

## ごみ固形燃料(RDF)の自然発熱特性について

～ RDF は本当に発酵により発熱して火災を引き起こしたのか！～

環境計画センター

技術士(衛生工学・建設・環境)・環境カウンセラー(事業者部門)、

専任理事 鍵谷 司(かぎやつかさ)

はじめに

1. RDF の発熱に関する報告書の概要(省略) ----- 1
  - ① 三重県「ごみ固形化燃料発電所事故調査最終報告書」；平成 15 年 11 月 22 日
  - ② 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報告書」；平成 15 年 12 月
  - ③ 原子力安全・保安院 電力安全小委員会  
「ごみ固形燃料発電所事故調査ワーキンググループ報告書」；平成 15 年 12 月 15 日
  - ④ 環境省 「ごみ固形燃料の適正管理方策について」；平成 15 年 12 月 25 日
  - ⑤ 独立法人 消防研究所  
「三重県 RDF 焼却発電施設における RDF 貯蔵槽火災原因調査報告書」；平成 17 年 3 月
  - ⑥ 大牟田 RDF 貯蔵貯蔵槽安全対策の有効性実機検証試験評価委員会  
「大牟田 RDF 貯蔵貯蔵槽安全対策の有効性実機検証試験評価報告書」；平成 20 年 6 月
  - ⑦ 消防危第 333 号 平成 20 年 8 月 29 日 消防庁危険物保安室長 通達  
「再生資源燃料における廃棄物固形化燃料等の安全対策について」
2. RDF 保管時における発酵発熱の問題点 ----- 3
  - (1) 事故原因専門委員会による発熱原因の究明
  - (2) 発酵・発熱メカニズムの疑問点
  - (3) 解明された発熱原因は「RDF の酸化・蓄熱である」
3. RDF 保管時における発熱に関する Q&A ----- 6
  - Q-1；三重県事故原因「発酵発熱メカニズム」はなにが問題なのか！
  - Q-2；有機物の発酵反応と酸化反応の特徴的なことはなにか！
  - Q-3；有機物の酸化反応が起こった根拠はなにか！
  - Q-4；発酵しない廃プラスチックも発熱するのか！

## はじめに

平成 15 年 8 月 19 日に発生した三重県 RDF 発電所貯蔵サイロの火災・爆発事故は極めて衝撃的な事故であり、その後のリサイクルの推進に大きな影響を与えた。同時期に稼動した各地の RDF 発電所の貯蔵サイロにおいても発熱・発煙事故が発生し、連日のごとくマスコミに取り上げられた。三重県や国の専門委員会は短期間で発熱原因を究明し、「RDF が空気中の水分を吸湿して発酵し、発熱したことが原因である。」とし、これを防止するために RDF の水分率の低下、石灰の 1 % 以上添加など発酵防止に焦点をあてた法規制が行われた。

ところで、RDF 貯蔵サイロの火災・爆発に至るまでの事故経緯によると、保管倉庫においても発熱や発煙が起こっており、RDF の発熱を示唆する多くの前兆が確認されていた。また、事故原因調査においては、発熱原因の究明を急ぐあまり、発熱に関する諸現象を科学的に検証することもなく発酵発熱説に固執し、誤った情報を提供してしまった。

全国紙やテレビ等のマスコミがこの発酵発熱説を連日報道したため、社会に「RDF は発酵発熱する危険な燃料である。」との風評が定着してしまった。その後、三重県と同様の RDF 発電を実施している大牟田リサイクル発電所では、事業主体である(株)電源開発、大牟田市や福岡県が委員会を構築し、4 間にわたって発熱原因を詳細に検討した結果、主たる発熱原因は RDF の酸化・蓄熱によるものと結論され、平成 20 年 8 月に消防庁より全国の関係機関は通達されている。

今後、エネルギー源及び二酸化炭素削減の視点から見直しが行われると考えられる RDF について、必ず問題と成る発酵発熱について「素朴な疑問」に答える形式で解説する。

### 1. RDF の発熱に関する報告書の概要(省略)

平成 15 年 8 月の三重県 RDF 発電所の火災事故後に、公的機関において事故原因の究明が行なわれ、短期間に発熱原因が特定され、発熱防止対策等が通達、規制等が行われた。その概要は以下の①から④の報告書に基づくものであるが、その後、総務省消防研究所及び大牟田 RDF 貯蔵貯蔵槽安全対策の有効性実機検証試験評価委員会による調査・検証試験によれば、主たる発熱原因は違うことが指摘された。

つまり、従来の発熱原因は発酵による発熱としてきたが、酸化反応に伴う発熱であることが実験的及び理論的に明らかにされている。以下に主要な報告書と報告期日を示す。

- ① 三重県「ごみ固形化燃料発電所事故調査最終報告書」；平成 15 年 11 月 22 日
- ② 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報告書」；平成 15 年 12 月
- ③ 原子力安全・保安院 電力安全小委員会  
「ごみ固形燃料発電所事故調査ワーキンググループ報告書」；平成 15 年 12 月 15 日
- ④ 環境省 「ごみ固形燃料の適正管理方策について」；平成 15 年 12 月 25 日
- ⑤ 独立法人 消防研究所  
「三重県 RDF 焼却発電施設における RDF 貯蔵槽火災原因調査報告書」；平成 17 年 3 月
- ⑥ 大牟田 RDF 貯蔵貯蔵槽安全対策の有効性実機検証試験評価委員会  
「大牟田 RDF 貯蔵貯蔵槽安全対策の有効性実機検証試験評価報告書」；平成 20 年 6 月
- ⑦ 消防危第 333 号 平成 20 年 8 月 29 日 消防庁危険物保安室長 通達  
「再生資源燃料における廃棄物固形化燃料等の安全対策について」

## 2. RDF 保管時における発酵発熱の問題点

各種報告書は、最も早く公表された三重県「ごみ固形化燃料発電所事故調査最終報告書;平成 15 年 11 月 22 日」が参考にされている。しかも、この事故調査専門委員会のメンバーが参画しており、考え方や発想がほぼ三重県報告書が踏襲されている。

三重県委員会以外の委員も多数参画しているが、いずれもこの分野において RDF の研究、製造、保管・利用に携わった専門家は皆無であった。つまり、先行して短期間に多くのデータを収集して発酵発熱による実験検証を積み上げて構築した発火メカニズムを公表した報告書に対し、たとえ疑問があっても短期間で検証して別途結論を導くことは不可能な状態であったといえる。

実験内容を精査すると、RDF の発酵実験はいずれも加湿して水分率を高くして発酵させて発熱を検証したものであり、その水分率が高くなる要因を空気中から水分吸収として発酵メカニズムが構築されている。このようなメカニズムが貯蔵サイロ内で現実に関起りえるか否かについての検討や検証は行われていない。つまり、RDF は水分が高くなれば、発酵し、発熱することが検証したに過ぎない。

以下に事故原因専門委員会による発熱原因の究明内容の概要を報告書から引用して記載し、その問題点を指摘する。

### (1) 事故原因専門委員会による発熱原因の究明※①

#### 【火災事故までの経緯について】

火災・爆発炎上事故の発生直後に三重県ごみ固形燃料発電所事故調査専門委員会が構築され、事故原因の究明が行われ、3ヶ月後の平成15年12月25日には最終報告書が提出された。発熱・発火・爆発の原因とメカニズムは次のように記載されている。

- 貯蔵槽は、貯蔵槽上部のRDF投入口やエスケープ部分などから空気が流入しうる構造となっていた。結果的には発熱・発火を起こす原因となったと考えられる。
- デッドスペース部分があり、RDFが長期滞留していた可能性が考えられる。
- 7月～8月の発熱・発火事故は、鈴鹿市内倉庫に長期間保管されていたRDFなどが再投入されたため、RDF投入時に湿った空気の持ち込みや結露による局所的な水分の集中により、RDFが吸湿して有機物の発酵により発熱したものと考えられる。また、貯蔵槽内に大量のRDFが保管されており、極めて熱が逃げにくい状況にあった。このため、発酵で発熱したRDFが有機物の化学的酸化による自己発熱で高温となり、発火したと考えられる。
- 受入が停止される7月21日以前から貯蔵槽頂上部のCO濃度が測定限界の300ppmを越える異常値を示しており、7月27日には火を確認したが、消防への通報が行われなかった。
- 7月27日以降、貯蔵槽内が長期間高温状態におかれていたことが確認されており、熱分解など様々な反応により可燃性ガスが発生していた可能性が考えられる。

貯蔵槽内ではRDFを抜き出した空隙や上部の空間に充満した可燃性ガスが、エスケープ部分や点検口などから空気流入や放水等により酸素と混合されて爆発限界に至り、何らかの火源により爆発したものと考えられる。なお、他県施設での事故にまで普遍化することはできず、本報告書の考察が新たな事実の判明や実験結果により、訂正しなければならない所があるかもれません」と結ん

しかしながら、報告書には事故経緯について次のように記載されており、外部倉庫から RDF を投入時に湿った空気の持込みのない貯蔵サイロ内に保管した直後から発熱が確認されており、しかも、平成 15 年 4 月から一酸化炭素濃度を測定を開始しているが、すでに 100 p p m 以上の濃度が測定されていた。一酸化炭素は、発酵反応では発生しなく、酸化反応で発生することが知られており、この時点で酸化反応を結露が搬入したときに時系列でまとめられており、

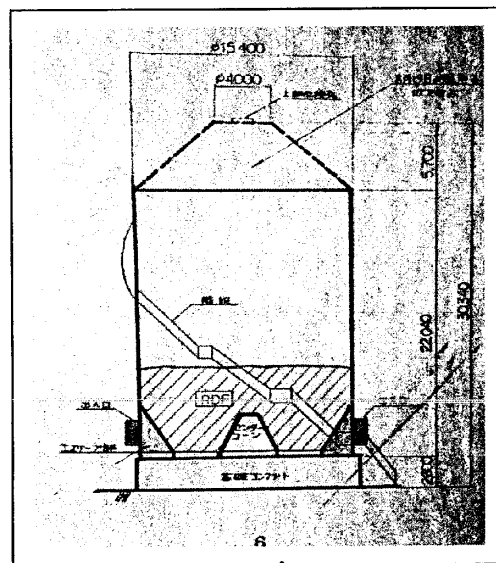
- 平成 14 年 12 月 10 日；貯蔵槽上部から水蒸気らしきものを視認(推定量；1,455 ト)
  - 平成 14 年 12 月 18 日；貯蔵槽底部コンベアから発煙を視認(推定量；1,989 ト)
  - 平成 14 年 12 月 23 日；貯蔵槽底部払出コンベア付近で煙を発見。エスケープ下部の隙間の一部で炎を視認 ((推定量 2,055 ト)、その後、注水等消火活動
  - 平成 15 年 7 月；鈴鹿 RDF 貯蔵倉庫内で発煙・発火事故発生
  - 平成 15 年 7 月；鈴鹿 RDF 貯蔵倉庫から発電所貯蔵サイロへ RDF の移動、持ち込み
  - 平成 15 年 7 月から 8 月；貯蔵サイロ内で発煙・発火が連日発生し、対応に苦慮。
- その継続の中で 19 日に爆発・炎上事故が発生した。

### 【火災事故が起こった RDF 貯留槽の概要】

サイロは、底面が平底であり、底面に設置したチェーンコンベアとスweep装置によって保管物を払い出す機構である。底部はコンクリート製、外周壁は鋼板製の二重壁、円錐形上屋は鋼板製の一重壁で、4,000m<sup>3</sup>の RDF を貯蔵できる。

結露対策として外壁は二重構造であるが、上部の RDF 投入口やエスケープ部分等からの空気の流入を遮断できる構造にはなっていない。なお、計画当初には、各種消火設備を備えた構造を有する RDF 貯蔵サイロを 4 基設置すると計画されていたが、RDF 発電事業費の削減から大型サイロを 1 基とし、当時の建築基準法や消防法では、スプリンクラーなどの消火設備や温度センサーなど規制はなかったもので、全て省略したと聞いている。

- 形式、数量：丸形サイロ（石炭や穀物用に実績のあるアトラスサイロ）1 基
- 貯蔵容量：4,000 m<sup>3</sup>（日平均 RDF 受入量 100 トンの 20 日分）
- 附属設備：払出機、レベル計、スweep装置、点検 歩廊・臭気・換気対策設備、非常停止装置 各一式



RDF 貯蔵槽概略図

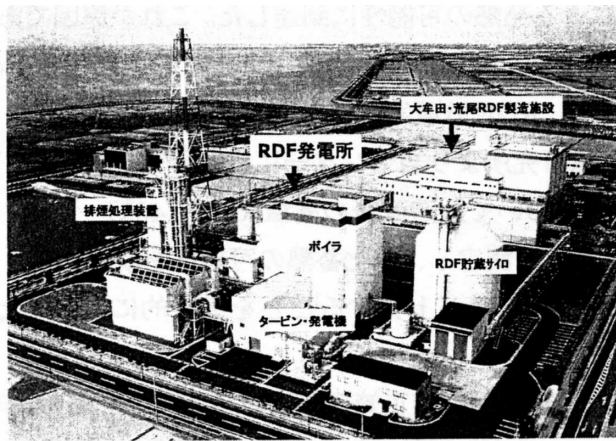


写真-2 大牟田 RDF 発電所の全景

## (2) 発酵・発熱メカニズムの疑問点

発酵熱により発熱があったとしても蓄熱しない限り、発火に至ることはない。通常、発酵熱は50～70℃程度であり、これ以上の高温下では微生物は死滅する。90℃程度の雰囲気温度でも活動する発酵菌は存在するが、RDF内での存在は確認されていない。三重県報告書によるとRDFは水分の存在下で発酵して単位重量当り(g)の一般細菌数が $10^5$ 個から $10^7$ 個に増加したとのデータは報告されているが、これによりRDFの温度がどの程度上昇したかについては明確にされていない。また、一般細菌は60度程度で急激に死滅するが※2)、温度上昇時ともなる細菌数の増減についても一切報告されていない。一般細菌数が増加したので、発酵が起こったことを検証したに過ぎない。

なお、大牟田RDFリサイクル発電所貯蔵槽で起こった発煙事故について、その原因究明の過程で一般細菌数が測定されているが、ほとんど $10^2$ 個/g程度で、最大 $10^5$ 個であり、かつ発熱を伴うような微生物がないことが遺伝子(DNA)解析より確認されている。※3)

また、説明では、「RDF投入時に湿った空気の持ち込みや結露による局所的な水分の集中」とあるが、これは表層での現象であり、放熱が大きいので発火に至るとは考えにくい。蓄熱するためには、放熱の小さい中央内部での発熱が必須であるが、中央部は通気しにくいことや結露、湿度の吸湿が起こりにくいので、発熱を伴う好気性分解が起こる可能性は低い。なお、嫌気性発酵は吸熱反応で、発熱はほとんど起こらないし、大牟田RDFリサイクル発電報告書では、貯蔵サイロ内におけるRDF中の水分移動は1%以下であることが確認されている。※3)

また、発酵では強い臭気を伴い $CO_2$ 濃度が上昇するが、COは発生しない。COが300ppmを越える異常な濃度になっていたことは、有機物の酸化反応が起こっていたことを示している。なお、貯蔵された2000トンのRDFが空気中の水分を吸収して、水分率が上昇するためには、湿度の高い大量の空気が必要であり、大量の空気の供給は放熱を促進するので、蓄熱を阻害すると考えられる。

## (3) 解明された発熱原因は「RDFの酸化・蓄熱である」

環境計画センターでは、平成3年頃からRDFに注目して技術セミナーを開催し、多くのRDF施設整備にかかわってきた。しかしながら、三重県下でのRDF施設ならびにRDF発電所計画にはほとんど関わっていなかった。RDFに関する多くの知見や情報が蓄積されていた

ので、直ちに RDF 特別研究部会を設置し、情報収集と関係者の勉強会を開催し、早くから RDF の保管時における酸化蓄熱による発熱の可能性に到達した。これが原因であれば RDF 発電所で起こった諸現象や事故の経緯などを全て合理的に説明できることを突き止めた。その結果を環境省 RDF 調査委員等に説明し、RDF 貯蔵実験を行うように助言した。

平成15年11月に国立環境研究所より当センターに委託研究があり、湖東広域衛生管理組合 RDF 施設(リバースセンター)において製造直後の高温 RDF (40℃～90℃) 500Kg を断熱容器に保管し、内部温度やCO濃度を測定し、酸化蓄熱の可能性を検証した。その結果、発酵が起こらなくても初期温度よりも内部温度が上昇することを実験的に検証した。(廃棄物学会論文誌; 18-4, pp.264-273(2007))※4)。

この結果は、環境省「ごみ固形燃料の適正管理方策について;平成15年12月25日」報告書 p.27 3.3 高温蓄熱性 RDF の発生と発熱の検証および対策において掲載され、環境省報告書で、発酵発熱以外の発熱要因として取り上げられた。なお、発酵発熱を否定する事はできないので、他の発熱要因も含んだ発熱防止対策が規定されたものである。

また、平成17年3月の桑名消防本部が総務省に原因究明を依頼した調査結果(消防研究所)によると、発熱・発火要因として、酸化・蓄熱反応の条件が満たされていると結論されている。(三重県 RDF 焼却発電施設における RDF 貯蔵層火災原因調査報告書) ※5)

さらに、平成16年9月から継続して検討している電源開発(株)、大牟田リサイクル発電(株)など主催する大牟田 RDF 貯蔵貯蔵槽安全対策の有効性実機検証試験評価委員会「大牟田 RDF 貯蔵貯蔵槽安全対策の有効性実機検証試験評価報告書」委員会報告では、大牟田リサイクル発電所における RDF 貯蔵時の発煙事故においては、RDF のDNA鑑定より発酵を起こすような微生物が検出されなかったこと、発熱は、サイロ底部の取り出しコンベアのモータの熱が蓄熱することによって起こったことが、現場状況、各種実験やシミュレーションより明らかにされている。(RDF 貯蔵層希薄酸素環境における安全対策有効性評価報告書;委員長 松本東大大学院教授。委員は鍵谷等5人) ※3)

いずれも発酵発熱は水分が高くなると起りうるとしたものの、その主たる原因は酸化反応に伴う発熱により熱が蓄熱したことによると結論付けられている。

### 3. RDF 保管時における発熱に関する Q&A

これまで検討した RDF の発酵発熱メカニズムは、多くの疑問があり、そのなかのいくつかの問題について Q&A の形式で回答を試みた。

#### Q-1 ; 三重県事故原因「発酵発熱メカニズム」はなにが問題なのか！

RDF が吸湿すること、発酵すること、発熱することなど個々の特性には間違いはないが、その現象が果たして貯蔵サイロ内で起こったか否か大きな問題なのである。しかも、発酵発熱に固執したため、他の原因がおろそかにされていることも問題である。結果論かもしれないが、発熱現象を慎重に検討していれば、大事故は防げた可能性がある。

仮に、発酵発熱が主原因であったとしてどのような問題があるのであろうか？

○貯蔵サイロに RDF を投入した平成14年12月には、直接サイロへ搬入していたのであり、湿った空気の持込がなかったにもかかわらずすでに発熱し、発煙が確認されていたこと。

○三重県報告書では、貯蔵サイロ利用の初期において RDF 搬出コンベア付近から発煙が確認

されており、事故後にこの付近が部分的にRDFの炭化物が確認されている。コンベア付近の発熱を疑うべきであった。

- 当初から発酵では発生しない一酸化炭素が検出されていたこと。なお、最大測定濃度が300ppmの検出器を用いており、これ以上の濃度を検出できなかったため、高濃度を見逃した可能性がたかい。数千ppmであればもっと注目したはずであろう。
- サイロ内で空気中から吸湿して発酵するためには、湿った空気が大量に必要である。むしろ外部空気はRDFの冷却に効果的であり、温度が上昇する事は疑問がある。
- RDF中の水分の吸収実験では、湿度が60%の空気中ではほとんど変化がないこと、湿度90%の空気中で10から15%増加するとの報告であるが、仮にサイロ内で水分が吸湿されたならば、空気中の湿度は急激に低下し、吸湿によるRDFの水分率は大きく変わらないと推測できる。大牟田検証試験では、水分変動は1%程度と報告されている。
- 発酵発熱の根拠となった三重県報告書の各種実験は、全てRDFに水分を加湿して実施したものであり、「RDFは水分が高いと発酵して発熱する事を検証したものである。」
- 発熱は一般細菌の増殖を伴うはずであるが、細菌数と発熱(温度)の相関性を検討した実験は行われていない。
- 一般細菌は50～60℃程度で増殖数よりも死滅数が多くなることが知られているが、死滅に関する検討が行われていない。40℃以上では酸化反応が主たる発熱要因になるが、この程度のRDF温度は受入時にも達しており、発酵でなくても説明ができる。

上記の通り、三重県報告書の発酵・発熱メカニズムは、多くの問題を含んでおり、RDF中の水分が高いと発酵がおこり発熱することは検証されているが、実際のRDFサイロ内で起こったことを検証されていない。仮に、水分が高いと発酵して発熱して危険であるとするならば、水分を40～60%含む家庭ごみ焼却施設のピット内では、頻繁に発酵による発熱や発煙が起こるはずである。ピット内で発酵して発煙や発火した事例は全く報告されていない。

このように発酵発熱メカニズムは科学的に検証が不十分であり、発酵が起こったであろうが、発煙から火災に至る事象を全て説明する事はできないので、主たる発熱原因であったと結論することはできない。

## Q-2；有機物の発酵反応と酸化反応の特徴的なことはなにか！

反応の起こる条件、反応によって発生するガス組成、発熱の仕方などが異なります。

とくに、発酵には、水分が不可欠であり、発熱する発酵は好気性発酵です。好気性発酵では、メタンや一酸化炭素などの可燃性ガスは発生しません。メタンや水素は、嫌気性発酵で発生しますが、嫌気性発酵は吸熱反応であり、発熱しません。

一方、酸化反応では、空気が存在すれば、水分の有無に関わらず起こり、二酸化炭素が発生します。空気が不足した場合には、一酸化炭素やメタンなどの炭化水素類が発生する事が知られています。常温では、反応速度は非常に小さいのですが、温度が10度上昇するごとに速度は2～3倍に大きくなるので、常温から数十度になるとおおよそ400倍程度に大きくない、大きな発熱を伴います。

以下に、発酵反応と酸化反応の比較一覧を示します。(鍵谷作成)

表-1 RDFの酸化反応と発酵反応の特徴

比較項目	酸化反応	発酵反応
臭気の発生	・焦げ臭い ・アルデヒド系の臭気	・アンモニア系・硫黄系の臭気
熱の発生	・瞬間的でピークをとまなう	・緩やかに発熱する
水分の影響	・水分がなくても反応する ・水分濃度の影響は不明	・必要 ・細菌は10%以上の水分が必要 ・カビは10%以下でも生育可
メタンガスの発生	・発生しうる	・大量に発生(%オーダー)
二酸化炭素の発生	・発生する	・大量に発生(%オーダー)
一酸化炭素の発生	・発生する	・発生しない
水素の発生	・発生しうる	・嫌気発酵で発生しうる (ただし吸熱反応)

Q-3 ; 有機物の酸化反応が起こった根拠はなにか！

有機物は、すべて炭素、水素、酸素や窒素などが沢山結合した高分子量体です。これを加熱などにより結合を切断するとガスが発生します。とくに、空気中には21%の酸素が存在しますが、酸素は非常に反応性が強く、熱や光などのエネルギーが付与されると速やかに反応(酸化反応)して酸素含有化合物、例えば、酸、アルコールや一酸化炭素などの酸化物を生成します。酸化反応は発熱し、温度が高くなるとさらに酸化反応速度が速くなるという特徴があります。一般的に温度が10度上昇すると反応速度は2~3倍になります。つまり、常温(20℃程度)から80℃に達すると200倍以上の速さで進行するので、急激に温度が上昇します。有機物を空気を送って燃焼した場合には、数百度以上の高温になることから分かるでしょう！

ところで、サイロ内で酸化反応が起こった証拠とは何でしょうか！ 次の現象から明らかであり、一番先に酸化反応による温度上昇に注目すべきであったのです。

- 当初から一酸化炭素が高濃度で検出されていたこと。
- 当初からメタンガスなどの全炭化水素ガスが発生していたこと。
- 三重県報告書 資料-4 RDF貯蔵発熱試験 図RDF貯蔵発熱試験温度変化において明らかに酸化反応に特徴的な瞬間的なピークを伴う発熱が示されている。温度測定単位時間を短くするとより明確に現われると考えられる。
- 最近情報では、若干水分の存在下でRDFは酸化反応による発熱が起こることが知られている。
- なお、発酵反応においてもメタンや水素ガスが発生するが、これは嫌気性発酵で反応速度も極端に遅く、しかも吸熱反応であり、温度上昇は起こりえない。

なお、RDFの発熱原因を4年間にわたって実験的に検証した「大牟田RDF貯蔵貯蔵槽安全対策の有効性実機検証試験評価報告書」においては、発酵が起こったであろうが、発熱を伴



う細菌は検出されなかったことがDNA鑑定から明らかにされている。発熱原因は酸化反応であり、主たる熱源は、サイロ内からRDFを搬出するコンベアを駆動するモータ室からサイロ内へ熱移動がおり、発熱の原因になったことが明らかになった。このため、モータ室をクーラを設置し、温度管理を行った結果、発熱が問題になっていない。底部からの熱移流は、サイロ底部のコンベア付近のRDFが炭化していた事象も全て説明ができたのである。

#### Q-4 ; 発酵しない廃プラスチックも発熱するのか！

三重県報告書のRDFの発熱原因が発酵発熱であるとの結論が広く広報されたことから、発酵しない廃プラスチックを原料とした燃料は安全であるとの誤った解釈が一般化した。しかしながら、廃プラスチックを原料として製造した燃料(RPF)の大量保管時においてしばしば自然発火が起り、現場は混乱している。

酸化反応による発熱であれば、当然、発熱は起こるのであり、温度管理、発生ガスをモニタリングするなどにより発熱事故は防止できるのである。なお、プラスチックや紙などの有機物は、長年、使用しているボロボロになるのは、空気中の酸素との化学反応により結合した分子が切断して分子が短くなり、もろくなった(劣化)ためである。当然、わずかながら発熱を伴うが、少量の場合には放熱が大きいので、蓄熱しないので、安全なのである。大量に保管した場合には、蓄熱して温度が上昇し、発煙や火災にいたるので、注意が必要である。