	0.044	1.9	261
450	30	0.2	0.064	2.2	289
500	45	0.19	0.10	2.6	308
	60	0.17	0.11	3.1	319
	90	0.18	0.12	3.2	319
600	45	0.16	0.27	5.5	334
	60	0.16	0.38	7.5	336
	90	0.14	0.4	7.2	334

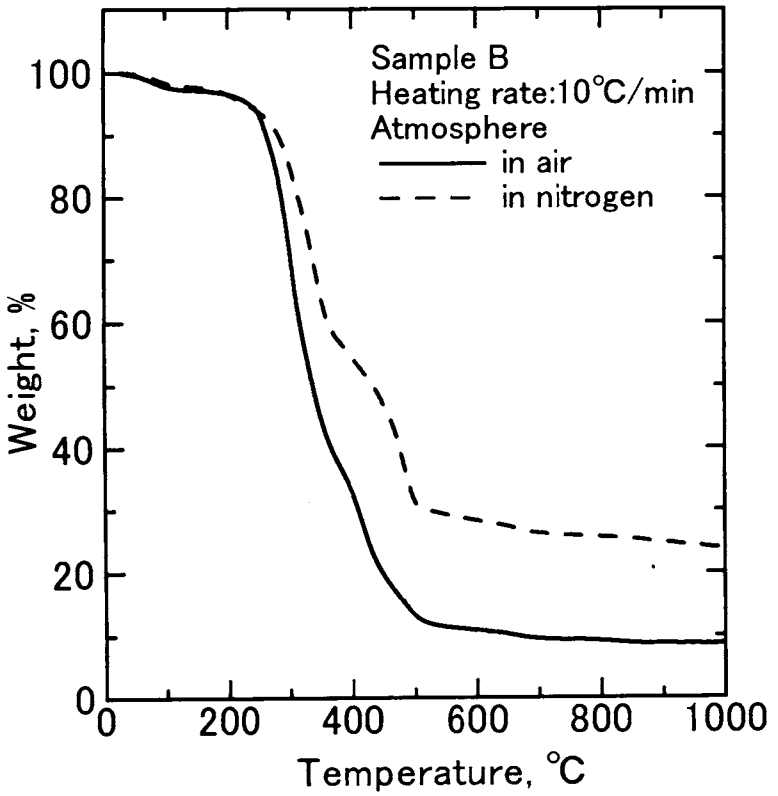


Fig. 1 TG curves in air and nitrogen gas at heating rate of 10℃/min.

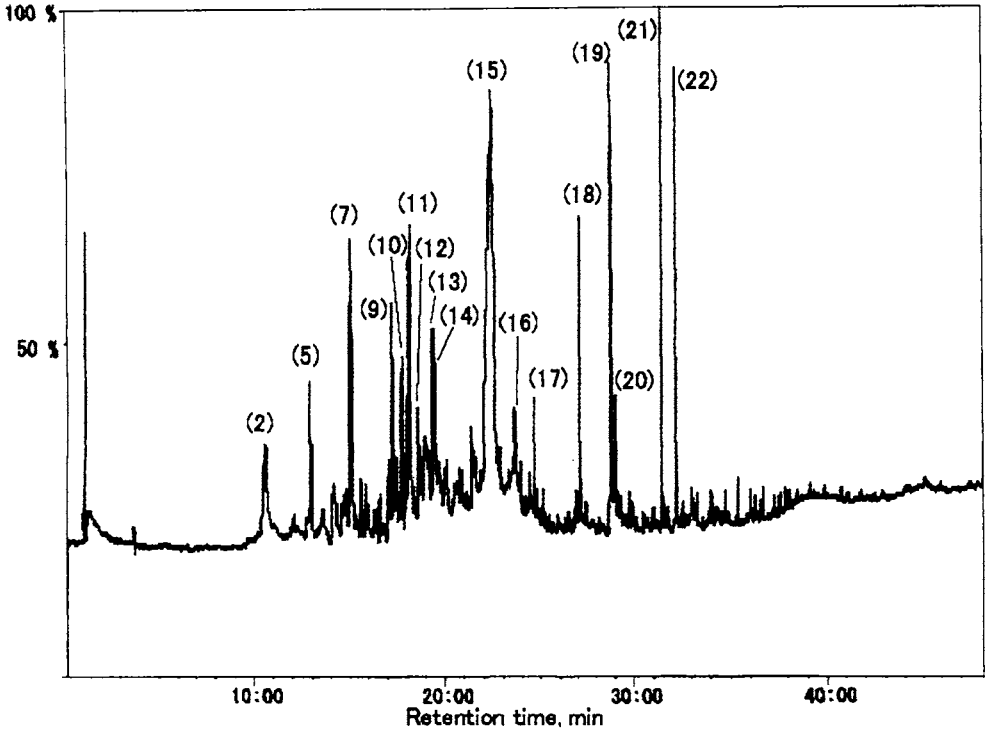


Fig. 2.1 Chromatogram of sample B at pyrolyzer temperature of 385℃.

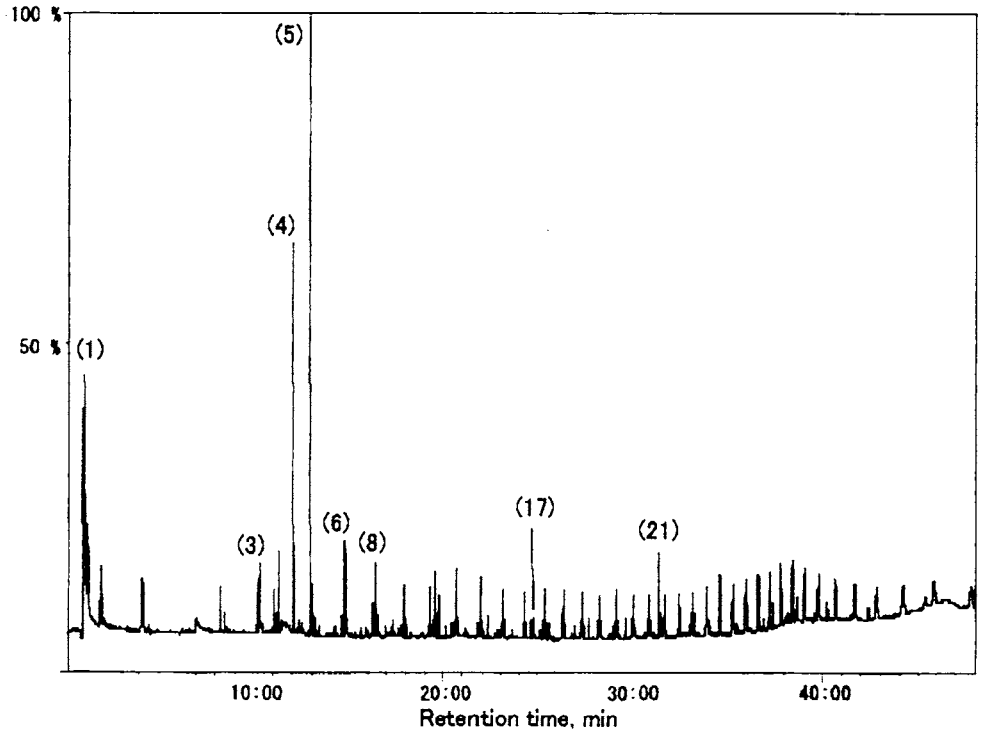


Fig. 2.2 Chromatogram of sample B at pyrolyzer temperature of 550℃.

5章　おわりに

5章　おわりに

本研究は、千葉科学大学の高助教授(当時)と共同で実施した。また研究成果のうち消火実験の一部は横浜市消防局消防訓練センター(当時)との共同研究で得られたものである。

なお、独立行政法人消防研究所は平成17年度をもって廃止された。それに伴い、研究テーマ「RDF爆発・火災に関する研究」も終了した。

参考1

第2章に記した消火実験のメモを以下に示す。また、測定の一部を菱日エンジニアリングに委託した。その報告書も示す。

目的
密閉性を期待できない状況で、燃焼の抑制のために不活性気体を使用した場合、どの程度の効果が得られるかを実験的に調べる。

実験①
目的：有炎燃焼している場合、どの程度の効果があるか。
方法：RDFの山(20 kg)にヘプタンをかけて着火する
　　ヘプタンが消費され、RDFのみの有炎燃焼になるのを待つ
　　山の内部に、ボンベから窒素を供給する

実験②
目的：くん焼が継続している際に、山の内部に空気が供給されるのを抑制できるか。
方法：RDFの山(20 kg)の内部に電気ヒーターを設置する
　　ヒーターに通電し、内部から着火する
　　外部からの観察により、着火を確認する
　　山の内部に、ボンベから窒素を供給する
　　山の内部と外部の差圧を測定する
　　(外部から内部に空気が流入するかどうかを監視するため)

窒素ガスが運び去ることができる熱量, W

Temperature rise, K

V dm3/min	20	30	40	50	60	70	80	90	100
10	3.9	5.9	7.9	9.8	11.8	13.8	15.7	17.7	19.7
20	7.9	11.8	15.7	19.7	23.6	27.5	31.5	35.4	39.3
30	11.8	17.7	23.6	29.5	35.4	41.3	47.2	53.1	59.0
40	15.7	23.6	31.5	39.3	47.2	55.0	62.9	70.8	78.6
50	19.7	29.5	39.3	49.1	59.0	68.8	78.6	88.5	98.3

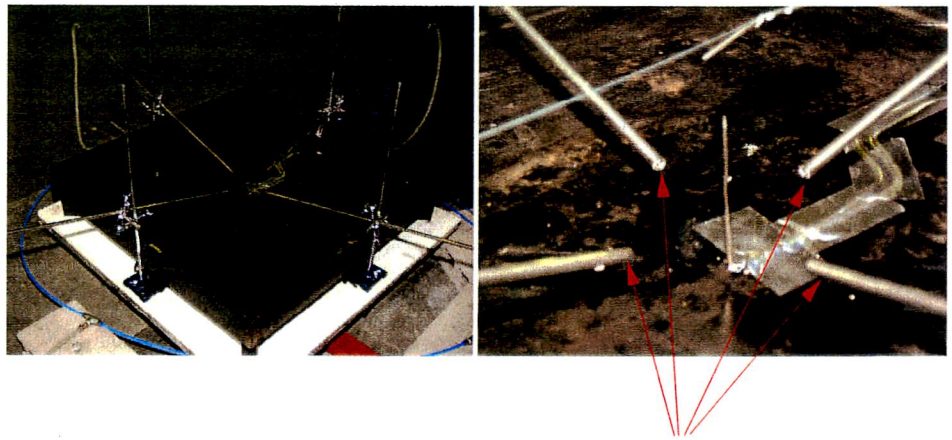
窒素ガスが比熱により持ち去ることのできる熱量は、燃焼反応により発生する熱に比べると、遙かに小さい

RDFが燃焼する際に必要とする空気量の見積
完全燃焼を仮定する

無炎燃焼が局所的である場合に限り、燃焼領域に供給される空気を完全窒素に置き換えることにより、燃焼領域での発熱を停止させることが可能と推定できる

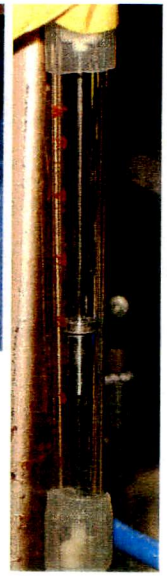
	weight loss rate kg/min	weight loss rate kg/s	heat release rate MW	volume of air needed dm3/s	volume of air needed dm3/min
	0.5	0.0083	0.17	43	2564
有炎燃焼→	0.3	0.0050	0.10	26	1538
	0.1	0.0017	0.033	8.5	512
	0.05	0.00083	0.017	4.3	256
無炎燃焼→(燃焼領域が広がっている)	0.03	0.00050	0.010	2.6	153
	0.01	0.00017	0.0033	0.85	51
	0.005	0.000083	0.0017	0.43	26
	0.003	0.000050	0.0010	0.26	15
無炎燃焼→(燃焼領域が局所的)	0.001	0.000017	0.00033	0.085	5.1

Experimental setup



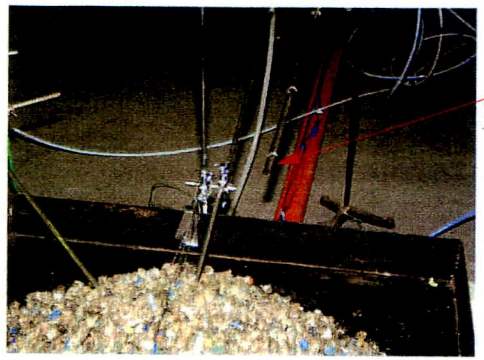
Pipes used for supplying nitrogen gas into the pile
Pipes are placed so that their exits may be surrounging the centre axis.

Experimental setup



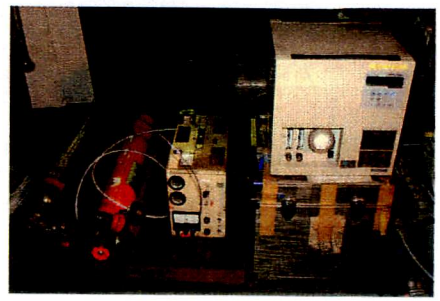
Nitrogen gas was supplied from a bomb.
Supply rate was controlled manually reading the position of float of flow meter.

Experimental setup

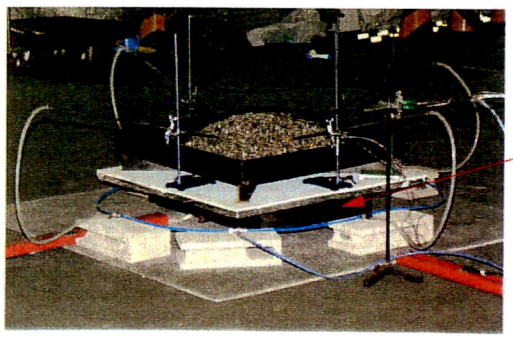


Sampling probe
Gas is collected and analysed by gas analyser continuously.

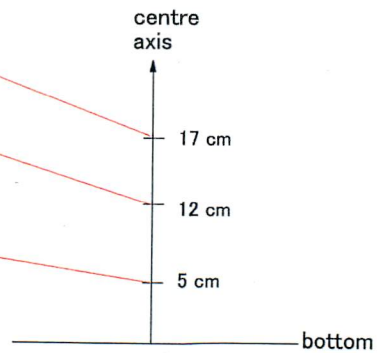
Gas analyser



Experimental setup

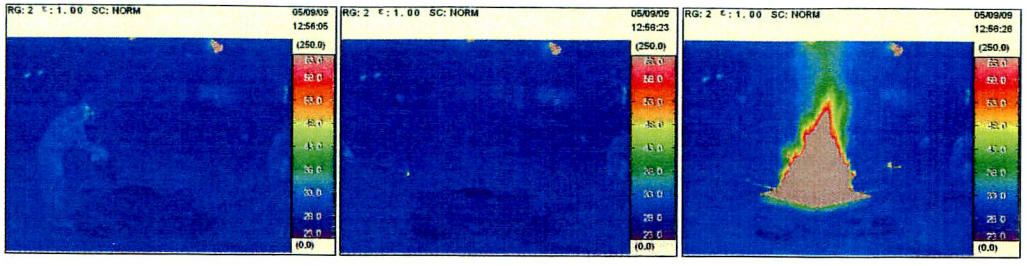


Load cell
Change in weight was measured.



Three thermocouples are placed along the centre axis of the pile.
Two of them is located inside the pile.
One is outside the pile.

Thermocouple located at 17 cm above the bottom



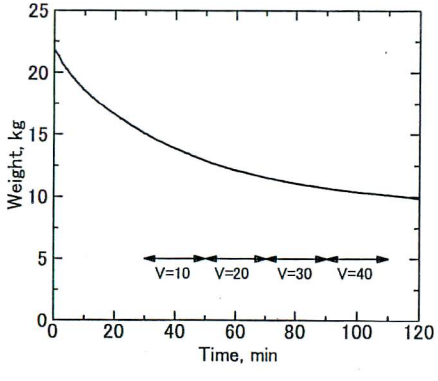
10_301

着火　2005年9月9日　12:56:26 ←サーマルカメラ(固定)の時計
13:00 ←サーマルカメラ(手持ち)の時計
12:58:54 ←データロガー

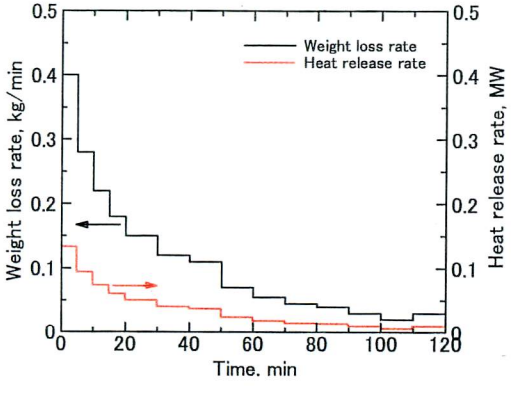
RDFの山(20 kg)にヘプタンをかけて着火する
ヘプタンが消費され、RDFのみの有炎燃焼になるのを待つ
着火から30分後に、山の内部に、ボンベから窒素を供給する
30 min < t < 50 min　V=10 dm3/min
50 min < t < 70 min　V=20 dm3/min
70 min < t < 90 min　V=30 dm3/min
90 min < t < 110 min　V=40 dm3/min

着火から26分　表面にかさぶたのようなものができる。火炎のあるところとないところがある。
31分　煙が増えたように感じた。
38分　窒素の効果かどうかはわからないが、煙が増えている。
51分　山すその付近では、ペレット表面は炭化し、炎がない。
55分頃　山の頂点付近は、炎がなく温度が周囲より少し低かった。ガスが頂点付近から盛んに発しているわけではないが、ガス採取管の採取口を山の頂点付近に移動する
58分　炎が見えなくなる。
67分　頂点付近の見かけの温度は、周囲より低い
69分　2～3 sくらい火がついた
90分　表面の見かけの温度が全体的に下がっている
104分　煙が減ったように感じた。
106分　煙が増えたように感じた。

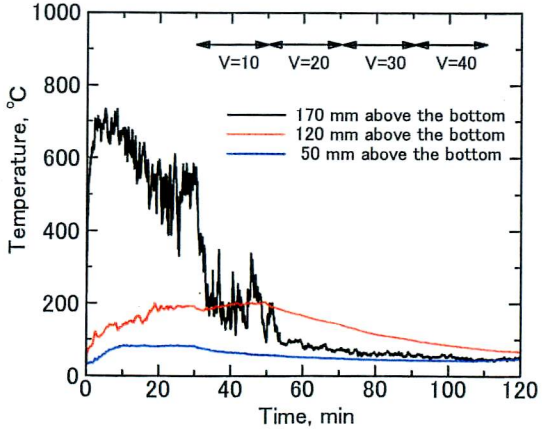
Heptane was soaked over the pile surface. Heptane was ignited by a torch flame.



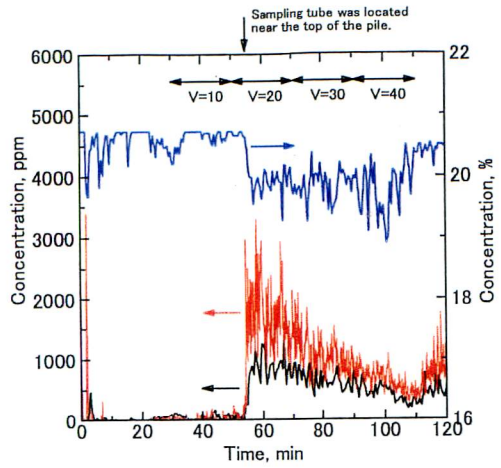
Variation of weight with time.
V: supply rate of nitrogen gas [dm3/min]



Variation of weight loss rate and heat release rate with time.

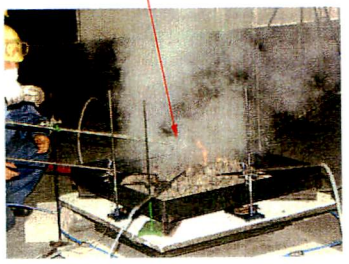


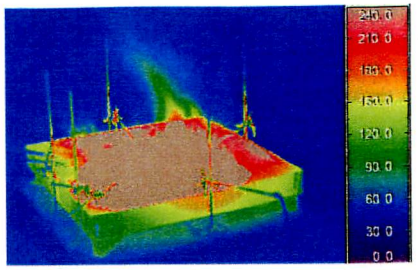
Variation of temperature with time.



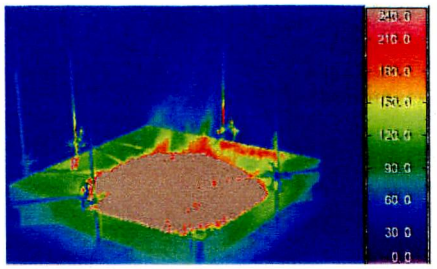
Variation of gas concentration with time.
V: supply rate of nitrogen gas [dm3/min]

t～55 min
Sampling probe was located near the top of the pile.

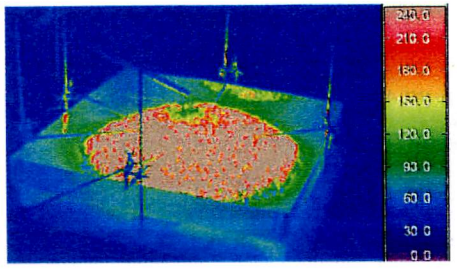




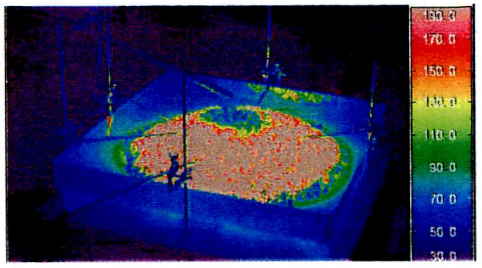
t=29min



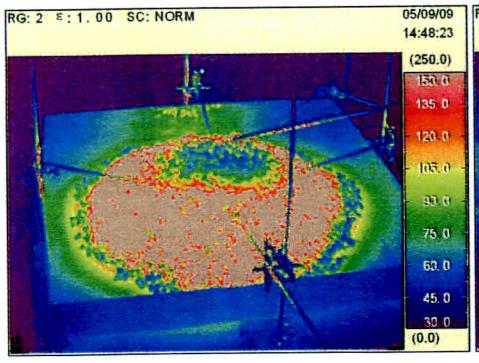
t=48min



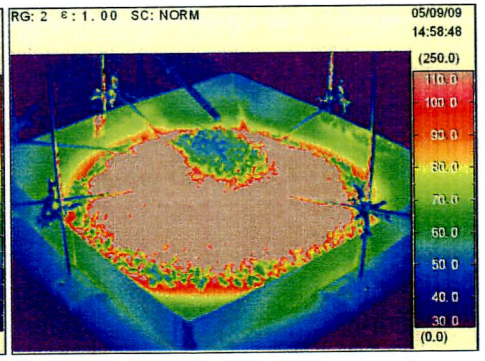
t=65min



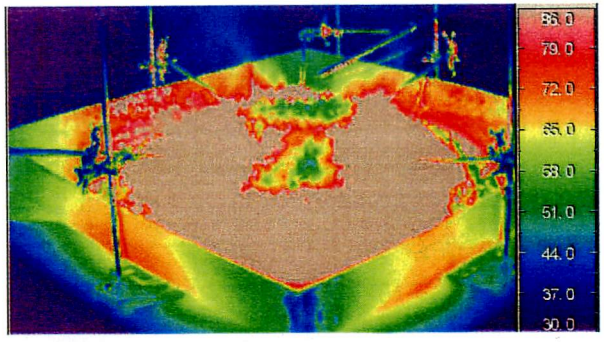
t=87min



t=108 min

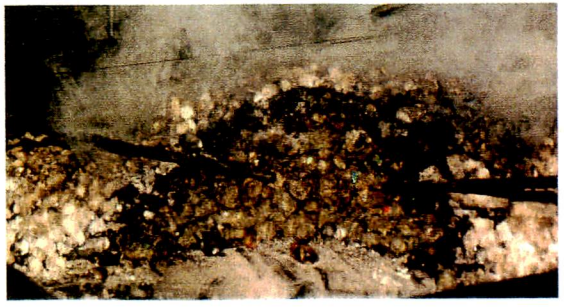


t=119 min



t > 120 min
Pile was cut open. Cross sectional area was revealed.

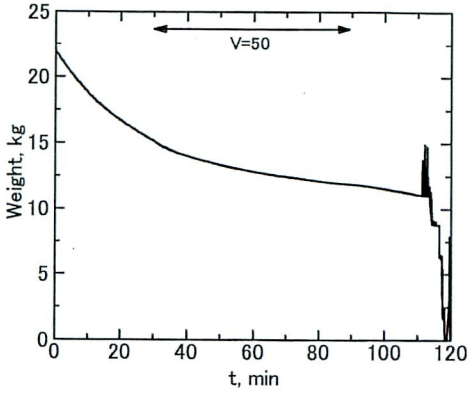
The coolest spot near the centre axis in the pile was about 50℃.
It corresponded with the temperature measured by thermocouple.



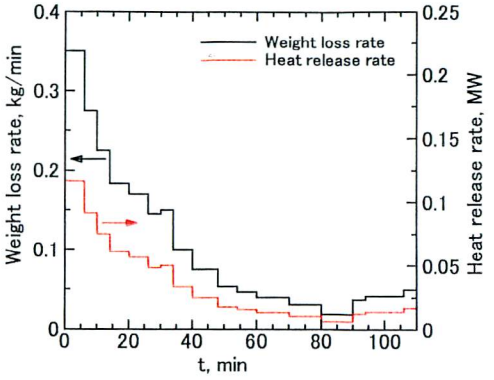
10_302

点火　10:46:27 ←データロガー
　　10:46:25 ←サーマルカメラ(固定)の時計

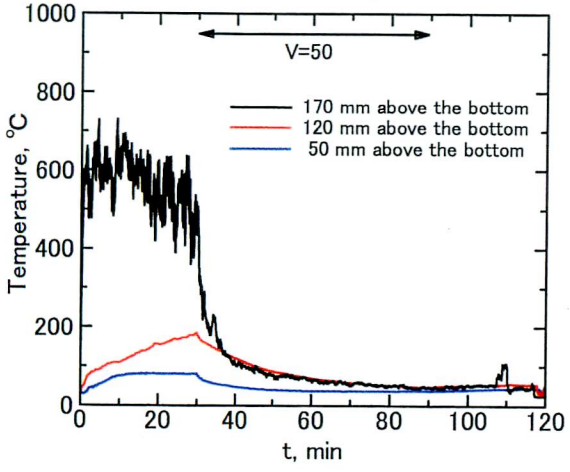
20分　煙が増えたように感じた。表面はペレットの形状を維持したまま灰化した。表面には炎が見えないところもある。
23分　山頂付近では、表面が灰化している。灰化したペレットの隙間から炎がでている。
27分　採取管を山頂付近に移動する。
30分　窒素注入を開始。煙が表面より勢いよく出るようになったように感じた。
31分　山頂付近の炎が見えなくなった。裾のあたりから炎がでているように見える。
34分　Avionicsのサーマルカメラによると、山頂付近の温度が低下した。窒素が山の中から煙を追い出しているかのようだった。
44分　炎は山裾の一部に残っている。山全体より盛んに煙が出ている。
50分　山裾に火が残っている。ただし、火のある位置は変動する。全体より盛んに煙が出ている。
51分　炎が見えなくなった。
60分　山全体から煙が出ている。サーマルカメラによると、山頂付近の温度が低下している。
85分　山頂付近の温度が低下し、それを取り囲むように環状に温度の高いところがある。
90分　窒素供給を停止。煙の出方に勢いがない。
95分　煙の発生量が増加したように感じた。
104分　サーマルカメラでみえた高温の部分から煙が出ている。
107分　自然に火がついた。



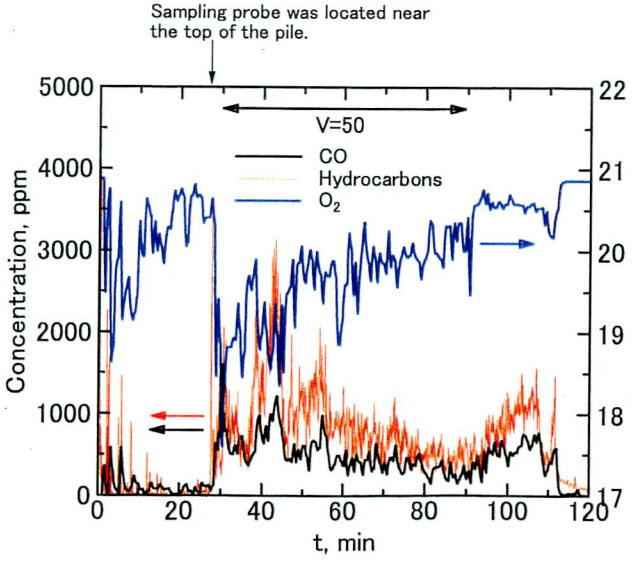
Variation of weight with time.

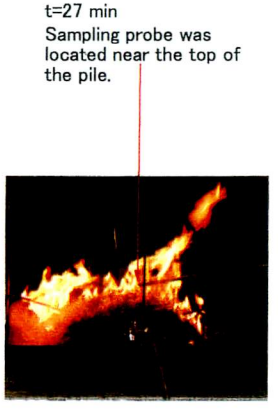


Variation of weight loss rate and heat release rate with time.

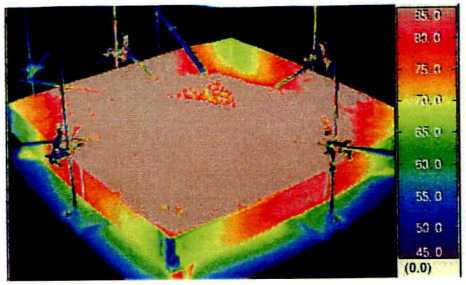


Variation of temperature with time.

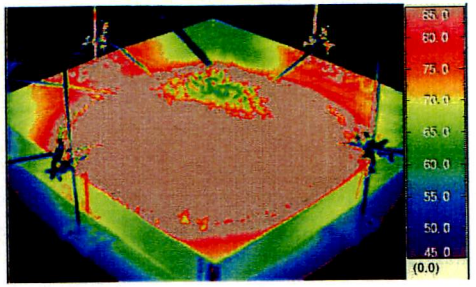




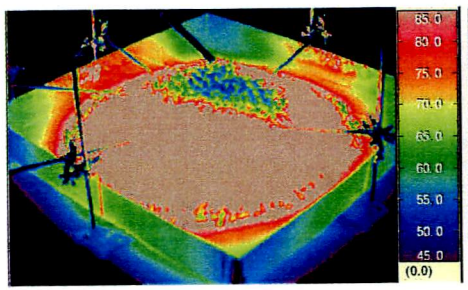
Variation of gas concentrations with time.



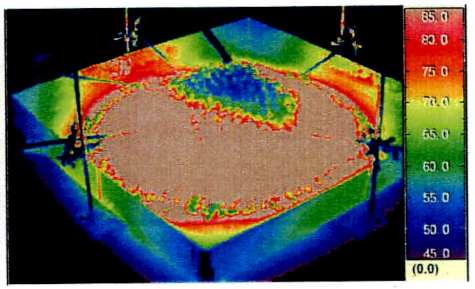
t=57 min



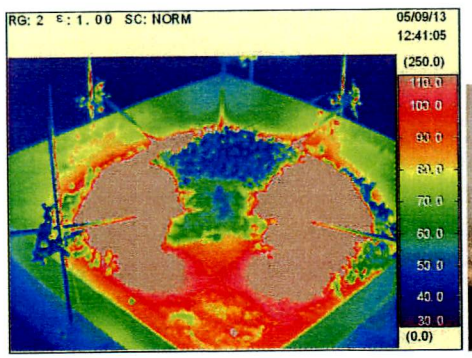
t=71 min



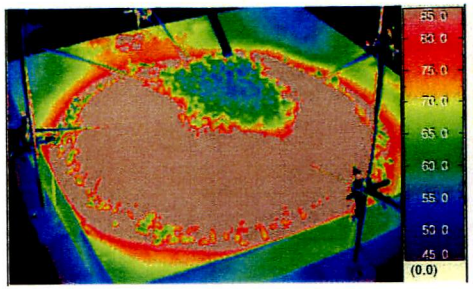
t=82 min



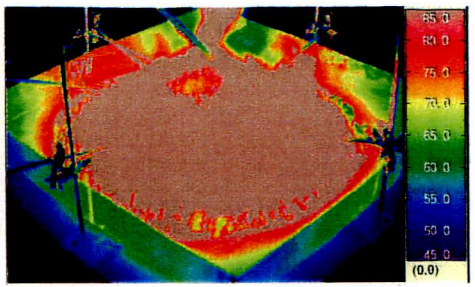
t=91 min



The pile was cut open.
Area along the centre axis was cooled.
Area near the foot of the pile was hot.
Smoke was emitted.



t=101 min



t=108 min

Cool area at the top of the pile expanded with the increase in nitrogen gas supply rate.

10_303

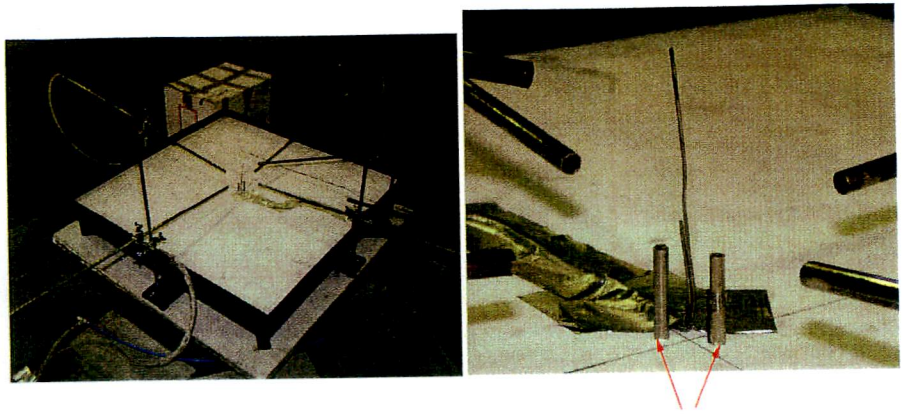
RDFの山の内部に電気ヒーターを設置する。内部から加熱し、着火する。ヒーターを取り囲むように、窒素の吹き出し口を設置する。

通電開始　2005年9月13日　14:36:54

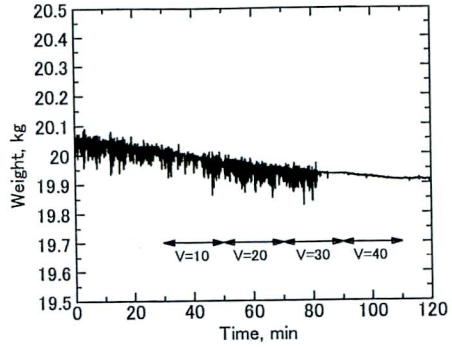
通電から30分後に、山の内部に、ボンベから窒素を供給する。供給速度を段階的に大きくする。
30 min < t < 50 min　V=10 dm3/min
50 min < t < 70 min　V=20 dm3/min
70 min < t < 90 min　V=30 dm3/min
90 min < t < 110 min　V=40 dm3/min

2分50秒　ヒーターが切れた。
14分　山頂よりの煙が濃くなったように感じた。山頂付近の見かけの温度が高くなったように感じた。
38分　煙が薄くなったように感じた。
62分　煙が少なくなった。山頂付近の見かけの温度が低下した。
70分頃　排煙装置停止
72分　煙が出なくなった。
84分　煙が出てない。山頂の見かけの温度も低下した。
93分　太陽光が実験場内に入射するので、シャッターを1 m下げる。
98分　煙が出てない。
111分　Avionicsのサーマルカメラのバッテリーが切れた。特に支障はないので、スイッチを切った。

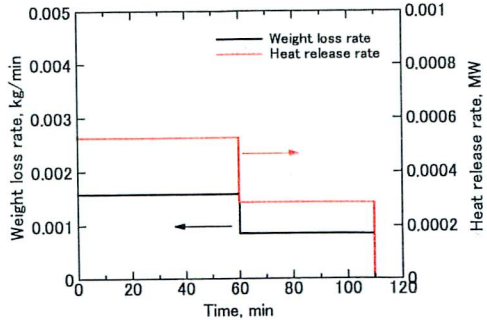
Experimental setup



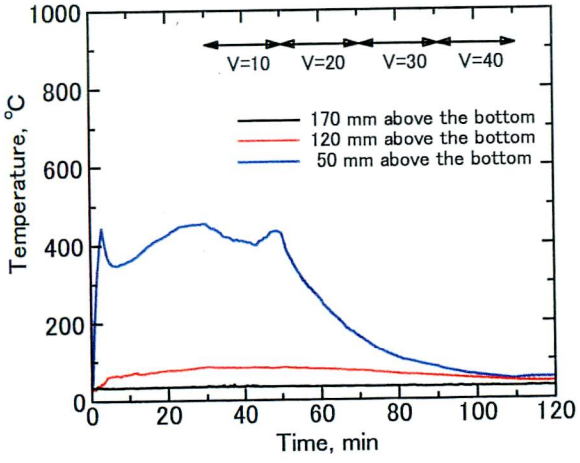
electric heater
(power: 100 V, 1.5 A, 300 W,
diameter: 6.2 mm, length: 50 mm)



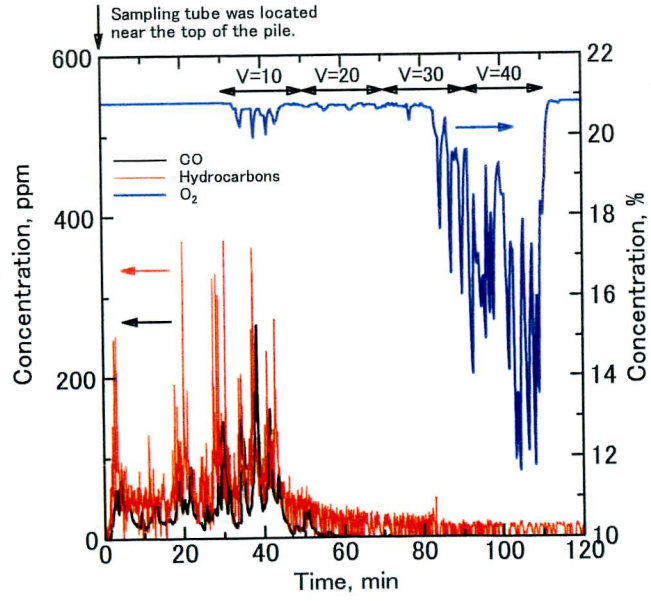
Variation of weight with time.

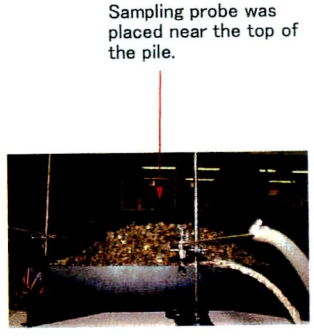


Variation of weight loss rate and heat release rate with time.

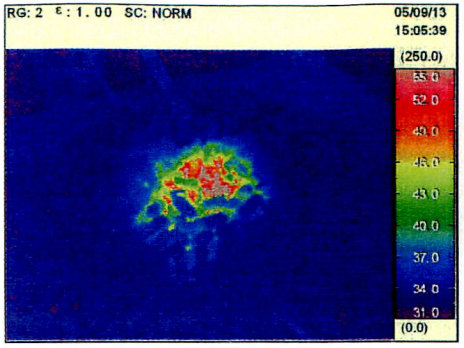


Variation of temperature with time.

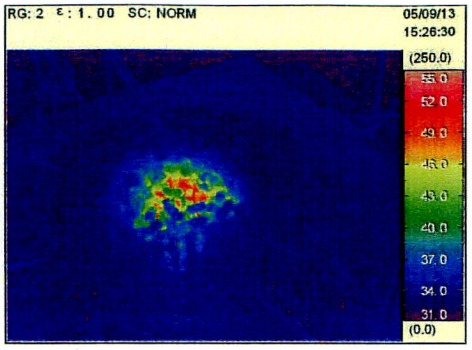




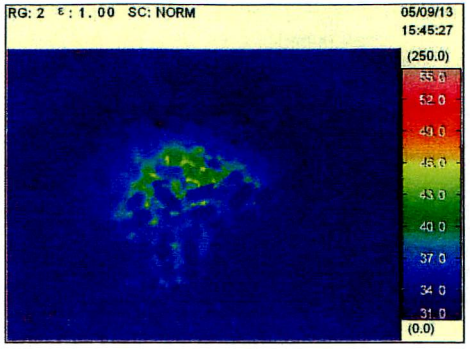
Variation of gas concentrations with time.



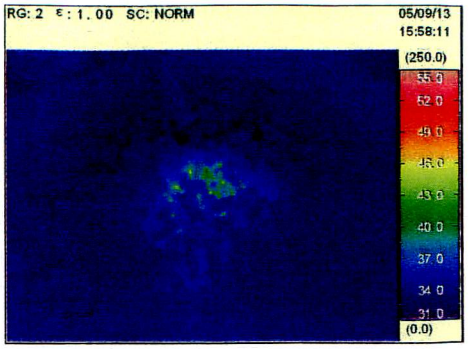
t=29min
V=0



t=40min
V=10

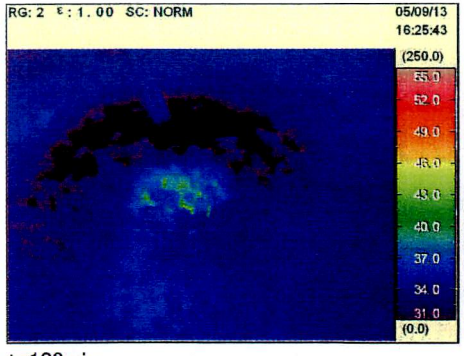


t=69min
V=20

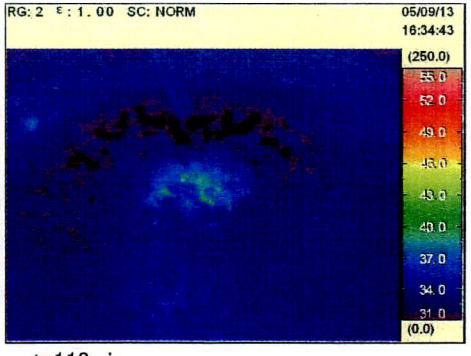


t=82min
V=30

Temperature at the top of the pile
The temperatures were visualized by thermal image camera.
The temperatures decreaed with the increase in nitrogen supply rate.

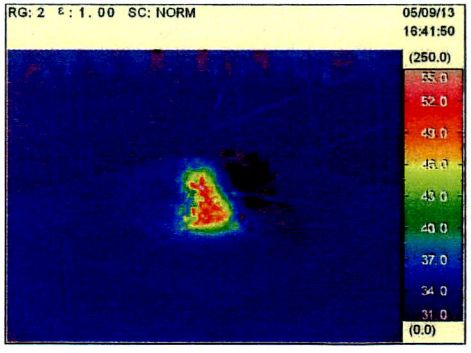


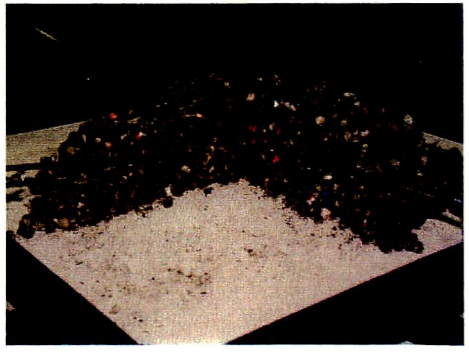
t=109min
V=40



t=118min
V=0

Cold area was found near the top of the pile.



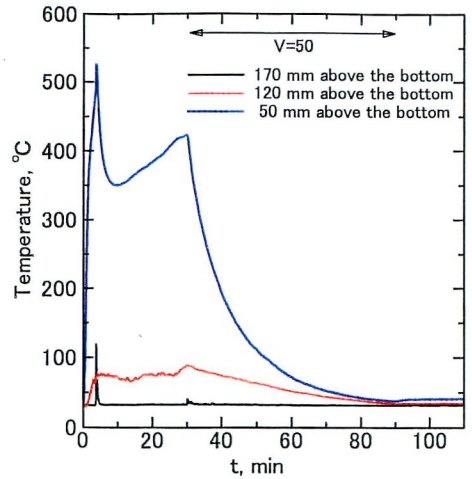


t>120min
Cross sectional area was revealed.
Temperature near the heaters was higher than that of surface.

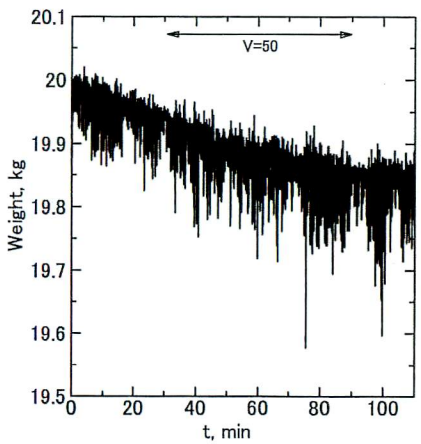
10_304

山の内部に電気ヒーターを設置し、内部から加熱する
ヒーターの位置は事前に決まっており、ヒーターを取り囲むように窒素の吹き出し口を設置するので、最も効率的に、化学反応を抑制できるはず。
窒素を可能な最大流量で供給する。

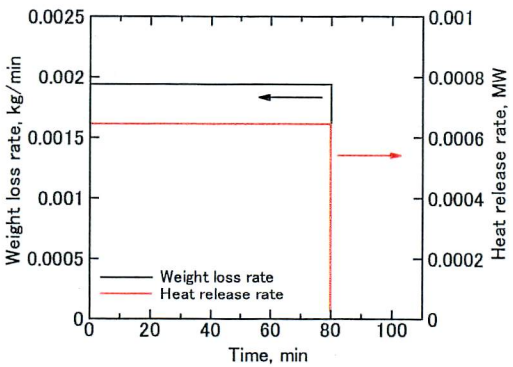
10:57:27　通電　← データロガーの記録より
27分　山頂より煙が出ている
30分　窒素注入開始　50 dm3/min
38分　煙の発生量が減った
44分　煙は出ていないように感じた。山頂の温度は周囲よりも高い。風下側の斜面の上部の温度が周囲よりも低い。
57分　煙は出ていないように感じた。山頂付近が蓋状になり、その下の隙間から窒素が噴きだしているように感じた。
84分　山頂付近の温度が低下している。
90分　窒素注入停止
100分　風下側の斜面、風上側の斜面の裾近くの温度が低い。山頂付近の温度は周囲より少し高い。



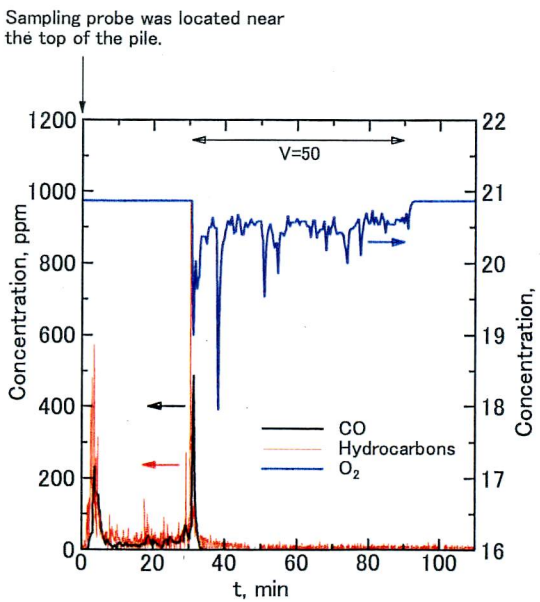
Variation of temperature with time.
t: time after onset of heating
V: supply rate of nitrigen gas in dm³/min

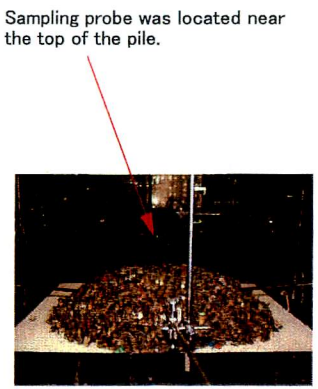


Variation of weight with time.

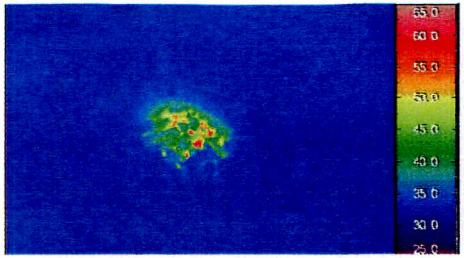


Variation of weight loss rate and heat release rate with time.

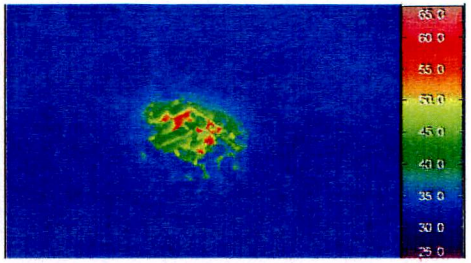




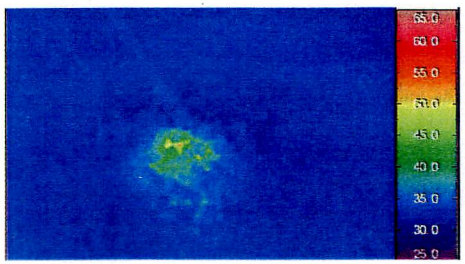
Variation of gas concentration with time.



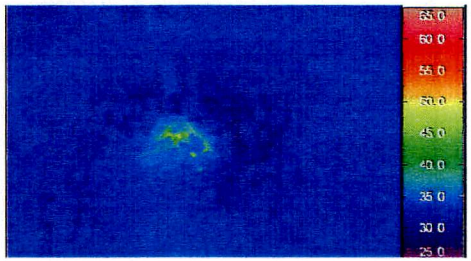
t=12 min



t=28 min

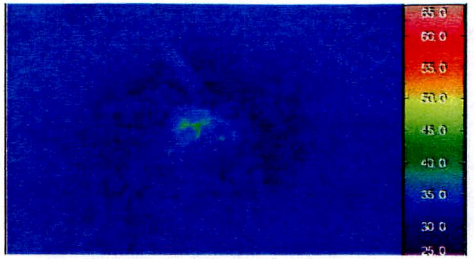


t=43 min

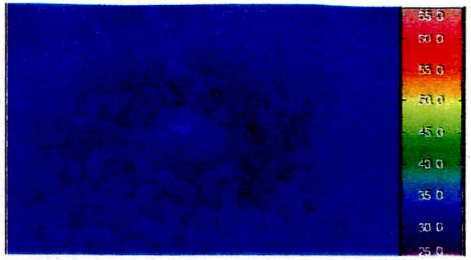


t=55 min

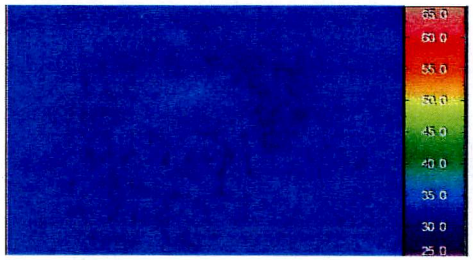
Thermal images at the top of pile.



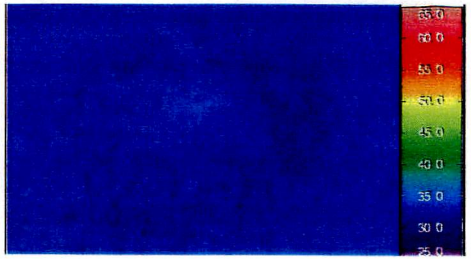
t=68 min



t=82 min

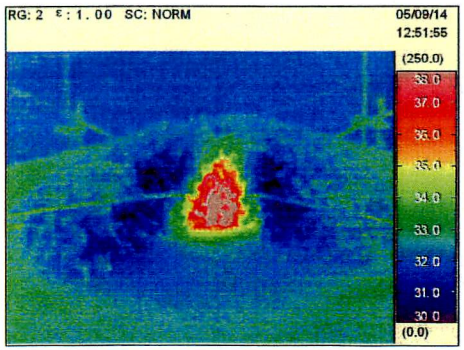


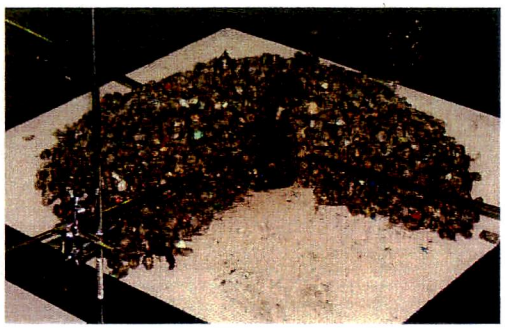
t=99 min



t=82 min

Temperature at the top of the pile increased with time before nitrogen gas injection. Temperature at the top of the pile decreased with time after nitrogen gas injection.





The pile was cut open.
Temperature at the area surrounding the centre axis was lower than environmental temperature.
Temperature at the hottest sopt measured by thermal image camera is about 40℃.
It corresponds with the temperature measured by thermocouple.

10_305

ヒーター加熱を行わずに、窒素のみを供給する。
ボンベから乾燥窒素を供給したので、RDF中の水分が気化し、冷却されると推定
山を崩して、冷却された領域をサーマルカメラで可視化する
窒素が供給された領域を可視化する

窒素注入開始　14:26:02　← ビデオテープ
50 dm3/minで15分間注入
排煙集塵機を起動
外部からサーマルカメラで観察すると、山頂付近のみが冷却されている。
15分間で約15 g減少した。

気温32℃　湿度63%

窒素注入開始　15:47:50　← ビデオテープ
50 dm3/minで15分間注入
排煙集塵機を停止
10分　山頂付近の温度が最も低い
15分間で約20 g減少した。

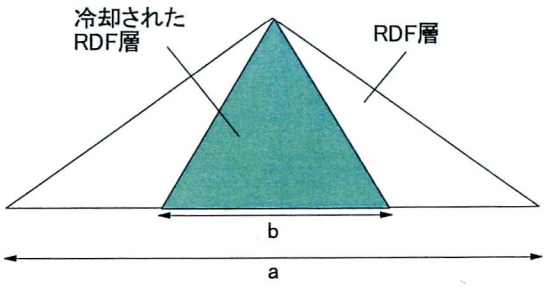
RDFは製造時で数%の水分を含む(JISでは10%以下とされている)
湿度が80%以上ある環境に放置していた。

RDF層の温度低下が、含まれている水分の気化の際に熱を奪われることによると仮定した場合の、気化する水の重量(g)

温度の低下, ℃

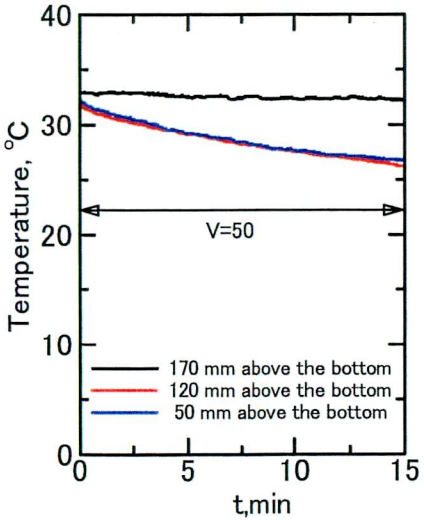
RDFの重量 kg	1	2	3	4	5
1	0.6	1.2	1.8	2.3	2.9
2	1.2	2.3	3.5	4.7	5.8
3	1.8	3.5	5.3	7.0	8.8
4	2.3	4.7	7.0	9.3	11.7
5	2.9	5.8	8.8	11.7	14.6
6	3.5	7.0	10.5	14.0	17.5
7	4.1	8.2	12.3	16.3	20.4
8	4.7	9.3	14.0	18.7	23.3
9	5.3	10.5	15.8	21.0	26.3
10	5.8	11.7	17.5	23.3	29.2

RDFの比熱：1400 J/(kg·K)
水の気化熱(25℃)：2.4 kJ/g



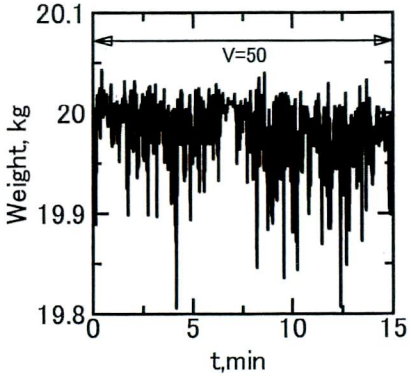
a=30 cm、b=70 cmとすると
冷却された部分の全体の体積に占める割合は
$(30/70)^2=0.18$
RDF層の総重量は20 kgなので、冷却される部分の重量は
(20)(0.18)=3.7 kg
a=16 cm、b=40 cmとすると
冷却された部分の全体の体積に占める割合は
$(16/40)^2=0.16$
RDF層の総重量は20 kgなので、冷却される部分の重量は
(20)(0.16)=3.2 kg

サーマルカメラによる観察結果によると、冷却された部分の断面形状は、三角形よりも、台形か釣り鐘型に近い。
実際に冷却され部分の重量は、もう少し大きいる

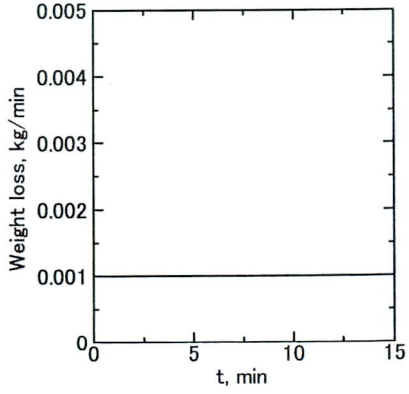


Variation of temperature with time.
t: time after onset of injection
V:supply rate of nitrogen gas, dm3/min

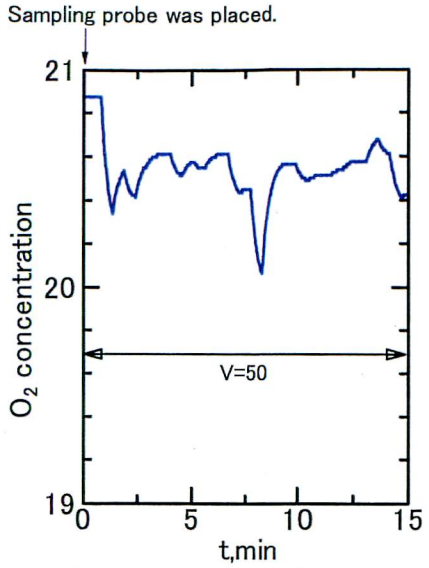
Exhaust system was activated.



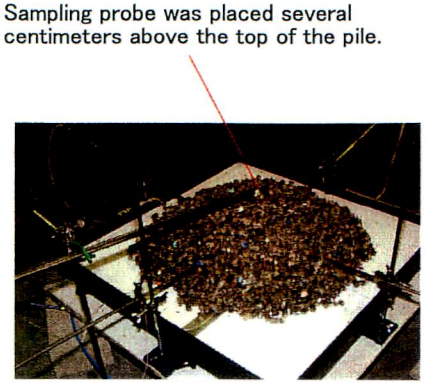
Variation of weight with time.
t: time after onset of injection
V:supply rate of nitrogen gas, dm3/min

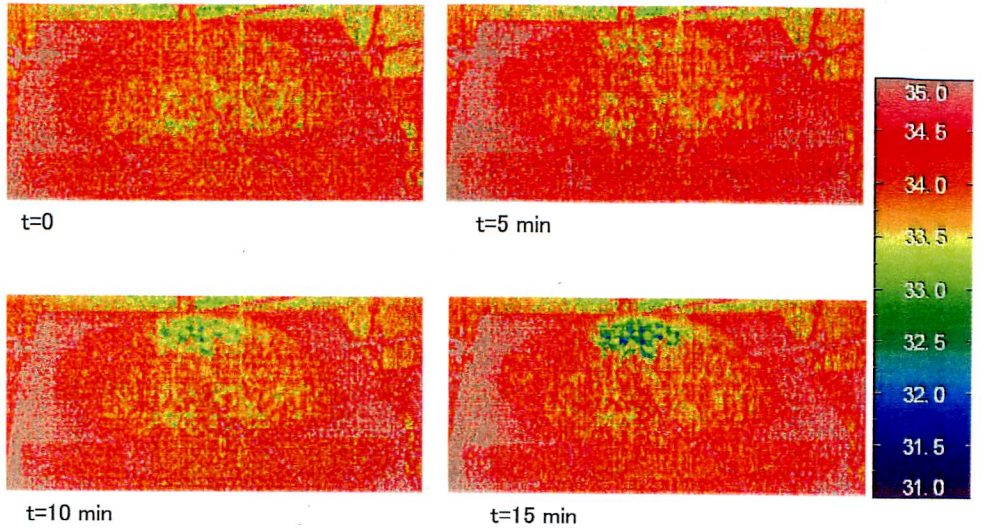


Variation of weight loss rate with time.

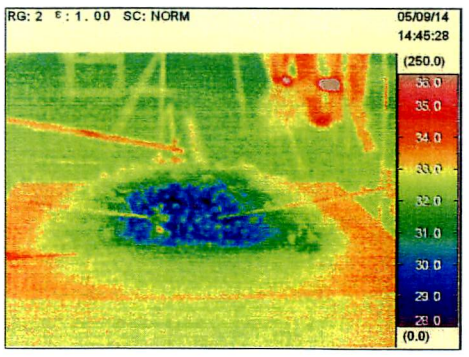


Variation of oxygen concentration near the top of the pile with time.



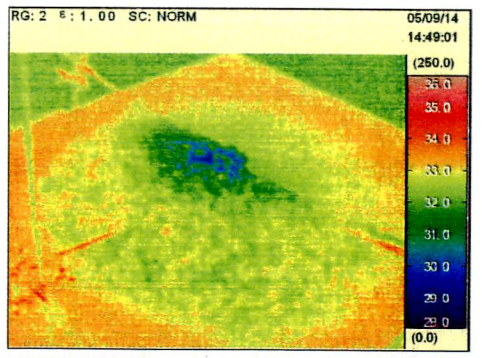


Change in surface temperature with time.
Surface temperature was visualized by a thermal image camera.



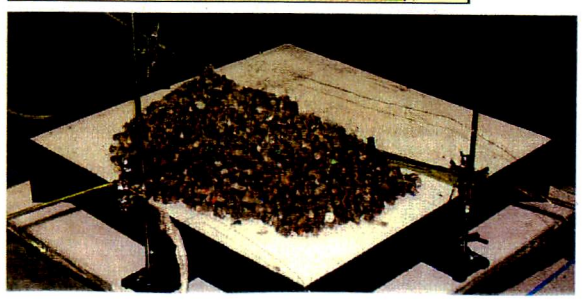
The pile was cut open.
Cross sectional area was revealed.
Cool area was found inside the pile. The cool area corresponds to area where nitrogen gas penetrated.
RDF pellets had been placed in the experimental site from July to September (hot and humid season). They absorbed humidity in the air. Dry nitrogen gas supplied from bomb flowed through the pile. Nitrogen gas absorbed water from the pellets. Pellets were cooled because of removal of water.

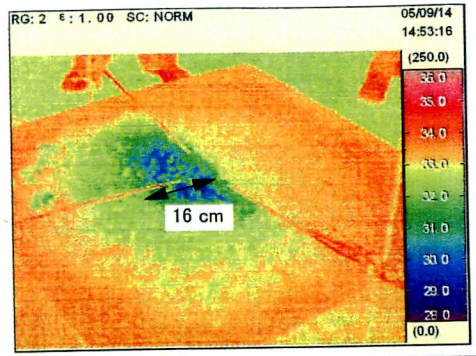
Temperature of nitrogen gas flowed into the pile was almost same as environmental temperature.



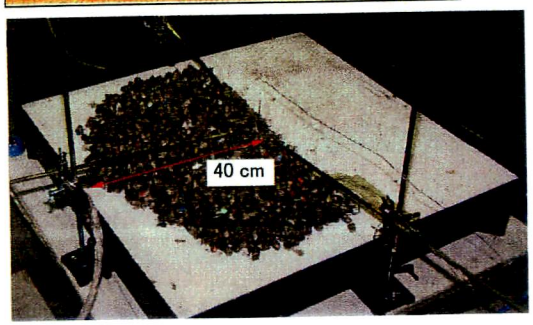
z=12 cm

z: distance from the bottom

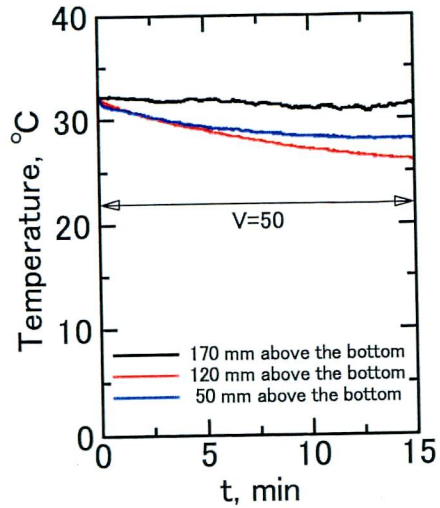




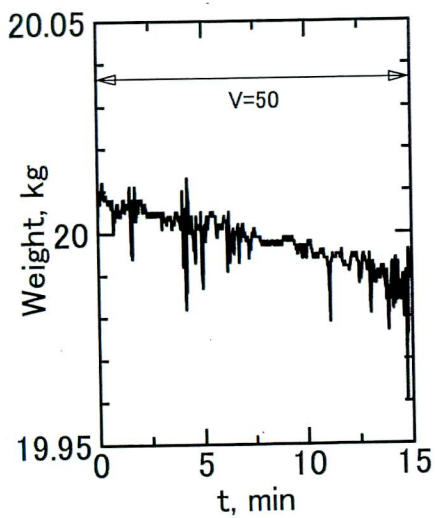
z=5 cm



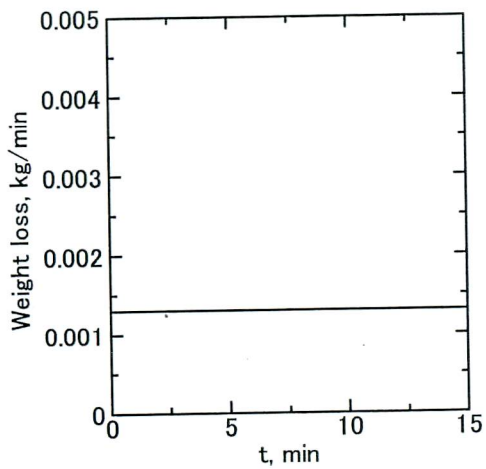
Exhaust system was not activated.



Variation of temperature with time.
t: time after onset of injection
V:supply rate of nitrogen gas, dm3/min

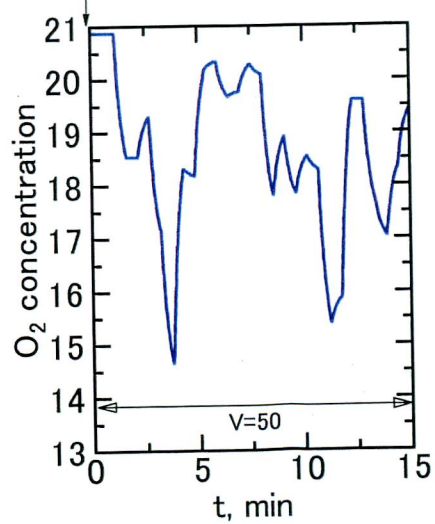


Variation of weight with time.
t: time after onset of injection
V:supply rate of nitrogen gas, dm3/min

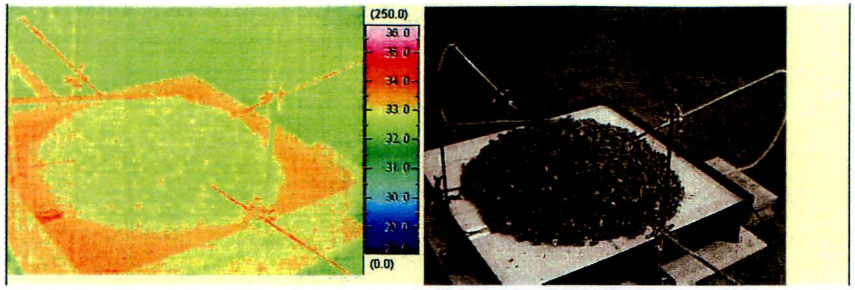


Variation of weight loss rate with time.

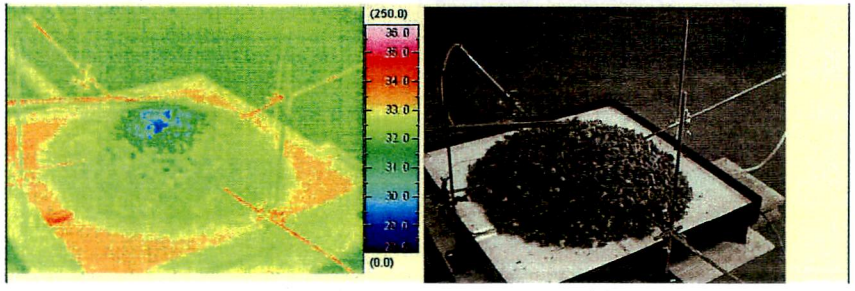
Sampling probe was placed.



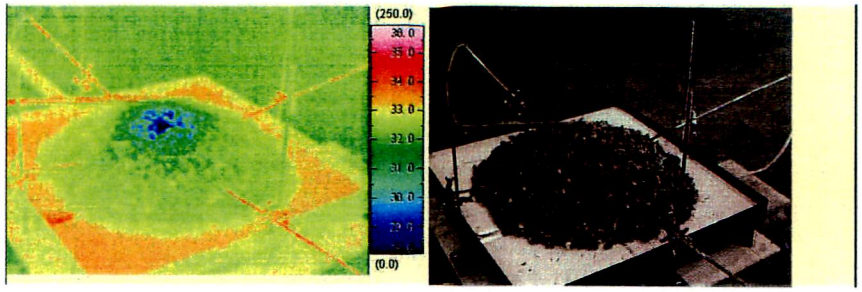
Variation of oxygen concentration near the top of the pile with time.



t=5 min

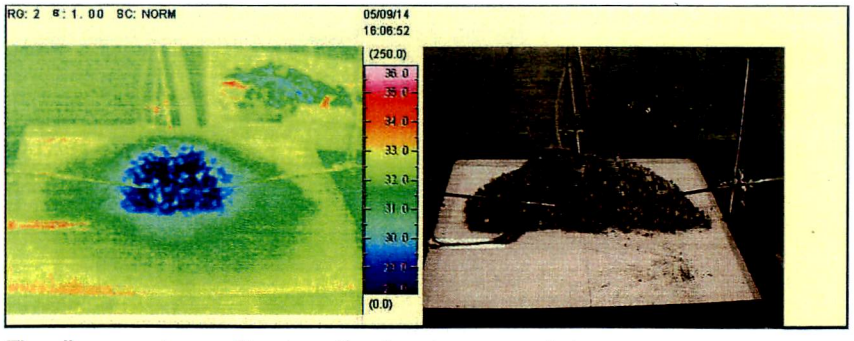


t=10 min

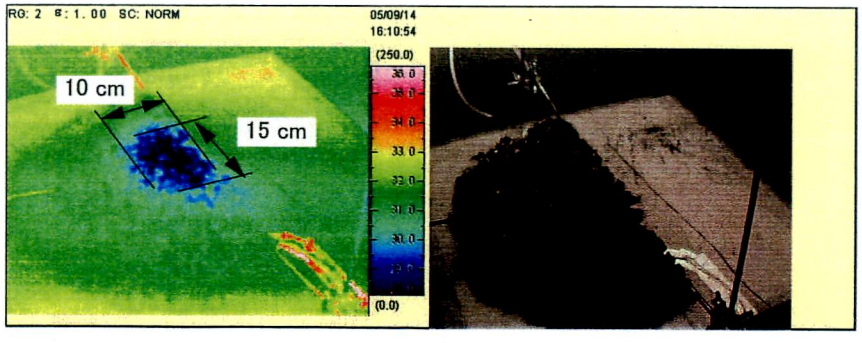


t=15 min

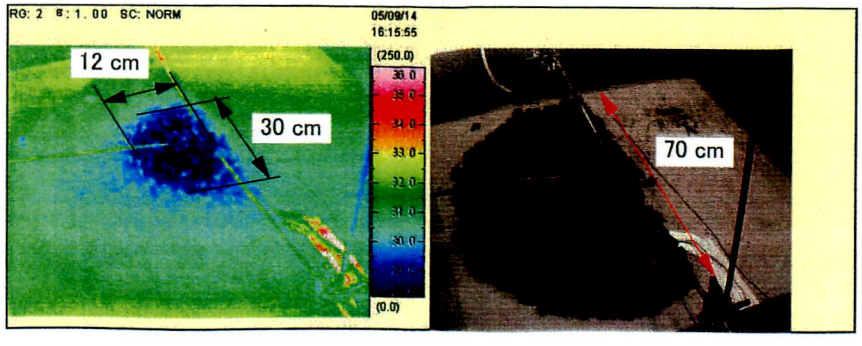
Change in surface temperature with time.
Surface temperature was visualized by a thermal image camera.



The pile was cut open. Cross sectional area was revealed.



z=12 cm



z=5 cm

11_701

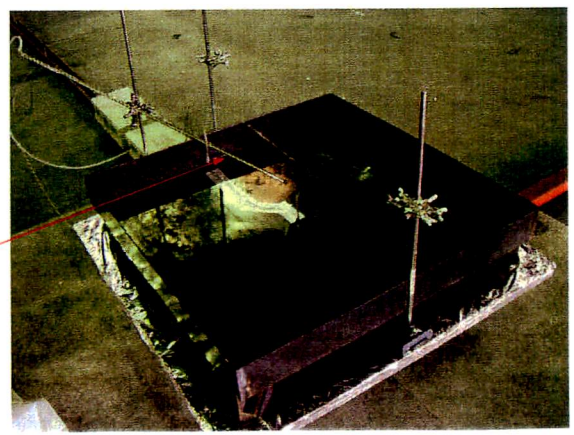
目的
比較のため、不活性気体の注入を行わない

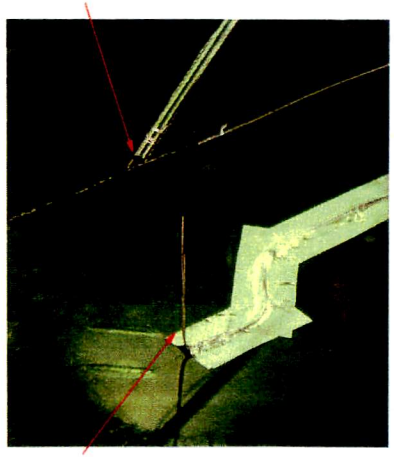
方法
RDFの山(5 kg)にヘプタンをかけて着火する
ヘプタンが消費され、RDFのみの有炎燃焼になるのを待つ
点火から20分後にRDF(15 kg)で覆い、消炎させる
点火から80分経過するまで観察する

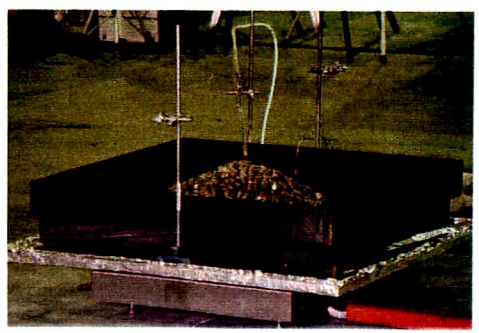
点火　11:09:10 (サーマルカメラ)

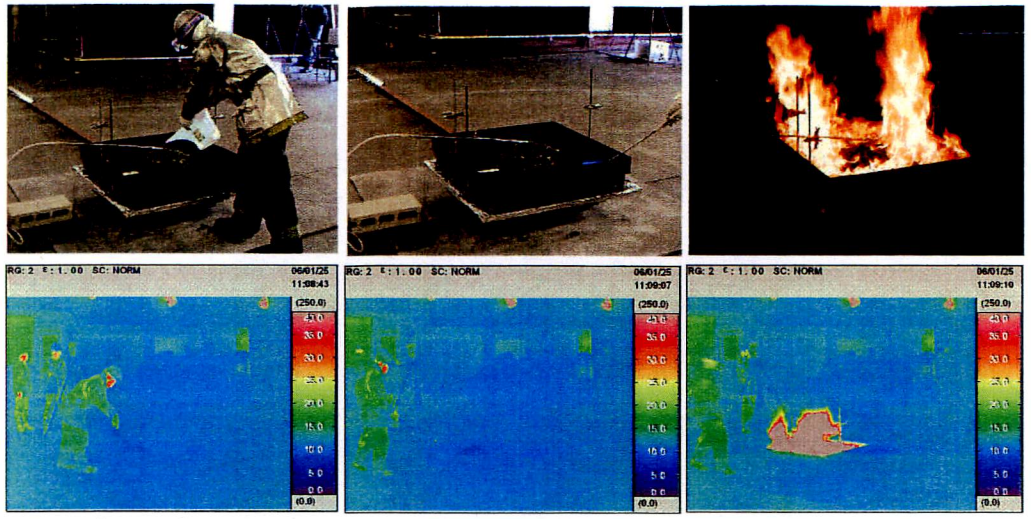
11:48　山の中から「グツグツ」という音がする
　　採取管の中を水分が上がろうとしていた、外部ポンプを使用し最大で15 ㍑/minでひいていた(今後、3～5 ㍑/minでひくことにする)
　　山の斜面上、中腹より少し上のあたりに、周囲より温度の高い部分があり、白煙が出ていた
11:58　煙が増えてきた
12:03　中腹の一部から白煙が出ている
12:07　中腹のシャッター寄りに小さな噴火口のようになっている部分があり、周囲より高温になっている
12:12　中腹の一部から白煙が出ている
12:18　シャッター側(風上側)では所々から煙が出ている、風下側では流れが乱れていて、全体から煙が出ているようにみえる
12:22　周囲より温度の高い部分が尾根のようになっている
80分経過　ライターの火を近づけたら一時的に火がついた

CO濃度計(上限5000ppm)の出力は、測定中はオーバーレンジの状態となった
CO濃度計(上限5%)を今後使用する

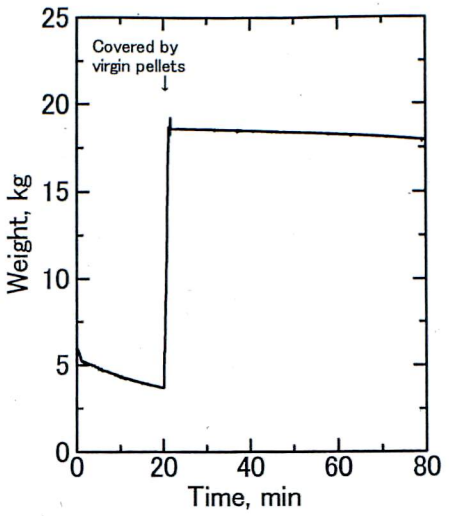


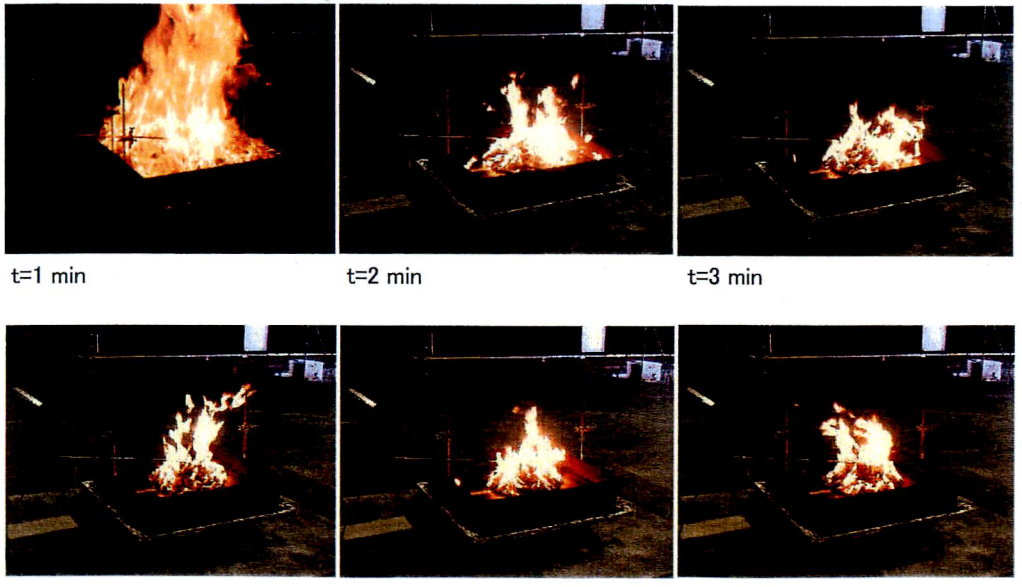






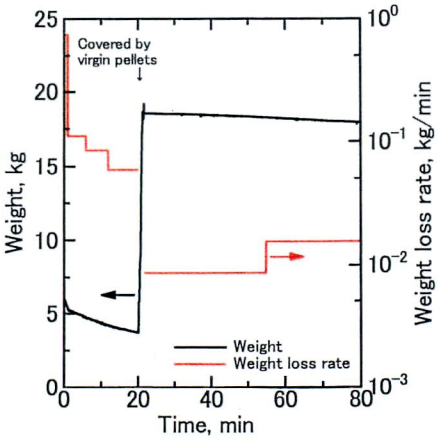
Heptane (1.5 dm3) was poured over the pile sirface and ignited by a torch flame.

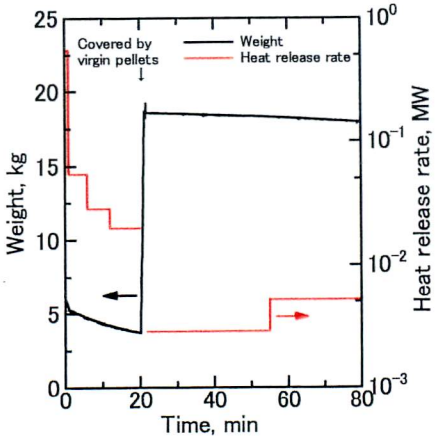


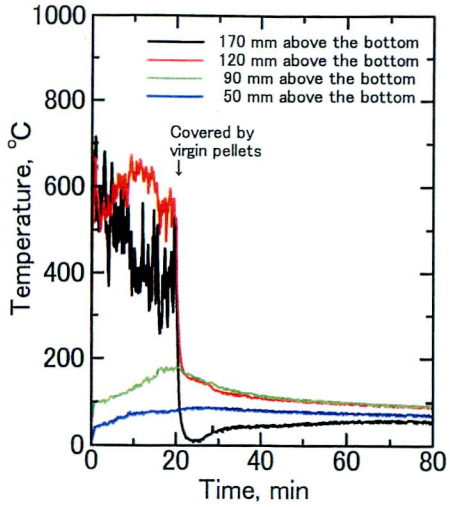


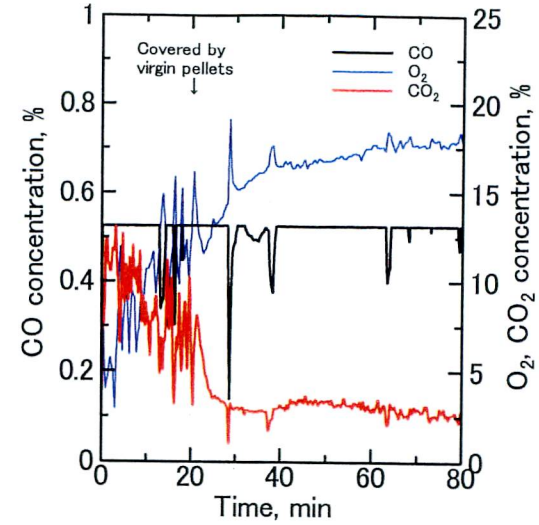
t=1 min t=2 min t=3 min

t=4 min t=5 min t=6 min

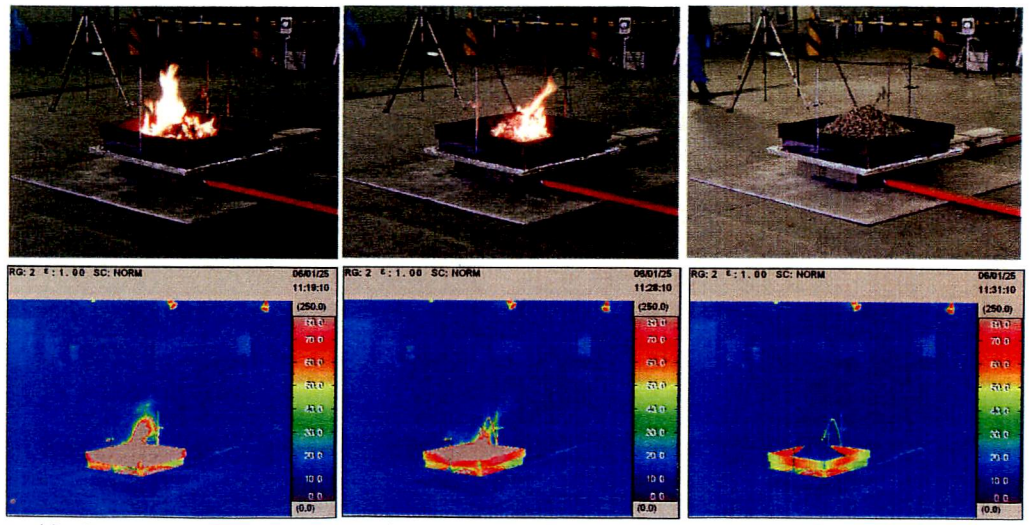




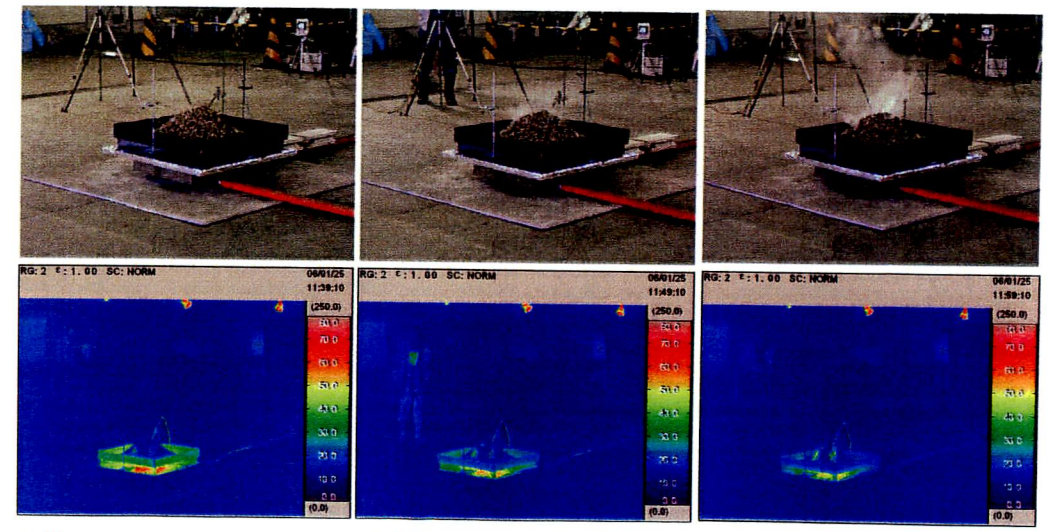




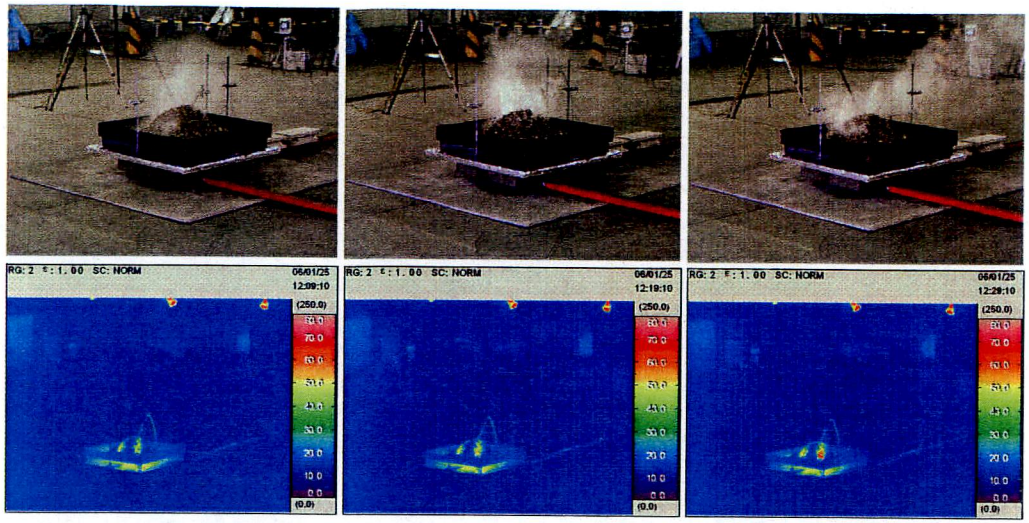
Concentration of carbon monoxide exceeded the limit of gas meter.



t=10 min t=19 min t=22 min



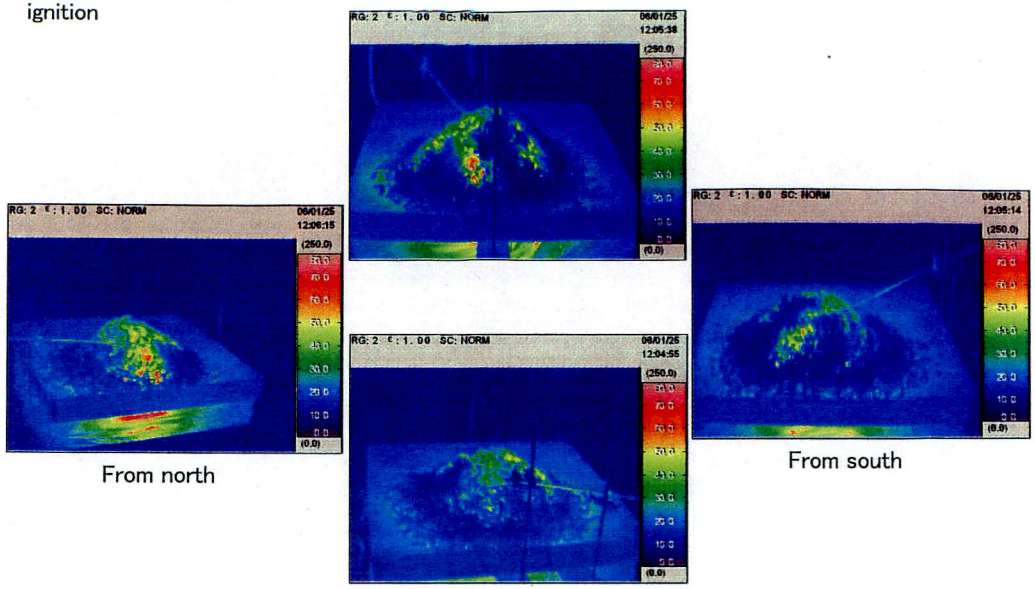
t=30 min t=40 min t=50 min



t=60 min t=70 min t=80 min

At 56 to 57 min after ignition

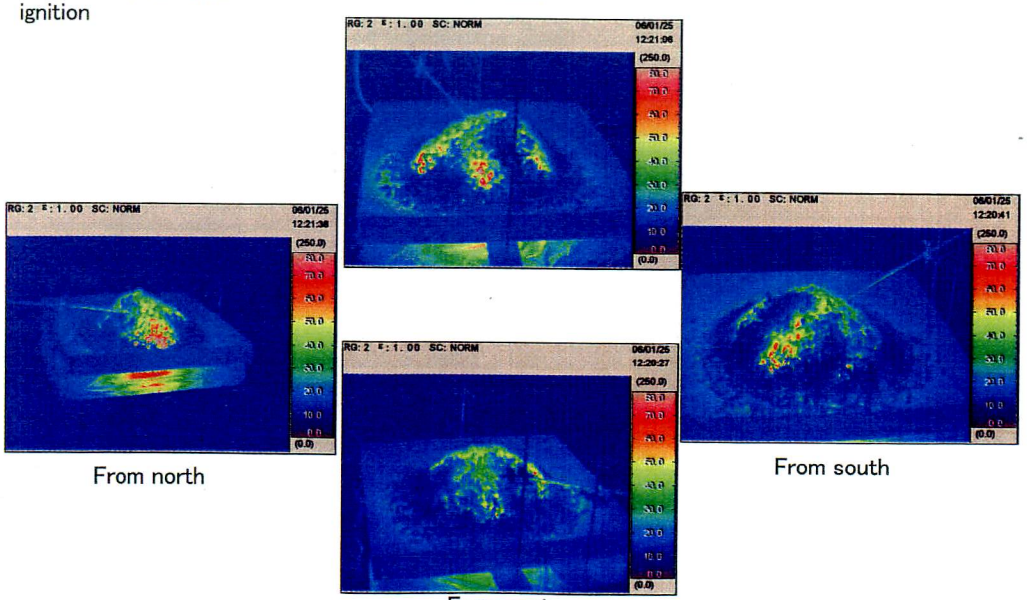
From west



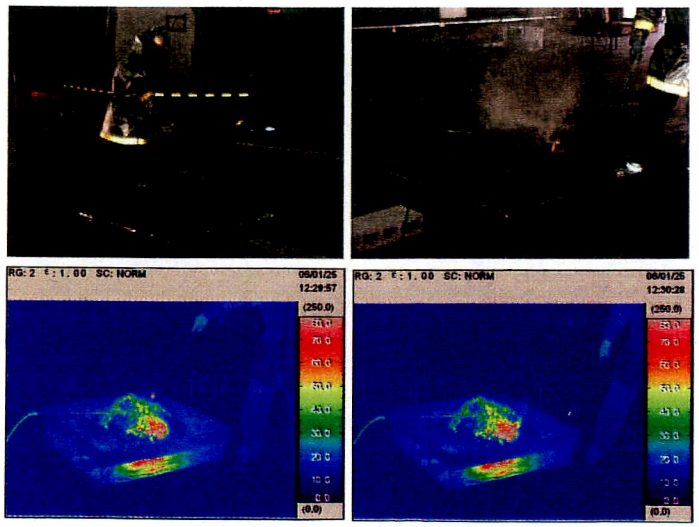
From north From south From east

At 71 to 72 min after ignition

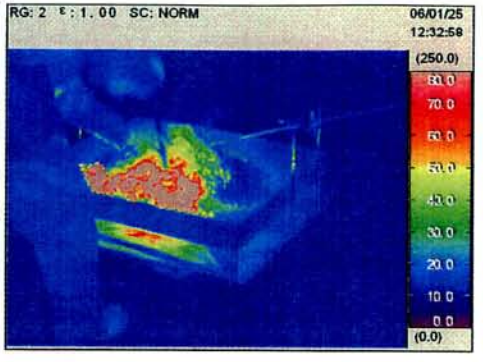
From west



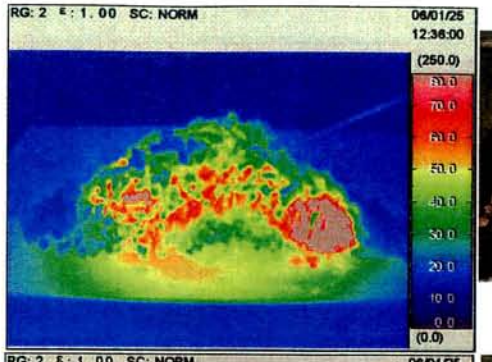
From north From south From east

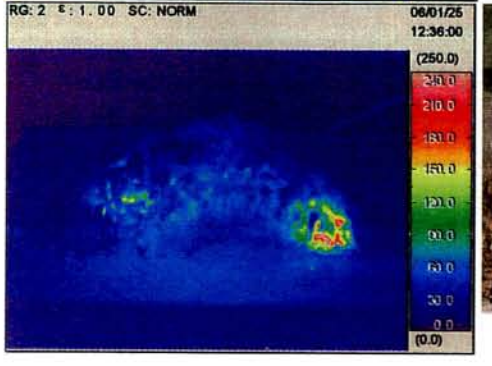


A torch flame was made approach to the area of high temperature.
A flame was formed over the surface for a short time.



The pile was cut open to reveal the cross sectional area.





11_702

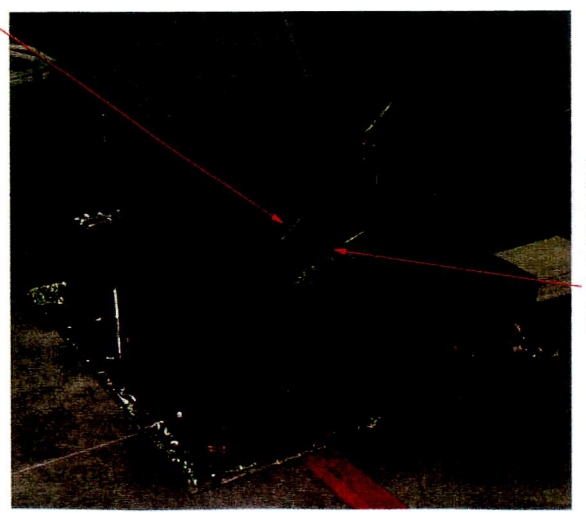
目的
燃焼部の内側から、不活性気体を供給し、燃焼を抑制する

方法
RDFの山(5 kg)にヘプタンをかけて着火する
ヘプタンが消費され、RDFのみの有炎燃焼になるのを待つ
点火から20分後に、RDF(15 kg)で覆い、消炎させる
点火から30分後に、内部に窒素を供給する、流量10 ﾘｯﾄﾙ/分
点火から50分後に、窒素流量を20 ﾘｯﾄﾙ/分に増加
点火から70分後まで窒素を供給する
点火から100分経過するまで観察する

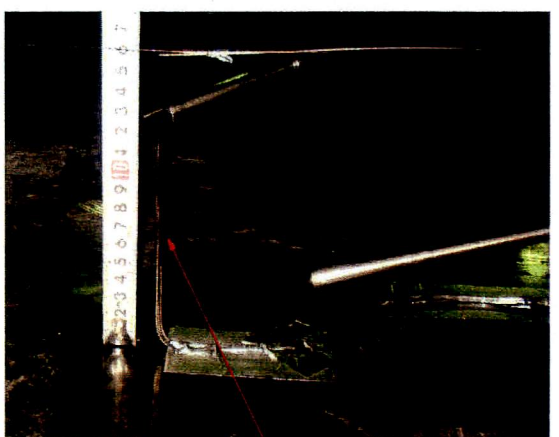
点火　15:21:00（サーマルカメラ）

着火　トレイ全体にヘプタンが拡がっている
2分　トレイ上に拡がったヘプタンは消費され、山に浸潤したヘプタンのみが有炎燃焼している
7分　表面の一部が灰化しているように見える
11分　表面の一部が灰化しているのが見える
12分　山裾では、時々ペレットの隙間から白煙が出ている
15分　山裾は火に覆われていない、山裾より少し上ではペレットの隙間から火が出ている
18分　山裾から中腹にかけて、所々でペレットの隙間から火が出ている
22分　匂いが明確に変わった
25分　山頂付近から白煙が出ていて、周囲よりわずかに温度が高い
30分　窒素ガス注入
47分　山頂付近から白煙が出ていて、周囲よりわずかに温度が高い
50分　窒素ガス注入量増加
16:13 山頂の肩の部分に周囲より温度が高いところがあり煙も出ている、山頂付近の温度の高い部分は全体的に拡がっているようだ
16:18　山頂からは煙が出ていない、山頂近くの肩の部分から煙が出ている
16:20　煙の発生量が増えたように見える
16:31　窒素供給停止、山頂の温度は低く、山頂を囲むように温度の高い部分がある
78分　煙の発生量が増えたように感じる
86分　煙の発生量が増えた
93分　山頂を取り囲むように存在した高温の部分が山の中腹に向かった拡大した、煙の発生量も増えた
99分　山頂を取り囲むように高温の部分があり、山頂の温度は周囲より低くなっている
100分経過　煙の発生量が多い部分に火を近づけると、一時的に火がつくが、火炎は定在しない
分割
はじめの山に相当する部分が黒く炭化していた、断面をみると特定の方向に熱分解が進行していた
(炭化していた部分を割ろうとすると硬かった)

Sampling probe
SUS
Inner diameter: 8 mm
Outer diameter: 10 mm
Exit: 0 cm from the centre, 13 cm from the bottom



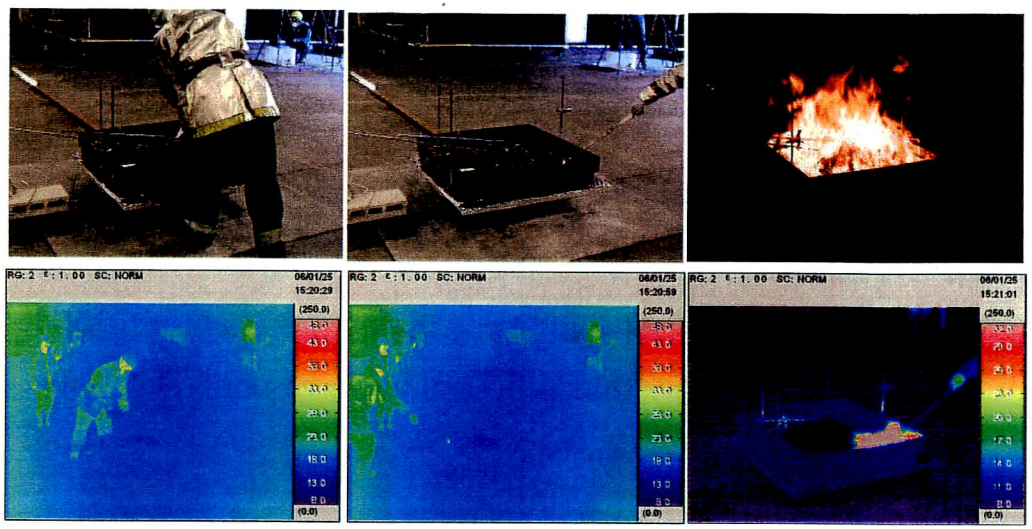
Probe for nitrogen injection
SUS
Inner diameter: 8 mm
Outer diameter: 10 mm
Exit: 7.5 cm from the centre, 8 cm from the bottom



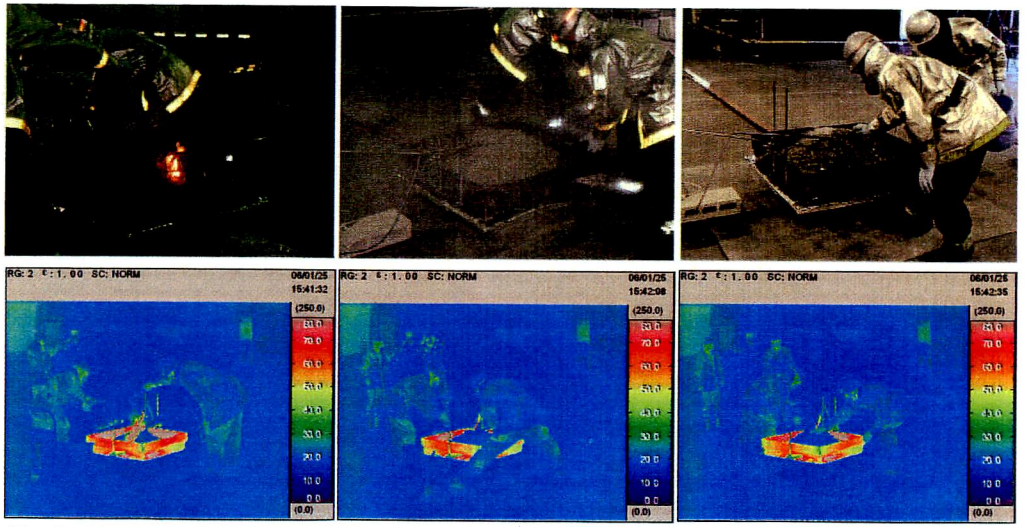
Thermocouples

Junctions are located at 50 mm, 90 mm, 120 mm, and 170 mm above the bottom.

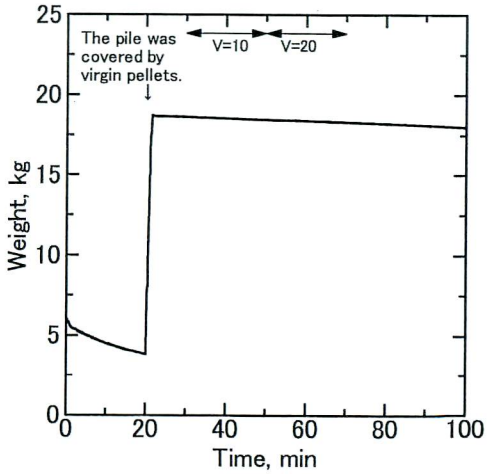
RDF pellets (5 kg) are loaded on a tray.

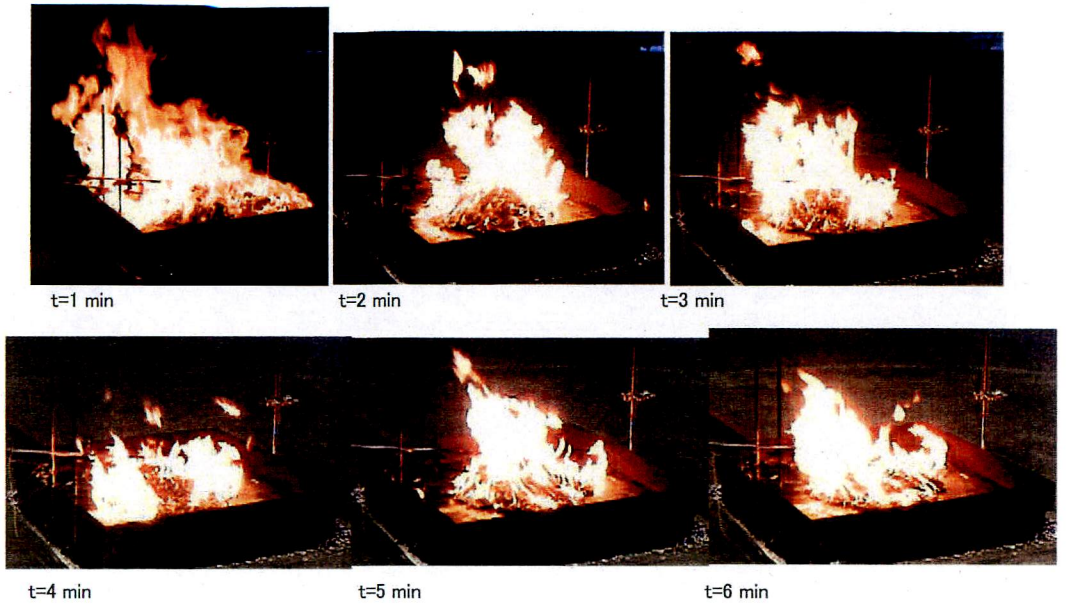


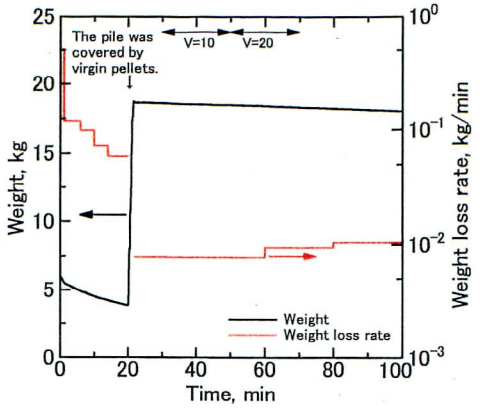
Heptane was poured over the pile surface and ignited by a torch flame.

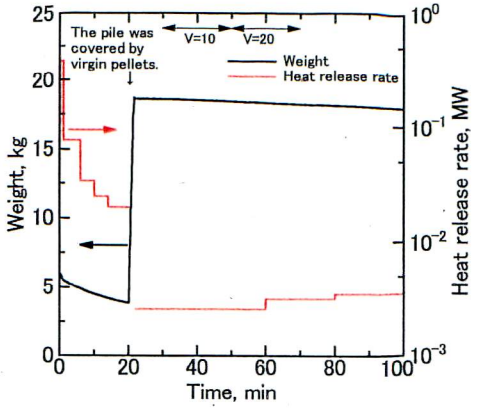


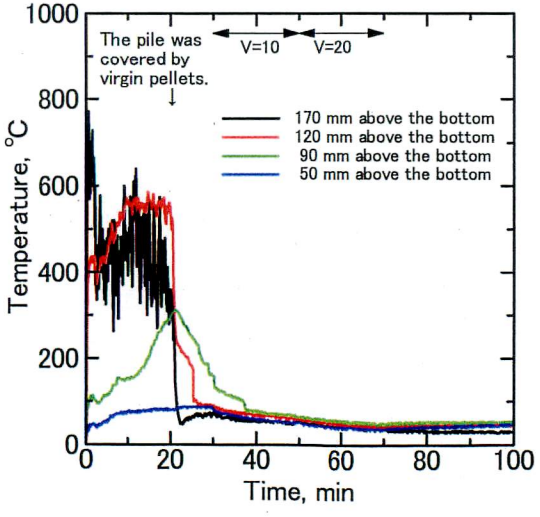
The burning pile was covered by virgin pellets.
A flame was extinguished.

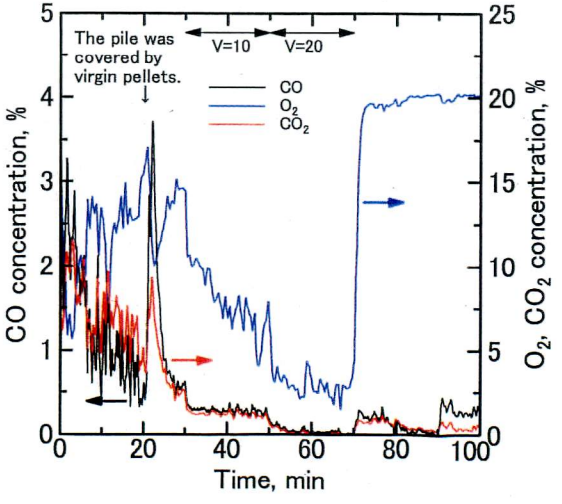


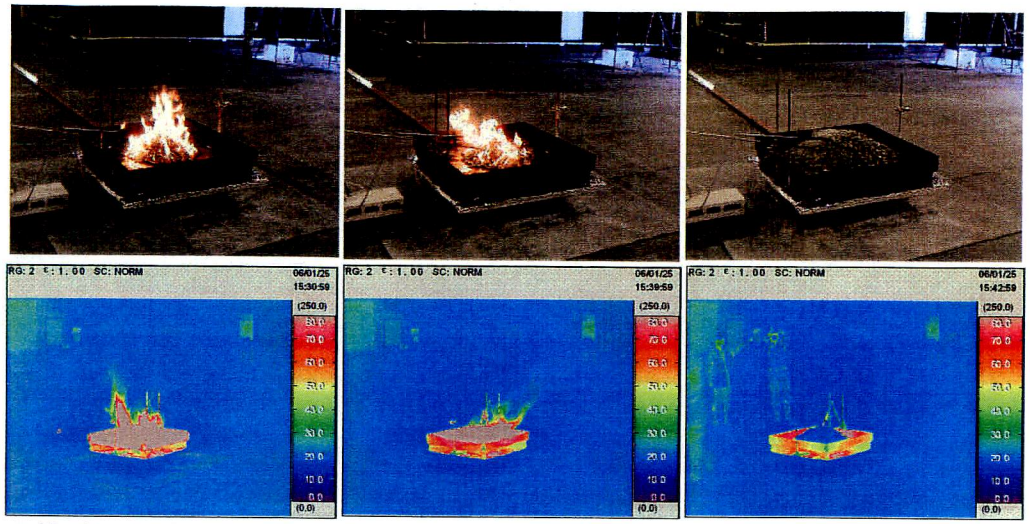

t=1 min
t=2 min
t=3 min
t=4 min
t=5 min
t=6 min


The pile was covered by virgin pellets.
V=10
V=20
Weight
Weight loss rate
Weight, kg
Weight loss rate, kg/min
Time, min

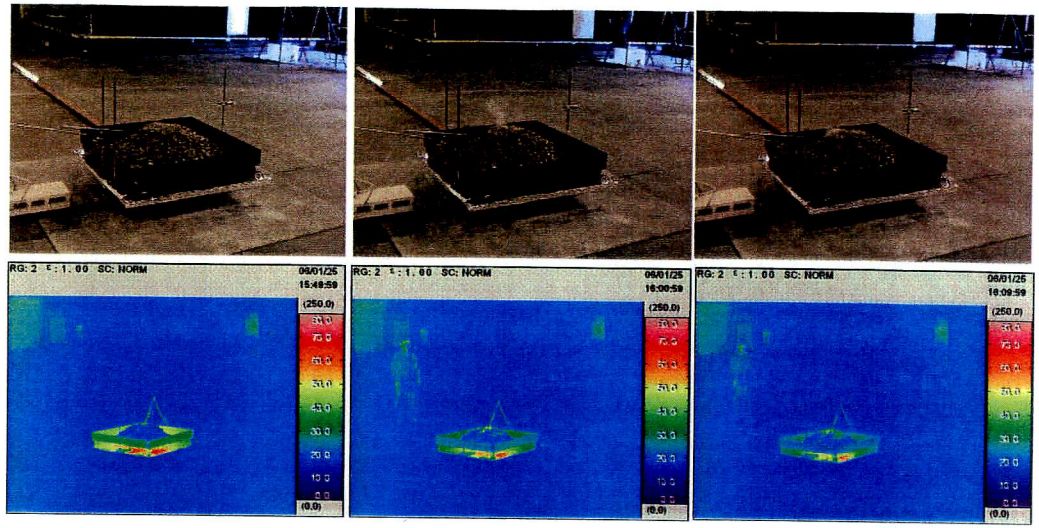

The pile was covered by virgin pellets.
V=10
V=20
Weight
Heat release rate
Weight, kg
Heat release rate, MW
Time, min


The pile was covered by virgin pellets.
V=10
V=20
170 mm above the bottom
120 mm above the bottom
90 mm above the bottom
50 mm above the bottom
Temperature, °C
Time, min

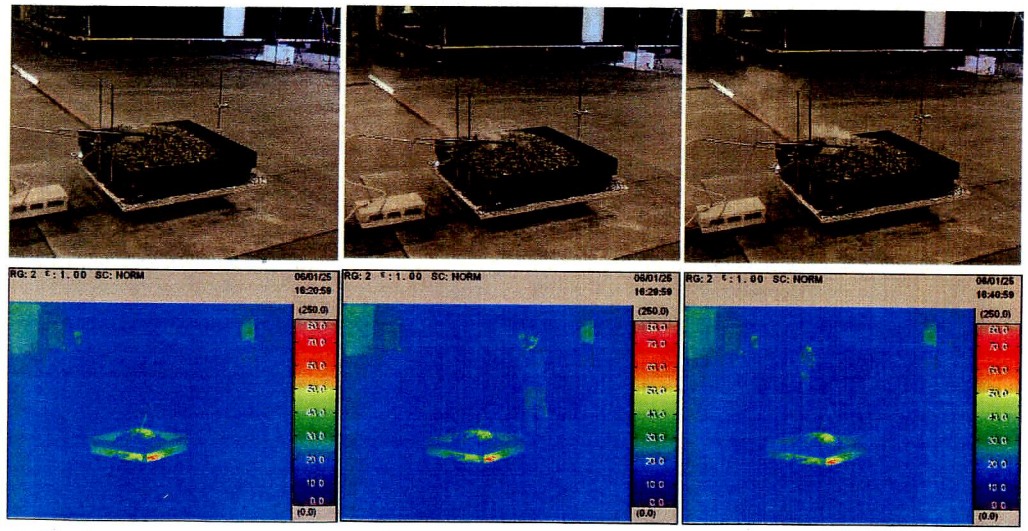

The pile was covered by virgin pellets.
V=10
V=20
CO
O_2
CO_2
CO concentration, %
O_2, CO_2 concentration, %
Time, min



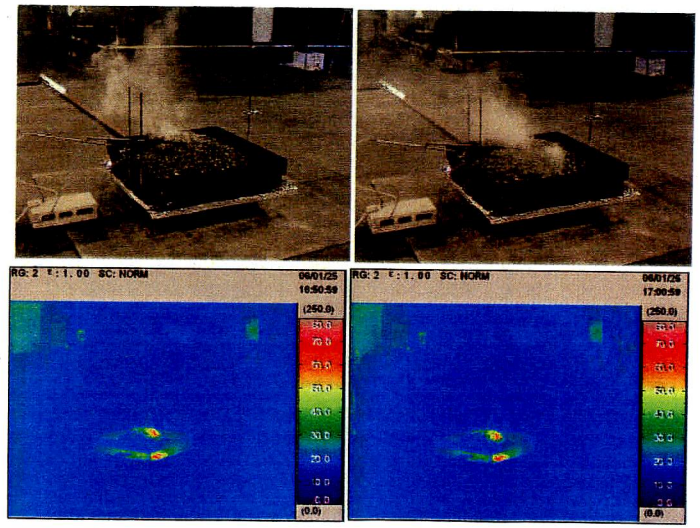
t=10 min t=19 min t=22 min



t=29 min t=40 min t=49 min

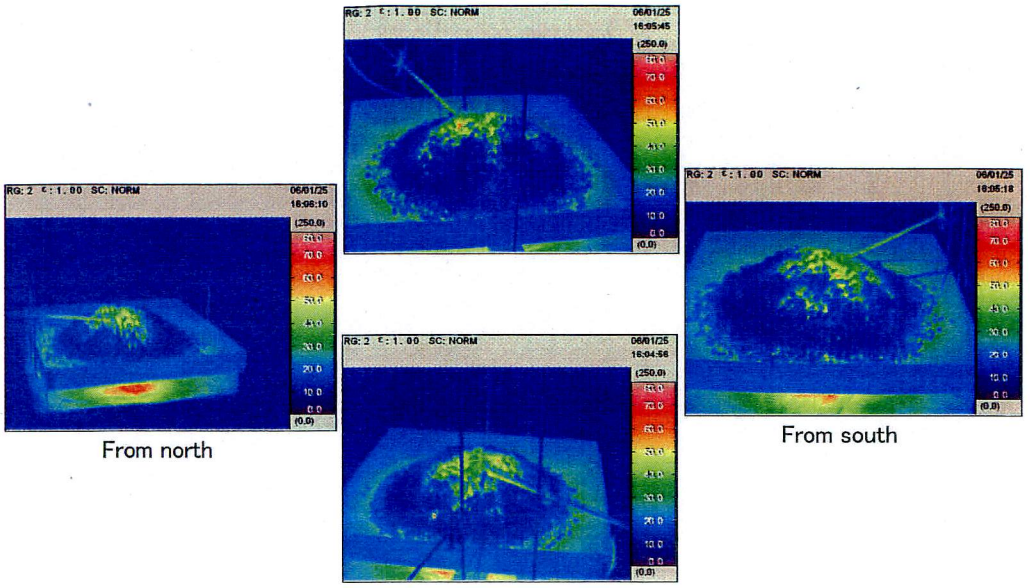


t=60 min t=69 min t=80 min

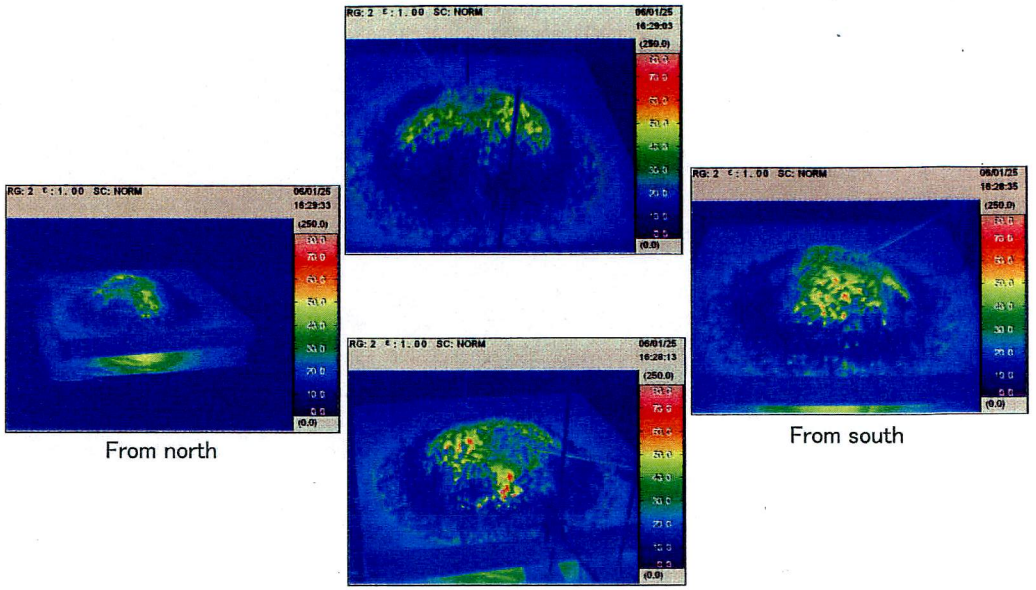


t=90 min t=100 min

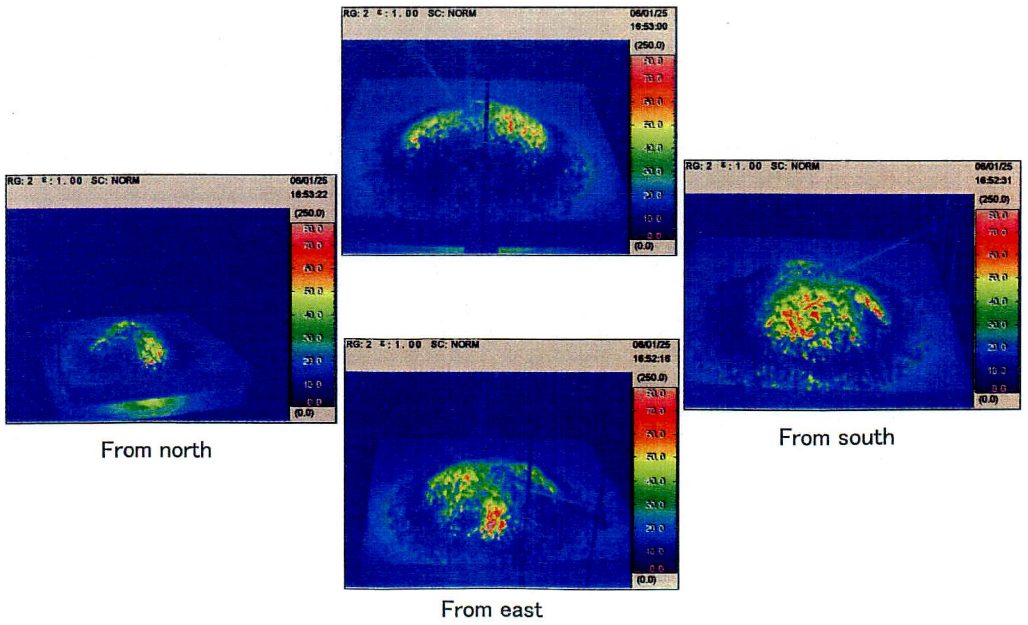
44 to 45 min after ignition

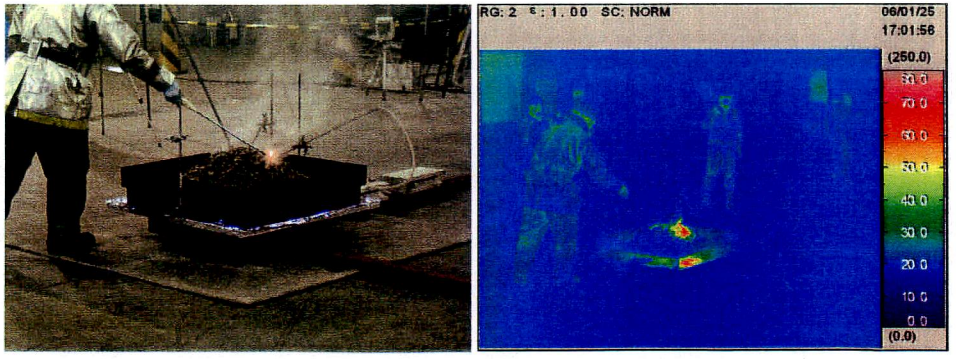


67 to 68 min after ignition

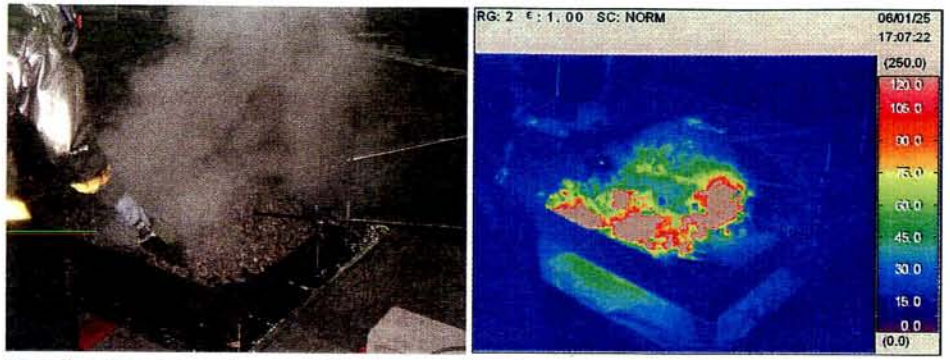


91 to 92 min after ignition

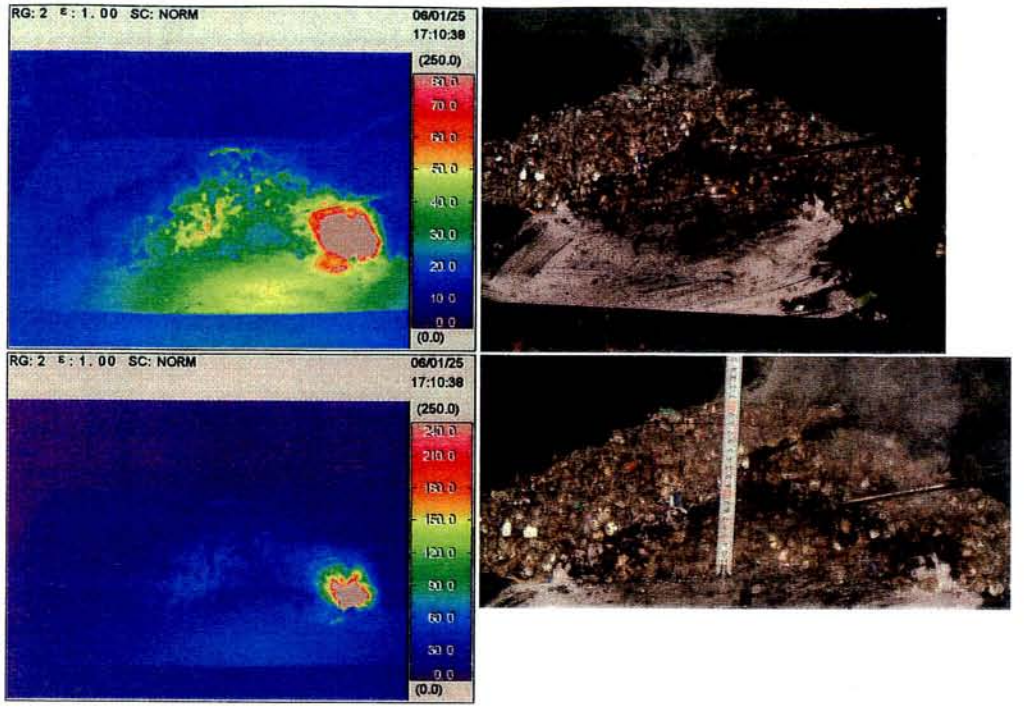




A torch flame was made approach to area from which a lot of smoke was generated.
A flame was observed for a short time.
A flame was not stabilized over the area.



The pile was cut open to reveal the cross sectional area.



11_703

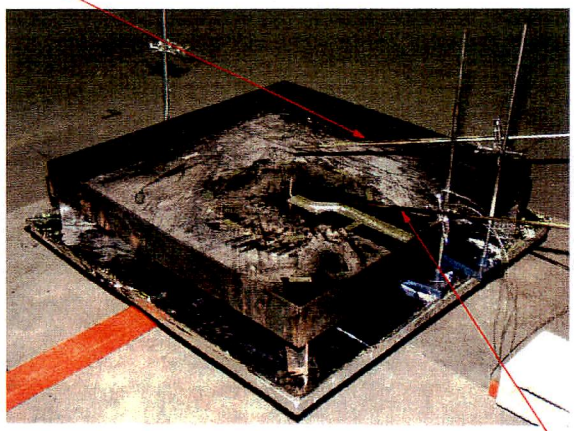
目的
燃焼部の外側から、不活性気体を供給し、燃焼を抑制する
山裾の付近に管を設置
空気の供給を遮断できたところだけ、燃焼を抑制できることを示す

方法
RDFの山(5 kg)にヘプタンをかけて着火する
ヘプタンが消費され、RDFのみの有炎燃焼になるのを待つ
点火から20分後に、RDF(15 kg)で覆い、消炎させる
点火から30分後に、内部に窒素を供給する、流量10 リットル/分
点火から50分後に、窒素流量を20 リットル/分に増加
点火から70分後まで窒素を供給する
点火から100分経過するまで観察する

点火　10:56:29(サーマルカメラ)

点火　ヘプタンがトレー上に拡がって燃えている
2分　風上側でトレー上のヘプタンが燃えている
3分30　山が火に覆われている
7分30　表面の一部が灰化
8分　山全体が炎に覆われている
11分　山裾も火に包まれる、表面の一部が灰化
16分　山裾の一部は火に覆われていない、ペレットの隙間から火が出ている、表面の多くの場所で灰化がみられる
19分30　すすが増えてきた
21分　火炎は見えなくなった、山全体から白煙が出ている
25分　山の所々から白煙が出ている
11:23　山頂近くと、シャッター側の斜面の一部で周囲より温度が高くなっている
28分　採取管とその下の窒素注入管の間に高温の部分がみられる、パイプが熱媒体となったか、あるいは、ガスの通り道ができてしまったのか
30分　窒素注入、山頂近くの温度が高い、山頂近くから白煙が多く出ている
32分　斜面のシャッター側の温度が高い
50分　窒素の注入量を増す
51分　斜面のシャッター側と山頂の観測室よりの温度が高い、山頂近くから白煙が出ている
68分　山頂近くの温度が周囲よりも低い、山頂を囲むように高温の部分がある、11_702の時に比べ煙が多く出ているように見える
70分　窒素注入停止
78分　山頂を囲むように高温の部分がある、窒素が山頂へ抜けていたのだろうか
79分　煙の発生量が増えたように感じた
90分　煙の発生量が増えた
91分　山の上半分から煙が出ている
95分　山頂付近の高温の部分が拡がったように感じた
100分経過　ライターの火を近づけたら、fan側の一部で火炎が定在した
分割した
はじめの山の表面に沿って炭化していた、窒素供給管の下の底の近くに赤く発光している部分があった

Sampling probe
SUS
Inner diameter: 8 mm
Outer diameter: 10 mm
Exit: 0 cm from the centre, 13 cm from the bottom

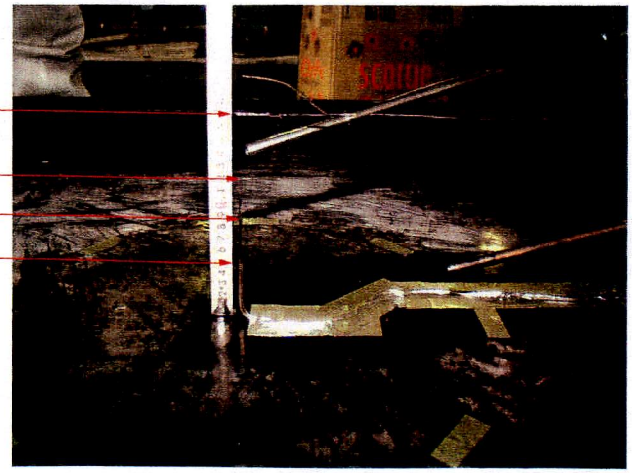


Probe for nitrogen injection
SUS
Inner diameter: 8 mm
Outer diameter: 10 mm
Exit: 14 cm from the centre, 9 cm from the bottom

Gas analyzer

Thermocouples

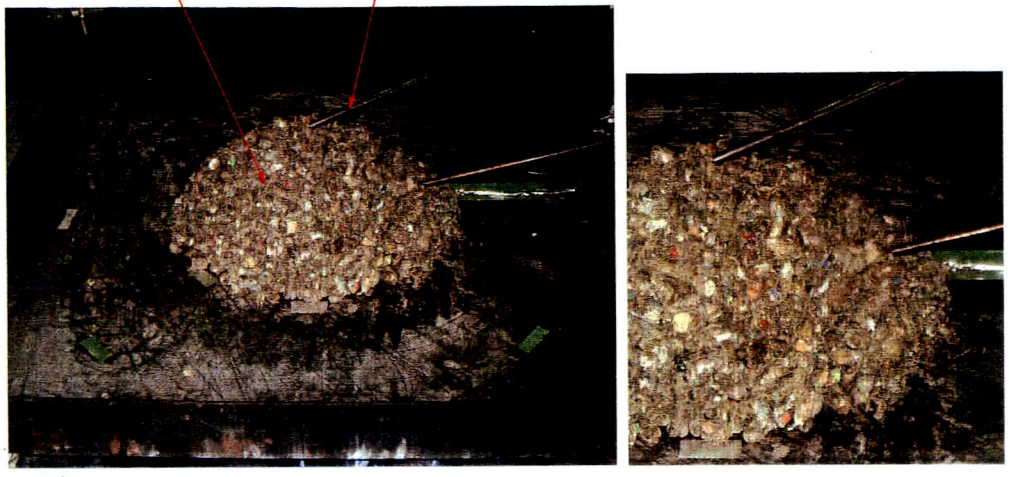
Junctions are located at 50 mm, 90 mm, 120 mm, and 170 mm above the bottom.

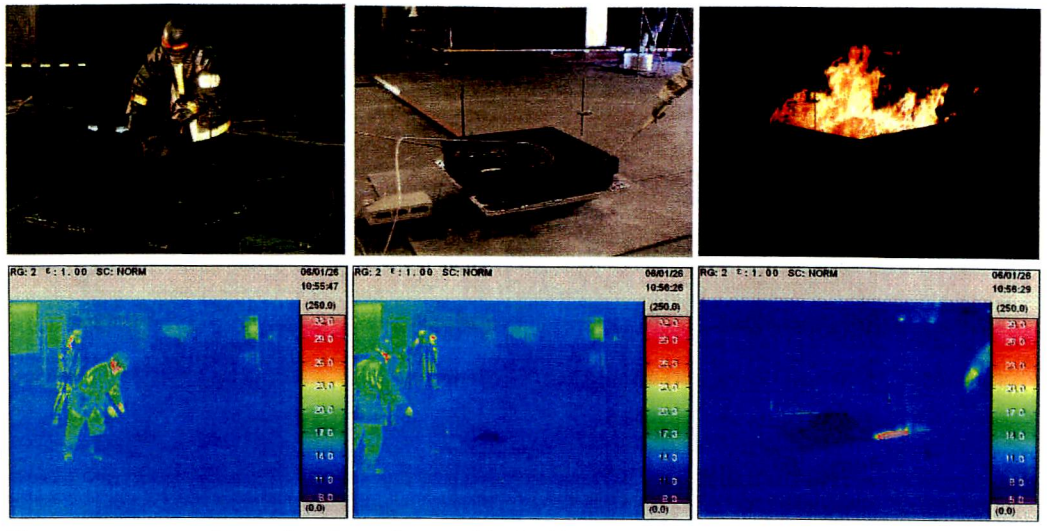


Nitrogen cylinder

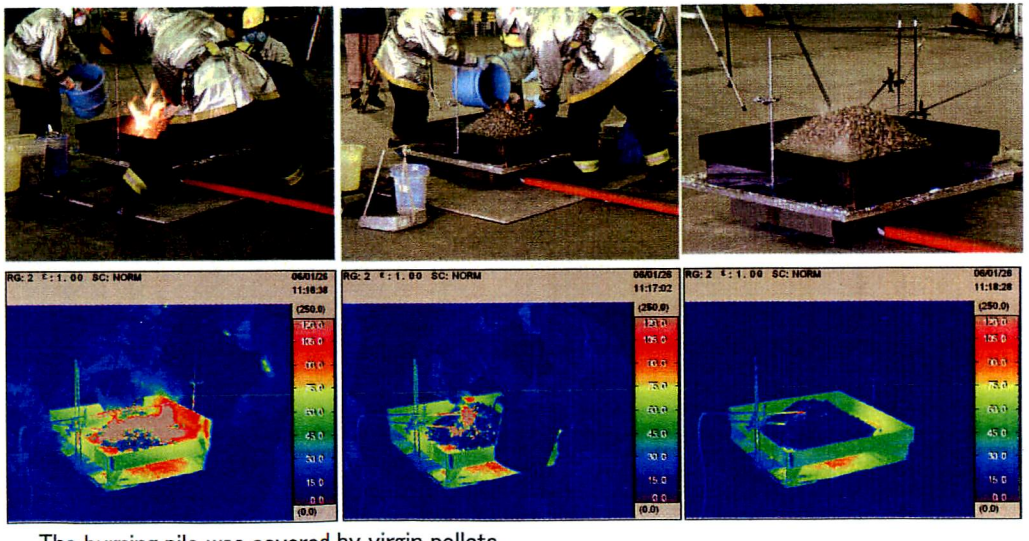
RDF pellets (5 kg) are loaded on a tray.
Pile geometry: radius: 20 cm, height: 12 cm

Sampling probe are above the top of the pile.

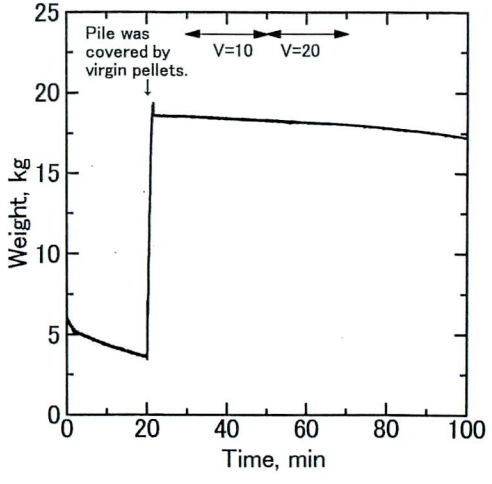




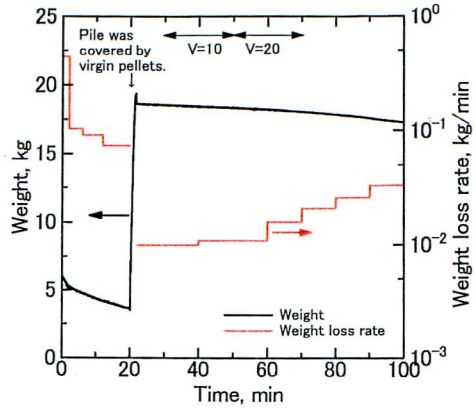
Heptane was poured over the pile surface and ignited by a torch flame.

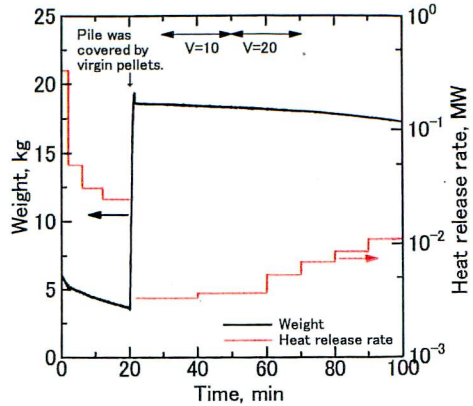


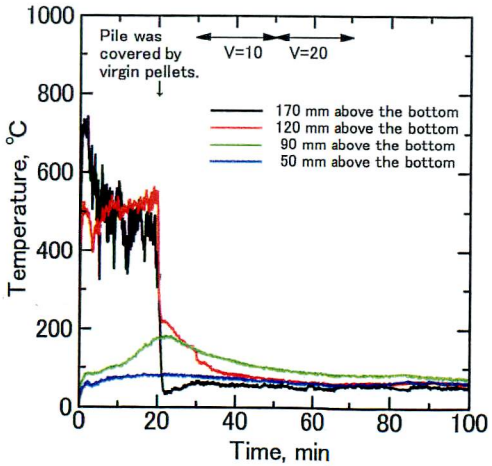
The burning pile was covered by virgin pellets.
A flame was extinguished.

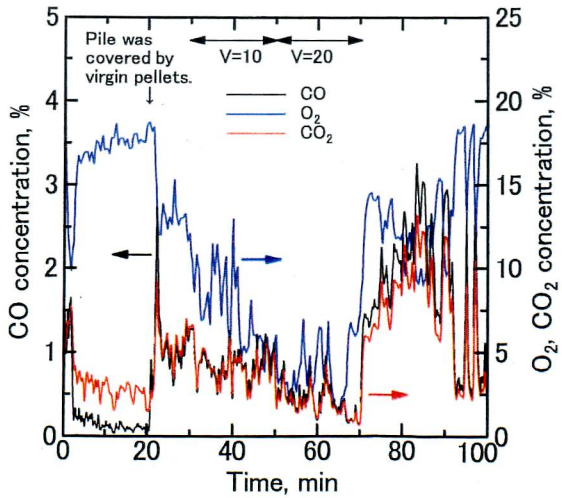


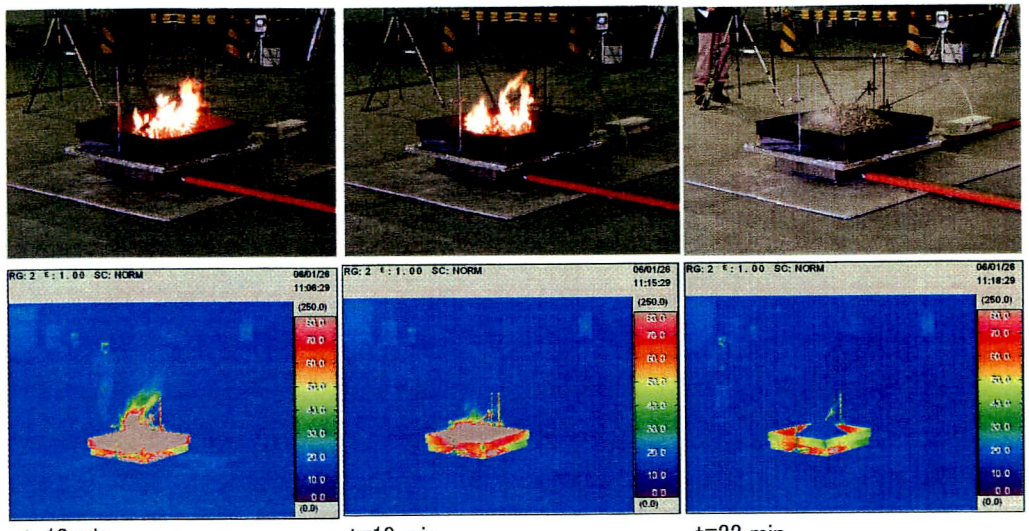
t=1 min
t=2 min
t=3 min
t=4 min
t=5 min
t=6 min
t=7 min
t=8 min
t=9 min


Pile was covered by virgin pellets.
V=10
V=20
Weight, kg
Weight loss rate, kg/min
Weight
Weight loss rate
Time, min

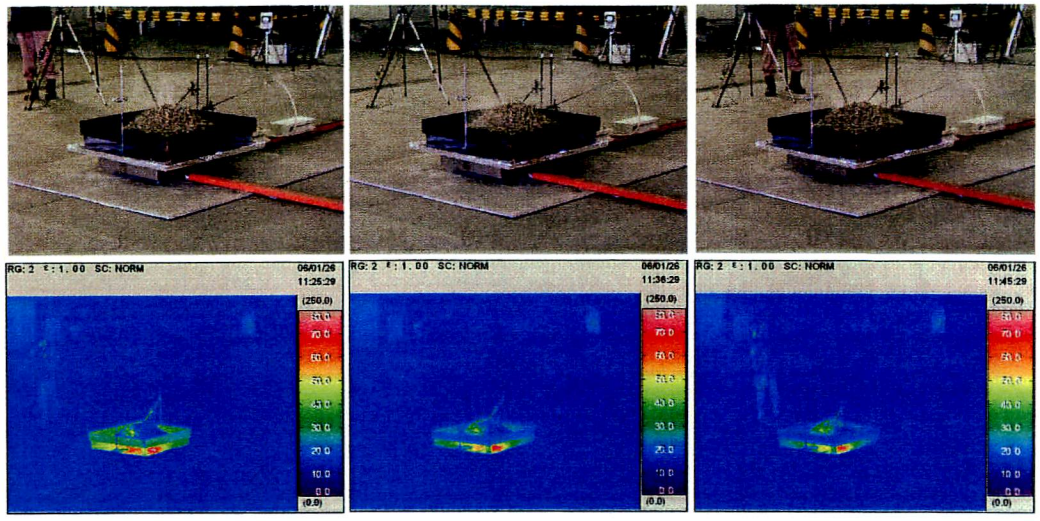

Pile was covered by virgin pellets.
V=10
V=20
Weight, kg
Heat release rate, MW
Weight
Heat release rate
Time, min


Pile was covered by virgin pellets.
V=10
V=20
170 mm above the bottom
120 mm above the bottom
90 mm above the bottom
50 mm above the bottom
Temperature, °C
Time, min

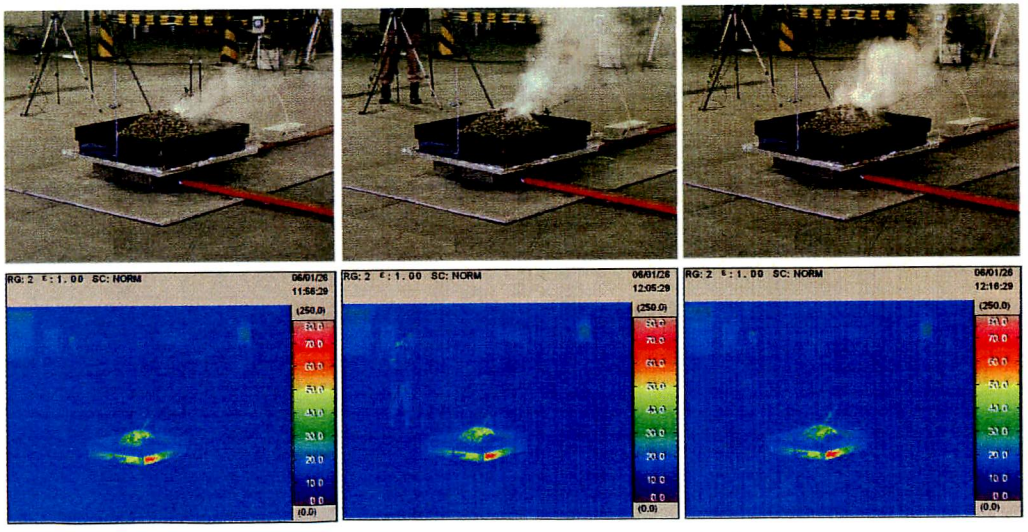

Pile was covered by virgin pellets.
V=10
V=20
CO
O_2
CO_2
CO concentration, %
O_2, CO_2 concentration, %
Time, min



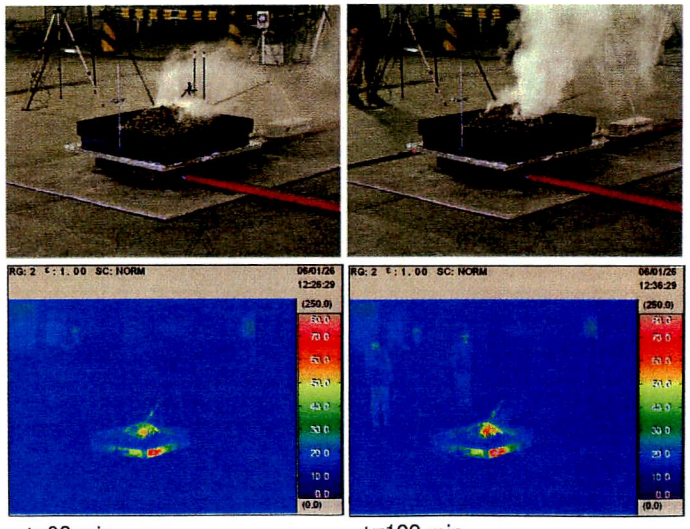
t=10 min t=19 min t=22 min



t=29 min t=40 min t=49 min

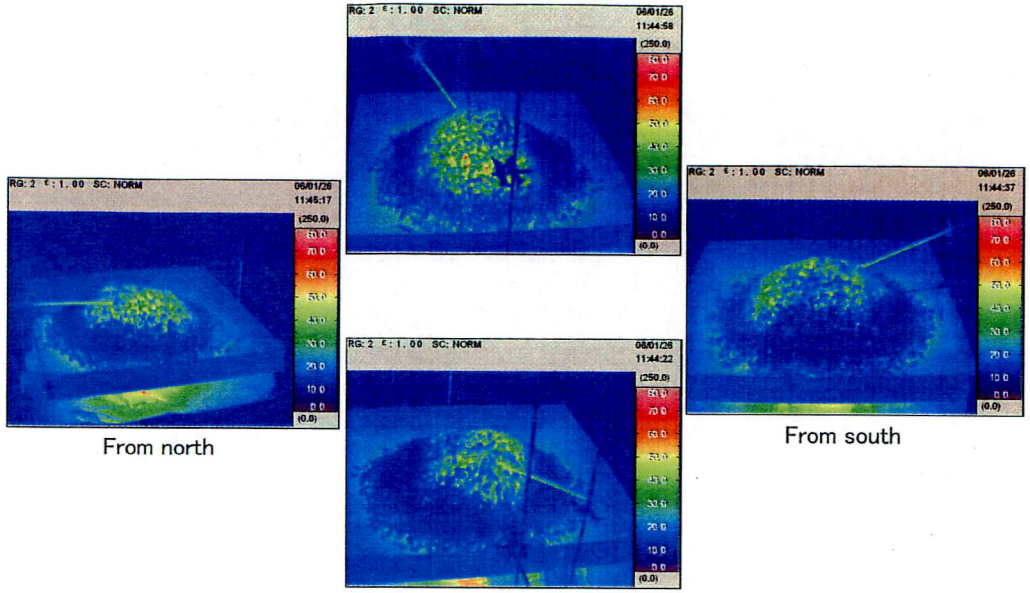


t=60 min t=69 min t=80 min

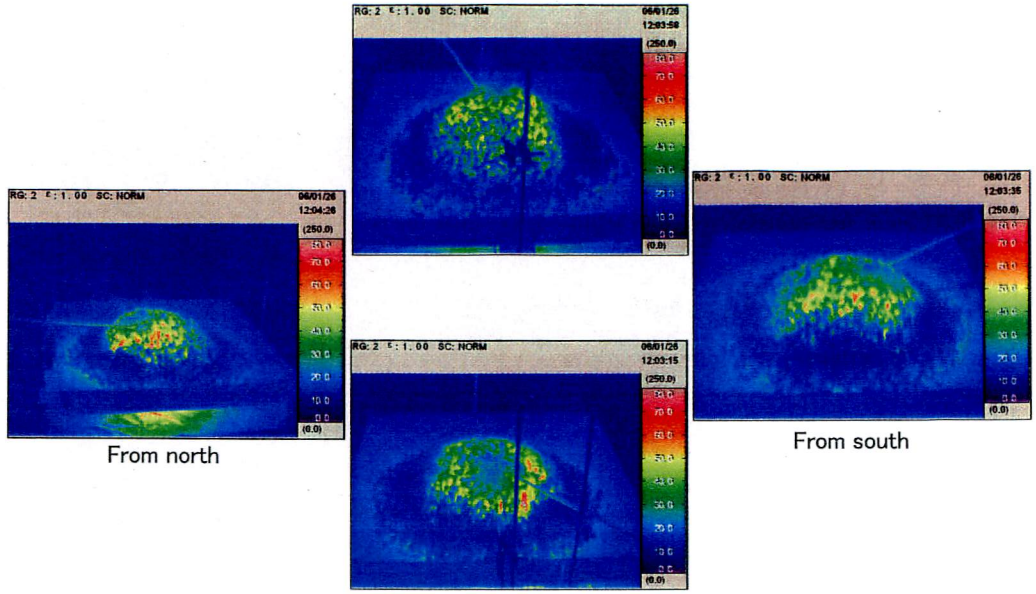


t=90 min t=100 min

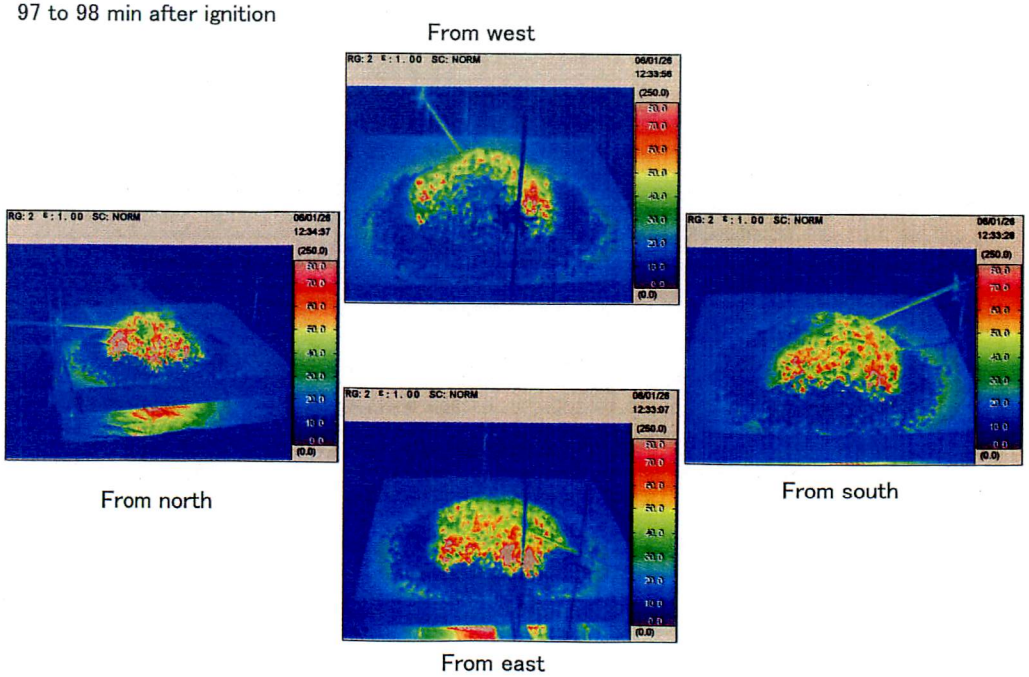
48 min after ignition



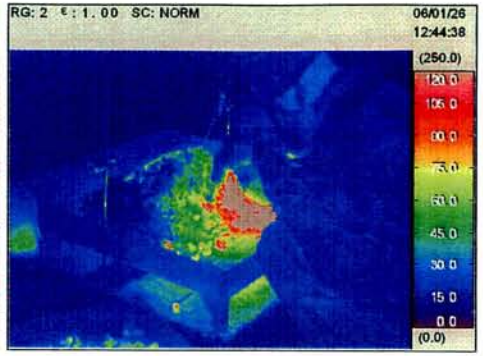
67 to 68 min after ignition



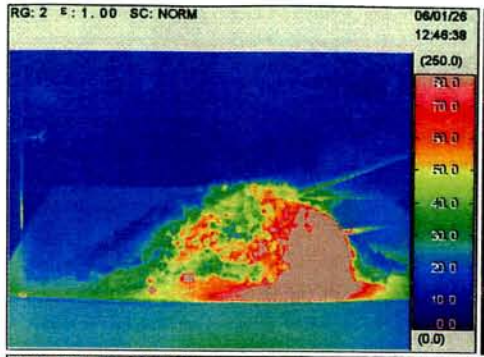
97 to 98 min after ignition

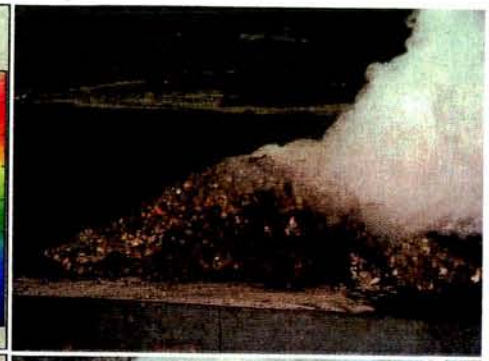


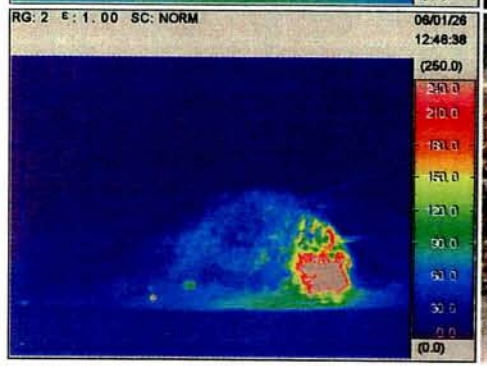
A torch flame was made approach to area from which a lot of smoke was generated.
A flame was stabilized over the area.



The pile was cut open to reveal the cross sectional area.







11_704

目的
燃焼部の外側から、不活性気体を供給し、燃焼を抑制する
最初の山の頂点より少し上に管を設置
空気の供給を遮断ができなさそうなので、燃焼を抑制できないことを示す

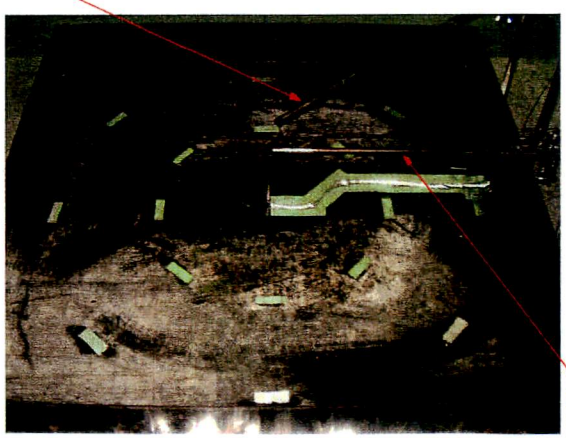
方法
RDFの山(5 kg)にヘプタンをかけて着火する
ヘプタンが消費され、RDFのみの有炎燃焼になるのを待つ
点火から20分後に、RDF(15 kg)で覆い、消炎させる
点火から30分後に、内部に窒素を供給する、流量10 リットル/分
点火から50分後に、窒素流量を20 リットル/分に増加
点火から70分後まで窒素を供給する
点火から100分経過するまで観察する

点火　14:45:23(サーマルカメラ)

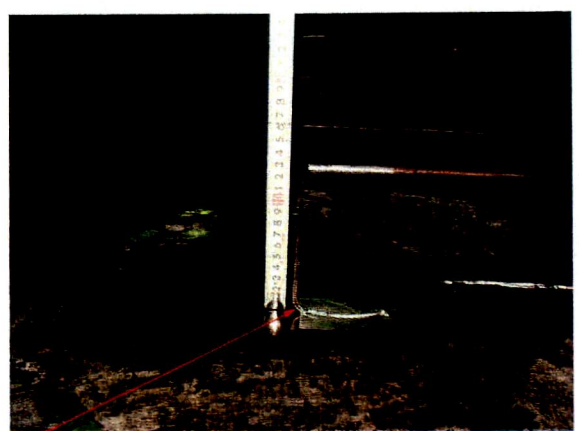
点火　全体が火に包まれる
1分　火炎が山を覆う、パンのコーナーにも火炎がある
2分　火炎が山を覆う
5分30　山の表面のごく一部が炭化している
8分　表面の一部が灰化、山全体が火に包まれている
14:57　山裾近くではペレットの隙間から火が出ている
12分　表面の灰化が進んでいる、ほぼ全体が灰色になっている
16分　裾近くの火に包まれていない部分からは時々煙が出ている
15:08　火は見えない、山の一部から煙が出ている
29分30　山頂に周囲より高温の部分がある
15:19 山頂近くに高温の部分がある、山頂近くから白煙が出ている
15:23　山頂近くの高温の部分が拡大
43分　山頂近くが高温になっているのが見える、主に山頂近くから白煙が出ている
48分　山頂近くの温度が周囲よりも高い、山頂の観測室寄りに温度の高い部分がある
54分　山頂の観測室寄りに温度の高い部分があり、そこから白煙が盛んに出ている
63分　山頂の観測室寄りに温度の高い部分があり、そこから白煙が盛んに出ている
68分　山頂の観測室寄りに温度の高い部分がある、山頂の温度はそこより少し低い
70分　窒素供給を止める
78分　山頂の観測室寄りから温度の高い部分が尾根のように伸びている、そこから白煙が盛んに出ている
83分　白煙の発生量が増えたように感じた
91分　煙が濃くなった
98分　山頂の観測室寄りから温度の高い部分が尾根のように伸びている、そこから濃い白煙が出ている

山を割った
山の外側のペレットを取り除いたら、自然に着火した
はじめの山の表面に相当する部分は炭化していた、新しい山の斜面の下に高温の部分があった

Sampling probe
SUS
Inner diameter: 8 mm
Outer diameter: 10 mm
Exit: 0 cm from the centre, 19 cm from the bottom



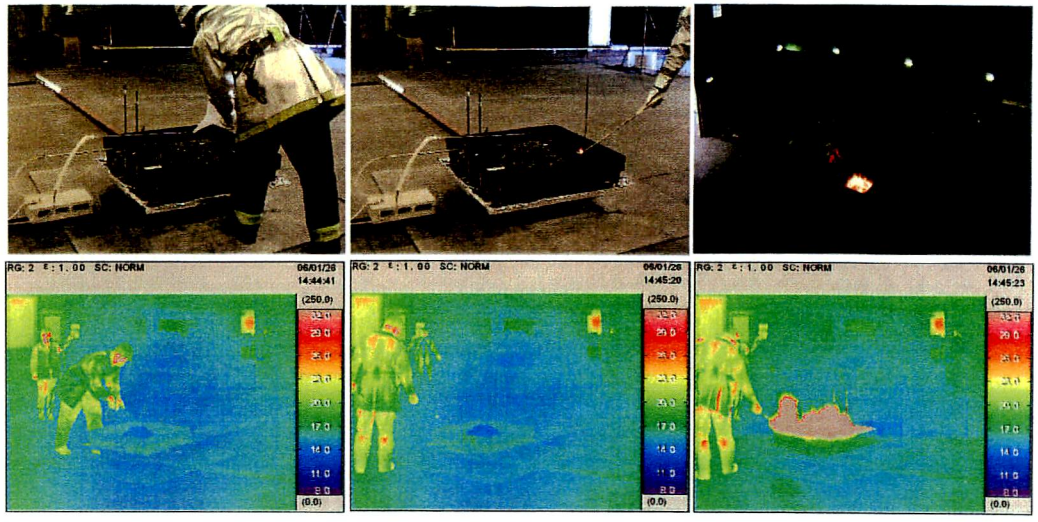
Probe for nitrogen injection
SUS
Inner diameter: 8 mm
Outer diameter: 10 mm
Exit: 0 cm from the centre, 14 cm from the bottom



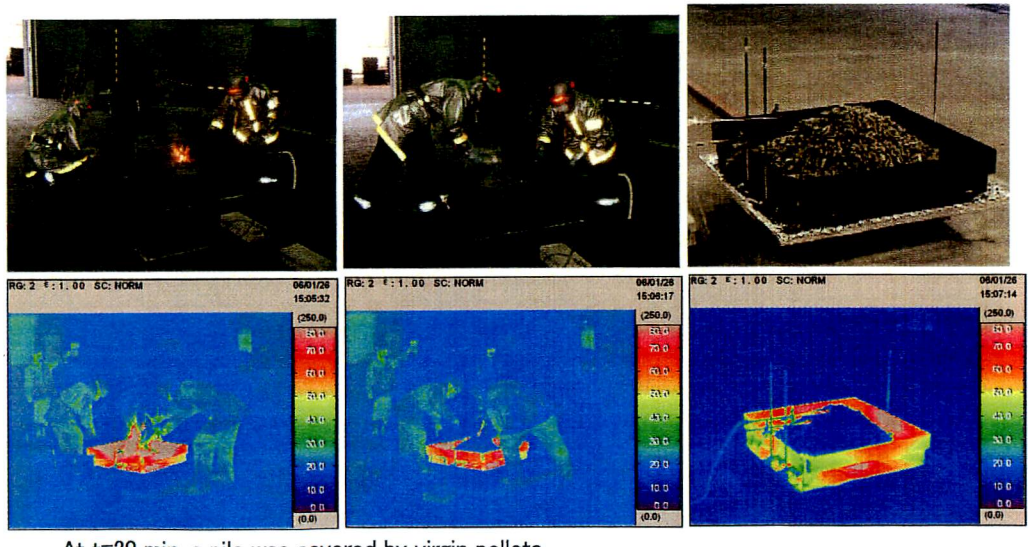
Thermocouples

Junctions are located at 50 mm, 90 mm, 120 mm, and 170 mm above the bottom.

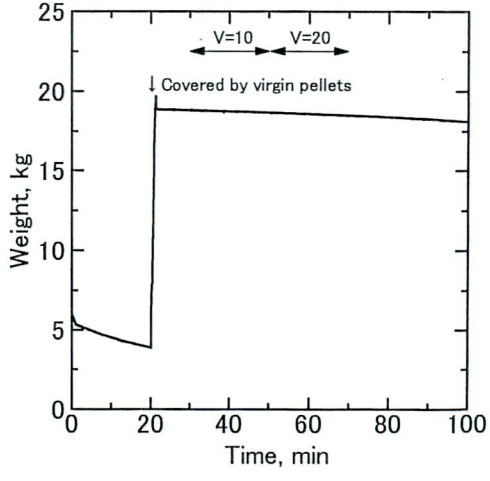
RDF pellets (5 kg) are loaded on a tray.
Pile geometry: radius: 20 cm, height: 12 cm

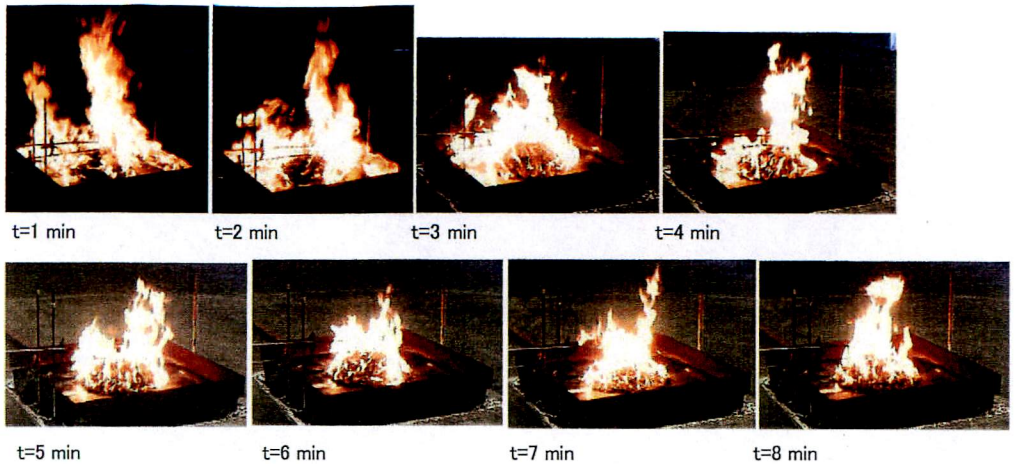


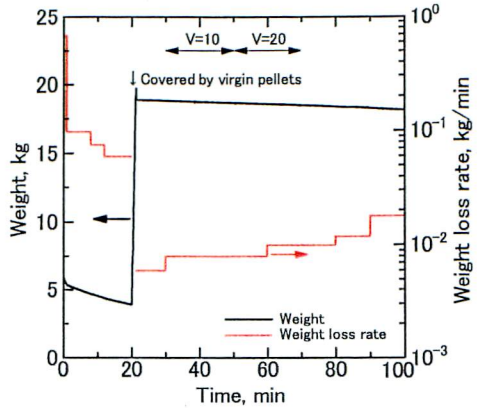
Heptane was poured over the pile surface and was ignited by a torch flame.

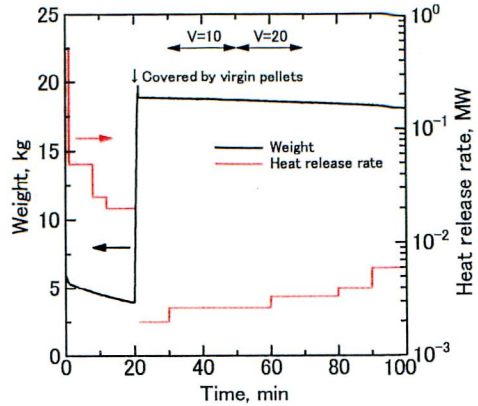


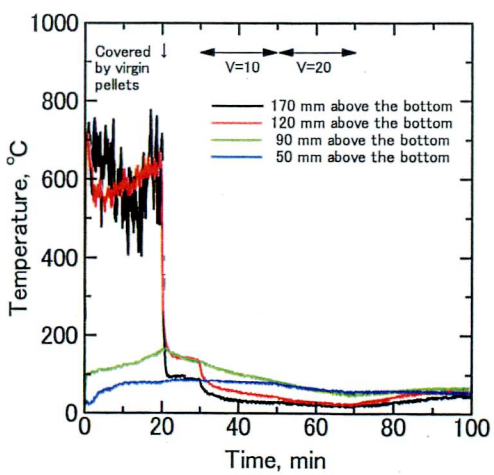
At t=20 min, a pile was covered by virgin pellets.

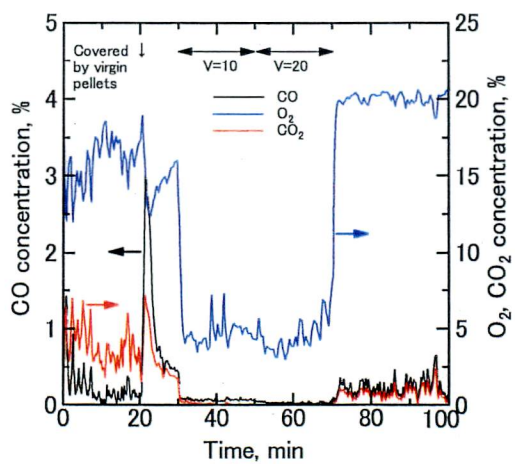


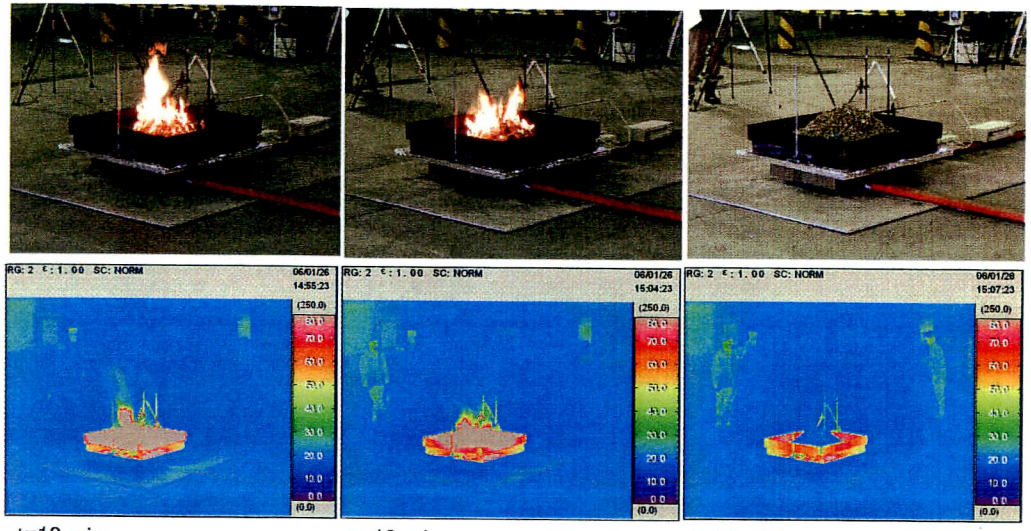

t=1 min
t=2 min
t=3 min
t=4 min
t=5 min
t=6 min
t=7 min
t=8 min


V=10
V=20
Covered by virgin pellets
Weight, kg
Weight loss rate, kg/min
Weight
Weight loss rate
Time, min

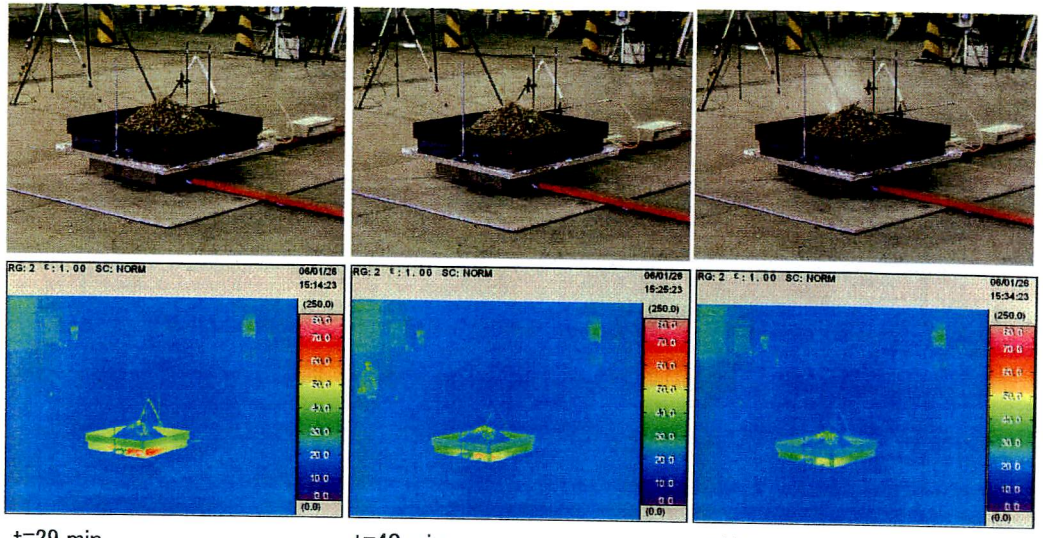

V=10
V=20
Covered by virgin pellets
Weight, kg
Heat release rate, MW
Weight
Heat release rate
Time, min


Covered by virgin pellets
V=10
V=20
170 mm above the bottom
120 mm above the bottom
90 mm above the bottom
50 mm above the bottom
Temperature, °C
Time, min

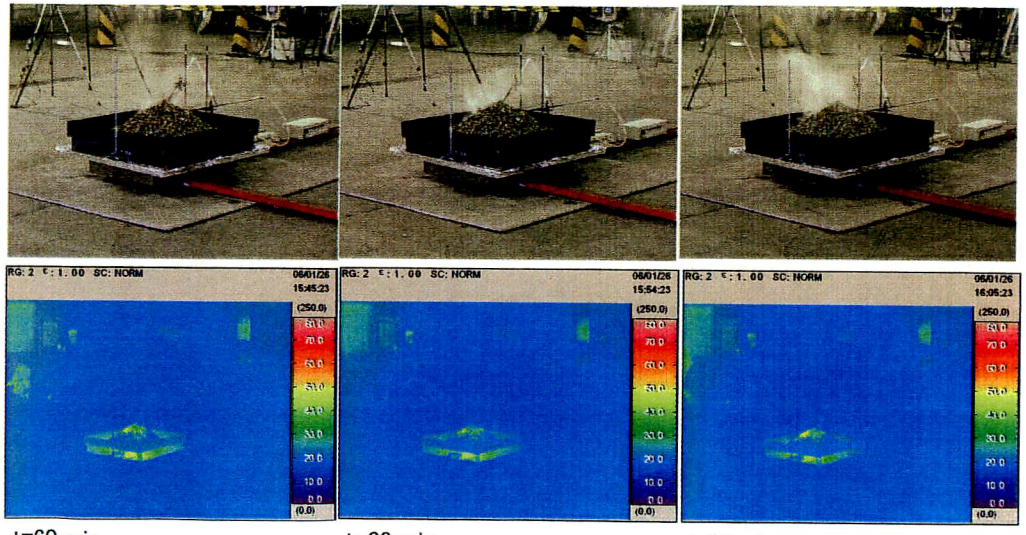

Covered by virgin pellets
V=10
V=20
CO
O_2
CO_2
CO concentration, %
O_2, CO_2 concentration, %
Time, min



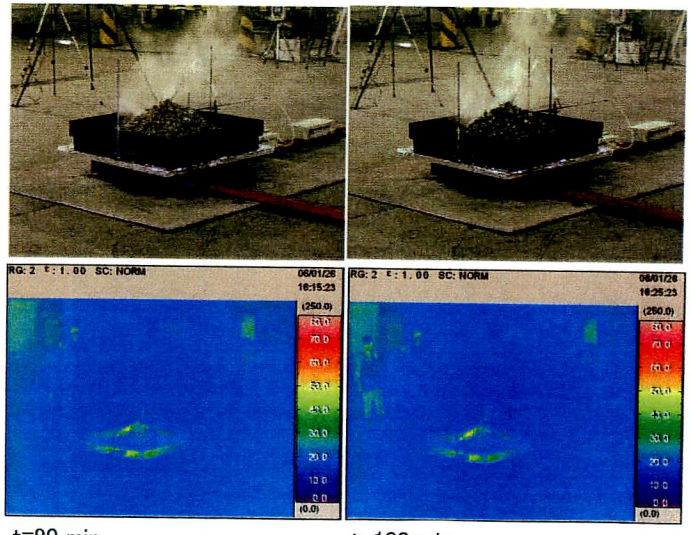
t=10 min t=19 min t=22 min



t=29 min t=40 min t=49 min

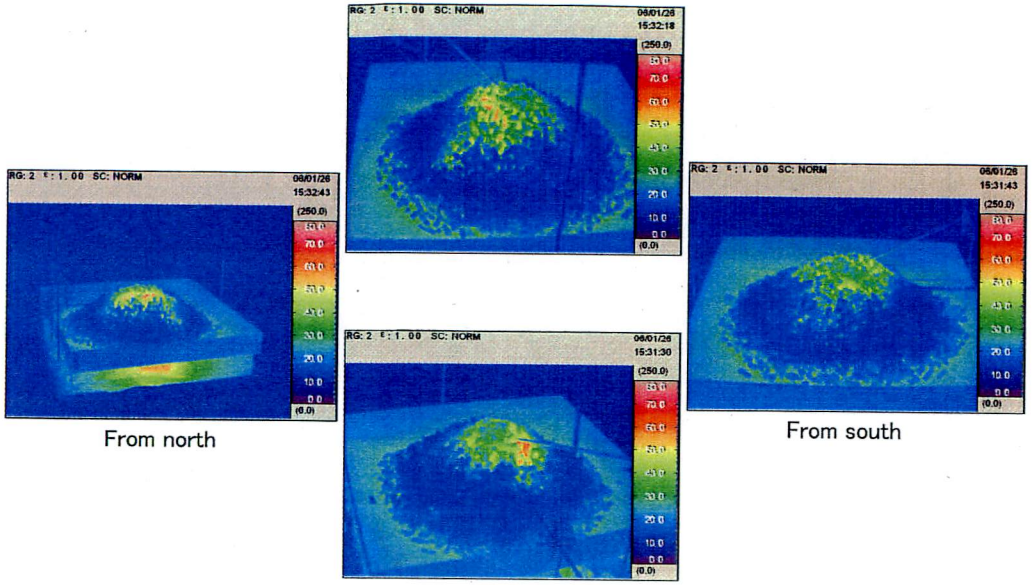


t=60 min t=69 min t=80 min

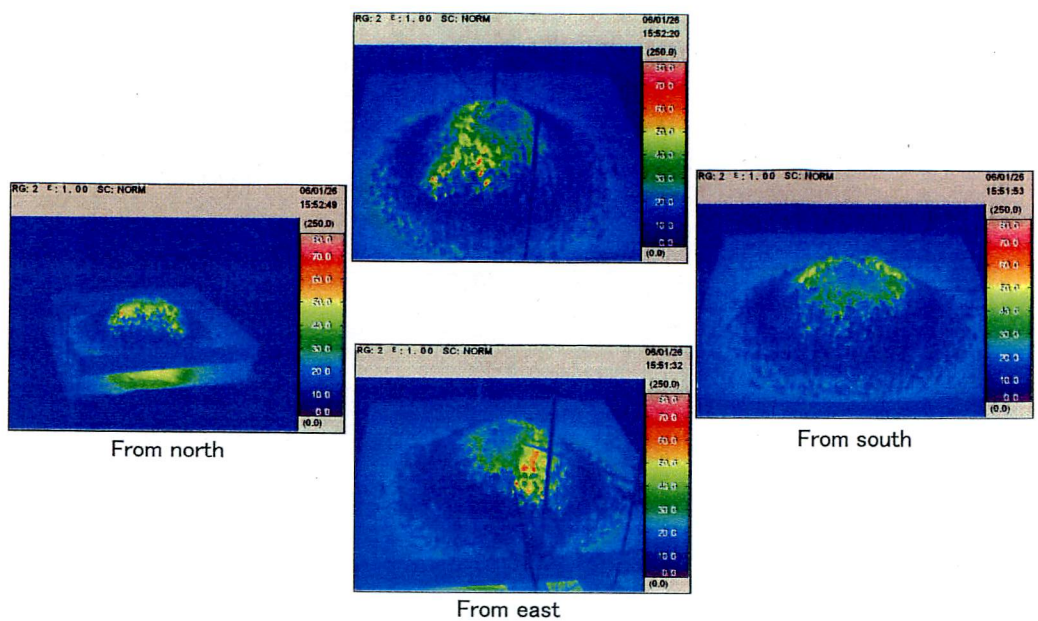


t=90 min t=100 min

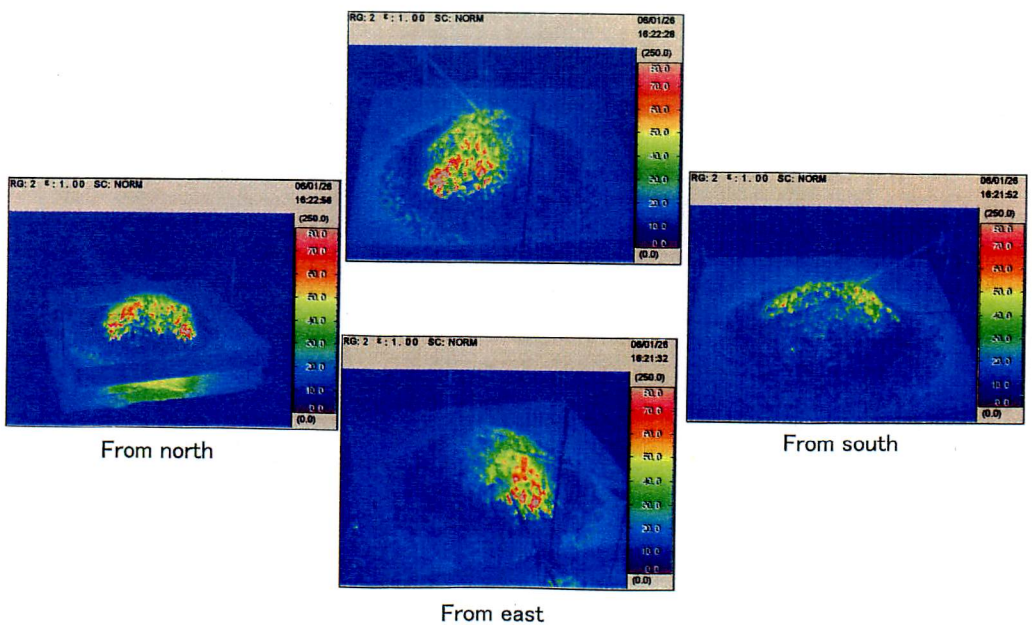
46 to 47 min after ignition

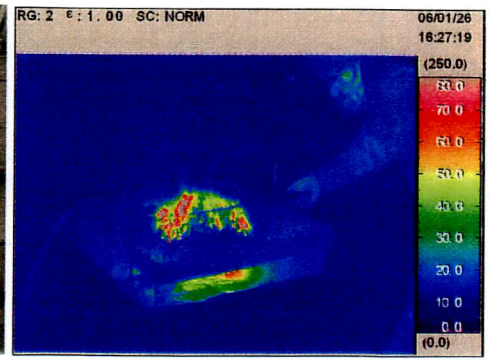


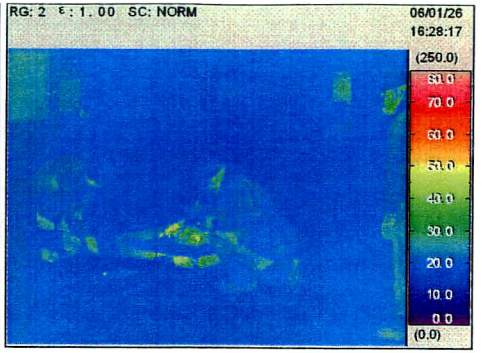
66 to 67 min after ignition



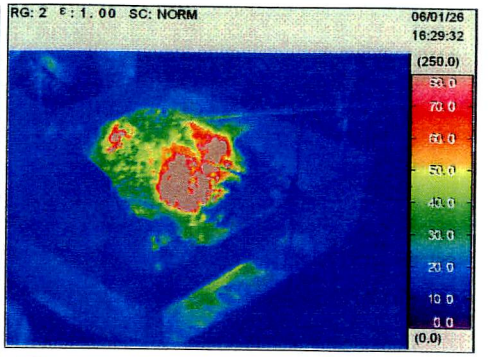
96 to 97 min after ignition



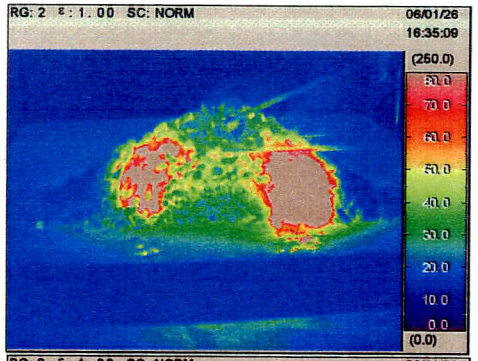


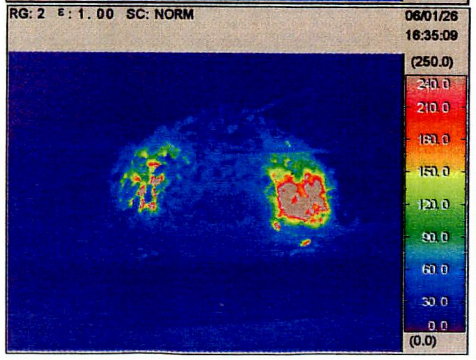


The pile was cut open to reveal cross sectional area for inspection.



A flame was formed.





11_705

目的
前回の実験と比較するため、パイプ4本を中心軸を取り囲むように設置し、窒素ガスを供給する

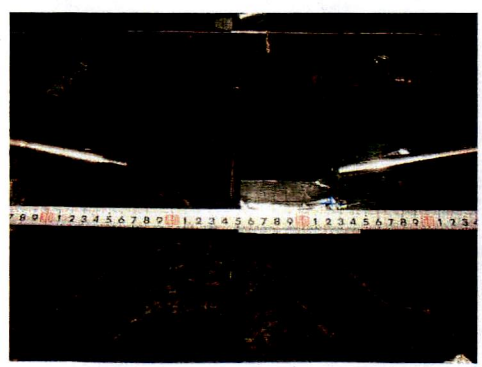
方法
RDFの山(5 kg)にヘプタンをかけて着火する
ヘプタンが消費され、RDFのみの有炎燃焼になるのを待つ
点火から20分後にRDF(15 kg)で覆い、消炎させる
点火から30分後に、内部に窒素を供給する、流量50 リットル/分
点火から90分後まで窒素を供給する
点火から120分経過するまで観察する

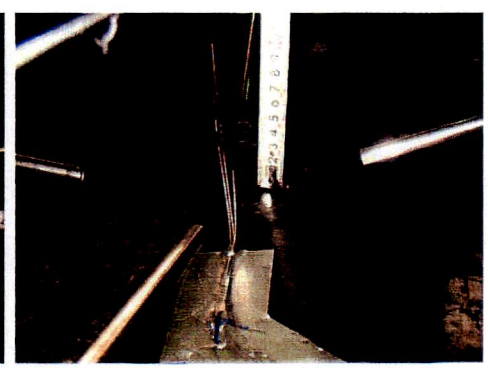
点火 10:41:57 (サーマルカメラ)

2分　山のみが火に包まれている
10分　表面の一部が炭化
11分　山裾のペレットは表面がほぼ炭化、ペレットの隙間から火が出ているように見える
18分　山裾の一部に火はない、山裾の一部から煙が出ている、表面はほぼ炭化
19分　煙が増えている、山の一部に火はない
23分　山の所々(中腹より上)から煙が出ている、山頂より少し下からは濃い煙が出ているところもある
29分　山頂近くに周囲より温度の高いところ(濃い煙も出ている)がある
35分　中腹より上全体で、温度上昇がみられる
42分　中腹より上、観測室寄り、fan側で煙が多く出ている
52分　中腹より上全体で、温度上昇がみられる
59分　中腹、観測室寄り、fan側で周囲より温度の高いところがあり、そこから煙も出ている、パイプを挿しているところの近くで高温となっている
67分　山頂から尾根状に、周囲より温度の高いところがある
74分　パイプを挿しているところの近くで高温となっている
山頂からパイプを挿したところに向かって尾根状に、周囲より温度の高いところがある
89分　山頂の周囲で全体的に温度が高くなっている
パイプを挿しているところの近くで高温となっている
103分　パイプを挿しているところの近くの高温となっている部分が拡大していて、煙の発生も増えた
110分　パイプを挿しているところの近くが黒化している
終了後　パイプを挿しているところの近くの黒化している部分に火を近づけたら、着火し、火炎が定在した
山を割り断面を露出させたところ、山の中心近くの温度は低かった
また、山の中心近くを黒化したペレットが覆っているようだった
炭化したところは割ろうとしたとき堅かった、とろうとすると固まりでとれた
黒化しところは高温となっていて、一部で赤熱していた

Sampling probe
SUS
Inner diameter: 8 mm
Outer diameter: 10 mm
Exit: 0 cm from the centre,
19 cm from the bottom

Probes for nitrogen injection
SUS
Inner diameter: 8 mm
Outer diameter: 10 mm
Exit: 7.5 cm from the centre, 5
cm from the bottom



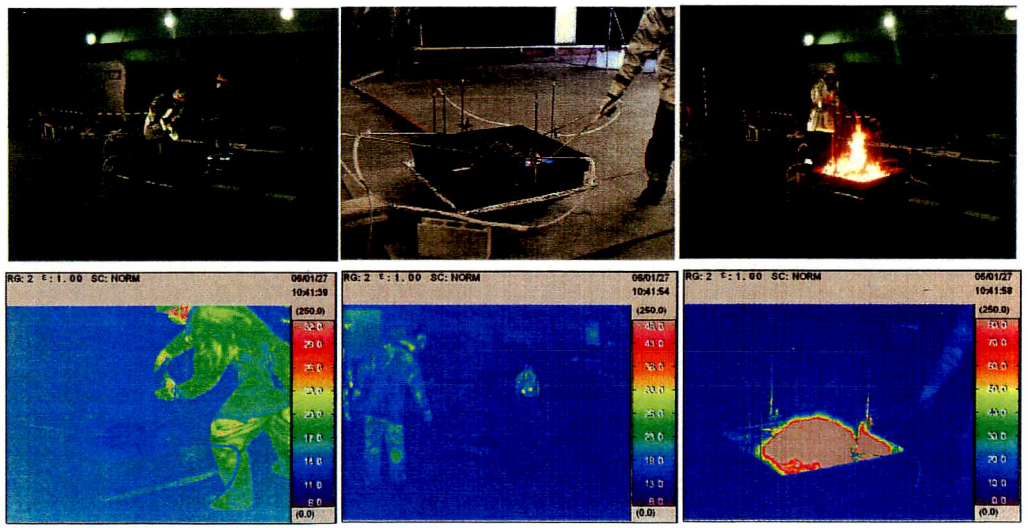


Probes for nitrogen injection
SUS
Inner diameter: 8 mm
Outer diameter: 10 mm
Exit: 7.5 cm from the centre, 5
cm from the bottom

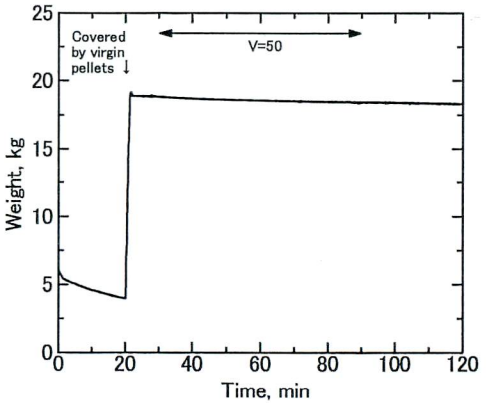
RDF pellets (5 kg) are loaded on a tray.
Pile geometry: radius: 20 cm, height: 12 cm

Thermocouples

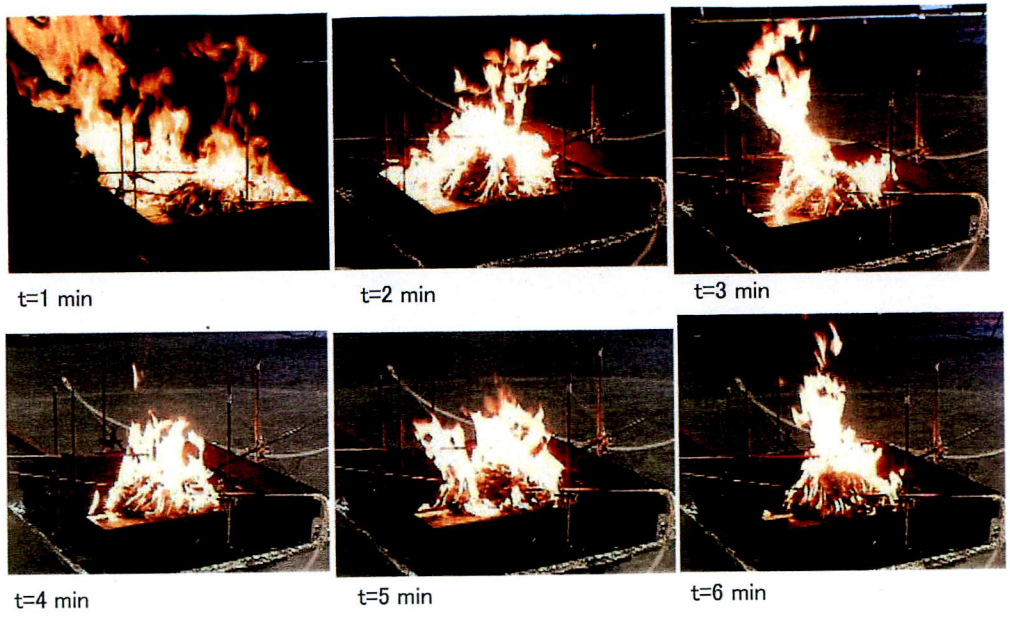
Junctions are located at 50 mm, 90 mm, 120 mm, and 170 mm above the bottom.

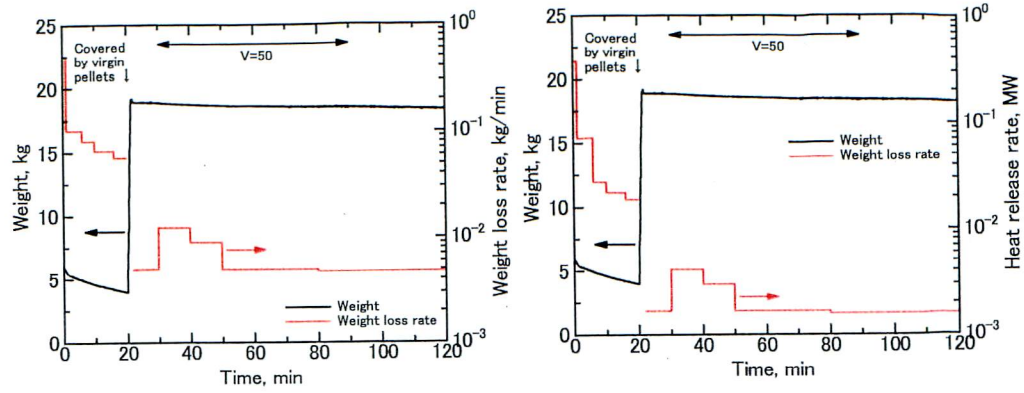


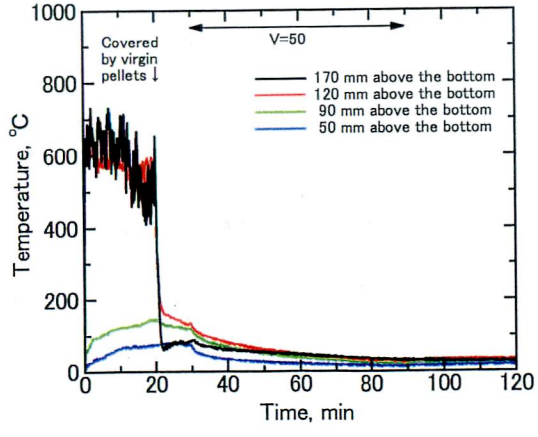
Heptane was poured over the pile surface and was ignited by a torch flame.



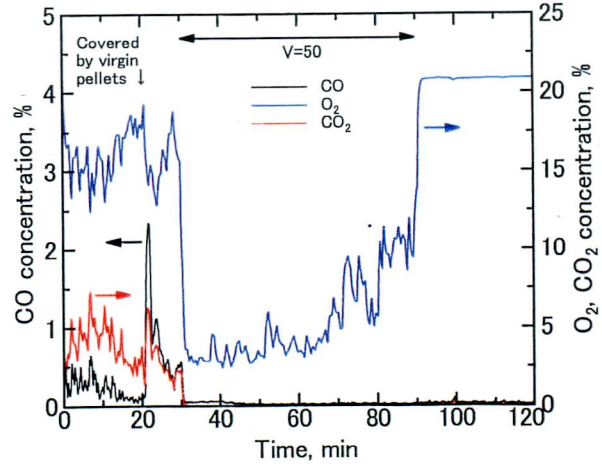
Variation of weight with time

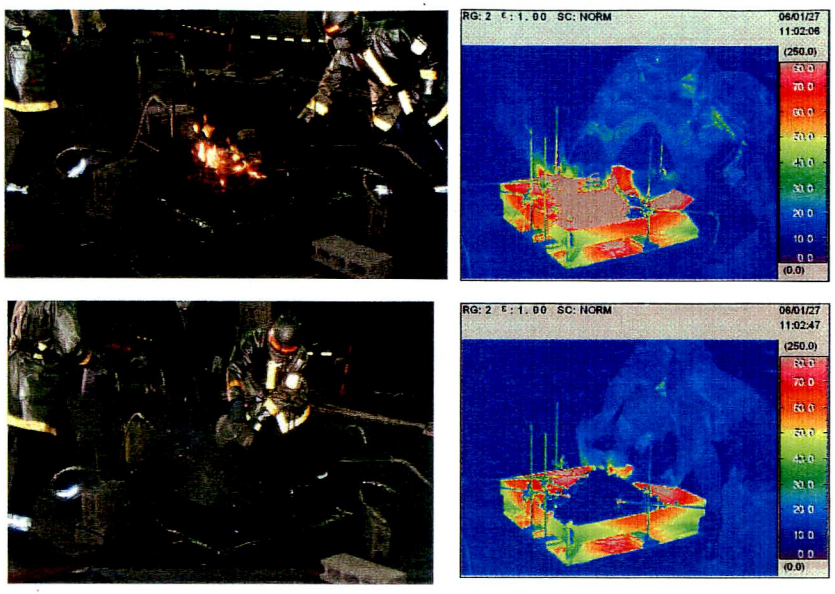




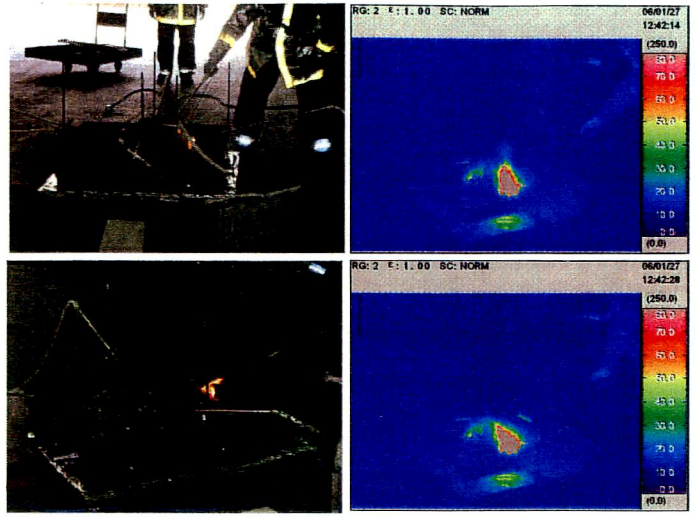


Variation of temperature with time

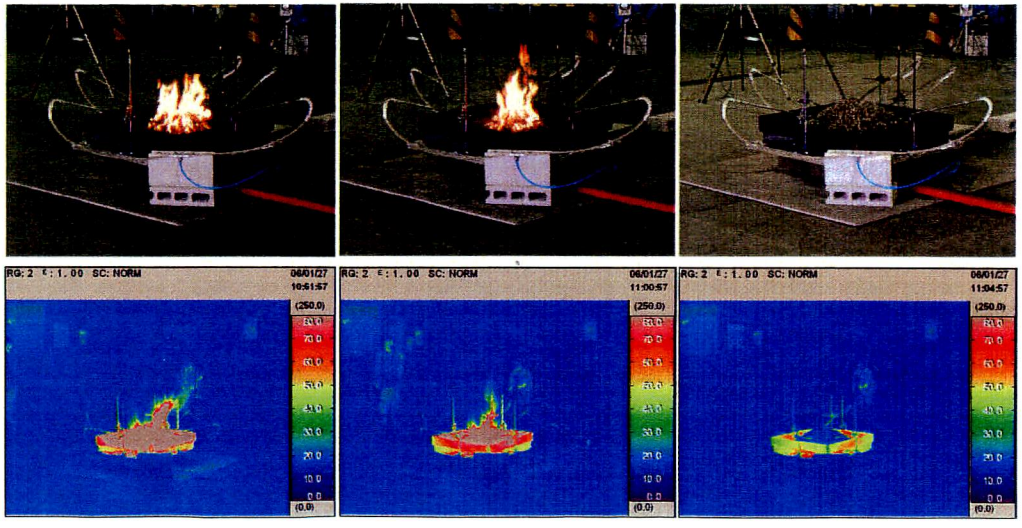




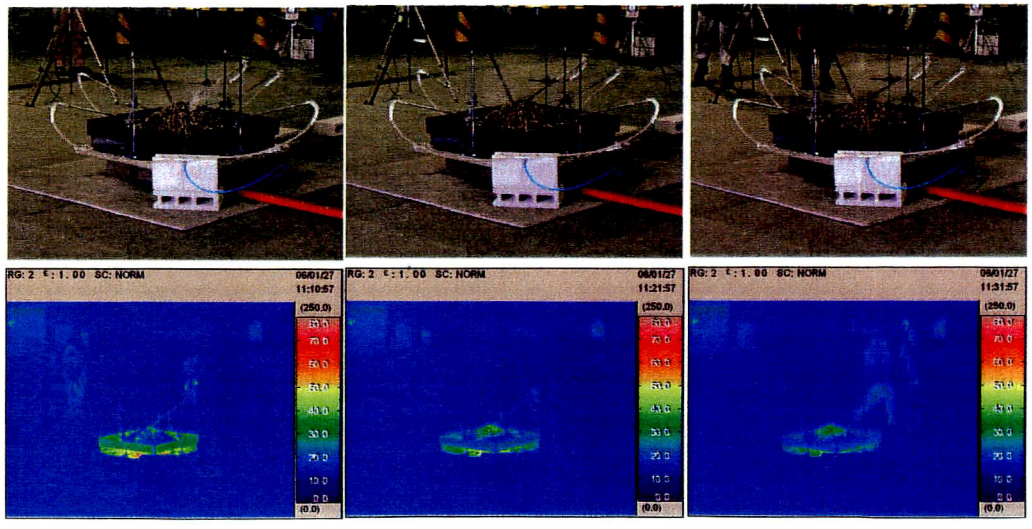
At t=20 min, a pile was covered by virgin pellets.



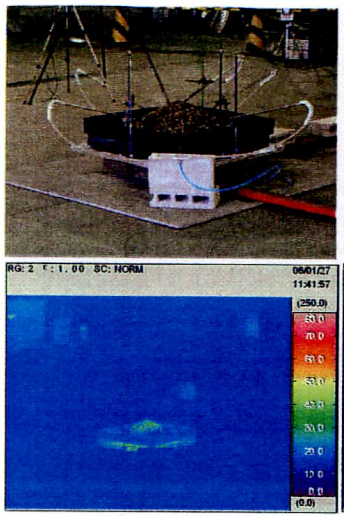
At t>120 min, a torch flame was made approach to hot area over the surface. A flame was formed over the hot area.



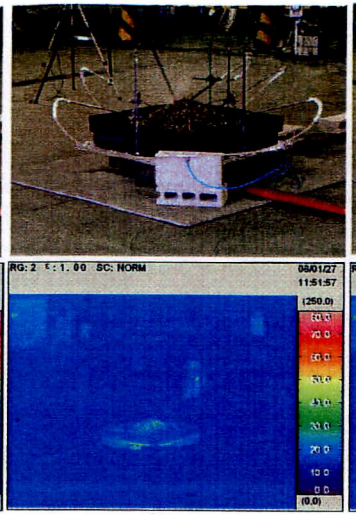
t=10 min t=19 min t=23 min



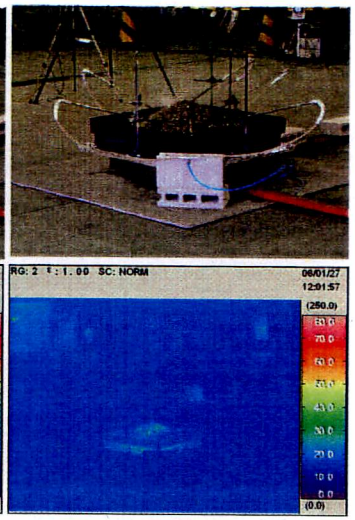
t=29 min t=40 min t=50 min



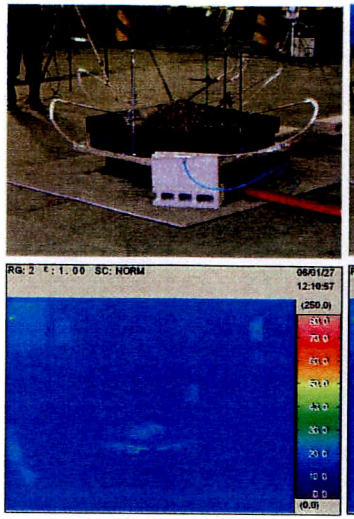
t=60 min



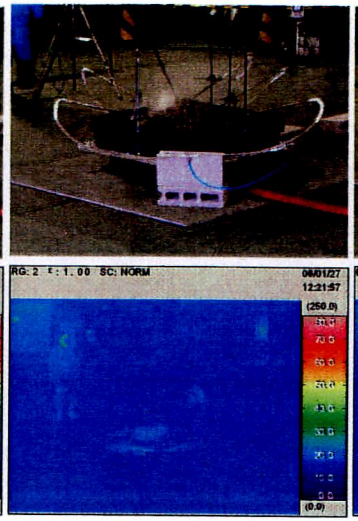
t=70 min



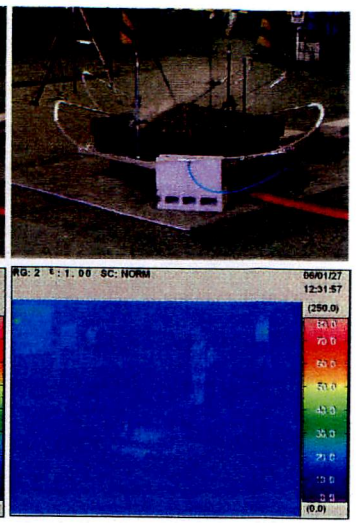
t=80 min



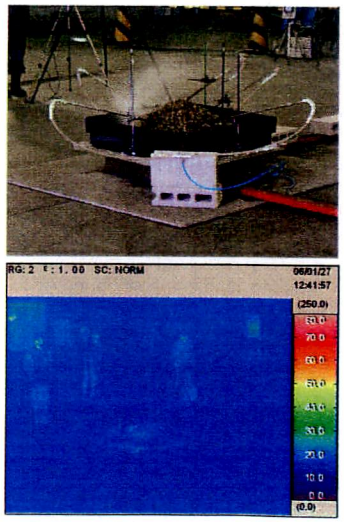
t=89 min



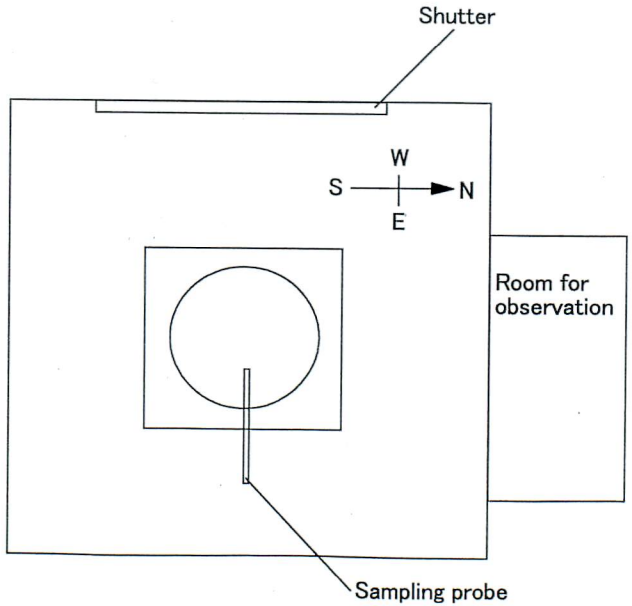
t=100 min



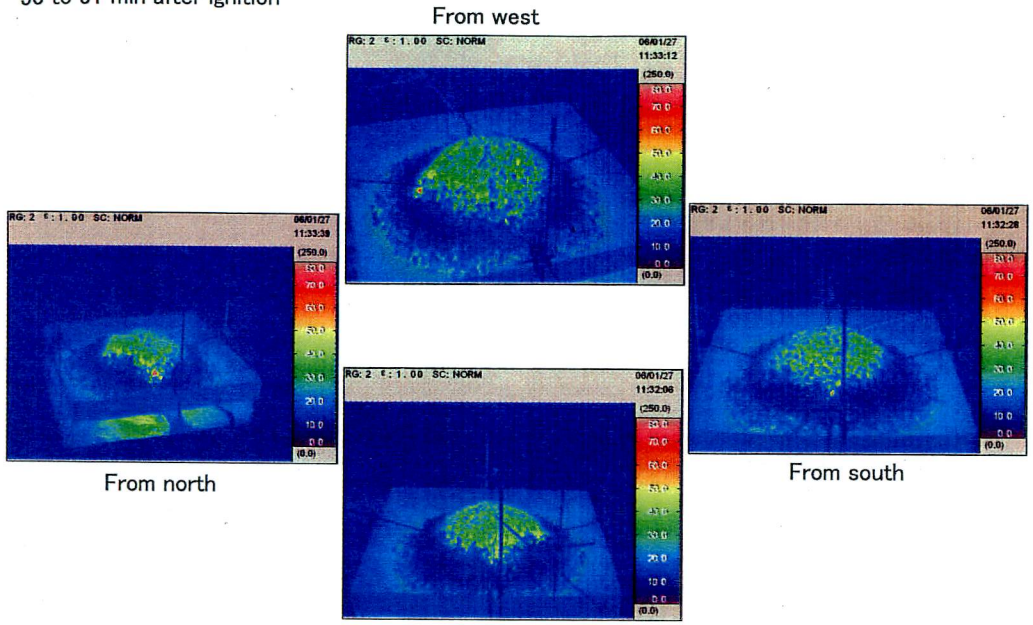
t=110 min



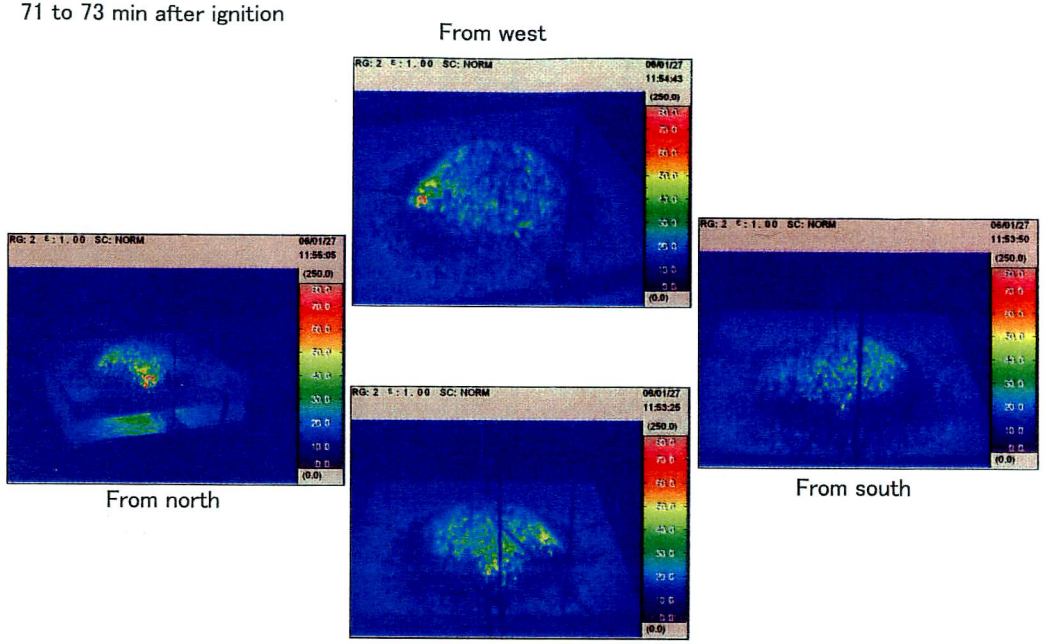
t=120 min



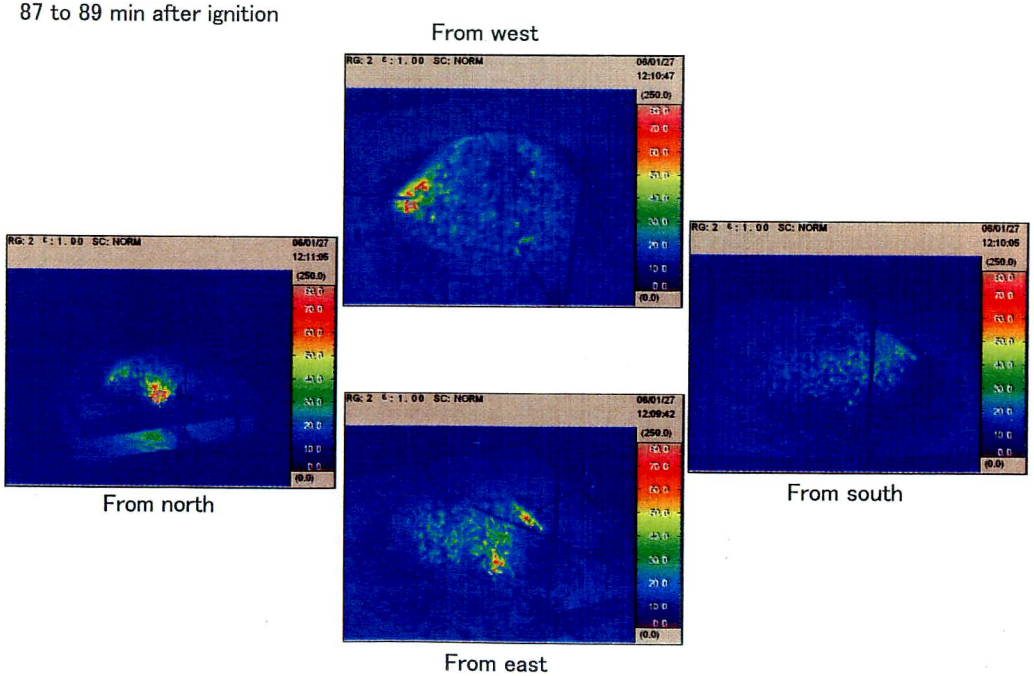
50 to 51 min after ignition



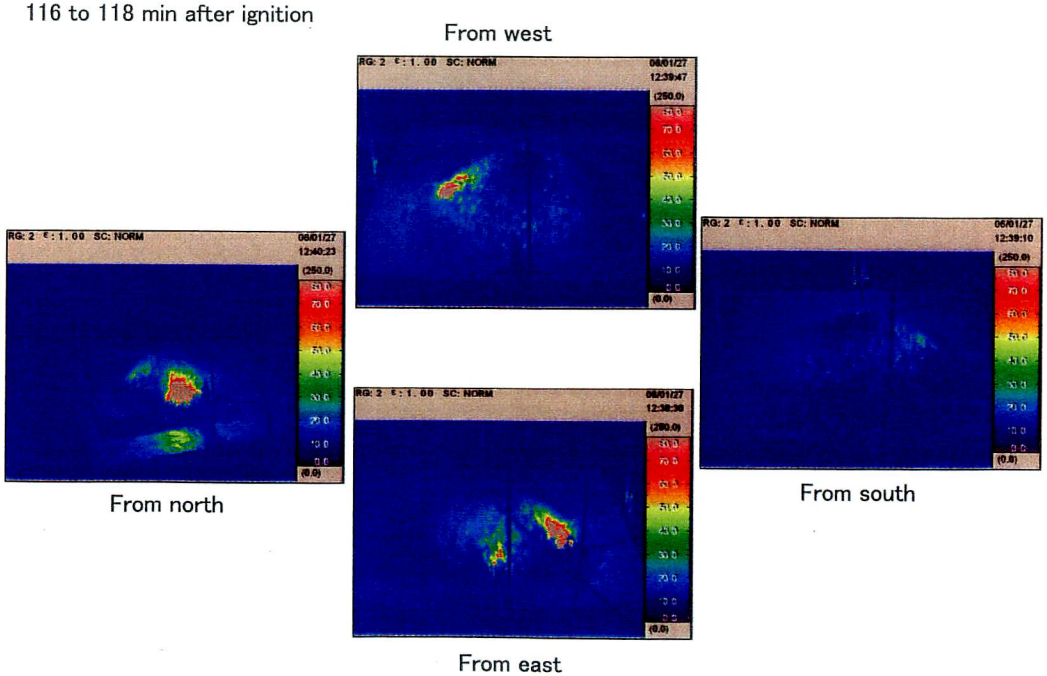
71 to 73 min after ignition

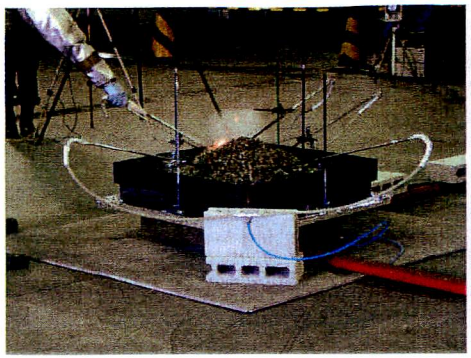


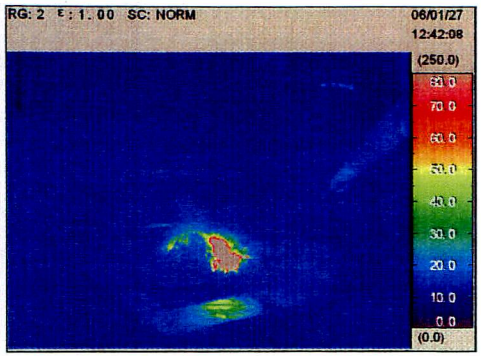
87 to 89 min after ignition



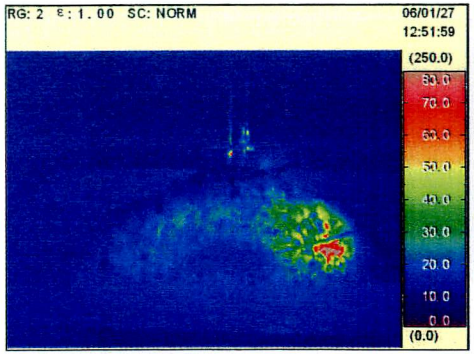
116 to 118 min after ignition

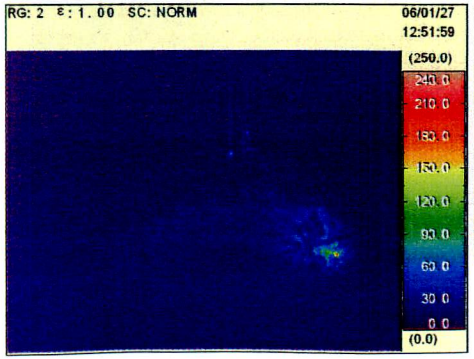


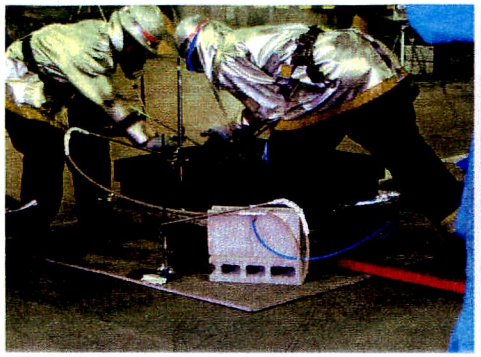


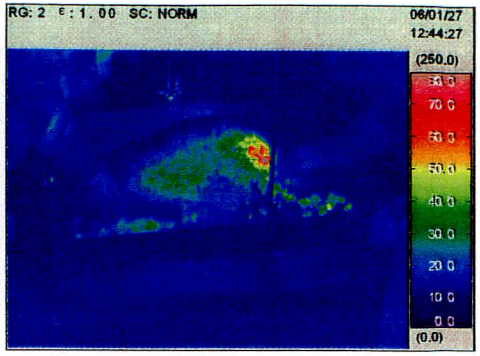


A torch flame was made approach.
A flame was formed.



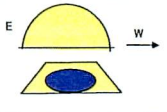
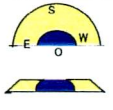


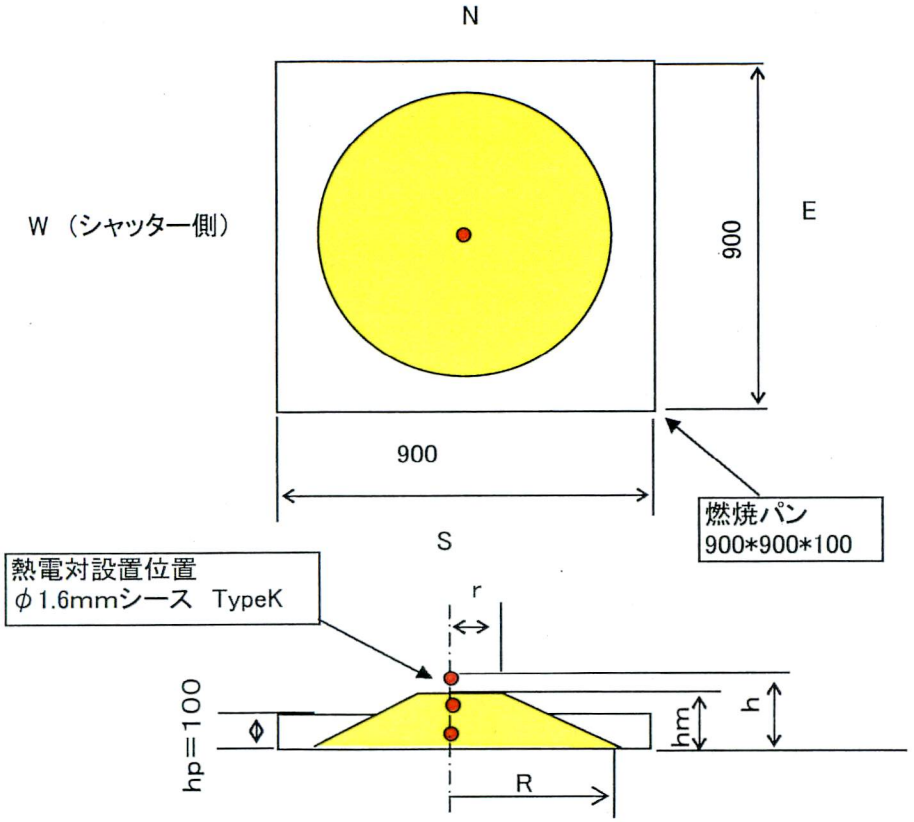


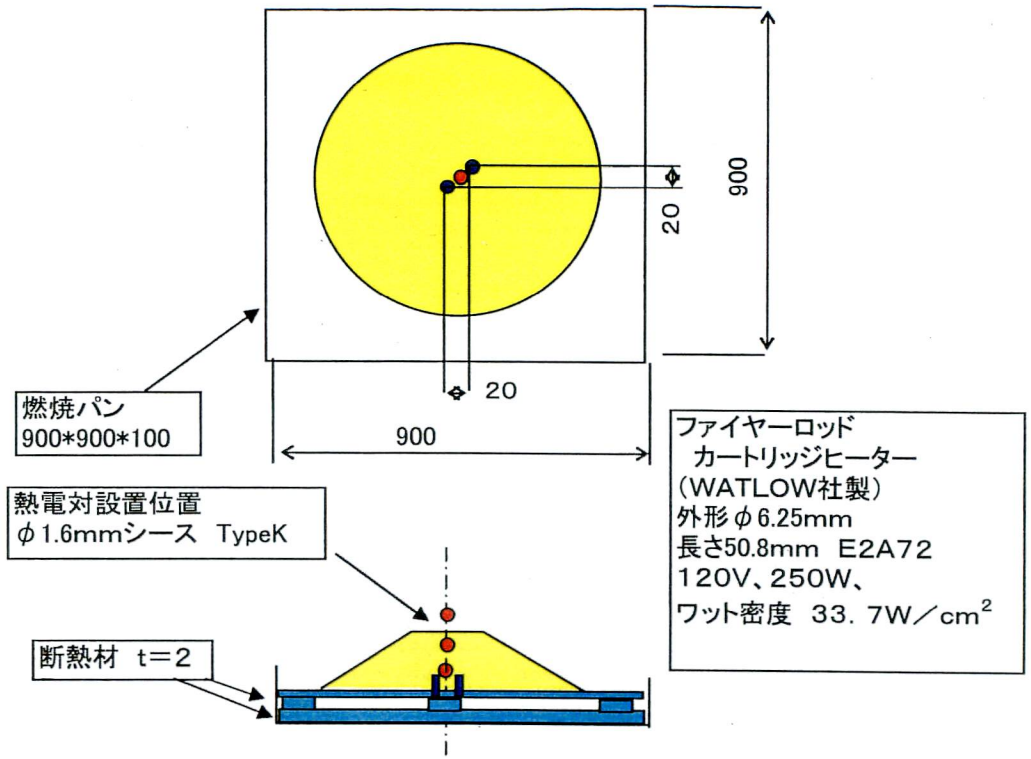


The pile was cut open to reveal cross sectional area for inspection.

表　　平成17年度　第1回（第10ターム）共同研究　実験データ概要

実験の名称	実験番号	実施日時	試験場所	使用ノズル	消火対象物	放水条件 水量 (L/min)	放水条件 空流量 (L/min)	室温 (℃)	湿度 (%)	気象	予燃時間	放水時間（着火を0分とする時刻 ）および進入時間 sec	消火判定	放水量 Qa L	流下水量 L	消火寄与水量 L	燃焼物 初期重量 (kg)	燃焼物 含水率 (%)	実験・計測状況	備考（コメント者：敬称略）
3. 廃棄物（RDF等）の燃焼と消火	10-301	2005/9/9 12:55	区画外（開放）	-	RDF 20kg 助燃ヘプタン3 L （パン900*900*100）	-	-	27.5	67	くもり	30分	N2流入管は高さ50mm、中央からr75mmの位置で4箇所とする。 RDF上にヘプタンをかける 0分：着火 30分：窒素流量　10リットル/分 50分：20　リットル/分 70分：30　リットル/分 90分：40　リットル/分 110分：0　リットル/分	①サーモカメラ　1式固定(南西)　1式移動　②温度計測位置　h=50,120,170，ガスサンプル点 ③重量計測 ④ガス分析　酸素、一酸化炭素、総炭化水素						26分　表面にかさぶたのようなものができる。火炎のあるところと無いところがある。 31分　窒素流量　10リットル/分　煙が増えた気がする 38分　窒素の効果が不明だが煙が増えている 51分　裾のあたりはペレット表面が炭化し炎はない。 55分　山の頂上付近は炎がなく温度が少し低い 55分　ガス採取管の採取口を山の頂上付近に移動 58分　炎が見えなくなる 67分　頂点付近の見かけの温度は周囲より低い 68分　2-3秒くらい火がつく 90分　表面のみかけの温度が全体的に下がる 104分　煙が減ったように感じた 120分　煙が増えたように感じた	30分　煙が少し増える？窒素のせいか 50分　煙が更に増える　53分　急に煙が増える 64分　実験場全体に煙がこもる 66分　煙が立ち上がっているように見える 68分40秒　一瞬火炎が出る 91分　煙が薄くなったように見える 100分　サーモ(移動)で見て中心が冷えてドーナッツ状で表示されている　114分 煙の出方が少し強くなった 118分　煙が濃くなった感じ
	10-302	2005/9/13 10:40	区画外（開放）	-	RDF 20kg 助燃ヘプタン3 L （パン900*900*100）	-	-	29.8	67	晴れ	30分	RDF上にヘプタンをかける 0分～30分　予燃3 30分～90分　窒素流量　50リットル/分 90分～110分　N2停止観察 110分：終了	①サーモカメラ　1式固定(南西)　1式移動　②温度計測 位置　h=50,120,170，　ガスサンプル点、室温 ③重量計測　1式 ④ガス分析　酸素、一酸化炭素、総炭化水素						20分　煙が増えてきた。表面がペレットのまま炭化 23分　頂点付近表面炭化ペレットの隙間から火が出ている 27分　ガス採集管を山の頂点付近に移動 30分　窒素流量　50リットル/分　煙が勢いよく出る 31-32分　山頂の炎がなくなり裾の煙がでている 34分　Avio　山頂の温度低下　窒素が煙を山中jから追い出す　44分　火は裾の一部のみ、全体より煙多し　50分55秒：消炎。 白煙は出続ける　85分　リング状に高温帯（山頂、裾は低温） 90分　窒素停止　：　煙の出方に勢いなし 95分　煙増える　104分　高温部の全体から煙がでる 107分17秒：自然に火がついた　（鈴木）	3分　少しグレイの煙 10分　グレイの煙増える 20分　山の周辺部が主に燃焼している 26分　部分的に燃え煙が増える 32分　N2を入れることで　炎が減って煙が増えたようだ 38分　火炎は部分的。煙が増えている　42分　煙が多い 48分　風上側のみ火炎あり 50分55秒　消炎。白煙は出続ける 74分　煙の発生が少なくなっている。TCで50℃ 84分　RDFの山の形が分かる程度に煙が薄くなった 90分　N2停止　煙の出方が悪くなるがその後改めて出始める 94分　煙が多くなる 98分　煙増加、IRで温度上昇部分あり 107分17秒　再着火 110分　終了。少量の水で火炎を消すが再燃した。（尾川）
	10-303	2005/9/13 14:30	区画外（開放）	—	RDF 20kg （パン900*900*100）	—	—	32.1	54	晴れ	30分	内部ヒータで着火 0～30分　予燃 30～50分　窒素10リットル/分 50～70分　窒素20リットル/分 70～90分　窒素30リットル/分 90～110分　窒素40リットル/分 110～120分　窒素　0リットル/分	①サーモカメラ　1式固定(南西)　1式移動　②温度計測 位置　h=50,120,170，　ガスサンプル点、室温、ヒーター温度h25 ③重量計測　1式 ④ガス分析　酸素、一酸化炭素、総炭化水素						2分50秒　ヒータ断線 14分　山頂付近の見かけ温度が高くなったように感じた 30分　窒素注入 38分　煙が薄くなった？ 62分　煙が少なくなった　山頂見かけ温度低下 72分　煙がでなくなった 84分　山頂見かけ温度低下 93分　太陽光入射を避けるためシャッターを1m弱に下げる　98分　煙がでない　110分　窒素を止める	50秒　煙出始め　1分30秒　一瞬火炎　2分35秒　一瞬火炎 2分51秒　ヒーター断線 16分　サーモで見て頂部が10℃高い　20分　内部400℃以上 32分　内部温度低下 44分　煙の出方が少なくなった。　頂部は　＋10℃ 60分　極わずかに煙がでている 64分　煙はみえない 80分　集塵機給水層異常で停止　（天秤安定） 109分　中心　50℃　115分　中心53℃
	10-304	2005/9/14 10:40	区画外（開放）	-	RDF 20kg （パン900*900*100）	—	—	30.7	66	晴れ	30分	内部ヒータで着火 0～30分　予燃 30～90分　窒素50リットル/分 90～110分　窒素停止観察	①サーモカメラ　1式固定(南西)　1式移動　②温度計測 位置　h=50,120,170，　ガスサンプル点、室温、ヒーター温度h25 ③重量計測　1式						27分　山頂付近より少しでい煙 30分　窒素　50リットル/分 38分　煙減った 44分　煙が出ていない 57分　山頂付近が蓋状になりその下の隙間から窒素が噴出している感じ。 84分　山頂付近の温度は低下している	30秒　煙が見える　1分10秒　煙が増える 3分38秒　ヒータ断線（一瞬炎が出る：h50＝506℃） 10分　内部温度上昇開始　(h50＝350℃) 30分　窒素50L/min注入開始　(h50＝423℃) 40分　(h50＝195℃)　50分　(h50＝112℃) 60分　(h50＝72℃)　70分　(h50＝53℃) 80分　(h50＝43℃)　90分　(h50＝38℃)
	10-305-1	2005/9/14 14:30	区画外（開放）	-	RDF 20kg （パン900*900*100）	—	—	32.0	63	晴れ		注入する窒素ガスでどのように冷えるかの確認　電気集塵機作動 0～15分　窒素50リットル/分	①サーモカメラ　1式固定(南西)　1式移動　②温度計測 位置　h=50,120,170，　ガスサンプル点、室温 ③重量計測　1式						山頂付近が冷えている	 底から上　5cmの位置で　冷却範囲　r=16cm
	10-305-2	2005/9/14 15:40	区画外（開放）	-	RDF 20kg （パン900*900*100）	—	—	31.8	64	晴れ	-	注入する窒素ガスでどのように冷えるかの確認　電気集塵機停止 0～15分　窒素50リットル/分	①サーモカメラ　1式固定(南西)　1式移動　②温度計測 位置　h=50,120,170，　ガスサンプル点、室温 ③重量計測　1式						山頂付近が冷えている 乾燥窒素を注入しているので、RDFの水分の気化熱による冷却が効いている。　ヒーター加熱時のほうが冷却域が広いように見えた。融けたブラが窒素の流れを変えたか？　重量減少は1g/min程度。窒素の温度は室温と同じ。	 冷却範囲は 底から上　5cmの位置で EW=31cm　OS=12cm 底から上　12cmの位置で EW=17cm　OS=10cm





試験NO.	RDF重量（kg）	試験体寸法（cm）			試験体体積(L)	計測位置
	W	h	R	r	V	初期設置
9-301,302	20	15	37.5	12.5	31.9	r=0×h=5,12,17
9-303-305	20	15	37.5	12.5	31.9	r=0×h=2.5,5,12,17

図　温度計測位置　実験番号10－300

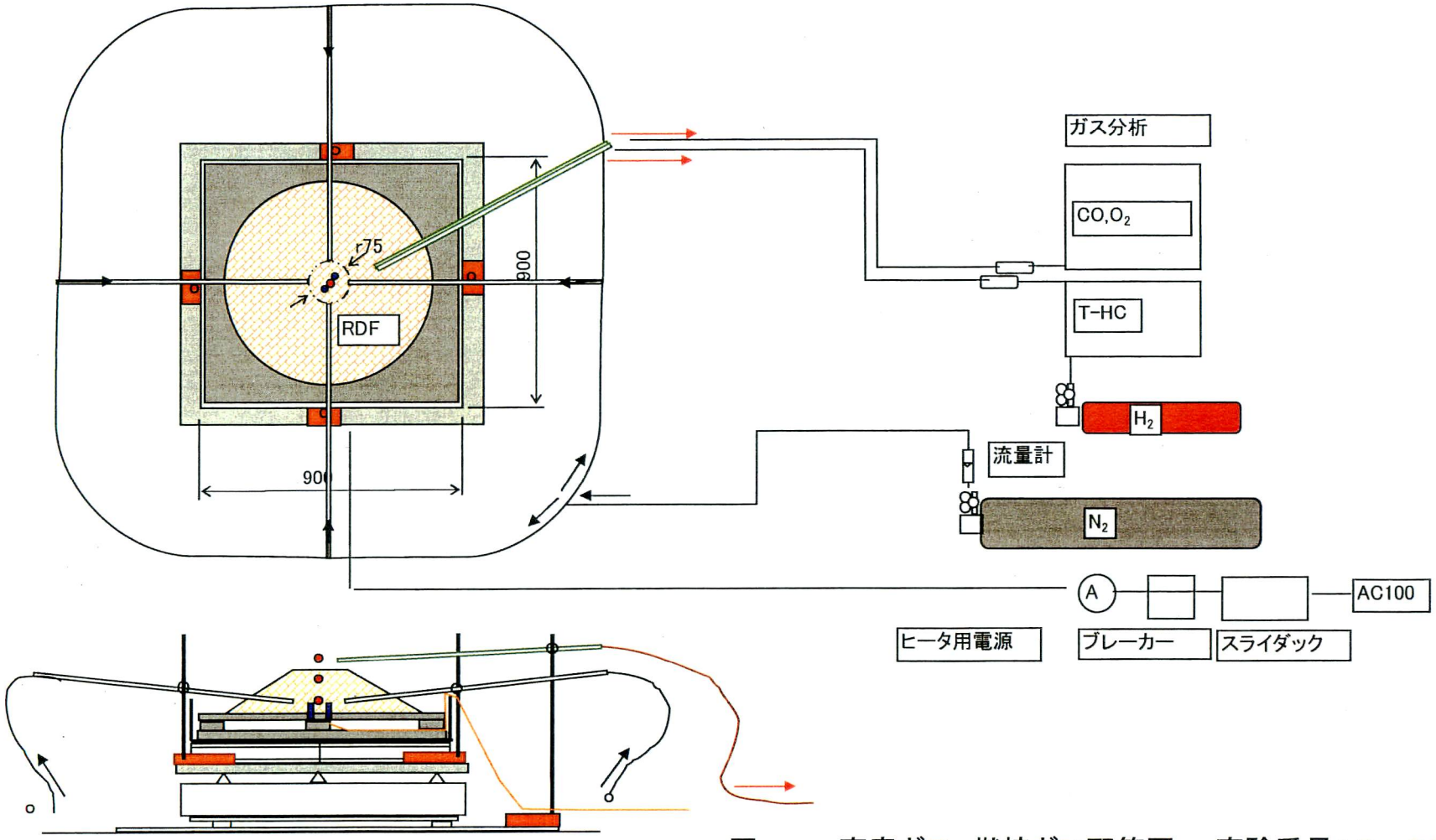


図　　窒素ガス、燃焼ガス配管図　実験番号10－300

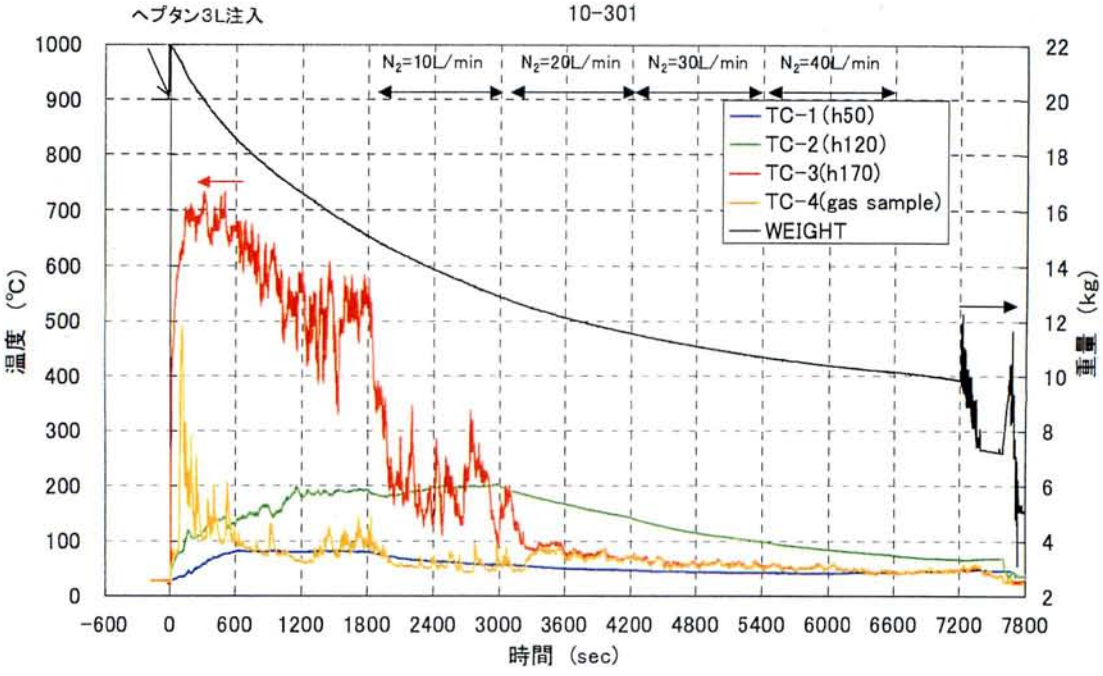


図　　温度および重量　（１０－３０１）

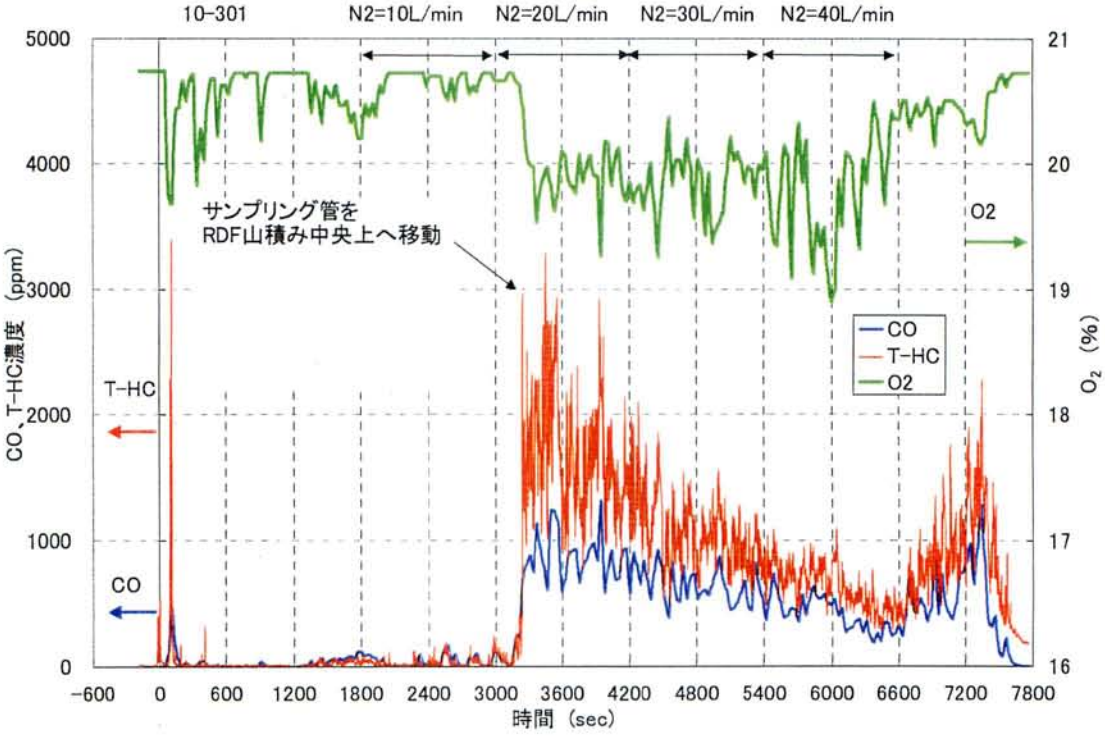


図　　燃焼ガス　　（１０－３０１）

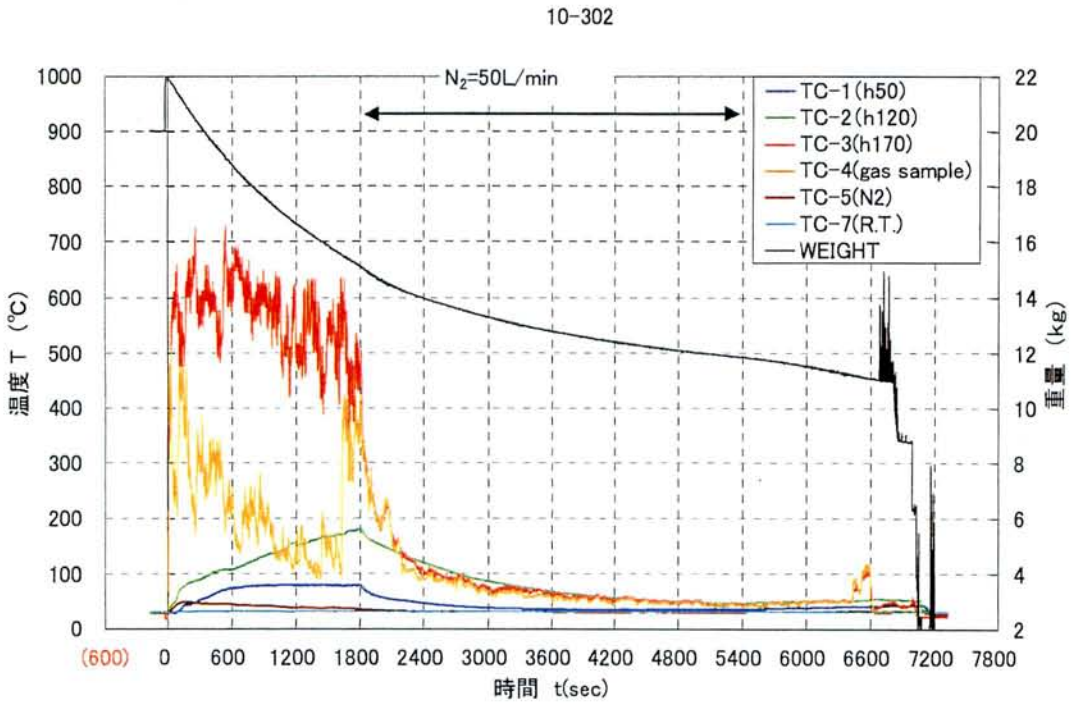


図　　温度および重量　（１０－３０２）

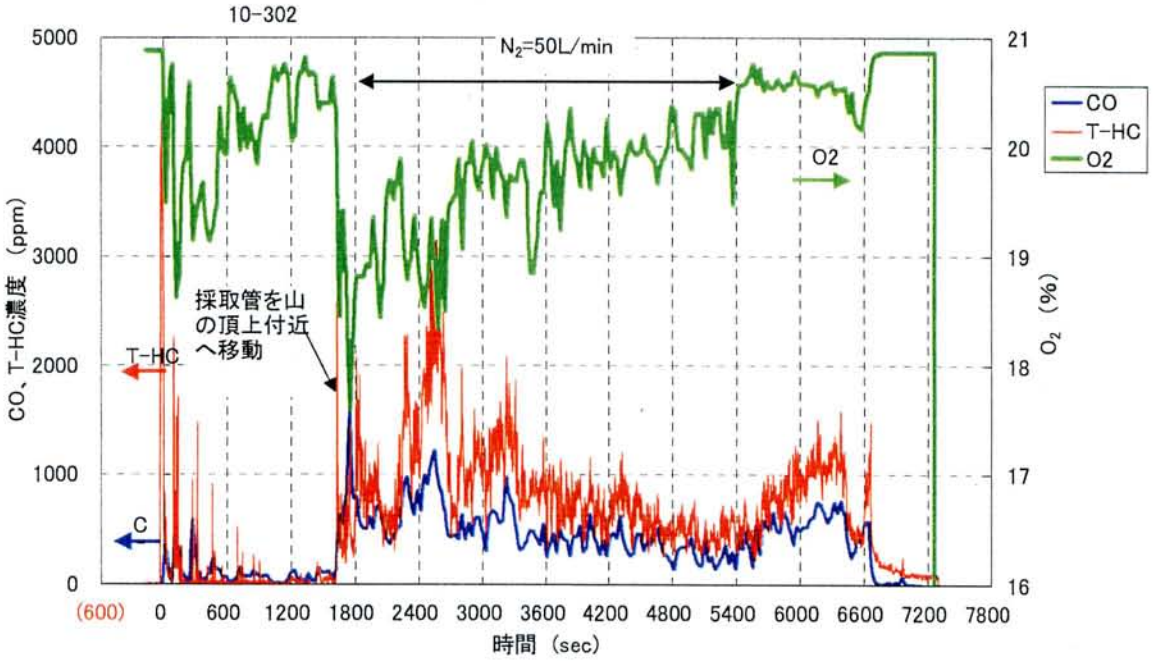


図　　燃焼ガス　　（１０－３０２）

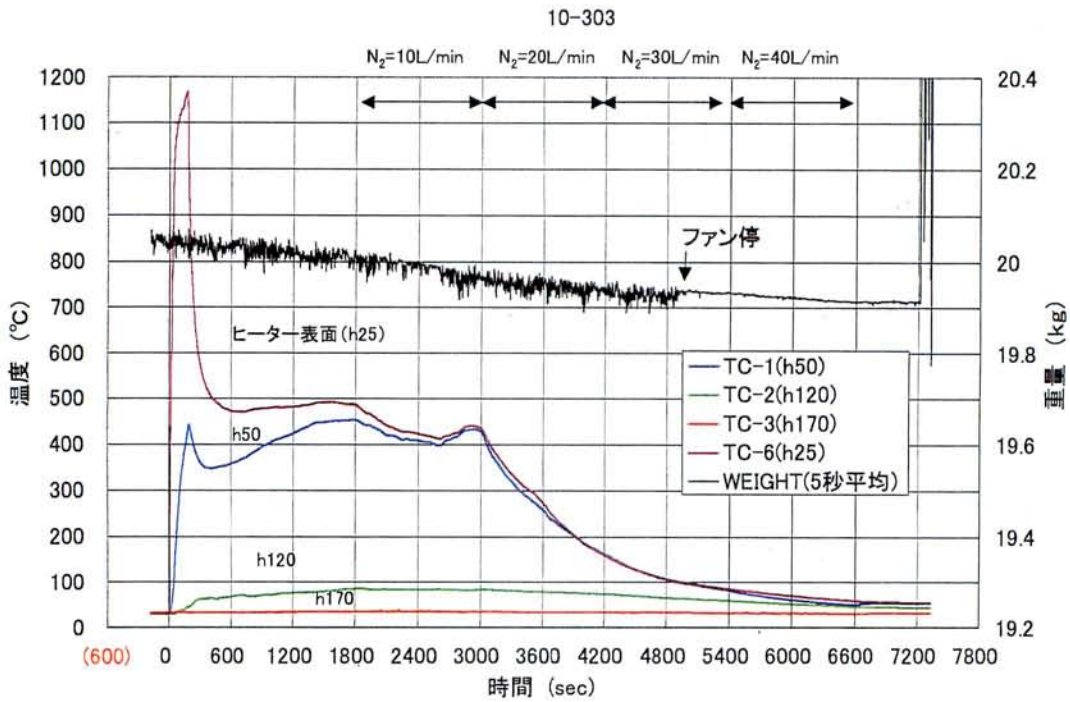


図　　温度および重量　（１０－３０３）

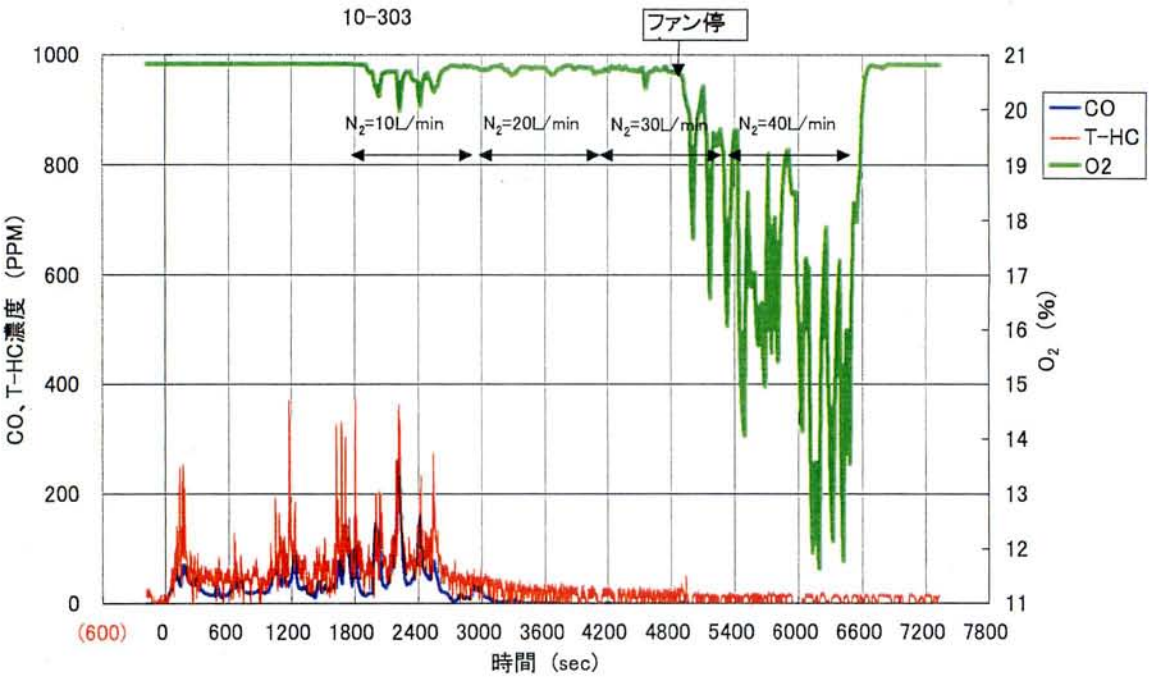


図　　燃焼ガス　　（１０－３０３）

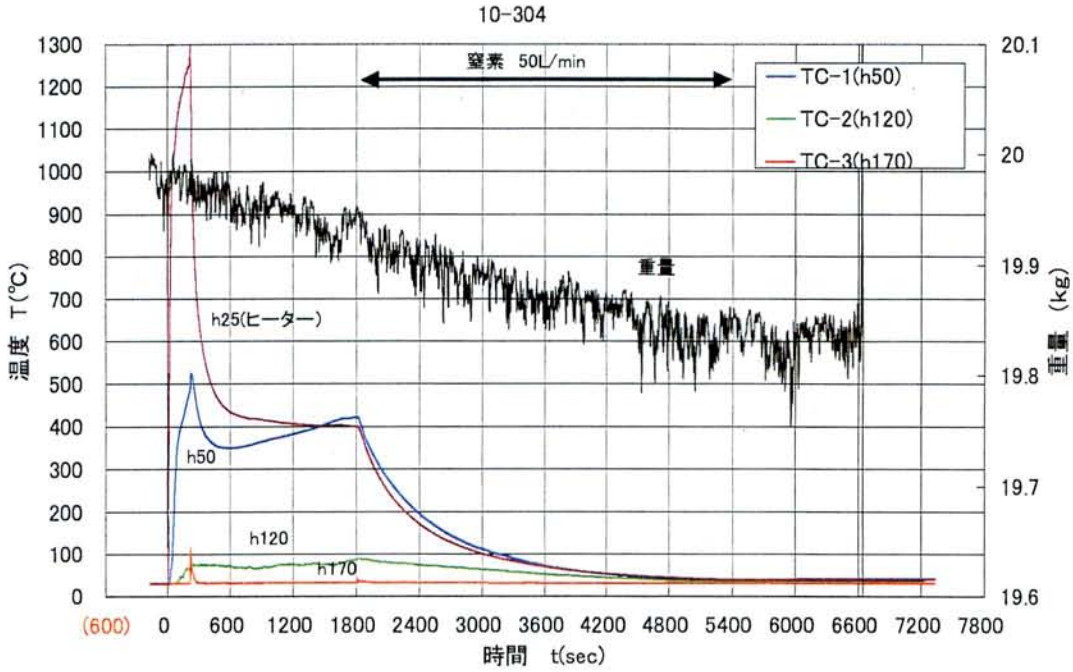


図　　温度および重量　（１０－３０４）

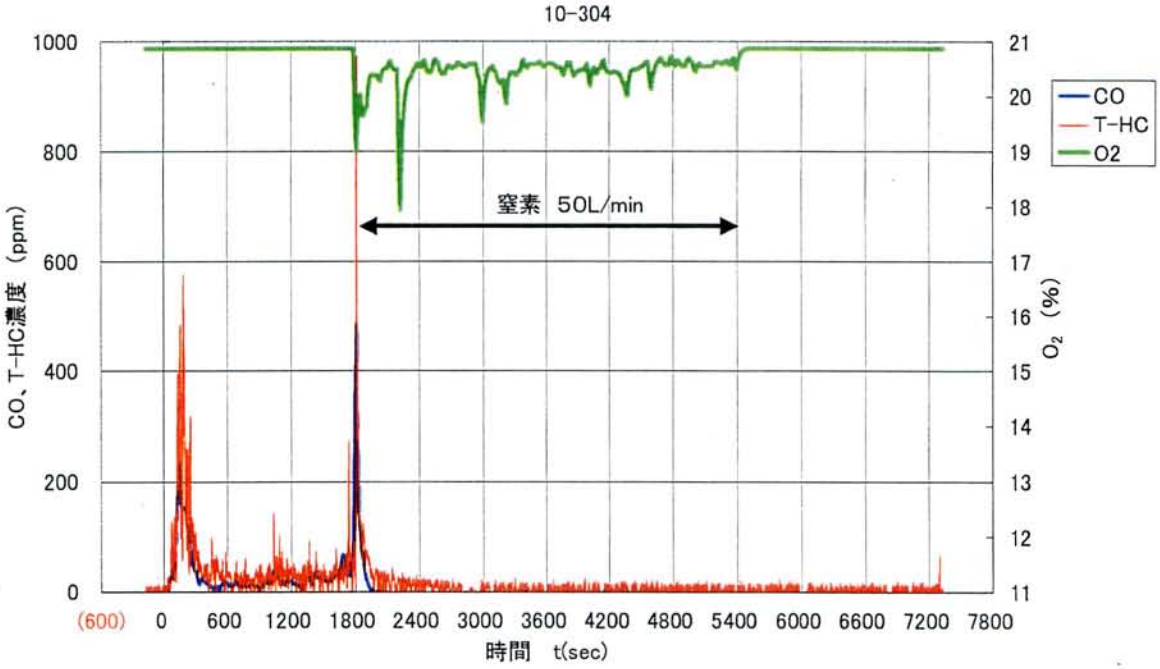


図　　燃焼ガス　　（１０－３０４）

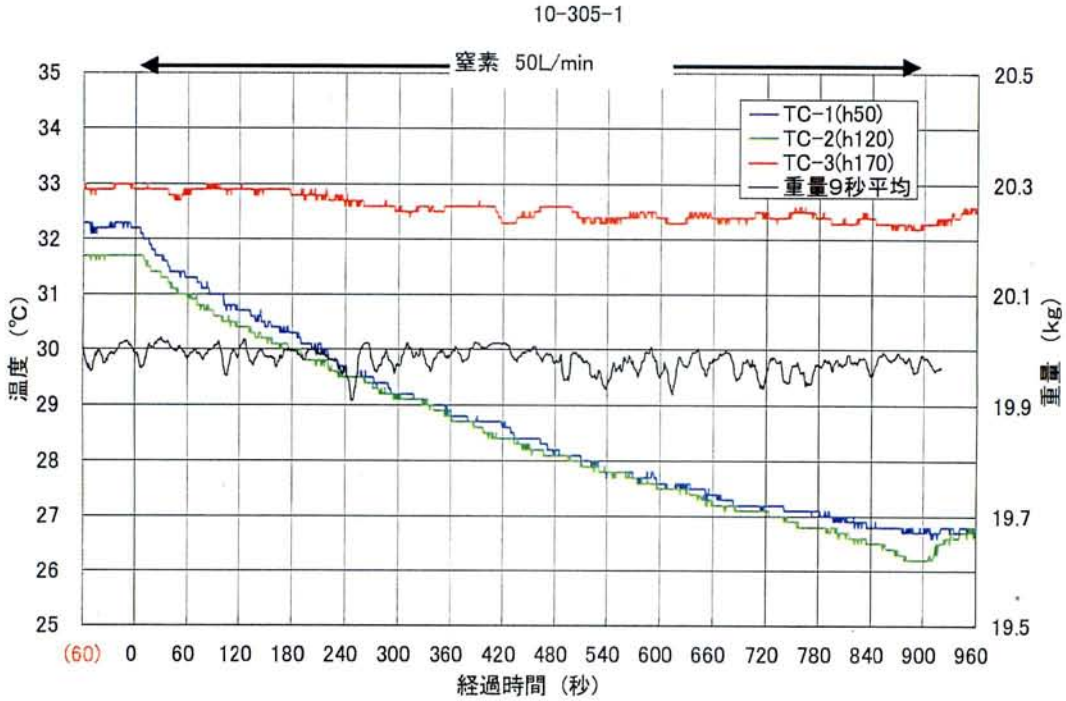


図　　温度および重量　（１０－３０５－１）

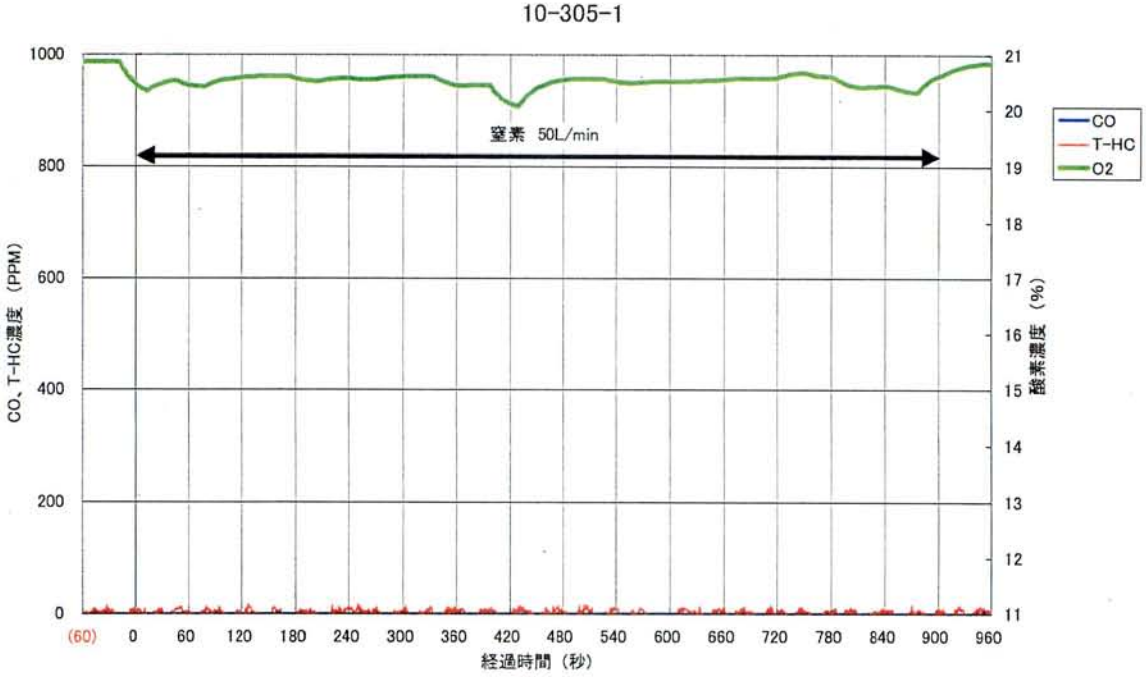


図　　ガス濃度　　（１０－３０５－１）

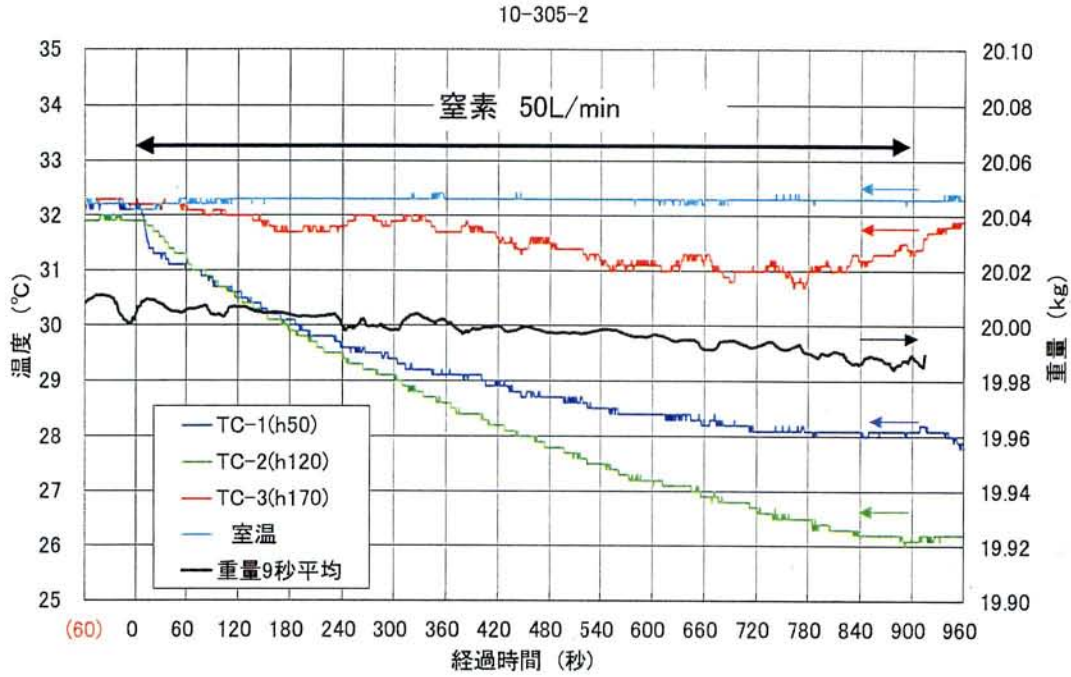


図　　温度および重量　（１０－３０５－２）

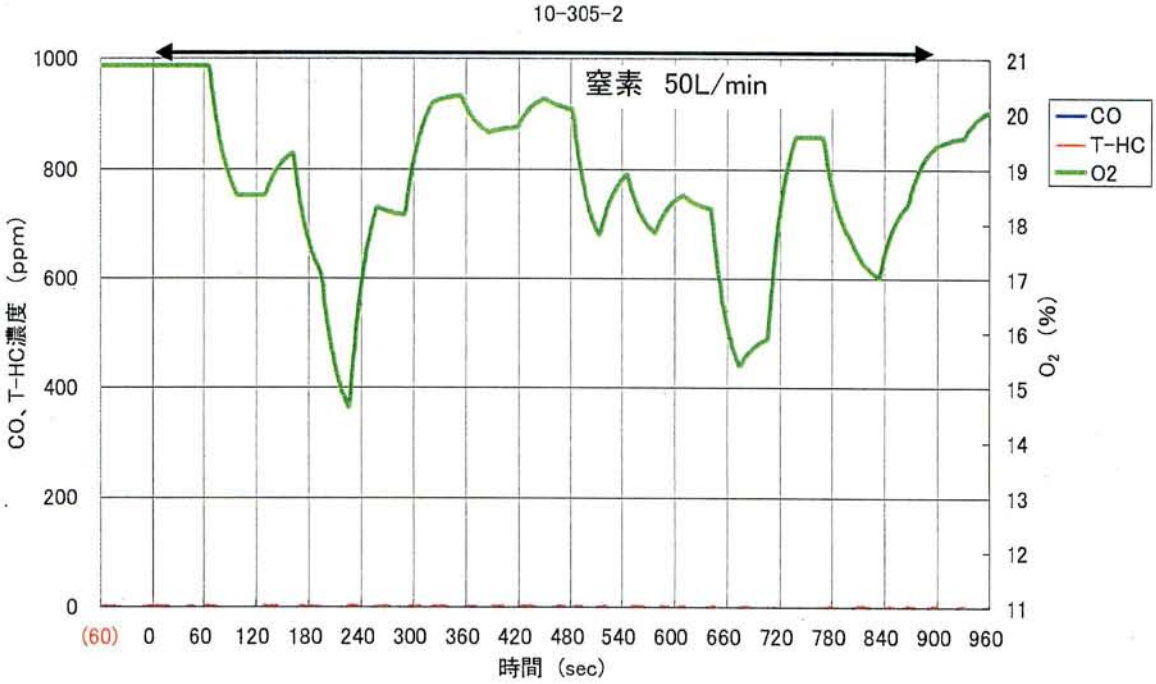
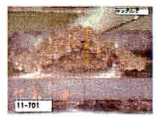
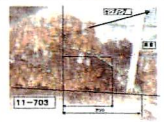
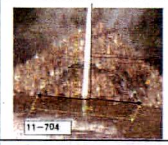


図　　ガス濃度　　（１０－３０５－２）

表　　平成17年度　第2回（第11ターム）共同研究　実験データ概要

実験の名称	実験番号	実施日時	試験場所	使用ノズル	消火対象物	放水条件 水量 (L/min)	放水条件 空流量 (L/min)	室温 (℃)	湿度 (%)	気象	予燃時間	放水時間（着火を0分とする時刻 ）および進入時間 sec	消火判定	放水量 Qa L	流下水量 L	消火寄与水量 L	燃焼物 初期重量 (kg)	燃焼物 含水率 (%)	実験・計測状況	備考（コメント者：敬称略）
4. RDFの燃焼と消火	11-701	2005/1/25 11:09	区画外（開放）	－	RDF 20kg（パン900*900*100）	－	－	6.9	34	晴れ	20分	5kgRDF+ヘプタン1.5ℓ 着火 0～20分 予燃 20分～21分30秒 RDF15kgfで覆う	①サーモカメラ 1式固定(南西)1式移動 ②温度計測位置 h=50,90,120,170， ガスサンプル点 初期山の中心上h=130 ③重量計測 1式 ④ガス分析 酸素、一酸化炭素 5000ppm、二酸化炭素 CO＞5000ppm CO2＝12% 外部ポンプ流量 12.6ℓ/min	28分 ガス分析ラインに褐色のドレン発生 （1ℓドレンポット追加 ） 35分 やや煙が多くなる 40分 煙が増える。 50分 北東側の赤外山頂部高温表示 70分 煙濃い 80分 白煙に着火確認 山を切るのは柔らかいあめのような手ごたえ	
	11-702	2005/1/25 15:21	区画外（開放）	－	RDF 20kg（パン900*900*100）	－	－	8.0	37	晴れ	20分	5kgRDF+ヘプタン1.5ℓ 着火 0～20分 予燃 20分 RDF15kgfで覆う 30分 窒素 10ℓ/min 50分 窒素 20ℓ/min 70分 窒素停止 100分 実験終了	①サーモカメラ 1式固定(南西) 1式移動 ②温度計測 位置 h=50,120,170， ガスサンプル点 初期山の中心上h=130 ③重量計測 1式 ④ガス分析 酸素、一酸化炭素計 5000ppm、一酸化炭素計5%追加、二酸化炭素 前処理 流量 3.8ℓ/min	20分 RDFで覆う際に山の高さが18～19cmになるように 30分 窒素供給位置 初期山の中 （高さ8cm、中心から7.5cm）		1）消火後の断面観察時、初期山の表面が硬くなっている（窒素による冷却によるものか）
	11-703	2005/1/26 10:56	区画外（開放）		RDF 20kg（パン900*900*100）	－	－	7.8	31	晴れ	20分	5kgRDF+ヘプタン1.5ℓ 着火 0～20分 予燃 20分 RDF15kgfで覆う 30分 窒素 10ℓ/min 50分 窒素 20ℓ/min 70分 窒素停止 100分 実験終了	①サーモカメラ 1式固定(南西) 1式移動 ②温度計測 位置 h=50,120,170， ガスサンプル点 初期山の中心上h=130 ③重量計測 1式 ④ガス分析 酸素、一酸化炭素計 5000ppm、一酸化炭素計5%追加、二酸化炭素	予燃中に窒素供給パイプが転ぶ。RDF15kg被服時に修正 30分 窒素供給位置 初期山の山裾 （高さ9cm、中心から14cm） 試験終了後 窒素供給ラインのシリコンチューブに割れ発見		1）割った時、701と同様に飴のような感じ 2）灰が多い
	11-704	2005/1/26 14:45	区画外（開放）		RDF 20kg（パン900*900*100）	－	－	9.8	28	晴れ	20分	5kgRDF+ヘプタン1.5ℓ 着火 0～20分 予燃 20分 RDF15kgfで覆う 30分 窒素 10ℓ/min 50分 窒素 20ℓ/min 70分 窒素停止 100分 実験終了	①サーモカメラ 1式固定(南西) 1式移動 ②温度計測 位置 h=50,120,170， ガスサンプル点 初期山の中心上h=190 ③重量計測 1式 ④ガス分析 酸素、一酸化炭素計 5000ppm、一酸化炭素計5%追加、二酸化炭素	パイプ転倒防止のため針金を追加 30分 窒素供給位置 初期山の上 （高さ14cm、中心）		1）固まっていない。 2）割った時、自然に火が点いた
	11-705	2005/1/27 10:42	区画外（開放）		RDF 20kg（パン900*900*100）	－	－	7.7	36	晴れ	20分	5kgRDF+ヘプタン1.5ℓ 着火 0～20分 予燃 20分 RDF15kgfで覆う 30分 窒素 50ℓ/min 90分 窒素停止 120分 実験終了	①サーモカメラ 1式固定(南西) 1式移動 ②温度計測 位置 h=50,120,170， ガスサンプル点 初期山の中心上h=190 、 ③重量計測 1式 ④ガス分析 酸素、一酸化炭素計 5000ppm、一酸化炭素計5%追加、二酸化炭素	30分 窒素供給位置 初期山の中 （高さ5cm、中心から7.5cm ×4本）		1）窒素供給パイプ周囲が高温 2）断面では黒化している点もあり 火をつけたら炎が定在した

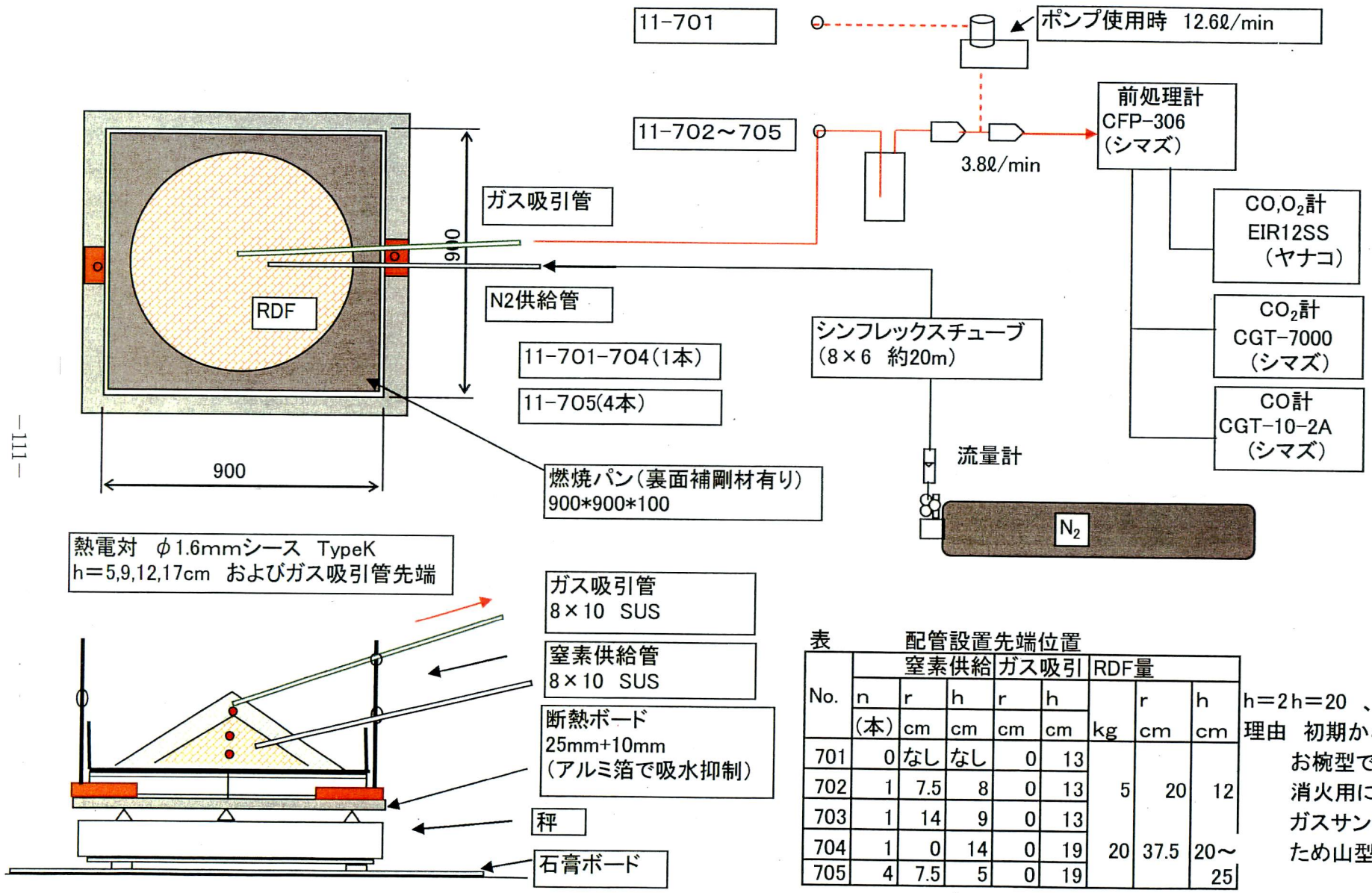
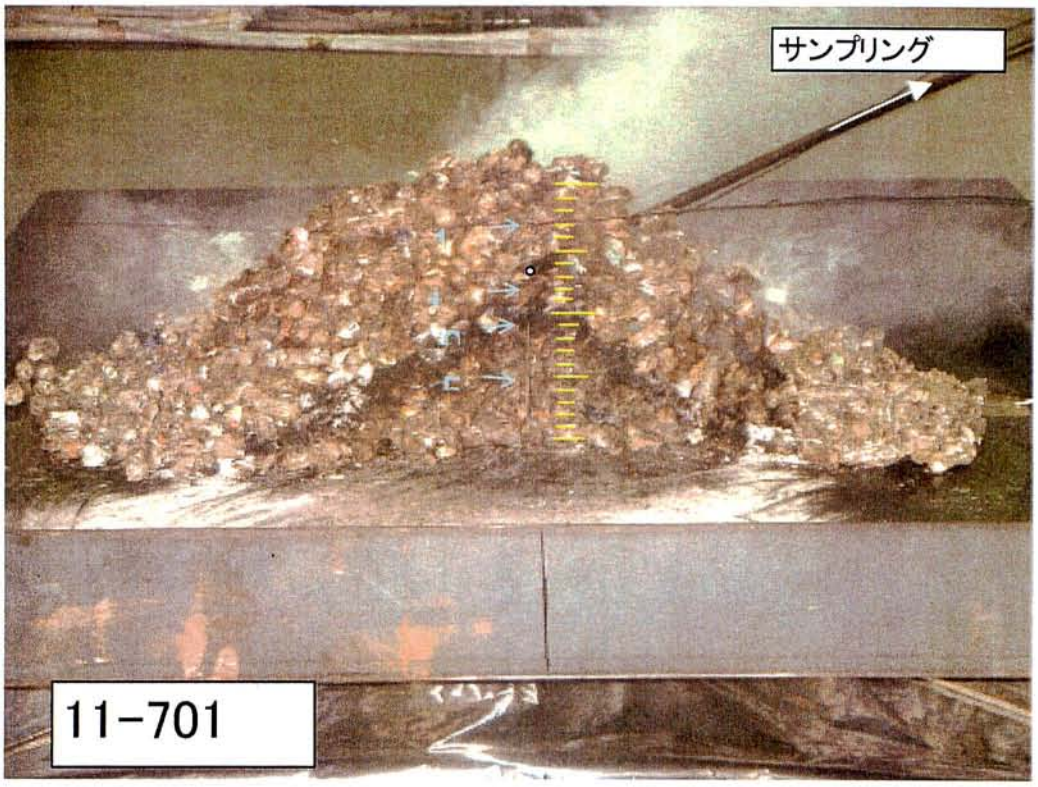


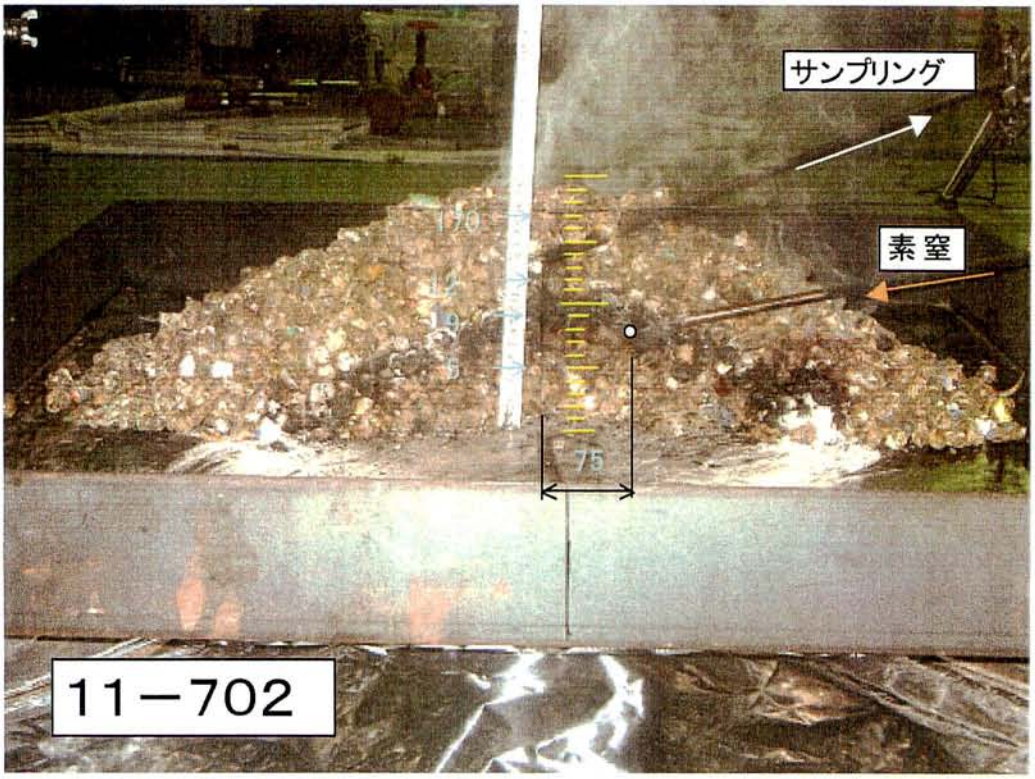
表　配管設置先端位置

No.	窒素供給			ガス吸引		RDF量		
	n (本)	r cm	h cm	r cm	h cm	kg	r cm	h cm
701	0	なし	なし	0	13			
702	1	7.5	8	0	13	5	20	12
703	1	14	9	0	13			
704	1	0	14	0	19	20	37.5	20～25
705	4	7.5	5	0	19			

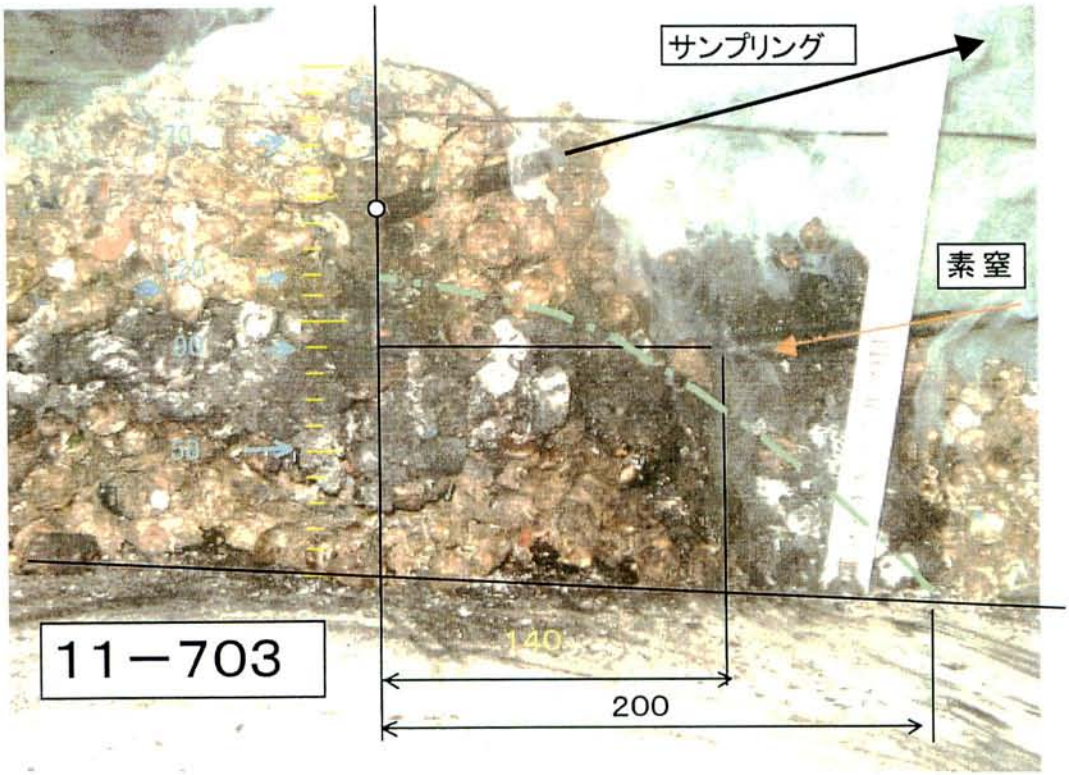
h=2h=20 、前回はh=15
理由 初期から20kgで成形すると
お椀型で高さが押さえられた
消火用に15kg追加する場合は
ガスサンプリング管を被服する
ため山型になり頂点が高くなった

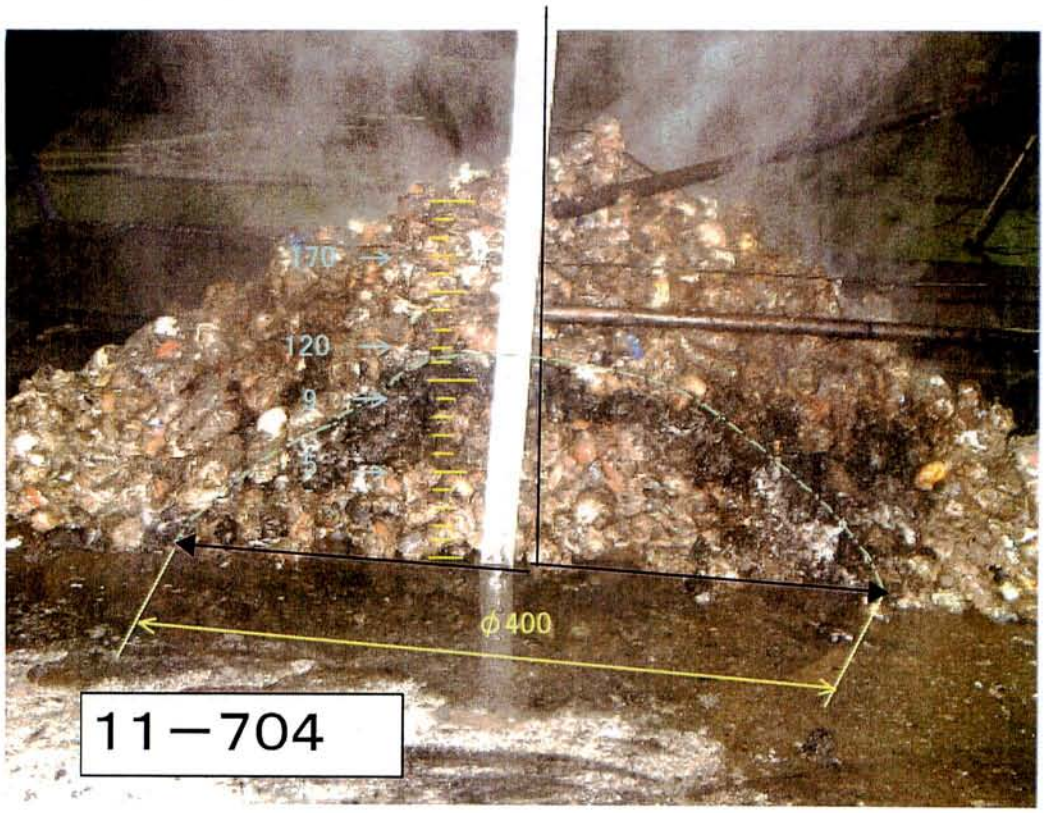
図　温度計測および窒素ガス、燃焼ガス配管図　実験番号11－700

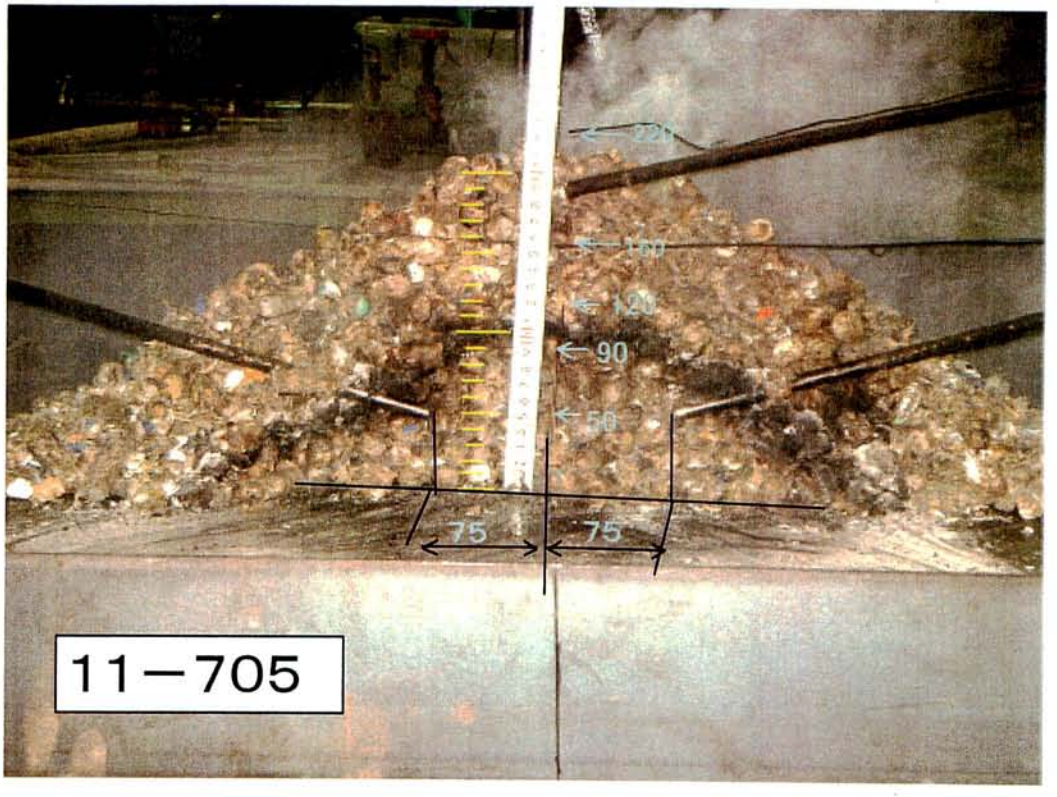

サンプリング
11−701

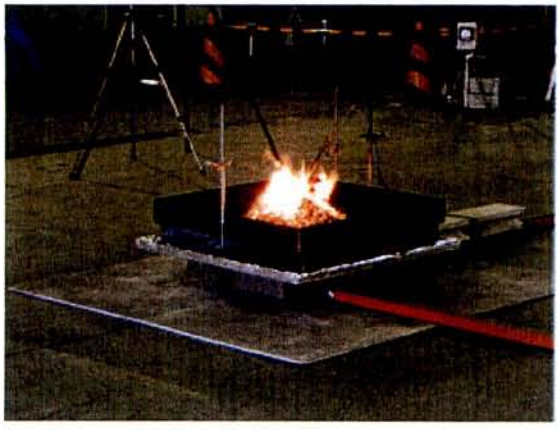

サンプリング
素窒
75
11−702

11－703
75


サンプリング
素窒
11－703
140
200

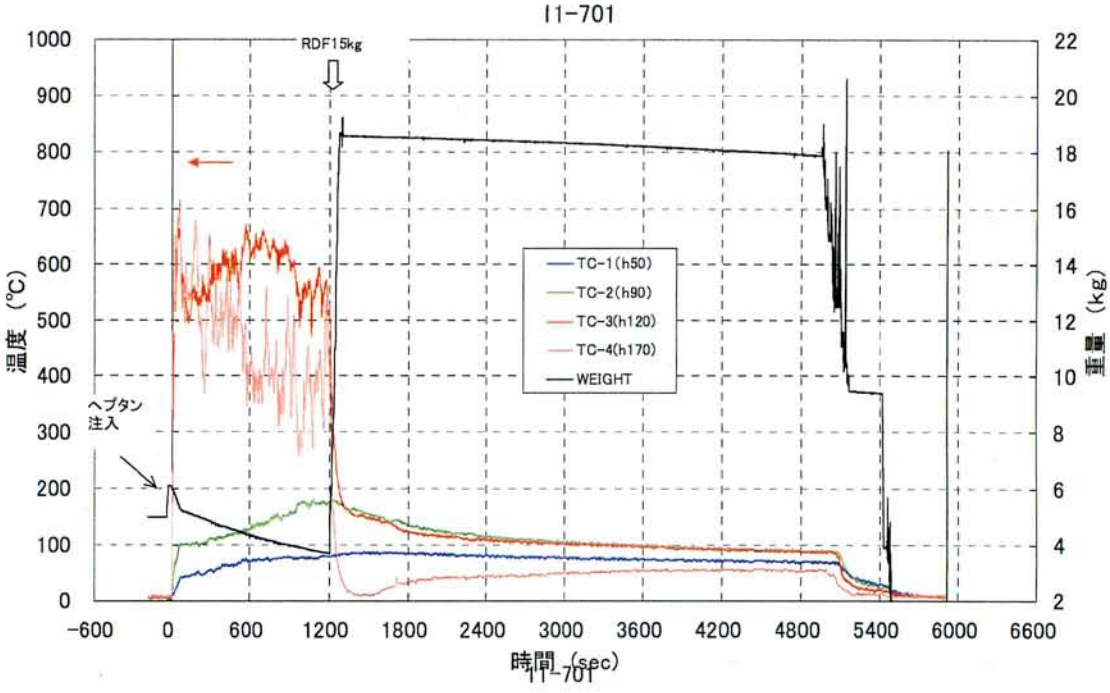

170
120
9
φ400
11−704


220
160
120
90
50
75
75
11−705



RDF5ｋｇ+ヘプタン 1.5L　20 分予燃
20 分後 RDF15ｋｇで覆う

80 分後　断面観察
ガスサンプリング　5ｋｇ山頂上



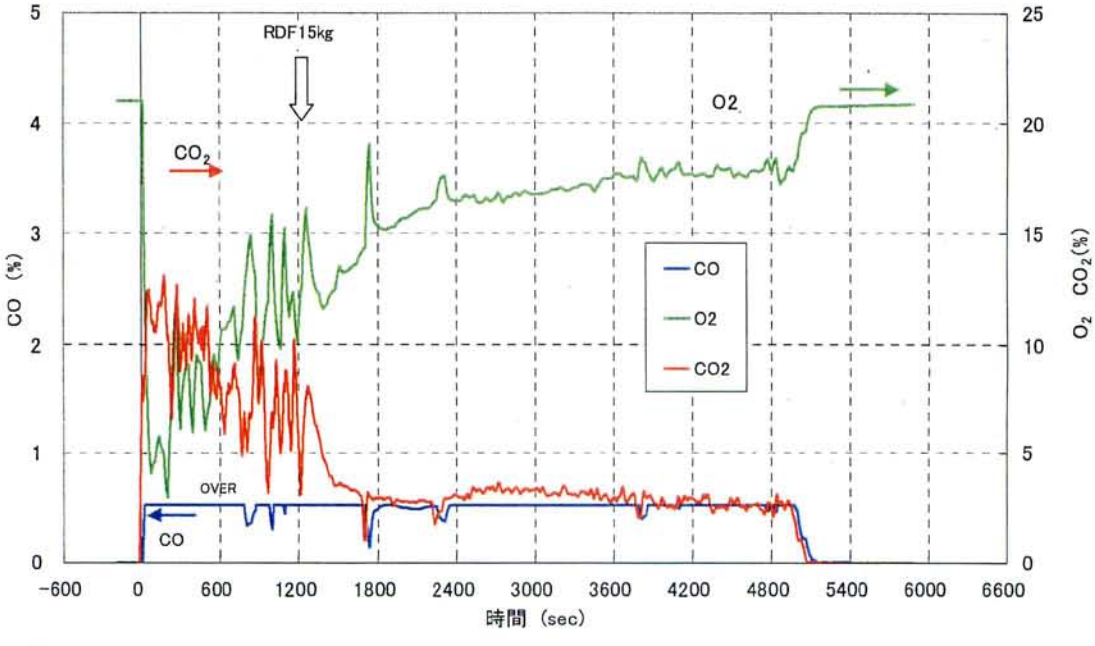
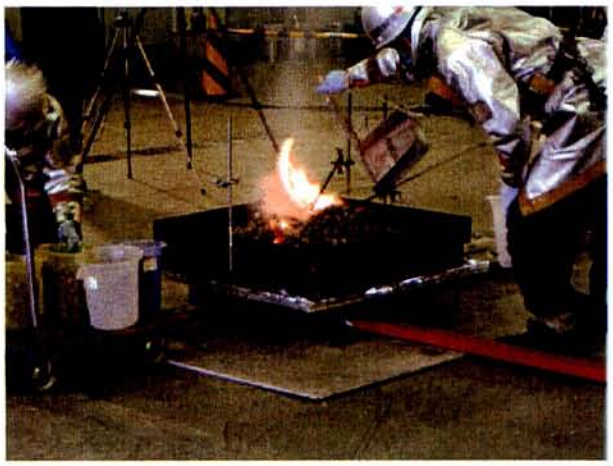
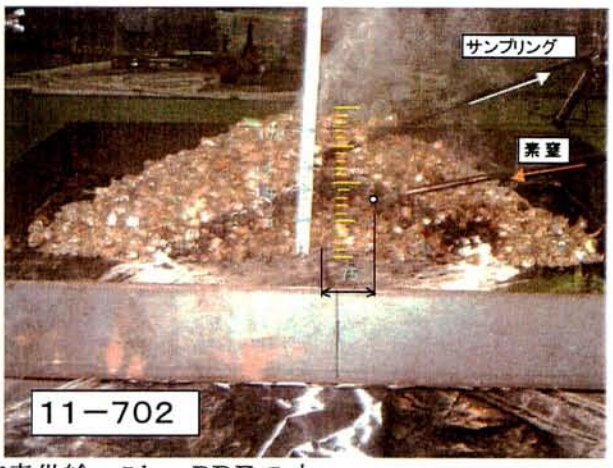


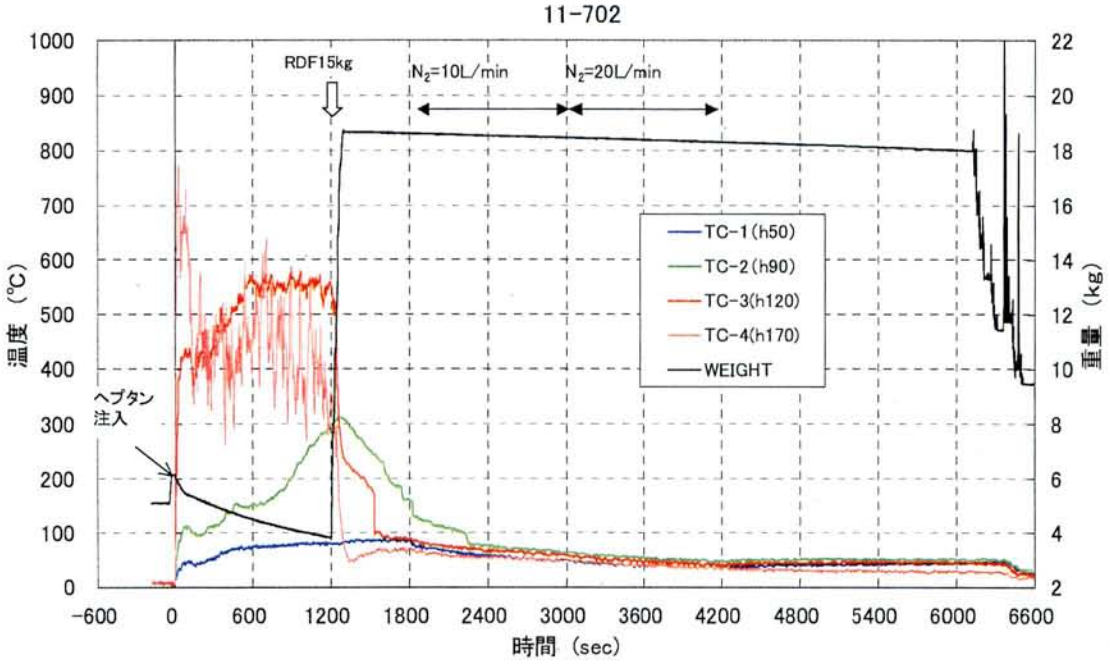
図　　計測データ　（１１－７０１）2006.125





RDF5ｋｇ+ヘプタン 1.5L　20 分予燃
20 分後 RDF15ｋｇで覆う

窒素供給　5ｋｇRDF の中
30 分後　窒素 10L/min　50 分後　窒素 20L/min
70 分後　窒素停止　100 分後　断面観察



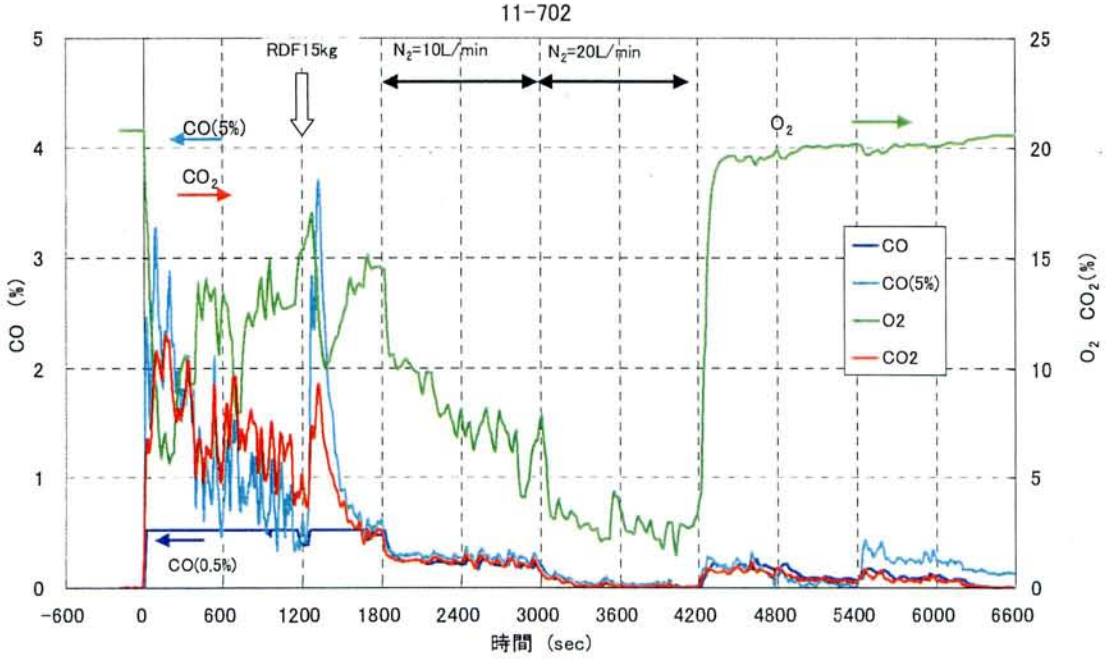
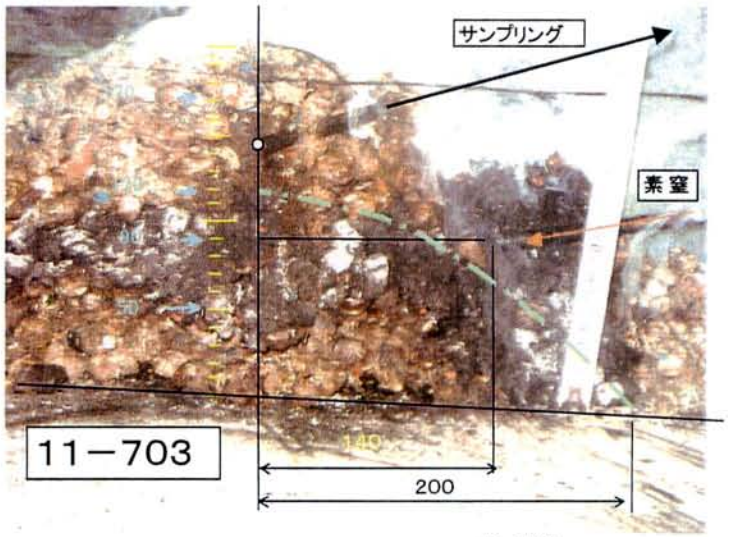
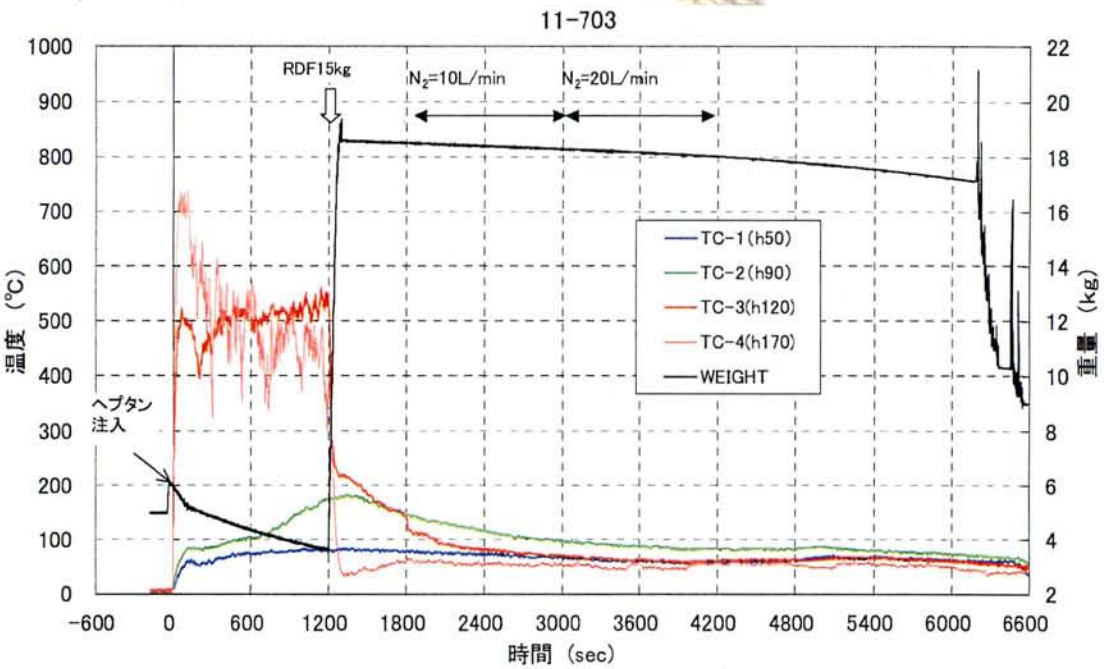


図　　計測データ　（１１−７０２）2006.125



窒素供給　5ｋｇRDF の外
30 分後　窒素 10L/min
50 分後　窒素 20L/min
70 分後　窒素停止
100 分後　断面観察



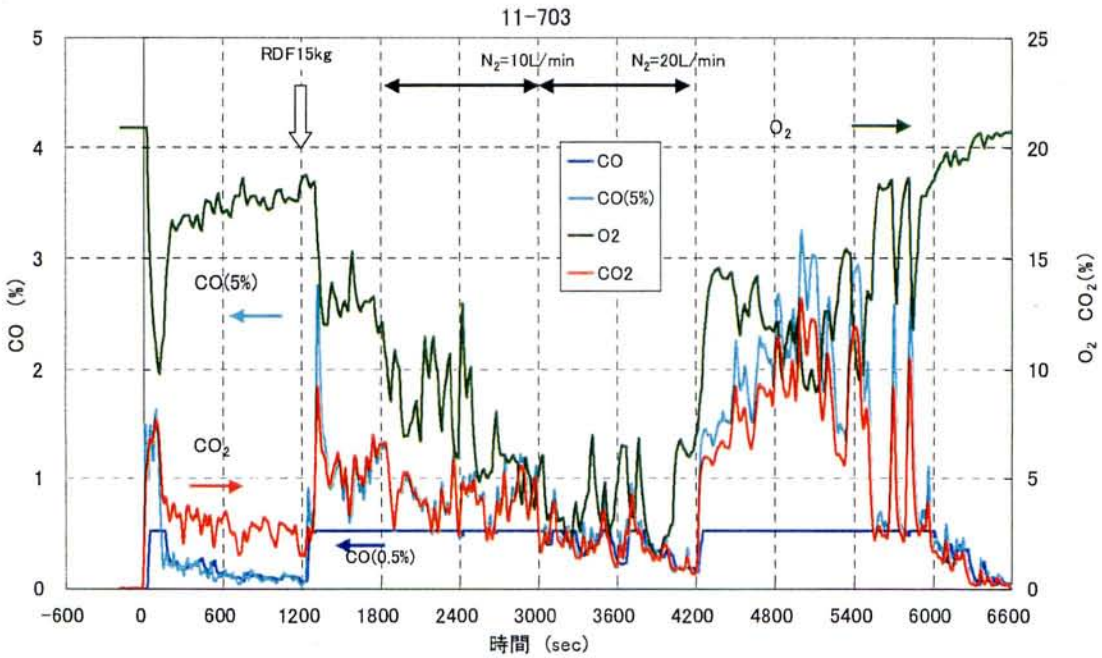
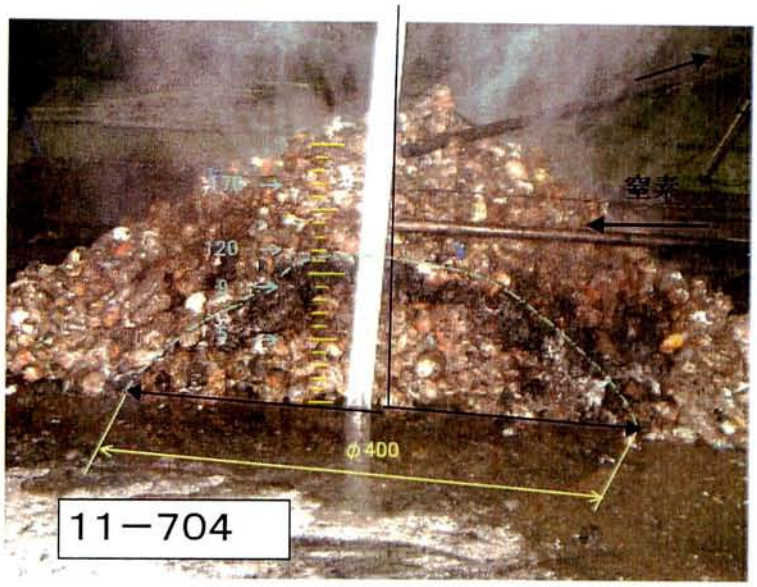
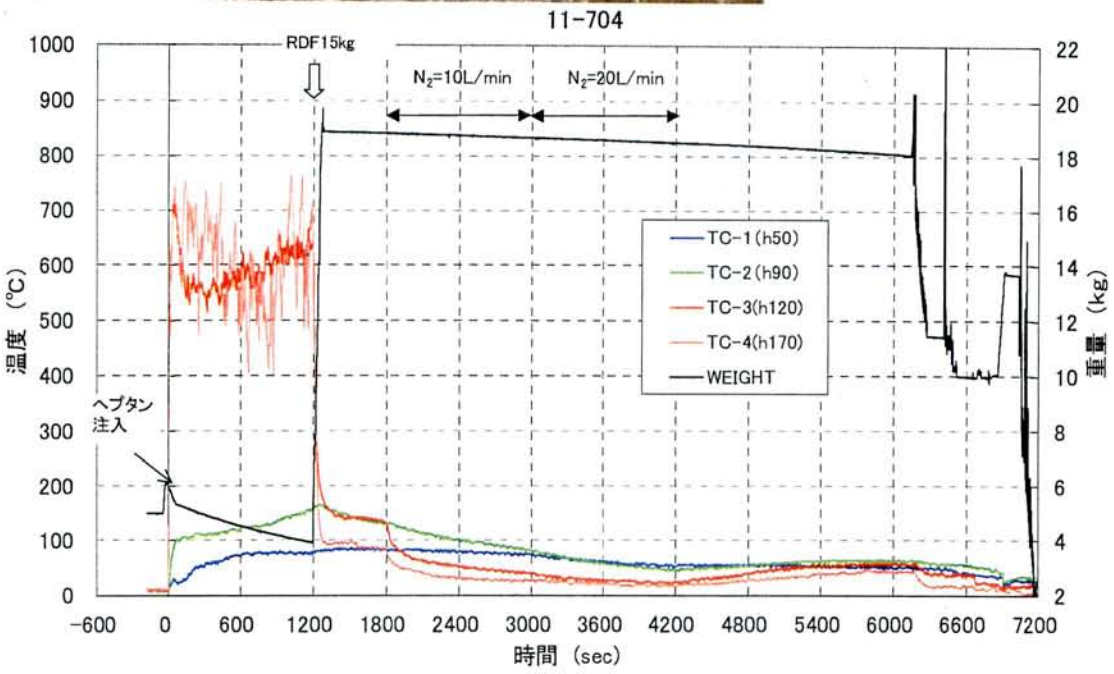


図　　計測データ　（１１−７０３）2006.125



窒素供給　5ｋｇRDFの上
30分後　窒素 10L/min
50分後　窒素 20L/min
70分後　窒素停止
100分後　断面観察



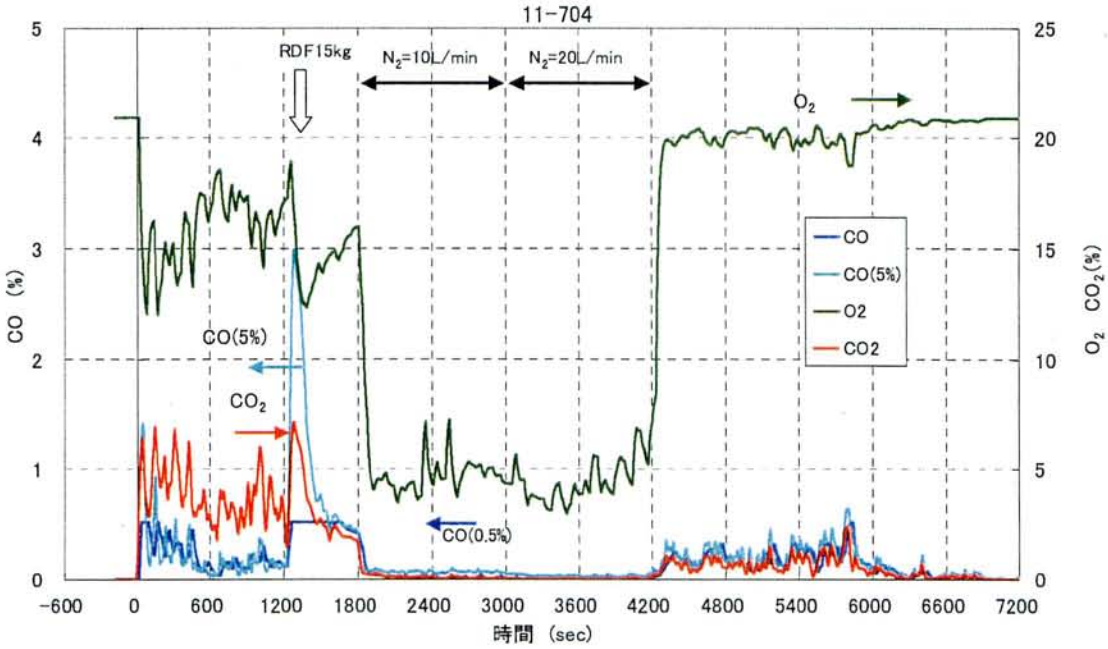
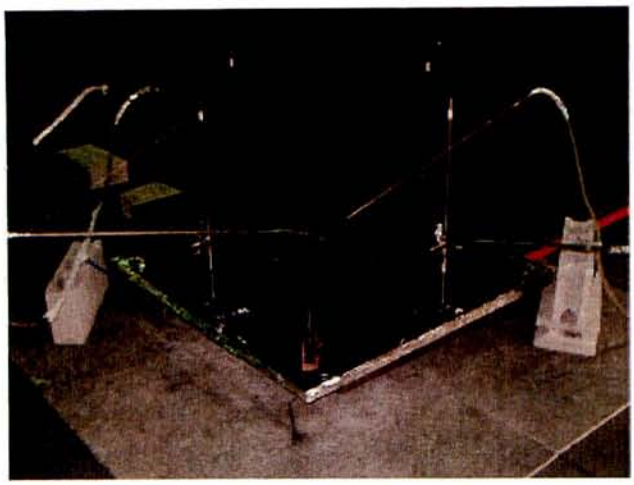
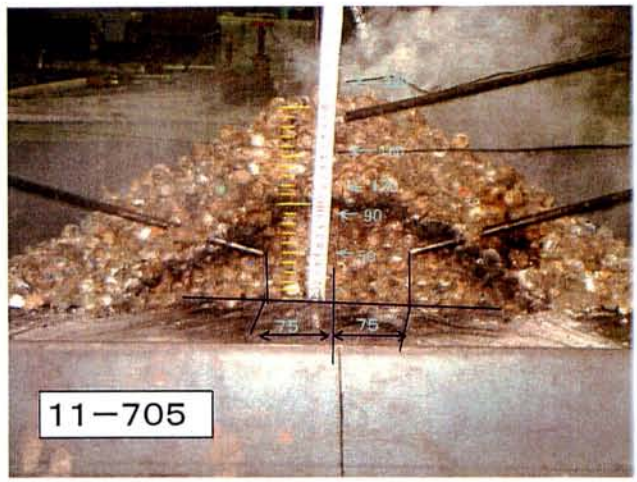


図　　計測データ　（１１−７０４）2006.126

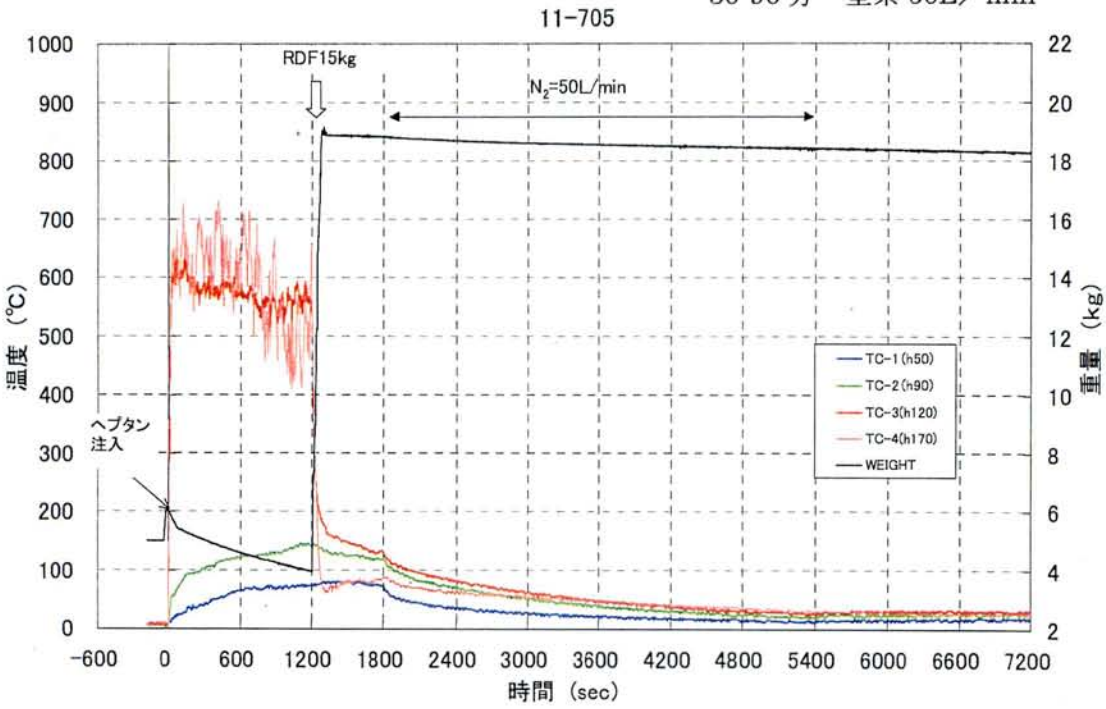


窒素供給　5ｋｇRDFの中（配管４本）



20分後　RDF15ｋｇで覆う

30-90分　窒素50L／min



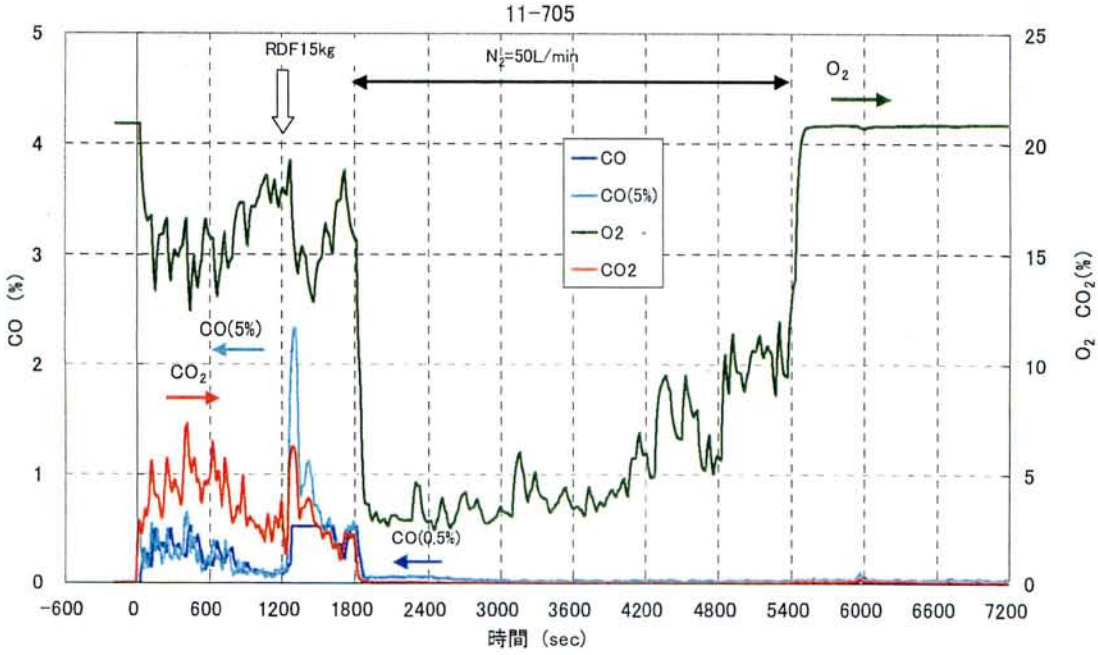


図　　計測データ　（１１−７０５）2006.127

参考2

RDFの試料を入手し、熱分解特性に関する測定を行った。その結果を以下に示す。なお、測定は、東レエンジニアリングとカヤテックに委託した。

分　析　結　果　報　告　書

独立行政法人　消　防　研　究　所　　御中

件名

ＲＤＦ（ごみ固形燃料）の分析

平成 17 年 12 月

濃度計量証明事業登録：滋賀県第 26 号

東レテクノ株式会社

〒520-0842　滋賀県大津市園山１丁目１番１号

ＴＥＬ(077)537-5150・ＦＡＸ(077)533-8659

平成17年12月16日

第０２８７２８号

独立行政法人　消防研究所　殿

濃度計量証明事業登録・滋賀県第26号
東レ　[illegible]株式会社
環境[illegible]技術部
環境計量士　田中　正隆
〒520-0842 滋賀県大津市園山１丁目１番１号
ＴＥＬ（077）537-5150
ＦＡＸ（077）533-8659

ＲＤＦ（ごみ固形燃料）の分析結果について（報告）

平成 17 年 10 月 12 日御依頼の表記分析結果を下記のとおり報告いたします。

＜　記　＞

１．試料名等（１検体）

固形燃料タ－ム 10

２．試験項目及び分析方法

１）ＲＤＦの性状と分析方法

ＲＤＦの性状	分析方法	ＲＤＦの性状	分析方法
１．サイズ	ノギスで計測	９．低位発熱量	JIS Z 7302-2 準拠
２．かさ密度	熱電導率測定時のかさ密度	10．炭素	ＣＨＮコーダー法
２．水分	JIS Z 7302-3 準拠	11．水素	〃
４．灰分	JIS Z 7302-4 準拠	12．窒素	〃
５．揮発性	JIS M 8812 準拠	13．全硫黄分	JIS Z 7302-7 準拠
６．固定炭素	JIS M 8812 準拠	14．全塩素分	JIS Z 7302-6 準拠
７．燃料比	計算	15．Ｃａ	JIS K0102 ICP 発光分光分析法
８．高位発熱量	JIS Z 7302-2 準拠	16．着火温度（引火点の代用）	DSC による発熱外挿開始温度

２）熱　分　析

１．ＴＧ－ＤＴＧ（その１）	窒素雰囲気と空気雰囲気２種類での活性化エネルギー算出
２．ＴＧ－ＤＴＧ（その２）	５，10%酸素雰囲気中での活性化エネルギー算出
３．ＤＳＣ	密閉セルで、窒素雰囲気での反応熱の測定

3）そ の 他

1．熱伝導率（λ）
2．比熱容量（c）
3．熱分解ＧＣ／ＭＳによる熱分解ガス分析

4．分析結果

1）ＲＤＦの性状

表－1 分 析 結 果

調 査 項 目	固形燃料10
① サイズ（直径×長さ mm）	15.49 × 32.67
② かさ密度（kgm^{-3}）	388
③ 水分（%）	6.6
④ 灰分（%）	12.9
⑤ 揮発分（%）	74.9
⑥ 固定炭素（%）	12.2
⑦ 燃料比（－）	0.2
⑧ 高位発熱量（J/g）	19,890
⑨ 低位発熱量（J/g）	18,440
⑩ 炭素（%）	44.9
⑪ 水素（%）	6.74
⑫ 窒素（%）	0.98
⑬ 全硫黄分（%）	0.11
⑭ 全塩素分（%）	0.40
⑮ Ｃａ（%）	3.3
⑯ 着火温度（℃）	255

注）着火温度は、ＤＳＣによる発熱外挿開始温度とした。

2）熱 分 析

表－2 分 析 結 果

1．ＴＧ－ＤＴＧ（その1）	窒素雰囲気と空気雰囲気２種類での活性化エネルギー算出	別紙報告
2．ＴＧ－ＤＴＧ（その2）	5，10%酸素雰囲気中での活性化エネルギー算出	別紙報告
3．ＤＳＣ	密閉セルで、窒素雰囲気での反応熱の測定	別紙報告

3）そ の 他

表－3（1） 分析結果（ニードルプローブ法による）

調 査 項 目		固形燃料10
① 温度（℃）		25
② かさ密度（Kg/m³）		372
③ 熱伝導率（λ）	(W/m・K)	0.0573
	(cal/cm・s・℃)	1.37×10^{-4}
④ 比熱容量（c）	(J/Kg・K)	1,449
	(cal/g・℃)	0.3463

表－3（2） 分析結果（レーザフラッシュ法による）

調 査 項 目		固形燃料10	
試 料 片		試料1	試料2
温度（℃）		25	25
密度（Kg/m³）		1,020	956
比熱（J/Kg・K）		1,450	1,450
熱拡散率（$10^{-7}m^2/s$）		0.940	0.919
熱伝導率	(W/m・K)	0.139	0.127
	(cal/cm・s・℃)	3.32×10^{-4}	3.04×10^{-4}

表－3（3） 分析結果

調 査 項 目	固形燃料10
熱分解ＧＣ／ＭＳによる熱分解ガス分析	別紙報告

添　付　資　料

① サイズ（結果の詳細）

② ＲＤＦ燃料の分析－熱伝導率・比熱測定（レーザフラッシュ法）－

③ ＲＤＦ燃料の分析－熱伝導率測定（ニードルプローブ法）－

④ ＲＤＦ燃料の分析－ＴＧ－ＤＴＧ測定（その１：加熱減量挙動）－

⑤ ＲＤＦ燃料の分析－ＴＧ－ＤＴＧ測定（その２：活性化エネルギーの算出）－

⑥ ＲＤＦ燃料の分析－ＤＳＣ測定

⑦ 熱分解ＧＣ／ＭＳによる熱分解ガス分析

⑧ 試料の状況

① サイズ（結果の詳細）

添 付 資 料

① サイズ（結果の詳細）

固形燃料ターム10			
直径 mm	長さ mm	直径 mm	長さ mm
15.76	40.80	15.10	32.63
15.30	52.00	15.25	48.93
15.29	32.95	15.76	32.62
15.46	32.01	15.39	32.54
15.48	31.98	15.25	34.31
15.70	25.97	14.99	29.23
15.20	37.68	15.27	26.77
15.62	35.19	15.82	38.65
15.04	42.62	15.71	23.18
15.47	44.22	15.07	36.65
15.54	46.22	15.42	44.28
15.68	34.85	15.10	33.02
15.61	37.17	16.88	28.58
14.93	44.01	15.72	21.91
15.75	36.12	15.93	23.30
15.69	39.65	16.68	47.30
15.12	31.38	16.23	26.01
16.08	38.27	15.70	21.21
15.13	24.64	15.78	28.85
15.36	35.98	15.57	24.40
15.65	35.94	14.62	30.54
15.06	22.06	15.11	34.17
15.09	37.49	15.30	28.37
15.38	38.07	15.43	23.78
15.15	36.08	16.36	25.25
15.62	27.52	15.38	40.11
15.32	23.38	15.23	25.05
15.23	39.99	15.90	30.61
15.13	45.59	16.15	28.21
15.20	35.21	15.94	17.64
15.59	25.29	15.13	25.82
15.65	25.03	15.55	25.30
15.34	32.47	15.26	19.04
	ave	15.49	32.67
	max	16.88	52.00
	min	14.62	17.64
	σ	0.405	7.834

②　ＲＤＦ燃料の分析－熱伝導率・比熱測定（レーザフラッシュ法）－

② ＲＤＦ燃料の分析－熱伝導率・比熱測定（レーザフラッシュ法）

1．試　料

1検体　：　RDF固形燃料 ターム10

・密　　度

貴方ご提供品を弊方で凍結粉砕して粉末化した後、錠剤成型器を用いて直径約13 mm、厚さ約1 mmの円板状に成型し、測定に供した。

・比　　熱

錠剤成型器を用いて直径約13 mm、厚さ約1 mmの円板状に成型したものから、DSC（示差走査熱量計）サンプル容器に入る大きさの試料片を切り出し、測定に供した。

・熱拡散率

密度測定に供した試料片から、直径約10 mm、厚さ約1 mmの円板状試料片を切り出し、カーボンスプレーを両面に塗布して表面を黒化し、測定に供した。

2．測定原理

2．1 熱拡散率

熱拡散率測定はレーザフラッシュ法にて行った。図1に同方法による厚さ方向の熱拡散率測定の原理（模式図）を示す。円板状試料のA面（表面）全体にレーザ光を瞬間照射(フラッシュ)し、パルス加熱する。ここで、A面からB面（裏面）へ試料中を1次元的に熱が伝わるとすると、B面の温度上昇は以下の式（1）で表される。

$$\Delta T = \Delta T_m \left\{ 1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \exp\left(- \frac{n^2 \pi^2 \alpha t}{L^2} \right) \right\} \qquad (1)$$

ここで、

α ：熱拡散率 ($m^2 s^{-1}$)

L ：厚さ (m)

t ：レーザ光を照射してからの経過時間 (s)

ΔT ：時刻 t におけるB面の温度上昇幅（℃）

ΔT_m ：ΔTの最大値（℃）

である。式（1）を図示すると図2のようになる。図2より、ΔT_mの1／2に達するまでの時間(ハーフタイム)を $t_{1/2}$ とすれば、$\alpha t_{1/2} / L^2 = 0.1388$ となることがわかる。従って、$t_{1/2}$ を測定すれば、式（2）から熱拡散率 αを求めることができる（ハーフタイム法)。

$$\alpha = 0.1388 \times \frac{L^2}{t_{1/2}} \times K \qquad (2)$$

ここで、Kは試料から周囲への熱損失分を補正する係数である[1)]。

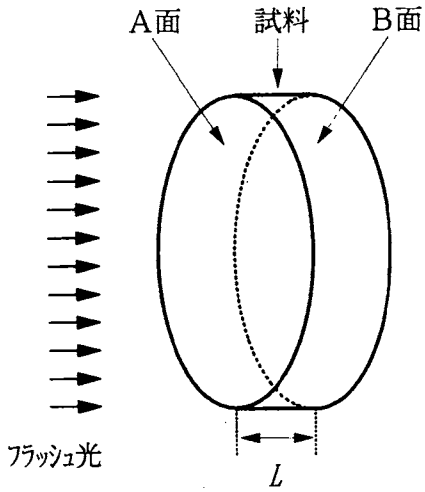


図１ レーザフラッシュ法の測定原理

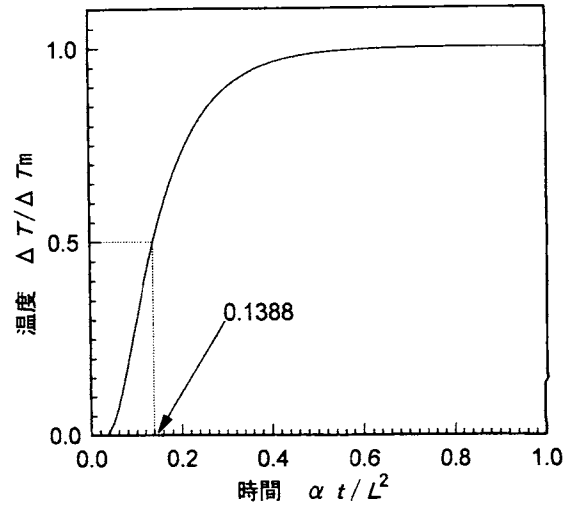


図２ Ｂ面の温度上昇曲線

２．２ 比　熱

比熱 C_p (J kg^{-1} K^{-1}) は、DSC（示差走査熱量測定）法[2,3]により測定した。

２．３ 熱伝導率

熱伝導率 λ (W m^{-1} K^{-1} または cal cm^{-1} s^{-1} ℃$^{-1}$) は、熱拡散率 α と熱容量 ρC_p(J m^{-3} K^{-1}) の積として、式（３）より算出される。

$$\lambda = \alpha \rho C_p \qquad (3)$$

ここで、ρ (kg m^{-3}) は密度であり、23℃において、試料の質量 m (kg)，断面積 S (m^2) および厚さ L (m) を実測し、式（４）により算出した値を用いた。

$$\rho = \frac{m}{S \times L} \qquad (4)$$

3．測定条件

3．1 密　　度

測定方法　：　質量，断面積および厚さ実測法
測定装置　：　質量…Mettler 社製　電子分析天びん　XS205
測定温度　：　23℃
測定ｎ数　：　３（３つの異なる試料片を測定に供した）

3．2 比　　熱

測定方法　：　DSC 法
測定装置　：　Perkin-Elmer 社製 示差走査熱量計 DSC-7
ﾃﾞｰﾀ処理　：　当社製 DSC データ処理システム TRC-THADAP-CP[3)]
昇温速度　：　10 ℃ / min
比熱校正　：　サファイア (62.58 mg)
雰 囲 気　：　乾燥窒素気流
測定温度　：　25℃
ｻﾝﾌﾟﾙ容器　：　Perkin-Elmer 社製 アルミニウム標準容器
測定ｎ数　：　２（それぞれ試料を新たにサンプリングして測定した）
試 料 量　：　約 30～40 mg（詳細は表２参照）

3．3 熱拡散率

測定方法　：　レーザフラッシュ法
測定装置　：　真空理工㈱製 熱定数測定装置 TC－7000
測定温度　：　25℃
照 射 光　：　ルビーレーザ光（励起電圧 2.2 kV）
試料裏面
　温度ｾﾝｻｰ：　赤外線検出器（InSb センサー）
雰 囲 気　：　空気中
測定ｎ数　：　３（３つの異なる試料片を測定に供した，重ね合せ５回）

4．測定結果

4．1 密　　度

表１に密度の測定結果を示す。密度の測定精度は±2～3%程度である。

表１ 密度測定結果

試　　料	温度 T / ℃	試料片	質量 m / 10^{-3} kg	面積 S / 10^{-4} m^2	厚さ L / 10^{-2} m	密度*1 ρ / kg m^{-3}
RDF固形燃料 ターム10	23	1	0.1661	1.4624	0.1248	910.2
		2	0.1270	1.5007	0.0953	887.4
		3	0.1366	1.4768	0.1019	907.6

*1 下式により求めた値

$$\rho = \frac{m}{S \times L}$$

密度の測定精度は±2～3%程度

4．2 比　　熱

表２に比熱の測定結果を示す。比熱の測定精度は±1%程度である。

表２ 比熱測定結果

試　　料	温度 T / ℃	Run	試料量 10^{-6} kg	比熱*1 C_p / J kg^{-1} K^{-1}
RDF固形燃料 ターム10	25	1	32.45	1453
		2	41.77	1420
		平均	-	1436

*1 比熱の測定精度は±1%程度

4．3 熱拡散率

熱拡散率の測定チャートの一部（試料片１）を Fig.3 に、熱拡散率の測定結果を表３に、それぞれ示す。熱拡散率の測定精度は通常±5%程度であるが、この試料に関しては±20%程度である。通常より測定精度が悪い理由としては、①複合材料（粉末状試料＋空気）を均一な連続媒体とみなして解析している、②作製した試料片表面に凸凹が見られ、試料片の厚さ測定に誤差が含まれやすい、等があげられる。

表３ 熱拡散率測定結果

試　　料	温度 T / ℃	試料片	厚さ*1 L / 10^{-3} m	ハーフタイム $t_{1/2}$ / 10^{-3} s	熱損失補正係数 K	熱拡散率*2 α / 10^{-7} $m^2 s^{-1}$
RDF固形燃料 ターム10	25	1	1.245	1590	0.802	1.09
		2	0.932	882.4	0.849	1.16
		3	1.049	1001	0.836	1.28

*1 23℃における実測値

*2 下式により求めた値

$$\alpha = 0.1388 \times \frac{L^2}{t_{1/2}} \times K$$

熱拡散率の測定精度は±20%程度

4．4 熱伝導率

表４に熱伝導率の測定結果を示す。熱伝導率の測定精度は±20%程度である。

なお、測定された熱伝導率値は、貴社ご提供品(粉末状試料)を円板状に成型した、表中記載のかさ密度を有する「粉末状試料＋空気」といった一種の複合材料に対する熱伝導率であることに注意されたい。

表４ 熱伝導率測定結果

試　　料	温度 T / ℃	試料片	密度*1 ρ / kg m^{-3}	比熱*2 C_p / J kg^{-1} K^{-1}	熱拡散率*3 α / 10^{-7} $m^2 s^{-1}$	熱伝導率*4 λ / W m^{-1} K^{-1}
RDF固形燃料 ターム10	25	1	910	1440	1.09	0.143
		2	887		1.16	0.148
		3	908		1.28	0.167

*1 23 ℃における実測値を有効数字３桁で丸めた値
密度の測定精度は±2～3%程度

*2 n=2の平均値を有効数字３桁で丸めた値
比熱の測定精度は±1%程度

*3 熱拡散率の測定精度は±20%程度

*4 熱伝導率の測定精度は±20%程度
なお、1 W m^{-1} K^{-1} = 2.390 × 10^{-3}cal cm^{-1} s^{-1} $℃^{-1}$

5．参考文献

1) 山根，片山，十時，第 13 回日本熱物性シンポジウム(1992)

2) 片山，薮内，十時，第８回日本熱物性シンポジウム(1987).

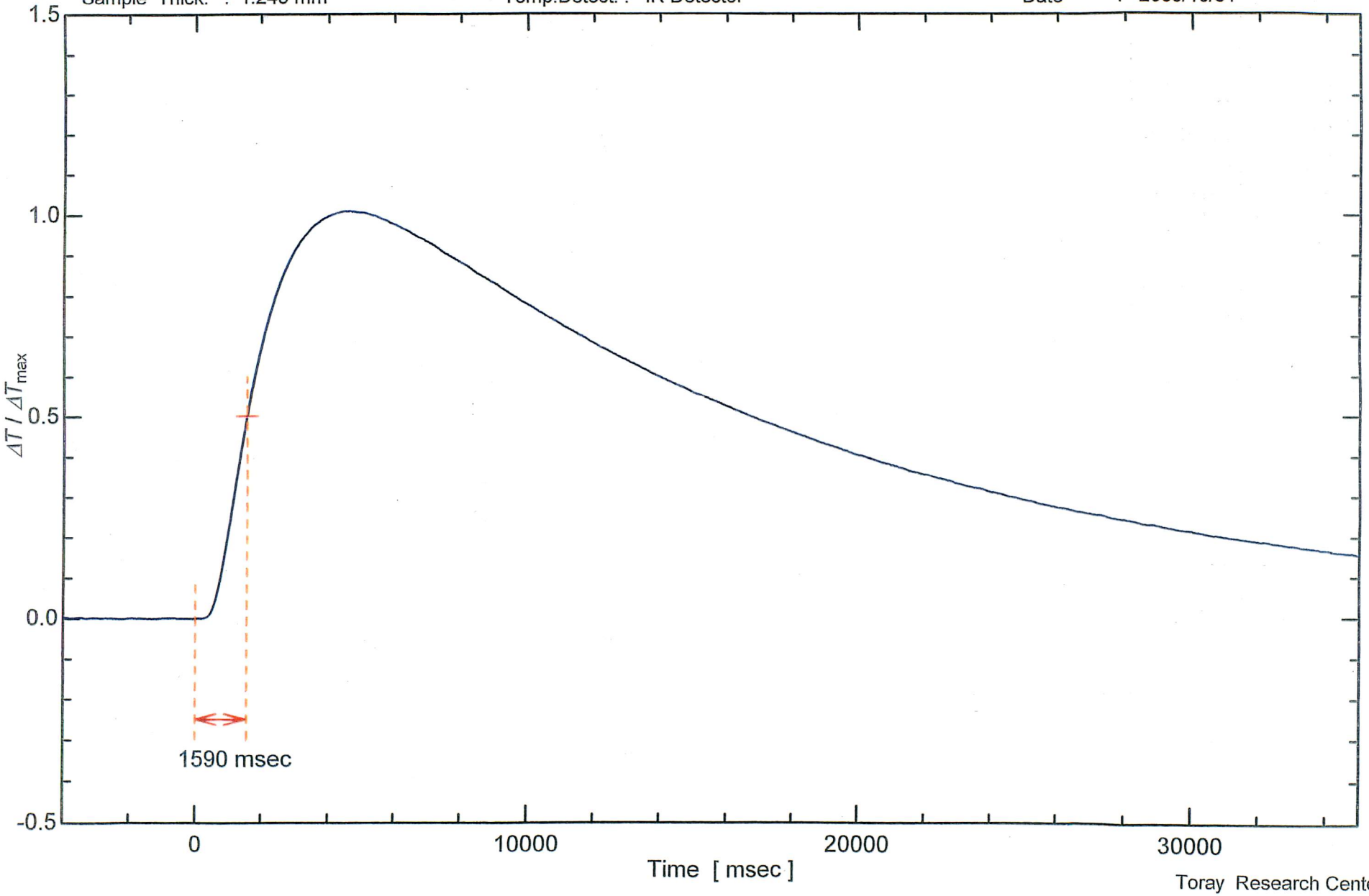
3) 片山，石切山，十時，熱測定 13(1) ,17(1986).

Fig. 3 Rear-surface Temperature Curve Sample: RDF固形燃料 ターム10

Apparatus : TC-7000
Measure. Temp.: 25 ℃
Sample Thick. : 1.245 mm

Measuer.Int. : 5 msec
Sensitivity : 100.0 uv
Temp.Detect. : IR Detector

Serial No. : K228930-A-A
Operator : A.Yamasaki
Date : 2005/10/31



Toray Research Center

③　ＲＤＦ燃料の分析－熱伝導率測定（ニードルプローブ法）－

③ ＲＤＦ燃料の分析－熱伝導率測定（ニードルプローブ法）

1．試料および測定温度

１検体　：　RDF固形燃料 ターム10　（測定温度：25℃）

貴社ご提供品を弊方で凍結粉砕して粉末化した後、試料セル（内径約14 mm，長さ約150 mmのパイレックスガラス製試験管）に採取し、測定に供した。

2．手　法

ニードルプローブ法

3．原　理

図１にニードルプローブ法による熱伝導率測定の原理を示す。一様温度 T_0 の等方性無限媒体中（熱伝導率 λ（W m^{-1} K^{-1}））に、無限に長い発熱細線があるとする。該細線から周囲の媒体中に、単位長さ当り q（W m^{-1}）の発熱が開始されたとすると、式（１）が成立する。

$$\Delta T(t) = T(t) - T_0$$

$$= \frac{q}{4\pi\lambda} \ln\left(\frac{4\,a\,t}{r^2 C}\right) \qquad (1)$$

ここで、$\Delta T(t)$ は細線の温度上昇 (K)、a は熱拡散率 (m^2 s^{-1})、r は細線半径 (m)、C は定数(=1.781..)である。すなわち、細線表面温度 ΔT(K)を発熱開始からの時間 ln (t/s)に対してプロットすれば、その傾きから、式 (2) より熱伝導率 λ を求めることができる。

$$\lambda = \frac{q}{4\pi} \frac{1}{d(\Delta T(t))/d(\ln(t))} \qquad (2)$$

4．装　置

図２に示すニードルプローブを用いた。直径約 1 mm，長さ約 140 mm のステンレス管にヒーターとシース型熱電対を封入した構造になっている。なお、ヒーターへ供給した電力の熱量への換算には、グリセリン(熱伝導率 0.288 W m^{-1} K^{-1}, 25℃[1])およびエチレングリコール (熱伝導率 0.258 W m^{-1} K^{-1}, 25℃[1])を標準試料として求めた校正係数を用いた。

図３に測定装置全体を示す。恒温槽には、恒温水槽(温度安定度±0.02℃)を用いた。試料セルは、既述の様に内径約 14 mm，長さ約 150 mm のパイレックスガラス製試験管を用いた。

5．手　順

① 試料を試料セル（重量・容積既知）に採取する。

② 試料重量を実測し、かさ密度を求める。

③ ニードルプローブを、試料に挿入する。

④ 試料セルを、25℃に制御した恒温槽にセットする。

⑤ 試料温度が安定したことを確認後、ヒーターに一定電流を供給し、その時の電力および熱電対の温度上昇を1秒毎に測定し、パソコンに取込む。

⑥ 9～20秒付近のデータを、式（2）に従って解析し、熱伝導率 λ を求める。

⑦ ⑤，⑥を10回程度繰り返し、平均して測定値を得る。

6．結　果

図4に測定チャートを示す。図中破線は、図中記載の式より求めた計算値である。この点線の傾きから、式（2）により熱伝導率を求めた。

表1に熱伝導率の測定結果を示す。かさ密度の測定精度は±10%程度、熱伝導率の測定精度は±20%程度である。なお、測定された熱伝導率値は、貴社ご提供品（粉末状試料）を試料セル（試験管）にサンプリングした、表中記載のかさ密度を有する「粉末状試料＋空気」といった一種の複合材料に対する熱伝導率であることに注意されたい。

表1　熱伝導率測定結果

試　料	温度 T / ℃	かさ密度*1 / kg m^{-3}	熱伝導率*2 λ / W m^{-1} K^{-1}
RDF固形燃料 ﾀｰﾑ10	25	388	0.0623

*1　かさ密度の測定精度は±10%程度

*2　熱伝導率の測定精度は±20%程度
なお、1 W m^{-1} K^{-1} = 2.390 × 10^{-3} cal cm^{-1} s^{-1} ℃$^{-1}$

7．参考文献

[1] 日本化学会編,「化学便覧基礎編改訂3版」, p. II -73,丸善㈱発行(1984).

8．添付資料

付録：単位換算表

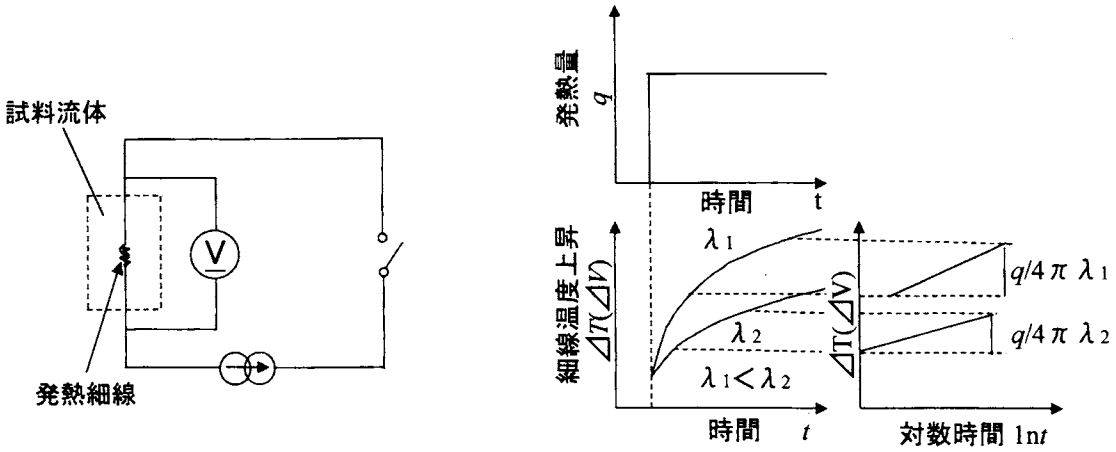


図１ ニードルプローブ法の測定原理

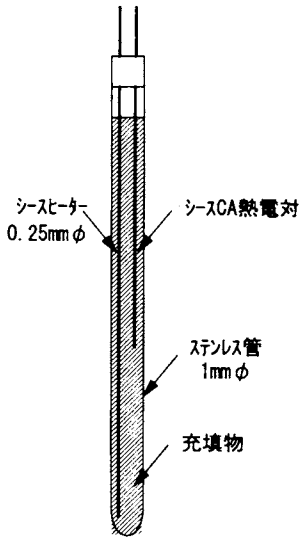


図２ ニードルプローブ

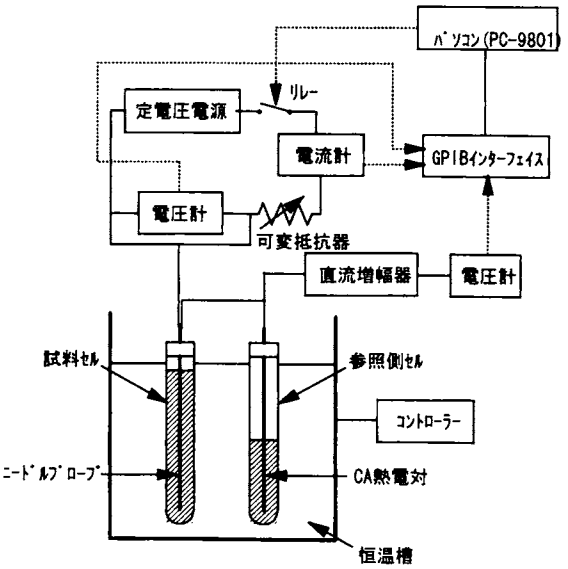


図３ ニードルプローブ法測定装置

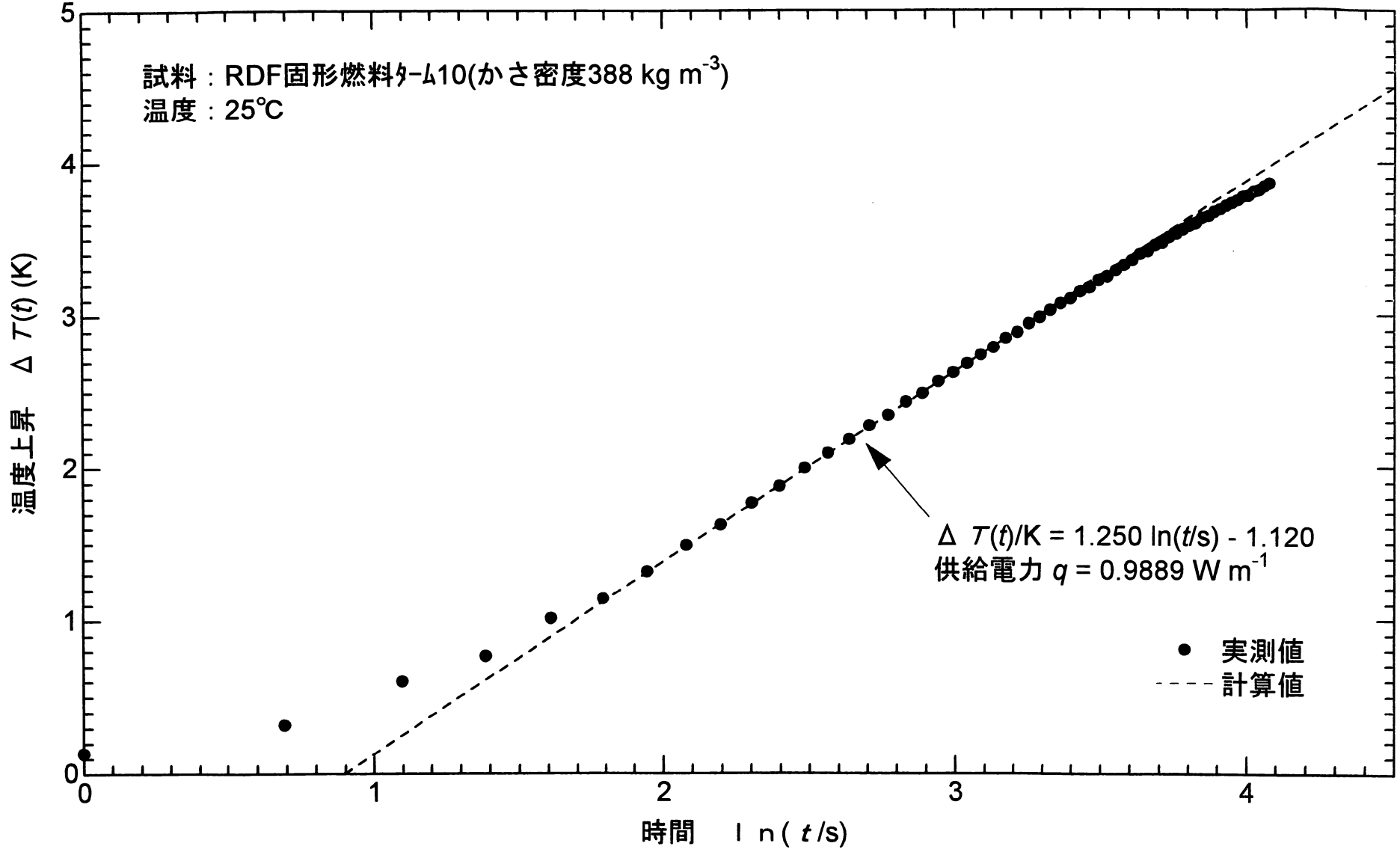


図4　熱伝導率測定チャート

付録：単位換算表

（1） エネルギー

J	cal
1	0.239
4.184	1

（2） 熱拡散率

$m^2\ s^{-1}$	$cm^2\ s^{-1}$	$m^2\ hr^{-1}$
1	1×10^4	3.600×10^{-3}
1×10^{-4}	1	3.600×10^{-1}
2.778×10^{-4}	2.778	1

（3） 比熱

$J\ kg^{-1}K^{-1}$	$cal\ g^{-1}℃^{-1}$
1	0.2390×10^{-3}
4.184×10^3	1

（4） 熱伝導率

$W\ m^{-1}K^{-1}$	$cal\ cm^{-1}s^{-1}℃^{-1}$	$kcal\ m^{-1}hr^{-1}℃^{-1}$
1	2.390×10^{-3}	0.8604
418.4	1	360
1.162	2.778×10^{-3}	1

④　ＲＤＦ燃料の分析－ＴＧ－ＤＴＧ測定（その１：加熱減量挙動）－

④ ＲＤＦ燃料の分析－ＴＧ－ＤＴＧ測定（その１：加熱減量挙動）

１．試　　料

１検体　：　RDF固形燃料 ターム10

貴社ご提供品を弊方で凍結粉砕して測定に供した。

２．手　　法

熱重量測定法（TG-DTG*：Thermogravimetry－Derivative Thermogravimetry）

*DTG は TG の微分

３．測　　定

窒素，５%酸素／窒素，10%酸素／窒素，空気の４種の雰囲気下で、室温～1000℃間の TG-DTG 曲線を昇温速度 10℃/min で測定して、RDF 固形燃料の加熱減量挙動を調べた。

測定条件の詳細は，次のとおりである。

装　　置：島津製作所製　TG-40 型
データ処理：東レリサーチセンター製データ処理システム "TRC-THADAP-TG-2"
雰　囲　気：窒素流，空気流，5%酸素／窒素，10%酸素／窒素
ガス流量：50 ml/min
温度較正：高純度ニッケル（キュリーポイント：353℃）
測定温度範囲：室温～1000℃
昇温速度：10℃/min
試　料　量：約 10 mg（値は図中に記載）

４．結　　果

４．１ 熱分解過程（窒素雰囲気）の TG 測定結果

TG 曲線を Fig.1 に示す。ほぼ四段階（DTG ピーク温度：61℃，346℃，498℃，677℃）の加熱減量が認められる。このうち、第一段階目の減量は付着水等の気散によるもの、第二～第四段階目の減量は熱分解によるものに帰属される。

TG 測定結果を表１にまとめる。

４．２ 熱酸化分解過程（空気雰囲気および 5%，10%酸素／窒素）の TG 測定結果

空気雰囲気下で測定した TG 曲線を Fig.2 に、5%酸素／窒素および 10%酸素／窒素における TG 曲線を Figs.3,4 に示す。

各雰囲気下における測定ともに、ほぼ四段階（DTG ピーク温度：55～62℃，310～325℃，485～498℃，676～684℃）の加熱減量が認められる。このうち、第一段階目の減量は付着水等の気散によるもの、第二～第四段階目の減量は熱酸化分解によるものに帰属される。

また、5%酸素／窒素雰囲気および 10%酸素／窒素雰囲気での熱酸化分解挙動は、空気雰囲気下での熱酸化分解挙動に似ている。 ただし、酸素濃度が高いほど、主分解の主熱分解の外挿開始温度および DTG ピーク温度は低温側にシフトしている。

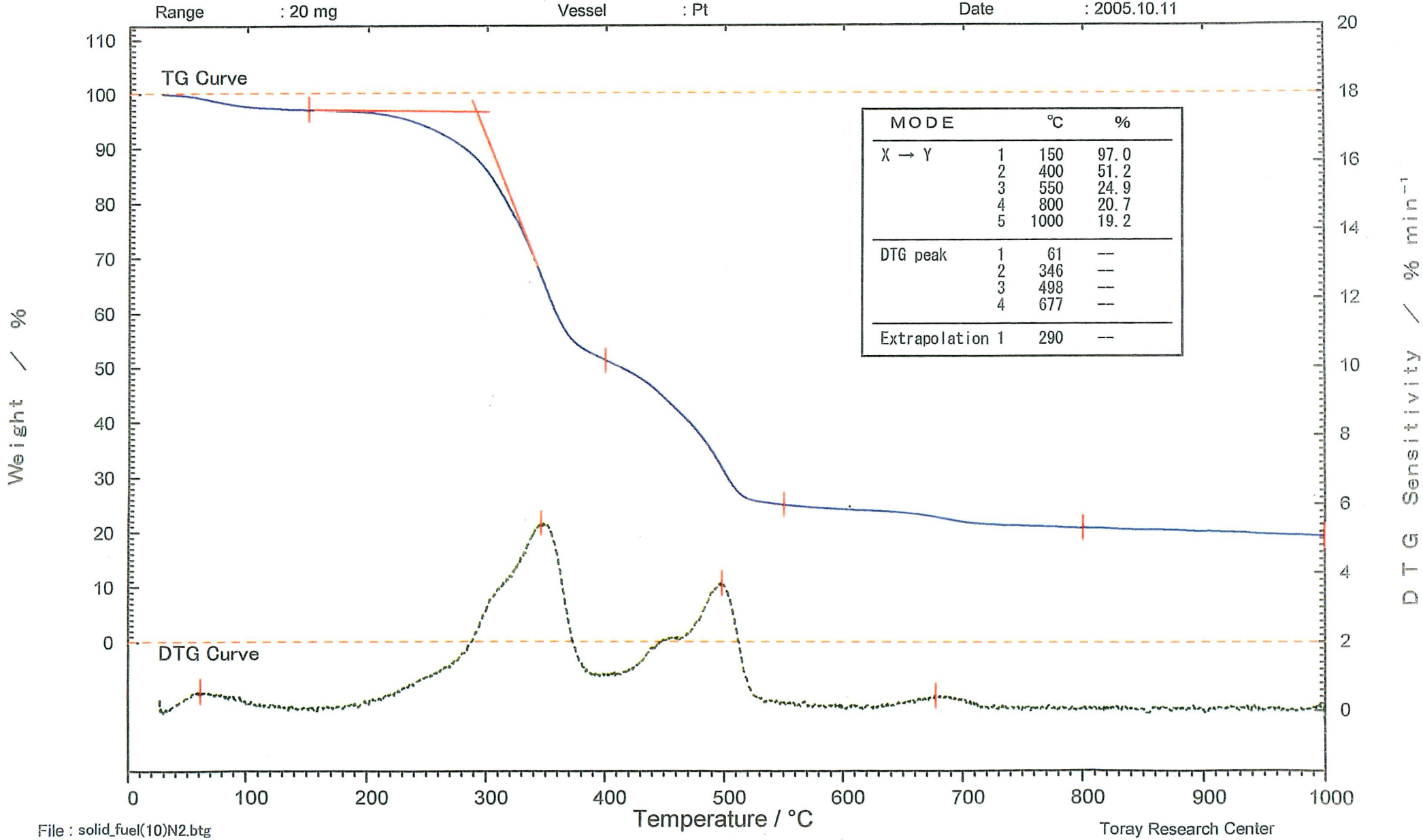
TG 測定結果を表 1 にまとめる。

表 1 RDF 固形燃料の各雰囲気下における TG 測定結果

試料 特性　　雰囲気	RDF 固形燃料（ターム 10）			
	窒素	5%酸素 ／窒素	10%酸素 ／窒素	空気
室温～150℃間の減量率 (%)	3.0	4.4	4.4	4.5
室温～400℃間の減量率 (%)	48.8	57.0	62.7	63.6
室温～550℃間の減量率 (%)	75.1	85.9	86.0	84.7
室温～800℃間の減量率 (%)	79.3	89.1	89.4	88.5
室温～1000℃間の減量率 (%)	80.8	89.4	90.3	89.0
DTG ピーク温度 (℃)	61 346 498 677	60 325 498 684	62 320 488 676	55 310 485 679
主熱分解の外挿開始温度 (℃)	290	279	270	261

Fig. | TG Curve [Nitrogen] Sample : RDF固形燃料

Apparatus	: Shimadzu TG-40	Sample Size	: 9.55 mg	Gas Flow	: 30 ml/min, (upper/)	20 ml/min, (bottom/)
Heating Rate	: 10 deg/min	Pretreatment	:	Operator	: I.Kawasaki	
Range	: 20 mg	Vessel	: Pt	Date	: 2005.10.11	



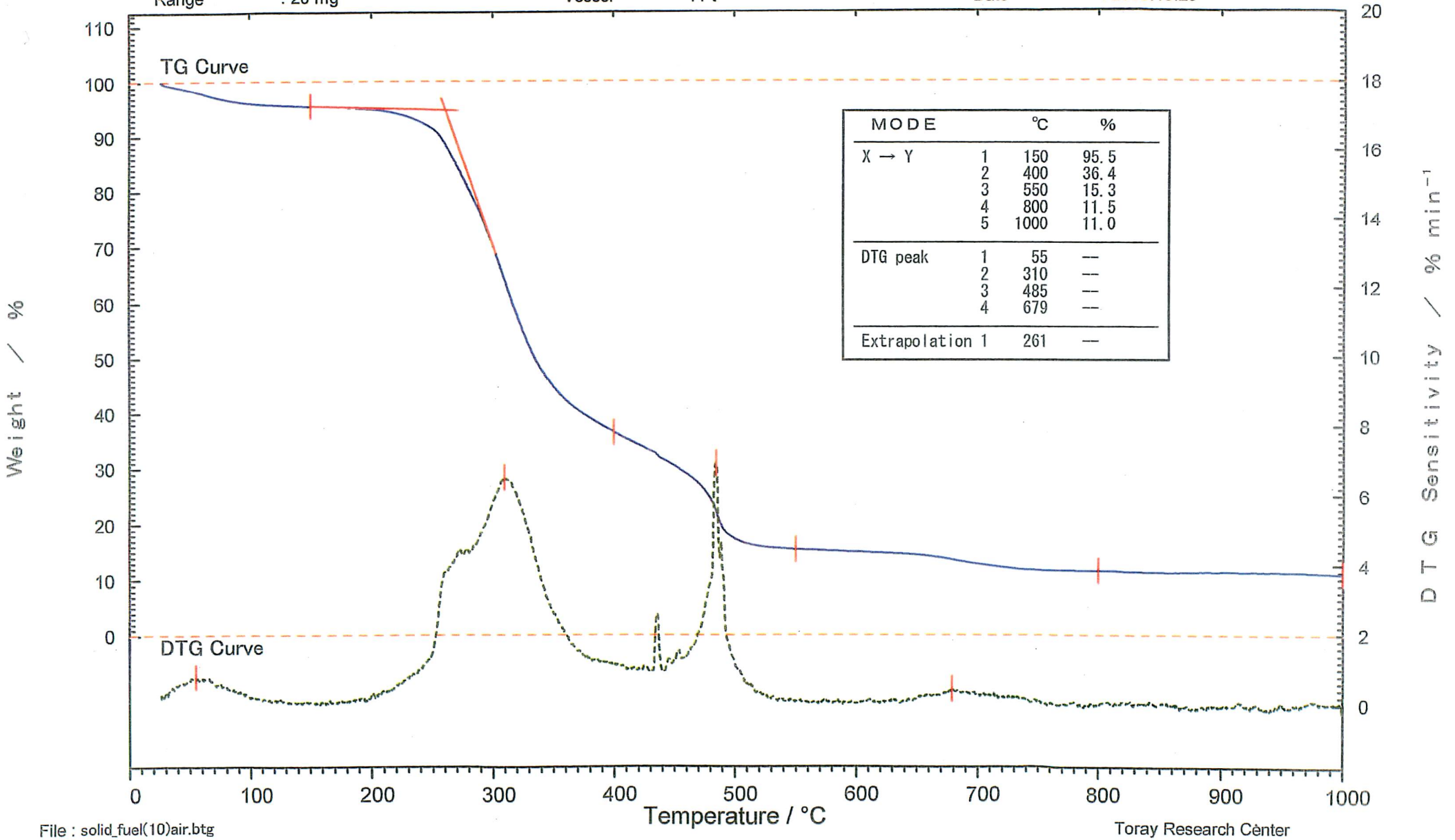
MODE		℃	%
X → Y	1	150	97.0
	2	400	51.2
	3	550	24.9
	4	800	20.7
	5	1000	19.2
DTG peak	1	61	--
	2	346	--
	3	498	--
	4	677	--
Extrapolation	1	290	--

File : solid_fuel(10)N2.btg

Toray Research Center

Fig. 2 TG Curve [Air] Sample : RDF固形燃料

Apparatus	: Shimadzu TG-40	Sample Size	: 10.31 mg	Gas Flow	: 30 ml/min, (upper/)	20 ml/min, (bottom/)
Heating Rate	: 10 deg/min	Pretreatment	:	Operator	: I.Kawasaki	
Range	: 20 mg	Vessel	: Pt	Date	: 2005.10.20	



MODE		℃	%
X → Y	1	150	95.5
	2	400	36.4
	3	550	15.3
	4	800	11.5
	5	1000	11.0
DTG peak	1	55	—
	2	310	—
	3	485	—
	4	679	—
Extrapolation	1	261	—

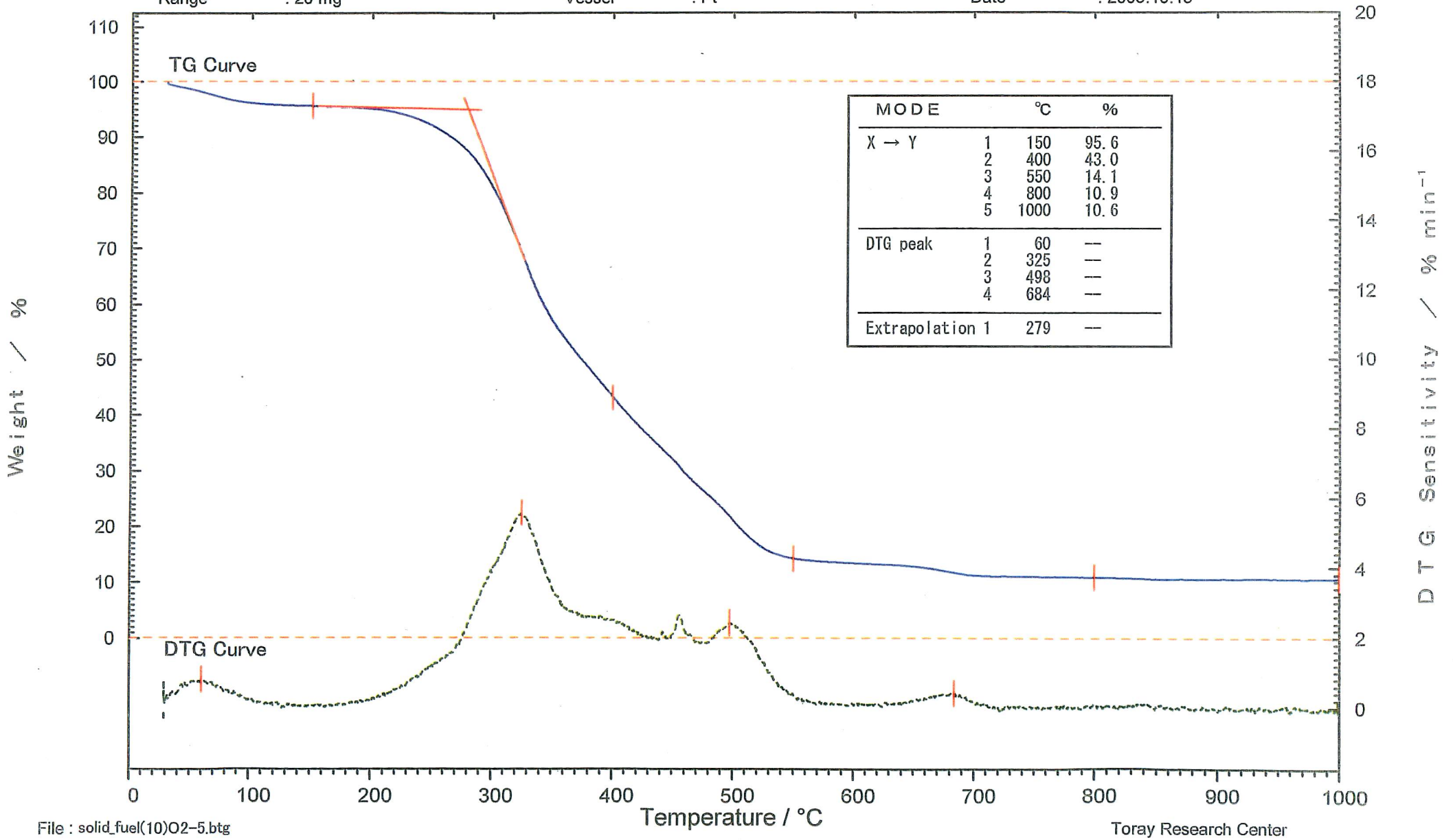
File : solid_fuel(10)air.btg

Toray Research Center

Fig. 3 TG Curve [5%O2]

Sample : RDF固形燃料

Apparatus	: Shimadzu TG-40	Sample Size	: 10.43 mg	Gas Flow	: 30 ml/min, (upper/)	20 ml/min, (bottom/)
Heating Rate	: 10 deg/min	Pretreatment	:	Operator	: I.Kawasaki	
Range	: 20 mg	Vessel	: Pt	Date	: 2005.10.13	



MODE		℃	%
X → Y	1	150	95.6
	2	400	43.0
	3	550	14.1
	4	800	10.9
	5	1000	10.6
DTG peak	1	60	—
	2	325	—
	3	498	—
	4	684	—
Extrapolation	1	279	—

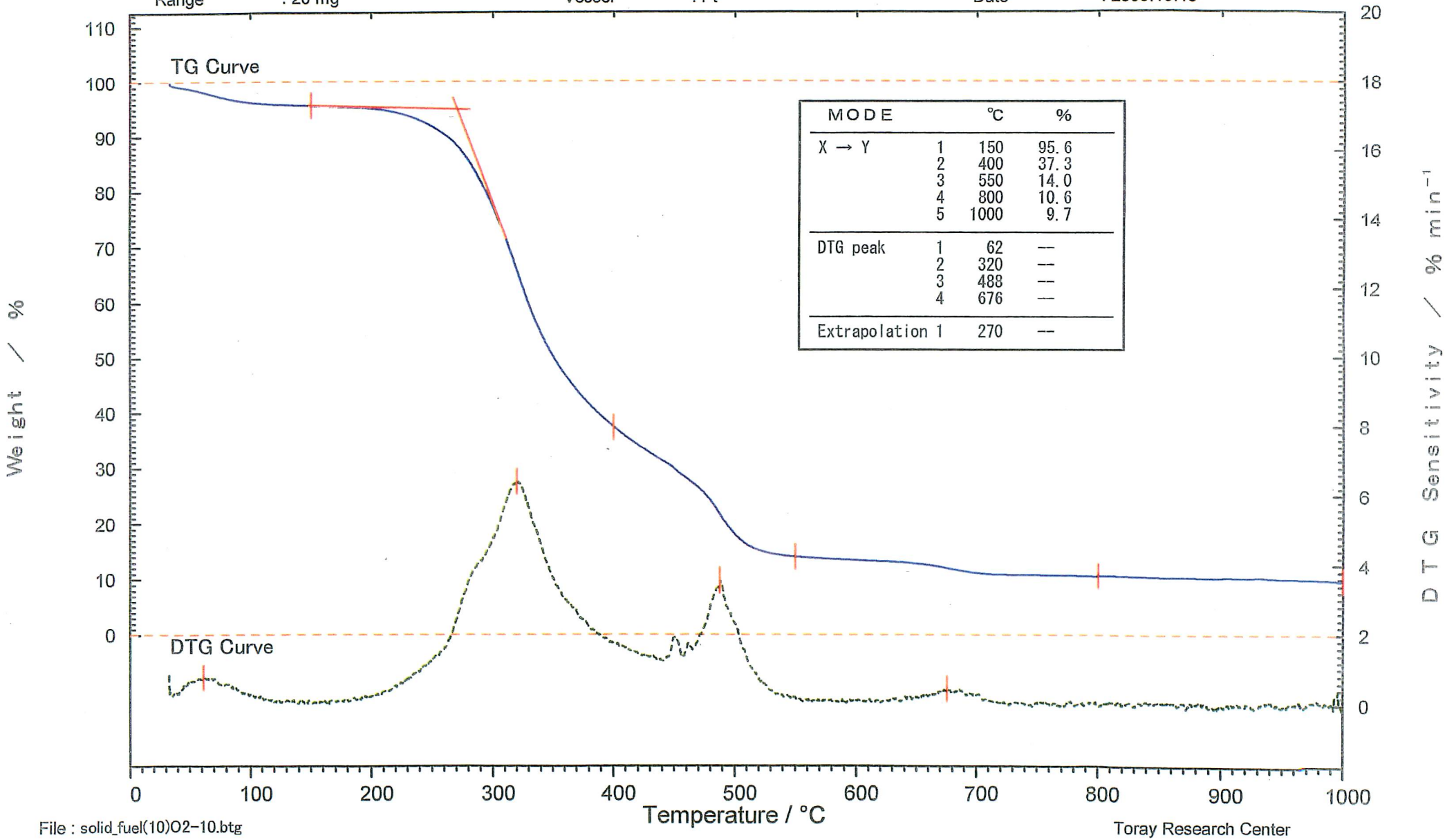
File : solid_fuel(10)O2-5.btg

Toray Research Center

Fig. 4 TG Curve [10%O2]

Sample : RDF固形燃料

Apparatus	: Shimadzu TG-40	Sample Size	: 10.64 mg	Gas Flow	: 30 ml/min, (upper/)	20 ml/min, (bottom/)
Heating Rate	: 10 deg/min	Pretreatment	:	Operator	: I.Kawasaki	
Range	: 20 mg	Vessel	: Pt	Date	: 2005.10.13	



MODE		℃	%
X → Y	1	150	95.6
	2	400	37.3
	3	550	14.0
	4	800	10.6
	5	1000	9.7
DTG peak	1	62	--
	2	320	--
	3	488	--
	4	676	--
Extrapolation	1	270	--

File : solid_fuel(10)O2-10.btg

Toray Research Center

⑤　ＲＤＦ燃料の分析－ＴＧ－ＤＴＧ測定（その２：活性化エネルギーの算出）－

⑤ ＲＤＦ燃料の分析－ＴＧ－ＤＴＧ測定（その２：活性化エネルギーの算出）

１．試　　料

１検体　：　RDF固形燃料 ターム10

貴社ご提供品を弊方で凍結粉砕して測定に供した。

２．手　　法

熱重量測定法（TG–DTG*：Thermogravimetry－Derivative Thermogravimetry）

*DTG は TG の微分

３．測　　定

窒素，5%酸素／窒素，10%酸素／窒素，空気の４種の雰囲気下で、室温～1000℃間の TG–DTG 曲線を昇温速度 2℃/min，5℃/min，10℃/min，20℃/min で測定した。

測定条件の詳細は、次のとおりである。

装　　置：島津製作所製　TG-40 型
データ処理：東レリサーチセンター製データ処理システム“TRC-THADAP-TG-2”
雰　囲　気：窒素流，空気流，5%酸素／窒素，10%酸素／窒素
ガス流量：50 ml/min
温度較正：高純度ニッケル（キュリーポイント：353℃）
測定温度範囲：室温～1000℃
昇温速度：2℃/min，5℃/min，10℃/min，20℃/min
試　料　量：約 10 mg

4．結　果

各昇温速度でのTG-DTG曲線をFigs. 1～4（Fig. 1：窒素，Fig. 2：5％酸素／窒素，Fig. 3：10％酸素／窒素，Fig. 4：空気）に重ね描きする。各曲線ともに、およそ四段階（DTGピーク温度：RT～100℃，250～350℃，450℃～550℃，650～750℃）の加熱減量が認められる。これらのうち、第一段階目の減量は付着水等の気散によるもの、第二～第四段階目の減量は試料の熱分解（窒素）および熱酸化分解（空気，5％酸素／窒素，10％酸素／窒素）によるものと考えられる。そこで、減量率が最も大きな第二段階目の加熱減量に注目して、小澤法による熱分解時の活性化エネルギーの算出を試みた。

活性化エネルギーを計算するために、分解がまだ始まっていない150℃の重量率を100%，第二段階目の減量の終了時温度（約300℃～400℃で各水準により異なる）の重量率を0％とみなして、TG曲線の規格化を行った（Figs. 5～8）。規格化されたTG曲線について、重量率90%～10%（熱分解率10%～90%）時の温度を読み取った。その結果を表1にまとめる。

次に、小澤法による活性化エネルギーを求めるために、表1の結果に基づいて、横軸に $1/T$（絶対温度 T の逆数）、縦軸に $\log\Phi$（昇温速度の常用対数）をプロットした。その結果をFigs. 9～12に示す（横軸は $1000/T$ にしてある）。この小澤プロットにおいて、線形近似の直線の傾きから下式に基づいて活性化エネルギーを求めた。

$$\text{近似直線の傾き} = 0.4567\,\Delta E / R$$

ここで、ΔE は活性化エネルギー、R は気体定数（8.314510 J mol^{-1} K^{-1}）であるため、

$$\Delta E \ \ (\text{kJ mol}^{-1}) = \text{近似直線の傾き}/0.0549$$

と書き換えることができる。

Figs. 9～12の小澤プロットは、熱分解率10%～熱分解率90%までのいずれのプロットについても、概ね直線関係が成立しているものの、それら直線の傾きは一定ではなく、熱分解率に依存して変化している。そこで、ほぼ平行性の成り立っている30%，50%，70%熱分解時の直線の傾きからそれぞれ活性化エネルギーを見積もり、平均値を算出することとした。その結果を各図中に記載するとともに、表2にまとめた。

表１ RDF 固形燃料の熱分解過程における TG 測定結果

雰囲気	昇温速度	所定熱分解率時の温度／℃								
		10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%
窒素	2℃/min	236.2	265.2	280.9	293.4	303.6	312.4	319.8	327.2	335.8
	5℃/min	248.6	277.1	291.7	303.7	314.7	324.3	332.6	340.8	350.8
	10℃/min	261.8	290.9	306.7	318.9	330.0	339.5	347.7	356.1	366.4
	20℃/min	276.7	307.9	325.1	338.1	349.5	358.9	367.1	375.6	385.8
5%酸素／窒素	2℃/min	230.4	251.0	262.6	273.0	281.2	288.6	295.7	303.4	312.3
	5℃/min	245.2	269.2	282.6	293.2	302.2	310.5	318.0	326.7	337.4
	10℃/min	254.3	280.1	294.7	305.5	314.4	322.6	330.3	338.1	348.5
	20℃/min	274.6	302.1	317.3	328.9	338.5	347.2	354.9	363.4	374.2
10%酸素／窒素	2℃/min	230.4	246.4	258.2	268	276.2	283.6	290.7	298.2	306.5
	5℃/min	242.6	262.1	273.9	284.5	293.6	301.4	309.0	317.5	327.6
	10℃/min	257.4	278.5	291.4	302.0	311.0	318.9	326.6	335.1	345.9
	20℃/min	274.8	299.2	312.1	323.1	332.6	340.5	348.3	356.5	366.3
空気	2℃/min	224.8	238.7	251.3	261.4	269.5	276.8	283.7	291.3	299.2
	5℃/min	241.6	255.4	268.2	279.7	288.8	296.7	305.2	314.1	325.4
	10℃/min	257.2	271.4	284.2	295.7	304.9	313.7	323.1	333.8	350.1
	20℃/min	278.5	294.5	307.7	319.3	328.6	336.4	345.2	357.2	375.3

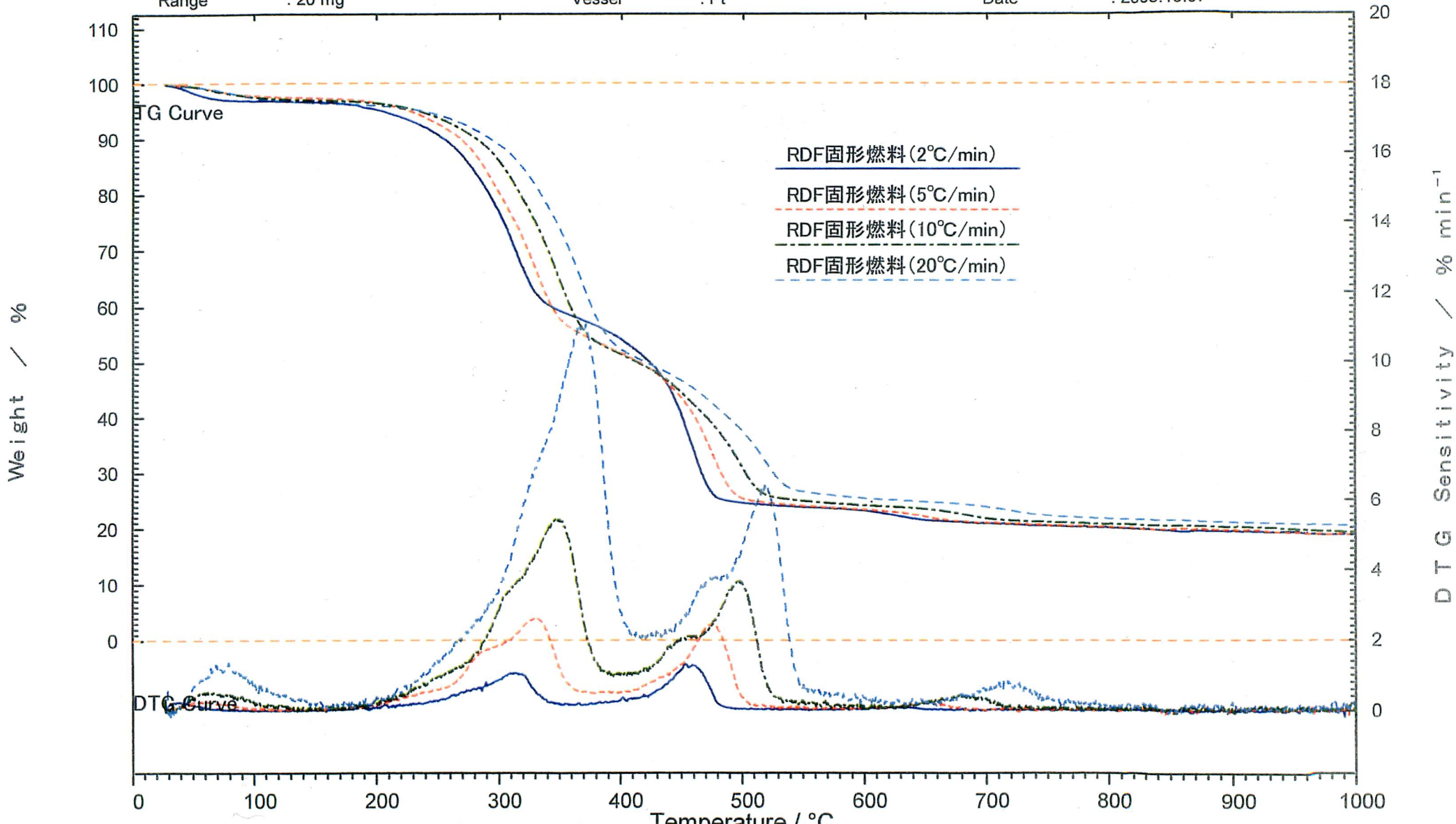
*150℃～約 350℃間で重量を規格化

表２ 各分解率における活性化エネルギー

特　性	窒　素	5%酸素／窒素	10%酸素／窒素	空気
30%熱分解時の ΔE (kJ mol^{-1})	132.8	107.0	103.9	98.2
50%熱分解時の ΔE (kJ mol^{-1})	138.5	109.6	107.0	101.1
70%熱分解時の ΔE (kJ mol^{-1})	143.8	111.9	110.5	102.3
ΔE の平均値 (kJ mol^{-1})	**138.4**	**109.5**	**107.1**	**100.5**

Fig. 1 TG Curve [Nitrogen]

Apparatus	: Shimadzu TG-40	Sample Size	: 10 mg	Gas Flow	: 30 ml/min, (upper/)	20 ml/min, (bottom/)
Heating Rate	: 2 deg/min	Pretreatment	:	Operator	: I.Kawasaki	
Range	: 20 mg	Vessel	: Pt	Date	: 2005.10.07	

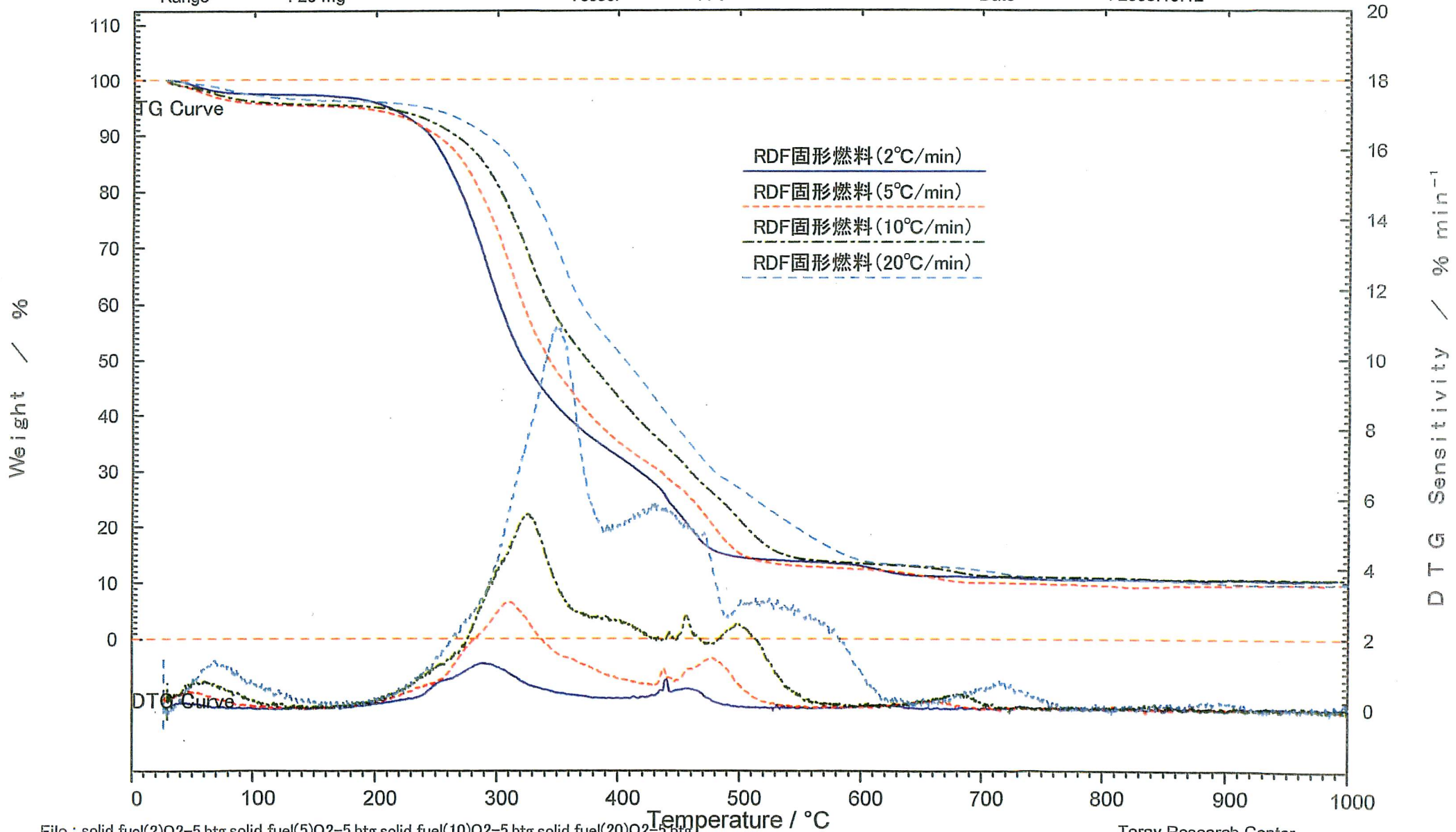


File : solid_fuel(10(2))N2.btg,solid_fuel(5)N2.btg,solid_fuel(10)N2.btg,solid_fuel(20)N2.btg

Toray Research Center

Fig. 2 TG Curve [5%O2]

Apparatus	: Shimadzu TG-40	Sample Size	: 10 mg	Gas Flow	: 30 ml/min, (upper/)	20 ml/min, (bottom/)
Heating Rate	: 2 deg/min	Pretreatment	:	Operator	: I.Kawasaki	
Range	: 20 mg	Vessel	: Pt	Date	: 2005.10.12	

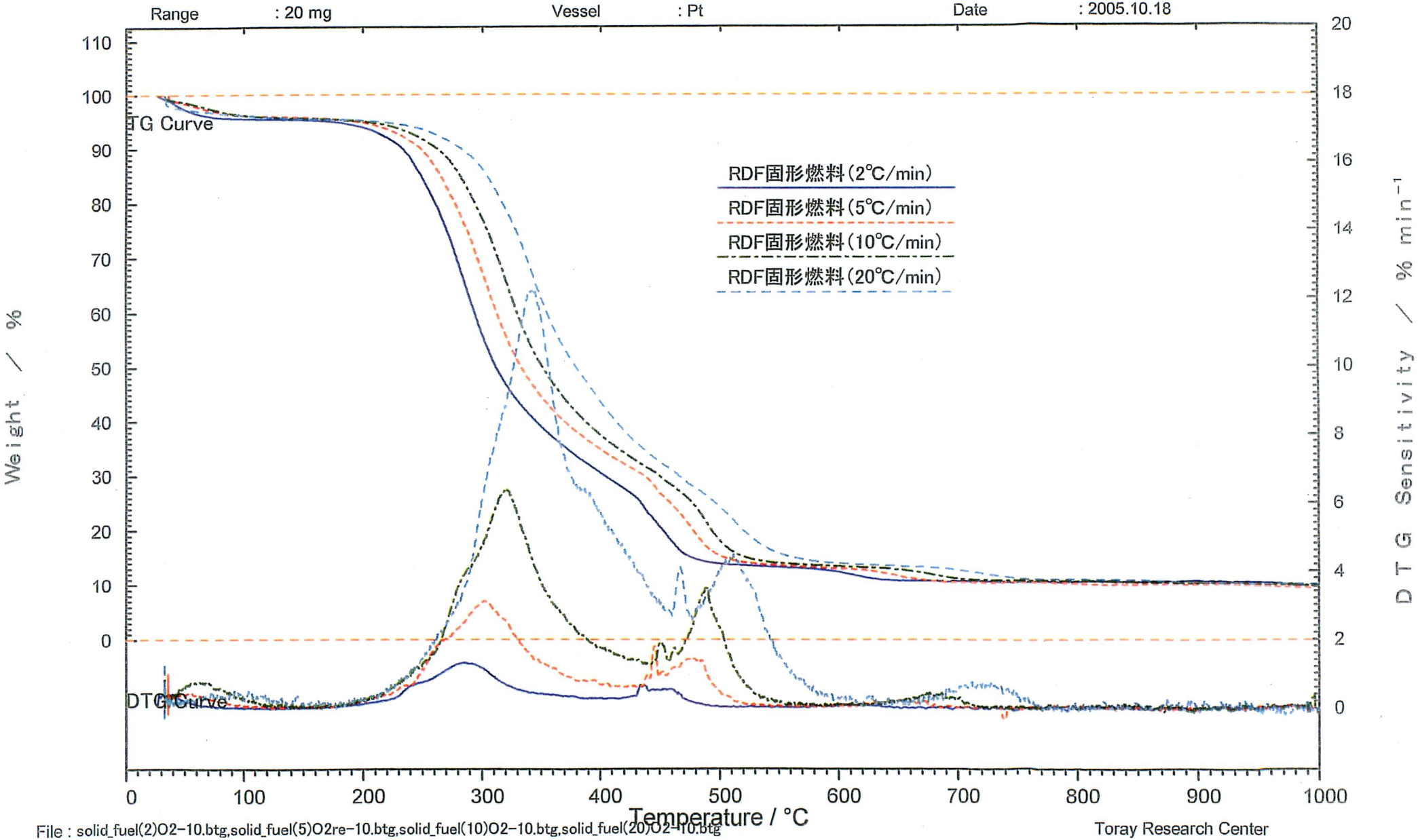


File : solid_fuel(2)O2-5.btg,solid_fuel(5)O2-5.btg,solid_fuel(10)O2-5.btg,solid_fuel(20)O2-5.btg

Toray Research Center

Fig. 3 TG Curve [10%O2]

Apparatus	: Shimadzu TG-40	Sample Size	: 10 mg	Gas Flow	: 30 ml/min, (upper/)	20 ml/min, (bottom/)
Heating Rate	: 2 deg/min	Pretreatment	:	Operator	: I.Kawasaki	
Range	: 20 mg	Vessel	: Pt	Date	: 2005.10.18	

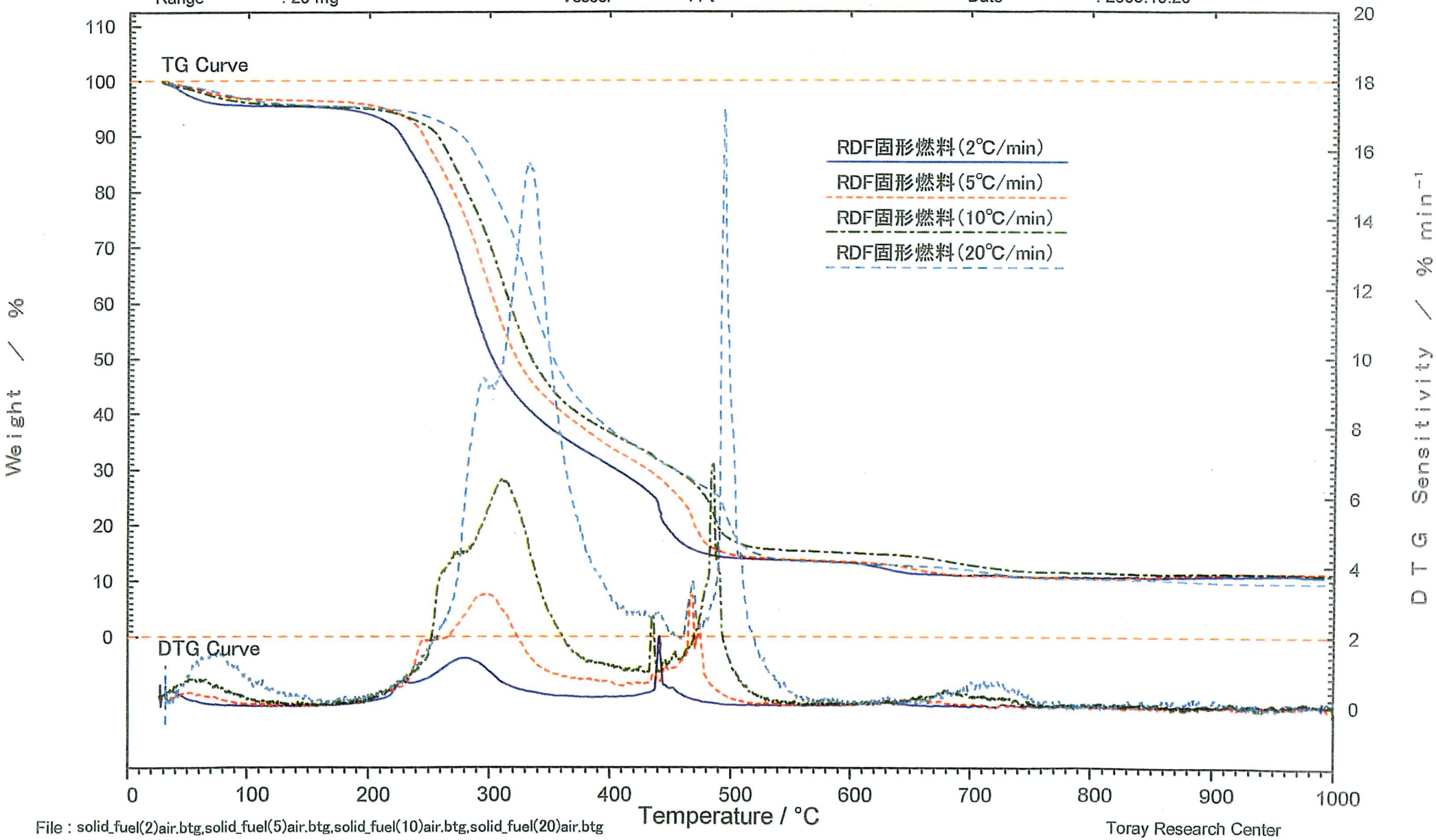


File : solid_fuel(2)O2-10.btg,solid_fuel(5)O2re-10.btg,solid_fuel(10)O2-10.btg,solid_fuel(20)O2-10.btg

Toray Research Center

Fig. 4 TG Curve [Air]

Apparatus	: Shimadzu TG-40	Sample Size	: 10 mg	Gas Flow	: 30 ml/min, (upper/)	20 ml/min, (bottom/)
Heating Rate	: 2 deg/min	Pretreatment	:	Operator	: I.Kawasaki	
Range	: 20 mg	Vessel	: Pt	Date	: 2005.10.20	

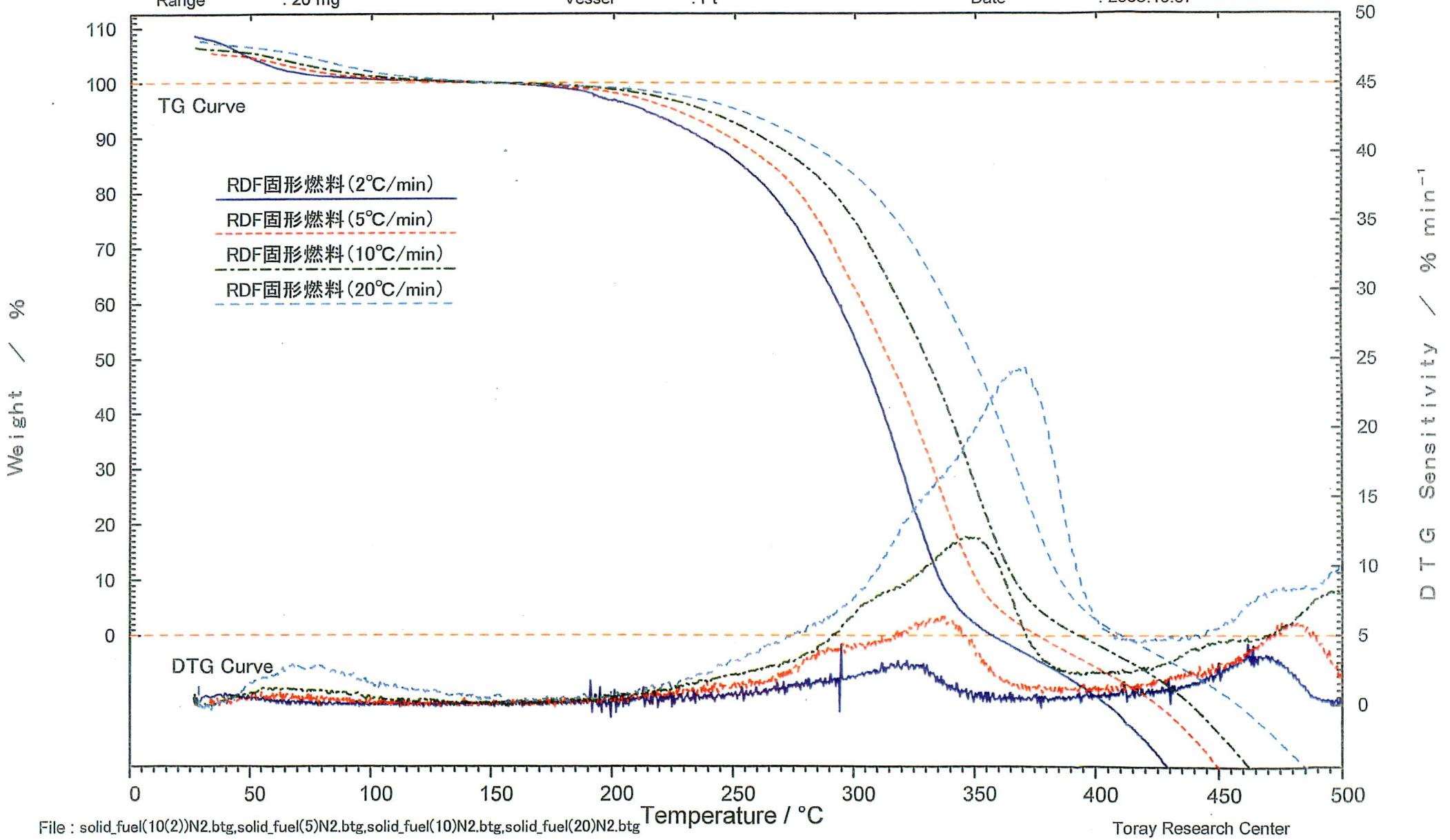


File : solid_fuel(2)air.btg,solid_fuel(5)air.btg,solid_fuel(10)air.btg,solid_fuel(20)air.btg

Toray Research Center

Fig. 5 TG Curve [Nitrogen]

Apparatus	: Shimadzu TG-40	Sample Size	: 10 mg	Gas Flow	: 30 ml/min, (upper/)	20 ml/min, (bottom/)
Heating Rate	: 2 deg/min	Pretreatment	:	Operator	: I.Kawasaki	
Range	: 20 mg	Vessel	: Pt	Date	: 2005.10.07	

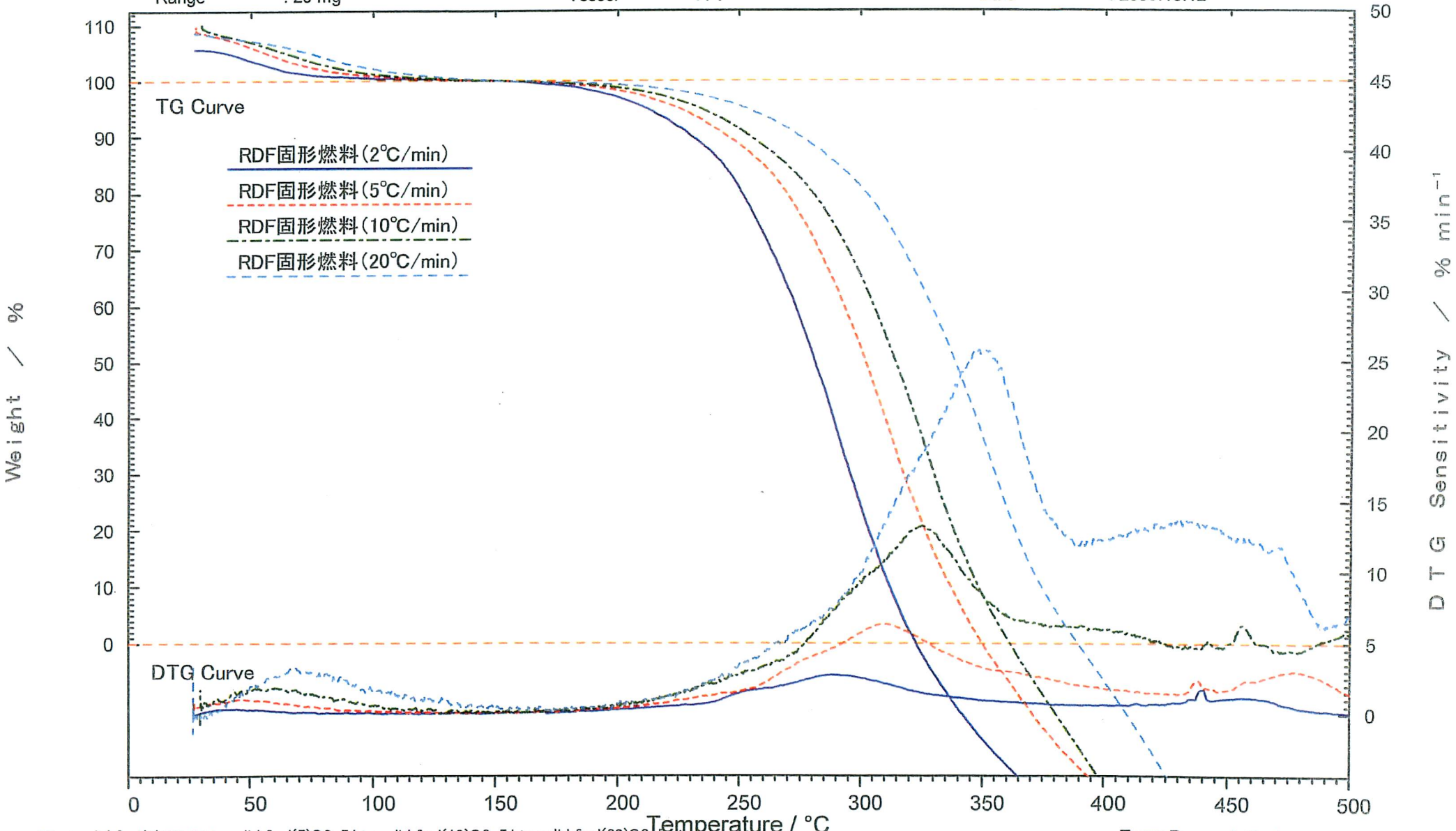


File : solid_fuel(10(2))N2.btg,solid_fuel(5)N2.btg,solid_fuel(10)N2.btg,solid_fuel(20)N2.btg

Toray Research Center

Fig. 6 TG Curve [5%O2]

Apparatus	: Shimadzu TG-40	Sample Size	: 10 mg	Gas Flow	: 30 ml/min, (upper/)	20 ml/min, (bottom/)
Heating Rate	: 2 deg/min	Pretreatment	:	Operator	: I.Kawasaki	
Range	: 20 mg	Vessel	: Pt	Date	: 2005.10.12	

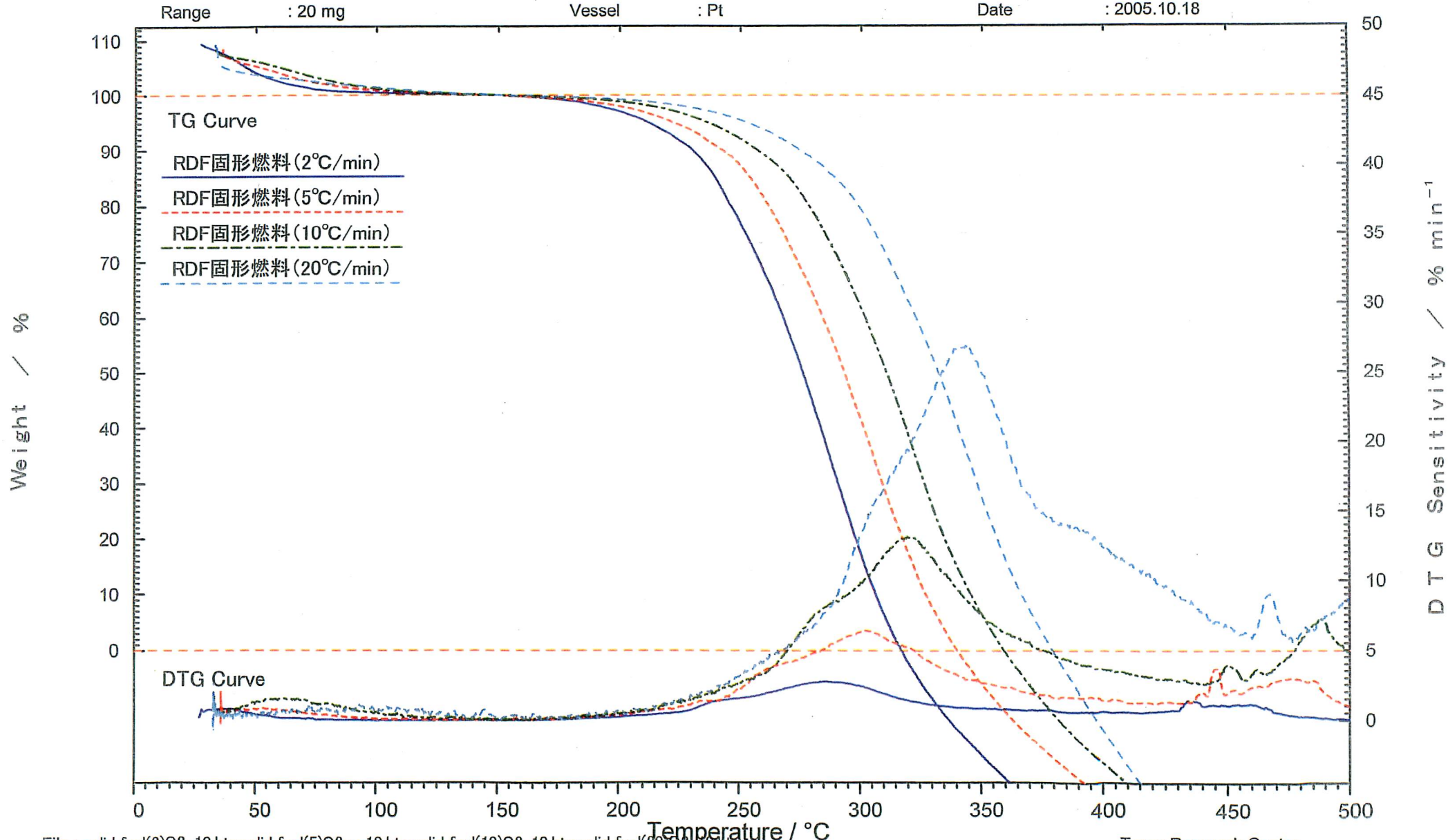


File : solid_fuel(2)O2-5.btg,solid_fuel(5)O2-5.btg,solid_fuel(10)O2-5.btg,solid_fuel(20)O2-5.btg

Toray Research Center

Fig. 7 TG Curve [10%O2]

Apparatus	: Shimadzu TG-40	Sample Size	: 10 mg	Gas Flow	: 30 ml/min, (upper/)	20 ml/min, (bottom/)
Heating Rate	: 2 deg/min	Pretreatment	:	Operator	: I.Kawasaki	
Range	: 20 mg	Vessel	: Pt	Date	: 2005.10.18	

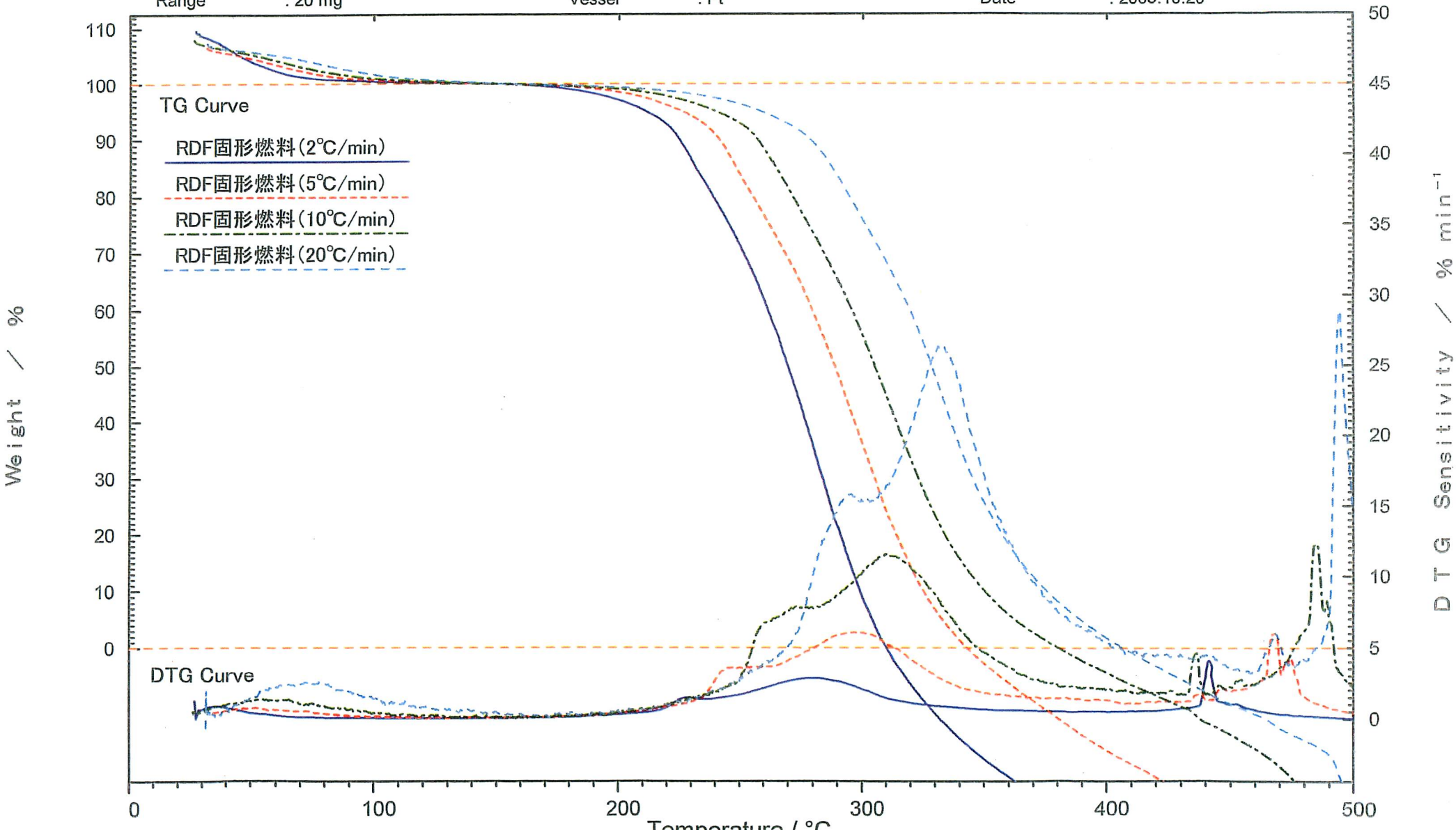


File : solid_fuel(2)O2-10.btg,solid_fuel(5)O2re-10.btg,solid_fuel(10)O2-10.btg,solid_fuel(20)O2-10.btg

Toray Research Center

Fig. 8 TG Curve [Air]

Apparatus	: Shimadzu TG-40	Sample Size	: 10 mg	Gas Flow	: 30 ml/min, (upper/)	20 ml/min, (bottom/)
Heating Rate	: 2 deg/min	Pretreatment	:	Operator	: I.Kawasaki	
Range	: 20 mg	Vessel	: Pt	Date	: 2005.10.20	



File : solid_fuel(2)air.btg,solid_fuel(5)air.btg,solid_fuel(10)air.btg,solid_fuel(20)air.btg

Toray Research Center

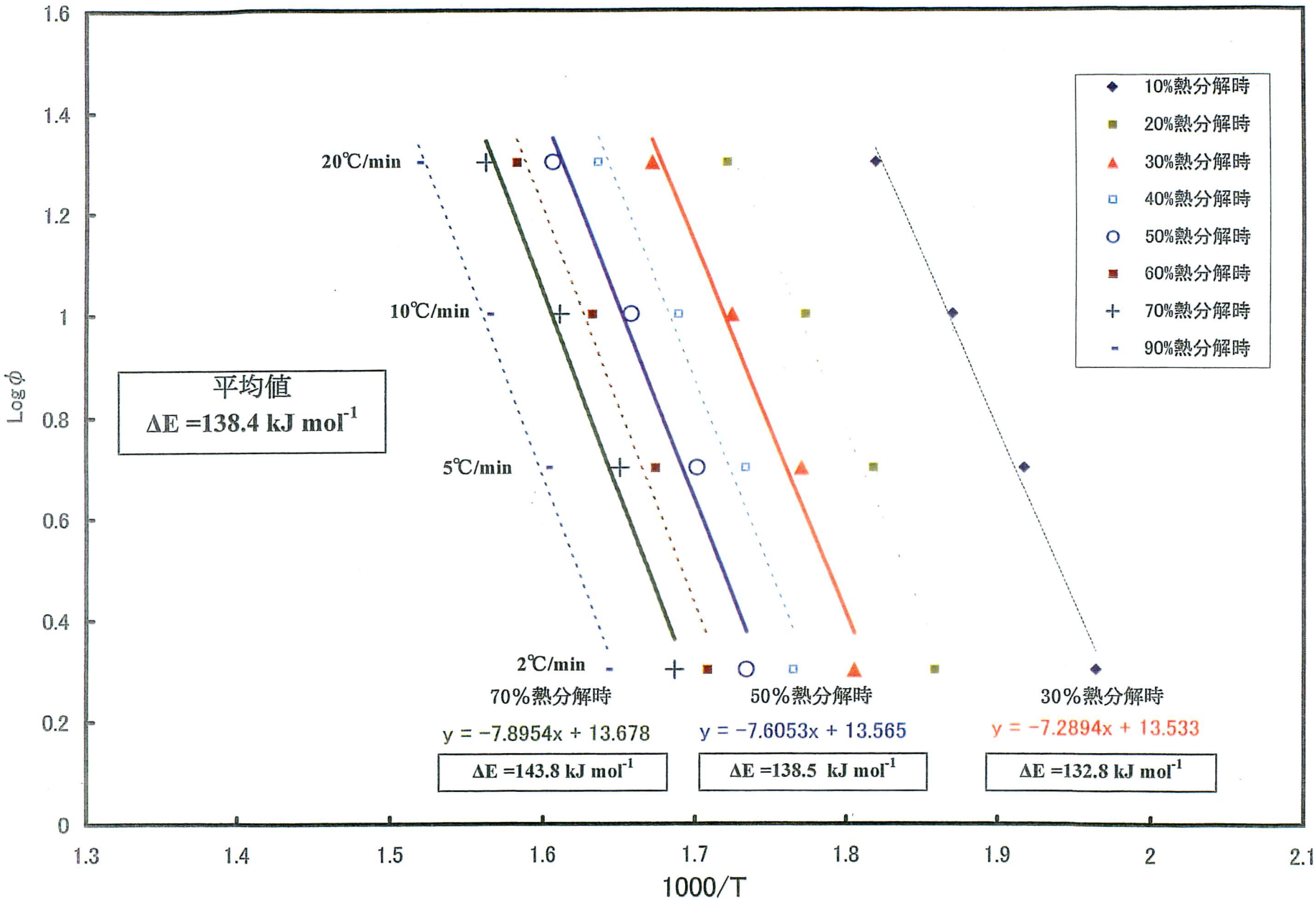


Fig 9.小澤プロット（窒素雰囲気）

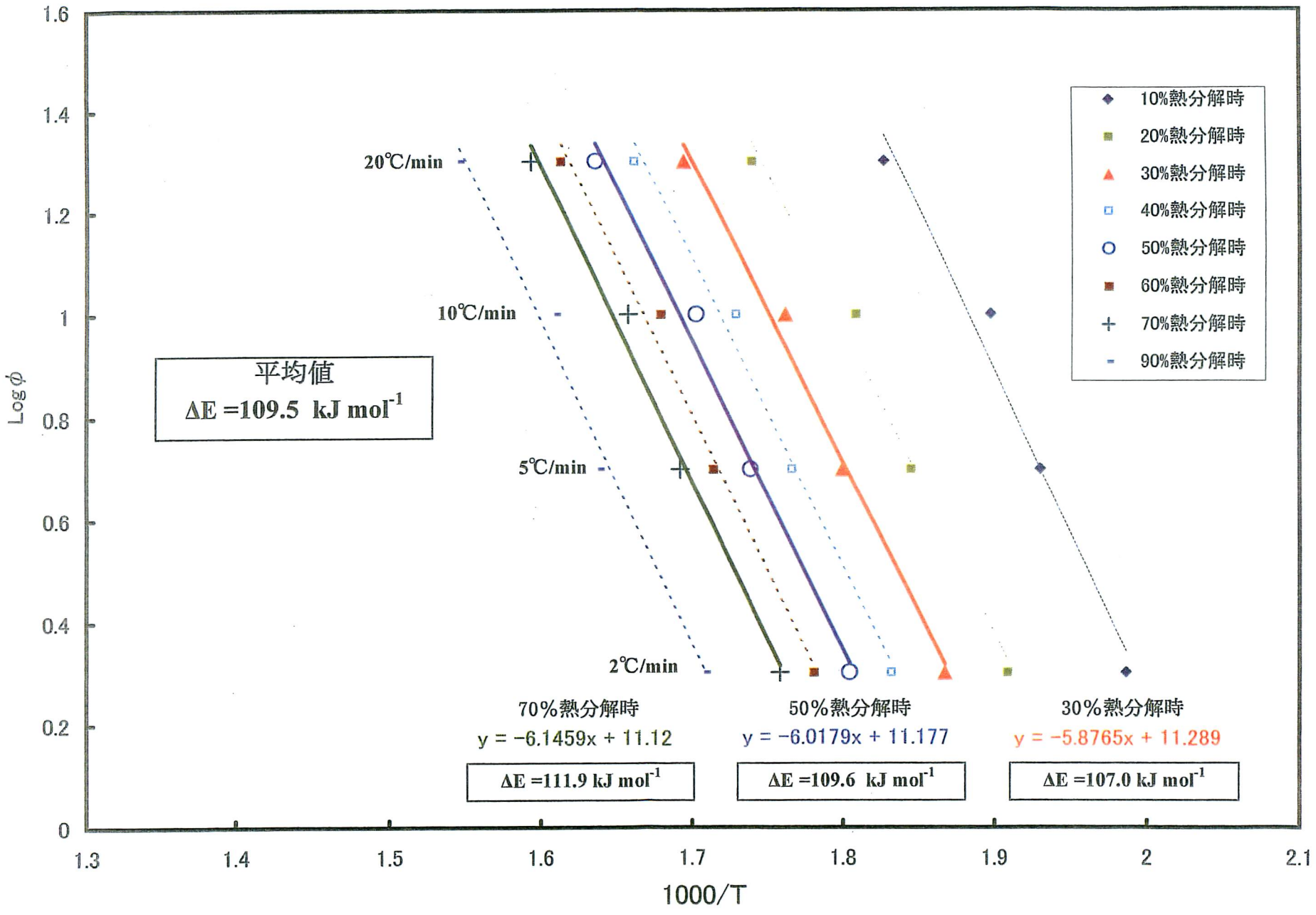


Fig.10.小澤プロット(5%酸素/窒素)

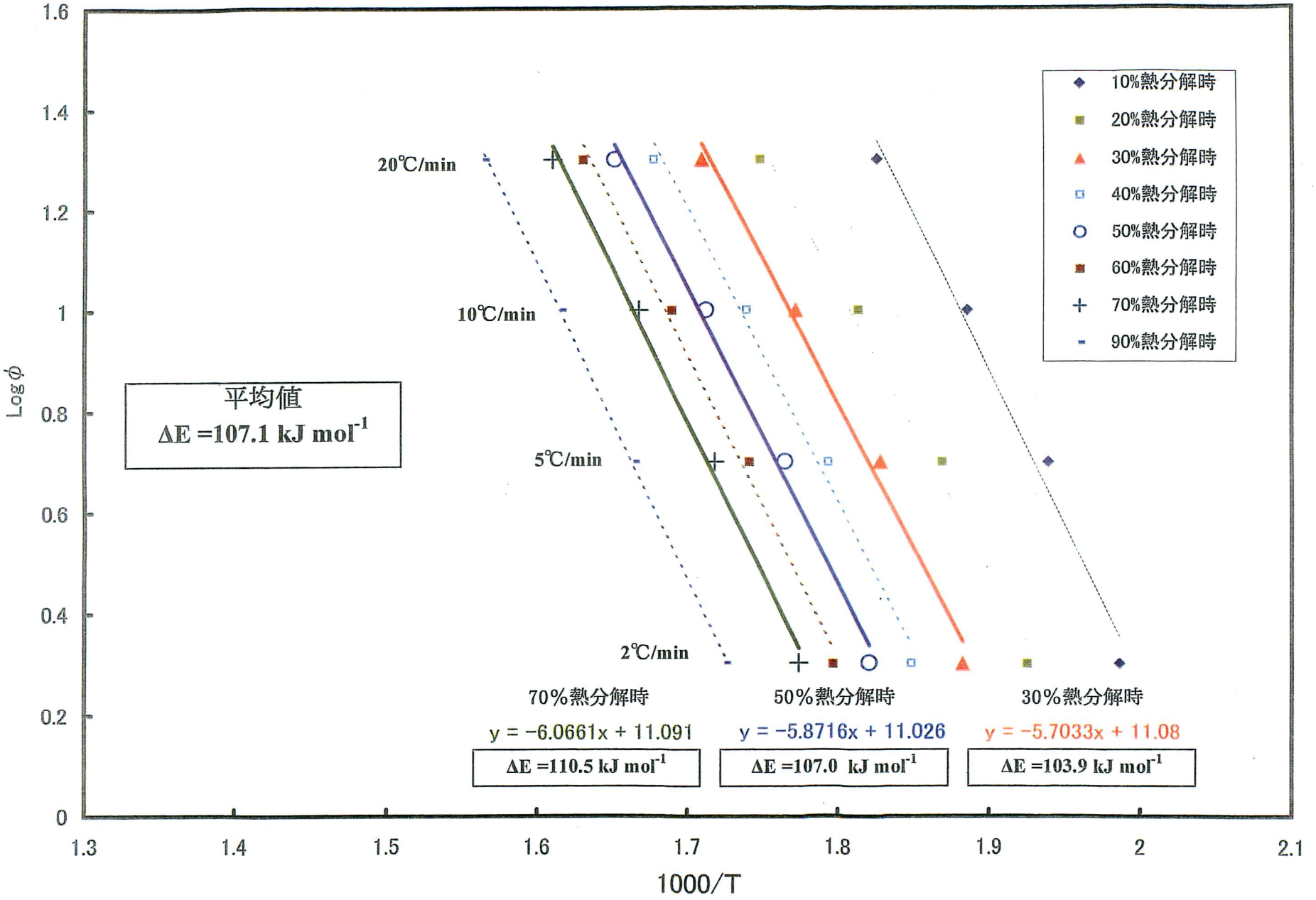


Fig11.小澤プロット(10%酸素/窒素)

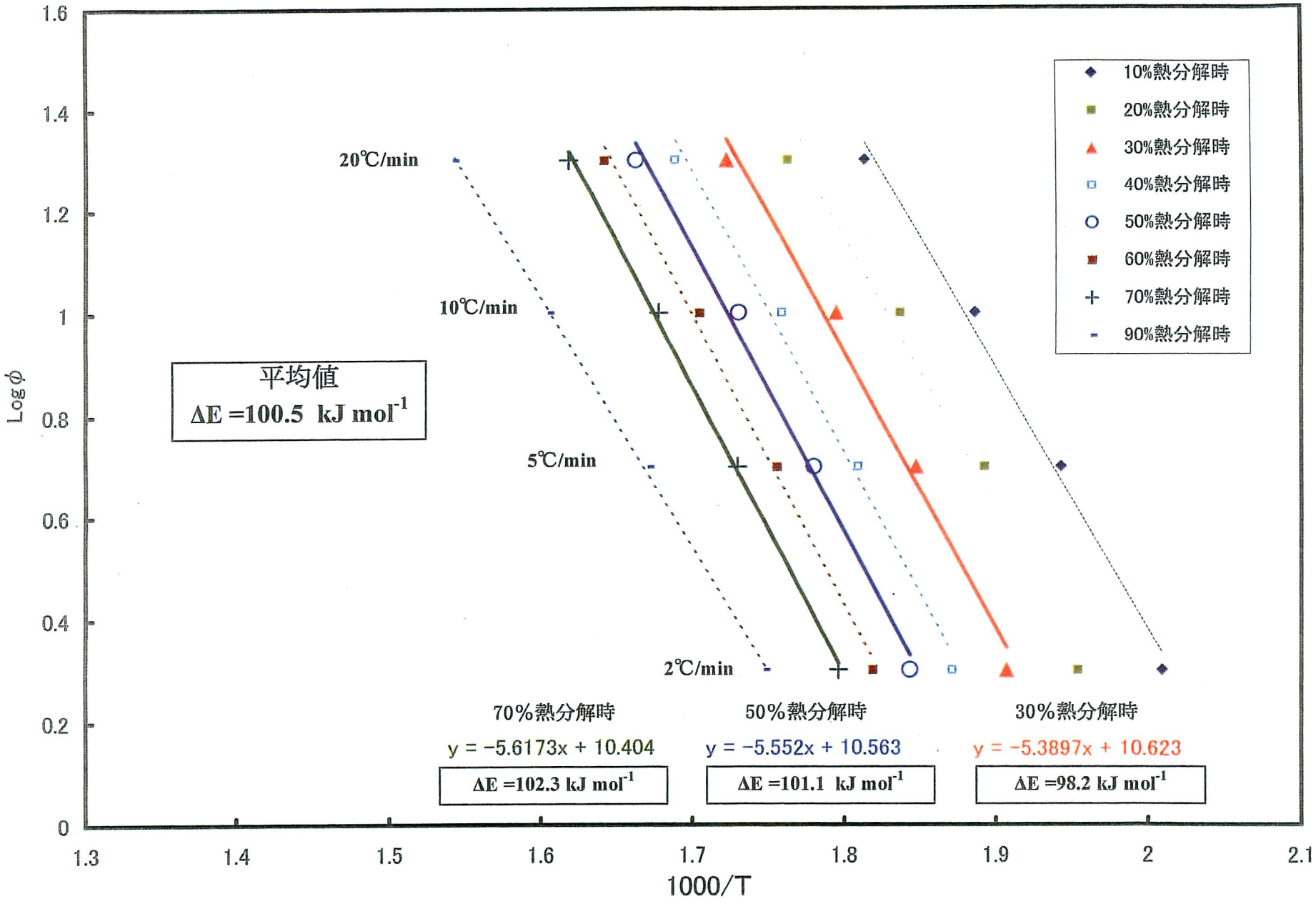


Fig12.小澤プロット（空気雰囲気）

⑥　ＲＤＦ燃料の分析－ＤＳＣ測定

⑥ ＲＤＦ燃料の分析－ＤＳＣ測定

１．試　　料

１検体　：　RDF固形燃料 ターム10

貴社ご提供品を弊方で凍結粉砕して測定に供した。

２．手　　法

示差走査熱量計法（DSC：Differential Scanning Calorimetry）

３．測　　定

原試料を窒素雰囲気下でステンレス製密閉型容器*に封入して，室温～約 300℃までの DSC 昇温曲線を繰り返し３回測定した。

* 密閉型容器を用いることにより，低沸点物あるいは熱分解ガスが容器外に放出する事ができなくなり，ガスの放出に伴う吸熱を抑えることができる。

測定条件の詳細は次の通りである.

装　　置：	セイコーインスツルメンツ社製　DSC220C
データ処理：	東レリサーチセンター製データ処理システム"TRC-THADAP-DSC"
雰囲気：	試料容器外：窒素流(80 ml/min)，試料容器内：窒素
温度・熱量校正：	高純度インジュウム（T_m＝156.61℃，$\triangle H_m$＝6.86 cal/g）
温度範囲：	室温 ～ 約 300℃
昇温速度：	10℃/min
試料量：	約 3.5 mg（DSC 曲線は試料量 3.5mg に規格化して図示）
試料容器：	ステンレス製密閉型容器（内容積：15μl，耐圧：50 気圧）

4. 結　果

DSC昇温曲線をFig.1に示す。該図には繰り返し３回測定した結果がまとめて描かれている。

また、DSC曲線は、上方が発熱、下方が吸熱を表していて、縦軸の目盛りは単位時間当たりの熱量を示す。

該試料のDSC曲線には，約127℃と約163℃に微少な吸熱ピーク、255℃付近から発熱シグナルが認められる。前回(第026116号)の結果を参考にすると、前者の微少な吸熱ピークは結晶性成分の融解、後者の発熱は熱分解に伴うものと考えられる。

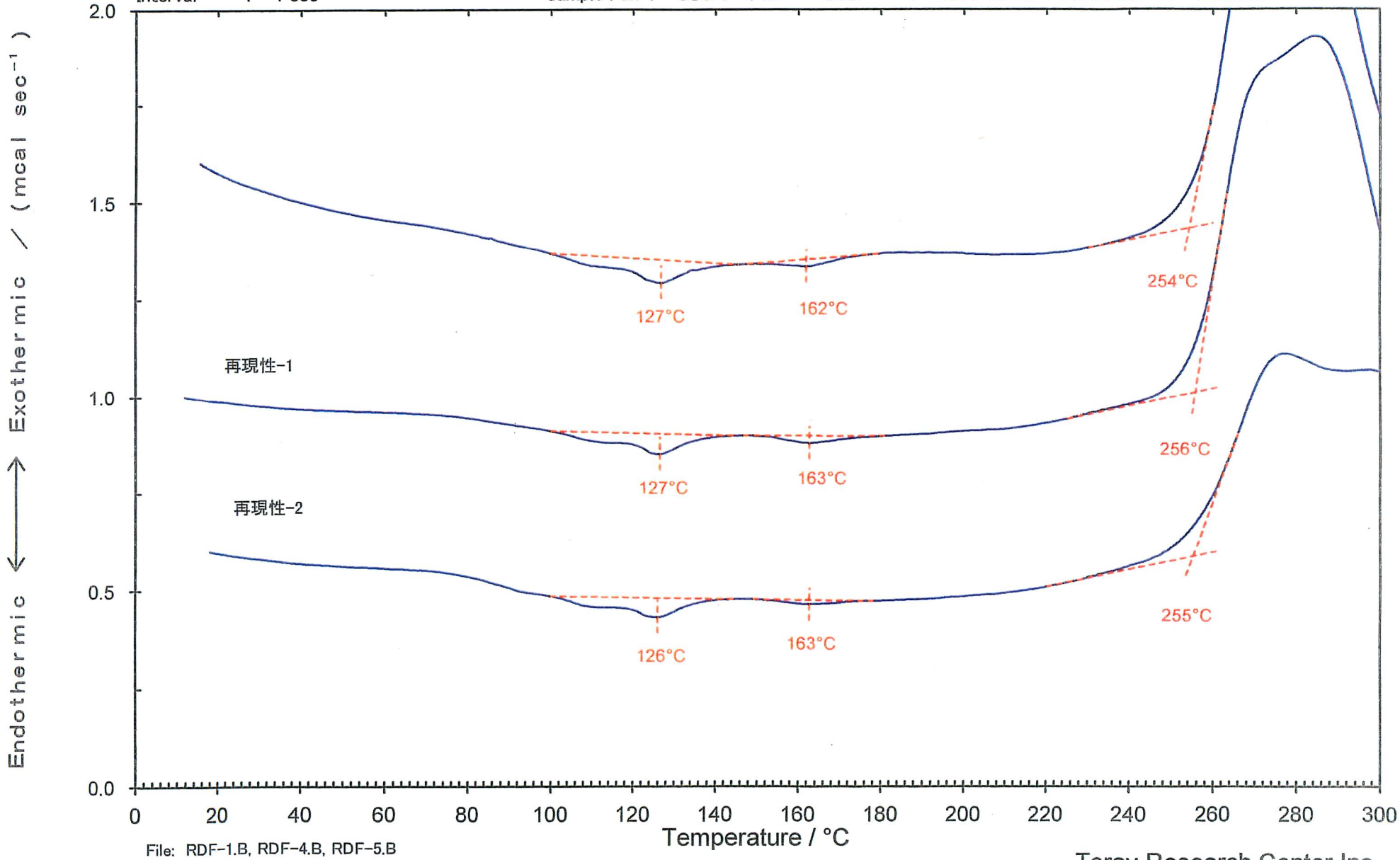
各DSC曲線から、吸熱ピーク温度と発熱外挿開始温度を読み取り、図中に記載するとともに表１にまとめる。

表１ DSC測定結果

試料＼特性		吸熱ピーク温度／℃		発熱外挿開始温度／℃
		低温側	高温側	
RDF固形燃料（ターム10）	①	127	162	254
	②	127	163	256
	③	126	163	255
	平均	**127**	**163**	**255**

Fig. DSC Curve (1st Heating Run) Sample: RDF ターム10

Apparatus	: Seiko Instruments DSC220C	Scan Rate	: 10°C/min	Shape	: Powder	Filename	: RDF-1
Atmosphere	: Dry Nitrogen (0ml/min)	Sample Size	: 3.5 mg	Operator	: T.Hosoi	Pretreatment	:
Interval	: 1 sec	Sample Pan	: SUS V Pan	Date	: 2005-10-26	Comment	: K228930



File: RDF-1.B, RDF-4.B, RDF-5.B

Toray Research Center,Inc.

⑦　熱分解ＧＣ／ＭＳによる熱分解ガス分析

⑦ 熱分解ＧＣ／ＭＳによる熱分解ガス分析

１．試　料

１検体　：　RDF 固形燃料 ターム 10

２．分析項目及び分析方法

２．１ 分析項目

加熱発生成分及び熱分解成分の定性分析

２．２ 分析方法

（１）発生ガス分析(EGA)

試料約 1.6mg をパイロライザーにセットし、EGA 法により、試料の発生ガス－昇温プロファイルを確認した。図１に分析条件を示した。

図２にサンプルの EGA クロマトグラムを示した。この結果より、加熱発生ガス分析及び、熱分解ガス分析の加熱条件を 385℃及び、550℃に決定した。

（２）加熱発生ガス、熱分解ガス分析

EGA 結果より試料加熱温度を所定の温度(385,550℃)に設定、試料約 0.4mg をパイロライザーにセット、加熱し、その時に発生したガスを GC/MS に導入、分析を行った。図３に分析条件を示した。

３．分析結果

分析結果を表－１に示す。

表－１　分　析　結　果

	単　位	固形燃料 10
推定含酸素化合物総計	mg/kg	36, 306
プラスチック成分	%	32

推定含酸素化合物総計：GC 分析において、保持時間 10:00～25:00 の全微小ピークを含酸素含 O)有機化合物と推定し、その総計を示した。

プラスチック成分：熱分解クロマトグラムで確認できたプラスチック(ポリスチレン, ポリエチレン)の推定量の総計を示した。

３．１ 385℃加熱条件分析結果

サンプルのクロマトグラム及び検出成分のマススペクトルを図４に示した。

検出された顕著なピークについてマススペクトルを解析、推定成分をマススペクトル上に記した。

これらの成分について、トルエンの検量線を用いて（トルエン換算にて）定量を行った。トルエン標品のクロマトグラム及び、マススペクトルを図５、検量線を図６に示した。定量結果を表４に示した。

各成分重量比率は以下のように算出した。

各成分重量比率(mg/kg) = 各成分成分量(μg) ／ 試料重量(μg) × 1000

3．2 550℃加熱条件分析結果

サンプルの熱分解クロマトグラムを図7に示した。スチレンダイマー，スチレントリマー及び規則的な不飽和炭化水素のピークが確認できたことから、サンプル中にポリスチレン及び、ポリエチレンが含まれていることがわかった。参考に図8，9にポリスチレン及びポリエチレンプラスチック製品の熱分解クロマトグラムを示した。

これらの特徴的な成分（特定成分）ピーク面積の比較から各サンプル中の該当プラスチック成分量を推定した。

推定重量比率は以下のように算出した。結果を表2，4に示した。

ポリマー推定量(μg) = 特定成分ピーク面積(サンプル) ／ 特定成分ピーク面積（プラスチック製品） × プラスチック製品重量(μg)

推定重量比率(%) = ポリマー推定量(μg) ／ 試料重量(μg) × 100

特定成分：以下の成分のピーク面積を用いて定量を行い、各成分で定量した推定量の平均値を用いて、重量比率を算出した。

ポリスチレン	ポリエチレン
スチレン	C6H12
スチレンダイマー	C10H20
スチレントリマー	C11H22

4．考　察

4．1 385℃加熱条件分析結果

顕著に検出されたピークについて、脂肪酸、含 O 脂環化合物、含OCH 化合物を主体とする有機化合物が検出された。また、保持時間 10:00～25:00 のピークについて、更にマススペクトルの解析を行ったところ、微小ピークの大部分は、含O化合物であることがわかった。そこで、これらを「その他含O化合物」と定義、含O化合物を総計し、推定含酸素化合物総計を求めた。

4．2 550℃加熱条件分析結果

ポリスチレン及びポリエチレンの熱分解成分のピークが顕著に確認できた。これらの定量結果からポリエチレン，ポリスチレンを主体とするプラスチック成分が約 30%含まれていることがわかった。

表１ 検量線

	R.T	成分量(ng)	12036	6018	2407	60	測定日
トルエン	10:20	TIC	3491909248	1747730685	698786688	17500150	05.11.29
トルエン	10:20	TIC	2925233280	1461654912	583921344	14632836	05.11.30

表２ 各成分ピーク面積

試料加熱温度			385℃	550℃		
	R.T	Q-ion	RDF(ターム10)	RDF(ターム10)	ﾎﾟﾘｽﾁﾚﾝｼｬｰﾚ	ﾎﾟﾘｴﾁﾚﾝ袋
測定日			05.11.30	05.11.30	05.11.30	05.11.29
C6H12	04:35	TIC	0	375423840		870438544
トルエン	10:20	TIC	0	87402400	63211852	
C9H18	12:05	TIC	477658	368873760		
スチレン	12:55	TIC	142268976	542752896	2376248064	
含OCH化合物	13:57	TIC	257562832			
C10H20	14:47	TIC	0	265166816		621019949
C11H22	16:27	TIC	0	264030704		517602917
CH化合物	16:49	TIC	53017336			
含O脂環化合物	17:26	TIC	37531852			
C9H10O2	19:22	TIC	50552812			
C10H12O2	21:23	TIC	22130806			
脂肪酸	22:03	TIC	178554928			
C10H12O3	22:51	TIC	23656740			
含OCH化合物	23:35	TIC	33048236			
スチレンダイマー	24:40	TIC	97567600	69181224	312539712	
C16H18	25:53	TIC	49409504			
ペプタデカノン	26:31	TIC	25271618			
パルミチン酸	27:08	TIC	212593984			
CH化合物(264)	28:48	TIC	241521424			
ステアリン酸	29:00	TIC	52478468			
含O多環化合物	29:08	TIC	76721856			
スチレントリマー	31:25	TIC	371030144	132571136	591224640	
フタル酸エステル	32:10	TIC	44296212			
その他含O化合物総計	10:00-25:00	TIC	2497051812			

ポリスチレン推定量(μg)	スチレンモノマーより推定	40.88	179 / 202
	スチレンダイマーより推定	39.62	
	スチレントリマーより推定	40.14	
	平均推定量(μg)	40	
ポリエチレン推定量(μg)	C6H12より推定	87.12	
	C10H20より推定	86.25	
	C11H22より推定	85.87	
	平均推定量(μg)	86	

試料重量(μg)

表３ 各成分成分量(ng)(トルエン換算)

			385℃	550℃
			RDF(ターム10)	RDF(ターム10)
測定日			05.11.30	05.11.30
C6H12		熱分解(PE)	0.00	1544.99
トルエン		熱分解(PS)	0.00	359.69
C9H18		熱分解	1.97	1518.03
スチレン		熱分解(PS)	585.48	2233.60
含OCH化合物			1059.95	0.00
C10H20		熱分解(PE)	0.00	1091.24
C11H22		熱分解(PE)	0.00	1086.57
CH化合物			218.18	0.00
含O脂環化合物			154.46	0.00
C9H10O2			208.04	0.00
C10H12O2			91.08	0.00
脂肪酸			734.81	0.00
C10H12O3			97.35	0.00
含OCH化合物			136.00	0.00
スチレンダイマー		熱分解(PS)	401.52	284.70
C16H18			203.34	0.00
ペプタデカノン			104.00	0.00
パルミチン酸			874.89	0.00
CH化合物(264)			993.94	0.00
ステアリン酸			215.97	0.00
含O多環化合物			315.73	0.00
スチレントリマー		熱分解(PS)	1526.90	545.57
フタル酸エステル			182.29	0.00
その他含O化合物総計	10:00-25:00		10276.14	

表４ 各成分成分重量比率(mg/kg)

			385℃	550℃
			RDF(ターム10)	RDF(ターム10)
測定日			05.11.30	05.11.30
C6H12			0.00	3931.26
トルエン			0.00	915.24
C9H18			5.00	3862.67
スチレン			1489.77	5683.45
含OCH化合物			2697.08	0.00
C10H20			0.00	2776.70
C11H22			0.00	2764.81
CH化合物			555.17	0.00
含O脂環化合物			393.02	0.00
C9H10O2			529.37	0.00
C10H12O2			231.74	0.00
脂肪酸			1869.74	0.00
C10H12O3			247.72	0.00
含OCH化合物			346.07	0.00
スチレンダイマー			1021.68	724.43
C16H18			517.39	0.00
ペプタデカノン			264.63	0.00
パルミチン酸			2226.18	0.00
CH化合物(264)			2529.10	0.00
ステアリン酸			549.53	0.00
含O多環化合物			803.40	0.00
スチレントリマー			3885.25	1388.22
フタル酸エステル			463.85	0.00
着目含O化合物総計			10158.47	
その他含O化合物総計	10:00-25:00		26147.95	
含O化合物総計			36306.43	
ポリスチレン推定重量比率(%)				10
ポリエチレン推定重量比率(%)				22
各サンプル重量(μg)			393	393

GAS CHROMATOGRAPH	6890 SERIES (Hewlett Packard)
COLUMN	GUARD COLUMN
	30m × 0.32mm,F.T - μ m
PYROLYZER	Double-shot pyrolyzer PY-2020D
	(FRONTIER LAB)
PYROLYZER TEMP.	60 ℃ (1min) → 700 ℃ (10min) / 15 ℃/min
INJECTION	PORT A
	INJECTION TEMP. 300 ℃
COLUMN OVEN TEMP.	300 ℃
MASS SPECTROMETER	JMS-AMSUN200 (JEOL)
IONIZATION/POLARITY	EI+
IONIZATION VOLTAGE	70eV
ION SOURCE TEMP.	220 ℃
INTERFACE TEMP.	240 ℃
APPLIED VOLTAGE	10kV
SCAN RANGE	m/z 20 - 400
CYCLE TIME	200msec

図 1　GC/MS 測定条件 (EGA)

Display V4.02 E:¥RDF¥31128-02.SPA 11/28/05 13:22:28
Station : JMS-AMSUN200/300 User : 日本電子(株)

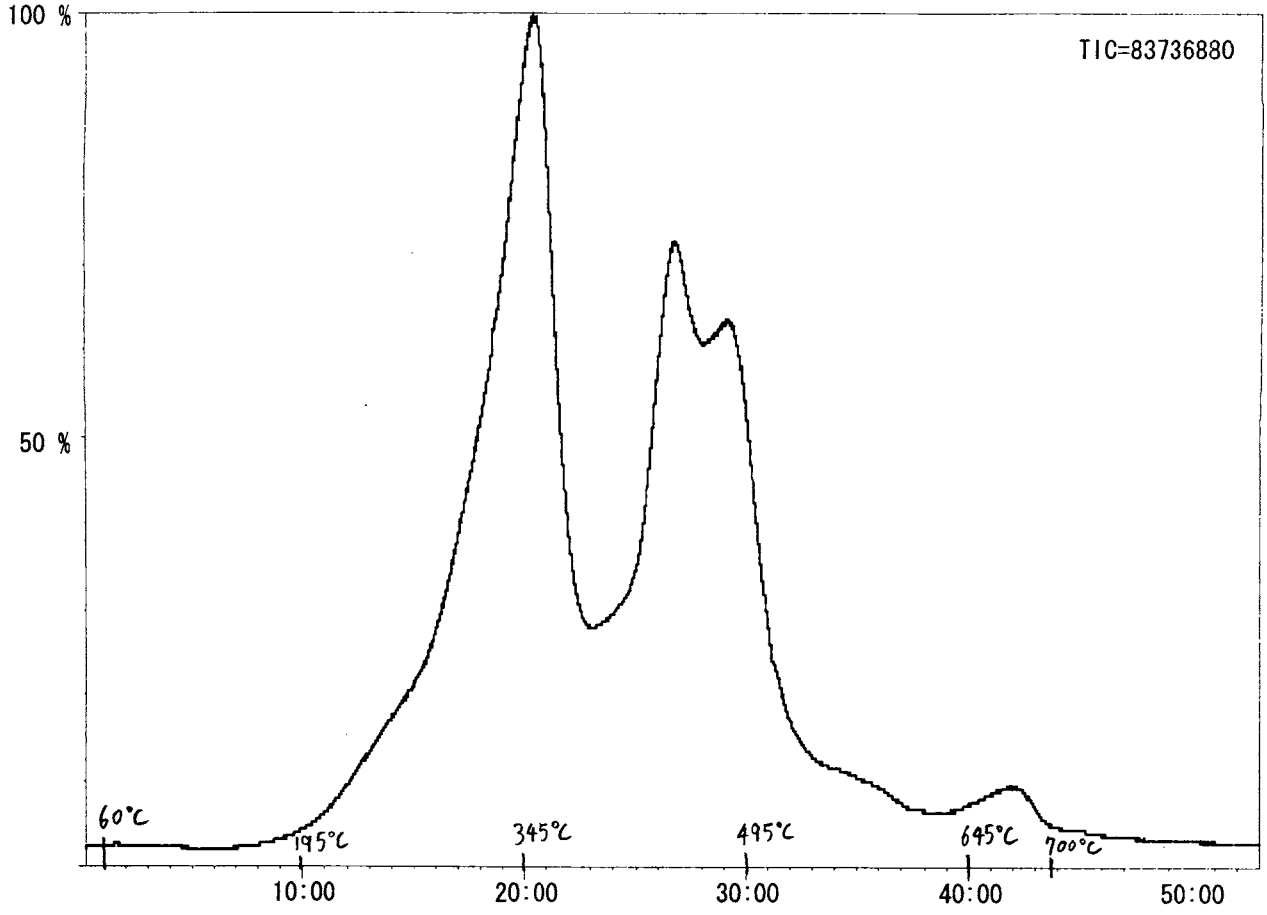


図 2　サンプル EGA クロマトグラム

GAS CHROMATOGRAPH	6890 SERIES (Hewlett Packard)
COLUMN	EQUITY-5 (Col: 33142-04A)
	30m × 0.32mm,F.T 0.25 μ m
PYROLYZER	Double-shot pyrolyzer PY-2020D
	(FRONTIER LAB)
PYROLYZER TEMP.	385,550 ℃
INJECTION	PORT A
	INJECTION TEMP. 300 ℃
COLUMN OVEN TEMP.	-10 ℃ (5min) → 320 ℃ (10min) / 10 ℃/min
MASS SPECTROMETER	JMS-AMSUN200 (JEOL)
IONIZATION/POLARITY	EI+
IONIZATION VOLTAGE	70eV
ION SOURCE TEMP.	220 ℃
INTERFACE TEMP.	240 ℃
APPLIED VOLTAGE	10kV
SCAN RANGE	m/z 10 - 400
CYCLE TIME	200msec

図3 GC/MS 測定条件(加熱発生ｶﾞｽ分析、熱分解ｶﾞｽ分析)

Display V4.02 E:¥RDF¥31130-06.SPA 11/30/05 14:37:41
Station : JMS-AMSUN200/300　　User : 日本電子(株)

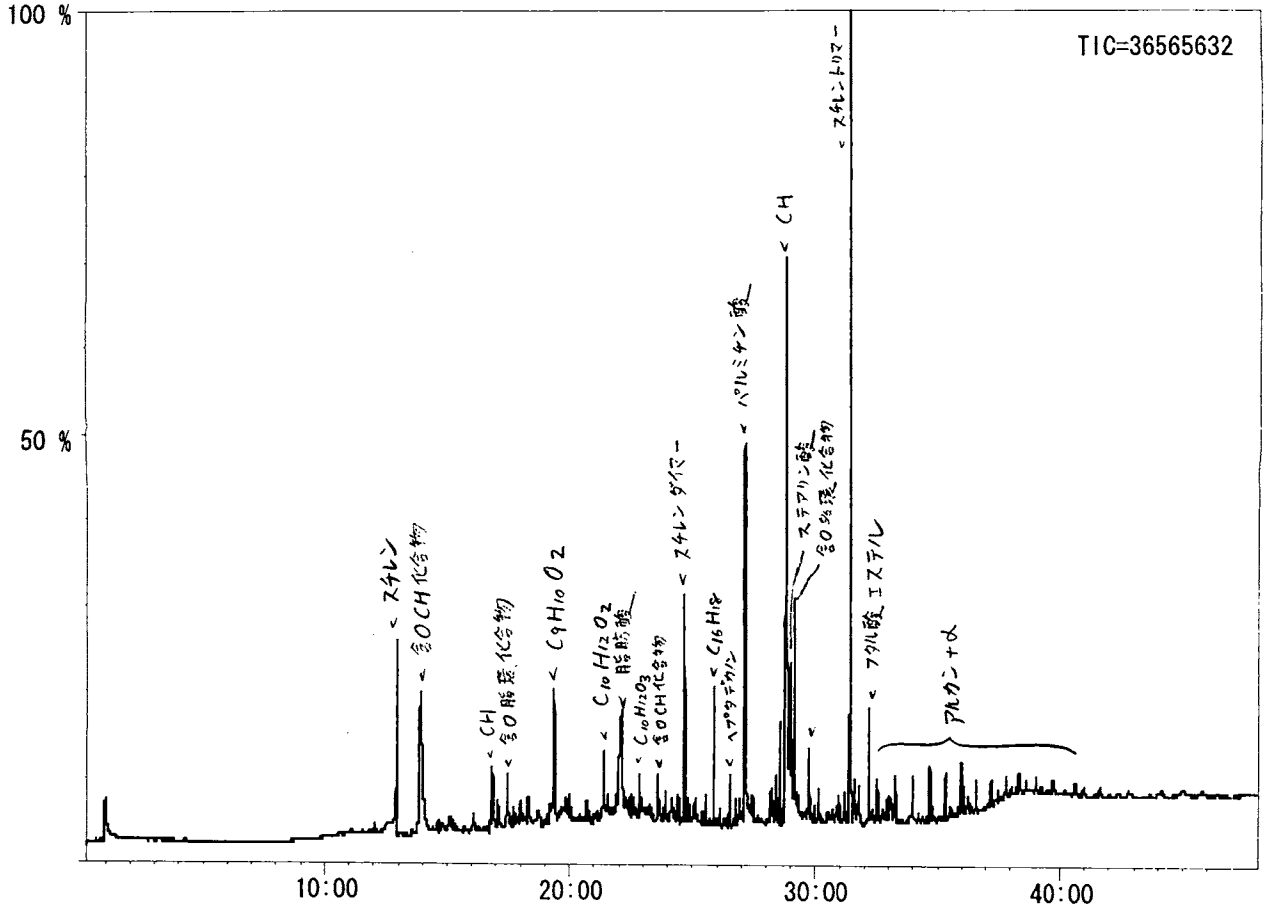
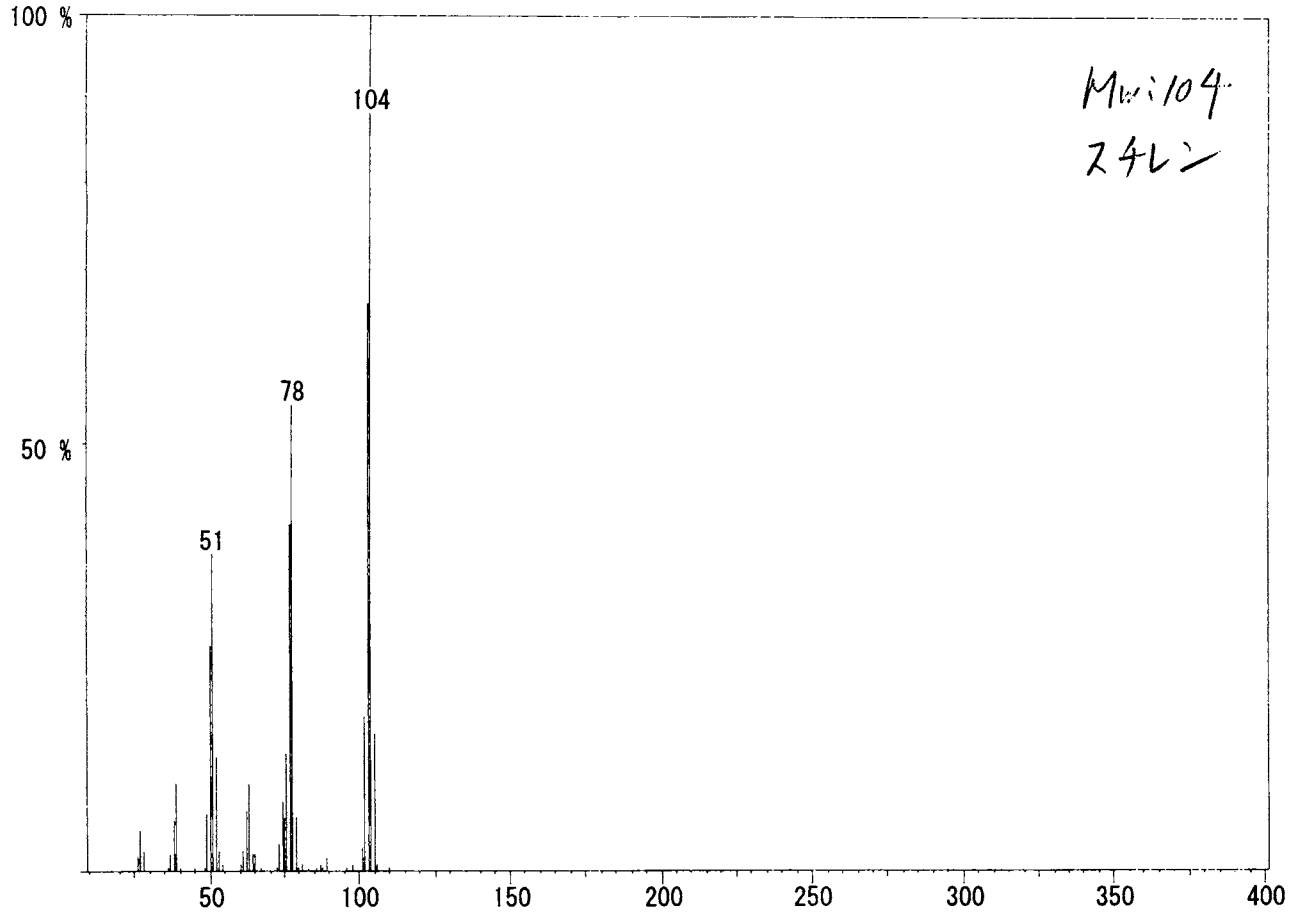


図 4(a)　サンプル加熱温度 385 ℃　クロマトグラム

Display V4.02 E:¥RDF¥31130-06.SPA 11/30/05 14:37:41
Station : JMS-AMSUN200/300 User : 日本電子(株)
Scan 4102-4086 BP=104.00[215808] TIC=1082240 RT=00:12:55.33



Scan 4410-4399 BP= 44.00[579648] TIC=3042458 RT=00:13:52.79

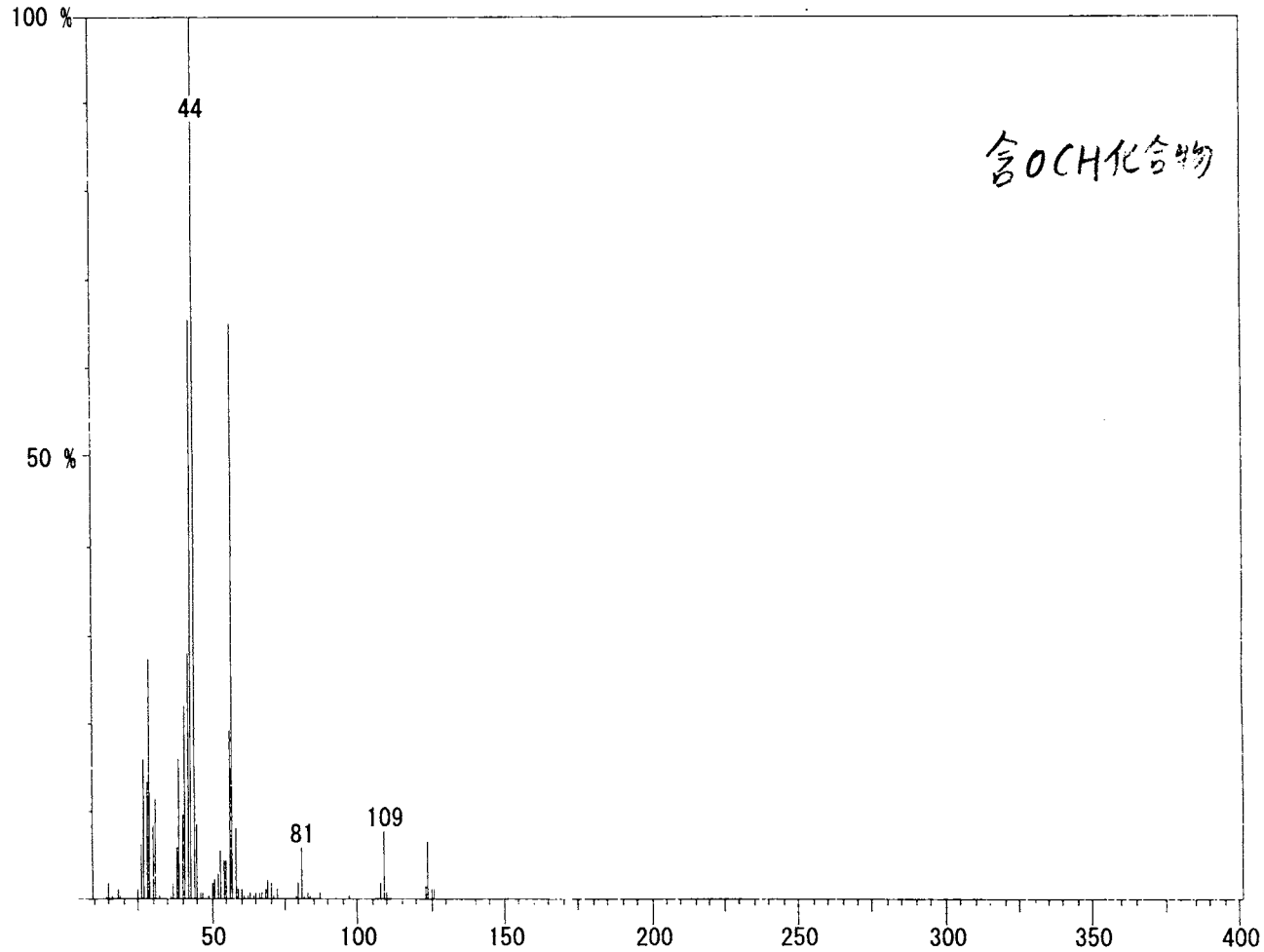
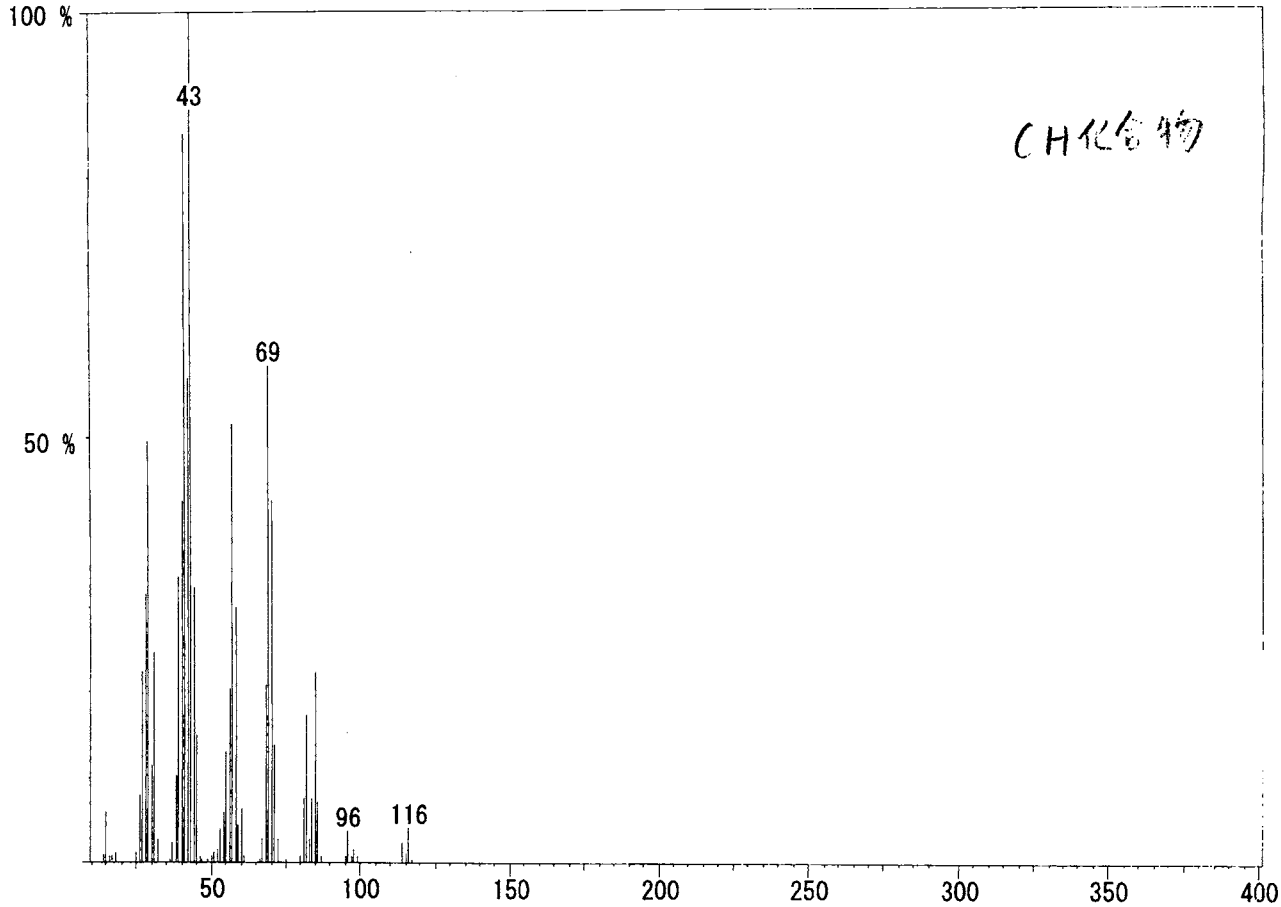


図 4(b)　ｻﾝﾌﾟﾙ加熱温度 385 ℃　ﾏｽｽﾍﾟｸﾄﾙ

Display V4.02 E:¥RDF¥31130-06.SPA 11/30/05 14:37:41
Station : JMS-AMSUN200/300 User : 日本電子(株)
Scan 5355-5348 BP= 43.00[201216] TIC=1876347 RT=00:16:49.10



Scan 5555-5550 BP= 69.00[191264] TIC=1231905 RT=00:17:26.42

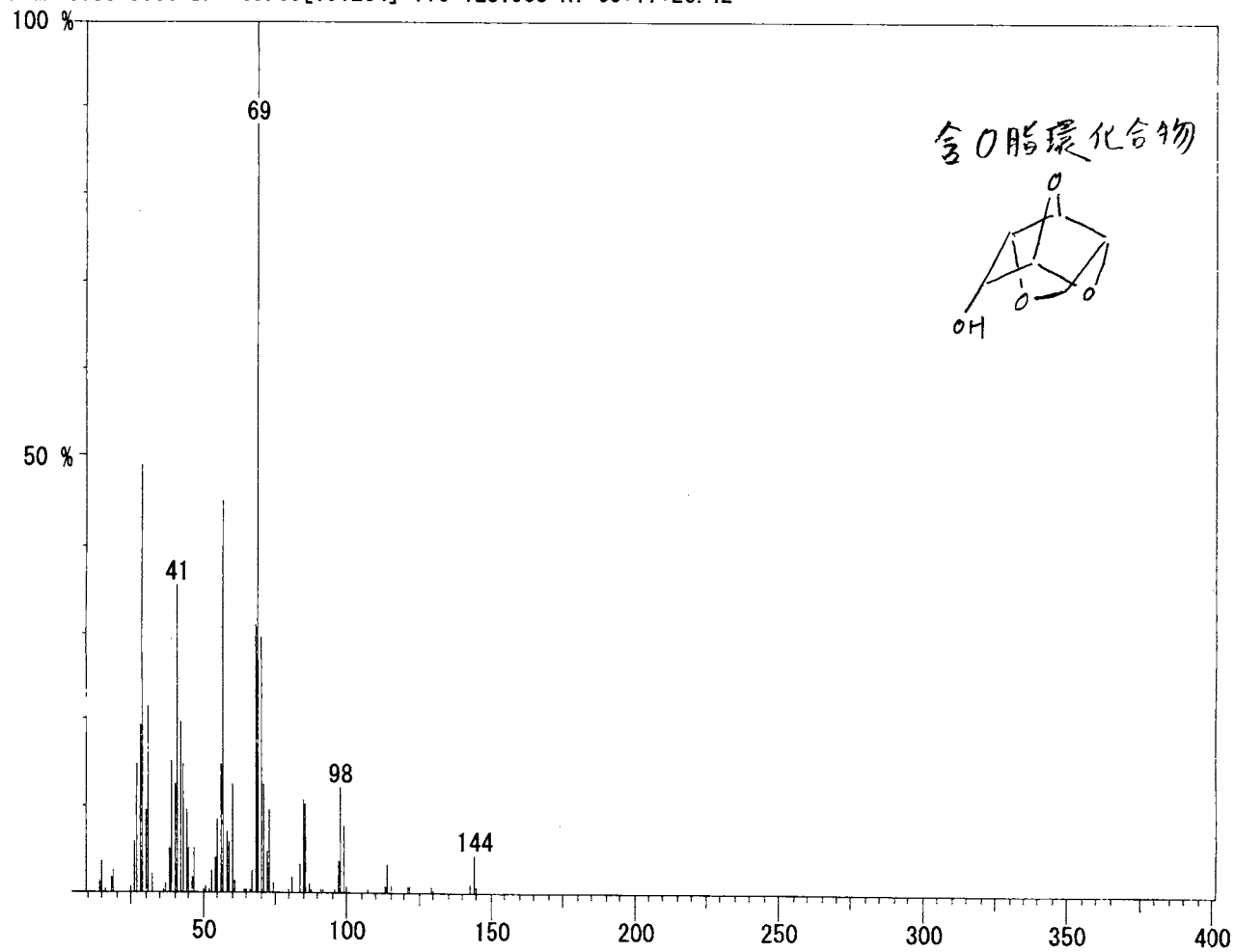
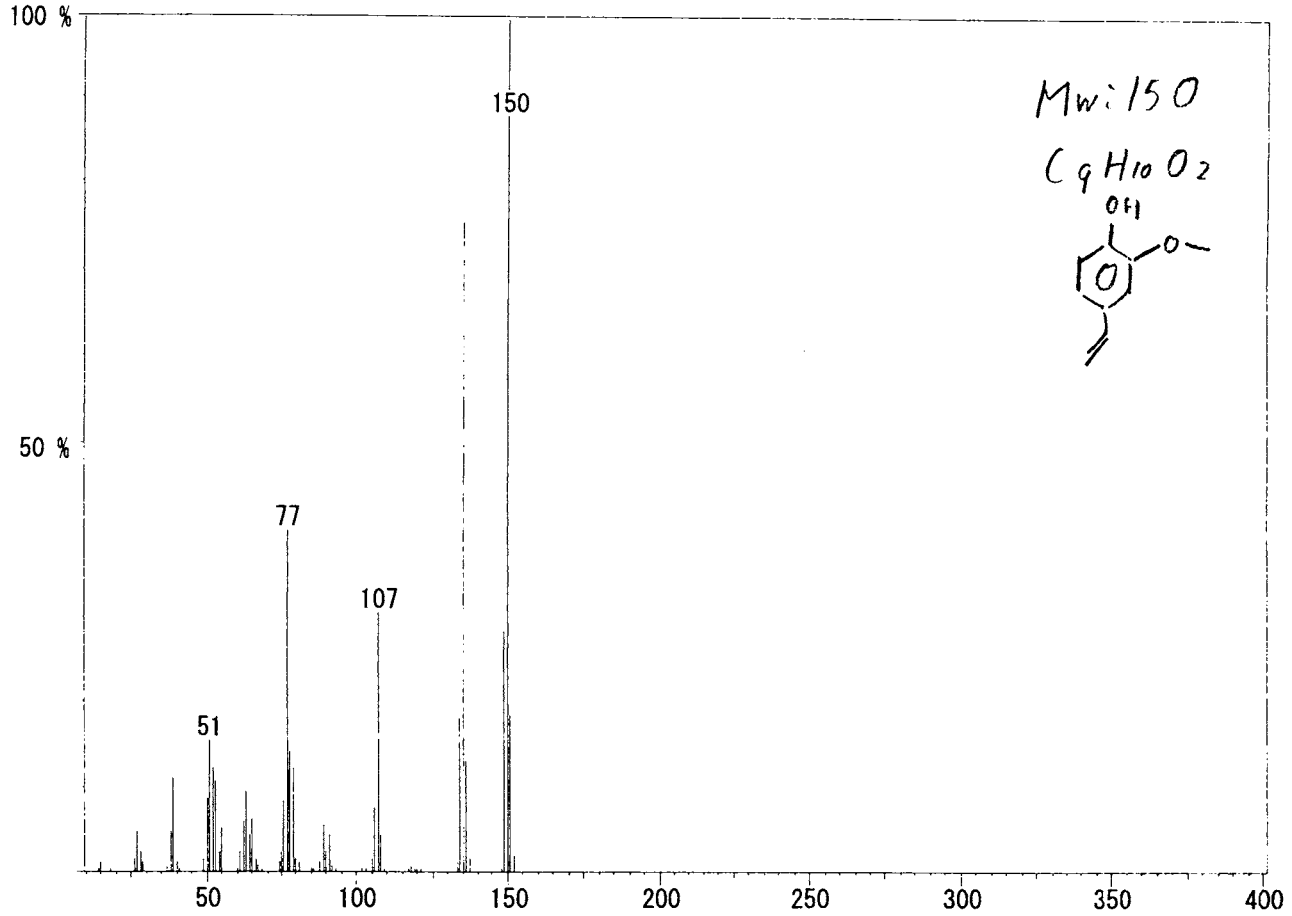


図 4(c) ｻﾝﾌﾟﾙ加熱温度 385 ℃ ﾏｽｽﾍﾟｸﾄﾙ

Display V4.02 E:¥RDF¥31130-06.SPA 11/30/05 14:37:41
Station : JMS-AMSUN200/300 User : 日本電子(株)
Scan 6176-6166 BP=150.00[738848] TIC=4013499 RT=00:19:22.28



Scan 6824-6819 BP=164.00[297568] TIC=1873640 RT=00:21:23.17

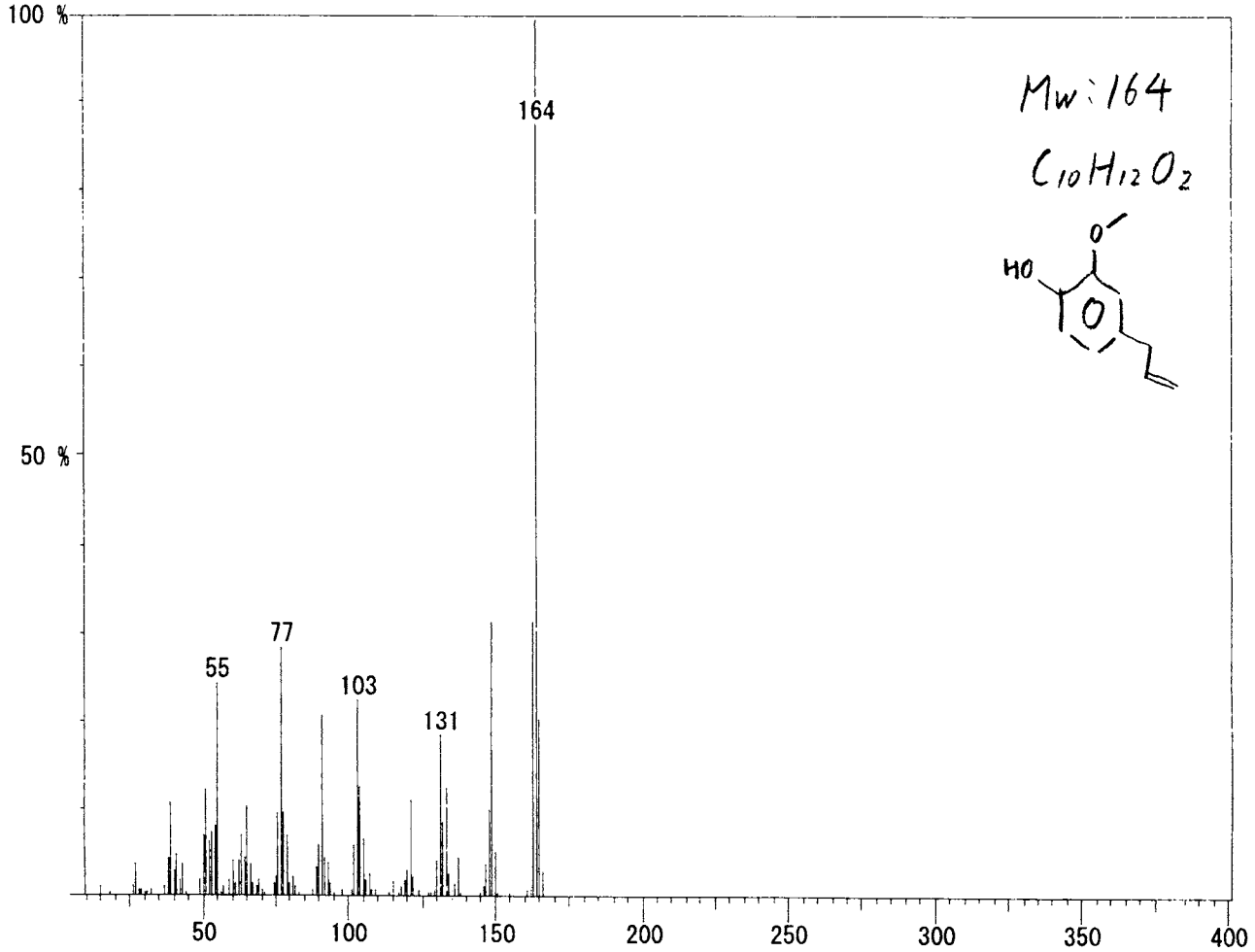
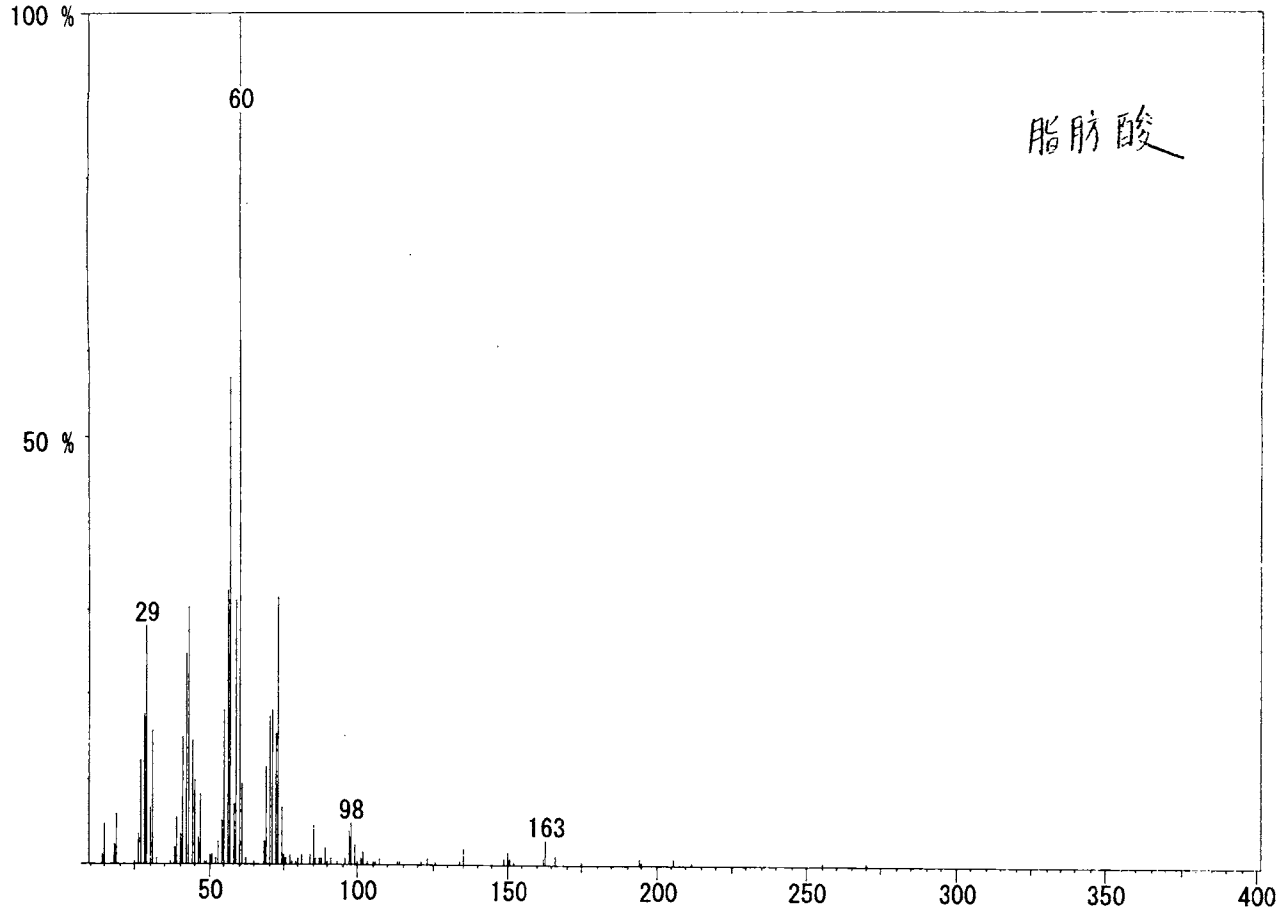


図 4(d)　ｻﾝﾌﾟﾙ加熱温度 385 ℃　ﾏｽｽﾍﾟｸﾄﾙ

Display V4.02 E:¥RDF¥31130-06.SPA 11/30/05 14:37:41
Station : JMS-AMSUN200/300 User : 日本電子(株)
Scan 7038-7013 BP= 60.00[406656] TIC=2749313 RT=00:22:03.10



Scan 7296-7293 BP=180.00[159680] TIC=781130 RT=00:22:51.24

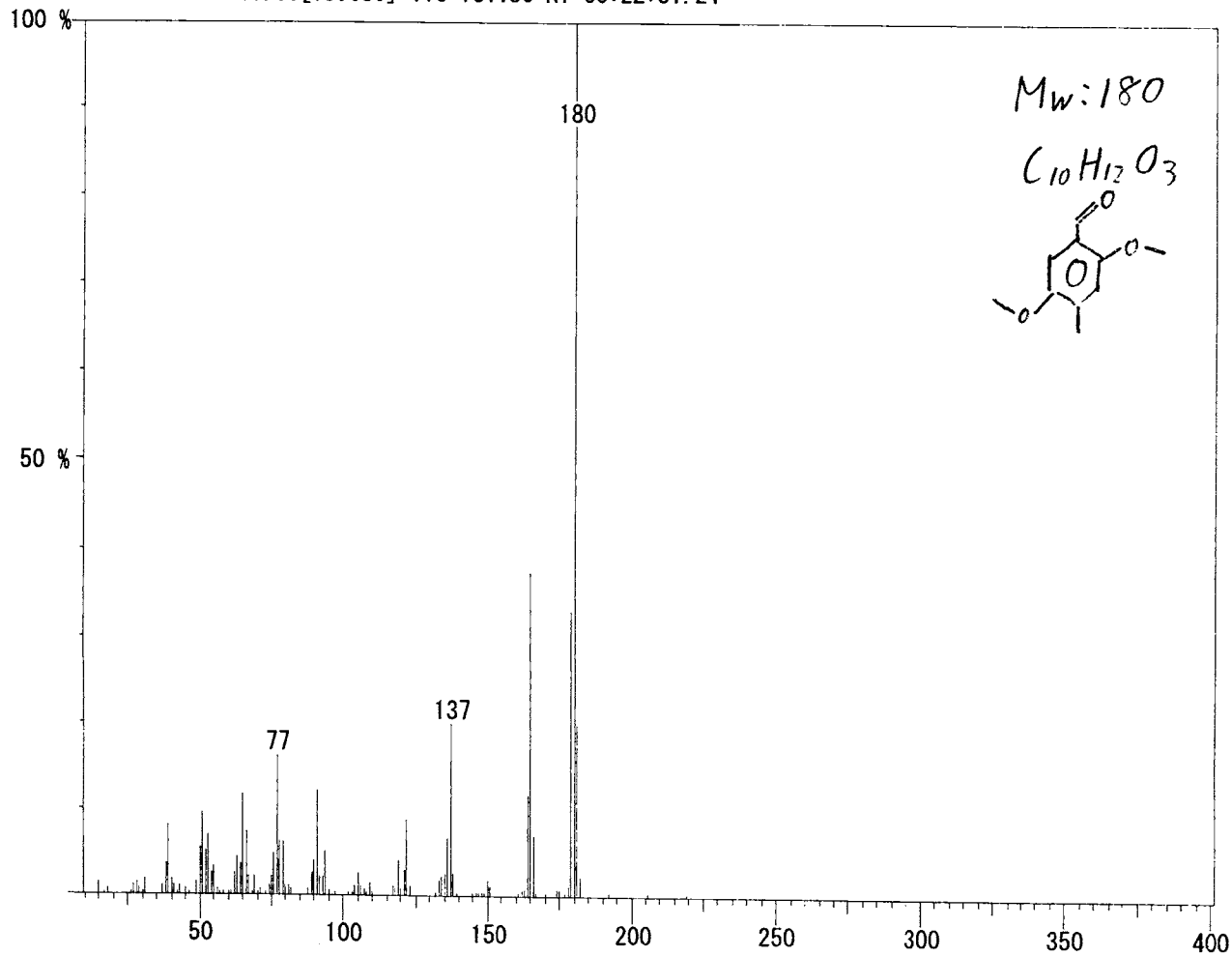
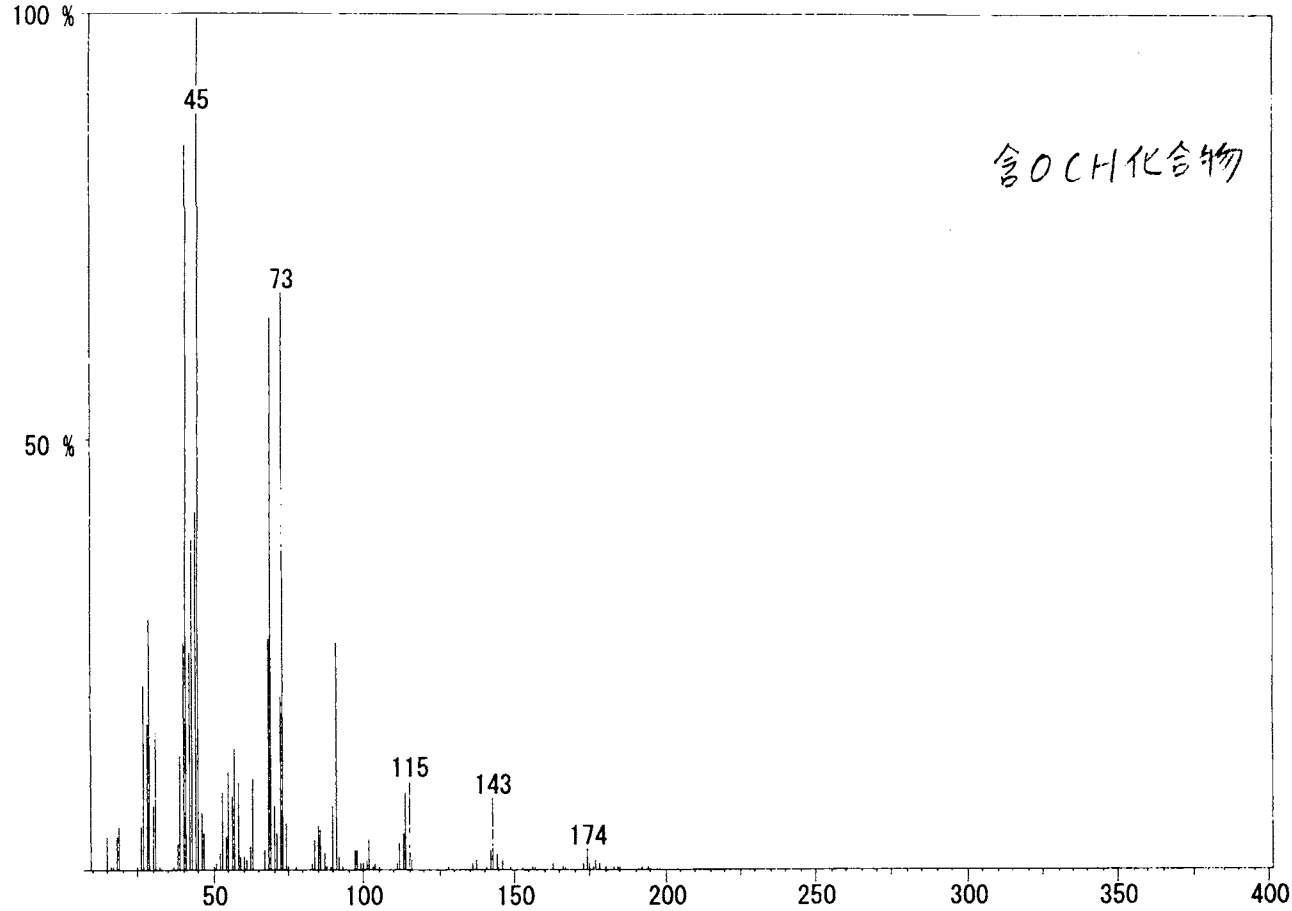


図 4(e)　ｻﾝﾌﾟﾙ加熱温度 385 ℃　ﾏｽｽﾍﾟｸﾄﾙ

Display V4.02 E:¥RDF¥31130-06.SPA 11/30/05 14:37:41
Station : JMS-AMSUN200/300 User : 日本電子(株)
Scan 7535-7527 BP= 45.00[189984] TIC=1692315 RT=00:23:35.83



Scan 7881-7875 BP= 91.00[1058496] TIC=4595385 RT=00:24:40.38

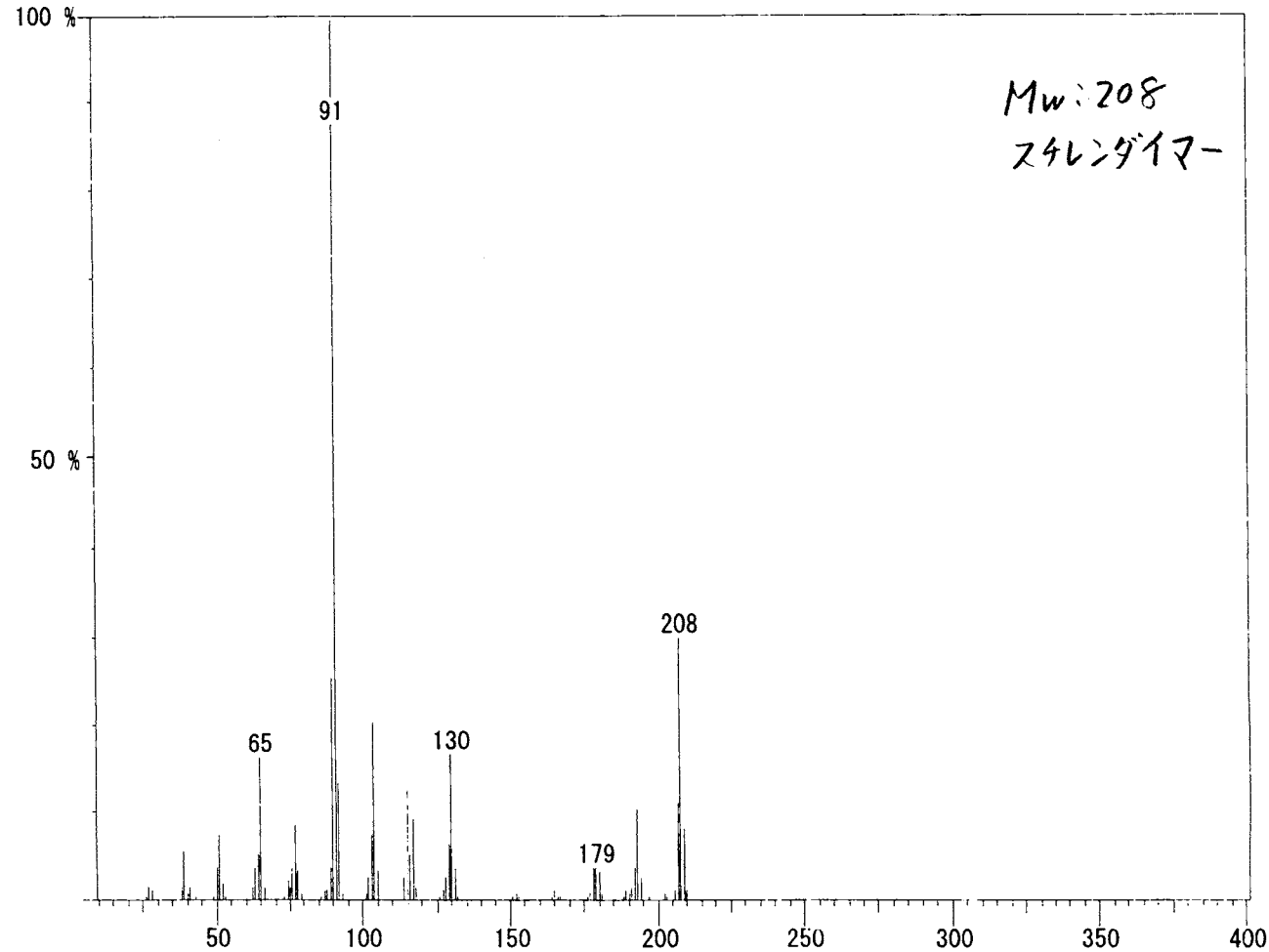
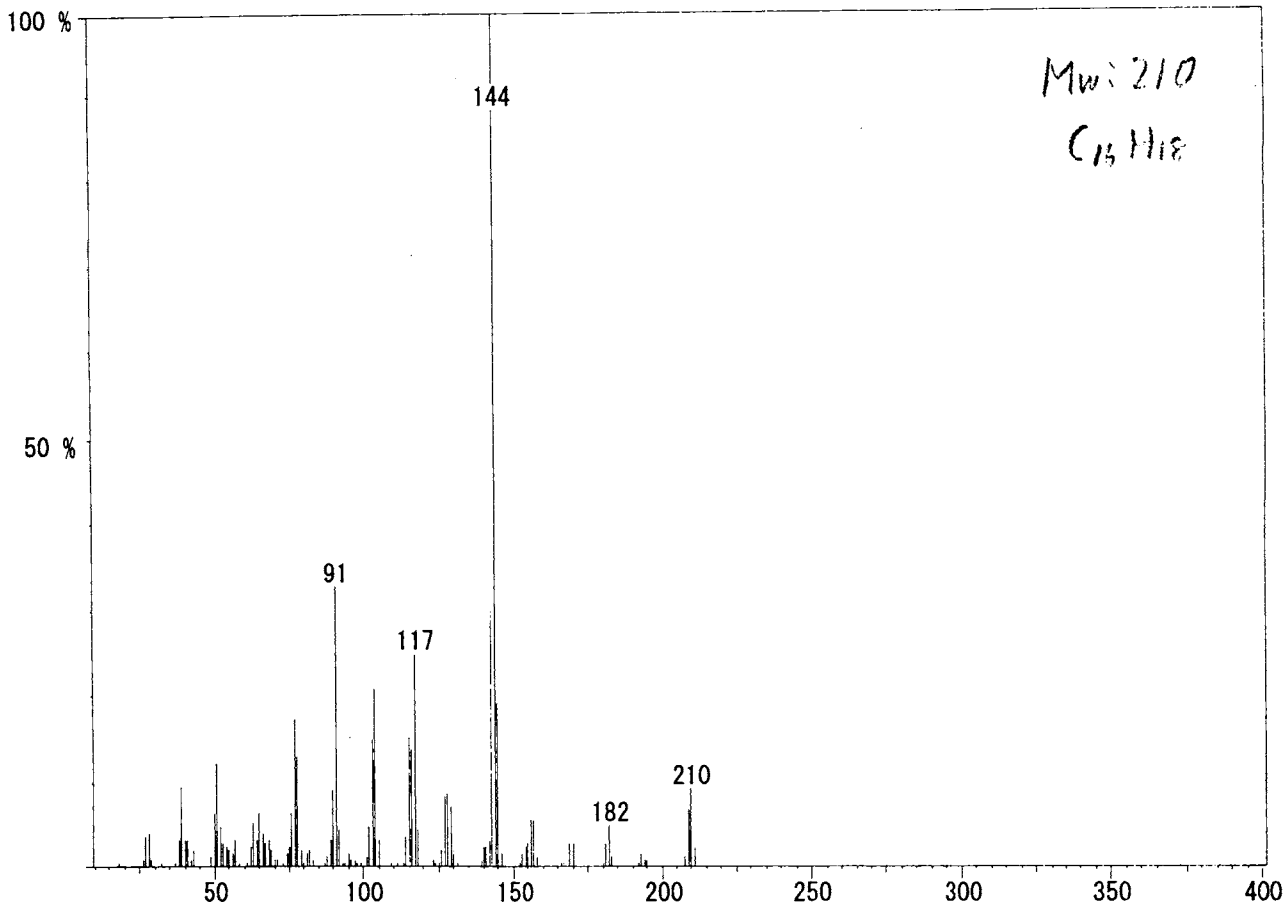


図 4(f)　サンプル加熱温度 385 ℃　マススペクトル

Display V4.02 E:¥RDF¥31130-06.SPA 11/30/05 14:37:41
Station : JMS-AMSUN200/300 User : 日本電子(株)
Scan 8271-8264 BP=144.00[788160] TIC=4720000 RT=00:25:53.14



Scan 8474-8464 BP= 58.00[207932] TIC=1567736 RT=00:26:31.02

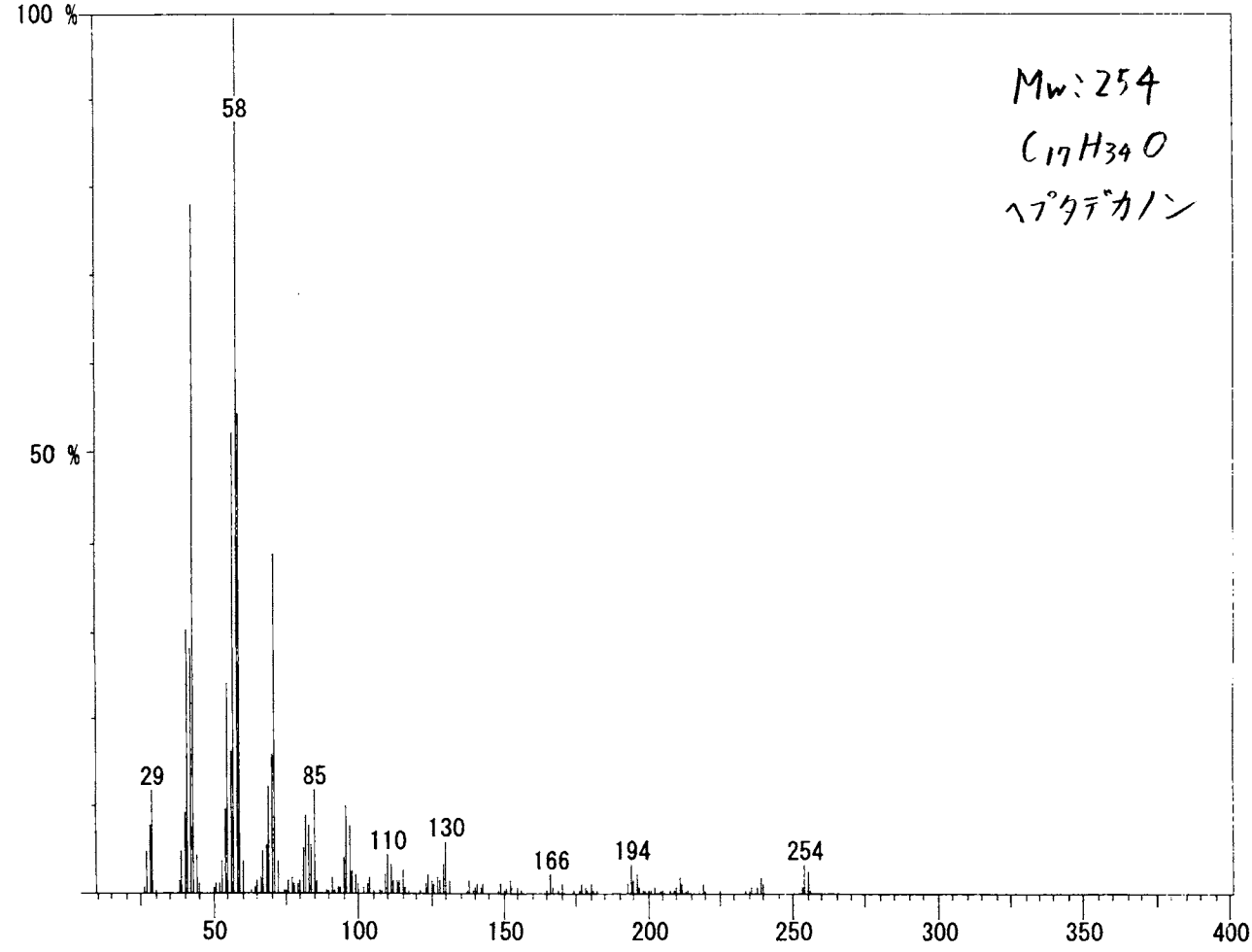
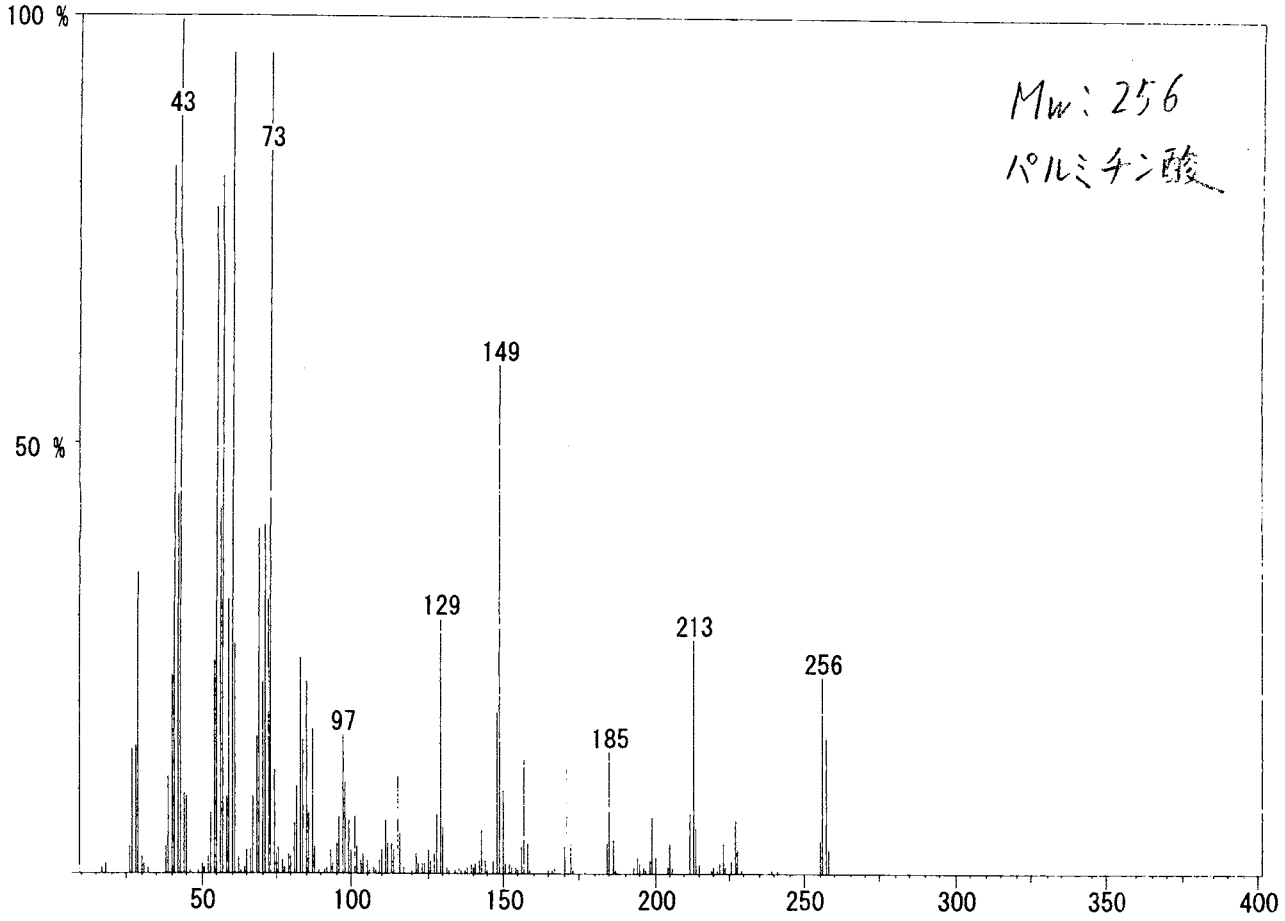


図 4(g) サンプル加熱温度 385 ℃ マススペクトル

Display V4.02 E:¥RDF¥31130-06.SPA 11/30/05 14:37:41
Station : JMS-AMSUN200/300 User : 日本電子(株)
Scan 8673-8667 BP= 43.00[453184] TIC=7574583 RT=00:27:08.14



Scan 9210-9206 BP= 55.00[574976] TIC=6783012 RT=00:28:48.33

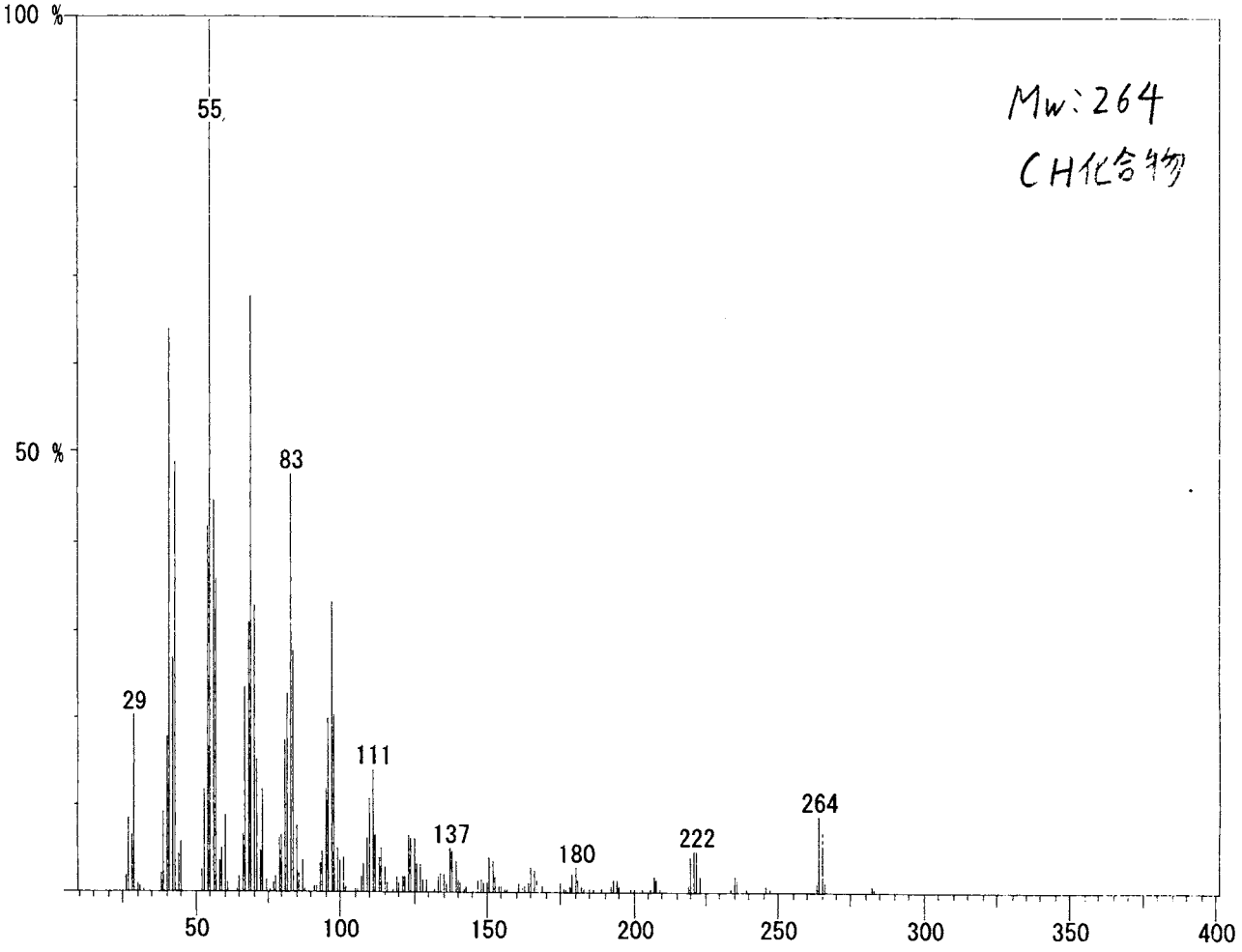
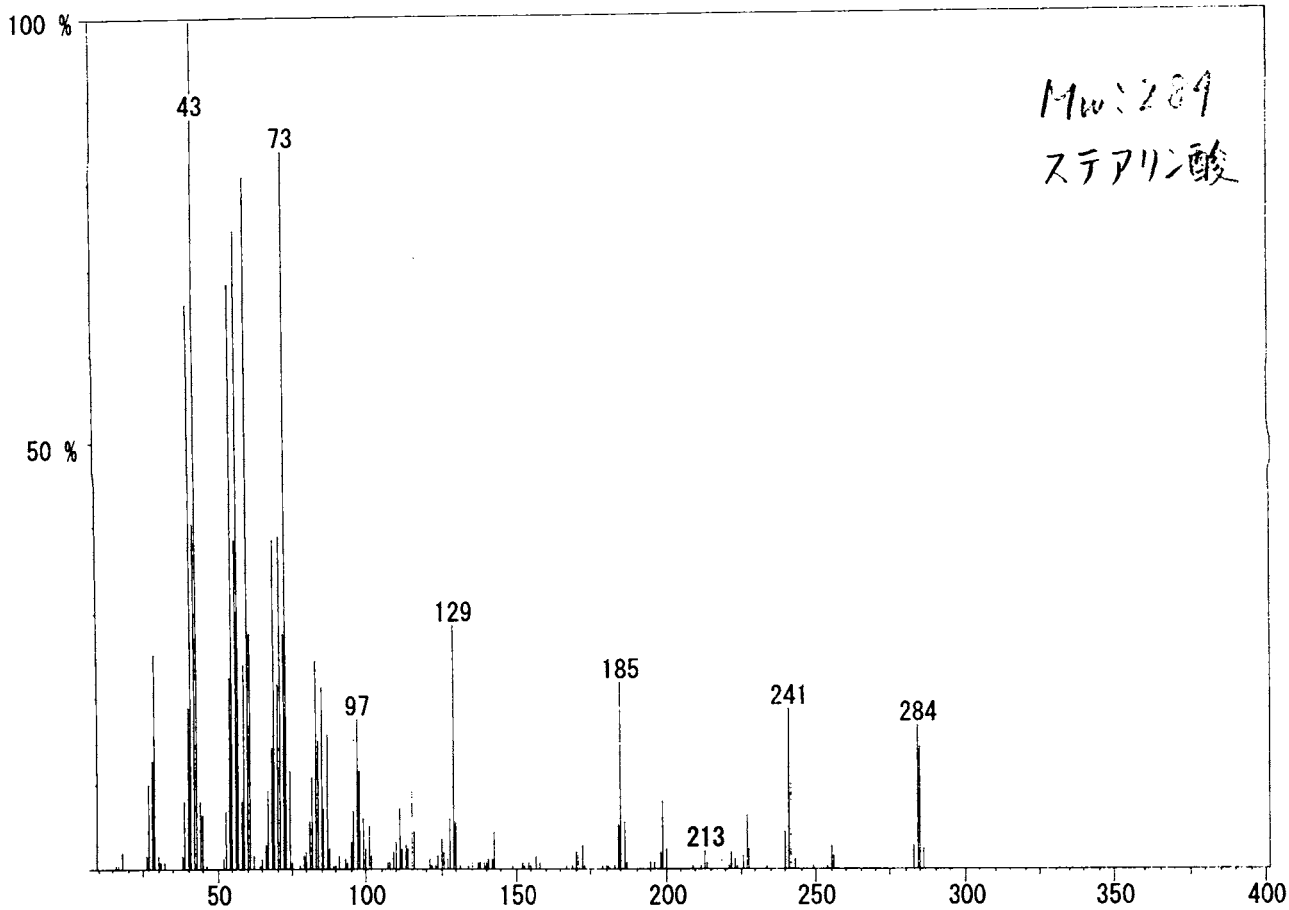


図 4(h)　サンプル加熱温度 385 ℃　マススペクトル

Display V4.02 E:¥RDF¥31130-06.SPA 11/30/05 14:37:41
Station : JMS-AMSUN200/300 User : 日本電子(株)
Scan 9276-9270 BP= 43.00[286336] TIC=3958785 RT=00:29:00.64



Scan 9317-9311 BP=170.00[295800] TIC=3336896 RT=00:29:08.29

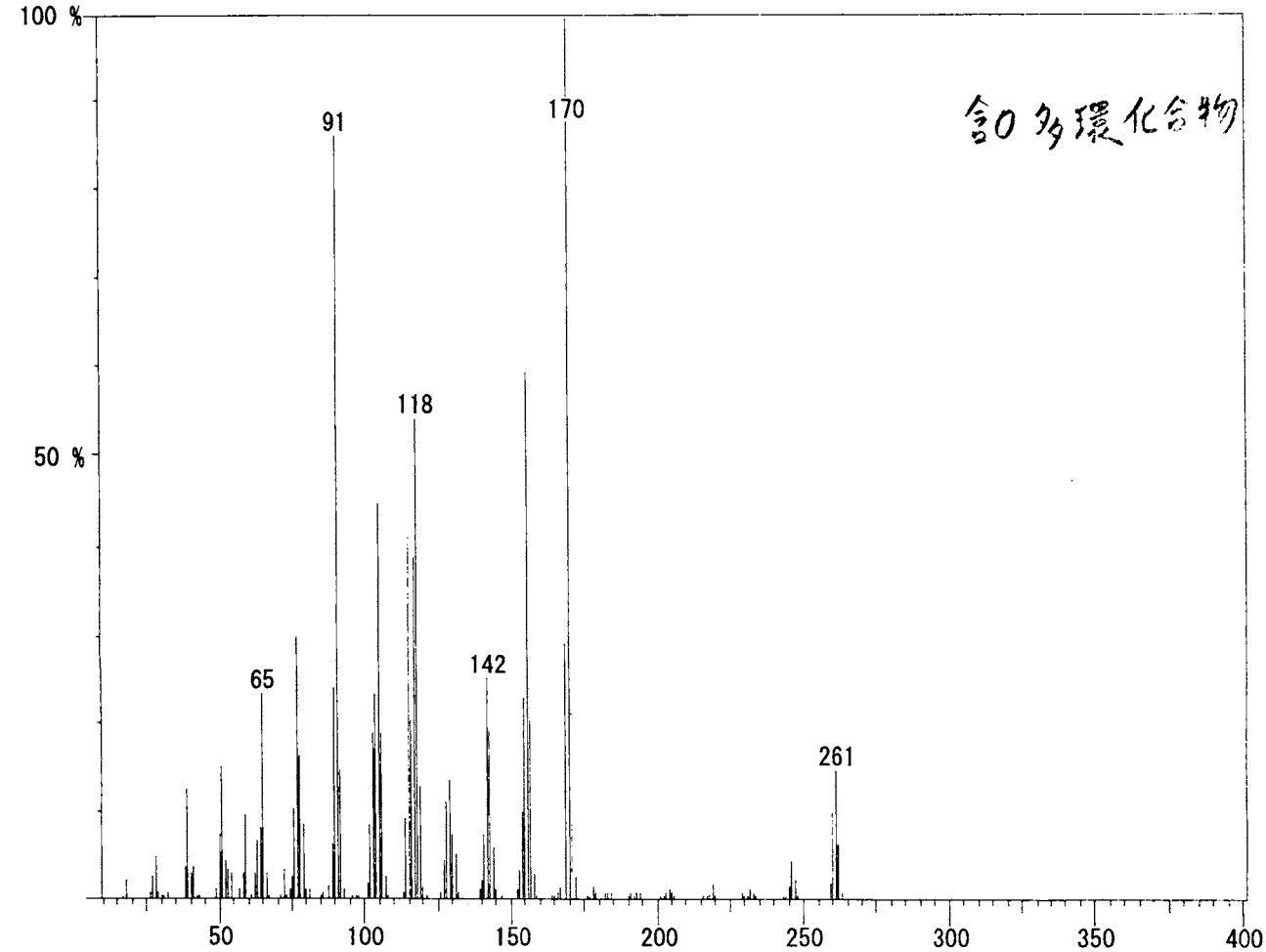
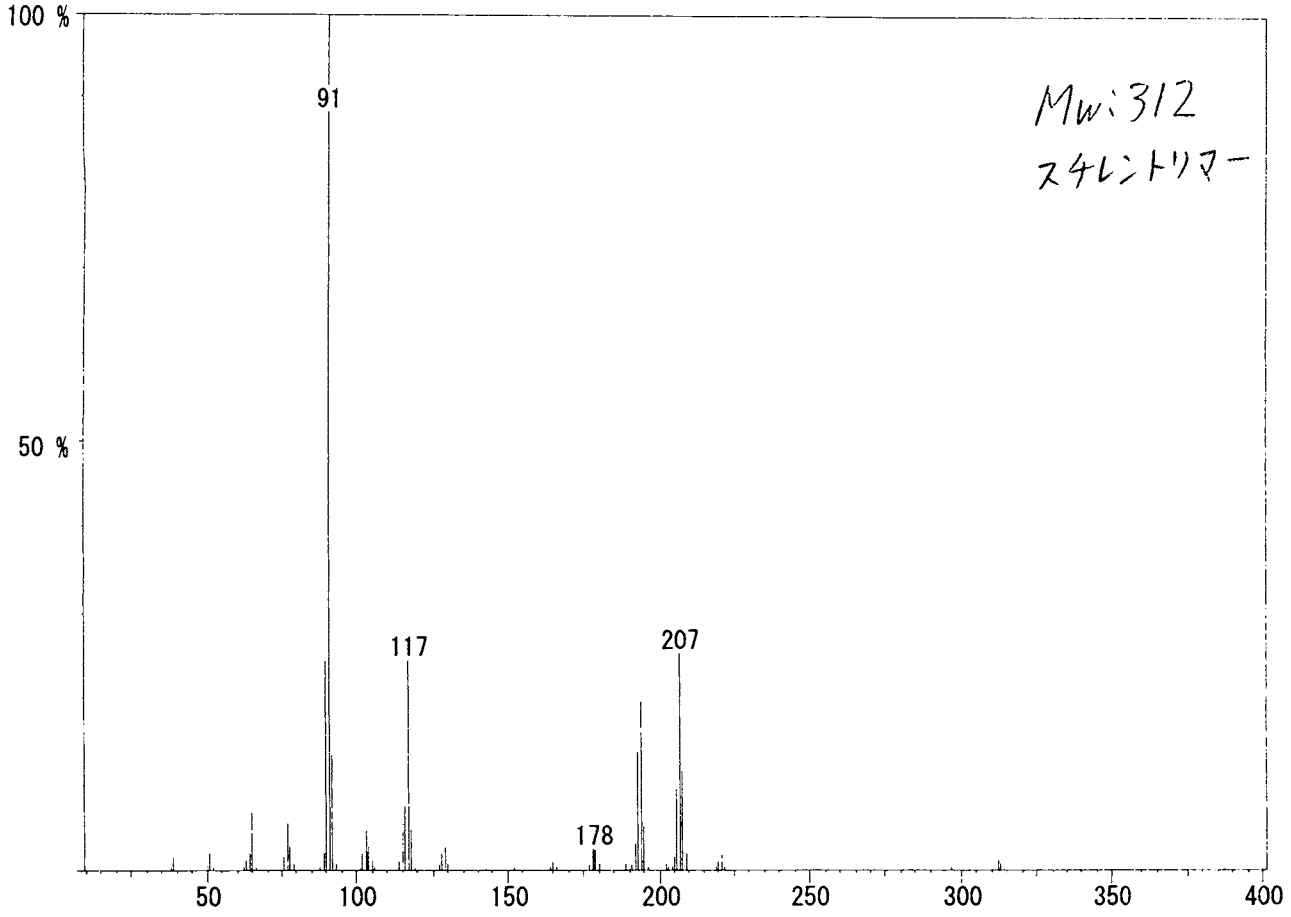


図 4(i)　サンプル加熱温度 385 ℃　マススペクトル

Display V4.02 E:¥RDF¥31130-06.SPA 11/30/05 14:37:41
Station : JMS-AMSUN200/300 User : 日本電子(株)
Scan 10055-10048 BP= 91.00[3313600] TIC=12179480 RT=00:31:25.98



Scan 10293-10287 BP=149.00[768128] TIC=3819764 RT=00:32:10.39

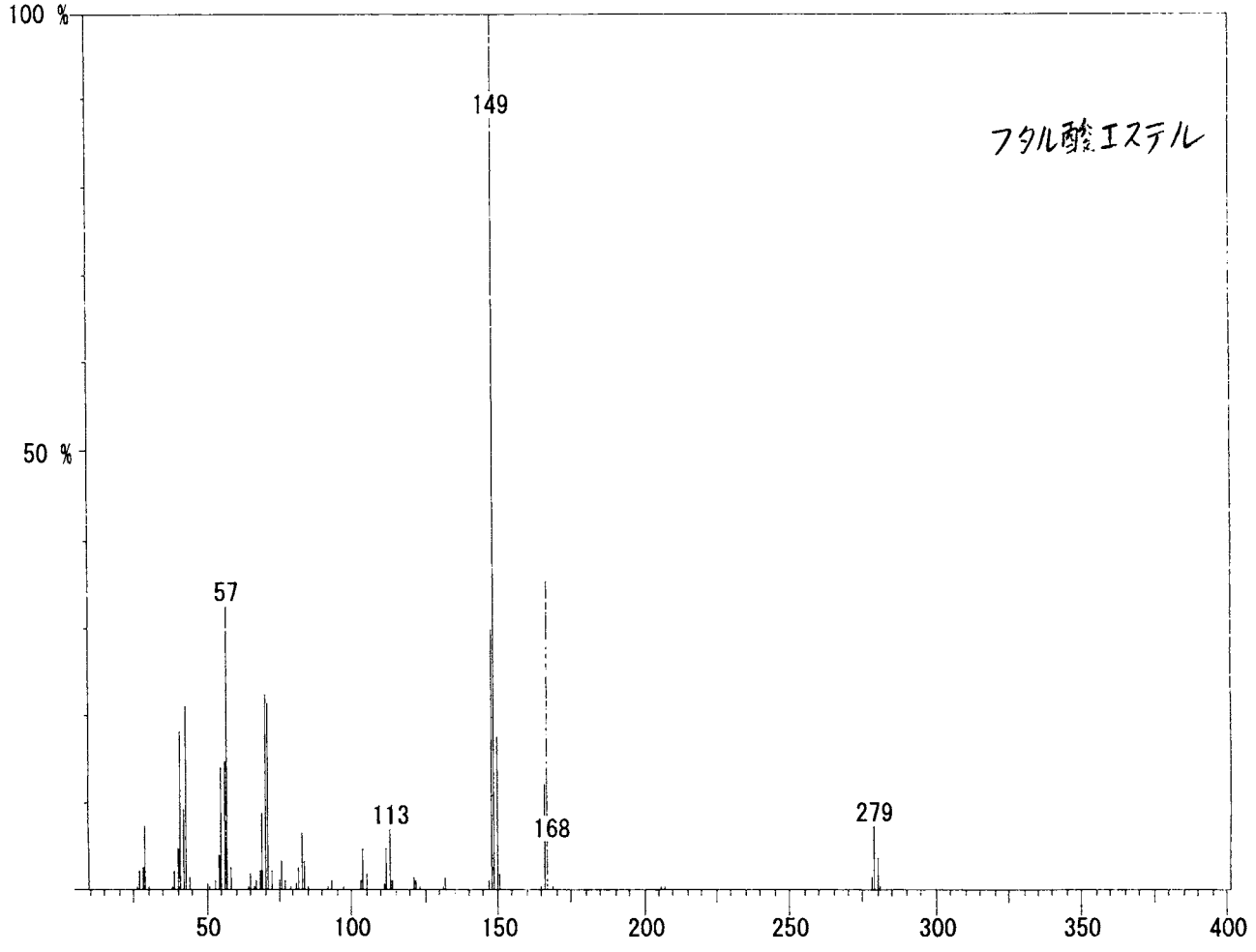


図 4(j) サンプル加熱温度 385 ℃ マススペクトル

Display V4.02 E:¥RDF¥31130-05.SPA 11/30/05 13:34:01
Station : JMS-AMSUN200/300 User : 日本電子(株)

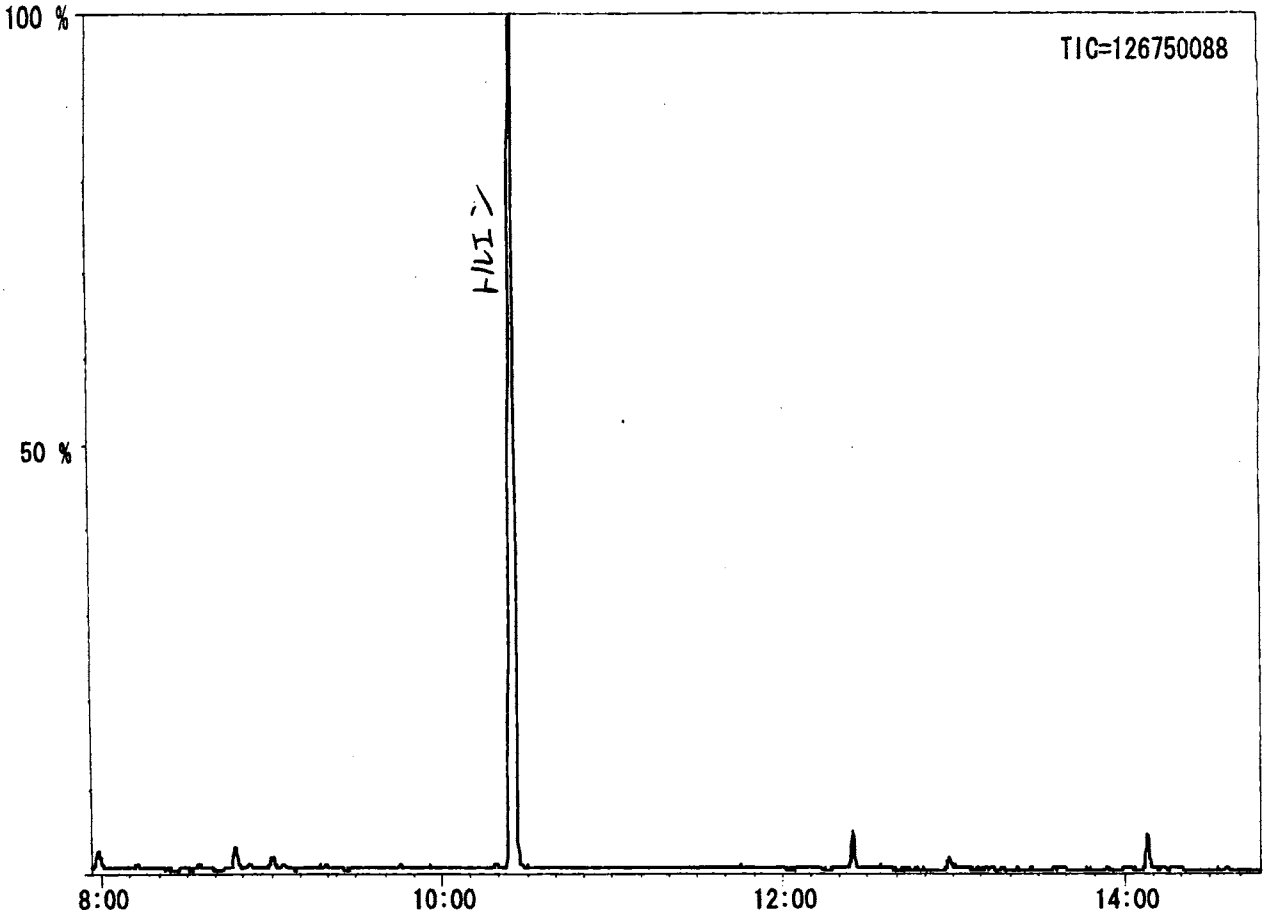


図 5(a)　標品クロマトグラム

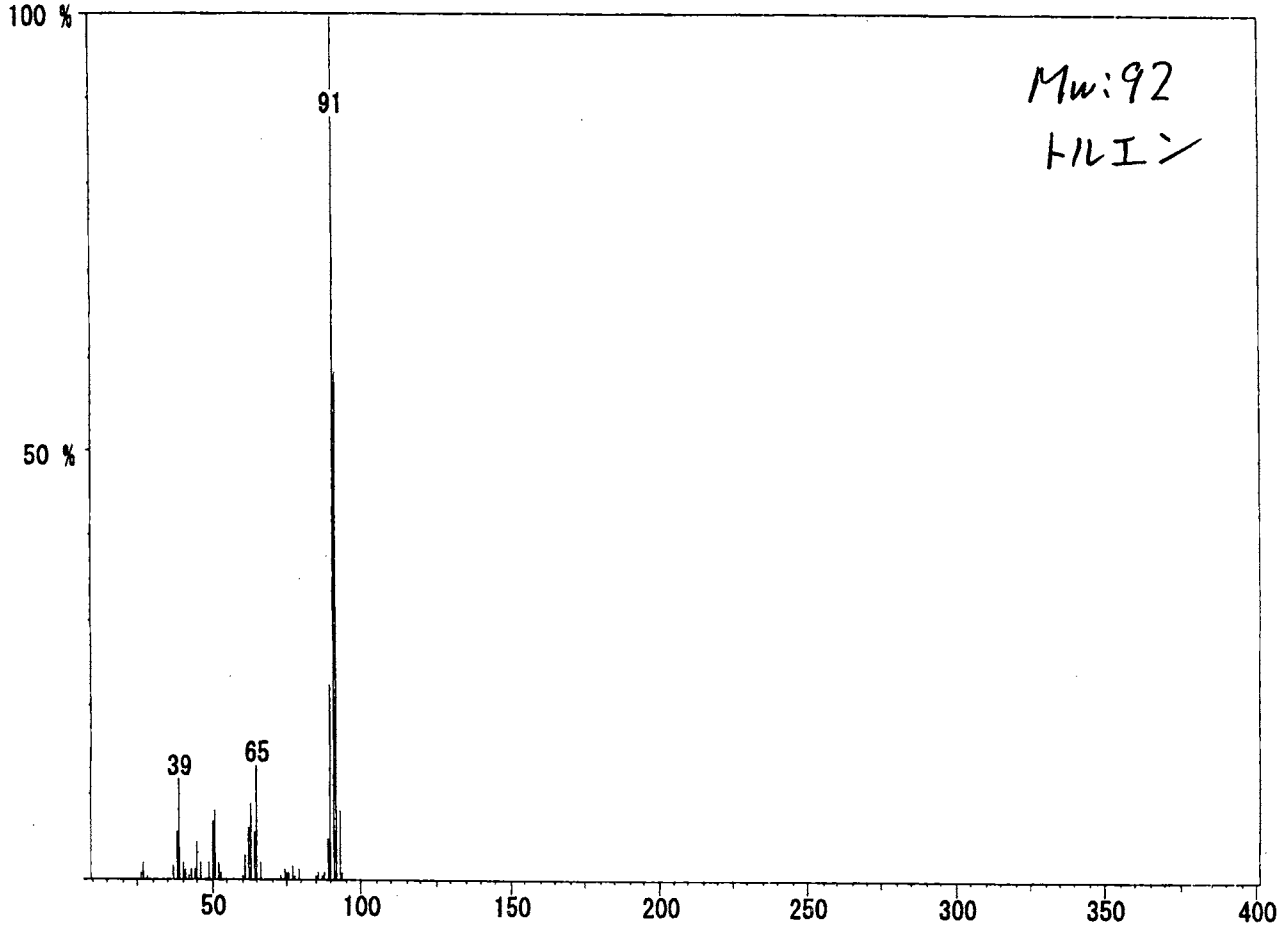


図 5(b)　標品マススペクトル

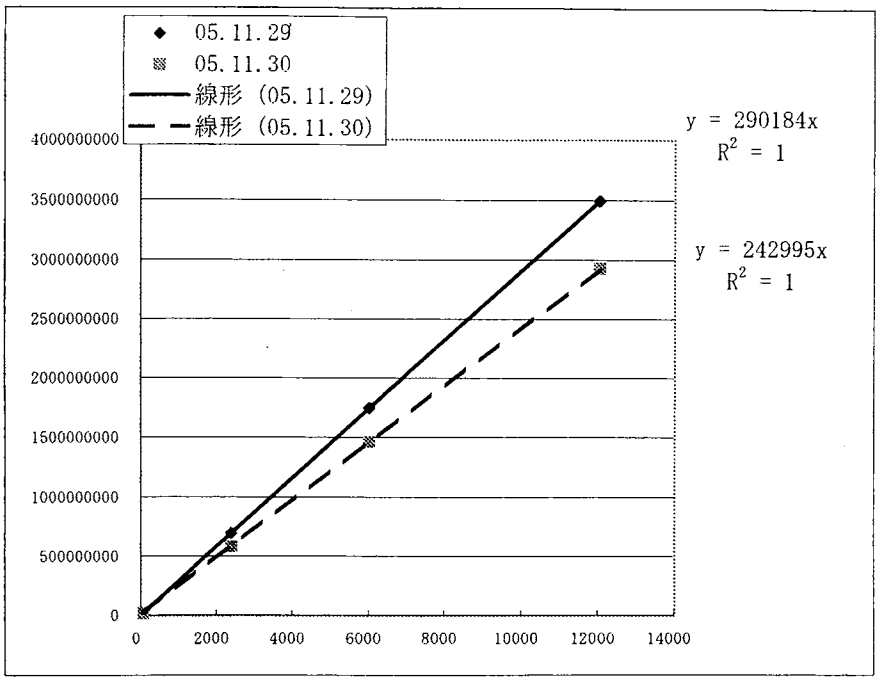


図 6　ﾄﾙｴﾝ検量線
縦軸：TICﾋﾟｰｸ面積
横軸：成分量(ng)

Display V4.02 E:¥RDF¥31130-07.SPA 11/30/05 15:37:29
Station : JMS-AMSUN200/300 User : 日本電子(株)

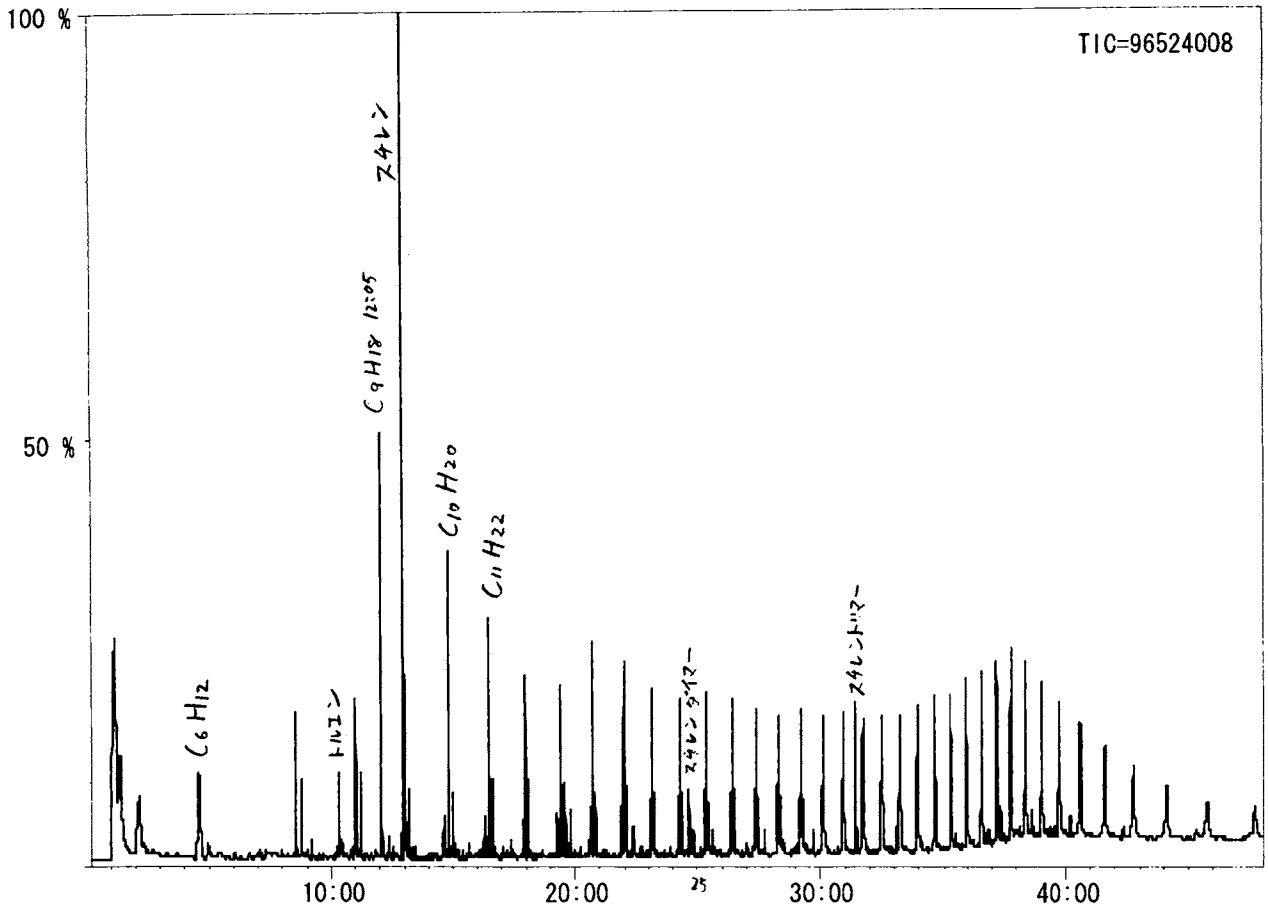


図 7 サンプル加熱温度 550 ℃ 熱分解クロマトグラム

Display V4.02 E:¥RDF¥31130-04.SPA 11/30/05 12:16:30
Station : JMS-AMSUN200/300 User : 日本電子(株)

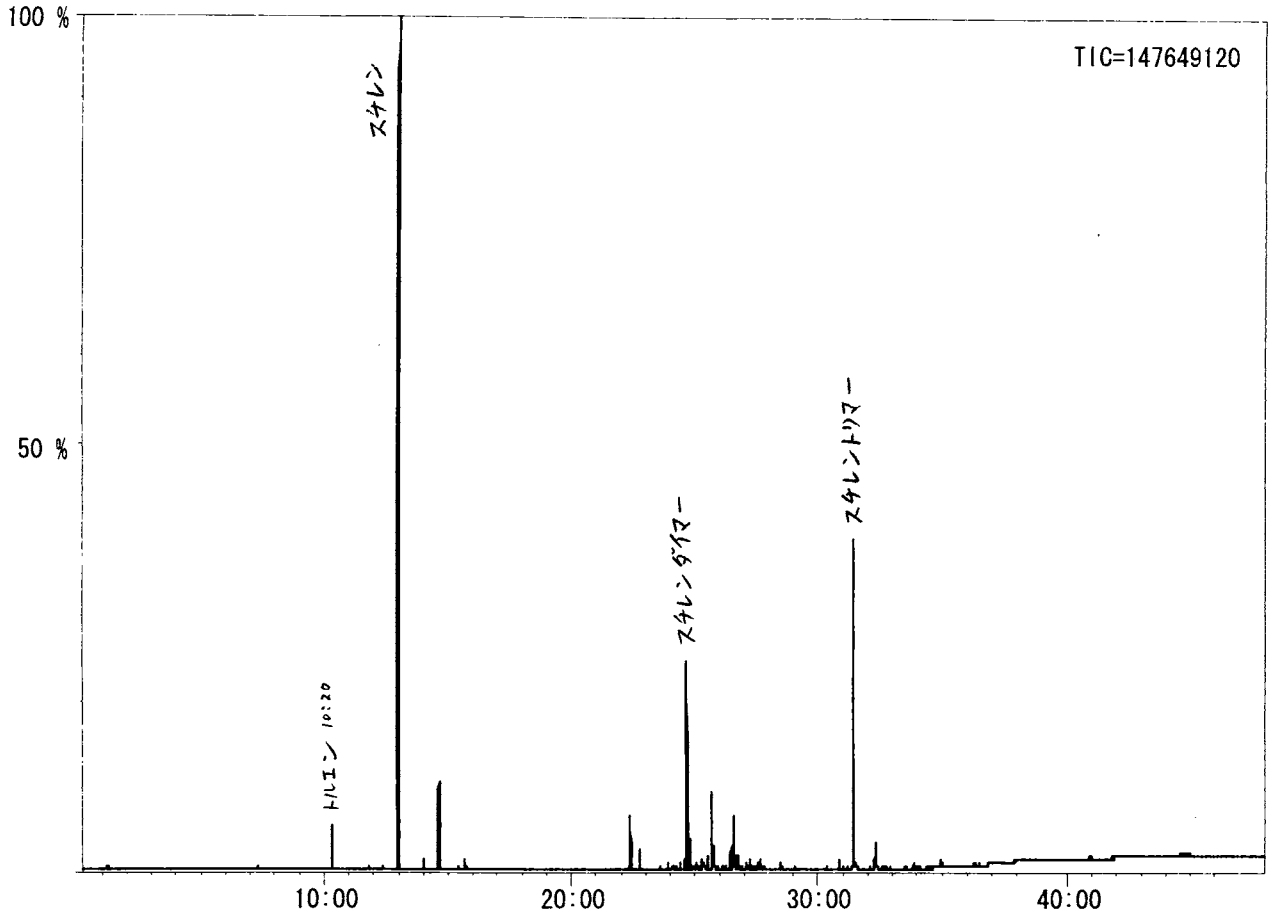


図 8 ポリスチレン製品加熱温度 550 ℃ 熱分解クロマトグラム

Display V4.02 E:¥RDF¥31129-08.SPA 11/29/05 18:50:01
Station : JMS-AMSUN200/300 User : 日本電子(株)

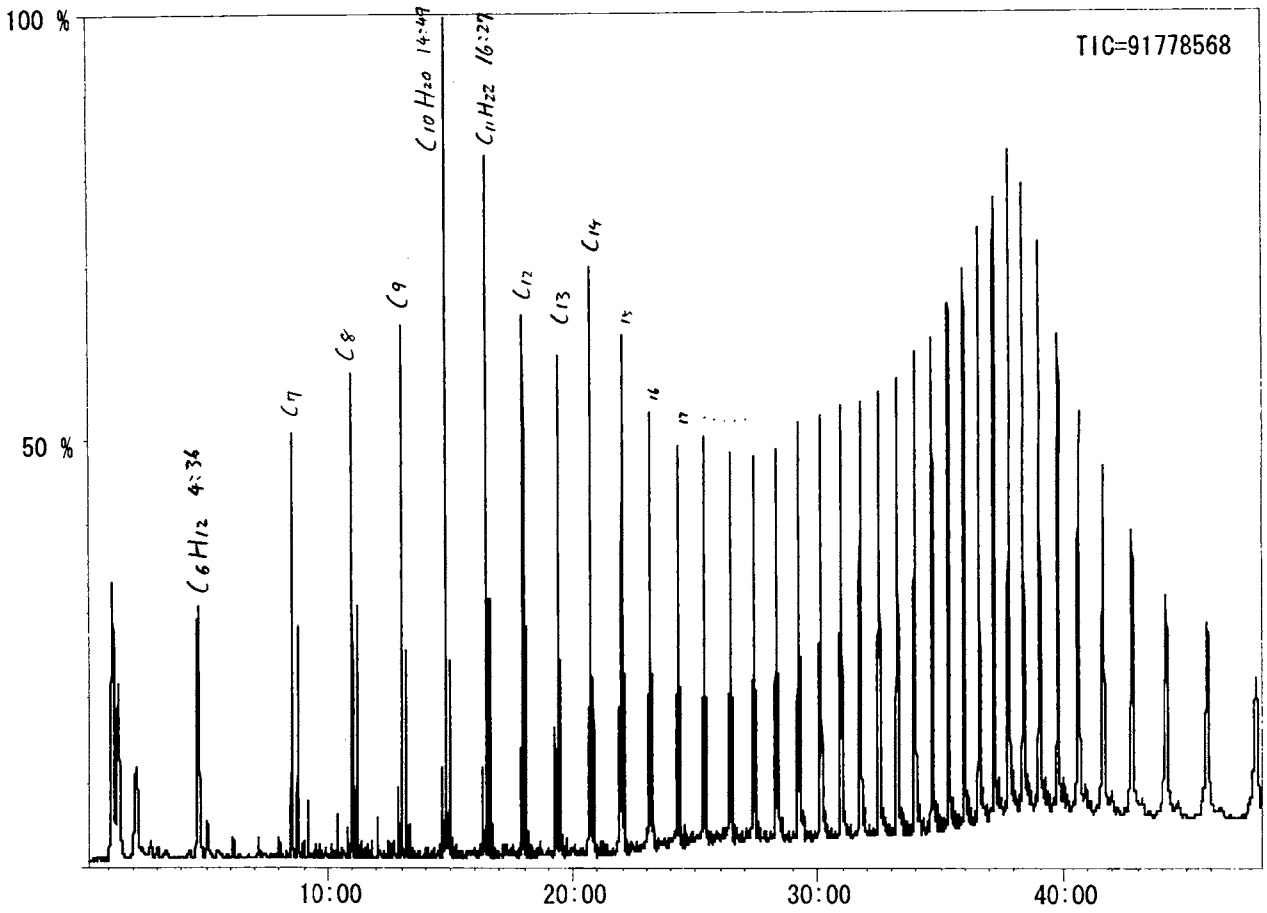


図 9 ポリエチレン製品加熱温度 550 ℃ 熱分解クロマトグラム

⑧　試料の状況

試料の状況

分　析　結　果　報　告　書

独立行政法人　消　防　研　究　所　　御中

件名

ＲＤＦ固形燃料の性状分析

平成 18 年３月

濃度計量証明事業登録・滋賀県第 26 号

東　レ　テ　ク　ノ　株　式　会　社

〒520-0842　滋賀県大津市園山１丁目１番１号

ＴＥＬ(077)537-5150・ＦＡＸ(077)533-8659

平成18年３月17日
第０３０２４２号

独立行政法人　消防研究所　殿

濃度計量証明事業登録・滋賀県第26号
東レテク株式会社
環境科学技術部
環境計量士　田中正隆
〒520-0842 滋賀県大津市園山１丁目１番１号
ＴＥＬ（077）537-5150
ＦＡＸ（077）533-8659

ＲＤＦ固形燃料の性状分析について（報告）

平成 18 年 1 月 27 日御依頼の表記分析結果を下記のとおり報告いたします。

＜　記　＞

１．試料名等（１検体）

桑名(2005 冬)

２．試験項目及び分析方法

１）ＲＤＦの性状と分析方法

ＲＤＦの性状	分析方法	ＲＤＦの性状	分析方法
１．サイズ	ノギスで計測	９．低位発熱量	JIS Z 7302-2 準拠
２．かさ密度	熱電導率測定時のかさ密度	10．炭素	ＣＨＮコーダー法
２．水分	JIS Z 7302-3 準拠	11．水素	〃
４．灰分	JIS Z 7302-4 準拠	12．窒素	〃
５．揮発性	JIS M 8812 準拠	13．全硫黄分	JIS Z 7302-7 準拠
６．固定炭素	JIS M 8812 準拠	14．全塩素分	JIS Z 7302-6 準拠
７．燃料比	計算	15．Ｃａ	JIS K0102 ICP 発光分光分析法
８．高位発熱量	JIS Z 7302-2 準拠	16．着火温度（引火点の代用）	DSC による発熱外挿開始温度

２）熱　分　析

１．ＴＧ－ＤＴＧ	空気雰囲気中での活性化エネルギー算出
２．ＤＳＣ	密閉セルで、窒素雰囲気での反応熱の測定

3）そ の 他

1．熱伝導率（λ）	
2．比熱容量（c）	

4．分析結果

1）ＲＤＦの性状

表－1 分 析 結 果

調 査 項 目	固形燃料 10
① サイズ（直径×長さ mm）	15.57 × 35.38
② かさ密度（kgm^{-3}）	428
③ 水分（%）	5.8
④ 灰分（%）	14.7
⑤ 揮発分（%）	73.5
⑥ 固定炭素（%）	11.8
⑦ 燃料比（－）	0.2
⑧ 高位発熱量（J/g）	20,810
⑨ 低位発熱量（J/g）	19,290
⑩ 炭素（%）	44.92
⑪ 水素（%）	6.99
⑫ 窒素（%）	1.08
⑬ 全硫黄分（%）	0.12
⑭ 全塩素分（%）	0.49
⑮ Ｃａ（%）	4.4
⑯ 着火温度（℃）	255

注）着火温度は、ＤＳＣによる発熱外挿開始温度とした。

2）熱 分 析

表－2 分 析 結 果

1．ＴＧ－ＤＴＧ	空気雰囲気中での活性化エネルギー算出	別紙報告
2．ＤＳＣ	密閉セルで、窒素雰囲気での反応熱の測定	別紙報告

3）そ の 他

表－3（1） 分析結果（レーザフラッシュ法による）

調査項目		桑名(2005冬)				測定温度
試料片		試料片1	試料片2	試料片3	平均値	
密度（kg/m³）		1,114	1,108	1,116	1,110	23
比熱（J/kg·K）		1,393	1,343	—	1,370	25
熱拡散率（$10^{-7}m^2/s$）		1.32	1.34	1.65	1.44	25
熱伝導率	(W/m・K)	0.201	0.204	0.253	0.219	25
	(cal/cm・s・℃)	4.80×10^{-4}	4.88×10^{-4}	6.05×10^{-4}	5.24×10^{-4}	

表－3（2） 分析結果（ニードルプローブ法による）

調査項目		桑名(2005冬)
① 温度（℃）		25
② かさ密度（kg/m³）		428
③ 熱伝導率（λ）	(W/m・K)	0.0556
	(cal/cm・s・℃)	1.329×10^{-4}

添　付　資　料

① サイズ（結果の詳細）

② ＲＤＦ燃料の分析－熱伝導率・比熱測定（レーザフラッシュ法）－

③ ＲＤＦ燃料の分析－熱伝導率測定（ニードルプローブ法）－

④ ＲＤＦ燃料の分析－ＴＧ－ＤＴＧ測定

⑤ ＲＤＦ燃料の分析－ＤＳＣ測定

⑥ 試料の状況

① サイズ（結果の詳細）

添 付 資 料

① サイズ（結果の詳細）

	桑名(2005冬)	
	直径 mm	長さ mm
	15.65	35.64
	15.71	49.11
	15.78	31.01
	15.71	27.42
	15.72	35.67
	15.53	59.60
	15.55	27.27
	15.58	29.48
	15.33	25.99
	15.38	32.98
	15.35	40.55
	15.99	44.78
	16.00	36.69
	15.24	32.63
	15.75	26.40
	15.81	42.09
	15.28	14.13
	15.92	41.61
	15.28	27.15
	15.32	44.47
	15.24	50.66
	15.34	37.65
	15.33	34.15
	15.76	21.76
	15.61	23.86
	15.82	43.51
	15.61	51.07
	15.33	24.05
	15.59	31.67
	15.55	38.21
ave	15.57	35.38
max	16.00	59.60
min	15.24	14.13
σ	0.231	10.109

②　ＲＤＦ燃料の分析－熱伝導率・比熱測定（レーザフラッシュ法）－

② ＲＤＦ燃料の分析－熱伝導率・比熱測定（レーザフラッシュ法）

1．試　料

１検体　：　桑名2005冬

・密　　度

貴方ご提供品を弊方で凍結粉砕して粉末化した後、錠剤成型器を用いて直径約13 mm、厚さ約1 mmの円板状に成型し、測定に供した。

・比　　熱

錠剤成型器を用いて直径約13 mm、厚さ約１mmの円板状に成型したものから、DSC（示差走査熱量計）サンプル容器に入る大きさの試料片を切り出し、測定に供した。

・熱拡散率

密度測定に供した試料片から、直径約10 mm、厚さ約1 mmの円板状試料片を切り出し、カーボンスプレーを両面に塗布して表面を黒化し、測定に供した。

2．測定原理

2．1　熱拡散率

熱拡散率測定はレーザフラッシュ法にて行った。図１に同方法による厚さ方向の熱拡散率測定の原理（模式図）を示す。円板状試料のA面（表面）全体にレーザ光を瞬間照射(フラッシュ)し、パルス加熱する。ここで、A面からB面（裏面）へ試料中を１次元的に熱が伝わるとすると、B面の温度上昇は以下の式（１）で表される。

$$\Delta T = \Delta T_m \left\{ 1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \exp\left(- \frac{n^2 \pi^2 \alpha t}{L^2} \right) \right\} \qquad (1)$$

ここで、

α ：熱拡散率 ($m^2 s^{-1}$)

L ：厚さ (m)

t ：レーザ光を照射してからの経過時間 (s)

ΔT ：時刻 t におけるＢ面の温度上昇幅（℃）

ΔT_m ：ΔTの最大値（℃）

である。式（１）を図示すると図２のようになる。図２より、ΔT_m の 1／2 に達するまでの時間(ハーフタイム)を $t_{1/2}$ とすれば、$\alpha t_{1/2} / L^2 = 0.1388$ となることがわかる。従って、$t_{1/2}$ を測定すれば、式（２）から熱拡散率 α を求めることができる（ハーフタイム法)。

$$\alpha = 0.1388 \times \frac{L^2}{t_{1/2}} \times K \qquad (2)$$

ここで、K は試料から周囲への熱損失分を補正する係数である[1]。

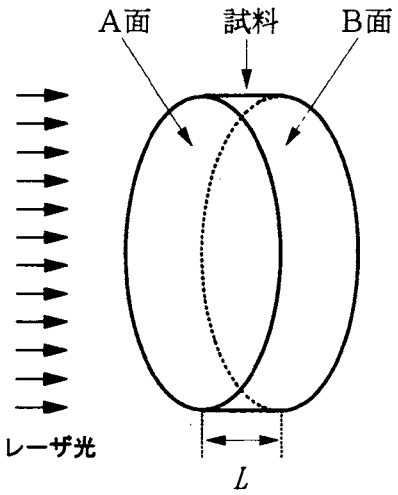


図１ レーザフラッシュ法の測定原理

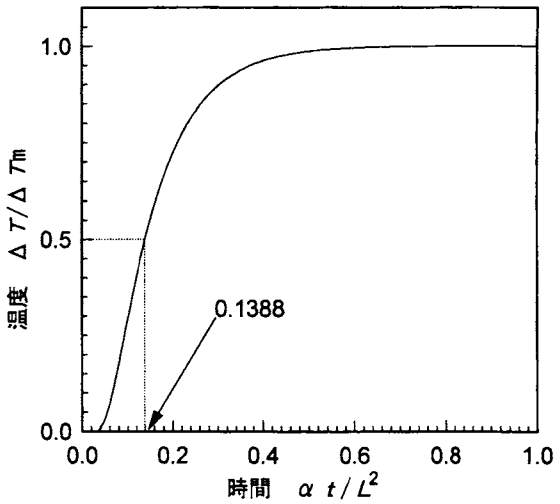


図２ Ｂ面の温度上昇曲線

２．２ 比 熱

比熱 C_p (J kg^{-1} K^{-1}) は、DSC（示差走査熱量測定）法[2,3]により測定した。

２．３ 熱伝導率

熱伝導率 λ (W m^{-1} K^{-1} または cal cm^{-1} s^{-1} ℃$^{-1}$) は、熱拡散率 α と熱容量 ρC_p(J m^{-3} K^{-1}) の積として、式（３）より算出される。

$$\lambda = \alpha \rho C_p \qquad (3)$$

ここで、ρ (kg m^{-3}) は密度であり、23℃において、試料の質量 m (kg)，断面積 S (m^2) および厚さ L (m) を実測し、式（４）により算出した値を用いた。

$$\rho = \frac{m}{S \times L} \qquad (4)$$

３．測定条件

３．１ 密　　度

測定方法　：　質量，断面積および厚さ実測法
測定装置　：　質量…Mettler 社製　電子分析天びん　XS205
測定温度　：　23℃
測定ｎ数　：　３（３つの異なる試料片を測定に供した）

３．２ 比　　熱

測定方法　：　DSC 法
測定装置　：　Perkin-Elmer 社製 示差走査熱量計 DSC-7
ﾃﾞｰﾀ処理　：　当社製 DSC データ処理システム TRC-THADAP-CP[3)]
昇温速度　：　10 ℃ / min
比熱校正　：　サファイア (62.58 mg)
雰 囲 気　：　乾燥窒素気流中
測定温度　：　25℃
ｻﾝﾌﾟﾙ容器　：　Perkin-Elmer 社製 アルミニウム標準容器
測定ｎ数　：　２（それぞれ試料を新たにサンプリングして測定した）
試 料 量　：　約 30 mg（詳細は表２参照）

３．３ 熱拡散率

測定方法　：　レーザフラッシュ法
測定装置　：　真空理工㈱製 熱定数測定装置 TC－7000
測定温度　：　25℃
照 射 光　：　ルビーレーザ光（励起電圧 2.2 kV）
試料裏面
　温度ｾﾝｻｰ：　赤外線検出器（InSb センサー）
雰 囲 気　：　空気中
測定ｎ数　：　３（３つの異なる試料片を測定に供した，重ね合せ 5 回）

4．測定結果

4．1 密　　度

表１に密度の測定結果を示す。密度の測定精度は±2～3%程度である。

表１　密度測定結果

試　料	温度 T / ℃	試料片	質量 m / 10^{-3} kg	面積 S / 10^{-4} m^2	厚さ L / 10^{-2} m	密度*1 ρ / kg m^{-3}
桑名 (2005冬)	23	1	0.1257	1.3596	0.0830	1114
		2	0.1558	1.3561	0.1037	1108
		3	0.1538	1.3318	0.1035	1116

*1 下式により求めた値

$$\rho = \frac{m}{S \times L}$$

密度の測定精度は±2～3%程度

4．2 比　　熱

表２に比熱の測定結果を示す。比熱の測定精度は±1%程度である。

表２　比熱測定結果

試　料	温度 T / ℃	試料片	試料量 10^{-6} kg	比熱*1 C_p / J kg^{-1} K^{-1}
桑名 (2005冬)	25	1	31.76	1393
		2	31.05	1343
		平均	-	1368

*1　比熱の測定精度は±1%程度

4．3 熱拡散率

熱拡散率の測定チャートの一部（試料片１）を Fig.3 に、熱拡散率の測定結果を表３に、それぞれ示す。熱拡散率の測定精度は通常±5%程度であるが、この試料に関しては±20%程度である。通常より測定精度が悪い理由としては、①複合材料（粉末状試料＋空気）を均一な連続媒体とみなして解析している、②作製した試料片表面に凸凹が見られ、試料片の厚さ測定に誤差が含まれやすい、等があげられる。

表３　熱拡散率測定結果

試 料	温度 T / ℃	試料片	厚さ*1 L / 10^{-3} m	ハーフタイム $t_{1/2}$ / 10^{-3} s	熱損失補正係数 K	熱拡散率*2 α / 10^{-7} m^2 s^{-1}
桑名 (2005冬)	25	1	0.850	669.2	0.880	1.32
		2	1.093	1040	0.839	1.34
		3	1.067	827.4	0.866	1.65

*1　23℃における実測値
*2　下式により求めた値

$$\alpha = 0.1388 \times \frac{L^2}{t_{1/2}} \times K$$

熱拡散率の測定精度は±20%程度

4．4 熱伝導率

表４に熱伝導率の測定結果を示す。熱伝導率の測定精度は±20%程度である。

なお、測定された熱伝導率値は、貴社ご提供品(粉末状試料)を円板状に成型した、表中記載のかさ密度を有する「粉末状試料＋空気」といった一種の複合材料に対する熱伝導率であることに注意されたい。

表４　熱伝導率測定結果

試　料	温度 T / ℃	試料片	密度*1 ρ / kg m^{-3}	比熱*2 C_p / J kg^{-1} K^{-1}	熱拡散率*3 α / 10^{-7} m^2 s^{-1}	熱伝導率*4 λ / W m^{-1} K^{-1}
桑 名 (2005冬)	25	1	1110	1370	1.32	0.201
		2	1110		1.34	0.204
		3	1120		1.65	0.253

*1　23 ℃における実測値を有効数字３桁で丸めた値
密度の測定精度は±2～3%程度
*2　試料片を替え,2 回測定した際の平均値を有効数字 3 桁に丸めた値
比熱の測定精度は±1%程度
*3　熱拡散率の測定精度は±20%程度
*4　熱伝導率の測定精度は±20%程度
なお、1 W m^{-1} K^{-1} ＝ 2.390×10^{-3} cal cm^{-1} s^{-1} $℃^{-1}$

5．参考文献

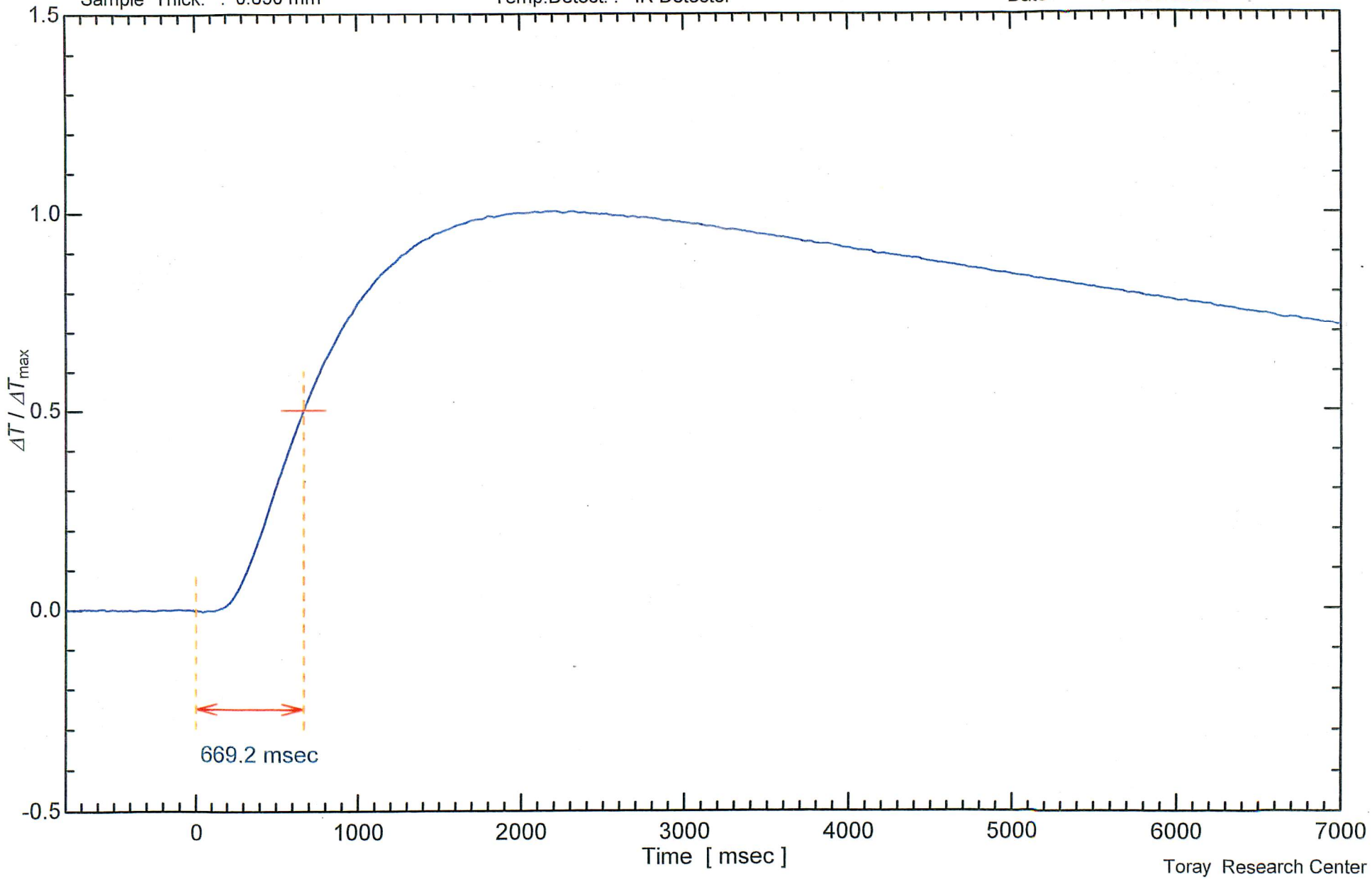
1) 山根，片山，十時，第 13 回日本熱物性シンポジウム(1992)
2) 片山，薮内，十時，第 8 回日本熱物性シンポジウム(1987)
3) 片山，石切山，十時，熱測定 13(1),17(1986).

Fig. 3 Rear-surface Temperature Curve Sample: 桑名（2005冬）（Run 1）

Apparatus : TC-7000
Measure. Temp.: 25 ℃
Sample Thick. : 0.850 mm

Measuer.Int. : 1 msec
Sensitivity : 100.0 uv
Temp.Detect. : IR Detector

Serial No. : K229638-A-A
Operator : R.Endoh
Date : 2006/02/22



Toray Research Center

③　ＲＤＦ燃料の分析－熱伝導率測定（ニードルプローブ法）－

③ ＲＤＦ燃料の分析－熱伝導率測定（ニードルプローブ法）

1．試料および測定温度

1検体　：　桑名2005冬　（測定温度：25℃）

貴社ご提供品を弊方で凍結粉砕して粉末化した後、試料セル（内径約14 mm，長さ約150 mmのパイレックスガラス製試験管）に採取し、測定に供した。

2．手　法

ニードルプローブ法

3．原　理

図1にニードルプローブ法による熱伝導率測定の原理を示す。一様温度 T_0 の等方性無限媒体中（熱伝導率 λ（W m^{-1} K^{-1}））に、無限に長い発熱細線があるとする。該細線から周囲の媒体中に、単位長さ当り q（W m^{-1}）の発熱が開始されたとすると、式（1）が成立する。

$$\Delta T(t) = T(t) - T_0$$

$$= \frac{q}{4\pi\lambda} \ln\left(\frac{4at}{r^2 C}\right) \qquad (1)$$

ここで、$\Delta T(t)$ は細線の温度上昇 (K)、a は熱拡散率 (m^2 s^{-1})、r は細線半径 (m)、C は定数(=1.781..)である。すなわち、細線表面温度 ΔT(K)を発熱開始からの時間 ln (t/s)に対してプロットすれば、その傾きから、式 (2) より熱伝導率 λ を求めることができる。

$$\lambda = \frac{q}{4\pi} \frac{1}{d(\Delta T(t))/d(\ln(t))} \qquad (2)$$

4．装　置

図2に示すニードルプローブを用いた。直径約1 mm，長さ約140 mmのステンレス管にヒーターとシース型熱電対を封入した構造になっている。なお、ヒーターへ供給した電力の熱量への換算には、グリセリン(熱伝導率0.288 W m^{-1} K^{-1}, 25℃[1])およびエチレングリコール（熱伝導率0.258 W m^{-1} K^{-1}, 25℃[1]）を標準試料として求めた校正係数を用いた。

図3に測定装置全体を示す。恒温槽には、恒温水槽(温度安定度±0.02℃)を用いた。試料セルは、既述の様に内径約14 mm，長さ約150 mmのパイレックスガラス製試験管を用いた。

5．手　順

① 試料を試料セル（重量・容積既知）に採取する。

② 試料重量を実測し、かさ密度を求める。

③ ニードルプローブを、試料に挿入する。

④ 試料セルを、25℃に制御した恒温槽にセットする。

⑤ 試料温度が安定したことを確認後、ヒーターに一定電流を供給し、その時の電力および熱電対の温度上昇を１秒毎に測定し、パソコンに取込む。

⑥ ９～20 秒付近のデータを、式（２）に従って解析し、熱伝導率 λ を求める。

⑦ ⑤, ⑥を 10 回程度繰り返し、平均して測定値を得る。

６．結　果

図４に測定チャートを示す。図中破線は、図中記載の式より求めた計算値である。この点線の傾きから、式（２）により熱伝導率を求めた。

表１に熱伝導率の測定結果を示す。かさ密度の測定精度は±10%程度、熱伝導率の測定精度は±20%程度である。なお、測定された熱伝導率値は、貴社ご提供品（粉末状試料）を試料セル（試験管）にサンプリングした、表中記載のかさ密度を有する「粉末状試料＋空気」といった一種の複合材料に対する熱伝導率であることに注意されたい。

表１　熱伝導率想定結果

試　料	温度 T / ℃	かさ密度*1 / kg m^{-3}	熱伝導率*2 λ / W m^{-1} K^{-1}
桑名 (2005冬)	25	428	0.0556

*1　かさ密度の測定精度は±10%程度

*2　熱伝導率の測定精度は±20%程度

なお、1 W m-1 K-1 ＝ 2.390 × 10-3 cal cm-1 s-1 ℃-1

７．参考文献

[1] 日本化学会編,「化学便覧基礎編改訂３版」, p. II -73,丸善㈱発行(1984).

８．添付資料

付録：単位換算表

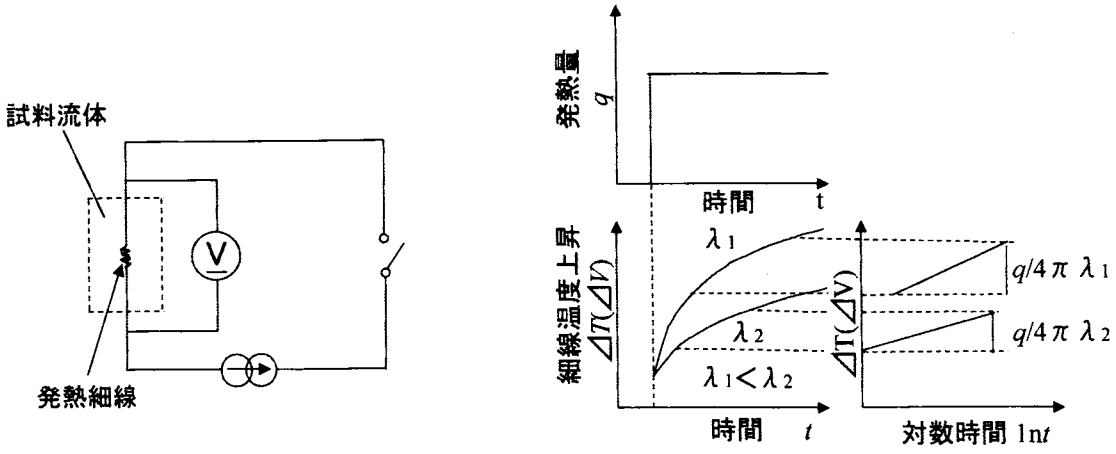


図１ ニードルプローブ法の測定原理

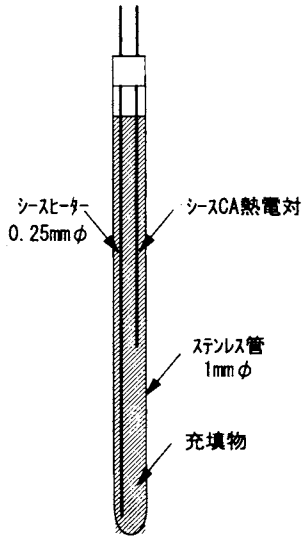


図２ ニードルプローブ

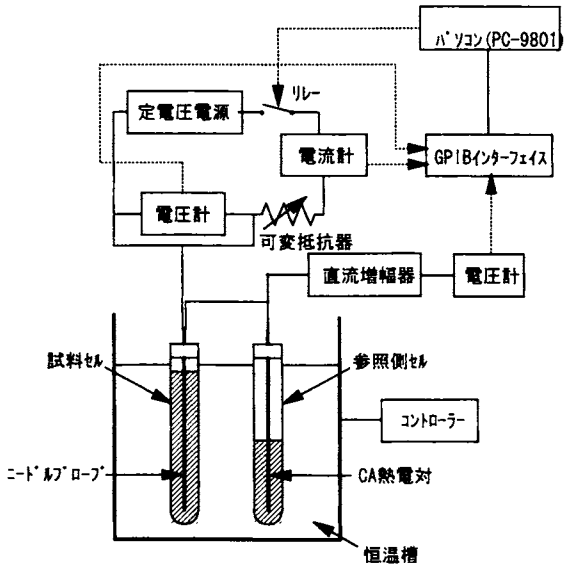


図３ ニードルプローブ法測定装置

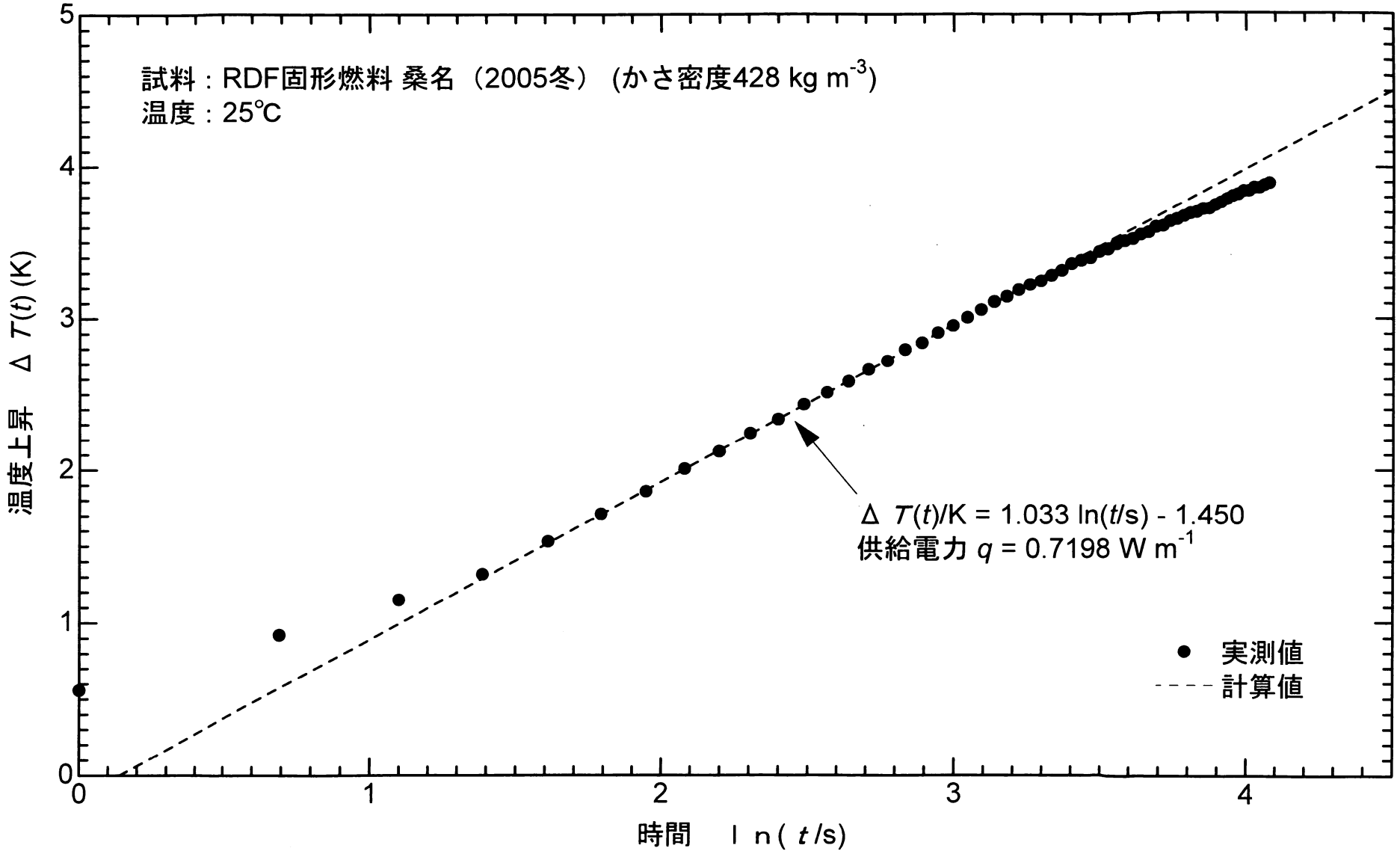


図4　熱伝導率測定チャート

付録：単位換算表

（1） エネルギー

J	cal
1	0.239
4.184	1

（2） 熱拡散率

$m^2\ s^{-1}$	$cm^2\ s^{-1}$	$m^2\ hr^{-1}$
1	1×10^4	3.600×10^{-3}
1×10^{-4}	1	3.600×10^{-1}
2.778×10^{-4}	2.778	1

（3） 比熱

$J\ kg^{-1}K^{-1}$	$cal\ g^{-1}℃^{-1}$
1	0.2390×10^{-3}
4.184×10^3	1

（4） 熱伝導率

$W\ m^{-1}K^{-1}$	$cal\ cm^{-1}s^{-1}℃^{-1}$	$kcal\ m^{-1}hr^{-1}℃^{-1}$
1	2.390×10^{-3}	0.8604
418.4	1	360
1.162	2.778×10^{-3}	1

④　ＲＤＦ燃料の分析－ＴＧ－ＤＴＧ測定

④ ＲＤＦ燃料の分析－ＴＧ－ＤＴＧ測定

１．試　　料

１検体　：　桑名(2005冬)

試料は、凍結粉砕して測定に供した。

２．手　　法

熱重量測定法（TG–DTG*：Thermogravimetry－Derivative Thermogravimetry）

*DTG は TG の微分

３．測　　定

空気雰囲気下で、室温～1000℃間の TG-DTG 曲線を昇温速度２℃/min，５℃/min，10℃/min，20℃/min で測定して，RDF 固形燃料の加熱減量挙動を調べた。

測定条件の詳細は，次のとおりである。

装　　置：島津製作所製　TG-40 型
データ処理：東レリサーチセンター製データ処理システム "TRC-THADAP-TG-2"
雰　囲　気：窒素流，空気流，5%酸素／窒素，10%酸素／窒素
ガス流量：50 ml/min
温度較正：高純度ニッケル（キュリーポイント：353℃）
測定温度範囲：室温～1000℃
昇温速度：10℃/min
試　料　量：約 10 mg（値は図中に記載）

４．結　　果

各昇温速度での TG-DTG 曲線を Fig. 1 に重ね書きする。各曲線ともに、およそ四段階（DTG ピーク温度：室温～100℃，270～330℃，450℃～500℃，600～700℃）の加熱減量が認められる。これらのうち、第一段階目の減量は付着水等の気散によるもの、第二～第四段階目の減量は試料の熱酸化分解によるものと考えられる。

そこで，減量率が最も大きな第二段階目の加熱減量に注目して、小澤法による熱酸化分解時の活性化エネルギーの算出を試みた。

はじめに，第一段階目の減量の終了時温度（150℃）の重量率を 100%、第二段階目の減量の終了時温度（約 300℃～450℃で各水準により異なる；DTG ピークの高さが最低になる温度）の重量率を０%とみなして、TG 曲線の規格化を行った（Fig. 2)。その TG 曲線について、重量率 90%～10%（熱酸化分解率 10%～90%）時の温度を読み取った。その結果を表１にまとめる.

表１　RDF 固形燃料の初期熱酸化分解過程*（空気雰囲気）における TG 測定結果

試　料	昇温速度	所定熱酸化分解時の温度　(℃)								
		10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%
桑名 (2005 冬)	2℃/min	223	240	251	261	269	276	284	294	308
	5℃/min	240	257	269	279	287	295	303	312	327
	10℃/min	253	272	284	294	303	312	321	331	347
	20℃/min	269	290	301	309	317	325	334	345	363

*150℃～約 400℃間で重量を規格化

次に、小澤法による活性化エネルギーを求めるために。表１の結果に基づいて、横軸に $1/T$（絶対温度 T の逆数)、縦軸に $\log\Phi$（昇温速度の常用対数）をプロットした。その結果を Fig. 3 に示す（横軸は $1000/T$ にしてある)。この小澤プロットにおいて、線形近似の直線の傾きから下式に基づいて活性化エネルギーを求めた。

$$\text{近似直線の傾き} = 0.4567\,\Delta E / R$$

ここで，ΔE は活性化エネルギー，R は気体定数（8.314510 J mol^{-1} K^{-1}）であるため，

$$\Delta E \ (\text{kJ mol}^{-1}) = \text{近似直線の傾き}/0.0549$$

と書き換えることができる.

Fig. 3 の小澤プロットを見ると、10%熱酸化分解～90%熱酸化分解までのいずれのプロットについても、概ね直線関係は成立しているが、その傾きは平行ではなく、熱酸化分解率に依存して変化している。そこで、両端を除く代表的な 3 点、具体的には 30%、50%、70%熱酸化分解時の直線の傾きからそれぞれ活性化エネルギーを見積もり、平均値を算出することとした。その結果を各図中に記載するとともに、表２にまとめる。

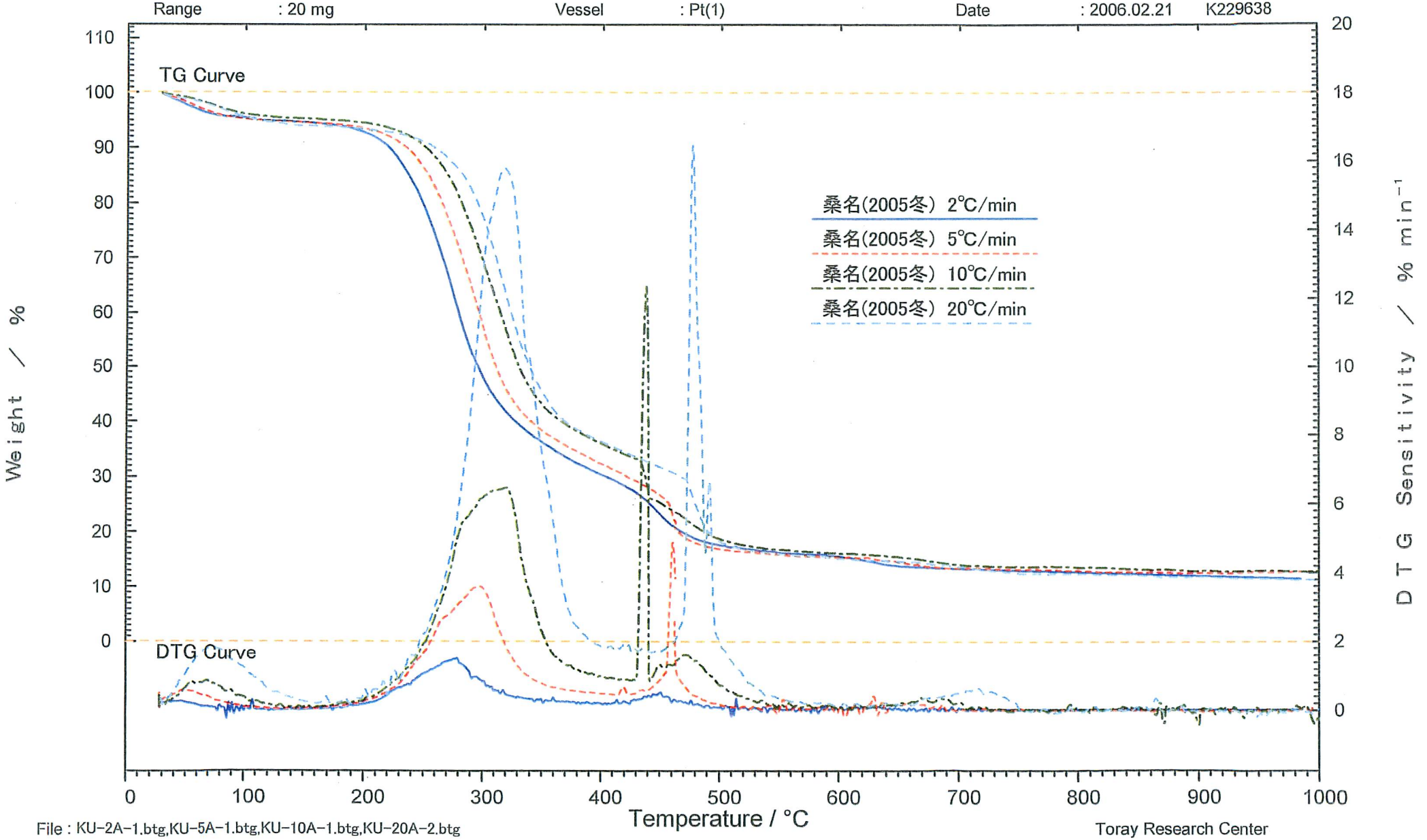
表２　RDF 固形燃料の初期熱酸化分解過程*（空気雰囲気）における活性化エネルギー

特　　性	桑名(2005冬)
30%熱酸化分解時の ΔE (kJ mol^{-1})	109.8
50%熱酸化分解時の ΔE (kJ mol^{-1})	120.2
70%熱酸化分解時の ΔE (kJ mol^{-1})	120.6
ΔE の平均値 (kJ mol^{-1})	**116.9**

*150℃～約 400℃間で重量を規格化

Fig. 1 TG Curve [Air]

Apparatus	: Shimadzu TG-40	Sample Size	: 10.260 mg	Gas Flow	: 30 ml/min, (upper/)	20 ml/min, (bottom/)
Heating Rate	: 2 deg/min	Pretreatment	:	Operator	: K.Nakanishi	
Range	: 20 mg	Vessel	: Pt(1)	Date	: 2006.02.21	K229638

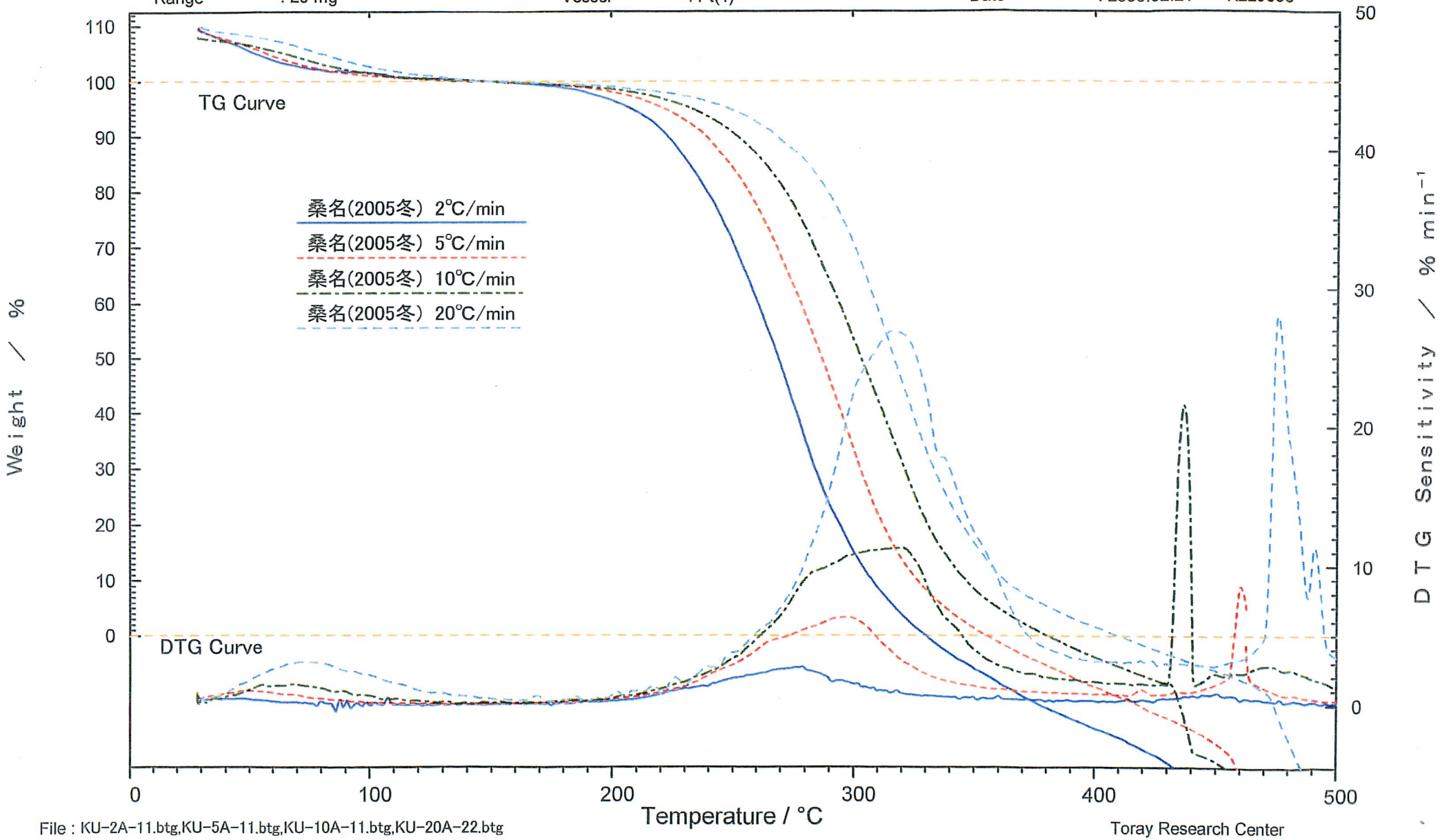


File : KU-2A-1.btg,KU-5A-1.btg,KU-10A-1.btg,KU-20A-2.btg

Toray Research Center

Fig. 2 TG Curve [Air]

Apparatus	: Shimadzu TG-40	Sample Size	: 10.260 mg	Gas Flow	: 30 ml/min, (upper/)	20 ml/min, (bottom/)
Heating Rate	: 2 deg/min	Pretreatment	:	Operator	: K.Nakanishi	
Range	: 20 mg	Vessel	: Pt(1)	Date	: 2006.02.21	K229638



File : KU-2A-11.btg,KU-5A-11.btg,KU-10A-11.btg,KU-20A-22.btg

Toray Research Center

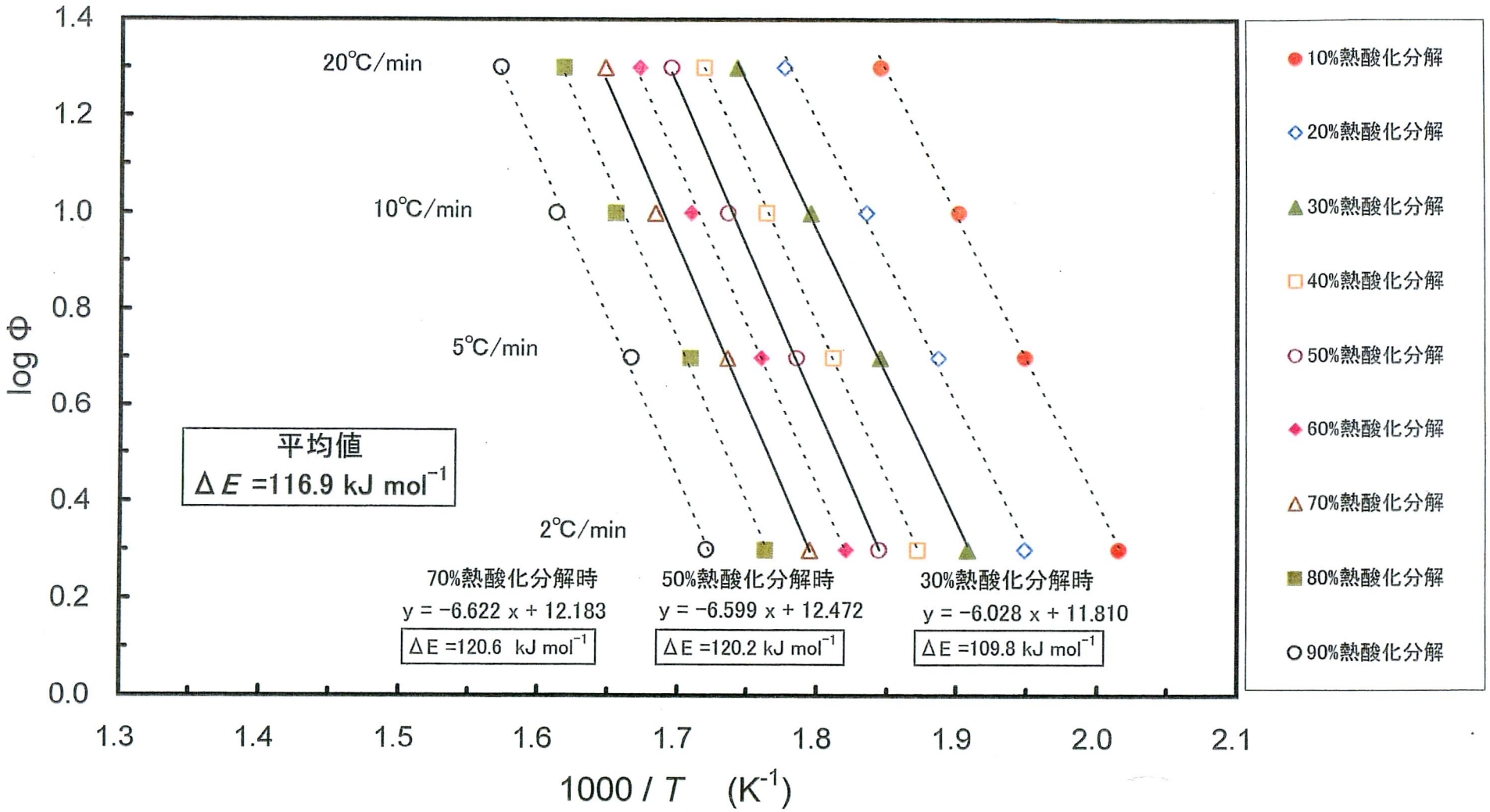


Fig. 3　試料 桑名(2005冬)の熱酸化分解過程(空気雰囲気)における小澤プロット

⑤　ＲＤＦ燃料の分析－ＤＳＣ測定

⑤ ＲＤＦ燃料の分析－ＤＳＣ測定

１．試　　料

１検体　：　桑名(2005冬)

貴社ご提供品を弊方で凍結粉砕して測定に供した。

２．手　　法

示差走査熱量計法（DSC：Differential Scanning Calorimetry）

３．測　　定

原試料を窒素雰囲気下でステンレス製密閉型容器*に封入して，室温～約 300℃までの DSC 昇温曲線を繰り返し３回測定した。

* 密閉型容器を用いることにより，低沸点物あるいは熱分解ガスが容器外に放出する事ができなくなり，ガスの放出に伴う吸熱を抑えることができる。

測定条件の詳細は次の通りである.

装　　置：	セイコーインスツルメンツ社製　DSC220C
データ処理：	東レリサーチセンター製データ処理システム"TRC-THADAP-DSC"
雰囲気：	試料容器外：窒素流(80 ml/min)，試料容器内：窒素
温度・熱量校正：	高純度インジュウム（T_m＝156.61℃，$\triangle H_m$＝6.86 cal/g）
温度範囲：	室温 ～ 約 300℃
昇温速度：	10℃/min
試料量：	約 3.5 mg（DSC 曲線は試料量 3.5mg に規格化して図示）
試料容器：	ステンレス製密閉型容器（内容積：15μl，耐圧：50 気圧）

4. 結　果

DSC昇温曲線をFig.1に示す。該図には繰り返し３回測定した結果がまとめて描かれている。

また、DSC曲線は、上方が発熱、下方が吸熱を表していて、縦軸の目盛りは単位時間当たりの熱量を示す。

該試料のDSC曲線には，約126℃と約160℃に微少な吸熱ピーク、255℃付近から発熱シグナルが認められる。前者の微少な吸熱ピークは結晶性成分の融解、後者の発熱は熱分解に伴うものと考えられる。

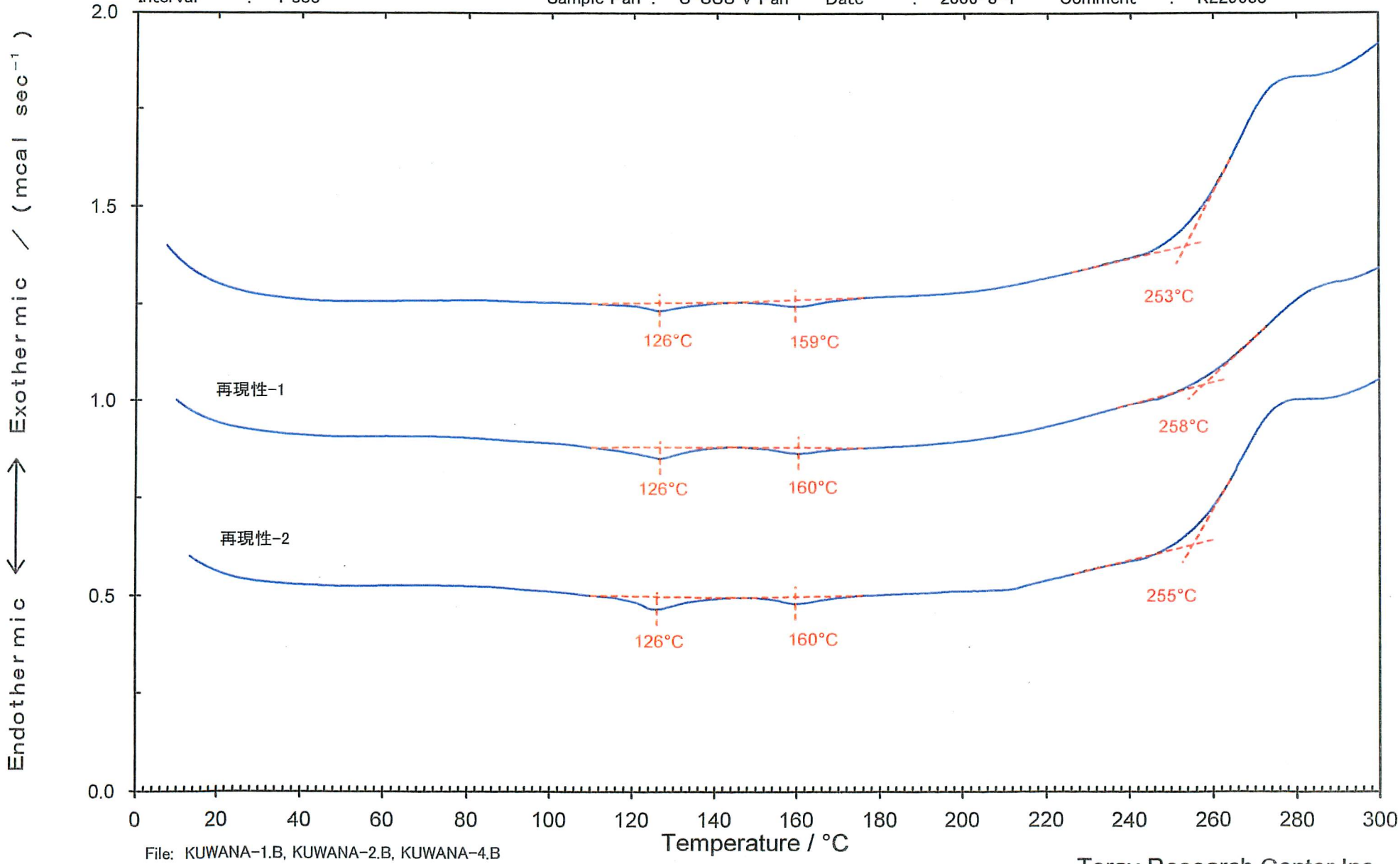
各DSC曲線から、吸熱ピーク温度と発熱外挿開始温度を読み取り、図中に記載するとともに表１にまとめる。

表１ DSC測定結果

試料＼特性		吸熱ピーク温度／℃		発熱外挿開始温度／℃
		低温側	高温側	
桑名 (2005冬)	①	126	159	253
	②	126	160	258
	③	126	160	255
	平均	**126**	**160**	**255**

Fig. 1 DSC Curve (1st Heating Run) Sample: RDF 桑名(2005冬)

Apparatus	: Seiko Instruments DSC220C	Scan Rate	: 10℃/min	Shape	: Powder	Filename	: KUWANA-1
Atmosphere	: Dry Nitrogen (0ml/min)	Sample Size	: 3.5 mg	Operator	: Nakanishi	Pretreatment	:
Interval	: 1 sec	Sample Pan	: S-SUS V Pan	Date	: 2006-3-1	Comment	: K229638



File: KUWANA-1.B, KUWANA-2.B, KUWANA-4.B

Toray Research Center,Inc.

⑥　試料の状況

試料の状況

平成 １７年　 ４月 １３日

〒１８１－８６３３
東京都三鷹市中原３－１４－１
独立行政法人　消防研究所

鈴 木　健　様
ＴＥＬ：０４２２－４４－８３３１
ＦＡＸ：０４２２－４２－７７１９

危険物輸送に関する国連勧告の試験結果報告書

ご依頼いただきました試料の試験結果を下記の通りご報告いたします。

記

１．試験試料
　試料１：ゴミ固形化燃料
２．試験項目
　試験１：Ｅ４２ｃ　自己発熱性物質の試験
３．試験結果
　次頁以下に示す。
４．試験場所および報告者
　〒757-8686 山口県山陽小野田市大字郡2300
　株式会社カヤテック厚狭事業所
　所長　大　石　淳
　TEL：0836-72-1150
　FAX：0836-73-0765
　URL：http：// www. kayatech.com
５．試験に関するお問い合わせ
　〒115-8588 東京都北区志茂 3-43-1
　株式会社カヤテック
　TEL：03-3598-8061
　FAX：03-3598-6272

試験名	自己発熱性物質の試験
試験日	平成１７年３月３日～４月１日
試験場所	山口県山陽小野田市大字郡２３００番地
試験実施者	株式会社カヤテック厚狭事業所　大石淳三
恒温槽	FC-410　ADVANTEC Co.,Ltd
温度記録計	キーエンス製　データ収集システム　NR-1000
試料名称	ゴミ固形化燃料
試料容器ｻｲｽﾞ	$10cm^3$

試験 No. 試料充填状態	恒温槽 設定 温度 (℃)	試料 重量 (g)	試料最大 発熱温度 (℃) TW No.	試料最大 発熱温度 到達時間 (hrs)	試験後 試料 重量 (g)	ﾁｬｰﾄ ｻﾝﾌﾟﾘﾝｸﾞ 速度
1 ﾀｯﾋﾟﾝｸﾞ充填	200	696.28	646.7 TW 1	13.67	114.83	図 1 1sec.
2 そのまま充填	200	588.16	687.4 TW 1	14.71	97.18	図 2 1sec.
3 そのまま充填	180	588.23	663.4 TW 1	16.34	101.99	図 3 2sec.
4 そのまま充填	160	588.21	201.2 TW 1	9.34	525.85	図 4 2sec.
5 そのまま充填	120	588.21	121.0 TW 1	13.33	547.38	図 5 5sec.
6 そのまま充填	140	588.21	146.1 TW 1	9.67	549.49	図 6 5sec.

熱電対の位置は鈴木様の指示に従い下記の通りとしました。

先端はすべて試料上面から 50mm 下に位置しています。

TW１：カゴの中心

TW２：TW１から 10mm 外側

TW３：TW２から 10mm 外側

TW４：TW３から 15mm 外側

TW５：金網の近く

図1－1．試験No.1 200℃　試料ﾀｯﾋﾟﾝｸﾞ充填　（1）

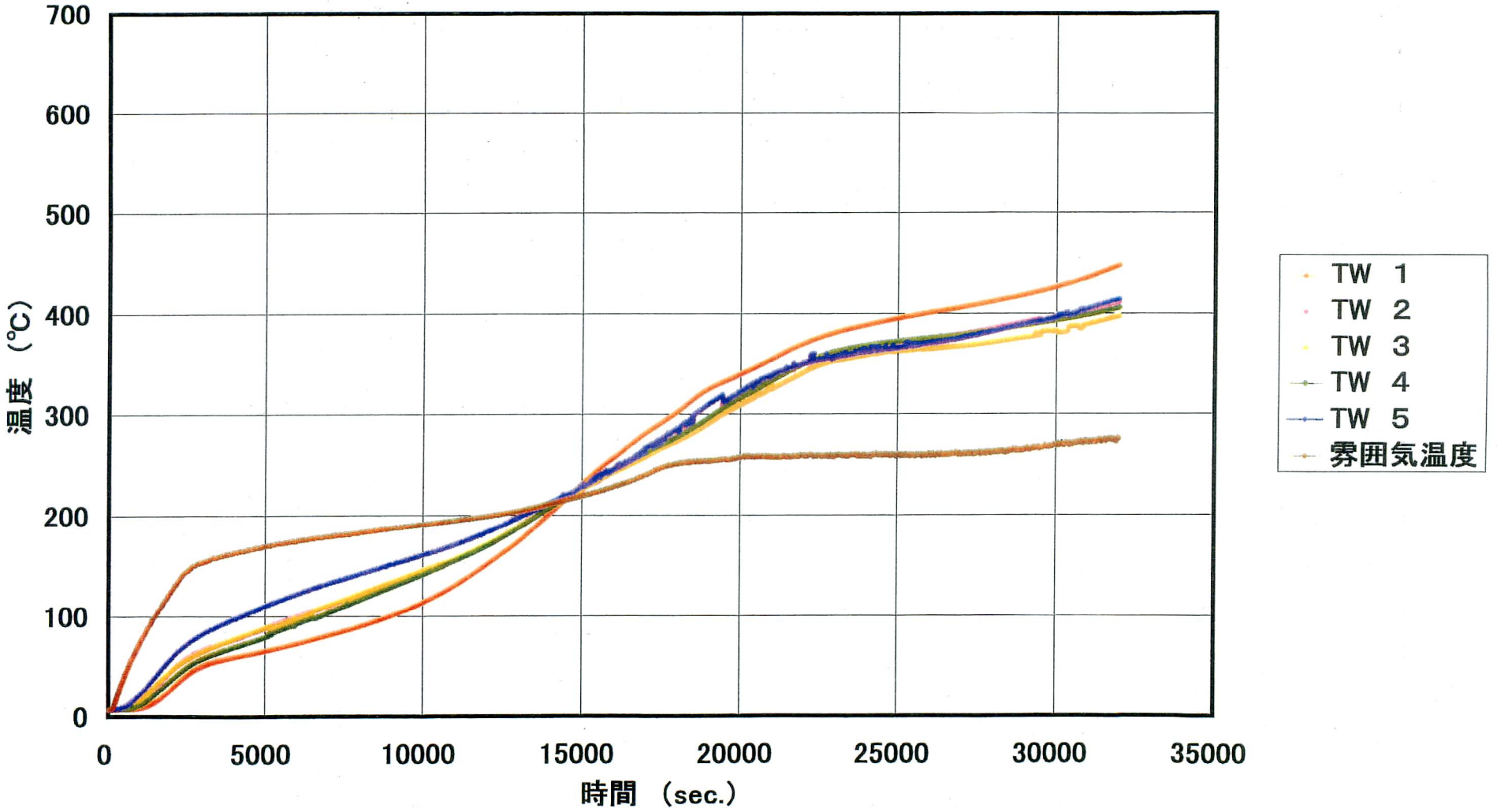


図1－2.　試験No.1　200℃　試料ﾀｯﾋﾟﾝｸﾞ充填　(2)

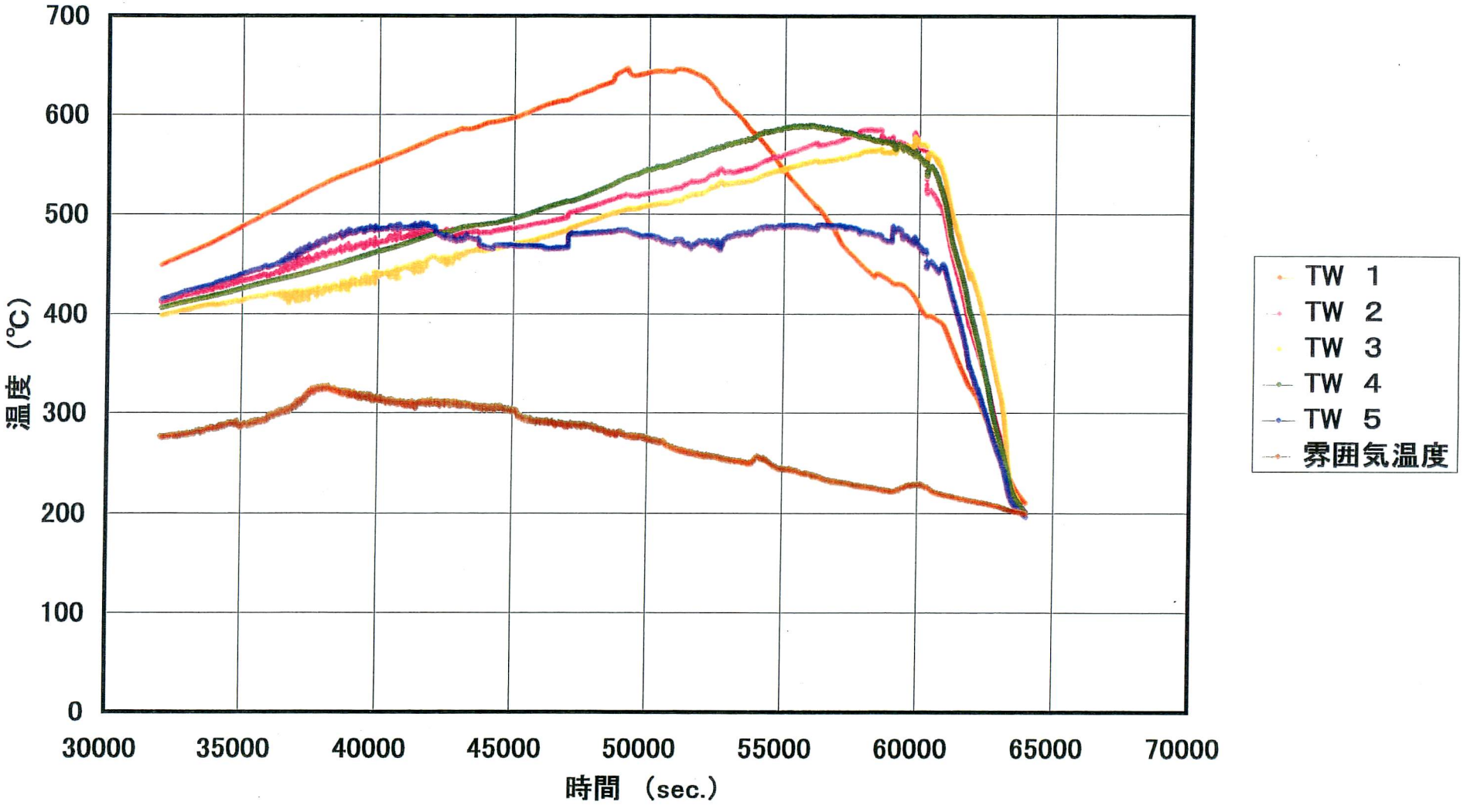


図2－1. 試験No.2　200℃　試料そのまま充填　（1）

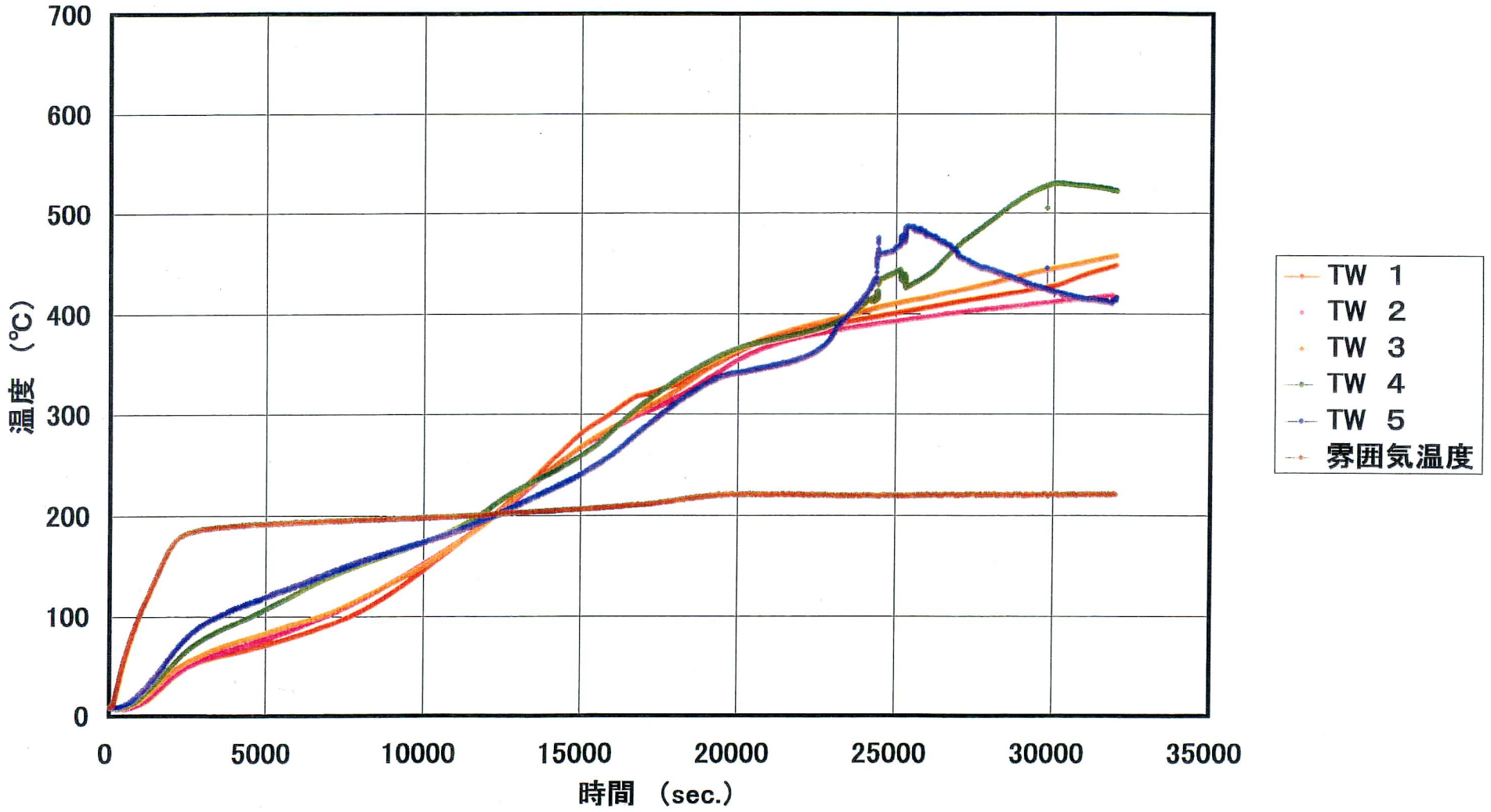


図2－2. 試験No.2　200℃　試料そのまま充填　(2)

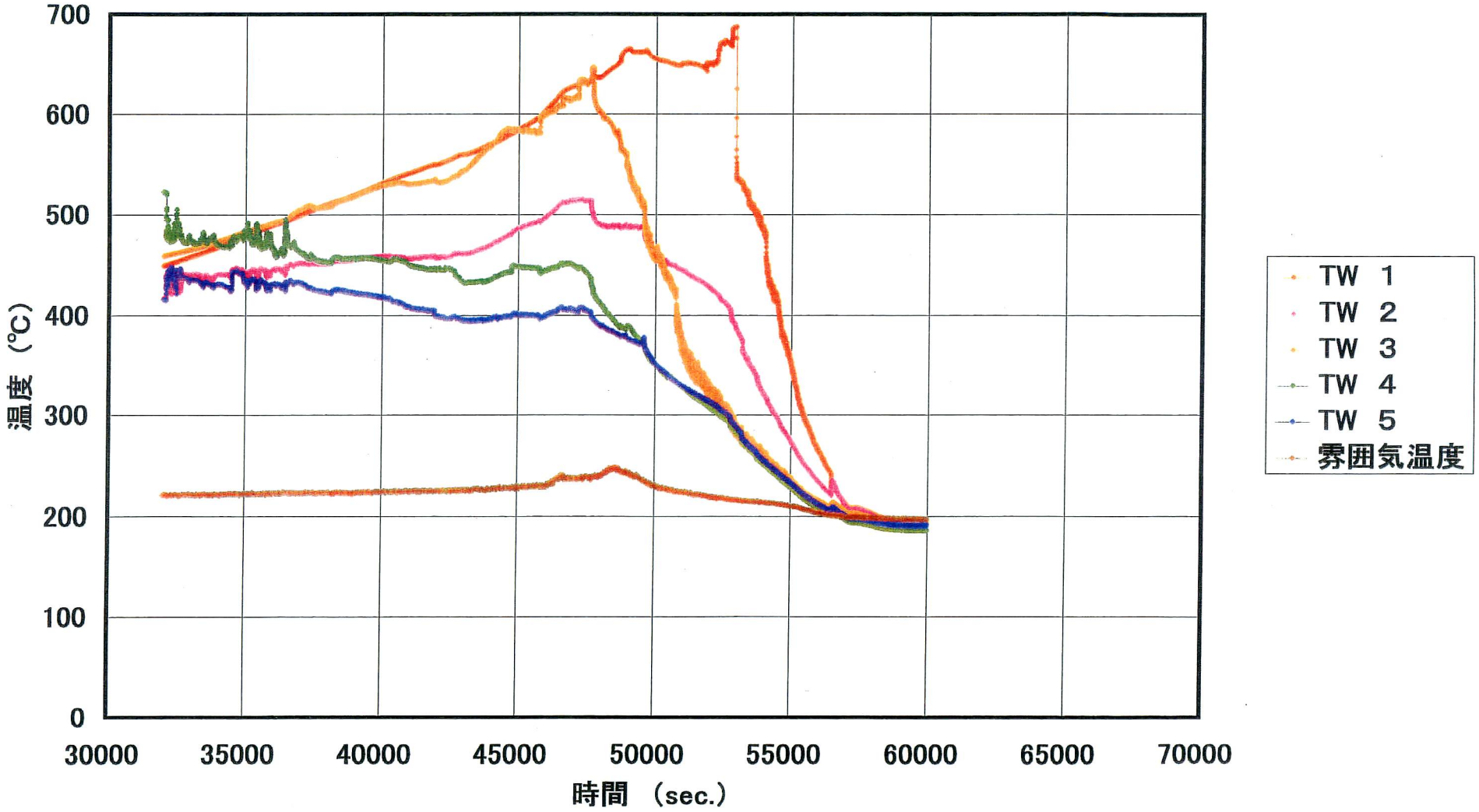


図３－１．試験No.3　180℃　試料そのまま充填　（1）

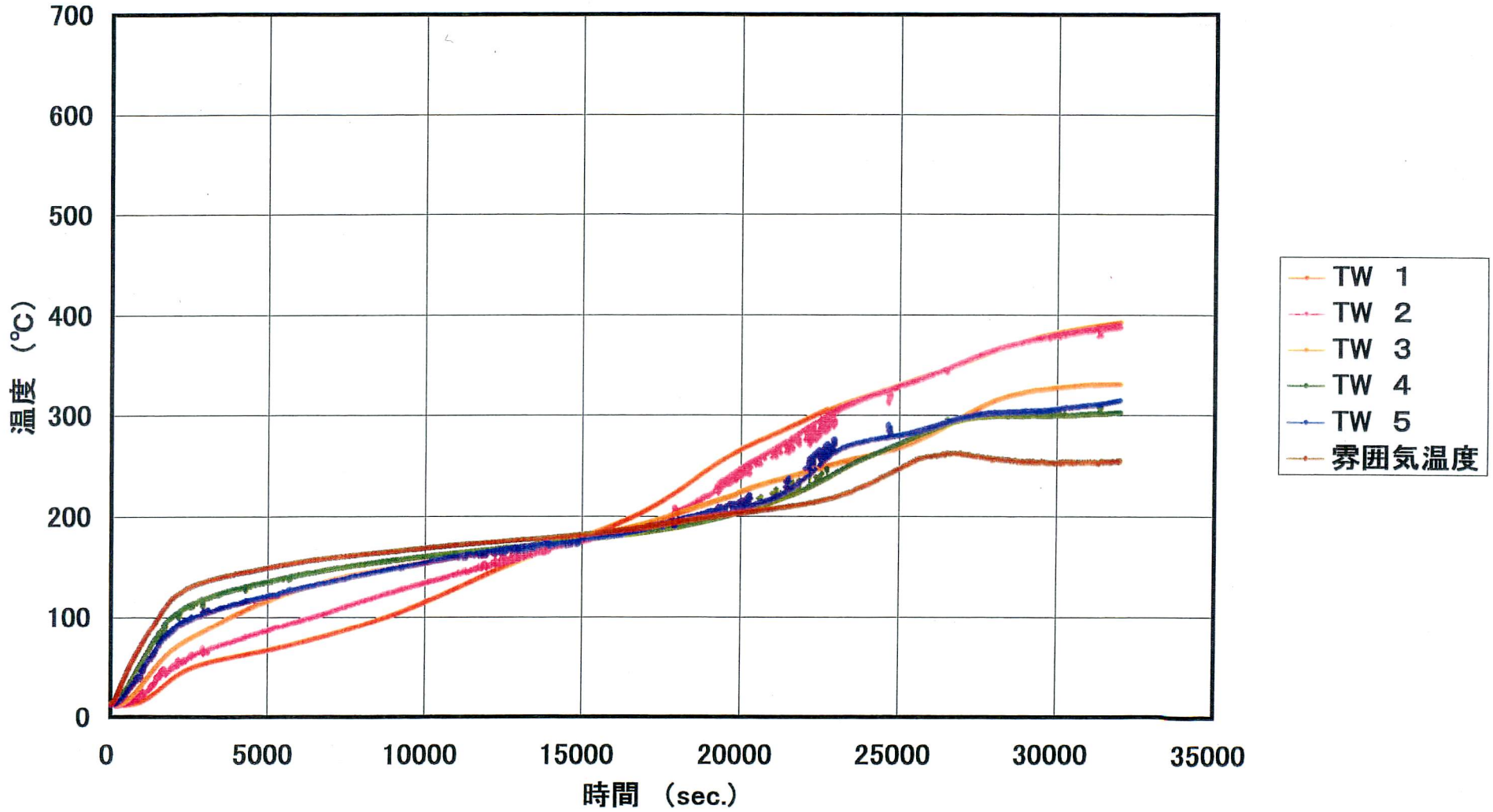


図3－2. 試験No.3　180℃　試料そのまま充填　(2)

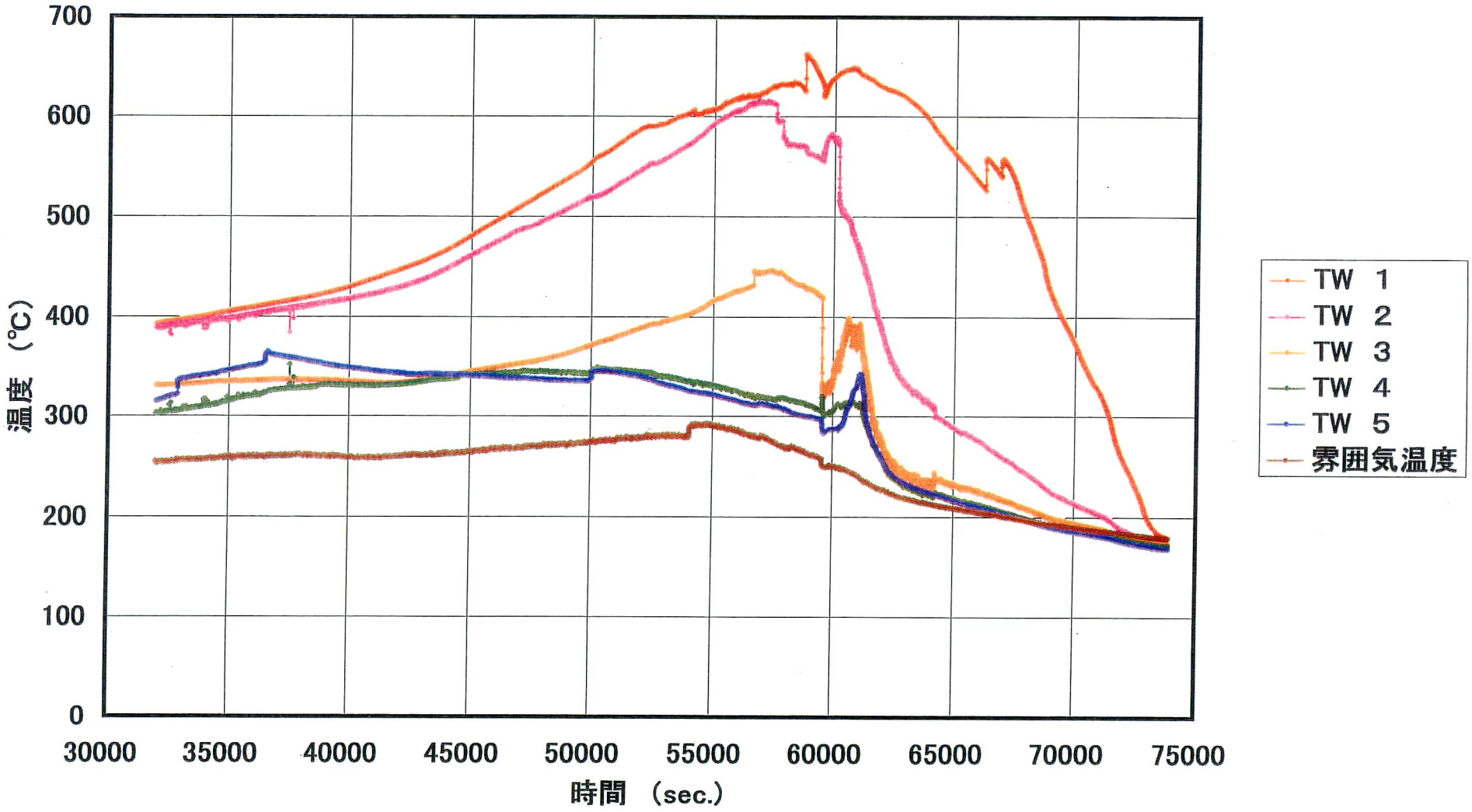


図4.　試験No. 4　160℃　試料そのまま充填

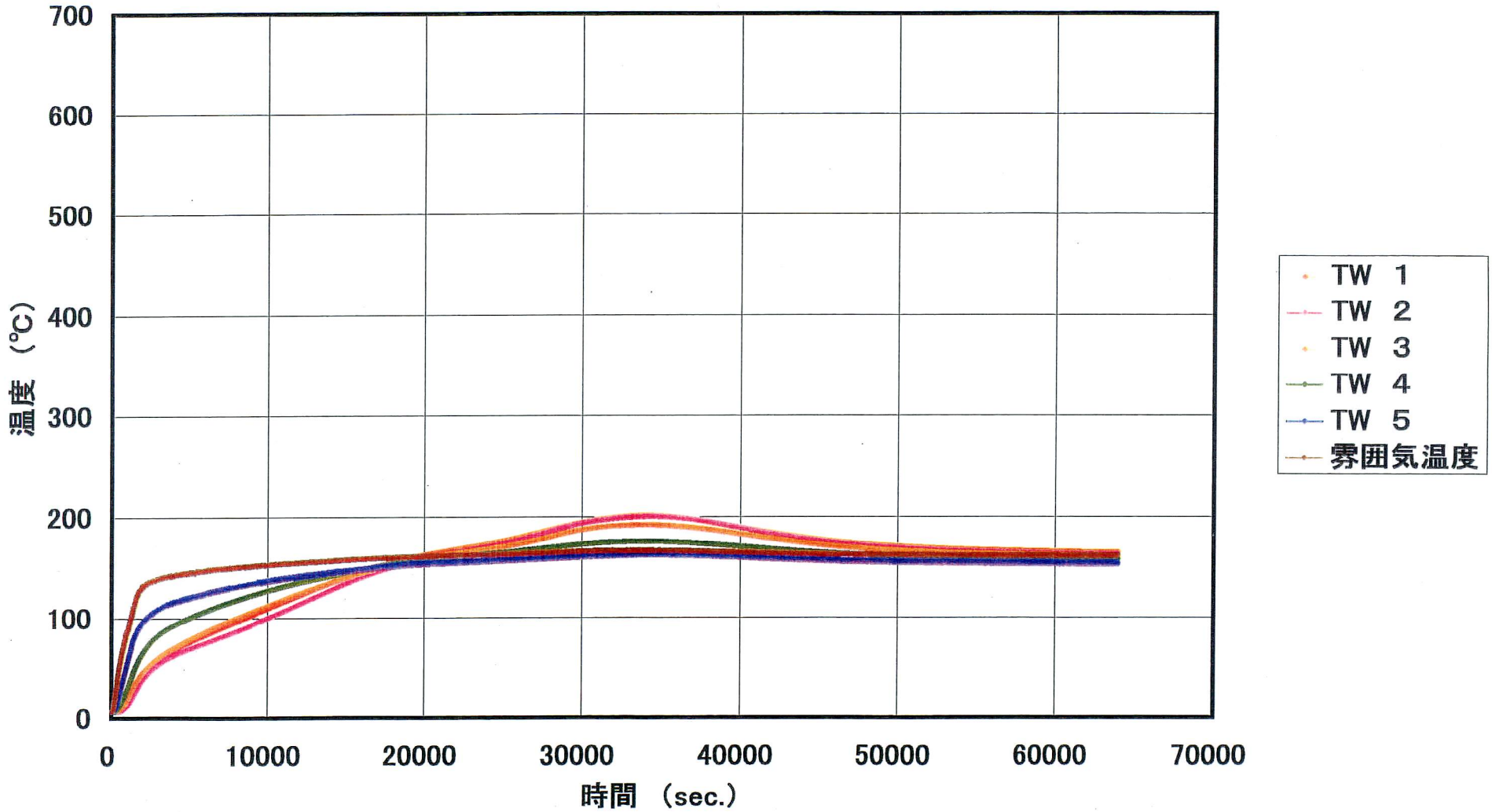
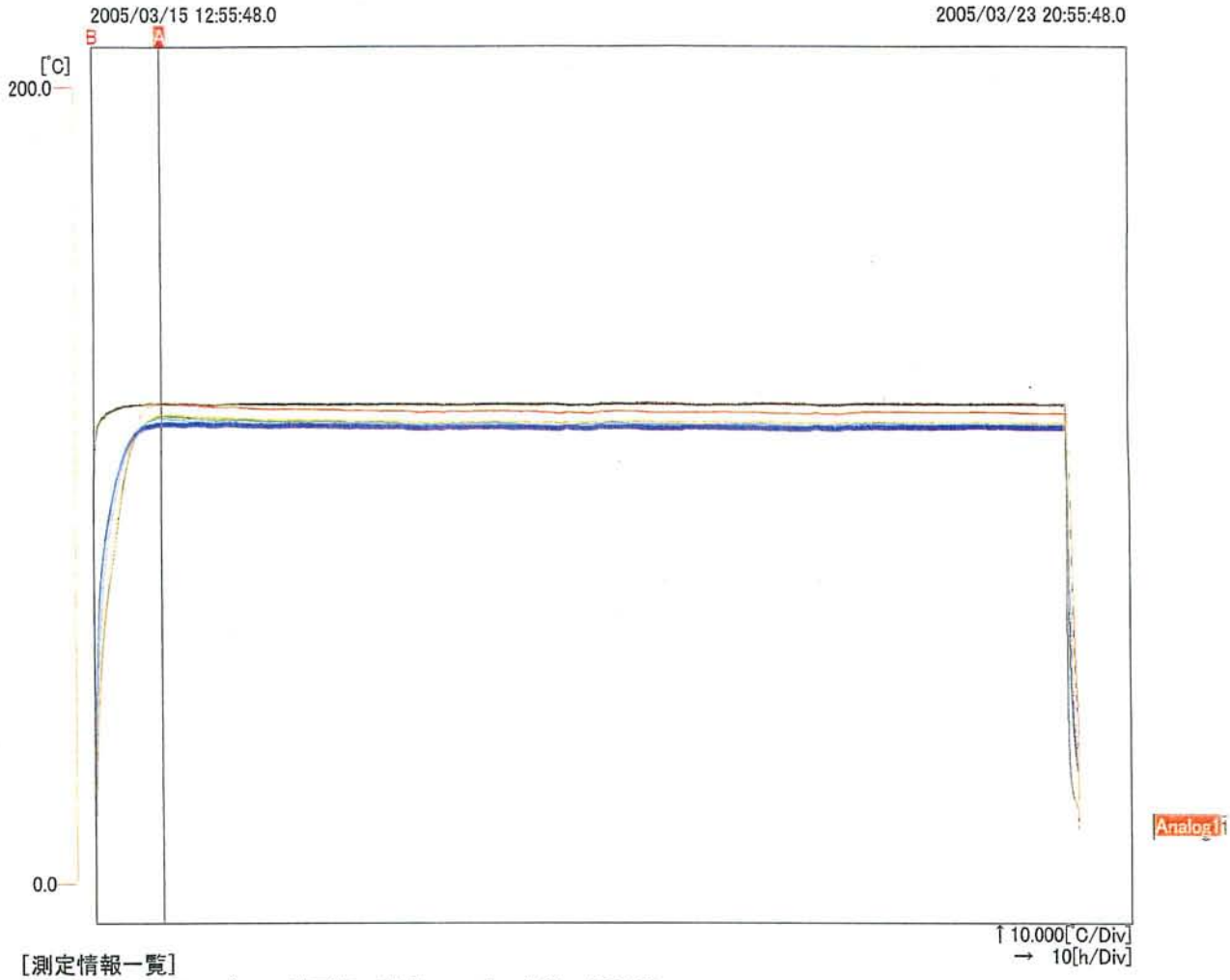


図 5



[測定情報一覧]
機種名：NR　サンプリング周期：5[s]　データ数：136770
トリガ条件：　トリガ無し
[アナログ]

Analog1	[℃](K熱電対)
Analog3	[℃](K熱電対)
Analog5	[℃](K熱電対)
Analog7	[℃](K熱電対)
Analog9	[℃](K熱電対)
Analog11	[℃](K熱電対)

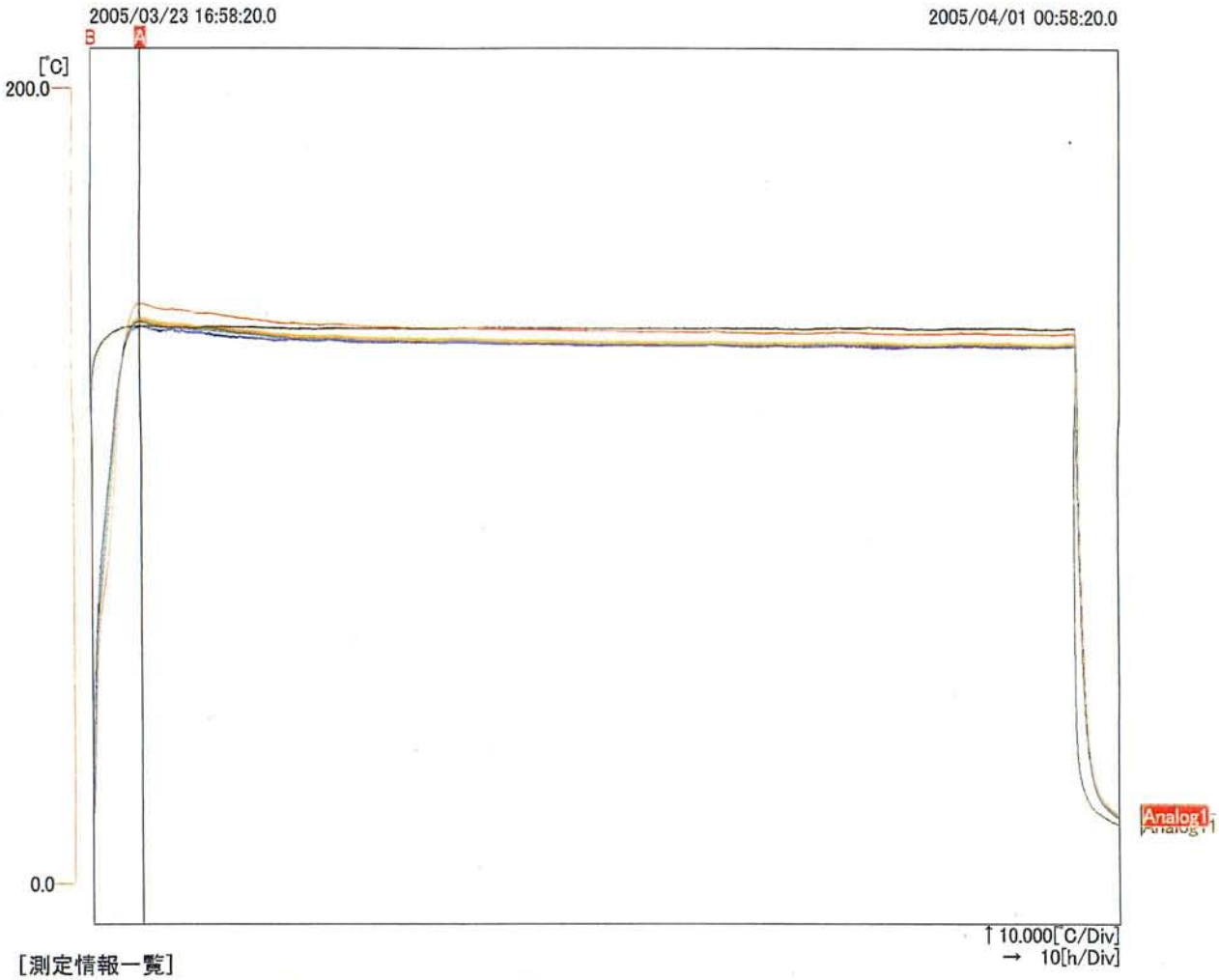
[演算]　　[ロジック]

[垂直カーソル解析値]

ｱｸﾃｨﾌﾞﾁｬﾝﾈﾙ：Analog1　　ｶﾚﾝﾄｳｨﾝﾄﾞｳ：ＮＲ－１０００カード[NR-1000]

ｶｰｿﾙ A	121.0[℃]	ｶｰｿﾙ B	11.0[℃]	ｶｰｿﾙＡＢ間	110.0
最 大 値	121.0	積 分 値	4599247.9	ON 回数	1
最 小 値	11.0	面 積	4599247.9	OFF回数	0
平 均 値	95.8	周 波 数	0.000021[Hz]	ON 時間	27665[sec]
10～90%立ち上がり 23775[sec]				OFF時間	20340[sec]

図 6



[測定情報一覧]
機種名：NR　サンプリング周期：5[s]　データ数：152500
トリガ条件：　トリガ無し
[アナログ]

Analog1	[℃](K熱電対)
Analog3	[℃](K熱電対)
Analog5	[℃](K熱電対)
Analog7	[℃](K熱電対)
Analog9	[℃](K熱電対)
Analog11	[℃](K熱電対)

[演算]　　[ロジック]

[垂直カーソル解析値]

ｱｸﾃｨﾌﾞﾁｬﾝﾈﾙ：Analog1　　ｶﾚﾝﾄｳｨﾝﾄﾞｳ：ＮＲ－１０００カード[NR-1000]

ｶｰｿﾙ A	146.1[℃]	ｶｰｿﾙ B	14.8[℃]	ｶｰｿﾙAB間	131.3
最大値	146.1	積分値	3605347.9	ON 回数	1
最小値	14.8	面積	3605348.0	OFF回数	0
平均値	103.6	周波数	0.000029[Hz]	ON 時間	19695[sec]
10～90%立ち上がり 20950[sec]				OFF時間	15110[sec]

5）１８０℃　そのまま充填　試験後

6）１６０℃　そのまま充填　試験後

7）１２０℃　そのまま充填　試験後

8）１４０℃　そのまま充填　試験後

平成 １７年　 6月 ２５日

〒１８１－８６３３
東京都三鷹市中原３－１４－１
独立行政法人　消防研究所

鈴 木　 健　 様
ＴＥＬ：０４２２－４４－８３３１
ＦＡＸ：０４２２－４２－７７１９

危険物輸送に関する国連勧告の試験結果報告書

ご依頼いただきました試料の試験結果を下記の通りご報告いたします。

記

１．試験試料
　試料１：ゴミ固形化燃料
２．試験項目
　試験１：Ｅ４２ｃ　自己発熱性物質の試験
３．試験結果
　次頁以下に示す。
４．試験場所および報告者
　〒757-8686 山口県山陽小野田市大字郡 2300
　株式会社カヤテック厚狭事業所
　所長　大　石　淳　主
　TEL：0836-72-1150
　FAX：0836-73-0765
　URL：http：// www. kayatech.com
５．試験に関するお問い合わせ
　〒115-8588 東京都北区志茂 3-43-1
　株式会社カヤテック
　TEL：03-3598-8061
　FAX：03-3598-6272

試験名	自己発熱性物質の試験
試験日	平成１７年３月３日～６月１０日
試験場所	山口県山陽小野田市大字郡２３００番地
試験実施者	株式会社カヤテック厚狭事業所　大石淳三
恒温槽	FC-410　ADVANTEC Co.,Ltd
温度記録計	キーエンス製　データ収集システム　NR-1000
試料名称	ゴミ固形化燃料
試料容器ｻｲｽﾞ	10cm^3

試験 No. 試料充填状態	恒温槽 設定 温度 （℃）	試料 重量 （g）	試料最大 発熱温度 （℃） TW No.	試料最大 発熱温度 到達時間 (hrs)	試験後 試料 重量 （g）	ﾁｬｰﾄ ｻﾝﾌﾟﾘﾝｸﾞ 速度
1 ﾀｯﾋﾟﾝｸﾞ充填	200	696.28	646.7 TW 1	13.67	114.83	図１ 1sec.
2 そのまま充填	200	588.16	687.4 TW 1	14.71	97.18	図２ 1sec.
3 そのまま充填	180	588.23	663.4 TW 1	16.34	101.99	図３ 2sec.
4 そのまま充填	160	588.21	201.2 TW 1	9.34	525.85	図４ 2sec.
5 そのまま充填	120	588.21	121.0 TW 1	13.33	547.38	図５ 5sec.
6 そのまま充填	140	588.21	146.1 TW 1	9.67	549.49	図６ 5sec.
7 そのまま充填	220	588.18	685.1 TW 2	11.20	89.28	図７ 1sec.
8 そのまま充填	240	588.32	646.1 TW 1	12.62	96.79	図８ 1sec.

熱電対の位置は鈴木様の指示に従い下記の通りとしました。
先端はすべて試料上面から 50mm 下に位置しています。

TW１：カゴの中心
TW２：TW１から 10mm 外側
TW３：TW２から 10mm 外側
TW４：TW３から 15mm 外側
TW５：金網の近く

図7　試験No.7　220℃　試料そのまま充填　（1）

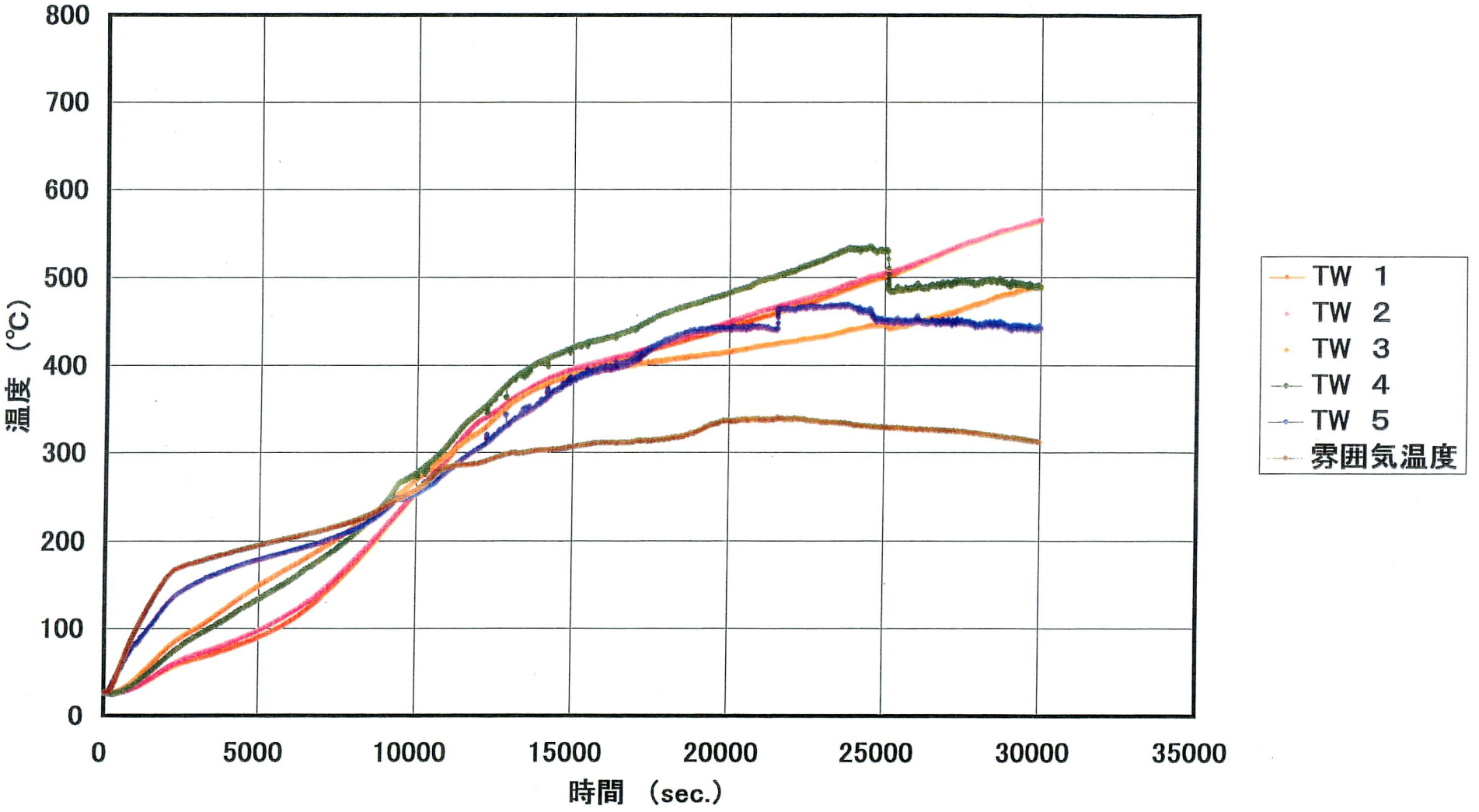


図7-2 試験No.7 220℃ 試料そのまま充填 （2）

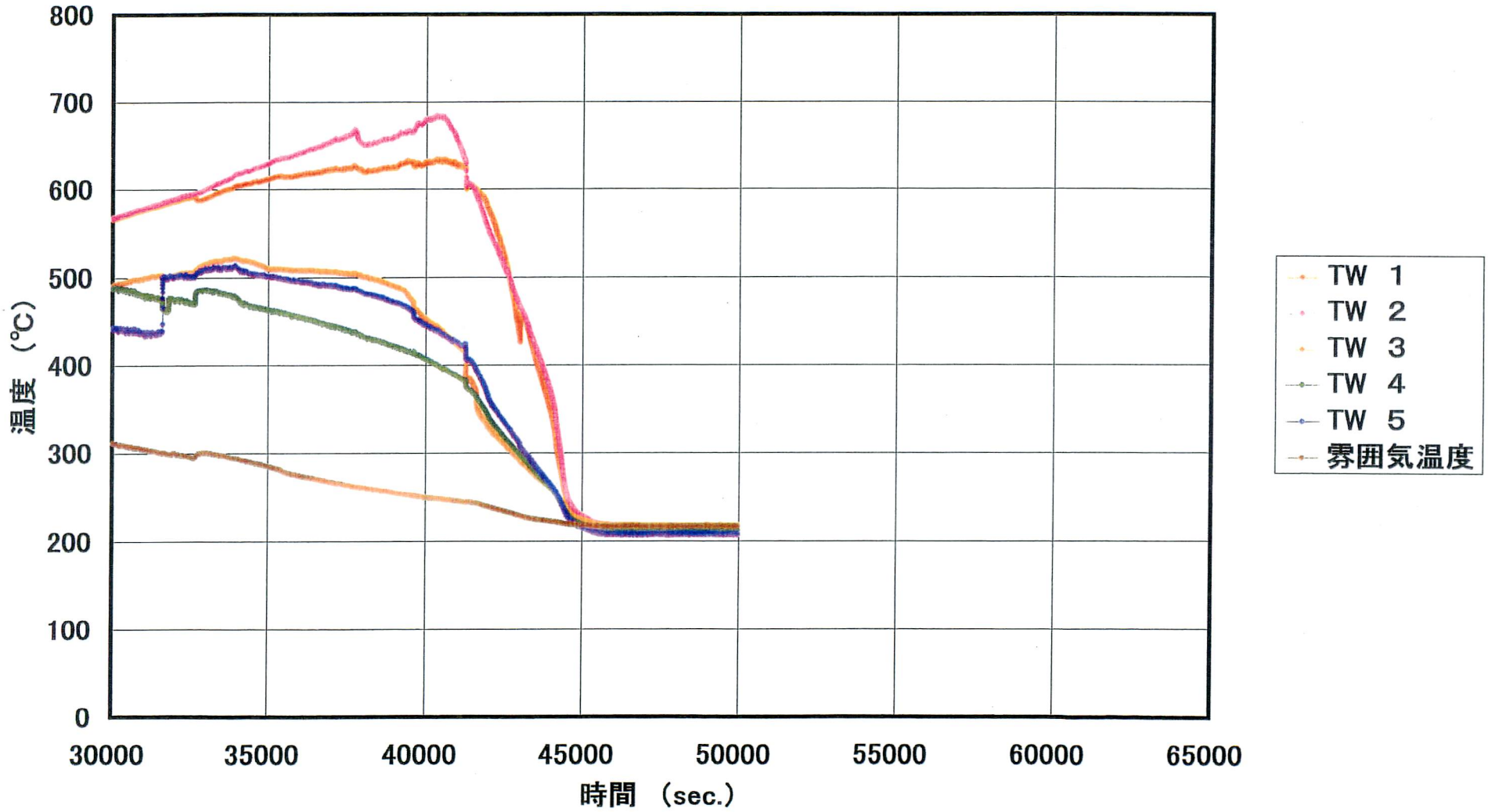


図8　試験No.8　240℃　試料そのまま充填　（1）

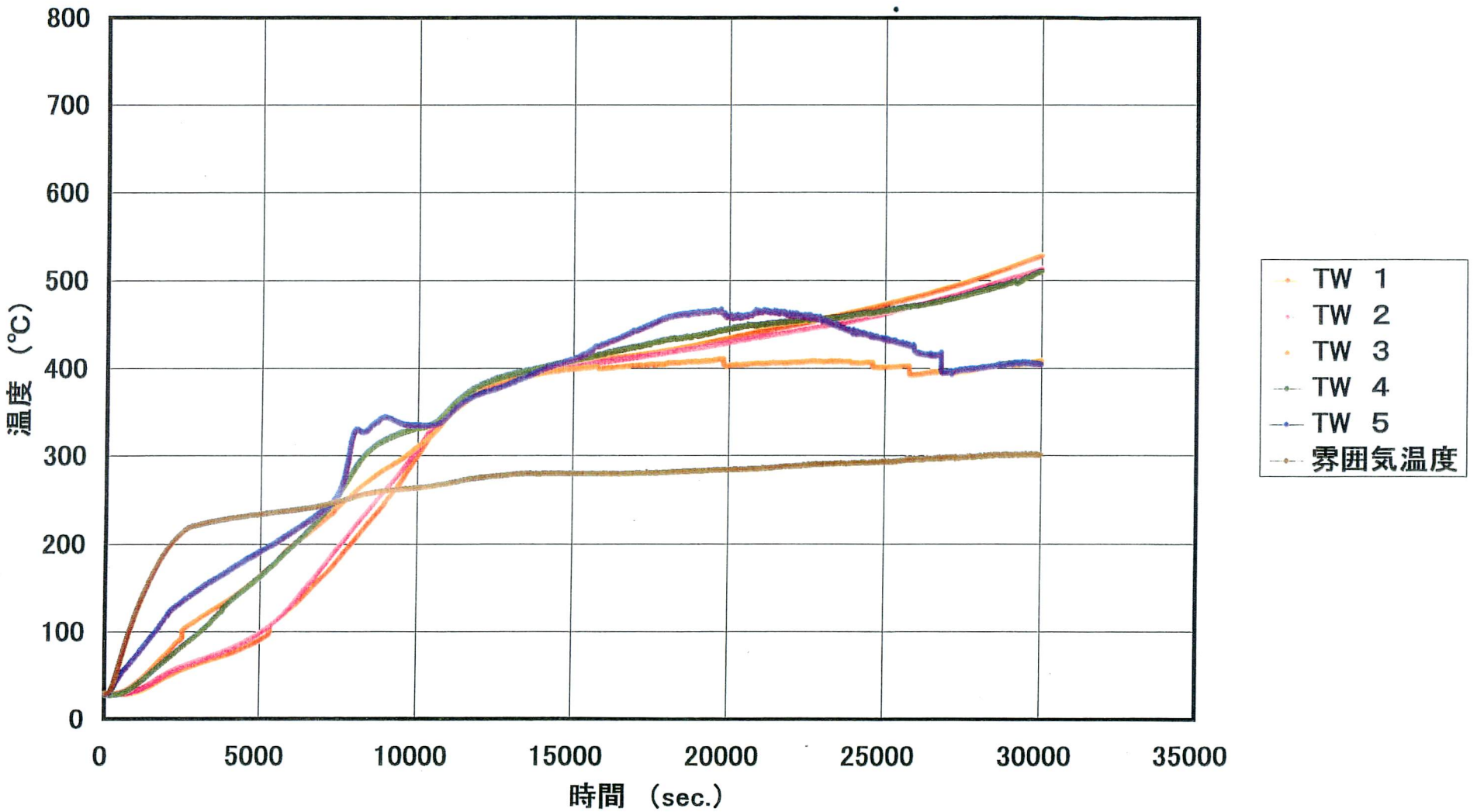
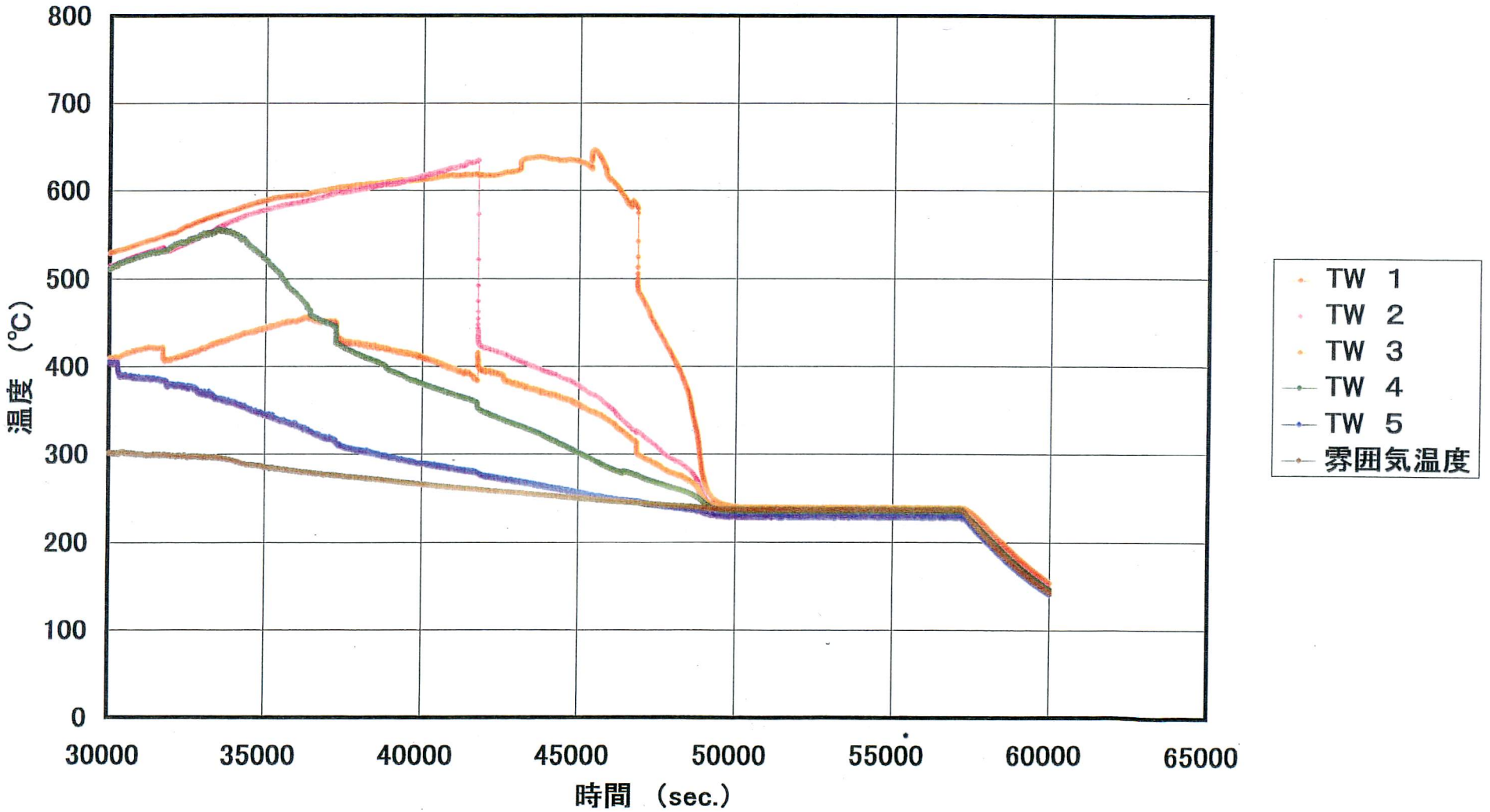


図8－2.　試験No.8　240℃　試料そのまま充填　（2）



RDF Wire Basket Test 状況

1） ２２０℃ そのまま充填 試験後

2） ２４０℃ そのまま充填 試験後

消防研究所研究資料一覧

号数	題　　名	年月日
1	武蔵野台地における地表水および地下水の測水資料	S43. 12
2	武蔵野吉祥寺における揚水実験資料	S44. 12
3	武蔵野台地における帯水層の性状に関する調査資料	S45. 12
4	地震時における少量危険薬品の出火危険とその対策	S48. 3
5	大震火災の延焼性状に関する研究野外火災実験　概要報告	S48. 10
6	市街地火災の延焼性状等に関する研究　旧松尾鉱山廃屋火災実験報告書	S50. 7
7	四日市市大協石油タンク火災原因調査報告書	S50. 10
8	石油タンク消火実験結果報告書	S51. 3
9	呉市山林火災現場付近の小気候	S52. 3
10	主要繊維・プラスチックの延焼・熱分解時の重量減少と発生ガス	S52. 3
11	酒田市大火の延焼状況等に関する調査報告書	S52. 10
12	炭化水素系燃料による可燃性蒸気雲の爆発特性に関する研究　－ファイヤーボールに関する実験－	S53. 10
13	震害分布と表層地盤の関係に関する調査資料　－関東資料－	S55. 1
14	日本海中部地震による危険物施設の挙動に関する調査報告書	S59. 1
15	水幕と樹木の併用による延焼防止向上効果に関する研究報告書	S60. 3
16	石油タンクの底板・アニュラー板の裏面腐食に関する研究　－厚さ分布と腐食量について－	S61. 2
17	円筒貯槽のスロッシングに関する研究報告書	S61. 3
18	修復石油タンクの水張り試験時ＡＥ特性	S61. 3
19	簡易型火災警報器の非火災報に関する調査・研究	S61. 3
20	火源の輪郭抽出	S63. 3
21	林野火災の飛火延焼に関する研究	S63. 3
22	パソコンを用いた林野火災の拡大予測に関する研究	H2. 3
23	早期津波予測システムに関する資料	H3. 3
24	火災規模の防炎効果に及ぼす影響に関する研究	H3. 3
25	火災性状把握システムに関する研究　その１－非火災報データベースに関する共同研究報告書	H3. 3
26	火災性状把握システムに関する研究　その２－火災性状把握システムの試作に関する共同研究報告書	H3. 3
27	防炎物品等を含む火災における発生ガスの毒性に関する研究	H5. 3
28	火災性状把握システムに関する研究（２次）　実用化をめざしたシステムの改良に関する共同研究報告書	H5. 3
29	地下利用の特殊空間内における火災性状に関する研究報告書	H6. 3
30	大火源燃焼試験方法によるカーテンの燃焼性評価に関する研究報告書	H7. 3
31	阪神・淡路大震災における石油タンクの座屈強度に関する調査研究報告書	H8. 3
32	ISO 6941による収縮性、溶融性繊維の燃焼性評価に関する研究報告書	H8. 3
33	平成５年８月６日鹿児島豪雨災害時における鹿児島市民の災害時の行動に関する調査報告書	H8. 3
34	火災性状把握避難誘導システムに関する研究（その１　試作システムの概要）	H8. 3
35	火災性状把握避難誘導システムに関する研究（その２　試作システムのソフトリスト）	H8. 3
36	地下施設における火災の特性に関する研究報告書	H9. 3
37	コーンカロリメーターによる防炎材料の燃焼性状に関する研究報告書	H9. 3
38	地下施設における火災の特性に関する研究報告書	H9. 3
39	少量水による大火災の延焼阻止技術の開発に関する研究報告書	H9. 12
40	被害情報の早期収集システムに関する研究	H10. 3

消防研究所研究資料一覧（つづき）

号数	題　　名	年月日
41	照明灯による舞台幕の着火・燃焼性状に関する実験的研究報告書	H10. 3
42	市街地火災時の空中消火による延焼阻止効果に関する研究報告書	H10. 3
43	実大規模でのカーテン類の燃焼性状に関する実験的研究報告書	H11. 3
44	大震火災時における地域防災活動拠点の安全性確保に関する研究報告書	H11. 3
45	市街地火災時における空中消火の延焼阻止効果に関する研究報告書	H11. 3
46	大規模石油タンクの延焼に関する研究報告書	H11. 9
47	プラスチックパレットの難燃化とその燃焼性に関する研究報告書	H12. 3
48	市街地火災時の空中消火による火災抑止効果に関する研究報告書	H12. 3
49	文化財建造物等の防炎対策に関する研究報告書（その１）	H12. 3
50	地下施設における消防活動のための加圧防排煙技術に関する研究報告書 その１　中型基本地下模型を用いた加圧防排煙実験	H13. 3
51	地下施設における消防活動のための加圧防排煙技術に関する研究報告書 その２　小型基本地下模型を用いた加圧防排煙実験	H13. 3
52	ＡＥ法による石油タンク底部の腐食モニタリング技術に関する共同研究報告書	H13. 8
53	文化財建造物等の防炎対策に関する研究報告書（その２）	H13. 9
54	煙量を減少させる添加剤を含む可燃性液体の燃焼性状に関する報告書	H14. 2
55	ＡＥ法による工水タンク底部の漏洩のモニタリング技術に関する共同研究報告書	H14. 3
56	水による固体可燃物火災の消火と延焼阻止の機構に関する研究報告書	H14. 10
57	実大規模燃焼実験による難燃杉材の燃焼性状に関する研究報告書	H14. 10
58	動物性飼料の自然発火に関する研究報告書	H15. 3
59	ウォーターミストの消火機構と有効な適用方法に関する研究報告書　分冊１	H15. 3
60	ウォーターミストの消火機構と有効な適用方法に関する研究報告書　分冊２	H15. 3
61	ヒドロキシルアミン及びその塩類の危険性に関する研究報告書	H15. 11
62	消防用防火服の耐熱性能の評価に関する研究報告書	H16. 1
63	林野火災の発生危険度と拡大を予測するシステムの開発に関する研究報告書	H16. 3
64	消防用防火服の快適性能、機能性能の評価に関する研究報告書	H16. 6
65	ＡＥ法による石油タンク底部の腐食劣化評価に関する共同研究－平成15年度共同研究報告書－	H16. 6
66	地下鉄火災における駅構内の煙流動シミュレーションに関する研究報告書－韓国大邱市の地下鉄中央路駅の場合－	H17. 3
67	救急対応の実情に関する調査報告書－救急対応に関するアンケート調査結果－	H17. 3
68	消防用防火服の総合的な評価手法に関する研究報告書	H17. 7
69	平成16年（2004年）新潟県中越地震被害および消防活動に関する調査報告書	H17. 9
70	斜面崩壊現場の二次崩壊危険度予測手法に関する研究報告書	H18. 3
71	ＲＤＦ火災に関する調査研究報告書（平成15年度）	H18. 3
72	一般住宅における初期火災時の燃焼特性に関する研究報告書 －住宅火災による死者低減に役立つ感知特性を探る－	H18. 3
73	石油タンク火災の安全確保に関する研究報告書 －石油タンク火災に使用される泡消火薬剤の消火特性－	H18. 3
74	災害弱者の火災時避難安全のための警報・通報手法の開発	H18. 3
75	ＡＥ法による石油タンク底部の腐食劣化評価に関する共同研究 －平成16・17年度　共同研究報告書－	H18. 3
76	新燃料自動車に求められる消火設備の能力に関する研究報告書	H19. 3
77	ＲＤＦ爆発・火災に関する研究報告書（その１）	H19. 9
78	ＲＤＦ爆発・火災に関する研究報告書（その２）	H19. 9

本報告書の本文用紙は古紙100%（白色度70.0%）を使用しています。

消防研究技術資料第78号

RDF爆発・火災に関する研究報告書
（その２）

平成19年９月

消防庁 消防大学校 消防研究センター
東京都調布市深大寺東町４－35－３（〒182-8508）
電　話　（0422）44－8331㈹
ＦＡＸ　（0422）42－7719

印刷所　株式会社　三 州 社
ISBN4-88391-086-5