

産業安全研究所安全ガイド

SAFETY GUIDE
OF

THE NATIONAL INSTITUTE OF INDUSTRIAL SAFETY

NIIS-SG-NO.3 (2004)

ごみ固形化燃料 (RDF) の爆発・火災の危険性と 安全な取扱いについて

ごみ固形化燃料 (RDF) の爆発・火災の危険性と安全な取扱いについて
NIIS-SG-NO.3 (2004)



まえがき

平成15年8月14日（木）、三重県多度町の三重ごみ固形燃料発電所において、ごみ固形燃料貯蔵サイロの小爆発により、4名が負傷し、19日（火）に同サイロの火災を消火作業中に再度サイロが爆発し、2名が死亡、1名が負傷するという災害が発生した。

産業安全研究所は、厚生労働省より災害原因調査の要請を受け、この災害の原因究明のため、化学安全研究グループが主体となって調査・研究を実施した。その結果、ごみ固形化燃料（RDF）について、今まであまり知られていなかった貯蔵等で取り扱う際に留意すべき危険性に関する多くの知見が得られた。

RDF（Refuse Derived Fuelの略語）は可燃性廃棄物を原料として、圧縮成形、押し出し成形などによって直径1～4cm、長さ2～5cmの円筒形に固形化されたごみ固形化燃料のことである。わが国では循環型社会の形成を推進するため、廃棄物の適正処理とリサイクルの推進のための法体系が整備されてきた。最近ではRDFを発電用の燃料として利用する技術も確立しようとしている。このような新しいごみ再資源化技術に伴い、これまで無かったRDFに関わる爆発や火災の事故災害が見られるようになってきた。廃棄物の処理を適正に実施するとともに、限りある資源を有効利用しようとする循環型社会のためにはリサイクルの促進が不可欠であるが、今後RDFの普及に伴い、適正な取扱いを行わないことに起因するRDFによる災害が危惧される。

本安全ガイドは、同種災害の防止のため、現段階での調査及び研究結果等を踏まえ、RDFの性状、危険特性、貯蔵等取扱い時の安全上の留意事項等について産業安全研究所安全ガイドとして取りまとめ、公表するものである。

本安全ガイドがRDFを取扱う際に発生し得る爆発・火災の危険性の認識を深めることに役立つ、災害防止の一助となることを願うものである。

平成16年9月21日

独立行政法人産業安全研究所
理事長 尾 添 博

本ガイドの概要

本安全ガイドは、ごみ固形燃料（RDF）の貯蔵施設において発生した爆発災害の調査・研究の過程において明らかとなったRDFの爆発・火災の危険性及びその安全な取扱い方法について、同種災害の防止の参考に資するため、独立行政法人産業安全研究所安全ガイドとして公表するものであり、以下の構成となっている。

第1章は、RDFの概要、全国のRDF製造施設の現在の状況を示した。

第2章は、RDFの一般的な性状を明らかにするために、実験室規模での吸湿性、発熱性、発生ガス、堆積状態における最低発火温度、燃焼性状（燃え広がり速度、層内の温度変化、発生ガスなど）、並びに、発熱を防止する方法として不活性ガスの添加効果、さらに消火性を明らかにするための窒素及び二酸化炭素を消火剤とする場合の消火効果に関する実験結果を示した。

第3章は、RDFの自然発火危険性に関して、堆積状態における温度変化を概説し、自然発火、さらに一酸化炭素、熱分解ガスの発生機構に関する知見を示した。さらにサイロの形状等の問題点について考察した結果を示した。

第4章は、同種災害の防止のためいくつかの貯蔵方式において留意すべき点を詳述するとともに、RDF化製造施設における有効な消火方法と消火設備等について示した。

目次

第1章 RDFの概要	1
1.1 RDFについて	1
1.2 RDFの製造過程について	1
1.3 全国のRDF製造施設	1
第1章の参考文献	2
第2章 RDFの物理的・化学的性質	3
2.1 RDFの寸法	3
2.2 水分量	4
2.3 吸湿性	4
2.4 比熱	5
2.5 発熱性と発生ガス	6
(1) 実験概要	6
(2) 実験結果	7
(3) まとめ	8
2.6 高温熱面上に堆積した場合の燃焼挙動	9
(1) 実験概要	9
(2) 実験結果	9
(3) くすぶり燃焼の際に発生する主なガス	14
(4) まとめ	14
2.7 消炎性	15
第2章の参考文献	16
第3章 RDFの自然発火等の危険性	16
3.1 RDFの原料となる可燃ごみ	16
3.2 外気温と堆積層内の温度変化	17
(1) 熱伝達と温度分布	17
(2) 水分、圧密によるRDFの粉化の影響	19
3.3 自然発火	19
(1) 堆積した粉状の可燃物が自然発火する場合の例	19
(2) 微粒化の影響	20
(3) 堆積による自然発火に関する理論	20
(4) RDFが堆積した場合の熱伝達	21
3.4 RDFからの一酸化炭素(CO)の発生について	21
3.5 消石灰の二酸化炭素との反応について	22

3.6	熱分解によって発生するガス	23
3.7	RDFの自然発火の可能性について	24
3.8	サイロの形状等に係る問題点	24
	第3章の参考文献	25
第4章	爆発・火災の防止対策	26
4.1	基本事項（RDFの燃焼危険性）	26
4.2	RDFの製造過程での防止対策	26
	(1) RDF成形前の段階までの製造過程	26
	(2) RDF成形過程から貯蔵の前まで	27
	(3) RDFの品質の維持	27
4.3	RDF化製造施設における貯蔵時の防止対策	28
	(1) サイロ方式	28
	(2) コンテナ方式	30
	(3) ピット方式	30
	(4) ヤード方式	31
4.4	RDF消費施設における防止対策	32
4.5	RDF消費施設における貯蔵時の防止対策	32
	(1) サイロ方式	32
	(2) コンテナ方式	33
	(3) ピット方式	33
	(4) ヤード方式	33
4.6	貯蔵施設における有効な温度管理の方法について	33
4.7	RDF貯蔵施設における有効な消火方法及び消火設備等について	33
	(1) 有効な消火方法	33
	(2) 消火設備	34
	(3) 連絡体制	34
	(4) その他	34
	第4章の参考文献	34
資料 (1)	三重県多度町の発電所のRDF貯蔵サイロにおける爆発災害	35
資料 (2)	廃棄物を含む同種災害の事例	35
資料 (3)	発熱性実験の結果（表）	38
資料 (4)	発熱性実験に付随して行ったガス分析の結果（表）	43
資料 (5)	高温熱面上に堆積した場合の燃焼挙動に関する実験方法	45
資料 (6)	くすぶり燃焼の際の発生ガス（表）	46

第1章 RDFの概要

1.1 RDFについて

可燃性廃棄物を主原料とするRDF（Refuse Derived Fuel：ごみ固形化燃料）の性状の規定については、標準情報（TR^注）が出されている¹⁾。RDFの製造方式には、大きく分けると、消石灰あるいは生石灰を乾燥工程の前に添加するか後に添加するかによって2種類あり、破碎・選別・乾燥過程の後で消石灰を添加、成形する方式（RMJ方式）と、破碎・選別過程の後で乾燥の前に生石灰を添加し、その発熱により水分の一部を乾燥し、成形、乾燥する方式（J-カトレル方式）がある²⁻⁴⁾。

なお、RDFに類似したものに「RPF」があるが、これは Refuse Paper and Plastic Fuel のことであり、産業系の廃棄物のうち古紙及びプラスチックを原料として固形燃料化されたものである。

注）TRとはJIS制度を補完する制度。

1.2 RDFの製造過程について

RDFの一般的な製造過程の例を挙げると次の通りである。

- ①ごみ受入れ：ごみ収集車は計量の後、ごみをピットに投入する。
- ②1次破碎：破袋機などでごみ袋を破った後、乾燥しやすい大きさに砕く。
- ③乾燥：水分量割合を10%以下にする。
- ④選別：磁選機、風力選別機、揺動分別機などにより、アルミや鉄、ガラスなどの不燃物を除去する。
- ⑤2次破碎：RDFの成形に適した大きさに細かく砕く。
- ⑥選別：大きさをそろえるため、風力選別などを行い、大きいものは再度破碎工程に送られる。
- ⑦成形：破碎された乾燥ごみに消石灰を加える。（乾燥前の元のごみの重さに対して2%程度添加）
- ⑧冷却
- ⑨一時貯留：数日から5日程度保管する。
- ⑩搬出

搬出はトラック（都市型ダンプなど）で焼却設備のある発電所等へ向けてなされ、搬出先の発電所等では容量の大きな貯蔵設備に受け入れ、貯留される。

1.3 全国のRDF製造施設

図1-1に全国の主なRDF化製造施設の整備・稼動状況を示す。平成15年1月1日現在で49施設が稼動中で、今後平成17年4月までに7施設がさらに整備されることとなっている。

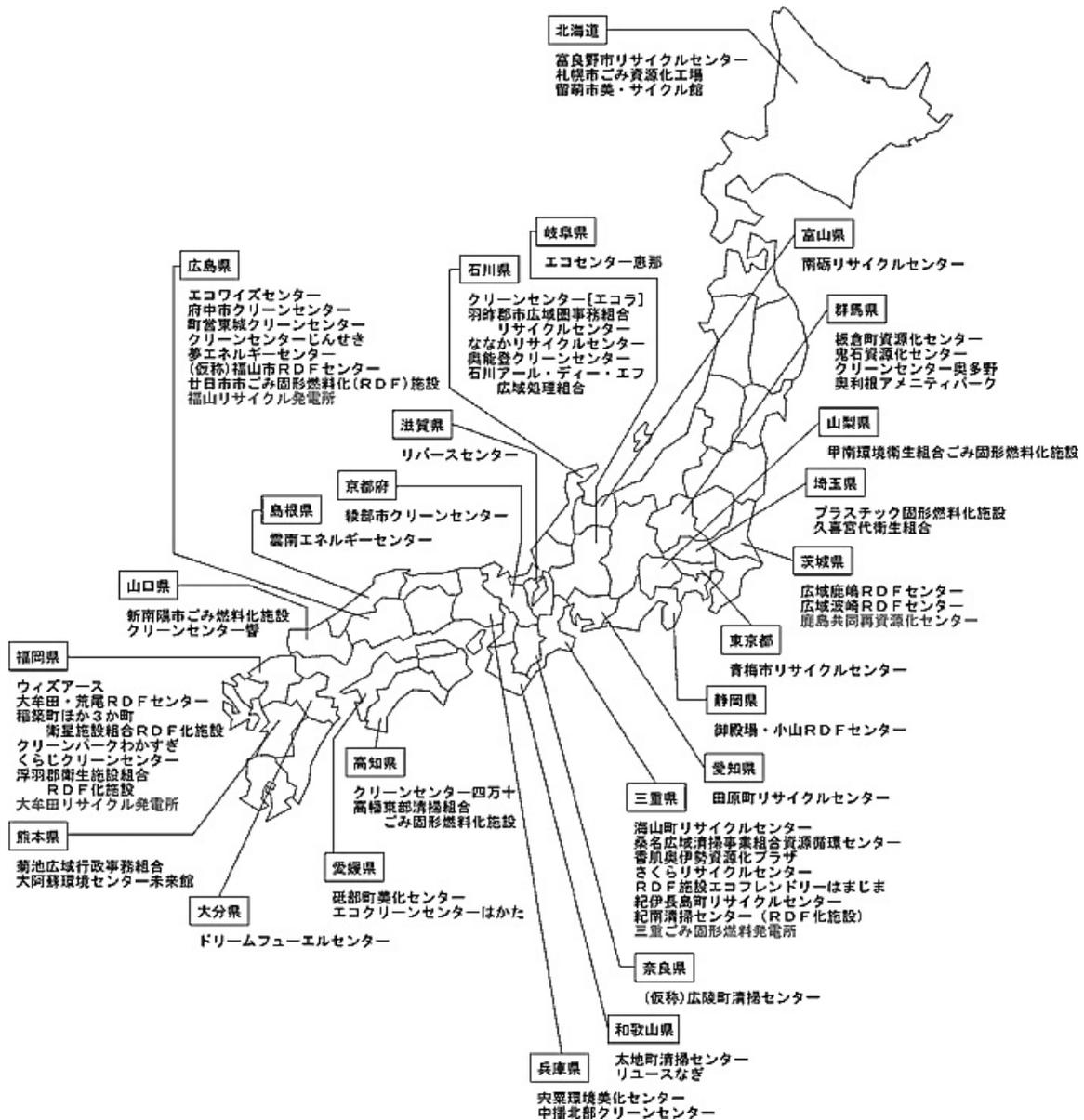


図1-1 全国の主なRDF化製造施設の整備・稼働状況
(平成15年1月1日 RDF全国自治体会議による調査結果により)

第1章の参考文献

- 1) 標準情報 (TR: Technical Report) Z 0011: 1999廃棄物固形化燃料, 日本工業標準調査会
- 2) 内沼一雄, RDF (ごみ固形化燃料) の現状, ECO INDUSTRY Vol.3, No.3, (1998), 62-71
- 3) 鍵谷 司, ごみ固形燃料 (RDF) の特性と魅力, PPM-1996, 5月号, 38-79
- 4) 陸田彰夫, 可燃性廃棄物の固形燃料化技術について, 建築設備, Vol.52.No.10. (2001), 60-64

第2章 RDFの物理的・化学的性質

各種RDF試料について、物理的・化学的性質を実験により測定した結果を以下に示す。

(1) 実験に用いたRDF試料

RDF試料の種類は10とし、試料を区別する都合上、1から10まで番号（No.）を付した。ただし、入手した試料は9カ所分であり、試料No.3とNo.4と付したものは同じところから入手したもので、No.3の方は製造後新しいもの、No.4は製造後時間が経過して古いものである。No.2も古い試料で、製造後10から14ヶ月経過したものである。

なお、入手した試料の量に限りがあったため、全種類の試料をすべての実験項目に用いることはできなかった。限られた試料を有効に使うため、実験項目に優先度を付け、試料を適宜選択して用いた。そのような理由で、必ずしも一連の実験に対して実施条件がそろっておらず、相互に比較しにくい点がある。10種類のRDFについて、形状、水分量、消石灰の含有量、成分分析結果からすれば各々細かい違いが見られるが、いずれも廃棄物固形化燃料のTR（標準情報¹⁾）に従い製造されたものであり、この意味では実験に用いたRDF試料に偏りは見られず、実験結果は一般的なRDFのもつ性状を代表しているものと考えてよい。

(2) 実験測定項目

- ①寸法測定 ②水分量 ③吸湿性 ④比重 ⑤発熱性 ⑥発生ガス ⑦不活性ガスの添加効果 ⑧堆積状態における最低発火温度 ⑨燃焼性状（燃え広がり速度，層内の温度変化，発生ガスなど） ⑩消炎性

2.1 RDFの寸法

RDF試料の寸法を測定した結果を図2-1に示す。試料No.8のみが寸法が大きいが、長さとの比は他のものと同様であり、1.5から2.5くらいにある。ただし、新しいもの（試料No.3）と古いもの（試料No.4）を比べると、古いRDFは碎け、長さが短くなり比が1に近づくことがわかる。

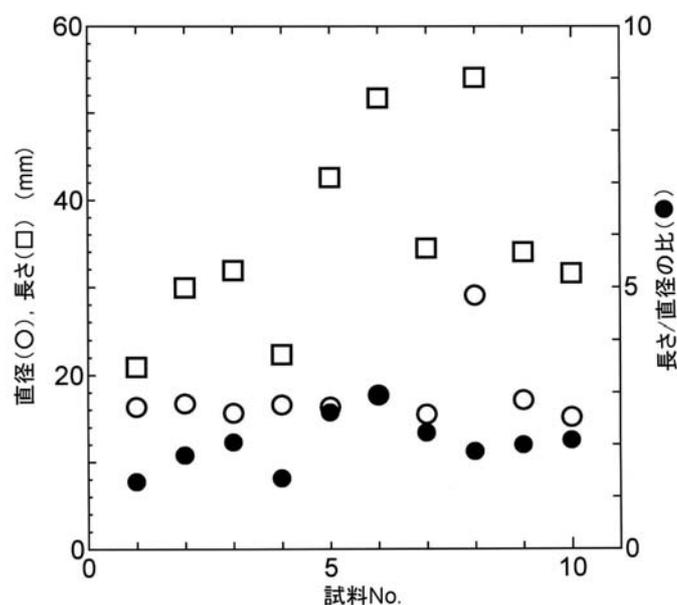


図2-1 RDF試料の寸法

2.2 水分量

試料No.5, 7, 9のRDFについて、粗破碎を行ったものを水分計を使って水分割合を測定した。ただし、測定は可燃ごみ収集袋（炭酸カルシウム入り）にRDFを入れ、実験室内の温度、湿度環境下で4ヶ月間保管を行ったものを用いた。

2回の測定で得られた結果を表2-1に示すが、いずれも水分量は6%前後であった。

表2-1 水分割合の実験結果

試料番号	水分割合[wt%]	
	1回目	2回目
No.5	6.4	6.5
No.7	5.5	5.4
No.9	6.3	5.6

使用機器：赤外線乾燥式電子水分計IB-30（ワイエムシー製）

2.3 吸湿性

RDFが堆積した状態では、地面からではなく、主に気相に触れたRDF堆積層の上面から吸湿が行われるものと考えられる。実験は堆積層の上面からの吸湿を模擬し、RDFを充てんしたステンレス製容器（バケツ）を、一定湿度・温度に保った恒温槽に入れ、一定時間ごとに水分の増加量を測定した。実験条件としては実際に考えられる高温・高湿度環境を想定し、無風、35℃、相対湿度90%とした（下記）。ただし、吸湿されたRDFは日々の周囲環境に応じて蒸発と吸湿を繰り返すはずであり、このような高温・高湿度環境が24時間、連日続くとは思えないが、最大量を見積もるために設定した。

予備実験で容器はふたをせずに恒温槽に入れてみたが、容器内壁と外壁と恒温槽に温度差が無いため、実験時間内で容器に結露が生じることは無かった。従って、壁面の結露によって余計な水分がRDFに吸湿することによる影響はなく、堆積層上面からの吸湿として測定できる。

実験条件／ 容器：160φ×160 mm（容積3.21 L），ステンレス製

初期充てん量：試料No.8のRDF 1,621.9g,

試料No.9のRDF 1,428.8g

温度35℃，相対湿度90%，無風

実験の結果、実験時間（121時間38分：5日間）内で吸湿する割合はほぼ一定であることがわかった。この時間内の水分の増加量から吸湿速度は試料No.8が0.32g/h，試料No.9が0.35g/hとなる。仮にこのような高温・高湿度の環境で水分が4%増加し、元の水分割合を含め全体の水分割合が10%を超えるのは7日～8日後となる。

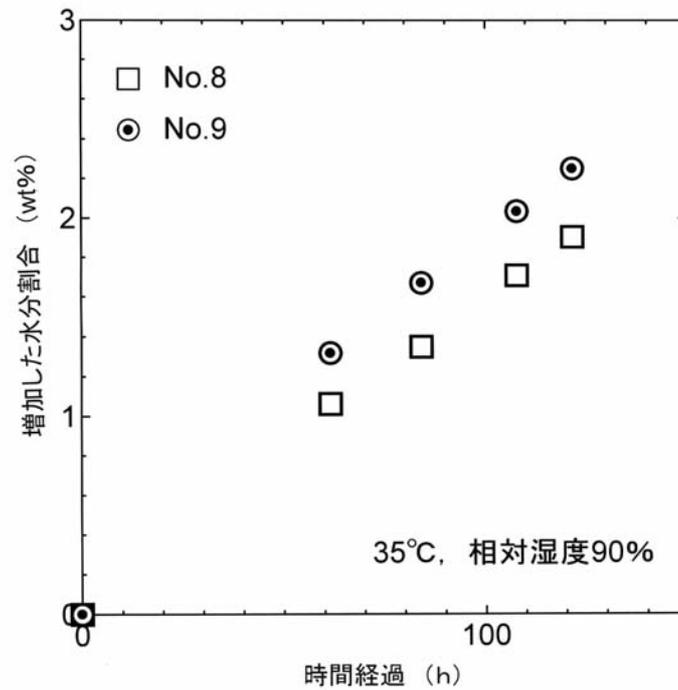


図2-2 吸湿性実験の結果

2.4 比熱

RDFの比熱 c は、初期温度 T_1 のRDFを水の入った容器（初期温度 T_2 ）に投入し、熱平衡に達した後の温度 T から、系外への熱の出入りがないものと仮定し、以下の熱収支の式で求めることができる。

$$c = (c_w m_w + c_c m_c) (T - T_2) / \{m \cdot (T_1 - T)\}$$

ただし、 c_w と c_c はそれぞれ水と容器の比熱、 m_w 、 m_c 、 m はそれぞれ、水、容器、RDFの質量である。

実験条件／ 試料：試料No.7のRDF、 測定回数：3回

容器：ステンレス容器（SUS316）

RDFの初期温度 T_1 ：50.0℃、水の初期温度 T_2 ：27.6から28.1℃の範囲

室温：28℃、 $c_w = 4.18 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 、 $c_c = 0.50 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$

得られた結果は表2-2の通りである。

表2-2 試料No.7のRDFの比熱の測定結果

実験回	比熱 [kJ/kgK]	平均値
1	1.87	1.7
2	1.32	
3	1.90	

2.5 発熱性と発生ガスの分析

(1) 実験概要

試料No.1～No.10のRDFについて、恒温槽を用い、堆積状態における発熱性を実験的に調べた。さらに発生するガスの成分の分析を行った。

1) 試料の調製

ペレット状であるRDFは充てん層のかさ密度によって層内の熱伝達率が変化すると考えられるが、そのことを考慮し、①元の長さのもの、②約10 mm長さに切断したもの、③粗く破碎したものの3種類の状態のRDF試料を準備し実験に用いた（写真2-1、2-2）。



写真2-1 試料No.5のRDF
左は粗破碎した状態、右は約10mm長さに切断した状態



写真2-2 試料No.8のRDF
左は粗破碎した状態、右は約10mm長さに切断した状態

2) 実験条件

10種類のRDFをそれぞれ以下の条件で容器に充てんし、その層内の温度測定を行った。実験期間は1週間を目安とした。

①RDF試料（10種類）

②RDFの粉碎・長さ（3種類）

③充てん容器（3種類）

小容器：70φ×90 mm（容積0.346 L）。側壁に熱電対挿入用のポートをそれぞれ設けた（高さ方向に等間隔に3点、下から23, 45, 68 mm位置）。

小容器2倍容積：70φ×180 mm（容積0.693 L）。充てんは容器高さの半分までとする。

中容器：160φ×160 mm（容積3.21 L）。温度測定は中央1点のみとし、密閉実験の際のふたに熱電対挿入用ポートを設けた。

④蓋開放の有無（3種類）

密閉、半密閉（小容器2倍容積）、開放

⑤恒温槽の温度（3種類）

36（34～37℃）、50℃、70℃

⑥充てん容器内のガスの組成（5種類）

空気，窒素富化（2種類），二酸化炭素富化（2種類）

⑦水分の追加割合（3種類）

0%wt, 15, 30

(2) 実験結果

1) 発熱性

写真2-3と2-4は、それぞれ実験番号1と14について、試料充てん容器を恒温槽に設置した状況である。



写真2-3 実験番号1の様子

小容器を恒温槽に設置した。
ガス分析用のチューブが見られる。



写真2-4 実験番号14の様子

中央の容器1つはふたありの密閉状態で、他の4つはふたなしの開放状態である。可燃性ガスの発生に備え、恒温槽は密閉せず、かつ定期的に換気を行った。

得られた結果を資料（3）に示す。その中で、実験番号13の各RDF試料の温度変化について図2-3に示す。No.2とNo.6は24時間を経過しないうちから恒温槽よりも温度が高くなり、最高値に達してから温度が下がるが、No.2は再び温度が上昇する傾向が見られる。このほかの結果を以下に記述する。

- ①外気温が35℃程度でも充てん層内で発熱することがわかった。しかし、温度上昇が継続し、発火するまでは至らなかった。
- ②小容器について粗破碎を行った条件ではNo.8のRDF試料の温度上昇が見られた。
- ③一連の実験を通し、No.4についてのみ温度上昇が見られなかったが、これは入手した試料の量が不十分で小容器実験のみを行ったため、おそらく中容器を使った場合には他のものと同様に温度上昇が見られるものと推測される。
- ④小容器についてRDFが10 mm長さの場合には温度上昇は見られなかった。
- ⑤中容器について、上部を開放し、水分を添加したものは温度が上昇するものが多く見られた。ただし、水分割合を増やしても上部を開放した実験条件では、蒸発が伴うため、当初の水分割合を維持できないため必ずしも比較できる結果は得られなかった。
- ⑥No.3については、水分量の追加が無くとも35℃程度で発熱することが（ここでは2℃）わかった。他のものでも、水分を15%追加した状態では温度上昇が見られた。

⑦窒素，あるいは二酸化炭素を加えたものでは温度上昇を抑制する効果があることがわかった。

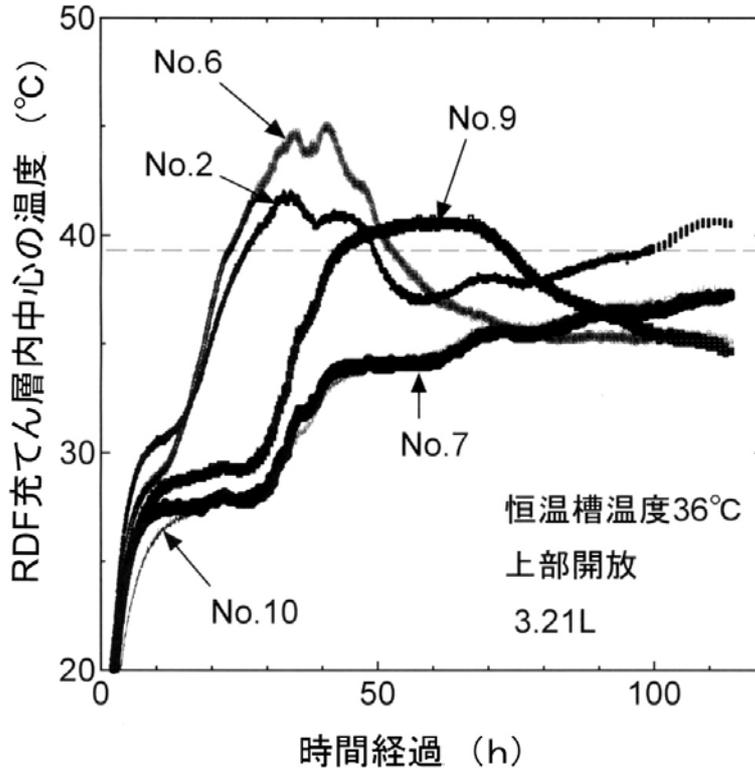


図2-3 時間経過に対する温度変化 (実験番号13)

2) ガス分析の結果

資料 (4) にガス分析の結果を示す。ただし、 C_2H_4 と C_2H_6 は検出されなかった。ガス分析の結果、COの発生について次のことがわかった。

- ①実験番号2より，RDFを粗破碎したものは表面積が大きいので反応しやすい。
- ②試料No.3とNo.8のものから発生が認められた。少量実験でも，砕いた場合は，当初の予想よりもCOの発生量が多い。
- ③実験番号2，17，18より，温度が高く，密閉の場合に発生しやすい。
- ④35°Cの実験では，試料が少ないため，COの発生がほとんど見られなかった。

(3) まとめ

得られた結果は次の通りである。

- ①各RDFは水分を含み，空気に触れた状態のほうが充てん層内では発熱しやすい。
- ②粗破碎した試料No.8のRDFは他とは異なる発熱挙動を示した。
- ③空气中に窒素あるいは二酸化炭素を添加し，酸素濃度を少ない状態に保つことで発熱性を抑制できる効果がある。
- ④試料量が少ないため，発熱からくすぶり発火する挙動は見られなかった。
- ⑤COは温度が高く，密閉した状態で発生しやすい。

2.6 高温熱面上に堆積した場合の燃焼挙動

(1) 実験概要

モータ、動力機器など熱を発するものの装置の壁面上に可燃性の固体が堆積した状態では、その壁面の温度がある一定値を越えるとその固体がくすぶり始めるようになる。一般的に、可燃性の粉体やペレット状の物が堆積している場合、堆積層の厚みが増すと発火（着火、と同義）する温度が下がることが知られている。

熱面上に粉状の物が平らに堆積した状態における最低発火温度（くすぶり温度、ともいう。）を測定する試験方法としては、国際電気標準会議IEC 61241-2-1-Ed1.0²⁾ や米国材料試験協会 ASTM E 2021³⁾ の規格が知られている。燃焼の有無、程度を見る危険性評価試験としては、粉状の物を円錐状に堆積させて行う消防法による酸化性固体に対する試験、危険物輸送に関する国連勧告による方法などがある。

発火点試験としてはJISの活性炭試験方法（K 1474（1991））がある。この方法は、通気性のある板（すのこ）付きの充てん容器に粉状の試料を約10 ml詰め、一定の昇温速度（約10℃/分）で加熱された空気を下から流し、試料層の下端、ちょうど“すのこ”に触れるあたりに設置された熱電対の温度を測定し、急激な温度上昇から発火点を求めるというものである。これまでRDFの発火点の測定は主にこの方法で行われ、約230℃が発火点であるとされてきたようである。本実験では、RDFが堆積した状態において高温熱面により着火する現象に着目し、高温熱面上に堆積させた場合の最低着火温度を実験的に測定した。実験方法の詳細は資料（5）に記述した。さらに燃焼の際に発生するガスの分析を行った。

(2) 実験結果

1) 実験1について

実験1の様子を写真2-5（加熱前）と写真2-6（加熱終了後）に示す。



写真2-5 粗破碎したNo.3のRDF試料をホットプレート上に堆積させた様子（加熱前）



写真2-6 加熱実験終了後、層内をかき出した様子。
内部が炭化していることがわかる。

所定の温度（例えば、240℃）に設定後、堆積させた初めの頃は湯気のような白い煙がわずかに発生するが、途中で止まり、層の中心付近の温度が150℃から180℃に達し、それ以上の温度では煙が間断なく発生することがわかった。層表面が黒く炭化し始め、くすぶり燃焼（くん焼）をするが、層上面にわたり火炎が形成することはなかった。加熱実験終了後、試料をかき出し

てみると、層内部ではくすぶり続けており、新鮮な空気にさらされたことで燃焼が促進することがわかった。プラスチックが溶融した様子が見られたが、流れ出すほどではなかった。実験の結果、最低着火温度は260℃であった。

2) 実験2について

実験の様子を写真2-7から2-10に示す。RDF層の上面は開放状態となっている。実験は2回行い、1回目の実験に対する温度測定の結果を図2-4 (a) から (c), 2回目を図2-5に示す。ただし、1回目と2回目の温度測定位置（熱面からの高さをyとする）は少し異なっている。



写真2-7 実験2の装置

画面には示されていないが、ほかに温度記録装置がある。



写真2-8 RDF堆積の様子

試料はNo.5のもの。

実験1回目（順次温度を変更した場合）：

1回目の実験では、熱面設定温度を150℃から開始し、順次温度を上げて調べた。開始から終了まで約36時間を要したが、(a), (b), (c) のグラフはその一部であり、それぞれ熱面の設定温度を変えた後に計時したものを図示した。ただし、熱面温度の制御のため5℃程度で周期的な変動が見られる。

1回目の実験の設定温度の変更は次のとおりである。150℃開始→1時間後160℃に変更→1時間10分後155℃に変更→1時間後175℃に変更→9時間20分後190℃に変更→6時間後170℃に変更→1時間50分後210℃に変更、終了まで5時間一定。

RDF層内から下面（熱面）への熱損失を減らすため（断熱状態を確保するため）、着火後もホットプレートの電源を人為的には切らなかった。しかし、ホットプレートの（自動）温度調整機能からすれば、あまり加熱した状態になかったものと思われる。

実験の結果、190℃では着火しないが、210℃では着火することがわかった。

図2-4(a) 温度変化(1回目:
設定熱面温度175°Cの場合)
着火には至らない。

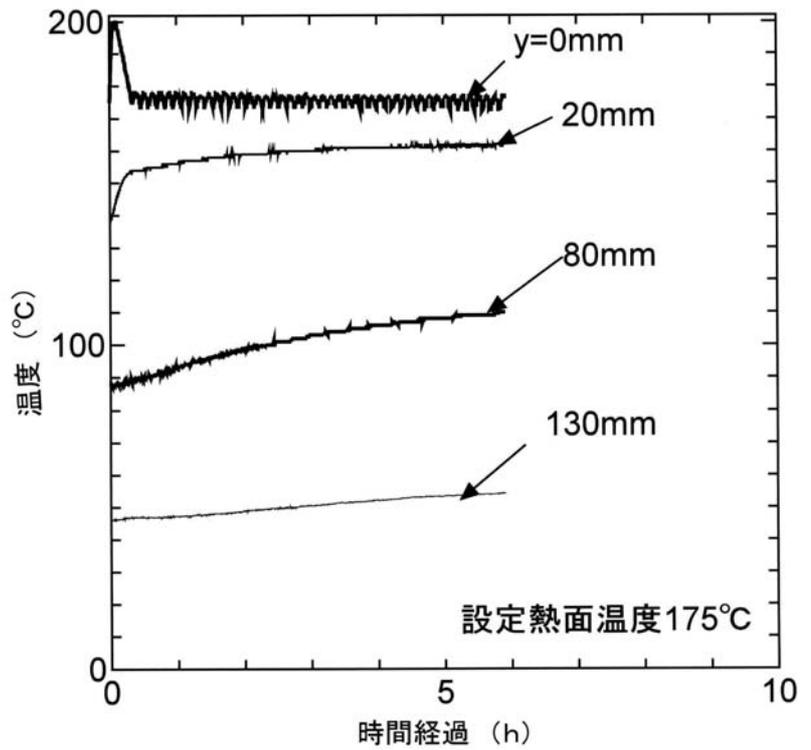


図2-4(b) 設定熱面温度190°C
の場合
着火には至らない。

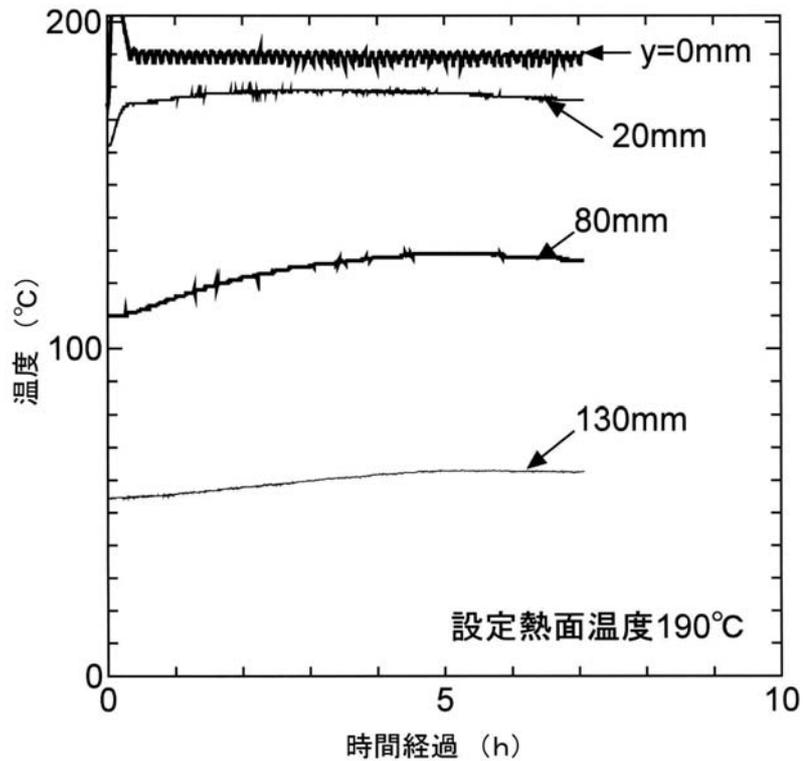
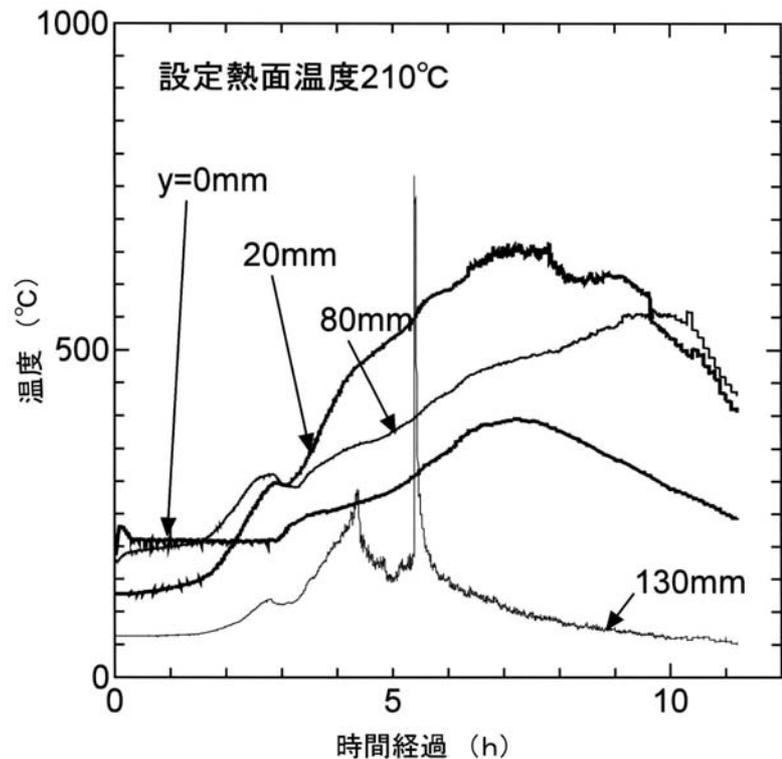


図2-4(c) 設定熱面温度210℃の
場合



実験2回目（温度を一定とした場合）：

2回目の実験では熱面の設定温度を少し下げ、200℃で行ってみた。1回目とは異なり、温度は一定とし、温度上昇から着火が認められた後はホットプレートの電源を人為的に切った。この場合は、熱的には燃焼領域から下面側（ホットプレート側）への放熱、熱損失となるが、むしろこのほうが現実の堆積層内での燃え拡がりを模擬しているといえる。

実験2で得られた結果を以下に記述する。

- ①興味深い現象は、写真2-10に示したように層内は赤熱し、炭火のような状態にあるが、時々層上に黄赤色の火炎が形成することである。この火炎は消えたり着いたりすることから、層内部からの可燃性の熱分解ガスが発生し、それに従って火炎が突然着いたり消えたりするようであった。
- ②白い煙は150℃程度でも見られるが、180℃程度で顕著になる。これは実験1と同じである。
- ③各測定位置間で一定温度に達する時間から推算すると、上方への燃え拡がりの速度は0.3～0.4 mm/分であり、次第に加速し、層の上部では0.6 mm/分となることがわかった。燃焼するにつれてRDFが崩れるため、層の上部の未燃焼のRDFはそれまでやや密の充てん・空隙状態からやや疎の充てん・空隙状態になり、空気が層内に流入しやすくなる。そのため、火炎が形成しやすくなり、層の上部で火炎ができることで、その周囲の温度が急に上昇し、予熱の効果で燃え拡がり速度が増加する。
- ④高さが異なる位置であってもある時間では各温度が近い結果が得られたことから、この燃え拡がりにおける燃焼帯は厚く、その厚さ（長さ）は30 mmを超えるものと考えられる。すなわち、この燃え拡がりは、個々のRDFが端部から燃えていくのではなく、堆積層全体で見れば、ほぼ均一的に燃焼帯が上方に移動している状態に近いことが推察される。

- ⑤燃焼温度の最高値は799℃で、用いた熱電対の熱慣性による応答性を考慮すると、おそらく、火炎の温度はメタンやプロパンなどの炭化水素系の可燃性ガスによる火炎よりも低いことが推察される。
- ⑥最低着火温度は200℃であり、従来から公表されている活性炭試験に基づく発火温度とは異なることがわかった。このような違いは活性炭試験の場合は昇温させながら熱風を送る方式であり、本実験のように無風条件の下で、堆積層内の熱移動によってのみ着火が起こるのと異なるためであると考えられる。RDF堆積層における着火温度測定に関しては、本実験のほうが実際の現象を模擬しているようである。しかし、堆積層の厚みが増すにつれ、最低着火温度が下がる傾向があるため、200℃という値は絶対的なものではないことに注意を要する。



写真2-9 燃焼中の様子（約4時間経過）
白煙が間断なく発生するが、180℃前後で顕著となる

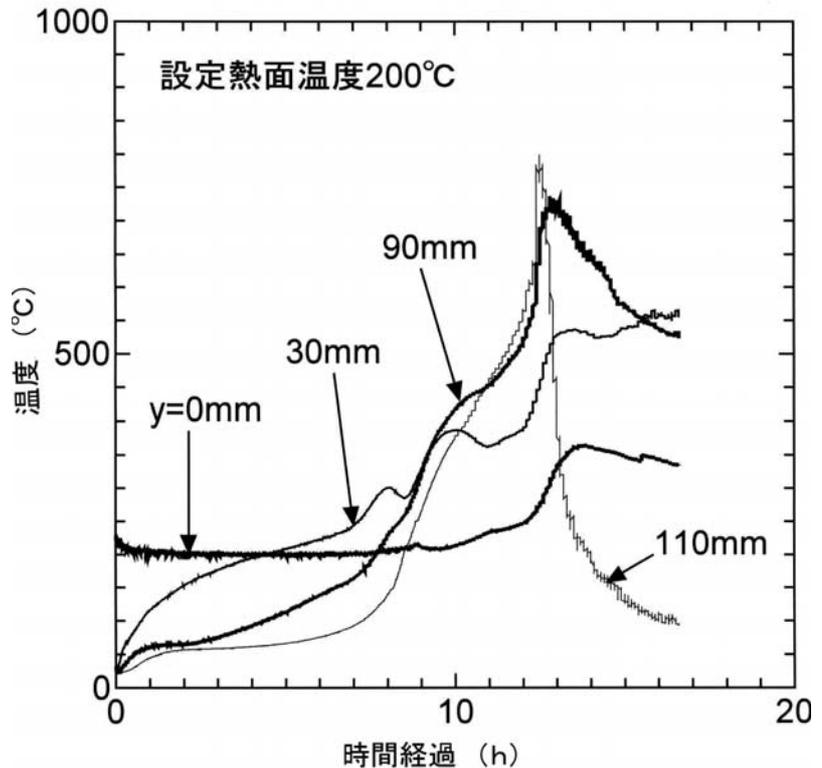


写真2-10 燃焼中の様子（約5時間経過）
堆積層の中で赤熱しながら燃焼している。時々黄赤の色の炎が層上に形成されることがわかった。ちょうど炭火のような様相である。



写真2-11 燃焼後のRDFの様子
白い灰分が残る。しかし、RDFペレットは原形をとどめている。

図2-5 温度変化 (2回目: 設定熱面温度が200℃の場合)
 $y = 110\text{mm}$ の最高温度は799℃であった。この時の時間では既に下部のRDFが燃え尽きた状態であり、測定位置は層上、気相側にある。



(3) くすぶり燃焼の際に発生する主なカス

上述の燃焼実験の際に堆積層よりも上方でサンプリングを行い、ガスクロマトグラフを用いたガス分析を行った。得られた結果を資料(6)に示す。

(4) まとめ

RDF試料としてNo.3とNo.5を使用し、以下の結果を得た。

- ①No.3のRDFを粗破碎し、15mmに堆積させた場合の最低着火温度は260℃であった。
- ②No.5のRDFを直径160mm、高さ150mmに円筒状に堆積させた場合の最低着火温度は200℃であった。
- ③白い煙が顕著に見られるのは層内の温度が180℃程度に達した場合であった。
- ④240℃付近、310℃付近、400℃付近、550℃付近においてRDFの相変化、熱分解等が発生していることが推察された。
- ⑤着火温度は100℃以上であるが、着火に関して水分の含有量はあまり影響しないものと考えられる。
- ⑥層の下部での燃え拡がり速度は0.3~0.4 mm/分で、その速度は層の上部に向かって次第に加速し、0.6 mm/分程度に達する。しかし、火炎が形成するとさらに加速する可能性があることがわかった。
- ⑦燃焼温度の最高値は799℃であった。
- ⑧上方への燃え拡がり過程においては、下の層のRDFが燃焼するにつれ上の層にあるRDFが崩れ、充てんされたRDF間の隙間が大きくなり、層内への空気の流入が容易になることがわかった。このことで、RDFから発生する可燃性の熱分解ガスが拡散し、流入する空気によって火炎が形成されやすくなる。

- ⑨燃焼の際にはCOの発生を伴う。
- ⑩炭化水素としてはメタンのみしか測定されなかったが、高級の炭化水素の発生の可能性も推察される。

2.7 消炎性

サイロ内の火災を模擬し、15 cm高さのRDF堆積層内を上方に燃え広がる状況において、下部側壁4カ所に設けた導入口から消火剤（消火ガス）を噴入した場合の消火の効果を調べた。消火剤の噴入は、燃え拡がりか堆積層の中央付近に達してから行った。

ただし、実験は堆積層の上面を開放した状態で行った。

実験条件／

消火剤：窒素あるいは二酸化炭素

試料：試料No.7とNo.9のRDF

容器：3.2 Lステンレス中容器

導入ポート：内径10 mm×4，側面に底面から1 cm高さに設置

導入量：10 L/分，20 L/分

時間：28秒，56秒，ほか（容積に対するガスの3倍以上の置換量）

堆積層内を上昇する消火ガスの平均速度：1.7 cm/s（最小値）～



写真2-12 容器を上から見たところ
(底面から1cm高さに4カ所消火ガスの導入ポートが見られる)



写真2-13 実験中の様子
(上ふたは完全に閉じていない)

得られた実験結果は次の通りである。

- ①二酸化炭素のほうが窒素よりも消火効果が高いことがわかった。
- ②開放条件では、消火剤噴入を止めると、層上方から新鮮な酸素が供給され、消えにくくなることがわかった。
- ③消火はサイロ内を密閉し、酸欠状態にすれば達成しやすくなるが、長時間くすぶり続けることにより構造材の熱的な劣化などで破壊が生じ、開口部ができる可能性は否定できない。この場合はむしろ火災の拡大につながる危険性がある。

- ④ガス系よりは水系の消火剤のほうが消火効果が高いが、固着などを生じる可能性がある。
しかし、消火は確実に行われる。

第2章の参考文献

- 1) 標準情報 (TR: Technical Report) Z 0011: 1999廃棄物固形化燃料
- 2) IEC 61241-2-1 Ed. 1.0:1994 (b) Electrical apparatus for use in the presence of combustible dust - Part 2: Test methods - Section 1: Methods for determining the minimum ignition temperatures of dust, International Electrotechnical Commission (国際電気標準会議)
- 3) ASTM E2021-01 Standard Test Method for Hot-Surface Ignition Temperature of Dust Layers, American Society for Testing and Materials (米国材料試験協会)

第3章 RDFの自然発火等の危険性

3.1 RDFの原料となる可燃ごみ

RDFの原料となる可燃物のごみについて、家庭から出される可燃ごみ・粗大ごみとしては次の物が挙げられる。

生ごみ (穀物, 野菜, 果物, 肉, 魚, 揚げ物, 菓子類, 卵の殻, 牛・豚・鳥・魚の骨, カニ・エビの殻, 貝殻類, 草・花, 食物油・酒・調味料, 塩化ナトリウム, 糖分, セルロース, 汚物など)

洗剤 (表面活性剤など)・漂白剤 (さらし粉など)・石けん

プラスチック・樹脂 (ポリエチレン, ポリ塩化ビニル, ポリスチレン, ポリプロピレン, ポリウレタン, ABS樹脂, アクリル樹脂など)

ゴム類

紙類

布類

木片・木屑 (くず)

アルミ箔

金属片, 切削粉, 鉄屑

薬品 (農薬など)

など。

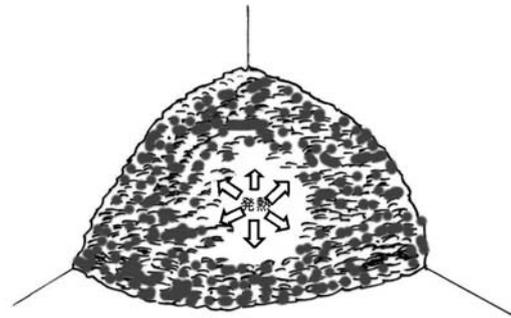
これらが破碎され、風力選別等により鉄、アルミは除かれ、消石灰が加えられRDFとして成形される。しかし、入手したRDF試料の成分分析結果と目視観察によると、アルミなどの金属の含有が認められるので、箔状のものや小さな金属片で軽量のは風力ではうまく選別できずに後の工程に送られていることがわかる。

3.2 外気温と堆積層内の温度変化

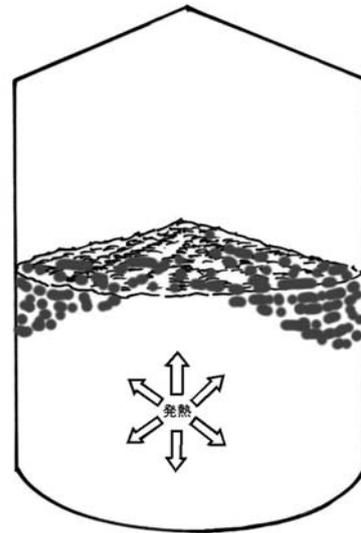
(1) 熱伝達と温度分布

図3-1 (a) と (b) には、RDFなどの可燃物が野積みした状態とサイロ内に堆積した状態で発熱する概要を示す。一般的に、発熱は層の内部で起こり、周囲への放熱を伴う。

発熱状況については層内部の温度が外気温（気相の温度で大気温、室温などを含む）よりも高いか低いかによっても異なるが、初めは図3-2のような温度分布により変化し、熱伝達により外から暖められ外気に近い温度に達する。この間、外気とRDFの間で水分の蒸発と吸収が行われ、蒸発熱と凝縮熱により層内の温度が低下したり、上昇したりする。層内で一定温度に達してから局所的に微生物発酵や（発熱を伴う）化学反応などが始まり、発熱速度が周囲への放熱速度よりも大きくなる状態になると局所的な温度上昇が継続する（図3-3）。その温度が発火温度に達するとくすぶり始め、発火する。



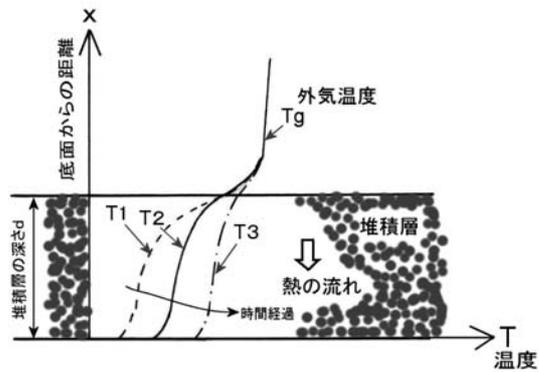
(a)野積み状態



(b)サイロ内に堆積した状態

図3-1 堆積状態における層内の発熱の様子

鉛直方向の温度変化



水平方向の温度変化

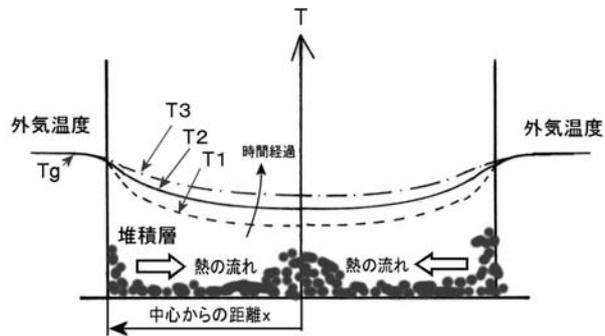
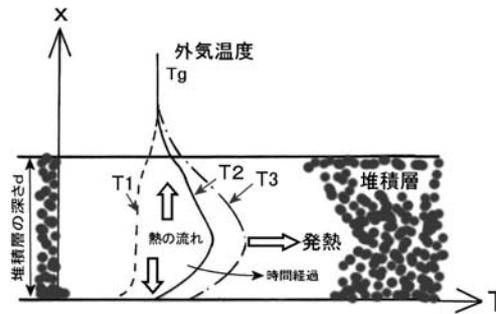


図3-2 温度分布の概略 (層内の温度 \leq 外気温の場合)

層内で発熱がない場合は、熱伝達により外から暖められ、層内の温度は高くなり次第に外気温度に近づき、平衡する。この後、層内で微生物発酵や発熱を伴う化学反応などにより発熱が継続すると、層内の温度が外気温度よりも高くなる(図3-3へ続く)。

鉛直方向の温度変化



水平方向の温度変化

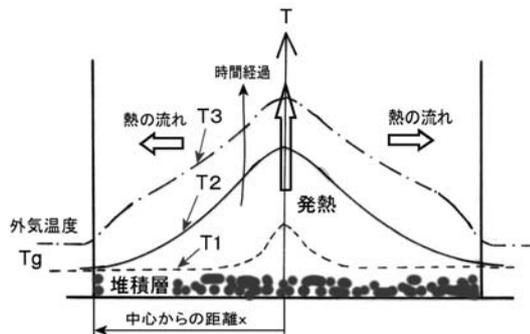


図3-3 温度分布の概略 (層内の温度 $>$ 外気温で中心で発熱する場合)

層内で発熱があり、放熱速度よりも発熱速度が大きい場合は、断熱性が高い中心付近の温度上昇が継続し、発火温度に達するとくすぶり始め発火する。

(2) 水分、圧密によるRDFの粉化の影響

湿度の影響に着目すると、水分量が多いRDFの場合は外気の温度、圧力、湿度によってはRDFから水分が蒸発するため、蒸発熱を奪われRDFの温度は低下する。逆に外からの水分を吸湿、凝縮した場合は、凝縮熱を得るのでRDFの温度は上昇する。一般的に、凝縮による熱伝達率は蒸発によるそれに比べて格段に大きいといわれるが、熱伝達を微視的に見ると、水の膜がRDF表層に存在する膜状凝縮や水滴状で存在する滴状凝縮の形態となるかもしれない¹⁾。これらの膜が断熱効果に寄与するため、水蒸気がすべて液化・凝縮せず実際の熱伝達率は低く、吸湿による温度上昇はあまりないと考えられる。むしろ、上記(1)に示した表層と外気との熱伝達により熱の移動がある。

凝縮した水は、重力の影響、毛細管現象などにより堆積した下部の層、内部に移動、広がっていくが、その日の天候、周囲の温度、湿度、直射日光を受けるかどうかなどの状況によって堆積した表層付近のRDFから逆に外気と平衡するまで蒸発が進む。そのため、RDFは常に吸湿側にあるわけではない。内部の下の層のRDFは外気に触れていないため水分の蒸発が進まず、また、内部で局所的にRDFが乾燥している場合には、毛細管現象で乾燥したRDFに向かって水が広がるので、時間が経過すると内部下部のRDFの水分の含有量が増える。さらに、内部で下の方の層は上からのRDFの荷重を受け、圧密となり、おそらく変形し、一部は砕け、粉になっているものと考えられる（ただし、これはRDFの硬さに依存する。製造場所ですべて異なるので、一概には言えない）。このように粉化され、表面積が大きな状態で、水分が多く、かつ圧密で堆積されたRDFは、断熱性が高い環境にあれば発酵や酸化反応が進行しやすい。実際のところ、微生物発酵が無くとも、RDFを構成する物質からすると、発熱を伴う化学反応により蓄熱し、発火する可能性がある。

3.3 自然発火

(1) 堆積した粉状の可燃物が自然発火する場合の例

代表的には以下の二つが挙げられる。

- ①高温熱面に接触あるいは熱面上に堆積していきすぶり、発火する場合
- ②酸化反応、分解反応等に伴う発熱により温度が上昇し、蓄熱、発火する場合

堆積した状態の自然発火とは、一般的には②が該当する。①は、具体的にはモータなど動力機械や加熱装置の周囲に粉が堆積した状態で発火する場合である。②は、ヤード、サイロなどに粉を保管した状態において、層の内部で発熱し、その後蓄熱から発火に至る場合である。

石炭は炭種によってかなり異なるが、いわゆる（低温における）自動酸化が起こる。その傾向は、採掘後や粉碎後で顕著であり、表面が多孔性であるため、酸素の吸着が進行し、発熱が起こる。漂白剤や殺菌剤として使われる（さらし粉（ $\text{Ca}(\text{ClO}_2)$ ）や生石灰（酸化カルシウム）は水分の存在で、それぞれ塩化カルシウムと水酸化カルシウムを生成する。これらも発熱を伴う。セルロイド（硝化綿）は硝酸基が分解し、亜硝酸ガスが触媒となって分解が促進され、自然発火に至る。油脂類の中で不飽和結合を持つ脂肪酸を含むものは酸化しやすく（低温における自動酸化）、特に紙、布、フィルタに浸潤した状態での自然発火の危険性が高い。対象となる低級、高級の不飽和脂肪酸は常温では液体ものが多い。

(2) 微粒化の影響

粉状、あるいは数センチのペレット状（クレヨンのような形状）に固形化した可燃性の物は、粒子の体積（大きさ）に比べて表面積が大きく、比表面積が大きい状態にあるが、細くなればなるほど比表面積が大きくなる。例えば、一辺が 1 cm の立方体1個（表面積 6 cm²）が一辺 0.1 cm の立方体の粒子に破碎されると、粒子の個数は1,000個（10³）、総表面積は 60 cm²（0.01×6×1,000）となる。細くなればなるほど表面積が大きくなり、化学反応に寄与する面積が増加するが、それとともに破碎・粉碎作業における微細化で表面が活性となり、場合によっては微粒化過程の途中で発火する場合がある。切断方式による破碎では局所的に大きな力が加わり、摩擦熱を伴うことが知られている。

(3) 堆積による自然発火に関する理論

堆積状態における自然発火については、セミヨノフ（Semenov）の発火限界や、次に述べる Frank-Kamenetskii（フランク-カメネツキー）の熱発火理論で説明されることがある²⁾。この理論では、いくつかの仮定により解析の簡略化が図られているが、解析的に導かれた式に実験値を適当に用いることで、現象をよく説明できることがわかっている。例えば、文献²⁾中の関係式 (9) は以下の通りである。

$$\ln T_c + a/2T_c = \ln r + (1/2) [\ln (a \cdot \Delta T / \delta_c a) - b] \tag{1}$$

ただし、 T_c ：限界発火温度（最低発火温度に相当）、 T ：温度、 r ：堆積寸法、 δ_c ：Frank-Kamenetskiiのパラメータ、 c_p ：定圧比熱、 E ：活性化エネルギー、 A ：頻度因子、 R ：気体定数、 H ：反応熱、 a ：熱拡散率、 Δ ：差、 $a = E/R$ 、 $b = \ln [(\Delta T \cdot c_p) / (\Delta H \cdot A)]$ 、 c ：モル熱容量（単に熱容量）、 ρ ：モル濃度（密度に相当）。

この式から限界温度 T_c が低くなる場合は、熱拡散率 a が小さいとき、活性化エネルギー E が小さいとき、発熱量 ΔH が大きいとき、そして r が大きいとき、すなわち層の厚み（ここでは $2r$ ）が大きいとき、であることがわかる。この関係式を定性的に示したものが図3-4である。堆積層の高さ（厚み）が増すと発火着火温度が下がることがわかる。

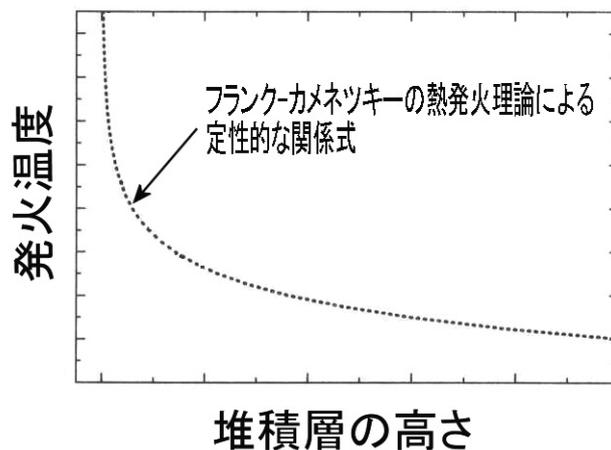


図3-4 フランク-カメネツキーの熱発火理論による定性的な関係式

ただし、式 (1) は普通、実験により求められた実測値を用いて曲線へのフィッティング（当

てはめ）が行われ、内挿や外挿によって着火温度を推定するという使い方がなされる。理論による上式は、無限平板や無限円筒と呼ばれる、高さ方向に対して水平方向の寸法が大きく、中心から水平方向への熱の伝わりが小さく（あるいは壁に熱の伝わる時間が長い）、高さ方向の熱の伝わりが大きい（あるいは、下面、上面に熱が伝わる時間が短い）場合を仮定している（図3-2と3-3参照）。そのため、高さに比べて直径が大きいずん胴のサイロやタンクならば適用できるが、高さに比べて直径が小さい、細いサイロならば、仮定が成り立たず、単純に高さのみで最低着火温度が決められるわけではないことに注意が必要である（無限円筒の場合、直径が堆積高さに相当する）。特にこの式は指数的に変化するため、高さの値が小さくあるいは大きくなる場合（高さが0あるいは無限大）には着火温度の値が実際のものとは食い違う可能性がある。

(4) RDFが堆積した場合の熱伝達

RDFが堆積した場合では、その隙間に空気が存在し、ある空隙率を持った状態におかれている。このような状態のRDFと空気の層の熱伝導性はその空隙率にも依存するが、空隙がない均質な層のものに比べて熱伝導率は小さくなる。堆積したRDF層とそれが砕けた粉の表面では、成分（前述（1）参照）によっては室温程度の低い温度であっても酸化反応（発熱を伴う）が始まり、層内での熱伝導率が小さいことから発熱する速度に比べて周囲に放熱する速度が小さくなり、熱収支上、発熱が大きければ蓄熱し、ごくわずかの発熱量（発熱速度）であっても長時間かかって温度が上昇するようになる。発火する温度まで層内の温度は次第に高くなるが、化学反応は温度に依存してその速度が増加するため、発火する温度付近になるとそれまでの時間の温度上昇に比べて短時間で発火に至るようになる。発火しても層内では燃焼反応が十分に進行できるだけの酸化剤（空気）がないため、くすぶり状態の燃焼形態（これをくん焼、という。）を持続する。

3.4 RDFからの一酸化炭素（CO）の発生について

COの発生機構としては次のものが考えられる。

- ①酸素不足条件の燃焼，燃焼反応の停止など燃焼特性による
- ②有機物の（低温の）熱分解や炭化（乾留）による
- ③微生物発酵による

①の場合は、a) いわゆる酸欠状態による燃焼により、酸化剤に対して可燃性ガスが過剰（過濃）にある場合に生成する機構と、b) 有機物、特に炭化水素の燃焼において、温度低下に伴い素反応段階で停止・消滅し、生成する機構とがある例えば³⁾。この場合、COの発生する速度は大きい。

②の「低温」とは発火温度に至らないまでの温度を指す。実験によると、粗破碎を行い、温度が高い条件（50℃）で密閉した条件では水分の追加なしでもCOの発生が見られた。これは、RDFに含まれる有機物が発火に至らない温度であっても熱分解により、炭化水素、O₂、H₂とともにCOが発生することを示している。一昨年、コーヒー抽出設備でCOが発生したことにより、CO中毒を引き起こし死亡災害に至った事例があった（平成14年11月22日、三重県四日市市）。この場合、COの発生する速度は①の機構に比べて小さい。

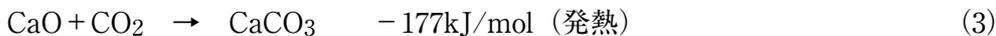
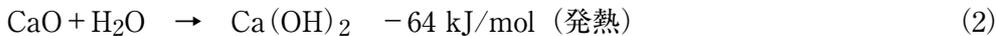
③の微生物発酵に基づくCOの発生については、未燃焼であっても密閉状態でCOが発生して

いることから、嫌気性発酵が行われていることも推察される（これに対して好気性発酵がある）。嫌気性発酵によれば、最終的には CH_4 、 CO_2 が発生するはずであるが、 CO とさらに H_2 が存在することから、嫌気性発酵の消化第1段階である酸性発酵期の反応⁴⁾が進み、その後の消化第2期であるメタン発酵期までは進まなかった可能性は否定できない。すなわち、反応が不十分で酸性発酵期で CO_2 とならず CO として生成したと考えられる。この場合、 CO の発生する速度は①に比べて小さい。

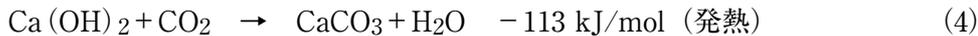
以上のことから、室温から温度が少し高くなると、②の機構が進み、微生物存在下で水を含み、ある温度範囲（例えば $30\sim 80^\circ\text{C}$ ）になると③の機構がそれに伴い、発火に及ぶと①の機構により CO が短時間に発生すると考えられる。

3.5 消石灰の二酸化炭素との反応について

酸化カルシウム（ CaO 、生石灰）と水あるいは二酸化炭素とにより、水酸化カルシウム（ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 、消石灰）、炭酸カルシウム（ CaCO_3 ）が生成する反応を次式に示す。



式(2)と(3)を整理し、消石灰（水酸化カルシウム）と二酸化炭素により、炭酸カルシウムと水が生成する反応は次式となる。



上の式は、消石灰水溶液中において二酸化炭素を吹き込み、白濁（炭酸カルシウムは不溶性）する反応としてよく知られているものである。単純に見積もると、生石灰 1kg が水と反応すると $1,142 \text{ kJ}$ 、消石灰 1kg が二酸化炭素と反応すると $1,527 \text{ kJ}$ の発熱が伴うことになる。

次に消石灰が二酸化炭素とすべて反応したものと仮定し、どの程度温度が上昇するのか見積もってみる。ただし、温度上昇が 100°C 未満であるとする。

$\text{Ca}(\text{OH})_2$ 1kg に対し、 CaCO_3 は 1.35kg 、水は 0.243kg 生成する。すなわち、生成する水分は消石灰に対して $24.3\% \text{wt}$ となる。

今、RDF1個を 10g とすると、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ が 4% 含有の場合は 0.4g 、水分が 6% 含有では 0.6g となる。式(4)より、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 1kg あたりの生成熱 ΔH は $1,527\text{kJ}$ である。ここで、RDFの比熱 $c = 1.7\text{kJ/kgK}$ （本実験2.5節より）、RDFの質量 $m = 10 \times 10^{-3}\text{kg}$ 、水の比熱 $c_w = 4.18\text{kJ/kgK}$ 、水の質量 $m_w = (0.6 + 0.4 \times 0.243) \times 10^{-3}\text{kg}$ とする。

反応系外への熱損失を無視すると、熱収支より次式、

$$\Delta H = cm\Delta T + c_w m_w \Delta T \quad (5)$$

が成り立ち、温度上昇 ΔT は与式に数値を代入し次のようになる。

$$\begin{aligned} \Delta T &= (1527 \times 0.4 \times 10^{-3}) / \{1.7 \times 10 \times 10^{-3} + 4.18 \times (0.6 + 0.4 \times 0.243) \times 10^{-3}\} \\ &= 31^\circ\text{C} \end{aligned}$$

製造後のもとのRDFには水分を10%以下（6%程度）含み、さらに式（4）の反応で水が生成される。もとの水が反応に関与しなければ、室温であってもRDFから水の蒸発が行われ、気化潜熱が奪われるはずである。消石灰は水分を含むごみの質量を基準に1~2 %添加されるが、乾燥成形後のRDFでは2~4 %含有することになる。化学反応は（多孔性である）RDFの表層から時間とともに進むが、消石灰はRDFに均一に混じっているため、表層付近での二酸化炭素と消石灰の反応速度（あるいは反応量）には限りがある。すなわち、化学式で示されたように消石灰の全体量がすべて二酸化炭素と速やかに反応し、温度が上昇するわけではないことは容易に想像できる。反応に関与する二酸化炭素が雰囲気中に十分になれば式（4）の炭酸化による反応は起こらない。しかも、二酸化炭素を富化した状態で発熱性を調べた研究所における小規模実験による結果では、温度の上昇は見られなかった。

3.6 熱分解によって発生するガス

熱分解により発生するガスは、そのときの雰囲気温度によって生成する成分が異なるため特定することは難しいが、通常、固体から液体、気体に相変化するに従い、低分子量の化合物に分解されていく。RDFは有機物と無機物を含み、熱分解によって無機物である水素（H）、一酸化炭素（CO）、二酸化炭素（CO₂）が、有機物としては主に炭化水素系（C_xH_y）の化合物が生じることがわかっている。熱分解によって生じる炭化水素の化合物としては低級（炭素が少ない化合物でC1化合物~C4化合物程度まで）のものが生じやすい。C1化合物としてはメタン（CH₄）、C2化合物としてはエチレン（C₂H₄）とエタン（C₂H₆）、C3化合物としてはプロピレン（C₃H₆）とプロパン（C₃H₈）、C4化合物としてはブタン（C₄H₁₀）などが挙げられる。これらはガスであるが、C5化合物以上では常温常圧では液体である。

プラスチックなどのポリマー（「高分子」という）は熱分解（特に「解重合」という）によりモノマー（「単量体」という）となるが、熱分解の際の温度が上昇するに従い、炭素-酸素、炭素-窒素などの結合が切れ低分子化が進む⁵⁾。例えば、プラスチックの一つメタクリル樹脂の熱分解開始温度は350℃程度であるが、その温度で気化、モノマーとなり、さらに温度が高くなるにつれモノマーの結合が切れて、低分子化していく。しかし、温度上昇に伴い二次的な反応、再結合などにより逆に高分子化が進み、想定しないような複雑な化合物が生成することがある。さらに温度が高くなり、熱分解ガスが燃焼する温度（おおむね1,000℃以上）になると、種々の化合物は分解し、反応に関与する酸素が周囲に十分に存在し、酸化反応が進行すれば最終的には二酸化炭素、水となり、雰囲気条件によっては二次的に有害な燃焼物（大気汚染物質となるもの）がそれらに併せて生成する。

熱分解ガスの組成の分析は通例、還元性雰囲気で行うように不活性ガスを封入した状態で温度を変えて行われるが、研究所におけるRDFに関するガス分析は、実現象に近づけて調べるため、空気雰囲気（酸化性雰囲気）中で行った。ガス分析にはガスクロマトグラフを用い、燃焼させない発熱を見るだけの発熱性実験（2.5節）では、一酸化炭素のほか微生物発酵によるものと思われる二酸化炭素の発生を確認した。この場合は、酸素を含んでおり、好気性発酵が伴っている。特に試料容器を密閉した酸素が少ない、嫌気性発酵が進行しやすい状態における実験では、水素の発生も見られた。空気中の燃焼実験ではRDF堆積層の上部でガスサンプリングを

行い、メタンと一酸化炭素の発生を確認した。可燃性ガスである水素は発生速度が小さくごく微量であるか、あるいはRDFの燃焼反応に付随して燃焼・消費されたためか、RDF堆積上でサンプリングした分析ではその発生が確認できなかった。いずれの実験でも、分析感度内ではエチレンの発生は確認できなかった。このことから、空気雰囲気（酸化性雰囲気）中における熱分解においては、水素、一酸化炭素、二酸化炭素のほか、炭化水素系の化合物としては、C2以上の化合物はあまり見られず、C1化合物であるメタンが主な成分であることがわかる。ただし、上述したように雰囲気温度によって生成する成分が異なることに注意が必要であるが、RDF原料にも依存する。分析対象外であった高級の炭化水素の発生も否定できない。

3.7 RDFの自然発火の可能性について

実験の結果、実験に用いたRDFには発熱性があることがわかった。3.2と3.3節の考察からすると、RDFが大量に堆積し、特に厚く堆積した状態では、層内部は熱的に断熱状態となりやすく、わずかの発熱速度であっても時間経過とともに蓄熱、昇温し、自然発火に至る可能性がある判断される。

一般的に蓄熱は局所的であり、層内部の中央付近あるいはやや下の方の断熱状態となりやすいところで生じやすい。原料となる物質の中には水と反応するものがある。水分の添加と適度な温度条件では微生物の発酵が加わり、発熱が促進される。RDFが砕けた状態では、反応に寄与する表面積が増加し、それは反応促進、発熱に寄与する。ただし、RDFに水分を余分に添加、浸潤させなくても発熱が見られたRDFがあったことから、水分の添加が発熱のために必要不可欠とはならない。

3.8 サイロの形状等に係る問題点

三重県で発生した災害（資料（1）参照）におけるRDFの貯蔵方式はサイロ方式であったが、上記考察を踏まえ、サイロの形状等の問題点と温度測定を行う上での問題点を以下に挙げる。

- ①サイロを設計する際、RDFを別の試料ペレットの物性条件、貯蔵物諸元で設計した場合、実際の輸送特性に違いが生じる可能性がある。RDFは製造施設ごとにばらつきがあり、形状が崩れたものや水分を含んだものはその影響が顕著である。サイロ設計は、RDFの性状とともにサイロの形状や払い出し能力等（温度、湿度管理等を含め）を勘案して行う必要がある。
- ②ブリッジ（架橋）ができると払い出しが困難となる。図3-5には粉体取り扱いプロセスにおけるサイロ内での架橋現象の主な原因と状況を示す。
- ③上述の通り、RDFは発熱性があるが、堆積した場合は蓄熱しやすくなる。大型のサイロは貯蔵量に比べ堆積高さを抑えることができるが、堆積層の水平方向（直径方向）への広がりがあるため、壁面への放熱効果が小さくなり、蓄熱する可能性がある。
- ④温度測定では、蓄熱しやすいと考えられる堆積層の中央付近まで長いプローブを挿入して行わなければならないが、実際の現場では短いプローブを用い、堆積層の端部や表層付近で測定している場合が多い。

なお、サイロの貯蔵方式による問題点や取り扱いの留意点については第4章で詳述した。

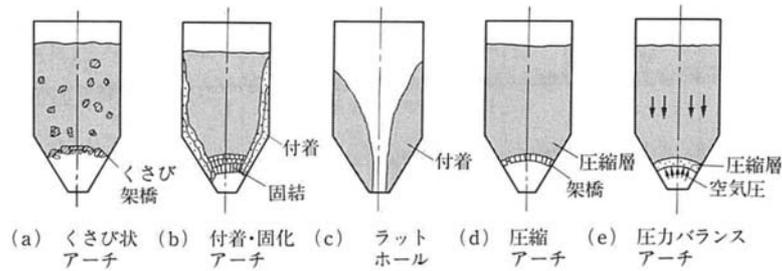


図3-5 架橋現象の主な原因と状況⁷⁾ p.347

第3章の参考文献

- 1) 一式尚次, 伝熱工学, 森北出版 (1967), pp.133-137
- 2) 琴寄 崇, おがくず堆積層の熱発火限界温度, 産業安全研究所報告, RIIS-RR-85 (1985), pp.33-44
- 3) 水谷幸夫, 燃焼工学 第二版, 森北出版, pp.209-211
- 4) 福本勤, 廃棄物処理工学, 朝倉書店 (1980), pp.53-54
- 5) Bilitewski, B., Hardtle, G., and Marek, K. 著, 花嶋正孝総監修, 島岡, 樋口, 堀井監訳, 廃棄物マネジメントハンドブック, (株)エヌ・ティー・エス (1996)
- 6) 神戸博太郎編, 高分子の熱分解と耐熱性, 培風館, (1974)
- 7) 狩野 武, 粉体輸送技術, 1991, 日刊工業新聞社, 第7章

第4章 爆発・火災の防止対策

第3章までの知見等に基づく、RDF製造過程における爆発・火災の防止対策としては以下のことが考えられる。

4.1 基本事項（RDFの燃焼危険性）

- ①RDFは周囲条件・環境によっては自然発火する物である。
 - a) 蓄熱しやすい物である。
 - b) 高温になればガス化し、可燃性のガスを発生する可能性がある。
 - c) 微生物による発酵により、可燃性のガスを発生する可能性がある。
- ②RDFは可燃性の物であり、みだりに着火源（点火源）となるおそれのあるものを接近させないようにする。着火源となりえるものとしては、（蓄熱による）自然発火のほか、次のようなものがある。
 - a) 裸火：灯火、ガスライタの炎、ガス溶断の際の炎など。
 - b) 高温物体：照明器具、発熱を伴う動力機械、モータなど。
 - c) 摩擦：可動部と装置壁などとの間のこすれなど。
 - d) 電気・火花放電：劣化などの電気配線の短絡（発熱、スパーク）、漏電、モータブラシの火花、静電気など。
- ③RDFは、水分が少なく、密であり、大きさがそろっていることからすれば、大量に堆積した状況で一度発火すれば、燃焼が継続しやすく、火災が拡大する可能性が高い。火災・爆発の予防と消火の対策としては、（全国的に見て）現状の可燃物や粗大ごみの処理施設よりもさらに慎重な対策を講ずる必要がある。
- ④RDFに関する一連の技術はまだ確立されているとはいいがたい状況にあり、不明な点も多い。

4.2 RDFの製造過程における防止対策

RMJ方式によるRDF化製造施設を念頭に、爆発・火災災害の再発防止対策を以下に示す。

(1) RDF成形前の段階までの製造過程

- ①受け入れごみピットにおける火災の防止
 - a) 消火設備に用いられる煙、熱、炎感知機などを設置する。
 - b) 屋内消火栓や散水設備を設置する。
 - c) カメラなどによる監視を実施する。
 - d) 文献1) や2) などを参照。
- ②破碎機における爆発や火災の防止
 - a) 粗大ごみ破碎機にスプレー缶、小型LPガスボンベ、溶剤入り塗料缶などが入らないようにする。このためには、カメラや目視による監視を徹底する。
 - b) 高速型（毎分数百回転以上）の破碎機は火花が生じやすく発火の注意が必要である。
 - c) 低速型（毎分20回転前後）の破碎機は回転刃での火花の発生が少ないが、漏えいした可燃性ガスが滞留する危険性が排除されるわけではない。
 - d) 破碎機内で漏えいした可燃性のガスの濃度が爆発範囲に入らないようにする方法としては強制通風や水蒸気吹き込みによる防爆があるが、それと併せて投入前のカメラ監

視装置，温度測定装置，ガス濃度測定装置，散水装置などを適宜設ける。

- e) 高速型では必ず，低速型の破碎機であっても爆発圧力放散設備を設けることが望ましい。この場合には文献3) の技術指針を参考に設計すること。
- f) 文献1) や2) などを参照。

③コンベアなどの輸送機器・設備

- a) コンベアのベルトの材質は難燃性のものとする。
- b) コンベアには適当な数の熱や炎の感知機と散水装置を設ける。
- c) RDFやその粉がモータ等の発熱を伴う動力機械の上や回転軸の周囲に堆積しないようにする。

④乾燥設備

- a) 間接加熱方式とする。
- b) 適切な処理量，乾燥温度，風速，湿度，乾燥速度，乾燥時間を設定する。
- c) 文献4) などを参考にし，一般的な乾燥設備における爆発・火災の防止対策を実施する。

(2) RDF成形過程から貯蔵の前まで

①カルシウム（消石灰等）の添加

- a) 添加するのは消石灰とし，生石灰の添加は避ける。ただし，J-カトレル方式など生石灰の発熱を利用する方式を除く。
- b) 添加割合は，現状通り原料である水分を含むごみに対して1~2%とする。ただし，この石灰割合が数%内であれば発熱の影響はない。

②温度管理

- a) 成形後の冷却過程では，周囲空気温度まで冷ましてから貯蔵する。
- b) RDFが集まり，積み重なったような状態では，冷却用の風がRDF間を流れても十分に冷めない可能性があるので冷却が確実に行えるように処理量，冷却条件を定める。
- c) 実験によると50℃で貯蔵した場合には発熱性が見られたことから，冷却温度はそれよりも低くする。それが35℃であっても貯蔵中に時間経過とともに発熱する可能性は排除できない。

注) 2.5節の発熱性を調べた実験結果による。

(3) RDFの品質の維持

①水分

- a) 水分割合（含水率）は標準情報（TR）の規定⁵⁾ に従い，10%以下とする。ただし，RDFは水分割合とは関係なく発熱する可能性があるため10%が限界値とはならない。また，15%程度になると発酵が顕著になる可能性がある。

注1) TRはJIS制度を補完する制度。

注2) 数値目標として一定の管理は必要であるが，特に厳しい水分管理は必要ではないと考える。RDFは他の多孔性のものや粉体と同じように周囲湿度に応じて平衡し，水分の吸収（凝縮）と蒸発を繰り返している。RDFは周囲が高い湿度環

境にあれば吸湿側となるが、吸湿性が特に高いとはいえない。ただし、消火のための散水や水没でRDFを水に浸した状態は別である。

②粉化度

a) 粉化度は標準情報 (TR) の規定に従い⁵⁾、2%以下とする。

注) しかし、これは2mの高さから落下させた場合の結果であって、コンベアから貯蔵設備に投入するのはより高い場合が考えられることから、この値が管理上の限界値とはならないことに留意する必要がある。

4.3 RDF化製造施設における貯蔵時の防止対策

貯蔵の方式としてはサイロ (ホッパーを含む)、コンテナ、ピット (地下堆積)、ヤード (地上堆積、平積み) が採用できる。少量であれば、フレコン (フレコンバック) を用いることができるが、この場合はコンテナ方式を参考とする。以下、各貯蔵方式ごとの留意点を示す。

(1) サイロ方式

①材質、構造、設置など

- a) 発生熱量、放熱量などを勘案し、大量貯蔵とならないように区分けするなど蓄熱されにくい構造 (容積、形状、壁面の断熱性など) とする。
- b) 材料は金属製 (鋼製) とし、種々の荷重、耐震設計に対して十分な強度を有すること。設計は文献4)、5) などが参考となる。
- c) 屋内、屋外のどちらの設置も可とするが、雨水が入らないようにする。
- d) サイロは断熱性を高める必要はない。
- e) 結露防止のため、サイロの外と内の温度差が少なく換気があるほうが良い。
- f) 堆積できる高さは、発熱・発火防止、消火対策などが施された場合は現在、通常行われている通りでよいと考えられるが、不具合が生じた場合にはさらに追加した防止対策を講じる必要がある。
- g) 円筒の高さに比べ直径が小さい寸法をもつ「細い」サイロの場合には、層内から水平、周方向への放熱のため蓄熱が抑えられ、堆積できる高さは緩和される。
- h) 堆積できる高さは、取り扱うRDFについて、地域性、搬入搬出条件等を勘案し、実証実験で確認すべきである。このとき、実規模の実証実験が困難であり、小規模実験で実証実験を行う場合は安全率を勘案して堆積できる高さを定めるべきである。

②通風換気 (エアーレーション)

- a) 通風用の空気は、周囲温度あるいはそれよりも低い温度とし、湿った空気を用いない。
- b) 堆積層上方から空気を吹き込み、上方の別の箇所から吸引する方法がある。この方法では、発生したガスの希釈、排出が主な目的であり、堆積層内の発熱防止のための放熱効果は小さいものと考えられる。
- c) 堆積層下部ホッパー部から空気を吹き込み、上方から吸引する方法がある。空気温度が30~40℃では、他の条件によっては発酵の促進、化学反応の促進に寄与する可能性があるため、その雰囲気よりも低い温度、30℃より低い空気を導入することが望ましい。

③温度，ガス濃度の測定

- a) 堆積層内部の温度を測定する。
- b) 温度の測定にあたっては，
 - イ) サイロ中心軸に沿って複数点測定できる長尺の熱電対などを用いる。
 - ロ) これには，熱電対や測温抵抗体などをステンレス製の保護管などに入れたもの（以下，単に熱電対と記述する）とし，ガラス製の温度計は使用しない。
 - ハ) 棒が折れないように壁に支持部などを設ける。
 - ニ) 熱電対の支持部は，堆積したRDFの偏析を防止するようなじゃま板，分散板，仕切り板などと組み合わせてもよい。
 - ホ) 温度は常時計測とするが，日頃の変化の傾向を把握し，かつトラブル発生時の原因究明に資するデータに生かすため，一定時間ごと（例えば5～10分間隔）に自動記録できるようにする。
 - ヘ) サイロ上方から堆積層に向かって熱感知機や赤外線温度計を設けてもよい。この装置は警報温度が任意に設定できるものとする。
 - ト) 警報温度は50から60℃の範囲で定める。ホ)の常時計測において，警報温度が設定できる場合にはこの温度とする。

注) 50～60℃とはRDF成形過程の後の冷却機出口よりもやや高い温度を意味している。
- c) ガス濃度の測定に関しては，通風換気を行っている施設では常時計測を要するものではないが，必要に応じて使用できるように一酸化炭素，炭化水素，酸素濃度が測定できるもの（多成分ガスを一台でモニターできる携帯型装置など）を備えておく。
- d) 火災の検知を目的とするならば，ガス濃度分析の連続測定を行うよりは一般的な消火設備として使われる煙検知機を設けることでよいと考えられる。

④貯蔵期間，点検の周期

- a) 既にある施設の貯蔵量は週3～5日間の製造量を目安とし，1週間を超えて貯蔵することを想定していないが，上記①から③の対策を施した場合，最長貯蔵期間としては3週間～1ヶ月を目安とする。

注) 水分量（2.2節）と吸湿性の実験（2.3節）に基づくと，発酵が顕著になると考えられる程度15%に達するのは概算では21日となる。
- b) 点検と清掃の周期は貯蔵量の増減を勘案し，3週間から1ヶ月を目安として実施されるように計画する。

⑤緊急払い出し（緊急排出）

- a) 円滑に払い出しが完了するようにすること。なお，強力な振動機，空気噴射装置などをホッパー部に設けると良い。
- b) RDFが未燃焼，既燃焼の状態に限らず固着，ブリッジ（架橋）の発生を防止する。
- c) 緊急払い出しにより全量が払い出されても支障がない空間，敷地を確保する。

⑥発熱防止，消火装置

4.6と4.7を参照。

(2) コンテナ方式

①材質，構造，設置など

- a) 発生熱量，放熱量などを勘案し，大量貯蔵とならないように区分けするなど蓄熱されにくい構造（容積，形状，壁面の断熱性など）とする。
- b) 材料は金属製（鋼製）とするが，使用に耐える強度があれば，現在，通常に用いられているコンテナが使用できる。
- c) 輸送トラックに搭載する脱着式のコンテナも使用できるが，天蓋，屋根が付いたものとする。
- d) 貨物用の海上コンテナ（ISO規格）の寸法によると，長さ12，20，40フィート（それぞれ3.6，6，12 m），幅は2.4 m，高さは約2.6 mであり，これによると，堆積できる高さの目安は2 m程度となる。ただし，堆積できる高さは，取り扱うRDFについて，地域性，搬入搬出条件等を勘案し，実証実験で確認すべきである。
- e) 屋内，屋外のどちらの設置も可とするが，雨水が入らないようにする。
- f) コンテナは断熱性を高める必要はない。

②通風換気（エアーレーション）

- a) 強制通風は必ずしも必要ないが，コンテナは密封しないこと。
- b) 臭気対策を兼ねて通風換気を行ってもよい。4.3（1）②を参照。

③温度，ガス濃度の測定

- a) 堆積層内部の温度を測定する。
- b) 貯蔵中（運搬中を除く）は差し込み式，取り外し可能な熱電対を堆積層内に挿入し，温度の測定を行う。
- c) 温度の常時計測，熱感知や赤外線温度計の装置，警報温度の設定，煙感知は4.3（1）③を参照。
- d) ガス濃度の測定に関しては，4.3（1）③を参照。

④貯蔵期間，点検の周期

- a) 一つのコンテナ，1ロット（同日保管分など）貯蔵されたものは原則として，毎回全量排出する。
- b) 最長貯蔵期間としては，3週間から1ヶ月を目安とする。4.3（1）④を参照。

⑤緊急払い出し（緊急排出）

- a) 開閉部（開口部）を大きくし，排出しやすい構造とする。この開口部からは注水等の消火が円滑に行えるようにする。
- b) 緊急払い出しにより全量が払い出されても支障がない空間，敷地を確保する。

⑥発熱防止，消火装置

4.6と4.7を参照。

(3) ピット方式

①材質，構造，設置など

- a) 発生熱量，放熱量などを勘案し，大量貯蔵とならないように区分けするなど蓄熱されにくい構造（容積，形状，壁面の断熱性など）とする。
- b) ピットの深さ（堆積できる高さ）はコンテナの高さ程度（2 m）にとどめる。ただし，

堆積できる高さは、発熱・発火防止、消火対策などが施された場合には、サイロ方式（4.3（1）①）に記した同じ考えでよい。なお、堆積できる高さは、取り扱うRDFについて、地域性、搬入搬出条件等を勘案し、実証実験で確認すべきである。

- c) 内壁を金属製にするなどし、放熱を促進させる。
- d) 雨水が入らないようにする。
- e) この方式では構造上、初めに投入したRDFの先入れ先出しの原則が確保されないことから、堆積層下部のRDFは圧密となり、細かく碎け、古いものが残り、微生物が繁殖する環境を作る可能性があるため、底部及び隅部に圧密されたものが長期にわたって堆積されることがないよう留意する。
- f) ピット方式は地下堆積を原則とするため、構造上、上記の留意点に対応することが困難な場合があるため、本質的な措置が困難な場合にあつては、下記②及び③に特に留意し、貯蔵期間の管理等を確実にを行うとともに、発熱・発火防止、消火対策等を適切に実施する必要がある。

②貯蔵期間，点検の周期

- a) 一区画で貯蔵されたものはできるだけ毎回全量排出する。
- b) 一区画で残ったRDFがそのまま長期間保管されないようにRDFを積み替える。
- c) 最長貯蔵期間としては、3週間から1ヶ月を目安とする。4.3（1）④を参照。

③発熱防止，消火装置

- a) ピットでは可燃ごみの取り扱いと同等の消火対策が必要であることに留意する。なお、この場合4.2（1）①の対策が必要となる。
- b) 4.6と4.7を参照。

(4) ヤード方式

①材質，構造，設置など

- a) 発生熱量，放熱量などを勘案し，大量貯蔵とならないように区分けするなど蓄熱されにくい構造（容積，形状，壁面の断熱性など）とする。
- b) RDFと接する床と仕切壁は金属製とする等放熱が促進されるものとする。
- c) 屋根を設け，雨水が入らないようにする。
- d) できるだけ堆積する高さが低くなるように留意する。堆積は山積みではなく，高さが低くなるようにできるだけ平積みになるようにする。
- e) 堆積できる高さは実験等を行って別途定める必要がある。

注) RDFの安息角と区画の寸法，焼却処理へ運び出せる量など総合的に勘案すれば高さは現実的には4.3（2）コンテナ方式の高さ（2m）が適当であると考えられる。

②通風換気（エアーレーション）

- a) 密封せず通風を確保する。

③温度，ガス濃度の測定

4.3（2）③を参照。

④貯蔵期間，点検の周期

- a) 先入れ先出しを原則とし，一区画で貯蔵されたものはできるだけ毎回全量排出する。
- b) 一区画で残ったRDFがそのまま長期間保管されないようにRDFを積み替える。

c) 最長貯蔵期間としては、3週間から1ヶ月を目安とする。4.3 (1) ④を参照。

⑤発熱防止，消火装置

4.6と4.7を参照。

4.4 RDF消費施設における防止対策

①一般事項

- a) 各地域のRDF化製造施設のごみの種別，成分を把握し，それにより消費されるRDFについて，性状（成分，物理的，化学的，生物学的特性など）を十分に把握する。
- b) トラブルなどでいつもと異なる経路や，仮置きされていたものなどが搬入された場合には注意を払う。
- c) RDFの性状，燃焼特性に応じた機器・設備の見直しを行う。
- d) RDFの処理が滞らないようにする。

②安全教育の実施

③RDFの受け入れ

- a) 受け入れたRDFに不良品が混じっていたような場合について，製造施設側に速やかに改善の要請を行うこと等により品質の維持に常に留意する。
- b) 不良品が混じったRDFは他のものと混ぜて貯蔵せずに別途保管し，早期に焼却過程で処理する。

4.5 RDF消費施設における貯蔵時の防止対策

(1) サイロ方式

①一般事項

- a) 4.3 (1) ①を参照。
- b) 大型のサイロではブリッジ（架橋）が出来る等を防止し，常に円滑に排出できる構造，機構を有すること。
- c) サイロの寸法が大きくなり貯蔵する堆積量が増えると，堆積層内での四方への放熱量よりも発熱量がまさり蓄熱しやすいことに留意する。
- d) 一つのサイロにおける堆積量を減らすため，サイロは小分けにし，複数設けることが望ましい。

②通風換気（エアーレーション）

- a) サイロのホッパー部からは乾燥空気が噴出すようにする。
- b) 場合によっては，回路を切り替え，ここから不活性ガスを投入したり逆に吸引できるようにする。

③温度，ガス濃度の測定

4.3 (1) ③を参照。

④貯蔵期間，点検の周期

- a) 4.3 (1) ④を参照。
- b) サイロを複数，必要基数設置し，1ヶ月以内を目安に一つのサイロが空になるようにローテーションを組み，その都度空になったサイロの点検などを実施する。

⑤緊急払い出し（緊急排出）

4.3 (1) ⑤を参照。

⑥発熱防止，消火装置

4.6と4.7を参照。

(2) コンテナ方式

4.3 (2) を参照。

(3) ピット方式

4.3 (3) を参照。

(4) ヤード方式

4.3 (4) を参照。

4.6 貯蔵施設における有効な温度管理の方法について

①発熱防止

a) RDFの品質の維持については4.2 (3) 参照。

b) 放熱を促すような堆積方法を採用（4.3参照）。

c) 一区画の堆積量を制限し，分散化を図る。

d) 通風による換気を行う。ただし，通風用の空気は，周囲温度あるいはそれよりも低い温度とし，湿った空気を用いてはならない。30℃以下の空気が望ましい。

e) 不活性ガスの添加。ただし，サイロ内への不活性ガスの連続封入は周囲への漏えいに対する追加対策が必要となる。

②温度の測定方法

a) 堆積層内部の温度を測定する。

b) 堆積層では一般的に中央付近が蓄熱しやすいことから，層内の温度分布が測定できるように複数の測定点をもつ熱電対あるいは測温抵抗体を埋め込んだ棒状の温度計を用いる。

③温度測定の周期について

a) 定時巡回の都度に測定を行っても良いが，自動計測とすることが望ましい。この場合は一定間隔で自動記録する装置を設け，警報温度を設定すること。警報温度は4.3 (1)

③参照。

4.7 RDF貯蔵施設における有効な消火方法及び消火設備等について

(1) 有効な消火方法

①注水

②不活性ガスの封入

a) 入手しやすいものとしては，窒素や二酸化炭素（炭酸ガス）がある（それぞれ液体窒素，ドライアイスも含む）。

b) 窒素は空気よりも軽く，二酸化炭素は空気よりも重いガスであり，貯蔵槽において，窒素は下から，二酸化炭素は上から吹き込むとより効果的である。押込と吸引（プッシュ・プル）の流れに対応するような換気システムを採用。

c) 不活性ガスによる消火では消火が確認されるまで時間と日数を要することに留意する。

注) 海外の穀物サイロの火災では、上記 (b) のようにして1ヶ月以上かかって消火が達成できた事例がある⁸⁾。ただし、火災時には上昇気流が伴うため、消火用のガスは上からよりも下から封入したほうが効果があると考えられる。

d) 液体窒素は液体状態で注入されれば周囲の気化潜熱を奪うが、注入途中で気化してしまふことにより、予想よりも冷却効果が期待できない可能性があることに留意する。

(2) 消火設備

①散水装置

②不活性ガスの封入装置

③屋内屋外消火栓の設置

これらの設置は関係機関との協議による。

(3) 連絡体制

a) 施設の休業日などで無人となる施設では、各種警報が警備・管理会社や市町村役場当直などに連絡が入る体制を整備する。

b) 各種警報の信号が正しく伝わっているかどうか動作の確認を実施する。

c) 関係機関の連絡体制は必要に応じて見直し、消火作業体制の再整備を図る。

(4) その他

a) 消火後もRDFが高温に置かれると、熱分解が進行し、可燃性ガスが発生し、時間の経過により、再燃によりガス爆発が生じる可能性があることに留意する。

b) 消火作業中は、着火源となり得る物の携行、着火を引き起こす行動は行わない。

c) a) に記した通り、消火作業中に爆発・火災により二次的な災害を引き起こす可能性があるため、適切な消火方法、消火設備等の確保はもとより、貯蔵施設の計画や貯蔵方式の決定の際には、本章の内容に十分に留意の上、本質的に発火することのないようなものとするのが望ましい。

第4章の参考文献

- 1) 破碎処理施設の火災と爆発事故防止対策マニュアル，社団法人全国市有物件災害共済会，（平成10年）
- 2) 上原陽一監修，防火・防爆対策技術ハンドブック，（株）テクノシステム（1994）
- 3) 爆発圧力放散設備技術指針，NIIS-TR-No.34（1998），労働省（現 独立行政法人）産業安全研究所
- 4) 労働省（現 厚生労働省）安全課編，新版乾燥作業の安全-乾燥設備作業主任者テキスト-，中央労働災害防止協会（1997）
- 5) 標準情報（TR：Technical Report）Z 0011：1999廃棄物固形化燃料
- 6) 日本建築学会編，容器構造設計指針・同解説，1996年改定版，（社）日本建築学会，丸善，（1996），5章サイロ，pp.111-147
- 7) 狩野 武，粉体輸送技術，日刊工業新聞社，（1991），pp.323-356
- 8) Eckhoff, R. K., Dust Explosions in the process Industries, Second Edition, Butterworth-Heinemann, 1997, UK, pp.183-186

資料（1）三重県多度町の発電所のRDF貯蔵サイロにおける爆発災害

三重県多度町にある「三重ごみ固形燃料発電所」では、三重県内26市町村・3市4組合のRDF化施設で製造されたRDFが搬入され、貯蔵サイロに保管した後、コンベアで燃焼炉に運ばれボイラ加熱により発電が行われていた。

平成15年8月14日午前3時12分頃、RDF貯蔵サイロ内で小爆発が発生し、かき出し作業と監視にあっていた作業員4名が火傷、打撲など負った。その後もサイロ内でRDFが燃焼を継続していたため消防による消火活動が行われていたが、19日午後2時18分頃、当該サイロが爆発し、サイロの屋根で消火活動を行っていた消防士2名のうち、1名が屋根とともに飛ばされ、もう1名はサイロの脇に転落し、またサイロ側面に消火散水用の開口部を設けようとガス溶断作業を行っていた作業員3名のうち1名が退避する際に腰を強打した。

資料（2） 廃棄物を含む同種災害の事例

表 新聞報道などによる主な事例（平成13年以降、平成16年3月まで。ただし、平成7年の事例を含む）

年月日	場 所	概 要	死傷者数
平成16年／ 2月9日	大阪府 堺市	ごみ焼却施設内の粗大ごみ貯留槽（縦、横各10m、深さ16.4m）内のごみから煙が上がっているのを職員がを見つけ、タンク車など車両11台が出動し、約4時間後に煙はおさまった。（読売新聞大阪、朝刊）	なし
平成15年／ 12月29日	神奈川県 横須賀市	産業廃棄物処理会社のリサイクルセンターから出火し、工場と、工場内にあったごみ固形燃料（RPF）約5tを焼いた。（読売新聞東京、朝刊）	なし
12月20日	京都府 宇治市	〔サイロ爆発〕アスファルト製造工場で、直径約3m、高さ約10mの円筒形アスファルト貯蔵タンクが爆発、上部が吹き飛んだ。パーナーを使って配管の詰まりを修理中だった。（火災学会、火災、268号）	死亡1名
11月20日	福岡市	同市東部清掃工場の集積場のごみから出火、市消防局が消火にあたったが、下火になった後もしばらくくすぶり続けた。（読売新聞西部、福岡、朝刊）	なし
11月5日	神奈川県 大和市	〔生ごみ処理施設で爆発〕市内スーパーで生ごみを発酵させて堆肥化する処理施設から煙が発生。消防などが消火活動を準備中の同5時10分頃、爆発が起きて建物側壁が壊れた。（火災学会、火災、268号）	負傷11名

年月日	場 所	概 要	死傷者数
10月15日	石川県 志賀町	[RDF貯蔵サイロで異常発熱] RDF貯蔵サイロで異常発熱，窒素ガス注入(火災学会。火災267号)	なし
9月23日	福岡県 大牟田市	[RDF貯蔵サイロで異常発熱] RDF貯蔵サイロで異常発熱，窒素ガス注入。(火災学会，火災，267号)	なし
9月3日	茨城県内	[ゴミ固形燃料製造・利用施設，出火など4件，設備の再点検指示] 三重県多度町のごみ固形燃料(RDF)発電所の爆発事故を受け，茨城県は2003年9月3日までに，RDFを扱う施設を緊急調査し，茨城県内でも出火や発熱など4件の異常事態が発生していたことを確認した。県内でRDFを製造，利用しているのは計13施設。県は9月3日までに12施設の調査を終えた。その結果，「保管場所に長期間残っていたRDFが発酵して発熱した」「RDFのクズがほこり状にたまって出火した」「廃プラスチックの固形燃料が出火した」など4件の異常が確認された。いずれも施設側がすでに再発防止策をとっていた。また，残る1施設でも製造設備で出火があったとの情報があり，確認中。(読売新聞東京，茨城東，朝刊)	
8月14日 19日	三重県 多度町	[ごみ固形化燃料施設で爆発]ごみ固形燃料(RDF)発電所のRDF貯蔵サイロで爆発が発生，その後も発熱が続き，19日午後2時20分頃，サイロ上部点検口から内部へ直接放水していたところ爆発が発生，天井部が吹き飛び，上にいた消防職員2人死亡，(火災学会，火災，267号)。	14日 負傷4名 19日 死亡2名， 負傷1名 (19日は消防士2名死亡)
7月22日	兵庫県 赤穂市	セメント工場の石炭貯蔵庫(約1000t貯蔵)で爆発があった。石炭が発熱したため，除去や冷却作業などをしていらしい。(火災学会，火災，265号)	負傷2名
7月20日	三重県 鈴鹿市	鉄骨平屋建て倉庫に保管されているRDF(ごみ固形化燃料)が発熱し，煙か水蒸気が上がっているのを，倉庫に保管を委託していた会社の関係者が見つけ，同市消防本部に連絡した。(読売新聞中部朝刊，三重A)	なし
6月3日	愛知県 豊田市	産業廃棄物処理会社の中間処理施設付近から出火。隣接する最終処分場などに燃え移り，野積みされている廃棄物の一部を焼いた。(朝日新聞，名古屋，夕刊)	なし
4月17日	群馬県 榛名町	ごみ処理施の粗大不燃ごみ処理貯留槽で，不燃ごみの一部から出火した。(読売新聞東京，群馬西，朝刊)	なし
平成14年/ 12月23日	三重県 多度町	RDF貯蔵槽(高さ30m,直径15mの円筒形)の下部で異常な発熱が見つかり，一部のRDFが蒸し焼きになっていた。貯蔵槽は，焼却前のRDFをためておく施設で，火の気はなく，発火原因を調べている。貯蔵槽の容量は約2000tで，発火当時はほぼ満杯だった。(読売新聞中部朝刊，三重A)	なし

年月日	場 所	概 要	死傷者数
6月13日	栃木県 真岡市	解体業の廃車置き場から出火，山積みになっていた廃タイヤ約8万4千本を焼き尽くし，約15時間後に鎮火した。（朝日新聞朝刊，東京）	なし
平成13年／ 12月3日	鹿児島市	肉骨粉業者の倉庫で火災が発生した。約1000tの肉骨粉がビニール袋に入れて山積みされていた。自然発火か。（火災学会，火災，256号）	なし
9月3日	横浜市	産業廃棄物処理会社の廃材置き場で火災が発生し，約10mの高さに野積みされた約5000立米の廃材がくすぶり続け39時間後に鎮火した。約1000平米を焼いた。（火災学会，火災，254号）	なし
6月5日	新潟県 紫雲寺町	紫雲寺町真野原外の松林で5日午後7時40分ごろ出火した火災は，野積みされた古タイヤ約6万5000本と周囲の松林を焼いて約11時間後に鎮火した。投棄した業者とは連絡が取れず，撤去の見通しが立たない状態だった。県内にはこのほかにも80万本近い古タイヤが不法投棄されており，県も処理に乗り出している。（朝日新聞朝刊，東京）	なし
5月16日	香川県 坂出市	産業廃棄物積み替え保管施設で16日夜から約22時間以上にわたって，野積み状態の紙や木ぎれ，プラスチック類などのごみの山が燃え続けた。（朝日新聞朝刊，大阪）	なし
平成7年 12月25日	茨城県 鹿島郡	鋼板製貯蔵サイロ20連からなるサイロ群の1つにおいて，約44トンの固化した飼料用副原料（とうもろこしの胚芽の皮）を貯蔵中，突然サイロが爆発した。原因は，飼料粉の湿潤部分にカビが発生し，発酵熱と太陽の輻射熱が粉体層内で蓄積して自然発火し，一酸化炭素などの熱分解ガス，あるいは，ある種の菌が放出した水素，が空気と混合し爆発，粉じん爆発も併発したものの。（産業安全研究所）	なし

資料 (3) 発熱性実験の結果 (表)

実験番号	実験条件										実験結果				
	RDFの状態 (破砕,長さ)	充てん 容器の 大きさ	容器 開閉 の有 無	恒温槽 内の温 度 T_0 [°C]	充てん容器 内のガス種	追加水 分割合 Ω_w [%wt]	期 間	RDF 試料 番号	RDF 充てん量 m_0 [g]	充てん層 かさ密度 [g/L]	RDF 試料 番号	充てん層 平均温度 T_{av} [°C]	充てん層 の 最高温度 T_{max} [°C]	温度上昇 $\Delta T = T_{max} - T_0$ [°C]	備 考
1	粗破砕	小 ($\phi 70 \times 90$ mm), 0.346L	密閉	36	空気 (21% $O_2 + 79\%$ N_2)	0	9日間	No. 1	107.5	311	No. 1	32.9	33.5	+4.4 +3.2 +0.8 +5.6 +0.5	・各容器3点ずつ計測 ・No.8のRDF試料は温 度上昇
								2	110	318	2	33.7	34.3		
								3	114.8	332	3	34.2	35.2		
								4	105.4	305	4	34.4	34.6		
								5	106.4	308	5	34.2	34.9		
								6	92.8	268	6	34.3	34.9		
								7	100.6	291	7	32.0	33.0		
								8	109.8	317	8	39.7	39.6		
								9	117.1	338	9	32.2	33.1		
								10	103.9	300	10	34.2	34.6		
2	粗破砕	小	密閉	50	空気	0	6日間	No. 1	82.7	239	No. 1	52.2	54.4	+4.4 +3.2 +0.8 +5.6 +0.5	・各容器3点ずつ計測
								2	111.6	323	2	47.6	47.9		
								3	97.2	281	3	52.7	53.2		
								4	91.7	265	4	48.8	48.9		
								5	98.6	285	5	50.2	50.8		
								6	94.6	273	6	49.0	49.5		
								7	94.6	273	7	45.4	46.2		
								8	110.3	319	8	54.5	55.6		
								9	106.5	308	9	47.5	48.8		
								10	92.7	268	10	49.1	50.5		
3	粗破砕	小 容積2倍	半密閉	35	空気	0	6日間	No. 1	90.9	263	No. 1	37.4	40.5	+5.5 +5.5	・各容器3点ずつ計測
								2	92.1	266	2	31.9	32.5		

4	粗破砕	小	(たただし、充てんは容積の半分)	37	空気	30	7日間	No. 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10	91.7 91.1 91.1 91.6 91.1 91.8 91.7 91.3	265 263 263 265 263 265 265 264	3 4 5 6 7 8 9 10	35.1 30.8 29.9 30.6 31.9 30.7 30.5 31.3	36.2 31.9 31.1 31.8 32.7 31.8 32.0 32.6	+1.2	・各容器3点ずつ計測
5	10mm長さ	小 容積2倍	半密閉	36	空気	0	7日間	No. 1 3 5 8	90.9 154.7 161.6 166.7	263 447 467 482	No. 1 3 5 8	36.8 31.1 29.9 36.4	39.0 32.0 30.8 37.4	+3.0 +1.4	・No.1のRDF試料は砕けていたため、粗破砕と同じ状態（そのままの状態）で使用した。
6	粗破砕		半密閉	36	空気	30	7日間	No. 1 3 5 8	90.5 90.4 90.8 90.5	262 261 262 262	No. 1 3 5 8	32.1 30.5 29.6 31.0	32.5 31.2 30.7 31.7		
7	10mm長さ	小	上部開放	35	空気	30	5日間	No. 1 3 5 8	77.2 160.5 154.2 165.7	223 464 446 479	No. 1 3 5 8	31.9 32.5 31.1 29.7	33.7 34.9 32.2 31.2		・No.1のRDF試料は砕けていたため、粗破砕と同じ状態（そのままの状態）で使用した。

8	粗破砕	小	上部開放	35	空気	30	5日間	No. 1	71.5	207	No. 1	31.7	34.3			・上部開放の場合は、1日1回10秒を目安に恒温槽の換気を行う。ただし、ガス分析も行う場合を除く。
9	10mm長さ	小	密閉	35	空気	15	6日間	No. 3	161.1 157.4 151.4	466 455 438	No. 3	30.3 30.6 28.8	32.8 33.0 31.7			
10	粗破砕	小	密閉	35	空気	15	6日間	No. 3	95.0 93.9 98.4	275 271 284	No. 3	27.3 28.2 28.2	30 30.5 31.2			
11	元の長さ	中 (φ160 × 160mm), 3.21L	密閉	35	空気	15	6日間	No. 3	1632 1674	508 521	No. 3	42 30.7	45.6 34			・温度測定は充てん層の中央で行う。
12	元の長さ	中	上部開放	35	空気	0	5日間	No. 3	1739	542	No. 3	34.4	37	+2.0		
			〃			〃		5	1752	546	5	30.4	31.3			
			〃			15		〃	1701	530	〃	31.7	34.8			
			密閉			〃		〃	1687	526	〃	32.8	34.3			
			〃			〃		〃	1612	502	〃	30.5	32.5			
13	元の長さ	中	上部開放	36	空気	15	4日間	No. 2	1561	486	No. 2	37.3	42	+6.0		・温度上昇が大きい
								6	1441	449	6	36.2	45.1	+9.1		
								7	1673	521	7	32.8	37.3	+1.3		
								9	1651	514	9	34.8	40.8	+4.8		
								10	1674	521	10	32.7	37.7	+1.7		

14	元の長さ	中	上部開放	50	空気	15	5日間	No. 5	1469	458	No. 5	51.3	57.8	+7.8	・No.5の温度上昇が大きい。 ・密閉よりも開放状態のほうが温度上昇が大きい。 ・No.8のものは温度上昇が見られない。 ・不活性ガス添加
			〃			30		〃	1471	458	〃	57.4	63.4	+13.4	
			密閉			〃		〃	1485	463	〃	48.7	54	+4.0	
			上部開放			15		8	1610	502	8	42.7	46.2		
			〃			30		〃	1767	550	〃	40.6	44.3		
15	元の長さ	中	密閉	34	3.9%O ₂ in N ₂	15	6日間	No. 2	1566	488	No. 2	34.1	38.4	+4.4	
						〃		〃	1572	490	〃	29.7	35.0	+1.0	
						〃		5	1489	464	5	29.1	31.8		
						〃		〃	1520	474	〃	28.8	31.6		
16	元の長さ	中	密閉	50	3.9%O ₂ in N ₂	15	5日間	No. 2	1566	488	No. 2	53	54.2	+4.2	・不活性ガス添加
						〃		〃	1572	490	〃	48.6	49.7		
						〃		5	1489	464	5	44.2	45.2		
						〃		〃	1520	474	〃	44.3	45.4		
17	元の長さ	中	上部開放	70	空気	0	6日間	No. 5	1573	490	No. 5	71.9	78.5	+8.5	・1日1回10秒間換気 ・実験18と同じ条件
			〃			15		〃	1559	486	〃	59.4	60.9		
			密閉			30		〃	1569	489	〃	60.9	64.8		
			上部開放			15		〃	1566	488	〃	62.6	63.2		
			〃			〃		8	1675	522	8	51.1	58.6		

18	元の長さ	中	上部	70	空気	0	6日間	No. 5	1646	513	No. 5	67.2	71.5	+1.5	・ 1日1回10秒間換気 ・ 実験17と同じ条件
			開放			15		〃	1561	486	〃	58.2	62.0		
			〃			30		〃	1648	513	〃	61.5	65.5		
			密閉			15		〃	1561	486	〃	61.3	64.4		
			上部			〃		8	1712	533	8	53.2	57.4		
			開放												

温度測定はK型熱電対（クロメル-アルメル，被覆管入り，直径1.6 mmφ）を使用した。

資料（４） 発熱性実験に付随して行ったガス分析の結果（表）

実験番号	RDF試料番号と条件					成分濃度%				
						H ₂	O ₂	CO	CO ₂	CH ₄
2	1	粗破碎 小容器	密閉	50℃	水分 添加 0%	0	—	0.0059 (59ppm)	0	0.0327
	2					0	—	0	0	0
	3					0	—	0.0125 (125ppm)	0	0
	4					0	—	0	0	0
	5					0	—	0	0	0
	6					0	—	0	0	0
	7					0	—	0	0	0
	8					0	—	0.0138 (138ppm)	0	0
	9					0	—	0	0	0
	10					0	—	0	0	0
3	1 ～ 10	粗破碎 小容器 容積2倍	半密閉	35	0	0	—	0	0	0
4	1	粗破碎 小容器	密閉	37	30	0	—	0	11.5	0
	2					0	—	0	12.1	0
	3					0	—	0	14.0	0
	4					0	—	0	4.4	0
	5					0	—	0	11.7	0
	6					0	—	0	9.2	0
	7					0	—	0	4.09	0
	8					0	—	0	0.146	0
	9					0	—	0	0.222	0
	10					0	—	0	0.12	0
5	1	10mm長さ 小容器 容積2倍	半密閉	36	0	0	—	0	0	0
	3					0	—	0	0	0
	5					0	—	0	0	0
	8					0	—	0	0	0
6	1	粗破碎 小容器 容積2倍	半密閉	36	30	0	—	0	17.01	0
	3					0	—	0	9.3	0
	5					0	—	0	5.75	0
	8					0	—	0	12.02	0

7	1	10mm長さ 小容器	上部 開放	35	30	0	—	0	0	0
	3					0		0	0	0
	5					0		0	0	0
	8					0		0	0	0
8	1	粗破碎 小容器	上部	35	30	0	—	0	0	0
	3					0		0	0	0
	5					0		0	0	0
	8		開放			0		0	0	0
9	3	粗破碎 小容器	密閉	35	15	0	—	0	0	0
	5					0		0	0	0
	8					0		0	0	0
10	3	粗破碎 小容器	密閉	35	15	0	—	0	0	0
	5					0		0	0	0
	8					0		0	0	0
11	3	元の長さ 中容器	密閉	35	15	0	—	0	0	0
	8					0		0	0	0
12	3	元の長さ 中容器	上部 開放	35	0	0	15.1	0	0.0144	0
	5				〃	0	—	0	0	0
	5				15	0	—	0	0	0
	5		密閉		〃	0	8.06	0	13.2	0
	8		〃		0.76	16.4	0	5.43	0	
13	2	元の長さ 中容器	上部 開放	36	15	0	—	0	0	0
	6				〃	0	—	0	0	0
	7				〃	0	16.4	0	0.057	0
	9				〃	0	—	0	0	0
14	5	元の長さ 中容器	上部 開放	50	15	0	0	0	0	0
	5				30	0	0	0	0	0
	5		密閉		〃	0	6.8	0	15.5	0
	8		上部 開放		15	0	0	0	0	0
	8		開放		30	0	0	0	0	0
15		不活性ガス				—	—	—	—	—
16		不活性ガス				—	—	—	—	—
17	5	元の長さ 中容器	上部 開放	70	0	0	—	0		0
	〃				15	0	—	0	0	0
	〃				30	0	—	0	0.0155	0
	〃		密閉		15	2.87	5.9	0.00669	10.2	0
	8		上部 開放			0		0	0	0

18	5	元の長さ 中容器	上部 開放	70	0	0	0	0	0	0
	〃				15	0	0	0	0	0
	〃				30	0	0	0	0	0
	〃		15		7.27	5.26	0.00556	22.8	0	
	8	〃	0		0	0	0	0		
			密閉							
			上部 開放							

ガス分析の条件

測定装置：ガスクロマトグラフ GC-14B（島津製作所）

カラム：SHINCARBON ST 50/80mesh 2M×3mmφステンレス，

同時検出対象ガス：O₂，CO，CO₂，CH₄，C₂H₄，C₂H₆

カラム温度：40～200℃，昇温速度：20℃/min，キャリアガス：He，

検出器：TCD，検出器温度・注入温度・TCD温度：210℃，試料注入量0.5mL

資料（5）高温熱面上に堆積した場合の燃焼挙動に関する実験方法

(1) 実験1

実験1はASTM E 2021³⁾ に準拠した方法で行った。実験には，温度を制御できるホットプレートを使い，加熱面上に直径100 mm，12.6 mm（ハーフインチ）の薄い板厚のステンレス製リング（外枠）を設置し，粗破碎したRDFを堆積させた。堆積させるときはASTMの方法に従い，熱面が予め所定の温度になった後，2分以内に試料をリング内に堆積させるようにした。ただし，粗破碎された試料は外枠上面よりはみ出しやすかったため，厳密に堆積層の厚さ（高さ）を12.6 mmにそろえず，2分以内にそろえやすい厚さであった15 mmを一定厚さと定めた。なお，堆積させる際にはへらを使って平らに均（なら）したが，加圧は行っていない。

実験中は堆積層の底面の温度と層中心の温度を測定し，中心の温度（堆積円筒の中心軸で厚さの半分高さ）が20℃以上の温度上昇を生じた場合を着火したものと判定した（ASTMによる）。不着火は50分経過しても温度上昇がない場合とした。試料としては必要量がcaろうじて確保できたNo.3のRDFを用いた。

(2) 実験2

実験2ではRDFの粗破碎を行わず，ペレット状のまま150 mm厚さに堆積させた場合の最低着火温度を調べた。実験1に使用したステンレス製金属外枠の熱伝導率はRDF堆積層よりも大きいいため，加熱面からの熱は堆積層内よりも速く金属枠内を上方に伝わる。すなわち，熱流が先回りするため，円筒形のRDF堆積層に対して，周方向と底面方向から加熱したような状態となる。粉体の場合には粒子径とステンレス外枠の大きさ，そして外枠と層内の熱伝導率からすると，実験1ではその熱伝導の影響はあまり問題とはならないが，ペレット状のRDFを150 mmに堆積させた場合には最低着火温度に及ぼす影響が懸念される。下面からの加熱を実現するため，外枠を断熱材に替え，ただし外枠の寸法を内径160 mm，厚さ（高さ）を170 mmと大きくした。

断熱材の板厚は50 mmである。RDF試料は粗破碎せずに層の厚さが150 mmになるように堆積させた。この堆積層の容積は、ちょうどRDFの発熱性実験（2.5節参照）の中容器の大きさに等しい。

実験では未燃焼から着火後燃え広がるまでの層内の温度変化を把握するため、4本のK型熱電対（クロメル-アルメル熱電対、直径1.6 mm被覆管入り）を層内に埋め込み、層内の中心軸の温度測定を行った。試料としてはNo.5のRDFを用いた。

注）本来、実験1との比較の点ではNo.3のRDFを試料として使うべきであるが、同じ条件のRDF必要量を確保できなかったため、実験2では入手できたNo.5のRDFを用いた。

資料（6） くすぶり燃焼の際の発生ガス（表）

下表に示した分析対象ガスはH₂、O₂、CO、CO₂、CH₄である。ただし、C₂H₄とC₂H₆は検出されなかったため表に加えなかった。

実験番号	ガス成分(%) 実験条件	H ₂	O ₂	CO	CO ₂	CH ₄
		1	試料No.3のRDFを粗破碎したもの 15mm堆積	0	17.3	0.484
2	試料No.9のRDF 中容器（ステンレス、側壁からの通気性なし） 150mm堆積	0	17.1	0.546	0.0659	0
3と4	試料No.9のRDF セラミックスウール（通気性あり）中容器サイズ 150mm堆積	0	19.0	0.0629	0	0
		0	19.6	0.00375	0	0
5	試料No.7のRDF セラミックスウール（通気性あり）中容器サイズ 150mm	0	19.0	0.0728	0	0

産業安全研究所安全ガイド NIIS-SG-NO.3 (2004)

発行日 平成16年9月24日
発行所 独立行政法人 産業安全研究所
〒204-0024 東京都清瀬市梅園1丁目4番 6号
電話 0424-91-4512 (代)

印刷所 株式会社 アトミ

SAFETY GUIDE
OF
THE NATIONAL INSTITUTE OF INDUSTRIAL SAFETY

NIIS - SG - NO.3 (2004)

Guide for Explosion and Fire Hazards of Refuse
Derived Fuel (RDF) and Their Safe Handling



THE NATIONAL INSTITUTE OF INDUSTRIAL SAFETY

1-4-6, Umezono, Kiyose, Tokyo 204-0024, JAPAN